

پیش‌بینی تغییرات آبی تبخیر و تعرق پتانسیل بر اساس سناریوهای انتشار RCP در حوزه آبخیز هلیل‌رود

سعیده ناطقی^۱، الهام رفیعی ساردوئی^۲، علی آذره*^۳ و فرشاد سلیمانی ساردو^۴

^۱ استادیار پژوهشی، بخش تحقیقات مرتع، مؤسسه تحقیقات جنگل‌ها و مراتع کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران، ^۲ و ^۴ استادیار، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه جیرفت و ^۳ استادیار، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه جیرفت

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۳/۲۶

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۱/۰۴

چکیده

یکی از اثرات تغییرات اقلیمی در دهه‌های اخیر، تغییرات چرخه‌های آبی در مناطق مختلف زمین بوده است. تبخیر و تعرق نیز به‌عنوان یکی از بخش‌های چرخه هیدرولوژی، دستخوش این تغییرات خواهد بود. لذا، در پژوهش حاضر، اثر تغییر اقلیم بر تغییرات تبخیر و تعرق پتانسیل در حوزه آبخیز هلیل‌رود، تحت سناریوهای RCP 2.6، RCP 4.5 و RCP 8.5 با استفاده از مدل ریزمقیاس‌نمایی LARS-WG و خروجی مدل گردش عمومی HadGEM2 در دوره زمانی آبی (۲۰۲۱-۲۰۴۰) مورد بررسی قرار گرفت و با استفاده از پارامترهای اقلیمی پیش‌بینی شده، میزان تبخیر و تعرق در سطح حوضه با استفاده از روش تورنت وایت برای دوره آبی محاسبه شد. بر طبق نتایج حاصل از مدل LARS-WG در سطح حوضه مورد مطالعه، میزان بارش در دوره آبی نسبت به دوره پایه کاهش و میزان دما تحت تمامی سناریوها افزایش خواهد یافت. میزان تبخیر و تعرق نیز بر اساس وضعیت دما و بارش پیش‌بینی شده افزایش خواهد یافت. به‌طوری که نتایج بررسی وضعیت تبخیر و تعرق در سطح حوضه مورد مطالعه حاکی از افزایش میزان تبخیر و تعرق در دوره آبی (۲۰۲۱-۲۰۴۰) نسبت به دوره پایه می‌باشد که این میزان به‌طور متوسط در دهه آبی به میزان ۳/۴، ۶/۸ و ۸/۵ درصد به ترتیب تحت سناریوهای RCP 2.6، RCP 4.5 و RCP 8.5 خواهد بود. بر طبق نتایج، بیشترین افزایش دما و تبخیر و تعرق و بیشترین کاهش بارش در سطح حوضه مربوط به سناریوی RCP 8.5 می‌باشد. از نتایج حاصل از این پژوهش می‌توان در مطالعات مربوط به مدیریت منابع آب، مطالعات کشاورزی و زیست‌محیطی استفاده نمود.

واژه‌های کلیدی: تغییر اقلیم، ریزمقیاس‌نمایی، سناریوهای RCP 2.6، RCP 4.5 و RCP 8.5

مقدمه

سیستم‌های مختلف به‌طور مستقیم و غیر مستقیم تأثیرگذار هستند (Salajegheh و همکاران، ۲۰۱۶). افزایش گازهای گلخانه‌ای و به تبع آن، افزایش دمای کره زمین، باعث افزایش قدرت تبخیر کنندگی هوا و در نتیجه، افزایش تبخیر و تعرق پتانسیل گیاه مرجع شده و افزایش مصرف آب در بخش کشاورزی را به‌دنبال دارد. همچنین، تغییرات اقلیم بر میزان

بر اساس گزارش پنجم هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم (IPCC، ۲۰۱۴)، تغییر در پارامترهای اقلیمی به سبب افزایش گازهای گلخانه‌ای در چند دهه اخیر باعث بر هم خوردن تعادل آب و هوایی کره زمین شده است. دما و بارش دو متغیر مهم در تعیین آب و هوای یک منطقه می‌باشند و تغییرات این دو متغیر بر

استفاده کردند و در نهایت، با استفاده از پارامترهای اقلیمی پیش‌بینی شده، میزان تبخیر و تعرق در دوره آبی برآورد شد. نتایج حاکی از افزایش دمای حداقل و حداکثر و متعاقباً افزایش تبخیر و تعرق محاسبه شده در دوره آبی بود. Ghahraman و همکاران (۲۰۱۶)، به بررسی اثر تغییر اقلیم بر تبخیر و تعرق پتانسیل در دشت مشهد طی دوره ۲۰۷۰-۲۰۲۱ با استفاده از مدل ریزمقیاس‌نمایی دینامیکی تحت سناریوهای RCP پرداختند. نتایج نشان داد که میزان تبخیر و تعرق در ماه‌های گرم سال کاهش و در ماه‌های سرد سال افزایش خواهد یافت. Heydari Tasheh Kaboud و Khoshkho (۲۰۱۹)، به بررسی اثر تغییر اقلیم بر تبخیر و تعرق پتانسیل در مقیاس‌های زمانی فصلی و سالانه در چند ایستگاه منتخب غرب ایران پرداختند. نتایج پژوهش نشان داد، بیشترین نرخ افزایش تبخیر و تعرق پتانسیل دوره‌های آبی در مقیاسه با دوره پایه در تمامی مقیاس‌های فصلی و سالانه و در کل منطقه، تحت سناریوی RCP 8.5 در دوره ۲۱۰۰-۲۰۷۱ رخ خواهد داد.

بر طبق مطالعات صورت گرفته، میزان تبخیر و تعرق مستقیماً با متغیرهای اقلیمی در ارتباط است و انتظار می‌رود با تغییر در پارامترهای اقلیمی به‌ویژه دمای هوا و بارش، میزان آن نیز تغییر پیدا کند. از این‌رو، بررسی تغییرات پارامترهای هواشناسی و تأثیر آن‌ها بر تبخیر-تعرق پتانسیل در هر منطقه از اهمیت بالایی برخوردار است. بر این اساس، هدف از انجام این تحقیق، بررسی اثر تغییر اقلیم بر تبخیر و تعرق پتانسیل در حوزه آبخیز هلیل‌رود با استفاده از مدل گردش عمومی جو HadGEM2 می‌باشد. در این راستا، ابتدا از مدل LARS-WG 6 جهت ریزمقیاس‌نمودن داده‌های گردش عمومی تحت سه سناریوی RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 در دوره ۲۰۴۰-۲۰۲۱، استفاده شد. سپس، تبخیر و تعرق پتانسیل بر اساس داده‌های دما و بارش پیش‌بینی شده در دوره آبی، با استفاده از روش تورنت وایت محاسبه شد.

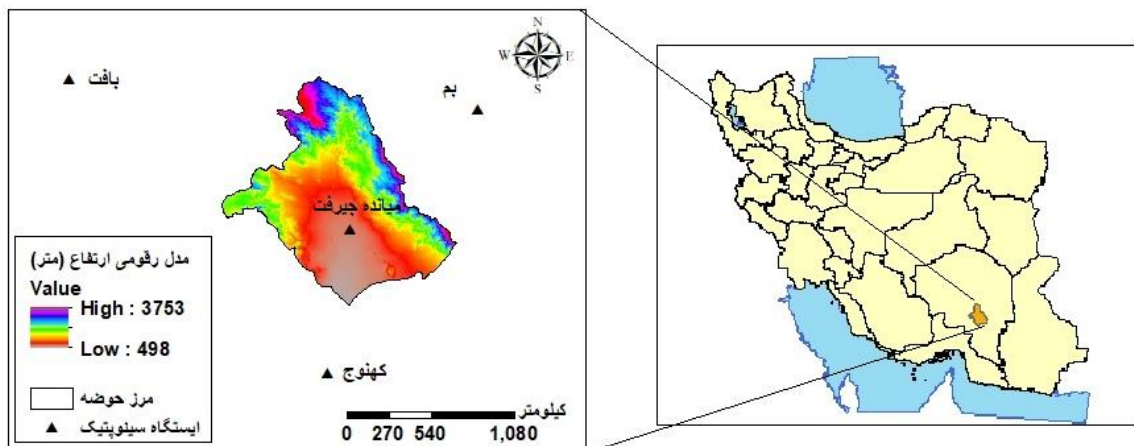
مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه: حوزه آبخیز هلیل‌رود در جنوب شرقی استان کرمان در شهرستان جیرفت واقع شده

بارندگی و رطوبت هوا مؤثر است که هر کدام به نحوی در تبخیر و تعرق و نیاز آبی گیاه تأثیر گذار هستند (Mirsaneh و همکاران، ۲۰۱۰). بر این اساس، بررسی و ارزیابی تغییرات تبخیر و تعرق گیاه مرجع و نحوه اثرپذیری آن از شرایط تغییر اقلیم احتمالی آبی از اهمیتی اساسی برخوردار است. مدل‌های جهانی اقلیم (Global Climate Models (GCMs) جهت ارزیابی تغییرات اقلیمی طراحی شده‌اند. این مدل‌ها تنها قادر به شبیه‌سازی داده‌های مدل گردش عمومی جو در سطوح بزرگ هستند. لذا، ریزمقیاس‌کردن نتایج این مدل‌ها در مقیاس ایستگاهی ضروری است. در سال‌های اخیر از میان چهار دسته کلی روش‌های ریزمقیاس‌نمایی (ریزمقیاس‌سازی دینامیکی، دسته‌بندی سینوپتیکی، ایجاد داده‌های مصنوعی و روش‌های آماری) روش‌های ریزمقیاس‌نمایی آماری، بیشتر از سایر روش‌های مورد توجه محققین قرار گرفته است (Coulibaly و Dibike، ۲۰۰۵؛ Fowler و همکاران، ۲۰۰۷). پژوهش‌های متعددی در زمینه اثر تغییر اقلیم بر تبخیر-تعرق انجام شده است. Kouhi و Sanaei Nejad (۲۰۱۴)، با استفاده از دو روش ریزمقیاس‌نمایی آماری LARS-WG و SDSM تحت دو سناریوی A2 و B2 مدل HadCM3 به پیش‌بینی تبخیر و تعرق مرجع به روش پنمن‌مانتیت در ایستگاه سینوپتیک ارومیه پرداختند. نتایج حاکی از افزایش ۳/۴ تا ۱۴/۹ درصدی تبخیر و تعرق در دهه‌های آبی نسبت به دوره پایه می‌باشد. Tao و همکاران (۲۰۱۵)، به بررسی اثر تغییر اقلیم بر تبخیر و تعرق گیاه مرجع در حوزه رودخانه خیانگ جیانگ چین تحت سناریوهای RCP و با استفاده از مدل ریزمقیاس‌نمایی SDSM پرداختند. نتایج نشان داد که در دوره‌های آبی، میزان تبخیر و تعرق گیاه مرجع تحت تمامی سناریوها افزایش خواهد یافت و نرخ این افزایش، بسته به منطقه و نوع سناریو متفاوت خواهد بود و بیشترین نرخ افزایش تحت سناریوی RCP 8.5 مشاهده شد. Goudarzi و همکاران (۲۰۱۸)، به برآورد میزان تبخیر و تعرق پتانسیل در ارتباط با تغییرات اقلیمی در حوزه آبخیز دریاچه ارومیه پرداختند. از این‌رو، از مدل‌های ریزمقیاس‌گردانی آماری LARS-WG و SDSM جهت پیش‌بینی پارامترهای اقلیمی در دوره آبی

قرار گرفتند. متوسط بارش سالانه در ایستگاه سینوپتیک میانده جیرفت، کهنوج، بافت و بم به ترتیب ۱۷۲/۷، ۱۷۷/۸۴، ۲۴۶/۹ و ۵۵/۵ میلی‌متر می‌باشد. همچنین، دمای متوسط سالانه در ایستگاه سینوپتیک میانده جیرفت ۲۵/۵، ایستگاه کهنوج ۲۷/۱۳، بافت ۱۶/۶ و بم ۲۳/۸ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. شکل ۱، موقعیت منطقه و ایستگاه‌های مورد مطالعه در ایران و استان کرمان را نشان می‌دهد.

است. این حوضه با مساحت ۵۰۴۹/۵ کیلومتر مربع یکی از زیرحوضه‌های حوزه آبخیز جازموریان می‌باشد. این منطقه از نظر موقعیت در طول جغرافیایی ۱۵° ۵۷' تا ۲۰' ۵۸° و عرض جغرافیایی ۱۵° ۱۶' تا ۲۸' ۱۶° قرار دارد. حداکثر ارتفاع منطقه مورد مطالعه از سطح دریا ۴۹۸ و ۳۷۵۳ متر و بارش متوسط سالانه منطقه ۱۶۰/۲۳ میلی‌متر می‌باشد. چهار ایستگاه سینوپتیک میانده جیرفت، کهنوج، بافت و بم در منطقه مورد بررسی و تجزیه و تحلیل



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه در ایران

اقلیم ایران است (Alizadeh, ۲۰۰۵). توان تبخیر و تعرق پتانسیل به روش تورنت وایت برای ایستگاه‌های ذکر شده در دوره پایه و دوره آتی با استفاده از فرمول زیر تعیین شد (رابطه ۱).

$$ETP = 16.2 \left[\frac{10T_i}{I} \right] \quad (1)$$

که در آن، ETP تبخیر و تعرق پتانسیل ماهانه (میلی‌متر)، T_i دمای متوسط ماهانه (درجه سانتی‌گراد)، I شاخص حرارتی سالانه که عبارت است از مجموع شاخص‌های حرارتی ماهانه می‌باشد.

$$I = \sum_{i=1}^{12} \left(\frac{T_i}{5} \right)^{1.511} \quad (2)$$

α توانی است که از فرمول زیر به دست می‌آید (رابطه ۳).

$$\alpha = (0.675I^3 - 77.1I^2 + 17920I + 492390)10^{-6} \quad (3)$$

و از آنجا که رابطه تورنت وایت برای ماه‌های ۳۰ روزه با ۱۲ ساعت روشنایی است، یکی از این شرایط

داده‌های جمع‌آوری شده

داده‌های اقلیمی: در این تحقیق، داده‌های روزانه دمای کمینه، دمای بیشینه، بارش و ساعات آفتابی ایستگاه‌های سینوپتیک میانده جیرفت، بم، بافت و کهنوج در دوره ۲۰۱۷-۱۹۸۹ تهیه و بر اساس مدل ریزمقیاس نمایی LARS-WG 6 و مدل گردش عمومی جو HadGEM2 تحت سناریوی واداشت تابشی RCP2.6، RCP4.5 و RCP 8.5 در دوره آتی (۲۰۲۱-۲۰۴۰) شبیه‌سازی شدند و کاهش یا افزایش دما و بارش در دوره آتی نسبت به دوره گذشته مورد بررسی قرار گرفت. سپس، بر اساس داده‌های داده‌های دما و بارش پیش‌بینی شده، تبخیر و تعرق پتانسیل در دوره آتی محاسبه شد.

تبخیر و تعرق پتانسیل: برای محاسبه تبخیر و تعرق پتانسیل بر اساس داده‌های دما و بارش در دوره پایه و دوره آتی از روش تورنت وایت استفاده شد که علت انتخاب این روش به غیر از سادگی، همخوانی آن با

شده (میلی‌متر)، D متوسط ساعات روشنایی روزانه، N تعداد روزهای ماه مورد نظر و Nm ضریب اصلاحی (مقادیر آن برای هر ماه در منطقه مورد مطالعه از جدول زیر به دست می‌آید) است.

تغییر کند، مقدار محاسبه شده از (۴) تصحیح می‌شود (Mahdavi, ۲۰۰۹).

$$ETP_c = ETP \left(\frac{D \cdot N}{360} \right) = ETP \times Nm \quad (4)$$

که در آن، ETP_c تبخیر و تعرق پتانسیل اصلاح

جدول ۱- مقادیر ضریب اصلاحی (Nm) برای منطقه مورد مطالعه در ماه‌های سال

Nm	ماه	Nm	ماه
۱/۲	تیر	۰/۹	دی
۱/۱۴	مرداد	۰/۸۷	بهمن
۱/۰۳	شهریور	۱/۰۳	اسفند
۰/۹۸	مهر	۱/۰۸	فروردین
۰/۸۹	آبان	۱/۱۸	اردیبهشت
۰/۸۸	آذر	۱/۱۷	خرداد

آن‌ها برخوردار است. به منظور تشخیص نقطه تحول در سری‌های زمانی، روش‌های متعددی مورد استفاده قرار می‌گیرند که در این تحقیق از روش غیرپارامتری پیشنهاد شده توسط Pettit (۱۹۷۹) استفاده خواهد شد. اساس این آزمون بر رتبه‌بندی داده‌ها استوار است و نیازی به داشتن توزیع آماری خاص برای داده‌ها نیست. از این‌رو، این روش در مطالعه مذکور مورد استفاده قرار گرفت. این روش، زمان وقوع تغییر معنی‌دار در میانگین سری‌های زمانی را مشخص می‌کند (Foroughi و Dinpashoh, ۲۰۱۸). فرض صفر در این آزمون، فقدان نقطه تغییر (یا شکست) در سری زمانی می‌باشد. آزمون پتیت برای تشخیص جهش در مقدار میانگین داده‌ها در طول زمان و معمولاً همراه با آزمون من-کندال به کار می‌رود (Pettit, ۱۹۷۹). پس از این‌که معنی‌داری روند با این آزمون در سطوح مختلف تأیید شد، روابط آزمون پتیت در می‌آید (Li و همکاران, ۲۰۱۸).

۱- ابتدا آماره آزمون $U_{t,n}$ ، که آزمون می‌کند آیا دو مجموعه نمونه x_1, \dots, x_t و x_{t+1}, \dots, x_n از یک جامعه آماری هستند به صورت رابطه (۵) تعریف می‌شود (Gao و همکاران, ۲۰۱۱).

$$U_{t,n} = \sum_{i=1}^t \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i) \quad (5)$$

که در آن، t طول دوره آماری ($t=2, \dots, n$) و n تعداد داده در سری آماری است که در آن n تعداد کل مشاهدات، x_t مجموعه اول و x_i مجموعه دوم می‌باشد.

بررسی روند داده‌ها با استفاده از آزمون من-کندال: آزمون ناپارامتری من-کندال ابتدا توسط Mann (۱۹۴۵)، ارائه و سپس، توسط Kendall (۱۹۷۵)، بر پایه رتبه داده‌ها در یک سری زمانی بسط و توسعه یافت. این روش جزو متداول‌ترین و پرکاربردترین روش‌های ناپارامتریک تحلیل روند سری‌های زمانی به‌شمار می‌رود. از مزایای این روش، مناسب بودن کاربرد آن برای سری‌های زمانی که از توزیع آماری خاصی پیروی نمی‌کنند. این روش، به‌وسیله سازمان جهانی هواشناسی (WMO) در سال ۱۹۸۸ پیشنهاد شد و برای بررسی معنی‌داری روند سری‌های اقلیمی در موارد مختلف مورد استفاده قرار گرفت. فرض صفر این آزمون بر تصادفی بودن و عدم وجود روند در سری داده‌ها دلالت دارد و پذیرش فرض یک (رد فرض صفر) دال بر وجود روند در سری داده‌ها می‌باشد. آزمون من-کندال در بررسی روند سری‌های اقلیمی به کرات و در موارد مختلف استفاده شده است (Bahak, ۲۰۱۳؛ Feizi, ۲۰۱۰). در این مطالعه نیز، آزمون من-کندال برای کشف روند موجود و معنی‌داری آن در سری‌های زمانی متغیرهای دما و بارش و تبخیر و تعرق پتانسیل در نرم‌افزار XLSTAT 2019 استفاده شده است.

بررسی نقاط جهش در داده‌های تبخیر و تعرق پتانسیل: زمان ایجاد تغییر معنی‌دار در سری‌های زمانی (نقطه تحول) از اهمیت ویژه‌ای در توصیف رفتار

واسنجی مدل استفاده شد. سپس، کل همین دوره (۱۹۸۹ تا ۲۰۱۷) برای صحت‌سنجی و ارزیابی مدل در نظر گرفته شد و نتایج به‌دست آمده از مدل با مقادیر مشاهده شده مقایسه و نحوه عملکرد مدل در شبیه‌سازی داده‌های بارش و دما ارزیابی شد. پس از این مراحل، مدل LARS-WG برای مدل‌گردش عمومی جو HadGEM2 و تحت سناریوهای RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 دوره زمانی آتی اجرا شد و در نهایت، به مقایسه داده‌های دوره پایه (۱۹۸۹-۲۰۱۷) و دوره آتی (۲۰۲۱-۲۰۴۰) پرداخته شد.

به‌منظور ارزیابی مدل و سناریو از معیارهای RMSE، NSE و R^2 استفاده شد. در زیر روابط (۸)، (۹) و (۱۰) برای معیارهای مذکور ارائه شده است.

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (o_i - s_i)^2}{\sum_{i=1}^n (o_i - \bar{o})^2} \quad (8)$$

$$RMSE = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (s_i - o_i)^2 \right]^{1/2} \quad (9)$$

$$R^2 = \left[\frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (s_i - \bar{s})(o_i - \bar{o})}{\sigma_s \times \sigma_o} \right]^2 \quad (10)$$

که در آن‌ها، o_i داده‌های مشاهداتی، s_i داده‌های برآورد شده، \bar{o} و \bar{s} میانگین داده‌های مشاهداتی و برآورد شده و σ_s و σ_o انحراف معیار داده مشاهداتی و برآورد شده می‌باشد. مقادیر RMSE معرف دقت در بسیاری از روش‌های آماری می‌باشد. هرچه این مقادیر به صفر نزدیک‌تر باشند، نشان‌دهنده دقت بالای مدل است. R^2 بیانگر ارتباط داده‌های مشاهداتی و محاسباتی می‌باشد. دامنه این پارامتر بین صفر تا یک است، هرچه این مقدار به یک نزدیک‌تر باشد، نشان‌دهنده ارتباط قوی بین دو گروه می‌باشد. دامنه ضریب نش-ساتکلیف (NSE) بین صفر تا یک قابل قبول و بهترین حالت زمانی است که ضریب NSE برابر یک باشد.

نتایج و بحث

بررسی روند داده‌های دما و بارش: نتایج حاصل از بررسی روند پارامترهای اقلیمی با استفاده از آزمون

۲- تابع $\text{sgn}(\theta)$ یا تابع علامت نیز بر اساس معادله زیر محاسبه خواهد شد. در واقع این آماره آزمون تعداد دفعاتی را که یک عضو از مجموعه اول بزرگ‌تر از اعضای مجموعه دوم باشد، محاسبه خواهد کرد. فرض صفر در این آزمون زمانی است که نقطه تحول معنی‌داری در سری زمانی وجود نداشته باشد.

$$\text{sgn}(\theta) = \begin{cases} 1 & \text{if } \theta > 0 \\ 0 & \text{if } \theta = 0 \\ -1 & \text{if } \theta < 0 \end{cases}$$

۳- در آزمون پتیت برای یک آزمایش دو دامنه ای از آماره Kt به‌صورت رابطه (۶) محاسبه می‌شود.

$$k_t = \max_{1 \leq t \leq n} |U_{t,n}| \quad (6)$$

واضح است که در یک سری زمانی ممکن است یک یا چند نقطه تغییر موجود باشد و البته برخی از آن‌ها ممکن است رو به بالا و برخی رو به پایین باشند. از طرفی، ممکن است هیچ نقطه تغییر معنی‌دار در سری زمانی نباشد. در تحلیل نقطه تغییر، هدف یافتن نقطه‌ای است که قدر مطلق آماره U_t در آن نقطه، بیشتر از همه نقاط دیگر می‌باشد.

۴- مقدار k در رابطه (۷) جایگزین و آماره P یا سطح معنی‌داری kt محاسبه می‌شود.

$$P = 2e^{\frac{-6k^2}{n^3+n^2}} \quad (7)$$

اگر مقدار P محاسبه شده، کوچک‌تر از سطح معنی‌داری مفروض (۰/۰۵) شود، وجود نقطه تغییر ناگهانی (پرش یا شکست) در سری، از نظر آماری معنی‌دار تلقی می‌شود.

- ریزمقیاس نمایی اقلیمی: مدل LARS-WG یکی از معروف‌ترین مدل‌های مولد داده‌های تصادفی وضع هوا است که برای تولید مقادیر بارش، تابش، درجه حرارت‌های بیشینه و کمینه روزانه در یک ایستگاه برای اقلیم حاضر و آینده به‌کار می‌رود (Semenov و همکاران، ۱۹۹۸؛ Barrow و Semenov، ۲۰۰۲). تولید داده‌های مدل LARS-WG در سه مرحله انجام می‌شود که عبارت‌اند از واسنجی، ارزیابی و ایجاد داده‌های هواشناسی (Babaian و Najafi Nik، ۲۰۰۷؛ Richardson و Wright، ۱۹۸۴). در این تحقیق، جهت ریزمقیاس نمایی آماری از مدل LARS-WG 6 استفاده شد. در ابتدا، دوره ۱۹۸۹ تا ۲۰۱۷ برای

من-کندال در ایستگاه سینوپتیک میانه جیرفت، بم، بافت و کهنوج در دوره آماری ۲۰۱۷-۱۹۸۹ میلادی در جدول ۲ نشان داده شده است. با توجه به جدول ۲، مشخص است که مقدار بارش در تمامی ایستگاه‌های سینوپتیک مورد بررسی، فاقد روند مشخص و معنی‌دار است. اما پارامتر دمای میانگین و تبخیر و تعرق پتانسیل دارای یک روند صعودی و معنی‌دار در سطح پنج درصد می‌باشند.

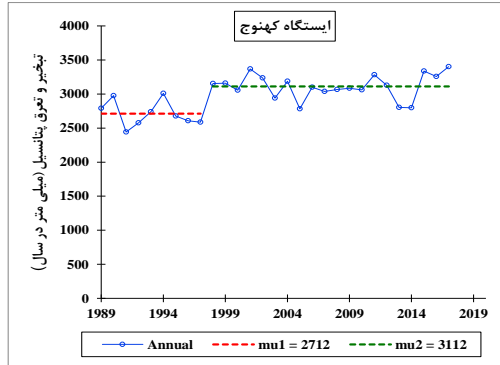
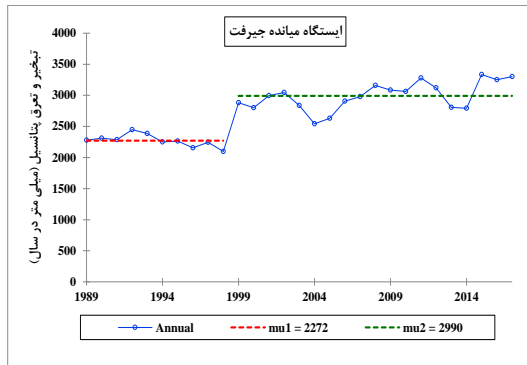
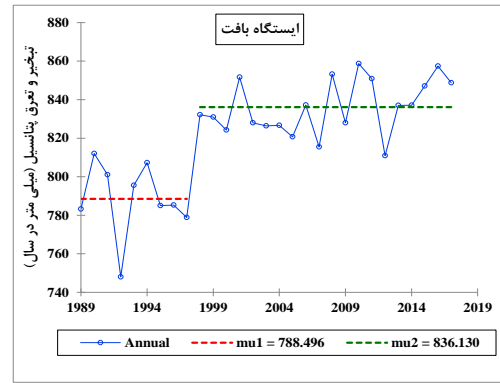
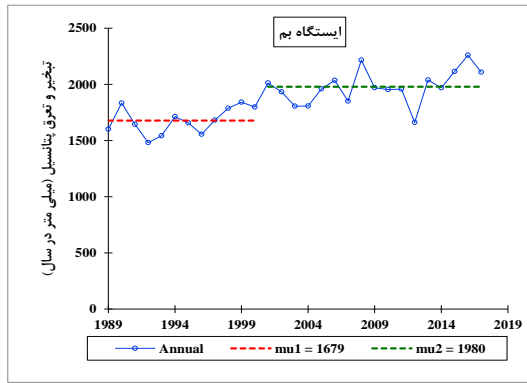
جدول ۲- نتایج حاصل از آزمون من-کندال در ایستگاه‌های سینوپتیک میانه جیرفت، کهنوج، بافت و بم (دوره آماری ۲۰۱۷-۱۹۸۹)

ایستگاه	پارامتر	Kendall's tau	p-value (Two-tailed)	بررسی معنی‌داری روند در سطح پنج درصد
سینوپتیک میانه جیرفت	دمای میانگین	۰/۰۷۸	۰/۰۰۰۴	دارای روند صعودی
	بارش	-۰/۰۰۹	۰/۷۸۹	فاقد روند مشخص
	تبخیر و تعرق پتانسیل	۰/۰۶۶	۰/۰۴	دارای روند صعودی
سینوپتیک کهنوج	دمای میانگین	۰/۰۳۲	۰/۰۰۰۱	دارای روند صعودی
	بارش	-۰/۰۳۲	۰/۴۱	فاقد روند مشخص
	تبخیر و تعرق پتانسیل	۰/۰۳۱	۰/۰۲۸	دارای روند صعودی
سینوپتیک بم	دمای میانگین	۰/۰۵۶	۰/۰۰۰۱	دارای روند صعودی
	بارش	-۰/۰۴۲	۰/۰۷۹	فاقد روند مشخص
	تبخیر و تعرق پتانسیل	۰/۰۵۱	۰/۰۰۶	دارای روند صعودی
سینوپتیک بافت	دمای میانگین	۰/۰۵۵	۰/۰۰۸	دارای روند صعودی
	بارش	۰/۰۰	۰/۹۹۶	فاقد روند مشخص
	تبخیر و تعرق پتانسیل	۰/۰۴	۰/۰۰۰۱	دارای روند صعودی

میانگین تبخیر و تعرق قبل و بعد از تاریخ تغییر (۱۹۹۷) به ترتیب ۷۷۸/۹ و ۸۳۲/۱۶ میلی‌متر در سال بود که اختلافی معادل ۵۳/۲۵ میلی‌متر در سال را در بردارد.

ارزیابی مدل تغییر اقلیم LARS-WG: نتایج ارزیابی دقت مدل LARS-WG در شبیه‌سازی دما و بارش متوسط سالانه بر اساس شاخص‌های R^2 ، RMSE و NSE در ایستگاه‌های سینوپتیک میانه جیرفت، بم، بافت و کهنوج در جدول ۴ نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که انطباق زیادی بین مقادیر شبیه‌سازی شده و مشاهداتی وجود داشته که مقادیر پایین RMSE و بالا بودن مقدار NSE و R^2 در تمامی ایستگاه‌های سینوپتیک، نشان‌دهنده همین انطباق است. با توجه به نتایج حاصله، می‌توان دریافت که مدل LARS-WG از توانایی قابل قبولی در ریزمقیاس‌نمایی داده‌های دما و بارش برخوردار است.

تعیین نقاط جهش در داده‌های تبخیر و تعرق پتانسیل: شکل ۲، نمودار تغییرات جهشی را در مقیاس سالانه برای تبخیر و تعرق پتانسیل ایستگاه‌های میانه جیرفت، کهنوج، بم و بافت نشان می‌دهد. در مقیاس سالانه، تمامی ایستگاه‌ها تغییر ناگهانی معنی‌داری در سطح پنج درصد در سری مقادیر تبخیر و تعرق پتانسیل داشتند (جدول ۳). همچنین، هویت سال تغییر و جهش ناگهانی برای مقادیر ETP در مقیاس سالانه در ایستگاه‌های مورد مطالعه (در سطح پنج درصد) در جدول نشان داده شده است. بر طبق جدول ۳، سال جهش یا تغییر در اکثر ایستگاه‌ها بین سال‌های ۱۹۹۷ تا ۲۰۰۰ بود. به طوری که سال جهش در ایستگاه بافت و کهنوج ۱۹۹۷، در ایستگاه بم ۲۰۰۰ و در ایستگاه میانه جیرفت ۱۹۹۸ می‌باشد. از بین ایستگاه‌های مذکور، بیشترین تغییر ناگهانی مربوط به ایستگاه بافت بود که



شکل ۲- نمودار تغییرات جهشی ETP برای ایستگاه‌های میانه جیرفت، کهنوج، بم و بافت در مقیاس سالانه

جدول ۳- هویت سال تغییر و جهش ناگهانی برای مقادیر تبخیر و تعرق پتانسیل سالانه در ایستگاه‌های مورد مطالعه

سال تغییر	P-value	K_t
۱۹۹۸	۰/۰۰۰۱	۱۹۰
۲۰۰۰	۰/۰۰۵	۱۸۴
۱۹۹۷	۰/۰۰۱	۱۶۲
۱۹۹۷	.	۱۷۸

جدول ۴- آماره‌های خطا حاصل از پارامترهای اقلیمی مشاهداتی و مدل‌سازی شده به‌وسیله مدل LARS-WG در مرحله صحت‌سنجی

ایستگاه	متغیر	R^2	RMSE	NSE
بافت	دمای میانگین (°C)	۰/۸۷	۰/۲۸	۰/۹۸
	بارش (میلی‌متر)	۰/۸۱	۳/۴۹	۰/۹۵
بم	دمای میانگین (°C)	۰/۸۳	۰/۶۵	۰/۹۴
	بارش (میلی‌متر)	۰/۷۶	۱/۴۵	۰/۹
جیرفت	دمای میانگین (°C)	۰/۸۵	۰/۱۷	۰/۹۷
	بارش (میلی‌متر)	۰/۸	۴/۶۸	۰/۹۱
کهنوج	دمای میانگین (°C)	۰/۸۴	۰/۴۱	۰/۹۶
	بارش (میلی‌متر)	۰/۷۱	۷/۹۷	۰/۷۹

دوره آبی (۲۰۲۱-۲۰۴۰) و نیز تغییرات دما (°C) و نسبت تغییرات بارش و تبخیر و تعرق (%) در دوره آبی

سناریوی تغییر اقلیم: نتایج بررسی روند تغییرات پارامترهای اقلیمی در دوره پایه (۱۹۸۹-۲۰۱۷) و

دوره پایه افزایش یافته و مقدار بارش کاهش یافته است، به طوری که در تمامی ایستگاه‌ها بیشترین درصد کاهش بارش و میزان افزایش دما مربوط به سناریوی RCP8.5 می‌باشد.

نسبت به دوره پایه در ایستگاه‌های مختلف و در مقیاس حوضه، در جدول ۵ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در همه ایستگاه‌ها مقدار پارامتر دمای میانگین در دوره آبی نسبت به

جدول ۵- بررسی روند تغییرات پارامترهای اقلیمی در دوره آبی نسبت به دوره پایه

ایستگاه	متغیر	مقادیر پارامترها					
		دوره پایه	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 2.6	RCP 4.5
بافت	دمای میانگین (°C)	۱۵/۲	۱۶/۳	۱۶/۶	۱۶/۹	۱/۱	۱/۷
	بارندگی (میلی‌متر)	۲۵۵/۷	۲۳۶/۵	۲۲۱/۶	۲۰۷	-۷/۵	-۱۳/۳
	تبخیر و تعرق (میلی‌متر)	۸۱۹/۵	۸۷۱/۸	۸۹۳/۵	۹۰۹/۷	۶/۴	۹/۰
بم	دمای میانگین (°C)	۲۳/۳	۲۴/۹	۲۵/۴	۲۵/۷	۱/۶	۲/۴
	بارندگی (میلی‌متر)	۵۸/۵	۵۲/۵	۴۶/۴	۳۹	-۱۰/۳	-۲۰/۷
	تبخیر و تعرق (میلی‌متر)	۱۶۶۱/۸	۱۷۱۹/۲	۱۷۹۶/۰	۱۸۳۹/۹	۳/۵	۸/۱
جیرفت	دمای میانگین (°C)	۲۵/۶	۲۶/۸	۲۷	۲۷/۳	۱/۲	۱/۷
	بارندگی (میلی‌متر)	۱۷۴	۱۷۵/۵	۱۳۶/۳	۱۲۳/۷	-۹/۵	-۲۱/۷
	تبخیر و تعرق (میلی‌متر)	۲۳۴۳/۲	۲۴۰۷/۵	۲۴۸۲/۵	۲۵۳۰/۴	۲/۷	۶
کهنوج	دمای میانگین (°C)	۲۷	۲۸/۱	۲۸/۴	۲۸/۶	۱/۱	۱/۶
	بارندگی (میلی‌متر)	۱۸۹	۱۶۹/۵	۱۵۲/۳	۱۳۹/۳	-۱۰/۳	-۱۹/۴
	تبخیر و تعرق (میلی‌متر)	۲۹۵۷/۲	۳۰۴۴	۳۱۲۲/۷	۳۱۵۵	۲/۹	۵/۶
کل حوضه	دمای میانگین (°C)	۲۲/۸	۲۴	۲۴/۳	۲۴/۶	۱/۲	۱/۸
	بارندگی (میلی‌متر)	۱۶۹/۳	۱۵۴	۱۳۹/۲	۱۲۷/۲	-۹	-۲۴/۹
	تبخیر و تعرق (میلی‌متر)	۱۶۴۵/۴	۲۰۱۲/۱	۲۰۷۸/۶	۲۱۱۱/۲	۳/۴	۶/۸

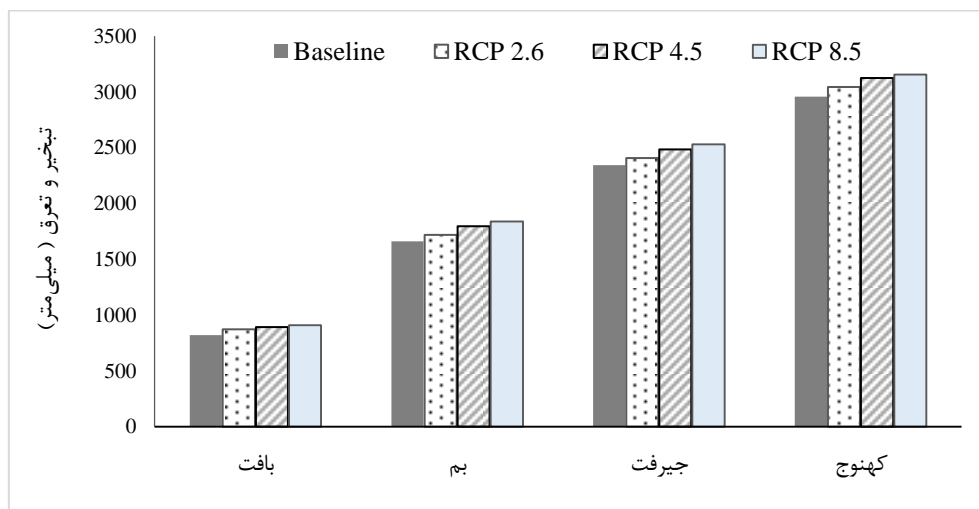
مدل LARS-WG، در سطح حوضه مورد مطالعه، میزان بارش در دوره آبی به ترتیب تحت سناریوهای RCP 2.6، RCP 4.5 و RCP 8.5 به میزان نه، ۱۷/۸ و ۲۴/۹ درصد نسبت به دوره پایه کاهش و میزان دما در دوره آبی به ترتیب تحت سناریوهای RCP 2.6، RCP 4.5 و RCP 8.5 به میزان ۱/۲، ۱/۵ و ۱/۸ درجه سانتی‌گراد افزایش خواهد یافت (جدول ۵). میزان تبخیر و تعرق نیز بر اساس وضعیت دما و بارش پیش‌بینی شده افزایش خواهد یافت. نتایج بررسی وضعیت تبخیر و تعرق در سطح حوضه مورد مطالعه حاکی از افزایش میزان تبخیر و تعرق در دوره آبی (۲۰۲۱-۲۰۴۰) نسبت به دوره پایه می‌باشد که این

متوسط بلندمدت میزان تبخیر و تعرق بر اساس روش تورنت وایت نیز برای دوره پایه و دوره‌های آبی در ایستگاه‌های مورد مطالعه در سطح حوضه بر اساس مدل ریزمقیاس نمایی LARS-WG در شکل ۳ آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در همه ایستگاه‌ها میزان تبخیر و تعرق در تمامی سناریوهای دوره آبی نسبت به دوره پایه افزایش پیدا خواهد کرد. در میان ایستگاه‌های مورد مطالعه، بیشترین میزان افزایش تبخیر و تعرق در دوره آبی نسبت به دوره پایه، مربوط به ایستگاه بافت به میزان ۶/۴، نه و ۱۱ درصد به ترتیب تحت سناریوهای RCP 2.6، RCP 4.5 و RCP 8.5 می‌باشد (جدول ۵). بر طبق نتایج حاصل از

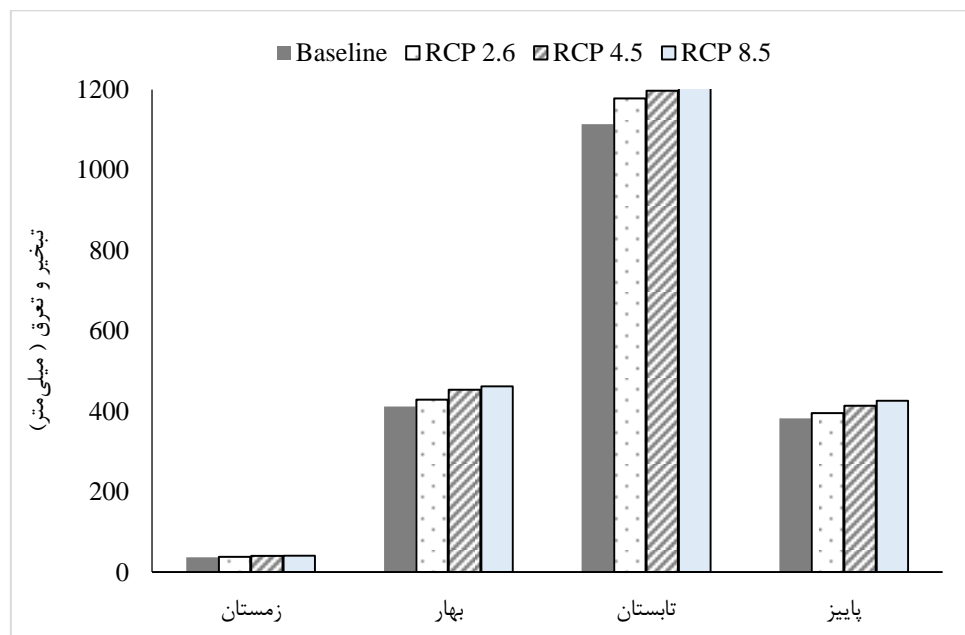
افزایش خواهد یافت و این افزایش در ماه‌های گرم سال بیشتر از ماه‌های سرد سال می‌باشد. بیشترین افزایش ماهانه تبخیر و تعرق در سطح حوضه نیز در هر سه سناریو مورد بررسی مربوط به ماه جولای نسبت به دوره پایه می‌باشد. متوسط فصلی تبخیر و تعرق نیز در دوره آبی حاکمی از افزایش میزان تبخیر و تعرق در سه سناریو در دوره آبی نسبت به دوره پایه در همه فصول سال می‌باشد. به طوری که بیشترین میزان افزایش آن نیز در فصل تابستان که زمان اوج نیاز آبیاری اکثر گیاهان می‌باشد، رخ خواهد داد (شکل ۵).

میزان به طور متوسط در دهه آبی به میزان ۳/۴، ۶/۸ و ۸/۵ درصد به ترتیب تحت سناریوهای RCP 2.6، RCP 4.5 و RCP 8.5 خواهد بود (جدول ۵). بر طبق نتایج، بیشترین افزایش دما و تبخیر و تعرق مربوط به سناریوی RCP 8.5 می‌باشد.

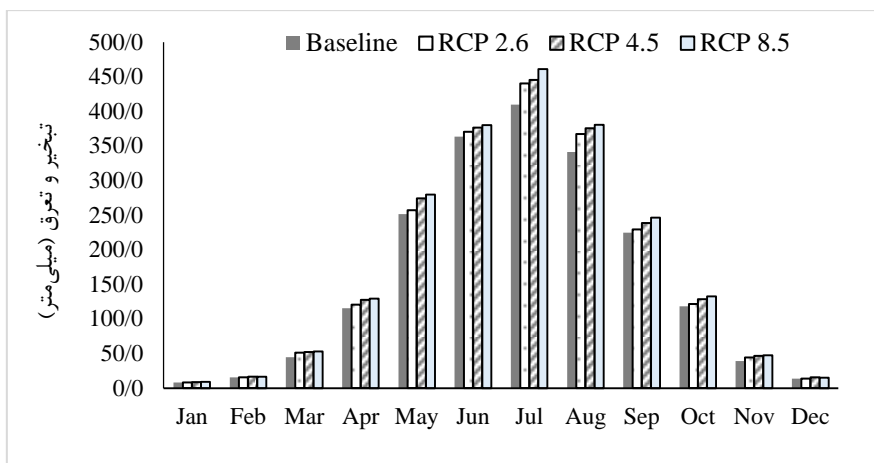
متوسط ماهانه و فصلی بلندمدت تبخیر و تعرق سطح حوضه در دوره‌های آبی نسبت به دوره پایه برای روش تورنت وایت و ریزمقیاس نمایی LARS-WG در شکل‌های ۴ و ۵ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، میزان تبخیر و تعرق در تمامی ماه‌های سال در هر سناریو نسبت به دوره پایه



شکل ۳- مقادیر تبخیر و تعرق پتانسیل در ایستگاه‌های مختلف در دوره پایه و دوره آبی



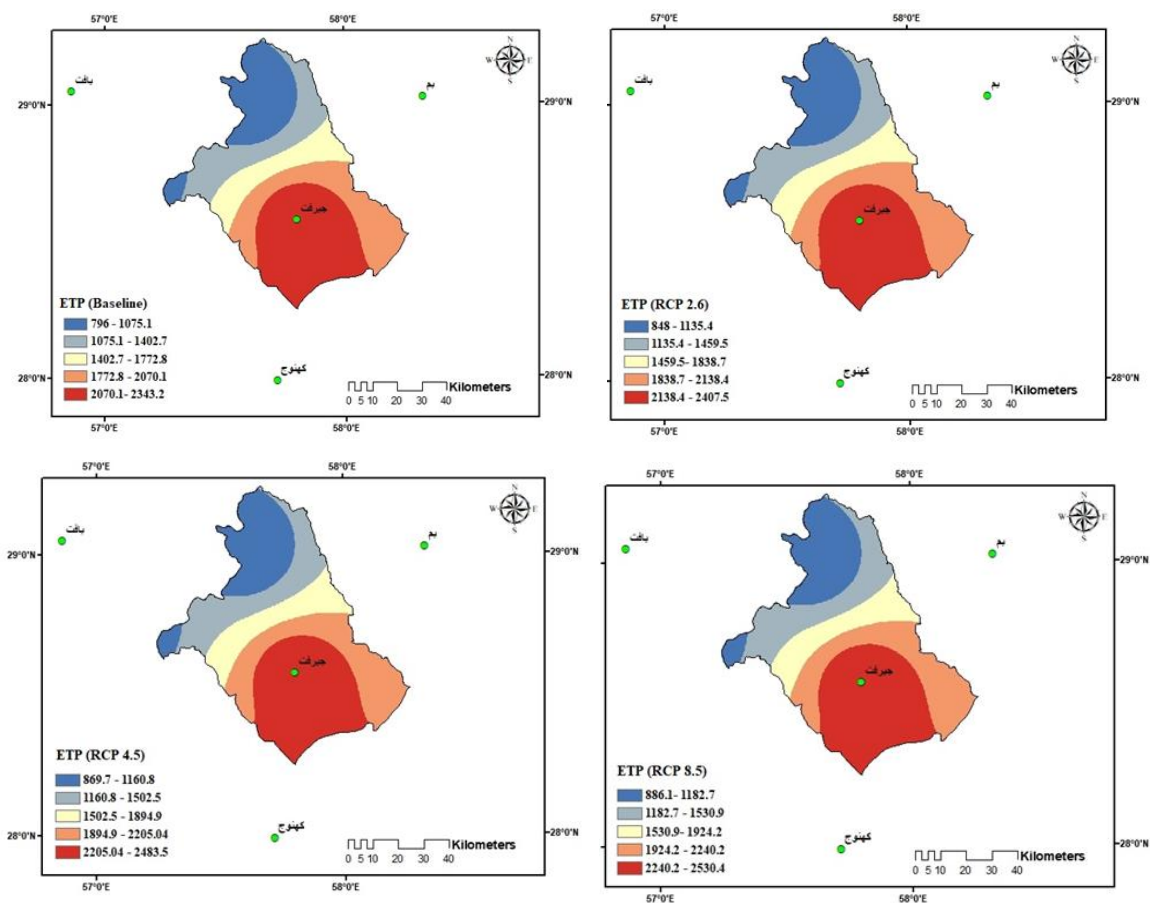
شکل ۴- مقادیر تبخیر و تعرق پتانسیل در فصول مختلف در دوره آبی و دوره پایه در سطح حوضه



شکل ۵- مقادیر تبخیر و تعرق پتانسیل در ماه‌های مختلف در دوره آبی و دوره پایه در سطح حوضه

شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در همه سناریوها میزان تبخیر و تعرق در دوره‌های آبی در همه پهنه‌های مورد نظر افزایش قابل ملاحظه‌ای را نسبت به دوره پایه خواهد داشت. همچنین، در تمامی سناریوها بیشترین میزان تبخیر و تعرق در قسمت جنوبی حوزه آبخیز هلیل‌رود مشاهده می‌شود.

جهت نمایش بهتر وضعیت تبخیر و تعرق در حوضه مورد بررسی، میزان تبخیر و تعرق محاسباتی در دوره پایه (۱۹۸۹-۲۰۱۷) و دوره آبی (۲۰۲۱-۲۰۴۰) به‌طور متوسط در سطح حوضه در محیط ArcGIS با استفاده از روش معکوس وزنی فاصله (IDW) درون‌یابی شد که نتایج حاصل در شکل ۶ نشان داده



شکل ۶- پهنه‌بندی مکانی تغییرات تبخیر و تعرق پتانسیل در دوره پایه و دوره آبی در سطح حوضه مورد مطالعه

نتیجه‌گیری

با توجه به کاهش منابع آب در دسترس، مدیریت و برنامه‌ریزی دقیق منابع آبی از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است. تغییرات آب و هوایی باعث تغییر پارامترهای اقلیمی و تبخیر-تعرق گیاهان و تغییر نیاز آبی گیاهان زراعی و باغی می‌شود (Babolhekami و همکاران، ۲۰۲۰). در این پژوهش، به بررسی اثر تغییر پارامترهای اقلیمی بر تبخیر-تعرق پتانسیل در حوزه آبخیز هلیل‌رود پرداخته شد. در این راستا، از مدل ریزمقیاس نمایی آماری LARS-WG و خروجی مدل جهانی HadGEM2 جهت پیش‌بینی تغییرات اقلیمی و به‌دنبال آن برآورد تبخیر و تعرق پتانسیل در دوره آبی (۲۰۲۱-۲۰۴۰) در حوزه آبخیز هلیل‌رود، استفاده شد. بر طبق نتایج حاصل، از مدل LARS-WG در مجموع در سطح حوزه مورد مطالعه میزان دما و به تبع آن میزان تبخیر و تعرق افزایش پیدا خواهد کرد. همچنین، در سطح حوزه مورد مطالعه میزان بارش در دوره آبی نسبت به دوره پایه کاهش خواهد یافت. میزان تبخیر و تعرق نیز بر اساس وضعیت دما و بارش پیش‌بینی شده افزایش خواهد یافت. نتایج بررسی وضعیت تبخیر و تعرق در سطح حوزه مورد مطالعه حاکی از افزایش میزان تبخیر و تعرق در دوره آبی

(۲۰۲۱-۲۰۴۰) نسبت به دوره پایه می‌باشد که این میزان به‌طور متوسط در دهه آبی به میزان ۳/۴، ۶/۸ و ۸/۵ درصد به ترتیب تحت سناریوهای RCP 2.6، RCP 4.5 و RCP 8.5 خواهد بود. بر طبق نتایج، بیشترین افزایش دما و تبخیر و تعرق و بیشترین کاهش بارش در سطح حوزه مربوط به سناریو RCP 8.5 می‌باشد. بررسی کلی این نتایج حاکی از این است که وضعیت هوا در منطقه مذکور در سال‌های آبی گرم‌تر و خشک‌تر خواهد شد. نتایج حاصل از افزایش دمای میانگین، کاهش بارش و به تبع آن افزایش تبخیر و تعرق پتانسیل با مطالعات Goudarzi و همکاران (۲۰۱۸)، Khadempour و همکاران (۲۰۱۹)، Babolhekami و همکاران (۲۰۲۰)، مطابقت دارد. به‌دلیل کاهش بارندگی و افزایش دما و ETP، بخش‌های کشاورزی تقاضای بیشتری برای آب خواهند داشت. بخش عمده مصرف آب در زمینه کشاورزی می‌باشد. لذا، برای این‌که بتوان در آینده با مشکل کم‌آبی مبارزه نمود باید آب مورد نیاز بخش کشاورزی را با راندمان بالا مصرف کرد. از نتایج حاصل از این پژوهش، می‌توان در مطالعات مربوط به مدیریت منابع آب، ذخیره‌سازی آب‌های سطحی و مطالعات کشاورزی و زیست‌محیطی استفاده نمود.

منابع مورد استفاده

1. Alizadeh, A. 2005. Principles of applied hydrological. Mashhad, Astan Quds Razavi, 807 pages.
2. Alizadeh, A., G.H. Kamali, F. Mosavi and M. Baygani. 2011. Weather and climatology. Ferdowsi University of Mashhad Press, 14: 1-381.
3. Babaian, I. and Z. Najafi Nik. 2007. Introducing and evaluating the LARS-WG Model for modeling the climatological parameters of Khorasan Province in 1961-2003. Journal of Nivar, 63: 50-67 (in Persian).
4. Babolhekami, A., M.A. Gholami Sefidkouhi and A.R. Emadi. 2020. The impact of climate change on reference evapotranspiration in Mazandaran Province. Iranian Journal of Soil and Water Research, 51(2): 387-401 (in Persian).
5. Bahak, B. 2013. Study of the likelihood of climate change in Kerman Province using Man-Kendall Method, case study: Kerman Station. Journal of Territory, 10(39): 67-74 (in Persian).
6. Dibike, Y. and P. Coulibaly. 2005. Hydrological impact of climate change in the Saguenay Watershed: comparison of downscaling methods and hydrologic models. Journal of Hydrology, 307: 145-163.
7. Dinpashoh, Y. and M. Foroughi. 2018. Impact of climate change on sudden changes in potential evapotranspiration time series (case study: north west of Iran). Water and Soil Journal, 32(3): 617-632.
8. Feizi, V., M. Farajzadeh and R. Nowruzi. 2010. Climate change study in Sistan and Baluchestan Province by Mann-Kendall Method. Proceedings of the Fourth International Congress of Geographers of the Islamic World. University of Sistan and Baluchestan.
9. Fowler, H.J., S. Blenkinsop and C. Tebaldi. 2007 Linking climate change modeling to impacts studies: recent advances in downscaling techniques for hydrological modeling. International Journal Climatology, 27: 1547-1578.

10. Gao, P., X.M. Mu, F. Wang and R. Li. 2011. Changes in streamflow and sediment discharge and the response to human activities in the middle reaches of the Yellow River. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15(1): 1-10.
11. Ghahraman, N., I. Babaeian and M. Tabatabaei. 2016. Investigation the effect of climate change on sugarcane growing season and water requirement under RCP scenarios. *Journal of Water and Soil Resources Conservation*, 6(1): 63-75.
12. Goudarzi, M., B. Salahi and S.A. Hosseini. 2018. Estimation of evapotranspiration rate due to climate change in the Urmia Lake Basin. *Iran-Watershed Management Science and Engineering*, 12(41): 1-13.
13. Heydari Tashah Kaboud, S.H. and Y. Khoshkho. 2019. Projection and prediction of the annual and seasonal future reference evapotranspiration time scales in the west of Iran under RCP emission scenarios. *Journal of Applied Researches in Geographical Sciences*, 19(53): 157-167.
14. Khadempour, F., H. Khozaymehnezhad and M. Amirabadizadeh. 2019. Investigating the effects of climate change on daily evapotranspiration in models with different mathematical structures in various climates of Iran. *Journal of Water Research in Agriculture*, 33(1): 149-162.
15. Mirsaneh, M., A.R. Massah Bavani, S. Bolouk Azari and T. Sohrabi Molayousef. 2010. Evaluation of the effect of climate change on the water requirement of sugar beet and its growth period. The Second National Conference on Comprehensive Management of Water Resources Utilization, Shahid Bahonar University of Kerman.
16. Kouhi, M. and H. Sanaei Nejad. 2014. Evaluation of climate change scenarios based on two statistical downscaling methods for reference evapotranspiration in Urmia region. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, 4(7): 559-574.
17. Li, Q., X. Wei, M. Zhang, W. Liu, K. Giles-Hansen and Y. Wang. 2018. The cumulative effects of forest disturbance and climate variability on streamflow components in a large forest-dominated watershed. *Journal of Hydrology*, 557: 448-459.
18. Mahdavi, M. 2009. *Applied hydrology*. University of Tehran Press, 2: 1-260.
19. Mann, H.B. 1945. Non-parametric tests against trend. *Econometrica* 13, *Mathscinet*, 245-259.
20. Pettitt, A.N. 1979. A non-parametric approach to the change point problem. *Applied Statistics*, 28: 126-135.
21. Richardson, C.W. and D.A. Wright. 1984. WGEN: a model for generating daily weather variables. US Department of Agriculture, Agricultural Research Service, ARS-8. USDA, Washington, DC.
22. Salajegheh, A., E. Rafiei Sardooi, A.R. Moghaddamnia, A. Malekian, S.H. Araghinejad, S.H. Khalighi Sigaroodi and A. Salehpourjam. 2016. Prediction of climatic variables using statistical downscaling model (SDSM) in future under scenario A2. *Desert Management Journal*, 4(7): 12-25.
23. Semenov, M.A. and E.M. Barrow. 2002. *A Stochastic weather generator for use in climate impact studies: user manual*. Harpenden, Hertfordshire, UK.
24. Semenov, M.A., R.J. Brooks, E.M. Barrow and C.W. Richardson. 1998. Comparison of the WGEN and LARS-WG stochastic weather generators for diverse climates. *Climate Research*, 10(2): 95-107.
25. Tao, X.E., H. Chen, C.Y. Xu, Y.K. Hou and M.X. Jie. 2015. Analysis and prediction of reference evapotranspiration with climate change in Xiangjiang River Basin, China. *Water Science and Engineering*, 8(4): 273-281.