

صص ۶۳-۷۸

ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر منابع آب (زیر حوضه لنجانان)

داریوش رحیمی*

استاد هیئت‌مدیره اقلیم، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم جغرافیایی و برنامه‌ریزی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران

فاطمه بشیریان

پژوهشگر پسا دکتری آب و هواشناسی، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم جغرافیایی و برنامه‌ریزی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران

احمد نوربخش

کارشناس ارشد آب و هواشناسی، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم جغرافیایی و برنامه‌ریزی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران

نصرت فرهادی

دکتری آب و هواشناسی، پردیس حضرت فاطمه زهرا دانشگاه فرهنگیان، اهواز، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۶/۱۷

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۱/۳۰

چکیده

تغییر اقلیم و گرمایش جهانی چالش جدی بر منابع آب ایران است. منابع آب حوضه زاینده‌رود در دو دهه اخیر تحت تأثیر تغییر اقلیم کاهش یافته است. برای ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر منابع آب، روند یابی، آتسکار سازی نقاط چرخش، پیش‌نگری و آنالیز دقت مدل‌ها برای داده‌های دمای حداقل و حداکثر، بارش و دبی در طول دوره آماری ۱۳۴۵-۱۴۰۱ انجام گرفت. در این فرایند از روش‌های آنومالی، آزمون نا پارامتری من-کندال و پی‌تیتیت، مبدل لارس (گزارش ششم) و ضریب همبستگی، ضریب تعیین، آرام اس ای استفاده شد. نتایج واکاوی روند نشان دهنده کاهش معنادار میانگین دمای سالانه در دوره (۱۳۴۵-۱۴۰۱) در حدود ۱٫۴ درجه سلسیوس و کاهش معنادار بارش فصل زمستان با شیب ۱٫۲۸- است. یافته‌ها نشان داد روند افزایش دما در دوره ۲۰۴۰-۲۰۲۱ ادامه خواهد داشت. در سناریوهای گوناگون دمای کمینه بین ۰٫۴ تا ۰٫۷+، دمای بیشینه ۰٫۶- تا ۰٫۸+ درجه سلسیوس، بارش سالانه نیز حدود ۱۱٪ کاهش می‌یابد. همچنین براساس رابطه دما-بارش میزان تبخیر به ازای هر ۰٫۱ درجه سلسیوس افزایش دما ۳٪ افزایش می‌یابد. در نتیجه این میانگین دبی ۱/۵ تا ۱/۹ درصد در دوره زمانی (۲۰۲۱-۲۰۴۰) است؛ بنابراین چنانچه در زمینه مدیریت منابع آب بازنگری صورت نگیرد چالش دسترسی به منابع آب در آینده جدی‌تر خواهد شد. در این زمینه راهبردهای سازگاری با تغییر اقلیم و افزایش تاب‌آوری پیشنهاد می‌شود.

واژگان کلیدی: تغییر اقلیم، روند، منابع آب، LARS-WG، زیر حوضه لنجانان.

مقدمه

افزایش روز افزون انتشار گازهای گلخانه‌ای ناشی از فعالیت‌های انسانی از حدود سال ۱۸۵۰ به بعد تأثیرات زیادی بر سامانه آب و هوایی داشته است. بر اساس گزارش هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم، در دهه ۲۰۱۵-۲۰۰۶، میانگین دمای

سطح زمین حدود ۰/۸۷ درجه سلسیوس (±۰/۱۲) نسبت به دوره پایه ۱۹۰۰-۱۸۵۰ افزایش یافته است. با توجه به اینکه دمای کره زمین در حال حاضر افزایش ۰/۲ درجه سلسیوس (±۰/۱) در هر دهه را نشان می‌دهد؛ در سال ۲۰۱۷ گرمایش ناشی از فعالیت‌های انسان به یک درجه سلسیوس بالاتر از سطح قبل از صنعتی شدن رسید. اگر این سرعت گرمایش ادامه یابد، در حدود سال ۲۰۴۰ گرمایش جهانی به ۱/۵ درجه سلسیوس خواهد رسید (IPCC, 2021).

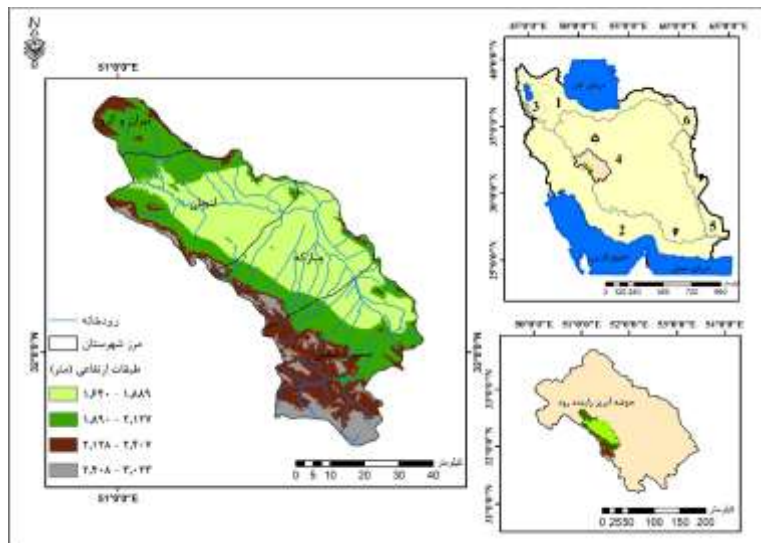
به دلیل افزایش میانگین دما در سراسر جهان، الگوهای گردش هوا، میزان رطوبت جو و توزیع بارندگی تغییر کرده است (Ellison et al. 2017; Swain et al. 2020)؛ بنابراین تغییر آب و هوای جهان اثرات قابل توجهی بر رژیم هیدرولوژیکی محلی و منطقه‌ای دارد (رحیمی و زارعی، ۱۳۹۸). تغییر اقلیم منجر به رخداد بیشتر بارش‌های سنگین (Senevirantne et al, 2021)، ذوب سریع یخچال‌ها (Douville et al, 2021) و کاهش کیفیت آب در بیشتر مناطق جهان گردیده است. تنش آبی، خشکیدگی تالاب‌ها و دریاچه‌ها، کاهش آبدی رودخانه‌ها، افت سطح ایستابی آبخوان‌ها، فرونشست دشت‌ها از دیگر شاخص‌های آسیب‌پذیری اقلیمی منابع آب هستند (IPCC, 2022; Rahimi, 2021). این رخدادهای محدودیت دسترسی به منابع آب شیرین و تأمین آب در بخش‌های شرب، کشاورزی و صنعت را تشدید کرده است؛ (Müller Schmied et al. 2021; Bijl et al. 2018) Hanasaki et al. 2018; Burk et al. 2020؛ پیش‌بینی شرایط منابع آب تا سال ۲۰۵۰ نشان می‌دهد که ۴۴۰ میلیون نفر از جمعیت شهری کشورهای توسعه یافته و به مقدار بسیار بیشتری در کشورهای در حال توسعه با چالش در تأمین منابع آب مواجه خواهند شد (Flörke et al. 2018). از آنجایی که تغییر آب و هوا به‌طور یکسان در سراسر جهان رخ نمی‌دهد، انتظار می‌رود بر هر منطقه تأثیر متفاوتی بگذارد. میزان آسیب‌پذیری منابع آب ناشی از تغییر اقلیم در عرض‌های میانی و مناطق خشک و نیمه‌خشک نسبت به عرض‌های بالایی و مناطق مرطوب کره زمین بیشتر است (IPCC 2018). خشک‌سالی‌های متوالی و افزایش دما همراه با برداشت بیش از ظرفیت تجدید شونده منابع آب در ایران موجب افزایش شاخص آسیب‌پذیری اقلیمی منابع آب در بیشتر حوضه‌های آبریز کشور شده است. بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی، انتقال آب بین حوضه‌ای، توسعه ناپایدار اقتصادی و اجتماعی، احداث پروژه‌های آب بر در مناطق کم بارش و توزیع نامناسب جمعیت این آسیب‌پذیری را از سال ۲۰۰۸ تاکنون افزایش داده و تاب‌آوری حوضه‌های آبی بشدت کاهش یافته است (صابری و همکاران، ۱۴۰۲؛ انصاری مهابادی و همکاران ۱۴۰۱؛ صالح و صالح نیا ۱۴۰۱؛ فرمان‌بر و دلاور ۱۳۹۶).

تغییر اقلیم از طریق تغییر در دما و بارش بر چرخه هیدرولوژیک، منابع آب در دسترس و تقاضای آب تأثیر می‌گذارد. لذا بررسی و پیش‌بینی تغییرات دما و بارش می‌تواند مؤثر واقع گردد. مدل‌های گردش عمومی جو ابزارهای پیشرفته‌ای برای ارزیابی اثرات و مطالعات تغییر آب و هوا هستند. این مدل‌ها به دلیل بزرگ‌مقیاس بودن شبکه‌های محاسباتی آن‌ها قادر به پیش‌بینی پارامترهای آب و هواشناسی در مقیاس نقطه‌ای نیستند. لذا دانشمندان ابزار واسطی به نام مدل Weather Generator را ابداع کردند که می‌توان بر اساس آن و با استفاده از خروجی مدل‌های عددی، تغییر اقلیم را در مقیاس ایستگاهی مورد مطالعه و ارزیابی قرار داد (بندری خلف آبادی و همکاران، ۱۳۹۲). در این مطالعه جهت

ریزمقیاس نمایی خروجی مدل های سیستم زمین از نرم افزار LARS-WG که بر اساس مدل های ریزمقیاس نمایی آماری است؛ بهره گرفته شده است. بر اساس مطالعات پیشین، از جمله مطالعه سلاجقه و همکاران (۱۳۹۶) مبدل گر LARS-WG برای شبیه سازی رفتار متغیر بارش، در مقایسه با سایر الگوهای مشابه عملکرد بهتری دارد. همچنین به منظور پیش نگرایی بارش و دما، از مدل HADGEM3-GCM31-LL که از مدل های سامانه زمین (ESM) فاز ششم پروژه مقایسه ای مدل جفت شده (CMIP6) می باشد؛ استفاده شده است. بر اساس برخی مطالعات گذشته از جمله زارعیان و همکاران (۱۴۰۱)، مدل HadGEM3-GC31-LL عملکرد قابل قبولی در برآورد بارش سالانه ایران دارد. در سال های اخیر به دلیل تغییر اقلیم و فعالیت های انسانی، منابع آب زیر حوضه لنجان با چالش روبرو شده است. لذا بررسی اثرات تغییر اقلیم بر منابع آب در بازه های زمانی گذشته و آینده می تواند در برنامه ریزی منطقه مؤثر واقع شود.

موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

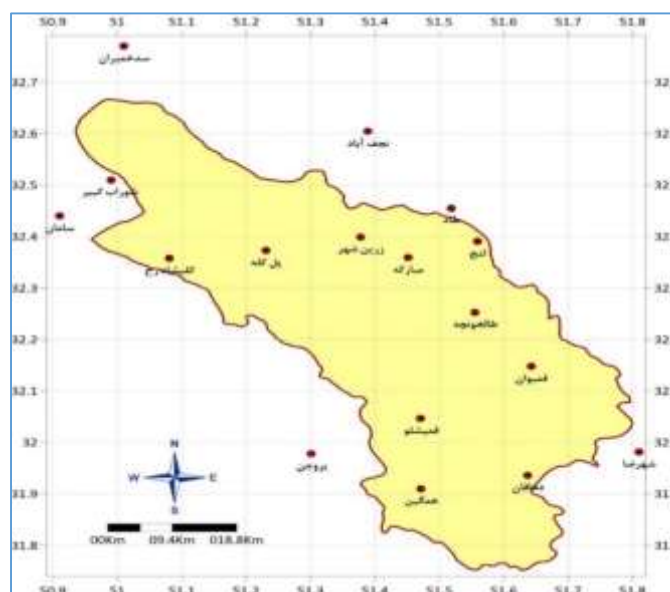
موقعیت جغرافیایی زیر حوضه لنجان، حفاصل ۵۰/۹۴ تا ۵۱/۸۰ درجه طول شرقی و ۳۱/۷۵ تا ۳۲/۶۷ درجه عرض شمالی است. مساحت این زیر حوضه ۳۳۸۱ کیلومتر مربع است. به لحاظ تقسیمات کشوری در جنوب غربی استان اصفهان واقع شده و شامل ۱۴ شهر و ۱۱ دهستان می باشد. این حوضه در محدوده شهرستان های لنجان، مبارکه، سمیرم سفلی و بخشی از شهرستان تیران و کرون قرار دارد (شکل ۱). محدوده مطالعاتی زیر حوضه لنجان (زاینده رود میانی دو) از سد نکو آباد تا ورودی به دشت لنجان (چم کهرئیز) با کد مطالعاتی ۴۲۱۶، یکی از ۲۱ محدوده مطالعاتی حوضه آبریز گاوخونی بوده و هشت درصد از کل مساحت حوضه آبریز گاوخونی را شامل می شود. پایین دست آن محدوده مطالعاتی زاینده رود میانی یک (نجف آباد) از محل پل مارنان اصفهان تا محل سد نکو آباد و بالادست آن محدوده مطالعاتی زاینده رود میانی سه (بن-سامان) از چم کهرئیز تا سد زاینده رود می باشد. لازم به ذکر است حوضه آبریز گاوخونی به مساحت ۴۲۵۵۰ کیلومتر مربع، خود از زیر حوضه های حوضه آبریز فلات مرکزی ایران می باشد. حوضه آبریز فلات مرکزی ایران نیز یکی از شش حوضه آبریز اصلی ایران زمین می باشد (سازمان نقشه برداری کشور، ۱۴۰۰) که در شکل (۱) با کد چهار مشخص شده است.



شکل ۱: موقعیت جغرافیایی و تقسیمات کشوری منطقه

داده‌ها

در این پژوهش از پایگاه داده سازمان هواشناسی و وزارت نیرو استفاده شده است (شکل ۲). دوره زمانی مورد بررسی در ۱۳۴۵-۱۴۰۲ است. لازم به ذکر است برای واکاوی دبی از ایستگاه پل کله در دوره ۱۳۹۸-۱۳۲۸ استفاده شده که از نظر دوره آماری به دو دوره قبل از احداث سد زاینده‌رود (۱۳۵۰) و بعد از احداث سد تقسیم می‌شود. با توجه به اینکه بعد از احداث سد (۱۳۹۸-۱۳۵۰) جریان پایه رودخانه تنظیم شده است؛ در این پژوهش از دوره ۱۳۲۸-۱۳۵۰ که جریان طبیعی رودخانه بوده استفاده می‌شود.



شکل ۲: موقعیت ایستگاه‌های هواشناسی و آب‌سنجی

روش پژوهش

برای ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر منابع آب منطقه مورد مطالعه، فرآیند آشکارسازی تغییر عناصر اقلیمی (دما و بارش)، روند یابی و تعیین نقاط چرخش به ترتیب با استفاده از روش‌های آماری آنومالی (رابطه ۱)، آزمون نا پارامتری من کندال (رابطه ۲) و پتیت (رابطه ۳) انجام می‌شود. در ادامه با بهره‌گیری از خروجی‌های گزارش ششم IPCC و مدل گر LARS-WG6، عناصر اقلیمی در دوره زمانی (۲۰۲۱-۲۰۴۰) پیش‌نگری می‌شوند. اعتبار سنجی نتایج توسط $r, R, MSE, RMSE$ (روابط ۴، ۵، ۶) سنجیده می‌شود.

$$Z = \frac{Y_i - \mu}{\sigma} \quad \text{رابطه (۱)}$$

$$Var(S) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \quad \text{رابطه (۲)}$$

$$U_{t,T} = \sum_{i=1}^t \sum_{j=t+1}^T \text{sgn}(X_i - X_j) \quad K_T \max |U_{t,T}|, \quad \text{رابطه (۳)}$$

$$p \approx 2 \exp\left(\frac{-6K_T^2}{T^3 + T^2}\right)$$

$$RMSE = \frac{\sum n \sqrt{(xi - \mu)^2}}{n} \quad \text{رابطه (۴)}$$

$$MSE = \frac{1}{n} \sum (xi - \mu)^2 \quad \text{رابطه (۵)}$$

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (xi - \bar{x})(yi - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (xi - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (yi - \bar{y})^2}} \quad \text{رابطه (۶)}$$

جهت برآورد میزان تبخیر و تعرق در دوره آینده (۲۰۲۱-۲۰۴۰) از روش هارگریوز-سامانی^۱، استفاده می‌شود. در این مدل میزان تبخیر و تعرق از رابطه (۷) به دست می‌آید:

$$ETO = 0.0023 \times Ra \times (T_{mean} + 17.8) \cdot (T_{max} - T_{min})^{0.5} \quad \text{رابطه (۷)}$$

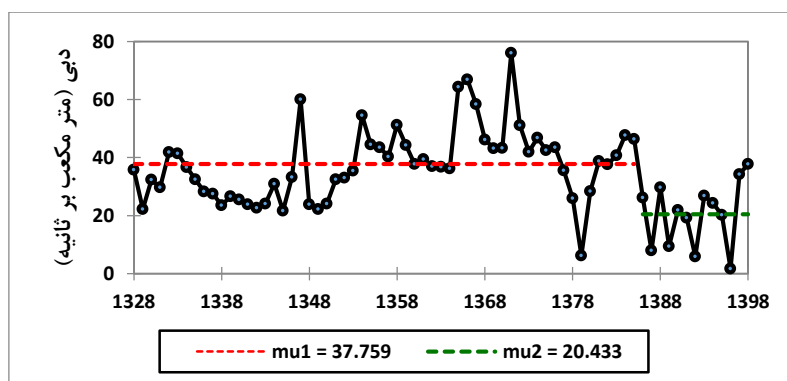
که در آن T_{mean} میانگین دما، T_{max} و T_{min} به ترتیب دمای بیشینه و دمای کمینه برحسب درجه سلسیوس و Ra تابش خورشیدی است.

بحث و نتایج

حوضه آبی زاینده‌رود به دلیل نقش مهمی که در تأمین آب فلات مرکزی ایران دارد؛ دارای اهمیت ویژه‌ای است. خشک‌سالی‌های متوالی، افزایش دما هوا و مدیریت منابع آب در سطح این حوضه منجر به بروز مشکلات عدیده^۱ در آن شده است. منابع آبی حوضه زاینده‌رود در دو دهه گذشته (۲۰۲۰-۲۰۰۰) شرایط حادی از نظر هیدرولوژیکی داشته است. به دلیل خشک‌سالی‌های بلندمدت (۲۰۱۷-۲۰۰۷) و روند افزایشی مصرف آب بیش از ظرفیت هیدرولوژیکی آن موجب

1- Hargreaves - Samani

شده است که مطالعه این حوضه در کانون توجه پژوهشگران قرار گیرد. در این مقاله تأثیر تغییر اقلیم بر منابع آب نیز زیر حوضه لنجان بررسی می‌شود. رژیم هیدرولوژیکی زیر حوضه لنجان به دلیل قرار گرفتن در پایین دست سد زاینده‌رود از سال ۱۳۵۰ فاقد جریان طبیعی بوده و جریان سطحی رودخانه به صورت کنترل شده جریان می‌یابد. در این حوضه ایستگاه هیدرومتری پل کله از سال ۱۳۲۸ دارای آماری اندازه‌گیری دبی است. تحلیل دبی رودخانه زاینده‌رود در محل ایستگاه هیدرومتری پل کله ایستگاه هیدرومتری پل کله یکی از ایستگاه‌های مهم موجود در طول مسیر رودخانه زاینده‌رود است. بر اساس نتایج آزمون من-کندال در سطح اطمینان ۹۵ درصد روند تغییرات دبی پل کله معنادار نیست ($P\text{-Value} = 0.89$). لذا فرض صفر مبنی بر عدم وجود روند و تصادفی بودن سری زمانی دبی پل کله تأیید می‌شود؛ اما نتایج آزمون پتیت نشان می‌دهد که یک نقطه چرخش معنادار در مقادیر دبی این ایستگاه وجود دارد ($P\text{-Value}=0.01$). نقطه عطف این روند مربوط به سال ۱۳۸۵ است. بطوری که میانگین دبی سالانه از $37/89$ به $20/43$ مترمکعب بر ثانیه کاهش یافته است (شکل ۳). مقایسه دو دوره نشان می‌دهد دبی رودخانه زاینده‌رود از سال ۱۳۸۷، ۴۵ درصد کاهش داشته است.



شکل ۳: نمودار همگنی متوسط دبی سالانه ایستگاه پل کله (آزمون Pettitt Test)

رابطه بین بارش و دبی

جهت بررسی اثر تغییر اقلیم بر دبی رودخانه زاینده‌رود، چگونگی ارتباط متغیر بارندگی و دبی زاینده‌رود در محل زیر حوضه مورد نیاز است. داده‌های مورد استفاده مربوط به قبل از اعمال تغییرات مدیریتی (احداث سد) است (۱۳۲۸-۱۳۵۰). نتایج نشان می‌دهد که همبستگی بالایی بین این دو متغیر وجود دارد ($r = 0.97$). مطابق با نتایج مدل رگرسیون خطی قبل از کنترل دبی زاینده‌رود توسط احداث سد و ایجاد تغییرات در منابع و مصارف آب، ۹۳ درصد تغییرات دبی زاینده‌رود در محل زیر حوضه، توسط متغیر بارش قابل تبیین بوده است (رابطه ۸).

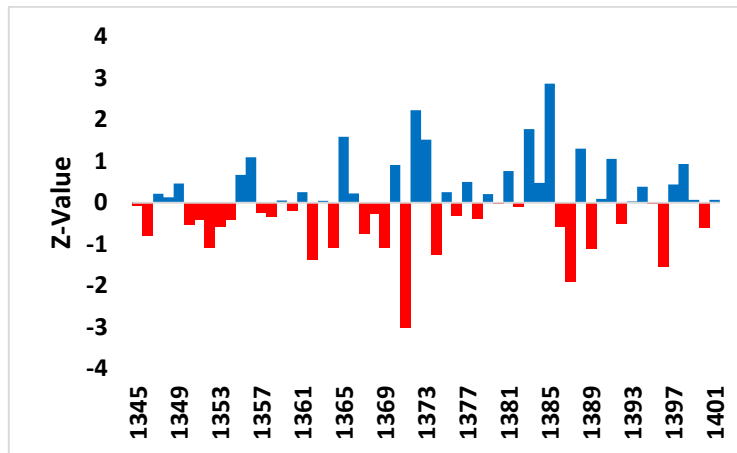
$$D = 0.25 * P - 5.96 \quad (\text{رابطه } 8)$$

متوسط سالانه دبی در محل ایستگاه هیدرومتری پل کله (برحسب مترمکعب بر ثانیه) $D=$

میانگین سالانه بارندگی (برحسب میلی‌متر) $P=$

آنومالی بارش

آنومالی بارش حوضه با استفاده از شاخص SPI در شکل (۴) نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد در طول دوره مورد مطالعه ۳۰ سال خشک‌سالی و ۲۶ سال ترسالی اتفاق افتاده است.



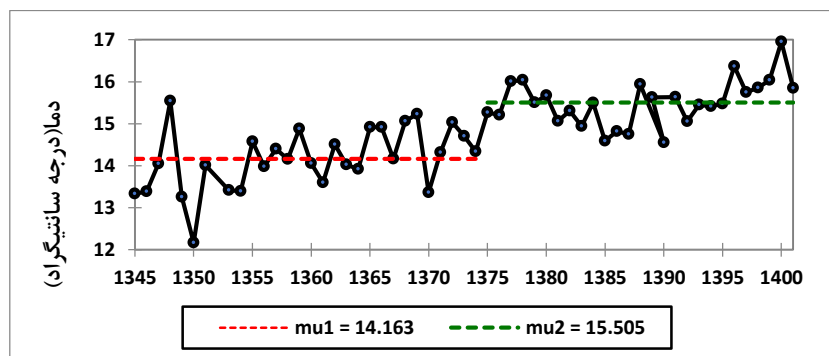
شکل ۴: آنومالی بارش زیر حوضه لنجان (۱۳۴۵-۱۴۰۱)

واکاوی روند دما

سری زمانی میانگین دمای سالانه تمامی ایستگاه‌های مورد مطالعه، در سطح معنی‌داری ۹۵٪ دارای روند افزایشی است (جدول ۱). نتایج آزمون پتیت نشان می‌دهد نقطه چرخش روند دما سالانه کل حوضه مربوط به سال ۱۳۷۴ است. پس از سال مذکور، میانگین دما ۱/۳۴ درجه سلسیوس نسبت به دوره قبل (۱۳۴۵-۱۳۷۳) افزایش یافته است (شکل ۵).

جدول ۱: نتایج آزمون آماری من-کندال بر روی سری زمانی میانگین سالانه دمای ایستگاه‌های مورد مطالعه

نام ایستگاه	زربین شهر	اصفهان	زفره	سامان	نجف‌آباد	مبارکه
Z-Value	2.38	6.98	5.71	3.13	2.82	1.97



شکل ۵: نمودار همگنی میانگین دما سالانه زیر حوضه لنجان (آزمون Pettitt Test)

واکوی روند بارندگی

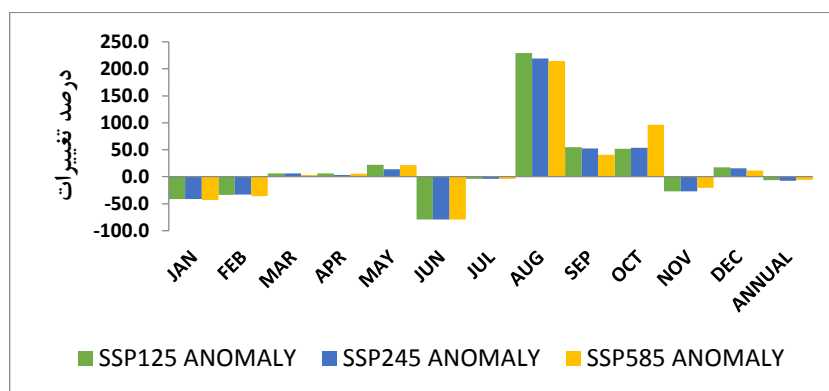
ارزیابی رفتار بلندمدت متوسط بارندگی سالانه ایستگاه‌های مورد مطالعه نشان داد که هیچ‌کدام روند معناداری ندارند. همچنین بارندگی کل حوضه در مقیاس سالانه، ماهانه و فصلی بررسی شد. نتایج نشان داد فقط بارندگی اردیبهشت ماه در سطح معنی‌داری ۹۵٪، معنی‌دار بوده و دارای روند افزایشی است. لیکن در سایر ماه‌ها روند معنی‌داری دیده نمی‌شود. در مقیاس فصلی نیز بارش فصل زمستان دارای روند کاهشی معنی‌دار می‌باشد. میزان شیب برآوردی بارش زمستان برابر با $-1/28$ می‌باشد.

پیش‌نگری عناصر اقلیمی بارش و دما

دوره زمانی ۲۰۲۱-۲۰۴۰ برای پیش‌نگری عناصر بارش، دمای کمینه و بیشینه ماهانه و فصلی انتخاب شده است. برای پیش‌نگری متغیرهای اقلیمی از مدل HADGEM3-GCM31-LL تحت سناریوهای SSP1-2.6 (خوش‌بینانه)، سناریو SSP2-4.5 (واقع‌نگر) و SSP5-8.5 (بدبینانه) استفاده شده است.

پیش‌نمایی بارندگی ماهانه

پیش‌نمایی میانگین بارش ماهانه در دوره ۲۰۲۱-۲۰۴۰ برای هر سه سناریو SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 حاکی از کاهش بارندگی نسبت به دوره پایه، در ماه‌های ژانویه، فوریه، ژوئن، جولای و نوامبر و افزایش بارندگی در ماه‌های مارس، آوریل، می، آگوست، سپتامبر، اکتبر و دسامبر می‌باشد (شکل ۶).

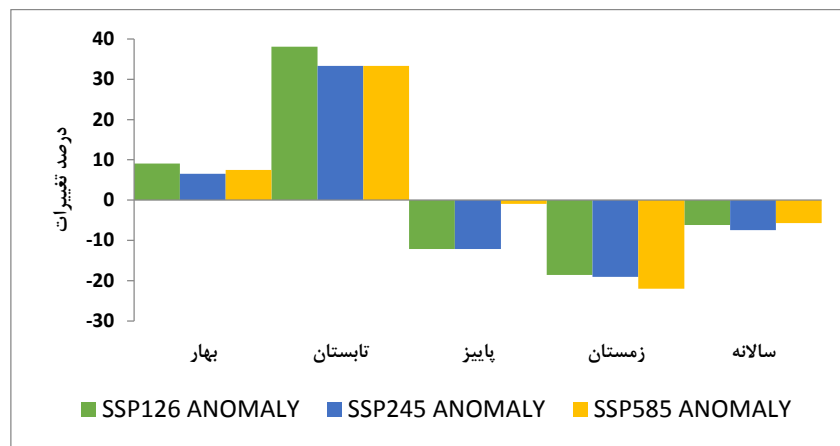


شکل ۶: تغییرات بارش ماهانه پیش‌نمایی شده در مقایسه با دوره پایه

پیش‌نمایی بارندگی فصلی

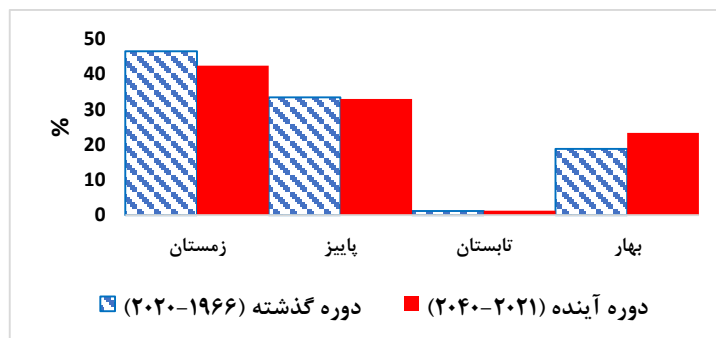
پیش‌نمایی بارش فصلی برای هر سه سناریو SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 حاکی از افزایش بارندگی نسبت به دوره پایه، در فصل‌های بهار و تابستان و کاهش بارندگی در فصل‌های پاییز و زمستان است (شکل ۷).

بر اساس سناریو خوش بینانه SSP1-2.6 میزان افزایش بارندگی نسبت به دوره پایه، در فصل های بهار و تابستان به ترتیب ۹ و ۳۸ درصد بوده و کاهش بارندگی در فصل های پاییز و زمستان به ترتیب ۱۲ و ۱۹ درصد است. کاهش بارش سالانه ۶ درصد برآورد می شود. نتایج سناریو حد واسط SSP2-4.5 حاکی از افزایش بارندگی در فصل های بهار و تابستان به ترتیب ۷ و ۳۳ درصد و کاهش بارندگی در فصل های پاییز و زمستان به ترتیب ۱۲ و ۱۹ درصد است. بر اساس همین سناریو کاهش بارش سالانه ۷ درصد می باشد. سناریو بدبینانه SSP5-8.5 نیز میزان افزایش بارندگی در فصل های بهار و تابستان را به ترتیب ۸ و ۳۳ درصد و کاهش بارندگی در فصل های پاییز و زمستان را یک و ۲۲ درصد برآورد می کند. بارش سالانه نیز ۶ درصد کاهش می یابد.



شکل ۷: تغییرات بارندگی فصلی پیش نمای شده در مقایسه با دوره پایه

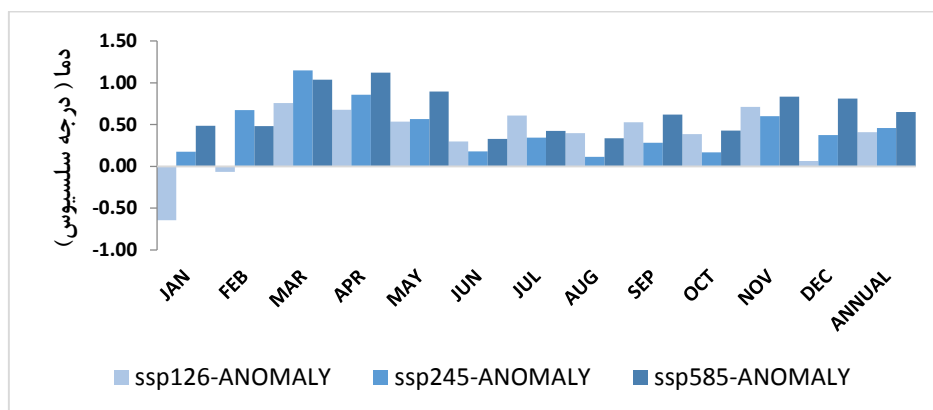
رژیم بارش منطقه (۲۰۲۰-۱۹۶۶) با ۴۶/۶٪ زمستانه است. سهم بارش فصل پاییز نیز ۳۳/۵٪ است. در مجموع فصل سرد سال ۷۸٪ بارش سالانه را دریافت می نماید. فصل بهار با ۱۸/۸٪ در رده سوم و فصل تابستان ۱/۱۲٪ بارش، کمترین سهم را دارد. در اثر تغییر اقلیم نسبت بارش های فصلی (۲۰۲۱-۲۰۴۰) در فصل زمستان ۴۲/۵٪، فصل پاییز ۳۳٪، فصل بهار ۲۳/۴٪ و تابستان ۱/۲۱٪ خواهد بود. بدین ترتیب بارش های فصل سرد سال کاهش و فصل گرم افزایش خواهد یافت (شکل ۸). هرچند افزایش بارش در فصول بهار و تابستان جزئی خواهد بود؛ با توجه به وضعیت نامناسب دسترسی به منابع آب در حال حاضر، همین مقدار تغییر در وزن بارش های فصل سرد سال در آینده نیز می تواند موجب اختلالات جدی در نظام هیدرولوژیکی حوضه شود.



شکل ۸: تغییرات سهم بارندگی فصلی در دو دوره گذشته و آینده

پیش‌نمایی میانگین ماهانه دمای کمینه

به‌جز دمای ماه‌های ژانویه و فوریه تحت سناریو SSP126 که کاهش می‌یابد، سایر ماه‌ها در تمامی سناریوها نسبت به دوره پایه، افزایش یافته است. همچنین متوسط سالانه میانگین کمینه دمای ماهانه در سناریوهای SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 به ترتیب به میزان ۰/۴، ۰/۵ و ۰/۷ درجه سلسیوس نسبت به دوره پایه افزایش یافته است (شکل ۹).

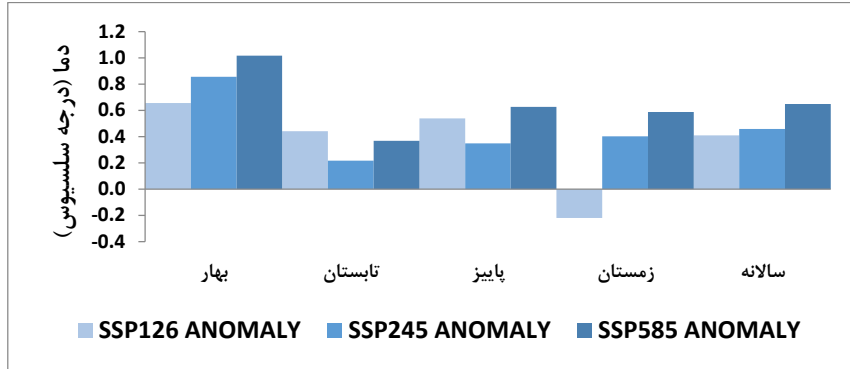


شکل ۹: تغییرات میانگین ماهانه دمای کمینه پیش‌نمایی شده در مقایسه با دوره پایه

پیش‌نمایی میانگین فصلی دمای کمینه

پیش‌نمایی میانگین فصلی کمینه دما در دوره ۲۰۲۱-۲۰۴۰ نشان می‌دهد؛ دمای فصل زمستان تحت سناریو SSP1-2.6 به میزان ۰/۲ درجه سلسیوس کاهش یافته است. در سایر سناریوها دما نسبت به دوره پایه، افزایش یافته است (شکل ۱۰). در این دوره بر اساس سناریو خوش‌بینانه SSP1-2.6، میزان افزایش دما نسبت به دوره پایه، در فصل‌های بهار، تابستان و پاییز به ترتیب ۰/۷، ۰/۴ و ۰/۵ درجه سلسیوس بوده است. بر اساس همین سناریو افزایش دمای سالانه نیز ۰/۴ درجه سلسیوس است. سناریو SSP2-4.5 میزان افزایش دما را نسبت به دوره پایه، در فصل‌های بهار، تابستان، پاییز و زمستان به ترتیب ۰/۹، ۰/۲، ۰/۳ و ۰/۴ درجه سلسیوس نشان می‌دهد. میزان افزایش دمای سالانه نیز ۰/۴ درجه

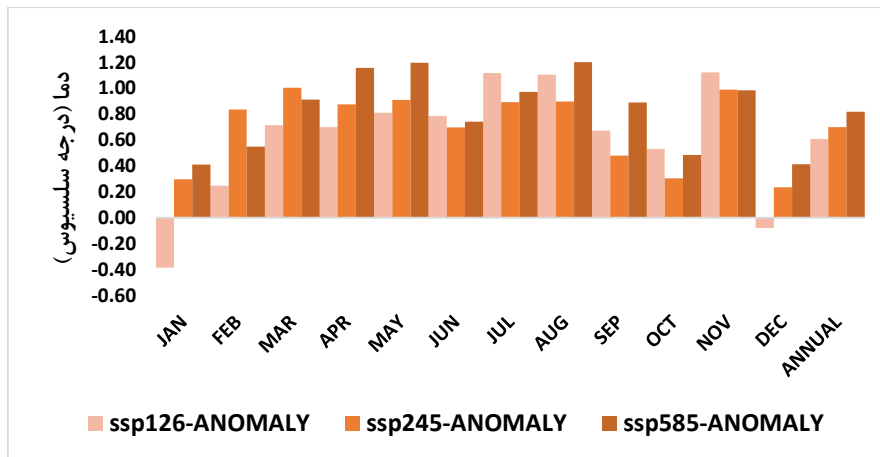
سلسیوس است. نتایج سناریو بدبینانه SSP5-8.5 حاکی از افزایش دما به میزان ۰/۱، ۰/۴، ۰/۶ و ۰/۶ درجه سلسیوس در فصل های بهار، تابستان، پاییز و زمستان بوده است. دمای سالانه نیز ۰/۷ درجه سانتی گراد افزایش می یابد.



شکل ۱۰: تغییرات میانگین فصلی دما کمینه پیش نمای شده در مقایسه با دوره پایه

پیش نمای میانگین ماهانه دمای بیشینه

پیش نمای میانگین بیشینه دمای ماهانه نشان می دهد روند دما نسبت به دوره پایه افزایشی خواهد بود. فقط در ماه های ژانویه و دسامبر مربوط به سناریو SSP1-2.6 روند دما کاهشی است. متوسط سالانه نیز در سناریوهای SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 به ترتیب به میزان ۰/۶، ۰/۷ و ۰/۸ درجه سلسیوس نسبت به دوره پایه افزایش می یابد (شکل ۱۱).

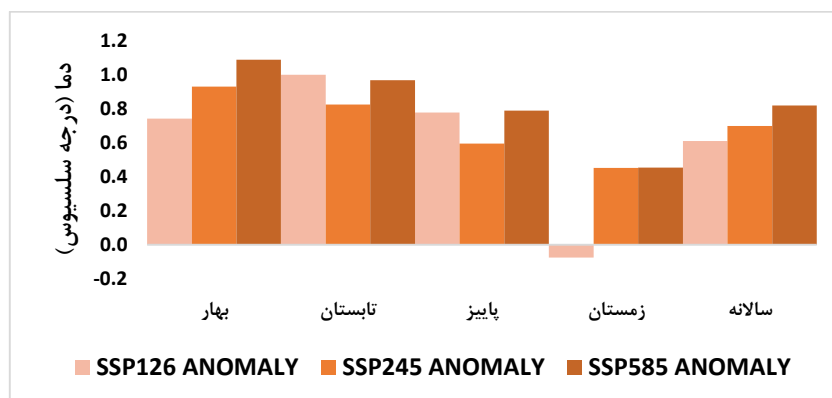


شکل ۱۱: تغییرات میانگین ماهانه دما بیشینه پیش نمای شده در مقایسه با دوره پایه

پیش‌نمایی میانگین فصلی دمای بیشینه

بررسی‌ها نشان می‌دهد روند میانگین فصلی بیشینه دما در دوره ۲۰۲۱-۲۰۴۰ در تمامی سناریوها نسبت به دوره پایه افزایش خواهد یافت. فقط دمای فصل زمستان تحت سناریو SSP1-2.6 به میزان ۰/۱ درجه سانتی‌گراد کاهش می‌یابد (شکل ۱۲). در این دوره بر اساس سناریو خوش‌بینانه SSP1-2.6 میزان افزایش دمای بیشینه نسبت به دوره پایه، در فصل‌های بهار، تابستان و پاییز به ترتیب ۰/۷، ۱ و ۰/۸ درجه سلسیوس است. بر اساس همین سناریو افزایش دمای سالانه نیز ۰/۶ درجه سلسیوس خواهد بود.

مطابق با نتایج سناریو SSP2-4.5 میزان افزایش دمای بیشینه نسبت به دوره پایه، در فصل‌های بهار، تابستان، پاییز و زمستان به ترتیب ۰/۹، ۰/۸، ۰/۶ و ۰/۵ درجه سلسیوس بوده و افزایش بیشینه دمای سالانه نیز ۰/۷ درجه سلسیوس است. بر اساس سناریو بدبینانه SSP5-8.5 میزان افزایش دمای بیشینه نسبت به دوره پایه، در فصل‌های بهار، تابستان، پاییز و زمستان به ترتیب ۱/۱، ۰/۱، ۰/۸ و ۰/۵ درجه سلسیوس بوده و افزایش دمای سالانه نیز ۰/۸ درجه سلسیوس می‌باشد.



شکل ۱۲: تغییرات میانگین فصلی دما بیشینه پیش‌نمایی شده در مقایسه با دوره پایه

اعتبار سنجی خروجی مدل LARS WG

با استفاده از شاخص‌های ضریب همبستگی، ریشه میانگین مربعات خطا ((RMSE) و ریشه میانگین مربعات خطای نرمال (NRMSE) و داده‌های مشاهداتی حوضه مطالعاتی (۲۰۰۸-۲۰۲۲)، خروجی‌های منتج از مدل LARSWG اعتبارسنجی شدند. نتایج کارایی قابل قبول مدل در ایجاد داده‌های ریزمقیاس‌نمایی شده بارش و دما را تأیید می‌کند (جدول ۲).

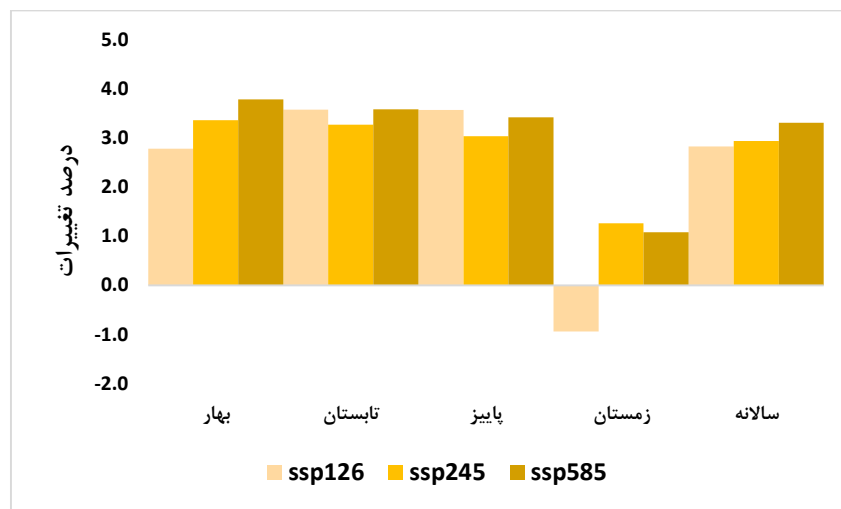
جدول ۲: اعتبار سنجی داده‌های برآوردی مدل LARS WG

NRMSE (%)	RMSE (%)	R2 (%)	R	
۹	۱۰/۱	۹۰	۰/۹۵	بارش
۲	۱۳/۱	۹۸/۲	۰/۹۹	دمای کمینه
۵	۱۱/۵	۹۸/۶	۰/۹۹	دمای بیشینه

برآورد اثرات تغییر دمای پیش‌نمایی شده بر تبخیر و تعرق

از آنجا که میزان تبخیر و تعرق مستقیماً با متغیر دمای هوا در ارتباط است؛ انتظار می‌رود در زیر حوضه لنجانان نیز با افزایش دما، میزان تبخیر و تعرق افزایش یابد. در ادامه میزان تبخیر و تعرق این منطقه در مقیاس زمانی فصلی برای دوره آینده (۲۰۲۱-۲۰۴۰) برآورد می‌شود.

نتایج نشان می‌دهد میزان تبخیر و تعرق جز در فصل زمستان تحت سناریو SSP1-2.6، در سایر سناریوها افزایش خواهد یافت. همچنین تبخیر و تعرق سالانه در سناریوهای SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 به ترتیب به میزان ۲/۸، ۳/۳ و ۲/۹ درصد نسبت به دوره پایه افزایش می‌یابد (شکل ۱۳)



شکل ۱۳: تغییرات میزان تبخیر و تعرق پیش‌نمایی شده نسبت به دوره پایه

تأثیر تغییرات بارندگی سالانه بر دبی زاینده‌رود در محل زیر حوضه لنجانان (۲۰۲۱-۲۰۴۰)

بر اساس نتایج به دست آمده میزان کاهش بارندگی سالانه پیش‌نمایی شده برای زیر حوضه لنجانان در دوره ۲۰۴۰-۲۰۲۱، ۵/۷ تا ۷/۵ درصد می‌باشد. در نتیجه با استفاده از رابطه رگرسیونی بارش و دبی (رابطه ۷)، برآورد می‌شود که میانگین دبی سالانه زاینده‌رود در محل زیر حوضه از ۱/۵ تا ۱/۹ درصد تحت سناریوهای مختلف نسبت به دوره پایه کاهش یابد.

نتیجه گیری

افزایش دما و تغییر توزیع زمانی بارش‌ها از پیامدهای تغییر اقلیم هستند. افزایش دما که منجر به تغییر الگوی بارش برف به باران می‌شود در مناطق کوهستانی اثر شدیدی بر حجم و پایداری منابع آب دارد. افزایش دما منجر به کاهش سهم بارش برف، ماندگاری آن و کاهش مساحت روزهای برف پوشان می‌شود. پیش‌نگری‌های انجام شده نیز حاکی از کاهش بارش و ادامه روند افزایشی دما با شدت بیشتر است. دما در خوش‌بینانه‌ترین سناریو بین ۰/۴ تا ۰/۶ درجه سلسیوس افزایش خواهد یافت. با کاهش بارندگی سالانه پیش‌نمایی شده میزان دبی زاینده‌رود در محل زیر حوضه (بدون لحاظ تغییرات ناشی از تصمیمات مدیریتی)، بین ۱/۵ تا ۱/۹ درصد، برحسب سناریوهای مختلف تغییر اقلیم کاهش خواهد یافت. همچنین با ادامه روند افزایش دما، تبخیر و تعرق سالانه در سناریوهای مختلف بین ۲/۸ تا ۳/۳ درصد نسبت به دوره پایه افزایش خواهد یافت. علاوه بر آن کاهش برف منجر به ناپایداری جریان‌های رودخانه می‌شود. در فصل خشک (از اواخر اردیبهشت تا اوایل آبان ماه) که منطقه بارشی را دریافت نمی‌کند؛ پایداری منابع آب بستگی به میزان توده‌های برفی ارتفاعات دارد. کاهش تغذیه برف منجر به کاهش دبی رودخانه شده است. روند افزایشی دما در منطقه نشان می‌دهد که تغییر الگوی بارش برف به باران در آینده با شدت بیشتری رخ خواهد داد؛ بنابراین تنش‌های آبی در منطقه مورد مطالعه شدت خواهد گرفت. این یافته با نتایج مطالعات غیاث‌آبادی و همکاران (۱۳۹۷)، رحیمی و داناپور (۱۳۹۰)، رحیمی و محمدی (۱۳۹۶) و بشیریان و همکاران (۱۳۹۹) مطابقت دارد. نتایج روند یابی و عملکرد مدل گر LARS-WG نیز نشان می‌دهد وجود روند افزایشی دما، کاهش بارش و دبی و میزان دقت مدل گر مذکور با یافته‌های رحیمی و زارعی (۱۳۹۸)، صابری و همکاران (۱۴۰۲)، انصاری مهابادی و همکاران (۱۴۰۲)، صالح و صالح نیا (۱۴۰۱)، سلاجقه و همکاران (۱۳۹۶) و زارعیان و همکاران (۱۴۰۱) مطابقت دارد.

جمع‌بندی نتایج مطالعات نشان می‌دهد روند افزایشی دما، کاهش بارندگی و افزایش تبخیر منجر به کاهش حجم جریان و پایداری منابع آب سطحی خواهد شد. تداوم این روند، تنش‌های آبی منطقه و محدودیت در میزان دسترسی به آب را افزایش می‌دهد. سازگاری با تغییر اقلیم و افزایش تاب‌آوری در مواجهه با آثار آن از جمله سیاست‌های پیشنهادی برای تعدیل تنش‌های آبی در منطقه است.

منابع

- ۱- انصاری مهابادی، ثمین، دهبان، حسین، زارعیان، محمدجواد و فرخ نیا، اشکان. (۱۴۰۱): بررسی روند تغییرات دما و بارش حوضه‌های آبریز ایران در افق ۲۰ سال آینده بر اساس برون‌داد مدل‌های CMIP6، پژوهش آب ایران، جلد ۱۶، شماره ۱.
- ۲- بشیریان، فاطمه، رحیمی، داریوش، موحدی، سعید و ذاکری نژاد، رضا. (۱۳۹۹): شبیه‌سازی رواناب، تبخیر، برگاب و تغذیه آب زیرزمینی دریاچه ارومیه در دوره‌های مرطوب و خشک. پژوهش آب ایران، ۱۵(۲) (۳۸ پی‌اچ‌پی)، ۸۵-۹۵.

- ۳- بندری خلف آبادی، وحیده، شکیبیا، علیرضا و عظیمی، فریده. (۱۳۹۲): پیش‌یابی رژیم بارش و دمای خوزستان با مدل‌های گردش عمومی جو. جغرافیای طبیعی، ۱۹(۶)، ۵۹-۷۰.
- ۴- رحیمی، داریوش و زارعی، فرحناز. (۱۳۹۸): اثرات تغییر اقلیم بر حجم منابع آب و انتقال آب بین حوضه‌ای. علوم مهندسی و آبیاری (مجله علمی کشاورزی)، ۳(۴۲)، ۶۱-۷۴.
- ۵- رحیمی، داریوش و محمدی، زهرا. (۱۳۹۶): بررسی خشک‌سالی هیدرولوژیکی حوضه آبخیز سد زاینده‌رود. آمایش جغرافیایی فضا، ۲۵(۷)، ۲۲۱-۲۳۳.
- ۶- زارعیان، محمدجواد، دهبان، حسین و گوهری، سید علیرضا. (۱۴۰۱): ارزیابی دقت مدل‌های CMIP6 در برآورد دما و بارش ایران بر اساس تحلیل شبکه‌ای. مدیریت آب و آبیاری، ۱۲(۴)، ۷۸۳-۷۹۷.
- ۷- سازمان نقشه‌برداری کشور، (۱۴۰۰): اطلس آب، تهران.
- ۸- سلاجقه، علی، رفیعی ساردویی، الهام، مقدم نیا، علیرضا، ملکیان، آرش، عراقی نژاد، شهاب، خلیقی سیگارودی، شهرام و صالح پورجم، امین. (۱۳۹۶): بررسی کارایی مدل‌های ریزمقیاس نمایی آماری LARS-WG و SDSM در شبیه‌سازی دما و بارش. تحقیقات آب و خاک ایران (علوم کشاورزی ایران)، ۴۸(۲)، ۲۵۳-۲۶۲.
- ۹- صابری، بیژن، رحیمی، داریوش و خوشحال دستجردی، جواد. (۲۰۲۳): آسیب‌پذیری اقلیمی و راهبردهای پایداری منابع آب در حوضه کارون شمالی. جغرافیا و توسعه ناحیه‌ای، ۲۱(۲)، ۲۲۹-۲۵۵.
- ۱۰- صالح، ایرج، صالح نیا، نرگس، (۱۴۰۱): بررسی نقش تنوع معیشتی در تاب‌آوری و سطح رفاه جامعه روستایی در مواجهه با تغییر اقلیم، مجله آب و توسعه پایدار، سال نهم، شماره ۱، صص ۸۴-۷۵.
- ۱۱- گیاث‌آبادی فراهانی، فاطمه، خوش‌اخلاق، فرامرز، شمسی‌پور، علی‌اکبر، عزیزی، قاسم و فتاحی، ابراهیم. (۱۳۹۷): بررسی و تحلیل تغییرات درون دهه‌ای روند و الگوی فضایی بارش‌های سالانه و فصلی (مطالعه موردی: نیمه غربی ایران). تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی (علوم جغرافیایی)، ۱۸(۴۸)، ۵۹-۷۸.
- ۱۲- فرمان‌بر، زهرا، دلاور، مجید، (۱۳۹۶): بررسی اثرات تغییر اقلیم بر سیستم‌های منابع آب و کشاورزی در چارچوب ارزیابی منطقه‌ای، تحقیقات منابع آب ایران، سال سیزدهم، شماره ۴، صص ۸۸-۷۵.

- 13- Bijl, D.L. Et Al. (2018): A Global Analysis Of Future Water Deficit Based On Different Allocation Mechanisms. *Water Resour. Res.* 54(8), 5803–5824, Doi:10.1029/2017wr021688.
- 14- Burke, E.J. Y. Zhang And G. Krinner, 2020: Evaluating Permafrost Physics In The Coupled Model Intercomparison Project 6 (CMIP6) Models And Their Sensitivity To Climate Change. *Cryosphere*, 14(9), 3155–3174.
- 15- Douville, H. Raghavan, K. Renwick, J. Allan, R. P. Arias, P. A. Barlow, M. Zolina, O. (2021): Water Cycle Changes. In: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution Of Working Group I To The Sixth Assessment Report Of The Intergovernmental Panel On Climate Change.*
- 16- Ellison, D. Morris, C. E. Locatelli, B. Sheil, D. Cohen, J. Murdiyarso, D. ... & Sullivan, C. A. (2017): Trees, Forests And Water: Cool Insights For A Hot World. *Global Environmental Change*, 43, 51-61.
- 17- Flörke, M. C. Schneider And R.I. Mcdonald, (2018): Water Competition Between Cities And Agriculture Driven By Climate Change And Urban Growth. *Nat. Sustain.* 1(1), 51–58, Doi:10.1038/S41893-017-0006-8
- 18- Hanasaki, N. Yoshikawa, S. Pokhrel, Y. & Kanae, S. (2018): A Quantitative Investigation Of The Thresholds For Two Conventional Water Scarcity Indicators Using A State-Of-The-Art Global Hydrological Model With Human Activities. *Water Resources Research*, 54(10), 8279-8294.
- 19- IPCC, (2018): SPECIAL REPORT Global Warming Of 1.5°C. October 2018.
- 20- IPCC, (2021): *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution Of Working Group I To The Sixth Assessment Report Of The Intergovernmental Panel On Climate*

- Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom And New York, NY, USA, In Press, Doi:10.1017/9781009157896.
- 21- Müller Schmied, H. Pokhrel, Y. Felfelani, F. Satoh, Y. Boulange, J. Burek, P. Gädeke, A. ... & Wada, Y. (2021): Global Terrestrial Water Storage And Drought Severity Under Climate Change. *Nature Climate Change*, 11(3), 226-233.
- 22- Seneviratne, S.I. X. Zhang, M. Adnan, W. Badi, C. Dereczynski, A. Di Luca, S. Ghosh, I. Iskandar, J. Kossin, S. Lewis, F. Otto, I. Pinto, M. Satoh, S.M. Vicenteserrano, M. Wehner, And B. Zhou, (2021): Weather And Climate Extreme Events In A Changing Climate. In: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution Of Working Group I To The Sixth Assessment Report Of The Intergovernmental Panel On Climate Change*.
- 23- Swain, D. L. Singh, D. Touma, D. & Diffenbaugh, N. S. (2020): Attributing Extreme Events To Climate Change: A New Frontier In A Warming World. *One Earth*, 2(6), 522-527.