



نشریه پژوهش‌های تغییرات آب و هوایی



فصلنامه علمی دانشگاه گلستان

سال چهارم / شماره مسلسل چهاردهم / تابستان ۱۴۰۲ / صفحات: ۲۷-۴۲

DOI: [10.30488/CCR.2023.397170.1134](https://doi.org/10.30488/CCR.2023.397170.1134)

ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر خشکسالی‌های آینده حوضه آبخیز گرگانرود تحت مدل‌های CMIP6

الیه عسگری^۱، محمد صادق نوروزی نظر^۲، محمد باعقیده^{۳*}، علیرضا انتظاری^۴

^۱دکتری اقلیم‌شناسی، دانشکده جغرافیا و علوم محیطی، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ایران
^۲کارشناس ارشد مهندسی عمران، گروه مهندسی عمران، واحد گنبد کاووس، دانشگاه آزاد اسلامی، گنبد کاووس، ایران.
^۳دانشیار اقلیم‌شناسی، دانشکده جغرافیا و علوم محیطی، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ایران
^۴دانشیار اقلیم‌شناسی، دانشکده جغرافیا و علوم محیطی، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۲/۲۳؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۳/۲۴

چکیده

مشخصه‌های خشکسالی به عنوان یکی از مخاطرات طبیعی، در دوره‌های آتی ممکن است تحت تأثیر تغییرات آب و هوایی تغییر نماید. پژوهش حاضر، با هدف پیش‌نگری خشکسالی هواشناسی در حوضه گرگانرود انجام شده است. به این منظور برونداد دما و بارش ۸ مدل پروژه CMIP6 تحت دو سناریوهای (SSP2-4.5) و (SSP5-8.5) طی دو دوره ۲۰۲۵-۲۰۵۴ و ۲۰۷۱-۲۱۰۰ مورد بررسی قرار گرفتند. با توجه به بزرگ مقیاس بودن مدل‌های گردش کلی جو از روش تصحیح اریبی نگاشت چندک (Quantial Mapping) برای ریزگردانی GCM‌های منتخب استفاده شد. با پیش‌نمایی مقادیر بارش و دما، شاخص SPEI، در مقیاس زمانی سالانه برای دوره‌های پایه و آتی محاسبه و در ادامه، نمایه‌های خشکسالی (مدت، شدت و بزرگی) بر مبنای تئوری Run استخراج و برای دوره‌های پایه و آتی با هم مقایسه شدند. با هدف ارتقای فرایند ارزیابی و کمی‌سازی اثرات تغییرات اقلیمی بر خشکسالی‌های آتی منطقه و نشان دادن عدم قطعیت‌های ناشی از مدل‌های اقلیمی از باندهای پیش‌بینی متغیرهای اقلیمی جهت کمی‌سازی شاخص SPEI استفاده شده است. نتایج پیش‌نگری اجرای گروهی مدل‌ها نشان داد که در شرایط اقلیم آینده متوسط دما و بارش سالانه در هر دو سناریو دارای روند افزایشی خواهد بود؛ بطوری که دما ۱/۲ تا ۴/۴ درجه سلسیوس و بارش به میزان ۲ تا ۱۱/۹ درصد افزایش می‌یابد. همچنین خروجی پایش خشکسالی بر مبنای شاخص SPEI در سناریو SSP2-4.5 نشان داد شرایط منطقه در دهه‌های آتی در محدوده‌های نزدیک به نرمال یا ترسالی خواهد بود. این وضعیت در دوره آینده نزدیک در سناریو SSP5-8.5 نیز ادامه دارد، ولی تحت تأثیر افزایش شدید دما و تبخیر و تعرق در دوره آینده دور، میزان وقوع خشکسالی‌ها افزایش خواهد یافت. نتایج حاصل از اجرای تئوری Run بیانگر آن است که نمایه‌های شدت مدت و بزرگی در سناریو SSP2-4.5 و دوره‌ی آینده نزدیک در سناریو SSP5-8.5 روند کاهشی خواهد داشت.

واژه‌های کلیدی: شاخص SPEI، CMIP6، نگاشت چندک، تئوری Run، حوضه آبخیز گرگانرود

مقدمه

زندگی بشر همواره در معرض انواع مخاطرات طبیعی قرار دارد که برخی از آن‌ها ناشی از فرآیندهای آب و هوایی می‌باشند. بررسی رویدادهای مخاطره‌آمیز طبیعی نشان می‌دهد که

خشکسالی در رده نخست فهرست این وقایع قرار دارد (پندرگراس و همکاران، ۲۰۲۰: ۱۹۰). خشکسالی شاید پیچیده‌ترین و کم شناخته‌ترین فاجعه طبیعی است که در بین سال‌های ۱۹۹۸ تا ۲۰۱۷، بر زندگی ۱/۵ میلیارد نفر در جهان تأثیر گذاشته است و یک سوم از کل اثرات بلایای طبیعی را به خود اختصاص داده است (فانک و همکاران، ۲۰۱۹). یکی از

مهمترین عوامل تاثیر گذار بر خشکسالی‌های آینده، تغییر اقلیم است. تغییر اقلیم می‌تواند خشکسالی‌های هواشناسی را از طریق تغییر در ظرفیت نگهداری آب، الگوهای گردشی و تامین رطوبت تحت تاثیر قرار دهد و موجب کاهش سریع جریان‌های سطحی، افت مخازن زیرزمینی، فرسایش آبی و بادی خاک، تغییر کیفیت منابع آب و خاک، افزایش بهره‌برداری از آب‌های زیرزمینی و نشست زمین شود (اکولا، ۲۰۲۰: ۲). طی ۱۱۵ سال گذشته (۲۰۱۶-۱۹۰۱) میانگین سالانه دمای جهانی حدود ۱/۵ درجه سلسیوس افزایش یافته است و پیش‌بینی می‌شود که این روند افزایش دما تا پایان قرن ادامه یابد (IPCC, 2020). نتایج مطالعات تجربی نشان می‌دهد افزایش دما به طور محسوسی بر شدت و مدت خشکسالی‌ها تاثیر دارد (دای، ۲۰۱۳؛ ترنبرث و همکاران، ۲۰۱۴). به عنوان مثال، در پژوهش ریبرتز و همکاران (۲۰۰۶: ۵۶۹) نشان داده شد که اگرچه خشکسالی‌های تابستان ۲۰۰۳ در نواحی مرکزی اروپا ناشی از وقوع بارش‌های کمتر از حد نرمال بوده اما افزایش شدید دما (۴ درجه سانتی‌گراد نسبت به میانگین درازمدت) سبب افزایش مقدار تبخیر و تعرق و تنش‌های آبی شده است. بر اساس نتایج ویکنت-سرانو و همکاران (۲۰۱۰: ۸) با افزایش دما و تبخیر و تعرق تقاضا برای آب بالا رفته که این امر تشدید اثرات خشکسالی‌ها را در پی دارد. بنابراین پایش و کمی‌سازی اثرات تغییر اقلیم در شرایط فعلی و در دوره‌های آتی، در نقاط مختلف جهان می‌تواند حائز اهمیت باشد.

بارش و تبخیر و تعرق، دو پارامتر مهم و ضروری برای پایش و کمی‌سازی خشکسالی‌ها می‌باشند. از این رو نمایه‌هایی که علاوه بر باران، مقدار تبخیر و تعرق را نیز در نظر می‌گیرند، می‌توانند برای پایش تغییرات اقلیمی در شرایط فعلی و در دوره‌های آتی مفیدتر باشند. شاخص‌های مختلفی از متغیرهای بارش و تبخیر و تعرق برای پایش خشکسالی بهره می‌گیرند که شاخص‌های شدت خشکسالی پالمیر (PDSI)، شاخص شناسایی خشکسالی (RDI) و

شاخص بارش تبخیر-تعرق استاندارد شده (SPEI) از آن جمله هستند. در نظر گرفتن تنها عامل بارش در تعیین خشکسالی‌های یک منطقه، از جمله انتقاداتی است که بر مطالعات انجام شده با استفاده از نمایه‌های خشکسالی مبتنی بر بارش خصوصا شاخص استاندارد شده‌ی بارش (SPI) وارد است. یکی از محدودیت‌های این شاخص عدم لحاظ بیلان آب براساس میزان تبخیر و تعرق است (نصرتی و همکاران، ۱۳۹۳: ۶۵). لذا شاخص جدیدی به نام بارش تبخیر-تعرق استاندارد شده SPEI به منظور پایش خشکسالی توسط وینسنت سرانو و همکاران ارائه گردید که بر مبنای تفاوت بارش و پتانسیل تبخیر-تعرق عمل می‌کند. مهم‌ترین برتری این شاخص نسبت به سایر نمایه‌های پرکاربرد خشکسالی، توانایی تشخیص اثر تغییر مقادیر دما و تبخیر و تعرق در ارتباط با گرمایش جهانی است.

لیو و همکاران (۲۰۲۱: ۱۲۸۰) خشکسالی‌های زمانی و مکانی استان سیچوان چین را با شاخص‌های SPI و SPEI مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند. خروجی‌ها نشان داد روند خشکسالی SPEI در همه‌ی مقیاس‌های زمانی در مناطق دشت و تپه ماهورها بیشتر از مناطق فلاتی و کوهستانی بوده است. همچنین لی و همکاران (۲۰۱۷: ۵۷۳) در پژوهشی به بررسی اثر تغییر اقلیم بر خشکسالی‌های آینده دشت هوانگهای کره شمالی پرداختند. نتایج نشان داد شدت خشکسالی‌های شناسایی شده توسط SPEI از ۱/۲۱ دوره پایه به ۱/۳۹ در دهه ۲۰۸۰ خواهد رسید. تحلیل روند شدت و وقوع خشکسالی در اروپا طی دوره زمانی ۱۹۵۱ تا ۲۰۱۵ با استفاده از شاخص SPI و SPEI نشان داد برخلاف عدم وجود روند آماری معنی‌دار در افزایش وقوع ماه‌های خشک ولی شدت خشکسالی‌های رخ داده در فصل تابستان برای شاخص SPEI در مقیاس ۶ ماهه برای تمام ایستگاه‌های مورد بررسی افزایش داشته است دکات و همکاران، ۲۰۲۲: ۱۳۴). اگانرید و همکاران (۲۰۲۲: ۱۸۳۴) در مطالعه‌ای با استفاده از سه شاخص SPI، RDI و SPEI به ارزیابی اثر تغییر

قطعیت ناشی از مدل‌های اقلیمی، از خروجی‌های یک مدل اقلیمی با مبنای انتخاب بهترین مدل بهره‌برده‌اند. استفاده از پیش‌نگری‌ها و خروجی‌های یک مدل اقلیمی جهت بررسی اثرات تغییرات اقلیم بدون در نظر گرفتن عدم قطعیت آن می‌تواند به نتایج و گزارشات گمراه کننده و غلط شود. راه حل جایگزین و مناسب‌تر، استفاده از پیش‌نگری‌های گروهی مدل‌هاست که منجر به یک باند پیش‌بینی برای شاخص‌های خشکسالی می‌گردد. در مطالعه پیش‌رو، به منظور بهبود و ارتقای فرایند ارزیابی و کمی‌سازی اثرات تغییرات اقلیمی بر خشکسالی‌های آتی در سطح منطقه از باندهای پیش‌بینی متغیرهای اقلیمی جهت کمی‌سازی شاخص SPEI استفاده شده است.

حوضه‌ی آبخیز گرگانرود یکی از حوضه‌های بخش شمالی کشور و واقع در استان گلستان است. گرگانرود از مهمترین رودخانه‌های این حوضه بوده که از منتهی‌الیه غرب کوه‌های خراسان سرچشمه گرفته و وارد منطقه کلانگه شده و نهایتاً پس از عبور از ترکمن‌صحرا و شمال گرگان وارد خلیج گرگان می‌شود. ۶۷ درصد آب سطحی استان، یعنی ۸۲۸ میلیون مترمکعب در این حوضه جریان دارد. با عنایت به پتانسیل خاک‌های مرغوب، این منطقه، سهم قابل ملاحظه‌ای در تولیدات کشاورزی در کشور دارد. با توجه به اینکه طی سال‌های اخیر و به دلایل مختلفی از جمله تغییرات آب و هوایی، وقوع خشکسالی‌ها و توسعه برداشت از آب‌های سطحی در فصول زراعی با بحران کمبود آب مواجهه شده است و ادامه این روند می‌تواند مشکلاتی را در زمینه اقتصادی و کشاورزی برای ساکنان منطقه و استان فراهم کند پیش‌بینی اثرات آتی تغییرات آب و هوایی بر وقوع خشکسالی‌های منطقه می‌تواند حائز اهمیت باشد. پژوهش حاضر روند وقوع خشکسالی را در شرایط اقلیمی گرم‌تر دهه‌های آتی با در نظر گرفتن عدم قطعیت ناشی از مدل‌های اقلیمی فاز ششم گزارش ارزیابی هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم (CIMP6) مورد ارزیابی قرار می‌دهد. نتایج حاصل از

اقلیم بر ویژگی‌های خشکسالی کشور نیجریه پرداختند. نتایج نشان داد شاخص SPI خشکسالی‌های آینده این کشور را مرطوب‌تر از شرایط فعلی در حالیکه SPEI و RDI هوای خشک‌تر را پیش‌بینی نموده‌اند. در مطالعات داخل کشور نیز آباده و خسروشاهی (۱۴۰۰: ۷۱۸) خشکسالی استان هرمزگان را با استفاده از دو شاخص SPI و SPEI مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج نشان داد اگرچه مقادیر شاخص SPI و SPEI دارای همبستگی بوده‌اند اما شاخص SPEI نسبت به خشکی حساس‌تر و پاسخ سریع‌تری به آن داشته و دوره‌های خشک و مرطوب طولانی‌تری را نشان داده است. همچنین نیکبخت و هادلی (۱۴۰۰: ۱۴) در پژوهشی به ارزیابی شدت، بزرگی و تداوم خشکسالی‌های ایستگاه کرمانشاه با استفاده از سه شاخص RDI، SPI و SPEI تحت شرایط تغییر اقلیم پرداختند و نشان دادند که حساسیت دو شاخص RDI و SPEI به تغییرات اقلیمی بیشتر از شاخص SPI است. ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر وضعیت خشکسالی استان تهران در دوره‌های آتی با استفاده از شاخص SPEI نشان داد که شدیدترین خشکسالی در ایستگاه ابعلی خواهد بود. همچنین شهر تهران نسبت به سایر مناطق استان از تنش خشکسالی بیشتری در سال‌های آینده برخوردار خواهد بود (جهانگیر و همکاران، ۱۴۰۰: ۱۱۹). زرین و همکاران (۱۴۰۱: ۱۵۰۲) در مقاله‌ای به پیش‌بینی خشکسالی‌های هواشناسی دریاچه ارومیه تحت سناریوهای SSP پرداختند. خروجی‌ها حکایت از افزایش قابل توجه خشکسالی‌ها در غرب و شمال این حوضه برای دوره گرم سال دارد. همین‌طور در رابطه با پیش‌بینی خشکسالی بر مبنای شاخص SPEI می‌توان به مطالعات زراع ایبانه و همکاران (۱۳۹۴)، تاج‌بخش و همکاران (۱۳۹۴) و میرزایی حسنلو و همکاران (۱۳۹۹) اشاره کرد.

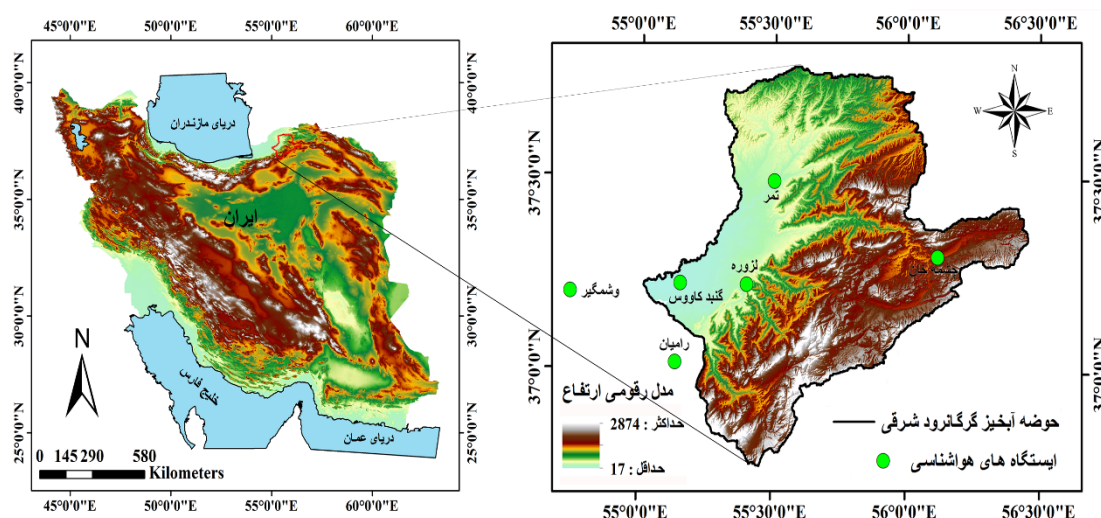
یکی از انتقادات وارد بر بسیاری از مطالعات پیشین انجام شده به منظور پایش و کمی‌سازی اثرات تغییر اقلیم بر خشکسالی‌ها، استفاده از روش‌های قطعی می‌باشد. این روش‌ها بدون لحاظ کردن عدم

صورت گرفته است. خشکسالی‌ها و سیل‌های اخیر عواقب شدیدی بر منابع آب‌های زیرزمینی و سطحی داشته است. این منطقه به دو بخش تقسیم می‌شود: مناطق کوهستانی با پوشش انبوه جنگل‌های هیرکانی در جنوب و مزارع کشاورزی با آب و هوای معتدل مدیترانه‌ای در شمال. ارتفاع حوضه بین ۱۷ متر تا ۲۸۷۴ متر از سطح دریا متغیر است. بر اساس داده‌های اقلیمی از سال ۱۹۸۵ تا ۲۰۱۴، میانگین بارندگی سالانه حوضه ۵۰۰ میلی‌متر بوده است، در حالی که بیشترین بارندگی از آذر تا اردیبهشت می‌باشد. میانگین دمای ماهانه در زمستان و تابستان به ترتیب بین ۰/۷ تا ۱۳/۵ درجه سلسیوس و ۱۷ تا ۳۲/۵ درجه سلسیوس متغیر است.

این پژوهش در واقع چشم‌انداز مناسبی از شرایط اقلیم‌شناختی حوضه در دوره‌های زمانی آینده به لحاظ مؤلفه‌های بارش، دما و خشکسالی، فراهم می‌نماید که می‌تواند دید بهتری از آینده حوضه برای مدیران و برنامه‌ریزان در مواجهه با خشکسالی ایجاد نماید.

مواد و روش تحقیق

محدوده مورد مطالعه: محدوده مورد مطالعه بخشی از حوضه آبخیز گرگانرود در شمال ایران است که بین ۳۶/۶۵-۳۷/۷۸ درجه شمالی و ۵۵/۰۱-۵۶/۴۵ درجه شرقی با مساحت ۶۹۵۴ کیلومتر مربع واقع شده است (شکل ۱). این حوضه در استان گلستان قرار دارد که در دهه‌های اخیر تغییرات کاربری شدیدی در آن



شکل ۱- محدوده مورد مطالعه

نام مسیرهای اجتماعی و اقتصادی مشترک (SSP^۲) استفاده می‌کند که با نماینده خطوط سیر غلظت گازهای گلخانه‌ای (RCP^۳) پروژه گزارش پنجم IPCC^۴ ترکیب شده است (ایرینگ و همکاران، ۲۰۱۵: ۱۹۴۳). سناریوهای جدید اضافه شده در SSP3.7.0, SSP4-3.4, SSP1-1.9 شامل CIMP6 هستند که چهار سناریوی SSP1.2.6, SSP2-4.5, SSP4-6.0 و SSP5-8.5 نیز به روز شده سناریوهای RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 و RCP8.5 موجود در

روش تحقیق

جهت انجام این پژوهش، ابتدا داده‌های اقلیمی مربوط به ایستگاه‌های گنبدکاووس، چشمه‌خان، لزوره، رامیان، وشمگیر و تمر طی بازه زمانی ۲۰۱۴-۱۹۸۵ از سازمان هواشناسی و شرکت مدیریت منابع آب ایران دریافت گردید (جدول ۱). همچنین برونداد بارش و دمای ۸ مدل جفت شده حال حاضر فاز ششم (CIMP6) از پایگاه داده ESGF^۱ استخراج شد (جدول ۲). پروژه مقایسه مدل‌های جفت شده گزارش ششم هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم از سناریوهای جدیدی به

2- Shared Socioeconomic Pathways
3- Representative Concentration Pathway
4- Intergovernmental Panel on Climate Change

1- [https:// esgf-node.llnl.gov/search/cimp6](https://esgf-node.llnl.gov/search/cimp6)

اجرا گردید. سناریوهای مذکور به طور گسترده در مطالعات مربوط به تغییرات آب و هوایی مورد استفاده قرار گرفته‌اند، زیرا امکان مقایسه بین چشم‌انداز مثبت‌تر (SSP2-4.5) که در آن انتشار گازهای گلخانه‌ای متوسط بوده و اثرات تغییرات آب و هوایی به آن شدید نیست را در مقابل یک چشم‌انداز شدیدتر (SSP5-8.5) که در آن چالش‌های تغییر اقلیم بیشتر است، فراهم می‌کنند (جیمنز-ناوارو و همکاران، ۲۰۲۱: ۱۸۰۳).

CIMP5 می‌باشند (گاپتا و همکاران، ۲۰۱۹: ۱۱۰۲). مدل‌های موجود در CMIP6 بهبود زیادی نسبت به مجموعه‌های پیشین داشته و پیشرفت‌های موثری را در باز تولید الگوهای بزرگ مقیاس متغیرهای آب و هوایی نشان داده‌اند (چن و همکاران، ۲۰۲۰: ۱۴۱۶). مشخصات مدل‌های مورد استفاده در این پژوهش در جدول (۲) ارائه شده است. شایان ذکر است پیش‌نگری برای دو دوره ۳۰ ساله آینده نزدیک (۲۰۲۵-۲۰۵۴) و دور (۲۰۷۱-۲۱۰۰) در قرن ۲۱ تحت دو سناریو SSP2-45 و SSP5-85

جدول ۱- مشخصات ایستگاه‌های هواشناسی مورد استفاده

ایستگاه	نوع ایستگاه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	ارتفاع
گنبدکاووس	سینوپتیک	۵۵-۱۵	۳۷-۲۲	۳۴/۵
لزوره	باران‌سنجی/تبخیرسنجی	۵۵-۴۰	۳۷-۲۲	۱۵۵
رامیان	باران‌سنجی/تبخیرسنجی	۵۵-۱۳	۳۷-۰۲	۲۰۰
چشمه‌خان	باران‌سنجی/تبخیرسنجی	۵۶-۳۲	۳۷-۳۵	۱۴۵۰
وشمگیر	باران‌سنجی/تبخیرسنجی	۵۴-۷۴	۳۷-۲	۱۲
نمر	باران‌سنجی/تبخیرسنجی	۵۵-۵۰	۳۷-۴۹	۱۳۲

جدول ۲- مشخصات مدل‌های تصحیح شده اریبی CIMP6 در پژوهش

مدل	موسسه سازنده/کشور	طول/عرض
CMCC-ESM2	CMCC/Italy	۲۸۸x۱۹۲
EC-Earth3-CC	EC-Earth Consortium/Sweden	۵۱۲x۲۵۶
INM-CM4-8	NM/Russia	۱۸۰x۱۲۰
INM-CM5-0	INM/Russia	۱۸۰x۱۲۰
MRI-ESM2-0	MRI/Japan	۳۲۰x۱۶۰
NorESM2-MM	NCC/Norway	۲۸۸x۱۹۲
MIROC6	MIROC/Japan	۲۵۶x۱۲۸
CNRM-CM6-1	CNRM-CERFACS/France	۲۵۶x۱۲۸

عنوان ورودی به مدل‌های دیگر مورد استفاده قرار می‌گیرند نیز ممکن است دارای اریبی باشند و نتایج را تحت تأثیر و خطای خروجی‌ها قرار دهند. الگوریتم‌های مختلفی به منظور حذف یا به حداقل رساندن این خطاها توسعه داده شده‌اند که نگاشت چندک به عنوان یکی از روش‌های کارآمد به منظور تصحیح اریبی در بسیاری از مطالعات مطرح شده است (گاپتا و همکاران، ۲۰۱۹: ۱۴۱۶). روند محاسبات در این روش به اینگونه است که ابتدا چندک هر عضو از

تصحیح اریبی به روش نگاشت چندک (Quantial Mapping): با توجه به اینکه خروجی‌های مدل‌های GCM^۵ و مدل‌های اقلیمی منطقه‌ای (RCM^۶) معمولاً دارای اریب سیستماتیک یا غیر شرطی در میانگین و انحراف معیار نسبت به داده‌های مشاهداتی هستند، بنابراین داده‌های مستخرج از این مدل‌ها نیز که به

1- General Circulation Models
6- Regional climate model

همبستگی پیرسون (R)، ضریب تبیین (R²) و میانگین خطای مطلق (MAE) برای هر یک از مدل‌ها و مدل همادی در دوره ۲۰۱۴-۱۹۸۵ محاسبه شد. مقادیر دو معیار MAE و RMSE هر چه به صفر نزدیک‌تر باشد نشان دهنده کارایی بالاتر آن مدل است. همچنین ضریب بالاتر دو سنجه R و R² نشان دهنده ارتباط بیشتر بین خروجی مدل و مشاهده است (فلاح‌کلاکی و همکاران، ۱۴۰۰: ۳۴۹ و شجاع و شمسی‌پور، ۱۴۰۲: ۱۵۹).

شاخص استاندارد شده بارش-تبخیر و تعرق (SPEI): در این مطالعه برای پایش و پیش‌نگری خشکسالی حوضه آبخیز گرگانرود از شاخص بارش-تبخیر-تعرق استاندارد شده استفاده شد. این شاخص چند کمیتی است و در آن داده‌های بارش و دما ترکیب می‌شوند. در شاخص SPEI مقادیر اختلاف بارش و پتانسیل تبخیر-تعرق PET مبتنی بر محاسبه‌ی ترازمندی آب اقلیمی مورد استفاده قرار می‌گیرد که برای محاسبه به داده‌های ماهانه‌ی بارندگی و دمای هوا نیاز دارد (ویسته سرانو و همکاران، ۲۰۱۰). طبقه‌بندی این شاخص در جدول ۳ نشان داده شده است.

مدل پیش‌بینی برای هر روز با توجه به تابع توزیع تجمعی پیش‌بینی (CDFs) محاسبه می‌شود، سپس این چندک با چندک متناظر مقدار مشاهداتی در تابع توزیع تجمعی مشاهداتی روزانه، جایگزین می‌شود. رابطه (۱) تابع توزیع معکوس که به نام تابع چندک نیز شناخته می‌شود، چگونگی کار را نشان می‌دهد:

$$BC_{fcst} = CDF_{obs}^{-1}(CDF_{fcst}(Fcst)) = CDF_{obs}^{-1}(Q_n) \quad \text{رابطه (۱)}$$

در رابطه فوق، BC_{fcst} مقدار پیش‌بینی تصحیح شده، $Fcst$ مقدار پیش‌بینی خام (قبل از اصلاح)، CDF_{obs}^{-1} تابع توزیع تجمعی داده‌های مشاهداتی: Q_n چندک مقدار پیش‌بینی در CDF_{fcst} است.

در پژوهش حاضر برای لحاظ کردن عدم قطعیت ناشی از مدل‌های کلی گردش جو از روش چندک ۲۵، ۵۰ و ۷۵ درصد (25th, 50th and 75th quantiles) استفاده شد. چندک‌ها مقادیری از متغیر هستند که دامنه تغییرات را به فاصله‌های چندکی مورد نیاز تقسیم می‌کنند به طوری که فراوانی‌ها در هریک از این فواصل درصد معینی از فراوانی کل را دارا باشد.

اعتبارسنجی مدل‌های CIMP6: اعتبارسنجی مدل‌های CIMP6 با استفاده از چهار سنجه آماری شامل ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، ضریب

جدول ۳. طبقات مختلف شاخص خشکسالی SPEI

طبقات شاخص	طبقه خشکسالی
≥ 2	ترسالی بسیار شدید
۱/۵ تا ۱/۹۹	رطوبت شدید
۱ تا ۱/۴۹	رطوبت متوسط
۰/۹۹ تا -۰/۹۹	نرمال
-۱ تا -۱/۴۹	خشکسالی متوسط
-۱/۵ تا -۱/۹۹	خشکسالی شدید
≤ -2	خشکسالی بسیار شدید

نمود. تعداد ماه‌های متوالی که در آن شاخص خشکسالی زیر ۰/۵- است، بعنوان مدت در نظر گرفته می‌شود. مجموع انحرافات منفی در هر توالی را شدت، تعداد ماه‌هایی که آستانه کمتر از ۰/۵- است فراوانی و مقدار میانگین کسری بارش را در یک دوره ویژه از

تحلیل روند و ویژگی‌های خشکسالی: تئوری Runs اولین بار توسط یوجویچ (۱۹۶۷) برای شناسایی و تجزیه و تحلیل ویژگی‌های خشکسالی پیشنهاد شد. با استفاده از این تئوری چهار ویژگی مهم خشکسالی (مدت، شدت، بزرگی و فراوانی) را می‌توان تعریف

مساحت‌های اقلیمی و همکاران (۱۴۰۰) مورد تایید قرار گرفته است که نتایج بدست آمده در این بخش بر اهمیت اجرای گروهی نسبت به مدل‌های منفرد اشاره دارد.

با تایید توانایی مدل گروهی در پیش‌نگری داده‌های اقلیمی دوره‌ی پایه، مقادیر روزانه پارامترهای اقلیمی برای دوره ۲۰۱۵-۲۱۰۰ بر مبنای سناریو SSP2-45 و SSP5-85 تولید شد. مطابق مقادیر پارامترهای اقلیمی برای دوره مذکور در شکل (۲ و ۳)، میانگین دمای پیش‌نمایی شده تحت هر دو سناریو SSP2-45 و SSP5-85 در ایستگاه‌های مورد مطالعه طی دهه‌های آتی روند افزایشی دارد که مقدار این افزایش در سناریو بدبینانه اجتماعی - اقتصادی SSP5-85 به ویژه در سال‌های پایانی قرن بیست و یکم بیشتر است. همانطور که در جدول ۵ نشان داده شده براساس میانه باند، دمای محدود مطالعاتی از حدود ۱/۲ تا ۲/۳ درجه سلسیوس در سناریو SSP2-45 و حدود ۱/۳ تا ۴/۴ درجه سلسیوس در سناریو SSP5-85 افزایش خواهد یافت که بیشترین افزایش مربوط به ایستگاه‌های چشمه‌خان، گنبدکاووس و وشمگیر است. نتایج حاصل از تجزیه و تحلیل آماره‌ی Z در سری‌های زمانی بلند مدت میانگین دما نیز روند افزایشی این پارامتر را در تمام ایستگاه‌ها در سطح اطمینان ۹۹ درصد اثبات می‌کند. همچنین تغییرات بارش دهه‌های آتی حوضه نسبت به دوره‌ی پایه تحت دو سناریوی مورد بررسی در شکل ۲ و ۳ نشان داده شده است. براساس نتایج میانه باند در سناریو متوسط بینانه SSP2-45 بارش در تمامی ایستگاه‌ها مابین ۲/۸ تا ۱۱/۹ درصد افزایش خواهد داشت که طبق مقادیر نمره Z در این سناریو بارش در حوضه گرگانرود در سطوح اطمینان ۹۵ و ۹۹ درصد من‌کندل معنی‌دار است. این روند افزایشی بارش در سناریوی SSP5-85 نیز ادامه دارد و تغییراتی بین ۲ تا ۱۰/۹ درصد خواهد داشت. مقادیر آماره Z و شیب سن نیز نشان داد که بجز دو ایستگاه لزوره و تمر در سایر ایستگاه‌ها این روند صعودی در سطح ۹۵ درصد معنی‌دار است. نکته قابل توجه در شکل‌های ۲ و ۳ ضخامت پهنای باند در پارامتر بارش است که در

خشکسالی، بزرگی می‌گویند. در مطالعه حاضر، مدت و شدت خشکسالی برای شرایط فعلی (۲۰۱۴-۱۹۸۵) و دو دوره‌ی ۲۰۲۵-۲۰۵۴ و ۲۰۷۱-۲۱۰۰ محاسبه گردید.

به منظور بررسی تغییرات آب و هوایی در طول سال‌های اخیر و آتی، سری زمانی بلندمدت سالانه دما و بارش ایستگاه‌های حوضه مورد آزمون روند قرار گرفتند. یکی از روش‌های متداول جهت تحلیل روند سری‌های زمانی، آزمون من-کندال و شیب سن استیمیتور می‌باشد که در این مطالعه مورد استفاده قرار گرفته است. مراحل محاسبه آماره این آزمون‌ها در مطالعه طاووسی و همکاران (۱۳۹۵: ۸۳) به تفصیل شرح داده شده است.

نتایج و بحث

ارزیابی عملکرد مدل‌های CIMP6 و بررسی روند تغییرات اقلیمی: جهت درستی‌سنجی عملکرد مدل‌های CIMP6 و میانگین مدل‌های منتخب در بازتولید داده‌های دما و بارش حوضه مطالعاتی در چشم‌انداز آینده، خروجی داده‌های محاسباتی مدل‌ها و داده‌های مشاهداتی ایستگاهی، طی دوره تاریخی (۲۰۱۴-۱۹۸۵) با یکدیگر مورد مقایسه قرار گرفتند. نتایج این مقایسه که مبتنی بر سنج‌های RMSE، MAE، R، و R² انجام گرفت در جدول ۴ نشان داده شده است. خروجی‌ها نشان داد مقادیر شاخص‌های آماری برای میانگین دما در اجرای منفرد مدل‌های اقلیمی از دقت بالاتر و تغییرات کمتری نسبت به پارامتر بارش برخوردار می‌باشد. کارکرد مدل همادی تولید شده به روش میانگین‌گیری برای پارامترهای مورد بررسی حاکی از این بود که در این مدل مقدار خطا به شکل قابل توجهی نسبت به اجرای منفرد مدل‌ها کمتر شده است. بنابراین به منظور نشان دادن عدم قطعیت مربوط به خروجی مدل‌های اقلیمی، مدل گروهی به جای مدل‌های منفرد برای پیش‌نگری پارامترهای اقلیمی در شرایط آتی مورد توجه قرار گرفت. افزایش کارایی مدل گروهی پیش‌تر توسط بای و همکاران (۲۰۲۱)، اگانرید و همکاران (۲۰۲۲) و

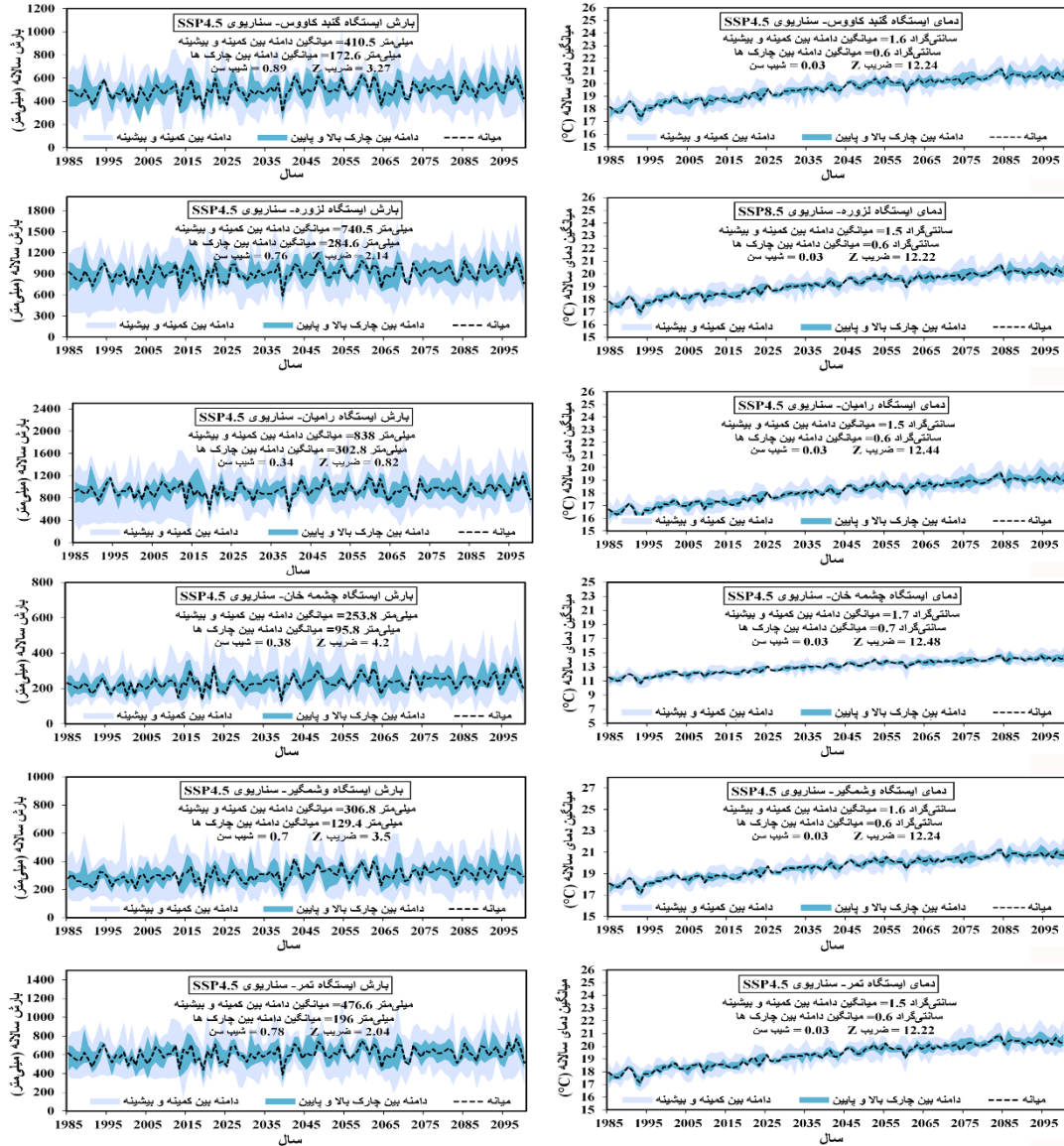
مقایسه با دما بیشتر می‌باشد. این امر ناشی از پیچیده بودن و تاثیر پذیری فرآیند بارش دارد که سبب می‌گردد پیش‌نگری آن از دقت کمتری نسبت به دما برخوردار باشد.

جدول ۴. سنجه‌های آماری جهت ارزیابی روش تصحیح اریبی برای هر GCM

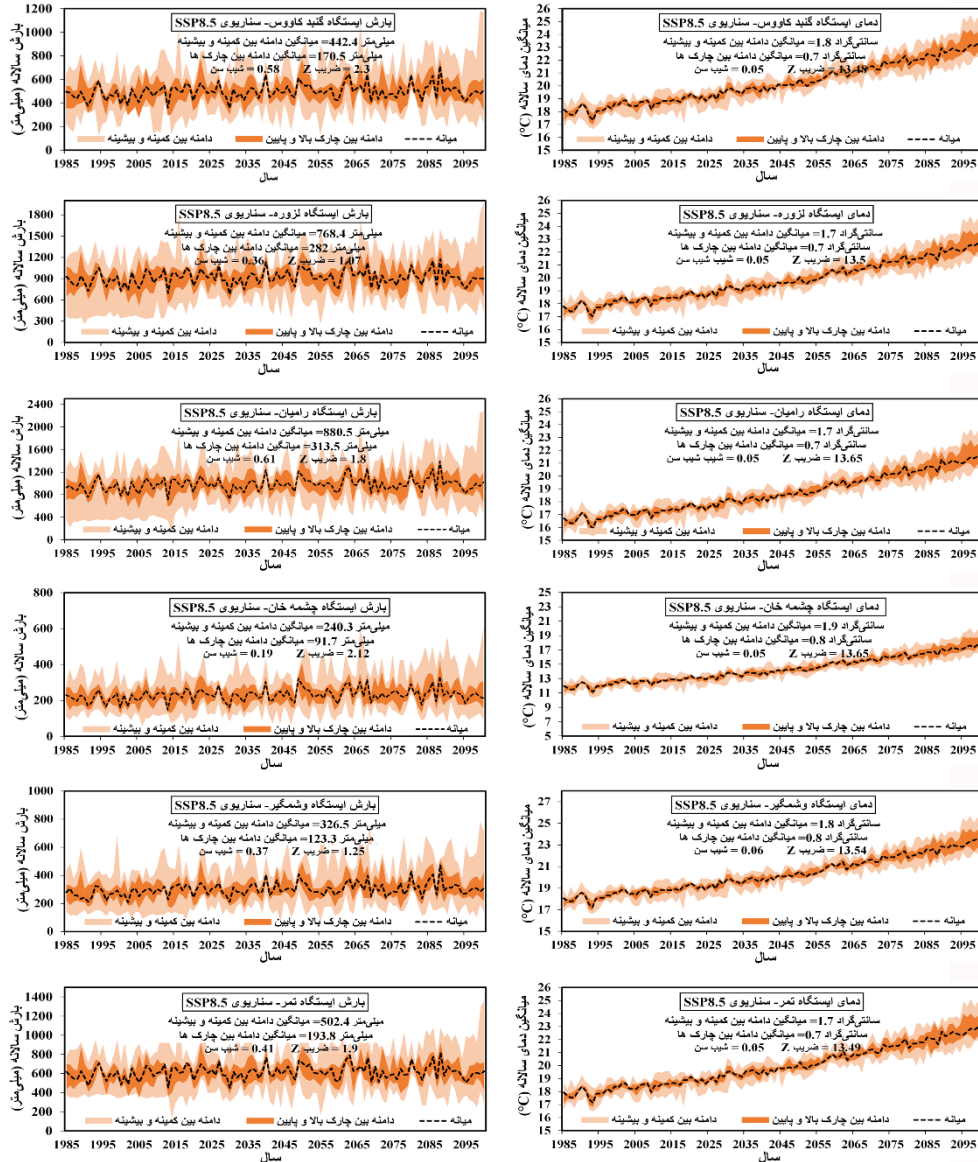
ایستگاه	مدل	CMCC-ESM2		CNRM-CM6-1		EC-Earth-CC		INM-CM4-8		INM-CM5-0		MIROC6		MRI-ESM2-0		NorESM2-0		Ensemble	
		بارش	دما	بارش	دما	بارش	دما	بارش	دما	بارش	دما	بارش	دما	بارش	دما	بارش	دما		بارش
گنبد کاوس	پارامتر																		
	R2	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۸	۰/۹۸	۰/۹۸	۰/۹۸	۰/۹۸	۰/۹۸	۰/۹۸	۰/۹۸	۰/۹۸	۰/۹۸	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹
	R	۰/۹۸	۰/۹۸	۰/۹۸	۰/۹۸	۰/۹۸	۰/۹۸	۰/۹۸	۰/۹۸	۰/۹۸	۰/۹۸	۰/۹۸	۰/۹۸	۰/۹۸	۰/۹۸	۰/۹۸	۰/۹۸	۰/۹۸	۰/۹۸
	RMSE	۰/۴۲	۰/۴۲	۰/۴۲	۰/۴۲	۰/۴۲	۰/۴۲	۰/۴۲	۰/۴۲	۰/۴۲	۰/۴۲	۰/۴۲	۰/۴۲	۰/۴۲	۰/۴۲	۰/۴۲	۰/۴۲	۰/۴۲	۰/۴۲
	MAE	۰/۴۰	۰/۴۰	۰/۴۰	۰/۴۰	۰/۴۰	۰/۴۰	۰/۴۰	۰/۴۰	۰/۴۰	۰/۴۰	۰/۴۰	۰/۴۰	۰/۴۰	۰/۴۰	۰/۴۰	۰/۴۰	۰/۴۰	۰/۴۰
لزوره	R2	۰/۹۷	۰/۹۷	۰/۹۷	۰/۹۷	۰/۹۷	۰/۹۷	۰/۹۷	۰/۹۷	۰/۹۷	۰/۹۷	۰/۹۷	۰/۹۷	۰/۹۷	۰/۹۷	۰/۹۷	۰/۹۷	۰/۹۷	۰/۹۷
	R	۰/۹۷	۰/۹۷	۰/۹۷	۰/۹۷	۰/۹۷	۰/۹۷	۰/۹۷	۰/۹۷	۰/۹۷	۰/۹۷	۰/۹۷	۰/۹۷	۰/۹۷	۰/۹۷	۰/۹۷	۰/۹۷	۰/۹۷	۰/۹۷
	RMSE	۰/۶۵	۰/۶۵	۰/۶۵	۰/۶۵	۰/۶۵	۰/۶۵	۰/۶۵	۰/۶۵	۰/۶۵	۰/۶۵	۰/۶۵	۰/۶۵	۰/۶۵	۰/۶۵	۰/۶۵	۰/۶۵	۰/۶۵	۰/۶۵
	MAE	۰/۶۳	۰/۶۳	۰/۶۳	۰/۶۳	۰/۶۳	۰/۶۳	۰/۶۳	۰/۶۳	۰/۶۳	۰/۶۳	۰/۶۳	۰/۶۳	۰/۶۳	۰/۶۳	۰/۶۳	۰/۶۳	۰/۶۳	۰/۶۳
	R	۰/۹۸	۰/۹۸	۰/۹۸	۰/۹۸	۰/۹۸	۰/۹۸	۰/۹۸	۰/۹۸	۰/۹۸	۰/۹۸	۰/۹۸	۰/۹۸	۰/۹۸	۰/۹۸	۰/۹۸	۰/۹۸	۰/۹۸	۰/۹۸
تمر	R2	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹
	R	۰/۹۸	۰/۹۸	۰/۹۸	۰/۹۸	۰/۹۸	۰/۹۸	۰/۹۸	۰/۹۸	۰/۹۸	۰/۹۸	۰/۹۸	۰/۹۸	۰/۹۸	۰/۹۸	۰/۹۸	۰/۹۸	۰/۹۸	۰/۹۸
	RMSE	۰/۹۲	۰/۹۲	۰/۹۲	۰/۹۲	۰/۹۲	۰/۹۲	۰/۹۲	۰/۹۲	۰/۹۲	۰/۹۲	۰/۹۲	۰/۹۲	۰/۹۲	۰/۹۲	۰/۹۲	۰/۹۲	۰/۹۲	۰/۹۲
	MAE	۱/۳	۱/۳	۱/۳	۱/۳	۱/۳	۱/۳	۱/۳	۱/۳	۱/۳	۱/۳	۱/۳	۱/۳	۱/۳	۱/۳	۱/۳	۱/۳	۱/۳	۱/۳
	R	۰/۹۸	۰/۹۸	۰/۹۸	۰/۹۸	۰/۹۸	۰/۹۸	۰/۹۸	۰/۹۸	۰/۹۸	۰/۹۸	۰/۹۸	۰/۹۸	۰/۹۸	۰/۹۸	۰/۹۸	۰/۹۸	۰/۹۸	۰/۹۸
رامیان	R2	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹
	R	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹
	RMSE	۰/۳۹	۰/۳۹	۰/۳۹	۰/۳۹	۰/۳۹	۰/۳۹	۰/۳۹	۰/۳۹	۰/۳۹	۰/۳۹	۰/۳۹	۰/۳۹	۰/۳۹	۰/۳۹	۰/۳۹	۰/۳۹	۰/۳۹	۰/۳۹
	MAE	۰/۵۰	۰/۵۰	۰/۵۰	۰/۵۰	۰/۵۰	۰/۵۰	۰/۵۰	۰/۵۰	۰/۵۰	۰/۵۰	۰/۵۰	۰/۵۰	۰/۵۰	۰/۵۰	۰/۵۰	۰/۵۰	۰/۵۰	۰/۵۰
	R	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹
چشمه‌خان	R2	۰/۹۸	۰/۹۸	۰/۹۷	۰/۹۷	۰/۹۷	۰/۹۷	۰/۹۷	۰/۹۷	۰/۹۸	۰/۹۸	۰/۹۸	۰/۹۸	۰/۹۷	۰/۹۷	۰/۹۷	۰/۹۷	۰/۹۷	۰/۹۷
	R	۰/۹۸	۰/۹۸	۰/۹۷	۰/۹۷	۰/۹۷	۰/۹۷	۰/۹۷	۰/۹۷	۰/۹۸	۰/۹۸	۰/۹۸	۰/۹۸	۰/۹۷	۰/۹۷	۰/۹۷	۰/۹۷	۰/۹۷	۰/۹۷
	RMSE	۰/۴۵	۰/۴۵	۰/۴۵	۰/۴۵	۰/۴۵	۰/۴۵	۰/۴۵	۰/۴۵	۰/۴۵	۰/۴۵	۰/۴۵	۰/۴۵	۰/۴۵	۰/۴۵	۰/۴۵	۰/۴۵	۰/۴۵	۰/۴۵
	MAE	۰/۵۲	۰/۵۲	۰/۵۲	۰/۵۲	۰/۵۲	۰/۵۲	۰/۵۲	۰/۵۲	۰/۵۲	۰/۵۲	۰/۵۲	۰/۵۲	۰/۵۲	۰/۵۲	۰/۵۲	۰/۵۲	۰/۵۲	۰/۵۲
	R	۰/۹۸	۰/۹۸	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۸	۰/۹۸	۰/۹۸	۰/۹۸	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹
وشمگیر	R2	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۸	۰/۹۸	۰/۹۸	۰/۹۸	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹
	R	۰/۹۸	۰/۹۸	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۸	۰/۹۸	۰/۹۸	۰/۹۸	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹
	RMSE	۰/۵۵	۰/۵۵	۰/۵۵	۰/۵۵	۰/۵۵	۰/۵۵	۰/۵۵	۰/۵۵	۰/۵۵	۰/۵۵	۰/۵۵	۰/۵۵	۰/۵۵	۰/۵۵	۰/۵۵	۰/۵۵	۰/۵۵	۰/۵۵
	MAE	۰/۷۳	۰/۷۳	۰/۷۳	۰/۷۳	۰/۷۳	۰/۷۳	۰/۷۳	۰/۷۳	۰/۷۳	۰/۷۳	۰/۷۳	۰/۷۳	۰/۷۳	۰/۷۳	۰/۷۳	۰/۷۳	۰/۷۳	۰/۷۳
	R	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹

جدول ۵. درصد تغییرات دما و بارش حوضه آبخیز گرگانرود تحت شرایط اقلیم آینده

بارش (درصد)				متوسط دما (سلسیوس)				ایستگاه
SSP5-8.5		SSP2-4.5		SSP5-8.5		SSP2-4.5		
(۲۰۷۰س)	(۲۰۲۵س)	(۲۰۷۰س)	(۲۰۲۵س)	(۲۰۷۰س)	(۲۰۲۵س)	(۲۰۷۰س)	(۲۰۲۵س)	
۱۰/۷	۷/۳	۱۱/۲	۷/۳	۴/۲	۱/۳	۲/۲۷	۱/۲۷	گنبد کاوس
۱۰/۸	۱۱/۹	۹/۳	۹/۵	۳/۸	۱/۳۵	۱/۹	۱/۲۰	لزوره
۱۰/۹	۸/۷	۱۱/۷	۸/۸	۳/۹	۱/۳۹	۱/۸	۱/۲۴	تمر
۹/۶	۶/۳	۵/۳	۲/۸	۳/۸	۱/۳۶	۲/۱۷	۱/۲۲	رامیان
۷/۸	۲/۶	۱۱/۹	۶/۳	۴/۴	۱/۵۸	۲/۴۸	۱/۴۱	چشمه‌خان
۱۰/۶	۴/۲	۱۰/۴	۴/۸	۴/۲	۱/۴۷	۲/۳۶	۱/۳۳	وشمگیر



شکل ۲. روند تغییرات دما و بارش حوضه آبخیز گرگانرود تحت سناریو SSP2-4.5 طی دوره ۲۱۰۰-۱۹۸۵



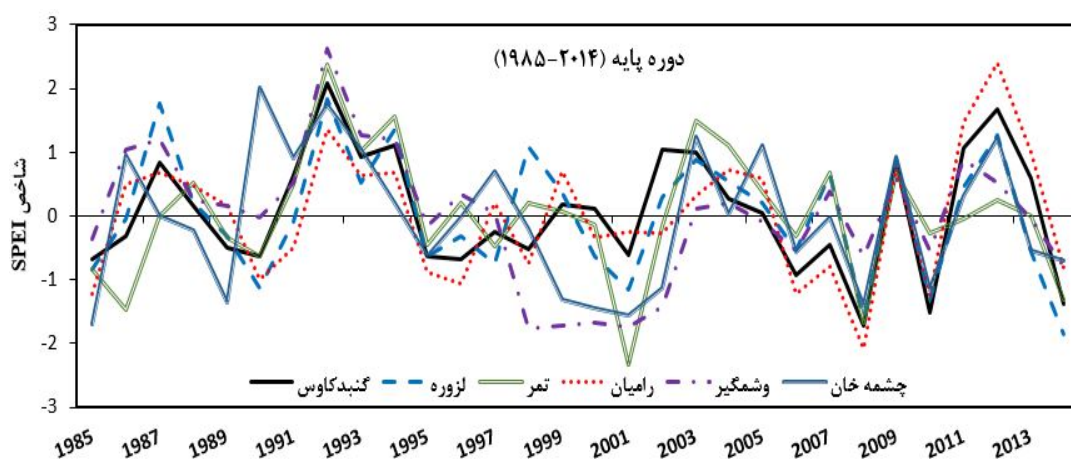
شکل ۳. روند تغییرات دما و بارش حوضه آبخیز گرگانود تحت سناریو SSP8.5 طی دوره ۲۱۰۰-۱۹۸۵

بازه زمانی ۱۹۹۰-۱۹۸۶ و ۲۰۱۳-۲۰۱۲ ترسالی پدیده غالب بوده است. بطوری که میانگین بارش در این ایستگاه‌ها در سال‌ها مذکور نسبت به متوسط ۳۰ ساله خود (۲۰۱۴-۱۹۸۵) بیشتر می‌باشد. بعنوان مثال در ایستگاه وشمگیر بارش سالانه طی سال‌های ۱۹۹۰-۱۹۸۶ به ترتیب ۴۶۳، ۴۷۲، ۳۱۵، ۳۴۸ و ۳۲۶ میلی‌متر بوده که افزایش نسبی با توجه به میانگین ۲۹۷/۴ میلی‌متری در دوره ۳۰ ساله را نشان می‌دهد؛ این افزایش بارش می‌تواند با رخداد لاینوی سال‌های ۱۹۸۸-۱۹۸۹ مرتبط باشد. همچنین در نتایج حاصل از محاسبه شاخص SPEI مشخص شد

ارزیابی روند شاخص خشکسالی SPEI در دوره پایه: خشکسالی هنگامی اتفاق می‌افتد که شاخص بارش تبخیر و تعرق (SPEI) به صورت منفی تداوم یافته و شاخص به ۰/۱- یا کمتر از آن برسد. این رویداد هنگامی که شاخص مثبت شود خاتمه می‌یابد. بنابراین هر وقوع خشکسالی یک تداوم تعریف شده به وسیله شروع، پایان و شدت آن برای هر ماه که حادثه ادامه داشته، دارد (نصرتی، ۱۳۹۳: ۶۶). نتایج حاصل از پایش خشکسالی دوره‌ی ۲۰۱۴-۱۹۸۵ در مقیاس زمانی ۱۲ ماهه برای ایستگاه‌های مورد بررسی در شکل ۲ حکایت از آن دارد که در اکثر ایستگاه‌ها طی

این شرایط خشکسالی در سال‌های ۲۰۰۸، ۲۰۱۰ و ۲۰۱۴ در همه‌ی ایستگاه‌ها بجز ایستگاه‌های چشمه خان و وشمگیر تکرار شده است. از نظر شدت خشکسالی، بیشترین شدت خشکسالی در ایستگاه‌های چشمه خان و تمر و در سال‌های ۱۹۸۵ و ۲۰۰۱ رخ داده است. در مجموع، نتایج بدست آمده از تغییرات زمانی شاخص SPEI در ایستگاه‌های تحقیقاتی نشان می‌دهد که اکثر ایستگاه‌ها از الگوی تقریباً یکسانی تبعیت می‌کنند به نحوی که بصورت متناوب دوره‌های نرمال و مرطوب تکرار شده است.

که در سال‌های ۱۹۹۷ تا ۲۰۰۲ خشکسالی متوسط و شدید بر ایستگاه‌های وشمگیر و چشمه خان حاکم بوده که خشکسالی‌های این دوره نیز در با الینوی گزارش شده در سال ۱۹۹۷-۱۹۹۸ همزمان می‌باشد همانطور که طبق نتایج ارائه شده توسط فائو در این بازه یک خشکسالی بلندمدت و شدید بر نواحی مختلف کشور سیطره یافت و بیش از نیمی از جمعیت را با بحران آب و غذا روبرو کرد این مسئله موجب افت شدید آب‌های سطحی و زیرزمینی و کاهش تولیدات کشاورزی گردید (زارع ابیانه و همکاران، ۱۳۹۴: ۳۸۴).



شکل ۴- تغییرات شاخص خشکسالی SPEI در دوره پایه برای ایستگاه‌های مختلف در منطقه مورد مطالعه

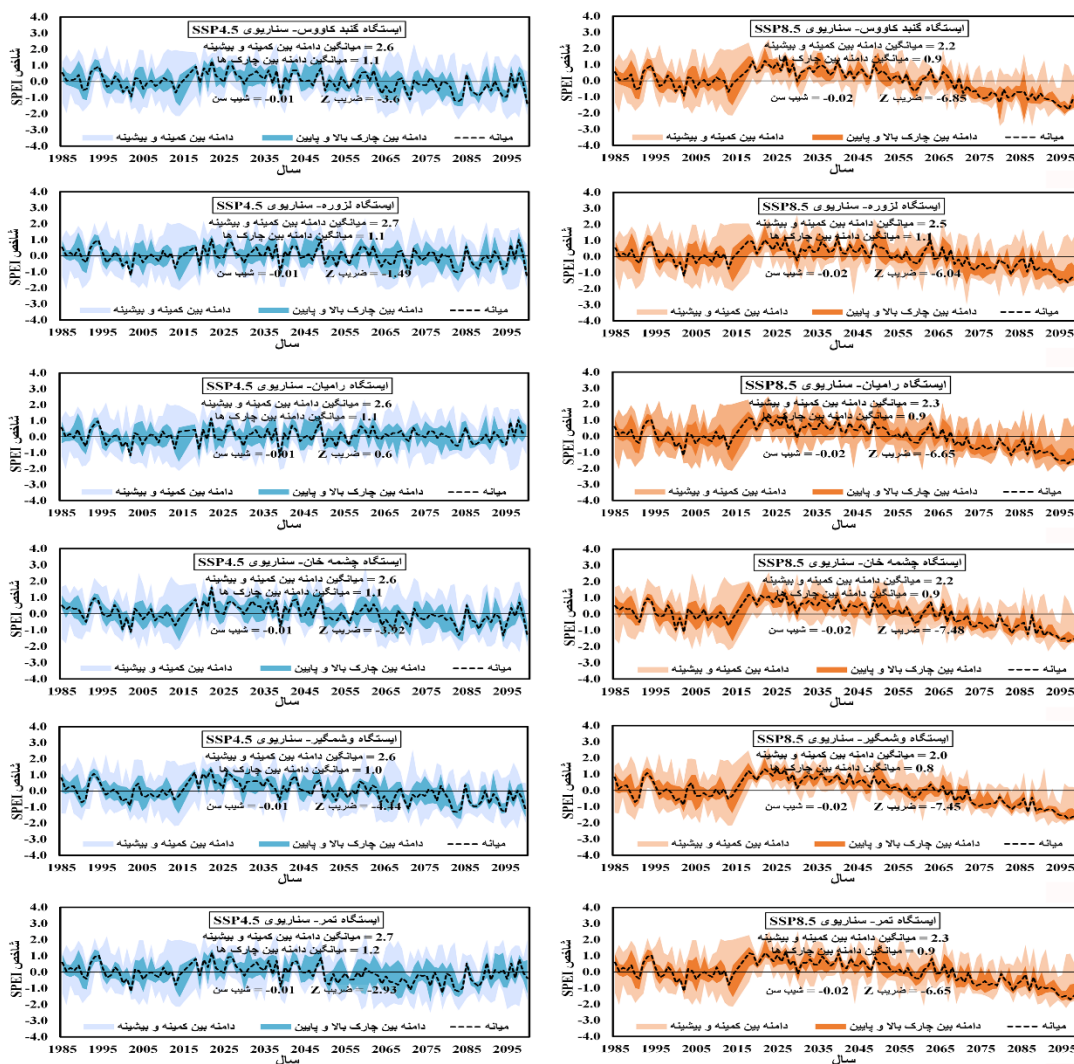
شاخص خشکسالی در هر دو دوره و تحت هر سه سناریو روند کاهشی داشته و بر وقوع خشکسالی در دهه‌های آتی افزوده خواهد شد. البته باید در نظر داشت پژوهش فوق مبتنی بر سناریوهای واداشت تابشی گزارش پنجم IPCC و تنها با استفاده از دو مدل گردش کلی جو (GCMs) انجام شده است.

نتایج بدست آمده از سناریو SSP5-8.5 با آنچه در سناریو SSP2-4.5 رخ داده کمی متفاوت است. پیش‌بینی می‌شود که همه ایستگاه‌ها در دوره زمانی ۲۰۲۰ تا ۲۰۷۰ رویدادهای ترسالی بیشتری را تجربه کنند که این همزمان با افزایش ۲ تا ۱۱/۹ درصدی بارش است. ولی از دهه ۲۰۷۰ خشکسالی‌های متوسط و شدید در حوضه آغاز و تا انتهای قرن بیست و یکم ادامه پیدا می‌کند. افزایش خشکسالی‌ها در این دوره

نتایج پایش خشکسالی در دهه‌های آتی: نوسانات پیش‌نگری شده در وقوع خشکسالی بر روی حوضه گرگانود تحت سناریوهای SSP2-4.5 و SSP5-8.5 در شکل ۵ نشان داده شده است. الگوی روند SPEI تحت سناریو حد واسط در تمام ایستگاه‌های مورد مطالعه تقریباً مشابه بوده و وضعیت منطقه در بخش قابل توجهی از دوره مورد بررسی در محدوده‌های نزدیک به شرایط نرمال یا ترسالی قرار دارد. از این لحاظ، ایستگاه‌های واقع در غرب حوضه شامل ایستگاه‌های لزوره و رامیان در طبقات تعریف شده خشکسالی شاخص SPEI قرار نمی‌گیرد که این امر با افزایش ۲/۸ تا ۱۱ درصد بارش در همین دوره مرتبط است. پیش‌بینی چنین شرایطی با مطالعه دنیایی (۱۴۰۱) در این حوضه همسو نیست. نتایج کار ایشان نشان داد

قرن برای حوضه مورد مطالعه خواهد بود. این رویداد در همه ایستگاه‌ها رخ خواهد داد اما بیشینه آن در ایستگاه‌های گنبد کاوس و لزوره است که مقدار شاخص به ۲- نیز می‌رسد.

علیرغم روند صعودی بارش، نتیجه افزایش ۳/۸ تا ۴/۴ درجه سلسیوس دما و افزایش قابل توجه تبخیر و تعرق خواهد بود که به خوبی نشان دهنده‌ی نقش قابل توجه افزایش دما بر وقوع خشکسالی‌ها در انتهای



شکل ۵. تغییرات شاخص خشکسالی SPEI برای ایستگاه‌های مختلف دوره پایه و تحت سناریوهای SSP2-4.5 و SSP58.5

نسبت به سناریو SSP2-4.5 (مقادیر Z بین ۴/۴- تا ۰/۶) قابل توجه‌تر خواهد بود. شکل ۵ به خوبی نشان می‌دهد که پیش‌نگری و ارزیابی وضعیت خشکسالی منطقه در دهه‌های آتی با بهره‌بردن از خروجی مدل‌های اقلیمی می‌تواند کاملاً تحت تاثیر عدم قطعیت‌های ناشی از انتخاب مدل باشد. از این‌رو برای بررسی اثرات تغییر اقلیم، لحاظ کردن گروهی مدل‌ها گردش کلی جو (GCM) ضروری به نظر می‌رسد. با در

ضرایب Z بدست آمده از آزمون من‌کن달 که با استفاده از داده‌های میانه باندها محاسبه شد برای تمامی ایستگاه‌ها تحت هر دو سناریو منفی بوده (به استثنای ایستگاه رامیان در سناریوی SSP5-8.5) و این مساله بیانگر روند نزولی مقدار شاخص طی دو دهه‌ی پایانی قرن و بدتر شدن وضعیت منطقه از نظر شرایط خشکسالی است. این روند کاهشی شاخص در سناریو SSP5-8.5 (مقادیر Z بین ۶/۰۴- تا ۷/۴۸-)

می‌دهد که منطقه مورد مطالعه دارای ویژگی‌های خشکسالی مشابهی، مانند دوره کنونی است و حتی با رسیدن به قرن بیست و یکم شرایط مرطوب‌تر خواهد بود و نمایه‌های مدت، شدت و بزرگی خشکسالی در تمامی ایستگاه‌ها کاهش یافته است. در سناریوی بدبینانه SSP5-8.5 شرایط در دوره آینده نزدیک (۲۰۲۵-۲۰۵۴) به مانند سناریو SSP2-4.5 می‌باشد و مقادیر شاخص‌های خشکسالی روند کاهشی داشته است ولی با افزایش دما در آینده دور (۲۰۷۱-۲۱۰۰) مدت، بزرگی و شدت خشکسالی در این بازه نسبت به دوره پایه افزایش خواهد یافت که بیشترین میزان افزایش در ایستگاه چشمه‌خان است که بعنوان مثال مدت از ۱۱ ماه به ۱۶ ماه در سال، در آینده دور رسیده است.

نظر گرفتن میانگین دامنه بین کمینه و بیشینه شاخص به عنوان معیاری جهت ارزیابی عدم قطعیت، خروجی‌ها حکایت از عدم قطعیت کمتر شاخص کمی‌سازی شده خشکسالی در سناریو SSP5-8.5 (میانگین دامنه بین ۲ تا ۲/۵) در مقایسه با سناریو SSP2-4.5 (میانگین دامنه بین ۲/۶ تا ۲/۷) دارد. اگرچه این اختلاف، چندان قابل ملاحظه نیست. ایستگاه‌های لزوره و وشمگیر، به ترتیب بیشترین و کمترین میانگین دامنه را به خود اختصاص داده‌اند.

تغییرات زمانی در مشخصه‌های خشکسالی:
جدول ۶ تغییرات زمانی متوسط مدت، شدت و بزرگی خشکسالی را با استفاده از نظریه Run نشان می‌دهد. پیش‌بینی‌های حاصل از مقادیر میانه شاخص SPEI در سناریو SSP2-4.5 در مقایسه با دوره پایه نشان

جدول ۶- تغییرات زمانی مشخصه‌های خشکسالی حوضه گرگانرود در دوره مشاهده و آتی

SSP5-8.5		SSP2-4.5		پایه	شاخص	ایستگاه
(۲۰۷۰s)	(۲۰۲۵s)	(۲۰۷۰s)	(۲۰۲۵s)			
۷/۹	۴/۲	۴/۳	۴/۳	۵/۱	مدت	گنبدکاوس
۳/۶	۱/۱	۱/۳	۱/۲	۲/۹	شدت	
۰/۳	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۲	بزرگی	
۹/۸	۳/۲	۴/۲	۵/۲	۶/۷	مدت	لزوره
۳/۹	۰/۶	۱/۳	۱/۳	۳	شدت	
۰/۴	۰/۱	۰/۲	۰/۲	۰/۱	بزرگی	
۸/۳	۲/۸	۴/۳	۵/۵	۷/۴	مدت	تمر
۵/۱	۰/۶	۱/۳	۱/۵	۳/۴	شدت	
۰/۴	۰/۱	۰/۲	۰/۲	۰/۲	بزرگی	
۶/۵	۴/۱	۴/۹	۴/۸	۶/۳	مدت	رامیان
۴/۲	۰/۸	۱/۶	۱/۴	۲	شدت	
۰/۵	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۳	بزرگی	
۱۶/۲	۴/۸	۴/۹	۹/۸	۱۱	مدت	چشمه‌خان
۷/۹	۱/۲	۱/۵	۳/۵	۶/۳	شدت	
۰/۴	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۲	بزرگی	
۱۵/۸	۴/۳	۵/۲	۵/۸	۱۳/۳	مدت	وشمگیر
۱۱/۸	۱	۱/۷	۱/۷	۶/۸	شدت	
۰/۳	۰/۱	۰/۲	۰/۲	۰/۲	بزرگی	

کشاورزی و منابع آب در استان گلستان، احتمالاً در آینده به دلیل عواملی چون افزایش جمعیت، تغییر اقلیم و فقدان سیاست‌های توسعه خوب رودخانه، دچار مشکلاتی خواهند شد. این مطالعه تغییرات روند نمایه‌های مدت، شدت و بزرگی را در شرایط فعلی و

نتیجه‌گیری

خشکسالی از جمله موضوعات مهم زیست محیطی است که به طور مستقیم جوامع را از طریق تغییرات در فراوانی یا قابلیت دسترسی به مواد غذایی، منابع آب و ذخایر انرژی تحت تأثیر قرار می‌دهد. بخش

چنین شرایطی با مطالعه متولی‌باشی نایینی و همکاران (۱۳۹۸) در حوضه زاینده‌رود برای دوره زمانی آینده دور (۲۰۹۹-۲۰۵۸) و تحت دو سناریو RCP4.5 و RCP8.5 همسو می‌باشد. آنان خصوصیات خشکسالی حوضه زاینده‌رود را با استفاده از روش توابع مفصل مورد بررسی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که فراوانی وقوع خشکسالی در حوضه مورد بحث طی دوره‌های آینده در مقایسه با گذشته کمتر خواهد شد که دلیل این امر افزایش جزئی در بارش است. با توجه به اهمیت طول دوره خشکسالی در نواحی اقلیمی در ادامه پژوهش حاضر با کاربرد تئوری Run، نمایه‌های شدت مدت و بزرگی پدیده مذکور در سناریوهای آینده نسبت به دوره پایه مقایسه شد که نتایج حاصل از این بخش نشان داد هر سه نمایه ذکر شده در دوره‌های آینده (به جز آینده دور) روند کاهشی خواهد داشت.

اگر چه نتایج به دست آمده از تحقیق حاضر بر مبنای مدل‌های مورد استفاده، رخداد تغییر اقلیم و به خصوص تکرار رویدادهای شدید اقلیمی را در حوضه آبخیز گرگانرود اثبات می‌کند، اما استفاده از تعداد مدل‌های اقلیمی بیشتر و با وضوح بالاتر یقیناً تجزیه و تحلیل فضایی پیش‌بینی‌ها و مهم‌تر از آن عدم قطعیت‌های را در شرایط آینده بهتر ارزیابی خواهد کرد. همچنین استفاده از سایر شاخص‌های خشکسالی مانند RDI، SPI، نمره Z نرمال و مقایسه نتایج آن با نتایج شاخص SPEI مورد مطالعه، به تفکیک حوضه‌های مختلف اقلیمی در این منطقه، به بهبود نتایج کمک کرده و برنامه‌ریزی‌های قبل از وقوع بحران را در منطقه تسهیل خواهد کرد.

تحت سناریوهای آینده مورد ارزیابی قرار داده که می‌تواند سیاست‌های آگاهانه در مورد مدیریت پایدار زمین و منابع آب در استان را تسهیل کند. برای دستیابی به اهداف پژوهش شاخص SPEI خشکسالی با استفاده از سری‌های زمانی مشاهده شده و هشت مدل از فاز ششم گزارش هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم تحت دو سناریو SSP2-4.5 و SSP5-8.5 محاسبه و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. یافته‌های اصلی مطالعه نشان می‌دهد که:

متوسط دما برای دهه‌های آتی در هر دو سناریو به ترتیب ۱/۲ تا ۴/۴ درجه سلسیوس و متوسط بارش سالانه برای منطقه مورد مطالعه به میزان ۲ تا ۱۱/۹ درصد افزایش خواهد یافت. خروجی این قسمت با نتایج پژوهش انصاری مهابادی و همکاران (۱۴۰۱): (۱۹) در مورد بررسی روند تغییرات دما و بارش حوضه‌های آبریز ایران بر اساس برونداد مدل‌های CMIP6 مطابقت دارد. ایشان در این تحقیق نشان دادند که حوضه آبخیز گرگانرود جزو مناطقی هستند که بارش آن بین ۱۵ تا ۲۵ درصد و دما مابین ۰/۴ تا ۰/۶ درجه سلسیوس افزایش خواهد یافت. داده‌های پیش‌نگری شده اقلیمی تحت دو سناریو، برای تخمین سری زمانی خشکسالی در مقیاس زمانی ۱۲ ماهه استفاده شدند و مشخصه‌های خشکسالی بر طبق تئوری ران در دوره‌ی مشاهده و آینده استخراج شدند. نتایج حاصل از این بررسی نشان داد در سناریو SSP2-4.5 وضعیت منطقه مورد مطالعه در محدوده‌های نزدیک به شرایط نرمال یا ترسالی خواهد بود و این شرایط در دوره آینده نزدیک در سناریو SSP5-8.5 ادامه دارد، اما در دهه‌های انتهایی قرن ۲۱ بر وقوع خشکسالی‌ها افزوده شده است. پیش‌بینی

منابع

۱. آباد، محمود، خسروشاهی، محمد. ۱۴۰۰. ارزیابی و پایش پدیده خشکسالی بر اساس دو شاخص SPI و SPEI در استان هرمزگان. تحقیقات مرتع و بیابان ایران، ۲۸(۴)، ۷۱۸-۷۳۲.
۲. انصاری مهابادی، ثمین، دهبان، حسین، زارعیان، محمدجواد، فرخ‌نیا، اشکان. ۱۴۰۰. بررسی روند تغییرات دما و بارش حوضه‌های آبریز ایران در افق ۲۰ سال آینده بر اساس برونداد مدل‌های CMIP6. پژوهش آب ایران، ۱۶ (۱)، ۱۱-۲۴.
۳. تاج‌بخش، سحر، عیسی‌خانی، نسرین، فضل‌کاطمی، امین. ۱۳۹۴. ارزیابی خشکسالی هواشناسی در ایران با استفاده از شاخص «استاندارد شده بارش و تبخیر-تعرق

۱۲. متولی باشی نایینی، الهه، آخوندعلی، علی محمد، رادمنش، فریدون، شریفی، محمدرضا، عابدی کوپایی، جهانگیر. ۱۳۹۸. پهنه‌بندی خصوصیات خشکسالی تحت اثر تغییر اقلیم با استفاده از روش توابع مفصل در حوضه زاینده‌رود. علوم مهندسی و آبیاری (مجله علمی کشاورزی)، ۴۲(۱)، ۱۴۵-۱۶۰.
۱۳. مساح بوانی، علیرضا، قاسم‌زاده، سجاد، روزبهانی، عباس، رجائی، فاطمه. ۱۴۰۰. پیش‌بینی تغییر اقلیم با استفاده از رویکرد مدل‌های چندگانه گروهی در حوضه آبخیز قره سو. اکوهیدرولوژی، ۸(۴)، ص ۱۱۹۷-۱۱۹۸.
۱۴. میرزایی حسنلو، ایوب، عبقری، هیراد، عرفانیان، مهدی. ۱۳۹۹. ارزیابی شاخص خشکسالی SPEI و تحلیل روند با استفاده از روش‌های پارامتریک در ایستگاه‌های منتخب حوزه آبریز دریاچه ارومیه. پژوهشنامه مدیریت حوزه آبریز دریاچه ارومیه. ۱۱(۲۲)، ۱۷۵-۱۸۷.
۱۵. نصرتی، کاظم. ۱۳۹۳. ارزیابی شاخص بارش - تبخیر و تعرق استاندارد شده (SPEI) جهت شناسایی خشکسالی در اقلیم‌های مختلف ایران، فصلنامه علوم محیطی، ۴، ۶۳-۷۴.
۱۶. نیکبخت، جعفر، هادلی، فاطمه. ۱۴۰۰. مقایسه شاخص‌های SPI، RDI و SPEI جهت پایش خشکسالی در شرایط تغییر اقلیم (مطالعه موردی: ایستگاه کرمانشاه)، هواشناسی کشاورزی، ۹(۱)، ۱۴-۲۵.
17. Bai, H., Xiao, D., Wang, B., Liu, D.L., Feng, P., & Tang, J. 2021. Multi-model ensemble of CMIP6 projections for future extreme climate stress on wheat in the North China plain. *International Journal of Climatology*, 41, P E171-E186.
18. Chen, H., Sun, J., Lin, W., & Xu, H. 2022. Comparison of CMIP6 and CMIP5 models in simulating climate extremes. *Science Bulletin*, 65(17), P 1415-1418.
19. Dai, A. 2013. Increasing drought under global warming in observations and models. *Nature Climate Change*, 3, 52-58.
20. Dukat, P., Bednorz, E., Ziemblńska, K., & Urbaniak, M. 2022. Trends in drought occurrence and severity at mid-latitude European stations (1951-2015) estimated using standardized precipitation (SPI) and precipitation and evapotranspiration (SPEI). *مجله فیزیک زمین و فضا*، ۴۱(۲)، ۳۱۳-۳۲۱.
۴. جهانگیر، محمدحسین، رحیمی، فراز، ابوالقاسمی، مهناز. ۱۴۰۰. پیش‌نگری و تحلیل زمانی و مکانی خشکسالی استان تهران تحت مدل گردش عمومی جوی اقیانوسی CanESM2 بر اساس شاخص SPEI. *نشریه مهندسی اکوسیستم بیابان*، ۳۳(۱۰)، ۱۳۹-۱۵۸.
۵. دنیائی، علیرضا، ۱۴۰۱. ارزیابی عملکرد مدل‌های BNU-ESM و MIROC-ESM در گرمایش جهانی با نگرشی بر فراسنج‌های اقلیمی و خشکسالی‌های آینده (مطالعه موردی: حوضه آبریز گرگان‌رود، استان گلستان)، *اکوسیستم‌های طبیعی ایران*، ۱(۱۳)، ۹۳-۱۱۲.
۶. زارع ابیانه، حمید، قبائی سوق، محمد، مساعدی، ابوالفضل. ۱۳۹۴. پایش خشکسالی بر مبنای شاخص بارش - تبخیر و تعرق استاندارد شده (SPEI) تحت تأثیر تغییر اقلیم، آب و خاک، ۲۹(۲)، ۳۷۴-۳۹۲.
۷. زرین، آذر، داداشی رودباری، عباس‌علی، کدخدا، الهام، ۱۴۰۱. پیش‌نگری خشکسالی تحت سناریوهای SSP تا پایان قرن بیست و یکم، مطالعه موردی: حوضه دریاچه ارومیه. *مجله تحقیقات آب و خاک ایران*، ۷(۵۳)، ص ۱۴۹۹-۱۵۱۶.
۸. سعیدی‌پور، مهدی، رادمنش فریدون، اسلامیان، سعید، شریفی، محمدرضا. ۱۳۹۸. تحلیل منطقه‌ای خشکسالی در حوضه آبریز کارون با استفاده از شاخص‌های SPI و SPEI، *علوم آب و خاک*، ۲۳(۲)، ۳۹۷-۴۱۵.
۹. شجاع، فائزه، شمسی‌پور، علی اکبر. ۱۴۰۲. پیش‌نمایی تغییرات بارش‌های آبی حوضه‌های آبخیز تأمین‌کننده آب شهر تهران، مخاطرات محیط طبیعی، ۳۶(۱۲)، ۱۵۱-۱۸۰.
۱۰. طاووسی، تقی، شجاع، فائزه، اکبری، الهه، عسگری، الهه، ۱۳۹۵. ارزیابی تغییرات کاربری اراضی و تحلیل روند بیابان‌زایی اقلیمی چاله گاوخونی. *فضای جغرافیایی*، ۵۶(۱۶)، ۹۴-۷۹.
۱۱. فلاح کلاکی، محمد، شکری کوچک، وحید، و رضانی اعتدالی، هادی. ۱۴۰۰. شبیه‌سازی اثرات تغییر اقلیم با استفاده از مدل‌های اقلیمی CMIP5 و CMIP6 بر رواناب با استفاده از مدل هیدرولوژیکی SWAT (مطالعه موردی: حوضه آبریز طشک-بختگان). *تحقیقات منابع آب ایران*، ۱۷(۳)، ۳۴۵-۳۵۹.

- the standardized precipitation index (SPI) and standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) in Sichuan Province, China. *Sci Rep* 11, P 1280.
28. Ogunrinde, A. T., Oguntunde, P. G., Akinwumiju, A. S., Fasinmirin, J. T., Olasehinde, D. A., Pham, Q. B., ... & Anh, D. T. 2022. Impact of Climate Change and Drought Attributes in Nigeria. *Atmosphere*, 13(11), P 1874.
 29. Pendergrass, A. G., Meehl, G. A., Pulwarty, R., Hobbins, M., Hoell, A., AghaKouchak, A., & Woodhouse, C. A. 2020. Flash droughts present a new challenge for subseasonal-to-seasonal prediction. *Nature Climate Change*, 10(3), P 191-199.
 30. Rebetez M., Mayer H., Dupont, O., Schindler D., Gartner K., Kropp J.P., and Menzel A. 2006. Heat and drought 2003 in Europe: A climate synthesis. *Ann. For. Sci.*, 63: 569–577.
 31. Trenberth, K. E., Dai, A., van der Schrier, G., Jones, P. D., Barichivich, J., Briffa, K. R., & Sheffield, J. 2014. Global warming and changes in drought. *Nature Climate Change*, 4, P 17–22.
 32. Ukkola, A. M., De Kauwe, M. G., Roderick, M. L., Abramowitz, G., & Pitman, A. J. 2020. Robust future changes in meteorological drought in CMIP6 projections despite uncertainty in precipitation. *Geophysical Research Letters*, 47(11), e2020GL087820.
 33. Vicente-Serrano S.M., Beguería S., and López-Moreno J.I. 2010. A Multi-scalar drought index sensitive to global warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index – SPEI. *Journal of Climate*, 23(7): P 1696–1718.
 34. Vicente-Serrano, S. M., Beguería, S., & López-Moreno, J. I. 2010. A multiscalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index. *Journal of climate*, 23(7), P1696- 1718.
 - (SPEI) indices. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 134(1), P 20.
 21. Eyring, V., Bony, S., Meehl, G. A., Senior, C., Stevens, B., Stouffer, R. J., Taylor, K. E. 2015. Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organisation. *Geoscientific Model Development Discussions*, 8(12), P 1937-1958.
 22. Funk, C., Harrison, L., Alexander, L., Peterson, P., Behrangi, A., & Husak, G. 2019. Exploring trends in wet-season precipitation and drought indices in wet, humid and dry regions. *Environmental Research Letters*.
 23. Gupta, R., Bhattarai, R., and Mishra, A. 2019. Development of Climate Data Bias Corrector (CDBC) Tool and Its Application over the AgroEcological Zones of India. *Journal of Water*, 11(5), 1102.
 24. IPCC. 2020. Summary for policymakers Climate Change 2020. The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press (2020).
 25. Jiménez-Navarro, I. C., Jimeno-Sáez, P., López-Ballesteros, A., Pérez-Sánchez, J., Senent-Aparicio, J. 2021. Impact of Climate Change on the Hydrology of the Forested Watershed That Drains to Lake Erken in Sweden: An Analysis Using SWAT+ and CMIP6 Scenarios. *Forests*, 12(12), P 1803.
 26. Lee, Sang-Hyun, Seung-Hwan Yoo, Jin-Yong Choi, and Seungjong Bae. 2017. Assessment of the Impact of Climate Change on Drought Characteristics in the Hwanghae Plain, North Korea Using Time Series SPI and SPEI: 1981–2100" *Water* 9, no. 8:P 579.
 27. Liu, C., Yang, C., Yang, Q. Wang, J., 2021. Spatiotemporal drought analysis by