



دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهر  
فصلنامه علمی فضای جغرافیایی

دوره بیست و چهارم، شماره ۸۸  
اسفند ۱۴۰۳، صفحات ۹۲-۶۵

مصطفی کرم پور<sup>۱</sup>

سمیرا بیرانوند<sup>۲</sup>

مسعود گودرزی<sup>۳</sup>

آذر بیرانوند<sup>۴\*</sup>

## پیش‌نگری تغییرات زمانی خشکسالی هواشناسی در استان لرستان با استفاده از مدل‌های اقلیمی

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۸/۱۸

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۳/۱۸

### چکیده

رخداد فرین‌های اقلیمی مانند امواج گرم، بارش‌های سنگین و خشکسالی‌ها آسیب‌های چشمگیری را به جوامع بشری وارد می‌کنند. واکاوی تغییر فراوانی این پدیده‌ها و بررسی روند و شدت رخداد‌های مشاهده شده و رخداد‌های پیش‌بینی شده می‌تواند کمک شایان توجهی به برنامه‌ریزی برای مدیریت و سازگاری با این رخدادها نماید. در پژوهش حاضر به ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر وضعیت خشکسالی استان لرستان با استفاده از شاخص خشکسالی بارش استاندارد شده (SPI) پرداخته شده است و سپس روند این شاخص مورد بررسی قرار گرفت. از آنجایی که شبکه‌های محاسباتی مدل گردش عمومی جو (GCM) به دلیل بزرگ مقیاس بودن و قدرت تفکیک کم برای استفاده، در ابعاد یک ایستگاه باید ریز مقیاس شوند، بنابراین در ابتدا داده‌های روزانه خروجی مدل گردش عمومی جو HADCM3 تحت سناریوی انتشار A2 و B1، توسط مدل آماری LARS-WG نسخه ۵، ریزمقیاس شده و توانایی مدل LARS-WG ۵ در شبیه‌سازی اقلیم گذشته (۱۹۹۶-۲۰۱۱) در ایستگاه‌های سینوپتیک الیگودرز، خرم‌آباد و بروجرد مورد تأیید قرار گرفته، سپس فراسنج بارش برای دوره ۲۰۵۰-۲۰۱۱ برای ایستگاه‌های مورد مطالعه شبیه‌سازی شده است. نتایج بدست آمده از بررسی روند خشکسالی حاکی از تشدید خشکسالی‌ها در فصل زمستان طی دهه‌های آتی در ایستگاه الیگودرز و بروجرد و تضعیف خشکسالی‌ها در ایستگاه خرم‌آباد می‌باشد. فصل بهار در هر سه ایستگاه مورد مطالعه بجز مدل INCM3 تضعیف خشکسالی را نشان می‌دهد که ایستگاه الیگودرز و خرم‌آباد به ترتیب مدل HADCM3 تحت سناریوی A2 و مدل INCM3 تحت سناریوی A2 و B1 دارای روند معنی‌دار می‌باشند. تغییرات صورت گرفته در رخداد فراوانی دوره‌ها خشکسالی (ترسالی) در فصول مختلف به خصوص در ایستگاه خرم‌آباد به نوعی نشان از تغییر رژیم بارشی در این ایستگاه دارد. به منظور سازگاری بخش کشاورزی با این تغییرات بایستی در

<sup>۱</sup> گروه جغرافیا، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، ایران.

<sup>۲</sup> دانش‌آموخته کارشناسی ارشد آب‌وهواشناسی کاربردی، گروه جغرافیا، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، ایران.

<sup>۳</sup> سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، وزارت جهاد کشاورزی، تهران، ایران.

<sup>۴</sup> دانش‌آموخته دکتری آب‌وهواشناسی سینوپتیک، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران. beyranvandazar@ut.ac.ir

بخش مدیریت و برنامه‌ریزی کشاورزی این استان راهبرد ظرفیت تطبیقی در پیش گرفته شود تا با در نظرگیری این تغییرات برنامه‌ریزی زمان و نوع کشت صورت پذیرد و در راستای بهره‌وری مطلوب‌تر اقدام شود.

**کلیدواژه‌ها:** تغییر اقلیم، بارش، پیش‌بینی فراسنج‌های اقلیمی، لرستان، ریزمقیاس‌نمایی

## مقدمه

افزایش دوبرابری فراوانی رخداد‌های خشکسالی در نواحی خشک جهان پس از ۱۹۷۰ میلادی (Trenberth et al., 2007) و تغییرپذیری بالای شدت، کثرت و دوره خشکسالی‌ها در مقیاس منطقه‌ای و حتی بعضاً افزایش منطقه‌ای فراوانی خشکسالی‌ها (Sheffield and Wood, 2008) بیش از پیش مطالعه رخداد‌های گذشته و پیش‌بینی رخداد‌های آینده این پدیده اقلیمی را اجتناب‌ناپذیر نموده است. شواهد مطالعات پالئوکلیمایی نشان می‌دهد که خشکسالی‌های اخیر جهان بی‌سابقه نیستند، ابرخشکسالی‌های شدیدی در اروپا، آمریکای شمالی و استرالیا در این پژوهش‌ها به ثبت رسیده است (Jansen et al., 2007). رخداد خشکسالی به عنوان یک دوره هوای خشک غیرعادی با توجه به طول دوره خود می‌تواند عدم توازن قابل توجه را در چرخه هیدرولوژی برقرار سازد. به‌گونه‌ای که مطالعات صورت گرفته در زمینه پیش‌بینی‌های اقلیمی، نشان دهنده آن است که خشکسالی در رطوبت خاک عمدتاً توسط تغییرات بارش به سبب افزایش تبخیر و تعرق ناشی از افزایش تابش، سرعت باد یا کاهش فشار بخار آب ایجاد می‌گردد (Burke and Sheffield and Wood (2008)؛ Brown (2008)؛ Orłowsky and Seneviratne (2011) و در صورتی که طول دوره خشکسالی افزایش یابد با کمبود رطوبت خاک، منابع آب سطحی و زیرزمینی نیز به عنوان ذخایر آب چرخه هیدرولوژی با توجه به شرایط محیطی (سطحی و زیرسطحی) و نیز شرایط جوی (دما، باد و ..) در زمان‌های مشخص نسبت به شروع پدیده خشکسالی، تغییرات محسوس خواهند داشت (Koster and Suarez (2001)؛ Seneviratne et al. (2010)؛ Beguería et al. (2010)). پژوهش‌های انجام گرفته در مقیاس قاره‌ای، روند افزایشی خشکسالی را در جنوب و شرق اروپا نشان داده است (Sheffield and Wood, 2008). Beniston and Stephenson (2004) نیز افزایش شدید در رخداد روزهای گرم در سراسر نواحی مرکزی و جنوبی اروپا در نیمه دوم قرن ۲۰م تا آخر این قرن گزارش می‌کنند. بطوری‌که مقارنت پیش آمده در وقوع رخداد خشکسالی و امواج گرم در این قاره، در سال ۲۰۰۳ باعث تشدید شرایط خشکسالی گردید و بخش‌های زیادی از اروپا در این سال با این رخداد درگیر شدند، در فرانسه و ایتالیا این رخداد سبب مرگ‌ومیر بسیار شد (Beniston and Stephenson, 2004). در شرق آسیا نیز رفتار خشکسالی سیر افزایشی داشته است، اما روند افزایشی خشکسالی در سایر مناطق قاره آسیا به طور سراسری گزارش نشده است (IPCC, 2007).

Babaeian et al (2009) از طریق ریزمقیاس‌نمایی آماری خروجی سناریوی ۱A مدل گردش عمومی جو ECHO-G دریافتند که در دوره ۲۰۱۰-۲۰۳۹ میلادی بارش کل کشور حدود ۹ درصد نسبت به دوره آماری کاهش می‌یابد، اما آستانه بارش‌های سنگین و خیلی سنگین به ترتیب ۱۳ و ۳۹ درصد افزایش می‌یابد. در

همین دوره تعداد روزهای همراه با بارش نیز کاهش می‌یابد. همچنین میانگین دمای سالانه حدود ۰/۵ درجه سانتی‌گراد افزایش خواهد یافت که بیشترین افزایش دما در فصول سرد سال رخ می‌دهد. *Khazanedari et al (2009)* برای دستیابی به دورنمایی از وضعیت خشکسالی در کشور شاخص‌های دهک (DI) و استاندارد بارش (SPI) را بر روی داده‌های بارش پیش‌بینی شده برای کشور اعمال نموده که نتایج حاصل از این تحقیق نشان داده است که طی سی سال آینده شرایط خشکسالی در کشور رو به افزایش خواهد بود که این مسأله به معنای وقوع تغییر اقلیم در منطقه است، به گونه‌ای که طی دوره مورد مطالعه، در سال‌های ۲۰۱۱، ۲۰۲۵، ۲۰۳۲، ۲۰۳۴، ۲۰۳۵ و ۲۰۳۹ بیشتر نقاط کشور با خشکسالی شدید و بسیار شدید روبرو خواهد بود که در این میان، وضعیت خشکسالی در سال ۲۰۳۹ به مراتب بحرانی‌تر خواهد بود. *Daneshmandi and Mahmoudi (2017)* با بررسی تغییرپذیری سری‌های زمانی شاخص مؤثر خشکسالی در ۴۱ ایستگاه در سطح کشور، نشان دادند که شدت سال‌های مرطوب در حال کاهش و شدت خشکسالی‌ها رو به افزایش است. همچنین مشاهده شد که فواصل دوره‌ای (بین دوره‌های رخداد خشکسالی) در ابتدا کوتاه‌تر اما در پایان سری‌های زمانی طولانی‌تر بودند. این امر نشان می‌دهد که احتمال وقوع خشکسالی در ایران رو به افزایش است. همچنین کاهشی در فاصله بین وقوع خشکسالی در ایران مشاهده می‌شود. به این معنی که فاصله بین وقوع خشکسالی در ابتدا طولانی‌تر و در پایان سری زمانی کوتاه‌تر بود.

در مقیاس منطقه‌ای *Abbasi et al (2009)* در بررسی تغییرات اقلیمی خراسان جنوبی، *Saidi Shahabadi (2009)* در واکاوی اثرات تغییر اقلیم بر منابع آب حوضه آبریز کرخه، *Saleh Nia (2009)* و *Moafi (2010)* در پیش‌بینی خشکسالی خطه خراسان، *Haqtaab et al (2012)* در شبیه‌سازی اقلیم استان‌های تهران و مازندران، *Dargahian et al (2015)* و *Nasiri and yarmoradi (2017)* در پیش‌بینی اقلیم لرستان از مدل ریزنمای LARS-WG بهره برده‌اند. نتایج این مطالعات تا حدود زیادی نشان از کارایی موفق این مدل در پیش‌بینی متغیرهای اقلیمی دارد. *Kaboosi and Kordjazi (2017)* در مطالعه‌ای به بررسی اثر تغییر اقلیم بر متغیرهای هواشناسی و خشکسالی استان گلستان پرداختند. مدل‌های مورد بررسی در این مطالعه کاهش درصد وقوع دوره‌های خشک و مرطوب و افزایش وقوع دوره نرمال را در مقیاس ماهانه در دوره آتی پیش‌بینی کردند. *Fallah Zolleh et al (2021)* در حوزه آبخیز ملایر به پیش‌بینی اثر تغییر اقلیم بر شاخص‌های خشکسالی پرداختند، بررسی‌ها نشان داد که شدت وقوع خشکسالی‌های متوسط و شدید در دوره آماری آینده در ایستگاه‌های مرویل، پیهان و وسج افزایش می‌یابد و سبب کاهش دبی و خشکسالی هیدرولوژیکی می‌شود. همچنین نتایج حاصله بیانگر این است که به علت متغیر بودن میزان بارش و میانگین دمای هوا روند تغییرات خشکسالی‌ها در ماه‌های مختلف یکسان نبوده و طول دوره، شدت و فراوانی خشکسالی در ماه‌ها و سال‌های مختلف متفاوت می‌باشد. *Azareh et al (2021)* در پژوهشی با هدف ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر دما، بارش و خشکسالی‌های آینده در شهرستان خاتم، از خروجی دو مدل گردش کلی *HadGEM2* و *BNU-ESM* تحت سه سناریو *RCP2.6*، *RCP4.5* و *RCP8.5* برای دو دوره آتی ۲۰۳۱ تا

۲۰۵۰ و ۲۰۵۱ تا ۲۰۷۰ استفاده نمودند. نتایج تغییرات دما و بارش در هر دو دوره آبی حاکی از آن بود که این شهرستان متأثر از گرمایش جهانی هست؛ به گونه‌ای که در تمامی سناریوها در هر دو مدل، دمای متوسط سالانه افزایش و بارش متوسط سالانه کاهش می‌یابد. (Boroughanie et al (2022). اثرهای تغییر اقلیم بر خشکسالی‌های سواحل جنوبی خزر در دوره‌های آبی را مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج به‌دست‌آمده از خروجی سنجه خشکسالی در دوره نظارت و دوره‌های آینده با مقیاس‌های زمانی مختلف در این مطالعه نشان می‌دهد که شدت خشکسالی در دهه‌های آینده نسبت به دوره نظارت افزایش خواهد یافت. این افزایش برای شرق دریای خزر شدیدتر است، به‌طوری‌که شدت خشکسالی دهه ۲۰۸۰ سه برابر دوره مشاهده خواهد بود.

استفاده از مدل برای تولید داده تصادفی به اواخر قرن بیستم برمی‌گردد. در این میان استفاده از مدل-Lars WG برای شبیه‌سازی داده‌ها در مطالعات گسترده‌ای در سطح جهان دیده می‌شود. از جمله این مطالعات می‌توان به پژوهش‌های (Semenov and Barrow (1997 در انگلستان، (Loukas and Vasiliades (2008 در یونان، (Chen et al (2013 در سودان، (Zulkarnain et al (2013 در شبه‌جزیره مالزی، (Osman et al (2014 در عراق اشاره نمود. در رابطه با تغییر اقلیم ایران نیز مطالعات خوبی با این مدل صورت گرفته است. (Fattahi et al (2015 در مطالعه‌ای تأثیر تغییر اقلیم بر شدت و مدت خشکسالی‌های غرب ایران (ایستگاه‌های ایلام، همدان، کرمانشاه، سنندج، زنجان و خرم‌آباد) را بررسی نمودند. آن‌ها با استفاده از ریزمقیاس‌نمایی آماری سناریوهای انتشار A1B, A2, B1 خروجی مدل گردش عمومی جو HADCM3 برای دوره‌ی آماری (۲۰۱۱-۲۰۳۰)، دریافتند که مقادیر بارش دوره‌ی آماری (۲۰۱۱-۲۰۳۰) در مقایسه با مقادیر دوره‌ی مشاهداتی (۱۹۹۰-۱۹۶۱) اختلاف معنی‌داری ندارند. بیشترین درصد تغییرات (۲۸٪) در ایستگاه کرمانشاه تحت سناریوی B1 رخ خواهد داد. (Kazemi Rad et al (2015 با استفاده از مدل LARS-WG و انتخاب یک مدل مناسب، خروجی‌ها را برای ارزیابی خشکسالی دوره‌ی ۲۰۱۱-۲۰۳۰ مورد استفاده قرار دادند. بررسی خشکسالی با استفاده از روش TOPSIS برای دوره‌ی حال و آینده انجام شد. نتایج نشان داد که گستره‌ی وضعیت با شرایط خشکسالی کمتر افزایش خواهد یافت. همچنین انتظار رخداد خشکسالی در این مناطق برای آینده وجود دارد. اهمیت موضوع پژوهش در راستای دستیابی به اثرات گرمایش جهانی بر اقلیم نواحی مختلف جهان به گونه‌ای می‌باشد که قابلیت پژوهش در این موضوع به تعداد شهرهای جهان و در مقیاس‌های زمانی مختلف وجود دارد. پویایی بکارگیری مدل‌های اقلیمی مختلف و روش‌های گوناگون ریزمقیاس‌نمایی خروجی این مدل‌ها برای پیش‌بینی آینده و نحوه واکاوی خروجی هر مدل-سناریو می‌تواند محور پژوهشی باشد. بررسی منابع مختلف اطلاعات قابل توجهی در زمینه کارایی مدل بکارگرفته شده در این پژوهش (LARS-WG) برای ما حاصل آورد. لذا انجام مطالعات در این زمینه حتی در مقیاس ایستگاهی به بهبود شناخت اثرات تغییر اقلیم در مناطق مختلف منجر خواهد شد. از سوی دیگر فهم همه‌جانبه از ویژگی‌های فضایی خشکسالی به منظور کاهش اثرات این مخاطره اقلیمی و سازگاری با آن، از اهمیت بسیار

زیادی برخوردار بوده و موجب گردیده است که این موضوع از مباحث مهم تغییرات آب و هوایی جهان باشد. چنانچه رخداد خشکسالی در ابعاد زمانی و مکانی طویل گردد، خسارات زیانبار و گاهاً سنگینی را در پی خواهد داشت. که در برخی موارد کمتر از خسارات ناشی از سیلاب‌های مخرب نیست. منتها اثرات منفی سیلاب به سرعت و به نحوی آشکار بروز پیدا می‌کند اما اثرات خشکسالی تا حدودی تدریجی بوده و تا مدت نسبتاً زیادی ماندگار است. از همین رو پایش گسترده، پایش آگاهی و پایش‌بینی دوره‌های خشک امری ضروری بوده و مهمترین راهکار در جلوگیری از بروز خسارات این پدیده زیان‌بخش در آینده است. هرچه این پایش‌بینی‌ها دقیق‌تر و برای فواصل زمانی طولانی‌تر باشد، ابعاد بحران محدودتر می‌گردد. هدف از مطالعه حاضر بررسی وضعیت خشکسالی‌های شرق استان لرستان برای دوره زمانی ۲۰۱۱ تا ۲۰۵۰ با استفاده از مدل‌های INCM3 و HADCM3 می‌باشد. در این راستا سوال اصلی این پژوهش که منجر به شکل‌گیری آن شد این است که تا افق زمانی ۲۰۵۰ وضعیت خشکسالی‌های فصلی و سالانه در استان لرستان چگونه خواهد بود؟

#### مواد و روشها

در پژوهش حاضر از داده‌های روزانه فراسنج‌های اقلیمی بارش (میلی‌متر)، تابش (مگاژول بر متر مربع) و دماهای بیشینه و کمینه (درجه سلسیوس) برای سه ایستگاه همدید استان لرستان شامل خرم‌آباد، بروجرد و الیگودرز در یک دوره ۱۵ ساله (۱۹۹۶-۲۰۱۰) استفاده شده است. سایر ایستگاه‌های همدید استان لرستان در دوره فوق دارای نقص آماری بودند، لذا به منظور افزایش دقت عملیاتی و به کار بردن آمار واقعی، همچنین به دلیل اینکه تقریباً همه‌ی مدل‌های بازسازی داده‌ها با خطا همراه هستند؛ از آمارسازی برای تکمیل داده‌های آنها خودداری شد و به بررسی سه ایستگاه فوق اکتفا شد. داده‌های فراسنج‌های مورد اشاره از مرکز آمار و اطلاعات سازمان هواشناسی کشور اخذ گردیده است. توزیع مکانی ایستگاه‌های مورد مطالعه در شکل شماره ۱ ارائه شده است. در مرحله بعد نرمال بودن داده‌ها مورد بررسی و همگنی آنها با استفاده از آزمون Run Test مورد ارزیابی قرار گرفت.

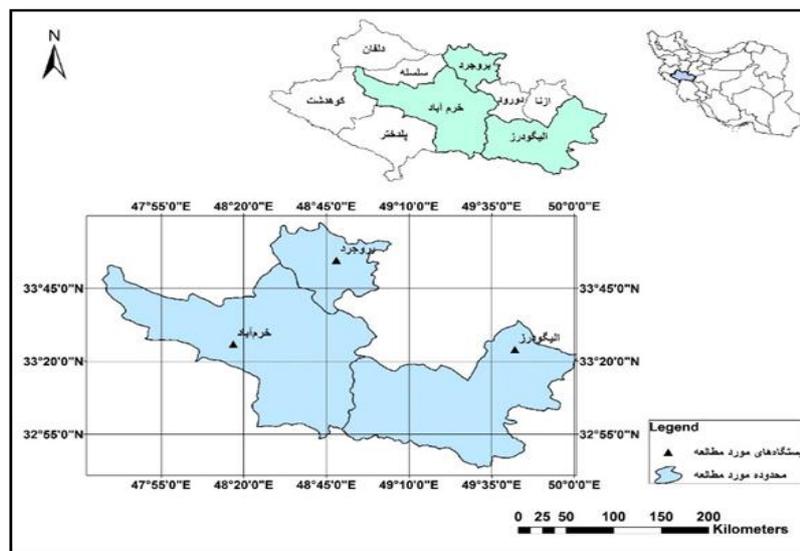
#### شبیه‌سازی فراسنج‌های اقلیمی و صحت‌سنجی مدل

در گام بعد با مراجعه به وبگاه کانادایی مرکز اطلاعات آب‌وهوایی و سناریوها (www.cccsn.ec.gc.ca) به دریافت داده‌های ماهانه فراسنج‌های اقلیمی مورد نیاز برای صحت‌سنجی مدل‌هایی که با مدل‌های موجود در مدل LARS-WG مشترک هستند اقدام گردید. سپس دوره مشترک بین داده‌های مدل و دوره دیده‌بانی انتخاب شد و صحت‌سنجی مدل با استفاده از روش وزن‌دهی میانگین (یکی از روش‌های بررسی عدم قطعیت مدل‌های اقلیمی و سناریوهای انتشار) انجام شد. وزن‌دهی میانگین برای هر مدل و سناریو برای ایستگاه‌های مورد مطالعه از رابطه شماره ۱ صورت پذیرفت:

رابطه شماره ۱)

$$w_i = \frac{1}{\Delta T_i} \frac{1}{\sum_{i=1}^N \frac{1}{\Delta T_i}}$$

که در آن  $W_i$  وزن به دست آمده در ماه مورد نظر،  $T_i \Delta$  انحراف میانگین طولانی مدت فراسنج اقلیمی شبیه‌سازی شده توسط مدل GCM در دوره پایه از میانگین داده‌های مشاهداتی است. با توجه به اینکه از بین سه مدل ((HADCM3- INCM3- IPCM3- HADCM3 و INCM3 وزن بالاتری نسبت به دو مدل دیگر داشتند، پس از دقت بالاتری برای پیش‌بینی اقلیم آینده برخوردار می‌باشند. نتایج تعیین وزن مدل HADCM3 و INCM3 در پیش‌بینی عناصر اقلیمی ایستگاه‌های هم‌دید مورد مطالعه بکار گرفته شد. مدل‌های انتخاب شده از سری AR4 2007 می‌باشند. هر کدام از مدل‌های ذکر شده دارای ۳ سناریو (B1, A2, A1B) می‌باشند. در ادامه فرایند ریزگردانی با اجرای مدل LARS-WG ۵ بر روی نتایج مدل‌های گردش عمومی که در بالا انتخاب گردید، انجام شد و مدل‌های فوق برای آینده منطقه برای دوره ۲۰۱۱-۲۰۳۰ اجرا و خروجی آن‌ها تحلیل شده است. با اجرای مدل آزمون‌های T و F به کاربر اجازه تولید داده برای هر تعداد سال را می‌دهد. سپس آن‌ها را تحلیل می‌کند و فایلی تولید می‌کند که شامل اطلاعات توزیع احتمال میانگین و انحراف معیار می‌باشد. نتایج این فایل‌ها در ایستگاه‌های مورد مطالعه عدم وجود اختلاف معنی‌دار بین مقادیر شبیه‌سازی فراسنج‌های اقلیمی و مقادیر واقعی در سطح ۰/۰۵ را نشان می‌دهد. علاوه بر آزمون‌های آماری ذکر شده در بالا، برای ارزیابی مدل LARS-WG از طریق نمودارهای مقایسه‌ای در شکل شماره (۲) و مقایسه داده‌های دوره دیده بانی با داده‌های تولید شده توسط مدل با استفاده از آزمون‌های آماری (آزمون دو نمونه‌ای T زوجی) و همچنین مقادیر همبستگی پیرسون در سطح ۰/۰۵ و ۰/۰۱ صورت پذیرفت. بنابراین، مدل LARS-WG توانمندی خوبی جهت تولید داده و مدل‌سازی اقلیم ایستگاه‌های مورد مطالعه دارد.



شکل شماره ۱: موقعیت ایستگاه‌های مورد مطالعه در کشور و استان لرستان

Figure 1: The location of the studied stations in the country and Lorestan province

مدل LARS-WG برای مدل‌سازی متغیرهای هواشناختی، توزیع‌های آماری پیچیده‌ای را به کار می‌برد. مبنای این مدل برای مدل‌سازی طول دوره‌های خشک و تر، بارش روزانه و سری‌های تابش، توزیع نیمه‌تجربی است. در این مدل سری‌های فوریه، دما را برآورد می‌کنند دماهای بیشینه و کمینه روزانه به صورت فرایندهایی تصادفی با میانگین و انحراف‌معیار دمای فصلی به کار می‌روند. این مدل توانایی مدل‌سازی دوره گذشته و آینده را دارد، و برای هر گونه مدل‌سازی نیازمند یک سناریوی اقلیمی ویژه است (Shamsipour, 2013:162).

جدول شماره ۱ - مشخصات مدل‌های آب‌وهوایی جهانی مورد استفاده در این مطالعه از سری AR ۴ دره LARS-WG. (Osman, 2014:950)

Table 1- Specifications of the global climate models used in this study from the AR ۴ series in LARS-WG ۵. (Osman, 2014:950)

مدل GCM	مرکز تحقیقی	شبکه
HADCM3	UK Meteorological Office UK	2.5° × 3.75°
INCM3	Institute for Numerical Mathematics Russia	4° × 5°

#### شاخص بارش استاندارد (SPI)

برای تحلیل وضعیت خشکسالی در این پژوهش از شاخص SPI استفاده شده است. این شاخص در سال ۱۹۹۵ توسط مکی و همکارانش ارائه شد. محاسبه شاخص بارش استاندارد شده برای هر منطقه براساس ثبت داده‌ها در بلند مدت برای یک دوره دلخواه استوار می‌باشد. این گزارشات (بارش) در بلند مدت با توزیع احتمال متناسب شده‌اند، بنابراین متوسط بارش استاندارد شده برای هر منطقه و برای هر دوره دلخواهی صفر و انحراف معیار آن یک می‌باشد (ادوارد و مکی ۱۹۹۷). مقدار SPI مثبت بیانگر بارش بیشتر از میانگین و مقدار SPI منفی بیانگر بارش کمتر از مقدار میانگین است. در واقع هدف SPI اختصاص ارزش عددی به بارندگی برای مقایسه نواحی با آب‌وهوای کاملاً متفاوت است، بر این اساس بررسی خشکسالی‌ها به وسیله شاخص SPI فارغ از مکان و موقعیت اقلیمی هر منطقه است. لذا پایش خشکسالی با این شاخص دارای دقت کافی می‌باشد (Yazdani et al., 2011).

جهت محاسبه SPI از فرمول زیر استفاده می‌شود:

$$SPI = \frac{p_i - \bar{p}}{s} \quad \text{رابطه شماره ۲}$$

در رابطه با فوق  $p_i$  مقدار بارش در دوره مورد نظر،  $\bar{p}$  میانگین درازمدت بارش برای دوره مورد نظر و  $S$  انحراف معیار مقادیر بارش است.

جدول شماره ۲-نمایه SPI برای پایش خشکسالی (Alizadeh, 2017)

Table 2- SPI index for drought monitoring (Alizadeh, 2017)

وضعیت آب و هوایی	نمایه SPI
شدیداً مرطوب	۲ و بیشتر
بسیار مرطوب	۱/۵ تا ۱/۹۹
مرطوب متوسط	۱ تا ۱/۴۹
نرمال مرطوب	۰ تا ۰/۹۹
نرمال خشک	۰ تا -۰/۹۹
خشک متوسط	-۱ تا -۱/۴۹
بسیار خشک	-۱/۵ تا -۱/۹۹
شدیداً خشک	-۲ و کمتر

## روند خطی شاخص خشکسالی

رگرسیون (وایازی) یک تکنیک آماری- ریاضی و تحلیلی برای بیان رابطه، برآورد و پیش‌بینی است. به وسیله محاسبات مربوط به آن در واقع به نوعی مدل‌سازی دست می‌زنیم. لذا در این مطالعه برای محاسبه روند شاخص خشکسالی از رگرسیون خطی ساده بهره گرفته شده است. در این روش معادله برازش خط به صورت رابطه شماره ۳ است:

$$\hat{y}_i = a + bt_i \quad \text{رابطه شماره ۳}$$

این معادله یک معادله درجه اول است و رابطه‌ای خطی را بیان می‌دارد. در این رابطه مختصات خط به ازای  $t$ های مختلف است. جزء  $a$  در این معادله به عنوان مؤلفه قطعی موسوم است که در آن  $a$  عرض از مبداء و  $b$  شیب خط حاصل از معادله است. عرض از مبداء، بیان‌گر نقطه‌ی آغاز ارتباط دو متغیر است درحالی‌که شیب خط، مقدار کجی و انحناء بهترین خط برازش یافته و عبارت از تانژانت زاویه خط وایازی و محور افقی ( $X$ ) است (Asakereh, 2011: 220-221). مثبت یا منفی بودن شیب خط به ترتیب بیان‌گر روند افزایشی یا کاهش می‌باشد، در حالی‌که صفر بودن آن دال بر فقدان روند است. برای محاسبه ضرایب رگرسیونی ( $a$ ,  $b$ ) سه روش رایج و پرکاربرد عبارتند از: ۱- روش کم‌ترین مربعات باقیمانده، ۲- روش کم‌ترین قدرمطلق انحراف‌ها و ۳- روش‌های ناپارامتری. در این پژوهش به منظور محاسبه ضرایب رگرسیونی، از روش کم‌ترین مربعات خطا (LSE) بهره گرفته شده است. از آنجایی‌که خط حاصل از این روش، بر مقادیر واقعی منطبق نیست و نسبت به آن‌ها فاصله دارد، فاصله هر نقطه از برآورد آن، خطای برآورد به حساب می‌آید، بدین جهت این روش خطی را بر داده‌ها برازش می‌دهد که مجموع مربعات خطاها را به حداقل ممکن می‌رساند. در این روش محاسبه شیب خط از طریق رابطه شماره ۴ و عرض از مبداء از رابطه شماره ۵ می‌باشد (Ibid, 222).

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad \text{رابطه شماره ۴}$$

و

$$a = \bar{y} - b\bar{x} \quad \text{رابطه شماره ۵}$$

برای تحلیل رگرسیون و استنباط آماری از مدل برازشده بر مشاهدات، از سه گروه آزمون آماری به شرح زیر استفاده می‌شود: ۱- آزمون ضرایب رگرسیون، ۲- آزمون و تحلیل پراش و ۳- آزمون مانده‌های الگوی رگرسیون. از آنجایی که هر یک از فراسنج‌های شیب خط (b) و عرض از مبدأ (a) متغیر تصادفی به شمار می‌آیند، می‌توان برای آن‌ها میانگین و پراش متصور شد. به همین دلیل می‌توان آزمون معنی‌داری ضرایب را بر روی این فراسنج‌ها انجام داد. برآورد شیب خط (b) نماینده میانگین شیب خط و انحراف استاندارد شیب خط (SE(b)) نیز بر اساس پراش مانده‌ها ( $MSD = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{n-2}$ ) به روش زیر قابل حصول است:

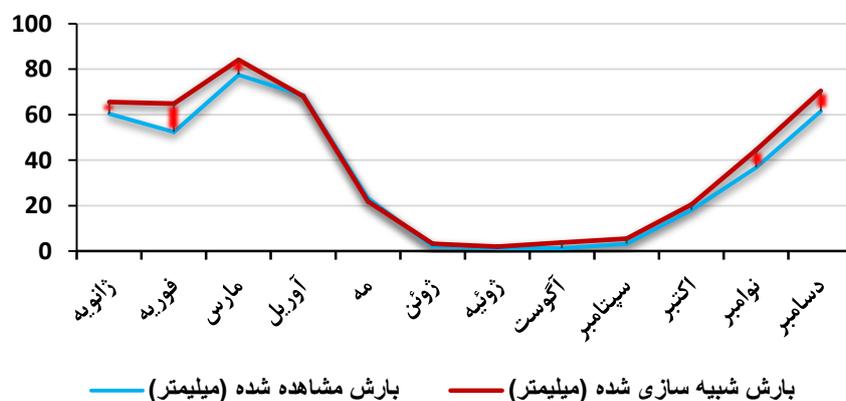
$$SE(b) = \sqrt{\frac{MSD}{\sum_{i=1}^n (t_i - \bar{t})^2}} \quad \text{رابطه شماره ۶}$$

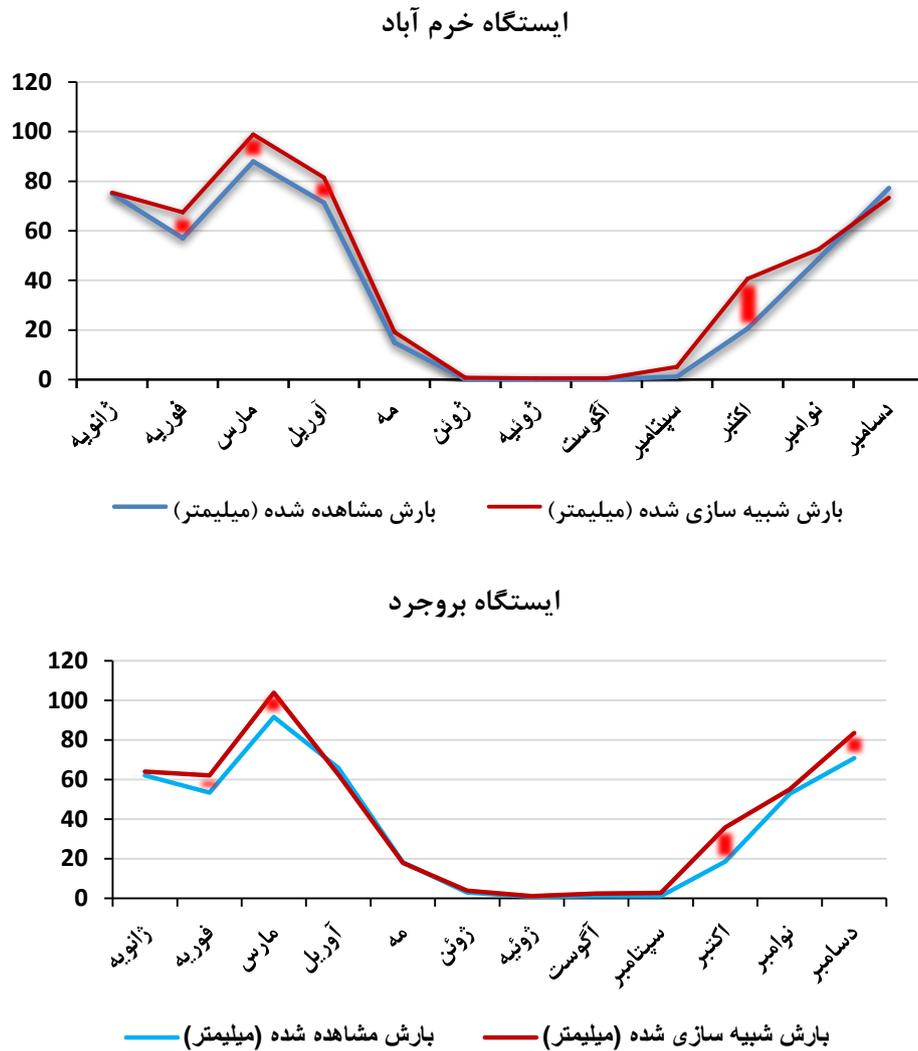
می‌توان آزمون فرض صفر مبتنی بر برابری ضریب شیب خط جامعه ( $\beta$ ) با صفر را به صورت در مقابل استفاده از آماره  $t_0$  به شرح زیر انجام داد:

$$t_0 = \frac{b}{SE(b)} \quad \text{رابطه شماره ۶}$$

قدر مطلق  $t_0$  با  $t_{(n-2, \alpha/2)}$  از جدول t با  $2n-2$  درجه آزادی قابل مقایسه است. در صورتی که قدر مطلق  $t_0$  بزرگتر از  $t_c$  (با  $2n-2$  درجه آزادی و در سطح معنی‌داری  $\alpha$  باشد) ( $|t_0| > t_{(n-2, \alpha/2)}$ )، شواهد کافی برای پذیرش فرض صفر وجود نخواهد داشت (Asakereh, 2011:454).

ایستگاه الیگودرز





شکل شماره ۲: مقایسه مقادیر بارش ماهانه مشاهده شده و شبیه‌سازی شده (۱۹۹۶-۲۰۱۰)

**Figure 2: Comparison of observed and simulated monthly precipitation values (2010-1996)**

#### یافته‌ها و بحث

در راستای پاسخ به پرسش پژوهش مبنی بر اینکه تا افق زمانی ۲۰۵۰ وضعیت خشکسالی‌های فصلی و سالانه در استان لرستان چگونه خواهد بود؟ در مقیاس‌های زمانی سه ماهه (فصلی) و سالانه شاخص خشکسالی برای ایستگاه‌های مورد بررسی حاصل آمد و مورد واکاوی قرار گرفت.

تحلیل فصلی رخداد خشکسالی بر پایه مقادیر بارش پیش‌بینی شده از مدل HADCM3 تحت سناریوی

A2 و B1

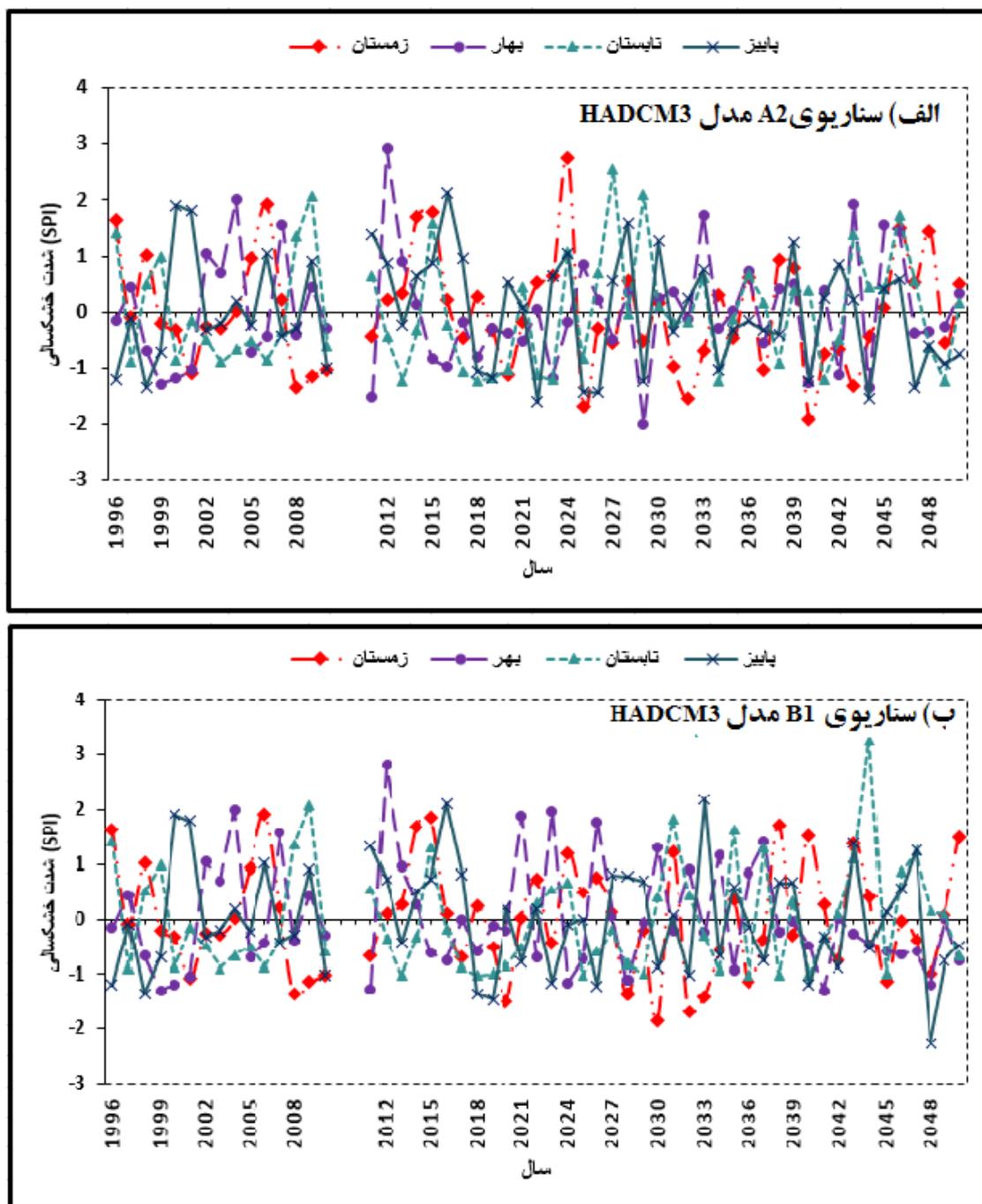
وقوع خشکسالی در ایستگاه‌های مورد مطالعه برای دهه‌های آتی امری بسیار محتمل است. از این رو جهت تجزیه و تحلیل خشکسالی‌های آینده با استفاده از داده‌های بارندگی مربوط به دوره ۲۰۱۱-۲۰۵۰ وضعیت خشکسالی فصلی دهه‌های آتی با استفاده از شاخص SPI محاسبه گردید.

### تحلیل مقادیر شدت خشکسالی فصلی در ایستگاه الیگودرز

شکل ۳ (بخش الف) مقادیر شدت خشکسالی را برای دوره‌ی مشاهداتی و دوره‌ی مدل‌سازی شده نشان می‌دهند. همانطور که مشاهده می‌گردد در سری‌زمانی سناریوی A2 مدل HADCM3، از ۴۰ فصل زمستان این دوره‌ی آماری ۶ فصل همراه خشکسالی که شامل ۳ فصل با خشکی شدید و ۳ فصل با خشکی متوسط و ۴ فصل مرطوب مشاهده می‌شود، محتمل است که زمستان سال ۲۰۲۴ یک ترسالی فرین رخ دهد. اما همان‌طور که مشاهده می‌شود فصل بهار سال ۲۰۲۹ یک خشکسالی فرین می‌باشد که در طول دوره‌ی مطالعاتی (۲۰۱۱-۲۰۵۰) بی‌سابقه خواهد بود. به‌طورکلی برای فصل بهار ۶ دوره‌ی خشک و ۵ دوره‌ی مرطوب قابل استنتاج می‌باشد و در ابتدای دوره یک فصل فرا مرطوب قابل مشاهده می‌باشد. می‌توان گفت که مقادیر SPI برای این فصل بین  $\pm 1$  در نوسان می‌باشند که در طبقه‌ی نرمال قرار دارند. اما مقادیر SPI برای فصل پاییز بیشترین فراوانی فصول خشک را نشان می‌دهد که شامل ۱۰ دوره‌ی خشک و در مقابل فقط ۶ دوره‌ی مرطوب می‌باشد. در بین دوره‌های مرطوب فصل بهار ۲۰۱۶ در رده‌ی فرامرطوب قرار دارد. با توجه به قسمت ب شکل شماره ۳، فصل زمستان بر پایه مقادیر حاصل از سناریوی B1 در این مدل، این ایستگاه افزایش دوره‌های خشک و مرطوب را نشان می‌دهد، البته تعداد دوره‌های خشک و مرطوب در پیش‌بینی این سناریو برابر می‌باشند یعنی ۸ دوره‌ی خشک و ۸ دوره‌ی مرطوب که در بین دوره‌های خشک زمستان سال ۲۰۳۰ و ۲۰۳۲ در طبقه‌ی خیلی خشک قرار دارند و زمستان ۲۰۱۵ در طبقه‌ی خیلی مرطوب می‌باشد. فصل بهار این سناریو افزایش دوره‌های تر و کاهش دوره‌های خشک را نشان می‌دهد که دوره‌های خشک نیز از نوع خشکی متوسط هستند. فصل پاییز نیز در این سناریو کاهش ۷/۵٪ دوره‌های خشک نسبت به سناریوی A2 را نشان می‌دهد. اما در بین دوره‌های خشک فصل پاییز سال ۲۰۴۸ در طبقه‌ی فراخشک قرار دارد.

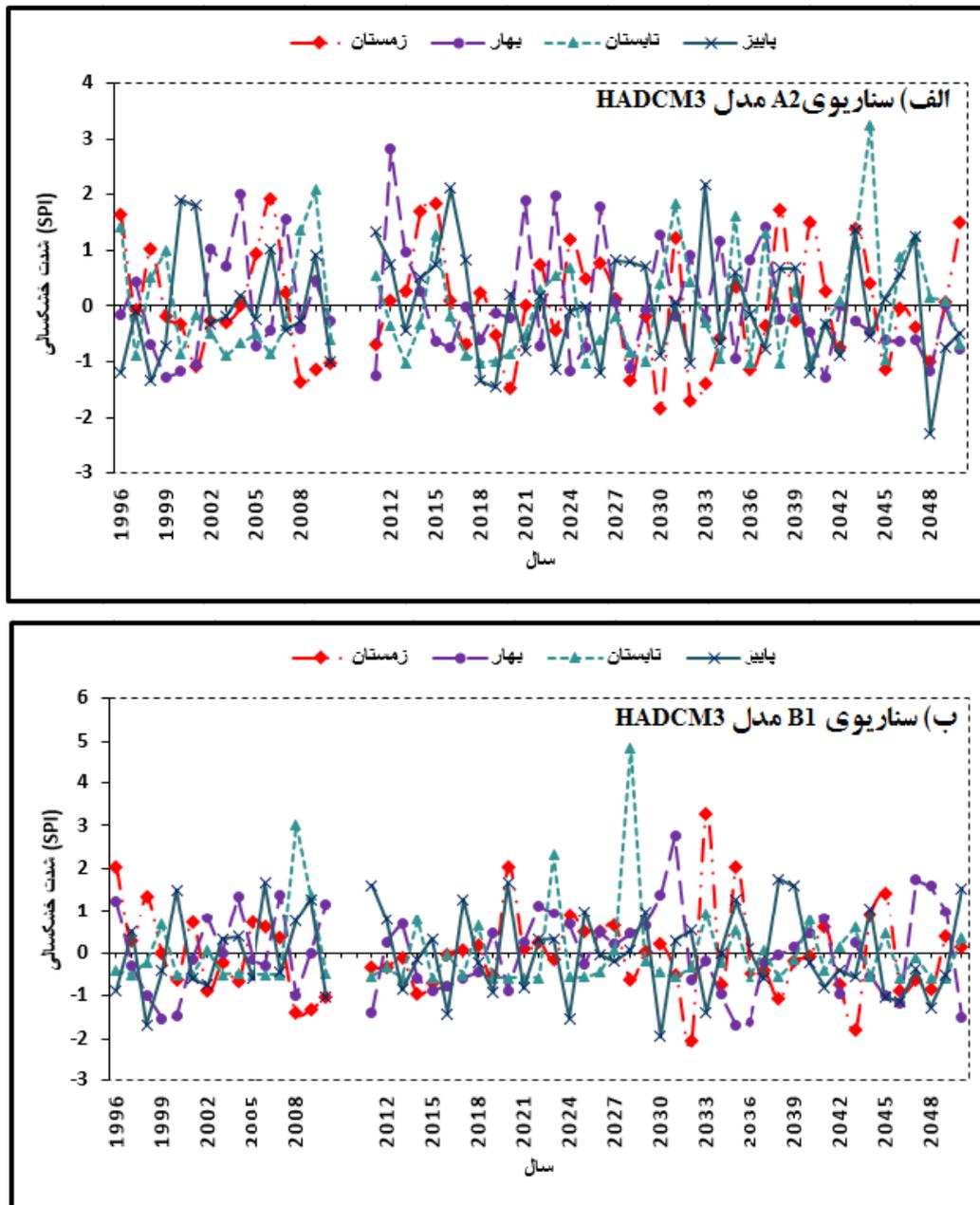
### تحلیل مقادیر شدت خشکسالی فصلی در ایستگاه خرم‌آباد

همان‌طور که در شکل ۴ (بخش الف) مشاهده می‌شود در دوره‌ی مشاهداتی فصل زمستان دارای بیشترین فراوانی فصول خشک می‌باشد به‌طوری که در این دوره ۶ فصل با خشکی ضعیف و ۳ فصل با خشکی متوسط دیده می‌شود. اما در این دوره فصل زمستان ۱۹۹۶ یک فصل مرطوب از نوع فرین می‌باشد. تعداد دوره‌های خشک در فصل بهار به حداقل رسیده است. فصل پاییز این دوره دارای ۳ دوره با تداوم ۱ ساله مرطوب و ۲ دوره‌ی خشک می‌باشد. سری زمانی شدت خشکسالی مربوط به سناریوی A2 مدل HADCM3 برای فصل زمستان ایستگاه خرم‌آباد ۴ دوره‌ی خشک را نشان می‌دهد که زمستان سال ۲۰۳۲ یک فصل فراخشک محسوب می‌شود.



شکل ۳: خشکسالی‌های فصلی ایستگاه الیگودرز برای دوره‌ی شبیه‌سازی شده (۲۰۴۰-۲۰۵۰) و دوره‌ی مشاهداتی (۱۹۹۶-۲۰۱۰)

Figure 3: Seasonal droughts of Aligodرز station for the simulated period (2040-2050) and the observation period (1996-2010)



شکل ۴: خشکسالی‌های فصلی ایستگاه خرم‌آباد برای دوره‌ی (۲۰۴۰-۲۰۵۰) و دوره‌ی مشاهداتی (۱۹۹۶-۲۰۱۰)

Figure 4: Seasonal droughts of Khorramabad station for the period (2050-2040) and observation period (2010-1996)

این سناریو برای فصل زمستان در آینده ۴ دوره مرطوب را پیش‌بینی می‌کند که مقادیر سال ۲۰۲۰ و ۲۰۳۲ با شدت  $+2/05$  و  $+3/24$  قابل ملاحظه می‌باشد. در فصل بهار این سناریو ۶ دوره خشک و ۴ دوره مرطوب قابل مشاهده است که بهار سال ۲۰۲۳ یک فصل فرا مرطوب می‌باشد و شدت آن  $+3/23$  می‌باشد. در سری زمانی شدت خشکسالی برای فصل پاییز، بیشترین فراوانی دوره‌های خشک مشاهده می‌شود و خشکسالی فرین با شدت  $-2/03$  و در مقابل ۷ دوره مرطوب که در بین آن‌ها ۲ ترسالی فرین با شدت  $+2/01$  و  $+2/07$  قابل مشاهده می‌باشد. به‌طور کلی افزایش جزئی در مقادیر حدی در فصل پاییز محسوس

می‌باشد (شکل ۷-الف). سناریوی B1 این مدل نیز برای ایستگاه فوق در سال ۲۰۳۲ زمستانی با خشکی فرین را پیش‌بینی می‌کند. اما دوره‌های مرطوب فرین طبق این سناریو افزایش یافته است و به‌طور کلی همان‌طور که در شکل ۴ (بخش ب) هم مشاهده می‌شود مقادیر شدت خشکسالی در محدوده‌ی نرمال در نوسان می‌باشد. فصل بهار دارای ۳ دوره‌ی خشکسالی متوسط ۳ دوره‌ی با خشکسالی شدید و همچنین ۵ دوره‌ی مرطوب که در میان آن‌ها یک دوره‌ی مرطوب فرین در سال ۲۰۳۱ مشاهده می‌شود، می‌باشد. فصل پاییز دارای ۵ دوره‌ی خشک و ۸ دوره‌ی مرطوب می‌باشد که نسبت بقیه فصول دارای بیشترین تعداد دوره خشک و مرطوب است. نمودارهای تمام فصول در این سناریو در بیشتر سال‌ها در محدوده‌ی نرمال یعنی بین مقادیر  $1 \pm$  قرار دارند.

### تحلیل مقادیر شدت خشکسالی فصلی در ایستگاه بروجرد

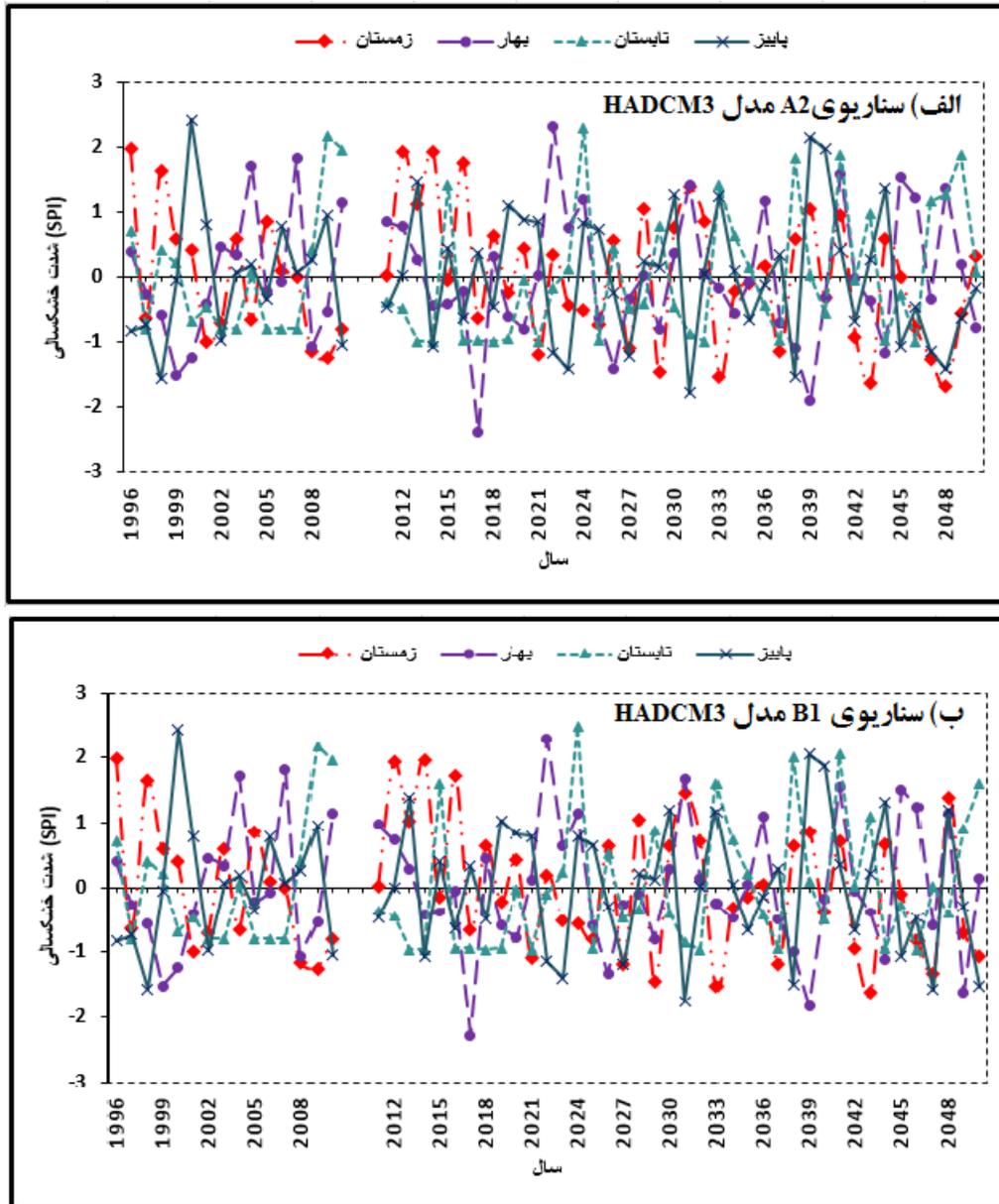
دوره‌ی آماری مشاهداتی ایستگاه بروجرد در فصل زمستان، ۸۰٪ از مقادیر شدت خشکسالی در محدوده‌ی نرمال قرار دارند و دو مورد خشکسالی متوسط و دو ترسالی متوسط و شدید روی داده است. در فصل بهار تعداد مقادیر SPI به ۳ مقدار خشک و ۳ مقدار مرطوب افزایش یافته است و در واقع ۶۰٪ از مقادیر در محدوده‌ی نرمال قرار دارند. فصل پاییز در این ایستگاه ۲ فصل خشک و یک فصل مرطوب از نوع فرین را نشان می‌دهد. با توجه به شکل (۵-الف) سناریوی A2 مدل HADCM3 فصل زمستان و پاییز دارای ۷ دوره‌ی خشک می‌باشند. نمودار فصل بهار ۵ دوره‌ی خشک را نشان می‌دهد. بهار سال ۲۰۱۷ یک فصل با خشکی فرین می‌باشد. در مقادیر شدت خشکسالی ایستگاه بروجرد نسبت به ایستگاه خرم‌آباد و الیگودرز فصول با مقادیر فرین خیلی کمتر می‌باشد و در فصل زمستان فقط دو فصل با خشکی شدید قابل مشاهده می‌باشد. رویداد خشکسالی ضعیف در بیشتر مواقع در ایستگاه قابل مشاهده می‌باشد.

### تحلیل سالانه رخداد خشکسالی بر پایه مقادیر بارش پیش‌بینی شده از مدل‌های HADCM3 و INCM3 تحت سناریوی A2 و B1

در این قسمت از تحقیق به تجزیه و تحلیل سری‌زمانی خشکسالی سالانه برای دو دوره‌ی زمانی پایه (۲۰۱۰-۱۹۹۶) و آینده (۲۰۵۰-۲۰۱۱) با استفاده از خروجی مدل HADCM3 و INCM3 تحت سناریوی A2 و B1 پرداخته شده است.

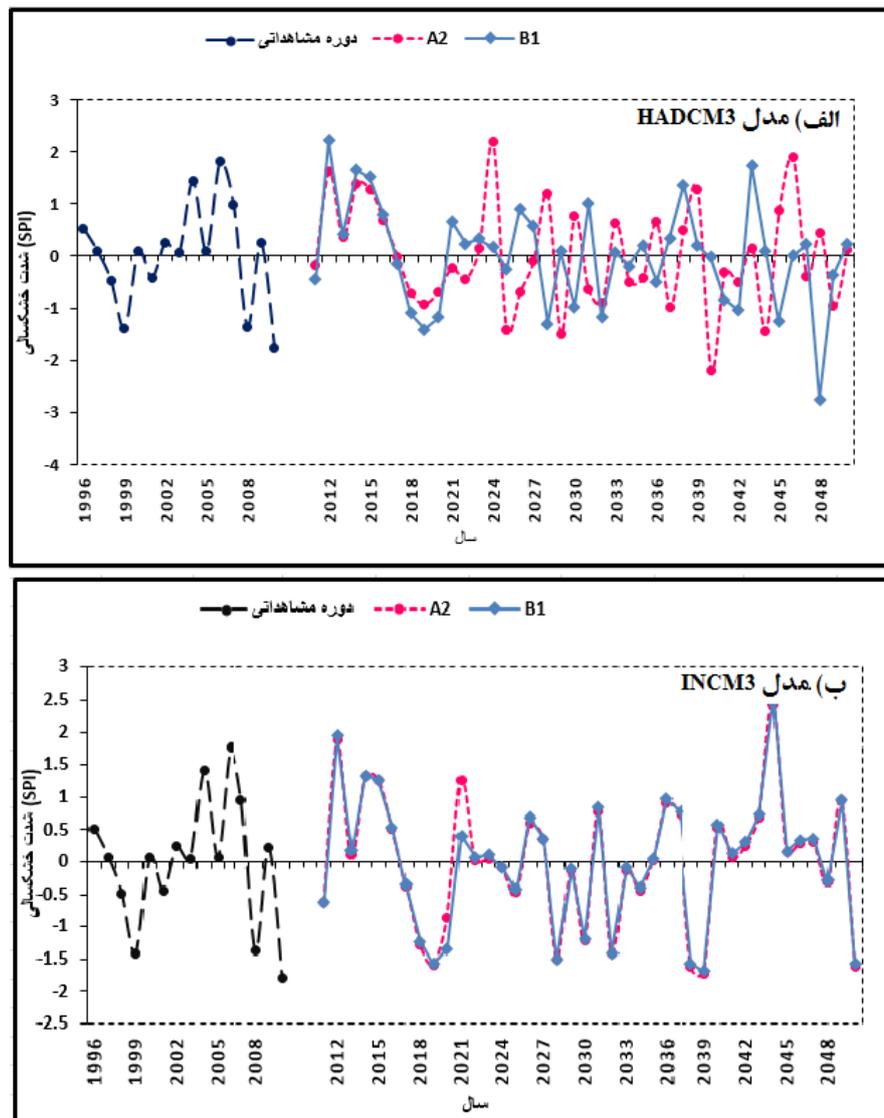
شکل (۶-الف) خشکسالی‌های سالانه ایستگاه الیگودرز خروجی مدل HADCM3 تحت سناریوی A2 و B1 برای دوره‌ی (۲۰۵۰-۲۰۴۰) و دوره‌ی مشاهداتی (۲۰۱۰-۱۹۹۶) را نشان می‌دهد. آن‌گونه که دیده می‌شود سال ۲۰۱۲ تا سال ۲۰۱۶ شاخص SPI برای هر دو سناریو ترسالی را نشان می‌دهد. دو نمودار در این سال‌ها تقریباً بر هم منطبق می‌باشند. فراوانی خشکسالی سناریوی A2 ۴ و در سناریوی B1 ۸ سال می‌باشد. نکته‌ی قابل توجه در این نمودار وجود خشکسالی‌های فرین در سال ۲۰۴۰ و ۲۰۴۸ تحت سناریوی A2 و B1 که شدت آن  $2/20-$  و  $2/75-$  می‌باشد که در دوره‌ی مشاهداتی مشاهده نشده است. قسمت ب شکل (۶)، خشکسالی‌های سالانه ایستگاه الیگودرز خروجی مدل INCM3 تحت سناریوی A2 و B1 برای دوره‌ی

(۲۰۴۰-۲۰۵۰) و دوره‌ی مشاهداتی (۱۹۹۶-۲۰۱۰) را نشان می‌دهد. نتایج حاصل از سناریوهای فوق مقادیر خشکسالی را برای ایستگاه تقریباً یکسان نشان می‌دهند. بر اساس نمودار خشکسالی‌های شدید و متوسط نیز دیده می‌شود که شدیدترین خشکسالی مربوط به سناریوی A2 سال ۲۰۳۹ با شدت  $1/73$  - می‌باشد.



شکل ۵: خشکسالی‌های فصلی ایستگاه بروجرد برای دوره‌ی (۲۰۴۰-۲۰۵۰) و دوره‌ی مشاهداتی (۱۹۹۶-۲۰۱۰)

Figure 5: Seasonal droughts of Borujerd station for the period (2050-2040) and observation period (2010-1996)

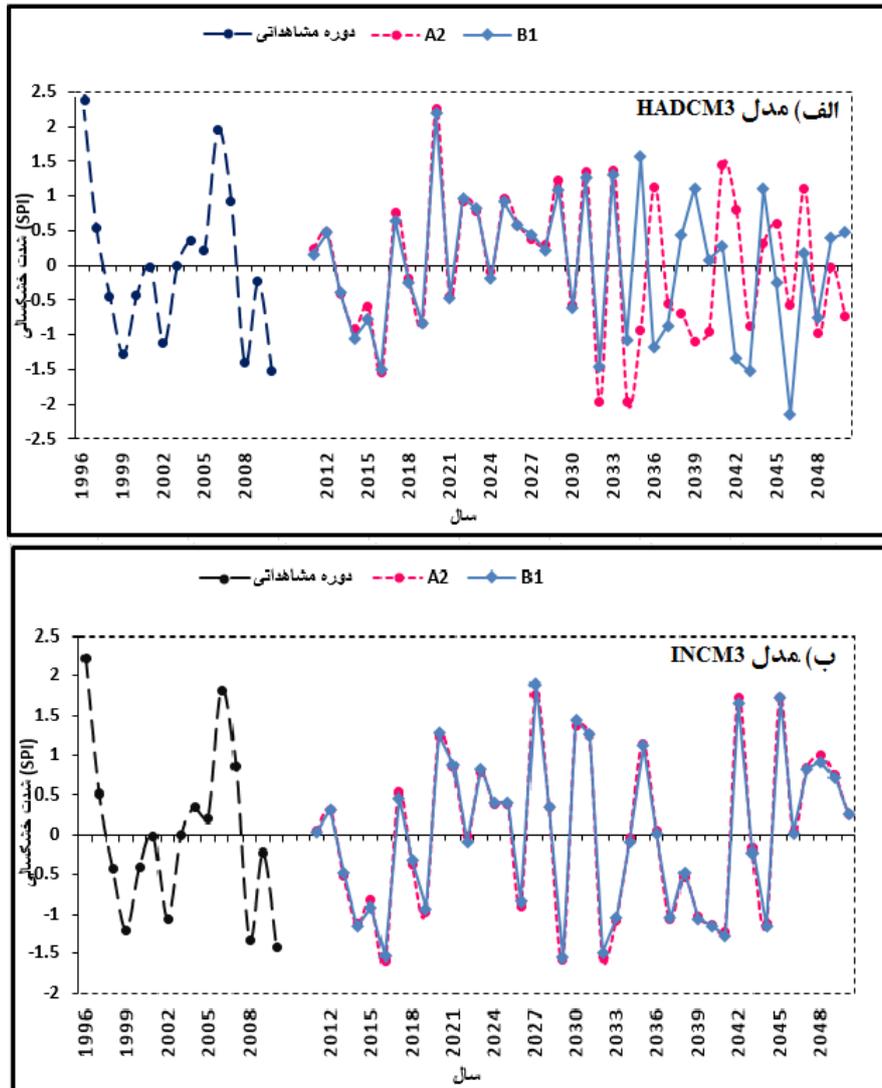


شکل ۶: خشکسالی‌های سالانه ایستگاه الیگودرز برای دوره‌ی (۲۰۴۰-۲۰۵۰) و دوره‌ی مشاهداتی (۱۹۹۶-۲۰۱۰)

Figure 6: Annual droughts of Aliguderz station for the period (2050-2040) and observation period (2010-1996)

شکل (۷-الف) خشکسالی‌های سالانه ایستگاه خرم‌آباد خروجی مدل HADCM3 تحت سناریوی A2 و B1 برای دوره‌ی (۲۰۴۰-۲۰۵۰) و دوره‌ی مشاهداتی (۱۹۹۶-۲۰۱۰) را نشان می‌دهد. آن‌گونه که دیده می‌شود تحت سناریوی A2 و B1 این مدل از سال ۲۰۱۱ تا ۲۰۳۱ تقریباً بر هم منطبق می‌باشند و از سال ۲۰۳۲ تا پایان دوره نوسانات شدیدی رخ داده که خشکسالی و ترسالی‌های شدید در نمودار قابل مشاهده می‌باشد. در نمودار فوق سناریوی A2 ۲ خشکسالی شدید و ۲ خشکسالی متوسط و سناریوی B1 ۵ خشکسالی متوسط، ۲ خشکسالی شدید و یک خشکسالی فرین می‌باشد. شکل (۷-ب) خشکسالی‌های سالانه ایستگاه خرم‌آباد خروجی مدل INCM3 تحت سناریوی A2 و B1 برای دوره‌ی (۲۰۴۰-۲۰۵۰) و دوره‌ی مشاهداتی (۱۹۹۶-۲۰۱۰) را نشان می‌دهد. آن‌گونه که دیده می‌شود هر دو سناریوی این مدل پیش‌بینی تقریباً یکسانی را برای خشکسالی ایستگاه خرم‌آباد نشان می‌دهند به طوری که در این مدل ۳ خشکسالی شدید و ۶ خشکسالی متوسط

قابل مشاهده می‌باشد.

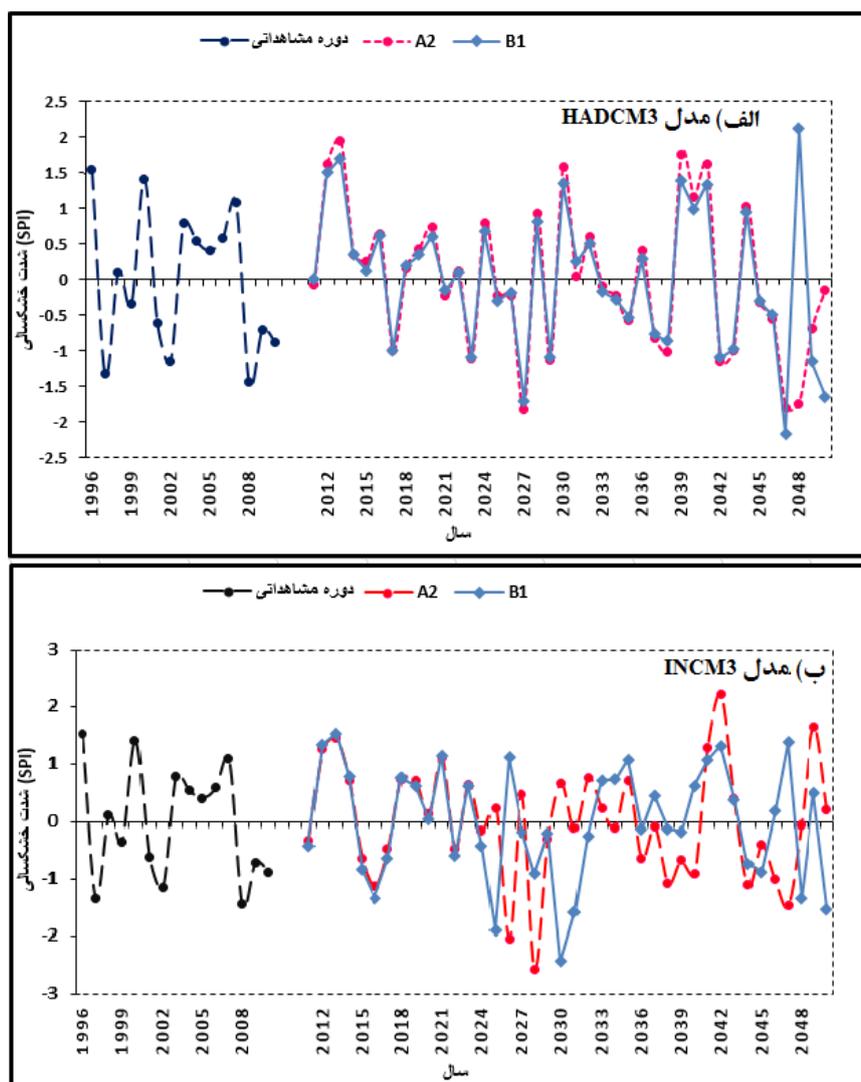


شکل ۷: خشکسالی‌های سالانه ایستگاه خرم‌آباد برای دوره‌ی (۲۰۴۰-۲۰۵۰) و دوره‌ی مشاهداتی (۱۹۹۶-۲۰۱۰)

Figure 7: Annual droughts of Khorramabad station for the period (2050-2040) and observation period (2010-1996)

شکل (۸-الف) خشکسالی‌های سالانه ایستگاه بروجرد خروجی مدل HADCM3 تحت سناریوی A2 و B1 برای دوره‌ی (۲۰۴۰-۲۰۵۰) و دوره‌ی مشاهداتی (۱۹۹۶-۲۰۱۰) را نشان می‌دهد. چنانچه در شکل دیده می‌شود در سناریوی A2، ۶ خشکسالی متوسط و ۳ خشکسالی شدید و سناریوی B1، ۵ خشکسالی متوسط و ۲ خشکسالی شدید و یک ترسالی فرین با شدت  $+2/11$  و یک خشکسالی فرین با شدت  $-2/17$  قابل مشاهده می‌باشد. نکته‌ی قابل توجه در این نمودار مربوط به سال ۲۰۴۸ می‌باشد که A2 برای این سال خشکسالی شدید و سناریوی B1 ترسالی فرین را پیش‌بینی نموده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در این مدل ترسالی‌ها و خشکسالی‌هایی با تداوم ۲ تا ۳ سال مشاهده می‌شود.

قسمت (ب) شکل (۸) خشکسالی‌های سالانه ایستگاه بروجرد خروجی مدل INCM3 تحت سناریوی A2 و B1 برای دوره‌ی (۲۰۴۰-۲۰۵۰) و دوره‌ی مشاهداتی (۱۹۹۶-۲۰۱۰) را نشان می‌دهد. سناریوی A2 در این مدل ۲ خشکسالی متوسط و ۳ خشکسالی متوسط و یک خشکسالی فرین را برای این دوره پیش‌بینی می‌کند و سناریوی B1 ۳ خشکسالی متوسط و ۲ خشکسالی فرین را نشان می‌دهد. نکته قابل توجه در این نمودار این است که شدت خشکسالی در بعضی سال‌ها در پیش‌بینی سناریوی A2 و B1 متفاوت است، مثلاً شدت خشکسالی سال ۲۰۲۸ در سناریوی A2،  $-۲/۵۶$  می‌باشد که یک خشکسالی فرین می‌باشد در حالی که سناریوی B1  $-۰/۹۱$  می‌باشد که تقریباً نرمال است.



شکل ۸: خشکسالی‌های سالانه ایستگاه بروجرد برای دوره‌ی (۲۰۴۰-۲۰۵۰) و دوره‌ی مشاهداتی (۱۹۹۶-۲۰۱۰)

**Figure 8: Annual droughts of Borujerd station for the period (2040-2050) and observation period (1996-2010).**

بررسی روند خطی خشکسالی به روش رگرسیون ساده

ساده‌ترین روابط میان متغیرها رابطه خطی است. بدین جهت در این قسمت از پژوهش به منظور دستیابی به

رفتار سری‌زمانی نسبت به زمان روش پرکاربرد رگرسیون ساده را به کار گرفته‌ایم. ذکر این نکته ضروری است که نمایه SPI در حالت منفی بیانگر خشکسالی می‌باشد بدین جهت روند منفی آن به معنای تشدید خشکسالی و روند نزولی می‌باشد درحالی‌که روند مثبت آن به معنای تضعیف پدیده خشکسالی و روند صعودی می‌باشد. جدول (۳) نشان‌دهنده‌ی برازش مدل رگرسیون خطی بر سری‌های شدت خشکسالی ایستگاه‌های مورد مطالعه می‌باشد. همان‌طور که مشاهده می‌شود فصل زمستان در ایستگاه الیگودرز و بروجرد دارای روند منفی می‌باشد که حاکی از تشدید خشکسالی‌ها در دهه‌های آتی می‌باشد، اما ایستگاه خرم‌آباد روند مثبت و تضعیف خشکسالی‌ها را نشان می‌دهد. فصل بهار در هر سه ایستگاه مورد مطالعه بجز مدل INCM3 دارای روند مثبت می‌باشد که ایستگاه الیگودرز و خرم‌آباد به ترتیب مدل HADCM3 تحت سناریوی A2 و مدل INCM3 تحت سناریوی A2 و B1 دارای روند معنی‌دار می‌باشند. خشکسالی‌های فصل تابستان خروجی مدل HADCM3 در هر سه ایستگاه تضعیف خواهند شد. خشکسالی‌های فصل پاییز روند منفی خواهند داشت که نشان از تشدید خشکسالی‌ها در این فصل می‌باشد.

جدول ۳- شیب خط روند خشکسالی‌ها بر حسب زمان در ایستگاه‌های مورد مطالعه

Table 3- Slope of the trend line of droughts in terms of time in the studied stations

ایستگاه	فصل	مدل HADCM3		مدل INCM3	
		B1	A2	B1	A2
الیگودرز	زمستان	-۰/۰۰۹	-۰/۰۰۴	۰/۰۰۰	-۰/۰۰۲
	بهار	۰/۰۸۱	۰/۰۰۷	۰/۰۱۳	۰/۰۱۳
	تابستان	۰/۰۱۳	۰/۰۲۱	-۰/۰۰۱	-۰/۰۰۳
	پاییز	-۰/۰۲۶	-۰/۰۱۶	-۰/۰۰۱	-۰/۰۰۲
	سالانه	-۰/۰۱۳	-۰/۰۲۳	۰/۰۰۱	-۰/۰۰۲
خرم‌آباد	زمستان	۰/۰۰۷	۰/۰۰۳	۰/۰۰۸	۰/۰۰۹
	بهار	۰/۰۲۰	۰/۰۰۴	۰/۰۲۷	۰/۰۲۸
	تابستان	۰/۰۲۰	۰/۰۰۱	**	**
	پاییز	-۰/۰۰۱۶	-۰/۰۰۹	۰/۰۰۶	۰/۰۰۷

۰/۰۱۲	۰/۰۱۳	-۰/۰۰۶	-۰/۰۰۶	سالانه	برورد
-۰/۰۰۱	۰/۰۰۸	-۰/۰۲۹	-۰/۰۳۲	زمستان	
		**	**		
-۰/۰۰۵	-۰/۰۰۷	۰/۰۱۶	۰/۰۱۶	بهار	
۰/۰۰۱	۰/۰۰۲	۰/۰۲۳	۰/۰۳۰	تابستان	
			**		
-۰/۰۰۷	-۰/۰۱۰	-۰/۰۰۵	-۰/۰۰۹	پاییز	
-۰/۰۰۵	-۰/۰۰۸	-۰/۰۲۲	-۰/۰۲۷	سالانه	

\*\*معنی داری آماری روند در سطح معنی داری ۰/۰۵

### نتیجه گیری

خشکسالی به عنوان یک بحران محیطی با اینکه از دیرباز توسط بشر شناخته شده بوده است و از قرن‌ها پیش به مبارزه با آن پرداخته شده است، امروزه نمود بیشتری دارد. افزایش جمعیت و نیاز روزافزون بشر به برنامه‌ریزی در استفاده از منابع آب و غذا، نیازمند مدیریتی قوی، هدفمند و از روی شناخت می‌باشد. مدیریتی که از پی‌شناختی انجام گیرد قطعاً نتایج مطلوب‌تری خواهد داشت. شناخت عوامل محلی و خارجی مؤثر بر یک پدیده آن هم از نوع چالش برانگیز آن ضروری می‌باشد. در این تحقیق با استفاده از خروجی مدل‌های گردش عمومی جو (HADCM3, INCM3) تحت سناریوی A2 و B1 به پیش‌بینی عناصر اقلیمی شامل عناصر اقلیمی بارش (میلیمتر)، تابش (مگاژول بر متر مربع در روز)، دماهای بیشینه و کمینه روزانه (درجه سلسیوس) در مقیاس روزانه برای ایستگاه‌های الیگودرز، بروجرد و خرم‌آباد طی دوره‌ی آماری (۲۰۱۱-۲۰۵۰) میلادی پرداخته شد. از نقاط ضعف مدل‌های گردش عمومی جو، بزرگ مقیاس بودن مکانی آن‌هاست که برای رفع این نقیصه از روش‌های ریزمقیاس‌نمایی استفاده می‌شود. داده‌های فوق با استفاده از مدل آماری LARS-WG ریزمقیاس‌نمایی شدند. تجزیه و تحلیل نتایج خروجی مدل آماری LARS-WG در مرحله صحت‌سنجی با استفاده از نمودارهای مقایسه‌ای و همچنین همبستگی پیرسون بین داده‌های مدلسازی شده در دوره‌ی پایه در سطح ۰/۰۵ و ۰/۰۱ قابل قبول می‌باشد.

در این تحقیق به منظور بررسی خشکسالی منطقه‌ی مورد مطالعه شاخص استاندارد (SPI) مورد استفاده قرار گرفت. بررسی وضعیت فصلی خشکسالی منطقه در دوره‌ی ۲۰۱۱-۲۰۵۰ میلادی تحت دو سناریوی A2 و B1 مدل HADCM3 و مقایسه آن با وضعیت خشکسالی منطقه در دوره‌ی مشاهداتی نشان از ایجاد تغییرات در نوسانات سال‌های خشک و تر منطقه دارد. همان‌طور که از نمودارهای ترسیم شده استنباط می‌شود، افزایش تعداد فصول و سال‌های همراه با خشکسالی ضعیف و متوسط در هر سه ایستگاه طی دوره‌ی

۲۰۵۰-۲۰۱۱) میلادی نسبت به دوره‌ی مشاهداتی محتمل می‌باشد. نکته‌ی قابل توجه در بررسی‌های به‌عمل آمده حاکی از وجود خشکسالی‌های شدید و بسیارشدید در آینده می‌باشد که در دوره‌ی مشاهداتی به ندرت و خیلی کم مشاهده شده است. تعداد دوره‌های دارای خشکسالی در فصل زمستان بر تعداد دوره‌های دارای ترسالی در این فصل در ایستگاه خرم‌آباد غالب می‌باشد این در حالی است که در فصل پاییز تعداد دوره‌های خشک کمتر از دوره‌های تر می‌باشد. این تفاوت در حال ایجاد بر مبنای شبیه‌سازی صورت گرفته می‌تواند به نوعی دال بر تغییر در رژیم بارش این ایستگاه باشد. در ایستگاه بروجرد در فصل بهار ترسالی‌های شدید کمتر اما ترسالی‌های ضعیف نسبتاً بیش از دوره مشاهداتی بوده است در حالی که در فصل پاییز این ایستگاه ترسالی‌های شدید بیشتر و ترسالی‌های ضعیف کمتر مشاهده شده است در فصل زمستان ترسالی‌های متوسط در دوره پیش‌بینی بیشتر شده است. این نتایج مؤید نتایج (Dargahian et al 2015) می‌باشد. در ایستگاه الیگودرز در فصول پاییز و زمستان ترسالی‌ها فراوانی بیشتری از خشکسالی‌ها در دوره پیش‌بینی شده داشته است. به منظور دستیابی به رفتار سری‌زمانی شدت خشکسالی نسبت به زمان روش پرکاربرد رگرسیون ساده بکار گرفته شد. که نتایج بدست آمده حاکی از تشدید خشکسالی‌ها در فصل زمستان طی دهه‌های آتی در ایستگاه الیگودرز و بروجرد و تضعیف خشکسالی‌ها در ایستگاه خرم‌آباد می‌باشد. فصل بهار در هر سه ایستگاه مورد مطالعه بجز مدل INCM3 تضعیف خشکسالی را نشان می‌دهد که ایستگاه الیگودرز و خرم‌آباد به ترتیب مدل HADCM3 تحت سناریوی A2 و مدل INCM3 تحت سناریوی A2 و B1 دارای روند معنی‌دار می‌باشند. همچنین خشکسالی‌های فصل تابستان خروجی مدل HADCM3 در هر سه ایستگاه تضعیف خواهند شد. خشکسالی‌های فصل پاییز نیز طی سال‌های آینده تشدید خواهند شد.

غلبه فراوانی دوره‌های خشکسالی در فصل زمستان بر تعداد دوره‌های ترسالی در این فصل در ایستگاه خرم‌آباد در مقابل تعارض موجود در فصل پاییز که کاهش فراوانی دوره‌های خشک را نسبت به دوره‌های تر نشان می‌دهد، می‌تواند حاکی از تغییر رژیم بارشی این ایستگاه در آینده باشد. این نتایج با نتایج (Karimi and Heidari 2023) و همچنین (Daneshmand and Mahmoudi 2017) همسو و هم‌راستا می‌باشد. تشدید خشکسالی‌ها در فصل زمستان طی دهه‌های آتی در ایستگاه الیگودرز و بروجرد نیز قابل توجه است. این تغییرات زمانی اهمیتی وافر برای توجه بیشتر می‌یابند که بدانیم پیشران اصلی اقتصاد در استان لرستان کشاورزی است. کشاورزی که بخش اعظم آن دیم بوده و در ارتباط مستقیم با بارش قرار دارد یا اینکه در غالب کشت آبی متکی به آبیاری است که اساس آن تغذیه آب‌های زیرزمینی و دریاچه‌های مصنوعی (سدها) در فصول بارشی در هر سال آبی می‌باشد. برنامه‌ریزی به منظور بهره‌برداری بهتر در این زمینه بایستی با توجه به وضعیت اقلیمی منطقه باشد، مسئولان این بخش بایستی ضمن اطلاع از تغییرات اقلیمی حاکم بر استان با اتخاذ ظرفیت تطبیقی به مدیریتی سازگار با آن برسند تا بتوانند گامی مهم در حفظ امنیت غذایی استان و کشور، بردارند.

## References

- Abbasi, F., Malbousi, Sh., Babaian, I., Athamari, M., & Burhani, R. (2009). "Forecasting the climatic changes of South Khorasan in the period of 2010-2039 using the statistical downscaling output of the ECHO-G model". *Water and Soil*, 24(2), 218-233. Doi: 10.22067/jsw.v0i0.3218. [in Persian].
- Alizadeh, A. (2008). "**Principles of Applied Hydrology**", Mashhad: Astan Quds Razavi Publications. [in Persian].
- Asakereh, H. (2011). **Basics of Statistical Climatology**. Zanjan: Zanjan University Publications, 545p. [in Persian].
- Azareh, A., Rafiei Sardooi, E., & Jafari Gadaneh, M. (2022). "Investigating the effect of climate change on future temperature, precipitation, and droughts using BNU-ESM and HadGEM2 models". *Desert Ecosystem Engineering*, 10(31), 95-110. doi: 10.22052/deej.2021.10.31.51.
- Babaeian, E., nagafineik, Z., zabolabasi, F., habeibei, M., adab, H., & malbisei, S. (2009). "Climate change assessment over Iran during 2010-2039 by using statistical downscaling of ECHO- G model". *Geography and Development*, 7(16), 135-152. doi: 10.22111/gdij.2009.1179. [in Persian].
- Beguería, S., Vicente-Serrano, S. M., & Angulo-Martínez, M. (2010). "A multiscalar global drought dataset: the SPEIbase: a new gridded product for the analysis of drought variability and impacts". *Bulletin of the American Meteorological Society*, 91(10), 1351-1354.
- Benistona, M., & Stephensonb, DB. (2004). "Extreme climatic events and their evolution under changing climatic conditions". *Global and Planetary Change*, 44, 1 –9.
- Boroughani, M., Fahiminejad, E., & Pazhouhan, I. (2022). "Predicting drought impact on the Caspian Sea coast affected by climate change". *Environmental Sciences*, 20(2), 99-116. doi: 10.52547/envs.2022.1038.
- Burke, E.J., & Brown, S.J. (2008). "Evaluating uncertainties in the projection of future drought". *Journal of Hydrometeorology*, 9(2), 292-299.
- Chen, H., Guo, J., Zhang, Z., & Xu, C. Y. (2013). "Prediction of temperature and precipitation in Sudan and South Sudan by using LARS-WG in future". *Theoretical and applied climatology*, 113, 363-375.
- Daneshmand, H., & Mahmoudi, P. (2017). Estimation and assessment of temporal stability of periodicities of droughts in Iran. *Water Resources Management*, 31(11), 3413-3426.
- Dargahian, F., Parvaneh, B., & Shiravand, H. (2015). "Predict The drought situation in the province of lorestan during the Years of 2013-2030 Using Down-scaling output of 4 general circulation model". *Territory*, 45, 1-14. [in Persian].
- Dubrovsky, M., Svoboda, M. D., Trnka, M., Hayes, M. J., Wilhite, D. A., & Zalud Z. (2009). "Application of relative drought indices in assessing climate-change impacts on drought conditions". *Theoretical Applied Climatology*, 96, 155–171.
- Fallah Zolleh, S., Ildoromi, A., & Nouri, H. (2021). "Predicting the effect f climate change on drought indices (SPI) and (SDI) in Malayer watershed using ARIMA time series model". *Geography and Planning*, 77, 205-218. doi: 10.22034/gp.2021.42464.2726
- Fattahi, E., Habibi, M., & kouhi, M. (2015). "Climate change impact on drought intensity and duration in West of Iran". *Earth Science & Climatic Change*, 6, 1-9.

- Hojam, S., Khoshkho, Y., & Shamsuddin, V.R. (2007). "Annual and seasonal precipitation trend analysis of some selective meteorological stations in central region of Iran using non-parametric methods". *Physical Geography Research Quarterly*, 64, 157-168. SID. <https://sid.ir/paper/5428/fa>. [in Persian].
- Haqtab, N., Godarzi, M., Habibi Nokhandan, M., Yaori, A., & Jafari, H. (2012). "Modeling the climate of Tehran and Mazandaran provinces using the LARS-WG climate model and comparing its changes in the northern and southern fronts of Central Alborz". *Environmental Science and Technology*, 15,37-49. SID. <https://sid.ir/paper/401332/fa>. [in Persian].
- IPCC, (2007). "Climate Change 2007: The physical science basis: Summary for policymakers". Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the IPCC. <http://www.ipcc.ch/>.
- Jansen, E., Overpeck, J., Briffa, K. R., Duplessy, J. C., Joos, F., Masson-Delmotte, V., & Zhang, D. (2007). **The Physical Science Basis**, Cambridge: Cambridge University Press.
- Kaboosi, K., & Kordjazi, M. (2017). "The effect of climate change on meteorological parameters and drought in Golestan province". *Iran-Water Resources Research*, 13(3), 205-213.
- Karimi, M., & Heidari, S. (2023). Variability and trend of changes in the severity-area of drought and wet in Iran. *Journal of Natural Environmental Hazards*, 36, 129-150. [in Persian].
- Kazemi Rad, L., Mohammadi, H., & Teyfo, V. (2015). Impacts of climate change on droughts in Gilan province, Iran. *Ecologia Balkanica*, 7(1),29-38.
- Khazanedari, L., Abasi, F., Ghandhari, S., Kouhi, M., & Malbousi, S. (2009). Drought conditions in the next thirty years in Iran. *Journal of Geography and Regional Development*, 9(3),23-43. [ In Persian].
- Koster, R. D., & Suarez, M. J. (2001). "Soil moisture memory in climate models". *Journal of hydrometeorology*, 6(2), 558-570.
- Loukas, A., & Vasiliades, L. (2008). Climate change effects on drought severity. *Adv Geosci*,23,17-29.
- Moafi madani, S. F., Mousavi baygi, M., & Ansari, H. (2012). "Prediction of drought in the Khorasan Razavi province during 2011-2030 by using statistical downscaling of HADCM3 model output". *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 3(1), 21-38. doi: 10.22067/geo.v1i3.20262. [in Persian].
- Nasiri, B., & yarmoradi, Z. (2017). "Predicting the climatic parameters changes of Lorestan province in the next 50 years using the HADCM3 model". *Scientific- Research Quarterly of Geographical Data (SEPEHR)*, 101, 143-154. doi: 10.22131/sepehr.2017.25733. [in Persian].
- Orlowsky, B., & Seneviratne, S.I. (2011). "Global changes in extremes events: Regional and seasonal dimension". *Climatic Change*, 110, 669-696. doi:10.1007/s10584-011-0122-9.
- Osman, Y., Al-Ansari, N., Abdellatif, M., Aljawad, S., & Knutsson, S. (2014). "Expected future precipitation in central". *Scientific Research*,6, 948-959.
- Saidi Shahabadi, A. (2009). "Investigating the effect of climate change on the water resources of the Karkheh watershed", master's thesis, Tehran University: Faculty of Geography, Department of Natural Geography. [in Persian].
- Saleh Nia, N. (2010). "Drought forecasting using the output of atmospheric general circulation models and statistical downscaling methods (case study: Neishabour basin)", master's thesism. Ferdowsi University Mashhad: Faculty of Agriculture, Department

- of Water Science and Engineering. [in Persian].
- Semenov, M.A., & Barrow E.M. (1997). "Use of a stochastic weather generator in the development of climate change scenarios". *Clim Change* 35, 397–414.
  - Seneviratne, S.I., Corti, T., Davin, E.L., Hirschi, M., Jaeger, E., Lehner, I., Orlowsky, B., & Teuling, A.J. (2010). "Investigating soil moisture-climate interactions in a changing climate: A review". *Earth Science Reviews*, 99(3-4), 125-161.
  - Shamsipour, A. (2013), "**Climate Modeling (Theory and Method)**", Tehran: University of Tehran pub. 307p. [in Persian].
  - Sheffield, J., & Wood, E. F. (2008). "Global trends and variability in soil moisture and drought characteristics, 1950–2000, from observation-driven simulations of the terrestrial hydrologic cycle". *Journal of Climate*, 21(3), 432-458.
  - Trenberth, K. E., Jones, P.D., Ambenje, P., Bojariu, R., Easterling, D., Klein Tank, A., & Zhai, P. (2007). "**Observations. Surface and atmospheric climate change**". Cambridge: Cambridge University Press.
  - Yazdani, V., Zare Abianeh, H., & Shadmani, M. (2011). "Analysis of the frequency and zoning of droughts in Iran using the standardized precipitation index". *Scientific Quarterly of Water Resources Engineering*, 8(4), 31-43. [in Persian].
  - Zulkarnain, h., Shamsudin, S., & Harun, S. (2013). "Application of SDSM and LARS-WG for simulating". *Theor Appl Climatol*, 116, 243–257.

## Forecasting the temporal changes of meteorological drought in Lorestan province using climate models

- 1 Mostafa Karam pour, Faculty of Geographical Sciences, Lorestan University, Khorramabad, Iran.
2. Samira Beyranvand. M.s Student of Climatology, Faculty of Geographical Sciences, Lorestan University, Khorramabad, Iran.
3. Massoud Goodarzi, Department of Climate Change and Drought, Tehran, Iran.
4. Azar Beyranvand\*, Department of Physical Geography, University of Tehran, Tehran, Iran.  
[beyranvandazar@ut.ac.ir](mailto:beyranvandazar@ut.ac.ir)

### Abstract

The occurrence of climatic extremes such as heat waves, heavy rains and droughts cause significant damage to human societies. Analyzing the change in the frequency of these phenomena and examining the trend and intensity of the observed events and the predicted events can help significantly in planning to manage and adapt to these events. In the current research, the effects of climate change on the drought situation of Lorestan province have been evaluated using the Standardized Precipitation Drought Index (SPI) and then the trend of this index was investigated.

The results obtained from the study of the drought trend indicate the intensification of droughts in the winter season during the coming decades in Aliguderz and Borujerd stations and the weakening of droughts in Khorramabad station. The spring season shows a weakening of the drought in all three studied stations except the INCM3 model, where Aliguderz and Khorramabad stations have significant trends under the HADCM3 model under scenario A2 and the INCM3 model under scenario A2 and B1, respectively.

**Keywords:** Climate change, precipitation, prediction of climate parameters, LORESTAN, Downscaling

### Introduction

The doubling of the frequency of drought events in the world's arid regions since 1970 and the high variability of the intensity, frequency, and duration of droughts on a regional scale, and even sometimes a regional increase in the frequency of droughts, have made it increasingly inevitable to study past events and predict future events of this climatic phenomenon. The use of models to generate random data dates back to the late twentieth century. In the meantime, the use of the Lars-WG model to simulate data is seen in extensive studies worldwide. On the other hand, a comprehensive understanding of the spatial characteristics of drought in order to reduce the effects of this climatic hazard and adapt to it is of great importance and has made this issue one of the important topics of global climate change. If the drought event is prolonged in time and space, it will cause harmful and sometimes heavy losses. In some cases, it is not less than the losses caused by destructive floods. The aim of the present study is to investigate the drought situation in the east of Lorestan province for the period from 2011 to 2050 using the INCM3 and HADCM3 models. In this regard, the main question of this research that led to its formation is: What will be the situation of seasonal and annual droughts in Lorestan province by the time horizon of 2050?

## Materials and Methods

In the present study, daily data of climate parameters of precipitation, radiation, and maximum and minimum temperatures for three synoptic stations of Lorestan province including Khorramabad, Borujerd, and Aligudarz were used over a 15-year period (1996-2010). In the next step, by referring to the Canadian website of the Center for Climate Information and Scenarios, monthly data of climate parameters required for the validation of models that are common to the models in the LARS-WG model were obtained. Then, the common period between the model data and the observation period was selected, and the model validation was performed using the weighted average method. Next, the downscaling process was carried out by running the LARS-WG 5 model on the results of the general circulation models selected above, and the above models were run for the future of the region for the period 2011-2030 and their outputs were analyzed. To analyze the drought situation in this study, the SPI index was used.

## Results and Discussion

An increase in the number of seasons and years with weak and moderate droughts is likely in all three stations during the period (2011-2050) compared to the observation period. A notable point in the studies conducted indicates the existence of severe and very severe droughts in the future, which have been observed rarely and very rarely in the observation period. The number of drought periods in the winter season dominates the number of wet periods in this season at the Khorramabad station, while in the autumn season the number of dry periods is less than wet periods. This difference is being created based on the simulation carried out and can be an indication of a change in the precipitation regime of this station. At Borujerd station, there were fewer severe wet spells in the spring, but relatively weaker wet spells than during the observation period, while in the autumn season, this station observed more severe wet spells and fewer weak wet spells. In the winter season, moderate wet spells increased during the forecast period. At Aligudarz station, wet spells were more frequent than droughts during the autumn and winter seasons in the forecast period. In order to obtain the time series behavior of drought severity over time, the widely used simple regression method was used. The results obtained indicate an intensification of droughts in the winter season during the coming decades at Aligudarz and Borujerd stations and a weakening of droughts at Khorramabad station. The spring season shows a weakening of drought in all three stations studied, except for the INCM3 model, which has a significant trend in Aligudarz and Khorramabad stations, respectively, under the HADCM3 model under scenario A2 and the INCM3 model under scenarios A2 and B1. Also, the summer droughts output by the HADCM3 model will be weakened in all three stations. The autumn droughts will also intensify in the coming years.

## Conclusion

The dominance of the frequency of drought periods in the winter season over the number of wet periods in this season at the Khorramabad station, in contrast to the conflict in the autumn season, which shows a decrease in the frequency of dry periods compared to wet periods, may indicate a change in the precipitation regime of this station in the future. These results are consistent with the results of Karimi and Heidari (2023) and also Daneshmand and Mahmoudi (2017). The intensification of droughts in the winter season over the coming decades is also noticeable in Aligudarz and Borujerd stations. These changes are of great importance for further attention when we know that the main

driver of the economy in Lorestan province is agriculture. Agriculture, most of which is rain-fed and is directly related to rainfall, or mostly irrigated cultivation, which is based on the feeding of groundwater and artificial lakes (dams) during the rainy seasons in each year.

Planning for better exploitation in this field should be based on the climatic conditions of the region, and the officials of this sector should be aware of the climatic changes prevailing in the province and adaptive capacity strategy to achieve a management compatible with it so that they can take an important step in maintaining the food security of the province and the country.