

## مطالعات جغرافیایی مناطق خشک

دوره هفتم، شماره‌ی بیستم و ششم، زمستان ۱۳۹۵

دریافت مقاله: ۹۵/۰۶/۰۶ تأیید نهایی: ۹۵/۱۰/۱۱

صص ۱۱۱-۱۲۴

### ارزیابی خشک‌سالی و تغییر اقلیم در دوره‌ی آبی با استفاده از مدل‌های گردش عمومی جو (مطالعه‌ی موردی: حوضه‌ی آبخیز گرگان رود-قره‌سو - ایران)

علیرضا ایلدرمی\*، دانشیار مرتع و آبخیزداری - دانشگاه ملایر

حمید نوری، استادیار مرتع و آبخیزداری - دانشگاه ملایر

مهناز کرمی، دانشجوی کارشناسی ارشد آبخیزداری - دانشگاه ملایر

#### چکیده

پیامدهای ناشی از تغییر اقلیم، به‌ویژه در اثر افزایش گازهای گلخانه‌ای طی سال‌های اخیر مشکلات زیادی را همراه داشته که به‌صورت مستقیم یا غیرمستقیم بخش‌های مختلف جامعه را تحت تأثیر قرار داده است. یکی از مهم‌ترین این پیامدها افزایش وقوع بلایای جوی- اقلیمی نظیر سیل، خشک‌سالی، چرخندهای حاره‌ای، بالا آمدن سطح آب دریا، توفان گردوغبار و ... است که شایع‌ترین آن‌ها در ایران وقوع سیل و خشک‌سالی است. در این مطالعه، سعی شده با استفاده از خروجی‌های مدل‌های GCM (دو مدل hadCM3 و ECHAM4) و ریزگردانی آن‌ها به کمک مدل آماری LARS-WG، داده‌های بارش برای دوره‌ی آبی و به مدت ۲۰ سال طی دوره‌ی 2030 - 2011 تولید گردد. سپس با استفاده از این داده‌ها، وضعیت خشک‌سالی حوضه‌ی آبخیز گرگان‌رود- قره‌سو به کمک شاخص‌های خشک‌سالی (ZSI, PN, SPI) طی این دوره مورد بررسی و ارزیابی قرار گیرد. هم‌چنین خشک‌سالی‌های دوره‌ی پایه به مدت ۲۰ سال (1989-2008) با استفاده از شاخص‌های مذکور ارزیابی و فراوانی خشک‌سالی‌ها و شدت آن‌ها با دوره‌ی آبی مقایسه شود. نتایج حاصل از این پژوهش، ضمن تأیید هم‌خوانی این شاخص‌ها جهت بررسی وضعیت خشک‌سالی، نشان‌دهنده‌ی آن است که طی سال‌های آینده شرایط خشک‌سالی دارای افزایش نسبی، نسبت به دوره‌ی پایه است که این مسئله، وقوع تغییر اقلیم در منطقه را تأیید می‌کند؛ از طرفی الگوی زمانی بارندگی تغییر یافته و با کاهش بارندگی‌ها در فصل زمستان می‌تواند مشکلاتی را در دوره‌های آبی کم‌آبی و کاهش ذخیره‌ی آب و تشدید خشک‌سالی را به وجود آورد.

**واژگان کلیدی:** مدل‌های گردش عمومی جو، ریزگردانی، مدل LARS-WG، خشک‌سالی اقلیمی، شاخص‌های خشک‌سالی، حوضه‌ی گرگان‌رود- قره‌سو.

\* Email: ildoromi@malayeru.ac.ir

## ۱- مقدمه

تغییر اقلیم تأثیر به‌سزایی بر چرخه‌ی هیدرولوژیکی و در نتیجه بر منابع آب، فراوانی و شدت خشک‌سالی و سیل دارد. معتبرترین ابزار موجود برای شبیه‌سازی اقلیمی آینده، استفاده از خروجی الگوهای جفت‌شده‌ی جو - اقیانوس گردش عمومی جو است (شاگرمی و مساح بوانی، ۲۰۰۶). ریزمقیاس‌نمایی داده‌های حاصل از مدل‌های GCM معمولاً به دو روش آماری و دینامیکی صورت می‌گیرد (بابائیان و نجفی نیک، ۲۰۰۵: ۱۹). مدل ریزمقیاس‌نمایی<sup>۱</sup> که یک روش آماری ریزمقیاس‌نمایی بوده و از توزیع‌های نیمه‌ی تجربی برای شبیه‌سازی و ریزمقیاس‌نمایی استفاده می‌کند و می‌تواند پارامترهای آتی اقلیمی را در سطح ایستگاه تولید نماید. یکی از مهم‌ترین و سودمندترین کاربردهای این داده‌ها، استفاده از آن‌ها جهت پیش و ارزیابی خشک‌سالی‌های آتی است. به‌عنوان مثال صمدی نقاب (۱۳۸۵) داده‌های بارش حاصل از سناریوی IS92a و الگوی GCM مرکز CISRO (IS92a) استرالیا را به روش رگرسیون یک‌متغیره و پارامترهای بدون بُعد، ریزگردانی کرد. نتایج وی نشان داد که با استفاده از این روش می‌توان از این شاخص که تاکنون تنها جهت پیش خشک‌سالی در گذشته استفاده شده است، به‌عنوان ابزاری جهت پیش‌بینی‌های آینده استفاده کرد. Benkinso و Fowler با استفاده از مدل‌های گردش عمومی جو به بررسی خشک‌سالی‌های سال‌های آتی در انگلستان پرداختند. نتایج مطالعه‌ی ایشان حاکی از کاهش شدت و تداوم خشک‌سالی‌ها بوده است (Blenkinson and Fowler, 2007: 71). دابروسکی و همکاران (۲۰۰۹) کاربرد شاخص‌های خشک‌سالی SPI و PSDI را در ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر خشک‌سالی موردبررسی و مطالعه قرار دادند. آن‌ها در این مطالعه از ۵ مدل گردش عمومی جو GFDL-HADCM3، CCSR/NIES، CSIRO.CGCM2، R30 و سناریوی انتشار A<sub>2</sub> برای پیش‌بینی تغییرات اقلیمی در تمامی مدل‌ها بارش در زمستان کاهش و در بهار و تابستان افزایش خواهد یافت که این موجب افزایش ریسک خشک‌سالی در دوره‌ی مورد مطالعه در آینده خواهد شد. این افزایش، تحت سناریوی A<sub>2</sub> به دلیل بیش‌ترین افزایش در میزان غلظت دی‌اکسید کربن بالاتر از سایر سناریوها خواهد بود. آن‌ها همچنین نشان دادند که شاخص SPI یک‌ماهه، بالاترین همبستگی را با تغییر فصلی بارش و شاخص SPI دوازده‌ماهه، بیش‌ترین همبستگی را با تغییر در میانگین بارش سالانه و شاخص PDSI دارد. آن‌ها به دلیل تغییر دما، علاوه بر بارش تحت شرایط تغییر اقلیم، شاخص PSDI را جهت پیش‌بینی و ارزیابی تأثیر تغییر اقلیم بر خشک‌سالی مناسب‌تر از SPI معرفی نمودند (Dubrovsky et al, 2009: 171). لوکاس و همکاران (۲۰۰۸) اثرات تغییر اقلیم را بر شدت خشک‌سالی در ناحیه‌ی تسالی یونان مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها از خروجی مدل CGCM و سناریوهای انتشار A<sub>2</sub> و B<sub>2</sub> برای پیش‌بینی تغییرات اقلیم و جهت بررسی روند خشک‌سالی از شاخص SPI برای دوره‌های ۲۰۲۰-۲۰۵۰ و ۲۰۷۰-۲۱۰۰ استفاده نمودند. نتایج آن‌ها نشان داد که شدت خشک‌سالی دارای روند افزایشی بوده و این افزایش تحت سناریوی A<sub>2</sub> بیش‌تر از سناریوی B<sub>2</sub> خواهد بود (Loukas et al, 2008: 29). در این مطالعه، سعی شده با استفاده از خروجی‌های مدل‌های GCM<sup>۲</sup> (دو مدل hadCM<sub>3</sub> و ECHAM<sub>4</sub>) و ریزگردانی آن‌ها به کمک مدل آماری LARS-WG، داده‌های بارش برای دوره‌ی آتی و به مدت ۲۰ سال طی دوره‌ی 2011 - 2030 تولید گردد. سپس با استفاده از این داده‌ها وضعیت خشک‌سالی حوضه‌ی آبخیز گرگان‌رود - قره‌سو به کمک شاخص‌های خشک‌سالی (SPI<sup>۳</sup>، PN<sup>۴</sup>، ZSI<sup>۵</sup>) طی این دوره موردبررسی و ارزیابی قرار گیرد. هم‌چنین خشک‌سالی‌های دوره‌ی پایه به مدت ۲۰ سال (1989- 2008) با استفاده از شاخص‌های مذکور ارزیابی و فراوانی خشک‌سالی‌ها و شدت آن‌ها با دوره‌ی آتی مقایسه گردید. در سال‌های اخیر مطالعات متعددی در زمینه‌ی تغییر اقلیم و خشک‌سالی در سراسر جهان صورت گرفته است که از آن جمله می‌توان به تحقیقات زیر اشاره کرد.

1. LARS- WG
- 2- Global Circulation Model
- 3- Standardized Precipitation Index
- 4- Percent of Normal Index
- 5- Z-Score Index

عباسی و همکاران (۱۳۸۹)؛ در این تحقیق، از داده‌های سناریوی A1 مدل گردش عمومی جو<sup>۶</sup> به ارزیابی تغییر اقلیم زاگرس با استفاده از مدل LARS-WG در دوره‌های ۲۰۱۰-۲۰۳۹ پرداختند و از داده‌های دمای کمینه - بیشینه - تابش و بارش مدل LARS-WG و داده‌های دیدبانی ۱۸ ایستگاه هم‌دید منطقه‌ی زاگرس استفاده شد. نتایج کلی برای دهه‌ی ۲۰۲۰ حاکی از کاهش بارش ۲٪، افزایش آستانه بارش‌های سنگین و خیلی سنگین و افزایش میانگین سالانه دما که بیش‌ترین افزایش دما مربوط به فصل زمستان است.

بابائیان و نجفی نیک (۱۳۸۹)؛ در این مطالعه، داده‌های روزانه الگوی گردش عمومی ECHO-G تحت سناریوی A1 در استان خراسان رضوی گرفته شده است که توسط مدل LARS-WG ریزگردانی شدند. نتایج این تحقیق حاکی از کاهش بارش در منطقه‌ی مورد مطالعه، افزایش آستانه‌ی بارش‌های سنگین و بسیار سنگین، بین ۴۵ تا ۶۰ درصد و هم‌چنین کاهش بارش‌های فصل سرد تا حدود ۱۳ درصد و جابه‌جایی آن در انتهای فصل سرد است. نتایج این تحقیق نشان‌دهنده‌ی افزایش حدود ۵۰ درصد بارش‌های تابستانه در این استان است.

خزانه‌داری و همکاران (۱۳۸۹)، روند خشک‌سالی در ایران را در دوره‌ی ۲۰۱۰-۲۰۳۹ بررسی نمودند. ایشان در تحقیقاتش از داده‌های ۴۳ ایستگاه سینوپتیک کشور در دوره‌ی پایه ۱۹۷۶-۲۰۰۵ و داده‌های سناریو A1 مدل گردش عمومی ECHO-G استفاده نموده و داده‌های اخیر را با استفاده از مدل LARS-WG ریزمقیاس نمودند. سپس به کمک این داده‌ها روند خشک‌سالی توسط دو شاخص دهک و استاندارد بارش در دوره‌ی مذکور را مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج حاصل، ضمن تأیید همخوانی این دو شاخص جهت بررسی روند خشک‌سالی نشان داد که طی ۳۰ سال آینده، شرایط خشک‌سالی در کشور رو به افزایش خواهد بود که این مسئله، وقوع تغییر اقلیم در منطقه را تأیید می‌کند و در اکثر نقاط کشور خشک‌سالی شدید حاکم بود.

واثقی و همکاران (۱۳۹۰) به بررسی رواناب حوضه‌ی تحت تأثیر سناریوهای انتشار B1, A2 با در نظر گرفتن اثر دسته‌جمعی مدل‌های AOGCM پرداختند که خروجی‌های مدل‌های تغییر اقلیم توسط مدل LARS-WG ریزمقیاس شدند و دما و بارش ریزمقیاس شده به مدل بارش-رواناب IHACRES معرفی شد و سری‌های زمانی بلندمدت رواناب روزانه در دوره‌ی آتی تولید شد. میانه‌ی تغییرات رواناب برای هر ۲ سناریو نشان می‌دهد که در زمستان و تابستان افزایش و در پاییز کاهش رواناب را خواهیم داشت. این در حالی است که میزان رواناب در بهار تقریباً بدون تغییر خواهد ماند. مقایسه‌ی ۲ سناریو در شبیه‌سازی دما نشان داد مدل‌های سری A2 دمای بیش‌تری را نسبت به مدل‌های سری B1 نشان می‌دهد.

خسروانیا (۱۳۹۱)؛ در این تحقیق، از مدل HADCM3 استفاده شده است که با مدل LARS-WG ریزمقیاس شده است و در دوره‌ی ۲۰۸۰-۲۰۹۹ مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان داد که بارش به میزان ۱۳/۴ درصد در کل دوره‌ی افزایش خواهد یافت که بیش‌ترین افزایش مربوط به فصل‌های پاییز و زمستان بوده است. تغییرات دمای حداقل و حداکثر روند افزایشی خواهند داشت و تغییرات مربوط به ساعات آفتابی جزئی بوده و در تمام فصول کاهش می‌یابد که بیش‌ترین تغییرات کاهش آن در فصل تابستان و کم‌ترین تغییرات مربوط به آن در فصل زمستان اتفاق می‌افتد.

هاشمی‌نسب و همکاران (۱۳۹۲)؛ در این پژوهش، داده‌های خروجی مدل HADCM3 با ۳ سناریو تغییر اقلیم B1, A2, A1B توسط مدل LARS-WG در استان کرمان ریزمقیاس شدند. نتایج حاصل از آن در ۹ ایستگاه سینوپتیک استان کرمان در دوره‌ی پایه ۱۹۹۱-۲۰۱۰ و دوره‌ی آینده ۲۰۱۱-۲۰۳۰ مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج حاصل از بررسی میانگین سالانه نشان‌دهنده‌ی افزایش میانگین سالانه بارش در همه ایستگاه‌هاست. بررسی طول بازه‌ی تر و خشک نشان داد که طول بازه‌ی تر در تابستان برای همه‌ی ایستگاه‌ها در دوره‌ی ۲۰۱۰-۲۰۳۰ رو به افزایش است. اگرچه در فصل زمستان بارش رو به کاهش است، اما در مجموع میانگین بارش رو به افزایش است.

کوان<sup>۷</sup> و همکاران (۲۰۰۴) به مقایسه‌ی ۲ مدل تولیدکننده‌ی آب‌وهوا LARS-WG و AAFC-WG در کانادا پرداختند. قابلیت آن‌ها برای تولید، میانگین و واریانس، بارش روزانه، ماکزیمم و مینیمم دما برای اقلیم مختلف کانادا مقایسه شد. شرایط اقلیمی مانند مرطوب و خشک بودن دوره‌ی‌های زمانی، تغییرپذیری سالانه و هم‌چنین عملکرد این ۲ مدل تخمین زده شد و مشخص شد AAFC-WG عملکرد بهتری در شبیه‌سازی دمای آماری دارد. درحالی‌که LARS-WG عملکرد بهتری در بارش روزانه با رابطه‌ی آماری دارد. به‌رحال هر ۲ مودل آب‌وهوا مشکلات پراکنده‌ای دارند. این مدل‌ها تغییرپذیری خصوصاً برای دماها را تخمین می‌زنند، ولی به‌طور کلی AAFC-WG عملکرد بهتری دارد. سیمینوف<sup>۸</sup> (۲۰۰۷) یک روش برای ایجاد سناریوهای تغییر اقلیم برای کاربرد در کشاورزی و هیدرولوژی ارائه نمود و از نتایج آن برای تحلیل رویدادهای اقلیمی حدی آینده و حال حاضر و بررسی اثرات تغییر اقلیم بر روی گندم در انگلستان استفاده نمود. ابتدا از تولیدکننده‌ی جوی تصادفی LARS-WG برای واسنجی اقلیم حال حاضر استفاده شده است. سپس پارامترهای موردنیاز مدل برای تغییر اقلیم با استفاده از خروجی مدل UKCIP20 اصلاح شده‌اند. برای ایجاد سناریوها در هر نقطه‌ی مشخص در انگلستان پارامترهای موردنیاز مدل برای مناطق مختلف بر اساس داده‌های درازمدت موجود اقلیمی محاسبه شده‌اند. در ادامه، سناریوهای روزانه‌ی ریزمقیاس شده UKCIP20 ایجاد شده برای محاسبه‌ی رویدادهای حدی متغیرهای مختلف جوی و بررسی اثرات تغییر اقلیم بر روی رشد گندم به کار رفته‌اند. دو شاخص مؤثر بر روی رشد گندم شامل شاخص تنش خشک‌سالی و احتمال وقوع گرمای شدید بعد از شکوفه زدن تحلیل شده‌اند. با وجود دمای بالاتر و بارندگی کم‌تر در طول تابستان در دهه‌ی ۲۰۸۰ اثرات نسبی آن بر روی میزان محصول بر اثر تنش خشک‌سالی کم‌تر از دوره‌ی پایه است که علت آن توانایی گندم برای بلوغ زودرس در یک اقلیم گرم‌تر برای جلوگیری از اثر تابستان گرم و تنش خشکی است.

لی<sup>۹</sup> و همکاران (۲۰۱۰)، تحقیقی در رابطه با پیش‌بینی اثرات تغییر اقلیم روی بارهای آلاینده‌ی غیرنقطه‌ای حوضه‌های آبخیز کوچک با استفاده از شبکه‌ی عصبی مصنوعی در حوضه‌ی آبخیز باران در کره انجام دادند. بارهای آلاینده‌ی منابع غیرنقطه‌ای با استفاده از دی-بار حاصل شده از پایش طولانی‌مدت داده‌ها محاسبه شد. از داده‌های سناریوهای A1B مدل Hadcm3 در دوره‌ی ۱۹۷۳ تا ۲۰۰۸ به‌عنوان دوره‌ی پایه و ۳ دوره‌ی آینده ۲۰۳۰-۲۰۴۶، ۲۰۴۶-۲۰۶۵، ۲۰۶۵-۲۰۸۰ جهت پیش‌بینی اثرات تغییر اقلیم روی بارهای آلاینده منابع غیرنقطه‌ای استفاده نمودند. مدل LARS-WG جهت تولید داده‌های روزانه بارش و شبکه‌ی عصبی مصنوعی جهت تبدیل داده‌های بارش به رواناب روزانه به کار گرفته شد. نتایج نشان از افزایش متوسط دمای حداقل-دمای حداکثر-افزایش تدریجی بارش و کاهش در تشعشعات آفتابی داشت.

سیمینوف و همکاران (۲۰۱۳) به اعتبارسنجی ELPIS در دوره‌های ۱۹۸۰-۲۰۱۰ برای ارزیابی سناریوهای اقلیمی مشاهده‌شده در اروپا پرداختند. در این تحقیق، از مدل LARS-WG برای کوچک‌مقیاس کردن و از مدل‌های CMIP3، EU-ENSEMBLES استفاده شده است. در این تحقیق، چندین آزمون آماری استفاده شد، در ارتفاعات مختلف آزمون Kolmogrov-Smirnov برای توزیع دمای روزانه و در t-test برای دمای ماهانه مقایسه شد. برای بارش روزانه از آزمون KS-test استفاده شد و حساسیت t-test نتایج معناداری برای ارتفاع بزرگ نشان داد. به‌طور تقریبی ۱۱٪ آزمون‌ها برای انحراف تابش خورشیدی نتایج مثبت یا منفی نشان دادند، هرچند ۸۶٪ در t-test نتایج معناداری نشان داد. این نتایج می‌تواند تغییرات مختلفی با زمان‌های مختلف تابش خورشیدی در LARS-WG و CGM شرح دهد. با در نظر گرفتن این محدودیت‌ها ELPIS می‌تواند با سناریوهای خطی برای ارزیابی اثرات کشاورزی در اروپا مناسب باشد.

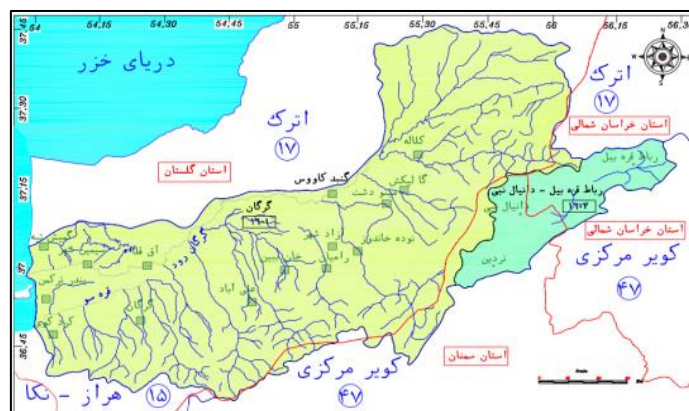
7- Qian

8- Semenov

9- lee

## ۲- منطقه‌ی مورد مطالعه

حوضه‌ی آبخیز گرگان‌رود- قره‌سو در بخش جنوب شرقی دریای خزر قرار داشته و در تقسیم‌بندی کلی هیدرولوژی ایران، جزئی از آبخیز دریای خزر به شمار می‌رود (شکل ۱). مساحت این حوضه ۱۳۰۶۱ کیلومترمربع است. حوضه‌ی آبخیز گرگان‌رود- قره‌سو دارای رودخانه‌های کوچک و متوسط متعدد است که پس از عبور از ارتفاعات و طی مسافتی در دشت، نهایتاً دو رودخانه‌ی اصلی حوضه؛ یعنی گرگان‌رود و قره‌سو را تشکیل می‌دهند که طی مسیر شرق به غرب به دریای خزر می‌ریزند.



شکل ۱: موقعیت منطقه‌ی مورد مطالعه

## ۳- مواد و روش‌ها

در این پژوهش برای ارزیابی عملکرد مدل LARS-WG از پارامترهای آماری  $R^2$ , MAE, RMSE, NSE جهت مقایسه‌ی میانگین‌های ماهانه‌ی داده‌های روزانه‌ی بارش حوضه‌ی مورد مطالعه از سال ۱۹۸۹ تا ۲۰۰۸ استفاده گردید. بدین ترتیب مرحله کالیبره کردن انجام پذیرفته و نتایج حاصل از مدل برای این دوره‌ی با داده‌های مشاهداتی مقایسه گردیده تا از کارایی مدل برای ایستگاه مورد نظر اطمینان حاصل شود. سپس از دو مدل گردش عمومی جو HadCM3 و ECHAM4 و سه سناریوی اقلیمی شامل  $A_1$ ,  $B_1$  و  $A1B$  و مدل آماری LARS-WG جهت ریزمقیاس نمایی داده‌های بارندگی در دوره‌ی های آتی در حوضه‌ی گرگان‌رود-قره‌سو در طول دوره‌ی آتی (۲۰۱۱-۲۰۳۰) استفاده شد. در مرحله‌ی بعد با استفاده از شاخص‌های خشک‌سالی SPI, ZSI و PN خشک‌سالی‌های اقلیمی دوره‌ی پایه و دوره‌ی آتی ارزیابی شده و شدت و فراوانی خشک‌سالی‌ها تحت سناریوهای مختلف دو مدل مذکور با استفاده از سه شاخص خشک‌سالی مورد مطالعه قرار گرفته است. ضمناً جهت ارزیابی کارایی مدل مورد استفاده از شاخص‌های میانگین مربعات خطای مطلق و ضریب ناش به منظور صحت سنجی داده‌ها استفاده شده است.

## ۴- بحث و نتایج

جهت ارزیابی و تشخیص کارایی مدل LARS-WG از شاخص‌های ضریب همبستگی به منظور افزایش دقت از میانگین مربعات خطا ۱۰، میانگین خطای مطلق ۱۱ و ناش ساتکلیف ۱۲ بین داده‌های مشاهداتی و داده‌های حاصل از مدل در دوره‌ی پایه (۱۹۸۹-۲۰۰۸) استفاده گردید که نتایج آن در (جدول ۱) آورده شده است.

10- Mean Square Error

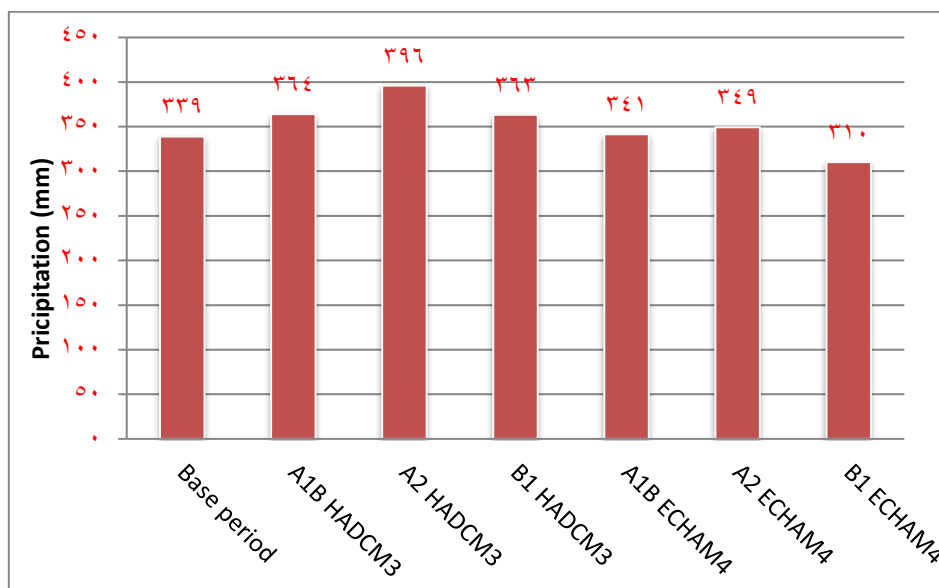
11- Mean Absolute Error

12- NSE

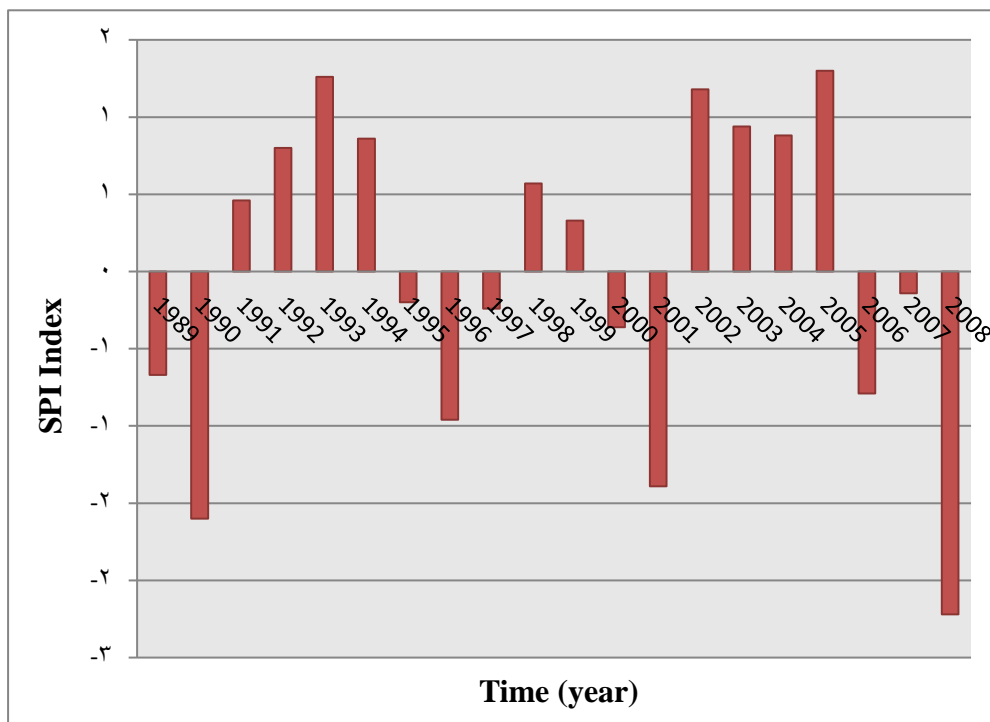
جدول ۱: نتایج ارزیابی و اعتبارسنجی مدل ریزمقیاس نمایی LARS-WG برای شبیه‌سازی فرآیند بارش

| $R^2$ | NSE  | RMSE | MAE  | Statistic Value |
|-------|------|------|------|-----------------|
| 0.94  | 0.91 | 3.75 | 1.31 |                 |

با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از جدول (۲) و مدل‌سازی فرآیند بارش توسط مدل LARS-WG، نتایج میزان بسیار خوبی با داده‌های مشاهداتی در تطابق است و می‌توان جهت شبیه‌سازی فرآیند بارش دوره‌ی آتی از این مدل استفاده نمود. شکل (۲) میانگین بارندگی ۲۰ ساله برای دوره‌ی پایه و دوره‌ی آینده تحت سه سناریوی A1B، A2 و B1 برای دو مدل HADCM3 و ECHAM4 را نشان می‌دهد. شکل (۳) شاخص سالانه SPI برای دوره‌ی پایه را نشان می‌دهد. در جدول (۲) نیز کلاس‌بندی خشک‌سالی برای شاخص‌های SPI نرمال شده، ZSI و PN سالانه در دوره‌ی پایه (۱۹۹۸-۲۰۰۸) آورده شده است.



شکل ۲: میانگین بارندگی ۲۰ ساله برای دوره‌ی پایه و دوره‌ی آینده تحت سناریوهای مختلف دو مدل HADCM3 و ECHAM4

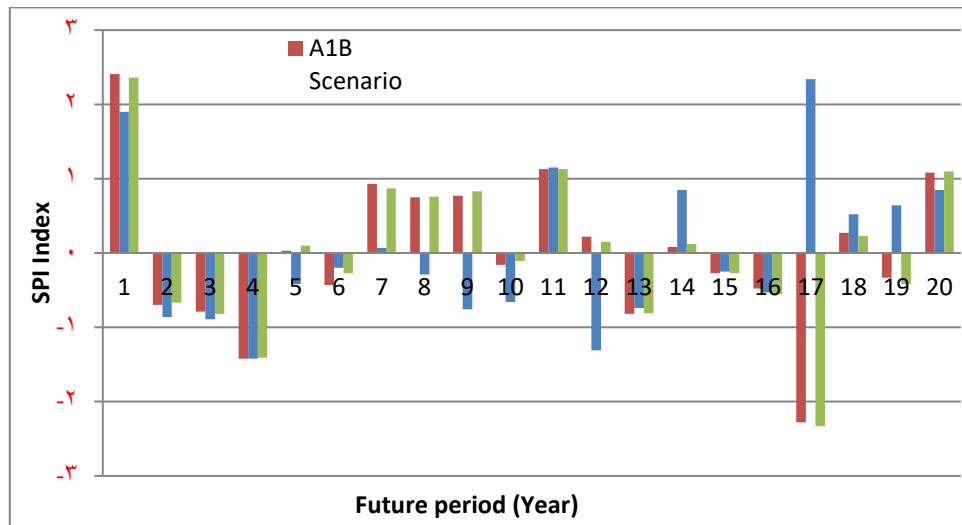


شکل ۳: شاخص سالانه SPI برای دوره‌ی پایه

جدول ۲: شاخص SPI نرمال شده، PN و ZSI سالانه و کلاس‌بندی خشک‌سالی برای دوره‌ی پایه (۱۹۹۸-۲۰۰۸)

| Drought Classification under ZSI | Drought Classification under PN | Drought Classification under SPI | ZSI Value | PN Value | SPI Value | Year |
|----------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|-----------|----------|-----------|------|
| Near normal                      | Normal                          | Near normal                      | -0.71     | 85.68    | -0.67     | 1989 |
| Severely dry                     | Moderate drought                | Severely dry                     | -1.51     | 69.75    | -1.6      | 1990 |
| Near normal                      | Normal                          | Near normal                      | 0.41      | 108.24   | 0.46      | 1991 |
| Near normal                      | Normal                          | Near normal                      | 0.78      | 115.76   | 0.8       | 1992 |
| Moderately wet                   | Normal                          | Moderately wet                   | 1.31      | 126.23   | 1.26      | 1993 |
| Near normal                      | Normal                          | Near normal                      | 0.84      | 116.96   | 0.86      | 1994 |
| Near normal                      | Normal                          | Near normal                      | -0.27     | 94.59    | -0.2      | 1995 |
| Near normal                      | Normal                          | Near normal                      | -0.97     | 80.53    | -0.96     | 1996 |
| Near normal                      | Normal                          | Near normal                      | -0.31     | 93.81    | -0.24     | 1997 |
| Near normal                      | Normal                          | Near normal                      | 0.52      | 110.52   | 0.57      | 1998 |
| Near normal                      | Normal                          | Near normal                      | 0.27      | 105.47   | 0.33      | 1999 |
| Near normal                      | Normal                          | Near normal                      | -0.42     | 91.57    | -0.36     | 2000 |
| Moderately dry                   | Slight drought                  | Moderately dry                   | -1.34     | 73.15    | -1.39     | 2001 |
| Moderately wet                   | Normal                          | Moderately wet                   | 1.22      | 124.46   | 1.18      | 2002 |
| Near normal                      | Normal                          | Near normal                      | 0.94      | 118.88   | 0.94      | 2003 |
| Near normal                      | Normal                          | Near normal                      | 0.87      | 117.41   | 0.88      | 2004 |
| Moderately wet                   | Normal                          | Moderately wet                   | 1.36      | 127.38   | 1.3       | 2005 |
| Near normal                      | Normal                          | Near normal                      | -0.82     | 83.52    | -0.79     | 2006 |
| Near normal                      | Normal                          | Near normal                      | -0.21     | 95.8     | -0.14     | 2007 |
| Severely dry                     | Moderate drought                | Extremely dry                    | -1.98     | 60.28    | -2.22     | 2008 |

در اشکال ۴ و ۵ شاخص SPI برای دوره‌ی آتی و سه سناریوی A<sub>1</sub>B، A<sub>2</sub> و B<sub>1</sub> دو مدل hadCM<sub>3</sub> و ECHAM<sub>4</sub> آورده شده است. با توجه به شکل شماره‌ی ۴ در مدل hadCM<sub>3</sub>، شاخص SPI برای ۲۰ سال دوره‌ی آتی تحت سناریوی A<sub>2</sub>، ۱۲ سال خشک‌سالی وجود خواهد داشت که این در بدبینانه‌ترین سناریوی مورد مطالعه است. تحت سناریوهای A<sub>1</sub>B و B<sub>2</sub> تعداد سال‌های خشک ۱۰ سال خواهد بود. همچنین با توجه به شکل شماره‌ی ۵ و مدل ECHAM<sub>4</sub>، شاخص SPI برای ۲۰ سال دوره‌ی آتی تحت سناریوی A<sub>2</sub>، ۱۳ سال خشک را نشان می‌دهد. این در صورتی است که تعداد سال‌های خشک دو سناریوی A<sub>1</sub>B و A<sub>2</sub> به ترتیب برابر ۱۱ سال و ۱۲ سال خواهد بود؛ یعنی در خوش‌بینانه‌ترین سناریو نیز فراوانی سال‌های خشک نسبت به دوره‌ی پایه (گذشته) افزایش خواهد یافت.



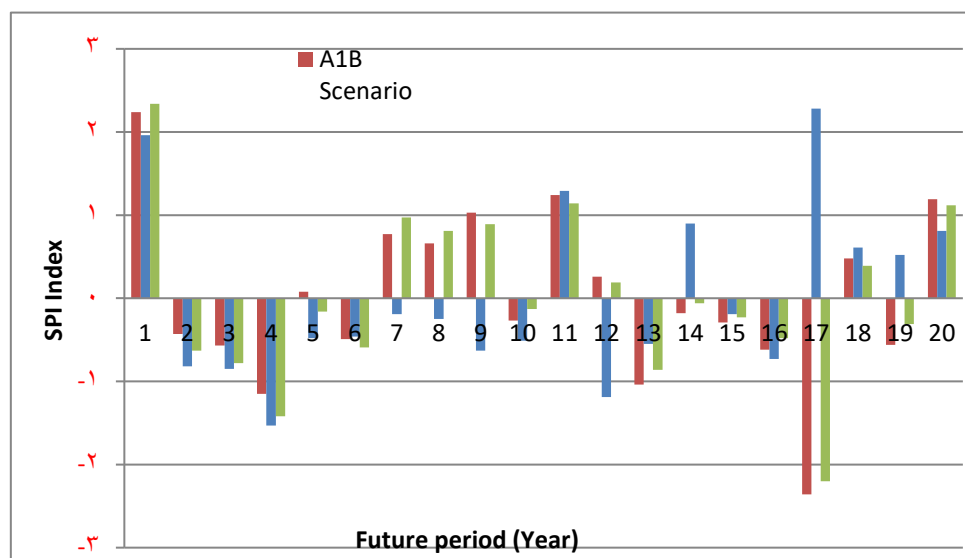
شکل ۴: شاخص SPI برای دوره‌ی آتی (۲۰۱۱ تا ۲۰۳۰) مدل HADCM3

جدول ۳: مقادیر عددی شاخص‌های SPI، PN و ZSI برای دوره‌ی آتی (۲۰۱۱ تا ۲۰۳۰) مدل HADCM3

| B1 Scenario |          |           | A2 Scenario |          |           | A1B Scenario |          |           | Year |
|-------------|----------|-----------|-------------|----------|-----------|--------------|----------|-----------|------|
| ZSI Value   | PN Value | SPI Value | ZSI Value   | PN Value | SPI Value | ZSI Value    | PN Value | SPI Value |      |
| 2.59        | 154.11   | 2.36      | 1.93        | 144.66   | 1.9       | 2.64         | 155.95   | 2.41      | 1    |
| -0.68       | 85.77    | -0.67     | -0.81       | 81.34    | -0.86     | -0.7         | 85.08    | -0.7      | 2    |
| -0.82       | 82.96    | -0.82     | -0.83       | 80.75    | -0.89     | -0.78        | 83.4     | -0.79     | 3    |
| -1.3        | 72.94    | -1.41     | -1.24       | 71.36    | -1.42     | -1.29        | 72.55    | -1.42     | 4    |
| 0.03        | 100.69   | 0.1       | -0.44       | 89.82    | -0.42     | -0.04        | 99.12    | 0.03      | 5    |
| -0.32       | 93.34    | -0.27     | -0.25       | 94.27    | -0.2      | -0.46        | 90.16    | -0.43     | 6    |
| 0.82        | 117.13   | 0.87      | -0.01       | 99.88    | 0.07      | 0.89         | 118.77   | 0.93      | 7    |
| 0.7         | 114.62   | 0.76      | -0.32       | 92.5     | -0.29     | 0.69         | 114.7    | 0.75      | 8    |
| 0.78        | 116.25   | 0.83      | -0.73       | 83.2     | -0.76     | 0.72         | 115.17   | 0.77      | 9    |
| -0.17       | 96.4     | -0.11     | -0.65       | 85.07    | -0.66     | -0.22        | 95.3     | -0.16     | 10   |
| 1.11        | 123.16   | 1.13      | 1.08        | 124.98   | 1.15      | 1.1          | 123.3    | 1.13      | 11   |
| 0.08        | 101.71   | 0.15      | -1.16       | 73.15    | -1.31     | 0.15         | 103.24   | 0.22      | 12   |
| -0.8        | 83.26    | -0.81     | -0.71       | 83.56    | -0.74     | -0.81        | 82.85    | -0.82     | 13   |
| 0.06        | 101.16   | 0.12      | 0.76        | 117.56   | 0.85      | 0.01         | 100.25   | 0.08      | 14   |
| -0.32       | 93.37    | -0.27     | -0.29       | 93.21    | -0.25     | -0.32        | 93.21    | -0.27     | 15   |



|       |        |       |       |        |       |       |        |       |    |
|-------|--------|-------|-------|--------|-------|-------|--------|-------|----|
| -0.57 | 88     | -0.55 | -0.54 | 87.6   | -0.53 | -0.51 | 89.2   | -0.48 | 16 |
| -1.97 | 58.95  | -2.33 | 2.46  | 156.99 | 2.34  | -1.92 | 59.28  | -2.28 | 17 |
| 0.16  | 103.25 | 0.23  | 0.43  | 109.85 | 0.52  | 0.19  | 104.12 | 0.27  | 18 |
| -0.46 | 90.45  | -0.42 | 0.54  | 112.61 | 0.64  | -0.38 | 92.03  | -0.33 | 19 |
| 1.08  | 122.5  | 1.1   | 0.76  | 117.63 | 0.85  | 1.05  | 122.29 | 1.08  | 20 |



شکل ۵: شاخص SPI برای دوره‌ی آتی (۲۰۱۱ تا ۲۰۳۰) مدل ECHAM4

جدول ۴: مقادیر عددی شاخص‌های SPI، PN و ZSI برای دوره‌ی آتی (۲۰۱۱ تا ۲۰۳۰) مدل ECHAM4

| B1 Scenario |          |           | A2 Scenario |          |           | A1B Scenario |          |           | Year |
|-------------|----------|-----------|-------------|----------|-----------|--------------|----------|-----------|------|
| ZSI Value   | PN Value | SPI Value | ZSI Value   | PN Value | SPI Value | ZSI Value    | PN Value | SPI Value |      |
| 2.56        | 156.76   | 2.34      | 1.99        | 147.22   | 1.96      | 2.45         | 152.97   | 2.24      | 1    |
| -0.65       | 85.71    | -0.63     | -0.78       | 81.61    | -0.82     | -0.47        | 89.91    | -0.43     | 2    |
| -0.77       | 82.97    | -0.78     | -0.8        | 81.1     | -0.85     | -0.6         | 87.04    | -0.57     | 3    |
| -1.29       | 71.4     | -1.42     | -1.32       | 68.81    | -1.53     | -1.09        | 76.53    | -1.15     | 4    |
| -0.22       | 95.09    | -0.16     | -0.49       | 88.37    | -0.48     | 0.01         | 100.16   | 0.08      | 5    |
| -0.61       | 86.45    | -0.59     | -0.48       | 88.69    | -0.46     | -0.52        | 88.71    | -0.49     | 6    |
| 0.93        | 120.48   | 0.97      | -0.24       | 94.3     | -0.19     | 0.72         | 115.45   | 0.77      | 7    |
| 0.75        | 116.67   | 0.81      | -0.29       | 93.07    | -0.25     | 0.59         | 112.85   | 0.66      | 8    |
| 0.84        | 118.51   | 0.89      | -0.62       | 85.28    | -0.63     | 1            | 121.57   | 1.03      | 9    |
| -0.2        | 95.67    | -0.13     | -0.52       | 87.71    | -0.51     | -0.32        | 92.99    | -0.27     | 10   |
| 1.11        | 124.57   | 1.14      | 1.23        | 129.06   | 1.29      | 1.24         | 126.7    | 1.24      | 11   |
| 0.11        | 102.5    | 0.19      | -1.07       | 74.74    | -1.19     | 0.19         | 104.15   | 0.26      | 12   |
| -0.84       | 81.39    | -0.86     | -0.55       | 87       | -0.55     | -1           | 78.49    | -1.04     | 13   |
| -0.12       | 97.31    | -0.06     | 0.81        | 119.3    | 0.9       | -0.24        | 94.8     | -0.18     | 14   |
| -0.29       | 93.67    | -0.23     | -0.24       | 94.3     | -0.19     | -0.34        | 92.55    | -0.29     | 15   |
| -0.52       | 88.58    | -0.48     | -0.7        | 83.45    | -0.73     | -0.64        | 86.19    | -0.62     | 16   |
| -1.85       | 58.97    | -2.2      | 2.38        | 156.47   | 2.28      | -1.98        | 57.17    | -2.36     | 17   |

|       |        |       |      |        |      |       |        |       |    |
|-------|--------|-------|------|--------|------|-------|--------|-------|----|
| 0.32  | 107.04 | 0.39  | 0.52 | 112.25 | 0.61 | 0.41  | 108.89 | 0.48  | 18 |
| -0.35 | 92.15  | -0.31 | 0.43 | 110.08 | 0.52 | -0.59 | 87.34  | -0.56 | 19 |
| 1.09  | 124.12 | 1.12  | 0.72 | 117.18 | 0.81 | 1.18  | 125.53 | 1.19  | 20 |

شاخص SPI در این مطالعه نشان می‌دهد که در مجموع در ۲۰ سال دوره‌ی پایه، ۱۰ سال آن خشک است. جداول شماره‌ی ۳ و ۴ مقادیر عددی و شدت خشک‌سالی با شاخص‌های SPI، PN و ZSI و تحت دو مدل HADCM3 و ECHAM4 را نشان می‌دهند. در مجموع با توجه به شاخص SPI در دوره‌ی آینده تحت تأثیر تغییر اقلیم، شدت خشک‌سالی‌ها تحت همه سناریوهای مورد مطالعه افزایش خواهد یافت. همچنین تحت شاخص ZSI شدت خشک‌سالی‌ها تحت همه‌ی سناریوهای مورد مطالعه افزایش را نشان می‌دهد.

جدول ۵: فراوانی سال‌های خشک تحت شاخص‌های SPI و ZSI در دوره‌ی پایه و دوره‌ی آینده دو مدل HADCM3 و ECHAM4

| Base Period |           | Future Period |    |    |           |    |    | ECHAM4 Model |    |    |           |    |    |
|-------------|-----------|---------------|----|----|-----------|----|----|--------------|----|----|-----------|----|----|
| SPI Index   | ZSI Index | HADCM3 Model  |    |    |           |    |    | ECHAM4 Model |    |    |           |    |    |
|             |           | SPI Index     |    |    | ZSI Index |    |    | SPI Index    |    |    | ZSI Index |    |    |
|             |           | AIB           | A2 | B1 | A1B       | A2 | B1 | A1B          | A2 | B1 | A1B       | A2 | B1 |
| 10          | 10        | 10            | 12 | 10 | 11        | 13 | 10 | 10           | 13 | 11 | 10        | 13 | 11 |

نتایج حاصل از جدول شماره‌ی ۵ نشان می‌دهد که با استفاده از دو شاخص SPI و ZSI، تعداد فراوانی سال‌های خشک در دوره‌ی پایه ۱۰ سال است. با توجه به نتایج حاصل از این مطالعه، تحت سناریوی A2 یک حالت بدبینانه از خشک‌سالی‌های اقلیمی در دوره‌های آتی مشاهده می‌گردد و روند فراوانی خشک‌سالی‌ها بیش‌تر از دو سناریوی دیگر خواهد بود. جداول ۶ تا ۸ به ترتیب فراوانی سالانه حاصل از شاخص SPI سالانه، ZSI سالانه و PN سالانه برای دوره‌ی پایه و دوره‌ی آتی تحت سناریوهای مختلف دو مدل مورد مطالعه را نشان می‌دهند. همان‌گونه که مشاهده می‌گردد، روند تغییرات در فراوانی سال‌های خشک تحت شاخص‌های مختلف متفاوت است. شکل شماره‌ی ۶ تغییرات میانگین فصلی بارش حوضه‌ی آبخیز گرگان‌رود- قره‌سو را در دوره‌ی ۲۰۳۰-۲۰۱۱ نسبت به دوره‌ی پایه نشان می‌دهد.

جدول ۶: فراوانی سالانه حاصل از شاخص SPI سالانه برای دوره‌ی پایه و دوره‌ی آتی

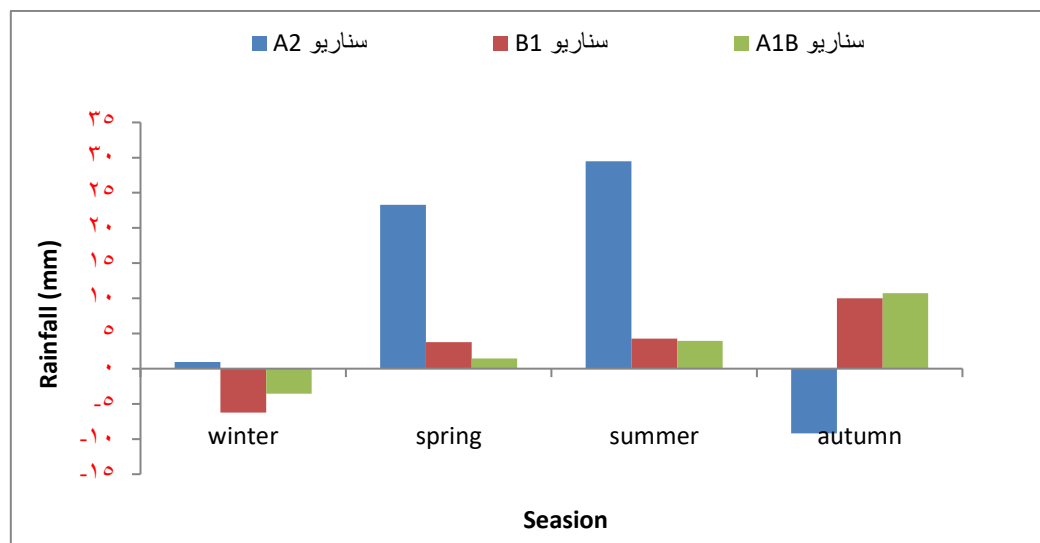
| Extremely wet | Severely wet | Moderately wet | Near normal | Moderately dry | Severely dry | Extremely dry | Scenario    |              |
|---------------|--------------|----------------|-------------|----------------|--------------|---------------|-------------|--------------|
| 0             | 0            | 3              | 14          | 1              | 1            | 1             | Base period |              |
| 1             | 0            | 2              | 15          | 1              | 0            | 1             | A1B         | HADCM3 Model |
| 1             | 1            | 1              | 15          | 2              | 0            | 0             | A2          |              |
| 1             | 0            | 2              | 15          | 1              | 0            | 1             | B1          |              |
| 1             | 0            | 3              | 13          | 2              | 0            | 1             | A1B         | ECHAM4 Model |
| 1             | 1            | 1              | 15          | 2              | 0            | 0             | A2          |              |
| 1             | 0            | 2              | 15          | 1              | 0            | 1             | B1          |              |

جدول ۷: فراوانی سالانه حاصل از شاخص ZSI سالانه برای دوره‌ی پایه و دوره‌ی آتی

| Extremely wet | Severely wet | Moderately wet | Near normal | Moderately dry | Severely dry | Extremely dry | Scenario    |              |
|---------------|--------------|----------------|-------------|----------------|--------------|---------------|-------------|--------------|
| 0             | 0            | 3              | 14          | 1              | 2            | 0             | Base period |              |
| 1             | 0            | 2              | 15          | 1              | 0            | 0             | A1B         | HADCM3 Model |
| 1             | 1            | 1              | 15          | 2              | 0            | 0             | A2          |              |
| 1             | 0            | 2              | 15          | 1              | 1            | 0             | B1          |              |
| 1             | 0            | 2              | 15          | 1              | 1            | 0             | A1B         | ECHAM4 Model |
| 1             | 1            | 1              | 15          | 2              | 0            | 0             | A2          |              |
| 1             | 0            | 2              | 15          | 1              | 1            | 0             | B1          |              |

جدول ۸: فراوانی سالانه حاصل از شاخص PN سالانه برای دوره‌ی پایه و دوره‌ی آتی

| Normal | Slight drought | Moderate drought | Severely dry | Extreme drought | Scenario    |              |
|--------|----------------|------------------|--------------|-----------------|-------------|--------------|
| 17     | 1              | 2                | 0            | 0               | Base period |              |
| 18     | 1              | 1                | 0            | 0               | A1B         | HADCM3 Model |
| 18     | 2              | 0                | 0            | 0               | A2          |              |
| 18     | 1              | 0                | 0            | 0               | B1          |              |
| 17     | 2              | 1                | 0            | 0               | A1B         | ECHAM4 Model |
| 18     | 1              | 1                | 0            | 0               | A2          |              |
| 18     | 1              | 1                | 0            | 0               | B1          |              |



شکل ۶: نمودار تغییرات میانگین فصلی بارش حوضه‌ی گرگان‌رود- قره‌سو در دوره‌ی ۲۰۱۱-۲۰۳۰ نسبت به دوره‌ی پایه

## ۵- نتیجه‌گیری

خشک‌سالی هواشناسی را می‌توان سیگنال ظهور دیگر انواع خشک‌سالی تعریف نمود. از نظر اقلیم‌شناسی، تمامی مناطق اقلیمی دنیا در معرض خطر وقوع خشک‌سالی می‌باشند. با توجه به نتایج حاصل از تحقیق برای حوضه‌ی آبخیز گرگان‌رود- قره‌سو مشخص می‌شود که در دوره‌ی زمانی ۲۰۱۱-۲۰۳۰ و با در نظر گرفتن سناریو A2 میانگین فصلی بارش به‌جز فصل پاییز با ۹/۱۸ میلی‌متر کاهش، در سایر فصول افزایش می‌یابد که بیش‌ترین افزایش مربوط به فصل تابستان به میزان ۲۹/۵ میلی‌متر است. در سناریو B1 میانگین فصلی بارش به‌جز فصل زمستان با ۶/۲۲ میلی‌متر کاهش،

در سایر فصول افزایش می‌یابد. بیش‌ترین افزایش مربوط به فصل پاییز به میزان ۱۰/۰۱ میلی‌متر است. هم‌چنین در سناریو A1B میانگین فصلی بارش به‌جز فصل زمستان با ۳/۵۷ میلی‌متر کاهش، در سایر فصول افزایش می‌یابد. بیش‌ترین افزایش مربوط به فصل پاییز به میزان ۱۰/۷۳ میلی‌متر است. در مجموع می‌توان نتیجه گرفت که تغییر در الگوی زمانی بارندگی در دوره‌ی آتی مشاهده خواهد گردید و بارندگی در فصل زمستان کم‌تر گردیده و در سایر فصول بیش‌تر می‌گردد. از طرف دیگر چون بارندگی و به‌تبع برف باریده‌شده در منطقه کاهش می‌یابد، می‌تواند تأثیر مهمی بر روی سطح تراز آب‌های زیرزمینی در منطقه بگذارد. نتایج حاصل از شاخص‌های SPI و ZSI حاکی از شباهت زیادی در شبیه‌سازی خشک‌سالی‌های دوره‌های آتی است.

با استفاده از دو شاخص SPI و ZSI، تعداد فراوانی سال‌های خشک در دوره‌ی پایه ۱۰ سال است. نتایج حاصل از این مطالعه نشان می‌دهد که تحت سناریوی A<sub>2</sub> یک حالت بدبینانه از خشک‌سالی‌های اقلیمی در دوره‌های آتی مشاهده می‌گردد و روند فراوانی خشک‌سالی‌ها بیش‌تر خواهد بود. در مجموع با توجه به شاخص SPI در دوره‌ی آینده تحت تأثیر تغییر اقلیم، شدت خشک‌سالی‌ها تحت همه‌ی سناریوهای مورد مطالعه، افزایش خواهد یافت. هم‌چنین تحت شاخص ZSI شدت خشک‌سالی‌ها تحت همه سناریوهای مورد مطالعه افزایش را نشان می‌دهد. هم‌چنین تحت سناریوی A<sub>2</sub> یک حالت بدبینانه از خشک‌سالی‌های اقلیمی در دوره‌های آتی مشاهده می‌گردد و روند فراوانی خشک‌سالی‌ها بیش‌تر از دو سناریوی دیگر خواهد بود.

همان‌گونه که مشاهده گردید روند تغییرات در فراوانی سال‌های خشک تحت شاخص‌های SPI، ZSI و PN متفاوت است، ولی آنچه مسلم است غیر از سناریوی B1 مدل ECHAM4 در تمام ۵ سناریوی دیگر مورد مطالعه، میزان بارندگی در مقیاس سالانه در دوره‌ی آتی افزایش خواهد یافت که این حالت خوش‌بینانه، تغییر اقلیم در منطقه‌ی مورد مطالعه را نشان می‌دهد. از طرفی با افزایش دما و کاهش میزان بارندگی به‌صورت برف در فصل زمستان، تغذیه‌ی آب‌های زیرزمینی در معرض خطر است؛ از دیگر سو افزایش دما باعث افزایش نیاز آبی گیاهان و موجودات شده و این خود باعث بروز انواع مشکلات و جنبه‌های دیگر خشک‌سالی‌ها مانند خشک‌سالی‌های اقتصادی در سطح منطقه می‌گردد.

## ۶- منابع

۱. بابائیان، ایمان، نجفی‌نیک، زهرا (۲۰۰۵). مطالعه‌ی مقدماتی و ارزشیابی الگوهای Generator Weather. مطالعه‌ی موردی: ارزیابی الگوی LARS-WG بر روی ایستگاه‌های منتخب خراسان، پژوهشکده‌ی اقلیم‌شناسی ایران، گزارش پروژه.
۲. بابائیان، ایمان، نجفی‌نیک، زهرا (۱۳۸۹). تحلیل تغییر اقلیم استان خراسان رضوی در دوره‌ی ۲۰۱۰-۲۰۳۹ با استفاده از ریزگردانی خروجی الگوی GCM. مجله‌ی جغرافیا و توسعه‌ی ناحیه‌ای، شماره‌ی پانزدهم، صص ۱۹-۱.
۳. بذرافشان، جواد (۲۰۰۲). مطالعه‌ی تطبیقی برخی شاخص‌های خشک‌سالی هواشناسی در چند نمونه اقلیمی ایران. پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد، گروه هواشناسی دانشکده‌ی کشاورزی، دانشگاه تهران.
۴. خزانه‌داری، لیلی، کوهی، مهدی، قندهاری، شهزاد. ملبوسی، شراره (۱۳۸۹). بررسی روند خشک‌سالی طی ۳۰ سال آینده، (۲۰۱۰-۲۰۳۹)، چهارمین کنفرانس منطقه‌ای تغییر اقلیم، صص ۷۹-۸۷.
۵. خسروانیان، جهانتاب (۱۳۹۱). ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر رواناب سطحی (مورد مطالعه: حوضه‌ی قره‌سو)، پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد، دانشکده‌ی مرتع و آبخیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان.
۶. شاکرمی، نیما، مساح بوانی، علیرضا (۲۰۰۶). تحلیل عدم قطعیت الگوهای جفت‌شده‌ی اقیانوس- اتمسفر گردش عمومی جو بر سناریوهای تغییر اقلیم دما و بارندگی در حوضه‌ی زاینده‌رود، کارگاه فنی اثرات تغییر اقلیم در مدیریت منابع آب.

۷. صمدی نقاب، سینا (۱۳۸۵)، پیش‌بینی خشک‌سالی با روش ریزگردانی خروجی الگوی GCM، مجله‌ی جغرافیا و توسعه ناحیه‌ای، شماره‌ی هشتم، صص ۱۹۳-۲۱۲.
۸. عباسی، فاطمه، ملبوسی، شراره (۱۳۸۹). ارزیابی تغییر اقلیم زاگرس در دوره‌ی ۲۰۱۰-۲۰۳۹ میلادی با استفاده از ریزمقیاس‌نمایی داده‌های مدل گردش عمومی جو ECHO-G. نشریه‌ی پژوهش‌های اقلیم‌شناسی، سال اول، شماره‌ی اول و دوم، صص ۲۰-۳.
۹. نصرتی، کاظم، آذرینوند، حسین (۲۰۰۲). تحلیل منطقه‌ای شدت، مدت، دوره‌ی بازگشت خشک‌سالی با استفاده از داده‌های بارندگی (مطالعه‌ی موردی: حوضه‌ی آبخیز اترک)، مجله‌ی بیابان، جلد ۷، شماره‌ی ۱، صص ۴۹-۶۰.
۱۰. واتقی، رفیعه، مشکواتی، امیرحسین (۱۳۹۰). بررسی رواناب حوضه‌ی تحت تأثیر سناریوهای انتشار A2 و B1 با در نظر گرفتن اثر دسته‌جمعی (ensemble) مدل‌های AOGCM. انجمن علوم و مهندسی منابع آب ایران، چهارمین کنفرانس مدیریت منابع آب ایران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر.
۱۱. هاشمی‌نسب خبیصی، فریده، موسوی بایگی، محمد، بختیاری، بهرام، داوری، کامران (۱۳۹۲)، پیش‌بینی تغییرات بارش ۲۰ سال آینده در استان کرمان با استفاده از مدل‌های ریزمقیاس‌کننده‌ی LARS-WG و مدل گردش عمومی HADCM3، فصلنامه‌ی علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب، سال سوم، شماره‌ی ۱۲، صص ۴۳-۵۸.
12. Blenkinsop, S., Fowler, H. J. (2007). Changes in drought frequency, severity and duration for the British Isles projected by the PRUDENCE regional climate models. *Journal of Hydrology*, 342(1), 50-71.
13. Briffa, K. R., Van Der Schrier, G., & Jones, P. D. (2009). Wet and dry summers in Europe since 1750: evidence of increasing drought. *International Journal of Climatology*, 29(13), 1894-1905.
14. Burke, E. J., Brown, S. J., & Christidis, N. (2006). Modeling the recent evolution of global drought and projections for the twenty-first century with the Hadley Centre climate model. *Journal of Hydrometeorology*, 7(5), 1113-1125.
15. Dubrovsky, M., Svoboda, M. D., Trnka, M., Hayes, M. J., Wilhite, D. A., Zalud, Z., & Hlavinka, P. (2009). Application of relative drought indices in assessing climate-change impacts on drought conditions in Czechia. *Theoretical and Applied Climatology*, 96(1-2), 155-171.
16. Giorgi, F. (2006). Climate change hot-spots. *Geophysical research letters*, 33(8).
17. Golmohammadi, M., Kamal, A., & Bovani, A. M. (2011). The Investigation of Drought Values Fluctuation Under the Effect of Climate Change.
18. Hoerling, M., Eischeid, J., Perlwitz, J., Quan, X., Zhang, T., & Pegion, P. (2012). On the increased frequency of Mediterranean drought. *Journal of Climate*, 25(6), 2146-2161.
19. Huo-Po, C. H. E. N., Jian-Qi, S. U. N., & Xiao-Li, C. H. E. N. (2013). Future changes of drought and flood events in China under a global warming scenario. *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, 6(1), 8-13.
20. Intergovernmental Panel on Climate Change. (2014). *Climate Change 2014—Impacts, Adaptation and Vulnerability: Regional Aspects*. Cambridge University Press.
21. Lee, E., Seong, C., Kim, H., Park, S., & Kang, M. (2010). Predicting the impacts of climate change on nonpoint source pollutant loads from agricultural small watershed using artificial neural network. *Journal of Environmental Sciences*, 22(6), 840-845.
22. Loukas, A., Vasiliades, L., & Tzabiras, J. (2008). Climate change effects on drought severity. *Advances in Geosciences*, 17, 23-29.

23. McKee, T. B., Doesken, N. J., & Kleist, J. (1995, January). Drought monitoring with multiple time scales. In *Proceedings of the 9th Conference on Applied Climatology* (pp. 233-236). Dallas, Boston, MA: American Meteorological Society.
24. Metz, B., Davidson, O. R., Bosch, P. R., Dave, R., & Meyer, L. A. (2007). IPCC, 2007: Summary for Policymakers. *Climate Change*.
25. Peterson, T. C., Hoerling, M. P., Stott, P. A., & Herring, S. C. (2013). Explaining extreme events of 2012 from a climate perspective. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 94(9), S1-S74.
26. Qian, B., Gameda, S., Hayhoe, H., De Jong, R., & Bootsma, A. (2004). Comparison of LARS-WG and AAFC-WG stochastic weather generators for diverse Canadian climates. *Climate Research*, 26(3), 175-191.
27. Semenov, M. A., Barrow, E. M., & Lars-Wg, A. (2002). A stochastic weather generator for use in climate impact studies. User Manual, Hertfordshire, UK.
28. Semenov, M. A. (2007). Development of high-resolution UKCIP02-based climate change scenarios in the UK. *Agricultural and Forest Meteorology*, 144(1), 127-138.
29. Semenov, M. A., Pilkington-Bennett, S., & Calanca, P. (2013). Validation of ELPIS 1980-2010 baseline scenarios using the observed European Climate Assessment data set. *Climate Research*, 57(1), 1-9.
30. Sivakumar, M. V. K., Wilhite, D. A., Pulwarty, R. S., & Stefanski, R. (2014). The high-level meeting on national drought policy. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 95(4), ES85-ES88.
31. Solomon, S. (Ed.). (2007). *Climate change 2007-the physical science basis: Working group I contribution to the fourth assessment report of the IPCC (Vol. 4)*. Cambridge University Press.
32. Wilhite, D. A. (Ed.). (2005). *Drought and water crises: science, technology, and management issues*. CRC Press.
33. Wu, H., Hayes, M. J., Weiss, A., & Hu, Q. (2001). An evaluation of the Standardized Precipitation Index, the China-Z Index and the statistical Z-Score. *International journal of climatology*, 21(6), 745-758.