

## تأثیر تغییر اقلیم بر شدت و دوره بازگشت خشکسالی های ایران

سید رضا الوانکار، دکتری منابع آب، استادیار گروه عمران آب، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی،  
واحد تهران جنوب، ایران.

فرزانه نظری، کارشناس ارشد جغرافیای طبیعی، کارشناس ارشد مهندسی مشاور لار، تهران، ایران.

ابراهیم فتاحی<sup>۱</sup>، دانشیار اقلیم شناسی، پژوهشکده هواشناسی، تهران، ایران.

پذیرش نهایی: ۱۳۹۵/۰۳/۰۳

دریافت مقاله: ۱۳۹۴/۰۹/۳۰

### چکیده

امروزه معتبرترین ابزار جهت تولید سناریوهای اقلیمی، مدل‌های AOGCM می‌باشد. از جمله مدل‌هایی که برای ریزمقیاس‌نمایی مبتنی بر روش‌های آماری استفاده می‌کنند مدل LARS-WG می‌باشد. در این مطالعه بر اساس مدل HadCM3 و دو سناریوی A1B، A2 برای دوره پایه (۱۹۶۱-۱۹۹۰) و دوره پیش‌بینی (۲۰۴۰-۲۰۱۱) در مقیاس روزانه فرایند ریزمقیاس‌نمایی انجام شد. و داده‌های مقادیر مجموع بارش روزانه برای ایستگاه‌های منتخب تولید شد. بعد از کالیبراسیون مدل و اطمینان از توانمندی مدل در ساخت سری‌های زمانی بارش که با مقایسه داده‌های شبیه‌سازی شده با مقادیر بارش در دوره پایه در سطح اطمینان ۹۵ درصد صورت پذیرفت، جهت بررسی وضعیت خشکسالی، شاخص استاندارد شده بارش (SPI) بکار رفت. نتایج نشان داد که میزان بارش نسبت به دوره پایه طی دوره‌های آینده نزدیک تحت خروجی‌های مدل گردش عمومی جو HadCM3 و دو سناریوی A1B، A2 تغییر معنی‌داری در بیشتر مناطق کشور خواهد داشت. بیشترین درصد تغییر مربوط به جنوب شرقی کشور می‌باشد که برای هر سه تداوم زمانی ۳، ۱۲ و ۲۴ ماهه افزایش خشکسالی را نشان می‌دهد بطوریکه برای تداوم زمانی ۱۲ ماهه و ۵۰ ساله شدت خشکسالی دوره پایه ۱۳/۸۲ بوده ولی در دوره آتی سناریوی A2، ۱۵/۰۵ و در دوره آتی سناریوی A1B، ۱۸/۳۹ را نشان می‌دهد. در غرب و شمال کشور نیز بطور مشابه در کلیه تداوم‌های زمانی شدت خشکسالی در دوره‌های آتی بیشتر از دوره پایه است، بطوریکه در دوره ۲۴ ماهه و دوره بازگشت ۵۰ ساله شدت خشکسالی پایه ۱۶/۳۱ ولی در دوره آتی A2، ۱۸/۶۵ و در دوره آتی A1B، ۱۹/۵۵ را نشان می‌دهد. در مناطق جنوب، مرکز و شرق کشور مقادیر شدت خشکسالی پایه و آتی با تداوم زمانی ۲۴ ماهه و در دوره برگشت ۵۰ ساله همگی حدود ۱۸/۸ بوده و شدت خشکسالی تغییرات زیادی را نشان نمی‌دهد. شدت خشکسالی در شمال غرب کشور و جنوب غرب کشور در هر سه تداوم زمانی ۳، ۱۲ و ۲۴ ماهه در دوره‌های آتی کمتر از دوره پایه خواهد بود بطوریکه در تداوم زمانی ۲۴ ماهه شدت خشکسالی با دوره برگشت ۵۰ ساله پایه ۲۳ ولی در دوره‌های آتی ۱۸/۴۴ را نشان می‌دهد. در نهایت، اگرچه در پیش‌بینی‌های بدست آمده از ریزمقیاس‌گردانی خروجی‌های مدل‌های اقلیمی عدم قطعیت‌هایی وجود دارد که این امر به علت ساختار مدل‌های گردش عمومی جو، داده‌های مشاهداتی و ... می‌باشد اما از آنجایی که مدل‌های اقلیمی به عنوان معتبرترین ابزار تولید سناریوهای اقلیمی مطرح می‌باشند، ضروری است مدیران و تصمیم‌گیران بخش‌های مختلف منابع آب و کشاورزی نتایج حاصل از چنین پژوهش‌هایی را نیز مد نظر قرار داده تا امکان برنامه‌ریزی‌های بلندمدت میسر شود.

واژگان کلیدی: SPI، AOGCM، خشکسالی، LARS-WG، HadCM3

## مقدمه

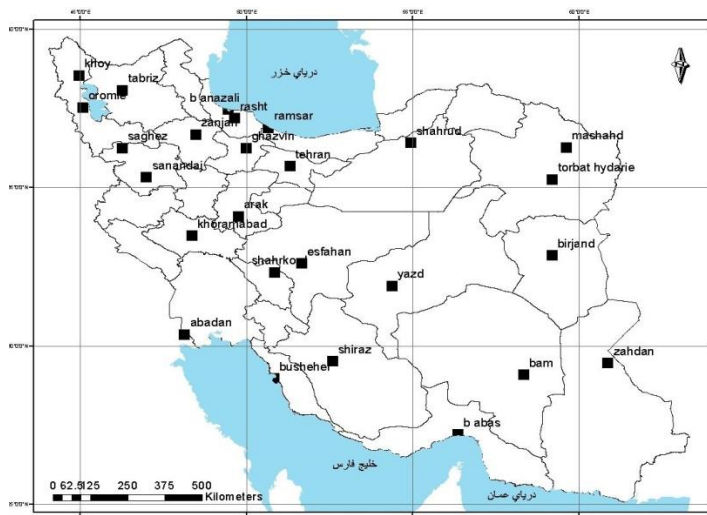
یک موضوع بسیار مهم بررسی اثرات تغییر اقلیم در زمینه های مرتبط ، نظیر وقایع حدی (فرین) در یک منطقه است. در رابطه با اینکه زبان آورترین اثرات تغییرات آب وهوایی به دلیل افزایش پتانسیل (درفرکانس ویا شدت) نمایه های حدی آب وهوایی و وقایع اقلیمی است اتفاق نظر وجود دارد. اگرچه وقایع حدی، به ندرت روی می دهند اما تاثیر مستقیمی بر مردم، کشورها و مناطق آسیب پذیر دارند (Sura, ۲۰۱۲). بستر رخداد وقایع آب وهوایی حدی، شرایط دمایی و بارش های حدی است؛ بنابراین، بررسی داده های اقلیمی حدی امری ضروری به نظر می رسد. (تقوی و محمدی ۱۳۸۶).

هیئت بین دول تغییرات آب وهوایی (IPCC) در سومین گزارش ارزیابی خود (TAR, ۲۰۰۱) پیش بینی کرد که در طول دوره ۱۹۹۰ تا ۲۱۰۰، متوسط دمای جهان ۱/۱ تا ۴/۶ درجه سانتیگراد افزایش خواهد یافت و بیشتر، فراوانی و شدت وقایع حدی اقلیمی (سیل، خشکسالی، وغیره) را متاثر خواهد ساخت. پس از آن گزارشی با عنوان "وقایع حدی رو به افزایش آب و هوایی" در سال ۲۰۰۳ توسط سازمان جهانی هواشناسی (WMO) منتشر شد و بیان داشت که جهان تعداد بی سابقه ای از وقایع آب وهوایی حدی مانند خشکسالی و گردباد را تجربه کرده است و این وقایع همچنان رو به افزایش اند. دلایل وقوع وقایع حدی آب وهوایی و اقلیمی بدلیل نبود کردن زندگی انسانها و افزایش هزینه های مرتبط با آنها در چند سال اخیر بشدت مورد توجه قرار گرفته است (Easterling et al, ۲۰۰۰)، زیرا می توانند اثرات عمده ای بر جامعه، اقتصاد و محیط زیست در پی داشته باشد (Manton et al, ۲۰۰۱). علاوه بر این، اثرات اجتماعی و زیست محیطی این رویدادهای حدی در مقیاس محلی زیاد بوده و می تواند بخشها و مناطق خاصی را به شدت تحت تاثیر قرار دهد. فعالیتهای متعددی در سراسر جهان در رابطه با روند تغییرات نمایه های حدی دما و بارش انجام گرفته است. بر این اساس روند نمایه های حدی اقلیمی بر پایه سری روزانه دما و بارش در اروپا برای دوره ۱۹۹۹-۱۹۴۶ با استفاده از مشاهدات بیش از ۱۰۰ ایستگاه هواشناسی مورد بررسی قرار گرفته است در این بررسی متوسط شاخص فرین های مرطوب در دوره ۱۹۹۹-۱۹۴۶ برای بارش افزایش داشته، ولیکن این روند معنی دار نبوده است. همچنین در مطالعه ای تغییرات ممکن در بارش بیشینه در انگلستان با استفاده از مدل HadCM3 تحت سناریوی انتشار A2 برای سه دوره ۲۰۳۹-۲۰۱۰، ۲۰۶۹-۲۰۴۰ و ۲۰۹۹-۲۰۷۰ بررسی شد (Ekstrom et al, ۲۰۰۵). مساح بوانی و مرید (۱۳۸۴)، اثرات تغییر اقلیم روی دما و بارندگی و رواناب در حوضه آبریز زاینده رود اصفهان را با استفاده از مدل HadCM3 تحت دو سناریوی B2، A2 در دوره های آتی مورد بررسی قرار دادند. و کاهش بارندگی و افزایش دما را پیش بینی نمودند. علاوه بر این اثر تغییر اقلیم بر بارش و دما را در حوضه آبریز زاینده رود در دوره های آتی با استفاده از مدل CGCM3 تحت دو سناریوی انتشار A2 و B2 مورد بررسی قرار گرفت و نتایج نشان دهنده افزایش دما در دوره های آینده و تغییرات بارش بوده است (آذرانفر و ابریشمچی، ۱۳۸۵). تغییرات اقلیمی استان خراسان رضوی در افق ۱۴۰۰ شمسی با استفاده از داده های مدل ECHO-G در دوره ۲۰۱۰-۲۰۳۹ مورد ارزیابی قرار گرفته و نتایج حاکی از کاهش ده درصدی بارش بوده است ولیکن علی رغم این کاهش، آستانه بارش های سنگین و خیلی سنگین افزایش نشان داده است (بابائیان و همکاران، ۱۳۸۷). بررسی مقادیر حدی و روند تغییرات آنها در دوره ۲۰۰۳-۱۹۵۱ در کل کشور نشان داده است هر سه حالت ایستا، روند مثبت و منفی از نمایه های فوق در سطح کشور قابل مشاهده است اما در حالیکه در برخی از مناطق مانند هرمزگان، اصفهان و تهران روند اکثر نمایه ها مثبت و در انطباق با یافته های هیات بین الدول تغییر اقلیم (IPCC) بوده در برخی مناطق مانند آذربایجان و فارس نیز روند اکثر نمایه ها منفی و بر خلاف آن تشخیص داده

شده است (عسگری و همکاران، ۱۳۸۶). همچنین بررسی روند نمایه‌های حدی اقلیمی دما در ایران طی دوره مذکور نشان داد نمایه‌های حدی چون روزهای یخبندان، روزهای یخی، روزهای سرد، شبهای سرد و دامنه تغییرات شبانه-روزی دما در اغلب نقاط کشور دارای روند منفی است و نمایه‌هایی چون روزهای تابستانی، روزهای گرم و شبهای گرم، نیز در اغلب نقاط کشور روند افزایشی داشته‌اند و به‌طور کلی روند نمایه‌ها جدا از موارد استثنایی، همسو با آخرین یافته‌های هیات بین‌الدول تغییر اقلیم و مطالعات جهانی دیگر می‌باشد (رحیم‌زاده و همکاران، ۱۳۸۸). عملکرد دو مدل LARS-WG و ClimGen در شبیه‌سازی متغیرهای دما، بارش و تابش را بررسی کردند نتایج حاکی از عملکرد بهتر مدل LARS-WG در شبیه‌سازی بارش و تابش و عملکرد بهتر مدل ClimGem در شبیه‌سازی دما می‌باشد (بذر افشان و همکاران، ۱۳۸۸). گل محمدی و مساح (۱۳۹۰) با شبیه‌سازی بارش با مدل HadCM3 تحت سناریوی A2 در دوره ۲۰۴۰-۲۰۶۹ میلادی برای حوضه آبریز قرسو، وضعیت خشکسالی این حوضه را در این دوره برای دوره بازگشت‌های مختلف مشخص کردند. مقایسه نتایج حاکی از این بود که در این حوضه طی این دوره شاهد افزایش بارش و به تبع آن کاهش شدت خشکسالی نسبت به دوره پایه خواهد بود. این کاهش شدت، در مقیاس‌های زمانی ۶ و ۱۲ ماهه با افزایش دوره بازگشت افزایش می‌یابد. این در حالی است که برای خشکسالی‌های ۲۴ ماهه با افزایش دوره بازگشت، شدت خشکسالی حوضه بیش از دوره پایه خواهد بود. همچنین ارزیابی شاخص‌های اقلیم کشاورزی تحت سناریوهای تغییر اقلیم در ایستگاه‌های منتخب خراسان رضوی نشان داد در دوره‌های ۲۰۱۰-۲۰۳۹، ۲۰۴۰-۲۰۶۹ طول دوره رشد در دو ایستگاه مشهد و سبزوار افزایش و در تربت حیدریه کاهش می‌یابد اما در هر سه ایستگاه این شاخص در دوره ۲۰۸۰-۲۰۹۹ تا ۱۸/۶ روز افزایش خواهد یافت (بابائیان و کوهی، ۱۳۹۱). بررسی خشکسالی تحت تأثیر تغییر اقلیم در سه دهه آینده در ایستگاه یزد نشان می‌دهد دمای کمینه و بیشینه ایستگاه یزد در دوره ۲۰۳۹-۲۰۱۱ میلادی تحت هر دو سناریوی انتشار A2، B2 نسبت به دوره مشاهداتی افزایش خواهد یافت ولیکن تغییرات بارش منطقه تحت دو سناریوی مورد مطالعه یکسان نبوده به طوری که سناریوی A2 تمامی ماه‌های سال بارش بیشتری را نسبت به دوره مشاهداتی برای این ایستگاه در بردارد. از طرف دیگر سناریوی B2 فقط بارش‌های ماه‌های مارس، می و اکتبر را بیش از دوره مشاهداتی تخمین زده و برای بقیه ماه‌ها بارش کمتری را نسبت به دوره پایه شبیه‌سازی کرد (دستورانی و همکاران، ۱۳۹۰). تحلیل خشکسالی هواشناسی کشاورزی استان گلستان در دوره ۲۰۳۰-۲۰۱۰ میلادی با استفاده از مدل HadCM3 و ریز مقیاس‌نمایی مدل LARS-WG حاکی از آن است که بیشترین فراوانی خشکسالی شدید در دوره ۲۰۳۹-۲۰۱۰ مربوط به ایستگاه کلاله و تحت سناریوی A1B می‌باشد. در همین دوره بیشترین فراوانی خشکسالی بسیار شدید مربوط به ایستگاه گنبد می‌باشد که در سناریوهای B1 و A1B پنج خشکسالی بسیار شدید در این ایستگاه پیش‌بینی می‌شود (کردج‌زی و همکاران، ۱۳۹۰). در این مطالعه تأثیر پدیده تغییر اقلیم بر رژیم بارش ایران زمین و مشخصاً روند تغییرات فراوانی و شدت خشکسالی کشور تحت تأثیر تغییر اقلیم طی دهه‌های آتی مورد بررسی قرار گرفته است. در این تحقیق با استفاده از مدل مولد LARS-WG بر اساس مدل HadCM3 و تحت سناریوی انتشار A1B، A2 داده‌های دوره‌های آتی تولید و خشکسالی با استفاده از نمایه SPI محاسبه و در نهایت با اعمال روش تحلیل فراوانی بر سری‌های زمانی دوره پایه و داده‌های حاصل از مدل‌های اقلیمی، شدت - فراوانی و دوره برگشت خشکسالی‌های دوره پایه و دهه‌های آتی ۲۰۴۰-۲۰۱۱ محاسبه و ارزیابی شده است.

## داده ها و روش کار

منطقه مورد مطالعه : با توجه به هدف تحقیق منطقه مورد مطالعه گستره ایران زمین است و داده های مورد نیاز برای این پژوهش از مجموع بارش روزانه و سری های اقلیمی دمای حداقل، حداکثر و ساعات آفتابی در مقیاس روزانه از ۲۷ ایستگاه سینوپتیک که دارای داده های معتبر و طولانی مدت (۱۹۹۰-۱۹۶۱) بوده اند انتخاب گردیده است. لازم به ذکر است انتخاب ایستگاه های با توجه به در دسترس بودن داده های بارش، توزیع مناسب منطقه ای، هم دوره بودن اطلاعات ایستگاه ها در دوره های آماری انتخاب شده است. در تحقیق حاضر همچنین از داده های مجموع بارش ماهانه ایستگاه های سینوپتیک منتخب طی دوره پایه (۱۹۹۰-۱۹۶۱) برای پایش خشکسالی استفاده گردیده است در شکل شماره (۱) پراکندگی ایستگاه های مورد مطالعه نشان داده شده است.



شکل ۱: پراکندگی ایستگاه های مورد مطالعه در سطح کشور

### - سناریوهای اقلیمی و سناریوهای انتشار

مدل های GCM مدل های سه بعدی هستند که بر پایه قوانین فیزیکی (که بوسیله روابط ریاضی ارائه می شوند) استوار می باشند و متغیرهای اقلیمی تحت سناریوهای مختلف انتشار (A1, A2, B1, B2) در دوره های زمانی مختلف شبیه سازی می گردند. در این سناریوها مقادیر گازهای گلخانه ای با نرخ ثابت تا سال ۲۱۰۰ افزایش می یابد. (IPCC, ۲۰۰۷, ۲۰۰۶, Wilby R.L. and I. Harris). در این تحقیق از خروجی مدل HadCM3، تحت سناریوی A1B و A2 استفاده شده است.

### - روشها

#### الف) کوچک مقیاس نمایی

در مطالعات ارزیابی تغییرات اقلیم در سطوح منطقه ای، یکی از مشکلات اصلی در استفاده از مدل های موجود، وسعت محدوده پیش بینی متغیرها در این مدل ها است که با توجه به تغییرات توپوگرافی و اقلیم در این محدوده، نمی توان از نتایج مستقیم در مقیاس ایستگاهی استفاده نمود. برای رفع این نقیصه، روش های مختلفی جهت تولید سناریوهای اقلیمی در مقیاس منطقه ای ایجاد شده اند که به آن ها ریز مقیاس کردن (Down-Scaling) گفته می شود (حق طلب و همکارن، ۱۳۹۲). از این روی با توجه به قدرت تفکیک پایین زمانی و مکانی این مدلها و عدم قطعیت بالای آنها در خروجی های روزانه بویژه بارش، استفاده مستقیم از این خروجی ها در مطالعات تحلیل رویدادهای فرین و کاربرد در

مدل های مختلف را نامناسب ساخته است (Semenov, ۲۰۰۸). لذا جهت استفاده از این داده ها لازم است تا خروجی های این مدل ها توسط تکنیک های مختلف در سطوح ایستگاهی ریز مقیاس گردد. یکی از این ابزارها مدل LARS-WG می باشد.

#### – مدل LARS-WG

مدل LARS-WG مولد مصنوعی داده های آب و هوایی است که می تواند برای شبیه سازی داده های هواشناسی در یک مکان واحد تحت شرایط اقلیم حال و آینده بکار رود. خواص آماری داده های تولید شده مشابه دوره آماری بوده اما انحراف معیار آنها به نسبت اختلاف داده های مدل GCM در دوره آینده و گذشته پیشیده می شود این مدل توانایی تولید سری های زمانی داده های آب و هوایی یکسان با دوره دیده بانی را داراست (Semenov, ۲۰۰۸; ۲۰۱۰).

نسخه اولیه LARS-WG در بوداپست طی سال ۱۹۹۰ به عنوان بخشی از پروژه ارزیابی ریسک های کشاورزی در کشور مجارستان ابداع شد (Racsko, ۱۹۹۹). هدف اصلی از این کار غلبه بر محدودیت های زنجیره مارکف در وقوع بارش بود. جدیدترین نسخه LARS-WG به طور کامل باز بینی شد که در نتیجه آن یک مدل قوی برای تولید داده های مصنوعی آب و هوایی برای محدوده های وسیعی از اقلیم ایجاد گردید.

#### ب) شاخص استاندارد شده بارش (SPI)

کمبود بارش بر رطوبت خاک، جریان سطحی، ذخیره منابع و سطح آب های زیرزمینی و غیره در مقیاس های زمانی متفاوت اثر می گذارد. در مقیاس زمانی کوتاه مدت، این کمبود عمدتاً بر روی وضعیت رطوبت خاک اثر می گذارد، در صورتی که کمبود بارش طولانی مدت اغلب بر آب های زیرزمینی، جریان رودخانه و ذخایر منابع آب موثر است. مک کی و همکاران (۱۹۹۳) شاخص SPI را برای کمی کردن کمبود بارش در مقیاس های زمانی چندگانه معرفی کردند (McKee et al, ۱۹۹۳). بطوریکه این نمایه در توصیف خشکسالی در هانگری توسط پژوهشگران مورد استفاده قرار گرفت (Szinell et al, ۱۹۹۸; Szalai et al, ۲۰۰۰) ایشان نتیجه گرفتند که SPI برای کیفی کردن بیشتر انواع خشکسالی مناسب می باشد. محاسبه SPI برای هر مکان، با استفاده از رکوردهای طولانی مدت در دوره زمانی مورد نظر صورت می گیرد. این داده ها، با یک توزیع احتمالاتی برازش داده می شوند و سپس به یک توزیع نرمال تبدیل می گردند، به طوری که میانگین SPI برای هر منطقه در دوره مورد بررسی صفر است (Hayes, ۲۰۰۱). جدول شماره (۴) مقیاس طبقه بندی SPI را نشان می دهد (McKee et al, ۱۹۹۵).

جدول ۱: طبقه بندی خشکسالی با مقادیر SPI و احتمالات مرتبط با هر رویداد

| مقدار SPI                  | طبقه             | طبقه          | احتمال % |
|----------------------------|------------------|---------------|----------|
| بیشتر از ۲+                | Extremely Wet    | ترسالی حاد    | ۲/۳      |
| $1/5 \leq SPI \leq +1/99$  | Severely Wet     | ترسالی شدید   | ۴/۴      |
| $1 \leq SPI \leq 1/49$     | Moderately Wet   | ترسالی متوسط  | ۹/۲      |
| $-0/99 \leq SPI \leq 0$    | Mildly Dry       | ترسالی خفیف   | ۳۴/۱     |
| $0 \leq SPI \leq -0/99$    | Mild drought     | خشکسالی خفیف  | ۳۴/۱     |
| $-1/49 \leq SPI \leq -1$   | Moderate drought | خشکسالی متوسط | ۹/۲      |
| $-1/99 \leq SPI \leq -1/5$ | Severe Drought   | خشکسالی شدید  | ۴/۴      |
| $SPI \leq -2$              | Extreme Drought  | خشکسالی حاد   | ۲/۳      |

### ج) محاسبه شدت خشکسالی تجمعی وزنی سالانه (AWCDS)

در این مطالعه به منظور رسم منحنی شدت خشکسالی-مقیاس زمانی SPI- دوره بازگشت ابتدا عامل شدت خشکسالی تجمعی وزنی سالانه (AWCDS) محاسبه شده است (Loukas et al, ۲۰۰۴ ; Kim et al, ۲۰۰۲) و سپس آنالیز فراوانی بر روی آن انجام شد. مراحل محاسبه این شاخص به شرح ذیل می باشد:

- محاسبه مقادیر SPI ماهانه برای کلیه مقیاس های ۳، ۱۲ و ۲۴ ماهه

مجموع سالانه مقادیر SPI در دوره های خشک ماهانه ( $SPI < -0.5$ ) در هر مقیاس زمانی با فراوانی وقوع خشکسالی در هر سال ضرب گردید.

فراوانی وقوع خشکسالی از تقسیم تعداد ماههایی که ( $SPI < -1$ ) است بر عدد ۱۲ ماه بدست می آید. این مراحل برای مقیاس های ۳، ۱۲ و ۲۴ ماهه SPI و برای دوره مشاهداتی و آتی برای دو سناریو A۲ و A۱B محاسبه شده است.

پس از محاسبه شدت خشکسالی تجمعی وزنی سالانه (AWCDS) و برازش توزیع های مختلف آماری به آمار آنها، با استفاده از کمترین خطای استاندارد بهترین توزیع انتخاب شده است. لازم به ذکر است در این مطالعه به منظور بررسی منطقه ای خشکسالی، کشور به ۹ منطقه تقریباً همگن از نظر اقلیمی و موقعیتی که شامل شمال، شمال غرب، جنوب غرب، جنوب شرق، جنوب شرق و شمال شرق و مرکزی تقسیم بندی شد، و نمودارهای شدت خشکسالی تجمعی -مقیاس زمانی SPI- دوره بازگشت برای مقیاس های زمانی ۳، ۱۲ و ۲۴ ماهه برای دوره مشاهداتی و آتی برای این مناطق ترسیم و مقایسه شده است. در نهایت پهنه بندی نمایه شدت خشکسالی برای کل ایران برای دوره های برگشت ۵، ۱۰، ۲۰، ۲۵ و ۵۰ نشان داده شده است.

### شرح و تفسیر نتایج

- نتایج صحت سنجی واطمینان از توانمندی مدل LARS-WG برای شبیه سازی مقادیر بارش در دهه های آینده : به منظور صحت سنجی واطمینان از توانمندی مدل LARS-WG برای شبیه سازی مقادیر بارش در دهه های آینده، ابتدا مدل برای دوره آماری ۱۹۹۰-۱۹۶۱ اجرا گردید و سپس خروجی های (در اینجا) مقادیر بارش روزانه، با داده های ۳۰ سال دیدبانی شده ایستگاههای مورد مطالعه مقایسه و با استفاده از آزمونهای آماری و نمودارهای مقایسه ای اعتباریابی شدند. علاوه بر این کاربرد آزمونهای آماری (T زوجی و F) اختلاف معناداری بین مقادیر مدل سازی شده و مقادیر واقعی را نشان نمی دهد. نتایج حاصل از آزمون t برای این ایستگاه ها نشان داد که بین میانگین شبیه سازی شده ی بارش با مقدار واقعی آن طی دوره پایه، اختلاف معنی داری در سطح معنی داری ۰/۰۵ وجود ندارد. همبستگی مقادیر مشاهداتی و شبیه سازی شده برای ایستگاه های مورد مطالعه در جدول شماره (۲) ارائه شده است و نشان می دهد در اکثر ایستگاهها مقادیر همبستگی بیش از ۹۵٪ درصد است و تنها در ایستگاههای ارومیه، تبریز و بم این مقدار کمتر از ۹۵٪ است. به طور کلی حاکی است، مدل LARS-WG توانمندی مدل سازی اقلیم را در بر داشته و می توان از نتایج مدل فوق برای شبیه سازی اقلیم آینده از آن بهره جست.

جدول ۲: مقایسه مقادیر بارش مشاهداتی و شبیه سازی شده توسط مدل LARS-WG5 در دوره ۱۹۹۰-۱۹۶۱

| ایستگاه    | ضریب همبستگی | ایستگاه  | ضریب همبستگی | ایستگاه     | ضریب همبستگی |
|------------|--------------|----------|--------------|-------------|--------------|
| خوی        | ۰/۹۸         | زاهدان   | ۰/۹۸         | تهران       | ۰/۹۹         |
| ارومیه     | ۰/۹۰         | اراک     | ۰/۹۶         | تربت حیدریه | ۰/۹۹         |
| تبریز      | ۰/۹۲         | بیم      | ۰/۹۰         | یزد         | ۰/۹۶         |
| بندر انزلی | ۰/۹۷         | آبادان   | ۰/۹۲         | زنجان       | ۰/۹۹         |
| بیرجند     | ۰/۹۹         | شیراز    | ۰/۹۸         | رشت         | ۰/۹۸         |
| بوشهر      | ۰/۹۷         | سنندج    | ۰/۹۴         | رامسر       | ۰/۹۸         |
| اصفهان     | ۰/۹۷         | سقز      | ۰/۹۷         | شاهرود      | ۰/۹۸         |
| مشهد       | ۰/۹۹         | بندرعباس | ۰/۹۴         | شهرکرد      | ۰/۹۹         |
| خرم آباد   | ۰/۹۹         | کرمانشاه | ۰/۹۸         |             |              |

### مقایسه تعداد ماههای خشک و مرطوب طی دوره پایه و دوره آتی (۲۰۴۰-۲۰۱۱):

از آنجا که هدف مطالعه حاضر شناخت دوره های خشک و تر در ایران طی دوره پایه و مقایسه آن با دوره های آتی است، بنابراین در این مطالعه به منظور بررسی تغییرپذیری بارش و پایش خشکسالی از روش شاخص بارش استاندارد شده SPI استفاده شد. زیرا این شاخص، ابزاری قوی برای تحلیل داده های بارندگی است. هدف شاخص SPI اختصاص ارزش عددی به بارندگی است، تا بتوان نواحی با آب و هوای کاملاً متفاوت را مقایسه کرد. شاخص فوق با مقایسه کل بارش تجمعی برای ایستگاه یا ناحیه ای خاص در یک فاصله زمانی ویژه برای مثال ماه گذشته و یا ۳ ماه گذشته با میانگین بارش برای همان فاصله زمانی در تمام دوره آماری بدست می آید. محاسبه شاخص برای هر منطقه ای معین بر پایه ی آمار درازمدت بارش برای یک دوره دلخواه ۱،۳،۶،۱۰،... می باشد. با مطالعه انجام شده بر روی ایستگاههای منتخب، مشخص گردید که در تمامی ایستگاههای مورد مطالعه پدیده خشکسالی و کاهش بارش وجود دارد و در تمامی ایستگاههای کشور از مناطق کم بارش تا مناطق پر بارش با پدیده خشکسالی روبرو هستیم. در رابطه با ریسک پذیری نسبت به پدیده خشکسالی در مناطق مختلف ایران، با وجود اینکه در کلیه مناطق کشور خشکسالی تکرار پذیر است اما تفاوت هایی نیز مشاهده می شود، همچنین نتایج بیانگر وقوع فراوانی بیشتر خشکسالی و تر سالی های ضعیف نسبت به وقوع خشکسالی و تر سالی متوسط و شدید است. وقوع بارش های حدی، رویداد های نظیر سیل، تر سالی و خشکسالی های شدید را باعث می گردد، این رویدادها پدیده های کمیاب با درجه سختی بالایی هستند که وقوع آنها جوامع بشری را تحت تاثیر قرار می دهد. با استفاده از پیش آگاهی هایی که امروزه به کمک خروجی های مدل AOGCM برای مقادیر بارش در دهه های آتی در اختیار است، به نظر می رسد می توان از خروجی این مدل ها برای پیش بینی و پیش آگاهی چگونگی نمایه های حدی نظیر خشکسالی - بهره گرفت، تا بدین ترتیب بتوان برنامه ریزی مناسبی برای سازگاری و مقابله با آن در سطح کشور فراهم نمود. نتایج بسیاری از مطالعات بیانگر وجود روند افزایشی قابل ملاحظه در مقیاس های منطقه ای است و تعداد کمی از مطالعات نیز بیانگر روند منفی و یا عدم وجود آن بوده که استنتاج فوق، کم و بیش در هماهنگی با نتایج بدست آمده از اجرای مدل های اقلیمی با در نظر گرفتن افزایش گاز های گلخانه ای می باشد. در شکل های شماره ۲ و ۳ نسبت فراوانی خشکسالی ایستگاههای مورد مطالعه طی دوره پایه ۹۰-۱۹۶۱ را به دوره آتی ۲۰۴۰-۲۰۱۱ را بر اساس مدل HadCM3 و سناریوهای A1B و A2 را برای بازه زمانی سه ماهه به تصویر کشیده است. همچنین در جداول شماره ۳ و ۴ مقایسه تعداد ماههای خشک، نرمال و مرطوب در دوره پایه و دوره آتی ۲۰۴۰-۲۰۱۱ برای

تداوم زمانی ۳ و ۲۴ ماهه درج شده است. با توجه به شکل ۲ ایستگاه بندر عباس با ۲۸ درصد فراوانی بیشترین روند منفی را در بین ایستگاهها نشان می دهد. به عبارتی الگوی حاصل از مدل HadCM۳ و بر اساس سناریوی A۱B بیانگر نرخ کاهشی در فراوانی رخداد خشکسالی های ایستگاه بندر عباس در دهه های آتی را بیان می دارد. همچنین نتایج حاصل از مدل فوق حاکی از کاهش در رفتار خشکسالی های سال های آتی در ایستگاههای خوی، رشت، بندر انزلی، بوشهر و مشهد را نسبت به دوره پایه نشان می دهد. این در حالی است که نتایج حاصل از مدل HadCM۳ و بر اساس سناریوی های A۱B و A۲ برای پایش خشکسالی با بازه زمانی سه ماهه بیانگر افزایش رخداد خشکسالی بیش از ۱۰ درصد نسبت به دوره پایه را در ایستگاههای واقع در غرب کشور (سقز، شهرکرد، سنندج، کرمانشاه و خرم آباد) را نشان می دهد، که با توجه به سهم قابل ملاحظه این منطقه در تامین آب رودخانه های بزرگ کشور نظیر رودخانه های دز، کارون و کرخه و استقرار بخش عمده ای از سازه های آبی در این منطقه، افزایش روند خشکسالی می تواند تهدیدی برای منطقه باشد و تنش های آبی و زیست محیطی را در دهه های آتی به همراه داشته باشد.

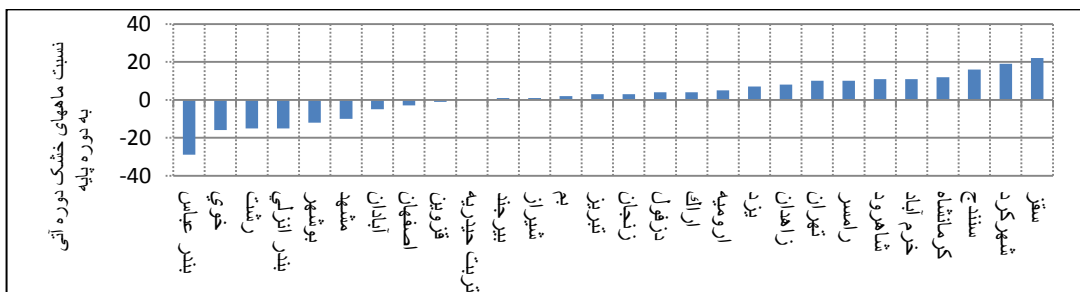
جدول ۳: تعداد ماههای خشک، نرمال و مرطوب در دوره مشاهداتی و دوره آتی ۲۰۴۰-۲۰۱۱ برای تداوم زمانی ۳ ماهه

| نام ایستگاه | دوره مشاهداتی |              |              | Had CM۳-A۱B |              |              | Had CM۳-A۲ |              |              |
|-------------|---------------|--------------|--------------|-------------|--------------|--------------|------------|--------------|--------------|
|             | ماههای خشک    | ماههای مرطوب | ماههای نرمال | ماههای خشک  | ماههای مرطوب | ماههای نرمال | ماههای خشک | ماههای مرطوب | ماههای نرمال |
| آبادان      | ۴۲            | ۲۰۳          | ۱۱۲          | ۴۰          | ۵۲           | ۲۶۴          | ۲۰         | ۶۳           | ۲۷۱          |
| اراک        | ۴۳            | ۲۴۵          | ۶۲           | ۴۶          | ۶۱           | ۲۵۰          | ۴۶         | ۶۱           | ۲۵۰          |
| بندر عباس   | ۳۰            | ۲۶۹          | ۵۹           | ۲۰          | ۵۸           | ۲۷۴          | ۲۰         | ۶۳           | ۲۷۱          |
| بم          | ۳۴            | ۲۶۹          | ۵۵           | ۳۴          | ۶۲           | ۲۵۸          | ۳۲         | ۵۸           | ۲۶۴          |
| بندر انزلی  | ۶۱            | ۲۳۶          | ۶۰           | ۵۷          | ۵۶           | ۲۴۲          | ۵۶         | ۵۴           | ۲۴۴          |
| بیرجند      | ۳۳            | ۲۴۵          | ۷۷           | ۳۲          | ۵۷           | ۲۶۷          | ۳۰         | ۵۲           | ۲۷۵          |
| بوشهر       | ۴۰            | ۲۰۷          | ۱۱۰          | ۳۷          | ۸۲           | ۲۳۸          | ۳۸         | ۶۸           | ۲۵۱          |
| اصفهان      | ۳۷            | ۲۵۳          | ۶۶           | ۳۵          | ۶۰           | ۲۵۹          | ۴۰         | ۵۴           | ۲۶۰          |
| قزوین       | ۶۰            | ۲۲۵          | ۷۱           | ۵۸          | ۵۹           | ۲۴۲          | ۵۵         | ۶۰           | ۲۴۳          |
| کرمانشاه    | ۴۰            | ۲۵۱          | ۶۱           | ۴۸          | ۵۵           | ۲۴۸          | ۵۰         | ۵۸           | ۲۵۰          |
| خرم آباد    | ۳۷            | ۲۵۸          | ۶۴           | ۴۴          | ۵۷           | ۲۵۷          | ۴۰         | ۵۳           | ۲۶۴          |
| خوی         | ۶۹            | ۲۳۳          | ۵۵           | ۶۰          | ۶۱           | ۲۴۲          | ۶۲         | ۵۹           | ۲۴۰          |
| مشهد        | ۴۷            | ۲۴۶          | ۶۶           | ۴۴          | ۵۵           | ۲۵۷          | ۵۷         | ۵۸           | ۲۴۳          |
| ارومیه      | ۵۱            | ۲۴۵          | ۵۶           | ۵۴          | ۶۰           | ۲۴۵          | ۵۶         | ۶۱           | ۲۳۹          |
| رامسر       | ۵۶            | ۲۴۶          | ۵۰           | ۶۲          | ۶۱           | ۲۳۸          | ۶۳         | ۵۶           | ۲۴۲          |
| رشت         | ۵۸            | ۲۲۹          | ۶۷           | ۵۳          | ۵۸           | ۲۴۶          | ۶۰         | ۵۷           | ۲۳۹          |
| سقز         | ۴۱            | ۲۵۸          | ۵۶           | ۵۷          | ۵۵           | ۲۴۵          | ۵۰         | ۵۶           | ۲۵۱          |
| سنندج       | ۴۲            | ۲۵۷          | ۵۷           | ۵۰          | ۶۰           | ۲۴۸          | ۴۷         | ۵۸           | ۲۵۱          |
| شاهرود      | ۵۶            | ۲۳۹          | ۶۰           | ۶۲          | ۵۸           | ۲۳۹          | ۶۲         | ۶۱           | ۲۳۵          |
| شهرکرد      | ۳۸            | ۲۵۲          | ۶۷           | ۵۰          | ۵۵           | ۲۵۰          | ۴۸         | ۶۰           | ۲۴۷          |
| شیراز       | ۳۸            | ۲۶۳          | ۵۶           | ۳۷          | ۹۲           | ۲۳۱          | ۳۶         | ۶۰           | ۲۶۵          |
| تبریز       | ۵۸            | ۲۳۷          | ۵۹           | ۵۹          | ۵۲           | ۲۴۶          | ۶۰         | ۵۴           | ۲۴۵          |
| تهران       | ۴۶            | ۲۴۹          | ۵۸           | ۵۱          | ۶۸           | ۲۳۹          | ۴۹         | ۶۸           | ۲۴۰          |
| تربت حیدریه | ۳۸            | ۲۵۶          | ۶۱           | ۳۶          | ۶۴           | ۲۵۳          | ۳۳         | ۶۳           | ۲۵۸          |
| یزد         | ۳۵            | ۲۱۲          | ۱۰۹          | ۳۸          | ۵۷           | ۲۶۲          | ۳۷         | ۵۵           | ۲۶۴          |
| زاهدان      | ۳۲            | ۲۷۰          | ۵۶           | ۳۶          | ۶۹           | ۲۵۲          | ۳۲         | ۶۴           | ۲۵۹          |
| زنجان       | ۵۹            | ۲۳۹          | ۶۴           | ۶۰          | ۵۸           | ۲۳۹          | ۵۴         | ۶۲           | ۲۴۳          |

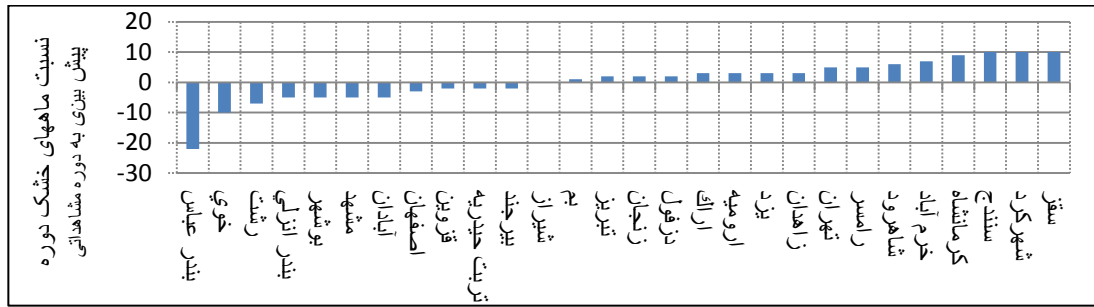


جدول ۴: تعداد ماههای خشک، نرمال و مرطوب در دوره مشاهداتی و دوره آتی ۲۰۴۰-۲۰۱۱ برای تدام ۲۴ ماهه

| نام ایستگاه | دوره مشاهداتی |              |              | Had CM <sup>۳</sup> -A <sup>۱</sup> B |              |              | Had CM <sup>۳</sup> -A <sup>۲</sup> |              |              |
|-------------|---------------|--------------|--------------|---------------------------------------|--------------|--------------|-------------------------------------|--------------|--------------|
|             | ماههای خشک    | ماههای مرطوب | ماههای نرمال | ماههای خشک                            | ماههای مرطوب | ماههای نرمال | ماههای خشک                          | ماههای مرطوب | ماههای نرمال |
| آبادان      | ۵۲            | ۵۵           | ۲۳۱          | ۵۹                                    | ۵۳           | ۲۲۵          | ۶۳                                  | ۵۳           | ۲۲۱          |
| اراک        | ۶۸            | ۵۶           | ۲۱۳          | ۲۲                                    | ۴۶           | ۲۵۹          | ۳۱                                  | ۵۳           | ۲۵۳          |
| بندر عباس   | ۷۳            | ۷۱           | ۱۹۴          | ۶۳                                    | ۶۱           | ۲۱۳          | ۵۳                                  | ۷۶           | ۲۱۰          |
| بم          | ۵۹            | ۶۵           | ۲۱۴          | ۶۶                                    | ۶۳           | ۲۱۰          | ۶۹                                  | ۷۴           | ۱۹۴          |
| بندر انزلی  | ۵۶            | ۵۸           | ۲۳۵          | ۴۳                                    | ۶۶           | ۲۳۰          | ۴۹                                  | ۶۲           | ۲۲۸          |
| بیرجند      | ۶۶            | ۶۵           | ۲۱۷          | ۴۵                                    | ۴۶           | ۲۴۶          | ۵۴                                  | ۵۷           | ۲۲۷          |
| بوشهر       | ۶۰            | ۴۲           | ۲۴۸          | ۵۹                                    | ۷۵           | ۲۰۳          | ۶۷                                  | ۴۷           | ۲۲۸          |
| اصفهان      | ۷۰            | ۵۵           | ۲۲۴          | ۵۶                                    | ۶۹           | ۲۱۴          | ۳۹                                  | ۶۵           | ۲۳۵          |
| قزوین       | ۵۹            | ۶۴           | ۲۲۶          | ۴۸                                    | ۵۷           | ۲۳۴          | ۴۹                                  | ۵۴           | ۲۳۶          |
| کرمانشاه    | ۲۷            | ۳۰           | ۲۹۵          | ۴۸                                    | ۵۱           | ۲۳۸          | ۴۷                                  | ۵۷           | ۲۳۴          |
| خرم آباد    | ۳۸            | ۴۷           | ۲۶۳          | ۵۹                                    | ۶۲           | ۲۱۸          | ۵۳                                  | ۶۰           | ۲۲۴          |
| خوی         | ۵۶            | ۵۲           | ۲۳۰          | ۶۷                                    | ۴۳           | ۲۲۷          | ۵۹                                  | ۴۲           | ۲۳۶          |
| مشهد        | ۷۱            | ۶۶           | ۲۱۲          | ۵۳                                    | ۶۵           | ۲۱۹          | ۶۰                                  | ۶۷           | ۲۱۰          |
| ارومیه      | ۴۹            | ۳۵           | ۲۶۴          | ۴۸                                    | ۳۷           | ۲۵۳          | ۶۱                                  | ۷۲           | ۲۰۴          |
| رامسر       | ۶۲            | ۵۴           | ۲۳۳          | ۴۹                                    | ۶۱           | ۲۲۷          | ۶۳                                  | ۵۴           | ۲۲۰          |
| رشت         | ۵۵            | ۴۵           | ۲۴۸          | ۶۳                                    | ۶۶           | ۲۰۸          | ۴۳                                  | ۶۵           | ۲۲۹          |
| سقز         | ۲۳            | ۱۴           | ۳۱۱          | ۶۵                                    | ۶۶           | ۲۰۶          | ۶۲                                  | ۵۹           | ۲۱۸          |
| سنندج       | ۶۷            | ۴۶           | ۲۳۶          | ۵۳                                    | ۵۰           | ۲۳۴          | ۵۴                                  | ۵۱           | ۲۳۲          |
| شاهرود      | ۷۷            | ۵۳           | ۲۲۱          | ۶۴                                    | ۵۳           | ۲۳۴          | ۶۳                                  | ۵۵           | ۲۲۱          |
| شهرکرد      | ۴۸            | ۵۵           | ۲۴۶          | ۶۰                                    | ۵۸           | ۲۲۰          | ۴۹                                  | ۶۶           | ۲۲۳          |
| شیراز       | ۶۷            | ۵۹           | ۲۲۲          | ۶۰                                    | ۵۹           | ۲۱۸          | ۵۴                                  | ۵۵           | ۲۲۸          |
| تبریز       | ۵۱            | ۵۴           | ۲۴۴          | ۵۷                                    | ۳۵           | ۲۴۶          | ۶۰                                  | ۴۳           | ۲۳۵          |
| تهران       | ۵۴            | ۳۳           | ۲۶۲          | ۷۳                                    | ۳۹           | ۲۲۶          | ۷۶                                  | ۴۹           | ۲۱۲          |
| تربت حیدریه | ۵۸            | ۶۱           | ۲۳۰          | ۵۷                                    | ۷۳           | ۲۰۷          | ۶۳                                  | ۵۳           | ۲۲۱          |
| یزد         | ۴۸            | ۵۰           | ۲۵۱          | ۶۵                                    | ۴۴           | ۲۲۹          | ۵۷                                  | ۴۲           | ۲۳۸          |
| زاهدان      | ۵۷            | ۷۴           | ۲۱۷          | ۴۸                                    | ۶۱           | ۲۲۸          | ۶۵                                  | ۶۲           | ۲۱۱          |
| زنجان       | ۴۴            | ۴۴           | ۲۶۱          | ۵۴                                    | ۷۲           | ۲۱۲          | ۶۲                                  | ۶۹           | ۲۰۶          |

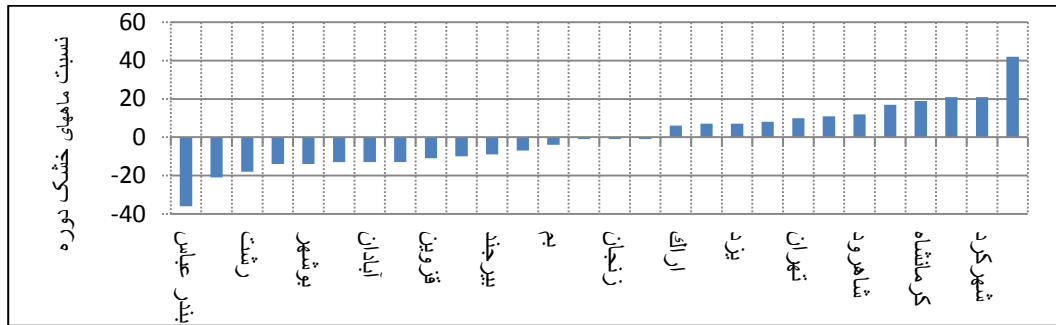


شکل ۲: نسبت فراوانی خشکسالی ایستگاههای منتخب دوره پایه و دوره ۲۰۴۰-۲۰۱۱ براساس مدل Had CM<sup>۳</sup> و سناریوی A<sup>۱</sup>B برای مقیاس زمانی ۳ ماهه

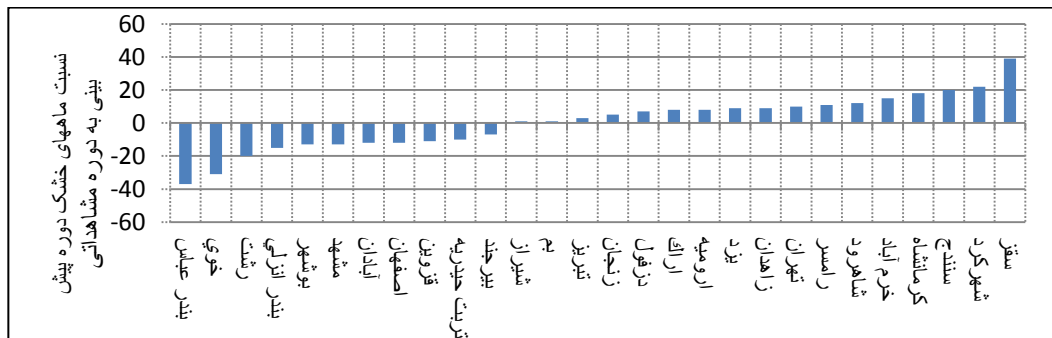


شکل ۳: نسبت فراوانی خشکسالی ایستگاههای منتخب دوره مشاهداتی و دوره ۲۰۱۱-۲۰۴۰ براساس سناریوی CM۳-A۲Had برای مقیاس زمانی ۳ ماهه

نتایج حاصل از مقایسه رفتار خشکسالی های بلند مدت ( با بازه زمانی ۲۴ ماهه) طی دوره پایه ۹۰-۱۹۶۱ با خشکسالی های دوره آتی ۲۰۱۱-۲۰۳۹ در شکل های ۴ و ۵ ارائه شده است. همانگونه که ملاحظه می شود الگوی حاصل از مدل HadCM۳ و بر اساس هر دو سناریوی A۲ و A۱B نتایج مشابهی را نشان می دهند و مطابق با نتایج حاصل از رفتار خشکسالی در بازه زمانی سه ماهه ایستگاههای بندرعباس، خوی، رشت، بندر انزلی، بوشهر، آبادان و مشهد جزء مناطقی هستند که طی دهه های آتی با کاهش بین ده تا سی درصد مواجه هستند.



شکل ۴: نسبت فراوانی خشکسالی ایستگاههای منتخب دوره مشاهداتی و دوره ۲۰۱۱-۲۰۳۹ براساس سناریوی Had CM۳-A۱B برای مقیاس زمانی ۲۴ ماهه



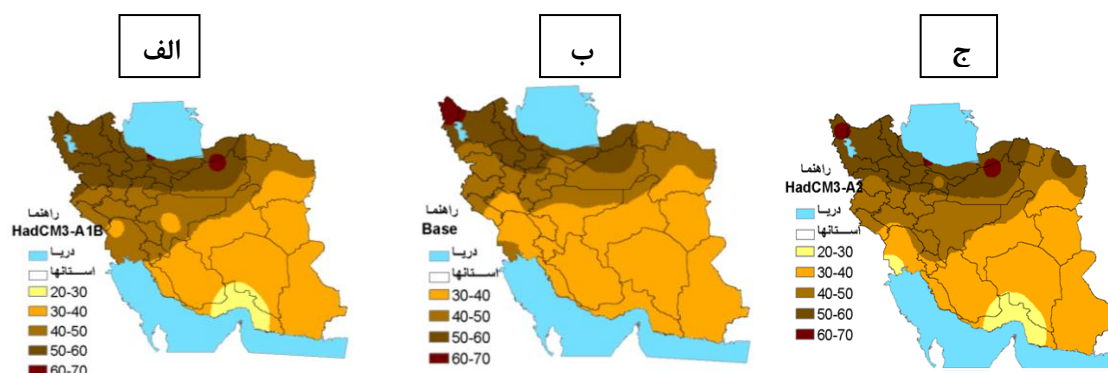
شکل ۵: نسبت فراوانی خشکسالی ایستگاههای منتخب دوره مشاهداتی و دوره ۲۰۱۱-۲۰۴۰ براساس سناریوی CM۳-A۲Had برای مقیاس زمانی ۲۴ ماهه

پهنه بندی توزیع فراوانی خشکسالی برای دوره مشاهداتی و دوره آتی

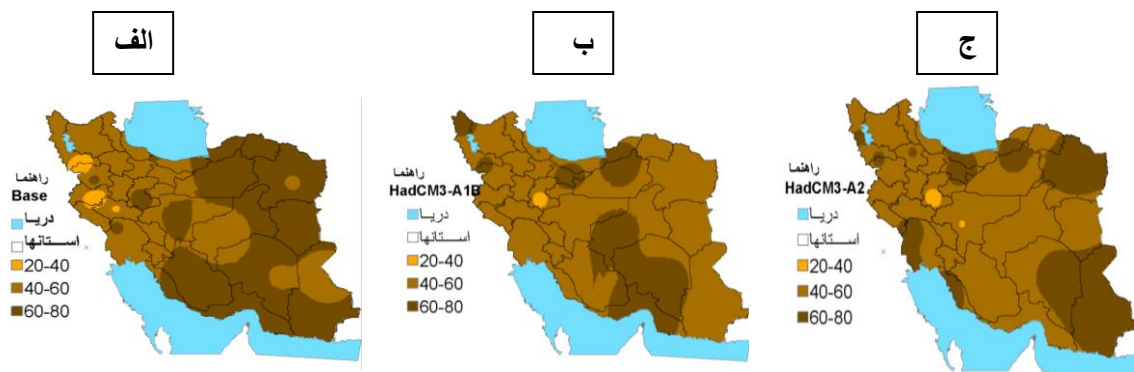
در شکل شماره ۶ حالت ( الف ) پهنه بندی فراوانی خشکسالی بر اساس شاخص SPI و برای بازه زمانی سه ماهه (طی) دوره ۱۹۹۰-۱۹۶۱) را نشان می دهد. همانطور که در این شکل ملاحظه می گردد، بیشترین فراوانی در رخداد خشکسالی های با بازه سه ماهه مربوط به مناطق شمال غرب و کرانه های دریای خزر می باشد که با بیش از ۵۰

رخداد خشکسالی بیشترین سهم را در سطح کشور به خود اختصاص داده اند. به عبارتی فراوانی وقوع ماههای کم آب در این مناطق (نسبت به متوسط بارش همان مناطق) طی دوره پایه بیش از سایر ایستگاههای کشور بوده است. استان های شمال شرقی، و استانهای واقع در جنوب رشته کوههای البرز و غرب کشور نیز با فراوانی رخداد خشکسالی بین ۴۰ تا ۵۰ دوره در رتبه دوم قرار دارند، سایر استانهای کشور با رخداد خشکسالی های کوتاه مدت بین ۳۰ تا ۴۰ دوره، طی دوره پایه کمترین فراوانی در رخداد خشکسالی را طی دوره پایه به خود اختصاص داده اند. پهنه بندی توزیع فراوانی خشکسالی برای (شکل شماره ۶ حالت (ب و ج) دوره آتی بر اساس سناریوهای A2, A1B برای تداوم زمانی ۳ ماهه، بیانگر شباهت الگوی نقشه های دوره های آتی با دوره پایه است، بنحوی که طی دهه های آتی بیشترین فراوانی رخداد خشکسالی در کرانه های دریای خزر و شمال غرب ایران و استان های واقع در جنوب رشته کوههای البرز رخ خواهد داد.

شکل شماره ۷ حالت (الف) پهنه بندی فراوانی خشکسالی بر اساس شاخص SPI و برای بازه زمانی ۲۴ ماهه یا بلندمدت (طی دوره ۱۹۹۰-۱۹۶۱) را نشان می دهد. با توجه به الگوی نقشه فوق، میزان خشکسالی در دوره پایه در نواحی شمال شرقی، شرقی و جنوبی حدود ۶۰ تا ۸۰ دوره به وقوع پیوسته است. که در دوره های آتی (شکل شماره ۷ حالت (ب و ج) و بر اساس سناریوهای A2, A1B فراوانی خشکسالی آن در این نواحی شمال شرقی به ۴۰ تا ۶۰ می رسد.



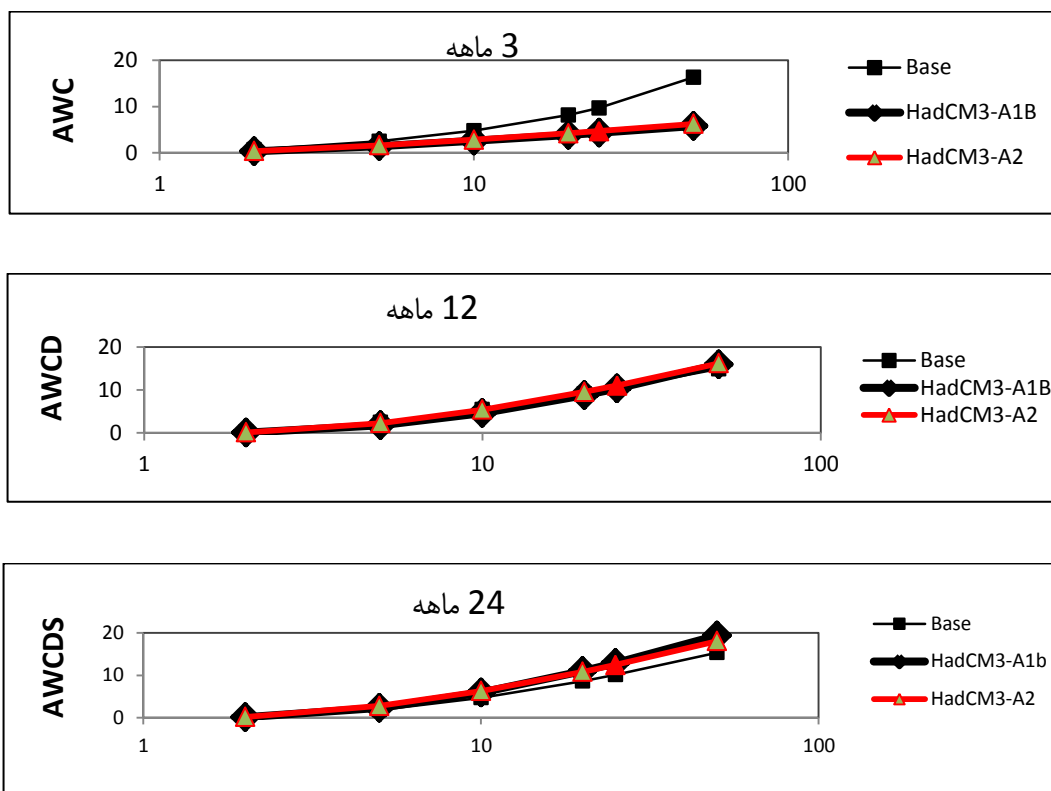
شکل ۶: توزیع فراوانی خشکسالی (SPI) برای تداوم زمانی ۳ ماهه به ترتیب برای الف: دوره مشاهداتی (پایه) و دوره های آینده ب: HadCM3-A2 و ج: HadCM3-A2



شکل ۷: توزیع فراوانی خشکسالی (SPI) برای تداوم زمانی ۲۴ ماهه به ترتیب برای الف: دوره مشاهداتی (پایه) و دوره های آینده ب: HadCM3-A1B و ج: HadCM3-A2

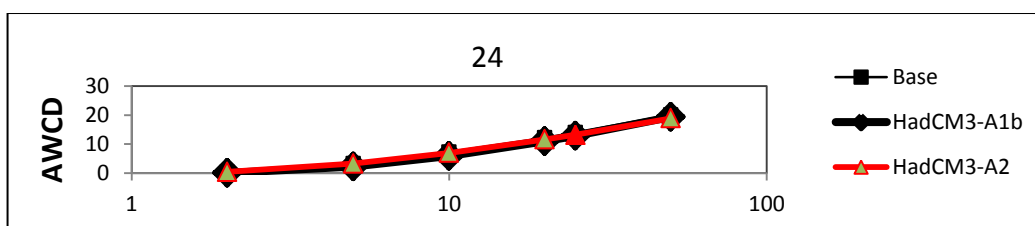
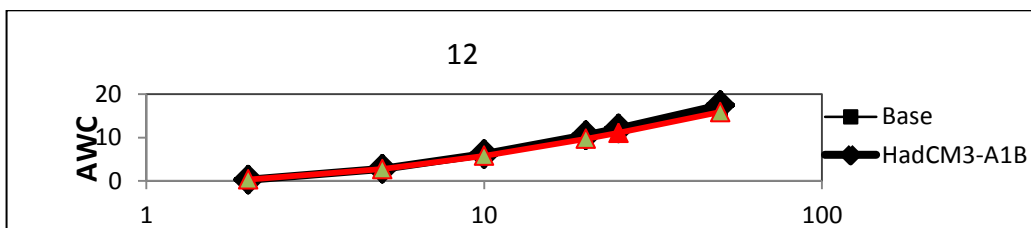
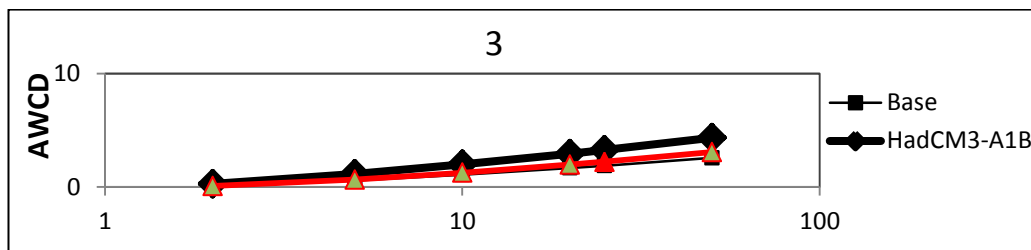
#### - تحلیل فراوانی شدت تجمعی وزنی خشکسالی (AWCDS) مناطق مختلف کشور

نتایج تحلیل فراوانی شدت تجمعی وزنی خشکسالی (AWCDS) برای مناطق نه گانه کشور برای مقیاس زمانی SPI ۳، ۱۲ و ۲۴ ماهه و برای دوره های مشاهداتی و آتی محاسبه و ترسیم شده است. شدت تجمعی وزنی خشکسالی منطقه شمال غرب کشور برای تداوم های زمانی ۳، ۱۲ و ۲۴ ماهه در شکل ۸ آورده شده است. با توجه به نتایج مشاهده می شود که میزان شدت تجمعی وزنی خشکسالی (دوره برگشت ۲ تا ۵۰ سال) در دوره مشاهداتی و برای دوره های کوتاه مدت (مقیاس زمانی ۳ ماهه) افزایش چشمگیری را نشان می دهد، مقایسه نمایه شدت خشکسالی کوتاه مدت دوره پایه ۱۹۹۰-۱۹۶۱ با دوره های آتی در سناریوهای A1B و A2 نشان می دهد که شدت خشکسالی کوتاه مدت مناطق شمال غرب کشور روند کاهشی را نشان می دهد، به عبارتی انتظار می رود که از شدت خشکسالی های کوتاه مدت (۳ ماهه) در شمال غرب کشور طی دهه های آینده کاسته شود. اما برای دوره های میان مدت (۱۲ ماهه) تغییر چشمگیری در شدت تجمعی وزنی خشکسالی منطقه شمال غرب دیده نمی شود. مقایسه نمایه شدت خشکسالی برای دوره مشاهداتی با دوره های آتی و بر اساس سناریوهای A1B و A2 نشان می دهد که شدت تجمعی وزنی خشکسالی برای بازه زمانی ۱۲ ماهه دوره مشاهداتی دوره پیش بینی تفاوت چندانی ندارد. در حالی که بر اساس بازه زمانی ۲۴ ماهه (خشکسالی های با تداوم بلند مدت) و بر اساس سناریوهای A1B و A2 شدت تجمعی وزنی خشکسالی طی دهه های آتی روند افزایشی را نسبت به دوره پایه نشان می دهد، که با توجه به مشکلات منابع آب و کاهش تراز آب دریاچه ارومیه و خشک شدن دریاچه، که به عنوان اصلی ترین چالش های آبی و زیست محیطی شمال غرب کشور طی سال های اخیر به شمار می رود، بایستی تمهیدات و تصمیمات خاصی اتخاذ شود.

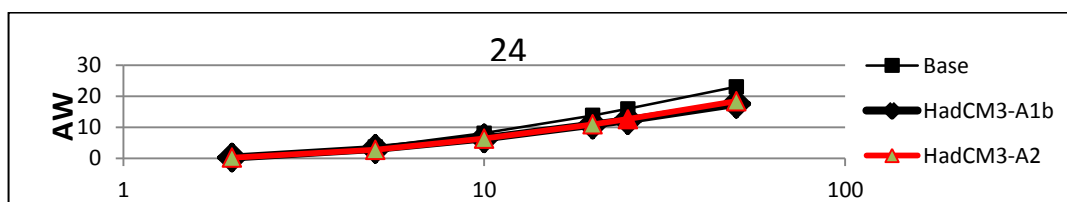
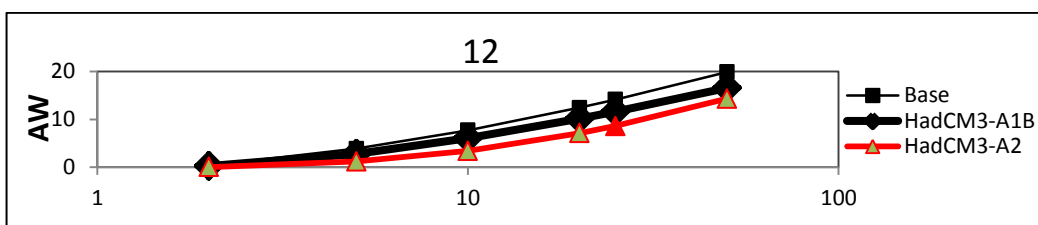
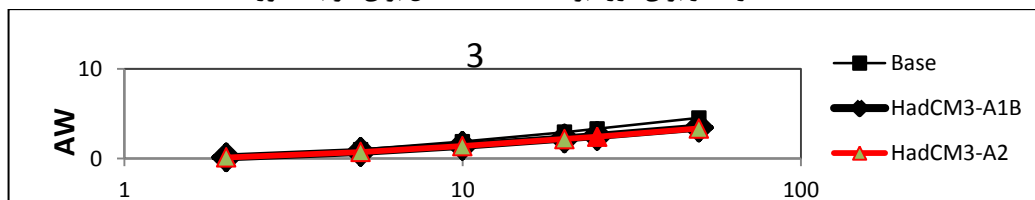


شکل ۸: شدت تجمعی خشکسالی به ترتیب از بالا به پایین برای تداوم زمانی ۳، ۱۲ و ۲۴ ماهه در دوره مشاهداتی، A1B و A2 و برای دوره برگشت ۲ تا ۵۰ سال برای شمال غرب کشور

شدت تجمعی وزنی خشکسالی منطقه غرب کشور برای تداوم های زمانی ۳، ۱۲ و ۲۴ ماهه در شکل ۹ آورده شده است. مقایسه نمایه شدت خشکسالی کوتاه مدت دوره پایه ۱۹۶۱-۱۹۹۰ با دوره های آتی در سناریوهای A1B و A2 نشان می دهد که شدت خشکسالی کوتاه مدت مناطق غرب کشور روند افزایشی را نشان می دهد، به عبارتی انتظار می رود، شدت خشکسالی های کوتاه مدت (۳ ماهه) در غرب کشور طی دهه های آینده افزایش یابد. اما برای دوره های میان مدت (۱۲ ماهه) و بلند مدت (۲۴ ماهه) تغییر چشمگیری در شدت تجمعی وزنی خشکسالی منطقه غرب دیده نمی شود. مقایسه نمایه شدت خشکسالی برای دوره مشاهداتی با دوره های آتی و بر اساس سناریوهای A1B و A2 نشان می دهد که شدت تجمعی وزنی خشکسالی برای بازه زمانی ۱۲ ماهه دوره مشاهداتی دوره پیش بینی تفاوت چندانی ندارد. همچنین بر اساس بازه زمانی ۲۴ ماهه (خشکسالی های با تداوم بلند مدت) و بر اساس سناریوهای A1B و A2 شدت تجمعی وزنی خشکسالی طی دهه های آتی روند افزایشی را نسبت به دوره پایه نشان نمی دهد.

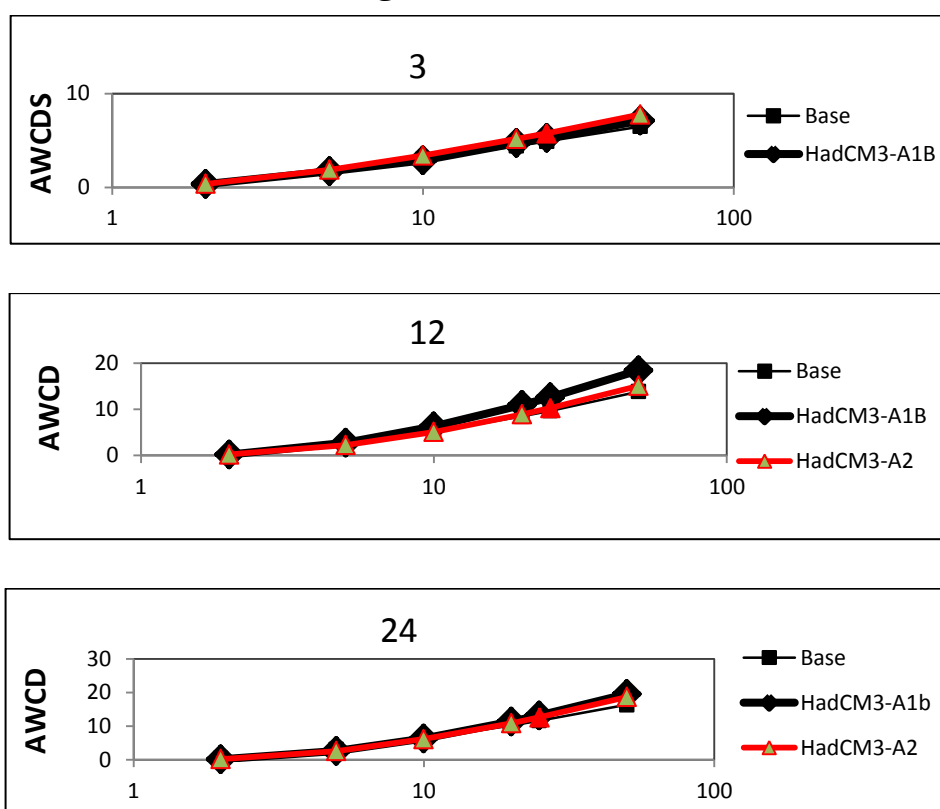


شکل ۹: شدت تجمعی خشکسالی به ترتیب از بالا به پایین برای تداوم زمانی ۳، ۱۲ و ۲۴ ماهه در دوره مشاهداتی، A1B و A2 برای دوره برگشت ۲ تا ۵۰ سال برای غرب کشور



شکل ۱۰: شدت تجمعی خشکسالی به ترتیب از بالا به پایین برای تداوم زمانی ۳، ۱۲ و ۲۴ ماهه در دوره مشاهداتی، A1B و A2 برای دوره برگشت ۲ تا ۵۰ سال برای جنوب غرب کشور

شدت تجمعی وزنی خشکسالی منطقه جنوب غرب ایران برای تداوم های زمانی ۳، ۱۲ و ۲۴ ماهه در شکل ۱۰ آورده شده است. در جنوب غرب کشور شدت خشکسالی طی هر دو دوره مشاهداتی دوره پیش بینی با افزایش تداوم زمانی در دوره برگشت های مختلف افزایش یافته است. مقایسه نمایه شدت خشکسالی کوتاه مدت، میان مدت و بلند مدت طی دوره پایه ۱۹۶۱-۱۹۹۰ با دوره های آتی در سناریوهای A1B و A2 نشان می دهد که شدت خشکسالی برای دوره مشاهداتی بیشتر از دوره پیش بینی در دو سناریوهای A1B و A2 می باشد که این نشان دهنده کاهش در شدت خشکسالی آینده در این منطقه است. در شمال کشور نیز همانطور که در شکل ۴-۱۱ نشان می دهد شدت خشکسالی در دوره مشاهداتی و پیش بینی برای تداوم زمانی ۳ ماهه به سمت تداوم زمانی ۱۲ و ۲۴ ماهه افزایش یافته است. همچنین شدت خشکسالی برای دوره پیش بینی بر اساس سناریوهای A1B و A2 نسبت به دوره مشاهداتی برای دوره برگشت بالاتر از ۲۰ سال روند افزایش شدیدی را نشان می دهد.

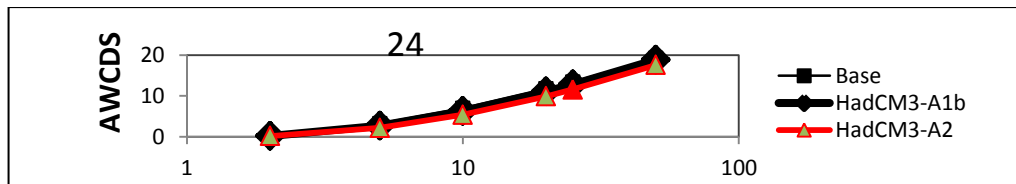
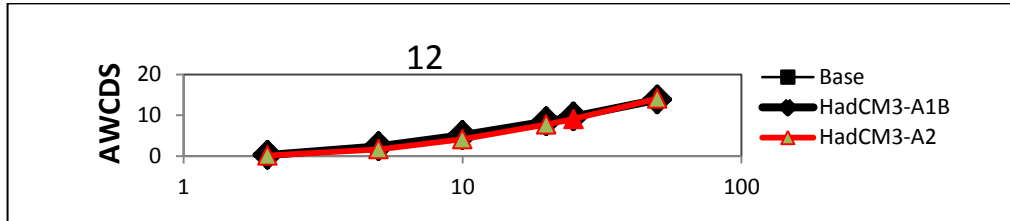
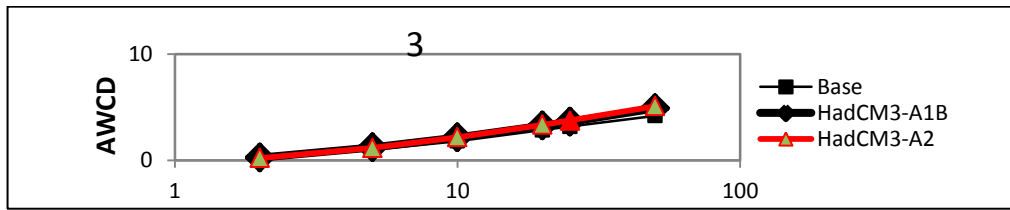


شکل ۱۱: شدت تجمعی خشکسالی به ترتیب از بالا به پایین برای تداوم زمانی ۳، ۱۲ و ۲۴ ماهه در دوره مشاهداتی،

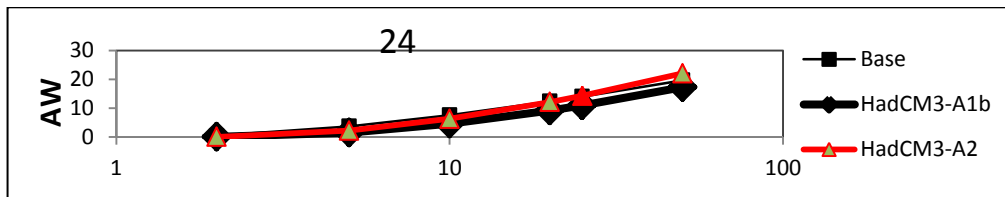
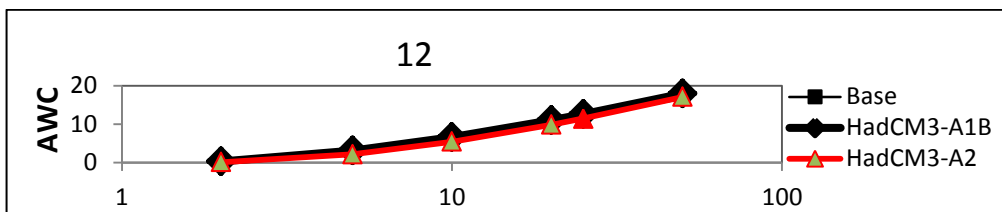
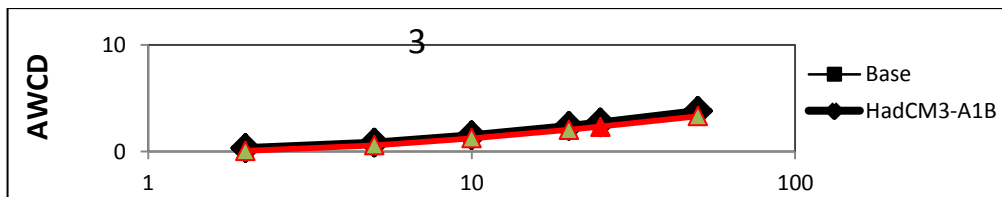
A1B و A2 و برای دوره برگشت ۲ تا ۵۰ سال برای شمال کشور

در نواحی مرکزی کشور نیز همانطور که در شکل شماره ۱۲ نشان می دهد شدت خشکسالی در دوره مشاهداتی و پیش بینی از تداوم زمانی ۳ ماهه به سمت تداوم زمانی ۱۲ و ۲۴ ماهه افزایش یافته است. همچنین شدت خشکسالی برای دوره پیش بینی در سناریوهای A1B و A2 نسبت به دوره مشاهداتی بسیار به هم نزدیک می باشد که نشان دهنده تغییرات کم شدت خشکسالی در آینده در این منطقه می باشد. شدت تجمعی وزنی خشکسالی منطقه جنوب کشور برای تداوم های زمانی ۳، ۱۲ و ۲۴ ماهه در شکل ۱۳ آورده شده است. مقایسه نمایه شدت خشکسالی کوتاه مدت دوره پایه ۱۹۶۱-۱۹۹۰ با دوره های آتی در سناریوهای A1B و A2 نشان می دهد که شدت خشکسالی کوتاه مدت مناطق جنوبی کشور تغییرات چندانی را نشان نمی دهد، اما برای دوره های میان مدت (۱۲ ماهه) و

بلند مدت (۲۴ ماهه) و بویژه برای دوره های برگشت کمتر از ۲۰ سال از شدت تجمعی وزنی خشکسالی منطقه جنوب کشور در سال های آتی کاسته خواهد شد.



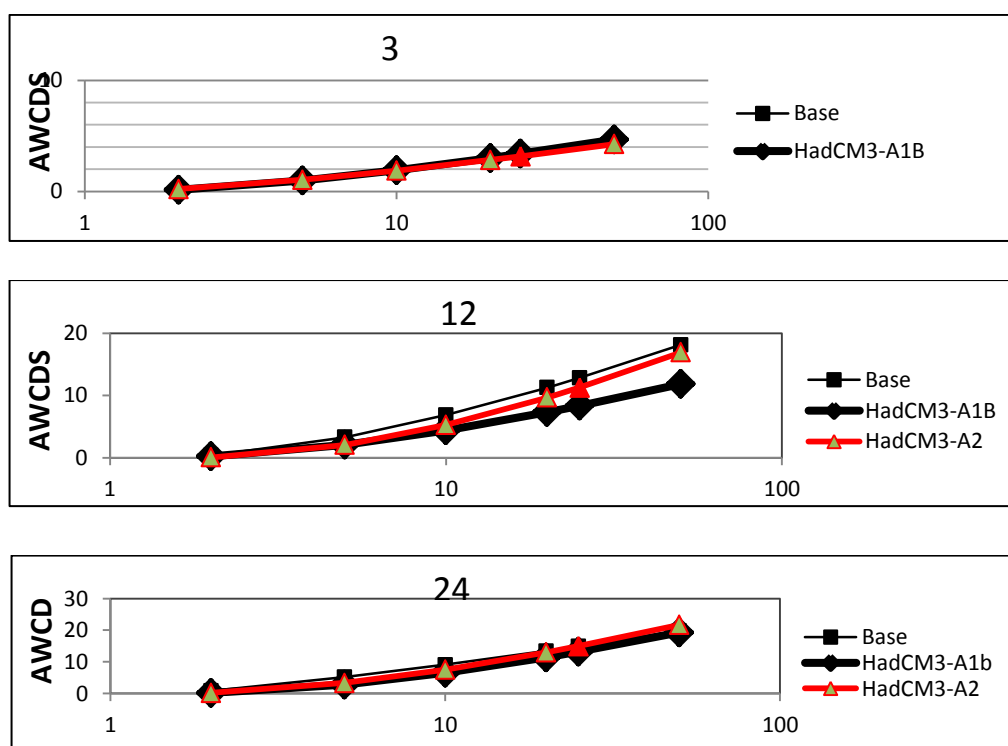
شکل ۱۲: شدت تجمعی خشکسالی به ترتیب از بالا به پایین برای تداوم زمانی ۳، ۱۲ و ۲۴ ماهه در دوره مشاهداتی، A1B و A2 و برای دوره برگشت ۲ تا ۵۰ سال برای مناطق مرکزی ایران



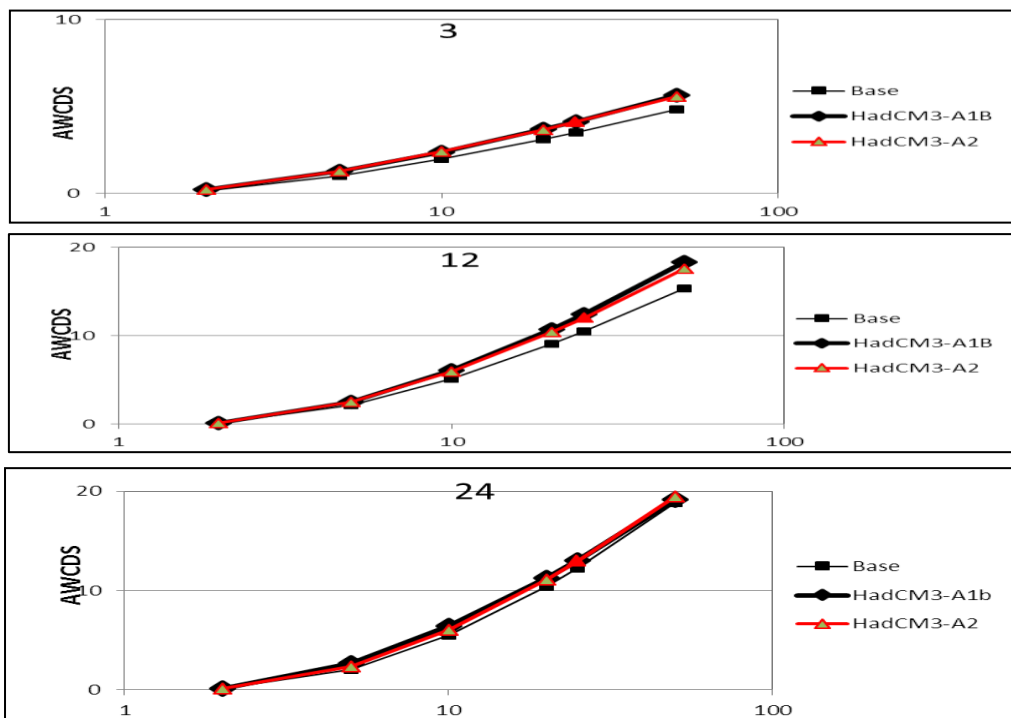
شکل ۱۳: شدت تجمعی خشکسالی به ترتیب از بالا به پایین برای تداوم زمانی ۳، ۱۲ و ۲۴ ماهه در دوره مشاهداتی، A1B و A2 و برای دوره برگشت ۲ تا ۵۰ سال برای مناطق جنوبی ایران



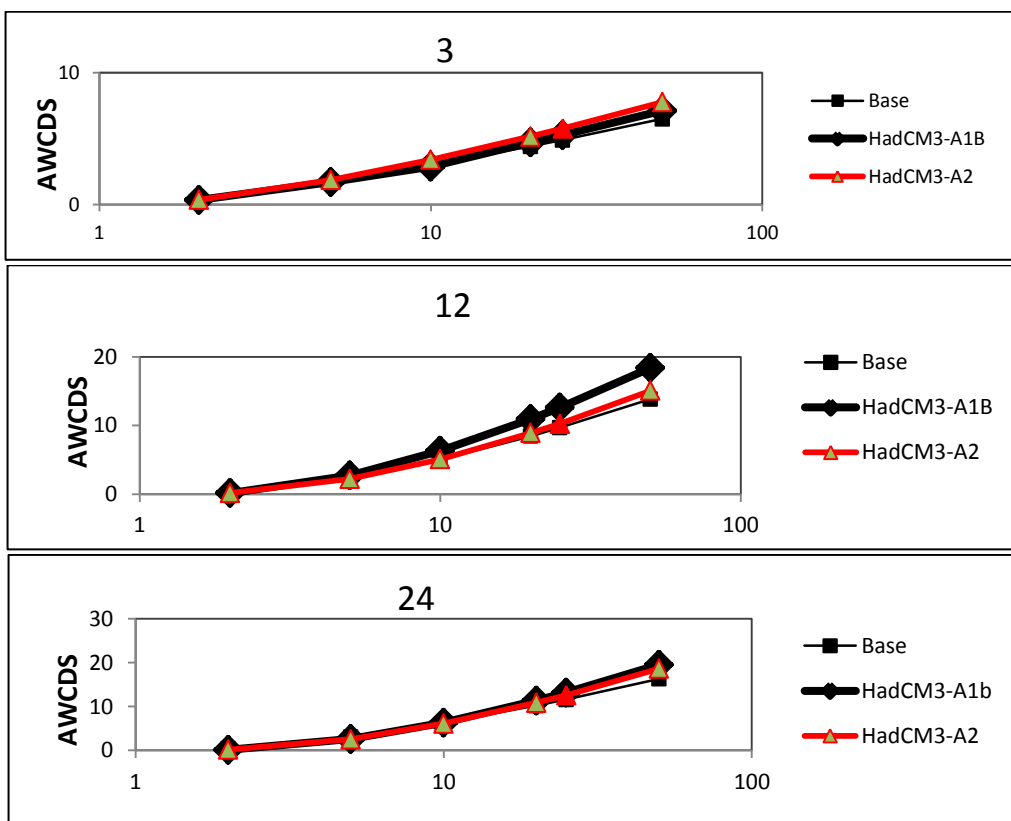
شکل شماره ۱۴ تحلیل فراوانی و نمودار شدت خشکسالی تجمعی را برای مقیاس های زمانی ۳، ۱۲ و ۲۴ ماهه و دوره برگشت ۲ تا ۵۰ ساله منطقه شمال شرق کشور را نشان می دهد. از آنجایی که هر یک از مقیاس های زمانی ( نمودار های ارائه شده) فاصله زمانی طبیعی بین بارش و منابع آبی (جریان رودخانه ها، رطوبت خاک و منابع آب زیر زمینی و غیره) را بیان می دارند، بنابراین کاربرد های مختلفی می توانند داشته باشند. نتایج شکل شماره ۱۴ نشان می دهد شدت خشکسالی در دوره مشاهداتی و پیش بینی از تداوم زمانی ۳ ماهه به سمت تداوم زمانی ۲۴ ماهه در دوره برگشت های مختلف افزایش یافته است. همچنین مقایسه نمایه شدت خشکسالی کوتاه مدت سه ماهه طی دوره پایه ۱۹۶۱-۱۹۹۰ با دوره های آبی در سناریوهای A1B و A2 تفاوت معنی داری را ندارد. در حالی که شدت خشکسالی تجمعی برای دوره پیش بینی بر اساس سناریوهای A1B و A2 نسبت به دوره مشاهداتی روند کاهشی را نشان می دهد. شکل شماره ۱۵ شدت تجمعی خشکسالی با تداوم زمانی ۳، ۱۲ و ۲۴ ماهه طی دوره مشاهداتی و دوره های آبی بر اساس سناریوهای A1B و A2 و برای دوره برگشت ۲ تا ۵۰ سال برای شرق ایران را نشان می دهد. مقایسه نمایه شدت خشکسالی کوتاه مدت سه ماهه و دوازده ماهه دوره پایه ۱۹۶۱-۱۹۹۰ با دوره های آبی بر اساس سناریوهای A1B و A2 روند افزایشی شدت تجمعی خشکسالی را طی دهه های آبی را نشان می دهد، به عبارتی انتظار می رود، شدت خشکسالی های کوتاه مدت (۳ ماهه) و (۱۲ ماهه) در شرق کشور طی دهه های آینده افزایش یابد. شدت تجمعی وزنی خشکسالی منطقه شرق کشور برای تداوم های زمانی ۲۴ ماهه نیز در شکل ۴-۱۵ آورده شده است. مقایسه نمایه شدت خشکسالی بلند مدت دوره پایه ۱۹۶۱-۱۹۹۰ با دوره های آبی و بر اساس سناریوهای A1B و A2 تغییرات چندانی را در روند رخداد شدت تجمعی خشکسالی بلند مدت نشان نمی دهد.



شکل ۱۴: شدت تجمعی خشکسالی به ترتیب از بالا به پایین برای تداوم زمانی ۳، ۱۲ و ۲۴ ماهه در دوره مشاهداتی، A1B و A2 و برای دوره برگشت ۲ تا ۵۰ سال برای مناطق شمال شرق ایران



شکل ۱۵: شدت تجمعی خشکسالی به ترتیب از بالا به پایین برای تداوم زمانی ۳، ۱۲ و ۲۴ ماهه در دوره مشاهداتی، A1B و A2 و برای دوره برگشت ۲ تا ۵۰ سال برای شرق ایران



شکل ۱۶: شدت تجمعی خشکسالی به ترتیب از بالا به پایین برای تداوم زمانی ۳، ۱۲ و ۲۴ ماهه در دوره مشاهداتی، A1B و A2 و برای دوره برگشت ۲ تا ۵۰ سال برای جنوب شرق ایرا

شکل شماره ۱۶ تحلیل فراوانی و نمودار شدت خشکسالی تجمعی را برای مقیاس های زمانی ۳، ۱۲ و ۲۴ ماهه و دوره برگشت ۲ تا ۵۰ ساله منطقه جنوب شرق کشور را نشان می دهد. نتایج حاصل از شکل شماره ۱۶ مطابق با الگوی منطقه شرق کشور می باشد، بطوری که مقایسه نمایه شدت خشکسالی تجمعی برای بازه های کوتاه مدت سه ماهه، میان مدت (۱۲ ماهه) و بلند مدت (۲۴ ماهه) طی دوره پایه ۱۹۹۰-۱۹۶۱ با دوره های آتی و بر اساس سناریوهای A1B و A2 بیانگر افزایش رخداد خشکسالی در دهه های آتی منطقه جنوب شرق کشور است، این روند افزایشی بویژه برای دوره برگشت های بیشتر از ۱۰ سال کاملاً مشهود می باشد.

### نتیجه گیری

بر اساس گزارش های ارائه شده توسط وزارت نیرو، یکی از چالش های پیش روی کشور در سال های آتی، بحران آب خواهد بود. یکی از راهکارهای مبارزه با چنین چالشی، پیش بینی وضعیت آتی متغیرهای آب و هوایی همچون بارش و دما با هدف ارائه دورنمایی از میزان تغییرات این متغیرها در سال های آتی، می باشد که این امر با استفاده از خروجی های مدل های اقلیمی صورت می پذیرد. در این راستا، این پژوهش با هدف پیش بینی وضعیت خشکسالی طی دوره ۲۰۳۹-۲۰۱۱ در ایستگاه های منتخب کشور انجام پذیرفت. در راستای انجام این هدف، از معتبرین ابزار برای پیش بینی متغیرهای آب و هوایی (در این پژوهش بارش)، یعنی مدل های گردش عمومی جو استفاده گردید، اما با توجه به اینکه خروجی این مدل ها در مقیاس بزرگ (حدود ۳۰۰ کیلومتر مربع در مدل HadCM3) ارائه می شوند، لذا برای پیش بینی پارامترهای هواشناسی در مقیاس ایستگاهی، نیاز به عمل ریزمقیاس نمایی می باشد. در این تحقیق، از بین روش های مختلف ریزمقیاس نمایی، از مدل LARS-WG استفاده شد. در ابتدا، با استفاده از داده های بارش دیدبانی شده هر ایستگاه طی دوره آماری ۱۹۹۰-۱۹۶۱ میلادی، پارامترهای آماری متغیرهای آب و هوایی استخراج و بعد از کالیبراسیون مدل و اطمینان از توانمندی مدل در ساخت سری های زمانی بارش که با مقایسه داده های شبیه سازی شده با مقادیر بارش در دوره پایه در سطح اطمینان ۹۵ درصد صورت پذیرفت، متغیر بارش با استفاده از خروجی های مدل گردش عمومی جو HadCM3 تحت دو سناریوی A1B، A2 طی دوره آینده نزدیک (۲۰۳۹-۲۰۱۱ میلادی) ریزمقیاس گردید. جهت بررسی وضعیت خشکسالی، شاخص استاندارد شده بارش (SPI) بکار رفت. نتایج نشان داد که میزان بارش نسبت به دوره پایه طی دوره های آینده نزدیک تحت خروجی های مدل گردش عمومی جو HadCM3 و دو سناریوی A1B، A2 تغییر معنی داری در بیشتر مناطق کشور خواهد داشت. بیشترین درصد تغییر مربوط به جنوب شرقی کشور می باشد که برای هر سه تداوم زمانی ۳، ۱۲ و ۲۴ ماهه افزایش خشکسالی را نشان میدهد بطوریکه برای تداوم زمانی ۱۲ ماهه و ۵۰ ساله شدت خشکسالی دوره پایه ۱۳/۸۲ بوده ولی در دوره آتی سناریوی A2، ۱۵/۰۵ و در دوره آتی سناریوی A1B، ۱۸/۳۹ را نشان میدهد. در غرب و شمال کشور نیز بطور مشابه در کلیه تداوم های زمانی شدت خشکسالی در دوره های آتی بیشتر از دوره پایه است، بطوریکه در دوره ۲۴ ماهه و دوره بازگشت ۵۰ ساله شدت خشکسالی پایه ۱۶/۳۱ ولی در دوره آتی A2، ۱۸/۶۵ و در دوره آتی A1B، ۱۹/۵۵ را نشان میدهد. در مناطق جنوب، مرکز و شرق کشور مقادیر شدت خشکسالی پایه و آتی با تداوم زمانی ۲۴ ماهه و در دوره برگشت ۵۰ ساله همگی حدود ۱۸/۸ بوده و شدت خشکسالی تغییرات زیادی را نشان نمی دهد. شدت خشکسالی در شمال غرب کشور و جنوب غرب کشور در هر سه تداوم زمانی ۳، ۱۲ و ۲۴ ماهه در دوره های آتی کمتر از دوره پایه خواهد بود بطوریکه در تداوم زمانی ۲۴ ماهه شدت خشکسالی با دوره

برگشت ۵۰ ساله پایه ۲۳ ولی در دوره‌های آتی ۱۸/۴۴ را نشان می‌دهد. از آنجایی که مدل‌های اقلیمی به عنوان معتبرترین ابزار تولید سناریوهای اقلیمی مطرح می‌باشند، ضروری است مدیران و تصمیم‌گیران بخش‌های مختلف منابع آب، کشاورزی و ... نتایج حاصل از چنین پژوهش‌هایی را نیز مد نظر قرار داده تا امکان برنامه‌ریزی‌های بلند مدت برای این منطقه میسر شود.

با توجه به وجود روش‌های دیگر ریزمقیاس‌نمایی و همچنین خروجی مدل‌های گردش عمومی جو تحت سناریوهای متفاوت انتشار، پیشنهاد می‌شود با هدف کاهش عدم قطعیت در نتایج، محاسبه نمایه استاندارد شده بارش با استفاده از خروجی این مدل‌ها و دیگر روش‌های ریزمقیاس‌نمایی مانند SDSM، ASD و ... صورت پذیرد و نتایج حاصل با یکدیگر مقایسه و در صورت امکان میانگین نتایج به عنوان پیش‌بینی قطعی‌تر این نمایه عنوان گردد. همچنین با توجه به امکان پیش‌بینی این نمایه برای دوره‌های بعدی، پیشنهاد می‌گردد دورنمایی از این نمایه برای دوره پایانی این قرن نیز ارائه گردد.

### تشکر و قدردانی

این تحقیق در قالب طرح پژوهشی "بررسی تغییرات شدت خشکسالی ایران زمین تحت تاثیر تغییر اقلیم" و با حمایت دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب انجام پذیرفته است که تشکر و قدردانی می‌شود.

### منابع

- آذرانفر، آرش؛ احمد ابریشم چی و مسعود تجربی. ۱۳۸۵. ارزیابی تغییرات بارش و دما بر اثر تغییر اقلیم با استفاده از خروجی مدل‌های چرخش عمومی. دومین کنفرانس مدیریت منابع آب، اصفهان، دانشگاه صنعتی اصفهان، انجمن علوم و مهندسی منابع آب ایران.
- بابائیان، ایمان، زهرا نجفی نیک، فاطمه عباسی، مجید نوخندان، حامد ادب و شراره ملبوسی. ۱۳۸۷. ارزیابی تغییر اقلیم کشور در دوره ۲۰۳۹-۲۰۱۰ با استفاده از ریزمقیاس‌نمایی داده‌های مدل گردش عمومی جو ECHO-G. جغرافیا و توسعه، ۱۶: ۱۵۲-۱۳۵.
- بابائیان، ایمان و معصومه کوهی. ۱۳۹۱. ارزیابی شاخص‌های اقلیم کشاورزی تحت سناریوهای تغییر اقلیم در ایستگاه‌های منتخب خراسان رضوی ۱۳۹۱. نشریه آب و خاک، ۲۶: ۹۶۷-۹۵۳.
- بذرافشان جواد، علی خلیلی، علی هورفر؛ صدیقه ترابی و سهراب حجام. ۱۳۸۸. بررسی و مقایسه عملکرد دو مدل لارس و ClimGen در شبیه‌سازی متغیرهای هواشناسی در شرایط مختلف اقلیمی ایران. مجله تحقیقات منابع آب ایران، ۱: ۵۷-۴۴.
- تقوی، فرحناز و حسین محمدی. ۱۳۸۶. بررسی دوره بازگشت رویدادهای اقلیمی حدی به منظور شناخت پیامدهای زیست محیطی. محیط شناسی، ۳۳: ۲۰-۱۱.
- حق طلب نفیسه، محسن گودرزی، مجید حبیبی نوخندان، احمدرضا یآوری و حمیدرضا جعفری. ۱۳۹۲. مدل سازی اقلیم استان‌های تهران و مازندران با استفاده از مدل LARS-WG و مقایسه تغییرات آن در جبهه‌های شمالی و جنوبی البرز مرکزی. علوم و تکنولوژی محیط زیست، ۱۵.

دستورانی محمد تقی، سمانه پور محمدی، علیرضا مساح بوانی و محمدحسین رحیمیان. ۱۳۹۰. پیش بینی خشکسالی تحت تأثیر تغییر اقلیم در سه دهه آینده به کمک مدل‌های چرخش عمومی (مطالعه موردی ایستگاه یزد). چهارمین کنفرانس مدیریت منابع آب.

کردجی، محمد، سعید باقری، ایمان بابائیان و عبدالجبار ملاعراضی. ۱۳۹۰. تحلیل خشکسالی هواشناسی استان گلستان در دوره ۲۰۱۰-۲۰۳۰ میلادی با استفاده از سناریوهای مختلف مدل گردش عمومی جو HadCM3. چهارمین کنفرانس مدیریت منابع آب.

گل محمدی، مریم و علیرضا مساح بوانی. ۱۳۹۰. بررسی تغییرات شدت و دوره بازگشت خشکسالی حوضه قره سو در دوره های آتی تحت تاثیر تغییر اقلیم، نشریه آب و خاک، ۲۵: ۳۲۶-۳۱۵.

مساح بوانی، علیرضا و سعید مرید. ۱۳۸۴. اثرات تغییر اقلیم بر منابع آب و تولید محصولات کشاورزی. نشریه تحقیقات منابع آب ایران، ۱: ۴۷-۴۰.

Easterling, D. R.; Evans, J. L.; Groisman, P. Ya.; Karl, T. R.; Kunkel, K. E. and Ambenje, P. ۲۰۰۰. Observed variability and trends in extreme climate events: A brief review. Bull. Amer. Meteor. Soc. ۸۱: ۴۱۷-۴۲۵.

Ekström, M.; Fowler, H.J.; Kilsby C.G. and Jones P.D. ۲۰۰۵. New estimates of future changes in extreme rainfall across the UK using regional climate model integrations. ۲. Future estimates and use in impact studies. Hydrol, J. ۳۰۰, ۲۳۴-۲۵۱.

Hayes, Michael, J. ۲۰۰۲. When Is Drought? Drought Indices. Climate Impacts Specialist. National Drought Mitigation Center. (<http://www.drought.unl.edu/whatis/indices.htm>).

Manton, M.J.; Della-Marta, P.M.; Haylock, M.R.; Hennessy, K.J.; Nicholls, N.; Chambers, L.E.; Collins, D.A.; Daw, G.; Finet, A.; Gunawan, D.; Inape, K.; Isobe, H.; Kestin, T.S.; Lefale, P.; Leyu, C.H.; win, T. L.; Maitrepierre, L.; Ouprasitwong, N.; Page, C.M.; Pahalad, J.; Plummer, N.; Salinger, M.J.; Suppiah, R.; Tran, V.L.; Trewin, B.; Tibig, I. and Yee, D. ۲۰۰۱. Trends in extreme daily rainfall and temperature in Southeast Asia and the South Pacific. ۱۹۱۶-۱۹۹۸. Int. Journal of Climatol. ۲۱: ۲۶۹-۲۸۴.

McKee, T.B.; Doesken, N.J. and Kliest, J. ۱۹۹۵. Drought Monitoring with Multiple Time Scales. In Prox, 9th Conf. on Applied Climatology. January. ۱۷-۲۲. American Meteorology Society, Massachusetts. Pp.۱۷۹-۱۸۴.

Semenov, M.A. and Brooks, R.J. ۱۹۹۹. Spatial interpolation of the LARS-WG weather generator in Great Britain. Climate Research. ۱۱:۱۳۷-۱۴۸ (pdf)

Semenov, M.A.; Barrow, E.M. ۱۹۹۷. Use of a stochastic weather generator in the development of climate change scenarios. Climatic Change. ۳۵: ۳۹۷-۴۱۴.

Semenov, M. ۲۰۰۸. Simulation of extreme weather events by a stochastic weather generator. Climate Research. ۳۵: ۲۰۳-۲۱۲.

Sura, P. ۲۰۱۲. Stochastic Models of Climate Extremes: Theory and Observations. Presentation at AMS General Meeting. American Meteorological Society. New Orleans, Louisiana.

Szalai, S.; Szinell, C.S. ۲۰۰۰. Comparison of Two Drought Indices for Drought Monitoring in Hungary - A Case Study, Drought and Drought Mitigation in Europe Advances in Natural and Technological Hazards Research. ۱۴: ۱۶۱-۱۶۶.

Szinell, C.S.; Bussay, A. and Szentimrey, T. ۱۹۹۸. Drought tendencies in Hungary. International Journal of Climatology. ۱۸(۱۳): ۱۴۷۹-۱۴۹۱.

Kim T.W., Valdes J.B., and Aparicio J. ۲۰۰۲. Frequency and spatial characteristics of droughts in the Conchos River Basin, Mexico, Water Int., ۲۷, ۳, ۴۲۰-۴۳۰.

Loukas A., and Vasiliades L. ۲۰۰۴. Probabilistic analysis of drought spatiotemporal characteristics in Thessaly region, Greece, Nat. Hazards Earth Syst. Sci., ۴, ۷۱۹-۷۳۱.

Wilby R. L. and Harris, I, ۲۰۰۶. A frame work for assessing uncertainties in climate change impacts: low flow scenarios for the River Thames, UK. Water Resources Research , ۴۲, W۰۲۴۱۹, doi:۱۰.۱۰۲۹/۲۰۰۵WR۰۰۴۰۶۰.

Semenov, M. A., Stratonovitch, P (۲۰۱۰), "Use of Multi-model Ensembles from Global Climate Models for Assessment of Climate Change Impacts," CLIMATE RESEARCH, ۴, pp. ۱-۱۴.