

## پیش‌نگری تغییرات بارش در سواحل جنوبی دریای خزر تا پایان قرن ۲۱ با استفاده از سناریوهای مختلف واداشت تابشی

مریم کثیری<sup>۱\*</sup>، مسعود گودرزی<sup>۲</sup>، غلامرضا جانباز قبادی<sup>۳</sup>، صدرالدین متولی<sup>۴</sup>

<sup>۱</sup>دکتری آب و هواشناسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نور، نور، مازندران، ایران

<sup>۲</sup>دانشیار پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی

<sup>۳</sup>استادیار اقلیم‌شناسی دانشگاه آزاد اسلامی واحد نور، نور، مازندران، ایران

<sup>۴</sup>دانشیار گروه جغرافیای دانشگاه آزاد اسلامی واحد نور، نور، مازندران، ایران

تاریخ دریافت: ۹۹/۱/۲۵؛ تاریخ پذیرش: ۹۹/۴/۱

### چکیده

بارش اصلی‌ترین جزء چرخه هیدرولوژی است و پیش‌نگری آن در بسیاری از مطالعات از جمله برنامه‌ریزی‌های محیطی و آمایش سرزمین اهمیت بالایی دارد. باتوجه به این نکته، هدف این پژوهش پیش‌نگری تغییرات بارش در سواحل جنوبی دریای خزر به عنوان پربارش‌ترین منطقه کشور است. بدین منظور از داده‌های مدل جهانی HadGEM2 تحت تأثیر سه سناریوی واداشت تابشی (RCP 8.5 و RCP 4.5، RCP2.6) با کاربست مدل ریزمقیاس گردانی LARS-WG6 بهره گرفته شد، سپس تغییرات بارش در سه دوره زمانی مختلف (۲۰۲۱-۲۰۵۰، ۲۰۸۰-۲۰۵۱ و ۲۱۰۰-۲۰۸۱) نسبت به دوره پایه (۲۰۱۸-۱۹۸۹) مورد بررسی قرار گرفت. جهت واسنجی و صحت‌سنجی مدل LARS-WG نیز از آزمون‌های آماری T و F و همچنین شاخص‌های MAE، MSE، RMSE و R<sup>2</sup> استفاده شد. نتایج حاصل از ارزیابی عملکرد مدل ریزمقیاس گردانی حاکی از دقت قابل قبول و بالای این مدل در ایستگاههای مورد مطالعه است. نتایج پیش‌بینی مدل نیز نشان داد که میزان بارش در دوره (۲۰۲۱-۲۰۵۰) به طور متوسط در سواحل جنوبی دریای خزر به میزان ۰/۲ درصد کاهش پیدا خواهد کرد، اما بارش در دوره‌های ۲۰۸۰-۲۰۵۱ و ۲۱۰۰-۲۰۸۱ به ترتیب به میزان ۵/۴ و ۱۰/۷ درصد افزایش خواهد یافت. در مجموع بر اساس نتایج حاصل، بارش در سواحل جنوبی دریای خزر تا پایان قرن ۲۱ نسبت به دوره پایه به طور متوسط ۵/۷ درصد افزایش خواهد یافت. بیشترین افزایش مربوط به ایستگاه گرگان با ۱۲/۲ درصد و کمترین میزان نیز مربوط به ایستگاه بابلس به ۰/۳ درصد است. کمترین و بیشترین تغییرات بارش نیز بر اساس سناریوهای RCP 8.5 و RCP 2.6 برآورد شده است.

**واژه‌های کلیدی:** بارش، تغییر اقلیم، دریای خزر، LARS-WG6، RCPs

### مقدمه

آمایش سرزمین، یک امر علمی با رویکردی فضایی و منطقه‌ای در شناخت توانمندی‌های توسعه با توجه به قابلیت‌های مکانی می‌باشد. تفکر آمایشی، با توجه به مفهوم آمایش، بهره‌برداری مطلوب و مستمر از قابلیت‌ها و توانائی‌های محیط با کمترین میزان تخریب است. در دهه‌های اخیر آب و هوا دچار تغییر و

تحولات اساسی گردیده و در این راستا مهم‌ترین اثر و نقش آمایش سرزمین و توسعه پایدار ارائه خط مشی اصولی به منظور کاهش اثرات تغییر اقلیم به شمار می‌آید. با توجه به جهانی بودن پدیده تغییر اقلیم و آسیب‌های ناشی از آن، لزوم توجه جدی به این موضوع چه در سطح ملی و چه در سطح منطقه‌ای و جهانی ضروری است (علاءالدین و ملکی، ۱۳۹۴: ۱). با توجه به افزایش گازهای گلخانه‌ای در دوره‌های آتی و

\*نویسنده مسئول:-----

تغییرات اقلیمی مدل‌های جهانی اقلیم (GCMs) طراحی شده‌اند. این مدل‌ها خصوصیات فیزیکی، چرخش‌ها و حرکات اتمسفری را تحلیل می‌نمایند و به دنبال آن متغیرهای هواشناسی را در شبکه‌های خاص شبیه‌سازی می‌کنند (شائمی و حبیبی‌نوخندان، ۱۳۸۸: ۳۴)؛ همچنین این مدل‌ها واکنش اقلیم جهانی به غلظت گازهای گلخانه‌ای و نیز سناریوهای اقلیمی آینده را برای سراسر کره زمین شبیه‌سازی می‌کنند (هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم، ۲۰۱۳). مدل‌های GCM متعددی توسعه یافته است و به دلیل تفاوت ساختار این مدل‌ها و تفاوت شرایط اولیه‌ای که تحت آن اجرا می‌شوند، نتایج آن‌ها حتی برای یک سناریوی انتشار یکسان، متفاوت است؛ لذا برای استفاده در مطالعات منطقه‌ای، لازم است خروجی این مدل‌ها با استفاده از یک روش مناسب ریزمقیاس شود (کی و همکاران<sup>۳</sup>، ۲۰۰۹: ۴۲). در این راستا عثمان و همکاران (۲۰۱۴) بارش مناطق مرکزی عراق را با استفاده از مدل‌های جهانی و مدل ریزمقیاس گردانی LARS-WG در سه دوره زمانی مختلف پیش‌بینی کردند. نتایج نشان داد که در دوره دسامبر تا فوریه و سپتامبر تا نوامبر بارش از روند افزایشی و در ماه‌های مارس، آوریل و می از روند کاهشی برخوردار است. سرکار و همکاران<sup>۴</sup> (۲۰۱۵) به پیش‌بینی تغییرات دما و بارش با استفاده از مدل‌های GCM و ریزمقیاس گردانی LARS-WG در هندوستان پرداختند. نتایج نشان داد که در دوره‌های آتی میزان بارش بین ۹ تا ۲۷ درصد کاهش می‌یابد. هیون‌چا و همکاران<sup>۵</sup> (۲۰۱۶) به پیش‌بینی تغییرات بارش تابستانه در کره با استفاده از مدل HadGEM2 سناریوهای RCP پرداختند. نتایج نشان داد میزان بارش کاهش و شدت آن افزایش می‌یابد. لیونگ تان و همکاران<sup>۶</sup> (۲۰۱۷) به ارزیابی اثرات تغییرات اقلیمی بر منابع آب در مالزی پرداختند. نتایج افزایش بارندگی ماهانه در فصل مرطوب و کاهش بارندگی در فصل خشک را نشان داد.

در نتیجه تشدید تغییرات پارامترهای اقلیمی، می‌تواند تأثیرات منفی زیادی را بر سیستم‌های مختلف از جمله منابع آب، محیط‌زیست، صنعت، بهداشت، کشاورزی و کلیه سیستم‌هایی که در کنش با سیستم اقلیم می‌باشند، بگذارد (هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم<sup>۱</sup>، ۲۰۰۷). فرایند تغییر اقلیم به ویژه تغییرات دما و بارش مهم‌ترین بحث مطرح در قلمرو علوم محیطی می‌باشد. این پدیده به دلیل ابعاد علمی و کاربردی (اثرات محیطی و اقتصادی-اجتماعی) آن از اهمیت فزاینده‌ای برخوردار است، چرا که سیستم‌های انسانی وابسته به عناصر اقلیمی مانند کشاورزی، صنایع و امثال آن بر مبنای ثبات و پایداری اقلیم طراحی شده و عمل می‌نمایند (ذهبیون و همکاران، ۱۳۸۹: ۴۳). در این بین نیز بارش مهم‌ترین متغیر آب‌شناختی است که پیوند میان جو و فرآیندهای سطحی را برقرار می‌سازد و ناهنجاری‌های مثبت و منفی آن سبب بروز سیل و خشکسالی می‌شود (مسعودیان و همکاران، ۱۳۹۳: ۷۴). ایران کشوری است که به لحاظ اقلیمی جزو کشورهای خشک و نیمه‌خشک جهان محسوب شده، به طوری که متوسط بارندگی سالانه آن حدود یک سوم متوسط بارندگی خشکی‌ها و کمتر از یک سوم متوسط بارندگی کره زمین است (جهانبخش و همکاران، ۱۳۸۰: ۵۲)؛ بنابراین با توجه به اهمیت بارش لازم است این پارامتر در مناطق مختلف برآورد شود. پیش‌بینی بارش برای مناطقی که اقتصاد آن‌ها مبتنی بر کشاورزی است، بسیار مهم است. از طرفی با پیش‌بینی به‌موقع بارندگی امکان مقابله با سیلاب، خشکسالی و کاهش خسارت ناشی از آن‌ها نیز مهیا می‌شود. در این میان بسیاری از بلایای طبیعی به‌طور مستقیم و غیرمستقیم در ارتباط با تغییر اقلیم قابل توجیه هستند، به طوری که، بر اساس نتایج حاصل از مطالعات تغییر اقلیم در حوضه دریای مدیترانه وجود رابطه بین افزایش دما و کاهش بارش و کمبود آب و افزایش خطر آتش‌سوزی جنگل‌های منطقه به اثبات رسیده است (پانل و لورت<sup>۲</sup>، ۱۹۹۸: ۳۴۵). برای ارزیابی

3. Kay et al  
4. Sarkar et al  
5. Hyun Cha et al  
6. Leong Tan et al

1. IPCC  
2. Panol and Loret

میزان بارش در دوره ۲۰۶۵-۲۰۴۶ به میزان ۵/۷ درصد نسبت به دوره پایه کاهش می‌یابد. خورشیددوست و همکاران (۱۳۹۷) به پیش‌بینی بارش‌های سنگین در سواحل جنوبی دریای خزر در دوره ۱۳۸۹ تا ۱۴۰۸ پرداختند. نتایج نشان داد در دوره آتی در مجموع بر تعداد روزهای همراه با بارش سنگین در اکثر ایستگاههای مورد مطالعه افزوده خواهد شد. خزائی و همکاران (۱۳۹۸) با استفاده از مدل HadGEM2 و ریزمقیاس گردانی LARS-WG به بررسی تغییرات دما و بارش در حوضه سیرا پرداختند. نتایج نشان داد که در دوره ۲۰۶۵-۲۰۳۶ بارش کاهش و دما افزایش می‌یابد. با توجه به آن که منابع آب در معرض خطرات ناشی از تغییرات اقلیم قرار دارند، بررسی تغییرات بارش در سال‌های آینده می‌تواند راهگشای معضلاتی همچون خشکسالی، سیلاب‌های ناگهانی و تخریب‌های زیست محیطی باشد، لذا در این پژوهش به چشم انداز تغییرات بارش در سواحل جنوبی دریای خزر در سه دوره زمانی مختلف (۲۰۵۰-۲۰۲۱، ۲۰۸۰-۲۰۵۱ و ۲۱۰۰-۲۰۸۱) با استفاده از روش ریزمقیاس گردانی آماری LARS-WG و خروجی مدل HadGEM2 تحت سناریوهای RCP پرداخته شد.

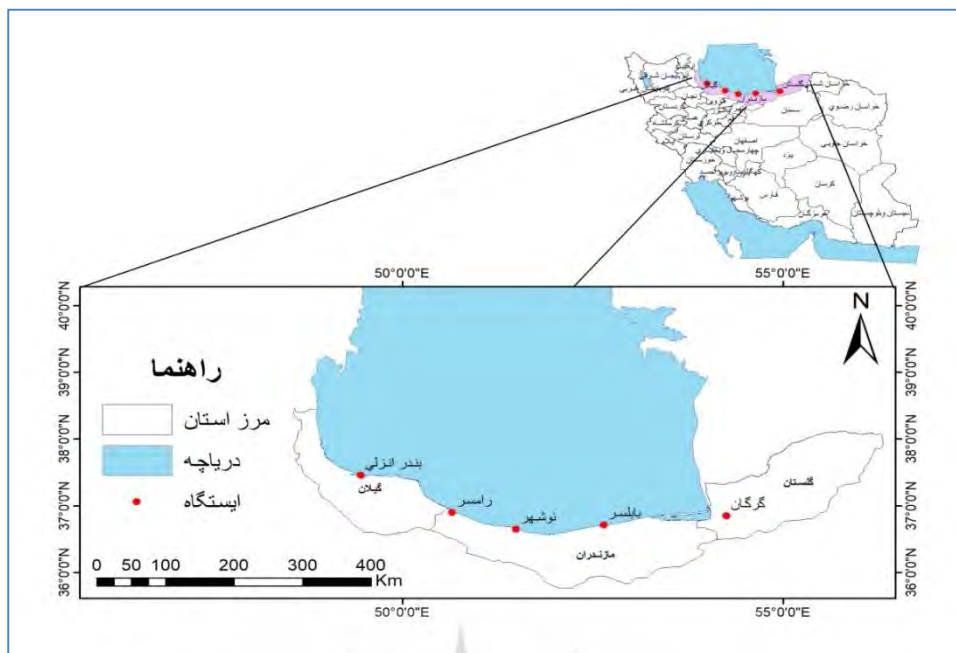
### محدوده و قلمرو پژوهش

منطقه مورد مطالعه ما در این پژوهش شامل ایستگاههای هواشناسی سینوپتیک با دوره آماری بلندمدت در نوار سواحل جنوبی دریای خزر است که سه استان گلستان، مازندران و گیلان را در برمی‌گیرد (شکل ۱). انتخاب ایستگاهها به گونه‌ای بوده است که از نظر زمانی دارای دوره آماری بلندمدت و مشترک (۲۰۱۸-۱۹۸۹) جهت بررسی تغییرات اقلیمی باشند و کمترین فاصله را با ساحل دریای خزر داشته باشند. مشخصات جغرافیایی ایستگاههای هواشناسی مورد مطالعه در جدول (۱) آورده شده است.

فریرا و همکاران<sup>۱</sup> (۲۰۱۸) به بررسی اثرات تغییرات آب و هوایی بر بارش‌های تابستانی در جنوب شرقی ایالات متحده پرداختند، نتایج حاکی از افزایش قابل ملاحظه بارش به دلیل افزایش دما و شار بخار آب است. نیلاوار و ویکار<sup>۲</sup> (۲۰۱۹) اثرات تغییرات اقلیمی بر جریان رودخانه پورنا در هند را با استفاده از سناریوهای RCP بررسی کردند. نتایج نشان داد که دما و بارش تحت هر دو سناریو در آینده افزایش پیدا خواهد کرد. حیدری و همکاران (۲۰۲۰) با استفاده از خروجی مدل جهانی HadGEM2 و سناریوهای RCP به بررسی اثرات تغییرات دما و بارش بر میزان جریان در حوضه آبریز دریاچه ارومیه پرداختند. نتایج نشان داد در دوره آتی میزان بارش به میزان ۴/۵ درصد نسبت به دوره پایه کاهش خواهد یافت. روشن و همکاران (۱۳۹۱) به ارتباط سنجی تأثیر گرمایش جهانی بر کیفیت آب با تأکید بر عنصر بارش با استفاده از مدل LARS-WG و داده‌های خروجی مدل HadCM3 تحت سه سناریوی انتشار در در خروجی حوضه آبریز گرگانرود پرداختند. نتایج نشان داد که سناریوهای A1B و B1 نسبت به سناریوی A2 خوش‌بینانه‌تر عمل کرده و دوره‌های ترسالی بیشتر و در نتیجه کیفیت آب بهبود می‌یابد. طائی و همکاران (۱۳۹۴) با استفاده از مدل ریزمقیاس گردانی LARS-WG به پیش‌بینی پارامترهای اقلیمی در سه دوره زمانی مختلف در حوضه بار نیشابور پرداختند. نتایج حاصل کاهش بارش و افزایش تابش و دما در دوره‌های آتی را نشان داد. صلاحی و همکاران (۱۳۹۵) به پیش‌بینی تغییرات دما و بارش با استفاده از مدل LARS-WG و داده‌های خروجی مدل HadCM3 تحت سه سناریوی انتشار در حوضه آبریز دریاچه پرداختند. نتایج حاکی از کاهش ۸/۲ درصدی بارش در دهه ۲۰۵۰ در حوضه مورد مطالعه است. گودرزی و حسینی (۱۳۹۶) به پیش‌بینی تغییرات بلندمدت بارش در شهرستان سقز با استفاده از مدل‌های گردش عمومی جو پرداختند. نتایج نشان داد

1. Ferreira et al

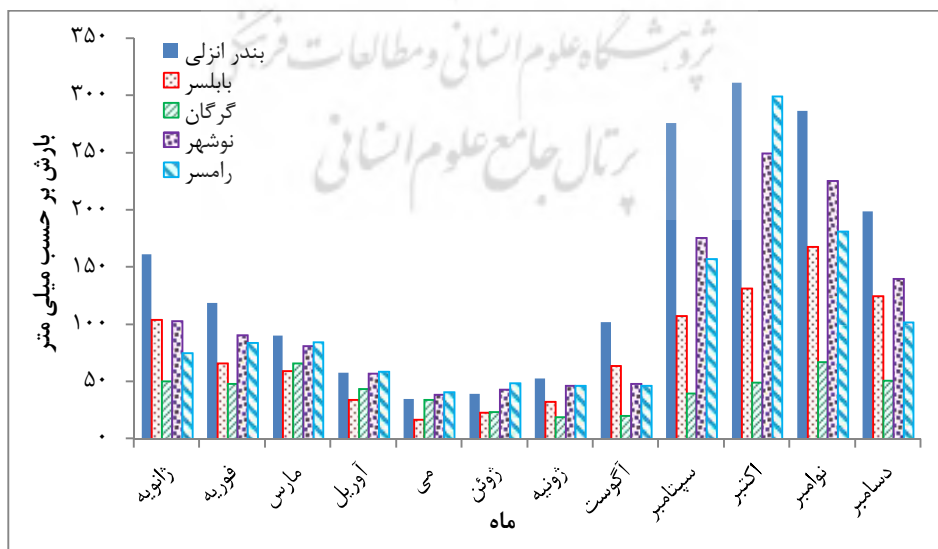
2. Nilawar and Waikar



شکل ۱: موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه و ایستگاههای هواشناسی مورد بررسی

جدول ۱: مشخصات جغرافیایی ایستگاههای هواشناسی مورد مطالعه

نام ایستگاه	نوع ایستگاه	عرض جغرافیایی	طول جغرافیایی	ارتفاع (متر)
بندر انزلی	سینوپتیک	۳۷/۴۷	۴۹/۴۵	-۲۳
بابلسر	سینوپتیک	۳۶/۷۱	۵۲/۶۵	-۲۰
گرگان	سینوپتیک	۳۶/۹	۵۴/۴۱	۰
نوشهر	سینوپتیک	۳۶/۶۵	۵۱/۵	-۲۹/۹
رامسر	سینوپتیک	۳۶/۹	۵۰/۶۶	-۲۰



شکل ۲: توزیع ماهانه بارش در ایستگاههای مورد مطالعه در طول دوره آماری (۲۰۱۸-۱۹۸۹)

انرژی بازگشتی به جو توسط زمین است و برای ارزیابی و مقایسه هر یک از عاملان طبیعی و انسانی تغییر اقلیم مورد استفاده قرار می‌گیرد (هیات بین‌الدول تغییر اقلیم، ۲۰۰۷). مدل HadGEM2 نیز از نوع مدل‌های گردش عمومی جفت شده جوی- اقیانوسی است که در مرکز هادلی سازمان هواشناسی انگلیس طراحی و توسعه یافته است و دارای شبکه‌ای به ابعاد  $1/25$  درجه عرض جغرافیایی در  $1/875$  درجه طول جغرافیایی است (گودرزی و همکاران، ۱۳۹۵). جهت اجرای مدل LARS-WG از داده‌های روزانه دمای حداقل و دمای حداکثر و بارش روزانه در دوره آماری (۱۹۸۹-۲۰۱۸) استفاده شد که در این پژوهش به عنوان دوره پایه و مبنای تغییر اقلیم گذشته، برای شبیه‌سازی اقلیم آینده مورد استفاده قرار گرفت. روش کار به این صورت است که مدل، داده‌های دیده‌بانی شده دوره پایه را دریافت نموده، با بررسی آن‌ها مشخصه‌های آماری داده‌ها استخراج می‌شوند، سپس به منظور صحت‌سنجی و اطمینان از توانمندی مدل، برای دوره آماری پایه مدل را اجرا نموده تا یک سری داده‌های مصنوعی در دوره پایه مجدد ایجاد شود. سپس این خروجی‌ها به منظور ارزیابی عملکرد مدل در بازسازی داده‌ها، با مشخصات آماری مشاهداتی ایستگاه‌ها به کمک آزمون آماری T-test جهت بررسی میانگین بارش ماهانه و آزمون F-test جهت ارزیابی واریانس ماهانه بارش، مقایسه می‌شوند. تطابق مشخصات آماری داده‌های مشاهداتی و داده‌های باز تولیدی، نشان می‌دهد که مدل می‌تواند سناریوهای انتخابی و خروجی مدل‌های اقلیمی (GCM) را به داده‌های دوره پایه اعمال و تغییرات را شبیه‌سازی کند (گودرزی و همکاران، ۱۳۹۵: ۱۷۲).

در این پژوهش جهت ارزیابی و تحلیل عملکرد مدل ریزمقیاس گردانی LARS-WG علاوه بر آزمون‌های آماری، از معیارهای RMSE، MSE، MAE و  $R^2$  نیز استفاده شد. ضریب تعیین ( $R^2$ ) معیاری بدون بُعد و بهترین مقدار آن برابر یک می‌باشد. رابطه (۱)

متوسط بارش سواحل جنوبی دریای خزر بر اساس ایستگاههای مورد مطالعه در طول دوره آماری مورد بررسی (۲۰۱۸-۱۹۸۹) برابر با  $1141/2$  میلی‌متر است که کمترین و بیشترین مقدار آن به ترتیب مربوط به ایستگاههای گرگان با  $514/7$  میلی‌متر و بندر انزلی با  $1730/3$  میلی‌متر است. بیشترین میزان بارش ماهانه ایستگاههای مورد مطالعه نیز مربوط به ماههای اکتبر (مهر) و نوامبر (آبان) است و از نظر فصلی، پاییز پر بارش‌ترین فصل سال است (شکل ۲).

### روش تحقیق

مدل ریزمقیاس گردانی LARS-WG یکی از مشهورترین مدل‌های مولد داده‌های تصادفی وضع هوا با استفاده از توزیع نیمه تجربی جهت ریزمقیاس گردانی آماری مدل‌های جهانی است (ویلکس و ویلیبی<sup>۱</sup>، ۱۹۹۹: ۲۲۹). این مدل، در عین پیچیدگی کمتر فرآیند شبیه‌سازی و داده‌های ورودی و خروجی، توانایی بالایی در پیش‌بینی تغییرات اقلیمی دارد و برای تولید داده‌های دمای حداقل، دمای حداکثر، بارش و تابش به صورت روزانه تحت شرایط اقلیم حاضر و آینده به کار می‌رود (سمنوف و استراتونویچ<sup>۲</sup>، ۲۰۱۰: ۱۴). اولین نسخه این مدل توسط راسکو و همکاران<sup>۳</sup> (۱۹۹۱) ارائه شد. سپس توسط سمنوف و همکاران (۱۹۹۸) در مرکز تحقیقات لانگ اشتون بازنگری و توسعه داده شد. دلیل اصلی تولید این مدل غلبه بر نقاط ضعف زنجیره مارکف بود (سمنوف و استراتونویچ، ۲۰۱۰: ۱۴). در سال ۲۰۱۸ نسخه ۶ این مدل (LARS-WG6) جهت ریزمقیاس گردانی داده‌های گزارش پنجم (CIMP5) به روز و منتشر گردید، که در این پژوهش جهت ریزمقیاس گردانی داده‌های مدل جهانی HadGEM2 تحت سه سناریوی واداشت تابشی (RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5) مورد استفاده قرار گرفت. سناریوهای واداشت تابشی تفاوت بین انرژی تابشی دریافتی از خورشید و

1. Wilks and Wilby
2. Semonov and Stratonovitch
3. Racsco et al

بارش به صورت ماهانه و دوره‌ای استخراج و تغییرات آن‌ها نسبت به دوره پایه محاسبه شد.

### نتایج و بحث

جهت پیش‌بینی و بررسی چشم‌انداز تغییرات بارش در منطقه مورد مطالعه، ابتدا مدل ریزمقیاس گردانی برای دوره آماری پایه جهت واسنجی و صحت‌سنجی، اجرا گردید. سپس خروجی مدل که در این پژوهش با داده‌های مشاهداتی و با استفاده از آزمون‌های آماری T و F مقایسه گردید. نتایج حاصل نشان داد که در هیچ‌کدام از ماه‌های سال اختلاف معنی‌داری بین مقادیر مدل‌سازی و مشاهداتی ایستگاه‌های مورد بررسی با خطای بحرانی ۰/۰۵ وجود ندارد. نمونه‌ای از نتایج حاصل برای دو ایستگاه گرگان و بندرانزلی در شرق و غرب دریای خزر در جدول (۲) آورده شده است.

جهت صحت‌سنجی و اطمینان از دقت مدل در ایستگاه‌های مختلف از شاخص‌های خطاسنجی RMSE، MSE و MAE و همچنین ضریب تعیین ( $R^2$ ) نیز استفاده شد که نتایج حاکی از دقت قابل قبول مدل در شبیه‌سازی بارش در ایستگاه‌های مورد مطالعه است. بیشترین دقت مدل مربوط به ایستگاه‌های گرگان و بابلرس به ترتیب با RMSE برابر با ۵/۵ و ۶/۵ و کمترین دقت نیز مربوط به ایستگاه بندرانزلی با RMSE برابر با ۱۷/۹ و ضریب تعیین برابر با ۰/۹۸ است (جدول ۳). بر اساس نتایج حاصل مقادیر همبستگی پیرسون بین داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده نیز در سطح معنی‌داری ۰/۰۵ قابل قبول است.

شکل (۳) نتایج ارزیابی عملکرد مدل LARS-WG در شبیه‌سازی بارش ماهانه ایستگاه‌های مورد بررسی در دوره آماری پایه را نشان می‌دهد. بر اساس نتایج حاصل بین مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی و همچنین انحراف استاندارد آن‌ها اختلاف چندانی در بیشتر ماه‌های سال وجود ندارند که حاکی از عملکرد مناسب و قابل قبول مدل LARS-WG جهت شبیه‌سازی و پیش‌بینی تغییرات بارش در ایستگاه‌های مورد مطالعه است.

نحوه محاسبه آن را نشان می‌دهد (صداقت‌کردار و همکاران، ۱۳۸۷: ۶۷). میانگین مربعات خطا (MSE) می‌تواند از صفر در عملکرد عالی تا بی‌نهایت تغییر کند که به صورت رابطه (۲) تعریف می‌گردد (کارآموز و همکاران، ۱۳۸۵: ۴). مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE) به عنوان قیاسی برای نشان دادن اختلاف بین مقادیر شبیه‌سازی شده از مقادیر اندازه‌گیری به کار می‌رود این معیار که به صورت رابطه (۳) تعریف می‌شود به عنوان مرسوم‌ترین شاخص خطا به کار می‌رود (لین و همکاران، ۲۰۰۶: ۶۰۳). میانگین مطلق خطا (MAE) برای مقایسه عبارت به عبارت خطای نسبی مقادیر شبیه‌سازی شده با توجه به مقادیر اندازه‌گیری شده به کار می‌رود که به صورت رابطه (۴) ارائه می‌گردد (هو و همکاران، ۲۰۰۱: ۷۳۲).

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^N X_o \cdot X_s}{\sqrt{\sum_{i=1}^N X_o^2 \sum_{i=1}^N X_s^2}} \quad (1)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_o - X_s)^2}{N}} \quad (2)$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^N |X_o - X_s|}{N} \quad (3)$$

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_o - X_s)^2 \quad (4)$$

در روابط فوق  $X_o$  داده‌های مشاهداتی،  $X_s$  داده‌های شبیه‌سازی شده و N تعداد داده‌ها است. پس از ارزیابی عملکرد مدل LARS-WG با استفاده از آزمون‌های آماری و شاخص‌های خطاسنجی و اطمینان از مناسب بودن مدل، داده‌های دوره آینده (۲۰۵۰-۲۰۲۱، ۲۰۸۰-۲۰۵۱ و ۲۱۰۰-۲۰۸۱) با استفاده از مدل جهانی HadGEM2 تحت سه سناریوی واداشت تابشی (RCP 8.5 و RCP 4.5، RCP2.6) تولید شد. پس از تولید داده‌ها برای دوره‌های آینده خروجی‌های

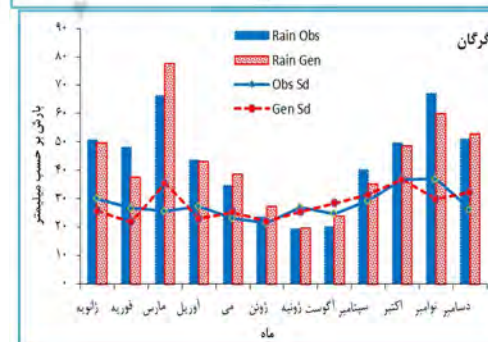
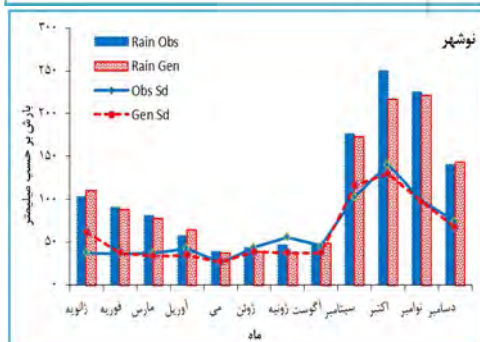
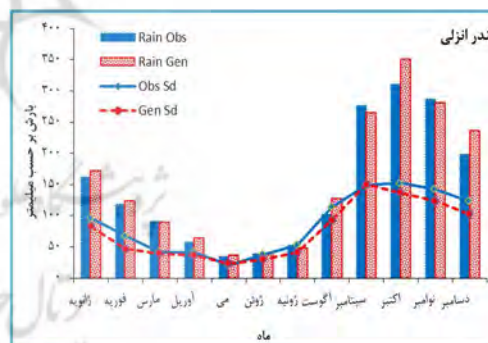
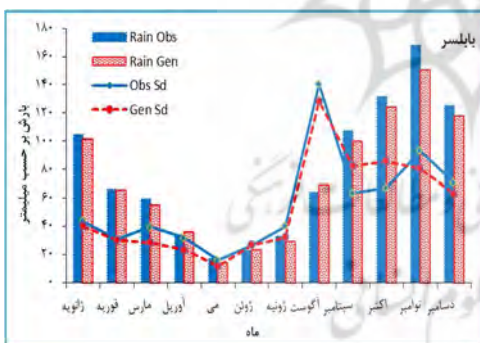
1. Lin et al
2. Hu et al

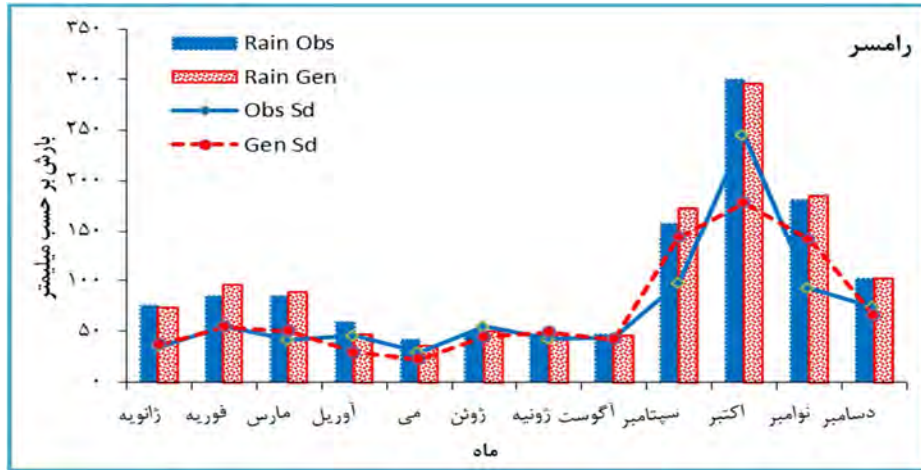
جدول ۲: مقایسه آزمون‌های آماری بر روی بارش مشاهداتی و شبیه‌سازی توسط مدل ریزمقیاس گردانی

ماه	ایستگاه بندر انزلی				ایستگاه گرگان			
	T-test	p-values	F-test	p-values	T-test	p-values	F-test	p-values
ژانویه	-۰/۴۵۸	۰/۶۴۸	۱/۳۵۱	۰/۳۷۷	۰/۱۳	۰/۸۹۷	۱/۳۶۵	۰/۳۶۱
فوریه	-۰/۳۴۷	۰/۷۳	۲/۰۶۲	۰/۰۳۵	۱/۷۹۲	۰/۰۷۸	۱/۴۸۸	۰/۲۴۵
مارس	۰/۱۲۲	۰/۹۰۳	۱/۱۰۴	۰/۷۶۴	-۱/۵۱۹	۰/۱۳۳	۱/۹۰۱	۰/۰۷۵
آوریل	-۰/۷۰۴	۰/۴۸۴	۱/۲۷۹	۰/۴۶۹	-۰/۰۵۹	۰/۹۵۳	۱/۴۰۵	۰/۳۱۹
می	-۰/۲۶۶	۰/۷۹۱	۱/۱۸۴	۰/۶۴۲	-۰/۷۳۳	۰/۴۶۶	۱/۱۸۴	۰/۶۴۲
ژوئن	-۰/۰۸۹	۰/۹۲۹	۱/۶۲۳	۰/۱۵۷	-۰/۷۲۲	۰/۴۷۳	۱/۰۵۷	۰/۸۸۸
ژوئیه	-۰/۴۹۲	۰/۶۲۴	۱/۶۷۵	۰/۱۳۳	-۰/۱۰۷	۰/۹۱۵	۱/۱۲۴	۰/۷۲۴
آگوست	-۰/۹۹۵	۰/۳۲۳	۱/۵۰۷	۰/۲۳	-۰/۶۰۲	۰/۵۴۹	۱/۳۱۹	۰/۴۴۲
سپتامبر	۰/۳۱۱	۰/۷۵۷	۱/۰۱۸	۰/۹۷۲	۰/۶۲۶	۰/۵۳۳	۱/۱۵۶	۰/۶۹۱
اکتبر	-۱/۱۲۶	۰/۲۶۴	۱/۲۳۴	۰/۵۳۴	-۰/۰۹۶	۰/۹۲۴	۱/۰۰۶	۰/۹۷۴
نوامبر	۰/۲۰۶	۰/۸۳۸	۱/۳۳۲	۰/۳۹۹	-۰/۸۸۲	۰/۳۸۱	۱/۵۳۵	۰/۲۱
دسامبر	-۱/۳۵۳	۰/۱۸۱	۱/۴۴۳	۰/۲۸۳	-۰/۳۰۷	۰/۷۶	۱/۵۱۵	۰/۲۴۷

جدول ۳: ارزیابی عملکرد مدل LARS-WG با استفاده از شاخص‌های مختلف در ایستگاه‌های مورد مطالعه

R <sup>2</sup>	MAE	MSE	RMSE	ایستگاه
۰/۹۸	۱۲/۳	۳۱۹/۴	۱۷/۹	بندر انزلی
۰/۹۹	۵	۴۲/۳	۶/۵	بایلسر
۰/۸۸	۴/۲	۳۰/۷	۵/۵	گرگان
۰/۹۸	۶/۵	۱۰۷/۸	۱۰/۴	نوشهر
۰/۹۹	۵/۲	۵۶/۲	۷/۵	رامسر

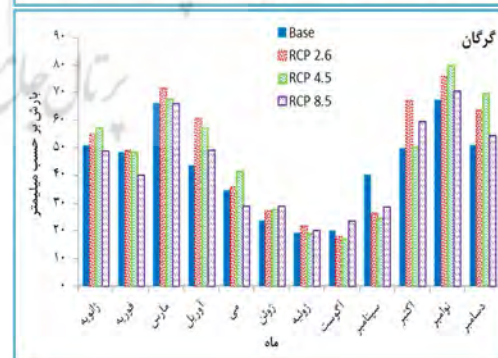
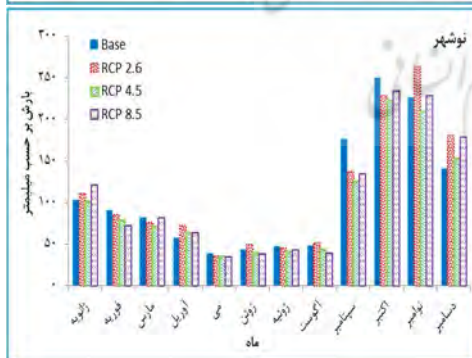
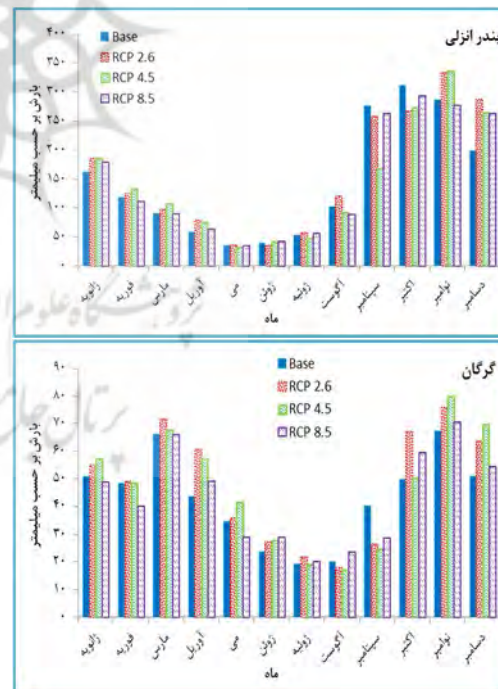
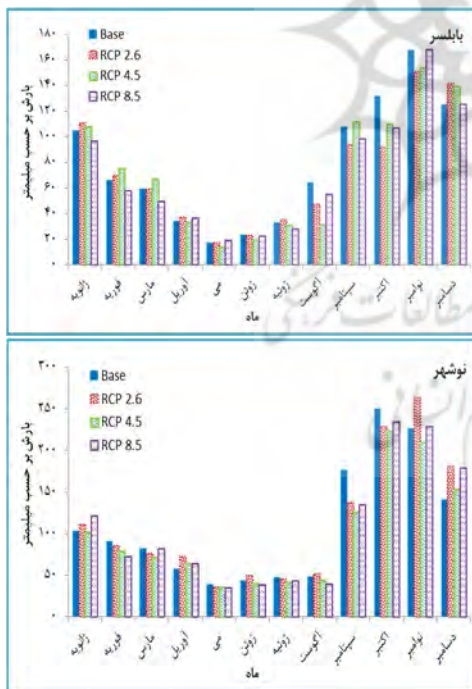




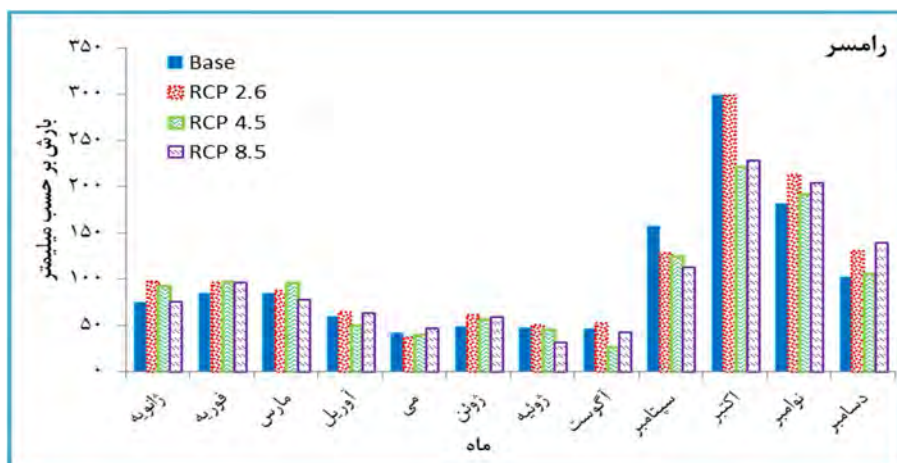
شکل ۳: مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده بارش در ایستگاههای مورد مطالعه

در بیشتر ماههای سال به غیر از ماههای آگوست و سپتامبر افزایش داشته است و انتظار می‌رود که بارش در ۳۰ سال دوره مذکور افزایش داشته باشد اما در ایستگاههای بابلسر، نوشهر و رامسر وضعیت متفاوت است به طوری که میزان بارش به ویژه در ماههای پر بارش سال کاهش داشته است (شکل ۴).

پس از ارزیابی مدل LARS-WG و اطمینان از مناسب بودن آن، به پیش‌بینی تغییرات بارش در دوره‌های آینده پرداخته شد. نتایج حاصل از بررسی ماهانه بارش در ایستگاه مطالعاتی نشان می‌دهد که در ایستگاه بندرانزلی و گرگان میزان بارش در دوره (۲۰۲۱-۲۰۵۰) بر طبق هر سه سناریوی مورد بررسی



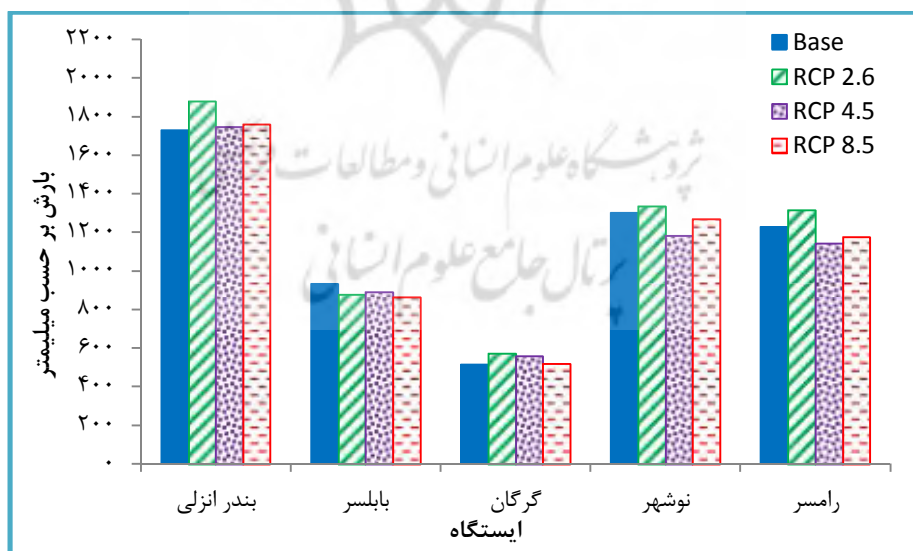




شکل ۵: تغییرات ماهانه بارش در دوره (۲۰۲۱-۲۰۵۰) نسبت به دوره پایه بر اساس سناریوهای مختلف در ایستگاههای مورد مطالعه

کاهش پیدا خواهند کرد و در دو ایستگاه دیگر و بر اساس هر سه سناریوی مورد بررسی میزان بارش افزایش پیدا خواهد کرد که بیشترین افزایش آن نیز بر اساس سناریوی RCP 2.6 برآورد شده است که میزان آن بر اساس سناریوی مذکور برای ایستگاه گرگان برابر با ۱۰/۱ درصد و برای ایستگاه بندرانزلی برابر با ۸/۶ درصد است (شکل ۶).

نتایج حاصل از متوسط بلندمدت بارش در دوره (۲۰۲۱-۲۰۵۰) بر اساس سناریوهای مختلف نشان می‌دهد که در ایستگاه بابلسر بر اساس سناریوهای RCP 2.6، RCP 4.5 و RCP 8.5 میزان بارش به ترتیب به میزان ۶/۲، ۴/۶ و ۷/۵ درصد و در ایستگاههای نوشهر و رامسر بر اساس سناریوهای RCP 4.5 و RCP 8.5 به ترتیب در نوشهر ۹/۲ و ۲/۵ درصد و در رامسر ۷ و ۴/۳ درصد نسبت به دوره پایه



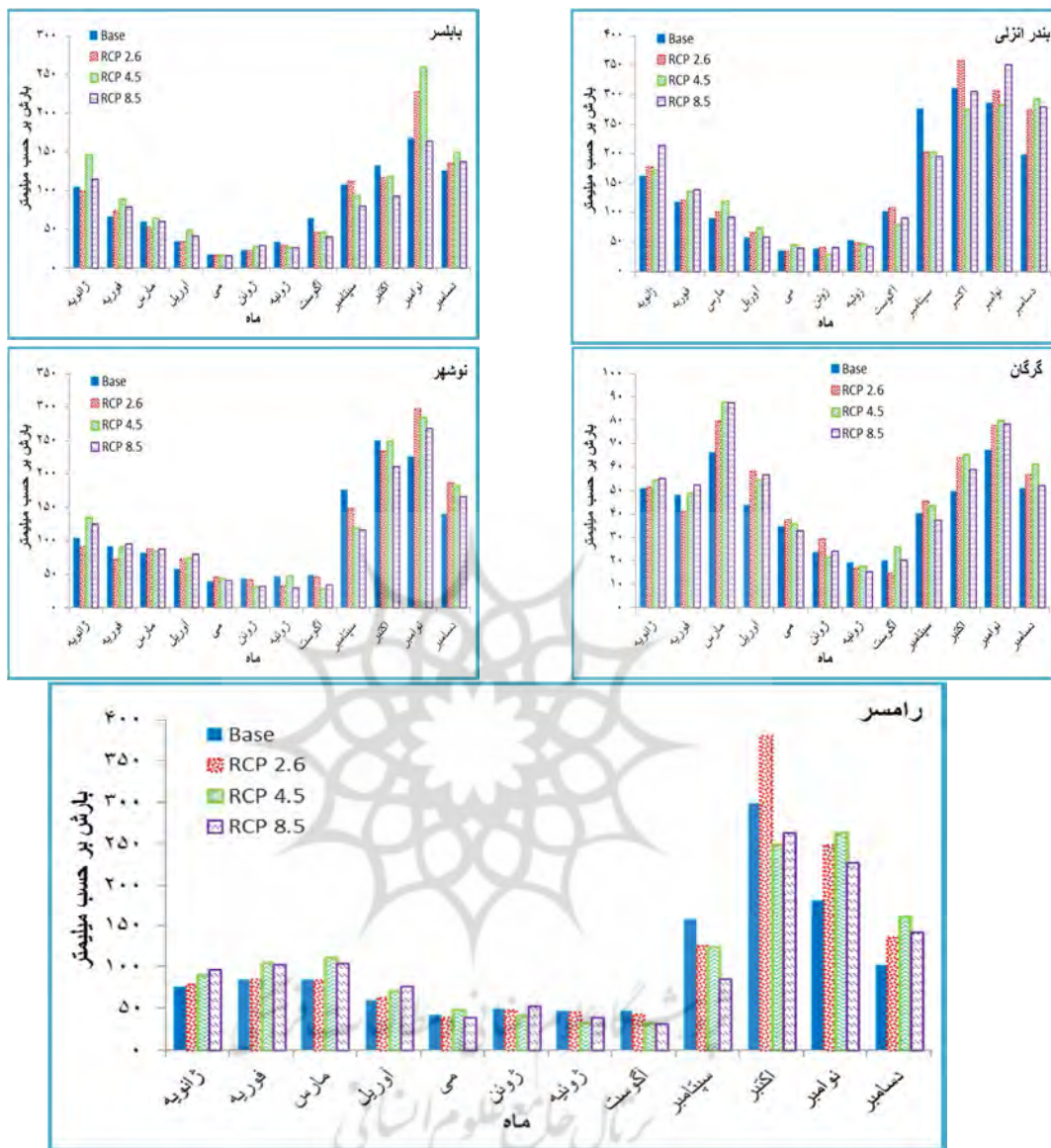
شکل ۶: تغییرات بلندمدت بارش در دوره (۲۰۲۱-۲۰۵۰) نسبت به دوره پایه بر اساس سناریوهای مختلف در ایستگاههای مورد مطالعه

نیز به غیر از ماههای آگوست و سپتامبر و در برخی ایستگاهها در ماههای ژانویه و فوریه در سایر ماههای

نتایج حاصل از تغییرات بارش در دوره (۲۰۸۰-۲۰۵۱) نیز نشان می‌دهد که میزان بارش در این دوره

ایستگاههای مورد مطالعه یعنی ماههای اکتبر، نوامبر و دسامبر است (شکل ۷).

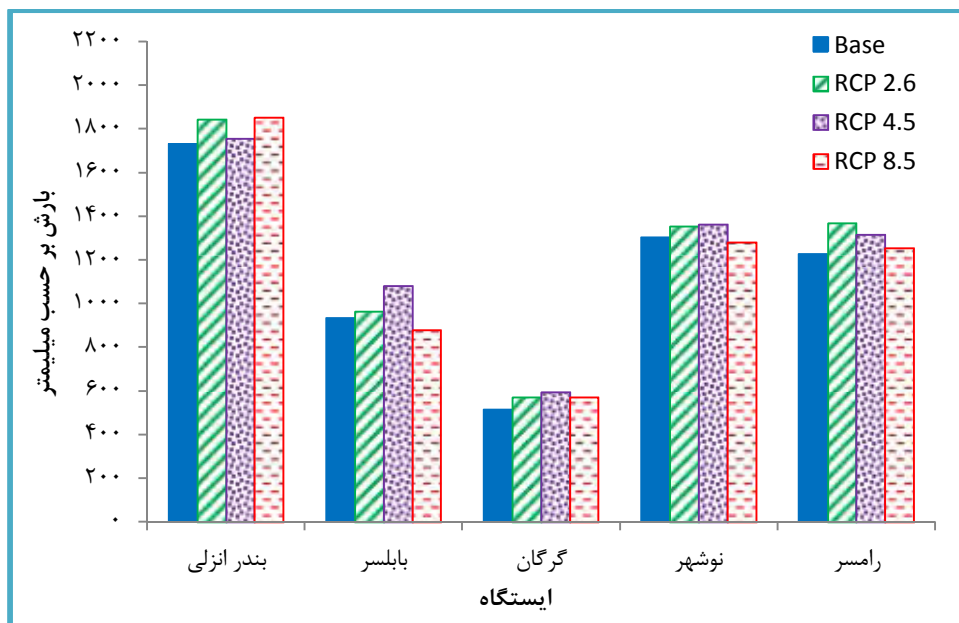
سال میزان بارش افزایش پیدا خواهد کرد. بیشترین تغییرات افزایشی نیز مربوط به ماههای پر بارش



شکل ۷: تغییرات ماهانه بارش در دوره (۲۰۸۰-۲۰۵۱) نسبت به دوره پایه بر اساس سناریوهای مختلف در ایستگاههای مورد مطالعه

پایه و بر اساس سناریوی RCP 2.6 است، اما بر اساس سناریو RCP 8.5 میزان بارش در ایستگاههای نوشهر و بابلسر به ترتیب ۱/۶ و ۶ درصد کاهش پیدا خواهد کرد. در سایر ایستگاهها بر اساس این سناریو نیز میزان بارش نسبت به دوره پایه افزایش پیدا خواهد کرد (شکل ۸).

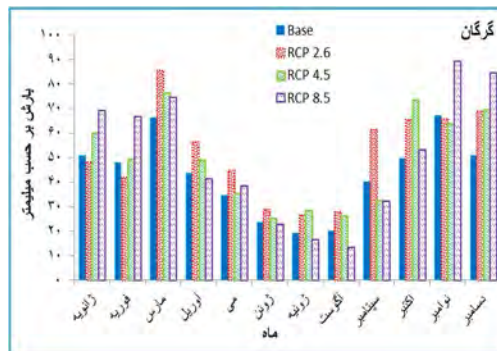
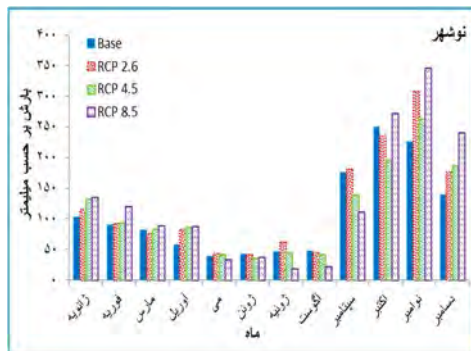
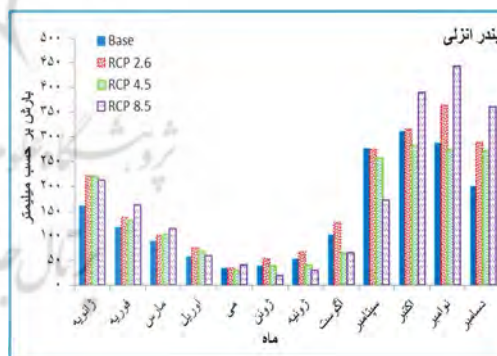
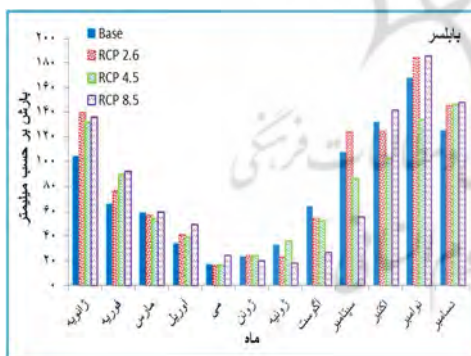
بررسی تغییرات بلندمدت بارش در دوره (۲۰۸۰-۲۰۵۱) بر اساس سناریوهای مختلف نشان داد که بر اساس سناریوهای RCP 2.6 و RCP 4.5 میزان بارش در تمام ایستگاههای مورد بررسی افزایش خواهد یافت که بیشترین میزان افزایش آن نیز مربوط به ایستگاه رامسر با ۱۱/۶ درصد افزایش نسبت به دوره

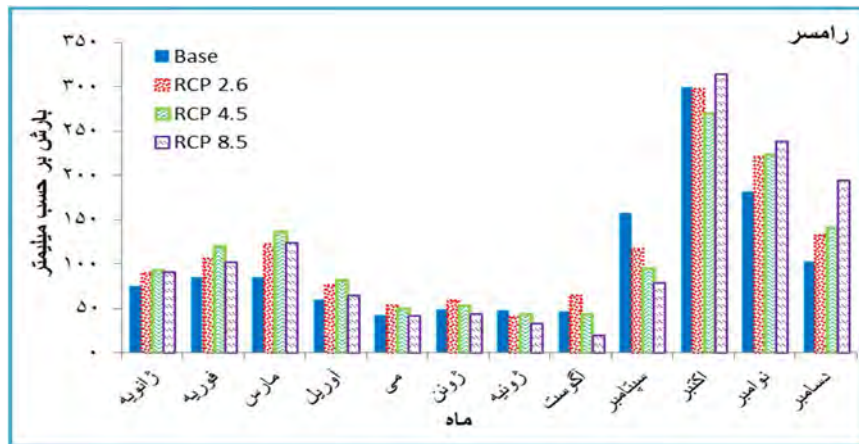


شکل ۸: تغییرات بلندمدت بارش در دوره (۲۰۵۱-۲۰۸۰) نسبت به دوره پایه بر اساس سناریوهای مختلف در ایستگاههای مورد مطالعه

به ویژه در ماههای آگوست و سپتامبر و بر اساس سناریوی RCP 8.5 میزان بارش نسبت به دوره پایه کاهش یافته است. بیشترین تغییرات افزایشی نیز در ایستگاههای مورد مطالعه مربوط به ماههای پر بارش سال در سواحل جنوبی دریای خزر است (شکل ۹).

نتایج حاصل از تغییرات ماهانه بارش در دوره (۲۰۸۱-۲۱۰۰) نیز نشان می‌دهد که میزان بارش در این دوره در بیشتر ایستگاهها و بیشتر ماههای سال و بر اساس هر سه سناریوی مورد بررسی نسبت به دوره پایه افزایش خواهد داشت. در برخی ایستگاهها نیز و

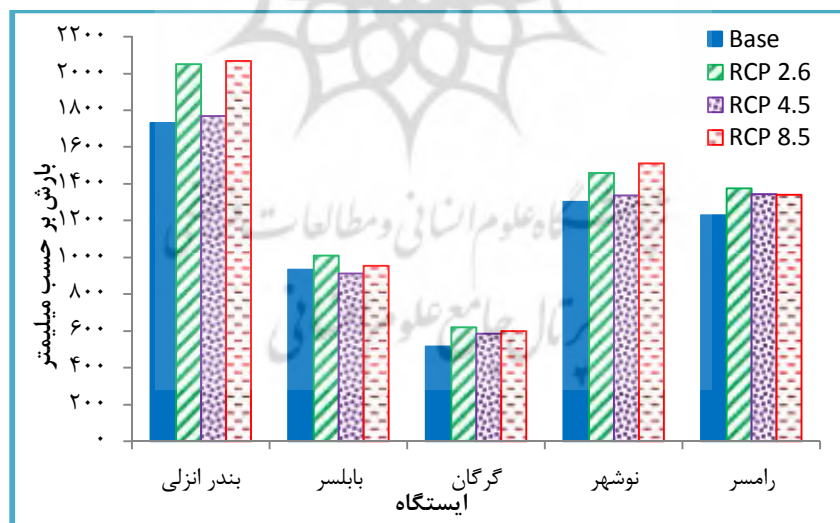




شکل ۹- تغییرات ماهانه بارش در دوره (۲۰۸۱-۲۱۰۰) نسبت به دوره پایه بر اساس سناریوهای مختلف در ایستگاههای مورد مطالعه

تغییرات بلندمدت بارش بر اساس سناریوهای مختلف در این دوره نیز نشان داد که بر اساس هر سه سناریوهای مورد بررسی میزان بارش در ایستگاههای مورد مطالعه به جز ایستگاه بابلسر بر اساس سناریوی RCP 4.5 افزایش خواهد یافت. بیشترین میزان افزایش بارش نسبت به دوره پایه نیز مربوط به ایستگاه بندر انزلی با ۱۸/۶ درصد و سپس ایستگاه رامسر با ۱۲/۳ درصد هر دو بر اساس سناریوی RCP 2.6 است. در این دوره تنها بر اساس سناریو RCP 4.5 میزان بارش در ایستگاه بابلسر به میزان ۲/۳ درصد کاهش پیدا خواهد کرد و بر اساس دو سناریوی دیگر میزان بارش نسبت به دوره پایه افزایش پیدا کرده است (شکل ۱۰).

تغییرات بلندمدت بارش بر اساس سناریوهای مختلف در این دوره نیز نشان داد که بر اساس هر سه سناریوهای مورد بررسی میزان بارش در ایستگاههای مورد مطالعه به جز ایستگاه بابلسر بر اساس سناریوی RCP 4.5 افزایش خواهد یافت. بیشترین میزان افزایش بارش نسبت به دوره پایه نیز مربوط به ایستگاه بندر انزلی با ۱۸/۶ درصد و سپس ایستگاه رامسر با



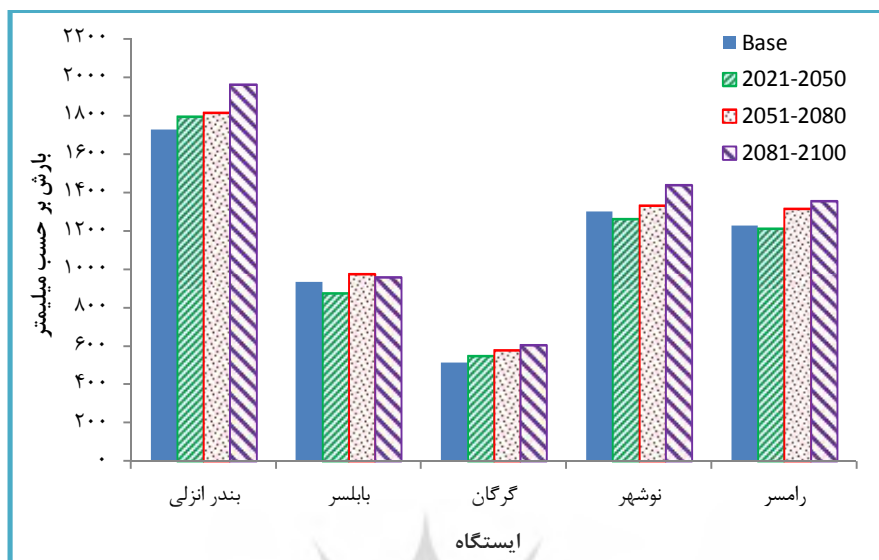
شکل ۱۰: تغییرات بلندمدت بارش در دوره (۲۰۸۱-۲۱۰۰) نسبت به دوره پایه بر اساس سناریوهای مختلف

در مجموع بر اساس نتایج حاصل از بررسی سناریوهای مختلف، میزان بارش در دوره (۲۰۲۱-۲۰۵۰) در ایستگاههای بندرانزلی، گرگان به ترتیب ۳/۸ و ۶/۸ درصد افزایش خواهد داشت و در ایستگاههای بابلسر، نوشهر و رامسر نیز به ترتیب ۶/۱، ۳/۱ و ۱/۳ درصد کاهش خواهد داشت. با این توصیف در این دوره میزان بارش به طور متوسط در سواحل جنوبی دریای خزر به میزان ۰/۲ درصد کاهش پیدا خواهد کرد. بر اساس نتایج در دو دوره دیگر (۲۰۵۱-۲۰۸۰ و ۲۰۸۱-۲۱۰۰) میزان بارش در تمام

در مجموع بر اساس نتایج حاصل از بررسی سناریوهای مختلف، میزان بارش در دوره (۲۰۲۱-۲۰۵۰) در ایستگاههای بندرانزلی، گرگان به ترتیب ۳/۸ و ۶/۸ درصد افزایش خواهد داشت و در ایستگاههای بابلسر، نوشهر و رامسر نیز به ترتیب ۶/۱، ۳/۱ و ۱/۳ درصد کاهش خواهد داشت. با این توصیف در این دوره میزان بارش به طور متوسط در سواحل جنوبی دریای خزر به میزان ۰/۲ درصد کاهش پیدا خواهد کرد. بر اساس نتایج در دو دوره دیگر (۲۰۵۱-۲۰۸۰ و ۲۰۸۱-۲۱۰۰) میزان بارش در تمام

میزان ۵/۴ و ۱۰/۷ درصد افزایش پیدا کند (شکل ۱۱).

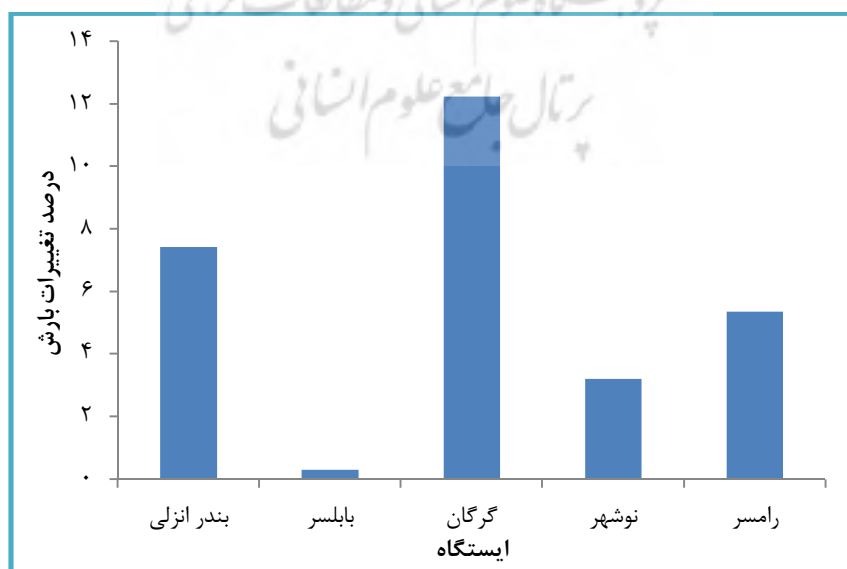
ایستگاههای مورد بررسی افزایش خواهد یافت و انتظار می‌رود میزان بارش به طور متوسط در سواحل جنوبی دریای خزر به ترتیب در دو دوره مذکور به



شکل ۱۱: وضعیت تغییرات بارش در دوره‌های آینده نسبت به دوره پایه در ایستگاههای مورد مطالعه

افزایش نیز مربوط به ایستگاه بابلسر به میزان ۰/۳ درصد پیش‌بینی شده است. بر این اساس انتظار می‌رود در سواحل جنوبی دریای خزر میزان بارش تا پایان قرن ۲۱ نسبت به دوره پایه (۱۹۸۹-۲۰۱۸) به طور متوسط به میزان ۵/۷ درصد افزایش پیدا کند (شکل ۱۲).

در مجموع بر اساس نتایج حاصل از بررسی سناریوهای مختلف در ایستگاههای سواحل جنوبی دریای خزر میزان بارش در دوره بلندمدت آینده (۲۰۲۱-۲۱۰۰) نسبت به دوره پایه افزایش خواهد داشت که بیشترین میزان آن نیز مربوط به ایستگاه گرگان به طور متوسط بلندمدت به میزان ۱۲/۲ درصد افزایش نسبت به دوره پایه است. کمترین میزان



شکل ۱۲: درصد تغییرات بارش در دوره بلندمدت (۲۰۲۱-۲۱۰۰) نسبت به دوره پایه در ایستگاههای مورد مطالعه

### جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

چشم‌انداز تغییرات بارش برای اطلاع از میزان تغییرات آن در آینده و در نظر گرفتن تمهیدات لازم برای تعدیل اثرات سوء ناشی از تغییرات آب و هوایی بر منابع آبی و کشاورزی و همچنین آمایش جغرافیایی فضا از اهمیت زیادی برخوردار است. اهمیت پیش‌بینی بارش زمانی آشکارتر است که در جایگاه‌های جغرافیایی ریزش ناچیز یا قابل توجه و یا ناگهانی حجم زیادی از بارش رخ دهد. به همین منظور در این پژوهش به پیش‌بینی تغییرات بارش در سواحل جنوبی دریای خزر با استفاده از مدل جهانی HadGEM2 تحت سه سناریوی RCP 2.6، RCP4.5 و RCP8.5 با کاربست ریزمقیاس گردانی آماری مدل LARS-WG6 در سه دوره زمانی آینده (۲۰۵۰-۲۰۲۱، ۲۰۸۰-۲۰۵۱ و ۲۱۰۰-۲۰۸۱) نسبت به دوره پایه (۲۰۱۸-۱۹۸۹) پرداخته شد. نتایج حاصل از ارزیابی عملکرد مدل LARS-WG با استفاده از آزمون‌های آماری و شاخص‌های خطاسنجی مختلف نشان داد که این مدل در بیشتر ماه‌های سال، کارآیی و دقت قابل قبولی جهت شبیه‌سازی بارش در ایستگاه‌های مورد مطالعه دارد. نتایج حاصل از مدل HadGEM2 نشان داد که مقدار تغییرات در هر دوره و تحت سناریوهای مختلف متفاوت است به طوری که در دوره ۲۰۵۰-۲۰۲۱ به ویژه در ایستگاه‌های بابلسر، نوشهر و رامسر بر طبق سناریوهای RCP 4.5 و RCP8.5 میزان بارش کاهش خواهد یافت و در ایستگاه‌های گرگان و بندرانزلی بر اساس هر سه سناریوی مورد بررسی میزان بارش افزایش پیدا خواهد کرد و به طور متوسط در این دوره در سواحل جنوبی دریای خزر بارش به میزان ۰/۲

درصد کاهش پیدا خواهد کرد. بر اساس نتایج در دو دوره دیگر میزان بارش در تمام ایستگاه‌های مورد بررسی افزایش خواهد یافت که این میزان در دوره ۲۰۸۰-۲۰۵۱ برابر با ۵/۴ درصد و در دوره ۲۱۰۰-۲۰۸۱ به میزان ۱۰/۷ درصد در سواحل جنوبی دریای خزر خواهد بود. در مجموع انتظار می‌رود در دوره پیش‌بینی شده (۲۰۲۱-۲۱۰۰) میزان بارش در سواحل جنوبی دریای خزر نسبت به دوره پایه به میزان ۵/۷ درصد افزایش یابد. بیشترین افزایش نیز مربوط به سواحل شرقی و سپس غربی دریای خزر خواهد بود. با این وجود پیش‌بینی‌های ریزش‌های جوی از یک طرف به دلیل پیچیدگی فرآیند بارش و از طرف دیگر توانایی و ویژگی‌های مدل‌های جهانی و ریزمقیاس گردانی همواره عدم قطعیت‌هایی را در این زمینه به همراه خواهد داشت. نتایج حاصل از این پژوهش با پژوهش‌های عثمان و همکاران (۲۰۱۴)، سرکار و همکاران (۲۰۱۵)، لیونگ تان و همکاران (۲۰۱۷)، صلاحی و همکاران (۱۳۹۵)، گودرزی و همکاران (۱۳۹۶)، خورشیددوست و همکاران (۱۳۹۷) و خزائی و همکاران (۱۳۹۸) مبنی بر عملکرد مناسب مدل LARS-WG در شبیه‌سازی تغییرات بارش و همچنین تغییرات بارش آینده در مناطق مختلف با توجه به افزایش دما و گرمایش جهانی مطابقت دارد. از نتایج حاصل از این پژوهش می‌توان در مقابله با معضلاتی همچون خشکسالی، سیلاب‌های ناگهانی و تخریب‌های زیست محیطی مدیریت و همچنین در آمایش جغرافیایی فضا و برنامه‌ریزی منابع آب، کشاورزی، انرژی و غیره استفاده نمود.

### منابع

- جهانبخش، سعید. علی اصغر موحد دانش و واحد مولوی. ۱۳۸۰. تحلیل مدل‌های برآورد تبخیر-تعرق برای ایستگاه هواشناسی تبریز، دانش کشاورزی، شماره دوم، تبریز.
- روشن، غلامرضا. رویاسادات موسوی و اصغر کامیار. ۱۳۹۱. ارتباط سنجی تأثیر گرمایش جهانی بر کیفیت آب در خروجی حوضه آبریز گرگانرود با تأکید بر عنصر
- بارش، مجله آمایش جغرافیایی فضا، دوره دوم، شماره پنجم، گرگان
- خزائی، محمدرضا. نازیلا تحسین‌زاده و احمد شرافتی. ۱۳۹۸. تحلیل عدم قطعیت سناریوهای بارش و دمای حوضه سیرا تحت اثر تغییر اقلیم، علوم و مهندسی آبخیزداری ایران، شماره چهل و پنجم، تهران.
- خورشیددوست علی محمد. بهروز ساری صراف و باقر قمرچشمه و فاطمه جعفرزاده. ۱۳۹۷. پیش‌بینی

- اسفزاری با پایگاه داده gmap, gpcc, gpcp. تحقیقات جغرافیایی، شماره دوازدهم، اصفهان.
15. Ferreira, R N., Nissenbaum, M R., and Rickenbach, TH M. 2018. Climate change effects on summertime precipitation organization in the Southeast United States. *Atmospheric Research*, 214:348- 363.
  16. Heydari, Sh., Hosseini, S.A., and Heydari, A. 2020. Investigating the effects of climate change on stream flows of Urmia Lake basin in Iran, *Modeling Earth Systems and Environment*, 1. 329-339.
  17. Hu, T.S., Lam, K.C., and Ng, S.T. 2001. River flow time series prediction with a range dependent neural network. *Hydrological Science Journal*, 46: 729-745.
  18. Hyun Cha, D., Kyou Lee, D., Chun-Sil Jin., Gayoung Kim., Yonghan Choi., Myoung-Seok Suh., Joong-Bae Ahn., Song-You Hong., Seung-Ki Min., Seong-Chan Park., Hyun-Suk Kang. 2016. Future changes in summer precipitation in regional climate simulations over the Korean Peninsula forced by multi-RCP scenarios of HadGEM2-AO. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 52. 139-149
  19. IPCC. 2007. Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Chen, M., Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.), Summary for Policymakers, in: *Climate Change 2007. Climate Change 2007: The Physical Science Basis, Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental*.
  20. IPCC. 2013. Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*.
  21. Kay, AL., Davies, HN., Bell, VA., Jones, RG. 2009. Comparison of uncertainty sources for climate change impacts. *L flood frequency in England. Climate Change*, 92. 41-63.
  22. Leong Tan, M., Latif Ibrahim, AB., Yusop, Z., Chua, V., Weng Chan, N. بارش‌های سنگین سواحل جنوبی دریای خزر تحت شرایط تغییر اقلیم در دوره ۱۴۰۸ - ۱۳۸۹. علوم و مهندسی آبخیزداری ایران، شماره چهل و دوم، تهران.
  ۵. ذهبیون، باقر. محمدرضا گودرزی و علیرضا مساح‌بوانی. ۱۳۸۹. کاربرد مدل SWAT در تخمین رواناب حوضه در دوره‌های آبی تحت تأثیر تغییر اقلیم، پژوهش‌های اقلیم‌شناسی، شماره یکم و دوم، مشهد.
  ۶. شائمی، اکبر و مجید حبیبی‌نوخندان. ۱۳۸۸. گرمایش جهانی و پیامدهای زیستی اکولوژیکی، چاپ اول، مشهد، انتشارات دانشگاه فردوسی.
  ۷. صداقت‌کردار، علی و ابراهیم فتاحی. ۱۳۸۷. شاخص‌های پیش‌آگاهی خشکسالی در ایران، جغرافیا و توسعه، شماره ۱۱، صص ۷۶-۵۹، انتشارات دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان.
  ۸. صلاحی، برومند. مسعود گودرزی و سید اسعد حسینی. ۱۳۹۵. پیش‌بینی تغییرات دما و بارش در دهه ۲۰۵۰ در حوزه آبخیز دریاچه ارومیه، مهندسی و مدیریت آبخیز، شماره چهارم، تهران.
  ۹. طائی‌سمیرمی، سیاوش. حمیدرضا مرادی و مرتضی خداقلی. ۱۳۹۴. پیش‌بینی تغییرات برخی از متغیرهای اقلیمی با استفاده از مدل ریز مقیاس‌سازی LARS-WG و خروجی مدل HadCM3 تحت سناریوهای مختلف، مهندسی و مدیریت آبخیز، شماره دوم، تهران.
  ۱۰. علاء‌الدین، فریده و حمیدرضا ملک‌ی. ۱۳۹۴. نقش تغییر اقلیم در دهه اخیر و اثر آن در توسعه پایدار از منظر آمایش سرزمین (مطالعه موردی: استان سمنان)، پنجمین کنفرانس منطقه‌ای تغییر اقلیم، تهران.
  ۱۱. کارآموز، محمد. فرید رضانی و سامان رضوی. ۱۳۸۵. پیش‌بینی بلند مدت بارش با استفاده از سیگنال‌های هواشناسی: کاربرد شبکه‌های عصبی مصنوعی، هفتمین کنگره بین‌المللی مهندسی عمران، تهران.
  ۱۲. گودرزی، مسعود. سید اسعد حسینی و ابراهیم مسگری. ۱۳۹۴. مدل‌های آب و هواشناسی، چاپ اول، زنجان، آذرکلک.
  ۱۳. گودرزی، مسعود. سید اسعد حسینی و مجید حسینی. ۱۳۹۶. پیش‌بینی تغییرات بلندمدت بارش در شهرستان سقز با استفاده از مدل‌های گردش عمومی جو، ششمین همایش سامانه‌های سطوح آبخیز باران، خمینی شهر.
  ۱۴. مسعودیان، ابوالفضل. محمدصادق کیخسروی و فاطمه رعیت‌پیشه. ۱۳۹۳، معرفی و مقایسه پایگاه داده

27. Racsco, P., L. Szeidl and M. Semenov. 1991. A serial approach to local stochastic weather models. *Ecological Modeling*, 57. 27-41.
28. Sarkar, J., Chicholikar, J.R., and Rathore, L.S. 2015. Predicting Future Changes in Temperature and Precipitation in Arid Climate of Kutch, Gujarat: Analyses Based on LARS-WG Model. *Current science*, 109. 2084-2093.
29. Semenov, M., Brooks, R., Barrow, E., Richardson, C. 1998. Comparison of the WGEN and LARS-WG stochastic weather generators for diverse climates. *Climate Resarche*, 10. 95-107.
30. Semenov, M.A., and Stratonovitch, P. 2010. Use of multi-model ensembles from global climate models for assessment of climate change impacts. *Climate Research*, 41. 1-14.
31. Wilks, D.S., and Wilby, R. 1999. The weather generation game: a review of stochastic weather models. *Progress in Physical Geography*, 23. 329-357.
2017. Climate change impacts under CMIP5 RCP scenarios on water resources of the Kelantan River Basin, Malaysia. *Atmospheric Research*, 189. 1-10.
23. Lin, J.Y., Cheng, C.T., and Chau, K.W. 2006. Using support vector machines for long-term discharge prediction. *Hydrological Science Journal*, 51. 599-612.
24. Nilawar, A P., and Waikar, M L. 2019. Impacts of climate change on streamflow and sediment concentration under RCP 4.5 and 8.5: A case study in Purna river basin, India. *Science of The Total Environment*, 2. 2685-2696
25. Osman, Y., AL-Ansari, N., Abdellatif, M., Aljawad, S.B., and Knutsson, S. 2014. Expected future precipitation in central Iraq using Lars-WG stochastic weather generator. *Engineering*, 6. 948-959.
26. Panol, T.J., and Loret, F. 1998. Climatic warning hazard and wildfire occurrence in coastal eastern Spain. *Climate Change*, 38. 345-357.