

## پیش بینی تغییرات اقلیمی با استفاده از مدل های گردش عمومی جو و مقیاس گاهی مدل های SDSM و LARS-WG تحت سناریوهای واداشت تابشی در حوضه آبریز دز

علی اکبر عرب سلغار

دانشجوی دکتری مهندسی منابع آب، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

جهانگیر پرهمت\*

استاد پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران

مسعود گودرزی

دانشیار پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۸/۷ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۲/۵

### چکیده

تغییرات اقلیمی یکی از بزرگ ترین چالش هایی می باشد که بشر در قرن حاضر با آن مواجه است؛ بنابراین پیش بینی تغییرات اقلیمی جهت پیش آگاهی از وضعیت آینده و در نظر گرفتن تمهیدات لازم جهت تعدیل و سازگاری با تغییرات اقلیمی از اهمیت زیادی برخوردار است. لذا در این پژوهش به پیش بینی تغییرات اقلیمی در حوضه آبریز رودخانه دز از زیر حوضه های کارون بزرگ پرداخته شد. بدین منظور از داده های دو مدل جهانی HadGEM2 و CanESM2 تحت سه سناریوی RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 و کاربست دو مدل مقیاس گاهی LARS-WG و SDSM بهره گرفته شد و تغییرات بارش، دمای بیشینه و کمینه در سه دوره آینده (۲۰۵۰-۲۰۲۱، ۲۰۸۰-۲۰۵۱ و ۲۱۰۰-۲۰۸۱) نسبت به دوره پایه (۱۹۸۹-۲۰۱۸) مورد بررسی قرار گرفت. همچنین جهت واسنجی و صحت سنجی مدل های SDSM و LARS-WG از شاخص های MAE، MSE، RMSE و R<sup>2</sup> استفاده شد. نتایج نشان داد که هر دو مدل مقیاس گاهی در شبیه سازی تغییرات اقلیمی در حوضه مورد مطالعه از دقت مناسبی برخوردارند و علی رغم تفاوت هایی در شبیه سازی، هیچ کدام بر دیگری برتری مطلق ندارد. نتایج حاصل از پیش بینی مدل های مورد بررسی نیز نشان داد که در دوره های آتی میزان بارش در سطح حوضه بین ۶/۳- تا ۱۵/۷ درصد نسبت به دره پایه در تغییر خواهد بود. بیشترین تغییرات کاهش و افزایش نیز به ترتیب مربوط به نواحی شرقی و جنوب غربی حوضه خواهد بود. همچنین دمای بیشینه حوضه بین ۱/۳ تا ۳/۹ درجه سلسیوس و دمای کمینه نیز بین ۱/۵ تا ۳/۵ درجه سلسیوس در نوسان خواهد بود که بیشترین و کمترین تغییرات آن ها نیز به ترتیب مربوط به نواحی جنوب شرقی و شمال غربی حوضه خواهد بود. بیشترین و کمترین تغییرات حاصل نیز به ترتیب بر اساس سناریوهای RCP8.5 و RCP2.6 پیش بینی شده است. لذا با توجه افزایش دما و بارش و همچنین کوهستانی بودن حوضه مورد مطالعه لازم است راهکارهای مقابله با سیلاب و مهار و مدیریت آن مورد توجه قرار گیرد.

واژگان کلیدی: تغییر اقلیم، حوضه آبریز دز، SDSM، LARS-WG، RCP

## مقدمه

افزایش گازهای گلخانه‌ای در دوره‌های آینده و در نتیجه تشدید تغییرات پارامترهای اقلیمی، می‌تواند تأثیرات منفی زیادی 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). تبعات منفی این پدیده برای بشر تا آنجا می‌تواند مخرب باشد که در بین ده عامل تهدیدآمیز بشر در قرن بیست و یکم، مانند فقر، سلاح‌های هسته‌ای، کمبود غذا و غیره پدیده تغییر اقلیم مقام اول را به خود اختصاص داده است (هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم، ۲۰۰۱). در بین عناصر اقلیمی، دما و بارش به دلیل تأثیر گسترده بر سایر عوامل و به‌خصوص تأثیراتی که بر فعالیت‌های انسانی دارند از اهمیت خاصی برخوردارند به طوری که تقریباً بیشترین نمود تغییرات اقلیمی در سطح کره زمین بر روی این دو پارامتر متمرکز شده است (طباطبایی و حسینی، ۱۳۸۲: ۳)؛ بنابراین پیش‌بینی بلندمدت متغیرهای اقلیمی جهت اطلاع از میزان تغییرات آن‌ها و در نظر گرفتن تمهیدات لازم به‌منظور تعدیل اثرات سوء ناشی از تغییرات اقلیمی مورد توجه بسیاری از مجامع علمی جهانی قرار گرفته است بر همین اساس مدل‌های گردش عمومی جو (GCM) توسعه یافته‌اند (کین<sup>۲</sup> و همکاران، ۲۰۰۴: ۱۷۶) هر چند که این مدل‌ها در مقیاس فضایی جوی و قاره‌ای نتایج معنی‌داری را به نمایش می‌گذارند و بخش بزرگی از پیچیدگی سیستم کره زمین را ترکیب می‌کنند اما ذاتاً قادر نیستند که دینامیک و اشکال با شبکه ریزمقیاس‌تر محلی را به نمایش بگذارند (کارت<sup>۳</sup> و همکاران، ۱۹۹۴؛ ایگلی<sup>۴</sup> و همکاران، ۱۹۹۰؛ شارما<sup>۵</sup> و همکاران، ۲۰۰۷). لذا ارزیابی تأثیر تغییرات اقلیم در مقیاس محلی نیازمند رویکردی است تا شکاف موقتی و فضایی بین متغیرهای اقلیمی بزرگ‌مقیاس و متغیرهای هواشناسی با مقیاس محلی را پر کند که رویکرد اساسی در این مورد، همان روش‌های ریزمقیاس‌نمایی یا مقیاس‌گاهی هستند (ویلبی<sup>۶</sup> و همکاران، ۲۰۰۲). در واقع مدل‌های گردش عمومی نمی‌توانند مستقیماً برای پیش‌بینی‌های منطقه‌ای یا نقطه‌ای استفاده شوند و در صورتی که به‌طور مستقیم به‌عنوان ورودی مدل‌های اقلیمی و هیدرولوژیکی مورد استفاده قرار گیرند، باعث افزایش عدم قطعیت می‌شوند به همین منظور برای افزایش دقت مکانی این داده‌ها از روش‌های مقیاس‌گاهی استفاده می‌شود که به روش‌های آماری و دینامیکی تقسیم می‌شوند (بیشام<sup>۷</sup> و همکاران، ۲۰۱۴: ۲۶۵۵). روش‌های آماری دو وجه تمایز عمده با روش‌های دینامیکی دارند اول این که نیازمند رفتار مشاهداتی (گذشته) ایستگاه مورد مطالعه هستند و دوم این که مدل‌سازی در یک دوره حدود دو تا سه دهه در کسری از ثانیه انجام می‌شود (شمسی‌پور، ۱۳۹۲: ۱۵۴)؛ بنابراین معتبرترین ابزار جهت ریزمقیاس‌گردانی داده‌های GCM استفاده از روش‌های آماری است. در میان روش‌های آماری نیز مدل‌های LARS-WG و SDSM از پرکاربردترین ابزارهای آماری

1- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)

2- Qian

3- Carter

4- Wigley

5- Sharma

6 - Wilby

7- Beecham

مقیاس‌کاهی می‌باشند که کاربرد بسیاری در مطالعات جوی، هیدرولوژیکی و زیست‌محیطی دارند (ویلبی و هاریس<sup>۱</sup>، ۲۰۰۶: ۴۲). در این راستا سرکار<sup>۲</sup> و همکاران (۲۰۱۵) به پیش‌بینی تغییرات دما و بارش با استفاده از مدل‌های جهانی مختلف در هندوستان پرداختند. نتایج نشان داد که در دوره‌های آتی میزان بارش بین ۹ تا ۲۷ درصد کاهش می‌یابد. هیونچا<sup>۳</sup> و همکاران (۲۰۱۶) به پیش‌بینی تغییرات بارش تابستانه در کره جنوبی با استفاده از سناریوهای مختلف RCP پرداختند. نتایج نشان داد در دوره‌های آینده میزان بارش کاهش ولی شدت آن افزایش می‌یابد. لیونگ‌تان<sup>۴</sup> و همکاران (۲۰۱۷) به ارزیابی و پیش‌بینی اثرات تغییرات اقلیمی بر منابع آب در مالزی پرداختند. نتایج افزایش بارندگی در فصل مرطوب و کاهش در فصل خشک را نشان داد. دیمری<sup>۵</sup> و همکاران (۲۰۱۸) به پیش‌بینی تغییرات کمینه و بیشینه دما تحت سناریوهای مختلف RCP در هیمالیا پرداختند. بر اساس نتایج حاصل دمای کمینه و بیشینه در این منطقه بین ۰/۵۴- تا ۰/۲۳ درجه سلسیوس در هر دهه افزایش می‌یابد. نیلاوار و ویکار<sup>۶</sup> (۲۰۱۹) به پیش‌بینی تغییرات دما و بارش تحت دو سناریوی RCP و اثرات آن بر جریان رودخانه‌ای در هند پرداختند. نتایج نشان داد که دما و بارش تحت هر دو سناریوی مورد بررسی در آینده افزایش پیدا خواهد کرد. حیدری و همکاران (۲۰۲۰) به پیش‌بینی تغییرات دما و بارش با استفاده از مدل HadGEM2 و مقیاس‌کاهی LARS-WG و اثرات آن بر جریان رودخانه‌ای در حوضه آبریز دریاچه ارومیه پرداختند. نتایج نشان داد در دوره‌های آتی میزان بارش کاهش و میزان دما افزایش خواهد یافت. حسینی و احمدی (۱۳۹۵) به پیش‌بینی تغییرات دمای کمینه و بیشینه با استفاده از مدل LARS-WG در سقز پرداختند. نتایج نشان داد که دما در دوره‌های آتی در تمامی ماه‌های سال در این منطقه افزایش خواهد یافت. نادری و همکاران (۱۳۹۶) به پیش‌بینی تغییرات دما و بارش با استفاده از مدل SDSM در حوضه آبخیز سیمره پرداختند. نتایج حاصل افزایش دما و کاهش بارش در حوضه مورد مطالعه را نشان داد. گودرزی و همکاران (۱۳۹۷) به پیش‌بینی تغییرات دما و بارش با استفاده از مدل SDSM در حوضه آبخیز دریاچه ارومیه پرداختند. بر اساس نتایج حاصل مقدار دما و بارش در دوره آینده نسبت به دوره پایه افزایش خواهد یافت. عزیزی و همکاران (۱۳۹۸) به پیش‌بینی تغییرات دما در استان ایلام بر اساس مدل‌های گزارش پنجم پرداختند. نتایج افزایش دماهای کمینه و بیشینه در ایستگاه‌های مورد مطالعه را نشان داد. کثیری و همکاران (۱۳۹۹) به پیش‌بینی تغییرات دما و بارش با استفاده از مدل CanESM2 و مقیاس‌کاهی SDSM در سواحل جنوبی دریای خزر پرداختند. نتایج نشان‌دهنده کاهش بارش و افزایش دما در منطقه مورد مطالعه است. لذا با توجه به اهمیت موضوع در این پژوهش به ارزیابی و پیش‌بینی تغییرات اقلیمی با استفاده از دو مدل GCM تحت سه سناریوی واداشت تابشی (RCP) با کاربری مقیاس‌کاهی مدل‌های LARS-WG و SDSM در سه دوره زمانی آینده (۲۰۵۰-۲۰۲۱، ۲۰۸۰-۲۰۵۱ و ۲۱۰۰-۲۰۸۱) در حوضه آبریز رودخانه دز پرداخته شد. حوضه مورد مطالعه در ارتفاعات دامنه‌های

1- Wilby and Harris

2- Sarkar

3- Hyun Cha

4- Leong Tan

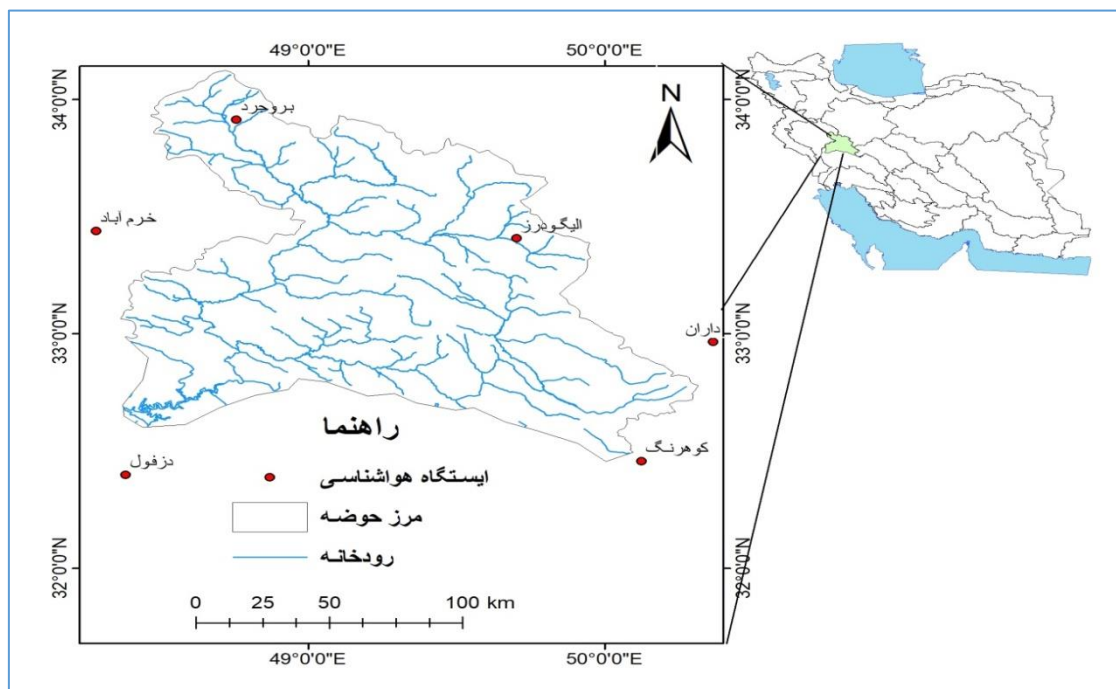
5- Dimri

6- Nilawar and Waikar

غربی و جنوب غربی زاگرس که جزو مناطق پرباران کشور به شمار می‌روند قرار دارد و بخش‌هایی از چهار استان خوزستان، لرستان، همدان و چهارمحال بختیاری را در بر می‌گیرد و از جهت داشتن گونه‌های گیاهی خاص و بارش‌های سیلابی و رسوب‌گذاری در سد دز از اهمیت بالایی برخوردار است. با توجه به نقش مهم رودخانه دز در حیات شهری مانند دزفول و اهمیت آن در آبیاری اراضی کشاورزی، لزوم بررسی تغییرات اقلیمی در آینده به منظور سازگاری و تعدیل اثرات تغییرات اقلیمی آشکار می‌گردد. به همین منظور در این پژوهش به بررسی تغییرات اقلیمی در این حوضه پرداخته شد.

### منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در این پژوهش حوضه آبخیز رودخانه دز با مساحت ۲۳۲۲۹ کیلومترمربع در دامنه‌های غربی و جنوب غربی زاگرس است که یکی از زیر حوضه‌های کارون بزرگ محسوب می‌شود. این حوضه در مختصات جغرافیایی "۳۲°۱۷' تا ۳۴°۱۵' عرض شمالی و "۴۸°۱۷' تا ۵۰°۲۰' قرار گرفته است. جهت بررسی تغییرات اقلیمی در این حوضه از آمار پارامترهای دمای کمینه، دمای بیشینه و بارش ایستگاه‌های هواشناسی سینوپتیک با دوره آماری بلندمدت (۲۰۱۸-۱۹۸۹) در داخل و خارج حوضه (به دلیل نبود ایستگاه با دوره آماری بلندمدت و جهت پوشش کامل حوضه) استفاده شد. موقعیت جغرافیایی و ایستگاه‌های هواشناسی مورد مطالعه در شکل (۱) و مشخصات جغرافیایی ایستگاه‌های هواشناسی در جدول (۱) آورده شده است.



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

جدول ۱: مشخصات جغرافیایی ایستگاه‌های هواشناسی مورد مطالعه

نام ایستگاه	نوع ایستگاه	سال تأسیس	عرض جغرافیایی (درجه)	طول جغرافیایی (درجه)	ارتفاع از سطح دریا (متر)
الیگودرز	سینوپتیک	۱۹۸۶	۳۳°۲۵"	۴۹°۴۲"	۲۰۲۲/۱
بروجرد	سینوپتیک	۱۹۸۹	۳۳°۵۴"	۴۸°۴۵"	۱۶۲۹
خرم‌آباد	سینوپتیک	۱۹۵۱	۳۳°۲۶"	۴۸°۱۷"	۱۱۴۷/۹
داران	سینوپتیک	۱۹۸۹	۳۲°۵۸"	۵۰°۲۲"	۲۲۹۰
دزفول	سینوپتیک	۱۹۶۱	۳۲°۲۴"	۴۸°۲۳"	۱۴۳
کوه‌رنگ	سینوپتیک	۱۹۸۷	۳۲°۲۸"	۵۰°۰۷"	۲۳۶۵

## روش پژوهش

## مدل مقیاس کاهی SDSM

مدل SDSM یک روش نمونه‌برداری مجدد شرطی و دو مرحله‌ای جهت مقیاس‌کاهی داده‌های مدل‌های GCM است (ویلی و داوسون، ۲۰۰۷: ۱۸۳)؛ که اولین بار توسط ویلی و همکاران (۲۰۰۲) جهت مقیاس‌کاهی داده‌های دما و بارش با استفاده از روش‌های آماری ارائه شد. این روش ابتدا متغیرهای پیش‌بینی کننده (مانند دما و بارش) را با استفاده از روش‌های رگرسیونی ترکیبی و یک روش مولد هواشناسی تصادفی، کوچک‌مقیاس کرده و در مرحله بعد در محل ایستگاه مجدداً داده مورد نظر تولید می‌گردد (تاتسومی<sup>۱</sup>، ۲۰۱۳: ۴۸). در واقع SDSM ترکیبی از روش مولد هواشناسی آماری و توابع تغییر شکل یافته است. در این پژوهش برای واسنجی کردن با استفاده از مدل SDSM، از داده‌های دما و بارش ایستگاه‌های هواشناسی حوضه مورد مطالعه و داده‌های مرکز ملی پیش‌بینی‌های محیطی (NCEP) در دوره پایه (در این پژوهش دوره ۲۰۱۸-۱۹۸۹) استفاده شد. پس از اطمینان و ارزیابی توانایی مدل در شبیه‌سازی پارامترهای اقلیمی در دوره پایه در منطقه مطالعاتی، به پیش‌بینی پارامترهای اقلیمی بر اساس خروجی مدل CanESM2 تحت سه سناریوهای RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 پرداخته شد. سناریوهای واداشت تابشی تفاوت بین انرژی تابشی دریافتی از خورشید و انرژی بازگشتی به جو توسط زمین است در هر نسخه از این سناریوها، اثر انتشار گازهای گلخانه‌ای بر اساس نقش آن بر سطح واداشت‌های تابشی برحسب وات بر مترمربع تا پایان قرن ۲۱، طبقه‌بندی شده‌اند. به‌طور مثال در RCP8.5 ادامه روند فعلی منجر به واداشت تابشی به میزان ۸/۵ وات بر مترمربع در سال ۲۱۰۰ می‌گردد (گودرزی و همکاران، ۱۳۹۵: ۱۲۲). مدل CanESM2 چهارمین نسل از مدل‌های آب‌وهوایی است که توسط مرکز مدل‌سازی و تحلیل آب‌وهوای کانادا (CCCma) زیر نظر سازمان محیط‌زیست این کشور توسعه یافته است. در این مدل کل زمین به‌صورت ۶۴\*۱۲۸ سلول شبکه‌بندی شده است که دارای شبکه‌ای با ابعاد ۱ در ۱ درجه طول و عرض جغرافیایی است (گودرزی و همکاران، ۱۳۹۵: ۱۴۹). روش کار به این صورت است که داده‌های اقلیمی روزانه از اول ژانویه سال ۱۹۸۹ تا پایان دسامبر ۲۰۱۸ جهت واسنجی مدل مورد استفاده قرار گرفتند بدین منظور از داده‌های NCEP دوره پایه که شامل ۲۶ متغیر مستقل

اتمسفری است، استفاده شد. حال مدل واسنجی شده قادر است با کمک داده‌های بزرگ‌مقیاس NCEP اقدام به تولید داده‌های مصنوعی در بازه مورد نظر نماید؛ اما در این داده‌های مصنوعی، سناریوهای واداشت تابشی تأثیر ندارند. لذا مدل با بهره‌گیری از پیش‌بینی‌کننده‌های CanESM2 که خود سناریوهای واداشت تابشی را گنجانده‌اند و به‌طور هم‌زمان و با توجه به سناریوهای واداشت تابشی، اقدام به ایجاد سناریوهای اقلیمی می‌نمایند. پس از تولید داده‌های روزانه برای دوره‌های آینده مورد بررسی (۲۰۲۱-۲۰۵۰، ۲۰۸۰-۲۰۵۱ و ۲۱۰۰-۲۰۸۱) از خروجی‌های مدل (در این پژوهش کمینه دما، بیشینه دما و بارش) میانگین‌گیری شده و میانگین ماهانه پارامترهای مذکور در دوره‌های آتی محاسبه می‌شود. سپس تغییرات آن‌ها نسبت به مقادیر میانگین دوره پایه محاسبه شده و نمودارهای تغییرات پارامترهای مذکور در حوضه مورد مطالعه ترسیم و تحلیل می‌گردد.

### مدل مقیاس‌گاهی LARS-WG

این مدل ابتدا توسط راسکو و همکاران (۱۹۹۱) ارائه شد و سپس توسط سمنوف و همکاران (۱۹۹۸) در مرکز تحقیقات لانگ‌اشتون بازنگری و توسعه داده شد. دلیل اصلی تولید این مدل غلبه بر نقاط ضعف زنجیره مارکوف بود. این مدل یکی از مشهورترین مدل‌های مولد داده‌های تصادفی وضع هوا است که به دلیل تکرار محاسبات، نیاز کمتر به داده‌های ورودی و سادگی و کارایی کاربردی بیشتری نسبت به دیگر مدل‌ها است (کیلسبی و همکاران<sup>۱</sup>، ۲۰۰۷؛ دیبیک و کولیبالی<sup>۲</sup>، ۲۰۰۵؛ هی و همکاران<sup>۳</sup>، ۲۰۰۰). نسخه ۶ این مدل (LARS-WG6) در سال ۲۰۱۸ جهت ریزمقیاس‌گردانی مدل‌های گزارش پنجم (CMIP5) به‌روز شده و منتشر گردید. در مدل LARS-WG6 چون نتایج مدل CanESM2 در ورودی‌های این مدل خورنده نشده است. از داده‌های مدل جهانی HadGEM2 تحت سه سناریوی RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 استفاده شد. مدل HadGEM2 از نوع مدل‌های گردش عمومی جفت شده جوی-اقیانوسی است که در مرکز هادلی سازمان هواشناسی انگلیس طراحی و توسعه یافته است. این مدل دارای شبکه‌ای به ابعاد ۱/۲۵ درجه عرض جغرافیایی در ۱/۸۷۵ درجه طول جغرافیایی است که داده‌های آن‌ها از سال ۱۹۶۱ تا ۲۱۰۰ موجود است. روش کار به این صورت است که مدل، داده‌های دیده‌بانی شده دوره پایه را دریافت کرده، با بررسی آن‌ها مشخصه‌های آماری داده‌ها استخراج می‌شوند سپس به‌منظور صحت‌سنجی و اطمینان از توانمندی مدل، برای دوره آماری پایه مدل را اجرا کرد تا یک سری داده‌های مصنوعی در دوره پایه مجدداً ایجاد شود. سپس این خروجی‌ها را به‌منظور ارزیابی عملکرد مدل در بازسازی داده‌ها، با مشخصات آماری مشاهداتی مقایسه می‌شوند. تطابق مشخصات آماری داده‌های مشاهداتی و داده‌های بازتولیدی، نشان می‌دهد که مدل، سناریوهای انتشار گازهای گلخانه‌ای انتخابی و

1- Kilsby et al

2- Dibike and Coulibaly

3- Hay et al

خروجی مدل های اقلیمی GCM را به داده های دوره پایه اعمال و تغییرات را شبیه سازی می کند. لازم به ذکر است ورودی ها و خروجی های این مدل به صورت ایستگاهی است (آقاشاهی و همکاران، ۱۳۹۱: ۴).

### ارزیابی عملکرد مدل ها

جهت ارزیابی مدل های مقیاس کاهی شاخص های عملکردی مختلفی وجود دارد که در این پژوهش از چهار شاخص مختلف استفاده شد. ضریب تعیین ( $R^2$ ) معیاری بدون بعد و بهترین مقدار آن برابر یک است. رابطه (۱) نحوه محاسبه آن را نشان می دهد (صداقت کردار و همکاران، ۱۳۸۷: ۶۲). میانگین مربعات خطا (MSE) روشی برای برآورد میزان خطاست که تفاوت بین مقادیر مشاهداتی و شبیه سازی شده را نشان می دهد. این شاخص به دلیل تصادفی بودن همیشه مثبت است بنابراین از صفر در عملکرد عالی تا بی نهایت در تغییر است و به صورت رابطه (۲) تعریف می گردد. این شاخص ابزار خوبی برای مقایسه خطاهای پیش بینی توسط یک مجموعه داده است (کارآموز و همکاران، ۱۳۸۵: ۴). مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE) نیز میزان خطای بین دو مجموعه داده را اندازه گیری می کند و به عنوان قیاسی برای نشان دادن اختلاف بین مقادیر شبیه سازی شده از مقادیر اندازه گیری به کار می رود این معیار که به صورت رابطه (۳) تعریف می شود به عنوان مرسوم ترین شاخص خطا به کار می رود. این شاخص در واقع بیانگر میانگینی از خطاهای موجود است و هنگامی که هدف ارزیابی دقت کل داده ها باشد، می توان از این عدد به عنوان یک شاخص مهم استفاده نمود (لین و همکاران، ۲۰۰۶: ۵۹۹). میانگین مطلق خطا (MAE) برای مقایسه عبارت به عبارت خطای نسبی مقادیر شبیه سازی شده با توجه به مقادیر اندازه گیری شده به کار می رود که به صورت رابطه (۴) ارائه می گردد (هو و همکاران، ۲۰۰۱: ۷۲۹).

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (X_{oi} - \bar{X}_o)(X_{ei} - \bar{X}_e)}{\sum_{i=1}^n (X_{oi} - \bar{X}_o)^2 \sum_{i=1}^n (X_{ei} - \bar{X}_e)^2} \quad (1)$$

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

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_o - X_s)^2}{N}} \quad (3)$$

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

در روابط فوق  $X_o$  داده های مشاهداتی،  $X_s$  داده های شبیه سازی شده و  $N$  تعداد داده ها است.

## بحث و یافته‌ها

به‌منظور واسنجی مدل LARS-WG، ابتدا مدل برای دوره آماری پایه (۲۰۱۸-۱۹۸۹) اجرا گردید. سپس داده‌های شبیه‌سازی با داده‌های مشاهداتی مقایسه و ارزیابی گردید. در مدل SDSM قبل از واسنجی مدل لازم است متغیرهای مستقل جوی (NCEP) که بیشترین میزان همبستگی را با پارامترهای اقلیمی مشاهداتی دارند تعیین گردند. بر اساس نتایج حاصل، متغیرهای متوسط دما در ارتفاع دو متری سطح زمین، ارتفاع ژئوپتانسیل تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال و متوسط فشار در سطح دریا بالاترین ضریب همبستگی را با بارش و دمای کمینه و بیشینه حوضه آبریز رودخانه دز دارند.

نتایج ارزیابی داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی‌شده بارش، دمای کمینه و بیشینه توسط هر دو مدل مقیاس‌گاهی با استفاده شاخص‌های آماری مختلف در جدول (۲) آورده شده است. نتایج حاصل نشان داد که اختلاف معنی‌داری بین مقادیر شبیه‌سازی شده و مشاهداتی آن‌ها با خطای بحرانی ۰/۰۵ وجود ندارد و مقادیر همبستگی پیرسون بین داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در سطح معنی‌داری ۰/۰۵ قابل قبول می‌باشد. بر اساس نتایج حاصل دقت مدل‌ها در ایستگاه‌ها و در پارامترهای مختلف متفاوت است به‌طوری که هر دو مدل در زمینه مدل‌سازی دما موفق‌تر از بارش عمل کرده‌اند و در شبیه‌سازی بارش به‌ویژه در ماه‌های پربارش از دقت کمتری برخوردارند. این امر ناشی از پیچیده بودن فرآیند بارش و همچنین ساختار مدل‌های اقلیمی و مقیاس‌گاهی است. در مجموع نتایج نشان می‌دهد هر دو مدل در ایستگاه‌های کم‌بارش و دارای نوسان کمتر از دقت مناسب‌تری نسبت به ایستگاه‌های پر بارش برخوردار است. با توجه به شاخص RMSE که مهم‌ترین شاخص ارزیابی مدل می‌باشد مدل LARS-WG در شبیه‌سازی مقادیر بارش به‌جز دو ایستگاه خرم‌آباد و کوه‌رنگ در سایر ایستگاه‌ها مناسب‌تر از مدل SDSM عمل کرده است. البته بیشترین مقادیر RMSE و MAE در زمینه بارش به ترتیب با ۱۵/۷ و ۱۰/۴ مربوط به مدل LARS-WG و در ایستگاه کوه‌رنگ پربارش‌ترین ایستگاه مورد بررسی می‌باشد. همچنین کمترین میزان  $R^2$  با ۰/۹۴ (ایستگاه داران) و بیشترین میزان MSE با ۲۴۴/۸ (ایستگاه کوه‌رنگ) مربوط به مدل LARS-WG است. در مجموع بر اساس معیار  $R^2$  مدل SDSM از ضریب تعیین بالاتری برخوردار است و بر اساس معیار MSE در سه ایستگاه (کوه‌رنگ، دزفو و خرم‌آباد) بهتر و در سه ایستگاه دیگر ضعیف‌تر از مدل LARS-WG عملکرد است (جدول ۲).

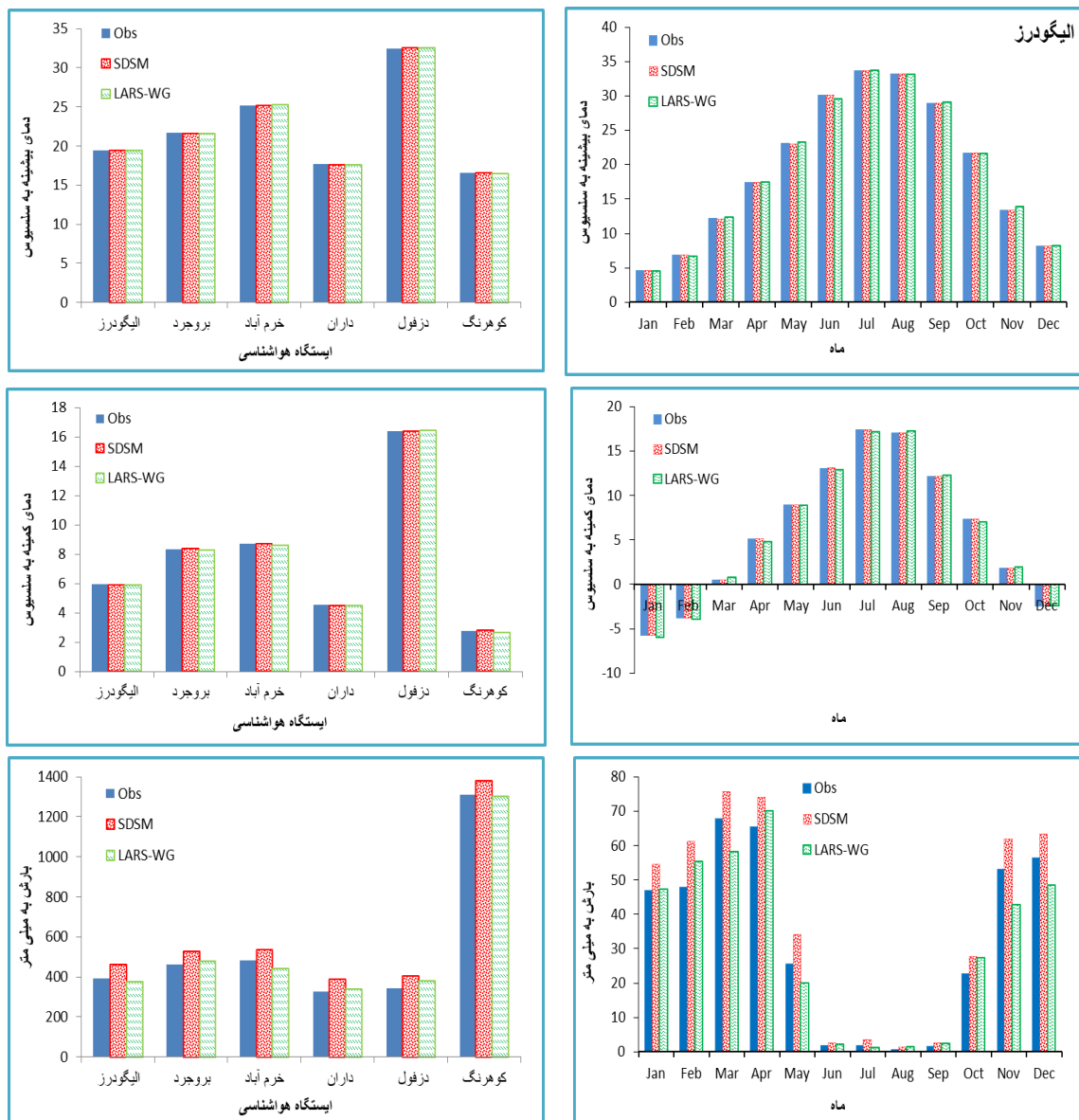
در زمینه مدل‌سازی دما نیز هر دو مدل در زمینه دمای بیشینه در بیشتر ایستگاه‌ها موفق‌تر از دمای کمینه عمل کرده‌اند با این وجود مدل SDSM با توجه به معیارهای خطا سنجی، عملکرد بهتری نسبت به مدل LARS-WG از در شبیه‌سازی دما از خود نشان داده است. بیشترین مقادیر RMSE و MAE در زمینه دما نیز به ترتیب با ۰/۳۳ و ۰/۲۶ مربوط به دمای کمینه ایستگاه کوه‌رنگ و مدل LARS-WG می‌باشد. بر اساس معیار  $R^2$  هر دو مدل از دقت برابر و در همه ایستگاه‌ها و هر دو پارامتر دمای کمینه و بیشینه دارای  $R^2$  برابر با ۰/۹۹ هستند؛ اما بر اساس معیار MSE در همه ایستگاه‌ها و در هر دو پارامتر دمایی مدل SDSM موفق‌تر از مدل LARS-WG عملکرد است. بیشترین میزان MSE نیز مربوط به ایستگاه کوه‌رنگ با ۰/۱۱ در زمینه دمای کمینه و بر اساس مدل LARS-WG می‌باشد (جدول ۲).



جدول ۲: ارزیابی عملکرد مدل ریزمقیاس گردانی SDSM با استفاده از شاخص‌های مختلف

RMSE		MSE		MAE		R <sup>2</sup>		شاخص	ایستگاه
SDSM	LARS	SDSM	LARS	SDSM	LARS	SDSM	LARS	مدل	
۷	۵/۷	۴۹/۴	۳۲/۶	۵/۸	۴/۴	۰/۹۸	۰/۹۵	بارش	الیگودرز
۰/۰۲	۰/۱۹	۰/۰۰	۰/۰۴	۰/۰۲	۰/۱۵	۰/۹۹	۰/۹۹	دمای حداقل	
۰/۰۲	۰/۲۴	۰/۰۰	۰/۰۶	۰/۰۲	۰/۱۹	۰/۹۹	۰/۹۹	دمای حداکثر	
۶/۶	۵/۷	۴۳	۳۲/۹	۵/۴	۴/۱	۰/۹۹	۰/۹۷	بارش	بروجرد
۰/۰۳	۰/۲	۰/۰۰	۰/۰۴	۰/۰۲	۰/۱۶	۰/۹۹	۰/۹۹	دمای حداقل	
۰/۰۴	۰/۲۵	۰/۰۰	۰/۰۶	۰/۰۴	۰/۲	۰/۹۹	۰/۹۹	دمای حداکثر	
۵/۸	۶/۶	۳۳/۱	۴۴	۴/۷	۴/۳	۰/۹۹	۰/۹۷	بارش	خرم‌آباد
۰/۰۳	۰/۱۹	۰/۰۰	۰/۰۴	۰/۰۲	۰/۱۴	۰/۹۹	۰/۹۹	دمای حداقل	
۰/۰۲	۰/۲۵	۰/۰۰	۰/۰۶	۰/۰۱	۰/۱۹	۰/۹۹	۰/۹۹	دمای حداکثر	
۶/۲	۵/۶	۳۸/۳	۳۱/۵	۵/۱	۳/۹	۰/۹۹	۰/۹۴	بارش	داران
۰/۰۵	۰/۲۴	۰/۰۰	۰/۰۶	۰/۰۴	۰/۲	۰/۹۹	۰/۹۹	دمای حداقل	
۰/۰۴	۰/۲۶	۰/۰۰	۰/۰۷	۰/۰۳	۰/۲۴	۰/۹۹	۰/۹۹	دمای حداکثر	
۶	۴/۶	۳۵/۸	۴۰/۴	۵/۲	۴/۳	۰/۹۹	۰/۹۸	بارش	دزفول
۰/۰۳	۰/۲۸	۰/۰۰	۰/۰۸	۰/۰۲	۰/۲۲	۰/۹۹	۰/۹۹	دمای حداقل	
۰/۰۳	۰/۲۲	۰/۰۰	۰/۰۵	۰/۰۳	۰/۱۹	۰/۹۹	۰/۹۹	دمای حداکثر	
۶/۹	۱۵/۷	۴۸	۲۴۴/۸	۵/۷	۱۰/۴	۰/۹۹	۰/۹۷	بارش	کوه‌رنگ
۰/۰۳	۰/۳۳	۰/۰۰	۰/۱۱	۰/۰۲	۰/۲۶	۰/۹۹	۰/۹۹	دمای حداقل	
۰/۰۲	۰/۲۱	۰/۰۰	۰/۰۵	۰/۰۲	۰/۱۶	۰/۹۹	۰/۹۹	دمای حداکثر	

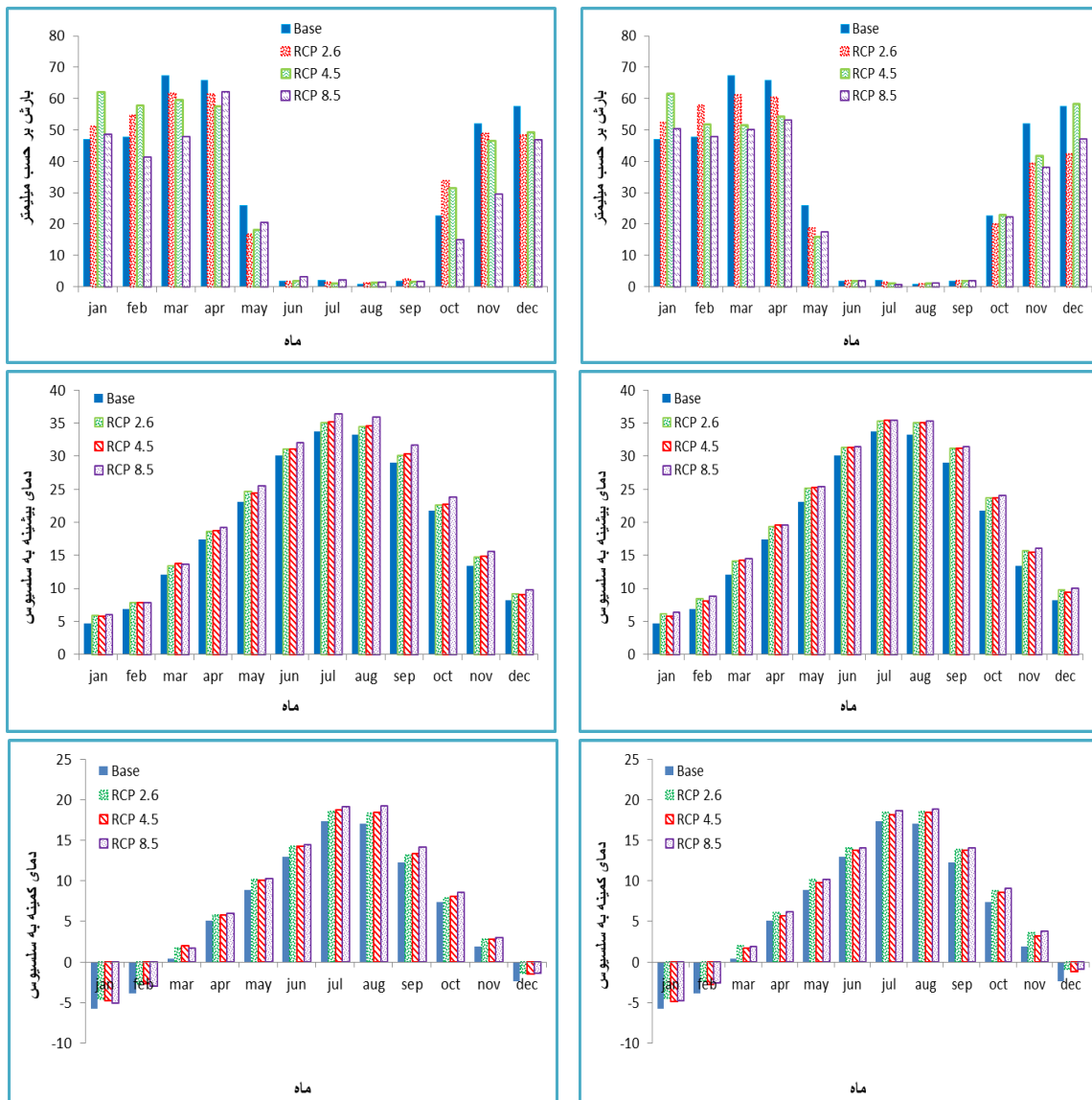
نتایج حاصل از ارزیابی مدل‌های مقیاس‌کاهی به صورت ماهانه و سالانه نشان می‌دهد که در شبیه‌سازی بارش در بیشتر ایستگاه‌ها مدل SDSM از دقت کمتری نسبت به مدل LARS-WG برخوردار است و در بیشتر موارد بارش را بیشتر از مقدار مشاهداتی شبیه‌سازی کرده است و بیش برآوردی داشته است؛ اما از نظر شبیه‌سازی پارامترهای دمایی از دقت بیشتری نسبت به مدل LARS-WG برخوردار است (شکل ۲). جهت نمایش بهتر و اطمینان از صحت پیش‌بینی و همچنین بررسی عدم قطعیت در مدل‌های مورد بررسی به مقایسه مقادیر شبیه‌سازی شده و مشاهداتی به صورت بلندمدت در طول دوره مورد بررسی در ایستگاه‌های مورد مطالعه با استفاده از نمودارهای مقایسه‌ای پرداخته شد که در این بررسی به علت تعداد زیاد نمودارهای مربوطه فقط نتایج ماهانه مربوط به ایستگاه سینوپتیک الیگودرز و سالانه مدل‌های مورد بررسی به عنوان نمونه در شکل (۲) آورده شده است همان‌طور که مشاهده می‌شود مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی پارامترهای مورد بررسی اختلاف چندانی با یکدیگر ندارند که حاکی از عملکرد مناسب مدل‌های مقیاس‌کاهی مورد بررسی جهت شبیه‌سازی و پیش‌بینی تغییرات پارامترهای مورد بررسی است و نمی‌توان یک مدل را بر دیگری ترجیح داد؛ چرا که در تحلیل عملکرد مدل‌ها در ایستگاه‌های مختلف و برای پارامترهای اقلیمی مختلف و همچنین مقیاس‌های ماهانه و سالانه در دوره مورد بررسی شاهد تفاوت در نتایج و نوع عملکرد مدل‌ها هستیم (شکل ۲).



شکل ۲: مقادیر مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده دما و بارش به صورت ماهانه (ایستگاه الیگودرز) و سالانه (ایستگاه‌های سطح حوضه) توسط مدل‌های LARS-WG و SDSM

پس از ارزیابی مدل‌های مقیاس‌کاهی و اطمینان از مناسب بودن آن به بررسی داده‌های تولید شده مدل‌های CanESM2 و HadGEM2 برای دوره‌های آینده تحت سه سناریوی واداشت تابشی پرداخته شد. نتایج حاصل از بررسی ماهانه پارامترهای مورد بررسی در ایستگاه‌های مطالعاتی نشان می‌دهد که بارش در دوره (۲۰۲۱-۲۰۵۰) در بیشتر ایستگاه‌های مورد مطالعه بر طبق هر سه سناریوی مورد بررسی در اکثر ماه‌های سال به غیر از ماه‌های ژانویه، فوریه و اکتبر نسبت به دوره پایه کاهش خواهد داشت و انتظار می‌رود که بارش در دوره (۲۰۲۱-۲۰۵۰) کاهش داشته باشد. بررسی تغییرات میانگین ماهانه دما نشان می‌دهد که کمینه و بیشینه دما بر اساس هر سه سناریو و در هر دو مدل مورد بررسی، در همه ایستگاه‌های هواشناسی مورد بررسی و در همه ماه‌های سال افزایش خواهد داشت و میزان تغییرات

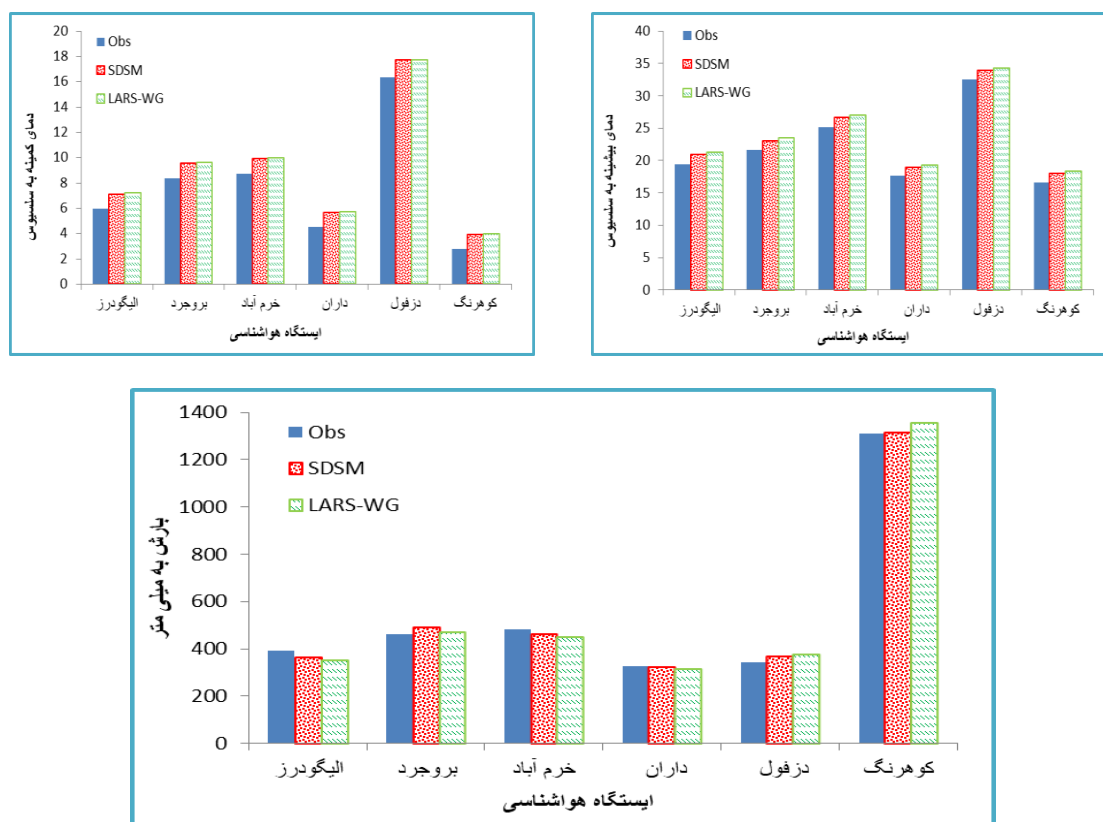
بیشینه دما بیشتر از کمینه دما است. بر اساس نتایج بیشترین تغییرات دما و بارش در هر دو مدل مورد بررسی و در بیشتر ماه‌های سال بر اساس سناریوی RCP8.5 برآورد شده است که ناشی از ویژگی‌هایی است که این سناریو به نمایش می‌گذارد (شکل ۳). در این بخش به دلیل تعداد زیاد نمودارهای حاصل، فقط نتایج خروجی دما و بارش بر اساس هر دو مدل مقیاس گاهی در ایستگاه سینوپتیک الیگودرز به‌عنوان نمونه آورده شده است (شکل ۳).



شکل ۳: وضعیت دما و بارش ماهانه در ایستگاه الیگودرز بر اساس مدل‌های LARS-WG (ستون سمت راست) و SDSM (ستون سمت چپ) در دوره ۲۰۵۰-۲۰۲۱ نسبت به دوره پایه

در مجموع بر اساس نتایج حاصل از بررسی سناریوها و مدل‌های مختلف، میزان بارش به‌طور متوسط در دوره (۲۰۲۱-۲۰۵۰) در حوضه آبریز دز بر اساس مدل‌های LARS-WG و SDSM به ترتیب به میزان ۰/۱۴ و ۰/۰۳ درصد کاهش خواهد داشت که بیشترین میزان کاهش آن نیز مربوط به ایستگاه الیگودرز با ۱۰/۴ و ۷/۲ درصد به ترتیب

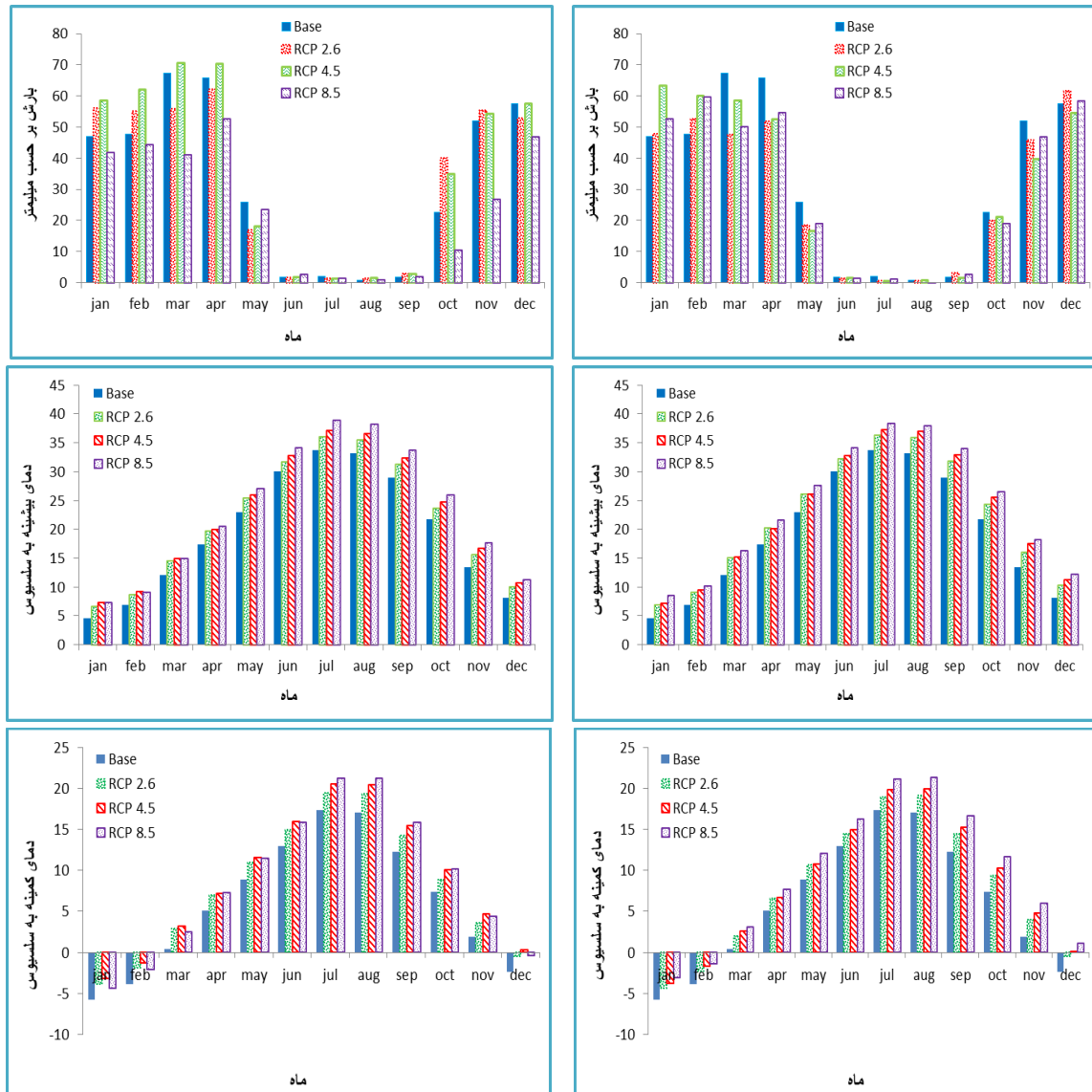
مدل‌های مذکور است. البته بر اساس هر دو مدل ریزمقیاس‌کاهی در ایستگاه‌های بروجرد، دزفول و کوهرنگ میزان بارش افزایش می‌یابد که این میزان برای ایستگاه بروجرد بین ۵/۷-۱/۳ درصد، برای ایستگاه دزفول بین ۹/۹-۶/۵ درصد و برای ایستگاه کوهرنگ بین ۳/۴-۰/۳ درصد بر اساس مدل‌های مورد بررسی است. دلیل افزایش بارش در این ایستگاه‌ها را می‌توان ویژگی‌های اقلیمی و وضعیت توپوگرافی محلی دانست. در این دوره دمای کمینه و بیشینه نیز به‌طور متوسط در سطح حوضه به ترتیب ۱/۲ و ۱/۷ درجه سلسیوس افزایش خواهد یافت که بیشترین تغییرات آن نیز بر اساس مدل LARS-WG و مربوط به ایستگاه دزفول با ۱/۴ درجه سلسیوس افزایش در زمینه کمینه دما و ایستگاه الیگودرز با ۱/۹ درجه سلسیوس در زمینه بیشینه دما است (شکل ۴).



شکل ۴: وضعیت دما و بارش بلندمدت در ایستگاه‌های مورد مطالعه بر اساس مدل‌های LARS-WG و SDSM در دوره ۲۰۵۰-۲۰۲۱ نسبت به دوره پایه

وضعیت بارش در دوره (۲۰۵۱-۲۰۸۰) نسبت به دوره قبل مقداری متفاوت است به‌طوری که بر اساس مدل LARS-WG در بیشتر ماه‌های سال به‌جز ژانویه و فوریه میزان بارش کاهش و برعکس بر اساس مدل SDSM میزان بارش در بیشتر ماه‌ها و بیشتر ایستگاه‌ها به‌ویژه بر اساس سناریو RCP4.5 افزایش خواهد یافت؛ اما افزایش دمای کمینه و بیشینه در دوره قبل در این دوره نیز ادامه دارد به‌طوری که بر اساس هر سه سناریو و هر دو مدل مورد بررسی، در همه ایستگاه‌های هواشناسی مورد بررسی و در همه ماه‌های سال دما افزایش خواهد یافت. بیشترین تغییرات دمای کمینه

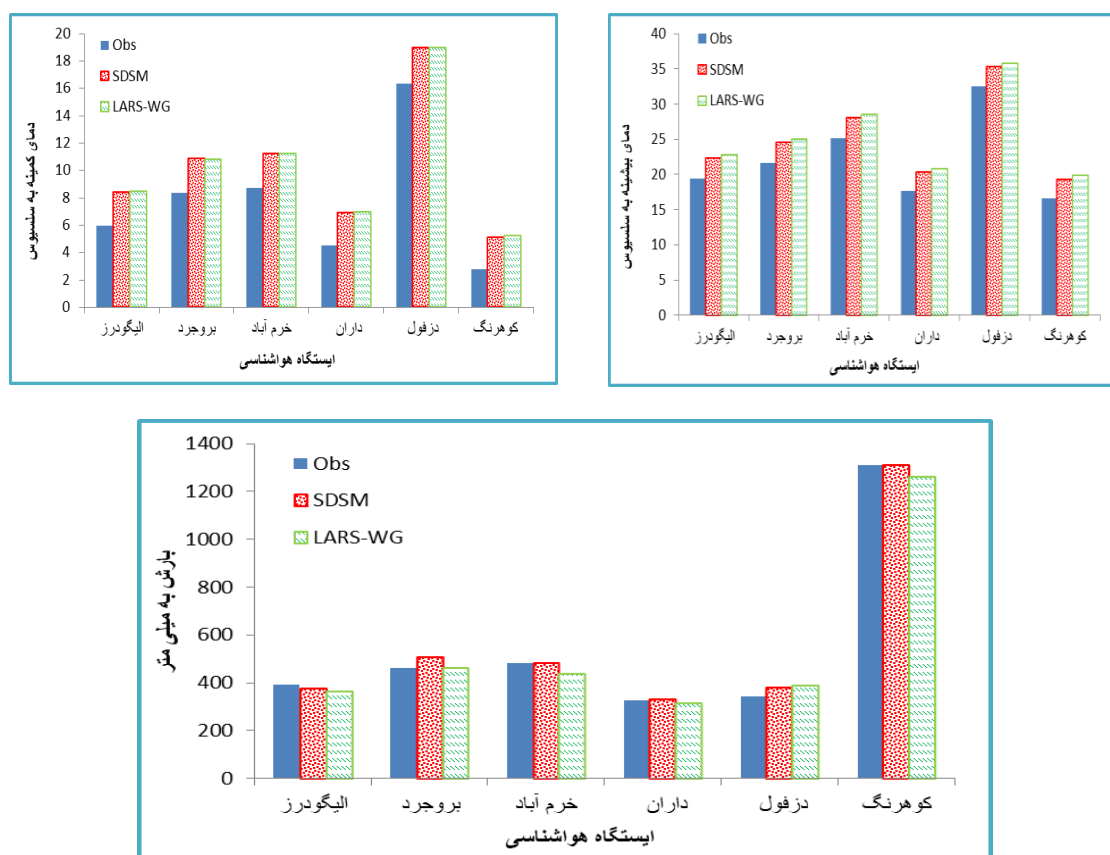
مربوط به ماه‌های سرد سال و بیشترین تغییرات دمای بیشینه نیز مربوط به ماه‌های گرم سال است و در هر دو حالت بیشترین تغییرات بر اساس سناریوی RCP8.5 برآورد شده است (شکل ۵).



شکل ۵: وضعیت دما و بارش در ایستگاه الیگودرز بر اساس مدل‌های LARS-WG (ستون سمت راست) و SDSM (ستون سمت چپ) در دوره ۲۰۵۱-۲۰۸۰ نسبت به دوره پایه

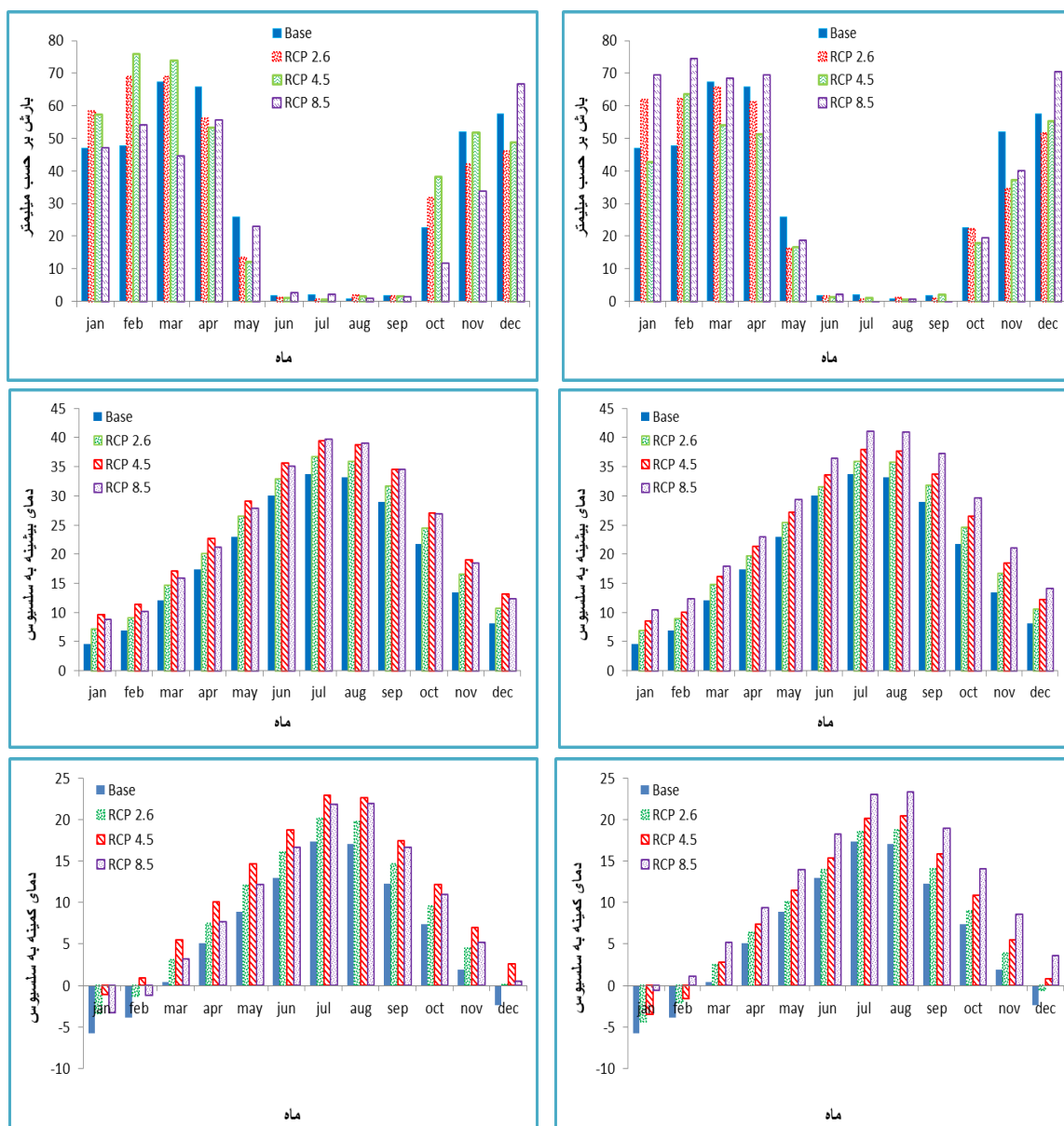
بررسی تغییرات بلندمدت بارش در دوره (۲۰۵۱-۲۰۸۰) در سطح حوضه نشان می‌دهد که بر اساس مدل SDSM به جز ایستگاه الیگودرز با ۳/۹ درصد کاهش در سایر ایستگاه‌ها میزان بارش افزایش خواهد یافت که این میزان افزایش به طور متوسط در سطح حوضه برابر با ۲/۱ درصد نسبت به دوره پایه است. بیشترین میزان افزایش نیز مربوط به ایستگاه دزفول با ۱۰/۳ درصد است؛ اما بر اساس مدل LARS-WG میزان بارش در این دوره به جز ایستگاه دزفول با ۱۳/۹ درصد افزایش در سایر ایستگاه‌ها کاهش خواهد یافت که بیشترین میزان کاهش نیز مربوط به ایستگاه خرم‌آباد با ۸/۸ و

ایستگاه الیگودرز با ۷/۲ درصد نسبت به دوره پایه است. بدین ترتیب بر اساس این مدل میزان بارش به‌طور متوسط در سطح حوضه به میزان ۲/۷ درصد کاهش خواهد یافت. نکته مشترک در این دوره در ارتباط با مدل‌های مورد بررسی این است که هر دو مدل ایستگاه‌های دارای کمترین و بیشترین تغییرات در سطح حوضه را همانند یکدیگر نشان داده‌اند. بر اساس مدل SDSM متوسط دمای کمینه و بیشینه حوضه به ترتیب به میزان ۲/۵ و ۲/۸ درجه سلسیوس و بر اساس مدل LARS-WG نیز به ترتیب به میزان ۲/۵ و ۳/۳ درجه سلسیوس نسبت به دوره پایه افزایش می‌یابد که بیشترین تغییرات آن بر اساس هر دو مدل مربوط به ایستگاه‌های الیگودرز و دزفول است (شکل ۶).



شکل ۶: وضعیت دما و بارش بلندمدت در ایستگاه‌های مورد مطالعه بر اساس مدل‌های LARS-WG و SDSM در دوره ۲۰۵۱-۲۰۸۰ نسبت به دوره پایه

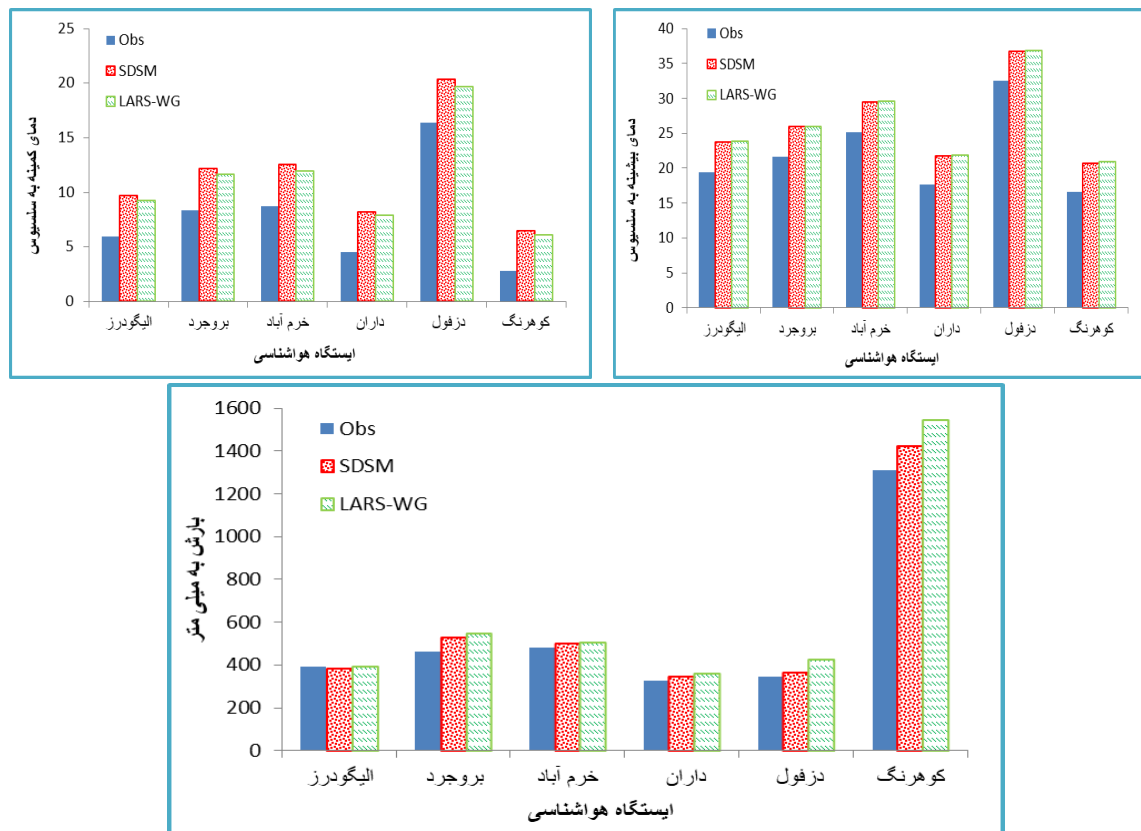
نتایج حاصل از تغییرات ماهانه بارش در سومین دوره مورد بررسی (۲۰۸۱-۲۱۰۰) نیز نشان می‌دهد که میزان بارش در این دوره به‌جز ایستگاه الیگودرز در سایر ایستگاه‌ها و در بیشتر ماه‌های سال و بر اساس هر سه سناریوی مورد بررسی نسبت به دوره پایه افزایش خواهد داشت. بیشترین تغییرات افزایشی در ایستگاه‌های مورد مطالعه نیز مربوط به ماه‌های پر بارش سال در حوضه مورد مطالعه و بر اساس سناریوی RCP 8.5 است. تغییرات ماهانه کمینه و بیشینه دما نیز نشان می‌دهد که همچون دو دوره قبل این دو پارامتر بر اساس هر سه سناریو و هر دو مدل در همه ایستگاه‌ها و ماه‌های سال افزایش خواهد یافت و بیشترین تغییرات نیز بر اساس سناریوی RCP8.5 برآورد شده است (شکل ۷).



شکل ۷: وضعیت دما و بارش در ایستگاه الیگودرز بر اساس مدل‌های LARS-WG (ستون سمت راست) و SDSM (ستون سمت چپ) در دوره ۲۰۱۰-۲۰۸۱ نسبت به دوره پایه

نتایج حاصل از بررسی تغییرات سالانه بارش در دوره پیش‌بینی شده (۲۰۸۱-۲۰۱۰) نیز نشان می‌دهد که میزان بارش حوضه آبریز دز بر اساس مدل‌های SDSM و LARS-WG به ترتیب به میزان  $۱۳/۴$  و  $۶/۹$  درصد افزایش می‌یابد. در این دوره به‌جز ایستگاه الیگودرز با کاهش بین  $۲/۲$ - $۰/۶$  درصد بر اساس مدل‌های مذکور، انتظار می‌رود در سایر ایستگاه‌ها میزان بارش نسبت به دوره پایه افزایش یابد. بر اساس مدل SDSM میزان کمینه و بیشینه دمای حوضه به ترتیب  $۳/۸$  و  $۴/۲$  درجه سلسیوس نسبت به دوره پایه افزایش خواهد یافت که بیشترین تغییرات آن مربوط به ایستگاه دزفول و سپس الیگودرز است. بر اساس مدل LARS-WG نیز دمای کمینه حوضه به میزان  $۳/۳$  درجه سلسیوس و

دمای بیشینه نیز به میزان  $4/3$  درجه سلسیوس نسبت به دوره پایه افزایش خواهد یافت بیشترین تغییرات نیز بر اساس این مدل مربوط به ایستگاه‌های الیگودرز با  $4/4$  و ایستگاه دزفول با  $3/3$  درجه سلسیوس است (شکل ۸).

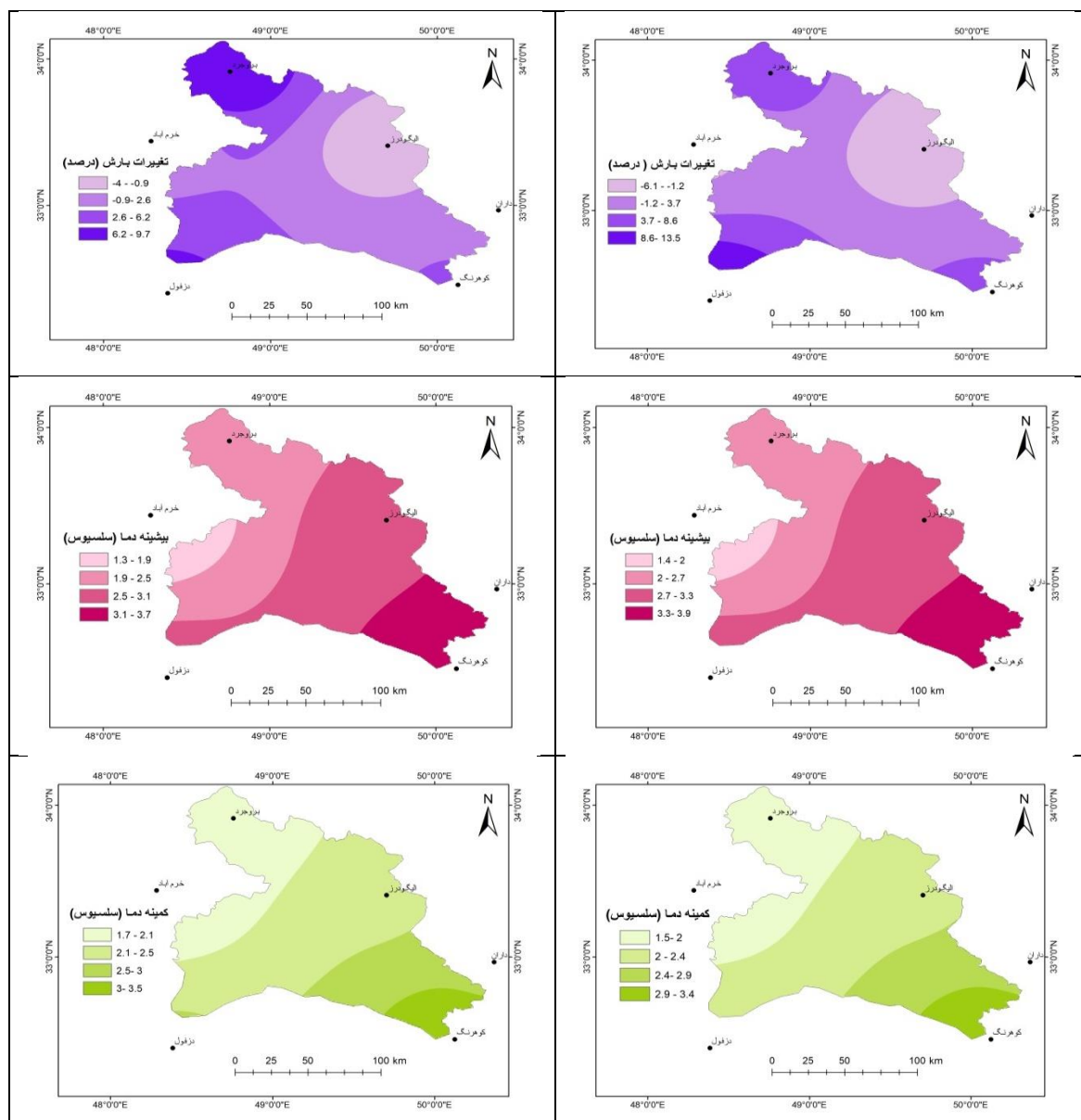


شکل ۸: وضعیت دما و بارش به صورت بلندمدت در ایستگاه‌های مورد مطالعه بر اساس مدل‌های LARS-WG و SDSM در دوره ۲۱۰۰-۲۰۸۱ نسبت به دوره پایه

میزان تغییرات بارش، دمای کمینه و بیشینه در مجموع دوره پیش‌بینی شده (۲۰۲۱-۲۱۰۰) نسبت به دوره پایه (۱۹۸۹-۲۰۱۸) در شکل (۹) آورده شده است. بر اساس نتایج حاصل در مجموع بارش در سطح حوضه آبریز دز افزایش خواهد یافت که این میزان افزایش بر اساس مدل CanESM2 و مقیاس‌کاهی مدل SDSM به‌طور متوسط برابر با ۳ درصد و بر اساس مدل HadGEM2 و مقیاس‌کاهی مدل LARS-WG برابر با  $3/5$  درصد خواهد بود. در مجموع بارش در حوضه آبریز دز بر اساس دو مدل جهانی مورد بررسی بین  $6/3-$  تا  $13/5$  درصد نسبت به دوره پایه در تغییر خواهد بود. بیشترین تغییرات کاهش بارش بر اساس هر دو مدل مربوط به نواحی شرقی حوضه مورد مطالعه و بیشترین تغییرات افزایشی مربوط به نواحی جنوب غربی و شمالی حوضه خواهد بود که ناشی از ویژگی‌های اقلیمی و توپوگرافی این ناحیه از زاگرس می‌تواند باشد. از نظر مکانی نیز پهنه‌های کم بارش بر اساس مدل LARS-WG وسعت بیشتری دارد. بر اساس نتایج حاصل از هر دو مدل مورد بررسی، دمای بیشینه حوضه نیز بین  $1/3$  تا  $3/9$  درجه سلسیوس در تغییر خواهد بود که بیشترین تغییرات آن نیز مربوط به نواحی جنوب شرقی حوضه مورد مطالعه خواهد بود. همچنین دمای



کمینه حوضه بین ۱/۵ تا ۳/۵ درجه سلسیوس در نوسان خواهد بود که همچون دمای بیشینه، بیشترین و کمترین تغییرات آن به ترتیب مربوط به نواحی جنوب شرقی و شمال غربی خواهد بود. بر اساس نتایج حاصل از مدل HadGEM2 و مقیاس‌گاهی مدل LARS-WG دمای بیشینه و کمینه به‌طور متوسط در سطح حوضه به ترتیب ۲/۸ و ۲/۳ درجه سلسیوس و بر اساس مدل CanESM2 و مقیاس‌گاهی مدل SDSM به ترتیب ۲/۶ و ۲/۵ درجه سلسیوس افزایش خواهد یافت. در مجموع تغییرات دمای بیشینه در حوضه آبریز دز بیشتر از دمای کمینه خواهد بود. تغییرات مکانی کمینه و بیشینه دما در هر دو مدل دقیقاً مشابه یکدیگر است و تنها تفاوت در شدت تغییرات پهنه‌های مذکور است (شکل ۹).



شکل ۹: وضعیت تغییرات دما و بارش در دوره آتی (۲۰۲۱-۲۱۰۰) نسبت به دوره پایه بر اساس دو مدل LARS-WG (ستون سمت راست) و SDSM (ستون سمت چپ)

## نتیجه‌گیری

تغییر اقلیم یکی از مهم‌ترین مسائل اقلیمی و زیست‌محیطی می‌باشد که در سال‌های اخیر با توجه مطرح شدن گرمایش جهانی و بحران در منابع آبی و طبیعی و تغییر اکوسیستم‌ها و همچنین مشکلات اجتماعی و اقتصادی ناشی از این تغییرات، توجه بسیاری از محافل جهانی را به خود جلب کرده است. به همین منظور در این پژوهش با استفاده از خروجی مدل‌های جهانی HadGEM2 و CanESM2 تحت سه سناریوهای واداشت تابشی RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 و دو مدل مقیاس‌گاهی آماری LARS-WG و SDSM، تغییرات بارش، دمای کمینه و دمای بیشینه در سه دوره زمانی آینده (۲۰۵۰-۲۰۲۱، ۲۰۸۰-۲۰۵۱ و ۲۱۰۰-۲۰۸۱) نسبت به دوره (۲۰۱۸-۱۹۸۹) در حوضه آبریز رودخانه دز مورد بررسی قرار گرفت. همچنین مدل‌های مقیاس‌گاهی مورد بررسی بر اساس معیارهای MAE، MSE، RMSE و  $R^2$  مورد ارزیابی و صحت‌سنجی قرار گرفتند. نتایج حاصل نشان داد که مدل‌های مقیاس‌گاهی مورد بررسی از کار آبی لازم جهت شبیه‌سازی تغییرات دما و بارش در حوضه مورد مطالعه برخوردارند و هیچ‌کدام از مدل‌ها برتری مطلق بر یکدیگر ندارند و علی‌رغم تفاوت‌هایی در شبیه‌سازی، می‌توانند در بررسی‌های تغییرات اقلیمی مفید واقع شوند. همچنین جهت بررسی عدم قطعیت تغییرات اقلیمی لازم است از نتایج مدل‌های گردش عمومی جو و ریزمقیاس‌گاهی مختلف استفاده شود. نتایج حاصل از پیش‌بینی تغییرات دما و بارش نیز نشان داد که در مجموع بر اساس هر دو مدل مورد بررسی در حوضه آبریز دز میزان دما و بارش افزایش خواهد یافت. بدین‌صورت که در مجموع به‌طور متوسط بلندمدت (۲۱۰۰-۲۰۲۱) بارش در سطح حوضه به میزان  $3-3/5$  درصد نسبت به دوره پایه افزایش خواهد یافت و دمای کمینه و بیشینه نیز به‌طور متوسط بلندمدت در سطح حوضه به ترتیب بین  $2/6-2/5$  و  $2/8-2/3$  درجه سلسیوس نسبت به دوره پایه افزایش پیدا خواهد کرد. از نظر توزیع مکانی نیز بیشترین تغییرات کاهش بارش حوضه آبریز دز مربوط به نواحی شرقی حوضه و بیشترین تغییرات افزایشی مربوط به نواحی جنوب غربی و شمالی حوضه خواهد بود. همچنین بیشترین کمترین تغییرات دمای کمینه و بیشینه به ترتیب مربوط به نواحی جنوب شرقی و شمال غربی حوضه خواهد بود و با حرکت از شمال به جنوب حوضه شدت تغییرات دما نیز بیشتر می‌شود. نتایج حاصل از این پژوهش با مطالعات گودرزی و همکاران (۱۳۹۷) در حوضه آبریز دریاچه ارومیه و کثیری و همکاران (۱۳۹۹) در سواحل جنوبی دریای خزر مبنی بر کار آبی و دقت مناسب مدل‌های LARS-WG و SDSM در شبیه‌سازی تغییرات دما و بارش مطابقت دارد. نتایج مربوط به افزایش بارش با مطالعات گودرزی و همکاران (۱۳۹۷) و نتایج افزایش دمای کمینه و بیشینه نیز با مطالعات نادری و همکاران (۱۳۹۶) در حوضه آبریز سیمره و عزیزی و همکاران (۱۳۹۸) در استان ایلام مطابقت دارد. همچنین نتایج حاصل از این پژوهش با مطالعات گودرزی و همکاران (۱۳۹۷) و نیلاوار و ویکار (۲۰۱۹) مبنی بر افزایش بارش در راستای افزایش دما را مورد تأیید قرار می‌دهد. بر اساس نتایج حاصل از خروجی مدل‌های جهانی مورد بررسی در حوضه آبریز دز میزان دما و بارش نسبت به دوره پایه افزایش خواهد یافت که این امر می‌تواند موجب افزایش بارش‌های حدی و رگباری و همچنین افزایش تبخیر و تعرق و ذوب برف و در نتیجه افزایش سیلاب و تخریب خاک در حوضه مورد

مطالعه شود؛ بنابراین لازم است برنامه‌ریزان مربوطه در بخش‌های مختلف منابع آبی و طبیعی، راهکارهای لازم جهت مقابله و سازگاری با شرایط جدید را اتخاذ نمایند.

## منابع

- ۱- آقاشاهی، محسن. مجتبی اردستانی. نیک سخن، محمدحسین. طهماسبی، بهشته (۱۳۹۱): معرفی و مقایسه مدل‌های LARS- WG و SDSM به منظور ریزمقیاس سازی پارامترهای زیست‌محیطی در مطالعات تغییر اقلیم، ششمین همایش ملی و نمایشگاه تخصصی مهندسی محیط‌زیست، تهران.
- ۲- حسینی، سید اسعد. احمدی، حمزه (۱۳۹۵): چشم‌انداز تغییرات دما با استفاده از ریزمقیاس‌نمایی آماری خروجی‌های مدل HadCM3، فصل‌نامه هواشناسی کشاورزی، شماره یکم، صص ۶۸-۷۳.
- ۳- شمس‌پور، علی‌اکبر (۱۳۹۲): مدل‌سازی آب و هوایی نظریه و روش، انتشارات دانشگاه تهران، چاپ اول.
- ۴- صداقت‌کردار، علی. فتاحی، ابراهیم (۱۳۸۷): شاخص‌های پیش‌آگاهی خشک‌سالی در ایران، فصل‌نامه جغرافیا و توسعه، شماره یازدهم، صص ۷۶-۵۹.
- ۵- طباطبایی، سید علی. حسینی، مهرداد (۱۳۸۲): بررسی تغییر اقلیم در شهر سمنان بر اساس پارامترهای بارش ماهیانه و متوسط دمای ماهیانه، سومین کنفرانس منطقه‌ای و اولین کنفرانس ملی تغییر اقلیم اصفهان. ص ۸.
- ۶- عزیزی، قاسم. احمدی، محمد. کردوانی، پرویز (۱۳۹۸): چشم‌انداز تغییرات دمای هوا دوره آینده بر اساس مدل‌های CMIP5 و سناریوهای واداشت تابشی (مطالعه موردی: ایستگاه‌های منتخب استان ایلام)، فصل‌نامه جغرافیای طبیعی، سال دوازدهم، شماره چهل و سوم، صص ۸۸-۷۱.
- ۷- کارآموز، محمد. رضانی، فرید. رضوی، سامان (۱۳۸۵): پیش‌بینی بلندمدت بارش با استفاده از سیگنال‌های هواشناسی: کاربرد شبکه‌های عصبی مصنوعی. هفتمین کنگره بین‌المللی مهندسی عمران، تهران، ص ۱۱.
- ۸- کثیری، مریم. گودرزی، مسعود. جانباز قبادی، غلامرضا. متولی، صدرالدین (۱۳۹۹): چشم‌انداز آینده تغییرات دما و بارش در سواحل جنوبی دریای خزر. فصلنامه جغرافیای طبیعی، سال سیزدهم، شماره چهل و هفتم، صص ۱۰۴-۸۹.
- ۹- گودرزی، مسعود. حسینی، سید اسعد. مسگری، ابراهیم (۱۳۹۵): مدل‌های آب و هواشناسی، انتشارات آذرکلک، زنجان.
- ۱۰- گودرزی، مسعود. صلاحی، برومند. حسینی، سید اسعد (۱۳۹۷): چشم‌انداز آبی تغییرات دما و بارش با استفاده از مدل ریز گردانی آماری (مطالعه موردی: حوزه آبخیز دریاچه ارومیه). فصل‌نامه فضای جغرافیایی، انتشارات دانشگاه آزاد اهر، سال هیجدهم، شماره شصت و چهارم، صص ۴۱-۶۰.
- ۱۱- نادری، سهراب. گودرزی، مسعود. قدمی دهنو، محمد (۱۳۹۶): اثر تغییر اقلیم بر پارامترهای اقلیمی در حوزه سیمره، علوم و مهندسی آبخیزداری، سال یازدهم، شماره سی و نهم، صص ۶۹-۷۶.

- 12- Beecham, S. Rashid, M. Chowdhury R.K. (2014): Statistical Downscaling Of Multi-Site Daily Rainfall In A South Australian Catchment Using A Generalized Linear Model. International Journal Of Climatology, 34(14): Pp. 3654-3670.
- 13- Carter, T. R. Parry, M. L. Harasawa, H. Nishioka, S. (1994): IPCC Technical Guidelines For Assessing Climate Change Impacts And Adaptions, IPCC Special Report To Working Group II Of IPCC, London.
- 14- Dibike, Y.B. Coulibaly, P. (2005): Hydrologic Impact Of Climate Change In The Saguenay Watershed: Comparison Of Own Scaling Methods And Hydrologic Models. Journal Of Hydrologic, 307: Pp. 145-163.

- 15- Dimri, A.P. Kumar, D. Choudhary, A. Maharana, P. (2018): Future Changes Over The Himalayas: Maximum And Minimum Temperature, Global And Planetary Change, (162): Pp. 212-234.
- 16- Hay, L.E. Wilby, R.L. Leavesley, G.H. (2000): A Comparison Of Delta Change And Downscaled GCM Scenarios For Three Mountainous Basins In The United States. Journal Of The American Water Resources Association, 36: Pp. 387-397.
- 17- Heydari, Sh. Hosseini, S.A. Heydari, A. (2020): Investigating The Effects Of Climate Change On Stream Flows Of Urmia Lake Basin In Iran, Modeling Earth Systems And Environment, 1: Pp. 329-339.
- 18- Hu, T.S. Lam, K.C. Ng, S.T. (2001): River Flow Time Series Prediction With A Range Dependent Neural Network. Hydrological Science Journal, 46: 729-745.
- 19- Hu, T.S. Lam, K.C. Ng, S.T. (2001): River Flow Time Series Prediction With A Range Dependent Neural Network. Hydrological Science Journal, 46: Pp. 729-745.
- 20- Hyun Cha, D. Kyou Lee, D. Chun-Sil Jin. GA Young 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: Pp. 139-149.
- 21- IPCC. (2001): In: Watson, R.T. Zinyowera, M.C. Moss, R.H. Dokken, D.J. (Eds.), Special Report On The Regional Impacts Of Climate Change, An Assessment Of Vulnerability. Cambridge University Press, UK.
- 22- 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.
- 23- Kilsby, C.G. Jones, P.D. Burton, A. Ford, A.C. Fowler, H.J. Harpham, C. James, P. Smith, A. Wilby, R.L. (2007): A Daily Weather Generator For Use In Climate Change Studies. Environmental Modelling And Software, 22: Pp. 1705-1719.
- 24- Leong Tan, M. Latifibrahim, AB. Yusop, Z. Chua, V. And Wengchan, N. (2017): Climate Change Impacts Under CMIP5 RCP Scenarios On Water Resources Of The Kelantan River Basin, Malaysia, Atmospheric Research, 189:1-10.
- 25- Lin, J.Y. Cheng, C. T. Chau, K.W. (2006): Using Support Vector Machines For Long-Term Discharge Prediction. Hydrological Science Journal, 51: 599-612.
- 26- Nilawar, A P. Waikar, M. L. (2019): Impacts Of Climate Change On Stream Flow 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.
- 27- Qian, B. Gameda, S. Hayhoe, H. Dejong, R. Bootsma, A. (2004): Comparison Of LARS-WG And AAFC-WG Stochastic Weather Generators For Diverse Canadian Climates. Climate Research. Pp. 26.
- 28- Racsko, P. L. Szeidl And M. Semenov. (1991): A Serial Approach To Local Stochastic Weather Models. Ecological Modeling, 57: Pp. 27-41.
- 29- Sarkar, J. Chicholikar, J. R. Rather, L. S. (2015): Predicting Future Changes In Temperature And Precipitation In Arid Climate Of Kutch, Gujarat: Analyses Based On LARS-WG Model, Research Article, Current Science, 109: Pp. 2084-2093
- 30- Semenov, M. Brooks, R. Barrow, E. Richardson, C. (1998): Comparison Of The WGEN And LARS-WG Stochastic Weather Generators For Diverse Climates. Climate Research, 10: Pp. 95-107.
- 31- Sharma, D. Gupta, A. D. Babel, M. S. (2007): Spatial Disaggregation Of Bias-Corrected GCM Precipitation For Improved Hydrologic Simulation: Ping River Basin, Thailand. Hydrol. Earth Syst. Sci. 11: Pp. 1373-1390.

- 32- Tatsumi, K. Oizumi, T. Yamashiki, Y. (2013): Introduction Of Daily Minimum And Maximum Temperature Change Signals In The Shikoku Region Using The Statistical Downscaling Method By Gcms. Hydrological Research Letters, 3: Pp. 48-53.
- 33- Wigley, T.W. L. Jones, P. D. Briffa, K. R. Smith, G. (1990): Obtaining Sub-Grid Scale Information From Coarse Resolution General Circulation Model Output, J. Geophysics. Res. 951: Pp. 1943-1953
- 34- Wilby, R.L. Dawson. C.W. Barrow, E.M. (2002): SDSM- A Decision Support Tool For The Assessment Of Regional Climate Change Impacts, Environmental Modeling & Software, 17: Pp. 147-159.
- 35- Wilby, R.L. Harris, I. (2006): A Frame Work For Assessing Uncertainties In Climate Change Impacts: Low Flow Scenarios For The River Thames, UK. Water Resour. Res. 42: 10 P.
- 36- Wilby, R.L. Dawson, W.C. (2007): SDSM 4.2- A Decision Support Tool For The Assessment Of Regional Climate Change Impacts, SDSM Manual Version 4.2, Environment Agency Of England And Wales, 94p.