

چشم‌انداز تغییرات دماهای حداکثر ارومیه با استفاده از ریزگردانی آماری خروجی مدل CanESM2

محمود هوشیار^۱

بهرروز سبجانی^۲

سید اسعد حسینی^۳

چکیده

افزایش دما و گرمایش جهانی از بزرگ‌ترین چالش‌هایی است که بشر در قرن بیست و یکم با آن مواجه است. تغییرات در پارامترهای اقلیمی به ویژه دما و بارش به عنوان مهم‌ترین پارامترهای اقلیمی می‌تواند فرایندهای هیدرولوژیکی، کشاورزی، محیط زیست، بهداشت، صنعت و اقتصاد را تحت تاثیر قرار دهد. بنابراین چشم‌انداز تغییرات آن، کمک فراوانی به چالش‌های مدیران و برنامه‌ریزان محیطی خواهد نمود. لذا در این پژوهش به منظور بررسی روند تغییرات دماهای حداکثر در طول دوره آماری پایه (۲۰۰۵-۱۹۶۱) و همچنین چشم‌انداز تغییرات آتی دماهای حداکثر در یک دوره ۳۰ ساله (۲۰۲۱-۲۰۵۱) در ایستگاه سینوپتیک ارومیه با کاربست مدل ریزمقیاس گردانی SDSM پرداخته شد. بدین منظور ابتدا با استفاده از آزمون ناپارامتری من-کندال و تخمین‌گر شیب سن، روند تغییرات این پارامتر بررسی شد. سپس میزان کارایی مدل SDSM با استفاده از داده‌های مشاهداتی و مدل شده مرکز ملی پیش‌بینی محیطی (NCEP) و شاخص‌های MSE، MAE، RMSE و همچنین ضریب تعیین و همبستگی مورد ارزیابی قرار گرفت. بعد از اطمینان از

۱- دانشجوی دکتری اقلیم‌شناسی، دانشگاه محقق اردبیلی و عضو هیات علمی دانشگاه پیام نور
Email: hooshyar. ahmad@yahoo.com

۲- اس دانشیار اقلیم‌شناسی، دانشگاه محقق اردبیلی

۳- دکتری اقلیم‌شناسی، دانشگاه محقق اردبیلی

دقت مدل، با استفاده از مدل گردش عمومی CanESM2 تحت سه سناریوی RCP2.6 و RCP4.5 و RCP8.5 چشم انداز آتی دماهای حداکثر و حدی در دوره (۲۰۵۱-۲۰۲۱) بررسی گردید. نتایج نشان داد که در طول دوره آماری پایه، دما دارای روند افزایشی است اما معنی‌داری روند مورد تأیید قرار نگرفت. نتایج حاصل ارزیابی مدل SDSM نیز نشان داد که مدل مذکور توانایی لازم جهت مدل‌سازی دمای حداکثر را دارد. بر اساس نتایج بدست آمده از داده‌های مدل CanESM2 میزان دماهای حداکثر افزایش خواهد یافت که این میزان برابر با ۰/۷ درجه سلسیوس نسبت به دوره‌ی پایه می‌باشد. از نظر فصلی نیز بیشترین و کمترین تغییرات مربوط به تابستان با ۱/۶ درجه سلسیوس و فصل زمستان با ۰/۱ درجه سلسیوس می‌باشد.

واژگان کلیدی: ارومیه، تغییر اقلیم، دمای حداکثر، SDSM، RCP

مقدمه

با جدی شدن بحث تغییر اقلیم در دنیا، مطالعه پارامترها و عناصر آب‌وهوایی به صورت گسترده‌ای مورد توجه قرار گرفته است (رسولی، ۱۳۹۳: ۱۱۲). در مطالعات اخیر به افزایش احتمالی امواج گرمایی، بارش‌های سنگین، زمستان‌های سخت و رخداد توفان‌های تابستانی بر روی خشکی‌ها به علت تغییرات اقلیمی اشاره شده است (چیوتی و جانسون، ۱۹۹۵: ۳۳۵؛ ژانگ، ۲۰۰۵: ۱۱۰). مطابق داده‌های ثبت شده اقلیمی، متوسط درجه حرارت سطح زمین تا پایان قرن بیستم حدود ۰/۶ سلسیوس افزایش پیدا کرده که بیشترین گرمایش از ۱۹۱۰ تا ۱۹۴۵ و از ۱۹۷۶ تا ۲۰۰۰ اتفاق افتاده است (هیأت بین‌الدول تغییر اقلیم، ۲۰۰۱). در حال حاضر نیز پیش‌بینی‌ها برای قرن ۲۱، افزایش گرمای جهانی ناشی از افزایش گازهای گلخانه‌ای و هواویزها را نشان می‌دهد، این افزایش گرما تا ۲/۵ درجه سلسیوس تا اواخر قرن حاضر می‌تواند در چرخه آب و به تبع آن عناصر اقلیمی تغییر ایجاد کند (عزیزی و روشن، ۱۳۸۷: ۱۳). همراه با تغییرات آب و هوایی و تغییر در الگوهای دما و بارش مؤلفه‌های دیگری مانند مقدار رواناب و رطوبت خاک که برای سیستم‌های طبیعی و انسانی مهم هستند، دچار دگرگونی خواهند شد (شائمی و حبیبی‌نوخندان، ۱۳۸۸: ۱۴۹). بنابراین پیش‌بینی بلندمدت

متغیرهای اقلیمی، جهت اطلاع از میزان تغییرات آن‌ها و در نظر گرفتن تمهیدات لازم به منظور تعدیل اثرات سوء ناشی از تغییرات اقلیمی مورد توجه بسیاری از مجامع علمی جهانی قرار گرفته است. پدیده تغییر اقلیم 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)؛ بر همین اساس مدل‌های گردش عمومی جو (GCM) توسعه یافته‌اند (کین و همکاران^۴، ۲۰۰۴: ۱۷۶) هر چند که این مدل‌ها در مقیاس فضایی اتمسفری 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 و همکاران^۵، ۱۹۹۴؛ ایگلی و همکاران^۶، ۱۹۹۰؛ شارما و همکاران^۷، ۲۰۰۷). لذا ارزیابی تأثیر تغییرات اقلیمی در مقیاس محلی نیازمند رویکردی است تا شکاف موقتی و فضایی بین متغیرهای اقلیمی بزرگ مقیاس و متغیرهای هواشناسی با مقیاس محلی را پر کند که در این مورد، رویکرد اساسی همان مدل‌های ریزمقیاس گردانی هستند (ویلی و همکاران^۸، ۲۰۰۲). مدل SDSM یکی از پرکاربردترین ابزارهای آماری ریزمقیاس گردانی می‌باشد؛ که کاربرد بسیاری در مطالعات هواشناسی، هیدرولوژیکی، جغرافیایی و زیست محیطی دارد (ویلی و هاریس^۹، ۲۰۰۶)؛ زیرا در این روش از الگوهای گردش روزانه بزرگ‌مقیاس در مقیاس ایستگاهی استفاده می‌شود؛ و در مواقعی که نیاز به برآورد سریع و کم‌هزینه از تغییرات اقلیمی باشد مورد استفاده قرار می‌گیرد؛ و در مورد مولدهای هواشناسی تصادفی و روش‌های توابع تغییر شکل یافته نتایج قابل قبولی ارائه داده است (صمدی و مساح‌بوانی، ۱۳۸۷: ۴). در

4- Qian et al
 5- Carter et al
 6- Wigley et al
 7- Sharma et al
 8- Wilby et al
 9- Wilby and Harris

این راستا هاشمی و همکاران^{۱۰} (۲۰۱۰) به مقایسه دو مدل LARS-WG و SDSM برای شبیه‌سازی بارش‌های شدید در حوضه کلوتا واقع در جزیره جنوبی نیوزلند پرداختند نتایج حاصل نشان داد که هر دو مدل توانایی‌های مشابه و خوبی دارند و قابل استفاده برای پیش‌بینی‌های اقلیمی می‌باشند. گودرزی و همکاران (۲۰۱۱) به بررسی تغییرات آب و هوایی با استفاده از روش ریزمقیاس گردانی آماری SDSM در کرمانشاه پرداختند نتایج حاصل نشان داد که ابزار SDSM قادر به نشان دادن بهتر شبیه‌سازی حداقل و حداکثر درجه حرارت است. چن و همکاران^{۱۱} (۲۰۱۲) به مقایسه و ارزیابی مدل‌های ریزمقیاس‌گردانی آماری SDSM و^{۱۲} SSVM در مطالعه تغییرات آب و هوایی در کشور چین پرداختند نتایج حاصل نشان می‌دهد که مدل SDSM عملکردی بهتر از SSVM دارد. عثمان و همکاران (۲۰۱۳) بارش مناطق مرکزی عراق را بر اساس هفت مدل جهانی و با استفاده از مدل LARS-WG ریزگردانی و پیش‌بینی نمودند، نتایج حاصل نشان داد که بارش از روند افزایشی در منطقه برخوردار می‌باشد. جوو و همکاران^{۱۳} (۲۰۱۴) به تأثیرات تغییرات اقلیمی در آینده بر اکو هیدرولوژی حوضه رودخانه‌ی جیوشو^{۱۴} در کشور چین با استفاده ریزمقیاس گردانی SDSM پرداختند. نتایج نشان داد که درجه حرارت حداقل و حداکثر روزانه در ۹۰ سال آینده دارای روند افزایشی است. اسپنانی و همکاران (۱۳۹۱) به بررسی تغییر اقلیم در دوره‌های آتی به کمک مدل SDSM در حوضه بهشت‌آباد کارون شمالی پرداختند. نتایج حاصل بیانگر افزایش دمای حداقل و حداکثر در حوضه موردبررسی است. آبکار و همکاران (۱۳۹۲) به بررسی میزان کارایی مدل SDSM در شبیه‌سازی شاخص‌های دمایی در مناطق خشک و پرداختند. نتایج نشان داد که مدل SDSM توانایی لازم جهت شبیه‌سازی شاخص‌های دمایی را دارد. قرمزچشمه و همکاران (۱۳۹۳) به بررسی اثر عوامل مورفو-اقلیمی بر دقت ریزمقیاس گردانی مدل SDSM در هشت ایستگاه سینوپتیک واقع در شمال

10- Hashmi et al

11- Chen et al

12- Smooth Support Vector Machine

13- Guo et al

14- Guishui

غرب کشور پرداختند. نتایج نشان داد که شبیه‌سازی دما با دقت مناسب‌تری انجام گرفته است. گودرزی و همکاران (۱۳۹۴) به ارزیابی عملکرد مدل‌های ریزمقیاس گردانی -LARS و WG و SDSM در شبیه‌سازی تغییرات اقلیمی در حوضه آبریز دریاچه ارومیه پرداختند. نتایج نشان داد که هیچ‌کدام از مدل‌ها برتری مطلق بر یکدیگر ندارند و علی‌رغم تفاوت‌هایی در شبیه‌سازی، می‌توانند در بررسی‌های تغییرات اقلیمی مفید واقع شوند. دشت‌بزرگی و همکاران (۱۳۹۴) به شبیه‌سازی شاخص‌های حدی دمای بر اساس سناریوهای RCP در استان خوزستان پرداختند. نتایج حاصل نشان داد که شاخص‌های دمای دوره سرد روند کاهشی و شاخص‌های دمای دوره گرم روند افزایشی دارند. صلاحی و همکاران (۱۳۹۵) به پیش‌بینی تغییرات دما و بارش در دهه ۲۰۵۰ در حوزه آبخیز دریاچه ارومیه پرداختند نتایج حاصل نشان داد بیشترین افزایش دمای حداکثر مربوط به ایستگاه سینوپتیک تبریز و بیشترین افزایش دمای حداقل و همچنین بیشترین میزان کاهش بارش در منطقه نیز مربوط به ایستگاه سینوپتیک ارومیه می‌باشد. پیر مرادیان و همکاران (۱۳۹۵) به پیش‌بینی تغییرات اقلیمی در ایستگاه سینوپتیک رشت تحت سناریوهای مختلف پرداختند. نتایج نشان داد بیشترین تغییرات مربوط به دمای کمینه و بیشینه است. خورانی و جمالی (۱۳۹۵) به بررسی شدت و مدت خشکسالی در شرایط تغییر اقلیم تحت مدل HadCM3 در ایستگاه‌های بندرعباس و شهرکرد پرداختند. بر اساس نتایج شدت خشکسالی در دوره آینده در هر دو ایستگاه افزایش می‌یابد. با توجه به این‌که مدل‌های جهانی عموماً عناصر اقلیمی را تا آستانه‌ی سال ۲۱۰۰ میلادی شبیه‌سازی نموده‌اند، امکان استفاده از داده‌های مدل‌های جهانی به‌منظور شبیه‌سازی متغیرهای موردنظر نظیر بارش و دما در مقیاس ایستگاهی وجود دارد. هیات بین‌الدول تغییر اقلیم در تدوین گزارش پنجم ارزیابی خود (AR5^{۱۵}) از سناریوهای جدید RCP^{۱۶} به‌عنوان نماینده‌های خطوط سیر غلظت‌های گوناگون گازهای گلخانه‌ای استفاده کرده است. سناریوهای جدید انتشار دارای چهار خط سیر کلیدی با نام‌های RCP2.6، RCP4.5، RCP6، RCP8.5 و می‌باشند که بر اساس میزان واداشت

1- Assessment Report

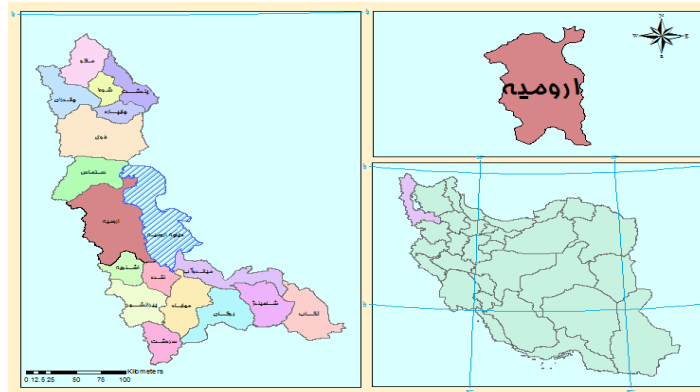
16- Representative Concentration Pathways

تابشی آن‌ها در سال ۲۱۰۰ نام گذاری شده اند؛ که در این پژوهش جهت چشم انداز آتی تغییرات دماهای حداکثر ایستگاه سینوپتیک ارومیه در دوره (۲۰۲۱-۲۰۵۰) از مدل جهانی CanESM2 تحت سه سناریوی RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 استفاده شده است.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

شهرستان ارومیه از لحاظ مختصات جغرافیایی در ۴۵ درجه و ۵ دقیقه طول جغرافیایی و ۳۷ درجه و ۳۲ دقیقه عرض جغرافیایی قرار دارد. که در ارتفاع ۱۳۱۵/۹ متری از سطح دریا واقع شده است (شکل ۱). جهت این بررسی از ایستگاه هواشناسی سینوپتیک ارومیه استفاده گردید (جدول ۱).



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه در استان و کشور

جدول ۱- مشخصات جغرافیایی ایستگاه مورد مطالعه

| نام ایستگاه | نوع ایستگاه | طول جغرافیایی | عرض جغرافیایی | ارتفاع از سطح دریا |
|-------------|-------------|---------------|---------------|--------------------|
| ارومیه | سینوپتیک | ۴۵ ' ۳" | ۳۷ ' ۴" | ۱۳۲۸ |

متوسط دمای حداکثر دوره پایه مورد بررسی (۲۰۰۵-۱۹۶۱) ایستگاه سینوپتیک ارومیه ۱۷/۵ درجه سلسیوس است. حداقل و حداکثر مشاهداتی دمای حداکثر نیز به ترتیب ۱۰- و ۳۸ درجه سلسیوس است

در این پژوهش داده‌های دمای حداکثر ایستگاه سینوپتیک ارومیه، داده‌های مرکز ملی پیش‌بینی متغیرهای محیطی کانادا و داده‌های مدل جهانی CanESM2 تحت سه سناریوی واداشت تابشی (RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 8.5) مورد استفاده قرار گرفت. سناریوهای مذکور تفاوت بین انرژی تابشی دریافتی از خورشید و انرژی بازگشتی به جو توسط زمین می‌باشد. واداشت مثبت (ورودی بیشتر انرژی تابشی خورشید) موجب افزایش و واداشت منفی (برون رفت بیشتر انرژی) موجب کاهش دمای سیستم زمین می‌گردد. واداشت تابشی که می‌تواند مهمترین علت تغییر اقلیم باشد، برای ارزیابی و مقایسه هر یک از عواملان طبیعی و انسانی تغییر اقلیم مورد استفاده قرار می‌گیرد (هیأت بین الدول تغییر اقلیم، ۲۰۰۷). مدل CanESM2 چهارمین نسل از مدل‌های آب‌وهوایی است که توسط مرکز مدل‌سازی و تحلیل آب‌وهوایی کانادا (CCCma) زیر نظر سازمان محیط زیست این کشور توسعه یافته است. در این مدل کل زمین به صورت ۶۴*۱۲۸ سلول شبکه بندی شده است. داده‌های مدل مذکور به صورت آنومالی هستند که نسبت به دوره (۲۰۰۵-۱۹۶۱) آنومالی آنها محاسبه شده است. داده‌های تاریخی مدل تا سال ۲۰۰۵ با بکارگیری داده‌های بازتحلیل NCEP برای واسنجی و طراحی روابط ریزمقیاس گردانی مورد استفاده قرار می‌گیرند و داده‌های سال ۲۰۰۶ تا ۲۱۰۰ نیز برای برآورد چشم‌انداز تغییرات اقلیمی دهه‌های آتی مورد استفاده قرار می‌گیرند. سپس داده‌های مشاهداتی ایستگاه مورد مطالعه پس از دریافت از سازمان هواشناسی بصورت فرمت نرم افزار SDSM (هریک از متغیرها در مقیاس روزانه و به ترتیب در یک ستون جداگانه و به صورت فایل متنی) آماده گردید. مدل ریزمقیاس گردانی SDSM در سال ۲۰۰۲ در انگلستان تهیه شده است که اساس آن استفاده از ترکیبی از روش‌های رگرسیونی و تولید داده‌های آب و هوای مصنوعی برای ریزمقیاس گردانی می‌باشد؛ که در این پژوهش از آخرین نسخه آن یعنی ۵/۲ استفاده شده است؛ در این

پژوهش از داده‌های ۴۵ ساله NCEP از سال ۱۹۶۱ تا ۲۰۰۵ که شامل ۲۶ متغیر مستقل اتمسفری می‌باشد، برای کالیبره کردن و ارزیابی مدل و از داده‌های مدل CanESM2 تحت سه سناریوی واداشت تابشی جهت بررسی چشم اندازه تغییرات دماهای حدی در دوره ۲۰۲۱ تا ۲۰۵۰ استفاده شده است. لازم به ذکر است دلیل استفاده از مدل CanESM2 جهت بررسی چشم اندازه تغییرات دما در منطقه این بوده است که تا زمان انجام این پژوهش از مدل‌های گردش عمومی گزارش پنجم فقط داده‌های این مدل جهت تحلیل در نرم افزار SDSM در دسترس بوده است.

جهت ارزیابی و تحلیل عملکرد مدل‌های تخمین و پیش‌بینی شاخص‌های عملکردی مختلفی وجود دارد که در ادامه به توضیح مختصری راجع به شاخص‌های مورد استفاده در این پژوهش پرداخته می‌شود. در رابطه (۱) که تحت عنوان ضریب تعیین شناخته می‌شود بهترین مقدار آن برابر یک می‌باشد که معیاری بدون بعد است (صداقت‌کردار و همکاران، ۱۳۸۷: ۶۷). میانگین مربعات خطا (رابطه ۲) که می‌تواند از صفر در عملکرد عالی تا بی‌نهایت تغییر کند (کارآموز و همکاران، ۱۳۸۵: ۱۰). مجذور میانگین مربعات خطا به عنوان قیاسی برای نشان دادن اختلاف بین مقادیر شبیه‌سازی شده از مقادیر اندازه‌گیری به کار می‌رود این معیار که بصورت رابطه (۳) تعریف می‌شود به عنوان مرسوم‌ترین شاخص خطا به کار می‌رود (لین و همکاران، ۲۰۰۶). میانگین مطلق خطا (رابطه ۴) 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). ضریب همبستگی (رابطه ۵) ارتباط خطی بین دو متغیر را اندازه‌گیری می‌کند و یک ابزار ریاضی است که در پایه‌ریزی تحلیل‌های اقلیمی بسیار کاربرد دارد (صداقت‌کردار و همکاران، ۱۳۸۷: ۶۳).

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

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

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

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

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N (X_o - \bar{X}_o)(X_s - \bar{X}_s)}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (X_o - \bar{X}_o)^2 \sum_{i=1}^N (X_s - \bar{X}_s)^2}} \quad (5)$$

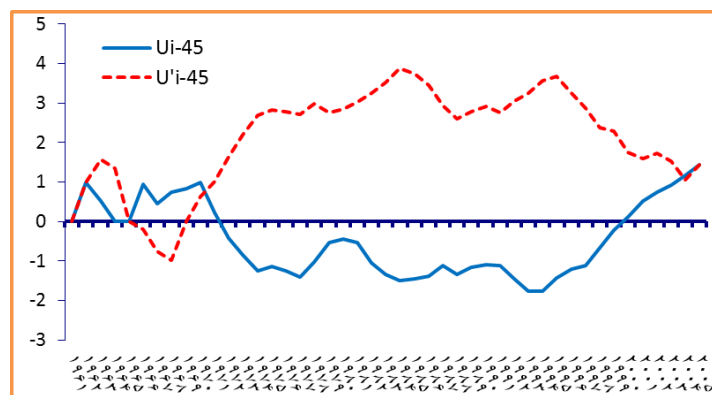
در روابط فوق X_o داده‌های مشاهداتی، X_s داده‌های شبیه‌سازی شده، \bar{X}_o میانگین داده‌های مشاهداتی و N تعداد داده‌ها است.

یافته‌ها و بحث

نتایج بدست آمده از اعمال آزمون من-کندال و تخمین گر شیب سن بر روی داده‌های سالانه‌ی دمای حداکثر در ایستگاه سینوپتیک ارومیه نشان می‌دهد (جدول ۲) که دمای حداکثر در منطقه مورد مطالعه با آماره آزمون من کندال $0/62$ دارای روند افزایشی است ولی معنی‌داری روند افزایشی این سری‌ها توسط آزمون من-کندال مورد تأیید قرار نگرفته است و می‌توان اظهار داشت روند کاهشی در این سری‌ها از نوع نوسانات کوتاه مدت آب و هوایی می‌باشد (شکل ۲). نتایج حاصل از شیب سن نیز حاکی از روند افزایشی جزئی دمای حداکثر با شیب سن برابر با $0/009$ است (جدول ۲).

جدول ۲- نتایج حاصل از آزمون من کندال و شیب سن

| ایستگاه | آماره من کندال | شیب سن |
|---------|----------------|--------|
| ارومیه | ۰/۶۲ | ۰/۰۰۹ |



شکل ۲- روند تغییرات دمای حداکثر سالانه با استفاده از آزمون من کندال در دوره پایه

جهت پیش‌بینی تغییرات اقلیمی شهرستان ارومیه از آمار هواشناسی ایستگاه سینوپتیک ارومیه در طول دوره آماری ۱۹۶۱-۲۰۰۵ استفاده گردید. متغیر هواشناسی مورد مطالعه نیز شامل دمای حداکثر به صورت روزانه و داده‌های سه سناریوی RCP 2.6، RCP 4.5 و RCP 8.5 مدل جفت شده‌ی جوی-اقیانوسی CanESM2 می‌باشند. در مدل ریزمقیاس گردانی SDSM قبل از کالیبره کردن مدل لازم است متغیرهای مستقل جوی (NCEP) که بیشترین میزان همبستگی را با پارامترهای اقلیمی مشاهداتی دارند تعیین گردند. جدول (۳) متغیرهای مورد استفاده جهت کالیبره نمودن مدل را نشان می‌دهد. بر اساس این جدول متغیرهای متوسط فشار در سطح دریا، ارتفاع ژئوپتانسیل ۵۰۰ هکتوپاسکال، رطوبت نسبی سطحی و متوسط دما در ارتفاع دو متری بیشترین ارتباط را با دمای حداکثر در منطقه مطالعاتی دارند. بر اساس نتایج حاصل، متغیر مستقل متوسط دما در

ارتفاع دو متری سطح زمین بالاترین ضریب را با حداکثر دما در منطقه مورد بررسی دارد (جدول ۳).

جدول ۳- متغیرهای مستقل مورد استفاده جهت کالیبره نمودن مدل

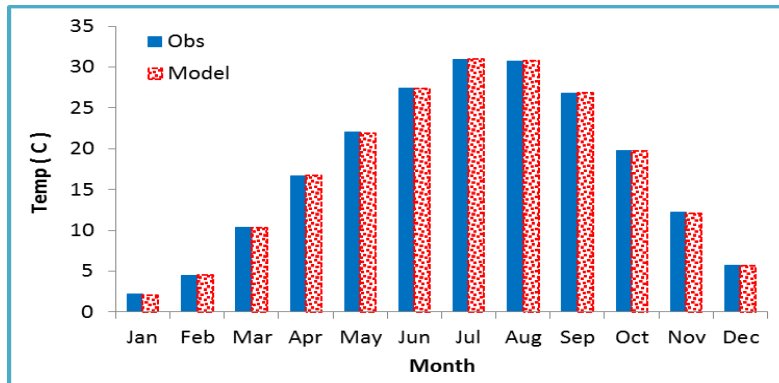
| ردیف | متغیر پیش‌بینی کننده | ضریب همبستگی | ضریب همبستگی جزئی | سطح معنی داری |
|------|---------------------------------|--------------|-------------------|---------------|
| ۱ | متوسط فشار در سطح دریا | -۰/۶۸ | -۰/۲۵ | ۰/۰۱ |
| ۲ | ارتفاع ژئوتانسیل ۵۰۰ هکتوپاسکال | ۰/۸۹ | ۰/۳۲ | ۰/۰۱ |
| ۳ | رطوبت نسبی سطحی | ۰/۸۵ | ۰/۰۸ | ۰/۰۱ |
| ۴ | متوسط دما در ارتفاع دو متری | ۰/۹۶ | ۰/۳۷ | ۰/۰۱ |

به منظور اطمینان از صحت مدل، به ارزیابی پارامترهای مدل شده با استفاده از متغیرهای NCEP و داده‌های واقعی برای دوره آماری ۲۰۰۵-۱۹۶۱ پرداخته شد؛ که نتایج ارزیابی داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده توسط مدل با استفاده شاخص‌های آماری مختلف در جدول (۴) آورده شده است. نتایج حاصل با استفاده از داده‌های NCEP بیانگر آن است که اختلاف معناداری بین مقادیر شبیه‌سازی شده و مقادیر مشاهداتی آن‌ها با خطای بحرانی ۰/۵ وجود ندارد و مقادیر همبستگی پیرسون بین داده‌های شبیه‌سازی شده و واقعی در سطح معناداری ۰/۱ قابل قبول می‌باشند. برای اطمینان از صحت واسنجی مدل از شاخص‌های خطاسنجی RMSE، MSE و MAE نیز استفاده شد. در مجموع نتایج حاصل از شاخص‌های خطاسنجی با استفاده از داده‌های NCEP بیانگر آن است که مدل ریز گردانی SDSM از کار آیی مناسبی جهت ریز گردانی پارامتر دمای حداکثر در ایستگاه سینوپتیک ارومیه برخوردار است.

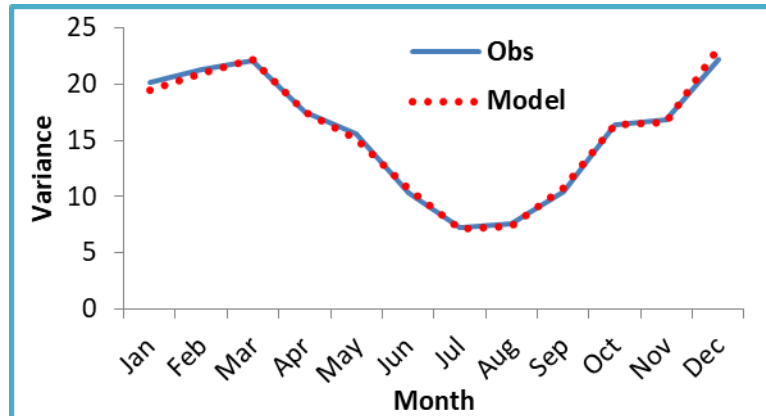
جدول ۴- ارزیابی عملکرد مدل در دوره پایه با استفاده از معیارهای مختلف

| R | R ² | MAE | MSE | RMSE |
|------|----------------|------|------|------|
| ۰/۹۹ | ۰/۹۹ | ۰/۰۶ | ۰/۰۱ | ۰/۰۸ |

جهت نمایش بهتر و اطمینان از صحت پیش‌بینی به مقایسه مقادیر دمای حداکثر مدل شده و مقادیر مشاهداتی ایستگاهی با استفاده از نمودارهای مقایسه‌ای در دوره پایه پرداخته شد (شکل ۳). همچنین جهت مقایسه بهتر به تحلیل واریانس بین مقادیر مذکور در ماه‌های مختلف سال پرداخته شد که نتایج حاکی از اختلاف کم مقادیر مشاهداتی و مدل شده توسط مدل SDSM است (شکل ۴).

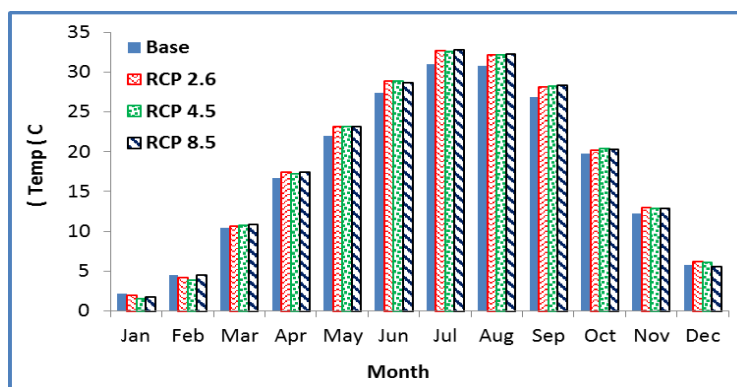


شکل ۳- مقایسه مقادیر مشاهداتی و مدل‌شده در دوره ارزیابی مدل



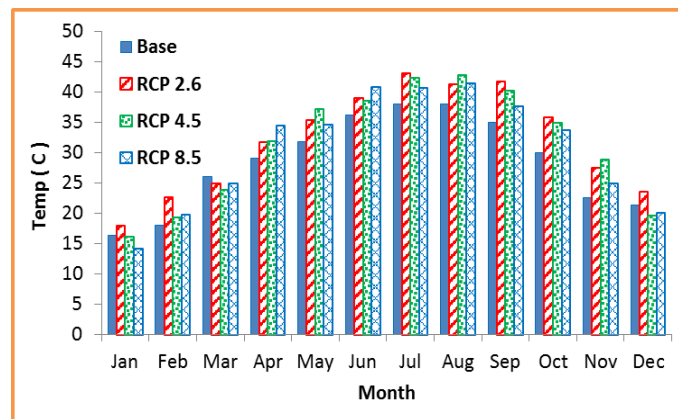
شکل ۴- مقایسه واریانس مقادیر مشاهداتی و مدل‌شده در دوره ارزیابی مدل

پس از ارزیابی مدل و اطمینان از مناسب بودن آن به بررسی داده‌های تولیدشده مدل CanESM2 برای دوره (۲۰۲۱-۲۰۵۰) تحت سه سناریوی واداشت تابشی پرداخته شد. نتایج حاصل از بررسی دمای حداکثر ماهانه در شکل (۵) نشان می‌دهد که متوسط دمای حداکثر بر طبق هر سه سناریوی مورد بررسی در اکثر ماه‌ها به غیر از ژانویه و فوریه نسبت به دوره پایه افزایش داشته و انتظار می‌رود که دمای حداکثر در ۳۰ سال آتی (۲۰۲۱-۲۰۵۰) افزایش داشته باشد. بیشترین افزایش دمای حداکثر ماهانه بر اساس هر سه سناریوی مورد بررسی مربوط به ماه جولای به میزان ۱/۸ درجه سلسیوس نسبت به دوره پایه می‌باشد (شکل ۵).

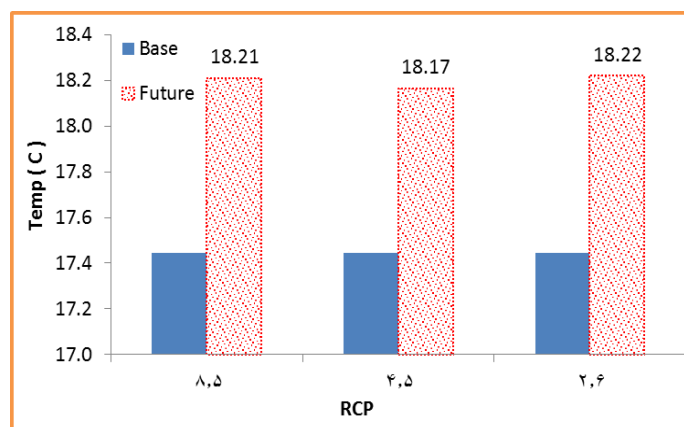


شکل ۵- تغییرات ماهانه دمای حداکثر در دهه آتی نسبت به دوره پایه تحت سناریوهای واداشت تابشی

در ارتباط با دماهای حدی نیز به غیر از ماه‌های دسامبر، ژانویه، فوریه بر اساس سناریوهای RCP 4.5 و RCP 8.5 و در ماه مارس بر اساس هر سه سناریوی مورد بررسی که کاهش جزئی داشته است در سایر ماه‌های سال افزایش دماهای حدی پیش‌بینی می‌شود. بیشترین میزان افزایش دماهای حدی منطقه نیز مربوط به ماه‌های آوریل و می در حدود ۵/۵ درجه سلسیوس نسبت به دماهای حدی دوره پایه می‌باشد (شکل ۶).

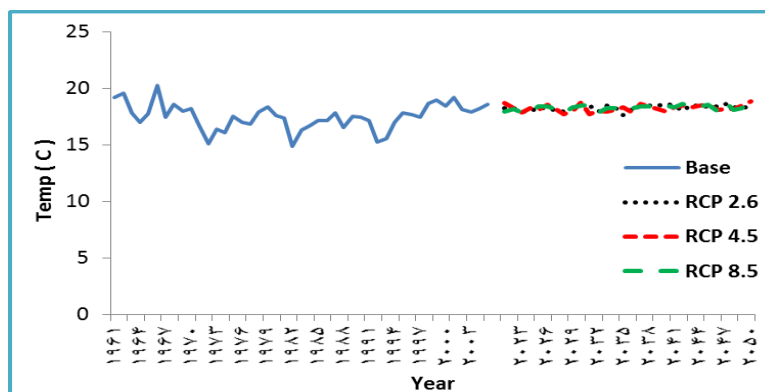


شکل ۶- تغییرات ماهانه دماهای حدی در دهه آتی نسبت به دوره پایه تحت سناریوهای واداشت تابشی میزان افزایش دمای حداکثر نیز به طور متوسط بر اساس سناریوهای مورد بررسی در دوره (۲۰۲۱-۲۰۵۰) برابر با ۰/۸ درجه سلسیوس می‌باشد (شکل ۶). بیشترین و کمترین تغییرات ارزیابی شده توسط سناریوهای مورد بررسی نیز به ترتیب مربوط به سناریوی RCP 2.6 و RCP 4.5 می‌باشد؛ که ناشی از ویژگی‌هایی است که هر کدام از این سناریوها برای وضعیت‌های ممکن آینده به تصویر می‌کشند.

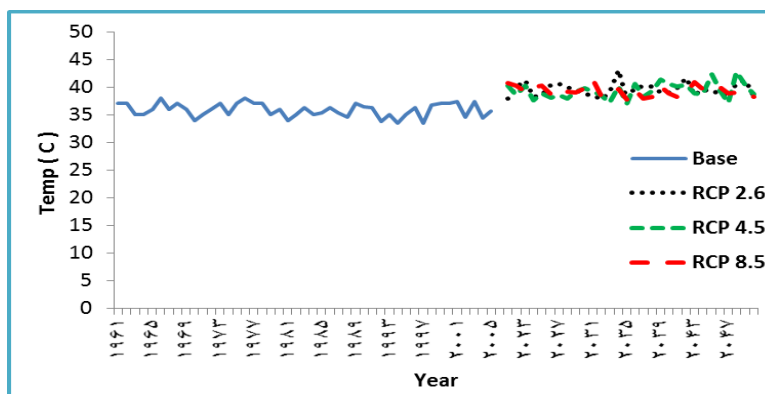


شکل ۷- تغییرات دمای حداکثر در دهه‌ی ۲۰۵۰ نسبت به دوره پایه بر اساس سناریوهای مورد بررسی

بررسی روند تغییرات سری زمانی متوسط دما حداکثر سالانه و دماهای حدی سالانه طی دوره آماری مورد بررسی حاکی از روند افزایشی پارامترهای مذکور در دوره‌های آتی نسبت به دوره پایه می‌باشد با این تفاوت که روند تغییرات دماهای حدی سالانه از شدت بیشتری برخوردار است (شکل‌های ۷ و ۸).



شکل ۷- روند تغییرات دمای حداکثر سالانه در طول دوره آماری پایه و آتی



شکل ۸- روند تغییرات دماهای حدی سالانه در طول دوره آماری پایه و آتی

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، داده‌های دمای حداکثر با استفاده از خروجی مدل CanESM2 تحت سه سناریوی RCP 2.6، RCP 4.5 و RCP 8.5 برای ایستگاه سینوپتیک ارومیه در دوره (۲۰۲۱-۲۰۵۰) و با استفاده از مدل آماری SDSM ریزمقیاس گردانی شدند. ابتدا مدل برای دوره پایه (۱۹۶۱-۲۰۰۵) و بر اساس داده‌های NCEP ارزیابی شد. سپس با استفاده از شاخص‌های آماری مختلف صحت و دقت مدل تعیین شد. نتایج حاصل نشان داد مدل SDSM در مدل‌سازی دمای حداکثر در دوره پایه از توانایی قابل قبولی برخوردار است. سپس به بررسی تغییرات دمای حداکثر در دوره آتی (۲۰۲۱-۲۰۵۰) پرداخته شد و در پایان به بررسی نمودارهای میانگین بلندمدت به صورت ماهانه و دوره‌ای برای ۳۰ سال آینده در مقایسه با دوره پایه پرداخته شد. نتایج حاصل از چشم انداز مدل نشان می‌دهد که مقادیر دماهای حداکثر در دوره آماری مورد بررسی افزایش خواهد یافت که این افزایش بطور متوسط سالانه بلندمدت برابر با ۰/۷ درجه سلسیوس نسبت به دوره پایه خواهد بود. بیشترین و کمترین تغییرات زمانی فصلی نیز به ترتیب برابر با ۱/۶ درجه سلسیوس مربوط به فصل تابستان و ۰/۱ درجه سلسیوس مربوط به فصل زمستان می‌باشد. خلاصه نتایج به دست آمده برای دوره آتی بر اساس سناریوهای مورد بررسی در مقایسه با دوره پایه در جدول (۵) آورده شده است. لازم به ذکر است که مدل SDSM بر مبنای رگرسیون چندگانه است و بر این فرض استوار است که روابط بدست آمده با داده‌های کنونی، طی دوره‌های آینده نیز ایستا و قابل استفاده می‌باشد، بنابراین در این زمینه عدم قطعیت‌هایی وجود دارد که این امر ناشی از پیچیده بودن فرآیندهای اقلیمی و همچنین ساختار مدل‌های اقلیمی و همچنین ناشی از روش‌های ریزمقیاس گردانی آماری است (کوهی و ثنائی‌نژاد، ۱۳۹۲: ۵۷۱).

جدول ۵- تغییرات زمانی دماهای حداکثر در طول دوره پایه و آینده تحت سناریوهای مورد بررسی

| زمان | زمستان | بهار | تابستان | پاییز | سالانه |
|-----------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| دوره پایه (۱۹۶۱-۲۰۰۵) | ۴/۱ | ۱۶/۴ | ۲۹/۷ | ۱۹/۶ | ۱۷/۵ |
| سناریو | RCP 2.6 | ۴/۱ | ۱۷/۱ | ۳۱/۲ | ۲۰/۵ |
| | RCP 4.5 | ۳/۹ | ۱۷/۱ | ۳۱/۲ | ۲۰/۵ |
| | RCP 8.5 | ۳/۹ | ۱۷/۲ | ۳۱/۳ | ۲۰/۵ |
| دامنه تغییرات (درجه) | ۰/۱ - ۰/۲ | ۰/۷ - ۰/۸ | ۱/۵ - ۱/۶ | ۰/۸ - ۰/۹ | ۰/۶ - ۰/۸ |

بر اساس نتایج بدست آمده در دوره آتی مورد بررسی، فصول گرم سال دارای روند افزایشی و فصول سرد سال دارای روند کاهشی در ارتباط با دماهای حداکثر هستند. نتایج این پژوهش با یافته‌های آبکار و همکاران (۱۳۹۲)، قرمزچشمه و همکاران (۱۳۹۳)، دشت-بزرگی و همکاران (۱۳۹۴)، گودرزی و همکاران (۱۳۹۴)، صلاحی و همکاران (۱۳۹۵) مطابقت دارد. لذا با توجه به این‌که به دنبال تغییرات دمایی، شرایط اقلیم کشاورزی و همچنین وضعیت منابع آبی و طبیعی منطقه نیز دچار تغییر می‌گردند لازم است برنامه‌ریزان و مسئولین بخش‌های مربوطه راهکارهای لازم برای تعدیل خسارات ناشی از گرمایش و یا سازگاری با شرایط آب‌وهوایی جدید را اتخاذ نمایند.

منابع

- اسپنانی، کیامرث؛ شهیدی، علی؛ رستمیان، رخساره؛ فرزانه، محمدرضا، ۱۳۹۱، بررسی تغییر اقلیم در دوره‌های آتی به کمک مدل SDSM مطالعه موردی حوضه بهشت‌آباد کارون شمالی، اولین همایش ملی بیابان، ۱۱ ص.
- آبکار، علی‌جان، حبیب‌نژاد، محمود، سلیمانی، کریم، نقوی، هرمزد. ۱۳۹۲. بررسی میزان کارایی مدل SDSM در شبیه‌سازی شاخص‌های دمایی در مناطق خشک و نیمه‌خشک، فصلنامه مهندسی آبیاری و آب، سال چهارم، ش ۱۴، صص ۱۷-۱.
- پیرمردیان، نادر؛ هادی‌نیا، حسین؛ اشرف‌زاده، افشین، ۱۳۹۵، پیش‌بینی دمای کمینه و بیشینه، تابش و بارش در ایستگاه سینوپتیک رشت تحت سناریوهای مختلف تغییر اقلیم، دوره ۲۰، ش ۵۵، صص ۲۹-۴۴.
- خورانی، اسدالله؛ جمالی، زهرا، ۱۳۹۵، اثر تغییر اقلیم بر شدت و مدت خشکسالی در ایستگاه‌های خشک و نیمه‌خشک (بندرعباس و شهرکرد) تحت مدل HadCM3، نشریه جغرافیا و برنامه‌ریزی، دوره ۲۰، ش ۵۷، صص ۱۳۱-۱۱۵.
- دشت‌بزرگی، آمنه، علیجانی، بهلول، جعفرپور، زین‌العابدین، شکیبیا، علیرضا. ۱۳۹۴. شبیه‌سازی شاخص‌های حدی دمای استان خوزستان بر اساس سناریوهای RCP. جغرافیا و مخاطرات محیطی، ش ۱۶، صص ۱۲۳-۱۰۵.
- ذهبیون، باقر؛ گودرزی، محمدرضا؛ مساح‌بوانی، علیرضا، ۱۳۸۹، کاربرد مدل SWAT در تخمین رواناب حوضه در دوره‌های آتی تحت تأثیر تغییر اقلیم، نشریه پژوهش‌های اقلیم‌شناسی، ش ۱ و ۲، صص ۴۳-۵۸.
- رسولی، علی‌اکبر، جهانبخش، سعید، قاسمی، احمدرضا. ۱۳۹۳. بررسی ارتباط بین پارامترهای مهم ابر و بارش روزانه در ایران، فصلنامه تحقیقات جغرافیایی، سال ۲۹، ش ۱، صص ۱۱۲.
- شامی، اکبر و مجید حبیبی‌نوخندان (۱۳۸۸)، گرمایش جهانی و پیامدهای زیستی اکولوژیکی، چاپ اول، انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد. ۲۱۶ ص.
- صداقت‌کردار، علی؛ فتاحی، ابراهیم، ۱۳۸۷، شاخص‌های پیش‌آگاهی خشکسالی در ایران، مجله جغرافیا و توسعه، دانشگاه سیستان و بلوچستان، جلد ۶، ش ۱۱، صص ۷۶-۵۹.

- صلاحی، برومند، گودرزی، مسعود، حسینی، سید اسعد. ۱۳۹۵. پیش‌بینی تغییرات دما و بارش در دهه ۲۰۵۰ در حوزه آبخیز دریاچه ارومیه، *نشریه علوم و مهندسی آبخیزداری*، ج ۸، ش ۴، صص ۴۳۸-۴۲۵.
- صمدی، سیده زهرا؛ مساح‌بوانی، علیرضا، ۱۳۸۷، معرفی روش‌های شبکه عصبی مصنوعی و SDSM به منظور کوچک مقیاس کردن آماری داده‌های دما و بارندگی، *سومین کنفرانس مدیریت منابع آب ایران*، دانشگاه تبریز، ۹ ص.
- عزیززی، قاسم، روشن، محمود. ۱۳۸۷. مطالعه تغییر اقلیم در سواحل جنوبی دریای خزر به روش من-کندال، *مجله پژوهش‌های جغرافیایی*، ش ۶۴، صص ۲۸-۱۳.
- قرمزچشمه، باقر، رسولی، علی اکبر، رضایی‌بنفشه، مجید، مساح‌بوانی، علیرضا، خورشیددوست، علی-محمد. ۱۳۹۳. بررسی اثر عوامل مرفو-اقلیمی بر دقت ریزمقیاس گردانی مدل SDSM، *نشریه مهندسی و مدیریت آبخیز*، ج ۶، ش ۲، صص ۱۶۴-۱۵۵.
- کارآموز، محمد، رضانی، فرید، رضوی، سامان. ۱۳۸۵. پیش‌بینی بلند مدت بارش با استفاده از سیگنال‌های هواشناسی: کاربرد شبکه‌های عصبی مصنوعی. *هفتمین کنگره بین‌المللی مهندسی عمران-تهران*، ۱۱ص.
- کوهی، منصوره؛ ثنایی‌نژاد، حسین، ۱۳۹۲، بررسی سناریوهای تغییر اقلیم بر اساس نتایج حاصل از دو روش ریزمقیاس گردانی آماری برای متغیر تبخیر-تعرق مرجع در منطقه ارومیه، *نشریه آبیاری و زهکشی ایران*، جلد ۷، ش ۴، صص ۵۷۴-۵۵۹.
- گودرزی، مسعود، صلاحی، برومند، حسینی، سید اسعد. ۱۳۹۴. ارزیابی عملکرد مدل‌های ریزمقیاس گردانی LARS-WG و SDSM در شبیه‌سازی تغییرات اقلیمی در حوضه آبریز دریاچه ارومیه. *فصلنامه علوم و مهندسی آبخیزداری ایران، انتشارات انجمن آبخیزداری ایران*، ش ۳۱، صص ۲۲-۱۱.
- مدرس، فرشته، عراقی‌نژاد، شهاب، ابراهیمی، کیومرث و مجید خلقی (۱۳۸۹)، بررسی منطقه‌ای تغییر اقلیم با استفاده از آزمون‌های آماری (مطالعه مورد: آبریز گرگانرود- قره سو)، *نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)*، ش ۳، صص ۴۸۹-۴۷۶.

- Carter, T. R., Parry, M. L., Harasawa, H. and Nishioka, S.: 1994. IPCC technical guidelines for assessing climate change impacts and adaptations, IPCC Special Report to Working Group II of IPCC, London
- Chen, H., Yu Xu, C., Guo, SH. 2012. Comparison and evaluation of multiple GCMs, statistical downscaling and hydrological models in the study of climate change impacts on runoff. *Journal of Hydrology*, 434-435: 36-45.
- Chiotti, Q.P. and Johnston, T. (1995) "Extending the boundaries of climate change research: A discussion on agriculture", *J. of Rural Studies* 11: 335-350.
- Goodarzi, M., Jahanbakhsh, S., Rezaee, M., Ghafouri, A., Mahdian, M H. 2011. Assessment of Climate Change Statistical Downscaling Methods in a Single Site in Kermanshah , Iran, *American-Eurasian Journal. Agric. & Environ. Sci.*, 6 (5): 564-572.
- Guo, B., Zhang, J., Gong, H., Cheng, X. 2014. Future climate change impacts on the ecohydrology of Guishui River Basin China, *Ecohydrology & Hydrobiology*, Available online, Volume null, Issue null, Page null.
- Hashmi, M.Z., Shamseldin A.Y., Melville, B.W. 2009. Downscaling of future rainfall extreme events: a weather generator based approach. 18th World IMACS. MODSIM Congress, Cairns, Australia, 13-17.
- 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.
- 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.
- 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*.

- 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.
- Osman, Y., AL-Ansari, N., Abdellatif, M., Aljawad, S.B. Knutsson, S. 2013. Expected future precipitation in central Iraq using Lars-WG stochastic weather generator. *Engineering Scientific Research*, 6: 948-959.
- Qian, B., Gameda, S., Hayhoe, H., DeJong, R. and Bootsma, A (2004). Comparison of LARS-WG and AAFC-WG stochastic weather generators for diverse Canadian climates. *Climate Research*. 26:175-191
- 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: 1373–1390.
- Wigley, T.W. L., Jones, P. D., Briffa, K. R. and Smith, G.: 1990. Obtaining sub-grid scale information from coarse resolution general circulation model output, *J. Geophys. Res.* 951: 1943–1953.
- 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: 147-159.
- Zhang, X., Aguilar. E., Sensoy. S. 2005. Trends in middle east climate extreme indices from 1950 to 2003. *Journal of Geophysical Research*. 110: 12P.