

ارزیابی آثار تغییر اقلیم بر وضعیت خشک‌سالی ایستگاه تبریز طی دوره‌های آبی با استفاده از مدل ریزمقیاس نمایی LARS-WG

خدیجه جوان^{۱*} و مهدی عرفانیان^۲

چکیده

خشک‌سالی از گسترده‌ترین و مخرب‌ترین مخاطرات طبیعی است که با رخداد تغییر اقلیم پیچیده‌تر می‌شود. برای فراهم کردن یک دید کلی از وضعیت خشک‌سالی، شاخص‌هایی برای پایش آن به‌طور گسترده استفاده می‌شوند. در این پژوهش به ارزیابی آثار تغییر اقلیم بر وضعیت خشک‌سالی ایستگاه تبریز طی دوره‌های آینده با استفاده از شاخص‌های خشک‌سالی دهک (DI) و بارش استاندارد شده (SPI) پرداخته شده است. ابتدا داده‌های روزانه خروجی مدل گردش عمومی جو HadGEM2 تحت سناریوهای انتشار RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5، توسط مدل LARS-WG نسخه ۶، ریزمقیاس شد، توانایی مدل در شبیه‌سازی اقلیم گذشته (۱۹۸۷-۲۰۱۶) تبریز مورد تأیید قرار گرفت و سپس پارامتر اقلیمی بارش برای دوره‌های آبی ۲۰۴۰-۲۰۲۱، ۲۰۶۰-۲۰۴۱ و ۲۰۸۰-۲۰۶۱ شبیه‌سازی شد. با استفاده از داده‌های بارش شبیه‌سازی شده، وضعیت خشک‌سالی تبریز به کمک دو شاخص ذکر شده در مقیاس سالانه بررسی شد. نتایج نشان داد در بیشتر سال‌های مورد مطالعه، تعداد خشک‌سالی در هر سه دوره آبی نسبت به دوره پایه کاهش و تعداد ترسالی‌ها افزایش یافت. از نتایج پایش خشک‌سالی و پیش‌بینی آن برای دوره‌های آینده می‌تواند در مدیریت منابع طبیعی و نیز برنامه‌ریزی‌های مرتبط با مدیریت منابع آبی استفاده شود.

واژه‌های کلیدی: تبریز، تغییر اقلیم، خشک‌سالی، مدل HadGEM2، مدل LARS-WG.

ارجاع: جوان خ. و عرفانیان م. ۱۳۹۹. ارزیابی آثار تغییر اقلیم بر وضعیت خشک‌سالی ایستگاه تبریز طی دوره‌های آبی با استفاده از مدل ریزمقیاس LARS-WG. مجله پژوهش آب ایران. ۳۸: ۹۷-۱۰۶.

۱- استادیار آب و هواشناسی، گروه جغرافیا، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه ارومیه.

۲- دانشیار گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه ارومیه.

* نویسنده مسئول: kh.javan@urmia.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۹/۳۰

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۷/۲۹

مقدمه

پژوهشگران هوا و اقلیم‌شناسی در سال‌های اخیر، تغییرات اقلیمی ناشی از افزایش گازهای گلخانه‌ای و گرمایش کلی زمین و به دنبال آن وضع اقلیم دهه‌های آبی کره زمین را مهم‌ترین نگرانی موجود می‌شمارند. خشک‌سالی از مهم‌ترین و شایع‌ترین بلایای متأثر از تغییر اقلیم است که به‌طور آرام و پیش‌رونده‌ای به خسارت‌های زیست‌محیطی، کشاورزی و اقتصادی در هر دو اقلیم خشک و مرطوب در سرتاسر دنیا منجر می‌شود (لی و همکاران، ۲۰۱۳). از آن‌جا که خشک‌سالی، بخش‌های مختلف جامعه مانند منابع آب، کشاورزی، صنعت، اقتصاد و بهداشت را تحت تاثیر قرار می‌دهد؛ بنابراین پایش و ارزیابی این عامل در حال و آینده برای برنامه‌ریزی صحیح در بخش‌های مختلف جامعه امری لازم و ضروری است. در حال حاضر اقلیم‌شناسان برای بررسی آثار تغییر اقلیم، به شبیه‌سازی متغیرهای اقلیمی با استفاده از مدل‌های گردش عمومی جو می‌پردازند (بارو و یو، ۲۰۰۵). هدف اصلی این مدل‌ها، محاسبه شاخص‌های سه بعدی اقلیم در شبکه‌های مشخص است. این مدل‌ها، ابزاری مناسب و توانا برای مطالعه و ارزیابی خطرهای تغییرات اقلیمی مانند وقوع خشک‌سالی و بارش‌های رگباری و سیل آساست. همچنین با استفاده از رویکردهای تأیید شده هیأت بین‌الدول تغییر اقلیم (IPCC)، قادر به ایجاد سری‌های زمانی بلندمدت بارش، دمای حداقل، دمای حداکثر، تابش و تبخیر و تعرق در مقیاس روزانه هستند (نصیری و یارمرادی، ۱۳۹۶). خروجی‌های این مدل‌ها دقت مکانی پایینی دارند؛ لذا در صورتی که خروجی آن‌ها مستقیماً به عنوان ورودی مدل‌های هیدرولوژیکی قرار گیرد، باعث افزایش عدم قطعیت می‌شود. امروزه برای افزایش دقت مکانی این داده‌ها، از روش‌های ریزمقیاس‌نمایی استفاده می‌شود. روش‌های ریزمقیاس‌نمایی به دو دسته روش‌های دینامیکی و آماری تقسیم می‌شوند (بیچام و همکاران، ۲۰۱۴). در مطالعات اقلیمی بیشتر از روش‌های آماری استفاده می‌شود. از جمله دلایل استفاده از این مدل‌ها، عملکرد سریع و آسان آن‌ها نسبت به سایر روش‌ها است (کیلسبی و همکاران، ۲۰۰۷).

خشک‌سالی را در منطقه تسالی کشور یونان ارزیابی کردند. در این پژوهش خروجی مدل گردش جهانی CGCM2 تحت دو رویکرد A2 و B2 با استفاده از یک روش آماری ریزمقیاس شدند و شاخص SPI برای برآورد شدت خشک‌سالی مورد استفاده قرار گرفت و سری‌های زمانی بارش برای دو دوره ۲۰۵۰-۲۰۲۰ و ۲۱۰۰-۲۰۷۰ برآورد شدند. نتایج نشان داد تغییرات اقلیمی به میزان زیادی بر شدت خشک‌سالی و همچنین طراحی پروژه‌های منابع آب در آینده اثر دارد. وروچیدو و همکاران (۲۰۱۳) به بررسی اثر تغییر اقلیم بر خشک‌سالی هیدرولوژیکی پرداختند. آن‌ها خروجی سه مدل گردش عمومی جو (دما و بارش) با داده‌های WFD را اصلاح آریبی و سپس بر پایه رویکردهای A2 و B1 خشک‌سالی را در مقیاس حوضه ارزیابی کردند. نتایج نشان داد طبق هر دو رویکرد، تعداد وقایع خشک‌سالی (سیلاب، افت آب زیرزمینی و رطوبت خاک) در دهه‌های آینده افزایش می‌یابد. داسکالو و همکاران (۲۰۱۶) با استفاده از مدل‌های گزارش پنجم IPCC بر اساس دو رویکرد RCP4.5 و RCP8.5 به ارزیابی تحولات آینده دمای ماهانه و بارش و تأثیرات آن‌ها بر خشک‌سالی در شرق رومانی با استفاده از شاخص شدت خشک‌سالی پالم (PDSI) پرداختند. تجزیه و تحلیل شاخص پالم در دو رویکرد بیان می‌کند که به‌طور متوسط در حوضه رودخانه یاد شده در وضعیت تغییرات آب و هوایی، خشک‌سالی کمی اتفاق خواهد افتاد. اوگونتونده و همکاران (۲۰۱۷) اثر تغییر اقلیم را بر خشک‌سالی هیدرواقلمی در سراسر حوضه ولتا در غرب آفریقا بررسی کردند و نشان دادند که وسعت خشک‌سالی‌ها در آینده بین ۲۴ تا ۳۴ درصد افزایش می‌یابد و بزرگی افزایش خشک‌سالی با استفاده از شاخص بارش-تبخیر و تعرق استاندارد شده (SPEI) بیشتر از شاخص SPI است. خزانه‌داری و همکاران (۱۳۸۸) با استفاده از خروجی مدل GCM و ریزمقیاس کردن داده‌ها با مدل LARS-WG، به بررسی وضعیت خشک‌سالی با استفاده از دو شاخص دهک (DI) و شاخص استاندارد شده بارش (SPI) در کشور طی دوره ۲۰۳۹-۲۰۱۰ پرداختند. نتایج حاصل از این پژوهش ضمن تأیید همخوانی این دو شاخص برای بررسی وضعیت خشک‌سالی در کشور، نشان داده است که طی سی سال آینده وضعیت خشک‌سالی در کشور رو به افزایش خواهد بود که این مسأله وقوع تغییر اقلیم در منطقه را تأیید

مدل ریزمقیاس نمایی SDSM استفاده کردند و به این نتیجه رسیدند که دما و بارندگی نسبت به زمان حال افزایش می‌یابد و نیز شاخص SPEI به دلیل اینکه از پارامترهای اقلیمی بیشتری برای ارزیابی خشک‌سالی استفاده می‌کند نتایج واقعی‌تری نسبت به شاخص SPI نشان می‌دهد؛ به گونه‌ای که ارزیابی خشک‌سالی بر اساس SPEI، وضعیت خشک‌سالی شدیدتری را نشان داده است. در این مطالعه خروجی مدل گردش عمومی جو HadGEM2 تحت سناریوهای انتشار RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5، با روش ریزمقیاس نمایی آماری و مدل LARS-WG ریزمقیاس می‌شوند و متغیرهای اقلیمی روزانه دمای کمینه، دمای بیشینه، بارش و ساعت آفتابی برای ایستگاه تبریز طی سه دوره آتی ۲۰۴۰-۲۰۲۱، ۲۰۶۰-۲۰۴۱ و ۲۰۸۰-۲۰۶۱ تولید می‌شوند. سپس به کمک داده‌های بارش شبیه‌سازی شده، وضعیت خشک‌سالی ایستگاه تبریز با استفاده از دو شاخص دهک (DI) و استاندارد بارش (SPI) ارزیابی قرار می‌شود.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه در این پژوهش، ایستگاه سینوپتیک تبریز است. این ایستگاه در عرض جغرافیایی ۳۸ درجه و ۵ دقیقه عرض شمالی و ۴۶ درجه و ۱۷ دقیقه طول شرقی واقع شده است که از نظر جغرافیایی در شمال غربی ایران قرار دارد. داده‌های استفاده شده شامل داده‌های دیده‌بانی و داده‌های شبیه‌سازی شده هستند. داده‌های دیده‌بانی شامل داده‌های دمای حداقل، دمای حداکثر، بارش و ساعات آفتابی است. این داده‌ها مربوط به دوره آماری ۲۰۱۶-۱۹۸۷ است. داده‌های شبیه‌سازی شده شامل مدل گردش عمومی جو HadGEM2 در سه دوره ۲۰۴۰-۲۰۲۱، ۲۰۶۰-۲۰۴۱ و ۲۰۸۰-۲۰۶۱ که تحت سناریو RCP4.5 و با مدل LARS-WG ریزمقیاس گردیده است.

مدل‌های گردش عمومی جو GCMs پیشرفته‌ترین ابزار موجود برای شبیه‌سازی پاسخ سیستم عمومی جو به افزایش گازهای گلخانه‌ای است. این مدل‌ها با استفاده از شبکه‌های سه بعدی در سطح کره زمین، دارای مقیاس افقی ۲۵۰ تا ۶۰۰ کیلومتر و مقیاس قائم ۱۰ تا ۲۰ لایه در جو و در برخی حالت‌ها ۳۰ لایه در اقیانوس هستند. مدل‌های GCM نشان می‌دهند که افزایش غلظت گازهای

می‌کند. صالح‌نیا و همکاران (۱۳۹۲) با استفاده از خروجی مدل گردش عمومی جو HadCM3 و روش ریزمقیاس نمایی آماری LARS-WG به پیش‌بینی خشک‌سالی با استفاده از شاخص PDSI طی سی سال آینده در حوضه نیشابور پرداخت. پیش‌بینی‌ها نشان دادند که در دوره سی سال آتی، بارش در دشت نیشابور افزایش خواهد یافت و خشک‌سالی کاهش می‌یابد. گل محمدی و مساح (۱۳۹۰) با شبیه‌سازی بارش با مدل HadCM3 بر اساس رویکرد A2 در دوره ۲۰۶۹-۲۰۴۰ میلادی برای حوضه قره‌سو، وضعیت خشک‌سالی این حوضه را در این دوره برای دوره بازگشت‌های مختلف مشخص کردند. نتایج حاکی از این بود که این حوضه، طی این دوره شاهد افزایش بارش و به تبع آن کاهش شدت خشک‌سالی نسبت به دوره پایه خواهد بود. بحری و همکاران (۱۳۹۳) به بررسی خشک‌سالی‌های دهه ۲۰۳۰-۲۰۱۱ تحت تأثیر تغییر اقلیم در حوضه اسکندری اصفهان پرداختند. بدین منظور پس از ارزیابی توانایی LARS-WG در شبیه‌سازی دوره ۲۰۰۸-۱۹۶۵ بر اساس رویکرد پایه، اقدام به ریزمقیاس‌نمایی برون داده‌های مدل HadCM3 بر اساس دو رویکرد A2 و B1 و پیش‌بینی دمای کمینه، بیشینه و بارش و بررسی شاخص خشک‌سالی SPI شده است. نتایج نشان داد شدیدترین خشک‌سالی با توجه به SPI شش‌ماهه مربوط به آگوست و شدیدترین خشک‌سالی بر اساس SPI12 ماهه متعلق به دسامبر است؛ بنابراین حوضه اسکندری با افزایش فراوانی وقوع خشک‌سالی روبه‌رو نخواهد بود؛ اما انتظار می‌رود بارش‌ها به سمت فصل گرم جابه‌جا شوند. جوان و همکاران (۱۳۹۴) به پهنه‌بندی شاخص‌های خشک‌سالی DI و SPI در مقیاس زمانی سالانه در شمال‌غرب ایران پرداختند و به این نتیجه رسیدند که قسمت‌های غربی و مرکزی ناحیه آذربایجان دارای خشک‌سالی است. پروانه و همکاران (۱۳۹۴) به تحلیل وضعیت خشک‌سالی استان لرستان طی دوره ۲۰۳۰-۲۰۱۱ با استفاده از ریزمقیاس نمایی خروجی چهار مدل گردش عمومی جو پرداختند. نتایج نشان داد که طی دو دهه آینده خشک‌سالی در اغلب ایستگاه‌ها کاهش می‌یابد. پیرنیا و همکاران (۱۳۹۷) به ارزیابی وضعیت خشک‌سالی حوضه تمر در گلستان با استفاده از شاخص‌های SPI و SPEI در حال و آینده پرداختند. آنان از داده‌های خروجی مدل CanESM2 تحت سناریوهای RCP2.6 و RCP8.5 و

گلخانه‌ای، تأثیر قابل توجهی برای اقلیم در مقیاس جهانی و منطقه‌ای خواهد داشت (IPCC, ۲۰۰۷). هیأت بین-الدول تغییر اقلیم (IPCC) در تدوین گزارش پنجم ارزیابی خود (AR5) از سناریوهای جدید RCP به عنوان نماینده-های خطوط سیر غلظت‌های گوناگون گازهای گلخانه‌ای استفاده کرده است. این رویکردها با عنوان رویکردهای واداشت تابشی هستند (IPCC, ۲۰۰۷). سناریوهای جدید انتشار دارای چهار خط سیر کلیدی با نام‌های RCP2.6, RCP4.5, RCP6, RCP8.5 هستند که بر اساس میزان واداشت تابشی در سال ۲۱۰۰ نام‌گذاری شده‌اند.

از جمله مشکلات عمده در استفاده از خروجی مدل‌های GCM در مطالعات ارزیابی تأثیر تغییر اقلیم در سطوح منطقه‌ای، بزرگ‌مقیاس بودن آن‌ها، به لحاظ مکانی و زمانی نسبت به منطقه مورد مطالعه است. روش‌های مختلفی برای تولید سناریوهای اقلیمی منطقه‌ای از سناریوهای اقلیمی مدل‌های GCM وجود دارد که به این روش‌ها، ریزمقیاس‌نمایی گفته می‌شود (هوپستون و کرن، ۲۰۰۶). این روش‌ها شامل روش‌های دینامیکی و آماری است. معتبرترین ابزار برای ریزمقیاس‌نمایی استفاده از روش‌های آماری است که از آن جمله می‌توان به LARS-WG اشاره کرد.

مدل LARS-WG از مشهورترین مدل‌های مولد داده‌های تصادفی وضع هوا است و برای تولید دمای حداقل و حداکثر، بارش و تابش بصورت روزانه در شرایط اقلیم حاضر و آینده به کار می‌رود. این مدل به دلیل تکرار محاسبات، نیاز کمتر به داده‌های ورودی و سادگی و کارایی، نسبت به دیگر برنامه‌ها دارای کاربرد بیشتری است (کیلسی و همکاران، ۲۰۰۷). این مدل را ابتدا راسکو و همکاران ارائه دادند و سپس آن را سمونوف و همکاران بازنگری کردند. این مدل، در عین پیچیدگی کمتر فرآیند شبیه‌سازی و داده‌های ورودی و خروجی، توانایی بالایی در پیش‌بینی تغییر اقلیم دارد (سمونوف و استراتونویچ، ۲۰۱۰). در این پژوهش، از نسخه دوم مدل محیطی مرکز هدلی با نام مدل HadGEM2 به عنوان مدل گردش عمومی و از نسخه ۶ مدل LARS-WG برای ریزمقیاس‌نمایی استفاده شد. همچنین از نتایج سناریوهای انتشار RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5 استفاده شده است. در مطالعاتی که برای مقایسه کارایی مدل‌های گردش عمومی جو انجام شده است، مدل‌های مرکز تحقیقات هدلی شامل

پایش خشک‌سالی با محاسبه شاخص‌های خشک‌سالی (الف) شاخص بارش استاندارد (SPI)

شاخص SPI را مک‌کی و همکارانش (۱۹۹۳) با توجه به بررسی تأثیرات متفاوت کمبود بارش بر آب‌های زیرزمینی، ذخایر و منابع آب سطحی، رطوبت خاک و جریان آبراهه ارائه دادند. این شاخص با قرار دادن تفاوت بارش از میانگین برای یک مقیاس زمانی مشخص و سپس تقسیم آن بر انحراف معیار به دست می‌آید و تنها فاکتور مؤثر در محاسبه این شاخص، عنصر بارندگی است. این شاخص را می‌توان در مقیاس‌های زمانی ۱، ۳، ۶، ۹، ۱۲، ۲۴ و ۴۸ ماهه محاسبه کرد. تعریف پیشنهادی بر اساس بارندگی استاندارد شده بنا شده است. در این تعریف بارندگی استاندارد شده در حقیقت تفاضل بارندگی از میانگین یک دوره زمانی خاص است که بر انحراف معیار تقسیم می‌شود؛ به گونه‌ای که میانگین و انحراف معیار از سوابق و وقایع گذشته قابل تعیین می‌باشد. معادله زیر شیوه محاسبه شاخص استاندارد شده بارش را نشان می‌دهد (هایز و همکاران، ۱۹۹۹).

$$PI = \frac{P_{ik} - P_i}{\sigma_i} \quad (1)$$

که در آن، P_{ik} = مقادیر بارش؛ P_i = میانگین بارش بلندمدت؛ σ_i = انحراف معیار داده‌های بارش بلندمدت است.

مقادیر مثبت SPI نشان‌دهنده بارندگی بیشتر از بارش متوسط و مقادیر منفی آن معنای عکس دارد. طبق این روش، دوره خشک‌سالی هنگامی اتفاق می‌افتد که SPI به‌طور مستمر منفی و به مقدار ۱- یا کمتر برسد و هنگامی پایان می‌یابد که SPI مثبت شود (جوان و همکاران، ۱۳۹۴).

ب) شاخص خشک‌سالی دهک (DI)

وقوع بارندگی‌های طولانی مدت را در دهک‌هایی از توزیع نرمال تقسیم می‌کنند و هر یک از این گروه‌ها را یک دهک می‌نامند. در این روش ابتدا داده‌های سالانه بارندگی را به‌صورت صعودی مرتب و سپس احتمال وقوع بارش

در شکل بررسی شده، داده‌های شبیه‌سازی شده بسیار شبیه به داده‌های مشاهداتی ایستگاه و واریانس داده‌های شبیه‌سازی شده نیز بسیار اندک است.

پس از صحت‌سنجی و تعیین میزان تطابق مدل با داده‌های مشاهده‌ای، مقادیر بارش از لحاظ نرمال بودن توزیع آزمون شد. بررسی نوع توزیع آماری داده‌ها با آزمون کولموگروف-اسمیرنوف (K-S) انجام گرفت و نتایج حاصل در جدول ۳ آورده شده است. محدوده نرمال K-S در حدود ۰/۰۵ و بالاتر از آن است. در تمام ماه‌های سال مقادیر K-S محاسبه شده بالاتر از این محدوده قرار دارد که این امر نشان‌دهنده آن است که داده‌های بارش از توزیع نرمال تبعیت می‌کند و فرض H_0 در این مسأله پذیرفته می‌شود.

با واسنجی مدل LARS-WG و اطمینان از قابلیت آن در شبیه‌سازی مطلوب سری داده‌های بارش برای ایستگاه تبریز، این مدل برای سه دوره ۲۰۲۱-۲۰۴۰، ۲۰۴۱-۲۰۶۰ و ۲۰۶۱-۲۰۸۰ با استفاده از خروجی مدل HadGEM2 تحت سناریوهای RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 اجرا و سپس خشک‌سالی سالانه این ایستگاه با استفاده از شاخص SPI و DI محاسبه شد.

در جدول ۴ میزان افزایش یا کاهش مقادیر شبیه‌سازی شده بارش در دوره‌های آتی نسبت به دوره پایه ۲۰۱۶-۱۹۸۷ در ایستگاه تبریز نشان داده شده است. بررسی داده‌های بارش شبیه‌سازی شده برای دوره‌های آینده نشان می‌دهد در ایستگاه تبریز در دوره ۲۰۲۱-۲۰۴۰، ماه‌های ژانویه، مارس، آوریل، ژوئن و دسامبر کاهش بارش خواهند داشت و بیشترین کاهش بارش در ماه ژانویه خواهد بود. سایر ماه‌ها افزایش بارش را خواهند داشت که بیشترین میزان این افزایش در ماه اکتبر خواهد بود. در دوره ۲۰۴۱-۲۰۶۰ تنها ماه‌های ژانویه، آوریل، ژوئن، نوامبر و دسامبر کاهش بارش و سایر ماه‌ها افزایش بارش خواهند داشت. در این دوره نیز بیشترین میزان کاهش بارش در ماه ژانویه و بیشترین افزایش بارش در ماه اکتبر خواهد بود. در دوره ۲۰۶۱-۲۰۸۰ اکثر ماه‌ها کاهش بارش را خواهند داشت و افزایش بارش تنها در ماه‌های می، ژوئیه، اگوست، سپتامبر و اکتبر خواهد بود. در این دوره بیشترین کاهش بارش در آوریل و بیشترین افزایش در اکتبر خواهد بود.

یک ماه یا سال را تعیین می‌کنند. احتمال وقوع بارش از طریق معادله زیر تعیین می‌شود (انصافی مقدم، ۱۳۸۶):

$$P_i = \frac{i}{N+1} \times 100 \quad (2)$$

که P_i احتمال وقوع بارندگی در ردیف i ام و N تعداد داده‌های بارش است. در این صورت برحسب اینکه مقدار P_i در چه دهکی قرار گرفته باشد، یکی از درجه‌های خشکی به آن تعلق می‌گیرد.

جدول ۱- طبقات خشک‌سالی و ترسالی بر اساس شاخص SPI

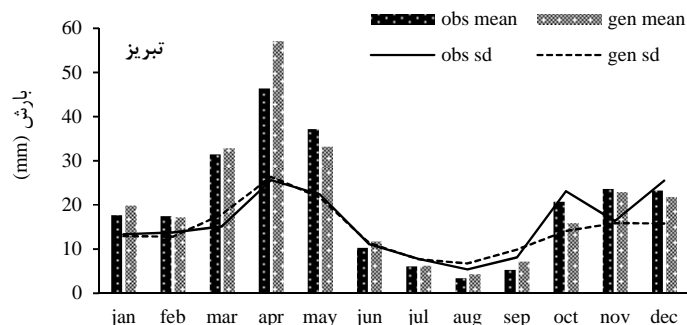
مقادیر SPI	طبقه خشک‌سالی
۲ و بالاتر	ترسالی خیلی شدید
۱/۵۰ تا ۱/۹۹	ترسالی شدید
۱/۰۰ تا ۱/۴۹	ترسالی ملایم
۰/۹۹ تا -۰/۹۹	نرمال
-۱/۰۰ تا -۱/۴۹	خشک‌سالی ملایم
-۱/۵۰ تا -۱/۹۹	خشک‌سالی شدید
-۲/۰۰ و پایین‌تر	خشک‌سالی خیلی شدید

جدول ۲- طبقات خشک‌سالی و ترسالی بر اساس شاخص DI

رده DI	دهک	طبقه خشک‌سالی
اول	کمتر از ۱۰	خشک‌سالی خیلی شدید
دوم	۱۰ تا ۲۰	خشک‌سالی شدید
سوم	۲۰ تا ۳۰	خشک‌سالی متوسط
چهارم	۳۰ تا ۴۰	خشک‌سالی خفیف
پنجم و ششم	۴۰ تا ۶۰	نرمال
هفتم	۶۰ تا ۷۰	ترسالی خفیف
هشتم	۷۰ تا ۸۰	ترسالی متوسط
نهم	۸۰ تا ۹۰	ترسالی شدید
دهم	۹۰ تا ۱۰۰	ترسالی خیلی شدید

نتایج و بحث

پس از بررسی اولیه داده‌ها، سری روزانه پارامتر بارش تنظیم و تولید و پس از تولید سری‌های روزانه، مدل LARS-WG اجرا شد. بعد از آنالیز داده‌های ورودی و بررسی‌های آماری اولیه، سناریوی حالت پایه برای داده‌های مشاهده‌ای اجرا و داده‌های اقلیمی برای پارامتر بارش شبیه‌سازی شدند. نتایج حاصل به صورت نمودار آماری بررسی و میزان انطباق داده‌های مشاهده‌ای و داده‌های شبیه‌سازی تجزیه و تحلیل شد. نتایج به دست آمده در شکل ۱ آورده شده است. صحت سنجی مدل بر اساس مقادیر بارش مشاهده‌ای و مقادیر بارش شبیه‌سازی شده توسط مدل لارس با استفاده از سناریوی حالت پایه نشان‌دهنده تطابق بالای مدل با مقادیر مشاهده‌ای است.



شکل ۱- مقایسه میانگین و انحراف معیار بارش ماهانه مشاهده‌ای و بارش شبیه‌سازی شده (۱۹۸۷-۲۰۱۶)

جدول ۳- آزمون نرمال بودن توزیع داده‌های بارش ایستگاه تبریز بر اساس مدل کولموگروف-اسمیرنوف

آماره آزمون	ژانویه	فوریه	مارس	آوریل	می	ژوئن	ژوئیه	اگوست	سپتامبر	اکتبر	نوامبر	دسامبر
K-S	۰/۰۲	۰/۰۷	۰/۰۵	۰/۰۸	۰/۰۵	۰/۱۳	۰/۱۱	۰/۳۱	۰/۰۹	۰/۱۴	۰/۱۲	۰/۰۳
P-value	۱	۱	۱	۱	۱	۰/۹۷	۰/۹۹	۰/۶۲	۱	۰/۹۵	۰/۹۹	۱

جدول ۴- مقادیر شبیه‌سازی شده بارش در دوره آبی (افزایش یا کاهش) برای ایستگاه تبریز با مدل LARS-WG

آماره آزمون	ژانویه	فوریه	مارس	آوریل	می	ژوئن	ژوئیه	اگوست	سپتامبر	اکتبر	نوامبر	دسامبر
۲۰۲۱-۲۰۴۰	-۱۱/۶	۱/۴	-۳	-۶/۸	۹	-۱	۰/۶	۰/۱	۱/۷	۱۰/۹	۰/۱	-۴/۸
۲۰۴۱-۲۰۶۰	-۱۲	۳/۱	۰	-۶/۶	۹/۴	-۰/۶	۱/۵	۱/۱	۱/۵	۹/۹	-۳/۱	-۷/۷
۲۰۶۱-۲۰۸۰	-۱۰/۲	-۰/۲	-۷/۲	-۱۳/۳	۶/۹	-۱/۸	۱/۱	۱	۱/۴	۹/۷	-۳/۷	-۳/۹

ترسالی بالاترین افزایش را دارد. در این دوره طبقات خشک‌سالی شدید، متوسط و نرمال کاهش ناچیزی را تجربه کرده‌اند. در دوره سوم وضعیت ایستگاه تبریز مانند دوره اول خواهد بود؛ به گونه‌ای که دوره‌های ترسالی افزایش و خشک‌سالی متوسط و نرمال کاهش خواهند داشت؛ ولی تغییرات خشک‌سالی بسیار شدید و شدید ناچیز خواهد بود.

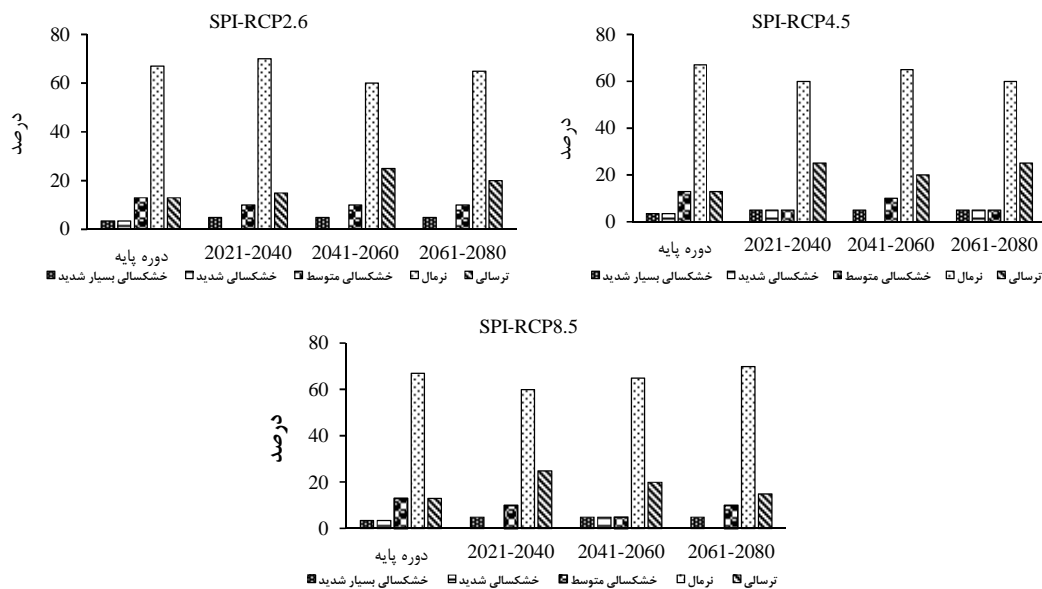
بر اساس سناریو RCP8.5، خشک‌سالی بسیار شدید در هر سه دوره تغییر نمی‌کند. درصد خشک‌سالی شدید در دوره اول و سوم و خشک‌سالی متوسط در هر سه دوره کاهش می‌یابد. وضعیت نرمال در دوره اول و دوم کاهش می‌یابد؛ ولی در دوره سوم افزایش ناچیزی را نشان می‌دهد. طبقه ترسالی‌ها در هر سه دوره افزایش نشان می‌دهد. در کل می‌توان گفت بر اساس مدل SPI و سناریوهای مورد بررسی، تعداد ترسالی‌ها در هر سه دوره آبی، افزایش دارند و تعداد سال‌های خشک‌سالی کاهش می‌یابد.

جدول ۵ مربوط به فراوانی طبقات مختلف شاخص SPI سالانه در دوره پایه (۱۹۸۷-۲۰۱۶) و سه دوره آبی بر اساس سناریوهای RCP4.5، RCP2.6، و RCP8.5 برای تبریز است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در همه دوره‌های پیش‌بینی شده، تعداد سال‌های خشک‌سالی نسبت به دوره پایه کاهش پیدا کرده است. برای مقایسه بهتر وضعیت خشک‌سالی، نتایج به صورت درصد در شکل ۲ آورده شده است. نتایج مدل SPI بر اساس RCP2.6، نشان می‌دهد خشک‌سالی بسیار شدید در هر سه دوره آینده بدون تغییر بوده؛ ولی خشک‌سالی‌های شدید و متوسط کاهش خواهند داشت. بر اساس این سناریو، طبقه ترسالی افزایش بیشتری را خواهد داشت.

بر اساس سناریو RCP4.5، طی دوره اول، طبقه ترسالی همچنان طبقه‌ای متمایز را نشان می‌دهد و درصد بالاتری را در اختیار دارد. میزان تغییرات خشک‌سالی بسیار شدید و شدید در این دوره ناچیز است؛ ولی خشک‌سالی متوسط و دوره‌های نرمال کاهش داشته‌اند. در دوره سوم نیز

جدول ۵- مقایسه فراوانی طبقات مختلف شاخص خشک‌سالی SPI در دوره پایه با دوره‌های پیش‌بینی شده بر اساس سناریوهای RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 در ایستگاه تبریز

طبقات خشک‌سالی	۳۰ سال دوره پایه	سناریو	۲۰۲۱-۲۰۴۰	۲۰۴۱-۲۰۶۰	۲۰۸۰-۲۰۹۹
بسیار شدید	۱	RCP2.6	۱	۱	۱
		RCP4.5	۱	۱	۱
		RCP8.5	۱	۱	۱
شدید	۱	RCP2.6	۰	۰	۰
		RCP4.5	۱	۰	۱
		RCP8.5	۰	۱	۰
متوسط	۴	RCP2.6	۲	۲	۲
		RCP4.5	۱	۲	۱
		RCP8.5	۲	۱	۲
نرمال	۲۰	RCP2.6	۱۳	۱۲	۱۴
		RCP4.5	۱۲	۱۳	۱۲
		RCP8.5	۱۴	۱۳	۱۲
ترسالی	۴	RCP2.6	۴	۵	۳
		RCP4.5	۵	۴	۵
		RCP8.5	۳	۴	۵



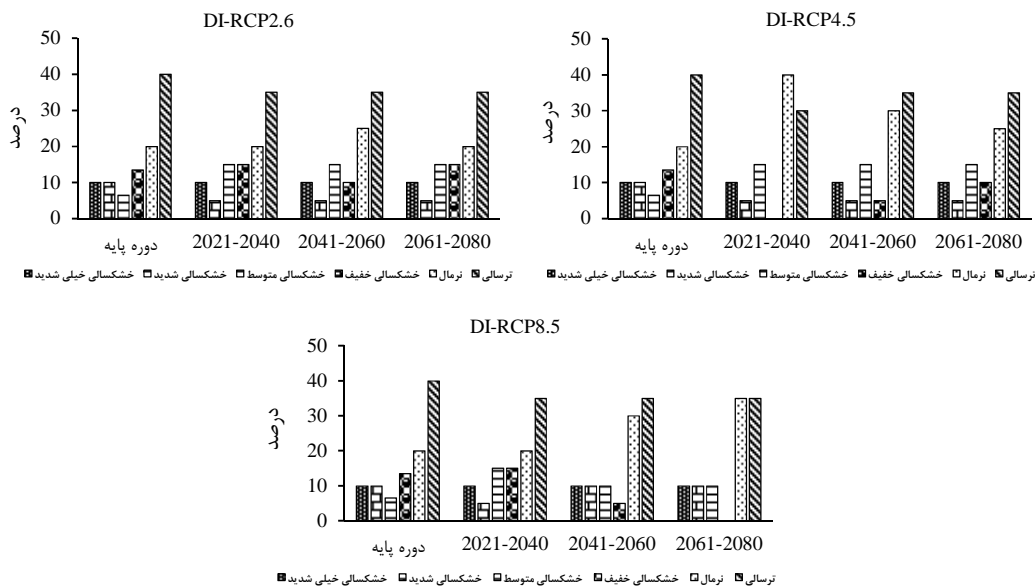
شکل ۲- درصد فراوانی طبقات مختلف شاخص خشک‌سالی SPI در مقیاس سالانه در دوره پایه و دوره‌های پیش‌بینی شده بر اساس سناریوهای RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 در ایستگاه تبریز

تغییری نشان نمی‌دهد. برای ارزیابی دقیق‌تر خشک‌سالی طی سه دوره آینده، درصد فراوانی طبقات شاخص DI در دوره پایه و دوره‌های آتی بر اساس هر سه سناریو در شکل ۳ ارائه شده است. بر اساس RCP2.6، خشک‌سالی بسیار شدید بدون تغییر است؛ درحالی‌که خشک‌سالی شدید و روند کاهشی خواهد داشت. میزان خشک‌سالی متوسط و خفیف افزایش و ترسالی‌ها در هر سه دوره کاهش می‌یابد. بر اساس RCP4.5، درصد خشک‌سالی شدید بدون تغییر

جدول ۶ فراوانی شاخص DI را در مقیاس سالانه در دوره پایه (۲۰۱۶-۱۹۸۷) و سه دوره آتی بر اساس سناریوهای RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 برای ایستگاه تبریز نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود در همه دوره‌های آتی و بر اساس هر سه سناریو، تعداد خشک‌سالی‌های شدید و خفیف کاهش پیدا می‌کند؛ ولی تعداد خشک‌سالی‌های متوسط افزایش می‌یابد. درصد خشک‌سالی بسیار شدید در هیچ‌یک از دوره‌های آینده

این سناریو نیز تنها خشک‌سالی‌های متوسط در هر سه دوره، افزایش خواهد داشت. خشک‌سالی خفیف نیز در دوره اول افزایش؛ ولی در دوره‌های بعدی کاهش می‌یابد. در این سناریو دوره‌های نرمال در هر دوره آتی افزایش؛ ولی دوره‌های ترسالی کاهش می‌یابند.

است در حالی که خشک‌سالی شدید و خفیف روند کاهشی را نشان می‌دهند. بر اساس این سناریو تنها خشک‌سالی متوسط و دوره‌های نرمال در هر سه دوره افزایش خواهد داشت. بر اساس RCP8.5 نیز، خشک‌سالی بسیار شدید و شدید در هر سه دوره آتی بدون تغییر بوده است. بر اساس



شکل ۳- درصد فراوانی طبقات مختلف شاخص خشک‌سالی DI در مقیاس سالانه در دوره پایه و دوره‌های پیش‌بینی شده بر اساس سناریوهای RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 در ایستگاه تبریز

جدول ۶- مقایسه فراوانی طبقات مختلف شاخص خشک‌سالی DI در دوره پایه با دوره‌های پیش‌بینی شده بر اساس سناریوهای RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 در ایستگاه تبریز

طبقات خشک‌سالی	۳۰ سال دوره پایه	سناریو	۲۰۴۰-۲۰۲۱	۲۰۶۰-۲۰۴۱	۲۰۸۰-۲۰۶۱
بسیار شدید	۳	RCP2.6	۲	۲	۲
		RCP4.5	۲	۲	۲
		RCP8.5	۲	۲	۲
شدید	۳	RCP2.6	۱	۱	۱
		RCP4.5	۱	۱	۱
		RCP8.5	۱	۲	۲
متوسط	۲	RCP2.6	۳	۳	۳
		RCP4.5	۳	۳	۳
		RCP8.5	۳	۲	۲
خفیف	۴	RCP2.6	۳	۲	۳
		RCP4.5	۰	۱	۲
		RCP8.5	۳	۱	۰
نرمال	۶	RCP2.6	۴	۵	۴
		RCP4.5	۸	۶	۵
		RCP8.5	۴	۶	۷
ترسالی	۱۲	RCP2.6	۷	۷	۷
		RCP4.5	۶	۷	۷
		RCP8.5	۷	۷	۷

نتیجه‌گیری

این پژوهش به منظور ارزیابی آثار تغییر اقلیم بر وضعیت خشک‌سالی ایستگاه تبریز طی سه دوره آبی دوره ۲۰۴۰-۲۰۲۱، ۲۰۶۰-۲۰۴۱ و ۲۰۸۰-۲۰۶۱ با استفاده از شاخص‌های دهک‌ها (DI) و بارش استاندارد شده (SPI) انجام شد. برای ریزمقیاس‌نمایی خروجی مدل HadGEM2 تحت سناریوهای RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 از مدل LARS-WG استفاده شد. پس از صحت‌سنجی، مدل مذکور برای سه دوره آبی اجرا و با استفاده از دو شاخص DI و SPI، بارش شبیه‌سازی شده برای پیش‌بینی خشک‌سالی ارزیابی شد. بررسی وضعیت خشک‌سالی بر اساس سناریوهای مختلف و با استفاده از شاخص SPI نشان داد که در بیشتر سال‌ها، تعداد خشک‌سالی نسبت به دوره پایه کاهش و تعداد ترسالی‌ها افزایش می‌یابد. ارزیابی شاخص DI نیز نشان داد که در همه دوره‌های آبی تعداد خشک‌سالی‌های بسیار شدید، شدید و خفیف نسبت به دوره پایه کاهش، ولی تعداد خشک‌سالی‌های متوسط افزایش می‌یابد. بر اساس این شاخص، درصد سال‌های نرمال در هر سه دوره آبی، افزایش قابل توجهی خواهد داشت؛ ولی درصد سال‌های مرطوب کاهش قابل ملاحظه‌ای را نشان می‌دهد.

منابع

۱. احمدی ح.، فلاح قاهره غ. و باعقیده م. ۱۳۹۸. پیش‌نگری اثرات تغییر اقلیم بر بارش فصلی مناطق سردسیر ایران بر اساس سناریوهای واداشت تابشی (RCP). فیزیک زمین و فضا. ۴۵(۱): ۱۷۷-۱۹۶.
۲. انصافی مقدم ط. ۱۳۸۶. ارزیابی چند شاخص خشک‌سالی اقلیمی و تعیین مناسب‌ترین شاخص در حوضه دریاچه نمک. فصلنامه تحقیقات مرتع و بیابان. ۱۴(۲): ۲۷۱-۲۸۸.
۳. بحری م.، دستورانی م. و گودرزی م. ۱۳۹۳. بررسی خشک‌سالی‌های دهه ۲۰۳۰-۲۰۱۱ تحت اثر تغییر اقلیم حوضه آبریز اسکندری اصفهان. نشریه مهندسی و مدیریت آبخیز. ۷(۲): ۱۵۷-۱۷۱.
۴. پروانه ب.، شیرواند ه. و درگاهیان ف. ۱۳۹۴. تحلیل وضعیت خشک‌سالی استان لرستان طی دوره ۲۰۳۰-۲۰۱۱ با استفاده از ریزمقیاس‌نمایی
- خروجی ۴ مدل گردش عمومی جو. فصلنامه جغرافیایی سرزمین. ۴۵: ۱-۱۳.
۵. پیرنیا ع.، گلشن م.، بیگنه س. و سلیمانی ک. ۱۳۹۷. ارزیابی وضعیت خشک‌سالی در حوضه آبخیز تمر (بالادست سد گلستان) با استفاده از شاخص‌های SPI و SPEI تحت شرایط اقلیمی حال و آینده. اکوهیدرولوژی. ۵(۱): ۲۱۵-۲۲۸.
۶. جوان خ.، عزیززاده م.، بشیری ه. و شهریار سرنقی ف. ۱۳۹۴. پهنه‌بندی شاخص‌های خشک‌سالی SPI و DI با استفاده از داده‌های شبکه‌ای بارش در شمال غرب ایران. فصل‌نامه جغرافیای طبیعی. ۲۹: ۱۱۷-۱۳۰.
۷. خزانه‌داری ل.، زابل عباسی ف.، قندهاری ش.، کوهی م. و ملیبوسی ش. ۱۳۸۸. دورنمایی از وضعیت خشک‌سالی ایران طی سی سال آینده. جغرافیا و توسعه ناحیه‌ای. ۱۲: ۸۳-۹۸.
۸. صالح‌نیا ن.، موسوی بایگی م. و انصاری ح. ۱۳۹۲. پیش‌بینی خشک‌سالی با استفاده از نمایه PDSI به کمک مدل‌های LARS-WG و HadCM3 (مطالعه موردی: حوضه نیشابور). مجله آبیاری و زهکشی ایران. ۷(۷): ۹۳-۱۰۳.
۹. گل‌محمدی م. و مساح بوانی ع. ۱۳۹۰. بررسی تغییرات شدت و دوره بازگشت خشک‌سالی حوضه قره‌سو در دوره‌های آبی تحت تأثیر تغییر اقلیم. نشریه آب و خاک. ۲۵: ۳۱۵-۳۲۶.
۱۰. نصیری ب. و یارمرادی ز. ۱۳۹۶. پیش‌بینی تغییرات پارامترهای اقلیمی استان لرستان در ۵۰ سال آبی با استفاده از مدل HADCM3. اطلاعات جغرافیایی (سپهر). ۱۰۱: ۱۴۳-۱۵۴.
11. Barrow E. and Yu G. 2005. Climate scenarios for Alberta. A report prepared for the Prairie Adaptation Research Collaborative (PARC) in co-operation with Alberta Environment. Alberta Environment, Regina, Saskatchewan. 73 p.
12. Beecham S. Rashid M. and 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): 3654-3670.
13. Dascălu S. I. Gothard M. Bojariu R. Birsan M. V. Cică R. Vintilă R. Adler M. J. Chendeş V. and Mic R. P. 2016. Drought-related variables over the Bârlad basin

25. Vrochidou A. E. Tsanis I. K. Grillakis M. G. and Koutroulis A. 2013. The impact of climate change on hydrometeorological droughts at a basin scale. *Journal of Hydrology*. 476: 290-301.
- (Eastern Romania) under climate change scenarios. *Catena*. 141: 92-99.
14. Farzaneh M. R. Eslamian S. Samadi S. Z. and Akbarpour A. 2012. An appropriate general circulation model (GCM) to investigate climate change impact. *International Journal of Hydrology Science and Technology*. 2(1): 34-47.
15. Hayes M. J. Svoboda M. D. Wihite D. A. and Vanyarkho O. V. 1999. Monitoring the 1996 drought using the standardized precipitation index. *Bulletin of the American meteorological society*. 80(3): 429-438.
16. Hewitson B. C. and Crane R. G. 2006. Consensus between GCM climate change projections with empirical downscaling: precipitation downscaling over South Africa. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*. 26(10): 1315-1337.
17. IPCC 2007. Climate change 2007: the physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University, Cambridge, UK. 996 p.
18. Kilsby C. G. Jones P. D. Burton A. Ford A. C. Fowler H. J. Harpham C. James P. Smith A. and Wilby R. L. 2007. A daily weather generator for use in climate change studies. *Environmental Modelling & Software*. 22(12): 1705-1719.
19. Li B. Su H. Chen F. Wu J. and Qi J. 2013. The changing characteristics of drought in China from 1982 to 2005. *Natural hazards*. 68(2): 723-743.
20. Loukas A. Vasiliades L. and Tzabiras J. 2008. Climate change effects on drought severity. *Advances in Geosciences*. 17: 23-29.
21. McKee Thomas B. Drought monitoring with multiple time scales." In *Proceedings of 9th Conference on Applied Climatology*, Boston, 1995.
22. Oguntunde P. G. Abiodun B. J. and Lischeid G. 2017. Impacts of climate change on hydro-meteorological drought over the Volta Basin, West Africa. *Global and Planetary Change*. 155: 121-132.
23. Samadi S. Z. Sagareswar G. and Tajiki M. 2010. Comparison of general circulation models: methodology for selecting the best GCM in Kermanshah Synoptic Station, Iran. *International Journal of Global Warming*. 2(4): 347-365.
24. 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): 1-14.