

بررسی کارایی مدل ریزمقیاس‌نمایی آماری (SDSM) در شبیه‌سازی و پیش‌بینی پارامترهای اقلیمی (مطالعه موردی: ایستگاه سینوپتیک کرج)

حسین یوسفی^{۱*}، لیلی امینی^۲، لیلا قاسمی^۲، نسیمه امرایی^۲

۱. دانشیار دانشکده علوم و فنون نوین، دانشگاه تهران

۲. دانشجوی کارشناسی ارشد اکوهیدرولوژی، دانشکده علوم و فنون نوین، دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت ۱۳۹۶/۱۰/۱۵؛ تاریخ تصویب ۱۳۹۷/۰۲/۰۴)

چکیده

افزایش جمعیت جهان، استفاده بیش از حد از سوخت‌های فسیلی، تغییر کاربری اراضی، گسترش روزافزون فعالیت‌های صنعتی برای تأمین رفاه و نیازهای جمعیت کره زمین، موجب شده است تا پس از انقلاب صنعتی به تدریج تغییرات مشهودی در اقلیم کره زمین به وجود آید که بارزترین آن افزایش متوسط دمای کره زمین و تبعات آن است. برای بررسی سیستم‌های اقلیمی در مقیاس‌های جهانی از مدل‌هایی با عنوان GCM استفاده می‌شود؛ این مدل‌ها، رفتار فیزیکی سیستم زمین، جو و اقیانوس را به شکل ریاضی شبیه‌سازی می‌کنند. در پژوهش حاضر برای ریزمقیاس‌نمایی و بررسی تغییرات اقلیم در منطقه کرج، از مدل SDSM استفاده شد. نتایج معیارهای آماری ارزیابی کارایی مدل رگرسیون خطی چندمتغیره نشان داد توانایی این مدل در شبیه‌سازی بارندگی و دما ایستگاه کرج نسبتاً قابل قبول و با داده‌های مشاهداتی مطابقت دارد. نتایج شبیه‌سازی، به‌طور متوسط در سناریوی A2، در دوره‌های اول (۱۹۹۹-۲۰۲۰)، دوم (۲۰۲۱-۲۰۵۰) و سوم (۲۰۵۱-۲۰۸۰) درباره بارندگی به ترتیب حدود ۰/۱، ۰/۱ و ۰/۲ میلی‌متر نسبت به دوره پایه کاهش و در مورد دما به ترتیب حدود ۰/۱، ۰/۴ و ۰/۲ سانتی‌گراد نسبت به دوره پایه افزایش را نشان می‌دهد. تحت سناریوی B2 در دوره‌های زمانی یادشده درباره بارندگی به ترتیب حدود صفر، ۰/۱ و ۰/۲ میلی‌متر کاهش و در مورد دما به ترتیب حدود ۰/۲، ۰/۱ و ۰/۱ سانتی‌گراد نسبت به دوره پایه افزایش را نشان می‌دهد. تغییرات در میزان بارندگی، سبب ایجاد تغییرات مهمی در کیفیت و کمیت منابع آب خواهد شد که نیاز به برنامه‌ریزی برای بهره‌برداری بهتر از منابع آب را نشان می‌دهد.

کلیدواژگان: تغییر اقلیم، ریزمقیاس‌نمایی، سناریوهای اقلیمی، شبیه‌سازی، مدل SDSM.

مقدمه

از تشدید ناهنجاری‌های مثبت و افزایشی دمای کره زمین، با عنوان «گرمایش جهانی» یاد می‌شود. گرمایش جهانی و ارتباط معنادار تغییرات دما و بارش نقاط مختلف دنیا، به‌عنوان مهم‌ترین نمودهای تغییر اقلیم در خور توجه‌اند [۱]. تغییرات آب و هوایی و یا تغییر اقلیم یعنی هر تغییر مشخص در الگوهای مورد انتظار برای وضعیت میانگین آب و هوایی، که در طولانی‌مدت در یک منطقه خاص یا برای کل اقلیم جهانی، رخ بدهد. تغییر اقلیم نشان‌دهنده تغییرات غیرعادی در اقلیم درون اتمسفر زمین و پیامدهای ناشی از آن در قسمت‌های مختلف کره زمین است. تغییر اقلیم پدیده‌ای است که در نتیجه فاکتورهای همچون فرایندهای دینامیکی زمین و یا عوامل بیرونی همچون تغییرات در شدت تابش آفتاب و یا فعالیت‌های انسانی رخ می‌دهد. عوامل خارجی تأثیرگذار بر اقلیم را اغلب نیروهای اقلیمی می‌نامند و شامل فرایندهایی همچون نوسانات در شدت نور خورشید، انحراف در مسیر حرکت زمین و افزایش غلظت گازهای گلخانه‌ای می‌شود. بازخوردهای ناشی از تغییر اقلیم متغیر بوده و ممکن است سبب افزایش یا کاهش این عوامل درونی شوند. بسیاری از تغییرات درونی در سیستم‌های اقلیمی با تأخیر رخ می‌دهند؛ زیرا سیستم اقلیمی کره زمین بسیار بزرگ است و به‌کندی حرکت می‌کند و به ورودی‌ها با تأخیر پاسخ می‌دهد. برای مثال، یک سال خشک‌سالی فقط سبب کاهش آرام سطح دریاچه‌ها یا خشک‌شدن حاشیه زمین‌های هموار می‌شود.

افزایش جمعیت جهان، استفاده بیش از حد از سوخت‌های فسیلی، تغییر کاربری اراضی، گسترش روزافزون فعالیت‌های صنعتی برای تأمین رفاه و نیازهای جمعیت کره زمین، موجب شده است تا پس از انقلاب صنعتی به تدریج تغییرات مشهودی در اقلیم کره زمین به وجود آید که بارزترین آن افزایش متوسط دمای کره زمین، افزایش پدیده‌های حدی اقلیمی نظیر سیل، توفان، تگرگ، توفان‌های حاره‌ای، امواج گرمایی، افزایش سطح آب دریاها، ذوب‌شدن یخ‌های قطبی و خشک‌سالی است. افزایش این رخدادها در سال‌های اخیر به دغدغه اصلی اقلیم‌شناسان و سران کشورهای جهان تبدیل شده است [۲]. برای بررسی سیستم‌های اقلیمی در مقیاس‌های جهانی از مدل‌هایی با

عنوان GCM استفاده می‌شود که این مدل‌ها، رفتار فیزیکی سیستم زمین، جو و اقیانوس را به شکل ریاضی شبیه‌سازی می‌کنند [۳].

با استفاده از روش‌های ریزمقیاس‌نمایی، خروجی‌های GCM به متغیرهای سطحی در حوضه مطالعه شده تبدیل می‌شود. ریزمقیاس کردن به‌عنوان یک عامل ایجادکننده ارتباط میان چرخه‌های بزرگ‌مقیاس (پیش‌بینی‌کننده‌ها) و متغیرهای اقلیمی در مقیاس محلی (پیش‌بینی‌شونده‌ها) تعریف شده است. در سال‌های اخیر از میان چهار دسته کلی روش‌های ریزمقیاس‌سازی (ریزمقیاس‌سازی دینامیکی، دسته‌بندی سینوپتیکی، ایجاد آب و هوا به روش تصادفی و روش‌های آماری)، ریزمقیاس‌سازی آماری، بیشتر از سایر روش‌ها مورد توجه محققان قرار گرفته است. این گروه از روش‌های ریزمقیاس‌سازی که مدل SDSM را نیز شامل می‌شود، کاهش مقیاس را مبتنی بر سابقه آماری پیشگوهای بزرگ‌مقیاس و پیش‌بینی‌شونده‌های موضعی پایه‌ریزی می‌کند [۱]. در ادامه، تحقیقاتی که در زمینه مطالعات تغییر اقلیم انجام شده است، بررسی شده‌اند.

یعقوبی و همکارانش در تحقیقی به مقایسه و ارزیابی منابع مختلف عدم قطعیت در مطالعه اثر تغییر اقلیم بر رواناب حوضه‌های نیمه‌خشک تحت سناریوهای B1، A2 و A1B در حوضه رودخانه اعظم-هرات یزد پرداختند. نتایج پژوهش آنها نشان می‌دهد طبق هر سه سناریو، دمای منطقه در دوره آتی، افزایشی تا ۲/۱ درجه سلسیوس خواهد داشت و میزان بارش و توزیع زمانی آن تغییر می‌کند. روش ریزمقیاس‌نمایی آماری مزایای بیشتری در مقایسه با ریزمقیاس‌نمایی دینامیکی دارد. در روش ریزمقیاس‌نمایی آماری، پیش‌بینی واقعی‌تر و منطقی‌تر بر اساس رابطه آماری صورت می‌گیرد و اجرای آن نیز آسان است [۵].

سیاوش طائی سمیرمی و همکارانش [۶] در یک پژوهش، مدل آماری (SDSM) را در شبیه‌سازی و پیش‌بینی دمای بیشینه؛ کمینه و بارش در حوضه آبخیز بار نیشابور با استفاده از دو روش آماری و ترسیمی ارزیابی کردند. برای اجرای مدل SDSM از خروجی‌های مدل HadCM3 و CGCM1 استفاده شد. نتایج تحقیق آنها نشان داد در سه دوره مطالعه شده بارش متوسط به اندازه ۶، ۱۰ و ۱۷ میلی‌متر نسبت به دوره پایه کاهش می‌یابد. مریم رضایی و همکارانش [۲]، پژوهشی به‌منظور بررسی

کالیبره‌شده SDSM نیز نشان داد دما مدام در منطقه در حال افزایش است، ولی وضعیت بارش در آینده بسیار پیچیده و نامشخص است.

کامیله گارناود و لامیکس سوشاما [۱۲] پژوهشی به‌منظور بررسی تغییرات مؤلفه‌های پوشش گیاهی و تعاملات آنها با اتمسفر تحت شرایط اقلیمی آینده آمریکای شمالی و با استفاده از شبیه‌ساز تغییر اقلیم (CRCM5) انجام دادند. نتایج پژوهش آنها به‌وضوح نشان‌دهنده پویایی فنولوژی و تعدیل گازهای گلخانه‌ای به‌واسطه گرم‌شدن کره زمین و از طریق بازخوردهای مختلف بیولوژیکی است. وترهال و همکارانش [۱۳] روی تکنیک ریزمقیاس‌نمایی بارش روزانه در سه منطقه چین پرداختند و نتیجه گرفتند که پیش‌بینی در مناطق نزدیک به ساحل و فصل زمستان بهتر انجام می‌شود و روش MOFRBC و SDSM بهتر از روش‌های آنالوگ است و اگر تغییرات رطوبت سالانه به مدل‌ها اضافه شود، نتایج بهتر می‌شوند. ویلی و همکارانش [۱۴] در مطالعه‌ای به مقایسه خروجی مدل‌های گردش عمومی ریزمقیاس‌نمایی آماری پرداختند. نتایج پژوهش آنها نشان می‌داد روش شبکه عصبی مصنوعی برای شبیه‌سازی آمار وقوع بارش روزانه کافی نیست و تغییرات در میزان بارش در بین سناریوهای حال و آینده تولیدشده توسط روش‌های ریزمقیاس‌نمایی آماری (SDSM) معمولاً کمتر به‌صورت مستقیم توسط مدل گردش عمومی (GCM) تولید می‌شود.

دیپیک و کولیبالی [۱۵] با دو نوع تکنیک ریزمقیاس‌نمایی آماری (رگرسیون و اعداد تصادفی) متغیرهای هواشناسی بارندگی و دما را در کانادا پیش‌بینی کردند. سری‌های زمانی ای که با استفاده از این دو روش به دست آمد، افزایش در مقادیر میانگین بارندگی و دما را نشان دادند، ولی با استفاده از اعداد تصادفی، در میزان بارندگی افزایش معناداری مشاهده نشد. زی‌هاشمی و همکارانش [۱۶] مقایسه‌ای بین مدل‌های LARS-WG و SDSM برای شبیه‌سازی و ریزمقیاس‌نمایی رگبار در حوضه آبخیز جنوب نیوزیلند انجام دادند. نتایج پژوهش آنها نشان داد هر دو مدل در شبیه‌سازی و پیش‌بینی پارامترهای اقلیمی توانمندند.

با توجه به اهمیت افزایش دما در چگونگی زندگی و فعالیت‌های بشری، و نیز تغییرات بارندگی برای درک ماهیت پیچیده جو و پیش‌بینی تغییرات آنها در آینده، باید

کارایی مدل ریزمقیاس‌نمایی آماری (SDSM) در پیش‌بینی پارامترهای دمایی انجام دادند. معیارهای آماری ارزیابی کارایی مدل مانند میانگین خطای مطلق، مجذور میانگین مربعات خطا، ضریب ناش-ساتکلیف و تحلیل نتایج خروجی مدل HadCM3، نشان داد این مدل در منطقه خشک، نسبت به منطقه فراهشک کارایی بیشتر و دقت قابل قبولی برای پیش‌بینی دما دارد.

سیاری و همکارانش [۷] در حوضه کشف‌رود برای پیش‌بینی دما از مدل HadCM3 استفاده کردند. نتایج پژوهش نشان می‌داد دمای بیشینه و کمینه ماهانه، افزایش خواهد یافت. توکل دوانی و همکارانش [۸]، با استفاده از مدل SDSM و روش داده‌کاوی، ریزمقیاس‌نمایی آماری بارش روزانه در حوضه سفیدرود را انجام دادند و نتیجه گرفتند که در بین مدل‌های داده‌کاوی، روش مدل درختی داده‌های بارندگی روزانه را بهتر از دو مدل دیگر آماده می‌کند و پتانسیل زیادی برای شناسایی و استخراج اطلاعات اقلیمی را دارد و برای ریزمقیاس‌نمایی و کالیبراسیون روش SDSM در مناطق خشک و فراهشک فقط داده‌های بارندگی کافی نیست. در مطالعه سادات آشفته و مساح [۹] مقادیر دما و بارش ماهانه مدل HadCM3 تحت سناریوی A2 برای حوضه آیدوغموش آذربایجان غربی به روش تناسبی، ریزمقیاس شد. نتایج نشان‌دهنده افزایش دما به میزان ۱/۵ تا ۴ درجه و تغییرات ۳۰ تا ۴۰ درصدی بارش دوره آبی نسبت به دوره پایه است.

موندال و همکارانش [۱۰] تغییرات بارش را در گذشته و آینده با توجه به تغییرات آب و هوایی در بخش مرکزی هند، بررسی کردند. نتایج تحقیق آنها نشان می‌دهد در سال ۲۰۲۰، تغییرات در میزان بارش، از ۳۱/۹۱- تا ۲۴/۱۲ درصد و در سال ۲۰۵۰، از ۱۸/۸۲- تا ۷۵/۴۸ درصد خواهد بود. یوکینگ ژانگ و همکارانش [۱۱] برای ارزیابی جریان رودخانه در حوضه رودخانه شین در کشور چین، ابزار ارزیابی آب و خاک (SWAT) و روش ریزمقیاس‌نمایی آماری را ادغام کردند. کاربرد آنها بر اساس سناریوهای تغییر اقلیم ریزمقیاس‌نمایی (BCC-CSM1.1, CanESM2, and NorESM1-M) تحت سه مؤلفه RCPs بود. نتایج پژوهش آنها نشان داد مدل SWAT کالیبره‌شده می‌تواند جزئیات فرایندهای هیدرولوژیکی ماهانه و روزانه را با دقت بیشتری نشان دهد و مقیاس‌های سالانه

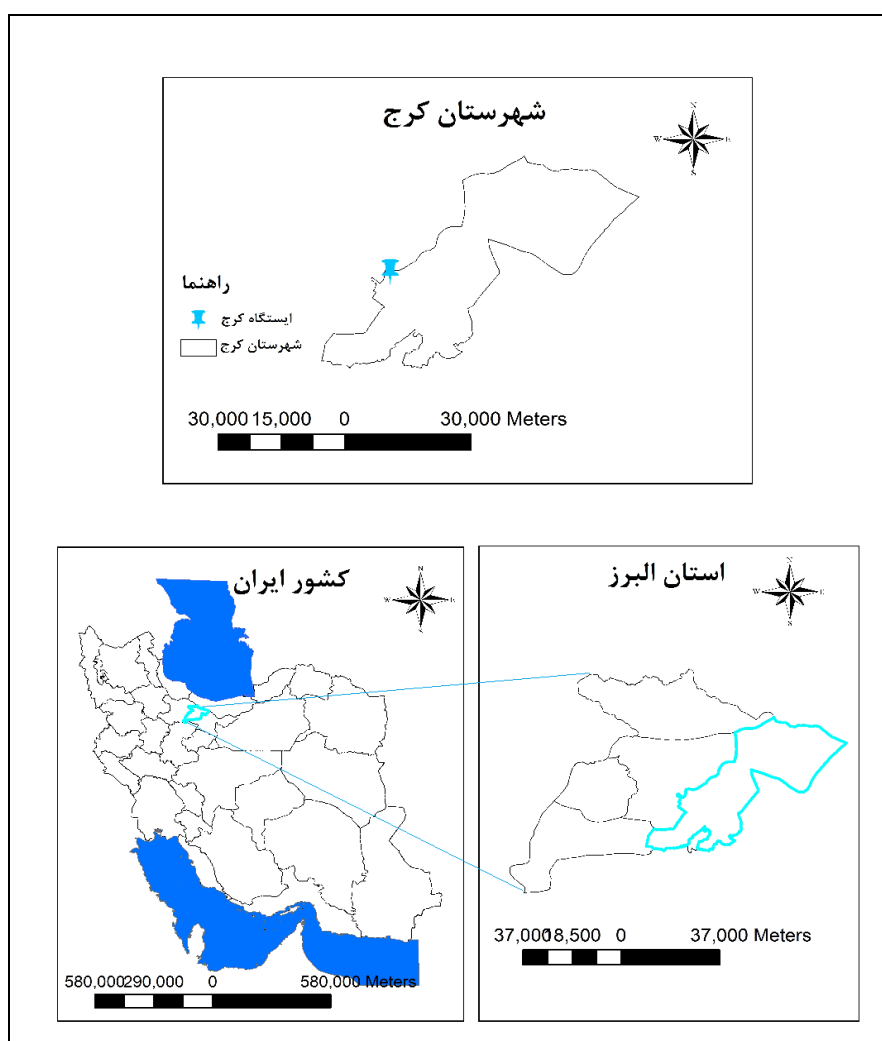
بارندگی در ایستگاه سینوپتیک کرج صورت گرفته است (شکل ۱). این ایستگاه در موقعیت طول جغرافیایی ۵۰ درجه و ۵۶ دقیقه و عرض جغرافیایی ۳۵ درجه و ۴۶ دقیقه قرار دارد و ارتفاع از سطح دریا در این ایستگاه، ۱۳۰۰ متر است. ایستگاه کرج دارای بارش سالانه بین ۲۴۸-۲۵۰ میلی‌متر و متوسط دمای سالانه ۱۶ درجه سانتی‌گراد است و اقلیم نیمه‌خشک دارد. در جدول ۱ خصوصیات آماری داده‌های استفاده شده در پژوهش حاضر ارائه شده است.

این تغییرات را مدل‌سازی کرد. در پژوهش حاضر اثر فرایند تغییر اقلیم بر روند تغییرات پارامترهای اقلیمی بارندگی و دما در منطقه کرج با استفاده از مدل ریزمقیاس‌نمایی SDSM بررسی شده است. در منطقه یادشده تا کنون مطالعه‌ای در این زمینه و با استفاده از مدل یادشده صورت نگرفته است.

مواد و روش

منطقه مطالعه‌شده و داده‌های استفاده‌شده

پژوهش حاضر با هدف بررسی پارامترهای اقلیمی دما و



شکل ۱. موقعیت منطقه مطالعه‌شده در استان البرز و ایران

جدول ۱. خصوصیات آماری منطقه مطالعه‌شده

ضریب تغییرات	انحراف معیار	مینیمم	ماکزیمم	میانگین	خصوصیت آماری پارامتر
۰/۳	۴/۳	۱۲/۶	۲۵/۱	۱۸/۴	دما
۰/۳	۴/۶	۲/۱	۳۷	۲۰/۷	بارش

روش تحقیق

از اطلاعاتی که برای انجام پژوهش حاضر استفاده شده است می‌توان به داده‌های روزانه بارش و دما اشاره کرد. این اطلاعات از ایستگاه سینوپتیک کرج تهیه شده‌اند. پس از جمع‌آوری اطلاعات مورد نیاز، صحت داده‌ها در محیط نرم‌افزار SPSS بررسی شد. در تحقیق حاضر به‌منظور تعیین مدل GMS و سناریوی مناسب، که شرایطی مشابه با شرایط ایستگاه داشته باشد، مدل Hadcm3 تحت سناریوهای A2 و B2 برای ایستگاه سینوپتیک کرج بررسی شد. مدل Hadcm3 با توجه به اینکه در مقالات پیشین کاربرد فراوانی داشته است، کارایی آن برای استفاده در ایران تأیید شده است. هر یک از سناریوهای یادشده شرایطی از اقلیم آینده را در اختیار کاربر قرار می‌دهد. در سناریوی A2، جهان به‌صورت ناهمگون با رشد مداوم جمعیت و رشد اقتصادی منطقه‌ای که بسیار پراکنده و کندتر از بقیه سناریوها است، توصیف شده است. در سناریوی B2، وضعیت جمعیت بر اساس نوع تکنولوژی با تأکید بر استفاده از انرژی‌های پاک و محیط زیست در قرن ۲۱ در نظر گرفته شده است. این سناریو بر پایداری اقتصادی محیط زیست و اقتصاد در سطح جهان تأکید دارد [۱۷].

دقت مدل Hadcm3 در ارزیابی آثار تغییر اقلیم روی منابع آب در بسیاری از مطالعات به اثبات رسیده است [۱۸]. به این ترتیب ابتدا مدل تحت سناریوهای مختلف، بر اساس پارامترهای آماری ارزیابی شد. سپس، سناریویی که دقت آماری بیشتری در منطقه مطالعه شده داشت، به‌عنوان سناریویی که با شرایط منطقه مطالعه شده شباهت بیشتری دارد (دقت آماری بیشتر)، انتخاب شد.

کوچک‌مقیاس کردن داده‌های اقلیمی

در نهایت، به‌منظور انتخاب مدل گردش عمومی جو و سناریوی مناسب، داده‌های ریزمقیاس‌سازی شده توسط مدل با داده‌های مشاهداتی ارزیابی شدند. برای بررسی عملکرد مدل‌ها و مقایسه آنها از دو روش ترسیمی و معیارهای آماری مرسوم PBIAS، NSE، MAE، RMSE و R^2 استفاده شده است. این معیارها بر اساس روابط ۱ تا ۵ محاسبه می‌شوند [۱۹].

$$PBIAS = \sum_{i=1}^n \frac{(O_i - S_i) * 100}{\sum_{i=1}^n O_i} \quad (1)$$

$$R^r = \left[\frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (S_i - S)(O_i - O)}{\sigma_s - \sigma_o} \right]^2 \quad (2)$$

$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (S_i - O_i)^2 \right]^{1/2} \quad (3)$$

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (S_i - O_i) \quad (4)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (5)$$

در روابط ۱ تا ۵، O_i داده‌های مشاهداتی، S_i داده‌های برآوردشده، \bar{O} و S میانگین داده‌های مشاهداتی و برآوردشده، δ واریانس است. مقادیر RMSE و MAE معرف دقت در بسیاری از روش‌های آماری‌اند. هرچه این مقادیر به صفر نزدیک‌تر باشد، نشان‌دهنده دقت زیاد مدل و مقدار صفر، نشان‌دهنده نبود خطا در برآورد مدل است. R^2 بیان‌کننده ارتباط داده‌های مشاهداتی و برآوردشده است. دامنه این پارامتر بین صفر تا یک است؛ هر چه این مقدار به یک نزدیک‌تر باشد، نشان‌دهنده ارتباط قوی بین دو گروه است. دامنه ضریب NSE بین منفی بی‌نهایت تا یک است؛ دامنه بین صفر تا یک قابل قبول و بهترین حالت زمانی است که ضریب NSE برابر یک باشد. مقدار PBIAS هرچه به صفر نزدیک‌تر باشد، نشان‌دهنده دقت بیشتر مدل در برآورد متغیر مد نظر است. در صورتی که مقدار پارامتر PBIAS به سمت مثبت میل کند، نشان‌دهنده مقدار کمتر برآوردشده متغیر نسبت به مقدار واقعی برآوردی و اگر به سمت منفی میل کند، نشان‌دهنده مقدار بیشتر برآوردشده متغیر نسبت به مقدار واقعی برآوردشده است. برای پارامتر PBIAS آستانه خاصی در نظر گرفته نشده است [۱۴].

مدل SDSM

SDSM یک روش نمونه‌برداری دوشرطی و دومرحله‌ای است. این روش ابتدا متغیر پیش‌بینی‌کننده (مانند دما و بارش) را با استفاده از روش‌های رگرسیونی ترکیبی و یک روش مولد هواشناسی تصادفی کوچک‌مقیاس کرده و در مرحله بعد بارش در محل ایستگاه دوباره تولید می‌شود. در واقع، SDSM ترکیبی از روش مولد هواشناسی آماری و توابع تغییر شکل یافته است. نرم‌افزار SDSM

شدند. با معرفی این داده‌ها به مدل SDSM، بارش و دمای متوسط تحت سناریوهای A2 و B2 برای منطقه مطالعه شده کوچک مقیاس شد؛ ابتدا به کمک پیش‌بینی‌کننده‌های منتخب متغیرهای بررسی شده برای دوره پایه شبیه‌سازی شدند. سپس، این متغیرها تحت سناریوهای A2 و B2 برای دوره‌های ۱۹۹۱-۲۰۲۰ (دوره اول)، ۲۰۲۱-۲۰۵۰ (دوره دوم) و ۲۰۵۱-۲۰۸۰ (دوره سوم) میلادی پیش‌بینی شد و تغییرات هر متغیر در سناریوهای مختلف نسبت به دوره پایه بررسی شد [۶].

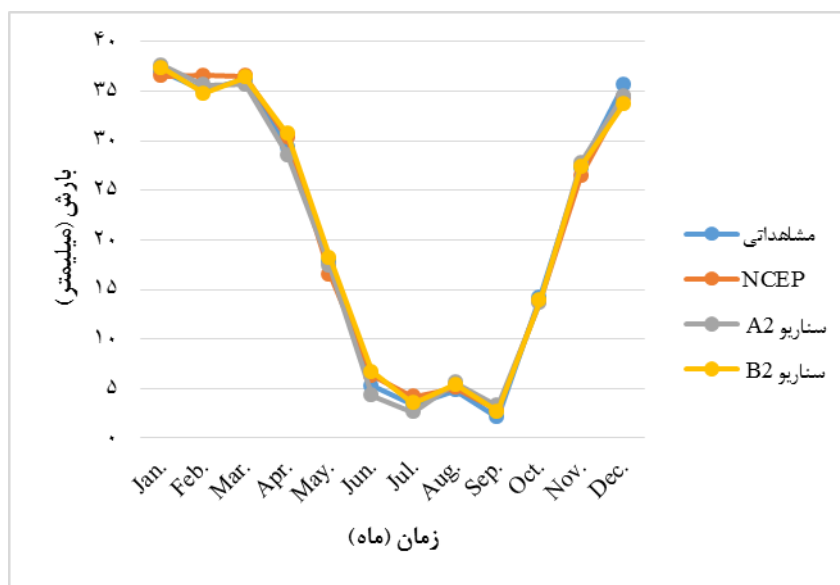
بحث و نتایج

بعد از واسنجی مدل با استفاده از داده‌های NCEP، متغیر بارش و دمای ماهانه برای منطقه مطالعه شده کرج از طریق مدل SDSM و داده‌های شبیه‌سازی شده، محاسبه شده و با داده‌های مشاهداتی مقایسه شدند و سپس از طریق روش‌های آماری، مقادیر معیارهای آماری محاسبه شد (جدول ۲). در شکل ۲، میزان بارندگی ماهانه مشاهداتی دوره پایه برای ایستگاه کرج با مقادیر بارندگی ماهانه شبیه‌سازی شده توسط سناریوهای A2، B2 و NCEP مقایسه شده است و نتایج به دست آمده توسط این سه سناریو در دو دوره واسنجی، دقت زیادی دارد. در شکل ۳ نیز این مقایسه برای دمای ماهانه صورت گرفته است.

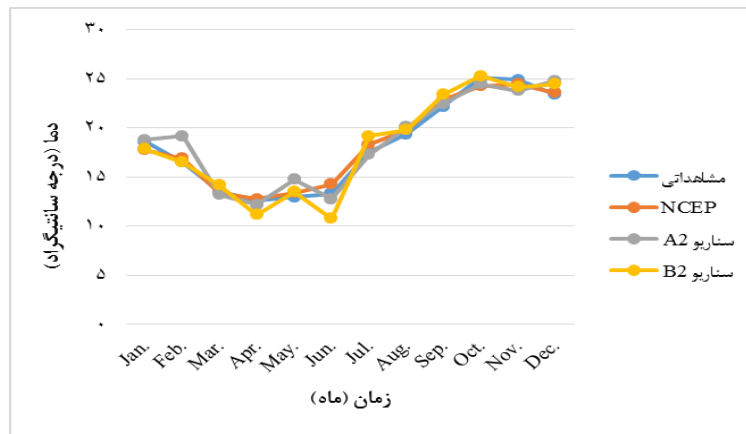
کوچک مقیاس کردن آماری متغیرهای اقلیمی روزانه را طی مراحل زیر انجام می‌دهد:

۱. کنترل کیفیت داده‌ها و تغییر شکل داده‌ها؛
۲. انتخاب بهترین متغیرهای پیش‌بینی‌کننده؛
۳. کالیبره کردن مدل؛
۴. تولید مدل هواشناسی (با استفاده از پیش‌بینی‌کننده مشاهده‌ای)؛
۵. آنالیز آماری؛
۶. خروجی گرافیکی مدل؛
۷. تولید سناریوی اقلیمی (با استفاده از پیش‌بینی‌کننده‌های اقلیمی مدل).

تمامی مراحل یادشده توسط گزینه‌های تعبیه شده در محیط نرم‌افزار SDSM انجام می‌شود. انتخاب پیش‌بینی‌کننده‌ها نرم‌افزار SDSM در واقع بین سری مشاهداتی روزانه منطقه و متغیرهای بزرگ مقیاس مشاهداتی منطقه (NCEP) رابطه‌ای با بیشترین ضریب همبستگی برقرار کرده [۱۵] و سپس با استفاده از پارامترهای به دست آمده از این رابطه، با به کارگیری متغیرهای بزرگ مقیاس حاصل از مدل HadCM3 و سناریوهای مختلف در دوره آتی سری زمانی بارندگی و دمای روزانه منطقه را تولید می‌کند. در پژوهش حاضر، داده‌های بزرگ مقیاس از داده‌های شبیه‌سازی توسط مدل HadCM3 برای دوره ۱۹۶۱-۱۹۹۰ استخراج



شکل ۲. مقایسه بارش ماهانه مشاهداتی و شبیه‌سازی شده توسط مدل در دو دوره واسنجی ایستگاه کرج



شکل ۳. مقایسه دمای ماهانه مشاهداتی و شبیه‌سازی شده توسط مدل در دو دوره واسنجی ایستگاه کرج

جدول ۲. محاسبه معیارهای آماری ارزیابی کارایی مدل (دوره آماری ۱۹۶۱-۲۰۰۱ میلادی)

متغیر	SDSM				
	PBIAS	NSE	R ²	RMSE	MAE
بارش	-۰/۵	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۳	۰/۲۱
دما	-۰/۵۶	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۵۲	۰/۱۳

با استفاده از پارامترهای بزرگ‌مقیاس مشاهداتی NCEP و نرم‌افزار SDSM به انتخاب پیش‌بینی‌کننده‌های منتخب پارامترهای اقلیمی مورد نیاز پرداخته شد. به این منظور، از بین ۲۶ پارامتر بزرگ‌مقیاس NCEP و توابع مختلف آنها، شش پارامتر نهایی بزرگ‌مقیاس، برای متغیرهای اقلیمی مد نظر انتخاب شد. نتایج پیش‌بینی‌کننده‌های منتخب نهایی در جدول ۳ ارائه شده است.

با توجه به نتایج جدول ۳ مشخص است که داده‌های دما در مقایسه با داده‌های بارندگی، همبستگی بهتری با داده‌های مشاهداتی داشته‌اند. به این علت که تغییرات دما یک متغیر پیوسته است و نسبت به بارندگی تغییرات کمتر را می‌پذیرد و کمتر تحت تأثیر ناهنجاری‌های زمانی قرار می‌گیرد. از سوی دیگر، بارش یک پارامتر گسسته است و تحت تأثیر عوامل مختلفی در حوضه قرار می‌گیرد.

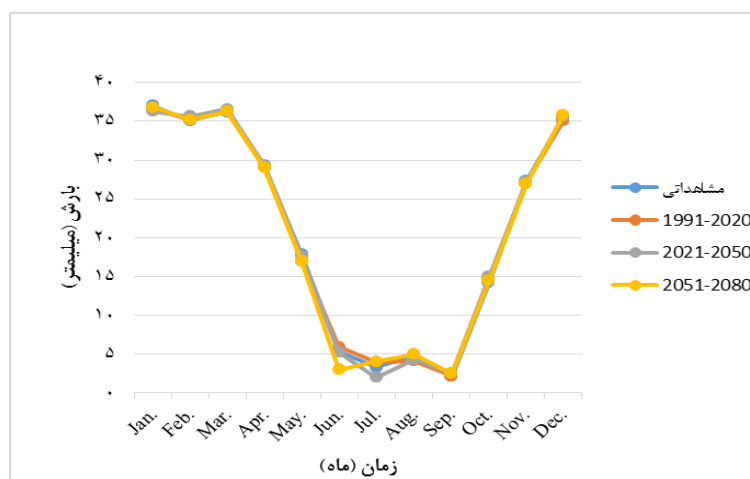
بارندگی و دمای ماهانه برآوردی ایستگاه کرج در دوره پایه و آینده در شکل‌های ۴ تا ۷ نشان داده شده است. به‌طور متوسط در سناریوی A2، در دوره‌های اول، دوم و سوم درباره بارندگی به ترتیب حدود ۰/۱، ۰/۱، ۰/۲ میلی‌متر نسبت به دوره پایه کاهش (شکل ۴) و درباره دما به ترتیب حدود ۰/۱، ۰/۴ و ۰/۲ سانتی‌گراد نسبت به دوره پایه افزایش را نشان می‌دهد (شکل ۵). تحت سناریوی B2 در دوره‌های زمانی یادشده درباره بارندگی به ترتیب حدود صفر، ۰/۱ و ۰/۲

در جدول ۲ معیارهای آماری ارزیابی مدل (دوره آماری ۱۹۶۱-۲۰۰۱ میلادی) ارائه شده است. مقادیر RMSE و MAE معرف دقت در بسیاری از روش‌های آماری اند. هر چه این مقادیر به صفر نزدیک‌تر باشند، خطا در برآورد مدل کمتر است که در اینجا مقادیر MAE ۰/۲۱ و ۰/۱۳ مقادیر RMSE ۰/۹۳ و ۰/۵۲ قابل قبولی هستند. R² بیان‌کننده ارتباط داده‌های مشاهداتی و برآوردشده است و هر چه به یک نزدیک‌تر باشد، نشان‌دهنده ارتباط قوی بین این دو گروه است، مقدار R² برابر ۰/۹۹ برای هر دو عامل دما و بارش عدد بسیار مناسبی است. NSE ضریبی برای ارزیابی هیدرولوژیکی مدل است، دامنه بین صفر تا یک قابل قبول و بهترین حالت زمانی است که ضریب NSE برابر یک باشد. در اینجا این ضریب برابر با ۰/۹۹ به دست آمده است که تقریباً برابر با بهترین حالت است. مقدار PBIAS هرچه به صفر نزدیک‌تر باشد، نشان‌دهنده دقت بیشتر مدل در برآورد متغیر مد نظر است. در صورتی که مقدار پارامتر PBIAS به سمت مثبت میل کند، نشان‌دهنده مقدار کمتر برآوردشده متغیر نسبت به مقدار واقعی برآوردی و اگر به سمت منفی میل کند، نشان‌دهنده مقدار بیشتر برآوردشده متغیر نسبت به مقدار واقعی برآوردشده است. در این مدل مقدار PBIAS به منفی میل کرده است، یعنی مقدار بیشتر برآوردشده متغیر نسبت به مقدار واقعی برآوردشده است.

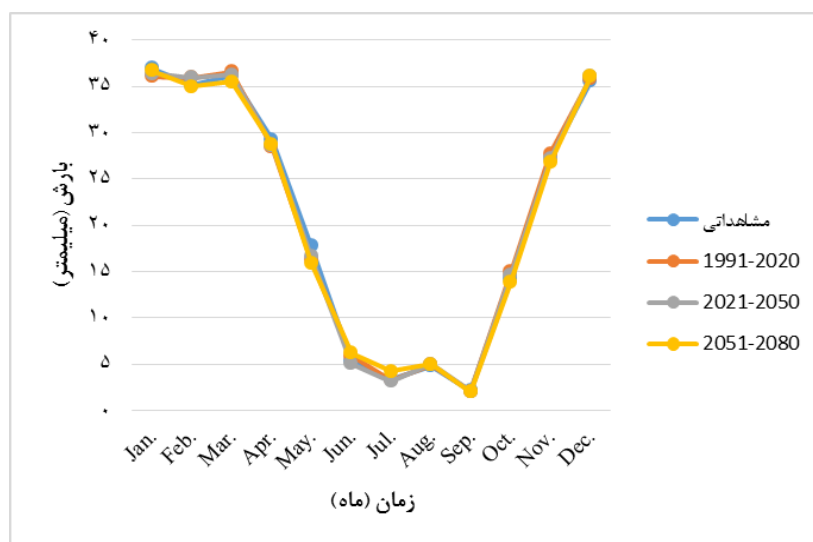
میلی‌متر کاهش (شکل ۶) و درباره دما به ترتیب حدود ۰/۲، می‌دهد (شکل ۷). تغییرات بارندگی و دما ایستگاه سینوپتیک کرج در جدول‌های ۴ و ۵ ارائه شده است.

جدول ۳. پیش‌بینی‌کننده‌های منتخب برای کوچک‌مقیاس‌نمایی آماری دما و بارش روزانه ایستگاه کرج

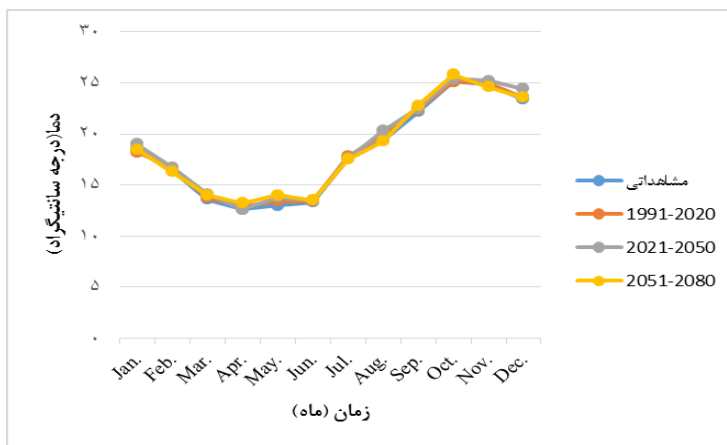
متغیر	پیش‌بینی‌کننده‌های منتخب	پیش‌بینی‌کننده‌های منتخب	همبستگی جزئی
بارش	500hPa Wind Direction	جهت باد در 500hPa	۰/۰۹
	Mean Temperature at 2m	میانگین دما در ارتفاع دو متری	۰/۰۸
	850hPa Wind Direction	جهت باد در 850 hPa	۰/۰۹
	Mean Sea Level Pressure	فشار متوسط سطح دریا	۰/۷۵
دما	850hPa Zonal Velocity	سرعت‌مداری در 850 hPa	۰/۰۶
	Near surface relative humidity	رطوبت نسبی سطح	۰/۵۸



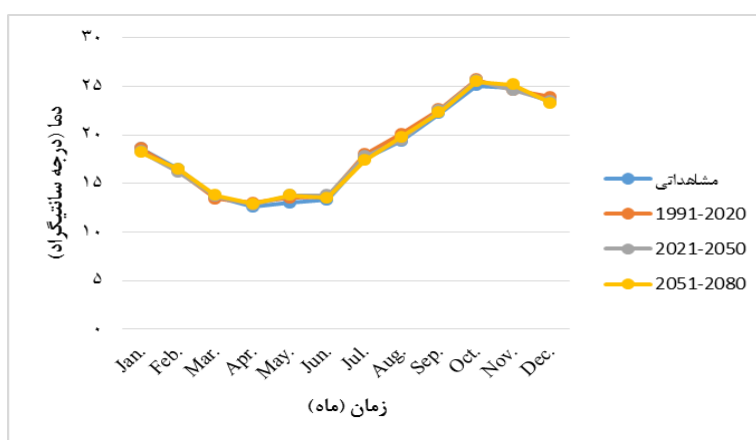
شکل ۴. مقایسه میزان بارش مشاهداتی و شبیه‌سازی‌شده دوره‌های آبی ایستگاه کرج توسط سناریوی A2



شکل ۵. مقایسه میزان بارش مشاهداتی و شبیه‌سازی‌شده دوره‌های آبی ایستگاه کرج توسط سناریوی B2



شکل ۶. مقایسه میزان دمای مشاهداتی و شبیه‌سازی‌شده دوره‌های آبی ایستگاه کرج توسط سناریوی A2



شکل ۷. مقایسه میزان دمای مشاهداتی و شبیه‌سازی‌شده دوره‌های آبی ایستگاه کرج توسط سناریوی B2

جدول ۴. تغییرات بارش ایستگاه سینوپتیک کرج در دوره آبی (پیش‌بینی‌شده تحت سناریوهای A2 و B2)

۲۰۸۰-۲۰۵۱		۲۰۵۰-۲۰۲۰		۲۰۲۰-۱۹۹۱		۱۹۹۰-۱۹۶۱	
B2	A2	B2	A2	B2	A2	مشاهداتی	ماه
۳۶/۷	۳۶/۹	۳۶/۴	۳۶/۳	۳۶/۱	۳۶/۶	۳۷	ژانویه
۳۵	۳۵/۲	۳۶	۳۵/۶	۳۶	۳۵/۱	۳۵/۱	فوریه
۳۵/۵	۳۶/۳	۳۶/۳	۳۶/۶	۳۶/۶	۳۶/۳	۳۶/۲	مارس
۲۹/۴	۲۹/۱	۲۸/۶	۲۹/۲	۲۸/۵	۲۹/۱	۲۹/۳	آوریل
۱۶/۳	۱۷	۱۶/۶	۱۷/۶	۱۶/۳	۱۷	۱۷/۸	می
۵/۹	۵/۴	۵/۱	۵/۲	۵/۹	۵/۹	۵/۳	ژوئن
۴/۲	۴/۱	۳/۲	۳/۳	۳/۳	۳/۹	۳/۳	ژوئیه
۵	۵	۴/۵	۳/۴	۴/۹	۴/۱	۴/۸	اوت
۲	۵/۲	۲/۱	۲/۵	۲	۲/۲	۲/۱	سپتامبر
۱۴/۹	۱۴/۵	۱۴/۷	۱۵	۱۵	۱۴/۶	۱۴/۲	اکتبر
۲۶/۸	۲۷	۲۷/۲	۲۷/۲	۲۷/۷	۲۷/۱	۲۷/۳	نوامبر
۳۶/۱	۳۵/۹	۳۶/۱	۳۵/۶	۳۵/۹	۳۵/۱	۳۵/۶	دسامبر
۲۴۷/۷	۲۴۸/۶	۲۴۶/۶	۲۴۸/۲	۲۴۸/۲	۲۴۷/۴	۲۴۸	مجموع سالانه

جدول ۵. تغییرات دمای ایستگاه سینوپتیک کرج در دوره آبی (پیش‌بینی شده تحت سناریوهای A2 و B2)

۲۰۸۰-۲۰۵۱		۲۰۵۰-۲۰۲۱		۲۰۲۰-۱۹۹۱		دوره پایه ۱۹۹۰-۱۹۶۱	
B2	A2	B2	A2	B2	A2	مشاهداتی	ماه
۱۸/۲	۱۸/۵	۱۸/۳	۱۹	۱۸/۶	۱۸/۲	۱۸/۶	ژانویه
۱۶/۵	۱۶/۳	۱۶/۲	۱۶/۷	۱۶/۳	۱۶/۷	۱۶/۵	فوریه
۱۳/۸	۱۴	۱۳/۷	۱۴/۱	۱۳/۴	۱۳/۸	۱۳/۶	مارس
۱۲/۹	۱۳/۲	۱۲/۸	۱۲/۶	۱۳	۱۲/۹	۱۲/۶	آوریل
۱۳/۸	۱۴	۱۳/۸	۱۳/۸	۱۳/۵	۱۳/۴	۱۳	می
۱۳/۵	۱۳/۵	۱۳/۸	۱۳/۵	۱۳/۷	۱۳/۴	۱۳/۳	ژوئن
۱۷/۴	۱۷/۵	۱۷/۸	۱۷/۶	۱۸	۱۷/۸	۱۷/۶	ژوئیه
۱۹/۸	۱۹/۳	۱۹/۵	۲۰/۳	۲۰/۱	۱۹/۹	۱۹/۴	اوت
۲۲/۳	۲۲/۸	۲۲/۵	۲۲/۵	۲۲/۶	۲۲/۴	۲۲/۲	سپتامبر
۲۵/۵	۲۵/۸	۲۵/۶	۲۵/۴	۲۵/۷	۲۵/۱	۲۵/۱	اکتبر
۲۵/۲	۲۴/۶	۲۴/۶	۲۵/۲	۲۴/۶	۲۵	۲۴/۹	نوامبر
۲۳/۳	۲۳/۶	۲۳/۵	۲۴/۴	۲۳/۹	۲۳/۶	۲۳/۴	دسامبر
۱۸/۵	۱۸/۶	۱۸/۵	۱۸/۸	۱۸/۶	۱۸/۵	۱۸/۴	متوسط سالانه

نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر با استفاده از مدل SDSM متغیرهای اقلیمی دما و بارندگی در ایستگاه کرج شبیه‌سازی و پیش‌بینی شدند. روش‌های مختلفی برای ریزمقیاس کردن خروجی مدل‌های گردش عمومی جو وجود دارد که هر یک از منطق خاصی پیروی می‌کنند. از این‌رو، می‌توان انتظار داشت که استفاده از روش‌های مختلف، نتایج متفاوتی را به دنبال داشته باشد. یکی از دلایل مهم آن عدم قطعیت روش‌های مد نظر است، زیرا در مطالعات تغییر اقلیم، منابع عدم قطعیت مختلفی بر نتایج نهایی تأثیرگذار است. نتایج معیارهای آماری ارزیابی کارایی مدل رگرسیون خطی چندمتغیره نشان داد توانایی این مدل در شبیه‌سازی بارندگی و دما در ایستگاه کرج نسبتاً قابل قبول است و با داده‌های مشاهداتی مطابقت دارد. نتایج شبیه‌سازی پژوهش حاضر، به‌طور متوسط در سناریوی A2، در دوره‌های اول (۱۹۹۱-۲۰۲۰)، دوم (۲۰۲۱-۲۰۵۰) و سوم (۲۰۵۱-۲۰۸۰) درباره بارندگی به ترتیب حدود ۰/۱، ۰/۱ و ۰/۲ میلی‌متر نسبت به دوره پایه کاهش و در مورد دما به ترتیب حدود ۰/۱، ۰/۴ و ۰/۲ سانتی‌گراد نسبت به دوره پایه افزایش نشان می‌دهد. تحت سناریوی B2 در دوره‌های زمانی یادشده درباره بارندگی به ترتیب حدود صفر، ۰/۱ و ۰/۲ میلی‌متر کاهش و در مورد دما به ترتیب حدود ۰/۲، ۰/۱ و ۰/۱ سانتی‌گراد نسبت به دوره پایه افزایش نشان می‌دهد.

نتایج تحقیق حاضر نشان می‌دهد مدل SDSM برای

بررسی پارامترهای اقلیمی در ایستگاه کرج مدل توانمندی است و می‌توان برای پیش‌بینی در آینده و تحلیل وضعیت از این مدل استفاده کرد. نتایج به دست آمده با نتایج تحقیقات صورت گرفته (استفاده از مدل SDSM) توسط سایر محققان از جمله یعقوبی و همکارانش (افزایش دما در دوره آبی، حوضه رودخانه اعظم-هرات یزد)، طائی سمیرمی و همکارانش (کاهش بارندگی در دوره آبی، حوضه آبخیز بار نیشابور) و سیاری و همکارانش (افزایش دما در دوره آبی، حوضه کشف رود) مطابقت دارد. تغییرات در میزان بارندگی، موجب ایجاد تغییراتی مهمی در کیفیت و کمیت منابع آب خواهد شد که دقت در برنامه‌ریزی برای بهره‌برداری از منابع آب را می‌طلبد. با توجه به روند نزولی میانگین بارندگی و افزایش دما در ایستگاه کرج پیشنهاد می‌شود تدابیری به منظوری اصلاح نظام آبیاری، کاهش تبخیر و استفاده مجدد از فاضلاب اتخاذ شود.

همچنین، می‌توان پیشنهاد کرد در پژوهش‌هایی که با هدف پیش‌بینی‌های تغییر اقلیم و یا بررسی آثار تغییر اقلیم در مناطق مختلف صورت می‌گیرد، ابتدا به‌صورت جداگانه برای همه پارامترهای بررسی شده نسبت به انتخاب مدل بهینه آن منطقه اقدام شود تا برای ارائه به بخش‌های اجرایی نتایج هر چه واقعی‌تر به دست آید. همچنین، با توجه به تعدد مدل‌های اقلیمی و دسترسی آسان به داده‌های خروجی آنها

- [8]. Tavakol-Davani, H. Nasserib, a M. Zahraie, B. Improved statistical downscaling of daily precipitation using SDSM platform and data-mining methods. *International Journal of Climatology*, 1-18. [Persian]
- [9]. SadatAshofteh P, MasahBoani A. Effect of Climate Change on Maximum Discharge: Case Study, Aydoghmoos Basin, East Azarbaijan, *Journal of Agricultural Sciences and Technology*. 2010; 14; 25-39. [Persian]
- [10]. Arun Mondal n, Deepak K, Sananda K. Change in rainfall erosivity in the past and future due to climate change in the central part of India, *International SoilandWaterConservationResearch* 4, pp. 2016; 186-194.
- [11]. Zhang Y, You Q, Chen Ch, Ge J. Impacts of climate change on streamflows under RCP scenarios: A case study in Xin River Basin, China. *Atmospheric Research*. 2016; 178-179
- [12]. Garnaud C, Sushama L. Biosphere-climate interactions in a changing climate over North America. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2014; 1091-1108.
- [13]. Wetterhall F, Bardossy A, Chen D, Halldin S, Xu C-Y. Daily precipitation-downscaling techniques in three Chinese regions. *WATER RESOURCES RESEARCH*. 2006; (42)11423, 1-13.
- [14]. Wilby, R.L. Dawson, C.W. Barrow, E.M. sdsM -a decision support tool for the assessment of regional climate change impacts. *Environmental Modelling & Software*. 2002; 17, 147-159.
- [15]. Dibike, Y.b. and P. Coulibaly. Hydrologic impact of climate change in the Saguenay watershed: comparison of downscaling methods and hydrologic models. *Journal of Hydrology*. 2005; 307: 145-163.
- [16]. Zia Hashmi, M. shamseldin, A. Comparison of SDSM and LARS-WG for simulation and downscaling of extreme precipitation events in a watershed. *Stoch Environ Res Risk Assess*. 2011; 25, 475-484.
- [17]. Tavasoli A. Intra-Storm runoff coefficient simulation using the components of rainfall in the watershed bar Nishapur, *Journal of Watershed Management Sciences and Engineering*. 2010; 10(4): 21-33. [Persian]
- [18]. Moriasi D N, Arnold JG, Van Liew M. W, Bingner R. L, Harmel, R. D, and Veith, T. L. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*. 2007; 50(3), 900-855.
- در زمان اندک، پیشنهاد می‌شود تا حد امکان از چندین مدل به جای یک مدل در مطالعات تغییر اقلیم استفاده شود و به این وسیله عدم قطعیت پیش‌بینی‌های انجام‌شده را تا حد قابل قبول کاهش داد.
- منابع**
- [1]. Azizabadi farahan M, Bakhtiari B, Ghaderi K, Rezapour M. Assessment the Effect of Climate Change on Severity- Duration-Frequency Curves Of Drought in Ghareh Sou Basin Using Detailed Functions, *Journal of Iranian soil and soil research*. 2017; 47(4): 743-754. [Persian]
- [2]. Rezaei M, Nehtani M, Abkar A, Rezaei M, Mirkazehi Rigi M. Erformance evaluation of statistical downscaling model (SdsM) in the prediction of temperature parameters in the dry climate and Hyper (Case Study: Kerman and Bam). *Journal of Watershed Management*. 2014; 5: 10. [Persian]
- [3]. Shiaae beighi A, Abbaspour M, Soltanieh M, Hosseinzadeh F, Abedi Z. Assessment of climate change and its impact on the performance and fuel consumption of Iran's thermal power plants in the next decade. *Journal of Science and technology of the environment*. 2014; 16(2). [Persian]
- [4]. Yaaghubi, M. Masahbovani, A. Compare and evaluate different sources of uncertainty in studying the effects of climate change on runoff of semi-arid basins (Case Study: Heart River Basin large-Yazd), *Iranian Water Resources Research*. 2015; 11(3): 113-130. [Persian]
- [5]. Tirgarfakheri, F. Arezumandi, L. Applications of downscaling in GCMS to create a map of rainfall in the southern coast of the Caspian, *Third International Symposium on Environmental and Water Resources Engineering*. 2015; 1-10. [Persian]
- [6]. Taei Samiromi S, Moradi H, Khodaghohi M. Simulation and forecasting of climatic variables by multiple linear model SdsM and General Circulation Models (Case Study: Watershed Bar Nishapur). *Journal of humans and the environment*. 2014; 28: 1393. [Persian]
- [7]. Sayari N, Alizadeh A, Bannayan Awal M, Farid Hossaini A, Hesami Kermani M.R. Comparison of two GCM models (HadCM3 and CGCM2) for the prediction of climate parameters and crop water use under climate change (Case Study: Kashafrood Basin). *Journal of Water and Soil*. 2011; 25(4): 912-925. [Persian]

[19]. Taei Samiromi S, Moradi H, Khodaghali M. Selection of general circulation model and appropriate scenario for studying the effects of climate change in watershed Bar Neishabour.

The 2nd National Conference on Climate Change and its Impact on Agriculture and the Environment, Orumiyeh, Collections of articles. 2013; 28-32. [Persian]