

ارزیابی ریزگردانی تک‌ایستگاهی و چندایستگاهی مدل آماری اس‌دی‌اس‌ام با استفاده از شاخص‌های حدی دما و بارش (مطالعه موردی: غرب میانی ایران)

منوچهر فرج‌زاده اصل^۱، روح‌اله اوجی^{۲*}، یوسف قوبدل^۳ و علیرضا مساح بوانی^۴

۱. استاد، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

۲. استادیار، دانشگاه گیلان، ایران

۳. استادیار، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

۴. دانشیار، دانشگاه تهران، پاکدشت، ایران

(دریافت: ۹۴/۱۱/۲۶، پذیرش نهایی: ۹۵/۳/۲۵)

چکیده

دو روش تک‌ایستگاهی و چندایستگاهی مدل ریزگردانی آماری SDSM-DC به منظور ریزگردانی مقادیر حدی دما و بارش، در ۹ ایستگاه سینوپتیک واقع در منطقه کوهستانی غرب میانی ایران طی سال‌های آماری ۲۰۱۰-۱۹۸۱ ارزیابی شدند. دوره آماری ۲۰۰۰-۱۹۸۱ به منظور واسنجی مدل و ۲۰۱۰-۲۰۰۱ برای اعتبارسنجی آن، با به‌کارگیری ۲۷ شاخص حدی اقلیمی، عملکرد مدل را مورد سنجش قرار داد. حساسیت روش‌ها به ناهنجاری‌های بزرگ‌مقیاس جوی و نیز توانمندی آن‌ها در بازنمونه‌برداری توزیع داده‌های مشاهداتی در دوره اعتبارسنجی، به‌طور جداگانه برای هر شاخص، به ترتیب با استفاده از آزمون‌های همبستگی پیرسون و کولموگروف-اسمیرنوف، بررسی شد. برای ارزیابی کلی مدل، از روش ترکیبی استفاده شد. روش ریزگردانی تک‌ایستگاهی (چندایستگاهی) با گذراندن به ترتیب ۷۶ (۸۱)، ۱۶ (۷) و ۱۴ (۵) درصد از آزمون‌های کولموگروف-اسمیرنوف، همبستگی پیرسون و نیز آزمون ترکیبی، نتایج قابل قبولی ارائه دادند؛ به نحوی که می‌توان گفت روش تک‌ایستگاهی، جهت ریزگردانی مقادیر حدی در هر تک ایستگاه بهتر از روش چندایستگاهی است ولی برای ریزگردانی مقادیر حدی در کل منطقه مورد مطالعه (یعنی در مجموع ایستگاه‌ها)، روش چندایستگاهی نتایج بهتری ارائه داد. هر دو روش، شاخص‌های دما را بهتر از شاخص‌های بارش، ریزگردانی کردند. درحالی که، بعضی از شاخص‌ها از جمله روزهای دارای بارش بیش از ۲۵ میلی‌متر، شاخص ساده روزانه بارش، روزهای مرطوب متوالی و حدکثر دمای حداقل با هیچ‌یک از روش‌های فوق به خوبی تولید نشدند. در حالت کلی، عملکرد مدل از ایستگاهی به ایستگاهی دیگر متغیر بود.

واژه‌های کلیدی: اس‌دی‌اس‌ام، اعتبارسنجی، ریزگردانی تک‌ایستگاهی و چندایستگاهی، غرب میانی ایران، مقادیر حدی.

۱. مقدمه

حدی و دستیابی به تصویری احتمالی از تغییرات اقلیمی آتی در مناطق مختلف زمین (مثل یک ایستگاه هواشناسی) از مدل‌های ریزگردانی آماری استفاده می‌شود. تکنیک‌های ریزگردانی آماری، گپ رزلوشن مکانی میان آنچه مدل‌های اقلیمی کنونی قادر به تولید آن‌ها هستند و آنچه که برای ارزیابی تأثیرات تغییر اقلیم مورد نیاز است را پر می‌کنند (ویلی و داوسن، ۲۰۰۷). مطالعات متعددی جهت بررسی اثر تغییر اقلیم بر مقادیر حدی با استفاده از روش‌های

آنالیز مقادیر حدی اقلیمی، به دلیل مشخص شدن تأثیر معنادار آن‌ها بر جوامع انسانی و سیستم‌های طبیعی، طی دو دهه اخیر از اهمیت روزافزونی برخوردار شده است (آی‌پی‌سی‌سی، ۲۰۱۲). بنابراین جهت ارزیابی اثر گرمایش جهانی بر روی این مقادیر حدی، رویکردهای متعددی به کار گرفته شده است (سلمن و همکاران، ۲۰۱۳). با توجه به رزلوشن مکانی نسبتاً پایین مدل‌های جهانی (جی‌سی‌ام‌ها) و نیز منطقه‌ای اقلیم (آرسی‌ام‌ها)، جهت کاوش مقادیر

فاکتورهای مهم استناد به کاربرد وسیع این مدل، رجوع‌های متعدد برای دانلود داده‌های ورودی SDSM از پرتال شبکه سناریوهای تغییر اقلیم کانادا است که متغیرهای پیش‌بینی‌کننده تغییر اقلیم را در اختیار کاربران قرار می‌دهد. ویلی و داوسن (۲۰۱۲) در مقاله‌ای با بررسی تکامل مفهومی و فنی SDSM در یک دهه کاربرد آن در مطالعات مختلف، به ارزیابی قابلیت‌های این مدل پرداختند. این بررسی نشان می‌دهد که بر اساس مطالعات مختلف، SDSM بازده خوبی در برآورد معنادار دماهای حدی، مجموع بارش فصلی، رفتار بارش منطقه‌ای و ایستگاهی ارائه داده است. درحالی‌که برآورد آن از فراوانی مقادیر بارش حدی در فصول خشک سال، کمتر قابل اعتماد است.

با وجود داشتن الگوریتمی ساده، SDSM در ریزگردانی دما و بارش (سلطان‌پور و حسامی، ۱۳۸۸؛ دهقانی‌پور و همکاران، ۱۳۹۰؛ جان‌آبکار و همکاران، ۱۳۹۲؛ جان‌آبکار و همکاران، ۱۳۹۳؛ قمرزچشمه و همکاران، ۱۳۹۳)؛ مقادیر حدی دما (لیو و همکاران، ۲۰۰۸؛ رضایی و همکاران، ۱۳۹۳)؛ دوره‌های بارش سالانه، مجموع بارش فصلی و سالانه (وترها و همکاران، ۲۰۰۷a، ۲۰۰۷b)؛ بارش حدی میانگین منطقه‌ای (هاشمی و همکاران، ۲۰۱۱)؛ کوهی و همکاران، ۱۳۹۱؛ عزیززاده‌پهلوان و زهرایی، ۱۳۹۳) و همبستگی بین ایستگاهی مقادیر بارش (لیو و همکاران، ۲۰۱۱) نتایج قابل قبولی ارائه کرد. به‌طور کلی، مهارت بیشتری در مدل‌سازی وقوع بارش، در مقایسه با شدت آن به‌خصوص در زمستان دارد (هیلوک و همکاران، ۲۰۰۶).

در هر صورت، SDSM به این معروف است که در تخمین واریانس طول دوره مرطوب و خشک، کمتر از واقعیت عمل می‌کند (لیو و همکاران، ۲۰۱۱)؛ در مدل‌سازی دوام امواج گرمایی نیز چنین است، مگر اینکه از خود همبستگی یا پیش‌بینی‌کننده‌های با تأخیر زمانی استفاده شود (ویلی 2008a).

مختلف ریزگردانی صورت گرفته است (هارپمن و ویلی، ۲۰۰۵؛ بنستد، ۲۰۱۰؛ کلچ و همکاران، ۲۰۱۱؛ یانگ و همکاران، ۲۰۱۲). مفهوم ریزگردانی، به دلیل جزئیاتی که به‌واسطه ایستگاه‌های مشاهداتی به مقادیر پیش‌بینی می‌افزاید، حائز اهمیت است؛ اگرچه، اینکه خروجی جوامع ریزگردانی تا چه حد به واقعیت نزدیک است، جای بحث دارد (ویلی و فولر، ۲۰۱۰؛ ویلی و داوسن، ۲۰۱۲).

یکی از محدودیت‌های به‌کارگیری ابزارهای مختلف ریزگردانی در مطالعات برنامه‌ریزی انطباقی با تغییر اقلیم، کاربرد اختصاصی این مدل‌ها در زمینه‌ها یا تحقیقات خاص است و اغلب برای کاربران به‌طور رایگان در دسترس نیست. علاوه بر این، مدل‌های ریزگردانی دینامیکی نیز برای مناطق مختلف، به‌طور وسیعی توسعه نیافته‌اند. بنابراین، مدل SDSM به‌منظور پر کردن خلأهای فوق، به‌وجود آمد (ویلی و داوسن، ۲۰۰۷). اس‌دی‌اس‌ام، ابزاری برای ریزگرانی و تولید سناریوهای تغییرات آب‌وهوایی با وضوح بالاست که رایگان در دسترس است. این نرم‌افزار رایگان، قادر به تولید سری‌های زمانی تغییر اقلیم در ایستگاه‌های هواشناسی است که داده‌های روزانه کافی برای واسنجی مدل و نیز سری زمانی لازم از خروجی جی‌سی‌ام‌ها را در دسترس داشته باشد. همچنین اس‌دی‌اس‌ام می‌تواند به‌عنوان مولد هواشناسی تصادفی برای ریزگردانی عناصر اقلیمی و نیز ابزاری جهت بازسازی داده‌های روزانه، استفاده شود. اولین نسخه عمومی از این نرم‌افزار در سال ۲۰۰۱ منتشر شد و از آن زمان به بعد مطالعات متعددی در سراسر جهان با استفاده از این نرم‌افزار انجام گرفته است. بدون شک، علاقه‌مندی به استفاده از SDSM را در استنادهای مختلف از جمله: چارچوب کنوانسیون سازمان ملل متحد در مورد تغییرات اقلیمی (http://unfccc.int/adaptation/nairobi_work_programme/knowledge_resources_and_publications/items/5487.php) برنامه توسعه سازمان ملل (لو، ۲۰۰۶) و گزارش چهارم هیأت بین‌دول تغییر اقلیم (کریستین و همکاران، ۲۰۰۷) نیز دریافت. یکی دیگر از

زمانی دارای توزیع مشابه با داده‌های مشاهداتی، به ترتیب با به‌کارگیری آزمون‌های معناداری همبستگی پیرسن و کولموگروف-اسمیرنوف، مورد سنجش قرار گرفت و در نهایت، ترکیبی از دو مورد فوق برای آزمون کلی مدل استفاده شد.

۲. روش تحقیق

برای این تحقیق، از مدل ریزگردانی آماری اس‌دی‌اس‌ام؛ (ویلیبی و همکاران، ۲۰۰۲؛ ویلیبی و داوسن، ۲۰۱۳) با دو رویکرد تک‌ایستگاهی و چندایستگاهی استفاده شده است.

۲.۱. نسخه تک‌ایستگاهی

بهترین توصیف از اس‌دی‌اس‌ام، تعریف آن به‌صورت مولد هواشناسی شرطی است؛ چرا که شاخص‌های گردش جوی و متغیرهای هواشناسی محلی، متغیرهای زمان‌مندی (مثل وقوع بارش یا دمای حداکثر) را که بیانگر هوای روزانه در یک ایستگاه هستند، تخمین می‌زنند. فرایند ریزگردانی می‌تواند یک رویداد غیرشرطی (مثل وقوع بارش و دما) یا شرطی (مثل مقدار بارش) باشد.

برای وقوع بارش (روز مرطوب) W_i یک رابطه مستقیم خطی در n متغیر پیش‌بینی کننده X_{ij} در i روز است:

$$W_i = a_0 \sum_{j=1}^n a_j X_{ij} \quad (1)$$

به شرطی که $0 \leq W_i \leq 1$ باشد، هنگامی که عدد تصادفی هم شکل $W_i \leq r$ باشد، آستانه روز مرطوب (mm)، بسته به تعریف روز بارانی و نیز دقت اندازه‌گیری، ممکن است از مکانی به مکان دیگر متفاوت باشد. به‌منظور افزایش دوام دوره‌های مرطوب و خشک، ممکن است متغیرهای پیش‌بینی کننده X_{ij} با تأخیر یا به‌صورت همزمان اعمال شوند.

در تابستان، از مسائل اصلی تمام روش‌های ریزگردانی بوده و SDSM هم از این قاعده مستثنا نیست (هیلوک و همکاران، ۲۰۰۶؛ چن و همکاران، ۲۰۱۰؛ لیو و همکاران، ۲۰۱۱). آزمایش‌های مختلف توسط نویسندگان نشان می‌دهد که اعتبار خروجی مدل، تا حد زیادی به طول دوره آماری و کیفیت سری زمانی در دسترس برای واسنجی مدل و عوامل محلی مؤثر بر آب و هوای محلی، بستگی دارد. این امر می‌تواند برای مناطقی که تغییرپذیری سالانه و فصلی بالا-به‌دلایلی مثل بارش‌های موسمی، قرارگیری در مناطق مجاورت پهنه‌های آبی-خشکی، سیستم‌های فشاری و ... دارند، بحث برانگیز باشد (ویلیبی، ۲۰۰۸b).

داده‌های طولانی‌مدت و همگن روزانه در بخشی از مناطق کره زمین، به‌ویژه در منطقه خاورمیانه نادر است. با وجود این، در صورت داشتن داده‌های با کیفیت مناسب برای واسنجی اس‌دی‌اس‌ام، امکان بازسازی و پیش‌بینی داده‌های مفقود از طریق روابط شناسایی‌شده بین پیش‌بینی کننده‌های بزرگ مقیاس و داده‌های هواشناسی محلی با استفاده از اس‌دی اس‌ام، وجود دارد (ویلیبی و داوسن، ۲۰۱۲).

در این پژوهش، تلاش شده است با به‌کارگیری مقادیر حدی اقلیمی دما و بارش همگن روزانه منطقه غرب میانی ایران، عملکرد مدل ریزگردانی SDSM، ارزیابی شود. برای این منظور، از شاخص‌های مقادیر حدی اقلیمی تیم کارشناسی شاخص‌ها و آشکارسازی تغییر اقلیم که در جدول ۱ آمده است، استفاده شد.

شاخص‌های مذکور، مورد تأیید و سفارش مؤکد سازمان هواشناسی جهانی جهت پایش تغییرات حدی اقلیمی هستند (پیترسن و مانتن، ۲۰۰۸؛ کلین تنک و همکاران، ۲۰۰۹؛ زنگ و همکاران، ۲۰۱۱؛ برگر و همکاران، ۲۰۱۲). توانایی ریزگردانی مدل، در (الف) پاسخ به آنومالی‌های بزرگ مقیاس اقلیمی و (ب) بازتولید سری

جدول ۱. شاخص‌های حدی اقلیمی دما و بارش تیم کارشناسی شاخص‌ها و آشکارسازی تغییر اقلیم (زنگ و همکاران، ۲۰۱۱)

واحد	تعاریف	نام شاخص	شناسه
mm	مجموع بارش سالانه در روزهای مرطوب (بارش ۱ میلی‌متر و بیشتر)	مجموع سالانه بارش روزهای مرطوب	PRCPTOT
روز	تعداد روزهای دارای بارش ۱۰ میلی‌متر و بیشتر در سال	تعداد روزهای دارای بارش سنگین	R10
روز	تعداد روزهای دارای بارش ۲۰ میلی‌متر و بیشتر در سال	تعداد روزهای دارای بارش خیلی سنگین	R20
mm	بیش از ۹۵ درصد از مجموع بارش سالانه	روزهای خیلی مرطوب	R95p
mm	بیش از ۹۹ درصد از مجموع بارش سالانه	روزهای بی‌نهایت مرطوب	R99p
روز	روزهای دارای بارش بیش از ۲۵ میلی‌متر	تعداد روزهای دارای بارش بیش از ۲۵ میلی‌متر	R25
mm	حداکثر بارش روزانه در ماه	حداکثر بارش روزانه	RX1day
mm	حداکثر بارش ۵ روز متوالی در ماه	مقدار حداکثر بارش ۵ روز متوالی	Rx5day
روز/روز	مجموع بارش ماهانه تقسیم بر روزهای مرطوب دارای بارش ۱ میلی‌متر و بیشتر	شاخص ساده شدت بارش روزانه	SDII
روز	تعداد روزهای متوالی دارای بارش ۱ میلی‌متر و بیشتر	روزهای مرطوب متوالی	CWD
روز	تعداد روزهای متوالی دارای بارش کمتر از ۱ میلی‌متر	روزهای خشک متوالی	CDD
°C	میانگین ماهانه اختلاف بین دمای حداقل و حداکثر	رنج دمایی	DTR
روز	روزهای بین اولین و آخرین روز از حداقل ۶ روز گرم	طول فصل رشد	GSL
روز	حداقل ۶ روز متوالی دارای دمای حداقل کمتر از صدم دهم	طول دوره سرد	CSDI
روز	تعداد روزهای دارای دمای حداقل کمتر از صفر	روزهای یخبندان	FD
روز	تعداد روزهای دارای دمای حداکثر کمتر از صفر	روز یخی (انجماد)	ID
%	درصد روزهای دارای دمای حداقل کمتر از صدم دهم	شب‌های سرد	TN10p
%	درصد روزهای دارای دمای حداقل بیش از صدم نودم	شب‌های گرم	TN90p
°C	حداقل مقدار ماهیانه دمای حداقل روزانه	حداقل دما	TNn
°C	حداکثر مقدار ماهیانه دمای حداقل روزانه	حداکثر دما	TNx
روز	تعداد روزهای دارای دمای حداکثر بیش از ۲۵ درجه سانتی‌گراد	روزهای تابستانی	SU
روز	تعداد روزهای دارای دمای حداقل بیش از ۲۰ درجه سانتی‌گراد	شب‌های حاره‌ای	TR
%	درصد روزهای دارای دمای حداکثر کمتر از صدم دهم	روزهای سرد	TX10p
%	درصد روزهای دارای دمای حداکثر بیش از صدم نودم	روزهای گرم	TX90p
°C	حداقل مقدار ماهیانه دمای حداکثر روزانه	حداقل دمای حداکثر	TXn
°C	حداکثر مقدار ماهیانه دمای حداکثر روزانه	حداکثر دمای حداکثر	TXx
روز	حداقل ۶ روز متوالی دارای دمای حداکثر بیش از صدم نودم	طول دوره گرم	WSDI

مشابهی استفاده شود و همه پیش‌بینی کننده‌های v_{ij} بر اساس میانگین اقلیمی \bar{V}_j و انحراف معیارشان δ_j استانداردسازی شوند:

$$X_{ij} = \frac{v_{ij} - \bar{V}_j}{\delta_j} \quad (3)$$

برای فرایندهای شرطی از قبیل دما و سرعت باد، رابطه خطی مستقیمی بین پیش‌بینی شونده U_i و پیش‌بینی کننده انتخاب شده X_{ij} برقرار است:

$$U_i = \gamma_0 + \sum_{j=1}^n \gamma_j X_{ij} + e_i \quad (4)$$

با مشخص شدن روز مرطوب از رابطه فوق، مجموع

بارش P_i با استفاده از رابطه (۲)، ریزگردانی می‌شود:

$$P_i^k = \beta_0 + \sum_{j=1}^n \beta_j X_{ij} + e_i \quad (2)$$

که در آن k (معمولاً ۰، ۲۵) جهت مطابقت بهتر با توزیع نرمال، برای تبدیل مقادیر روز مرطوب استفاده می‌شود. اگرچه تبدیل‌های دیگری (از قبیل لگاریتم یا عکس نرمال) نیز ممکن است برای P_i به کار گرفته شود. لازم به ذکر است که برای ریزگردانی P_i و W_i باید پیش‌بینی کننده‌های

۲.۲. الحاقیه چندایستگاهی

گرچه SDSM قادر به ریزگردانی هم‌زمان برای چند ایستگاه نمی‌باشد ولی استفاده از مدل اولیه آن برای این منظور امکان‌پذیر است (ویلی و همکاران، ۲۰۰۳) که شامل دو مرحله است: ابتدا، یک سری زمانی بارش "شاخص" بر اساس میانگین روزانه منطقه متشکل از چند ایستگاه (یا یک ایستگاه کلیدی منطقه) با استفاده از پیش‌بینی‌کننده‌های X_{ij} تولید می‌شود. سپس، میانگین منطقه‌ای بارش، به مجموع بارش مشاهده‌شده روزانه ثبت‌شده در ایستگاه‌های تشکیل‌دهنده منطقه، تفکیک می‌گردد. این امر، از طریق بازنمونه‌برداری مقادیر چندایستگاهی بارش در روزی که میانگین منطقه‌ای مشاهداتی آن نزدیک‌ترین مقدار به مقادیر ریزگردانی شده میانگین منطقه‌ای باشد، صورت می‌گیرد.

از آنجایی که الگوهای واقعی بارش، بازنمونه‌برداری می‌شوند، میانگین منطقه‌ای ایستگاه‌های شاخص و نیز کواریانس فضایی آرایه‌ای چندایستگاهی، حفظ می‌گردد (ویلی و همکاران، ۲۰۰۳؛ هارپمن و ویلی، ۲۰۰۵). بنابراین به علت به کارگیری همزمان همه ایستگاه‌ها، امکان حفظ روابط بین ایستگاهی از جمله همبستگی بین ایستگاهی و غیره وجود دارد (هیلوک و همکاران، ۲۰۰۶). عمدتاً میانگین‌های منطقه‌ای، مقبولیت بیشتری در سری‌های شاخص تک‌ایستگاهی دارند؛ چرا که خطر احتمال به کارگیری داده‌های غیرهمگن یا رکوردهایی که نمایانگر مقادیر ایستگاه مورد نظر نیستند، کمتر است و از طرفی، قابلیت پیش‌بینی بالاست (به دلیل بالاتر بودن نسبت سیگنال به نویز). با این حال در صورتی که شرایط جوی، دنباله‌ای تولید کند که در مجموعه آموزشی، پنهان باشد، ممکن است مجموع N روز بارش مصنوعی ایجادشده از مجموع N روز مشاهداتی تجاوز کند. ریزگردانی و بازنمونه‌برداری مقادیر دما نیز همانند روش تک‌ایستگاهی، از رابطه مستقیم خطی تبعیت می‌کند.

فرض بر این است که خطای مدل e_i از توزیع گوسی تبعیت می‌کند. این مقدار به‌طور تصادفی از اعداد تصادفی دارای توزیع نرمال تولید شده و روزانه به جزء قطعی مدل اضافه می‌گردد. این نویز سفید، واریانس توزیع‌های مقادیر مشاهداتی و ریزگردانی شده را به هم نزدیک‌تر می‌کند ولی ممکن است مهارت تکرار خود همبستگی روزانه متغیرهای پیش‌بینی‌کننده را کاهش دهد. فرایند تصادفی نیز، امکان تولید گروهی از سری‌های زمانی را فراهم می‌کند که منعکس‌کننده عدم قطعیت مدل هستند.

همه پارامترهای ریزگردانی $(\alpha_j, \beta_j, \gamma_j)$ ، از طریق واسنجی پیش‌بینی‌شونده (های) محلی در مقابل متغیرهای پیش‌بینی‌کننده منطقه‌ای مشتق از داده‌های بازتحلیل مرکز ملی پیش‌بینی زیست محیطی (انسپ) برای دوره مورد بررسی و به روش حداقل مربعات، به دست می‌آیند (کلنی و همکاران، ۱۹۹۶). پیش‌بینی‌کننده‌ها جداگانه ریزگردانی می‌شوند؛ بنابراین هر نوع کواریانس باید از طریق متغیرهای پیش‌بینی‌کننده مشترک یا همبستگی بین پیش‌بینی‌کننده‌ها، منتقل گردد. آزمون مدل نشان می‌دهد که این فرض منطقی است (ویلی، ۱۹۹۸).

همانند همه روش‌های ریزگردانی، فرض بر این است که روابط پیش‌بینی‌کننده-پیش‌بینی شونده دوره کالیراسیون SDSM نیز تحت تأثیر عوامل انسانی تغییر اقلیم بوده و این روابط برای دهه‌های آتی صادق است. ولی در عمل مشاهده شده است که پارامترهای تمام مدل‌های ریزگردانی تجربی و دینامیکی در طی زمان، متغیرند (ویلی، ۱۹۹۷). با این وجود، پیش‌بینی تغییر پذیری فرکانس پایین اقلیمی، بعلا تغییرات بزرگ مقیاس جوی از طریق ترکیبی از روش‌های تصادفی، امکان‌پذیر است (ویلی، ۱۹۹۸b). اما بازخوردهای تغییرات سطح زمین، مهمترین عامل موثر ناشناخته تمام سناریوهای ریزگردانی است (ویلی و داوسون، ۲۰۱۲).

۳.۲. ارزیابی شاخص‌های حدی اقلیمی

به منظور ارزیابی شاخص‌های مقادیر حدی دما و بارش، آزمون‌های همبستگی و توزیع سری زمانی به کار رفت. این شاخص‌ها که در جدول ۱ آورده شده‌اند، برای سری‌های زمانی روزانه دما و بارش محاسبه شد. بعد از محاسبه شاخص‌های داده‌های مشاهداتی و ریزگردانی شده برای دوره زمانی ۲۰۱۰-۲۰۰۱، عملکرد مدل توسط دو آزمون زیر، ارزیابی شد:

- آزمون ۱ که بر همبستگی پیرسون استوار است، بررسی می‌کند که آیا شاخص شبیه‌سازی شده همبستگی معناداری با شاخص مشاهداتی دارد یا خیر؛ در صورت داشتن همبستگی معنادار، روش مورد بررسی، آزمون را گذرانده است. با به کارگیری این آزمون، پاسخ مدل به آنومالی موجود در داده‌های بازتحلیل، مورد واکاوی قرار می‌گیرد.

- آزمون ۲ بر کلموگروف-اسمیرنوف استوار است و تابع توزیع تجمعی تجربی داده‌های مشاهداتی و ریزگردانی شده را با هم مقایسه می‌کند (ویلکز، ۲۰۰۶). چنانچه توزیع مقادیر ریزگردانی شده، شباهت معناداری به داده‌های تاریخی داشته باشد، مدل آزمون را با موفقیت خواهد گذراند.

هر دو آزمون فوق، در سطح معناداری ۰/۰۱ به اجرا در می‌آیند. با توجه به تولید سری‌های زمانی تصادفی توسط اس‌دی‌اس‌ام، در روش تک‌ایستگاهی برای هر دو آزمون از میانگین ۳۰ سری زمانی هر شاخص استفاده می‌شود. به نحوی که برای هر سری زمانی، شاخص‌ها جداگانه محاسبه و سپس از میانگین شاخص مذکور برای مقایسه با شاخص داده‌های مشاهداتی استفاده می‌گردد. در روش چندایستگاهی نیز از میانگین منطقه‌ای ۳۰ سری زمانی استفاده می‌شود. ولی برای باز نمونه‌برداری سری زمانی هر ایستگاه جهت تولید شاخص‌های حدی، همانند روش‌های قطعی عمل شد.

۳. منطقه مورد مطالعه و اطلاعات مورد نیاز

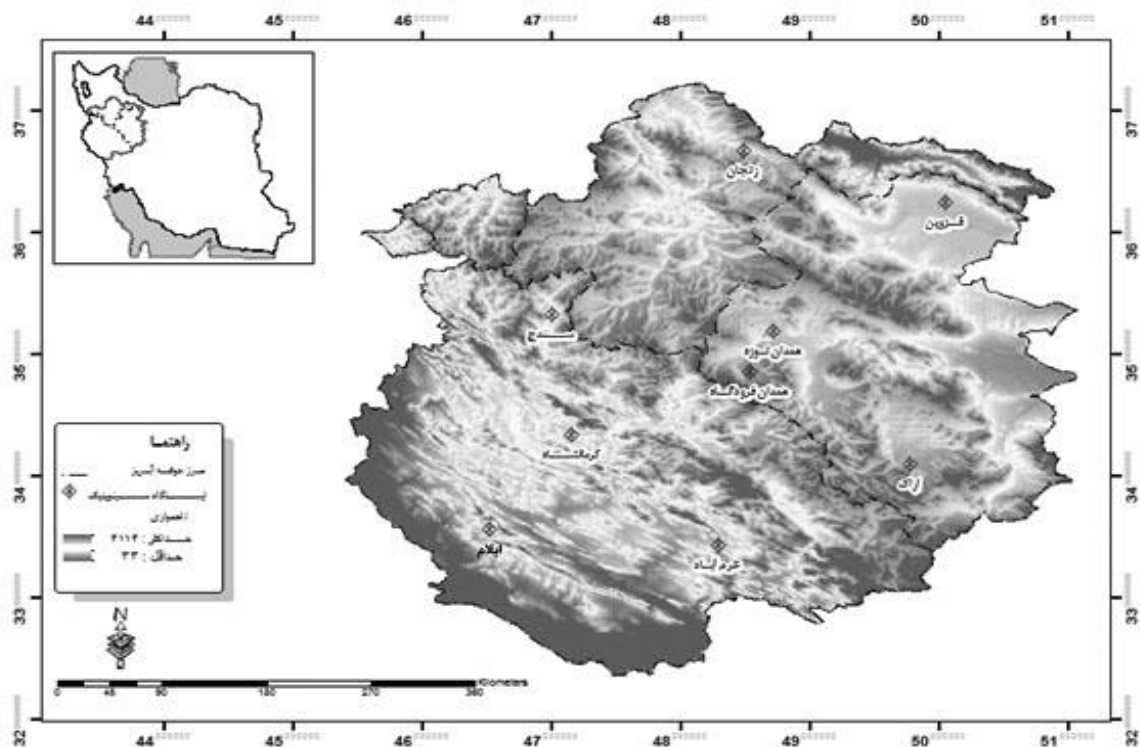
همچنان‌که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، منطقه مورد مطالعه، بخش میانی غرب ایران را شامل می‌شود که در محدوده ناهمواری‌های بلند زاگرس و محل خط تقسیم آب چهار حوضه آبریز اصلی کشور (دریای خزر، دریاچه ارومیه، ایران مرکزی و خلیج فارس-دریای عمان) قرار دارد و سرچشمه تعدادی از رودهای مهم حوضه‌های فوق می‌باشد. هر گونه تغییر در عناصر اقلیمی این منطقه می‌تواند تمام اجزای سامانه را در بخش‌های مختلف حوضه و در نتیجه حیات (انسانی، گیاهی و جانوری) متأثر سازد. بنابر این می‌تواند شرایط مناسبی برای مطالعه و بررسی تغییرات اقلیمی در ابعاد منطقه‌ای فراهم کند. از نظر شرایط اقلیمی، آب و هوای مدیترانه‌ای بر این منطقه حاکمیت دارد. منطقه مورد بررسی، به علت گرادیان شدید ناهمواری از یک طرف و نیز حاکمیت الگوهای متنوع جوی در مقیاس سینوپتیک-از قبیل پرفشار جنب حاره‌ای، سیکلون‌های مدیترانه‌ای و پرفشار سبیری- در طول سال، تغییرپذیری دما و بارش زیادی را تجربه می‌کند. منطقه مورد مطالعه به طور ویژه با تابستان گرم و خشک و زمستان سرد و مرطوب مشخص می‌شود.

بطور کلی، به منظور ریزگردانی آماری، دو سری از داده‌ها مورد نیاز است: ۱. داده‌های مشاهداتی روزانه بلندمدت مربوط به ایستگاه‌های سینوپتیک منطقه، به عنوان پیش‌بینی شونده‌ها؛ ۲. داده‌های بزرگ‌مقیاس جوی حاصل از خروجی مدل‌های جی‌سی‌ام یا داده‌های بازتحلیل، به عنوان پیش‌بینی‌کننده‌ها. به منظور ارزیابی بهتر روند و تغییرپذیری اقلیم در مقیاس محلی و منطقه‌ای، سری زمانی طولانی‌مدت و قابل اطمینان از داده‌های اقلیمی ریزمقیاس مورد نیاز است (مکیس و وینسنت، ۲۰۱۱؛ مین و همکاران، ۲۰۱۲). همچنان‌که در جدول ۲ مشاهده می‌شود

برای غرب میانی ایران، ۹ ایستگاه سینوپتیک که در ارتفاعات مختلف غرب میانی ایران پراکنده شده‌اند را با

(ویلیبی و داوسن، ۲۰۱۲ و ۲۰۱۳) بر اساس متغیرهای پیش‌بینی‌کننده بازتحلیل و بازسازی داده‌های مفقود با استفاده از روش انتساب نزدیک‌ترین همسایگی متوالی K (کیم و یی، ۲۰۰۸) انجام گرفت و آزمون‌های همگنی مذکور برای هر سری زمانی، قبل و بعد از بازسازی آن‌ها به کار گرفته شد. پیش‌بینی‌کننده‌های مورد استفاده در این پژوهش از آرشیو داده‌های بازتحلیل مراکز ملی پیش‌بینی زیست‌محیطی (انسپ)، (کلنی و همکاران، ۱۹۹۶) با وضوح $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ استخراج شد. بر اساس جدول ۳ انتخاب پیش‌بینی‌کننده‌های مورد استفاده در این پژوهش، به وسیله روش انتخاب متغیر SDSM و از بین خروجی توابع تجربی متعامد (EOF) داده‌های بازتحلیل برای محدوده بین $30^\circ N$ ، $42^\circ E$ و $40^\circ N$ ، $52^\circ E$ غربال‌گیری شد.

آماري نسبتاً طولانی‌مدت انتخاب کردیم که پوشش تقریباً کاملی از داده‌ها را برای سال‌های ۲۰۱۰-۱۹۸۱ دارند. دو دهه (۲۰۰۰-۱۹۸۱) از داده‌های روزانه دماهای حداقل و حداکثر و نیز مجموع بارش ایستگاه‌های انتخابی برای واسنجی مدل و یک دهه (۲۰۱۰-۲۰۰۱) باقی‌مانده آن برای اعتبار سنجی مدل استفاده شد. به‌منظور ارزیابی صحت و همگنی داده‌های مشاهداتی، از روش‌های مختلف زیر استفاده شد: بسته‌های نرم‌افزاری آراچ تست وی ۳ (ونگ و فنگ، ۲۰۱۰) و آراچ تست بارش روزانه (ونگ و همکاران، ۲۰۱۰) بر اساس روش آزمون‌های Penalized Maximal T&F (ونگ و همکاران، ۲۰۰۷؛ ونگ، ۲۰۰۸b) که در یک الگوریتم آزمون‌نمایی برگشتی نهادینه شده است (ونگ، ۲۰۰۸a)؛ بسته کلاسیکال (خررو، ۲۰۱۲) بر اساس مدل رگرسیون خطی تیپ ۲، نرم‌افزار اس‌دی‌اس‌ام



شکل ۱. منطقه مورد مطالعه

جدول ۲. ایستگاه‌های مورد مطالعه

نام ایستگاه	عرض جغرافیایی (°)	طول جغرافیایی (°)	ارتفاع (m)	دما (°C)	بارش (mm)
اراک	34.1	49.77	1708	13.9	341.7
قزوین	36.25	50.05	1279.2	14	316
همدان فرودگاه	34.87	48.53	1741.5	11.3	317.7
همدان نوژه	35.2	48.72	1679.7	11	332.7
ایلام	33.63	46.43	1337	16.9	616
کرمانشاه	34.35	47.15	1318.6	14.3	445.1
خرم‌آباد	33.43	48.28	1147.8	17.2	509
سنندج	35.33	47	1373.4	13.4	458.4
زنجان	36.68	48.48	1663	11	313.1

نیز حدود سال‌های ۱۹۹۰ تا ۱۹۹۵ که همانند روش تک‌ایستگاهی شبیه‌سازی کمتری از واقعیت داشته است، در بقیه موارد، عملکرد بهتری از روش تک‌ایستگاهی داشته است. متأسفانه، هیچ‌یک از روش‌ها قادر به ارائه نتیجه مورد قبول برای شاخص روزهای خیلی مرطوب نشدند. هر چند در بعضی از موارد، مثلاً سال‌های ۱۹۹۷ تا ۱۹۹۹، تا حدودی توانستند نوسانات موجود را با مقداری خطا نمایش دهند.

عملکرد هر دو روش در شبیه‌سازی شاخص‌های دما، از نظر نمایش روند و نیز حساسیت به آنومالی‌های حدی روزهای گرم و شب‌های سرد، به‌ویژه در انعکاس آنومالی احتمالی سال ۱۹۹۲ شاخص شب‌های سرد، مطلوب بوده است. اگرچه برآورد روش چندایستگاهی، برای آنومالی‌های احتمالی سال‌های ۱۹۹۲، ۱۹۹۸ و ۲۰۰۸، بهتر از روش تک‌ایستگاهی بوده است. در کل، روش تک‌ایستگاهی، به‌ویژه در شبیه‌سازی دوره اعتبارسنجی روزهای گرم، دارای عملکرد بهتری از روش چندایستگاهی است. هر چند هر دو روش، به نوسانات بین سالانه و نیز روند شاخص روزهای گرم، به خوبی پاسخ داده‌اند، اما همه روش‌ها با مقداری خطا، برآوردی بالاتر یا کمتر از مشاهده‌های ایستگاه داشتند.

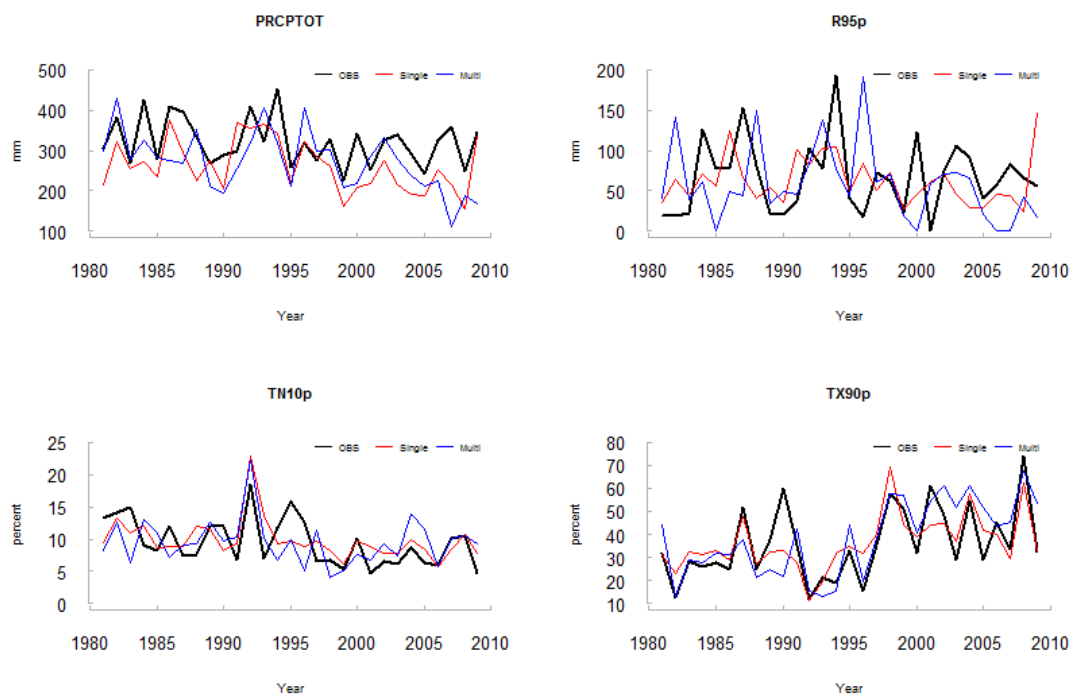
جدول ۳. پیش‌بینی‌کننده‌های بالقوه (متغیر مستقل) مورد استفاده برای هر ایستگاه.

پیش‌بینی‌کننده	سطح
h,t,u,v	700 hPa
h,t,u,v	850 hPa
P,Tn,Tx	سطح زمین

*h=ارتفاع ژئوپتانسیل؛ t=دما؛ u/v=اجزاء باد؛ Tn=دمای حداقل؛ Tx=دمای حداکثر؛ P=بارش.

۴. نتایج و بحث

به منظور بررسی پاسخ مدل‌ها به آنومالی موجود در داده‌های بازتحلیل و نیز مقایسه تابع توزیع تجمعی تجربی داده‌های مشاهداتی و ریزگردانی شده، تعدادی از شاخص‌های حدی مربوط به دما و بارش ایستگاه نوژه همدان برای نمونه در این بررسی مورد بحث قرار می‌گیرد. با توجه به شکل ۲، اگرچه هر دو روش تک‌ایستگاهی و چندایستگاهی، تا حدود زیادی توانسته‌اند نمایش نسبتاً خوبی از تغییرپذیری شاخص مجموع سالانه بارش روزهای مرطوب داشته باشند؛ در مجموع می‌توان گفت که روش تک‌ایستگاهی، مقدار شاخص مذکور را همواره کمتر از مقادیر مشاهداتی، برآورد نموده است. درحالی که روش چندایستگاهی، غیر از نیمه دوم دوره اعتبارسنجی و



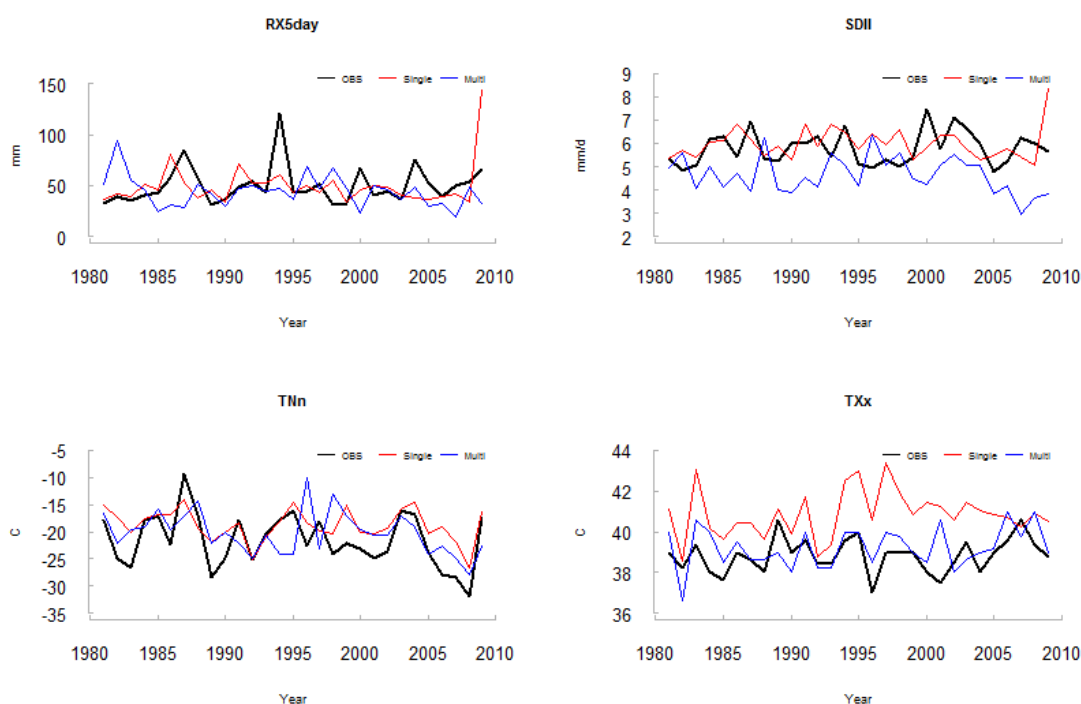
شکل ۲. شاخص‌های مجموع سالانه بارش روزهای مرطوب، روزهای خیلی مرطوب، روزهای گرم و شب‌های سرد ایستگاه همدان نوزه. برای روش‌های تصادفی، از میانگین ۳۰ سری شبیه‌سازی شده استفاده شده است.

شده است.

روش تک‌ایستگاهی، عملکرد ضعیفی از شبیه‌سازی شاخص حداکثر دمای حداکثر، به نمایش گذاشته است. اما برآورد روش چندایستگاهی از این شاخص، با اغماض از خطاهایی از قبیل ۲۰۰۱، بهتر از روش تک‌ایستگاهی است. به‌ویژه برای سال‌های ۱۹۹۰ تا ۱۹۹۵ که نمایش مناسبی از روند و تغییرات این شاخص ارائه کرده است.

بر اساس کیو-کیو پلات شاخص‌های مجموع سالانه بارش روزهای مرطوب، روزهای خیلی مرطوب، روزهای گرم و شب‌های سرد در شکل ۴، هر دو روش با دارا بودن بایاس منفی در شبیه‌سازی مجموع سالانه بارش روزهای مرطوب، قادر به گذراندن آزمون ب نیستند. در بقیه موارد، غیر از عملکرد روش تک‌ایستگاهی برای شاخص شب‌های سرد که با مقداری عدم قطعیت همراه است، توانسته‌اند این آزمون را به‌خوبی پشت سر بگذرانند.

با توجه به شکل ۳، هیچ‌یک از روش‌ها نتوانستند نمایش خوبی از نوسانات شاخص مقدار حداکثر بارش ۵ روز متوالی را به‌ویژه برای دوره اعتبارسنجی، ارائه دهند. با این وجود، عملکرد روش چندایستگاهی طی سال‌های ۱۹۹۰ تا ۱۹۹۳ و نیز ۲۰۰۲ تا ۲۰۰۴ غیر قابل چشم‌پوشی است. روش تک‌ایستگاهی نیز، بدون انعکاس دقیق تغییرات، روند آن را دنبال کرده است. شاخص ساده شدت بارش روزانه نیز توسط هیچ‌یک از روش‌ها به‌خوبی شبیه‌سازی نشده، اگرچه روند تغییرات آن با مقداری خطا، پی‌گیری شده است. در اغلب موارد، روش چندایستگاهی، مقدار این شاخص را کمتر از مقدار مشاهداتی آن، برآورد کرده است. هرچند هر دو روش توانستند به آنومالی‌های احتمالی موجود در شاخص حداقل دمای حداقل پاسخ داده و این ناهنجاری‌ها را در شبیه‌سازی این شاخص منعکس نمایند. تغییرات دوره اعتبارسنجی این شاخص توسط هر دو روش با مقداری برآورد بیش از مقادیر مشاهداتی، به‌خوبی انعکاس داده

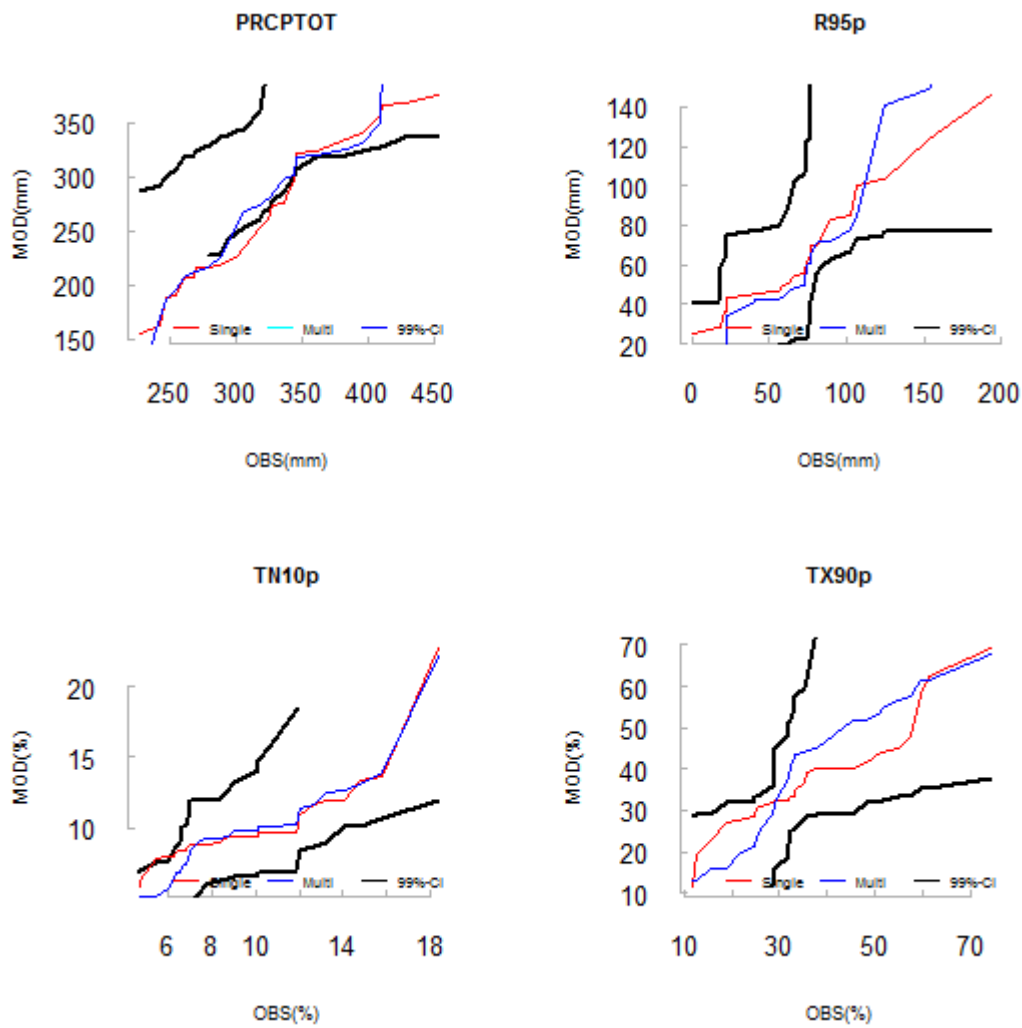


شکل ۳. شاخص‌های مقدار حداکثر بارش ۵ روز متوالی، شاخص ساده شدت بارش روزانه، حداکثر دمای حداکثر و حداقل دمای حداقل ایستگاه همدان نرژ.

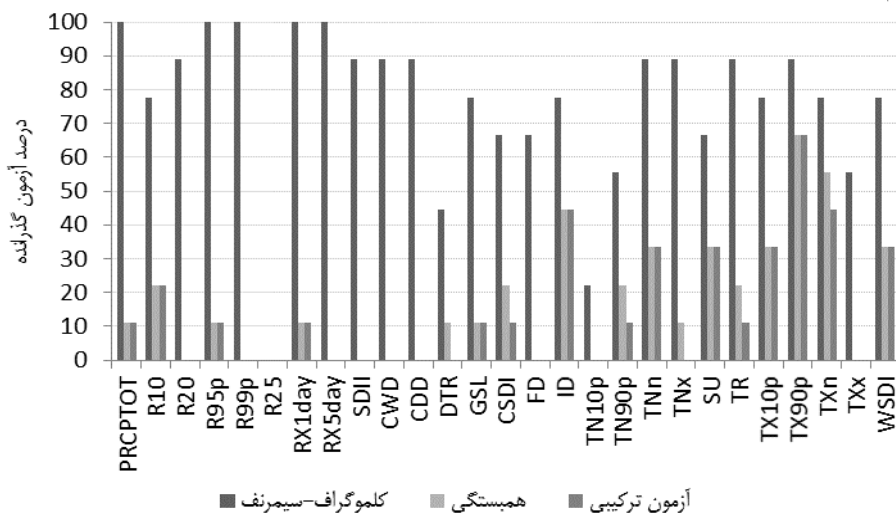
دارای توزیعی مشابه داده‌های مشاهداتی هستند. به نحوی که توزیع شاخص‌هایی مثل مجموع سالانه بارش روزهای مرطوب، روزهای خیلی مرطوب، روزهای بی‌نهایت مرطوب، حداکثر بارش روزانه و حداکثر بارش ۵ روز متوالی، با گذراندن ۱۰۰٪ آزمون (یعنی در تمامی ایستگاه‌های مورد بررسی) کاملاً منطبق بر توزیع مقادیر مشاهده‌ای می‌باشد. در حالی که این امر برای بارش‌های بیشتر از ۲۵ میلی‌متر در هیچ یک از ایستگاه‌ها امکان‌پذیر نشد. همچنان که در شکل ۵ نشان داده شده است، علاوه بر اغلب شاخص‌های مربوط به دما که با گذراندن ۱۰ تا ۶۰ درصد آزمون ترکیبی، قابلیت تولید به وسیله این مدل را در اکثر ایستگاه‌های مورد مطالعه دارند، بعضی از شاخص‌های مربوط به بارش از جمله مجموع بارش سالانه و روزهای خیلی مرطوب نیز به ترتیب با گذراندن ۱۰ و ۲۰ درصد از آزمون ترکیبی، توانسته‌اند به وسیله مدل مذکور، به خوبی تولید شوند.

نتایج در اشکال ۷ و ۸ خلاصه شده‌اند. همچنان که در شکل ۵ مشاهده می‌شود براساس آزمون ۱ بسیاری از شاخص‌ها از قبیل روزهای یخی، روزهای تابستانی، دمای حداقل، شب‌های سرد، حداقل دمای حداکثر و روزهای گرم به ترتیب با گذراندن ۴۵٪، ۳۳٪، ۳۳٪، ۵۷٪، ۵۷٪ و ۶۶٪ از آزمون به خوبی به وسیله مدل تک‌ایستگاهی شبیه‌سازی شده‌اند.

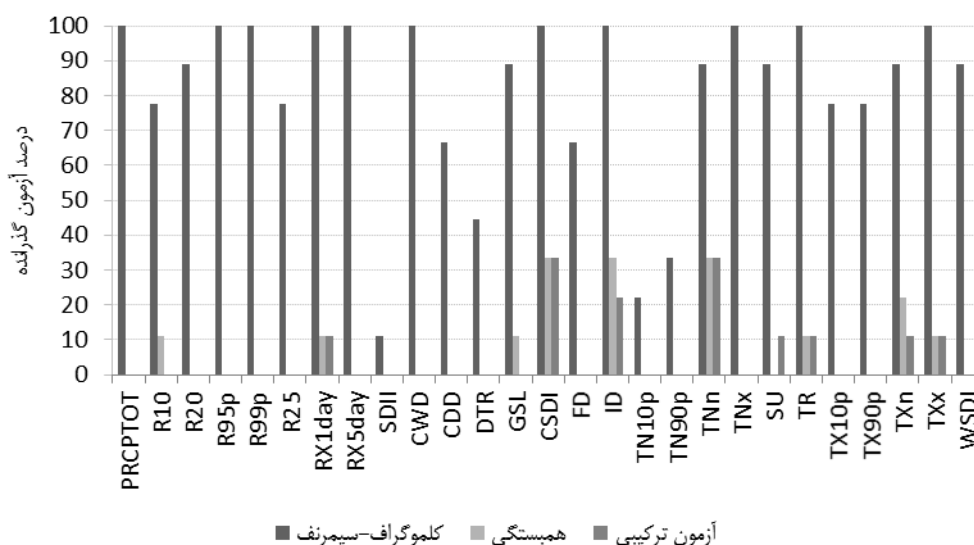
هرچند شبیه‌سازی شاخص‌های بارش روزانه در مناطق خشک و نیمه‌خشک غالباً بحث برانگیز بوده و نتوانسته‌اند به خوبی به وسیله این مدل شبیه‌سازی شوند، ولی شاخص‌هایی مثل مجموع سالانه بارش روزهای مرطوب، تعداد روزهای دارای بارش سنگین، روزهای خیلی مرطوب و حداکثر بارش روزانه با گذراندن به ترتیب ۱۰٪، ۲۲٪، ۱۰٪ و ۱۰٪ از آزمون، امکان شبیه‌سازی توسط این مدل را فراهم می‌سازد. بر اساس آزمون ۲، اکثر شاخص‌های تولید شده به وسیله مدل تک‌ایستگاهی در اغلب ایستگاه‌ها،



شکل ۴. کیو-کیو پلات مقادیر ریزگردانی شده داده‌های آنالیز مجدد در مقایسه با شاخص‌های سالانه مجموع سالانه بارش روزهای مرطوب، روزهای خیلی مرطوب، روزهای گرم و شب‌های سرد ایستگاه همدان نوزه.



شکل ۵. نمودار خلاصه نتایج آزمون‌های مورد استفاده جهت ارزیابی مدل تک‌ایستگاهی



شکل ۶ نمودار خلاصه نتایج آزمون‌های مورد استفاده جهت ارزیابی مدل چندایستگاهی

اغلب شاخص‌های مربوط به بارش با گذراندن ۱۰ تا ۳۲ درصد آزمون ترکیبی، امکان ریز گردانی به وسیله این مدل را فراهم می‌کند.

۵. نتیجه‌گیری

همچنان که در بخش مقدمه نیز اشاره شد، SDSM در مطالعات متعددی به صورت تک‌ایستگاهی و چندایستگاهی جهت ریزگردانی مقادیر حدی دما و بارش (از جمله: هیلوک و همکاران، ۲۰۰۶؛ وترهال و همکاران، ۲۰۰۷a، ۲۰۰۷b؛ ویلی، 2008a؛ چن و همکاران، ۲۰۱۰؛ لیو و همکاران، ۲۰۱۱؛ ویلی و داوسن، ۲۰۱۲) مورد استفاده قرار گرفته و ارزیابی مدل در مطالعات مذکور نشان می‌دهد که عملکرد مطلوبی در بین مدل‌های مورد استفاده داشته‌اند. هرچند روش تک‌ایستگاهی این مدل در ایران نیز در مطالعات مختلفی مورد استفاده قرار گرفته است ولی در بین مطالعات انجام شده، موردی در خصوص روش چندایستگاهی و نیز ارزیابی عملکرد ریزگردانی مقادیر حدی رویکردهای مختلف این مدل یافت نشد. علاوه بر این، همچنان که قبلاً نیز ذکر شد، جهت حصول نتایج مطلوب در هر پژوهش، داده‌های هواشناسی و خصوصاً

بر اساس شکل ۶ برخی از شاخص‌های تولیدشده توسط مدل چندایستگاهی SDSM از جمله: روزهای خیلی مرطوب، حداکثر بارش ماهانه، طول دوره رشد، طول دوره سرد، روزهای یخی، حداقل دمای حداقل، شب‌های حاره‌ای، حداقل دمای حداکثر و حداکثر دمای حداکثر، با گذراندن ۱۰ تا ۳۲ درصد آزمون ۱ دارای همبستگی معناداری با داده‌های مشاهداتی هستند. درحالی‌که از میان شاخص‌های مربوط به بارش، فقط شاخص روزهای خیلی مرطوب و حداکثر بارش ماهانه با گذراندن ۱۰ درصد از آزمون ۲، می‌توانند به وسیله این مدل تولید شوند. همچنان که در شکل ۶ نشان داده شده است، بر اساس آزمون کولموگروف-اسمیرنوف همه شاخص‌های تولیدشده، در اغلب ایستگاه‌های مورد بررسی منطقه دارای توزیعی همانند داده‌های مشاهداتی است. به‌نحوی که ۱۱ مورد از ۲۷ شاخص مورد بررسی، در تمام ایستگاه‌های منطقه ۱۰٪ از توزیع داده‌های مشاهداتی تبعیت می‌کند. از این رو برتری محسوسی به روش تک‌ایستگاهی دارد. بر اساس آزمون ترکیبی، از میان شاخص‌های مربوط به بارش، فقط شاخص حداکثر بارش روزانه با گذراندن ۱۰ درصد از آزمون ترکیبی، می‌توانند به وسیله این مدل تولید شود. درحالی‌که

جان‌آبکار ع.، حبیب‌نژاد، م.، سلیمانی، ک. و نقوی، ه.، ۱۳۹۳، حساسیت مدل ریز مقیاس‌نمایی SDSM به داده‌های بازتحلیل شده در مناطق خشک، دو فصلنامه علمی-پژوهشی خشک‌بوم، جلد چهارم، شماره دوم، ۱۱-۲۷.

جان‌آبکار ع.، حبیب‌نژاد، م.، سلیمانی، ک. و نقوی، ه.، ۱۳۹۲، بررسی میزان کارایی مدل SDSM در شبیه‌سازی شاخص‌های دمایی در مناطق خشک و نیمه خشک، فصلنامه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب، سال چهارم، شماره چهارده، ۱-۱۷.

دهقانی پور ا. ح.، حسن‌زاده، م. ج.، عطاری، ج. و عراقی‌نژاد، ش.، ۱۳۹۰، ارزیابی توانمندی مدل SDSM در ریز مقیاس‌نمایی بارش، دما و تبخیر (مطالعه موردی: ایستگاه سینوپتیک تبریز)، یازدهمین سمینار سراسری آبیاری و کاهش تبخیر، کرمان، دانشگاه شهید باهنر.

سلطان‌پور، ک. و حسامی‌کرمانی، م. ر.، ۱۳۸۸، ریز مقیاس‌نمایی بارندگی در تهران، هشتمین کنگره بین‌المللی مهندسی عمران، شیراز، دانشگاه شیراز.

علیزاده‌پهلوان ح. و زهرایی، ب.، ۱۳۹۳، مقایسه مدل‌های ریزمقیاس‌نمایی آماری در شبیه‌سازی بارش روزانه، مجموعه مقالات شانزدهمین کنفرانس ژئوفیزیک ایران، تهران.

قزمز چشمه ب.، رسولی، ع. ا.، رضائی‌بنفشه، م.، مساح‌بوانی، ع. ر. و خورشیددوست، ع. م.، ۱۳۹۳، بررسی اثر عوامل مورفو-اقليمی بر دقت ریزمقیاس‌گردانی مدل SDSM، نشریه علمی-پژوهشی مهندسی و مدیریت آبخیز، جلد ششم، شماره دوم، ۱۵۵-۱۶۴.

کوهی م.، موسوی بایگی، م.، فرید حسینی، ع. ر.، ثنایی نژاد، ح. و جباری نوقابی، ه.، ۱۳۹۱، ریزمقیاس‌نمایی آماری و ارایه سناریوهای آتی رویدادهای حدی بارش در حوضه کشف رود، نشریه پژوهش‌های اقلیم‌شناسی،

مقادیر روزانه آن‌ها - به‌خصوص در ایستگاه‌های موجود در کشورمان - نیاز به کنترل کیفی و همگنی دارند.

در مجموع پژوهش حاضر با بررسی مقادیر حدی دما و بارش روزانه همگن ایستگاه‌های سینوپتیک غرب میانی ایران نشان می‌دهد که مدل ریزگردانی تک‌ایستگاهی (چندایستگاهی) با گذراندن به ترتیب ۷۶(۸۱)، ۱۶(۷) و ۱۴(۵) درصد از آزمون‌های کولموگروف-اسمیرنوف، همبستگی پیرسون و نیز آزمون ترکیبی، امکان ریزگردانی ایستگاه‌های مورد بررسی را فراهم می‌نماید. همچنان که مشاهده می‌گردد، چنانچه ریزگردانی مقادیر حدی دما و بارش در ایستگاه‌های منفرد مد نظر باشد، مدل تک‌ایستگاهی اس‌دی‌اس‌ام، امکان بهتری را فراهم می‌کند. درحالی‌که مدل چندایستگاهی به دلیل حفظ کوارینانس بین ایستگاهی، برای ریزگردانی در ابعاد منطقه‌ای مناسب‌تر است. چرا که داده‌های تولیدشده توسط این روش، دارای همگنی بیشتری در ابعاد منطقه‌ای بوده و انعکاس‌دهنده ویژگی‌های منطقه‌ای در کل ایستگاه‌های منطقه است؛ بنابراین هرچند عملکرد روش چندایستگاهی در تک‌تک ایستگاه‌ها، ضعیف‌تر از روش تک‌ایستگاهی است، ولی همچنان که از نتایج آزمون‌های به‌کار رفته بر می‌آید، به‌منظور به‌کارگیری نتایج ریزگردانی در برنامه‌ریزی‌های منطقه‌ای، بهتر است از روش‌های چندایستگاهی استفاده شود. از بین ایستگاه‌های مورد بررسی، ضعیف‌ترین عملکرد هر دو مدل، به ایستگاه ایلام مربوط است که دارای بیشترین ناهمگنی و داده‌های مفقود نیز می‌باشد؛ مناسب‌ترین عملکرد نیز به ایستگاه قزوین مربوط است.

مراجع

اوجی ر.، ۱۳۹۲، تحلیل عدم قطعیت روش‌های تک‌ایستگاهی و چندایستگاهی در ریزگردانی مقادیر حدی دما و بارش. رساله دکتری، دانشگاه تربیت مدرس.

- سال سوم، شماره دوازدهم، ۳۵-۵۳.
- رضایی، م.، نهتانی، م.، جان آبکار، ع. و میرکازهی ریگی، م.، ۱۳۹۳، بررسی کارایی مدل ریزمقیاس‌نمایی آماری SDSM در پیش‌بینی پارامترهای دمایی در دو اقلیم خشک و فراخشک (مطالعه موردی: کرمان و بم).
- Downscaling heavy precipitation over the UK: a comparison of dynamical and statistical methods and their future scenarios, *International Journal of Climatology*, 26, 1397-1415, doi: 10.1002/joc.1318.
- Kallache, M., Vrac, M., Naveau, P. and Michelangeli, P. A., 2011 Nonstationary probabilistic downscaling of extreme precipitation, *J. Geophys. Res.*, 116, D05113, doi: 10.1029/2010JD014892.
- Kalnay, E., Kanamitsu, M., Kistler, R., Collins, W., Deaven, D., Gandin, L., Iredell, M., Saha, S., White, G., Woollen, J., Zhu, Y., Leetmaa, A., Reynolds, R., Chelliah, M., Ebisuzaki, W., Higgins, W., Janowiak, D., Mo, K. C., Ropelewski, C., Wang, J., Jenne, R. and Joseph, D., 1996, The NCEP/NCAR 40 year Reanalysis project, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 77, 437-471.
- Kim, K. Y. and Yi, G. S., 2008, CSBio lab., Information and Communications University Sequential KNN imputation method. R package version 1.0.1. <http://csbio.icu.ac.kr>.
- Klein Tank, F., Zwiers, W. and Zhang, X., 2009, Guidelines on Analysis of extremes in a changing climate in support of informed decisions for adaptation, WMO-TD No. 1500, 56 pp.
- Liu W., Guobin, F., Changming L. and Stephen, P. C., 2013, A comparison of three multi-site statistical downscaling models for daily rainfall in the North China Plain, *Theoretical Applied Climatology*, 111, 585-600, doi: 10.1007/s00704-012-0692-0.
- Liu, X. L., Coulibaly, P. and Evora, N., 2008, Comparison of data-driven methods for downscaling ensemble weather forecasts. *Hydrology and Earth System Sciences*, 12, 615-624.
- Liu, Z., Xu, Z., Charles, S. P., Fu, G. and Liu, L., 2011, Evaluation of two statistical downscaling models for daily precipitation over an arid basin in China. *International Journal of Climatology*, 31, 2006-2020.
- Lu, X., 2006, Guidance on the development of climate scenarios within the framework of national communications from parties not
- پژوهشنامه مدیریت حوزه آبخیز. سال پنجم. شماره ۱۰.
- دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ۱۱۷-۱۳۱.
- Benestad, R. E., 2010, Downscaling precipitation extremes, *Theor. App. Climatol.*, 100, 1-21.
- Bürger, G., Murdock, T. Q., Werner, A. T., Sobie S. R. and Cannon, A. J., 2012, Downscaling extremes - an intercomparison of multiple statistical methods for present climate, *J. Clim.*, 25, 4366-4388, doi: 10.1175/JCLI-D-11-00408.1.
- Chen, S. T., Yu, P. S. and Tang, Y. H., 2010, Statistical downscaling of daily precipitation using support vector machines and multivariate analysis, *Journal of Hydrology*, 385, 13-22.
- Christensen, J. H., Hewitson, B., Busuioic, A., Chen, A., Gao, X., Held, I., Jones, R., Kolli, R. K., Kwon, W. T., Laprise, R., Magaña Rueda, V., Means, L., Menéndez, C. G., Ríos-Anen, J., Rinke, A., Sarr, A. and Whetton, P., 2007, Regional climate projections, In *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Solomon, S., Quin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K. B., Tignor, M., Miller, H. L., (eds), Cambridge University Press, Cambridge.
- Farajzadeh, M., Oji, R., Cannon, A. J., Ghavidel Y. and Massah Bavani, A., 2015, An evaluation of single-site statistical downscaling techniques in terms of indices of climate extremes for the Midwest of Iran. *Theoretical and Applied Climatology* 120, 377-390, doi 10.1007/s00704-014-1157-4,
- Guijarro, J. A., 2012, climatol, Some tools for climatology: series homogenization, plus windrose and Walter&Lieth diagrams. R package version 2.1. <http://CRAN.R-project.org/package=climatol>.
- Harpham, C., Wilby, R. L., 2005, Multi-site downscaling of heavy daily precipitation occurrence and amounts, *J. Hydrol.*, 312, 235-255.
- Hashemi, M. Z., Shamseldin, A. Y. and Melville, B. W., 2011, Comparison of SDSM and LARS-WG for simulation and downscaling of extreme precipitation events in a watershed, *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 25, 475-484.
- Haylock, M. R., Cawley, G. C., Harpham, C., Wilby, R. L. and Goodess, C. M., 2006,

- included in annex I (NAI) to the United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC). National Communications Support Programme (NCSP), UNDP-UNEP-GEF.
- Mekis, E. and Vincent, L. A., 2011, An overview of the second generation adjusted daily precipitation dataset for trend analysis in Canada, *Atmosphere-Ocean*, 49, 163-177, doi: 10.1080/07055900.2011.583910.
- Menne, M. J., Durre, I., Vose, R.S., Gleason, B. and Houston, T. G., 2012, An overview of the Global Historical Climatology Network-Daily Database, *J. Atmos. Ocean. Tech.*, 29, 897-910, doi: 10.1175/JTECH-D-11-00103.1.
- Peterson, T. C. and Manton, M. J., 2008, Monitoring changes in climate extremes: a tale of international collaboration, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 89, 1266-1271, doi: <http://dx.doi.org/10.1175/2008BAMS2501.1>.
- Sillmann, J., Kharin, V. V., Zwiers, F. W., Zhang, X. and Bronaugh, D., 2013, Climate extremes indices in the CMIP5 multimodel ensemble: Part 2. Future climate projections, *J. Geophys. Res. Atmos.*, doi: 10.1002/jgrd.50188.
- Wang, X. L., 2008a, Accounting for autocorrelation in detecting mean-shifts in climate data series using the penalized maximal t or F test, *J. App. Meteorol. Climatol*, 47, 2423-2444.
- Wang, X. L., 2008b, Penalized maximal F-test for detecting undocumented mean-shifts without trend-change, *J. Atmos. Oceanic. Tech.*, 25, 368-384, doi:10.1175/2007/JTECHA982.1.
- Wang, X.L., Chen, H., Wu, Y., Feng, Y. and Pu, Q., 2010, New techniques for the detection and adjustment of shifts in daily precipitation data series, *J. App. Meteorol. Climatol*, 49, 2416-2436.
- Wang, X. L. and Feng, Y., 2010, RHtestsV3 user manual: Climate Research Division, Science and Technology Branch, Environment Canada, Toronto, ON, Canada. http://cccma.seos.uvic.ca/ETCCDMI/RHtest/RHtestsV3_UserManual.doc.
- Wang, X. L., Wen, Q. H. and Wu, Y., 2007, Penalized maximal t test for detecting undocumented mean change in climate data series, *J. App. Meteorol. Climatol*, 46, 916-931, doi: 10.1175/JAM2504.1.
- Wetterhall, F., B'ardossy, A., Chen, D., Halldin, S. and Xu, C., 2007a, Daily precipitation-downscaling techniques in three Chinese regions, *Water Resources Research*, 42, W11423, doi: 10.1029/2005WR004573.
- Wetterhall, F., Halldin, S. and Xu, C. Y., 2007b, Seasonality properties of four statistical-downscaling methods in central Sweden, *Theoretical and Applied Climatology*, 87, 123-137.
- Wilby, R. L. and Dawson, C. W., 2007, SDSM User Manual—A decision support tool for the assessment of regional climate change Impacts.
- Wilby, R. L. and Dawson, C. W., 2012, The statistical down scaling model: insights from one decade of application, *Int J Climatol*, doi: 10.1002/joc.3544.
- Wilby, R. L. and Dawson, C. W., 2013, Statistical down scaling model – decision centric (SDSM-DC) version 5.1 supplementary note, Loughborough University, Loughborough.
- Wilby, R. L., Dawson, C. W. and Barrow, E. M., 2002, A decision support tool for the assessment of regional climate Impacts, *Environmental Modeling & Software*, [http://dx.doi.org/10.1016/S1364-8152\(01\)00060-3](http://dx.doi.org/10.1016/S1364-8152(01)00060-3).
- Wilby, R. L. and Fowler, H. J., 2010, Regional climate downscaling, in *Modelling the Impact of Climate Change on Water Resources*, Fung CF, Lopez A, New M (eds). Wiley-Blackwell, Chichester.
- Wilby, R. L., Tomlinson, O. J. and Dawson, C. W., 2003, Multi-site simulation of precipitation by conditional resampling, *Climate Research*, 23, 183-194.
- Wilby, R. L., 1997, Nonstationarity in daily precipitation series: implications for GCM downscaling using atmospheric circulation indices, *International Journal of Climatology*, 17, 439-454.
- Wilby, R. L., 1998a, Modelling low-frequency rainfall events using weather pattern and frontal frequencies, *Journal of Hydrology*, 213, 381-392.
- Wilby, R. L., 1998b, Statistical downscaling of daily precipitation using daily airflow and seasonal teleconnection indices, *Climate Research*, 10, 163-178.
- Wilby, R. L., 2008a, Constructing climate change scenarios of urban heat island intensity and air quality, *Environment and Planning B, Planning and Design*, 35, 902-919.
- Wilby, R. L., 2008b, Dealing with uncertainties of future climate: the special challenge of semi-arid regions, *Proceedings of the Water Tribune, Expo Zaragoza, Spain*.
- Wilks, D. S., 2006, *Statistical methods in the atmospheric sciences*, 2nd ed. Elsevier Academic Press, California, USA.
- Yang, T., Li, H., Wang, W., Xu, C. Y. and Yu, Z., 2012, Statistical downscaling of extreme daily

- precipitation, evaporation, and temperature and construction of future scenarios, *Hydrological processes*, 26, 3510-3523, doi: 10.1002/hyp.8427.
- Zhang, X., Alexander, L., Hegerl, G. C., Jones, P., Tank, A. K., Peterson, T. C., Trewin, B. and Zwiers, F. W., 2011, Indices for monitoring changes in extremes based on daily temperature and precipitation data, *WIREs Clim Change*, 2, 851-870, doi: 10.1002/wcc.147.

An evaluation of single-site and multi-site statistical downscaling of SDSM–DC in terms of indices of climate extremes (Case study: Midwest of Iran)

Farajzadeh, M.¹, Oji, R.^{2*}, Ghavidel, Y.³ and Massah Bavani, A.⁴

1. Professor, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

2. Assistant Professor, University Of Guilan, Iran

3. Assistant Professor, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

4. Associate Professor, University of Tehran, Pakdasht, Iran

(Received: 15 Feb 2016, Accepted: 14 Jun 2016)

Summary

Two single and multi-site statistical downscaling methods of Statistical Downscaling Model–Decision Centric (SDSM–DC) for daily temperature and precipitation are evaluated at nine stations located in the mountainous region of Iran’s Midwest. SDSM is best described as a single-site model, but it can be extended to multi-site applications via conditional resampling (CR-SDSM, Wilby et al. 2003; Harpham and Wilby 2005). SDSM–DC (Wilby and Dawson 2013) is a hybrid of the stochastic weather generator and transfer function methods. Predictor selection is based on empirical relationships between GCM-scale predictors and single-site predictand variables. (Farajzadeh et al. 2015). Applying SDSM to multi-site daily rainfall downscaling includes two steps: (1) the daily rainfall and temperature at a “marker” site (in this study, the area average amounts) is first downscaled by the single-site SDSM; (2) Daily rainfall amounts are then “resampled from the empirical distribution of area averages, conditional on the large-scale atmospheric forcing and the stochastic error term. The actual daily rainfall is determined by mapping the modeled normal cumulative distribution value onto the observed cumulative distribution of amounts at the marker site” (Wilby et al. 2003; Liu et al. 2013). Ultimately, the marker site rainfall is resampled to the constituent amount falling on the same day from each station in the multi-sites array (Harpham and Wilby 2005). Thus, if the marker series is based on an unweighted average of all sites, the conditional resampling will preserve both the areal average of the marker series and the spatial covariance of the multi-site rainfall (Wilby et al. 2003). Additionally, using area average, instead of individual sites as the marker series, reduces the risk of employing a nonhomogeneous/non-representative record and increases the signal to noise ratio of the predictand (Wilby et al. 2003; Liu et al. 2013). To downscale temperature, the same steps are applied but unconditionally using transfer function methods. For statistical downscaling, two sets of data are generally required: (1) observational data for model calibration and validation, as predictands; and (2) synoptic-scale climate data from GCM and/or reanalysis, as predictors. In order for a better assessment of climate variability and change on local and regional scale, long-term time series of reliable climate data at fine-scale resolution are required (Vincent et al 2002; Mekis and Vincent 2011; Menne et al 2012). As mentioned before, for the Midwest of Iran, we selected nine synoptic stations with nearly complete data coverage for 1981–2010. We used station data for two decades (1981–2000) for calibration and from one decade (2001–2010) for validation of daily values of minimum and maximum temperature, and total daily precipitation. To assess the accuracy and homogeneity of the observational data, we used different methods for quality control: the R packages RHtestsV3 (Wang and Feng 2010) and RHtests_dlyPrp (Wang et al. 2010), based on penalized maximal t and F tests (Wang et al. 2007; Wang 2008b) that are embedded in a recursive testing algorithm (Wang 2008a); the R package Climatol (Guijarro 2012), which applies a type II linear regression model; and SDSM (Wilby and Dawson 2012, 2013) based on reanalysis predictor variables. Missing values are filled in by using the sequential k-nearest neighbor imputation method (Kim and Yi 2008) and homogeneity tests are applied both before and after infilling to assess infilling performance. Predictor fields are extracted from the National Centers for Environmental Prediction (NCEP) Reanalysis (Kalnay et al. 1996) archives at resolutions of 2.5°×2.5°. As mentioned earlier, SDSM has its own methodology for predictor selection in which EOFs of NCEP reanalysis data over the domain (30° N, 42° E) and (40° N, 52° E) are screened separately for temperature and for precipitation. (Farajzadeh et al. 2015). Results indicate that the methods are of widely varying complexity, with input requirements that range from single point predictors of temperature and precipitation to multivariate synoptic-scale fields. The period 1981–2000 is used for model calibration and 2001–2010 for validation, with performance assessed in terms of 27 Climate Extremes Indices (CLIMDEX). The sensitivity of the methods to large-scale anomalies and their ability to replicate the observed data distribution in the validation period are separately tested for each index by Pearson correlation and Kolmogorov–Smirnov (KS) tests, respectively. Combined tests are used to assess overall model performances. Single (multi)-site method of SDSM, passing 76%(81%), 16%(7%) and 14% (5%) of the Kolmogorov–Smirnov (KS), the Pearson correlation and the combined tests, performed well in terms of temperature and precipitation downscaling. Single-site method performed better than multi-site one at single sites; however, multisite method performance is better at regional downscaling. Correlation tests were passed less frequently than KS tests. Both methods downscaled temperature indices better than precipitation indices. Some indices, notably R20, R25, SDII, CWD, and TNx, were not successfully simulated by any of the methods. Model performance varied widely across the study region.

Keywords: Single-site and multi-site downscaling, SDSM, Climate extremes, Pearson correlation and Kolmogorov–Smirnov (KS) tests, Iran’s Midwest.