

اصلاح خطای دما و بارش در شبیه‌سازی مدل‌های آب و هوایی

اصغر کامیار^{*۱}

^۱ دانش‌آموخته دکتری اقلیم‌شناسی، کارشناس سازمان هواشناسی کشور

تاریخ دریافت: ۹۸/۱۲/۸ ؛ تاریخ پذیرش: ۹۹/۲/۱۷

چکیده

اصلاح خطا معمولاً برای خروجی‌های مدل اقلیمی قبل از استفاده بعنوان ورودی مدل‌های محیطی در مطالعات اثر تغییر اقلیم استفاده می‌شود. در این پژوهش ابتدا خروجی شش GCM ریزمقیاس نمایی شده با RegCM4-4 در محدوده CORDEX جنوب آسیا با قدرت تفکیک افقی حدود ۵۰ کیلومتر از سایت ESGF دریافت گردید. همچنین داده‌های بارش، دمای بیشینه و دمای کمینه ۴۱ ایستگاه همدید با نزدیکترین فاصله با یاخته‌های مدل‌ها در محدود ایران از سازمان هواشناسی کشور اخذ شد. سپس دقت خروجی‌های یاخته‌های متناظر با ایستگاه‌های زمینی نسبت به داده‌های مشاهداتی با روش‌های همبستگی و انحراف معیار استاندارد شده با استفاده از نمودار تیلور ارزیابی گردید. در ادامه خطای مدل با کمترین خطای آماری برای خروجی‌های بارش با روش fitQmapRQUANT و برای خروجی‌های دمای بیشینه و دمای کمینه با روش اصلاح خطای اسکن خطی تصحیح خطا شدند. نتایج نشان داد روش‌های اصلاح خطای بکار رفته برای خروجی‌های دما سبب کاهش خطای داده‌ها شده است. برای دمای بیشینه در اکثر ایستگاه‌های مطالعاتی کم برآوردی این متغیر مشاهده گردید. این کم برآوردی در فصول گرم سال بیشتر از فصول سرد سال است. خروجی‌های ماهانه دمای کمینه مدل CCCma در مقایسه با داده‌های ایستگاه‌های واقع در مناطق جنوبی ایران بیش برآوردی این متغیر را بویژه در فصول گرم سال از خود نشان دادند. این در حالی است که در اکثر ایستگاه‌های واقع در عرض‌های جغرافیایی بالا برآوردی درست یا کم برآوردی این متغیر مشاهده شد. در حالی که برای خروجی‌های بارش به سبب اختلاف زیاد بین داده‌های مشاهداتی و مدل روش اصلاح خطا اثر بخش نبود. برای این متغیر مدل در شبیه‌سازی آن متأثر از بارش‌های موسمی جنوب آسیا برآورد درستی از بارش‌های جنوب ایران نداشته و شرایط بارش تابستانه را در این مناطق و حتی مناطق واقع در عرض‌های بالاتر در خروجی‌های هر شش مدل مورد بررسی از خود نشان داد.

واژه‌های کلیدی: RegCM4-4، اصلاح خطا، CORDEX، تغییر اقلیم.

مقدمه

توجه به پیش‌بینی اقلیم‌شناسی نادیده انگاشته نشود. مزیت روش‌های اصلاح خطا^۱ این است که اجازه تغییر در متغیرهای زمانی آب و هوا را داده و سناریوهای آب و هوایی گذرا^۲ ایجاد می‌کند. با این وجود در روش‌هایی چون تغییر دلتا^۳ اطمینان به فرض ایستگاهی بودن برای خطاهای مدل جای تردید دارد. اما باید توجه داشت خروجی مدل‌های جهانی و منطقه‌ای آب و هوا (RCMs, GCMs) با خطاها سامانمند همراه بوده و در مقیاس ایستگاهی برای ارزیابی اثرات تغییر آب و هوا اغلب آزمایشی بوده و

اصلاح خطای متغیرهای هواشناسی از شبیه‌سازی مدل اقلیمی راهبردی مرسوم برای رفع محدودیت‌های موجود در وضعیت فناورانه مدل‌های گردش عمومی جو در نظر گرفته می‌شود. پیش‌بینی‌هایی که به درستی کالیبره شوند ویژگی‌های آماری مشابه را بعنوان توزیعی اصلی که توسط طبیعت بوجود آمده، را به‌همراه دارند. برای این که این پیش‌بینی‌ها برای تصمیم‌گیران مفید باشد باید آنها را اصلاح کرد، به این معنی که توزیع پیش‌بینی شده در تمام مدل‌ها با

1. Bias Correction
2. Transient
3. Delta-Change

*نویسنده مسئول: asgharkhuzani@gmail.com

عملیاتی نیستند (ایوانوف و کوتلارسکی^۱، ۲۰۱۷؛ کرینر^۲ و همکاران، ۲۰۱۹؛ بک^۳ و همکاران، ۲۰۲۰؛ غیمیر و همکاران، ۲۰۱۹). مدل‌های مبتنی بر همرفت با قدرت تفکیک بسیار بالا بطور فراگیر مورد استفاده قرار می‌گیرند اما این مدل‌ها دارای محاسباتی سنگین، خطاهای سامانمند و نامناسب برای ارزیابی‌های نقطه‌ای هستند. غالباً ریزمقیاس نمایی با رویکرد تغییر دلتا و اصلاح خطا صورت می‌گیرد. ارزیابی اثرات تغییر اقلیم اغلب به تغییرپذیری اشتراکی متغیرهای چندگانه وابسته بوده و عموماً روش اصلاح خطا برای بهبود هر متغیر بطور مستقل و بدون ارتباط با متغیرهای دیگر صورت می‌گیرد. بنابراین اصلاح خطای مستقل می‌تواند اصلاحات غیرفیزیکی ایجاد کند و ممکن است ارتباطات مهم چندگانه با شکست روبرو شود (لی^۴ و همکاران، ۲۰۱۴؛ مولر^۵ و همکاران، ۲۰۱۳؛ ترفند^۶ و همکاران، ۲۰۱۰؛ پیانی و هاپر^۷، ۲۰۱۲؛ ژانگ و همکاران، ۲۰۱۳). برای نمونه می‌توان بیان کرد با استفاده از روش‌های اصلاح خطا بصورت مستقل نمی‌توان روابط چند متغیره را اصلاح نمود (مارون^۸ و همکاران، ۲۰۱۷؛ دوسیو و پارولو^۹، ۲۰۱۱). هر مدل اقلیمی مستقل از دیگر مدل‌ها برای محاسبه خطاهای اساسی منتهج از تنوع ساختاری و درونی، پس پردازش می‌گردند. همچنین در حال حاضر بررسی تنوع درونی عناصر چند عضوی در جامعه مدلسازی اقلیم بسیار مرسوم است و اصلاح خطای هر عنصر نیاز به ملاحظه‌های ویژه‌ای دارد. اصلاح همه عناصر هر مدل تجمعی بطور مستقل به تمام اثر آنها بر توزیع هدفمند نیاز دارد، بنابراین اثر تنوع ذاتی بر دوره پیمایش از بین می‌رود. این که چگونه این اثر نامطلوب به دوره زمانی بعد منتقل می‌شود در حال حاضر یکی از سؤالات اساسی مدلسازان

اقلیمی محسوب می‌شود (چن^{۱۰}، ۲۰۱۹؛ کانون^{۱۱} و همکاران، ۲۰۲۰). بیشتر روش‌های اصلاح خطا تمام شبیه‌سازی مدل‌های اقلیمی را به داده‌های مشاهداتی طی دوره پیمایش نزدیک می‌نماید. بدلیل عدم ثابت بودن خطا ممکن است پس از اصلاح خطا اختلافاتی بین دوره اعتبارسنجی یا دوره‌های شبیه‌سازی شده آینده وجود داشته باشد (گو^{۱۲} و همکاران، ۲۰۱۹؛ مارون و همکاران، ۲۰۱۲). از روش‌های اصلاح خطا نمی‌توان اصلاح تغییرپذیری بین شبیه‌سازی‌های اقلیمی را انتظار داشت (چن و بریزت^{۱۳}، ۲۰۱۹). در این پژوهش پس از ارزیابی خطای خروجی ریزمقیاس نمایی شده چند مدل جهانی آب و هوا با روش‌های اصلاح خطا، خطای خروجی‌ها اصلاح گردید.

مواد و روش‌ها

جهت انجام این پژوهش خروجی ریزمقیاس نمایی شده شش مدل جهانی آب و هوا با مدل منطقه‌ای RegCM4.4 در پروژه CORDEX جنوب آسیا با قدرت تفکیک افقی حدود ۵۰ کیلومتر از پایگاه ESGF دریافت شد (جدول ۱). همچنین داده‌های دما (کمینه، بیشینه) و بارش ۴۱ ایستگاه متناظر با یاخته‌های مورد بررسی به صورت روزانه و برای دوره ارزیابی (۲۰۰۵-۱۹۸۶) از سازمان هواشناسی ایران (IRIMO) اخذ گردید (شکل ۱؛ جدول ۲). برای ارزیابی مدل‌ها، ابتدا یاخته‌های با فاصله کمتر از ۲۰ کیلومتر از ایستگاه‌های مشاهداتی استخراج و پس از آن با استفاده از نمودار تیلور مدلی که کمترین خطا آماری را داشت انتخاب و با استفاده از روش‌های اصلاح خطا، خطای خروجی‌های دمای کمینه، دمای بیشینه و بارش مدل‌ها اصلاح گردید. اصلاح خطای خروجی‌های دمای کمینه و بیشینه با روش اصلاح خطای اسکن خطی^{۱۴} و اصلاح خطای داده‌های بارش با روش اصلاح خطای ناپارامتری تجربی قوی^{۱۵} در

1. Ivanov & Kotlarski
2. Krinner
3. Beck
4. Li
5. Müller
6. Terink
7. Piani & Haerter,
8. Maraun
9. Dosio & Paruolo

10. Chen
11. Cannon
12. Guo
13. Chen & Brissette
14. Linear scanning bias correction
15. Non-parametric quantile mapping using robust empirical quantiles

حدافل مربع خطی برآورد می‌کند. همچنین تابع doQmapRQUANT اصلاح خطا را با میانبایی تصحیحات تجربی انجام می‌دهد.

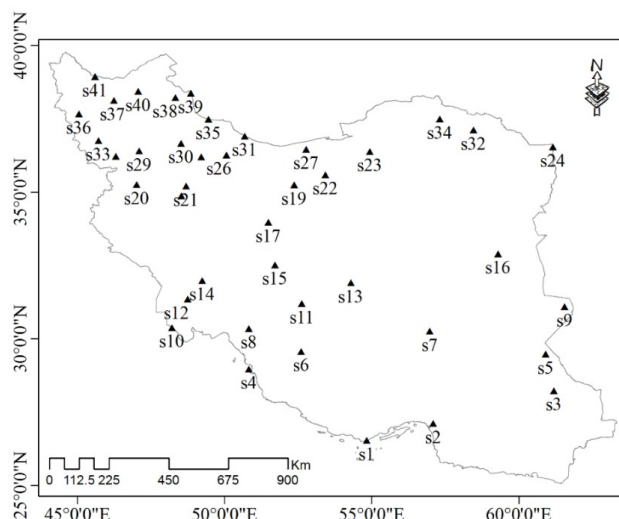
بسته نرم‌افزاری qmap انجام شد. در بسته نرم‌افزاری qmap تابع fitQmapRQUANT ارتباط -quantile- quantile سری زمانی مشاهداتی و مدلسازی شده را برای تصحیحات با فاصله منظم با استفاده از رگرسیون

جدول ۱: مدل‌های ارزیابی شده در این پژوهش.

مدل جهانی آب و هوا (GCMs)	مدل منطقه‌ای آب و هوا (RCMs)
CCCma-CanESM2	RegCM4.4
CNRM-CERFACS-CNRM-CM5	
CSIRO-QCCCE-CSIRO-Mk3-6-0	
IPSL-IPSL-CM5A-LR	
MPI-M-MPI-ESM-MR	
NOAA-GFDL-GFDL-ESM2M	

جدول ۲: ایستگاه‌ها متناظر با یاخته‌ها مدل‌های مورد بررسی به همراه کد در نظر گرفته شده برای آنها.

Stations Name	S. Code	Lon	Lat	Stations Name	S. Code	Lon	Lat
Bandar-e-Lengeh	s1	54.82833	26.52833	Semnan	s22	53.42139	35.58833
Minab	s2	57.08861	27.10694	Shahrud	s23	54.92972	36.38056
Khash	s3	61.185	28.22694	Sarakhs	s24	61.14889	36.53722
Bushehr (Airport)	s4	50.81917	28.96306	Khorramdareh	s25	49.21083	36.19583
Zahedan	s5	60.90028	29.47222	Qazvin	s26	50.06139	36.26167
Shiraz	s6	52.6025	29.56139	Gharakhil	s27	52.77167	36.45417
Kerman	s7	56.9625	30.25611	Saqez	s28	46.31111	36.22167
Dogonbadan	s8	50.81917	30.34611	Takab	s29	47.09861	36.39556
Zabol	s9	61.54306	31.08861	Zanjan	s30	48.52167	36.66028
Abadan	s10	48.21472	30.37722	Ramsar	s31	50.68333	36.90444
Abadeh	s11	52.61639	31.19833	Quchan	s32	58.45	37.11667
Ahvaz	s12	48.74417	31.34472	Mahabad	s33	45.71528	36.75333
Yazd	s13	54.28972	31.90389	Bojnurd	s34	57.30333	37.48722
Masjedsoleyman	s14	49.24083	31.98333	Bandar Anzali	s35	49.4575	37.47972
Esfahan	s15	51.70611	32.5175	Orumiyeh	s36	45.05528	37.65861
Birjand	s16	59.28361	32.89056	Tabriz	s37	46.2425	38.12222
Kashan	s17	51.48083	33.96694	Ardebil	s38	48.32861	38.21806
Hamedan (Air.)	s18	48.53472	34.86944	Astara	s39	48.85472	38.365
Garmsar	s19	52.36028	35.24306	Ahar	s40	47.06667	38.43333
Sanandaj	s20	47.01472	35.25444	Jolfa	s41	45.6	38.93333
Hamedan (Noz.)	s21	48.69028	35.19528				

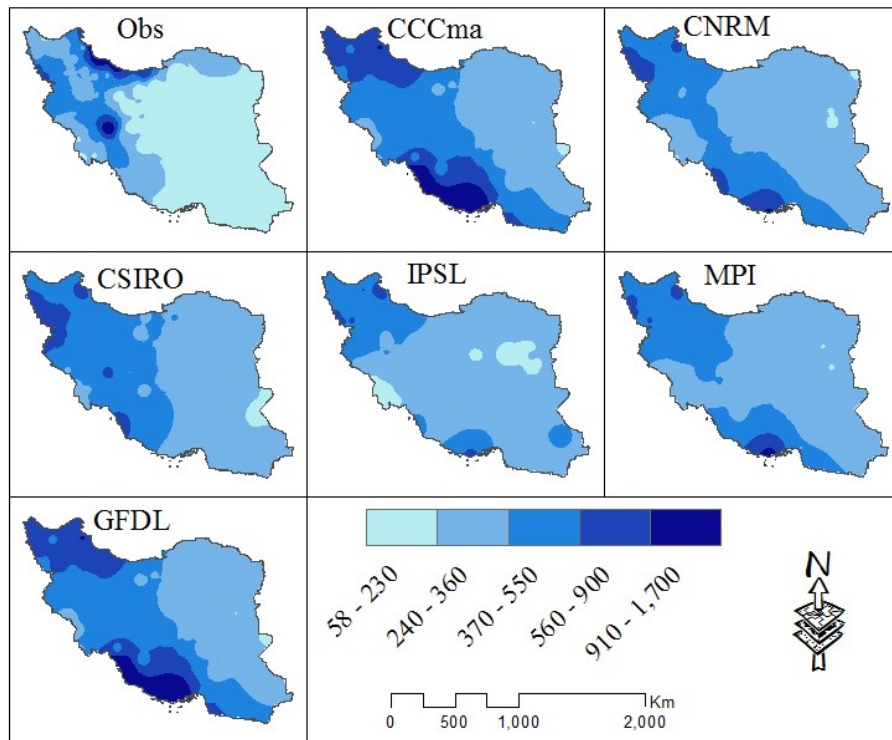


شکل ۱: موقعیت ایستگاه‌های همدیدی متناظر با یاخته‌های مدل‌های مورد بررسی، به‌مراه کد معرف آنها.

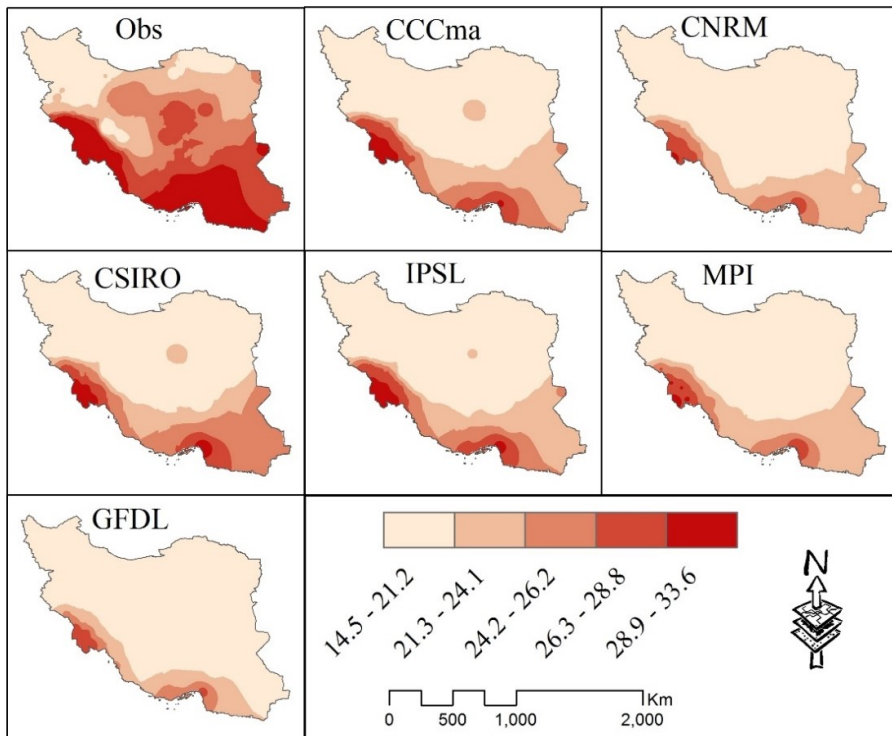
یافته‌ها و بحث

ارزیابی خروجی‌های مدل RegCM4-4: مقایسه داده‌های مشاهداتی و خروجی‌های بارش طی دوره ۱۹۸۷-۲۰۰۵ بیانگر این است که هیچ یک از مدل‌ها مقادیر میانگین بلندمدت بارش را به درستی شبیه‌سازی نکرده و اختلاف بسیار زیادی بین این داده‌ها و داده‌های مشاهداتی وجود دارد. به طوری که در مدل‌های CNRM، MPI، GFDL و CCCma بارش‌های سواحل جنوبی کشور را بالاتر از ۹۱۰ میلیمتر برآورد کرده که بسیار با مقادیر واقعی فاصله دارد. بین مدل‌های مورد بررسی مدل CSIRO خطای کمتری نسبت به بقیه دارد (شکل ۲). مقایسه داده‌های بیشینه دما مشاهداتی و خروجی این متغیر برای مدل‌های مختلف نشان می‌دهد مدل CCCma کمترین اختلاف با داده‌های مشاهداتی دارد. همه مدل‌ها برآورد درستی از دمای بیشینه در جنوب کشور دارند و این در حالی است که در مناطق شمالی دقت

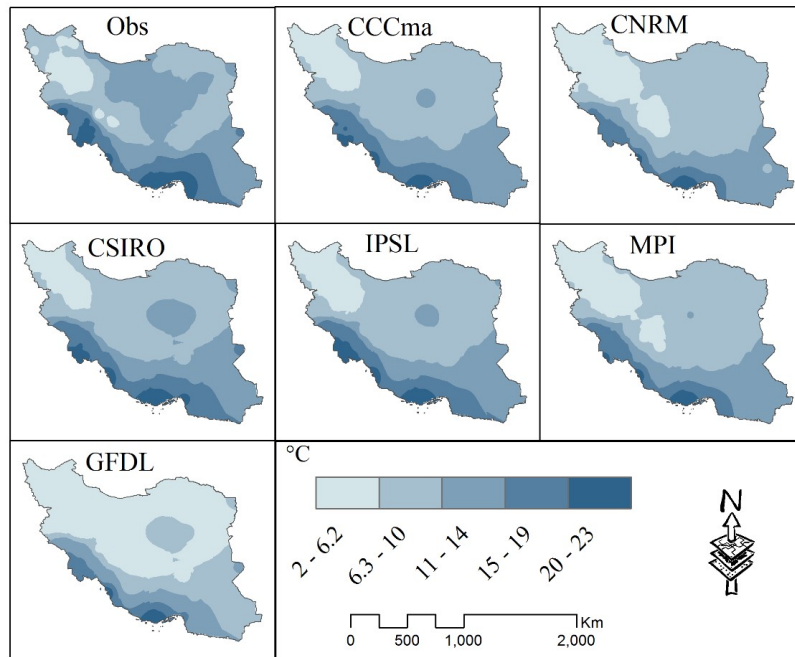
قابل قبولی ندارند (شکل ۳). مقایسه داده‌های میانگین بلندمدت دمای کمینه مشاهداتی و خروجی مدل‌ها نشان می‌دهد مدل CCCma نسبت به مدل‌های دیگر برآورد درست‌تری از مقادیر این متغیر دارد (شکل ۴). نمودار تیلور که از انحراف معیار استاندارد شده و ضریب همبستگی میانگین بلندمدت روزانه در ۱۲۹ ایستگاه و یاخته متناظر آن حاصل شد برای خروجی‌های بارش نشان می‌دهد که هیچ یک از مدل‌ها مقادیر بارش را خوب شبیه‌سازی نکرده‌اند. نمودار تیلور برای خروجی مدل‌های مختلف نشان می‌دهد در مجموع دو مدل CNRM و CSIRO بیشترین همبستگی و کمترین انحراف معیار را نسبت به داده‌های مشاهداتی دارند. برای دمای بیشینه و بیشینه مدل CCCma کمترین انحراف معیار و بیشترین همبستگی را با داده‌های مشاهداتی نشان می‌دهد (شکل ۵).



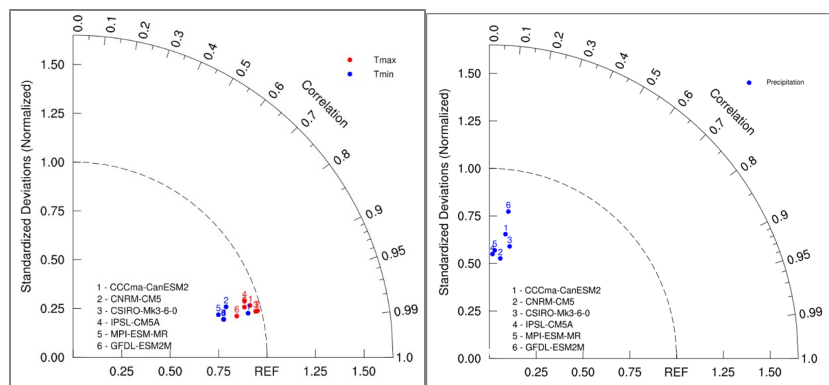
شکل ۲: مقدار بارش برحسب میلیمتر طی دوره ۱۹۸۶-۲۰۰۵ در ایستگاه‌ها و یاخته‌های متناظر آنها در مدل‌های مختلف.



شکل ۳: میانگین بلندمدت دمای بیشینه طی دوره ۱۹۸۶-۲۰۰۵ در ایستگاه‌ها و یاخته‌های متناظر آنها در مدل‌های مختلف.



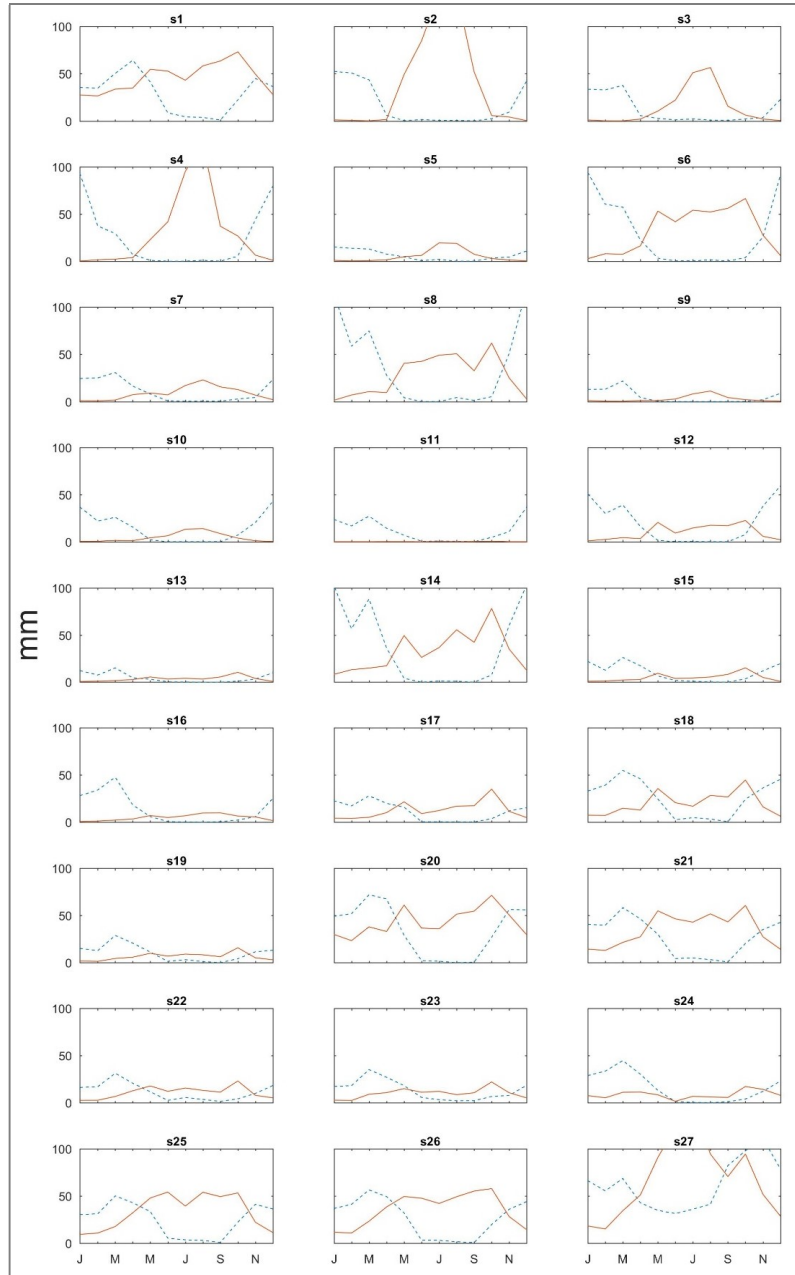
شکل ۴: میانگین بلندمدت دمای کمینه طی دوره ۱۹۸۶-۲۰۰۵ در ایستگاه‌ها و یاخته‌های متناظر آنها در مدل‌های مختلف.



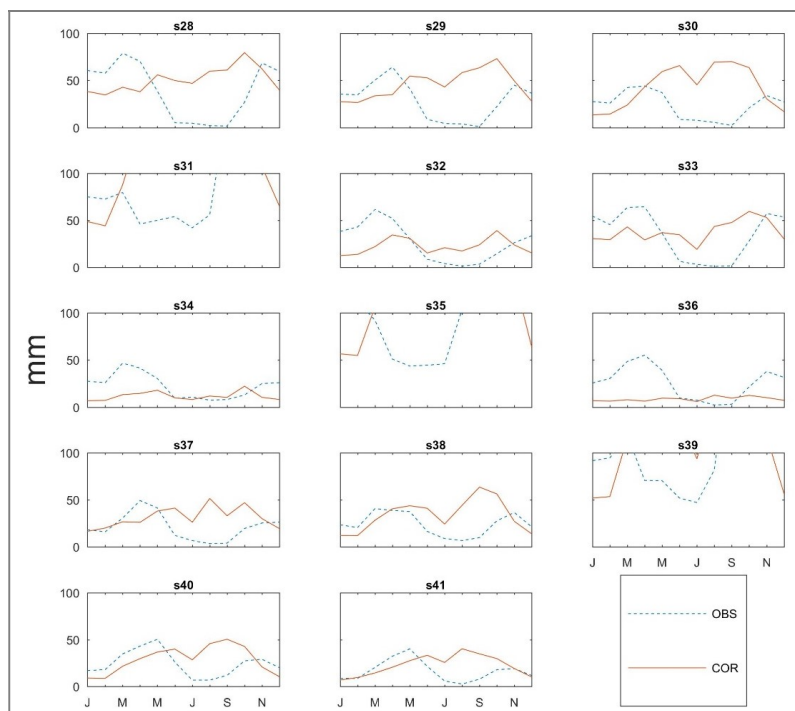
شکل ۵: نمودار تیلور خروجی مدل RegCM4-4 برای مدل جهانی مختلف طی دوره ۱۹۸۶-۲۰۰۵، حاصل از میانگین همبستگی و انحراف معیار استاندارد شده بلندمدت روزانه ۱۲۹ ایستگاه همدید و یاخته متناظر هر ایستگاه.

داده‌های مدل جهانی آب و هوا جستجو کرد. بنظر می‌رسد در این مدل‌ها با توجه به نزدیکی ایران به سامانه‌های جوی موسمی جنوب آسیا و عدم استفاده از ایستگاه‌های زمینی واقع در این مناطق برای تولید داده‌های مدل‌های جهانی خطایی فاحش در خروجی نهایی آنها وجود دارد. در نهایت با توجه به اختلاف زیاد بین خروجی‌های این مدل با داده‌های مشاهداتی روش اصلاح خطای استفاده شده تأثیر زیادی در تصحیح خطای این خروجی‌ها نداشت (شکل ۶).

اصلاح خطای خروجی‌های مدل RegCM4-4: خروجی ماهانه مدل CSIRO که نسبت به مدل‌های دیگر همبستگی بیشتر با داده‌های مشاهداتی داشت برای اصلاح خطای متغیر بارش استفاده شد. خروجی‌های این مدل در اکثر یاخته‌های متناظر با ایستگاه‌های مطالعاتی در فصول سرد سال کم برآوردی بارش و در فصول گرم سال که بارش در اکثر ایستگاه‌ها نزدیک به صفر است مقادیر بالای بارش توسط مدل برآورد شده است. این مشکل را می‌توان در ورودی



شکل ۶: میانگین ماهانه بارش برای داده‌های مشاهداتی (OBS) و مدل CCCma اصلاح شده (COR).

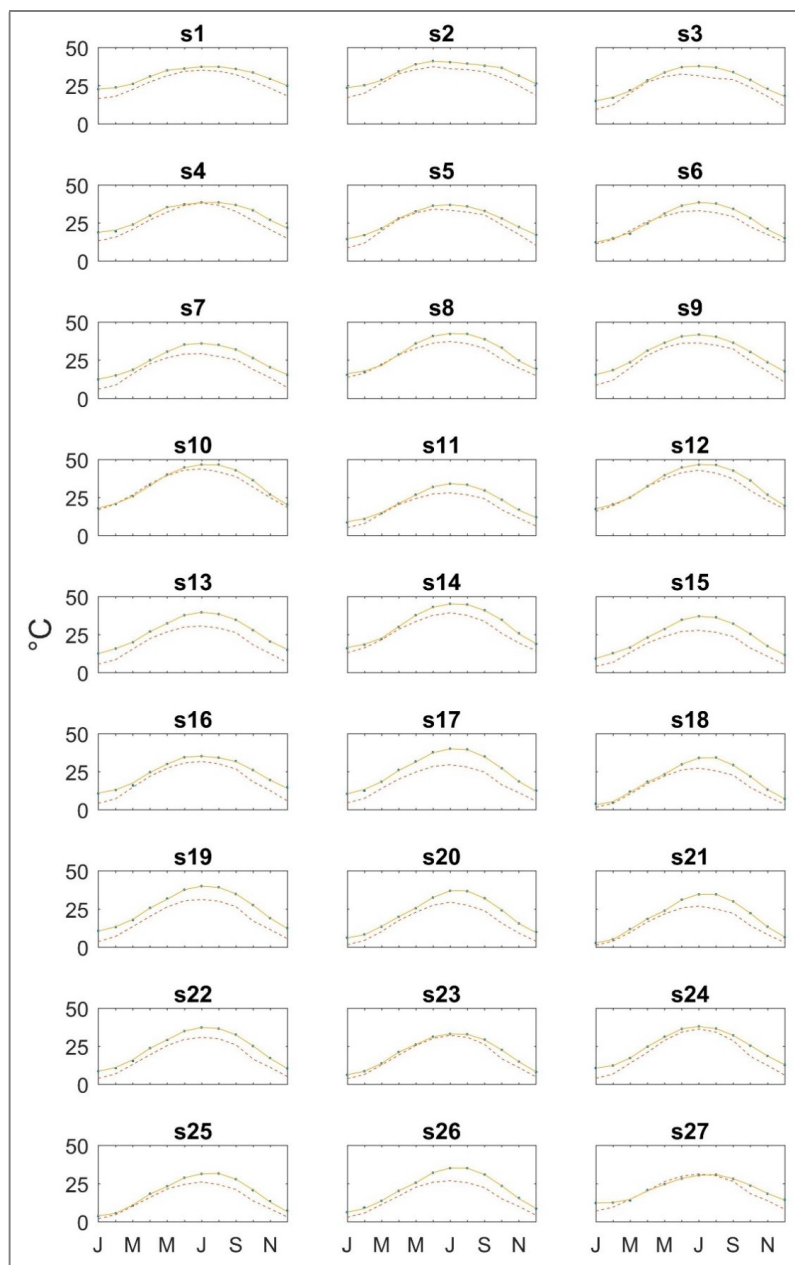


ادامه شکل ۶-

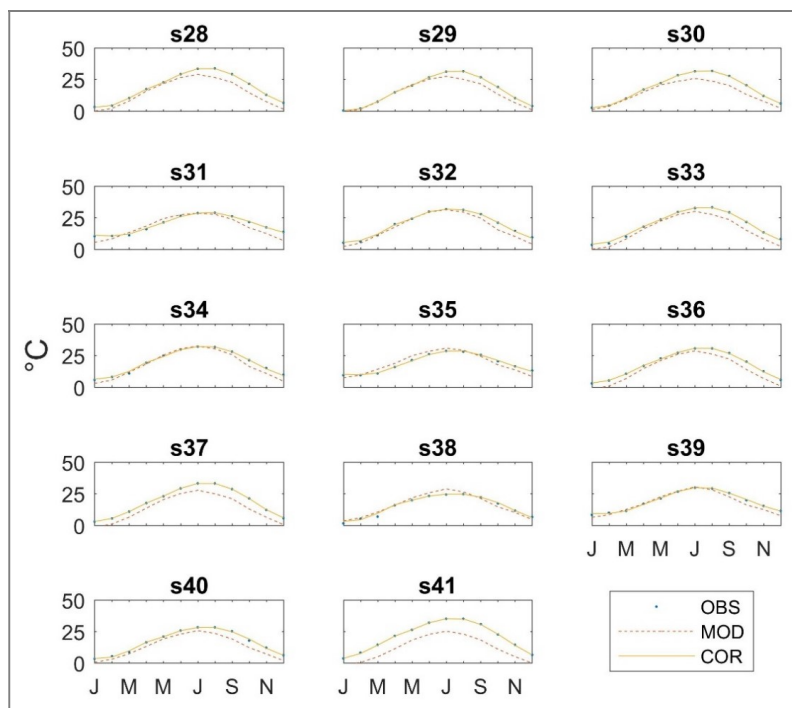
s16، s18، s21، s25، s26، s28، s29، s30 و s40 در همه فصول بجز فصل زمستان و در یاخته‌های s1، s2، s7، s9، s13، s15، s17، s19، s20، s22، s37 و s41 در همه فصول کم برآوردی خروجی‌های مدل نسبت به داده‌های ایستگاهی مشاهده گردید. همچنین در یاخته‌های s32، s33، s34، s35، s38 و s39 اختلاف داده‌های مشاهداتی و خروجی‌های مدل بسیار به هم نزدیک هستند (شکل ۷). اصلاح خطای خروجی‌های این مدل برای یاخته‌های متناظر با نزدیکترین ایستگاه زمینی در همه فصول سبب از بین رفتن خطاهای موجود در این خروجی‌ها شد.

ارزیابی خطای مدل‌های برای دمای کمینه و بیشینه نشان داد مدل CCCma کمترین خطا را با داده‌های مشاهداتی دارد. به همین سبب خروجی‌های مدل CCCma برای اصلاح خطای این دو متغیر در نظر گرفته شد. برای اصلاح خطای خروجی‌های ریزمقیاس نمایی شده این مدل از روش اصلاح خطای اسکن خطی برای ۴۱ یاخته متناظر با نزدیکترین ایستگاه زمینی استفاده شد.

برای متغیر دمای بیشینه در یاخته‌های s4، s10، s23، s24، s27، s31، s36 در همه فصول بجز فصل تابستان، در یاخته‌های s3، s5، s6، s8، s11، s12، s14،



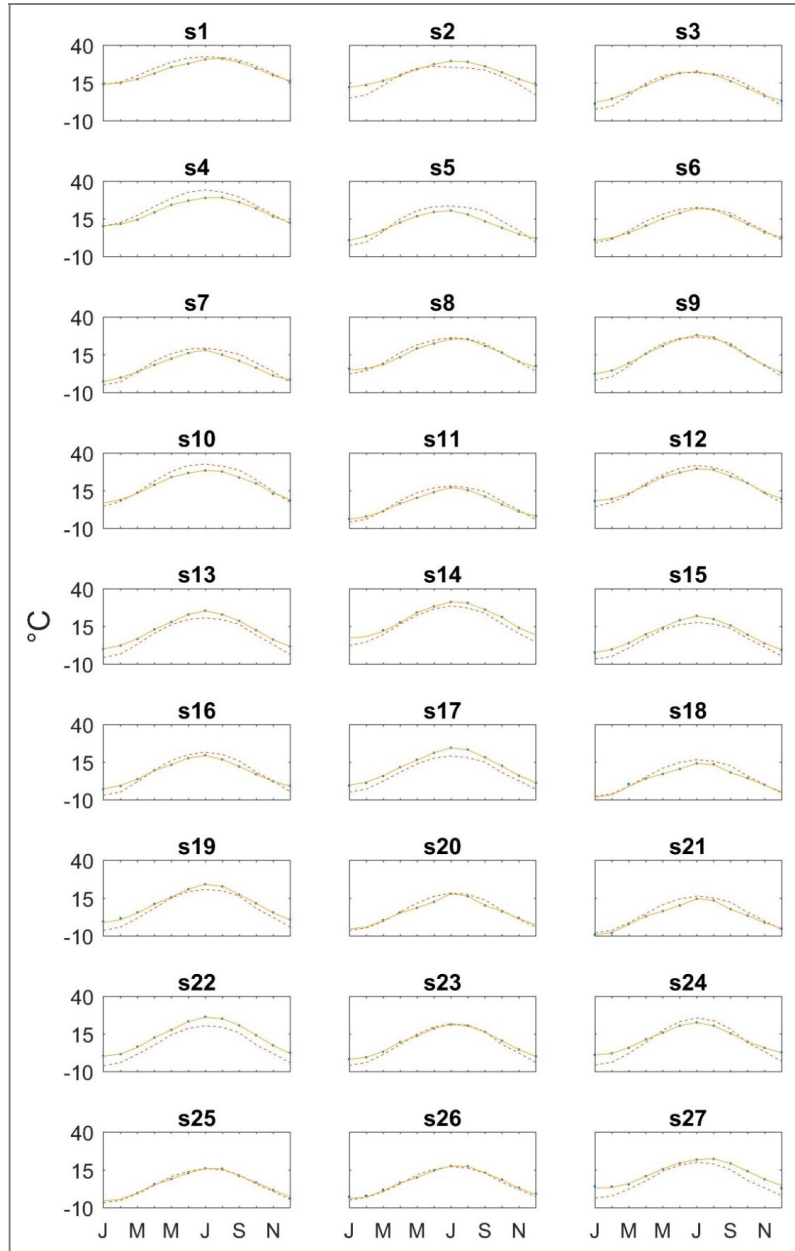
شکل ۷: میانگین ماهانه دمای بیشینه برای داده‌های مشاهده‌ای (OBS) و مدل CCCma بدون اصلاح (MOD) و اصلاح شده (COR).



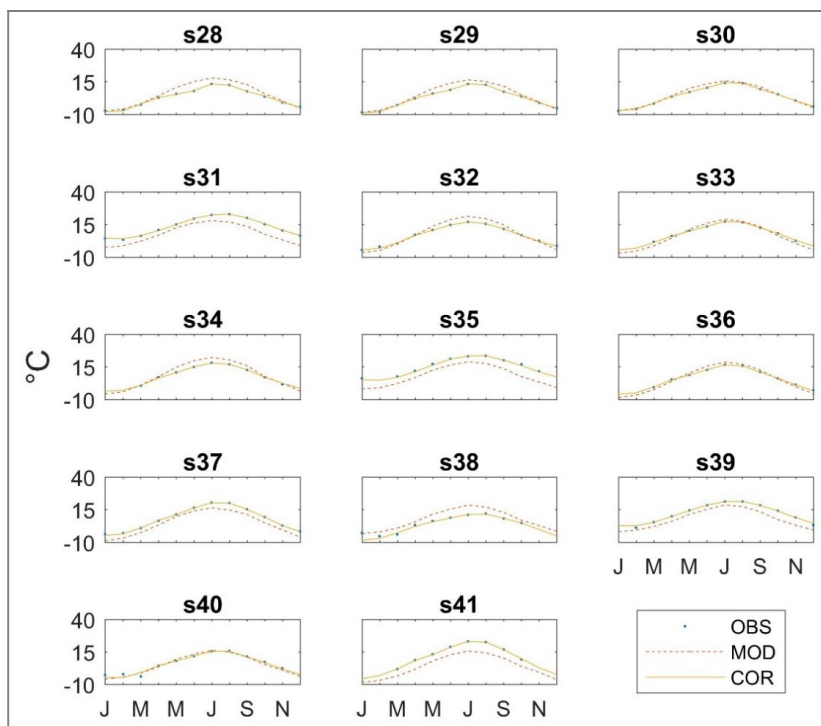
ادامه شکل ۷-

شد. در یاخته‌های s5، s15، s17، s24، s31، s35، s39 و s41 در همه فصول کم برآوردی بین خروجی‌های یاخته‌های متناظر با ایستگاه همدیدی و داده‌ها زمینی مشاهده گردید. همچنین در یاخته‌های s6، s7، s8، s11، s12، s21، s25، s26، s30، s33، s36 و s40 اختلاف زیادی بین داده‌های مشاهداتی و داده‌های مدل وجود نداشت (شکل ۸). اصلاح خطاهای موجود با روش اسکن خطی صورت گرفت که با رفع این خطاها مقادیر ماهانه داده‌های مدل به داده‌های مشاهداتی بسیار نزدیک گردید.

برای متغیر دمای کمینه خروجی مدل CCCma برای یاخته متناظر با نزدیکترین ایستگاه زمینی در یاخته‌های s1، s26، s38 و s39 بیش برآوردی و در یاخته‌های s16، s19، s27 و s37 کم برآوردی در شش ماه اول سال، در یاخته‌های s2، s13 و s14 کم برآوردی در همه فصول بجز فصل بهار، در یاخته‌های s3، s9 و s23 کم برآوردی تنها در فصل زمستان، در یاخته‌های s4 و s22 کم برآوردی در همه فصول بجز فصل زمستان و در یاخته‌های s10، s18، s32 و s34 کم برآوردی در همه فصول بجز فصل تابستان مشاهده



شکل ۸: میانگین ماهانه دمای کمینه برای داده‌های مشاهداتی (OBS) و مدل CCCma بدون اصلاح (MOD) و اصلاح شده (COR).



ادامه شکل ۸-

نتیجه‌گیری

تصحیح خروجی‌های این متغیر نداشته و امکان استفاده از این خروجی‌ها را در مطالعات ارزیابی اثر تغییر اقلیم ناممکن می‌نماید. برای دمای بیشینه در اکثر ایستگاه‌های مطالعاتی کم برآوردی این متغیر مشاهده گردید. این کم برآوردی در فصول گرم سال بیشتر از فصول سرد سال است. از سویی دیگر اختلاف بین داده‌های مشاهداتی و خروجی مدل CCCma در ایستگاه‌های واقع در عرض‌های جغرافیایی بالاتر نیز کمتر بوده که می‌توان بیان کرد مدل در این مناطق نسبت به مناطق واقع در عرض‌های جغرافیایی پایین در برآورد دمای بیشینه خطای کمتری داشته است. خروجی‌های ماهانه دمای کمینه مدل CCCma در مقایسه با داده‌های ایستگاه‌های واقع در مناطق جنوبی ایران بیش برآوردی این متغیر را بویژه در فصول گرم سال از خود نشان دادند. این در حالی است که در اکثر ایستگاه‌های واقع در عرض‌های جغرافیایی بالا برآوردی درست یا کم برآوردی این متغیر مشاهده شد. اصلاح خطای خروجی‌های مدل برای این متغیر سبب تصحیح خطاهای موجود در یاخته‌های متناظر با ایستگاه‌های مشاهداتی گردید.

در این پژوهش ارزیابی خروجی شش مدل جهانی آب و هوا که با مدل RegCM4-4 ریزمقیاس نمایی شده‌اند نشان داد هیچ یک از مدل‌ها در شبیه‌سازی بارش برآورد مناسبی نداشتند. در حالی که ارزیابی خروجی‌های دمای بیشینه و کمینه نشان داد مدل CCCma نسبت به سایر مدل‌ها با داده‌های مشاهداتی بیشترین همبستگی و کمترین اختلاف را در میانگین انحراف معیار مشاهداتی و مدل دارند. پس از شناسایی مدل با کمترین خطا با استفاده از روش fitQmapRQUANT خروجی‌های بارش و بارش اصلاح خطای اسکن خطی خروجی‌های دمای بیشینه و کمینه اصلاح شد. برای متغیر بارش مدل در شبیه‌سازی آن متأثر از بارش‌های موسمی جنوب آسیا برآورد درستی از بارش‌های جنوب ایران نداشته و شرایط بارش تابستانه را در این مناطق و حتی مناطق واقع در عرض‌های بالاتر در خروجی‌های هر شش مدل مورد بررسی از خود نشان داد. اصلاح خطای خروجی‌های بارش با توجه به اختلاف زیاد بین داده‌های مدل و داده‌های مشاهداتی اثر مطلوبی در

منابع

1. Ahmed, K.F., Wang, G., Silander, J., Wilson, A.M., Allen, J.M., Horton, R., and Anyah, R. 2013. "Statistical downscaling and bias correction of climate model outputs for climate change impact assessment in the U.S. Northeast". *Global and Planetary Change*, 100, 320-332.
2. Beck, H.E., Wood, E.F., McVicar, T.R., Zambrano-Bigiarini, M., Alvarez-Garreton, C., Baez-Villanueva, O.M., and Karger, D.N. 2020. Bias Correction of Global High-Resolution Precipitation Climatologies Using Streamflow Observations from 9372 Catchments. *Journal of Climate*, 33(4), 1299-1315. doi: 10.1175/jcli-d-19-0332.1
3. Berg, P., Feldmann, H., and Panitz, H.J. 2012. "Bias correction of high-resolution regional climate model data". *Journal of Hydrology*, 448-449, 80-92.
4. Cannon, A.J., Piani, C., and Sippel, S. 2020. Chapter 5 - Bias correction of climate model output for impact models. In J. Sillmann, S. Sippel & S. Russo (Eds.), *Climate Extremes and Their Implications for Impact and Risk Assessment* (pp. 77-104): Elsevier.
5. Chen, J. et al. 2019. "Bias correcting climate model multi-member ensembles to assess climate change impacts on hydrology." *Climatic Change*, 153(3): 361-377.
6. Chen, J., and Brissette, F.P. 2019. "Reliability of climate model multi-member ensembles in estimating internal precipitation and temperature variability at the multi-decadal scale". *International Journal of Climatology*, 39(2), 843-856. doi: 10.1002/joc.5846
7. Dosio, A., and Paruolo, P. 2011. "Bias correction of the ENSEMBLES high-resolution climate change projections for use by impact models: Evaluation on the present climate". *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 116(D16). doi: 10.1029/2011jd015934
8. Ghimire, U., Srinivasan, G., and Agarwal, A. 2019. Assessment of rainfall bias correction techniques for improved hydrological simulation. *International Journal of Climatology*, 39(4), 2386-2399. doi: 10.1002/joc.5959
9. Guo, Q., Chen, J., Zhang, X., Shen, M., Chen, H., and Guo, S. 2019. "A new two-stage multivariate quantile mapping method for bias correcting climate model outputs". *Climate Dynamics*. doi: 10.1007/s00382-019-04729-w
10. Ivanov, M.A., and Kotlarski, S. 2017. Assessing distribution-based climate model bias correction methods over an alpine domain: added value and limitations. *International Journal of Climatology*, 37(5), 2633-2653. doi:10.1002/joc.4870
11. Kanamaru Hideki and Masao Kanamitsu. 2007. "Scale-Selective Bias Correction in a Downscaling of Global Analysis Using a Regional Model". *Monthly weather review*. Vol. 135.
12. Krinner, G., Beaumet, J., Favier, V., Déqué, M., & Brutel-Vuilmet, C. 2019. Empirical Run-Time Bias Correction for Antarctic Regional Climate Projections With a Stretched-Grid AGCM. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 11(1), 64-82. doi: 10.1029/2018ms001438
13. Maraun, D., Shepherd, T. G., Widmann, M., Zappa, G., Walton, D., Gutiérrez, J. M., and Mearns, L.O. 2017. "Towards process-informed bias correction of climate change simulations". *Nature Climate Change*, 7, 764. doi: 10.1038/nclimate 3418.
14. Maraun, D. 2012. "Nonstationarities of regional climate model biases in European seasonal mean temperature and precipitation sums". *Geophysical Research Letters*, 39(6). doi: 10.1029/2012gl051210
15. Maurer, E.P., Das, T., and Cayan, D.R. 2013. "Errors in climate model daily precipitation and temperature output: time invariance and implications for bias correction". *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 17(6), 2147-2159. doi: 10.5194/hess-17-2147-2013.
16. Müller, M.F., and Thompson, S.E. 2013. "Bias adjustment of satellite rainfall data through stochastic modeling: Methods development and application to Nepal". *Advances in Water Resources*, 60, 121-

134. doi: <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2013.08.004>
17. Piani, C., and Haerter, J.O. 2012. "Two-dimensional bias correction of temperature and precipitation copulas in climate models". *Geophysical Research Letters*, 39(20). doi: 10.1029/2012gl053839
18. Terink, W., Hurkmans, R.T.W.L., Torfs, P.J.J.F., and Uijlenhoet, R. 2010. "Evaluation of a bias correction method applied to downscaled precipitation and temperature reanalysis data for the Rhine basin". *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 14(4), 687-703. doi: 10.5194/hess-14-687-2010
19. Xu, Zhongfeng and Zong-Liang Yang. 2012. "An Improved Dynamical Downscaling Method with GCM Bias Corrections and Its Validation with 30 Years of Climate Simulations". *Journal of Climate* Vol. 25.
20. Yuan, Q., Thorarinsdottir, T.L., Beldring, S., Wong, W. K., Huang, S., and Xu, C.-Y. 2019. New Approach for Bias Correction and Stochastic Downscaling of Future Projections for Daily Mean Temperatures to a High-Resolution Grid. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 58(12), 2617-2632. doi: 10.1175/jamc-d-19-0086.1
21. Zhang, H., Fraedrich, K., Blender, R., and Zhu, X. 2013. "Precipitation Extremes in CMIP5 Simulations on Different Time Scales". *Journal of Hydrometeorology*, 14(3), 923-928. doi: 10.1175/jhm-d-12-0181.1