نشریه پژوهش‌های اقلیم شناسی
سال دهم | شماره سی و هشتم | تابستان ۱۳۹۸
وصول: ۹۶/۰۸/۲۲ پذیرش: ۹۸/۰۷/۳۰
صص ۳۱-۱۷

بررسی تأثیر روش‌های مختلف ریزمقیاس‌سازی آماری بر تغییرات جریان پیش‌بینی‌شده بر اثر تغییراقلیم در حوضه‌ی سد کرج

وحید کیمیاگر*[۱]، ابراهیم فتاحی [۲]، سعید علیمحمدی [۳]
۱. دانشجوی دکترای مهندسی عمران-آب، دانشکده عمران، آب و محیط‌زیست، دانشگاه شهید بهشتی
۲. دانشیار، پژوهشکده هواشناسی، تهران
۳. دانشیار، دانشکده عمران، آب و محیط‌زیست، دانشگاه شهید بهشتی

چکیده:

اطلاعات مدل‌های اقلیمی اغلب در مقیاس بزرگ (>۱۰۰ کیلومتر) ارائه می‌گردند و برای استفاده از آن‌ها احتیاج به ریزمقیاس‌سازی است. این پژوهش عدم قطعیت ناشی از چهار روش مختلف ریزمقیاس سازی آماری را بررسی و نتایج را در سناریوهای مختلف اقلیمی ارائه کرده‌است. به همین منظور نتایج مدل CSIRO MK3.6 *در چهار سناریو تابشی ۲/۶، ۴/۵، ۶/۰ و ۸/۵ در نظر گرفته‌شده است. جریان ورودی در دوره-ی آینده (۲۰۱۳-۲۰۴۵) محاسبه و با اطلاعات تاریخی و داده‌های شبیه‌سازی‌شده مدل در دوره‌ی پایه (۱۹۸۵-۲۰۱۲) مقایسه شده است. هیدروگراف متوسط ماهانه جریان و تابع توزیع احتمالاتی جریان، دما و بارش رسم و مقایسه شده است. روند کلی دما در آینده افزایشی است اما بارش روند منظمی ندارد و در برخی از مدل سناریوها کاهشی و در بعضی دیگر افزایشی است. این مطالعه نشان‌داد که برای دسترسی به طیف کامل‌تری از آینده‌های محتمل علاوه بر سناریوهای اقلیمی مختلف، روش‌های گوناگون ریزمقیاس‌سازی نیز باید در نظرگرفته شوند. نتایج حاکی از آن است که میزان تغییرات جواب در روش‌های ریزمقیاس سازی با اصلاح اریبی و عامل تغییر با یکدیگر دارای تفاوت معنی‌دار است و انتخاب نوع روش (بر پایه میانگین یا بر پایه واریانس) تاثیر کمتری نسبت به روش‌های ذکر شده‌دارد. همچنین این مطالعه پیش‌بینی می‌کند که در آینده میزان جریان در ماه آوریل کاهش‌یافته و روند کلی جریان از یک پیک در ماه آوریل به دو پیک متوالی در ماه‌های آوریل و مه می‌رسد.*

کلمات کلیدی: اصلاح اریبی، روش دلتا، پیش‌بینی جریان، آنالیز عدم قطعیت

* نویسنده مسئول : ۰۹۱۱۱۳۸۴۲۶۰
Email: v_kimiagar@sbu.ac.ir

مقدمه

به‌منظور عملکرد مطلوب زیرساخت‌ها در شرایط اقلیمی متغیر احتیاج به اطلاعاتی در خصوص میزان تغییرات مورد انتظار است. این اطلاعات عدم قطعیت‌های زیادی دارند. این عدم قطعیت‌ها در گام‌های مختلف مطالعات تغییر اقلیم مانند انتخاب سناریوهای انتشار (RCP)، مدل‌های اقلیمی (GCM) و همچنین ریزمقیاس سازی دینامیکی یا آماری به وجود می‌آیند. تصمیم‌گیری درست و توانمند در شرایط تغییر اقلیم باید بر پایه تغییرات محتمل و با در نظر گرفتن عدم قطعیت آن‌ها باشد. در این پژوهش عدم قطعیت ناشی از انتخاب روش‌های مختلف ریزمقیاس سازی مورد بررسی قرار می‌گیرد. اطلاعات خروجی مدل‌های اقلیمی معمولاً دقت کافی را برای استفاده در مطالعات ندارند، درنتیجه احتیاج به ریزمقیاس سازی اطلاعات آن‌هاست. ریزمقیاس سازی عبارت است از روش‌هایی که به کمک آن‌ها اطلاعات اقلیمی در مقیاس منطقه‌ای یا محلی (۱۰-۱۰۰ کیلومتر) از اطلاعات مدل‌های تغییراقلیم (>۱۰۰ کیلومتر) استخراج می‌شود(Fung, Lopez et al. 2011). دو روش اصلی ریزمقیاس سازی عبارت‌اند از ریزمقیاس سازی دینامیکی و ریزمقیاس سازی آماری. ویلبای و ویگلی ریزمقیاس‌سازی را به چهار دسته‌ی کلی مدل‌های رگرسیونی، روش‌ها بر پایه الگوهای آب و هوایی در جو، مدل‌های اقلیمی تصادفی و مدل‌های اقلیمی در سطح محدود تقسیم کردند که سه دسته‌ی اول ریزمقیاس‌سازی آماری و دسته‌ی چهارم ریزمقیاس سازی دینامیکی هستند (Wilby and Wigley 1997). در ریزمقیاس سازی دینامیکی، روندهای فیزیکی در مقیاس بسیار کمتر به کمک مدل‌های محلی اقلیمی (RCM) مدل‌سازی می‌شوند. به‌عنوان مثال شابالوا و همکاران به کمک مدل HadRM2 (Johns, Carnell et al. 1997) که یک مدل ریزمقیاس سازی دینامیکی است، جریان حوضه رودخانه راین را پیش‌بینی کردند (Shabalova, Van Deursen et al. 2003). RCM ها به دلیل سلول بندی ریزتر، معمولاً دقت بیشتری در پیش‌بینی بارش و احتمال وقوع اتفاقات حدی دارند اما آن‌ها نیز احتیاج به اصلاح اریبی نتایج دارند (Durman, Gregory et al. 2001). مشکل اصلی استفاده از آن‌ها، پیچیدگی و احتیاج به منابع زیاد برای محاسباتشان است، لذا به دلیل بالابودن هزینه‌های مالی و زمان، معمولاً در مطالعات محدود و کوچک روش‌های ریزمقیاس‌سازی - آماری ترجیح داده‌می‌شوند (Wilby and Wigley 1997, Maurer and Hidalgo 2008, Tabor and Williams 2010).

ریزمقیاس‌سازی آماری غالباً برقراری ارتباط بین چند متغیر در مقیاس بزرگ (پیش‌بینی کننده) و چند متغیر در مقیاس کوچک (پیش‌بینی شونده) است (Chen, Brissette et al. 2013). از بین روش‌های مختلف ریزمقیاس سازی آماری، ریزمقیاس سازی آماری تجربی که در آن روابط آماری برای ساختن اطلاعات سناریوهای تغییر اقلیم در مقیاس محلی از خروجی‌های مدل اقلیمی استفاده می‌شود پرکاربردتر هستند (Chiew, Teng et al. 2009, Wang, Ranasinghe et al. 2016).

بااینکه مطالعات مختلفی در مورد تأثیر انتخاب روش‌های مختلف ریزمقیاس سازی آماری انجام‌شده است، اغلب آن‌ها این عدم قطعیت را در پیش‌بینی دما و بارش ارزیابی کرده‌اند (Gudmundsson, Bremnes et al. 2012, Wang, Ranasinghe et al. 2016, Vrac and Vaittinada Ayar 2017). و مطالعات کمی اثر این عدم قطعیت را بر جریان در نظر گرفته‌اند. چن و همکاران (۲۰۱۳) تأثیر روش‌های مختلف ریزمقیاس سازی را بر خروجی چهار مدل منطقه‌ای در سناریو SRES A2 بررسی کردند(Chen, Brissette et al. 2013). مندال و سیمونویچ عدم قطعیت پیش‌بینی جریان را به کمک روش‌های مختلف ریزمقیاس سازی در سه سناریو انتشار بررسی کردند (Mandal and Simonovic 2017). از مطالعات انجام شده در این زمینه در ایران می‌توان به مطالعه‌ی نجفی و کامرانی (۲۰۱۷) اشاره کرد، در این تحقیق، تأثیر انتخاب دو روش مختلف ریزمقیاس سازی به نام‌های ASD و SDSM را بر بارش و جریان پیش‌بینی‌شده طبق سناریوهای SRES را در دو ایستگاه هواشناسی در ایران بررسی شده است. سرزعیم و همکاران (۲۰۱۷) تغییرات احتمالی نیاز آبی محیط‌زیستی حوزه‌ی آبریز کرخه را تحت سه سناریو و دو روش ریزمقیاس سازی (مجموعه ۶ حالت) مقایسه کردند (Sarzaeim et al. 2017).

در ایران مطالعات زیادی بر پایه سناریوهای گزارش پنجم IPCC انجام‌نشده است. این مقاله با استفاده توأمان از مدل هیدرولوژیک IHACRES و خروجی‌های مدل اقلیمی CSIRO Mk3.6.0 تحت ۴ سناریو اقلیمی مختلف که به ۴ روش ریزمقیاس سازی شده‌اند (جمعاً ۱۶ سناریو) به پیش‌بینی جریان ورودی به مخزن سد کرج در سناریوهای مختلف می‌پردازد. با ارائه‌ی نتایج و تجمیع‌های مختلف از آن به مدیران منابع آبی برای برنامه‌ریزی آینده منابع آب تهران کمک می‌کند. هدف این مقاله بررسی تأثیر انتخاب روش‌های مختلف ریزمقیاس سازی بر عدم قطعیت بارش، دما و جریان پیش‌بینی‌شده در حوضه سد کرج است.

۲. مواد و روش‌ها

در این مطالعه پس از استخراج اطلاعات مدل اقلیمی برای محدوده مورد مطالعه، ابتدا دما و بارش هر ایستگاه در آینده در سناریوها و روش‌های مختلف محاسبه شده‌است. پس از تهیه‌ی مدل هیدرولوژیک منطقه مورد مطالعه و دما و بارش حوزه در آینده، میزان جریان در سناریوها مختلف محاسبه شده‌است.

۲-۱ مدل اقلیمی و سناریوهای مورداستفاده

در این مطالعه از مدل اقلیمی CSIRO Mk3.6.0 که در ادامه به‌اختصار CSIRO خوانده می‌شود استفاده‌شده است(Jeffrey, Rotstayn et al. 2013).

هیئت بین‌الدول تغییراقلیم در تدوین گزارش پنجم ارزیابی خود (AR5) از سناریوهای جدیدی RCPs به‌عنوان نماینده‌های چهار خط سیر کلیدی گازهای گلخانه‌ای با نام‌های RCP2.6، RCP4.5، RCP6 و RCP8.5 استفاده نموده‌است. این سناریوها در سال ۲۰۱۰ توسط یک کمیته علمی و زیر نظر هیئت بین‌الدول تغییرات اقلیمی با هدف مهیا نمودن مجموعه‌ای از اطلاعاتی که از نتایج آن بتوان عوامل اصلی تغییرات اقلیمی را ردیابی نمود و نتایج آن را بر مدل‌های اقلیمی اعمال کرد، به وجود آمده‌اند. این سناریوها کاملاً جدید نیستند، بلکه بر پایه سناریوهای قدیمی توسعه داده‌شده‌اند (Sachindra et al, 2014). سناریوهای فوق بر اساس مشخصات متفاوت سطح فن-آوری، وضعیت اجتماعی و اقتصادی و خط‌مشی‌ها در آینده است که در هر شرایط می‌تواند منجر به سطح انتشار متفاوت گازهای گلخانه‌ای و تغییرات اقلیمی گردد. نام‌گذاری سناریوهای خانواده‌ی RCP بر اساس میزان سطح واداشت‌های تابشی ناشی از انتشار گازهای گلخانه‌ای تا پایان قرن ۲۱ شامل مقادیر ۲/۶، ۴/۵، ۶/۰ و ۸/۵ وات بر مترمربع انجام‌شده است. به‌منظور پوشش دامنه‌ی کامل‌تری از تغییرات در آینده تمامی سناریوهای اقلیمی در این مطالعه استفاده‌شده‌اند.

۲-۲ ریزمقیاس‌سازی آماری

در ریزمقیاس سازی آماری بر اساس انتخاب متغیرهای پایه (داده‌های مشاهداتی یا داده‌های تاریخی مدل GCM)، روش‌ها به دو دسته تقسیم می‌شوند. روش‌های اصلاح اریبی (BC) و روش‌های عامل تغییر (CF). در هر دوی این روش‌ها، اریبی اطلاعات اصلاح می‌شود. در روش‌های مبتنی بر اصلاح اریبی فرض می‌شود که تفاوت میان مدل تغییر اقلیم و داده‌های مشاهداتی در طول زمان ثابت می‌ماند و در روش‌های مبتنی بر عامل تغییر فرض می‌شود که میزان تغییر داده‌ها در پارامترهای اقلیمی مشاهداتی برابر میزان تغییر آن‌ها در مدل تغییراقلیم است و احتمال وقوع بارش تغییر نمی‌کند (Ho, Stephenson et al. 2012, Wang, Ranasinghe et al. 2016). در این پژوهش از چهار روش (دو روش مبتنی بر BC و دو روش مبتنی بر CF) استفاده شده است.

۲-۲-۱ اصلاح اریبی بر اساس میانگین (MB-BC)

در این روش اصلاح بارش بر اساس نسبت بارش متوسط طولانی مدت مدل تغییراقلیم و داده‌های مشاهداتی انجام‌شده است. (Lenderink, Buishand et al. 2007, Wang, Ranasinghe et al. 2016)

در این معادله، Pr میزان بارش ماهانه، بالانویس‌های f و p نشانگر آینده و گذشته، زیرنویس‌های obs و GCM به ترتیب بیانگر مشاهداتی و مدل و μ متوسط بارش سالانه هستند. به‌عنوان مثال در معادله ۱، بارش مشاهداتی (پیش‌بینی‌شده برای منطقه در آینده) برابر است با بارش مدل در آینده در آن ایستگاه ضربدر، نسبت متوسط بارش مشاهداتی در دوره پایه به بارش مدل اقلیمی در دوره پایه.

دما در این روش به کمک فرمول ۲ اصلاح می‌شود

$$Pr_{obs}^{f} = Pr_{GCM}^{f} * \frac{\mu_{obs}^{p}}{\mu_{GCM}^{p}} \qquad (۱)$$

$$T_{obs}^{f} = T_{GCM}^{f} + \mu_{obs}^{p} - \mu_{GCM}^{p} \quad (۲)$$

که در آن دمای ایستگاه موردنظر در آینده، دمای خروجی مدل اقلیمی در آینده، متوسط دمای مشاهداتی در ایستگاه موردمطالعه و دمای متوسط مدل در ایستگاه موردنظر در دوره پایه.

۲-۲-۲ *اصلاح اریبی بر اساس واریانس (VB-BC)*

در این روش میانگین و واریانس داده‌های برای تطابق با داده‌های مشاهداتی اصلاح می‌شوند. فرمول اصلاح برای بارش و دما یکسان و به شرح زیر است (Ho, Stephenson et al. 2012, Hawkins, Osborne et al. 2013).

$$X_{obs}^{f} = \left(X_{GCM}^{f} - \mu_{GCM}^{p}\right) * \frac{\sigma_{obs}^{p}}{\sigma_{GCM}^{p}} + \mu_{obs}^{p} \quad (۳)$$

در این معادله، X میزان بارش یا دما و σ انحراف معیار استاندارد است.

۲-۲-۳ عامل تغییر بر اساس میانگین[۲] (MB-CF)

در این روش که به آن "دلتا" نیز گفته می‌شود، اصلاح بارش بر اساس نسبت و اصلاح دما بر اساس تفاضل داده‌های مدل GCM در گذشته و آینده است (Wang, Ranasinghe et al. 2016).

$$Pr_{obs}^{f} = Pr_{obs} * \frac{\mu_{GCM}^{f}}{\mu_{GCM}^{p}} \quad (۴)$$

$$T_{obs}^{f} = T_{obs} + \mu_{GCM}^{f} - \mu_{GCM}^{p} \quad (۵)$$

۲-۲-۴ عامل تغییر بر اساس واریانس[۳] (VB-CF)

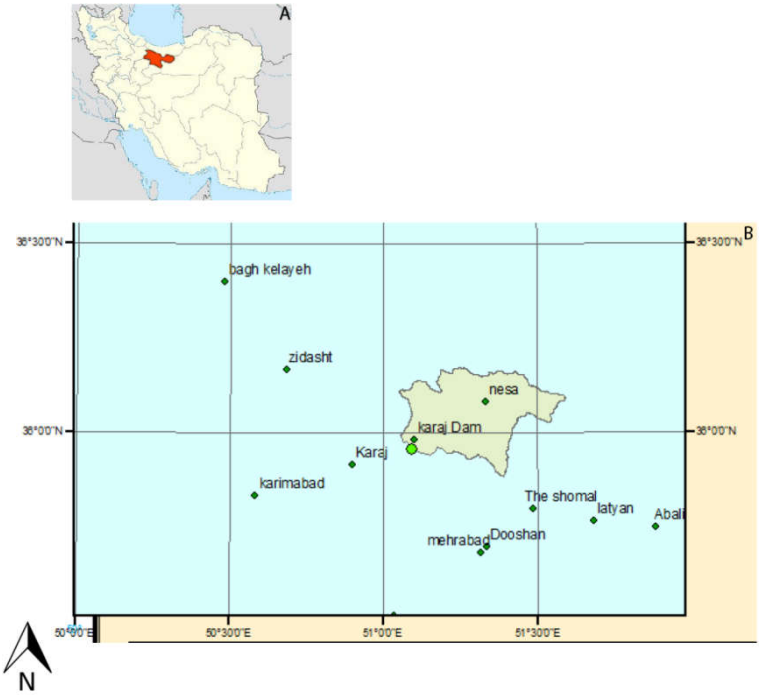
در این روش میانگین و واریانس داده‌های برای تطابق با داده‌های مشاهداتی و با توجه به تغییرات GCM اصلاح می‌شوند. فرمول اصلاح برای بارش و دما یکسان و به شرح زیر است (Hawkins, Osborne et al. 2013, Wang, Ranasinghe et al. 2016).

$$X_{obs}^{f} = \left(X_{obs}^{p} - \mu_{GCM}^{p}\right) * \frac{\sigma_{GCM}^{f}}{\sigma_{GCM}^{p}} + \mu_{GCM}^{f} \quad (۶)$$

در این مطالعه و پس از ریزمقیاس سازی اطلاعات تغییر اقلیم به روش‌های مختلف، تغییرات دما، بارش و جریان بررسی و گزارش شده‌است.

۳- منطقه‌ی مورد مطالعه و مدل‌سازی هیدرولوژیکی حوضه آبریز

حوضه‌ی آبریز سد کرج در بخش مرکزی شمال کشور و در استان تهران، شهرستان کرج بین طول‌های جغرافیایی ۵۱/۰۵ و ۵۱/۶۰ شرقی و عرض‌های جغرافیایی ۳۵/۸۸ و ۳۶/۱۸ شمالی قرارگرفته است. مساحت این حوضه آبریز برابر ۸۴۶/۵ کیلومترمربع و میانگین ارتفاعی آن ۲۸۲۶ متر از سطح دریا است. برای بررسی تغییرات هیدرولوژیک حوضه از اطلاعات دما و بارش ۵ ایستگاه سینوپتیک و ۷ ایستگاه تبخیر سنجی با طول اطلاعات کافی بارش و دما در داخل و اطراف حوضه استفاده‌شده است. برای ریزمقیاس‌سازی مکانی اطلاعات تغییر اقلیم برای ایستگاه‌ها از متوسط چهار نقطه نزدیک به هر ایستگاه استفاده‌شده است. دوره‌ی تاریخی در ریزمقیاس‌سازی از ژانویه ۱۹۸۵ تا دسامبر ۲۰۱۲ و دوره‌ی آینده از ژانویه ۲۰۱۳ تا دسامبر ۲۰۴۵ در نظر گرفته‌شده است. در این مطالعه سه دسته اطلاعات مورداستفاده قرار گرفته‌اند. داده‌های مشاهداتی که از ایستگاه‌های هواشناسی منطقه استخراج شده‌اند و از ژانویه۱۹۸۵ تا دسامبر ۲۰۱۲ می‌باشند. داده‌های تاریخی مربوط به هر سناریو نیز در همین بازه در نظر گرفته‌شده‌اند (از ۱۹۸۵ تا انتهای ۲۰۰۵ خروجی‌های تاریخی مدل اقلیمی یکسان برای همه سناریوها، و از ۲۰۰۶ تا ۲۰۱۲ برای هر سناریو به‌طور جداگانه از خروجی مدل برای آن تاریخ) و داده‌های پیش‌بینی مدل در سناریوهای مختلف که از ژانویه ۲۰۱۳ تا دسامبر ۲۰۴۵ می‌باشند. شکل ۱ محدوده مورد مطالعه و ایستگاه‌های اطراف آن را نشان می‌دهد. مشخصات این ایستگاه‌ها در جدول ۱ ارائه‌شده است.



شکل ۱: A: استان‌های تهران و البرز B: حوضه آبریز و ایستگاه‌های استفاده‌شده در داخل و اطراف حوضه

برای شبیه‌سازی بارش-رواناب حوضه‌ی موردنظر از نرم‌افزار IHACRES استفاده‌شده است. نرم‌افزار IHACRES به کمک بارش و دمای متوسط حوضه میزان رواناب را پیش‌بینی می‌کند. (Croke, Andrews et al. 2005).

IHACRES خصوصیات حوضه را به کمک چند پارامتر شبیه‌سازی می‌کند. برای استفاده از این مدل ابتدا باید به کمک اطلاعات سری‌های تاریخی بارش، دما و جریان را وارد مدل کرد. این مرحله کمک می‌کند تا کارایی مدل به کمک پارامترهایی مثل حداقل متوسط مربعات خطاها[۴]، و اریبی سنجیده شود. کالیبراسیون به کمک دو ماژول انجام می‌گیرد:

- یک ماژول غیرخطی هدررفت[۵]
- یک ماژول خطی هیدروگراف واحد

ماژول غیرخطی، روابط غیرخطی مشاهده‌شده بین بارش و دما را محاسبه کرده، و بارش را به بارش مؤثر تبدیل می‌کند. ماژول خطی هیدروگراف واحد که با استفاده از تئوری هیدروگراف واحد حوضه را به‌صورت ترکیبی از چند مخزن خطی که سری و/یا موازی هستند شبیه‌سازی می‌کند (Croke, Andrews et al. 2005).

مدل نیاز به ۶ پارامتر (سه پارامتر برای ماژول غیرخطی و سه پارامتر برای ماژول خطی) دارد. علیرغم این سادگی مدل IHACRES عملکرد خوبی داشته و در مطالعات مختلفی نیز استفاده‌شده است (Ashofteh, Haddad et al. 2012, Lalozaee, Pahlavanravi et al. 2013, Ghorbani, Sohrabian et al. 2016, Badjana, Fink et al. 2017).

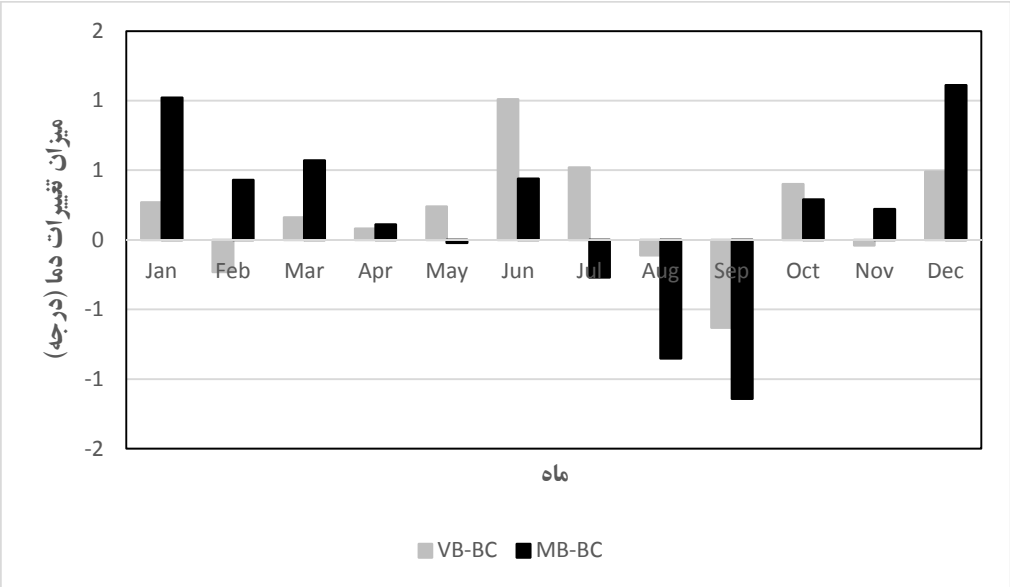
جدول ۱- مشخصات ایستگاه‌های مورداستفاده

نام ایستگاه	زیدشت	باغ کلایه	سد کرج	کریم‌آباد	لتیان	نسا	پرندک	تهران شمال	آبعلی	دوشان	کرج	مهرآباد
طول جغرافیایی (درجه شرقی)	۵۰/۶۸	۵۰/۴۸	۵۱/۱۰	۵۰/۵۸	۵۱/۶۸	۵۱/۳۳	۵۱/۰۳	۵۱/۴۸	۵۱/۸۸	۵۱/۳۳	۵۰/۹۰	۵۱/۳۲
عرض جغرافیایی (درجه شمالی)	۳۶/۱۷	۳۶/۴۰	۳۵/۹۸	۳۵/۸۳	۳۵/۷۷	۳۶/۰۸	۳۵/۵۱	۳۵/۸۰	۳۵/۷۵	۳۵/۷۰	۳۵/۹۲	۳۵/۶۸
ارتفاع (متر)	۱۷۵۰	۱۳۰۰	۱۵۸۸	۱۱۶۰	۱۶۶۰	۲۳۰۰	۱۰۴۰	۱۵۴۹	۲۴۶۵	۱۲۰۹	۱۳۱۲	۱۱۹۰

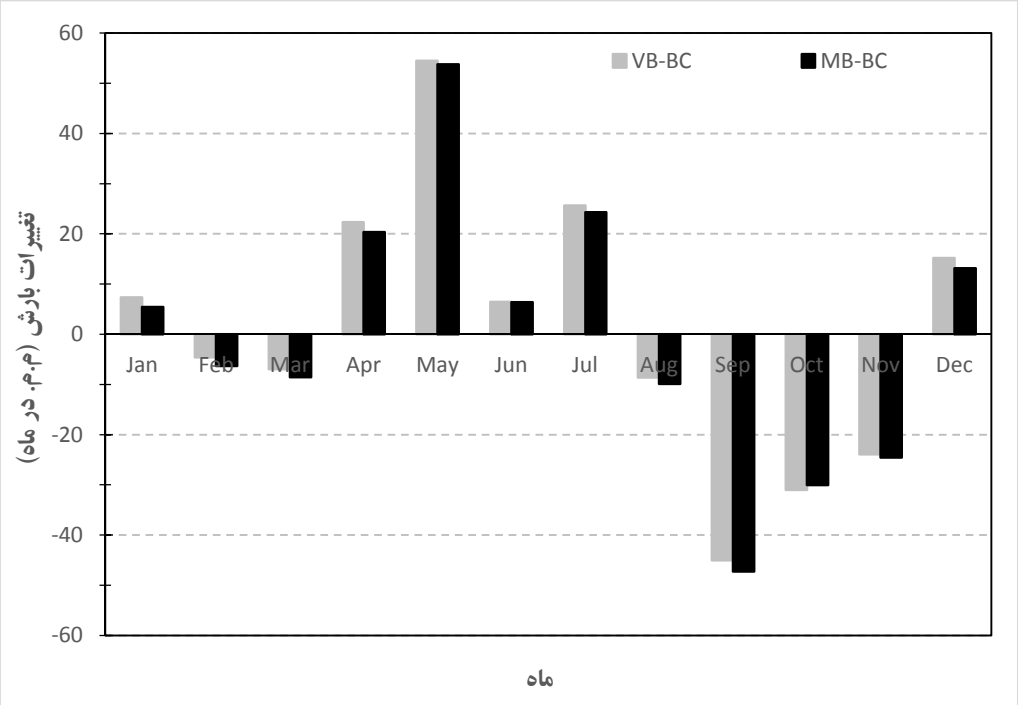
برای سنجش کارایی مدل‌های ریزمقیاس سازی و نرم‌افزار IHACRES با استفاده از بارش و دمای متوسط حوضه در هر روش (BC) میزان جریان در گذشته شبیه‌سازی و با جریان مشاهداتی مقایسه شده است. نمودار درصد تفاوت متوسط دما، بارش و جریان ماهانه شبیه‌سازی‌شده و مقادیر مشاهداتی آن در اشکال ۲ تا ۴ آورده شده است. با توجه به اینکه دوره تاریخی اطلاعات مدل اقلیمی تا سال ۲۰۰۵ بوده، ریزمقیاس سازی برای هر سناریو به‌صورت جداگانه و با در نظر گرفتن اطلاعات مربوط به هر سناریو در بازه‌ی ۲۰۰۵ تا ۲۰۱۲ انجام‌شده و متوسط این اطلاعات به‌عنوان خروجی مدل در بازه‌ی تاریخی گزارش‌شده است. به‌عنوان مثال برای ریزمقیاس سازی در سناریو RCP 2.6، از مجموع اطلاعات مدل تغییر اقلیم در بازه ۱۹۸۵-۲۰۰۵ و همچنین پیش‌بینی مدل در این سناریو در بازه ۲۰۰۵-۲۰۱۲ به‌عنوان اطلاعات تاریخی و از خروجی مدل در بازه ۲۰۱۲-۲۰۴۵ به‌عنوان اطلاعات آینده استفاده‌شده است.

همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود مقادیر تصحیح‌شده دما در روش‌های MB-BC و VB-BC تفاوت چندانی با مقادیر مشاهداتی ندارند و بیشترین تفاوت در روش VB-BC برابر ۱/۰۱ درجه و بیشترین تفاوت در روش MB-BC برابر ۱/۱۴ درجه است. اختلاف متوسط سالانه دمای دو مدل و دمای مشاهداتی نیز کمتر از ۰/۲ درجه است.

شکل ۳ میزان بارش متوسط در مدل‌های ریزمقیاس سازی را با متوسط مشاهداتی مقایسه می‌کند. برخلاف دما، اختلاف در میزان بارش در مدل‌ها بیشتر از دماست. متوسط و حداکثر تغییرات در مدل VB-BC برابر ۰/۶۸- و ۵۴/۵ درصد و متوسط و حداکثر تغییرات در مدل MB-BC برابر ۱/۷۲- و ۴۷/۳ درصد است.

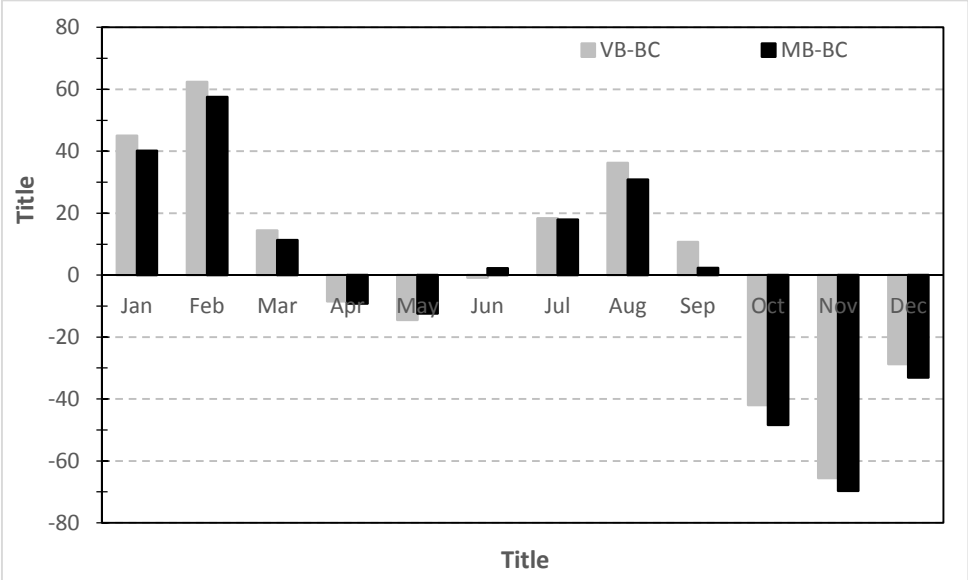


شکل ۲- میزان تغییرات دمای مدل نسبت به داده‌های مشاهداتی در روش‌های مختلف ریزمقیاس سازی

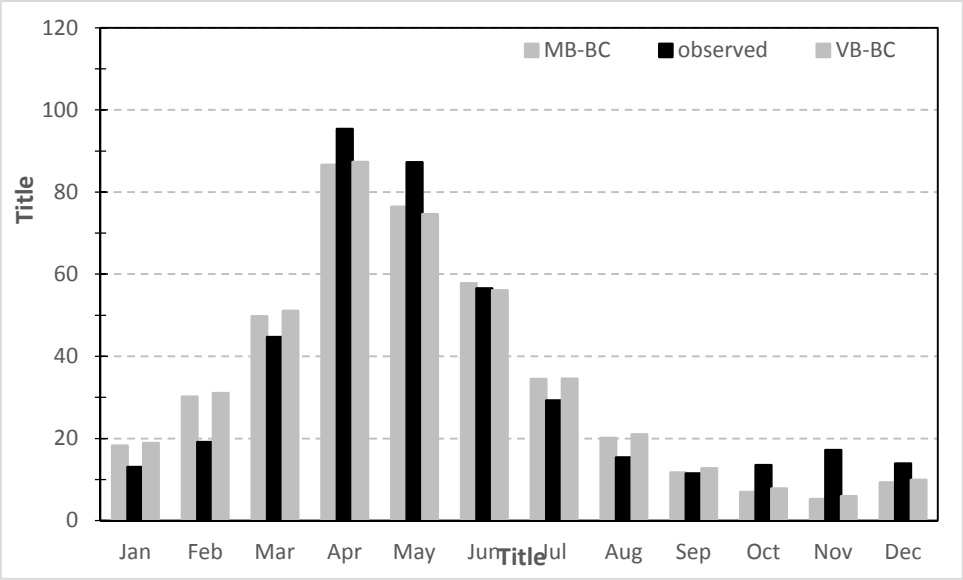


شکل ۳- میزان تغییرات بارش نسبت به داده‌های مشاهداتی در روش‌های مختلف ریزمقیاس سازی

شکل ۴ میزان درصد اختلاف متوسط جریان مشاهداتی و پیش‌بینی‌شده، توسط IHACRES در ماه‌های مختلف را نشان می‌دهد. میزان جریان مدل شده در دو مدل ریزمقیاس سازی در ماه‌های مختلف شبیه به یکدیگر است. برای مقایسه بهتر جریان متوسط شبیه‌سازی‌شده در روش‌های مختلف و جریان متوسط مشاهداتی در شکل ۵ نشان داده‌شده است.

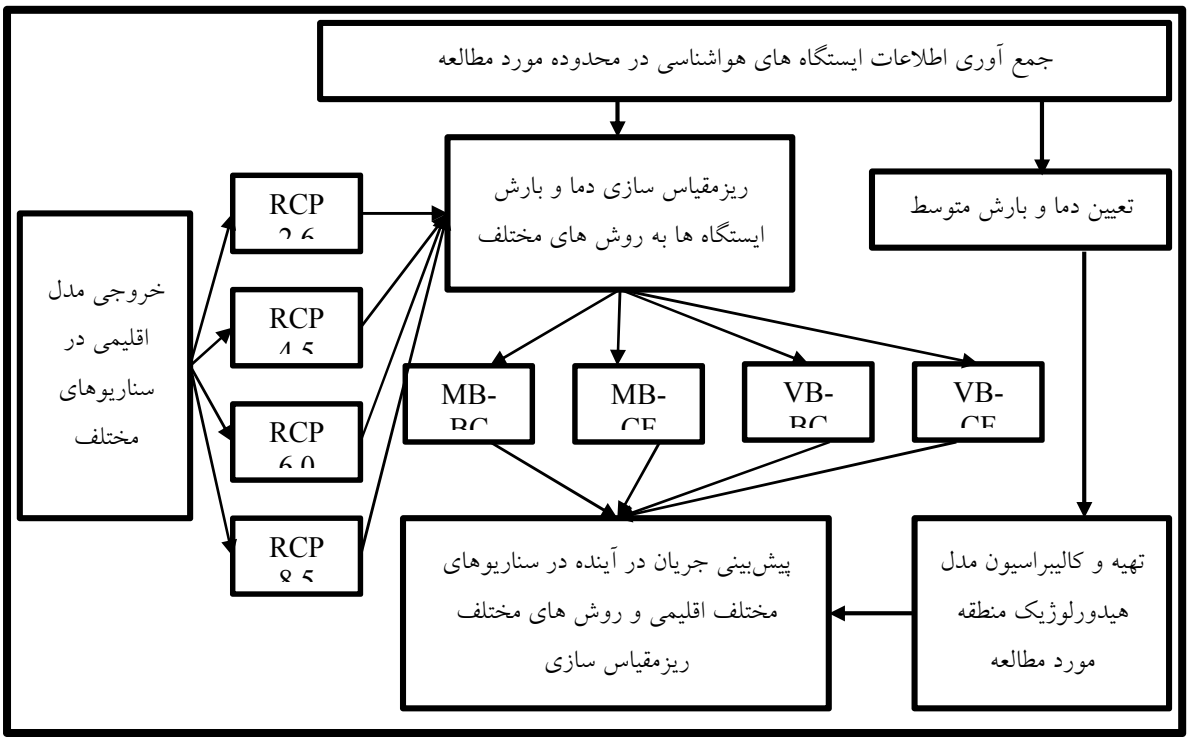


شکل ۴- میزان تغییرات جریان نسبت به داده‌های مشاهداتی در روش‌های مختلف ریزمقیاس سازی



شکل ۵- جریان متوسط ماهانه مشاهداتی و شبیه‌سازی در روش‌های VB-BC و MB-BC (در بازه زمانی پایه مطالعات ۱۹۸۵ تا ۲۰۱۲)

روند نمای کلی کار در شکل ۶ قابل مشاهده است.

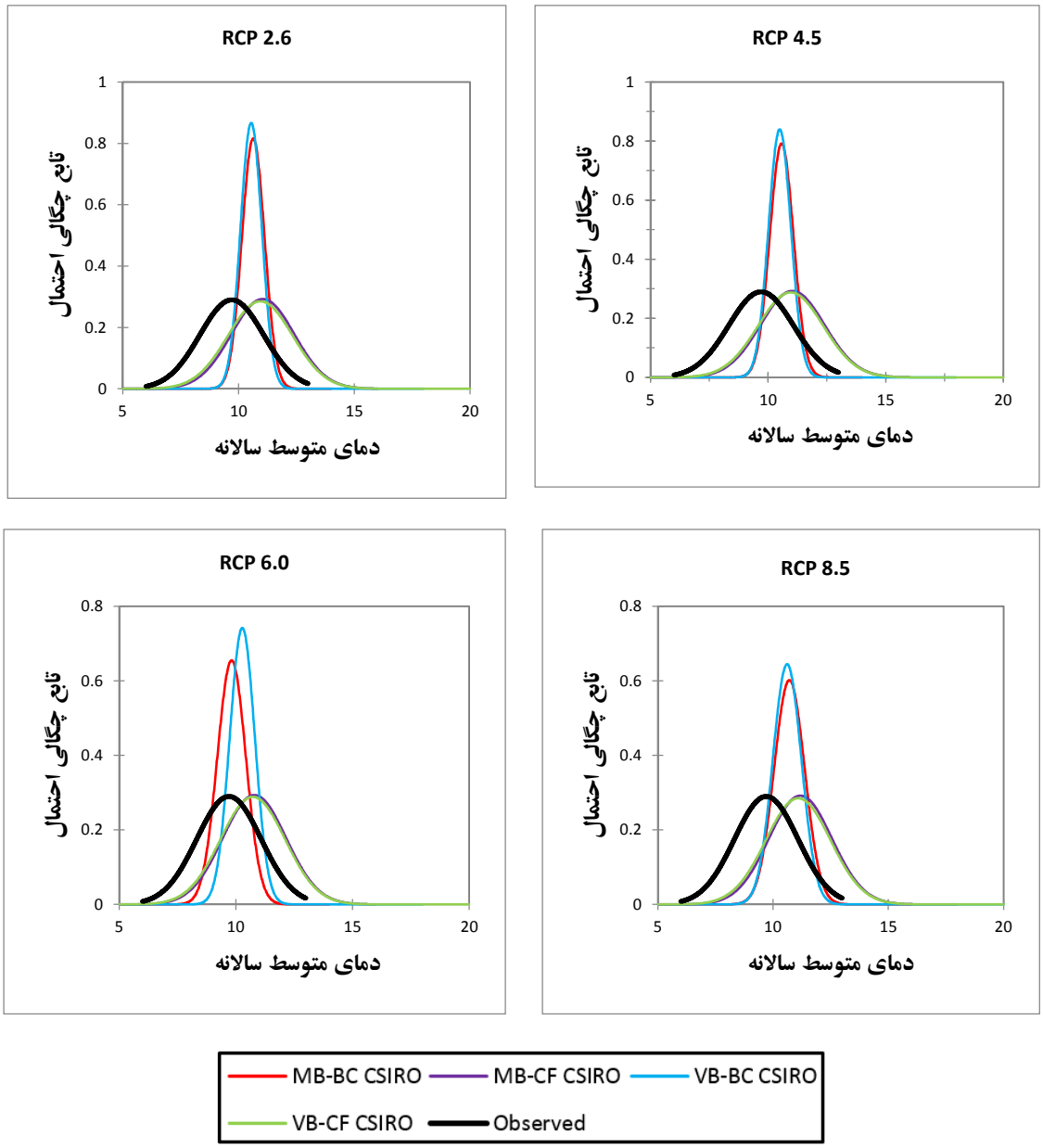


شکل ۶- روند نمای کلی مراحل انجام کار در مطالعه‌ی حاضر

۳- نتایج

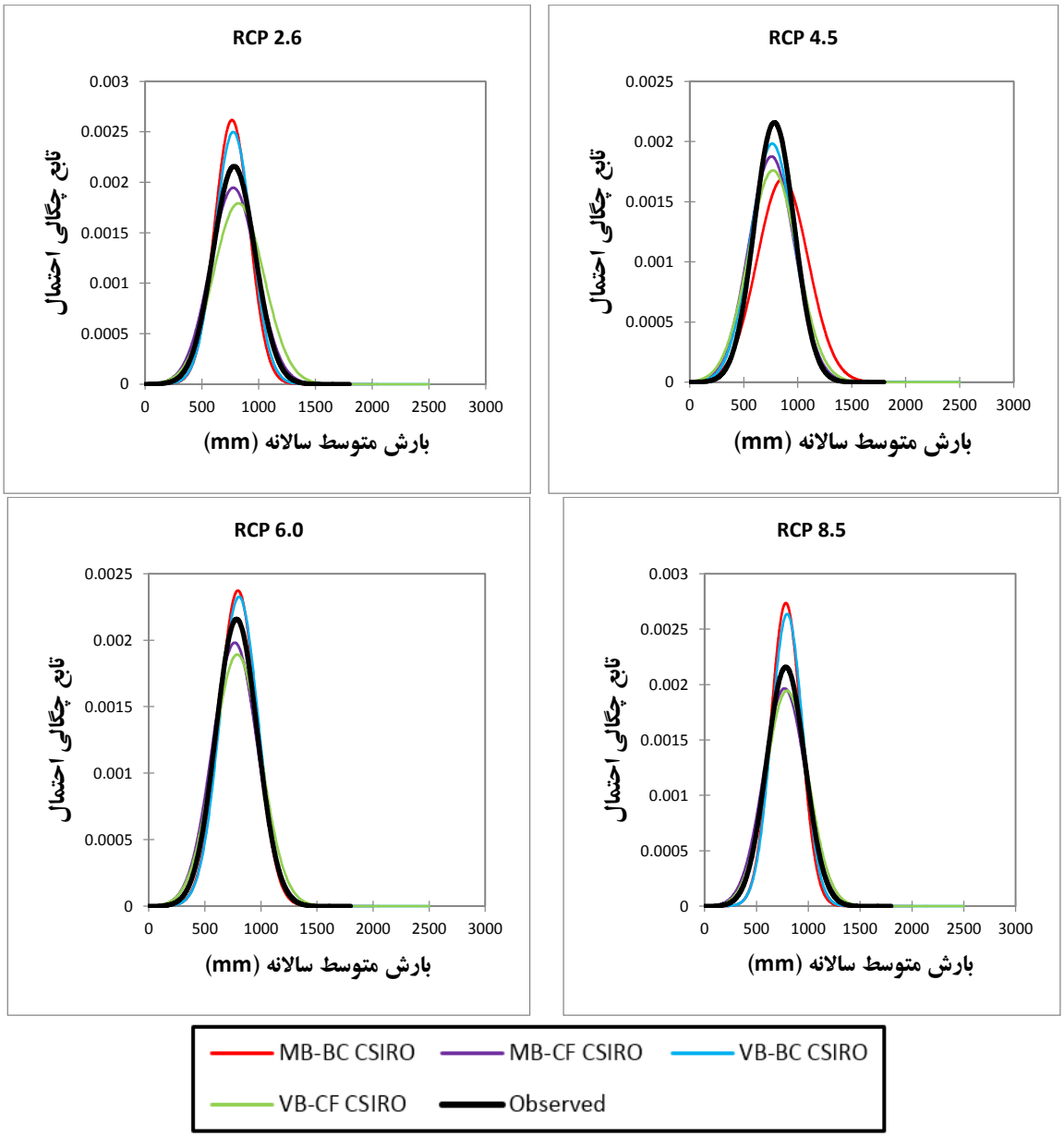
۳-۱ تغییرات دما و بارش

شکل ۷ PDF متوسط دمای سالانه برحسب درجه سانتی‌گراد در سناریوهای تغییر اقلیم و روش‌های مختلف ریزمقیاس سازی را با یکدیگر مقایسه کرده است. این نمودارها نشان می‌دهند که علیرغم عدم قطعیت‌های موجود، روند کلی تغییرات دما در سناریوهای مختلف و با روش‌های مختلف ریزمقیاس سازی روند افزایشی است. همچنین این نمودارها بیانگر آن هستند که عدم قطعیت ناشی از انتخاب روش ریزمقیاس سازی، بیشتر از عدم قطعیت به دلیل سناریوهای مختلف تغییراقلیم است. دامنه‌ی تغییرات دمایی در روش اصلاح اریبی کمتر و تأثیر انتخاب روش کلی ریزمقیاس سازی (اصلاح اریبی یا عامل تغییر) بیشتر از انتخاب جزئی روش (ریزمقیاس سازی بر پایه میانگین یا واریانس) است.



شکل ۷- توزیع احتمالاتی متوسط دمای سالانه (درجه سانتی‌گراد) در سناریوهای مختلف تغییر اقلیم و روش‌های مختلف ریزمقیاس سازی (۲۰۱۳-۲۰۴۵) و مقایسه آن با توزیع دمای متوسط سالانه در دوره پایه (۱۹۸۵-۲۰۱۲)

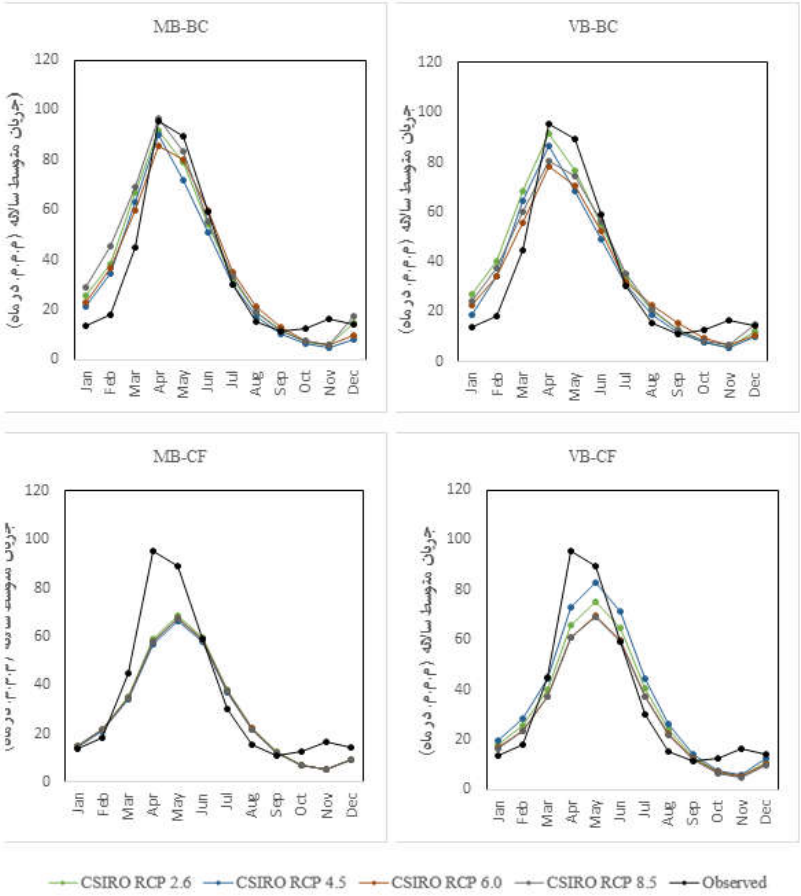
PDF بارش سالانه در سناریوهای تغییر اقلیم و روش‌های مختلف ریزمقیاس سازی در شکل ۸ ارائه‌شده است. برخلاف دما، تغییرات بارش در سناریوها و روش‌های مختلف ریزمقیاس سازی تا حدی با یکدیگر متفاوت است. در برخی مدل‌ها افزایشی و در برخی کاهشی است. دامنه تغییرات بارش در روش‌های مختلف بیشتر از داده‌های مشاهداتی است که نشان‌دهنده آن است که در تغییرات اقلیم احتمال وقوع فرآیندهای حدی شدیدتر (سال‌های بسیار خشک یا بسیار تر) افزایش می‌یابد.



شکل ۸- توزیع احتمالاتی بارش سالانه (میلی‌متر) در سناریوهای مختلف تغییر اقلیم و روش‌های مختلف ریزمقیاس سازی (۲۰۱۳-۲۰۴۵) و مقایسه آن با توزیع بارش متوسط سالانه در دوره پایه (۱۹۸۵-۲۰۱۲)

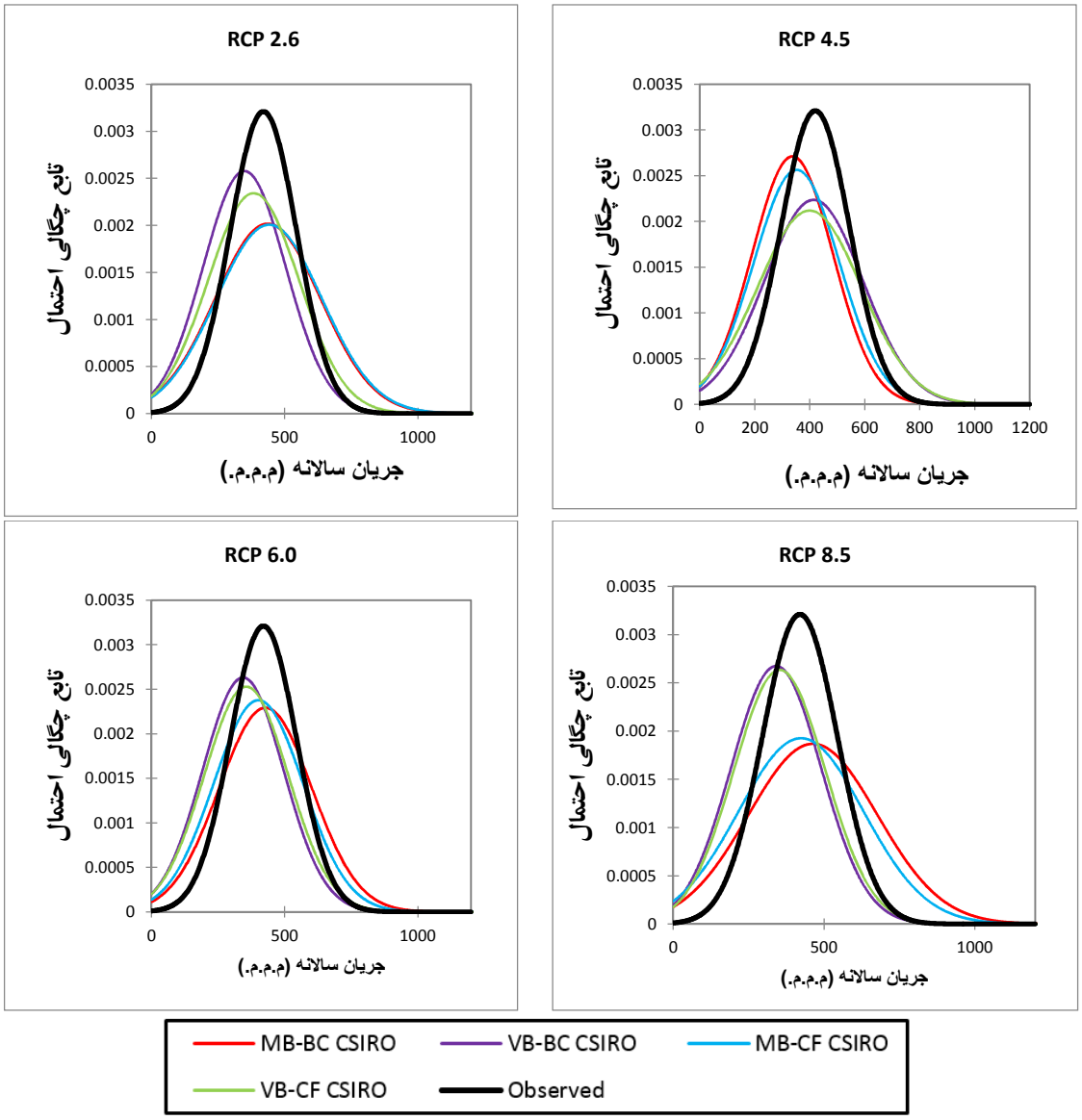
۳-۲ تأثیرات تغییرات اقلیمی بر جریان

شکل ۹ نمودار جریان ماهانه متوسط پیش‌بینی‌شده در نرم‌افزار IHACRES در مدل سناریوهای مختلف را باهم و با جریان در دوره پایه مقایسه می‌کند. علیرغم تفاوت در خروجی‌های مدل‌ها و روش‌های مختلف ریزمقیاس سازی، به نظر می‌رسد روند کلی جریان پیش‌بینی‌شده در مدل CSIRO در سناریوها و روش‌های مختلف کاهشی است. همان‌طور که قبلاً نیز گفته شد تأثیر انتخاب روش (BC یا CF) بیشتر از انتخاب زیر روش (ریزمقیاس سازی بر پایه میانگین یا واریانس) است.



شکل ۹- جریان ماهانه متوسط در آینده (۲۰۱۳-۲۰۴۵) در سناریوهای مختلف و روش‌های مختلف ریزمقیاس سازی و مقایسه آن با متوسط مشاهداتی در دوره پایه (۱۹۸۵-۲۰۱۲)

شکل ۱۰ PDF جریان در روش‌های مختلف ریزمقیاس سازی را، در سناریوهای مختلف نشان می‌دهد. همان‌طوری که از این اشکال هم مشخص است دامنه تغییرات جریان در آینده بیشتر از گذشته است و عدم قطعیت بخصوص در پدیده‌های حدی بیشتر است. در بین سناریوهای مختلف پهنای باند جواب در RCP 4.5 و RCP 6.0 به نسبت بقیه سناریوها کمتر و گستره جواب در RCP 8.5 بیشتر است.



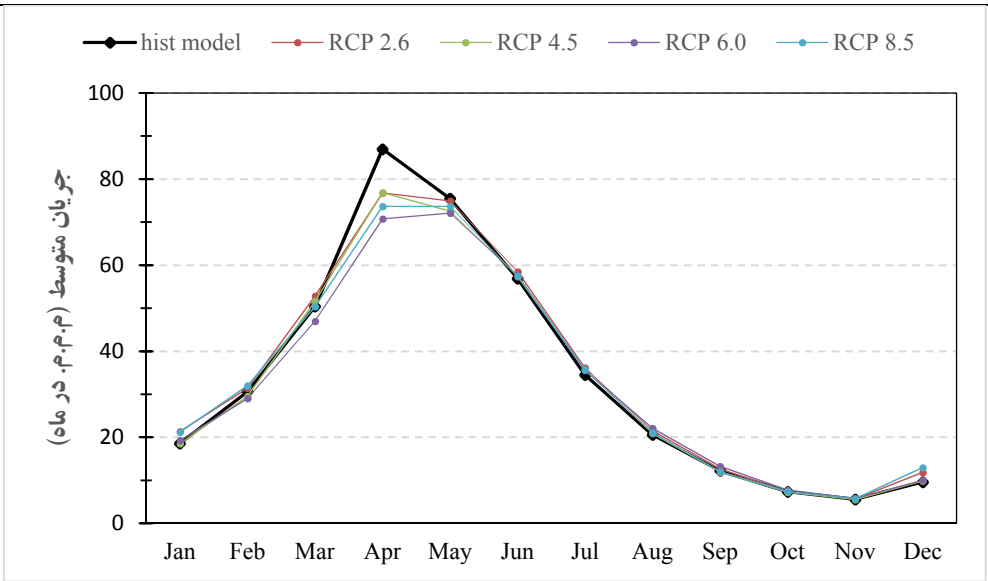
شکل ۱۰- تابع توزیع احتمالاتی جریان در سناریوهای مختلف تغییر اقلیم در روش‌های مختلف ریزمقیاس سازی در آینده (۲۰۱۳-۲۰۴۵) و مقایسه آن با دوره پایه (۱۹۸۵-۲۰۱۲)

میزان متوسط جریان در سناریوهای مختلف اقلیمی (متوسط چهار روش ریزمقیاس سازی) در جدول۲ و شکل ۱۱ آورده شده و با متوسط جریان مدل شده در دوره پایه توسط دو روش BC مقایسه شده است. این جدول بیانگر آن است که میزان جریان در سناریو RCP 4.5 کاهش‌یافته و در سایر سناریوها افزایش می‌یابد. علیرغم تفاوت در میزان جریان و تغییرات آن در ماه‌های مختلف روند کلی جریان تغییر زیادی نمی‌کند. مهم‌ترین تغییر، کاهش قابل‌ملاحظه پیک جریان در ماه آوریل نسبت به گذشته است. کمترین میزان جریان متوسط سالانه در RCP 6.0 و بیشترین میزان جریان متوسط سالانه مربوط به سناریو RCP 2.6 است.

جدول ۲- تغییرات متوسط جریان چهار روش ریزمقیاس سازی در سناریوهای مختلف و مقایسه آن با جریان شبیه‌سازی‌شده درگذشته مدل

	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
Model Hist	۱۸/۶۰	۳۰/۶۱	۵۰/۴۱	۸۶/۹۵	۷۵/۴۷	۵۶/۸۸	۳۴/۵۲	۲۰/۵۶	۱۲/۲۲	۷/۳۸	۵/۵۷	۹/۵۹

RCP 2.6	۲۱/۳۹	۳۱/۴۳	۵۲/۸۵	۷۶/۸۰	۷۴/۹۳	۵۸/۴۵	۳۶/۱۶	۲۱/۵۱	۱۲/۶۴	۷/۳۶	۵/۶۶	۱۱/۸۱
RCP 4.5	۱۸/۵۶	۲۹/۵۴	۵۱/۶۲	۷۶/۸۵	۷۲/۵۲	۵۷/۳۵	۳۵/۶۵	۲۰/۹۳	۱۱/۹۶	۷/۲۰	۵/۵۲	۹/۸۰
RCP 6.0	۱۹/۲۸	۲۹/۰۱	۴۶/۹۲	۷۰/۷۳	۷۲/۰۸	۵۷/۶۲	۳۵/۵۹	۲۲/۱۰	۱۳/۲۹	۷/۷۳	۵/۸۱	۹/۹۸
RCP 8.5	۲۱/۱۹	۳۲/۰۴	۵۰/۳۶	۷۳/۶۴	۷۳/۶۲	۵۷/۴۱	۳۵/۷۴	۲۱/۰۵	۱۲/۰۲	۷/۳۷	۵/۷۵	۱۲/۹۴



شکل ۱۱- متوسط جریان ماهانه در چهار روش ریزمقیاس سازی در سناریوهای مختلف و مقایسه آن با جریان شبیه‌سازی‌شده در گذشته‌ی مدل

۴- بحث و نتیجه‌گیری

به‌منظور برنامه‌ریزی و استفاده بهتر از منابع آب در آینده احتیاج به پیش‌بینی تغییرات اقلیمی و تأثیر آن بر جریان در آینده است. این مقاله تأثیرات تغییر اقلیم بر جریان خروجی حوضه‌ی آبریز سد کرج در تهران، ایران را بررسی کرده و به عدم قطعیت جواب‌ها ناشی از استفاده از روش‌های مختلف ریزمقیاس سازی آماری و سناریوهای مختلف اقلیمی پرداخته است. سد کرج از منابع اصلی تأمین آب شرب تهران است و بررسی وضعیت آن در آینده پیش‌بینی از وضعیت منابع آب تهران در آینده در اختیار تصمیم سازان و برنامه ریزان منابع آب قرار می‌دهد. به همین منظور از خروجی مدل اقلیمی CSIRO-MK 3.6.0 تحت چهار سناریوی RCP 2.6, 4.5, 6.0و8.0 استفاده‌شده است. برای بررسی تأثیرات ریزمقیاس سازی آماری چهار روش (دو روش Bias Correction و دو روش Change Factor) در دوره‌ی پایه مطالعه ۱۹۸۵-۲۰۱۲ و دوره‌ی مورد بررسی آینده ۲۰۱۳-۲۰۴۵ استفاده‌شده است. جریان در سناریوها و روش‌های مختلف در دوره‌ی ۳۰ ساله آینده پیش‌بینی‌شده و ارائه شده‌است.

ابتدا جریان به کمک نرم‌افزار IHACRES پیش‌بینی شد. این نرم‌افزار به کمک بارش، دما و جریان تاریخی مدلی را کالیبره می‌کند که به کمک دما و بارش پیش‌بینی‌شده، جریان در آینده را پیش‌بینی می‌کند. سپس جریان به‌دست‌آمده تحلیل شد.

در نظر گرفتن هر ۴ سناریو محتمل برای آینده طیف کامل‌تری از جواب‌های ممکن در آینده را در اختیار می‌گذارد. این مطالعه نشان داد برای بررسی بهتر اثرات تغییر اقلیم نیازاست که علاوه بر استفاده از سناریوهای مختلف اقلیمی روش‌های مختلف ریزمقیاس سازی نیز استفاده شوند. عدم قطعیت پیش‌بینی‌های انجام‌شده بخصوص در مورد اتفاقات و پدیده‌های حدی خشک و تر نیازمند توجه ویژه است.

روند کلی جریان از یک پیک در ماه آوریل به دو پیک متوالی در ماه‌های مه و آوریل تغییر می‌کند؛ که این تغییر به دلیل تغییرات در ذوب برف به دلیل افزایش دما در اثر تغییر

اقلیم هست، در بقیه ماه‌ها در آینده روند کلی جریان شبیه به گذشته است. بیشترین تغییرات جریان نیز کاهش آن در ماه آوریل است. کمترین جریان متوسط سالانه مربوط به سناریو RCP 6.0 و بیشترین جریان متوسط سالانه مربوط به سناریو RCP 2.5 است.

جواب‌ها در روش‌های ریزمقیاس سازی با اصلاح اریبی و عامل تغییر با یکدیگر دارای تفاوت معنی‌دار است و انتخاب نوع روش (بر پایه میانگین یا بر پایه واریانس) تأثیر کمتری نسبت به روش‌های ذکرشده دارد. نتایج همچنین تغییرات احتمالی روند جریان در آینده را نشان داد که باید در تعیین منحنی فرمان مخزن به آن توجه گردد.

منابع

1. Ashofteh, P. S., O. B. Haddad and M. A. Mariño (2012). "Climate change impact on reservoir performance indexes in agricultural water supply." Journal of Irrigation and Drainage Engineering 139(2): 85-97.
2. Badjana, H. M., M. Fink, J. Helmschrot, B. Diekkrüger, S. Kralisch, A. A. Afouda and K. Wala (2017). "Hydrological system analysis and modelling of the Kara River basin (West Africa) using a lumped metric conceptual model." Hydrological Sciences Journal 62(7): 1094-1113.
3. Chen, J., F. P. Brissette, D. Chaumont and M. Braun (2013). "Performance and uncertainty evaluation of empirical downscaling methods in quantifying the climate change impacts on hydrology over two North American river basins." Journal of Hydrology 479: 200-214.
4. Chiew, F. H. S., J. Teng, J. Vaze, D. A. Post, J. M. Perraud, D. G. C. Kirono and N. R. Viney (2009). "Estimating climate change impact on runoff across southeast Australia: Method, results, and implications of the modeling method." Water Resources Research 45(10): n/a-n/a.
5. Croke, B., F. Andrews, J. Spate and S. Cuddy (2005). IHACRES user guide, Technical Report 2005/19. Second Edition. iCAM, School of Resources, Environment and Society, The Australian National University, Canberra. http://www. toolkit. net. au/ihacres.
6. Durman, C., J. M. Gregory, D. C. Hassell, R. Jones and J. Murphy (2001). "A comparison of extreme European daily precipitation simulated by a global and a regional climate model for present and future climates." Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society 127(573): 1005-1015.
7. Fung, F., A. Lopez and M. New (2011). Modelling the impact of climate change on water resources, Wiley Online Library.
8. Ghorbani, K., E. Sohrabian, M. Salarijazi and M. ABDOLHOSSEINI (2016). "Prediction of climate change impact on monthly river discharge trend using IHACRES hydrological model (Case study: Galikesh watershed)."
9. Gudmundsson, L., J. Bremnes, J. Haugen and T. Engen-Skaugen (2012). "Technical Note: Downscaling RCM precipitation to the station scale using statistical transformations–a comparison of methods." Hydrology and Earth System Sciences 16(9): 3383-3390.
10. Hawkins, E., T. M. Osborne, C. K. Ho and A. J. Challinor (2013). "Calibration and bias correction of climate projections for crop modelling: an idealised case study over Europe." Agricultural and Forest Meteorology 170: 19-31.
11. Ho, C. K., D. B. Stephenson, M. Collins, C. A. Ferro and S. J. Brown (2012). "Calibration strategies: a source of additional uncertainty in climate change projections." Bulletin of the American Meteorological Society 93(1): 21.
12. Jeffrey, S., L. Rotstayn, M. Collier, S. Dravitzki, C. Hamalainen, C. Moeseneder, K. Wong and J. Syktus (2013). "Australia's CMIP5 submission using the CSIRO Mk3. 6 model." Aust. Meteor. Oceanogr. J 63: 1-13.
13. Johns, T. C., R. E. Carnell, J. F. Crossley, J. M. Gregory, J. F. Mitchell, C. A. Senior, S. F. Tett and R. A. Wood (1997). "The second Hadley Centre coupled ocean-atmosphere GCM: model description, spinup and validation." Climate dynamics 13(2): 103-134.
14. Lalozaee, A., A. Pahlavanravi, F. Bahreini, H. Ebrahimi and H. Iezadi (2013). "EFFICIENCY COMPARISON OF IHACRES MODEL AND ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS (ANN) IN RAINFALL-RUNOFF PROCESS SIMULATION INKAMEHWATERSHED (A CASE STUDY INKHORASAN PROVINCE, NE IRAN)." International Journal of Agriculture 3(4): 900.
15. Lenderink, G., A. Buishand and W. v. Deursen (2007). "Estimates of future discharges of the river Rhine using two

scenario methodologies: direct versus delta approach." Hydrology and Earth System Sciences 11(3): 1145-1159.

16. Maurer, E. P. and H. G. Hidalgo (2008). "Utility of daily vs. monthly large-scale climate data: an intercomparison of two statistical downscaling methods."
17. Shabalova, M., W. Van Deursen and T. Buishand (2003). "Assessing future discharge of the river Rhine using regional climate model integrations and a hydrological model." Climate Research 23(3): 233-246.
18. Tabor, K. and J. W. Williams (2010). "Globally downscaled climate projections for assessing the conservation impacts of climate change." Ecological Applications 20(2): 554-565.
19. Vrac, M. and P. Vaittinada Ayar (2017). "Influence of Bias Correcting Predictors on Statistical Downscaling Models." Journal of Applied Meteorology and Climatology 56(1): 5-26.
20. Wang, L., R. Ranasinghe, S. Maskey, P. van Gelder and J. Vrijling (2016). "Comparison of empirical statistical methods for downscaling daily climate projections from CMIP5 GCMs: a case study of the Huai River Basin, China." International journal of climatology 36(1): 145-164.
21. Wilby, R. L. and T. Wigley (1997). "Downscaling general circulation model output: a review of methods and limitations." Progress in Physical Geography 21(4): 530-548.