نشریه علمی-پژوهشی مهندسی و مدیریت آبخیز
جلد ۱۰، شماره ۲، ۱۳۹۷، صفحات ۲۰۴-۲۱۳

Journal of Watershed Engineering and Management
Volume 10, Issue 2, 2018, Pages 204-213
DOI: 10.22092/ijwmse.2018.115664.1361

ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر مقادیر حداکثری بارش روزانه برف، مطالعه موردی: تهران

محمدرضا خزائی*[۱]، احمد شرافتی[۲] و حدیث خزائی[۳]

[۱] استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه پیام نور، ایران، [۲] استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران و [۳] دانشجوی دکتری، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۷/۱۰ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۱۲/۲۳

چکیده

از آثار مهم تغییر اقلیم در آینده، تغییر رژیم بارش برف از جمله برف‌های بیشینه‌ای است. افزایش بارش‌های حدی و افزایش دما در اقلیم آتی با اثرات معکوس مقدار بارش برف‌های حدی آینده را تحت تأثیر قرار می‌دهند و روند تغییر آن در آینده مشخص نیست. در این مقاله اثر تغییر اقلیم بر بارش‌های روزانه حدی برف در ایستگاه مهرآباد تهران ارزیابی شده است. سناریوهای روزانه بارش و دمای روزانه اقلیم آینده مدل CGCM3 تحت سناریوهای انتشار B1، A2 و A1B به‌وسیله مدل استوکستیک IWG ریزمقیاس شده است و با شبیه‌سازی بارش برف با استفاده از معیار دمای آستانه، اثر تغییر اقلیم بر برف دوره ۶۵-۲۰۳۶ ارزیابی شده است. نتایج اعتبارسنجی روش، نشان می‌دهد که مدل IWG دامنه وسیعی از مشخصات دما و بارش را به خوبی باز تولید کرده و مشخصات برف شبیه‌سازی، به‌ویژه توزیع فراوانی برف‌های روزانه بیشینه سالانه به خوبی شبیه‌سازی شده است. نتایج ارزیابی اثر تغییر اقلیم نشان می‌دهد که تحت سناریوهای انتشار مختلف، با وجود افزایش بارش‌های حدی آینده ایستگاه مهرآباد تهران، بارش برف‌های روزانه بیشینه سالانه به میزان زیادی کاهش می‌یابد. به‌طوری که بیشینه بارش روزانه برف با دوره بازگشت دو سال در آینده تحت همه سناریوها بیش از ۵۰ درصد کاهش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: اقلیم آتی، ایستگاه مهرآباد، برف حد، بیشینه برف روزانه، کاهش مقیاس، IWG.

مقدمه

تغییر اقلیم و افزایش دمای کره زمین اثر مهمی بر بارش و ذوب برف دارد. بیشتر مطالعاتی که در گذشته اثر تغییر اقلیم بر برف را ارزیابی کرده‌اند، بر اثر تغییر اقلیم بر برف انباشته شده در مناطق سرد و کوهستانی تمرکز نموده‌اند (Lasanta و همکاران، ۲۰۰۷؛ Uhlmann و همکاران، ۲۰۰۹؛ Tirgar Fakheri و همکاران، ۲۰۱۷). نتایج چنین مطالعاتی به‌دلیل پیش-یابی مقدار آب حاصل از ذوب برف برای استفاده‌های شهری، کشاورزی، نیروگاه‌های برقابی و همچنین، فعالیت‌های اقتصادی مربوط به صنعت توریست در زمستان اهمیت دارد. اما، مطالعات اندکی به ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر بارش‌های حدی برف پرداخته‌اند (López-Moreno و همکاران، ۲۰۱۱). مطالعه بارش برف‌های حدی در اقلیم فعلی و آتی به دلایلی از جمله تأثیر بر ترافیک، ریزش بهمن، تخریب زیرساخت‌های اقتصادی، مسدود شدن راه‌های روستایی و سیلاب‌های حاصل از ذوب برف اهمیت دارد (López-Moreno و

* مسئول مکاتبات: m_r_khazaee@yahoo.com

همکاران، ۲۰۱۱؛ Kawase و همکاران، ۲۰۱۶). بارش برف متأثر از بارش و دما است. تغییر اقلیم موجب افزایش شدت بارش‌های حدی در اغلب نقاط دنیا می‌شود. به‌ویژه در عرض‌های میانی کره زمین احتمال افزایش شدت و فراوانی بارش‌های حدی در اقلمی آینده بسیار زیاد است (IPCC، ۲۰۱۳). با افزایش شدت باراش‌های حدی، شدت بارش‌های حدی برف نیز می‌تواند در اقلیم آینده افزایش یابد (Lute و همکاران، ۲۰۱۵).

از طرف دیگر، بارش برف به شدت متاثر از افزایش دمای ناشی از تغییر اقلیم است و افزایش دما در آینده می‌تواند موجب کاهش شدت برف‌های حدی شود (De Vries و همکاران، ۲۰۱۴). مطالعات انجام شده در مناطق مختلف نتایج متفاوتی را برای اثر تغییر اقلیم بر برف‌های حدی نشان داده است. Sun و همکاران (۲۰۱۰) روند بارش‌های حدی برف را در دوره گذشته (۱۹۶۲ الی ۲۰۰۰) در چین بررسی کردند. نتایج حاکی از روند افزایشی بارش‌های حدی برف در شمال غربی چین و فلات تبت شرقی و روند کاهشی در شرق چین بود. ایشان در ادامه بر مبنای استفاده مستقیم از خروجی‌های بزرگ مقیاس چهار مدل GCM پیش‌یابی کردند که تغییر اقلیم در پایان قرن ۲۱ موجب کاهش شدت و فراوانی بارش‌های حدی برف در سراسر چین شود.

De Vries و همکاران (۲۰۱۴) اثر تغییر اقلیم بر بارش برف‌های حدی فصلی را در غرب و مرکز اروپا با استفاده از خروجی‌های یک مدل RCM ارزیابی کردند. در اروپا به غیر از مناطق سرد رشته کوه‌های آلپ، تغییر اقلیم در آینده موجب کاهش شدت برف‌های حدی می‌شود. Lute و همکاران (۲۰۱۵) اثر تغییر اقلیم بر بارش برف‌های حدی سه روزه را در غرب ایالت متحده با استفاده از خروجی های روزانه ۲۰ مدل GCM ارزیابی کردند. ایشان برای کاهش مقیاس از روش MACA[1] استفاده کردند که از جمله روش‌های چند متغیره اصلاح اریبی خروجی‌های GCM است. ایشان این روش را به خوبی روش کاهش مقیاس دینامیکی (به‌وسیله RCMs[2]) نمی‌دانستند، اما چون خروجی مدل‌های RCM برای GCMهای معدودی در دسترس است از این روش استفاده کردند. در نتیجه پیش‌یابی شد به غیر از در مناطق خیلی سرد مانند کوهستان‌های راکی، تغییر اقلیم در آینده موجب کاهش قابل توجه شدت برف‌های حدی در غرب آمریکا می‌شود (Lute و همکاران، ۲۰۱۵).

Kawase و همکاران (۲۰۱۶) اثر تغییر اقلیم بر برف‌های حدی را در ژاپن با استفاده از خروجی‌های یک مدل RCM ارزیابی کردند. ایشان پیش‌یابی کردند که در مناطقی از ژاپن به‌ویژه در مناطق سرد شمالی بارش برف‌های سنگین در اقلیم آینده افزایش یابد (Kawase و همکاران، ۲۰۱۶). López-Moreno و همکاران (۲۰۱۱) اثر تغییر اقلیم بر بارش‌های سنگین برف در کوه‌های پیرنه در اروپا را با استفاده ار خروجی‌های یک مدل RCM ارزیابی کردند. ایشان نتیجه گرفتند که نتایج به ارتفاع وابسته است. به‌طوری که در ارتفاع ۱۰۰۰ متر، شدت و فراوانی برف‌های سنگین در آینده کاهش می‌یابد، در حالی که در ارتفاع ۲۰۰۰ متر، شدت و بارش برف در اقلیم آینده افزایش می‌یابد.

Marty و Blanchet (۲۰۱۲) روند تغییر بارش‌های حدی برف مشاهداتی در ۸۰ سال گذشته را در سوئیس بررسی کردند و مشاهده کردند که بارش برف‌های سنگین در بیش از ۵۰ درصد از نقاط روند معنی‌دار کاهشی دارد. Räisänen (۲۰۱۶) تغییرات بارش برف را در شمال اروپا با استفاده از خروجی‌های ۱۲ مدل RCM تحت سناریوی A1B بررسی کردند. ایشان پیش‌یابی کردند با وجود کاهش بارش برف زمستانی در آینده، برف‌های حدی روزانه اغلب بدون تغییر می‌ماند. البته در مناطقی که بارش برف به شدت کاهش می‌یابد، برف‌های حدی نیز دچار کاهش می‌شوند.

برای ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر بارش‌های حدی برف، لازم است با استفاده از داده‌های بارش و دمای اقلیم حال و آینده برف را شبیه‌سازی نمود. برای دستیابی به داده‌های بارش و دمای آینده در یک منطقه لازم است از روش کاهش مقیاسی استفاده شود که متغیرهای دما و بارش را به‌طور هم‌زمان و با حفظ همبستگی طبیعی آن‌ها ریزمقیاس کند. علاوه بر آن،

[1] Multivariate Adaptive Constructed Analogs
[2] Regional Climate Models

این روش باید توانایی تولید صحیح مقادیر حدی بارش برای تولید برف‌های حدی را داشته باشد. روش‌های کاهش مقیاس عموما این ویژگی‌ها را به‌طور هم‌زمان در خود ندارند (Fowler و همکاران، ۲۰۰۷؛ Khazaei و همکاران، ۲۰۱۲).

در اغلب مطالعات پیشین که اثر تغییر اقلیم بر برف‌های حدی را ارزیابی کرده‌اند، از خروجی GCMها بدون کاهش مقیاس و یا از روش کاهش مقیاس دینامیکی به‌وسیله مدل‌های RCM استفاده شده است (López-Moreno و همکاران، ۲۰۱۱؛ Lute و همکاران، ۲۰۱۵؛ Räisänen و همکاران، ۲۰۱۶). اما این مدل‌ها بارش‌های حدی را به خوبی بازتولید نمی‌کنند (Kilsby و همکاران، ۲۰۰۷). بعضی از مطالعات نیز از روش اصلاح اریبی خروجی‌های GCMها با اصلاح اریبی آن‌ها استفاده کرده‌اند. ایشان این روش‌ها را حتی به خوبی استفاده از RCMها نمی‌دانند (Lute و همکاران، ۲۰۱۵). Khazaei و همکاران (۲۰۱۲ و ۲۰۱۳) یک مولد آب و هوا[1] به‌نام IWG را توسعه دادند که ویژگی‌های فوق‌الذکر را در خود دارد. ایشان این مدل را با موفقیت در ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر سیلاب‌ها به‌کار بردند.

در این پژوهش، اثر تغییر اقلیم بر توزیع فراوانی بارش‌های حدی برف روزانه در ایستگاه مهرآباد تهران با استفاده از مدل IWG ارزیابی می‌شود. این روش در مقایسه با روش‌های پیشین، همبستگی دما و بارش را در کاهش مقیاس حفظ می‌کند و ضمن آن، مقادیر حدی بارش را به خوبی در سری‌های کاهش مقیاس یافته تولید می‌کند. این دو قابلیت برای ارزیابی صحیح اثر تغییر اقلیم بر برف‌های حدی ضروری است. علاوه بر آن با استفاده از IWG می‌توان سری‌های بارش و دما (و در نتیجه برف) اقلیم فعلی و آینده را به تعداد دلخواه تولید نمود. این سری‌ها حالات مختلفی از شرایط هر اقلیم را نشان می‌دهند که سری مشاهداتی تنها یکی از این حالات است. به این ترتیب از عدم قطعیت نوسانات طبیعی اقلیم نیز در نتایج این روش کاسته می‌شود.

مواد و روش‌ها

مدل IWG: مدل IWG یک مولد آب هوای (Weather Generator (WG)) استوکستیک روزانه است که به‌وسیله Khazaei و همکاران (۲۰۱۳) توسعه یافته است. این مدل از سه قسمت تشکیل شده است که عبارتند از ۱- مدل بارش، ۲- مدل دمای کمینه و بیشینه روزانه و ۳- مدل دمای کمینه و بیشینه ماهانه.

مدل بارش: در اغلب WGs از مدل‌های تجربی برای بازتولید بارش استفاده می‌شود. این مدل‌ها اغلب گشتاورهای مرتبه پایین بارش را در سطح روزانه بازتولید می‌کنند، اما قادر به بازتولید وقایع حدی و آماره‌های مرتبه پایین مقیاس‌های زمانی دیگر، از جمله واریانس ماهانه نیستند (Srikanthan و McMahon، ۲۰۰۱؛ Burton و همکاران، ۲۰۰۸). در مدل IWG، برای تولید بارش از مدل NSRP[2] استفاده شده است. NSRP از نوع مدل‌های استوکستیکی نیمه‌فیزیکی است که در آن، فرایندهای فیزیکی ساختار بارش به‌وسیله روش‌های استوکستیکی توصیف می‌شود. در مطالعات بسیاری مشاهده شده است که این مدل می‌تواند ویژگی‌های آماری بارش مشاهداتی را در دامنه وسیعی از گام‌های زمانی بازتولید کند و رخدادهای حدی بارش را نیز به خوبی بازتولید کند (Cowpertwait و همکاران، ۲۰۰۲؛ Olsson و Burlando، ۲۰۰۲؛ Kilsby و همکاران، ۲۰۰۴؛ Khazaei و همکاران، ۲۰۱۲ و ۲۰۱۳).

مدل دمای کمینه و بیشینه روزانه: مدل دمای روزانه یک مدل AR(1) دو متغیره است که بر سری‌های استاندارد شده دمای کمینه و بیشینه روزانه (وابسته به خشک یا تر بودن روز) به شرح زیر برازش می‌شود. با استفاده از داده‌های مشاهداتی، در هر روز تقویمی از سال و برای روزهای خشک و تر به‌صورت جداگانه، میانگین و انحراف معیار دمای کمینه و دمای بیشینه محاسبه می‌شود. بر هر یک از این آماره‌ها، برای روزهای تر و خشک به‌صورت جداگانه، سری فوریه درجه سه برازش می‌شود. پس از حذف سیکل میانگین‌ها و انحراف معیارهای روزانه، سری زمانی

[1] Weather Generator

[2] Neyman-Scott Rectangular Pulse Model

باقی‌مانده‌ها به‌عنوان یک فرایند خودهمبسته درجه اول AR(1) دو متغیره مدل می‌شود (رابطه ۱) و باقی‌مانده‌ها از توزیع نرمال تخمین زده می‌شود.

$$\begin{cases} x_1(i) = a_{1,1}x_1(i-1) + a_{2,1}x_2(i-1) + b_{1,1}\varepsilon_1(i) + b_{2,1}\varepsilon_2(i) \\ x_2(i) = a_{1,2}x_1(i-1) + a_{2,2}x_2(i-1) + b_{1,2}\varepsilon_1(i) + b_{2,2}\varepsilon_2(i) \end{cases} \quad (1)$$

که در آن، $x_k(i)$، باقی‌مانده متغیر k برای ماه i، $x_k(i-1)$ باقی‌مانده متغیر k برای ماه i-1 و $\varepsilon_k(i)$ متغیرهای نرمال استاندارد مستقل هستند.

مدل ماهانه: مدل‌های WG روزانه، معمولا نوسانات ماهانه و سالانه را دست کم بازتولید می‌کنند. این موضوع می‌تواند به‌دلیل آن باشد که انواع معمول WGs، صریحا نوسانات کم بسامد[1] را در مدل‌سازی در نظر نمی‌گیرند. در مدل IWG، برای بازتولید نوسانات کم بسامد، یک WG ماهانه به‌نام M-IWG[2] توسعه داده شد، که سری زمانی میانگین‌های ماهانه را با همبستگی واقعی بین ماه‌ها تولید می‌کند. سپس میانگین‌های ماهانه دمای کمینه و بیشینه تولیدی به‌وسیله مدل روزانه D-IWG، بر مقادیر متناظر میانگین‌های تولید شده به‌وسیله مدل ماهانه M-IWG، منطبق می‌شود.

از آن‌جا که در IWG، مدل بارش از کفایت لازم برای بازتولید نوسانات کم بسامد، برخوردار است، در مدل M-IWG، میانگین‌های ماهانه بارش تولید نمی‌شود، بلکه از میانگین‌های ماهانه بارش مدل روزانه، برای برقراری همبستگی در سری ماهانه سه متغیر بارش، دمای کمینه و دمای بیشینه استفاده می‌شود. در M-IWG، مدل‌سازی سری ماهانه سه متغیر دمای بیشینه، دمای کمینه و بارش به‌وسیله یک مدل سه متغیره خودهمبسته درجه اول ((AR(1))، انجام می‌شود.

تلفیق سری‌های روزانه و ماهانه: برای تنظیم آماره‌های ماهانه سری‌های روزانه که به‌وسیله مدل روزانه D-IWG تولید شده است، میانگین‌های سری روزانه در هر ماه از طول سری، بر مقدار متناظر ماهانه تولیدی به‌وسیله مدل ماهانه M-IWG، منطبق می‌شود. به این منظور، تفاضل مقدار ماهانه (تولید شده به‌وسیله مدل ماهانه) از میانگین داده‌های روزانه (تولید شده به‌وسیله مدل روزانه) در ماه متناظر، به همه مقادیر روزانه همان ماه اضافه می‌شود تا میانگین سری روزانه در آن ماه از سری روزانه، با مقدار ماهانه متناظر مطابق شود.

اعتبارسنجی نتایج: برای ارزیابی عملکرد مدل، لازم است آماره‌های سری زمانی تولید شده و مشاهداتی با هم مقایسه شود. برای مقایسه آماره‌های سری زمانی مشاهداتی و سری‌های زمانی تولیدی، ۱۰۰ سری هم‌طول با سری‌های مشاهداتی، به‌وسیله مدل واسنجی شده تولید می‌شود. این تکرار به دلیل تغییرپذیری نمونه‌گیری[3] است. برای هر سری تولید شده، آماره‌های متغیرها محاسبه شده و میانه و حدود اطمینانی[4] مانند ۹۰ درصد (حدودی که ۹۰ درصد آماره سری‌های تولید شده در آن قرار دارند)، با آماره‌های متناظر سری مشاهداتی مقایسه می‌شود (Kilsby و همکاران، ۲۰۰۷؛ Holman و همکاران، ۲۰۰۹). قرارگیری آماره‌های سری مشاهداتی در حدود تعیین شده، حاکی از نکویی عملکرد مدل، در سطح احتمال مورد نظر است.

روش کاهش مقیاس: برای کاهش مقیاس خروجی‌های GCM به‌وسیله IWG، آماره‌های به‌دست آمده از سری‌های مشاهداتی، مطابق با سناریوهای تغییر اقلیم GCM، تغییر داده می‌شود و سناریوهای اقلیم آینده با استفاده از آماره‌ها و پارامترهای تغییر یافته، تولید می‌شود. به این منظور، ابتدا از سری‌های روزانه و ماهانه بارش، دمای کمینه و دمای بیشینه خروجی GCM برای منطقه مورد مطالعه، برای دوره پایه و همچنین، برای سناریوی آینده، آماره‌های مورد نیاز IWG محاسبه می‌شود. سپس تغییرات آماره‌های به‌دست آمده از خروجی‌های GCM برای سناریوی مورد نظر، به مقادیر آماره‌های محاسبه شده از داده‌های کفایت مدل AR(1) برای شبیه‌سازی دما به‌طور فراوان در مطالعات گذشته دیده شده است و معمولا در بین WGs مشترک است (Khazaei و همکاران، ۲۰۱۳).

[1] Low-frequency variability
[2] Monthly-IWG
[3] Sampling variability
[4] Confidence interval

مشاهداتی برای هر ماه از سال به‌صورت مجزا اعمال می‌شود. برای میانگین روزانه و ماهانه دمای کمینه و بیشینه، تفاضل سناریوهای آینده از دوره پایه برای هر ماه سال به مقادیر متناظر مشاهداتی اضافه می‌شود. برای سایر آماره‌ها (از جمله میانگین، انحراف معیار، چولگی و ... بارش و انحراف معیار دمای کمینه و بیشینه دمای روزانه و ماهانه) نسبت سناریوهای آینده به دوره پایه در مقادیر متناظر مشاهداتی ضرب می‌شود.

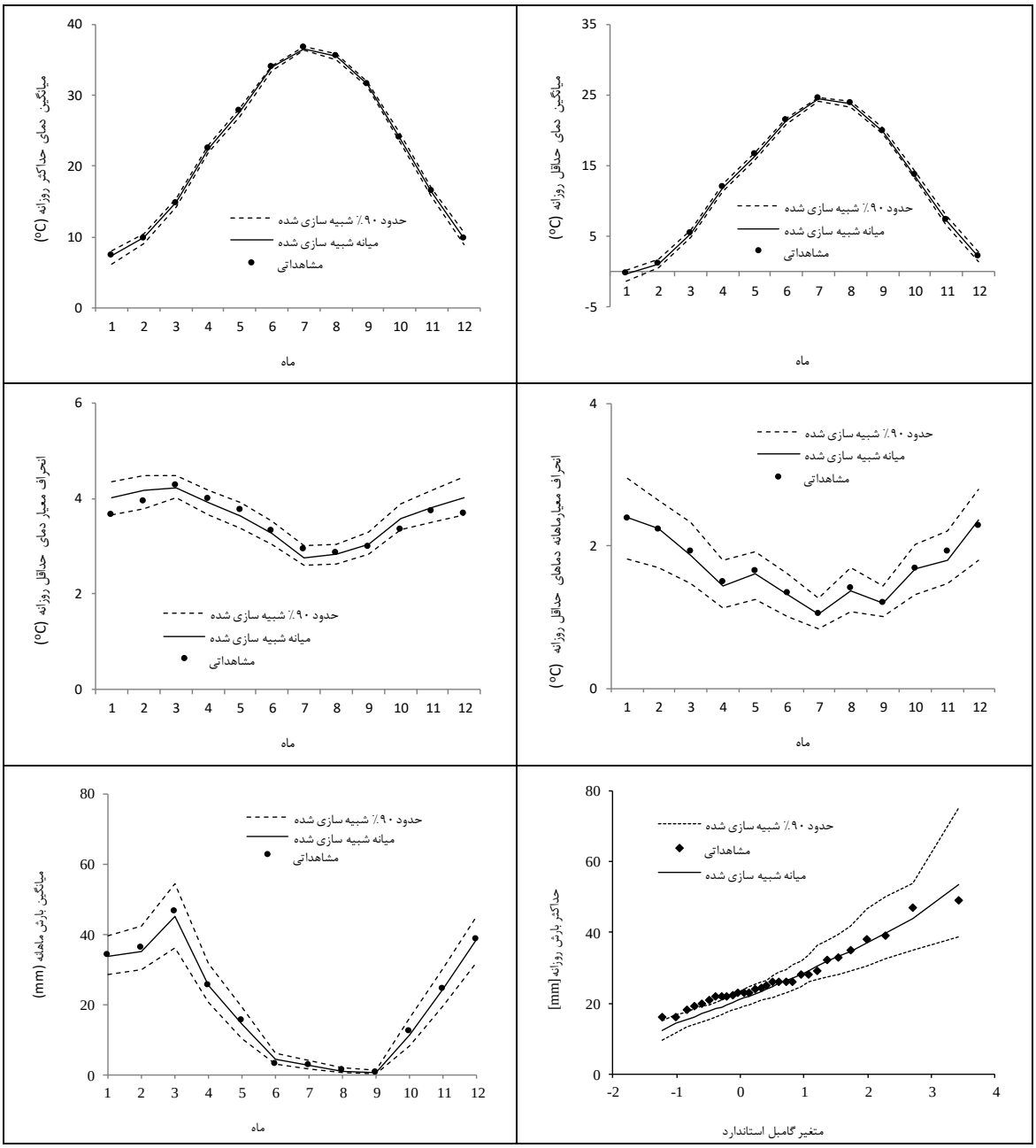
شبیه‌سازی برف: Dini و همکاران (۲۰۰۸) دمای میانگین روزانه آستانه بارش برف را ۲/۹ درجه سانتی‌گراد در البرز مرکز (شامل تهران) محاسبه کردند. در تحقیق حاضر با بررسی روزهای برفی مشاهداتی ایستگاه مهرآباد، دمای ۲/۹ درجه سانتی‌گراد به‌عنوان دمای آستانه بارش برف در ایستگاه مهرآباد پذیرفته شد. همچنین، چگالی برف تازه ۰/۱ منظور شد که به این معنی است که ارتفاع بارش برف ۱۰ برابر ارتفاع آب معادل آن است.

نتایج و بحث

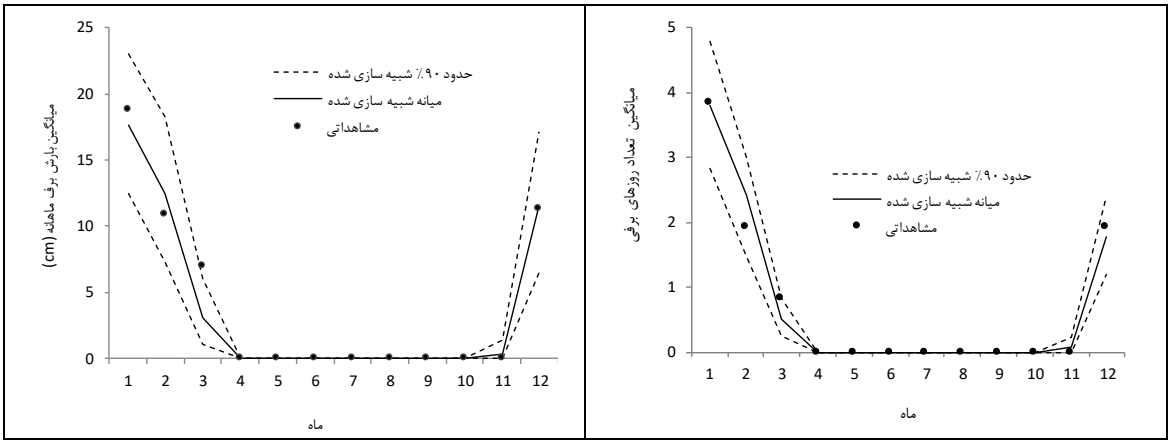
اعتبارسنجی مدل IWG به روش مستقیم: در شکل ۱، به اختصار گزیده آماره‌های سری‌های مشاهداتی با حدود ۹۰ درصد آماره‌های متناظر ۱۰۰ سری ۳۰ ساله تولید شده به‌وسیله IWG (برای میانگین دمای کمینه، میانگین دمای بیشینه، انحراف معیار روزانه دمای کمینه، انحراف معیار ماهانه دمای کمینه ، میانگین بارش، و توزیع احتمالات بارش‌های روزانه حداکثر سالانه) مقایسه شده است. مدل میانگین‌های متغیرها را به خوبی بازتولید کرده است. علاوه بر آن، IWG انحراف معیار ماهانه (به‌عنوان شاخصی از نوسانات کم بسامد) و توزیع بارش‌های بیشینه سالانه را نیز به‌خوبی تولید کرده است و مقادیر مشاهداتی در همه ماه‌ها در حدود ۹۰ درصد مقادیر تولید شده قرار دارند. این نتایج نشان از عملکرد خوب مدل IWG در حفظ دامنه وسیعی از ویژگی‌های سری‌های مشاهداتی در سری تولید شده دارد.

اعتبارسنجی مدل IWG به روش غیرمستقیم: در شکل‌های ۲ و ۳، عملکرد مدل IWG به‌صورت غیرمستقیم در خصوص برف شبیه‌سازی شده بررسی شده است. با استفاده از سری‌های ۳۰ ساله مشاهداتی و ۱۰۰ سری ۳۰ ساله تولید شده بارش و دمای روزانه، سری‌های متناظر بارش برف روزانه تولید شد. در این شکل ویژگی‌های بارش برف مشاهداتی و حدود ۹۰ درصد سری‌های برف شبیه‌سازی شده برای دوره ۲۰۰۰-۱۹۷۱ مقایسه شده است. میانگین عمق ماهانه بارش برف و میانگین تعداد روزهای برفی در ماه به خوبی شبیه‌سازی شده است و مقادیر مشاهداتی عموما در دامنه ۹۰ درصد مقادیر شبیه‌سازی شده قرار دارند (شکل ۲). توزیع فراوانی بارش برف روزانه بیشینه سالانه نیز به خوبی شبیه‌سازی شده است (شکل ۳). مقادیر مشاهداتی عموما در حدود ۹۰ درصد مقادیر شبیه‌سازی شده قرار دارند و شیب توزیع مشاهداتی به خوبی شبیه‌سازی شده است. برای شبیه‌سازی صحیح برف لازم است، علاوه بر هر یک از متغیرهای اولیه (بارش و دما)، همبستگی طبیعی آن‌ها نیز به خوبی تولید شود. موفقیت مدل IWG برای شبیه‌سازی برف نیز نشان می‌دهد که علاوه بر شبیه‌سازی هر یک از متغیرهای بارش و دما، همبستگی آن‌ها نیز به خوبی شبیه‌سازی شده است.

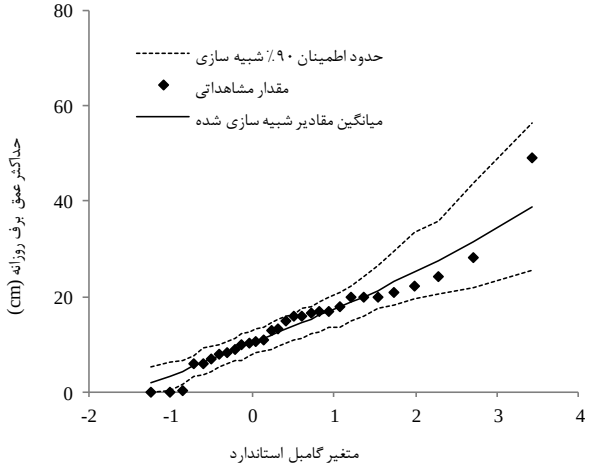
ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر برف: در شکل ۴- الف، نتایج ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر میانگین ماهانه بارش برف نشان داده شده است. مقادیر میانگین بارش ماهانه برف در دوره تاریخی ۱۹۷۱-۲۰۰۰ و سناریوهای آینده ۲۰۳۶-۶۵ در جدول ۱ ارائه شده است. بر این مبنا، عمق بارش برف در همه سناریوهای آینده کاهش چشم‌گیر خواهد داشت. در ماه ژانویه که پربرف‌ترین ماه سال است، میانگین عمق بارش برف در دوره تاریخی ۲۲ سانتی‌متر است که پیش‌یابی می‌شود در آینده مقداری بین سه تا ۱۰ سانتی‌متر باشد. در ماه دسامبر نیز عمق برف از ۱۷ سانتی‌متر در دوره تاریخی به مقداری بین یک تا سه سانتی‌متر در آینده کاهش خواهد یافت. همچنین، انتظار می‌رود عمق بارش برف سالانه در دوره ۲۰۳۶-۶۵ نسبت به دوره ۲۰۰۰-۱۹۷۱ به میزان ۵۵ تا ۸۵ درصد کاهش یابد.



شکل ۱- اعتبارسنجی مستقیم مدل IWG



شکل ۲- ارزیابی عملکرد روش در شبیه‌سازی ویژگی‌های ماهانه برف



شکل ۳- ارزیابی عملکرد روش در شبیه‌سازی توزیع بارش برف روزانه حداکثر سالانه

جدول ۱- میانگین ماهانه عمق بارش بارش برف در دوره تاریخی و سناریوهای آینده (cm)

Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan
۲۲	۱۶	۶	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۱۷	۱۹۷۱-۲۰۰۰
۳	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۲۰۳۶-۶۵ A1B
۶	۲	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۲۰۳۶-۶۵ B1
۱۰	۲	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۳	۲۰۳۶-۶۵ A2

در شکل ۴- ب، اثر تغییر اقلیم بر میانگین تعداد روزهای با بارش برف در هر ماه سال ازیابی شده است. مقادیر میانگین تعداد روزهای برفی در دوره تاریخی و سناریوهای آینده نیز در جدول ۲ ارائه شده است. پیش‌یابی می‌شود، تعداد روزهای برفی تهران در آینده به مقدار زیادی کاهش یابد. به‌عنوان نمونه، در ماه ژانویه میانگین تعداد روزهای برفی در دوره تاریخی ۳/۸ روز است که انتظار می‌رود در آینده به عددی بین ۲/۴ تا ۰/۹ برسد. در ماه فوریه میانگین تعداد روزهای برفی ۲/۴ روز در دوره تاریخی است که بر مبنای سناریوهای مورد بررسی در آینده به مقداری بین ۰/۵ تا ۰/۱ روز در ماه خواهد رسید.

جدول ۲- میانگین تعداد روزهای با بارش برف در ماه در دوره تاریخی و سناریوهای آینده

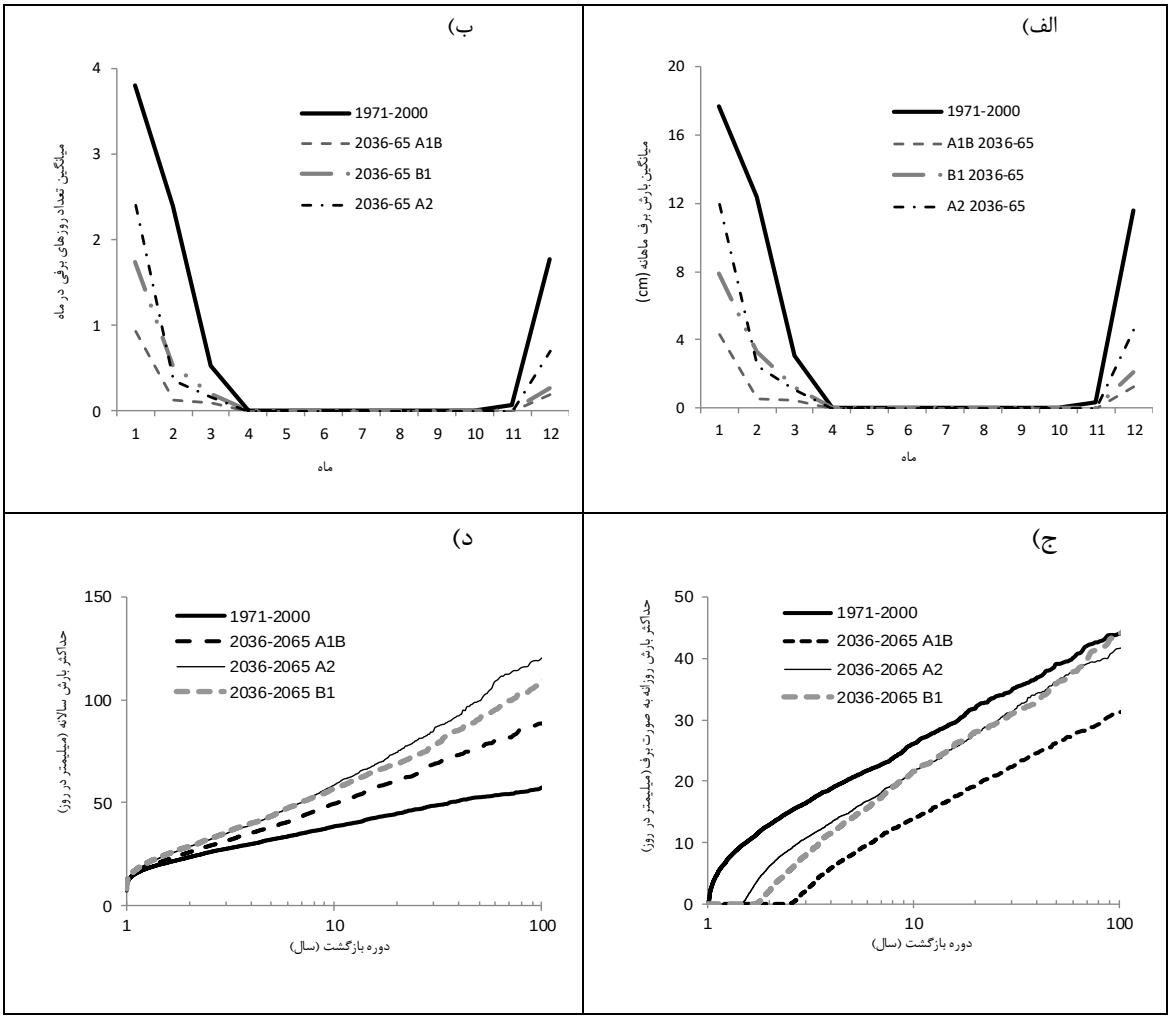
Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	
۳/۸	۲/۴	۰/۵	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰/۱	۱/۸	۱۹۷۱-۲۰۰۰
۰/۹	۰/۱	۰/۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰/۲	۲۰۳۶-۶۵ A1B
۱/۷	۰/۵	۰/۲	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰/۳	۲۰۳۶-۶۵ B1
۲/۴	۰/۴	۰/۲	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰/۷	۲۰۳۶-۶۵ A2

در شکل ۴- ج، اثر تغییر اقلیم بر توزیع فراوانی بیشینه بارش برف روزانه در سال نشان داده شده است. شکل ۴- د نیز اثر تغییر اقلیم بر توزیع فراوانی بیشینه بارش روزانه در سال را نشان می‌دهد. تحت همه سناریوهای B1، A1B و A2 بارش‌های حدی آینده افزایش قابل توجهی خواهند یافت. با این حال شدت بارش‌های حدی برف تهران در آینده کاهش می‌یابد. علت این امر غلبه افزایش دما بر افزایش بارش در تولید برف آینده در ایستگاه مهرآباد تهران است. بر مبنای نتایج، عمق بیشینه بارش روزانه برف با دوره

بازگشت دو سال در اقلیم تاریخی ۱۳ سانتی‌متر است که پیش‌یابی می‌شود تحت سناریوهای مورد بررسی در دوره ۶۵-۲۰۳۶ به مقداری بین صفر تا شش سانتی‌متر کاهش یابد. در دوره بازگشت ۲۰ سال عمق حداکثر بارش روزانه برف دوره تاریخی ۳۲ سانتی‌متر است که انتظار می‌رود، در دوره آینده مقداری بین ۱۹ تا ۲۸ سانتی‌متر باشد. عمق بیشینه بارش روزانه برف ۱۰۰ ساله در دوره تاریخی ۴۴ سانتی‌متر تخمین زده می‌شود و بر مبنای سناریوهای مورد بررسی پیش‌یابی می‌شود، در آینده به مقداری بین ۳۱ تا ۴۴ سانتی‌متر برسد.

جدول ۳- اثر تغییر اقلیم بر بارش برف روزانه بیشینه سالانه سال در دوره بازگشت‌های مختلف

دوره بازگشت (سال)	۱۹۷۱-۲۰۰۰	۲۰۳۶-۶۵		
		B1	A2	A1B
۲	۱۳	۲	۶	۰
۱۰	۲۶	۲۲	۲۲	۱۴
۲۰	۳۲	۲۸	۲۸	۱۹
۵۰	۳۹	۳۶	۳۶	۲۶
۱۰۰	۴۴	۴۴	۴۲	۳۱
۲۰۰	۵۱	۵۱	۴۹	۳۹



شکل ۴- ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر بارش و بارش برف در ایستگاه مهرآباد تهران

نتیجه‌گیری

در این مطالعه اثر تغییر اقلیم بر توزیع فراوانی بارش برف‌های حداکثری در ایستگاه مهرآباد تهران ارزیابی شد. در مقایسه با مطالعات پیشین، در این مطالعه از مدل IWG که قابلیت ویژه‌ای برای چنین مطالعه‌ای برخوردار است استفاده شد. نتایج اعتبارسنجی نشان داد که این مدل دامنه وسیعی از ویژگی‌های بارش و دمای مشاهداتی را به خوبی باز تولید کرده است. همچنین، ویژگی‌های برف مشاهداتی از جمله میانگین ماهانه بارش برف، میانگین تعداد روزهای برفی در ماه و توزیع فراوانی بارش برف‌های روزانه بیشینه سال در سطح اعتماد ۹۰ درصد به خوبی بازتولید شد. این نتایج حاکی از عملکرد مناسب روش پیشنهادی برای ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر برف و برف‌های حدی روزانه است.

نتایج ارزیابی اثر تغییر اقلیم آینده تحت سناریوهای B1، A1B و A2 مدل CGCM3 نشان داد که با وجود افزایش قابل توجه بارش‌های حدی در اقلیم آینده، بارش‌های شدید برف به مقدار زیادی کاهش می‌یابد. به‌عنوان نمونه در دوره بازگشت دو سال، عمق بیشینه بارش برف روزانه از ۱۳ سانتی‌متر در دوره تاریخی ۱۹۷۱-۲۰۰۰ به مقداری کمتر از شش سانتی‌متر در دوره آینده ۲۰۳۶-۶۵ می‌رسد. در دوره بازگشت ۱۰۰ سال، این مقدار از ۴۴ سانتی‌متر در اقلیم تاریخی به مقداری بین ۳۱ تا ۴۴ سانتی‌متر تحت سناریوهای مختلف اقلیم آینده می‌رسد. تعداد روزهای برفی و میانگین بارش برف ماهانه نیز به مقدار زیادی کاهش می‌یابد. به‌عنوان نمونه بارش میانگین برف ماه ژانویه از ۲۲ سانتی‌متر در اقلیم تاریخی به مقداری بین سه تا ۱۰ سانتی‌متر تحت سناریوهای مختلف آینده خواهد رسید و میانگین برف ماه فوریه از شش سانتی‌متر در اقلیم فعلی به مقداری کمتر از دو سانتی‌متر در دوره ۲۰۳۶-۶۵ خواهد رسید. پیش‌یابی می‌شود، تعداد روزهای برفی نیز در اقلیم آینده نسبت به اقلیم فعلی کاهش یابد. به‌عنوان نمونه میانگین تعداد روزهای برفی ماه ژانویه از ۳/۸ در اقلیم فعلی به مقداری بین ۰/۹ تا ۲/۴ در اقلیم آینده خواهد رسید.

منابع مورد استفاده

1. Burton, A., C.G. Kilsby, H.J. Fowler, P.S.P. Cowpertwait and P.E. O'Connell. 2008. RainSim: a spatial-temporal stochastic rainfall modeling system. Environmental Modelling and Software, 23: 1356–1369.
2. Cowpertwait, P.S.P., C.G. Kilsby and P.E. O'Connell. 2002. A space-time Neyman-Scott model of rainfall: Empirical analysis of extremes. Water Resources Research, 38(8): 11-31.
3. De Vries, H., G. Lenderink and E. van Meijgaard. 2014. Future snowfall in western and central Europe projected with a high-resolution regional climate model ensemble. Geophysical Research Letters, 41: 4294–4299.
4. Dini, G.H.R., P. Zieaean Firouzabadi, A. Alimohammadi Sarab and S. Dadashi Khanghah. 2008. GIS-based snow mapping in Central Alborz Mountain chain using MODIS and AVHRR data. Iran Water Resources Research, 3(3): 1-8 (in Persian).
5. Fowler, H.J., S. Blenkinsop and C. Tebaldi. 2007. Linking climate change modeling to impacts studies: recent advances in downscaling techniques for hydrological modeling. International Journal of Climatology, 27: 1547-1578.
6. Holman, I.P., D. Tascone and T.M. Hess. 2009. A comparison of stochastic and deterministic downscaling methods for modeling potential groundwater recharge under climate change in East Anglia, UK: implications for groundwater resource management. Hydrogeology Journal, 17: 1629–1641.
7. IPCC. 2013. Climate change 2013: the physical science basis, contribution of working group i to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change, chap. 12. Cambridge University Press, Cambridge, 237 pages.
8. Kawase, H., A. Murata, R. Mizuta, H. Sasaki, M. Nosaka and M. Ishii. 2016. Enhancement of heavy daily snowfall in central Japan due to global warming as projected by large ensemble of regional climate simulations. Climatic Change, 139: 265–278.
9. Khazaei, M.R., S. Ahmadi, B. Saghafian and B. Zahabiyoun. 2013. A new daily weather generator to preserve extremes and low-frequency variability. Climatic Change, 119: 631–645.

10. Khazaei, M.R., B. Zahabiyoun and B. Saghafian. 2012. Assessment of climate change impact on floods using weather generator and continuous rainfall-runoff model. International Journal of Climatology, 32: 1997-2006.
11. Kilsby, C.G., P.D. Jones, A. Burton, A.C. Ford, H.J. Fowler and C. Harpham. 2007. A daily weather generator for use in climate change studies. Environmental Modelling and Software, 22: 1705-1719.
12. Kilsby, C.G., A. Moaven-Hashemi and P.E. O'Connell. 2004. Simulation of rainfall extremes: fitting to observed annual maxima. 1st International Conference on Flood Risk, Institute of Mathematics and its Applications, University of Bath, UK.
13. Lasanta, T., M. Laguna Marín-Yaseli and S.M. Vicente-Serrano. 2007. Do tourism-based ski resorts contribute to the homogeneous development of the Mediterranean mountains? A case study in the Central Spanish Pyrenees? Tour Manager, 28(5): 1326–1339.
14. López-Moreno, J.I., S. Goyette, S.M. Vicente-Serrano and M. Beniston. 2011. Effects of climate change on the intensity and frequency of heavy snowfall events in the Pyrenees. Climatic Change, 105: 489–508.
15. Lute, A.C., J.T. Abatzoglou and K.C. Hegewisch. 2015. Projected changes in snowfall extremes and internal variability of snowfall in the western United States. Water Resources Research, 51: 960-972.
16. Marty, C. and J. Blanchet. 2012. Long-term changes in annual maximum snow depth and snowfall in Switzerland based on extreme value statistics. Climatic Change, 111(3): 705–721.
17. Olsson, J. and P. Burlando. 2002. Reproduction of temporal scaling by a rectangular pulses rainfall model. Hydrological Processes, 16: 611–630.
18. Räisänen, J. 2016. Twenty-first century changes in snowfall climate in Northern Europe in ENSEMBLES regional climate models. Climate Dynamics, 46(1): 339–353.
19. Srikanthan, R. and T.A. McMahon. 2001. Stochastic generation of annual, monthly and Daily climate data: a review. Hydrology and Earth System Sciences, 5: 653–670.
20. Sun, J., H. Wang, W. Yuan and H. Chen. 2010. Spatial-temporal features of intense snowfall events in China and their possible change. Journal of Geophysical Research, 15: 1-8.
21. Tirgar Fakheri, F., B. Alijani, P. Zeaiean Firuzabadi and M. Akbari. 2017. Simulation of snowmelt runoff under climate change scenarios in Armand Basin. Ecohydrology, 4(2): 357-368 (in Persian).
22. Uhlmann, B., S. Goyette and M. Beniston. 2009. Sensitivity analysis of snow patterns in Swiss ski resorts to shifts in temperature precipitation and humidity under condition of climate change. International Journal of Climatology, 29: 1048–1055.

DOI: 10.22092/ijwmse.2018.115664.1361

Climate change impact assessment on maxima daily snowfalls, case study: Tehran

Mohammadreza Khazaei[*1], Ahmad Sharafati[2] and Hadis Khazaei[3]

[1] Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Payame Noor University, Iran, [2] Assistant Professor, Faculty of Technical and Engineering, Tehran Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran and [3] PhD Student, Faculty of Technical and Engineering, Tehran Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

Received: 02 October 2017 Accepted: 14 March 2018

Abstract

One of the most important impacts of climate change is the change of snowfall regime, especially extreme snowfalls in the future. Extreme snowfalls will be affected by increasing in extreme rainfalls and temperature oppositely in the future climate while the trend of changes is not clear. In this paper, climate change impact on extreme daily rainfalls in the Mehrabad station of Tehran is assessed. Future daily precipitation and temperature projections of the CGCM3 model under B1, A2, and A1B emission scenarios are downscaled using IWG stochastic model. Snowfall is simulated using temperature threshold criteria, and climate change impact is assessed on snowfall in 2036-65 period. Results of the validation tests showed that the IWG model have reproduced a broad range of the temperature and precipitation statistics. Also, snowfall statistics specially the annual maximum daily snowfall distribution are well reproduced. The climate change impact assessment results showed that under various emission scenarios, despite increasing in extreme precipitation in the future in the Tehran Mehrabad station, annual maxima daily snowfalls would greatly decrease. So that, maximum daily snowfall with return period of two years would decrease more than 50% under all considered scenarios.

Key words: Downscaling, Extreme snowfalls, Future climate, IWG, Mehrabad station

[*] Corresponding author: m_r_khazaee@yahoo.com