

## پیش‌یابی بارش‌های سیل‌آسا در شرایط تغییر اقلیم و تحلیل حساسیت نتایج به روش کاهش مقیاس

محمد رضا خزائی<sup>۱\*</sup>، رضا کاظمی<sup>۲</sup>

(۱) استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه پیام نور، ایران.

\* نویسنده مسئول مکاتبات: [m\\_r\\_khazae@yahoo.com](mailto:m_r_khazae@yahoo.com)

(۲) گروه مدیریت ساخت و آب، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۵/۰۵

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۲/۱۹

### چکیده:

در بسیاری از نقاط دنیا در آینده شدت و فراوانی بارش‌های سیل‌آسا در اثر تغییر اقلیم افزایش خواهد یافت. لذا لازم است چنین مطالعاتی بر اساس سناریوهای تغییر اقلیم بازنگری شوند. از ابزارهای کارآمد در چنین مطالعاتی، مدل‌های مولد داده‌های هواشناسی از جمله *LARS-WG* است. با آنکه *GCM* تغییرات ویژگی‌های مختلف بارش را برای آینده پیش‌یابی می‌کند، معمولاً در کاهش مقیاس توسط *LARS-WG* تنها تغییرات میانگین‌های ماهانه اعمال می‌شود؛ و از تغییرات سایر مشخصات بارش چشم‌پوشی می‌شود. در این مقاله، ضمن ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر بارش‌های سیل‌آسای گرگان و خرم‌آباد، نتایج روشی که تغییرات مشخصات مختلف بارش را در کاهش مقیاس اعمال می‌کند (روش کامل‌تر) با روش متداولی که تنها تغییرات میانگین‌ها را اعمال می‌کند (روش ساده‌تر) مقایسه شده است. برای اقلیم آینده از سناریوهای بارش مدل *CanESM2* تحت سناریوهای انتشار *RCP2.6*، *RCP4.5* و *RCP8.5* در دوره ۲۰۳۶-۲۰۶۵ استفاده شد. نتایج نشان داد که برای ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر بارش‌های سیل‌آسا، علاوه بر تغییرات میانگین‌ها، لازم است تغییرات سایر آماره‌ها نیز اعمال شود. زیرا تفاوت نتایج دو روش قابل توجه است. مثلاً در گرگان برای سناریوهای انتشار مختلف، بارش‌های روزانه حداکثر سالانه‌ی با دوره بازگشت ۱۵ سال در آینده نسبت به دوره تاریخی، طبق روش کامل‌تر بین ۱۶ تا ۲۱ درصد، اما طبق روش ساده‌تر، بین ۳۷ تا ۴۹ درصد افزایش می‌یابند. طبق روش کامل‌تر، شدت بارش‌های سیل‌آسای هر دو ایستگاه در آینده افزایش خواهد یافت. این افزایش برای دوره بازگشت ۲ سال بین ۲۳٪ تا ۳۰٪ و برای دوره بازگشت ۳۰ سال بین ۲۵٪ تا ۲۹٪ خواهد بود.

**کلید واژه‌ها:** بارش حدی؛ تغییر اقلیم؛ روش کاهش مقیاس؛ عدم قطعیت

### مقدمه

پس از آن (از جمله Agilan and Umamahesh, 2016، Hosseinzadehtalaei et al., 2017 و Elshorbagy et al., 2018)، شدت و فراوانی بارش‌های سیل‌آسا تا انتهای قرن ۲۱ نیز همچنان به صورت معنی داری افزایش می‌یابد و در نتیجه انتظار می‌رود مخاطرات بارش‌های شدید از جمله سیل، فرسایش خاک و رانش زمین افزایش یابد

شدت و فراوانی بارش‌های سیل‌آسا در دهه‌های اخیر، در نقاط مختلف دنیا افزایش یافته است (Shahabul and Elshorbagy, 2016). بر مبنای نتیجه‌گیری هیات بین‌الدول تغییر اقلیم (International Panel on Climate Change (IPCC) (Change (IPCC) (IPCC, 2012) و مطالعات مختلف

تغییر اقلیم، علاوه بر میانگین بارش ماهانه، تعداد روزهای بارانی هر ماه نیز تغییر خواهد کرد که آن هم بر شدت بارش‌های روزانه اثر مهمی دارد. به همین دلیل در تعدادی از مطالعات گذشته علاوه بر تغییرات میانگین، تغییرات تعداد روزهای بارانی نیز برای کاهش مقیاس بارش در نظر گرفته شده است (Liu et al., 2012; Khazaei et al., 2012; Taye and Willems, 2013). این در حالی است که در بسیاری دیگر از مطالعات گذشته، تنها تغییرات میانگین‌ها را در ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر بارش‌های حدی در نظر گرفته‌اند (Mareuil et al., 2007; Kay et al., 2007).

Goodarzi و همکاران (2014) نتایج دو روش کاهش مقیاس توسط *LARS-WG* را در ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر میانگین ماهانه‌ی دما، بارش و جریان در یک حوضه در اقلیم خشک یزد مقایسه کردند. در روش اول، تنها تغییرات میانگین ماهانه‌ی متغیرهای اقلیمی در کاهش مقیاس وارد می‌شود و روش دوم، حالت کامل‌تری است که علاوه بر تغییرات میانگین‌ها، تغییرات سایر ویژگی‌های متغیرهای اقلیمی نیز در کاهش مقیاس اعمال می‌شود. ایشان مشاهده کردند که اختلاف بین نتایج دو روش برای میانگین دما در حدود ۳ تا ۴ درصد، برای میانگین بارش حدود ۳۰ درصد و برای جریان شبیه‌سازی شده توسط متغیرهای هواشناسی ریزمقیاس شده، بیش از ۳۰ درصد بود. این نتایج نشان داد که نتایج دو روش کاهش مقیاس توسط *LARS-WG* به خصوص در نتایج ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر بارش و جریان به مقدار قابل توجه‌ای با هم متفاوت است. در نتیجه برای ارزیابی اثرات تغییر اقلیم، لازم است از روش دوم که منجر به نتایج دقیق‌تری می‌شود استفاده شود. البته در این مطالعه اثر روش کاهش مقیاس تنها بر میانگین‌ها بررسی شد (Goodarzi et al., 2014). لیکن چون بارش‌های حدی در مقایسه با میانگین‌ها، به تغییرات سایر ویژگی‌های بارش (مثلاً تعداد روزهای تر) حساسیت بیشتری دارند، خطای این ساده-سازی در ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر بارش‌های حدی

(Mullan, 2013). این در حالی است که روش‌های سنتی و مرسوم تحلیل فراوانی بارش‌های شدید و سیل تنها بر مبنای داده‌های ثبت شده در گذشته توسعه یافته‌اند و بر این فرض استوارند که ویژگی‌های بارش در آینده بدون تغییر باقی می‌ماند. با تغییر ویژگی‌های بارش‌های سیل‌آسا در آینده، نتایج روش‌های مرسوم و سنتی تحلیل فراوانی بارش‌های شدید دیگر معتبر نخواهد بود (Teegavarapu, 2012). لذا برای طرح‌های زیر بنایی جدید و کاهش آثار مخرب بارش‌های سیل‌آسا لازم است سناریوهای توزیع بارش‌های حدی آینده با در نظر گرفتن اثرات تغییر اقلیم پیش‌یابی شود.

مدل‌های گردش عمومی (General Circulation Models (GCM)) به عنوان ابزاری معتبر برای تولید سناریوهای اقلیمی، از جمله بارش آینده، مطرح هستند (IPCC, 2001; Jahangir et al., 2016). اما خروجی این مدل‌ها بزرگ مقیاس است و مستقیماً برای مطالعات منطقه‌ای مناسب نیست (IPCC, 2001; Jahangir et al., 2016). لذا ضروری است که خروجی این مدل‌ها برای تولید سناریوهای منطقه‌ای، ریزمقیاس شود. در میان روش‌های کاهش مقیاس (از جمله روش‌های دینامیکی توسط مدل‌های منطقه‌ای اقلیم و روش‌های آماری) از جمله روش‌های عامل تغییر، مدل‌های مولد داده‌های هواشناسی، و روش‌های رگرسیونی))، مدل *LARS-WG* که از نوع مدل‌های مولد داده‌های هواشناسی است بسیار پرکاربرد بوده است.

در مدل *LARS-WG* سناریوهای آینده‌ی تغییر اقلیم به گونه‌ای تعبیه شده است که از تغییراتی که مدل‌های GCM برای بارش آینده پیش‌بینی کرده‌اند، تنها تغییرات میانگین ماهانه‌ی بارش در نظر گرفته شده است و از تغییرات سایر ویژگی‌های آن چشم‌پوشی شده است (Semenov and Stratonovitch, 2010). به علت سادگی استفاده از این سناریوها، در بیشتر مطالعات گذشته از این روش استفاده شده است. این در حالی است که در اثر

می‌تواند بزرگتر و مهم‌تر باشد.

Shahabul و Elshorbagy (2016) از مدل *LARS-WG*

برای ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر بارش‌های سیل‌آسای ایستگاه ساسکاتون (*Saskatoon*) در کانادا استفاده کردند. عملکرد مدل *LARS-WG* برای شبیه‌سازی بارش در دوره پایه قابل قبول بود. ایشان در ادامه نتایج ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر بارش‌های سیل‌آسا را برای حالتی که تنها تغییرات میانگین ماهانه بارش در کاهش مقیاس وارد می‌شود با حالت کامل‌تری که هم تغییرات میانگین و هم تغییرات تعداد روزهای بارانی لحاظ می‌شود مقایسه کردند. نتایج ایشان برای ایستگاه ساسکاتون نشان داد که استفاده از روش ساده‌تر کاهش مقیاس موجب خطای قابل توجه‌ای در نتایج ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر بارش‌های سیل‌آسا شده است. نتایج تحقیق نشان داد شدت بارش‌های سیل‌آسای منطقه مطالعاتی در آینده افزایش خواهد یافت.

در اغلب مطالعات ارزیابی آثار تغییر اقلیم توسط مدل *LARS-WG*، یا صریحاً به استفاده از روش ساده‌ی کاهش مقیاس (که در مدل تعبیه شده است) اشاره شده است و یا بیان نشده است که از روش کامل‌تر کاهش مقیاس استفاده شده است. از جمله، Khosrovanian و همکاران (2015) به ارزیابی اثر تغییر اقلیم آینده بر میانگین‌های بارش، دما و ساعات آفتابی در ایستگاه گرگان، با استفاده از مدل *LARS-WG* تحت سناریوهای *A2*، *A1B* و *B1* مدل *HadCM3* پرداختند. ایشان مشاهده کردند عملکرد مدل در شبیه‌سازی میانگین‌های ماهانه متغیرها خوب است و قابلیت پیش‌یابی متغیرهای اقلیمی را دارد. همچنین نتایج افزایش دما و بارش در آینده را نشان داد. Khoorani و Jamali (2016) با استفاده از مدل *LARS-WG* و خروجی‌های مدل *HadCM3* تحت سناریوهای *A2*، *A1B* و *B1* اثر تغییر اقلیم را بر شدت خشکسالی در ایستگاه‌های بندرعباس و شهرکرد ارزیابی کردند و پیش‌یابی کردند که شدت خشکسالی در دوره ۲۰۱۱-۲۰۴۰ افزایش می‌یابد. Askarizadeh و همکاران (2017) با استفاده از مدل

*LARS-WG* رویدادهای حدی آینده‌ی ایستگاه سبزوار را پیش‌یابی کردند. ایشان از دو سناریوی *A1B* و *A2* سه مدل *GCM* استفاده نمودند. نتایج نشان داد که شدت بارش‌های سیل‌آسا در آینده افزایش خواهد یافت.

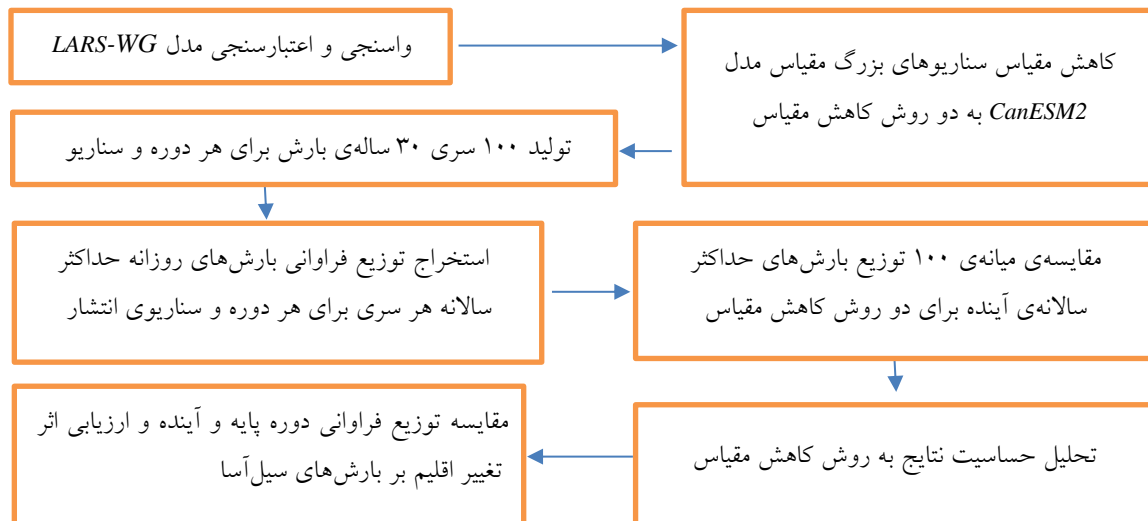
اگرچه به صورت متداول در استفاده از مدل *LARS-WG*، از روش کاهش مقیاس ساده‌ای استفاده می‌شود که تنها بر مبنای تغییر میانگین‌های متغیرها است، لیکن استفاده از این روش برای ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر بارش‌های سیل‌آسا هنوز به مقدار کافی اعتبارسنجی نشده است و می‌تواند موجب خطای قابل ملاحظه‌ای در نتایج گردد. در این تحقیق نتایج دو روش مذکور کاهش مقیاس توسط مدل *LARS-WG* برای ارزیابی آثار تغییر اقلیم بر بارش‌های سیل‌آسا مقایسه شده است. سپس با استفاده از روش کامل‌تر، توزیع بارش‌های سیل‌آسای آینده‌ی گرگان و خرم‌آباد، که از مناطق سیل‌خیز ایران هستند، تحت سه سناریوی جدید انتشار گازهای گلخانه‌ای *RCP* پیش‌یابی شده است.

### مواد و روش‌ها

مراحل روش تحقیق در مراحل زیر و شکل (۱) تشریح شده است. ۱- مدل *LARS-WG* برای شبیه‌سازی بارش روزانه‌ی ایستگاه‌های گرگان و خرم‌آباد واسنجی و اعتبارسنجی شده است. ۲- با استفاده از مدل *LARS-WG*، سناریوهای آینده‌ی بزرگ مقیاس مدل *CanESM2* برای هر دو ایستگاه به دو روش ریز مقیاس شد. در روش اول تنها تغییرات میانگین‌های ماهانه‌ی بارش وارد شد و در روش دوم علاوه بر تغییرات میانگین‌ها، تغییرات طول سری‌های بارانی و خشک نیز لحاظ گردید. ۳- به منظور کاستن عدم قطعیت نوسانات اقلیم و خطای نمونه برداری، برای دوره پایه و برای هر یک از سناریوهای آینده به جای یک سری ۳۰ ساله، ۱۰۰ سری ۳۰ ساله‌ی بارش روزانه تولید شد و توزیع فراوانی بارش‌های سیل-آسای (بارش‌های روزانه حداکثر سالانه) میانه‌ی ۱۰۰

آسای دوره پایه و سناریوهای انتشار مختلف آینده، اثر تغییر اقلیم بر بارش‌های سیل‌آسا در هر ایستگاه پیش‌یابی شد. در ادامه به تشریح مدل و روش‌های مورد استفاده پرداخته می‌شود.

سری تولید شده برای هر دوره و سناریو استخراج شد. ۴- با مقایسه‌ی توزیع بارش‌های حداکثر سالانه‌ی آینده برای دو روش کاهش مقیاس، حساسیت نتایج به انتخاب روش کاهش مقیاس تحت سناریوهای انتشار مختلف تحلیل شد. ۵- با مقایسه توزیع فراوانی بارش‌های سیل-



شکل ۱. روند نمای روش تحقیق

احتمالات مشاهداتی از ۲۳ بازه استفاده می‌شود. سپس با استفاده از این توزیع‌ها، سری‌های مصنوعی داده‌های هواشناسی را به صورت تصادفی با طول دلخواه تولید می‌کند (Semenov and Stratonovitch, 2010). روش تولید داده به این ترتیب است که ابتدا سری زمانی روزهای خشک و تر تولید می‌شود. به این منظور، به صورت متوالی طول سری‌های خشک و تر به صورت مستقل و تصادفی از  $SED$  سری‌های خشک و تر تولید می‌شود. طول هر سری خشک یا تر از  $SED$  ماهی که سری از آنجا آغاز می‌شود، برداشت می‌شود. سپس برای روزهای تر، به صورت مستقل و تصادفی مقدار بارش از  $SED$  مقادیر بارش تولید می‌شود.

#### اعتبارسنجی مدل

اعتبارسنجی مدل LARS-WG با مقایسه ویژگی‌های آماری داده‌های تولید شده با مقادیر متناظر سری‌های

#### مدل LARS-WG

مدل LARS-WG یک مدل تولید داده است که بر اساس رویکرد سریالی عمل می‌کند (Semenov and Stratonovitch, 2010). این مدل سری‌های زمانی بارش روزانه، تابش خورشیدی، دمای بیشینه، دمای کمینه روزانه را تولید می‌کند. LARS-WG به کمک داده‌های مشاهداتی یک محل مشخص مجموعه‌ای از پارامترهای توزیع احتمالاتی متغیرهای هواشناسی را تولید می‌کند ضمن آنکه که همبستگی بین این متغیرها را نیز در نظر می‌گیرد.

LARS-WG از توزیع احتمالات نیمه تجربی تجمعی (Semi-Empirical Distribution (SED)) برای تخمین توزیع احتمالات طول سری‌های خشک و تر، مقدار بارش روزانه، و مقادیر دمای بیشینه و کمینه، و تابش خورشیدی استفاده می‌کند که این توزیع‌ها از داده‌های مشاهداتی به دست می‌آیند. در  $SED$  برای مطابقت مناسب با توزیع

اعتماد نتایج را افزایش می‌دهد.

#### تحلیل حساسیت نتایج به روش کاهش مقیاس

برای کاهش مقیاس سناریوهای بزرگ مقیاس توسط مدل LARS-WG و تولید سناریوی روزانه اقلیم آینده برای یک ایستگاه، پارامترهای توزیع‌های مدل که بر اساس داده‌های مشاهداتی ایستگاه به دست آمده است، بر اساس تغییرات پیش‌بینی شده توسط مدل‌های جهانی اقلیم (GCMs) تغییر داده می‌شود و سناریوهای روزانه آینده برای منطقه مورد مطالعه تولید می‌شود. برای انجام این کار دو روش مطرح است. در روش اول که روش متداول است، از سناریوهای تغییر اقلیم تعبیه شده در مدل LARS-WG استفاده می‌شود. به دلیل آنکه داده‌های روزانه‌ی GCMها برای همه‌ی سناریوها و مدل‌ها در همه‌ی مناطق در دسترس نبوده است، در نتیجه در سناریوهای LARS-WG، تنها تغییرات میانگین‌ها تعبیه شده است که با استفاده از سناریوهای ماهانه‌ی GCMها قابل استخراج است. در این سناریوها از تغییرات سایر مشخصات آماری بارش که نیاز به داده‌های روزانه‌ی GCMها دارد، چشم پوشی شده است. در روش دوم، علاوه بر تغییرات میانگین‌ها، تغییرات طول دوره‌های خشک و تر و تغییر واریانس دما نیز اعمال می‌شود. البته روش دوم نیازمند دسترسی به سناریوهای روزانه‌ی GCMها است (Semenov and Stratonovitch, 2010). در این روش آماره‌های مشاهداتی مورد استفاده در مدل LARS-WG، برای تولید سناریوهای ریزمقیاس شده آینده به روش زیر تغییر داده می‌شود. مقادیر میانگین‌های بارندگی، دمای حداقل، دمای حداکثر، واریانس دما، طول دوره‌های خشک و طول دوره‌ها تر هر ماه سال در دوره کنترل و هر یک از سناریوهای آینده در سلول منطقه مورد مطالعه محاسبه می‌شود. برای میانگین دما، تفاضل مقدار میانگین دمای آینده نسبت به دوره کنترل از خروجی‌های مدل GCM محاسبه می‌شود و به میانگین‌های متناظر دمای مشاهداتی

مشاهداتی انجام می‌شود. مقایسه مقادیر میانگین‌ها، واریانس‌ها و توزیع‌های فراوانی به ترتیب به وسیله‌ی آزمون‌های  $F$ -test،  $T$ -test و کولموگروف-اسمیرنوف ( $K-S$  test) صورت گرفته است. از آنجا که هدف تحقیق، تولید سناریوهای مناسب روزانه برای تحلیل وقایع حدی است، لازم است توانایی مدل برای شبیه‌سازی وقایع حدی نیز مورد ارزیابی قرار گیرد (Semenov, 2008)، که با مقایسه توزیع مقادیر بارش‌های حداکثر سالانه مشاهداتی و شبیه‌سازی شده توسط  $K-S$  test و مقایسه گرافیکی توزیع‌ها انجام شده است.

#### منطقه مورد مطالعه و داده‌های تحقیق

در این تحقیق از داده‌های بارندگی روزانه ثبت شده در ایستگاه‌های هواشناسی گرگان و خرم‌آباد برای دوره ۳۰ ساله‌ی ۱۹۷۱-۲۰۰۰ استفاده شده است. این داده‌ها از سازمان هواشناسی کشور دریافت شده است. بر اساس طبقه‌بندی اقلیمی دومارتن، ایستگاه گرگان دارای شرایط اقلیمی مدیترانه‌ای با میانگین بارش ۵۷۹ میلی‌متر در سال است. ایستگاه خرم‌آباد دارای شرایط اقلیمی نیمه خشک با میانگین بارش سالانه‌ی ۵۱۱ میلی‌متر است. هر دو ایستگاه در مناطق سیل خیز ایران واقع هستند. سناریوهای اقلیمی مورد استفاده، خروجی‌های مدل  $GCM$  جدید کانادایی  $CanESM2$  برای دوره کنترل ۱۹۷۱-۲۰۰۰ و دوره آینده ۲۰۳۶-۶۵ تحت سناریوهای انتشار  $RCP2.6$ ،  $RCP4.5$  و  $RCP8.5$  می‌باشد. سناریوهای انتشار ( $Representative Concentration Pathway (RCP)$ ) سری جدید سناریوهای است که در سال ۲۰۱۰ توسط هیئت بین دول تغییرات اقلیمی منتشر شده است و حالات محتمل وضعیت اقلیمی آینده را در بر می‌گیرد. با استفاده از سه سناریوهای انتشار متفاوت، عدم قطعیت سناریوهای انتشار در نتایج در نظر گرفته می‌شود که منجر به دستیابی به دامنه‌ای از حالات محتمل آینده می‌شود و قابلیت

۰/۰۵ به دست آمده است (جدول ۱). هنگامیکه مقدار  $P$ -value بزرگتر از ۰/۰۵ به دست آید، عملکرد مدل در سطح معنی‌داری ۵ درصد قابل قبول است (Semenov and Stratonovitch, 2010). در نتیجه عملکرد مدل  $LARS-WG$  برای شبیه‌سازی بارش در ایستگاه‌های مورد مطالعه مناسب و قابل قبول است.

علاوه بر آزمون‌های آماری پارامتری فوق، ویژگی‌های بارش مشاهداتی و شبیه‌سازی شده توسط  $LARS-WG$ ، به صورت گرافیکی نیز مقایسه شده است. این مقایسه برای میانگین‌های ماهانه بارش و همچنین برای توزیع‌های بارش‌های روزانه‌ی حداکثر سالانه در شکل (۲) برای گرگان و در شکل (۳) برای خرم‌آباد ارائه شده است. برای هر دو ایستگاه، میانگین‌های ۳۰ سال بارش مشاهداتی با میانگین‌های ۳۰۰۰ سال بارش تولید شده مطابقت خوبی دارد. این نتایج نیز توانایی مدل  $LARS-WG$  در بازتولید میانگین‌های ماهانه بارش که مهم‌ترین خصوصیت بارش است را تایید می‌کند. همچنین برای هر دو ایستگاه، میانه توزیع‌های بارش‌های حداکثر سالانه‌ی ۱۰۰ سری تولید شده توسط مدل  $LARS-WG$  با توزیع متناظر مشاهداتی مقایسه شده است و مشاهده می‌شود که توزیع‌های تولید شده مطابقت خوبی با توزیع مقادیر مشاهداتی دارد. این نتایج نشان می‌دهد مدل  $LARS-WG$  بارش‌های حداکثر سالانه مشاهداتی را به خوبی شبیه‌سازی کرده است.

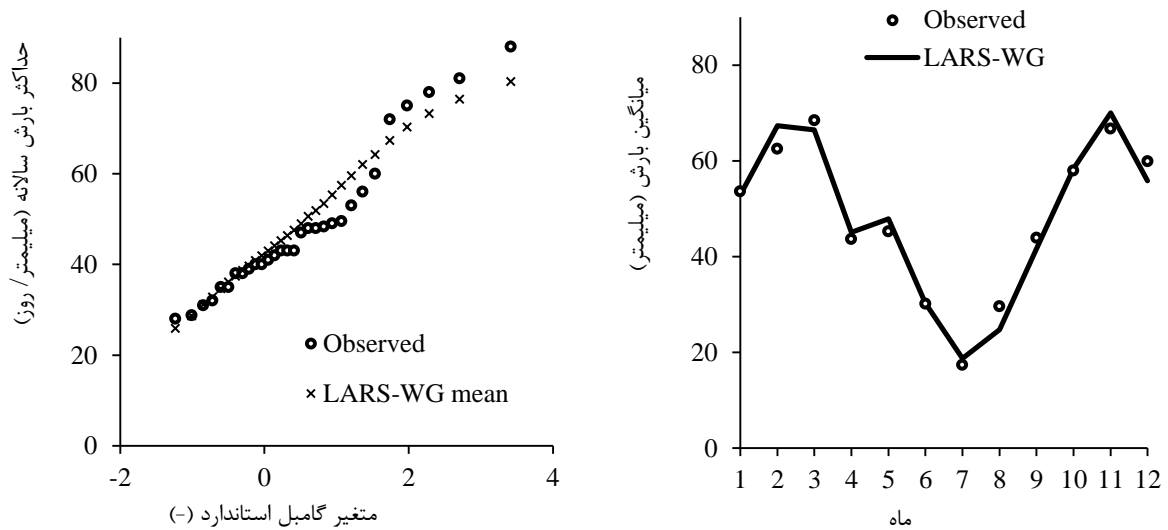
اضافه می‌شود. برای هر یک از آماره‌های میانگین‌های بارندگی، واریانس دما، طول دوره‌های خشک و طول دوره‌ها تر، نسبت تغییر مقدار آماره برای آینده نسبت دوره کنترل از خروجی‌های مدل  $GCM$  محاسبه می‌شود و در آماره متناظر مشاهداتی ضرب می‌شود. سپس با ورود آماره‌های به دست آمده به مدل  $LARS-WG$ ، سناریوهای ریزمقیاس شده‌ی آینده تولید می‌شود. در این مقاله برای بررسی حساسیت نتایج به روش کاهش مقیاس، نتایج بر مبنای هر دو روش ارایه و مقایسه شده است تا میزان خطای روش اول (که روش متداول‌تر است) در مقایسه با روش دوم (که روش کامل‌تر است) معلوم شود.

### نتایج و بحث

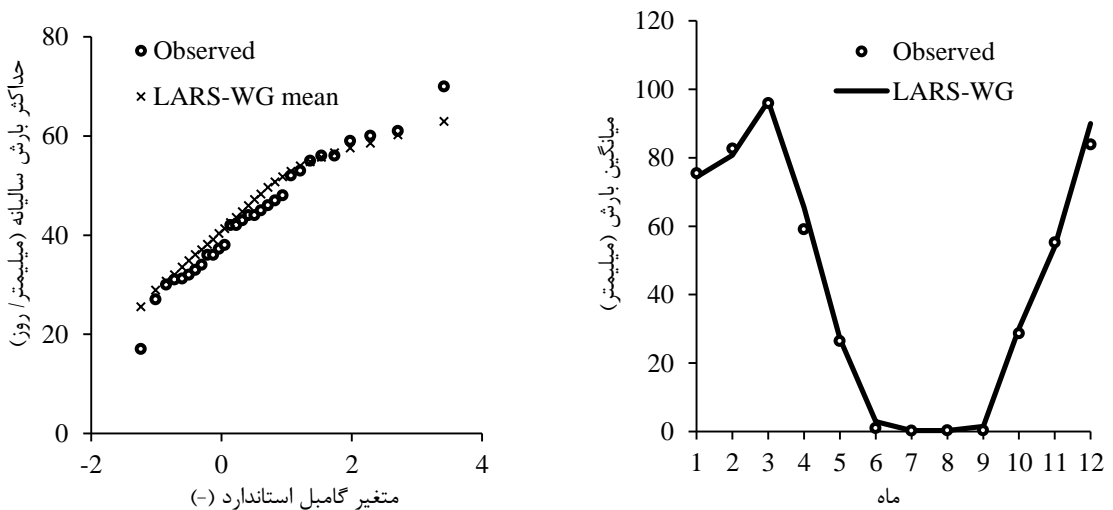
برای ارزیابی عملکرد مدل  $LARS-WG$ ، خصوصیات آماری سری‌های ۳۰۰۰ ساله‌ی تولید شده با خصوصیات آماری سری ۳۰ ساله‌ی مشاهداتی مقایسه شده است. مقادیر  $P$ -Value آزمون‌های  $t$ -test،  $f$ -test و  $K-S$  test به ترتیب برای میانگین‌ها، انحراف معیارها و توزیع فراوانی بارش‌های روزانه برای هر ماه از سال در جدول (۱) ارائه شده است. بعلاوه، مقایسه توزیع‌های بارش‌های روزانه حداکثر سالانه‌ی مشاهداتی و شبیه‌سازی شده نیز توسط  $K-S$  test انجام شد که مقدار  $P$ -Value برای گرگان و خرم‌آباد به ترتیب برابر ۰/۷۶ و ۰/۹۴ به دست آمد. بر مبنای نتایج، مقادیر  $P$ -Value در اغلب موارد بیش از

جدول ۱. مقادیر p-value برای شبیه‌سازی بارش ایستگاه‌های گرگان و خرم‌آباد با استفاده از مدل  $LARS-WG$

ژانویه	فوریه	مارس	آوریل	می	ژوئن	ژوئیه	اوت	سپتامبر	اکتبر	نوامبر	دسامبر
Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.
گرگان:											
0.89	0.38	0.70	0.76	0.63	0.97	0.67	0.30	0.67	0.95	0.69	0.48
0.75	0.30	0.13	0.70	0.12	0.94	0.04	0.74	0.27	0.11	0.35	0.20
1	1	1	1	1	0.86	1	0.9	0.91	1	1	1
خرم‌آباد:											
0.88	0.80	0.94	0.33	0.89	0.07	0.74	0.66	0.07	0.82	0.85	0.45
0.96	0.39	0.64	0.20	0.68	0.00	0.70	0.01	0.00	0.04	0.04	0.06
1	1	1	1	1	0.10	0.10	0.03	0.29	1	1	1



شکل ۲. عملکرد LARS-WG در بازتولید میانگین‌های ماهانه‌ی بارش و بارش‌های حداکثر سالانه در گرمگان



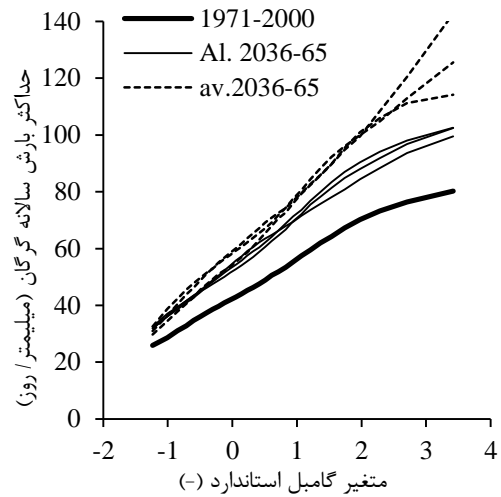
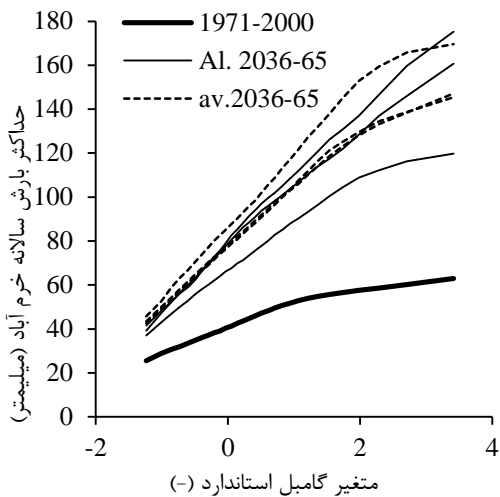
شکل ۳. عملکرد LARS-WG در بازتولید میانگین‌های ماهانه‌ی بارش و بارش‌های حداکثر سالانه در خرم‌آباد

AI مشخص شده است. برای تولید این شکل‌ها، هم برای دوره مشاهداتی و هم برای هر یک از سه سناریوی RCP آینده با استفاده از هر دو روش کاهش مقیاس، ۱۰۰ سری ۳۰ ساله بارش تولید شده است و میانه‌ی ۱۰۰ توزیع بارش‌های حدی تولید شده‌ی هر حالت ترسیم شده است. برای هر روش کاهش مقیاس، سه توزیع ترسیم شده است که مربوط به سه سناریوی RCP آینده می‌باشند. اگرچه بر مبنای هر دو روش، شدت بارش‌های حدی در آینده نسبت به دوره‌ی ۲۰۰۰-۱۹۷۱ افزایش می‌یابد، اما مقدار این افزایش در دو روش متفاوت است و نتایج دو روش با

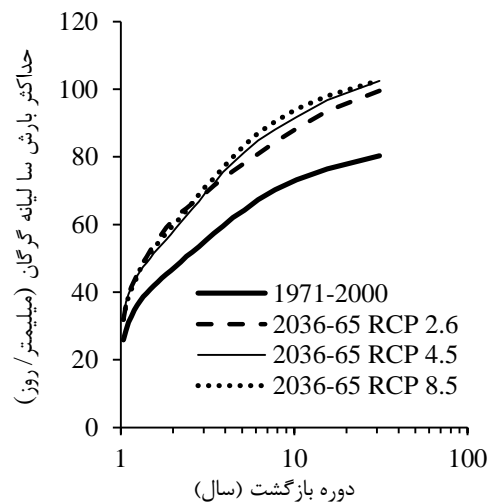
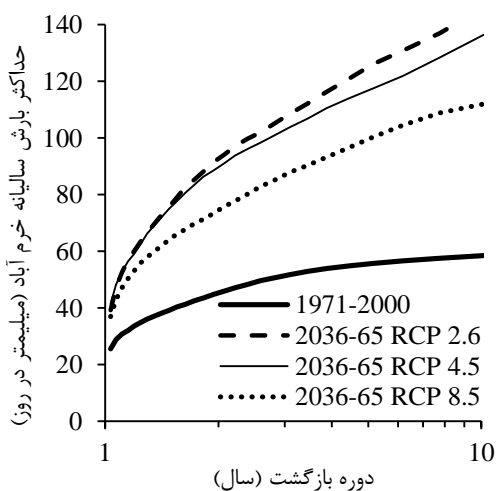
به منظور بررسی عدم قطعیت و حساسیت نتایج ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر بارش‌های حدی نسبت به روش کاهش مقیاس، در شکل (۴)، نتایج دو روش کاهش مقیاس توسط مدل LARS-WG با هم مقایسه شده است. در روش اول، تنها میانگین‌های متغیرهای اقلیمی بر اساس سناریوهای تغییر اقلیم به‌هنگام شده است. این روش با عبارت av. مشخص شده است. در روش دوم برای تولید سناریوهای ریزمقیاس بارش آینده، علاوه بر تغییرات میانگین، تغییرات طول دوره‌های تر و طول دوره‌های خشک نیز در نظر گرفته شده است. این روش با عبارت

بارش‌های روزانه حداکثر سالانه آینده بین ۳۷ تا ۴۹ درصد نسبت به دوره تاریخی افزایش می‌یابد. در خرم‌آباد در دوره بازگشت ۱۵ سال برای سناریوهای انتشار مختلف، بر مبنای روش کامل‌تر مقدار بارش‌های روزانه حداکثر سالانه‌ی آینده بین ۹۳ تا ۱۶۵ درصد نسبت به دوره تاریخی افزایش می‌یابد، در حالی که روش ساده‌تر نشان می‌دهد که مقدار بارش‌های روزانه حداکثر سالانه آینده بین ۱۳۰ تا ۱۷۵ درصد نسبت به دوره تاریخی افزایش می‌یابد. با توجه به تفاوت نتایج دو روش، در مطالعات ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر بارش‌های حدی، لازم است از روش کامل‌تر استفاده شود.

هم مطابقت ندارد. به این معنی که با انتخاب روش ساده‌تر کاهش مقیاس (که از تغییرات تعداد زیادی از آماره‌ها چشم‌پوشی می‌کند (av.))، دقت نتایج می‌تواند به مقدار زیادی کاهش یابد. مقدار این تأثیر در ایستگاه‌های مختلف متفاوت است. در گرگان خطای ساده‌سازی روش کاهش مقیاس حتی از عدم قطعیت سناریوهای انتشار بسیار بزرگتر است. به عنوان نمونه در گرگان در دوره بازگشت ۱۵ سال برای سناریوهای انتشار مختلف، روش کامل‌تر نشان می‌دهد که مقدار بارش‌های روزانه حداکثر سالانه‌ی آینده بین ۱۶ تا ۲۱ درصد نسبت به دوره تاریخی افزایش می‌یابد، در حالی که روش ساده‌تر نشان می‌دهد که مقدار



شکل ۴. مقایسه دو روش کاهش مقیاس در ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر توزیع بارش‌های حدی



شکل ۵. اثر تغییر اقلیم بر توزیع بارش‌های حدی گرگان و خرم‌آباد



جدول ۲. مقادیر بارش‌های روزانه گرگان حداکثر سالانه در اقلیم فعلی و آتی (میلی‌متر)

2036-2065			1971-2000	دوره بازگشت (سال)
RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 8.5		
61	58	60	47	2
88	92	94	73	10
94	97	98	76	15
100	102	103	80	30

جدول ۳. مقادیر بارش‌های روزانه خرم‌آباد حداکثر سالانه در اقلیم فعلی و آتی (میلی‌متر)

2036-2065			1971-2000	دوره بازگشت (سال)
RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 8.5		
93	90	75	45	2
147	137	112	59	10
160	146	116	60	15
175	161	120	63	30

مقدار بیشتری افزایش خواهد یافت. به عنوان مثال در خرم‌آباد در دوره بازگشت ۲ سال، مقدار بارش روزانه حداکثر سالانه در دوره مشاهداتی ۴۵ میلی‌متر در روز است که تحت سناریوهای انتشار مختلف پیش‌یابی می‌شود در آینده مقداری بین ۷۵ تا ۹۳ میلی‌متر در روز باشد (جدول ۳). در دوره بازگشت ۱۰ سال نیز انتظار می‌رود مقدار بارش دوره مشاهداتی خرم‌آباد از ۶۰ میلی‌متر در روز است به مقداری بین ۱۱۶ تا ۱۶۰ میلی‌متر در روز، افزایش یابد.

### نتیجه‌گیری

ارزیابی عملکرد مدل *LARS-WG* برای شبیه‌سازی بارش گرگان و خرم‌آباد نشان داد که ویژگی‌های بارش شبیه‌سازی شده با بارش مشاهداتی مطابقت دارد و به ویژه توزیع بارش‌های حداکثر سالانه به خوبی شبیه‌سازی شده است. در نتیجه می‌توان از مدل *LARS-WG* برای ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر بارش‌های سیل‌آسای این ایستگاه‌ها استفاده نمود.

تحلیل حساسیت نتایج ارزیابی آثار تغییر اقلیم بر بارش‌های سیل‌آسا نسبت به "روش کاهش مقیاس" نشان داد که سناریوهایی که بر مبنای تغییرات میانگین‌های ماهانه بارش آینده در مدل *LARS-WG* تعبیه شده است (و عموماً به علت سادگی، از این سناریوها در مطالعات

با توجه به آنکه روش کامل‌تر، تغییرات آماره‌های بیشتری را تحت اثر تغییر اقلیم اعمال می‌کند و روش صحیح‌تری است، در ادامه برای ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر بارش‌های حدی گرگان و خرم‌آباد از روش کامل‌تر استفاده شده است. به این منظور در شکل (۵)، توزیع بارش‌های روزانه حداکثر سالانه برای دوره گذشته (۲۰۰۰-۱۹۷۱) و آینده (۲۰۳۶-۲۰۶۵) تحت سناریوهای مختلف *RCP* مقایسه شده است. همچنین مقادیر بارش‌های روزانه حداکثر سالانه برای دوره بازگشت‌های مختلف در اقلیم فعلی و آینده تحت سناریوهای مختلف تغییر اقلیم در جدول (۲) برای گرگان و در جدول (۳) برای خرم‌آباد ارائه شده است. این نتایج نشان می‌دهد که تحت همه سناریوهای انتشار، شدت بارش‌های حدی در آینده به مقدار زیادی افزایش خواهد یافت. به عنوان مثال برای گرگان در دوره بازگشت ۲ سال، مقدار بارش روزانه حداکثر سالانه در دوره مشاهداتی ۴۷ میلی‌متر در روز است که تحت سناریوهای انتشار مختلف پیش‌یابی می‌شود در آینده مقداری بین ۵۸ تا ۶۱ میلی‌متر در روز باشد (جدول ۲). در دوره بازگشت ۱۰ سال نیز انتظار می‌رود مقدار بارش دوره مشاهداتی گرگان که ۷۳ میلی‌متر در روز است، در آینده به مقداری بین ۹۴ تا ۹۸ میلی‌متر در روز، برای سناریوهای انتشار مختلف، افزایش یابد. برای خرم‌آباد بارش‌های حدی آیند نسبت به دوره تاریخی به

افزایش برای دوره بازگشت‌های مختلف و با در نظر گرفتن عدم قطعیت سناریوهای انتشار برای گرگان بین ۲۰ تا ۳۰ درصد و برای خرم‌آباد بین ۴۵ تا ۱۷۹ درصد خواهد بود. این نتایج با جمع بندی IPCC (۲۰۱۲) که پیش‌بینی نموده است که شدت و فراوانی بارش‌های حدی برای بسیاری از نقاط جهان و به ویژه برای عرض‌های میانی کره زمین تا پایان قرن ۲۱ افزایش خواهد یافت (IPCC, 2012)، مطابقت دارد. همچنین این نتایج با نتایج Khazaei و همکاران (2012)، Agilan و Umamahesh (2016)، Hosseinzadehtalaei و همکاران (2017) و Elshorbagy و همکاران (2018) همسو می‌باشد. لیکن در این مقاله مقدار افزایش محتمل به طور خاص برای گرگان و خرم‌آباد در دوره ۲۰۳۶-۲۰۶۵ پیش‌بینی شده است. در نتیجه توزیع‌های فراوانی بارش‌های حدی مشاهداتی که بر مبنای ماندگار بودن شرایط اقلیمی و تنها بر اساس داده‌های ثبت شده در دوره‌ی گذشته تهیه شده‌اند، برای ایجاد طرح‌های زیربنایی جدید کافی نیستند و پیشنهاد می‌شود با در نظر گرفتن تغییر اقلیم اصلاح شوند. همچنین توصیه می‌شود سازه‌های زیربنایی کنترل سیل موجود، با در نظر گرفتن تغییرات بارش‌های سیل‌آسا در آینده تحت اثر تغییر اقلیم مجدداً تحلیل ریسک شده و در صورت نیاز بازسازی شوند.

ارزیابی آثار تغییر اقلیم استفاده شده است)، کفایت لازم برای تولید سناریوهای بارش‌های سیل‌آسای آینده را ندارد. زیرا نتایج تحت این سناریوها به مقدار قابل توجهه-ای با نتایج روش کامل‌تر تفاوت دارد. علت این امر آن است که بر مبنای سناریوهای آینده‌ی مدل *GCM*، تغییر اقلیم علاوه بر تغییر مقدار بارش ماهانه، تعداد روزهای بارانی را نیز تغییر می‌دهد. در این حالت، اگر مطابق روش اول، افزایش مقدار بارش در آینده تنها به افزایش بارش روزهای بارانی اختصاص داده شود و از افزایش تعداد روزهای بارانی چشم‌پوشی شود، شدت بارش‌های حدی سیل‌آسا به صورت غیر واقعی دست بالا تولید خواهد شد. به همین علت در روش کامل‌تر، که هم تغییرات تعداد روزهای بارانی و هم تغییرات میانگین‌های بارش را در نظر می‌گیرد، شدت بارش‌های سیل‌آسای آینده به صورت صحیح‌تری شبیه‌سازی می‌شود. در نتیجه برای ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر بارش‌های سیل‌آسا، با توجه به آنکه نتایج به روش کاهش مقیاس حساس است، لازم است که از روش کامل‌تر کاهش مقیاس استفاده شود. نتایج ارزیابی اثر تغییر اقلیم نشان داد که تحت سناریوهای مختلف انتشار گازهای گلخانه‌ای، شدت بارش‌های سیل‌آسا در هر دو ایستگاه گرگان و خرم‌آباد در آینده (دوره ۲۰۳۶-۲۰۶۵) افزایش خواهد یافت. این

#### منابع مورد استفاده

- Agilan. V. and Umamahesh. N.V. 2016. Is the covariate based non-stationary rainfall IDF curve capable of encompassing future rainfall changes. *Journal of Hydrology*. 5(41): 1441-1455.
- Askarizadeh. S. mozaffari. G. and mazidy A. 2017. Projections of Variation in precipitation extreme values in Sabzevar by LARS-WG downscaling model during 2011-2030 to 2046-2065. 9(34): 3-82 (In Persian with English abstract).
- Elshorbagy. A. Lindenas. K. and Azinfar. H. 2018. Risk-based quantification of the impact of climate change on storm water infrastructure. *Water Science*. 32: 102-114.
- Goodarzi. E. Massah Bavani. A.R. Dastorani. M.T. and Talebi A. 2014. Evaluating effect of downscaling methods; change-factor and LARS-WG on surface runoff (A case study of Azam-Harat River basin, Iran). *Desert*. 19: 99-109.
- Hosseinzadehtalaei. P. Tabari. H. and Willems. P. 2017. Uncertainty assessment for climate change impact on intense precipitation: how many model runs do we need? *International Journal of Climatology*. 37: 1105-1117.
- IPCC. 2001. *Climate change. Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the third assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change UK*. Cambridge University Press.

- IPCC. 2012. Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation, A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change UK. Cambridge University Press.
- Jahangir. M.H. Norozi. E. Yarahmadi. Y. 2016. Investigation of Climate Parameters' Changes in Borujerd City in Next 20 Years through the Using HADCM3 Model. *Ecohydrology*. 5(4): 1345-1353. [Persian]
- Kay, A. Davies. H. Bell. V. and Jones. R. 2009. Comparison of uncertainty sources for climate change impacts: flood frequency in England. *Climatic Change*. 92: 1-63.
- Khazaei. M.R. Zahabiyoun. B. and Saghafian. B. 2012. Assessment of climate change impact on floods using weather generator and continuous rainfall-runoff model. *International Journal of Climatology*. 32: 1997-2006.
- Khoorani. A. and Jamali. J. 2016. Effects of Climate Change on Drought Duration and Severity in Arid and Semi-arid Stations (Bandarabbassand Shahrekord), Based on HADCM3 Model. *Journal of Geography and Planning*. 20(57): 115-131 (In Persian with English abstract).
- Khosrovanian. j. Onagh. M. Guderzi, M. and Hejazi. S. 2015. Prediction of Climatic Parameters Using LARS-WG Model in Ghare-su Basin, *Journal of Geograohy and Planning*. 19(53): 93-115 (In Persian with English abstract).
- Liu. T. Willems P. Pan. X.L. Bao. A.M. Chen. X. Veroustraete. F. and Dong. And Q.H. 2011. Climate change impact on water resource extremes in a headwater region of the Tarim basin in China. *Hydrol. Earth Syst. Sci*. 15: 3511-3527.
- Mareuil. A. Leconte. R. Brissette. F. and Minville. M. 2007. Impacts of climate change on the frequency and severity of floods in the Chateauguay River basin, Canada. *Canadian Journal of Civil Engineering*. 34: 1048-1060.
- Mullan. D. 2013. Soil erosion under the impacts of future climate change: Assessing the statistical significance of future changes and the potential on-site and off-site problems. *CATENA*. 109: 234-246.
- Semenov. and M.A. and Stratonovitch P. 2010. Use of multi-model ensembles from global climate model for assessment of climate change impacts. *Climate Research*. 41: 1-14.
- Semenov. M.A. 2008. Simulation of extreme weather events by a stochastic weather generator, *Climate Research*. 35: 203-212.
- Shahabul. M.D. and Elshorbagy. A. 2016. Quantification of the climate change-induced variation Intensity-Duration-Frequency curves in Canadian Paris, *Journal of Hydrology*. 5(27): 990-1005.
- Taye. M.T. and Willems. P. 2013 Influence of downscaling methods in projecting climate change impact on hydrological extremes of upper Blue Nile basin. *Hydrology and Earth System Sciences & Discussions*. 10: 7857-7896.
- Teegavarapu. R.S.V. 2012. *Floods in Changing Climate Extreme- $\tau$  Precipitation*, UK: Cambridge University Press.
- Utset, A. Martinez-cob. A. Farre. I. and Caverro J. 2006. Simulating the effects of extreme dry and wet years on the water use of flooding-irrigated maize in a Mediterranean landplane, *Agricultural Water Management*. 85: 77-84.



## Projection of extreme precipitation in climate change condition and sensitivity analysis of results to downscaling method

Mohammad Reza Khazaei<sup>1\*</sup> and Reza Kazemi<sup>2</sup>

<sup>1\*</sup>) Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Payame Noor University, I.R of IRAN.

\*Corresponding author email: m\_r\_khazae@yahoo.com

<sup>2</sup>) Department of Civil Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

Received: 09-03-2020

Accepted: 26-07-2020

### Abstract

The frequency and intensity of extreme rainfalls will increase over many areas of the globe due to climate change. So, it is required to revise result of such studies based on the climate change scenarios. One of the most effective tools in such studies is Weather Generators, including LARS-WG. While GCMs predict future changes in the various characteristics of precipitation, usually in downscaling using LARS-WG, just changes of monthly averages are considered. In this paper, the future climate change impact on extreme precipitation in Gorgan and Khoramabad stations are assessed; while, the results of two methods of applying just change in averages (simple method) or applying changes in various characteristics of precipitation (complete method) in downscaling are compared. For future, CanESM2 outputs under RCP2.6, RCP4.5, and RCP8.5 scenarios for 2036-2065 period were used. The results showed that for climate change impact assessment on extreme rainfalls, additional to change in averages, change in other precipitation characteristics should be considered. Because the results of the two methods are different. In Gorgan, for example, the annual maximum daily rainfall with a return period of 15 years in the future will increase by 16 to 21 percent according to the more complete method, but between 37 and 49 percent according to the simpler method. Based on the complete, Intensity of the extreme rainfalls at both stations will increase in the future. This increase will be between 23% and 30% for the 2-year return period and between 25% and 29% for the 30-year return period.

**Keywords:** Climate change, Downscaling method, Extreme precipitation, Uncertainty.