

اثر تغییر اقلیم بر رواناب حوضه آبریز سیلاخور رحیم‌آباد لرستان

زیبا کونانی^۱، علیرضا ایلدرمی^{۲*}، حسین زینی‌وند^۳، حمید نوری^۴

۱- دانش‌آموخته‌ی کارشناسی ارشد آبخیزداری، دانشکده‌ی منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه ملایر

۲- دانشیار دانشکده‌ی منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه ملایر

۳- دانشیار دانشکده‌ی منابع طبیعی، دانشگاه لرستان، لرستان، ایران

۴- دانشیار دانشکده‌ی منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه ملایر

تأیید نهایی مقاله: ۱۳۹۹/۰۴/۳۱

وصول مقاله: ۱۳۹۷/۱۲/۱۹

چکیده

امروزه بررسی و پیش‌بینی اثر تغییرات اقلیمی جهت برنامه‌ریزی‌های کلان کشور در رابطه با مدیریت منابع آب در دوره‌های آتی مورد توجه قرار گرفته است. هدف از این تحقیق ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر رواناب حوضه آبریز رحیم‌آباد- سیلاخور لرستان در دوره‌های آتی است. ابتدا داده‌های مدل گردش عمومی جو HADCM3 با بکارگیری دو مدل ریزمقیاس‌نمایی آماری LARS-WG و SDSM طبق سه سناریو A2، B2 و B1 برای حوضه ریزمقیاس و سپس پارامترهای اقلیمی دوره پایه (۲۰۱۴-۱۹۹۰)، مورد ارزیابی و سپس پارامترهای اقلیمی برای دوره‌ی ۲۰۶۵-۲۰۴۶ شبیه‌سازی شدند. همچنین به منظور بررسی اثر تغییر اقلیم بر رواناب در منطقه‌ی مورد مطالعه، از مدل SIMHYD استفاده شد. نتایج نشان می‌دهد که در هر دو مدل SDSM و LARS-WG بارش کاهش و دما افزایش می‌یابد. اما مدل SDSM تغییرات بیشتری را نسبت به مدل LARS-WG نشان می‌دهد. نتایج حاصل از مدل SIMHYD بیانگر کاهش میزان رواناب در هر دو مدل ریزمقیاس‌نمایی در دوره‌ی آتی و دقت و کارایی قابل قبول در رابطه با شبیه‌سازی بارش-رواناب حوضه می‌باشد. بررسی‌ها نشان می‌دهد که کارایی مدل با مقادیر سهم نفوذ، آستانه نفوذ و ظرفیت ذخیره‌ی رطوبت خاک رابطه مستقیم دارد. همچنین مدل SIMHYD، بیشترین حساسیت را نسبت به پارامترهای ضریب جریان پایه و ظرفیت ذخیره‌ی باران و کمترین میزان حساسیت‌پذیری را نسبت به آستانه نفوذپذیری دارد. بطوری‌که با افزایش مقدار پارامتر ضریب جریان پایه تا بیش از ۰/۰۵۷ شاهد روند افزایشی در مقدار ضریب کارایی مدل و پس از آن این مقدار کاهش می‌یابد. با توجه به افزایش دما و کاهش دبی و مولفه‌های رواناب کل، تغییر ذخیره‌ی رطوبت خاک و تغییر ذخیره‌ی آب زیرزمینی در منطقه، بایستی راهکارهایی جهت برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب حوضه آبریز سیلاخور- رحیم‌آباد در پیش گرفته شود.

کلمات کلیدی: شبیه‌سازی بارش-رواناب، LARS-WG، SIMHYD، SDSM، HADCM3، سیلاخور-رحیم‌آباد لرستان

۱- مقدمه

شبیه‌سازی فرآیند بارش-رواناب، در پیش‌بینی دبی جریان، یکی از موضوعات اساسی در تحقیقات هیدرولوژیکی است، که در سال‌های اخیر، مدل‌های ریاضی بارش-رواناب به عنوان یک ابزار کارآمد در پیش‌بینی رواناب حاصل از رخداد بارش مورد توجه قرار گرفته است. نتایج خروجی از این مدل‌ها به طور مستقیم در مسائلی از قبیل مدیریت منابع آب، طراحی سازه‌ها و کنترل و مدیریت سیلاب مورد استفاده قرار می‌گیرد (اسدی و همکاران^۱، ۲۰۱۳: ۶۱). در حال حاضر به دلیل اهمیت تغییر اقلیم و اثرات آن بر روی رواناب، ارائه الگویی مناسب برای شبیه‌سازی و پیش‌بینی دبی جریان در حوضه‌های آبریز، امری مهم و ضروری به نظر می‌رسد (رجبی و همکاران^۲، ۲۰۱۴: ۴۱). تاکنون مطالعات متعددی در زمینه‌ی تغییر اقلیم و تأثیر آن بر تغییر رواناب در داخل و خارج از کشور انجام شده است که در آن‌ها به بررسی اثرات تغییر اقلیم بر رواناب حوضه‌ی آبریز با استفاده از مدل LARS-WG پرداختند و مقدار حداکثر دبی جریان در افق آینده را پیش‌بینی نمودند. ثانی‌خانی و همکاران^۳ (۲۰۱۷)، در سال‌های اخیر ارزیابی کارایی مدل بارش-رواناب با استفاده از مدل SIMHYD و مدل‌های گردش عمومی جو HadCm3 و LARS-WG در حوضه‌های آبریز بسیار مورد توجه قرار گرفته است که در آن وضعیت ماه‌های کم بارش سال به سوی خشکی بیشتر و ماه‌های پربارش به سوی سیلابی شدن و کاهش بارش، افزایش تبخیر و تعرق پتانسیل و کاهش رواناب مورد ارزیابی واقع شده است (رزاقیان و همکاران^۴، ۲۰۱۹: ۲۱۶؛ ابراهیمیان و همکاران^۵، ۲۰۱۸: ۲۹). در تحقیقات دیگر شیخ‌گودرزی و همکاران^۶ (۲۰۱۹)، در رابطه با مقایسه‌ی کارکرد مدل‌های مفهومی هیدرولوژیک ادراکی TANK، SIMHYD و AWBM در شبیه‌سازی دبی رودخانه حوضه‌ی آبریز نشان می‌دهد که مدل SIMHYD دبی جریان را با تطابق قابل قبول‌تری شبیه‌سازی نموده و مدل‌های HadCm3، SDSM و LARS-WG می‌تواند تغییرات بارش و دما را بخوبی ارزیابی نمایند و بیانگر این است که نتایج حاصل از مدل SIMHYD می‌تواند کاهش یا افزایش میزان رواناب را در هر دو مدل ریزمقیاس‌نمایی در دوره‌ی آتی با دقت و کارایی قابل قبول در رابطه با شبیه‌سازی بارش-رواناب برآورد نماید. در این راستا امروزه اثر تغییرات اقلیمی و فعالیت‌های انسانی بر مقدار رواناب سطحی و سیلاب حوضه (زنگ و همکاران^۷، ۲۰۱۵: ۱۲؛ هو و همکاران^۸، ۲۰۱۵: ۹۷) نشان داده که تغییرات اقلیمی آینده می‌تواند موجب بی‌نظمی در بارش و کاهش رواناب در حوضه‌های آبریز شود. بنابراین کاربرد مدل‌های LARS-WG و SDSM برای شبیه‌سازی بارش و دما در حوضه‌های آبریز و پیامدهای آن در سال‌های اخیر مورد توجه محققان بسیاری قرار گرفته است.

1- Asadi et al.
 2- Rajabi et al.
 3- SaniKhani et al.
 4- Razaghian et al.

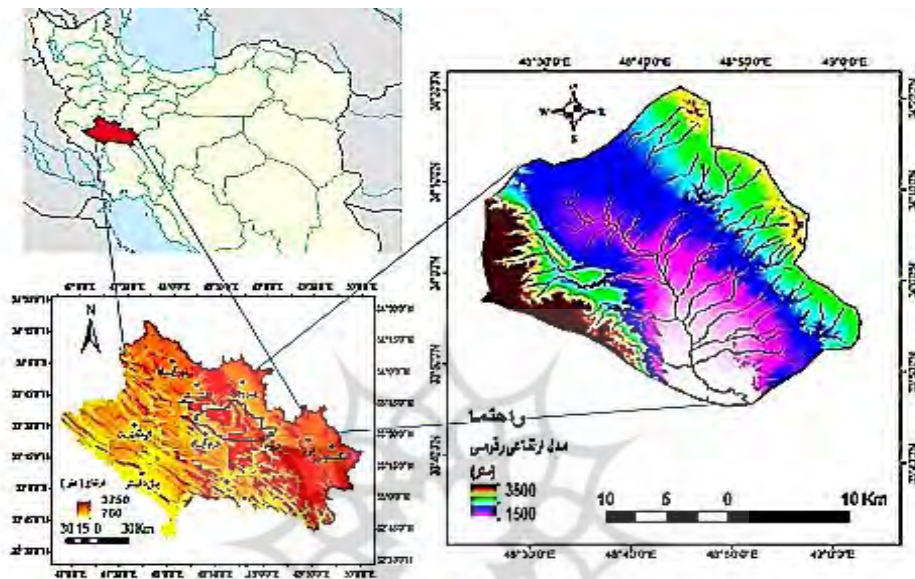
5- Ebrahimian et al.
 6- Godarzi et al.
 7- Zeng et al.
 8- Hu et al.

نتایج اکثر این بررسی‌ها نشان می‌دهد که افزایش بارش روزانه در مدل SDSM تغییرات بیشتری را نسبت به مدل LARS-WG نشان می‌دهد. ذوالقرنین و همکاران^۱ (۲۰۱۳)، همچنین تحقیقات مربوط به بررسی اثر تغییر اقلیم بر رواناب نشان می‌دهد که بین تغییرات رواناب با بارش رابطه‌ی همبستگی کمی وجود دارد رودر و همکاران^۲ (۲۰۱۴). و برای شبیه‌سازی مقدار دبی جریان بهتر است از الگوریتم‌های بهینه‌سازی جست و جو، الگوریتم ژنتیک، تکامل رقابتی جامع و مدل ADM به‌منظور افزایش دقت شبیه‌سازی و رابطه‌ی همبستگی تغییرات رواناب با بارش و نتایج حاصله استفاده شود فرانچینی و همکاران^۳ (۲۰۱۵). بنابراین بررسی و مرور منابع نشان می‌دهد که با توجه به حساسیت حوضه آبریز سیلاخور لرستان با سیلاب‌های قابل توجه و از طرف دیگر بررسی تغییرات بارش-رواناب در این حوضه جهت مدیریت منابع آب می‌تواند ابزاری جهت استفاده مدیران و برنامه‌ریزان باشد، لذا هدف پژوهش حاضر، ارزیابی نقش تغییر اقلیم با استفاده از دو مدل ریزمقیاس‌نمایی آماری LARS-WG و SDSM طبق سه سناریو A2، B2 و B1 در برآورد رواناب خروجی حوضه سیلاخور-رحیم‌آباد لرستان با استفاده از مدل بارش-رواناب SIMHYD است.

۲- مواد و روش

حوضه آبریز سیلاخور-رحیم‌آباد از زیر حوضه‌های آبریز سد دز در شهرستان بروجرد استان لرستان است، که در بین ۳۳ درجه و ۴۵ دقیقه تا ۳۴ درجه و ۷ دقیقه عرض شمالی و ۴۸ درجه و ۲۹ دقیقه تا ۴۸ درجه و ۵۷ دقیقه طول شرقی قرار گرفته است. مساحت آن ۱۰۱۹/۸۱ کیلومتر مربع و حداکثر و حداقل ارتفاع آن به ترتیب ۳۴۷۴ و ۱۴۷۵ متر می‌باشد. متوسط بارندگی سالانه‌ی آن ۴۵۳/۸ میلی‌متر و متوسط دمای سالانه ۱۴/۸۶ درجه سانتی‌گراد و بر اساس روش دومارتن دارای اقلیم نیمه خشک سرد می‌باشد (شکل ۱).

جهت بررسی اثر تغییر اقلیم بر رواناب حوضه‌ی مورد مطالعه، داده‌های مدل گردش عمومی جو HADCM3 با بکارگیری دو مدل ریزمقیاس‌نمایی آماری LARS-WG و SDSM طبق سه سناریو A2، B2 و B1 برای منطقه‌ی مورد نظر ریزمقیاس شدند. بدین منظور ابتدا دو مدل LARS-WG و SDSM با معرفی پارامترهای اقلیمی دوره‌ی پایه (۲۰۱۴-۱۹۹۰)، مورد ارزیابی قرار گرفتند و پس از اطمینان از توانایی این دو مدل، پارامترهای اقلیمی برای دوره‌ی ۲۰۴۶-۲۰۶۵ شبیه‌سازی و با یکدیگر مقایسه و تحلیل شدند. به منظور بررسی اثر تغییر اقلیم بر رواناب در منطقه‌ی مورد مطالعه، از مدل SIMHYD استفاده و ضمن بررسی اثر تغییر اقلیم بر روی بارش و دما کارایی مدل در شبیه‌سازی رواناب حوضه در دوره‌ی آتی مورد بررسی قرار گرفته است.



شکل (۱): موقعیت حوزه آبریز سیلاخور - رحیم آباد در استان لرستان و در ایران
Fig (1): Location of Silakhor-Rahimabad basin in Lorestan province and in Iran

۱-۲- داده‌های مورد نیاز

ابتدا داده‌های دوره پایه شامل داده‌های مشاهداتی دمای حداقل، دمای حداکثر، بارش و ساعات آفتابی در دوره ۲۰۱۴-۱۹۹۰ میلادی و داده‌های بخش بارش-رواناب شامل داده‌های تبخیر، بارش و دبی که در دسترس بود، به ترتیب از اداره کل هواشناسی و اداره کل آب منطقه‌ای استان لرستان جمع‌آوری شدند. در این بررسی از داده‌های روزانه‌ی ایستگاه‌های سینوپتیک بروجرد، رحیم‌آباد، و سیلاخور و ایستگاه هیدرومتری رحیم‌آباد استفاده شده است.

۲-۲- معرفی مدل LARS-WG

در حال حاضر این مدل به دو منظور تولید داده‌های روزانه آینده به صورت مصنوعی و داده‌سازی در بازه‌های زمانی در ایستگاه‌های فاقد آمار به کار می‌رود. جهت تولید داده‌های مصنوعی، مدل از داده‌های روزانه دراز مدت دما، بارش، تابش خورشیدی یا ساعات آفتابی به صورت ورودی استفاده می‌کند. با استفاده از داده‌های ورودی اقدام به باز تولید آن‌ها کرده و با کمک آنالیزهای آماری داده‌های باز تولید شده و ورودی را با هم مقایسه می‌نماید. در صورت تطابق این دو دسته داده، مدل قادر به تولید سری‌های زمانی مربوط به آینده می‌باشد. در عملکرد دوم، یعنی تولید داده برای ایستگاه فاقد اطلاعات، مدل از داده‌های نزدیک‌ترین ایستگاه به ایستگاه

مجهول استفاده کرده، و خصوصیات آماری آنها را بررسی کرده و با توجه به یکسان بودن خصوصیات اقلیمی این دو ایستگاه از داده‌های ایستگاه معلوم جهت تولید داده در ایستگاه مجهول استفاده می‌کند.

۲-۳- معرفی مدل SDSM^۱

مدل SDSM بر روابط آماری تکنیک‌های رگرسیون چندگانه خطی بین متغیرهای بزرگ‌مقیاس و متغیرهای مشاهده‌ای محلی پایه‌گذاری شده است (ویلیبی و همکاران^۲، ۲۰۰۷). ورودی‌های مدل SDSM شامل داده‌های مشاهداتی بارش روزانه، دمای حداقل و حداکثر، ساعات آفتابی می‌باشد که از نزدیک‌ترین شبکه‌ی جهانی به منطقه‌ی مورد مطالعه بدست می‌آیند و مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این مدل با استفاده از متغیرهای بزرگ مقیاس اتمسفری استخراج شده از مدل‌های GCM اقدام به تولید سناریوهای اقلیمی شبیه‌سازی شده برای حال و آینده می‌شود.

۲-۴- واسنجی و ارزیابی مدل SDSM, LARS-WG

جهت ارزیابی توانمندی مدل SDSM, LARS-W از نمودارهای مقایسه‌ای بین داده‌های گذشته با داده‌های تولید شده توسط مدل و پارامترهای خطاسنجی NSE، MAE و RMSE استفاده شده است (روابط ۱ تا ۴).

$$NSE = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (x-y)^2}{\sum_{i=1}^n (x-xp)^2} \right] \quad (1)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x-y)^2}{n}} \quad (2)$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |x-y|}{n} \quad (3)$$

$$BIAS = \frac{1}{n} \sum (y - x) \quad (4)$$

در روابط بالا y : داده‌های شبیه‌سازی شده توسط مدل، x : داده‌های مشاهده شده، yp : میانگین داده‌های مشاهده شده و n تعداد داده‌ها می‌باشد.

۲-۵- معرفی مدل SIMHYD

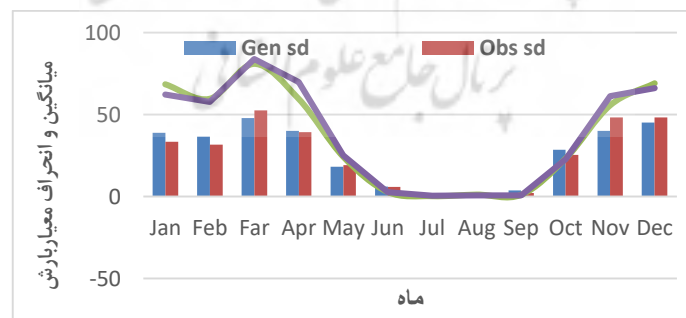
مدل SIMHYD یک مدل مفهومی، پیوسته و یکپارچه بارش-رواناب است که جریان روزانه را با استفاده از داده‌های بارش و تبخیر تعرق پتانسیل روزانه شبیه‌سازی می‌کند و به صورت موفقیت‌آمیز در مطالعاتی همچون تخمین رواناب اثر تغییر اقلیم بر مقدار رواناب و آنالیز منطقه‌ای به کار برده شده است. SIMHYD نسخه‌ی

ساده شده‌ی مدل مفهومی بارش-رواناب HYDROLOG در سال ۱۹۷۲ و MODHYDROLOG در سال ۱۹۹۱ است (چیوا، ۲۰۰۲). در این مدل برای ۹ پارامتر ضریب جریان پایه، آستانه‌ی نفوذناپذیر، ضریب نفوذ، شکل نفوذ، ضریب جریان زیر قشری، کسر نفوذپذیر، ظرفیت مخزن بارش برگاب، ضریب تغذیه و ظرفیت مخزن رطوبت خاک از مقادیر پیش‌فرض استفاده می‌شود. این مدل، تولید رواناب را از سه منبع رواناب مازاد بر میزان نفوذ، جریان داخلی و رواناب مازاد بر اشباع و جریان پایه بررسی کرده و تخمین می‌زند.

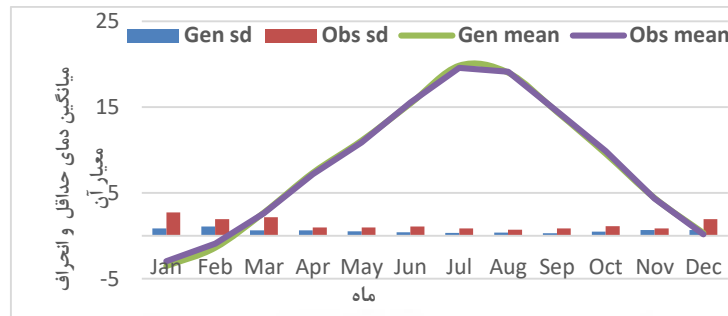
۳- بحث و نتایج

۳-۱- بررسی عملکرد مدل LARS-WG در شبیه‌سازی دما و بارش حوضه

به طور کلی تولید داده توسط مدل LARS-WG در سه مرحله صورت می‌گیرد که عبارتند از: واسنجی کردن مدل، ارزیابی مدل و تولید داده‌های هواشناسی برای دوره‌ی آتی. نتایج تحلیل آماری و معیارهای ارزیابی نشان می‌دهد که بیشترین خطا مربوط به مدل‌سازی بارش می‌باشد. اما پارامترهای دمای حداقل و حداکثر با دقت بالایی مدل‌سازی شده‌اند. نتایج بیانگر این است که مدل LARS-WG توانمندی خوبی در شبیه‌سازی پارامترهای بارش، دمای حداقل و حداکثر ایستگاه مورد مطالعه دارد (اشکال ۳ و ۲). نتایج ارزیابی و تشخیص کارایی مدل توسط شاخص‌های میانگین مربعات خطا (RMSE)، میانگین خطای مطلق (MAE) و نش - ساتکلیف (NSA) بین داده‌های مشاهده‌ای و داده‌های حاصل از مدل در دوره‌ی (۲۰۱۴-۱۹۹۰) نشان می‌دهد که مدل LARS-WG توانایی مدل‌سازی اقلیم دوره‌ی گذشته حوضه‌ی مورد مطالعه را دارد جدول ۱.



شکل (۲): مقایسه‌ی میانگین و انحراف معیار ماهانه بارش مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده در دوره‌ی ۱۹۹۰-۲۰۱۴
Fig (2): Comparison of mean and monthly standard deviation of observational and simulated precipitation in the Period 2014-1990



شکل (۳): مقایسه‌ی میانگین و انحراف معیار ماهانه دمای حداقل مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در دوره‌ی ۱۹۹۰-۲۰۱۴
 Fig (3): Comparison of average and monthly standard deviation of minimum observational and simulated temperature in the Period 2014-1990

جدول (۱): نتایج ارزیابی مدل ریزمقیاس نمایی LARS-WG در دوره‌ی ۱۹۹۰-۲۰۱۴

Table (1): Results of the LARS-WG micro-scale evaluation model for the Period 2014-1990

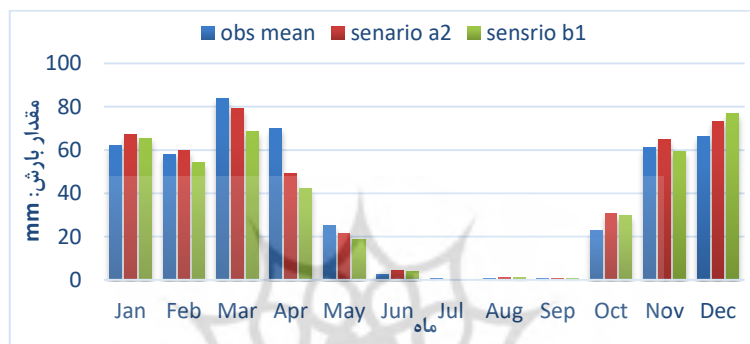
| BIAS | MAE | NSE | RMSE | پارامتر |
|-------|--------|-------|------|-------------|
| ۰/۶۴۳ | -۰/۶۱۱ | ۰/۹۸۲ | ۴/۰۷ | بارش |
| ۰/۰۵۷ | ۰/۰۳۵ | ۰/۹۹۸ | ۰/۲۶ | دمای حداقل |
| ۰/۰۱۵ | -۰/۰۰۸ | ۰/۹۹۹ | ۰/۲۶ | دمای حداکثر |

۳-۲- ارزیابی تغییر اقلیم حوضه برای دوره‌ی ۲۰۴۶-۲۰۶۵ در مدل LARS-WG

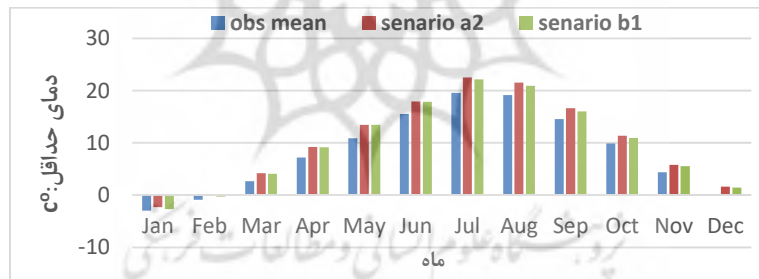
پس از اطمینان از توانمندی مدل LARS-WG خروجی مدل HADCM3 تحت سناریوهای A2 و B1 کوچک مقیاس شده و پارامترهای مورد نظر پیش‌بینی و با مقادیر آن‌ها در دوره‌ی ۱۹۹۰-۲۰۱۴ مقایسه شد (شکل‌های ۴ و ۵). بررسی شکل ۴ نشان می‌دهد که میزان تغییرات بارش در افق ۲۰۵۰ نسبت به دوره‌ی ۱۹۹۰-۲۰۱۴ روند یکنواختی را نشان نمی‌دهد. بررسی‌ها نشان می‌دهد که در سناریو A2، میانگین ماهانه بارش در ماه‌های ژانویه، فوریه، ژوئن، اوت، اکتبر، نوامبر و دسامبر افزایش و در بقیه‌ی ماه‌ها کاهش می‌یابد. در سناریو B1، میانگین ماهانه بارش در ماه‌های ژانویه، ژوئن، اوت، اکتبر و دسامبر افزایش و در بقیه‌ی ماه‌ها کاهش می‌یابد. به طور کلی میانگین بارش در سطح حوضه در افق ۲۰۵۰ کاهش می‌یابد.

بررسی‌ها نشان می‌دهد که طی دوره‌ی زمانی ۲۰۴۶-۲۰۶۵ و با در نظر گرفتن سناریو A2 و B1 میانگین ماهانه دمای حداقل و حداکثر در همه‌ی ماه‌ها افزایش می‌یابد. بیشترین مقدار افزایش میانگین ماهانه دمای حداقل در هر دو سناریو A2 و B1 مربوط به ماه جولای به ترتیب برابر با ۲/۹۵ و ۲/۵۶ درجه سانتی‌گراد و کمترین افزایش مربوط به ماه ژانویه به ترتیب برابر با ۰/۶۴ و ۰/۳۱ درجه سانتی‌گراد می‌باشد و پیش‌بینی می‌شود که در دهه ۲۰۵۰، دما به طور متوسط به میزان ۱/۶۶ درجه سانتی‌گراد نسبت به دوره‌ی پایه افزایش می‌یابد. شکل

۵ که با نتایج ذوالقرنین و همکاران (۲۰۱۳)، رودر و همکاران (۲۰۱۴)، ثانی‌خانی و همکاران (۱۳۹۵)، رزاقیان و همکاران (۱۳۹۷) از لحاظ دقت و روش تحلیل و نتایج اخذ شده مطابقت دارد.



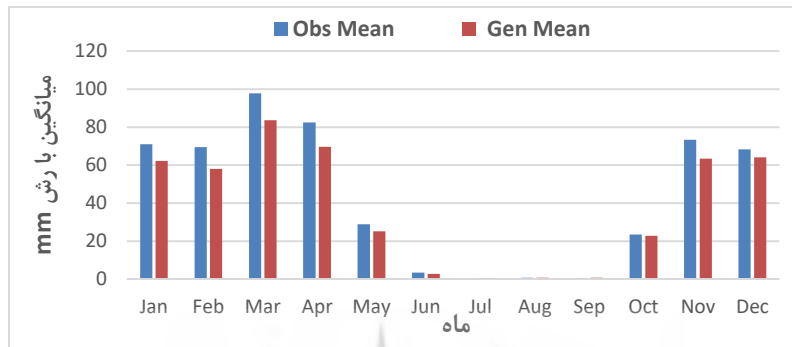
شکل (۴): میانگین بارش ماهانه ۲۰۱۴-۱۹۹۰ و ۲۰۶۵-۲۰۴۶ (سناریوهای A2 و B1)
Fig (4): Average monthly precipitation 2014-1990 and 2065-2046 (scenarios A2, B1)



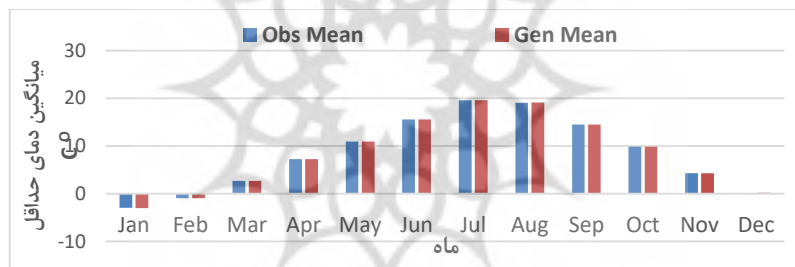
شکل (۵): میانگین دمای حداقل ماهانه ۲۰۱۴-۱۹۹۰ و ۲۰۶۵-۲۰۴۶ تحت سناریوهای A2 و B
Fig (5): Average monthly minimum temperature of 2014-1990 and 2065-2046 under scenarios A2 and B

۳-۳- بررسی عملکرد مدل SDSM در شبیه‌سازی دما و بارش حوضه

در شکل‌های ۶ و ۷ مقایسه میانگین بین داده‌های مشاهداتی و داده‌های حاصل از مدل در دوره ۲۰۱۴-۱۹۹۰ آورده شده است. با توجه به مقادیر بالای ضریب نش - ساتکلیف و مقادیر پایین شاخص‌های خطاسنجی محاسبه شده است (جدول ۲)، نتایج نشان‌دهنده‌ی عملکرد پایین مدل در شبیه‌سازی پارامتر بارش نسبت به دما است. در ادامه ارزیابی نوسانات اقلیمی با مدل اقلیمی HADCM3 تحت دو سناریو A2 و B2 و اجرا و نسبت به مدل‌سازی برای دوره ۲۰۴۶-۲۰۶۵ اقدام گردید.



شکل (۶): میانگین ماهانه ی بارش مشاهداتی و شبیه سازی شده در دوره ی ۱۹۹۰-۲۰۱۴
Fig (6): Average monthly observational and simulated precipitation in the Period 2014-1990



شکل (۷): میانگین ماهانه ی دمای حداقل مشاهداتی و شبیه سازی شده در دوره ی ۱۹۹۰-۲۰۱۴
Fig (7): Average monthly minimum temperature observed and simulated in the Period 2014-1990

جدول (۲): نتایج ارزیابی مدل ریزمقیاس نمایی SDSM در دوره ی ۱۹۹۰-۲۰۱۴

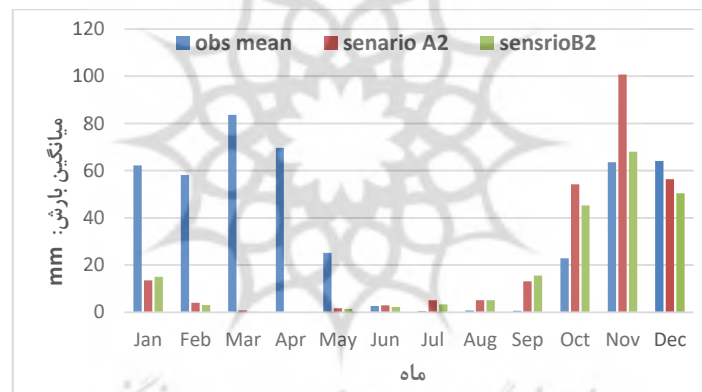
Table (2): The results of the evaluation of the Microsoft small scale model in the Period 2014-1990

| BIAS | MAE | NSE | RMSE | پارامتر |
|-------|-------|-------|------|-------------|
| ۵/۵ | ۵/۴۶ | ۰/۹۳۳ | ۷/۶۳ | بارش |
| ۰/۰۲۱ | ۰/۰۲۳ | ۰/۹۹۹ | ۰/۰۷ | دمای حداکثر |
| ۰/۰۰۹ | ۰/۰۰۷ | ۰/۹۹۹ | ۰/۰۲ | دمای حداقل |

۳-۴ اثر تغییر اقلیم بر بارندگی و دمای حوضه با مدل های SDSM ، LARS-WG

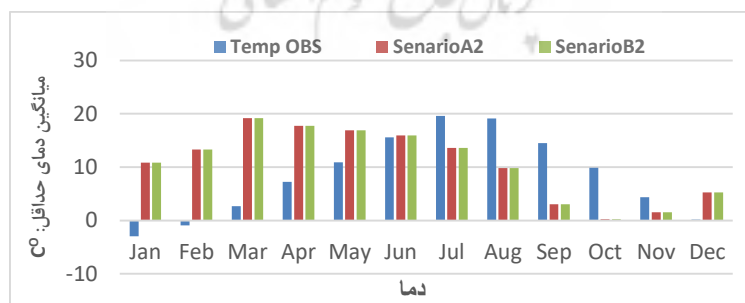
بررسی ها نشان می دهد که در هر دو سناریو A2 و B2 میانگین ماهانه بارش در ماه های ژانویه، فوریه، مارس، آوریل، می و دسامبر کاهش و در بقیه ی ماه ها افزایش می یابد (شکل ۸). به طوری که بیشترین افزایش به ترتیب به میزان ۳۷/۲۶ و ۲۲/۳۶ میلی متر در ماه های نوامبر و سپتامبر برای سناریو A2 و B2 و بیشترین کاهش در ماه مارس به میزان ۸۲/۸۸ میلی متر برای هر دو سناریو می باشد. به طور کلی میانگین بارش در سطح حوضه در دوره ی ۲۰۴۶-۲۰۶۵ در مقایسه با دوره ی پایه کاهش می یابد. بررسی شکل ۹ نشان می دهد که تغییرات دمای

حداقل در هر دو سناریو A2 و B2 در دوره ۲۰۴۶-۲۰۶۵ رخ می‌دهد که بیشترین افزایش مربوط به ماه مارس با ۱۶/۴۷ درجه سانتی‌گراد و بیشترین کاهش مربوط به ماه سپتامبر با ۱۱/۴۷ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. میانگین دمای حداقل دوره‌ی مشاهداتی و دوره‌ی ۲۰۴۶-۲۰۶۵ به ترتیب برابر با ۸/۳۴ و ۱۰/۶ درجه سانتی‌گراد است. بنابراین پیش‌بینی می‌شود دمای حداقل در دوره‌ی ۲۰۴۶-۲۰۶۵ نسبت به دوره‌ی پایه ۲/۲ درجه سانتی‌گراد در حوضه افزایش می‌یابد که با نتایج ذوالقرنین و همکاران^۱ (۲۰۱۳)، رودر و همکاران^۲ (۲۰۱۴)، آقاشاهی و همکاران^۳ (۲۰۱۳)، رزاقیان و همکاران^۴ (۲۰۱۹) از لحاظ دقت و روش تحلیل و نتایج اخذ شده مطابقت دارد.



شکل (۸): میانگین بارش ماهانه ۲۰۱۴-۱۹۹۰ و ۲۰۴۶-۲۰۶۵ تحت سناریوهای A2 و B2

Fig (8): Average monthly precipitation 2014-1990 and 2065-2046 under scenarios A2 and B2

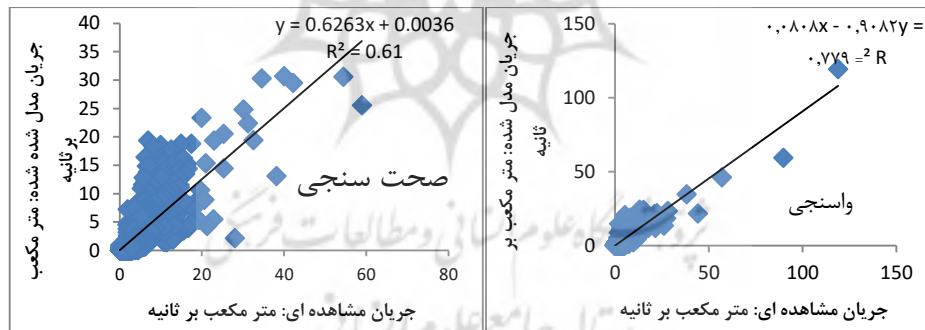


شکل (۹): میانگین دمای حداقل ماهانه ۲۰۱۴-۱۹۹۰ و ۲۰۴۶-۲۰۶۵ (سناریوهای A2 و B2)

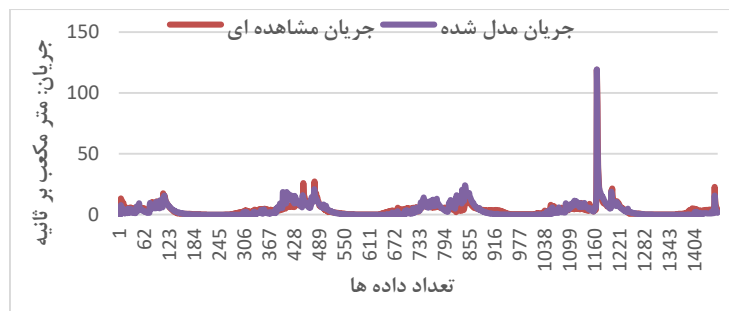
Fig (9): Average monthly minimum temperature of 2014-1990 and 2065-2046 (scenarios A2 and (B2)

۳-۵- شبیه‌سازی بارش - رواناب

در این بررسی ابتدا شبیه‌سازی بارش- رواناب روزانه‌ی حوضه برای مدل SIMHYD در بخشی از دوره‌ی پایه (۲۰۱۴-۱۹۹۰)، صورت گرفت. در مدل SIMHYD دوره‌ی (۲۰۰۲/۱/۱-۲۰۰۵/۱۲/۳۱) برای واسنجی و دوره (۲۰۰۶/۱/۱-۲۰۰۸/۱۲/۳۱) برای صحت‌سنجی شبیه‌سازی انتخاب شدند. شکل‌های (۱۱، ۱۰ و ۱۲) عملکرد مدل SIMHYD را نشان می‌دهد. با توجه به نتایج عملکرد مدل SIMHYD، این مدل با ضرایب نش $0/63$ و ضرایب تعیین $0/779$ و $0/61$ به ترتیب برای دوره‌های واسنجی و صحت‌سنجی الگوی تغییرات رواناب حوضه را خوب شبیه‌سازی کرده که نشان از کارکرد خوب مدل SIMHYD در شبیه‌سازی دبی می‌دهد. شکل‌های (۱۰ و ۱۱) سری زمانی رواناب مشاهداتی را با رواناب محاسبه شده از مدل SIMHYD مقایسه می‌کند. بررسی نمودارها در دوره‌ی واسنجی و صحت‌سنجی نشان می‌دهد که علاوه بر تطبیق قابل قبول داده‌ها با هم، روند کلی افزایش یا کاهش نیز در دوره‌ها تقریباً مشابه هم هستند. به‌علاوه نتایج نشان داد که شبیه‌سازی رواناب توسط مدل در مرحله‌ی واسنجی بهتر از دوره‌ی صحت‌سنجی می‌باشد.

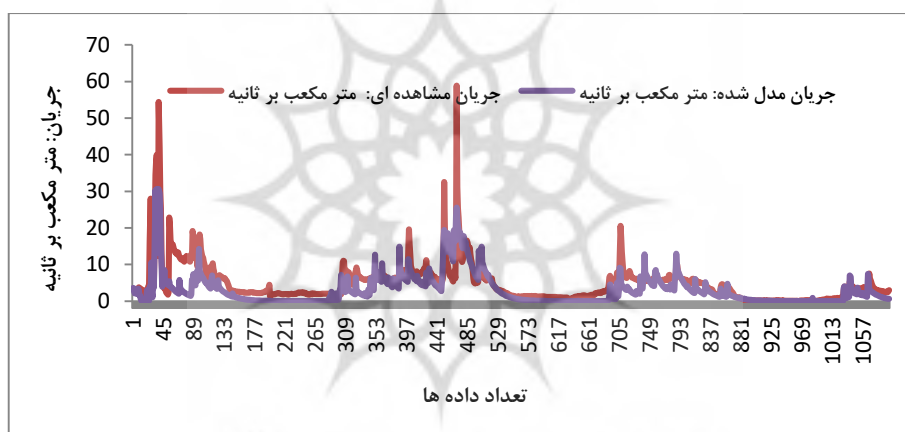


شکل (۱۰): نمودار پراکندگی عملکرد مدل SIMHYD در دوره‌ی واسنجی و دوره‌ی صحت‌سنجی
Fig (10): SIMHYD performance distribution diagram in calibration and validation Period



شکل (۱۱): سری زمانی رواناب مشاهداتی و مدل شده SIMHYD در دوره‌ی واسنجی
Fig (11): Time series of observational and modeled runoff of SIMHYD in the calibration Period

بررسی‌ها نشان می‌دهد که کارایی مدل با مقادیر ضریب تغذیه، ضریب جریان زیر سطحی و شکل نفوذ رابطه‌ی معکوس و در مقابل با پارامترهای کسر نفوذ داخلی، آستانه‌ی نفوذپذیری و ظرفیت ذخیره‌ی رطوبت خاک رابطه‌ی مستقیم دارد. همچنین مدل SIMHYD، بیشترین حساسیت را نسبت به پارامترهای ضریب جریان پایه و ظرفیت ذخیره‌ی باران و کمترین میزان حساسیت پذیری را نسبت به آستانه‌ی نفوذپذیری دارد. با افزایش مقدار پارامتر ضریب جریان پایه تا بیش از ۰/۰۵۷ شاهد روند افزایشی در مقدار ضریب کارایی مدل و پس از آن این مقدار کاهش می‌یابد (جدول ۳).



شکل (۱۲): سری زمانی رواناب مشاهداتی و مدل شده SIMHYD در دوره‌ی صحت‌سنجی

Fig (12): Time series of SIMHYD observational and modeled runoff in the validation Period

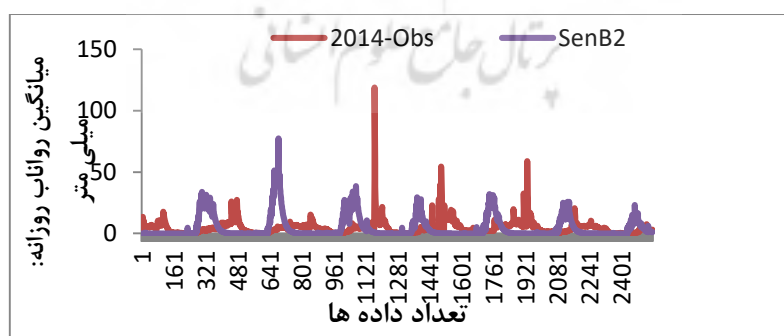
جدول (۳): مقادیر حداکثر، حداقل و بهینه در مرحله‌ی واسنجی مدل SIMHYD

Table (3): The maximum, minimum, and optimal values in the SIMHYD model calibration step

| مقدار بهینه | محدوده تغییر پارامتر | پارامتر |
|-------------|----------------------|----------------------------|
| ۰/۰۵۷ | ۰-۱ | ضریب جریان آب پایه |
| ۰ | ۰-۵ | آستانه نفوذناپذیری |
| ۲۳۰ | ۰-۴۰۰ | ضریب نفوذ |
| ۲/۴ | ۰-۱۰ | شکل نفوذ |
| ۰ | ۰-۱ | ضریب جریان ورودی |
| ۰/۹۸ | ۰-۱ | سهم نفوذپذیر |
| ۰/۱ | ۰-۵ | ظرفیت ذخیره برگاب (mm) |
| ۰/۶۰۳ | ۰-۱ | ضریب تغذیه |
| ۳۸۲ | ۱-۵۰۰ | ظرت ذخیره‌ی رطوبت خاک (mm) |

۳-۶- اثر تغییر اقلیم بر رواناب حوضه تحت مدل‌های LARS-WG و SDSM

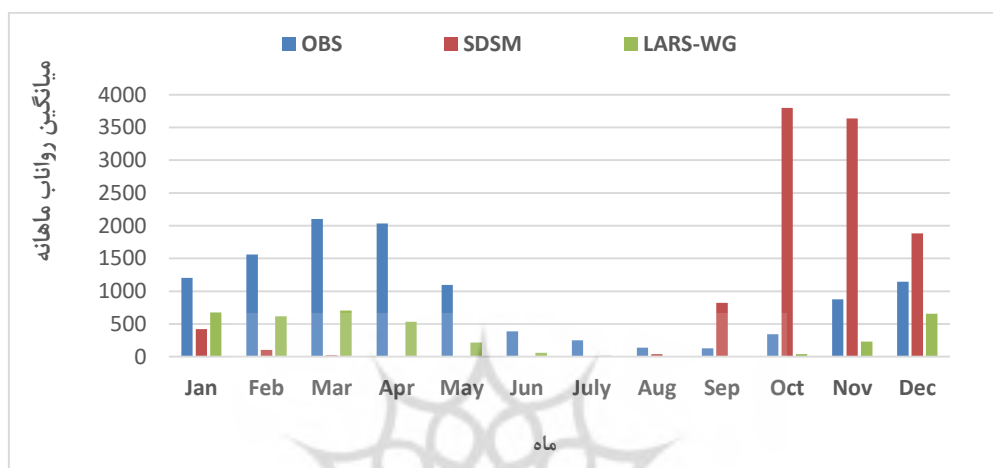
نتایج حاصل از بررسی اثر تغییر اقلیم بر رواناب حوضه آبریز سیلاخور- رحیم‌آباد در دوره‌ی ۲۰۴۶-۲۰۶۵ نسبت به دوره‌ی ۱۹۹۰-۲۰۱۴ بیانگر کاهش میزان رواناب در هر دو مدل ریزمقیاس‌نمایی است و نشان می‌دهد که بیشترین میزان کاهش مربوط به ماه‌های مارس و آوریل می‌باشد که می‌توان این کاهش میزان رواناب را ناشی از افزایش دما و به دنبال آن افزایش میزان تبخیر و کاهش میزان بارندگی دانست. همان‌طور که از شکل ۱۳ مشخص می‌شود، خروجی حاصل از مدل LARS-WG مقادیر رواناب را بهتر از مدل SDSM، شبیه‌سازی نموده است. بنابراین مدل LARS-WG در برآورد مقادیر رواناب حاصل از خروجی مدل مذکور در حوضه توانا تر و دقیق‌تر می‌باشد. همان‌طور که در شکل ۱۴ مشاهده می‌شود، بیشترین اختلاف در مقادیر رواناب ماهانه در مدل SDSM و LARS-WG به ترتیب مربوط به ماه اکتبر با افزایش $3454/7$ و آوریل با کاهش $1500/8$ متر مکعب بر ثانیه و کم‌ترین اختلاف به ترتیب مربوط به ماه آگوست با کاهش $96/57$ و سپتامبر با کاهش $127/2$ متر مکعب بر ثانیه خواهد بود. تفاوت بسیار زیادی بین رواناب حاصل از خروجی LARS-WG و SDSM وجود دارد، چرا که خروجی برخی از مدل‌ها در شبیه‌سازی مناسب بارش موفق نیستند. همچنین بارندگی در یک منطقه، تابع عوامل مختلفی بوده و وجود نوسانات درونی در سیستم اقلیم بخصوص در مقیاس‌های زمانی کوتاه (فصلی، ماهانه و روزانه) در بارندگی می‌تواند، باعث ایجاد انحراف در شبیه‌سازی مربوط به روش‌ها گردد. نهایتاً مدل LARS-WG توانایی بالاتری در تولید مجدد بارندگی و دما در حوضه داشته است، چراکه رواناب حاصله تفاوت قابل قبول‌تری با رواناب مشاهده‌ای دارد که با نتایج ثانی‌خانی و همکاران^۱ (۲۰۱۷)، رزاقیان و همکاران^۲ (۲۰۱۹)، ابراهیمیان و همکاران^۳ (۲۰۱۸) و شیخ‌گودرزی و همکاران^۴ (۲۰۱۹) مطابقت دارد.



شکل (۱۳): مقایسه‌ی رواناب روزانه در دوره‌ی آتی (۲۰۴۶-۲۰۶۵) تحت تأثیر تغییر اقلیم با مقادیر مشاهده‌ای
Fig (13): Comparison of daily runoff in the next Period (2065-2046) under the influence of climate change with observational values

1- Sanikhani et al.
2- Razaghian et al.

3- Ebrahimian et al.
4- Sheykhgodarzi et al.



شکل (۱۴): مقایسه‌ی رواناب ماهانه در دوره‌ی آتی (۲۰۴۶-۲۰۶۵) تحت تأثیر تغییر اقلیم با مقادیر مشاهده‌ای
Fig (14): Comparison of monthly runoff in the next Period (2065-2046) under the influence of climate change with observational values

۴- نتیجه‌گیری

افزایش گازهای گلخانه‌ای در چند دهه اخیر و افزایش دمای ناشی از آن تغییرات اقلیمی گسترده‌ای را در اغلب نواحی کره‌ی زمین موجب شده است. از این‌رو، پیش‌بینی‌های اقلیمی جهت استفاده در برنامه‌ریزی‌های کلان کشور خصوصاً در رابطه با بلایای طبیعی ضروری به نظر می‌رسند. هدف از این تحقیق ارزیابی تغییر اقلیم بر رواناب در حوضه‌ی آبریز رحیم‌آباد- سیلاخور لرستان می‌باشد که به کاهش آسیب‌پذیری این پدیده و چالش‌های مدیران و برنامه‌ریزان حوضه‌ی آبریز در دوره‌های آتی کمک خواهد کرد. جهت بررسی اثر تغییر اقلیم بر رواناب منطقه‌ی مورد مطالعه، داده‌های مدل گردش عمومی جو HADCM3 با بکارگیری دو مدل ریزمقیاس‌نمایی آماری LARS-WG و SDSM طبق سه سناریو A2، B2 و B1 برای منطقه‌ی مورد نظر ریزمقیاس شدند. بدین منظور ابتدا دو مدل LARS-WG و SDSM با معرفی پارامترهای اقلیمی دوره‌ی پایه (۲۰۱۴-۱۹۹۰)، مورد ارزیابی قرار گرفتند و پس از اطمینان از توانایی این دو مدل، پارامترهای اقلیمی برای دوره ۲۰۴۶-۲۰۶۵ شبیه‌سازی شد. نتایج حاکی از کاهش بارش در هر دو مدل SDSM و LARS-WG و افزایش دما در هر دو مدل ریزمقیاس‌نمایی است. همچنین در این تحقیق مدل SDSM تغییرات بیشتری را نسبت به مدل LARS-WG نشان داد در نهایت نتایج بدست آمده در هر دو مدل ریزمقیاس‌نمایی حاکی از کاهش رواناب حوضه‌ی مورد مطالعه در دوره‌ی آتی است. با توجه به نتایج عملکرد مدل SIMHYD، این مدل با ضرایب نش ۰/۶۳ و ۰/۶۱ و ضرایب تعیین ۰/۷۷۹ و ۰/۶۱ به ترتیب برای دوره‌های واسنجی و صحت‌سنجی نشان می‌دهد که مدل الگوی تغییرات رواناب حوضه را خوب شبیه‌سازی نموده است. بررسی نتایج حاصل از داده‌های شبیه‌سازی شده

با داده‌های مشاهداتی نشان می‌دهد که مدل SIMHYD در شبیه‌سازی دبی دارای دقت و کارایی قابل قبول در رابطه با شبیه‌سازی بارش-رواناب حوضه می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد که علاوه بر تطبیق قابل قبول داده‌ها با هم، روند کلی افزایش یا کاهش نیز در دوره‌ها تقریباً مشابه هم هستند. علاوه بر شبیه‌سازی رواناب توسط مدل در مرحله واسنجی بهتر از دوره‌ی صحت‌سنجی می‌باشد. این نتایج با یافته‌های نادری و همکاران (۲۰۱۸)، شیخ‌گودرزی و همکاران (۲۰۱۹)، حجازی و همکاران (۲۰۱۸)، ژانگ و همکاران^۱ (۲۰۱۴) همخوانی دارد.



۵- منابع

- Aghashahi, M., Ardestani, M., NikSokhan, M., & Tahmasebi., B. (2013). *Introducing and Comparing LARS-WG and SDSM Models to Micro-Scale Environmental Parameters in Climate Change Studies*, 6th Iranian National Conference on Environmental Engineering, University of Tehran.
- Asadi, E., Fakhri Fard, A., & Ghorbani, M.A. (2013). Development of a Conceptual Model of Rainfall-Runoff to Simulate Rapid and Slow Runoff (Case Study: Navrood Basin), *Journal of Soil and Water Science*, 22(1), 61-75.
- Chiew, F.H.S., & Siriwardena, L. (2005). *Estimation of SIMHYD parameter values for application in ungauged catchments*, In Zerger, A. and Argent, R.M. (eds) *MODSIM 2005 International Congress on Modeling and Simulation*, Modelling and Simulation Society of Australia and New Zealand.
- Ebrahimian, T., Haghizadeh, A., Zeinivand, H., Tahmasebipour, N., & Alijani, R. (2018). Investigation of Climate Elasticity Method and SIMHID Model for Quantitative Evaluation of Factors Affecting Hydrological Drought, *Journal of Biomedical Research*, 7(2), 29-49.
- Franchini, M., Galeati, G., & Berra, S. (2015). Global Optimization Techniques for the Calibration of Conceptual Rainfall-Runoff Models, *Hydrological Sciences Journal*, 43(3), 443-458.
- Hejazi, A., & Marzbani, M. (2015). Estimation of Maximum Runoff Height and Discharge Using Curve Number Method Case Study: Sarab Darehshahr Watershed. *Journal of Hydrogeomorphology*, 2(5), 63-81.
- Hu, Z., Wang, L., Wang, Z., Hong, Y., & Zheng, H. (2015). Quantitative assessment of climate and human impacts on surface water resources in a typical semi-arid watershed in the middle reaches of the Yellow River from 1985 to 2006. *International Journal of Climatology*, 35(1), 97-113.
- Naderi, M., Ildoromi, A., Nouri, H., Aghabeigi Amin, S., & Zeinivand, H. (2018). The Impact of Land Use and Climate Change on Watershed Runoff Model SWAT (Case Study: Watershed Garin). *Journal of Hydrogeomorphology*, 4(14), 23-42.
- Rajabi, A., & Shabanloo, S. (2014). Investigation of Multiple Climate Indicator Changes in Output of NCCCSM Global Circulation Model (Case Study: Kermanshah Iran), *Iranian Journal of Water Research*, Seventh Year, 13, 41-49.
- Razzagian, H., & Mohseni, B. (2019). Evaluation of SIMHID Rainfall-Runoff Model Performance under Different Climate Change Scenarios, *Journal of Aquatic Management*, Ninth Year, 17, 216-255.

Roudier, P., Ducharne, A., & Feyen, L. (2014). Climate change impacts on runoff in West Africa: a review, *Hydrol. Earth Syst. Sci*, 18, 2789-2801.

Sani Khani, H., Gohardasht, M., & Sadeghi, M. (2017). Investigating the Impacts of Climate Change on Runoff of Gharechai Watershed in Central Province, *Watershed Management Research*, 7(13), 12-22.

Sheikh Goodarzi, M., Jabarian Amiri, B., & Azarniwand, H. (2019). Comparison of the Function of Conceptual Models in River Hydrological Simulation, *Journal of Natural Environment*, 71(4), 509-521.

Wilby, R.L., & Harris, I. (2007). A frame work for assessing uncertainties in climate change impacts: low flow scenarios for the River Thames, UK. *Water Resources Research*. 42. W02419, Doi: 10.1029/2005 WR004065.

Zeng, S., Zhan, C., Sun, F., Du, H., & Wang, F. (2015). Effects of Climate Change and Human Activities on Surface Runoff in the Luan River Basin. *Advances in Meteorology*. Hindawi Publishing Corporation *Advances in Meteorology*, Article ID 740239, 12p.

Zhang, X., Xu, Y.p., & Fu, G. (2014). Uncertainties in SWAT extreme flow simulation under climate change. *Journal of Hydrology*, 515, 205-222.

Zolgharnain, H., Supiah, S., & Sobri, H. (2014). *Application of SDSM and LARS-WG for Simulating and Downscaling of Rainfall and Temperature*, *Theor Appl Climatol*, DOI 10.1007/s00704-013-0951-8.