

ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر رواناب حوضه کن

مرضیه حاجی محمدی^{۱*}، ابوالفضل عزیزبان^۲ و باقر قرمزچشمه^۳

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه اردکان، آستادیار، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه اردکان،
^۲ استادیار، پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۹/۲۸

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۳/۲۹

چکیده

شناخت دگرگونی‌های اقلیمی و رفتار آن‌ها در دوره‌های آتی و اثرات آن‌ها در حوزه‌های مختلف به‌خصوص در منابع آب در برنامه‌ریزی‌های کلان و استراتژیک از اهمیت خاصی برخوردار است. هدف از این پژوهش، ارزیابی اثر تغییرات اقلیمی بر شرایط هیدرولوژیکی حوضه کن است. برای این منظور ابتدا شبیه‌سازی متغیرهای دما و بارش به‌وسیله داده‌های مدل بزرگ مقیاس HadCM3 تحت سناریوی A2 و مدل ریزمقیاس‌گردانی SDSM صورت گرفت. سپس شبیه‌سازی رواناب به‌صورت ماهانه و به‌وسیله مدل هیدرولوژیکی SWAT انجام شد و برای واسنجی و تحلیل عدم قطعیت مدل، از نرم‌افزار SWAT-CUP و الگوریتم SUFI-2 استفاده شد. نتایج حاصل از ارزیابی مدل SDSM به‌وسیله دو پارامتر MBE و NRMSE نشان داد که مدل در شبیه‌سازی متغیر دما نسبت به بارش از دقت بالاتری برخوردار بوده است. مقایسه مقادیر شبیه‌سازی شده برای دوره آتی (۲۰۴۰-۲۰۱۱) و دوره پایه (۲۰۰۱-۱۹۶۱) به‌ترتیب افزایش ۱/۳ و ۰/۸ درجه سانتی‌گراد دمای بیشینه و کمینه را نشان داد. همچنین، در تمامی ایستگاه‌های منتخب کاهش بارش به‌دست آمد که بیشترین کاهش مربوط به فصل بهار بود، ولی در برخی ماه‌های مربوط به فصل زمستان افزایش بارش مشاهده شد. نتایج حاصل از واسنجی و اعتبارسنجی مدل SWAT نیز رضایت‌بخش بود به‌طوری که معیار نش-ساتکلیف به‌عنوان تابع هدف برای دوره واسنجی (۱۹۹۱-۱۹۸۳) و اعتبارسنجی (۱۹۹۶-۱۹۹۲) به‌ترتیب ۰/۸۲ و ۰/۷۱ به‌دست آمد. در نهایت سناریوهای اقلیمی ایجاد شده، افزایش رواناب برای فصل زمستان و کاهش مقدار آن را برای سایر فصول نشان داد. به‌طور کلی، بر اساس نتایج به‌دست آمده، کاهش هفت درصدی رواناب برای دوره آتی پیش‌بینی شد.

واژه‌های کلیدی: اعتبارسنجی، دما و بارش، مدل آماری SDSM، مدل هیدرولوژیکی SWAT، واسنجی

مقدمه

غیرمستقیمی داشته است (Goodarzi, ۲۰۱۱). از این بین، مهمترین تأثیر مربوط به فزونی درجه حرارت بوده است. نتایج حاصل از بررسی‌های متعددی که در سطح بین‌المللی برای مناطق مختلف جهان انجام پذیرفته، نشان می‌دهد که به‌دلیل روند افزایشی دمای کره زمین، تغییرات زمانی و مکانی محسوسی در

از شروع نیمه دوم قرن نوزدهم، اقلیم کره زمین دستخوش تغییرات مهمی شد. به‌نحوی که جابه‌جایی فراگیری در رژیم بارندگی، الگوهای فشار و دمای سطح آب دریاها صورت گرفت که خود بر بخش‌های مختلف حیات در این کره خاکی تأثیرات مستقیم و

همکاران (۲۰۱۴) اثر عوامل مورفواقلیمی را بر دقت ریزمقیاس گردانی مدل SDSM بررسی کردند، نتایج نشان داد که دقت شبیه‌سازی بارش با فاصله از مرکز سلول HadCM3 ارتباط دارد و دمای بیشینه در ایستگاه‌هایی که ارتفاع آن‌ها نزدیک به متوسط ارتفاع سلول بود، از دقت بیشتری برخوردار بود. Rasuli و همکاران (۲۰۱۴) همین مطالعه را در مورد مدل LARS-WG انجام دادند و به نتایج مشابه در مورد رابطه خطای شبیه‌سازی دما و بارش با ارتفاع و فاصله از مرکز سلول HadCM3 دست یافتند. در مطالعه‌ای دیگر Ahmadی و همکاران (۲۰۱۴) دقت مدل SDSM را در شبیه‌سازی بارش و دما به صورت فصلی و سالانه بررسی کردند. بر اساس نتایج به دست آمده در مورد بارش عملکرد مدل فصلی بهتر از سالانه بود ولی در مورد دما این گونه نبود.

تغییر در پارامترهای اقلیمی می‌تواند توزیع مکانی و زمانی منابع آب را تغییر دهد، این مسئله می‌تواند سبب ایجاد خشکسالی‌ها و سیلاب‌هایی شود که قبلاً مشاهده نشده است، بنابراین در عرصه مدیریت منابع آب تحولات و تغییرات بسیاری را به وجود خواهد آورد. Huang (۲۰۱۳)، با استفاده از سه مدل RCM و مدل هیدرولوژیکی SWIM^۳ به بررسی اثرات تغییر اقلیم بر روی جریان‌های کمینه برای دوره‌های ۲۰۶۱-۲۰۲۶ و ۲۱۰۰-۲۰۶۱ در آلمان پرداختند. نتایج حاکی از کاهش جریان کمینه در منطقه مورد مطالعه است. Mendizabal و همکاران (۲۰۱۴)، تأثیر تغییر اقلیم بر رخداد سیل و اثرات آن بر انسان را در حوضه رودخانه دبا^۴ (شمال اسپانیا) بررسی کردند. در این مطالعه از چهار مدل RCM و مدل هیدرولوژیکی MIKESHE- MIKE11 استفاده شد. نتایج نشان داد، دبی بیشینه با دوره بازگشت ۴۰ سال برای سه مدل بین ۹±۱۴ و ۸±۱۵ درصد در دوره ۲۰۴۰-۲۰۰۱ افزایش خواهد یافت و افزایش آن برای دو مدل در دوره ۲۰۸۰-۲۰۴۱ بین ۱۰±۱۹ و ۸±۱۲ درصد پیش‌بینی شد. همچنین، مناطق سیل‌خیز و شدت خطرات آن افزایش خواهد یافت.

میزان بارش و تبخیر به وجود آمده و تغییر الگوهای بارندگی، منابع آبی را تغییر می‌دهد. با توجه به اهمیت موضوع مدل‌های جفت شده اقیانوسی- اتمسفری (AOGCM^۱) گردش عمومی جو به منظور پیش‌بینی متغیرهای اقلیمی برای دوره آتی ایجاد شده است.

از آنجایی که دقت مکانی این مدل‌ها پایین بوده و نمی‌توان خروجی آن‌ها را با این ابعاد در بررسی اثر دگرگونی‌های اقلیمی بر منابع مختلف به کار برد، لذا، به منظور مطالعات در مقیاس محلی تکنیک ریزمقیاس گردانی به کار گرفته می‌شود. مدل SDSM^۲ یکی از مدل‌های ریزمقیاس گردانی آماری به حساب می‌آید که تاکنون مطالعات و پژوهش‌های متعددی در خصوص کارایی این مدل در نقاط مختلف جهان و مقایسه آن با سایر مدل‌ها صورت گرفته است. Harpham و Wilby (۲۰۰۵) چندین مدل ریزمقیاس گردانی را در مناطق مرطوب انگلستان برای شبیه‌سازی بارش مورد ارزیابی قرار دادند و نتیجه-گیری کردند که مدل SDSM نسبت به سایر روش‌های ریزمقیاس گردانی ارجحیت دارد. Fiseha و همکاران (۲۰۱۲) در پژوهشی برای ریزمقیاس گردانی پیش‌بینی کننده‌های حاصل از مدل HadCM3 از دو مدل SDSM و LARS-WG استفاده کردند. نتایج هر دو مدل تغییرات دما و بارش ناشی از تغییر اقلیم را نشان داد. Ahmadی (۲۰۱۴) چندین روش آماری را برای ریزمقیاس گردانی داده‌های دما و بارش به کار برد و به ارجحیت مدل SDSM نسبت به سایر مدل‌ها برای پیش‌بینی سری زمانی پی بردند.

Ghermezcheshmeh (۲۰۱۴) در پژوهشی در حوزه آبخیز ارومیه، عدم قطعیت ناشی از ریزمقیاس گردانی مدل‌های AOGCM را با تحلیل دما و بارش مورد بررسی قرار داد. در این مطالعه از سه مدل آماری، الف- SDSM، ب- LARS-WG، ج- شبکه عصبی و از مدل بزرگ مقیاس HadCM3 تحت سناریوی A2 استفاده شد. در نهایت نتایج نشان داد که در منطقه مطالعاتی عملکرد مدل SDSM بهتر از دو مدل دیگر است. همچنین، Ghermezcheshmeh و

³ Soil and Water Integrated Model

⁴ Deba

¹ Atmosphere Ocean General Circulation Model

² Statistical Down Scaling Model

متر)، E_a مقدار تبخیر و تعرق (میلی‌متر)، W_{seep} مقدار نشست که در روز t از نیم‌رخ خاک وارد منطقه غیراشباع می‌شود (میلی‌متر) و Q_{gw} مقدار آب بازگشتی در روز t می‌باشد.

نتایج حاصل از مطالعاتی که به‌وسیله Rostamian (۲۰۰۷) در حوضه بهشت‌آباد (واقع در کارون شمالی)، Abbaspour و همکاران (۲۰۰۷) در حوضه رودخانه تور^۱ در شمال شرقی کشور سوئیس، Alansi و همکاران (۲۰۰۹) در بالادست حوضه برنامه^۲ در کشور مالزی، Jeong و همکاران (۲۰۱۰)، Goodarzi و همکاران (۲۰۱۱) و Hosseini (۲۰۱۳) در حوضه قره-سو، انجام شده است، قابلیت بالای این مدل را در شبیه‌سازی رواناب نشان می‌دهد.

از مطالعات انجام شده در زمینه اثر دگرگونی‌های اقلیمی بر شرایط هیدرولوژیکی که به‌وسیله این مدل انجام شده می‌توان به مطالعه Muttiah و Wurbs (۲۰۰۲) اشاره کرد. آن‌ها به‌منظور ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر منابع آب مدل هیدرولوژیکی SWAT را به‌کار گرفتند. نتایج مطالعه آن‌ها نشان داد که افزایش جریان رودخانه می‌تواند سیلابی شدن بیشتر را به همراه داشته باشد این در حالی است که فراوانی جریان‌های نرمال و جریان‌های کمینه کاهش یافته است. در پژوهشی دیگر Rosenberg و همکاران (۲۰۰۳) به‌منظور شبیه‌سازی تأثیرات تغییر اقلیم پیش‌بینی شده با مدل HadCM2 از مدل SWAT و مدل HUMUS^۳ استفاده نمودند آبدهی در مقایسه با دوره پایه به‌ترتیب به میزان ۱۱- تا ۱۵۳ درصد و ۲۸ تا ۳۴۲ درصد در سال‌های ۲۰۳۰ و ۲۰۹۵ تغییر خواهد داشت.

Farzaneh (۲۰۱۱) در پژوهشی تغییرات رواناب را در حوضه بهشت‌آباد کارون شمالی با استفاده از داده‌های مدل HadCM3، مدل ریزمقیاس گردانی SDSM و مدل هیدرولوژیکی SWAT مورد بررسی قرار داد. نتایج تحقیق نشان دهنده کاهش ۴۹ درصدی مجموع بارش متوسط و افزایش ۳۰ درصدی دمای حداقل و افزایش ۱۰ درصدی دمای بیشینه در دوره آتی بود که

در پژوهشی دیگر اثر تغییرات اقلیمی بر آبدهی سالانه حوضه قران طالار به‌وسیله Ahmadi (۲۰۱۴)، بررسی شد. در این پژوهش، مدل SDSM و شبکه عصبی به‌منظور ریزمقیاس گردانی داده‌های سناریوی A2 و B2 مدل HadCM3 به‌کار گرفته شد، سپس با استفاده از مدل هیدرولوژیکی IHACRES مقادیر جریان شبیه‌سازی شد بر اساس نتایج به‌دست آمده مقادیر جریان تحت سناریوی A2 و B2 به‌ترتیب ۲۱/۳۴ و ۱۹/۴۲ درصد افزایش خواهد داشت. لازم به ذکر است که تغییر اقلیم می‌تواند باعث افزایش رواناب در مناطق با عرض‌های جغرافیایی بالایی کره زمین، به‌دلیل افزایش در میزان بارندگی و ذوب برف شود، اما در عرض‌های جغرافیایی پایین انتظار می‌رود که کاهش رواناب را شاهد باشیم (Lane و همکاران، ۱۹۹۹). به‌منظور بررسی اثر این تغییرات بر منابع آب از مدل‌های هیدرولوژیکی استفاده می‌شود. مدل‌های هیدرولوژیکی چارچوبی را برای ارزیابی رابطه مابین هواشناسی، فعالیت‌های انسان و منابع آب فراهم می‌کنند (Leavesley, ۲۰۰۲). در این تحقیق مدل هیدرولوژیکی SWAT به‌منظور شبیه‌سازی رواناب مورد استفاده قرار گرفت. SWAT یک مدل شبیه‌سازی هیدرولوژیکی نیمه‌توزیعی پیوسته رواناب سطحی، نفوذ، تبخیر تعرق، فرسایش، جابه‌جایی مواد مغذی و آفت‌کش‌ها، رشد گیاه، جریان آب زیرزمینی، تلفات انتقال در کانال و قابل استفاده برای شبیه‌سازی ذخیره‌سازی در مخزن در بازه‌های زمانی طولانی مدت است. این مدل قابلیت اتصال به نرم‌افزار ArcGIS را دارد، لذا محدودیتی از نظر ورود حجم وسیعی از اطلاعات در مورد حوضه‌های بزرگ وجود نداشته، می‌توان برای مدل‌سازی حوضه‌های وسیع و پیچیده از آن استفاده نمود. این مدل برای شبیه‌سازی رواناب روی معادله بیلان آبی پایه‌ریزی شده است. رابطه (۱) این معادله را نشان می‌دهد.

$$SW_t = SW_o + \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - W_{seep} - Q_{gw}) \quad (1)$$

که در آن، SW_t مقدار نهایی، SW_o مقدار اولیه رطوبت خاک (میلی‌متر)، t زمان (روز)، R_{day} مقدار بارش (میلی‌متر)، Q_{surf} مقدار رواناب سطحی (میلی-

¹ Thur

² Bernam

³ Hydrologic Unit Model for the United States

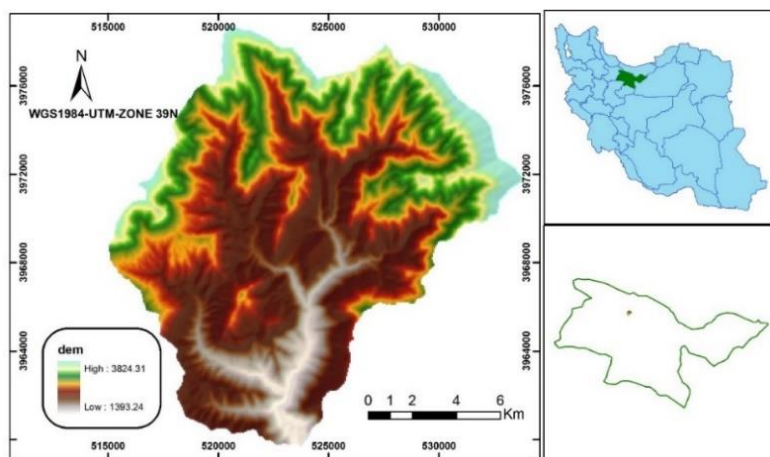
ریزمقیاس گردانی پیش‌بینی کننده‌های بزرگ مقیاس از مدل آماری SDSM استفاده شد و شبیه‌سازی رواناب به‌وسیله مدل هیدرولوژیکی SWAT انجام گرفت.

مواد و روش‌ها

روش پژوهش: این مطالعه در حوزه آبخیز کن انجام شد. این حوضه که از زیرحوضه‌های آبخیز مرکزی کشور محسوب می‌شود، با مساحت بیش از ۲۲۰ کیلومتر مربع در طول جغرافیایی $11^{\circ} 51'$ تا $21^{\circ} 55'$ شمالی و عرض جغرافیایی $46' 35^{\circ}$ تا 35° شرقی واقع شده است. این حوضه در یک منطقه کوهستانی قرار گرفته که اختلاف ارتفاع بین بلندترین و پست‌ترین نقطه ۲۰۰۰ متر است. متوسط بارندگی سالانه حوضه ۶۲۵ میلی‌متر است و بر اساس مطالعات موجود بیشینه، کمینه و متوسط درجه حرارت سالانه به ترتیب معادل $13/2$ ، $1/6$ و $7/3$ درجه سانتی‌گراد می‌باشد (Abbasi, ۲۰۰۹). رودخانه کن پر آب‌ترین رود تهران است که دبی متوسط آن در یک دوره سی‌ساله (۱۳۹۱-۱۳۷۱) برابر $2/44$ مترمکعب در ثانیه می‌باشد. شکل ۱ موقعیت منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

این مسأله، باعث کاهش رواناب و تبدیل اقلیم منطقه از نیمه‌خشک به خشک خواهد شد. Rezaizaman و همکاران (۲۰۱۳) به‌منظور بررسی تغییرات دما و بارش در دوره آتی در حوضه سیمینه‌رود از نرم‌افزار SDSM و روش TOPSIS استفاده شد و تغییرات رواناب با استفاده از مدل SWAT مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج به‌دست آمده کاهش بارش ماهیانه را تا ۴۰ درصد و افزایش دما تا دو درجه سلسیوس را نشان داد. همچنین، کاهش ۲۵ درصد منابع آبی حوضه سیمینه‌رود و متعاقباً کاهش تخلیه این رودخانه به دریاچه ارومیه تا حدود ۳۰ درصد پیش‌بینی شد. Azari و همکاران (۲۰۱۳) به‌منظور بررسی تغییرات هیدرولوژیکی حوضه گرگان‌رود از مدل SWAT و الگوریتم SUFI2 در نرم‌افزار SWAT-CUP استفاده کردند. نتایج نشان داد که برای دوره ۲۰۹۹-۲۰۷۰ مقدار بارندگی سالانه سه تا $6/7$ درصد کاهش می‌یابد. همچنین، رواناب سطحی $0/4$ تا $7/7$ درصد و آب خاک $5/2$ تا ۱۳ درصد کاهش خواهد یافت.

هدف این تحقیق ارزیابی اثر تغییر اقلیم پیش‌بینی شده با مدل HadCM3 تحت سناریوی A2 که یکی از سختگیرانه‌ترین سناریوهای اقلیمی محسوب می‌شود، بر رواناب حوضه کن بود، برای این منظور برای



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد پژوهش

در این پژوهش شامل داده‌های NCEP از سال ۱۹۶۱ تا ۲۰۰۱ و داده‌های HadCM3 تحت سناریو A2 از سال ۱۹۶۱ تا ۲۰۴۰ بودند. از آنجایی که داده‌های مدل HadCM3 ۳۶۰ روزه می‌باشد، بنابراین ابتدا

در مطالعات تغییر اقلیم دو سری داده بزرگ مقیاس مدل‌های گردش عمومی جو و داده‌های مشاهداتی روزانه ایستگاه‌های زمینی مورد نیاز است. داده‌های بزرگ مقیاس مدل‌های گردش عمومی جو

مقادیر بیشینه و کمینه داده‌های مشاهداتی و n تعداد داده را نشان می‌دهد. پایین بودن مقادیر مربوط به پارامترهای نامبرده نشان دهنده کارایی بهتر مدل است.

به منظور شبیه‌سازی و بررسی اثرات اقلیمی بر مقادیر رواناب حوضه کن از مدل بارش-رواناب SWAT استفاده شد. برای این منظور نقشه DEM با استفاده از نقشه توپوگرافی با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰ و دقت ۲۰ متر تهیه شد. همچنین، نقشه‌های کاربری اراضی و خاک منطقه با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰ از دفتر مطالعات منابع طبیعی تهران تهیه شد. حوضه مورد مطالعه شامل کاربری‌های مراتع نیمه‌متراکم (۹۳/۹۲ درصد)، باغات (۲/۴۷ درصد)، مراتع متراکم (۲/۲۲ درصد)، مراتع کم تراکم (۱/۳۷ درصد) و منطقه شهری (۰/۰۲ درصد) می‌باشد. اولین مرحله از مدل-سازی، تقسیم حوضه به تعدادی زیرحوضه می‌باشد که بر اساس توپوگرافی و خطوط شبکه تقسیم‌بندی در محیط ArcGIS صورت گرفت. پس از آن هر زیرحوضه با توجه به مشخصات کاربری اراضی، نقشه خاک و شیب به تعدادی واحد پاسخ هیدرولوژیکی (HRU) تقسیم شد. خروجی‌های مدل مانند رواناب سطحی در هر زیرحوضه، از جمع رواناب سطحی محاسبه شده برای هر واحد هیدرولوژیکی، به روش متوسط وزنی به دست آمد. در این مطالعه حوضه کن به نه زیرحوضه و ۹۸ واحد پاسخ هیدرولوژیکی تقسیم شد.

برای واسنجی و تحلیل عدم قطعیت مدل SWAT از روش SUFI-2 استفاده شد. روش SUFI-2 در واقع معکوس مدل SWAT عمل می‌کند به این معنی که با گرفتن داده‌های مشاهده‌ای و همچنین، محدوده مجاز پارامترهای مدل SWAT که در واسنجی نمودن مدل نسبت به حوضه مطالعاتی نقش دارند، میزان بهینه پارامترهای مذکور را برآورد می‌نماید (Dillaha و Beasley, ۱۹۸۳). برنامه SUFI-2 به ترتیب زیر انجام شد. ۱- تابع هدف تعیین شد. ۲- مقادیر کمینه و بیشینه مطلق پارامترها مشخص شد. ۳- تحلیل حساسیت تمامی پارامترها در مراحل اولیه واسنجی صورت گرفت. ۴- دامنه عدم قطعیت اولیه ارزیابی

کالیبراسیون مدل به وسیله داده‌های NCEP انجام می‌شود و سپس تولید سناریو به وسیله داده‌های HadCM3 و معادله ایجاد شده در مرحله واسنجی صورت می‌پذیرد. با توجه به طول دوره آماری مدل بزرگ مقیاس NCEP دوره پایه انتخاب شده باید بین سال‌های ۱۹۶۱ تا ۲۰۰۱ باشد. بنابراین، ایستگاه‌های انتخاب شده باید دارای آمار کافی در این دوره باشند. از بین ایستگاه‌های سینوپتیک نزدیک به حوضه تنها ایستگاه‌های مهرآباد و شمال تهران دارای آمار کافی برای ریزمقیاس گردانی بود. پس از تهیه سری زمانی داده‌های دمای بیشینه، دمای کمینه و بارش ایستگاه-های منتخب، ریزمقیاس گردانی به وسیله مدل SDSM انجام شد. برای استخراج روابط کمی بین متغیرهای اتمسفری بزرگ مقیاس و متغیرهای محلی، می‌بایست پیش‌بینی‌کننده‌ها را از پایگاه NCEP استخراج کرد. از بین ۲۶ متغیر پیش‌بینی‌کننده، حدود چهار الی شش مورد (Dibike, ۲۰۰۶) از مهم‌ترین آن‌ها که همبستگی بالاتری با متغیرهای اقلیمی (دمای بیشینه، دمای کمینه و بارش) داشتند با در نظر گرفتن همبستگی داخلی متغیرهای پیش‌بینی‌کننده، انتخاب شدند. واسنجی مدل و تعیین روابط رگرسیونی به وسیله ۷۵ درصد از داده‌های ایستگاه‌ها و پیش‌بینی‌کننده‌های منتخب مدل NCEP انجام شد و پس از استخراج رابطه رگرسیونی، دقت آن با ۲۵ درصد داده‌های باقی‌مانده و همچنین، داده‌های کل دوره مشاهداتی ایستگاه‌ها و HadCM3 صحت‌سنجی شد. در این تحقیق ارزیابی دقت مدل SDSM بر اساس معیار اختلاف میانگین (MBE^1) و $NRMSE^2$ صورت پذیرفت که روابط (۲) و (۳) معادلات مربوط به آن‌ها را نشان می‌دهد.

$$MBE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (S_i - O_i) \quad (2)$$

$$NRMSE = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{S_i - O_i}{n}\right)^2}}{X_{max} - X_{min}} \quad (3)$$

که در آن، S مقادیر شبیه‌سازی شده به وسیله مدل، O مقادیر مشاهده شده، \bar{X}_{obs} میانگین ماهانه داده‌های اندازه‌گیری شده، i ماه‌های سال، X_{min} و X_{max}

¹ Mean Bias Error

² Normalized Root Mean Square Error

مشخصات ایستگاه‌های منتخب، دوره واسنجی و اعتبارسنجی داده‌های NCEP ریزمقیاس شده با مدل SDSM برای ایستگاه‌های سینوپتیک و باران‌سنجی و مدل SWAT بر اساس داده‌های ایستگاه هیدرومتری سولقان آورده شده است. لازم به ذکر است که داده‌های ایستگاه شمال تهران به دلیل کوتاه بودن طول دوره آماری برای مدل NCEP ارزیابی نشدند و کل دوره با مدل HadCM3 مورد ارزیابی قرار گرفت.

نتایج و بحث

انتخاب پیش‌بینی کننده‌ها و ارزیابی دقت

مدل SDSM: در جدول ۲، پیش‌بینی کننده‌های منتخب برای هر متغیر پیش‌بینی شونده نشان شده است. با توجه به نتایج جدول پیش‌بینی کننده‌های ژئوتانسیل در ۵۰۰ هکتوپاسکال و رطوبت نسبی سطحی در شبیه‌سازی فرایند بارش تأثیرگذار بودند. متغیرهای رطوبت ویژه سطحی، متوسط دما در ارتفاع دو متری و ژئوتانسیل در ۵۰۰ هکتوپاسکال در هر دو ایستگاه سینوپتیک همبستگی خوبی با دمای بیشینه و کمینه داشتند. همچنین، در مطالعه‌ای که به وسیله Ghermezcheshmeh (۲۰۱۴) در شمال غرب کشور انجام شد، این پنج متغیر پیش‌بینی کننده برای شبیه‌سازی پارامترهای دما و بارش به وسیله مدل SDSM انتخاب شدند. مقادیر MBE و NRMSE حاصل از مقایسه مقادیر شبیه‌سازی شده و مشاهداتی در جداول ۳ و ۴ آورده شده است. با بررسی جدول ۳، مدل توانسته متغیر دما را با دقت بالاتری نسبت به بارش شبیه‌سازی کند، به طوری که بالاترین اختلاف میانگین دما برابر ۱/۵ درجه سانتی‌گراد برای فصل زمستان به دست آمد. البته بالاترین مقادیر خطای MBE در شبیه‌سازی دما بیشتر مربوط به فصل بهار بود و کمترین آن برای فصل تابستان محاسبه شد. از آنجایی که مدل‌های GCM قادر به شبیه‌سازی شرایط محلی نیستند و پدیده‌های فراگیر را در شبیه‌سازی مورد توجه قرار می‌دهند، در مورد بارش بیشترین درصد خطای نسبی (RMBE) مربوط به فصولی است که بارش‌های محلی بیشتر اتفاق می‌افتد. بنابراین بیشترین خطا مربوط به فصول بهار و پاییز بود. با بررسی جدول ۴، کمترین خطای بارش برای

شده و برای روش نمونه‌برداری لاتین هایپر-کیوب^۱ واگذار شد. ۵- نمونه‌برداری لاتین هایپر-کیوب اجرا شده و بعد از n تا شبیه‌سازی بر اساس تابع هدف انجام گرفت. ۶- پارامترهای حساس شناسایی شده و بهینه‌سازی پارامترهای حساس در طی واسنجی صورت می‌پذیرفت. تحلیل حساسیت در این مدل بر اساس دو پارامتر p-value و t-stat صورت گرفت (Abbaspour, ۲۰۰۷).

سنجش میزان عدم قطعیت در روش SUFI2، به وسیله P-factor و D-factor صورت گرفت. P-factor بیانگر درصد داده‌های اندازه‌گیری شده که درون باند عدم قطعیت ۹۵ درصد ($95PPU^2$) قرار می‌گیرند، است و D-factor برابر با میانگین ضخامت 95ppu تقسیم بر انحراف معیار مقادیر اندازه‌گیری شده است. معیار 95ppu با محاسبه مقادیر متناظر احتمال ۲/۵ درصد به عنوان حد پایین و ۹۷/۵ درصد به عنوان حد بالا، با استفاده از نمونه‌برداری به روش هایپرکیوب و حذف پنج درصد شبیه‌سازی بسیار بد، به دست آمد. علاوه بر دو عامل بالا، از دو تابع R^{23} و NS^4 برای ارزیابی آماری مدل واسنجی شده استفاده شد. این دو تابع ارزیابی را با رابطه‌های (۴) و (۵) انجام می‌دهد.

$$R^2 = \frac{\left[\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - \bar{Q}_{obs})(Q_{sim,i} - \bar{Q}_{sim}) \right]^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - \bar{Q}_{obs})^2 \sum_{i=1}^n (Q_{sim,i} - \bar{Q}_{sim})^2} \quad (4)$$

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - Q_{sim,i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - \bar{Q}_{obs})^2} \quad (5)$$

که در آن، Q_{obs} مقادیر اندازه‌گیری شده رواناب، Q_{sim} مقادیر شبیه‌سازی شده رواناب، \bar{Q}_{obs} میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده، \bar{Q}_{sim} میانگین مقادیر شبیه‌سازی شده و n تعداد مشاهدات است.

در این تحقیق، از داده‌های دبی روزانه ایستگاه هیدرومتری سولقان واقع در خروجی حوضه کن به منظور بررسی تغییرات رواناب حوضه استفاده شد که واسنجی مدل بر اساس ۷۰ درصد داده‌های این ایستگاه صورت گرفت و باقی‌مانده داده‌ها (۳۰ درصد) برای اعتبارسنجی مدل استفاده شد. در جدول ۱،

¹ Latin Hypercube Sampling

² 95 Percent Prediction Uncertainty

³ Coefficient of Determination

⁴ Nash-Sutcliffe

عوامل تأثیرگذار بر خطای مدل می‌توان به خطای اندازه‌گیری و جابه‌جایی ایستگاه‌ها، اثرات شهری شدن و صنعتی شدن، متوسط ارتفاع، دما و بارش ایستگاه‌ها نسبت به متوسط آن‌ها در سلول HadCM3 و ... اشاره کرد (Ghermezcheshmeh, ۲۰۱۴). در مطالعه‌ای که به‌وسیله Ahmadi و همکاران (۲۰۱۴) در حوضه قرآن‌طالار انجام شد، خطای MBE سالانه بارش برای ایستگاه قرآن‌طالار و قائمشهر به ترتیب ۰/۲۴ و ۰/۱۸ درصد به‌دست آمد.

ایستگاه مهرآباد و بیشترین آن برای ایستگاه شمال تهران به‌دست آمد. بالا بودن دقت شبیه‌سازی در ایستگاه سینوپتیک مهرآباد می‌تواند به‌دلیل کیفیت بالاتر اندازه‌گیری متغیرها در این ایستگاه نسبت به سایر ایستگاه‌های مطالعاتی باشد. همچنین، به‌دلیل شهری بودن ایستگاه شمال تهران در دوره پایه و با توجه به این‌که عواملی از قبیل شهری شدن به‌وسیله مدل HadCM3 در نظر گرفته نمی‌شود، بنابراین بالاتر بودن خطا در این ایستگاه منطقی به نظر می‌رسد. از

جدول ۱- مشخصات ایستگاه‌های منتخب و دوره واسنجی و اعتبارسنجی مدل‌ها برای هر ایستگاه

ایستگاه	نوع ایستگاه	طول جغرافیایی (درجه-دقیقه)	عرض جغرافیایی (درجه-دقیقه)	دوره واسنجی	دوره اعتبارسنجی
مهرآباد	سینوپتیک	۵۱-۱۹	۳۵-۴۱	۱۹۶۱-۱۹۸۵	۱۹۸۶-۲۰۰۱
شمال تهران	سینوپتیک	۵۱-۲۹	۳۵-۴۸	۱۹۸۸-۲۰۰۱	-
شهرستانک	باران‌سنجی	۵۱-۲۱	۳۵-۵۸	۱۹۷۰-۱۹۹۱	۱۹۹۲-۲۰۰۱
سیرا	باران‌سنجی	۵۱-۰۹	۳۶-۰۲	۱۹۷۰-۱۹۹۱	۱۹۹۲-۲۰۰۱
بیلقان	باران‌سنجی	۵۱-۰۲	۳۵-۵۰	۱۹۷۰-۱۹۹۱	۱۹۹۲-۲۰۰۱
سولقان	هیدرومتری	۵۱-۱۵	۳۵-۴۷	۱۹۸۳-۱۹۹۱	۱۹۹۲-۱۹۹۶

می‌کند، بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که ممکن است در شبیه‌سازی ذوب برف ضعیف عمل کرده باشد (Fontain و همکاران، ۲۰۰۲) و به همین دلیل، شبیه‌سازی مقادیر بیشینه در برخی سال‌ها خوب صورت نگرفت. در مرحله واسنجی مدل، تحلیل حساسیت انجام و حساس‌ترین پارامترها مشخص شد. جدول ۵ پارامترهای منتخب را به همراه محدوده بهینه به‌دست آمده برای آن‌ها در مرحله واسنجی نشان می‌دهد. با توجه به نتایج این جدول، پارامترهای برف به‌دلیل کوهستانی بودن منطقه و نقش آب حاصل از ذوب برف در جریان منطقه از جمله پارامترهای حساس بودند. همچنین، به‌دلیل کوهستانی بودن منطقه و فاصله نسبتاً زیاد ایستگاه‌های منتخب نسبت به خروجی حوضه گردان بارش جزء پارامترهای حساس و حائز اهمیت بود. هدایت هیدرولیکی مؤثر و مقدار ضریب مانینگ از پارامترهای مؤثر در فرایند نفوذ از بستر رودخانه هستند. در واقع این پارامترها اتلاف آب از بستر رودخانه را کنترل می‌کنند.

نتایج تحلیل حساسیت و عدم قطعیت مدل

SWAT: مدل بر اساس آمار سال‌های ۱۹۸۰ تا ۱۹۹۶، با در نظر گرفتن سه سال آماری ۱۹۸۰-۱۹۸۲ برای گرم کردن، اجرا شد. لازم به ذکر است که با توجه به شواهد موجود و در استفاده لایه کاربری اراضی مربوط به مطالعات تفصیلی-اجرایی آبخیزداری منطقه در سال ۱۳۷۵ برای واسنجی مدل به سال‌های قبل از این سال محدود شد.

در ادامه، واسنجی مدل در مقیاس زمانی ماهانه بر اساس مقادیر مشاهده‌ای دبی ایستگاه سولقان واقع در خروجی حوضه برای دوره آماری ۱۹۸۳-۱۹۹۱ صورت گرفت و نوع تابع هدف برای بهینه کردن مدل مقدار NS انتخاب شد. نتایج واسنجی در شکل ۲ نشان داده شده است. بر اساس نتایج شکل ۲، مقادیر شبیه‌سازی شده در بیشتر ماه‌ها انطباق خوبی با داده‌های مشاهداتی داشت، اما در برخی سال‌ها جریان‌های بیشینه بیشتر یا کمتر از حد واقعی به‌دست آمد. از آنجایی که مدل SWAT، بر اساس متوسط دمای روزانه، بارش را به دو صورت باران یا برف تقسیم‌بندی

به منظور ارزیابی مدل واسنجی شده، مدل برای سال‌های ۱۹۹۶-۱۹۹۲ بر اساس مقادیر به دست آمده برای پارامترهای منتخب در مرحله واسنجی، اعتبارسنجی شد. در این مرحله، مقادیر D-factor و P-factor به ترتیب برابر ۰/۳۳ و ۰/۲۵ حاصل شد. همچنین، مقادیر NS و R² برای دوره اعتبارسنجی برابر ۰/۷۱ و ۰/۷۷ به دست آمد که نسبت به دوره واسنجی کمی کاهش داشت. از دلایل این کاهش می‌توان به تغییرات ایجاد شده به وسیله فعالیت‌های انسانی اشاره کرد که در مدل‌سازی نمی‌توان در نظر گرفت. نتایج اعتبارسنجی مدل، در شکل ۳، به صورت ماهانه آورده شده است. به طور کلی، نتایج حاصل از واسنجی و اعتبارسنجی در این تحقیق قابل قبول به دست آمد.

همان‌طور که قبلاً گفته شد، تحلیل کیفیت واسنجی مدل به وسیله پارامترهای P-factor، D-factor و R² صورت گرفت. در این تحقیق، مقدار D-factor برابر ۰/۳۶ (کمتر از یک) به دست آمد. از آنجایی که D-factor ضخامت باند عدم قطعیت را نشان می‌دهد، بنابراین، کمتر بودن مقدار آن به معنی عدم قطعیت پایین‌تر در نتایج بود. در حالی که مقدار شاخص P-factor برابر ۰/۳۶ و تا حدودی کوچک به دست آمد که ممکن است به دلیل کوچک بودن باند عدم قطعیت باشد. مقادیر تابع هدف NS و R² برای دوره واسنجی به ترتیب ۰/۸۲ و ۰/۸۳ به دست آمد (جدول ۶). عموماً اگر ضریب نش-ساتکلیف بیشتر از ۰/۷۵ باشد، مدل عالی و کامل، اگر بین ۰/۷۵ و ۰/۳۶ باشد، رضایت‌بخش و اگر کمتر از ۰/۳۶ باشد، غیر قابل قبول فرض می‌شود (Motovilov و همکاران، ۱۹۹۹).

جدول ۲- متغیرهای پیش‌بینی کننده منتخب برای هر متغیر پیش‌بینی شونده

ایستگاه	متغیر اقلیمی پیش‌بینی شونده	متغیر پیش‌بینی کننده
	بارش	P-z, P5-z, R500, Rhum
مهرآباد	دمای بیشینه	P5-z, P500, P8-u, Shum, Temp
	دمای کمینه	P-v, P5-f, P500, P8-u
شمال تهران	بارش	P-z, P5-z, P500, Rhum
	دمای بیشینه	P500, P8-u, Shum, Temp
	دمای کمینه	P-v, P5-u, P500, Shum
شهرستانک	بارش	P5-u, P5-z, P500, P5-zh, Rhum
سیرا	بارش	P-z, P5-f, P5-z, P500, Rhum
بیلقان	بارش	P-z, P5-z, P500, R500, Rhum

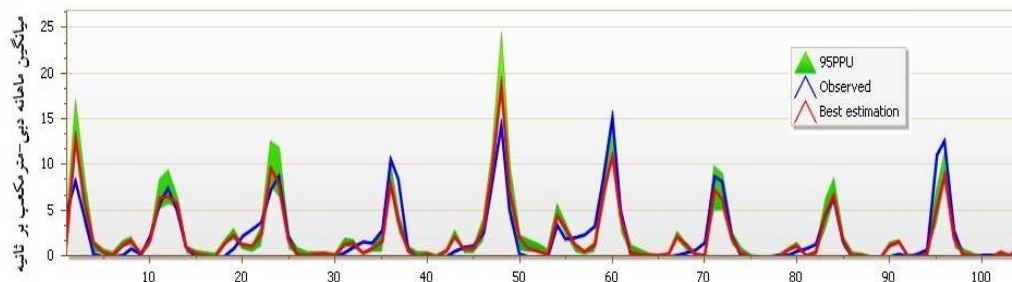
P-z تاوایی سطحی، P-v سرعت نصف‌النهاری سطحی، P5-f قدرت جریان در ۵۰۰ هکتوپاسکال، P5-u سرعت مداری در ۵۰۰ هکتوپاسکال، P5-z تاوایی در ۵۰۰ هکتوپاسکال، P500 ژئوپتانسیل در ۵۰۰ هکتوپاسکال، P5-zh واگرایی در ۵۰۰ هکتوپاسکال، P8-u سرعت مداری در ۸۵۰ هکتوپاسکال، T500 رطوبت ویژه یا نسبی در ۵۰۰ هکتوپاسکال، shum رطوبت ویژه سطحی، Rhum رطوبت نسبی سطحی، Temp متوسط دما در ارتفاع دو متری

جدول ۳- میزان اختلاف میانگین (MBE) نتایج مدل HadCM3 با مقادیر مشاهداتی متغیرهای دمای بیشینه و کمینه و بارش برای دوره پایه

ایستگاه	شاخص	دوره آماری	مقادیر MBE در فصول مختلف			
			بهار	تابستان	پاییز	زمستان
	دمای بیشینه (سانتی‌گراد)		-۱	-۰/۳	-۰/۴	۰/۵
مهرآباد	دمای کمینه (سانتی‌گراد)	۱۹۶۱-۲۰۰۱	-۱/۱	۰/۱	-۰/۳	-۰/۶
	بارش (درصد)		-۲۵/۷	۱۹/۴	۱۵/۱	-۲۱/۸
	دمای بیشینه (سانتی‌گراد)		-۱/۳	۰	-۰/۶	۰/۸
شمال تهران	دمای کمینه (سانتی‌گراد)	۱۹۸۸-۲۰۰۱	-۰/۹	۰/۲	۰/۲	۱/۵
	بارش (درصد)		۲۹	۳/۶	۵۰	۳/۲
شهرستانک	بارش (درصد)	۱۹۷۰-۲۰۰۱	-۴/۸	-۹/۷	۱۱/۵	-۱۳/۸
سیرا	بارش (درصد)	۱۹۷۰-۲۰۰۱	۴/۴	۱۳/۳	۲۴/۱	-۶/۴
بیلقان	بارش (درصد)	۱۹۷۰-۲۰۰۱	-۷	-۲۰/۶	۴۹/۲	۲۳/۴

جدول ۴- مقادیر NRMSE داده‌های بارش ایستگاه‌های مطالعاتی

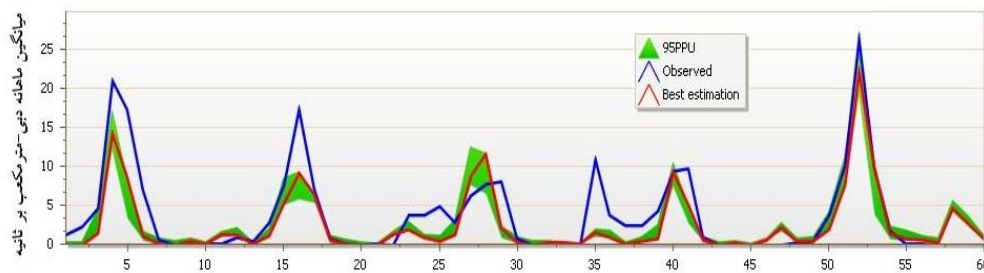
ایستگاه	مهرآباد	شمال تهران	شهرستانک	سیرا	بیلقان
NRMSE	۰/۲۵	۰/۳۴	۰/۳۰	۰/۳۱	۰/۳۳



شکل ۲- مقایسه مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده رواناب در دوره واسنجی (۱۹۹۱-۱۹۸۳)

جدول ۵- پارامترهای منتخب برای واسنجی در مدل SWAT 2012

پارامتر	توضیحات	محدوده اولیه		محدوده بهینه	
		کمینه	بیشینه	کمینه	بیشینه
V_SFTMP	دمای بارش برف (درجه سانتی‌گراد)	۵	-۵	۲/۰۲	۰/۲۵
V_ALPHA-BF	ضریب عکس‌العمل جریان آب زیرزمینی	۱	۰	۰/۵۲	۰
V_REVAPMN	کمینه میزان ذخیره آب در آبخوان سطحی برای روی دادن revap ^۱ (میلی‌متر)	۱۰۰	۰	۵۰	۰
V_SMFMX	عامل ذوب برف در ۲۱ ژوئن (میلی‌متر بر درجه سانتی‌گراد)	۱۰	۰	۹/۱۶	۶/۰۴
R_CN2	شماره منحنی	۰/۲	-۰/۲	۰/۱۶	۰/۰۷
V_SMFMN	عامل ذوب برف در ۲۱ دسامبر (میلی‌متر بر درجه سانتی‌گراد)	۱۰	۱	۳/۸۳	۱/۵۲
V_GWQMN	حداقل مقدار جریان در آبخوان برای جریان پایه	۱۰۰	۰	۳۶/۲۲	۱۲/۰۷
V_PLAPS	تغییرات بارش در ارتفاع	۲۰۰	۰	۱۵۸/۱	۱۴۰/۵۹
V_SMTMP	دمای ذوب توده برف (درجه سانتی‌گراد)	۱۰	-۵	۶/۶۳	۳/۸۳
V_GW-REVAP	ضریب تعیین نفوذ به آبخوان عمیق از آبخوان سطحی یا صعود مویینگی از آبخوان سطحی	۰/۲	۰/۰۲	۰/۱۳	۰/۰۶
V_CH-K2	هدایت هیدرولیکی آبراهه اصلی (میلی‌متر بر ساعت)	۱۳۰	۵	۱۰۰/۱۲	۵۶/۷۹
V_CH-N2	ضریب مانینگ آبراهه اصلی در هر زیر حوضه	۰/۳	۰	۰/۰۷	۰/۰۲
V_GW-DELAY	زمان تأخیر تغذیه آب زیرزمینی (روز)	۱۰۰	۰	۱/۸	۱/۴
V_SURLAG	ضریب تأخیر رواناب سطحی	۲۴	۰/۰۵	۱۳/۸۸	۱
V_ESCO	ضریب تصحیح تبخیر از خاک	۱	۰	۰/۸۹	۰/۶۶
R_SOL_AWC	ظرفیت آب قابل دسترس خاک (میلی‌متر در میلی‌متر)	۰/۱	-۰/۲	-۰/۱	-۰/۲



شکل ۳- نمودار مقایسه مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده رواناب در دوره اعتبارسنجی (۱۹۹۶-۱۹۹۲)

^۱ Water in shallow aquifer returning to root zone (mm H₂O)

جدول ۶- نتایج واسنجی و اعتبارسنجی مدل

d-factor	p-factor	R ²	NS	دوره
۰/۳۶	۰/۳۶	۰/۸۳	۰/۸۲	واسنجی
۰/۲۵	۰/۳۳	۰/۷۷	۰/۷۱	اعتبارسنجی

به فصل زمستان افزایش بارش مشاهده شد. به‌طور کلی، در همه ایستگاه‌ها کاهش بارش سالانه پیش‌بینی شد که مقادیر کاهش محاسبه شده در فصول بهار و تابستان نسبت به فصول دیگر از کاهش بیشتری برخوردار بود. همچنین، در ایستگاه‌های شمال تهران و سیرا در فصل زمستان افزایش بارش مشاهده شد. به‌طور کلی، بر اساس نتایج مطالعات انجام شده در نقاط مختلف دنیا افزایش دما برای دوره آتی پیش‌بینی شده است، اما در مورد بارش نتایج به‌دست آمده در نقاط مختلف متفاوت است. به‌طوری که Ahmadi (۲۰۱۴) برای حوضه قرآن‌طالار واقع در دامنه شمالی البرز با اقلیم مرطوب افزایش بارش را پیش‌بینی کرد.

پیش‌بینی متغیرهای دما و بارش برای دوره ۲۰۴۰-۲۰۱۱: به‌منظور از بین بردن اثر خطای مدل‌ها در نتایج پیش‌بینی متغیرهای اقلیمی، سناریوهای دمای کمینه، دمای بیشینه و بارش برای دو دوره پایه (۲۰۰۱-۱۹۶۱) و آتی (۲۰۴۰-۲۰۱۱) ایجاد شد و مورد مقایسه قرار گرفت. تغییرات دما و بارش نسبت به دوره پایه در جدول ۷، به‌صورت سالانه و فصلی، آورده شده است. بر این اساس، افزایش دمای بیشینه و کمینه برای هر دو ایستگاه مهرآباد و شمال تهران پیش‌بینی شد. همچنین، بیشترین افزایش دما مربوط به فصول بهار و پاییز بود. بررسی نتایج تغییرات بارش نسبت به دوره پایه، کاهش بارش را برای بیشتر ماه‌های سال نشان داد و تنها در برخی از ماه‌های مربوط

جدول ۷- تغییرات دما و بارش در دوره آتی (۲۰۴۰-۲۰۱۱) نسبت به دوره پایه (۲۰۰۱-۱۹۶۱) (واحد دما بر حسب درجه سانتی‌گراد و واحد بارش بر حسب میلی‌متر)

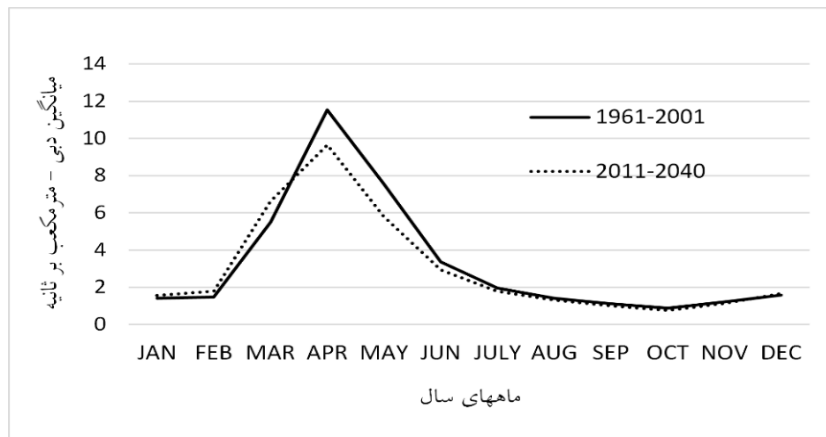
نام ایستگاه	متغیر	بهار	تابستان	پاییز	زمستان	سالانه
مهرآباد	دمای بیشینه	۱/۵	۱/۵	۱/۶	۰/۹	۱/۴
	دمای کمینه	۱	۰/۹	۱	۰/۴	۰/۸
شمال تهران	بارش	-۷/۲	-۲/۴	-۱/۵	-۱/۲	-۱۲/۳
	دمای بیشینه	۱/۱	۱/۹	۱/۷	۰/۶	۱/۳
شهرستانک	دمای کمینه	۱/۱	۰/۵	۱/۱	۰/۶	۰/۸
	بارش	-۱۹/۸	-۳/۷	-۰/۶	۳/۵	-۲۰/۶
سیرا	بارش	-۱۵/۱	-۱۰/۹	-۵/۵	-۱/۵	-۳۳
	بارش	-۶/۱	-۱۲	-۷/۵	۸/۳	-۱۷/۴
بیلقان	بارش	-۹/۴	-۲/۵	-۲/۲	-۲/۸	-۱۶/۹

افزایش دبی در ماه‌های مارس و دسامبر به‌ترتیب برابر ۱/۱۲ و ۰/۰۸ مترمکعب بر ثانیه حاصل شد. در فصل‌های بهار، تابستان و پاییز به‌ترتیب ۰/۸۳، ۰/۲۳ و ۰/۱۱ مترمکعب بر ثانیه کاهش دبی مشاهده شد. در حالی‌که در فصل زمستان ۰/۱۸ مترمکعب بر ثانیه افزایش دبی به‌دست آمد. بنابراین، افزایش دبی در فصل زمستان و کاهش آن برای سایر فصول پیش‌بینی شد که افزایش بارش برای این فصل نیز محاسبه شده

پیش‌بینی رواناب برای دوره ۲۰۴۰-۲۰۱۱: نتایج حاصل از مقایسه رواناب برای دو دوره ۲۰۰۱-۱۹۶۱ و ۲۰۴۰-۲۰۱۱ در شکل ۴ آورده شده است. بر این اساس، در ماه‌های ژانویه، فوریه، مارس و دسامبر افزایش دبی و در سایر ماه‌ها کاهش دبی مشاهده شد. بیشترین و کمترین کاهش دبی به‌ترتیب برای ماه‌های آوریل و نوامبر به‌ترتیب برابر ۱/۹ و ۰/۰۹ مترمکعب بر ثانیه به‌دست آمد. همچنین، بیشترین و کمترین

حوضه بهشت‌آباد کارون شمالی و Rezaizaman و همکاران (۲۰۱۳) در حوضه سیمینه‌رود به نتایج مشابه این تحقیق در مورد رواناب دست یافتند.

بود. میانگین سالانه رواناب برای دوره پایه ۳/۲۵ مترمکعب بر ثانیه و برای دوره آتی سه مترمکعب بر ثانیه به‌دست آمد که کاهش هفت درصدی رواناب را برای دوره آتی نشان داد. Farzaneh (۲۰۱۱) در



شکل ۴- مقایسه ماهانه دبی دوره‌های ۱۹۶۱-۲۰۰۱ و ۲۰۱۱-۲۰۴۰

شمال تهران به‌دست آمد. بالا بودن دقت شبیه‌سازی در ایستگاه سینوپتیک مهرآباد می‌تواند به‌دلیل کیفیت بالاتر اندازه‌گیری متغیرها در این ایستگاه نسبت به سایر ایستگاه‌ها باشد. همچنین، به‌دلیل شهری بودن ایستگاه شمال تهران در دوره پایه و با توجه به این‌که عواملی از قبیل اثرات شهری شدن به‌وسیله مدل HadCM3 در نظر گرفته نمی‌شود، بالاتر بودن خطا در این ایستگاه منطقی به نظر می‌رسد.

شبیه‌سازی جریان نشان داد که مقادیر شبیه‌سازی شده در بیشتر ماه‌ها انطباق خوبی با داده‌های مشاهداتی دارند، اما در برخی سال‌ها جریان‌های بیشینه بیشتر یا کمتر از حد واقعی به‌دست آمد. از آنجایی که مدل SWAT، بر اساس متوسط دمای روزانه، بارش را به دو صورت باران یا برف تقسیم‌بندی می‌کند، بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که ممکن است در شبیه‌سازی ذوب برف ضعیف عمل کرده باشد (Fontain و همکاران، ۲۰۰۲) و به همین دلیل شبیه‌سازی مقادیر بیشینه در برخی سال‌ها خوب صورت نگرفت. بر اساس تحلیل حساسیت، مدل به ۱۶ پارامتر حساسیت نشان داد که مهمترین آن‌ها دمای بارش برف، شماره منحنی، دمای ذوب برف و هدایت هیدرولیکی آبراهه اصلی بود که در جدول ۵، به همراه محدوده بهینه، به‌دست آمده است. لازم به ذکر است

نتیجه‌گیری

از ۲۶ متغیر پیش‌بینی کننده HadCM3، متغیرهای رطوبت ویژه سطحی، متوسط دما در ارتفاع دو متری و ژئوپتانسیل در ۵۰۰ هکتوپاسکال در هر دو ایستگاه سینوپتیک مهرآباد و شمال تهران همبستگی خوبی با دمای بیشینه و کمینه برقرار کردند که در شمال غرب کشور نیز Ghermezcheshmeh (۲۰۱۴) این پنج متغیر پیش‌بینی کننده را برای شبیه‌سازی پارامترهای دما و بارش به‌وسیله مدل SDSM به‌کار بردند. مقادیر MBE و NRMSE حاصل از مقایسه مقادیر شبیه‌سازی شده نشان داد که مدل توانسته متغیر دما را با دقت بالاتری نسبت به بارش شبیه‌سازی کند. به‌طوری‌که بالاترین اختلاف میانگین دما برابر ۱/۵ درجه سانتی‌گراد به‌دست آمد. در خصوص بارش باید اذعان داشت از آنجایی که مدل‌های GCM قادر به شبیه‌سازی شرایط محلی نیستند و پدیده‌های فراگیر را در شبیه‌سازی مورد توجه قرار می‌دهند، بیشترین درصد خطای نسبی (RMBE) مربوط به فصل بهار است که بارش‌های محلی بیشتر اتفاق می‌افتد که با تحقیق Rasuli و همکاران (۲۰۱۴) و Ghermezcheshmeh و همکاران (۲۰۱۴) مطابقت دارد. با بررسی مقادیر خطا، کمترین خطای بارش برای ایستگاه مهرآباد و بیشترین آن برای ایستگاه

همکاران (۲۰۱۳) در حوضه گرگان‌رود تطابق داشتند. همچنین، در ایستگاه‌های شمال تهران و سیرا در فصل زمستان افزایش بارش مشاهده شد. رواناب دوره آبی در ماه‌های ژانویه، فوریه، مارس و دسامبر افزایش دبی و در سایر ماه‌ها کاهش را نسبت به دوره حاضر نشان داد. دلیل این موضوع، افزایش دما در دوره آبی و ذوب زود هنگام برف در ماه‌های زمستانی و همچنین، تغییر در نوع بارش می‌تواند باشد. بیشترین و کمترین کاهش دبی به ترتیب برای ماه‌های آوریل و نوامبر به ترتیب برابر ۱/۹ و ۰/۰۹ مترمکعب بر ثانیه به دست آمد. نتایج به دست آمده منطقی بوده و افزایش رواناب در فصل زمستان و کاهش آن برای سایر فصول پیش-بینی شد که افزایش بارش نیز برای این فصل محاسبه شده بود. میانگین سالانه رواناب برای دوره پایه ۳/۲۵ مترمکعب بر ثانیه و برای دوره آبی سه مترمکعب بر ثانیه به دست آمد که کاهش هفت درصدی رواناب را برای دوره آبی نشان داد. Farzaneh (۲۰۱۱) در حوضه بهشت‌آباد کارون شمالی و Rezaizaman و همکاران (۲۰۱۳) در حوضه سیمینه‌رود به نتایج مشابه این تحقیق در مورد رواناب دست یافتند.

که با توجه به وضعیت منطقه پارامترهای حساس تغییر می‌کند. در این حوضه، پارامترهای برف به دلیل کوهستانی بودن منطقه و نقش آب حاصل از ذوب برف در جریان منطقه از جمله پارامترهای حساس بودند. هدایت هیدرولیکی موثر و مقدار ضریب مانینگ از پارامترهای موثر در فرایند نفوذ از بستر رودخانه بودند که میزان اتلاف آب از بستر رودخانه را کنترل می‌کردند.

تغییرات دما و بارش دوره آبی نسبت به دوره پایه، افزایش دمای بیشینه و کمینه برای هر دو ایستگاه مهرآباد و شمال تهران را نشان داد. همچنین، بیشترین افزایش دما مربوط به فصول بهار و پاییز بود. بررسی نتایج تغییرات بارش نسبت به دوره پایه، کاهش بارش را برای بیشتر ماه‌های سال نشان داد و تنها در برخی از ماه‌های مربوط به فصل زمستان افزایش بارش مشاهده شد. در مقیاس سالانه همه ایستگاه‌ها کاهش بارش سالانه در دوره آبی را نشان دادند که با نتایج تحقیقات Farzaneh (۲۰۱۱) در حوضه بهشت‌آباد کارون شمالی، Rezaizaman و همکاران (۲۰۱۳) در حوضه سیمینه‌رود و Azari و

منابع مود استفاده

1. Abbaspour, K.C., J. Yang, I. Maximov, R. Siber, K. Bonger, J. Mieleitner, J. Zobrist and R. Sirinivasan. 2007. Modelling hydrology and water quality in the pre-alpine/alpine Thur Watershed using SWAT. *Journal of Hydrology*, 333(4): 413-430.
2. Abbasi, M. 2009. Assessment of basin practices using HEC-HMS Model, case study: KAN sub-basin in Tehran Province. Final Report of Research Plan, Agriculture Research and Education Organization, Tehran, Iran.
3. Ahmadi, A., H. Ghasemieh and B. Ghermezcheshmeh. 2014. Assessment of statistical downscaling methods in Downscaling AO-GCMS model data as an input of hydrological models. 2nd National Conference on Water Crisis, Shahrekord, Iran.
4. Ahmadi, M. 2014. Analyzing impact of climate change on annual discharge in Qorantalar Watershed. MSc Thesis, Shahrekord University, 145 pages.
5. Alansi, A.W., M.S.M. Amin, G. Abdolhalim, H.Z.M. Shafri and W. Aimrun. 2009. Validation of SWAT model for stream flow simulation and forecasting in upper Bernam humid tropical river basin Malaysia. *Hydrology and Earth System Sciences*, 6(1): 7581-7609.
6. Azari, M., H.R. Moradi, B. Saghafian and M. Faramarzi. 2013. Assessment of hydrological effects of climate change in Gourganroud River Basin. *Journal of Water and Soil*, 27(3): 537-547.
7. Dibike, B.Y. and P. Coulibaly. 2006. Temporal neural networks for downscaling variability and extremes. *Neural Networks*, 19: 135-144.
8. Dillaha, T.A. and B.D. Beasley. 1983. Distributed parameter modeling of sediment movement and particle size distribution. *Transactions of the ASAE. American Society of Agricultural Engineers*, 4(26): 1766-1772.
9. Fiseha, B.M., A.M. Melesse, E. Romano, E. Volpiand and A. Fiori. 2012. Statistical downscaling of precipitation and temperature for the upper Tiber Basin in central Italy. *International Journal of Water Sciences*, 1(3): 1-14.

10. Fontain, T.A., T.S. Cruickshank, J.G. Arnold and R.H. Hotchkiss. 2002. Development of a snowfall-snowmelt routine for mountainous terrain for the soil water assessment tool (SWAT). *Journal of Hydrology*, 262(1-4): 209-223.
11. Farzaneh, M. 2011. Evaluation of multiple linear SDSM model uncertainty on runoff, case study: Behesht Abad North Karun, Iran. MSc Thesis, Kermanshah University, 134 pages.
12. Ghermezcheshmeh, B. 2014. Assessment of downscaling GCM models uncertainty by analyzed on temperature and precipitation, case study: Urmia Lake Basin. PhD Thesis, 156 pages.
13. Ghermezcheshmeh, B., A. Rasuli, M. Rezaei-banafsheh, A. Massah and A. Khorshiddoost. 2015. Uncertainty analyzing of neural network in downscaling of HadCM3 data with bootstrap confidence interval method. *Journal of Watershed Engineering and Management*, 7(3): 306-316.
14. Ghermezcheshmeh, B., A. Rasuli, M. Rezaei-banafsheh, A. Massah and A. Khorshiddoost. 2014. Investigation impact of morpho-climatic parameters on accuracy of SDSM model. *Journal of Watershed Engineering and Management*, 6(2): 155-164.
15. Goodarzi, M. 2011. Evaluation and assessment of impacts of climate variability on surface water resources, case study: Karkheh Olia Sub-basin. PhD Thesis, 134 pages.
16. Harpham, H. and R. L. Wilby. 2005. Multi-site downscaling of heavy daily precipitation occurrence and amount. *Journal of Hydrology*, 312: 235-255.
17. Hosseini, M. 2013. Water balance simulation in Ghare-Sou Watershed, Kermanshah, using the SWAT model. *Watershed Engineering and Management*, 6(1): 63-73.
18. Huang, S., V. Krysanova and F.F. Hettermann. 2013. Projection of low flow conditions in Germany under climate change by combining RCMs and a regional hydrological model. *Acta Geophysical*, 61(1): 151-193.
19. Jeong, I., N. Kannan, J. Arnold, R. Glick, L. Gosselink and R. Srinivasan. 2010. Development and integration sub-hourly rainfall-runoff modeling capability within a watershed model. *Water Resources Management*, 24(15): 4505-4527.
20. Lane, M.E., P.H. Kirshenand and R.M. Vogel. 1999. Indicators of impact of global climate change on US water resources. *ASCE, Journal of Water Resources Planning and Management*, 125(4): 194-204.
21. Leavesley, G.H., S.L. Markstrom, P.J. Restrepo and R.J. Viger. 2002. A modular approach to addressing model design, scale and parameter estimation issues in distributed hydrological modeling. *Hydrological Processes*, 16(2): 173-187.
22. Mendizabal, M., J. Sepulveda and P. Trop. 2014. Climate change impacts on flood events and its consequences on human in Deba River. *International Journal of Environment Research*. 8(1): 221-230.
23. Motovilov, Y.G., L. Gottschalk, K. Engeland and A. Rodhe. 1999. Validation of a distributed hydrological model against observations. *Agriculture and Forest Meteorology*, 98-99: 257-277.
24. Muttiah, R.S. and R.A. Wurbs. 2002. Modeling the impact of climate change on water supply reliabilities. *Water International*, 27(3): 407-419.
25. Rasuli, A.A., M. Rezaei-Banafsheh, A.R. Massah, M.A. Khorshiddust and B. Ghermezcheshmeh. 2014. Investigation impact of morpho-climatic parameters on accuracy of LARS-WG model. *Journal of Watershed Management Science and Engineering*, 8(24): 9-18.
26. Rezaizaman, M., S. Morid and M. Delavar. 2013. Evaluation of impact of climate change on climatological variables Siminerud Watershed. *Water and Soil Publication (Agricultural Science and Technology)*, 27(6): 1247-1259.
27. Rostamian, R. 2007. Estimation of runoff and sedimentation in Beheshtabad Basin in Northern Karoun Watershed using SWAT 2000 model. MSc Thesis, University of Esfahan, 134 pages.
28. Rosenberg, N.J., R.A. Brown, R.C. Izaurralde and A.M. Thomson. 2003. Integrated assessment of hadley center (HadCM2) climate change projections on agriculture productivity and irrigation water supply in the conterminous United States: I. Climate change scenarios and impact on irrigation water supply simulated with the HUMUS model. *Agriculture and Forest Meteorology*, 117(1-2): 73-96.
29. Tryhorn, L. and A. Degaetano. 2011. A comparison of techniques for downscaling extreme precipitation over the North-eastern United States. *International Journal of Climatology*, 31(13): 1975-1989.

Evaluation of the impact of climate change on runoff in Kan Watershed

Marzieh Hajimohammadi^{*1}, Abolfazl Azizian² and Bagher Ghermezcheshmeh³

¹MSc Student, Faculty of Natural Resources, University of Ardakan, Iran, ²Assistant Professor, Faculty of Natural Resources, University of Ardakan, Iran and ³Assistant Professor, Soil Conservation and Watershed Management Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran

Received: 18 June 2016

Accepted: 18 December 2016

Abstract

Knowledge of climate variabilities and their behavior in future periods and their effects in various fields has great importance especially in strategic and macro planning in water resources. This study aims to evaluate the effect of climate change on hydrological condition of the Kan Watershed. For this purpose the HadCM3 model under the A2 emission scenario and also statistical downscaling model (SDSM) were applied for temperature and rain variables simulation. Then, SWAT model was used for monthly runoff simulation and SUFI-2 algorithm was used in SWAT-CUP software pack for calibrating and uncertainly analyzing. The performance of SDSM model was evaluated base on MBE and NRMSE parameters, the result indicated that temperature variable was simulated more accurate than of precipitation. The result of the predicting temperature in period (2011-2040) compare with the base period (1961-2001) showed the maximum and minimum temperature will increase by 1.3 and 0.8 °C, respectively. Also, the rainfall will decrease by 3-4 percent for all of selected stations. The most rainfall reduction will be for spring. While in some months of winter an increase of precipitation was predicted. The result of calibration and validation of SWAT model agreed well with the observed data, so that Nash-Sutcliff efficiency coefficient, as objective function, was 0.82 and 0.71, in calibration period (1983-1991) and validation period (1992-1996) respectively. Finally, results of runoff prediction showed an increase in winter and a decrease in other seasons based on climate scenarios. Overall, according to obtained results runoff will decrease by seven percent for future period.

Key words: Calibration, SDSM statistical model, SWAT hydrological model, Temperature and rain, Validation

* Corresponding author: hmohammadi.m1988@gmail.com