

بررسی اثرات تغییر اقلیم بر رواناب سطحی در حوضه آبخیز بازفت

پریسا الماسی^{۱*}، سعید سلطانی^۱، مسعود گودرزی^۲ و رضا مدرس^۱

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۳/۲۸؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۱/۲۹)

DOI: 10.18869/acadpub.jstnar.20.78.39

چکیده

با توجه به آشکار شدن تغییرات اقلیمی در اکثر مناطق دنیا و اثر آن بر بخش‌های مختلف چرخه آب، آگاهی از وضعیت منابع آب به منظور مدیریت صحیح منابع و برنامه‌ریزی برای آینده ضروری است. از اینرو مطالعات زیادی در مناطق مختلف با هدف تحلیل اثرات تغییر اقلیم بر فرآیندهای هیدرولوژیک در دوره‌های آتی انجام شده است. در مطالعه حاضر به بررسی اثرات تغییر اقلیم بر رواناب سطحی در حوضه آبخیز بازفت پرداخته شده است. حوضه آبخیز بازفت که در شمال غرب استان چهارمحال و بختیاری واقع شده، به دلیل وضعیت خاص توپوگرافیکی و موقعیت جغرافیایی خود سهم قابل توجهی در تولید منابع آب منطقه دارد. در این مطالعه از مدل اقلیمی سه HadCM و سناریوهای انتشار A2 و B2 جهت ارزیابی عدم قطعیت موجود در پیش‌بینی تغییر اقلیم استفاده شده است. بدین منظور، مدل آماری SDSM برای ریزمقیاس کردن داده‌های بزرگ مقیاس بارش و دما و مدل هیدرولوژیک WetSpa برای شبیه‌سازی رواناب مورد استفاده قرار گرفته است. پس از واسنجی مدل هیدرولوژیک، داده‌های ریزمقیاس شده بارش و دما در دوره‌های آینده نزدیک (۲۰۵۰ - ۲۰۲۰) و آینده دور (۲۱۰۰ - ۲۰۷۰) به مدل WetSpa معرفی و رواناب برای دوره‌های مذکور شبیه‌سازی گردید. نتایج این مطالعه بیانگر عملکرد مناسب مدل SDSM در ریزمقیاس‌سازی داده‌های اقلیمی به‌ویژه دمای حداقل و حداکثر می‌باشد. ارزیابی کارایی مدل WetSpa نیز حاکی از عملکرد مناسب این مدل برای شبیه‌سازی رواناب در حوضه بازفت است، به طوری که ضریب ناش - ساتکلیف طی واسنجی و صحت‌سنجی به ترتیب برابر ۰/۶۳ و ۰/۶۵ حاصل شده است. همچنین، بررسی میزان رواناب پیش‌بینی شده در دوره‌های آتی نشان‌دهنده افزایش رواناب سالانه در حوضه آبخیز بازفت تحت هر دو سناریوی A2 و B2 است.

کلمات کلیدی: تغییر اقلیم، مدل SDSM، مدل WetSpa، رواناب سطحی، حوضه آبخیز بازفت

۱. گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه صنعتی اصفهان

۲. پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری تهران

*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی Parisa.almasi@gmail.com

مقدمه

تغییر اقلیم یکی از مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر چرخه هیدرولوژیک است که توجه بسیاری از دانشمندان و کارشناسان را جلب نموده است. تغییر در پارامترهای اقلیمی به‌ویژه تغییر در میزان بارش و دما نقش مهمی در تعیین میزان رواناب در دوره‌های آبی یک حوضه خواهد داشت. بنابراین آنالیز اثرات تغییر اقلیم بر فرآیندهای هیدرولوژیک از جمله رواناب سطحی به‌منظور شناسایی تغییرات پتانسیل منابع آبی در آینده و ارائه راهکارهای مناسب برای مدیریت منابع آب از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

اثرات تغییر اقلیم بر رواناب یا به‌طور مستقیم با استفاده از سری‌های زمانی گذشته اقلیم و رواناب برآورد می‌شود (۲۵) و یا با استفاده از مدل‌های هیدرولوژیک شبیه‌سازی می‌گردد (۹). رویکرد مدل‌سازی هیدرولوژیک در مطالعات بسیاری مورد استفاده قرار گرفته است، زیرا در این مدل‌ها ویژگی‌های روزانه و ماهانه رواناب می‌تواند به‌طور مستقیم برآورد، سایر متغیرهای مورد نظر تعیین و مدل‌سازی اثرات ترکیبی تغییر اقلیم و سایر محرک‌ها بر جریان انجام شود (۱۲). در این رویکرد، ابتدا مدل، با استفاده از دبی‌های روزانه ثبت شده واسنجی شده و سپس با ثابت در نظر گرفتن پارامترها، مدل برای سری پارامترهای اقلیمی مربوط به آینده اجرا می‌گردد.

نکته قابل توجه در مطالعات تغییر اقلیم وجود عدم قطعیت‌های مربوط به آنالیز اثرات است (۸، ۱۱، ۱۳، ۱۷، ۲۳، ۲۶، ۳۰). هرچند شناسایی و کنترل تمام منابع عدم قطعیت امری دشوار بوده و تاکنون روشی کارا برای مقابله با همه این منابع ارائه نشده است، اما شناسایی عدم قطعیت‌های موجود در آنالیز اثرات شامل عدم قطعیت ناشی از انتشار گازهای گلخانه‌ای در آینده، ساختار و پارامترهای مدل‌های چرخش عمومی (General Circulation Model (GCMs)، روش‌های ریز مقیاس سازی و مدل‌های آنالیز اثرات از جمله مدل‌های هیدرولوژیک و پارامترهای آنها ضروری است. به‌طور مثال، چو و همکاران (۲۰۱۰)، پنج مدل ریز مقیاس سازی را با

افزایش میزان پیچیدگی مقایسه نمودند و دریافتند که تفاوت بین میزان رواناب آبی مدل شده طبق روش‌های مختلف قابل توجه می‌باشد (۱۳). هار فام و ویلی (۲۰۰۵)، روش‌های مختلف ریز مقیاس سازی آماری شامل شبکه عصبی شعاعی، شبکه عصبی چندلایه و مدل SDSM را برای پیش‌بینی بارش در مناطق مختلف انگلستان مورد استفاده قرار دادند. نتایج حاصل از مطالعات نشان داد که همه روش‌های به‌کاررفته از توانایی مطلوبی برای پیش‌بینی بارش برخوردارند، ولی مدل‌های شبکه عصبی فقط در ۸۰ درصد از مواقع توانسته‌اند وقوع بارش را به‌درستی شبیه‌سازی نمایند، درحالی‌که مدل ریز مقیاس سازی SDSM قادر به شبیه‌سازی بهتر مقادیر بارش روزانه بوده است (۱۵).

آیسون و همکاران (۲۰۰۴) تأثیر تغییر اقلیم را بر وضعیت تناوب سیلاب در کشور انگلستان تحت خروجی‌های مدل گردش عمومی HadRM3H RCM و سناریوی انتشار A۲ مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان داد که علی‌رغم کاهش متوسط سالانه بارش در حوضه‌ها (به‌استثنای یک حوضه) در بیشتر دوره‌های بازگشت، تناوب سیلاب‌ها افزایش یافته است. همچنین برای تعدادی حوضه واقع در جنوب و شرق انگلستان علی‌رغم افزایش بارش حداکثر و بارش زمستانه، کاهش‌هایی در پیک سیلاب نشان داده شده است. همچنین طبق نتایج این تحقیق حوضه‌های شمالی و غربی در چند مورد بیش از ۵۰ درصد افزایش پیک سیلاب در دوره بازگشت ۵۰ ساله نشان می‌دهد (۵).

سید قاسمی و همکاران (۱۳۸۵) آثار تغییر اقلیم ناشی از گازهای گلخانه‌ای را در جریان زاینده‌رود در دهه‌های آبی مورد ارزیابی قرار دادند. اجزای هیدرولوژیک مورد استفاده در این تحقیق عبارتند از نتایج به‌دست آمده از کوچک‌مقیاس کردن خروجی‌های مدل GCM که به‌عنوان ورودی‌های مدل هیدرولوژیک SWAT مورد استفاده قرار گرفته است. با استفاده از این نرم‌افزار تغییرات رواناب این حوضه برای دو دوره ۳۰ ساله ۲۰۲۱-۲۰۵۰ میلادی (آینده نزدیک) و ۲۰۷۱-۲۱۰۰

طولانی مدت اقلیم فعلی و آتی استفاده کرده است. در این مطالعه همچنین از مدل پیوسته مفهومی بارش - رواناب ARNO برای شبیه سازی جریان رودخانه استفاده شده است. در نهایت اثر تغییر اقلیم بر سیلاب های حوضه پاتاوه، تحت سناریوهای A1B، B1 و A2، در دوره های ۲۰۳۳-۲۰۰۷، ۲۰۶۳-۲۰۳۷ و ۲۰۹۳-۲۰۶۷، ارزیابی شد. نتایج حاکی از افزایش قابل توجه بزرگی سیلاب های حوضه پاتاوه، در دوره های بازگشت مختلف، در اثر تغییر اقلیم است (۲).

همان گونه که اشاره شد، تغییر اقلیم با تأثیر بر میزان رواناب و سایر فرآیندهای هیدرولوژیک، کیفیت آب و دسترسی به آب سالم را تحت تأثیر قرار می دهد، لذا آنالیز اثرات تغییر اقلیم بر رواناب در دوره های آتی در راستای مدیریت صحیح منابع آب و ارائه راهکارهای مدیریتی مناسب ضروری به نظر می رسد. حوضه آبخیز بازفت که در شمال غرب استان چهارمحال و بختیاری واقع شده، به دلیل وضعیت خاص توپوگرافیکی و موقعیت جغرافیایی خود سهم قابل توجهی در تولید رواناب در منطقه دارد. هدف از مطالعه حاضر نیز استفاده از داده های مدل اقلیمی HadCM3 تحت سناریوهای انتشار A2 و B2 برای در نظر گرفتن عدم قطعیت های موجود در آنالیز اثرات تغییر اقلیم است. سپس این داده ها با استفاده از مدل آماری Statistical Downscaling Model (SDSM) در مدل هیدرولوژیک Water and Energy Transfer between Soil, Plant and Atmosphere (WetSpa) به منظور شبیه سازی رواناب در حوضه آبخیز بازفت به کار رفته است.

مواد و روش ها

معرفی منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه حوضه آبخیز بازفت است که با مساحت ۲۱۳۳ کیلومتر مربع در شمال غرب استان چهارمحال و بختیاری و بین طول جغرافیایی ۵۰° ۳۴' ۴۹" تا ۳۰° ۳۰' ۵۰" شرقی و عرض جغرافیایی ۵۶° ۳۷' ۳۱" تا ۳۲° ۳۹' ۱۶" شمالی واقع شده است (شکل ۱). متوسط بارش سالانه حوضه حدود ۹۶۶

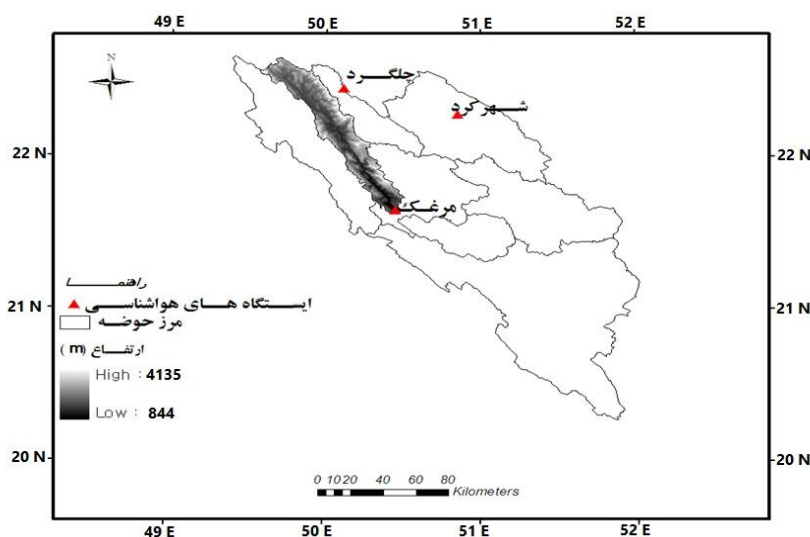
میلادی (آینده دور) برای دو سناریوی A2 و B2 شبیه سازی شده است. نتایج شبیه سازی در هر دو دوره کاهش جریان در ماه های آوریل و می، انتقال پیک جریان از ماه های مارس و آوریل به ماه های ژانویه و مارس را نشان می دهد (۳).

هریچه و همکاران (۲۰۰۷)، به بررسی اثر تغییر اقلیم بر منابع آب حوضه های آبخیز کشور لبنان پرداختند و به این نتیجه رسیدند که با استفاده از مدل بارش رواناب MEDOR و مدل های اقلیمی، به ازای افزایش ۲ درجه سانتی گراد به دمای محیط، حداکثر دبی جریان دو ماه زودتر اتفاق می افتد و دوره های خشک هم ۱۵ روز تا یک ماه زودتر اتفاق خواهد افتاد (۱۶).

کیم و همکاران (۲۰۱۱) از مدل نیمه توزیعی هیدرولوژیک زنجیره مارکوف برای تولید سناریوی تغییر اقلیم در حوضه رودخانه هان در چین طی دوره ۲۰۹۹-۲۰۰۱ استفاده نمودند. نتایج به دست آمده حاکی از کاهش جریان در ماه های می و جولای و احتمال افزایش جریان طی آگوست تا آوریل می باشد. حداکثر میزان افزایش نیز برابر ۴۰٪ و مربوط به ماه سپتامبر است (۱۸).

چن و همکاران (۲۰۱۱) به تحلیل عدم قطعیت روش های مختلف ریز مقیاس سازی در مطالعه اثرات تغییر اقلیم بر هیدرولوژی در حوضه رودخانه کبک پرداختند. در این مطالعه مدل چرخش عمومی، ۳ سناریوی انتشار و ۶ روش ریز مقیاس سازی مورد استفاده قرار گرفت. دوره آماری پایه ۱۹۷۰-۱۹۹۹ با دوره آماری ۲۰۷۰-۲۰۹۹ از نظر میانگین آورد حوضه و زمان و مقدار پیک جریان مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج نشان دهنده افزایش جریان در فصل زمستان و کاهش جریان در طول فصل تابستان بود. روش ریز مقیاس سازی آماری افزایش دمای بیشتری را در مقایسه با سایر روش ها پیش بینی نمود و روش های مختلف در ریز مقیاس سازی بارش تفاوت معنی داری را با یکدیگر نشان ندادند (۱۰).

خزائی (۱۳۹۱) از یک مولد اقلیمی روزانه جدید برای ریز مقیاس سازی خروجی های GCM و تولید سری های پیوسته



شکل ۱. موقعیت حوضه آبخیز بازفت و ایستگاه‌های مورد استفاده در استان چهارمحال و بختیاری

هواشناسی با استفاده از ترکیب دو روش احتمالاتی و رگرسیونی انجام می‌گیرد، لذا در طبقه‌بندی مدل‌های مختلف ریز مقیاس سازی، مدل آماری ریز مقیاس سازی یکی از بهترین مدل‌ها است. در این مدل برای هر ماه از سال یک مدل رگرسیون خطی چند متغیره بین متغیرهای پیش‌بینی کننده بزرگ مقیاس منتخب (متغیرهای مستقل) و متغیر پیش‌بینی شونده (بارش و یا دما)، به‌عنوان متغیر وابسته، تدوین می‌گردد. پیش‌بینی کننده‌های بزرگ مقیاس مناسب با استفاده از تحلیل‌های همبستگی بین متغیرهای پیش‌بینی کننده، همبستگی جزئی بین پیش‌بینی کننده‌ها و پیش‌بینی شونده‌ها و همچنین با توجه به حساسیت فیزیکی میان پیش‌بینی کننده‌ها و پیش‌بینی شونده‌ها، در محدوده حوضه مطالعاتی، انتخاب می‌شوند (۲۹).

معادله‌هایی که در این مدل مورد استفاده قرار می‌گیرد، به دو بخش معادله‌های وقوع پیش‌بینی شونده‌ها (بارش) و معادله‌های محاسبه مقدار پیش‌بینی شونده‌ها (دما و بارش) به شرح زیر تقسیم می‌شوند:

معادله وقوع بارش

در این مدل بارش به صورت یک فرآیند شرطی مدل می‌شود، به این صورت که مقادیر بارش با روزهای تر دارای همبستگی

میلی متر، متوسط دمای سالانه برابر ۱۰/۴ درجه سلسیوس، شیب متوسط حوضه حدود ۴۵ درصد، ارتفاع حداکثر ۴۱۳۵ متر و ارتفاع حداقل ۸۳۴ متر است (۴). از نظر خاک‌شناسی، بافت‌های غالب حوضه شامل بافت سیلتی لومی و رسی لومی بوده و بافت‌های دیگر نظیر رسی، لومی و شنی لومی نیز در این حوضه مشاهده می‌شود. کاربری غالب حوضه مرتع بوده و کاربری جنگل و اراضی کشاورزی نیز از کاربری‌های عمده این حوضه است. در این مطالعه، از آمار و اطلاعات بارش روزانه ایستگاه‌های مرغک و چلگرد، آمار دمای متوسط روزانه ایستگاه‌های مرغک و شهرکرد و آمار دبی روزانه ایستگاه هیدرومتری مرغک استفاده شده است. موقعیت این ایستگاه‌ها در شکل (۱) نشان داده شده است.

مدل ریز مقیاس سازی SDSM

مدل آماری ریز مقیاس سازی توسط ویلی و داوسون (۲۰۰۷) به‌عنوان ابزاری برای ریز مقیاس کردن به روش آماری توسعه یافته است. مبنای این مدل رگرسیون چند متغیره است و برای پیش‌بینی پارامترهای اقلیمی چون بارش و دما در دراز مدت با توجه به سیگنال‌های بزرگ مقیاس اقلیمی استفاده می‌شود. از آنجا که در مدل ریز مقیاس سازی آماری ساخت داده‌های

مدل هیدرولوژیک WetSpa

در این مطالعه از مدل WetSpa برای شبیه‌سازی رواناب استفاده شده است. مدل WetSpa یک مدل هیدرولوژیک توزیعی با پایه فیزیکی است که برای پیش‌بینی انتقال آب و انرژی بین خاک، گیاهان و اتمسفر در مقیاس منطقه‌ای و حوضه‌ای و بازه زمانی روزانه به کار می‌رود. این مدل اولین بار توسط ونگ و همکاران ابداع (۲۸) و سپس توسط دی اسمت و همکاران (۱۴) و لئو و همکاران (۲۰) برای پیش‌بینی سیل توسعه یافت. در این مدل از داده‌های بارش، دمای متوسط و تبخیر و تعرق پتانسیل در مقیاس روزانه و همچنین نقشه‌های رقمی ارتفاع، کاربری اراضی و بافت خاک به‌عنوان اطلاعات ورودی استفاده می‌شود.

این مدل سیستم هیدرولوژیک حوضه را که متشکل از اتمسفر، تاج پوشش، منطقه ریشه، منطقه انتقال و منطقه اشباع است، مفهومی می‌کند. به‌منظور مقابله با عدم همگنی، حوضه به تعدادی سلول تقسیم می‌شود. هر سلول نیز به خاک لخت و قسمت دارای پوشش تقسیم می‌گردد که برای هر قسمت تعادل آب و انرژی در نظر گرفته می‌شود. حرکت آب در خاک به صورت جریان عمودی یک بعدی ساده شده است که شامل نفوذ سطحی، نفوذ عمقی و صعود موینگی در ناحیه غیراشباع و تغذیه آب‌های زیرزمینی است. در این مدل رواناب کل در هر پیکسل ترکیبی از مجموع رواناب سطحی، جریان داخلی و جریان زیرزمینی است (۲۱).

در این مطالعه، واسنجی و اعتبارسنجی مدل با استفاده از داده‌های مربوط به بازه زمانی ۱۹۸۱ تا ۱۹۸۴ و ۱۹۸۵ تا ۱۹۸۷ و با تعدیل پارامترهای عمومی مدل انجام شد.

نتایج

واسنجی و اعتبارسنجی مدل WetSpa

واسنجی مدل WetSpa با تغییر مقادیر اولیه مربوط به ۱۱ پارامتر عمومی مدل انجام می‌شود. جدول (۱) مقادیر تعیین شده نهایی این پارامترها را نشان می‌دهد.

خواهد شد که روزهای تر به نوبه خود با پیش‌بینی کننده‌های جوی در مقیاس منطقه‌ای دارای همبستگی هستند. در این مدل روزهای تر به صورت روزهایی که میزان بارش در آن روز غیر صفر است، یعنی به‌عنوان مثال دارای مقدار ۰/۳ میلی‌متر و یا بیشتر از آن هستند، تعریف می‌شوند. لذا با توجه به این که دما یک فرآیند غیرشرطی است، از معادله (۱) تنها جهت محاسبه احتمال وقوع بارش استفاده می‌شود.

$$\omega_i = \alpha_i + \sum_{j=1}^n \alpha_j u_i^{(j)} \quad [1]$$

طبق رابطه فوق، اگر $\omega_i \leq \pi_i$ آنگاه بارش اتفاق می‌افتد که در آن ω_i احتمال وقوع بارش در روز i ام، $iu_i^{(j)}$ مقدار نرمال شده پیش‌بینی کننده‌ها، α_j ضریب رگرسیون و π_i یک متغیر تصادفی است (۲۹).

معادله محاسبه مقدار بارش یا دما

در این مدل جهت محاسبه مقادیر بارش و دمای از رابطه زیر استفاده می‌شود:

$$Z_i = \beta_0 + \sum_{j=1}^n \beta_j u_i^{(j)} + \varepsilon \quad [2]$$

که در آن Z_i مقدار پیش‌بینی شونده، ε مقدار خطا، β_j ضریب رگرسیون خطی و $iu_i^{(j)}$ مقدار نرمال شده پیش‌بینی کننده‌ها است. مقدار پیش‌بینی شونده‌ها با توجه به رابطه (۳) محاسبه می‌شود:

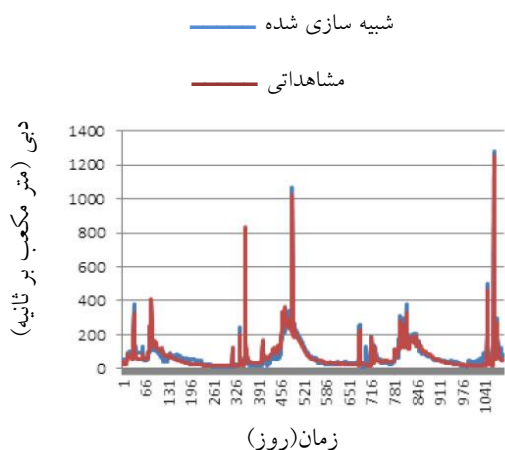
$$Z = \Phi^{-1}(F(v_i)) \quad [3]$$

که در آن y_i مقدار بارش و یا دمای روزانه، $\Phi^{-1}(F(v_i))$ تابع توزیع تجمعی نرمال از $F(y_i)$ و $F(y_i)$ تابع توزیع تجربی از y_i است (۲۹).

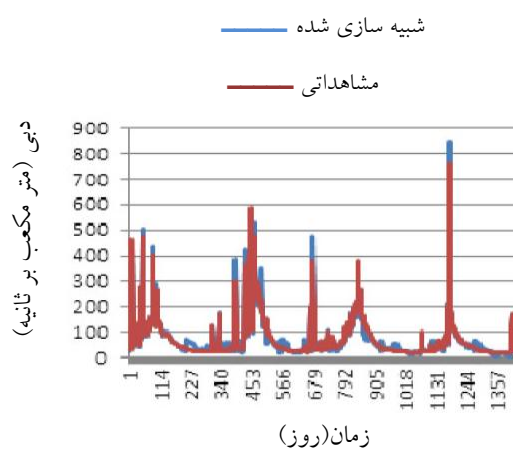
در این مطالعه بازه زمانی ۱۹۷۱ تا ۲۰۰۰ به‌عنوان دوره پایه مدل در نظر گرفته شد. بدین صورت که بازه ۱۹۷۱ تا ۱۹۹۵ برای واسنجی و بازه ۱۹۹۶ تا ۲۰۰۰ برای صحت‌سنجی مورد استفاده قرار گرفت. برای دستیابی به نتایج دقیق‌تر، تعداد ۲۰ سری پیش‌بینی شده برای دوره‌های آتی تهیه و میانگین مقادیر روزانه این سری‌ها برای بررسی‌های بعدی انتخاب گردید.

جدول ۱. پارامترهای عمومی مدل و مقادیر تعیین شده طی واسنجی

مقدار واسنجی شده	علامت	پارامتر
۰/۱	Ki	فاکتور جریان زیر سطحی (-)
۰/۰۱۶	Kg	ضریب افت آب زیرزمینی (d^{-1})
۱/۲	Kss	رطوبت اولیه خاک (-)
۰/۱	kep	فاکتور تصحیح تبخیر و تعرق پتانسیل (-)
۱۰۰	°G	ذخیره آب زیرزمینی اولیه (mm)
۲۰۰۰	Gmax	حداکثر ذخیره آب زیرزمینی (mm)
۱/۱	°T	ضریب درجه حرارت آستانه ($^{\circ}C$)
۱/۱	ksnow	ضریب درجه روز دما ($mm/^{\circ}C/day$)
۰/۱	kraim	ضریب درجه روز بارش ($mm/mm/^{\circ}C/day$)
۷	krun	توان رواناب سطحی (-)
۱۶۰	pmax	حداکثر شدت بارش (mm)



شکل ۳. مقایسه هیدرو گراف های شبیه سازی شده و مشاهداتی طی دوره اعتبارسنجی



شکل ۴. مقایسه هیدرو گراف های شبیه سازی شده و مشاهداتی طی دوره واسنجی

و همچنین با توجه به مقادیر معیارهای ارزیابی در می یابیم که مدل توانسته فرآیندهای هیدرولوژیک حوضه را به خوبی شبیه سازی نماید و بنابراین برای شبیه سازی رواناب در دوره های آبی مناسب است؛ لذا داده های اقلیمی ریزمقیاس شده برای شبیه سازی های آبی به مدل وارد و نتایج ارزیابی گردید. در ادامه نتایج حاصل از واسنجی مدل ریزمقیاس نمایی و بررسی اثر تغییر اقلیم بر بارش و دما ارائه شده و سپس رواناب شبیه سازی شده توسط مدل WetSpa مورد

پس از تغییر مقادیر پارامترها برای دوره واسنجی، مدل مجدداً اجرا و نتایج شبیه سازی با مقادیر مشاهداتی به صورت گرافیکی و آماری مقایسه گردید. شکل (۲) و (۳) هیدروگراف های شبیه سازی شده و مشاهداتی را برای دوره واسنجی و اعتبارسنجی نشان می دهد. جدول (۲) نیز مقادیر معیارهای ارزیابی کارایی مدل را طی فرآیند واسنجی و اعتبارسنجی ارائه می دهد. از مقایسه هیدرو گراف های مشاهداتی و شبیه سازی شده

جدول ۲. مقادیر معیارهای ارزیابی کارایی مدل طی واسنجی و اعتبارسنجی

اعتبارسنجی	واسنجی	معیار
۰/۶۵	۰/۶۳	ناش - ساتکلیف (Nash-Sutcliffe)
۰/۷۵	۰/۷۱	ناش - ساتکلیف برای جریان‌های کم (Nash-Sutcliffe for low flow)
۰/۶۵	۰/۶۵	ناش - ساتکلیف برای جریان‌های زیاد (Nash-Sutcliffe for high flow)
۰/۰۷۱	۰/۰۹۵	اریبی (Bias)

جدول ۳. پیش‌بینی کننده‌های انتخابی برای بارش در ایستگاه مرغک

ضریب همبستگی	پیش‌بینی کننده
۰/۳۷۵	قدرت جریان هوا در ۵۰۰ هکتوپاسکال
۰/۳۶۷	سرعت نصف‌النهاری در ۵۰۰ هکتوپاسکال
۰/۳۵۶	رطوبت نسبی در ۸۵۰ هکتوپاسکال
۰/۳۳۳	رطوبت نسبی در نزدیکی سطح

جدول ۴. پیش‌بینی کننده‌های انتخابی برای بارش در ایستگاه چلگرد

ضریب همبستگی	پیش‌بینی کننده
۰/۳۰۵	قدرت جریان هوا در ۵۰۰ هکتوپاسکال
۰/۳۵۹	سرعت نصف‌النهاری در ۵۰۰ هکتوپاسکال
۰/۳۹۷	رطوبت نسبی در ۸۵۰ هکتوپاسکال
۰/۳۹۸	رطوبت نسبی در نزدیکی سطح

جدول ۵. پیش‌بینی کننده‌های انتخابی برای دمای حداقل در ایستگاه مرغک

ضریب همبستگی	پیش‌بینی کننده
۰/۸۴۵	میانگین فشار در سطح دریا (Mean sea level pressure)
۰/۸۲۵	ارتفاع ژئوپتانسیل در ۵۰۰ هکتوپاسکال (۵۰۰ hPa geopotential height)
۰/۹۱۸	میانگین دما در ارتفاع ۲ متری (Mean temperature at (m ²))

بررسی قرار گرفت.

نصف النهاری در ۵۰۰، رطوبت نسبی در ۸۵۰ هکتوپاسکال و رطوبت نسبی در نزدیکی سطح انتخاب گردیدند. مقادیر ضرایب همبستگی بین پیش‌بینی کننده‌ها و بارش برای این دو ایستگاه در جدول‌های (۳) و (۴) ارائه شده است.

ضرایب همبستگی پیش‌بینی کننده‌ها و متغیر دما برای دو ایستگاه شهرکرد و مرغک نیز در جدول‌های (۵) تا (۸) آورده شده است.

واسنجی و صحت‌سنجی مدل SDSM

برای واسنجی و صحت‌سنجی مدل، انتخاب پیش‌بینی کننده‌های مؤثر از اهمیت زیادی برخوردار است. برای بارش در ایستگاه‌های مرغک و چلگرد طبق نتایج ضرایب همبستگی، ۴ پیش‌بینی کننده قدرت جریان هوا در ۵۰۰ هکتوپاسکال، سرعت

جدول ۶. پیش‌بینی کننده‌های انتخابی برای دمای حداکثر در ایستگاه مرغک

ضریب همبستگی	پیش‌بینی کننده
۰/۸۷۹	رطوبت نسبی در نزدیکی سطح
۰/۸۸۰	ارتفاع ژئوپتانسیل در ۵۰۰ هکتوپاسکال
۰/۹۳۹	میانگین دما در ارتفاع ۲ متری

جدول ۷. پیش‌بینی کننده‌های انتخابی برای دمای حداقل در ایستگاه شهرکرد

ضریب همبستگی	پیش‌بینی کننده
۰/۷۰۳	میانگین فشار در سطح دریا
۰/۷۴۱	ارتفاع ژئوپتانسیل در ۵۰۰ هکتوپاسکال
۰/۸۲۵	میانگین دما در ارتفاع ۲ متری

جدول ۸. پیش‌بینی کننده‌های انتخابی برای دمای حداکثر در ایستگاه شهرکرد

ضریب همبستگی	پیش‌بینی کننده
۰/۷۲۷	میانگین فشار در سطح دریا
۰/۸۱۶	ارتفاع ژئوپتانسیل در ۵۰۰ هکتوپاسکال
۰/۸۷۸	میانگین دما در ارتفاع ۲ متری

جدول ۹. نتایج واسنجی بارش و دما در ایستگاه‌های مورد استفاده

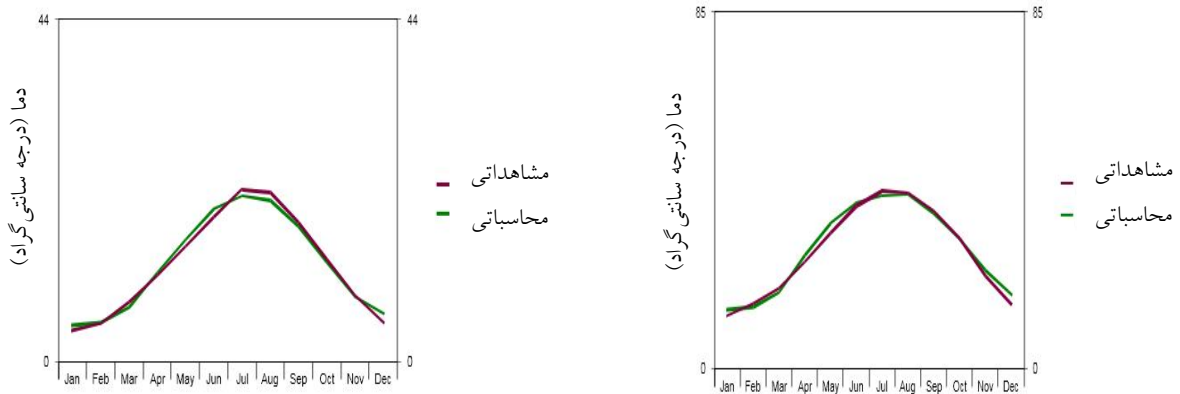
ایستگاه	پارامتر	R ^۲	SE
	بارش	۰/۳۱	۰/۳۱
مرغک	دمای حداقل	۰/۸۵	۲/۷۷
	دمای حداکثر	۰/۸۹	۳/۶۵
چلگرد	بارش	۰/۳۱	۰/۳۳
	دمای حداقل	۰/۶۸	۴/۵۰
شهرکرد	دمای حداکثر	۰/۷۸	۵/۱۲

گردید. بدین ترتیب که داده‌های ریزمقیاس شده دما و بارش برای آینده نزدیک و آینده دور به مدل هیدرولوژیک معرفی و رواناب در دوره‌های آتی شبیه‌سازی شد. به دلیل تفاوت ناچیز میزان رواناب شبیه‌سازی شده تحت ۲ سناریوی مورد استفاده، تنها رواناب شبیه‌سازی شده برای آینده نزدیک تحت سناریوی A۲ نشان داده شده است که در واقع بیانگر رواناب بازه ۲۰۲۰-۲۰۵۰ است (شکل ۸). در شکل‌های (۹) و (۱۰) نیز دبی متوسط ماهانه و سالانه

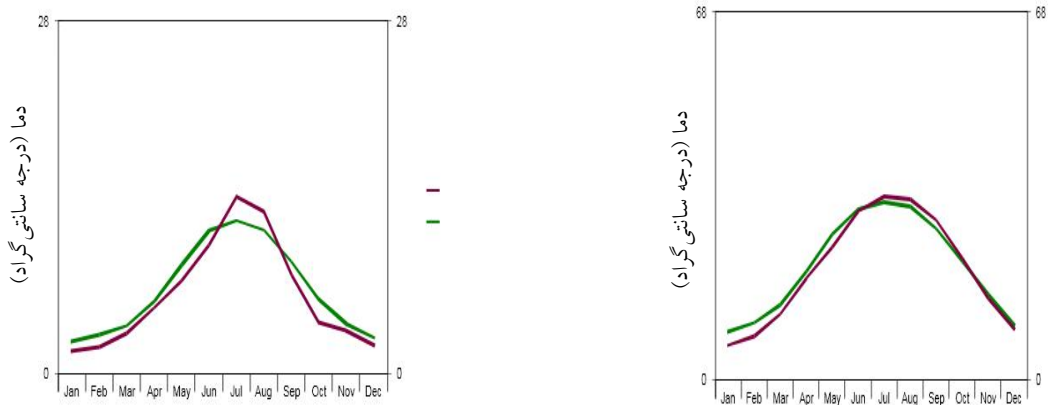
جدول (۹) مقادیر ضرایب تبیین (R^۲) و خطای استاندارد را برای دوره واسنجی نشان می‌دهد. نتایج حاصل از مقایسه داده‌های ریزمقیاس شده توسط مدل و داده‌های مشاهداتی برای دوره صحت‌سنجی نیز در شکل‌های (۴) تا (۷) نشان داده شده است.

اثر تغییر اقلیم بر رواناب سطحی

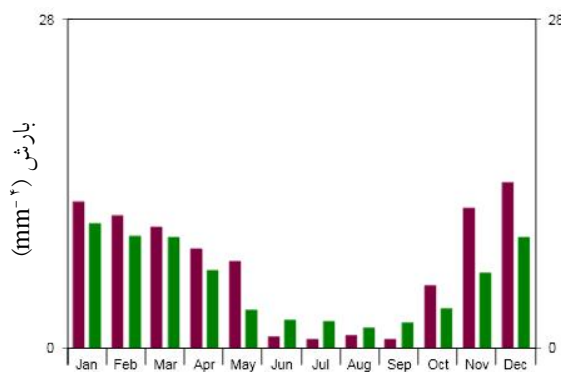
با استفاده از سناریوهای ریزمقیاس شده و مدل کالیبره شده برای حوضه مورد مطالعه، اثر تغییر اقلیم بر رواناب ارزیابی



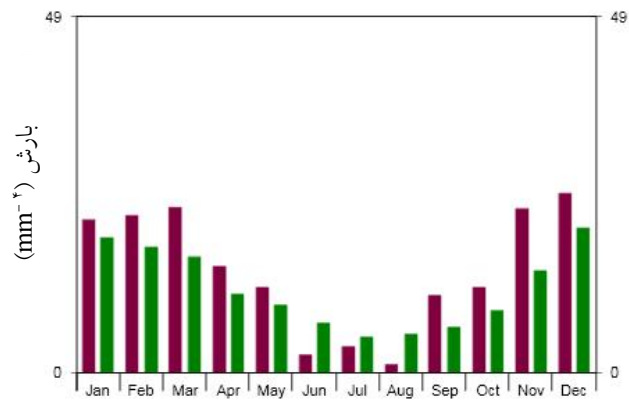
شکل ۴. (رنگی در نسخه الکترونیکی) مقایسه مقادیر مشاهداتی و محاسباتی میانگین ماهانه دمای حداقل و حداکثر ایستگاه مرغک در طول دوره صحت‌سنجی



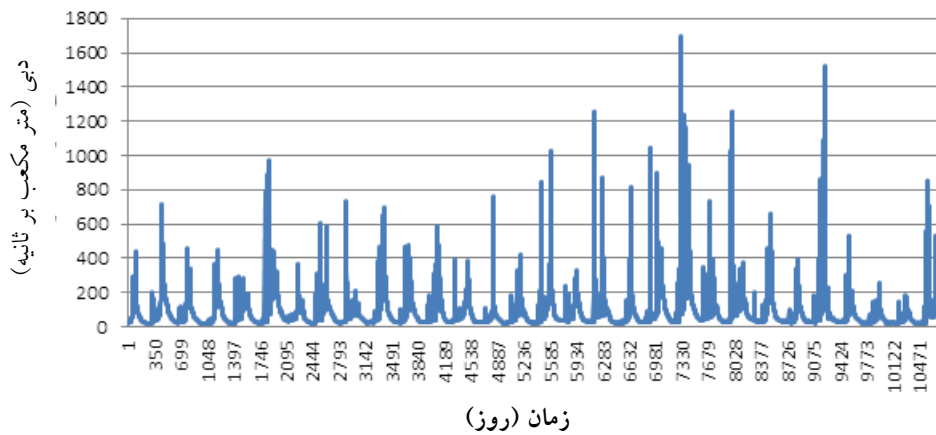
شکل ۵. (رنگی در نسخه الکترونیکی) مقایسه مقادیر مشاهداتی و محاسباتی میانگین ماهانه دمای حداقل و حداکثر ایستگاه شهرکرد در طول دوره صحت‌سنجی



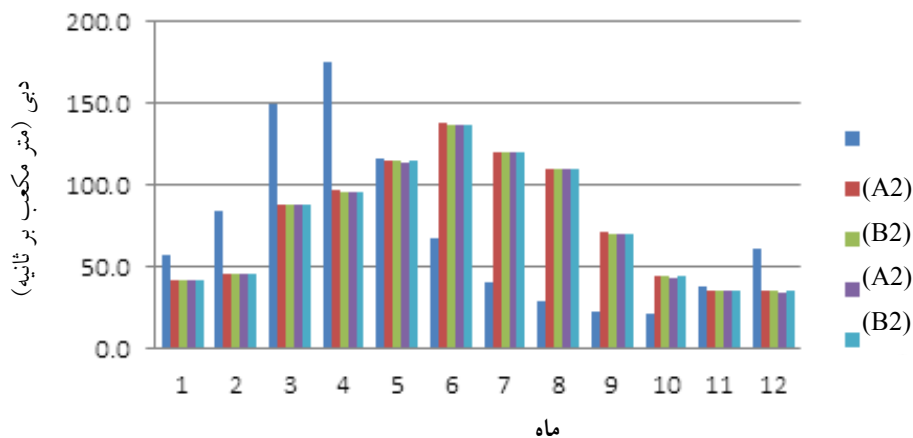
شکل ۶. (رنگی در نسخه الکترونیکی) مقایسه مقادیر مشاهداتی و محاسباتی میانگین ماهانه بارش ایستگاه مرغک در طول دوره صحت‌سنجی



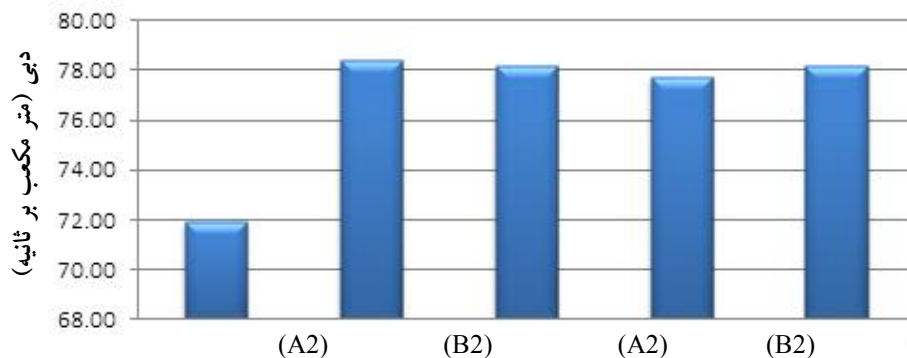
شکل ۷. (رنگی در نسخه الکترونیکی) مقایسه مقادیر مشاهداتی و محاسباتی میانگین ماهانه بارش ایستگاه چلگرد در طول دوره صحت سنجی



شکل ۸. هیدروگراف شبیه‌سازی شده برای آینده نزدیک تحت سناریوی A2



شکل ۹. تغییرات رواناب ماهانه تحت سناریوی A2 و B2 نسبت به دوره مشاهداتی



شکل ۱۰. تغییرات رواناب سالانه تحت سناریوی A2 و B2 نسبت به دوره مشاهداتی

برای دوره پایه، آینده نزدیک و آینده دور ترسیم شده است.

بحث

این تحقیق با اهداف اولیه ارزیابی توانایی مدل هیدرولوژیک توزیعی WetSpa در شبیه‌سازی رواناب، ارزیابی مدل آماری ریز مقیاس سازی SDSM در تولید داده‌های اقلیمی و با هدف اصلی بررسی اثر تغییر اقلیم بر رواناب سطحی انجام گرفت. در شبیه‌سازی رواناب با استفاده از مدل WetSpa، با توجه به معیارهای آماری حاصل طی واسنجی و اعتبارسنجی عملکرد مدل در برآورد رواناب ارزیابی گردید. طبق مطالعه پورتا و همکاران (۲۰۱۰) ضریب ناش-ساتکلیف بین ۰/۶۵-۰/۵۰ نشان‌دهنده عملکرد خوب و مقادیر ۰/۸۵-۰/۶۵ برای این ضریب بیانگر عملکرد خیلی خوب مدل است (۲۴). در منطقه مورد مطالعه، ضریب ناش-ساتکلیف در مرحله واسنجی و اعتبارسنجی به ترتیب برابر ۰/۶۳ و ۰/۶۵ حاصل گردید. بنابراین طبق ضرایب به دست آمده، می‌توان عملکرد مدل را طی واسنجی خوب و طی اعتبارسنجی خیلی خوب ارزیابی کرد. این مقادیر با نتایج حاصل از شبیه‌سازی رواناب در بسیاری از مطالعات مطابقت دارد (۶، ۷ و ۲۲). بررسی نتایج مراحل واسنجی و اعتبارسنجی نشان داد در این حوضه به دلیل کوهستانی و پرشیب بودن بخش قابل توجهی از بارش به رواناب تبدیل می‌گردد که این امر می‌تواند زمینه‌ساز وقوع سیلاب‌های بسیاری در منطقه باشد.

علی‌رغم برخی مزایای مدل WetSpa نظیر داشتن ساختار توزیعی، ارتباط با سامانه اطلاعات جغرافیایی برای تولید نقشه‌های توزیعی و نیاز به ورودی‌های کم برای اجرا (کاربری آرازی، مدل رقومی ارتفاع و نوع خاک)، این مدل معایبی نیز دارد. به طور مثال یکی از معایب قابل توجه مدل استفاده از روش تیسن است. زیرا روش تیسن به خوبی توزیع بارش را در حوضه برآورد نمی‌کند، به‌ویژه در شرایطی که تعداد ایستگاه‌های مورد استفاده و یا میزان بارش اندک باشد. به عبارتی هرچه ایستگاه‌ها معرف بهتری از بارش و دمای حوضه باشند، نتایج دقیق‌تری حاصل می‌شود. در این تحقیق به دلیل کم بودن تعداد ایستگاه‌ها، وجود تنها یک ایستگاه داخل حوضه و تغییرات شدید ارتفاع نتایج تا حدودی با خطا همراه بوده است. بنابراین با توجه به این‌که در روش تیسن توزیع بارش به خوبی نشان داده نمی‌شود و بنابراین در مناطق کوهستانی دارای تغییرات ارتفاعی زیاد با خطا همراه خواهد بود، بهتر است در این مناطق از روش‌های بهتری مانند منحنی‌های هم باران استفاده کرد. در استفاده از مدل‌های توزیعی، دقت نقشه‌ها و اطلاعات مورد نیاز مدل از اهمیت بالایی برخوردار است. زیرا صحت و دقت نتایج این مدل‌ها به دقت ورودی‌های آنها به‌ویژه دقت نقشه‌های رقومی بستگی دارد و هرچه دقت این نقشه‌ها بیشتر باشد مدل نتایج بهتری ارائه می‌دهد.

برای ارزیابی مدل SDSM از آمار بارش و دمای حداقل و حداکثر دوره ۲۰۰۰-۱۹۷۱ استفاده شد. با توجه به شکل‌های

وقوع چنین بارش‌هایی باعث کاهش نفوذپذیری خاک می‌شود، در این شرایط رواناب سطحی افزایش خواهد یافت. در مطالعه لی و همکاران (۲۰۱۳) نیز افزایش رواناب سالانه برای زیر حوضه‌های مورد مطالعه پیش‌بینی شده است (۱۹).

نتیجه‌گیری

به‌طور کلی، مطالعات انجام شده در حوضه آبخیز بازفت و نتایج حاصل از سناریوهای مورد استفاده، بیانگر این است که این حوضه به سمت اقلیمی با بارش کمتر و دمای بیشتر پیش می‌رود. بنابراین، تحت شرایط تغییر اقلیم پیش‌بینی شده و با توجه به تغییرات مورد انتظار در دما و بارش، احتمالاً در آینده بیشتر شاهد بارش‌های کوتاه مدت با شدت زیاد بوده که باعث کاهش نفوذپذیری و ایجاد رواناب بیشتر می‌گردد. به‌همین دلیل باید اقدامات مدیریتی صحیح در این حوضه با در نظر گرفتن اثرات تغییر اقلیم انجام گیرد و راهکارهای مناسبی برای ذخیره و استفاده از رواناب سطحی به‌عنوان منبعی برای تأمین بخشی از نیازهای آبی ارائه گردد.

(۴) تا (۷)، مقایسه پارامترهای اقلیمی تولید شده با داده‌های مشاهداتی بیانگر این امر بود که تفاوت معنی‌داری بین این دو سری از داده‌ها وجود ندارد. نتایج مراحل واسنجی و اعتبارسنجی مدل SDSM نشان داد ریز مقیاس سازی داده‌های دما با دقت بسیار بالایی انجام گرفته، ولی ریز مقیاس سازی داده‌های بارش با عدم قطعیت بیشتری همراه بوده است. مطالعات خرمیان نیز بیانگر خطای بیشتر در ریز مقیاس سازی داده‌های بارش می‌باشد (۱). به‌رحال نتایج ریز مقیاس سازی هر دو سناریوی مورد استفاده بیانگر افزایش دما و کاهش بارش در دو دوره آینده نزدیک و دور است.

نتایج بررسی اثر تغییر اقلیم بر رواناب نشان داد علی‌رغم افزایش دما و کاهش بارش، به‌طور کلی شاهد افزایش رواناب در آینده بوده و بیشترین میزان افزایش حدود ۹٪ در آینده نزدیک و تحت سناریوی A۲ پیش‌بینی شد. این امر می‌تواند به‌دلیل تغییر رژیم بارش در آینده رخ دهد. بنابراین طبق نتایج حاصل از این مطالعه، انتظار می‌رود در آینده حوضه با شرایط گرم و خشک‌تری مواجه شده و در نتیجه احتمال وقوع بارش‌های کوتاه مدت با شدت زیاد افزایش یابد. از آنجایی‌که

منابع مورد استفاده

۱. خرمیان، ا. ۱۳۹۱. بررسی اثرات تغییر اقلیم بر فرآیند تبدیل برف به رواناب در بالادست حوضه آبریز زاینده‌رود. پایان‌نامه کارشناسی ارشد عمران آب. دانشکده عمران. دانشگاه صنعتی اصفهان.
۲. خزائی، م. ر. ۱۳۹۱. بررسی اثر تغییر اقلیم بر فراوانی و بزرگی سیلاب‌ها. پایان‌نامه دکتری عمران آب. دانشکده مهندسی عمران. دانشگاه علم و صنعت.
۳. سیدقاسمی، س.، ا. ابریشمچی و م. تجربی. ۱۳۸۵. اثرات تغییرات جریان رودخانه زاینده‌رود بر اثر تغییر اقلیم. دومین کنفرانس مدیریت منابع آب. دانشگاه صنعتی اصفهان. ۳ تا ۴ بهمن ۱۳۸۵.
۴. مهندسین مشاور پارساب. ۱۳۷۴. *مطالعات شناسایی، توجیهی طرح آبخیزداری حوضه بازفت استان چهارمحال و بختیاری*. جلد سوم. مطالعات هیدرولوژی. معاونت آبخیزداری جهاد سازندگی، تهران.
5. Alison L. K., G. J. Richard and S. R. Nicholas. 2004. RCM rainfall for UK flood frequency estimation. II. Climate change results. *J. Hydrol.* 318: 163-172.
6. Bahremand, A., J. Corluy, Y. Liu, F. De Smedt, J. Poórová and L. Velcická. 2005. Stream flow simulation by WetSpa model in Hornad river basin, Slovakia. PP: 67-74. *In: van Alphen J, E. van Beek and M. Taal. (Eds.), Floods, from defense to management. Taylor-Francis. London.*
7. Bahremand, A., F. De Smedt, J. Corluy, Y. Liu, J. Poorova, L. Velcicka and E. Kunikova. 2007. WetSpa Model Application for Assessing Reforestation Impacts on Floods in Margecany–Hornad Watershed, Slovakia. *Water*

- Resour. Manag. 21 (8): 1373-1391.
8. Bastola, S., C. Murphy and J. Sweeney. 2011. The role of hydrological modelling uncertainties in climate change impact assessments of Irish river catchments. *Adv. Water Resour.* 34(5): 562-576.
 9. Charles, S. P., G. Fu and F. H. S. Chiew. 2007. A two-parameter climate elasticity of streamflow index to assess climate change effects on annual streamflow. *Water Resour. Res.* 43(11): 1-12
 10. Chen, J., F. P. Brissette and R. Leconte. 2011. Uncertainty of downscaling method in quantifying the impact of climate change on hydrology. *J. Hydrol.* 401(3-4): 190-202.
 11. Chiew, F. H. S. 2006. Estimation of rainfall elasticity of streamflow in Australia. *Hydrol. Sci. J.* 51(4): 613-625.
 12. Chiew, F.H.S., J. Teng, J. Vaze, D. A. Post, J. M. Perraud, D. G. C. Kirono and N. R. Viney. 2009. Estimating climate change impact on runoff across southeast Australia: Method, results, and implications of the modeling method. *Water Resour. Res.* 45(10): 2-17.
 13. Chiew, F. H. S., D. G. C. Kirono, D. M. Kent, A. J. Frost, S. P. Charles, B. Timbal, K. C. Nguyen, and G. Fu. 2010. Comparison of runoff modelled using rainfall from different downscaling methods for historical and future climates. *J. Hydrol.* 387(1): 10-23.
 14. De Smedt, F., Y. B. Liu and S. Gebremeskel. 2000. Hydrologic modeling on a catchment scale using GIS and remote sensed land use information. *Risk analysis II*. PP: 295-304. *In*: C.A. Brebbia (Ed.), *Risk Analysis II*, WTI press, Boston.
 15. Harpham, C. and R. Wilby. 2005. Multi-site downscaling of heavy daily precipitation occurrence and amounts. *J. Hydrol.* 312: 235-255.
 16. Hreiche, A., W. Najem and C. Bocquillon. 2007. Hydrological impact of climate change on Lebanese coastal rivers. *Hydrol. Sci. J.* 52(6): 637-647.
 17. Kay, A. L., H. N. Davies, V. A. Bell and R. G. Jones. 2009. Comparison of uncertainty sources for climate change impacts: flood frequency in England. *Clim. Chang.* 92(1-2): 41-63.
 18. Kim, B. S., B. K. Kim and H. H. Kwon. 2011. Assessment of the impact of climate change on the flow regime of the Han River basin using indicators of hydrologic alteration. *Hydrol. Process.* 25: 691-704.
 19. Li, F., Y. Zhang, Z. Xu, J. Teng, C. Liu, W. Liu and F. Mpelasoka. 2013. The impact of climate change on runoff in the southeastern Tibetan Plateau. *J. Hydrol.* 505: 188-201.
 20. Liu, Y. B., S. Gebremeske, F. De Smedt and L. Pfister. 2002. Flood prediction with the WetSpa model on catchment scale. PP: 499-507. *In*: Wu, et al. (Eds.), *Flood Defense 2002*. New York.
 21. Liu, Y. B. and F. De Smedt. 2004. *WetSpa Extension, A GIS-based hydrologic model for flood prediction and watershed management. Documentation and User Manual*. PP: 1-126. Department of Hydrology and Hydraulic Engineering, Vrije universiteit Brussel, Brussels, Belgium.
 22. Liu, Y. B., J. Corluy, A. Bahremand, F. De Smedt, J. Poorova and L. Velcicka. 2006. Simulation of Runoff and Phosphorus Transport in a Carpathian Catchment, Slovakia. *River Res. Appl.* 22: 1009-1022.
 23. Minville, M., F. Brissette and R. Leconte. 2008. Uncertainty of the impact of climate change on the hydrology of a nordic watershed. *J. Hydrol.* 358(1): 70-83.
 24. Porretta, L., J. Chormanski, S. Ignar, T. Okruszko, A. Brandyk, T. Szymczak and K. Krezalek. 2010. Evaluation and verification of the WetSpa model based on selected rural catchments in Poland. *J. Water Land Dev.* 14: 115-133.
 25. Sankarasubramanian, A., R. M. Vogel and J. F. Limburner. 2001. Climate elasticity of stream flow in the United States. *Water Resour. Res.* 37(6): 1771-1781.
 26. Teegavarapu, R. S. V. 2010. Modeling Climate Change Uncertainties in Water Resources Management Models. *Environ. Model. Softw.* 25(10): 1261-1265.
 27. Teng, J, V. Jai, F. H. S. Chiew, B. Wang and J.M. Perraud. 2012. Estimating the Relative Uncertainties Sourced from GCMs and Hydrological Models in Modeling Climate Change Impact on Runoff. *J. Hydrometeorol* 13(1): 122-139.
 28. Wang, Z., O. Batelaan and F. De Smedt. 1996. A distributed model for Water and Energy Transfer between Soil, Plants and Atmosphere. *Phys. Chem. Earth.* 21: 189-193.
 29. Wilby, R. L. and C. W. Dawson. 2007. *A decision support tool for the assessment of regional climate change impacts, User Manual, United Kingdom*. Available from: <http://co-ublic.lboro.ac.uk/coced/SDSM/SDSMManual.pdf>
 30. Wilby, R. L. and I. Harris. 2006. A framework for assessing uncertainties in climate change impacts: Low-flow scenarios for the River Thames, UK. *Water Resour. Res.* 42(2): 1-10.

Assessment the Impacts of Climate Change on Surface Runoff in Bazoft Watershed

P. Almasi^{1*}, S. Soltani¹, M. Goodarzi² and R. Modarres¹

(Received: June 18-2015 ; Accepted: April 17-2016)
DOI: 10.18869/acadpub.jstnar.20.78.39

Abstract

With regard to the confirmation of climate change in most regions of the world and its effects on different parts of the water cycle, knowledge of the status of water resources is necessary for proper management of resources and planning for the future. Hence many studies have been done in different areas with the aim of analyzing the impact of climate change on hydrological processes in the upcoming periods. In present research, the effect of climate change on surface runoff in Bazoft watershed has been studied. Bazoft watershed, located in North-West of Chahar Mahal & Bakhtiari province, has significant contribution in the production of water resources of the region due to its special topographical and geographical status. In this study, climatic model – HadCM3- and A2 and B2 emission scenarios have been used to assess uncertainty in forecasting climate change. For this purpose, a statistical model –SDSM- has been applied to downscale large- scale precipitation and temperature data and hydrological model –WetSpa- has been used to simulate runoff. After calibration of the hydrological model, downscaled precipitation and temperature data in near future (2020-2050) and far future (2070-2100) periods were introduced to WetSpa model and runoff was simulated for mentioned periods. Results of this study represent suitable performance of SDSM model in downscaling climatic data, especially minimum and maximum temperature. Also, performance evaluation of Wetspa model shows proper performance of this model for runoff simulation in Bazoft watershed, so that Nash- Sutcliffe efficiency during calibration and validation was 0.63 and 0.65, respectively. Moreover, assessing the amount of predicted runoff for future periods indicates an increase in annual runoff in the Bazoft watershed under both A2 and B2 scenarios.

Keywords: Bazoft watershed, climate change, SDSM model, surface runoff, WetSpa model

1. Division of Range and Watershed Management, Dept. of Natural Resour., Isf. Univ. of Technol., Isfahan, Iran.

2. Res. Institute for Soil Conservation and watershed Manage., Tehran. Iran.

*: Corresponding Author, Email: Parisa.almasi@gmail.com