

شبیه‌سازی پارامترهای مؤثر بر روند دبی جریان رودخانه با استفاده از مدل بارش-رواناب IHACRES در دوره‌های آتی (مطالعه موردی: رودخانه زولاچای)

مجید قربانی دایلاری^۱، صابره دربندی^۲، اسماعیل اسدی^{۳*}، مرتضی صمدیان^۴

۱. دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، علوم و مهندسی آب، دانشگاه تبریز

۲. دانشیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه تبریز

۳. استادیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه تبریز

۴. دانشجوی دکتری علوم و مهندسی منابع آب، دانشگاه تبریز و مدرس گروه عمران، مؤسسه آموزش عالی علم و فن ارومیه

(تاریخ دریافت ۱۳۹۹/۰۷/۰۷، تاریخ تصویب ۱۳۹۹/۱۱/۳۰)

چکیده

نظر به اهمیت آثار تغییر اقلیم بر منابع آبی، بررسی رفتار رودخانه به‌ویژه میزان آبدهی آن در دوره‌های آتی برای مدیریت منابع آب و ارائه راهکارهای سازگاری با پدیده تغییر اقلیم امری مفید و ضروری است. هدف از تحقیق حاضر، بررسی اثر پدیده تغییر اقلیم بر دبی رودخانه زولاچای واقع در استان آذربایجان غربی است. به این منظور، ابتدا با استفاده از مدل LARS-WG مقادیر بارش و دمای ایستگاه هواشناسی چهارپق علیا تحت سناریوهای مختلف از سال ۲۰۲۱ تا سال ۲۰۸۰ پیش‌بینی شد. سپس، بر اساس داده‌های ریزمقیاس‌شده بارش و دمای آینده، به کمک مدل بارش-رواناب IHACRES واسنجی و صحت‌سنجی شده حجم رواناب خروجی حوضه آبخیز در دوره‌های آتی شبیه‌سازی شد. نتایج پیش‌بینی رواناب طی دوره‌های اقلیمی آتی نشان داد متوسط تغییرات رواناب سالانه درازمدت طی دوره ۲۰۲۱-۲۰۸۰ به میزان ۱/۱۲ مترمکعب در ثانیه (۳۳/۳۴ درصد) تحت سناریوی RCP2.6، ۱/۱۷ مترمکعب در ثانیه (۳۳/۶۷ درصد) تحت سناریوی RCP4.5 و ۱/۳۷ مترمکعب در ثانیه (۳۹/۴۲ درصد) تحت سناریوی RCP8.5 نسبت به دوره پایه کاهش خواهد یافت.

کلیدواژگان: تغییر اقلیم، رودخانه زولاچای، مدل بارش-رواناب، LARS-WG، IHACRES.

مقدمه

اقلیم شرایط متوسط آب‌وهوایی است که در سال‌های اخیر با افزایش گازهای گلخانه‌ای در جو که باعث برهم خوردن توازن تابشی در درازمدت می‌شود را به عنوان پدیده تغییر اقلیم می‌توان معرفی کرد. تغییر اقلیم یکی از چالش‌های مهمی است که بخش‌های مختلف زندگی انسان را روی کره زمین تحت تأثیر قرار می‌دهد [۱]. بر اثر تغییر اقلیم متوسط متغیرهای آب‌وهوایی مانند دما و بارش ثابت نیست و در مناطق مختلف تغییر می‌کند. یکی از دلایل اصلی تغییر اقلیم، افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای در جو به دلیل صنعتی شدن و افزایش مصرف سوخت‌های فسیلی است [۲]. تغییرات اقلیم یکی از چالش‌های مهم کره زمین محسوب می‌شود. پدیده‌هایی مثل سیل‌های ویرانگر، خشکسالی‌های مداوم و گسترده، آتش‌سوزی‌ها، گرد و غبارها و غیره بخشی از پیامدهای تغییر اقلیم محسوب می‌شوند. برای پیش‌بینی اینکه جوامع بشری در آینده چه مقدار از گازهای گلخانه‌ای را وارد اتمسفر زمین کنند و به تبع آن، چه تغییری در سامانه اقلیم کره زمین رخ خواهد داد، معین و قطعی نیست. بنابراین، به صورت کاملاً غیرقطعی و تحت سناریوهای مختلفی ارائه شده است [۳]. بارندگی و دما، دو متغیر اساسی در هواشناسی هستند که در بررسی تغییر اقلیم کارکرد زیادی را ایفا می‌کنند که در سال‌های اخیر برای دانشمندان بسیاری به منظور شبیه‌سازی دما و بارندگی برای دوره‌های آینده از مدل‌های اقلیمی مختلفی استفاده می‌کنند [۴]. در سال‌های اخیر، مدل‌های گردش عمومی جو^۱ (GCM) به مدلی کارآمد برای ارزیابی تأثیر تغییرات اقلیمی بر اجزای چرخه هیدرولوژیک نظیر بارش - رواناب در بیشتر کشورها تبدیل شده است [۵]. مدل‌های گردش عمومی جو (GCM)، تغییرات اقلیمی مانند بارش و دما را در بعدهای مکانی و زمانی در مقیاس جهانی به طرز قابل قبولی پیش‌بینی کرده [۶] و همچنین، قادر به شبیه‌سازی با مقیاس‌های مختلف هستند، اما قدرت تفکیک مکانی و زمانی پایین، یکی از مشکلات اساسی این مدل‌ها به شمار می‌رود. به همین منظور، محققان تغییر اقلیم برای رفع این مشکل روش‌های گوناگونی ابداع کرده‌اند که قدرت تفکیک مکانی

و زمانی در حد بالایی را دارند که به این روش‌ها ریزمقیاس‌نمایی گویند. اصول تمامی روش‌های ریزمقیاس‌نمایی برپایه برقراری ارتباط بین متغیر مستقل و متغیرهای وابسته در مقیاس‌های منطقه‌ای، محلی و حتی نقطه‌ای است. متغیرهای مستقل در این بخش همان متغیرهای گردش عمومی جو یعنی رطوبت، فشار هوا، باد و غیره هستند و متغیرهای وابسته همان متغیرهای اقلیمی یعنی بارش، دما و غیره هستند [۷].

تا کنون در زمینه آثار تغییر اقلیم روی شاخص‌های دما، بارندگی و منابع آب سطحی رودخانه‌ها، پژوهش‌های زیادی از سوی محققان، صورت گرفته است. عثمان و همکاران (۲۰۱۴) در پژوهشی از مدل LARS-WG برای پیش‌بینی تغییرات بارش در دوره‌های آتی بر اساس خروجی هفت مدل گردش عمومی جو (GCM) تحت سناریوی SRA2 در کشور عراق استفاده کردند. نتایج نشان داد مدل LARS-WG کارایی مناسبی برای شبیه‌سازی بارش روزانه دارد. همچنین، نتایج پیش‌بینی بارش بیانگر روند افزایشی آن در فصل‌های زمستان و پاییز و روند کاهش بارش در فصل بهار را در آینده نشان می‌دهد [۸]. داگنت و دیس (۲۰۱۸) به منظور بررسی تغییرات اقلیمی حوضه آبخیز رودخانه نیل به کمک دو مدل ریزمقیاس‌نمایی LARS-WG و SDSM توانایی شبیه‌سازی و مقایسه خوبی را برای شبیه‌سازی متغیرهای آب‌وهوایی منطقه‌ای نشان داده‌اند. نتیجه ارزیابی نشان داد SDSM با استفاده از canESM2 CMIP5 GCM قادر به تولید دقیق‌تر و بلندمدت بارش ماهانه بود، اما LARS-WG در توزیع بارندگی روزانه در کل بازه زمانی بهترین عملکرد را داشت [۹]. شوا و لیبی (۲۰۱۹) در تحقیقی در شمال شرقی چین به بررسی کاربرد LARS-WG در مناطق سردسیر و ارزیابی پاسخ دما بر اساس سه سناریوی (RCP) گزارش CMIP5 و ۱۴ مدل گردش عمومی (GCM) پرداختند. نتایج نشان داد از سناریوهای CMIP5 می‌توان با موفقیت در یک مدل LARS-WG استفاده کرد و این مدل در شرایط آب‌وهوای سرد عملکرد خوبی دارد [۱۰]. ارزیابی مدل LARS-WG توسط بهاروند و همکاران (۱۳۹۸) برای تولید داده‌های روزانه در کرمانشاه نشان داد مدل LARS-WG کارایی مناسبی برای شبیه‌سازی در مقیاس‌های روزانه، ماهانه و فصلی دارد [۱۱]. قضاوی و ابراهیمی (۲۰۱۹) تأثیر تغییر اقلیم بر آب‌های

1. General Circulation Models (GCM)

زیرزمینی در استان ایلام را بررسی کردند. در تحقیق حاضر از مدل LARS-WG برای شبیه‌سازی بارش استفاده کردند. نتایج نشان داد مدل LARS-WG همبستگی زیادی برای شبیه‌سازی بارش داشته است. همچنین، نتایج نشان داد مقادیر سطح تراز آب‌های زیرزمینی در دوره‌های آبی کاهش خواهد یافت [۱۲]. حسینی بقانام و همکاران (۲۰۱۹) تغییرات دمای شهر تبریز برای دوره‌های آبی با استفاده از مدل LARS-WG و مدل SDSM را بررسی کردند. نتایج نشان داد مدل LARS-WG برای دوره‌های ماهانه همبستگی زیادی نسبت به مدل SDSM از خود نمایش داد. همچنین، نتایج نشان داد دمای متوسط شهر تبریز افزایش خواهد داشت [۱۳]. جوان و عرفانیان (۱۳۹۹) در تحقیقی به ارزیابی آثار تغییر اقلیم بر وضعیت خشکسالی ایستگاه تبریز طی دوره‌های آبی با استفاده از مدل گردش عمومی جو HadGEM2 و مدل آماری ریزمقیاس‌نمایی LARS-WG تحت سناریوهای انتشار گازهای گلخانه‌های RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 و با استفاده از شاخص‌های خشکسالی دهک (DI) و بارش استاندارد شده (SPI) پرداختند. نتایج نشان داد تعداد خشکسالی در هر سه دوره آبی نسبت به دوره پایه کاهش و تعداد ترسالی‌ها افزایش می‌یابد [۱۴].

تغییرات بارش-رواناب سبب شده تا بسیاری از محققان به دنبال روش‌هایی برای ارزیابی رفتار بارش و تأثیر آن روی رواناب و همچنین، پیش‌بینی احتمال وقوع آن باشند، به این منظور تا کنون مدل‌های بسیاری ابداع شده که از جمله مهم‌ترین و ساده‌ترین مدل‌های بارش-رواناب می‌توان به مدل IHACRES که در سال‌های اخیر مورد توجه بسیاری از دانشمندان در حل این‌گونه مسائل بوده، اشاره کرد. این مدل برای مناطقی که دارای سری‌های زمانی بارش، دما و رواناب به صورت پیوسته باشند، کاربرد دارد. استفاده از این مدل به دلیل قدرتمند بودن در عین سادگی برای حل مسائل مربوط به فرایند بارش - رواناب مورد توجه محققان مختلف بوده است [۱۵-۱۷]. هوپ و همکاران (۲۰۰۶) به مطالعه مدل IHACRES در ۲۰ حوضه آبخیز در جنوب کالیفرنیا برای پیش‌بینی جریان روزانه پرداختند. نتایج حاصل از ارزیابی واسنجی مدل IHACRES نشان داد برای نیمی از حوضه‌های آبخیز منطقه بهتر بوده است. همچنین، نتایج شبیه‌سازی رواناب روزانه توسط مدل IHACRES نشان

داد در ۱۸ حوضه آبخیز همبستگی زیادی وجود دارد [۱۸]. مکینتر و القریشی (۲۰۰۹) برای محاسبه دبی اوج و همچنین، حجم جریان خروجی از حوضه آبخیز وادی آهین که در کشور عمان واقع شده است از سه مدل IHACRES، KINEROS2 و رگرسیون استفاده کردند و نتایج نشان داد مدل IHACRES نسبت به دو مدل رگرسیون و KINEROS2 کارایی بهتری دارد [۲۰]. ویز و همکاران (۲۰۱۰) به بررسی آثار تغییر اقلیم روی ۶۱ حوضه آبخیز در جنوب شرق استرالیا با استفاده از چهار مدل بارش-رواناب Sacramento، SMARG، SIMHYD و IHACRES پرداختند. نتایج به‌دست‌آمده از پژوهش یادشده نشان داد مدل IHACRES نسبت به بقیه مدل‌ها همبستگی نسبتاً خوبی با داده‌های مشاهداتی داشته است [۲۱]. کیم و همکاران (۲۰۱۱) با استفاده از مدل نیمه‌توزیعی IHACRES اثر تغییر اقلیم را روی رواناب حوضه آبخیز در جنوب شرق استرالیا بررسی کردند. نتایج به‌دست‌آمده از تحقیق یادشده نشان داد عملکرد مدل در هر زیرحوضه آبخیز رابطه مستقیمی با بارش اتفاق افتاده در همان زیرحوضه آبخیز است، زیرا زیرحوضه‌هایی که از بارندگی کمتر برخوردار شده‌اند عملکرد ضعیفی را در مدل از خود نشان دادند [۲۲]. ابوشندی و مرکل (۲۰۱۱) با استفاده از مدل بارش-رواناب IHACRES به شبیه‌سازی جریان در منطقه‌ای خشک در کشور جردن تحلیل کردند. در این تحقیق از ۱۹ واقعه رگبار که سبب ایجاد رواناب شده، استفاده کردند. نتایج نشان داد مدل IHACRES کارایی ضعیفی را در شبیه‌سازی جریان در مقیاس روزانه دارد [۲۳]. احمدی و همکاران (۲۰۱۹) از سه مدل ANN، SWAT و IHACRES برای شبیه‌سازی بارش-رواناب حوضه‌های در منطقه کن^۱ به صورت روزانه، ماهانه و همچنین، سالانه استفاده کردند. نتایج نشان می‌دهد کارایی مدل‌های یادشده با در نظر گرفتن کمترین خطای مدل ANN بهتر از دو مدل دیگر و همچنین، مدل SWAT نیز بهتر از مدل IHACRES است و با اینکه مدل IHACRES نسبت به دو مدل خطای بیشتر دارد، ولی باز هم قابل قبول است [۲۴]. اسمعیلی‌عوری و همکاران (۱۳۹۴) در تحقیق دیگری برای شبیه‌سازی رواناب حوضه

و جریان رودخانه‌ای طی دوره‌های آتی استفاده کرد [۲۹].
 طبیعی و همکاران (۱۳۹۹) بررسی آثار تغییر اقلیم روی
 رواناب حوضه آبخیز کرخه با استفاده از مدل IHACRES
 در دوره آتی (۲۰۴۱-۲۰۶۰) نشان داد کاهش رواناب به
 میزان ۱۲/۹۶ درصد تحت سناریوی RCP2.6 و ۲۴/۱۲
 درصد تحت سناریوی RCP8.5 در دوره ۲۰۴۱-۲۰۶۰
 نسبت به دوره پایه وجود دارد [۳۰].

با توجه به اهمیت تأثیر تغییر اقلیم بر رواناب یک
 حوضه آبخیز، هدف از تحقیق حاضر، بررسی کارایی مدل
 مفهومی IHACRES در شبیه‌سازی بارش-رواناب حوضه
 آبخیز رودخانه زولاچای بر اساس داده‌های دما و بارش
 تحت سناریوهای مختلف تغییر اقلیم است.

مواد و روش‌ها

توصیف منطقه مطالعه شده

حوضه آبخیز رودخانه زولاچای به مساحت ۷۸۰ کیلومتر
 مربع در شهرستان سلماس و در استان آذربایجان غربی
 واقع شده است. این حوضه از سمت شمال غربی به حوضه
 قطور و از سمت جنوب به حوضه رودخانه نازلو و از جنوب
 شرقی به دریاچه ارومیه و از غرب به کوه‌های مرزی ایران و
 ترکیه محدود می‌شود. زولاچای دارای رژیم برفی و بارانی
 بوده و حوضه آن با توجه به موقعیت آب‌وهوایی سردسیری
 در زمستان برفگیر بوده و تقریباً در ۴ تا ۵ ماه از سال
 پوشیده از برف است. ایستگاه آب‌سنجی چهریق‌علیا در
 نقطه خروجی و روی رودخانه زولاچای است. این ایستگاه
 آب‌سنجی از سال ۱۳۶۳-۱۳۶۴ دارای آمار بوده و از لحاظ
 تأسیسات مجهز به اشل، لمنیگراف و تلفریک است. دبی
 متوسط در ایستگاه آب‌سنجی چهریق‌علیا بین بازه زمانی
 ۱۳۶۳ تا ۱۳۹۶ تقریباً برابر با ۳/۴۵ مترمکعب در ثانیه و
 متوسط آورد سالانه ۱۱۸/۱۱ میلیون مترمکعب بوده است.
 داده‌های آماری استفاده‌شده در تحقیق یادشده (۱۳۶۳-
 ۱۳۹۶) شامل مقادیر کمینه و بیشینه دما و بارش روزانه
 ایستگاه هواشناسی چهریق‌علیا است. برای بررسی آزمون
 همگنی و آزمون داده‌های پرت از الحاقیه XLSTAT و از
 آزمون‌های دیکسون^۱ و نمودار جعبه‌ای^۲ استفاده شد. نتایج
 به‌دست‌آمده بیانگر آن است که داده‌ها در سطح اعتماد ۹۵

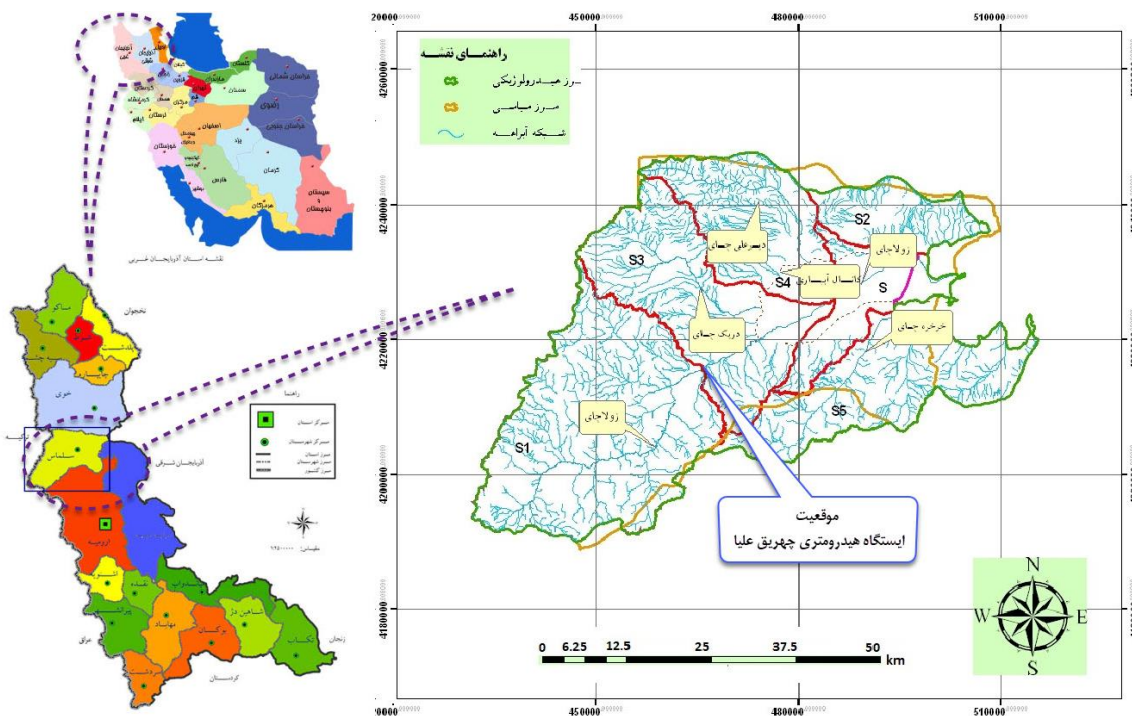
خرم‌آباد از مدل یکپارچه IHACRES و مدل نیمه‌توزیعی
 SWAT استفاده شوند. بررسی‌های پژوهش یادشده نشان
 داد دقت مدل SWAT در شبیه‌سازی دبی جریان با دقت
 مدل IHACRES تفاوت درخور توجهی ندارد و مدل
 IHACRES با توجه به ورودی‌های اندک هواشناسی که
 قابلیت شبیه‌سازی مقدار دبی جریان در حوضه آبخیز را
 دارد را پیشنهاد شد [۲۵]. قربانی و همکاران (۱۳۹۵) به
 بررسی روش‌های هیدرولوژیک و داده‌کاوی در شبیه‌سازی
 و پیش‌بینی دبی جریان ماهانه در ایستگاه آب‌سنجی
 آرازکوسه با استفاده از مدل IHACRES پرداختند. نتایج
 نشان داد مدل IHACRES در مرحله واسنجی و مرحله
 صحت‌سنجی با ضریب همبستگی به ترتیب برابر با ۰/۸۱ و
 ۰/۷۹ کارایی مناسبی برای شبیه‌سازی جریان ماهانه را
 دارد [۲۶]. گودرزی و همکاران (۱۳۹۶) در تحقیقی به
 ارزیابی کارایی مدل IHACRES برای شبیه‌سازی رواناب
 سطحی پرداختند. نتایج پژوهش یادشده نشان داد مدل
 توانایی شبیه‌سازی داده‌های جریان روزانه و ماهانه را با
 دقت قابل قبولی دارد [۲۷]. یزدانی و همکاران (۱۳۹۶) اثر
 تغییر اقلیم روی دبی حداکثر روزانه در حوضه دینور در
 استان کرمانشاه را تحت شرایط عدم قطعیت بررسی
 کردند. آنها در تحقیق خود از ۶ مدل گردش عمومی جو و
 همچنین، برای شبیه‌سازی مدل بارش-رواناب از مدل
 IHACRES استفاده کردند. نتایج نشان داد دمای حوضه
 دینور در دوره‌های آتی تحت هر سه سناریو، افزایش
 چشمگیری خواهد داشت و همچنین، بارش حوضه آبخیز
 در دوره‌های آتی تحت هر سه سناریو نسبت به دوره پایه
 کاهش خواهد یافت. مقدار دبی متوسط و نیز حجم رواناب
 در دوره‌های آتی افزایشی بوده، اما رژیم دبی‌های حداکثر
 این حوضه آبخیز در دوره‌های آتی به گونه‌ای است که
 نسبت به دوره مشاهداتی تعدیل یافته است [۲۸]. رضایی
 مقدم و همکاران (۱۳۹۸) در پژوهشی میزان عملکرد مدل
 بارش-رواناب IHACRES در شبیه‌سازی رواناب حوضه
 آبخیز لنبران ارزیابی کردند. نتایج نشان داد ارزیابی مدل
 IHACRES با استفاده از معیارهای عملکردی مختلف و به
 دلیل کاربری آسان و ورودی‌های کمتر و کاهش صرف
 زمان می‌توان استفاده از این مدل را برای شبیه‌سازی و
 پیش‌بینی رواناب در مقیاس ماهانه در حوضه آبخیز لنبران
 توصیه کرد و از آن جهت بررسی و مطالعه رواناب سطحی

1. Dixon Test
 2. Box Plot

قربانی دایلاری و همکاران: شبیه‌سازی پارامترهای مؤثر بر روند دبی جریان رودخانه با استفاده از مدل بارش-رواناب ... ۱۸۱

زولاچای و شبکه آبراه‌های منطقه مطالعه شده ارائه شده است.

درصد، همگن و تصادفی بوده و خطای سیستماتیک در آنها وجود ندارد. در شکل ۱ موقعیت جغرافیایی حوضه



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی حوضه زولاچای و شبکه آبراه‌های منطقه مطالعه شده

(ب) سناریوی RCP4.5: سناریوی RCP4.5 توسط گروه مدل‌سازی MiniCAM طراحی شده که در این سناریو میزان غلظت گاز دی‌اکسید کربن تا سال ۲۱۰۰ حدود ۶۵۰ ppm و همچنین، میزان رشد جمعیت کمتر از سناریوی RCP2.6 خواهد شد و همچنین، اثر گازهای گلخانه‌ای بر واداشت تابشی را تا حدود $4/5W/m^2$ اعلام کردند. در سناریوی RCP4.5 رشد فناوری نسبت به سناریوی RCP2.6 کاهش خواهد یافت و میزان استفاده از انرژی‌های نو به جای انرژی و سوخت فسیلی نیز کاهش خواهد داشت و در نهایت، میزان تولید و انتشار گازهای گلخانه‌ای با افزایش روبه‌رو خواهد شد.

(ج) سناریوی RCP8.5: سناریوی RCP8.5 توسط گروه مدل‌سازی MESSAGE^۲ و مؤسسه بین‌المللی تحلیل سیستم‌های کاربردی در کشور اتریش طراحی شده که در این سناریو میزان غلظت دی‌اکسید کربن تا سال ۲۱۰۰ حدود ۱۹۶۰ ppm و همچنین، رشد جمعیت حدود

سناریوهای اقلیمی

در تحقیق حاضر از سه سناریوی RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 استفاده شده که توضیح مختصری از سه سناریوی استفاده شده در زیر ارائه شده است:

(الف) سناریوی RCP2.6: سناریوی RCP2.6 توسط گروه مدل‌سازی IMAGE^۱ از مؤسسه ارزیابی محیط زیست کشور هلند طراحی شده که در این سناریو میزان غلظت گاز دی‌اکسید کربن تا سال ۲۱۰۰ را حدود ۴۹۰ ppm و همچنین، جمعیت جهان را حدود ۷ میلیارد نفر و همچنین، اثر گازهای گلخانه‌ای بر واداشت تابشی را تا حدود $2/6W/m^2$ اعلام کردند. در سناریوی RCP2.6 رشد فناوری افزایش خواهد یافت و میزان استفاده از انرژی‌های نو به جای انرژی و سوخت فسیلی افزایش خواهد داشت و در نهایت، میزان تولید و انتشار گازهای گلخانه‌ای با کاهش روبه‌رو خواهد شد.

2. Model for Energy Supply Strategy Alternatives and their General Environmental

1. Integrated Assessment Modeling Framework Fescribing Global Environmental Change

دانشگاه ملی استرالیا، کانبرا و مرکز اکولوژی و هیدرولوژی (CEH) انجمن تحقیقات محیط زیست انگلستان برای حوزه‌هایی با آب‌وهوای معتدل گسترش یافته بود [۳۴] که به صورت مستمر در مجلات و نشریات مرتبط با هیدرولوژی توضیح داده شده است. سپس، با پیشرفت کارایی این مدل در ارتباط با موضوعاتی نظیر رودخانه‌های موقت، تغذیهٔ آبخوان‌های زیرزمینی، مدل‌سازی نیمه‌توزیعی بارش-رواناب، پیش‌بینی رواناب در حوضه‌های فاقد آمار و اطلاعات، آثار پوشش زمین و تغییر کاربری آن بر فرایندهای هیدرولوژیک، بررسی پاسخ‌های فیزیکی و دینامیکی حوضه‌های معرف استفاده شد [۳۵]. مدل بارش - رواناب IHACRES بر پایهٔ دو مدول تلفات غیرخطی^۱ و مدول هیدروگراف واحد خطی^۲ تشکیل شده است. مدل IHACRES از داده‌های بارندگی و دما به عنوان واسنجی مدل و از داده‌های جریان رودخانه برای صحت‌سنجی و دقت مدل ساخته شده استفاده می‌کند. به این منظور ابتدا، بارندگی (T_k) و دما (T_K) در هر گام زمانی k توسط مدول غیرخطی، به بارندگی مؤثر (U_k)، (بخشی از بارش که به جریان تبدیل می‌شود و به رودخانه می‌ریزد) تبدیل شده و سپس، به وسیلهٔ مدول هیدروگراف واحد خطی، بارش مؤثر را به رواناب سطحی (X_k) در همان گام زمانی تبدیل می‌کند. در شکل ۲ روند شبیه‌سازی بارش-رواناب توسط مدل IHACRES ارائه شده است.

مدل IHACRES شش پارامتر دارد که سه پارامتر آن مربوط به بخش تلفات غیرخطی (f)، که به ترتیب ظرفیت ذخیرهٔ رطوبت حوضه، ثابت زمانی خشکیدگی حوضهٔ آبخیز و فاکتور تعدیل حرارت حوضه را شامل می‌شوند) و سه پارامتر بعدی مربوط به بخش مدول خطی (T_s ، T_q) که به ترتیب مدت زمانی که طول می‌کشد رواناب سریع و آهسته کاهش یابد و $V^{(S)}$ نشان‌دهندهٔ حجمی از رواناب آهسته که در جریان رودخانه مشارکت می‌کند) را شامل می‌شوند. بر اساس این مدل، تبدیل بارش مؤثری که از طریق مدول تلفات غیرخطی حاصل می‌شود بر اساس رابطهٔ ۱ است [۳۶ و ۳۷]:

$$U_k = S_k * r_k \quad (1)$$

۱۲ میلیارد نفر خواهد شد و همچنین، اثر گازهای گلخانه‌ای بر واداشت تابشی را تا حدود $۸/۵W/m^2$ اعلام کردند. در سناریوی RCP8.5 رشد فناوری به دلیل افزایش تولید ناخالصی داخل کشور نسبت به سناریوی RCP2.6 کاهش خواهد یافت.

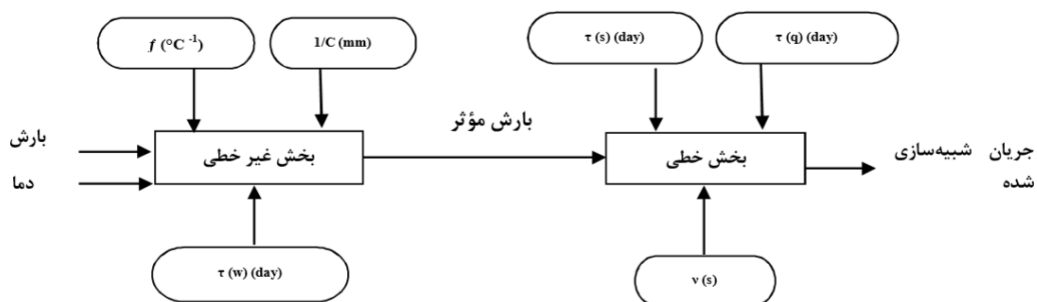
مدل ریزمقیاس‌نمایی LARS-WG

مدل LARS-WG یک مولد تصادفی آب و هوا است که می‌تواند برای شبیه‌سازی داده‌های هواشناسی در هر شرایط آب‌وهوایی و فقط در یک موقعیت مکانی واحد استفاده شود [۳۱-۳۳]. اولین نسخه از مدل LARS-WG به عنوان بخشی از ارزیابی خطرات کشاورزی در مجارستان در سال ۱۹۹۰ در بوداپست برای پروژه‌های تأمین‌شده توسط آکادمی علوم مجارستان تهیه شد [۳۱]. مدل LARS-WG از توزیع‌های نیمه‌تجربی برای طول سری‌های زمانی روزانهٔ دوره‌های خشک و مرطوب، بارندگی روزانه و تشعشع خورشید یا ساعت‌های آفتابی روزانه استفاده می‌کند. داده‌ها به صورت مجموعه‌ای از سری‌های زمانی روزانهٔ آب‌وهوایی شامل بارش (میلی‌متر)، حداکثر و حداقل دما (درجهٔ سانتی‌گراد) و ساعت‌های آفتابی یا تابش خورشیدی (مگاژول در مترمربع در روز) هستند. این مدل از سه بخش اساسی واسنجی مدل، صحت‌سنجی مدل (ارزیابی) و در نهایت، تولید داده‌های هواشناسی برای دوره‌های آتی تشکیل شده است. در این تحقیق دورهٔ آماری ۳۴ ساله (۱۳۶۳-۱۳۹۶) برای ایستگاه هواشناسی چهریق علیا به عنوان دورهٔ پایه انتخاب شد و سپس، در سه دورهٔ ۲۰ ساله شامل سال‌های ۲۰۲۱-۲۰۴۰، ۲۰۴۰-۲۰۶۰ و ۲۰۶۰-۲۰۸۰ تولید شد. در ضمن، در این بررسی مدل جوی-اقیانوسی HadGEM2-ES که توسط مرکز مطالعات محیطی جهانی هدلی تهیه شده است؛ با تفکیک افقی $۱/۸ \times ۱/۱۲۵$ کیلومتر مربع در مدل LARS-WG استفاده شده است. در نهایت، از آزمون ناپارامتری کلموگروف - اسمیرنوف برای بررسی برآزش مقادیر شبیه‌سازی شده با مقادیر مشاهداتی استفاده شده است.

توصیف مدل بارش - رواناب IHACRES

مدل IHACRES یک مدل بارش-رواناب مفهومی و پیوسته است که به طور مشترک توسط هیدرولوژیست‌های مرکز مدیریت و ارزیابی جامع حوضهٔ آبخیز (ICAM)

1. Non - linear Loss Module
2. Linear Unit Hydrograph Module



$1/c$: ظرفیت ظرفیت ذخیره رطوبت حوضه آبخیز، f : فاکتور تعدیل حرارت حوضه آبخیز، τ_w : ثابت زمانی خشکیدگی حوضه آبخیز، τ_s : ثابت زمانی کاهش جریان آهسته، τ_q : ثابت زمانی کاهش جریان سریع، $v^{(s)}$: نشان‌دهنده حجمی از رواناب آهسته که در جریان رودخانه مشارکت می‌کند

شکل ۲. روند شبیه‌سازی بارش-رواناب توسط مدل IHACRES [۳۵].

$$X_K = X_K^{(q)} + X_K^{(s)} \quad (7)$$

در روابط یادشده a_q و β_q ثابت‌های زمانی جریان سریع و a_s و β_s ثابت‌های زمانی جریان آهسته هستند که از روابط ۸ و ۹ به دست می‌آیند:

$$\tau_q = \frac{-\Delta}{\ln(-a_q)} \quad (8)$$

$$\tau_s = \frac{-\Delta}{\ln(-a_s)} \quad (9)$$

در معادلات یادشده Δ بازه زمانی، τ_q و τ_s ثابت‌های زمانی فروکشی برای جریان سریع و آهسته در مخازن متوالی (بر حسب روز) هستند و در نهایت، نسبت حجمی جریان سریع و آهسته به صورت رابطه ۱۰ قابل محاسبه است [۳۶]:

$$V_q = 1 - V_s = \frac{\beta_q}{1+a_q} = 1 - \frac{\beta_s}{1+a_s} \quad (10)$$

در این تحقیق برای انتخاب دوره واسنجی و صحت‌سنجی مدل به منظور شبیه‌سازی رواناب، آمار و اطلاعات ایستگاه آب‌سنجی چهارپق علیا طی دوره آماری ۱۹۸۴-۲۰۱۶ استفاده شد، به طوری که از ۳۳ سال آمار موجود تقریباً ۸۰ درصد از کل داده‌ها را به بخش واسنجی و ۲۰ درصد از کل داده‌ها را به بخش صحت‌سنجی اختصاص یافت. همچنین، در واسنجی مدل IHACRES دو مقدار ثابت زمانی خشکیدگی و فاکتور تعدیل دما که در قسمت غیرخطی مدل است، توسط کاربر به طور دلخواه انتخاب شد و مقادیر پارامترها در قسمت خطی مدل و همچنین، پارامتر ثابت میزان ذخیره حوضه آبخیز توسط خود مدل محاسبه شد.

در معادله یادشده r_k بارش مشاهداتی و S_k شاخص رطوبت خاک است که با توجه به خیس یا خشک بودن آن بین ۱ و صفر متغیر خواهد بود. اگر حوضه کاملاً خیس باشد، تمام بارش به بارش مؤثر تبدیل خواهد شد [۳۶]: و با استفاده از رابطه ۲ قابل محاسبه است:

$$U_k = [C(\varphi_k - l)]^p \quad (2)$$

در رابطه ۲، C ظرفیت نگهداشت رطوبت حوضه (بر حسب میلی‌متر)، l حد آستانه شاخص رطوبت خاک، p فاکتور مدول غیرخطی و φ_k شاخص رطوبت خاک است:

$$\Phi_k = r_k + \left(1 - \frac{1}{\tau_k}\right) \varphi_{k-1} \quad (3)$$

τ_k برابر شدت خشکی خاک حوضه آبخیز و به عنوان تابعی از دما است که با استفاده از رابطه ۴ می‌توان محاسبه کرد:

$$\tau_k = \tau_w * \exp(f(T_{ref} - T_k) * 0.062) \quad (4)$$

که در رابطه ۴، τ_w شدت خشکی خاک مبنا، f تابع تعدیل دما، T_{ref} و T_k به ترتیب دمای مرجع و دمای مشاهداتی در بازه زمانی مورد نظر هستند.

برای تبدیل بارش مؤثر به رواناب از مدول هیدروگراف واحد خطی استفاده می‌شود. از ترکیب دو جریان سریع $X_K^{(q)}$ و جریان آهسته $X_K^{(s)}$ منجر به تولید رواناب X_K می‌شود که با استفاده از روابط ۵-۷ محاسبه می‌شود [۳۶] و [۳۷]:

$$X_K^{(q)} = -a_q X_{K-1}^{(q)} + \beta_q U_K \quad (5)$$

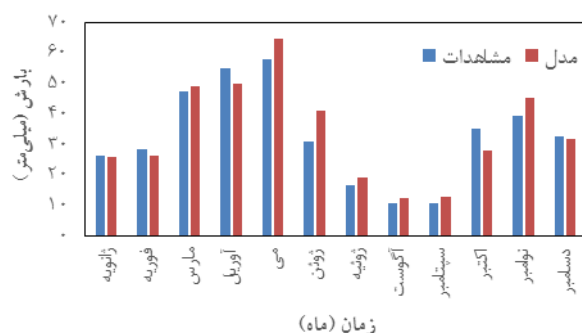
$$X_K^{(s)} = -a_s X_{K-1}^{(s)} + \beta_s U_K \quad (6)$$

یافته‌ها

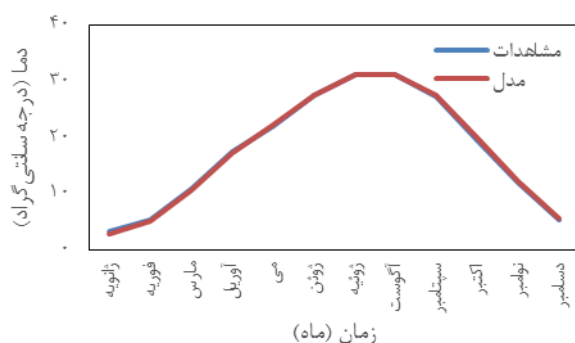
الف) ارزیابی کارایی مدل ریزمقیاس‌نمایی LARS-WG به منظور تولید داده‌های بارش و دما برای دوره‌های آتی در منطقه مطالعه‌شده، متغیرهای بزرگ‌مقیاس خروجی مدل هواشناسی HadGEM2-ES به وسیله مدل ریزمقیاس‌نمایی LARS-WG ریزمقیاس‌شد و سپس، به بررسی روند این تغییرات پرداخته شد. شکل ۳ نمایشی از کارایی مدل LARS-WG برای مقایسه مقادیر بارش مشاهداتی با شبیه‌سازی‌شده در دوره پایه را نشان می‌دهد. همچنین، شکل ۴ مقایسه مقادیر حداکثر دمای مشاهداتی با حداکثر دمای شبیه‌سازی‌شده توسط مدل در دوره پایه و در نهایت، در شکل ۵ مقایسه مقادیر حداقل دمای مشاهداتی با حداقل دمای شبیه‌سازی‌شده در دوره پایه را نشان می‌دهد.

جدول ۱ نتایج ارزیابی پارامترهای شبیه‌سازی‌شده توسط مدل LARS-WG با مقادیر مشاهداتی در دوره پایه را نشان می‌دهد.

در جدول‌های ۲-۴ به ترتیب نتایج آزمون کلموگروف - اسمیرنوف (K-S) برای توزیع احتمالی بارش ماهانه و دمای حداقل و دمای حداکثر ارائه شده است.



شکل ۳. مقایسه مقادیر بارش مشاهداتی با شبیه‌سازی‌شده توسط مدل LARS-WG در دوره پایه



شکل ۴. مقایسه مقادیر حداکثر دمای مشاهداتی با شبیه‌سازی‌شده توسط مدل LARS-WG در دوره پایه

معیارهای ارزیابی کارایی مدل

در این تحقیق برای ارزیابی کارایی مدل LARS-WG از معیارهای ضریب تبیین (R^2)، میانگین مطلق خطا (MAE) و ریشه دوم میانگین مربعات خطا (RMSE) و برای ارزیابی کارایی مدل IHACRES از معیارهای ضریب همبستگی (R) و بایاس (BIAS) بر اساس روابط ذیل استفاده شده است [۳۵ و ۳۶]:

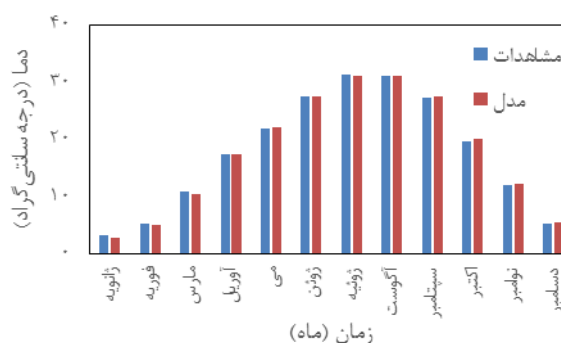
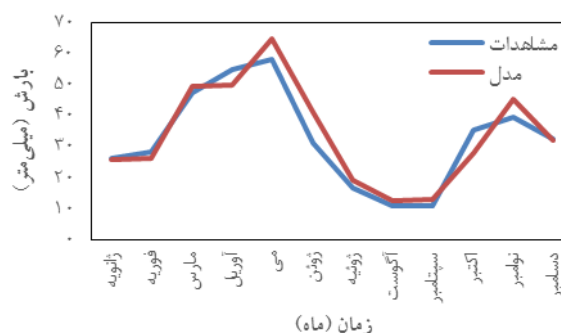
$$R^2 = \frac{(\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}))^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (11)$$

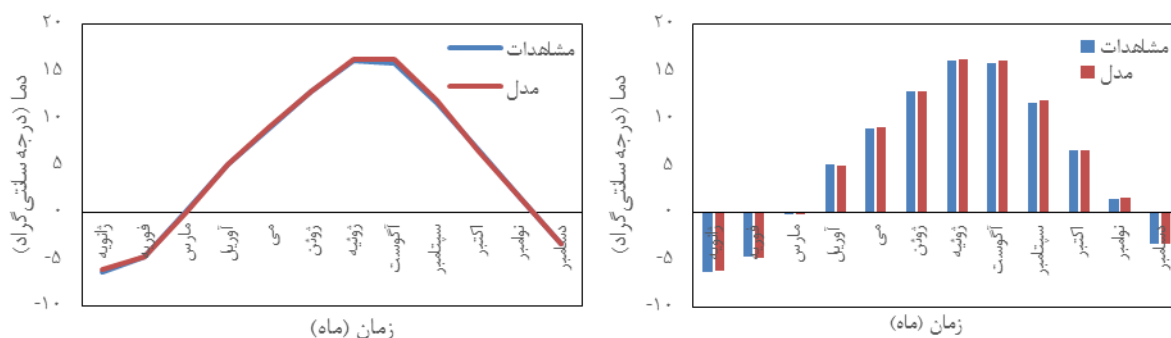
$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (12)$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |x_i - y_i|}{n} \quad (13)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}{n}} \quad (14)$$

در معادلات یادشده x_i مقادیر مشاهداتی، y_i مقادیر محاسباتی، \bar{x} و \bar{y} به ترتیب میانگین مقادیر مشاهداتی و محاسباتی هستند.





شکل ۵. مقایسه مقادیر حداقل دمای مشاهداتی با شبیه‌سازی شده توسط مدل LARS-WG در دوره پایه

جدول ۱. مقادیر معیارهای آماری ارزیابی کارایی مدل LARS-WG برای بارش، دمای حداکثر و دمای حداقل

پارامتر	R ²	RMSE	MAE
بارش (mm)	۰/۹۱	۴/۷۸	۳/۸۲
دمای حداکثر (°C)	۰/۹۹	۰/۲۴	۰/۲۰
دمای حداقل (°C)	۰/۹۹	۰/۱۴	۰/۱۰

جدول ۲. نتایج آزمون کلموگروف - اسمیرنوف توزیع بارش ماهانه

ماه	آزمون K-S	p-value	ارزیابی
ژانویه	۰/۲۱۳	۰/۶۱۹	برازش خوب
فوریه	۰/۱۶۸	۰/۸۷۰	برازش بسیار خوب
مارس	۰/۱۰۶	۰/۹۹۹	برازش بسیار خوب
آوریل	۰/۲۳۵	۰/۴۹۲	برازش بسیار خوب
می	۰/۰۵۵	۱/۰۰۰	برازش عالی
ژوئن	۰/۰۹۶	۱/۰۰۰	برازش بسیار خوب
جولای	۰/۱۳۲	۰/۹۸۱	برازش بسیار خوب
آگوست	۰/۱۳۴	۰/۹۷۸	برازش عالی
سپتامبر	۰/۴۰۶	۰/۰۳۲	برازش بسیار خوب
اکتبر	۰/۰۸۹	۱/۰۰۰	برازش بسیار خوب
نوامبر	۰/۱۴۸	۰/۹۴۶	برازش بسیار خوب
دسامبر	۰/۱۷۵	۰/۸۳۷	برازش عالی

جدول ۳. نتایج آزمون کلموگروف - اسمیرنوف توزیع حداکثر دمای ماهانه

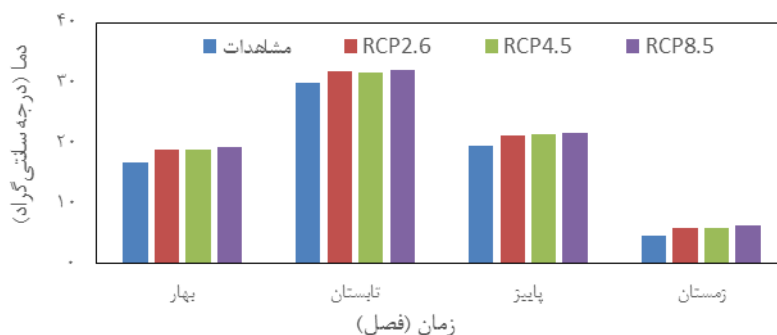
ماه	آزمون K-S	p-value	ارزیابی
ژانویه	۰/۱۰۶	۰/۹۹۹	بسیار خوب
فوریه	۰/۱۰۶	۰/۹۹۹	بسیار خوب
مارس	۰/۱۰۶	۱/۰۰۰	عالی
آوریل	۰/۱۰۵	۰/۹۹۹	بسیار خوب
می	۰/۱۰۵	۱/۰۰۰	عالی
ژوئن	۰/۱۰۶	۰/۹۹۹	بسیار خوب
جولای	۰/۱۵۷	۰/۹۱۳	بسیار خوب
آگوست	۰/۱۰۶	۰/۹۹۹	بسیار خوب
سپتامبر	۰/۱۰۵	۱/۰۰۰	عالی
اکتبر	۰/۰۵۳	۰/۹۹۹	بسیار خوب
نوامبر	۰/۱۰۵	۰/۹۹۹	بسیار خوب
دسامبر	۰/۱۰۶	۰/۹۹۹	بسیار خوب

جدول ۴. نتایج آزمون کلموگروف - اسمیرنوف توزیع حداقل دمای ماهانه

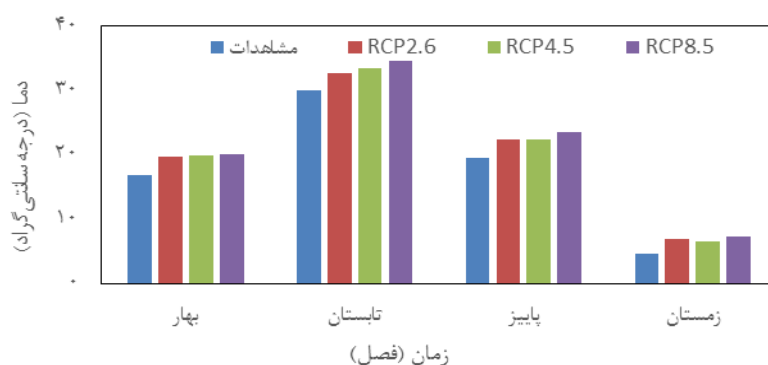
ماه	آزمون K-S	p-value	ارزیابی
ژانویه	۰/۱۰۶	۰/۹۹۹	بسیار خوب
فوریه	۰/۱۰۶	۰/۹۹۹	بسیار خوب
مارس	۰/۰۵۳	۰/۹۹۹	بسیار خوب
آوریل	۰/۱۰۵	۰/۹۹۹	بسیار خوب
می	۰/۰۵۳	۰/۹۹۹	بسیار خوب
ژوئن	۰/۱۰۵	۰/۹۹۹	بسیار خوب
جولای	۰/۱۵۸	۰/۹۱۶	بسیار خوب
آگوست	۰/۱۰۶	۰/۹۹۹	بسیار خوب
سپتامبر	۰/۰۵۳	۰/۹۹۹	بسیار خوب
اکتبر	۰/۱۰۶	۱/۰۰۰	عالی
نوامبر	۰/۱۰۵	۰/۹۹۹	بسیار خوب
دسامبر	۰/۱۰۵	۰/۹۹۹	بسیار خوب

در دوره پایه با مقادیر خروجی حاصل از سناریوهای اقلیمی در سه دوره ۲۰۲۱-۲۰۴۰، ۲۰۴۱-۲۰۶۰ و ۲۰۶۱-۲۰۸۰ منجر به تولید سری‌های زمانی آتی فصلی شد. در شکل‌های ۶-۸ به ترتیب مقایسه مقادیر حداکثر دمای فصلی در دوره پایه و در سه دوره ۲۰۲۱-۲۰۴۰، ۲۰۴۱-۲۰۶۰ و ۲۰۶۱-۲۰۸۰ تحت سناریوهای مختلف شد.

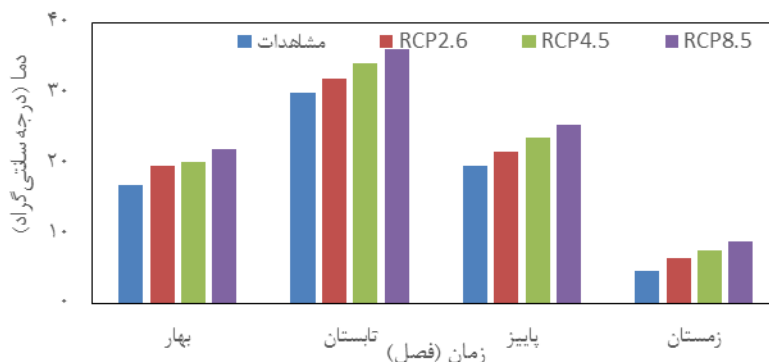
با توجه به جدول‌های یادشده می‌توان نتیجه گرفت که مدل LARS-WG برای هر سه پارامتر بارش، حداقل و حداکثر دما از برازش خوبی نسبت به مقادیر مشاهداتی برخوردار بوده است و همچنین، می‌توان نتیجه گرفت که مقادیری که برای دوره‌های آتی پیش‌بینی می‌کند، قابل اعتماد است. به منظور مقایسه تغییرات پارامترهای اقلیمی با استفاده از مدل LARS-WG، مقادیر مشاهداتی



شکل ۶. مقایسه مقادیر حداکثر دمای فصلی در دوره پایه و دوره ۲۰۲۱-۲۰۴۰ تحت سناریوهای مختلف



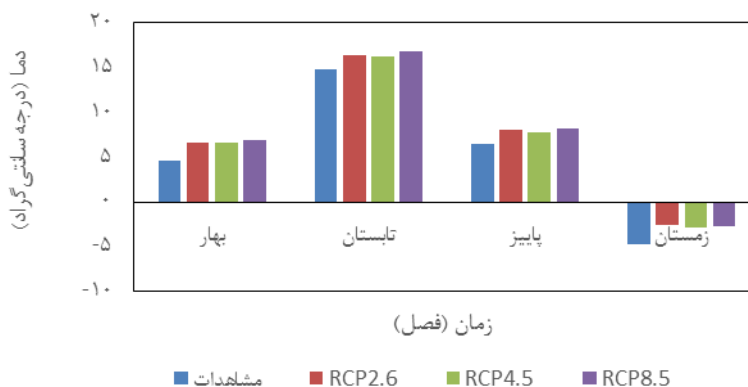
شکل ۷. مقایسه مقادیر حداکثر دمای فصلی در دوره پایه و دوره ۲۰۴۱-۲۰۶۰ تحت سناریوهای مختلف



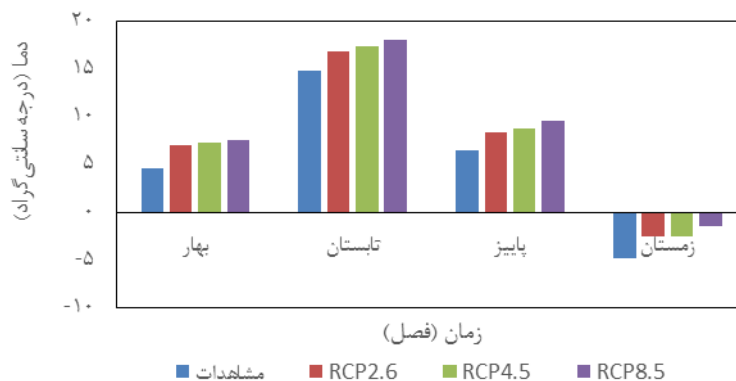
شکل ۸- مقایسه مقادیر حداکثر دمای فصلی در دوره پایه و دور ۲۰۶۱-۲۰۸۰ تحت سناریوهای مختلف

با توجه به شکل‌های ۶-۸؛ در دوره ۲۰۲۱-۲۰۴۰ بیشترین افزایش حداکثر دمای فصلی تحت سناریوی RCP8.5 در فصل زمستان رخ می‌دهد و همچنین، کمترین افزایش حداکثر دما تحت سناریوی RCP4.5 در فصل تابستان رخ خواهد داد. در دوره ۲۰۴۱-۲۰۶۰ بیشترین افزایش حداکثر دمای فصلی تحت سناریوی RCP8.5 در فصل زمستان و همچنین، کمترین افزایش حداکثر دما تحت سناریوی RCP2.6 در فصل تابستان رخ خواهد داد. در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ به ترتیب مقایسه مقادیر حداقل دمای فصلی در دوره پایه و در سه دوره ۲۰۲۱-۲۰۴۰، ۲۰۴۱-۲۰۶۰ و ۲۰۶۱-۲۰۸۰ تحت سناریوهای مختلف شد.

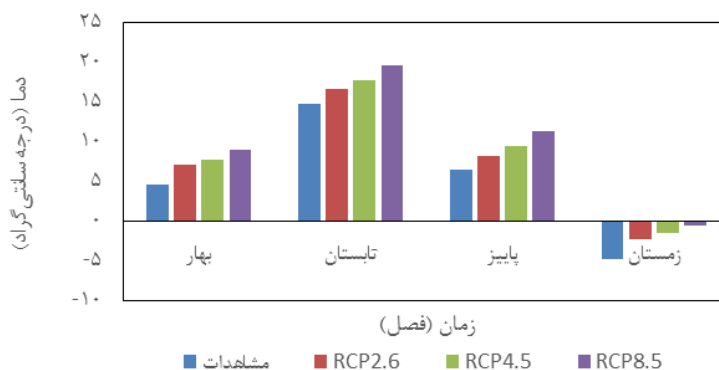
بیشترین افزایش حداکثر دمای فصلی تحت سناریوی RCP8.5 در فصل زمستان رخ می‌دهد و همچنین، کمترین افزایش حداکثر دما تحت سناریوی RCP4.5 در فصل تابستان رخ خواهد داد. در دوره ۲۰۴۱-۲۰۶۰ بیشترین افزایش حداکثر دمای فصلی تحت سناریوی RCP8.5 در فصل زمستان و همچنین، کمترین افزایش حداکثر دما تحت



شکل ۹. مقایسه مقادیر حداقل دمای فصلی در دوره پایه و دوره ۲۰۲۱-۲۰۴۰ تحت سناریوهای مختلف



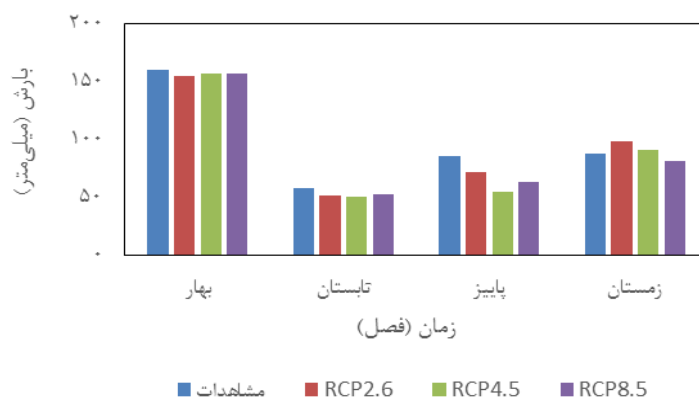
شکل ۱۰. مقایسه مقادیر حداقل دمای فصلی در دوره پایه و دوره ۲۰۴۱-۲۰۶۰ تحت سناریوهای مختلف



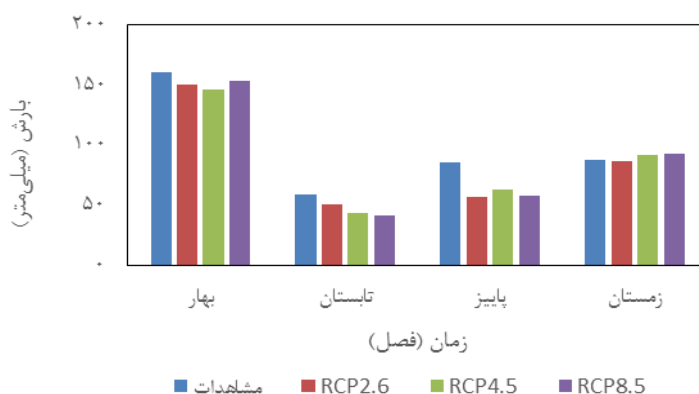
شکل ۱۱. مقایسه مقادیر حداقل دمای فصلی در دوره پایه و دوره ۲۰۶۱-۲۰۸۰ تحت سناریوهای مختلف

فصل تابستان رخ خواهد داد. در دوره ۲۰۶۱-۲۰۸۰ بیشترین افزایش حداقل دمایی فصلی تحت سناریوی RCP8.5 در فصل بهار رخ می دهد و همچنین، کمترین افزایش دمایی تحت سناریوی RCP2.6 در فصل تابستان رخ خواهد داد. در شکل های ۱۲-۱۴ به ترتیب مقایسه مقادیر بارش فصلی در دوره پایه و در سه دوره ۲۰۲۱-۲۰۴۰، ۲۰۴۱-۲۰۶۰ و ۲۰۶۱-۲۰۸۰ تحت سناریوهای مختلف شد.

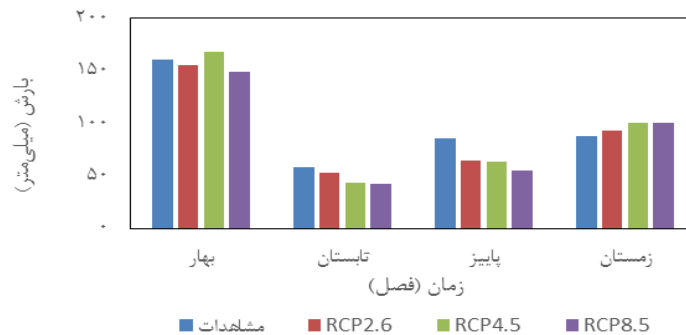
با توجه به شکل های ۱۰ و ۱۱ در دوره ۲۰۲۱-۲۰۴۰ بیشترین افزایش حداقل دمای فصلی تحت سناریوی RCP8.5 در فصل بهار رخ می دهد و همچنین، کمترین افزایش حداقل دما تحت سناریوی RCP4.5 در فصل تابستان اتفاق خواهد افتاد. همچنین، در دوره ۲۰۴۱-۲۰۶۰ بیشترین افزایش حداقل دمایی تحت سناریوی RCP8.5 در فصل زمستان و کمترین افزایش حداقل دمایی تحت سناریوی RCP2.6 در



شکل ۱۲. مقایسه مقادیر بارش فصلی در دوره پایه و دوره ۲۰۲۱-۲۰۴۰ تحت سناریوهای مختلف



شکل ۱۳. مقایسه مقادیر بارش فصلی در دوره پایه و دوره ۲۰۴۱-۲۰۶۰ تحت سناریوهای مختلف



شکل ۱۴. مقایسه مقادیر بارش فصلی در دوره پایه و دوره ۲۰۶۱-۲۰۸۰ تحت سناریوهای مختلف

بیانگر آن شد که مدل از توانایی کافی در مقیاس روزانه برخوردار نبود. زارعی و همکاران (۱۳۸۸) نیز در شبیه‌سازی جریان رودخانه حوضه آبخیز کسلیان با استفاده از مدل بارش-رواناب IHACRES به این نتیجه رسیدند که نتایج شبیه‌سازی جریان ماهانه قابل قبول‌تر از شبیه‌سازی مقادیر جریان روزانه بوده است [۳۹]. آباشاندی و بوردر (۲۰۱۱) نیز در شبیه‌سازی مقادیر سیل در مقیاس روزانه عملکرد مدل IHACRES را ضعیف ارزیابی کردند [۴۰]. بنابراین، در مرحله بعدی تحقیق حاضر برای شبیه‌سازی رواناب از مقیاس ماهانه استفاده شد. نتایج حاصل شبیه‌سازی با استفاده از مدل بارش-رواناب IHACRES در مقیاس ماهانه طبق معیارهای ارزیابی ضریب همبستگی (R) و خطای بایاس (Bias) در دوره واسنجی به ترتیب برابر ۷۸ درصد و ۰/۰۶ و در دوره صحت‌سنجی به ترتیب برابر ۷۲ درصد و ۰/۶۰ شد. براساس نتایج به‌دست‌آمده، مشاهده می‌شود که ضریب همبستگی مدل IHACRES در شبیه‌سازی رواناب در مقیاس ماهانه نسبت به مقیاس روزانه بیشتر است و نتایج رضایت‌بخش و قابل قبولی را ارائه کرده است. همچنین، می‌توان نتیجه گرفت که دقت مدل در هر دو مقیاس زمانی در مرحله واسنجی نسبت به مرحله صحت‌سنجی دقت بیشتری دارد.

ج) تولید سری‌های زمانی رواناب با استفاده از مدل بارش

- رواناب IHACRES در دوره‌های آتی

بعد از انجام ارزیابی کارایی مدل IHACRES در دو مرحله واسنجی و صحت‌سنجی، سری‌های زمانی دما و بارش تولیدشده توسط مدل LARS-WG برای دوره‌های آینده به مدل IHACRES معرفی شد تا رواناب در دوره‌های آتی تولید شود. نتایج تغییرات ماهانه رواناب در سه دوره ۲۰۲۱-

با توجه به شکل‌های یادشده می‌توان نتیجه گرفت که در دوره ۲۰۲۱-۲۰۴۰ بیشترین افزایش بارندگی تحت سناریوی RCP2.6 در فصل زمستان رخ می‌دهد و بیشترین کاهش بارندگی تحت سناریوی RCP4.5 در فصل پاییز رخ خواهد داد. همچنین، در دوره ۲۰۴۱-۲۰۶۰ می‌توان مشاهده کرد که بیشترین افزایش بارندگی تحت سناریوی RCP8.5 در فصل زمستان و بیشترین کاهش بارندگی تحت سناریوی RCP2.6 در فصل پاییز اتفاق خواهد افتاد. در دوره ۲۰۶۱-۲۰۸۰ بیشترین افزایش بارندگی تحت سناریوی RCP4.5 در فصل زمستان و بیشترین کاهش بارندگی تحت سناریوی RCP8.5 در فصل پاییز رخ خواهد داد. مقادیر شبیه‌سازی‌شده توسط مدل LARS-WG برای پارامتر بارندگی نشان‌دهنده کاهش این پارامتر در فصل‌های آینده نسبت به دوره پایه است. بیشترین کاهش بارندگی تحت سناریوی RCP8.5 در فصل پاییز در دوره ۲۰۶۱-۲۰۸۰ و همچنین، بیشترین افزایش بارندگی تحت سناریوی RCP4.5 در فصل زمستان در دوره ۲۰۶۱-۲۰۸۰ رخ می‌دهد.

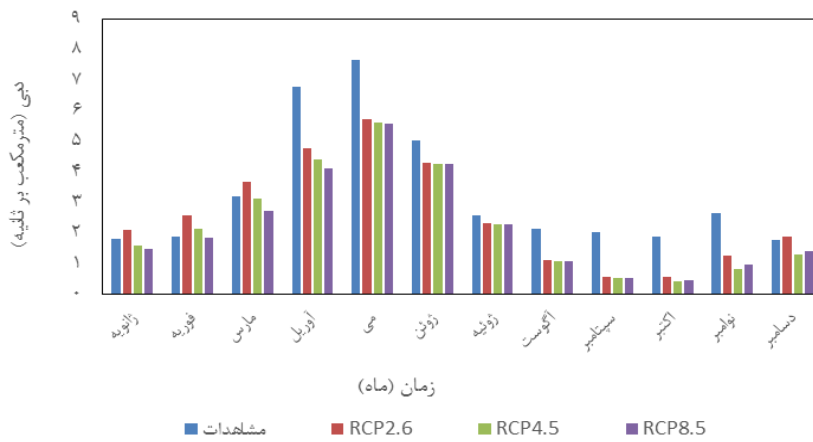
ب) ارزیابی کارایی مدل IHACRES برای شبیه‌سازی

بارش - رواناب

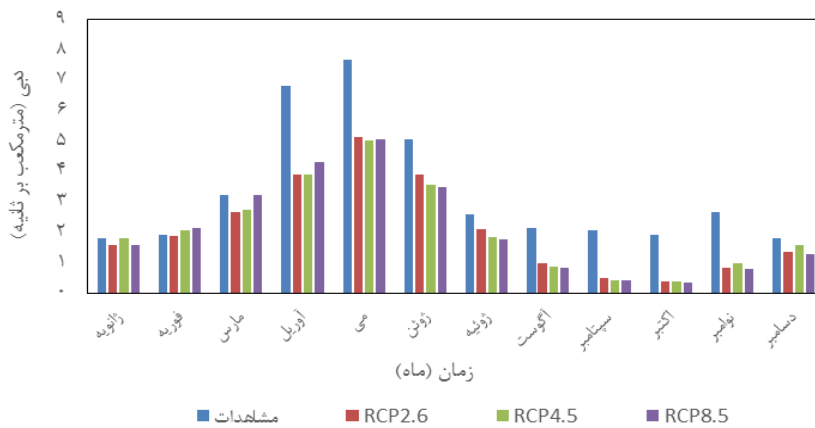
در تحقیق حاضر طی دوره آماری ۱۹۸۴-۲۰۱۶، ابتدا ۹۶۳۸ روز که تقریباً ۸۰ درصد از کل داده‌ها است، به عنوان دوره واسنجی و ۲۴۱۴ روز که تقریباً ۲۰ درصد از کل داده‌ها است به عنوان دوره صحت‌سنجی در نظر گرفته شد. نتایج حاصل شبیه‌سازی با استفاده از مدل بارش-رواناب IHACRES در مقیاس روزانه طبق معیارهای ارزیابی ضریب همبستگی (R) و خطای بایاس (Bias) در دوره واسنجی به ترتیب برابر ۷۱ درصد و ۰/۲۳ و در دوره صحت‌سنجی به ترتیب برابر ۳۷ درصد و ۱/۷۱ شد. نتایج

مشاهداتی که از مدل IHACRES به دست آمده را می‌توان به ترتیب در شکل‌های ۱۵-۱۷ نشان داد.

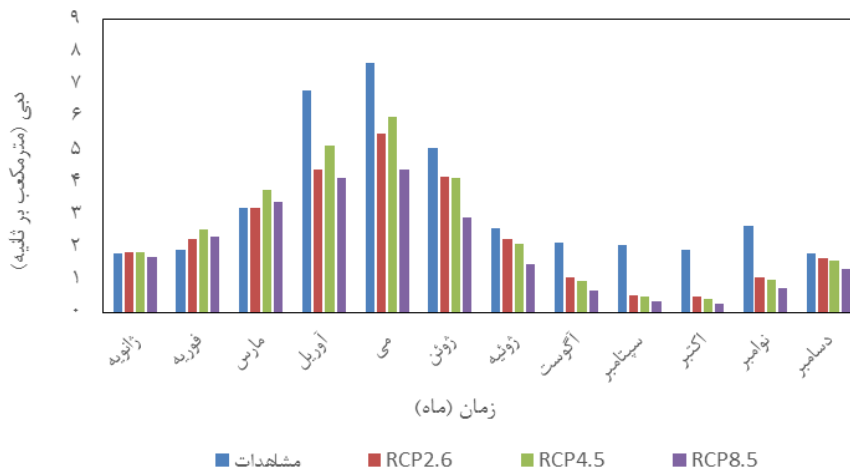
۲۰۴۰، ۲۰۶۰-۲۰۶۱ و ۲۰۸۰ تحت سناریوهای RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 نسبت به مقادیر دوره



شکل ۱۵. سری‌های زمانی رواناب مشاهداتی و شبیه‌سازی شده توسط مدل IHACRES در دوره ۲۰۲۱-۲۰۴۰



شکل ۱۶. سری‌های زمانی رواناب مشاهداتی و شبیه‌سازی شده توسط مدل IHACRES در دوره ۲۰۴۱-۲۰۶۰



شکل ۱۷. سری‌های زمانی رواناب مشاهداتی و شبیه‌سازی شده توسط مدل IHACRES در دوره ۲۰۶۱-۲۰۸۰

بحث و نتیجه‌گیری

با توجه به موارد یادشده می‌توان نتیجه گرفت که میزان رواناب در دوره ۲۰۲۱-۲۰۴۰ نسبت به دوره مشاهداتی تحت سناریوی RCP2.6 در ماه‌های ژانویه، فوریه، مارس و دسامبر بوده و همچنین، تحت سناریوی RCP4.5 در ماه فوریه افزایش خواهد یافت و تحت سناریوی RCP8.5 در همه ماه‌های سال میزان رواناب نسبت به دوره پایه کاهش خواهد داشت. درضمن، می‌توان نتیجه گرفت که میزان رواناب در دوره ۲۰۴۱-۲۰۶۰ نسبت به دوره مشاهداتی تحت سناریوی RCP2.6 در همه ماه‌های سال کاهش خواهد یافت و تحت سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5 در ماه فوریه افزایش خواهد داشت و در بقیه ماه‌ها کاهش می‌یابد. در نهایت، میزان رواناب در دوره ۲۰۶۱-۲۰۸۰ نسبت به دوره مشاهداتی تحت سناریوی RCP2.6 در ماه‌های ژانویه و فوریه و تحت سناریوی RCP4.5 در ماه‌های ژانویه، فوریه، مارس و در نهایت، تحت سناریوی RCP8.5 در ماه‌های فوریه و مارس افزایش و در بقیه ماه‌ها تحت هر سه سناریو کاهش خواهد یافت. همچنین، میزان رواناب طی دوره ۲۰۲۱-۲۰۸۰ نسبت به دوره مشاهداتی تحت سناریوی RCP2.6 در ماه فوریه ۱۷/۴۰ درصد که بیشترین میزان افزایش است و همچنین، در ماه اکتبر ۷۴/۵۱- درصد که بیشترین کاهش را شامل می‌شود، نشان می‌دهد. همچنین، تحت سناریوی RCP4.5 در ماه فوریه ۱۸/۰۲ درصد که بیشترین میزان افزایش است و در ماه اکتبر ۷۸/۶۰- درصد که بیشترین کاهش را شامل می‌شود، از خود نشان می‌دهد. در ماه فوریه ۱۰/۸۹ درصد که بیشترین میزان افزایش است و همچنین، در ماه اکتبر ۸۰/۶۳- درصد که بیشترین کاهش را شامل می‌شود، تحت سناریوی RCP8.5 اتفاق خواهد افتاد. حال با بررسی سالانه نتایج بیانگر آن است که جریان سالانه رودخانه زولاچای در محل ایستگاه آب‌سنجی چهریق‌علیا تحت هر سه سناریو در دوره‌های آتی نسبت به دوره پایه کاهش می‌یابد که این کاهش رواناب در دوره آتی تحت سناریوی RCP2.6 به میزان ۱/۱۲ مترمکعب بر ثانیه (۳۳/۳۴ درصد)، تحت سناریوی RCP4.5 به میزان ۱/۱۷ مترمکعب بر ثانیه (۳۳/۶۷ درصد) و تحت سناریوی RCP8.5 به میزان ۱/۳۷ مترمکعب بر ثانیه (۳۹/۴۲ درصد) خواهد بود.

درنهایت، به طور خلاصه می‌توان یافته‌های تحقیق حاضر را به شرح ذیل خلاصه کرد:

- نتایج نشان داد سری‌های زمانی دما و بارش تولیدشده از مدل LARS-WG دارای دقت قابل قبول و همچنین، دارای خطای کمتری برای به کار بردن در مدل مفهومی IHACRES هستند.
- نتایج ارزیابی کارایی مدل IHACRES نشان داد مدل مفهومی در مقیاس ماهانه نسبت به مقیاس روزانه دارای جواب قابل اعتمادتری است که با نتایج مطالعات زارعی و همکاران (۱۳۸۸) در حوضه آبخیز کسلیان، آشفته و بزرگ حداد (۱۳۹۲) در حوضه آیداموش و وردیان و همکاران (۱۳۹۲) در حوضه ناورود مطابقت دارد [۳۹، ۴۱ و ۳۵].

همچنین، نتایج حاصل از مدل مفهومی IHACRES نشان داد با وجود اینکه این مدل برای حوزه‌هایی با جریان دایمی بیشتر کاربرد دارد (به و همکاران، ۱۹۹۷)، اما با واسنجی مناسب قابلیت استفاده برای حوزه‌های با آبدهی کم (اقلیم نیمه‌خشک) را نیز دارد [۳۶].

منابع

- [1]. Karamoz M. Iraqi Nejad Sh. Advanced hydrology. Amirkabir University Press. Tehran; 2005. pp. 464. [Persian]
- [2]. Ghorbani Kh. 1394. Evaluation of data mining models in exponential precipitation microscale based on NCEP public circulation model data, Case study: Kermanshah synoptic station. Iranian Journal of Water Research. 2015; pp. 186-177. [Persian]
- [3]. Rahimi R. Rahimi M. Spatial and temporal analysis of climate change in the coming years and comparison of microscale methods of SDSM, LARS-WG and artificial neural network (Case study: Khuzestan province). Journal of Echo Hydrology. 2018; 4, pp. 1174-1161. [Persian]
- [4]. Mesbah B. Murid S. Effects of Climate Change on the Zayandehrood River in Isfahan. Agricultural Science and Technology and Natural Resources Journal. 2005; 4, pp. 27-17. [Persian]
- [5]. Sood A. Smakhtin V. Global hydrological models: a review. Hydrological Sciences Journal. 2015; 60(4): 549-565.

- [6]. Koukidis E.N. Berg A. Ensitivity of statistical downscaling model (SDSM) to reanalysis products. *Atmosphere–ocean*. 2009; 1: pp. 1-18.
- [7]. Karimi M. Kaki S. Rafati S. The future climatic conditions and hazards of Iran in climate research. *Journal of Spatial Analysis of Environmental Hazards*. 2018; 3, pp. 22-1. [Persian]
- [8]. Osman Y. Al-Ansari N. Abdellatif M. Aljawad S.B. Knutsson. S. Expected Future Precipitation in Central Iraq Using LARS-WG Stochastic Weather Generator. *Engineering*. 2014; 06 (13), pp. 948-959.
- [9]. Dagnenet M and Disse M. Analyzing the future climate change of Upper Blue Nile River basin using statistical downscaling techniques. *Hydrology and Earth System Sciences journal*. 2018; 22(4): pp. 2391-2408.
- [10]. Sha J and Li X. Estimation of future climate change in cold weather areas with the LARS-WG model under CMIP5 scenarios. *Theoretical and Applied Climatology journal*. 2019; 137(3-4): pp.1-13.
- [14]. Javan Kh and Erfanian M. Assessing the impact of climate change on drought status in Tabriz station during future periods using LARS-WG. *Iranian Water Researches Journal*. 2020; 14(3). [Persian]
- [15]. Dye P. Croke B. Evaluation of stream flow predictions by the IHACRES rainfall-runoff model in two South African catchments. *Environmental Modeling and Software*. 2003; 18:pp. 705-712.
- [16]. Fauzi M. Malik A. Putra D. Putra A. Application of Hybrid-IHACRES models for water availability in Siak River. *MATEC Web of Conferences*. 2018; pp.1-6.
- [24]. Ahmadi M. Moeini A. Motamedvaziri B. Zehtabiyani Gh. Comparison of the performance of SWAT, IHACRES and artificial neural networks models in rainfall-runoff simulation (case study: Kan watershed, Iran). *Physics and Chemistry of the Earth*. 2019; 111, pp. 65-77.
- [25]. Esamari E. Golshan M. Witness K. Jahanshahi A. Evaluation of efficiency of SWAT and IHACRES models in runoff simulation of Khorramabad watershed. *Water and Soil Knowledge*. 2015; 26(1), pp. 42-29. [Persian]
- [26]. Gorbani Kh. Sohrabian A. Evaluation of hydrological methods and data mining in simulation and forecasting of monthly flow rate (Case study: Arakkoseh hydrometric station).
- [17]. Borzi I. Bonaccorso B. Fiori A. A Modified IHACRES Rainfall–Runoff Model for Predicting Hydrologic Response of a River Basin System with a Relevant Groundwater Component. Presented at the 3rd International Electronic Conference on Water Sciences. 2018; pp.1-8.
- [18]. Hope A. Decker J. Jankowski P. Daily river flow predictions in southern California Catchments using the IHACRES model and gridded rainfall input data. *Ame Rican Geophysical Union fall meeting, San Francisco, USA*. 2006; pp.11.
- [19]. Carla Carcano E. Bartolini P. Muselli M. Piroddi L. Jordan recurrent neural network versus IHACRES in modelling daily stream flows. *Journal of Hydrology*. 2008; 362(3), pp. 291-307.
- [20]. McIntyre N. Al-Qurashi A. Performance of ten rainfall-runoff models applied to an arid catchment in Oman. *Environmental Modeling and Software J*. 2009; 24: 726-738.
- [21]. Vaze J. Post D. Chiew F. Perraud N.R. Viney and J. Teng. Climate non-stationarity-validity of calibrated rainfall–runoff models for use in climate change studies. *Journal of Hydrology*. 2010; 394: pp. 447-457.
- [22]. Kim H.S. Croke A.J. Jakeman F. An assessment of modeling capacity to identify the impacts of climate variability catchment hydrology. *Mathematics and Computer in Simulation*. 2011; 81, pp. 1419-1429.
- [23]. Abushandi E.H. Merkel B. Application of IHACRES rainfall-runoff model to the Wadi Dhuliel arid catchment, Jordan. *Journal of Water and Climate Change*. 2011; 2, pp. 56-71/
Journal of Soil and Water Conservation Research. 2016; 1, pp. 217-203. [Persian]
- [27]. Goodarzi M. Motameduziri b. Mir Hosseini M.R. Evaluation of application of IHACRES model for simulation of surface runoff in climate change conditions (Case study: Watershed). *Iranian Watershed Management Science and Engineering j*. 2017; 11(38), pp. 95-83. [Persian]
- [28]. Yazdani M. Najafian S. Azeri A. Rahimi M. The effect of climate change on the maximum daily discharge under uncertainty conditions (Dinur Basin, Kermanshah province). *Journal of Soil and Water Conservation Research*. 2017; 24(1), pp. 156-139. [Persian]

- [29]. Rezaei Moghaddam M., Hejazi M., Behbuodi A. A Calibration and Dvaluation of IHACRES Model in Runoff Simulation the Lanbaran Sub-basin, Ahar Chay. *Journal of Hydrogeomorphology*. 2019; 5(20), pp. 187-204.[Persian]
- [30]. Motiee H., Shirkhodaei F., Motiee AR. Predicting the effects of climate change on the inflow of Karkheh dam reservoir using CMIP5-RCP scenarios. *Journal of Dam and Hydroelectric Powerplant*. 2020; 7(25), pp. 51-38.[Persian]
- [31]. Racsko P., Szeidl L., Semenov M. A serial approach to local stochastic weather models. *Ecological Modelling*. 1991; 57, pp.27-41.
- [32]. Semenov M.A., Barrow E.M. Use of a stochastic weather generator in the development of climate change scenarios. *Climatic Change*. 1997; 35, pp. 397-414.
- [33]. Semenov M.A., Brooks R.J. Spatial interpolation of the LARS-WG stochastic weather generator in Great Britain. *Climate Research*. 1999; 11, pp.137 – 148.
- [34]. Zakerinia M., Nirumandfard F. Investigation of the effect of climate change on river flow using IHACRES rainfall-runoff model (Case study: Mohammadabad basin in Golestan province). *Journal of Irrigation Science and Engineering*. 2018; 41(3), pp. 117-103.[Persian]
- [35]. Vardian F., Shahedi K., Habibnejad Roshan M. and Zarei M. Evaluating the efficiency of IHACRES runoff model in simulating the daily and monthly flow of Navarood watershed in Guilan province. *Iranian Water Researches Journal*, 2014; pp. 229-233.[Persian]
- [36]. Lotfi M., Adib A. and Haghghi A. Estimation of daily runoff using semi-conceptual IHACRES model in Navroud catchment of Guilan. *EcoHydrology*, 2018; 5(2): 449-460.
- [37]. Jakeman AJ, Hornberger GM. How much complexity is warranted in a rainfall-runoff model? *Water Resour Research*. 1993; 29(8): 2637– 2649.
- [38]. Khosravianian J. The effect of climate change on surface runoff. Master Thesis in Watershed Management. Faculty of Natural Resources, Gorgan University. 2013.[Persian]
- [39]. Zarei M., Ghanbarpour M., Habibnejad Roshan M., Shahedi K. Simulation of river flow using IHACRES rainfall-runoff model (Case study: Kasilian watershed). *Iranian Journal of Watershed Management Science and Engineering*. 2009; pp. 20-11.[Persian]
- [40]. Abushandi, E.H., and Broder, M. Application of IHACRES rainfall-runoff model to the Wadi Dhuliel arid catchment Jordan. *Journal of Water and Climate Change*, 2011; 2 (1), 56-71.
- [41]. Ashofteh, P., Bozorg Hadad, O., 2012, An Approach to Assessing Climate Change Impacts on Runoff. *Water Resources Engineering Journal*. 2012; 6, pp 51-66 (in Persian).