

## مدل سازی بارش - رواناب در زیرحوضه هلیل رود به منظور پیش بینی جریانهای آبی تحت شرایط اقلیمی آینده

آسیه زارعی<sup>۱</sup>، نسرين سياري<sup>۲\*</sup>، بهرام بختياري<sup>۳</sup>، محمدمهدی احمدی<sup>۲</sup>

۱. دانش آموخته کارشناسی ارشد رشته مدیریت منابع آب، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان

۲. استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان

۳. دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان

(تاریخ دریافت ۱۳۹۹/۰۷/۰۴، تاریخ تصویب ۱۳۹۹/۱۱/۳۰)

### چکیده

تغییر اقلیم با ایجاد تغییر در میزان دما و بارش موجب تغییر در دبی رودخانه‌ها می‌شود. محدودیت منابع آبی و توزیع نامتجانس آن در مناطق مختلف کشور سبب شده است که در مقایسه با بسیاری از نقاط جهان، نسبت به پدیده تغییر اقلیم آسیب پذیرتر باشد. شبیه سازی جریان رودخانه به عنوان پیش نیاز برخی از مسائل زیست محیطی و مهندسی اهمیت دارد. در تحقیق حاضر تأثیر تغییر اقلیم بر میزان رواناب سطحی حوضه آبخیز هلیل رود استان کرمان با استفاده از مدل IHACRES در دوره های زمانی آینده نزدیک (۲۰۲۰-۲۰۵۰) و آینده دور (۲۰۷۰-۲۱۰۰) پیش بینی شد. به این منظور، ابتدا داده های روزانه بارش و دما ایستگاه های تعیین شده طی دوره آماری ۱۹۹۵-۲۰۱۷ از ایستگاه های هواشناسی منطقه مطالعه شده اخذ شدند. سپس، خروجی های مدل گردش عمومی جو CanESM2 تحت دو سناریوی انتشار میانه (RCP4.5) و بدینانه (RCP8.5) با استفاده از مدل SDSM ریزمقیاس شدند. میانگین دمای ایستگاه ها در دو دوره آینده نزدیک و دور به ترتیب ۵- و ۴/۶- درصد کاهش و میزان بارش نزدیک ۴۲/۵ و ۴۰ درصد افزایش نسبت به دوره مشاهداتی (۱۹۸۹-۲۰۱۷) نشان دادند. در گام بعدی، مقادیر پیش بینی شده دما و بارش توسط مدل ریزمقیاس نمایی آماری SDSM به مدل بارش- رواناب IHACRES وارد شده و تغییرات دبی در دو دوره زمانی آینده پیش بینی شد. بر اساس مقادیر پیش بینی شده، متوسط دبی ماهانه در هر دو ایستگاه (کناروئیه، چشمه عروس) در ماه های گرم سال بیشترین افزایش را بر اساس پیش بینی ها نشان داد. براساس یافته های پژوهش حاضر، کاهش دما و افزایش میزان بارش طی دوره های آینده منجر به افزایش رواناب و شدت وقایع سیل در حوضه آبخیز هلیل رود در ماه های گرم سال خواهد شد.

**کلیدواژگان:** تغییر اقلیم، سناریوهای انتشار RCP، SDSM، IHACRES، CanESM2.

## مقدمه

تأثیر تغییر اقلیم بر منابع آب‌های سطحی و زیرزمینی و همچنین، بخش کشاورزی یکی از موضوعات حیاتی برای بشر است. حتی اگر همین امروز انتشار گازهای گلخانه‌ای متوقف شود، افزایش دما و تأثیرات وابسته به آن شامل موجودیت آب و طغیان رودخانه‌ها برای چند دهه آینده ادامه خواهد یافت. تغییر در میزان بارش همراه با افزایش دما و کاهش پوشش برف که بر منابع آبی تأثیر می‌گذارد، مدیران بخش آب را مجبور می‌کند تا تغییر اقلیم را در برنامه‌هایشان دخیل کنند [۱]. ارزیابی آسیب‌پذیری و سازگاری یافتن در مقابل تغییرات اقلیمی، فقط با بررسی آمار و اطلاعات وضعیت و تغییرات دوره‌های گذشته ممکن نیست و به آگاهی از شرایط اقلیمی سرزمین در آینده نیز وابسته است. متداول‌ترین روش ارزیابی اقلیم آینده، بهره‌گیری از مدل‌های گردش عمومی جو است. در کنار این مدل‌ها که به اصطلاح «سناریوهای اقلیمی» نیز نامیده می‌شوند، سناریوهای انتشار گازهای گلخانه‌ای نیز با توجه به رویکرد احتمالی بشر طی سالیان آتی در تولید آلاینده‌های گازی در جو، که بر وضعیت اقلیم جهانی نیز تأثیر گذارند، طرح می‌شود. به طوری که مدل‌های گردش عمومی جو، اطلاعات مفیدی درباره پاسخ جو به افزایش غلظت گازهای گلخانه‌ای فراهم می‌کنند. اما مدل‌های گردش عمومی جو دقت فضایی و زمانی لازم را ندارند تا اقلیم دهه‌های آتی را در مقیاس محلی و ایستگاه‌های هواشناسی بررسی شده، ارزیابی و پیش‌بینی قرار دهند. آنها می‌توانند وضع اقلیم آینده را در یک مقیاس نسبتاً وسیع، حدود  $300 \times 300$  کیلومتر (سطحی حدود مساحت کشور پرتغال) پیش‌بینی کنند که ممکن است در داخل این شبکه گسترده چندین ایستگاه هواشناسی واقع شده باشد. علت ضعف این مدل‌ها در عدم پیش‌بینی در مقیاس‌های مکانی و زمانی کوچک‌تر، به نبود سامانه‌های قدرتمند محاسبات عددی، غیراقتصادی بودن و زمان‌بر بودن آنها برمی‌گردد. برای غلبه بر این مشکل، باید خروجی مدل‌های اقلیمی را به مقیاس‌های کوچک‌تر تبدیل کرد تا بتوان اقلیم محلی و ایستگاهی را پیش‌بینی و ارزیابی کرد، که به این فرایند به اصطلاح «ریزمقیاس‌نمایی» می‌گویند. از روش‌های ریزمقیاس‌نمایی می‌توان به ریزمقیاس‌نمایی دینامیکی و آماری اشاره کرد. با توجه به اینکه ریزمقیاس‌نمایی دینامیکی نیاز به سامانه‌های بسیار سریع دارد که اغلب کشورها فاقد آن هستند، بنابراین

توجه عمومی به روش ریزمقیاس‌نمایی آماری معطوف شده است. از جمله این مدل‌های ریزمقیاس‌نمایی آماری برای مدل‌سازی اقلیم طی دهه‌های آتی، مدل ریزمقیاس‌نمایی SDSM<sup>۱</sup> است. برای بررسی آثار تغییر اقلیم بر سیستم‌های مختلف در دوره‌های آتی، باید ابتدا مقدار متغیرهای اقلیمی در آینده شبیه‌سازی شود. مدل‌های مختلفی برای شبیه‌سازی جریان آب دوره‌های آتی وجود دارد که یکی از این مدل‌ها، IHACRES است. این مدل به علت داده‌های اندک مورد نیاز، بدون صرف زمان و هزینه زیاد برای تهیه داده‌ها، به آسانی می‌تواند در بسیاری از حوضه‌های آبخیز به کار برده شود [۲]. در این زمینه، مطالعات زیادی انجام شده که در ادامه به یادآوری برخی از آنها پرداخته شده است. آشفته و مساح بوانی (۱۳۸۷) تأثیر تغییر اقلیم را بر دبی‌های حداکثر در آذربایجان شرقی با استفاده از مدل IHACRES را برای دوره آینده ۲۰۴۰-۲۰۶۹ شبیه‌سازی کردند. آنها از مدل HadCM3 تحت سناریوی A2 برای ریزمقیاس‌نمایی داده‌ها استفاده کردند. در پژوهش حاضر، مقادیر همبستگی برای دوره‌های واسنجی و اعتبارسنجی به ترتیب ۷۹ و ۷۰ درصد ارزیابی شد. نتایج نشان داد شدت دبی‌ها برای دوره بازگشت‌های تا ۵۰ سال تفاوت چندانی نکرده و با افزایش دوره بازگشت، شدت آنها در دوره آتی افزایش خواهد یافت. همچنین، بر اساس پیش‌بینی‌های انجام‌شده نشان داده شد احتمال وقوع دبی‌های حداکثر با مقدار معین در دوره آتی نسبت به دوره پایه کمتر خواهد بود [۳]. زارعی و همکاران (۱۳۸۹) برای شبیه‌سازی جریان حوضه آبریز کسلیان واقع در استان مازندران از مدل بارش-رواناب IHACRES استفاده و مدل را واسنجی و ارزیابی کردند. نتایج بررسی آنها نشان داد مدل، توانایی شبیه‌سازی داده‌های روزانه و ماهانه را با قابلیت قابل قبولی داشته ( $0.75 < NSE < 0.36$ )، ولی قدرت شبیه‌سازی داده‌های سالانه را ندارد [۴]. آشفته (۱۳۸۹) در پژوهشی به بررسی تأثیر پدیده تغییر اقلیم بر رواناب حوضه قرنقو واقع در دامنه‌های شرقی سهند در دوره ۲۰۱۰-۲۰۳۹ میلادی پرداخت. در پژوهش یادشده از مقادیر بارش و دمای ماهانه و مدل گردش عمومی جو HadCM3 تحت دو سناریوی انتشار A2 و B2 استفاده شد. همچنین، از روش ریزمقیاس‌سازی مکانی تناسبی و کوچک‌مقیاس‌سازی زمانی

1. Statistical DownScaling Model

در دوره مشاهداتی (۱۹۸۲-۲۰۱۰) را واسنجی کردند. سپس، از خروجی‌های مدل HAdCM3 تحت سه سناریوی انتشار A1B، A2 و B1 و مدل ریزمقیاس‌نمایی LARS-WG پارامترهای دما و بارش را برای دوره آبی (۲۰۱۱ - ۲۰۴۰) تولید کردند و به منظور شبیه‌سازی رواناب حوضه وارد مدل IHACRES شدند. نتایج حاصل از پیش‌بینی رواناب در دوره اقلیمی آبی نشان داد مجموع متوسط تغییرات رواناب سالانه درازمدت در دوره ۲۰۱۱-۲۰۴۰ به میزان ۱/۷۲ مترمکعب بر ثانیه در سناریوی A1B، ۴/۸۶ مترمکعب بر ثانیه در سناریوی A2 و ۰/۲۵ مترمکعب بر ثانیه در سناریوی B1 نسبت به دوره مشاهداتی کاهش خواهد یافت [۸]. شاهی و همکاران (۱۳۹۹) تأثیر تغییر اقلیم بر داده‌های دما و بارش در حوضه روانسر سنجایی استان کرمانشاه را با استفاده از داده‌های دوره زمانی پایه (۱۹۷۹-۲۰۰۵) تحت سه سناریوی RCP8.5، RCP4.5 و RCP2.6 و مدل گردش عمومی جو CanESM2 را برای دو دوره زمانی آینده (۲۰۴۱-۲۱۰۰) بررسی کردند. نتایج حاصل از پیش‌بینی نشان داد مقادیر میانگین بارش سالانه، دماهای حداکثر و حداقل سالانه در حوضه روانسر سنجایی در دوره ۲۰۴۱-۲۱۰۰ افزایش خواهند یافت. بیشترین مقادیر پیش‌بینی شده این متغیرها مربوط به سناریوی RCP8.5 است، به طوری که درصد افزایش میانگین بارندگی در ماه دسامبر با توجه به این سناریو و در دوره‌های پیش‌بینی ۲۰۴۱-۲۰۷۰ و ۲۰۷۱-۲۱۰۰ به ترتیب ۱۵۳ و ۶/۱۵۹ درصد در مقایسه با میانگین بارش در دوره مشاهداتی به دست آمد [۹]. دسترنج و رستمی (۱۳۹۹) در تحقیقی به پیش‌بینی مقادیر بارش و دما و تعیین اقلیم آینده با استفاده از مدل گردش عمومی جو و شبیه‌سازی اقلیمی در دوره‌های ۲۰۷۰-۲۰۹۹ و ۲۰۲۰-۲۰۴۹ در ایستگاه‌های سینوپتیکی بابلسر، گرگان، رامسر، رشت، قزوین، تهران و زنجان پرداختند. آنها برای تهیه سناریوهای اقلیمی از خروجی‌های مدل گردش عمومی HAdCM3 تحت سناریوی انتشار A2 و B2 و روش ریزمقیاس‌نمایی آماری SDSM استفاده کردند و در ادامه، با استفاده از روش دومارتن اقلیم آینده تعیین شد. نتایج نشان داد اقلیم در ایستگاه‌های بابلسر، قزوین، رامسر و رشت نسبت به اقلیم مشاهداتی ۱۹۷۹-۲۰۰۸ در دوره‌های آبی تغییر نخواهد کرد. ولی در ایستگاه گرگان در دوره ۲۰۷۰-۲۰۹۹ تحت سناریوی A2 اقلیم از مدیترانه‌ای به نیمه‌خشک تغییر خواهد کرد. در ایستگاه تهران در دوره ۲۰۲۰-۲۰۴۹ تحت

عامل تغییر برای داده‌های منطقه استفاده شده و برای تولید رواناب ماهانه حوضه از مدل IHACRES استفاده شد. نتایج نشان‌دهنده افزایش دما و تغییرات در بارندگی دوره ۲۰۱۰-۲۰۳۹ نسبت به دوره مشاهدات ۱۹۷۱-۲۰۰۰ منطقه بود. مقایسه رواناب دوره ۲۰۱۰-۲۰۳۰ با دوره مشاهداتی نشان‌دهنده تأثیر تغییر اقلیم بر رواناب این حوضه در دوره آبی بود [۵]. طائی سمیرمی و همکاران (۱۳۹۳) آثار ناشی از تغییر اقلیم بر دما، بارندگی و رواناب در حوضه آبخیز بار نیشابور را با استفاده از خروجی مدل HAdCM3 تحت سه سناریوی انتشار A1B، A2 و B1 و مدل ریزمقیاس‌نمایی آماری LARS-WG در دوره‌های ۲۰۱۰-۲۰۳۰، ۲۰۳۰-۲۰۴۶ و ۲۰۴۶-۲۰۶۵ و ۲۰۸۰-۲۰۹۹ نسبت به دوره پایه ۱۹۷۱-۲۰۱۰ ارزیابی و مطالعه کردند. سپس، متغیرهای تولیدشده به عنوان ورودی مدل بارش رواناب IHACRES استفاده و جریان رودخانه برای دوره‌های آبی و تحت سناریوهای مختلف پیش‌بینی شد. نتایج تحقیق یادشده نشان داد دما و بارش طی قرن ۲۱ به ترتیب افزایش و کاهش پیدا خواهد کرد. همچنین، بر اساس نتایج حاصل از سناریوی A2 نشان داده شد که جریان رودخانه ۹، ۴۴ و ۶۶ درصد به ترتیب در دوره‌های ۲۰۱۱-۲۰۳۰، ۲۰۳۰-۲۰۴۶ و ۲۰۴۶-۲۰۸۰ و ۲۰۸۰-۲۰۹۹ نسبت به دوره پایه کاهش می‌یابد [۶]. حافظ‌پرست و همکاران (۱۳۹۶) در پژوهشی به منظور ارزیابی عدم قطعیت تغییرات اقلیمی و اثر آن بر آبدی رودی سد جامیشان واقع در شمال شرقی استان کرمانشاه، از مدل ترکیبی حاصل از میانگین وزنی خروجی هفت مدل اقلیمی (CGCCM3, CNRMCM3, CSIROMK3/5, ECHOM5OM, ECHO-G, HADCM3, HADGEM) استفاده کردند. در تحقیق یادشده تغییر در پارامترهای دما و بارش منطقه مطالعاتی در دوره‌های ۲۰۲۰-۲۰۳۹ و ۲۰۴۰-۲۰۵۹ تحت سه سناریوی انتشار A1B، B1 و A2 بررسی شد. نتایج پیش‌بینی نشان داد بارش و رواناب سالانه در دوره ۲۰۲۰-۲۰۳۹ کاهش و دمای سالانه افزایش می‌یابد. در دوره ۲۰۴۰-۲۰۵۹ این تغییرات شدیدتر است و دمای سالانه بین ۲+ و ۶- درجه سانتی‌گراد تغییر می‌کند. بارش و رواناب سالانه در سناریوهای A1B و B1 کاهش و در سناریوی A2 افزایش نشان دادند [۷]. نیرومندفرد و همکاران (۱۳۹۷) در تحقیقی به بررسی تأثیر تغییر اقلیم بر جریان رودخانه در حوضه محمدآباد در استان گلستان پرداختند. آنها ابتدا مدل بارش رواناب IHACRES برای منطقه مطالعه‌شده

نشان داد. نتایج شبیه‌سازی رواناب در دوره آبی، افزایش ۲/۷ تا ۲۲/۴ درصدی در حجم رواناب سالانه در منطقه را نشان داد [۱۵]. همودا و همکاران (۲۰۱۷) با ارزیابی پیش‌بینی آب‌وهوا در شمال تونس با استفاده از سه مدل مفهومی بارش-رواناب IHACRES، GR4j و HBV، نشان دادند در هر سه مدل افزایشی ۲۰ تا ۵۰ درصدی در رواناب تحت سناریوهای انتشار RCP4.5 و RCP8.5 برای هر دو دوره آینده نزدیک (۲۰۴۰-۲۰۷۰) و آینده دور (۲۰۷۰-۲۱۰۰) مشاهده شد [۱۶]. اولندا و همکاران (۲۰۱۹) در تحقیقی به پیش‌بینی ارتباط آبخوان آب‌های زیرزمینی با تغذیه هیدرولیکی حوضه رودخانه آلکانترا در ایتالیا با نرم‌افزار IHACRES پرداختند. آنها مدل را برای داده‌های دبی در دوره‌های ۱۹۸۰-۱۹۸۴ و ۱۹۸۶-۱۹۸۸ به ترتیب کالیبره و واسنجی کردند. مدل رابطه مستقیم بین نقطه پیک جریان رودخانه و آبخوان آب‌های زیرزمینی را در ماه‌های سرد سال به‌خوبی شبیه‌سازی کرد [۱۷]. با تغییر در اقلیم یک منطقه در سایر بخش‌های آن منطقه نیز تغییراتی به وجود می‌آید که از این تغییرات می‌توان به تغییر رژیم آبدی رودخانه‌ها که جزء اصلی منابع آب سطحی هستند، اشاره کرد. رواناب سطحی یکی از دلایل اصلی فرسایش و کاهش حاصل‌خیزی خاک، رسوب‌گذاری در مخازن و کاهش کیفیت آب رودخانه است. بنا به نظر کارشناسان یکی از دلایل عدم موفقیت در زمینه کاهش خطرات سیل نبود برآوردهای دقیق از حجم احتمالی رواناب است. حجم رواناب از یک طرف بر بزرگی طغیان می‌افزاید و از طرف دیگر، موجب افزایش نقل و انتقال رسوبات می‌شود که با به جا ماندن آنها، از ظرفیت بستر اصلی رودخانه کاسته می‌شود. در یک مدل هیدرولوژیکی که در آن امکان شبیه‌سازی کلیه فرایندهای یک سیستم و قوانین حاکم بر آن وجود دارد، تحلیل و پیش‌بینی واقع‌گرایانه از رواناب صورت می‌گیرد. برای بررسی اثرات ناشی از سیل در مناطق مجاور رودخانه که شامل زمین‌های کشاورزی و باغ‌ها و انواع ساختمان‌ها است، به استفاده از این مدل‌ها نیاز دارد. رودخانه هلیل‌رود در جنوب شرق ایران قرار گرفته و یکی از زیرحوضه‌های اصلی حوضه آبریز جازموریان است و علاوه بر اینکه پرآب‌ترین رودخانه در استان کرمان است، یکی از منابع عمده آب سطحی در جنوب شرقی ایران به شمار می‌رود. در تحقیق حاضر برای بررسی تأثیر تغییر اقلیم بر جریان روزانه حوضه آبخیز هلیل‌رود، به منظور برآورد داده‌های بارش و

سناریوی A2 اقلیم از نیمه‌خشک به خشک تغییر خواهد کرد. در ایستگاه زنجان در دوره ۲۰۲۰-۲۰۴۹ تحت سناریوی A2 اقلیم از نیمه‌خشک به مدیترانه‌ای و در دوره ۲۰۷۰-۲۰۹۹ از اقلیم مدیترانه‌ای دوباره به اقلیم نیمه‌خشک تغییر خواهد کرد [۱۰]. عبود و همکارانش (۲۰۰۹) از مدل HadCM3 و ریزمقیاس‌نمایی آماری SDSM و از مدل IHACRES برای ارزیابی تأثیر اقلیم بر هیدرولوژی در حوضه گیلجل ابی در ایتویبی استفاده و نشان دادند حجم رواناب در دوره زمانی ۲۰۷۱-۲۰۹۹ تحت سناریوهای A2 و B2 به ترتیب ۱۱/۶ و ۱۰/۱ درصد کاهش خواهد یافت [۱۱]. مکینتر و القریشی (۲۰۰۹) با هدف محاسبه دبی اوج و حجم جریان خروجی از حوضه وادی آهین در کشور عمان با مساحت ۷۳۴ کیلومتر مربع از سه مدل هیدرولوژیکی IHACRES، KINEROS2 و رگرسیون استفاده و برتری نتایج مدل IHACRES نسبت به دو مدل دیگر را تأیید کردند [۱۲]. در تحقیقی ویز و همکاران (۲۰۱۰) با استفاده از چهار مدل بارش-رواناب SMARG، SIMHYD، SACRAMENTO و IHACRES تأثیر تغییر اقلیم روی واکنش‌های هیدرولوژیکی ۶۱ حوضه جنوب شرق استرالیا بررسی کردند و نشان دادند مدل IHACRES دقت بیشتری در مقایسه با سایر روش‌ها در شبیه‌سازی بارش-رواناب دارد [۱۳]. تینگ و همکاران (۲۰۱۲)، به مقایسه عدم قطعیت مدل‌های گردش عمومی جو و مدل‌های بارش-رواناب بر نتایج حاصل از تأثیر تغییر اقلیم بر رواناب استرالیا پرداختند. آنها به این منظور، از خروجی ۱۵ مدل گردش عمومی و پنج مدل بارش-رواناب استفاده کردند. بیشتر نتایج حاصل از مدل‌های گردش عمومی جو، خشکی را به‌ویژه در جنوبی‌ترین بخش منطقه بررسی‌شده پیش‌بینی کرده، کاهش درخورد توجهی را در حجم رواناب نشان دادند [۱۴]. سو و همکاران (۲۰۱۶) اثر تغییر اقلیم را بر اساس سه سناریوی انتشار RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 روی شش حوضه در فلات تبت براساس خروجی‌های ۲۰ مدل گردش عمومی جو بررسی کردند. ایشان برای شبیه‌سازی هیدرولوژیکی از مدل (Variable Infiltration Capacity) VIC استفاده کردند. نتایج پژوهش آنها نشان داد بارش بین ۵ تا ۱۰ درصد در آینده نزدیک (۲۰۱۱ تا ۲۰۴۰) و بین ۱۰ تا ۲۰ درصد در آینده دور (۲۰۴۱ تا ۲۰۷۰) در منطقه افزایش خواهد داشت، همچنین نتایج افزایش ۲ تا ۴ درصدی دما در حوضه‌های شمالی و ۱/۲ تا ۲/۸ درصدی در مناطق جنوبی را

هلیل‌رود که عامل عمده مؤثر در جریان آب رودخانه‌هاست به صورت برف است. در حوضه آبخیز هلیل‌رود تنوع آب و هوایی زیادی مشاهده می‌شود. به شکلی که در ارتفاعات اقلیم سرد و خشک و در مناطق دشت، اقلیم گرم و خشک مشاهده می‌شود. متوسط ریزش‌های سالانه حوضه آبریز هلیل‌رود ۳۲۰ میلی‌متر است. سد جیرفت یکی از سدهای مهم حوضه هلیل‌رود جیرفت در استان کرمان است. این سد با اهداف کشاورزی، تولید برق و کنترل سیلاب بر سرشاخه هلیل‌رود احداث شده است. در حوضه بالادست و پایین دست سد جیرفت ایستگاه‌های هواشناسی سلطانی و حسین‌آباد سقدر و می‌آنده جیرفت ایستگاه آب‌سنجی کناروئیه قرار دارند. رودخانه هلیل‌رود در ارتفاعات از آبراهه‌های زیادی سرچشمه گرفته و پس از الحاق شاخه‌های سلطانی، بافت، رابر، سیدمرتضی، رودر و رودخانه شور در شمال سبزواران و چند مسیل دیگر وارد دشت رودبار شده و از آنجا به داخل هامون جازموریان تخلیه می‌شود. روی مسیر آبی از سرشاخه‌ها تا محل خروجی حوضه چندین ایستگاه هیدرومتری احداث شده است که از مهم‌ترین آنها می‌توان به ایستگاه‌های سلطانی، بافت، هنجان، میدان، کناروئیه و چشمه عروس اشاره کرد. در این پژوهش از متغیرهای هواشناسی دما و بارش ایستگاه‌های هواشناسی و برای متغیر هیدرولوژیکی متوسط دبی ماهانه دوره پایه ۳۰ ساله (۱۹۸۹-۲۰۱۷) از دو ایستگاه هیدرومتری استفاده شد. مشخصات ایستگاه‌های یادشده در جدول ۱ و نقشه منطقه مطالعاتی در شکل ۱ ارائه شده است.

دمای آینده از مدل گردش عمومی جو CanESM2 تحت دو سناریوی RCP4.5 و RCP8.5 و از مدل ریزمقیاس‌نمایی آماری SDSM4.2.9 استفاده شد. سپس، توسط مدل بارش رواناب IHACRES با مقایسه رواناب دوره‌های گذشته با دوره‌های آبی متأثر از شرایط تغییر اقلیم، کارایی مدل IHACRES در پیش‌بینی رواناب روزانه برای زیرحوضه آبخیز هلیل‌رود بررسی شد.

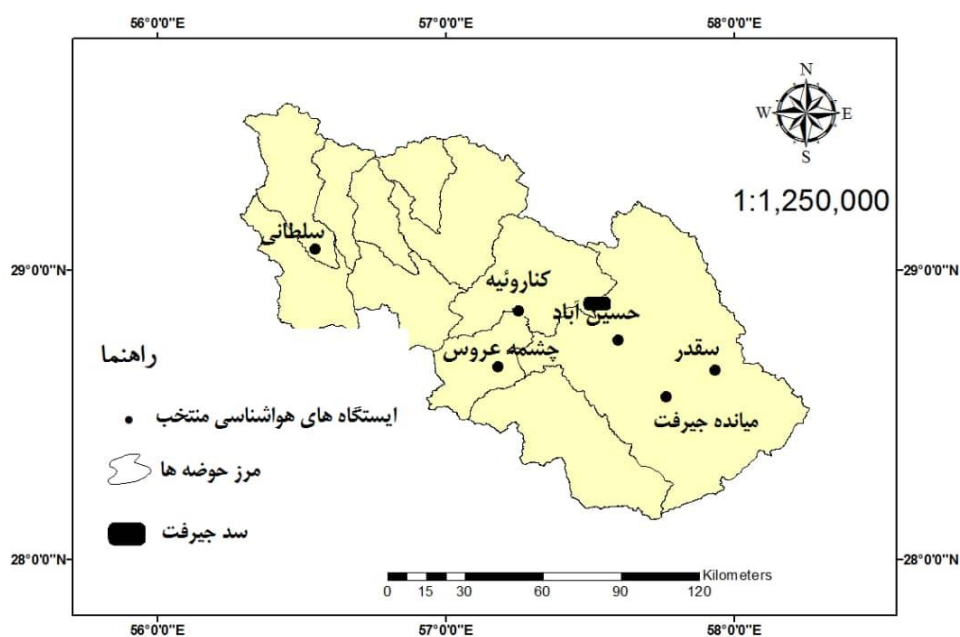
## مواد و روش‌ها

### معرفی منطقه مطالعه‌شده

رودخانه هلیل‌رود در جنوب شرق ایران و پرآب‌ترین رودخانه در استان کرمان است. حوضه یادشده بین حدود جغرافیایی  $15^{\circ} 56'$  تا  $30^{\circ} 58'$  طول شرقی و  $27^{\circ} 45'$  تا  $33^{\circ} 29'$  عرض شمالی واقع شده که از شمال و شمال غربی به ارتفاعات بارز و لاله‌زار، از جهت شمال شرقی، به حوضه آبریز رودخانه نسا و از طرف شرق، به ساحل غربی دریاچه هامون جازموریان منتهی می‌شود. حوضه آبریز رودخانه هلیل‌رود به طور کلی کم‌باران ارزیابی می‌شود ولی در ارتفاعات سرشاخه رودخانه بارش از مرز ۴۰۰ میلی‌متر در سال فراتر رفته و پوشش برفی نیز دیده می‌شود. نزولات جوی در قسمت اعظم سطح حوضه به استثنای خط‌الرأس‌های شمالی و شمال‌غربی که شامل ارتفاعات جبال بارز و لاله‌زار است و برف‌گیر هستند، در بقیه قسمت‌ها به صورت رگبارهای فصلی و از نوع لحظه‌ای و موسمی هستند. متوسط ریزش‌های سالانه حوضه آبریز هلیل‌رود ۳۲۰ میلی‌متر است و به طور کلی، می‌توان گفت که بخش مهمی از ریزش‌های جوی در ارتفاعات سراب

جدول ۱. مشخصات ایستگاه‌های حوضه هلیل‌رود

ایستگاه	نوع ایستگاه	طول جغرافیایی (دقیقه-درجه-ثانیه)	عرض جغرافیایی (دقیقه-درجه-ثانیه)	ارتفاع از سطح دریا (متر)	میانگین طولانی مدت بارش (میلی‌متر)	میانگین طولانی مدت دما (سانتی‌گراد)
سلطانی	تبخیرسنجی	۵۶ ۳۱ ۵۵	۲۹ ۰۴ ۳۲	۲۰۷۰	۶۵	۱۳
حسین‌آباد	تبخیرسنجی	۵۷ ۳۵ ۳۲	۲۸ ۴۶ ۵۶	۹۰۳	۱۱۴	۲۰
سقدر	کلیماتولوژی	۵۷ ۵۳ ۰۰	۲۸ ۴۹ ۰۰	۱۶۱۰	۱۶۰	۱۸/۱۶
می‌آنده جیرفت	سینوپتیک	۵۷ ۴۸ ۰۰	۲۸ ۳۵ ۰۰	۶۰۱	۶۶۰	۲۱/۷
کناروئیه	آبسنجی	۵۷ ۱۴ ۲۳	۲۸ ۵۱ ۳۱	۱۴۵۶	۹۰	۱۷
چشمه عروس	آبسنجی	۵۶ ۵۲ ۱۱	۲۹ ۱۸ ۴۳	۲۴۶۰	۱۲۰	۱۴



شکل ۱. موقعیت حوضه آبخیز هلیل رود و ایستگاه‌های مطالعه‌شده

$$I = \frac{P}{T + 10} \quad (1)$$

در رابطه بادشده  $I$  ضریب خشکی،  $T$  متوسط دمای سالانه ( $^{\circ}\text{C}$ ) و  $P$  متوسط بارندگی سالانه (میلی‌متر) است [۱۸].

#### معرفی مدل‌های استفاده‌شده

مدل‌های گردش عمومی جو مدل‌هایی هستند که به منظور شبیه‌سازی اقلیم حال حاضر زمین توسعه داده شده و قادرند تغییر اقلیم آینده کره زمین را پیش‌بینی کنند. هدف مدل‌های گردش عمومی پیش‌بینی تحول زمانی جو است [۱۹]. این پیش‌بینی‌ها براساس سناریوهای مختلفی صورت می‌گیرد که هر یک بیانگر وضعیتی از تولید گازهای گلخانه‌ای و عوامل مؤثر بر کنترل تولید این گازها هستند. هر یک از این سناریوها بر مبنای فرضیات مختلفی درباره رشد جمعیت، توسعه اقتصادی، تحول فناوری، سطح زندگی و گزینه‌های موجود تولید انرژی استوار هستند که به آنها سناریوی انتشار نیز گفته می‌شود [۲۰]. پیش‌بینی‌های انجام‌شده توسط بسیاری از مدل‌های گردش عمومی ( $\text{GCMs}^1$ ) بیانگر افزایش تعداد و مقدار

#### روش دومارتن

یکی از روش‌های متداول برای تعیین اقلیم یک منطقه روش دومارتن است. این روش بین دما و مقدار رطوبت، رابطه تجربی برقرار می‌کند که به صورت معادله ۱ نشان داده می‌شود. در روش دومارتن براساس ضریب خشکی ( $I$ ) شش نوع اقلیم برای منطقه مشخص می‌شود که در جدول ۲ آورده شده‌اند. با توجه به اینکه متوسط بارندگی حوضه هلیل رود ۳۲۰ میلی‌متر و متوسط دمای سالانه ۱۴/۵ سانتی‌گراد است، بر اساس روش دومارتن، ضریب خشکی حوضه هلیل رود ( $I=13$ ) محاسبه شد. براساس جدول ۲ اقلیم منطقه مطالعه‌شده نیمه‌خشک تعیین شد.

#### جدول ۲. تعیین نوع اقلیم به روش دومارتن

نام اقلیم	محدوده ضریب خشکی دومارتن (I)
خشک	کوچک‌تر از ۱۰
نیمه‌خشک	۱۰ تا ۱۹/۹
مدیترانه‌ای	۲۰ تا ۲۳/۹
نیمه‌مرطوب	۲۴ تا ۲۷/۹
مرطوب	۲۸ تا ۳۴/۹
بسیارمرطوب	بزرگ‌تر از ۳۵

ریزمقیاس‌نمایی آماری SDSM4.2.9 استفاده شد. در مطالعه‌ای دهقان و همکاران (۲۰۲۰) برای پیش‌بینی خشکسالی هواشناسی در استان فارس تحت شرایط تغییر اقلیم از شاخص شدت خشکسالی پالمر (PDSI) و مدل ریزمقیاس‌نمایی آماری SDSM استفاده کردند. با توجه به دقت زیاد مدل SDSM در پیش‌بینی بارش و دما، آنها این مدل را برای مناطق خشک و نیمه‌خشک پیشنهاد کردند [۲۲]. این مدل آماری ریزمقیاس‌نمایی توسط ویلی و داوسون (۲۰۰۷) به‌عنوان ابزاری برای ریزمقیاس کردن به روش آماری توسعه یافته است. مبنای این مدل رگرسیون چندمتغیره بوده و برای پیش‌بینی پارامترهای اقلیمی نظیر بارش و دما در درازمدت با توجه به سیگنال‌های بزرگ‌مقیاس اقلیمی استفاده می‌شود [۲۳]. این مدل براساس داده‌های روزانه اقلیم محلی (بارش و دما) و داده‌های بزرگ‌مقیاس ناحیه‌ای NCEP<sup>۴</sup> که شامل ۲۶ متغیر اتمسفری بزرگ‌مقیاس بوده و دقت مکانی آن  $2/5^\circ \times 2/5^\circ$  بوده و از سایت SDSM در دوره آماری ۲۰۱۷-۱۹۴۸ قابل دسترسی است. فهرست متغیرهای NCEP در جدول ۳ آورده شده است.

مدل SDSM از سه بخش اصلی شامل واسنجی، ارزیابی و تولید متغیرهای هواشناسی در آینده تشکیل شده است. مدل در مرحله واسنجی، نیاز به مشخص‌کننده رفتار اقلیم در دوره گذشته دارد. در مطالعه حاضر این فایل با استفاده از دوره زمانی (۱۹۸۹-۲۰۱۷) به‌عنوان دوره پایه، تهیه شد. در این پژوهش از مدل CanESM2 با روش ریزمقیاس‌نمایی برای SDSM تولید داده‌های بارش، دما روزانه استفاده شد. سناریوهای انتشار استفاده‌شده در این پژوهش RCP4.5 و RCP8.5 انتخاب شدند. ارزیابی داده‌های تولیدشده در دوره پایه با استفاده از شاخص‌های آماری نظیر ضریب تبیین ( $R^2$ ) و شاخص‌های خطاسنجی مجذور میانگین مربعات خطا ( $RMSE^5$ )، میانگین خطای مطلق ( $MAE^6$ ) و ضریب نش-ساتکلیف ( $NSE^7$ ) انجام شد که به ترتیب با استفاده از معادلات ۲-۵ به دست می‌آیند [۲۵].

وقایع اقلیمی بزرگ و تغییرات بارش در مناطق مختلف دنیا است که این مسئله روی منابع آب در آینده تأثیرات زیادی دارد [۱]. مدل‌های هیدرولوژیکی زیادی برای تعیین تأثیرات کمی هیدرولوژیکی تغییر اقلیم با استفاده از داده‌های مدل‌های گردش عمومی استفاده شده‌اند. با این وجود، شفافیت مکانی بین نتایج مدل‌های گردش عمومی و داده‌های مورد نیاز برای مدل‌های هیدرولوژیکی وجود نداشته و این مسئله همواره به‌عنوان یک چالش مطرح بوده است. برای رفع این مسائل، روش‌های ریزمقیاس‌نمایی دینامیکی یا مدل‌های اقلیمی ناحیه‌ای ( $RCMs^1$ ) و روش‌های ریزمقیاس‌نمایی آماری توسعه داده شدند. صالح‌نیا و همکاران (۲۰۱۹) با مقایسه روش‌های ریزمقیاس‌نمایی آماری و دینامیکی در منطقه‌ای با اقلیم نیمه‌خشک نشان دادند روش‌های دینامیکی دقت بیشتری در در ریزمقیاس کردن خروجی‌های مدل‌های گردش عمومی جو داشتند. همچنین، روش‌های ریزمقیاس‌نمایی آماری در برآورد میانگین سالانه روزهای مرطوب کم برآورد داشتند [۲۱]. مدل گردش عمومی جو CanESM2<sup>۲</sup> در برآورد چهارمین نسل از مدل‌های آب‌وهوایی که در سال ۲۰۱۴ در پنجمین گزارش IPCC<sup>۳</sup> منتشر و توسط مرکز مدل‌سازی و تحلیل آب‌وهوای کانادا زیر نظر سازمان محیط زیست این کشور با قدرت تفکیک اتمسفری  $2/8^\circ \times 2/8^\circ$  توسعه یافته است. این مدل از سناریوهای جدید RCP (شامل RCP های ۲/۶، ۴/۵ و ۸/۵) استفاده می‌کند. در سناریوی RCP8.5، توازن واداشت تابشی در منتهی‌الیه جو و در سال ۲۱۰۰ حدود ۸/۵ وات بر متر مربع خواهد بود. یعنی تابش ورودی منهای خروجی از جو مثبت ۸/۵ وات بر متر مربع است که این انباشت ۸/۵ وات بر متر مربع در سامانه جو منجر به افزایش دمای کره زمین می‌شود. البته سناریوی RCP2.6 به دلیل اینکه تشعشع را خیلی پایین در نظر می‌گیرد. و برای مناطق خشک و نیمه‌خشک معقول نیست. به همین دلیل، در پژوهش حاضر به منظور برآورد داده‌های بارش و دمای آینده از مدل گردش عمومی جو CanESM2 تحت دو سناریوی میانه (RCP4.5) و بدبینانه (RCP8.5) و از مدل

4. National Centers for Environmental Prediction

5. Root Mean Square

6. Mean Absolutely Error

7. Nash-Sutcliffe Efficiency

1. Regional Climate Models

2. The Canadian Earth System Model

3. Intergovernmental Panel on Climate Change

جدول ۳. فهرست متغیرهای NCEP [۲۴]

ردیف	تعریف متغیر	ردیف	تعریف متغیر
۱	فشار سطح صفر (mslp)	۱۴	رطوبت ویژه سطحی (shum)
۲	قدرت جریان هوای سطحی (p-f)	۱۵	سرعت مداری سطحی (p-u)
۳	سرعت نصف‌النهاری سطحی (p-v)	۱۶	حالت گردابی سطحی (p-z)
۴	جهت باد سطحی در ارتفاع ۵۰۰ هکتوپاسکال (p5-th)	۱۷	واگرایی سطحی (p-zh)
۵	قدرت جریان هوا در ارتفاع ۵۰۰ هکتوپاسکال (p5-f)	۱۸	سرعت مداری در ارتفاع ۵۰۰ هکتوپاسکال (p5-u)
۶	سرعت نصف‌النهاری در ارتفاع ۵۰۰ هکتوپاسکال (p5-v)	۱۹	حالت گردابی در ارتفاع ۵۰۰ هکتوپاسکال (p5-z)
۷	ژئوپتانسیل در ارتفاع ۵۰۰ هکتوپاسکال (p850)	۲۰	جهت باد در ارتفاع ۵۰۰ هکتوپاسکال (p5-th)
۸	قدرت جریان هوا در ارتفاع ۸۵۰ هکتوپاسکال (p8-f)	۲۱	واگرایی در ارتفاع ۵۰۰ هکتوپاسکال (p5-zh)
۹	سرعت نصف‌النهاری در ارتفاع ۸۵۰ هکتوپاسکال (p8-v)	۲۲	سرعت مداری در ارتفاع ۸۵۰ هکتوپاسکال (p8-u)
۱۰	ژئوپتانسیل در ارتفاع ۸۵۰ هکتوپتانسیل (p850)	۲۳	حالت گردابی در ارتفاع ۸۵۰ هکتوپاسکال (p8-z)
۱۱	واگرایی در ارتفاع ۸۵۰ هکتوپتانسیل (p8-zh)	۲۴	جهت باد در ارتفاع ۸۵۰ هکتوپاسکال (p8-th)
۱۲	رطوبت نسبی در ارتفاع ۸۵۰ هکتوپتانسیل (r850)	۲۵	رطوبت نسبی در ارتفاع ۵۰۰ هکتوپاسکال (r500)
۱۳	میانگین دما در ارتفاع ۲ متری (temp)	۲۶	رطوبت نسبی سطحی (rhum)

### مدل بارش - رواناب

IHACRES یک مدل یکپارچه مفهومی متریک برای شبیه‌سازی بارش - رواناب است که توسط جکمن و هورنبرگر در سال ۱۹۹۳ توسعه یافت [۲۶]. یکی از مدل‌های کاربردی تغییر اقلیم که با نام اختصاری ICP<sup>۱</sup> قادر به شبیه‌سازی رواناب با دقت خوبی است. این مدل در بیشتر مناطق آب‌وهوایی گوناگون از جمله مناطق گرم و نیمه‌خشک کاربرد دارد. در این مطالعه از نسخه ۲ این نرم‌افزار استفاده شده که برای حوضه‌های دارای داده‌های پیوسته بارش، دما و رواناب کاربرد دارد. سری زمانی بارندگی و دما به عنوان ورودی مدل و برای شبیه‌سازی جریان استفاده می‌شوند. در حالی که داده جریان برای کالیبراسیون مدل و همچنین، بررسی دقت نتایج حاصل از شبیه‌سازی استفاده می‌شود. این مدل مطابق شکل ۲ شامل دو بخش به هم پیوسته غیرخطی و خطی است که ابتدا بارندگی ( $r_k$ ) و دما ( $t_k$ ) در هر گام زمانی ( $k$ ) با مدول غیرخطی به بارندگی مؤثر ( $u_k$ ) تبدیل و سپس، با مدول خطی هیدروگراف به رواناب سطحی ( $x_k$ ) در همان گام زمانی تبدیل می‌شود.

$$R^2 = \frac{(\sum_{j=1}^n [O_i - \bar{O}_i][P_i - \bar{P}_i])^2}{\sum_{j=1}^n [O_i - \bar{O}_i]^2 \sum_{j=1}^n [P_i - \bar{P}_i]^2} \quad (۲)$$

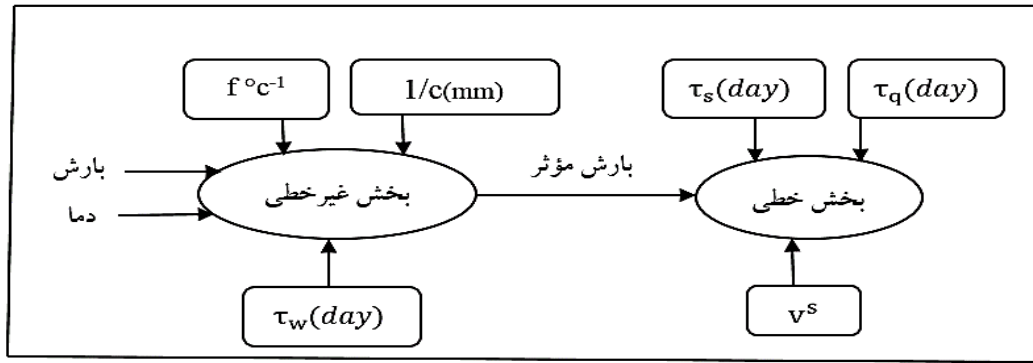
$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (O_i - P_i)^2}{n}} \quad (۳)$$

$$MAE = \frac{\sum_{j=1}^n |P_i - P_i|}{n} \quad (۴)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{j=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{j=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (۵)$$

که در معادلات یادشده  $O_i$  داده‌های مشاهده‌ای،  $P_i$  داده‌های شبیه‌سازی شده بر حسب مترمکعب بر ثانیه و  $n$  تعداد داده‌ها است. RMSE و MAE معرف دقت در روش‌های آماری است. دامنه ضریب NSE بین  $-\infty$  تا ۱ است. دامنه بین صفر تا ۱ قابل قبول و بهترین حالت زمانی است که ضریب NSE برابر ۱ باشد [۲].





شکل ۲. ساختار عملکرد مدل IHACRES [۲۶]

سریع و  $\alpha^s$  و  $\beta^s$  به ترتیب ثابت زمانی جریان آهسته هستند این ضرایب با استفاده از روابط ۱۲ و ۱۳ محاسبه می شوند. که در آن بازه زمانی و  $\tau_q$  و  $\tau_s$  ثابت زمانی فروکش برای جریان سریع و آهسته در مخازن متوالی (بر حسب روز) هستند. نسبت حجمی جریان سریع و آهسته به صورت رابطه ۱۴ در گرفته می شوند.

$$x_k = x_k^q + x_k^s \quad (9)$$

$$x_{k-1}^q + \beta^q u_k \quad (10)$$

$$x_k^s = -\alpha^s x_{k-1}^s + \beta^s u_k \quad (11)$$

$$\tau_q = \frac{-\Delta}{\ln(-\alpha^q)} \quad (12)$$

$$\tau_s = \frac{-\Delta}{\ln(-\alpha^s)} \quad (13)$$

$$v^q = 1 - v^s = \frac{\beta^q}{1 + \alpha^q} = 1 - \frac{\beta^s}{1 + \alpha^s} \quad (14)$$

در این روش سه پارامتر  $C, \tau_w$  و  $f$  از مدل غیرخطی کاهش و سه پارامتر از چهار پارامتر  $\alpha^q, \beta^q, \alpha^s$  و  $\beta^s$  از مدل خطی هیدروگراف باید براساس داده های مشاهداتی برای حوضه مطالعه شده کالیبره شوند بهترین مقادیر اولیه  $\tau_w$  و  $f$  از طریق جدول ها و گراف های مشخص شده در خروجی ICP قابل تعیین هستند [۲۸]. در ارزیابی نتایج شبیه سازی پیوسته جریان در مدل IHACRES از معیارهای آماری مختلفی استفاده می شود. رابطه ۵ که تحت عنوان ضریب کارایی نش - ساتکلیف شناخته

۱. تبدیل بارش به بارش مؤثر (بخش غیر خطی)

روابط به کاررفته در مدول غیرخطی کاهش به منظور تبدیل بارش به بارندگی مؤثر در حوضه به شرح ذیل است [۲۷].

$$u_k = [c(\phi_k - 1)]^p \times r_k \quad (6)$$

$$\phi_k = r_k + \left(1 - \frac{1}{t_k}\right) \phi_{k-1} \quad (7)$$

$$t_k = \tau_w \exp(f(T_{ref} - T_k) \times 0.062) \quad (8)$$

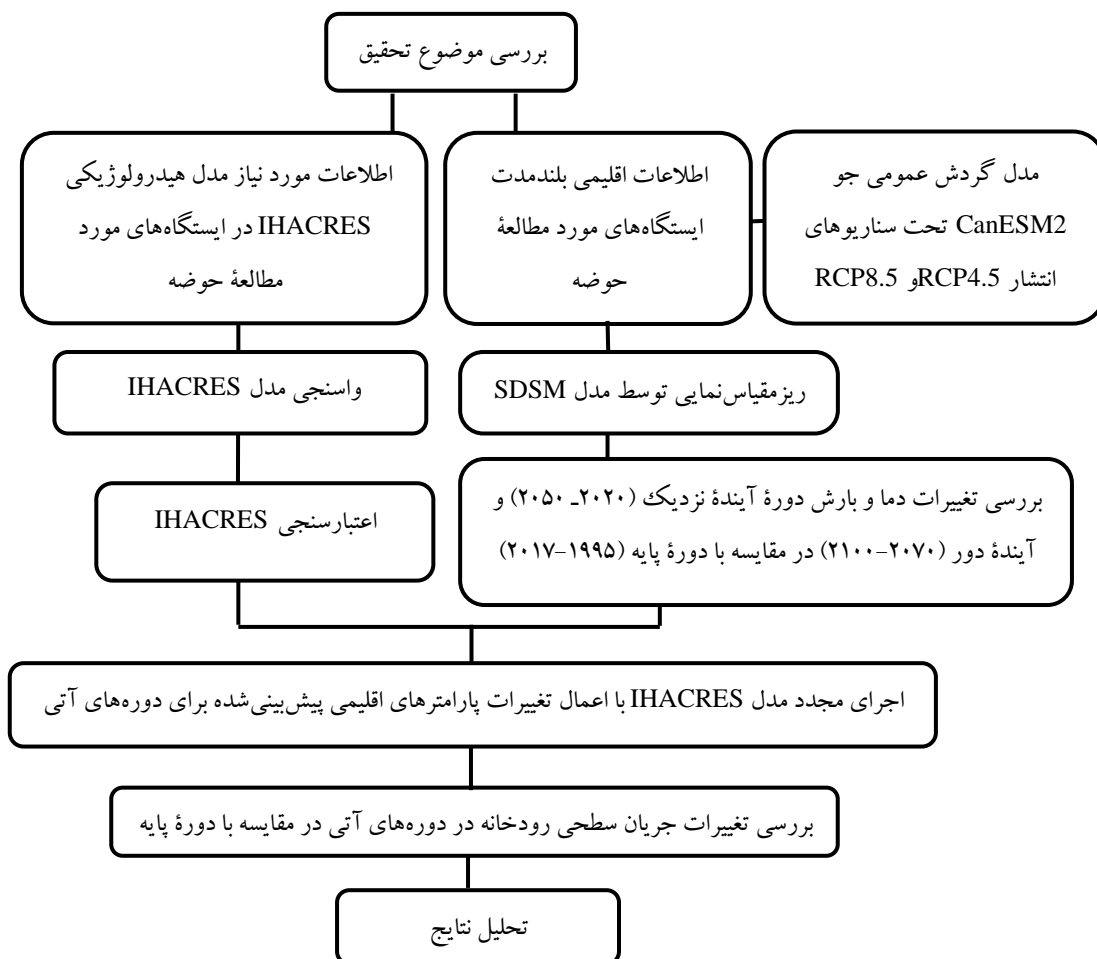
در رابطه ۶ ظرفیت نگهداری رطوبت حوضه آبریز (بر حسب میلی متر)،  $I$  آستانه شاخص رطوبت خاک،  $P$  فاکتور واکنش غیرخطی و  $r_k$  بارش مشاهداتی (بر حسب میلی متر) است.  $\Phi_k$  شاخص رطوبت خاک است که با استفاده از رابطه ۷ محاسبه می شود. که در آن  $t_k$  برابر شدت خشکی خاک (بر حسب روز) و به عنوان تابعی از دما است که با استفاده از رابطه ۸ محاسبه می شود. در رابطه ۸  $\tau_w$  شدت خشکی خاک مینا (بر حسب روز)،  $f$  تابع تعدیل دما (تأثیر تغییر یک واحد دما بر میزان تلفات)،  $T_{ref}$  دمای مرجع و  $T_k$  دما در بازه زمانی مورد نظر (بر حسب درجه سانتی گراد) هستند. بعد از محاسبه بارش مؤثر، هیدروگراف واحد کل (بر حسب متر مکعب بر ثانیه) با استفاده از بخش خطی در مدل محاسبه می شود.

۲. تبدیل بارش مؤثر به رواناب (بخش خطی)

بخش خطی سه پارامتر  $v^s, \tau_s, \tau_q$  دارد. ترکیب دو مؤلفه جریان سریع  $x_k^q$  و جریان آهسته  $x_k^s$  منجر به تولید رواناب  $x_k$  می شود که با استفاده از روابط ۹ - ۱۴ محاسبه می شود. که در آن  $\alpha^q$  و  $\beta^q$  به ترتیب، ثابت زمانی جریان

بازندگی بر حسب میلی‌متر یا اینچ، داده‌های دما بر حسب درجه سلسیوس، فارنهایت و یا کلوین و داده‌های جریان رودخانه بر حسب مترمکعب در ثانیه، میلی‌گرم در پایه زمانی، میلی‌متر در هر پایه زمانی، لیتر بر ثانیه یا فوت مکعب بر ثانیه.

می‌شود، نشان می‌دهد دبی‌های جریان تا چه حد توسط مدل درست شبیه‌سازی شده‌اند. این معیار در واقع اهمیت نسبی واریانس مقادیر شبیه‌سازی شده را در مقایسه با واریانس داده‌های مشاهداتی نشان می‌دهد. مدل یادشده به سه سری داده‌ها نیاز دارد، که عبارت‌اند از: داده‌های



شکل ۳. فلوجارت مراحل انجام پژوهش

آماري بررسی شد. برای ارزیابی خروجی‌های مدل، داده‌های مشاهداتی و مدل‌سازی شده با یکدیگر مقایسه شدند. این کار از طریق مقایسه داده‌های متغیرهای بارش، دما داده‌های مشاهداتی با داده‌های شبیه‌سازی توسط مدل و با استفاده از روش آماری، نقشه و نمودار انجام شد. در مرحله بعد خروجی‌های مدل منتخب تحت دو سناریوی متفاوت اقلیمی میانه (RCP4.5) و بدبینانه (RCP8.5) در دو دوره آینده نزدیک (۲۰۲۰-۲۰۵۰) و آینده دور (۲۰۷۰-۲۱۰۰) در مقیاس جهانی به دست آمد و به مقیاس ایستگاهی تبدیل شدند. فرایند تغییر اقلیم حوضه

در تحقیق حاضر به منظور شناسایی تغییر اقلیم در حوضه آبخیز مطالعه شده با توجه به داده‌های مورد نیاز مدل، از آمار بلندمدت، برای دوره پایه (۱۹۸۹-۲۰۱۷) چهار ایستگاه هواشناسی و دو ایستگاه هیدرومتری برای مقادیر دما و بارش روزانه استفاده شد. پس از جمع‌آوری داده‌ها و اطلاعات برای محدوده مطالعاتی، نسبت به آزمون همگنی داده‌ها در محیط نرم‌افزار Minitab و اصلاح داده‌ها انجام شد. در مرحله بعد، توانمندی مدل SDSM در مدل‌سازی اقلیم دوره پایه ایستگاه‌های مطالعه شده، براساس سناریوی حالت پایه و با استفاده از پارامترهای

آبخیز هلیل رود، تحت سناریوهای اقلیمی یادشده بررسی و ارزیابی شد. در مرحله بعد داده های بارش، دما و دبی مشاهده ای در دوره آماری ۳۰ ساله (۱۹۸۹-۲۰۱۷) به عنوان ورودی های مدل IHACRES به منظور انجام واسنجی و صحت سنجی استفاده شد. پس از این مرحله مقادیر پیش بینی شده دما و بارش توسط مدل اقلیمی SDSM، به مدل بارش رواناب IHACRES داده شد و تغییرات دبی در دو دوره آینده نزدیک و آینده دور مشخص شد که مراحل انجام پژوهش در شکل ۳ آورده شده است.

### نتایج و بحث

#### بررسی توانمندی مدل SDSM

با تحلیل آماری طبق جدول ۴ نتایج مدل سازی بین دمای شبیه سازی شده تطابق بسیار خوبی وجود داشته و فقط در مورد بارش تفاوت کمی بود که با نتایج ویلی و همکاران (۲۰۰۷) هماهنگی داشت.

ارزیابی تغییر در پارامترهای اقلیمی در دو دوره پیش بینی در جدول های ۵ تا ۱۲ مقادیر میانگین دما و بارش ماهانه در دوره پایه، دوره آینده نزدیک و دوره آینده دور تحت دو سناریوی اقلیمی RCP4.5 و RCP8.5 حاصل از خروجی مدل SDSM بیان شد. میانگین بارش ماهانه در ماه های سرد سال (دسامبر، ژانویه، فوریه و مارس) کاهش می یابد. در مورد متغیر دما، در دوره آینده نزدیک و هم در دوره آینده دور در هر دو سناریو و در ماه های می، ژوئن، جولای، آگوست، سپتامبر و اکتبر کاهش و در ماه های نوامبر، دسامبر، ژانویه، فوریه، مارس افزایش می یابد. درصد تغییرات میزان دما و بارش در دوره مشاهداتی نسبت به دو دوره آینده نزدیک (۲۰۲۰-۲۰۵۰) و آینده دور (۲۰۷۰-۲۱۰۰) در جدول های ۱۳ تا ۱۶ نشان می دهد که میزان دما در هر دو دوره کاهش و میزان بارش افزایش پیدا خواهد کرد.

جدول ۴. نتایج ارزیابی مدل در مرحله صحت سنجی با استفاده از آماره های  $R^2$  (ضریب تبیین) و RMSE (مجدور میانگین مربعات خطا)، MAE (میانگین خطای مطلق) و NSE (ضریب نش - ساتکلیف)

بارش دما								ایستگاه
RMSE	MAE	NSE	$R^2$	RMSE	MAE	NSE	$R^2$	
۰/۲۲	۰/۳۵	۰/۸۰	۰/۹۹	۰/۸۱	۰/۳۶	۰/۹۹	۰/۹۹	سلطانی
۰/۴۱	۰/۱۷	۰/۶۳	۱	۰/۸۷	۰/۳۶	۰/۹۹	۰/۹۹	حسین آباد
۰/۲۸	۰/۲۵	۰/۸۲	۰/۹۹	۰/۸۸	۰/۸۲	۰/۹۸	۰/۹۸	سقدر
۰/۵۵	۰/۱۹	۰/۶۱	۰/۹۸	۰/۶۶	۰/۳۶	۰/۹۹	۰/۹۹	می آنده جیرفت

جدول ۵. مقادیر دما مشاهداتی و شبیه سازی شده (سانتی گراد) ایستگاه سلطانی در دوره های پیش بینی شده تحت دو سناریوی انتشار متفاوت

دوره	ماه	ژانویه	فوریه	مارس	آوریل	می	ژوئن	جولای	آگوست	سپتامبر	اکتبر	نوامبر	دسامبر
دوره پایه ۱۹۸۹-۲۰۱۷	۲	۱	۲/۷	۶/۶	۱۱/۷	۱۷/۰	۲۱/۳	۲۳/۲	۲۲/۱	۱۸/۸	۱۳/۴	۷/۴	۸/۲
دوره RCP4.5	۱/۵	۵/۵	۹/۶	۱۱/۸	۱۱/۷	۱۶/۶	۱۳/۶	۱۲/۲	۱۴/۹	۱۱/۹	۱۲/۲	۱۲/۲	۱۲/۲
دوره RCP8.5 (۲۰۲۰-۲۰۵۰)	۳	۷	۱۱/۶	۱۲	۱۱/۹	۱۸/۸	۱۲	۱۲/۱	۱۳	۱۲	۱۲/۲	۱۲/۲	۱۲/۸
دوره RCP4.5	۱	۴	۱۲	۱۲/۲	۱۲	۲۰	۱۲/۱	۱۲	۱۶	۱۲/۵	۱۲/۳	۱۲/۶	۱۲/۶
دوره RCP8.5 (۲۰۷۰-۲۱۰۰)	۵	۱	۱۲/۴	۱۳	۱۲/۷	۱۹/۷	۱۳	۱۸	۱۵	۱۳	۱۲/۴	۱۲/۷	۱۲/۷

جدول ۶. مقادیر دمای مشاهداتی و شبیه سازی شده (سانتی گراد) ایستگاه حسین آباد در دوره های پیش بینی شده تحت دو سناریوی انتشار متفاوت

دوره	ماه	ژانویه	فوریه	مارس	آوریل	می	ژوئن	جولای	آگوست	سپتامبر	اکتبر	نوامبر	دسامبر
دوره پایه ۱۹۸۹-۲۰۱۷	۱۰/۵	۱۲	۱۵	۲۱	۲۴/۵	۲۶/۷	۲۹	۳۰/۶	۲۸	۲۱/۵	۱۷	۱۴/۵	
دوره RCP4.5	۱۶	۱۵	۱۹	۲۱/۵	۲۲	۲۳	۲۴	۲۶	۲۶/۵	۱۹	۱۹/۵	۱۸	
دوره RCP8.5 (۲۰۲۰-۲۰۵۰)	۱۷	۱۷/۵	۱۸	۲۱	۲۱/۵	۲۴/۵	۲۳	۲۷/۵	۲۵	۱۸/۸	۱۹	۱۶	
دوره RCP4.5	۱۵/۶	۱۳	۱۷	۲۲	۲۱	۲۰	۲۵	۲۳/۵	۲۲	۲۰	۲۱	۱۶	
دوره RCP8.5 (۲۰۷۰-۲۱۰۰)	۱۸	۱۵	۱۷/۸	۲۱/۲	۲۱/۴	۲۲/۵	۲۶	۲۴	۲۲/۵	۲۱	۲۰/۵	۱۵	

جدول ۷. مقادیر دمای مشاهداتی و شبیه‌سازی شده (سانتی‌گراد) ایستگاه سقدر در دوره‌های پیش‌بینی شده تحت دو سناریوی انتشار متفاوت

دوره	ماه	ژانویه	فوریه	مارس	آوریل	می	ژوئن	جولای	اگوست	سپتامبر	اکتبر	نوامبر	دسامبر
دوره پایه ۱۹۸۹-۲۰۱۷		۷/۵	۱۰/۵	۱۳/۷	۱۷	۲۳	۲۵	۲۷	۲۵/۵	۲۳	۲۰	۱۶	۹/۸
دوره RCP4.5		۱۰	۱۲	۱۵	۱۸	۱۹/۵	۲۲	۲۱/۵	۲۰	۱۸/۵	۱۸	۱۷/۵	۱۳
دوره RCP8.5		۱۱/۵	۱۳/۵	۱۴/۲	۱۸/۳	۱۸	۲۱/۵	۲۲	۲۰/۷	۱۷	۱۸/۲	۱۹	۱۵
دوره RCP4.5		۱۲	۱۱	۱۶	۱۹	۱۷	۱۹/۷	۲۰/۳	۲۰/۵	۱۸	۱۷/۵	۱۸/۵	۱۴
دوره RCP8.5		۱۱	۱۳	۱۶/۵	۱۸/۵	۱۹	۲۰/۶	۲۰/۵	۲۱	۱۹	۱۸/۴	۱۸/۸	۱۲/۵

جدول ۸. مقادیر دمای مشاهداتی و شبیه‌سازی شده (سانتی‌گراد) ایستگاه می‌آنده جیرفت در دوره‌های مورد پیش‌بینی تحت دو سناریوی انتشار متفاوت

دوره	ماه	ژانویه	فوریه	مارس	آوریل	می	ژوئن	جولای	اگوست	سپتامبر	اکتبر	نوامبر	دسامبر
دوره پایه ۱۹۸۹-۲۰۱۷		۱۲	۱۴	۱۸/۵	۲۵	۲۸/۶	۲۹/۵	۳۰	۲۹	۲۷/۵	۲۴	۱۹/۵	۱۴/۸
دوره RCP4.5		۱۶	۱۷	۲۱	۲۳/۶	۲۵	۲۴/۷	۲۸	۲۷	۲۴/۵	۲۱/۵	۲۱	۱۸
دوره RCP8.5		۱۷/۵	۱۸	۲۲/۷	۲۴	۲۴/۴	۲۶	۲۶/۵	۲۵/۲	۲۳	۲۲	۲۲/۳	۱۹/۵
دوره RCP4.5		۱۸	۱۹	۲۰/۵	۲۵/۶	۲۴	۲۵	۲۶/۲	۲۵	۲۳/۵	۲۳	۲۲	۱۷
دوره RCP8.5		۱۷/۶	۱۶/۹	۲۲	۲۴/۵	۲۵/۲	۲۴	۲۷	۲۶	۲۴	۲۱/۳	۲۲/۶	۲۱

جدول ۹. مقادیر بارش مشاهداتی و شبیه‌سازی شده (میلی‌متر) ایستگاه سلطانی در دوره‌های پیش‌بینی شده تحت دو سناریوی انتشار متفاوت

دوره	ماه	ژانویه	فوریه	مارس	آوریل	می	ژوئن	جولای	اگوست	سپتامبر	اکتبر	نوامبر	دسامبر
دوره پایه ۱۹۸۹-۲۰۱۷		۱۱/۶۴	۱۴/۲۸	۱۰/۸	۴/۴۴	۱/۲۷	۱/۱	۱/۶۸	۱/۹۲	۲/۴	۲/۲۸	۲/۶۴	۱۰/۲
دوره RCP4.5		۵/۸۸	۴/۵۶	۶/۳۶	۶/۲۴	۷/۴	۶/۳۰	۷/۵	۶/۱۲	۶/۷	۷/۸	۸/۴	۶/۸
دوره RCP8.5		۴/۸	۵/۰۴	۵/۵	۶/۴	۶/۸۴	۵/۸	۶/۶	۶	۴/۵۶	۵/۰۴	۳/۹۶	۴/۸
دوره RCP4.5		۶/۲۴	۵/۸	۵/۱۶	۵/۴	۶/۴۸	۷	۵/۴	۴/۸	۶/۳۶	۷/۶۸	۸/۵	۵/۱۶
دوره RCP8.5		۶/۳۶	۶/۸۴	۶/۴۲	۴/۵۶	۷/۴	۶/۳۴	۵/۲۸	۵/۱۶	۷/۴	۴/۵۶	۵/۲۸	۴/۸

جدول ۱۰. مقادیر بارش مشاهداتی و شبیه‌سازی شده (میلی‌متر) ایستگاه حسین‌آباد در دوره‌های پیش‌بینی شده تحت دو سناریوی انتشار متفاوت

دوره	ماه	ژانویه	فوریه	مارس	آوریل	می	ژوئن	جولای	اگوست	سپتامبر	اکتبر	نوامبر	دسامبر
دوره پایه ۱۹۸۹-۲۰۱۷		۲۰/۲	۲۶/۳	۱۸	۴/۸	۲/۱۶	۷/۰۸	۲/۴	۴/۹	۳	۴/۰۸	۳/۹	۱۷
دوره RCP4.5		۱۷/۴	۱۳/۱	۳۲	۱۲	۱۹/۲	۱۲/۷	۱۳/۲	۱۱/۸	۱۴/۷	۹	۱۱/۱	۱۲/۷۲
دوره RCP8.5		۱۳	۱۶/۸	۲۰/۴	۱۳/۳	۱۲/۶۹	۱۵/۲	۹/۲۴	۱۲/۶	۱۸	۱۴/۲	۱۴/۴	۱۶/۹
دوره RCP4.5		۹/۶	۱۳/۵	۳۱/۲	۱۴/۲	۱۸/۲	۱۴/۴	۱۶/۸	۱۲/۶	۱۱/۷	۱۰	۱۶	۲۰/۴
دوره RCP8.5		۱۰/۸	۱۹/۶	۱۵/۹	۱۹	۱۵/۶	۱۳/۴	۲۰/۱	۲۲/۵	۲۸	۱۶/۵	۲۲	۱۸/۲

جدول ۱۱. مقادیر بارش مشاهداتی و شبیه‌سازی شده (میلی‌متر) ایستگاه سقدر در دوره‌های پیش‌بینی شده تحت دو سناریوی انتشار متفاوت

دوره	ماه	ژانویه	فوریه	مارس	آوریل	می	ژوئن	جولای	اگوست	سپتامبر	اکتبر	نوامبر	دسامبر
دوره پایه ۱۹۸۹-۲۰۱۷		۱۸/۷	۱۹	۱۵/۶	۱۰/۵	۱۲	۱۰/۲	۶/۴	۹/۵	۱۳/۱	۹/۵	۱۱/۸	۲۲/۹
دوره RCP4.5		۸/۴	۲۴	۳۰	۴۵	۳۸/۲	۴۷/۶	۳۰	۱۹/۷	۲۰	۲۹/۵	۸/۵	۱۱/۴
دوره RCP8.5		۱۱/۲	۱۱	۳۷	۳۵/۵	۴۸	۳۹/۶	۱۹/۵	۲۳/۵	۳۰	۳۸/۲	۹/۶	۸/۴
دوره RCP4.5		۱۵/۶	۴۴/۲	۸/۴	۹/۷	۹	۴۳/۲	۴۰	۲۴/۲۸	۱۷/۷	۷/۹	۵	۷/۸
دوره RCP8.5		۶	۳۸/۴	۶/۵	۱۳/۹	۱۰/۷	۵۵	۳۷/۸	۲۷/۶	۲۸/۶	۱۰/۶	۱۱/۲	۱۸

جدول ۱۲. مقادیر بارش مشاهداتی و شبیه سازی شده (میلی متر) ایستگاه می آنده جیرفت در دوره های پیش بینی شده تحت دو سناریوی انتشار متفاوت

دوره	ماه	ژانویه	فوریه	مارس	آوریل	می	ژوئن	جولای	اگوست	سپتامبر	اکتبر	نوامبر	دسامبر
دوره پایه ۱۹۸۹-۲۰۱۷		۸۰	۷۹	۷۵	۶۰	۴۰/۳	۲۵/۴	۳۸	۳۷	۶۴/۸	۶۲/۴	۴۰/۸	۹۸
دوره ۲۰۲۰-۲۰۵۰	RCP4.5	۶۰	۶۴	۵۴	۶۲	۵۰/۵	۶۵	۹۸	۵۱/۶	۶۷/۲	۵۴	۴۲/۲	۶۴/۸
	RCP8.5	۷۱	۶۶	۶۷	۶۵	۶۷/۲	۶۲/۵	۷۹	۵۵/۲	۷۴	۴۲	۴۴/۴	۵۴
دوره ۲۰۷۰-۲۱۰۰	RCP4.5	۷۶/۵	۸۱	۶۳/۵	۵۸/۵	۵۱	۵۶/۵	۸۷	۶۸	۶۹	۴۸/۵	۵۶	۸۶/۸
	RCP8.5	۷۹	۶۸	۷۲	۶۶	۶۴	۵۸	۷۲/۵	۶۹	۷۷	۳۸	۵۲/۸	۷۸

جدول ۱۳. مقادیر بارش (میلی متر) در دوره مشاهداتی و دوره آینده نزدیک (سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5)، میانگین (سالانه) و درصد تغییرات آن در حوضه هلیل رود

ایستگاه	مشاهداتی	RCP4.5	RCP8.5	میانگین	درصد تغییرات
سلطانی	۶۵	۸۰	۶۶	۷۳	۱۲/۴
حسین آباد	۱۱۴	۱۸۰	۱۷۷	۱۷۸/۵	۵۶
سقدر	۱۶۰	۳۱۰	۳۱۲	۳۱۱	۹۴
می آنده جیرفت	۶۶۰	۷۳۶	۷۴۷	۷۴۲	۱۳

جدول ۱۴. مقادیر بارش (میلی متر) در دوره مشاهداتی و دوره آینده دور (سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5)، میانگین (سالانه) و درصد تغییرات آن در حوضه هلیل رود

ایستگاه	مشاهداتی	RCP4.5	RCP8.5	میانگین	درصد تغییرات
سلطانی	۶۵	۷۴	۷۰	۷۲	۱۱
حسین آباد	۱۱۴	۱۸۸	۲۲۱	۲۰۵	۷۹/۸
سقدر	۱۶۰	۲۳۳	۲۶۵	۲۴۹	۵۵
می آنده جیرفت	۶۶۰	۸۰۲	۷۹۴	۷۹۸	۲۱

جدول ۱۵. مقادیر دما (درجه سانتی گراد) در دوره مشاهداتی و دوره آینده نزدیک (سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5)، میانگین (سالانه) و درصد تغییرات آن در حوضه هلیل رود

ایستگاه	مشاهداتی	RCP4.5	RCP8.5	میانگین	درصد تغییرات
سلطانی	۱۲/۸	۱۱/۱	۱۱/۶۲	۱۱/۳۶	-۱۱/۳
حسین آباد	۲۰/۹۵	۲۰/۸	۲۰/۷	۲۰/۷۵	-۱
سقدر	۱۸/۲	۱۷	۱۷/۳	۱۷/۱۵	-۵/۸
می آنده جیرفت	۲۲/۷	۲۲/۲	۲۲/۴	۲۲/۳	-۱/۸

جدول ۱۶. مقادیر دما (سانتی گراد) در دوره مشاهداتی و دوره آینده دور (سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5)، میانگین (سالانه) و درصد تغییرات آن در حوضه هلیل رود

ایستگاه	مشاهداتی	RCP4.5	RCP8.5	میانگین	درصد تغییرات
سلطانی	۱۲/۸	۱۱/۵	۱۲/۳۲	۱۲	-۶/۲
حسین آباد	۲۰/۹۵	۱۹/۷	۲۰/۴	۲۰	-۴/۵
سقدر	۱۸/۲	۱۶/۶	۱۷/۴	۱۷	-۶/۶
می آنده جیرفت	۲۲/۷	۲۲/۴	۲۲/۶	۲۲/۵	-۱

## ارزیابی تغییرات رواناب

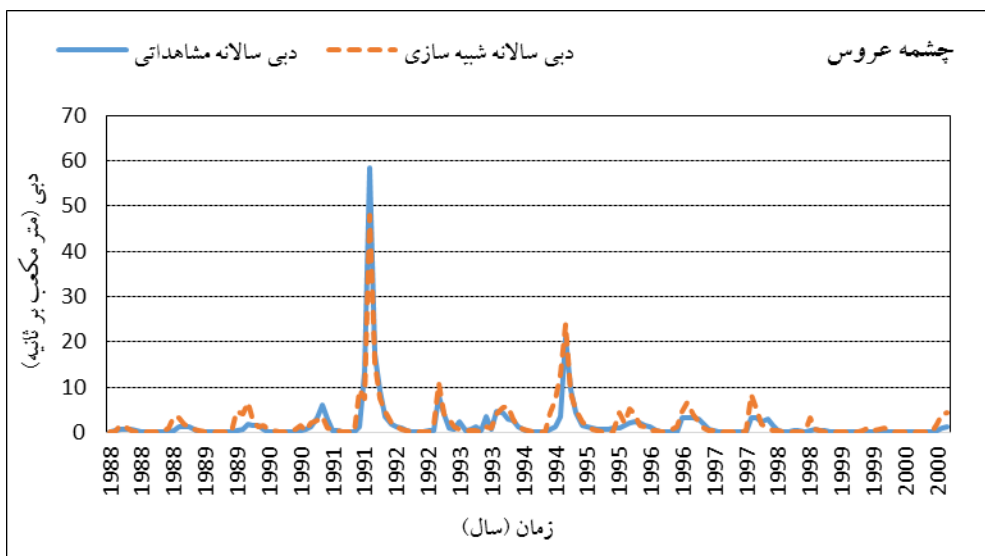
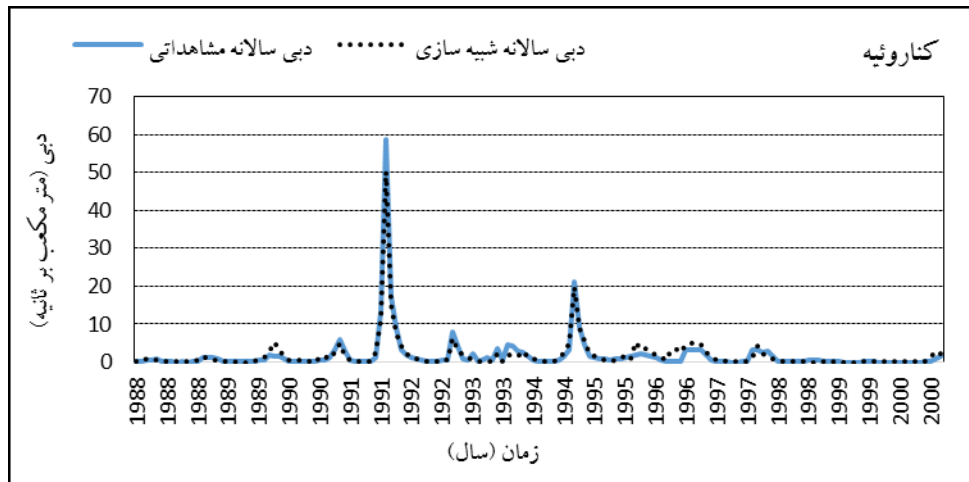
## واسنجی و ارزیابی مدل IHACRES

ابتدا پارامترهای مدل IHACRES برای حوضه آبخیز هلیلرود برای دو ایستگاه هیدرومتری کناروئیه و چشمه عروس طبق جدول ۱۷ کالیبره شده سپس در مقیاس روزانه طی سال‌های آماری (۱۹۸۸-۲۰۰۰) مورد واسنجی و در دوره آماری (۲۰۰۱-۲۰۱۷) ارزیابی شدند. نتایج واسنجی و صحت‌سنجی مدل مقادیر پارامتر ضریب نش-ساتکلیف به‌ترتیب برای ایستگاه هیدرومتری کناروئیه ۰/۶۹ و ۰/۶۵ و همچنین، برای ایستگاه چشمه عروس به‌ترتیب ۰/۸۷ و ۰/۷۷ مشخص شد. که عملکرد مدل در حوضه مورد نظر قابل قبول بوده و مدل توانایی نسبتاً خوبی در شبیه‌سازی جریان‌های حداکثر داشته است. همچنین، با توجه به شکل ۴ دبی شبیه‌سازی در هر دو ایستگاه هیدرومتری کمتر از دبی مشاهداتی است که با نتایج رحیمی‌فر و همکاران (۱۳۹۳) سازگاری داشت. با نگاهی به نتایج حاصل از دو مرحله واسنجی و صحت‌سنجی می‌توان دریافت نتایج ارزیابی مدل در حوضه ضعیف‌تر از نتایج واسنجی مدل بوده که این نتیجه با نتایج حاصل از تحقیق کروک و جکمن (۲۰۰۸) و زارعی و همکاران (۱۳۸۹) مطابقت داشت [۲، ۴، ۲۹].

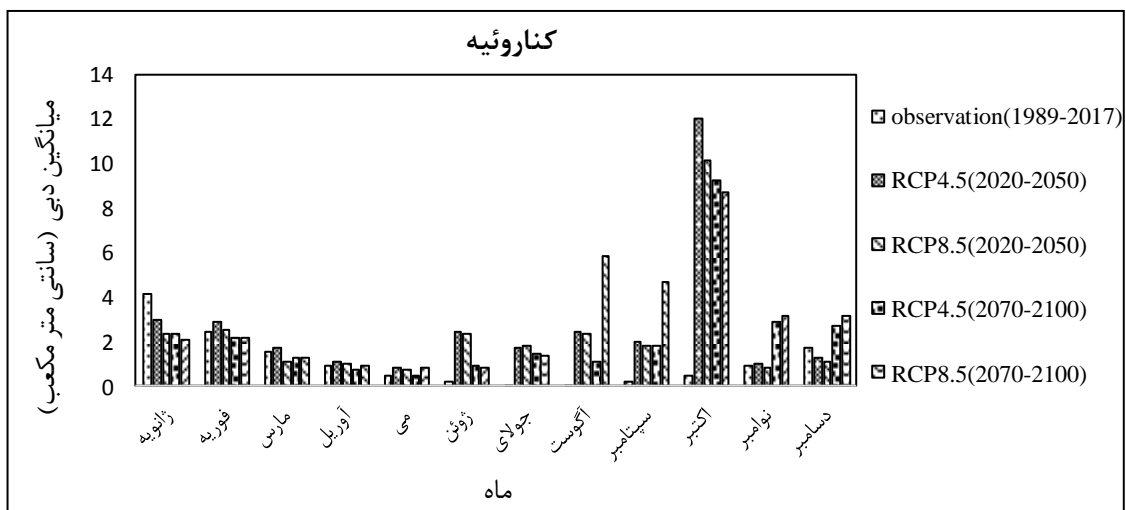
پس از واسنجی مدل، سری زمانی رواناب ماهانه حوضه در دوره‌های آینده نزدیک (۲۰۲۰-۲۰۵۰) و آینده دور (۲۰۷۰-۲۱۰۰) برای داده‌های دما و بارش تولید شده حاصل از مدل SDSM برای هر دو سناریوی RCP4.5 و RCP8.5 با استفاده از مدل IHACRES شبیه‌سازی شدند. سپس، متوسط رواناب ماهانه درازمدت (۳۰ ساله) در دوره آتی با میانگین رواناب ماهانه دوره مشاهداتی در هر دو سناریو بررسی شد. با توجه به شکل‌های ۵ و ۶ نتایج شبیه‌سازی جریان تحت سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5 نشان می‌دهند بیشترین افزایش دبی در دو دوره آتی برای ایستگاه هیدرومتری کناروئیه مربوط به ماه‌های ژوئن، جولای، آگوست، سپتامبر و اکتبر است و نتایج در ایستگاه هیدرومتری چشمه عروس در هر دو دوره آتی براساس سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5 بیشترین کاهش دبی در ماه‌های ژانویه، فوریه، مارس و آوریل پیش‌بینی شده است. همچنین، تغییرات دبی بر حسب متر مکعب بر ثانیه تحت دو سناریوی RCP4.5 و RCP8.5 در دو دوره آینده نزدیک (۲۰۲۰-۲۰۵۰) و آینده دور (۲۰۷۰-۲۱۰۰) نسبت به دوره مشاهداتی (۱۹۸۹-۲۰۱۷) در شکل ۷ نشان داده شده است.

جدول ۱۷. پارامترهای کالیبره شده نرم‌افزار IHACRES

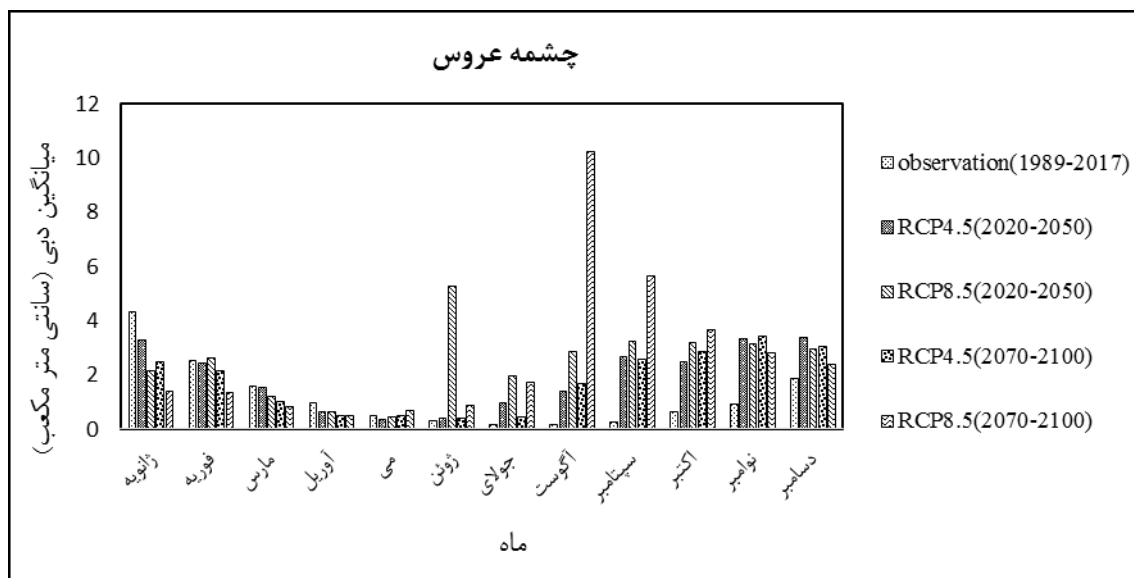
پارامتر	C(mm)	$\tau_w(\text{day})$	F( $^{\circ}\text{C}^{-1}$ )	I	P
ایستگاه	ظرفیت ذخیره	زمان خشک	ضریب حرارت	ضریب آستانه	فاکتور واکنش
کناروئیه	رطوبت	شدن حوضه	حوضه	رطوبت	غیر خطی
چشمه عروس	۰/۰۴	۲۰	۴	۰/۰	۱/۰
	۰/۰۶۹	۱۸	۲	۰/۰	۱/۰
پارامتر	$\alpha^s$	$\beta^s$	$\tau_s(\text{day})$	$V^q$	$V^s$
ایستگاه	ضریب خشکیدگی	شاخص پیک	زمان فروکش جریان آهسته	نسبت حجمی جریان سریع	نسبت حجمی جریان آهسته
کناروئیه	-۰/۵۵	۰/۴	۱/۶۹	۱	۰/۸۹
چشمه عروس	-۰/۵۲	۰/۳	۱/۵۳	۰/۳۵	۰/۹۸



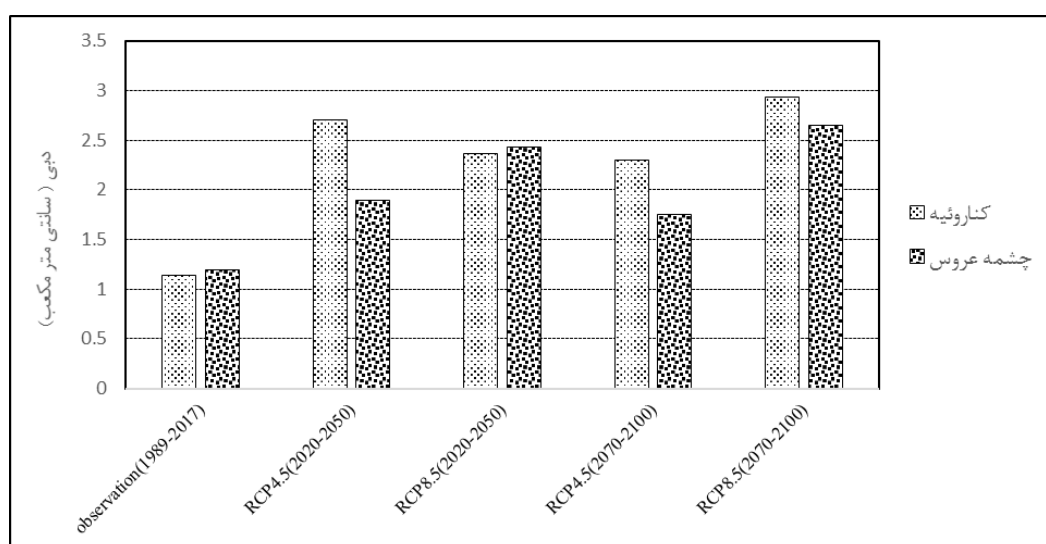
شکل ۴. سری زمانی رواناب مشاهداتی و مدل سازی شده ایستگاههای هیدرومتری در دوره واسنجی



شکل ۵. مقادیر میانگین دبی مشاهداتی و شبیه سازی شده (مترمکعب بر ثانیه) ایستگاه کناروئیه در دوره های پیش بینی شده تحت دو سناریوی انتشار متفاوت



شکل ۶. مقادیر میانگین دبی مشاهداتی و شبیه‌سازی شده (مترمکعب بر ثانیه) ایستگاه چشمه عروس در دوره‌های پیش‌بینی شده تحت دو سناریوی انتشار متفاوت



شکل ۷. متوسط دبی ماهانه برحسب مترمکعب بر ثانیه در ایستگاه کناروئیه و چشمه عروس در دوره پایه نسبت به دو دوره آینده

### نتیجه‌گیری

امروزه بروز پدیده تغییر اقلیم و دخالت روزافزون بشر در اقلیم جهانی دو سانحه طبیعی خشکسالی و سیل، بخش‌های مختلف کره زمین را تحت تأثیر قرار می‌دهند. کشور ما نیز در چند سال اخیر بارها شاهد وقوع سیلاب‌ها و خشکسالی‌های شدید در بیشتر نقاط بوده است، به‌ویژه آنکه بروز هم‌زمان این دو سانحه طبیعی یکدیگر را تقویت کرده به گونه‌ای که در اثر وقوع خشکسالی‌های شدید، پوشش گیاهی و رطوبت خاک از بین می‌رود که این خود عامل تسهیل‌کننده جریان یافتن سیلاب‌های مخرب است. از سوی

دیگر، بروز سیلاب‌های شدید نیز سبب از بین رفتن اراضی زراعی و شسته شدن خاک‌های حاصل‌خیز می‌شود که این امر اثرات خشکسالی را در این منطقه تشدید می‌کند. در تحقیق حاضر برای ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر رواناب حوضه آبخیز هلیل‌رود در دوره پایه (۱۹۸۹-۲۰۱۷) و دوره‌های ۲۰۲۰-۲۰۵۰ و ۲۰۷۰-۲۱۰۰ میلادی، خروجی مدل گردش عمومی جو CanESM2 با سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5 از طریق مدل SDSM ریزمقیاس‌نمایی شدند. سپس، مقادیر پیش‌بینی‌شده دما و بارش، به مدل بارش-رواناب IHACRES وارد شده و تغییرات دبی در دو دوره



- Scenarios. Human and Environment. 2014; 12(2):1-19. [Persian]
- [7]. Hafezparast M, Bafkar A, Panahi E. Assessment of climate change uncertainty and its effects on the probability of the Jamishan dam inflow frequency. Journal of Water and Soil Resources Conservation. 2017; 6(3):19-42. [Persian]
- [8]. Niromandfard F, Zakerinia M, Yazerloo B. Investigating the Effect of Climate Change on River Flow Using IHACRES Rainfall-Runoff Model. Journal of Irrigation Sciences and Engineering. 2018; 41(3): 103-117.
- [9]. Shahoei S.V, Fahiminezhad E, Fatehi Z. Impact of Global Climate Change on Climate Data in Ravansar Sanjabi Basin, Kermanshah Province. Environment and water Engineering. 2020 ; 6(1): 45 – 57. [Persian]
- [10]. Dastranj A, Rostami mohammad. Assessment and prediction of climate change in the next decade, by downscaling General Circulation Models (GCMs). Geography and Human Relationship. 2020; 3(1): 1-17. [Persian]
- [11]. Abdo K.S, Fiseha B.M, Rientje T.H.M, Gieske A.S.M, Haile A. T. Assessment of climate change impacts on the hydrology of Gilgel Abay catchment in Lake Tana Basin. Ethiopia. Hydrological Processes. 2009 ;23 (26): 3661-3669.
- [12]. McIntyre N, Al-Qurashi A. Performance of ten rainfall-runoff models applied to an arid catchment in Oman. Environmental Modelling and Software. 2009; 24(6):726-738.
- [13]. Vaze J, Post D.A, Chiew F.H.S, Perraud J.M, Viney N.R, Teng J. Climate non-stationarity validity of calibrated rainfall-runoff models for use in climate change studies. Hydrology. 2010 ; 394: 447-457.
- [14]. Teng J, Vaze J, Chiew F, Wangand H.S, Perraud J.M. Estimating the relative uncertainties sourced from GCMs and hydrological models in modeling Climate Change impact on runoff. Journal of Hydrometeorology. 2012 ;13(1): 122-139.
- [15]. Su F, Zhang L, Ou T, Chen D, Yao T, Tong K, Qi Y. Hydrological response to future climate changes for the major upstream river basins in the Tibetan Plateau. Global and Planetary Change. 2016 ; 136: 82-95.
- [16]. Iolanda B, Brunella B, Aldo F. A Modified IHACRES Rainfall-Runoff Model for Predicting the Hydrologic Response of a River Basin Connected with a Deep Groundwater Aquifer. Journal Water. 2019; 11(10):1-15.
- مشخص شد. براساس نتایج به‌دست‌آمده میزان بارش در حوضه آبخیز هلیل‌رود در دوره‌های پیش‌بینی برای آینده نزدیک از ۵/۸ تا ۹۶ درصد و در آینده دور از ۱۱ تا ۷۹/۸ درصد متغیر خواهد بود. همچنین، میزان تغییرات افزایشی میانگین دما در سناریوی RCP8.5 نسبت به سناریوی RCP4.5 بیشتر بود. میانگین دما تحت هر دو سناریوی انتشار در بیشتر ماه‌های سرد سال افزایش خواهد داشت. با توجه به نتایج و براساس پیش‌بینی افزایش بارش در ماه‌های گرم سال، بیشترین افزایش جریان در دوره‌های آینده مربوط به ماه‌های ژوئن، جولای، آگوست، سپتامبر، اکتبر و نوامبر خواهد بود. در آینده نزدیک افزایش رواناب در سناریوی انتشار RCP8.5، بیشتر از RCP4.5 پیش‌بینی شده است. پیشنهاد می‌شود با استفاده از نتایج حاصل از مدل و پیش‌بینی‌های صورت‌گرفته در بحث کنترل سیلاب با توجه به تأثیرات تغییر اقلیم در منطقه و تغییر الگوی بارش از فصل زمستان به پاییز و بهار، راهکارهایی اعمال شود.

#### منابع

- [1]. IPCC. Summary for policy makers. In: IPC Climate change: The Physical Science basic, Contribution of working group first to the Fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change, Cambridge university press, 2007;p. 450
- [2]. Croke B.F.W, Jakeman A.J. Use of the IHACRES rainfall-runoff model in arid and semi arid regions. Hydrological Modelling in Arid and Semi-arid Areas. 2008;41-48 pp.
- [3]. Ashofteh P.S and Massah A.R. The effect of climate change on maximum discharges in the Aydoghmush basin of East Azerbaijan. Water and Soil Science (Journal of Science aure and Natural Resources). 2008; 14(53): 25-39.
- [4]. Zarei M, Habibnezhad Roshan M, Shahedi K, Ghanbarpour M.R. Calibration and Evaluation of IHACRES Hydrological Model for Daily Flow Simulation. Journal of Water and Soil. 2011; 25(1): 104-114. [Persian]
- [5]. Ashofteh P.S. The effect of climate change on runoff using HadCM3 model and under greenhouse gas emission scenarios (Case study: Gharangho Basin). Fourth Regional Conference on Climate Change, Meteorological Organization of the country. 2010. 21-22 December. [Persian]
- [6]. Taei Semiromi S, Moradi H.R, Khodaghohi M. Evaluation Change in Nayshabour Bar River flow Under Differents Climate Change

- [17]. Hamouda D, Denis R, Yves T, Zoubeida B. Robustness of conceptual rainfall-runoff models to high-resolution climate projections in northern Tunisia. *MISTRALS Impacts des changements climatiques en Méditerranée*, (1), Montpellier. 2017. France.
- [18]. Rezaei M, Nohtani M, Abkar A, Rezaei M, Mirkazehi Rigi M. Performance Evaluation of Statistical Downscaling Model (SDSM) in Forecasting Temperature Indexes in Two Arid and Hyper Arid Regions (Case Study: Kerman and Bam). *Journal of Watershed Management Research*. 2014;5(10): 117-131. [Persian]
- [19]. Xu C.y. From GCMs to river flow: A review of downscaling methods and hydrologic modeling approaches. *Progress in Physical Geography*. 1999; 23(2), 229-249.
- [20]. IPCC: Climate Change The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Houghton, J. T., Ding, Y., Griggs, D.J., Noguer, M., van der Linden, P. J., Dai, X., Maskell, K., Johnson, C. A. (eds.)], Cambridge University Press, Cambridge and New York, 2001;p. 881.
- [21]. Salehnia N, Farid A, Hosseini F, Kolsoumi S, Zarrin A, Hasheminia M. Comparing the performance of dynamical and statistical downscaling on historical run precipitation data over the semi-arid region. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*. 2019; 55(4): 737-749, DOI: 10.1007/s13143-019-00112-1
- [22]. Dehghan S, Salehnia N, Sayari N, Bakhtiari B. Prediction of meteorological drought in semi-arid and arid lands using PDSI and SDSM model (Case study: Fars Province). *Journal of Arid Lands*. 2020;12(2):318-330. <https://doi.org/10.1007/s40333-020-0095-5>.
- [23]. Wilby R.L, Dawson C.W. SDSM version 4.2-A decision support tool for the assessment of regional climate change impacts. User Manual. London, UK. 2007;17(2), 147-159.
- [24]. Roohi Panah F, Mir Rokni M, Massah Bavani A, Nasr Esfahani M. Investigation of SDSM exponential microscale model in selecting the best predictor variables. Fifteenth Conference on Fluid Dynamics. 2013; 18-20 December. Hormozgan University. [Persian]
- [25]. Erasmo C, Wilfrido R. Short term wind speed forecasting in La Venta, Oaxaca, Mexico, using Artificial Neural Networks. *Renewable Energy*. 2009; 34(12), 274-278.
- [26]. Jakeman A.J, Hornberger G.M. How much complexity is warranted in a rainfall runoff model?. *Water Resources Research*. 1993; (29): 2637-2649.
- [27]. Box G.E.P, Jenkins G.M. *Time Series Analysis: Forecasting and Control*. Holden-Day, San Francisco. 1970. 230p.
- [28]. Littlewood L.G, Clarke R.T.B, Collischonn W, Croke B. Predicting daily Streamflow using rainfall forecasts, a simple loss module and unit hydrographs: Two Brazilian catchments. *Environmental Modelling and Software*. 2007 ;22(9):1229-1239.
- [29]. Rahimifar H, Hesadi H, Omid N, Asadi A. Simulation of runoff runoff in Ravansar basin using IHACRES model. National Conference on Water, Man and Earth. 2014. Esfahan, pages: 1-12. [Persian]