

## چشم‌انداز اثرات تغییر اقلیم بر جریان کمینه حوضه کرخه، افق ۲۰۷۰ تا ۲۱۰۰

سیما رحیمی بندرآبادی\*

<sup>۱</sup> استادیار، پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۹/۲۵

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۴/۲۹

### چکیده

افزایش گازهای گلخانه‌ای ضمن تاثیر بر روی عناصر آب و هوایی، سامانه‌های متاثر از این متغیرها، نظیر منابع آب، کشاورزی، محیط زیست، بهداشت و اقتصاد را نیز دگرگون می‌سازد. تغییر آب و هوا، با ایجاد تغییرات در چرخه هیدرولوژی باعث اثرات معنی‌داری در منابع آب می‌شود. برای بررسی تغییرات آب و هوا در آینده، روش‌های مختلفی وجود دارد که مهمترین آن‌ها مدل‌های اقلیمی هستند. مدل‌های گردش کلی جفت شده (AOGCM) متغیرهای اقلیمی را در وسعت چند ده هزار کیلومتر مربع شبیه‌سازی می‌کنند، اما قادر به شبیه‌سازی فرایندهای منطقه‌ای و کوچک مقیاس آب و هوا نیستند. برای رسیدن به این مهم، از روش‌های ریزمقیاس‌نمایی استفاده می‌شود که یکی از مهمترین آن‌ها روش‌های دینامیکی می‌باشد. این روش، مبتنی بر بالا بردن قدرت تفکیک و تجزیه هرچه بیشتر مدل‌های گردش کلی هستند. در این مطالعه، به بررسی اثرات تغییر آب و هوا بر جریان کمینه حوضه کرخه، به‌عنوان یکی از مهمترین حوضه‌های کشور از لحاظ آورد آبی و کشاورزی، پرداخته شده است. برای این منظور، از مدل ریزمقیاس‌نمایی دینامیکی PRECIS برای برآورد بارش و دما در دوره ۲۰۷۰ تا ۲۱۰۰ و تحت دو سناریوی A2 و B2 استفاده شده است. برای برآورد دبی روزانه در سال‌های آتی نیز از مدل هیدرولوژیکی SWAT (که یک مدل جامع و پیوسته در مقیاس حوضه‌ای می‌باشد) استفاده شده است. بدین صورت که مقادیر بارش و دمای خروجی مدل PRECIS تحت سناریوهای مختلف به مدل وارد و مقدار دبی روزانه برای زیرحوضه‌ها برآورد شد. سپس، شاخص‌های جریان کمینه (سه شاخص Q75، Q90 و Q95) از منحنی‌های تداوم و سری جریان‌های کمینه ۱۰ و ۳۰ روزه در هر یک از زیرحوضه‌ها محاسبه شد. بررسی شاخص‌های جریان کمینه طی دوره آینده نشان می‌دهد که تحت سناریوی A2، جریان کمینه حدود ۷۰ درصد افزایش خواهد داشت و این افزایش دبی کمینه در قسمت‌های شمالی حوضه بیشتر است. این در حالی است که تحت سناریوی B2، شاخص‌ها نشان از کاهش ۵۰ درصدی جریان کمینه در افق ۲۰۸۰ دارند. اما توزیع مکانی جریان کمینه نسبت به دوره پایه تغییری نخواهد داشت. لذا، مناطق مرکزی و تا حدودی شمالی حوضه تحت این سناریو، خشکسالی‌های شدیدی را تجربه خواهد کرد. از این‌رو، با توجه به اثرات متفاوت تغییر اقلیم بر جریان کمینه تحت سناریوهای مختلف، در طرح‌های مدیریتی باید عدم قطعیت سناریوها و همچنین، وضعیت اقتصادی و اجتماعی منطقه در آینده مد نظر قرار گیرد.

**واژه‌های کلیدی:** تغییر آب و هوا، ریزمقیاس‌نمایی، سناریوهای اقلیمی، مدل گردش کلی، مدل PRECIS

\* مسئول مکاتبات: rahimi\_si@yahoo.com

## مقدمه

بررسی‌ها نشان می‌دهد، تغییر آب و هوا در آسیا، بر سامانه‌های مختلف تاثیرات قابل توجهی دارد. به طوری که چهارمین گزارش مجمع بین‌المللی تغییرات اقلیمی حاکی از آن است که تغییر آب و هوا، فشار بر منابع آب را در بیشتر نواحی آسیا افزایش داده است و جدی‌ترین خطری که آسیا را در نتیجه تغییر آب و هوا تهدید می‌کند، کمبود آب (به ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک) است (IPPC, ۲۰۰۷). اگرچه انتظار می‌رود که تغییر آب و هوا بخش‌های زیادی از محیط زیست را تحت تاثیر قرار دهد، ولی آب بحرانی-ترین عامل تاثیرپذیر از تغییر آب و هوا می‌باشد (Ringius و همکاران، ۱۹۹۶). از آنجایی که کشورهایی مانند ایران که در کمربند خشک جهانی واقع شده‌اند، همواره با محدودیت منابع آب مواجه هستند و به دلیل این که تغییر آب و هوا می‌تواند یک عامل تشدیدکننده در بحران آب محسوب شود، لذا، مدیریت منابع آب اهمیت زیادی در این مناطق دارد. از طرف دیگر، برنامه‌ریزی‌های دقیق و مناسب، نیاز به اطلاعات کامل و تخمین عوامل مهم برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب دارد که لازمه آن آگاهی از تغییرات دما و بارش و چگونگی تاثیر آن بر منابع آب است. برای بررسی اثرات تغییر آب و هوا بر منابع مختلف در آینده، ابتدا باید متغیرهای آب و هوایی تحت تغییرات گازهای گلخانه‌ای (سناریوهای انتشار) شبیه‌سازی شوند. معتبرترین روش شبیه‌سازی، استفاده از مدل‌های آب و هوایی می‌باشد (Houghton و همکاران، ۲۰۰۱). این مدل‌ها بر اساس رفتارهای گذشته چرخه عمومی جو بنا شده و قادرند، روند تغییرات این چرخه را با دقت مناسبی پیش‌بینی کنند. مدل‌های گردش کلی جو تغییرات آب و هوایی را در مقیاس‌های بزرگ (چند ده هزار کیلومترمربعی و یا بیشتر) پیش‌بینی می‌نمایند. این در حالی است که در بسیاری از مناطق دنیا پدیده‌هایی با مقیاس کوچک، عامل تغییرات آب و هوا بوده، به شدت بر روی آب و هوای منطقه تاثیر می‌گذارند. از این رو، ضروری است که این تغییرات به-طور دقیق‌تر و در مقیاس‌های کوچک‌تر مورد بررسی قرار گیرند. برای رسیدن به این مهم از ریزمقیاس-نمایی (Downscaling) استفاده می‌شود (Wang و

همکاران، ۲۰۰۴؛ Giorgi و Mearns، ۱۹۹۹؛ Giorgi، ۱۹۹۰). برای ریزمقیاس‌نمایی مدل‌های گردش کلی، روش‌های متعددی وجود دارد که روش‌های دینامیکی از مهمترین آن‌ها می‌باشد، هر چند دارای پیچیدگی و محاسبات بیشتری هستند. مدل‌های منطقه‌ای دینامیکی در مقایسه با مدل‌های ریزمقیاس شده با روش‌های دیگر، در بیان و توضیح فرایندهای کوچک مقیاس بسیار توانمند بوده، شبیه‌سازی‌های نزدیک به واقعیتی از رویدادهای حدی محلی و منطقه‌ای ارائه می‌کند (Jones و همکاران، ۲۰۰۴؛ Gerogi و Hewitson، ۲۰۰۱). در مورد اثرات تغییر آب و هوا در آینده مطالعات متعددی انجام شده است. Wilby و Harris (۲۰۰۶) تاثیر تغییر آب و هوا بر روی میزان جریان‌های کم رودخانه تایمز در انگلستان را بررسی کردند. در پژوهش یاد شده، منابع عدم قطعیت مربوط به مدل‌های AOGCM، روش‌های ریزمقیاس‌کردن، سناریوهای انتشار گازهای گلخانه‌ای، مدل‌های مختلف شبیه‌سازی بارش-رواناب و عدم قطعیت مربوط به پارامترهای آن‌ها شبیه‌سازی شد. نتایج نشان می‌دهد که عدم قطعیت مربوط به مدل‌های AOGCM بیشترین سهم و سناریوهای انتشار کمترین سهم را در برآورد تابع احتمالاتی رواناب دارند.

Mourer و همکاران (۲۰۰۸) از داده‌های بارش و دمای ۱۶ مدل آب و هوایی و سناریوهای انتشار B1 و A2 برای ارزیابی اثرات تغییر آب و هوا در حوضه ریولمپا آمریکای مرکزی در طول دوره‌های ۲۰۶۹-۲۰۴۰ و ۲۰۹۹-۲۰۷۰ استفاده کردند. آن‌ها همچنین، از یک مدل سطح زمین برای ارزیابی تغییرات هیدرولوژیکی ناشی از تغییر آب و هوا بهره بردند. نتایج نشان می‌دهند که طی دوره ۲۰۹۹-۲۰۷۰ در مقایسه با دوره ۲۰۶۹-۲۰۴۰ میزان دما ۱/۹ و ۳/۴ درجه سانتی‌گراد به ترتیب برای سناریوهای B1 و A2 افزایش یافته و مقدار بارش نیز پنج و ۱۰/۴ درصد به-ترتیب برای این دو سناریو کاهش داشته است. از طرف دیگر، میزان جریان ورودی به منابع نیز در حدود ۱۳ درصد برای سناریو B1 و ۲۴ درصد برای سناریو A2 کاهش داشته است. به طوری که بیشترین کاهش جریان در طی ماه‌های ژوئن تا سپتامبر اتفاق

شدند. بنابر نتایج، تا پایان قرن حاضر متوسط دما در سطح حوزه آبخیز کرخه ۵/۱-۲ درجه افزایش خواهد یافت. متوسط بارندگی‌ها نیز در سطح حوضه تا پایان قرن با افزایش مواجه خواهد شد. همچنین، تغییراتی نیز در زمان و شکل بارش‌ها وجود خواهد داشت. بارش‌های بهار بیشتر در اواخر فصل زمستان رخ خواهند داد و به دلیل افزایش دما بارش‌ها کمتر به صورت نزولات جوی جامد خواهند بود.

Ghafouri و همکاران (۲۰۱۳)، به بررسی تاثیر پدیده تغییر آب و هوا بر اجزای بیلان آب حوضه بزرگ کرخه در آینده نزدیک (۲۰۳۹ تا ۲۰۱۰) پرداختند. آن‌ها از داده‌های مدل آب و هوایی HadCM3 تحت سناریو انتشار A2 و همچنین، مدل هیدرولوژیکی SWAT استفاده کردند. در پژوهش مذکور، داده‌های بارش، دمای کمینه و دمای بیشینه منطقه برای دوره آینده نزدیک با روش SDSM ریزمقیاس شد و به عنوان ورودی به مدل واسنجی شده SWAT وارد شد. نتایج شبیه‌سازی اثرات هیدرولوژیکی سناریوی تغییر آب و هوا در مدل SWAT نشان داد که تبخیر-تعرق پتانسیل و واقعی حوضه در سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۳۹ به ترتیب حدود ۹/۵ درصد (۱۵۳ میلی‌متر) و یک درصد (۳/۲ میلی‌متر) افزایش خواهد یافت. همچنین، رواناب حوضه حدود ۱۳/۵ درصد (۲/۹۵ میلی‌متر)، جریان جانبی حدود ۱/۲۵ درصد (۰/۷۵ میلی‌متر) و آبدهی حوضه حدود ۷/۲ درصد (۱۰/۵۳ میلی‌متر) کاهش می‌یابد. تغذیه سفره آب زیرزمینی کم عمق و عمیق نیز حدود ۱۱ درصد کاهش می‌یابد.

Rahimi و همکاران (۲۰۱۶) مدل ریزمقیاس‌نمایی دینامیکی PRECIS را در حوضه کرخه ارزیابی کردند. نتایج ارزیابی مدل PRECIS نشان داد که به طور کلی، این مدل می‌تواند برآورد مناسبی از بارش و دما در منطقه داشته باشد، هر چند که درباره بارش‌های پاییزه و بهار به دلیل ماهیت محلی این بارش‌ها مدل، چندان توانمند نبوده است. از طرف دیگر، با توجه به نتایج به دست آمده از ارزیابی‌های نقطه‌ای و منطقه‌ای به نظر می‌رسد که ارزیابی نقطه‌ای نمی‌تواند معیار مناسبی برای سطح یک منطقه باشد و بهتر است،

افتاده است. فراوانی جریان‌های کمینه نیز افزایش نشان می‌دهد.

Boyer و همکاران (۲۰۱۰) برای بررسی تغییرات هیدرولوژیکی رودخانه لاورنس واقع در کانادا تحت تاثیر تغییر آب و هوا، به شبیه‌سازی دبی‌های رودخانه با استفاده از یک مدل هیدرولوژی و سه مدل گردش کلی HadCM3، CSIRO-MK2 و ECHAM4 تحت سناریوهای انتشار A2 و B2 پرداختند. با وجود استفاده از مدل‌های آب و هوایی متفاوت، شبیه‌سازی-های هیدرولوژی ناشی از خروجی‌های هر سه مدل، افزایش دبی در فصل زمستان و کاهش دبی در فصل بهار را پیش‌بینی کرد. آن‌ها دریافتند که دبی‌های بیشینه در فصل زمستان و دبی‌های کمینه در فصل بهار موجب تغییرات ژئومورفولوژیکی و هیدرولوژیکی در رودخانه خواهند شد.

Zohrabi و همکاران (۲۰۰۹) به شناخت تغییر آب و هوا در حوضه کارون بزرگ با کمک مدل‌های آب و هوایی پرداختند. آن‌ها برای این کار، از آمار بلندمدت (۱۰۰۰ ساله) دما و بارش، حاصل از اجرای کنترل ثابت ماندن گازهای گلخانه‌ای طی سال‌های آینده) مدل‌های آب و هوایی HadCM3 و CGCM3 استفاده کردند. سپس، بر اساس توزیع نرمال دو متغیره، محدوده نوسانات درونی سالانه آب و هوایی منطقه مورد مطالعه را به صورت نمودارهای دو بعدی ترسیم کردند. نتایج نشان می‌دهند که دما دارای روند افزایشی و بارندگی دارای روند کاهشی در حوضه کارون بزرگ است. به طوری که در تمامی قسمت‌های حوضه تقریباً سال‌های انتهایی دوره ۲۰۰۹-۱۹۷۱، در خارج از محدوده نوسانات درونی آب و هوا قرار گرفته و نشان‌دهنده تاثیر تغییر آب و هوا بر متغیرهای آب و هوایی طی این سال‌ها می‌باشد.

Abrishamchi و Hosseini (۲۰۰۹) به بررسی اثرات پدیده تغییرات آب و هوا بر منابع آب در حوزه آبخیز کرخه پرداختند. در این پژوهش، تغییرات دما و بارش در سطح حوضه تحت دو سناریوی انتشار (SRES: A2, B2) و با کمک مدل CGCM2 مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور، داده‌های خروجی مدل GCM برای سه دوره ۲۰۱۰-۲۰۳۹، ۲۰۱۰-۲۰۶۹، ۲۰۴۰-۲۰۶۹ و ۲۰۷۰-۲۰۹۹ با روش آماری SDSM کوچک مقیاس

### مواد و روش‌ها

**منطقه مورد پژوهش:** منطقه مورد مطالعه، حوزه آبخیز کرخه تا بالادست سد کرخه می‌باشد که بین طول‌های جغرافیایی  $۴۶^{\circ} ۵'$  و  $۴۹^{\circ} ۱۹'$  و عرض‌های  $۳۲^{\circ} ۵۳'$  و  $۳۵^{\circ} ۹'$  با مساحتی حدود ۴۲۵۴۲ کیلومتر مربع قرار گرفته است (شکل ۱). حوزه مورد مطالعه دارای دامنه ارتفاعی بین ۸۳ و ۳۵۹۸ متر است. میانگین بارندگی این منطقه ۵۳۹ میلی‌متر بوده، دامنه آن از ۳۱۰ میلی‌متر تا ۷۰۰ میلی‌متر در تغییر می‌باشد. بخش اصلی بارندگی‌های این منطقه را سامانه‌های مدیترانه‌ای، در آخر پاییز و فصل زمستان تامین می‌کند. در مناطق کوهستانی نیز ممکن است، جریان‌های همرفتی موجب بروز بارندگی در فصل بهار و ابتدای تابستان شوند. به‌طور کلی، جریان رودخانه کرخه از مهر ماه روند افزایشی به خود می‌گیرد و در اردیبهشت به بیشترین مقدار خود می‌رسد، سپس، آبدهی رودخانه کم و در شهریور ماه به کمترین مقدار خود می‌رسد. دلیل افزایش آبدهی رودخانه در فصل بهار، افزایش دما و ذوب برف و بارش‌های بهاره می‌باشد. هر چند بیشترین جریان رودخانه مربوط به فصول زمستان و بهار است، ولی بیشتر سرشاخه‌های اصلی کرخه دارای جریان دائمی در طول سال هستند. این نشان می‌دهد که دبی پایه نقش اساسی در آبدهی رودخانه‌ها دارد. برداشت آب از رودخانه برای آبیاری یا سایر مصارف تأثیر زیادی بر جریان رودخانه کرخه دارد. به‌طور کلی، در منطقه پنج نوع کاربری اصلی شامل کشاورزی دیم، مرتع، جنگل، کشاورزی آبی و مناطق مسکونی وجود دارد. بیشترین مساحت حوزه به کاربری کشاورزی دیم و کمترین آن به کاربری مسکونی و اراضی مرطوب اختصاص دارد (Ghafouri و همکاران، ۲۰۱۳). در این مطالعه، برای بررسی پارامترهای هواشناسی از ایستگاه‌های سینوپتیک و کلیماتولوژی سازمان هواشناسی که دارای آمار مناسب طی دوره پایه سال‌های آماری ۱۹۶۰ تا ۲۰۰۰ بودند، استفاده شد (شکل ۱- الف). برای ارزیابی‌های هیدرولوژیکی نیز از اطلاعات ایستگاه‌های هیدرومتری وزارت نیرو استفاده شده است (شکل ۱- ب). مشخصات ایستگاه‌های هیدرومتری در جدول ۱ ارائه شده است.

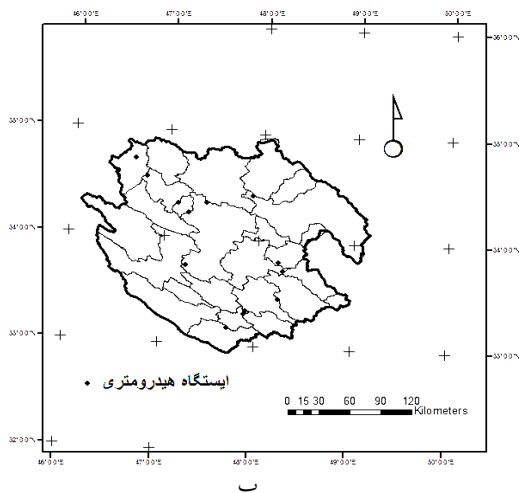
برای ارزیابی مدل‌های اقلیمی و بررسی تغییرات اقلیمی یک حوضه به‌صورت منطقه‌ای عمل شود.

Rahimi و همکاران (۲۰۱۶) به بررسی تغییرات اقلیمی حوضه کرخه با استفاده از مدل دینامیکی PRECIS و برای دوره ۲۰۷۰ تا ۲۱۰۰ پرداختند. بررسی تغییرات آب و هوایی در حوضه کرخه نشان داد که تحت سناریوی A2 مقدار بارش حدود ۱۱ درصد و میانگین دمای کمینه و بیشینه، حدود پنج درجه افزایش خواهند داشت. برای سناریوی B2 مقدار بارش حدود هفت درصد و مقدار میانگین دمای کمینه و بیشینه، حدود سه درجه افزایش خواهند داشت، این در حالی است که تحت هر دو سناریو، بارش فصل پاییز بر خلاف دوره پایه، بیشتر از بارش فصل زمستان خواهد بود.

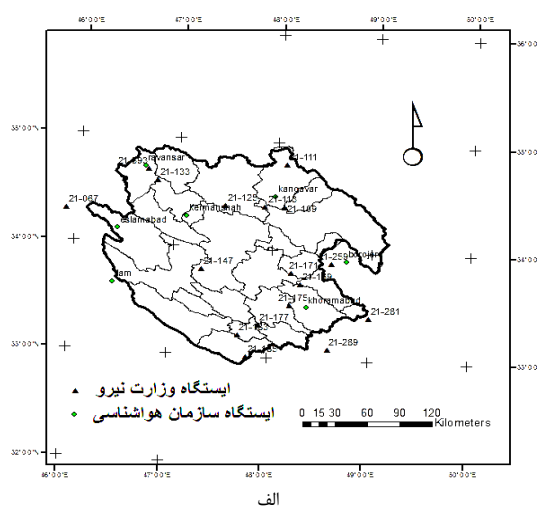
Abaspur و همکاران (۲۰۰۹) اثرات تغییر آب و هوا بر منابع آب ایران را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها سناریوهای A2، B1 و A1B1 را برای دوره‌های ۲۰۴۰-۲۰۱۰ و ۲۱۰۰-۲۰۷۰ را ارزیابی کردند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که بارندگی در قسمت‌های شمالی و غربی کشور در همه سناریوهای مورد بررسی افزایش خواهد داشت. این افزایش برای سناریوی A2 و دوره ۲۰۷۰ تا ۲۱۰۰ چشم‌گیرتر می‌باشد. آن‌ها همچنین بیان کردند که تحت سناریوی A2 و برای افق ۲۰۸۰، در قسمت وسیعی از کشور، مخصوصاً شمال و غرب کشور، منابع آب افزایش خواهد داشت، اما در قسمت‌های جنوبی و شرقی کاهش می‌یابد. ولی تحت سناریوی B2 منابع آب طی این دوره (۲۰۷۰-۲۱۰۰) کمتر از سناریوی A2 و در برخی مناطق نسبت به دوره پایه کاهش خواهد یافت. بررسی منابع نشان می‌دهد که مطالعه اندکی در زمینه اثرات تغییر اقلیم بر جریان کمینه در ایران صورت گرفته است. ضمن این- که عمده روش‌های به‌کار برده شده برای ریزمقیاس-نمایی مدل‌های گردش کلی نیز روش‌های آماری می‌باشد و نیاز به تعداد زیاد ایستگاه و طول دوره آماری بلندمدت دارد که اغلب مناطق کشور فاقد چنین ایستگاه‌هایی هستند. لذا، در این مقاله اثرات تغییر آب و هوا بر جریان‌های کمینه حوضه کرخه با استفاده از مدل ریزمقیاس‌نمایی دینامیکی PRECIS بررسی شده است.

جدول ۱- مشخصات ایستگاه‌های مورد استفاده

ایستگاه	آران غرب	پل چپر	دو آب مرگ	پل کیمنه	قور باغستان	هولیان	کاکا رضا	نواب سید علی	چم انجیر	آفرینه	چولبول	پل دختر	روان سر	جلوگیر
کا	۲۱-۱۱۲	۲۱-۱۲۷	۲۱-۱۳۳	۲۱-۱۴۱	۲۱-۱۴۳	۲۱-۱۴۷	۲۱-۱۶۹	۲۱-۱۷۱	۲۱-۱۷۵	۲۱-۱۷۷	۲۱-۱۷۹	۲۱-۱۸۳	۲۱-۳۹۳	۲۱-۱۸۵
ارتفاع (متر)	۱۴۴۰	۱۲۸۰	۱۳۱۰	۱۲۸۴	۱۰۰۰	۱۰۰۰	۱۵۳۰	۱۵۲۰	۱۱۴۰	۸۲۰	۸۰۰	۶۵۰	۱۳۴۳	۴۱۸
طول (درجه)	۴۷/۹	۴۷/۴	۴۶/۸	۴۷/۱	۴۷/۳	۴۷/۲	۴۸/۳	۴۸/۲	۴۸/۲	۴۷/۹	۴۷/۹	۴۷/۷	۴۶/۶	۴۷/۸
عرض (درجه)	۳۴/۴	۳۴/۳	۳۴/۵	۳۴/۳	۳۴/۲	۳۳/۷	۳۳/۷	۳۳/۸	۳۳/۴	۳۳/۳	۳۳/۳	۳۳/۲	۳۴/۷	۳۲/۸



ب



الف

شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه و ایستگاه‌های مورد استفاده، الف) ایستگاه‌های هواشناسی و ب) ایستگاه‌های هیدرومتری

در این مطالعه از روش ویبول استفاده شده است) محاسبه می‌شود. سپس، این دو پارامتر روی نمودار رسم می‌شوند. در این پژوهش، سه شاخص  $Q_{90}$ ،  $Q_{75}$  و  $Q_{95}$  از منحنی‌های تداوم استخراج و بررسی شده است.

دسته دوم، شاخص‌های سری جریان کمینه سالانه هستند که از تحلیل فراوانی به دست می‌آیند (Rifai و همکاران، ۲۰۰۰؛ Durrans و Tomic، ۲۰۰۱). جریان کم  $n$  روزه در یک سال، کمترین مقدار میانگین متحرک  $n$  روزه جریان‌های روزانه در آن سال است که لازم است، مناسب‌ترین تابع توزیع به آن برازش داده شود. به این منظور، سری‌های زمانی جریان کمینه با

شاخص‌های جریان کمینه: شاخص‌های جریان کم به دو دسته تقسیم می‌شوند. دسته اول شامل شاخص‌هایی هستند که از منحنی تداوم جریان استخراج می‌شوند (Pyrce، ۲۰۰۴). منحنی تداوم جریان، نشان‌دهنده ویژگی‌های هیدرولوژیکی بوده، برای مقایسه پاسخ و رفتار هیدرولوژیکی حوزه آبخیز بسیار مفید است (Yilmaz و همکاران، ۲۰۰۸). این منحنی به اشکال مختلف ترسیم می‌شود و نشان-دهنده رابطه بین مقادیر دبی و درصد زمانی که این دبی مساوی یا بیشتر از آن مقدار است، خواهد بود. برای این منظور، داده‌های دبی مربوط به هر ایستگاه به صورت نزولی مرتب و احتمال وقوع تجربی آن‌ها (که

برای هر HRU و سپس، هر زیرحوضه و در نهایت کل حوزه آبخیز محاسبه می‌شود (Arnold و همکاران، ۱۹۹۸). به‌خاطر وجود خطاهای اندازه‌گیری در ورودی مدل و تاثیر آن در خروجی آن، همچنین، وجود خطا در ساختار مدل و حجم بسیار زیاد پارامترها که در مدل‌های توزیعی وجود دارد (که معمولاً قابل شناسایی نیستند)، واسنجی مدل‌های هیدرولوژیک بسیار مشکل است. مدل SWAT روش SUFI-2 را برای ارزیابی مدل در اختیار گذاشته است. روش SUFI-2 تمام عدم قطعیت‌های مدل‌سازی، شامل عدم قطعیت ورودی‌ها، مدل مفهومی، پارامترها و داده‌های اندازه‌گیری شده را در نظر می‌گیرد. در این روش، میزان عدم قطعیت به‌وسیله دو معیار P-فاکتور و R-فاکتور محاسبه می‌شود. در این پژوهش، از مدل SWAT واسنجی و اعتبارسنجی شده به‌وسیله Ghafouri و همکاران (۲۰۱۳) که دارای منطقه مورد مطالعه یکسان با این پژوهش بود، استفاده شده است؛ برای دستیابی به جزئیات بیشتر به این منبع رجوع شود.

**مدل اقلیمی:** مدل‌های آب و هوایی در پی شبیه‌سازی فرایندهایی هستند که آب و هوا را به‌وجود می‌آورند. در مدل‌سازی لازم است، این فرایندها شناسایی و اثرات تغییرات و روابط متقابل آن‌ها با یکدیگر پیش‌بینی شوند. شبیه‌سازی از طریق تعریف دستگاه آب و هوا بر اساس قوانین فیزیک، شیمی و زیست‌شناسی انجام می‌شود. روابط ریاضی مدل‌ها، معمولاً در شبکه‌های سه بعدی با مقیاس مکانی افقی حدود ۱۰۰ تا ۶۰۰ کیلومتر مربع، ۱۰ تا ۲۰ لایه در اتمسفر و ۳۰ لایه در اقیانوس حل می‌شوند. برای منطقه‌ای کردن مدل‌های آب و هوایی دو روش عمده وجود دارد که به روش‌های ریزمقیاس‌نمایی معروف هستند. ریزمقیاس‌نمایی آماری و ریزمقیاس‌نمایی دینامیک. مدل PRECIS یک مدل اتمسفر-سطح با قدرت تفکیک بالا است. اجزای این مدل شامل جریان دینامیک (شامل جریان‌های هواشناسی و ترمودینامیکی)، سیکل سولفور اتمسفر، ابر و بارندگی، مراحل تابش، پوشش سطح زمین و عمق خاک می‌باشد. خروجی مدل نیز سری کامل متغیرهای هواشناسی بوده که می‌تواند در مقیاس‌های زمانی تعیین شده، استخراج شود. شرایط مرزی سطحی

توزیع‌های نرمال، لوگ نرمال، لوگ نرمال سه پارامتری، گامبل، پیرسون تیپ سه، لوگ پیرسون تیپ سه و تابع حد نهایی تعمیم یافته برازش داده شدند. با مقایسه پارامترهای توزیع و با روش امتیازدهی، بهترین تابع توزیع تعیین می‌شود. در این پژوهش، از شاخص‌های جریان کم ۱۰ و ۳۰ روزه با دوره بازگشت‌های مختلف استفاده شده است که به‌صورت Qd,T معرفی شده است، به‌طوری که d به دوره تداوم به روز و T به دوره بازگشت اشاره می‌کند.

**مدل هیدرولوژیک SWAT:** مدل SWAT یک مدل جامع و کامل در مقیاس حوضه‌ای است و برای پیش‌بینی تاثیر روش‌های مدیریتی متفاوت بر جریان، رسوب، عناصر غذایی، مواد شیمیایی و بیلان آبی در حوضه‌هایی با خاک و کاربری اراضی متفاوت، برای دوره‌های زمانی طولانی ارائه شده است (Arnold و همکاران، ۱۹۹۸). این مدل، برای شبیه‌سازی فرایندهای هیدرولوژیکی در حوضه‌های آبخیز پیچیده و وسیع با توجه به تغییرات خاک، کاربری اراضی و شرایط آب و هوایی مختلف، در دوره‌های طولانی مدت کاربرد دارد. این مدل، از نظر محاسباتی کارآمدی مناسبی دارد و دارای قابلیت اتصال به سامانه‌های اطلاعات جغرافیایی است و با دریافت داده‌های ورودی نظیر هواشناسی، توپوگرافی، کاربری اراضی و خاک به‌صورت لایه‌های اطلاعاتی، فرایندهای هیدرولوژیکی حوزه آبخیز را به‌صورت پیوسته شبیه‌سازی می‌کند. مدل هیدرولوژیکی SWAT، بر اساس معادله بیلان آبی پایه‌ریزی شده است و روندیابی جریان از دو روش ماسکینگ‌هم و ذخیره متغیر انجام می‌شود (Neitsch و همکاران، ۲۰۱۱). این مدل، با استفاده از دو روش شماره منحنی CN و رابطه نفوذ گرین-آمپ رواناب سطحی را شبیه‌سازی می‌کند. مدل SWAT بیشینه رواناب را با استفاده از روش منطقی یا همان استدلالی محاسبه می‌کند. این مدل، به لحاظ مقیاس فضایی نیمه‌توزیعی و از نظر زمانی مدلی پیوسته است. کوچک‌ترین واحد کاری در این مدل، واحد واکنش هیدرولوژیک (Hydrologic Response Unit, HRU) است که از روی هم‌گذاری نقشه‌های طبقات شیب، خاک و کاربری اراضی حاصل می‌شود. آب موجود در خاک، رواناب سطحی، رسوب و عناصر شیمیایی ابتدا،

لینوکس نصب می‌شود)، ابتدا ناحیه مورد نظر و قدرت تفکیک مکانی مدل انتخاب و پس از آن به ترتیب سناریو، زمان اجرا و پایان آن و متغیرهای پیش‌بینی به مدل معرفی می‌شوند. برای تعیین ناحیه مورد نظر بایستی محدوده را بزرگ‌تر از منطقه مورد مطالعه در نظر گرفت تا عوامل آب و هوایی خارج از منطقه که بر روی آب و هوای منطقه تاثیر می‌گذارند نیز در نظر گرفته شوند. از طرفی، محدوده نباید خیلی بزرگ در نظر گرفته شود تا حجم محاسبات را بالا ببرد (Giorgi و Mearns, ۱۹۹۹). تغییر ناهم‌واری، نوع پوشش سطح زمین و فرمت داده‌های خروجی را می‌توان در طول اجرای مدل تعیین کرد. بعد از انتخاب محدوده برای ارزیابی مدل ابتدا، مدل برای دوره گذشته (پایه) اجرا می‌شود. مدل PRECIS، امکان استفاده از چند نوع داده که دوره‌های مختلفی را نیز در بر می‌گیرند را دارد. داده‌های مرزی مورد قبول مدل شامل ERA40 (1957-1993)، Assimilated ERA15 (1979-2004) (2001)، NCEP-R2 (1979-2004) و HadAM3P (1960-1990) است. در این مطالعه، از داده‌های HadAM3P استفاده شده است.

**سناریوهای انتشار:** تغییرات غلظت گازهای گلخانه‌ای به وسیله فعالیت‌های بشر به صورت کاملاً غیرقطعی و تحت سناریوهای مختلف ارائه شده است. به طور کلی، یک سناریو حاوی اطلاعاتی از وضعیت اقتصادی-اجتماعی و میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای در آینده است که به آن سناریو انتشار (Emission Scenario) گفته می‌شود (IPCC, ۲۰۰۷). در این مطالعه نیز با توجه به ویژگی‌های منطقه، سناریوهای A2 و B2 برای پیش‌بینی استفاده شد. در این زمینه، شش گروه سناریو با توجه به پیش‌بینی تغییرات در بخش‌های جمعیت، توسعه‌های اجتماعی و اقتصادی و پیشرفت‌های فناوری در آینده و مطابق با چهار گروه A1, A2, B1 و B2 ارائه شده‌اند. این سناریوها به طور خلاصه به صورت زیر هستند.

A1F1: تصور جهانی در آینده با رشد اقتصادی خیلی سریع و کاربرد شدید سوخت‌های فسیلی، A1T: رشد اقتصادی خیلی سریع و استفاده از منابع سوختی غیرفسیلی با ایجاد تکنولوژی‌های جدید، A1B: رشد اقتصادی خیلی سریع در آینده و استفاده از منابع

شامل دمای سطح آب و یخ منطقه و شرایط مرزی جانبی شامل اطلاعات دینامیکی اتمسفر نظیر فشار هوا، اجزا افقی باد، مقدار درجه حرارت و رطوبت هوا در نقاط گوشه‌های محدوده مدل می‌باشد. اطلاعات شرایط مرزی سیکل سولفور نیز به صورت مقدار دی‌اکسید سولفور، سولفات و ذرات شیمیایی مرتبط با سولفور تعریف شده است. ساختار دینامیکی مدل منطقه‌ای PRECIS مشابه مدل جوی HadAM3P است (Jones و همکاران، ۲۰۰۴). این مدل، مولفه جوی مدل گردش کلی HadCM3 است. قدرت تفکیک مکانی مدل نیز در دو سطح ۰/۴۴ و ۰/۲۲ درجه با نه لایه در جو (از سطح زمین تا ۳۰ کیلومتری در استراتوسفر) و چهار لایه در عمق خاک می‌باشد (Burrige و Simmons, ۱۹۸۱). در این مدل، برای پارامترسازی همرفت از طرح‌واره نفوذ شار جرمی گرگوری استفاده می‌شود که در آن همرفت قائم بر روی تکانه گرما و رطوبت تاثیرگذار است (Giorgi, ۱۹۹۰). در طرح‌واره محاسباتی مدل، فرض می‌شود که بارش همرفتی بدون توجه به درصد ابرناکی، بر روی ۶۵ درصد از مساحت شبکه مدل می‌بارد. مقدار آستانه آب ابر در بارش بر روی خشکی،  $2 \text{ gkg}^{-1}$  و بر روی دریا  $0.4 \text{ gkg}^{-1}$  است. برای بارش‌های بزرگ مقیاس، رطوبت نسبی بحرانی برای شروع بارش، در هر گام مکانی و زمانی محاسبه شده و فرض می‌شود که شکل آب در داخل ابر، در بالای صفر درجه سلسیوس، مایع و در دمای زیر ۹- درجه، جامد و در بین این دو درجه، تلفیقی از مایع و جامد باشد. مقادیر آستانه آب مایع ابر، برای آغاز بارش  $0.1 \text{ kgkg}^{-1}$  بر روی خشکی و  $2 \times 10^5 \text{ kgkg}^{-1}$  بر روی دریا است. طرح‌واره تابش، میزان انرژی تابشی دریافتی، تابش طول موج‌های کوتاه (شش نوار) و نوار (هشت نوار) ناشی از دمای محیط، ابر (آب مایع و جامد)، بخار آب و گازهای گلخانه‌ای، همچون ازن، دی‌اکسید کربن، اکسید نیترو، متان و CFCها را محاسبه می‌کند. در لایه مرزی جو، از طرح‌واره اختلاط تلاطمی مرتبه اول و برای اختلاط قائم، از متغیرهای ترمودینامیکی و تکانه استفاده می‌شود. فرایندهای سطح زمین نیز با استفاده از طرح‌واره کاکس شبیه‌سازی می‌شود (Cox, ۱۹۹۹). برای اجرای مدل (که بر روی سامانه عامل

سانتی‌گراد برای ماه اکتبر است. مقدار MAE نیز بین سه تا ۱۳ درجه سانتی‌گراد است که به ترتیب مربوط به ماه‌های ژانویه و اکتبر است. بررسی دمای کمینه در منطقه نشان می‌دهد که به جز ماه‌های سرد سال، دمای کمینه در بقیه ماه‌ها، بیش از مقدار مشاهده‌ای برآورد شده است. به طوری که کمترین درصد خطا و انحراف نسبت به میانگین مشاهده‌ای برای ماه دسامبر و بیشترین آن‌ها مربوط به ماه سپتامبر است. هر چند که از لحاظ عددی MBE<sup>۲</sup> از -۰/۱ تا -۶/۴ و MAE از یک تا ۶/۱ تغییر می‌کنند. نتایج نشان می‌دهد که به طور کلی مدل توانسته است، برآورد مناسبی از بارش در منطقه را نشان دهد. هر چند که در مورد بارش‌های پاییزه و بهار، به دلیل ماهیت محلی آن‌ها، مدل چندان توانمند نبوده است. ارزیابی مدل PRECIS در مقاله دیگری به وسیله نویسنده به تفصیل ارائه شده است (Rahimi و همکاران، ۲۰۱۶).

بعد از ارزیابی مدل طی دوره پایه، مدل آب و هوایی برای دوره ۲۰۷۰ تا ۲۱۰۰ (افق ۲۰۸۰) و تحت دو سناریوی آب و هوایی A2 و B2 اجرا شد. برای کاهش عدم قطعیت ریزمقیاس‌نمایی برای هر سناریو، سه ensemble<sup>۳</sup> استخراج شد. برای ارزیابی تغییرات بارش طی دوره آینده، مقادیر بارندگی دوره پایه با مقادیر برآورد شده به وسیله مدل برای دوره ۲۰۷۰ تا ۲۱۰۰ مورد مقایسه قرار گرفت. ارزیابی سناریوی A2، نشان می‌دهد، میانگین بارندگی در بیشتر ماه‌ها بیش از دوره کنونی برآورد شده است، هر چند این افزایش، به طور میانگین حدود ۱۱ درصد خواهد بود. همچنین، تحت سناریوی A2، هماهنگی یکسانی در شبیه‌سازی بارندگی در ماه‌های مختلف دیده نمی‌شود (شکل ۵-الف). بررسی بارش فصول نشان می‌دهد که بارش به جز در فصل بهار که اندکی کاهش خواهد یافت (حدود دو درصد) در بقیه ماه‌ها افزایش خواهد داشت. به طوری که در تابستان حدود ۳۴ درصد، در پاییز حدود ۲۱ درصد و در زمستان این افزایش حدود ۹/۵ درصد خواهد بود. لازم به ذکر است که نتایج نشان از

سوخت فسیلی و غیر فسیلی به صورت متعادل تر، A2: رشد اقتصادی متوسط در آینده و نرخ آلودگی بیشتر از A1، B1: تصور جهانی همگرا با تغییر سریع در ساختارهای اقتصادی، اجتماعی، ایجاد فناوری‌های جدید و کمترین نرخ رشد آلودگی و B2: تاکید بر راه‌حل‌های منطقه‌ای برای پایداری اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی، رشد اقتصادی متوسط بوده و نرخ رشد آلودگی کمتر از A2.

## نتایج و بحث

برای بررسی اثرات تغییر آب و هوا بر جریان کمینه حوضه کرخه ابتدا، مدل ریزمقیاس‌نمایی دینامیکی PRECIS مورد ارزیابی قرار گرفت. برای این منظور، ابتدا مدل برای دوره پایه (۱۹۶۰ تا ۱۹۹۰) اجرا شده و مقادیر بارش و دمای شبیه‌سازی شده با مقادیر مشاهده‌ای مقایسه شد (جدول ۲). لازم به ذکر است که مدل فوق‌الذکر با تفکیک افقی ۰/۴۴ درجه در شبکه‌هایی با ابعاد ۵۰ کیلومتر اجرا شد. برای تنظیم مدل و ایجاد سازگاری بین فرایندهای جوی و عمق زمین، لازم است، دوره اجرای مدل چند ماه قبل از دوره مطالعه باشد تا تعادل بین رفتار اتمسفر و خشکی ایجاد شود (Spin up). با توجه به بررسی منابع و راهنمای استفاده از مدل PRECIS، اولین سال (سال ۱۹۶۰) به عنوان Spin up در نظر گرفته شد. دامنه انتخابی برای شبیه‌سازی نیز مطابق نتایج بررسی Rahimi و همکاران (۲۰۱۶) از مدیترانه تا مرز شرقی ایران در نظر گرفته شده است. همان‌طور که در جدول ۲ مشخص است، مقدار انحراف میانگین در همه ماه‌ها کمتر از ۲۰ میلی‌متر و مقدار خطا (MAE)<sup>۱</sup> بین ۰/۴ تا ۲۲ میلی‌متر است. بیشترین خطا و انحراف با توجه به مقادیر مشاهده‌ای به جز ماه‌های تابستان، مربوط به ماه اکتبر (با حدود ۴۸ درصد) و سپس، نوامبر (با حدود ۳۰ درصد) می‌باشد. در مورد دما، بررسی‌ها نشان می‌دهند که دمای بیشینه برآورد شده به وسیله مدل آب و هوایی، در تمام ماه‌ها بیش از مقادیر مشاهده‌ای بوده و مقدار انحراف از میانگین بین ۰/۶ درجه سانتی‌گراد برای ماه ژانویه تا سه درجه

<sup>۲</sup> Mean Bias Error

<sup>۳</sup> برای کاهش عدم قطعیت ریزمقیاس‌نمایی معمولاً برای هر سناریو چند بار اجرا انجام می‌گیرد که خروجی اجراهای مختلف ensemble نامیده می‌شوند.

<sup>۱</sup> Mean Absolute Error

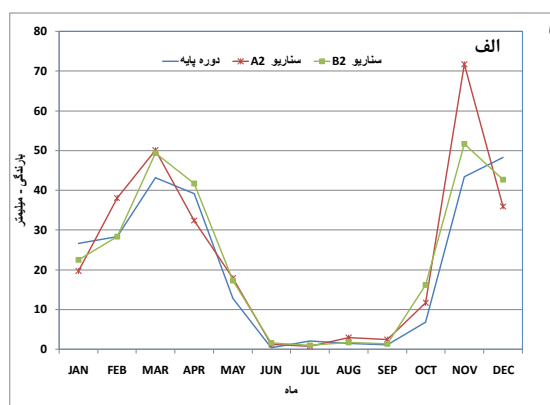
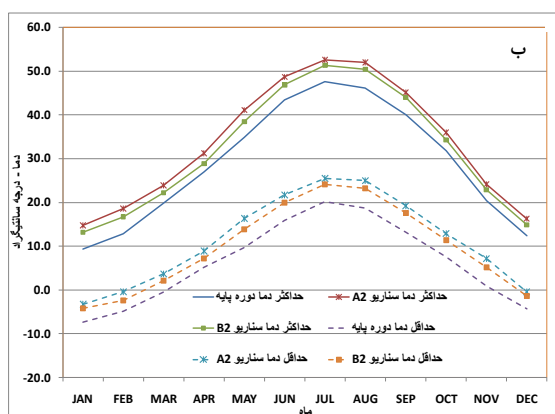


درصد، در فصل پاییز حدود ۱۲ درصد و در فصل زمستان این افزایش حدود دو درصد خواهد بود. میانگین دمای کمینه و بیشینه تحت سناریوی A2، در همه ماهها به طور متوسط پنج درجه افزایش نشان می دهد (شکل ۵- ب). افزایش میانگین دمای بیشینه در پاییز، کمتر از سایر فصول است، در حالی که این افزایش برای میانگین دمای کمینه در زمستان، کمتر از بقیه فصول خواهد بود. تحت سناریوی B2، میانگین دمای کمینه و بیشینه، حدود سه درجه سانتی گراد افزایش یافته است (شکل ۲- ب). هر چند دمای بیشینه طی دوره آینده تقریباً فاقد روند می باشد، در حالی که روند دمای کمینه، طی دوره ۲۰۷۰ تا ۲۱۰۰ همچنان افزایشی است. نتایج بررسی تغییرات اقلیمی حوضه کرخه به وسیله Rahimi و همکاران (۲۰۱۶) به تفصیل ارائه شده است.

تغییر توزیع فصلی بارش تحت این سناریو دارند، به طوری که در دوره آینده بیشترین درصد بارش فصلی مربوط به پاییز و بعد از آن زمستان خواهد بود (بارش پاییزه چهار درصد بیشتر از زمستان خواهد بود). در حالی که در زمان حاضر، بارندگی فصول زمستان و پاییز نزدیک به هم، اما با درصد بیشتر برای فصل زمستان می باشد. بررسی بارش شبیه سازی شده تحت سناریوی B2 نیز، بیانگر تغییرات ناهمگن بارش در ماههای مختلف است. میانگین بارندگی منطقه ای در بیشتر ماهها بیش از دوره کنونی برآورد شده است، هر چند این افزایش، به طور میانگین، حدود هفت درصد خواهد بود (شکل ۲- الف). بررسی بارش فصول نشان می دهد که بارش به جز در فصل تابستان (که حدود ۱۳ درصد) کاهش و در بقیه ماهها افزایش خواهد داشت. به طوری که در فصل بهار حدود ۱۵

جدول ۲- پارامترهای آماری بارندگی منطقه ای (میلی متر) و مقدار خطای مدل آب و هوایی (طی دوره پایه)

خطا	مدل PRECIS						مشاهده ای						
	MAE	MBE	%CV	STD	MEAN	MAX	MIN	%CV	STD	MEAN	MAX	MIN	MONTH
	۲۲/۰	۲۰/۶	۳۸/۶	۲۱/۲	۵۵/۰	۱۰۸/۳	۱۳/۶	۱۴/۳	۱۰/۸	۷۵/۵	۱۱۳/۰	۴۲/۱	JAN
	۱۸/۷	۱۰/۴	۳۷/۵	۲۲/۹	۶۰/۹	۱۳۷/۰	۲۰/۶	۱۵/۱	۱۰/۸	۷۱/۴	۱۱۴/۰	۴۲/۰	FEB
	۲۰/۶	۱۹/۷	۲۵/۲	۲۳/۲	۹۲/۲	۱۵۵/۵	۵۲/۹	۸/۷	۸/۱	۹۲/۸	۱۲۳/۶	۶۱/۲	MAR
	۱۵/۷	-۱۴/۵	۲۹/۱	۲۰/۶	۷۰/۹	۱۲۹/۴	۳۹/۴	۱۳/۵	۷/۹	۵۸/۷	۹۸/۹	۳۱/۰	APR
	۰/۴	۸/۰	۲۶/۹	۶/۰	۲۲/۲	۳۴/۵	۱۰/۶	۱۶/۱	۴/۹	۳۰/۱	۴۷/۹	۱۴/۷	MAY
	۰/۴	-۰/۳	۶۶/۱	۰/۵	۰/۸	۲/۳	۰/۱	۶۱/۶	۰/۳	۰/۵	۱/۴	۰/۰	JUN
	۲/۵	-۲/۵	۳۷/۹	۱/۱	۲/۹	۶/۷	۱/۲	۱۱۷/۵	۰/۴	۰/۳	۱/۸	۰/۰	JUL
	۲/۷	-۲/۷	۵۲/۵	۱/۶	۳/۰	۷/۱	۰/۶	۵۸/۴	۰/۲	۰/۴	۲/۰	۰/۰	AUG
	۱/۸	-۱/۷	۴۳/۱	۱/۰	۲/۲	۵/۵	۰/۸	۸۷/۶	۰/۴	۰/۵	۱/۳	۰/۰	SEP
	۱۲/۷	۱۲/۶	۳۹/۷	۵/۵	۱۳/۸	۲۹/۸	۴/۷	۲۲/۰	۵/۸	۲۶/۴	۴۱/۴	۱۰/۲	OCT
	۱۸/۷	-۱۶/۵	۲۹/۱	۲۰/۶	۷۰/۹	۱۲۹/۴	۳۹/۴	۱۰/۲	۵/۵	۵۴/۱	۶۹/۱	۳۳/۰	NOV
	۲۰/۶	-۱۴/۱	۳۳/۴	۲۸/۴	۸۵/۰	۱۷۳/۰	۲۹/۹	۲۲/۷	۱۶/۰	۷۰/۵	۱۴۹/۳	۳۹/۲	DEC



شکل ۲- میانگین بارش و دمای ماهانه حوضه کرخه طی دوره پایه و آینده تحت سناریوهای مختلف، بارش و ب) دمای بیشینه و کمینه

برآورد شده است. با توجه به این‌که مدل اقلیمی PRECIS مقادیر بارش را کمتر از مقادیر مشاهده‌ای و مقدار دما را بیش از مقادیر مشاهده‌ای برآورد کرده است و با توجه به عدم قطعیت موجود در مدل هیدرولوژیکی، نتیجه تا حدودی قابل قبول است. لازم به ذکر است که انحراف مقادیر بارش و دمای شبیه‌سازی شده به‌وسیله مدل اقلیمی برای ورود به مدل SWAT و محاسبه دبی روزانه دوره‌های آینده در نظر گرفته شده است. مقدار میانگین دبی برآورد شده تحت سناریوی A2 و برای افق ۲۰۸۰ حوضه کرخه برابر  $350/8$  مترمکعب بر ثانیه برآورد شده است. این در حالی است که تحت این سناریو، مقدار بارش حدود ۱۱ درصد و مقدار دما حدود پنج درجه افزایش داشته است. افزایش دبی تحت این سناریو حدود دو برابر مقادیر مشاهده‌ای است. تحت سناریوی B2 میانگین دبی حوضه کرخه برابر  $74/7$  مترمکعب بر ثانیه برآورد شده است. در این سناریو، مقدار بارش تغییر چندانی نداشته است، حدود سه درصد افزایش داشته، ولی مقدار دما سه درجه سانتی‌گراد افزایش داشته است. لذا، با توجه به تغییرات دما و بارش تحت این سناریو انتظار کاهش دبی منطقی است.

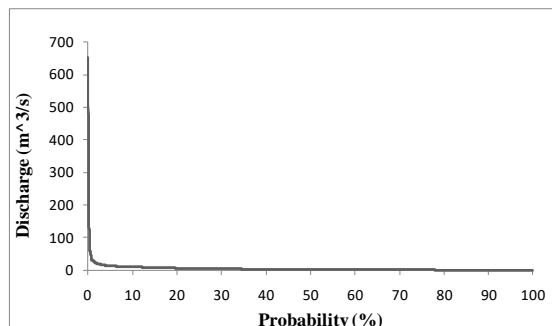
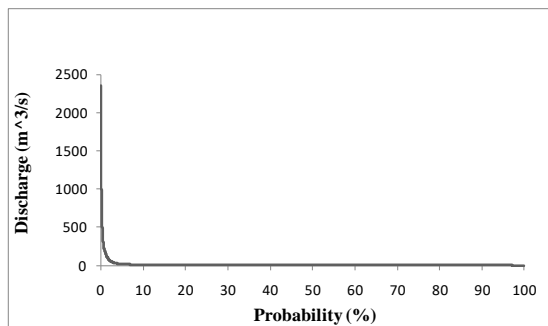
**الف) سناریوی A2:** برای محاسبه شاخص‌های  $Q_{75}$ ،  $Q_{90}$  و  $Q_{95}$  طی دوره ۲۰۷۰ تا ۲۱۰۰ تحت سناریوی A2 داده‌های بارش و دما شبیه‌سازی شده به‌وسیله مدل PRECIS برای دوره آینده، به مدل هیدرولوژیکی SWAT وارد و دبی روزانه برای دوره ۲۰۷۰ تا ۲۱۰۰ در هر یک از زیرحوضه‌ها استخراج شد. آن‌گاه، با استفاده از منحنی‌های تداوم، شاخص‌های  $Q_{75}$ ،  $Q_{90}$  و  $Q_{95}$  برای هر یک از زیرحوضه‌ها برآورد شد (جدول ۳). برای نمونه شکل ۳، منحنی تداوم جریان را برای زیرحوضه قره باغستان (کد ۱۴۳-۲۱) نشان می‌دهد.

همان‌طور که در جدول نیز مشخص است، در همه شاخص‌ها، کمترین مقدار در زیرحوضه آفرینه (چلهول) و بیشترین مقدار در خروجی حوضه (جلوگیر) برآورد شده است. میزان دبی در خروجی حوضه معمولاً بیشتر از بقیه نقاط می‌باشد. ایستگاه آفرینه (چلهول) نیز بر روی شاخه اصلی رودخانه قرار ندارد و لذا، مقدار دبی کمتری دارد. برای بررسی

برای بررسی دبی‌های کمینه تحت سناریوهای مختلف، ابتدا، منحنی تداوم جریان و شاخص‌های جریان کمینه برای دوره پایه و هر یک از سناریوها محاسبه، سپس، جریان کمینه دوره آینده با دوره پایه مقایسه شد. به‌همین منظور، سری زمانی بارش و دمای روزانه شبیه‌سازی شده به‌وسیله مدل PRECIS، طی دوره پایه و تحت سناریوهای مختلف برای دوره ۲۰۷۰ تا ۲۱۰۰ به مدل SWAT وارد و دبی روزانه برای این دوره‌ها استخراج شد. سپس، شاخص‌های مختلف جریان کمینه برای دبی‌های شبیه‌سازی شده، محاسبه و ارزیابی شدند. لازم به ذکر است، مدل SWAT به‌وسیله Ghafouri و همکاران (۲۰۱۳) برای حوضه کرخه اجرا، واسنجی و اعتبارسنجی شده است. واسنجی مدل برای سال‌های ۱۹۹۵ تا ۲۰۰۱، ابتدا به‌صورت دستی و سپس، به کمک روش اتوماتیک SUFI2 انجام شد. اعتبارسنجی بر اساس آمار سال‌های ۲۰۰۲ تا ۲۰۰۵ انجام شد. آن‌ها به‌منظور کاهش عدم قطعیت، در واسنجی و اعتبارسنجی مدل، اجزای مختلف بیلان آب را در نظر گرفته و همچنین، از داده‌های مشاهداتی چندین ایستگاه اندازه‌گیری به‌طور هم‌زمان استفاده کردند. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که برای دوره اعتبارسنجی، شاخص P-فاکتور در همه ایستگاه‌ها نزدیک به یک است، یعنی تقریباً همه داده‌های مشاهداتی در باند عدم قطعیت ۹۵ درصد قرار گرفته‌اند. از طرف دیگر، با بررسی شکل ظاهری هیدروگراف‌های مشاهداتی و بهترین شبیه‌سازی و شاخص‌های ارزیابی کارایی مدل نتیجه گرفتند که به‌طور کلی تطابق هیدروگراف‌ها در دوره اعتبارسنجی نسبت به دوره واسنجی بهتر است. لذا، به‌نظر می‌رسد، مدل SWAT برای شبیه‌سازی هیدرولوژی حوضه کرخه از کارایی مناسبی برخوردار است. برای ارزیابی اولیه از مقادیر دبی برآورد شده، ابتدا، مقادیر میانگین دبی برای هر یک از سناریوها محاسبه شد. مقدار میانگین دبی در حوضه کرخه برای مقادیر مشاهده‌ای برابر  $153/8$  مترمکعب بر ثانیه می‌باشد. این مقدار طی دوره پایه برآورد شده به‌وسیله مدل SWAT و با کمک داده‌های دما و بارش مدل PRECIS برابر  $103/18$  مترمکعب بر ثانیه بوده که نسبت به مقادیر مشاهده‌ای حدود ۳۰ درصد کمتر

دبی کمینه تحت سناریوی A2، با دوره پایه تفاوت عمده‌ای دارد. به طوری که در دوره پایه قسمت‌های شمالی و غربی دبی کمینه کمتری از قسمت‌های شرقی و جنوبی دارند.

تغییرات دبی کمینه در حوضه، از دبی کمینه ویژه استفاده شد. شکل ۴، توزیع مکانی qs75 را برای دوره پایه و افق ۲۰۸۰ تحت سناریو A2 نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل نیز مشخص است، توزیع مکانی



شکل ۳- منحنی تداوم جریان زیرحوضه قره باغستان، الف) دوره پایه و ب) تحت سناریوی A2

جدول ۳- مقادیر شاخص‌های استخراج شده از منحنی تداوم برای دوره و پایه و سناریوهای مختلف (مترمکعب بر ثانیه)

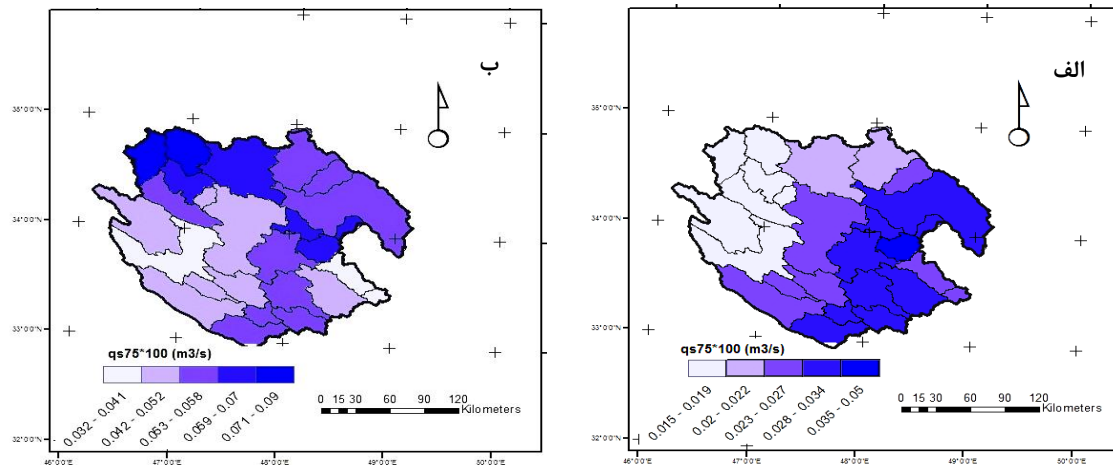
سناریو B2 (افق ۲۰۸۰)			سناریو A2 (افق ۲۰۸۰)			دوره پایه			زیرحوضه‌ها
Q <sub>95</sub>	Q <sub>90</sub>	Q <sub>75</sub>	Q <sub>95</sub>	Q <sub>90</sub>	Q <sub>75</sub>	Q <sub>95</sub>	Q <sub>90</sub>	Q <sub>75</sub>	
۰/۰۰۱۰	۰/۰۰۱۰	۰/۰۰۰۰	۰/۱۹۱۵	۰/۲۳۸۹	۰/۳۵۳۲	۰/۰۰۱۰	۰/۰۰۱۰	۰/۰۴۵۴	روانسر (نهر اصلی)
۰/۰۰۱۰	۰/۰۰۱۰	۰/۰۰۳۷	۰/۵۰۵۵	۰/۶۴۹۳	۰/۹۵۷۳	۰/۰۰۱۰	۰/۰۰۱۰	۰/۰۶۰۸	دواب مرک
۰/۰۰۱۰	۰/۰۰۱۰	۰/۰۲۳۲	۰/۴۰۴۷	۰/۶۱۹۳	۱/۰۷۴۰	۰/۰۰۱۰	۰/۰۰۱۰	۰/۰۹۸۲	آران غرب
۰/۰۰۱۰	۰/۰۰۱۰	۲/۷۴۷۰	۲/۹۹۶۰	۴/۲۴۱۰	۷/۲۳۰۰	۰/۰۰۱۰	۰/۰۳۹۷	۳/۷۲۷۰	پل چهر
۰/۰۰۱۰	۰/۰۰۱۰	۰/۰۳۲۱	۱/۲۱۷۰	۱/۶۶۶۰	۲/۵۳۲۰	۰/۰۰۱۰	۰/۰۰۱۰	۰/۳۷۲۹	پل کهنه
۰/۱۱۷۲	۰/۲۶۵۸	۰/۵۵۸۵	۰/۲۶۵۰	۰/۳۴۳۹	۰/۴۹۳۶	۰/۱۵۱۸	۰/۳۳۱۸	۰/۸۲۳۹	هولیان
۰/۰۰۱۰	۰/۰۳۹۷	۰/۵۴۳۶	۰/۲۸۵۷	۰/۳۶۸۱	۰/۶۰۱۹	۰/۰۰۸۱	۰/۱۴۷۲	۰/۶۸۵۸	دوآب سید علی
۰/۰۰۱۰	۰/۰۰۱۰	۰/۰۰۱۰	۰/۱۶۱۳	۰/۲۱۴۳	۰/۳۱۷۹	۰/۰۰۱۰	۰/۰۰۱۰	۰/۰۰۱۰	کاکا رضا
۰/۰۰۱۰	۰/۰۰۰۸	۰/۷۲۷۷	۰/۴۵۷۶	۰/۶۱۹۵	۰/۹۹۵۹	۰/۰۴۶۵	۰/۲۵۵۶	۱/۰۷۵۰	چم انجیر
۰/۰۰۱۰	۰/۰۰۱۰	۱/۷۷۵۰	۱/۶۶۵۰	۲/۲۵۵۰	۳/۶۲۵۰	۰/۰۰۱۰	۰/۱۱۶۵	۲/۵۵۸۰	آفرینه (کشکان)
۰/۰۰۱۰	۰/۰۰۱۰	۰/۰۰۱۰	۰/۰۰۱۰	۰/۰۰۱۰	۰/۰۰۱۰	۰/۰۰۱۰	۰/۰۰۱۰	۰/۰۰۱۰	آفرینه (چلهول)
۰/۰۰۱۰	۰/۰۰۱۰	۳/۰۹۸۰	۲/۵۶۴۰	۳/۴۳۶۰	۵/۴۲۵۰	۰/۰۰۱۰	۰/۴۶۹۱	۴/۱۹۸۰	پل دختر
۰/۰۲۹۹	۰/۱۰۳۷	۹/۸۳۰۰	۱۲/۸۲۰۰	۱۷/۵۳۰۰	۲۷/۸۷۰۰	۰/۱۱۳۰	۰/۹۸۸۶	۱۴/۴۵۰۰	جلوگیر

می‌دهد که در مناطق شمالی حوضه این شاخص‌ها افزایش شدیدی دارند، در حالی که مناطق جنوبی و نزدیک به خروجی حوضه تفاوت اندک است. مقایسه متوسط مقادیر دبی کمینه ایستگاه‌ها با مقادیر پایه ایستگاه‌ها نشان می‌دهد که شاخص Q<sub>75</sub> حدود ۱/۷ مترمکعب بر ثانیه تحت سناریوی A2 افزایش دارد. این در حالی است که مقدار این شاخص در ایستگاه‌های دوآب سید علی، چم‌انجیر و قره‌باغستان

در حالی که دبی کمینه در دوره آینده و تحت این سناریو، در قسمت‌های غربی مقدار کمتری دارند و در قسمت‌های شمالی مقدار آن بیشتر از سایر مناطق است. در مورد دبی‌های کمینه با دوره بازگشت‌های ۷۵ و ۹۵ سال نیز روند تا حدودی مشابه می‌باشد. به طوری که توزیع مکانی شاخص‌های دبی کمینه Q<sub>75</sub>، Q<sub>90</sub> و Q<sub>95</sub> تحت سناریوی A2 کاملاً با دوره پایه متفاوت هستند. مقایسه نقشه‌ها همچنین، نشان

دبی کمینه با احتمال ۹۰ درصد نسبت به  $Q_{75}$  کمتر می‌باشد. مقدار متوسط  $Q_{95}$  در منطقه نیز نسبت به دوره پایه در همه ایستگاه‌ها افزایش دارد (حدود دو مترمکعب بر ثانیه).

نسبت به دوره پایه کاهش یافته‌اند و در بقیه زیرحوضه‌ها این شاخص افزایش دارد. شاخص  $Q_{90}$  تحت سناریوی A2 در دوره ۲۰۷۰ تا ۲۱۰۰، نسبت به دوره پایه در همه ایستگاه‌ها افزایش نشان می‌دهد (به-طور متوسط دو مترمکعب بر ثانیه). هر چند که مقدار



شکل ۴- توزیع مکانی شاخص  $Q_{75}$  در حوضه کرخه، الف) دوره پایه و ب) دوره آبی تحت سناریوی A2

دوره پایه در ایستگاه‌ها، نشان می‌دهد که این شاخص به‌طور میانگین حدود ۱/۵ مترمکعب بر ثانیه افزایش یافته است. هر چند که در ایستگاه‌های هولیان و چمانجیر مقدار دبی کمینه ۱۰ روزه کمتر از دوره پایه می‌باشد. در مورد دبی ۳۰ روزه نیز مقادیر نشان‌دهنده افزایش این شاخص جریان کمینه به مقدار ۱/۵ مترمکعب بر ثانیه است.

برای ارزیابی تغییرات دبی کمینه با استفاده از شاخص‌های جریان کمینه ۱۰ روزه، سری جریان‌های کمینه ۱۰ و ۳۰ روزه طی دوره ۲۰۷۰ تا ۲۰۸۰ محاسبه شده، پس از آن میانگین این سری‌ها با دوره پایه مقایسه شدند. جدول ۴، مقادیر میانگین جریان کمینه ۱۰ و ۳۰ روزه را نشان می‌دهد. مقایسه دبی ۱۰ روزه دوره ۲۰۷۰ تا ۲۱۰۰ تحت سناریوی A2 با

جدول ۴- مقادیر میانگین جریان کمینه ۱۰ و ۳۰ روزه (مترمکعب بر ثانیه)

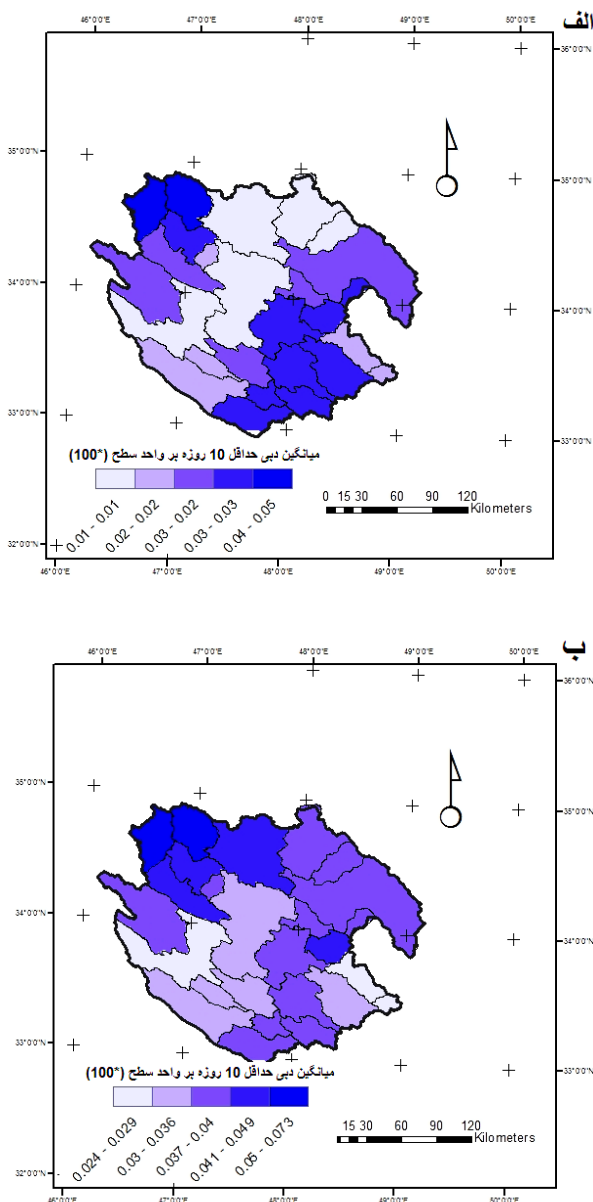
Q <sub>70B</sub>		Q <sub>70A</sub>		Q <sub>60</sub>		زیرحوضه
Q <sub>30</sub>	Q <sub>10</sub>	Q <sub>30</sub>	Q <sub>10</sub>	Q <sub>30</sub>	Q <sub>10</sub>	
۰/۰۶۱	۰/۰۵۴	۰/۳۰۷	۰/۲۸۶	۰/۱۹۳	۰/۱۸۰	روانسر (نهر اصلی)
۰/۲۴۰	۰/۱۸۳	۰/۸۴۹	۰/۷۹۳	۰/۵۴۹	۰/۴۹۹	دوآب مرک
۰/۰۳۰	۰/۰۰۵	۰/۹۴۰	۰/۸۲۲	۰/۱۲۷	۰/۰۸۷	آران غرب
۰/۶۴۰	۰/۳۴۱	۴/۹۲۳	۴/۴۶۸	۱/۶۰۳	۱/۳۱۷	پل چهر
۰/۲۴۲	۰/۲۱۴	۲/۲۳۲	۲/۰۴۵	۰/۹۴۴	۰/۸۷۵	پل کهنه
۰/۴۰۶	۰/۳۷۷	۰/۳۷۷	۰/۳۵۰	۰/۷۱۶	۰/۶۸۰	هولیان
۰/۲۶۳	۰/۱۹۴	۰/۳۹۹	۰/۳۶۲	۰/۳۱۷	۰/۲۷۵	دوآب سید علی
۰/۰۶۴	۰/۰۶۰	۰/۲۶۸	۰/۲۴۳	۰/۱۸۲	۰/۱۶۴	کاکا رضا
۰/۳۵۶	۰/۳۰۲	۰/۷۶۶	۰/۷۰۵	۰/۷۵۹	۰/۷۰۷	چمانجیر
۰/۸۰۲	۰/۶۱۴	۲/۷۴۹	۲/۵۲۴	۱/۶۶۳	۱/۴۸۶	آفرینه (کشکان)
۱/۳۹۴	۱/۱۲۲	۴/۰۴۱	۳/۷۰۷	۲/۷۶۳	۲/۵۰۲	پل دختر
۳/۶۰۸	۲/۶۸۳	۲۰/۸۸۶	۱۸/۹۶۷	۹/۸۴۴	۸/۸۷۱	جلوگیر

بنابراین، به‌طور خلاصه می‌توان گفت که دبی کمینه در افق ۲۰۸۰ و تحت سناریوی A2 افزایش خواهد داشت. هر چند که توزیع مکانی شاخص‌های استخراج شده از منحنی تداوم جریان ( $Q_{90}$ ،  $Q_{75}$  و  $Q_{95}$ ) نشان می‌دهند که در قسمت‌های شمالی حوضه دبی کمینه افزایش خواهد داشت، در حالی که مناطق جنوبی و نزدیک به خروجی حوضه تفاوت چندانی ندارند. شاخص‌های جریان کمینه ۱۰ و ۳۰ روزه تحت سناریوی A2 توزیع مکانی مشابه دوره پایه داشته و افزایش این شاخص‌ها تقریباً در تمام سطح حوضه مشابه است. از طرف دیگر، پس از محاسبه سری جریان‌های کمینه ۱۰ و ۳۰ روزه، طی دوره ۲۰۷۰ تا ۲۰۸۰، چند تابع توزیع فراوانی به این داده‌ها برازش داده و بهترین تابع توزیع انتخاب شد. با کمک تابع توزیع مناسب، مقادیر این شاخص با دوره بازگشت‌های مختلف محاسبه شدند (جدول ۵).

برای مقایسه مکانی شدت خشکسالی در حوضه، از نمایه میانگین سری جریان‌های کمینه ۱۰ و ۳۰ روزه در واحد سطح استفاده شد. شکل‌های ۵ و ۶ توزیع مکانی این نمایه را برای میانگین سری جریان کمینه ۱۰ و ۳۰ روزه در واحد سطح نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل نیز مشخص است، در دوره آینده جریان کمینه ۱۰ روزه در قسمت‌های شمالی بیشتر از جنوبی حوضه است. هر چند که قسمت‌های مرکزی دبی کمتری دارند. مقایسه دبی کمینه ۱۰ روزه تحت سناریوی A2 با دوره پایه (شکل ۵- الف) نشان می‌دهد که توزیع مکانی این شاخص تا حدودی با دوره پایه مطابقت دارد، هر چند در قسمت‌های جنوبی با هم متفاوت هستند. مقایسه توزیع مکانی دبی کمینه ۳۰ روزه دوره پایه و آینده (شکل ۶) نیز بیانگر شباهت تغییرات مکانی این شاخص می‌باشد، هر چند که به لحاظ مقداری در دوره آینده جریان کمینه افزایش دارد.

جدول ۵- مقادیر شاخص‌های سری‌های جریان کمینه سالانه در ایستگاه‌های مورد بررسی تحت سناریوی A2 (مترمکعب بر ثانیه)

ایستگاه	روانسر (نهر اصلی)	دواب مرک	آران غرب	پل چپر	پل کهنه	هولیان
Q <sub>10,5</sub>	۴/۱۲۹	۱۱/۴۱۳	۱۲/۴۱۴	۶۵/۱۳۹	۲۹/۵۱۱	۴/۸۳۳
Q <sub>10,10</sub>	۵/۰۵۲	۱۳/۸۴۹	۱۵/۳۵۳	۷۹/۱۲۶	۳۵/۸۱۹	۵/۵۳۱
Q <sub>10,25</sub>	۶/۱۵۱	۱۶/۷۱۳	۱۸/۸۴۷	۹۵/۶۰۱	۴۳/۲۲۵	۶/۳۷۵
Q <sub>10,50</sub>	۶/۹۲۸	۱۸/۷۱۵	۲۱/۳۲۱	۱۰۷/۱۸۰	۴۸/۳۹۹	۶/۷۵۶
Q <sub>10,100</sub>	۷/۶۷۲	۲۰/۶۲۲	۲۳/۷۰۵	۱۱۸/۲۷۰	۵۳/۳۲۳	۷/۱۸۸
Q <sub>30,5</sub>	۴/۳۸۸	۱۲/۱۴۱	۱۳/۶۸۳	۷۰/۵۴۸	۳۲/۹۴۶	۵/۱۵۶
Q <sub>30,10</sub>	۵/۳۴۹	۱۴/۷۲۹	۱۷/۳۵۵	۸۷/۳۹۵	۳۹/۹۳۵	۵/۹۴۷
Q <sub>30,25</sub>	۶/۴۹۳	۱۷/۷۸۵	۲۱/۹۳۹	۱۰۷/۸۰۲	۴۷/۴۴۶	۶/۷۶۵
Q <sub>30,50</sub>	۷/۳۰۱	۱۹/۹۲۸	۲۵/۲۹۱	۱۲۲/۲۵۳	۵۲/۱۶۰	۷/۲۶۶
Q <sub>30,100</sub>	۸/۰۷۵	۲۱/۹۷۳	۲۸/۵۸۴	۱۳۶/۰۳۷	۵۶/۲۱۵	۷/۶۹۱
ایستگاه	دوآب سید علی	کاکا رضا	چمنجیر	آفرینه (کشکان)	پل دختر	جلوگیر
Q <sub>10,5</sub>	۵/۲۰۳	۳/۳۹۷	۱۰/۴۵۲	۳۶/۶۳۳	۵۳/۱۵۸	۶۱۱/۲۷۲
Q <sub>10,10</sub>	۶/۴۳۷	۴/۱۳۸	۱۲/۲۳۴	۴۵/۵۱۲	۶۴/۵۴۳	۳۲۹/۵۶۳
Q <sub>10,25</sub>	۷/۹۹۶	۵/۰۳۲	۱۴/۱۳۳	۵۶/۷۳۱	۷۷/۹۷۷	۳۹۶/۱۴۶
Q <sub>10,50</sub>	۹/۱۵۳	۵/۶۷۱	۱۵/۳۶۰	۶۵/۰۵۴	۸۷/۳۹۸	۴۴۲/۴۹۹
Q <sub>10,100</sub>	۱۰/۳۰۲	۶/۲۸۷	۱۶/۴۶۳	۷۳/۳۱۶	۹۶/۳۸۷	۴۸۶/۵۰۸
Q <sub>30,5</sub>	۵/۴۶۵	۳/۶۷۲	۱۰/۸۸۴	۳۹/۱۶۳	۵۵/۹۱۲	۲۹۷/۹۴۰
Q <sub>30,10</sub>	۶/۷۴۹	۴/۴۵۶	۱۳/۱۷۸	۴۸/۲۵۷	۶۸/۳۴۰	۳۶۳/۰۶۴
Q <sub>30,25</sub>	۸/۴۰۶	۵/۴۲۸	۱۵/۹۲۲	۵۹/۷۴۸	۸۳/۵۴۳	۴۳۸/۷۹۰
Q <sub>30,50</sub>	۹/۶۶۲	۶/۱۴۳	۱۷/۸۷۵	۶۸/۲۷۲	۹۴/۵۰۴	۴۹۰/۴۰۹
Q <sub>30,100</sub>	۱۰/۹۳۶	۶/۸۵۲	۱۹/۷۶۴	۷۶/۷۳۴	۱۰۵/۱۶۷	۵۳۸/۱۴۳



شکل ۵- توزیع مکانی میانگین سری جریان کمینه ۱۰ روزه، الف) دوره پایه و ب) سناریوی A2

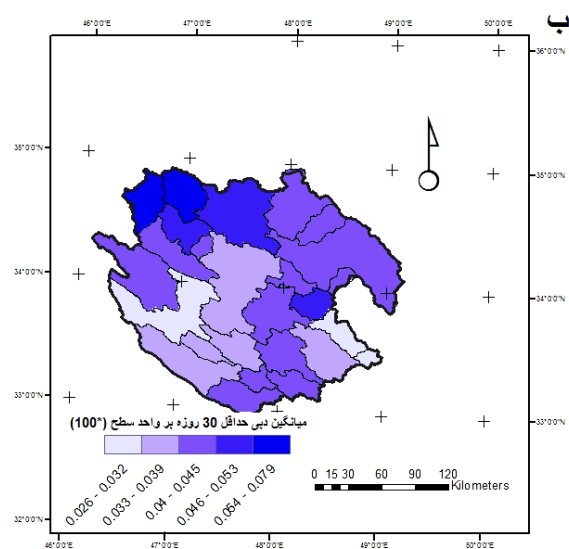
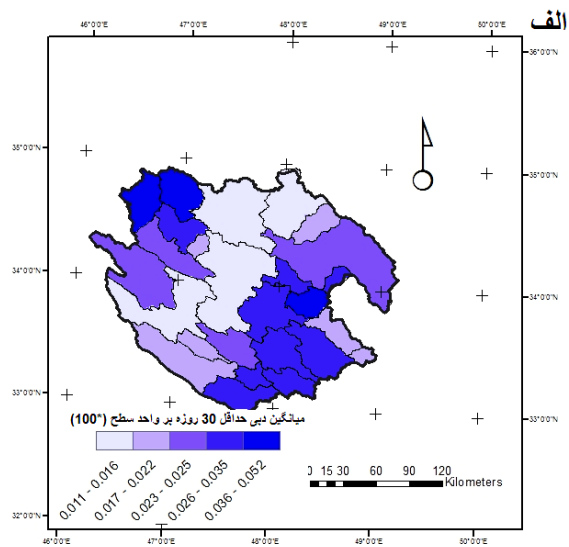
۰/۱۵ مترمکعب بر ثانیه و برای  $Q_{95}$  حدود ۰/۱ مترمکعب بر ثانیه می‌باشد که با توجه به متوسط این شاخص‌ها در دوره پایه، مقدار کاهش دبی کمینه تحت سناریوی B2 برای افق ۲۰۸۰، حدود ۳۵ درصد است. شکل ۸، توزیع مکانی  $Q_{75}$  را برای افق ۲۰۸۰ تحت این سناریو نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل نیز دیده می‌شود، توزیع مکانی دبی کمینه تحت سناریوی B2، با دوره پایه کاملاً مشابه است. به‌طوری که در قسمت‌های شمالی و غربی دبی کمینه کمتری از قسمت‌های شرقی و جنوبی دارند. در مورد دبی‌های کمینه با دوره بازگشت‌های ۷۵ و ۹۵ نیز روند تا

ب) سناریوی B2: برای ارزیابی جریان کمینه در افق ۲۰۸۰ تحت سناریوی B2، نیز ابتدا، منحنی‌های تداوم جریان هر یک از ایستگاه‌ها رسم شد. به‌عنوان نمونه، شکل ۷ این منحنی را برای ایستگاه قره‌باغستان نشان می‌دهد. سپس، شاخص‌های  $Q_{75}$ ،  $Q_{90}$  و  $Q_{95}$  هر یک از ایستگاه‌ها استخراج شد (جدول ۳).

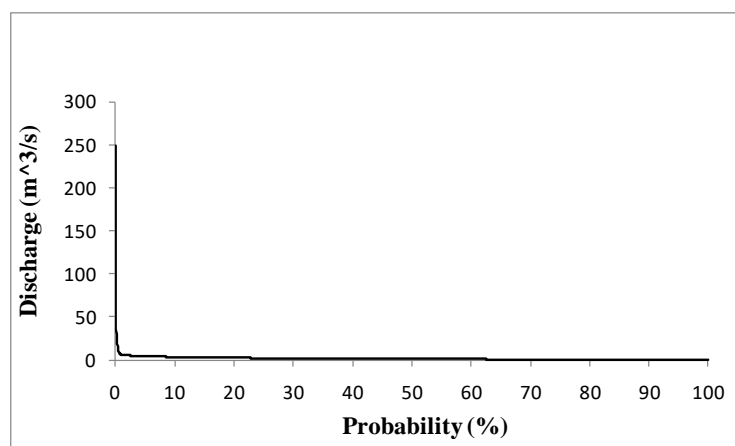
مقایسه متوسط مقادیر دبی کمینه ایستگاه‌ها با مقادیر پایه ایستگاه‌ها نشان می‌دهد که در سناریوی B2، همه شاخص‌های دبی کمینه طی دوره آینده کاهش یافته‌اند. به‌طوری که مقدار کاهش برای  $Q_{75}$  حدود ۰/۷ مترمکعب بر ثانیه، برای  $Q_{90}$  به‌طور متوسط

نظر می‌رسد که دبی کمینه در افق ۲۰۸۰ تحت سناریوی B2 کاهش می‌یابد، اما توزیع مکانی دبی کمینه تغییری نخواهد کرد.

حدودی مشابه است. به طوری که می‌توان گفت، توزیع مکانی شاخص‌های دبی کمینه  $Q_{95}$  و  $Q_{90}$ ،  $Q_{75}$  تحت سناریوی B2 کاملاً با دوره پایه مشابه هستند. لذا، به-



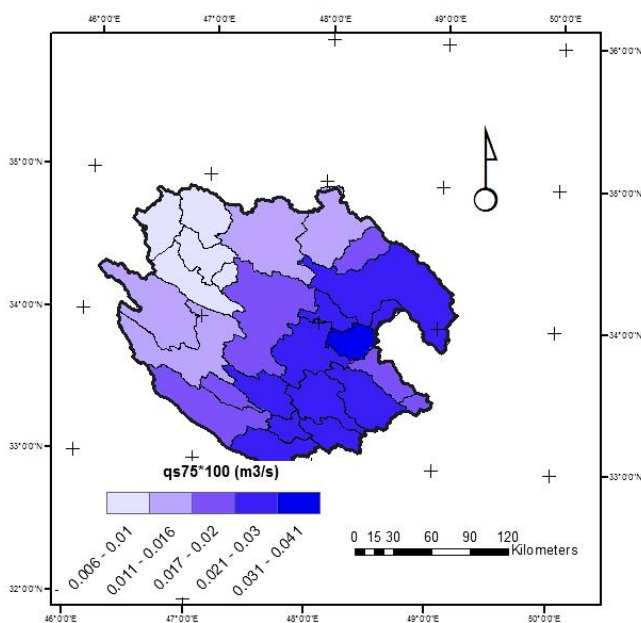
شکل ۶- توزیع مکانی میانگین سری جریان حداقل ۳۰ روزه، دوره پایه و (ب) سناریوی A2



شکل ۷- منحنی تداوم جریان زیرحوضه قره‌باغستان تحت سناریوی B2

می‌دهد. همان‌طور که در شکل نیز مشخص است، در هر دو سری جریان کمینه در قسمت‌های شمالی بیشتر از جنوبی حوضه است، هر چند که قسمت‌های مرکزی دبی کمتری دارند. مقایسه نقشه‌های دبی کمینه ۱۰ و ۳۰ روزه تحت سناریوی B2 با دوره پایه نشان می‌دهد که توزیع مکانی این شاخص با دوره پایه مطابقت دارد. لذا، می‌توان نتیجه گرفت که دبی کمینه طی دوره ۲۰۷۰ تا ۲۱۰۰ تحت سناریوی B2 کاهش زیادی خواهد یافت، اما توزیع مکانی آن تغییری نخواهد داشت. به‌طوری که وضعیت خشکسالی هیدرولوژیک در مناطق مرکزی و حوضه‌های بالادست شدیدتر خواهد بود.

جدول ۴، مقادیر میانگین جریان کمینه ۱۰ و ۳۰ روزه را نشان می‌دهد. مقایسه دبی ۱۰ و ۳۰ روزه طی دوره ۲۰۷۰ تا ۲۱۰۰ تحت سناریوی B2 با دوره پایه در ایستگاه‌ها، نشان می‌دهد که این شاخص به‌طور میانگین (حدود یک مترمکعب بر ثانیه) کاهش یافته است. با توجه به مقدار میانگین این شاخص‌ها، میزان کاهش شاخص‌های دبی کمینه ۱۰ و ۳۰ روزه حدود ۶۰ درصد است. برای مقایسه مکانی شدت خشکسالی در حوضه کرخه، از نمایه میانگین سری جریان‌های کمینه ۱۰ و ۳۰ روزه در واحد سطح استفاده شد. شکل ۹، توزیع مکانی این نمایه را برای میانگین سری جریان کمینه ۱۰ و ۳۰ روزه در واحد سطح نشان



شکل ۸- توزیع مکانی شاخص  $qs_{75}$  در حوضه کرخه برای دوره آبی تحت سناریوی B2

کمینه بیشتری نسبت به سایر نقاط حوضه هستند. قسمت‌های مرکزی همچنان خشک‌تر از سایر قسمت‌ها خواهند بود. این در حالی است که بررسی تغییرات بارندگی و دما تحت این سناریو نشان می‌دهد که میانگین بارش ماهانه حدود ۱۱ درصد افزایش و میانگین دمای کمینه و بیشینه پنج درجه (حدود ۱۰ درصد) افزایش خواهد داشت. افزایش بارندگی ماهانه هماهنگی یکسانی در ماه‌های مختلف ندارد، ولی به‌طور مجموع بارندگی نسبت به دوره پایه، در فصل بهار دو درصد کاهش و در سایر فصول افزایش دارد.

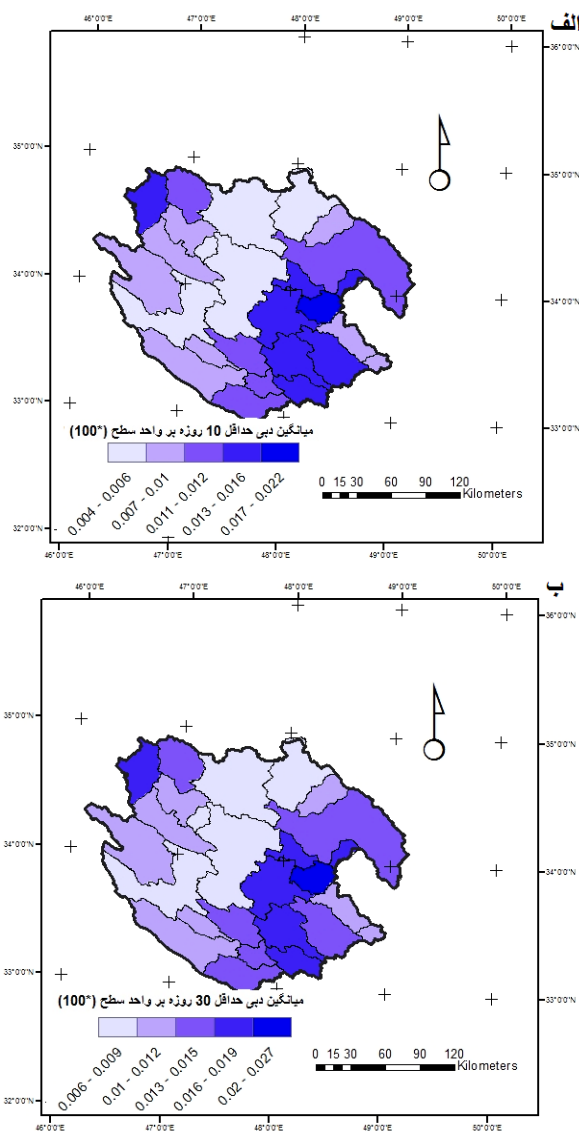
**مقایسه تغییرات جریان حداقل در افق ۲۰۸۰:**  
بررسی‌های انجام شده بر روی دبی کمینه تحت سناریوهای A2 و B2، برای دوره ۲۷۰ تا ۲۱۰۰ نشان می‌دهد که تحت سناریوی A2 دبی کمینه بیش از ۷۰ درصد افزایش خواهد یافت. این افزایش دبی کمینه در قسمت‌های شمالی حوضه بیشتر می‌باشد. ضمن آن‌که توزیع مکانی دبی کمینه نیز تحت این سناریو تغییر خواهد کرد. به‌طوری که قسمت‌هایی که طی دوره پایه، دبی کمینه کمتری را تجربه می‌کنند (قسمت‌های شمالی)، طی افق ۲۰۸۰ دارای دبی



حدودی شمالی حوضه تحت این سناریو خشکسالی-های شدیدی را تجربه خواهد کرد. مقدار متوسط بارندگی تحت سناریوی B2 و برای افق ۲۰۸۰ حدود هفت درصد افزایش دارد که بیشتر تحت تاثیر یک سال پر بارش ۲۰۹۱ می‌باشد. به طوری که با حذف این سال مقدار افزایش بارش ماهانه حدود سه درصد خواهد بود (Rahimi و همکاران، ۲۰۱۶). لذا، افزایش بارش تحت این سناریو کمتر از سناریوی A2 می‌باشد، هر چند که میانگین دمای کمینه و بیشینه نیز کمتر از سناریوی A2 افزایش یافته است. افزایش میانگین دمای کمینه و بیشینه تحت سناریوی B2 برای افق ۲۰۸۰ حدود سه درجه سانتی‌گراد می‌باشد. لذا، به طور کلی می‌توان با توجه به رابطه بارش و دبی به این نتیجه رسید که تحت این سناریو دبی و در نتیجه دبی کمینه کمتر از سناریوی A2 خواهد بود. هر چند که توزیع فصلی بارش تحت این سناریو نیز نشان می‌دهد که در فصل تابستان بارش حدود ۱۳ درصد کاهش، در فصل بهار ۱۵ درصد افزایش، فصل پاییز ۱۲ درصد افزایش و فصل زمستان دو درصد افزایش خواهد داشت. بنابراین، با کاهش بارش در فصل تابستان و همچنین، افزایش ناچیز بارش در فصل زمستان و در نتیجه کاهش مخازن برف (با توجه به افزایش دما)، کاهش شاخص‌های جریان کمینه محتمل می‌باشد. از طرف دیگر، تغییرات دبی کمینه با کاهش دبی متوسط طی این دوره هم‌خوانی دارد، به طوری که میانگین دبی نیز در این دوره تقریباً نسبت به دوره مشاهده‌ای ۵۰ درصد کم شده است. لذا، با توجه به وضعیت اقتصادی-اجتماعی حوضه کرخه و این‌که روند توسعه در منطقه به کدامیک از این سناریوها در آینده نزدیک‌تر خواهد بود، اثرات تغییر اقلیم بر بارش و دما و در نتیجه خشکسالی هیدرولوژیکی نیز متفاوت خواهند بود. البته تغییرات اقلیمی بسیار پیچیده بوده و اثرات آن‌ها بر هر یک از سیستم‌ها نیز پیچیدگی خاصی دارد، چرا که این عوامل بر روی یکدیگر تاثیر گذاشته و از هم تاثیر می‌پذیرند. لذا، تحت سناریوهای مختلف اثرات تغییر اقلیم بر جریان کمینه متفاوت است. بنابراین، برای طرح‌های مدیریتی باید شدت خشکسالی و همچنین، توزیع مکانی آن مدنظر قرار گیرد.

به طوری که بارش فصل تابستان تحت این سناریو حدود ۳۴ درصد، بارش فصل پاییز ۲۱ درصد و بارش فصل زمستان حدود نه درصد افزایش نشان می‌دهد (Rahimi و همکاران، ۲۰۱۶). لذا، با مقایسه نتایج دبی کمینه و با توجه به رابطه دبی با بارش و دما می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش بارندگی تحت این سناریو انتظار افزایش دبی وجود دارد. مخصوصاً که بیشترین افزایش بارش مربوط به تابستان می‌باشد که جریان کمینه در این فصل فراوانی وقوع بیشتری دارد. این درحالی است که افزایش دما در تمام فصول تقریباً یکسان است. از طرف دیگر، با توجه به کوهستانی بودن قسمت‌های شمالی و شرقی حوضه و این‌که بارش‌های فصل تابستان این حوضه بیشتر محلی و اروگرافیک می‌باشد، شاخص‌های منتج از منحنی تداوم جریان ( $Q_{95}$  و  $Q_{90}$ ،  $Q_{75}$ ) در قسمت‌های شمالی حوضه افزایش یافته است. در مورد سری جریان‌های ۱۰ و ۳۰ روزه چون از میانگین چند روز که کمترین دبی را دارند، استفاده می‌شود، تغییرات تعدیل می‌شود که توزیع مکانی این شاخص‌ها در افق ۲۰۸۰ تا حدودی مشابه دوره پایه بوده است، هر چند مقدار آن با توجه به افزایش بارش افزایش یافته است. باید توجه داشت که افزایش بارش‌های زمستانی تحت این سناریو (حدود نه درصد) منجر به افزایش بارش برف در این منطقه خواهد شد که عمده جریان‌های فصل بهار و تابستان در این حوضه مربوط به ذوب برف می‌باشد. بنابراین، یکی دیگر از دلایل افزایش جریان کمینه تحت سناریوی A2 می‌تواند به این عامل نیز بستگی داشته باشد. ضمن این‌که بررسی‌ها نشان می‌دهد که میانگین دبی نیز طی این دوره دو برابر افزایش داشته است.

جریان کمینه در دوره آینده تحت سناریوی B2، در سرتاسر حوضه کاهش خواهد یافت (حدود ۵۰ درصد). اما توزیع مکانی جریان کمینه تغییری نسبت به دوره پایه نخواهد داشت. لذا، مناطق مرکزی و تا



شکل ۹- توزیع مکانی میانگین سری جریان کمینه تحت سناریوی B2، الف) سری ۱۰ روزه و ب) سری ۳۰ روزه

### نتیجه گیری

بررسی اثرات تغییر اقلیم بر جریان کمینه حوضه کرخه با کمک مدل اقلیمی دینامیکی نشان می‌دهد که بررسی توزیع مکانی شاخص‌های مختلف جریان کمینه، برای داده‌های مشاهده‌ای در دوره گذشته، بیانگر خشک‌تر بودن قسمت‌های شمالی حوضه نسبت به شرق و جنوب حوضه است. دبی کمینه در افق ۲۰۸۰ و تحت سناریو A2، بیش از ۷۰ درصد افزایش خواهد داشت. این افزایش دبی کمینه در قسمت‌های شمالی حوضه بیشتر می‌باشد. ضمن این‌که توزیع مکانی دبی کمینه نیز تحت این سناریو تغییر خواهد کرد. به طوری که قسمت‌هایی که طی دوره پایه دبی کمینه کمتری را تجربه می‌کنند (قسمت‌های شمالی)

طی افق ۲۰۸۰ دارای دبی کمینه بیشتری نسبت به سایر نقاط حوضه می‌باشند. همچنین، جریان کمینه در دوره آینده تحت سناریو B2، در سرتاسر حوضه کاهش خواهد یافت (حدود ۵۰ درصد). اما توزیع مکانی جریان کمینه تغییری نسبت به دوره پایه نخواهد داشت. لذا، مناطق مرکزی و تا حدودی شمالی حوضه تحت این سناریو خشکسالی‌های شدیدی را تجربه خواهند کرد.

با توجه به نتایج به دست آمده، بهتر است، استفاده از اطلاعات مدل‌های GCM متعدد برای کاهش عدم قطعیت مربوط به داده‌های مرزی و جانبی در ریزمقیاس‌نمایی دینامیکی، بررسی مدل‌های ریزمقیاس‌نمایی دیگر و مقایسه آن‌ها، و بررسی جامع

در خصوص عدم قطعیت‌های موجود در پیش‌بینی اثرات تغییر آب و هوا بر هیدرولوژی و به‌کارگیری آن‌ها در مطالعات بعدی مد نظر قرار گیرد.

#### منابع مورد استفاده

1. Abbaspour, K.C., M. Faramarzi, S. Seyed Ghasemi and H. Yang. 2009. Assessing the impact of climate change on water resources in Iran. *Water Resources Research*, W10434, doi:10.1029/2008WR007615.
2. Abrishamchi, A. and F. Hosseini. 2009. The effects of climate change on temperature and precipitation in the Karkhe River Basin. 8th National Congress on Civil Engineering, Shiraz, Iran (in Persian).
3. Arnold, J.G., R. Srinivasan, R.S. Muttiah and J.R. Williams. 1998. Large-area hydrologic modeling and assessment: part I. model development. *Journal of the American Water Resources Association*, 34(1): 73-89.
4. Boyer, C., D. Chaumont, I. Chartier and A.G. Roy. 2010. Impact of climate change on the hydrology of St. Lawrence tributaries. *Journal of Hydrology*, 384: 65-83.
5. Cox, P.M., R.A. Betts, C.B. Bunton, R.L.H. Essery, P.R. Rowntree and J. Smith. 1999. The impact of new land surface physics on the GCM simulation of climate and climate sensitivity. *Climate Dynamic*, 15(3): 183-203.
6. Durrans, S.R. and S. Tomic. 2001. Comparison of parametric tail estimators for low-flow frequency analysis. *Journal of the American Water Resources Association*, 37(5): 1203-1214.
7. Giorgi, F. and B. Hewitson. 2001. Regional climate information-evaluation and projections. In *Climate Change 2001: The Scientific Basis, Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, 256 pages.
8. Giorgi, F. 1990. On the simulation of regional climate using a limited area model nested in a general circulation model. *Journal Climatol*, 3: 941-963
9. Giorgi, F. and L.O. Mearns. 1999. Introduction to special section: regional climate modeling revisited. *Journal of Geophysical Research*, 104(D6): 6335-6352
10. Ghafouri Rozbehani, A., M. Hosseini, M.R. Tabatabaai, A. Sarreshtehdari and A. Khalkhali. 2013. Simulation of impacts of climate change impacts on water yield of Karkhe River Basin. Final Report of Soil Conservation and Watershed Management Research Institute, 123 pages (in Persian).
11. Houghton, J.T., Y. Ding, D.J. Griggs, M. Noguier, P.J. van der Linden and D. Xioaosu. 2001. *Climate change 2001: the scientific basis, contribution of working group I to the third assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, 156 pages.
12. IPCC. 2007a. The science of climate change, contribution of working group I to the 2nd assessment report of Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, 256 pages.
13. IPCC. 2007b. Technical summary in climate change: impacts, adaptations and climate change. Cambridge University Press, 572 pages.
14. Jones, R.G., M. Noguier, D.C. Hassell, D. Hudson, S.S. Wilson, G.J. Jenkins and J.F.B. Mitchell. 2004. Generating high resolution climate change change scenarios using PRECIS. Met Office Hadley Centre, Exeter, UK.
15. Mourer, E.P., J.C. Adam and A.W. Wood. 2008. Climate model based consensus on the hydrologic impacts of climate change to the Rio Lempa Basin of Central America. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 5: 3099-3128
16. Neitsch, S.L., J.G. Arnold, J.R. Kiniry and J.R. Williams. 2011. Soil and water assessment tool, theoretical documentation, version 2009. College Station: Texas Water Research Institute, Technical Report, 406 pages.
17. Pyrcie, R. 2004. Hydrological low flow indices and their uses. Watershed Science Center, Report No. 4, 33 pages.
18. Rahimi Bondarabadi, S., S. Jahanbakhsh Asl and B. Sari Saraf. 2016. Evaluation of a dynamical downscaling climate model for assessment of climate change in Karkheh Basin. *Watershed Engineering and Management*, 11(3): 633-649 (in Persian).
19. Rahimi Bondarabadi, S., S. Jahanbakhsh Asl and B. Sari Saraf. 2016. Study of climate change in Karkha River Basin by dynamical downscaling. *Watershed Engineering and Management*, (in Press).
20. Rifai, H.S., S.M. Brock, K.B. Ensor and P.B. Bedient. 2000. Determination of lowflow characteristics for Texas streams. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 126(5): 310-319.

21. Ringius, L., T.E. Downing, M. Hulme and R. Selrod. 1996. Climate change in Africa: issues and regional strategy. University of Oslo, 154 pages.
22. Simmons, A.J. and D.M. Burridge. 1981. An energy and angular-momentum conserving vertical finite difference scheme and hybrid vertical coordinates. *Monthly Weather Review*, 109: 758–766.
23. Wang, B., I.S. Kang and J.Y. Li. 2004. Ensemble simulation of Asian-Australian monsoon variability by 11 AGCMs. *Journal of Climate*, 17: 803–818.
24. 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 Resources Research*, 42(2): 12-25.
25. Yilmaz, K.K., H.V. Gupta and T. Wagener 2008. A process-based diagnostic approach to model evaluation: application to the NWS distributed hydrologic model. *Water Resources Research*, 44(9): 15-29.
26. Zohrabi, N., A. Massah Bavani, A. Telvari and H. Sedghi. 2009. Determining the temporal trend in annual maximum flood series in the Large Karoun River (Iran). 4th Regional Conference on Climate Change, Tehran (in Persian).