

## تغییرات برخی شاخص‌های کم‌آبی تحت تاثیر تغییر اقلیم در حوضه آبریز تنگ پنج سزار

ملیحه مزین<sup>۱\*</sup> - علی محمد آخوند علی<sup>۲</sup> - علیرضا مساح بوانی<sup>۳</sup> - فریدون رادمش<sup>۴</sup>

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۰۵/۲۶

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۰۵/۲۶

### چکیده

با توجه به اثرات تغییر اقلیم بر منابع آب و هیدرولوژی، تغییرات جریان کم‌آبی به عنوان بخش مهمی از چرخه آب، مورد توجه محققین، مدیران و استفاده‌کنندگان از آب در زمینه‌های مختلف می‌باشد. رشد جمعیت و کاهش سرانه آب، محدودیت منابع آبی تجدیدپذیر، همچنین وقوع خشکسالی‌های مکرر در دهه‌های اخیر در نقاط مختلف جهان، اهمیت پیش‌بینی وضعیت جریان رودخانه را خصوصاً در فصول خشک سال به منظور مدیریت منابع آبی منطقه ضروری می‌سازد. شاخص‌های مختلفی به منظور سنجش جریان کم‌آبی یک منطقه وجود دارند. در این تحقیق اثرات تغییر اقلیم بر سه شاخص  $Q_{70}$ ،  $Q_{90}$  و  $Q_{95}$  مستخرج از منحنی تداوم جریان در حوزه آبریز رودخانه سزار در دوره آبی ۲۰۴۰-۲۰۱۱ مورد بررسی قرار گرفت. به منظور لحاظ کردن عدم قطعیت مدل‌های AOGCM در تولید سناریوهای اقلیمی از ۱۰ مدل گردش عمومی جو استفاده و تاثیر سناریوهای مذکور در وضعیت جریان رودخانه، پس از ریزمقیاس‌نمایی توسط مدل LARS-WG، با استفاده از مدل مفهومی بارش-رواناب IHACRES مورد ارزیابی قرار گرفت. با توجه به نتایج، تغییرات  $Q_{70}$  از ۲۶- درصد تا ۱۹۰ درصد،  $Q_{90}$  از ۵۴- درصد تا ۲۲۱ درصد و  $Q_{95}$  از ۶۴- درصد تا ۳۳۲ درصد در زیرحوضه‌های مختلف می‌باشد. نتایج نشان از افزایش نسبی مقادیر شاخص‌های کم‌آبی در زیرحوضه‌های مورد مطالعه در دوره آبی مورد مطالعه دارد.

**واژه‌های کلیدی:** تحلیل فراوانی، مدل گردش عمومی جو، مدل LARS-WG، منحنی تداوم جریان، ویژگی‌های کمبود

### مقدمه

برخوردار است (۱۷). در این حیطة، جریان کم‌آبی به عنوان یکی از متغیرهای مهم هیدرولوژیکی مطرح می‌باشد که بررسی آن از چند نظر حائز اهمیت است. مازر و همکاران (۲۰) معتقدند که وضعیت جریان‌های کم‌آبی، یکی از فاکتورهای مهم محدودکننده در بهره‌برداری از منابع آب است. جریان‌های کم‌آبی در صورت ادامه، می‌تواند باعث ایجاد خشکسالی شوند و از طرف دیگر می‌توانند بر عملکردهای رودخانه‌ای در یک منطقه مانند کیفیت آب، تامین آب آشامیدنی، تامین آب برای کشاورزی، تولید نیروی برق - آبی، صنعت، کشتیرانی، همچنین بر عملکرد اکولوژیکی و توریسم یک منطقه اثر گذارند (۲۰). لذا بررسی تغییرات این متغیر تحت پدیده تغییر اقلیم از ضروریات یک منطقه به شمار می‌رود. گزارش‌ها و مطالعات علمی اخیر عمدتاً بیانگر تاثیر تغییر اقلیم بر جریان‌های کم‌آبی هستند (۱۵). با وجود مطالعات گسترده در جهان در ارتباط با اثرات هیدرولوژیکی تغییر اقلیم، در زمینه تاثیر تغییر اقلیم بر جریان کم‌آبی و شاخص‌های آن مطالعات محدودتری صورت گرفته است. ویت و همکاران (۹) در مطالعه خود اثرات تغییر اقلیم را بر جریان کم‌آبی در رودخانه میوز با استفاده از دو شاخص میانگین دبی تابستانی ( $Q_{aveS}$ ) و حجم تجمعی کمبود جریان فصلی ( $Q_{def}$ ) مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که شاخص  $Q_{aveS}$  در دوره آبی به نصف مقدار خود در دوره پایه و شاخص  $Q_{def}$  به چهار برابر مقدار خود در

گرمایش جهانی و تغییر اقلیم در سطح کره زمین در حال وقوع است. هیات بین‌الدول تغییر اقلیم<sup>۵</sup> با قطعیت بالا (احتمال ۹۹ درصد) گزارش کرده است که دمای سطح خشکی و آب در کره زمین از قرن ۱۹ تا کنون به میزان ۰/۴ تا ۰/۷۸ درجه سانتی‌گراد افزایش داشته است. افزایش دمای سطح زمین و تغییر در الگوی بارندگی، پدیده‌های غالب در تغییر اقلیم می‌باشند که تقریباً تمام بخش‌های دیگر چرخه آب را تحت تاثیر قرار می‌دهند (۱). با در نظر گرفتن سیکل هیدرولوژیکی، اولین اثرات تغییر اقلیم را می‌توان در این بخش مشاهده نمود. در این میان، تغییرات هیدرولوژیکی مانند سیل و خشکسالی به دلیل تاثیرگذاری بر فعالیتهای اقتصادی-اجتماعی همچنین قابلیت سکنی‌گزینی مردمان یک منطقه، از اهمیت ویژه‌ای

۱- استادیار گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه صنعتی خاتم الانبیا بهبهان

\*- نویسنده مسئول: (Email: mmozayyan80@yahoo.com)

۲ و ۴- استاد و استادیار گروه هیدرولوژی، دانشکده علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز

۳- دانشیار گروه منابع آب، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران

## مواد و روش‌ها

### منطقه مورد مطالعه

در این تحقیق حوضه آبریز تنگ پنج سزار با مساحت ۹۴۱۰ کیلومتر مربع واقع در محدوده طول‌های جغرافیایی  $۲۳/۵^{\circ}$  تا  $۴۸^{\circ}$  تا  $۵۴/۶^{\circ}$  شرقی و عرض‌های جغرافیایی  $۳۲^{\circ}$  تا  $۳۴^{\circ}$  شمالی مد نظر قرار گرفت. حداکثر ارتفاع حوضه در بلندی‌های آن به ۴۰۱۵ متر و در پست‌ترین نقطه به ۵۴۶ متر می‌رسد. ارتفاع میانگین حوضه برابر با ۱۹۷۸ متر محاسبه شده است. به دلیل وجود درز و شکاف‌های زیاد در زیرحوضه تنگ پنج سزار (به استثناء بخش‌هایی از شاخه شرقی رودخانه تیره) که ناشی از وجود اشکال کارستی است، آب‌های زیرزمینی در این بخش سطح بالایی دارند.

در این مطالعه به منظور بررسی دقیق‌تر تغییرات شاخص‌های کم آبی تحت اثر تغییر اقلیم، منطقه مورد مطالعه به زیرحوضه‌های کوچک‌تری شامل سپید دشت سزار، تیره درود، درود ماربره، سپید دشت زاز، چم چیت و کشور تقسیم شد که در شکل ۱ به همراه ایستگاه‌های هواشناسی و هیدرومتری مورد استفاده نشان داده شده‌اند. داده‌های هیدرولوژیکی مورد استفاده در این مطالعه شامل جریان روزانه مشاهداتی است که به منظور واسنجی مدل بارش-رواناب، همچنین استخراج شاخص‌های کم آبی مورد استفاده قرار می‌گیرند. داده‌های هواشناسی دو متغیر دما و بارندگی در مقیاس روزانه نیز به منظور واسنجی مدل بارش-رواناب، همچنین واسنجی مدل ریزمقیاس‌نمایی مورد نیاز هستند. با وجود تعدادی ایستگاه سینوپتیک در درون حوضه آبریز تنگ پنج سزار (با دوره آماری کمتر از ۱۰ سال)، از آمار دمای روزانه ایستگاه سینوپتیک خرم آباد در خارج از زیرحوضه، به دلیل داشتن دوره آماری طولانی، برای تمامی زیرحوضه‌ها استفاده گردید. همچنین با وجود تعدادی باران‌سنج در هر

زیرحوضه، انتخاب باران‌سنج بر مبنای همبستگی بیشتر میان بارندگی ایستگاه و جریان رودخانه در نقطه خروجی انجام گرفت. در جدول ۱ و ۲ به ترتیب مشخصات ایستگاه‌های هیدرومتری و هواشناسی آورده شده است. لازم به ذکر است، به دلیل استفاده از سال میلادی در این تحقیق، جدول‌های ۱ و ۲ بر همین اساس تنظیم گردید.

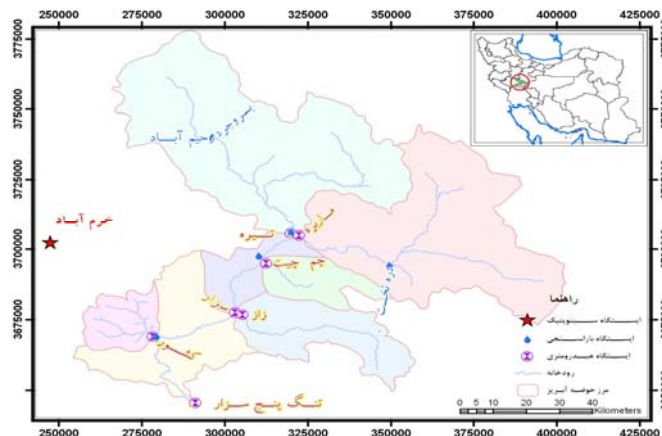
### روش تحقیق

#### تولید سناریوهای اقلیمی برای دوره آبی

به منظور بررسی تغییرات اقلیمی در آینده، داده‌های بارندگی و دمای ماهانه، با استفاده از مدل‌های گردش عمومی جو برای دو دوره پایه (۲۰۰۰-۱۹۷۱) و دوره آبی (۲۰۴۰-۲۰۱۱) تهیه گردید. مدل‌های اقلیمی مختلفی در نقاط مختلف جهان مورد استفاده یا در حال توسعه است.

دوره پایه خواهد رسید. مازر و همکاران (۲۰) به بررسی اثرات تغییر اقلیم بر مقدار و فراوانی وقوع جریان‌های کم آبی در بالا دست حوضه آبریز دانوب در اروپای مرکزی با بررسی شاخص کمترین جریان متوسط ۷ روزه در سال (NM7Q) پرداختند. همچنین تغییرات این شاخص با دوره بازگشت ۵۰ سال در دوره آبی ۲۰۶۰-۲۰۱۱ نسبت به دوره گذشته ۱۹۷۱ تا ۲۰۰۳ مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که با افزایش دما در دوره آبی، جریان کم آبی به ۵۰ درصد مقدار کنونی خود در ۲۰۳۰ و به یک سوم مقدار کنونی خود در ۲۰۶۰ می‌رسد. گین و همکاران (۱۲) تاثیر تغییر اقلیم بر سیلاب و جریان کم آبی را در حوضه آبریز برهماپوترا مورد مطالعه قرار دادند. به منظور بررسی تغییرات جریان کم آبی در دوره آبی در این مطالعه از دو شاخص Q95 و Q90 مستخرج از منحنی تداوم جریان، همچنین تحلیل فراوانی جریان کم آبی استفاده گردید. با توجه به نتایج، تغییرات قابل توجهی در مقادیر دو شاخص Q95 و Q90 در دوره آبی رخ نخواهد داد در حالیکه کاهش احتمال وقوع رخداد‌های کم آبی شدید در تحلیل فراوانی جریان کم آبی پیش بینی گردید. هوانگ و همکاران (۱۴) وضعیت جریان‌های کم آبی را در آینده در ۵ رودخانه بزرگ کشور آلمان با مطالعه تغییرات فراوانی وقوع جریان کم آبی ۵۰ ساله، همچنین کمبود جریان به تصویر کشیدند. نتایج نشان از افزایش فراوانی وقوع جریان کم آبی ۵۰ ساله، همچنین کمبود جریان در دوره‌های آبی دارد.

تمامی مطالعات حاکی از تاثیرپذیری جریان‌های کم آبی تحت اثر تغییر اقلیم می‌باشند و نشان می‌دهند که جریان کم آبی در مناطق مختلف، به تغییرات مذکور پاسخ‌های متفاوتی نشان می‌دهند. شاخص‌های کم آبی متفاوتی وجود دارند که در سه گروه کلی شاخص‌های مستخرج از منحنی تداوم جریان، تحلیل فراوانی جریان کم آبی و خصوصیات کمبود قرار می‌گیرند. آنچه که در اغلب این مطالعات مورد توجه قرار گرفته شامل شاخص‌های گروه دوم و سوم می‌باشد. در مجموع با توجه به اهمیت شاخص‌های مستخرج از منحنی تداوم جریان در درک و ارزیابی وضعیت جریان رودخانه در فصول خشک سال، در این مطالعه برای اولین بار تغییرات این شاخص‌ها در دوره آبی تحت اثر تغییر اقلیم در بالادست سد دز در غرب ایران مورد بررسی قرار گرفت. همچنین تحقیقات مختلف نشان می‌دهند که عدم قطعیت مربوط به مدل‌های AOGCM در شبیه‌سازی متغیرهای اقلیمی در سطوح منطقه‌ای، تاثیر بیشتری را نسبت به سایر منابع عدم قطعیت دارند. لذا در این تحقیق تغییرات شاخص‌های مستخرج از منحنی تداوم جریان در دوره آبی تحت اثر تغییر اقلیم، با استفاده از ۱۰ مدل گردش عمومی جو مورد ارزیابی قرار گرفت تا به این ترتیب بتوان عدم قطعیت مدل‌های گردش عمومی جو را نیز مد نظر قرار داد.



شکل ۱- حوضه آبریز تنگ پنج سزار به همراه ایستگاه‌های مختلف استفاده شده در تحقیق

Figure 1- Tang Panj Sezar basin with different stations used in this study

جدول ۱- مشخصات زیرحوضه‌های مورد استفاده

Table 1- Characteristics of the used sub catchments

زیرحوضه Sub-catchment	رودخانه River	مشخصات جغرافیایی Geographical information			مساحت (کیلومتر مربع) Area (km <sup>2</sup> )	دوره آماری Period
		طول شرقی East longitude	عرض شمالی North latitude	ارتفاع (متر) Altitude (m)		
سپید دشت سزار Sepid Dasht Sezar	سزار Sesar	48-53	33-13	970	7174	1965-2008
تیره درود Tireh Doroud	تیره Tireh	49-04	33-28	1450	3400	1965-2007
درود ماربره Doroud Marbare	ماربره Marbare	49-05	33-29	1450	2655	1956-2007
چم چیت Cham Chit	سبزه Sabzeh	48-59	33-23	1290	345	1965-2007
سپید دشت زاز Sepid Dasht Zaz	زاز Zaz	48-53	33-13	970	680	1965-2008
کشور Keshvar	سرخاب Sorkhab	48-38	33-08	770	336	1965-2006

جدول ۲- مشخصات ایستگاه‌های هواشناسی مورد استفاده در تحقیق

Table 2- Characteristics of meteorological stations used in study

نام ایستگاه Station name	نوع ایستگاه Type of station	مشخصات جغرافیایی Geographical information			دوره آماری Period
		طول جغرافیایی Longitude	عرض جغرافیایی Latitude	ارتفاع (متر) Altitude (m)	
چم چیت Cham Chit	باران سنجی Rain-gauge	49.4	33.23	1290	1966-2007
دره تخت Dare Takht	"	49.22	33.21	1890	1967-2007
بروجرد Boroujerd	"	48.45	33.55	1600	1976-2007
کشور Keshvar	"	48.38	33.08	770	1966-2007
رحیم آباد Rahimabad	"	48.48	33.47	1490	1984-2007

جدول ۳- مشخصات ۱۰ مدل GCM مورد استفاده در این تحقیق

Table 3 Characteristics of 10 GCMs used in this study

نام مدل Model name	مخفف مدل Abbreviation of model name	گروه موسس Group founder	قدرت تفکیک درجه (طول × عرض) Resolution (length × width)	سناریوهای انتشار Emission scenario
BCM2.1 (1)	BCM2	BCCR(Norway)	2.8° × 2.8°	A <sub>2</sub>
CNRM-CM3 (2)	CNCM3	CNRM(France)	1.9° × 1.9°	A <sub>2</sub>
CSIRO-MK3.0 (3)	CSMK3	ABM(Australia)	1.9° × 1.9°	A <sub>2</sub>
GFDL-CM2.1 (4)	GFCM2.1	NOAA/GFDL(USA)	2.5° × 2°	A <sub>2</sub>
HADCM3 (5)	HADCM3	UKMO(UK)	3.75° × 2.75°	A <sub>2</sub>
HADGEM1 (6)	HADGEM	HCCPR(UK)	1.758° × 1.25°	A <sub>2</sub>
INMCM3 (7)	INCM3	INM(Russia)	5° × 4°	A <sub>2</sub>
IPSL-CM4 (8)	IPCM4	IPSL(France)	2.5° × 3.75°	A <sub>2</sub>
NCARCCSM3 (9)	NCCCSM	NCAR (USA)	1.4° × 1.4°	A <sub>2</sub>
NCARPCM-Mean (10)	NCPCM	NCAR (USA)	2.8° × 2.8°	A <sub>2</sub>

استفاده از دما و بارش خروجی از مدل‌های GCM در دوره پایه (۲۰۰۰-۱۹۷۱) و دوره آتی (۲۰۴۰-۲۰۱۱) در هر زیرحوضه تهیه گردید. به این ترتیب داده‌های دما و بارش روزانه منطقه مربوط به ۱۰ مدل GCM برای دوره ۲۰۴۰-۲۰۱۱، با استفاده از سناریوهای ماهانه دما و بارش توسط مولد آب و هوایی LARS-WG تولید شد. قابل ذکر است برای ساخت سناریوی تغییر اقلیم، دوره ۳۰ ساله ۲۰۴۰-۲۰۱۱ به عنوان دوره آتی مد نظر قرار گرفت، اما به دلیل ارائه این تحقیق در سال ۲۰۱۴، نتایج مربوط به سال ۲۰۱۵ به بعد ارائه خواهد شد.

#### مدل بارش-روناب IHACRES

مدل بارش-روناب IHACRES به منظور شبیه سازی جریان روزانه در دوره آتی ۲۰۴۰-۲۰۱۱ با استفاده از سناریوهای اقلیمی مد نظر قرار گرفت. مدل IHACRES یک مدل پیوسته دینامیکی در مقیاس حوضه آبریز<sup>۱</sup> است که برای حوضه‌های آبریز با مساحت ۴۹۰ مترمربع در چین تا ۱۰۰۰۰ کیلومتر مربع در انگلیس با موفقیت به کار گرفته شده است (۷). مدل مذکور توسط جکمن و هورمبرگر در سال ۱۹۹۳ ارائه شد. اساس این روش از دو مدول غیر خطی کاهش<sup>۲</sup> و مدول خطی هیدروگراف<sup>۳</sup> تشکیل می‌شود. به این منظور در ابتدا بارندگی rk و دما tk در هر گام زمانی k توسط مدول غیر خطی، به بارندگی موثر uk تبدیل شده و سپس به وسیله مدول خطی هیدروگراف واحد به روناب سطحی در همان گام زمانی تبدیل می‌شود (شکل ۲). جزئیات مربوط به چگونگی عملکرد مدل در جکمن و هورمبرگر (۱۶) قابل دسترسی است.

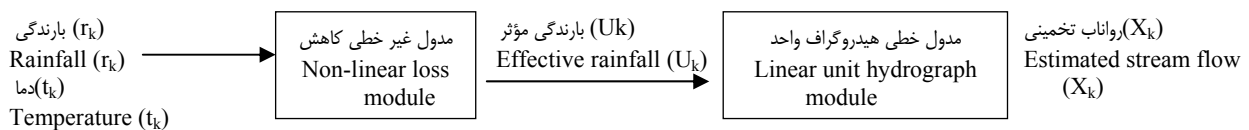
در این تحقیق، از خروجی ۱۰ مدل GCM تحت سناریوی انتشار A<sub>2</sub>، مربوط به چهارمین گزارش ارزیابی IPCC استفاده شد، که مشخصات آنها در جدول ۳ ارائه شده است. در این مقاله برای هر مدل شماره‌ای تعیین شده که در جدول در کنار نام مدل آورده شده است.

#### ریز مقیاس نمایی

یکی از مشکلات عمده در استفاده از خروجی مدل‌های GCM در مطالعات ارزیابی تاثیر تغییر اقلیم در سطوح منطقه‌ای، بزرگ بودن مقیاس مکانی سلول محاسباتی آن‌ها نسبت به منطقه مورد مطالعه می‌باشد (۱۹). به طور کلی دو روش برای ریزمقیاس نمایی وجود دارد: آماری و دینامیکی (۱۱). در این مطالعه از روش آماری (مدل LARS-WG) استفاده شد. یکی از مزیت‌های مهم روش آماری ارزیابی و ساده بودن آنها است. مزیت دیگر این روش‌ها این است که می‌توانند اطلاعات مربوط به یک منطقه خاص را تهیه کنند که در بسیاری از مطالعات تغییر اقلیم مهم و اساسی است. به طور کلی مطابق تحقیقات مختلف ثابت شده است که مدل LARS-WG در شبیه سازی مقادیر روزانه و مقادیر حدی متغیرهای هواشناسی در اقلیم‌های مختلف به شکل مناسبی عمل کرده است (۲، ۳، ۵، ۲۲، ۲۳، ۲۶ و ۲۷).

این مدل سری‌های زمانی روزانه از دمای حداقل، دمای حداکثر، بارندگی و تابش خورشید را تولید می‌کند و از سه بخش اصلی تشکیل شده است: کالیبره کردن مدل، ارزیابی مدل، تولید داده‌های هواشناسی. مدل LARS-WG پس از دریافت داده‌های دما و بارش مشاهداتی منطقه مورد واسنجی قرار گرفته و سپس با استفاده از دو آزمون t برای نمونه‌های مستقل و آزمون نیکویی برازش کای اسکور به ارزیابی عملکرد مدل می‌پردازد. مدل LARS-WG به منظور تولید داده‌های هواشناسی، نیاز به دریافت سناریوی تغییر اقلیم دارد که با

1- Dynamic lumped parameters with catchment-scale  
2-Non – linear loss module  
3-Linear unit hydrograph module



شکل ۲- چگونگی شبیه سازی بارش رواناب مدل IHACRES همراه با مدول‌های خطی و غیر خطی

Figure 2- The overall structure of the IHACRES rainfall-runoff model

صحت‌سنجی مدل IHACRES در هر زیرحوضه، جریان روزانه در دوره آبی ۲۰۱۱-۲۰۴۰ با استفاده از سناریوهای اقلیمی شبیه سازی شده و در نهایت شاخص‌های جریان کم آبی برای دو دوره مشاهده‌ای و آبی استخراج و مورد مقایسه قرار گرفتند.

## ۲-۴ شاخص‌های کم آبی مستخرج از منحنی تداوم جریان

منحنی تداوم جریان<sup>۴</sup>، یکی از مفیدترین روش‌ها برای نمایش دامنه کاملی از آینده‌های رودخانه از جریان‌های کم آبی تا وقایع سیلاب می‌باشد. این منحنی ارتباط بین هر یک از مقادیر جریان و درصد زمان‌هایی که جریان رودخانه مساوی یا بیشتر از آن مقدار باشد و به عبارت دیگر ارتباط بین بزرگی<sup>۵</sup> و فراوانی<sup>۶</sup> جریان را نشان می‌دهد (۲۸). منحنی‌های تداوم جریان بر اساس تفکیک‌های مختلف زمانی (۱، ۷، ۱۰، ۳۰، ۶۰ و ...) ساخته می‌شوند. در صورت استفاده از فواصل زمانی بیش از یک روز، از روش میانگین متحرک، قبل از ساختن منحنی استفاده می‌شود. در این تحقیق، یک میانگین متحرک ۷ روزه قبل از ساخت منحنی مذکور، بر داده‌های روزانه جریان اعمال گردید. استفاده از تداوم ۷ روزه باعث حذف تغییرات روز به روز جریان و تولید مقادیر جریان کم آبی "صحیح" می‌شود (۲۸، ۲۹). در منحنی‌های تداوم جریان، توزیع جریان شدیداً به بارندگی و ویژگی‌های حوزه آبریز وابسته است و لذا منحنی مذکور می‌تواند برای کشف تغییرات بارندگی و یا کاربری اراضی مورد استفاده قرار گیرد (۱۰). تا کنون در مطالعات گوناگون، این منحنی به منظور ارزیابی اثرات سناریوهای اقلیمی مختلف بر جریان رودخانه مورد استفاده قرار گرفته است (۱۳ و ۳۳).

در مطالعات کم آبی معمولاً، ناحیه جریان کم آبی در منحنی تداوم جریان را به شکل قراردادی، به عنوان بخشی از منحنی که جریان پایین‌تر از جریان میانه<sup>۷</sup> (که با آبدی که در ۵۰ درصد از زمان‌ها، جریان مساوی یا بیشتر از آن است مطابقت دارد، Q<sub>50</sub>) باشد در نظر می‌گیرند. شاخص‌های جریان کم آبی دیگری نیز، از این بخش از

مدل IHACRES با دریافت داده‌های مشاهده‌ای جریان رودخانه، بارندگی و دمای روزانه مربوط به هر زیرحوضه مورد واسنجی و صحت‌سنجی قرار گرفت. جهت بررسی کمی عملکرد مدل در این مرحله، از معیارهای عملکرد خطای اریب<sup>۱</sup> (خطای کلی در حجم جریان بر حسب میلیمتر در سال) (رابطه ۱)، تغییرات الگوی جریان با دادن وزن مساوی به همه دبی‌ها<sup>۲</sup> (رابطه ۲) و تغییرات الگوی جریان با دادن وزن بیشتری به جریان کم آبی<sup>۳</sup> (رابطه ۳) استفاده شد. روابط مربوط به این معیارها به شرح زیر است:

$$Bias = \frac{\sum (Q_O - Q_M)}{n} \quad (1)$$

$$R^2_{log} = 1 - \frac{\sum (\ln(Q_O + \epsilon) - \ln(Q_M + \epsilon))^2}{\sum (\ln(Q_O + \epsilon) - \overline{\ln(Q_O + \epsilon)})^2} \quad (2)$$

$$R^2_{inv} = 1 - \frac{\sum \left( \frac{1}{Q_O + \epsilon} - \frac{1}{Q_M + \epsilon} \right)^2}{\sum \left( \frac{1}{Q_O + \epsilon} - \overline{\frac{1}{Q_O + \epsilon}} \right)^2} \quad (3)$$

در روابط مذکور  $Q_M$ ،  $Q_O$ ،  $n$  و  $\epsilon$  به ترتیب جریان مشاهده‌ای، جریان مدل‌سازی شده، تعداد داده‌ها و ۹۰ درصد جریان مشاهده‌ای غیر صفر می‌باشند. هنگامی که شبیه‌سازی جریان‌های کم آبی دارای اهمیت باشد، شکل لگاریتمی یا معکوس شاخص کارایی به دلیل دادن وزن بیشتری به جریان کم آبی می‌بایست مورد استفاده قرار گیرد (۸، ۱۴، ۱۸). دو معیار  $R^2_{log}$  و  $R^2_{inv}$  نیز که در مرحله واسنجی مدل مورد استفاده قرار گرفت، در حقیقت همان ضریب کارایی نش هستند که به جای استفاده از مقدار جریان به ترتیب از لگاریتم و معکوس جریان در آن‌ها استفاده شده است. هر چه مقدار ضرایب مذکور به ۱ نزدیک‌تر باشد، نشان‌دهنده شباهت بیشتر جریان شبیه‌سازی شده و مشاهده‌ای است. در هر حال، دو شاخص مذکور فقط می‌توانند الگوی رفتاری جریان را بررسی نمایند. لذا با استفاده از معیار خطای اریب، می‌توان اختلاف میان مقادیر مشاهده‌ای و شبیه‌سازی را به صورت کمی در اختیار داشت. مقدار خطای اریب بستگی به کیفیت داده‌های مشاهده‌ای جریان و متغیرهایی که به عنوان ورودی به مدل استفاده می‌شوند، دارد و تا حد امکان باید کم باشد. پس از واسنجی و

4 -Flow Duration Curve

5 -Magnitud

6 -Frequency

7 -Median Flow (MF)

1- Bias

2 -R2\_log

3 -R2\_inv

بررسی قرار گرفته است.

برای تعیین فصل خشک سال، پس از اعمال آستانه  $Q_{70}$  بر جریان رودخانه و شمارش روزهای خشک در هر ماه، ۶ ماه از سال که دارای بیشترین تعداد روزهای خشک باشد، به عنوان فصل خشک مشخص گردید (۱۴ و ۳۴). جدول ۵ تعداد روزهای خشک را در ماه‌های مختلف سال برای منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهد. با توجه به جدول ۵، شش ماه ژوئن تا نوامبر به عنوان شش ماه خشک سال در این تحقیق مد نظر قرار گرفت. البته به منظور مطابقت با تاریخ شمسی کشورمان، از ۲۲ ماه ژوئن تا ۲۱ ماه دسامبر (مطابق با اول تیر تا آخر آذر) به عنوان دوره خشک در نظر گرفته شد.

بررسی جدول ۴ برای دوره تر نشان می‌دهد که در تمامی زیرحوضه‌ها، مقدار بارش در دو ماه فوریه و مارس (پر بارش ترین ماه‌های سال) کاهش می‌یابد. دو ماه ژانویه و آوریل که پس از فوریه و مارس بیشترین بارش‌ها را به خود اختصاص می‌دهند، در اغلب زیرحوضه‌ها، افزایش مقدار بارش را در آینده نشان می‌دهند. تغییرات مقدار بارش در ماه دسامبر نیز در اغلب زیرحوضه‌ها افزایشی است. ماه می نیز دارای تغییرات اندک افزایشی یا کاهشی می‌باشد. همچنین بررسی دوره خشک در جدول ۴ نشان داد که ماه اکتبر دارای تغییرات کاهشی و افزایشی در زیرحوضه‌های مختلف و نوامبر دارای تغییرات افزایشی در همه زیرحوضه‌ها است. چهار ماه ژوئن، جولای، آگوست و سپتامبر (از ماه‌های خشک) نیز به دلیل داشتن مقدار بارش صفر و یا ناچیز در دوره مشاهداتی، با مقدار بارش در دوره آتی مورد مقایسه قرار نگرفتند، محاسبه درصد تغییرات برای چنین ماه‌هایی نتایج درستی ارائه نمی‌دهد. از طرفی تغییرات مقدار بارش در ماه‌های مذکور در دوره آتی ناچیز است.

سناریوهای دما برای دوره آتی همانند بارندگی با استفاده از ۱۰ مدل GCM تحت سناریوی انتشار  $A_2$ ، تولید شدند. میانگین دراز مدت دمای ماهانه شبیه‌سازی شده توسط ۱۰ مدل GCM، در دوره آتی (۲۰۴۰-۲۰۱۵) با میانگین ماهانه دما در دوره گذشته در تمام زیرحوضه‌ها مورد مقایسه قرار گرفت. شکل ۴ مربوط به زیرحوضه تنگ پنج سزار است. تغییرات دمای دوره آتی نسبت به گذشته برای سایر زیرحوضه‌ها مشابه تنگ پنج سزار می‌باشد لذا از آوردن نمودارهای مربوطه صرف نظر گردید.

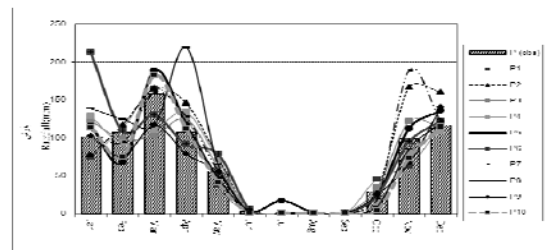
با توجه به شکل ۴، مدل‌های مختلف GCM برای شبیه‌سازی دما، تشابه بسیار زیادی با هم دارند به صورتی که در همه ماه‌های سال دمای متوسط ماهانه نسبت به دوره مشاهداتی افزایش یافته است. افزایش دما در ماه‌های مختلف در آینده بین  $0.85$  درجه سانتی‌گراد (فوریه برابر با اسفند) تا  $2.1$  درجه سانتی‌گراد (نوامبر برابر با آذر) قابل پیش بینی است. همچنین، افزایش دما در شش ماه خشک بیشتر از شش ماه تر است.

منحنی تلاوم جریان می‌توانند برآورد شوند. جریان‌هایی که در دامنه ۷۰ تا ۹۹ درصد زمانی تجاوز قرار دارند، پرکاربردترین شاخص‌های جریان کم آبی به حساب می‌آیند. بعضی شاخص‌های معمول شامل آبدهی ۱ یا n روزه با درصد تجاوز ۷۵، ۹۰ و ۹۵ درصد زمانی، به عنوان نمونه  $Q_{95}(1)$ ،  $Q_{90}(1)$ ،  $Q_{75}(10)$ ،  $Q_{75}(7)$ ،  $Q_{95}(10)$  می‌باشند (۲۸). صدک مورد استفاده به عنوان شاخص کم آبی تا حد زیادی وابسته به نوع رودخانه مورد مطالعه است. برای رودخانه‌های دائمی  $Q_{90}$  و  $Q_{95}$  به عنوان شاخص‌های تیپیک به کار گرفته می‌شوند (۳۴). در این تحقیق،  $Q_{90}$  و  $Q_{95}$  از معروف‌ترین شاخص‌ها در این زمینه (۳۴، ۲۱، ۲۴، ۲۵، ۶، ۲۸، ۳۲، ۳۰) همچنین شاخص  $Q_{70}$  مورد استفاده قرار گرفت.

## نتایج و بحث

### سناریوهای اقلیمی بارش و دمای حوضه

شکل ۳ متوسط ماهانه بارش شبیه‌سازی شده توسط ۱۰ مدل GCM در دوره آتی (۲۰۴۰-۲۰۱۵) را در مقایسه با دوره گذشته (۲۰۰۷-۱۹۷۸) در حوضه آبریز تنگ پنج سزار نشان می‌دهد. برای سایر زیرحوضه‌های مورد مطالعه نیز نمودارهای مشابهی ترسیم شد که از آوردن شکل‌های آن‌ها صرف‌نظر گردید. شماره‌های استفاده شده در شکل (P1، P2 و ...) شماره مدل‌هایی است که برای شبیه‌سازی مقدار بارش از آن‌ها استفاده شده است و در جدول ۳ آمده است.



شکل ۳- مقایسه بارش ماهانه دوره آتی با گذشته، تنگ پنج سزار  
Figure 4- Comparison of monthly rainfall in the future by the past, Tang Panj Sesar

مقایسه مقدار بارندگی در دوره آتی نسبت به دوره گذشته در تمامی زیرحوضه‌ها نشان داد که تغییرات کلی مقدار بارش پیش‌بینی شده توسط مدل‌های مختلف GCM از تغییرات مقدار بارش مشاهداتی تبعیت می‌کند، به این ترتیب که مقدار بارش در ۶ ماه خشک کمتر از ۶ ماه تر است. عدم قطعیت استفاده از مدل‌های مختلف گردش عمومی جو (۱۰ مدل)، باعث شد که در هر یک از زیرحوضه‌های مورد مطالعه، برای هر ماه دامنه‌ای از اعداد مربوط به مقدار بارش وجود داشته باشد. در جدول ۴ تغییرات بارندگی در دوره آتی نسبت به گذشته، به صورت جداگانه در دو دوره خشک و تر مورد

جدول ۴- درصد تغییرات مقدار بارش شبیه سازی شده در دوره آتی نسبت به مقدار مشاهداتی آن  
**Table 4- Percentage of the changes of simulated rainfall in the future compared to the past**

زیر حوضه Sub catchment	۶ ماه تر 6 wet month					۶ ماه خشک* 6 dry month		
	دسامبر Dec	ژانویه Jan	فوریه Feb	مارس Mar	آوریل Apr	می May	اکتبر Oct	نوامبر Nov
تنگ پنج سزار Tang Panj Sezar	** + 11	+ 14	- 10	-8	+ 17	+6	-14	+5
سپید دشت سزار Sepid Dasht Sezar	+ 11	+ 15	- 24	-10	+11	-14	+ 45	-1
تیره درود Tireh Doroud	-0.3	+ 1	-1	-27	-2	-5	+ 31	+1
درود ماربره Doroud Marbare	+ 6	+3	-8	-5	+4	+3	- 17	+ 8
چم چیت Cham Chit	+ 14	-2	-10	-4	+ 13	-3	+31	+ 4
سپید دشت زاز Sepid Dasht Zaz	+ 31	+ 14	-21	-15	+13	+4	+42	+ 7
کشور Keshvar	+ 31	+ 13	-22	-14	+13	+4	+42	+ 7

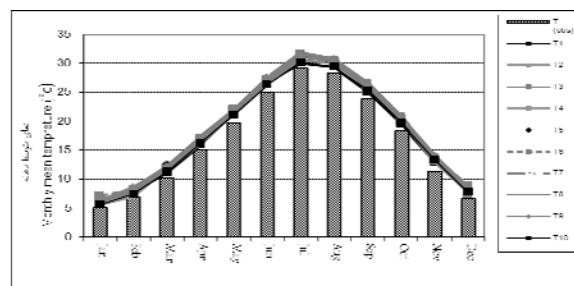
\* در ۶ ماه خشک، ۴ ماه ژوئن، جولای، اگوست و سپتامبر دارای تغییرات ناچیز مقدار باران هستند. لذا درصد تغییرات باران برای ماه‌های مذکور محاسبه نشده است.  
 \* At 6 dry month, 4 month of June, July, August and September have small changes in rainfall quantity and therefore, the changes of rainfall is not calculated for these months.

\*\* هر کدام از اعداد درون جدول، میانه شبیه سازی‌های ۱۰ مدل GCM است

\*\* Each of the numbers in the table, are median of the outputs of 10 GCM.

جدول ۵- تعداد روزهای با دبی کمتر از  $Q_{70}$  ( $30 \text{ m}^3/\text{s}$ ) در دوره مشاهداتی (۱۹۷۸-۲۰۰۸)، حوضه آبریز تنگ پنج سزار  
**Table 5 The number of days with flow less than  $Q_{70}$  ( $30 \text{ m}^3/\text{s}$ ) in the observation period (1978-2008), Tang Panj Sezar basin**

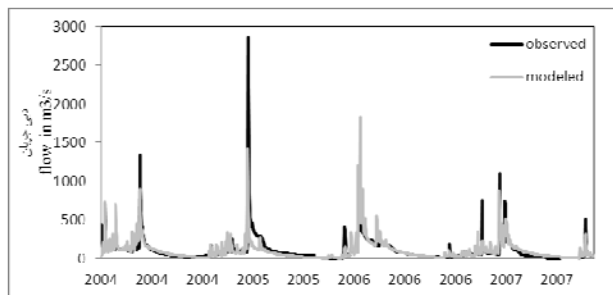
ماه میلادی Month	ژانویه Jan	فوریه Feb	مارس Mar	آوریل Apr	می May	ژوئن Jun	جولای Jul	اگوست Aug	سپتامبر Sep	اکتبر Oct	نوامبر Nov	دسامبر Dec
تعداد روز خشک Number of dry day	13	11	6	0	3	50	265	632	722	726	401	49



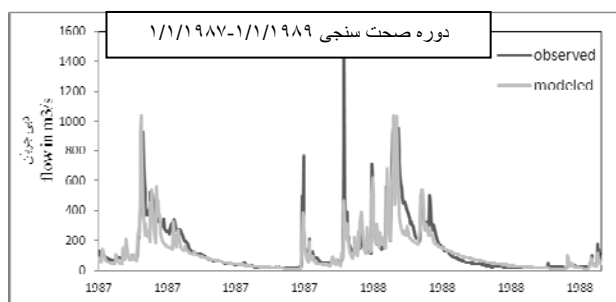
شکل ۴- مقایسه دمای ماهانه دوره آتی با گذشته، تنگ پنج سزار  
**Figure 4- Comparison of monthly temperature in the future by the past, Tang Panj Sezar**

واسنجی (الف) و صحت‌سنجی (ب) نشان می‌دهد. همچنین در جدول ۶ مشخصات مربوط به دوره واسنجی و صحت‌سنجی در هر یک از زیرحوضه‌ها آورده شده است.

واسنجی مدل بارش-رواناب  
 شکل ۵، جریان شبیه‌سازی شده با مدل IHACRES را در مقایسه با جریان مشاهداتی در زیرحوضه تنگ پنج سزار در دو دوره



شکل ۵ الف- مقایسه دبی مشاهداتی و شبیه سازی، تنگ پنج سزار  
Figure 5a- Comparison of observed and modeled flow, Tang Panj Sezar



شکل ۵ ب- مقایسه دبی مشاهداتی و شبیه سازی، تنگ پنج سزار  
Fig 5 b- Comparison of observed and modeled flow, Tang Panj Sezar

جدول ۶- مشخصات دوره‌های واسنجی و صحت سنجی زیرحوضه‌های مختلف

Table 6- Characteristics of calibration and validation periods in different sub catchments

زیر حوضه Sub catchment	دوره واسنجی Calibration period			دوره صحت سنجی Validation period		
	R <sup>2</sup> -inv	R <sup>2</sup> -log	Bias(mm/y)	R <sup>2</sup> -inv	R <sup>2</sup> -log	Bias(mm/y)
تنگ پنج سزار Tang Panj Sezar	0.76	0.80	1.85	0.91	0.91	107
سپید دشت سزار Sepid Dasht Sezar	0.72	0.61	8.60	0.70	0.78	4.50
تیره درود Tireh Doroud	0.76	0.81	27.60	0.71	0.73	69
درود ماربره Doroud Marbare	0.79	0.78	0.29	0.62	0.69	7.50
چم چیت Cham Chit	0.67	0.75	-7.42	0.77	0.76	3.60
سپید دشت زاز Sepid Dasht Zaz	0.84	0.82	10.80	0.81	0.81	46
کشور Keshvar	0.90	0.91	3.63	0.86	0.86	25

مشاهداتی و شبیه‌سازی شده با مدل IHACRES تعیین و سپس مورد مقایسه قرار گرفتند (جدول ۷). بررسی جدول ۷ نشان می‌دهد که عملکرد مدل برای جریان‌ات بالا و پایین متفاوت است و به عبارت دیگر مدل IHACRES در یک زیرحوضه معین ممکن است جریان‌ات پایین (دو شاخص Q<sub>95</sub> و Q<sub>90</sub>) را کمتر از مقدار واقعی و جریان‌ات بالاتر (دو شاخص Q<sub>70</sub> و Q<sub>50</sub>) را بیشتر از مقدار واقعی برآورد نماید و بر عکس.

با توجه به جدول ۶، مدل IHACRES توانایی قابل قبولی در مدل‌سازی جریان رودخانه در زیرحوضه‌های مطالعاتی دارد. در این تحقیق علاوه بر معیارهای عملکرد نامبرده شده در بالا، مدل بارش- رواناب IHACRES نسبت به شاخص‌های جریان کم آبی نیز مورد آزمون قرار گرفت تا مشخص شود که در اثر واسنجی به کار گرفته شده، توانمندی مدل در تولید شاخص‌های کم آبی چقدر خواهد بود. چهار شاخص دبی ۵۰ درصد، ۷۰ درصد، ۹۰ درصد و ۹۵ درصد مستخرج از منحنی تداوم جریان با استفاده از داده‌های جریان



جدول ۷- مقایسه  $Q_{50}$ ،  $Q_{70}$ ،  $Q_{90}$  و  $Q_{95}$  مشاهداتی و شبیه سازی شده با مدل IHACRES در دوره مشاهداتی  
 Table 7- Comparison of observed and simulated  $Q_{50}$ ،  $Q_{70}$ ،  $Q_{90}$  and  $Q_{95}$  with IHACRES model

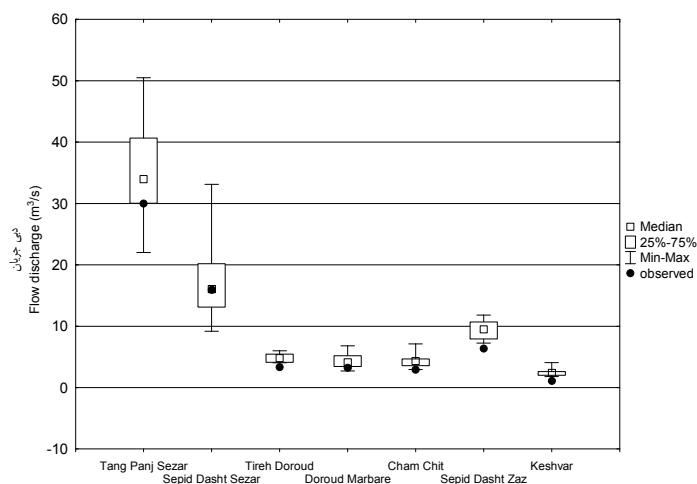
زیرحوضه Sub catchment	تفاوت مقدار شاخص کم آبی شبیه سازی و مشاهداتی (متر مکعب بر ثانیه) Difference of quantity of observed and simulated low flow index ( $m^3/s$ )			
	$Q_{50}$	$Q_{70}$	$Q_{90}$	$Q_{95}$
تنگ پنج سزار Tang Panj Sezar	+3.7	+0.7	-3.4	-4.9
سپید دشت سزار Sepid Dasht Sezar	+1.3	-4.4	-5.4	-3.4
تیره درود Tireh Doroud	-1.1	+1.5	+2	+1.7
درود ماربره Doroud Marbare	-0.38	+0.63	+0.42	+0.22
چم چیت Cham Chit	+2	+0.6	-0.3	-0.5
سپید دشت زاز Sepid Dasht Zaz	+2.6	+1.2	-0.2	-0.8
کشور Keshvar	+1.1	+0.6	0	-0.1

میان زیرحوضه‌ها)، مدل IHACRES جریان‌های پایین ( $Q_{90}$  و  $Q_{95}$ ) را بهتر از مقادیر زیادتر جریان ( $Q_{50}$ ) شبیه سازی نموده است. به عبارت دیگر، توانایی مدل برای شبیه‌سازی شاخص‌های کم آبی جریان نسبت به مقادیر بالای جریان بهتر است.

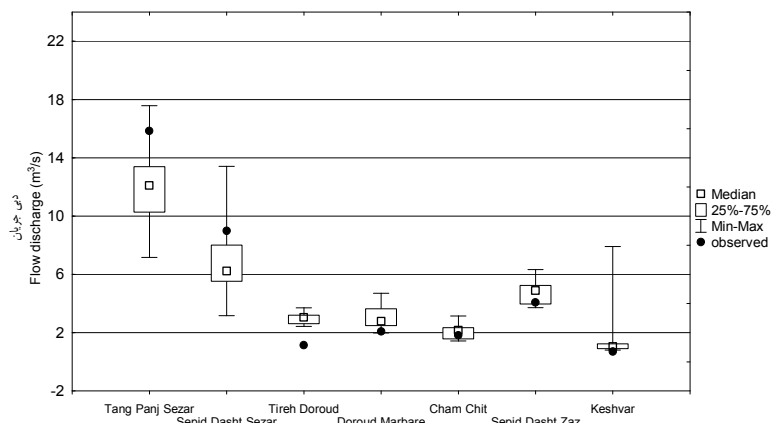
#### بررسی تغییرات شاخص‌های کم آبی در دوره آتی

شکل‌های شماره ۶ تا ۸، دامنه تغییرات شاخص‌های کم آبی  $Q_{70}$ ،  $Q_{90}$  و  $Q_{95}$  مربوط به ۱۰ مدل گردش عمومی جو (عدم قطعیت مدل‌ها) در گذشته و آینده را در زیرحوضه‌های مختلف نشان می‌دهد.

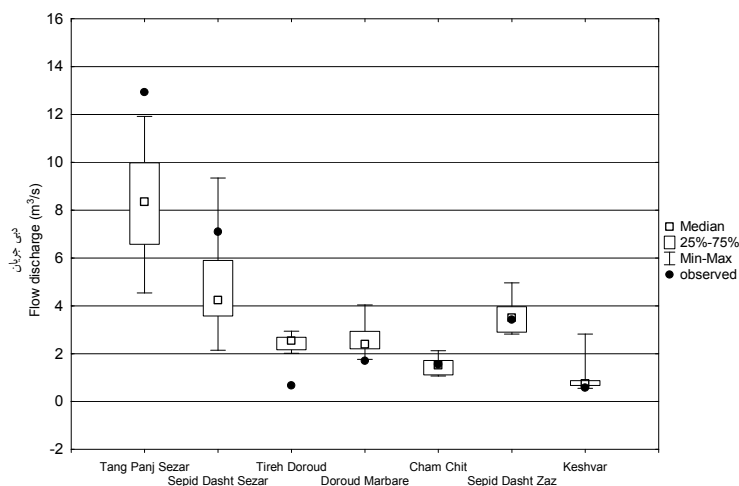
مقایسه تفاوت دبی جریان مشاهداتی و شبیه‌سازی شده، در زیرحوضه‌های مختلف نشان داد که در زیرحوضه‌های با مساحت کمتر، مقدار تفاوت بسیار کمتر از زیرحوضه‌های با مساحت بزرگ‌تر است. به عنوان مثال در زیرحوضه تنگ پنج سزار (با بیشترین مساحت) حداکثر تفاوت‌ها و در زیرحوضه کشور (با کمترین مساحت) حداقل تفاوت‌ها دیده می‌شود و این نشانگر عملکرد بهتر مدل IHACRES در زیرحوضه‌های کوچک می‌باشد. در این زیرحوضه‌ها باران سنج موجود در منطقه با پوشش دادن مساحت کمتر نسبت به زیرحوضه‌های بزرگ‌تر، در عملکرد مدل بارش-رواناب تاثیر خود را به صورت واقعی‌تری نشان می‌دهد. همچنین مشاهده گردید که در سه زیرحوضه چم چیت، سپید دشت زاز و کشور (با کمترین مساحت در



شکل ۶- دامنه تغییرات مقدار شبیه‌سازی شده شاخص  $Q_{70}$  در دوره آتی و مقایسه آن با مقدار مشاهداتی  
 Fig 6- The range of changes of simulated  $Q_{70}$  in future and comparison of that with observed  $Q_{70}$



شکل ۷- دامنه تغییرات مقدار شبیه‌سازی شده شاخص  $Q_{90}$  در دوره آبی و مقایسه آن با مقدار مشاهداتی  
 Fig 7- The range of changes of simulated  $Q_{90}$  in future and comparison of that with observed  $Q_{90}$



شکل ۸- دامنه تغییرات مقدار شبیه‌سازی شده شاخص  $Q_{95}$  در دوره آبی و مقایسه آن با مقدار مشاهداتی  
 Fig 8- The range of changes of simulated  $Q_{95}$  in future and comparison of that with observed  $Q_{95}$

همچنین بررسی عدم قطعیت نوع تغییرات شاخص‌های مختلف در هر زیرحوضه، تغییرات هر یک از شاخص‌ها بر مبنای میانه مدل‌های AOGCM در جدول ۸ آورده شده است.

جهت دستیابی صحیح به نوع تغییرات شاخص‌های کم آبی، پس از محاسبه درصد تغییرات هر شاخص در دوره آبی نسبت به گذشته، می‌بایست مقادیر خطای شبیه‌سازی شاخص‌های مذکور توسط مدل بارش-رواناب را نیز مد نظر قرار داد. با در نظر گرفتن خطای مذکور، جهت تغییرات برخی از شاخص‌ها تغییر می‌کند. به این ترتیب و با توجه به جدول ۸، مقادیر سه شاخص  $Q_{70}$ ،  $Q_{90}$  و  $Q_{95}$  در همه زیرحوضه‌ها (به استثناء تنگ پنج سزار) در دوره آبی افزایش نسبی خواهند داشت.

افزایش نسبی مقادیر شاخص‌های کم آبی، نشانگر بهبود وضعیت کم آبی در دوره آبی است. بهبود وضعیت کم آبی در دوره آبی، مربوط به تغییراتی است که در وضعیت سناریوهای اقلیمی رخ داده است.

با توجه به شکل‌های ۶ تا ۸، دامنه دبی‌های شبیه‌سازی شده توسط مدل AOGCM، برای هر یک از شاخص‌های  $Q_{70}$ ،  $Q_{90}$  و  $Q_{95}$  در زیرحوضه تنگ پنج سزار حداکثر و برای سایر زیرحوضه‌ها کمتر می‌باشد. این زیرحوضه دارای بیشترین مساحت نسبت به سایر زیرحوضه‌ها است و این موضوع مربوط به عملکرد متفاوت مدل IHACRES در زیرحوضه‌های با مساحت‌های مختلف است. بر اساس نتایج بدست آمده می‌توان گفت که در اغلب موارد سه شاخص  $Q_{70}$ ،  $Q_{90}$  و  $Q_{95}$  تغییرات افزایشی در دوره آبی نسبت به گذشته نشان می‌دهند.

### عدم قطعیت تغییرات شاخص‌های مختلف کم آبی در یک زیرحوضه

در این بخش، به منظور جمع‌بندی و تفسیر بهتر نتایج تحقیق،

جدول ۸- تغییرات شاخص‌های کم آبی دوره آبی نسبت به گذشته (میان‌ه نتایج)

Table 8- Changes of low flow indices in the future than the past (median of the results)

شاخص کم آبی Lowflow index	تنگ پنج سزار Tang Panj Sezar		سپیددشت سزار Sepid Dasht Sezar		تیره درود Tireh Doroud		درود ماربره Doroud Marbare		چم چیت Cham Chit		سپیددشت زاز Sepid Dasht Zaz		کشور Keshvar	
	قبل Before	بعد after	قبل Before	بعد after	قبل Before	بعد after	قبل Before	بعد after	قبل Before	بعد after	قبل Before	بعد after	قبل Before	بعد after
	Q <sub>70</sub>	13	افزایشی (A)	0.4	افزایشی (A)	44	افزایشی (A)	27	افزایشی (A)	48	افزایشی (A)	50	افزایشی (A)	92
Q <sub>90</sub>	-24	کاهشی (D)	-31	افزایشی (A)	165	افزایشی (A)	35	افزایشی (A)	19	افزایشی (A)	20	افزایشی (A)	38	افزایشی (A)
Q <sub>95</sub>	-35	افزایشی (A)	-40	افزایشی (A)	275	افزایشی (A)	41	افزایشی (A)	-2	افزایشی (A)	2	افزایشی (A)	22	افزایشی (A)

\* قبل: درصد تغییرات شاخص نسبت به گذشته قبل از اعمال خطای شبیه سازی جریان با مدل بارش-رواناب

\*Before: Before: percentage of index changes than in the past, before applying error of flow simulation with IHACRES rainfall-runoff model

\* بعد: نوع تغییرات شاخص نسبت به گذشته پس از اعمال خطای شبیه سازی جریان با مدل بارش-رواناب

\*After: type of index changes than in the past, after applying error of flow simulation with IHACRES rainfall-runoff model  
A: Additive, D: Decreasing

در حالی که عدم قطعیت مدل‌های GCM در برآورد سناریوهای دما اندک است، نتایج نشان از عدم قطعیت بیشتر مدل‌های GCM در برآورد مقدار بارش و به همراه داشتن این عدم قطعیت در برآورد شاخص‌های کم آبی دارد؛ به صورتی که برای هر یک از شاخص‌های کم آبی مورد استفاده در این تحقیق، دامنه ای از اعداد مربوط به مدل‌های مختلف گردش عمومی جو تولید شد. با به کارگیری سناریوهای دما و بارش برای تولید جریان در دوره آبی، سه شاخص Q<sub>70</sub>، Q<sub>90</sub> و Q<sub>95</sub> مستخرج از منحنی تداوم جریان در این دوره محاسبه و تغییرات آنها نسبت به گذشته ارزیابی گردید. با توجه به نتایج بدست آمده، در همه زیرحوضه‌ها افزایش نسبی مقدار شاخص‌های کم آبی در دوره آبی نسبت به گذشته پیش بینی شد.

از میان ۳ شاخص مربوط به منحنی تداوم جریان، پیشنهاد می‌شود، فقط دو شاخص Q<sub>90</sub> و Q<sub>95</sub> جهت پیگیری اثرات تغییر اقلیم مد نظر قرار گیرد، چرا که دو شاخص ذکر شده به عنوان شاخص‌های مهم کم آبی مورد استفاده قرار می‌گیرند (۲۱). اگر چه هر سه شاخص مذکور، مقدار جریان کم آبی در فصل خشک را نشان می‌دهند، دو شاخص Q<sub>90</sub> و Q<sub>95</sub> نسبت به Q<sub>70</sub> به منظور پیگیری اثرات تغییر اقلیم بر وضعیت کم آبی مناسب ترند؛ بدین لحاظ که مقادیر کمتر جریان در فصول خشک را نشان می‌دهند و لذا تغییرات این دو شاخص در تعیین وضعیت کم آبی دارای اهمیت بیشتری است. از طرفی عدم قطعیت کمتری در برآورد دو شاخص مذکور نسبت به Q<sub>70</sub> وجود دارد.

تغییرات دو شاخص مذکور در زیرحوضه تنگ پنج سزار بسیار اندک (۲ تا ۳ درصد افزایشی یا کاهششی) و در سایر زیرحوضه‌ها افزایشی می‌باشد. افزایش Q<sub>90</sub> و Q<sub>95</sub> نشان دهنده افزایش مقدار

همان‌طور که نتایج نشان داد، در اغلب موارد در فصل خشک افزایش مقدار بارش مشاهده می‌شود. در فصل تر نیز در صورتی که برآیند تغییرات مقدار بارش در ماه‌های مختلف، افزایشی باشد، از طریق تغذیه آب‌های زیرزمینی می‌تواند منجر به افزایش جریان رودخانه گردد. از طرفی به دلیل آهک و وجود اشکال کارستی در قسمت اعظم از مساحت حوضه، توانایی ذخیره آب و افزایش مقدار جریان رودخانه در فصول کم آبی در چنین مناطقی مورد انتظار است. بررسی مقدار بارش در زیرحوضه تنگ پنج سزار نیز نشان داد که نسبت به دوره گذشته در فصل خشک، افزایش و یا کاهش محسوسی در مقدار بارش رخ نخواهد داد و لذا انتظار می‌رود که شاخص‌های کم آبی نیز تغییرات محسوسی نداشته باشند. در این زیرحوضه، تغییرات شاخص‌های مختلف کاملاً با هم مطابقت ندارند، و بنابراین دستیابی به نتیجه قابل اطمینان دشوارتر است، اما با توجه به تغییرات افزایشی مقدار Q<sub>95</sub> (شاخص کم آبی با عدم قطعیت کمتر)، همچنین بهبود شاخص‌های کم آبی در سایر زیرحوضه‌ها، می‌توان وضعیت نسبی تقریباً بهتری را در دوره آبی در این زیرحوضه نیز پیش بینی نمود.

## نتیجه‌گیری کلی

در این تحقیق، تاثیر پدیده تغییر اقلیم بر جریان کم آبی شاخه سزار رودخانه دز، با استفاده از شاخص‌های مستخرج از منحنی تداوم جریان مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به وجود عدم قطعیت ذاتی در مطالعات تغییر اقلیم، در این تحقیق طیف متنوعی از مدل‌های GCM (جدول ۳) به همراه روش‌های معتبر مورد استفاده قرار گرفت تا بتوان نتایج تحقیق را نه بر مبنای شبیه‌سازی‌های یک مدل، بلکه بر مبنای دامنه‌ای از شبیه‌سازی مدل‌های مختلف ارائه کرد.

Q70، Q90 و Q95 را در زیرحوضه‌های بزرگ‌تر با عدم قطعیت بیشتری نسبت به زیرحوضه‌های کوچک‌تر شبیه‌سازی نموده است، پیشنهاد می‌شود در مطالعات بعدی از مدل‌های توزیعی یا نیمه توزیعی بارش-رواناب استفاده و با نتایج این تحقیق مقایسه گردد. به طور کلی، اگر چه هر سه شاخص کم آبی مورد استفاده در این مطالعه، مقدار جریان کم آبی در فصل خشک را نشان می‌دهند، کاربردهای منحصری فردی نیز دارند. لذا انتخاب شاخص در یک مطالعه خاص، کاملاً به هدف تحقیق و نوع رودخانه وابسته می‌باشد.

### سپاسگزاری

از تمامی دوستان و افرادی که در دانشگاه شهید چمران اهواز و سایر ارگانها در انجام این تحقیق به اینجانب یاری رساندند صمیمانه تشکر و قدردانی می‌نمایم.

جریان رودخانه در ماه‌های خشک سال است و بالعکس. باجیوس و همکاران (۴) نیز به منظور بررسی جریان کم آبی تحت تاثیر تغییر اقلیم، از آستانه ۵ درصد جریان (Q95) استفاده کرده و با توجه به نتایج به دست آمده، مشاهده کردند که فراوانی شاخص مذکور در فصل تابستان در دوره آبی افزایش می‌یابد. گین و همکاران (۱۲) نیز از دو شاخص کم آبی Q90 و Q95 استفاده کرده و مشاهده کردند که در هر دو سناریوی انتشار A1B و A2، مقدار آنها در دوره آبی، بدون تغییر باقی ماند.

آگاهی از مقدار دو شاخص Q90 و Q95 در ماه‌های خشک سال به منظور ارزیابی اهداف مورد انتظار از رودخانه ضروری است. دو شاخص مذکور و به طور کلی سایر شاخص‌های کم آبی مشابه، برآورد ارزشمندی از وضعیت تجربه شده طی فصل خشک در اختیار قرار می‌دهند.

با توجه به اینکه مدل بارش-رواناب IHACRES سه شاخص

### منابع

- 1- Azari M., Moradi H.R., Saghafian B., and Faramarzi M. 2013. Evaluation of hydrological effects of climate changes on the Gorganrood basin, *Journal of Water and Soil (Agricultural Sciences and Technology)*, 27(3): 537-547.
- 2- Babaeian I., Kwon W.T., and Im E.S. 2004. Application of weather generator technique for climate change assessment over Korea, Korea Meteorological Research Institute, Climate Research Lab.
- 3- Babaeian I., and Najafi Nic Z. 2007. Introduction and evaluation LARS-WG model for modeling of meteorological parameters of Khorasan state, priod 1961-2039, Technical workshop on the effects of climate change on water resources management, the National Committee on Irrigation and Drainage, Tehran.
- 4- Baguis P., Roulin E., Willems P., and Ntegeka V. 2010. Climate change and hydrological extremes in Belgian catchments, *Hydrology and Earth System Sciences*, 7: 5033-5078.
- 5- Bazrafshan J., Khalili A., Hoorfar A., Torabi S., and Hejam S. 2009. Investigate and compare the performance of two models LARS-WG and ClimGen in simulation of meteorological variables in different climatic conditions of Iran, *Journal of Iran Water Resources Researches*, 13: 44-57.
- 6- Brilly M., Kobold M., and Vidmar A., 1997. Water information management system and low flow analysis in Slovenia, FRIEND '97 – Regional Hydrology: concepts and models for sustainable water resource management, Proceedings from the International Conference, 246: 117-124.
- 7- Croke B.F.W., Andrews F., Spat J., and Cuddy S., 2005. IHACRES User Guide, Technical Report 2005/19. Second Edition, iCAM, School of Resources, Environment and Society, The Australian National University, Canberra. <http://www.toolkit.net.au/ihacres>
- 8- Croke B.F.W., and Jakeman A.J. 2005. Use of the IHACRES rainfall-runoff model in arid and semi arid regions, in: *Hydrological Modelling in Arid and Semi-Arid Areas*, edited by: Wheeler, H., Sorooshian, S. and Sharma, K. D., Cambridge University Press, Cambridge, 41-48, 2007.
- 9- De Wit M.J.M., Van den Hurk B., Warmerdam P.M.M., Torfs P.J.J.F., Roulin E. and Van Deursen W.P.A. 2007. Impact of climate change on low-flows in the river Meuse, *Climatic Change*, 82:351-372.
- 10- Filiz D.C., and Heinz G.S. 2009. Stream Flow Response to Climate in Minnesota, Project Report No. 510, University of Minnesota.
- 11- Fowler H.J., Blenkinsop S., and Tebaldi C. 2007. Review: Linking climate change modeling to impacts studies: recent advances in downscaling techniques for hydrological modeling, *International Journal of Climatology*, 27(12): 1547-1578.
- 12- Gain A.K., Immerzeel W.W., Sperna Weiland F.C., and Bierkens M.F.P., 2011. Impact of climate change on the stream flow of lower Brahmaputra: trends in high and low flows based on dischargeweighted ensemble modeling, *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 8: 365-390.
- 13- Gosain A.K., Rao S., and Basuray D., 2006. Climate change impact assessment on hydrology of Indian river basins, *Current Science*, 90(3): 346-353.
- 14- Huang Sh., Krysanova V., and Hattermann F., 2013. Projection of low flow conditions in Germany under climate change by combining three RCMs and a regional hydrological model, *Acta Geophysica*, 61(1): 151-193.

- 15- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Climate Change and Water. Bates Bryson C., Kundzewicz Zbigniew W., Wu Sh. and Palutikof J., Technical Paper VI of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 200, Geneva, Switzerland.
- 16- Jakeman A.J., and Hornberger G.M., 1993. How much complexity is warranted in a rainfall-runoff model? *Water Resources Research*, 29(8): 2637-2649
- 17- Kavvas M.L., Chen Z.Q., Ohara N., Bin Shaaban A.J., and Amin M.Z.M., 2006. Impact of climate change on the hydrology and water resources of Peninsular Malaysia, International Congress on River Management 2a.
- 18- Krause P., Boyle D.P., and Base F., 2005. Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment, *Advances in Geosciences*, 5: 89–97.  
Sref-ID: 1680-7359/adgeo/2005-5-89
- 19- Massah Bavani A.R., 2006. Assessing the risk of climate change and its impact on water resources (Case Study: Isfahan Zayanderood basin), The PhD thesis, the field of Water Resources, Department of Water Structures Engineering, Faculty of Agriculture, Tarbiat Modarres University.
- 20- Mauser W., Marke T., and Stoeber S., 2008. Climate Change and Water Resources: Scenarios of Low-flow Conditions in the Upper Danube River Basin, XXIVth Conference of the Danubian Countries, IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 4 (2008) 012027.
- 21- Pyrcce R.S., 2004. Hydrological Low Flow Indices and their Uses, Watershed Science Centre Report No.04-2004, Peterborough, Ontario, 33 p.
- 22- Qian B., Gameda S., Hayhoe H., De Jong R., and Bootsma A., 2004. Comparison of LARS-WG and AAFC-WG stochastic weather generators for diverse Canadian climates, *Climate Research*, 26: 175–191.
- 23- Qian B., Gameda S. and Hayhoe H. 2008. Performance of stochastic weather generators LARSWG and AAFC-WG for reproducing daily extremes of diverse Canadian climates, *Climate Research*, 37: 17–33.
- 24- Reaney S.M., and Fowler H. 2008. Uncertainty estimation of climate change impacts on river flow incorporating stochastic downscaling and hydrological model parametrisation error sources, BHS 10<sup>th</sup> National Hydrology Symposium, Exeter.
- 25- Riggs H.C., Caffey J.E., Orsborn J.F., Schaake J.C., Singh K.P., and Wallace J.R. (Task Committee of Low-Flow Evaluation, Methods, and Needs of the Committee on Surface-Water Hydrology of the Hydraulics Division), 1980. Characteristics of low flows, *Journal of the Hydraulics Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers*, 106: 717-731.
- 26- Semenov M.A., Brooks R.J., Barrow E.M., and Richardson C.W. 1998. Comparison of the WGEN and LARS-WG stochastic weather generators for diverse climates, *Climate Research* 10: 95–107.
- 27- Semenov M.A. 2008. Simulation of weather extreme events by stochastic weather generator, *Climate Research*, 35: 203–212.
- 28- Smakhtin V.U. 2001. Low flow hydrology: a review, *Journal of Hydrology*, 240:147–186.
- 29- Stahl K., Hisdal H., Hannaford J., Tallaksen L.M., van Lanen H.A.J., Sauquet E., Demuth S., Fendekova M. and Jodar J. 2010. Streamflow trends in Europe: evidence from a dataset of near-natural catchments, *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 14: 2367-2382.
- 30- Tharme R.E. 2003. A global perspective on environmental flow assessment: emerging trends in the development and application of environmental flow methodologies for rivers, *River Research and Applications*, 19: 397-441.
- 31- Vogel R.M., and Fennessey N.M. 1995. Flow duration curves. II. A review of applications in water resource planning, *Water Resources Bulletin*, 31(6): 1029–1039.
- 32- Wallace T.B., and Cox W.E. 2002. Locating information on surface water availability in Virginia.  
< <http://www.rappriverbasin.va.us/studies/locatingsurfacewaterinfo.doc>>
- 33- Wilby R., Greenfield B., and Glenny C. 1994. A coupled synoptichydrological model for climate change impact assessment, *Journal of Hydrology*, 153: 265–290.
- 34- WMO., 2008. Manual on low flow estimation and prediction, Operational hydrology report No.50 (WMO-No.1029), Geneva.

## Changes of Some Indices of Low Flow affected by Climate Change in the Tang Panj Sezar Basin

M. Mozayyan<sup>1\*</sup> - A. M. Akhoond Ali<sup>2</sup> - A.R. Massah Bavani<sup>3</sup> - F. Radmanesh<sup>4</sup>

Received: 17-08-2014

Accepted: 17-08-2015

**Introduction:** Due to the effects of climate change on water resources and hydrology, Changes in low flow as an important part of the water cycle, is of interest to researchers, water managers and users in various fields. Changes in characteristics of low flows affected by climate change may have important effects on various aspects of socioeconomic, environmental, water resources and governmental planning. There are several indices to assess the low flows. The used low flow indices in this research for assessing climate change impacts, is include the extracted indices from flow duration curve (Q70, Q90 and Q95), due to the importance of these indices in understanding and assessing the status of river flow in dry seasons that was investigated in Tang Panj Sezar basin in the west of Iran.

**Materials and methods:** In this paper, the Tang Panj Sezar basin with an area of 9410 km<sup>2</sup> was divided into 6 smaller sub catchments and the changes of low flow indices were studied in each of the sub catchments. In order to consider the effects of climate change on low flow, scenarios of temperature and precipitation using 10 atmospheric general circulation models (to investigate the uncertainty of GCMs) for both the baseline (1971-2000) and future (2011-2040) under A2 emission scenario was prepared. These scenarios, due to large spatial scale need to downscaling. Therefore, LARS-WG stochastic weather generator model was used. In order to consider the effects of climate change on low flows in the future, a hydrologic model is required to simulate daily flow for 2011-2040. The IHACRES rainfall-runoff model was used for this purpose. After simulation of daily flow using IHACRES, with two time series of daily flow for the observation and future period in each of the sub catchment, the low flow indices were compared.

**Results Discussion:** According to results, across the whole year, the monthly temperature in the future period has increased while rainfall scenarios show different variations for different months, also within a month for different GCMs. Based on the results of low flow indices, in most cases, the three indices of Q<sub>70</sub>, Q<sub>90</sub>, and Q<sub>95</sub> will show incremental changes in the future compared to the past. Also, the domain simulation by 10 GCMs for all three indices is maximum in Tang Panj Sezar and less for other sub catchments, which is related to better performance of IHACRES model in smaller sub catchments. In order to investigate the uncertainty of type changes in different indices in every sub catchment, changes in any of the indices were considered based on the median of GCMs. To achieve the correct type of changes in low flow indices, the amount of error in a simulation of the indices of IHACRES rainfall-runoff model should also be taken into consideration. Therefore, considering the error, the three indices Q<sub>70</sub>, Q<sub>90</sub> and Q<sub>95</sub> in all sub catchments (except for Tang Panj Sezar) will have the relative increase in the future period. The improvement of low flow state in the future period is related to the changes occurred in the state of climate scenarios. As the results indicated, most often, there is an increase in rainfall in dry seasons. Also, in different months of the wet season wet season, if the result of changes in quantity of rainfall is incremental, it can lead to an increase in river flow through groundwater recharge. On the other hand due to the limestone and karst forms in most of the basin area, water storage ability and increase the amount of river flow during low water season in this area is expected. The study on rainfall quantity in Tang Panj Sezar sub catchment also indicated that, there will be no significant increase or decrease in the quantity of rainfall in the dry season. Thus, it is expected that there will not be significant changes in low flow indices. In this sub catchment, changes in various low flow indices do not match perfectly, so more difficult to obtain reliable results. With regard to incremental changes of Q<sub>95</sub>, low flow index with less uncertainty, as well as improving indices of low flow in other sub-basins, it is possible to predict a relatively better state for low flow indices of Tang Panj Sezar in the future period.

**Conclusion:** Using temperature and rainfall scenarios to simulate river flow in the future, a relative increase

1- Assistant Professor Range and Watershed Management Department, Natural Resources Faculty, Behbahan Khatam Alanbia University of Technology

(\*- Corresponding Author Email: mmozayyan80@yahoo.com)

2, 4- Professor and Assistant Professor Hydrology Department, Faculty of Water science, Shahid Chamran University of Ahwaz

3- Associate Professor Water Resources Department, Tehran University, Abourraihan Pardis

of all three low flow indices  $Q_{70}$ ,  $Q_{90}$  and  $Q_{95}$  was predicted compared with the past period. Although all three of mentioned indices show the amount of low flow in the dry season, it is recommended that only two indices of  $Q_{90}$  and  $Q_{95}$  to assess the effects of climate change be considered.  $Q_{90}$  and  $Q_{95}$  indices are more suitable indices than  $Q_{70}$  for studying the effects of climate change on low flow state. These two indices indicate less quantity of flow in dry seasons; therefore, the changes of the two indices are more important in identifying the low flow state. However, there is less uncertainty in the estimation of the two  $Q_{90}$  and  $Q_{95}$  indices than  $Q_{70}$ .

**Keywords:** Climate change, Flow duration curve, LARES-WG model, Low flow, Tang Panj Sezar