

## اثر تغییر اقلیم بر اطمینان پذیری تأمین آب پایین دست سد کرخه و راهکارهای سازگاری با آن

منوچهر فرح زاده<sup>۱</sup>، کاوه مدنی لاریجانی<sup>۲</sup>، علیرضا مساح<sup>۳</sup> و رحمان داوطلب<sup>۴</sup>

۱) استادا؛ گروه سنجش از دور و GIS؛ دانشگاه تربیت مدرس؛ دانشکده ادبیات و علوم انسانی؛ تهران؛ ایران  
\*نویسنده مسئول مکاتبات: [farazam@modares.ac.ir](mailto:farazam@modares.ac.ir)

۲) استادا؛ مرکز سیاستهای محیط زیستی؛ دانشگاه امپریال کالج؛ SW7 2AZ؛ لندن؛ انگلستان

۳) استادا؛ گروه مهندسی آبیاری و زهکشی؛ دانشگاه تهران؛ پردیس کشاورزی ابوریحان؛ تهران؛ ایران

۴) دانشجوی دکتری؛ گروه سنجش از دور و GIS؛ دانشگاه تربیت مدرس؛ دانشکده ادبیات و علوم انسانی؛ تهران؛ ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۰۸/۰۶ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۰۳/۳۰

### چکیده

افزایش جمعیت و رشد تقاضا برای آب، همواره مدیران این بخش را با چالشی اساسی مواجه نموده است. این در حالی است که تغییر اقلیم در آینده‌ای نه چندان دور بیش از پیش بر پیچیدگی‌های این چالش می‌افزاید. در این مطالعه به منظور بررسی اثر تغییر اقلیم بر سیستم تأمین آب حوضه آبریز کرخه، نخست با استفاده از ۱۵ مدل GCMs و چند سناریوی انتشار گازهای گلخانه‌ای، تغییرات بارش و دما برای افق زمانی ۲۰۵۰ بررسی شد. سپس با واسنجی یک مدل بارش-رواناب، سری‌های زمانی بارش و دما، برای تولید سری‌های زمانی آورد رودخانه بکار گرفته شد. به دلیل عدم قطعیت مدل‌های GCMs در برآورد دما و بارش، آینده پیش‌بینی شده برای اواسط قرن جاری از ۵۶ درصد کاهش تا ۳۴ درصد افزایش، داشته اند. لذا برای حل مشکل عدم قطعیت، با استفاده از روش خوشه‌بندی سلسله مراتبی، ۳۵ سری زمانی آینده به ۵ خوشه گروه‌بندی و از هر خوشه یک نماینده انتخاب شد. ارزیابی وضعیت تخصیص آب با استفاده از مدل WEAP و به روش شبیه‌سازی انجام گرفت. همچنین سه استراتژی مدیریتی افزایش راندمان آبیاری، استفاده مجدد آب و تغییر الگوی کشت برای سازگاری با تغییر اقلیم ارزیابی گردید. نتایج نشان داد که ساخت سدهای جدید به دلیل افزایش تخصیص آب در بالادست، می‌تواند اطمینان‌پذیری تأمین آب کشاورزی پایین دست سد کرخه را تا کمتر از ۷۰ درصد کاهش دهد. همچنین استفاده مجدد از آب، با اطمینان‌پذیری ۹۱ درصد، به عنوان موثرترین راهکار برای سازگاری با تغییرات اقلیمی شناخته شد. هر چند تغییر الگوی کشت روشی کم هزینه‌تر است، لیکن اجرای آن منوط به همکاری کشاورزان می‌باشد.

**کلید واژه‌ها:** تخصیص آب؛ تغییر اقلیم؛ حوضه آبریز کرخه؛ راهبردهای سازگاری

### مقدمه

۱۳۹۲). بر اساس گزارش چهارم هیئت بین الدول تغییر اقلیم یا IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) تغییرات دما و بارش ناشی از تغییر اقلیم، موجب تغییر در مقدار و توزیع زمانی و مکانی آورد رودخانه‌ها می‌گردد. مطابق با این گزارش، آورد آبی رودخانه‌های واقع در منطقه تحت تاثیر سامانه بارشی

افزایش جمعیت و نیاز به آب بیشتر برای تولید محصولات غذایی و همچنین تأثیر تغییر اقلیم بر کاهش منابع آب، چالش بزرگی را برای تصمیم سازان این بخش ایجاد نموده است (Huntjens et al., 2011; Wei et al., 2009; Raje and Mujumdar, 2010; رزاقی و همکاران،

(Abrishamchi *et al.*, 2011) با بهره‌گیری از مدل‌ها و سناریوهای مشابه با مطالعه فوق، حدود ۲۵ درصد کاهش آورد متوسط سالانه حوضه آبریز کرخه را برای اواسط قرن جاری پیش‌بینی نمودند.

در اکثر پژوهش‌ها، تمرکز بر تعداد محدودی از مدل‌های GCM و یا سناریوهای انتشار بوده است. اما مطالعات بسیاری تاکید دارند که برای تصمیم‌گیری با اطمینان بیشتر در بخش آب، نیاز است که دامنه‌ی گسترده‌تری از مدل‌های GCM و یا سناریوهای انتشار گازهای گلخانه‌ای مورد استفاده قرار گیرد و راه حلی برای عدم قطعیت خروجی مدل‌ها ارائه شود (Gohari *et al.*, 2013; Dessai and Hulme, 2007; Teegavarapu, 2010; Raje and Mujumdar, 2010; Cai *et al.*, 2011a and b).

شایان ذکر است که غالب این مطالعات برای حل مشکل عدم قطعیت مدل‌ها، دقت شبیه‌سازی آنها را برای تولید داده‌های گذشته، به عنوان معیار قرار می‌دهند. به این معنی که هر مدلی که بتواند وقایع گذشته را بهتر شبیه‌سازی کند، از ظرفیت بالاتری برای پیش‌بینی آینده برخوردار خواهد بود. بر این اساس اغلب مطالعات مذکور از طریق وزن‌دهی، ترکیبی از چند مدل را برای پیش‌بینی وضعیت آینده مورد استفاده قرار می‌دهند. وزن هر مدل بر اساس دقت مدل در پیش‌بینی داده‌های گذشته برآورد می‌گردد. همچنین فرض می‌گردد که وزن هر مدل در واقع بیانگر احتمال تغییرات اقلیمی در آینده است. بنابراین در این وزن‌دهی احتمال تغییرات بارش و دما به صورت تابع توزیع احتمال ارائه می‌شود. همچنین با استفاده از فرض تغییرات بارش و دما با احتمال یکسان، مقادیر آورد رودخانه در احتمال مذکور محاسبه می‌گردد (Gohari *et al.*, 2013). توضیح آنکه به عنوان مثال برای هر مدل مقدار بارش و دما را با ۹۰ درصد اطمینان برآورد می‌کنند. در صورتیکه شاید هیچ‌گاه این دو پارامتر بطور یکسان در آینده تغییر نکنند.

در اینجا دو سوال اساسی وجود دارد که عبارتند از:

مدیترانه‌ای، برای اواسط قرن بیست و یکم حدود ۱۰ تا ۳۰ درصد کاهش خواهد داشت که عمدتاً ناشی از تأثیر توام کاهش بارش و افزایش دما و به تبع آن افزایش تبخیر و تعرق می‌باشد (IPCC, 2007).

رودخانه کرخه یکی از مهمترین رودخانه‌های ایران می‌باشد که در جنوب غربی کشور واقع گردیده و منبع تامین آب برای بیش از ۴ میلیون نفر جمعیت است. پنج استان همدان، کرمانشاه، لرستان، ایلام و خوزستان از عمده مصرف‌کنندگان آب این رودخانه هستند که هر کدام با طرح احداث سد‌های کوچک و بزرگ، سعی در افزایش سهم خود و مقابله با کاهش آب دارند (وزارت نیرو، ۱۳۹۱). علاوه بر این، در پایین دست این رودخانه، تالاب هورالعظیم به عنوان یکی از تالاب‌های مهم بین‌المللی واقع گردیده که در سال‌های اخیر به دلیل بروز خشکسالی‌های پی در پی و همچنین توسعه بیش از اندازه در بالادست، در هر دو کشور ایران و عراق به سمت خشکی، پیش رفته است (Masih, 2011). مطالعات متعددی تأثیر تغییر اقلیم را بر منابع آب حوضه آبریز کرخه مورد بررسی قرار داده‌اند.

جمالی و همکاران (۲۰۱۳) ۱۵ درصد کاهش متوسط سالانه آورد رودخانه کرخه را برای اواسط قرن میلادی جاری گزارش نمودند. در این مطالعه از دو مدل گردش عمومی جو یا GCM (General Circulation Model) به نام‌های GCM3 و HadCM3 و همچنین سه سناریوی انتشار گازهای گلخانه‌ای A1B، B1 و A2 استفاده شد.

اشرف واقفی و همکاران (۲۰۱۳) برای بخش‌های شمالی حوضه آبریز کرخه حدود ۵۰ درصد افزایش آب قابل دسترس را تا اواسط قرن جاری پیش‌بینی نمودند. در این مطالعه همچنین برای بخش‌های جنوبی این حوضه آبریز حدود ۴۰ درصد کاهش آب قابل دسترس پیش‌بینی گردید. مدل CGCM3 و سه سناریوی A1B، B1 و A2 در مطالعه مذکور مورد استفاده قرار گرفتند.

وضعیت کنونی تامین کننده حدود ۱.۸ میلیارد متر مکعب نیازهای آبی پایین دست است.

در این مطالعه کلیه داده‌های هواشناسی اعم از داده‌های روزانه و ماهانه بارندگی، دما، ساعات آفتابی و ... از سازمان هواشناسی کشور اخذ گردیدند. بدین منظور با توجه به در دسترس بودن داده‌ها، دوره‌ی زمانی ۳۰ ساله ۱۹۷۹-۲۰۰۸ به عنوان دوره زمانی پایه‌ی مطالعات انتخاب گردید. همچنین داده‌های روزانه و ماهانه آبدهی رودخانه از آرشیو داده‌های شرکت مدیریت منابع آب ایران دریافت گردید. از طرفی به منظور تامین داده‌های مقدار و نوع مصارف از گزارشهای طرح جامع اول (جاماب ۱۳۷۳) و طرح جامع دوم (وزارت نیرو، ۱۳۹۱) و همچنین آماربرداری سراسری سالهای ۱۳۸۰ و ۱۳۸۸ (بانک شرکت مدیریت منابع آب ایران) استفاده گردید. علاوه بر داده‌های هیدروکلیمایی و برداشت آب، برای بخشهای مختلف مطالعه خصوصاً واسنجی مدل هیدرولوژیک نیاز به نقشه‌های خاک و پوشش گیاهی و همچنین مدل رقومی-ارتفاعی بود که این اطلاعات از آرشیو داده‌های شرکت مدیریت منابع آب ایران، سازمان جغرافیایی کشور و همچنین سازمان جنگلها و مراتع تهیه گردید.

جدول شماره ۱ برخی از خصوصیات هیدروکلیمایی حوضه‌ی آبریز کرخه و زیرحوضه‌های اصلی آنرا نشان می‌دهد. با توجه به جدول، مساحت حوضه آبریز کرخه تا محل سد مخزنی کرخه حدود ۴۳۰۰۰ کیلومتر می‌باشد که آورد سالیانه آن به ۶ میلیارد مترمکعب در سال می‌رسد. متوسط بارش سالانه حوضه آبریز کرخه در بالادست سد کرخه حدود ۵۱۰ میلیمتر، متوسط دمای سالانه ۱۳.۵ درجه سانتیگراد و متوسط تبخیر بیش از ۲۰۰۰ میلیمتر در سال است. ارقام دما، بارش و تبخیر در این جدول از ترسیم خطوط هم‌باران، هم‌دما و هم‌تبخیر بدست آمده است که روش ترسیم آن به تفصیل در گزارش طرح جامع آب (وزارت نیرو، ۱۳۹۱) ارائه شده است.

آیا علیرغم قبول اثرات تغییر اقلیم، رفتار اقلیم در آینده مشابه رفتار اقلیم در گذشته خواهد بود؟

با توجه به ماهیت متفاوت پارامترهای دما و بارندگی، برای برآورد جریان رودخانه، چرا سطح اطمینان یکسانی برای این دو پارامتر در نظر گرفته می‌شود؟

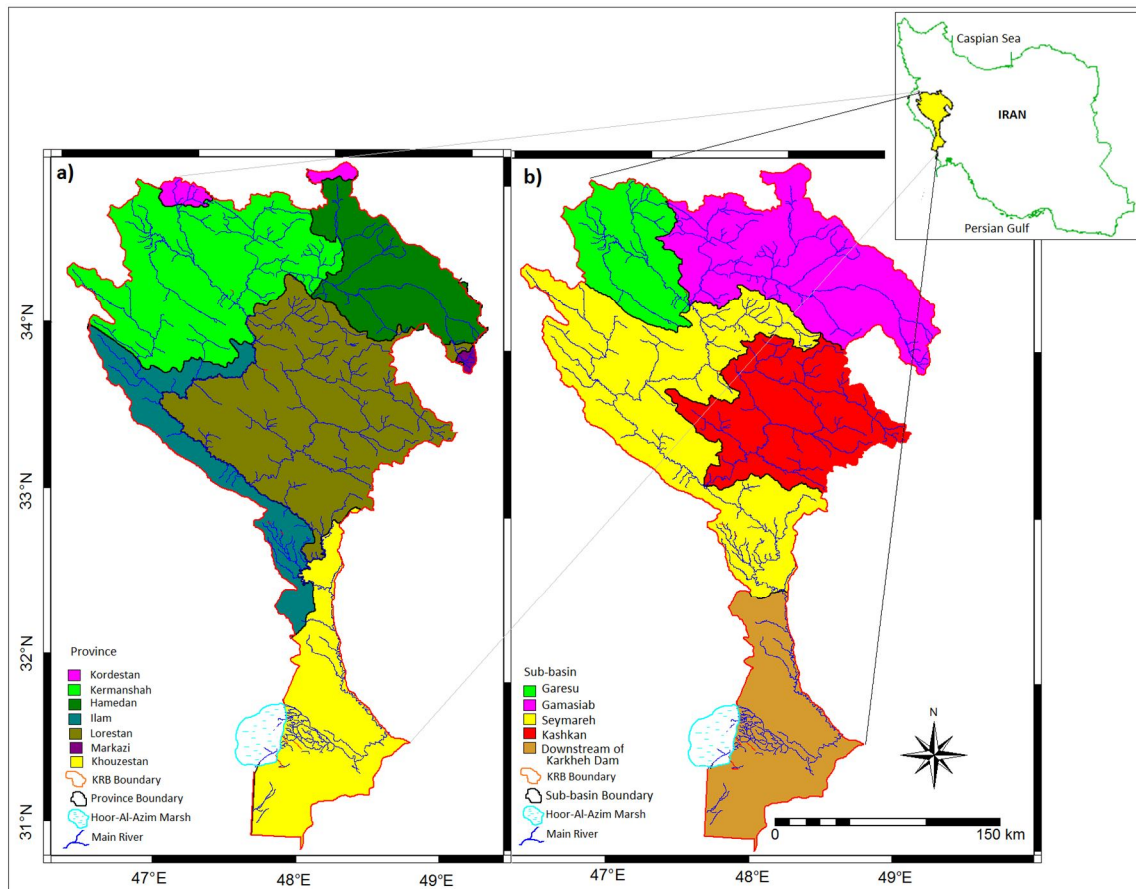
با توجه به این سوالها و همچنین با توجه به نظر برخی از محققین نسبت به نادرستی حذف مدلها برای پیش‌بینی آینده (Brown, 2011)، در این مطالعه از روش متفاوتی برای کاهش عدم قطعیت مدل‌های GCM استفاده شده است. بطور کلی مطالعه‌ی حاضر، سه هدف عمده را مورد توجه قرار داده است که عبارتند از:

- توسعه یک روش برای ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر منابع آب با توجه به عدم قطعیت مدل‌های GCM.
- ارزیابی اطمینان‌پذیری تامین آب در پایین دست رودخانه کرخه و
- پیشنهاد راهکارهای سازگاری با تغییرات اقلیمی.

#### مواد و روش‌ها

##### الف- داده‌ها و منطقه مطالعاتی

شکل 1a و 1b موقعیت حوضه آبریز کرخه را در داخل کشور ایران به همراه زیرحوضه‌های آبریز اصلی آن و استانهای ذینفع نشان می‌دهد. مطابق با شکل 1a، بخشهایی از هفت استان کشور حوضه آبریز کرخه را تشکیل می‌دهند. البته تنها ۵ استان کرمانشاه، همدان، لرستان، ایلام و خوزستان مصرف‌کنندگان عمده آب حوضه آبریز کرخه هستند. چهار زیرحوضه گاماسیاب و کشکان در بخشهای شمال شرقی، قره‌سو در بخشهای شمالی و سیمره در بخشهای غربی و مرکزی، تامین کننده آب سد کرخه می‌باشند. سد کرخه با حجمی بیش از ۵ میلیارد متر مکعب، بزرگترین سد مخزنی کشور بوده و در



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی حوضه آبریز کرخه به همراه زیرحوضه‌ها و تقسیمات استانی  
 جدول ۱. خصوصیات هیدروکلیماتی حوضه آبریز سد کرخه و زیرحوضه‌های اصلی آن

نام زیرحوضه	ایستگاه هیدرومتری	مساحت (km <sup>2</sup> )	متوسط آورد سالانه (MCM)	دمای هوا (°C)			متوسط بارش سالانه (mm)	متوسط تبخیر سالانه (mm)
				مینیمم	متوسط	ماکزیمم		
قره سو	قورباغستان	۵۳۷۰	۷۲۴	۲۰/۵	۱۲/۲	۴/۳	۵۰۴	۱۹۴۷
گاماسیاب	پل چهر	۱۰۸۶۰	۱۰۸۴	۱۹	۱۰/۹	۳	۴۸۹	۱۹۷۳
کشکان	پل دختر	۹۱۴۰	۱۶۸۵	۲۱/۳	۱۳/۸	۵/۷	۵۶۶	۲۰۵۳
سد کرخه	پای پل	۴۲۶۲۰	۵۹۵۹	۲۱/۳	۱۳/۵	۵/۵	۵۱۰	۲۰۷۴

GCM ها برای پیش‌بینی وضعیت دما و بارش از سناریوهای مختلف انتشار گازهای گلخانه‌ای استفاده می‌کنند ( IPCC Special Report on Emmission Scenarios or SRES, 2000). در این مطالعه از سه سناریوی انتشار گازهای گلخانه‌ای A1B، B1 و A2 استفاده گردید. در جدول شماره (۲) سناریوهای مختلف تغییر اقلیم مورد استفاده در این مطالعه (ترکیب مدل‌های GCM و سناریوهای انتشار) ارائه شده است.

**ب- مدل‌های گردش عمومی جو و فرایند ریز مقیاس نمایی (Downscaling)**

در این مطالعه از مدل‌های متعدد گردش عمومی جو یا GCM برای پیش‌بینی وضعیت منابع آب استفاده شده است. به همین دلیل تعداد ۱۵ مدل GCM، که در گزارش چهارم IPCC منعکس شده است (Randall et al., 2007)، برای پیش‌بینی دما و بارندگی حوضه‌ی آبریز کرخه در اواسط قرن میلادی جاری (افق زمانی ۲۰۵۰ یا دوره ۲۰۶۰-۲۰۴۱) مورد استفاده قرار گرفت. از طرفی

می‌تواند داده‌های آینده را تولید کند و برای هر گونه مدل‌سازی نیازمند یک سناریوی اقلیمی ویژه می‌باشد (Semenov and Barrow, 2002). بنابراین ابتدا با استفاده از داده‌های مشاهداتی، مدل LARS در حوضه آبریز کرخه واسنجی گردید. سپس بر اساس متوسط پیش‌بینی هر مدل GCM، داده‌های آینده در مقیاس روزانه تولید گردید. به منظور تعیین کیفیت نتایج واسنجی، از معیارهای نیکویی برازش P-value و ضریب همبستگی استفاده شد (Semenov and Barrow, 2002) و نتایج حاکی از برازش داده‌های شبیه‌سازی بر داده‌های مشاهداتی در سطح اطمینان ۹۵ درصد بود. البته به دلیل مقادیر پایین بارش در فصل تابستان، نتایج واسنجی در این فصل ضعیف‌تر بوده است، اما کماکان معنی‌دار است.

GCM ها قادر به پیش‌بینی وضعیت آینده در مقیاس جهانی و قاره‌ای هستند اما به دلیل تاثیر عوارض منطقه‌ای در وضعیت اقلیمی (نظیر شیب و جهت شیب، ارتفاع، مجاورت با دریا و ...)، از کیفیت لازم برای پیش‌بینی پارامترهای اقلیمی در مقیاس‌های کوچکتر برخوردار نیستند (Wigley et al., 1990). بنابراین به منظور استفاده از خروجی مدل‌های GCM می‌بایست از روش‌های ریز مقیاس‌نمایی استفاده نمود. در این مطالعه از روش آماری شبیه‌ساز LARS-WG 5.5 برای ریز مقیاس‌نمایی استفاده شد. در واقع مدل LARS یک مدل تولید داده‌های هواشناسی (Weather Generator) بوده که بر اساس برازش یک تابع توزیع با ۲۱ پارامتر بر داده‌های مشاهداتی، قادر به بازتولید داده‌های است. همچنین

جدول ۲. سناریوهای تغییر اقلیم مورد استفاده در مطالعه هر سناریو متشکل از یک مدل (BCM2, CGMR, CNCM3, CSMK3, FGOALS, GFCM21, GIAOM, HADCM3, INCM3, IPCM4, MIHR, MPEH5, NCCCSM or NCPCM) و یک سناریوی انتشار

(A2, B1 or A1B) است

BCM2-SRA1B	FGOALS-SRA1B	HADCM3-SRA1B	INCM3-SRB1	MPEH5-SRA2
BCM2-SRB1	FGOALS-SRB1	HADCM3-SRA2	IPCM4-SRA1B	MPEH5-SRB1
CGMR-SRA1B	GFCM21-SRA1B	HADCM3-SRB1	IPCM4-SRA2	NCCCSM-SRA1B
CNCM3-SRA1B	GFCM21-SRA2	HADGEM-SRA1B	IPCM4-SRB1	NCCCSM-SRA2
CNCM3-SRA2	GFCM21-SRB1	HADGEM-SRA2	MIHR-SRA1B	NCCCSM-SRB1
CSMK3-SRA1B	GIAOM-SRA1B	INCM3-SRA1B	MIHR-SRB1	NCPCM-SRA1B
CSMK3-SRB1	GIAOM-SRB1	INCM3-SRA2	MPEH5-SRA1B	NCPCM-SRA2

مدل در بین ۱۸ مدل هیدرولوژیک از لحاظ کیفیت شبیه‌سازی، دسترسی به داده‌های مورد نیاز، سادگی یادگیری، دارا بودن طیف وسیع‌تری از فرآیندهای هیدرولوژیکی و ...، برای استفاده در مطالعات تغییر اقلیم مناسب تشخیص داده شده است.

اما کاربرد صحیح مدل HEC-HMS منوط به واسنجی قابل قبول پارامترهای آن است. با توجه به ضرورت لحاظ ذوب برف در حوضه کرخه، برای استفاده از این مدل می‌بایست مجموعاً تعداد ۴۰ پارامتر واسنجی گردد (۱۸ پارامتر برای نفوذ، ۲ پارامتر برای هیدروگراف، ۳ پارامتر

ج- واسنجی مدل بارش رواناب

مدل‌های GCM داده‌های بارش و دما را در مقیاس روزانه در اختیار قرار می‌دهند. برای تبدیل این داده‌ها به رواناب می‌بایست از یک مدل پیوسته بارش-رواناب استفاده شود. در این مطالعه از مدل HEC-HMS تهیه شده توسط مرکز مهندسی هیدرولوژی ارتش آمریکا استفاده شد. در این مدل الگوریتم Soil Moisture Accounting برای شبیه‌سازی بارش-رواناب پیوسته مورد استفاده قرار می‌گیرد (USACE, 2010). مدل HEC-HMS یک مدل نیمه توزیعی می‌باشد و با توجه به بررسی‌های انجام گرفته توسط Cunderlik (2003)، این

مدار یا Event-Oriented Systematic Approach تبدیل گردید. در روش جدید ابتدا هیدروگرافهای مشاهداتی هر سال بررسی شده و بر اساس عوامل اصلی تولید سیلاب یعنی ذوب برف، سیلاب ناشی از بارش گرم بهاره، بارندگی پاییزه و ... طبقه‌بندی گردیدند. با این طبقه‌بندی می‌توان واسنجی را برای هیدروگرافهایی انجام داد که از پارامترهای کمتری تاثیر می‌گیرند. به عنوان مثال در شکل (۲) هیدروگراف نوامبر ۱۹۹۴ (آبان ۱۳۷۳) ناشی از یک رگبار شدید بوده (بیش از ۱۰۰ میلی‌متر بارش در طی ۴۸ ساعت) که در این رخداد پارامترهای نفوذ عمقی و پارامترهای مربوط به لایه‌های زیرین در آن بی‌تاثیر و یا کم تاثیر بوده‌اند (با تغییر این پارامترها مقدار رواناب و شکل هیدروگراف تغییر نمی‌کند). لذا این هیدروگراف برای واسنجی پارامترهای سطحی خاک و مجاور زمین مناسب است. با این روش از تعدد پارامترها و تاثیر توام آنها در مرحله واسنجی جلوگیری می‌گردد و دقت واسنجی نیز افزایش می‌یابد. دوره ۶ ساله ۲۰۰۰-۱۹۹۴ برای واسنجی مدل و همچنین دوره ۱۹۹۳-۱۹۸۷ به عنوان دوره اعتبارسنجی استفاده شد. لازم به ذکر است که با توجه به پیچیدگی و زمان‌بر بودن فرایند واسنجی دستی، در منابع (Fleming and Neary, 2004 و Gyawali and Watkins, 2013) حداکثر ۵ سال برای دوره واسنجی و اعتبارسنجی استفاده شده است، اما در این مطالعه به منظور پوشش دادن بیشتر فرایندهای موثر در رواناب حوضه کرخه، از دوره زمانی بزرگتری استفاده شده، ضمن اینکه سعی بر آن بوده که طیف وسیعی از وضعیتهای هیدروکلیمایی اعم از سالهای تر و خشک، سالهای پربرف، سالهای با بارش گرم بهاره و ... مد نظر قرار گیرد و همچنین دوره منتخب جزئی از دوره انتخاب شده در بخش هواشناسی باشد. مرحله اعتبارسنجی مدل در این مطالعه تنها به منظور بررسی صحت خروجی روش واسنجی انجام شد و پارامترهای استخراجی تغییر داده نشد.

برای رواناب پایه، ۱۰ پارامتر ذوب برف و ۷ پارامتر برای استخراج مقادیر منطقه‌ای دما و آب معادل برف از مقادیر ایستگاهها). نرم‌افزار HEC-HMS دارای قابلیت واسنجی خودکار نیز می‌باشد. اما به دو دلیل از روش واسنجی خودکار در این مطالعه استفاده نشده است که عبارتند از: خروجی واسنجی خودکار فارغ از روش بهینه‌سازی مورد استفاده و یا پارامترهای اولیه منجر به تولید مقادیر کمینه محلی (Local minimum) می‌شود (Cunderlik and Simonovic, 2004).

ابزار ذوب برف که پس از توسعه اولیه مدل به آن اضافه شده، یک ابزار جانبی بوده و مقادیر ذوب برف را به صورت بارش ثانوی به مدل وارد می‌نماید. لذا بهینه‌سازی پارامترهای ذوب برف در مدل HEC-HMS امکان‌پذیر نیست.

مقادیر اولیه‌ی پارامترها با استفاده از انواع نقشه‌های رقومی (نظیر نقشه‌های خاک، شیب، جهت شیب و ...) و با استفاده از توصیه‌های ارایه شده توسط USACE (۲۰۰۰) و مطالعات Fleming and Neary (2004) و Gyawali and Watkins (2013) محاسبه گردید. پس از استخراج مقادیر اولیه پارامترها، روش واسنجی دستی با رویکرد سیستماتیک یا Systematic Approach of Manual Calibration (Fleming and Neary, 2004; Cunderlik and Simonovic, 2004). در این روش مقادیر اولیه هر پارامتر در هر مرحله از واسنجی  $\pm 10\%$  تغییر داده می‌شود و این فرایند ادامه می‌یابد تا مقدار پارامتر به  $\pm 75\%$  درصد مقدار اولیه برسد. مقدار مناسب هر پارامتر بر اساس معیارهای مختلف نیکویی برازش (که متعاقباً ذکر خواهد شد)، در رواناب شبیه‌سازی شده مورد مقایسه قرار گرفت و در نهایت پارامتر مورد نظر انتخاب گردید. اما ایراد این روش آن است که تاثیر توام پارامترها دیده نمی‌شود. در مطالعه حاضر، روش واسنجی دستی با رویکرد سیستماتیک توسعه داده شد و به واسنجی دستی سیستماتیک پدیده-

$$SREP = \sum_{i=1}^N |QPO_i - QPS_i| / QPO_i \quad (3)$$

$$SREL = \sum_{i=1}^N |QLO_i - QLS_i| / QLO_i \quad (4)$$

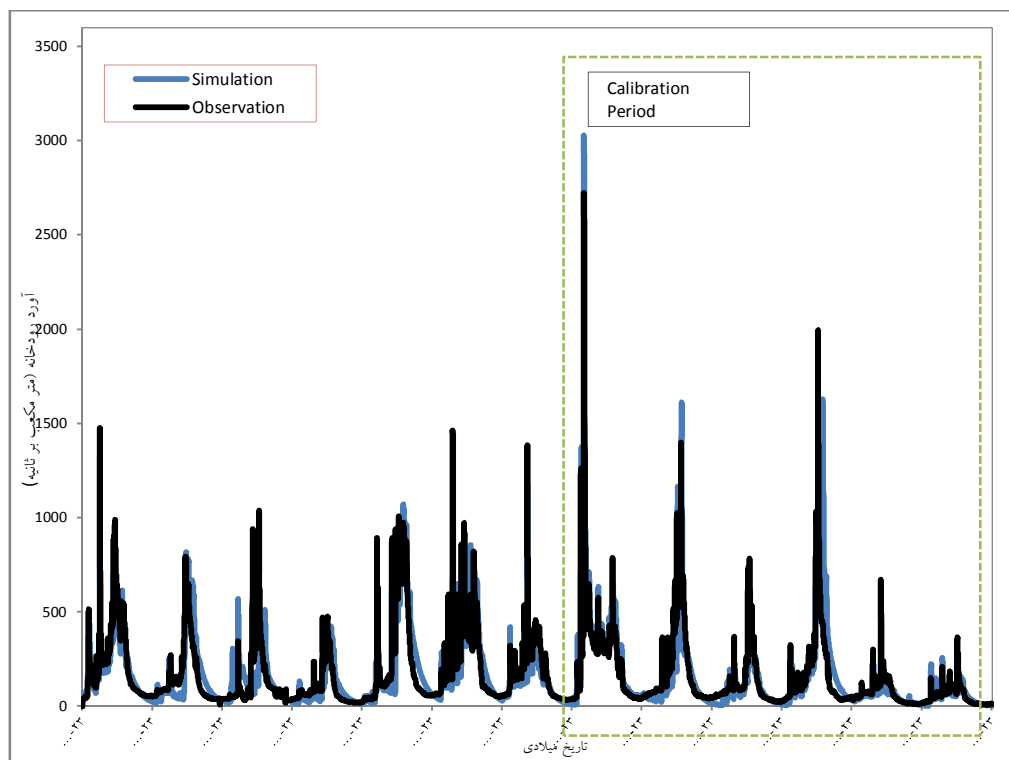
$$NSEC = 1 - (QO_i - QS_i)^2 / (QO_i - QO_m)^2 \quad (5)$$

در فرمول‌های فوق QO آبدهی مشاهداتی، QS آبدهی شبیه‌سازی، QPO مقدار پیک سیلاب مشاهداتی در هر هیدروگراف، QPS مقدار پیک سیلاب شبیه‌سازی در هر هیدروگراف، QLO مقدار حداقل سیلاب مشاهداتی در هر هیدروگراف، QLS مقدار حداقل سیلاب شبیه‌سازی در هر هیدروگراف و  $QO_m$  متوسط آبدهی مشاهداتی برای دوره مورد نظر می‌باشد.

برای ارزیابی صحت واسنجی، ۵ معیار نیکویی برازش ضریب هبستگی (CORL)، مجموع مطلق خطا (SAE)، مجموع مربعات باقیمانده‌ها (SSR)، مجموع خطای نسبی پیک سیلاب (SREP)، مجموع خطای نسبی حداقل جریان (SREL) و ضریب بهره‌وری Nash-Sutcliffe (NSEC) مطابق با مطالعات Gyawali and Watkins, 2013 مورد استفاده قرار گرفت:

$$CORRL: \frac{\sum_{i=1}^N (QO_i - QO_m) \times (QS_i - QS_m)}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (QO_i - QO_m)^2 \times \sum_{i=1}^N (QS_i - QS_m)^2}} \quad (1)$$

$$SAE = \sum_{i=1}^N |QO_i - QS_i| \quad (2)$$



شکل ۲. مقایسه هیدروگراف روزانه شبیه‌سازی شده و مشاهداتی در محل ورودی به سد کرخه (ایستگاه پای پل)

مدل‌های مختلف GCM و سناریوهای مختلف به مدل واسنجی شده فوق‌الذکر، مقادیر آورد رودخانه کرخه برای افق زمانی ۲۰۵۰ محاسبه گردید. با احتساب ۱۵ مدل و ۲ یا ۳ سناریو برای هر مدل جمعا تعداد ۳۵ سری زمانی رواناب استحصال گردید.

با توجه به مراحل مختلف واسنجی در نهایت مقادیر زیر برای معیارهای نیکویی برازش محاسبه و مدل واسنجی گردید (جدول ۳). همچنین شکل (۲) به صورت نمونه هیدروگراف شبیه‌سازی شده و مشاهداتی را برای ایستگاه پای پل، بعنوان ورودی سد کرخه نشان می‌دهد. در نهایت با ورود داده‌های بارندگی و دمای خروجی

جدول ۳. مقادیر معیارهای نیکویی برازش برای دوره اعتبارسنجی

CORRL	NSEC	SREL	SREP	SAE × 10 <sup>-4</sup>	مساحت (km <sup>2</sup> )	ایستگاه هیدرومتری	نام حوضه
۰.۸۶	۰.۵۲	۴.۶۸	۱.۹۰	۱.۸	۵۳۷۰	قورباغستان	قره سو
۰.۷۷	۰.۳۴	۱۱.۴۷	۱.۳۵	۴.۹	۱۰۸۶۰	پل چهر	گاماسیاب
۰.۷۷	۰.۴۷	۵.۰۰	۲.۲۷	۵.۳	۹۱۴۰	پل دختر	کشکان
۰.۷۹	۰.۵	۴.۰۰	۰.۹۹	۱۳.۹	۴۲۶۲۰	پای پل	سد کرخه

استفاده عبارتند از فاصله متوسط، فاصله ساده، فاصله کامل و روش Ward (علیجانی، ۱۳۸۱). برای ارزیابی عملکرد هر یک از روش‌ها در گروه‌بندی سری‌های زمانی آینده بدست آمده از مدل‌های GCM از دو روش انحراف استاندارد درون خوشه‌ای (SIN) و انحراف معیار استاندارد بین خوشه‌ای (SB) استفاده شد که در مطالعه Bunkers and Miller (1996) معیارهای مذکور به تفصیل توضیح داده شده است.

$$S_{IN} = k^{-1} \sum S_k \quad (۶)$$

$$S_B = \left[ (k-1)^{-1} \sum (\bar{x}_k - \bar{x})^2 \right]^{0.5} \quad (۷)$$

در معادلات فوق، k تعداد خوشه‌ها، SK انحراف استاندارد در خوشه k،  $\bar{x}_k$  متوسط خوشه k،  $\bar{x}$  و متوسط کل اعضا می‌باشد. بهترین خوشه‌بندی باید از بیشترین مقدار SIN و کمترین مقدار SB برخوردار باشد. با توجه به نتایج معیارهای فوق روش خوشه بندی Ward برای گروه‌بندی سری‌های زمانی آینده استفاده گردید.

#### ۵- ارزیابی تخصیص آب به روش شبیه‌سازی

در وضعیت کنونی، دو سد کرخه و تنگ هاله در منطقه مطالعاتی در دست بهره‌برداری هستند (شکل ۳). همچنین در پایین‌دست سد کرخه حدود ۱۵۰۰۰۰ هکتار اراضی کشاورزی در دست بهره‌برداری است (با احتساب اراضی کشاورزی دشت عباس)، که مجموعاً ۱.۵ میلیارد متر مکعب آب مصرف می‌کنند. در افق زمانی ۲۰۵۰، شش سد دیگر به مدار بهره‌برداری خواهند پیوست (شکل ۳). ضمن آنکه مجموع اراضی پایین‌دست سد کرخه به حدود ۳۴۸۰۰۰ هکتار افزایش خواهد یافت که متعاقباً

#### د- کاهش عدم قطعیت مدل‌های GCM و سناریوهای انتشار

سری‌های زمانی روزانه بارش و دما (خروجی مدل‌های مختلف GCM و سناریوهای مختلف انتشار) به وسیله مدل واسنجی شده بارش رواناب، به ۳۵ سری زمانی آینده روزانه تبدیل شدند. البته در این مطالعه ارزیابی تخصیص آب به صورت ماهانه مد نظر بوده، لذا با میانگین‌گیری، آینده‌های ماهانه به روزانه تبدیل گردید. این سری‌های زمانی از تغییرات ماهانه وسیعی برخوردار می‌باشد (علیرغم اینکه مقادیر متوسط سالانه نسبتاً نزدیک به هم بوده‌است) و این امر در ارزیابی تخصیص آب موثر خواهد بود. لذا در این مطالعه به منظور کاهش عدم قطعیت برآورد آینده (که بطور غیرمستقیم از عدم قطعیت مدل‌های GCM و سناریوهای انتشار ناشی شده) با استفاده از روش خوشه‌بندی سعی شده سری زمانی ماهانه آینده به گروه‌های مشابه تقسیم‌بندی شده و از هر خوشه یک نماینده انتخاب گردد. با این روش سعی بر آن بود که حداکثر ضریب تغییرات آینده در ماه‌های مختلف حفظ شود و از طرفی با تعداد کمتری از داده‌های آینده، تخصیص انجام گیرد. در این مطالعه چهار روش خوشه‌بندی سلسله مراتبی (Hierarchical Clustering) با فاصله اقلیدسی (Euclidian Distance) مورد مقایسه قرار گرفت (Bunkers and Miller, 1996). بطور کلی تحلیل خوشه‌بندی سعی در گروه‌بندی مشاهداتی دارد که از ساختار مشخصی برخوردار نیستند (Anderberg, 1973). چندین روش برای خوشه‌بندی وجود دارد که هر روش سعی در بیشینه نمودن تشابه درون گروهی و کاهش تشابه بین گروهی دارد (Balling, 1984). چهار روش مورد



مصارف مختلف سد کرخه و سد‌های بالادست در شرایط فعلی و شرایط توسعه را نشان می‌دهد.

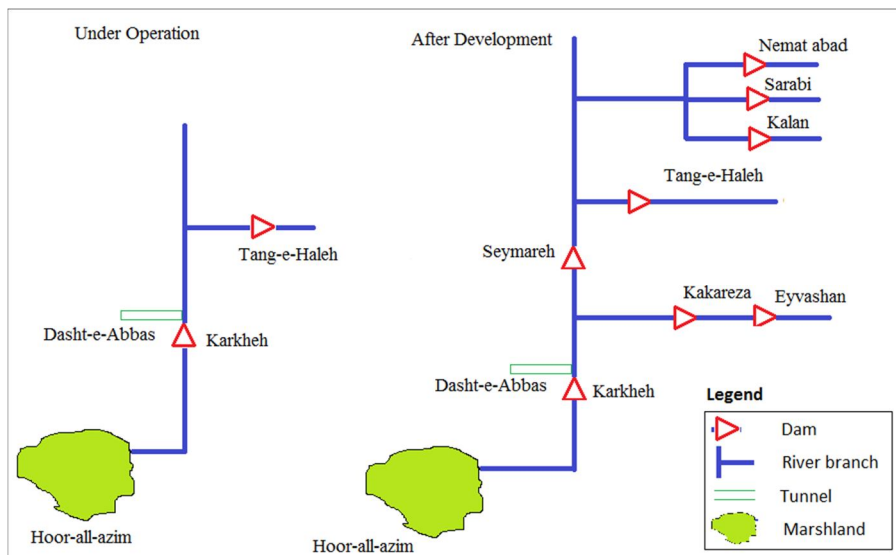
در این مطالعه برای ارزیابی تخصیص آب و اثرات تغییر اقلیم از مدل شبیه‌سازی WEAP و شاخص اطمینان‌پذیری در مقیاس ماهانه استفاده گردید (Hashimoto et al., 1982):

$$R = \frac{\text{No. of } D_i \geq 0}{n} \quad (8)$$

$$D_i = \text{Maximum} [0, (\text{Demand}_i - \text{Supply}_i)] \quad (9)$$

در این معادلات Demand<sub>i</sub> نیاز آبی در ماه i ام، Supply<sub>i</sub> مقدار تامین آب در ماه i ام و D<sub>i</sub> کمبود تامین آب در ماه i ام می‌باشد.

نیازمند ۳.۵ میلیارد متر مکعب آب خواهد بود. نکته قابل توجه دیگر در بهره‌برداری سد کرخه وجود تونل دشت عباس است که ورودی آن در داخل دریاچه سد کرخه، در رقوم ارتفاعی ۱۷۸ متر قرار دارد. در صورت افت رقوم مخزن سد کرخه، دشت عباس قادر به برداشت آب نبوده، اما در همین شرایط تامین آب اراضی پایین دست (استان خوزستان) بدون مشکل ادامه خواهد یافت. این موضوع در سالهای اخیر چالش اجتماعی در منطقه ایجاد کرده است. بنابراین در بهره‌برداری از سد کرخه می‌بایست این موضوع مد نظر قرار گیرد. جدول شماره (۴) مقادیر



شکل ۳. وضعیت طرح‌های در حال بهره‌برداری و در دست توسعه حوضه آبریز سد کرخه

جدول ۴. مقادیر مصرف طرح‌های در حال بهره‌برداری و در دست توسعه حوضه آبریز سد کرخه (میلیون مترمکعب)

نوع مصرف	کرخه		تنگ هاله		سیمره		کلان		سرابی		نعمت‌آباد		ایوشان		طرح کاکارضا
	وضع موجود	وضع افق	وضع موجود	وضع افق	وضع موجود	وضع افق	وضع موجود	وضع افق	وضع موجود	وضع افق	وضع موجود	وضع افق	وضع موجود	وضع افق	
کشاورزی	۱۵۹۲	۳۸۸۳	۲/۴	۲/۴	---	---	---	۷/۸	---	---	---	---	---	---	---
شرب	۲۳۰	۲۳۰	---	---	---	---	---	۱۲	---	---	---	---	---	---	---
صنعت	۲۴	۲۴	۰/۵	۰/۵	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
محیط زیست	۵۸۷	۵۸۷	۰/۵	۰/۵	---	---	---	۱	---	---	---	---	---	---	---

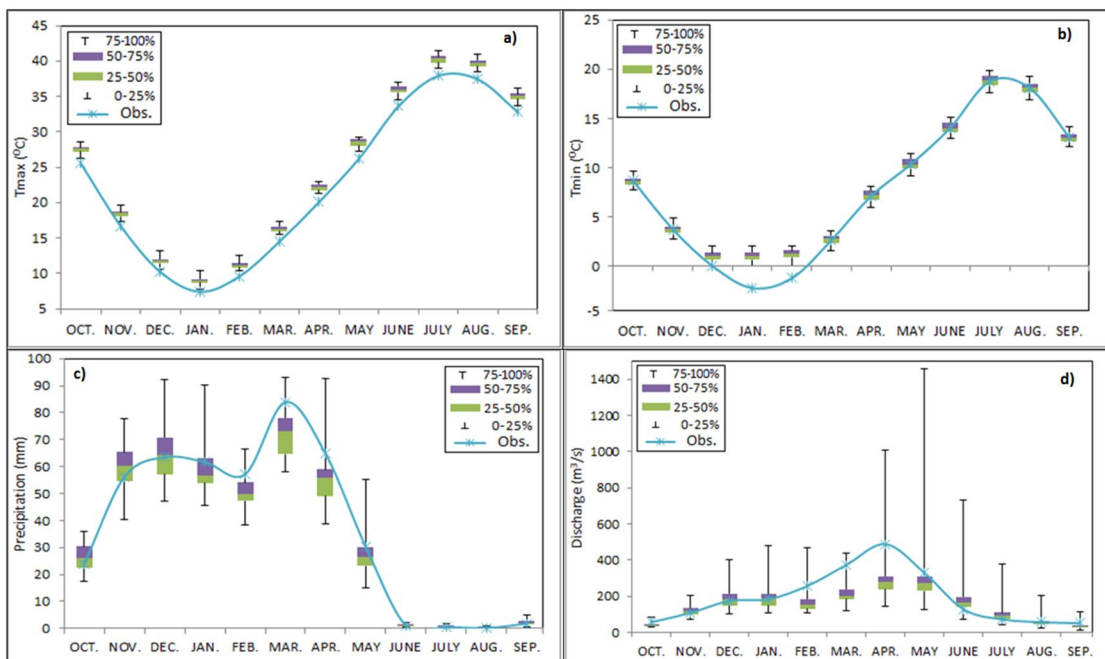
**بحث و نتایج**

**الف- اثرات تغییر اقلیم**

شکل‌های 4a تا 4d مقادیر پیش‌بینی شده‌ی دمای بیشینه و کمینه، بارندگی و جریان رودخانه (به عنوان مثال در ایستگاه پای پل) را برای افق زمانی ۲۰۵۰ نشان می‌دهند. در این اشکال همچنین، مقادیر مشابه مربوط به دوره‌ی پایه (۲۰۰۸-۱۹۷۹) نیز جهت مقایسه ارائه شده است. با توجه به این اشکال، پیش‌بینی می‌شود که بطور متوسط دمای هوا در اواسط قرن جاری بین ۱ تا ۳ درجه سلسیوس افزایش یابد. با توجه و عنایت به این مطلب که دمای کمینه در زمستان از افزایش بیشتری برخوردار خواهد بود. بارندگی در ماههای مختلف از تغییرات مثبت و منفی برخوردار است.

همچنین نتایج حاکی از آن است که بیشترین کاهش بارندگی در فصل زمستان اتفاق خواهد افتاد. شکل 4c

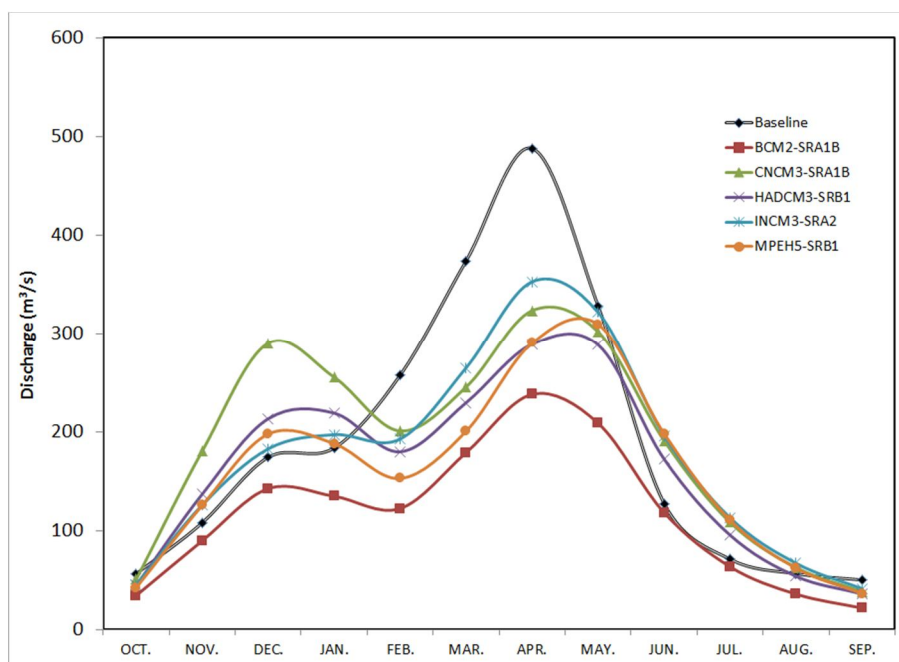
همچنین نشان می‌دهد که عدم قطعیت بسیار بالایی برای پیش‌بینی بارندگی وجود دارد. بطوریکه در برخی از ماهها بارش پیش‌بینی شده توسط مدلها و سناریوهای مختلف از ۵۰ درصد کاهش تا ۲۰۰ درصد افزایش، نسبت به دوره پایه، متغیر بوده است (خصوصا در فصل تابستان). با توجه به شکل 4d عدم قطعیت پیش‌بینی جریان رودخانه به مراتب بیشتر از بارندگی است. بطوریکه کل آورد رودخانه کرخه تا محل سد کرخه در اواسط قرن میلادی جاری بین ۸۳ میلیون متر مکعب تا ۴۴۴ میلیون مترمکعب متغیر است. در حالی که متوسط این مقدار در دوره پایه حدود ۱۸۹ میلیون متر مکعب بوده است. لذا با توجه به دامنه بالای عدم قطعیت، تصمیم‌گیری در خصوص تخصیص آب در شرایط آبی بسیار مشکل خواهد بود.



شکل ۴. پارامترهای پیش‌بینی شده تحت مدل‌ها و سناریوهای مختلف (a) دمای ماکزیمم، (b) دمای مینیمم، (c) بارندگی و (d) آبدی رودخانه کرخه در ورودی سد کرخه

جدول ۵. مقایسه مقادیر متوسط سالانه آبدی تحت مدل‌ها و سناریوهای مختلف با دوره پایه (ایستگاه پای پل)

MPEH5-SRB1	INCM3-SRA2	HADCM3-SRB1	CNCM3-SRA1B	BCM2-SRA1B	دوره پایه	پارامتر
۱۵۹/۵	۱۷۴/۹	۱۶۲/۹	۱۸۶/۹	۱۱۵/۵	۱۸۹	متوسط آبدی (m <sup>3</sup> /s)
-۱۵/۶	-۷/۵	-۱۳/۸	-۱/۱	-۳۸/۹	----	درصد تغییرات



شکل ۵. تغییرات ماهانه آبدهی رودخانه با توجه مدل‌های و سناریوهای منتخب و همچنین دوره پایه (ایستگاه پای پل)

می‌شود، همچنین افزایش سود کل حوضه آبریز مد نظر قرار می‌گیرد. اما در وضعیت دوم هر استان سعی خواهد نمود که سود منطقه‌ای خود را افزایش دهد. ستون پنجم استراتژیهای مدیریتی را برای سازگاری با تغییر اقلیم و کاهش اثرات آن نشان می‌دهد. استراتژیهای مدیریتی شامل ادامه وضع مدیریتی کنونی (Business as Usual)، افزایش راندمان آبیاری، تغییر الگوی کشت و استفاده مجدد از آب است.

با استفاده از مدل WEAP، تحت سناریوهای مختلف تخصیص، اطمینان‌پذیری تامین آب در سطح حوضه آبریز کرخه مورد ارزیابی قرار گرفت. با توجه به ترکیب‌های مختلف سناریوهای تخصیص ارائه شده در جدول شماره ۶، مدل WEAP به تعداد ۱۹۲ بار اجرا شد و معیار اطمینان‌پذیری مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که ساخت سدهای جدید در بالادست و تغییر اقلیم می‌تواند به شدت، اطمینان‌پذیری تامین آب را در پایین دست سد کرخه کاهش داده و همچنین منجر به کاهش ورودیها و وارد آوردن تنش به تالاب هورالعظیم گردد. البته آب برگشتی بخش کشاورزی می‌تواند مشکلات

#### ب- ارزیابی تخصیص آب و راهبردهای سازگاری

جدول ۶ شرایط لحاظ شده اقتصادی-اجتماعی و سناریوهای مختلف شبیه‌سازی را برای تعیین میزان اطمینان‌پذیری تامین آب پایین دست سد کرخه را در آینده نشان می‌دهد. هر سناریو از ترکیبی از شرایط مختلف هیدروکلیمایی، توسعه منابع آب، محیط زیست، مدیریتی، بعلاوه استراتژیهای مختلف مدیریتی تشکیل شده است. ستون اول مربوط به عامل اقلیم بوده که شرایط محتمل هیدرولوژیکی را نشان می‌دهد. ستون دوم سطوح مختلف توسعه منابع آب در حوضه آبریز کرخه را نشان می‌دهد که شامل ساخت سدهای جدید و شبکه‌های آبیاری مطابق با توضیحات فوق است.

ستون سوم این جدول به دیدگاه حمایتی از محیط زیست اختصاص یافته است. بطوریکه با دیدگاه اول اولویت تامین نیاز محیط زیستی مورد توجه قرار می‌گیرد. اما در حالت دوم برای افزایش سود موقت، نیاز محیط زیستی کاهش می‌یابد. ستون چهارم دیدگاههای سازمانی را برای شبیه‌سازی نشان می‌دهد که عبارتند از مدیریت یکپارچه حوضه‌ای و مدیریت استانی. در حالت اول اولویت تامین آب به شرب کل سطح حوضه آبریز داده

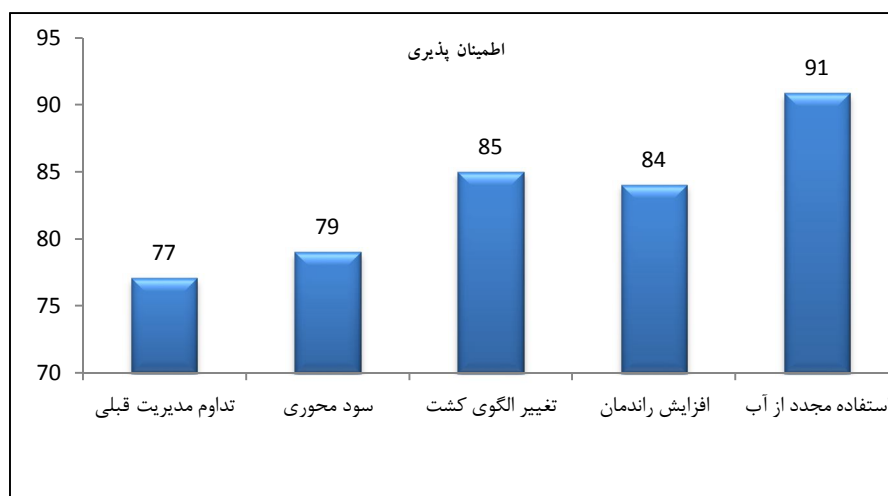
کمبود آب را برای هورالعظیم حل نماید، اما از لحاظ کیفی اثرات آن باید بر روی اکوسیستم این تالاب بررسی گردد.

به عنوان نمونه شکل شماره ۶ مقادیر اطمینان‌پذیری تامین آب کشاورزی پایین‌دست سد کرخه را در بدترین شرایط هیدرولوژیکی (۳۹ درصد کاهش متوسط آورد سالانه) و در صورت احداث سدهای بالادست نشان می‌دهد. با توجه به این شکل ملاحظه می‌شود که در صورت تداوم مدیریت کنونی مقدار اطمینان‌پذیری تامین آب برای اواسط قرن جاری به ۷۷ درصد می‌رسد. در این شرایط واکنش مردم به کمبود آب عدم توجه به نیازهای محیط زیستی خواهد بود که در اینصورت تنها ۲ درصد به

شاخص اطمینان‌پذیری افزوده خواهد شد. این درحالی است که با لحاظ استراتژیهای سازگاری تغییر الگوی کشت، افزایش راندمان آبیاری و استفاده مجدد از آب به ترتیب اطمینان‌پذیری به ۸۵، ۸۴ و ۹۱ درصد تغییر یابد. بنابراین روش استفاده مجدد از آب موثرترین راهکار به شمار می‌آید. این درحالیست که راهکار مذکور از هزینه‌های اولیه و هزینه‌های بهره‌برداری و نگهداری بالاتری برخوردار است. در مقابل راهکار تغییر الگوی کشت، مقدار افزایش اطمینان‌پذیری قابل مقایسه‌ای را فراهم می‌نماید. اما مشکل این روش این است که نیاز، به مشارکت تنگاتنگ کشاورزان در فرآیند اجرا داشته و مسیر دشوارتری را برای عملیاتی شدن در بر خواهد داشت.

جدول ۶. سناریوهای شبیه‌سازی برای ارزیابی تخصیص آب حوضه آبریز کرخه

وضعیت هیدرولوژیکی	توسعه منابع آب	توجه به محیط زیست	دیدگاههای سازمانی	استراتژیهای سازگاری
عدم وجود تغییر اقلیم	بدون لحاظ توسعه	لحاظ بالاترین اولویت به محیط زیست	مدیریت یکپارچه حوضه‌ای	تداوم وضعیت کنونی
BCM2-SRA1B (۳۹ درصد کاهش)	بهره‌برداری سدها و شبکه‌های آبیاری جدید	لحاظ کمترین اولویت به محیط زیست	مدیریت استانی	افزایش راندمان آبیاری
CNCM3-SRA1B (یک درصد کاهش)	-----	-----	-----	تغییر الگوی کشت
HADCM3-SRB1 (۱۴ درصد کاهش)	-----	-----	-----	استفاده مجدد از آب
INCM3-SRA2 (۸ درصد کاهش)	-----	-----	-----	-----
MPEH5-SRB1 (۱۶ درصد کاهش)	-----	-----	-----	-----



شکل ۶. اطمینان‌پذیری تامین آب اراضی کشاورزی پایین‌دست سد کرخه تحت راهبردهای سازگاری مختلف

## نتیجه‌گیری

در این مطالعه اثرات تغییر اقلیم بر روی اطمینان‌پذیری تامین آب پایین‌دست سد کرخه مورد بررسی قرار گرفت. گام‌های اصلی در این مطالعه عبارت بودند از: پیش‌بینی بارش و دما برای اواسط قرن میلادی جاری، واسنجی یک مدل پیوسته بارش-رواناب، پیش‌بینی آورد رودخانه با توجه به اثرات تغییر اقلیم، تحلیل خوشه‌بندی سری‌های زمانی مختلف رواناب تولید شده توسط انواع GCM ها و سناریوهای انتشار و کاهش عدم قطعیت آنها، توسعه یک مدل شبیه‌سازی برای ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر تخصیص آب و در نهایت بررسی تاثیر استراتژی‌های مختلف سازگاری برای افزایش اطمینان‌پذیری تامین آب، تحت تأثیر تغییرات اقلیمی و دیگر عوامل اقتصادی-اجتماعی در حوضه آبریز.

استفاده از تحلیل خوشه‌بندی ضمن استفاده از طیف وسیعی از مدل‌های گردش عمومی جو و سناریوهای انتشار، با ارائه تصویری محتمل تر از آینده و حذف پیش‌بینی‌های متشابه، فرآیند کار را برای اتخاذ تصمیم قوی‌تر، تسهیل می‌کند. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که ساخت سدهای جدید در بالادست و تغییر اقلیم، به شدت اطمینان‌پذیری تامین آب را تحت تاثیر قرار داده و موجب تشدید تنش وارده به تالاب هورالعظیم می‌باشد. استفاده مجدد از آب برگشتی بخش کشاورزی به عنوان موثرترین روش برای افزایش اطمینان‌پذیری تامین آب پایین‌دست سد کرخه شناخته شد. البته تغییر الگوی کشت روش ارزان‌تری بوده که به دلیل نیاز به همکاری کشاورزان، مسیر دشوارتری را برای اجرایی شدن پیش‌رو خواهد داشت.

## فهرست منابع

- شرکت مهندسين مشاور جاماب، ۱۳۷۳. طرح جامع آب ایران- حوضه آبریز کرخه. تهران، ایران.
- عليجانی، ب. ۱۳۸۱. اقلیم‌شناسی سینوپتیک. انتشارات سمت. تهران، ایران.
- وزارت نیروی جمهوری اسلامی ایران، ۱۳۹۱. طرح جامع آب ایران- حوضه آبریز کرخه. تهران، ایران.
- Abrishamchi A., Jamali S. 2011. Hydrological Response to Climate Change Impacts in the Karkheh River Basin. 1st International and 3rd National Conference on Dams and hydropower, Tehran, Iran.
- Anderberg, M. R. 1973. Cluster analysis for applications. Academic Press, 359 pp.
- Ashraf-Vaghefi, S., Mousavi, S. J., Abbaspour, K. C., Srinivasan, R., Yang, H. 2013. Analyses of the impact of climate change on water resources components, drought and wheat yield in semiarid regions: Karkheh River Basin in Iran. Hydrol. Process. Published online in Wiley Online Library.
- Balling, R. C., Jr. 1984. Classification in climatology. Spatial statistics and models, G. L. Gaile and C. J. Willmott, Eds., Reidel, 81-108.
- Brown, C., Werick, W., Leger, W., Fay, D. 2011. A decision-analytic approach to managing climate risks: application to the upper great lakes. J. of the American Water Resources Association, 47 (3): 524-534.
- Bunkers, M. J., Miller Jr. R. 1996. Definition of the Climate Regions in the Northern Plains Using an Objective Cluster Modification Technique. J. Climate, 9: 130-145.
- Cai, Y., P., Huang, Y., P., Tan, Q., Yang, Z., F. 2011a. An integrated approach for climate-change impact analysis and adaptation planning under multi-level uncertainties. Part I: Methodology. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 15: 2779-2790.
- Cai, Y., P., Huang, Y., P., Tan, Q., Liu, L. 2011b. An integrated approach for climate-change impact analysis and adaptation planning under multi-level uncertainties. Part II. Case study. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 15: 3051-3073.
- Cunderlik, J., 2003. Hydrologic model selection. CFCAS Project Rep. I, Dep. of Civil and Environmental Engineering, University of Western Ontario.
- Cunderlik, J., Simonovic, S. P. 2004. Calibration, verification, and sensitivity analysis of the HEC-HMS hydrologic model. CFCAS Project Rep. IV, Dep. of Civil and Environmental Engineering, University of Western Ontario.
- Dessai, S., Hulme, M. 2007. Assessing the robustness of adaptation decisions to climate

- رزاقی، پ.، بابازاده، ح. و شوریان، م. ۱۳۹۲. توسعه سیاست جیره‌بندی بهره‌برداری از مخزن چندمنظوره در شرایط محدودیت منابع آب با استفاده از مدل MODSIM 8.1. مجله حفاظت منابع آب و خاک، ۳ (۲): ۱۱-۲۳.

- semi-arid Karkheh basin, Iran. PHD dissertation, Delft Univ. of Technology, Delft.
- Raje, D., Mujumdar, P.P. 2010. Dynamic modelling of water demand, water availability and adaptation strategies for power plants to global change. *Advances in Water Resources*, 33: 312-326.
- Randall, D. A., Wood, R. A., Bony, S., Colman, R., Fichet, T., Fyfe, J., Kattsov, V., Pitman, A., Shukla, J., Srinivasan, J., Stouffer, R. J., Sumi A., Taylor, K. E. 2007. Climate Models and Their Evaluation. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Semenov, M. A., Barrow, E. M. 2002. LARS-WG: a stochastic weather generator for use in climate impact studies (Version 3.0). User Manual.
- Teegavarapu, R., S., V. 2010. Modeling climate change uncertainties in water resources management models. *Environmental Modelling & Software*, 25: 1261-1265.
- U. S. Army Corps of Engineers (USACE). 2000. Hydrologic modeling system HEC-HMS technical reference manual. Rep. CPD-74A, Hanover, NH.
- U. S. Army Corps of Engineers (USACE). 2010. Hydrologic modeling system HEC-HMS user's manual. Rep. CPD-74A, Hanover, NH.
- Wei, X., Declan, C., Erda, L., Yinlong, X., Hui, J., Jinhe, J., Ian, H., Yan, L., 2009. Future cereal production in China: The interaction of climate change, water availability and socio-economic scenarios, *Global Environment Change*, 19, 34-44.
- Wigley, T., Jones, P.D., Briffa, K.R. Smith, G. 1990. Obtaining sub-grid-scale information from coarse-resolution general circulation model output. *Journal of Geophysical Research* 95: doi: 10.1029/89JD01600. issn: 0148-0227.
- change uncertainties: A case study on water resources management in the East of England. *Global Environmental Change*, 17: 59-72.
- Fleming, M., Neary, V. 2004. Continuous hydrologic modeling study with the hydrologic modeling system. *J. Hydrol. Eng.*, 9 (3): 175-183.
- Gohari A., Eslamian S., Abedi-Koupaei J., Massah Bavani A., Wang D., Madani K. 2013. Climate change impacts on crop productivity in Iran's Zayandeh-Rud River basin. *Science of the Total Environment*, 442: 405-419, doi:10.1016/j.scitotenv.2012.10.029.
- Gyawali, R., Watkins, D. W., 2013. Continuous Hydrologic Modeling of Snow-Affected Watersheds in the Great Lakes Basin Using HEC-HMS. *J. Hydrol. Eng.*, 18: 29-39.
- Hashimoto, T., Stedinger, J. R., Loucks, D. P. 1982. Reliability, resiliency and vulnerability criteria for water resource system performance evaluation. *Water Resour. Res.*, 18(1): 14-20.
- Huntjens, Lebel, L., Pahl-Wostl, C., Schulze, R., Camkin, J., Kranz, N., 2011. Institutional design propositions for the governance of adaptation to climate change in the water sector. *Global Environment Change*, 22: 67-81.
- IPCC AR4 SYR, 2007. Core Writing Team; Pachauri, R. K., Reisinger, A., ed. *Climate Change 2007: Synthesis Report, Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. IPCC, ISBN 92-9169-122-4.
- IPCC SRES, 2000. Nakićenović, N., Swart, R., ed. *Special Report on Emissions Scenarios: A special report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (book). Cambridge University Press, ISBN 0-521-80081-1, 978-052180081-5 (pb: 0-521-80493-0, 978-052180493-6).
- Jamali, S., Abrishamchi, A., Madani, K. 2013. Climate Change and Hydropower Planning in the Middle East: Implications for Iran's Karkheh Hydropower Systems. *J. Energy Eng.*, 139(3): 153-160.
- Masih, I. 2011. Understanding hydrological variability for improved water management in the



## Climate change effects on reliability of water delivery in downstream of Karkheh river basin and its adaptation strategies

Manouchehr Farajzadeh<sup>1\*</sup>, Kaveh Madani<sup>2</sup>, Alireza Massah<sup>3</sup> and Rahman Davtalab<sup>4</sup>

1\*) Professor, Department of Remote Sensing and GIS, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran, Corresponding author email: [farajzam@modares.ac.ir](mailto:farajzam@modares.ac.ir)

2) Professor, Centre for Environmental Policy, Imperial College London, London SW7 2AZ, UK

3) Associate Professor, Department of Irrigation and Drainage Engineering, College of Abureyhan, University of Tehran, Iran

4) Ph.D. Candidate, Department of Remote Sensing and GIS, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

Received: 28-10-2013

Accepted: 21-06-2014

### Abstract

Increasing population and water demands caused a considerable challenge for decision makers in water sector. Also climate change in near future will exacerbate the situation. This study evaluated the impacts of climate change on water supply reliability and allocation in Karkheh river basin. In this study for assessing the effects of climate change on Karkheh river basin water supply, 15 GCMs and several greenhouse gas emission scenarios were applied to evaluate the changes of precipitation and temperature for time horizon 2050s. Then multiple river flow time series (RFTS) were generated by feeding future temperature and precipitation into a calibrated rainfall-runoff model. Due to the uncertainty of GCMs for generating future temperature and precipitation, the forecasted river flow for mid-century had a wide range of changes between -50% to +36%. Therefore for dealing with uncertainty of GCMs, the hierarchical clustering method was used to identify 5 clusters from 35 RFTS and subsequently 1 representative member from each clusters. Also three management strategies of crop pattern change, increasing irrigation efficiency and water reuse for adaptation of climate change was evaluated. Results showed that building new dams in upstream will decrease the reliability of agriculture water supply to less than 70%. Also, the water reuse with more than 90% reliability, is the most effective strategy for dealing with climate change. The crop pattern change includes comparable water demand reliability, but less costs. However, execution of crop pattern change is a low-cost strategy, depending on farmers cooperation.

**Keywords:** adaptation strategies; climate change; Karkheh river basin; water allocation