

## Investigation of the Big Karun Basin Features Considering Operation of the Study Construction Development Projects Based on Dynamic System Approach

MEHRI ABDI-DEHKORDI<sup>1\*</sup>, OMID BOZORG-HADDADAND<sup>1</sup>, ABDOLRAHIM SALAVITABAR<sup>2</sup>

1. Faculty of Agricultural Engineering and Technology, Dept. of Irrigation and Reclamation, College of Agriculture and Natural Resources, Univ. of Tehran, Karaj, Tehran, Iran

2. Managing Director Consultant on Water Resources of Mahab Ghodss Consulting Engineering Company.

(Received: July. 29, 2019- Revised: Oct. 9, 2019- Accepted: Oct. 14, 2019)

### ABSTRACT

In this study, the impact of operation of the study/construction inter-basin water transfer and agricultural development projects in Big Karun Basin has been investigated. In this regard, the Big Karun Basin including six under operating dams, five under operating inter-basin water transfer projects, 12 drinking and industrial consumers, seven fish farmers, 34 agricultural consumers has been simulated using a dynamic system approach. In addition to quantitative investigation, water quality has been also modeled. Then the behavior of the system was investigated under operation condition of seven under study/construction inter-basin water transfer and nine agricultural development projects. In both conditions, the capability of Big Karun Basin in terms of power generation and water supply for downstream demand was assessed in a different sector based on reliability, resiliency, and vulnerability performance indices. The results indicate 28% reduction in firm hydropower energy generated by the Big Karun Basin system in the condition of operating under study/construction inter-basin water transfer project compared to the present condition. This is very important due to the key role of the Big Karun Basin in hydropower generation throughout the country, especially during the peak consumption hours. Also, the results indicate that the amount of reliability, resiliency, and vulnerability in south Karun will be 70.9, 60.67, and 36.33 for present condition and 51.3, 49.4, and 72.66 for operating under study/construction inter-basin water transfer and agricultural development projects. Quantitative and qualitative zoning figures at each consumer site show although the impact of operating under study/construction inter-basin water transfer and agricultural development projects in northern Karun and Dez rivers is less than the one in southern Karun River basin, however, ignoring integrated water management and continuing system operation process based on the present condition results not only reduction in hydropower generation, but also the inability of Big Karun Basin in terms of quantitative and qualitative supplying of consumers demands in southern Karun Basin and especially in the end parts.

**Keywords:** System dynamic approach, Inter-basin water transfer, Performance indices, Agricultural development, Big Karun basin.

---

\*corresponding author's E-mail: [Abdi.Dehkordi@ut.ac.ir](mailto:Abdi.Dehkordi@ut.ac.ir)

## بررسی سیمای حوضه آبریز کارون بزرگ در شرایط بهره‌برداری از طرح‌های توسعه‌ی در دست مطالعه یا اجرا مبتنی بر رویکرد پویایی سامانه

مهری عبدی دهکردی<sup>۱\*</sup>، امید بزرگ‌حداد<sup>۱</sup>، عبدالرحیم صلوی تبار<sup>۲</sup>

۱. گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، کرج، ایران.

۲. مشاور مدیر عامل در مسائل منابع آب، شرکت مهندسی مشاور مهتاب قدس.

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۵/۷ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۸/۷/۱۷ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۸/۷/۲۲)

### چکیده

در این مطالعه تأثیر بهره‌برداری از طرح‌های انتقال بین حوضه‌ای آب و طرح‌های توسعه کشاورزی در دست مطالعه یا اجرا در رفتار سامانه حوضه آبریز کارون بزرگ بررسی شده است. برای این منظور سامانه حوضه آبریز کارون بزرگ مشتمل بر شش سد در حال بهره‌برداری، پنج طرح انتقال بین حوضه‌ای آب موجود، ۱۲ مصرف‌کننده شرب و صنعت، هفت مصرف‌کننده پرورش ماهی و ۳۴ مصرف‌کننده کشاورزی با استفاده از یک مدل مبتنی بر رویکرد پویایی سامانه (SDM) شبیه‌سازی گردید. همچنین در این مدل وسیع و پیچیده علاوه بر کمیت آب، کیفیت آن نیز مدل‌سازی شده است. در ادامه رفتار سامانه در شرایط بهره‌برداری از ۷ طرح انتقال بین حوضه‌ای آب در دست مطالعه یا اجرا و نه طرح توسعه کشاورزی در دست مطالعه یا اجرا مورد بررسی قرار گرفت. در هر دو حالت توانایی سامانه حوضه آبریز کارون بزرگ در تولید انرژی برق‌آبی و نیز تأمین نیازهای مصرف‌کنندگان پایین‌دست بر اساس شاخص‌های کارایی اطمینان‌پذیری، بازگشت-پذیری و آسیب‌پذیری ارزیابی شد. نتایج نشان‌دهنده آن است که در صورت بهره‌برداری از تمامی طرح‌های انتقال بین حوضه‌ای آب در دست مطالعه یا اجرا، انرژی تولیدشده در سامانه به میزان ۲۸٪ نسبت به شرایط موجود کاهش خواهد یافت. این میزان به دلیل نقش حوضه آبریز کارون بزرگ در تولید انرژی برق‌آبی کل کشور به‌ویژه در طول ساعات‌های اوج مصرف از اهمیت بسیار برخوردار است. همچنین نتایج بیان‌کننده آن است که در دو حالت شرایط موجود و بهره‌برداری کامل از طرح‌های انتقال بین حوضه‌ای آب و طرح‌های توسعه کشاورزی در دست مطالعه یا اجرا، اطمینان‌پذیری، بازگشت-پذیری و آسیب‌پذیری سامانه در محل رودخانه کارون جنوب به‌ترتیب مقادیر ۷۰/۹، ۶۰/۶۷ و ۳۶/۳۳ (شرایط موجود) و ۵۱/۳، ۴۹/۴ و ۷۲/۶۶ را به خود اختصاص خواهد داد. ترسیم نمودارهای پهنه‌بندی کمیت و کیفیت جریان‌های برداشتی در محل هر یک از مصرف‌کنندگان، مؤکد این نکته است که اگرچه در محدوده رودخانه‌های کارون شمال و دز تأثیرپذیری مصرف‌کنندگان از بهره‌برداری از طرح‌های انتقال بین حوضه‌ای آب و طرح‌های توسعه کشاورزی در دست مطالعه یا اجرا به‌مراتب کم‌تر از حوضه رودخانه کارون جنوب است اما در صورت ادامه روند بهره‌برداری از سامانه در شکل کنونی آن و بدون توجه به مفهوم مدیریت یکپارچه منابع و مصارف علاوه بر کاهش قابل‌توجه تولید انرژی برق‌آبی، سامانه حوضه آبریز کارون بزرگ هم از نظر کمی و هم از نظر کیفی توانایی تأمین نیازهای مصرف‌کنندگان واقع در حوضه رودخانه کارون جنوب و به‌ویژه بخش‌های انتهایی آن را نخواهد داشت.

**واژه‌های کلیدی:** رویکرد پویایی سامانه، انتقال بین حوضه‌ای آب، توسعه کشاورزی، شاخص‌های کارایی، حوضه آبریز کارون بزرگ.

### مقدمه

در طول فصل‌های پربارش و سپس انتقال آن، می‌توان بخشی از نیاز مناطق کم‌آب را در طول فصل‌های خشک تأمین نموده و بدین ترتیب کمبود آب را کاهش داد. اگرچه انتقال بین حوضه‌ای آب، نقش مهمی را در توسعه اجتماعی و اقتصادی حوضه مقصد ایفا می‌کند اما این مسئله نیازمند بررسی دقیق سود و زیان‌های ناشی از انتقال آب در حوضه‌های مبدأ و مقصد می‌باشد.

توزیع نامتقارن مکانی و زمانی منابع آب در سرتاسر جهان باعث شده است تا بسیاری از مناطق جهان با مشکلات ناشی از کمبود آب روبه‌رو شوند. بدین ترتیب انتقال آب از حوضه‌هایی با رودخانه-های دارای آب فراوان به حوضه‌هایی با منابع آب کم به‌عنوان یک راهکار مطرح شده است. در این شرایط با ذخیره آب مازاد بر نیاز

بررسی اثرات و پیامدهای طرح‌های انتقال بین حوضه‌ای آب مورد توجه پژوهشگران بسیاری بوده است. در بیش‌تر این مطالعات به بررسی اثرات مثبت و منفی زیست‌محیطی و اقتصادی-اجتماعی طرح‌های انتقال بین حوضه‌ای آب پرداخته شده است. کنترل سیلاب در حوضه مبدأ (Wang, 2004)، احیای بوم‌سامانه و بهبود تنوع زیستی در حوضه مقصد Rivera Monroy (et al., 2013)، بهبود وضعیت سفره‌های آب زیرزمینی (Chen et al., 2001; Larsona et al., 2008) و بهبود وضعیت تالاب‌ها و رودخانه‌ها و بهبود کیفیت آب (Gijbers and Loucks, 1999; Chen et al., 2008) از جمله پیامدهای مثبت و برهم زدن بوم-سامانه رودخانه در حوضه مبدأ (Yan et al., 2012)، شور شدن اراضی (Ma and Wang, 2011)، گسترش آلودگی و بیماری (Sible et al., 2015; Gupta and Van Der Zaag, 2008) و تأثیر کانال‌های باز انتقال آب بر مهاجرت و مرگ‌ومیر حیوانات (Davies et al., 1992)، از جمله پیامدهای منفی انتقال بین حوضه‌ای آب به‌شمار می‌روند.

در کنار محدودیت منابع آب، افزایش جمعیت، توسعه شهر-نشینی، پیشرفت صنعت و گسترش کشاورزی باعث تشدید روند افزایشی مصرف از منابع آب و به‌تبع آن ورود فاضلاب‌های شهری، پساب‌های صنعتی و زه‌آب‌های کشاورزی به منابع آب سطحی و در نتیجه کاهش کیفیت آنها شده است. در این شرایط مدیریت صحیح، یکپارچه و پایدار سامانه‌های منابع آب ضروری به‌نظر می‌رسد (Jahandideh-Tehrani et al., 2014). از طرفی تأمین نیازهای غذایی جمعیت روبه رشد، افزایش بهره‌برداری از طرح‌های کشاورزی را به‌دنبال دارد. بهره‌برداری از چنین طرح‌هایی بدون توجه به توان و ظرفیت سامانه می‌تواند تبعات جبران‌ناپذیری را با خود به همراه داشته باشد.

روش پویایی سامانه، که در این مطالعه از آن استفاده شده است، یک روش شناخته‌شده برای فراهم کردن مفهوم و چارچوب تئوری به‌منظور مدل‌سازی پویای تخصیص منابع آب هست. اولین کاربردهای مدل‌های پویا در منابع آب را می‌توان در مطالعات اواخر سال‌های دهه ۱۹۶۰ جستجو نمود (Hamilton, 1969). پس از آن به‌شکل گسترده‌ای از مفهوم پویایی سامانه‌ها در زمینه‌های متفاوتی مانند تجزیه و تحلیل قوانین آب و برنامه‌ریزی بلندمدت حوضه رودخانه (Simonovic et al., 1997)، تهیه قوانین بهره-برداری از مخازن با هدف کمینه کردن سیلاب‌های پایین‌دست (Ahmad and Simonovic, 2000)، شبیه‌سازی تولید انرژی برق-آبی در سامانه مخازن برق‌آبی (Jahandideh-Tehrani et al., 2014) و ... استفاده شده است.

روشنایی سامانه، که در این مطالعه از آن استفاده شده است، یک روش شناخته‌شده برای فراهم کردن مفهوم و چارچوب تئوری به‌منظور مدل‌سازی پویای تخصیص منابع آب هست. اولین کاربردهای مدل‌های پویا در منابع آب را می‌توان در مطالعات اواخر سال‌های دهه ۱۹۶۰ جستجو نمود (Hamilton, 1969). پس از آن به‌شکل گسترده‌ای از مفهوم پویایی سامانه‌ها در زمینه‌های متفاوتی مانند تجزیه و تحلیل قوانین آب و برنامه‌ریزی بلندمدت حوضه رودخانه (Simonovic et al., 1997)، تهیه قوانین بهره-برداری از مخازن با هدف کمینه کردن سیلاب‌های پایین‌دست (Ahmad and Simonovic, 2000)، شبیه‌سازی تولید انرژی برق-آبی در سامانه مخازن برق‌آبی (Jahandideh-Tehrani et al., 2014) و ... استفاده شده است.

### حوضه آبریز کارون

رودخانه‌های پر آب کارون و دز از دامنه‌های غربی رشته کوه زاگرس در غرب ایران سرچشمه گرفته و پس از خروج از محدوده کوهستان در پهنه دشت خوزستان جریان می‌یابند و پس از تلاقی با یکدیگر رودخانه کارون بزرگ را تشکیل می‌دهند. این حوضه در داخل ارتفاعات زاگرس میانی واقع شده و محدود به مشخصات جغرافیایی ۰'۴۸-۰'۳۰ و ۰'۵۲-۰'۳۰ درجه طول شرقی و ۰'۳۰-۰'۰۵ و ۰'۳۴-۰'۰۵ درجه عرض شمالی است. حوضه آبریز کارون در محدوده عملکرد سازمان آب منطقه‌ای استان‌های خوزستان، فارس، کهگیلویه و بویراحمد، لرستان، مرکزی، چهارمحال و بختیاری و اصفهان واقع شده است. در این میان استان خوزستان بیش‌ترین سهم را در مساحت و تولید آب دارد و پس از آن استان چهارمحال و بختیاری حائز رتبه دوم است. در شکل (۱) نقشه حوضه آبریز کارون بزرگ نسبت به کشور ایران نشان داده شده است.

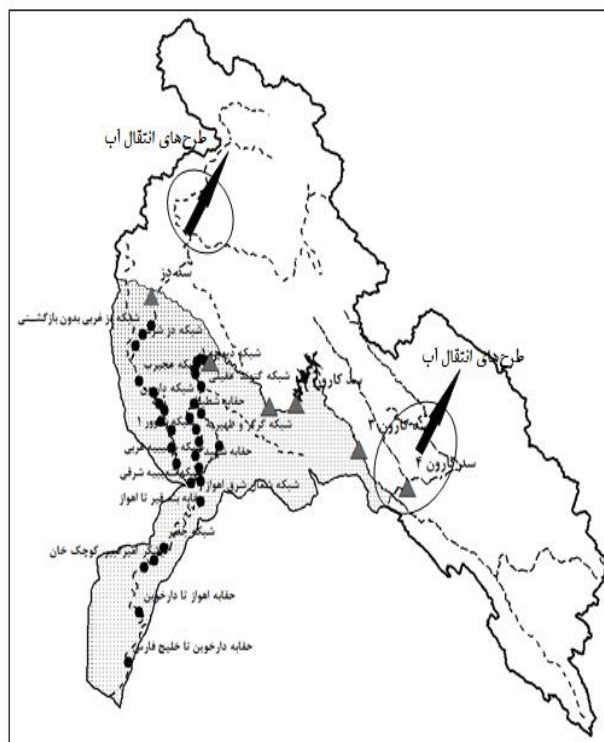
بررسی اثرات و پیامدهای طرح‌های انتقال بین حوضه‌ای آب مورد توجه پژوهشگران بسیاری بوده است. در بیش‌تر این مطالعات به بررسی اثرات مثبت و منفی زیست‌محیطی و اقتصادی-اجتماعی طرح‌های انتقال بین حوضه‌ای آب پرداخته شده است. کنترل سیلاب در حوضه مبدأ (Wang, 2004)، احیای بوم‌سامانه و بهبود تنوع زیستی در حوضه مقصد Rivera Monroy (et al., 2013)، بهبود وضعیت سفره‌های آب زیرزمینی (Chen et al., 2001; Larsona et al., 2008) و بهبود وضعیت تالاب‌ها و رودخانه‌ها و بهبود کیفیت آب (Gijbers and Loucks, 1999; Chen et al., 2008) از جمله پیامدهای مثبت و برهم زدن بوم-سامانه رودخانه در حوضه مبدأ (Yan et al., 2012)، شور شدن اراضی (Ma and Wang, 2011)، گسترش آلودگی و بیماری (Sible et al., 2015; Gupta and Van Der Zaag, 2008) و تأثیر کانال‌های باز انتقال آب بر مهاجرت و مرگ‌ومیر حیوانات (Davies et al., 1992)، از جمله پیامدهای منفی انتقال بین حوضه‌ای آب به‌شمار می‌روند.

در کنار محدودیت منابع آب، افزایش جمعیت، توسعه شهر-نشینی، پیشرفت صنعت و گسترش کشاورزی باعث تشدید روند افزایشی مصرف از منابع آب و به‌تبع آن ورود فاضلاب‌های شهری، پساب‌های صنعتی و زه‌آب‌های کشاورزی به منابع آب سطحی و در نتیجه کاهش کیفیت آنها شده است. در این شرایط مدیریت صحیح، یکپارچه و پایدار سامانه‌های منابع آب ضروری به‌نظر می‌رسد (Jahandideh-Tehrani et al., 2014). از طرفی تأمین نیازهای غذایی جمعیت روبه رشد، افزایش بهره‌برداری از طرح‌های کشاورزی را به‌دنبال دارد. بهره‌برداری از چنین طرح‌هایی بدون توجه به توان و ظرفیت سامانه می‌تواند تبعات جبران‌ناپذیری را با خود به همراه داشته باشد.

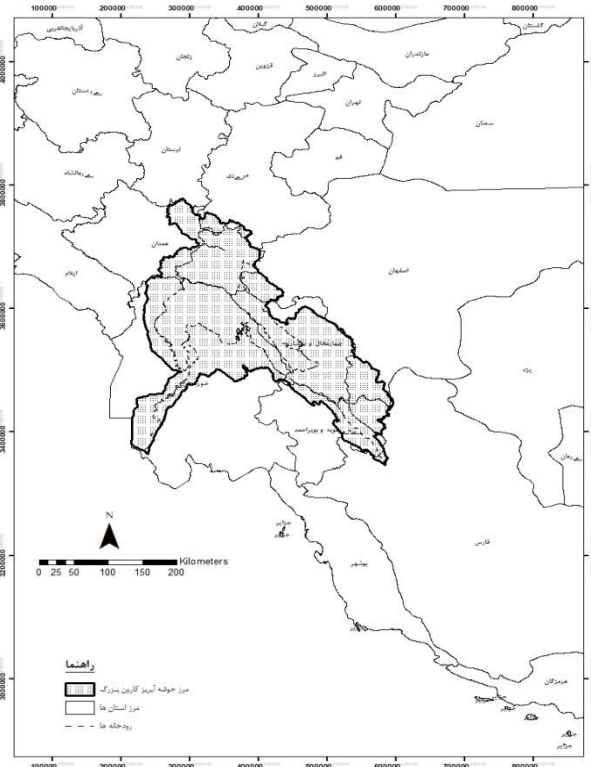
روش پویایی سامانه، که در این مطالعه از آن استفاده شده است، یک روش شناخته‌شده برای فراهم کردن مفهوم و چارچوب تئوری به‌منظور مدل‌سازی پویای تخصیص منابع آب هست. اولین کاربردهای مدل‌های پویا در منابع آب را می‌توان در مطالعات اواخر سال‌های دهه ۱۹۶۰ جستجو نمود (Hamilton, 1969). پس از آن به‌شکل گسترده‌ای از مفهوم پویایی سامانه‌ها در زمینه‌های متفاوتی مانند تجزیه و تحلیل قوانین آب و برنامه‌ریزی بلندمدت حوضه رودخانه (Simonovic et al., 1997)، تهیه قوانین بهره-برداری از مخازن با هدف کمینه کردن سیلاب‌های پایین‌دست (Ahmad and Simonovic, 2000)، شبیه‌سازی تولید انرژی برق-آبی در سامانه مخازن برق‌آبی (Jahandideh-Tehrani et al., 2014) و ... استفاده شده است.

و پرورش ماهی مناطق پایین دست را بر عهده دارند. در جدول (۱)، برخی از مشخصات فنی و عمومی سدهای برق آبی در حال بهره‌برداری در حوضه‌های کارون و دز ارائه شده است.

تاکنون سد دز بر روی رودخانه دز و سدهای کارون ۴، کارون ۳، کارون ۱، گذراندن و گتوند بر روی رودخانه کارون مورد بهره‌برداری قرار گرفته‌اند. این سدها در کنار تولید انرژی برق آبی وظیفه تأمین آب مورد نیاز بخش‌های شرب و صنعت، کشاورزی



(ب)



(الف)

شکل ۱- (الف) گستره حوضه آبریز کارون بزرگ، (ب) منابع آب سطحی، سدهای در حال بهره‌برداری و طرح‌های انتقال آب بین حوضه‌ای و موقعیت هر یک از مصرف‌کنندگان

جدول ۱- مشخصات فنی و عمومی سدهای در حال بهره‌برداری در حوضه آبریز کارون بزرگ

دز	گتوند	گذراندر	کارون ۱	کارون ۳	کارون ۴	واحد	پارامترها
۲۵۶/۶	۴۶۶	۴۱۲	۳۹۲/۵	۳۳۲/۸	۱۹۰	مترمکعب در ثانیه	متوسط آبدهی سالانه
۳۵۴	۲۴۶	۳۸۲	۵۴۲	۸۵۰	۰۳۲/۱	متر از سطح دریا	رقوم تاج سد
						-	نوع بدنه سد
		سنگ‌ریزهای	بتنی	بتنی	بتنی		
	دوقوسی	با هسته رسی	دوقوسی	دوقوسی	دوقوسی		
۳۵۲	۲۳۰	۳۷۲	۵۳۲	۸۴۵	۰۲۵/۱	متر از سطح دریا	رقوم نرمال
۳۱۰	۱۸۵	۳۶۳	۵۰۰	۸۰۰	۹۹۶	متر از سطح دریا	رقوم کمینه بهره‌برداری
۱۲۶/۱	۱۱۷	۱۸۱	۰۹۵/۱	۱۴۱/۱	۲۶۶/۱	میلیون مترمکعب	حجم متناظر رقوم کمینه
۰۴۸/۲	۰۵۰/۳	۴۶	۳۱۸/۱	۶۸۹/۱	۷۴۸/۷	میلیون مترمکعب	حجم فعال مخزن
۵۲۰	۵۰۰/۱	۰۰۰/۲	۰۰۰/۲	۰۰۰/۲	۰۰۰/۱	مگاوات	ظرفیت نصب
۸۹	۹۳	۹۲	۹۰	۹۲/۴	۹۲	%	راندمان نیروگاه
۱۶۵	۱۳۰	۱۳۸	۱۵۴	۱۶۷	۱۶۲	متر	تراز طراحی
۳۵۷	۲۶۵/۱	۶۰۰/۱	۱۹۱	۱۷۲	۱۷۱	مترمکعب در ثانیه	دبی طراحی

موجود و در دست مطالعه یا اجرا و پرورش ماهی و طرح‌های انتقال آب موجود و در دست مطالعه یا اجرا در حوضه رودخانه‌های

در جدول‌های (۲) و (۳) به ترتیب نیاز آبی سالانه مصرف‌کنندگان بخش‌های شرب و صنعت، طرح‌های کشاورزی

دز و کارون ارائه شده‌اند.

جدول ۲- نیاز آبی سالانه طرح‌های انتقال آب موجود و در دست مطالعه یا اجرا در حوضه رودخانه‌های دز و کارون (مترمکعب بر ثانیه)

کارون		دز		نوع طرح
نیاز	نام طرح	نیاز	نام طرح	
۱۰/۲	کوه‌رنگ ۱	۵/۸	دز به قمرود	موجود
۱۰/۲	کوه‌رنگ ۲	۳/۸	تونل چشمه‌لنگان	
-	-	۲/۶	تونل خدنگستان	
۷/۹	کوه‌رنگ ۳	۶/۳	سد و تونل گوکان	در دست مطالعه یا اجرا
۳۵/۱	بهشت‌آباد	۲/۱	سد کمال صالح	
۷/۴	سولکان	-	-	
۱/۹	سد شهید	-	-	
۷/۳	سد بیده	-	-	
-	-	-	-	

#### رویکرد پویایی سامانه<sup>۱</sup>

روش SD، یک روش شبیه‌سازی شیء‌گرا بر اساس رابطه‌های بازخوردی است. اولین بار فارستر (۱۹۸۵) از رویکرد SD استفاده نمود. پس از آن کاربرد روش SD در زمینه‌های مختلف و از جمله مدیریت منابع آب به‌طور گسترده‌ای رواج یافته است. واژه پویایی در این روش به معنای تغییر مقادیر متغیرها در طول زمان است. در این رویکرد تمامی عوامل و متغیرها بر روی هم و خودشان تأثیر گذاشته و نمی‌توانند به‌صورت مجزا و منفرد مورد بررسی قرار گیرند. استفاده از حلقه‌های بازخوردی، نمودارهای جریان و متغیرهای جریان و حالت، موجب تمایز این روش از دیگر روش‌ها می‌شود. در این روش حلقه‌های بازخوردی به‌خوبی ارتباط میان متغیرها و تأثیرات آنها بر روی یکدیگر را بیان می‌کند.

با توجه به پیچیدگی رابطه‌های مخزن برق‌آبی، می‌توان از یک حلقه تکرارشونده در روش SD جهت ساده‌سازی روابط مخزن استفاده کرد. در مطالعه حاضر برای شبیه‌سازی سامانه از نرم‌افزار Vensim استفاده شده است. اگرچه این نرم‌افزار مختص علم آب نمی‌باشد، اما به‌دلیل امکان اعمال تغییرات، تحلیل حساسیت و تغییر روابط حاکم از کارایی مناسبی جهت کاربرد در مسائل منابع آب برخوردار است. زیرا به‌عنوان مثال در نرم‌افزار ویپ روابط و فرضیات تعریف شده و غیرقابل تغییر هستند، در اجرا محدودیت ایجاد می‌کنند. در نرم‌افزار ویپ، جهت محاسبه توان تولیدی در هر دوره، تراز آب مخزن تنها در ابتدای دوره لحاظ می‌شود و از هیچ روشی نمی‌توان آن را به حجم مخزن وابسته نمود. حال آنکه در معادلات اصلی حاکم بر مخازن برق‌آبی، به‌منظور محاسبه توان

تولیدی، لازم است تراز آب مخزن در کل دوره زمانی لحاظ گردد. در روش SD می‌توان از طریق تعریف رابطه حجم-سطح-ارتفاع، تراز آب مخزن در هر دوره را به حجم آن وابسته نمود.

#### مدل‌سازی سدها بر مبنای رویکرد پویایی سامانه

پیش از این عنوان شد که سدهای واقع در حوضه آبریز کارون بزرگ وظیفه تولید انرژی برق‌آبی را بر عهده دارند. علاوه بر این تأمین نیازهای مصرف‌کنندگان بخش‌های مختلف شرب و صنعت، کشاورزی و پرورش ماهی نیز بر عهده سدهای واقع در حوضه قرار دارد. در شکل (۲) مدل مفهومی مربوط به تولید انرژی برق‌آبی در حوضه آبریز کارون بزرگ و مبتنی بر رویکرد SD نشان داده شده است.

در شکل‌های (۳) تا (۵) نمودارهای حالت و جریان مورد استفاده به‌منظور شبیه‌سازی مخازن برق‌آبی، طرح‌های انتقال بین حوضه‌ای آب و کیفیت جریان برداشتی ترسیم شده است.

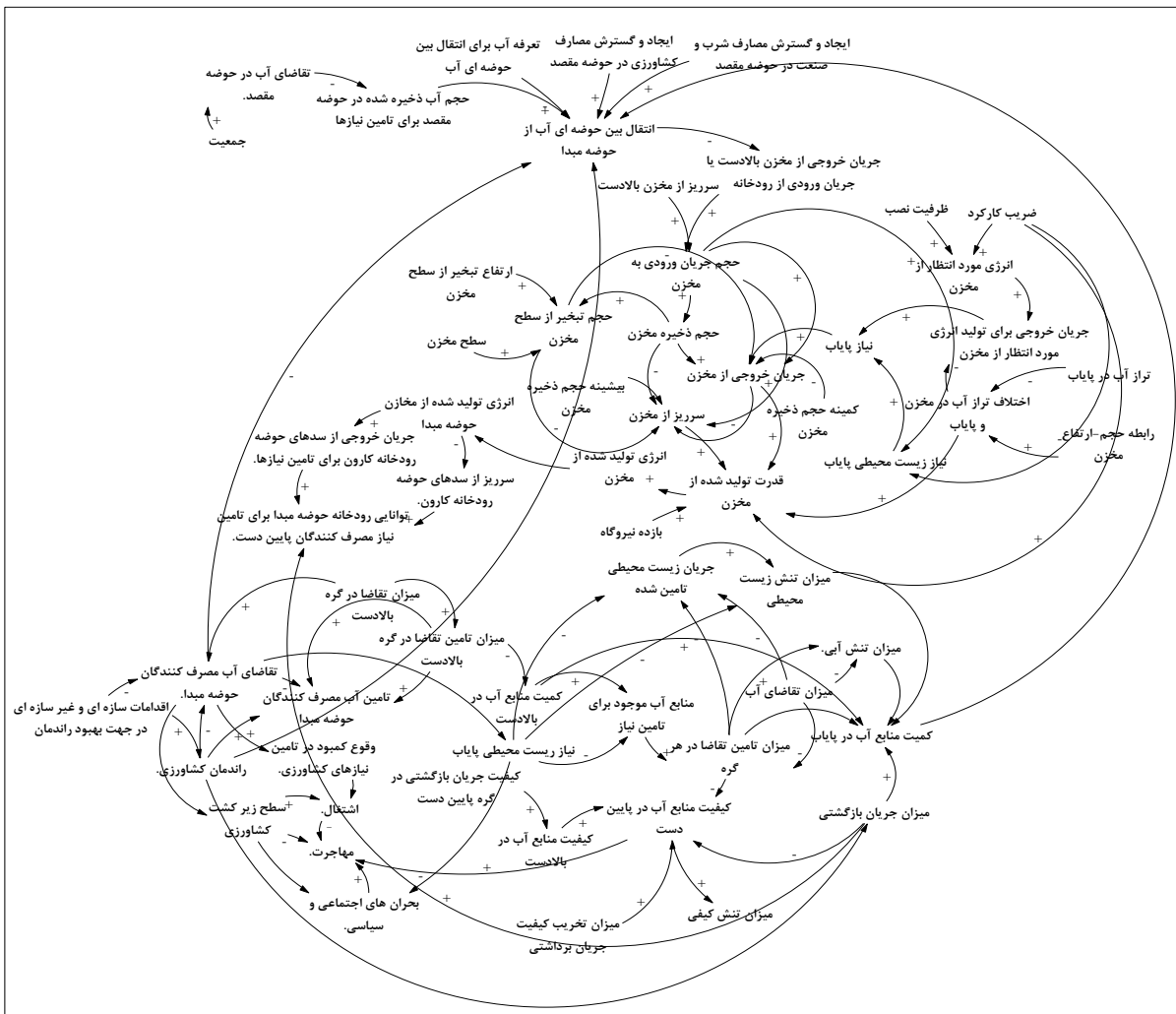
از شکل (۲) مشخص است که برای شبیه‌سازی هر کدام از سدها لازم است اطلاعاتی شامل کمینه و بیشینه حجم ذخیره مخزن، رابطه حجم-سطح-ارتفاع مخزن، بازده نیروگاه، ضریب کارکرد، ظرفیت نصب، تبخیر از سطح مخزن، نیاز زیست‌محیطی پایاب و غیره در اختیار باشند. نیاز زیست‌محیطی پایاب بر اساس روش مونتانا (Orth and Maughan, 1981) محاسبه شده است. لازم به ذکر است شبیه‌سازی هر یک از مخازن بر مبنای سیاست تصمیم‌گیری استاندارد<sup>۲</sup> (SOP) صورت گرفت (Bozorg-Haddad, 2014; Jahandideh-Tehrani et al., 2014). در هر زمان می‌توان حجم ذخیره مخزن را بر اساس رابطه

ورودی به مخزن  $i$  در طول دوره  $t$   $RE_{i,t}$  = جریان رهاسازی شده از مخزن  $i$  در طول دوره  $t$   $Loss_{i,t}$  = حجم تلفات از مخزن  $i$  (تبخیر و نشت) در طول دوره  $t$   $SP_{i,t}$  = حجم سرریز از مخزن  $i$  در طول دوره  $t$  و  $t =$  دوره بهره‌برداری (ماه) می‌باشند.

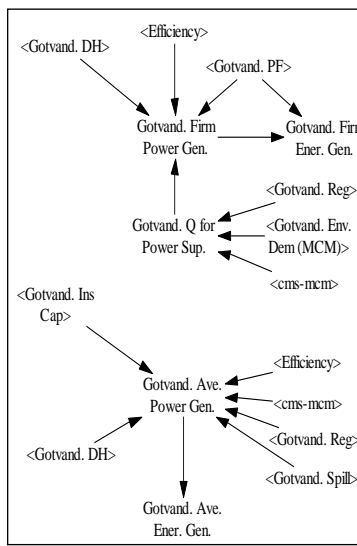
توازن جرمی و مطابق رابطه (۱) محاسبه نمود.  
 (رابطه ۱)  $S_{i,t+1} = S_{i,t} + Q_{i,t} - RE_{i,t} - Loss_{i,t} - SP_{i,t}$   
 در این رابطه،  $S_{i,t+1}$  = حجم ذخیره مخزن  $i$  در ابتدای دوره  $t+1$   
 $S_{i,t}$  = حجم ذخیره مخزن  $i$  در ابتدای دوره  $t$   $Q_{i,t}$  = جریان

جدول ۳- نیاز آبی سالانه مصرف‌کنندگان در حوضه رودخانه‌های دز، کارون شمال و کارون جنوب (مترمکعب بر ثانیه)

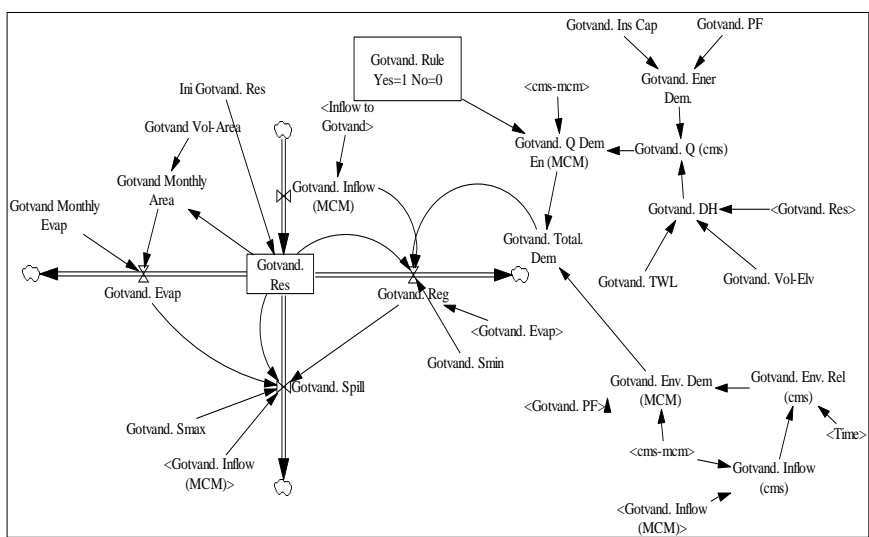
نوع نیاز	دز		کارون شمال		کارون جنوب	
	شبکه	نیاز	شبکه	نیاز	شبکه	نیاز
آب شرب	آب شرب دزفول	۳/۰	آب شرب مسجدسلیمان	۰/۴	شرب ملائانی و ویس	۱/۱
صنعت	صنعت نیشکر دز	۵/۷	آب شرب گتوند	۰/۵	نیروگاه رامین و زرگان	۵/۲
و- شرب	-	-	آب شرب لالی	۰/۱	آب شرب اهواز و توابع	۱۷/۹
صنعت	-	-	آب شرب شوستر	۱/۷	آب شرب ماهشهر-بندر امام	۰/۷
-	-	-	صنعت نیشکر کارون شمال	۵/۷	صنعت نیشکر کارون جنوبی	۱۷/۰
-	-	-	آب شرب هفتگل و رامهرمز	۰/۴	شرب آبادان و خرمشهر	۵/۵
حقاب‌های	حقاب سد مخزنی تا حرمله	۵/۷	حقابه گرگر	۷/۵	حقابه اهواز تا دارخوین	۴۱/۹
کشاورزی	حقابه حرمله تا بند قیر	۱۲/۷	حقابه گتوند تا بند میزان	۰/۳	حقابه بند قیر تا اهواز	۸/۵
-	-	-	حقابه شطیط	۷/۳	حقابه دارخوین تا خلیج فارس	۳/۰
-	-	-	حقابه شهید	۲/۳۸	-	-
<u>طرح‌های موجود:</u>						
-	دز غربی بدون آب برگشتی	۲۳/۸	دیمچه ۲	۳/۰	شبکه شمال شرق اهواز	۱۰/۱
-	دز غربی با آب برگشتی	۱۴/۰	شبکه دیمچه شرقی	۳/۱	شبکه جفیر	۲۲/۱
-	دز شرقی و سیلی	۲۴/۵	شبکه گتوند و عقیلی	۲/۸	نیشکر امیرکبیر-میرزا کوچک خان	۲۳/۹
-	عجیروپ	۱/۹	دیمچه ۱ غربی نیشکر	۲۲/۵	نیشکر فارابی-سلمان فارسی	۳۶/۳
-	نیشکر میاناب	۶/۲	شبکه داریون	۱/۹	شبکه آبادان و خرمشهر	۲۹/۴
-	نیشکر هفت‌تپه	۱۱/۵	میاناب شوستر	۱۵/۳	-	-
شبکه‌های	شبکه شاوور ۱	۴/۳	نیشکر خمینی-شرقی	۹/۵	-	-
آبیاری	نیشکر خمینی-غربی	۳/۲	شبکه شرق گرگر و ظهیریه	۲/۴	-	-
-	نیشکر دهخدا	۱۱/۶	-	-	-	-
<u>طرح‌های در دست مطالعه</u>						
<u>یا اجرا:</u>						
-	بالارود	۳/۴	-	-	شمال غرب اهواز	۳/۲
-	شبکه شاوور ۲	۶/۵	-	-	جنوب شرق اهواز - ناحیه ۱	۱۲/۵
-	شبکه شاوور ۳	۷/۵	-	-	جنوب شرق اهواز - ناحیه ۲	۵/۲
-	شبکه شاوور ۴	۰/۷	-	-	جنوب شرق اهواز - ناحیه ۳	۲/۸
-	-	-	-	-	جنوب شرق اهواز - ناحیه ۴	۴/۴
-	پرورش ماهی اندیمشک	۱۲/۵	پرورش ماهی مسجدسلیمان	۱۱/۰	پرورش ماهی اهواز تا خرمشهر	۲/۶
-	پرورش ماهی پرورش ماهی دز	۰/۴	پرورش ماهی کارون شمالی	۰/۶	پرورش ماهی آبادان	۷/۲
-	-	-	پرورش ماهی گرگر	۱/۷	پرورش میگوی بهمینشیر	۷/۴



شکل ۲- مدل مفهومی مورد استفاده در مدل سازی حوضه آبریز کارون بزرگ بر مبنای SDM

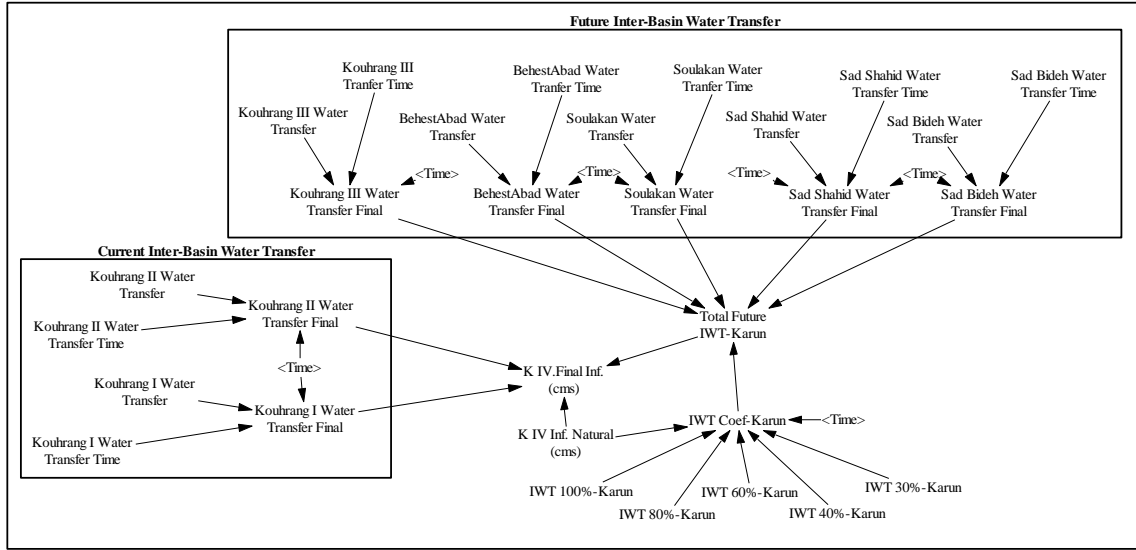


(ب)

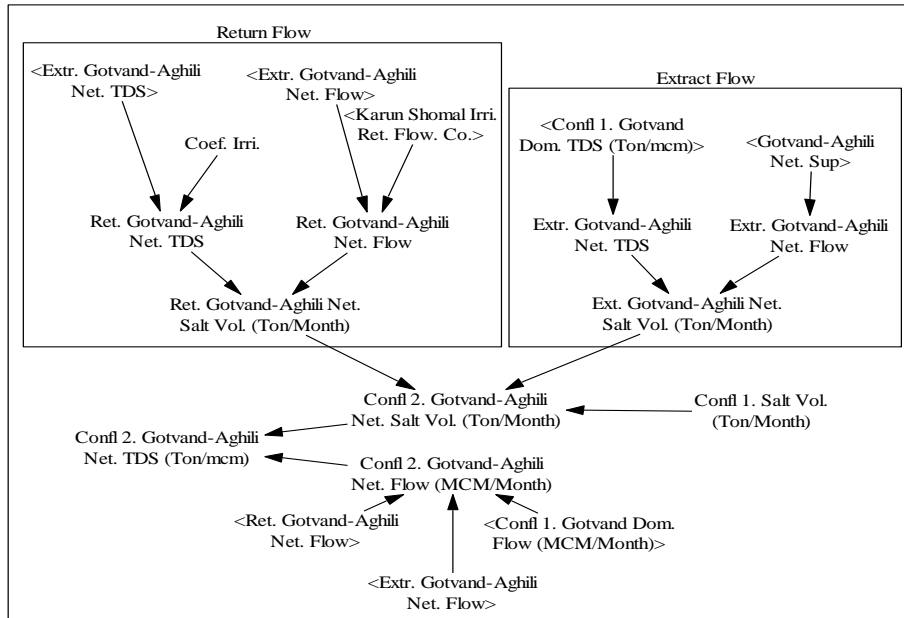


(الف)

شکل ۳- (الف) شبیه سازی مخزن یک سد با هدف تولید انرژی برق آبی، (ب) برآورد قدرت و انرژی تولید شده



شکل ۴- شبیه‌سازی طرح‌های انتقال بین حوضه‌ای آب



شکل ۵- شبیه‌سازی کیفیت جریان برداشتی در مصرف‌کننده کشاورزی (شبکه نوین آبیاری گتون‌دعقلی)

$$P_{i,t} = \frac{RE_{i,t} \times g \times E_i \times (H_{i,t} - TW_i)}{PF_i \times 1000} \quad (\text{رابطه ۳})$$

$$En_{i,t} = \frac{P_{i,t} \times PF_i \times nh_t}{1000} \quad (\text{رابطه ۴})$$

$$Smin_i \leq S_{i,t} \leq Smax_i \quad (\text{رابطه ۵})$$

$$P_{i,t} \geq PPC_i \rightarrow P_{i,t} = PPC_i \quad (\text{رابطه ۶})$$

در این رابطه‌ها،  $P_{i,t}$  = قدرت تولید شده در مخزن  $i$  در زمان  $t$  (مگاوات)،  $g$  = شتاب ثقل،  $E_i$  = راندمان مجموع توربین و ژنراتور در مخزن  $i$ ،  $RE_{i,t}$  = میزان جریان خروجی از نیروگاه در مخزن  $i$  در زمان  $t$  ( $m^3/s$ )،  $H_{i,t}$  = تراز آب در مخزن  $i$  در زمان  $t$  (متر)،  $TW_i$  = تراز آب پایاب در مخزن  $i$  (متر)،  $PF_i$  = ضریب کارکرد نیروگاه مخزن  $i$  که نشان‌دهنده نسبت ساعات کارکرد نیروگاه در طول شبانه‌روز است،  $nh_t$  = تعداد ساعات در ماه  $t$

سرریز از یک مخزن را می‌توان بر اساس رابطه (۲) تعیین نمود.

(رابطه ۲)

$$S_{i,t} + Q_{i,t} - RE_{i,t} - Loss_{i,t} \geq Smax_i \rightarrow SP_{i,t} = S_{i,t} + Q_{i,t} - RE_{i,t} - Loss_{i,t} - Smax_i$$

در این رابطه  $Smax_i$  = بیشینه حجم ذخیره مخزن  $i$  است. بدیهی است اگر رابطه (۲) برقرار نباشد میزان سرریز صفر خواهد بود.

قدرت و انرژی تولیدشده از یک مخزن را می‌توان مطابق رابطه‌های (۳) و (۴) محاسبه کرد. همچنین لازم است به قیدهای تعریف شده در رابطه‌های (۵) و (۶) توجه نمود.



$$Vul. = \frac{\sum_{t=1}^T (Dem_t - Sup_t)}{\sum_{t=1}^T Dem_t} \quad (\text{رابطه ۱۴})$$

در این رابطه ها،  $Rel.$  = اطمینان پذیری تعدادی،  $n_\alpha$  = دوره ای که در آن  $\alpha$  درصد از نیاز تأمین می شود،  $T$  = تعداد کل دوره ها در طول افق بهره برداری از سامانه،  $Res.$  = بازگشت پذیری،  $n_{f \rightarrow s}$  = دوره ای که بعد از وقوع شکست بهره برداری از سامانه با موفقیت همراه بوده است،  $T_F$  = تعداد کل دوره هایی که بهره برداری از سامانه با شکست روبرو بوده است،  $Vul.$  = آسیب پذیری،  $Dem_t$  = میزان نیاز در دوره  $t$  و  $Sup_t$  = میزان تأمین در دوره  $t$  می باشند.

شاخص اطمینان پذیری یک سامانه بیان گر میزان توانایی آن سامانه در تأمین قابل قبول هدف های مورد نظر است که می تواند به ازای هر بازه زمانی یا به ازای کل دوره بهره برداری در یک سامانه محاسبه شود. خطر پذیری سامانه در واقع مکمل اطمینان پذیری آن می باشد. به عبارت دیگر اطمینان پذیری به معنای احتمال عدم وقوع شکست در بهره برداری از یک سامانه و در طول مدت زمان مشخص می باشد. همچنین شاخص کارایی بازگشت پذیری سامانه می تواند به عنوان احتمال وقوع وضعیتی تعریف شود که حالت بعدی یک سامانه پس از یک حالت غیر رضایت بخش (شکست)، یک حالت رضایت بخش (موفقیت) باشد. بر اساس این تعریف، هر چه بازگشت پذیری یک سامانه بیشتر باشد، توانایی آن سامانه نسبت به رویارویی با تغییرات عوامل مؤثر بر آن، بیشتر تر بوده و اطمینان پذیری تأمین هدف ها توسط آن سامانه بیشتر خواهد بود. شاخص آسیب پذیری، معیاری است که وسعت اختلاف بین حالت رضایت بخش و حالت غیر رضایت بخش را برای سامانه مورد بررسی نشان می دهد. هر چه شاخص آسیب پذیری در سامانه ای کم تر باشد، قابلیت آن سامانه در حفظ شرایط پایدار و رضایت بخش و انعطاف پذیری سامانه در رویارویی با شرایط غیر رضایت بخش بیشتر است

در مطالعه حاضر تمامی سدهای سامانه بر اساس قاعده SOP و با هدف تولید انرژی برق آبی شبیه سازی شدند. سپس طرح های انتقال بین حوضه های آب در دست مطالعه یا اجرا و نیز طرح های توسعه کشاورزی در دست مطالعه یا اجرا به سامانه اضافه شده و عملکرد سامانه حوضه آبریز کارون بزرگ به منظور تولید انرژی برق آبی از نظر کمی و تأمین نیاز مصارف متعدد پایین دست از نظر کمی و کیفی و بر مبنای معیارهای کارایی مورد بررسی قرار گرفت. در این شرایط براساس اطمینان پذیری ۹۰٪ و با تغییر نسبت ساعات کارکرد نیروگاه، انرژی مطمئن و متوسط محاسبه شدند.

$En_{i,t}$  = انرژی تولید شده (مگاوات بر ساعت)،  $Smin_i$  = کمینه حجم ذخیره مخزن  $i$  و  $PPC_i$  = ظرفیت نصب مخزن  $i$  (مگاوات) می باشند.

در تولید انرژی برق آبی و به ویژه در سامانه حوضه آبریز کارون بزرگ که در بالادست منابع آب از کیفیت بسیار مناسب برخوردار هستند، کمیت آب از اهمیت بسیاری برخوردار است. با این وجود در تأمین نیازهای مصرف کنندگان و ذینفعان شرب، صنعت، پرورش ماهی و کشاورزی علاوه بر کمیت منابع آب، کیفیت آن نیز اهمیت دارد. بر این اساس به SDM مذکور قابلیت شبیه سازی کیفی بر اساس معادله توازن جرمی و بر مبنای پارامتر کل جامدات محلول<sup>۱</sup> (TDS) نیز افزوده شده است (رابطه های (۷) تا (۱۱)) (Asheghmoala, 2015).

$$S.V_{ext}(t) = Sup_t \times TDS_{up}(t) \quad (\text{رابطه ۷})$$

$$S.V_{ret}(t) = Sup_t \times Ce_{sup} \times TDS_{up}(t) \times Co_{TDS} \quad (\text{رابطه ۸})$$

$$S.V_{d}(t) = S.V_{up}(t) - S.V_{ext}(t) + S.V_{ret}(t) \quad (\text{رابطه ۹})$$

$$Inf_{d}(t) = Inf_{up}(t) + Sup_t(1 - Ce_{sup}) \quad (\text{رابطه ۱۰})$$

$$TDS_{d}(t) = \frac{S.V_{d}(t)}{Inf_{d}(t)} \quad (\text{رابطه ۱۱})$$

در این رابطه ها،  $S.V_{ext}(t)$  و  $S.V_{ret}(t)$  = به ترتیب حجم نمک برداشتی و بازگشتی از طریق جریان برداشتی و بازگشتی در زمان  $t$   $Sup_t$  = جریان برداشت شده به منظور تأمین نیاز در زمان  $t$   $TDS_{up}(t)$  و  $TDS_{d}(t)$  = به ترتیب TDS جریان در بالادست و پایین دست در زمان  $t$   $Ce_{sup}$  = درصد جریان بازگشتی که بسته به نوع مصرف کننده متفاوت است،  $Co_{TDS}$  = ضریب تغییرات TDS در جریان بازگشتی که بسته به نوع مصرف کننده متفاوت است،  $S.V_{up}(t)$  و  $S.V_{d}(t)$  = به ترتیب حجم نمک در بالادست و پایین دست نقطه مورد بررسی در زمان  $t$  و  $Inf_{up}(t)$  و  $Inf_{d}(t)$  = به ترتیب جریان در بالادست و پایین دست نقطه مورد بررسی در زمان  $t$  هستند.

### شاخص های کارایی

معیارهایی که نشان دهنده چگونگی و میزان واکنش طرح ها و سیاست های مدیریتی به تغییرات موجود در سامانه های منابع آب می باشند، شاخص های کارایی نامیده می شوند. از جمله این شاخص ها می توان به اطمینان پذیری (Reliability)، بازگشت پذیری (Resiliency) و آسیب پذیری (Vulnerability) (رابطه های (۱۲) تا (۱۴)) اشاره نمود (Zolghadr-Asli et al., 2018).

$$Rel. = \frac{\sum_{t=1}^T n_\alpha}{T} \quad (\text{رابطه ۱۲})$$

$$Res. = \frac{\sum_{t=1}^{T-1} n_{f \rightarrow s}}{T_F} \quad (\text{رابطه ۱۳})$$

مقادیر نزدیک به یک نشان‌دهنده همپوشانی بالا میان مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده خواهد بود. شاخص RSR مبین میزان پراکندگی متغیرها است. هرگاه واریانس داده‌های شبیه‌سازی شده به‌طور کامل با واریانس داده‌های مشاهداتی برابر باشد، RSR برابر با یک خواهد شد. هرچه مقدار RSR به یک نزدیک‌تر باشد مدل شبیه‌سازی از دقت بالاتری برخوردار است. PBIAS میانگین تمایل داده‌های شبیه‌سازی شده به مقادیری بیشتر یا کمتر از مقادیر مشاهداتی را نشان می‌دهد. مقدار ایده‌آل این شاخص صفر است. مقادیر مثبت نشان‌دهنده تمایل مدل به تخمین پایین و مقادیر منفی معرف تمایل مدل به تخمین مقادیری بیشتر از مقادیر مشاهداتی است.

در نهایت جهت سنجش عملکرد مدل پس از محاسبه شاخص‌های آماری، ارزیابی نهایی بر اساس جدول (۴) انجام می‌گردد (Tavakoli, 2018)

شاخص‌های آماری سنجش کارایی مدل واسنجی شده جهت ارزیابی کارایی مدل شاخص‌های آماری ضریب ناش-ساتکلیف، نسبت انحراف معیار داده‌های شبیه‌سازی شده به داده‌های مشاهداتی و ضریب اریبی مطابق رابطه‌های (۱۵) تا (۱۷) محاسبه شده‌اند.

$$NS = 1 - \frac{\sum_{t=1}^n (Q_t^o - Q_t^s)^2}{\sum_{t=1}^n (Q_t^o - \bar{Q}^o)^2} \quad \text{(رابطه ۱۵)}$$

$$RSR = \frac{\sum_{t=1}^n (Q_t^s - \bar{Q}^s)}{\sum_{t=1}^n (Q_t^o - \bar{Q}^o)} \quad \text{(رابطه ۱۶)}$$

$$PBIAS = \frac{\sum_{t=1}^n (Q_t^o - Q_t^s) * 100}{\sum_{t=1}^n Q_t^o} \quad \text{(رابطه ۱۷)}$$

در این رابطه‌ها، NS=ضریب ناش-ساتکلیف، RSR=نسبت انحراف معیار داده‌های شبیه‌سازی شده به داده‌های مشاهداتی، PBIAS=درصد اریبی،  $Q_t^s$  = مقدار شبیه‌سازی شده در زمان t،  $Q_t^o$  = مقدار مشاهده شده در زمان t،  $\bar{Q}^s$  = میانگین مقادیر شبیه‌سازی شده،  $\bar{Q}^o$  = میانگین مقادیر مشاهده شده و t= زمان هستند.

ضریب ناش-ساتکلیف در بازه صفر و یک تغییر کرده و

جدول ۴- رتبه‌بندی عملکرد عمومی مدل بر اساس شاخص‌های آماری در گام زمانی ماهانه

شاخص آماری			ارزیابی عملکرد
PBIAS	NS	RSR	
PBIAS <±10	0.75 ≤ NSE ≤ 1.00	RSR ≥ 0.70	خیلی خوب
±10 ≤ PBIAS ≤ ±15	0.65 ≤ NSE ≤ 0.75	0.60 ≤ RSR ≤ 0.70	خوب
±15 ≤ PBIAS ≤ ±25	0.50 ≤ NSE ≤ 0.65	0.50 ≤ RSR ≤ 0.60	قابل قبول
PBIAS ≥ ±25	NSE ≤ 0.50	0.00 ≤ RSR ≤ 0.50	غیرقابل قبول

در شرایط بهره‌برداری از طرح‌های انتقال بین حوضه‌ای آب نیز اطمینان‌پذیری ۹۰٪ برای بهره‌برداری از سدها مدنظر قرار گرفت. لازم به ذکر است سامانه در طول دوره آماری ۳۷-۱۳۳۶ تا ۹۲-۱۳۹۱ مورد ارزیابی قرار گرفته است. این دوره دربرگیرنده دوره‌های تر، نرمال و خشک می‌باشد. از این میان دوره آماری ۹۱-۱۳۸۰ برای واسنجی و اعتبارسنجی مدل مورد استفاده قرار گرفت. بدین ترتیب دوره آماری ۹۱-۱۳۸۲ برای واسنجی و دوره آماری ۸۱-۱۳۸۰ برای اعتبارسنجی مدل به‌کار گرفته شدند. زیرا به‌دلیل طبیعی‌سازی جریان در بالادست مخازن سدها براساس سال شروع بهره‌برداری از سدها، طرح‌های انتقال آب و طرح‌های توسعه کشاورزی، این دوره‌ها می‌توانند نشان‌دهنده شرایط کنونی سامانه باشند. واسنجی مدل براساس کمیت و کیفیت جریان در محل ایستگاه اهواز و براساس مقادیر ضرایب جریان‌های بازگشتی (در مدل کمی) و میزان تخریب کیفیت جریان بازگشتی (در مدل کیفی) صورت پذیرفت. مقادیر ضرایب جریان‌های بازگشتی بخش‌های مختلف مصرف‌کننده در جدول (۵) ارائه شده‌اند. مقادیر این ضرایب

## نتایج

در مطالعه حاضر، سامانه حوضه آبریز کارون بزرگ مشتمل بر ۶ سد، ۱۲ مصرف‌کننده شرب و صنعت، ۷ مصرف‌کننده پرورش ماهی، ۳۴ مصرف‌کننده کشاورزی، ۵ طرح انتقال بین حوضه‌ای آب موجود و ۷ طرح انتقال بین حوضه‌ای آب در دست مطالعه یا اجرا، شبیه‌سازی شده است. برای شبیه‌سازی این سامانه بزرگ-مقیاس از یک مدل مبتنی بر رویکرد پویایی سامانه (SDM) استفاده شده است. همچنین در این مدل وسیع و پیچیده علاوه بر کمیت آب، کیفیت آن نیز مدل‌سازی شده است.

SDM بخش‌های مختلف (۱) سدهای برق‌آبی در حال بهره‌برداری، (۲) طرح‌های انتقال بین حوضه‌ای آب موجود و در دست مطالعه یا اجرا، (۳) مصرف‌کنندگان و ذینفعان شرب، صنعت، پرورش ماهی و کشاورزی و (۴) نیازهای زیست‌محیطی پایاب هر یک از مخازن محاسبه شده بر اساس روش مونتانا را در برمی‌گیرد. پیش از این عنوان شد که ابتدا سدهای سامانه با هدف تولید انرژی برق‌آبی و با حفظ اطمینان‌پذیری ۹۰٪ شبیه‌سازی شدند.

از نظر کارشناسان آشنا به سامانه تأیید شده است.

**جدول ۵- ضرایب جریان‌های بازگشتی و تخریب کیفیت جریان در بخش‌های مختلف مصرف‌کننده**

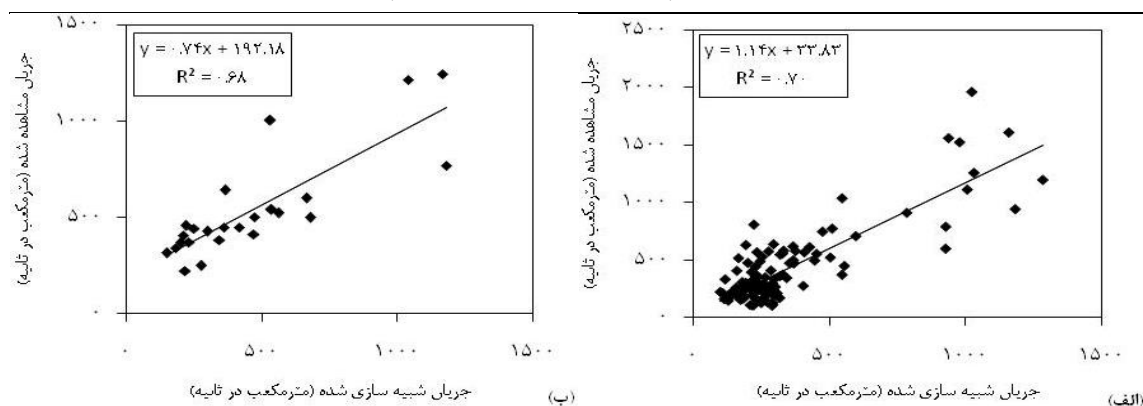
بخش مصرف‌کننده	ضرایب	
	شرب و صنعت	پرورش ماهی کشاورزی
ضریب جریان بازگشتی	۰/۸	۰/۹۵
ضریب تخریب کیفیت جریان	۲	۳

در جدول (۶) مقادیر شاخص‌های آماری محاسبه شده برای سنجش کارایی مدل ذکر شده‌اند. مشاهده می‌شود براساس

شاخص‌های آماری رتبه‌بندی عملکرد مدل واسنجی شده در دسته قابل قبول جای می‌گیرد. همچنین رتبه‌بندی عملکرد اعتبارسنجی مدل براساس شاخص‌های NS، RSR و PBIAS به- ترتیب در رده‌های خیلی خوب، قابل قبول و خوب قرار دارد. در شکل (۶)، مقادیر شبیه‌سازی شده و مقادیر مشاهده شده جریان در مقابل هم ترسیم شده‌اند. واسنجی و اعتبارسنجی مدل کیفی به دلیل عدم در اختیار داشتن سری زمانی ماهانه مقادیر TDS در طول دوره‌های آماری واسنجی و اعتبارسنجی، براساس مقایسه مقادیر متوسط سری زمانی مشاهداتی و شبیه‌سازی شده TDS صورت گرفت.

**جدول ۶- مقادیر شاخص‌های آماری محاسبه شده برای سنجش کارایی مدل واسنجی و اعتبارسنجی شده**

شاخص	نوع مدل	مقادیر مشاهده شده	مقادیر شبیه‌سازی شده
واسنجی	مدل کمی	RSR ۰/۵۴	NS ۰/۶۳
	مدل کیفی	متوسط مقادیر مشاهده شده ۱۱۷۴/۶	متوسط مقادیر شبیه‌سازی شده ۱۳۷۱/۰
اعتبارسنجی	مدل کمی	RSR ۱/۲	NS ۰/۵۲
	مدل کیفی	متوسط مقادیر مشاهده شده ۱۰۰۵/۷	متوسط مقادیر شبیه‌سازی شده ۱۰۷۶/۵



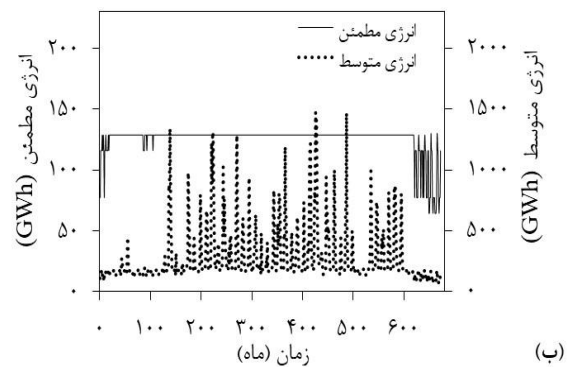
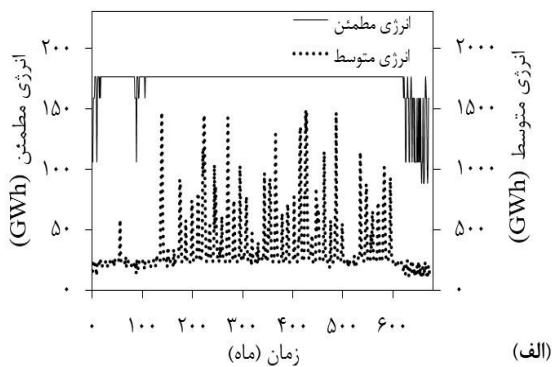
**شکل ۶- ترسیم مقادیر جریان شبیه‌سازی شده در مقابل مقادیر مشاهده شده در دوره زمانی (الف) واسنجی و (ب) اعتبارسنجی مدل**

۱ بیش‌ترین میزان انرژی مطمئن تولید شده سالانه را به خود اختصاص داده است، در شکل‌های (۷) و (۸) نمودارهای مربوط به انرژی مطمئن و متوسط تولید شده توسط نیروگاه‌های سدهای کارون ۱ و دز به ترتیب در حوضه رودخانه‌های کارون و دز ترسیم شده‌اند. نتایج نشان‌دهنده تأثیرپذیری اندک توان تولید انرژی برق‌آبی حوضه رودخانه دز در شرایط بهره‌برداری از طرح‌های انتقال آب بین حوضه‌ای در دست مطالعه یا اجرا است.

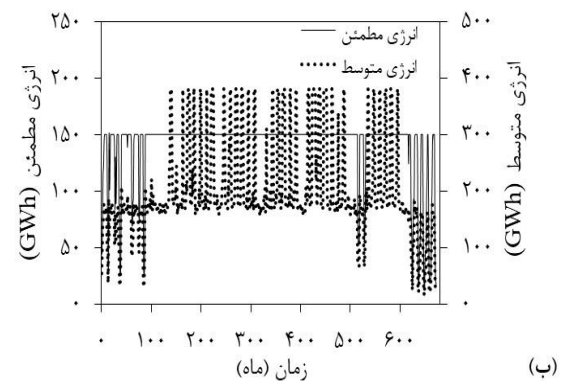
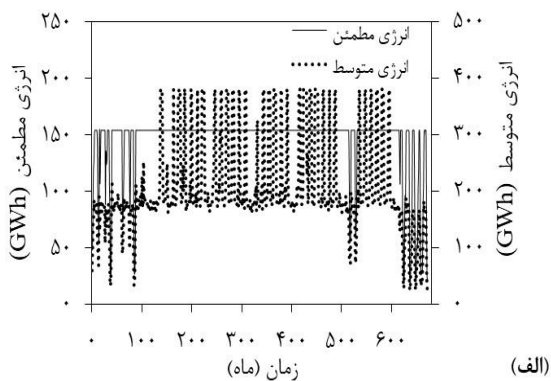
جدول (۷) نتیجه‌های مربوط به ضریب کارکرد نیروگاه که نشان‌دهنده نسبت ساعات کارکرد نیروگاه در طول شبانه‌روز است، میانگین سالانه انرژی مطمئن، میانگین سالانه انرژی متوسط مربوط به هر یک از سدها و در هر یک از حالت‌های شرایط فعلی و انتقال کامل نیازهای طرح‌های انتقال بین حوضه‌ای آب در دست مطالعه یا اجرا ارائه شده‌اند. از آنجایی که مطابق نتایج ارائه شده در جدول (۵)، سد کارون

جدول ۷- مقادارهای ضریب کارکرد، انرژی مطمئن و انرژی تولید شده در هر یک از سدها

پارامتر	شرایط	نام سد					
		کارون ۴	کارون ۳	کارون ۱	گدارلندر	گتوند	دز
ضریب کارکرد نیروگاه	شرایط موجود	۰/۱۳۵	۰/۱۱۲	۰/۱۲۱	۰/۱۰۸	۰/۱۱۱	۰/۴۰۵
	شرایط بهره‌برداری از طرح‌ها	۰/۰۶۱	۰/۰۷۵	۰/۰۸۸	۰/۰۸۰	۰/۰۸۶	۰/۳۹۵
میانگین سالانه انرژی مطمئن تولید شده (GWh)	شرایط موجود	۱۱۴۸/۱	۱۸۹۱/۲	۲۰۷۰/۰	۱۸۶۳/۶	۱۹۱۵/۳	۱۷۴۶/۴
	شرایط بهره‌برداری از طرح‌ها	۵۱۰/۰	۱۲۶۴/۹	۱۵۰۸/۷	۱۳۷۹/۵	۱۴۷۴/۳	۱۶۹۳/۶
میانگین سالانه انرژی متوسط تولید شده (GWh)	شرایط موجود	۲۱۴۸/۷	۳۶۵۰/۱	۳۹۹۱/۸	۳۷۵۹/۹	۳۹۶۱/۷	۲۴۴۹/۲
	شرایط بهره‌برداری از طرح‌ها	۱۳۶۷/۸	۲۸۸۶/۵	۳۲۷۰/۸	۳۱۰۷/۶	۳۳۳۷/۴	۲۳۸۱/۱



شکل ۷- انرژی مطمئن و انرژی متوسط تولید شده از سد کارون ۱ درالف) شرایط موجود و ب) بهره‌برداری از طرح‌های انتقال آب بین حوضه‌ای در دست مطالعه یا اجرا



شکل ۸- انرژی مطمئن و انرژی متوسط تولید شده از سد دز الف) شرایط موجود و ب) بهره‌برداری از طرح‌های انتقال آب بین حوضه‌ای در دست مطالعه یا اجرا

کاهش خواهد یافت. اهمیت این مسئله زمانی از آنجایی است که حدود ۹۰٪ انرژی برق‌آبی تولید شده در کشور ایران از طریق نیروگاه‌های برق‌آبی واقع بر رودخانه‌های کارون و دز تولید می‌شود.

همچنین ضریب کارکرد هر یک از نیروگاه‌های سدهای مذکور به‌منظور حفظ اطمینان‌پذیری ۹۰٪ در تأمین نیازهای برق‌آبی، در شرایط انتقال کامل نیازهای طرح‌های انتقال آب کاهش یافته است. همچنین نتایج نشان‌دهنده تأثیرپذیری بیشتر حوضه رودخانه کارون نسبت به حوضه رودخانه دز است. این مسئله را

همان‌طور که از مقادیر ارائه شده در جدول (۷) مشاهده می‌شود، انتقال کامل تمامی نیازهای طرح‌های انتقال بین حوضه‌ای آب واقع در حوضه رودخانه کارون تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر انرژی برق‌آبی تولید شده توسط سدهای کارون ۴، کارون ۳، کارون ۱، گدارلندر و گتوند دارد. به‌گونه‌ای که در شرایط فعلی میانگین سالانه انرژی مطمئن تولید شده ۱۰,۶۳۴/۶ گیگاوات ساعت بوده و در صورت بهره‌برداری کامل از طرح‌های انتقال بین حوضه‌ای آب در دست مطالعه یا اجرا این مقدار به ۷۸۳۱/۰ گیگاوات ساعت

نیازهای مصرف‌کنندگان و ذینفعان متأثر از بهره‌برداری از طرح-های انتقال آب و طرح‌های توسعه کشاورزی در دست مطالعه یا اجرا می‌باشد. توانایی سامانه حوضه آبریز کارون بزرگ در تأمین نیازهای مصرف‌کنندگان و ذینفعان واقع در هر یک از زیرحوضه-های دز، کارون شمال و کارون جنوب در شرایط موجود و بهره-برداری از طرح‌های انتقال آب و توسعه کشاورزی در دست مطالعه یا اجرا با استفاده از شاخص‌های کارایی مورد ارزیابی قرار گرفته است. از آنجایی که در شبیه‌سازی سامانه حوضه آبریز کارون اولویت تأمین نیازها به‌صورت شرب و صنعت، پرورش ماهی و کشاورزی مدنظر قرار گرفته است، بخش‌های شرب و صنعت و پرورش ماهی به‌شکل قابل توجهی تحت تأثیر بهره‌برداری از طرح-های انتقال آب و توسعه کشاورزی قرار نخواهند گرفت. بدین ترتیب در جدول (۸) شاخص‌های کارایی مربوط به بخش کشاورزی بیان شده‌اند.

جدول ۸- مقادیر شاخص‌های کارایی در بخش کشاورزی به تفکیک زیر حوضه‌ها

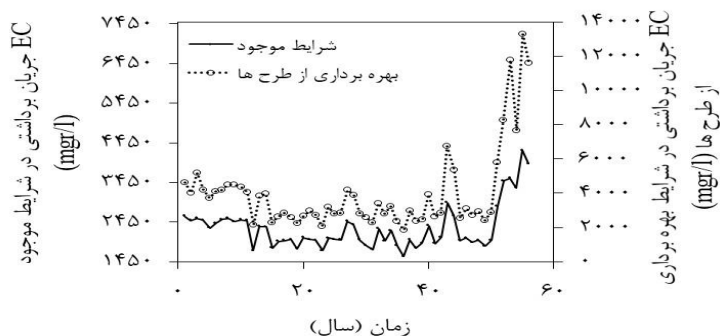
حوضه	شاخص	شرایط موجود	شرایط بهره‌برداری از طرح‌ها	حوضه	شاخص	شرایط موجود	شرایط بهره‌برداری از طرح‌ها
کارون	اطمینان‌پذیری	۹۳/۲	۹۳/۰	کارون جنوب	اطمینان‌پذیری	۹۴/۵	۹۲/۶
	بازگشت‌پذیری	۹۳/۱۳	۹۲/۹۹		بازگشت‌پذیری	۷۵/۵۳	۷۰/۰
شمال	آسیب‌پذیری	۰/۶۷	۱/۹۹		آسیب‌پذیری	۲۵/۰۴	۴۴/۹

بهره‌برداری از طرح‌های انتقال آب و توسعه کشاورزی در دست مطالعه یا اجرا بیش‌ترین میزان تأثیرات منفی را خواهد پذیرفت. علاوه بر کمیت، بررسی کیفیت جریان برداشتی در محل هر یک از مصرف‌کنندگان نیز از اهمیت فراوان برخوردار است. به‌دلیل آنکه در این مطالعه تعداد زیادی از مصرف‌کنندگان در قالب یک مدل توزیعی مورد بررسی قرار گرفته‌اند، تنها نمودار مربوط به کیفیت جریان در آخرین گره کشاورزی واقع بر رودخانه کارون جنوب (قبل از انشعاب شاخه‌های بهمنشیر و اروندرود) ارائه شده است (شکل ۹).

می‌توان در حجم نیازهای طرح‌های انتقال بین حوضه‌ای آب واقع در حوضه هر یک از رودخانه‌های کارون و دز جستجو نمود. زیرا براساس مقادیر ارائه شده در جدول (۲)، حجم نیاز سالانه طرح-های در دست مطالعه یا اجرا در حوضه کارون تقریباً ۷ برابر این مقدار در حوضه دز می‌باشد.

علاوه بر طرح‌های انتقال بین حوضه‌ای آب، لازم است تأثیر بهره‌برداری از طرح‌های توسعه کشاورزی در دست مطالعه یا اجرا در نیز مورد ارزیابی قرار گیرد. از آنجایی که مطابق جدول (۳) طرح‌های توسعه کشاورزی در حوضه رودخانه‌های دز و کارون جنوب قرار دارند، بهره‌برداری از آنها بر روی تولید انرژی برق-آبی سامانه تأثیر نخواهد داشت. بنابراین توان تولید انرژی برق آبی سامانه حوضه آبریز کارون بزرگ متأثر از بهره‌برداری از طرح‌های انتقال آب در دست مطالعه یا اجرا خواهد بود حال آنکه تأمین

نتایج ارائه شده در جدول (۵) نشان می‌دهند که شاخص‌های کارایی در گره‌های کشاورزی زیر حوضه کارون شمال تقریباً یکسان هستند. بدین ترتیب و از لحاظ کمی بهره‌برداری از طرح-های انتقال آب و توسعه کشاورزی در دست مطالعه یا اجرا تأثیر چندان متفاوتی بر گره‌های کشاورزی حوضه کارون شمال ندارند. همچنین نتایج نشان می‌دهند اگرچه در حوضه دز میزان تأثیرپذیری سامانه بیش‌تر از حوضه کارون شمال است اما بیش-ترین میزان تأثیرپذیری و تغییرات سامانه را می‌توان در حوضه کارون جنوب مشاهده نمود به‌گونه‌ای که حوضه در ازای

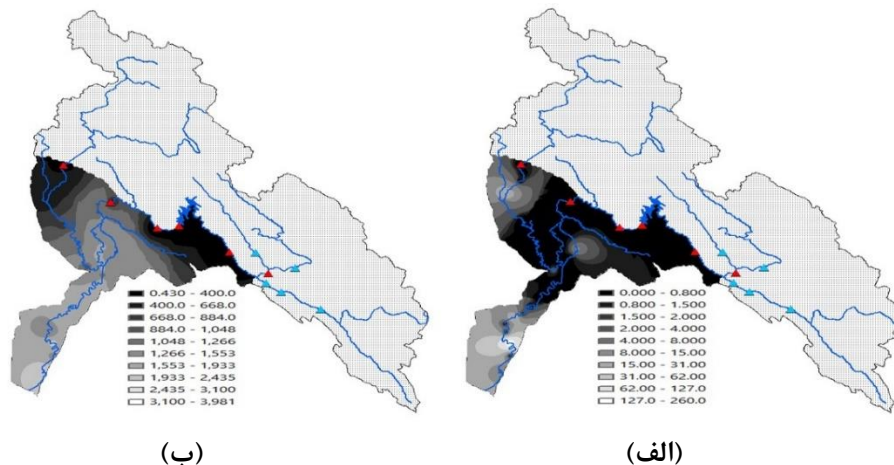


شکل ۹- نمودار کیفیت جریان برداشتی در گره کشاورزی حقایقه‌های سنتی دارخوین تا خلیج فارس در شرایط موجود و شرایط بهره‌برداری از طرح‌های انتقال آب و توسعه کشاورزی در دست مطالعه یا اجرا

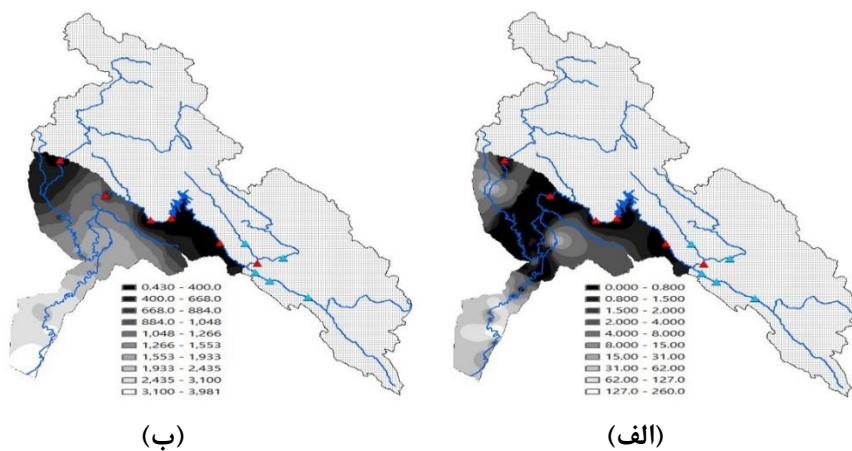
فراوان ناشی از نامناسب بودن کمیت و کیفیت جریان برداشتی خواهد بود.

در شکل‌های (۱۰) و (۱۱) پهنه‌بندی میزان کمبود و کیفیت جریان برداشتی در گره‌های مختلف مصرف کننده در حوضه آبریز کارون بزرگ نشان داده شده است.

شکل (۹) مؤکد آن است که توسعه نه تنها از لحاظ کمی بلکه از لحاظ کیفی نیز امکان پذیر نمی‌باشد. در این حالت EC جریان برداشتی با قرارگیری در حد فاصل ۱,۸۴۳ تا ۱۳,۳۰۰ میکروموس بر سانتی‌متر به هیچ عنوان برای تولید محصولات کشاورزی مناسب نبوده و بدین ترتیب این گره در معرض خسارت‌های



شکل ۱۰- پهنه‌بندی الف) میزان کمبود و ب) کیفیت جریان برداشتی در گره‌های مختلف مصرف کننده در حوضه آبریز کارون بزرگ در شرایط موجود



شکل ۱۱- پهنه‌بندی الف) میزان کمبود و ب) کیفیت جریان برداشتی در گره‌های مختلف مصرف کننده در حوضه آبریز کارون بزرگ در شرایط بهره‌برداری از طرح‌های انتقال بین حوضه‌ای آب و طرح‌های توسعه کشاورزی

### نتیجه‌گیری و بحث

حوضه‌های مقصد نیاز به برداشت منابع آب بیش تر در قالب طرح‌های جدید انتقال بین حوضه‌ای آب احساس شود و از طرف دیگر در حوضه مبدأ بهره‌برداری از طرح‌های توسعه کشاورزی جدید برنامه‌ریزی گردد. در یک سامانه بزرگ مقیاس مانند حوضه آبریز کارون بزرگ که مصرف‌کنندگان و ذینفعان متعدد را در دل خود جای داده است بهره‌برداری از طرح‌های انتقال بین حوضه‌ای آب و طرح‌های توسعه کشاورزی جدید در قالب طرح‌های در دست مطالعه یا اجرا نیازمند در نظر گرفتن ابعاد وسیعی از جمله بررسی توان تولید انرژی برق‌آبی سامانه و نیز تأمین نیازهای مصرف‌کنندگان حوضه مبدأ می‌باشد. در مطالعه حاضر سعی شده است

انتقال آب از رودخانه‌های دارای آب فراوان به مناطق با منابع آب کم به عنوان راهکاری برای مقابله با مشکلات ناشی از کمبود آب مطرح می‌شود. بدین ترتیب تاکنون در قالب طرح‌های انتقال بین حوضه‌ای آب، بخشی از آورد رودخانه‌های کارون و دز برای تأمین نیازهای نواحی مرکزی و شرقی کشور به این مناطق انتقال داده شده است. افزایش جمعیت و به تبع آن رشد شهرنشینی و گسترش صنعت و کشاورزی، مدیریت عرضه به‌جای مدیریت تقاضا، برداشت بیش از اندازه از سفره‌های آب زیرزمینی، تغییر اقلیم و عواملی از این دست باعث شده است تا از یک سو در

محل هر یک از مصرف‌کنندگان تصویری عینی از وضعیت سامانه حوضه آبریز کارون بزرگ را در اختیار قرار داده است. جمع‌بندی نتایج نشان‌دهنده آن است که در صورت ادامه روند بهره‌برداری از سامانه در شکل کنونی آن علاوه بر کاهش قابل توجه تولید انرژی برق‌آبی، سامانه حوضه آبریز کارون بزرگ هم از نظر کمی و هم از نظر کیفی توانایی تأمین نیازهای مصرف‌کنندگان واقع در حوضه رودخانه کارون جنوب و به‌ویژه بخش‌های انتهایی آن را نخواهد داشت.

با بهره‌گیری از روش پویایی سامانه، رفتار حوضه آبریز کارون بزرگ در شرایط موجود و نیز بهره‌برداری از تمامی طرح‌های انتقال بین حوضه‌ای آب و طرح‌های توسعه کشاورزی در دست مطالعه یا اجرا مورد ارزیابی قرار گیرد. در هر دو حالت رفتار سامانه از نظر توان تولید انرژی برق‌آبی بررسی شده است. همچنین توان سامانه در تأمین نیازهای بخش‌های شرب و صنعت، کشاورزی و پرورش ماهی و در قالب شاخص‌های کارایی اطمینان‌پذیری، بازگشت-پذیری و آسیب‌پذیری مورد ارزیابی قرار گرفته است. در پایان ترسیم نمودارهای پهنه‌بندی کمیت و کیفیت جریان برداشتی در

## REFERENCES

- Ahmad, S. and Simonovic, S. (2000). Modeling reservoir operations for flood management using system dynamics. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 14(3): 190–198.
- Asheghmoala, M. (2015). *Simulation water quality in river with QUAL2KW model*. Talab press, First edition, Tehran, Iran (in Farsi).
- Bozorg-Haddad, O. (2014). *Optimization of water resources systems*. Tehran university press, First edition, Tehran, Iran (in Farsi).
- Chen, Y. N., Pang, Z. H., Chen, Y. P., Li, W. H., Xu, C. C., Hao, X. M., Huang, X., Huang, T. M. and Ye., Z. X. (2008). Response of riparian vegetation to water-table changes in the lower reaches of Tarim River, Xinjiang Uygur, China. *Hydrogeology Journal*, 16(7):1371–1379.
- Chhipi-Shrestha, G. K., Hewage, K. N. and Sadiq, R. (2017). Water-Energy-Carbon modeling for urban water system dynamics approach. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 143(6): 04017016.
- Davies, B. R., Thoms, M. and Meador, M. (1992). An assessment of the ecological impacts of inter-basin water transfers, and their threats to river basin integrity and conservation. *Aquatic Conservation Marine and Freshwater Ecosystems*, 2(4): 325–349.
- Gijsbers, P. J. A. and Loucks, D. P. (1999). Libya's choices: desalination or the Great Man-made River Project. *Physics and Chemistry of the Earth, Part B: Hydrology, Oceans and Atmosphere*, 24(4): 385–389.
- Gupta, J. and Van Der Zaag, P. (2008). Interbasin water transfers and integrated water resources management: where engineering, science and politics interlock. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C* 33(1-2): 28–40.
- Gohari, A., Mirchi, A. and Madani, K. (2017). System dynamics evaluation of climate change adaptation strategies for water resources management in Central Iran. *Water Resources Management*, 31(5): 1413–1434.
- Hamilton, H. R. (1969). *Systems simulation for regional analysis: an application to river-basin planning*. MIT Press, Cambridge, MA.
- Jahandideh-Tehrani, M., Bozorg-Haddad, O. and Marino, M. A. (2014). Power generation simulation of a hydropower reservoir system using system dynamics: case study of Karoon reservoir system. *Journal of Energy Engineering*, DOI: 10.1061/(ASCE)EY.1943-7897.0000179.
- Larsona, K. J., Başagaoglu, H. and Mariño, M. A. (2001). Prediction of optimal safe ground water yield and land subsidence in the Los Banos-Kettleman City area, California, using a calibrated numerical simulation model. *Journal of Hydrology*, 242(1–2): 79–102.
- Ma, F. B. and Wang, X. (2011). Impacts of water transfer project on eco environment: a review. *Water Conservancy Science and Technology and Economy*, 17(10): 20–24.
- Nassery, H. R., Adinehvand, R., Salavitarbar, A. and Barati, R. (2017). Water management using system dynamics modeling in semi-arid regions. *Civil Engineering Journal*, 3(9): 766–778.
- Orth, D. J. and Maughan, O. E. (1981). Evaluation of the Montana Method for recommending instream flows in Oklahoma streams. *Proceedings of the Oklahoma Academy of Science*, 61: 62–66.
- Rivera Monroy, V. H., Branoff, B., Meselhe, E. A., McCorquodale, A., Dortch, M., Steyer, G. D., Visser, J. and Wang, H. (2013). Landscape-level estimation of nitrogen loss in coastal Louisiana wetlands: potential sinks under different restoration scenarios. *Journal of Coastal Research*, 67: 75–87.
- Simonovic, S. P., Fahmy, H. and El-Shorbagy, A. (1997). The use of object-oriented modeling for water resources planning in Egypt. *Water Resources Management*, 11(4): 243–261.
- Sharifi, A., Kalin, L. and Tajrishy, M. (2013). System dynamics approach for hydropower generation assessment in developing watersheds: case study of Karkheh River basin, Iran. *Journal of Hydrologic Engineering*, 18(8): 1007–1017.
- Sible, E., Cooper, A., Malkia, K., Bruder, K., Watkins, S. C., Fofanov, Y. and Putonti, C. (2015). Survey of viral populations within Lake Michigan nearshore waters at four Chicago area beaches. *Data in Brief*, 5: 9–12.
- Tavakoli, M. A. (2018). *Demand-Based Hydro-*

*Economic model for transitioning groundwater sustainability: System Dynamics approach*. M.Sc. dissertation, Iran University of Science and Technology, Iran.

Wang, X. L. (2004). The famous water transfer projects in foreign basins and regions. *Water Resource Electric Power*, 30(1): 1–25 (In Chinese).

Yan, D. H., Wang, H., Li, H. H., Wang, G., Qin, T. L., Wand, D. Y. and Wang, L. H. (2012). Quantitative

analysis on the environmental impact of large-scale water transfer project on water resource area in a changing environment. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16: 2685-2702.

Zolghadr-Asli, B., Bozorg-Haddad O. and Chu, X. (2018). Effects of the uncertainties of climate change on the performance of hydropower systems. *Journal of Water and Climate Change*, DOI: 10.2166/wcc.2018.120.