

مقاله پژوهشی

ارزیابی پایداری حوضه‌های آبریز با تلفیق نظریه بازی و شاخص‌های پایداری ترکیبی در طرح انتقال آب بین حوضه‌ای بهشت‌آباد

مریم کفایتی^۱، بهرام ثقفیان^{۲*}، آزاده احمدی^۳ و حسین بابازاده^۴

چکیده

در سال‌های اخیر، کاهش ذخایر آب و طرح انتقال آب، به‌عنوان یک راهکار باعث مناقشات بین حوضه‌ای زیادی شده است. این پژوهش، روشی تجربی را برای محاسبه پایداری حوضه‌ها در طرح مناقشه‌ای انتقال آب بهشت‌آباد مطالعه می‌کند. ابتدا، با استفاده از مفاهیم پایداری در نظریه بازی‌ها و با مدلی مناقشه‌ای، گزینه‌ها و انتخاب‌های دو حوضه مبدأ و مقصد بررسی و پایدارترین سناریوها انتخاب شد؛ سپس، پایداری حوضه‌ها در سناریوهای انتخابی براساس شاخص‌های ترکیبی و با شبیه‌سازی در مدل مادسیم بررسی شد. در این روش، ۱۰ شاخص پایداری انتخاب شد که برای تحلیل مناسب‌تر به ۴ شاخص ترکیبی تبدیل شد. همچنین، روشی آماری برای تعیین شاخص‌های اصلی به کار رفت. اعتبار شاخص‌های ترکیبی با روش همبستگی پیرسون بررسی شد. نتایج نشان داد تمام شاخص‌های پایه، برای ساخت شاخص‌های ترکیبی ضروری و همبستگی میان شاخص‌های ترکیبی پذیرفته شده است. در نهایت، مشاهده شد از منظر نظریه بازی‌ها در حالت همکارانه، پایداری در منطقه برقرار می‌شود؛ ولی نتایج شاخص‌های ترکیبی، نشان‌دهنده کاهش پایداری مبدأ در هر ۴ روش به‌کاررفته است و پایداری مقصد نیز به‌علت استفاده از آب انتقالی در گسترش طرح‌های توسعه و نبود مدیریت عرضه و تقاضا افزایش زیادی نمی‌یابد.

واژه‌های کلیدی: انتقال آب بین حوضه‌ای، پایداری، شاخص ترکیبی پایداری، نظریه بازی‌ها.

ارجاع: کفایتی م.، ثقفیان ب.، احمدی آ. و بابازاده ح. ۱۴۰۰. ارزیابی پایداری حوضه‌های آبریز با تلفیق نظریه بازی و شاخص‌های پایداری ترکیبی در طرح انتقال آب بین حوضه‌ای بهشت‌آباد. مجله پژوهش آب ایران. ۴۱: ۶۵-۷۴.

1- دانشجوی دکتری گروه عمران، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

2- استاد گروه عمران، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

3- دانشیار گروه عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران.

4- دانشیار گروه علوم و مهندسی آب، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

* نویسنده مسئول: b.saghafian@gmail.com

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۰/۲۸

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۹/۰۲

مقدمه

در سال‌های اخیر، کمبود آب در اثر افزایش مصرف در بخش‌های شرب خانگی، صنعتی، کشاورزی و خشکسالی‌های متوالی در فلات مرکزی ایران باعث تنش در منطقه شده است. یکی از راه‌حل‌ها برای رفع این مشکل، انتقال آب بین حوضه‌ای است؛ ولی این راهکار بر حقوق آبی بسیاری از مصرف‌کنندگان اثر می‌گذارد و باعث تشدید درگیری و مناقشات در این مناطق می‌شود. همچنین، برای سیاست‌گذاران بخش آب در پروژه‌های انتقال آب بین حوضه‌ای، به‌علت گستردگی و پیچیدگی ابعاد مسئله، تکیه بر ابزاری برای تصمیم‌گیری، بسیار مهم است. توسعه پایدار حوضه مبدأ و مقصد، ابزاری در این فرایند بر مبنای نیازهای موجود در نظر گرفته می‌شود؛ بدون اینکه با نیازهای نسل‌های آینده در تعارض باشد (برانت لند، ۱۹۸۷). به توسعه پایدار از جنبه‌های مختلف توجه می‌شود که یکی از آنها پایداری هیدرولوژیکی و دیگری، پایداری در مناقشات است. توسعه پایدار هیدرولوژیکی از سه منظر اقتصادی، عدالت اجتماعی و دوستدار محیط‌زیست، ارزیابی و در مناقشات، پایداری از منظر مجموعه مدل‌های نظریه بازی‌ها بررسی می‌شود. پایداری هیدرولوژیکی با شاخص‌های پایداری هیدرولوژیکی کمی‌سازی می‌شود؛ اما بزرگ‌ترین مشکل، تفسیر و تحلیل ترکیبی این شاخص‌هاست که مانع کاربرد عملی آنها برای تصمیم‌گیران می‌شود. برای رفع این مشکل، کوشش‌هایی برای متراکم‌سازی این شاخص‌های چندبعدی به شاخص ترکیبی انجام شده است که به تصمیم‌گیران حوزه آب کمک می‌کند. کفایتی و همکاران (۲۰۱۷) در مطالعه‌ای درباره انتقال آب بهشت‌آباد با ساخت شاخص‌های ترکیبی با روش‌های وزن‌دهی و متراکم‌سازی مختلف نشان دادند در پروژه انتقال آب بهشت‌آباد و با سناریوهای خاصی، پایداری حوضه‌ها افزایش پیدا می‌کند. ونگ و همکاران (۲۰۱۹) از شاخص پایداری ترکیبی برای بررسی پایداری منابع آب منطقه‌ای در چین در دوره ۲۰۱۲ تا ۲۰۱۶ استفاده کردند و نشان دادند پایداری، تغییر زیادی نکرده است. پالپ دونات و همکاران (۲۰۲۰) با مقایسه شاخص‌های پایداری و شاخص‌های قابلیت اطمینان^۱ (RI)، که در مقررات اسپانیا براساس عملکرد تقاضای آب ایجاد شده است، نشان دادند

شاخص‌های پایداری، ابزار مناسب‌تری برای پیش پایداری حوضه در شرایط هیدرولوژیکی مختلف در مقایسه با شاخص RI است. همچنین، نظریه بازی، به‌عنوان ابزار دیگری برای توسعه پایدار، راه‌حلی را برای مناقشات مختلف ارائه می‌دهد و رویکردهای همکارانه و غیرهمکارانه دارد. نظریه بازی‌های غیرهمکارانه در بردارنده برخی تحلیل‌ها براساس مفهوم پایداری است که نشان می‌دهد کدام یک از تعاریف پایداری، نشان‌دهنده رفتار بازیگران یا تصمیم‌گیران است. مدنی و هایپل (۲۰۱۱) شش مورد از این تعاریف پایداری، یعنی Nash Stability^۲، GMR^۳، SMR^۴، SEQ^۴، Limited-Move Stability و Non-Myopic Stability را برای یک بازی غیرهمکارانه در منابع آب بازیابی کردند. آنها نشان دادند اگر همه بازیگران به راه‌حل پایداری برسند، هیچ‌کدام از آنها تمایل ندارند از آن موقعیت خارج شوند و در نتیجه، آن وضعیت پایدار می‌ماند و اگر مسئله با تعاریف پایداری گوناگون بررسی شود، احتمال رسیدن به یک راه‌حل پایدار افزایش می‌یابد. رد و همکاران (۲۰۱۳) نشان دادند هرگاه، چندین گروه در مذاکره درباره تقاضای خود اختلاف دارند، دنبال کردن راه‌حلی که از نظر اجتماعی بهینه باشد، ممکن است راهبردی‌ترین راه برای رسیدن به توافق نباشد. آنها نشان دادند راه‌حل پایدار، حالتی است که همه گروه‌ها را به اندازه کافی راضی می‌کند تا در مذاکره باقی بمانند و به توافق برسند؛ ولی این امر، لزوماً بهترین تصمیمی نیست که به‌طور کامل، سیستم را راضی کند. فیلیپات و همکاران (۲۰۱۶) برای حل اختلاف بین نوادا و یوتا، درباره تخصیص آب‌های زیرزمینی، بررسی‌هایی انجام دادند. آنها برای این منظور از سیستم پشتیبانی تصمیم به نام GMCR+ استفاده کردند. یافته‌های تجزیه و تحلیل درگیری نشان داد به‌علت نبود انگیزه و فرصت برای هر یک از طرفین، مذاکرات ادامه پیدا نمی‌کند که این درگیری حل شود. تغییر مهمی در گزینه‌های پیشنهادی، یا ابزارهای جدید حکومتی یا مداخله گروه سوم برای جلوگیری از این مناقشات لازم است.

مسلم است، طرح‌های انتقال آب بین حوضه‌ای باید به‌دقت بررسی شود تا به جای حل مشکل بر میزان معضلات افزوده نشود. صادقی و همکاران (۱۳۹۵)، ۱۷۰ پروژه

2- General Meta rationality

3- Symmetric Meta rationality

4- Sequential Stability

1- Reliability Indicators

شهر و فعالیت‌های کشاورزی و صنعتی زیادی را فراهم می‌کند (مهندسین مشاور جاماب، ۱۳۹۱).

حوضه گاوخونی در فلات مرکزی ایران با مساحت ۴۱۴۹۱ کیلومتر مربع واقع شده است و بین طول جغرافیایی $2^{\circ} 50'$ و $22^{\circ} 53'$ و عرض جغرافیایی $12^{\circ} 31'$ و $42^{\circ} 33'$ قرار دارد. حوضه در بیشتر نقاط، اقلیم خشک دارد و فقط بخش کمی از بالادست آن، اقلیم سرد دارد. رودخانه‌های اصلی این حوضه، زاینده‌رود، خشکه‌رود و ایزدخواست است. بیشتر رودخانه‌ها در این حوضه به تالاب گاوخونی منتهی می‌شود (مهندسین مشاور یکم، ۱۳۹۱). به‌علت نقش اساسی اقتصادی و اجتماعی این حوضه، تقلاهای زیادی برای فراهم کردن آب ضروری بخش‌های مختلف این حوضه انجام شده است. در گذشته، برای انتقال منابع آب از حوضه کارون به حوضه گاوخونی، دو تونل به نام‌های کوه‌رنگ ۱ و کوه‌رنگ ۲ به ترتیب، در سال‌های ۱۳۳۲ و ۱۳۶۴ ساخته شد و ساخت کوه‌رنگ ۳، که در سال ۱۳۷۷ آغاز شده ولی هنوز تکمیل نشده است. در سال‌های اخیر، به پروژه بهشت‌آباد به‌عنوان یک طرح انتقال آب بین‌حوضه‌ای برای انتقال منابع آب شمال حوضه کارون به حوضه گاوخونی توجه زیادی شده است. ظرفیت انتقال این تونل، ۵۸۰ متر مکعب در ثانیه در نظر گرفته شد که به‌تازگی بازبینی مجدد شده است. این تونل برای تصمیم‌گیران این حوضه باعث مشکلات فراوان زیست‌محیطی، اقتصادی و اجتماعی شده است (محمدی و همکاران، ۱۳۹۸). موقعیت حوضه‌ها و چارچوب پژوهش در شکل‌های ۱ و ۲ نشان داده شده است.

توسعه مدل مناقشه‌ای

مدل مناقشه‌ای^۱ GMCR+، که رامی کینسارا در سال ۲۰۱۴ ایجاد کرد، بر مبنای تحلیل مبتنی بر تعریف‌های پایداری غیرهمکارانه است. نظریه^۲ NS از متداول‌ترین تعریف‌ها در بازی‌های غیرهمکارانه است که در آن، هر بازیگر در طول بازی فقط باید یک تصمیم بگیرد که در دنیای واقعی دور از واقعیت به نظر می‌رسد (نش، ۱۹۵۰)؛ بنابراین، این تعریف برای پیش‌بینی مناقشات، به‌تنهایی موفق عمل نمی‌کند (سلبیراک، ۱۹۹۴).

انتقال آب را با اهداف مختلف در سراسر جهان بررسی کردند. نتایج نشان داد با توجه به تأثیر مستقیم اجرای این طرح‌ها بر مدیریت منابع آب در حوضه مبدأ و مقصد، درازمدت باعث تضعیف شرایط اجتماعی، اقتصادی و زیست‌محیطی این مناطق می‌شود. گوهری و همکاران (۲۰۱۳)، مدلی دینامیکی را برای ارزیابی آثار انتقال آب بین‌حوضه‌ای در حوضه زاینده‌رود توسعه دادند. نتایج نشان داد پروژه‌های انتقال آب به افزایش تقاضای آب و جمعیت حوضه منجر می‌شود و در نتیجه، نیاز حوضه را برای زمان کوتاهی برطرف می‌کند. در نهایت، بدون مدیریت عرضه و تقاضا، مشکلات کمبود آب به‌صورت جدی‌تری بازمی‌گردد. رثوفی و همکاران (۱۳۹۴) در پژوهشی، طراحی مطلوب ابعاد طرح انتقال آب بهشت‌آباد از حوضه بالادست کارون را به حوضه گاوخونی در قالب ۶ سناریو ارزیابی کردند؛ سپس با استفاده از مدل‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره و نظریه مجموعه‌های فازی، سناریوی مطلوب را انتخاب و بدین ترتیب، توجیه‌پذیری و حجم آب قابل انتقال در دوره هیدرولوژیک بلندمدت و خشک را مشخص کردند.

در این پژوهش، پایداری حوضه‌های متأثر از طرح انتقال آب بهشت‌آباد با تلفیقی از روش نظریه بازی‌های غیرهمکارانه و ساخت شاخص‌های ترکیبی مناسب در قالب سناریوهای همکارانه و غیرهمکارانه بررسی و راهکارهایی برای رهایی از مناقشه و دستیابی به پایداری حوضه‌ها ارائه می‌شود.

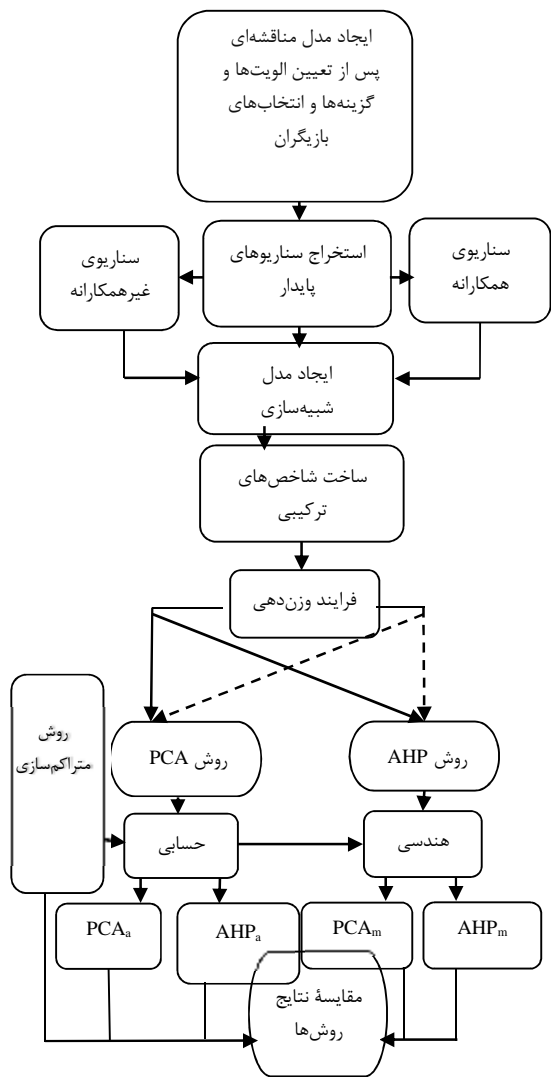
مواد و روش‌ها

محدوده‌های مطالعاتی

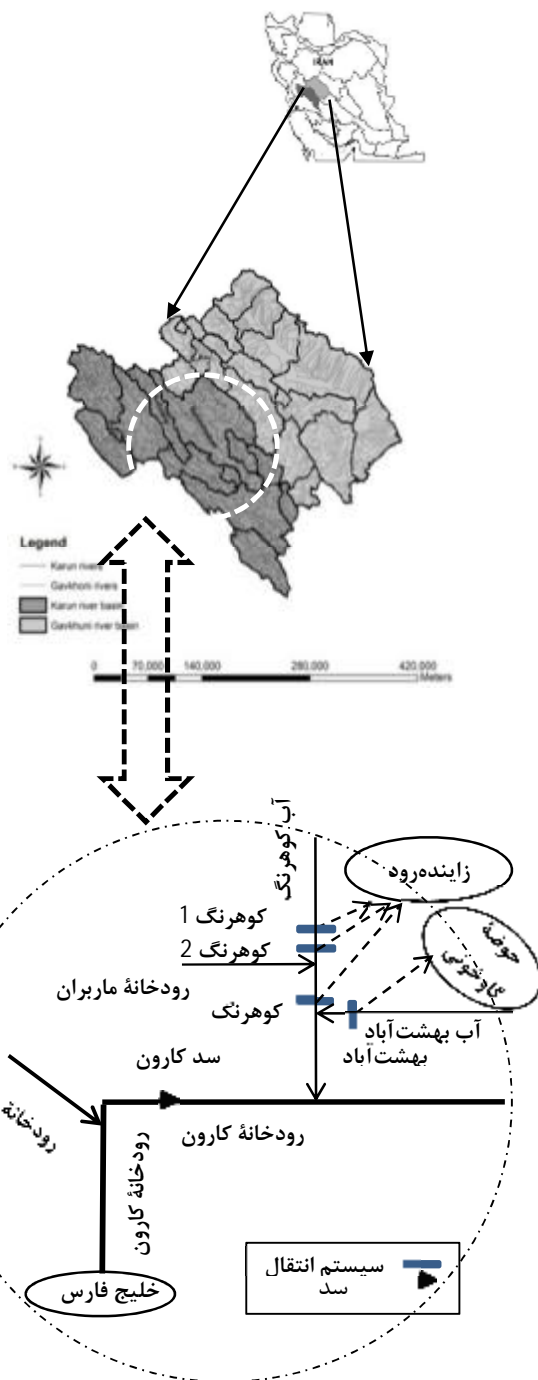
در این مطالعه، تأثیر انتقال آب بر پایداری حوضه کارون به‌عنوان حوضه مبدأ و حوضه گاوخونی به‌عنوان حوضه مقصد با تکیه بر طرح انتقال بهشت‌آباد به‌علت ماهیت مجادله‌ای آن بررسی می‌شود. حوضه کارون در جنوب غربی ایران واقع شده است. مساحت حوضه، حدود ۶۷۰۰۰ کیلومتر مربع است و بین طول جغرافیایی 15° و 48° و عرض جغرافیایی $17^{\circ} 30'$ و $49^{\circ} 33'$ واقع شده است. این حوضه، تنوع اقلیمی گوناگونی از گرم خشک، سرد نیمه‌خشک، نسبتاً مرطوب تا خیلی مرطوب دارد. شاخه اصلی رودخانه کارون از کوهستان‌های زاگرس سرچشمه می‌گیرد و به شمال غربی خلیج فارس می‌ریزد. کارون طولانی‌ترین رودخانه ایران است و مصرف شرب ۶۰

1- Graph Model for Conflict Resolution

2- Nash Stability



شکل ۲- چارچوب روش پژوهش



شکل ۱- موقعیت حوضه‌های کارون و گاوخونی و سیستم انتقال

حرکت آنها نیز در روش‌های ذکر شده از کم تا نامحدود متغیر است. در روش‌های NS، GMR، SMR بازیگران از عملکرد یکدیگر آگاهی ندارند و تمایل به پسرقت در NS نیست و در دو مورد بعد، محدود به رقیبان است. در سه روش باقیمانده SEQ، LM و NM بازیگران از عملکرد

برای تکمیل آن از تعریف پایداری GMR و SMR، که با هوارد (۱۹۷۱) توسعه یافت، و SEQ، که با فراسر و هاپیل (۱۹۷۹) توسعه پیدا کرد، و درنهایت، مفاهیم LM^۱ و NM^۲ استفاده شد. آگاهی از عملکرد بازیگران و پیش‌بینی

1- Limited-Move
2- Non-Myopic stabilities

آب شرب و محیط زیست داده شود. شبیه‌سازی این سناریوها شامل مراحل ایجاد یک نمایش گرافیکی از مناطق مورد مطالعه، واردکردن داده‌های عرضه و تقاضای مناطق مختلف، مقایسه نتایج با مشاهده‌ها و واسنجی مدل است. داده‌های لازم برای منابع آب سطحی، آبخوان‌ها، مخازن سد، تقاضای مصرف‌کنندگان و اولویت آنها در محدوده‌های مطالعاتی متعدد در هر دو حوضه (۴۲ منطقه مطالعاتی برای حوضه کارون و ۲۱ منطقه برای حوضه گاوخونی) و به‌صورت ماهانه جمع‌آوری و در مدل وارد می‌شود. نیاز زیست‌محیطی از روش مونتانا محاسبه می‌شود که تنانت در سال ۱۹۷۶ به دست آورد و در آن، درصدی از میانگین جریان رودخانه را در نظر می‌گیرد. تغییر منابع و مصارف برای سال ۱۴۲۰ بر مبنای تغییر جمعیت و اجرای طرح‌های اجرایی و توسعه، که در این بازه زمانی مهندسان مشاور لحاظ کرده‌اند، از سال پایه متفاوت بوده و اثر تغییر اقلیم در این دوره زمانی در نظر گرفته نشده است.

توسعه چارچوب نظری و انتخاب شاخص‌های پایداری پایه

در گام اول برای مدیریت حجم زیاد شاخص‌ها، چارچوبی نظری برای انسجام کار استفاده می‌شود. یکی از کاربردی‌ترین مدل‌های مفهومی برای مدیریت جامع و پایدار منابع آب در سطح کلان و برای ارتباط جنبه‌های اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی به یکدیگر، مدل DPSIR^۲ است که سازمان محیط زیست اتحادیه اروپا معرفی کرده است. در گام دوم، در انتخاب شاخص‌های مناسب باید توجه داشت که آنها به تغییرات زمان و مکان و مجموعه‌ای که در آن هستند؛ حساس باشند، علائم و شرایط ناپایداری را پیش‌بینی کنند، در دسترس و غیرجهت‌دار باشند، به‌راحتی از تبدیل داده‌های خام به دست آیند و در آخر، پیوستگی بین شاخص‌ها وجود داشته باشد. اهمیت شاخص ترکیبی در فراهم کردن یک علامت برای تشخیص شرایط ناپایدار است که تصمیم‌گیرندگان باید از آن آگاه شوند (لیورمن و همکاران، ۱۹۸۸). در جدول ۱، خلاصه‌ای از تعاریف شاخص‌های انتخابی آورده شده است.

یکدیگر آگاه هستند و به‌جز SEQ دو مورد بعدی به سرفت تمایل دارند. پیش‌بینی حرکت نیز در روش‌های ذکرشده از کم تا نامحدود متغیر است (فنگ و همکاران، ۱۹۹۳). در این روش، هرچه مفاهیم بیشتری استفاده شود، احتمال خطا و عدم قطعیت کاهش پیدا می‌کند.

در ادامه، برای ایجاد مدل مناقشه‌ای، ابتدا باید راهبردها و اولویت‌های هر کدام از بازیگران (حوضه‌های مبدأ و مقصد) بررسی شود. در این پژوهش، گزینه‌ها و انتخاب‌های پیش روی حوضه مبدأ عبارت است از: ماندن در وضعیت موجود، مشارکت در طرح انتقال آب، گرفتن عواید از حوضه مقصد برای مشارکت در طرح انتقال، توسعه کشاورزی و صنعت و در پایان، مدیریت عرضه و تقاضا. گزینه‌ها و انتخاب‌های پیش روی حوضه مقصد عبارت است از: اجرای طرح انتقال آب، پرداخت عواید به حوضه مبدأ برای مشارکت در طرح انتقال، توسعه کشاورزی و صنعت و در پایان، مدیریت عرضه و تقاضا. این بازیگران می‌توانند به هر کدام از این گزینه‌ها پاسخ بله (YES) یا خیر (NO) بدهند. در گام بعدی، پس از تعیین بازیگران انتخاب‌ها و اولویت‌هایشان، مدل، فهرستی از سناریوهای احتمالی را تولید می‌کند؛ در حالی که سناریوهای غیرمحمتمل، که به وقوع پیوستن آنها در واقعیت ممکن یا منطقی به‌نظر نمی‌رسد، باید از مناقشه حذف شود. درنهایت، سناریوهای محتمل و نوع حرکت هر بازیگر، که می‌تواند از هر وضعیت اولیه به آنها برگردد یا نه، مشخص شد.

توسعه مدل شبیه‌سازی

سناریوهای استخراجی از مدل مناقشه‌ای برای مدل‌سازی و تخصیص آب، وارد مدل شبیه‌سازی MODSIM^۱ می‌شود. شبیه‌سازی اولیه حوضه‌ها در مادسیم را مهندسیین مشاور جاماب و یکم به‌ترتیب برای حوضه‌های کارون و گاوخونی انجام دادند و جزئیات آن در پژوهش براساس سناریوهای مطرح‌شده تغییر کرد. در این مطالعه، سال ۱۳۸۵ به‌عنوان سال پایه و سال ۱۴۲۰ به‌عنوان افق طرح و ۳۵ سال آماری از ۱۳۴۵ تا ۱۳۸۵ برای شبیه‌سازی هر دو حوضه در نظر گرفته شده است. در مدل‌سازی کوشیده شد بیشترین اولویت تا حد امکان به بخش‌های

2- Driving forces, Pressures, State, Impact, Response

1- MODified SIMyld

جدول ۱- شاخص‌های پایداری، تعریف و مشخصات آنها

ابعاد	شاخص‌های پایداری	واحد	موقعیت در DPSIR	تعاریف
اقتصادی	آب به حساب‌نیامده	بدون بعد	حالت	مصرف آب بدون درآمد
	بهره‌وری آب در تولید کشاورزی و صنعتی	Kg/m ³	واکنش	نسبت وزنی میزان تولید محصولات کشاورزی آبی به کل آب مصرفی کشاورزی
اجتماعی	نرخ رشد جمعیت	درصد	بدون بعد	هر سال به ازای هر هزار نفر، چند نفر به جمعیت اضافه می‌شود
زیست محیطی	تنش آبی نسبی	بدون بعد	حالت- فشار	مجموع برداشت‌ها نسبت به ذخایر آب موجود
	وابستگی به آب سطحی	بدون بعد	حالت	میزان اتکای محدوده را به منابع آب خارج از محدوده
	راندمان آبیاری	درصد	بی بعد	میزان آب تلف شده در انتقال و توزیع و مصرف آبیاری
	نسبت سطح اراضی تحت کشت	بدون بعد	حالت	نسبت کل اراضی تحت کشت به کل مساحت حوضه و استان است
	سهم مصرف کشاورزی به کل مصرف	درصد	فشار	نسبت آب تخصیص یافته در این بخش به کل
	سهم مصرف شرب و صنعت به کل مصرف	درصد	فشار	نسبت آب تخصیص یافته در این بخش به کل
	تأمین نیاز زیست محیطی	درصد	حالت- تأثیر	نسبت آب تخصیص یافته به کل نیاز زیست محیطی
محیطی	آب خروجی به حوضه مجاور	بدون بعد	حالت - واکنش	معرف نسبت حجم منابع آب سطحی خروجی از حوضه مرزی به کل منابع آب سطحی حوضه است

ساخت شاخص‌های ترکیبی پایداری^۱ (CIS)

برای محاسبه شاخص‌های ترکیبی در ابتدا، باید تحلیل چندمتغیره انجام شود تا همبستگی زیادی بین شاخص‌ها وجود نداشته باشد و از محاسبه دوباره در هنگام ساخت شاخص ترکیبی خودداری شود و سپس به ترتیب، مراحل نرمال‌سازی داده‌ها، تعیین وزن و متراکم‌سازی شاخص‌ها انجام شود. با توجه به اینکه داده‌ها واحدهای اندازه‌گیری متفاوتی دارد، نرمال‌سازی آنها پیش از مرحله متراکم‌سازی ضروری است. در این مطالعه، تحلیل چندمتغیره با استفاده از روش PCA^۲ انجام می‌شود که روش آماری چندمتغیره‌ای است. در دیدگاه ریاضی، این روش مشتمل بر کد دادن به متغیرهاست تا میانگین صفر و واریانس واحد داشته باشند، محاسبه ماتریس همبستگی، پیدا کردن مقادیر ویژه و بردارهای ویژه متناظر با آنهاست. از روش min-max برای نرمال‌سازی شاخص‌ها استفاده شد؛ بنابراین، مقادیر شاخص‌های نرمال شده بین صفر و یک تغییر می‌کند که مقدار صفر و یک برای یک شاخص، نشان‌دهنده کمترین و بیشترین میزان پایداری است. معادلات کلی در معادله (۱) آورده شده است که در آن، S_i

شاخص نام نرمال شده، X_i مقدار واقعی شاخص نام، X_{min} و X_{max} مقادیر مینیمم و ماکسیمم برای شاخص نام است.

$$S_i = \frac{(X_i - X_{min})}{(X_{max} - X_{min})} \quad (1)$$

تکنیک وزن دهی، مهم‌ترین بخش در فرایند ساخت شاخص‌های ترکیبی است که موجب می‌شود اهمیت نسبی هر یک از شاخص‌های پایه مشخص شود که به دو دسته تقسیم می‌شود: یک، روش آماری و دوم، روش مشارکتی. در گروه اول، وزن شاخص‌ها با فرایندهای آماری و در گروه دوم، برپایه نظر کارشناسان به دست می‌آید. در این پژوهش، از روش PCA به عنوان نماینده گروه اول و روش AHP^۳ روشی بر مبنای تصمیم‌گیری چندمتغیره برای تعیین وزن با مقایسه زوجی به عنوان نماینده گروه دوم استفاده می‌شود. روش PCA برای تعیین وزن، ۴ مرحله دارد: اول، تعیین همبستگی شاخص‌ها؛ شاخص‌های بدون همبستگی، وزن یکسانی دارد و عوامل یکسانی را با یکدیگر تقسیم نمی‌کند. اگر همبستگی وجود داشته باشد، گام دوم، تعیین عوامل یکسان یا مؤلفه‌های اصلی و سهم هر شاخص در مؤلفه اصلی متناظرش است. در گام سوم، سهم هر شاخص در عامل متناظرش با استفاده از تحلیل بارهای عامل مشخص می‌شود. گام نهایی، تعیین وزن

1 - Composite Indicator of Sustainability

2- Principle Component Analysis

3 - Analytical Hierarchy process

به راهبرد مد نظر، یک وضعیت را به وجود می‌آورند و درنهایت، GMCR+ فهرستی از ۵۱۲ سناریوی احتمالی را تولید می‌کنند که ۵۰۷ مورد از آنها حالت‌های غیرمحمتمل است و باید از مدل حذف شود؛ در نتیجه، ۵ سناریوی محتمل باقی می‌ماند؛ به‌عنوان مثال، حوضه مبدأ نمی‌تواند هم‌زمان در وضعیت موجود باشد و در عین حال، در پروژه انتقال آب شرکت کند (YY-----)؛ بنابراین، تمام حالاتی که شامل این عبارت و حالات غیرممکن دیگر است، از مدل حذف می‌شود و درنهایت، تعداد حالت‌های ممکن به ۵ عدد کاهش می‌یابد. در گام بعد، اولویت‌های حوضه مبدأ به ترتیب عبارت است از: YNNY-----، NYYY----- و NYN----- و اولویت‌های حوضه مقصد به ترتیب عبارت است از: YYNN-----، YYNY----- و YYNY-----. در جدول ۳، تمام ۵ وضعیت ممکن و ۳ وضعیت تعادل ۱، ۴ و ۵، که در تمام تعاریف غیرهمکارانه پایدار است، آورده شده است.

در وضعیت ۱ (سناریوی غیرهمکارانه)، حوضه کارون در طرح انتقال مشارکت ندارد و طرح‌های توسعه خود را دنبال می‌کند و حوضه گاوخونی برای رفع کمبود آب خود، گزینه مدیریت عرضه و تقاضا را به کار می‌برد و تمام طرح‌های توسعه خود را متوقف می‌کند. در وضعیت‌های ۴ و ۵ (سناریوی همکارانه) حوضه کارون در پروژه انتقال آب، همکاری و در ازای آن از حوضه مقصد، عواید دریافت می‌کند که می‌تواند آن را صرف جلوگیری از محدود شدن طرح‌های توسعه و یا اجرای طرح مدیریت عرضه و تقاضا در حوضه کند. در این وضعیت، حوضه مقصد علاوه بر استفاده از گزینه مدیریت عرضه و تقاضا، تمام طرح‌های توسعه خود را نیز اجرا می‌کند. در این پژوهش، وضعیت ۴ به‌عنوان سناریوی همکارانه انتخاب و در ادامه، نتایج آن بررسی می‌شود.

تحلیل نتایج شاخص‌های ترکیبی

پس از استخراج سناریوهای همکارانه و غیرهمکارانه در گام قبلی و مدل‌سازی آنها در مادسیم، از نتایج به‌دست آمده برای ساخت CIS برای سهولت در بررسی پایداری حوضه‌ها استفاده می‌شود. در این مطالعه برای تحلیل چندمتغیره با مؤلفه‌های اصلی (PCA)، ضریب همبستگی ۰/۶ و ۰/۵ به ترتیب برای حوضه کارون و گاوخونی در نظر گرفته شده است (کفایتی و همکاران، ۲۰۱۷). شاخص‌ها با

بر پایه مؤلفه‌های مشترک و تحلیل بارهای این مؤلفه‌هاست. در این پژوهش، از نرم‌افزار SPSS برای روش PCA و روش‌های مبتنی بر آمار استفاده شده است. در روش AHP مبنای مقایسه و تصمیم‌گیری براساس نظرات کارشناسان در شرکت‌های مشاور یکم و جاماب بود و برای مقایسه زوجی وزن شاخص‌ها از نرم‌افزار Expert Choice استفاده شده است. برای متراکم‌سازی، دو روش حسابی و هندسی از معمول‌ترین روش‌هاست. در روش حسابی، جایگزینی و جبران کامل بین همه زیرشاخص‌ها وجود دارد (ناردو و همکاران، ۲۰۰۵)؛ یعنی مقادیر کم شاخص‌ها در این حالت با مقادیر زیاد از شاخص‌ها جبران می‌شود. در تضاد با این روش، روش هندسی، جایگزینی و جبران کامل بین همه شاخص‌ها برقرار نمی‌کند. روش متراکم‌سازی هندسی، برخلاف روش حسابی، تفاوت بین شاخص‌ها را در نظر می‌گیرد و عملکرد شاخص‌های ضعیف را نشان می‌دهد.

بنابراین، اگر اختلاف بین این شاخص‌ها مهم باشد، روش هندسی مناسب‌تر است. روش‌های حسابی و هندسی به ترتیب، در معادله‌های (۲) و (۳) نشان داده شده است که در آن، I نشان‌دهنده شاخص متراکم‌شده، N تعداد شاخص‌ها، S_i مقدار شاخص i و W_i وزن شاخص i HSJ. در جدول ۲، نشانه‌گذاری روش‌های محاسبه CISها آورده شده است:

$$I = \sum_{i=1}^N W_i S_i \quad (2)$$

$$I = \sum_{i=1}^N S_i^{W_i} \quad (3)$$

پس از ساخت CISها، وابستگی این شاخص‌ها به نوع روش استفاده‌شده بررسی می‌شود.

جدول ۲- نشانه‌گذاری روش‌های انتخابی برای ساخت

شاخص‌های ترکیبی		
روش متراکم‌سازی		روش وزندهی
هندسی	حسابی	
PCAm	PCAA	PCA
AHPm	AHPa	AHP

نتایج و بحث

تحلیل مدل مناقشه‌ای CMCR+

پس از تعیین بازیگران (حوضه مبدأ و مقصد)، انتخاب‌ها و راهبردهایشان (۵ وضعیت برای حوضه مبدأ و ۴ وضعیت برای حوضه مقصد)، بازیگران با انتخاب گزینه بلی یا خیر

آزمون کولوگروف اسمیرنوف ($p < 0.05$ است). داده‌ها به‌صورت نرمال توزیع شده است؛ به همین علت از آزمون همبستگی پارامتری پیرسون استفاده می‌شود. نتایج حوضه مبدأ (قسمت در سایه) و حوضه مقصد (قسمت روشن) در سناریوی غیرهمکارانه در جدول ۷ آورده شده است. نتایج نشان می‌دهد بین روش‌های مختلف CIS، همبستگی مثبت و زیادی وجود دارد. ساختار هر یک از روش‌های وزن‌دهی و متراکم‌سازی، عامل مهمی در کمی‌سازی پایداری است؛ بنابراین، همبستگی بین CIS‌هایی که از روش تحلیل سلسله‌مراتبی و به‌صورت حسابی ترکیب شده‌اند با CIS‌هایی که از روش تحلیل مؤلفه‌های اصلی و به‌صورت هندسی ساخته شده است، زیاد نیست. پژوهش‌های بیشتری باید انجام شود تا اعتبار CIS‌ها را به‌صورت تجربی اثبات کند؛ ولی به نظر می‌رسد آنها می‌توانند به‌عنوان ابزار مناسبی در تصمیم‌گیری مسائل کلان با ابعاد پیچیده برای سیاست‌گذاران بخش آب راهگشا باشند.

ضرایب همبستگی کمتر از این مقادیر به‌عنوان شاخص‌های اصلی در نظر گرفته نمی‌شود. نتایج نشان داد تمام شاخص‌های انتخابی در ساخت CIS‌ها در هر دو حوضه و هر دو سناریو، ضرایب همبستگی بیشتر از مقادیر ذکر شده برای همه PC‌ها دارند و در نتیجه، به‌عنوان مؤلفه‌های اصلی در نظر گرفته می‌شوند. جدول ۴، مقادیر بردار ویژه حوضه مبدأ در سناریوی غیرهمکارانه، جدول ۵، نتایج وزن به‌دست‌آمده از روش‌های مختلف را در سناریوی غیرهمکارانه و جدول ۶، CIS استخراج‌شده از روش‌های مختلف را نشان می‌دهد. گفتنی است، از ارائه تمامی جدول‌ها به‌علت تعداد زیاد آنها خودداری شده است. پس از ساخت CIS‌ها، تحلیل مقایسه‌ای آنها انجام شد تا مشخص شود آیا همه آنها مفاهیم یکسانی را برای پایداری حوضه در انتقال بین حوضه‌های نشان می‌دهند. برای این منظور، همبستگی بین شاخص‌های پایداری ترکیبی بررسی شد. برای تحلیل همبستگی باید بررسی شود شاخص‌های پایداری از چه توزیع آماری پیروی می‌کند. نتایج نشان می‌دهد توزیع CIS‌ها به‌صورت نرمال است (در

جدول ۳- حالات ممکن و تعادل استخراجی از مدل مناقشه‌ای GMCR+

۵	۴	۳	۲	۱	ترتیب	
N	N	N	N	Y	وضعیت موجود	
Y	Y	Y	Y	N	انتقال آب	
Y	Y	Y	Y	N	دریافت عواید برای انتقال آب	حوضه مبدأ
Y	Y	Y	Y	Y	توسعه صنعت و کشاورزی	
Y	N	Y	N	N	مدیریت عرضه و تقاضا	
Y	Y	Y	Y	N	انتقال آب	
Y	Y	N	N	N	توسعه صنعت و کشاورزی	حوضه مقصد
N	N	N	N	Y	مدیریت عرضه و تقاضا	
Y	Y	Y	Y	N	پرداخت عواید برای انتقال آب	

جدول ۴- بردارهای ویژه استخراجی از PCA حوضه مبدأ در سناریوی غیرهمکارانه

۴	۳	۲	۱	شاخص‌ها
-۰/۱۴۵	-۰/۷۶۰	۰/۲۰۰	۰/۳۰۸	آب به‌حساب‌نیامده
۰/۲۸۴	۰/۰۳۰	-۰/۴۰۳	۰/۷۱۰	بهره‌وری آب در تولید کشاورزی و صنعتی
۰/۳۹۶	۰/۳۵۷	۰/۶۳۰	۰/۱۸۲	نرخ رشد جمعیت
۰/۵۲۴	۰/۱۵۲	-۰/۶۳۶	۰/۲۰۳	تنش آبی نسبی
۰/۰۰۴	-۰/۰۷۳	۰/۱۶۰	۰/۸۵۳	وابستگی به آب سطحی
-۰/۰۸۸	۰/۴۲۷	-۰/۰۰۴	۰/۷۲۸	راندمان آبیاری
۰/۰۳۷	۰/۳۲۱	۰/۷۳۰	-۰/۱۶۴	نسبت سطح اراضی تحت کشت
۰/۶۸۰	-۰/۴۸۰	۰/۳۲۸	-۰/۱۶۶	سهم مصرف کشاورزی به کل مصرف
۰/۰۵۰	۰/۱۱۵	-۰/۱۷۷	-۰/۹۲۲	سهم مصرف شرب و صنعت به کل مصرف
۰/۱۱۹	۰/۰۵۶	-۰/۱۲۸	-۰/۹۳۸	تأمین نیاز زیست‌محیطی

جدول ۵- وزن‌های به‌دست آمده برای سناریوی غیرهمکارانه

AHP (درصد) روش		PCA (درصد) روش		شاخص
حوضه مقصد	حوضه مبدأ	حوضه مقصد	حوضه مبدأ	
۱۳/۴	۱۵/۸	۳/۷	۶/۹	آب به حساب‌نیامده
۲/۳	۵/۱۳	۳/۳	۱۳/۸	بهره‌وری آب در تولید کشاورزی wkujs صنعتی
۸/۴	۷/۲	۲	۵/۵	نرخ رشد جمعیت
۱۱/۴	۱۳/۶	۱۵	۳/۵	تنش آبی نسبی
۹/۴	۵/۵	۱۰	۶/۶	وابستگی به آب سطحی
۱۵/۸	۲۳/۵	۱۹	۱۲	راندمان آبیاری
۱۵	۷/۲	۹	۳/۸	نسبت سطح اراضی تحت کشت
۷/۶	۶/۵	۱/۵	۳/۴	سهم مصرف کشاورزی به کل مصرف
۱۴/۹	۱۱/۹	۱۸/۴	۱۵	سهم مصرف شرب و صنعت به کل مصرف
۱/۹	۳/۷	۱۸/۲	۲۰/۶	تأمین نیاز زیست‌محیطی
۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	کل

جدول ۶- شاخص‌های ترکیبی ساخته‌شده از روش‌های مختلف

روش متراکم‌سازی	سناریوی غیرهمکارانه مبدأ	سناریوی همکارانه مبدأ	سناریوی غیرهمکارانه مقصد	سناریوی همکارانه مقصد
AHPa	۰/۴۰	۰/۲۶	۰/۴۱	۰/۴۲
AHPm	۰/۴۲	۰/۳۴	۰/۵۰	۰/۵۰
PCa	۰/۵۰	۰/۳۳	۰/۴۵	۰/۴۰
PCm	۰/۵۲	۰/۴۰	۰/۵۱	۰/۵۴

جدول ۷- نسبت ضریب همبستگی پیرسون برای سناریوی غیرهمکارانه

PCAm	PCAA	AHPm	AHPa	CIS
۰/۱۵۲	**۰/۵۱۲	۰/۴۸۱		AHPa
**۰/۶۹۶	۰/۲۹۷		**۰/۵۲۸	AHPm
**۰/۶۱۳		۰/۲۳۵	**۰/۶۲۱	PCAA
	**۰/۷۱۹	**۰/۷۲۶	۰/۴۱۵	PCAm

(*) Significance level $p < 0.05$, (**) Significance level $p < 0.01$

نتیجه‌گیری

روش‌های گوناگون برای ساخت CIS و مدل مناقشه‌ای به تحلیل ابعاد مسئله، کمک بیشتری می‌کند و براساس نتایج PCA به کارگیری تمام شاخص‌های انتخابی در ساخت CISها ضروری است. همچنین، همبستگی روش‌های مختلف CIS با توجه به متفاوت بودن ساختار آنها پذیرفتنی است. در انتها، نتایج نشان می‌دهد با انتقال آب به حوضه مقصد، در صورت اجرای طرح‌های توسعه و به کار نگرفتن مدیریت عرضه و تقاضا در این حوضه، پایداری حوضه مقصد، افزایش زیادی نمی‌یابد که در درازمدت، مشکلات موجود را به آن بازمی‌گرداند. همچنین، با وجود وضعیت تعادل در منطقه از منظر نظریه بازی‌ها، اگر دریافت عواید توسط حوضه مبدأ صرف مدیریت عرضه و تقاضا در این حوضه نشود، به ناپایداری هیدرولوژیکی حوضه مبدأ منجر می‌شود.

این پژوهش در ابتدا، تحلیلی پایداری بر مبنای رویکرد غیرهمکارانه در نظریه بازی‌ها برای دستیابی به سناریوهای پایدار ارائه می‌دهد که به تعادل منطقه مورد مناقشه منجر می‌شود. در گام بعد، پایداری هیدرولوژیکی این سناریوها ارزیابی شدند. برای این منظور، چارچوبی برای ساخت CIS از روش‌های مختلف پیشنهاد شد که هدف آن، پایش پایداری هیدرولوژیکی برای تصمیم‌گیری در هنگام مواجهه با منطقه با وسعت زیاد و حجم انبوه داده‌هاست. سناریوهای مذکور در مدل مادسیم شبیه‌سازی شد تا اطلاعات اولیه و ضروری در ساخت شاخص‌ها به دست آید. همچنین، مدل آماری چندمتغیره PCA برای تعیین شاخص‌های اصلی به کار رفت. سپس، CISها با یک روش همبستگی تحلیل شد. نتایج نشان داد به کارگیری

- toward measurement. *Journal of Environmental Management*. 12: 133-143.
13. Madani K. and Hipel K. W. 2011. Non-Cooperative Stability Definitions for strategic Analysis of Generic Water Resources Conflicts. *Water Resource Management*. 25(8): 1949-1977.
 14. Nardo M. Saisana M. Saltelli A. Tarantola S. Hoffman A. and Giovannini E. 2005. Handbook on constructing composite indicators: methodology and user guide. Ispra, Italy: OECD Statistics Working Paper. 158 p.
 15. Nash J. 1950. Equilibrium Points in N-person Games. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 36(1): 48-49.
 16. Palop-Donat C. Paredes-Arquiola J. Solera A. and Andreu J. 2020. Comparing performance indicators to characterize the water supply to the demands of the Guadiana River basin (Spain). *Hydrological Sciences Journal*. 65(S3): 1060-1074.
 17. Philipot S. Hipel K. Johnson P. 2016. Strategic analysis of a water rights conflict in the south western United States. *Environmental Management*. 180: 247-256.
 18. Read L. Inanloo B. and Madani K. 2013. Assessing the Stability of Social Planner Solutions in Multi-Participant Water Conflicts. *World Environmental and Water Resources Congress. Showcasing the Future*, pp 2329-2337, Cincinnati, Ohio.
 19. Selbirak T. (1994). Some concepts of non-myopic equilibria in games with finite strategy sets and their properties. *Annals Operations Research*. 51(2): 73-82.
 20. Wang Q. Li S. and Li R. 2019. Evaluating water resource sustainability in Beijing, China: Combining PSR model and matter-element extension method. *Journal of Cleaner Production*. 206(1): 171-179.
- منابع**
۱. رثوفی ی. شوریان م. و عطاری ج. ۱۳۹۴. طراحی ابعاد سیستم انتقال آب بین حوضه‌های با لحاظ شاخص‌های تصمیم‌گیری در حوضه‌های آبریز مبدأ و مقصد. *مجله تحقیقات منابع آب ایران*. ۱۱(۱): ۴۹-۶۰.
 ۲. صادقی س.ح.ر. کاظمی کیا س. خیرفام ح. و حزباوی س. ۱۳۹۵. تجارب و پیامدهای انتقال آب بین حوضه‌ای در جهان. *مجله تحقیقات منابع آب ایران*. ۱۲(۲): ۱۲۰-۱۴۰.
 ۳. محمدی ح.ر. حکیمی خرم. ع. و احمدی ا. ۱۳۹۸. امکان‌سنجی اجرای پروژه‌های انتقال آب بین حوضه‌ای در ایران (مطالعه موردی: طرح انتقال آب بهشت‌آباد- فلات مرکزی). *پژوهش‌های جغرافیای انسانی*. ۵۱(۴): ۱۰۷۳-۱۰۹۲.
 ۴. مهندسین مشاور جاماب. ۱۳۹۱. ارزیابی منابع آب ملی: حوضه آبریز دز و کارون. گزارش فنی وزارت نیرو. ۵۰۲ ص.
 ۵. مهندسین مشاور یکم. ۱۳۹۱. ارزیابی جامع منابع آب ملی: حوضه آبریز گاوخونی. گزارش فنی وزارت نیرو. ۲۹۹ ص.
 6. Brundtland GH. 1987. *Our common future/world commission on environment and development*. Oxford; New York: Oxford University Press. 400 p.
 7. Fang L. Hipel K. and Kilgour D. 1993. *Interactive decision making: the graph model for conflict resolution*. Wiley, New York. 221 p.
 8. Fraser N.M. and Hipel K.W. 1979. Solving complex conflicts. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*. 9(12): 805-816.
 9. Gohari A. Eslamian S. Mirchi A. Abedi-Koupaei J. Massah Bavani A. and Madani K. 2013. Water transfer as a solution to water shortage: A fix that can Backfire. *Journal of Hydrology*. 491: 23-39.
 10. Howard N. 1971. *Paradoxes of rationality: theory of met games and political behavior*. Cambridge: MIT. 248 p.
 11. Kefayati M. Saghafian B. Ahmadi A. and Babazadeh H. 2017. Empirical evaluation of river basin sustainability affected by inter-basin water transfer using composite indicators. *Water and Environment Journal*. 32(1): 104-111.
 12. Liverman D. Hanson M. Brown B. and Merideth R. 1988. *Global sustainability:*