

یک مدل ریاضی چندهدفه، برای تخصیص آب مجازی در صنعت غذایی استان خوزستان

چکیده

هدف تحقیق حاضر بهینه سازی بهره برداری از منابع آبی سدهای استان خوزستان است. برای این منظور، در این تحقیق به دنبال بهینه سازی هزینه و زمان ارسال آب به هر یک از شهرها از مجموع سدهای موجود در استان خوزستان می باشیم. مدل با استفاده از روش محدودیت اپسیلون حل شده است. طبق نتایج ارائه شده در تحقیق حاضر، آب رسانی از سد بالارود به شهرهای اهواز، ایذه، آبادان، باغملک و بندر امام خمینی بهینه تشخیص داده نشده است. در حالیکه همین سد به شهرهای اندیمشک، دزفول، شوش، شوشتر و گتوند میزان مشخصی آب ارسال می کند. علاوه بر این، طبق تحلیل حساسیت انجام شده، مشخص شده است که افزایش تقاضای آب می تواند تا ۱.۹ درصد زمان ارسال و تا ۶ دهم درصد هزینه ارسال را افزایش می دهد. بنابراین اثر تقاضای آب بیشتر بر زمان و نه هزینه خود را نشان می دهد. افزایش بودجه اما می تواند بر هزینه و زمان اثرگذار باشد که البته بازهم اثر بیشتر بر زمان است تا هزینه. پارامتر بعدی فاصله زمانی بین شهرها و مجموعه تولیدی است که انتظار می رود با افزایش آن زمان ارسال آب تا ۱۳ درصد افزایش یابد که اثر نسبتاً قابل توجهی را نشان می دهد در حالیکه این اثر بر هزینه کمتر از زمان می باشد.

کلمات کلیدی: مدیریت آب سدها، بهینه سازی، محدودیت اپسیلون

مقدمه و بیان مساله

آب یکی از اساسی ترین عناصر زیست است. برخورداری از آب سالم برای نیازهای انسانی از عوامل اساسی و به منزله عامل تمدن شناخته شده است، به طوری که همواره مورد احترام جوامع بوده و رودخانه های مختلف در سراسر جهان، نزد جمعیت های ساکن در آن نواحی اهمیت زیادی داشته و مورد تقدس بوده است. هیچ کشوری بدون اطمینان از داشتن آب نمی تواند ثبات اقتصادی و اجتماعی و سیاسی خود را حفظ کند و بدون کاهش میزان آلودگی جو، امنیت نسل های آتی از نظر آب و غذا مبهم و بدین طریق، توسعه پایدار فقط در حد یک شعار دلفریب باقی خواهد ماند. امروزه کمبود و آلودگی آب، زندگی میلیون ها نفر از ساکنان زمین، خصوصاً کشورهای فقیر را به شدت با خطر مواجه ساخته است. از نگاه آمار ۸۰ درصد جمعیت جهان تنها به ۲۰ درصد از ذخایر آب سالم و بهداشتی دسترسی دارند. بیماری های ناشی از آب آلوده نیز عامل بسیاری از مرگ و میرها در کشورهای فقیر جهان است (حیدری کوشالشاہ و همکاران، ۲۰۲۳).

تولید هر نوع کالا و خدمات نیازمند آب است. آب مصرفی در فرآیند تولید یک محصول کشاورزی یا صنعتی، اصطلاحاً «آب مجازی»^۱ نامیده می شود. اصطلاح آب مجازی برای اولین بار توسط آلن در سال ۱۹۹۳ میلادی مطرح شد. در این ارتباط، مقاله ای که پروفیسور آلن در کنفرانس سالانه دانش در لندن ارائه کرد، به بحث پیرامون کمبود آب^۲ در خاورمیانه و مدیریت منابع برای عبور از بحران می پرداخت. در دهه های ۱۹۶۰ و ۱۹۷۰ تحقیقاتی توسط شوروی سابق برای بررسی تعادل آب در جهان انجام شد. در این تحقیقات میزان در دسترس بودن آب و استفاده از آن نیز مورد اشاره قرار گرفته است (یه و همکاران، ۲۰۱۸). امروزه محققین، دانشمندان و پژوهشگران بسیاری بر بازنگری در سیاستگزاری ها و رویکردهای مدیریتی منابع آب تأکید دارند. به طوری که رویکرد جایگزینی پیشنهادی از سوی آنها رویکرد مدیریتی آب مجازی می باشد. آب مجازی مجموع کل جریان آب های استفاده شده برای تولید یک کالا است (لی و همکاران، ۲۰۱۹). به عبارت دیگر آب مجازی مقدار آبی است که یک کالای صنعتی و یا یک فرآورده کشاورزی طی فرآیند تولید مصرف نموده تا به مرحله تولید نهایی برسد و مقدار آن معادل جمع کل آب مصرفی در مراحل مختلف زنجیره تولید از لحظه شروع تا پایان می باشد. یک کشور یا منطقه می تواند با انتخاب خود به عنوان وارد کننده ی آب مجازی، خود را از فشار بر منابع آبی اش آزاد سازد. شرایط اقلیمی و فرهنگی، مکان تولید، مدیریت و برنامه ریزی در حجم آب مجازی هر کالا مؤثر است و قطعاً

¹ Virtual water

² Water scarcity

مقدار آن در مورد یک کالا در مناطق مختلف، متفاوت است. تجارت آب مجازی می‌تواند منجر به واردات محصول از دیگر مناطق شود و به این ترتیب، از آثار منفی استفاده از منابع آب پرهیز می‌شود. به این ترتیب، دخالت دادن تجارت آب مجازی در سیاست‌های تجاری باعث مبادله‌ی میان حفاظت از منابع آب و امنیت غذایی می‌گردد (ونگ و همکاران، ۲۰۱۷).

در مقایسه با دو سه قرن گذشته، جهان در زمینه حفظ منابع طبیعی وارد دوران حساسی شده است. مدیریت صحیح و متناسب با منابع طبیعی موجود، ضرورتی مهم برای رسیدن به توسعه پایدار است. در میان همه منابع طبیعی، آب شیرین از اصلی‌ترین منابعی است که باید به آن اهمیت ویژه داد. بسیاری از کشورها به دلیل بهره‌برداری از آب فسیلی تجدید ناپذیر خود به منظور رفع فشار فوری ناشی از تنش آبی، سبب تهی‌کردن ذخایر و منابع آب، تضعیف توسعه اقتصادی و کاهش امنیت بلند مدت غذایی خود شده‌اند (وو و همکاران، ۲۰۱۹). تعدادی از محققان استدلال کردند که مناطق دارای کمبود آب می‌توانند با وارد کردن محصولاتی که دارای میزان آب مجازی بالایی هستند و صادر کردن محصولاتی که میزان آب مجازی بسیار کمی دارند، به سطوح بالایی از کارایی مصرف آب در سطح جهانی دست یابند (ژو و همکاران، ۲۰۲۰). آب مجازی، همراه با آب بومی یا محلی، امکان پاسخگویی به نیازهای آب در سطح ملی را فراهم می‌سازد. این امر، مفهوم مبادله آب مجازی را شکل می‌دهد. بر این اساس، کشورهای وارد کننده، علاوه بر کالاها، آب مصرفی برای تولید آن کالاها را نیز دریافت می‌کنند. بدین ترتیب آبی را که برای تولید این محصولات از منابع داخلی مورد نیاز بوده است ذخیره می‌نمایند. مبادله آب مجازی داخل کشورها، بین کشورها و حتی قاره‌ها می‌تواند به عنوان ابزاری برای ارتقای کارایی مصرف آب در سطح جهانی، دست یابی به امنیت آبی در مناطق دارای فقر آبی و برطرف کردن محدودیت‌های محیطی، با تعیین محل‌های مناسب برای تولید، استفاده شود (حیدری کوشال‌شاه و همکاران، ۲۰۲۳). با به حساب آوردن حجم آب مجازی مندرج در واردات مواد غذایی در کشورهای دچار کمبود آب، رابطه نزدیکی بین بر خورداری از آب و وابستگی به واردات مواد غذایی آشکار می‌گردد. بنابراین واردات مواد غذایی را می‌توان از شاخص‌های قوی در تعیین سطح کم آبی کشورها به حساب آورد (یه و همکاران، ۲۰۱۸).

تجارت آب مجازی^۱ یک اتفاق جدید نیست و همزمان با شکل‌گیری بازارها و گسترش مبادلات بین جوامع انسانی، این نوع تجارت نیز به صورت مبادلات محصولات کشاورزی گسترش پیدا کرد. با این وجود مفهوم آب مجازی و تجارت آن در طی چند سال اخیر وارد مباحث علمی و سیاست‌گذاری‌های ملی و بین‌المللی مدیریت و توسعه منابع آبی شده است. در سال‌های اخیر با افزایش شدید جمعیت جهان و

¹ Virtual Water Trading

تنش آبی در بسیاری از کشورها این ابزار به عنوان یکی از راهکارهای موثر در تأمین امنیت آبی و غذایی جوامع مختلف به خصوص مناطق مواجه به کم آبی مطرح گردید. ویچلنز (۲۰۰۱) نقش آب مجازی در تأمین امنیت غذایی کشورهای مختلف با تأکید بر کشور مصر مورد بررسی قرار داده است و بیان می‌کند که مسأله هزینه فرصت مصرف آب نیز از مؤلفه‌های کلیدی در رابطه با گسترش مفهوم آب مجازی و مبادلات آن می‌باشد که باید در تخصیص مؤثر و بهینه منابع آب موجود مد نظر قرار گیرد. با توجه به اهمیت موضوع سعی بر این است که در این نوشتار به صورت خلاصه مفهوم آب مجازی، تجارت آب مجازی، تخصیص آب مجازی و تأمین امنیت غذایی جوامع انسانی مورد بررسی قرار گیرد (ونگ و همکاران، ۲۰۱۷).

نظر به اینکه، دغدغه اصلی مهمترین صنایع و شرکت‌های بزرگ غذایی، تأمین امنیت غذایی و تخصیص مطلوب آب مجازی می‌باشد. با توجه به نیاز و ضرورت تخصیص آب مجازی در شرایط نوسانات اقلیمی در صنعت غذایی ایران به منظور ایجاد امنیت تغذیه، این تحقیق به صورت مطالعه موردی، صنعت غذایی استان خوزستان را مورد بررسی قرار داده و اقدام به طراحی مدلی جهت تخصیص آب مجازی می‌نماید. بنابراین معرفی و ارائه راهکار تخصیص آب مجازی بسیار لازم و ضروری به نظر می‌رسد. مدل ریاضی پیشنهادی در این تحقیق می‌تواند بر اساس مولفه‌های قیمت‌گذاری آب مصرفی صنعت غذایی و هزینه ارسال آن، منابع تأمین آب استان، سیاستهای تشویقی دولت و تجارت آزاد تعیین و تبیین گردد. بنابراین، مهمترین سهم مشارکت تحقیق عبارت است از طراحی مدل ریاضی جهت تخصیص آب مجازی در صنعت غذایی استان خوزستان به منظور تعیین نقش و جایگاه تجارت آب مجازی در مدیریت منابع آب بخش صنعت غذایی استان خوزستان.

باقیمانده مقاله به صورتی که مشخص شده سازماندهی می‌شود. در بخش دوم یک مطالعه تاریخی از تحقیقات گذشته ارائه شده است. در بخش سوم، مدلسازی ریاضی و جزئیات آن تبیین شده است. در بخش چهارم نتایج بکارگیری مدل ریاضی ارائه شده است و سرانجام در بخش پنجم یک نتیجه‌گیری به همراه پیشنهاداتی برای تحقیقات آتی ارائه شده است.

مرور ادبیات

فراکاسو و همکارانش در سال ۲۰۱۶، در مقاله‌ای به بررسی عوامل تعیین‌کننده اصلی آب مجازی دو جانبه (آب مورد استفاده در تولید محصولات یا خدمات) مرتبط با تجارت بین‌المللی در کالاهای کشاورزی در سراسر حوزه مدیترانه پرداختند. در این پژوهش جریان ناخالص دو جانبه آب مجازی در منطقه را در نظر گرفتند و بررسی نمودند که عوامل خاص صادرات و واردات به طور قابل‌توجهی با جریان‌های آب مجازی

در ارتباط هستند. یک رویکرد متوالی را دنبال کردند. از طریق مدل جاذبه تجاری، یک نسخه "تصفیه شده" از متغیری را که قصد داشتند توضیح دهند بدست آوردند، موردی که از مقدار جریان ناشی از عوامل خاص جفت که بر جریانهای تجاری دو جانبه تاثیر می گذارد آزاد است و به طور کامل تاثیر عوامل تعیین کننده خاص بر تجارت آب مجازی را منعکس می کند. تعدادی از متغیرهای بالقوه توضیحی بالقوه، اعم از آب به موانع تجاری، از سرانه تولید ناخالص داخلی^۱ به قیمت های آبیاری، ارایه و آزمایش می شوند. برای شناسایی متغیرهایی که به توضیح جریان های دو جانبه آب مجازی کمک می کنند، یک روش انتخاب مدل براساس میانگین گیری مدل اتخاذ نمودند. یافته ها یکی از نتایج بحث برانگیز اصلی در این زمینه را تایید می کند: کمبود منابع آبی لزوماً منجر به "صادرات" بزرگ تر از آب مجازی نمی شود، همانطور که انتظار می رود. همچنین شواهدی پیدا کردند که قیمت های بالاتر آب آبیاری (افزایش) صادرات آب مجازی (واردات) را کاهش می دهند. چن و همکاران در سال ۲۰۱۷، در پژوهشی ردپای آب چین در استان و انتقال بین المللی آب مجازی را مورد مطالعه قرار دادند. مفاهیم جای پای آب و آب مجازی یک روش جدید برای کاهش کمبود منطقه ای منابع آب چینی به وسیله تخصیص منابع آب تجاری فراهم می کند. در این مطالعه، یک مدل ورودی - ستانده محلی برای ارزیابی کمی ردپای آب هر استان در چین و تعیین کمیت انتقال بین استانی آب مجازی به کار گرفته شد. نتایج نشان داد که تنوع قابل توجهی در رد پاها در استان های مختلف وجود داشته است. ایالات متحده با جمعیت بزرگ تر و تولید ناخالص داخلی بیشتر، جای پای آب بیشتری داشت و نواحی توسعه یافته نسبت به جای پای آب خارجی دارای نسبت های بالاتر بودند. از دیدگاه تقاضای نهایی، مصرف محلی عامل اصلی در ایجاد جای پای آب این استان ها بود. از دیدگاه ساختار بخشی، ردپای آب کشاورزی نسبت بیشتری در این ایالات دارد. انتقال آب مجازی در چین از مناطقی با منابع آب فراوان برای کسانی که از کمبود آب رنج می برند رخ نداده است، اما به طور کلی از غرب به شرق، از خشکی تا نواحی ساحلی و از کشورهای توسعه نیافته تا مناطق توسعه یافته اتفاق افتاد. بسیاری از مناطق دارای کمبود آب نیز دارای خالص صادرات آب مجازی بزرگ هستند. کمبود آب در چین با افزایش کارایی مصرف آب صنعتی در مناطق با کمبود آب، انتقال صنایع ویژه آب به مناطق با منابع آب فراوان و توسعه صنایع با مصرف آب پایین کاهش خواهد یافت. وانگ و همکارانش در سال ۲۰۱۷، در مقاله ای تجارت حقوق آب کشاورزی و صادرات آب مجازی در یک منطقه آبیاری در چین را مورد مطالعه قرار دادند و سپس یک مدل برنامه ریزی دو سطحی با اهداف چندگانه ایجاد کردند. این مدل در منطقه آبیاری هتائو با استفاده از روش شمارشی مورد استفاده قرار گرفت. تغییرات استفاده از آب جدید از مصرف کنندگان مختلف، منافع مناطق آبیاری و

¹GDP

مصرف کنندگان آب با قیمت‌های متفاوت آب مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت و طرح‌های بهینه‌سازی انتخاب شدند. نتایج نشان می‌دهد که مدل از طریق تنظیم متغیرهای قیمتی شامل قیمت تجارت حقوق آب و قیمت غرامت آب مجازی برای بهینه‌سازی تخصیص مقدار آب کشاورزی در بین مصرف کنندگان مختلف آب صرفه‌جویی می‌کند، که در عین حال مدیریت آبیاری و مصرف کنندگان آب سود بیشتری کسب می‌کنند. طرح بهینه می‌تواند تمایل به صرفه‌جویی در آب در منطقه آبیاری را افزایش داده و قابلیت رقابت کاربر آب کشاورزی را در برابر مصرف‌کننده آب غیر کشاورزی افزایش دهد. این مطالعه یک روش و مبنای علمی برای اداره مدیریت منابع آب در سیاست‌گذاری آن‌ها فراهم می‌کند. آویسو و همکاران در سال ۲۰۱۸، مقاله‌ای با عنوان یک مدل ورودی و خروجی چند منطقه‌ای برای بهینه‌سازی جریان تجارت آب مجازی در تولید محصولات کشاورزی را منتشر کردند. آنها اظهار داشتند که شروع تغییرات آب و هوایی منجر به تغییراتی در الگوی آب و هوا می‌شود و می‌تواند مسائل کمبود آب را تشدید کند و این امر می‌تواند به طور بالقوه بر بهره‌وری اقتصادی کشورها تأثیر بگذارد زیرا فعالیت‌های اقتصادی به ویژه برای کشورهای دارای صنعت کشاورزی بسیار وابسته به آب است. از مدل‌های ورودی-خروجی محیطی توسعه یافته اغلب برای تحلیل تعاملات بین سیستم‌های اقتصادی و اکولوژیکی استفاده می‌شود اما در این تحقیق، یک مدل ورودی و خروجی چند منطقه‌ای برای بهینه‌سازی تجارت آب مجازی بین مناطق مختلف جغرافیایی با در نظر گرفتن محدودیت منابع محلی محیط زیست، تقاضای محصول و بهره‌وری اقتصادی ایجاد شده است. کوآنلیانگ و همکاران در سال ۲۰۱۸، تخصیص بهینه منابع آب فیزیکی تلفیقی با تجارت آب مجازی در مناطق کم آب را در یک مطالعه موردی برای پکن چین مورد مطالعه قرار دادند. این مطالعه کاربرد ابتکاری تجارت آب مجازی در تخصیص سستی منابع آب فیزیکی در مناطق کم آب را فراهم می‌کند. یک مدل بهینه‌سازی چند هدفه برای بهینه‌سازی تخصیص منابع آب فیزیکی و آب مجازی به کاربران مختلف آب در پکن با توجه به مبادله سود اقتصادی و اثرات زیست محیطی مصرف آب، بهینه‌سازی شده است. چوچان و همکاران در سال ۲۰۱۸، در مقاله‌ای با عنوان الگوهای تجارت آب مجازی در ارتباط با عوامل محیطی و اقتصادی اجتماعی را در یک مطالعه موردی برای کشور تونس مورد بررسی قرار دادند. این مطالعه با هدف تجزیه و تحلیل پویایی در تجارت آب مجازی تونس در ارتباط با عوامل محیطی و اقتصادی اجتماعی مانند تواید ناخالص داخلی، زمین‌های آبیاری، بارش، جمعیت و کمبود آب انجام شده است. لی و همکاران در سال ۲۰۱۹، در پژوهشی با عنوان ارزیابی کارآمد و عادلانه و اکولوژیکی هماهنگی منابع آب منطقه‌ای را با در نظر گرفتن آب مرئی و مجازی مورد مطالعه قرار دادند. در این مقاله یک روش برای ارزیابی جامع از هماهنگی منابع آب منطقه‌ای، که در آن آب مرئی و مجازی در سیستم شاخص در

نظر گرفته می شود، توسعه یافته است. سریویدیها و الانگو در سال ۲۰۱۹، پژوهشی با عنوان تنوع زمانی در صادرات و واردات آب مجازی توسط هند از طریق محصولات غذایی و دامی انجام دادند. هدف این تحقیق کمی کردن تغییرات زمانی در تجارت آب مجازی هند از سال ۲۰۰۶ تا ۲۰۱۶ از طریق محصولات غذایی و دامی محبوب بوده است. وو و همکارانش در سال ۲۰۱۹، در مقاله ای با عنوان هیدرولوژی اجتماعی جهانی، مروری بر استفاده آب مجازی توسط اقتصاد دنیا از منابع بهره برداری تا مصرف شدن بعنوان مصرف نهایی را انجام دادند. این مقاله به بررسی استفاده آب مجازی جهانی از منبع بهره برداری تا مصرف نهایی از طریق معاملات بین منطقه ای در اقتصاد دنیا پرداخته است که توسط پایگاه داده های ورودی و خروجی جهانی برای سال ۲۰۱۴ منعکس شده است. بر اساس یک مدل حسابداری تجسمی توسعه یافته است که بطور کامل بازخورد آب مجازی مربوط به ورودی های اولیه را در نظر میگیرد. حجم کل تجارت جهانی آب مجازی در حدود ۳۰٪ از برداشت مستقیم آب شیرین جان تخمین زده شده است. همچنین بیان شده است که انتقال آب مجازی جهانی در تجارت های واسطه ای ۱.۴ برابر تجارت نهایی است. ژونگون و همکاران در سال ۲۰۲۰، در مقاله ای با عنوان نابرابری در تخصیص آب و پاسخ سیاست با توجه به تجارت مجازی آب را در یک مطالعه موردی در شهر لانژو، چین مورد مطالعه قرار دادند. آنها بیان کردند که مدیریت تخصیص آب که تجارت بین توسعه اقتصادی و حفاظت محیط زیست را متعادل می کند. در این مطالعه با معرفی یک رابطه بین آب و غذا، تجارت آب مجازی را در مدل پیشنهادی و مطالعه موردی معرفی کردند و با توجه به تأثیرات تغییرات آب وهوایی در تأمین آب فصلی، این مطالعه برنامه ریزی هر سال را به فص ها تقسیم می کند و در نهایت یک مدل دینامیکی دو هدفه برای تخصیص آب در یک منطقه خشک در چین فرموله کرده و اعمال می کند. هدف از این مطالعه تولید استراتژی تخصیص بهینه منابع آب در بین بخش های صنعتی، خانگی، کشاورزی و زیست محیطی و آشکارسازی تأثیرات بارش متغیر بر استراتژی تخصیص آب بوده است. یائو و همکاران در سال ۲۰۲۰، مقاله ای با عنوان یک چارچوب تحلیلی مبتنی بر داده جدید در تخصیص سلسله مراتبی آب که با انتقال آب آبی و مجازی یکپارچه شده است را منتشر کردند. در این تحقیق تخصیص بهینه انتقال آب آبی و مجازی را تحت شرایط مختلف هیدرولوژیکی و اقتصادی تضمین می کند. همچنین یک مدل تعادل استاکلبرگ-نش-هرسانی برای مقابله با درگیری های سلسله مراتبی بین دفتر امور آب و چندین بخش استفاده از آب و غلبه بر مشکلات مرتبط با کمبود آب و توزیع ناهموار ایجاد شده است. بریندا در سال ۲۰۲۰، در مقاله ای جریان های آب مجازی، رد پای آب و ذخیره آب حاصل از تجارت محصولات زراعی و دامی آلمان را مورد بررسی و مطالعه قرار

داد. آنها در این تحقیق تجارت آب مجازی آلمان با جهان را بصورت جامع ارزیابی کردند و ردپای آب ملی از طریق تجارت محصولات زراعی و دامی را از سال ۱۹۹۱ تا ۲۰۱۶ ارزیابی کردند.

در میان مطالعات داخلی نیز، می توان به تحقیقاتی مانند زیر اشاره کرد. برای مثال، تهامی پور و عابدی در سال ۱۳۹۶، به تجزیه و تحلیل تجارت آب مجازی در بخش صنعت استان زنجان پرداختند. در این پژوهش از اطلاعات طرح آمارگیری از کارگاه های صنعتی ده نفر کارکن و بیشتر مرکز آمار ایران برای سال ۱۳۸۹-۱۳۹۰ استفاده کردند. ضمن دسته بندی صنایع نیاز آبی و تولیدات این صنایع میزان آب مورد نیاز آنها تخمین زده شد نتایج نشان داد که بیشترین محتوای آب مجازی استان زنجان به صنعت تولید زغال کک و پالایشگاه صنعت تولید کاغذ و محصولات کاغذی و صنعت مواد غذایی و آشامیدنی به ترتیب با میانگین ۳۲/۷۰ و ۲۶/۱۴ و ۱۱/۶۳ مترمکعب بر میلیون ریال اختصاص دارد. نفرزادگان و همکارانش در سال ۱۳۹۶، استفاده از برنامه ریزی خطی بازه ای تعاملی برای تخصیص بهینه آب و سطح کشت با توجه به محتوای آب مجازی و فاکتورهای اقتصادی-اجتماعی را در یک مطالعه موردی در دشت درودزن- کربال مورد مطالعه قرار دادند. مدل توسعه یافته شامل چهار هدف دربرگیرنده فاکتورهای اقتصادی-اجتماعی، محتوای آب مجازی محصولات و تأمین نیاز آبی محیط زیست است. برای حل مدل، چهار سناریو (فرض) برای سطوح کشت در نظر گرفته شده است. کاخکی و همکاران در سال ۱۳۹۶، تغییر اقلیم و مدیریت آب مجازی را مورد تجزیه و تحلیل و بررسی قرار دادند. در این پژوهش عنوان نمودند که تغییر توزیع تجارت غذا در اندازه گیری میزان تاثیر تغییر اقلیم حایز اهمیت است. اویسی و همکاران در سال ۱۳۹۸، پژوهشی با عنوان بررسی آب مجازی و ردپای اکولوژیک آب در محصول گندم آبی استان اصفهان را نیز انجام دادند. آنها در این تحقیق معتقدند که استان اصفهان با وجود خشکسالی های اخیر، تغییرات اقلیمی و افزایش رو به رشد جمعیت، همچنین گسترش فعالیت های صنعتی و کشاورزی با بحران آب مواجه است. بنابراین برای مقابله با این بحران می بایست راهکارهای اساسی از جمله بررسی آب مجازی و ردپای اکولوژیک آب محصولات استراتژیک در بخش کشاورزی، برای مدیریت منابع آبی در معرض خطر در نظر گرفت. هدف از این مطالعه بررسی آب مجازی و ردپای اکولوژیک آب محصول گندم استان اصفهان از سال زراعی ۸۶-۱۳۸۵ تا ۹۴-۱۳۹۳ است. دهقان و همکاران در سال ۱۳۹۸ به بررسی و ارزیابی میزان آب مجازی و ردپای آب در بخش کشاورزی استان خراسان جنوبی پرداخته اند. همچنین در آن تحقیق نتایج حاصل با میزان آب مجازی بخش صنایع آب بر استان مقایسه گردیده است. در این پژوهش میانگین آب مجازی محصولات عمده ی کشاورزی استان خراسان جنوبی حدود ۲۹۰۰ متر مکعب برای تولید هر تن محصول است که این مقدار برای صنایع آب بر استان حدود ۲۱ مترمکعب بر تن برآورد شده است. ابوترابی و همکاران در سال

۱۳۹۹، برآورد ردپای آب و آب مجازی برای تعیین الگوی کشت بهینه را در یک مطالعه موردی برای شهرستان های قائنات و زیرکوه انجام دادند. آنها بیان داشتند برای اجتناب از پیامدهای منفی بیلان منفی آب در شهرستان های قائنات و زیرکوه، محدودیت کشت محصولات زراعی با نیاز آبی بالا ضروری است. در این پژوهش با استفاده از برنامه ریزی غیرخطی چندهدفه (MOP)، الگوی کاشت بهینه با هدف حداکثرسازی سودخالص و حداقل سازی آب مجازی، ردپاهای آب سبز، آبی، خاکستری و سفید محصولات زراعی منطقه قائنات و زیرکوه پیشنهاد شده است. باغبانیان و همکاران در سال ۱۳۹۹، کاربرد برنامه ریزی آرمانی در تعیین الگوی کشت محصولات زراعی با تاکید بر آب مجازی در استان کردستان را مورد مطالعه قرار دادند. بنابراین، مطالعه آنها با هدف ارزیابی اقتصادی الگوی کشت محصولات زراعی استان کردستان به تفکیک شهرستان های آن با تاکید بر حداقل آب مجازی طرح ریزی و اجرا شده است. حکمت نیا و همکاران در سال ۱۳۹۹، تعیین و ارزیابی ردپای آب های سبز، آبی و خاکستری در تجارت بین المللی محصولات کشاورزی ایران را نیز انجام دادند. آنها در این تحقیق بیان کردند که برای کاهش بحران آب، تجارت بین المللی محصولات کشاورزی می تواند نقش بسزایی در توزیع مجدد منابع آب داشته باشد زیرا کالاهای مورد معامله حاوی مقدار زیادی آب مجازی هستند. کدخدایی در سال ۱۳۹۹، به بررسی کاربردهای آب مجازی در مدیریت منابع و مصارف آب در ایران پرداخت. در این مقاله کاربردهای آب مجازی در مدیریت منابع و مصارف آب در ایران با استفاده از روش تاپسیس مورد مقایسه و ارزیابی قرار گرفته و رتبه بندی شدند. کلاهی و همکاران در سال ۱۳۹۹، پژوهشی با عنوان بهینه سازی الگوی کشت براساس مفهوم آب مجازی به کمک برنامه ریزی خطی را در منطقه دشت عمرانی گناباد، استان خراسان رضوی انجام دادند. بر این اساس هدف از تحقیق آنها، تعیین الگوی کشت بهینه براساس مفهوم آب مجازی و سوددهی اقتصادی به کمک برنامه ریزی خطی در دشت عمرانی گناباد میباشد. صفدری و همکاران در سال ۱۴۰۰، پژوهشی با عنوان ردپای مصرف آب و تجارت آب مجازی خرما در ایران انجام داده اند. بنابراین هدف این تحقیق بررسی ردپای مصرف آب کشت خرما در ایران با استفاده از سه آب خاص به نام های آب آبی، آب سبز و آب خاکستری می باشد. سپس با استفاده از مفهوم ردپای آب مجازی، ردپای تجارت آب برای محصول خرما طی سال های ۲۰۱۸-۲۰۰۱ محاسبه شد.

با بررسی سوابق پیشین و تحقیقاتی که در زمینه تخصیص آب مجازی صورت گرفته است مشاهده گردید که روش پیشنهادی با ارائه یک مدل ریاضی می تواند بهره وری بیشتری نسبت به سایر روشها داشته باشد. بنابراین، با توجه به بررسی و مرور مبانی نظری، تاکنون مدلسازی ریاضی دوسطحی صورت نگرفته است؛ همچنین در صنعت مورد مطالعه و استان مورد نظر به این مهم توجهی نشده است؛ بنابراین پژوهش حاضر با

رویکرد پژوهش کاربردی در راستای این مهم برآمده است تا در رفع نیاز صنعت مربوطه در قلمروی مکانی مورد نظر در این خصوص گامی برداشته باشد. بنابراین در این تحقیق مدل ریاضی دوسطحی جهت تخصیص آب مجازی در صنعت غذایی استان خوزستان طراحی می‌شود.

روش تحقیق

این پژوهش به لحاظ قلمروی موضوعی با ارائه مدل ریاضی دوسطحی تخصیص آب مجازی کار خود را در پیش گرفته است که با کمک الگوریتم محدودیت اپسیلون حل دقیق مدل ریاضی را در نرم افزار GAMS تعیین می‌کند. از نظر قلمروی مکانی این تحقیق داده‌های مورد نیاز را از صنایع غذایی استان خوزستان استخراج کرده است. به این صورت که مشخصات کلیه شرکت‌ها و کارخانجات تولیدی مواد غذایی در این استان با ذکر نوع محصول و مشخصات و نشانی آنها در ادامه آورده شده است. که از مجموع ۱۴۸ شرکت صنایع غذایی، ۱۳۴ شرکت فعال در ۱۶ شهر این استان شناسایی شده است. از حیث قلمروی زمانی این تحقیق داده‌های مورد نیاز را در فاصله زمانی زمستان ۹۸ تا بهار ۹۹ از منابع مورد نظر جمع‌آوری نموده است. بنابراین، در این تحقیق با ارائه یک مدل دو سطحی مبتنی بر برنامه ریزی ریاضی به تخصیص آب مجازی در صنعت غذایی استان خوزستان اقدام می‌شود. در ادامه با معرفی فرضیات حاکم بر مدل، پارامترها، متغیرها، توابع هدف و محدودیت‌های مدل ریاضی را بیان می‌کنیم.

فرضیات مدل ریاضی

فرض اول: محدودیت بودجه در نظر گرفته شده است

فرض دوم: هر سد می‌تواند به چند شهر آب رسانی کند

فرض سوم: هر شهر میتواند از چند سد آب بگیرد.

نمادگذاری

مجموعه‌ها:

I : مجموعه سدها

J : مجموعه شهرها

K : مجموعه تولیدکننده (شهرک‌ها یا کارخانجات)

T : مجموعه دوره‌ها

O : مجموعه توالی‌ها انتقال آب به تولید کننده‌ها (شهرک‌ها یا کارخانجات)

اندیس‌ها:

$i \in I$ اندیس متعلق به مجموعه سدها

$j \in J$ اندیس متعلق به مجموعه شهرها

$k \in K$ اندیس متعلق به مجموعه تولید کننده (شهرک‌ها یا کارخانجات)

$t \in T$ اندیس متعلق به مجموعه دوره‌ها

$o \in O$ اندیس متعلق به مجموعه توالی‌ها انتقال آب به تولید کننده‌ها (شهرک‌ها یا کارخانجات)

پارامترها:

dk_{kt} : میزان مورد نیاز آب خاکستری مجموعه تولیدی

U_j : تعداد کل مراکز تولید که به شهر j متصل است.

cap_i : ظرفیت سد i ام

b_i : میزان بودجه اولیه

M : عدد خیلی بزرگ

td_{jk} : فاصله زمانی بین شهر تا مجموعه تولیدی k

ts_{jk} : فاصله زمانی درون مجموعه تولیدی (شهرک‌ها) k که در شهر j ام قرار دارند.

$td_{kk'}$: فاصله زمانی بین مجموعه تولیدی k تا مجموعه تولیدی k'

cd_{ijt} : هزینه انتقال آب بر اساس میزان دبی به ازای هر واحد فاصله از سد i ام به شهر j ام

w_{jk} : میزان اهمیت وزنی زمانی مجموعه تولیدی k ام در شهر j ام

$Velocity_{ijt}$: میزان سرعت آب از سد i به شهر j در دوره t

TE_{ijt} : میزان زمان رسیدن اب از سد i به شهر j

$$TE_{ijt} = \frac{dis_{ij}}{Velocity_{ijt}}$$

$perc_i$: درصد قابل استفاده از ظرفیت آبی سد i ام

UTW_k : حد بالای پنجره زمانی برای مجموعه تولیدی k ام

LTW_k : حد پایین پنجره زمانی برای مجموعه تولیدی k ام

α_{kj} : اگر مجموعه تولیدی k ام در شهر j ام باشد یک در غیر اینصورت صفر

متغیرها:

x_{ijt} : اگر از سد i ام به شهر j ام در دوره t آب انتقال داده شود یک در غیر اینصورت صفر.

z_{jkt} : اگر مجموعه تولیدی k ام متعلق به شهر j در توالی (ترتیب انتقال آب) o در دوره t باشد یک در غیر اینصورت صفر.

y_{ijt} : مقدار آب مجازی که از سد i ام به شهر j ام در دوره t آب انتقال داده می شود.

ct_{jkt} : زمان اتمام انتقال آب به مجموعه تولیدی k ام متعلق به شهر j در دوره t می باشد.

TA_{jt} : ماکزیمم زمان رسیدن آب از سد به شهر j ام در دوره t .

توابع هدف و محدودیت ها:

$$Min(z_1) = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{t \in T} CD_{ijt} \cdot d_{ij} \cdot x_{ijt}$$

$$Min(z_2) = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{t \in T} ct_{jkt} \cdot w_{jk}$$

$$\sum_{i \in I} y_{ijt} = \sum_{k \in K} Dk_{kt} \cdot \alpha_{kj} \quad \forall j \in J, t \in T \quad (1)$$

$$y_{ijt} \leq M \cdot x_{ijt} \quad \forall i \in I, j \in J, t \in T \quad (2)$$

$$y_{ijt} \geq x_{ijt} \quad \forall i \in I, j \in J, t \in T \quad (3)$$

$$\sum_{j \in J} y_{ijt} \leq perc_i \cdot cap_i \quad \forall i \in I, t \in T \quad (4)$$

$$z_1 \leq b_t \quad \forall t \in T \quad (5)$$

$$TA_{jt} \geq TE_{ijt} \cdot X_{ijt} \quad \forall i \in I, j \in J, t \in T \quad (6)$$

$$\sum_{o \in O; o \leq U_j} z_{jkot} = \alpha_{kj} \quad \forall j \in J, k \in K, t \in T \quad (7)$$

$$\sum_{k \in K} z_{jkot} = 1 \quad \forall j \in J, o \in O, t \in T; o \leq U_j \quad (8)$$

$$ct_{jkt} \geq (TA_{jt} + tdj_{jkt} + ts_{jk}) - M \cdot (1 - z_{jkot}) \quad \forall j \in J, o \in O, t \in T; o = 1 \quad (9)$$

$$ct_{jk't} \geq ct_{jkt} + (td_{kk't} + ts_{jk'}) - (1 - z_{jk'ot} + 1 - z_{jko-1t}) \cdot M \quad \forall j \in J, k, k' \in K, o \in O, t \in T; 1 < o \leq U_j \quad (10)$$

$$\alpha_{kj} \cdot LTW_k \leq ct_{jkt} \leq \alpha_{kj} \cdot UTW_k \quad \forall j \in J, o \in O, t \in T; o \leq U_j \quad (11)$$

تابع هدف اول مقدار هزینه ارسال به شهرها را برحسب دبی حساب می کند. تابع هدف دوم زمان ارسالی آب به هریک از شهرها را به صورت مجموع وزنی حساب می کند. محدودیت (۱) مقدار انتقال آب به شهرها را مشخص می کند. محدودیت (۲) و (۳) متغیر X_{ijt} براساس مثبت بودن متغیر Y_{ijt} مشخص می کند. محدودیت (۴) مقدار انتقال آب به شهرها را براساس ظرفیت محدود می کند. محدودیت (۵) ضمانت می کند مقدار هزینه نباید بیشتر از مقدار بودجه در نظر گرفته شده باشد. محدودیت (۶) ماکزیم زمان رسیدن آب مجازی از سدها به شهر J را تعیین می کند. محدودیت (۷) توالی ارسال آب هر مجموعه تولیدی در شهرها مشخص می کند. محدودیت (۸) ضمانت می کند هر توالی O در هر شهر باید متعلق به یک مجموعه تولیدی باشد. محدودیت (۹) و (۱۰) زمان تکمیل انتقال آب به هریک از مجموعه های تولیدی را محاسبه می کند. محدودیت (۱۱) پنجره زمانی، زمان انتقال آب به هریک از مجموعه های تولیدی را محدود می کند.

روش حل مسأله

یکی از روشهای دقیق بدست آوردن حل های پارتوی بهینه استفاده از روش محدودیت اپسیلون است که اولین بار توسط آلدان ارائه شده است. مزیت اصلی این روش نسبت به سایر روشها بهینه سازی چند هدفه کاربرد آن برای فضاهاى حل غیر محدب است زیرا روشهایی از قبیل ترکیب وزنی اهداف در فضای نامحدب کارایی خود را از دست میدهند. زمان محاسباتی یک الگوریتم از ویژگیهای مهم هر الگوریتم جهت ارزیابی آن است از آنجایی که یکی از ضعفهای اساسی الگوریتمهای مبتنی بر جستجوی دقیق از جمله روش اپسیلون محدودیت بالا بودن زمان محاسباتی آنهاست، بدیهی است که بکارگیری الگوریتم

فراابتکاری موجب کاهش شدید زمان محاسباتی خواهد شد. در این روش همواره به بهینه سازی یکی از اهداف می پردازیم به شرطی که بالاترین حد قابل قبول را برای سایر اهداف در غالب محدودیتها تعریف کنیم که برای یک مساله دو هدفه نمایش ریاضی زیر را خواهیم داشت.

(۱۲)

$$\text{Min } f_1(x)$$

$$\text{Subject to } f_2(x) \leq \varepsilon_2, f_3(x) \leq \varepsilon_3, \dots, f_p(x) \leq \varepsilon_p, x \in S$$

با تغییر مقادیر سمت راست محدودیت های جدید ε_i ها، لبه پارتوی مسئله بدست خواهد آمد. یکی از مشکلات عمده روش اپسیلون- محدودیت حجم بالای محاسبات است، چرا که برای هرکدام از توابع هدف تبدیل شده به محدودیت (به تعداد $p-1$) باید چندین مقدار مختلف از مقادیر ε_i امتحان شود. یکی از مرسوم ترین رویکرد های اجرای روش اپسیلون- محدودیت این است که ابتدا ماکزیمم و می نیمم تک تک توابع هدف را بدون در نظر گرفتن سایر توابع هدف و در فضای $x \in S$ بدست می آورند. سپس به کمک مقادیر بدست آمده از مرحله قبل بازه مرتبط با هریک از توابع هدف را محاسبه می کنند. اگر مقادیر ماکزیمم و می نیمم توابع هدف را به ترتیب با $f_i^{\max}$ و $f_i^{\min}$ بنامیم، آنگاه بازه هریک از آنها به صورت زیر محاسبه می شود:

$$r_i = f_i^{\max} - f_i^{\min} \quad (13)$$

بازه r_i به q_i بازه تقسیم می شود. سپس برای ε_i در رابطه زیر می توان به تعداد $q_i + 1$ مقدار مختلف که از فرمول زیر محاسبه می شوند، بدست آورد.

$$k = 0, 1, \dots, q_i \quad \varepsilon_i^k = f_i^{\max} - \frac{r_i}{q_i} \times k \quad (14)$$

در رابطه فوق k شماره نقطه جدید مربوط به ε_i را نشان می دهد. به کمک روش اپسیلون- محدودیت مسئله بهینه سازی چند هدفه فوق را می توان به $\prod_{i=2}^p (q_i + 1)$ تعداد زیر- مسئله بهینه سازی تک هدفه تبدیل کرد. هر زیر- مسئله دارای فضای جواب S است با توجه به اینکه توسط نامساوی های مرتبط با

توابع هدف $f_2, \dots, f_p$ محدودتر نیز خواهد شد. هر زیر مسئله منجر به یک جواب کاندیدا برای مسئله بهینه سازی چند هدفه مورد نظر یا اصطلاحاً جبهه پارتوی بهینه می شود. گای اوقات برخی از زیر- مسائل فضای غیر موجه ایجاد می کنند. نهایتاً پس از بدست آمدن جبهه پارتوی بهینه تصمیم گیرنده می تواند مناسب ترین جواب از نظر خود را انتخاب و مورد استفاده قرار دهد.

یافته ها

برای بکارگیری مدل پیشنهادی در صنایع غذایی استان خوزستان، ابتدا مسائل در ابعاد مختلف حل شده و نتایج حاصل از آن که شامل مقادیر توابع هدف و زمان می باشند، محاسبه شده و اثرات افزایش ابعاد بر این مقادیر مقایسه می شود. نکته دیگر این است که تحلیل حساسیت بر روی یکی از پارامترها صورت گرفته و اثر افزایش یا کاهش درصد قابل استفاده از سد آبی مورد بررسی قرار می گیرد. قبل از هر چیز ۸ مسئله که شامل ابعاد کوچک تا ابعاد واقعی می باشد به عنوان مثال معرفی می شود. در جداول و نمودارهای ذیل نتیجه این نتایج ارائه شده است.

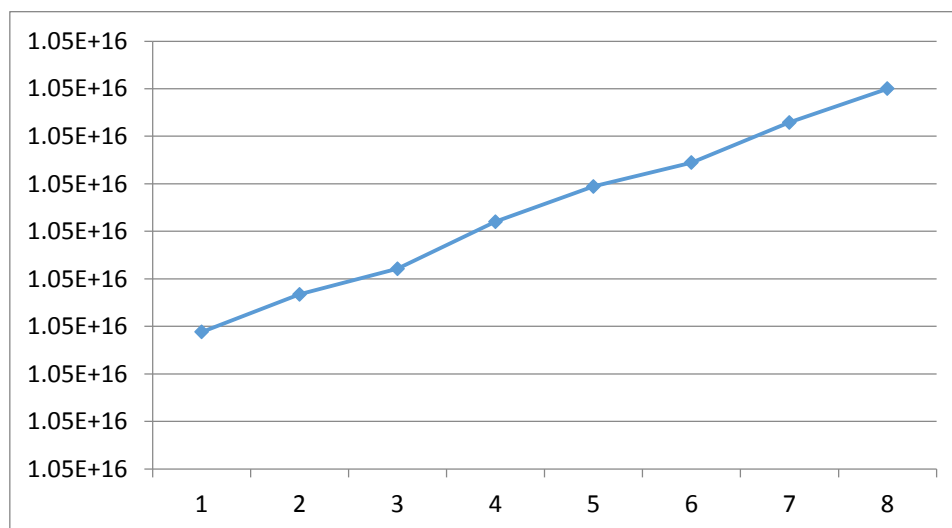
جدول ۱- پارامترهای تعیین شده برای اجرای مدل ریاضی

شماره نمونه	سدها	شهرها	کارخانه های تولیدی
1	3	4	20
2	4	4	30
3	5	6	40
4	6	8	50
5	7	10	60
6	8	12	70
7	9	14	80
8	10	16	92

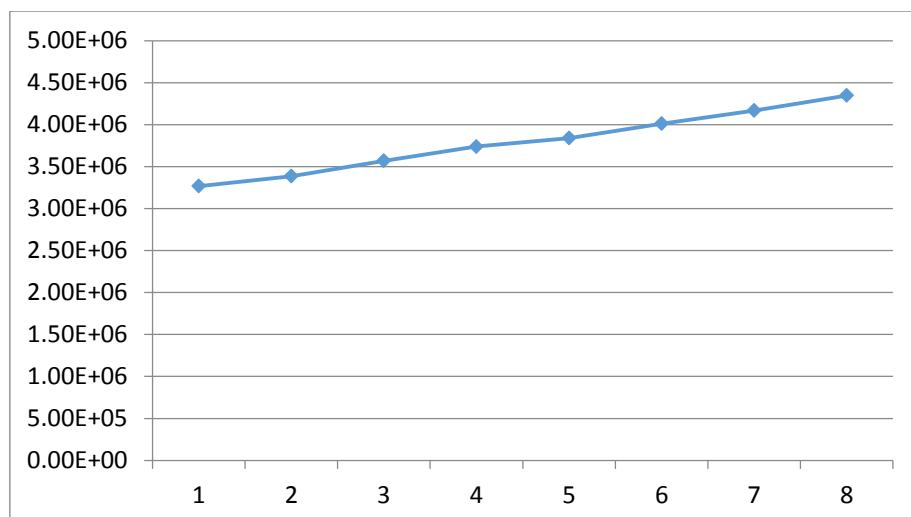
جدول ۲- نتایج حاصل از مقادیر توابع هدف و زمان محاسبه بر اساس مثالهای ارائه شده

شماره نمونه	هزینه	زمان	زمان محاسبه
1	1.05E+16	3.27E+06	10
2	1.05E+16	3.39E+06	24
3	1.05E+16	3.57E+06	37
4	1.05E+16	3.74E+06	54
5	1.05E+16	3.84E+06	72
6	1.05E+16	4.01E+06	90
7	1.05E+16	4.17E+06	110
8	1.05E+16	4.35E+06	125

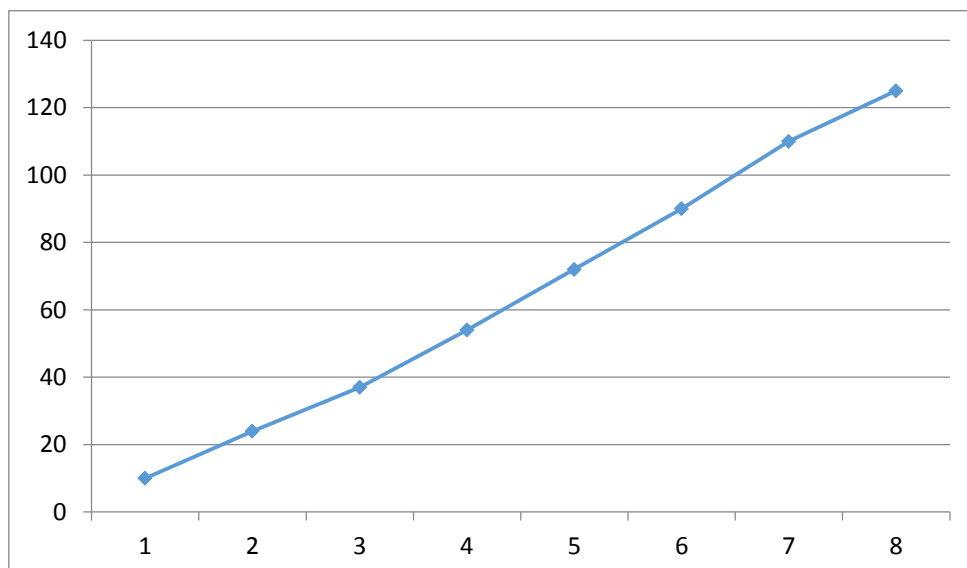
همانگونه که طبق جداول ۱ و ۲ مشاهده می‌شود مقادیر هزینه، زمان و زمان محاسبه با افزایش ابعاد مسئله دچار تغییر و افزایش شده است. برای روشن تر شدن نتایج تغییرات در نمودارهای ۱ تا ۳ نشان داده شده است.



نمودار ۱- افزایش هزینه در پی افزایش ابعاد



نمودار ۲- افزایش زمان در پی افزایش ابعاد



نمودار ۳- افزایش زمان حل در پی افزایش ابعاد

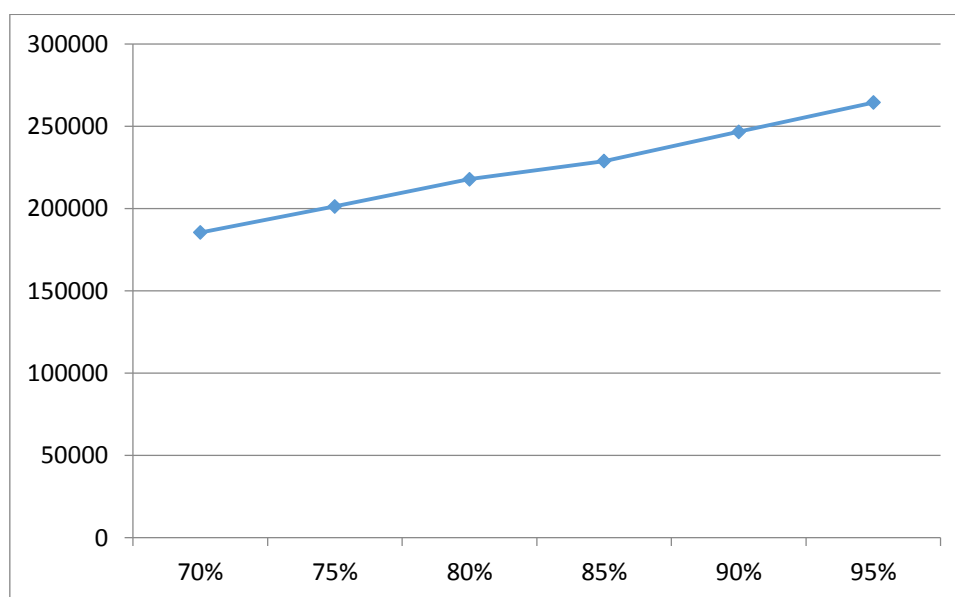
همانگونه که مشاهده می‌شود واکنش هزینه، زمان و زمان محاسبه به افزایش ابعاد مسئله از نوع مثبت و صعودی بوده و لذا می‌توان گفت اعتبار مسئله از نظر افزایش ابعاد قابل تأیید می‌باشد اما در ادامه نوع دیگری از اعتبارسنجی صورت می‌گیرد که در جدول ۲ و نمودار ۴ ارائه شده است.

جدول ۲- تغییر در درصد قابل استفاده از سد آبی

سد جره-رامهرمز	سد کارون-ایذه	سد دز-اندیمشک	درصد قابل استفاده از سد آبی
25579	19519	198147	70%

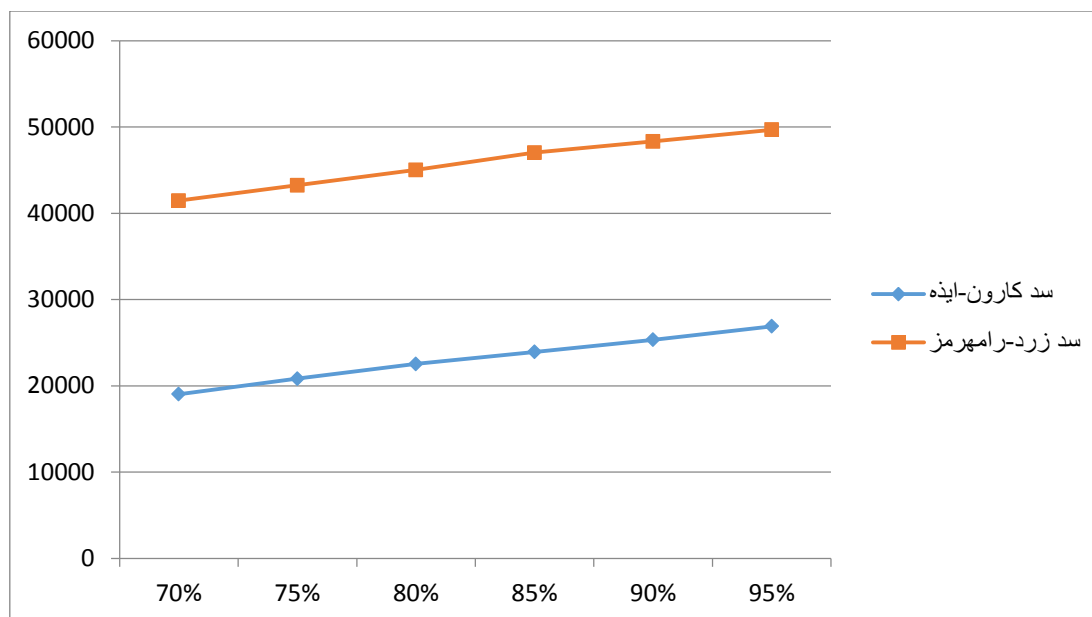
درصد قابل استفاده از سد آبی	سد دز-اندیمشک	سد کارون-ایذه	سد جره-رامهرمز
75%	214004	21319	27357
80%	230581	23020	29144
85%	241543	24413	31140
90%	259370	25817	32428
95%	277136	27376	33791

در جدول ۲ مشاهده می شود که درصد قابل استفاده از سد آبی تغییرات صورت گرفته است به طور طبیعی افزایش درصد قابل استفاده از سبد آبی می تواند بر ظرفیت سبد آبی اثر گذاشته و در نتیجه متغیر میزان انتقال آب را افزایش دهد. در جدول فوق این اقدام صورت گرفته و در انتها محقق به دنبال واکنش متغیرتصمیم به افزایش در درصد قابل استفاده از سد آبی می باشد. فرض می شود که ظرفیت استفاده در ابتدا ۷۰ درصد می باشد و در ادامه تا ۹۵ درصد افزایش می یابد نتیجه در نمودار ذیل ارائه گردیده است.



نمودار ۴- تغییر در درصد قابل استفاده از سد آبی دز

همانگونه که در نمودار ۴ مشاهده می شود با افزایش درصد استفاده از ظرفیت سد آبی دز، میزان آب ارسالی به شهرستان اندیمشک که به عنوان متغیر تصمیم در مسئله حاضر در نظر گرفته می شود افزایش می یابد. این کار برای دو سد آبی دیگر که به عنوان نمونه ارائه شده است نیز صورت می گیرد.



نمودار ۵- تغییر در درصد قابل استفاده از سد آبی کارون ایذه و سد زرد رامهرمز

در نمودار ۵ مشاهده می شود این افزایش در خصوص سدهای آبی کارون ایذه و سد زرد رامهرمز نیز صورت گرفته در نتیجه می توان گفت متغیر تصمیم مسئله که میزان انتقال آب می باشد به تغییر در درصد قابل استفاده از سدهای آبی اثر گذاشته و از این جهت می توان گفت مسئله دارای اعتبار لازم می باشد. پس از تایید اعتبار مدل، نتایج عددی حاصل از حل مدل ارائه می شود. این نتایج در قالب دو متغیر اصلی یعنی میزان آب ارسالی از هر سد به هر شهر و همچنین ترتیب و توالی آبرسانی به مجموعه های تولیدی در هر شهر ارائه می شود. ابتدا به میزان آبرسانی سدها به شهرها در جدول ۳ پرداخته می شود.

جدول ۳- میزان آب رسانی سدها به هر شهر

سد شهید عباسپور	سد مسجد سلیمان	سد گتوند	سد جره	سد مارون	سد آریوبرزن	سد کارون ۳	سد بالارود	سد کرخه	سد دز	سد شهر
78968553	74602102	6.99E+08	0	0	0	0	33229268	1.54E+09	628333901.2	اندیمشک
0	27484985	3.82E+08	59132328	5.41E+08	0	0	0	58939096	0	اهواز
7.24E+08	3.77E+08	0	31765120	0	0	0	0	0	0	ایذه
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	آبادان
1.38E+08	1.06E+08	0	44844876	0	7830189	2.08E+09	0	0	0	باغملک
0	0	0	10899796	28792099	10962264	0	0	0	0	بندر امام خمینی
0	0	0	16505406	4.66E+08	55124528	0	0	0	0	بهبهان

0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	خرمشهر
1.58E+08	1.18E+08	7.7E+08	0	0	0	0	30886179	1.45E+09	660674616.7	دزفول
1.51E+08	1.14E+08	0	49827639	1.64E+08	25683019	8.87E+08	0	0	0	رامهرمز
0	6.75E+08	0	1245691	0	0	0	0	0	0	سوسنگرد
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	شادگان
0	0	5.76E+08	0	0	0	0	24708943	1.43E+09	503591141.4	شوش
5.66E+08	3.65E+08	9.58E+08	14325446	0	0	0	18744715	7.66E+08	406568994.9	شوشتر
3.55E+08	2.36E+08	1.16E+09	4359918	0	0	0	18531707	7.54E+08	401948892.7	گتوند
9.67E+08	5.22E+08	5.37E+08	27093779	0	0	0	4899187	0	110882453.2	مسجد سلیمان
3.14E+09	2.62E+09	5.08E+09	2.6E+08	1.200.000.000	99600000	2.97E+09	1.31E+08	6E+09	2712000000	ظرفیت کل سد

همانگونه که دیده می شود مقدار آب ارسالی از هر سد به هر شهر در جدول فوق ارائه شده است. با توجه به مسافت این مقدار تعیین شده و نتیجه نشان می دهد برخی سدها به برخی شهرها به دلیل عدم بهینه بودن آبرسانی نمی کنند و لذا مقدار آن در برابر هر شهر به مقدار صفر رسیده است. از سوی دیگر جمع کل میزان آبرسانی به عنوان مثال از سد دز به تمامی شهرها نمی بایست بیش از ظرفیت کل سد باشد که در جدول فوق این مقدار بدست آمده است. به عنوان مثال میزان آب رسانی سد دز به شهر مسجد سلیمان 110882453.2 در حالی است که این سد به شهرهای شادگان، سوسنگرد و رامهرمز آبرسانی انجام نمی دهد و لذا مقدار آن برابر با صفر گردیده است. در ادامه به ترتیب توالی آبرسانی به مجموعه های تولیدی پرداخته می شود که به دلیل حجم بالای مجموعه های تولیدی در هر شهر صرفاً یک نمونه یعنی مجموعه های تولیدی واقع در شهر اهواز مد نظر قرار می گیرد نتیجه در جدول ۴ ارائه گردیده است.

جدول ۴- ترتیب و توالی آبرسانی به مجموعه های تولیدی در شهر اهواز همراه با زمان ارسال

ترتیب و توالی	نام مجموعه تولیدی	زمان ارسال
1	کشت و صنعت سلمان فارسی	1471
2	آرد جنوب	1714
3	بام لبن تهران	1951

ترتیب و توالی	نام مجموعه تولیدی	زمان ارسال
4	کشت و صنعت نیشکر امیرکبیر	2140
5	تعاونی ۲۶۲ همبرگر خوش خوراک	2332
6	بهامین جنوب	2601
7	آرد مهزیار اهواز	2711
8	تولیدی آرد غنچه اهواز	2855
9	فرآورده های گوشتی بهخوراک	3069
10	تعاونی شماره ۵۷۲ اینارگران اهواز	3237
11	کنسروسازی خوزستان	3483
12	دز ماکارون	3606
13	مهنا نوش	3873
14	پانیذ جنوب	4036
15	ماکارونی گندمین جنوب	4310
16	پرسیان دارو	4498
17	فرآورده های گوشتی و مواد غذایی ممتازان اهواز	4636
18	صنایع غذایی سی دل	4845
19	بهشاد خوزستان	5027
20	آرا پروتئین جنوب	5133
21	آرمان دشت جنوب	5278
22	شرکت بهار فرح نوش	5575

ترتیب و توالی	نام مجموعه تولیدی	زمان ارسال
23	صنایع گوشتی خوزستان	5826
24	کشت و صنعت پرش	5990
25	فردوس کار خوزستان	6272
26	جوان امید آینده	6458
27	حلواشکری افق	6657
28	صنایع غذایی پاساژ	6823
29	زمزم اهواز	6939
30	مهرداد فرزاد	7207
31	طلوع اهواز	7464
32	مهرشاد رزین	7637
33	خرم نوش اهواز	7866
34	شرکت شادمهر جنوب	8087
35	قند و تصفیه شکر اهواز	8189
36	اسر	8323
37	شیر جاموس جنوب	8493
38	کشت و صنعت حکیم فارابی	8606
39	کشت و صنعت دعبل خزاعی	8903
40	تعاونی غسل سخاوت اهواز	9081
41	آرد خوزستان	9379
42	خمیرمایه و الکل توسعه نیشکر و صنایع جانبی	9491
43	آرد اهواز	9614

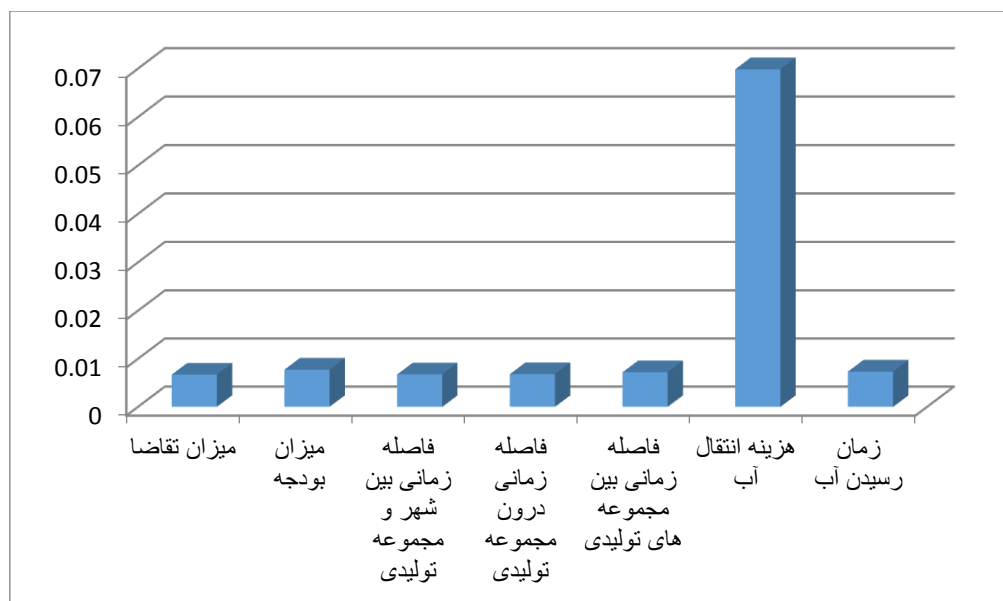
همانگونه که در جدول ۴ مشاهده می شود ترتیب و توالی آبرسانی به تفکیک هر مجموعه تولیدی ارائه شده است. در واقع ترتیب و توالی آبرسانی به مجموعه های تولیدی در شهر اهواز مطابق با جدول ۴ در وضعیت بهینه قرار دارد و بر اساس زمان صرف شده بهتر است توالی آبرسانی به شکل فوق باشد.

تحلیل حساسیت

در این بخش به تحلیل حساسیت پارامتری مسئله پرداخته می شود. تحلیل حساسیت روشی برای سنجش واکنش مدل به تغییرات در پارامترها و در نهایت یافتن اثرگذارترین پارامترها می باشد. در این بخش مهمترین پارامترها که به نظر می رسد امکان تغییر در آنها وجود داشته ارائه شده و در بازه ۱۰ تا ۵۰ درصد با افزایش مواجه می شوند و در ادامه واکنش به این افزایش مورد بررسی قرار می گیرد. نتایج در قالب جداول و نمودارهای ذیل ارائه می گردد. برای این منظور، به مقایسه اثرگذاری پارامترهای مختلف بر هزینه و زمان پرداخته شده و تعیین می شود که کدام پارامترها دارای اثرگذاری بیشتری می باشد نتایج در جداول و نمودارهای ذیل ارائه شده است.

جدول ۵- مقایسه پارامترهای اثرگذار بر هزینه

هزینه	میزان تقاضا	میزان بودجه	فاصله زمانی بین شهر و مجموعه تولیدی	فاصله زمانی درون مجموعه تولیدی	فاصله زمانی بین مجموعه های تولیدی	هزینه انتقال آب	زمان رسیدن آب
10%	0.000957	0.001668	0.001481	0.000964	0.001032	0.018192	0.001415
20%	0.002331	0.003232	0.002821	0.002716	0.002653	0.03527	0.003236
30%	0.003277	0.005069	0.003807	0.004393	0.004085	0.048147	0.00422
40%	0.004883	0.006246	0.005407	0.005613	0.005893	0.061302	0.005798
50%	0.006708	0.007751	0.006756	0.006802	0.007208	0.069878	0.007352

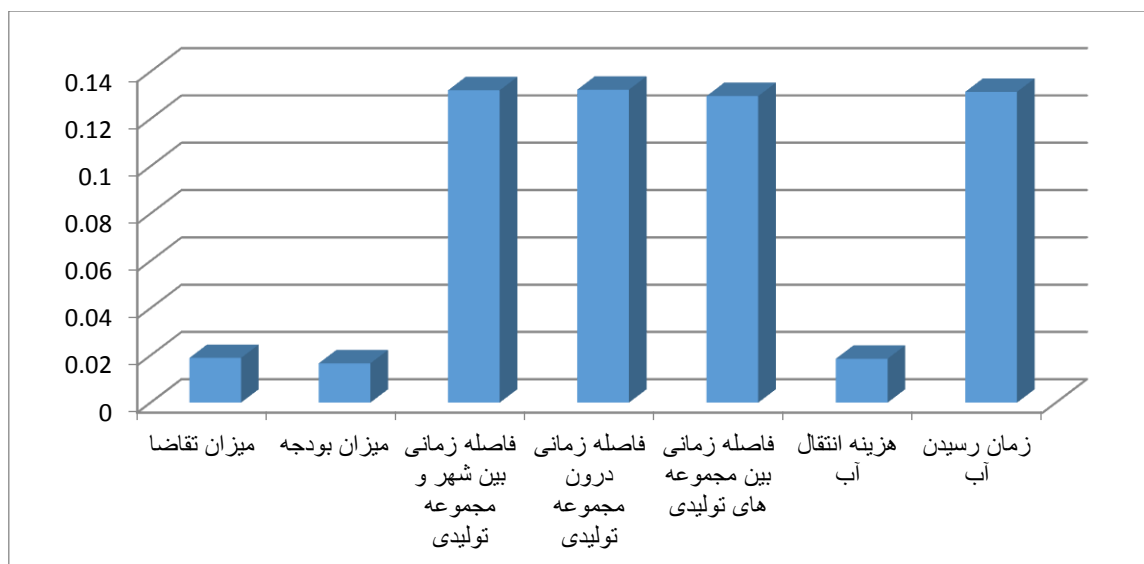


نمودار ۷- مقایسه پارامترهای اثرگذار بر هزینه

همانگونه که در نمودار ۷ مشاهده می شود اثرگذار ترین پارامتر بر هزینه در سطح افزایش ۵۰ درصد پارامتر هزینه انتقال آب می باشد که می تواند تا ۷ درصد موجب افزایش هزینه شود در حالیکه اثرگذاری سایر پارامتر در حد ۵ دهم درصد می باشد و به ندرت به ۱ درصد می رسد. در واقع سایر پارامترها از نظر اثرگذاری تقریباً یکسان بوده و تفاوتی بین آنها وجود ندارد اما صرفاً پارامتر هزینه انتقال آب است که دارای اثرگذاری قابل توجهی می باشد.

جدول ۶- مقایسه پارامترهای اثرگذار بر زمان

زمان	میزان تقاضا	میزان بودجه	فاصله زمانی بین شهر و مجموعه های تولیدی	فاصله زمانی درون مجموعه های تولیدی	فاصله زمانی بین مجموعه های تولیدی	هزینه انتقال آب	زمان رسیدن آب
10%	0.004588	0.003135	0.028758	0.024827	0.03554	0.004038	0.0237
20%	0.007138	0.006735	0.06766	0.047373	0.065165	0.008325	0.058386
30%	0.011622	0.010334	0.102476	0.087981	0.095422	0.012431	0.091643
40%	0.015919	0.012834	0.118233	0.107313	0.113714	0.015628	0.121867
50%	0.018921	0.01663	0.132082	0.132367	0.129649	0.018575	0.131448



نمودار ۸- مقایسه پارامترهای اثرگذار بر زمان

در نمودار ۸، پارامترهای اثرگذار بر زمان مورد مقایسه قرار می گیرد. همانگونه که دیده می شود فاصله زمانی بین شهر و مجموعه تولیدی، فاصله زمانی درون مجموعه تولیدی، زمان رسیدن آب و فاصله زمانی بین مجموعه های تولیدی دارای بیشترین اثرگذاری بوده و این رقم نزدیک به ۱۳ درصد می باشد در واقع اثرگذاری پارامترهای فوق بر زمان انتقال آب به طور کلی تقریباً یکسان می باشد و دارای فاصله قابل توجهی با پارامترهای تقاضا، میزان بودجه و هزینه انتقال آب می باشد. بر اساس نتایج بدست آمده می توان گفت که پارامتر تقاضا، میزان بودجه و هزینه انتقال آب دارای اثر اندکی بر زمان انتقال آب می باشد و این اثر کمتر از ۲ درصد می باشد. در حالیکه پارامترهای فواصل زمانی و زمان رسیدن آب با توجه به ماهیت زمانی که دارا می باشند دارای بیشترین اثر و اثری نزدیک به ۱۳ درصد می باشند.

نتیجه گیری و پیشنهادات

هدف تحقیق حاضر بهینه سازی بهره برداری از منابع آبی سدهای استان خوزستان است. برای این منظور ابتدا مطالعات کتابخانه ای صورت گرفته و شکاف تحقیقاتی در حوزه مورد مطالعه کشف گردید. سپس، بر اساس نوآوری اهداف تحقیق و مفروضات تعیین شد و سپس بر اساس مفروضات یک مدل برنامه ریزی ریاضی چند هدفه طراحی شده است. به دنبال بهینه سازی هزینه و زمان ارسال آب به هر یک از شهرها از مجموع سدهای موجود در استان خوزستان انجام شده است. مدل با استفاده از روش محدودیت اپسیلون بهینه سازی شده است. یکی از مواردی که در تحقیق حاضر شناسائی شده است تعیین بهینگی آب رسانی به شهرها از سدها می باشد. بر اساس این متغیر شهرهایی وجود داشتند که اصولاً از برخی سدها به آنها آب رسانی نمی شود و این امر نشانگر عدم بهینگی ارسال آب می باشد. به عنوان مثال در حالت بهینه بهتر

است سد دز به شهرهای شادگان، سوسنگرد و رامهرمز آب رسانی انجام ندهد. چون آب رسانی به این شهرها از سد دز از نظر زمانی و هزینه ای به صرفه نمی باشد. در حالیکه سد دز به شهر مسجد سلیمان می تواند تا حجم قابل قبولی آب رسانی نماید. این موضوع در خصوص سایر سدها نیز مشاهده می شود. به عنوان مثال طبق نتایج ارائه شده در تحقیق حاضر، آب رسانی از سد بالارود به شهرهای اهواز، ایذه، آبادان، باغملک و بندر امام خمینی بهینه تشخیص داده نشده است. در حالیکه همین سد به شهرهای اندیمشک، دزفول، شوش، شوشتر و گتوند میزان مشخصی آب ارسال می کند. این موضوع که معین شود ابرسانی از چه سدهایی بهینه و از چه سدهایی بهینه نمی باشد برای مسئله ارسال آب بسیار مهم است چرا که این امر می تواند در خط مشی گذاری ارسال آب از سدها تاثیرگذار بوده و برنامه ریزی بهتری به منظور جلوگیری از هدر رفت آب ارائه نماید. نتایج تحلیل حساسیت بیان می کرد که افزایش تقاضای آب می تواند تا ۱.۹ درصد زمان ارسال و تا ۶ دهم درصد هزینه ارسال را افزایش دهد. بنابراین اثر تقاضای آب بیشتر بر زمان و نه هزینه خود را نشان می دهد. افزایش بودجه اما می تواند بر هزینه و زمان اثرگذار باشد که البته بازهم اثر بیشتر بر زمان است تا هزینه. پارامتر بعدی فاصله زمانی بین شهرها و مجموعه تولیدی است که انتظار می رود با افزایش آن زمان ارسال آب تا ۱۳ درصد افزایش یابد که اثر نسبتاً قابل توجهی را نشان می دهد در حالیکه این اثر بر هزینه کمتر از زمان می باشد. استفاده از سایر الگوریتم های فراابتکاری و مقایسه آنها با یکدیگر از نظر کارایی و در نظر گرفتن سایر اهداف نظیر ریسک و قابلیت اطمینان ارسال آب به عنوان پیشنهاداتی برای تحقیقات آتی به سایر محققین معرفی می شود.

منابع

- ابوترابی، حمیدرضا؛ رمودی، محمود؛ اصغری پور، محمدرضا؛ غضنفری مقدم، محمد صادق. (۱۳۹۹). 'برآورد ردپای آب و آب مجازی برای تعیین الگوی کشت بهینه؛ مطالعه موردی: شهرستان های قائنات و زیرکوه، بوم شناسی کشاورزی.
- اویسی، فاطمه؛ فتاحی، اردکانی، احمد؛ فهرستی ثانی، مسعود. ۱۳۹۸، بررسی آب مجازی و ردپای اکولوژیک آب در محصول گندم آبی استان اصفهان. مجله علوم آب و خاک
- باغبانیان، مصطفی؛ قادرزاده، حامد؛ امام وردی، قدرت الله؛ دامن کشیده، مرجان، امین رشتی، نارسیس. (۱۳۹۹). 'کاربرد برنامه ریزی آرمانی در تعیین الگوی بهینه کشت محصولات زراعی با تاکید بر آب مجازی در استان کردستان'، فصلنامه مدیریت صنعتی. ۱۵ (۵۲) ۳۱-۱۷.
- تهامی پور، مرتضی و سمانه عابدی، ۱۳۹۶، ارزیابی تجارت آب مجازی در بخش صنعت استان زنجان، مجله آب و فاضلاب.

حکمت نیا، مهران؛ صفدری، مهدی؛ حسینی، سیدمهدی. (۱۳۹۹)، تعیین و ارزیابی ردپای آب های سبز، آبی و خاکستری در تجارت بین المللی محصولات کشاورزی ایران. مجله آبیاری و زهکشی ایران.

دهقان مصطفی، شهیدی علی، نجفی مود محمدحسین، عربی یزدی اعظم، ۱۳۹۸، برآورد و مقایسه ی ردپای آب در بخش صنعت و کشاورزی (مطالعه ی موردی: استان خراسان جنوبی). مجله آبیاری و زهکشی ایران

صفدری، مهدی؛ حسینی، سید مهدی؛ حکمت نیا، مهران؛ دادرس مقدم، امیر (۱۴۰۰). ردپای مصرف آب و تجارت آب مجازی خرما در ایران. دانش آب و خاک.

کاخکی، سیدفاضل؛ مرتضی گلدانی؛ علی اکبر مویدی و جواد رضایی، ۱۳۹۶، تغییر اقلیم و مدیریت آب مجازی، اولین کنگره بین المللی آب، خاک و علوم محیطی، تهران، همایش پردازان البرز، دانشگاه شهید بهشتی

کدخدایی، محسن (۱۳۹۹). بررسی کاربردهای آب مجازی در مدیریت منابع و مصارف آب در ایران، ششمین کنفرانس بین المللی مهندسی محیط زیست و منابع طبیعی، تهران.

کلاهی، مهدی؛ حسینیعلی، فرهاد؛ کریمائی طبرستانی، مجتبی (۱۳۹۹). بهینه سازی الگوی کشت براساس مفهوم آب مجازی به کمک برنامه ریزی خطی (منطقه مورد مطالعه: دشت عمرانی گناباد، استان خراسان رضوی)، دهمین همایش سراسری کشاورزی و منابع طبیعی پایدار، تهران.

نفرزادگان، علیرضا؛ وقارفرد، حسن؛ نیکو، محمدرضا؛ نوحه گر، احمد. (۱۳۹۶). 'استفاده از برنامه ریزی خطی بازه ای تعاملی برای تخصیص بهینه آب و سطح کشت با توجه به محتوای آب مجازی و فاکتورهای اقتصادی-اجتماعی (مطالعه موردی: دشت درودزن-کربال)'، اکوهیدرولوژی، ۴(۲)، ۶۰۱-۶۱۳.

Allan, J. A. (1998). Virtual water: a strategic resource global solutions to regional deficits. *Groundwater* 36 (4): 545-546.

Aviso, K.B., Holaysan, S.A.K., B. Promentilla, M.A., S. Yu, K.D. and R. Tan, R. (2018), "A multi-region input-output model for optimizing virtual water trade flows in agricultural crop production", *Management of Environmental Quality*, Vol. 29 No. 1, pp. 63-75.

Brindha, K. (2020), Virtual water flows, water footprint and water savings from the trade of crop and livestock products of Germany. *Water and Environment Journal*, 34: 656-66

Chapagain, A. K., Hoekstra, A. Y., & Savenije, H. H. G. (2005). Water saving through international trade of agricultural products. *Hydrology and earth system sciences discussions*, 2(6), 2219-2251.

Chen, W., Wu, S., Lei, Y., & Li, S. (2017). China's water footprint by province, and inter-provincial transfer of virtual water. *Ecological indicators*, 74, 321-333.

Fracasso, A., Sartori, M., & Schiavo, S. (2016). Determinants of virtual water flow in the Mediterranean. *Science of The Total Environment*, 543, 1054-1062.

Hatem Chouchane, Maarten S. Krol, Arjen Y. Hoekstra, (2018), Virtual water trade patterns in relation to environmental and socioeconomic factors: A case study for Tunisia, *Science of The Total Environment*, Volumes 613-614, Pages 287-297.

Heydari Kushalshah, T., Daneshmand-Mehr, M., & Abolghasemian, M. (2023). Hybrid modelling for urban water supply system management based on a bi-objective mathematical model and system dynamics: A case study in Guilan province. *Journal of Industrial and Systems Engineering*.

K.S. SreeVidhya, L. Elango, (2019), Temporal variation in export and import of virtual water through popular crop and livestock products by India, *Groundwater for Sustainable Development*, Volume 8, Pages 468-473.

Quanliang Ye, Yi Li, La Zhuo, Wenlong Zhang, Wei Xiong, Chao Wang, Peifang Wang, (2018), Optimal allocation of physical water resources integrated with virtual water trade in water scarce regions: A case study for Beijing, China, *Water Research*, Volume 129, Pages 264-276.

Salah, A. (2014). Investigating virtual water trade patterns in economic activity of Guilan province by Application of expanded input - Output table, Master Thesis, School of Economics, Shahid Beheshti University. (In Farsi).

Sun, S., Wang, Y., Engel, B. A., & Wu, P. (2016). Effects of virtual water flow on regional water resources stress: A case study of grain in China. *Science of the Total Environment*, 550, 871-879.

Turton, A. R. (1999). Precipitation, people, pipelines and power: Towards a political ecology discourse of water in southern Africa. MEWREW Occasional Paper No. 11, School of Oriental and African Studies, University of London.

Wang, Y. B., Liu, D., Cao, X. C., Yang, Z. Y., Song, J. F., Chen, D. Y., & Sun, S. K. (2017). Agricultural water rights trading and virtual water export compensation coupling model: A case study of an irrigation district in China. *Agricultural water management*, 180, 99-106.

Wichelns, D. (2001). The role of 'virtual water' in efforts to achieve food security and other national goals, with an example from Egypt. *Agricultural water management*, 49(2), 131-151.

X.D. Wu, J.L. Guo, C.H. Li, L. Shao, M.Y. Han, G.Q. Chen, (2019), Global socio-hydrology: An overview of virtual water use by the world economy from source of exploitation to sink of final consumption, *Journal of Hydrology*, Volume 573, Pages 794-810, ISSN 0022-1694.

Yang, H., & Zehnder, A. J. (2002). Water scarcity and food import: A case study for southern Mediterranean countries. *World development*, 30(8), 1413-1430.

Yao, L., Xu, Z., Wu, H., and Chen, X, (2020), A novel data-driven analytical framework on hierarchical water allocation integrated with blue and virtual water transfers, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 24, 2769.

Zhongwen Xu, Liming Yao, Qion Zhang, KiyoshiDowaki, Yin Long, (2020), Inequality of water allocation and policy response considering virtual water trade: A case study of Lanzhou city, China, *Journal of Cleaner Production*, Volume 269, ISSN 0959-6526

Zongmin Li, Qi Zhang, Huchang Liao, (2019), Efficient-equitable-ecological evaluation of regional water resource coordination considering both visible and virtual water, *Omega*, Volume 83, Pages 223-235, ISSN 0305-0483.