

رفع مناقشه روی منحنی تعامل حاصل از مدل پایداری چندمنظوره محیط طبیعی و زراعت تحت ورشکستگی آبی

علیرضا نغرزادگان^۱، حسن وقار فرد^{۲*}، محمدرضا نیکو^۳ و احمد نوحه‌گر^۴

۱. دانشجوی دکتری علوم و مهندسی آبخیزداری گرایش آب، دانشگاه هرمزگان nafarzadegan@gmail.com

۲. استادیار، گروه علوم و مهندسی آبخیزداری، دانشگاه هرمزگان

۳. استادیار، بخش مهندسی عمران و محیط‌زیست، دانشگاه شیراز nikoo@shirazu.ac.ir

۴. استاد، دانشکده محیط‌زیست، دانشگاه تهران nohegar@ut.ac.ir

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۱۱/۱۵

تاریخ وصول مقاله: ۱۳۹۶/۰۴/۱۸

چکیده

هدف این پژوهش توسعه مدل غیرخطی تخصیص آب با لحاظ تابع تولید محصول به‌ازای آب مصرفی، معادله پیوستگی مخزن سد و بیلان آب‌های سطحی است. نوآوری این مطالعه تدوین چارچوبی برای تخصیص آب براساس چهار شاخص پایداری کشاورزی و محیط‌زیست (دو تابع کسری و دو تابع غیرکسری) شامل: ۱. افزایش سود خالص - با لحاظ کم‌آبیاری - نسبت به آب مصرفی؛ ۲. افزایش تولید گیاهی نسبت به آب مصرفی؛ ۳. افزایش عدالت و انصاف در تخصیص آب در شرایط ورشکستگی و ۴. تأمین احتیاجات آبی اکوسیستم، در قالب مدلی چندهدفه و سپس تلاش برای یافتن نقطه مصالحه از بین مجموعه جواب‌های غیر مسلط با استفاده از رویکردهای انتخاب اجتماعی شامل امتیاز بُرد، قاعده کثرت، رأی میانه، مصالحه اکثریت و منتخب کاندورسیت است. نتایج نشان داد با اعمال گزینه مدیریتی شناسایی شده برای رفع مناقشه، در طول دوره ۷ ساله ورشکستگی آبی متوسط سطوح کشت اختصاصی به گندم، جو و کلزا نسبت به تقاضا به ترتیب معادل ۱۶، ۲۴ و ۴۱ درصد خواهد بود. ضمناً این گزینه مدیریتی از نظر جلب رضایت در سه شاخص پایداری بهره‌وری آب آبی، تخصیص منصفانه آب و اختصاص آب برای حفظ اکوسیستم در رتبه دوم بین گزینه‌های بهینه اجتماعی شناسایی شده قرار می‌گیرد.

کلیدواژه

برنامه‌ریزی کسری، بهینه‌سازی چندهدفه، تخصیص آب، عدالت، قواعد انتخاب اجتماعی

۱. سرآغاز

کرده است. این توجه از آنجا نشأت می‌گیرد که جمعیت جهان و به تبع آن نیاز به آب هر روزه رو به افزایش است و میزان آب در دسترس برای تأمین نیازها رو به کاهش. این کاهش در عرضه آب که معلول آثار زیان‌بار تغییر اقلیم و آثار مخرب بهره‌برداری‌های بی‌رویه گذشته از منابع آب است، تخصیص آب را به مقوله‌ای سخت و چالش‌برانگیز تبدیل کرده است. از آنجایی که میزان کمبود منابع آب

تناقض موجود بین افزایش تقاضا برای آب و کاهش آب در دسترس، به بهره‌برداری بی‌رویه از منابع آب انجامیده تا جایی که در مواردی به سهم آب مورد نیاز برای حفظ محیط طبیعی نیز دست‌اندازی شده است. از این‌رو امروزه مدیریت منابع آب و شناسایی استراتژی‌های بهینه تخصیص آب بیش از پیش توجه سیاست‌گذاران را به خود جلب

آب مصرفی بیشینه می‌کرد. نتایج نشان داد عملکرد بهینه به دست آمده موجب افزایش سود کشاورزی شده است. Papamichail و Georgiou (۲۰۰۸) یک مدل بهینه‌سازی غیرخطی را برای تعیین الگوی بهینه کشت و تخصیص منابع آب ارائه کردند. فرمولاسیون این مدل شامل هدف حداکثرسازی سود با استفاده از تابع تولید جنسن و با در نظر گرفتن بیلان آب و مشخصات مخزن بود. این مدل برای سد رودخانه هاورپاس در یونان به کار گرفته شد. نتایج نشان داد که فرمولاسیون پیشنهادی می‌تواند ابزاری عمومی برای بهینه‌سازی تخصیص آب و برنامه کشت در هر شرایطی باشد. Srinivasa Prasad و همکاران (۲۰۱۱) از مدلی خطی برای حداکثرسازی سود حاصل از سیستمی شامل یک سد و شبکه آبیاری، با در نظر گرفتن محدودیت‌هایی از قبیل میزان دسترسی به آب و زمین، پیوستگی در ذخیره مخزن و عدالت در عرضه آب استفاده کردند. ایشان همچنین با لحاظ کردن ضریب واکنش عملکرد گیاه به کمبود آب، مقدار آب تخصیص داده شده به گیاه را بهینه‌سازی کردند، به طوری که کشت گیاهان حساس، با آبیاری کامل و گیاهان مقاوم، با کم آبیاری در سطوح بهینه به دست آمده قابل برنامه‌ریزی شد. Birhanu و همکاران (۲۰۱۴) به وسیله مدل برنامه‌ریزی غیرخطی با محدودیت شانس برای آب در دسترس، سیاست‌های ماهانه بهره‌برداری از سد آبیاری کوگا در کشور اتیوپی را تحت تقاضاهای آبی مختلف براساس پنج سناریوی متفاوت الگوی کشت بررسی کردند. نتایج نشان داد آب موجود در مخزن برای تأمین نیاز کامل آبیاری الگوهای مختلف کفایت نمی‌کند. سپس Birhanu و همکاران (۲۰۱۵) با بهره‌گیری از برنامه‌ریزی خطی با محدودیت شانس، یک مدل بهینه‌سازی الگوی کشت با دو هدف بیشینه‌سازی برای تولید گیاهی و سود سیستم با لحاظ کم آبیاری تحت محدودیت‌های آب و زمین برای همین منطقه ارائه کردند. نتایج نشان داد با بهینه‌سازی برنامه کشت و مصرف آب، امکان آبیاری کل اراضی وجود دارد

سطحی در مناطق خشک و نیمه‌خشک در حال بیشتر شدن است، لذا تخصیص آب در شبکه‌های آبیاری و زهکشی با وسعت زیاد که در چنین مناطقی احداث شده‌اند حتی با دشواری بیشتری همراه است (Lu et al., 2011). از سوی دیگر، افزایش نگرانی‌های زیست‌محیطی و بالا رفتن آگاهی‌های عمومی در این زمینه سبب به رسمیت شناخته شدن نیاز آبی اکوسیستم شده است. از بُعد مدیریتی و تصمیم‌سازی این شرایط سبب وخیم‌تر شدن رقابت برای منابع آب محدود بین بخش کشاورزی و محیط‌زیست می‌شود که می‌تواند به مناقشه‌های جدی منجر شود. اراضی آبخور سد درودزن واقع در حوضه آبخیز مهارلو-بختگان، یکی از مناطق استان فارس است که در حال تجربه کردن منازعات بر سر تخصیص آب است. در این محدوده کمبود آب، خشکسالی و توع مدیریت آب توسط دولت منجر به افزایش جدی مناقشات بر سر آب کشاورزی شده است (بیژنی و همکاران، ۱۳۹۱). به منظور دستیابی به استراتژی‌های بهینه و پایدار برای تخصیص آب در شرایط وجود گروداران^۱ مختلف باید مجموعه‌ای از اهداف متفاوت و گاه متناقض (دارای همبستگی ضعیف یا منفی) و مقایسه‌ناپذیر^۲ بررسی و پردازش شود. برای نمونه معمولاً افزایش سود یک سیستم کشاورزی در گرو بهره‌برداری بیشتر از منابع آبی است، در حالی که پایداری این سیستم مستلزم کاهش مصرف آب است.

تاکنون تحقیقات زیادی در زمینه بهینه‌سازی تخصیص آب و سطح کشت انجام شده است. مطالعه Shangguan و همکاران (۲۰۰۲) برای بهینه کردن آب آبیاری تخصیصی در شرایط کمبود آب نشان داد که در تمام شرایط، استفاده از کم آبیاری به عنوان راهکار مناسب در تخصیص بهینه آب سطحی و زیرزمینی اجتناب‌ناپذیر است. Nagesh Kumar و همکاران (۲۰۰۶) برای بهینه‌کردن عملکرد مخزن سد یک منظوره مالپ‌رابها در هند برای آبیاری گیاهان زراعی از مدلی غیرخطی استفاده کردند که مجموع حداکثر عملکرد نسبی گیاهان را با لحاظ تابع تولید محصول به ازای

فرمولاسیون مسئله‌ای (برنامه‌ریزی کسری^۲) تضمینی خواهد بود که تنها جواب‌هایی که بهترین دستاوردها را به‌ازای واحد منابع مصرفی دارند پیدا خواهند شد، لذا چنین فرمولاسیونی می‌تواند به‌عنوان ابزاری برای ارزیابی پایداری سیستم‌های کشاورزی در نظر گرفته شود، ضمن اینکه ترکیب اهداف در قالب نسبت‌ها باعث تسریع در مدیریت جواب‌ها خواهد شد (Lara & Stancu-Minasian, 1999). یکی از مسائل در کار با مدل‌های چندهدفه انتخاب جوابی از بین مجموعه‌ای از جواب‌های غیر مسلط^۴ یا غیر پست^۵ است که منحنی تعامل (پارتو) بهینه را تشکیل می‌دهند. Alizadeh و همکاران (۲۰۱۷) از روش‌های انتخاب اجتماعی برای رفع مناقشه بین توابع هدف گروه‌داران مختلف و تعیین جواب سازشی مطلوب استفاده کردند.

هدف این مطالعه توسعه مدل غیرخطی تخصیص آب در اراضی آبخور سد درودزن شامل پنج محدوده آبیاری با لحاظ تابع تولید محصول به‌ازای آب مصرفی، محتوای آب مجازی، معادله پیوستگی مخزن سد، بیلان آب‌های سطحی در پایین‌دست سد، در عین توجه به انصاف و عدالت است. نوآوری این مطالعه در نظرگرفتن چارچوبی برای تخصیص آب براساس چهار شاخص پایداری کشاورزی و محیط‌زیست (دو تابع کسری و دو تابع غیرکسری) شامل:

۱. افزایش سودخالص - با لحاظ کم‌آبایی - نسبت به آب مصرفی؛
۲. افزایش تولید گیاهی نسبت به آب مصرفی؛
۳. افزایش عدالت در تخصیص آب در شرایط ورشکستگی و کاهش کمبود در تأمین احتیاجات آبی اکوسیستم، در قالب یک مدل چندهدفه با لحاظ محدودیت‌های فیزیکی سیستم مخزن-رودخانه و سپس تلاش برای یافتن نقطهٔ مصالحه از بین مجموعه جواب‌های غیر مسلط براساس این چهار مطلوبیت (توابع هدف) با استفاده از رویکردهای انتخاب اجتماعی است.

اما نیاز به انجام مطالعه برای تعیین مقدار بهینه کم‌آبایی در بیشینه‌سازی بهره‌وری آب کشاورزی است. Rabie و همکاران (۲۰۱۶) یک مدل تک‌هدفه غیرخطی برای بیشینه‌سازی سود خالص با لحاظ تابع تولید محصول به‌ازای آب مصرفی در محدودهٔ کانال اردیبهشت از شبکه آبیاری و زهکشی درودزن اجرا کردند. ارزیابی استراتژی‌های مختلف کم‌آبایی با این مدل نشان داد که استفاده از تکنیک کم‌آبایی سبب کاهش میزان آب تخصیصی و افزایش سطوح کشت شده است.

در رابطه با بهینه‌سازی محتوای آب مجازی در محصولات کشاورزی، Su و همکاران (۲۰۱۴) یک مدل تخصیص بهینه آب کشاورزی را با تقسیم آب مصرفی کشاورزی به دو بخش آب سبز و آب آبی و در نظر گرفتن سه هدف بیشینه‌سازی سود خالص، بیشینه‌سازی استفاده از آب سبز و توزیع عادلانه آب توسعه دادند. کاربرد این مدل در حوزه رودخانه شیانگ در چین نشان داد امکان افزایش استفاده از آب سبز در کنار بهره‌وری بالاتر برای آب آبی وجود دارد. همچنین نفرزادگان و همکاران (۱۳۹۶) ضمن بررسی منابع مرتبط با آب مجازی، اقدام به تعیین تخصیص بهینه آب و سطح کشت برای دو شبکه آبیاری درودزن و کربال در عین توجه به سود، محتوای آب مجازی و نیاز آبی محیط‌زیست کردند. ایشان با بررسی دورهٔ ۳ ساله با توجه به حجم آب تخصیص داده شده به شبکه‌ها و تولید گیاهی اتفاق افتاده و با صرف نظر از شبیه‌سازی مخزن سد و بدون لحاظ تابع تولید محصول به‌ازای آب مصرفی، یک مدل برنامه‌ریزی خطی بازه‌ای تدوین کردند و برای سناریوهای مختلف و همچنین در سطوح رضایت مختلف برای محدودیت‌های غیرقطعی، مدل را اجرا کردند.

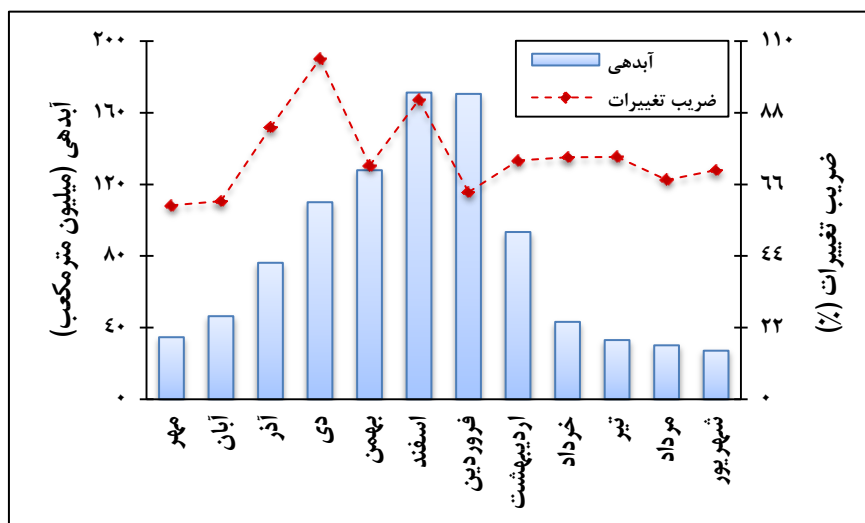
در شرایط عملی و کاربردی، بهینه‌سازی نسبت‌های متغیرها و پارامترها درک ژرف‌تری را برای مدیران و تصمیم‌سازان نسبت به بهینه‌سازی هر کدام از آنها در قالب یک تابع هدف مجزا به ارمغان می‌آورد (Amini, Fasakhodi et al., 2010). استفاده از نسبت‌ها در

کر است. اما متأسفانه در سال‌های اخیر با توجه به کاهش نزولات جوی و افزایش تقاضا برای آب، میزان رهاسازی از سد درودزن به شدت کاهش یافته است و لذا ورودی آب دریاچه تنها محدود به سیلاب‌های منطقه شده که این مسئله در نهایت باعث کاهش سطح آب دریاچه و خشک‌شدن آن شده است (مه‌اب‌قدس، ۱۳۹۱). خشک‌شدن دریاچه سبب گسترش زمین‌های شورزار و بروز طوفان‌های نمکی می‌شود. این رویداد همچنین تأثیرات منفی اقلیمی از جمله کمبود بخار آب در پی دارد که سبب کاهش شدید محصول گیاهان کوهی شهرستان‌های نیریز و استهبان می‌شود (طرازکار و همکاران، ۱۳۹۵).

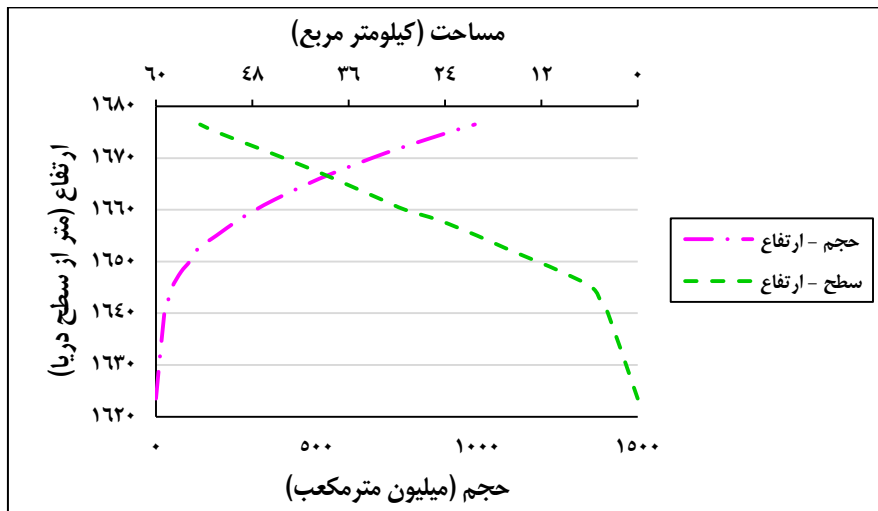
محدوده آب‌خور سد درودزن شامل اراضی دشت‌های رامجرد و کربال است. شبکه آبیاری و زهکشی درودزن شامل چهار محدوده اصلی به نام‌های کانال اصلی و ابرج، کانال سمت چپ، کانال اردیبهشت و کانال هامون است و در ادامه مسیر، شبکه آبیاری کربال در بخش انتهایی رودخانه کر قرار دارد (شکل ۱). ارتفاع دشت درودزن-کربال بین ۱۵۶۰ متر تا ۱۶۶۰ متر -بالاتر از سطح دریا- است. بارش سالانه این حوضه معمولاً بین ۲۰۰ میلی‌متر در جنوب شرق تا ۷۰۰ میلی‌متر در شمال غرب متغیر است و عمدتاً در زمستان و بهار اتفاق می‌افتد. اقلیم منطقه براساس طبقه‌بندی دومارتن، نیمه خشک با متوسط ساعات آفتابی ۹٫۱ ساعت در روز و متوسط تبخیر ۶٫۲ میلی‌متر در روز است. مهم‌ترین منبع تأمین آب دریاچه بختگان، رودخانه

جدول ۲. متوسط نیاز آبیاری خالص (مترمکعب در هکتار) و حد مجاز کم‌آبیاری محصولات شتوی در نواحی زراعی

گندم	جو	کلزا	
۴۰۴۷	۳۳۰۶	۳۶۵۸	نیاز آبیاری خالص
۰/۴	۰/۴	۰/۳۲	حد مجاز کم‌آبیاری



شکل ۲. میانگین ماهانه و ضریب تغییرات آبدهی رودخانه کر در محل سد درودزن.



شکل ۳. منحنی سطح-حجم-ارتفاع مخزن سد درودزن.

۲.۲. قاعده ورشکستگی

دو عنصر اصلی در یک مسئله ورشکستگی میزان منابع موجود و مقادیر مورد ادعایی ذی‌نفعان است. در اغلب مسائل ورشکستگی در منابع آب، می‌توان عنصر اول را به سادگی برابر با میزان آب در دسترس برای توزیع بین گروداران در زمان و مکان مشخص در نظر گرفت.

برای نمونه اصل تقلیل متناسب یا کم‌کردن نسبی یکی از قدیمی‌ترین قواعد ورشکستگی است که به‌صورت گسترده برای مدیریت منابع آب در مواقع خشکسالی در مناطق مختلف جهان از جمله در تخصیص آب قنات‌ها در ایران و آب زیرزمینی در کالیفرنیا استفاده می‌شده است (Madani et al., 2014b). آن هر بهره‌بردار براساس نسبتی از حجم آب مورد ادعای آن (PR) تأمین می‌شود (روابط ۱ و ۲):

$$PR_i = \lambda \cdot d_i \quad \forall i \quad (1)$$

$$\lambda = \frac{\sum_{i=1}^n w_i}{\sum_{i=1}^n d_i} = W/D \quad (2)$$

که در آن، W : مجموع آب در دسترس برای تخصیص به بهره‌برداران و D : مجموع آب مورد ادعای بهره‌برداران است.

مقادیر سطح زیر کشت، نیاز آبی، عملکرد، هزینه و راندمان در نواحی عمرانی-زراعی آبخور سد درودزن در شرایط خشک از اطلاعات شرکت بهره‌برداری از شبکه‌های آبیاری و زهکشی استان فارس و مجموعه گزارش‌های مهندسی مشاور مهتاب قدس استخراج شد. در شرایط خشک رهاسازی از سد تنها برای کشت شتوی (گندم، جو و کلزا) اتفاق می‌افتد. اطلاعات مربوط به حد مجاز کم‌آبیاری برای گندم و جو از پایان‌نامه کارشناسی ارشد ربیعی (۱۳۸۹) و برای کلزا از رساله دکترای Shabani (۲۰۱۳) استخراج شد (جدول ۲). در این مطالعه، سری زمانی رواناب ورودی ماهانه به سد درودزن در دوره زمانی ۳۹ ساله (سال‌های آبی ۱۳۵۵ تا ۱۳۹۴) بررسی شد. متوسط ماهانه و ضریب تغییرات حجم آب رودخانه کر در محل سد درودزن و منحنی سطح-حجم-ارتفاع مخزن سد در شکل‌های (۲) و (۳) ارائه شده است.

بعد از استخراج شاخص استاندارد رواناب (Shukla & Wood, 2008) در پنجره زمانی ۱۲ ماهه، خشک‌ترین دوره ۷ ساله به‌عنوان بازه زمانی اجرای مدل شبیه‌سازی-بهبینه‌سازی توسعه داده شده برای تخصیص آب و سطح کشت انتخاب خواهد شد.

2014a). رویکردهای استفاده شده در پژوهش حاضر برای تصمیم‌سازی اجتماعی در جدول (۳) ارائه شده‌اند.

۳.۲. قواعد انتخاب اجتماعی

روش‌های تصمیم‌سازی اجتماعی، فرآیندهایی هستند که با در نظر گرفتن جمیع ترجیحات فردی، ترجیحی اجتماعی را استخراج می‌کنند (Alizadeh et al., 2017; Madani et al., 2017).

جدول ۳. رویکردهای مورد استفاده برای تصمیم‌سازی اجتماعی و شیوه کار آنها

توضیح	قواعد انتخاب اجتماعی
هر گروهی که گزینه مطلوب‌تر، امتیاز کمتری می‌گیرد. امتیازهای داده شده به هر گزینه جمع شده و گزینه دارای کمترین امتیاز، گزینه منتخب است.	امتیاز بُرداً ^۶
گزینه منتخب، گزینه‌ای است که اکثریت گروه‌داران آن را در بالاترین سطح رتبه‌بندی ممکن انتخاب نمایند.	رای میانه ^۷
گزینه ارجح برای هر گروه‌دار، گزینه منتخب خواهد بود. به عبارت دیگر در این روش نیازی به رتبه‌بندی کردن گزینه‌ها توسط هر گروه‌دار نیست و تنها مطلوب‌ترین گزینه مهم است.	کثرت ^۸
گزینه منتخب، گزینه‌ای است که اکثریت قاطع گروه‌داران آن را در بالاترین سطح رتبه‌بندی ممکن انتخاب نمایند.	مصالحه اکثریت ^۹
گزینه منتخب، گزینه‌ای است که اکثریت گروه‌داران آن را نسبت به بقیه گزینه‌ها در فرآیند مقایسات زوجی انتخاب نمایند.	مقایسه زوجی ^{۱۰}
گزینه منتخب، گزینه‌ای است که همه گروه‌داران آن را نسبت به بقیه گزینه‌ها در فرآیند مقایسه‌های زوجی انتخاب کنند.	منتخب کاندورسیت ^{۱۱}

۴.۲. کم‌آیاری

کم‌آیاری سیاست بهینه‌سازی است که در آن گیاهان سطوح متفاوتی از کمبود آب را تحمل می‌کنند. در هر شرایط، سطح مطلوب کمبود آب و همچنین کاهش محصول ناشی از آن از طریق فرآیند بهینه‌سازی تعیین می‌شود که اساس آن تابع تولید محصولات کشاورزی به‌ازای آب مصرفی است (احمدی‌بنی، ۱۳۹۰). رابطه بین کاهش عملکرد و کمبود نسبی تبخیر-تعرق به صورت رابطه (۳) ارائه شده است (Doorenbos & Kassam, 1979).

$$\frac{Y_A}{Y_P} = \prod_{j=1}^n \left(1 - Ky_j \left(1 - \frac{ET_A}{ET_P} \right)_j \right) \quad (3)$$

که در آن، j : مرحله رشد، n : تعداد مراحل رشد، Y_P : محصول تولیدی در شرایط بدون تنش آبی، Y_A : محصول تولیدی در شرایط تنش آبی، ET_P : تبخیر-تعرق بالقوه (حداکثر)، ET_A : تبخیر-تعرق واقعی، Ky : ضریب واکنش عملکرد به آب است.

Montazar و Ghahraman و Sepaskhah (۲۰۰۴)

(۲۰۱۳) برای تخصیص منابع محدود آب از تقریب رابطه

(۳) استفاده کرده‌اند که به صورت رابطه (۴) ارائه شده

است.

کشاورزی و محیط طبیعی دارای چهار هدف برای تخصیص بهینه آب و سطوح کشت در سیستم مخزن- رودخانه دروزن توسعه داده شده است.

تابع هدف اول بیشینه سازی سود خالص زراعت با لحاظ کم آبیاری تقسیم بر آب آبی مصرفی است که به صورت رابطه کسری (۵) ارائه شده است.

$$\frac{Y_A}{Y_P} = \prod_{j=1}^n \left(1 - Ky_j \left(1 - \frac{IWR_A}{IWR_P} \right)_j \right) \quad (4)$$

که در آن، IWR_P : نیاز آبیاری بالقوه (بدون تنش آبی) و IWR_A : نیاز آبیاری واقعی گیاه (در شرایط تنش آبی) است.

۵.۲. فرمول بندی مدل پایداری چند منظوره زراعت و اکوسیستم

در این پژوهش، یک مدل بهینه سازی چندمنظوره پایداری

$$Max Z_1 = \frac{\sum_{r=1}^5 \sum_{c=1}^3 \sum_{y=1}^7 \left[\left(Y_P^{rc} \times P_C^{rc} \times \prod_{m=1}^{12} (1 - Ky^{cm} \times d^{rcym}) - C^{rc} \right) - \left(\sum_{m=1}^{12} (1 - d^{rcym}) \times IWR_P^{rcm} \right) \times P_W^{rc} \right] \times X^{rcy}}{\sum_{r=1}^5 \sum_{c=1}^3 \sum_{y=1}^7 (IWR_A^{rcy} / \eta^r) \times X^{rcy}} \quad (5)$$

$$d^{rcym} = 1 - \frac{IWR_A^{rcym}}{IWR_P^{rcm}} \quad r=1, \dots, 5; \quad c=1, \dots, 3; \quad y=1, \dots, 7; \quad m=1, \dots, 12. \quad (6)$$

تابع هدف سوم بیشینه سازی عدالت و انصاف در تخصیص آب است. به عبارت دیگر این هدف یک تابع کمینه سازی اختلاف بین آب تخصیصی بهینه به هر ناحیه زراعی و سهم آب تعیین شده برای آن ناحیه -براساس قانون ورشکستگی توزیع نسبی- است که به صورت رابطه (۸) ارائه شده است.

$$Min Z_3 = \sum_{r=1}^5 \sum_{y=1}^7 (F^{ry} - W_{Bankrupt}^{ry})^2 \quad (8)$$

که در آن، $W_{Bankrupt}$: سهم آب سالانه ناحیه r م براساس قانون کم کردن نسبی (MCM) و F : حجم آب تخصیصی سالانه به ناحیه r م (MCM) است.

که در آن، y : شماره سال در طول دوره بهره برداری، m : شماره ماه، r : شماره ناحیه زراعی، c : شماره محصول، Y_P : حداکثر عملکرد محصول (کیلوگرم بر هکتار)، IWR_P : حداکثر آب آبیاری مورد نیاز گیاه r م در ماه m م (مترمکعب بر هکتار)، IWR_A : میزان واقعی آب آبیاری (مترمکعب بر هکتار)، X : سطح کشت محصول r م در ناحیه r م در سال y م (هکتار)، P_C : قیمت محصول زراعی (تومان بر کیلوگرم)، C : هزینه تولید به غیر از هزینه آب (تومان بر هکتار)، P_W : قیمت آب (تومان بر مترمکعب) و d : مقدار کاهش نسبی مصرف آب به ازای کم آبیاری است. همانطور که در رابطه ۶ مشخص است مقدار d برای شرایط آبیاری کامل برابر صفر است.

تابع هدف دوم بیشینه سازی بهره وری آب آبیاری (تولید گیاهی به ازای آب آبی مصرفی) یا به عبارت دیگر کمینه سازی محتوای آب مجازی آبی است که به صورت رابطه کسری (۷) ارائه شده است.

نیازهای اکوسیستم در ماه m از سال y (MCM) و D_{env} : حجم تقاضای آبی زیست محیطی در ماه m (MCM) است.

محدودیت‌های مدل پیشنهادی شامل معادلات پیوستگی مخزن، بیلان آب‌های سطحی در پایین دست سد، محدودیت سطوح کشت و آب مصرفی در هر ناحیه زراعی و حجم تخصیص آب برای محیط طبیعی هستند که به صورت خلاصه در روابط (۱۰) تا (۲۰) ارائه شده‌اند.

شایان یادآوری است که مقادیر $W_{Bankrupt}$ براساس میزان تقاضای هر یک از نواحی عمرانی-زراعی در حین اجرای مدل شبیه‌سازی-بهبودسازی محاسبه می‌شوند. تابع هدف چهارم کمینه‌سازی کمبود در تأمین حبابه اکوسیستم دریاچه بختگان است که به صورت رابطه (۹) ارائه شده است.

$$Min Z_4 = 1 - \frac{\sum_{y=1}^7 \sum_{m=1}^{12} W_{env}^{ym}}{\sum_{y=1}^7 \sum_{m=1}^{12} D_{env}^{ym}} \quad (9)$$

که در آن، W_{env} : حجم آب تخصیصی برای تأمین

$$R^{ym} = W_{dri}^{ym} + W_{ind}^{ym} + W_{agr}^{ym} + W_{env}^{ym} \quad y=1, \dots, 7; \quad m=1, \dots, 12. \quad (10)$$

$$\sum_{r=1}^4 f^{rym} = \left(\sum_{c=1}^3 IWR_A^{rcym} \times X^{rcym} \right) / \eta^r \quad y=1, \dots, 7; \quad m=1, \dots, 12. \quad (11)$$

$$f^{5ym} = \left(\sum_{c=1}^3 IWR_A^{5cym} \times X^{5cym} \right) / \eta^5 + \left(\sum_{r=1}^4 f^{rym} \times U \right) \quad y=1, \dots, 7; \quad m=1, \dots, 12. \quad (12)$$

$$a_{min}^{rc} \leq X^{rc} \leq a_{max}^{rc} \quad r=1, \dots, 5; \quad c=1, \dots, 3. \quad (13)$$

$$\sum_{c=1}^3 X^{rc} \leq A^r \quad r=1, \dots, 5. \quad (14)$$

$$S_{min} \leq S^{ym} \leq S_{max} \quad y=1, \dots, 7; \quad m=1, \dots, 12. \quad (15)$$

$$R^{ym} \leq R_{max} \quad y=1, \dots, 7; \quad m=1, \dots, 12. \quad (16)$$

$$S^{y,m+1} = \begin{cases} S_{max} & \text{if } S^{ym} + I^{ym} + P^{ym} - R^{ym} - L^{ym} \geq S_{max} \\ S^{ym} + I^{ym} + P^{ym} - R^{ym} - L^{ym} & \text{if } S^{ym} + I^{ym} + P^{ym} - R^{ym} - L^{ym} < S_{max} \end{cases} \quad (17)$$

$$Spill^{ym} = S^{ym} + I^{ym} + P^{ym} - R^{ym} - L^{ym} - S_{max} \quad y=1, \dots, 7; \quad m=1, \dots, 12. \quad (18)$$

$$D_{env_{min}} \leq \sum_{m=1}^{12} W_{env}^{ym} \leq D_{env_{max}} \quad y=1, \dots, 7. \quad (19)$$

$$f^{rcym} \geq 0, \quad Spill^{ym} \geq 0, \quad W_{env}^{ym} \geq 0 \quad r=1, \dots, 5; \quad c=1, \dots, 3; \quad y=1, \dots, 7; \quad m=1, \dots, 12. \quad (20)$$

حجم آب تخصیصی برای صنعت (MCM): W_{agr} حجم آب تخصیصی برای کشاورزی (MCM): W_{env}

که در آن، R : حجم رهاسازی آب از سد (MCM)، W_{dri} : حجم آب تخصیصی برای شرب (MCM): W_{ind}

کدنویسی و با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه NSGA-II^{۱۲} حل شد. شایان یادآوری است فرضیات مدل پیشنهادی شامل نگاشت دوره‌های رشد محصولات در مقیاس ماهانه، ثابت بودن نیاز آبیاری خالص ماهانه محصولات در طول سال‌های مختلف دوره مورد بررسی، در نظر گرفتن متوسط طولانی مدت حجم برون‌نشت ماهانه (MCM) برای محاسبه تلفات آب مخزن و همچنین استفاده از متوسط طولانی مدت تبخیر ماهانه (mm) از دریاچه سد برای تخمین حجم تبخیر (MCM) در هر ماه با استفاده از منحنی سطح-حجم-ارتفاع مخزن در حین اجرای بخش شبیه‌سازی مدل (محدودیت‌های پیوستگی مخزن سد) است.

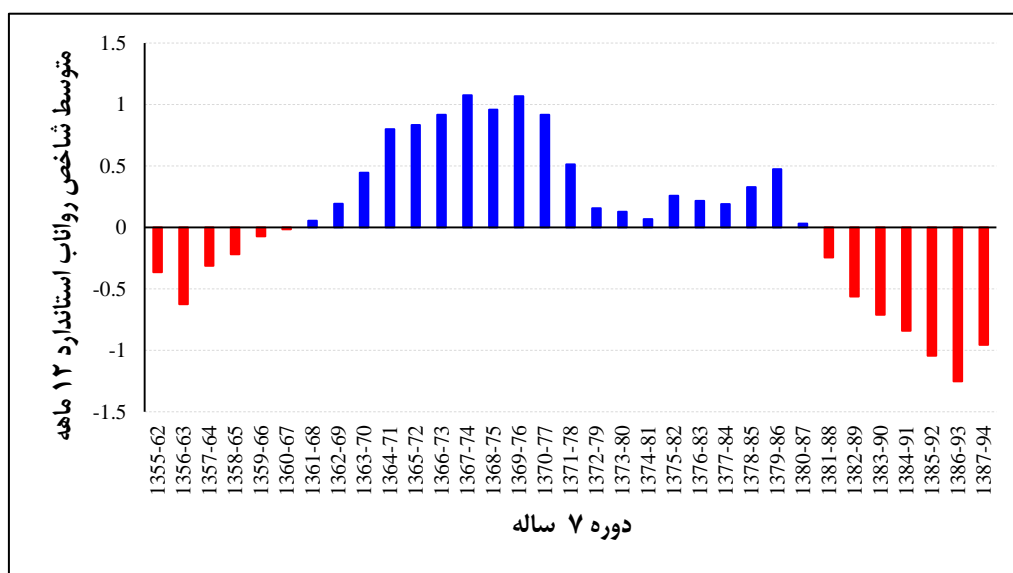
۳. نتایج و بحث

۳.۱. دوره تحت ورشکستگی آبی

مقادیر متوسط شاخص استاندارد رواناب ۱۲ ماهه دوره‌های ۷ ساله در طول سری زمانی ۳۹ ساله (۱۳۵۵ تا ۱۳۹۴)، در شکل (۴) ارائه شده است.

آب تخصیصی تأمین نیاز آبی اکوسیستم (MCM)، f^{rym} : حجم آب تخصیصی در ماه m از سال λ م به ناحیه زراعی λ م (MCM)، a_{min}^{rc} و a_{max}^{rc} به ترتیب معادل حداقل و حداکثر سطح کشت محصول c م در ناحیه λ م (هکتار)، A^r : مجموع سطوح قابل کشت در ناحیه λ م (هکتار)، U : درصد آب بازگشتی، η : راندمان انتقال، توزیع و کاربرد آب، S_{min} و S_{max} به ترتیب معادل حداقل و حداکثر حجم ذخیره آب در مخزن سد (MCM)، R_{max} : حداکثر حجم رهاسازی ماهانه از سد (MCM)، S : حجم ذخیره مخزن سد (MCM)، I : حجم آب ورودی به سد (MCM)، P : حجم ریزش باران روی دریاچه سد (MCM) و L : حجم تلفات آب شامل تبخیر و برون‌نشت از مخزن سد (MCM) و $Spill$: حجم آب سرریزی از سد (MCM) است. $D_{env_{min}}$ و $D_{env_{max}}$ به ترتیب معادل حداقل و حداکثر تقاضای آبی سالانه برای حفظ اکوسیستم دریاچه بختگان است.

مدل پیشنهادی در محیط نرم‌افزار MATLAB



شکل ۴. میانگین مقادیر شاخص استاندارد رواناب سالانه برای ۳۳ دوره ۷ ساله (بازه زمانی ۱۳۵۵ تا ۱۳۹۴).

خشک و هشت دوره تر قابل تشخیص است (شکل ۴). به عبارت دیگر بیش از نیمی (۵۴ درصد) از دوره‌های ۷ ساله در طول بازه زمانی ۳۹ ساله مورد بررسی، شرایط

در صورتی که محدوده بین ۰/۵ و -۰/۵ را محدوده نرمال برای متوسط شاخص رواناب استاندارد در هر دوره ۷ ساله در نظر بگیریم، در سری زمانی بررسی شده هفت دوره

مدیریتی غیر مسلط استخراج شد که هر گزینه مقادیر مختلفی برای توابع هدف مدل (مطلوبیت‌های پایداری سیستم) ارائه می‌کند.

برای انتخاب یک گزینه از بین ۶۳۷ گزینه تولید شده، گروداران مختلف همچون کشاورزان، بانیان محیط‌زیست، دغدغه‌مندان بهره‌وری آب کشاورزی و عدالت‌خواهان در زمینه تقسیم آب ترجیحات مختلف و گاهاً متناقضی دارند که مسئله حاضر را تبدیل به نمونه کلاسیکی از مناقشه می‌کند. بنابراین می‌توان از روش‌های رفع مناقشه همچون قواعد انتخاب اجتماعی برای انتخاب گزینه یا گزینه‌های بهینه سازی استفاده کرد (جدول ۴).

نرمال یا نزدیک به نرمال را تجربه کرده‌اند. شایان یادآوری است بازه زمانی ۱۳۸۶ تا ۱۳۹۳ با میانگین شاخص رواناب سالانه معادل ۱/۲۵- به‌عنوان دوره تحت ورشکستگی آبی برای اجرای مدل شبیه‌سازی-بهینه‌سازی تدوین شده برای پایداری چندمنظوره سیستم مخزن-رودخانه درودزن انتخاب شد.

۲.۳. رفع مناقشه بین گزینه‌های غیر مسلط برای پایداری سیستم

با حل مدل توسعه داده شده با استفاده از NSGA-II، منحنی تعامل بین اهداف مختلف پایداری کشاورزی و اکوسیستم در منطقه مطالعاتی حاصل می‌شود. بعد از اجرای مدل، یک منحنی تعامل حاوی ۶۳۷ گزینه بهینه

جدول ۴. شناسایی گزینه‌های منتخب اجتماعی بین ۶۳۷ گزینه مدیریتی غیر مسلط بهینه حاصل از حل مدل

مجموعه سازی	قواعد انتخاب اجتماعی
{گزینه ۸۷}	امتیاز بُردا
{ }	رأی میانه
{گزینه‌های ۶۷، ۷۶، ۱۶۱ و ۱۸۸}	کثرت
{ }	مصالحه اکثریت
{گزینه ۸۷}	مقایسه زوجی
{ }	منتخب کاندورست

یکی از موارد اختلاف دو قاعده رأی میانه و مصالحه اکثریت مربوط به دو مفهوم اکثریت و اکثریت قاطع است. با توجه به این نکته که از بین چهار رأی، اکثریت تنها و تنها با سه رأی حاصل می‌شود و از آنجایی که در مسأله مورد بررسی چهار جنبه پایداری مورد نظر است؛ بنابراین دو قاعده رأی میانه و مصالحه اکثریت جواب یکسانی خواهند داشت. البته تهی بودن مجموعه سازی حاصل از این دو قاعده نشان می‌دهد که نه تنها در سطح اول توافق بلکه در تمام سطوح ممکن (۶۳۷ سطح) برای توافق، هیچ گزینه مدیریتی در بین گزینه‌های بهینه غیر مسلط استخراج شده وجود ندارد که موافقت همزمان اکثریت ذی‌نفعان را

جدول (۴) نشان می‌دهد تنها دو رویکرد امتیاز بُردا و مقایسه زوجی توانستند مجموعه سازی^{۱۳} دارای یک عضو تنها (گزینه مدیریتی شماره ۸۷) ارائه کنند. همان‌طور که مشاهده می‌شود خروجی قاعده کثرت مجموعه‌ای سازی با چهار عضو بوده است. با توجه به این موضوع که فرآیند رأی‌گیری بین چهار جنبه پایداری صورت گرفته است این خروجی نشان می‌دهد که در سطح اول ارجحیت هیچ گزینه‌ای وجود ندارد که گزینه ارجح براساس بیش از یک جنبه پایداری باشد. بنابراین هر یک از چهار گزینه شناسایی شده مطلوب‌ترین گزینه براساس یکی از چهار جنبه پایداری مد نظر هستند.

نسبت کل سطح کشت هر محصول به کل سطح کشت مورد تقاضا برای آن محصول در نواحی عمرانی-زراعی پنجگانه و همچنین میزان کمبود در آب تخصیصی به منظور حفظ محیط طبیعی در طول دوره ۷ ساله شبیه‌سازی- بهینه‌سازی براساس گزینه‌های شناسایی شده توسط قواعد انتخاب اجتماعی در جدول (۵) ارائه شده است.

گرفته باشد. همچنین تهی بودن مجموعه سازشی براساس قاعده کاندورسیت نشان می‌دهد در بین گزینه‌های بهینه مدیریتی غیرمسلط هیچ گزینه‌ای وجود ندارد که در فرآیند مقایسه‌های زوجی، موافقت همه گروداران را جلب کرده باشد. بنابراین با توجه به جدول (۴) می‌توان گزینه شماره ۸۷ را به عنوان بهترین گزینه منتخب اجتماعی در نظر گرفت.

جدول ۵. میانگین نسبت کل سطح کشت هر محصول به تقاضا و کمبود در آب تخصیصی به اکوسیستم در دوره ۷ ساله ورشکستگی براساس گزینه‌های منتخب اجتماعی.

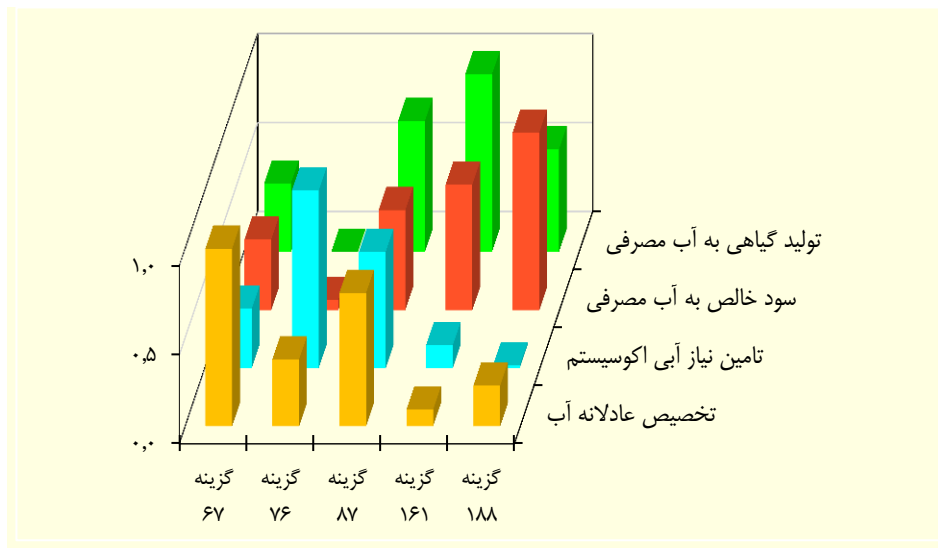
محیط طبیعی (تخصیص آب)	کشاورزی (تخصیص سطح کشت)			گزینه شماره
	کمبود (%)	کلزا (%)	جو (%)	
-۰/۶۴	۰/۴۴	۰/۲۷	۰/۱۶	گزینه شماره ۶۷
-۰/۴۴	۰/۶۱	۰/۳۶	۰/۱۷	گزینه شماره ۷۶
-۰/۵۴	۰/۴۱	۰/۲۴	۰/۱۶	گزینه شماره ۸۷
-۰/۷۱	۰/۲۹	۰/۲۲	۰/۱۶	گزینه شماره ۱۶۱
-۰/۷۴	۰/۲۶	۰/۱۸	۰/۱۵	گزینه شماره ۱۸۸

بدان دلیل است که در مدل ارائه شده برای بخش کشاورزی دو تابع هدف کسری با همبستگی ضعیف فرمول‌بندی شده است که تعامل بین این دو تابع هدف، نحوه اختصاص سطح کشت به هر محصول را مشخص می‌کند.

مقادیر نرمالیزه شده چهار تابع هدف مدل پایداری - شامل: ۱. بهره‌وری اقتصادی (سودخالص به آب مصرفی)؛ ۲. بهره‌وری آب (تولید گیاهی به آب مصرفی)؛ ۳. توزیع عادلانه و ۴. درصد تأمین تقاضای آبی زیست‌محیطی - براساس مجموعه‌های سازشی شناسایی شده توسط قواعد تصمیم‌سازی اجتماعی در شکل ۵ ارائه شده است.

همان‌طور که در جدول (۵) مشخص است براساس گزینه مدیریتی شماره ۸۷ در کل اراضی کشاورزی در طول دوره ۷ ساله ورشکستگی آبی میانگین سطوح کشت اختصاصی به گندم، جو و کلزا نسبت به تقاضا به ترتیب معادل ۱۶، ۲۴ و ۴۱ درصد است. در ضمن این گزینه مدیریتی، ۴۶ درصد از تقاضای آبی دریاچه بختگان را تأمین می‌کند.

همچنین جدول (۵) نشان می‌دهد که مدل توسعه داده شده برای پایداری چند منظوره کشاورزی و اکوسیستم در عین توجه به عدالت و انصاف در تخصیص آب در زمینه کم کردن سطوح کشت با نسبت ثابتی کار نکرده است. این



شکل ۵. مقادیر توابع هدف پایداری سیستم براساس گزینه‌های مدیریتی شناسایی شده توسط قواعد انتخاب اجتماعی .

دروذن در عین توجه به تأمین آب مورد نیاز اکوسیستم دریاچه بختگان است. مدل مذکور با بهره‌گیری از تابع تولید محصول به‌ازای آب مصرفی (کم‌آبیاری)، معادله پیوستگی مخزن سد، بیلان آب‌های سطحی در پایین دست سد و کمینه‌سازی اختلاف بین الگوی بهینه توزیع آب با سهم هر آب‌بر براساس قاعده ورشکستگی تدوین شده است. تخصیص آب در مدل مذکور براساس چهار شاخص پایداری که به‌صورت دو تابع هدف کسری و دو تابع هدف غیرکسری فرمول‌بندی شده‌اند صورت می‌گیرد. با توجه به غیرخطی و چندهدفه بودن مسئله مورد بررسی، خروجی حاصل از حل مدل به صورت مجموعه‌ای از جواب‌های غیر مسلط است که منحنی تعامل بین این چهار مطلوبیت (توابع هدف) را تشکیل می‌دهد. تلاش برای یافتن نقطه سازش از بین نقاط غیر پست تولید شده با استفاده از رویکردهای انتخاب اجتماعی از دیگر اهداف این مطالعه است. نتایج نشان داد که استفاده از رویکردهای انتخاب اجتماعی مختلف می‌تواند سبب شود تا حکمرانان و مدیران آب، درک بهتری از گزینه‌های مدیریتی در دسترس و نحوه تعامل مطلوبیت‌های گروداران درگیر در مسئله در شرایط اعمال این گزینه‌ها داشته باشند. به‌طوری که در پژوهش حاضر مقایسه بهترین گزینه موجود برای

با توجه به شکل (۵) گزینه‌های مدیریتی شناسایی شده به راحتی براساس چهار جنبه مختلف پایداری سیستم مقایسه‌شدنی هستند. بر این اساس با اعمال گزینه مدیریتی شماره ۱۸۸ سیستم شاهد بالاترین سودخالص - با لحاظ تابع کم‌آبیاری - نسبت به آب آبیاری مصرفی خواهد بود. گزینه ۱۸۸ همچنین از نظر تولید گیاهی نسبت به آب آبیاری مصرفی (یا کاهش محتوای آب مجازی آبی) بین گزینه‌های سازشی دارای سومین رتبه بعد از گزینه‌های ۱۶۱ و ۸۷ است. با اعمال گزینه مدیریتی شماره ۷۶ سیستم از نظر تأمین تقاضای آبی محیط‌زیست بیشترین رضایت را جلب خواهد کرد. گزینه مدیریتی شماره ۶۷ نیز بیشترین تأکید را به نزدیکی الگوی توزیع آب به مقادیر تعیین شده براساس قاعده ورشکستگی کم کردن نسبی اختصاص داده است. اما گزینه مدیریتی شماره ۸۷ از نظر جلب رضایت در سه جنبه بهره‌وری آب آبی، تأمین احتیاجات آبی اکوسیستم و تخصیص منصفانه آب در رتبه دوم بین گزینه‌های بهینه اجتماعی قرار می‌گیرد.

۴. نتیجه‌گیری

یکی از اهداف پژوهش حاضر، توسعه یک مدل تخصیص آب و سطح کشت بین نواحی عمرانی-زراعی آب‌خور سد

بررسی‌های اجتماعی، اقتصادی و فنی دقیق دارد- بهره‌گیری شود.

یادداشت‌ها

1. stakeholders
2. incommensurable
3. fractional programming
4. non-dominated
5. non-inferior
6. Borda count (score)
7. median voting
8. plurality
9. majoritarian compromise
10. pairwise comparison
11. Condorcet choice
12. non-dominated sorting genetic algorithm-II
13. compromise set

مصلحه و رفع مناقشه بین آب‌بران مختلف با گزینه‌های شناسایی شده توسط قاعده انتخاب اجتماعی کثرت، اطلاعات ارزشمندی راجع به استراتژی‌های بهینه برای حکمرانی آب و نحوه حصول پایداری چندمنظوره کشاورزی و محیط‌زیست در سیستم مخزن-رودخانه درودزن در اختیار مراجع تصمیم‌گیر قرار می‌دهد. البته یادآوری این نکته ضروری به نظر می‌رسد که با گسترده‌تر کردن طیف رویکردهای مورد استفاده برای رفع مناقشه درک جامع‌تری از گزینه‌های در دسترس برای مصالحه حاصل می‌شود؛ بنابراین پیشنهاد می‌شود برای یافتن چنین گزینه‌هایی علاوه بر تکنیک‌های استفاده شده در مطالعه حاضر از رویکردهای چانه‌زنی بازگشتی و همچنین مدل‌های چانه‌زنی با لحاظ قدرت هر آب‌بر - که نیاز به

منابع

- احمدی بنی، م. ۱۳۹۰. مدیریت و بهره‌برداری بهینه آب کشاورزی در شبکه آبیاری و زهکشی سد دز، پایان‌نامه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی کشاورزی (آبیاری و زهکشی)، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز، شیراز.
- بیژنی، م.، حیاتی، د.، عبدالوند، ب. ۱۳۹۱. تضاد در بهره‌برداری از آب در شبکه آبیاری سد درودزن: دیدگاه کارشناسان امور آب منطقه، علوم محیطی، ۱۰(۳): ۱۴-۲۶.
- ربیعی، ز. ۱۳۸۹. تعیین الگوی بهینه کشت در شرایط کمبود منابع آب با استفاده از بیلان کامل آب در خاک در کانال اردیبهشت سد درودزن، پایان‌نامه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی کشاورزی (آبیاری و زهکشی)، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز، شیراز.
- طرازکار، م.ح.، زیبایی، م.، سلطانی، غ. ۱۳۹۵. بهره‌برداری بهینه از مخزن سد درودزن با تأکید بر بهره‌وری آب کشاورزی، اقتصاد کشاورزی و توسعه، ۲۴ (۹۶): ۲۵-۵۵.
- مهتاب قدس. ۱۳۹۱. مطالعات طرح ارزیابی عملکرد، پایش مدیریت بهره‌برداری و نگهداری، بهبود، ترمیم و بهسازی شبکه آبیاری و زهکشی درودزن، گزارش برنامه‌ریزی منابع آب، سازمان آب منطقه‌ای فارس. شیراز.
- نفرزادگان، ع.ر.، وقارفر، ح.، نیکو، م. ر.، نوحه‌گر، ا. ۱۳۹۶. استفاده از برنامه‌ریزی خطی بازه‌ای 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.

Alizadeh, M.R., Nikoo, M.R. and Rakhshandehroo, G.R. 2017. Developing a multi-objective conflict-resolution model for optimal groundwater management based on fallback bargaining models and social choice rules: a case study. *Water Resources Management*, 31(5): 1457-1472.

Amini Fasakhodi, A., Nouri, S.H. and Amini, M. 2010. Water resources sustainability and optimal cropping pattern in farming systems; a multi-objective fractional goal programming approach. *Water Resources Management*, 24(15): 4639-4657.

- Birhanu, K., Alamirew, T., Dinka, M.O., Ayalew, S. and Aklog, D. 2014. Optimizing reservoir operation policy using chance constraint nonlinear programming for Koga irrigation Dam, Ethiopia. *Water Resources Management*, 28(14): 4957-4970.
- Birhanu, K., Alamirew, T., Olumana, M., Ayalew, S. and Aklog, D. 2015. Optimizing cropping pattern using chance constraint linear programming for Koga Irrigation Dam, Ethiopia. *Irrigat Drainage Sys Eng*, 4(134): 1-7.
- Doorenbos, J. and Kassam, A. 1979. Yield response to water, Irrigation and drainage paper No. 33, FAO, Rome.
- Georgiou, P. and Papamichail, D. 2008. Optimization model of an irrigation reservoir for water allocation and crop planning under various weather conditions. *Irrigation Science*, 26(6): 487-504.
- Ghahraman, B. and Sepaskhah, A.R. 2004. Linear and non linear optimization models for allocation of a limited water supply. *Irrigation and Drainage*, 53(1): 39-54.
- Lara, P. and Stancu-Minasian, I. 1999. Fractional programming: a tool for the assessment of sustainability. *Agricultural Systems*, 62(2): 131-141.
- Lu, H., Huang, G. and He, L. 2011. An inexact rough-interval fuzzy linear programming method for generating conjunctive water-allocation strategies to agricultural irrigation systems. *Applied Mathematical Modelling*, 35(9): 4330-4340.
- Madani, K., Read, L. and Shalikarian, L. 2014a. Voting under uncertainty: a stochastic framework for analyzing group decision making problems. *Water Resources Management*, 28(7): 1839-1856.
- Madani, K., Zarezadeh, M. and Morid, S. 2014b. A new framework for resolving conflicts over transboundary rivers using bankruptcy methods. *Hydrology and Earth System Sciences*, 18(8): 3055-3068.
- Montazar, A. 2013. A decision tool for optimal irrigated crop planning and water resources sustainability. *Journal of Global Optimization*, 55(3): 641-654.
- Nagesh Kumar, D., Raju, K.S. and Ashok, B. 2006. Optimal reservoir operation for irrigation of multiple crops using genetic algorithms. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 132(2): 123-129.
- Rabie, Z., Honar, T. and Mehdi Bateni, M. 2016. Determination of optimal and and water allocation under limited water resources using soil water balance in Ordibehesht canal of Doroodzan water district. *Iran Agricultural Research*, 34(2): 21-28.
- Shabani, A. 2013. Effects of water stress, salinity and in-furrow planting on growth and yield of rapeseed (brassica napus l.) and its growth modeling, PhD Thesis, Shiraz University, Shiraz, Iran.
- Shangguan, Z. et al., 2002. A model for regional optimal allocation of irrigation water resources under deficit irrigation and its applications. *Agricultural Water Management*, 52(2): 139-154.
- Shukla, S. and Wood, A.W. 2008. Use of a standardized runoff index for characterizing hydrologic drought. *Geophysical Research Letters*, 35(2): 1-7.
- Srinivasa Prasad, A., Umamahesh, N. and Viswanath, G. 2011. Optimal irrigation planning model for an existing storage based irrigation system in India. *Irrigation and Drainage Systems*, 25(1): 19-38.
- Su, X., Li, J. and Singh, V.P. 2014. Optimal allocation of agricultural water resources based on virtual water subdivision in Shiyang River Basin. *Water Resources Management*, 28(8): 2243-2257.