محیط‌شناسی، دورهٔ ٤٣، شمارهٔ ٤، زمستان ١٣٩٦، صفحهٔ ٧١٣-٦٩٩

رفع مناقشه روی منحنی تعاملِ حاصل از مدل پایداریِ چندمنظورهٔ محیط طبیعی و زراعت تحت ورشکستگی آبی

علیرضا نفرزادگان[١]، حسن وقارفرد[٢]*، محمدرضا نیکو[٣] و احمد نوحه‌گر[٤]

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

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

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

٤. استاد، دانشکدهٔ محیط‌زیست، دانشگاه تهران nohegar@ut.ac.ir

تاریخ وصول مقاله: ١٣٩٦/٠٤/١٨ تاریخ پذیرش مقاله: ١٣٩٦/١١/١٥

چکیده

هدف این پژوهش توسعهٔ 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: ١. افزایش سود خالص -با لحاظ کم‌آبیاری- نسبت به آب مصرفی؛ ٢. افزایش تولید گیاهی نسبت به آب مصرفی؛ ٣. افزایش عدالت و انصاف در تخصیص آب در شرایط ورشکستگی و ٤. تأمین احتیاجات آبی اکوسیستم، در قالب مدلی چندهدفه و سپس تلاش برای یافتن نقطهٔ مصالحه از بین مجموعه جواب‌های غیر مسلّط با استفاده از رویکردهای انتخاب اجتماعی شامل امتیاز بُردا، قاعدهٔ کثرت، رأی میانه، مصالحهٔ اکثریت و منتخب کاندورسِت است. نتایج نشان داد با اِعمال گزینه مدیریتی شناسایی شده برای رفع مناقشه، در طول دورهٔ ٧ ساله ورشکستگی آبی متوسط سطوح کشت اختصاصی به گندم، جو و کلزا نسبت به تقاضا به‌ترتیب معادل ١٦، ٢٤ و ٤١ درصد خواهد بود. ضمناً این گزینهٔ مدیریتی از نظر جلب رضایت در سه شاخص پایداری بهره‌وری آب آبی، تخصیص منصفانه آب و اختصاص آب برای حفظ اکوسیستم در رتبهٔ دوم بین گزینه‌های بهینه اجتماعی شناسایی شده قرار می‌گیرد.

کلیدواژه

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

١. سرآغاز

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 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 دردسترس برای تأمین نیازها رو به کاهش. این کاهش در عرضهٔ آب که معلول آثار زیان‌بار تغییر اقلیم و آثار مخرب بهره‌برداری‌های بی‌رویهٔ گذشته از منابع آب است، تخصیص آب را به مقوله‌ای سخت و چالش‌برانگیز تبدیل کرده است. از آنجایی که میزان کمبود منابع آب

* نویسنده مسئول: Email: hvaghar52@yahoo.com

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 حوضهٔ 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). به‌منظور دست‌یابی به استراتژی‌های بهینه و پایدار برای تخصیص آب در شرایط وجود گروداران[1] مختلف باید مجموعه‌ای از اهداف متفاوت و گاهاً متناقض (دارای همبستگی ضعیف یا منفی) و مقایسه‌ناپذیر[2] بررسی و پردازش شود. برای نمونه معمولاً افزایش سود یک سیستم کشاورزی در گرو بهره‌برداری بیشتر از منابع آبی است، در حالی‌که پایداری این سیستم مستلزم کاهش مصرف آب است.

تاکنون تحقیقات زیادی در زمینهٔ بهینه‌سازی تخصیص آب و سطح کشت انجام شده است. مطالعهٔ Shangguan و همکاران (۲۰۰۲) برای بهینه کردن آب آبیاری تخصیصی در شرایط کمبود آب نشان داد که در تمام شرایط، استفاده از کم‌آبیاری به‌عنوان راهکار مناسب در تخصیص بهینه آب سطحی و زیرزمینی اجتناب‌ناپذیر است. Nagesh Kumar و همکاران (۲۰۰۶) برای بهینه‌کردن عملکرد مخزن سد یک‌منظوره مالاپ‌رابها در هند برای آبیاری گیاهان زراعی از مدلی غیرخطی استفاده کردند که مجموع حداکثر عملکرد نسبی گیاهان را با لحاظ تابع تولید محصول به‌ازای آب مصرفی بیشینه می‌کرد. نتایج نشان داد عملکرد بهینهٔ به‌دست آمده موجب افزایش سود کشاورزی شده است. Georgiou و Papamichail (۲۰۰۸) یک مدل بهینه‌سازی غیرخطی را برای تعیین الگوی بهینهٔ 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 هاوریاس در یونان به کار گرفته شد. نتایج نشان داد که فرمولاسیون پیشنهادی می‌تواند ابزاری عمومی برای بهینه‌سازی تخصیص آب و برنامهٔ کشت در هر شرایطی باشد. SrinivasaPrasad و همکاران (۲۰۱۱) از مدلی خطی برای حداکثرسازی سود حاصل از سیستمی شامل یک سد و شبکهٔ 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، به‌طوری‌که کشت گیاهان حساس، با آبیاری کامل و گیاهان مقاوم، با کم آبیاری در سطوح بهینهٔ به‌دست آمده قابل برنامه‌ریزی شد. Birhanu و همکاران (۲۰۱۴) به‌وسیلهٔ مدل برنامه‌ریزی غیرخطی با محدودیت شانسی برای آب در دسترس، سیاست‌های ماهانهٔ 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 شانسی، یک مدل بهینه‌سازی الگوی کشت با دو هدف بیشینه‌سازی برای تولید گیاهی و سود سیستم با لحاظ کم‌آبیاری 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

اما نیاز به انجام مطالعه برای تعیین مقدار بهینه کم‌آبیاری در بیشینه‌سازی بهره‌وری آب کشاورزی است. Rabie و همکاران (۲۰۱۶) یک مدل تک‌هدفهٔ 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 کم‌آبیاری با این مدل نشان داد که استفاده از تکنیک کم‌آبیاری 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 بهینهٔ آب کشاورزی را با تقسیم آب مصرفی کشاورزی به دو بخش آب سبز و آب آبی و در نظر گرفتن سه هدفِ بیشینه‌سازی سود خالص، بیشینه‌سازی استفاده از آب سبز و توزیع عادلانه آب توسعه دادند. کاربرد این مدل در حوزهٔ 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 بهینهٔ آب و سطح کشت برای دو شبکهٔ 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، بهینه‌سازیِ 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 et al., 2010; Fasakhodi). استفاده از نسبت‌ها در فرمولاسیون مسئله‌ای (برنامه‌ریزی کسری[3]) 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 مسلّط[4] یا غیر پَست[5] است که منحنی تعامل (پارتو) بهینه را تشکیل می‌دهند. Alizadeh و همکاران (۲۰۱۷) از روش‌های انتخاب اجتماعی برای رفع مناقشه بین توابع هدف گروداران مختلف و تعیین جواب سازشی مطلوب استفاده کردند.

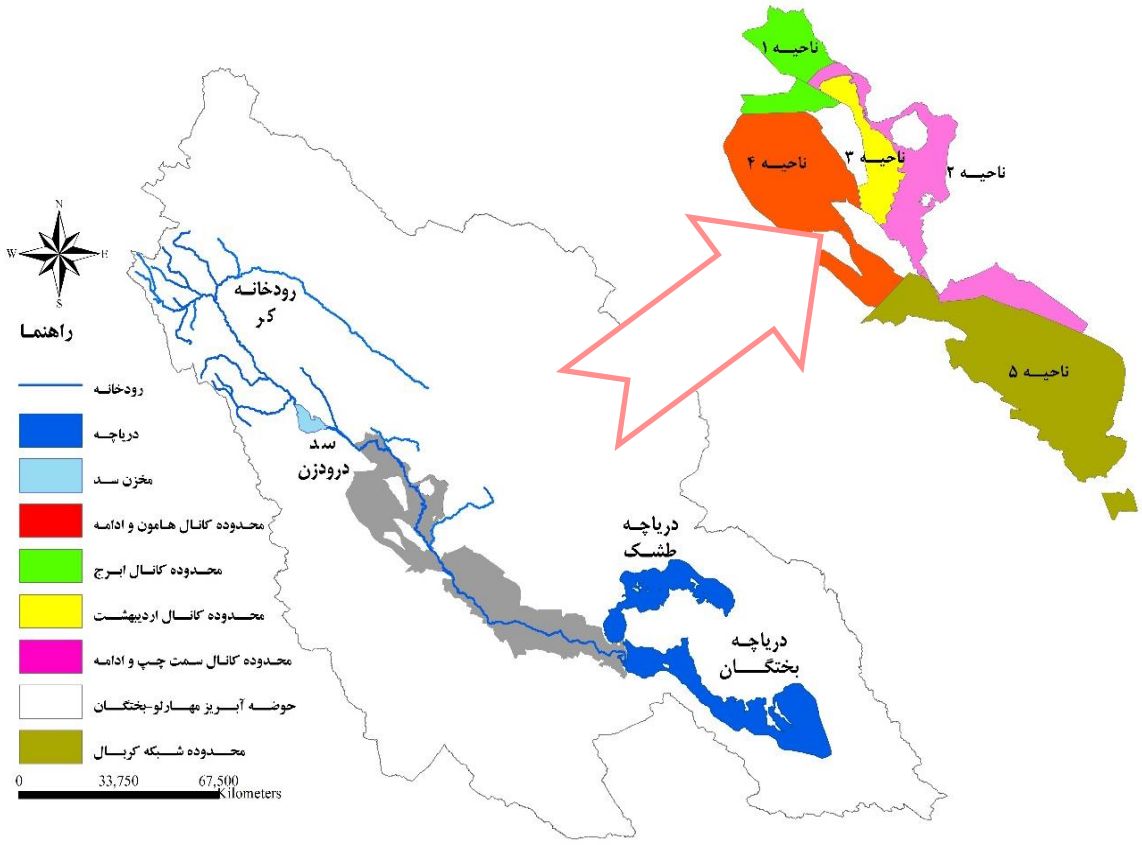
هدف این مطالعه توسعهٔ مدل غیرخطی تخصیص آب در اراضی آبخور سد درودزن شامل پنج محدودهٔ آبیاری با لحاظ تابع تولید محصول به‌ازای آب مصرفی، محتوای آب مجازی، معادلهٔ پیوستگی مخزن سد، بیلان آب‌های سطحی در پایین‌دست سد، در عین توجه به انصاف و عدالت است. نوآوری این مطالعه در نظرگرفتن چارچوبی برای تخصیص آب براساس چهار شاخص پایداری کشاورزی و محیط‌زیست (دو تابع کسری و دو تابع غیرکسری) شامل: ۱. افزایش سودخالص – با لحاظ کم‌آبیاری- نسبت به آب مصرفی؛ ۲. افزایش تولید گیاهی نسبت به آب مصرفی؛ ۳. افزایش عدالت در تخصیص آب در شرایط ورشکستگی و ۴. 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 مسلّط براساس این چهار مطلوبیت (توابع هدف) با استفاده از رویکردهای انتخاب اجتماعی است.

۲. مواد و روش‌ها

۲. ۱. منطقهٔ مورد مطالعه

سیستم رودخانه- مخزن سد درودزن بخشی از حوضهٔ آبخیز مهارلو- بختگان است. این حوضهٔ آبخیز با مساحت ۳۱۴۹۲ کیلومترمربع در شمال استان فارس و در محدوده‌ای بین طول جغرافیایی ۵۱ درجه و ۴۲ دقیقه تا ۵۴ درجه و ۳۱ دقیقهٔشرقی؛ و عرض جغرافیایی ۲۹ درجه تا ۳۱ درجه و ۱۴ دقیقهٔ شمالی واقع شده است (شکل ۱).

سد درودزن حدود یک‌صد کیلومتری شمال غربی شیراز بر روی رودخانه کر واقع شده است. حجم نرمال و حجم مفید مخزن به‌ترتیب معادل ۹۹۳ و ۸۶۰ میلیون مترمکعب است. این سد سالانه حدود ۷۷۰ میلیون متر مکعب آب برای تأمین مصارف کشاورزی، بخشی از نیاز شرب شهرهای شیراز و مرودشت و آب مصرفی مؤسسات بزرگ صنعتی همچون پتروشیمی تنظیم می‌کند (جدول ۱).



شکل ۱. حوضهٔ آبخیز مهارلو- بختگان و نواحی عمرانی- زراعی آبخور سد درودزن.

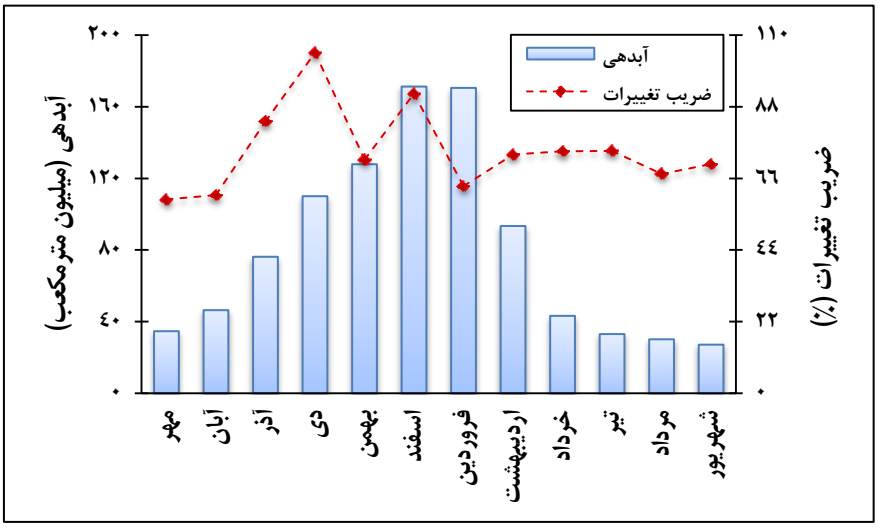
جدول ۱. مقادیر تقاضای آب (میلیون مترمکعب) بخش‌های کشاورزی، شرب و صنعت از سد مخزنی درودزن.

	مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور	سالانه
کشاورزی	۲۴/۳۸	۱/۴۶	۷۲/۵۷	۰/۰۰	۳۸/۳۳	۱۰۳/۹۴	۱۸۲/۳۶	۱۵۱/۹۲	۲۲/۴۱	۳۷/۷۲	۴۰/۲۰	۴۴/۷۱	۷۲۰
شرب	۲/۸۳	۲/۸۵	۲/۸۵	۲/۹۵	۲/۹۷	۲/۸۷	۳/۰۷	۳/۰۳	۳/۰۳	۲/۸۱	۲/۸۷	۲/۸۸	۳۵
صنعت	۱/۲۵	۱/۲۵	۱/۲۵	۱/۲۵	۱/۲۵	۱/۲۵	۱/۲۵	۱/۲۵	۱/۲۵	۱/۲۵	۱/۲۵	۱/۲۵	۱۵

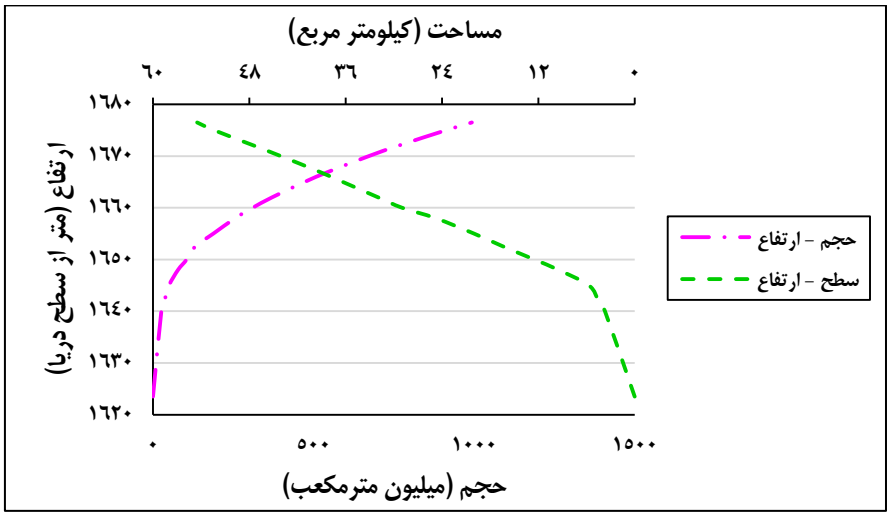
محدودهٔ آبخور سد درودزن شامل اراضی دشت‌های رامجرد و کربال است. شبکهٔ آبیاری و زهکشی درودزن شامل چهار محدودهٔ اصلی به نام‌های کانال اصلی و ابرج، کانال سمت چپ، کانال اردیبهشت و کانال هامون است و در ادامهٔ مسیر، شبکه آبیاری کربال در بخش انتهایی رودخانه کر قرار دارد (شکل ۱). ارتفاع دشت درودزن-کربال بین ۱۵۶۰ متر تا ۱۶۶۰ متر –بالاتر از سطح دریا- است. بارش سالانه این حوضه معمولاً بین ۲۰۰ میلی‌متر در جنوب‌شرق تا ۷۰۰ میلی‌متر در شمال‌غرب 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 دریاچهٔ بختگان، رودخانه 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 شوره‌زار 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).

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

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



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



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

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 مجموعهٔ گزارش‌های مهندسی مشاور مهاب 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 پایان‌نامهٔ 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 دورهٔ زمانی ۳۹ ساله (سال‌های آبی ۱۳۵۵ تا ۱۳۹۴) بررسی شد. متوسط ماهانه و ضریب تغییرات حجم آب رودخانهٔ 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 پنجرهٔ زمانی ۱۲ ماهه، خشک‌ترین دورهٔ ۷ ساله به‌عنوان بازهٔ زمانی اجرای مدل شبیه‌سازی-بهینه‌سازی توسعه داده شده برای تخصیص آب و سطح کشت انتخاب خواهد شد.

۲. ۲. قاعدهٔ ورشکستگی

دو عنصر اصلی در یک مسئله ورشکستگی میزان منابع موجود و مقادیر مورد اِدعایی 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). در روش کم‌کردن نسبی، تقاضای آب هر بهره‌بردار براساس نسبتی از حجم آب مورد اِدعای آن (PR) تأمین می‌شود (روابط ۱ و ۲):

$$PR_i = \lambda \cdot d_i \quad \forall i \tag{۱}$$

$$\lambda = \sum_{i=1}^{n} w_i \Big/ \sum_{i=1}^{n} d_i = W/D \tag{۲}$$

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

۲. ۳. قواعد انتخاب اجتماعی

روش‌های تصمیم‌سازی اجتماعی، فرآیندهایی هستند که بـا در نظر گرفتن جمیـع ترجیحـات فـردی، ترجیحـی اجتمـاعی را استخراج می‌کنند (Alizadeh et al., 2017; Madani et al., 2014a). رویکردهای استفاده شده در پژوهش حاضر بـرای تصمیم‌سازی اجتماعی در جدول (۳) ارائه شده‌اند.

جدول۳. رویکردهای مورد استفاده برای تصمیم‌سازی اجتماعی و شیوهٔ کار آنها

قواعد انتخاب اجتماعی	توضیح
اِمتیاز بُردا[۶]	هر گرودار به گزینه‌ها براسـاس ارجحیـت امتیـازی مـی‌دهـد. بـه صـورتی کـه گزینـه مطلوب‌تر، امتیاز کمتری می‌گیرد. امتیازهای داده شده به هر گزینه جمـع شـده و گزینـهٔ دارای کمترین امتیاز، گزینهٔ منتخب است.
رأی میانه[۷]	گزینهٔ منتخب، گزینه‌ای است که اکثریت گروداران آن را در بالاترین سـطح رتبـه‌بنـدی ممکن انتخاب نمایند.
کِثرت[۸]	گزینهٔ ارجح برای هر گرودار، گزینهٔ منتخب خواهد بود. به عبارت دیگر در ایـن روش نیازی به رتبه‌بندی کردن گزینه‌ها توسط هر گرودار نیست و تنها مطلوبـت‌تـرین گزینـه مهم است.
مصالحه اکثریت[۹]	گزینهٔ منتخب، گزینه‌ای اسـت کـه اکثریـت قـاطع گـروداران آن را در بـالاترین سـطح رتبه‌بندی ممکن انتخاب نمایند.
مقایسه زوجی[۱۰]	گزینهٔ منتخب، گزینه‌ای است که اکثریت گروداران آن را نسـبت بـه بقیـه گزینـه‌هـا در فرآیند مقایسات زوجی انتخاب نمایند.
منتخب کاندورسِت[۱۱]	گزینهٔ منتخب، گزینه‌ای است که همه گروداران آن را نسبت به بقیهٔ گزینه‌هـا در فرآینـد مقایسه‌های زوجی انتخاب کنند.

۲. ۴. کم‌آبیاری

کم‌آبیاری سیاست بهینه‌سازی است که در آن گیاهان سـطوح 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 می‌شـود کـه اسـاس آن تـابع تولیـد محصـولات کشـاورزی بـه‌ازای آب مصـرفی اسـت (احمدی‌بنی، ۱۳۹۰). رابطهٔ بـین کـاهش عملکـرد و کمبـود نسبی تبخیر- تعرق به صورت رابطـهٔ (۳) ارائـه شـده اسـت (Doorenbos & Kassam, 1979).

$$\frac{Y_A}{Y_P}=\prod_{j=1}^{n}\left(1-Ky_j\left(1-\frac{ET_A}{ET_P}\right)_j\right) \qquad (۳)$$

کـه در آن، j: مرحلـهٔ رشـد، n: تعـداد مراحـل رشـد، Y_P: محصول تولیدی در شرایط بدون تنش آبـی، Y_A: محصـول تولیدی در شـرایط تـنش آبـی، ET_P: تبخیـر-تعـرق بـالقوه (حداکثر)، ET_A: تبخیر-تعرق واقعـی، Ky: ضـریب واکـنش عملکرد به آب است.

Ghahraman و Sepaskhah (۲۰۰۴) و Montazar (۲۰۱۳) برای تخصیص منابع محدود آب از تقریـب رابطـهٔ (۳) استفاده کرده‌اند که بـه‌صـورت رابطـهٔ (۴) ارائـه شـده است.

$$\frac{Y_A}{Y_P}=\prod_{j=1}^{n}\left(1-Ky_j\left(1-\frac{IWR_A}{IWR_P}\right)_j\right) \qquad (۴)$$

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

۲. ۵. فرمول‌بندی مدل پایداری چند منظوره زراعت و اکوسیستم

در این پژوهش، یک مدل بهینه‌سازی چندمنظوره پایداری کشاورزی و محیط طبیعی دارای چهار هدف برای تخصیص بهینه آب و سطوح کشت در سیستم مخزن- رودخانه درودزن توسعه داده شده است.

تابع هدف اول بیشینه‌سازی سود خالص زراعت با لحاظ کم‌آبیاری تقسیم بر آب آبی مصرفی است که به صورت رابطهٔ کسری (۵) ارائه شده است.

(۵)

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

$$d^{rcym}=1-IWR_A{}^{rcym}\Big/IWR_P{}^{rcm} \qquad r=1,\ldots,5;\ c=1,\ldots,3;\ y=1,\ldots,7;\ m=1,\ldots,12. \qquad (۶)$$

که در آن، y: شمارهٔ سال در طول دورهٔ بهره‌برداری، m: شمارهٔ ماه، r: شمارهٔ ناحیهٔ زراعی، c: شمارهٔ محصول، Y_P: حداکثر عملکرد محصول (کیلوگرم بر هکتار)، IWR_P: حداکثر آب آبیاری مورد نیاز گیاه cاُم در ماه mاُم (مترمکعب بر هکتار)، IWR_A: میزان واقعی آب آبیاری (مترمکعب بر هکتار)، X سطح کشت محصول cاُم در ناحیه rاُم در سال yاُم (هکتار)، Pc: قیمت محصول زراعی (تومان بر کیلوگرم)، C: هزینهٔ تولید به غیر از هزینهٔ آب (تومان بر هکتار)، Pw: قیمت آب (تومان بر مترمکعب) و d: مقدار کاهش نسبی مصرف آب به‌ازای کم‌آبیاری است. همانطور که در رابطه ۶ مشخص است مقدار d برای شرایط آبیاری کامل برابر صفر است.

تابع هدف دوم بیشینه‌سازی بهره‌وری آب آبیاری (تولید گیاهی به‌ازای آب آبی مصرفی) یا به‌عبارت دیگر کمینه‌سازی محتوای آب مجازی آبی است که به صورت رابطهٔ کسری (۷) ارائه شده است.

(۷)

$$Max\ Z_2=\frac{\sum_{r=1}^{5}\sum_{c=1}^{3}\sum_{y=1}^{7}\left(Y_A{}^{rcy}\times X^{rcy}\right)}{\sum_{r=1}^{5}\sum_{c=1}^{3}\sum_{y=1}^{7}\left(\left(IWR_A{}^{rcy}/\eta^{r}\right)\times X^{rcy}\right)}$$

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

$$Min\ Z_3=\sum_{r=1}^{5}\sum_{y=1}^{7}\left(F^{ry}-W_{Bankrupt}{}^{ry}\right)^2 \qquad (۸)$$

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

شایان یادآوری است که مقادیر $W_{Bankrupt}$ براساس میزان تقاضای هر یک از نواحی عمرانی-زراعی در حین اجرای مدل شبیه‌سازی- بهینه‌سازی محاسبه می‌شوند.

تابع هدف چهارم کمینه‌سازی کمبود در تأمین حقابه اکوسیستم دریاچه بختگان است که به صورت رابطه (۹) ارائه شده است.

$$Min\ Z_4 = 1 - \frac{\sum_{y=1}^{7}\sum_{m=1}^{12} W_{env}{}^{ym}}{\sum_{y=1}^{7}\sum_{m=1}^{12} D_{env}{}^{ym}} \qquad (۹)$$

که در آن، W_{env}: حجم آب تخصیصی برای تأمین نیازهای اکوسیستم در ماه mام از سال yام (MCM) و D_{env}: حجم تقاضای آبی زیست‌محیطی در ماه mام (MCM) است.

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

$$R^{ym} = W_{dri}{}^{ym} + W_{ind}{}^{ym} + W_{agr}{}^{ym} + W_{env}{}^{ym} \qquad y=1,...,7;\ m=1,...,12. \qquad (۱۰)$$

$$\sum_{r=1}^{4} f^{rym} = \left(\sum_{c=1}^{3} IWR_A{}^{rcym} \times X^{rcym}\right)/\eta^r \qquad y=1,...,7;\ m=1,...,12. \qquad (۱۱)$$

$$f^{5ym} = \left(\sum_{c=1}^{3} IWR_A{}^{5cym} \times X^{5cym}\right)/\eta^5 + \left(\sum_{r=1}^{4} f^{rym} \times U\right) \qquad y=1,...,7;\ m=1,...,12. \qquad (۱۲)$$

$$a_{\min}{}^{rc} \le X^{rc} \le a_{\max}{}^{rc} \qquad r=1,...,5;\ c=1,...,3. \qquad (۱۳)$$

$$\sum_{c=1}^{3} X^{rc} \le A^r \qquad r=1,...,5. \qquad (۱۴)$$

$$S_{\min} \le S^{ym} \le S_{\max} \qquad y=1,...,7;\ m=1,...,12. \qquad (۱۵)$$

$$R^{ym} \le R_{\max} \qquad y=1,...,7;\ m=1,...,12. \qquad (۱۶)$$

$$S^{y,m+1} = \begin{cases} S_{\max} & if \quad S^{ym} + I^{ym} + P^{ym} - R^{ym} - L^{ym} \ge S_{\max} \\ S^{ym} + I^{ym} + P^{ym} - R^{ym} - L^{ym} & if \quad S^{ym} + I^{ym} + P^{ym} - R^{ym} - L^{ym} < S_{\max} \end{cases} \qquad (۱۷)$$

$$Spill^{ym} = S^{ym} + I^{ym} + P^{ym} - R^{ym} - L^{ym} - S_{\max} \qquad y=1,...,7;\ m=1,...,12. \qquad (۱۸)$$

$$D_{env_{min}} \le \sum_{m=1}^{12} W_{env}{}^{ym} \le D_{env_{\max}} \qquad y=1,...,7. \qquad (۱۹)$$

$$f^{rcym} \ge 0,\quad Spill^{ym} \ge 0,\quad W_{env}{}^{ym} \ge 0 \qquad r=1,...,5;\ c=1,...,3;\ y=1,...,7;\ m=1,...,12. \qquad (۲۰)$$

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

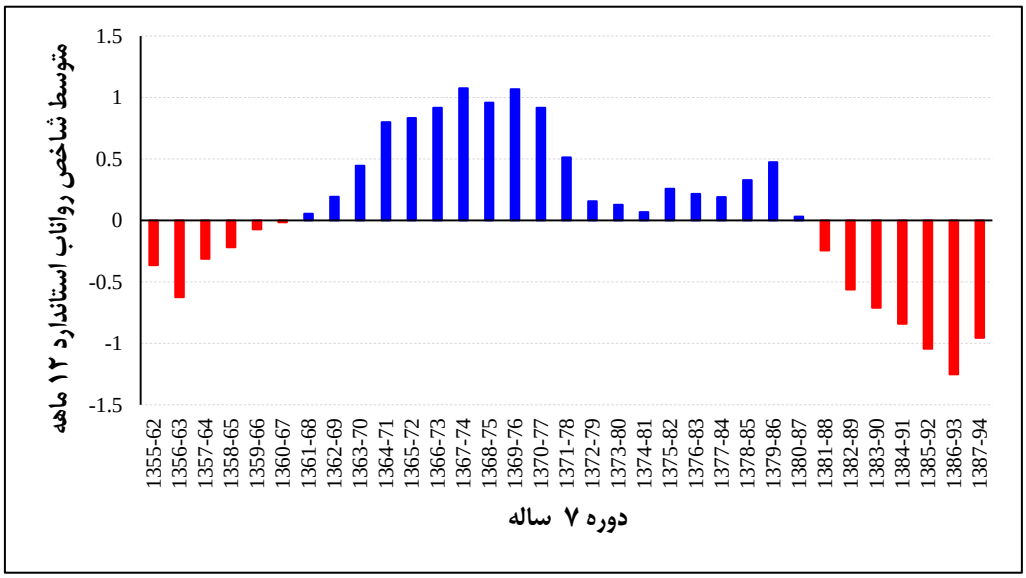
آب تخصیصی تأمین نیاز آبی اکوسیستم (MCM)، f^{rym}: حجم آب تخصیصی در ماه mاُم از سال yاُم به ناحیه زراعی rاُم (MCM)، a_{min}^{rc} و a_{max}^{rc} به‌ترتیب معادل حداقل و حداکثر سطح کشت محصول cاُم در ناحیه rاُم (هکتار)، A^r: مجموع سطوح قابل کشت در ناحیه rاُم (هکتار)، U: درصد آب بازگشتی، η: راندمان انتقال، توزیع و کاربرد آب، S_{min} و S_{max} به‌ترتیب معادل حداقل و حداکثر حجم ذخیرهٔ آب در مخزن سد (MCM)، R_{max}: حداکثر حجم رهاسازی ماهانه از سد (MCM)، S: حجم ذخیرهٔ مخزن سد (MCM)، I: حجم آب ورودی به سد (MCM)، P: حجم ریزش باران روی دریاچهٔ 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 $D_{env\ max}$ به‌ترتیب معادل حداقل و حداکثر تقاضای آبی سالانه برای حفظ اکوسیستم دریاچه بختگان است.

مدل پیشنهادی در محیط نرم‌افزار MATLAB کدنویسی و با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه NSGA-II[12] 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 دورهٔ مورد بررسی، در نظر گرفتن متوسط طولانی‌مدت حجم برون‌نشت ماهانه (MCM) برای محاسبهٔ تلفات آب مخزن و همچنین استفاده از متوسط طولانی‌مدت تبخیر ماهانه (mm) از دریاچهٔ 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. دورهٔ تحت ورشکستگی آبی

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



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

در صورتی که محدودهٔ بین ۰٫۵ و ۰٫۵– را محدودهٔ نرمال برای متوسط شاخص رواناب استاندارد در هر دورهٔ ۷ ساله در نظر بگیریم، در سری زمانی بررسی شده هفت دورهٔ خشک و هشت دورهٔ تر قابل تشخیص است (شکل ۴). به‌عبارت دیگر بیش از نیمی (۵۴ درصد) از دوره‌های ۷ ساله در طول بازهٔ زمانی ۳۹ سالهٔ مورد بررسی، شرایط

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

۳. ۲. رفع‌مناقشه بین گزینه‌های غیر مسلّط برای پایداری سیستم

با حل مدل توسعه داده شده با استفاده از NSGA-II، منحنی تعامل بین اهداف مختلف پایداری کشاورزی و اکوسیستم در منطقهٔ مطالعاتی حاصل می‌شود. بعد از اجرای مدل، یک منحنی تعامل حاوی ۶۳۷ گزینهٔ بهینهٔ مدیریتی غیر مسلّط 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 زمینهٔ تقسیم آب ترجیحات مختلف و گاهاً متناقضی دارند که مسئلهٔ حاضر را تبدیل به نمونهٔ کلاسیکی از مناقشه می‌کند. بنابراین می‌توان از روش‌های رفع مناقشه همچون قواعد انتخاب اجتماعی برای انتخاب گزینه یا گزینه‌های بهینهٔ سازشی استفاده کرد (جدول ۴).

جدول۴. شناسایی گزینه‌های منتخب اجتماعی بین ۶۳۷ گزینهٔ مدیریتی غیر مسلّط بهینه حاصل از حل مدل

قواعد انتخاب اجتماعی	مجموعهٔ سازشی
اِمتیاز بُردا	{گزینه ۸۷}
رأی میانه	{ }
کِثرت	{گزینه‌های ۶۷، ۷۶، ۱۶۱ و ۱۸۸}
مصالحه اکثریت	{ }
مقایسه زوجی	{گزینه ۸۷}
منتخب کاندورسِت	{ }

جدول (۴) نشان می‌دهد تنها دو رویکرد اِمتیاز بُردا و مقایسهٔ زوجی توانستند مجموعهٔ سازشی[۱۳] دارای یک عضو تنها (گزینه مدیریتی شماره ۸۷) ارائه کنند. همان‌طور که مشاهده می‌شود خروجی قاعدهٔ کِثرت مجموعه‌ای سازشی با چهار عضو بوده است. با توجه به این موضوع که فرآیند رأی‌گیری بین چهار جنبهٔ پایداری صورت گرفته است این خروجی نشان می‌دهد که در سطح اول ارجحیت هیچ گزینه‌ای وجود ندارد که گزینه ارجح براساس بیش از یک جنبهٔ پایداری باشد. بنابراین هر یک از چهار گزینهٔ شناسایی شده مطلوب‌ترین گزینه براساس یکی از چهار جنبهٔ پایداری مد نظر هستند.

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 مسألهٔ مورد بررسی چهار جنبهٔ پایداری مورد نظر است؛ بنابراین دو قاعدهٔ رأی میانه و مصالحه اکثریت جواب یکسانی خواهند داشت. البته تهی بودن مجموعهٔ سازشی حاصل از این دو قاعده نشان می‌دهد که نه تنها در سطح اول توافق بلکه در تمام سطوح ممکن (۶۳۷ سطح) برای توافق، هیچ گزینهٔ مدیریتی در بین گزینه‌های بهینه غیر مسلّط استخراج شده وجود ندارد که موافقت همزمان اکثریت ذی‌نفعان را

گرفته باشد. همچنین تهی بودن مجموعهٔ سازشی براساس قاعده کاندورسِت نشان می‌دهد در بین گزینه‌های بهینهٔ مدیریتی غیرمسلّط هیچ گزینه‌ای وجود ندارد که در فرآیند مقایسه‌های زوجی، موافقت همه گرواران را جلب کرده باشد. بنابراین با توجه به جدول (۴) می‌توان گزینهٔ شماره ۸۷ را به‌عنوان بهترین گزینهٔ منتخب اجتماعی در نظر گرفت.

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 به‌منظور حفظ محیط طبیعی در طول دورهٔ ۷ ساله شبیه‌سازی-بهینه‌سازی براساس گزینه‌های شناسایی شده توسط قواعد انتخاب اجتماعی در جدول (۵) ارائه شده است.

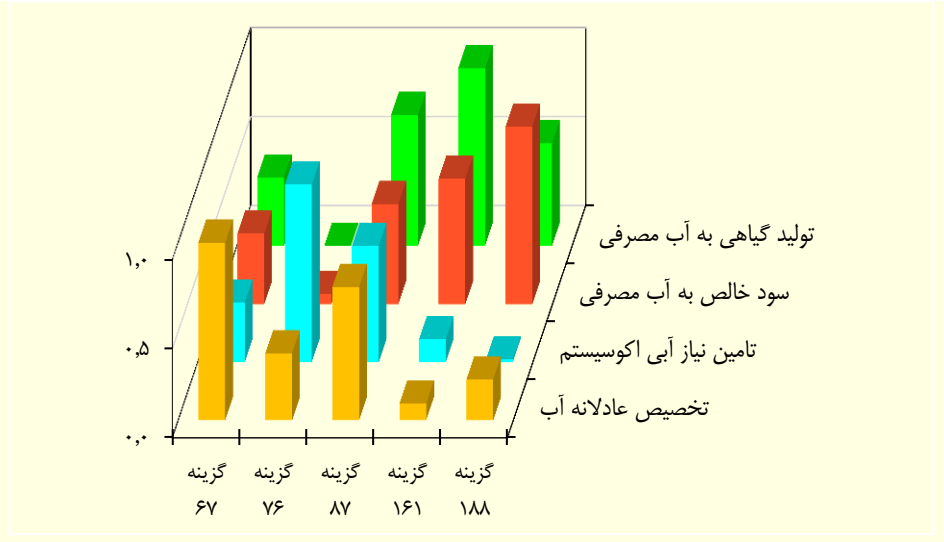
جدول ۵. میانگین نسبت کل سطح کشت هر محصول به تقاضا و کمبود در آب تخصیصی به اکوسیستم در دورهٔ ۷ سالهٔ ورشکستگی براساس گزینه‌های منتخب اجتماعی.

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

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

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



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

با توجه به شکل (۵) گزینه‌های مدیریتی شناسایی شده به راحتی براساس چهار جنبهٔ مختلف پایداری سیستم مقایسه‌شدنی هستند. بر این اساس با اِعمال گزینهٔ مدیریتی شمارهٔ ۱۸۸ سیستم شاهد بالاترین سودخالص –با لحاظ تابع کم‌آبیاری– نسبت به آب آبیاری مصرفی خواهد بود. گزینهٔ ۱۸۸ همچنین از نظر تولید گیاهی نسبت به آب آبیاری مصرفی (یا کاهش محتوای آب مجازی آبی) بین گزینه‌های سازشی دارای سومین رتبهٔ بعد از گزینه‌های ۱۶۱ و ۸۷ است. با اِعمال گزینهٔ مدیریتی شماره ۷۶ سیستم از نظر تأمین تقاضای آبی محیط‌زیست بیشترین رضایت را جلب خواهد کرد. گزینهٔ مدیریتی شمارهٔ ۶۷ نیز بیشترین تأکید را به نزدیکی الگوی توزیع آب به مقادیر تعیین شده براساس قاعدهٔ ورشکستگی کم‌کردن نسبی اختصاص داده است. اما گزینهٔ مدیریتی شمارهٔ ۸۷ از نظر جلب رضایت در سه جنبهٔ 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، توسعهٔ یک مدل تخصیص آب و سطح کشت بین نواحی عمرانی–زراعی آبخور سد درودزن در عین توجه به تأمین آب مورد نیاز اکوسیستم دریاچه بختگان است. مدل مذکور با بهره‌گیری از تابع تولید محصول به‌ازای آب مصرفی (کم‌آبیاری)، معادلهٔ پیوستگی مخزن سد، بیلان آب‌های سطحی در پایین‌دست سد و کمینه‌سازی اختلاف بین الگوی بهینه توزیع آب با سهم هر آب‌بر براساس قاعدهٔ 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 مسئلهٔ مورد بررسی، خروجی حاصل از حل مدل به صورت مجموعه‌ای از جواب‌های غیر مسلّط است که منحنی تعامل بین این چهار مطلوبیت (توابع هدف) را تشکیل می‌دهد. تلاش برای یافتن نقطهٔ 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 نحوهٔ تعامل مطلوبیت‌های گرودارن درگیر در مسئله در شرایط اِعمال این گزینه‌ها داشته باشند. به‌طوری که در پژوهش حاضر مقایسهٔ بهترین گزینهٔ موجود برای

مصالحه و رفع مناقشه بین آب‌بران مختلف با گزینه‌های شناسایی شده توسط قاعدهٔ انتخاب اجتماعی کثرت، اطلاعات ارزشمندی راجع به استراتژی‌های بهینه برای حکمرانی آب و نحوهٔ حصول پایداری چندمنظورهٔ 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 مطالعهٔ حاضر از رویکردهای چانه‌زنی بازگشتی و همچنین مدل‌های چانه‌زنی با لحاظ قدرت هر آب‌بر -که نیاز به بررسی‌های اجتماعی، اقتصادی و فنّی 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

منابع

احمدی بنی، م. ۱۳۹۰. مدیریت و بهره‌برداری بهینهٔ آب کشاورزی در شبکهٔ آبیاری و زهکشی سد دز، پایان‌نامهٔ کارشناسی‌ارشد در رشتهٔ مهندسی کشاورزی (آبیاری و زهکشی)، دانشکدهٔ کشاورزی، دانشگاه شیراز، شیراز.

بیژنی، م.، حیاتی، د.، عبدالوند، ب. ۱۳۹۱. تضاد در بهره‌برداری از آب در شبکهٔ آبیاری سد درودزن: دیدگاه کارشناسان امور آب منطقه، علوم محیطی، ۱۰(۳): ۱۴-۲۶.

ربیعی، ز. ۱۳۸۹. تعیین الگوی بهینهٔ کشت در شرایط کمبود منابع آب با استفاده از بیلان کامل آب در خاک در کانال اردیبهشت سد درودزن، پایان‌نامهٔ کارشناسی‌ارشد در رشتهٔ مهندسی کشاورزی (آبیاری و زهکشی)، دانشکدهٔ 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.

مهاب قدس. ۱۳۹۱. مطالعات طرح ارزیابی عملکرد، پایش مدیریت بهره‌برداری و نگهداری، بهبود، ترمیم و بهسازی شبکهٔ آبیاری و زهکشی درودزن، گزارش برنامه‌ریزی منابع آب، سازمان آب منطقه‌ای فارس. شیراز.

نفرزادگان، ع.ر.، وقارفرد، 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 (مطالعهٔ 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 ctudy. 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.