

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)

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

۱. دانشجوی دکتری علوم و مهندسی آبخیزداری گرایش آب، دانشگاه هرمزگان

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

۳. استادیار، گروه مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه شیراز

۴. استاد، دانشکده محیط زیست، دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت ۱۳۹۵/۰۹/۰۲؛ تاریخ تصویب ۱۳۹۵/۱۲/۲۵)

چکیده

یکی از مسائل اساسی در برنامه‌ریزی کاربردی برای منابع آب، وجود فاکتورهای غیرقطعی است. یکی از رویکردها برای تصمیم‌گیری در چنین شرایطی، برنامه‌ریزی بازه‌ای است. هدف از این مطالعه توسعه نوعی مدل بهینه‌سازی تعاملی برای تخصیص آب و سطح کشت است. مدل توسعه‌یافته 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 شد. نتایج نشان داد با افزایش آستانه رضایت محدودیت‌ها، مقدار آب تخصیص داده‌شده به هر یک از آب‌بران کاهش یافته است به طوری که از سطح رضایت ۰/۶۵ تا سطح رضایت کامل، مدل فقط کمترین حجم آب در نظر گرفته‌شده برای تأمین نیازهای محیط زیست (۴۰ میلیون مترمکعب) را اختصاص می‌دهد. براساس سناریوهای حل در نظر گرفته‌شده، مدل بیشترین سطح کشت در بین محصولات شتوی را به گندم و بیشترین سطح کشت در بین محصولات صیفی را به ذرت اختصاص داده است. نتایج حل مدل در غیاب حد بالا برای سطوح زیر کشت نشان داد بیشترین اختلاف بین سطح کشت بهینه و بیشترین سطح کشت اتفاق افتاده، متعلق به برنج به ترتیب با ۲۷۷۷ و ۵۸۲۱/۶ هکتار برای مناطق درودزن و کربال بوده است. از قوت‌های مدل توسعه داده‌شده در این پژوهش، خطی بودن و توانایی آن در مواجهه با پارامترهای غیرقطعی است. خروجی‌های این مدل اطلاعات لازم برای ارزیابی ریسک و قابل اتکایی گزینه‌های برنامه‌ریزی تخصیص آب را فراهم می‌کند.

کلیدواژگان: بهره‌وری آب، بهینه‌سازی، تقاضای زیست‌محیطی آب، عدم قطعیت.

مقدمه

یکی از مسائل مهم مدیریت منابع آب، مسئله تخصیص آب بین بخش کشاورزی و محیط زیست است. در یک مدیریت عملی برای منابع آب، تصمیم‌گیران باید اهداف مختلف و گاه متناقض را مد نظر قرار دهند. بنابراین، رویکردهای چندهدفه به‌طور گسترده در مدیریت و برنامه‌ریزی منابع آب استفاده شده است. از طرف دیگر، یکی از مسائل اساسی در مدیریت عملی سیستم‌های منابع آب، وجود فاکتورهای غیرقطعی است. این فاکتورهای غیرقطعی معمولاً سبب می‌شوند داده‌های در دسترس برای تعریف پارامترهای مدل کافی نباشند [۱]. یکی از رویکردها برای تصمیم‌گیری در چنین شرایطی، برنامه‌ریزی بازه‌ای است. برخلاف رویکردهای احتمالاتی و فازی، در برنامه‌ریزی بازه‌ای نیازی به تعیین توزیع احتمال یا تابع عضویت نیست و فقط اطلاعات مورد نیاز تصمیم‌گیر دامنه تغییرات پارامترهای غیرقطعی است [۲-۴]. اراضی آبخور سد درودزن واقع در حوضه آبخیز طشک- بختگان- مهارلو، یکی از مناطق ایران است که در حال تجربه کردن مناقشات بر سر تخصیص آب است. از آنجا که در این محدوده عواملی همچون خشکسالی، کمبود آب و نوع مدیریت آب توسط دولت به افزایش جدی منازعات بر سر آب کشاورزی منجر شده است [۵]. بدین‌منظور، استفاده از رویکردهایی برای مدیریت تخصیص آب که علاوه بر چارچوب‌بندی وضعیت با استفاده از مبانی ریاضی و اقتصادی، از توانایی ارائه دامنه‌ای از استراتژی‌ها براساس سطوح ریسک برخوردار باشند، الزامی به‌نظر می‌رسد. بنابراین، هدف این پژوهش توسعه نوعی مدل غیرقطعی (با پارامترهای بازه‌ای) چندهدفه با بهره‌گیری از روش تعاملی اورلی و نادایو (۱۹۹۲) است. این رویکرد تعاملی می‌تواند با استفاده از یک آنالیز پارامتری نتایج انتخاب‌های صورت‌گرفته توسط تصمیم‌گیر را بررسی و تحلیل کند و نوعی فرایند سازش بین اهداف را براساس سطوح مختلف ارضای محدودیت‌های بازه‌ای (غیرقطعی) در سطوح مختلف بهبودی هر یک از اهداف اجرا کند. در نتیجه، تصمیم‌سازان اطلاعات لازم برای آنالیز ریسک و قابل اتکایی گزینه‌های برنامه‌ریزی را در اختیار خواهند داشت.

در زمینه استفاده از برنامه‌ریزی خطی بازه‌ای در مسائل مربوط به مدیریت آب تا کنون تحقیقات مختلفی انجام شده است. برای نمونه، مقصود و همکارانش (۲۰۰۵) یک مدل

بهبودسازی دومرحله‌ای برای برنامه‌ریزی منابع آب در یک سیستم کشاورزی در شرایط عدم قطعیت ارائه کردند [۶]. وو و همکارانش (۱۹۹۷) نوعی روش برنامه‌ریزی خطی فازی بازه‌ای برای حل مسائل چندهدفه پیشنهاد دادند که روش فازی و برنامه‌ریزی خطی بازه‌ای را با هم ترکیب می‌کند [۷]. سپس وانگ و همکارانش (۲۰۰۶) این روش را برای مدیریت آبخیز دریاچه کینگای به‌کار بردند [۸]. اورلی و نادایو (۱۹۹۲) نوعی روش تعاملی برای حل مسائل چندهدفه با الهام از روش STEM ارائه کردند [۹]. هان و همکارانش (۲۰۰۸) نیز نوعی مدل چندهدفه تخصیص منابع آب شهری برای کاربری‌های مختلف با استفاده از روش STEM ارائه کردند [۱۰].

مفهوم آب مجازی اولین‌بار توسط آلن در سال ۱۹۹۳ معرفی شد و اشاره به مقدار آب مورد نیاز برای تولید محصولات و یا خدمات دارد [۱۱]. به‌طور کلی، مطالعاتی در زمینه کاربرد سیاست‌های آب مجازی در مناطق مختلف و کشورهای دچار کم‌آبی از جمله خاورمیانه [۱۲]، جنوب و شرق مدیترانه [۱۳]، هند [۱۴]، اسپانیا [۱۵]، مراکش و هلند [۱۶]، جامعه توسعه جنوب آفریقا^۱ [۱۷]، حوضه آبخیز نیل [۱۸] و نیوزیلند [۱۹] انجام گرفته است. در این زمینه ولازکوئز (۲۰۰۷) در مقاله‌ای تحلیلی به نام «تجارت آب در آندلس. آب مجازی: راهکاری جایگزین برای مدیریت مصرف آب» بیان می‌کند که حجم زیادی از آب از طریق صادرات محصولات زراعی و باغی دارای آب‌بری زیاد از آندلس اسپانیا خارج می‌شود و از طرف دیگر، محصولاتی همچون غلات که با احتیاج آبی کمتری قابل کشت هستند، وارد می‌شوند و در صورت توجه به آب مجازی، پتانسیل صرفه‌جویی آب بسیار شایان توجه خواهد بود [۱۵]. همچنین ورما و همکارانش (۲۰۰۹) نتایج دو تز کارشناسی ارشد که جریان‌های بین ایالتی آب مجازی در هندوستان را در چارچوب برنامه بزرگ انتقال آب دولت هندوستان بررسی کرده‌اند را تحلیل کردند. این پژوهشگران نشان دادند الگوی فعلی تجارت بین ایالتی آب مجازی، کمبود آب را در ایالت‌های دچار کمبود آب تشدید می‌کند و این موضوع بیش از اینکه تحت سلطه استعداد آبی^۲ مناطق باشد، توسط جریان آب مجازی که خود تحت تأثیر فاکتورهای دیگری مثل «سرانه مساحت سطح زیر کشت» و «دسترسی به بازار مطمئن» است، کنترل می‌شود

1. Sothern African Development Community (SADC)
2. water endowment

مناسب تجارت محصولات زراعی به همراه اطلاعات مربوط به مقدار دقیق واردات و صادرات آب مجازی لازم است [۲۳]. فرامرزی و همکارانش (۲۰۱۰) تجارت آب مجازی داخل کشوری ایران را به منظور تسهیل بهبود تولید غلات و همچنین تسکین مسئله کمبود آب در قالب استراتژی تصحیح ساختار الگوی کشت تحلیل کردند. بدین منظور نوعی مدل بهینه‌سازی چندهدفه خطی تدوین شد. نتایج نشان داد براساس سناریوی اصلی (ادامه وضع موجود از نظر آب مصرفی و تولید محصول)، بعضی از سناریوهای تصحیح الگوی کشت می‌توانند به تولید گندم بیشتر با مصرف آب کمتری منجر شوند [۲۴]. بخشوده و دهقان‌پور (۲۰۱۵) الگوی کشت را با توجه به بهینه‌سازی واردات آب مجازی و سود خالص اجتماعی محصولات کشاورزی منتخب در منطقه مرودشت را با یک فرمولاسیون خطی بهینه کردند و نتیجه گرفتند گندم از نظر واردات آب مجازی و گوجه‌فرنگی از نظر اشتغال اهمیت دارند [۲۵]. خانجاری ساداتی و همکارانش (۲۰۱۴) یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی برای تعیین مقادیر بهینه رهاسازی سد درودزن و الگوی کشت بهینه در اراضی آبخور آن ارائه کردند [۲۶]؛ همچنین ربیعی و همکارانش (۲۰۱۵) در بخشی از همین منطقه (اراضی تحت پوشش کانال اردیبهشت)، به بهینه‌سازی غیرخطی سطوح کشت براساس استراتژی‌های مختلف کم‌آبایی در دوره‌های مختلف رشد گیاه اقدام کردند [۲۷]. در هر دو پژوهش اخیر، بیشترین سطح اراضی زراعی در کشت‌های شتوی و صیفی به ترتیب به گندم و ذرت اختصاص داده شده است.

به‌طور کلی، بررسی منابع نشان می‌دهد بعد از معرفی مفهوم آب مجازی، مطالعات زیادی در دو دهه گذشته در زمینه تجارت آب مجازی در سطح جهانی و منطقه‌ای انجام شد. در سال‌های اخیر برخی پژوهشگران این مفهوم را آسیب‌شناسی کردند و ضمن اینکه به نمونه‌هایی اشاره کردند که تجارت آب مجازی به تسکین مشکل کمبود آب منجر نشده است بلکه آن را به‌عنوان راهکاری ناهماهنگ با برخی مفاهیم اقتصادی معرفی کرده‌اند. از طرف دیگر، در کشوری مثل ایران بعضی محصولات علاوه بر داشتن کارکرد استراتژیک، به‌گونه‌ای با فرهنگ کشاورزی مردم عجین است، بنابراین سیاست‌های مدیریتی نزدیک‌بینانه^۱ مانند اینکه از

[۱۴]. شایان یادآوری است ویشلنز (۲۰۱۰) در مقاله‌ای با عنوان «آب مجازی: یک چشم‌انداز مفید، اما معیار ناکافی برای سیاست‌گذاری» بیان می‌کند که نویسندگان بسیاری به تشریح جریان آب مجازی بین کشورها در قالب تجارت محصولات کشاورزی و دامی پرداخته‌اند. بعضی پیشنهاد کرده‌اند که کشورهای کم‌آب باید محصولات کشاورزی با آب‌بری زیاد را از کشورهای پرآب وارد و از منابع داخلی آب برای فعالیت‌های با ارزش بیشتری استفاده کنند. این نسخه تعیین سیاست ابتدا قانع‌کننده به نظر می‌رسد، ولی از طرفی می‌تواند به شدت گمراه‌کننده باشد. وی همچنین بیان می‌کند که مباحث پیرامون آب مجازی موجب تقویت توجه و تمرکز مسئولان و شهروندان عادی روی مسائل کمبود آب می‌شود؛ با این حال مقوله یادشده براساس یک قالب کاری مفهومی مبنایی پایه‌ریزی نشده است. به بیان دیگر، استراتژی‌های تجارتي براساس آب مجازی، با مفهوم اقتصادی مزیت نسبی سازگار نیستند [۲۰]. به‌علاوه، باید توجه شود که مقادیر محاسبه‌شده برای جریان‌های آب مجازی چه در سطح جهانی و چه در سطح کشوری در مطالعات مختلف، متفاوت است. یانگ و زندر (۲۰۰۷) این تغییرات را اساساً ناشی از سازگار نبودن مطالعات مختلف در چهار جنبه می‌دانند. این چهار مورد عبارت‌اند از: ۱. مقدار محاسبه‌شده برای محتوای آب مجازی؛ ۲. محصولاتی که مورد مطالعه قرار گرفته‌اند؛ ۳. مدت در نظر گرفته‌شده برای مطالعه و ۴. منبع تأمین‌کننده اطلاعات مبادلات تجاری هستند. برآورد جریان‌های مربوط به آب مجازی به شدت به مقادیر محاسبه‌شده برای محتوای آب مجازی محصولات غذایی وابسته است [۲۱].

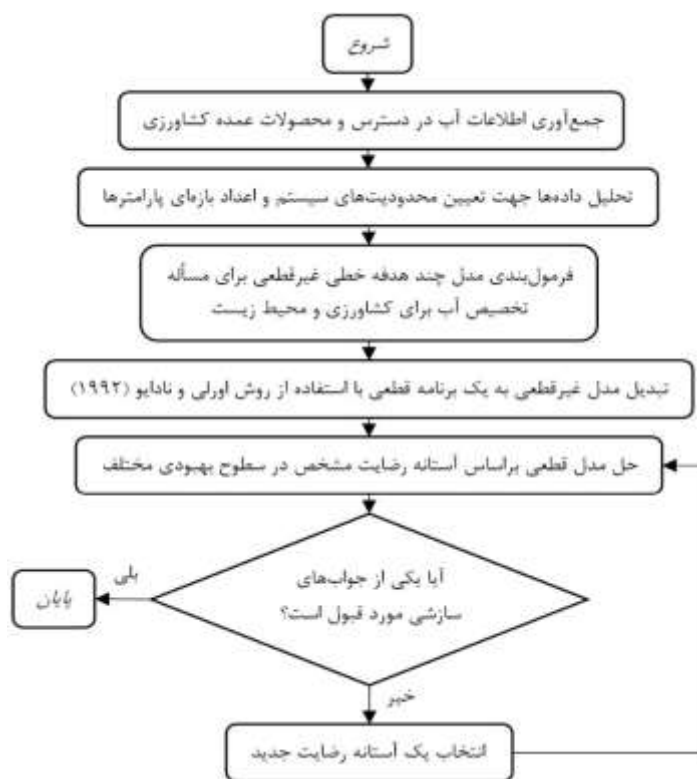
در ایران، روحانی و همکارانش (۱۳۸۷) تجارت آب مجازی در زمینه منابع آب موجود را به‌عنوان راهکاری برای کاهش تنش آبی در سطح کشور ارزیابی کردند. نتایج نشان داد تجارت آب مجازی در کشور با در نظر گرفتن میزان مصرف و بهره‌وری آب، تقریباً ناآگاهانه صورت گرفته است به‌صورتی که گندم با سهم ۵۸/۵ درصد در واردات آب مجازی بزرگ‌ترین محصول وارداتی در سال‌های ۱۳۶۲ تا ۱۳۸۲ بوده است [۲۲]. در زمینه بهینه‌سازی الگوی کشت، صبوحی و سلطانی (۱۳۸۷) روشی براساس بهینه‌سازی در استفاده کارا از آب در دسترس، منافع اجتماعی و واردات خالص آب مجازی در حوضه آبخیز حریررود و کشف‌رود ارائه کردند و نتیجه گرفتند که برای ارزیابی یک الگوی کشت خاص، وجود یک الگوی

1. myopic policies

روش‌شناسی

تخصیص منطقی آب در یک سیستم کشاورزی، براساس سطوح کشت بهینه برای محصولات مختلف صورت می‌گیرد. برای بهینه‌سازی سطوح کشت باید ویژگی‌هایی همچون دوره کشت، عملکرد و نیاز آبی محصولات در کنار محدودیت‌های فیزیکی سیستم همچون آب و زمین مد نظر قرار گیرد. از آنجا که قریب‌به‌اتفاق این پارامترها بازه تغییرات (عدم قطعیت) دارند، استفاده از بهینه‌سازی بازه‌ای در چنین مواردی مفید خواهد بود. روندنمای پژوهش حاضر در شکل ۱ ارائه شده است.

کشاورزان یک منطقه خواسته شود که کشت محصولی خاص را به‌طور کامل متوقف کنند، نمی‌تواند رویکرد مناسبی تلقی شود. بنابراین، در این مقاله سعی خواهد شد بدون حرکت به سمت استراتژی تجارت آب مجازی به‌عنوان راهکار کمبود آب، از مفهوم سودمند محتوای آب مجازی برای بهینه‌سازی سطوح زیر کشت بهره‌گیری شود. همچنین مرور منابع نشان داد تا کنون از روش برنامه‌ریزی خطی تعاملی با اعداد بازه‌ای برای بهینه‌سازی تخصیص آب و سطح کشت- در کنار تأمین نیاز آبی محیط زیست- استفاده نشده است.



شکل ۱. روندنمای تخصیص بهینه آب و سطح کشت با استفاده از برنامه‌ریزی خطی بازه‌ای تعاملی

ضرایب به‌صورت اعداد بازه‌ای، فرمولاسیون کلی این مدل به‌صورت روابط ۱ تا ۶ است:

$$Max P^{\pm} = C_1^{\pm} . X_1 \tag{1}$$

$$Max L^{\pm} = C_2^{\pm} . X_2 \tag{2}$$

$$Max W^{\pm} = C_3^{\pm} . X_3 \tag{3}$$

$$Max Env = X_4 \tag{4}$$

subject to

$$A^{\pm} . X^{\pm} \leq B^{\pm} \tag{5}$$

$$X^{\pm} \geq 0 \tag{6}$$

مدل چندهدفه با پارامترهای بازه‌ای برای تخصیص آب کشاورزی

در این پژوهش، بهینه‌سازی سطوح کشت و تخصیص آب به‌صورت یک مدل چندهدفه دارای سه هدف بیشینه‌سازی سود، بیشینه‌سازی اشتغال و بیشینه‌سازی بهره‌وری آب برای بخش کشاورزی و همچنین یک هدف اضافی دیگر برای بیشینه‌سازی آب تخصیصی به‌منظور تأمین نیاز آبی محیط زیست صورت می‌گیرد. با در نظر گرفتن پارامترها و

حل مدل چندهدفه با پارامترهای بازه‌ای

براساس روش اورلی و نادایو (۱۹۹۲) که از روش STEM مشتق شده است [۹]، مدل چندهدفه بازه‌ای بالا معادل برنامه‌قطعی^۱ زیر خواهد بود که به صورت روابط ۷ تا ۹ است:

$$\text{Max } P_k(d_k^+) = 1 - d_k^+ / (g_k^+ - g_k^-) \quad (7)$$

subject to

$$d_k^+ = g_k^+ - Z_k(x), \quad d_k^+ \geq 0, \quad d_k^+ \leq g_k^+ - g_k^- \quad (8)$$

$$\sum_{j=1}^n (a_{ij}^- + \alpha_i(a_{ij}^+ - a_{ij}^-)), \quad x_j \leq b_i^+ - \alpha_i(b_i^+ - b_i^-), \quad x_j \geq 0, \quad (9)$$

$$i = 1, \dots, m; \quad k = 1, \dots, K$$

که در آن $P_k(d_k^+)$ بیان‌کننده درجه رضایت تصمیم‌گیر، x_j متغیر تصمیم j ام ($j = 1, 2, \dots, n$) و n تعداد کل متغیرهای تصمیم است. همچنین g_k^+ و g_k^- به ترتیب مطلوب‌ترین و نامطلوب‌ترین مقدار تابع هدف k ام مرکزی تابع هدف k ($k = 1, 2, \dots, K$)، تعداد کل توابع هدف و $Z_k^0(x)$ مقدار مرکزی تابع هدف k ام است. a_{ij}^- و a_{ij}^+ به ترتیب حدود بالا و پایین ضریب متغیر تصمیم j ام در سمت چپ محدودیت i ام ($i = 1, 2, \dots, m$)، b_i^- و b_i^+ به ترتیب حدود بالا و پایین پارامتر سمت راست محدودیت i ام، m تعداد کل محدودیت‌های برنامه و α_i آستانه رضایت محدودیت i ام است. به منظور خلاصه‌سازی در ادامه متن برای اشاره به محدودیت‌ها از D_0 براساس رابطه ۱۰ استفاده خواهد شد:

$$D = \{x \in R^n : d_k^+ = g_k^+ - Z_k(x), \quad d_k^+ \geq 0, \quad d_k^+ \leq g_k^+ - g_k^-, \quad k = 1, \dots, K\} \quad (10)$$

به دست آمده از ماتریس بازدهی، با استفاده از روابط ۱۱ و ۱۲ محاسبه می‌شوند.

$$\pi_k = b_k / \sum_k b_k \quad (11)$$

$$b_k = \left[\frac{(P_k^M - P_k^m)}{P_k^m} \right] \cdot \left[1 / \|c_k^0\|_r \right] \quad (12)$$

که در آن $\|c_k^0\|_2$ ، نرم اقلیدسی بردار c_k^0 است. سپس نقاط (جواب) سازش اول که با x^1 نشان داده خواهند شد با حل یک برنامه شامل روابط ۱۳ تا ۱۶ به دست خواهند آمد.

$$\text{Min } M. \delta - \sum_k \varepsilon_k \quad (13)$$

subject to

$$\pi_k (P_k^+ - P_k(d_k^+)) \leq \delta - \varepsilon_k \quad (14)$$

$$x \in D. \quad (15)$$

که در آن L^\pm ، P^\pm و W^\pm توابع هدف بازه‌ای به ترتیب معرف میزان سود، اشتغال و بهره‌وری در بخش کشاورزی هستند و Env تابع هدف بیان‌کننده تأمین نیاز آبی زیست‌محیطی است. در این فرمولاسیون کلی، X_1 ، معرف سطح زیر کشت هر یک از محصولات عمده کشاورزی و X_2 ، معرف حجم آب تخصیصی به محیط زیست است. همچنین اگر R^\pm را به عنوان مجموعه اعداد بازه‌ای در نظر بگیریم، خواهیم داشت: $A^\pm \in \{R^\pm\}^{m \times n}$ ، $B^\pm \in \{R^\pm\}^{m \times 1}$ و $C^\pm \in \{R^\pm\}^{1 \times n}$.

همان طور که مشخص است این مدل، مسائل اقتصادی-اجتماعی را در کنار توجه به بهره‌وری آب و نگرانی‌های زیست‌محیطی مد نظر قرار می‌دهد. شایان یادآوری است استراتژی کاهش محتوای آب مجازی محصولات کشاورزی، در هدف سوم تأمین خواهد شد. به بیان دیگر، از آنجا که محتوای آب مجازی- مترمکعب بر تن- هر محصول کشاورزی برابر است با نیاز آبی گیاه (مترمکعب در هکتار) تقسیم بر عملکرد محصول (تن در هکتار) [۲۸]، بنابراین مقدار محتوای آب مجازی برابر با معکوس مقدار بهره‌وری آب (تن بر مترمکعب) برای آن محصول است.

برای حل روابط ۷ تا ۹ باید ماتریس بازدهی ساخته شود. بدین منظور برای هر تابع هدف $P_k(d_k^+)$ و برای هر α_i ، برنامه حل می‌شود و مطلوب‌ترین (P_k^M) و نامطلوب‌ترین (P_k^m) مقدار بهینه برای $P_k(d_k^+)$ با استفاده از معادلاتی که توسط اورلی و نادایو (۱۹۹۲) ارائه شده است از ماتریس بازدهی^۱ استخراج می‌شوند [۹]. با استفاده از این اطلاعات، از تصمیم‌گیر درخواست می‌شود یک سطح انتظار^۲ (O_k) برای مقدار هر یک از توابع $Z_k(x)$ ، $k = 1, \dots, K$ را تعیین کند. سپس همانند روش STEM، وزن‌های (π_k) مربوط به هر $P_k(d_k^+)$ با استفاده از مطلوب‌ترین و نامطلوب‌ترین مقدار بهینه

1. payoff matrix
2. aspiration level

بیشتر در زمستان و بهار اتفاق می‌افتد. محدوده آبخور سد درودزن اراضی دشت‌های رامجرد و کربال را که در طرفین بخش انتهایی رودخانه کر واقع شده‌اند، در بر می‌گیرد و شامل شبکه آبیاری و زهکشی درودزن (شهرستان‌های مرودشت و زرقان) و شبکه آبیاری و زهکشی دشت کربال (شهرستان خرامه) است. ارتفاع دشت درودزن - کربال بین ۱۵۶۰ متر تا ۱۶۶۰ متر بالاتر از سطح دریاست. اقلیم منطقه براساس طبقه‌بندی دومارتن، نیمه‌خشک با متوسط ساعات آفتابی ۹٫۱ ساعت در روز و متوسط تبخیر ۶٫۲ میلی‌متر در روز است. رود کر در نهایت به دریاچه بختگان منتهی می‌شود و اصلی‌ترین منبع تأمین آب این دریاچه است. در این مطالعه، برای یک دوره سه‌ساله که از نظر آورد هیدرولوژیکی، آب علاوه بر کشت شتوی برای کشت صیفی نیز توزیع شده است، مقادیر سطح زیر کشت، عملکرد، هزینه و نیروی کار لازم برای تولید محصولات عمده منطقه با استفاده از اطلاعات شرکت بهره‌برداری از شبکه‌های آبیاری و زهکشی استان فارس، سازمان جهاد کشاورزی استان فارس و همچنین مصاحبه با کشاورزان محلی تهیه شد. بازه تغییرات سطح زیر کشت و عملکرد برای محصولات عمده در محدوده هر یک از شبکه‌ها نیز در جدول ۱ ارائه شده است.

در این مطالعه، با در نظر گرفتن متوسط تبخیر و تعرق پتانسیل در دوره کشت هر محصول در هر محدوده و اطلاعات سند ملی آبیاری کشور ضریبی برای برآورد نیاز آبی هر گیاه استخراج شد که مقدار این ضریب برای محصولات عمده در دو شبکه آبیاری درودزن و کربال در جدول ۲ آورده شده است. با کم کردن مقدار بارش مؤثر از مقدار آب مورد نیاز هر محصول (CWR)، نیاز آبیاری گیاه (IWR) به دست خواهد آمد. شایان یادآوری است متغیرهایی همچون کمترین، بیشترین و متوسط دما در برآورد تبخیر و تعرق پتانسیل کارکردی اساسی دارند، به طوری که متغیر دما تأثیر اصلی را در بعضی از اولین و پُرکاربردترین روش‌های برآورد تبخیر و تعرق همچون بلینی - کریدل دارد [۲۹ و ۳۰].

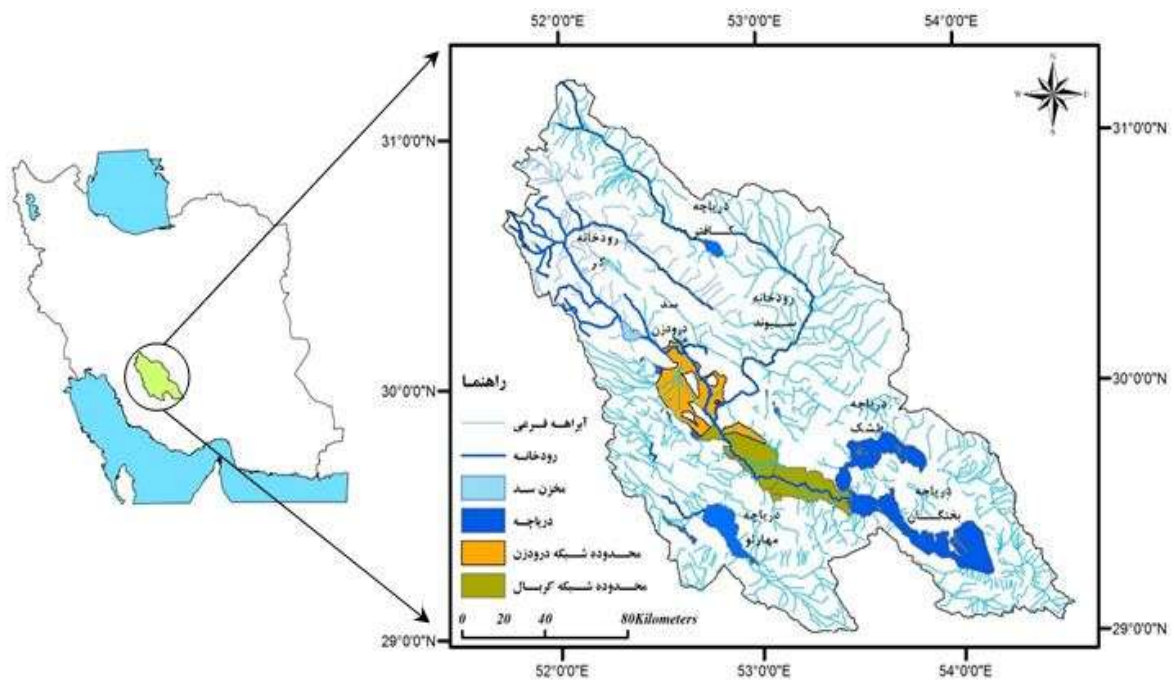
$$\sum_{j=1}^n (a_{ij}^- + \alpha_i (a_{ij}^+ - a_{ij}^-)). x_j \leq b_i^+ - \alpha_i (b_i^+ - b_i^-), x_j \geq 0, \quad (16)$$

$$i = 1, \dots, m; k = 1, \dots, K$$

که در آن $P_k^0 = 1 - (g_k^+ - O_k / g_k^+ - g_k^-)$ است. در این برنامه M مقداری است بزرگ‌تر از همه ضرایب موجود در برنامه و ϵ_k کارآیی نقاط سازش اول (x^1) را تضمین می‌کند. نقاط سازش بعدی به صورت $x^m, m = 1, 2, 3, \dots$ نشان داده خواهند شد. اگر نقطه سازش اول (x^1) برای تصمیم‌ساز راضی‌کننده باشد، الگوریتم در این مرحله متوقف خواهد شد و x^1 به عنوان جواب مسئله چندهدفه اولیه قبول خواهد شد. در غیر این صورت، به منظور محاسبه نقاط سازشی جدید، سلسله‌ای از مراحل تعاملی شروع خواهد شد تا زمانی که به نقطه راضی‌کننده‌ای دست پیدا کنیم. تصمیم‌گیر باید اعلام کند که آیا نقطه سازش به دست آمده برای او راضی‌کننده است - که در این صورت فرایند پایان می‌یابد - یا تمایل دارد برای به دست آوردن راه حل مطلوب‌تری تلاش کند. برای مورد اخیر، نتایج هر سطح بهبودی انتخابی توسط تصمیم‌ساز با استفاده از یک فرایند تعاملی (آنالیز پارامتری) بررسی و تحلیل می‌شود. به محض اجرای آنالیز پارامتری برای هر سطح بهبودی، تصمیم‌ساز با نقطه سازش جدید مواجه خواهد شد. با این نقطه سازش جدید درست همانند جواب قبلی رفتار خواهد شد و فرایند تا جایی ادامه خواهد یافت تا تصمیم‌گیر احساس رضایت کند. در هر حال، فرایند بعد از چندین بار خاتمه خواهد یافت. چون تابع هدفی که روی آن فرایند بهبود صورت گرفته بیش از حدی مشخص نمی‌تواند بهبود یابد.

مطالعه موردی: اراضی آبخور سد درودزن

اراضی آبخور سد درودزن بخشی از حوضه آبخیز طشک - بختگان - مهارلو هستند. این حوضه آبخیز با مساحت ۳۱۴۹۲ کیلومتر مربع در شمال استان فارس و در محدوده‌ای بین طول جغرافیایی ۵۱ درجه و ۴۲ دقیقه تا ۵۴ درجه و ۳۱ دقیقه شرقی؛ و عرض جغرافیایی ۲۹ درجه تا ۳۱ درجه و ۱۴ دقیقه شمالی واقع شده است (شکل ۲). بارش سالانه این حوضه معمولاً بین ۲۰۰ میلی‌متر در جنوب شرق تا ۷۰۰ میلی‌متر در شمال غرب متغیر است و



شکل ۲. موقعیت اراضی آبخور سد درودزن و دریاچه بختگان در حوضه آبخیز طشک-بختگان-مهارلو

جدول ۱. اعداد بازه‌ای سطح کشت (هکتار) و عملکرد (تن در هکتار) محصولات اصلی در شبکه‌های آبیاری مطالعه‌شده

شبکه درودزن		شبکه کربال						
سطح زیر کشت		سطح زیر کشت		عملکرد		عملکرد		
حد بالا	حد پایین	حد بالا	حد پایین	حد بالا	حد پایین	حد بالا	حد پایین	
۲۷۷۲۸٫۸۶	۲۸۵۴۲٫۲۲	۴٫۸۴	۵٫۶۰	۱۹۱۸۱٫۱۶	۲۸۰۱۵٫۴۳	۴٫۶۱	۵٫۶۴	گندم
۱۸۸۷٫۱۸	۳۱۴۸٫۰۶	۲٫۷۴	۳٫۲۶	۲۹۸۹٫۰۶	۶۰۱۹٫۲۳	۲٫۶۴	۳٫۵۹	جو
۳۹	۱۷۰٫۲۰	۸٫۲۷	۱۲٫۸۵	۱۵۶٫۶۰	۲۸۷٫۰۵	۱۰٫۵۲	۱۳٫۱۶	یونجه
۳۶۱۸٫۸۰	۴۳۲۲٫۴۰	۶٫۵۴	۷٫۷۴	۷۸۹٫۸۴	۱۵۸۶٫۱۸	۸٫۸۱	۱۰٫۲۶	ذرت دانه
۶۷	۲۸۴۴	۴٫۴۲	۵٫۰۵	۳۴۹۱٫۴۰	۹۳۱۳	۴٫۷۰	۵٫۰۳	برنج
۴۳۴٫۹۰	۱۲۶۴	۴۱٫۲۲	۵۴٫۵۵	۳۱۴٫۸۲	۱۱۷۶	۳۵٫۸۵	۵۰٫۰۱	چغندر قند
۹۰۴٫۷۰	۱۰۸۰٫۶۰	۴۴٫۸۶	۵۳٫۱۷	۰٫۰۰	۲۱۹٫۴۰	۴۳٫۹۶	۵۴٫۷۵	ذرت علوفه

جدول ۲. ضرایب استخراجی برای تبدیل تبخیر و تعرق پتانسیل به تبخیر و تعرق واقعی به تفکیک گیاه و منطقه

محدوده	محصولات						
	گندم	جو	یونجه	ذرت دانه‌ای	برنج	چغندر قند	ذرت علوفه‌ای
شبکه درودزن	۰٫۶۴	۰٫۶۴	۰٫۸۰	۰٫۶۹	۱٫۴۵	۰٫۷۹	۰٫۶۸
شبکه کربال	۰٫۶۱	۰٫۵۸	۰٫۸۱	۰٫۶۵	۱٫۴۴	۰٫۸۲	۰٫۶۷

منبع: بررسی و محاسبات نگارندگان

در نظر داشتن تأمین آب مورد نیاز دریاچه بختگان در قالب مدل بهینه‌سازی بازه‌ای خطی شامل روابط ۱۷ تا ۲۵ فرمول‌بندی شده است:

$$\text{Max } Z_1^\pm = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m [(Y_{ij}^-, Y_{ij}^+) \times Pc_{ij} - Cost_{ij} - Pw_{ij}]. x_{ij}^a \quad (17)$$

$$\text{Max } Z_2^\pm = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m [Emp_{ij}^-, Emp_{ij}^+]. x_{ij}^a \quad (18)$$

$$\text{Max } Z_3^\pm = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m [(Y_{ij}^- / CWR_{ij}^-), (Y_{ij}^+ / CWR_{ij}^+)]. x_{ij}^a \quad (19)$$

$$\text{Max } Z_4^\pm = x_w^{env} + x_s^{env} \quad (20)$$

Subject to

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{l_i} x_{ij}^a \leq [A_{W_i}^-, A_{W_i}^+] \quad (21)$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=l_i+1}^m x_{ij}^a \leq [A_{S_i}^-, A_{S_i}^+] \quad (22)$$

$$x_w^{env} + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{l_i} [IWR_{ij}^-, IWR_{ij}^+]. x_{ij}^a \leq [Q_{W_i}^-, Q_{W_i}^+] \quad (23)$$

$$x_s^{env} + \sum_{i=1}^n \sum_{j=l_i+1}^m [IWR_{ij}^-, IWR_{ij}^+]. x_{ij}^a \leq [Q_{S_i}^-, Q_{S_i}^+] \quad (24)$$

$$x^a \geq 0, x_w^{env} \geq 0, x_s^{env} \geq 0 \quad (25)$$

که در آن:

$$Z_1^\pm, Z_2^\pm, Z_3^\pm$$

$$Z_4^\pm$$

$$i = 1, 2, \dots, n$$

$$j = 1, 2, \dots, l_i$$

$$j = l_i + 1, l_i + 2, \dots, n$$

$$x^a$$

$$x_w^{env}, x_s^{env}$$

$$Y^\pm$$

$$Pw, Pc$$

$$Cost$$

$$Emp^\pm$$

$$CWR^\pm$$

$$IWR^\pm$$

$$A_{W_i}^\pm, A_{S_i}^\pm$$

$$Q_w^\pm, Q_s^\pm$$

(فرض) حل می‌شود: ۱. در نظر گرفتن حد بالا برای سطوح کشت محصولات و حد پایین غیر صفر برای برنج؛ ۲. در نظر گرفتن حد بالا برای سطوح کشت محصولات و حد پایین صفر برای برنج؛ ۳. در نظر گرفتن حد پایین غیر صفر

مدل بازه‌ای تخصیص بهینه آب و سطح کشت

در این پژوهش، مدل تخصیص بهینه آب و سطوح کشت بین دو شبکه آبیاری و زهکشی درودزن و کربال با

سه تابع هدف بازه‌ای برای بخش کشاورزی

تابع هدف بیشینه‌سازی آب تخصیصی برای اهداف زیست‌محیطی

اندیس نشان‌دهنده منطقه کشاورزی

اندیس نشان‌دهنده محصولات شتوی

اندیس نشان‌دهنده محصولات صیفی

سطح زیر کشت به هکتار

سهام محیط زیست از آب رهاسازی شده از سد برای کشت شتوی (w) و صیفی (s)

مقدار بازه‌ای عملکرد محصول (تن در هکتار)

قیمت محصول (ریال بر تن) و آب بهای محصول (ریال بر مترمکعب)

هزینه تولید محصول (ریال بر هکتار)

مقدار بازه‌ای نیروی کار لازم در فرایند تولید محصول (نفر در هکتار)

مقدار بازه‌ای نیاز آبی محصول (مترمکعب در هکتار)

مقدار بازه‌ای نیاز آبیاری محصول (مترمکعب در هکتار)

مقدار بازه‌ای مجموع سطوح کشت برای کشت شتوی (w) و صیفی (s)

مقدار بازه‌ای حجم آب قابل تأمین برای کشت شتوی (w) و صیفی (s)

در این تحقیق برای حل مسئله چندهدفه تخصیص بهینه

آب و سطح کشت، کمترین آب مورد نیاز محیط زیست در

منطقه مطالعاتی برابر با ۴۰ میلیون مترمکعب در نظر گرفته

شده است. مدل توسعه داده شده براساس چهار سناریو

بهینه‌سازی چندهدفه خطی بازه‌ای تحت یک آستانه رضایت مشخص ($\alpha = 0.5$)، در جدول‌های ۳ و ۴ ارائه شده است. همان‌طور که در این جدول‌ها مشخص است نتایج مدل بهینه‌سازی براساس سناریوهای که در آنها حد بالا برای سطوح کشت لحاظ شده است (سناریوهای ۱ و ۲)، دقیقاً مشابه است. بر این اساس، در شرایط هیدرولوژیکی بررسی‌شده، طرح نکاشت برنج (وجه افتراق بین این دو سناریوی حل) لزوماً استراتژی بهینه مدیریتی برای منطقه مطالعاتی نیست.

برای برنج و حذف حد بالا برای سطوح کشت محصولات و ۴. فرض کردن حد پایین صفر برای برنج و حذف حد بالا برای سطوح کشت محصولات.

یافته‌ها

نتایج حل مدل با فرضیات مختلف

با حل مدل توسعه داده‌شده، جواب‌های منطقی برای مسئله تخصیص بهینه آب و سطح زیر کشت بین دو شبکه درودزن و کربال در عین توجه به تأمین نیاز آبی محیط زیست به‌دست خواهد آمد. نتایج براساس چهار سناریوی حل مدل

جدول ۳. سطوح بهینه کشت محصولات اصلی در هر محدوده براساس چهار سناریوی حل برای سطح رضایت ۰/۵۰

سناریو	محصولات محدود	گندم	جو	یونجه	ذرت دانه‌ای	برنج	چغندر قند	ذرت علوفه‌ای
۱	شبکه درودزن	۲۸۵۴۲٫۲۲	۲۰۴۲٫۷۴	۱۷۰٫۲۰	۴۳۲۲٫۴۰	۴۹۱٫۲۰	۱۲۶۴٫۰۰	۱۰۸۰٫۶۰
	شبکه کربال	۲۷۳۳۸٫۷۱	۲۹۸۹٫۰۶	۲۸۷٫۰۵	۱۵۸۶٫۱۸	۴۷۶۳٫۱۹	۱۱۷۶٫۰۰	۲۱۹٫۴۰
۲	شبکه درودزن	۲۸۵۴۲٫۲۲	۲۰۴۲٫۷۴	۱۷۰٫۲۰	۴۳۲۲٫۴۰	۴۹۱٫۲۰	۱۲۶۴٫۰۰	۱۰۸۰٫۶۰
	شبکه کربال	۲۷۳۳۸٫۷۱	۲۹۸۹٫۰۶	۲۸۷٫۰۵	۱۵۸۶٫۱۸	۴۷۶۳٫۱۹	۱۱۷۶٫۰۰	۲۱۹٫۴۰
۳	شبکه درودزن	۲۸۶۹۷٫۷۸	۱۸۸۷٫۱۸	۳۹٫۰۰	۳۶۱۸٫۸۰	۶۷٫۰۰	۴۳۴٫۹۰	۳۱۶۸٫۷۰
	شبکه کربال	۲۷۳۳۸٫۷۱	۲۹۸۹٫۰۶	۱۵۶٫۶۰	۷۸۹٫۸۴	۳۴۹۱٫۴۱	۳۱۴٫۸۲	۴۰۵۱٫۰۴
۴	شبکه درودزن	۲۸۶۹۷٫۷۸	۱۸۸۷٫۱۸	۳۹٫۰۰	۳۶۱۸٫۸۰	۰٫۰۰	۴۳۴٫۹۰	۳۲۳۵٫۷۰
	شبکه کربال	۲۷۳۳۸٫۷۱	۲۹۸۹٫۰۶	۱۵۶٫۶۰	۷۸۹٫۸۴	۰٫۰۰	۳۱۴٫۸۲	۷۵۴۲٫۴۵

جدول ۴. مقادیر توابع هدف مدل بهینه‌سازی براساس چهار سناریوی حل برای سطح رضایت ۰/۵۰

مفروضات برای حل	سود کشاورزی (10^6 ریال)	اشتغال کشاورزی (۱۰۰۰ نفر روز)	بهره‌وری آب کشاورزی (تن بر مترمکعب)	آب برای محیط زیست (MCM)
لحاظ حد بالا	سناریو ۱	۱۶۷۹٫۰۱	۹۲٫۳۲	۴۰٫۰۰
	سناریو ۲	۱۶۷۹٫۰۱	۹۲٫۳۲	۴۰٫۰۰
لحاظ نکردن حد بالا	سناریو ۳	۱۴۲۱٫۷۰	۱۳۹٫۶۰	۵۵٫۰۳
	سناریو ۴	۱۰۸۷٫۶۶	۱۷۳٫۴۴	۵۰٫۶۰

البته، با بررسی خروجی مدل براساس سناریوی حل ۳ که هیچ حد بالایی برای سطوح کشت فرض نمی‌کند و امکان نکاشت برنج را نیز اعمال نمی‌کند، این موضوع آشکار می‌شود که بیشترین اختلاف بین سطوح کشت بهینه هر یک از محصولات و حدود بالای متناظر آنها در هر دو محدوده درودزن و کربال متعلق به برنج به ترتیب با ۲۷۷۷ هکتار و ۵۸۲۱/۵۹ هکتار است. در عین حال تنها محصول صیفی که سطح کشت بهینه آن از حد بالای خود تجاوز کرده است، ذرت علوفه‌ای است. در نتایج به‌دست‌آمده براساس سناریوی حل ۴ نیز همین موارد

مشاهده می‌شوند، اما مقادیر متفاوت‌اند. به‌طور کلی، خروجی چهار سناریوی حل برای مدل بهینه‌سازی خطی چندهدفه توسعه داده‌شده، بیشترین سطح کشت در بین محصولات شتوی (گندم و جو) را به گندم و در بین محصولات صیفی (برنج، چغندر قند، ذرت دانه‌ای، ذرت علوفه‌ای و یونجه) بیشترین سطح کشت را به ذرت-علوفه‌ای و دانه‌ای- اختصاص داده است (جدول ۳). مقایسه مقادیر توابع هدف در شرایط در نظر گرفته‌شده براساس چهار سناریوی حل نشان می‌دهد در صورتی که محدودیت پیشینه سطح کشت وجود نداشته باشد (سناریوهای ۳ و

مختلف براساس فرضیات لحاظ شده در سناریوی ۳ در جدول ۵ ارائه شده است.

علاوه بر این، کاربران مدل می‌توانند برای هر آستانه رضایت مشخص ($\alpha = 0.5$)، یک فرایند تعاملی (آنالیز پارامتری) برای بهبود نتایج با استفاده از نظرات تصمیم‌گیران یا ذی‌نفعان اجرا کنند. نتایج اجرای این فرایند تعاملی برای سطوح بهبودی (τ) مختلف در جدول ۶ ارائه شده است.

۴)، امکان رسیدن به راه‌حل بهینه‌ای که در آن امکان تأمین آب مورد نیاز دریاچه بختگان با اطمینان زیاد- یعنی تخصیص آب بیش از حداقل نیاز- وجود دارد (جدول ۴).

نتایج حل مدل برای سطوح مختلف رضایت (α) و بهبودی (τ)

از آنجا که بین نتایج مدل بهینه‌سازی، خروجی سناریوی ۳ بیشترین میزان آب به بخش محیط زیست را تخصیص داد. بنابراین، خروجی حل مدل برای آستانه‌های رضایت

جدول ۵. حجم بهینه آب تخصیصی برای هر یک از مناطق کشاورزی و دریاچه برای سطوح رضایت (α) مختلف

حجم آب قابل تخصیص (MCM)			
α	شبکه درودزن	شبکه کربال	دریاچه بختگان
۰.۵۰	۲۶۶,۴۳	۳۳۴,۷۶	۵۵,۰۳
۰.۵۵	۲۶۰,۲۹	۳۲۸,۶۸	۴۸,۰۳
۰.۶۰	۲۵۴,۲۴	۳۲۲,۶۰	۴۱,۱۳
۰.۶۵	۲۵۳,۹۴	۳۱۶,۵۲	۴۰,۰۰
۰.۷۰	۲۵۴,۷۴	۳۱۰,۴۴	۴۰,۰۰
۰.۷۵	۲۵۵,۵۲	۳۰۴,۳۶	۴۰,۰۰
۰.۸۰	۲۵۶,۲۷	۲۹۸,۲۸	۴۰,۰۰
۰.۸۵	۲۵۷,۰۰	۲۹۲,۲۰	۴۰,۰۰
۰.۹۰	۲۵۷,۷۱	۲۸۶,۱۲	۴۰,۰۰
۰.۹۵	۲۵۸,۴۰	۲۸۰,۰۴	۴۰,۰۰
۱	۲۵۹,۰۶	۲۷۳,۹۶	۴۰,۰۰

جدول ۶. تغییر در مقادیر سه تابع هدف کشاورزی شامل سود (ریال)، اشتغال (نفر روز) و بهره‌وری آب (تن بر مترمکعب) و همچنین میزان آب تخصیصی برای محیط زیست (MCM) تحت مقادیر مختلف سطح بهبودی (τ) برای سطح رضایت ۰/۵۰

τ	$Z_1(X_1)$ سود کشاورزی (بیشینه)	$Z_2(X_1)$ اشتغال کشاورزی (بیشینه)	$Z_3(X_1)$ بهره‌وری آب کشاورزی (بیشینه) یا محتوای آب مجازی (کمینه)	$Z_4(X_2)$ آب برای محیط‌زیست (بیشینه)
۰.۵۰	۳۶۶۱۰۰۵۹۹۱۵,۲۶	۱۶۷۳۵۳۸,۵۳	۱۱۸,۱۸	۴۸۷۴۳۹۵۰,۸۳
۰.۵۵	۳۶۰۵۹۸۰۶۵۸۴,۶۳	۱۶۴۸۳۵۴,۸۸	۱۲۰,۷۴	۵۰۰۷۱۷۰۳,۸۵
۰.۶۰	۳۵۵۰۹۵۵۳۲۵۴,۰۰	۱۶۲۳۱۷۱,۲۳	۱۲۳,۲۹	۵۱۳۹۹۴۵۶,۸۷
۰.۶۵	۳۴۹۵۹۲۹۹۹۲۳,۳۷	۱۵۹۷۹۸۷,۵۸	۱۲۵,۸۴	۵۲۷۲۷۲۰۹,۸۸
۰.۷۰	۳۴۴۰۹۰۴۶۵۹۲,۷۴	۱۵۷۲۸۰۳,۹۳	۱۲۸,۴۰	۵۴۰۵۴۹۶۲,۹۰
۰.۷۵	۳۳۹۴۸۴۴۴۰۹۸,۱۳	۱۵۴۷۶۲۰,۲۷	۱۳۰,۷۴	۵۵۰۳۲۹۳۰,۹۴
۰.۸۰	۳۳۷۳۸۴۹۷۴۶۵,۱۹	۱۵۲۲۴۳۶,۶۲	۱۳۲,۵۱	۵۵۰۳۲۹۳۰,۹۴
۰.۸۵	۳۳۵۲۸۵۵۰۸۳۲,۲۶	۱۴۹۷۲۵۲,۹۷	۱۳۴,۲۹	۵۵۰۳۲۹۳۰,۹۴
۰.۹۰	۳۳۳۱۸۶۰۴۱۹۹,۳۲	۱۴۷۲۰۶۹,۳۲	۱۳۶,۰۶	۵۵۰۳۲۹۳۰,۹۴
۰.۹۵	۳۳۱۰۸۶۵۷۵۶۶,۳۹	۱۴۴۶۸۸۵,۶۷	۱۳۷,۸۳	۵۵۰۳۲۹۳۰,۹۴
۱	۳۲۸۹۸۷۱۰۹۳۳,۴۵	۱۴۲۱۷۰۲,۰۲	۱۳۹,۶۰	۵۵۰۳۲۹۳۰,۹۴

محیط زیست- کمک خواهد کرد تا در فرایند چانه‌زنی با سرعت بیشتری روی یک نقطه‌سازی به توافق برسند.

تخصیص سطوح کشت در خروجی مدل توسعه داده‌شده به‌گونه‌ای است که محصولات با سود و اشتغال زیاد (برنج و چغندر قند) بیشترین مساحت کشت را ندارند. این مسئله به دلیل در نظر گرفتن عواملی همچون محتوای آب مجازی و همچنین حد پایین سطح زیر کشت برای محصولات است- در بیشتر موارد این حد پایین بیشتر از صفر است. با در نظر گرفتن حد پایین غیر صفر برای سطح زیر کشت محصولات کشاورزی، از تولید نقاط سازشی جلوگیری می‌شود که راهکارهای مدیریتی رادیکال تلقی می‌شود. از طرف دیگر، در نظر گرفتن حد بالا برای سطوح کشت می‌تواند در سیاست‌های تنظیم بازار خلل ایجاد کند و بنابراین چنین سناریوهایی برای حل مدل تخصیص بهینه آب و سطح کشت بهتر است در سطوح استانی و ملی تعریف شود. به‌طور کلی، خروجی حل مدل براساس سناریوهای حل ۱ و ۲، بیشترین مجموع سطح زیر کشت شتوی و صیفی به ترتیب به گندم و ذرت دانه‌ای اختصاص داده شده است. این نتایج با پژوهش‌های خانجاری ساداتی و همکارانش (۲۰۱۴) و ربیعی و همکارانش (۲۰۱۵) که به ترتیب به بهینه‌سازی الگوی کشت در اراضی آبخور سد درودزن و اراضی تحت پوشش کانال اردیبهشت در شبکه آبیاری و زهکشی درودزن اقدام کردند [۲۶ و ۲۷]، همخوانی دارد. به‌علاوه، بخشوده و دهقان‌پور (۲۰۱۵) نیز به منظور ارائه الگوی کشت بهینه از بین محصولات کشاورزی منتخب در منطقه مرودشت فقط گندم را به‌عنوان محصول دارای مزیت نسبی در تولید معرفی کردند و از نظر واردات آب مجازی مقید به سطح فعلی آب و زمین نیز گندم را دارای اهمیت بیشتری در مقایسه با سایر محصولات دانستند [۲۵].

از سوی دیگر، بررسی نتایج سناریوی حل ۳ در پژوهش حاضر نشان داد در هر دو محدوده درودزن و کربال بیشترین اختلاف بین سطح کشت بهینه و بیشترین سطح کشت اتفاق افتاده متعلق به محصول برنج است. در عین حال، تنها محصول صیفی که سطح کشت بهینه آن از حد بالای خود تجاوز کرده است، ذرت علوفه‌ای است. محسن‌پور و زیبایی (۱۳۸۹) نیز بعد از بهینه‌سازی الگوی کشت در اراضی آبخور سد درودزن با استفاده از برنامه‌ریزی غیرخطی مطلوبیت کارا دریافتند در الگوهای بیشترین مطلوبیت ذرت جایگزین برنج شده است که نیاز آبی فراوانی دارد [۳۱]؛ اما با حل مدل

همان طور که در جدول ۶ مشخص است در فرایند سازشی بین توابع هدف، با افزایش بهره‌وری آب در بخش کشاورزی و به‌بیان دیگر، کاهش محتوای آب مجازی، مقادیر توابع هدف مربوط به سود و اشتغال کشاورزی کاهش و مقدار تابع هدف زیست‌محیطی افزایش می‌یابد به طوری که از سطح بهبودی ۰/۷۵ به بالا، حجم بهینه آب قابل تخصیص به دریاچه بختگان بیشتر نمی‌شود و بنابراین به حد تعریف شده برای تأمین کامل نیازهای محیط زیست (۸۰ میلیون مترمکعب) نمی‌رسد. به‌بیان دیگر، با تغییر بیش از ۰/۷۵ در سطح انتظار، فرایند سازش تنها بین بالابردن بهره‌وری آب کشاورزی از یک طرف و افزایش سود و اشتغال بخش کشاورزی از طرف دیگر ادامه پیدا می‌کند و حجم آب قابل تخصیص برای اهداف زیست‌محیطی تغییری نمی‌کند.

بحث

در این پژوهش برای حل مدل ارائه‌شده، آستانه رضایت برای همه محدودیت‌های غیرقطعی به صورت هم‌زمان تغییر می‌کند. هان و همکارانش (۲۰۱۱) نیز از این رویکرد برای حل یک مدل بازه‌ای چندهدفه خطی برای تخصیص آب در شهر دالیان چین استفاده کرده‌اند [۱]. البته نیکو و همکارانش (۲۰۱۲) با بهره‌گیری از نوعی رویکرد برنامه‌ریزی غیرخطی بازه‌ای، واریانس تابع هدف را حداقل‌سازی کردند تا مقادیر بهینه قابل اتکا برای مسئله بهینه‌سازی مد نظر را به دست آورند [۳].

همان طور که در بخش نتایج گفته شد از سطح رضایت ۰/۶۵ به بالا، مدل فقط کمترین آب مورد نیاز برای تأمین نیازهای محیط زیست (۴۰ میلیون مترمکعب) را اختصاص می‌دهد. این حد پایین توسط توسعه‌دهندگان (نگارندگان) به مدل معرفی شده و بعد از بررسی مصوبات شورای آب استانداری فارس و گزارش‌های خبری تعیین شده است. بدیهی است که امکان معرفی حد پایین دیگری به مدل و تولید خروجی براساس آن وجود خواهد داشت. این نتیجه را همچنین می‌توان به شکل دیگری بیان کرد، به‌صورتی که در انتخاب بین قابل اتکا بودن و امکان‌پذیری گزینه‌های تخصیص آب در منطقه مطالعه‌شده، از سطح قابل اتکایی ۰/۶۵ به بالا، تغییری در آب قابل تخصیص برای محیط زیست در نتایج مدل مشاهده نمی‌شود و وجود چنین اطلاعاتی به هر دو طرف مناقشه- بخش کشاورزی و بخش

بازخوردی که از ذی‌نفعان گرفته می‌شود، یک نقطه سازشی از بین نقاط سازشی ارائه‌شده انتخاب خواهد شد که به رفع مناقشه تخصیص آب و سطح کشت در منطقه مطالعه‌شده خواهد انجامید. در ضمن، برای پیدا کردن چنین نقاط سازشی پیشنهاد می‌شود از توابع انتخاب اجتماعی و مدل‌های چانه‌زنی و رفع مناقشه بهره‌گیری شود.

منابع

- [1]. Han Y, Huang Y-F, Wang G-Q, Maqsood I. A multi-objective linear programming model with interval parameters for water resources allocation in Dalian city. *Water resources management*. 2011;25(2):449-63.
- [2]. Nikoo MR, Kerachian R, Poorsephahy-Samian H. An interval parameter model for cooperative inter-basin water resources allocation considering the water quality issues. *Water resources management*. 2012;26(11):3329-43.
- [3]. Nikoo MR, Kerachian R, Karimi A. A nonlinear interval model for water and waste load allocation in river basins. *Water resources management*. 2012;26(10):2911-26.
- [4]. Nikoo MR, Karimi A, Kerachian R. Optimal long-term operation of reservoir-river systems under hydrologic uncertainties: application of interval programming. *Water resources management*. 2013;27(11):3865-83.
- [5]. Bijani M, Hayati D, Abdolvand B. Agricultural Water Conflict in the Doroodzan Dam Irrigation Network, Iran: The Opinion of Regional Water Experts. *Environmental Sciences*. 2012;10(1):59-78. [Persian]
- [6]. Maqsood I, Huang G, Huang Y, Chen B. ITOM: an interval-parameter two-stage optimization model for stochastic planning of water resources systems. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*. 2005;19(2):125-33.
- [7]. Wu S, Huang G, Guo H. An interactive inexact-fuzzy approach for multiobjective planning of water resource systems. *Water Science and Technology*. 1997;36(5):235-42.
- [8]. Wang L, Meng W, Guo H, Zhang Z, Liu Y, Fan Y. An interval fuzzy multiobjective watershed management model for the Lake Qionghai Watershed, China. *Water resources management*. 2006;20(5):701-21.
- [9]. Urli B, Nadeau R. An interactive method to multiobjective linear programming problems with interval coefficients. *INFOR: Information Systems and Operational Research*. 1992;30(2):127-37.

توسعه داده‌شده براساس فرضیات لحاظ‌شده در سناریوهای ۳ و ۴، بیشترین مجموع سطح زیر کشت در اختیار ذرت علوفه‌ای قرار خواهد گرفت که این مورد می‌تواند به دلیل محتوای آب مجازی بسیار کمتر ذرت علوفه‌ای نسبت به ذرت دانه‌ای باشد، زیرا ذرت دانه‌ای در منطقه مطالعه‌شده حدود ۲ دور آبیاری بیشتر از ذرت علوفه‌ای نیاز دارد و به‌نظر می‌رسد طی فرایند بهینه‌سازی صورت‌گرفته در مدل (مقایسه بین بیوماس تولیدی نسبت به آب مصرفی و همچنین سود به‌دست‌آمده و اشتغال ایجادشده) به کشت ذرت علوفه‌ای ارجحیت بیشتری داده شده است.

نتیجه‌گیری

هدف از این مطالعه، توسعه یک مدل تعاملی چندهدفه خطی بازه‌ای برای تخصیص بهینه آب و سطح کشت با توجه به محتوای آب مجازی و فاکتورهای اقتصادی-اجتماعی است. مدل توسعه‌یافته شامل سه هدف بهینه‌سازی سود، اشتغال و بهره‌وری آب (به‌بیان دیگر، کمینه‌سازی محتوای آب مجازی) برای بخش کشاورزی به علاوه یک هدف زیست‌محیطی یعنی بهینه‌سازی آب تخصیص داده‌شده به دریاچه بختگان است.

از قوت‌های مدل توسعه داده‌شده در این پژوهش، خطی بودن و توانایی آن در مواجهه با پارامترهای غیرقطعی و همچنین رویکرد تعاملی به‌کاررفته در آن است که می‌تواند یک فرایند سازش بین اهداف را براساس سطوح مختلف رضای محدودیت‌های بازه‌ای و در سطوح مختلف بهبودی هر یک از اهداف اجرا کند به‌طوری که با استفاده از یک آنالیز پارامتری نتایج انتخاب‌ها و انتظارات تصمیم‌گیران یا ذی‌نفعان در هر مرحله بررسی و تحلیل می‌شود. همچنین به دلیل در نظر گرفتن سطوح مختلف برای رضای محدودیت‌های بازه‌ای، تصمیم‌سازان اطلاعات لازم برای آنالیز ریسک و قابل اتکایی گزینه‌های برنامه‌ریزی و استراتژی‌های مدیریت آب را در اختیار خواهند داشت. شایان یادآوری است که با تغییر در سطح رضایت، ممکن است در جواب‌های به‌دست‌آمده، بیشترین مقدار آب قابل تخصیص برای تأمین نیاز آبی دریاچه بختگان تغییر کند. همچنین این احتمال وجود دارد که در آستانه‌های رضایت کمتر از ۰/۵۰، مدل نقطه سازشی بهینه ارائه دهد که در آن امکان تأمین کامل نیاز آبی محیط زیست وجود داشته باشد. با داشتن چنین اطلاعاتی در کنار

- [10]. Han Y, Xu S-g, Xu X-z. Modeling multisource multiuser water resources allocation. *Water resources management*. 2008;22(7):911-23.
- [11]. Allan T. Fortunately there are substitutes for water otherwise our hydro-political futures would be impossible. *Proceedings of the Conference on Priorities for water resources allocation and management*. 1993;Paper 2:13-26.
- [12]. Allan T. 'Virtual water': a long term solution for water short Middle Eastern economies?. *British Association Festival of Science, Water and Development Session, University of Leeds*; 1997.
- [13]. Yang H, Wang L, Zehnder AJ. Water scarcity and food trade in the Southern and Eastern Mediterranean countries. *Food Policy*. 2007;32(5):585-605.
- [14]. Verma S, Kampman DA, van der Zaag P, Hoekstra AY. Going against the flow: a critical analysis of inter-state virtual water trade in the context of India's National River Linking Program. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*. 2009;34(4):261-9.
- [15]. Velázquez E. Water trade in Andalusia. Virtual water: An alternative way to manage water use. *Ecological Economics*. 2007;63(1):201-8.
- [16]. Hoekstra AY, Chapagain AK. The water footprints of Morocco and the Netherlands: Global water use as a result of domestic consumption of agricultural commodities. *Ecological Economics*. 2007;64(1):143-51.
- [17]. Kort A. Virtual water trade in the SADC region: a grid-based approach. 2010.
- [18]. Zeitoun M, Allan JT, Mohieldeen Y. Virtual water 'flows' of the Nile Basin, 1998–2004: A first approximation and implications for water security. *Global Environmental Change*. 2010;20(2):229-42.
- [19]. Paulsen A. Virtual water: a useful concept for informing land use in New Zealand. 2013.
- [20]. Wichelns D. Virtual water: A helpful perspective, but not a sufficient policy criterion. *Water Resources Management*. 2010;24(10):2203-19.
- [21]. Yang H, Zehnder A. "Virtual water": an unfolding concept in integrated water resources management. *Water Resources Research*. 2007;43(12):2203-19.
- [22]. Rouhani N, Yang H, Amin Sichani S, Afyuni M, Mousavi S, Kamgar Haghghi A. Assessment of Food Products and Virtual Water Trade as Related to Available Water Resources in Iran. *JWSS-Isfahan University of Technology*. 2009;12(46):417-32. [Persian]
- [23]. Sabouhi M, Soltani G. Optimization of Cropping Patterns at Basin Level by Considering Social Profit and Net Virtual Water Import: A Case Study of Khorasan District. *JWSS-Isfahan University of Technology*. 2008;12(43):297-313. [Persian]
- [24]. Faramarzi M, Yang H, Mousavi J, Schulin R, Binder C, Abbaspour K. Analysis of intra-country virtual water trade strategy to alleviate water scarcity in Iran. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*. 2010;7(2):2609-49.
- [25]. Bakhshoodeh M, Dehghanpur H. Modeling crop cultivation pattern based on virtual water trade: evidence from Marvdasht in southern Iran. *Iran Agricultural Research*. 2015;34(2):29-34.
- [26]. Khanjari Sadati S, Speelman S, Sabouhi M, Gitizadeh M, Ghahraman B. Optimal irrigation water allocation using a genetic algorithm under various weather conditions. *Water*. 2014;6(10):3068-84.
- [27]. Rabie Z, Honar T, Mehdi Bateni M. Determination of optimal and water allocation under limited water resources using soil water balance in Ordibehesht canal of Doroodzan water district. *Iran Agricultural Research*. 2015;34(2):21-28.
- [28]. Su X, Li J, Singh VP. Optimal allocation of agricultural water resources based on virtual water subdivision in Shiyang River Basin. *Water resources management*. 2014;28(8):2243-57.
- [29]. Fooladmand HR, Ahmadi SH. Monthly spatial calibration of Blaney–Criddle equation for calculating monthly ETo in south of Iran. *Irrigation and Drainage*. 2009;58(2):234-45.
- [30]. Tabari H, Hosseinzadeh Talae P, Shifteh Some'e B. Spatial modelling of reference evapotranspiration using adjusted Blaney–Criddle equation in an arid environment. *Hydrological Sciences Journal*. 2013;58(2):408-20.
- [31]. Mohsenpour R, Zibaei M. Determination of optimal crop patterns using nonlinear programming and deficit Irrigation strategies under Dorodzan Dam. *Agricultural Economics and Development* 2010;18(71):1-23. [Persian]