



"مقاله پژوهشی"

توسعه مدل بهینه‌سازی تحت شرایط عدم قطعیت برای تخصیص منابع آب
(مطالعه موردی: آبخیز مرند)

جواد حسین‌زاد^۱، مه‌ری راعی^۲ و محمدعلی قربانی^۳

۱ - دانشیار گروه اقتصاد کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، (نویسنده مسوول: J.hosseinzad@tabrizu.ac.ir)

۲ - دانشجوی دکتری گروه اقتصاد کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

۳ - استاد گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۱/۲۹ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۲/۲۵

صفحه: ۱۰۹ تا ۱۱۹

چکیده مبسوط

مقدمه و هدف: با توجه به محدودیت منابع آب، مسائل مربوط به مناقشات تخصیص آب از جمله نگرانی‌های مهم برنامه‌ریزان و مصرف‌کنندگان آب است. عدم قطعیت موجود در سیستم منابع آب و تغییرات آب و هوایی نیز تخصیص بهینه منابع آب در بخش کشاورزی را پیچیده‌تر کرده است. بنابراین، در مطالعه حاضر سعی می‌گردد که با توسعه مدل برنامه‌ریزی ریاضی که قادر به لحاظ پویایی و شرایط عدم حتمیت هم در پارامترهای توابع هدف و هم در محدودیت‌ها باشد، به تخصیص بهینه منابع آب در آبخیز مرند پرداخته شود.

مواد و روش‌ها: در این مطالعه یک مدل برنامه‌ریزی تصادفی چندمرحله‌ای تعاملی مبتنی بر عدم قطعیت (UIMSP) از طریق تلفیق روش معیار کاتاوکا و برنامه‌ریزی محدودیت شانس در یک چارچوب تصمیم‌گیری چندمرحله‌ای برای مدیریت منابع آب کشاورزی آبخیز مرند در دوره‌های مختلف برنامه‌ریزی توسعه داده شده است. یک درخت سناریوی دو دوره‌ای با ترکیبات مختلف احتمال نقض محدودیت‌ها (α) و سطوح مختلف معیار فرکتایل برای تابع هدف (β) انتخاب شدند.

یافته‌ها: نتایج نشان می‌دهد که مینیمم سود خالص سیستم، زمانی که $\alpha = 0.01$ و $\beta = 0.9$ باشد $10^6 \times [46/6, 983/6]$ ریال حاصل می‌شود و ماکزیمم آن زمانی که $\alpha = 0.1$ و $\beta = 0.01$ باشد $10^6 \times [699/7, 1483/1]$ ریال می‌باشد. همچنین به ازاء هر احتمال تخطی از محدودیت (α)، با افزایش سطح رضایت تابع هدف (β)، هر دو کران بالا و پایین سود خالص سیستم به تدریج کاهش می‌یابد، درحالی‌که اختلاف بین سود خالص سیستم تحت سطوح مختلف تخطی از محدودیت (α) قابل توجه است. همچنین نتایج حاصل از مدل UIMSP نشان می‌دهد کمبود آب در سناریوهای مختلف به دلیل ناکافی بودن منابع آب در آبخیز مرند مشاهده می‌شود. با این حال بر اساس نتایج مدل، در دوره دوم علیرغم کاهش در مقدار آب موجود، میزان کمبود آب با افزایش کارایی آبیاری کاهش یافته است. به‌عنوان مثال، تحت شدت جریان متوسط مقدار کمبود آب سطحی و زیرزمینی آبخیز در دوره اول به ترتیب برابر با $43/6$ درصد و $32/5$ درصد می‌باشد که در دوره دوم به میزان $[24/5, 36/9]$ درصد و $[0, 24/5]$ درصد کاهش می‌یابد.

نتیجه‌گیری: نتایج حاصل از مدل توسعه یافته به تصمیم‌گیرندگان کمک می‌کند تا تعاملات بالقوه بین ریسک‌های مربوط به تابع هدف تصادفی و محدودیت‌های موجود را بررسی کنند. همچنین افزایش بهره‌وری آبیاری و به‌روزرسانی سیستم‌های آبیاری از اصلی‌ترین استراتژی‌هایی هستند که می‌توانند ضمن کاهش آسیب‌های زیست محیطی، یک مزیت اقتصادی برای کشاورزان فراهم کنند.

واژه‌های کلیدی: برنامه‌ریزی تصادفی چندمرحله‌ای، برنامه‌ریزی محدودیت‌شانس، کران تصادفی، مدیریت منابع آب، معیار کاتاوکا

مقدمه

روش‌ها، ابزارها و مدل‌های بهینه‌سازی برای تامین آب با مقدار بهینه و با کیفیت مناسب برای مصرف‌کنندگان است. در نتیجه می‌توان از تکنیک‌های بهینه‌سازی که کارا و از نظر زیست‌محیطی پایدار باشند، برای مدیریت منابع آب استفاده کرد. به هر حال، انواع عدم قطعیت در اجزاء سیستم‌های منابع آبی وجود دارد که با یکدیگر ارتباط دارند. این ارتباطات، پیچیدگی‌های پویا در سیستم، مانند پراکندگی زمانی و مکانی بین عرضه و تقاضای آب را تشدید می‌کند. علاوه بر این، عدم قطعیت ممکن است در سطوح مختلف، مانند تصادفی بودن کران‌های بالا و پایین یک پارامتر وجود داشته باشد. این پیچیدگی‌ها نمی‌توانند با روش‌های بهینه‌سازی سنتی نشان داده شوند (۱۸، ۱۱). بنابراین توسعه و استفاده از مدل‌های ریاضی که بتوانند عدم قطعیت و ریسک را در بهره‌برداری از این منابع، لحاظ کنند، برای این نوع از مسایل برنامه‌ریزی، مطلوب و ضروری می‌باشند. طی دهه‌های گذشته تعدادی از روش‌های بهینه‌سازی غیر دقیق برای مقابله با عدم قطعیت در مدیریت منابع آب گزارش شده است (۲۶، ۲۵، ۲۴، ۲۳، ۱۵، ۱۲، ۲۱، ۱۷، ۱۶، ۴، ۲۷). از بین این مدل‌ها، مدل برنامه‌ریزی تصادفی چند مرحله‌ای^۲ در مسایل مدیریتی منابع آب، به‌عنوان یک تکنیک موثر در رابطه با عدم قطعیت

رشد روزافزون جمعیت و توسعه بخش‌های مختلف اقتصادی موجب افزایش مداوم تقاضا و رقابت بخش‌های مختلف برای آب شده است که این مساله نگرانی‌های زیادی را برای بسیاری از کشورها به دلیل کاهش دسترسی به آب و وخامت کیفیت آب به‌وجود آورده است (۱۹، ۱). به‌طوری‌که پیش‌بینی‌های سازمان ملل نشان‌دهنده آن است که تا سال ۲۰۲۵ میلادی محدودیت منابع آبی، اصلی‌ترین موضوع مورد بحث جهانی خواهد بود. این وضعیت برای ایران نیز که در کمربند خشک آب و هوایی جهان قرار دارد، هشداردهنده‌تر است (۲۰، ۹). از دید بلندمدت، توسعه منابع آبی جدید می‌تواند جایگزین مناسبی برای رفع نیازهای افزایش آب باشد، ولیکن هزینه‌های هنگفت اقتصادی و زیست‌محیطی تامین آب بیشتر، موجب می‌شود که این راه‌حل همیشه مقدور نباشد (۱۷). بنابراین نیاز به تصمیم‌گیری‌های صحیح که بهترین استفاده را از منابع آب محدود داشته باشد، ضروری به نظر می‌رسد. با توجه به پیشرفت‌های صورت گرفته در دانش و تکنولوژی در سال‌های اخیر، رویکردهای مدیریت منابع آب برای بهینه‌سازی و حفظ پایداری منابع آب موجود مورد توجه قرار گرفته است. مدیریت منابع آب شامل مجموعه‌ای از

است. روش پیشنهادی شامل تلفیق برنامه‌ریزی محدودیت‌شناس و رویکرد معیار کاتاوکا در یک چارچوب تصمیم‌گیری چندمرحله‌ای است. UIMSP قادر به لحاظ پویایی و پارامترهای عدم قطعیت، هم در تابع هدف و هم در محدودیت‌ها بوده و این عدم قطعیت‌ها را با کران‌های تصادفی در نظر می‌گیرد. برای نشان‌دادن کاربرد بودن روش پیشنهادی، از این مدل برای بهینه‌سازی منابع آب کشاورزی آبخیز مرند استفاده شده‌است. روش پیشنهادی نه تنها می‌تواند انواع گزینه‌های تصمیم‌گیری را برای تجزیه و تحلیل مصالحه بین منافع سیستم و ریسک‌های مربوطه فراهم کند، بلکه همچنین تصمیم‌گیرندگان را قادر می‌سازد یک سازش مطلوب بین درجه رضایت تابع هدف و درجه امکان محدودیت‌ها را شناسایی کنند.

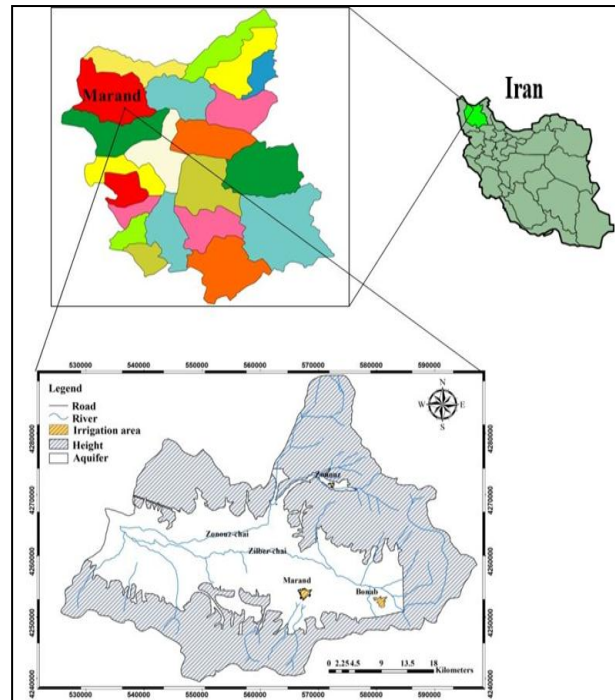
مواد و روش‌ها منطقه مورد مطالعه

آبخیز مرند (۴۵/۵ تا ۴۶/۱۰ درجه طول شرقی و ۳۸/۷ تا ۳۸/۵۶ درجه عرض شمالی) به‌عنوان بخشی از حوضه رودخانه ارس در شمال غرب استان آذربایجان شرقی به‌عنوان مطالعه موردی انتخاب شده است (شکل ۱). وسعت حوضه ۱۸۷۲/۳۹ کیلومتر مربع می‌باشد که از این میزان ۵۸۹/۷۶ کیلومتر مربع مربوط به وسعت دشت و ۱۲۸۲/۶۳ کیلومتر مربع ارتفاعات محدوده تشکیل می‌دهد. رودخانه‌های زیلبر چای و نوز چای به عنوان اصلی‌ترین رودخانه‌های این حوضه می‌باشند. بر اساس مطالعات انجام شده کل سطح زیر کشت اراضی زراعی و باغی در این محدوده مطالعاتی در سال زراعی ۱۳۹۶-۱۳۹۷، در حدود ۳۰۵۱۵ هکتار برآورد شده که ۷۰ درصد از آن را اراضی آبی و ۳۰ درصد دیگر را اراضی دیم تشکیل می‌دهد (۲). طبق آمارهای سازمان هواشناسی، میانگین بلندمدت بارندگی ایستگاه مرند حدود ۳۹۵ میلی‌متر و نیز میانگین دمای سالانه این منطقه ۱۲/۱ درجه سانتی‌گراد است. بر اساس اطلاعات سازمان آب منطقه‌ای استان آذربایجان شرقی، منابع آب سطحی (شامل جریان‌ات سطحی) و زیرزمینی (شامل چاه، چشمه و قنات) موجود در این محدوده به‌ترتیب ۹۰/۵ و ۱۹۵/۷ میلیون مترمکعب است، درحالی‌که کل مصرف واقعی آب ۲۸۲/۵ میلیون مترمکعب می‌باشد که نشانگر مشکل کمبود آب در حوضه است. بخش کشاورزی نیز با سهم ۸۶ درصدی مصرف، بزرگترین مصرف‌کننده آب می‌باشد.

شناخته شده است. به‌عنوان مثال لی و همکاران (۱۴)، یک مدل برنامه‌ریزی تصادفی چندمرحله‌ای بازه‌ای را برای مدیریت منابع آب در کانادا پیشنهاد دادند که عدم قطعیت‌ها به‌صورت تصادفی و بازه‌ای بیان شده است. وانگ و هوانگ (۲۲) یک روش برنامه‌ریزی تصادفی فازی چندمرحله‌ای تعاملی را برای شناسایی استراتژی‌های تخصیص بهینه منابع آب، که در آن عدم قطعیت‌ها به‌صورت متغیرهای فازی تعاملی تخمین زده شده‌اند، ارائه دادند. همایونی‌فر و رستگاری‌پور (۸) به ارزیابی نحوه تخصیص بهینه آب سد لتیان بین محصولات مختلف کشاورزی پرداختند. بدین منظور از دو مدل برنامه‌ریزی دو مرحله‌ای غیردقیق و برنامه‌ریزی فازی بازه‌ای استفاده کردند. نتایج نشان داد که کاربرد این مدل باعث افزایش همزمان سود و قطعیت سیستم می‌شود.

به‌طورکلی روش برنامه‌ریزی تصادفی چندمرحله‌ای قادر به لحاظ پارامترهای عدم قطعیت در محدودیت‌ها می‌باشد ولی قادر به لحاظ اطلاعات عدم قطعیت که در تابع هدف وجود دارد نمی‌باشد. علاوه بر این در میان مطالعات انجام گرفته، محققان کمی این روش را به تنهایی در زمینه مدیریت منابع آب به کار برده‌اند و به عدم قطعیت‌های تصادفی که در تابع هدف و محدودیت‌ها وجود دارند، پرداخته‌اند. در مطالعات، عدم قطعیت‌ها اغلب به صورت بازه‌ای بیان می‌شوند، درحالی‌که حد پایین و بالای بازه را نمی‌توان به‌صورت مقادیر قطعی در مسائل واقعی به دست آورد، بلکه ممکن است به‌صورت متغیرهای تصادفی با توزیع احتمال مشخص فرض شوند. به عنوان مثال داده‌های اقتصادی در مدیریت منابع آب (مانند سود حاصل از تخصیص آب و زیان ناشی از کمبود آب) که نقش مهمی در فرآیند تصمیم‌گیری دارند، اغلب در ضرایب تابع هدف و به شکل توزیع احتمال ارائه می‌شوند. در عین حال، متغیر تصادفی جریان آب نیز ممکن است در محدودیت‌های مدل لحاظ شود. در این وضعیت روش برنامه‌ریزی تصادفی چندمرحله‌ای قادر به لحاظ چنین متغیرهای تصادفی هم در تابع هدف و هم در محدودیت‌ها نمی‌باشد. در چنین مواردی، برای لحاظ ضرایب تصادفی که در تابع هدف وجود دارد می‌توان از معیار کاتاوکا^۳ برای تبدیل هدف تصادفی به یک تابع معادل قطعی استفاده کرد (۱۰). برای لحاظ پارامترهای تصادفی که در محدودیت‌ها وجود دارند نیز می‌توان از روش برنامه‌ریزی محدودیت‌شناس (CCP)^۴ استفاده نمود (۵،۷).

بنابراین هدف این مطالعه ارائه یک رهیافت برنامه‌ریزی تصادفی چندمرحله‌ای تعاملی مبتنی بر عدم قطعیت (UIMSP)^۵ برای مدیریت منابع آب طی یک افق برنامه‌ریزی

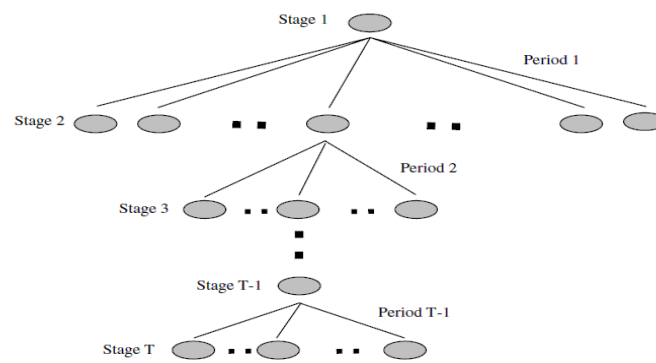


شکل ۱- آبخیز مرند
Figure 1. The study area (Marand watershed)

انجام می‌شود، سپس در شروع مراحل بعد پارامترهای تصادفی تحقق پیدا می‌کنند و با توجه به این اطلاعات جدید می‌توان اقدامات اصلاحی^۱ را برای حداقل کردن ضرر و زیان ناشی از رویداد تصادفی انجام داد. در شکل ۲ ساختار یک درخت سناریوی چندمرحله‌ای با گره‌ها (مبین تصمیمات) و ساقه‌ها (تحقق متغیر تصادفی) نمایش داده شده است (۶).

مدل برنامه‌ریزی تصادفی چندمرحله‌ای تعاملی بر پایه عدم قطعیت (UIMSP)

مدل برنامه‌ریزی تصادفی چندمرحله‌ای روشی سناریو محور بوده و جهت آنالیز مسائل برنامه‌ریزی بلندمدت و میان مدت مؤثر است. در مدل برنامه‌ریزی تصادفی چندمرحله‌ای، در مرحله اول، تصمیم‌گیری بدون آگاهی از متغیرهای تصادفی



شکل ۲- ساختار درخت سناریوی چند مرحله‌ای
Figure 2. Structure of a multi-stage tree

قطعیت (UIMSP) برای تخصیص منابع آب آبیاری کشاورزی را می‌توان به صورت مدل (۱) تبیین کرد.

بر اساس مدل اصلی ITSP (۱۷)، روش CCP (۳)، معیار کاتالوگا (۱۰) و روش تخصیص منابع آب آبیاری کشاورزی، مدل برنامه‌ریزی تصادفی چندمرحله‌ای تعاملی بر پایه عدم

$$Max f^{\pm} = \sum_{i=1}^I \sum_{m=1}^M \sum_{t=1}^T NB_i^{(\pm)}(\omega) W_{imt}^{\pm} - \sum_{i=1}^I \sum_{m=1}^M \sum_{t=1}^T \sum_{h=1}^H \rho_{hm} C_i^{(\pm)}(\omega) S_{imth}^{\pm} \quad (1a)$$

Subject to:

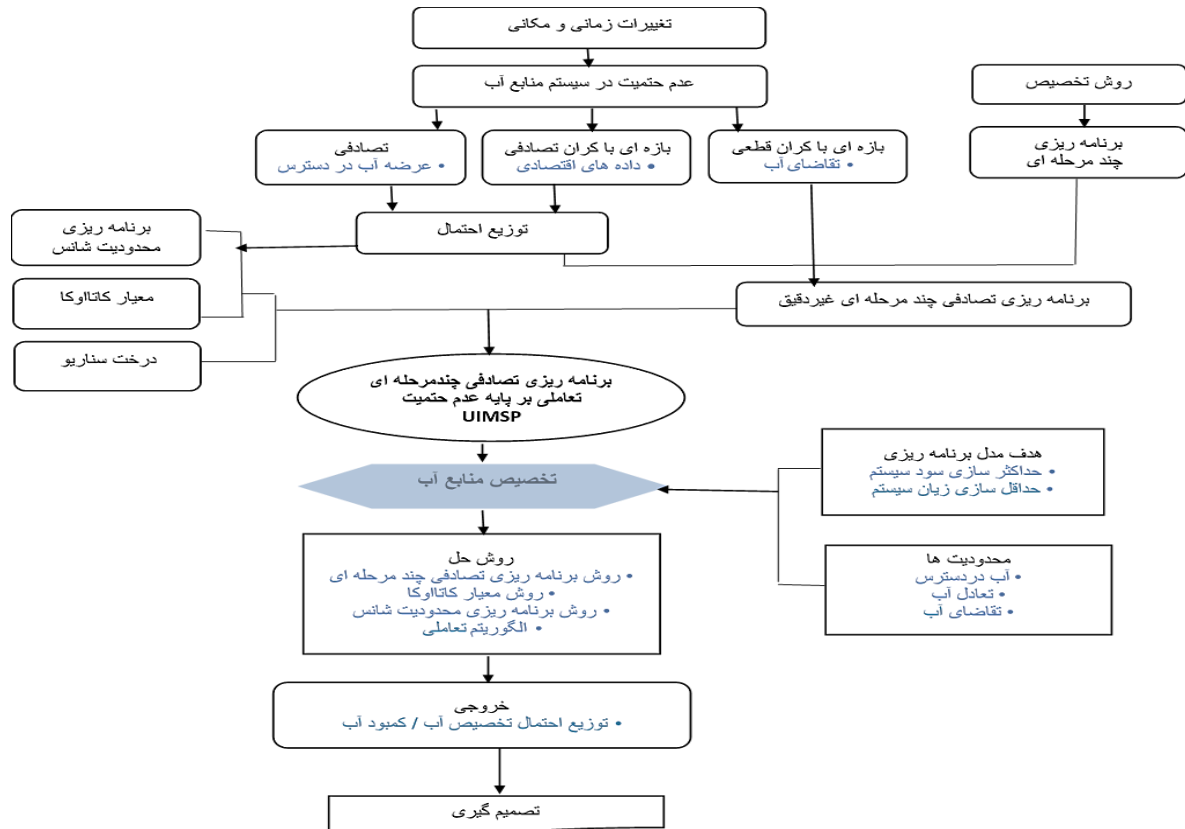
$$\sum_{i=1}^I (W_{imt}^{\pm} - S_{imth}^{\pm}) / \eta_i^{\pm} \leq (q_{mth}^{(\alpha)})^{\pm} + \varepsilon_{m(t-1)h}^{\pm} + Q_{mt}, \quad \forall m, t, h \quad (1b)$$

$$\varepsilon_{m(t-1)h}^{\pm} = \varepsilon_{m(t-2)h}^{\pm} + (q_{m(t-1)h}^{(\alpha)})^{\pm} - \sum_{i=1}^I (W_{im(t-1)}^{\pm} - S_{im(t-1)h}^{\pm}) / \eta_i^{\pm}, \forall m, t, h \quad (1c)$$

$$0 \leq (W_{imt}^{\pm} - S_{imth}^{\pm}) / \eta_i^{\pm} \leq W_{imt,max}, \quad \forall i, m, t, h \quad (1d)$$

مقداری از W_{imt} که در هنگام عرضه q_{mth} تامین نمی‌شود. $q_{mth}^{(\alpha)}$ مقدار آب در دسترس (نوع m) در یک سطح ریسک مجاز (قابل قبول) در شدت جریان h در زمان t ، ρ_{hm} احتمال وقوع سناریوی h برای منبع آب نوع m ε_{mth} بیانگر مقدار آب مازاد (نوع m) پس از آنکه آب در زمان t در وضعیت h تخصیص داده شود، Q_{mt} مقدار آب در دسترس (نوع m) در شروع دوره t ، η_i ضریب مصرف آب کشاورزی (راندمان آبیاری) در منطقه i ام، $W_{imt,max}$ حداکثر مقدار تخصیص آب مجاز (نوع m) به منطقه i ام در زمان t می‌باشد. جزئیات چارچوب مدل توسعه‌یافته در این مطالعه در شکل ۳ نشان داده شده است.

در روابط فوق \pm بیانگر کران بالا و پایین پارامترهای بازه‌ای، m بیانگر نوع منابع آبی ($m = 1$ آب سطحی و $m = 2$ آب زیرزمینی)، i بیانگر منطقه کشاورزی، h بیانگر شدت جریان آب ($h = 1$ زیاد، $h = 2$ متوسط و $h = 3$ کم)، T بیانگر دوره زمانی برنامه‌ریزی، f بیانگر سود خالص سیستم (ریال)، $NB_i^{\pm}(\omega)$ سود منطقه i ام به ازاء هر مترمکعب آب تخصیصی (پارامتر بازه‌ای با کران تصادفی)، W_{imt} (متغیر تصمیم مرحله اول) مقدار آب هدف تخصیصی (نوع m) به فعالیت i ام در زمان t ، $C_i^{\pm}(\omega)$ زیان منطقه i ام به ازاء هر مترمکعب آب تخصیص داده نشده (پارامتر بازه‌ای با کران تصادفی)، S_{imth} (متغیر تصمیم مرحله دوم) مقدار کمبود آب (نوع m) منطقه i ام در زمان t در وضعیت h (به بیان دیگر



شکل ۳- چهارچوب تخصیص منابع آب کشاورزی تحت شرایط عدم قطعیت
Figure 3. Framework of agricultural water resources allocation under uncertainty

زیرزمینی و بیلان منفی آبخوان در سال‌های اخیر، حداکثر مقدار تخصیص آب مجاز و مقدار موجود آب‌های سطحی و زیرزمینی برای دوره دوم کمتر از دوره اول تنظیم شده است. زیرا منطقه مورد مطالعه یک دشت ممنوع است و امکان توسعه منابع آبی وجود ندارد. جدول ۱ منابع آب موجود و احتمال وقوع آنها را در دو دوره برنامه‌ریزی نشان می‌دهد.

نتایج و بحث

با توجه به شرایط محلی، آبخیز مرند به سه منطقه آبیاری شامل مرند، بناب مرند و زنوز تقسیم شده است. برای تخصیص منابع آب آبخیز، یک افق زمانی شش ساله با دو دوره برنامه‌ریزی ۲۰۲۶-۲۰۲۴ و ۲۰۲۳-۲۰۲۱ و سه سطح مختلف شدت جریان آب (کم، متوسط و زیاد) برای عرضه آب در نظر گرفته شده است. با توجه به پایین آمدن تراز آب

جدول ۱- توزیع سطوح مختلف جریان آب در افق برنامه ریزی و احتمال وقوع آن‌ها

Table 1. The distribution forms of the boundaries of different flow levels and probabilities of occurrence in the planning periods

آب سطحی (میلیون مترمکعب)			
سطح جریان	دوره ۱ (T=1)	احتمال وقوع (ρ)	دوره ۲ (T=2)
زیاد	[N(75.3, 8 ²), N(85.1, 8 ²)]	0.17	[N(67.2, 8 ²), N(77.2, 8 ²)]
متوسط	[N(40.1, 10 ²), N(50.3, 10 ²)]	0.64	[N(22.5, 10 ²), N(40.3, 10 ²)]
کم	[N(19.5, 5 ²), N(29.8, 5 ²)]	0.19	[N(9.2, 5 ²), N(19.1, 5 ²)]
آب زیرزمینی (میلیون مترمکعب)			
سطح جریان	دوره ۱ (T=1)	احتمال وقوع (ρ)	دوره ۲ (T=2)
زیاد	[N(160.2, 12 ²), N(190.8, 12 ²)]	0.1	[N(130.2, 12 ²), N(160.8, 12 ²)]
متوسط	[N(126.1, 15 ²), N(145.3, 15 ²)]	0.8	[N(100.1, 15 ²), N(120.3, 15 ²)]
کم	[N(95.5, 12 ²), N(110.2, 12 ²)]	0.1	[N(75.5, 12 ²), N(97.2, 12 ²)]

جدول ۲ داده‌های اقتصادی را به صورت بازه‌ای با کران‌های تصادفی ارائه می‌کند.

جدول ۲- سود و زیان حاصل از هر واحد آب آبیاری مناطق مختلف آبخیز مرند

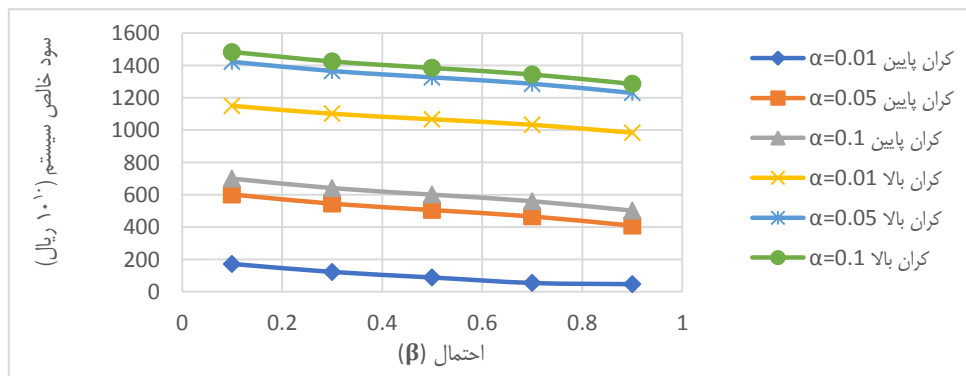
Table 2. Net benefits and penalties of different irrigation area of Marand watershed (Rials/m³)

سود خالص	
T=2	T=1
[N(3323.5, 552.3 ²), N(4747.8, 552.3 ²)]	[N(2437.5, 476.7 ²), N(3968.1, 476.7 ²)]
[N(3274.8, 574.2 ²), N(4568.1, 574.2 ²)]	[N(2342.2, 489.6 ²), N(3856.3, 489.6 ²)]
[N(3235.1, 576.4 ²), N(4734.6, 576.4 ²)]	[N(2387.5, 491.3 ²), N(3897.4, 491.3 ²)]
زیان	
T=2	T=1
[N(3988.2, 662.8 ²), N(5934.8, 690.4 ²)]	[N(2952, 572 ²), N(4960.1, 596 ²)]
[N(3929.8, 689 ²), N(5710.1, 717.8 ²)]	[N(2810.6, 587.5 ²), N(4820.4, 612 ²)]
[N(3882.1, 691.7 ²), N(5918.3, 720.5 ²)]	[N(2865, 589.6 ²), N(4871.8, 614.1 ²)]

سال آبی، تخصیص آب با توجه به سناریوهای مختلف جریان آب و بهینه‌سازی الگوی کشت در هر منطقه را تسهیل کند. سود خالص سیستم یعنی تفاوت بین سود حاصل از تخصیص بهینه آب و زیان ناشی از کمبود آب، به صورت کران بالا و پایین، تحت ترکیبات مختلف احتمال تخطی از محدودیت (α) و سطوح مختلف معیار فرکتایل (β) در شکل ۴ نشان داده شده است. سه سطح احتمال تخطی از محدودیت (۰/۰۱، ۰/۰۵ و ۰/۱) و سطوح مختلف برای معیار فرکتایل انتخاب شده است. شکل ۴ نشان می‌دهد که مینیمم سود خالص سیستم، زمانی که α = 0.01 و β = 0.9 باشند ۱۰^{۱۰} × [۴۶/۶، ۹۸۳/۶] ریال و ماکزیمم آن زمانی که α = 0.1 و β = 0.01 باشند ۱۰^{۱۰} × [۶۹۹/۷، ۱۴۸۳/۱] ریال می‌باشد.

برای حل مساله بهینه‌سازی تصادفی یک درخت سناریوی سه مرحله‌ای (دو دوره‌ای) با سطوح مختلف آب در دسترس برای هر یک از سه کاربر آب ساخته شده است که هر درخت سناریو دارای یک ساختار شاخه‌ای ۱-۳-۳ است. با ترکیبات مختلف احتمال نقض محدودیت‌ها و سطوح مختلف معیار فرکتایل برای تابع هدف، مدل UIMSP می‌تواند گزینه‌های مختلف تصمیم‌گیری را تحت سطوح مختلف ریسک ارائه دهد.

با حل مدل UIMSP، مجموعه‌ای از جواب‌ها شامل کران بالا و پایین سود خالص سیستم، مقدار تخصیص بهینه آب (سطحی و زیرزمینی) و مقدار کمبود آب برای مناطق مختلف آبخیز مرند تحت سطوح مختلف شدت جریان آب حاصل شده است. این نتایج می‌تواند مدیریت و تخصیص کارایی آب آبیاری برای استفاده در اهداف تعیین‌شده آبیاری در ابتدای



شکل ۴- سود خالص سیستم آبخیز مرند تحت ترکیبات مختلف احتمال α و β

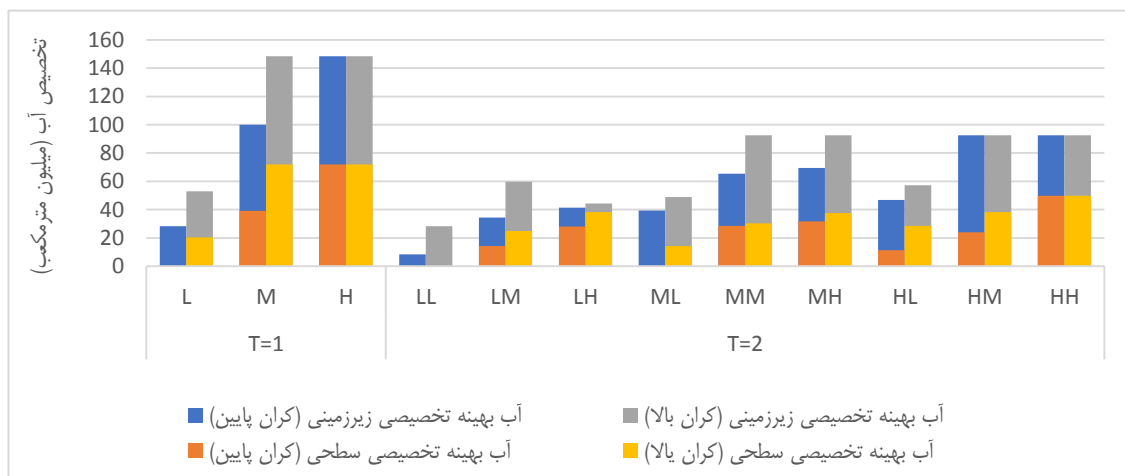
Figure 4. System benefits of Marand basin under different combinations of probabilities α and β

تخصیص در طول افق برنامه‌ریزی افزایش می‌یابد. در واقع مقادیر بالاتر α برابر با ریسک بالاتر سیستم است که نشان دهنده یک معامله بین سود سیستم و ریسک‌های مرتبط با آن است. شکل ۴ همچنین نشان می‌دهد که اگرچه سود خالص سیستم تحت سطوح مختلف احتمال تخطی از محدودیت افزایش می‌یابد، اما میزان افزایش متفاوت است. بر این اساس، سطح احتمال مطلوب تخطی از محدودیت، تصمیم‌گیرندگان و مدیران را برای مدیریت آب کشاورزی به چالش کشیده است. با در نظر گرفتن $\alpha = 0$ به‌عنوان معیار مقایسه، میزان افزایش سود برای سطوح احتمال $\alpha = 0.01$ ، $\alpha = 0.05$ و $\alpha = 0.1$ محاسبه شده که به ترتیب برابر با $10^{10} \times 1.86/5$ ، $10^{10} \times 2.59/3$ و $10^{10} \times 5.8/1$ ریال است که بیانگر یک روند افزایشی در ابتدا و سپس یک روند کاهشی می‌باشد. بنابراین، $\alpha = 0.05$ می‌تواند به‌عنوان یک احتمال تخطی مطلوب برای تصمیم‌گیرندگان، از نظر این مطالعه موردی، در نظر گرفته شود.

بر اساس تجزیه و تحلیل فوق و با در نظر گرفتن $\alpha = 0.05$ به‌عنوان احتمال مطلوب تخطی از محدودیت و $\beta = 0.9$ به‌عنوان سطح رضایت تابع هدف، میزان تخصیص بهینه آب کشاورزی (سطحی و زیرزمینی) برای مناطق مختلف آبیاری آبخیز مرند (شامل مرند، بناب و زوز)، تحت سناریوهای مختلف شدت جریان آب به‌دست آمده است که در شکل‌های ۵ تا ۷ نشان داده شده است.

بر اساس این نمودار می‌توان گفت زمانی که راندمان آبیاری افزایش پیدا کرده و کشاورزان نسبت به در دسترس بودن آب خوشبین باشند، سیستم مورد مطالعه می‌تواند به حداکثر سودی معادل $10^{10} \times 14.83/1$ ریال برسد و برعکس، حداقل سود $(10^{10} \times 4.6/6)$ ریال نیز تحت نامساعدترین شرایط در وضعیت موجود، حاصل می‌شود. همچنین به ازاء هر احتمال تخطی از محدودیت α ، با افزایش سطح رضایت تابع هدف β ، هر دو کران بالا و پایین سود خالص سیستم به تدریج کاهش می‌یابد. این بدان مفهوم است که سود خالص سیستم به سطح رضایت تابع هدف غیرحساس است. با این حال در ادامه مطالعه مقدار $\beta = 0.9$ به‌عنوان سطح رضایت تابع هدف انتخاب شده است. از طرف دیگر، اختلاف بین سود خالص سیستم تحت سطوح مختلف تخطی از محدودیت α قابل توجه است. این وضعیت بیانگر این است که سود خالص سیستم به سطح احتمال تخطی از محدودیت حساس است. مدل پیشنهادشده قادر است تعاملات بین سود سیستم و ریسک‌های مربوطه را انعکاس دهد. بنابراین تصمیم‌گیرندگان می‌توانند بر اساس اولویت‌ها و ترجیحات خود، یک برنامه مدیریتی مطلوب تهیه کنند.

لازم به ذکر است که مقادیر بالاتر α به معنای احتمال بالاتر نقض محدودیت و دسترسی بیشتر به آب آبیاری کشاورزی (کمبود آب کمتر) و در نتیجه افزایش سود سیستم است. به عبارت دیگر حجم آب تخصیص‌یافته به هر منطقه آبیاری هنگامی که مقدار α افزایش یابد، در تمام برنامه‌های



شکل ۵- میزان تخصیص بهینه آب (سطحی و زیرزمینی) منطقه مرند تحت سناریوهای مختلف طی افق برنامه‌ریزی
Figure 5. Optimized water-allocation patterns of Maran sub-region under different scenarios during planning horizon

شکل ۵ الگوهای تخصیص بهینه آب سطحی و زیرزمینی منطقه مرند را تحت تمام سناریوهای ممکن شدت جریان آب در افق برنامه‌ریزی ارائه می‌دهد. نتایج $Z_{111,opt} = Z_{121,opt} = 0$ بیان می‌کنند که مقدار آب بهینه هدف تخصیصی سطحی منطقه مرند معادل با کران پایین آب هدف تخصیصی یعنی برابر با $71/9$ و $49/8$ میلیون مترمکعب به ترتیب برای دوره اول و دوره دوم می‌باشند. علاوه بر این، بر اساس نتایج $Z_{122,opt} = 0$ و $Z_{112,opt} = 0.6$ هدف تخصیصی زیرزمینی منطقه مرند نیز برابر با

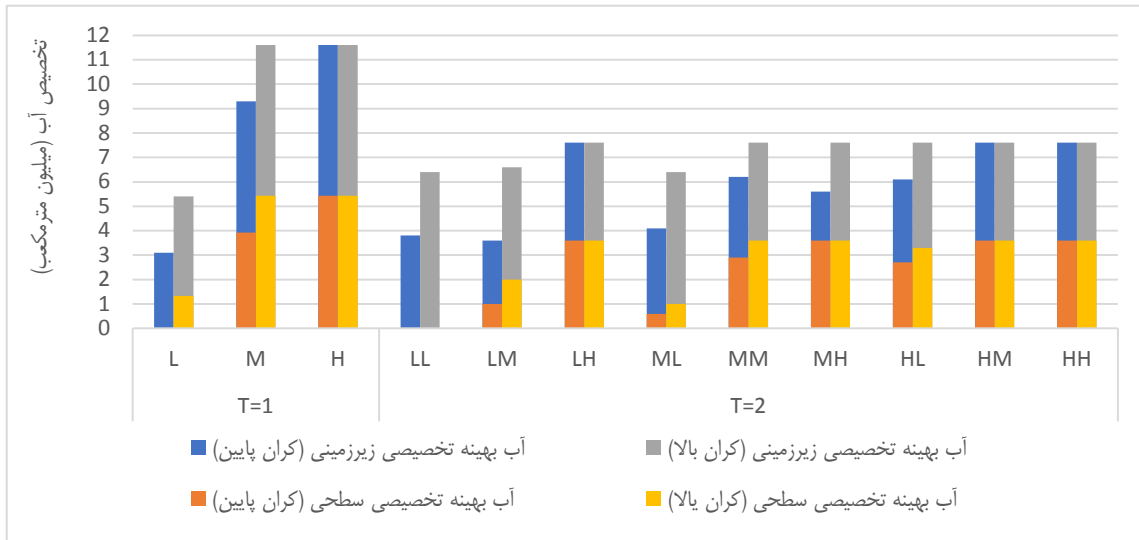
شکل ۵ الگوهای تخصیص بهینه آب سطحی و زیرزمینی منطقه مرند را تحت تمام سناریوهای ممکن شدت جریان آب در افق برنامه‌ریزی ارائه می‌دهد. نتایج $Z_{111,opt} = Z_{121,opt} = 0$ بیان می‌کنند که مقدار آب بهینه هدف تخصیصی سطحی منطقه مرند معادل با کران پایین آب هدف تخصیصی یعنی برابر با $71/9$ و $49/8$ میلیون مترمکعب به ترتیب برای دوره اول و دوره دوم می‌باشند. علاوه بر این، بر اساس نتایج $Z_{122,opt} = 0$ و $Z_{112,opt} = 0.6$ هدف تخصیصی زیرزمینی منطقه مرند نیز برابر با

دوم می‌باشند. نتایج $S_{1111,opt}^{\pm} = S_{1121}^{\pm} = 0$ و $S_{1112,opt}^{\pm} = [0, 32.8] \times 10^6 m^3$ ، $S_{1113,opt}^{\pm} = [51.5, 71.9] \times 10^6 m^3$ و $S_{1123,opt}^{\pm} = [95.5, 120.2] \times 10^6 m^3$ نشان می‌دهند در دوره اول تحت شدت جریان بالای آب هیچ کمبود آبی (سطحی و زیرزمینی) در منطقه مرند وجود ندارد؛ تحت شدت جریان متوسط مقدار کمبود آب سطحی و زیرزمینی به ترتیب برابر با $32/8$ و $48/5$ میلیون مترمکعب

دوم می‌باشند. نتایج $S_{1111,opt}^{\pm} = S_{1121}^{\pm} = 0$ و $S_{1112,opt}^{\pm} = [0, 32.8] \times 10^6 m^3$ ، $S_{1113,opt}^{\pm} = [51.5, 71.9] \times 10^6 m^3$ و $S_{1123,opt}^{\pm} = [95.5, 120.2] \times 10^6 m^3$ نشان می‌دهند در دوره اول تحت شدت جریان بالای آب هیچ کمبود آبی (سطحی و زیرزمینی) در منطقه مرند وجود ندارد؛ تحت شدت جریان متوسط مقدار کمبود آب سطحی و زیرزمینی به ترتیب برابر با $32/8$ و $48/5$ میلیون مترمکعب

شده به منطقه تحت این سناریو به ترتیب برابر با آب هدف تخصیصی یعنی $۴۹/۸$ و $۹۲/۵$ میلیون مترمکعب خواهد بود. نتایج $S_{1212,opt}^{\pm} = [11.6, 25.9] \times 10^6 m^3$ و $S_{1213,opt}^{\pm} = [21.2, 38.5] \times 10^6 m^3$ نشان می‌دهد با شدت جریان بالای آب در دوره اول، مقدار آب سطحی تخصیصی تحت شدت جریان متوسط و کم (سناریوهای HM و HL) به ترتیب برابر با $[۲۳/۹, ۳۸/۲]$ و $[۱۱/۳, ۲۸/۶]$ میلیون مترمکعب خواهد بود. همچنین بر اساس نتایج $S_{1222,opt}^{\pm} = 0$ و $S_{1223,opt}^{\pm} = [35.2, 45.6] \times 10^6 m^3$ مقدار آب زیرزمینی تخصیصی تحت شدت جریان متوسط و کم آب به ترتیب برابر با $۹۲/۵$ و $[۴۶/۹, ۵۷/۳]$ خواهد بود.

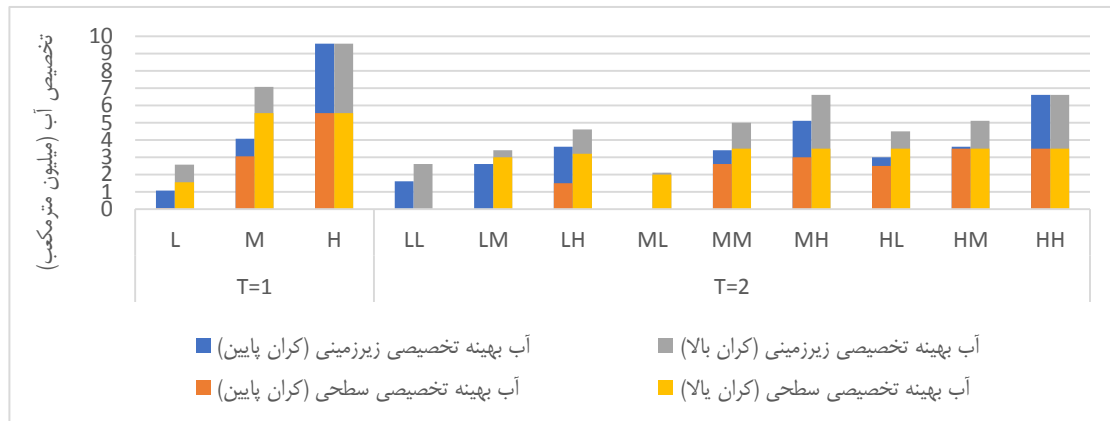
می‌باشد و تحت سناریوی شدت جریان کم آب سطحی، مقدار کمبود برابر با $۷۱/۹$ میلیون مترمکعب می‌باشد که معادل با مقدار آب هدف تخصیصی است. بنابراین تحت این شرایط مقدار آب تخصیصی برابر صفر خواهد بود. مقدار آب زیرزمینی تخصیصی به منطقه تحت سناریوی شدت جریان کم، برابر با $[۲۸/۲, ۵۲/۹]$ میلیون مترمکعب می‌باشد. الگوهای تخصیص بهینه آب منطقه مرند در دوره دوم، نشان می‌دهد تحت سناریوی شدت جریان بالای آب هم در دوره اول و هم دوره دوم (سناریو HH) هیچ کمبود آب سطحی و زیرزمینی مشاهده نمی‌شود. بنابراین بر اساس نتایج می‌توان گفت مقدار آب سطحی و زیرزمینی تخصیص داده



شکل ۶- میزان تخصیص بهینه آب (سطحی و زیرزمینی) منطقه بناب تحت سناریوهای مختلف طی افق برنامه‌ریزی
Figure 6. Optimized water-allocation patterns of Bonab sub-region under different scenarios during planning horizon

و مقدار کمبود آب زیرزمینی برابر با صفر، $[۰, ۲/۳]$ و $[۸/۵, ۶/۲]$ میلیون مترمکعب می‌باشد. بر این اساس، مقدار آب بهینه سطحی تخصیصی برابر با $۵/۴$ و $[۳/۹, ۵/۴]$ و $[۰, ۱/۳]$ و مقدار آب بهینه زیرزمینی برابر با $۱۱/۶$ و $[۹/۳, ۱۱/۶]$ و $[۳/۱, ۵/۴]$ میلیون مترمکعب خواهد بود. همچنین نتایج نشان می‌دهد زمانی که شدت جریان در دوره اول زیاد باشد، مقدار آب سطحی و زیرزمینی تخصیص داده شده به منطقه بناب در دوره دوم تحت شدت جریان زیاد و متوسط به ترتیب برابر با آب هدف تخصیصی یعنی $۳/۶$ و $۷/۶$ میلیون مترمکعب می‌باشد. علاوه بر این، زمانی که شدت جریان در کل دوره‌های برنامه‌ریزی کم باشد، مقدار آب سطحی تخصیصی برابر صفر و مقدار آب زیرزمینی تخصیصی برابر $[۳/۸, ۶/۴]$ میلیون مترمکعب خواهد بود.

الگوهای تخصیص بهینه آب سطحی و زیرزمینی منطقه بناب تحت تمام سناریوهای ممکن شدت جریان آب در افق برنامه‌ریزی در شکل ۶ نشان داده شده است. نتایج برنامه‌ریزی در شکل $Z_{221,opt} = 0$ و $Z_{211,opt} = 0.13$ بیان می‌کنند که مقدار آب بهینه هدف تخصیصی سطحی منطقه بناب طی دوره اول و دوم به ترتیب برابر با $۵/۴$ و $۳/۶$ میلیون مترمکعب می‌باشد. همچنین بر اساس نتایج $Z_{212,opt} = Z_{222,opt} = 1$ مقدار آب بهینه هدف تخصیصی زیرزمینی منطقه بناب در دوره اول و دوم به ترتیب برابر با $۱۱/۶$ و $۷/۶$ میلیون مترمکعب می‌باشند که معادل کران بالای آب هدف تخصیصی می‌باشند. بر اساس نتایج، مقدار کمبود آب سطحی منطقه مرند در دوره اول تحت شدت جریان زیاد، متوسط و کم به ترتیب برابر با صفر، $[۰, ۱/۵]$ و $[۴/۱, ۵/۴]$ میلیون مترمکعب



شکل ۷- میزان تخصیص بهینه آب (سطحی و زیرزمینی) منطقه زونوز تحت سناریوهای مختلف طی افق برنامه‌ریزی
Figure 7. Optimized water-allocation patterns of Zonouz sub-region under different scenarios during planning horizon

همان‌طور که تمام نتایج نشان می‌دهد کمبود آب در سناریوهای مختلف به دلیل ناکافی بودن منابع آب مشاهده می‌شود. با این حال بر اساس نتایج در دوره دوم علیرغم کاهش در مقدار آب موجود، میزان کمبود آب با افزایش کارایی آبیاری کاهش می‌یابد. به‌عنوان مثال در منطقه مرند، مقدار کمبود آب سطحی و زیرزمینی در دوره اول تحت شدت جریان متوسط به ترتیب برابر با ۴۵/۷ درصد و ۳۲/۷ درصد می‌باشد که در دوره دوم به میزان [۳۹/۲، ۴۲/۸] درصد و [۲۴/۶، ۲۹/۳] درصد کاهش می‌یابد. بر این اساس می‌توان گفت ضرر و زیانی که تحت این سناریو در سیستم رخ داده قابل‌توجه است، هرچند که در سناریو بدبینانه ممکن است کمتر باشد. بنابراین در مدیریت تخصیص منابع آب نه تنها سود بلکه ریسک ذاتی سیستم نیز باید به دلیل عدم قطعیت در نظر گرفته‌شود. علاوه بر این، نتایج نشان می‌دهد مقدار کمبود آب در کران بالا به میزان قابل توجهی کاهش پیدا کرده‌است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت برای جلوگیری از کاهش ذخیره و افت سطح ایستایی آبخوان آبخیز مرند، افزایش راندمان آبیاری و اجرای طرح‌های تغذیه مصنوعی پیشنهاد می‌گردد.

مقایسه رهیافت UIMSP با روش برنامه‌ریزی تصادفی چندمرحله‌ای پارامتر بازه‌ای موجود (IMSP) حاکی از آن است که رهیافت IMSP تنها عدم قطعیت‌هایی که به صورت بازه‌ای در محدودیت‌های مدل وجود دارند را لحاظ می‌کند. درحالی‌که در مسائل دنیای واقعی اطلاعات عدم قطعیت پیچیده‌تری می‌تواند در پارامترهای مدل وجود داشته باشد. این عدم قطعیت‌ها را می‌توان به صورت بازه‌هایی با کران‌های تصادفی با توزیع‌های احتمال مشخص تخمین زد. چنین عدم قطعیت‌هایی ممکن است هم در تابع هدف و هم در محدودیت‌های مدل وجود داشته باشد که منجر به عدم قطعیت دوگانه شود. UIMSP در برخورد با این عدم قطعیت‌های دوگانه کارا می‌باشد. علاوه بر این رهیافت IMSP فاقد اطلاعات در مورد ریسک تخطی از محدودیت تعریف شده توسط α و ریسک مربوط به تابع هدف تعریف شده توسط β می‌باشد. درحالی‌که مدل UIMSP با استفاده از ترکیبات مختلف احتمالات α و β ، گزینه‌های متنوعی را برای

الگوهای تخصیص بهینه آب سطحی و زیرزمینی منطقه زونوز تحت تمام سناریوهای ممکن شدت جریان آب در افق برنامه‌ریزی در شکل ۷ نشان داده شده است. نتایج بهینه هدف تخصیص سطحی منطقه زونوز برابر با ۹/۶ و ۶/۶ میلیون مترمکعب به ترتیب برای دوره اول و دوره دوم می‌باشند. علاوه بر این، بر اساس نتایج $Z_{312,opt} = 0.6$ و $Z_{311,opt} = Z_{321,opt} = 0.1$ مقدار آب بهینه تخصیص سطحی منطقه زونوز برابر با ۹/۶ و ۶/۶ میلیون مترمکعب به ترتیب برای دوره اول و دوم می‌باشند. نتایج $S_{3111,opt}^{\pm} = 0$ و $S_{3112,opt}^{\pm} = [2.5, 5.5] \times 10^6 m^3$ و $S_{3113,opt}^{\pm} = [7, 8.5] \times 10^6 m^3$ بیانگر مقدار کمبود آب سطحی و نتایج $S_{3121,opt}^{\pm} = 0$ و $S_{3122,opt}^{\pm} = [0, 2.5] \times 10^6 m^3$ و $S_{3123,opt}^{\pm} = [4, 5.5] \times 10^6 m^3$ بیانگر مقدار کمبود آب زیرزمینی به ترتیب تحت سناریوهای شدت جریان زیاد، متوسط و کم در دوره اول در منطقه زونوز می‌باشند. بر این اساس، مقدار تخصیص آب سطحی برابر با ۹/۶، [۴/۱، ۷/۱] و [۲/۶، ۱/۱] میلیون مترمکعب و مقدار تخصیص آب زیرزمینی نیز برابر با ۵/۵، [۳، ۵/۵] و [۰، ۱/۵] میلیون مترمکعب خواهد بود. علاوه بر این نتایج $S_{3214,opt}^{\pm} = [0, 1.5] \times 10^6 m^3$ و $S_{3215,opt}^{\pm} = [1.6, 3.2] \times 10^6 m^3$ و $S_{3215,opt}^{\pm} = [1.6, 3.2] \times 10^6 m^3$ و نتایج $S_{3224,opt}^{\pm} = [0, 0.5] \times 10^6 m^3$ و $S_{3225,opt}^{\pm} = [0, 0.9] \times 10^6 m^3$ و $S_{3226,opt}^{\pm} = [1.5, 3.5] \times 10^6 m^3$ مقدار کمبود آب زیرزمینی را به ترتیب تحت شدت جریان زیاد، متوسط و کم در دوره دوم نشان می‌دهد، درحالی‌که شدت جریان در دوره اول متوسط باشد. بنابراین مقدار آب سطحی تخصیصی در دوره دوم تحت سناریوهای فوق، برابر با [۵/۱، ۶/۶]، [۳/۴، ۵] و [۰، ۲/۱] و [۰، ۲/۶] میلیون مترمکعب و مقدار آب زیرزمینی تخصیصی در دوره دوم تحت سناریوهای فوق برابر با [۳، ۳/۵]، [۳، ۳/۵] و [۲/۶، ۳/۵]، [۰، ۲] میلیون مترمکعب خواهد بود. همچنین نتایج نشان می‌دهد مقدار آب سطحی و زیرزمینی تخصیصی در دوره دوم تحت بدترین سناریو (LL) به ترتیب برابر با [۱/۶، ۲/۶] و صفر میلیون مترمکعب خواهد بود.

با ترکیبات مختلف سطح ریسک برای تابع هدف و محدودیت‌ها، برای برنامه‌ریزی سیستم تخصیص منابع آب تولید می‌شود که برای ارزیابی عمیق مصالحه بین سود سیستم و ریسک‌های مربوطه مفید می‌باشند. تصمیم‌گیرندگان می‌توانند از گزینه‌های مختلف برای تدوین یک سیاست مناسب تخصیص آب تحت شرایط عدم قطعیت بهره‌مند شوند. نتایج حاصل از مدل UIMSP نشان می‌دهد کمبود آب در سناریوهای مختلف به دلیل ناکافی بودن منابع آب در محدوده مطالعاتی مرند مشاهده می‌شود. با این حال بر اساس نتایج مدل، در دوره دوم علیرغم کاهش در مقدار آب موجود، میزان کمبود آب با افزایش کارایی آبیاری کاهش یافته است. به عنوان مثال، تحت شدت جریان متوسط مقدار کمبود آب سطحی و زیرزمینی آبخیز در دوره اول به ترتیب برابر با ۴۳/۶ درصد و ۳۲/۵ درصد می‌باشد که در دوره دوم به میزان [۳۶/۹، ۲۴/۵] درصد و [۰، ۲۴/۵] درصد کاهش می‌یابد. بر این اساس می‌توان گفت ضرر و زیانی که تحت این سناریو در سیستم رخ داده قابل توجه است، هرچند که در سناریو بدبینانه ممکن است کمتر باشد. بنابراین در مدیریت تخصیص منابع آب نه تنها سود بلکه ریسک ذاتی سیستم نیز باید به دلیل عدم قطعیت در نظر گرفته شود. علاوه بر این، نتایج نشان می‌دهد مقدار کمبود آب در کران بالا به میزان قابل توجهی کاهش پیدا کرده است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت برای جلوگیری از کاهش ذخیره و افت سطح ایستایی آبخوان دشت مرند، افزایش راندمان آبیاری و اجرای طرح‌های تغذیه مصنوعی پیشنهاد می‌گردد.

تصمیم‌گیرندگان جهت شناسایی یک سازش مطلوب بین درجه رضایت تابع هدف و درجه امکان محدودیت‌ها در روند تصمیم‌گیری فراهم می‌کند. چنین ترکیباتی از احتمالات α و β اهمیت پارامترهای ریسک و اثرات متقابل آنها بر سود سیستم را نشان می‌دهد. در مقایسه با مدل IMSP مدل توسعه‌یافته می‌تواند پویایی و عدم قطعیت بیشتری را در ساختار مدل‌سازی ادغام کند و به تصمیم‌گیرندگان کمک کند تا ارزیابی عمیق‌تری در رابطه با هدف اقتصادی و ریسک مربوطه داشته باشند.

نتیجه‌گیری کلی

در این مطالعه یک رویکرد برنامه‌ریزی تصادفی چندمرحله‌ای تعاملی مبتنی بر عدم قطعیت (UIMSP) از طریق تلفیق روش معیار کاتالوگا و مدل برنامه‌ریزی محدودیت شانس در یک چارچوب تصمیم‌گیری چندمرحله‌ای ارائه شده است. UIMSP نه تنها می‌تواند عدم قطعیت را به شکل بازه‌ای و توزیع احتمال و ترکیبات آن‌ها لحاظ کند، بلکه با ساخت مجموعه‌ای از سناریوها که نمایانگر همه پیامدهای تصادفی ممکن در یک زمینه چندمرحله‌ای هستند، پویایی‌های عدم قطعیت و فرآیندهای تصمیم‌گیری را منعکس می‌کند. علاوه بر این UIMSP می‌تواند به تصمیم‌گیرندگان در بررسی ریسک‌های بالقوه مربوط به تابع هدف تصادفی و محدودیت‌های تصادفی کمک کند. برای نشان دادن کاربردی بودن روش پیشنهادی، از این مدل برای بهینه‌سازی منابع آب کشاورزی محدوده مطالعاتی مرند استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد در مقایسه با رهیافت IMSP موجود، تحت چارچوب توسعه یافته مجموعه‌ای از گزینه‌های تصمیم‌گیری

منابع

1. Afzali, A. and K. Shahedi. 2014. Investigation on Trend of Groundwater Quantity-Quality Variation in Amol-Babol Plain. *Journal of Watershed Management Research*, 5(10): 144-156 (In Persian).
2. Ahmadi, K., H.R. Ebadzadeh, F. Hatami, H. Abdshah and A. Kazemian. 2020. Agricultural statistics (Crop year 2018-2019, Volume I: crops). Ministry of Jihad-Agriculture, Department for Planning and Economic Affairs, Tehran, Iran, 97 pp (In Persian).
3. Askew, A.J., 1974. Chance-constrained dynamic programming and the optimization of water resource systems. *Water Resources Research*, 10(6): 1099-1106.
4. Bai, T., J. Wei, F.J. Chang, W.W. Yang and Q. Huang. 2019. Optimize multi-objective transformation rules of water-sediment regulation for cascade reservoirs in the Upper Yellow River of China. *Journal of Hydrology*, 577: 123987.
5. Charnes, A., W.W. Cooper and M.J.L. Kirby. 1971. Chance-constrained programming: an extension of statistical method. *Optimizing Methods in Statistics*. Academic Press, University of Texas, Carnegie-Mellon University, Dalhousie University, 391-402.
6. Dupačová, J., G. Consigli and S.W. Wallace. 2000. Scenarios for multistage stochastic programs. *Annals of Operations Research*, 100(1): 25-53.
7. Edirisinghe, N.C.P., E.I. Patterson and N. Saadouli. 2000. Capacity planning model for a multipurpose water reservoir with target-priority operation. *Annals of Operations Research*, 100(1): 273-303.
8. Homayounifar, M. and F. Rastgaripour. 2010. Water allocation of Latian dam between agricultural products under uncertainty. *Journal of Agricultural Economics and Development*, 24(2): 259-267 (In Persian).
9. Hosseinzad, J., A. Javadi, B. Hayati, E. Pishbahar and Gh. Dashti. 2011. Application of optimal control model in groundwater extraction (Case study: Ajabshir Plain). *Journal of Agricultural Economics and Development*, 25(2): 212-218 (In Persian).
10. Kataoka, S. 1963. A stochastic programming model. *Econometrica*, 31(1): 181-196.
11. Li, Y.P., G.H. Huang and S.L. Nie. 2009. Water resources management and planning under uncertainty: an inexact multistage joint-probabilistic programming method. *Water Resources Management*, 23: 2515-2538.

12. Li, M., P. Guo, G.Q. Yang and S.Q. Fang. 2013a. IB-ICCMSP: An integrated irrigation water optimal allocation and planning model based on inventory theory under uncertainty. *Water Resources Management*, 28: 241-260.
13. Li, M., P. Guo, V.P. Singh and G. Yang. 2016. An uncertainty-based framework for agricultural water-land resources allocation and risk evaluation. *Agricultural Water Management*, 177: 10-23.
14. Li, Y.P., G.H. Huang and S.L. Nie. 2006. An interval-parameter multi-stage stochastic programming model for water resources management under uncertainty. *Advances in Water Resources*, 29(5): 776-789.
15. Li, Z., G. Huang, Y. Zhang, and Y. Li. 2013b. Inexact two-stage stochastic credibility constrained programming for water quality management. *Resources, Conservation and Recycling*, 73: 122-132.
16. Luo, B., I. Maqsood, Y.Y. Yin, G.H. Huang and S.J. Cohen. 2003. Adaption to climate change through water trading under uncertainty- an inexact two-stage nonlinear programming approach. *Journal of Environmental Informatics*, 2(2): 58-68.
17. Maqsood, I., G. Huang, Y. Huang and B. Chen. 2005. ITOM: an interval-parameter two-stage optimization model for stochastic planning of water resources systems. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 19(2): 125-133.
18. Miao D.Y., W.W. Huang, Y.P. Li and Z.F. Yang. 2014. Planning water resources systems under uncertainty using an interval-fuzzy de novo programming method. *Journal of Environmental Informatics*, 24(1): 11-23.
19. Seyedan, S.M. and A. Ghadami Firozabadi. 2018. Pricing of groundwater resources of Hamadan-Bahar Plain using spatial econometric approach, *Journal of Watershed Management Research*, 9(17): 258-268 (In Persian).
20. Shafaeianfard, D., F. koohiyan Afzal and M. Ebrahim Yakhleshi. 2014. Determination of top options in utilization of water resources using WEAP model and multi attribute decision-making analysis (Case study: Zaryngol basin). *Journal of Watershed Management Research*, 5(9): 29-45 (In Persian).
21. Shen, Y.S., Z.F. Tan, X.L. Shen, J.J. Bai, Q.Z. Li and S. Wang. 2012. Study of energy saving and emission reduction based on the OLAP multi-indicator relational model. *Journal of Environmental Informatics*, 20(2): 115-122.
22. Wang, S. and G.H. Huang. 2012. Identifying optimal water resources allocation strategies through an interactive multi-stage stochastic fuzzy programming approach. *Water resources management*, 26(7): 2015-2038.
23. Wang, S., G.H. Huang and Y. Zhou. 2015. Inexact probabilistic optimization model and its application to flood diversion planning in a dynamic and uncertain environment. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 141(8): 04014093-1-04014093-10.
24. Wang, Y.Z., L. Liu, P. Guo, C.L. Zhang, F. Zhang and S.S. Guo. 2019. An inexact irrigation water allocation optimization model under climate change. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 33(1): 271-285.
25. Xu, J., G. Huang, Z. Li and J. Chen. 2017. A two-stage fuzzy chance-constrained water management model. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(13): 12437-12454.
26. Yang, G.Q., L. Liu, P. Guo and M. Li. 2017. A flexible decision support system for irrigation scheduling in an irrigation district in China. *Agricultural Water Management*, 179: 378-389.
27. Zhang, C. and P. Guo. 2017. A generalized fuzzy credibility-constrained linear fractional programming approach for optimal irrigation water allocation under uncertainty. *Journal of Hydrology*, 553: 735-749.

Development of an Optimization Model for Water Resources Allocation under Uncertain Conditions (Case study: Marand Watershed)

Javad Hosseinzad¹, Mehri Rai² and Mohammad Ali Ghorbani³

1 - Associate Professor, Department of Agricultural Economics, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, (Corresponding Author: J.hosseinzad@tabrizu.ac.ir)

2- PhD student, Department of Agricultural Economics, Faculty of Agriculture, University of Tabriz

3- Professor of Water Engineering, Faculty of Agriculture, University of Tabriz

Received: 17 February, 2021 Accepted: May 15, 2021

Extended Abstract

Introduction and Objective: Given the limited available water resources, the conflict-laden issues of water allocation have become a challenging issue for planners and water consumers. The existence of different types of uncertainties and climate change conditions in the water resources systems intensify the complexity of the optimal allocation process of water resources in the agricultural field. Therefore, In the present study, it is tried to optimally allocate water resources in Marand watershed by developing a mathematical planning model that is capable of dynamics and uncertainty conditions both in the parameters of objective functions and in constraints.

Material and Methods: In this study, an uncertainty-based interactive multi-stage stochastic programming (UIMSP) approach is proposed by incorporating the fractile criterion method and chance-constrained programming within a multi-stage decision-making framework for agricultural water resource management in various planning horizon. A two-period scenario tree with different probabilities for violating constraints (α) and various satisfactory levels of the objective function (β) were selected.

Results: The results indicates that the minimum and maximum benefits of the system are $[46.6, 983.6] \times 10^{10}$ (Rials) and $[699.7, 1483.1] \times 10^{10}$ (Rials) when $\alpha = 0.01$, $\beta = 0.9$ and $\alpha = 0.1$, $\beta = 0.1$, respectively. In addition, an increase in satisfactory levels of the objective function (β) led to a gradual decrease in both upper and lower bound of the total net benefits at each given probability level of violating constraint (α), while any change in probability of constraint violation (α) resulted in creating a significant change in the system profits. Also, the results of the UIMSP model show that water scarcity is observed in different scenarios due to insufficient water resources in Marand watershed. However, according to the results, in the second period, despite the decrease in the amount of water available, the amount of water shortage has decreased with increasing irrigation efficiency. For example, under medium flow level, the amount of surface and groundwater shortages in the first period is 43.6% and 32.5%, respectively, while it is reduced by $[36.9, 24.5]$ and $[24.5, 0]$ percent in the second period.

Conclusion: The results can help decision-makers examine potential interactions between risks related to the stochastic objective function and constraints. Also, increasing irrigation efficiency and upgrading irrigation systems are among the main strategies that can provide an economic benefit to farmers while reducing environmental damage.

Keywords: Chance constraint programming, Kataoka's criterion, Multi-stage Stochastic programming, Random Interval, Water Resources Allocation