

## توسعه یک مدل برنامه‌ریزی احتمالی فازی بازه‌ای برای تخصیص منابع آب سطحی با در نظر گرفتن عوامل بوم‌شناختی و کمبود آب (مطالعه موردی: حوضه سیمینه‌رود)

پرشنگ آذری<sup>۱</sup>، سهیل سبحان‌اردکانی<sup>۲\*</sup>، مهرداد چراغی<sup>۳</sup>، بهاره لریستانی<sup>۴</sup> و امیررضا گودرزی<sup>۵</sup>

- (۱) دانشجوی دکتری تخصصی مهندسی محیط زیست، گروه مهندسی محیط زیست، دانشکده فنی و مهندسی، واحد همدان، دانشگاه آزاد اسلامی، همدان، ایران.
- (۲) استاد گروه محیط زیست، دانشکده علوم پایه، واحد همدان، دانشگاه آزاد اسلامی، همدان، ایران.  
\*رایانامه نویسنده مسئول مکاتبات: [sobhan@iauh.ac.ir](mailto:sobhan@iauh.ac.ir)
- (۳) استاد گروه محیط زیست، دانشکده علوم پایه، واحد همدان، دانشگاه آزاد اسلامی، همدان، ایران.
- (۴) استاد گروه محیط زیست، دانشکده علوم پایه، واحد همدان، دانشگاه آزاد اسلامی، همدان، ایران.
- (۵) دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، واحد همدان، دانشگاه آزاد اسلامی، همدان، ایران.

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۵/۱۴

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۳/۰۶

### چکیده

تخصیص منابع آب سطحی به‌عنوان یک راه‌حل برای مقابله با تنش آبی به‌ویژه در نواحی کم‌بارش تلقی می‌شود، اما وجود عدم قطعیت بالا و همچنین کمبود آب، این تخصیص را همواره دچار مشکل ساخته و این موضوع به یکی از مشکلات اصلی حکمرانی در نواحی کم‌بارش جهان تبدیل شده است. از این‌رو، در این پژوهش یک مدل برنامه‌ریزی احتمالی فازی بازه‌ای برای تخصیص منابع آب سطحی با در نظر گرفتن عوامل بوم‌شناختی و کمبود آب طراحی شد. بدین منظور، پس از تجزیه و تحلیل و اعتبارسنجی مدل، تحلیل حساسیت پارامتری بر عوامل بوم‌شناختی و اقتصادی در سیمینه‌رود که از رودخانه‌های مهم حوضه آبریز دریاچه ارومیه است، انجام شد. نتایج نشان داد افزایش ۱۰ تا ۵۰ درصدی کمبود آب به افت مقادیر توابع هدف منجر شد. همچنین، افزایش ۵۰ درصدی ضریب تولید آلاینده‌ها منجر به کاهش همه اهداف اقتصادی و بوم‌شناختی از ۲/۵ تا ۳/۵ درصد و افزایش ۵۰ درصدی حذف آلاینده‌ها نیز به بهبود دو تا سه درصدی اهداف اقتصادی منجر شد. به‌طور کلی، می‌توان اذعان داشت کمبود آب از پیامدهای آلودگی این منبع حیاتی محسوب شده و بدین سبب بخش قابل توجهی از منابع آبی از چرخه تخصیص کنار گذاشته می‌شوند، این در حالی است که با افزایش ۱۰۰ درصدی عدم قطعیت، هدف بوم‌شناختی تا ۲/۷ درصد دچار افت و سایر اهداف نیز در بازه ۱/۵ تا ۲/۰ درصد دچار تغییر شدند. نظر به اینکه در نظر گرفتن متغیرهای کمبود آب کارکردی و آلودگی آب نیز می‌تواند در خروجی مدل تاثیرگذار بوده و پاسخ‌های قابل اطمینان‌تری را ارائه دهد، بنابراین نسبت به لحاظ کردن این دو عامل در پژوهش‌های آتی توصیه می‌شود.

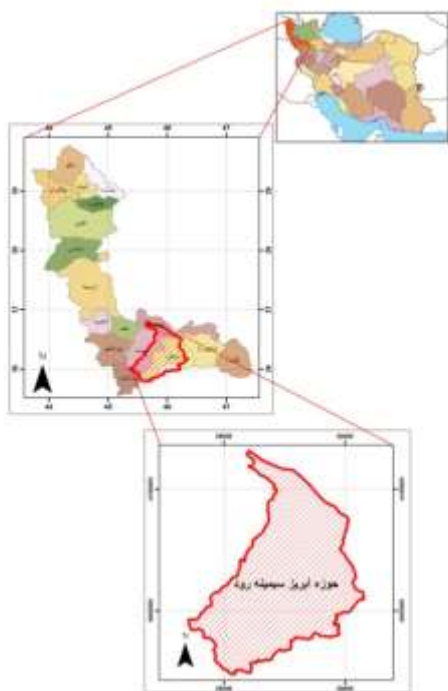
واژه‌های کلیدی: بهینه‌سازی پویای بازه‌ای فازی، تخصیص منابع آب، فرآیندهای بوم‌شناختی، کمبود آب.

آب به عنوان مهم ترین ماده حیاتی برای بقای بشر، نیازمند تخصیص بهینه بوده و برخلاف سایر منابع، توسط انسان قابل تولید نبوده و حاصل از ریزش های جوی و منابع موجود در رودخانه ها و آبخیزها به صورت زیرزمینی و سطحی است، بنابراین اگر تخصیص این منابع به درستی انجام نپذیرد، نمی توان بهره برداری مناسب از منابع آبی را انتظار داشت (Aldieri et al., 2021). برخی از کشورها با وجود کمبود آب موفق به مدیریت مناسب منابع آبی شده و از بحران های مترتب با آن تا حد قابل قبولی جلوگیری کرده اند. اما، در برخی کشورها منجمله ایران، تخصیص منابع آبی به درستی انجام نیافته و کمبود آب به ویژه در فصولی که تقاضای مصرف آب زیاد است، در سطح کشور مشهود است. به طوری که در برخی استانها نظیر سیستان و بلوچستان تعدادی از روستاها خالی از سکنه شده و جمعیت برخی از شهرها نیز رو به کاهش است. ضمن اینکه مهاجرت افراد به استان های واجد منابع آبی قابل توجه از جمله مازندران، گیلان و گلستان نیز به دلیل این بحران قابل توجه است. البته باید توجه داشت که ظرفیت های گردشگری سه استان مزبور نیز در امر مهاجرت دخیل هستند، هرچند که قطعاً نمی تواند نقش مسایل و تنش های آبی را نیز نادیده گرفت (Bozorgzadeh & Mousavi, 2023). از این رو، نظر به اهمیت موضوع، پژوهش های زیادی در این خصوص در سطح دنیا انجام یافته است (Ranarahu & Dash, 2022). یکی از ویژگی های مهم مدل های تخصیص منابع آب، عدم قطعیت است. چرا که محققین و کارشناسان اطلاعات دقیقی در خصوص میزان بارش یا میزان ورودی آب در هر فصل در اختیار ندارند. بنابراین، موضوع عدم قطعیت باید به شکل جدی در مساله تخصیص آب مورد توجه قرار گیرد (Genova & Wei, 2023). علی رغم آنکه در بیشتر پژوهش های مرتبط با منابع آبی به ندرت به موضوع عوامل و منافع بوم شناختی توجه شده است، Li و همکاران (۲۰۲۲) به موضوع کمبود آب به عنوان یک چالش توجه داشته و اذعان داشته اند که اهمیت این موضوع از آنجایی نشأت می گیرد که ارزش ایجاد شده توسط بوم سازگان آبی نمی تواند به طور جدا در نظر گرفته شود. از دیگر سو، مطالعه های مربوط به تخصیص بهینه منابع

آب شهری بیشتر به ستانده اقتصادی مصرف آب توجه داشته و به ارزش بوم شناختی نپرداخته اند و بدین سبب، هم افزایی بوم شناختی و اقتصادی - اجتماعی مصرف آب نادیده انگاشته شده است. بنابراین، ضرورت دارد که در حین در نظر گرفتن تخصیص منابع آبی، به ارزش بوم شناختی آن نیز توجه ویژه ای معطوف شود (Wang et al., 2023). در خصوص عدم قطعیت نیز باید توجه شود که شرایط ویژه ای برای آن در تخصیص بهینه منابع آبی وجود دارد و در این راستا می توان به موجودیت منابع آبی، تقاضا و توسعه فناوری های مدیریت آب اشاره کرد (Genova & Wei, 2023).

مرور ادبیات پژوهش بیانگر آن است که Li و همکاران (۲۰۲۳) یک روش تخصیص بهینه زمانی - مکانی برای منابع آب آبیاری با در نظر گرفتن سطح آب زیرزمینی ارائه کردند. Calvete و همکاران (۲۰۲۳) یک ابزار تصمیم مبتنی بر بهینه سازی دو سطحی برای تخصیص منابع آبی در سیستم سلسله مراتبی ارائه نمودند. Jain و همکاران (۲۰۲۳) نسبت به ارزیابی الگوریتم های بهینه سازی متاهیورستیک برای تخصیص بهینه منابع آبی سطحی و زیرزمینی برای تولید غلات اقدام کردند. Chen و همکاران (۲۰۲۳) نیز با در نظر گرفتن هم افزایی بین مزایای اقتصادی مبتنی بر سرمایه، آلاینده گی غیرنقطه ای و کارایی استفاده از آب نسبت به بهینه سازی منابع آب و خاک کشاورزی تحت عدم قطعیت تصادفی فازی اقدام کردند. همچنین Li و همکاران (۲۰۲۲) به تخصیص بهینه چندهدفه مبتنی بر توازن مکانی منابع آب ناحیه ای پرداختند. Wang و همکاران (۲۰۲۲) تخصیص بهینه منابع آب ناحیه ای را بر اساس الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات تبریید انجام دادند. Gao و همکاران (۲۰۲۱) به بررسی مورد مدل تخصیص بهینه منابع آب غیرستتی اقدام کردند. Wang و همکاران (۲۰۲۳) نیز نسبت به بررسی تخصیص آب کشاورزی تحت شرایط تغییر آب و هوا بر اساس بهینه سازی الگوریتم گرگ خاکستری در یک ناحیه نیمه خشک چین اقدام کردند. Deng و همکاران (۲۰۲۲) بهینه سازی چندهدفه تخصیص منابع آب در چین را با ترکیب پایداری، عدالت و کارایی مورد مطالعه قرار دادند. Bozorgzadeh و Mousavi (۲۰۲۳) چارچوب توسعه سبز با محدودیت آبی را بر اساس

نقشه منطقه مورد مطالعه (موقعیت جغرافیایی حوزه آبریز سیمینه رود)، در شکل (۱) آورده شده است (فلاحی و جمالی، ۱۳۹۶).



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی حوزه آبریز سیمینه رود

**معرفی مدل طراحی شده:** مدل فازی بازه ای بر مبنای منافع اقتصاد آبی و هزینه ها شامل هزینه مصرف، هزینه مدیریت محیط زیستی، ظرفیت جریان بوم شناختی (شرایط ویژه محیط مورد بررسی یا مورد مطالعه)، منافع بوم شناختی، مولفه های بوم شناختی و همچنین بخش های مختلف متقاضی و مصرف کننده آب طراحی شد. این مدل به شرح زیر قابل توصیف است (Suo et al., 2022):

#### الف) تابع هدف

رابطه (۱) نشان دهنده تابع هدف است.

$$\max = t^{\pm} (0 \leq t \leq 1) \quad (1)$$

$t^{\pm}$  بیانگر درجه عضویت تابع فازی و  $t$  نیز دوره زمانی برحسب ماه را نشان می دهد. درجه عضویت تابع فازی با توجه به فضای عدم قطعیت موجود با استفاده از رابطه (۲) محاسبه می شود.

منابع آب قابل تخصیص از نظر اقتصادی ارایه کردند. Zhang و همکاران (۲۰۲۲) مدلی برای تخصیص بهینه منابع آب همراه با عوامل ارزش بوم شناختی در دالیان چین ارایه کردند. Hao و همکاران (۲۰۲۲) یک مدل محدودیت احتمالی دو مرحله ای فازی بازه ای را برای تخصیص منابع آب رودخانه تینگزیانگ چین تبیین کردند. Luo و همکاران (۲۰۲۳) نسبت به تخصیص بهینه منابع آبی بر اساس مدل GWAS در هاندان چین اقدام کردند. از طرفی، Suo و همکاران (۲۰۲۲) نیز یک مدل برنامه ریزی پویای بازه ای فازی برای مدیریت آب تحت عدم قطعیت با ترکیب برنامه ریزی خطی بازه ای فازی و برنامه ریزی پویا ارایه کردند.

از آنجایی که خلا در نظر گرفتن کمبود آب سطحی در تحقیقات پیشین کم و بیش مشهود است، بنابراین پژوهش حاضر با هدف ارایه یک مدل برنامه ریزی احتمالی فازی بازه ای برای تخصیص منابع آب سطحی با در نظر گرفتن عوامل بوم شناختی و اقتصادی به عنوان تابع هدف رودخانه سیمینه رود واقع در استان آذربایجان غربی به عنوان نمونه موردی انجام یافت.

#### مواد و روش ها

**معرفی منطقه مورد مطالعه:** رودخانه سیمینه رود از رودخانه های مهم حوزه آبریز دریاچه ارومیه است که در جنوب آذربایجان غربی و در غرب حوزه آبریز زرینه رود جریان دارد. طول این رودخانه در حدود ۲۰۰ کیلومتر و مساحت حوزه آبریز آن ۳۵۰۰ کیلومترمربع است. حوزه آبریز سیمینه رود در مختصات جغرافیایی ۴۵ درجه و ۳۵ دقیقه تا ۴۶ درجه و ۲۵ دقیقه شرقی تا ۳۶ درجه و ۱ دقیقه تا ۳۷ درجه و ۵۶ دقیقه شمالی واقع شده است (مسگری و همکاران، ۱۳۹۲). سیمینه رود از شهرهای بوکان و میاندوآب عبور می کند و محدوده مطالعاتی بوکان به طور کامل در حوزه آبریز سیمینه رود واقع شده است. میانگین آبدهی طولانی مدت سیمینه رود در پایین دست آن ۱۹/۲ مترمکعب در ثانیه و در محل سد سیمینه رود برابر با ۱۲/۲ مترمکعب در ثانیه ثبت شده است. تخلیه فاضلاب شهری و زه آب کشاورزی از عمده ترین منابع آلاینده سیمینه رود هستند (احمدآلی و همکاران، ۱۳۹۶).

$$f_1^{\pm} - f_2^{\pm} + f_3^{\pm} - f_4^{\pm} - f_5^{\pm} - f_6^{\pm} \geq f'' - (1 - t'')(f'' - f') \quad (2)$$

ظرفیت جریان بوم‌شناختی را با  $f_4^{\pm}$  نمایش می‌دهند که با استفاده از رابطه (۶) محاسبه شد.

$$f_1^{\pm} = \sum_{j=1}^1 \sum_{k=1}^3 \sum_{m=1}^M WRD_j^{\pm} \pi |\lambda| \quad (6)$$

$WRD_j^{\pm}$ ، قیمت آب پایین‌دستی برحسب ریال و  $\pi$ ، حجم استفاده پایین‌دستی از آب وارده از بالادست و  $\lambda$ ، ضریب تعیین جریان بوم‌شناختی را نشان می‌دهند.

$f_5^{\pm}$  نشان‌دهنده مرحله دوم برای بهینه‌سازی مقدار جریمه مصرف بی‌رویه آب بر حسب ریال است که با استفاده از رابطه (۷) محاسبه شد.

$$f_5^{\pm} = \sum_{h=1}^5 p_h PNB_h^{\pm} DIS_h^{\pm} \quad (7)$$

$h$ : نشان‌دهنده موقعیت هیدرولوژیکی،  $P$ : احتمال سناریوی هیدرولوژیکی و  $PNB_h^{\pm}$ : تامین آبی که نمی‌تواند جبران‌کننده زیان ناشی از هدررفت منبع اصلی آب باشد، را نشان می‌دهند. از طرفی،  $DIS_h^{\pm}$  نرخ بیانگر کمبود آب برحسب مترمکعب است. محدودیت‌های فوق شامل محدودیت‌های اقتصادی هستند.

$f_6^{\pm}$  نماد مولفه‌های بوم‌شناختی است که با استفاده از رابطه (۸) محاسبه شد.

$$f_6^{\pm} = \sum_{t=1} \sum_{m=1} CC_1 L_t A_{mt}^{\pm} + \sum_{t=1} L_t CC_2 \left( \sum_m A_{mt}^{\pm} D + \sum_n S_{nt}^{\pm} Z \right) + \sum_{t=1} \sum_{m=1} L_t CC_3 A_{mt}^{\pm} V_{mt}^{\pm} + \sum_t L_t \left( \sum_m A_{mt}^{\pm} D + \sum_n S_{nt}^{\pm} Z \right) \quad (8)$$

محدودیت‌های بوم‌شناختی با استفاده از روابط (۹) تا (۱۱) محاسبه شدند:

$$A_{mt}^{\pm} - DA_{mt}^{\pm} \geq PRA_{mt}^{\pm} \quad (9)$$

$$S_{nt}^{\pm} - DS_{nt}^{\pm} \geq PRA_{nt}^{\pm} \quad (10)$$

$PRA_{mt}^{\pm}$  بیانگر حداقل مساحت حوضه آبخیز و رودخانه را نشان می‌دهد.

$$\sum_{m=1} (A_{mt}^{\pm} - DA_{mt}^{\pm}) V_{mt}^{\pm} + \sum_{n=1} (A_{nt}^{\pm} - DA_{nt}^{\pm}) V_{nt}^{\pm} \leq IAS_t^{\pm} \quad (11)$$

$f'$  و  $f''$  به ترتیب نشان‌دهنده کم‌ترین و بیش‌ترین مزیت اقتصادی حوضه آبی هستند. مزیت اقتصادی آب که با  $f_1^{\pm}$  نشان داده می‌شود، با استفاده از رابطه (۳) محاسبه شد:

$$f_1^{\pm} = \sum_{j=1}^1 \sum_{k=1}^3 \sum_{m=1}^M NB_{jkmr}^{\pm} ISOPT_{jkm} \quad (3)$$

$j, k$  و  $m$  به ترتیب بیانگر واحد اجرایی، بخش‌های مهم متقاضی آب و طبقات مختلف صنعت در هر بخش هستند. مقدار خروجی به‌ازای هر واحد با  $NB_{jkm}^{\pm}$  و راه‌حل بهینه مصرف آب در اولین مرحله نیز با  $ISOPT_{jkm}$  نشان داده می‌شوند.

$f_2^{\pm}$ ، هزینه مصرف آب برحسب ریال است که با استفاده از رابطه (۴) محاسبه شد:

$$f_2^{\pm} = \sum_{j=1}^1 \sum_{k=1}^3 \sum_{m=1}^M WR_{jk}^{\pm} ISOPT_{jkm} \quad (4)$$

$WR_{jk}^{\pm}$  نشان‌دهنده قیمت هر مترمکعب آب است.  $f_3^{\pm}$ ، هزینه مدیریت محیط‌زیستی آب برحسب ریال است که با استفاده از رابطه (۵) محاسبه شد:

$$f_3^{\pm} = \sum_{j=1}^1 \sum_{k=1}^3 \sum_{m=1}^M \delta_{jk}^{\pm} ISOPT_{jkm} STC_{jkm}^{\pm} \quad (5)$$

$\delta_{jk}^{\pm}$  ضریب تولید آلاینده‌گی برحسب درصد و  $STC_{jkm}^{\pm}$  نیز هزینه کنترل آلاینده‌گی برحسب ریال را نمایندگی می‌کنند.

$n$ : اندیس رودخانه،  $CC_1$ : ارزش فرهنگی و علمی آبخیز و  $CC_2$ : نیز هزینه پروژه آب‌رسانی برحسب ریال را نشان می‌دهند.  $Z$ : سطح نرمال آب در ناحیه مورد مطالعه،  $D$ : حداکثر تفاوت ذخیره آبی،  $L_t$ : طول دوره مورد بررسی،  $V_{mt}^{\pm}$ : ظرفیت ذخیره آبی برحسب مترمکعب در سطح نرمال،  $A_{mt}^{\pm}$ : مساحت حوضه آبخیز برحسب مترمربع،  $S_{nt}^{\pm}$ : مساحت رودخانه برحسب مترمربع و  $CC_3$ : نیز میزان آلاینده‌گی پیکره آبی را نشان می‌دهند.

رابطه (۱۲) مدل سازی شده است:

$$\sum_{m=1}^M ISOPT_{jkm} - DIS_{jkmh}^+ \leq IWUL_{jk}^+ \quad (12)$$

$IAS_t^+$  نشان دهنده حجم منابع آب موجود در حوضه مورد بررسی است. حداکثر نرخ بهره برداری از منابع آبی در

به تفکیک نواحی و بخش ها است. حد فوقانی مصرف آب ناحیه ای با استفاده از رابطه (۱۳) محاسبه شد.

$$\sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^K \sum_{k=1}^K ISOPT_{jkm} - DIS_{jkmh}^+ \geq RWUL_j^+ - (1 - t^+)(RWUL_j^+ - RWUL_j^-) \quad (13)$$

$ECS_j^+$  دامنه بوم شناختی نواحی مختلف حوضه آبخیز را نشان می دهد.

برای محاسبه کل میزان آب تخصیص یافته برای هر ناحیه از حوضه که نمی تواند از حداکثر منابع آبی موجود در حوضه فزونی بگیرد، از رابطه (۱۵) استفاده شد:

$$\sum_{j=1}^I \sum_{k=1}^3 \sum_{m=1}^M ISOPT_{jkm} - DIS_{jkmh}^+ \geq TAWR^+ - (1 - t^+)(TAWR^+ - TAWR^-) \quad (15)$$

(۱۶) مدل سازی شد. باید توجه داشت که غلظت آلاینده ها در حوضه می بایست با قوانین دولت های ملی و محلی منطبق باشد.

$$\sum_{k=1}^2 \sum_{m=1}^M (ISOPT_{jkm} - DIS_{jkmh}^+) C_{jkmr}^+ Y_{jkmr}^+ + (ISOPT_{jkm} - DIS_{jkmh}^+) C_{j3mr}^+ \leq AEP_{jr}^+ \quad (16)$$

حوضه می بایست محقق کننده حداقل نیازهای منبع در آن ناحیه باشد که با استفاده از رابطه (۱۷) محاسبه شد:

$$\Pr\{\sum_{j=1}^J \sum_{m=1}^M PNB(w)_{jkm}^+ (ISOPT_{jkm} - DIS_{jkmh}^+) \geq DSL(w)_{ik}^+ \quad (17)$$

فازی» برای ارزیابی مزایای اقتصادی بهره گرفت. به عنوان بخشی از حل مدل، آن را به خرده مدل هایی با حدود فوقانی و تحتانی تفکیک شدند. برای مثال، خرده مدل حد فوقانی مصرف آب با تبدیل رابطه (۱۷) به روابط (۱۸) و (۱۹) و لحاظ کردن سطوح ریسک و اطمینان به ترتیب برابر با ۰/۰۵ و ۰/۹۵ حل شد.

حداکثر نرخ بهره برداری از منابع آبی برحسب مترمکعب در نواحی مختلف با  $RWUL_j^+$  نشان داده شده است. تخصیص منابع آبی در هر ناحیه حوضه که بیانگر مصرف آب بوم شناختی است نیز با استفاده از رابطه (۱۴) محاسبه شد:

$$\sum_{m=1}^M ISOPT_{jkm} - DIS_{jkmh}^+ \geq ESC_j^+ \quad (14)$$

$TAWR^+$  نشان دهنده بیشینه نرخ بهره برداری از منابع آبی در حوضه برحسب مترمکعب است. غلظت آلاینده ها با توجه به اهداف بوم شناختی و محیط زیستی مسئله با استفاده از رابطه

ضریب تولید آلاینده گی،  $Y_{jkmr}^+$  نرخ حذف آلاینده ها و  $AEP_{jr}^+$  نیز بیشینه نرخ مجاز تخلیه آلاینده ها را نشان می دهند.  $r$  هم بیانگر آلاینده های مختلف منابع آبی است. باید توجه داشت که تخصیص منابع آبی در هر ناحیه از

$DSL_{ik}^+$  حداقل ضروریات توسعه ناحیه ای و  $i$  نیز بخش های مختلف برای تخصیص آب را نشان می دهند.

### ب) حل مدل

در این پژوهش، مدل طراحی شده از چهار روش بهینه سازی شامل «برنامه ریزی بازه ای»، «برنامه ریزی دو مرحله ای»، «برنامه ریزی محدودیت احتمالی» و «برنامه ریزی

$$\sum_{j=1}^{Jj} \sum_{m=1}^M (u_1^+ (ISOPT_{jkm} - DIS_{jkmh}^-) - \phi_1^+) - \phi^{-1}(1 - \theta) \sqrt{\sum_{j=1}^{Jj} \sum_{m=1}^M (a_1^+ (ISOPT_{jkm} - DIS_{jkmh}^-))^2 + (\varepsilon_1^+)^2} \geq 0$$

جریمه  $DIS^-$ ، در مرحله دوم تخصیص منابع آبی قرار دارد. با در نظر گرفتن شرط محدودیت  $ISOPT_{jkm}$  رابطه (۱۹) ایجاد می‌شود:

$$ISOPT_{jkm} = IS_{jkm}^+ + KN_{jkm}(IS_{jkm}^+ - IS_{jkm}^-) \quad (19)$$

$\theta$  نشان‌دهنده ریسک شکست،  $u_i$  بیانگر مقدار مورد انتظار  $DSL_{ik}^+$ ،  $\phi_i$  نشان‌دهنده ارزش مورد انتظار  $DSL_{ik}^+$ ،  $NB_{jkm}^+$  بیانگر واریانس  $NB_{jkm}^+$  و  $\varepsilon_i$  نیز نشان‌دهنده واریانس است. حد فوقانی خرده مدل به حل پارامتر تخصیص منابع آب بهینه  $ISOPT_{jkm}$  در مرحله اول منجر شده و حد تحتانی مقدار

علاوه بر این، خرده مدل حد تحتانی مصرف آب نیز با تبدیل رابطه (۱۷) به (۱۹) حل شد.

جدول ۱. ابعاد مدل برای همه حوضه‌های آبی

مثال	واحد اجرایی	بخش‌های مهم مصرف آب	طبقات مختلف صنعت در هر بخش	دوره زمانی	رودخانه	بخش‌بندی آبی	موقعیت هیدرولوژیکی
۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
۲	۲	۱	۱	۲	۱	۱	۱
۳	۳	۲	۱	۳	۲	۲	۱
۴	۴	۲	۲	۴	۲	۲	۲
۵	۵	۳	۲	۵	۳	۳	۲
۶	۶	۳	۲	۶	۴	۳	۲
۷	۷	۴	۳	۷	۵	۴	۳
۸	۸	۴	۳	۸	۶	۴	۳
۹	۹	۵	۳	۹	۷	۵	۳
۱۰	۱۰	۵	۴	۱۰	۸	۵	۴
۱۱	۱۱	۶	۴	۱۱	۹	۶	۴
۱۲	۱۲	۶	۴	۱۲	۱۰	۶	۴
۱۳	۱۳	۷	۵	۱۳	۱۱	۷	۵
۱۴	۱۴	۷	۵	۱۴	۱۲	۷	۵
۱۵	۱۵	۸	۵	۱۵	۱۳	۸	۵
۱۶	۱۶	۸	۶	۱۶	۱۴	۸	۶
۱۷	۱۷	۹	۶	۱۷	۱۵	۹	۶
۱۸	۱۸	۹	۶	۱۸	۱۶	۹	۶
۱۹	۱۹	۱۰	۷	۱۹	۱۷	۱۰	۷
۲۰	۲۰	۱۰	۷	۲۰	۱۸	۱۰	۷

### نتایج

مثال طراحی شده و در هر مثال ابعاد مسئله نسبت به مسئله قبلی افزایش یافته است.

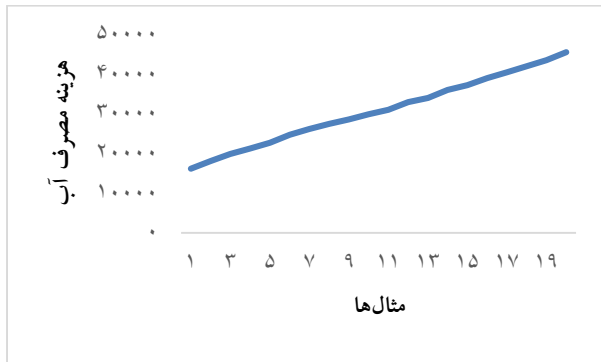
نتایج ابعاد مدل (برای همه حوضه‌های آبی) در جدول (۱) آورده شده است. این جدول شامل ابعاد مدل است که در ۲۰

**توسعه یک مدل برنامه ریزی احتمالی فازی بازه ای برای تخصیص منابع آب سطحی با در نظر گرفتن عوامل ..... / ۹۷**

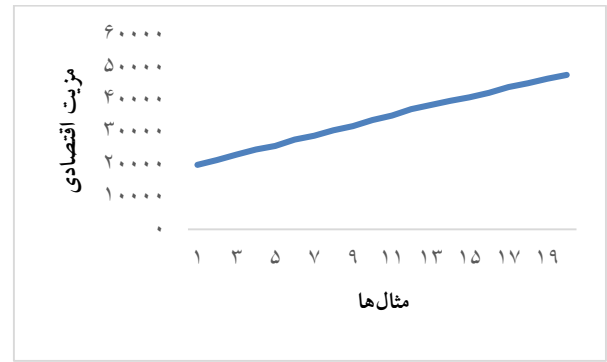
(F1 تا F6) است.

نتایج حل مدل با افزایش ابعاد در نمودارهای (۱) تا (۶)

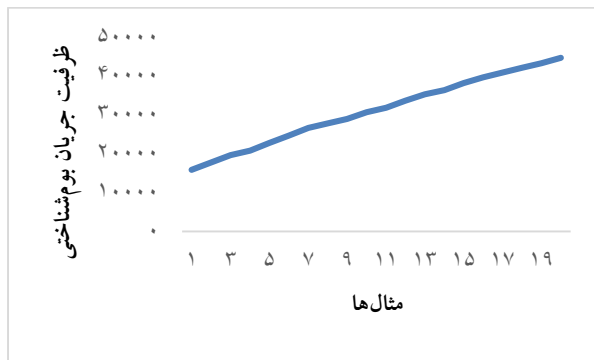
آورده شده که بیانگر اثر افزایش ابعاد بر مقادیر توابع هدف



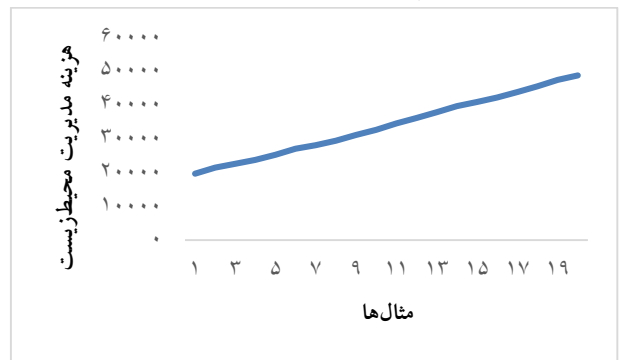
نمودار ۲. نتایج اثر افزایش ابعاد بر  $F_2$  (مقدار هزینه مصرف آب)



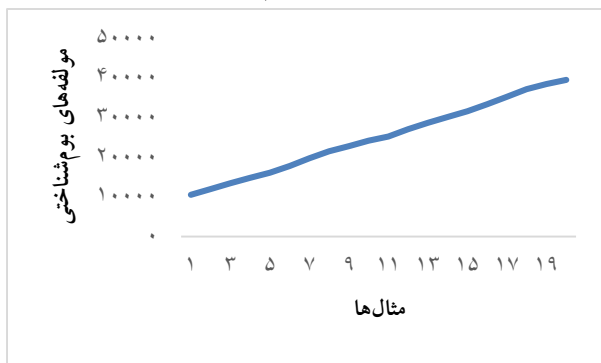
نمودار ۱. نتایج اثر افزایش ابعاد بر  $F_1$  (مقدار کمترین و بیشترین مزیت اقتصاد)



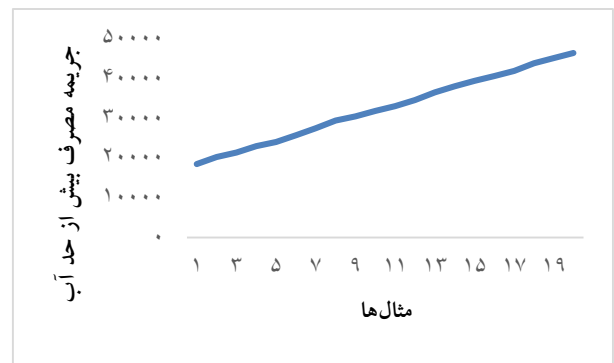
نمودار ۴. نتایج اثر افزایش ابعاد بر مقدار  $F_4$  (ظرفیت جریان بوم‌شناختی)



نمودار ۳. نتایج اثر افزایش ابعاد بر مقدار  $F_3$  (هزینه مدیریت محیط‌زیستی)



نمودار ۶. نتایج اثر افزایش ابعاد بر مقدار  $F_6$  (مولفه‌های بوم‌شناختی)



نمودار ۵. نتایج اثر افزایش ابعاد بر مقدار  $F_5$  (مرحله دوم برای بهینه‌سازی مقدار جریمه مصرف بیش از حد آب)

نتایج تحلیل حساسیت پارامتری که با تغییر در پارامترهای مختلف، اثرات آنها بر مقادیر توابع هدف اندازه‌گیری شده، آورده شده است.

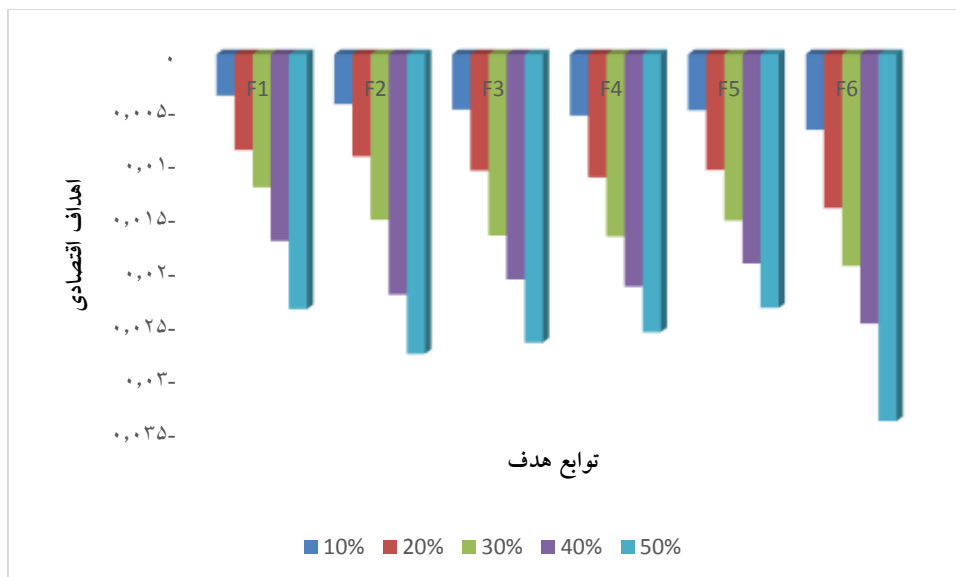
همان‌طور که در نمودارهای (۱) تا (۶) مشاهده می‌شود، توابع هدف  $F_1$  تا  $F_6$  به افزایش ابعاد واکنش نشان داده و در نتیجه توابع هدف نیز افزایش یافته‌اند. نتایج اثر کمبود آب بر مقادیر توابع هدف در نمودار (۷) آورده شده است. در ادامه،



نمودار ۷. نتایج اثر کمیود آب بر مقادیر توابع هدف

اقتصادی و بوم‌شناختی در تخصیص آب در نمودار (۸) آورده شده است.

نتایج ارایه شده در نمودار (۷) بیانگر آن است که با افزایش ۱۰ تا ۵۰ درصدی کمیود آب، همه توابع هدف کاهش یافته‌اند. نتایج بررسی اثر ضریب تولید آلاینده‌گی بر اهداف



نمودار ۸. نتایج بررسی اثر ضریب تولید آلاینده‌گی بر اهداف اقتصادی و بوم‌شناختی

تا ۲/۵ درصد و هدف ششم (هدف بوم‌شناختی) را تا ۳/۵ درصد کاهش داده است. نتایج مربوط به نرخ حذف آلاینده‌ها در نمودار (۹) آورده شده است.

همان‌طور که در نمودار (۸) مشاهده می‌شود، تولید آلاینده‌گی می‌تواند همه اهداف توابع F<sub>1</sub> تا F<sub>6</sub> را تحت تاثیر قرار داده و افزایش ۵۰ درصدی ضریب تولید آلاینده‌گی هدف اول را تا ۲/۵ درصد، هدف دوم را تا ۳/۰ درصد، هدف سوم را تا ۲/۷ درصد، هدف چهارم را تا ۲/۶ درصد، هدف پنجم را

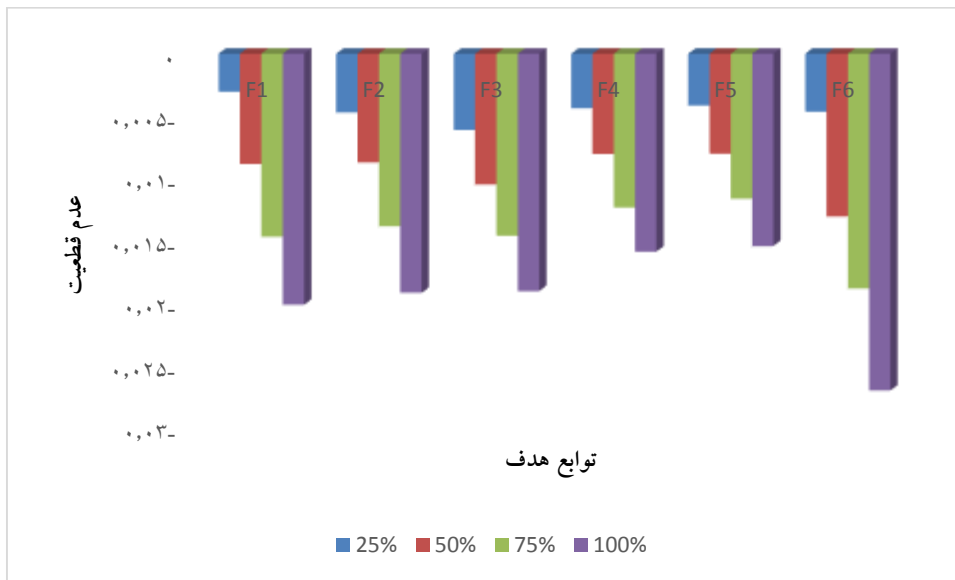




نمودار ۹. نتایج بررسی اثر نرخ حذف آاینده‌ها

بهبود را تجربه کرده‌اند. نتایج بررسی اثر عدم قطعیت بر مقادیر توابع هدف در نمودار (۱۰) نشان داده شده است.

با استناد به نتایج، افزایش ۵۰ درصدی حذف آاینده‌ها می‌تواند ۳/۰ درصد هدف بوم‌شناختی را بهبود بخشیده، ضمن اینکه همه اهداف اقتصادی نیز در بازه ۲/۰ تا ۳/۰ درصد



نمودار ۱۰. نتایج بررسی اثر عدم قطعیت بر مقادیر توابع هدف

### بحث و نتیجه‌گیری

در این پژوهش با توسعه یک مدل برنامه‌ریزی فازی بازه‌ای ضمن در نظر گرفتن حداکثر عدم قطعیت در تخصیص منابع آب سطحی، پارامترها هم به صورت فازی و هم به صورت بازه‌ای مورد ارزیابی قرار گرفتند. از سوی دیگر، عوامل بوم‌شناختی و کمبود آب نیز در مدل لحاظ شدند که در پژوهش‌های پیشین در خصوص برنامه‌ریزی برای تخصیص منابع آب سطحی به ندرت در نظر گرفته شده بودند. به علاوه،

نتایج مندرج در نمودار (۱۰) نشان می‌دهد افزایش عدم قطعیت می‌تواند اهداف مسئله را تنزل دهد. به طوری که با افزایش ۱۰۰ درصدی عدم قطعیت انتظار می‌رود هدف بوم‌شناختی تا ۲/۷ درصد دچار افت شود. ضمن اینکه سایر اهداف نیز در بازه ۱/۵ تا ۲/۰ درصد دچار تغییر شده است.

مسایل تخصیص منابع آبی، Suo و همکاران (۲۰۲۲) و Hao و همکاران (۲۰۲۲) عدم قطعیت در سطح فازی بازه‌ای را در پژوهش خود مورد توجه قرار داده بودند.

هرچند که Li و همکاران (۲۰۲۳) نسبت به ارایه یک مدل تخصیص بهینه منابع آبی در گواناتائوی چین و Calvete و همکاران (۲۰۲۳) نیز نسبت به ارایه یک ابزار تصمیم بهینه‌سازی دو سطحی برای تخصیص منابع آبی در سیستم سلسله مراتبی اقدام کردند، ولی هر دوی این پژوهش‌ها فقط بر بهینه‌سازی تخصیص منابع آبی تمرکز داشتند. این در حالی است که عدم در نظر گرفتن کمبود آب در تحقیقات پیشین کم و بیش مشهود است. در سایر پژوهش‌های مرتبط، Chen و همکاران (۲۰۲۳) بهینه‌سازی تخصیص منابع آب کشاورزی تحت شرایط عدم قطعیت تصادفی فازی را بررسی کردند. Li و همکاران (۲۰۲۲) نیز با هدف دستیابی به تخصیص بهینه چندهدفه مبتنی بر توازن مکانی منابع آب ناحیه‌ای، مساله کمبود آب را در پژوهش خود مدنظر قرار دادند. علاوه بر این، عدم توجه به تفکیک منابع آب به منابع آب سطحی و زیرزمینی در تحقیقات پیشین کم و بیش مشهود است. در این خصوص، فقط Jain و همکاران (۲۰۲۳) با ارزیابی الگوریتم‌های بهینه‌سازی فراابتکاری، بر تفکیک منابع آب به منابع آب سطحی و زیرزمینی برای بهینه‌سازی تخصیص منابع آبی تاکید کردند. از دیگر سو، Li و همکاران (۲۰۲۳) نسبت به بررسی تخصیص بهینه زمانی- مکانی منابع آب آبیاری و Genova و Wei (۲۰۲۳) نسبت به بررسی مدل هیدرولوژیکی اجتماعی برای ارزیابی تخصیص منابع آب با در نظر گرفتن سطح آب زیرزمینی اقدام کردند. Gao و همکاران (۲۰۲۱) نیز مساله کمبود منابع آب زیرزمینی برای تخصیص بهینه منابع آب مورد ارزیابی قرار دادند. در سایر پژوهش‌ها، Chen و همکاران (۲۰۲۳) نسبت به بهینه‌سازی منابع آب و خاک کشاورزی تحت عدم قطعیت تصادفی توسط رویکرد فازی اقدام کردند. Deng و همکاران (۲۰۲۲) نیز متغیرهای پایداری، عدالت و کارایی را در مدل خود برای تخصیص منابع آبی لحاظ کردند که وجه افتراق این پژوهش با مطالعه حاضر است.

این مطالعه، با هدف ارایه یک مدل برنامه‌ریزی احتمالی فازی بازه‌ای برای تخصیص منابع آب زیرزمینی و سطحی با

کمبود آب به صورت یک واقعیت عینی در مدل در نظر گرفته شد و از آنجایی که فقط بر روی مطالعه منابع آب سطحی تمرکز شد، پژوهشگران موفق شدند نتایج دقیق‌تری به دست آورند.

نتایج نشان داد هر شش تابع هدف ( $F_1$  تا  $F_6$ ) به افزایش ابعاد مدل واکنش نشان داده (نمودارهای ۱ تا ۶) و در خصوص همه اهداف، افزایش مقادیر توابع هدف مشاهده شد، بنابراین بر این اساس می‌توان اعتبار مدل را مورد تایید قرار داد. چرا که افزایش مقادیر در پی افزایش ابعاد، نتیجه منطقی حل مدل است. همان‌طور که در نمودار (۷) مشاهده می‌شود، با افزایش نرخ کمبود آب از ۱۰ تا ۵۰ درصد، خروجی مدل برای همه توابع هدف تنزل کرد. به این صورت که سودآوری اقتصادی و شرایط بوم‌شناختی در منطقه با توجه به کمبود و کاهش ظرفیت استحصال آب کاملاً به شکل منفی تحت تاثیر قرار می‌گیرند. بدین طریق می‌توان اذعان داشت که کمبود آب اثر منفی بر شرایط بوم‌شناختی و اقتصادی تخصیص آب را در پی دارد.

افزایش ضریب تولید آلاینده‌گی به وخیم شدن شرایط بوم‌شناختی منجر می‌شود. بر اساس یافته‌ها (نمودار ۸)، افزایش ضریب تولید آلاینده‌گی به کاهش ۲/۵ تا ۳/۵ درصد به ترتیب در اهداف اقتصادی و بوم‌شناختی منجر شد. بنابراین، می‌توان اثر منفی افزایش ضریب تولید آلودگی بر اهداف اقتصادی و بوم‌شناختی را تایید کرد.

نتایج مربوط به نرخ حذف آلاینده‌ها از آب (نمودار ۹) بیانگر اثر مثبت این عامل بر همه توابع هدف بود، به طوری که هدف بوم‌شناسی (هدف ششم) از بالاترین اثرپذیری برخوردار بود و هدف دوم در رتبه دوم قرار داشت. از این رو، می‌توان به اهمیت توجه به عوامل بوم‌شناختی هم‌راستا با عوامل اقتصادی تاکید کرد. بررسی منابع بیانگر آن است که در بین پژوهش‌های مشابه فقط Zhang و همکاران (۲۰۲۲) در مطالعه خود به عوامل بوم‌شناختی در قالب یک تابع هدف توجه داشته‌اند. نتایج بررسی عدم قطعیت فازی بازه‌ای به عنوان یکی از نوآوری‌های مهم این پژوهش بر توابع هدف (نمودار ۱۰) نشان داد که عدم قطعیت، اثر منفی بر مقادیر توابع هدف داشته و با افزایش عدم قطعیت، مقادیر توابع هدف تنزل یافته است. در این خصوص و با توجه به اهمیت ویژه عدم قطعیت در

- economically-allocable water resources. *Scientific Reports*, 13: 5306.
- Calvete, H.I., Galé, C., Iranzo, J.A. and Mateo, P.M. (2023) A decision tool based on bilevel optimization for the allocation of water resources in a hierarchical system. *International Transactions in Operational Research*, 30(4): 1673-1702.
- Chen, Y., Fu, Q., Singh, V.P., Ji, Y., Li, M. and Wang, Y. (2023) Optimization of agricultural soil and water resources under fuzzy and random uncertainties: Synergy and trade-off between equity-based economic benefits, nonpoint pollution and water use efficiency. *Agricultural Water Management*, 281: 108264.
- Deng, L., Guo, S., Yin, J., Zeng, Y. and Chen, K. (2022) Multi-objective optimization of water resources allocation in Han River basin (China) integrating efficiency, equity and sustainability. *Scientific Reports*, 12: 798.
- Gao, Y., Wei, N., Song, X., Gu, J., Yang, F., Zhang, S. and He, S. (2021) Research and realization of non-traditional water resources optimal allocation model. *Proceedings of The International Conference on Water Resource and Environment*, pp: 351-358.
- Genova, P. and Wei, Y. (2023) A socio-hydrological model for assessing water resource allocation and water environmental regulations in the Maipo River basin. *Journal of Hydrology*, 617: 129159.
- HAO, N., SUN, P., HE, W., YANG, L., QIU, Y., CHEN, Y. AND ZHAO, W. (2022) WATER RESOURCES ALLOCATION IN THE TINGJIANG RIVER BASIN: CONSTRUCTION OF AN INTERVAL-FUZZY TWO-STAGE CHANCE-CONSTRAINTS MODEL AND ITS ASSESSMENT THROUGH PEARSON CORRELATION. *WATER*, 14(18): 2928.
- Jain, S., Ramesh, D., Trivedi, M.C. and Edla, D.R. (2023) Evaluation of metaheuristic optimization algorithms for optimal allocation of surface water and groundwater resources for crop production. *Agricultural Water Management*, 279: 108181.
- Li, M., Yang, X., Wu, F. and Babuna, P. (2022) Spatial equilibrium-based multi-objective optimal allocation of regional water resources. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 44: 101219.
- Li, Y., Han, Y., Liu, B., Li, H., Du, X., Wang, Q., Wang, X. and Zhu, X. (2023) Construction and application of a refined model for the optimal allocation of water resources—Taking Guantao County, China as an example. *Ecological Indicators*, 146(2): 109929.
- Luo, Y., Sha, J., Liu, B., Zhang, Y. and Yang, J. (2023) Optimal allocation of water resources based on GWAS Model in Handan, China. *Water*, 15(6): 1090.
- Ranarahu, N. and Dash, J.K. (2022) Computation of multi-objective two-stage fuzzy probabilistic programming problem. *Soft Computing*, 26(1): 271-282.
- Suo, M., Xia, F. and Fan, Y. (2022) A fuzzy-interval dynamic optimization model for regional water

در نظر گرفتن عوامل بوم‌شناختی و کمبود آب در حوضه آبریز زربینه رود انجام یافت. نتایج نشان داد با افزایش عدم-قطعیت، خروجی مدل از نظر اقتصادی و بوم‌شناختی از پاسخ بهینه فاصله گرفته و از این‌رو، اثر منفی عدم قطعیت در بهینه‌سازی و تخصیص بهینه منابع آبی در مدل حاضر به اثبات رسید. نظر به اینکه در نظر گرفتن متغیرهای کمبود آب کارکردی و آلودگی آب نیز می‌تواند در خروجی مدل تاثیرگذار بوده و پاسخ‌های قابل اطمینان‌تری را ارائه دهد، توصیه می‌شود این دو عامل در پژوهش‌های آتی لحاظ گردند.

### سپاسگزاری

این مقاله برگرفته از رساله دکتری تخصصی مهندسی محیط‌زیست مصوب واحد همدان دانشگاه آزاد اسلامی با کد ۱۷۱۳۴۸۰۴۰۵۰۷۶۱۷۷۷۰۰۱۱۱۶۲۶۹۷۶۹۴ است که بدین وسیله نویسندگان از معاونت محترم پژوهش و فن‌آوری دانشگاه برای فراهم کردن امکانات اجرای مطالعه، سپاسگزاری می‌کنند.

### منابع

- احمدآلی، ج.، بارانی، غ.، قادری، ک. و حصاری، ب. (۱۳۹۶) واسنجی و اعتبارسنجی مدل WEAP21 برای حوضه‌های آبریز زربینه رود و سیمینه رود. *نشریه تحقیقات آب و خاک ایران*، ۴۸(۴): ۸۳۹-۸۲۳.
- فلاحی، غ. و جمالی، ل. (۱۳۹۶) پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در حوضه آبریز سیمینه رود بوکان با تلفیق مدل‌های آماری، فرآیند تحلیل سلسله مراتبی و سامانه اطلاعات مکانی. *نشریه علوم و فنون نقشه‌برداری*، ۴(۶): ۱۹۹-۱۸۵.
- مسگری، م.س.، فرج‌زاده‌اصل، م.، خدادادی‌دربان، ا.، هاشمی، ه. و امینی، ج. (۱۳۹۲) پهنه‌بندی کیفیت آلودگی آب رودخانه با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی و سامانه اطلاعات جغرافیایی، مطالعه موردی رودخانه سیمینه رود. *نشریه سنجش از دور و GIS ایران*، ۵(۳): ۱-۱۵.
- Aldieri, L., Brahmi, M., Chen, X. and Vinci, C.P. (2021) Knowledge spillovers and technical efficiency for cleaner production: An economic analysis from agriculture innovation. *Journal of Cleaner Production*, 320: 128830.
- Bozorgzadeh, E. and Mousavi, S.J. (2023) Water-constrained green development framework based on

- arid region of China. *Environmental Science*, 11: e14577.
- Zhang, J., Meng, C., Hu, S. and Li, W. (2022) Optimal Allocation Model for Water Resources Coupled with Ecological Value Factors—A Case Study of Dalian, China. *Water*, 14(2): 266-266.
- resources allocation under uncertainty. *Sustainability*, 14(3): 1096.
- Wang, Z., Tian, J. and Feng, K. (2022) Optimal allocation of regional water resources based on simulated annealing particle swarm optimization algorithm. *Energy Reports*, 8: 9119-9126.
- Wang, Z., Zhao, X., Wang, J., Song, N. and Han, Q. (2023) Agricultural water allocation with climate change based on gray wolf optimization in a semi-

## A fuzzy interval dynamic optimization model development for surface water resources allocation based on ecological and water scarcity factors, the case of Simineh River Basin

Prshang Azari<sup>1</sup>, Soheil Sobhanardakani<sup>2\*</sup>, Mehrdad Cheraghi<sup>3</sup>, Bahareh Lorestani<sup>4</sup> and Amirreza Goodarzi<sup>5</sup>

- 1) Ph.D Candidate in Environmental Engineering, Department of Environmental Engineering, College of Engineering, Hamedan Branch, Islamic Azad University, Hamedan, Iran.
- 2) Professor, Department of the Environment, College of Basic Sciences, Hamedan Branch, Islamic Azad University, Hamedan, Iran. Corresponding Author Email Address: [s\\_sobhan@iauh.ac.ir](mailto:s_sobhan@iauh.ac.ir)
- 3) Professor, Department of the Environment, College of Basic Sciences, Hamedan Branch, Islamic Azad University, Hamedan, Iran.
- 4) Professor, Department of the Environment, College of Basic Sciences, Hamedan Branch, Islamic Azad University, Hamedan, Iran.
- 5) Associate Professor, Department of Civil Engineering, College of Engineering, Hamedan Branch, Islamic Azad University, Hamedan, Iran.

Date of Submission: 2024/08/04

Date of Acceptance: 2024/05/26

### Abstract

Allocation of surface water resources is considered as a solution to deal with water stress, especially in low rainfall areas, but the existence of high uncertainty as well as the lack of water. This allocation has always caused problems and this issue has become one of the main problems of governance in low rainfall areas of the world. Hence, in this research, a fuzzy interval probabilistic planning model was designed for the allocation of surface water resources by considering ecological factors and water scarcity. In so doing, after analyzing and validating the model, parametric sensitivity analysis was performed on the ecological and economic factors in the Simineh River, which is one of the important rivers of the Urmia Lake catchment. The results showed that an increase of 10 to 50 percent of water shortage led to a drop in the values of the objective functions. Also, a 50% increase in the pollution production rate has led to a decrease in all economic and ecological goals from 2.5 to 3.5%, and a 50% increase in the removal of pollutants has also led to a 2-3% improvement in economic goals. In conclusion, it can be argued that the water scarcity is one of the consequences of the pollution of this crucial resource, and for this reason, a significant part of water resources are left out of the allocation cycle. With a 100% increase in uncertainty, the ecological goal has dropped by 2.7% and other goals have changed in the range of 1.5% to 2.0%. Considering the variables of water scarcity and water pollution can also affect the output of the developed model and provide more reliable answers, therefore, it is recommended to consider these two factors in future studies.

**Keywords:** Ecological processes, Fuzzy interval dynamic optimization, Water resources allocation, Water scarcity.