فصلنامه علوم محیطی، دوره شانزدهم، شماره ۲، تابستان ۱۳۹۷

۱۶۵-۱۸۴

توسعه مفهومی عامل مبنا و بهینه‌سازی مبتنی بر الگوریتم ژنتیک در تخصیص منابع آب

امین حسینی اصل[۱]، محمدسعدی مسگری[۲]* و علی‌اکبر متکان[۳]

[۱] گروه سیستم‌های اطلاعات مکانی، دانشکده مهندسی ژئودزی و ژئوماتیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

[۲] گروه سیستم‌های اطلاعات مکانی، دانشکده مهندسی ژئودزی و ژئوماتیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی و قطب علمی فناوری اطلاعات مکانی، تهران، ایران

[۳] مرکز مطالعات سنجش از دور و GIS، دانشکدهٔ علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۹/۰۴ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۵/۱۶

حسینی اصل، ا.، م. س مسگری و ع. ا. متکان. ۱۳۹۷. توسعه مفهومی عامل مبنا و بهینه‌سازی مبتنی بر الگوریتم ژنتیک در تخصیص منابع آب. فصلنامه علوم محیطی. ۱۶ (۲): ۱۸۴-۱۶۵.

سابقه و هدف: در تخصیص منابع آب، تقسیم مناسب منابع یک اصل اساسی است، اما تعیین آن به‌دلیل وجود معیارهای مختلف مشکل است. شبیه‌سازی سامانه‌های منابع آب که بتواند عوامل مؤثر را لحاظ کند و تعامل درونی اجزاء آن را نمایان سازد، اقدامی کارآمد در بهینه کردن تخصیص منابع آب به شمار می‌آید. بررسی‌های مختلف نشان می‌دهد که شبیه‌سازی چندعاملی به تنهایی یا در تلفیق با روش‌های بهینه‌سازی به‌عنوان روشی مؤثر برای درک بهتر پیچیدگی‌های استفاده از آب و کاربران آب به کار می‌آید و الگوریتم ژنتیک نیز یکی از روش‌های هوشمند تکاملی در بهینه‌سازی مسائل پیچیده غیرخطی است.

مواد و روش‌ها: چارچوب مفهومی مدل تخصیص آب پیشنهادی، تعامل عرضه و تقاضای آب با توجه به عوامل اقتصادی را در یکی از زیرحوضه‌های کویر مرکزی ارائه کرده است که مهمترین منابع آب آن را آب‌های زیرزمینی تشکیل می‌دهند. از مهمترین وظایف تخصیص‌دهنده آب، تخصیص آب به شکل بهینه به بخش‌های مختلف است. این کار با توجه به تقاضای آب موردنیاز هر یک از عامل‌های مصرف‌کننده انجام می‌شود. عامل کشاورزی که بیشترین سهم آب را به خود اختصاص می‌دهد، به قسمت‌های جزئی‌تری تقسیم می‌شود و در هر یک از محصولات به تنوع الگوی کشت، شرایط کم آبیاری و ... در جهت بهبود وضع اقتصادی و تخصیص بهینه منابع آب با توجه به داده‌ها و آمار در دسترس لحاظ می‌شود. در بخش صنعت، تولیدات و توابع آن در قالب یک تابع دربرگیرنده مجموع بنگاه‌ها مطرح می‌شود و در بخش شرب نیز، به‌دلیل اهمیت ویژه تأمین آب این بخش، کل مقدار آب مورد نیاز محاسبه و به‌طور کامل به این بخش اختصاص می‌یابد.

نتایج و بحث: در منطقه مورد بررسی، بر اساس معیار بیشینه کردن سود اقتصادی و با توجه به منابع آب در دسترس، کشت نباتات علوفه‌ای

*Corresponding Author. *E-mail Address*: mesgari@kntu.ac.ir

و روغنی بهینه نیست. از سویی دیگر، در محصولات گروه غلات، به‌دلیل کم‌آبیاری و در محصولات باغی نیز به‌دلیل سودآوری بالای این محصولات سطح کشت بالا حفظ شده است و پس از غلات، درختان مثمر از قبیل: پسته، انار، انگور و خرما دارای بیشترین سطح هستند. بنابراین در بخش کشاورزی، بهره‌گیری از کم‌آبیاری در محصولات خانواده غلات و تغییر الگوی کشت با حذف محصولات دو خانواده نباتات علوفه‌ای و روغنی، منجر به بهینه شدن تخصیص آب می‌شود. در بخش صنعت، نکته حائز اهمیت، تأثیر تغییر تکنولوژی در کاهش تقاضای آب است و به‌دلیل سودآوری اقتصادی بالاتر این بخش نسبت به بخش کشاورزی، تخصیص بهینه در راستای افزایش سودآوری اقتصادی منجر به تخصیص بیشتر آب در مقایسه با مصرف فعلی شده است. از دیدگاه مدل توسعه‌یافته نیز، ارزیابی نتایج بهینه‌سازی در الگوریتم ژنتیک نشان داد که سرعت همگرایی در تکرارهای اولیه زیاد و به‌تدریج کاهش می‌یابد تا به همگرایی برسد و این همگرایی تابع بهینگی به‌تدریج حاصل می‌شود. همچنین واریانس کم تغییرات جواب نهایی الگوریتم در بازه صفر و یک، حاکی از ثبات مناسب این الگوریتم است.

نتیجه‌گیری: استفاده از چارچوب پیشنهادی در منطقه مورد بررسی در افزایش سودآوری اقتصادی حاصل از تخصیص بهینه منابع آب به بخش‌های مختلف تأثیرگذار است و بر اساس آن، سطح زیرکشت و میزان تخصیص آب بهینه برای مصارف مختلف تعیین شده است. نتایج حاکی از گرایش به سمت تولید محصولات باغی پربازده به جای محصولات کشاورزی کم‌بازده و تخصیص بیشتر آب به بخش صنعت است.

واژه‌های کلیدی: تخصیص آب، بهینه‌سازی، مدل عامل مبنا.

مقدمه

در دهه‌های اخیر، رشد سریع جمعیت و سکونتگاه‌ها، صنعتی شدن و افزایش رقابت برای دسترسی به منابع طبیعی کمیاب، مدیریت بهینه منابع آب را با چالش‌های جدی مواجه ساخته است. در این راستا، بهبود راندمان مصرف آب با استفاده از بهینه‌سازی تخصیص منابع آب به عنوان یک راهکار اساسی برای حل کمبود و توزیع مناسب منابع آب در نظر گرفته می‌شود. تخصیص آب عبارت است از تعیین میزان آبی که از منابع آب سطحی و زیرزمینی، به منظور تأمین نیازهای گوناگون در محدوده جغرافیایی معین، در نظر گرفته می‌شود. میزان آب اختصاص‌یافته به نیازهای مختلف، بر اساس اولویت و با توجه به محدودیت‌های کمی، کیفی و امکان جابه‌جایی تخصیص از یک مصرف به مصارف دیگر تعیین می‌شود (Kiafar *et al.*, 2011). به عبارت دیگر، در تخصیص آب، تقسیم مناسب آن یک اصل اساسی است که به دلیل وجود معیارهای مختلف، تعیین آن مشکل است و در این راستا شبیه‌سازی سامانه‌های منابع آب که بتواند عوامل مؤثر را لحاظ کرده و تعامل درونی اجزاء آن را نمایان سازد، اقدامی کارآمد در بهینه کردن تخصیص منابع آب به شمار می‌آید (Schluter *et al.*, 2005). از سوی دیگر، با توجه به تأثیر معیارهای متنوع کمی و کیفی در تخصیص آب، استفاده از تکنیک‌های بهینه‌سازی به معنای رسیدن به هدف مطلوب بر اساس محدودیت‌ها و قیدهای در نظر گرفته‌شده برای آن، در چارچوب روش‌های شبیه‌سازی مکانی همواره توجه محققان را به خود جلب می‌کند.

افزایش تعداد حقابه‌بران و تنوع آنها در بیشتر حوضه‌های آبریز، موجب شده است که تخصیص بهینه آب، بیش از پیش اهمیت پیدا کند. در این راستا، مدل‌های ریاضی تخصیص می‌توانند نقش مؤثری ایفا کنند. مدل‌های ریاضی مورد استفاده در تخصیص آب، به سه دسته: بهینه‌سازی[1]، شبیه‌سازی[2] و بهینه‌سازی-شبیه‌سازی قابل تقسیم هستند. اساس مدل‌های بهینه‌سازی بر کمینه یا بیشینه کردن یک تابع هدف است که بر متغیرهای تصمیم و قیودات از پیش تعیین‌شده، استوار هستند. مدل‌های شبیه‌سازی با استفاده از مجموعه‌ای از رابطه‌ها و پارامترها به پیش‌بینی رفتار سیستم می‌پردازند. مدل‌های آخر نیز به‌طور همزمان بهینه‌سازی و شبیه‌سازی را در یک سیستم منابع آب به انجام می‌رسانند. در انتخاب مدل مناسب، توجه به قابلیت‌ها و داده‌های در دسترس و ساختار مدل اهمیت پیدا می‌کند. به‌علاوه مقایسه و ارزیابی آنها، با توجه به اهداف مدیریتی بسیار ضروری است.

Wang *et al.* (2015) در تحقیق خود مدل جدیدی را برای بهینه‌سازی تخصیص منابع آب در یک حوضه آبریز ارائه کردند. در این تحقیق یک مدل برنامه‌ریزی چندهدفی و با چند محدودیت ایجاد شده و در آن اثر کاربری اراضی به‌عنوان یک محدودیت بر تخصیص آب لحاظ شد. Zechman Berglund (2015) در مقاله خود به معرفی جامع مدل‌سازی عامل مبنا برای بررسی سیستم‌های منابع آب می‌پردازد. همچنین دو بررسی موردی در زمینه‌های تقاضای آب شهری و مدیریت کیفیت آب، توسط مدل‌سازی سیستم منابع آب چندعاملی انجام شده است.Mashhadi Ali *et al.* (2014) در تحقیق خود مدلی را برای شبیه‌سازی تعاملات بین سیستم‌های مهندسی و اجتماعی ایجاد کردند. این مدل عامل مبنا برای شبیه‌سازی رفتار مصرف‌کنندگان آب خانگی استفاده شد و با مجموعه‌ای از مدل‌های تکنیکی مشتمل بر تصویر تغییر اقلیم، مدل هیدرولوژیکی حوضه آبریز و مدل منابع آب همراه بود. Akhbari and Grigg (2013) یک مدل عامل مبنا را برای مدیریت مناقشات منابع آب ارائه کردند که در آن رفتارها و تعاملات بخش‌های مختلف مدل‌سازی شده است. مدل ارائه‌شده، مدیران را قادر به ارزیابی سناریوهای مدیریتی و فهم نتایج تصمیم‌هایشان بر بهره‌برداران مختلف و رفتارهای ایشان کرده است. Wenjuan *et al.* (2009) بیان کردند که با توسعه اقتصادی و اجتماعی، موضوع تخصیص بهینه منابع آب به‌طور فزاینده‌ای جنبه‌های مختلف سیستم‌های پیچیده اعم از مقیاس بزرگ، چندهدفی بودن، چندعاملی بودن، چندبعدی بودن، غیرخطی بودن، پویابودن، تکاملی بودن و نظایر این‌ها را ارائه می‌دهد که این مشخصات، تخصیص بهینه منابع آب بر اساس مدل‌های ریاضی عددی محض را با مشکلات و محدودیت‌هایی مواجه می‌سازد. این پژوهش، مسئله پیچیده تخصیص بهینه منابع آب را با استفاده از مفهوم سیستم‌های چندعاملی منابع آب ارائه داده است. Kumar and Reddy (2007) نتایج بهتری را با استفاده از الگوریتم ژنتیک نسبت به PSO در استخراج سیاست‌های بهره‌برداری از مخازن چندمنظوره در هندوستان به دست آوردند. Berger *et al.* (2007) در پژوهشی در شیلی، به‌دلیل پیچیدگی‌های اقتصادی-اجتماعی و هیدرولوژیکی استفاده از آب در حوضه‌ها و زیرحوضه‌های آبریز، از شبیه‌سازی چندعاملی به‌عنوان یک روش مؤثر و امیدوارکننده برای فهم بهتر پیچیدگی‌های مرتبط با استفاده از آب و کاربران آب در حوضه آبریز استفاده کرده‌اند. نتایج این تحقیق، فشارهای ناشی از تغییرات تکنولوژیک و بازارهای غیررسمی اجاره را بر درآمد خانوار و راندمان مصرف آب نشان داد. Kumar *et al.* (2006) برای بهینه کردن عملکرد یک مخزن سد تک‌منظوره برای آبیاری گیاهان زراعی، با استفاده از تابع هدف حداکثر کردن عملکرد نسبی گیاهان، الگوریتم ژنتیک را با برنامه‌ریزی خطی مقایسه کردند و تفاوت چندانی بین عملکرد این دو روش در توزیع آب بین مراحل مختلف رشد به دست نیاوردند. Raju and Kumar (2004) تحقیقی در مورد استفاده از الگوریتم ژنتیک در برنامه‌ریزی آبیاری و توسعه الگوی کشت مؤثر و بهینه و در راستای افزایش سود یک پروژه آبیاری انجام دادند. نتایج به‌دست‌آمده از الگوریتم ژنتیک با روش برنامه‌ریزی خطی مقایسه و بسیار نزدیک مشاهده شد. به‌طوری که می‌توان از الگوریتم ژنتیک به‌عنوان یک مدل بهینه‌سازی مؤثر برای برنامه‌ریزی هر سیستم آبیاری استفاده کرد. Saeidian (2015) در پژوهش خود، چارچوبی را برای طراحی یک سیستم یکپارچه و پویا به‌منظور تخصیص بهینه منابع آب به زمین‌های کشاورزی با استفاده از عامل و الگوریتم‌های فراابتکاری ارائه کرده است که تمرکز آن بر برنامه‌ریزی منابع آب برای مصرف‌کنندگان کشاورزی در مقیاس قطعات زراعی است. Afshar et al. (2016) مدل‌های عامل بنیان را به‌عنوان راهکاری کارآمد و ابزاری مکمل در کنار دیگر دیدگاه‌ها نظیر مسائل اقتصادی در حل مناقشات مرتبط با منابع محدود در مدیریت منابع آب با دیدگاه توسعه پایدار معرفی کرده و به ساختار کلی این مدل‌ها، اهمیت آنها در مدیریت

منابع آب، کاربردها، محدودیت‌ها و مزیت‌ها اشاره کرده‌اند. Kiafar *et al*. (2011) درباره بهینه‌سازی تخصیص آب در طول فصل زراعی در شبکه آبیاری و زهکشی صوفی‌چای تحقیق کردند و نشان دادند که مقادیر آب تخصیص‌یافته واقعی به مراتب بیشتر از مقادیر بهینه است. Nabinejhad and Mousavi (2011) تلفیق الگوریتم بهینه‌سازی PSO و مدل شبیه‌سازی شبکه حوضه آبریز MODISM را برای بهینه‌سازی تخصیص منابع آب حوضه آبریز اترک به‌کار گرفته و نتیجه گرفتند که در نظر گرفتن شرایط هیدرولوژیکی سبب بهبود توزیع کمبودهای حوضه آبریز در گام‌های مکانی و زمانی می‌شوند. در تحقیق دیگری توسط Mirfendereski and Mousavi (2011) به‌منظور بهینه‌سازی منابع آب حوضه‌ای، الگوریتم بهینه‌سازی PSO را با مدل جامع شبیه‌سازی حوضه آبریز MODISM تلفیق و نسبت به ساخت یک مدل جایگزین از نوع ماشین‌های بردار پشتیبان به جای مدل MODISM و توسعه یک فرامدل که در آن ارزیابی تابع هدف با استفاده از مدل تقریبی جایگزین استفاده می‌شود، اقدام کردند و با توسعه مدل PSO-MODISM~SVM حل مسئله تخصیص منابع آب حوضه آبریز اترک را مورد بررسی قرار داده‌اند. نتایج حاصل از فرامدل‌سازی بر مبنای استفاده از SVM از منظر کیفیت جواب‌ها و میزان بهینگی و نیز بار محاسباتی بیانگر عملکرد مطلوب این روش است.

بررسی مطالعات و تحقیقات در سال‌های اخیر حاکی از آن است که افزایش تعداد حقابه‌بران و تنوع آنها در بیشتر حوضه‌های آبریز، موجب توجه و گسترش تحقیقات خارجی و داخلی در زمینه روش‌های مختلف مدل‌سازی تخصیص منابع آب شده است. در این باره، بسته‌های نرم‌افزاری متعددی بر مبنای مدل‌های ریاضی تخصیص ایجاد شده‌اند. مدل‌های ریاضی با وجود قابلیت بسیار، مدل‌های شبیه‌سازی هستند که از الگوریتم‌های بهینه‌سازی تک‌دوره‌ای در هر گام زمانی برای مسئله تخصیص بهره می‌برند و به‌طور مستقیم قادر به بهینه‌سازی بلندمدت بهره‌برداری یا مؤلفه‌های طراحی سیستم نیستند. از جنبه دیگر، مدل‌های شبیه‌سازی حوضه‌ای دربرگیرنده انواع فرآیندهای طبیعی، اقتصادی-اجتماعی و اداری، با وجود قابلیت‌های بالا در مدل‌سازی و ارزیابی عملکرد سیستم منابع آب، از مشکل زمان محاسباتی زیاد رنج می‌برند. از طرفی افزودن جنبه‌های مختلف فرآیندی در درون مدل شبیه‌سازی اگرچه جامعیت مدل و سیستم پشتیبان تصمیم‌گیری را افزایش می‌دهد، اما به‌طور قابل‌توجهی بر بار محاسباتی آن نیز خواهد افزود. همچنین، جنبه‌های مختلف قابل بررسی در تخصیص بهینه منابع آب اعم از: مقیاس بزرگ، چندهدفی بودن، چندعاملی بودن، چندبعدی بودن، غیرخطی بودن، پویا بودن، تکاملی بودن و ... استفاده از مدل‌های ریاضی محض را دچار محدودیت کرده است. بررسی‌هایی که در زمینه بهره‌گیری از سیستم‌های چندعاملی در مدیریت و برنامه‌ریزی منابع آب صورت گرفته است، حاکی از آن است که شبیه‌سازی چندعاملی به تنهایی یا در تلفیق با روش‌های بهینه‌سازی به‌عنوان یک روش مؤثر در جهت درک بهتر پیچیدگی‌های مرتبط با استفاده از آب و کاربران آب قابل بهره‌برداری است. از میان الگوریتم‌های بهینه‌سازی نیز، به الگوریتم ژنتیک در بسیاری از تحقیقات به‌عنوان یکی از روش‌های هوشمند تکاملی در بهینه‌سازی مسائل پیچیده غیرخطی توجه شده است که دامنه مطالعات انجام شده با این روش در زمینه هیدرولوژی و مدیریت منابع آب محدود بوده است (Kiafar et al., 2011). از این‌رو در این تحقیق، توسعه مفهومی یک مدل عامل مبنا و تلفیق آن با الگوریتم فراابتکاری ژنتیک در زمینه تخصیص منابع آب به مصارف مختلف مدنظر قرار گرفته است. بر اساس این در بخش‌های بعدی تحقیق، ابتدا به معرفی مدل مفهومی تحقیق در قسمت مواد و روش‌ها پرداخته شده و ضمن معرفی منطقه مورد بررسی، نحوه مدل‌سازی تخصیص آب با معرفی عامل‌های مختلف و تعاملات آنها، و نیز نحوه

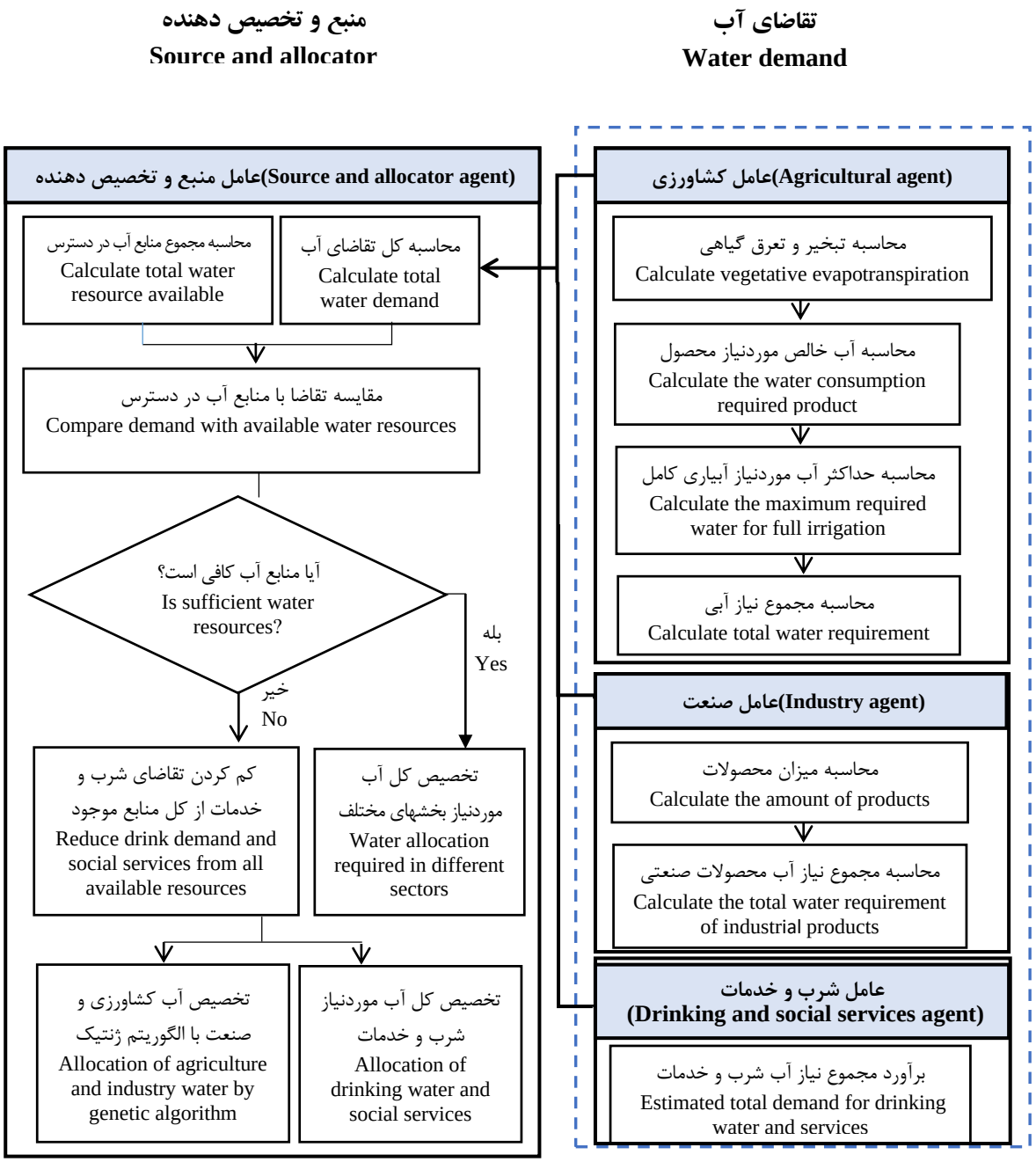
بهینه‌سازی تخصیص با بهره‌گیری از الگوریتم ژنتیک ارائه شده است. در ادامه نتایج حاصل از اجرای مدل در منطقه مورد بررسی ارائه شد و مورد بحث و ارزیابی قرار گرفت و در نهایت نتایج و پیشنهادات مرتبط ارائه شدند.

مواد و روش‌ها

در روش‌های متداول مدیریت منابع آب، برای مقابله با مشکلات تخصیص، کل حوضه آبریز به‌صورت یک سیستم مدل می‌شود و مقدار آب تخصیص‌یافته به‌عنوان یک متغیر تصمیم، در یک مدل ریاضی بهینه‌سازی می‌شود. اما در جهان واقعی هر کاربر آب، متناسب با منافع شخصی خود (و نه الزاماً سود کل سیستم) تصمیم‌گیری می‌کند. در این صورت با افزایش تعداد متغیرهای تصمیم‌گیری، مسئله پیچیدگی خاصی پیدا می‌کند و مدل‌های عامل مبنا با قابلیت شبیه‌سازی مؤثر جنبه‌های مختلف بازیگران و کاربران منابع آب قادرند تا با در نظرگرفتن بازتاب صحیح جهان واقعی، پیچیدگی‌ها و سختی محاسبات را نیز کاهش دهند. از جنبه مفهومی نیز، چارچوب عامل مبنا زمانی ضروری است که تغییر وضعیت اجزاء سیستم، حداقل به‌طور جزیی تابع تصمیم‌گیری اجزاء موجود در سیستم باشد. در این مدل‌ها، یک عامل به‌عنوان یک واحد مستقل در یک سیستم مشخص می‌شود که می‌تواند با دیگران تحت مجموعه‌ای از رفتارها رابطه داشته باشد. عاملان در این مدل‌ها می‌توانند طوری تعیین شوند که تنها با هدف منافع خودشان آب را مصرف کنند. تصمیمات مصرف‌کنندگان می‌تواند تحت‌تأثیر تصمیم همسایگان قرار گیرد که به‌وسیله محدودیت‌های فیزیکی و قوانین مدیریتی محدود می‌شوند.

مطابق با شکل (۱)، چارچوب مفهومی مدل تخصیص آب پیشنهادی در این تحقیق تلاش دارد تا در یک چارچوب یکپارچه، تعامل عرضه و تقاضای آب را با توجه به عوامل اقتصادی در نظر گیرد. بنابراین در فرایند تخصیص آب، عرضه‌کننده آب تحت‌تاثیر محدودیت دسترسی به منابع آب و بیشینه‌سازی درآمد حاصل از تأمین آب موردنیاز متقاضیان مختلف برای تخصیص آب تصمیم می‌گیرد.

در این مدل مفهومی، عامل‌های اصلی مورد نظر در تخصیص آب تعیین شده‌اند. این عامل‌ها در تحقیق حاضر به اراضی کشاورزی، صنایع، خدمات و منبع آب که خود نقش تخصیص‌دهنده آب را نیز ایفا می‌کنند، تقسیم‌بندی شده‌اند. بر اساس این، برای هر یک از عامل‌ها وظایف و رفتار مورد نظر مدل‌سازی شده است. از مهمترین وظایف تخصیص‌دهنده آب، تخصیص آب به شکل بهینه به بخش‌های مختلف است. این موضوع باید با توجه به تقاضای آب موردنیاز هر یک از عامل‌های مصرف‌کننده و متقاضی آب صورت پذیرد. با توجه به اینکه بیشترین سهم مصرف‌کننده منابع آب در مناطق مختلف را بخش کشاورزی به خود اختصاص می‌دهد، می‌توان آن را به قسمت‌های جزئی‌تری نیز تقسیم کرد و در هر یک از محصولات این بخش به تنوع الگوی کشت، شرایط آبیاری کم و ... در جهت بهبود وضع اقتصادی و تخصیص بهینه منابع آب به داده‌ها و آمار در دسترس توجه کرد. در تحقیقات مختلف مشخص شده است که اعمال استراتژی کم‌آبیاری و کاهش سطح در شرایط کم‌آبی منجر به درآمد اقتصادی بالاتری می‌شود. در این شرایط گیاه با سطح معیینی از تنش آبی طی یک دوره خاص یا در سرتاسر فصل رشد بدون کاهش معنی‌داری از عملکرد روبه‌رو می‌شود. در بخش صنعت، تولیدات و توابع آن در قالب یک تابع در بر گیرنده مجموع بنگاهها مطرح شده و در بخش شرب نیز، به‌دلیل اهمیت ویژه تأمین آب این بخش، کل مقدار آب مورد نیاز محاسبه و پس از کسر از کل منابع آب موجود، به‌طور کامل به این بخش اختصاص می‌یابد. از آنجاکه در این تحقیق تخصیص آب به شکل کلان به بخش‌های کشاورزی، صنعت و شرب با توجه به نیاز و تقاضای هر یک از این بخش‌ها مد نظر قرار گرفته است، از مشخصات سطوح خرد هر بخش مانند: مساحت اراضی مختلف کشاورزی، نوع صنایع و ... صرف‌نظر شده است.



شکل ۱- مدل مفهومی تحقیق

Fig. 1- Conceptual model of research

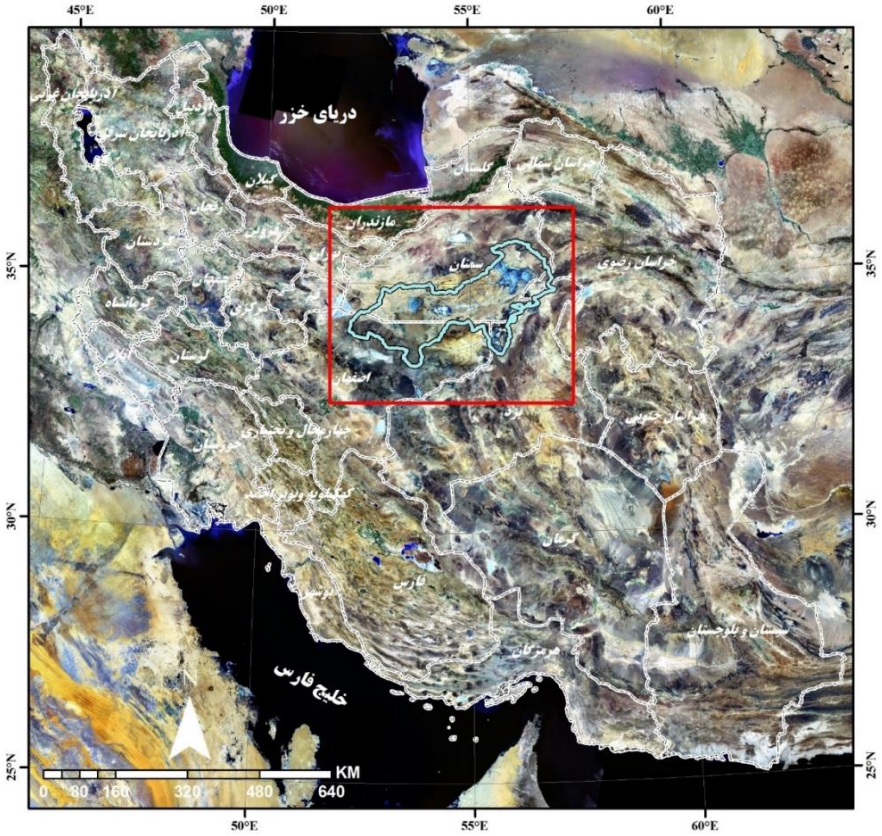
همچنین، در این تحقیق با توجه به میزان آب مصرفی بخش‌های موردنظر، توابع هدف غیرخطی تعریف و محدودیت‌ها (قیدها)ی میزان کل آب قابل دسترس و میزان کل اراضی سطح زیر کشت در بخش کشاورزی مد نظر قرار گرفته است. بنابراین، به‌دلیل روند غیرخطی تابع هدف و قیدهای اعمال‌شده، از الگوریتم فرابتکاری ژنتیک نیز برای بهینه‌سازی استفاده شده است.

درباره عامل عرضه‌کننده آب که خود نیز محاسبه‌کننده میزان تخصیص نیز است، متناسب با محاسبه مجموع آب در دسترس از منابع آب زیرزمینی

(در حال حاضر به‌عنوان تنها منبع تأمین آب منطقه مورد بررسی) که توسط این عامل انجام می‌شود و مقایسه آن با تقاضای آب بخش‌های مختلف، درباره نحوه تخصیص تصمیم‌گیری می‌شود. در این زمینه، میزان آب بر اساس دبی خروجی از چاه‌ها و سایر منابع قابل‌محاسبه است که بر اساس بررسی‌های انجام‌شده، متوسط ماهیانه معادل ۴۲۷۷ متر مکعب است.

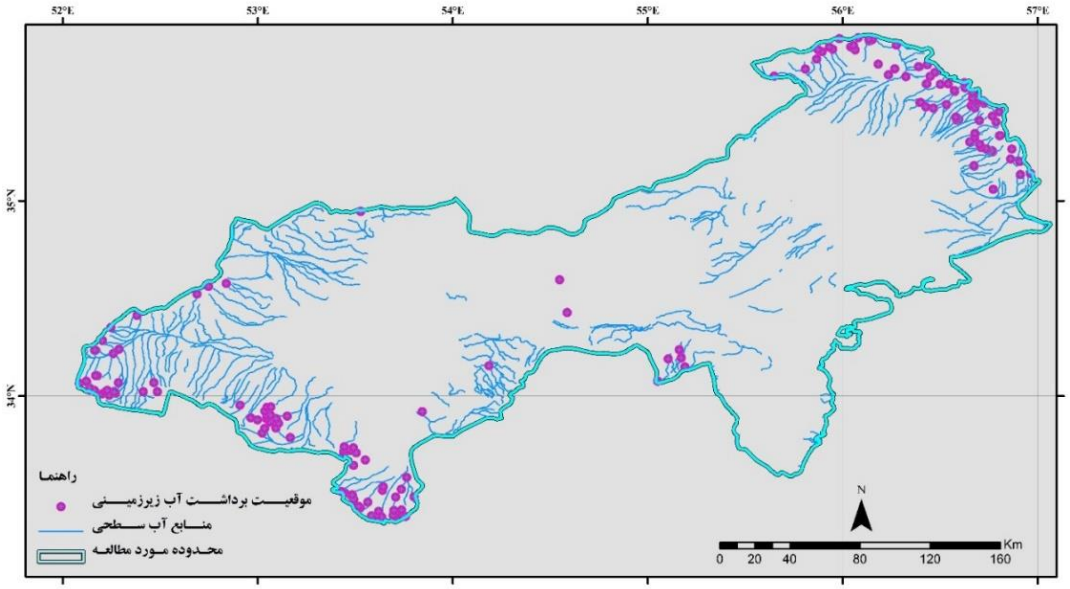
معرفی منطقه مورد بررسی و آماده‌سازی داده‌ها

منطقه مورد بررسی، یکی از زیرحوضه‌های کویر مرکزی است که با کد ۲-۴-۵-۸ در تقسیم‌بندی شرکت جاماب مشخص شده است. مساحت تقریبی این محدوده معادل ۵۳۰۰۰ کیلومتر مربع و بخش اعظم آن در استان‌های سمنان و اصفهان واقع می‌شود (شکل ۲). بر اساس داده‌ها و آمار موردنیاز تحقیق حاضر که از گزارشات طرح جامع آب کشور، مطالعات شناسایی منابع آب زیرزمینی محدوده مطالعاتی، پایگاه اطلاعات وزارت جهادکشاورزی و مرکز آمار ایران تهیه شده است، به‌دلیل شرایط خشک حاکم بر منطقه، مهمترین منابع آب حوضه، به منابع آب زیرزمینی اعم از چاه، چشمه و قنات محدود می‌شود (شکل ۳). رودهای موجود در حوضه، اکثراً فصلی بوده و رودهای اصلی نیز در حاشیه غربی، شمال شرقی و جنوب حوضه، از ارتفاعات موجود در منطقه سرچشمه گرفته و بخش عمده‌ای، به حوضه‌های مجاور سرازیر می‌شوند و به‌عنوان منابع آب برای حوضه‌های مجاور قابل محاسبه هستند. مطابق با پراکنش منابع آب زیرزمینی، حداکثر میزان آب قابل برداشت از این منابع به میزان تقریبی ۱۹۵ میلیون متر مکعب در سال است. در میان انواع مصارف آب منطقه مورد بررسی، بخش کشاورزی با حدود ۱۷۳/۵ میلیون متر مکعب و ۸۹ درصد، بیشترین برداشت را به خود اختصاص داده و در بخش‌های شرب و صنعت به ترتیب ۸/۸ و ۲/۲ درصد مصرف آب گزارش شده است.



شکل ۲- نقشه موقعیت محدوده حوضه آبریز مورد بررسی

Fig. 2- Location map of the catchment area studied



شکل ۳- نقشه موقعیت منابع آب محدوده مورد بررسی
Fig. 3- Location map of the water resources of the study area

مدل‌سازی تخصیص آب

همان‌طور که در شکل (۱) چارچوب مفهومی تحقیق ارائه شده است، سیستم عامل مبنای طراحی‌شده دارای چهار نوع عامل است: اراضی کشاورزی، صنایع، خدمات و منبع آب که خود نقش تخصیص‌دهنده آب را نیز برعهده دارد. در واقعیت عامل‌های مختلف در سطح محدوده مورد بررسی توزیع شده‌اند. اما به‌دلیل محدودیت دسترسی به نقشه‌ها و اطلاعات دقیق وضعیت تنوع کشت اراضی کشاورزی و صنایع مختلف، محدوده‌های کلی اراضی کشاورزی، صنایع و خدمات تعیین شد. بر اساس مطالعات موجود، درصد نیاز آبی مشخص شد و بر اساس منابع آب موجود که به‌صورت تجمعی و واحد در نظر گرفته شده است، میزان تخصیص از آب مشخص شده است. بدیهی است در صورت وجود داده‌ها و اطلاعات دقیق و تفصیلی‌تر، مدل قابل تعمیم به عوامل جزئی‌تر در هر بخش نیز است. عامل منبع که به‌صورت تجمعی، میزان آب موجود را برآورد می‌کند، خود نقش برنامه‌ریزی و تعیین میزان تخصیص به مصارف مختلف را نیز عهده‌دار است. بر اساس این، عامل‌های مختلف، ابتدا آب موردنیاز خود را محاسبه و به عامل منبع، اطلاع می‌دهند. عامل منبع میزان آب موجود را که بر اساس مجموع دبی خروجی از چاه‌ها، قنات‌ها و ... محاسبه کرده است، با تقاضای آب عامل‌های مختلف مقایسه می‌کند. در صورت کمبود آب، عامل منبع به‌عنوان عامل تخصیص‌دهنده، میزان تقاضای شرب و خدمات را ابتدا به عامل‌های مربوطه تخصیص و از کل منابع کسر می‌کند. سپس مابقی منابع آب موجود را به عامل‌های کشاورزی و صنعت طوری تخصیص می‌دهد که سود اقتصادی حاصل از کل تخصیص‌ها، بیشینه شود. محیط سیستم عامل مبنای طراحی شده می‌تواند زمین منطقه مورد بررسی باشد. اما از آنجاکه در سیستم عامل مبنای طراحی‌شده، هدف شبیه‌سازی پیگیری نشده است، تعریف یک محیط خارجی ضرورت نداشته و محیط نرم‌افزار به‌عنوان محیط فعالیت و مراوده عامل‌ها در نظر گرفته شده است. با توجه به مطالب فوق، ویژگی‌ها و رفتار عامل‌های مختلف در ادامه تشریح می‌شود.

عامل‌های مصرف‌کننده

عامل‌های مصرف‌کننده بر اساس اولویت‌بندی تعیین‌شده میزان آب موردنیاز خود را دریافت می‌کنند. مطابق با اصول برنامه‌ریزی شهری و ناحیه‌ای، مقدار آبی که به بخش‌های شرب و خانگی (خدمات) تخصیص می‌یابد، بدون توجه به بازده اقتصادی این بخش نسبت به سایر بخش‌ها، باید به‌صورت کامل تأمین شود. بنابراین، در اولویت اول عامل خدمات با استفاده از داده‌های موجود و شرایط خود، آب موردنیاز و تقاضای خود را تعیین کرده و به عامل منبع ارسال می‌کند. سپس بر اساس برنامه‌ریزی عامل منبع، میزان تخصیص به این عامل تعیین و محدوده‌ها این میزان آب را دریافت می‌کنند. تعیین میزان تقاضای آب کشاورزی و صنعت نیز به‌صورت زیر انجام می‌شود.

-تقاضای آب کشاورزی: بررسی پژوهش‌های صورت‌گرفته نشان می‌دهد که مدیریت تقاضای آب در بخش کشاورزی با استفاده از بهینه‌سازی تلفیقی تغییر الگوی کشت و کم‌آبیاری قابل انجام است. آب موردنیاز گیاه jام (W_{aj}) از طریق رابطه (۱) قابل استخراج است:

$$W_{aj} = (1 - h)W_{pi} \qquad (۱)$$

در این رابطه، Wp_i حداکثر آب موردنیاز آبیاری کامل محصول jام (مترمکعب بر هکتار) است و از طریق رابطه (۲) به دست می‌آید. در این معادله، INj مقدار آب خالص موردنیاز محصول jام (میلی‌متر) است (عدد ۱۰ برای تبدیل میلی‌متر به مترمکعب در هکتار است) که با استفاده از رابطه (۳) به دست می‌آید.

مقدار IN_j با توجه به رابطه (۲) به دست می‌آید:

$$W_{pi} = IN_j \times 10 \qquad (۲)$$

$$IN_j = ET_{Cropi} - P_e \qquad (۳)$$

در رابطه (۳)، Pe بارندگی مؤثر در روز iام دوره مورد نظر است و مقدار آن با استفاده از روش USDA برای ماه‌هایی که در آن بارندگی اتفاق می افتد، قابل محاسبه است. ET_{cropi} نیز تبخیر-تعرق گیاه jام (میلی‌متر) است که از طریق رابطه (۴) قابل محاسبه است.

$$ET_{Cropi} = K_c \times ET_0 \qquad (۴)$$

در این رابطه، ET_o تبخیر-تعرق پتانسیل گیاه مرجع (میلی‌متر) و Kc ضریب محصول مورد نظر است. تبخیر و تعرق پتانسیل گیاه مرجع معمولاً با استفاده از روش پنمن-مانتیث[۳] محاسبه می‌شود که روشی مناسب برای مناطق خشک و نیمه‌خشک همانند ایران ارزیابی شده است. ضرایب گیاهی مورد نیاز نیز بر اساس مقادیر پیشنهادی در دستورعمل‌های فائو مبنای کار قرار گرفته است.

- تقاضای آب صنعت: تابع تقاضا برای نهاده آب و غیرآب به‌صورت تابعی از سطح محصول X و قیمت سایر نهاده‌ها (P_Y) با استفاده از رابطه (۵) به دست می‌آید:

$$Y^D = Y(\overline{X}, P_Y, P_W) \qquad (۵)$$
$$W^D = W(\overline{X}, P_Y, P_W)$$

که در آن D میزان تخصیص‌یافته آب در بخش صنعت، P_W قیمت نهاده آب و P_Y قیمت سایر نهاده‌ها است.

عامل منبع تخصیص‌دهنده

این عامل که دارای دو نقش منبع و برنامه‌ریز تخصیص است، با دریافت میزان تقاضای آب از عامل‌های مصرف‌کننده، مجموع تقاضای آب را محاسبه و آن را با منابع آب موجود مقایسه می‌کند. در صورت کفایت منابع آب موجود، تقاضای آب عامل‌های مصرف‌کننده را برآورده می‌کند. در غیر این صورت، در اولویت اول تقاضای آب

عامل شرب و خدمات را به‌صورت کامل برآورده کرده و با کسر این میزان، مانده آب قابل تخصیص را محاسبه می‌کند. سپس از الگوریتم فرااِبتکاری ژنتیک برای تخصیص آب به عامل‌های کشاورزی و صنعت بدون لحاظ کردن اولویتی خاص بین آنها، در راستای بیشینه کردن سود اقتصادی کل استفاده می‌کند که مراحل انجام این فرآیند نیز در ادامه تشریح شده است.

تعریف یک جواب مسئله در فضای بهینه‌سازی

طبق روش‌هایی که قبلاً تشریح شد، تقاضای آب برای مصارف مختلف محاسبه می‌شود و این محاسبه به‌صورتی است که سود اقتصادی حداکثر شود. در نتیجه، یک جواب در صورت داشتن n محدوده برای تخصیص آب، به‌صورت شکل (۴) تعریف می‌شود که در آن، L_{ai} میزان آب تخصیص‌یافته به هر بخش iام (مترمکعب) است.

L1	L2	L3	L4	L5	…	Ln

شکل ۴- یک جواب مسئله

Fig. 4- One response to the problem

تعریف تابع بهینگی و قیود مسئله

در تحقیق حاضر، تابع هدف اصلی بر اساس حداکثر کردن سود اقتصادی حاصل از تخصیص بهینه آب به بخش‌های کشاورزی، صنعت و خدمات است. این تابع هدف را می‌توان به شکل زیر ارائه کرد:

$$OF_{Tot} = Max\ (OF_{Agri} + OF_{Indus} + OF_{Soc}\} \qquad (۶)$$

در این رابطه، OF_{Agri} تابع هدف بخش کشاورزی، OF_{Indus} تابع هدف بخش صنعت و OF_{Soc} تابع هدف بخش خدمات را ارائه می‌دهد.

همان‌طور که اشاره شد، طبق بررسی پژوهش‌های صورت گرفته، مدیریت تقاضای آب در بخش کشاورزی با استفاده از بهینه‌سازی تلفیقی تغییر الگوی کشت و میزان کم‌آبیاری قابل انجام است. از این‌رو، حداکثر کردن سود اقتصادی حاصل از تخصیص آب به بخش کشاورزی با استفاده از تابع هدف زیر پیشنهاد شده است:

$$OF_{Agri} = \{\sum_{k=1}^{k} F_k(Q_k)A_kP_k\} \qquad (۷)$$

در رابطه (۷) OF_{Agri} تابع سود اقتصادی حاصل از محصولات مختلف، K تعداد محصولات، $F_k(Q_k)$ تابع عملکرد محصولات (Q_K میزان آب مصرفی محصول K در تابع عملکرد محصول است)، A_k سطح زیرکشت (هکتار) و P درآمد حاصل از محصول k است.

تابع عملکرد محصولات به‌طور غیرمستقیم از رابطه (۸) به دست می‌آید (میبر و همکاران، ۱۹۹۳):

$$\frac{Y_a}{Y_p} = \prod_{i=1}^{n}\left[1 - KY_i\left[1 - \frac{W_a}{W_p}\right]_i\right] \qquad (۸)$$

در این رابطه، Y_P عملکرد محصول در شرایط آبیاری کامل، Y_a عملکرد محصول در شرایط کم‌آبیاری، i مرحله مشخصی از رشد، n تعداد مراحل رشد، KY_i ضریب واکنش عملکرد محصول نسبت به آب در مرحله رشد i، W_P عمق آب آبیاری کامل محصول و W_a عمق آب کم‌آبیاری محصول است (Doorenbos & Pruitt, 1977; Sivanandam & Deepa, 2007 ; Lopez et al., 2011).

با توجه به روابط محاسباتی فوق، جدول (۱)، سطح زیر کشت محصولات غالب، آب مورد نیاز ناخالص و راندمان اقتصادی آب هر یک از این محصولات را در منطقه مورد بررسی نشان می‌دهد. در این منطقه، گیاهان تیره غلات (همانند گندم و جو) با ۳۸۳ هکتار، بیشترین سطح زیرکشت اراضی زراعی را به خود اختصاص داده‌اند، در صورتی که کمترین مقدار ناخالص نیاز آبی را دارند. در این میان باغات مثمر (همانند پسته، خرما و انار) با ۱۲۴ هکتار سطح زیر کشت، بیشترین مقدار ناخالص نیاز آبی را دارند.

جدول ۱- سطح زیر کشت محصولات زراعی غالب موجود در محدوده مورد بررسی
Table 1. Area of dominant crop cultivation in the study area

نام محصول Product name	سطح زیر کشت (هکتار) Cropland (ha)	مقدار ناخالص نیاز آبی (مترمکعب بر هکتار در سال) Gross amount of water requirement (m3/ha per year)	سطح زیر کشت (درصد) Crop area (%)	عملکرد محصول (تن در سال) Product yield (tonnes per year)	درآمد یک هکتار از کاشت محصول (میلیون ریال) Revenue per hectare of planting (million rials)	راندمان اقتصادی آب (ریال بر متر مکعب) Economic water efficiency (Rial Cubic Meter)
غلات Cereals	383	29317	63.3	7	26.5	1741
نباتات علوفه‌ای Forage Plants	32	48000	5.3	6.5	26.3	474
نباتات روغنی Oily Plants	29	61962	4.8	2.9	24.5	612
باغات مثمر Productive orchards	124	197146	20.5	15.5	599.2	10199
صیفی‌جات Siffy	37	148486	6.1	96.7	492.6	14164
جمع کل Total	605	484911	100			

تابع هدف در بخش صنعت را نیز می‌توان به شکل زیر ارائه کرد:

$$OF_{Indus} = \{F(Y^D, W^D) \times P_{Indus}\} \quad (۹)$$

در این رابطه، OF_{Indus} تابع سود اقتصادی تولید بخش صنعت (ریال)، $F(Y^D, W^D)$ تابع تقاضا برای نهاده آب و غیرآب (تن محصول تولیدی در مجموع بنگاه‌ها) و P_{Indus} راندمان اقتصادی تولید (ریال بر تن محصول تولیدی) است.

تابع تقاضا برای نهاده آب و غیرآب در رابطه (۹) به‌صورت تابعی از سطح محصول X و قیمت سایر نهاده‌ها (P_Y) با استفاده از رابطه (۱۰) به دست می‌آید:

$$Y^D = Y(\overline{X}, P_Y, P_W) \quad (۱۰)$$
$$W^D = W(\overline{X}, P_Y, P_W)$$

که در آن D میزان تخصیص‌یافته آب در بخش صنعت، P_W قیمت نهاده آب و P_Y قیمت سایر نهاده‌ها است.

در جدول (۲) میزان کل تقاضای آب در محدوده مورد بررسی، درآمدهای حاصل از کل نهاده آب، میزان تولید و راندمان اقتصادی تولید در بخش صنعت مشخص شده است. بر اساس این ، بخش صنعت دارای راندمان اقتصادی بیشتر و سهم کمتری در استفاده از منابع آب نسبت به بخش کشاورزی است.

جدول ۲- میزان مصرف موجود منابع آب و درآمد حاصل در بنگاه‌های اقتصادی
Table 2. Amount of available water resources and the resulting business income

مقدار کل مصرف (متر مکعب) Total amount of consumption (cubic meters)	راندمان اقتصادی نهاده آب (ریال بر متر مکعب) Economic efficiency of water supply (Rials per cubic meter)	میزان تولید (تن) Production rate (tons)
4.300.000	72.884	887.712

همچنین، مطابق با اصول برنامه‌ریزی شهری و ناحیه‌ای، در این تحقیق، مقدار آبی که به بخش‌های شرب و خانگی تخصیص می‌یابد، بدون توجه به بازده اقتصادی این بخش نسبت به سایر بخش‌ها، باید به‌صورت کامل تأمین شود. بنابراین، با فرض $Benefit_{Soc} = Cost_{Soc}$ رابطه (۱۱) را می‌توان به دست آورد:

$$OF_{Soc} = Benefit_{Soc} - Cost_{Soc} = 0 \qquad (۱۱)$$

همان‌طور که اشاره شد، مدل بهینه‌سازی پیشنهادی در تحقیق حاضر دارای دو محدودیت (قید) است. محدودیت اول، به کل منابع آب در دسترس منطقه مورد بررسی مرتبط است و بر اساس آن، پس از کسر آب تخصیص‌یافته به خدمات، مجموع آب تخصیص‌یافته به بخش‌های کشاورزی و صنعت کمتر یا مساوی کل باقیمانده آب در دسترس است. این محدودیت در ارتباط با منابع آب بخش‌های کشاورزی و صنعت را می‌توان در قالب رابطه زیر ارائه کرد:

$$\sum_{j=1}^{n} W_{aj} + \sum_{i=1}^{m} W_{Ii} \leq q_{Tot} - \sum_{k=1}^{l} W_{sk} \qquad (۱۲)$$

در این رابطه، q_{Tot} کل منابع آب موجود (مترمکعب)، W_{aj} آب موردنیاز گیاه jام (متر مکعب بر هکتار) و W_{Ii} مقدار آب موردنیاز بنگاه iام و W_{sk} مقدار آب موردنیاز بخش خدماتی kام است. محدودیت دوم در ارتباط با توسعه زمین‌های کشاورزی است که در آن حداکثر میزان توسعه اراضی کشاورزی برابر با کل زمین‌های کشاورزی موجود است. هرچند ممکن است با توجه به محدودیت‌های منابع آبی موجود در منطقه، این محدودیت تأثیر چندانی در جواب‌های مسئله نداشته باشد. این محدودیت را نیز می‌توان در قالب رابطه زیر ارائه کرد:

$$\sum_{j=1}^{n} X_j \leq X_{Total} \qquad (۱۳)$$

در این رابطه، X_j سطح زیرکشت گیاه j (هکتار) و X_{total} کل اراضی کشاورزی موجود در محدوده مورد بررسی (هکتار) و معادل ۸۶۵ هکتار است.

ایجاد جمعیت اولیه

به‌منظور ایجاد جمعیت اولیه، تعدادی جواب به‌صورت تصادفی تولید می‌شود. برای ایجاد یک جواب، مقدار آبی که به هر محدوده در مصارف مختلف باید تخصیص یابد، به‌صورت تصادفی تعیین می‌شود. به‌طوری که محدودیت‌های تعریف‌شده برای توابع هدف رعایت شود. در غیر این صورت، جواب حذف و جواب جدید که قیود در آن رعایت شده است، ایجاد می‌شود.

– **انتخاب دو والد:** به منظور انتخاب دو والد از روش چرخ گردونه استفاده می‌شود. در این روش احتمال انتخاب برای هرکرومزوم با نسبت برازندگی آن کرومزوم نسبت به مجموع برازندگی تمامی کرومزوم ها در جمعیت برابر است.

– **ترکیب دو والد:** در این تحقیق از ترکیب تک‌نقطه‌ای استفاده شده است. در این روش یک نقطه (که می‌تواند از قبل تعیین شود یا به‌طور تصادفی انتخاب می‌شود) در کرومزوم‌های والد انتخاب شده و هر کرومزوم در این نقطه به دو بخش تقسیم می‌شود و بخشی از یک کرومزوم والد با بخشی دیگر از کرومزوم والد دیگر دوباره با همدیگر ترکیب می‌شوند. در شکل (۵) مثالی از ترکیب در مسئله تخصیص آب نمایش داده شده است. در این شکل و شکل‌های بعدی به‌منظور سادگی شکل‌ها تعداد ژن کرومزوم هشت عدد فرض شده که کمتر از تعداد واقعی آنها است که در اصل نشان‌دهنده تعداد محدوده‌ها برای تخصیص آب هستند.

1580.5	980.2	450.9	1600.1	320.2	1305.3	850.5	1900.1	**والد اول First parent**
1642.2	952.5	365.1	810.9	2050	3230.3	570.2	2600.6	**والد دوم Second parent**
1580.5	980.2	450.9	1600.1	2050	3230.3	570.2	2600.6	**فرزند Child**

شکل ۵- نمایش ترکیب دو والد و تشکیل فرزند جدید

Fig. 5- Composition of two parents and the formation of a new child

1580.5	980.2	450.9	1600.1	320.2	1305.3	850.5	1900.1	**کروموزوم اولیه Primary chromosome**
1580.5	870.5	450.9	1600.1	320.2	1365.1	850.5	1900.1	**کروموزوم جهش‌یافته Mutated chromosome**

شکل ۶- نمونه‌ای از جهش در تخصیص آب

Fig. 6- Example of a change in water allocation

با این نوع ترکیب، قیدهای مسئله نیز رعایت می‌شود زیرا در تشکیل جمعیت اولیه این قیدها لحاظ شده است.

- **عملگر جهش:** پس از انجام ترکیب روی کروموزوم‌ها، نوبت به انجام عمل جهش می‌رسد. بدین منظور عددی به‌طور تصادفی بین صفر تا یک انتخاب می‌شود؛ اگر عدد کوچک‌تر از نرخ جهش بود، برای این کروموزوم جهش انجام می‌شود. روند جهش به این صورت است که دو ژن به‌صورت تصادفی انتخاب می‌شود. سپس از یکی از ژن‌ها x مترمکعب کم شده و به ژن دیگر که به‌صورت تصادفی انتخاب شده است، همین مقدار اضافه می‌شود. میزان آب این ژن به‌طور تصادفی و طوری تغییر می‌یابد که قیود مسئله برقرار باشد. در صورتی که قیود مسئله رعایت نشود باید دو ژن دیگر برای معاوضه انتخاب شود. این عملیات n بار انجام می‌شود تا میزان آب مناسب تخصیص یابد. در واقع، کروموزوم جهش‌یافته حاصل n تغییر کروموزوم اولیه است که هر تغییر کم کردن یک مقدار آب از یک ژن و اضافه کردن آن به ژن دیگر به صورتی است که کروموزوم صحیح ایجاد شود. در شکل (۶) نمونه‌ای از این نوع جهش در صورت یک تغییر ارائه شده است.

- **نخبه‌گرایی:** نخبه‌گرایی در این الگوریتم بها دادن بیشتر به نخبه‌ها است. در این تحقیق نخبه‌گرایی از طریق درصد نخبه‌گرایی اعمال شده است. این پارامتر تعداد کروموزوم‌های نخبه هر نسل بهترین تابع بهینگی را دارند و این تعداد کروموزوم‌ها بدون تغییر به نسل بعد منتقل می‌شوند و باقی اعضای نسل بعدی توسط ترکیب و جهش تولید می‌شوند.

- **ذخیره بهترین پاسخ:** با انجام مراحل فوق، مدل یک بار اجرا شده است. در نتیجه ضرورت دارد تا بهترین جواب ذخیره شود. جواب نهایی، بهترین جواب از بین بهترین‌ها در تمام اجراهاست.

- شرایط خاتمه: بعد از ذخیره بهترین جواب، شرط خاتمه الگوریتم بررسی می‌شود. اگر این شرط یا شروط برآورده شود، الگوریتم خاتمه می‌یابد و جواب نهایی ذخیره می‌شود (بهترین جواب در بین بهترین هر تکرار). در صورتی که شرط یا شروط برقرار نشود الگوریتم تکرار می‌شود. شرط توقف می‌تواند رسیدن به دقتی خاص، تعداد تکرارهای خاص، زمان خاص یا ترکیبی از اینها باشد. در این پژوهش به‌منظور ساده‌سازی روند پیاده‌سازی

و اجرای الگوریتم، شرط توقف تعداد اجرای خاص (۳۰۰۰ تکرار) در نظر گرفته شده است.

نتایج و بحث

با عنایت به اینکه مجموع تقاضای آب بخش‌های مختلف، بیش از کل آب در دسترس و قابل‌تخصیص در منطقه مورد بررسی است، از الگوریتم ژنتیک به‌منظور تخصیص بهینه و در محیط پیاده‌سازی نرم‌افزار Matlab به‌عنوان محیط پیاده‌سازی مدل استفاده شده است. مقادیر بهینه پارامترهای اولیه الگوریتم بر اساس سعی و خطا و تجربیات حاصل از تکرارهای مختلف الگوریتم به دست آمده است (جدول ۳).

جدول ۳-پارامترهای استفاده شده در الگوریتم ژنتیک

Table 3. Parameters used in the genetic algorithm

پارامتر Parameter	مقدار amount
تعداد جمعیت اولیه Initial population	100
درصد نخبه‌گرایی Percentage of elitism	20%
نقطه تقاطع در ترکیب Intersection point in combination	شماره ژن ۱۴۰۰ Gene number 1400
نرخ جهش Mutation rate	0.3
تعداد تغییر در جهش The number of changes in the mutation	30
مقدار تغییر در جهش (مترمکعب) Amount of change in mutation (cubic meter)	500
تعداد تکرارها Number of Reps	3000
شرط توقف Stop condition	تعداد تکرار Repeat number

جدول ۴- سطح زیر کشت بهینه محصولات زراعی غالب موجود در محدوده مورد بررسی

Table 4. Optimum cropping area of dominant crops in the study area

نام محصول Product name	سطح زیرکشت بهینه (هکتار) Optimum crop area (ha)	مقدار آب موردنیاز ناخالص بهینه (متر مکعب بر هکتار در سال) Optimal amount of gross water requirement (m3 / ha per year)
غلات Cereals	264.5	21157
نباتات علوفه‌ای Forage plants	0	0
نباتات روغنی Oily plants	0	0
باغات مثمر Productive orchards	158.1	195216
صیفی‌جات Siffy	42	142995
جمع کل Total	464.6	361368

این تحقیق بر این فرض استوار است که کل آب قابل استحصال از منابع آب زیرزمینی موجود را می‌توان برای الگوی موجود در منطقه استفاده کرد و با بهره‌گیری از الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی تخصیص آن به مصارف مختلف اقدام کرد. همان‌طور که در نتایج بهینه‌سازی بخش کشاورزی در جدول (۴) ملاحظه می‌شود، گروه غلات با ۲۶۴/۵ هکتار، دارای بیشترین سطح زیرکشت بهینه است. همچنین نتایج حاکی از آن است که در منطقه مورد بررسی، در حالت بهینه کشت نباتات علوفه‌ای و روغنی در این منطقه، با توجه به منابع آب در دسترس، با معیار بیشینه کردن سود اقتصادی، بهینه نیست. پس از غلات، درختان مثمر از قبیل پسته، انار، انگور و خرما دارای بیشترین سطح زیرکشت هستند. بررسی نتایج نشان می‌دهد که در محصولات گروه غلات، به‌دلیل کم‌آبیاری سطح کشت بالا حفظ شده و افزایش سطح زیرکشت محصولات باغی نیز به دلیل سودآوری بالای این محصولات است. بنابراین همان‌طور که در تحقیقات مشابه و مطالعات دستگاه‌های ذیربط در منطقه مورد بررسی مشخص شده است، بر مبنای معیار سودآوری اقتصادی، الگوی کشت منطقه می‌تواند به سمت محصولات باغی پربازده حرکت کند.

در بخش صنعت، نکته حائز اهمیت، تأثیر تغییر

تکنولوژی در کاهش تقاضای آب است. به‌عبارت دیگر هر نوع تغییر در قیمت یا عرضه آب، تغییر تکنولوژی در تجهیزات و ماشین‌آلات صنعتی در جهت کاهش و بهینه کردن مصرف آب خواهد بود. بر اساس این، میزان مصرف آب در حالت بهینه معادل ۹/۷۰۰/۰۰۰ مترمکعب در سال برآورد شده است. جدول (۵) جمع‌بندی نتایج حاصل از بهینه‌سازی مصارف سالیانه در سه بخش مصرفی را ارائه کرده است:

جدول ۵- میزان مصرف بهینه منابع آب در بنگاه‌های اقتصادی

Table 5. Optimal use of water resources in economic enterprises

مصارف Costs	میزان مصرف آب در حالت بهینه (مترمکعب در سال) Water consumption in optimal mode (cubic meter per year)	درصد استفاده از منابع آب در حالت بهینه Percentage of water resources usage in optimal mode
کشاورزی Agriculture	179.700.000	86
صنعت Industry	9.700.000	5
خدمات Social services	17.500.000	9
جمع کل Total	195.000.000	100

نتایج الگوریتم توسعه‌یافته نشان داد که تخصیص بهینه آب در بخش کشاورزی معادل ۱۷۹/۷۰۰/۰۰۰ متر مکعب در سال (در حالت بهینه، ۸۶ درصد استفاده از منابع آب) و در بخش صنعت معادل ۹/۷۰۰/۰۰۰ متر مکعب در سال (در حالت بهینه، ۵ درصد استفاده از منابع آب) است. همچنین، با توجه به محدودیت‌های اعمال‌شده در میزان مصرف آب بین بخش‌های مختلف بیشترین مصرف آب مانند وضعیت پایه و فعلی در بخش کشاورزی است. البته به علت سودآوری کمتر این بخش نسبت به دو بخش صنعت و خدمات، درصد استفاده از منابع آبی در حالت پایه که ۸۹ درصد بود به میزان ۸۶ درصد کاهش یافته است. همچنین قابل توجه است که در بخش صنعت این میزان از ۲/۲ درصد به حالت بهینه ۵ درصد (بیش از دو برابر) رسیده است که خود نشان‌دهنده سودآوری اقتصادی قابل‌ملاحظه‌ای در بخش صنعت و در نهایت در حالت بهینه تخصیص آب در منطقه مورد بررسی است. بنابراین منطقی به نظر می‌رسد که با توجه به شرایط طبیعی فعلی حاکم بر منطقه و محدودیت‌هایی که در دسترسی به منابع آب به‌دلیل وقوع خشک‌سالی‌ها وجود دارد، با اعمال محدودیت و تخصیص بهینه آب به بخش‌های مختلف می‌توان تولید را از بخش کشاورزی به بخش صنعت منتقل کرد و با افزایش تولید در بخش صنعت، افزایش سودآوری اقتصادی را در عین مصرف بهینه منابع آب شاهد بود.

همچنین بررسی نتایج حاکی از آن است که در بخش کشاورزی، همچنان بیشترین سطح زیر کشت بهینه در محدوده مورد بررسی مربوط به گیاهان خانواده غلات جمعاً به میزان ۲۶۴/۵ هکتار و دارای حدود ۵۷ درصد از کل الگوی کشت بهینه است و کم‌آبیاری در این بخش رخ داده است. همچنین نتایج بهینه‌سازی حاکی از آن است که برای بالابردن سودآوری اقتصادی، در حالت بهینه می‌توان از کاشت محصولات دو خانواده نباتات علوفه‌ای و روغنی جلوگیری به عمل آورد که این موضوع را می‌توان ناشی از سود اقتصادی پایین در مقایسه با تقاضای آب این محصولات دانست.

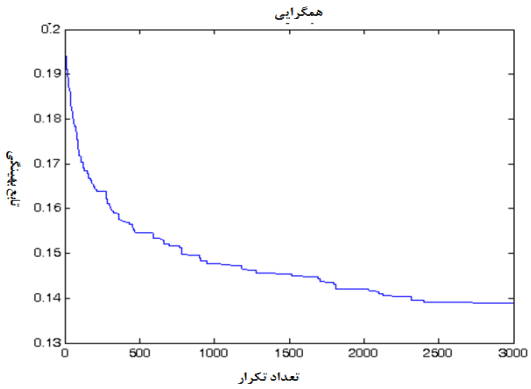
در درختان مثمر، به‌دلیل سودآوری بالای این محصولات در مقایسه با تقاضای آب آنها، افزایش سطح زیرکشت رخ داده و الگوی کشت منطقه را از جنبه مدیریت بهینه منابع آب، از محصولات زراعی به محصولات باغی پربازده هدایت می‌کند.

ارزیابی عملکرد الگوریتم ژنتیک

به‌منظور ارزیابی الگوریتم ژنتیک از پارامترهای همگرایی و پایداری، استفاده شده است که نتایج حاصله در ادامه ارائه شده است.

همگرایی الگوریتم

هر چه یک الگوریتم سریعتر به همگرایی برسد، نشان از برتری این الگوریتم دارد. شکل(۷) روند بهینه شدن تابع بهینگی را نشان می‌دهد.



شکل ۷- روند همگرایی تابع بهینگی در الگوریتم ژنتیک

Fig. 7- Convergence process of the optimality function in the genetic algorithm

با توجه به نمودار شکل(۷)، سرعت همگرایی در تکرارهای اولیه بسیار زیاد است. اما به تدریج این سرعت کاسته شده و در نهایت همگرا می‌شود. همچنین، تابع بهینگی، همگرایی متفاوتی را در هر مقطعی از خود نشان می‌دهد. به‌طوری که از شروع تا اجرای ۲۸۰ تقریباً همگرایی شتاب بیشتری دارد؛ از این اجرا تا اجرای تقریبا ۵۰۰، شتاب همگرایی کمتر شده است. سپس یک همگرایی کمتری از این اجرا تا اجرای ۱۰۰۰ وجود داشته و همگرایی از تکرار ۱۰۰۰ به بعد روندی تدریجی را نشان می‌دهد.

تست تکرارپذیری الگوریتم ژنتیک

هرچه یک الگوریتم در اجراهای متوالی نتایج مشابه‌تری را به دست آورد، این الگوریتم پایداری بیشتری دارد. برای بررسی این معیار، الگوریتم، ۱۰ بار اجرا شده است. واریانس تغییرات جواب نهایی الگوریتم در ۱۰ اجرا محاسبه شده است. به‌منظور درک و مقایسه بهتر از واریانس داده‌های نرمال‌شده استفاده می‌شود که این نرمال کردن داده‌ها، منجر به تغییر واریانس بین صفر تا یک می‌شود و هر چه به صفر نزدیک‌تر باشد، الگوریتم ثبات بیشتری دارد. در این تحقیق، واریانس الگوریتم ژنتیک در بهترین حالت ۰/۱۶۲۴ به دست آمده است که ثبات نسبتاً مناسب الگوریتم را اثبات می‌کند.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق تلاش شد تا با ارائه چارچوب مفهومی عامل مبنا برای تخصیص بهینه منابع آب به بخش‌های مختلف، نحوه تعاملات بین عامل‌های مختلف تشریح و قابلیت بهره‌گیری از این روش مدل‌سازی ارائه شود. همچنین در این چارچوب، از الگوریتم فراابتکاری ژنتیک برای بهینه‌سازی تخصیص آب بین بخش‌های مختلف استفاده شده است. با بهره‌گیری از چارچوب طراحی‌شده، تلاش می‌شود تا منابع آب به‌صورتی مناسب تخصیص یابد به‌طوری که عملکرد مطلوب اقتصادی در منطقه مورد بررسی فراهم شود و تخصیص آب منجر به ارتقاء سودآوری اقتصادی منطقه شود.

نتایج بهینه‌سازی در تخصیص آب به بخش‌های مختلف نشان داد که در بخش کشاورزی، بهره‌گیری از کم‌آبیاری در محصولات خانواده غلات و تغییر الگوی کشت با حذف محصولات دو خانواده نباتات علوفه‌ای و روغنی منجر به بهینه شدن تخصیص آب می‌شود. هر چند این بهینه شدن، منجر به کاهش سطح زیر کشت در این بخش و کاهش مقدار آب تخصیص‌یافته در مقایسه با وضعیت فعلی شده است. در بخش صنعت نیز به‌دلیل سودآوری اقتصادی بالاتر این بخش نسبت به بخش کشاورزی، تخصیص بهینه در راستای افزایش سودآوری اقتصادی منجر به تخصیص بیشتر آب در مقایسه با مصرف فعلی شده است.

بنابراین، استفاده از چارچوب پیشنهادی در منطقه مورد بررسی می‌تواند در افزایش سودآوری اقتصادی حاصل از تخصیص بهینه منابع آب به بخش‌های مختلف تأثیرگذار باشد، به‌نحوی که گرایش از محصولات

کشاورزی کم‌بازده به سمت تولید محصولات باغی پربازده باشد و تخصیص بیشتر آب به بخش صنعت سوق یابد.

درباره الگوریتم پیشنهادی نیز، نتایج حاصل از الگوریتم ژنتیک نشان داد که سرعت همگرایی در تکرارهای اولیه زیاد و به تدریج کاهش می‌یابد تا به همگرایی برسد و این همگرایی تابع بهینگی به‌تدریج حاصل می‌شود. همچنین واریانس کم تغییرات جواب نهایی الگوریتم در بازه صفر و یک حاکی از ثبات مناسب این الگوریتم است.

با توجه به نتایج حاصله و برای بهبود و ارتقاء تحقیق حاضر می‌توان پیشنهاد کرد که چارچوب مفهومی عامل مبنای ارائه شده با استخراج دقیق‌تر تعاملات بین عامل‌های مختلف با داده‌های منابع آب پیاده‌سازی و نتایج استخراج شود. همچنین می‌توان برای بهینه‌سازی تخصیص در این چارچوب، سایر الگوریتم‌های فراابتکاری را نیز به کار گرفت و نسبت به هم نتایج را مقایسه کرد. در صورت استفاده از الگوریتم فراابتکاری ژنتیک نیز می‌توان از سایر الگوریتم‌ها مانند: NSGA-II، MOGA و ... نیز استفاده کرد.

پی‌نوشت‌ها

[1] Optimization models
[2] Simulation models
[3] Penman Mantienth

منابع

Afshar, A., Jalali, M.R., Ghoreishi, S.M., Saed, B. and Pour Mohammad Abadi, A., 2016. Agent based models as a strategy for water resource management with sustainable development perspective. Journal of Applied Environmental and Biological Sciences. 6(2), 208-212.

Akhbari, M. and Grigg, N.S., 2013. A Framework for an Agent-based model to manage water resources conflicts. Water Resour Manage. DOI 10.1007/s11269-013-0394-0

Berger, B., Birner, R., D´ıaz, J., McCarthy, N. and Wittmer, H., 2007. Capturing the complexity of water uses and water users within a multi-agent framework. Water Resour Manage. 21, 129–148.

Doorenbos, J. and Pruitt, W.O., 1977. Guidelines for predicting crop water requirements. FAO Research Report.

Habibi Davijani, M., Banihabib, M.E. and Hashemi, S.R., 2012. Development of optimization model for water allocation in agriculture, industry and service sectors by using advanced algorithm, GAPSO. Journal of Water and Soil. 27(4), 680-691.

Kiafar, H., Sadradini, A.A., Nazemi, A.H. and Sanikhani, H., 2011. Optimal water allocation for Sufi-Chay irrigation and drainage network in east azerbaijan province of Iran using genetic algorithm. Water Journal. 5, 52-60.

Kumar, D.N. and Reddy, J., 2007. Multi use reservoir operation using particle swarm optimization. Journal of Water Resource Planning and Management. 133(3),192-201.

Kumar, D.N., Raju, K.S. and Ashok, B., 2006. Optimal reservoir operation fir of multiple crops using genetic algorithms. ASCE, Journal of Irrigation and Drainage Engineering. 132(2),123-129.

Lopez, G., Larrigaudière, C., Girona, J., Behboudian, H. and Marsal, J., 2011. Fruit thinning in ‘Conference’ pear grown under deficit irrigation: implications for fruit quality at harvest and after cold storage. Scientia Horticulturae. 129, 64-70.

Mashhadi Ali, A., Shafiee, M. E., Zechman Berglund, E. and Arumugam, S., 2014. An agent-based modeling approach to simulate the dynamics of water supply and water demand. World Environmental and Water Resources Congress. 1806-18011.

Mirfendereski, G. and Mousavi, S.J., 2011. Support vector machines in meta-modelling for using in optimization of basin water allocation. In Proceedings Sixth Congress of Civil Engineering, Semnan Uni., Semnan, Iran.

Nabinejhad, S. and Mousavi, S.J., 2011. Hydrological-based allocation of water resources at the catchment area. In Proceedings Sixth Congress of Civil Engineering, Semnan Uni., Semnan, Iran.

Raju, K.S. and Kumar, N.D., 2004. Irrigation planning using genetic algorithms. J. Water Resources Management. 18(2), 163-176.

Saeidian, B., Saadi Mesgari, M. and Ghodousi, M., 2015. Comparing the efficiency of GA and PSO metaheuristic algorithms in optimal allocation of water to agricultural farms in water scarcity. Engineering Journal of Geospatial Information Technology. 3(4), 19-42.

Sheta, A. and Turabieh, H., 2006. A comparison between genetic algorithms and sequential quadratic programming in solving constrained optimization problems. ICGST Internatioanl Journal on Artificial Intelligence and Machine Learning (AIML). 6(1), 67-74.

Sivanandam, S.N. and Deepa, S.N., 2007. Introduction to genetic algorithms. Springer Science & Business Media.

Thakur , A. and Singh, Z., 2012. Responses of ‘Spring Bright’ and ‘Summer Bright’ nectarines to deficit irrigation: fruit growth and concentration of sugars. Scientia Horticulturae. 135, 112-119.

Wang, Z., Yang, J., Deng, X. and LAN, Xi., 2015. Optimal water resources allocation under the constraint of land use in the Heihe river basin of China. Sustainability Journal. 7, 1558-1575.

Zechman Berglund, E., 2015. Using agent-based modeling for water resources planning and management. Journal of Water Resource Planning and Management. DOI: 10.1061/ (ASCE) WR. 1943-5452.0000544.

Environmental Sciences Vol.16 / No.2 / Summer 2018

165-184

Agent-based conceptual development and optimization based on a genetic algorithm in water resource allocation

Amin Hosseiniasl,[1] Mohammad Sadi Mesgari [*2] and Ali Akbar Matkan[3]

[1] Department of GIS, Faculty of Geodesy and Geomatics Engineering, K.N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

[2] Department of GIS, Faculty of Geodesy and Geomatics Engineering and Centre of Excellence for Geo-Information Technology, K.N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

[3] Remote Sensing and GIS Research Center, Faculty of Earth Science, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

Received: 2017.11.25 **Accepted:** 2018.08.07

Hosseiniasl, A., Mesgari, M.S. and Matkan, A. A., 2018., Agent-based conceptual development and optimization based on a genetic algorithm in water resource allocation. Environmental Sciences. 16 (2), 165-184.

Introduction: In water resource allocation, a good division is a major principle which is difficult to determine due to the existence of different criteria. To optimize water resource allocation, it would be efficient to simulate water resource systems in order to consider effective agents and reveal the internal interaction among their parts. Various studies show that a multi-agent simulation alone, or in combination with optimization methods, is an effective approach for understanding better the complexities related to water use and users. Also, the genetic algorithm has received attention as an intelligent evolutionary method to optimize non-linear complex problems.

Materials and methods: The conceptual framework of the proposed water resource allocation presented the interaction between water demand and supply, taking into consideration the economic factors in a sub-basin of Dasht-e Kavir desert in Iran, whose major water source is groundwater. One of the most important duties of water allocators is to achieve optimized allocation of water to different sectors, performed on the basis of the water demands of each consuming agent. Agricultural agents who receive the major portion of water were divided into sub-units. For each product, the diversity of cultivation patterns, deficit irrigation conditions, etc. were considered in order to improve economic status and allocate water resources optimally based on available data and statistics. In industrial uses, products and their functions were discussed as a function governing all businesses. Finally, as water supply is especially important in the drinking sector, the total volume of water required was calculated and completely allocated for this.

Results and discussion: In the study area, the cultivation of fodder and oil plants is not optimal on the basis of the available water resources with the criterion of maximizing economical profit. Cereals, followed by fruit-

[*] Corresponding Author. *E-mail Address*: mesgari@kntu.ac.ir

bearing trees (including pistachio, pomegranate, grape, and date) have the largest area under cultivation. Results showed that cereals retain their large cultivation area due to deficit irrigation, and the increase in the area under cultivation belonging to garden products is because of their high profitability. Therefore, in the agricultural sector, water allocation can be optimized by using deficit irrigation in cereals and changing the cultivation pattern for products relating to fodder and oil plants. In the industrial sector, the important point is the changing impact of technology on reducing water demand. Since this sector has a higher economical profitability than the agricultural sector, optimized allocation in order to increase economical profitability has led to a water allocation higher than the current consumption level. Evaluation of the optimization results in the genetic algorithm indicates that the convergence rate is high in first iterations and gradually decreases to reach convergence. The convergence of the optimization function is achieved gradually. Moreover, the small variance of changes in the final output of the algorithm (ranging from 0 to 1) suggests the high stability of this algorithm.

Conclusion: Implementation of the proposed framework in the study area increases the economic profitability resulting from optimized water resource allocation to various sectors, if a move is observed from low-efficiency agricultural products to high-efficiency garden products, and the higher allocation of water to industry.

Keywords: Water allocation, Optimization, Agent-based model.