

مسائل بهینه‌سازی چند محدودیتی با فضای بزرگ و پیچیده جهت بهره‌وری بهینه از منابع آب، برنامه‌ریزی و نیز توسعه آن در آینده، برمی‌آیند. به‌طور کلی از اطلاعات ارائه شده در تحقیق حاضر می‌توان در برنامه‌ریزی‌های آینده به‌منظور توسعه پایدار منابع آب بهره برد.

واژه‌های کلیدی: مدیریت منابع آب، الگوریتم فراابتکاری، الگوریتم کلاسیک، شبیه‌سازی

مقدمه

آب نیاز اولیه و اساسی برای حفظ بقا، توسعه صنایع و رونق اقتصادی می‌باشد. به عبارتی دیگر کلید توسعه در گرو گسترش منابع آب و استفاده بهینه از آن می‌باشد. برای رسیدن به این مهم، مدیریت جامع منابع آب امری ضروری به نظر می‌رسد. یکی از جنبه‌های مدیریت جامع منابع آب، بحث بهره‌برداری تلفیقی از منابع آب سطحی و زیرزمینی می‌باشد. منابع آب قابل برداشت را می‌توان در دو گروه بزرگ آب‌های سطحی و زیرزمینی تقسیم‌بندی نمود. در اکثر مناطق این دو منبع بصورت توأم وجود داشته و با هم برهم‌کنش دارند که در این حالت سیستم را یک سیستم منابع آب ترکیبی می‌نامند. بهره‌برداری تلفیقی، مدیریتی متناسب با خصوصیات هر دو منبع است. هر چند که این دو منبع در ظرفیت ذخیره، تغذیه، تخلیه، هزینه‌های اولیه و بهره‌برداری متفاوت هستند اما استفاده همزمان از این دو منبع باعث افزایش عملکرد، کفایت، اعتماد پذیری توزیع، کاهش هزینه‌ها در یک سیستم و جلوگیری از سرمایه‌گذاری اضافی در منابع آب سطحی مثل احداث سد و یا طراحی سیستم انتقال آب با ظرفیت بیش از حد بهینه و هم‌چنین جلوگیری از فشار بیش از حد به منابع آب زیرزمینی می‌شود [۱۰].

امروزه مطالعات تلفیقی منابع آب و استفاده از مدل‌های شبیه‌ساز جهت توصیف رفتار هیدرودینامیکی جریان بین آب‌های سطحی و زیرزمینی به خصوص در مقیاس‌های بزرگ و منطقه‌ای، به‌عنوان مؤلفه‌ای کلیدی در برنامه‌ریزی هیدروسیتسم‌ها، به‌طور وسیعی مورد توجه قرار گرفته است. از طرفی، مدیریت استفاده تلفیقی یکی از گزینه‌های به کارگیری بهینه منابع آب در دسترس می‌باشد و می‌تواند بهره‌وری آب را بهبود ببخشد.

تحقیقات انجام شده در بهره‌برداری تلفیقی، از دیدگاه کلان منابع آب در سه بخش کلی کمی، کیفی و کمی-کیفی تقسیم‌بندی

مروری بر مدیریت تلفیقی منابع آب سطحی و زیرزمینی با تاکید بر کاربرد مدل‌های بهینه‌سازی

هانیه اسدی^{۱*} و کاکا شاهدی^۲

تاریخ دریافت: ۹۸/۰۶/۰۸ تاریخ پذیرش: ۹۸/۱۱/۰۹

چکیده

توزیع ناهمگون زمانی و مکانی آب شیرین به لحاظ کمی از یک طرف و هم‌چنین رشد سریع و روزافزون جمعیت جهان و به‌ویژه کشور ما ایران در دهه‌های اخیر، سبب بروز مشکلات روزافزون در تأمین منابع آب مورد نیاز شده است. در این راستا آگاهی از روش‌های مدیریت و بهره‌برداری تلفیقی بهینه منابع آب سطحی و زیرزمینی به عنوان یکی از جنبه‌های مدیریت جامع منابع آب و عملکرد آن‌ها در تدوین برنامه‌های مختلف مدیریت بحران، حفاظت منابع آب و مدیریت جامع حوزه‌های آبخیز امری ضروری به نظر می‌رسد. بر همین اساس پژوهش حاضر با هدف ارائه اطلاعات جامع از پیشینه و جدیدترین مطالعات انجام شده در خصوص رایج‌ترین مدل‌های ریاضی مورد استفاده در این زمینه و ارزیابی کاربرد آن‌ها در مدیریت جامع منابع آب و نیز مروری کلی بر گسترش هر مدل، امتیازات و محدودیت‌ها انجام شده است. نتایج حاصل نشان داد که مدیریت تلفیقی یکی از راه‌کارهای نوین و بسیار مؤثر در دهه‌های اخیر است و استفاده ترکیبی از تکنیک‌های بهینه‌سازی و شبیه‌سازی یک روش مفید و قدرتمند در تعیین استراتژی‌های مدیریتی و طراحی برای توسعه بهره‌برداری تلفیقی بهینه از منابع آب‌های سطحی و زیرزمینی می‌باشد. در این زمینه مدل MODFLOW بیش‌ترین کاربرد را در شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی، مدل MT3DMS بیش‌ترین کاربرد را در زمینه مدل‌سازی آلودگی آب‌های زیرزمینی داشته و مدل GMS نیز مدلی توانمند، عمومی، جامع و کاربرپسند است. هم‌چنین بررسی منابع به‌منظور ارزیابی الگوریتم‌های بهینه‌سازی در حل مسائل مدیریت منابع آب نشان داد که الگوریتم‌های تکاملی با درجه‌های مختلف از پیچیدگی به‌طور مؤثری از حل

۱. نویسنده مسئول و دانشجوی دکترای گروه مهندسی آبخیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ایران. Email: h.asadi@stu.sanru.ac.ir

۲. دانشیار گروه مهندسی آبخیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ایران.

مدل‌های شبیه‌سازی آب زیرزمینی

مدل‌های مختلفی به صورت دو بعدی و سه بعدی برای شبیه‌سازی جریان و آلودگی به صورت عمومی یا محدود تهیه شده و در دسترس قرار گرفته‌اند که از جمله می‌توان به مدل‌های AQUA، LEWASTE، FTRANS، HST3D، ASM، FEMWATER، MOC، MOC DENSE، MODFLOW، MT3D، SWIFT، USGS 2D FLOW-USGS 3D FLOW اشاره کرد. از سال ۱۹۹۵ میلادی به خصوص با عرضه نسخه جدید سیستم عامل Windows مانند win98 و win2000 بعضی از شرکت‌های خصوصی و دانشگاه‌ها در آمریکا با تطبیق مدل‌های موجود آب‌های زیرزمینی با این سیستم عامل و بالا بردن جنبه‌های گرافیکی آن‌ها و ارائه خدمات بعد از فروش به‌طور وسیعی نرم افزارهای مختلفی از جمله PMWIN، Visual Modflow، MT3DMS، GMS و غیره در زمینه مدل‌سازی آب‌های زیرزمینی به دنیا ارائه کردند. بالطبع مدل GMS که خود از تلفیق چندین مدل از جمله مدل‌های MODFLOW، MODPATH، MT3DMS، FEMWATER، SEEP2D، SEAM3D، MODAEM، UTCHEM و غیره تشکیل شده است، جامع‌ترین مدل آب زیرزمینی است و روز به روز کاربرد آن در اکثر کشورهای دنیا گسترش می‌یابد [۴۶، ۶۷]. از ویژگی‌های مهم این نرم افزار اشتراک داده‌ها با نرم افزار پرکاربرد GIS می‌باشد [۲۷].

بهینه‌سازی

از مهم‌ترین پیشرفت‌های حاصله در حوزه مهندسی منابع آب، گسترش فن‌آوری‌های بهینه‌سازی جهت برنامه‌ریزی، طراحی و مدیریت سیستم‌های پیشرفته منابع آب می‌باشد. تحلیل یک سیستم منابع آب پیشرفته ممکن است متغیرهای تصمیم و محدودیت فراوانی را شامل شود. پس از مشخص شدن اهداف و محدودیت‌ها، بیشتر مسائل از روش‌های حل که در حوزه علم مدیریت و تحقیق در عملیات گسترش یافته‌اند، بهره می‌گیرند [۲۵]. هر مسئله بهینه‌سازی، شامل دو بخش مدل‌سازی و برنامه‌ریزی می‌باشد. بخش مدل‌سازی شامل تشکیل تابع هدف و قیودات مربوط، بر اساس روابط فی‌مابین متغیرها به صورت معادلات و یا نامعادلات است. در بخش برنامه‌ریزی، روش جستجو به منظور تعیین شرایط بهینه در رسیدن به مقدار مطلوب تابع هدف انجام می‌گیرد. مسایل بهینه‌سازی به آن دسته از مسایلی گفته می‌شود که در آن‌ها هدف، کمینه یا بیشینه کردن یک یا چند تابع هدف، تحت یک دسته از قیود می‌باشد. روش‌های بهینه‌سازی بر اساس شیوه حل مسئله، به دو بخش کلاسیک و تکاملی (غیرکلاسیک) تقسیم‌بندی می‌شوند. از سال ۱۹۴۰ تاکنون روش‌های بهینه‌سازی متعددی مطرح شده‌اند که به‌عنوان روش‌های کلاسیک شناخته می‌شوند. بهینه کردن تابع هدف در بیش‌تر روش‌های کلاسیک بهینه‌سازی، توالی معینی از محاسبات را دارا می‌باشند. این روش‌ها یک نقطه از فضای جستجو را برای شروع در نظر می‌گیرند و به تدریج در میان

می‌شود. در دیدگاه کمی هدف تعیین مقدار برداشت و توزیع زمانی و مکانی بهره‌برداری از هر یک از منابع به منظور کاهش میزان کمبودها، کاهش اثرات منفی توزیع زمانی نامناسب جریان رودخانه، ذخیره آب در سفره‌های آب زیرزمینی واقع در مجاورت کاربران، مدیریت مطلوب‌تر تقاضا برای آب در زمان خشکسالی و حذف یا کاهش مسائل مربوط به زهکشی می‌باشد [۱۷]. در بعد کیفی بیش‌تر تحقیقات در زمینه‌های شبکه‌های آبیاری و استفاده تلفیقی از آب‌های با کیفیت پائین با آب به کیفیت مطلوب‌تر انجام شده است [۵۵]. بیش‌تر تحقیقات از لحاظ کمی-کیفی در زمینه آبرسانی شهری و تامین آب مورد نیاز در حد کیفیت استاندارد مورد نظر بوده است [۲۳].

به‌طور کلی، بیش از سی سال از کاربرد مدل‌های شبیه‌سازی، بهینه‌سازی و ترکیبی از مدل‌های شبیه‌سازی و بهینه‌سازی برای یافتن استراتژی‌های بهره‌برداری تلفیقی می‌گذرد. یک سیستم تلفیقی منابع آب، از دو زیر سیستم آب سطحی و آب زیرزمینی تشکیل شده است [۴۷] که مدل‌سازی آب زیرزمینی به دلیل ناهمگنی، خروجی‌ها و ورودی‌های متعدد آن، به مراتب پیچیده‌تر از مدل‌سازی سیستم آب سطحی است. به همین دلیل معمولاً بخش اصلی یک مدل تلفیقی، ساختار مدل آب زیرزمینی آن است [۲۴]. لذا در این مطالعه به بررسی برخی مدل‌های ریاضی شبیه‌سازی آب زیرزمینی و هم‌چنین برخی مدل‌های بهینه‌سازی مورد استفاده در مدیریت منابع آب می‌پردازیم.

تعاریف و مفاهیم

شبیه‌سازی

شبیه‌سازی به عنوان یک تکنیک مدل‌سازی است که برای تخمین زدن رفتار سیستم با نشان دادن تمام ویژگی‌های سیستم توسط توصیف‌های جبری یا ریاضی مورد استفاده قرار می‌گیرد. این روش با یک روش برنامه‌ریزی ریاضی فرق دارد. به عبارت دیگر مدل شبیه‌سازی پاسخ سیستم به ورودی‌های مشخص که شامل قوانین تصمیم است را تعیین می‌کند. این عمل تصمیم گیرنده را قادر می‌سازد که اثرات سناریوهای مختلف سیستم‌های موجود یا یک سیستم جدید را بدون راه‌اندازی آن سیستم آزمایش کنند. یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی معمولاً نیازمند فرضیات در مورد ساختار مدل و قیدهای سیستم برای اجرای عملی است، در حالیکه یک مدل شبیه‌سازی چند بعدی و انعطاف پذیرتر است. به طور کلی مدل شبیه‌سازی پاسخ‌هایی را تولید می‌کند که از قوانین حاکم بر فرآیند تبعیت می‌کند. بنابراین مدل شبیه‌سازی امکان‌پذیری استراتژی‌های مدیریتی را بررسی می‌کند [۴۴]. هم‌چنین می‌توان از مدل‌های شبیه‌سازی به صورت ترکیبی با مدل مدیریتی یا با استفاده از معادلات حاکم بر شبیه‌سازی به صورت قیود اجباری در مدل بهینه‌سازی یا با استفاده از ماتریس پاسخ یا مدل شبیه‌سازی خارجی استفاده نمود. رویکرد درون‌گذاری و ماتریس پاسخ دو روش معمول برای وارد کردن مدل شبیه‌سازی درون مدل مدیریتی هستند [۲۹].

مدل‌های برنامه‌ریزی پویا

یک روش مناسب برای حل مسائل بهینه‌سازی پیوسته و یا گسسته، برنامه‌ریزی پویا است. این نوع برنامه‌ریزی (پویا) که بیشتر بوسیله بلمن [۱۳] فرمول‌بندی شده است، روشی برای بهینه‌سازی یک فرآیند تصمیم‌گیری چندمرحله‌ای است. برنامه‌ریزی پویا به صورت گسترده در بهینه‌سازی سیستم‌های منابع آب استفاده می‌شود [۳۴، ۷۱ و ۷۲]. عمومیت و موفقیت این روش در این است که شکل‌های غیرخطی و احتمالاتی را که شامل تعداد زیادی سیستم‌های منابع هستند می‌توان به شکل و رابطه برنامه‌ریزی پویا تبدیل کرد. همچنین این مزیت را دارا می‌باشد که مسائل با پیچیدگی زیاد و تعداد زیاد متغیرها را می‌توان به مجموعه‌ای از مسائل جزئی و فرعی تجزیه کرد که بصورت برگشتی حل می‌شوند. یک مساله را می‌توان با بیش از یک روش فرمول‌بندی کرد و بخشی از هنر برنامه‌ریزی پویا تصمیم‌گیری برای فرمول بندی موثرتر و مفیدتر مساله موجود است.

با توجه به مشکلات مذکور که بر سر راه اغلب روش‌های کلاسیک وجود دارند و نیز با توجه به این‌که زمان صرف شده برای رسیدن به جواب‌های بهتر، از دغدغه‌های افرادی است که با بهینه‌سازی سروکار دارند و همچنین با توجه به این‌که اغلب مسائل بهینه‌سازی واقعی، مسائل غیرخطی با تعاملات پیچیده در فضای شدنی خود می‌باشند، بنابراین به منظور جلوگیری از مشکلات ناشی از این شرایط، به یک تعداد از الگوریتم‌های بهینه‌سازی کارا جهت استفاده در طیف وسیعی از مسائل احتیاج می‌باشد. بدین‌منظور در چند سال اخیر محققین زیادی برای رفع این مشکل و همچنین برطرف کردن برخی از نقاط ضعف روش‌های بهینه‌سازی کلاسیک رو به بهینه‌سازی تکاملی، آورده‌اند. این روش‌ها با الهام گرفتن از طبیعت، مجموعه‌ای از نقاط و یا جمعیت را در فضای جواب‌ها در نظر گرفته و در جهات مختلف برای پیدا کردن جواب بهینه، مدل را سوق می‌دهند [۵۱، ۵۲].

الگوریتم‌های تکاملی بر خلاف روش‌های کلاسیک، به‌جای استفاده از یک جواب، جمعیتی از جواب‌ها را در فرآیند خود استفاده می‌کنند و با استفاده از عملگرهای خود، سعی در رسیدن به جواب بهینه دارند. همچنین الگوریتم‌های تکاملی این قابلیت را دارند که از ترکیب برخی روش‌های سودمند با آن، می‌توان جواب‌های بهینه‌چندگانه را در برخی مسائل خاص بدست آورد. علاوه بر تمام موارد ذکر شده، مزیت اصلی الگوریتم‌های تکاملی این می‌باشد که در فرآیند خود به مشتق‌پذیری و یا حتی پیوستگی تابع هدف و قیود مسائل بهینه‌سازی، احتیاجی ندارند و با ایجاد توازن بین جستجو و بهره‌برداری در فرآیند خود، به عنوان یک روش بهینه‌سازی کارا مورد استفاده قرار می‌گیرند [۵۲]. از جمله برخی روش‌های بهینه‌سازی تکاملی در زمینه مدیریت منابع آب

صعودی‌ترین یا نزولی‌ترین ناحیه‌ها بهبود می‌یابند. این شیوه نقطه به نقطه، مشکل اساسی قرار گرفتن در یک نقطه بهینه محلی را بوجود می‌آورد. ساده‌ترین راه برای بدست آوردن یک جواب محلی بهتر این است که بهینه‌سازی از نقاط اولیه متفاوتی که به شکل تصادفی انتخاب شده‌اند، تکرار شده تا جواب‌های دیگر نیز بررسی و مقایسه شوند. با این وجود، برای مسائلی که تعداد زیادی متغیر دارند امکان عدم دستیابی به مینیمم فراگیر زیاد است مگر آن‌که فرآیند جستجو از نقاط اولیه متفاوت در تعداد دفعات زیادی انجام شود [۴۳]. به‌طور کلی مشکلات رایجی که بر سر راه اغلب روش‌های کلاسیک وجود دارند به شرح زیر می‌باشند:

۱- همگرایی به جواب بهینه بستگی به جواب آغازین انتخاب شده دارد ۲- برخی از الگوریتم‌ها تمایل در رسیدن به جواب بهینه موضعی دارند ۳- الگوریتمی که در حل یک مساله بهینه‌سازی کارا می‌باشد، ممکن است در حل یک مساله بهینه‌سازی دیگر کارا نباشد ۴- برخی از الگوریتم‌ها هنگام برخورد با مسائل بهینه‌سازی دارای فضای شدنی گسسته، کارا نیستند [۵۶]. از جمله برخی روش‌های بهینه‌سازی کلاسیک متداول در زمینه مدیریت تلفیقی منابع آب سطحی و زیرزمینی می‌توان به برنامه‌ریزی خطی^۱، برنامه‌ریزی پویا^۲ و برنامه‌ریزی غیرخطی^۳ اشاره کرد.

مدل‌های برنامه‌ریزی خطی و غیرخطی

برنامه‌ریزی خطی از متداول‌ترین روش‌های مورد استفاده در مدیریت منابع آب است. برنامه‌ریزی خطی به حل نوع ویژه‌ای از مسائل مربوط می‌شود که در ابتدا همه روابط بین متغیرها (تابع هدف و محدودیت‌ها) خطی بوده و ثانیا محدودیت‌ها و تابع هدف به صورت هماهنگ بهینه می‌گردد. یکی از ویژگی‌ها و مزیت‌های مهم این روش آن است که یک جواب کمینه یا بیشینه موضعی در آن، یک جواب سراسری می‌باشد. حال اگر تابع هدف و توابع قیدها، توابع غیرخطی از متغیرهای طراحی باشند، برنامه‌ریزی از نوع غیرخطی می‌باشد [۴۹، ۷۲]. همچنین مسائل غیرخطی تحت فرضیات مشخص می‌توانند خطی شوند و به وسیله روش‌های تقریبی یا تکراری حل گردند [۵۳]. برنامه‌ریزی خطی دارای قابلیت‌های زیادی می‌باشد، این روش در مدیریت منابع آب از مسائل ساده تخصیص منابع تا موارد پیچیده بهره‌برداری و مدیریت به‌کار گرفته شده است [۹، ۱۲، ۳۵، ۶۳ و ۶۶]. انواع مشخصی از محدودیت‌ها که حل آن‌ها توسط مسئله شبکه مشکل و یا غیرممکن است به‌راحتی در برنامه‌ریزی خطی ارائه و حل می‌شود. در این مدل می‌بایست تمام توابع وابسته به صورت خطی بوده یا خطی شده باشند. از دیگر دلایل کاربردهای زیاد برنامه‌ریزی خطی در مسائل مهندسی می‌توان به روش‌های توسعه یافته‌تر این الگوریتم که شامل برنامه‌ریزی خطی باینری، برنامه‌ریزی خطی صحیح و برنامه‌ریزی خطی صحیح مختلط می‌باشد اشاره کرد [۶۹].

1. Linear programming (LP)
2. Dynamic programming (DP)
3. Non linear programming (NLP)

می‌توان به الگوریتم ژنتیک^۱، الگوریتم بهینه‌سازی اجتماع ذرات^۲، الگوریتم بهینه‌سازی جامعه مورچه‌ها^۳، الگوریتم بهینه‌سازی کلونی زنبور عسل مصنوعی^۴، الگوریتم شبیه‌سازی باز پخت^۵، الگوریتم جستجوی هارمونی^۶ و غیره اشاره نمود.

الگوریتم ژنتیک

روش ژنتیک عبارت است از یک جستجوی چند جانبه موازی، هدایت شده بر اساس نظریه تکامل که با شبیه‌سازی فرایندهای بقای اصلح در علم زیست‌شناسی، اقدام به یافتن متکامل‌ترین پاسخ یک مسئله می‌نماید. در نظام طبیعی موجوداتی که شایستگی بالاتری دارند، امکان بقا و تولید مثل بیشتری پیدا می‌کنند و پس از چندین نسل نیز به درجه شایستگی بالاتری می‌رسند. فرآیند طبیعی انتخاب اصلح با ترکیب عملگرهای ژنتیک مانند به‌گزینی، تلاقی و جهش صورت می‌پذیرد. در مدل ریاضی روش ژنتیک، هر کدام از این عملگرها شبیه‌سازی می‌شوند [۲۸ و ۵۱]. بدین صورت که الگوریتم ژنتیک با تولید جمعیت تصادفی شامل N کروموزوم شروع می‌شود. هر کروموزوم، به صورت رشته یا دنباله‌ای از پارامترها یا متغیرهای مسئله کد می‌شود، که هر کروموزوم بیانگر یک راه حل ممکن برای مسئله است. سپس به کمک یک تابع ارزیابی، شایستگی راه حل‌های موجود بررسی شده و از بین آن‌ها شایسته‌ترین کروموزوم‌ها به‌عنوان والد انتخاب می‌شوند، که از ترکیب آن‌ها فرزندان (نسل جدید) به وجود می‌آید. پس از انجام عملیات ترکیب، فرآیند جهش به‌منظور تغییر تصادفی تعدادی از ژن‌ها بر روی فرزندان، انجام می‌شود. سپس شرط پایان بررسی می‌شود و این فرآیند تا پایان یافتن الگوریتم ادامه می‌یابد [۳۳، ۴۰ و ۵۱].

الگوریتم بهینه‌سازی اجتماع ذرات

الگوریتم بهینه‌سازی اجتماع ذرات الگوریتم شبیه‌سازی یک رفتار دسته‌جمعی است که ایده اصلی آن از نحوه حرکت دسته پرنده‌ها و ماهیان نشأت گرفته است [۳۶ و ۴۱]. این الگوریتم مانند سایر تکنیک‌های محاسباتی تکاملی، از یک جمعیت که شامل راه حل‌های بالقوه مسئله تحت بررسی است، جهت اکتشاف در فضای جستجو استفاده می‌کند. در این الگوریتم، هر راه حل که به آن یک ذره گفته می‌شود، معادل یک پرنده در الگوی حرکت جمعی پرندگان فرض شده و شایستگی آن توسط یک تابع هدف تعیین می‌گردد. ایده اصلی در این الگوریتم این است که در هر دسته از موجودات فوق، هر عضو می‌تواند از مشاهدات و تجربیات تمام اعضا در حین جستجو برای رسیدن به هدف سود جوید. روش کار این الگوریتم بدین صورت است که ابتدا تعدادی ذره با موقعیت و سرعت تصادفی ایجاد شده، سپس در هر تکرار، ذرات بر حسب

1. Genetic algorithm (GA)
2. Particle swarm optimization (PSO)
3. Ant colony optimization (ACO)
4. Artificial bee colony optimization (ABC)
5. Simulated Annealing (SA)
6. Harmony search (HS)

بهترین موقعیت گذشته خود و همسایگان‌شان حرکت به سوی هدف را اصلاح می‌نمایند. پس از تکرارهای متوالی، مسئله به جواب بهینه همگرا می‌گردد [۲۲، ۲۶ و ۵۷].

الگوریتم بهینه‌سازی کلونی زنبور عسل مصنوعی

الگوریتم کلونی زنبور مصنوعی به‌منظور حل مسائل بهینه‌سازی عددی توسط کارابوگا پیشنهاد شد [۳۲]. در الگوریتم زنبور، یک منبع غذایی بیانگر یک راه حل ممکن برای مسئله است. الگوریتم کلونی زنبورهای مصنوعی الهام گرفته از رفتار زنبورها در طبیعت می‌باشد و مشابه با کلونی زنبورهای طبیعی، این الگوریتم نیز شامل سه نوع زنبور است: زنبور کارگر، زنبور پیشاهنگ و زنبور مراقب. وظیفه زنبور کارگر، جستجو برای یافتن منابع غذایی جدید است. زنبور مراقب، وظیفه ارزیابی راه حل‌های به‌دست آمده توسط زنبورهای کارگر را به عهده دارد. در هر تکرار الگوریتم، تعدادی از زنبورهای کارگر که بهترین راه حل‌ها را پیدا کرده‌اند توسط زنبورهای مراقب به زنبور پیشاهنگ تبدیل می‌شوند. برای زنبورهای پیشاهنگ، فرایند سربازگیری انجام می‌گیرد، بدین معنی که به هر زنبور پیشاهنگ تعدادی زنبور کارگر برای جستجو در نزدیکی منبع غذایی مربوط به آن زنبور پیشاهنگ، اختصاص داده می‌شود. این روند تا یافتن جواب بهینه ادامه می‌یابد [۳۲ و ۳۷].

الگوریتم بهینه‌سازی جامعه مورچه‌ها

روش نوین بهینه‌سازی به شیوه جامعه مورچه‌ها روشی است که جایگاه خود را در مسائل بهینه‌سازی پیچیده باز نموده است. این روش اولین بار توسط مارکو دوریگو در سال ۱۹۹۲ معرفی گردید و در یک سری از امور مورد استفاده و ارزیابی قرار گرفت و بعد از آن، ویرایش‌ها و انواع مختلفی از آن ارائه گردید [۲۰]. در سال‌های اخیر این روش از اقبال بالایی برای استفاده به عنوان ابزار بهینه‌سازی در طراحی، مدیریت و برنامه‌ریزی منابع آب، برخوردار شده است. از جمله کاربردهای صورت گرفته می‌توان به بهره‌برداری از مخازن، سیستم‌های توزیع آب و آبرسانی و فاضلاب، طراحی چاهک‌های مشاهداتی آب زیرزمینی، مدیریت احیاء منابع آب زیرزمینی، تخمین مشخصه‌های هیدرولیکی خاک‌ها و ... اشاره نمود [۱، ۲، ۴۵، ۶۲ و ۷۴]. براساس مطالعه‌های زیست‌شناختی، در مدت زمانی مشخص، جامعه مورچه‌ها قادر به تعیین کوتاه‌ترین مسیر به سمت منبع غذایی می‌باشند. این امر از طریق نشانه گذاری جامعه مورچه‌ها با ماده‌ای شیمیایی به نام فرومون و به جهت آگاه ساختن سایر مورچه‌ها از اطلاعات کسب شده می‌باشد. با گذشت زمان، کوتاه‌ترین مسیر دارای بیشترین مقدار این ماده شیمیایی خواهد بود. بهینه‌سازی به روش جامعه مورچه‌ها بر پایه این طبیعت ذکر شده مورچه‌ها می‌باشد و در یک روند تکراری مبتنی بر سعی و خطا این رفتار شبیه‌سازی می‌شود [۲].

الگوریتم شبیه‌سازی باز پخت

الگوریتم شبیه‌سازی باز پخت یک روش بهینه‌سازی عددی با ساختار تصادفی هوشمند است که بر مبنای مکانیک آماری و قیاس با

فرآیند فیزیکی انتقال حرارت به عنوان یک فرآیند فیزیکی در صنعت شبیه سازی شده است [۳۸ و ۷۵]. با توجه به شباهت آن به فرآیند فیزیکی حرارت فلزات و سرد کردن آن ها به این اسم نامیده شده است. ایده اصلی که این الگوریتم بر مبنای آن پایه گذاری شده است، اولین بار توسط متروپولیس و همکاران [۵۰] مطرح شد. کرک پاتریک و همکاران دریافتند که می توان از این ایده برای مسایل بهینه سازی ترکیبی سود جست و بر این اساس روش شبیه سازی باز پخت را پایه گذاری نمودند [۱۴ و ۳۸]. مهم ترین پارامترها و معیارهایی که قبل از کاربرد این روش برای مساله مورد نظر بایستی بررسی و تنظیم شوند عبارتند از دمای اولیه، فاکتور کاهش دما، طول گام تصادفی، پارامتر مربوط به شرط تعادل، طول دوره، حداکثر تعداد تکرارها در هر دما جهت رسیدن به شرط تعادل و دمای نهایی (شرط توقف). به طور کلی مراحل مختلف این الگوریتم به صورت زیر می باشد:

۱. فراخوانی پارامترهای روش الگوریتم شبیه سازی باز پخت
۲. ایجاد نمونه اولیه ۳. ایجاد نمونه ثانویه ۴. بررسی تغییرات تابع هدف ۵. تکرار گام های ۳ و ۴ را به تعداد طول دوره ۶. بررسی شرط تعادل [۷۰]. ۷. اگر شرط تعادل برقرار شد گام ۷ اجرا می شود. ۸. بررسی شرط توقف.

الگوریتم جستجوی هارمونی

الگوریتم جستجوی هارمونی برای اولین بار توسط گیم و

همکاران در سال ۲۰۰۱ میلادی ارائه گردید. هرچند این الگوریتم نسبتاً جدید است ولی اثر بخشی و مزیت های آن در برنامه های مختلف به اثبات رسیده و کارایی خود را به خوبی نشان داده است. با وجود این که زمان زیادی از معرفی و به کارگیری این الگوریتم نمی گذرد، ولی برای حل مسائل مختلف بهینه سازی از جمله بهینه سازی مسائل پیچیده، بهینه سازی مسایل مهندسی، طراحی شبکه های توزیع آب، مدل سازی آب های زیرزمینی، صرفه جویی در انتقال انرژی، طراحی خراباها و موارد فراوان و گوناگون دیگر مورد استفاده قرار گرفته است [۷، ۸ و ۳۷]. گیم و همکاران این فرایند بهینه سازی را به وسیله سه مولفه استفاده از حافظه هارمونی، تنظیم گام صدا و انتخاب تصادفی ایجاد کردند [۷]. مراحل الگوریتم جستجوی هارمونی را به صورت قدم به قدم به صورت زیر می باشد:

۱. تعریف تابع هدف و پارامترهای الگوریتم ۲. ایجاد ماتریس حافظه ۳. تولید یک راه حل یا هارمونی جدید ۴. به روز کردن ماتریس حافظه ۵. شرط توقف. که با تکرار این پنج مرحله، الگوریتم به مرور به مقادیر بهینه نزدیک شده و جواب های مسئله بهبود می یابد.

در جداول ۱ و ۲، به ترتیب خلاصه ای از کاربرد مدیریت تلفیقی منابع آب سطحی و زیرزمینی و مدل های بهینه سازی (الگوریتم های تکاملی و کلاسیک) در مدیریت منابع آب ارائه شده است.

جدول ۱: کاربرد مدیریت تلفیقی منابع آب سطحی و زیرزمینی

منابع	منطقه مورد مطالعه	مدل شبیه سازی	مدل بهینه سازی
یوسفی [۷۳]	-	Visual MODFLOW	LP
بازرگان لاری و همکاران [۱۱]	آبخوان تهران	MT3D و MODFLOW	NSGA-II
شمسایی و فرقانی [۶۵]	آبخوان یزد	MODFLOW-PMWIN	GA
باریکانی و همکاران [۹]	دشت قزوین	-	LP
جنوبی و همکاران [۳۰]	دشت ارومیه	MODFLOW	-
کریمی و همکاران [۳۵]	حوزه آبریز زاینده رود	مدل غیرخطی کمی-کیفی WEAP-MODFLOW	LP
احمدی و همکاران [۳]	حوزه آبریز زاینده رود	-	-
لطیف و جیمز [۴۲]	حوزه ایندیوس پاکستان	-	LP
متسوکاوا و همکاران [۴۹]	حوزه رودخانه ماد، کالیفرنیا	MODFLOW	NLP
بلانیه و همکاران [۱۲]	حوزه فرضی	-	LP
ستهی [۶۳]	حوزه رودخانه کاستال	معادله توازن حجمی	LP
بارلو و همکاران [۱۰]	سیستم آبخوان-آبراهه درایالات متحده	شبیه سازی عددی	LP
کارآموز و همکاران [۳۳]	جنوب شهر تهران	شبکه عصبی مصنوعی ^۱	GA
دیپاک کار و همکاران [۱۸]	منطقه کشاورزی Sapon اندونزی	-	LP
صفوی و همکاران [۵۹]	دشت نجف آباد	شبکه عصبی مصنوعی MODFLOW	GA
صفوی و بحرینی [۵۸]	دشت نجف آباد	ISOGUAD	-
یانگ و همکاران [۷۱]	جنوب تایوان	GMS و ویژوال بیسیک	CDDP و MOGA
محبوب و همکاران [۴۶]	آبخوان دشت مراغه	ماشین بردار پشتیبان ^۲	-
صفوی و اسمی خانی [۶۰]	حوزه رودخانه زاینده رود	شبکه عصبی مصنوعی	GA
چینگ ون و همکاران [۱۶]	سیستم مخروط افکنه چو-شویی در مرکز تایوان	MODFLOW96 و SWAT 2009	LP
دولت آبادی و زمردیان [۲۱]	حوزه فیروزآباد	GMS و شبکه عصبی مصنوعی	-
ولی زادگان و یزدان پناه [۶۷]	دشت مهاباد	شبکه عصبی مصنوعی	GA
صفوی و همکاران [۶۱]	زیرحوزه نجف آباد	شبکه عصبی مصنوعی	HBMO

جدول ۲: کاربرد مدل‌های بهینه‌سازی در مدیریت منابع آب

منابع	منطقه مورد مطالعه	مدل بهینه سازی	کاربرد
کارآموز و همکاران [۳۴]	جنوب تهران	GA و DP	تخصیص بهینه آب به مناطق کشاورزی
مقدسی و همکاران [۵۳]	زاینده رود اصفهان	GA و PSO, NLP	مدیریت تخصیص منابع آب
صابر چناری و همکاران [۵۷]	حوزه رودخانه مهاباد	GA و PSO	بهره‌برداری بهینه مخزن
کانونی و همکاران [۳۱]	سد مخزنی یامچی، اردبیل	GA	حداکثر نمودن سود حاصل از تخصیص آب به بخش کشاورزی
دینیر [۱۹]	آنکارا، ترکیه	LP	حداکثرسازی برداشت آب
یارن و دینار [۷۲]	مزرعه (نمونه)	DP و NLP	بهینه کردن برنامه‌ریزی آبیاری
شمیر و همکاران [۶۴]	آبخوان ساحلی مجاور با دریای مدیترانه در فلسطین	LP	مدیریت بهره‌برداری آبخوان ساحلی
وچولا [۶۸]	حوزه رودخانه Cauvery	MO	طرح تخصیص بهینه آب آبیاری
کومار و همکاران [۴۰]	۳ مخزن یک منظوره واقع در هند	LP و GA	طرح تخصیص بهینه آب آبیاری
ایمی و هیلتون [۵]	حوزه فرضی	ACO	طرح نظارت بر آب‌های زیرزمینی
کومار و ردی [۴۱]	مخزن چند منظوره Bhadra (هند)	GA, PSO و EMP	استخراج سیاست‌های بهره‌برداری در مخازن
سندر و همکاران [۶۶]	منطقه کریشنا - پنا ر هند	LP	الگوی کاشت بهینه و حداکثر درآمد
ایوز [۷]	آبخوان آزاد فرضی	HS	مدیریت آب‌های زیرزمینی
گاور [۲۶]	حوزه رودخانه Dore در فرانسه	PSO	مدیریت هیدرولیکی آب‌های زیرزمینی
نوری و همکاران [۵۴]	ایران مرکزی	PSO, LP و DPSO	بهینه‌سازی تخصیص آب آبیاری
ایوز و الجی [۸]	حوزه Tahtalı (Izmir-Turkey)	HS	مدیریت آبهای زیرزمینی
کورکس و متوگلو [۳۹]	جزیره Santorini در یونان	MO, SO و II- NSGA	مدیریت آبخوان ساحلی
عطائی آشتیانی و همکاران [۶]	جزیره کیش، خلیج فارس در ایران	GA و MO	مدیریت بهینه آبخوان ساحلی
کتابچی و عطائی آشتیانی [۳۷]	حوزه فرضی	GA, CACO, PSO, HS, ABC, SCE, SIMPSA و DE	مدیریت آبخوان ساحلی

HBMO: Honey-Bee Mating optimization, CACO: Continuous ant colony optimization, DE: Differential evolution, SCE: Shuffled complex evolution, SIMPSA: Simplex simulated annealing, SO: Single-objective, MO: multi-objective, NSGA-II: non-dominated sorting GA-II, CPSO: Continuos Particle swarm optimization, EMPPO: Elitist-mutation Particle Swarm Optimization, CDDP: constrained differential dynamic programming, GV4: Groundwater Vistas - Version 4.

نتیجه‌گیری

مدیریتی پرداخته شد. مدل‌های جریان آب زیرزمینی (مدل‌های شبیه‌سازی) در ترکیب با الگوریتم بهینه‌سازی بطور فزاینده در سال‌های اخیر به عنوان ابزار مدیریت آبخوان مورد استفاده قرار گرفته‌اند. در واقع برای تعیین پاسخ آبخوان به سیاست‌های بهره‌برداری مختلف لازم است آبخوان مورد نظر شبیه‌سازی شود. بررسی منابع پیشین نشان داد که در بین مدل‌های کاربردی در مهندسی و مدیریت منابع آب، مدل MODFLOW بیشترین کاربرد را در شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی و مدل MT3DMS بیش‌ترین کاربرد را در زمینه مدل‌سازی آلودگی آب‌های زیرزمینی داشته است

مرور تحقیقات انجام گرفته نشان داد که یکی از راهکارهای نوین و مؤثر در دهه‌های اخیر در بحث مدیریت، استفاده تلفیقی از منابع آب‌های سطحی و زیرزمینی می‌باشد به طوریکه امروزه مدیریت منابع آب، با تأکید بر بهره‌برداری مشترک از منابع آب‌های سطحی و زیرزمینی، در دستور کار کلیه سازمان‌های بهره‌بردار قرار گرفته است. در این مقاله ضمن مروری بر مطالعات مدیریت تلفیقی منابع آب سطحی و زیرزمینی به معرفی و بررسی کارایی الگوریتم بهینه‌سازی به عنوان یکی از روش‌های قدرتمند در سیستم‌های

1. Abbaspour, K.C., Schlin, R. and Van Genuchten, M.T. 2001. Estimating unsaturated soil hydraulic parameters using ant colony optimization. *Advances Water Resources*. 24(8): 827-933.
2. Afshar, M.H., Ketabchi, H. and Rasa, E. 2006. Elitist continuous ant colony optimization algorithm: Application to reservoir operation problems. *International Journal of Civil Engineering*. 4(4): 274-285.
3. Ahmadi, A., Zadehvakili, N., Safavi H.R. and Ohab Yazdi S.A. 2015. Development of a Dynamic Planning Model for Surface and Groundwater Allocation, Case Study: Zayandehroud River Basin. Iran - *Water Resources Research journal*, 1(11):22-32. (In Persian)
4. Al khamisi, S.A., Prathapar, S.A. and Ahmed, M. 2013. Conjunctive use of reclaimed water and groundwater in crop rotations. *Journal of Agricultural water management*. 116:228-234.
5. Amy, Y.L. and Hilton, B.C. 2007. Short communication optimal groundwater monitoring design using an ant colony optimization paradigm. *Environmental Modeling Software*. 22:110-116.
6. Ataie-Ashtiani, B., Ketabchi, H. and Rajabi, M.M. 2014. Optimal management of freshwater lens in a small island using surrogate models and evolutionary algorithms. *J. Hydrol. Eng., ASCE*. 19 (2):339-354.
7. Ayvaz, M.T. 2009. Application of harmony search algorithm to the solution of groundwater management models. *Advances in water resources*. 9:916-924.
8. Ayvaz, M.T. and Elci, A. 2013. A groundwater management tool for solving the pumping cost minimization problem for the Tahtali watershed (Izmir-Turkey) using hybrid HS-Solver optimization algorithm. *J. Hydrology*. 478: 63-76.
9. Barikani, A. Ahmadian, M. Khalilian, p. and Chizari, O. 2012. Sustainable Consolidated Use of Surface Water and Groundwater Resources in Determining the Optimal Pattern of Qazvin Plain cultivation. *Agricultural Economics and Development*. 20 (77): 29-56. (In Persian)
10. Barlow, P. M., Ahfeld, D. P. and Dikerman, D. C. 2003. Conjunctive Management Models for Sustained

و مدل GMS نیز مدلی توانمند، عمومی، جامع و کاربرپسند است. از طرفی همانطور که گفته شد برای یافتن سیاست بهره‌برداری بهینه، مدل شبیه‌ساز باید با یک الگوریتم بهینه‌سازی مناسب ترکیب شود. با در نظر گرفتن ابعاد و پیچیدگی‌های سیستم‌های منابع آب و نیز با توجه به اینکه در ایران آب یک منبع محدود کننده توسعه است، استفاده از مدل‌های بهینه‌سازی مناسب یک ابزار کارآمد در مدیریت منابع آب محسوب می‌شود. در این راستا ارزیابی روش‌های کلاسیک و تکاملی، موضوع بسیاری از تحقیقات در زمینه مدیریت منابع آب بوده است که نتایج به‌دست آمده حاکی از این می‌باشد که اگرچه روش‌های تکاملی در مسئله‌های مشابه دقت و اطمینان روش‌های کلاسیک را ندارند، ولی فرار از بهینه‌های موضعی، سادگی کاربرد، عدم نیاز به محاسبه مشتق‌ها و توانایی حل و ارائه جواب برای مسئله‌های پیچیده مهندسی را می‌توان از مهمترین مزیت‌های الگوریتم‌های تکاملی برشمرد. بررسی مطالعات پیشین نشان داد که تمرکز تعداد زیادی از این مطالعات بر روی کاربرد الگوریتم‌های تکاملی خاص هست به‌طوری که الگوریتم ژنتیک بیشترین کاربرد را داشته است و الگوریتم‌های تکاملی از قبیل HS، ABC و SCE به ندرت در مدیریت منابع آب استفاده شده‌اند. الگوریتم بهینه‌سازی اجتماع ذرات نیز از محبوب‌ترین الگوریتم‌های تکاملی محسوب شده که معمولاً کارایی بالاتری نسبت به الگوریتم ژنتیک داشته است. ارزیابی و مقایسه نتایج روش‌های مختلف الگوریتم‌های تکاملی نشان داد که الگوریتم ژنتیک اگرچه دارای جستجوی سراسری خوب می‌باشد ولی مصرف زیاد حافظه و جستجوی محلی ضعیف از نقاط ضعف آن می‌باشد. در الگوریتم اجتماع ذرات نیز پیاده‌سازی آسان، تعداد کم پارامترها و همگرایی بالا از نقاط قوت آن و جستجوی محلی ضعیف از نقاط ضعف آن می‌باشد. در الگوریتم بهینه‌سازی جامعه مورچه‌ها نیز تعداد کم پارامترها و استفاده از مقادیر گسسته از نقاط قوت آن و جستجوی سراسری ضعیف از نقاط ضعف آن می‌باشد. روش الگوریتم جستجوی هارمونی نیز در مقایسه با الگوریتم ژنتیک از نظر سرعت همگرایی به پاسخ مسئله وضعیت بهتری دارد. همچنین این الگوریتم از همه حل‌های موجود در حافظه‌اش استفاده می‌کند و این ویژگی انعطاف الگوریتم را در جستجوی فضاهای بهتر حل افزایش می‌دهد. از نقاط قوت الگوریتم شبیه‌سازی بازپخت، زمان بسیار کم‌تر حل مسئله است، همچنین هنگامی که تعداد تکرارها در این روش از اندازه مسئله بزرگ‌تر باشد، جواب‌های مطلوبی حاصل می‌شود. به‌طور کلی نتایج نشان داد که توجه به کاربرد راه حل مناسب برای حل مسئله بهینه‌سازی با توجه به خصوصیات مسئله بسیار با اهمیت می‌باشد و موفقیت هر یک از آن‌ها به این بستگی دارد که چقدر الگوریتم با مساله ارایه شده متناسب است. در نهایت می‌توان گفت که الگوریتم‌های تکاملی به عنوان ابزاری انعطاف پذیر و کارآمد در بهینه‌سازی و کمی کردن محدودیت‌ها جهت غلبه بر چالش‌های مدیریت و توسعه پایدار سیستم‌های منابع آب می‌باشد.

Engineering. 20(1): 485-496.

22. Eberhart, R. C. and Shi, Y. 1998. Comparison between genetic algorithms and particle swarm optimization, In V. W. Porto, N. Saravanan, D. Waagen, and A. E. Eiben, Eds. *Evolutionary Programming VII: Proc. 7th Ann. Conf. on Evolutionary Programming Conf.*, San Diego, CA. Berlin: Springer-Verlag.

23. Ejaz, S.M. and Peralta, R. C. 1985. Maximizing conjunctive use of surface and groundwater under surface water quality constraint, *advanced in water resource*, 18(2): 67-75.

24. Esmikhani, M., Safavi H.R. and Yazdanipoor, M. 2010. Integrated management of ground and surface water using support vector machine and genetic algorithm methods, 5th National Congress on Civil Engineering. Ferdowsi University of Mashhad. (In Persian)

25. Fatahi, M.H., and Jabbari, M.M. 2009. A review on mathematical models of operation and water resources management. The National Conference on Water Crisis Management, Islamic Azad University of Marvdasht. 1-21. (In Persian)

26. Gaur, S., Chahar, B.R. and Graillot, D. 2011. Analytic elements method and particle swarm optimization based simulation-optimization model for groundwater management. *J. Hydrology*. 402 (3): 217-227.

27. Ghodrati, M. and Sabani, A. 2012. *Mathematical Models of Groundwater (applied training of GMS model)*, Simaye danesh Press. 210pp. (In Persian)

28. Glodberg, D.D. 1989. *Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning*. Addison Wesley publishing company Inc. 401p.

29. Gorelick, S. M. 1983. A review of distributed parameter groundwater management modeling method, *Water Resources Research*, 19:305-319.

30. Jonoubi R., Rezai H. and Behmanesh, J. 1392. Underground Water Management through Combining Surface and Sub-surface Water Using Modflow Model in Urmia Plain, *Journal of Water and Irrigation Management*, 3(1), 49-68. (In Persian)

31. Kanooni A., hashem shahedani S.M. and anvari, S. 2019. Conjunctive use of surface water and

Yield of Stream-aquifer Systems. *J. Water Resources Planning and Management*, ASCE. 129 (1): 35-48.

11. Bazargan-Lari M.R., Kerachian R., Sedghi H., Fallahnia M., Abed-Elmdoust A. and Nikoo, M.R. 2011. Developing Probabilistic Real-time Operating Rules for Conjunctive Use of Surface and Groundwater Resources: Application of Support Vector Machines. *Journal of Water and Wastewater*. 4: 54-69. (In Persian)

12. Belaine, G., Richard, C. and Hughes, T.C. 1999. Simulation – optimization modeling for water resources management. *Journal of Water Resource Planning and Management*, ASCE. 125 (3): 154-160.

13. Bellman, R. E. 1957. *Dynamic Programming*, Princeton N.J., Princeton Univ. press.

14. Cereny, V. 1985. Thermodynamical approach to the traveling salesman problem: an efficient simulation algorithm. *Journal of Optimization Theory and Applications*. 45: 41-51.

15. Chang, L. Ch., Ho, Ch. Ch., Yeh, M.Sh. and Yang, Ch.Ch. 2011. Integrating approach for conjunctive – use planning of surface and subsurface water system. *Journal of Water resource management*. 25:59-78.

16. Ching-Wen, C., Chih-Chiang, W., Hung-Jen, L. and Nien-Sheng, H. 2014. Application of Neural Networks and Optimization Model in Conjunctive Use of Surface Water and Groundwater. *Water Resources Management*. 28:2813-2832.

17. Coe, J. 1990. Conjunctive use-advantages, constraints and examples, *J. Irrigation and Drainage Engineerings*, ASCE, 116(3): 427-443.

18. Deepak Khare, MK. and Jat, E. 2006. Assessment of conjunctive use planning options: a case study of Sapon irrigation command area of Indonesia. *J Hydrology*. 328:764-777.

19. Deninger, R.A. 1970. System analysis of water supply system. *Water resources Bulletin*. 6: 573-579.

20. Dorigo, M. and Socha, T. 2007. *An Introduction to Ant Colony Optimization*. IRIDIA Technical Report Series ISSN. 1781-3794.

21. Dowlatbadi, S. and Zomorodian, S. M.A. 2016. Conjunctive Simulation of Surface Water and Groundwater using SWAT and MODFLOW in Firoozabad Watershed. *KSCE Journal of Civil*

41. Kumar, D.N. and Reddy, M.J. 2007. Multipurpose Reservoir Operation Using Particle Swarm Optimization, *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, May/June. 133(3): 192-201.
42. Latif, M. and James, D. 1991. Conjunctive water use to control water logging and salinization. *Journal of Water resource planning and management*. 117(6): 11-28.
43. Loucks D.P. and Van Beek E. 2014. *Water resources systems planning and management*, Translated by Bozorg Haddad O., Ashofteh P.S., Seifollahi- Aghmiani S., University of Tehran Press, 720pp. (In Persian).
44. Maass, A., Hufschmidt, M.M., Dorfman, R., Thomas, H.A., Marglin, S.A. and Fair, G.M. 1962. *Design of water –resource systems*. Cambridge, Mass., Harvard University press. *Science Magazine*. 136(3512): 250-261.
45. Madadgar, S. and Afshar, A. 2009. An improved continuous ant algorithm for optimization of water resources problems. *Water Resources Management*. 23: 2119–2139.
46. Mahjub, H., Mohammadi, M.M. and Parsinejad, M. 2011. Conjunctive use modeling of groundwater and surface water. *Journal of Water resource and protection*. 2011(3):726-734.
47. Mahmoodi, Z., Bahremand, A. and Abdollahi, Kh. 2018. A Review on Methods and Models of Surface Water and Groundwater Interaction- with Focus on Regional Integrated Models. *Water and Sustainable Development*. 5(2): 101-116. (In Persian)
48. Male, J.W. and Mueller, F.A. 1992. Model for prescribing groundwater use permits. *Journal of Water Resource Planning and Management*, ASCE. 118 (5): 543–561.
49. Matsukava, J., Finney, B. and Willis, R. 1992. Conjunctive Use planning in Mad River basin, California. ASCE, *Journal of water resources planning and management*. 118(2): 115-131.
50. Metropolis, N., Rosenbluth, A., Teller, A. and Teller, E. 1953. Equation of state calculations by fast computing machines. *Journal of Chemical Physics*. 21: 1087- 1092.
- grounwater for optimal water allocation of reservoir dam under water resources shortage (Case Study: Yamchi Reservoir dam, Ardabil). 15(1): 40-50. (In Persian)
32. Karaboga, D. and Basturk, B. 2007. A powerful and efficient algorithm for numerical function optimization artificial bee colony algorithm. *Journal of Global Optimization*, 459–471.
33. Karamouz, M., Reazportabari, M. and Kerachian, R. 2007. Application of genetic algorithms and artificial neural networks in conjunctive use of surface and growndwater resources. *Water International*. 32(1): 163-176. (In Persian)
34. Karamouz, M., Rezapourtabari, M., Kerachian, R. and Zahraie, B. 2005. *Conjunctive Use of surface and groundwater Resources with Emphasis on Water Quality*, ASCE, World Water and Environmental Resources Congress, Anchorage. May 15-19.
35. Karimi, A., Nikoo, M.R., Kerachian R. and Mokhtarpour A. 2013. Optimization of Long-term Conjunctive Water Use at Basin Scale Considering Water Quality Constraints: Case Study, Zayandehrude Basin. *Iranian Water Research Journal*. 8(14): 97-108. (In Persian)
36. Kennedy, J. and Eberhart, R.C. 1995. Particle swarm optimization, *Proceedings of the IFEE International Joint Conference on Neural Networks*: 1942-1948.
37. Ketabchi, H. and Ataie-Ashtiani, B. 2015. Evolutionary algorithms for the optimal management of coastal groundwater: A comparative study toward future challenges. *Journal of Hydrology*. 520: 193–213.
38. Kirkpatrick, S., Gelatt, C.D. and Vecchi, M.P. 1983. Optimization by simulated annealing. *Science*. 220: 671-680.
39. Kourakos, G. and Mantoglou, A. 2013. Development of a multi-objective optimization algorithm using surrogate models for coastal aquifer management, *J. Hydrol*, 479: 13–23.
40. Kumar, D.N., Raju, K.S. and Ashok, B. 2006. Optimal reservoir operation for irrigation of multiple crops using genetic algorithms. ASCE, *J.Irrig. Drain. Eng*. 132(2): 123-129.

61. Safavi, H.R., Kalantari, M. and Bozorg Haddad, O. 2019. Conjunctive management of groundwater and surface water using HONEY-BEE MATING algorithm. Sharif civil engineering journal. 35.2(2.2): 111-122. (In Persian)
62. Saghi-Jadid, M. and Ketabchi, H. 2019. Restoration management of groundwater resources using the combined model of numerical simulation - evolutionary ant colony optimization. Iran-Water Resources Research journal, 15(2): 119-133. (In Persian)
63. Sethi, L.N., Nathpanda, S. and Chandramal, B. 2002. Optimal crop planning and conjunctive use of water resources in a Costal river basin, Journal of Water resources management, 16: 145-169.
64. Shamir, U., Bear, J. and Gamiliel, A. 1984. Optimal annual operation of a coastal Aquifer, Water. Resour. Res., 20 (4): 435-444.
65. Shamsai A. and Forghani A. 2011. Conjunctive use of Surface and Ground Water Resources in Arid Regions, Iran-Water Resources Research journal, 7(2): 26-36. (In Persian)
66. Sunder, J. D., Deepak Khare and Jat, M. K. 2007. Assessment of Water Resources Allocation Options: Conjunctive Use Planning in a Link Canal Command, Resources, Conservation and Recycling, 51: 487-506.
67. Valizadegan, E. and Yazdanpanah, S. 2018. Quantitative model of optimal conjunctive use of Mahabad plain's surface and underground water resources. Amirkabir J. Civil Engeering. 50(4): 631-640. . (In Persian)
68. Vedula, S. 1985. Optimal Irrigation Planning in River Basin Development :The Case Study of Upper Cauvery River Basin, Water Resources System Planning :Some Case Studies for India, M.C Chaturvedi and P.Rogers eds., Indian Academy of Sci., Bangalur, India.
69. Vedula, S., Mujumdar, P.P. and Sekhar, G.C. 2005. Conjunctive use modeling for multicorp irrigation, Agriculture Water Management, 73: 193-221.
70. Wilhelm, M.R. and Ward, T.L. 1987. Solving quadratic assignment problem by simulated annealing, 51. Michalewicz, Z. 1996. Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York, ISBN 3-540-58090-5.
52. Michalewicz, Z. and Schoenauer, M., 1996. Evolutionary algorithms for constrained parameter optimization problems. Evolutionary computation, 4(1), 1-32.
53. Moghaddasi, M., Morid, S. and Araghinejad, SH. 2009. Optimization of Water Allocation During Water Scarcity Condition Using Non-Linear Programming, Genetic Algorithm and Particle Swarm Optimization (Case Study), Iran-Water Resources Research journal, 4(3): 1-13. (In Persian)
54. Noory, H., Liaghat, A.M., Parsinejad, M. and Bozorg Haddad, O. 2012. Optimizing Irrigation Water Allocation and Multicrop Planning Using Discrete PSO Algorithm. Journal of Irrigation and drainage engineering. 2012(138):437-444.
55. Qureshi, A. S. and Massih, I. 2003. Managing soil salinity through conjunctive use of surface water and ground water: A simulation study, ICID Asian Regional workshop, Chines, Taipei: 233-247.
56. Rao, S.S. 1984. Optimization Theory and Application, Second edition, John Wiley and Sons: 1247p.
57. Saberchenari, K., Abghari, H., Erfanian, M. and Gholizadeh, S. 2012. Short-term Model of Optimization Operation of Water Resources Using Particle Swarm Optimization and Compared with Genetic Algorithm Watershed Management Research (Pajouhesh & Sazandegi), 97: 63-72. (In Persian)
58. Safavi, H.R. and Bahreini, G.R. 2009. Conjunctive simulation of surface water and ground water resources under uncertainty. Iran J Sci Technol Trans B. 33(B1):.79-94.
59. Safavi, H.R., Darzi, F. and Marino, M.A. 2009. Simulation-Optimization Modeling of Conjunctive Use of Surface Water and Groundwater. Water Resources Management. 24(10):1965-1988.
60. Safavi, H.R. and Esmikhani, M. 2013. Conjunctive Use of Surface Water and Groundwater: Application of Support Vector Machines (SVMs) and Genetic Algorithms. Water Resour Manage. 27:2623-

74. Zecchin, A.C. Maier, H.R. Simpson, A.R., Leonard, M. and Nixon, J.B. 2007. Ant colony optimization applied to water distribution system design: Comparative study of five algorithms, Journal of Water Resources Planning and Management. ASCE, 133(1): 87-92.

75. Zegordi, S.H., Itoh, K. and Enkawa, T. 1995. A knowledgeable simulated annealing scheme for the early/tardy flow shop scheduling problem. International Journal of Production Research. 33: 1449-1466.

IIE Transactions, 107-119.

71. Yang, Ch., Chang, L, Ch., Chen, Sh. and Yeh, M. Sh. 2009. Multi-objective Planning for Conjunctive Use of Surface and Subsurface Water Using Genetic Algorithm and Dynamics Programming, J. of Water Resour. Plann. & Manage. 23: 417-437.

72. Yaron, D. and Dinar, A. 1982. Optimal allocation of water on a farm during feed season, J. Agric. Econ, 64: 452-458.

73. Yousefi, M. 2007. Conjunctive intelligent use of Surface and Ground Water Resources with Cyclic Storage Approach, M.Sc. Thesis, University of Tehran. 99 pp. (In Persian)



Abstract

A Review on the Conjunctive Management of Ground and Surface Water Resources with Emphasis on Application Optimization Models

H. Asadi*¹ and K. Shahedi²

Received: 2019/08/30 Accepted: 2020/01/29

Uneven spatial and temporal distribution of water and population growth in the world, especially in Iran in recent decades have caused problems in providing required water resources. In this regard, knowledge of management procedures and conjunctive utilization of ground and surface water resources as one of the important aspects of integrated management of water resources and their performance in various crisis management programs, water resources conservation and watersheds integrated management seems essential. Accordingly, the present study was conducted to provide a comprehensive information of past and recent studies about the mathematical models and evaluate their efficiency in integrated management of water resources, and overall review of each model expansion, advantages and limitations. Results showed that the integrated management is one of the new and efficient strategies in recent decades. Application of optimization and simulation techniques is a powerful and useful method in determination of management strategies in development of conjunctive optimum utilization of ground and surface water resources. In this regard, MODFLOW model in groundwater flow simulation and MT3DMS model in modeling of groundwater pollution were the most used models and GMS was used as a powerful, general, comprehensive and user-friendly model. Also the literature review on the evaluation of optimization algorithms in solving problems of water resources management showed that evolutionary algorithms with various degrees of complexity are capable of effective solving complex multi-restriction optimization problems for optimum utilization of water resources, planning and sustainable development in the future. In general the provided information in this study can be applied in future planning for sustainable development of water resources.

Keywords: Water resources management, Meta heuristic algorithm, Classic algorithm, Simulation

1. Corresponding Author and PhD Student, Department of Watershed Management Engineering, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Iran. Email: h.asadi@stu.sanru.ac.ir

2. Associate Professor, Department of Watershed Management Engineering, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Iran.