

# بررسی الگوریتم ژنتیک و کاربردهای آن در مهندسی و مدیریت منابع آب

سید مصطفی طباطبائی<sup>۱\*</sup>، علی شهیدی<sup>۲</sup>، سید رضا هاشمی<sup>۳</sup>

۱- گروه مهندسی منابع آب دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

۲- گروه مهندسی آب دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

۳- گروه مهندسی آب دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۲/۰۹

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۴/۳۰

## چکیده

با توجه به گسترده‌گی و پیچیدگی سیستم‌های منابع آب، تعیین سیاست و انتخاب گزینه و راهبردهای مناسب جهت عملکرد مناسب سیستم‌های منابع آب در شرایط مختلف ضرورت داشته و نیاز به یک فرایند بهینه‌سازی جامع دارد. در این تحقیق ابتدا ضرورت استفاده از روش‌های بهینه‌سازی تکاملی و سپس شرح مختصری درباره چگونگی اجرای عملگرهای الگوریتم ژنتیک به عنوان پرکاربردترین روش تکاملی پرداخته شده است. در ادامه مزایا و محدودیت‌های الگوریتم ژنتیک بررسی شده و سپس پژوهش‌های انجام شده پیرامون آن در چند بخش بیان شده است. نتایج نشان می‌دهد که الگوریتم ژنتیک در حل مسائل متنوع منابع آب بطور موثری از حل مسائل چند محدودیتی با فضای بزرگ برمی‌آید و ضمن توانایی دستیابی به جواب بهینه مطلق، قادر است در شرایط مختلف مجموعه‌ای از جواب‌های قابل قبول را به عنوان گزینه‌های پیش رو در اختیار قرار دهد. جهت افزایش کارایی الگوریتم و دستیابی به راه حل‌های بهتر، با توجه به ماهیت مساله می‌توان از نسخه‌های بهبود یافته یا تلفیق با مدل‌های شبیه‌سازی یا سایر روش‌های بهینه‌سازی ریاضیاتی از آن بهره مطلوب را برد.

واژه‌های کلیدی: بهینه‌سازی، روش‌های تکاملی، مدیریت منابع آب

## مقدمه

با در نظر گرفتن ابعاد و پیچیدگی‌های سیستم‌های منابع آب، استفاده از مدل‌های بهینه‌سازی یک ابزار کارآمد محسوب می‌شود. اما همواره عدم قطعیت‌ها نتایج مدل‌های بهینه‌سازی را تحت تاثیر قرار می‌دهند (Loucks et al, 2000). امروزه با گسترش فناوری، ابزارهای نوین انعطاف‌پذیر ایجاد شده و ترکیب آنها با مدل‌های بهینه‌سازی فضای جدیدی برای توسعه ابزارهای تحلیل، برنامه‌ریزی و مدیریت سیستم‌های منابع آب فراهم نموده است. توسعه این روش‌های انعطاف‌پذیر تا حد زیادی می‌تواند چگونگی برخورد با عدم قطعیت‌ها را بهبود دهد (کارآموز و زهرایی، ۱۳۸۲).

فعالیت‌های بخش مدیریت منابع آب را می‌توان به سه دسته‌ی تدوین سیاست‌های مدیریت منابع آب، اقدامات مدیریتی برای دستیابی به اهداف سیاست‌ها و ارزیابی اثرات آنها تقسیم نمود. سیاست‌های کلان مدیریت منابع آب در واقع ارتباط توسعه و نحوه بهره‌برداری از این منابع را با اهداف توسعه ملی مشخص می‌سازند. اولین مرحله تدوین سیاست‌های کلان مدیریت منابع آب پیشنهاد گزینه‌های مختلف با توجه به محدودیت‌ها و اهداف فراگیر و همه جانبه توسعه و مدیریت است (کارآموز و همکاران، ۱۳۸۵).

خودسازمان،<sup>۶</sup> الگوریتم ژنتیک زایشی<sup>۷</sup> و الگوریتم ژنتیک حالت دائمی (Michalewicz, 1999).

با توجه به گستردگی و پیچیدگی سیستم‌های منابع آب و لزوم بهینه‌سازی در بخش‌های مختلف آن، همچنین کاربردهای موفق الگوریتم ژنتیک، در این تحقیق به بررسی الگوریتم ژنتیک، نقاط قوت و ضعف و کاربردهای مختلف آن در صنعت آب پرداخته شده است.

### ساختار الگوریتم ژنتیک

GA شامل عملگرهای کدگذاری، ارزیابی، انتخاب، ترکیب، جهش و رمزگشایی است. ابتدا متغیرهای مساله کدگذاری می‌شود. در این مرحله الگوریتم بجای اینکه روی پارامترها یا متغیرهای مساله کاری انجام دهد با شکل کد شده آنها سروکار دارد. در مرحله ارزیابی تابع برازندگی از روی تابع هدف هر رشته را با یک مقدار عددی ارزیابی می‌کند و کیفیت آن را مشخص می‌کند. هر چه کیفیت رشته جواب بیشتر باشد مقدار برازندگی جواب بیشتر است و احتمال مشارکت برای تولید نسل بعدی افزایش خواهد یافت. در مرحله انتخاب یک جفت از کروموزوم‌ها برگزیده می‌شوند تا با هم ترکیب شوند. در واقع عملگر انتخاب رابط بین دو نسل است. روند انتخاب حالت تصادفی دارد و معیار انتخاب برازندگی می‌باشد. در عملگر ترکیب نسل قدیمی کروموزوم‌ها با یکدیگر مخلوط و ترکیب می‌شوند و نسل تازه‌ای از کروموزوم‌ها بوجود می‌آورند. عملگر ترکیب در الگوریتم ژنتیک باعث از بین رفتن پراکندگی یا تنوع

یکی از روش‌های انعطاف‌پذیر جهت حل مسائل پیچیده، بهینه‌سازی مبتنی بر هوش جمعی می‌باشد که با الهام از سیستم‌های بیولوژیکی و فیزیکی موجود در طبیعت به وجود آمده‌اند. تعداد زیادی ذره در فضای مساله پخش شده و به طور همزمان به دنبال جواب بهینه می‌گردند. این روش‌ها را الگوریتم‌های تکاملی<sup>۱</sup> می‌نامند (Rao, 2009). در واقع تکامل یک پروسه بهینه‌سازی مبتنی بر تغییرات تصادفی تدریجی نمونه‌های مختلف در یک جمعیت و انتخاب بهترین آنهاست. از مهم‌ترین تفاوت الگوریتم‌های تکاملی و الگوریتم‌های کلاسیک تولید دسته‌ای از جواب‌های مناسب در هر گام به جای تولید یک جواب توسط الگوریتم‌های تکاملی است که بهترین حالت مجموعه جواب بوده و یا می‌توان امیدوار بود که با مجموعه جواب اصلی فاصله زیادی نداشته است (Montalvo et al, 2008).

الگوریتم ژنتیک GA از اولین و موفق‌ترین الگوریتم‌های تکاملی محسوب می‌شود و کاربردهای موفقیت آمیزی از آن در علوم مختلف گزارش شده است. GA ذاتا برای حل مسائل بهینه‌سازی بدون قید مناسب است و می‌توان با اعمال تغییراتی برای حل مسائل بهینه‌سازی پیوسته و ترکیبی غیرخطی تحت قیود غیرخطی از نوع برابری و نابرابری نیز به کار برد (Goldberg, 1987 ; Halland, 1975). جهت بهبود عملکردهای این الگوریتم تاکنون چندین نسخه بهبود یافته ابداع شده که مهم‌ترین آنها عبارتند از الگوریتم ژنتیک سری<sup>۳</sup>، الگوریتم ژنتیک آشفته<sup>۴</sup>، الگوریتم ژنتیک هیبرید<sup>۵</sup>، الگوریتم ژنتیک

- 1- Evolutionary Algorithms
- 2 - Genetic Algoritm
- 3- Sequential GA
- 4 - Messy GA
- 5 - Hybrid GA
- 6 - Adaptiv GA
- 7 - Generational GA
- 8 - Steady State GA

ژنتیکی جمعیت می‌شود و در واقع اجازه می‌دهد ژن‌های خوب با یکدیگر ترکیب شوند.

عملگر جهش جواب‌های ممکن دیگر را تولید می‌کند. در عملگر جهش با احتمال معین به رشته‌های مرحله قبل جفت‌گیری نسل قبل اعمال و رشته‌های حاصل از مجموعه رشته‌های نسل بعد اضافه می‌شود. نتیجه عمل عملگر جهش باعث افزایش احتمال گریز از نقاط بهینه محلی خواهد شد. جهش باعث جستجو در فضاهای دست نخورده‌ی مساله می‌شود و مهم-ترین وظیفه آن جلوگیری از همگرایی در بهینه محلی است. جهش بر اساس احتمال جهش اتفاق می‌افتد و اگر گام‌های جهش زیاد باشد جستجوی الگوریتم ژنتیک کاملاً تصادفی خواهد شد.

عملگر رمزگشایی عکس عملگر کدگذاری است و بعد از اینکه الگوریتم بهترین جواب را برای مساله ارائه داد عمل رمزگشایی بر روی جواب‌ها اعمال می‌شود تا جواب بصورت تابع واقعی ظاهر شود. معمولاً سهم هر یک از این عملگرها در تولید رشته‌های مجموعه جدید پیش از اجرای برنامه تعیین می‌شود. پس از تولید هر مجموعه جدید از رشته‌های دودویی مقدار تناسب هر یک از رشته‌ها محاسبه شده و شرط لازم برای خاتمه اجرای الگوریتم بررسی می‌شود. در صورت عدم تامین شرط در نظر گرفته شده برای اجرای الگوریتم با تکرار مراحل فوق مجموعه‌های جدیدی از رشته‌ها تولید شده و مقادیر تناسب متناظر محاسبه می‌شود. پس از حصول همگرایی و یا تامین شرط خاتمه، الگوریتم متوقف شده و بهترین رشته به دست آمده در آخرین نسل به عنوان جواب بهینه معرفی می‌شود.

#### محاسن الگوریتم ژنتیک

مهم‌ترین نقطه قوت الگوریتم ژنتیک موازی بودن آن است بطوریکه برای حل مساله چندین نقطه شروع

وجود دارد و در یک لحظه می‌تواند فضای مساله را از چند جهت مختلف جستجو کند. این مساله کارایی الگوریتم ژنتیک در حل مسائل غیرخطی با فضای بزرگ را افزایش می‌دهد. با توجه به اینکه اغلب مسائل واقعی غیرخطی هستند، در مسائل خطی هر عنصر مستقل است و تغییر بر یک قسمت بر کل سیستم تاثیر مستقیم دارد. در مسائل غیرخطی تغییر در یک قسمت ممکن است تاثیری ناهماهنگ بر کل سیستم و یا تغییر در چند عنصر تاثیر فراوانی بر سیستم بگذارد. موازی بودن الگوریتم ژنتیک باعث حل این مساله می‌شود. مثلاً برای حل یک مساله خطی ۱۰ رقمی ۲۰ راه حل وجود دارد و در یک مساله غیرخطی ۱۰ رقمی ۲۱۰ راه حل وجود دارد. از محاسن دیگر الگوریتم ژنتیک خاصیت ساعت‌ساز نابینا بودن آن است. یعنی الگوریتم ژنتیک از مسائلی که حل می‌کند اطلاعی ندارد. الگوریتم برای حل مساله تغییرات تصادفی را در راه حل‌های کاندید نشان می‌دهد و از تابع برازش برای سنجش اینکه تغییرات پیشرفتی ایجاد کرده‌اند یا نه استفاده می‌کند. این عمل به الگوریتم اجازه می‌دهد در یک فضای گسترده‌تر شروع به حل مساله کند و از آنجایی که تصمیمات آن اساساً تصادفی است همه راه حل‌های ممکن به روی مساله باز است. از دیگر محاسن می‌توان به جستجوی سراسری خوب، قابلیت پیاده‌سازی آسان، توانایی بهینه‌سازی با متغیرهای گسسته و پیوسته و حل مسائل بهینه‌سازی ترکیبی غیرخطی تحت قیود غیرخطی از نوع برابری و نابرابری را نام برد.

#### معایب و محدودیت‌های الگوریتم ژنتیک

الگوریتم ژنتیک فضای مساله را به صورت سراسری بررسی می‌کند و جستجوی محلی آن ضعیف است. از دیگر معایب آن نیاز به کدگذاری

جریمه‌های است و بر خلاف سه روش قبل که از ورود جواب‌های غیرموجه جلوگیری می‌کردند، جواب غیرموجه با احتمال کم احتمال حضور می‌یابند. در استراتژی جریمه‌ای برای هر تخلف از محدودیت‌ها یک جریمه اختصاص داده می‌شود که در تابع هدف تعریف می‌شود. مساله اصلی چگونگی انتخاب یک مقدار مناسب برای جریمه می‌باشد. در این روش یک جواب غیرموجه به سادگی حذف نمی‌شود زیرا ممکن است در ژن‌های آن اطلاعات مفیدی وجود داشته باشد که با اندکی تغییر به جواب بهینه تبدیل شود. وی راهکارهای دیگری مانند استفاده از بهینه‌گر محلی، تغییر پارامتر جمعیت اولیه، آهنگ جهش و کسر ادغام، تغییر الگوریتم ژنتیک باینری به پیوسته و بالعکس را نیز پیشنهاد داد.

در ادامه این نوشتار به تحقیقات انجام شده در زمینه کاربرد الگوریتم ژنتیک در مسائل مربوط به صنعت آب پرداخته شده است. ابتدا تحقیقات محققین در خارج از ایران و سپس تحقیقات محققین داخل کشور در زمینه‌های مختلف بطور مجزا مورد بررسی قرار گرفته است.

#### تحقیقات محققین خارج از ایران

از اولین کاربردهای الگوریتم ژنتیک در منابع آب می‌توان به تحقیق Easat and Hall (۱۹۹۴) اشاره کرد. آنها الگوریتم ژنتیک را در حل یک مساله چهار مخزنه بکار برده و نتیجه گرفتند که الگوریتم ژنتیک قابلیت بالایی در حل مسائل بهینه‌سازی منابع آب دارد. Mohan (۱۹۹۷) مدلی را بر مبنای الگوریتم ژنتیک به منظور تخمین پارامترهای ماسکینگام غیرخطی ارائه نمود. نتایج وی نشان داد هیدروگراف خروجی حاصل از روش الگوریتم ژنتیک با هیدروگراف جریان خروجی مشاهداتی نسبت به روش‌های ارائه شده سایر محققان انطباق بالاتری

متغیرهای مساله با استفاده از رشته‌های دو دویی است که باعث مصرف حافظه و افزایش بار محاسباتی الگوریتم خواهد شد. از دیگر معایب چگونگی نوشتن عملگر ارزیاب است که منجر به بهترین راه حل برای مساله شود. اگر این کارکرد برآزش به خوبی انجام نشود ممکن است باعث شود که راه حلی برای مساله پیدا نشود و یا مساله اشتباه حل شود. به علاوه برای انتخاب تابع مناسب برای ارزیاب، پارامترهای دیگری مثل اندازه جمعیت، نرخ ترکیب، قدرت و نوع انتخاب هم باید مورد توجه قرار گیرند. مشکل دیگر وقوع پدیده نارس است و هنگامی اتفاق می‌افتد که ژنی که فاصله زیادی با سایر ژن‌ها دارد و خیلی بهتر از بقیه باشد خیلی زود شناسایی می‌شود و مساله را به سوی جواب بهینه محلی سوق دهد. این اتفاق معمولاً در جمعیت‌های کم اتفاق می‌افتد. همچنین عملگرهای الگوریتم ژنتیک در برخی مواقع کروموزوم‌های غیرموجه تولید می‌کنند و حل مساله را با محدودیت مواجه می‌سازند.

#### استراتژی‌های در مواجهه با محدودیت

Michalewicz (۱۹۹۹) جهت بهبود عملکرد و پوشش معایب الگوریتم ژنتیک چند راه حل ارائه نمود که روش اول اصلاح عملگرهای ژنتیک است و در آن عملگر ژنتیکی طوری تعریف می‌شود که پس از عمل بر روی کروموزوم‌ها کروموزوم تولید شده نیز موجه باشد. روش دوم استراتژی ردی است که در آن پس از تولید هر کروموزوم آن را از نظر موجه بودن تست کرده و در صورت غیر موجه بودن حذف می‌گردد. روش سوم استراتژی اصلاحی می‌باشد که در این روش بجای اینکه کروموزوم غیرموجه حذف گردد تبدیل به یک کروموزوم موجه می‌شود. این روش به مساله وابسته بوده و یافتن فرایند اصلاح گاهی بسیار پیچیده می‌باشد. روش چهارم استراتژی

Jian et al (۲۰۰۵) از الگوریتم ژنتیک چندهدفه جهت برنامه‌ریزی سیستم‌های چند مخزنه استفاده نموده و ضمن تعریف چندین جمعیت برای مساله مورد بررسی نتیجه گرفتند که با وجود افزایش تعداد متغیرها و نیز طولانی شدن زمان اجرای برنامه، باز هم الگوریتم ژنتیک از روش‌هایی محسوب می‌شود که در حل مسائل با ورودی‌های کم و شرایط پیچیده از پتانسیل بالایی برخوردار است. Broad et al (۲۰۰۵) یک مدل تغییر یافته شبکه عصبی برای طراحی بهینه شبکه‌های توزیع آب ارائه نمودند که شبکه عصبی پس از آموزش با تعداد زیادی داده‌های آموزشی در مدل الگوریتم ژنتیک جایگزین بخش شبیه‌سازی مدل که قبلاً توسط نرم افزار EPANET انجام می‌گرفته می‌شود. شبکه عصبی مذکور پس از ورود به مدل بهینه‌سازی، آموزش داده می‌شود که با توجه به عدم آموزش مجدد آن، امکان بروز خطا در طی نسل‌های آینده مدل بهینه‌سازی وجود خواهد داشت. Kumar et al (۲۰۰۶) در یک طرح برنامه-ریزی آبیاری، نتایج حاصل از دو روش الگوریتم ژنتیک و برنامه‌ریزی خطی را با یکدیگر مقایسه کردند. تابع هدف آنها در این مساله حداکثر کردن عملکرد نسبی گیاهان بود. نتایج آنها نشان داد که عملکرد الگوریتم ژنتیک در برنامه‌ریزی خطی در توزیع آب بین مراحل مختلف رشد گیاهان تفاوت چندانی ندارد. Yan and Minsker (۲۰۰۶) برای کاهش زمان محاسباتی یک مدل الگوریتم ژنتیک تک‌هدفه شبکه عصبی را برای طراحی بهینه‌ی پایش، بمنظور کاهش آلودگی آب‌های زیرزمینی با حداقل‌سازی هزینه ارائه دادند. Karahan et al (۲۰۰۷) برای پیش‌بینی شدت بارش به ازای دوره-های بازگشت مختلف از الگوریتم ژنتیک استفاده نمودند. نتایج حاصل از کمترین خطای مربعات نشان داد که الگوریتم ژنتیک بهترین برازش را بر داده‌های اندازه‌گیری شده ارائه می‌دهد (Chen et al (۲۰۰۸)

دارد. Sharif and Wardlaw (۱۹۹۹) روش‌های مختلف عملگرهای ژنتیکی را تشریح نموده و سپس از آن در بهینه‌سازی برنامه‌ریزی مساله چهار مخزنه بهره بردند. آنها تحقیقات Easat and Hall را ارزیابی کرده و قابلیت الگوریتم ژنتیک را برای بهره-برداری بهنگام مخازن با پیش‌بینی جریان استوکاستیک مورد بررسی قرار دادند. آنها به تشریح روش‌های مختلف عملگرهای ژنتیکی پرداخته و نحوه عمل هر یک از این عملگرها را در مساله چهار مخزنه ارائه کردند. سپس یک مساله چند مخزنی را با الگوریتم ژنتیک حل و نشان دادند که الگوریتم ژنتیک از حل مسائل پیچیده با تابع هدف و قیود غیرخطی به خوبی برمی‌آید. Ndirito (۲۰۰۳) بهبود کارایی الگوریتم ژنتیک را در روش اصلاح شده‌ای جهت کالیبراسیون مدل بارش-رواناب بررسی کرده و نتیجه گرفت که با استفاده از الگوریتم ژنتیک اصلاح شده در مسائل هیدرولوژی نیز می‌توان به پاسخ‌های منطقی و قابل قبولی دست یافت. Chen (۲۰۰۳) از الگوریتم ژنتیک برای بدست آوردن منحنی فرمان ده روزه برای یک مخزن بهره برد و برای ارزیابی کارایی الگوریتم از شبیه‌سازی استفاده نمود. طبق نتایج وی بکارگیری روش منحنی فرمان با الگوریتم ژنتیک می‌تواند کمبود آبی را حداقل سازد و ارتفاع آب مخزن را در سطح بالایی نگه دارد. Raju and Kumar (۲۰۰۴) تحقیقی در مورد استفاده از الگوریتم ژنتیک در برنامه‌ریزی آبیاری و توسعه الگوی کشت بهینه در راستای افزایش سود یک پروژه آبیاری انجام دادند. محدودیت‌های در نظر گرفته شده در این مدل بهینه‌سازی معادله پیوستگی، نیاز آب، تنوع محصول و محدودیت ذخیره بود. آنها نتایج به دست آمده از الگوریتم ژنتیک را با حل برنامه‌ریزی خطی مقایسه و نتایج را مشابه گزارش کردند. به بیان آنها می‌توان از الگوریتم ژنتیک به عنوان یک مدل بهینه‌سازی موثر برای برنامه‌ریزی هر سیستم آبیاری استفاده کرد.

برای پیش‌بینی جریان رودخانه‌ای به تحلیل غیرخطی سری‌های زمانی با استفاده از الگوریتم ژنتیک پرداختند. نتایج آنها نشان داد که الگوریتم ژنتیک نسبت به روش‌های تحلیل سری‌های زمانی عملکرد بسیار مناسبتری دارد.

### تحقیقات محققین داخل ایران

#### کاربرد الگوریتم ژنتیک در مدیریت منابع آب

ممتحن و برهانی داریان (۱۳۸۴) به بررسی کاربرد الگوریتم ژنتیک در بهینه‌سازی بهره‌برداری از سیستم‌های چندمخزنی پرداختند. آنها پس از بررسی اجمالی الگوریتم ژنتیک پیشنهادی، عملکرد آن را در یک سیستم بهینه‌سازی سه مخزنی بررسی و با روش‌های برنامه‌ریزی پویای استوکاستیک (SDP) و برنامه‌ریزی پویا با رگرسیون (DPR) مقایسه کردند. نتایج آنها نشان دهنده برتری الگوریتم ژنتیک هم به لحاظ سرعت محاسبات و هم مقدار تابع هدف در مقایسه با دو روش دیگر بود. حسینی و همکاران (۱۳۸۵) به تخمین پارامترهای مدل مفهومی ناش با استفاده از الگوریتم ژنتیک و حداقل مربعات معمولی پرداختند. آنها کارایی این دو روش را با بکارگیری پارامترهای تخمینی در شبیه‌سازی ۷ واقعه بارندگی- رواناب واقع در شمال کشور تایوان مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج در هر دو مدل نشان داد که مدل الگوریتم ژنتیک قادر به بهبود ضریب کارایی و کاهش ضریب تغییرات و خطای دبی اوج مدل نسبت به روش حداقل مربعات می‌باشد. اصغری مقدم و همکاران (۱۳۸۶) کارایی الگوریتم ژنتیک را در تخمین پارامترهای هیدرولیکی سفره‌های تحت فشار از داده‌های آزمایش پمپاژ مورد ارزیابی قرار دادند. بدین منظور توسط الگوریتم ژنتیک پارامترهای چهار سفره تحت فشار برآورد و با نتایج حاصل از روش‌های گرافیکی مقایسه کردند. نتایج آنها نشان داد که الگوریتم ژنتیک روشی قابل اعتماد و قوی جهت تخمین پارامترهای

هیدرولیکی سفره‌های تحت فشار می‌باشد. کیفرو و همکاران (۱۳۹۰) به تخصیص بهینه آب در محدوده سد علویان و شبکه آبیاری و زهکشی صوفی‌چای در استان آذربایجان شرقی با استفاده از الگوریتم ژنتیک پرداختند. نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد که اختلاف میزان آب تخصیص یافته واقعی و مقدار بهینه در مناطق مختلف بطور متوسط بیش از ۲/۱ میلیون متر مکعب است. نوروزی و همکاران (۱۳۹۰) جهت بهره‌برداری بهینه از یک سیستم چند مخزنه شامل سدهای گلستان و وشمگیر واقع در حوزه گرگانرود استان گلستان از الگوریتم ژنتیک بهره بردند. آنها با توجه به حجم ورودی ماهانه به سد، نیاز آبی گیاهان کشت شده در پایین دست و نیز جریانات حد فاصل مخازن، برنامه را اجرا کردند. نتایج حاصل از تحقیق آنها در زمینه میزان حجم آب خروجی در ماه‌های مختلف در آنالیز حساسیت در رابطه با تغییر احتمال عملگرهای همآوری و جهش نشان داد که بهترین حالت همگرایی در شرایطی رخ می‌دهد که احتمال همآوری ۰/۸ بوده و احتمال جهش ۰/۱ باشد. به این ترتیب پس از ۶۰۰ نسل میزان بهینه کمیت‌ها حاصل شده است. ظهیری و همکاران (۱۳۹۱) برای تعیین رابطه دبی-اشل برای مقاطع آزمایشگاهی و صحرایی از الگوریتم ژنتیک استفاده کردند. آنها با استفاده از حدود ۴۰۰ داده دبی-اشل از ۳۰ مقطع مرکب آزمایشگاهی و صحرایی با شرایط مختلف هندسی و هیدرولیکی رابطه‌ای بر مبنای الگوریتم ژنتیک برای محاسبه دبی جریان در مقاطع مرکب ارائه دادند. به بیان آنها از این رابطه پیشنهادی می‌توان در طرح‌های کنترل سیلاب و محاسبات روندیابی سیلاب در رودخانه‌ها و طراحی کانال‌های انتقال آب با مقاطع مرکب استفاده نمود. ولی سامانی و همکاران (۱۳۹۲) توسط الگوریتم ژنتیک روندیابی هیدرولوژیکی سیل را به روش ماسکینگام خطی مورد بررسی قرار دادند. روش آنها برای رودخانه‌های یک

در ایستگاه تحقیقاتی پنبه هاشم آباد گرگان با الگوریتم ژنتیک روابط مختلف برای تخمین مقدار ضریب یکنواختی توزیع آب با استفاده از پارامترهای مختلف مورد بررسی قرار دادند. با توجه به مقدار همبستگی و انحراف معیار نسبت مقادیر تخمین زده شده به اندازه-گیری شده حاصل از محاسبات الگوریتم ژنتیک معادله‌ای استخراج کردند.

روحانی و افشار (۱۳۹۲) طراحی بهینه سیستم انتقال ثقلی برای مقابله با ضربه قوچ ناشی از بسته شدن شیر با دو روش الگوریتم ژنتیک و بهینه‌سازی ریاضی مورد بررسی قرار دادند. آنها با تابع هدف قرار دادن مجموع هزینه‌های طرح شامل خرید تجهیزات، اجرا و نصب به دنبال طراحی بهینه سیستم انتقال و مقایسه قابلیت‌های دو روش بودند. در نهایت قطر و ضخامت بهینه یک سیستم انتقال به گونه‌ای تعیین کردند که پدیده ضربه قوچ رخ ندهد. اصلانی و همکاران (۱۳۹۲) به تعیین مقادیر مناسب پارامترهای الگوریتم ژنتیک جهت بهینه‌سازی سدهای بتنی وزنی پرداختند. آنها حساسیت مدل را نسبت به مقادیر پارامترها مورد ارزیابی قرار دادند. طبق نتایج آنها در بهینه‌سازی مقطع سدهای بتنی وزنی با الگوریتم ژنتیک در بهترین حالت نرخ تکرار، جمعیت اولیه، نرخ هم‌آوری و نرخ جهش و به ترتیب ۳۰، ۵۰، ۰/۵ و ۰/۳ به دست آمد که این اطلاعات برای مطالعه سدهای دیگر با استفاده از الگوریتم ژنتیک می‌تواند مفید باشد. دهقانی و همکاران (۱۳۹۳) به ارائه یک روش جدید در بهینه‌سازی اقتصادی سیستم انحراف سد با استفاده از الگوریتم ژنتیک پرداختند و نتایج خود را با روش ضرایب لاگرانژ و سد واقعی، مورد بررسی قرار دادند. تابع هدف آنها کمترین هزینه احداث سیستم انحراف با ارضای کلیه ملاحظات طراحی بود. نتایج آنها نشان داد روش الگوریتم ژنتیک و ضرایب لاگرانژ جهت بهینه‌سازی هزینه ساخت سیستم انحراف و قطر بهینه تونل و کاهش زمان احداث تونل انحراف

شاخه‌ای و چند شاخه‌ای و همچنین برای رودخانه فاقد آمار هیدروگراف حوضه میانی اعمال شد. طبق نتایج آنها در کلیه موارد به کار برده شده نتایج محاسباتی با نتایج واقعی انطباق رضایت بخشی نشان داده است. زرگر و همکاران (۱۳۹۴) جهت بهینه‌سازی بهره‌برداری از سرریزهای دریچه‌دار در سیستم‌های چندمخزنه با استفاده از الگوریتم ژنتیک به مطالعه موردی سد دز و بختیاری پرداخته و نتایج را با تحقیقات سایر محققین مقایسه کردند. نتایج آنها نشان داد اجرای مدل شبیه‌سازی-بهینه‌سازی در سدهای مورد مطالعه باعث کاهش قابل ملاحظه‌ی خسارت سالانه سیلاب قابل انتظار شده که نشانگر عملکرد مناسب مدل بهینه‌سازی می‌باشد.

#### کاربرد الگوریتم ژنتیک در مسائل مهندسی آب

افشار و دارائی خواه (۱۳۸۹) عملکرد الگوریتم ژنتیک را در طراحی بهینه سرریزهای متوالی مورد ارزیابی قرار دادند. هدف آنها یافتن مقادیری برای ارتفاع و طول سرریزهای متوالی که ضمن تمام قیدهای هیدرولیکی و تپوگرافی مساله کمترین هزینه ساخت را داشته باشد. آنها نتایج خود را با نتایج روش سنتی ویتال و پوری مقایسه کردند. نتایج آنها نشان داد در روش ویتال و پوری بهینه‌سازی سرریزها و حوضچه‌های آرامش نیازمند تغییرات است. اصول حاکم بر مساله ثابت است اما ماهیت مساله بهینه‌سازی نیازمند تغییرات است. نتایج آنها بیانگر توانایی الگوریتم ژنتیک در حل اینگونه مسائل بود. بطور مشابه شجاع و همکاران (۱۳۹۱) جهت طراحی بهینه سرریزهای پلکانی برای جایگزینی سرریز صاف سد ساروق واقع در استان آذربایجان غربی از الگوریتم ژنتیک بهره بردند.

هزارجریبی و همکاران (۱۳۹۰) به تخمین یکنواختی توزیع آب در آبیاری بارانی با استفاده از الگوریتم ژنتیک پرداختند. آنها با داده‌های مشاهده‌ای

نسبت به روش شبکه عصب مصنوعی عملکرد بهتری دارد.

### کاربرد تلفیقی الگوریتم ژنتیک و شبکه عصب مصنوعی

سلطانی و پورطبری (۱۳۹۱) به تعیین عوامل موثر بر نرخ شکست لوله‌ها در شبکه‌های توزیع آب با استفاده از تلفیق الگوریتم ژنتیک و شبکه عصب مصنوعی پرداختند. آنها برای شبیه‌سازی نرخ شکست لوله‌ها از شبکه عصب مصنوعی استفاده کردند. با توجه به عدم توانایی شبکه‌های عصبی در مشخص کردن تاثیر هر متغیر مستقل بر متغیر وابسته، برای تعیین پارامترهای ورودی موثر بر نرخ شکست و همچنین مناسب‌ترین پارامترهای مرتبط با ساختار شبکه عصب مصنوعی، از الگوریتم ژنتیک با تابع هدف ارائه ساختاری با کمترین میزان خطای شبیه‌سازی، بهره بردند. نتایج آنها نشان داد روش ترکیبی پیشنهادی قادر است پارامترهای بهینه و موثر در نرخ شکست لوله‌ها را از میان عوامل متعدد موثر بر نرخ شکست استخراج کند و این روش کارایی بالایی در شبیه‌سازی روابط غیرخطی و پیچیده دارد. بهزادیان و اردشیر (۱۳۸۶) یک مدل بهینه‌سازی چندهدفه نوین برای انتخاب نقاط بهینه در شبکه توزیع آب به منظور نصب ابزارهای اندازه‌گیری فشار و کاهش زمان اجرای مدل بهینه‌سازی چندهدفه از تلفیق الگوریتم ژنتیک با شبکه عصب مصنوعی استفاده کردند. نتایج آنها نشان داد تلفیق شبکه‌های عصب مصنوعی با الگوریتم ژنتیک برای برآورد تابع هدف بخشی از جواب‌ها، کاهش چشمگیری در زمان اجرا دارد و می‌تواند در کاهش اجرای مدل‌های بهینه‌سازی با زمان اجرای طولانی نویدبخش باشد. فقیه (۱۳۸۹) به ارزیابی کاربرد شبکه عصب مصنوعی و بهینه‌سازی آن با الگوریتم ژنتیک در تخمین داده‌های بارش ماهانه پرداخت. نتایج وی تلفیق روش شبکه عصب

مصنوعی با الگوریتم ژنتیک را مثبت ارزیابی کرده و روش تلفیقی در اکثر موارد برتری خود را نسبت به اجرای شبکه عصبی بدون بهینه‌سازی نشان داد. حسن‌زاده و همکاران (۱۳۹۰) به پیشبینی خشکسالی با استفاده از تلفیق الگوریتم ژنتیک و مدل ترکیبی شبکه عصبی-موجکی پرداختند. نتایج آنها نشان داد که روش الگوریتم ژنتیک جواب مطلوبتری نسبت به روش شبکه عصبی موجکی داشته و به‌کارگیری روش تلفیقی در مقایسه با کاربرد هر یک از این دو روش نتایج مطلوب‌تری دارد. زمانی‌احمد محمودی و همکاران (۱۳۹۳) روش تلفیقی زمین‌آمار و شبکه عصب مصنوعی بهینه شده با الگوریتم ژنتیک را جهت تخمین سطح آب زیرزمینی در دشت رامهرمز مورد بررسی قرار دادند. نتایج آنها نشان داد که ترکیب این دو مدل با الگوریتم ژنتیک دارای معیارهای ارزیابی مناسب‌تری در تخمین سطح ایستایی نسبت به کاربرد روش زمین‌آمار می‌باشد. آنها جهت تخمین سطح ایستایی این روش را پیشنهاد دادند.

### کاربرد تلفیقی الگوریتم ژنتیک با سایر مدل‌ها

تابش و همکاران (۱۳۸۹) با استفاده از الگوریتم ژنتیک میزان تزریق کلر در شبکه‌های آبرسانی را بهینه کردند. آنها میزان تزریق کلر در محل‌های تزریق را با تلفیق مدل تحلیل هیدرولیکی و مدل-سازی کیفی EPANET بررسی و توسط الگوریتم ژنتیک بهینه‌سازی کردند. نتایج مدل ارائه شده حاکی از کاهش کلر مصرفی در شبکه و افزایش درصد قرار گرفتن مقادیر کلر باقی مانده شبکه در محدوده استاندارد بود. تقیان و همکاران (۱۳۹۱) در بهینه‌سازی قاعده جیره‌بندی سدهای مخزنی، الگوریتم ژنتیک را به مدل شبیه‌ساز ARSP که دارای ساختار برنامه‌ریزی خطی است متصل و کارایی مدل را در سیستم منابع آب رودخانه زهره ارزیابی کردند. نتایج



آنها نشان داد که مدل جدید، شدت کمبودها را نسبت به حالت بدون جیره‌بندی نیازها تا حد زیادی بهبود بخشیده است. همچنین مدل جدید امکان در نظر گرفتن جزئیات بیشتری از سیستم‌های منابع آب را در مقایسه با مدل‌های قبلی فراهم ساخته است.

رئییسی و غفوری (۱۳۹۲) برای بهره‌برداری بهینه از آبخوان‌های ساحلی برای مقابله با تهاجم آب شور دریا از یک مدل شبیه‌سازی به همراه الگوریتم ژنتیک استفاده نمودند که مدل بهینه‌ساز بر روی یک آبخوان ساحلی آزمایش و بر اساس نتایج بهینه‌سازی میزان پمپاژ از هر چاه با ترکیب‌های مختلفی از قیود شوری و بار هیدرولیکی مشخص شد. به بیان آنها امکان استفاده از این مدل برای سناریوهای مدیریتی متفاوت از آنچه که در تحقیقشان ارائه شد برای مدیریت بهینه و بهره‌وری حداکثر از آب‌های زیرزمینی وجود دارد. ولیزادگان و همکاران (۱۳۹۲) با استفاده از الگوریتم ژنتیک به بهره‌برداری بهینه از تخلیه‌کننده‌های تحتانی جهت کمینه‌سازی رسوبگذاری در مخازن سدها پرداختند. آنها به منظور شبیه‌سازی رسوبگذاری در مخزن سد نرم افزار شبیه‌ساز رسوبگذاری GSTAR3 را بکار بردند. نتایج آنها نشان داد استفاده از الگوریتم ژنتیک جهت کمینه‌سازی رسوبگذاری مخازن از کارایی خوبی برخوردار است.

اژدری مقدم و جعفری ندوشن (۱۳۹۲) جهت بهینه‌یابی هندسه سرریز کنگره‌ای ذوذنقه‌ای یک سد در ایالات متحده آمریکا از مدل فازی-عصبی ANFIS و الگوریتم ژنتیک استفاده کردند. تابع هدف آنها کمینه‌سازی هزینه‌های سرریز با ارضای قیودات هیدرولیکی بود. مقایسه نتایج حاصل از این روش با مقادیر موجود ۱۳ درصد کاهش هزینه‌ها را نشان داد. نخعی و همکاران (۱۳۹۳) جهت مدیریت بهره‌برداری بهینه از آبخوان دشت ساحلی ارومیه و تعیین نرخ بهینه پمپاژ با استفاده از مدل MODFLOW طراحی را انجام داده و سپس توسط

الگوریتم ژنتیک نرخ پمپاژ را بهینه کردند. جعفری ندوشن و همکاران (۱۳۹۴) با تابع هدف کمینه کردن هزینه‌ها با ارضای قیودات هیدرولیکی در طراحی جریان در حوضچه رسوبگیر و بهینه‌یابی هندسه آن، به طور رضایت بخشی از مدل فازی عصبی و الگوریتم ژنتیک بهره بردند. ایزدی و رخشنده‌رو (۱۳۹۴) با استفاده از الگوریتم ژنتیک بر اساس معیارهای کمی و کیفی به بهینه‌یابی اقتصادی شبکه آبرسانی پرداختند. آنها با بررسی شبکه دو مخزنه تلاش کردند تا اثر معیار کمی قابلیت اطمینان برای ایجاد ظرفیت اضافی در شبکه برای تامین آب مصرفی در مواقع بحرانی و معیار کیفی غلظت مناسب کلر آزاد باقی مانده در تمام نقاط شبکه بر روی طراحی، هزینه شبکه بررسی شود. آنها نتایج حاصل را با نرم‌افزار EPANET شبیه‌سازی کردند. نتایج آنها نشان داد با استفاده از الگوریتم ژنتیک می‌توان با اندکی افزایش هزینه، ارتباطی هماهنگ میان پارامترهای کمی و کیفی با اهداف بهینه‌یابی ایجاد نمود. و از این طریق مبنای جدیدی برای قضاوت انتخاب نهایی حاصل شود. احمدیان‌فر و همکاران (۱۳۹۵) به ارائه یک مدل بهینه‌سازی چندهدفه شامل اهداف کشاورزی و زیست محیطی در یک سیستم سه سدی منابع آب پرداختند. آنها از تلفیق مدل شبیه‌ساز بهره‌برداری جیره‌بندی گسسته و الگوریتم ژنتیک با رویکرد مرتب‌سازی نامغلوب استفاده کرده تا شاخص کمبود آب برای تامین اهداف مورد نظر در طول دوره آماری ۴۸ ساله کاهش یابد. نتایج آنها بیانگر کارایی موثر الگوریتم ژنتیک در به دست آوردن مجموعه جواب‌های قابل قبول است و این به تصمیم‌گیری در مورد نحوه تامین آب اهداف متضاد کشاورزی و زیست محیطی در شرایط مختلف و پیچیده بهره‌برداری از جمله شرایط خشکسالی کمک می‌نماید.

### سایر کاربردهای متفاوت الگوریتم ژنتیک

اسدی پور و همکاران (۱۳۹۱) جهت تعیین پارامترهای بهینه در روش سوگنو منطق فازی برای بهینه‌سازی هیدروگراف خروجی مخزن سد کارون ۳ از الگوریتم ژنتیک استفاده کردند. تابع هدف آنها در این مساله به صورت مجموعه‌ای از اهداف مختلف کنترل سیل مانند حداقل کردن پیک خروجی، حداقل خرابی پایین دست، ذخیره سیلاب و نگهداری سطح نهایی آب به ذخیره مطلوب و... منظور شد. آنها با مقایسه نتایج کار خود با دو تحقیق دیگر به این نتیجه رسیدند که روش پیشنهادی قابلیت نسبتاً بهتری در بهینه‌سازی عملکرد مخزن داشته است. حقیقی (۱۳۹۲) به طراحی اقتصادی شبکه‌های آبرسانی با استفاده از عملگر مفهومی آستانه پویا در الگوریتم ژنتیک پرداخت. توسط این عملگر در فرایند بهینه‌سازی فضای تصمیم‌گیری، مساله بصورت تدریجی و منطبق با تاریخچه جستجو فشرده و کوچک می‌شود و شانس رسیدن به بهینه مطلق در آستانه‌های مختلف افزایش می‌یابد. وی قابلیت این روش را با حل دو مثال مورد ارزیابی قرار داد. نتایج وی نشان داد که الگوریتم پیشنهادی سبب افزایش کارایی فرایند جستجو و امید دستیابی به پاسخ بهینه مطلق در مساله طراحی شبکه‌های آبرسانی می‌شود. یزدی (۱۳۹۴) به منظور طراحی بهینه شبکه‌های توزیع آب با استفاده از تجزیه عملگرهای الگوریتم ژنتیک به توسعه الگوریتم پرداخت. وی به جای حل مساله با استفاده از تجمیع توابع هدف، مساله اصلی را به چند زیرمساله تک هدفه گسسته تبدیل کرد و برای حل دو مساله استاندارد و شناخته شده‌ی طراحی بهینه شبکه توزیع آب به ترتیب با ۹۹ و ۴۵۴ متغیر تصمیم مورد استفاده قرار داد. سپس عملکرد این مدل را با دو الگوریتم NSGA و SPEA مقایسه کرد. نتایج وی نشان داد که الگوریتم ژنتیک مبتنی بر تجزیه هم به لحاظ کیفیت جواب‌ها و هم به لحاظ

حفظ تنوع در جمعیت بر دو الگوریتم دیگر برتری دارد. این نتایج بیانگر امیدبخش بودن بهبود عملکرد الگوریتم ژنتیک در حل مسائل پیچیده بهینه‌سازی در حوزه مهندسی و مدیریت منابع آب می‌باشد.

### جمع‌بندی

ارزیابی الگوریتم ژنتیک و کاربردهای متنوع آن را بطور خلاصه می‌توان در جدول ۱ نشان داد.

جدول ۱- ارزیابی الگوریتم ژنتیک و کاربردهای آن

معرفی	انواع	
الگوریتم ژنتیک	سری، آشفته، هیبرید، الگوریتم ژنتیک خودسازمان، زایشی و حالت دائمی	
ساختار	کدگذاری	باینری، جایگشتی، مقدار و درختی
	ارزیابی	تنها هر رشته را با یک مقدار عددی ارزیابی می کند.
	انتخاب	چرخ رولت، ترتیبی، بولتزمن، حالت پایدار، نخه گرایی، رقابتی، رقابتی بریندل، قطعی بریندل، قطع سر، مسابقه، مسابقه تصادفی و جایگزینی نسل اصلاح شده
	ترکیب	جابجایی دودویی، جابجایی حقیقی، ترکیب تک نقطه‌ای، دو نقطه‌ای، n نقطه‌ای، یکنواخت، حسابی، ترتیب، چرخه، محدب و بخش نگاشته
	جهش	باینری، حقیقی، وارونه‌سازی بیت، تغییر ترتیب قرارگیری، وارون‌سازی و تغییر مقدار
	رمزگشایی	عکس روش کدگذاری
	کاربرد	مدیریت
مهندسی		طراحی بهینه سرریزهای متوالی، پلکنی، سد، استخراج معادله جهت تخمین یکنواختی توزیع آبیاری بارانی، طراحی بهینه سیستم انتقال ثقلی، بهینه‌سازی سدهای بتونی وزنی و تعیین پارامترهای الگوریتم ژنتیک برای طراحی بهینه سد، طراحی بهینه اقتصادی سیستم سد انحرافی
تلفیق با شبکه عصبی مصنوعی		تعیین عوامل موثر بر نرخ شکست لوله‌ها در شبکه‌های توزیع آب، برای انتخاب نقاط بهینه در شبکه توزیع آب به منظور نصب ابزارهای اندازه‌گیری فشار و کاهش زمان اجرای مدل بهینه‌سازی چندهدفه، تخمین داده‌های بارش ماهانه، پیش‌بینی خشکسالی، تخمین سطح آب زیرزمینی، کاهش بار زمانی اجرای الگوریتم، طراحی بهینه‌ی پایش بمنظور کاهش آلودگی آب‌های زیرزمینی با حداقل هزینه
تلفیق با سایر مدل‌ها		بهینه‌سازی میزان تزریق کلر در شبکه‌های آبرسانی همراه با شبیه‌سازی در EPANET، در بهینه‌سازی قاعده جیره‌بندی سدهای مخزنی همراه مدل شبیه‌ساز ARSP، بهره‌برداری بهینه از تخلیه‌کننده‌های تحتانی جهت کمیته‌سازی رسوبگذاری در مخازن سدها با مدل GSTAR3، بهینه‌یابی هندسه سرریز سد با مدل فازی-عصبی ANFIS، طراحی بهینه حوضچه رسوبگیر همراه با مدل فازی عصبی، بهینه‌سازی اقتصادی شبکه دو مخزنه آبرسانی همراه با شبیه‌ساز EPANET، بهینه‌سازی چندهدفه همراه با مدل شبیه‌ساز بهره‌برداری جیره‌بندی گسسته، تعیین نرخ بهینه پمپاژ با استفاده از مدل MODFLOW
چند کاربرد متفاوت دیگر		- تعیین پارامترهای بهینه در روش سوگنو منطق فازی برای بهینه‌سازی هیدروگراف خروجی مخزن سد، - طراحی اقتصادی شبکه‌های آبرسانی با استفاده از عملگر مفهومی آستانه پویا - طراحی بهینه شبکه‌های توزیع آب با استفاده از تجزیه عملگرهای الگوریتم ژنتیک
محاسن	موازی بودن، توانایی بهینه‌سازی با متغیرهای گسسته و پیوسته و حل مسائل بهینه‌سازی ترکیبی غیرخطی تحت قيود غیرخطی از نوع برابری و نابرابری، جستجوی سراسری خوب و پیاده‌سازی آسان	
محدودیت	معایب و محدودیت‌ها جستجوی محلی ضعیف، بار محاسباتی زیاد، تعیین مقادیر مناسب برای پارامترهای اولیه، وقوع پدیده نارس استراتژی در مواجهه با اصلاح عملگرهای ژنتیک، استراتژی ردی، استراتژی اصلاحی، استراتژی جریمه‌ای، استفاده از بهینه‌گر محلی، تغییر پارامتر جمعیت اولیه، آهنگ جهش و کسر ادغام، تغییر الگوریتم ژنتیک باینری به پیوسته و بالعکس	

افزایش دامنه کاربردهای این الگوریتم شده است. همچنین نتایج نشان می‌دهد با پیچیده‌تر شدن مسائل می‌توان از روش بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک با سایر مدهای طراحی و شبیه‌سازی و یا روش‌های ریاضیاتی، ضمن افزایش سرعت اجرا به پاسخ‌های مطمئن‌تری دست یافت. همچنین در شبیه‌سازی‌هایی که در مدل‌ها نمی‌توان عدم قطعیت‌ها را در نظر گرفت می‌توان با ارتباط مدل شبیه‌سازی و الگوریتم ژنتیک این مشکل را تا حدی برطرف ساخت.

الگوریتم ژنتیک از اولین و پرکاربردترین روش‌های تکاملی محسوب شده و سادگی ساختار و پیاده‌سازی ساده آن به همراه کاربردهای مختلف و مشخص بودن نقاط ضعف و قوت و راهکارهای ارائه شده جهت غلبه بر محدودیت‌های آن و در نظر گرفتن اهداف چندگانه و متضاد به صورت همزمان در الگوریتم ژنتیک، این الگوریتم را حتی نسبت به روش‌های جدیدتر که پیچیدگی ساختاری بیشتری دارند به عنوان روشی قابل اعتماد مطرح و باعث

### منابع

۱. احمدیان فر، ا.، ادیب، آ.، تقیان، م.، و حقیقی، ع. ۱۳۹۵. بهینه‌سازی بهره برداری از سدهای مخزنی با استفاده از الگوریتم ژنتیک چند هدفه با رویکرد مرتب‌سازی نامغلوب. مجله علوم و مهندسی آبیاری. ۳۹(۲):۸۹-۱۰۰.
۲. اژدری مقدم، م.، جعفری ندوشن، ا. ۱۳۹۲. بهینه‌یابی هندسه سرریز کنگره‌ای ذوذنقه ای با استفاده از مدل فازی-عصبی و الگوریتم ژنتیک، مطالعه موردی سد Ute در ایالات متحده آمریکا. یادداشت فنی مجله مهندسی عمران فردوسی. ۲۴(۲): ۱۲۹-۱۳۸.
۳. اسدی پور، ن.، کریمی، م.، و شاهی نژاد، ب. ۱۳۹۱. بکارگیری الگوریتم ژنتیک در تعیین پارامترهای منطق فازی برای بهینه‌سازی هیدروگراف خروجی مخزن سد. مجله پژوهش آب ایران. ۶(۱۰):۳۷-۴۵.
۴. اصغری مقدم، ا.، نورانی، و.، و کرد، م. ۱۳۸۶. تخمین پارامترهای هیدرولیکی سفره‌های تحت فشار بوسیله تکنیک بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک. مجله تحقیقات منابع آب. ۳(۳):۳۰-۴۱.
۵. اصلانی، م.، عمادی، ع.، نظرپور، ه.، ۱۳۹۲. تعیین مقادیر مناسب پارامترهای الگوریتم ژنتیک در بهینه‌سازی سدهای بتنی وزنی. گزارش علمی مجله پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، ۲۰(۵):۲۳۱-۲۳۹.
۶. افشار، م. ه.، دارائی‌خواه، م. ۱۳۸۹. کمینه‌سازی هزینه سرریزهای متوالی در سدهای بلند با استفاده از الگوریتم ژنتیک. مجله عمران مدرس. ۱۰(۱): ۶۰-۷۲.
۷. ایزدی، ا.، رخشنده رو، غ. ر. ۱۳۹۲. بهینه‌یابی اقتصادی شبکه آبرسانی بر اساس معیارهای کمی و کیفی با استفاده از الگوریتم ژنتیک. یادداشت فنی مجله آب و فاضلاب. ۶۴(۱): ۱۱۹-۱۲۴.
۸. بهزادیان، ک.، اردشی، ع. ۱۳۸۷. طراحی نمونه برداری چند هدفه برای واسنجی مدل شبکه توزیع آب با استفاده از الگوریتم ژنتیک و شبکه عصبی. مجله آب و فاضلاب. ۶۵(۳):۱۳-۲۲.
۹. تابش، م.، آزادی، ب.، و روزبهانی، ع. ۱۳۸۹. بهینه‌سازی میزان تزریق کلر در شبکه‌های آبرسانی توسط الگوریتم ژنتیک. مجله آب و فاضلاب. ۷۳(۱): ۲-۱۱.
۱۰. تقیان، م.، رادمنش، ف.، آخوندعلی، ع. م.، و حقیقی، ع. ۱۳۹۱. بهینه‌سازی قاعده جیره‌بندی در سدهای مخزنی از طریق اتصال الگوریتم ژنتیک به یک مدل شبیه ساز. مجله علوم و مهندسی آبیاری. ۳۵(۲):۴۱-۵۰.

۱۱. جعفری ندوشن، ا.، تاج نسایی، م.، و فرزین، س. ۱۳۹۴. بررسی عددی جریان در حوضچه رسوبگیر و بهینه‌یابی هندسه حوضچه با استفاده از مدل فازی عصبی و الگوریتم ژنتیک. دهمین کنفرانس بین‌المللی مهندسی عمران، دانشگاه تبریز.
۱۲. حسن زاده، ی.، عبدی کردانی، ا.، و فاخری فرد، ا. ۱۳۹۱. پیش‌بینی خشکسالی با استفاده از الگوریتم ژنتیک و مدل ترکیبی شبکه عصبی - موجکی. مجله آب و فاضلاب. ۹۲(۳): ۴۸-۵۹.
۱۳. حسینی، س م.، زهرایی، ب.، هورفر، ع.، ۱۳۸۵. تخمین پارامترهای مدل مفهومی ناش با استفاده از روش‌های الگوریتم ژنتیک و حداقل مربعات معمولی. گزارش فنی مجله تحقیقات منابع آب ایران. ۲(۲): ۱۰۵-۱۰۷.
۱۴. حقیقی، ع. ۱۳۹۲. طراحی اقتصادی شبکه‌های آبرسانی با استفاده از عملگر مفهومی آستانه پویا در الگوریتم ژنتیک. مجله هیدرولیک. ۸(۱): ۱۹-۳۶.
۱۵. دهقانی، ر.، دهقانی، ن.، و عباسپور، د. ۱۳۹۳. ارائه یک روش جدید در بهینه‌سازی اقتصادی سیستم انحراف سد با استفاده از الگوریتم ژنتیک. مجله مهندسی آبیاری و آب. ۱۶(۴): ۳۷-۴۷.
۱۶. روحانی، م.، افشار، م. ه. ۱۳۹۲. طراحی بهینه سیستم انتقال ثقلی در مقابل ضربه قوچ ناشی از بسته شدن شیر با دو روش الگوریتم ژنتیک و بهینه‌سازی ریاضی. مجله آب و فاضلاب، ۱۴(۱): ۱۰۷-۱۱۸.
۱۷. رئیسی عیسی آبادی، ع.، غفوری، ح. ر. ۱۳۹۲. بهره‌برداری بهینه از آبخوان‌های ساحلی برای مقابله با تهاجم آب شور دریا با استفاده از الگوریتم ژنتیک. مجله پژوهش آب ایران. ۷(۱۲): ۷۹-۸۷.
۱۸. زرگر، م.، ولی سامانی، ح.، و حقیقت، ع. ۱۳۹۴. بهینه‌سازی بهره‌برداری از سرریزهای دریچه‌دار در سیستم‌های چند مخزنه با استفاده از الگوریتم ژنتیک با مطالعه موردی سیستم سدهای دز و بختیاری. مجله هیدرولیک. ۱۰(۲): ۲۷-۴۳.
۱۹. زمانی احمد محمودی، ر.، آخوند علی، ع م.، زارعی، ح.، و رادمنش، ف. ۱۳۹۳. تخمین سطح ایستایی با استفاده از یک روش ترکیبی بهینه شده با الگوریتم ژنتیک در دشت رامهرمز. مجله مهندسی آبیاری و آب. ۴(۱۵): ۲۶-۳۸.
۲۰. سلطانی، ج.، پورطبری، م. ۱۳۹۱. تعیین عوامل موثر بر نرخ شکست لوله‌ها در شبکه‌های توزیع آب با استفاده از تلفیق شبکه‌های عصبی مصنوعی و الگوریتم ژنتیک. مجله آب و فاضلاب. ۲۳(۳): ۱-۱۵.
۲۱. شجاع، ف.، سلماسی، ف.، فرسی زاده، د.، ناظمی، اح.، و صدرالدینی ع. ۱۳۹۱. طراحی بهینه سرریزهای پلکانی جهت حداکثرسازی استهلاک انرژی با استفاده از الگوریتم ژنتیک. مجله دانش آب و خاک، ۲۲(۴): ۸۳-۶۹.
۲۲. ظهیری، ع.، دهقانی، ا.ا.، و هزارجریبی، ا. ۱۳۹۱. تعیین رابطه دبی - اشل برای مقاطع مرکب آزمایشگاهی و صحرایی با استفاده از الگوریتم ژنتیک. مجله پژوهش‌های حفاظت آب و خاک. ۲(۱۹): ۱۷۹-۱۹۲.
۲۳. فقیه، ه. ۱۳۸۹. ارزیابی کاربردی شبکه عصب مصنوعی و بهینه‌سازی آن با روش الگوریتم ژنتیک در تخمین داده‌های بارش ماهانه. مجله علوم آب و خاک. ۱۴(۵۱): ۲۷-۴۲.
۲۴. کارآموز، م.، احمدی، آ.، و نظیف، س. ۱۳۸۵. چالش‌ها و فرصت‌های بکارگیری مدل‌های بهره‌برداری بهینه از سیستم‌های منابع آب. اولین همایش منطقه‌ای بهره‌برداری بهینه از منابع آب حوضه‌های کارون و زاینده رود. شهرکرد، ایران. ۳۰۹-۲۹۳.
۲۵. کارآموز، م.، زهرایی، ب. ۱۳۸۲. انعطاف‌پذیری در برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب. مجله دانشگاه صنعتی شریف. ۲۳(۳): ۵۲-۳۹.

۲۶. کیافر، ح.، اشرف صدرالدینی، س.ع.، ناظمی ا.ح.، و ثانی خانی، ه. ۱۳۹۰. ه. تخصیص بهینه آب در شبکه آبیاری زهکشی صوفی چای در استان آذربایجان شرقی با استفاده از الگوریتم ژنتیک. مجله مهندسی آبیاری و آب. ۲(۵): ۶۱-۵۲.
۲۷. ممتحن، ش.، برهانی داریان، ع. ۱۳۸۴. کاربرد مقایسه ای الگوریتم ژنتیک در بهینه‌سازی بهره‌برداری از سیستم‌های چند مخزنی. مجله آب و فاضلاب، ۱۶(۵۶): ۱۱-۲۰.
۲۸. نخعی، م.، محمدی، خ.، و رضایی، ح. ۱۳۹۳. بهینه‌یابی مدل عددی برداشت از آبخوان با استفاده از الگوریتم ژنتیک، مطالعه موردی آبخوان ساحلی ارومیه. یادداشت فنی مجله تحقیقات منابع آب ایران. ۱۰(۲): ۹۴-۹۷.
۲۹. نوروزی، ب.، بارانی، غ.ع.، مفتاح هلقی، م.، و دهقانی، ا.ا. ۱۳۹۰. بهینه‌سازی بهره‌برداری از یک سیستم چند مخزنه به روش الگوریتم ژنتیک چند جمعیتی مطالعه موردی سدهای گلستان و وشمگیر. مجله پژوهش‌های حفاظت آب و خاک ۱۸(۴): ۴۳-۶۲.
۳۰. ولی‌زادگان، ا.، جلیلی، ف.، نصرالله‌زاده اصل، ع. ۱۳۹۲. بهره‌برداری بهینه از تخلیه کننده‌های تحتانی با استفاده از الگوریتم ژنتیک پیوسته جهت کمینه سازی رسوبگذاری در مخازن سدها. مجله دانش آب و خاک. ۲۳(۳): ۷۸-۶۷.
۳۱. ولی‌سامانی، ح.، حقیقی، ع.، و فرهادی، ش. ۱۳۹۲. روندیابی هیدرولوژیکی سیل به روش ماسکینگام خطی در سیستم رودخانه‌های چند شاخه‌ای با بهینه‌یابی توسط الگوریتم ژنتیک. یادداشت فنی مجله هیدرولیک ۸(۱): ۸۳-۹۲.
۳۲. هزارجرینی، ا.، دهقانی، ا.، حسام، م.، و شریفان، ح. ۱۳۹۰. تخمین یکنواختی توزیع آب در آبیاری بارانی با استفاده از روش بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک. مجله پژوهش‌های حفاظت آب و خاک. ۱۸(۴): ۱۲۹-۱۴۴.
۳۳. یزدی، ج. ۱۳۹۴. توسعه الگوریتم بهینه‌سازی چند هدفه مبتنی بر تجزیه با استفاده از عملگرهای الگوریتم ژنتیک به منظور طراحی طراحی بهینه شبکه‌های توزیع آب. مجله هیدرولیک. ۱۰(۳): ۲۷-۴۰.
34. Broad, D. R, Dandy G. C., Maier, H. R. 2005. Water distribution system optimization using metamodels. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 131(3):172-180.
35. Chen, CS., Liu, CH., and Su, HC. 2008. A nonlinear time series analysis using two-stage genetic algorithms for streamflow forecasting. *Journal of Hydrological Processes* 22(1): 3697-3711.
36. Chen, L. 2003. Real Coded Genetic Algorithm Optimization of Long Term Reservoir Operation. *Journal of American Water Resources Association (JAWRA)*, 39(5): 1157-1165.
37. Easat, V., Hall, M. 1994. Water resources system optimization using gentic algorithms. *Journal of Hydro-environment Research*. 11(1): 225-231.
38. Goldberg. D.E. 1987. *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*, Addison Wesley Publishing Company Inc.
39. Halland, J. 1975. *Adaptation in Natural and Artificial Systems*, MIT Pess Combridge, pp. 228.
40. Jian, C., Qiang, H., Min, W. 2005. Genetic algorithm for optimal dispatching. *Journal of Water Resources Management*. 19(2): 321-331.
41. Karahan, H., Ceylan, H., and Ayvaz, MT. 2007. Predicting rainfall intensity using a genetic algorithm approach. *Journal of Hydrological Processes*. 21(3): 470-475.

42. 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.
43. Loucks, D.P., Stakhiv, E.Z., Martine, L.R. 2000. sustainable water resources management. ASCE, Journal of Water Resources Planning and Management. 126(2).
44. Michalewicz, Z. 1999. Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs, Department of Computer Science University of North Carolina, USA. Springer Publishing 388p.
45. Mohan, S. 1997. Parameter estimation of nonlinear Muskingum models using genetic algorithm. Hydraulic Engineering. 123(3): 137-142.
46. Montalvo, I., Izquierdoa, J., Pereza, R., and Tungb, M. M. 2008. Particle Swarm Optimization applied to the design of water supply systems, Computers and Mathematics with Applications. 56(3): 769–776.
47. Ndirito, J. 2003. Reservoir system optimization using a penalty approach and a multi population genetic algorithm. Water Resources Management. 29(1): 273-289.
48. Raju, K.S., Kumar, N.D. 2004. Irrigation planning using genetic algorithms. Journal of Water Resources Management, 18(2):163-176.
49. Rao, S. 2009. Engineering Optimization Theory and Practice, Publishers John Wiley & Sons. 830p.
50. Sharif, M., Wardlaw, R, 1999. Evaluation of genetic algorithms for optimal reservoir system operation. Journal of Water Resources Management 12(3): 25-33.
51. Yan, S., Minsker B. 2006. Optimal groundwater remediation design using an adaptive neural network genetic algorithm. water resources research, 42(5).