

بهره‌برداری بهینه از مخزن سد سلمان فارسی با استفاده از الگوریتم وال و هیبرید آن با الگوریتم ژنتیک براساس روش تصمیم‌گیری چندمعیاره

مجید محمدی^۱، سید فرهاد موسوی^۲، سعید فرزین^{۳*}، حجت کرمی^۳

۱. دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان

۲. استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان

۳. استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان

(تاریخ دریافت ۱۳۹۷/۰۷/۰۱؛ تاریخ تصویب ۱۳۹۷/۰۹/۲۷)

چکیده

بهره‌برداری بهینه از مخازن سدها، یکی از مباحث ضروری در مدیریت منابع آب و به‌ویژه منابع آب سطحی است. در پژوهش حاضر، پس از معرفی الگوریتم بهینه‌سازی وال، عملکرد این الگوریتم به‌تنهایی و در حالت ترکیب با الگوریتم ژنتیک در مسئله بهره‌برداری بهینه از مخزن سد سلمان فارسی ارزیابی شده است. در مسئله بهینه‌سازی حاضر، تابع هدف به‌صورت کمینه‌سازی کل کمبود طی دوره بهره‌برداری تعریف شده است. همچنین، محدودیت‌های معادله پیوستگی مخزن، حجم ذخیره مخزن و حجم رهاسازی از مخزن بر تابع هدف مسئله اعمال شده‌اند. عملکرد حاصل از الگوریتم‌های پیشنهادی با عملکرد حاصل از الگوریتم ژنتیک به‌عنوان یکی از الگوریتم‌های رایج در این زمینه و برنامه‌ریزی غیرخطی به‌عنوان به‌عنوان مطلق مقایسه شده است. عملکرد مدل‌ها براساس شاخص‌های اطمینان‌پذیری، برگشت‌پذیری، آسیب‌پذیری و پایداری ارزیابی شده است. نتایج به‌دست‌آمده از جواب‌های بهینه نشان دادند جواب بهینه مطلق حاصل از نرم‌افزار لینگو و براساس روش برنامه‌ریزی غیرخطی برابر با مقدار ۰/۱۸۱ به دست آمده است و جواب بهینه مدل‌های الگوریتم هیبریدی وال-ژنتیک، الگوریتم ژنتیک و الگوریتم وال به ترتیب با ۲/۹، ۲۴/۲ و ۳۳۷/۰ درصد افزایش نسبت به جواب بهینه مطلق در رتبه‌های اول تا سوم قرار دارند. همچنین، نتایج به‌دست‌آمده از شاخص‌های ارزیابی عملکرد مدل‌ها نشان دادند از نظر اطمینان‌پذیری و آسیب‌پذیری، مدل برنامه‌ریزی غیرخطی و از لحاظ برگشت‌پذیری، الگوریتم ژنتیک و از نظر پایداری، الگوریتم هیبریدی وال-ژنتیک بهترین عملکرد در بین مدل‌ها را دارند. به منظور انتخاب برترین مدل براساس تابع هدف و شاخص‌های ارزیابی عملکرد مدل‌ها از روش تصمیم‌گیری چندمعیاره استفاده شده است. نتایج به‌دست‌آمده از این روش نشان دادند عملکرد الگوریتم هیبریدی وال-ژنتیک در رتبه اول قرار دارد و مدل‌های برنامه‌ریزی غیرخطی، الگوریتم ژنتیک و الگوریتم وال به ترتیب در رتبه‌های دوم تا چهارم قرار دارند.

کلیدواژگان: الگوریتم هیبریدی وال-ژنتیک، الگوریتم بهینه‌سازی وال، بهره‌برداری بهینه از مخزن سد سلمان فارسی، برنامه‌ریزی غیرخطی، تصمیم‌گیری چندمعیاره.

مقدمه

ایران از جمله کشورهایی است که با مشکل آب مواجه است. عوامل متعددی از جمله قرارگیری ایران در اقلیم خشک و نیمه‌خشک، رشد سریع جمعیت و شهرنشینی، کاهش نزولات جوی و پراکنش ناهمگون آن، وقوع پدیده تغییر اقلیم و به تبع آن، وقوع سیل و خشک‌سالی‌های پی‌درپی، آلودگی منابع آب سطحی و زیرزمینی، کم‌بودن بهره‌وری آب کشاورزی و میزان آبیاری، موجب افزایش مشکل آب در ایران شده است [۱]. از این‌رو، بهره‌برداری از منابع آبی موجود و به‌ویژه منابع آبی سطحی اهمیت زیادی دارد. متداول‌ترین نوع بهره‌برداری از منابع آب سطحی، احداث سد در مسیر رودخانه است و یکی از منابع اصلی عرضه آب، مخازن سدهاست. به دلیل وجود نوسان در میزان آورد رودخانه‌ها و همچنین محدودبودن ظرفیت مخازن سدها، همواره از نظر توزیع زمانی میان میزان ورودی به مخزن و نیاز آبی پایین‌دست مغایرت وجود دارد. بنابراین، بهره‌برداری بهینه از مخازن سدها یکی از مباحث ضروری در مدیریت منابع آب و به‌ویژه منابع آب سطحی است. در بهره‌برداری بهینه از مخازن سدها، هدف دستیابی به میزان خروجی بهینه از سد برای تأمین نیاز بخش‌های مختلف تقاضاکننده آب طی زمان است [۲].

در سال‌های اخیر الگوریتم‌های فراابتکاری به‌صورت گسترده در مسائل بهینه‌سازی مختلف استفاده شده‌اند [۳]. از آن جمله حسینی موعاری و بنی‌حبیب (۲۰۱۴) به بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخزن بازفت برای تأمین آب کشاورزی با استفاده از الگوریتم‌های کرم شب‌تاب، ژنتیک و بهینه‌سازی مجموعه ذرات پرداختند. نتیجه پژوهش آنها بیان‌کننده عملکرد بهتر الگوریتم کرم شب‌تاب نسبت به دو الگوریتم دیگر بود [۴]. اکبری‌فرد و همکارانش (۲۰۱۵) به تدوین سیاست‌های بهره‌برداری بهینه از سامانه مخازن در حوضه آبریز گرگان‌رود با استفاده از الگوریتم‌های جست‌وجوی گرگ و ژنتیک پرداختند. نتیجه به‌دست‌آمده از پژوهش آنها بیان‌کننده عملکرد بهتر الگوریتم جست‌وجوی گرگ در مقایسه با الگوریتم ژنتیک بود [۵]. بزرگ حداد و همکارانش (۲۰۱۷) به بهره‌برداری بهینه از مخزن کارون ۴ و سیستم چهارمخزنه مرجع با الگوریتم جست‌وجوی موجودات همزیست، الگوریتم چرخه آب و الگوریتم ژنتیک پرداختند. نتیجه پژوهش آنها نشان داد الگوریتم

جست‌وجوی موجودات همزیست علاوه بر عملکرد بهتری که داشت، از همگرایی زودتر دوری کرد و انحراف معیار کمتری در نقطه بهینه به وجود آورد [۶]. افشار و همکارانش (۲۰۱۷) کارایی روش‌های هیبرید اتوماتای سلولی - جست‌وجوی هارمونی، هیبرید اتوماتای سلولی - برنامه‌ریزی غیرخطی، ژنتیک و ازدحام ذرات در بهره‌برداری برق‌آبی سیستم‌های چهارمخزنه مرجع را بررسی کردند. نتیجه پژوهش آنها نشان داد الگوریتم هیبریدی اتوماتای سلولی - جست‌وجوی هارمونی از سایر الگوریتم‌ها کارایی بهتری داشته است [۷]. دشتی و همکارانش (۲۰۱۷) عملکرد الگوریتم تکاملی تفاضلی و الگوریتم اصلاح‌شده جست‌وجوی هارمونی در بهره‌برداری بهینه از سیستم تک‌مخزنه سد علویان را ارزیابی کردند. نتیجه تحقیق آنها بیان‌کننده عملکرد خوب الگوریتم تکامل تفاضلی بود [۸]. یاسین و همکارانش (۲۰۱۸) به بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخزن کارون ۴ با استفاده از الگوریتم هیبریدی جدید ازدحام ماهی مصنوعی - ازدحام ذرات پرداختند. نتایج پژوهش آنها نشان داد الگوریتم هیبریدی در مقایسه با الگوریتم‌های تشکیل دهنده آن، پایداری و برگشت پذیری بیشتر و آسیب پذیری کمتر داشته است [۹]. کومار و یاداو (۲۰۱۸) به بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخازن چهار و ده مخزنه مرجع با رویکردی جدید در محاسبات تکاملی با استفاده از الگوریتم‌های TLBO و JA پرداختند. آنها نتیجه گرفتند که هر دو الگوریتم TLBO و JA همانند سایر روش‌های بهینه‌سازی ذکرشده در سایر مقالات عملکرد رضایت‌بخشی دارند. در نهایت، JA عملکرد بهتری نسبت به TLBO داشت [۱۰]. کرمی و همکارانش (۲۰۱۸) الگوریتم‌های کریل بهبودیافته، کریل ساده، ژنتیک و ازدحام ذرات در بهره‌برداری از مخزن سد Timah را ارزیابی کردند. نتیجه پژوهش آنها نشان داد الگوریتم کریل بهبودیافته کمترین مقدار شاخص آسیب‌پذیری را در بین الگوریتم‌های استفاده‌شده داشته است [۱۱]. احترام و همکارانش (۲۰۱۸) به بهره‌برداری از مخزن سد آیدوموش با استفاده از الگوریتم تکاملی جدیدی به نام الگوریتم Kidney و همچنین الگوریتم‌های خفاش، ژنتیک، ازدحام ذرات، کوسه و علف‌های هرز پرداختند. نتیجه پژوهش آنها نشان داد الگوریتم Kidney بهترین عملکرد را در مقایسه با سایر الگوریتم‌های تکاملی استفاده‌شده داشت [۱۲].

مسئله بهره‌برداری بهینه از مخزن سد سلمان فارسی ارزیابی شده است. سپس، عملکرد الگوریتم‌های پیشنهادی با عملکرد الگوریتم ژنتیک به عنوان یکی از الگوریتم‌های رایج در این زمینه و برنامه‌ریزی غیرخطی به عنوان بهینه‌یاب مطلق مقایسه شده است. در نهایت، عملکرد مدل‌ها با استفاده از روش تاپسیس رتبه‌بندی شده است.

مواد و روش‌ها

منطقه مطالعه‌شده و اطلاعات آماری

سد مخزنی سلمان فارسی (قیر) در استان فارس و جنوب شیراز روی رودخانه قره‌آغاج که از کوه‌های زاگرس سرچشمه می‌گیرد، در محل تنگه کارزین احداث شده است. دسترسی به محل از طریق راه اختصاصی آسفالت به طول ۱۳ کیلومتر منشعب از کیلومتر ۱۲ جاده قیر به فیروزآباد صورت می‌گیرد. فاصله محل احداث سد تا شیراز حدود ۲۰۰ کیلومتر و از شهرهای فیروزآباد و جهرم نیز به ترتیب حدود ۷۵ و ۱۰۰ کیلومتر است. از نظر جغرافیایی، محدوده سد بین ۲۸ درجه و ۳۰ دقیقه تا ۲۸ درجه و ۴۵ دقیقه عرض شمالی و ۵۳ درجه و ۱۵ دقیقه طول شرقی قرار دارد. مشخصات فنی طرح سد سلمان فارسی در جدول ۱ نشان داده شده است [۱۸]. سد سلمان فارسی در حوضه آبریز رودخانه مند و حوضه‌های بسته‌هرم، کاریان و خنج واقع شده است. حوضه آبریز رودخانه مند یکی از حوضه‌های باز ایران است که در تقسیم‌بندی حوضه‌های آبریز ایران، زیرمجموعه حوضه آبریز خلیج فارس و دریای عمان است. موقعیت سد سلمان فارسی در حوضه آبریز مند در شکل ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱. مشخصات مخزن سد سلمان فارسی

رقوم سطح عادی آب	۸۵۵/۰۵ متر
رقوم سطح آب در سیلاب طراحی	۸۵۹/۸۵ متر
مساحت دریاچه (در تراز عادی)	۴۸۵۰ هکتار
طول دریاچه	۱۹ کیلومتر
عرض حداکثر دریاچه	۹ کیلومتر
حجم کل مخزن	۱۴۰۰ میلیون مترمکعب
حجم مفید مخزن	۱۲۳۶ میلیون مترمکعب
حجم رسوبات پنجاه‌ساله	۱۶۴ میلیون مترمکعب
ضریب تنظیم مخزن	۰/۸۵ (حجم ورودی / حجم تنظیمی)

منصوری و همکارانش (۲۰۱۸) به معرفی نسخه اصلاح‌شده الگوریتم بهینه‌سازی جست‌وجوی پنگوئن را معرفی کردند و آن را به همراه الگوریتم‌های بهینه‌سازی جست‌وجوی پنگوئن و ژنتیک در بهره‌برداری بهینه از سیستم مخزن کارون ۴ به کار بردند. نتیجه پژوهش آنها نشان داد الگوریتم‌های جست‌وجوی پنگوئن اصلاح‌شده، ژنتیک و جست‌وجوی پنگوئن از نظر کارایی به ترتیب در رتبه‌های نخست تا سوم قرار گرفتند [۱۳]. ربیعی و همکارانش (۲۰۱۸) به بهینه‌سازی بهره‌برداری از سیستم‌های چهار و ده مخزنه مرجع با استفاده از الگوریتم‌های CBO، ECBO و VPS پرداختند. نتیجه پژوهش آنها عملکرد موفقیت‌آمیز الگوریتم VPS را در مقایسه با الگوریتم‌های CBO و ECBO نشان داد [۱۴]. علوی و همکارانش (۲۰۱۸) به بهره‌برداری از سیستم مخزن Aswan High Dam با استفاده از الگوریتم یادگیری ماشین کوسه و الگوریتم ژنتیک پرداختند. نتیجه پژوهش آنها نشان داد عملکرد مدل یادگیری ماشین کوسه بهتر از مدل ژنتیک بود [۱۵]. روزگاری و همکارانش (۲۰۱۸) به بهینه‌سازی سیاست بهره‌برداری از مخزن سد مهاباد با استفاده از الگوریتم شبیه‌سازی حرارتی و برنامه‌ریزی غیرخطی پرداختند. نتیجه پژوهش آنها نشان داد روش فراابتکاری شبیه‌سازی حرارتی در مقایسه با برنامه‌ریزی غیرخطی نتایج نسبتاً بهتری ارائه داده است [۱۶]. سادات فرحناکیان و همکارانش (۲۰۱۸) به بهره‌برداری بهینه از سیستم تک‌مخزنه سد دز با استفاده از الگوریتم‌های جست‌وجوی ذرات باردار، هوش جمعی ذرات و الگوریتم ژنتیک پرداختند. نتیجه پژوهش آنها نشان‌دهنده کارایی بهتر الگوریتم جست‌وجوی ذرات باردار بود [۱۷].

بررسی تحقیقات پیشین نشان می‌دهد الگوریتم‌های فراابتکاری در حل مسئله بهره‌برداری بهینه از مخزن سد در مقایسه با روش‌های قطعی مانند برنامه‌ریزی‌های خطی، غیرخطی و دینامیکی عملکرد رضایت‌بخشی دارند. از یک‌سو، الگوریتم‌های وال و هیبرید وال-ژنتیک تا کنون در بهره‌برداری بهینه از مخزن سد استفاده نشده است. از سوی دیگر، بهره‌برداری بهینه از مخزن سد با استفاده از روش‌های نوین همواره اهمیت زیادی داشته است. بنابراین، در پژوهش حاضر پس از معرفی الگوریتم وال، عملکرد این الگوریتم به تنهایی و در حالت هیبرید با الگوریتم ژنتیک در



شکل ۱. موقعیت سد سلمان فارسی در حوضه آبریز مند

مخزن در نظر گرفته شده‌اند [۲]. محدودیت‌های زیر بر تابع هدف مسئله بهینه‌سازی حاضر اعمال شده‌اند: محدودیت رابطه پیوستگی: این محدودیت براساس قانون بقای جرم استوار است. در تمام مراحل بهره‌برداری از مخزن می‌بایست موازنه جرمی بین مقادیر ورودی و خروجی و ذخیره مخزن برقرار باشد. محدودیت رابطه پیوستگی به صورت رابطه ۲ تعریف می‌شود [۲]:

$$S_{t+1} = S_t + Q_t - Re_t - Sp_t - Ev_t \quad (2)$$

در رابطه ۲، S_{t+1} و S_t به ترتیب حجم آب موجود در مخزن در ابتدا و انتهای ماه t ، Q_t حجم آب ورودی به مخزن طی ماه t ، Re_t حجم آب رهاسازی از مخزن طی ماه t ، Sp_t حجم سرریز از مخزن طی ماه t ، Ev_t حجم تبخیر از سطح مخزن طی ماه t است.

حجم سرریز از مخزن به صورت رابطه ۳ تعریف می‌شود [۱۹]:

$$Sp_t = \begin{cases} S_t + Q_t - Re_t - Ev_t - S_{max} & \text{if } S_t + Q_t - Re_t - Ev_t > S_{max} \\ 0 & \text{if } S_t + Q_t - Re_t - Ev_t \leq S_{max} \end{cases} \quad (3)$$

در رابطه ۳، S_{max} حداکثر حجم ذخیره مخزن است. محدودیت حجم ذخیره مخزن: این محدودیت بیان می‌کند که در تمام مراحل بهره‌برداری از مخزن می‌بایست حجم ذخیره مخزن بین مقادیر حداقل و حداکثر حجم ذخیره مخزن قرار داشته باشد. محدودیت حجم ذخیره مخزن به صورت رابطه ۴ تعریف می‌شود [۲]:

مدل بهره‌برداری بهینه از مخزن سد

افق برنامه‌ریزی شامل یک دوره ۹۶ ماهه از مهر تا شهریور ۱۳۹۷ در نظر گرفته شده است. اطلاعات ورودی به مدل شامل سری زمانی ماهانه حجم آورد رودخانه، حجم تبخیر از سطح مخزن و حجم نیازهای پایین دست سد می‌شود. حجم رهاسازی از مخزن به عنوان متغیر تصمیم‌گیری مسئله بهینه‌سازی تعیین شده است. تابع هدف مدل بهینه‌سازی به صورت کمینه‌سازی کل کمبود طی دوره آماری تعریف شده است. تابع هدف به صورت رابطه ۱ تعریف می‌شود [۵]:

$$\text{Minimize } F(Re) = \sum_{t=1}^T \left(\frac{Re_t - De_t}{De_{max}} \right)^2 + \quad (1)$$

$$\text{Penalty}_1 + \text{Penalty}_2$$

در رابطه ۱، Re_t حجم رهاسازی از مخزن در ماه t ، De_t حجم موردنیاز پایین دست سد در ماه t ، De_{max} حداکثر حجم موردنیاز پایین دست سد طی دوره بهره‌برداری، T طول دوره بهره‌برداری، Penalty_1 تابع جریمه مربوط به محدودیت حجم مخزن سد در ماه t و Penalty_2 تابع جریمه مربوط به محدودیت حجم رهاسازی از مخزن در ماه t است.

در هر مدل بهینه‌سازی، مقادیر کلیه متغیرهای تصمیم برای بیشینه یا کمینه‌سازی تابع هدف تحت مجموعه‌ای از محدودیت‌ها محاسبه می‌شوند. بر این اساس، محدودیت‌های مختلفی در مطالعات مختلف بهره‌برداری از

محدودیت باشد. مسئله بهینه‌سازی حاضر به دلیل وجود عامل غیرخطی در تابع هدف آن از نوع برنامه‌ریزی غیرخطی است. به منظور یافتن جواب بهینه مطلق از نرم‌افزار لینگو (Lingo) استفاده شده است. نرم‌افزار لینگو یکی از نرم‌افزارهای قوی حل مسائل بهینه‌سازی خطی، غیرخطی و عدد صحیح و مختلط است. این نرم‌افزار مزایای عمده‌ای دارد که آن را از سایر نرم‌افزارهای مشابه متمایز می‌کند. از جمله این مزایا شناسایی نوع مدل توسط نرم‌افزار، در اختیار بودن تمامی حل‌کننده‌ها در یک محیط به صورت هم‌زمان، نوشتن برنامه‌های پیچیده و بزرگ فقط با تعداد اندکی دستور ساده و امکان ارتباط با بانک‌های اطلاعاتی و نرم‌افزارهای صفحه گسترده مانند اکسل است. یکی از امکاناتی که در ویرایش‌های هشتم به بعد لینگو قرار داده شده است، جست‌وجو برای یافتن حل بهینه مطلق در مدل‌های غیرخطی است. به این منظور، قبل از حل مدل لازم است گزینه مربوطه را که در مسیر زیر قرار دارد، فعال کرد:

Lingo/ Option/ Global Solver/ use global solver
 با این کار، نرم‌افزار لینگو مدل‌های برنامه‌ریزی غیرخطی غیرمحدب را به مجموعه‌ای مدل‌های محدب تبدیل می‌کند و جواب را از طریق روش انشعاب و کران (branch and bound) به دست می‌آورد.

الگوریتم ژنتیک (GA)

الگوریتم ژنتیک نخستین بار توسط پروفیسور هولند در سال ۱۹۷۵ مطرح شد. این الگوریتم از علم ژنتیک و نظریه تکاملی داروین الهام می‌گیرد [۲۰]. این الگوریتم زیرمجموعه‌ای از الگوریتم‌های تکاملی است و روشی برای یافتن راه حل تقریبی برای مسائل بهینه‌سازی است [۲۱]. نخستین گام در پیاده‌سازی الگوریتم ژنتیک، تبدیل جواب مسئله به یک کروموزوم است. هر کروموزوم از ترکیبی از ژن‌ها ساخته شده است. هر یک از ژن‌ها می‌تواند از اعداد حقیقی، دودویی، طبیعی، نمادها و ماتریس‌ها باشد. هر یک از کروموزوم‌ها به عنوان یک جواب برای مسئله در نظر گرفته می‌شود. پس از شکل‌گیری ساختار کروموزوم یک سری کروموزوم‌های اولیه (در واقع تولید یک سری جواب مسئله) به صورت تصادفی تولید می‌شود که به آن نسل اولیه می‌گویند و کروموزوم‌های آن، جمعیت آن نسل را تشکیل می‌دهند. تعداد کروموزوم‌های اولیه، اندازه جمعیت نامیده می‌شود. جمعیت اولیه فقط یک‌بار و در زمان شکل‌گیری اولین نسل الگوریتم

$$S_{min} \leq S_t \leq S_{max} \quad (4)$$

در رابطه ۴، S_{min} حداقل حجم ذخیره مخزن است. به منظور اعمال محدودیت حجم ذخیره مخزن از تابع جریمه استفاده می‌شود. تابع جریمه مربوط به محدودیت حجم ذخیره مخزن به صورت رابطه ۵ تعریف می‌شود [۵]:

$$Penalty_1 = \begin{cases} \sum_{t=1}^T \left(\frac{S_t - S_{min}}{S_{min}} \right)^{\gamma} & \text{if } S_t < S_{min} \\ \sum_{t=1}^T \left(\frac{S_t - S_{max}}{S_{max}} \right)^{\gamma} & \text{if } S_t > S_{max} \\ \cdot & \text{if } S_{min} \leq S_t \leq S_{max} \end{cases} \quad (5)$$

محدودیت حجم رهاسازی از مخزن: این محدودیت بیان می‌کند که در تمام مراحل بهره‌برداری از مخزن می‌بایست حجم رهاسازی از مخزن علاوه بر اینکه مثبت باشد، بین مقادیر حداقل و حداکثر حجم موردنیاز پایین دست سد نیز قرار داشته باشد. محدودیت حجم رهاسازی از مخزن به صورت رابطه ۶ تعریف می‌شود [۲]:

$$De_{min,t} \leq Re_t \leq De_{max,t} \quad (6)$$

در رابطه ۶، $De_{max,t}$ و $De_{min,t}$ به ترتیب حداقل و حداکثر حجم آب مورد نیاز پایین‌دست سد طی ماه t هستند.

به منظور اعمال محدودیت حجم رهاسازی از مخزن از تابع جریمه استفاده می‌شود. تابع جریمه مربوط به محدودیت حجم رهاسازی مخزن به صورت رابطه ۷ تعریف می‌شود [۵]:

$$Penalty_2 = \begin{cases} \sum_{t=1}^T \left(\frac{Re_t - De_{min,t}}{De_{min,t}} \right)^{\gamma} & \text{if } Re_t < De_{min,t} \\ \sum_{t=1}^T \left(\frac{Re_t - De_{max,t}}{De_{max,t}} \right)^{\gamma} & \text{if } Re_t > De_{max,t} \\ \cdot & \text{if } De_{min,t} \leq Re_t \leq De_{max,t} \end{cases} \quad (7)$$

مدل برنامه‌ریزی غیرخطی

در مدل برنامه‌ریزی غیرخطی (NLP) ارتباط بین متغیرهای تصمیم‌گیری، حداقل در یکی از موارد غیرخطی است. عامل غیرخطی بودن می‌تواند در تابع هدف و یا در یک یا چند

$$\bar{D} = \left| \bar{C} \cdot \bar{X}^*(t) - \bar{X}(t) \right| \quad (۸)$$

$$\bar{X}(t+1) = \bar{X}^*(t) - \bar{A} \cdot \bar{D} \quad (۹)$$

در روابط (۸) و (۹)، t تکرار جاری، \bar{A} و \bar{C} بردارهای ضرایب، \bar{X}^* بردار مکان بهترین راه حل به دست آمده در حال حاضر، \bar{X} بردار مکان، \bar{A} اقدر مطلق و \bar{C} ضرب نقطه‌ای (المان در المان) می‌باشد. لازم به یادآوری است که در صورت وجود راه حل بهتر، \bar{X}^* در هر تکرار باید به روز شود.

بردارهای \bar{A} و \bar{C} به صورت روابط (۱۰) و (۱۱) محاسبه می‌شوند:

$$\bar{A} = 2\bar{a} \cdot \bar{r} - \bar{a} \quad (۱۰)$$

$$\bar{C} = 2 \cdot \bar{r} \quad (۱۱)$$

که \bar{a} به صورت خطی از مقدار ۲ تا صفر طی تکرارها کاهش می‌یابد (در هر دو فاز اکتشاف و استخراج) و \bar{r} بردار تصادفی در فاصله صفر تا ۱ است.

در روش حمله حباب- شبکه (فاز استخراج)، وال گوژپشت حول طعمه در امتداد یک دایره‌ی انقباضی و هم‌زمان در مسیر مارپیچی شکلی شنا می‌کند. برای مدل‌سازی این رفتار هم‌زمان، فرض شده است که وال با احتمال ۵۰ درصد از بین مکانیزم محاصره‌ی انقباضی و یا مدل مارپیچی یکی را انتخاب می‌کند تا موقعیت وال‌ها طی بهینه‌سازی به‌روزرسانی شود. مدل ریاضی این فاز به صورت رابطه (۱۲) تعریف می‌شود:

$$\bar{X}(t+1) = \begin{cases} \bar{X}^*(t) - \bar{A} \cdot \bar{D} & \text{if } p < 0.5 \\ \bar{D} \cdot e^{bl} \cdot \cos(\gamma \pi t) + \bar{X}^*(t) & \text{if } p \geq 0.5 \end{cases} \quad (۱۲)$$

که \bar{D} از رابطه (۸) به دست می‌آید و به فاصله‌ی i امین وال تا طعمه اشاره دارد (بهترین راه حل به دست آمده تا کنون)، b ثابتی برای تعریف شکل مارپیچ لگاریتمی، l عددی تصادفی بین -۱ تا +۱ و γ ضرب نقطه‌ای (المان در المان) می‌باشد. p عددی تصادفی بین صفر تا ۱ است. بردار \bar{A} با مقادیر تصادفی بین -۱ و +۱ به کار گرفته می‌شود تا عامل جستجو به وال مرجع نزدیک شود.

در جستجو برای طعمه (فاز اکتشاف)، برای به‌روزرسانی موقعیت عامل جستجو، به‌جای استفاده از داده‌های بهترین عامل جستجو، از انتخاب تصادفی عامل بهره برده می‌شود. مدل ریاضی به‌صورت روابط (۱۳) و (۱۴) است:

ژنتیک به صورت تصادفی ایجاد می‌شود. تعیین اندازه مناسب جمعیت نسل، نکته مهمی در پیاده‌سازی الگوریتم ژنتیک است. اگر جمعیت نسل اولیه کوچک باشد، ممکن است الگوریتم نتواند راه حل خوبی بیابد. همچنین، جمعیت زیاد ممکن است به صرف زمان زیادی در اجرای برنامه منجر شود. سپس، میزان شایستگی هر یک از کروموزوم‌ها براساس تابع هدف محاسبه می‌شود.

با استفاده از عملگر انتخاب، تعدادی از کروموزوم‌های جمعیت فعلی به عنوان والدین نسل بعد برگزیده می‌شوند. با تقاطع والدین از طریق عملگر ترکیب، فرزندان نسل آینده که همان راه حل‌های جدید هستند، تولید می‌شوند. هدف از این تولید امکان به وجود آمدن فرزندان بهتر است. به این معنا که جواب‌های بهتری می‌تواند پس از ترکیب والدین به وجود آید. سپس، با استفاده از عملگر جهش برخی از ژن‌ها به صورت تصادفی انتخاب و تغییر می‌کنند. هدف از جهش، جلوگیری از همگرایی راه حل‌ها به سمت یک جواب بهینه محلی و شروع جستجو در محل دیگری از فضای تصمیم است [۲۲]. از میان کروموزوم‌های قبلی و جدید، کروموزوم‌هایی که شایستگی بهتری دارند، انتخاب می‌شوند و به این ترتیب، اندازه جمعیت در نسل بعدی نیز ثابت خواهد ماند. پس از چندین تکرار، الگوریتم به سمت بهترین کروموزوم همگرا می‌شود که نشان‌دهنده جواب بهینه و یا نزدیک به بهینه خواهد بود [۲۳].

الگوریتم بهینه‌سازی وال

الگوریتم بهینه‌سازی وال (WOA) اولین بار توسط سید علی میر جلیلی در سال ۲۰۱۶ مطرح شد [۲۴]. این الگوریتم از رفتار اجتماعی وال‌های گوژپشت الهام گرفته است. الگوریتم وال با مجموعه‌ای از راه‌حل‌های تصادفی شروع به کار می‌کند. در هر تکرار، عوامل جستجو موقعیت خود را با استفاده از سه عملگر به نام‌های محاصره طعمه، روش حمله حباب- شبکه (فاز استخراج) و جستجو برای طعمه (فاز اکتشاف) به‌روزرسانی می‌کنند. در محاصره طعمه، وال‌های گوژپشت طعمه را شناسایی کرده و آن را محاصره می‌کنند. الگوریتم وال فرض می‌کند که بهترین راه حل در حال حاضر، طعمه است. بعد از اینکه بهترین عامل جستجو شناسایی شد، سایر عوامل جستجو مکان خود را نسبت به بهترین عامل جستجو به‌روزرسانی می‌کنند. این رفتار با روابط (۸) و (۹) بیان می‌شود:

در یک سیستم زمانی که c_t در بین حد بالا و پایین محدوده قابل قبول واقع شود، آن‌گاه سیستم در حالت مطلوب قرار دارد و در غیر این صورت، سیستم در حالت شکست قرار دارد. این حدود براساس قضاوت تصمیم‌گیرندگان تعیین می‌شود. در پژوهش حاضر حد پایین و بالای محدوده قابل قبول برای c_t به ترتیب ۰/۸ و ۱ در نظر گرفته شده است. پس از تعیین پارامتر c_t و حدود بالا و پایین محدوده قابل قبول برای شاخص‌های ارزیابی عملکرد مدل‌ها به صورت زیر تعریف می‌شوند:

اطمینان‌پذیری (RE): احتمال موفقیت سیستم طی دوره بهره‌برداری را نشان می‌دهد [۲۵]. اطمینان‌پذیری عبارت است از تعداد دفعاتی که c_t در حالت مطلوب قرار دارد نسبت به کل دوره شبیه‌سازی. شاخص اطمینان‌پذیری به صورت رابطه ۱۶ محاسبه می‌شود [۲۶]:

$$RE(C) = \frac{\text{Number of satisfactory } c_t \text{ value}}{\text{Total number of simulated period}} \quad (16)$$

برگشت‌پذیری (RS): سرعت بازگشت از حالت شکست به حالت مطلوب را نشان می‌دهد [۲۵]. برگشت‌پذیری عبارت است از: تعداد دفعاتی که مقدار c_t از حالت شکست به حالت مطلوب می‌رسد نسبت به تعداد کل مقادیر شکست. شاخص برگشت‌پذیری به صورت رابطه ۱۷ محاسبه می‌شود [۲۶]:

$$RS(C) = \frac{\text{Number of times a satisfactory } c_{t+1} \text{ values follows an unsatisfactory } c_t \text{ value}}{\text{Total number of unsatisfactory values}} \quad (17)$$

آسیب‌پذیری (VU): شدت بزرگی شکست سیستم را نشان می‌دهد [۲۵]. آسیب‌پذیری عبارت است از: مجموع مقادیر c_t در حالت شکست نسبت به تعداد کل مقادیر c_t در حالت شکست. شاخص آسیب‌پذیری به صورت رابطه ۱۸ محاسبه می‌شود [۲۶]:

$$VU(C) = \frac{\text{Individual extents of } c_t \text{ failurs}}{\text{Total number of individual extents of } c_t \text{ failurs}} \quad (18)$$

پایداری (SI): برای پایداری شاخص‌های اطمینان‌پذیری و برگشت‌پذیری حداکثر و شاخص آسیب‌پذیری حداقل است. شاخص پایداری به صورت رابطه ۱۹ محاسبه می‌شود [۲۶]:

$$SI = RE(C) \times RS(C) \times (1 - VU(C)) \quad (19)$$

$$\bar{D} = \left| \overline{C \cdot X_{rand}} \cdot \bar{X} \right| \quad (13)$$

$$\bar{X}(t+1) = \overline{X_{rand}} - \bar{A} \cdot \bar{D} \quad (14)$$

که $\overline{X_{rand}}$ بردار موقعیت تصادفی انتخاب شده (وال تصادفی) از جمعیت جاری می‌باشد و بردار \bar{A} با مقادیر تصادفی بزرگ‌تر از ۱ و یا کمتر از ۱- به کار گرفته می‌شود تا عامل جستجو مجبور به دور شدن از وال مرجع شود.

الگوریتم هیبریدی وال-ژنتیک

هر الگوریتم بهینه‌سازی در مواجهه با مسائل مختلف ضعف‌ها و قوت‌های فراوانی دارد. هدف از ایجاد الگوریتم‌های ترکیبی آن است که بتوانند با استفاده از قوت‌های الگوریتم‌های ترکیب‌شونده، عملکرد بهتری را در حل مسائل بهینه‌سازی مختلف داشته باشند. در پژوهش حاضر از الگوریتم هیبریدی وال-ژنتیک برای حل مسئله بهینه‌سازی بهره‌برداری بهینه از مخزن سد سلمان فارسی استفاده شده است. در الگوریتم هیبریدی وال-ژنتیک، ابتدا جمعیت اولیه به صورت تصادفی تولید می‌شود. سپس، حلقه تکرار شروع می‌شود. در تکرار اول، الگوریتم‌های وال و ژنتیک به صورت موازی جمعیت اولیه را دریافت می‌کنند و دو جمعیت جدید با نام‌های جمعیت الگوریتم وال و جمعیت الگوریتم ژنتیک تولید می‌کنند. سپس جمعیت اولیه، جمعیت الگوریتم وال و جمعیت الگوریتم ژنتیک با یکدیگر ادغام می‌شوند. جمعیت جدید از بین افراد جمعیت‌های ادغام‌شده براساس تابع برانزنگی انتخاب می‌شود. در جمعیت جدید فردی که دارای بهترین برانزنگی باشد، به عنوان بهترین فرد انتخاب می‌شود. جمعیت جدید به عنوان جمعیت اولیه برای تکرار بعدی انتخاب می‌شود. تکرارها تا رسیدن به یکی از شرایط توقف ادامه می‌یابد.

شاخص‌های ارزیابی عملکرد مدل‌ها

عملکرد مدل‌ها با استفاده از شاخص‌های اطمینان‌پذیری (RE)، برگشت‌پذیری (RS)، آسیب‌پذیری (VU) و پایداری (SI) ارزیابی می‌شود. برای محاسبه شاخص‌های ارزیابی ابتدا پارامتر c_t به صورت رابطه ۱۵ محاسبه می‌شود:

$$c_t = \left(\frac{S}{D} \right)_t \quad (15)$$

در رابطه ۱۵، S میزان تأمین، D میزان نیاز، در رابطه ۱۵، T و $t = 1, \dots, T$ طول دوره شبیه‌سازی است.

فاصله آن نقطه از ایده آل منفی هم در نظر گرفته می شود. به این معنا که گزینه انتخابی باید دارای کمترین فاصله از راه حل ایده آل مثبت بوده و در عین حال دارای دورترین فاصله از راه حل ایده آل منفی باشد [۲۸]. مراحل استفاده از روش تاپسیس عبارت است از [۲۹]:

گام اول: ماتریس تصمیم تشکیل می شود. ماتریس تصمیم شامل m گزینه و n معیار است. هر درایه ماتریس تصمیم r_{ij} نامیده می شود.
گام دوم: ماتریس تصمیم با رابطه ۲۳ بی مقیاس (نرمال سازی) می شود.

$$N_{ij} = \frac{r_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m r_{ij}^2}} \quad (23)$$

گام سوم: ماتریس بی مقیاس وزن دار با رابطه ۲۴ محاسبه می شود. در این گام وزن معیارها که از روش آنتروپی به دست آمده است، در ماتریس نرمال ضرب می شود تا ماتریس وزن دار به دست آید.

$$V_{i,j} = N_{i,j} \times W_j I \quad (24)$$

گام چهارم: حل ایده آل (A_j^+) و ضد ایده آل (A_j^-) با روابط ۲۵ تا ۲۸ به دست می آیند. در این گام باید نوع معیارها مشخص شود، معیارها یا جنبه مثبت دارند یا منفی. در معیار مثبت، حل ایده آل برابر با بزرگترین درایه ستون معیار و ضد ایده آل برابر با کوچکترین درایه ستون معیار است. در معیارهای منفی به عکس است.

$$A_j^+ = \left\{ (\max_i V_{ij} | j \in J), (\min_i V_{ij} | j \in J) | i = 1, 2, \dots, m \right\} \quad (25)$$

$$A_j^- = \left\{ (\min_i V_{ij} | j \in J), (\max_i V_{ij} | j \in J) | i = 1, 2, \dots, m \right\} \quad (26)$$

$$J = \{ j = 1, 2, \dots, n | j \in benefit \} \quad (27)$$

$$J = \{ j = 1, 2, \dots, n | j \in cost \} \quad (28)$$

گام پنجم: فاصله هر گزینه از حل ایده آل (d_i^+) و ضد ایده آل (d_i^-) با روابط ۲۹ و ۳۰ محاسبه می شود.

$$d_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (V_{ij} - A_j^+)^2}, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (29)$$

$$d_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (V_{ij} - A_j^-)^2}, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (30)$$

روش آنتروپی شانون

روش آنتروپی (Entropy) در سال ۱۹۷۴ توسط شانون و ویور ارائه شد. آنتروپی یکی از روش های تصمیم گیری چندشاخصه برای محاسبه وزن معیارهاست. ایده اصلی این روش آن است که هر چه پراکندگی در مقادیر یک شاخص بیشتر باشد، آن شاخص اهمیت بیشتری دارد. گام های این روش عبارتند از [۲۷]:

گام اول: ابتدا ماتریس تصمیم تشکیل می شود. ماتریس تصمیم شامل m گزینه و n معیار است. در این ماتریس معیارها در ستون ها و گزینه ها در سطرها قرار می گیرند. هر سلول ماتریس، ارزیابی هر گزینه نسبت به هر معیار است.

گام دوم: ماتریس تصمیم نرمال می شود. نرمال شدن به این صورت است که درایه هر ستون را بر مجموع درایه های آن ستون تقسیم می کنیم. هر درایه نرمال شده P_{ij} نامیده می شود.

گام سوم: آنتروپی هر شاخص (E_j) با رابطه ۲۰ محاسبه می شود.

$$E_j = -K \sum_{i=1}^m (P_{ij} * \ln P_{ij}) \quad (20)$$

و $k = \frac{1}{\ln(m)}$ به عنوان مقدار ثابت، مقدار E_j را بین صفر و یک نگه می دارد.

گام چهارم: در ادامه مقدار درجه انحراف (d_j) با رابطه ۲۱ محاسبه می شود.

$$d_j = 1 - E_j \quad (21)$$

گام پنجم: سپس، مقدار وزن (W_j) با رابطه ۲۲ محاسبه می شود.

$$W_j = \frac{d_j}{\sum_{j=1}^n d_j} \quad (22)$$

روش شباهت به راه حل ایده آل

روش شباهت به راه حل ایده آل (تاپسیس) نخستین بار توسط هوانگ و یون در سال ۱۹۸۱ پیشنهاد شد. این مدل یکی از مدل های پرکاربرد تصمیم گیری چندشاخصه است. اساس روش یادشده بر این مفهوم استوار است که علاوه بر در نظر گرفتن فاصله یک گزینه از نقطه ایده آل مثبت،

مقدار جواب بهینه مطلق حاصل از نرم افزار لینگو بر اساس روش برنامه ریزی غیرخطی برابر با مقدار ۰/۱۸۱ به دست آمده است. جواب‌های بهینه حاصل از الگوریتم‌های فراابتکاری به ازای ۱۰ بار اجرا در جدول ۵ نشان داده شده‌اند. از نظر میانگین جواب‌های بهینه، مدل‌های الگوریتم هیبریدی وال-ژنتیک، الگوریتم ژنتیک و ال به ترتیب با ۳/۹، ۴۷/۳ و ۴۶۵/۰ درصد افزایش نسبت به جواب بهینه مطلق، در رتبه‌های اول تا سوم قرار دارند. از نظر ضریب تغییرات جواب‌های بهینه، الگوریتم هیبریدی وال-ژنتیک با مقدار ۰/۰۰۱۲ کمترین مقدار در بین مدل‌ها را دارد و مدل‌های الگوریتم ژنتیک و الگوریتم وال به ترتیب با افزایش ۳/۲۵ و ۷/۵۰ برابری نسبت به الگوریتم وال-ژنتیک در رتبه‌های بعدی قرار دارند.

جدول ۵. جواب بهینه الگوریتم‌های مختلف به ازای ۱۰ بار اجرا

شماره اجرا	الگوریتم ژنتیک	الگوریتم وال	الگوریتم وال-ژنتیک
۱	۰/۲۴۶۷	۰/۸۶۱۳	۰/۱۹۰۴
۲	۰/۲۶۰۲	۰/۷۹۲۳	۰/۱۸۹۲
۳	۰/۳۷۵۶	۰/۸۸۵۴	۰/۱۸۷۷
۴	۰/۲۸۱۹	۰/۹۱۲۰	۰/۱۸۷۱
۵	۰/۲۲۵۲	۱/۱۵۸۱	۰/۱۸۹۱
۶	۰/۲۹۰۰	۰/۸۸۳۱	۰/۱۸۶۶
۷	۰/۲۶۸۷	۰/۸۶۳۰	۰/۱۸۹۵
۸	۰/۲۶۲۶	۱/۰۱۶۲	۰/۱۸۷۴
۹	۰/۳۳۱۹	۰/۹۲۴۵	۰/۱۸۷۵
۱۰	۰/۲۲۷۵	۱/۹۴۷۲	۰/۱۸۸۹
حداکثر	۰/۳۷۵۶	۱/۹۴۷۲	۰/۱۹۰۴
حداقل	۰/۲۲۵۲	۰/۷۹۲۳	۰/۱۸۶۶
انحراف معیار	۰/۰۴۱۹	۰/۳۲۲۲	۰/۰۰۱۲
میانگین	۰/۲۶۷۰	۱/۰۲۴۳	۰/۱۸۸۳
ضریب تغییرات	۰/۱۵۶۹	۰/۳۱۴۵	۰/۰۰۶۲
جواب بهینه مطلق		۰/۱۸۱۳	

مقادیر شاخص‌های اطمینان‌پذیری، برگشت‌پذیری، آسیب‌پذیری و پایداری برای مدل‌های برنامه‌ریزی غیرخطی، الگوریتم ژنتیک و الگوریتم وال و الگوریتم هیبریدی وال-ژنتیک در جدول ۶ نشان داده شده‌اند. از نظر اطمینان‌پذیری، مدل برنامه‌ریزی غیرخطی با مقدار ۰/۷۵۰ دارای بیشترین مقدار در بین مدل‌هاست و مدل‌های الگوریتم وال-ژنتیک، الگوریتم ژنتیک و الگوریتم وال به ترتیب با ۲/۸، ۵/۶ و ۳۸/۹ درصد کاهش نسبت به برنامه‌ریزی غیرخطی در رتبه‌های بعدی قرار دارند. از نظر

گام ششم: شاخص شباهت با رابطه ۳۱ محاسبه می‌شود. شاخص شباهت نشان‌دهنده امتیاز هر گزینه است و براساس رابطه ۳۱ محاسبه می‌شود. هرچقدر این شاخص به عدد یک نزدیک‌تر باشد، نشان‌دهنده برتری آن گزینه است.

$$Cl_i^* = \frac{d_i^-}{d_i^- + d_i^+}, 0 < Cl_i^* < 1, i = 1, 2, \dots, m \quad (31)$$

گام هفتم: گزینه‌ها براساس ترتیب نزولی شاخص شباهت، رتبه‌بندی می‌شوند.

بحث و نتیجه‌گیری

در اغلب الگوریتم‌های بهینه‌سازی پارامترهای قابل تنظیم مختلفی تعریف شده‌اند که تغییر هر یک از این پارامترها به تغییر در زمان اجرای الگوریتم و مقدار جواب بهینه تابع هدف منجر می‌شود. مقادیر مناسب این پارامترها با آنالیز حساسیت تعیین می‌شود. مقادیر مناسب پارامترهای قابل تنظیم در مدل‌های الگوریتم ژنتیک، الگوریتم وال و الگوریتم هیبریدی وال-ژنتیک در جدول‌های ۲-۴ نشان داده شده‌اند.

جدول ۲. مقادیر مناسب پارامترهای الگوریتم ژنتیک

نام پارامتر	مقدار مناسب
تعداد تکرار	۱۲۵۰
تعداد جمعیت	۱۰۰
احتمال برش تک‌نقطه‌ای	۰/۷
احتمال جهش	۰/۳
نوع انتخاب والدین	چرخه رولت

جدول ۳. مقادیر مناسب پارامترهای الگوریتم وال

نام پارامتر	مقدار مناسب
تعداد تکرار	۱۵۰۰
تعداد جمعیت	۱۵۰

جدول ۴. مقادیر مناسب پارامترهای الگوریتم وال-ژنتیک

نام پارامتر	مقدار مناسب
تعداد تکرار	۱۵۰۰
تعداد جمعیت	۱۵۰
احتمال برش تک‌نقطه‌ای	۰/۶
احتمال جهش	۰/۴
روش انتخاب والدین	چرخه رولت

مدل‌های برنامه‌ریزی غیرخطی، الگوریتم ژنتیک و الگوریتم وال به ترتیب در رتبه‌های دوم تا چهارم قرار دارند.

جدول ۶. مقادیر شاخص‌های ارزیابی عملکرد مدل‌های مختلف

مدل	اطمینان‌پذیری برگشت‌پذیری آسیب‌پذیری پایداری		
برنامه‌ریزی غیرخطی	۰/۷۵۰۰	۰/۴۵۸۳	۰/۶۶۱۴
الگوریتم ژنتیک	۰/۷۰۸۳	۰/۵۳۵۷	۰/۷۱۰۶
الگوریتم وال	۰/۴۵۸۳	۰/۴۰۳۸	۰/۸۷۶۱
الگوریتم وال-ژنتیک	۰/۷۲۹۲	۰/۵۰۰۰	۰/۶۶۸۱

جدول ۷. ماتریس تصمیم‌گیری

معیار ۱	معیار ۲	معیار ۳	معیار ۴	معیار ۵	گزینه
۰/۱۸۱۳	۰/۷۵۰	۰/۴۵۸	۰/۶۶۱	۰/۱۱۶	۱
۰/۲۲۵۲	۰/۷۰۸	۰/۵۳۶	۰/۷۱۱	۰/۱۱۰	۲
۰/۷۹۲۳	۰/۴۵۸	۰/۴۰۴	۰/۸۷۶	۰/۰۲۳	۳
۰/۱۸۶۶	۰/۷۲۹	۰/۵۰۰	۰/۶۶۸	۰/۱۲۱	۴

جدول ۸. بردار وزن محاسبه‌شده به روش آنتروپی

معیارهای ماتریس تصمیم‌گیری	تابع هدف	اطمینان‌پذیری برگشت‌پذیری آسیب‌پذیری پایداری
مثبت یا منفی بودن معیارها	-	+
وزن معیارها	۰/۶۰۵	۰/۰۴۴
	۰/۰۱۴	۰/۰۱۸
	۰/۳۱۹	+

جدول ۹. رتبه‌بندی گزینه‌های مختلف با روش تاپسیس

رتبه‌بندی	شاخص شباهت	ماتریس تصمیم‌گیری	شاخص شباهت	رتبه‌بندی
۲	۰/۹۸۴	برنامه‌ریزی غیرخطی	۰/۹۸۴	۲
۳	۰/۹۲۲	الگوریتم ژنتیک	۰/۹۲۲	۳
۴	۰/۱۰۰	الگوریتم وال	۰/۱۰۰	۴
۱	۰/۹۹۲	الگوریتم وال-ژنتیک	۰/۹۹۲	۱

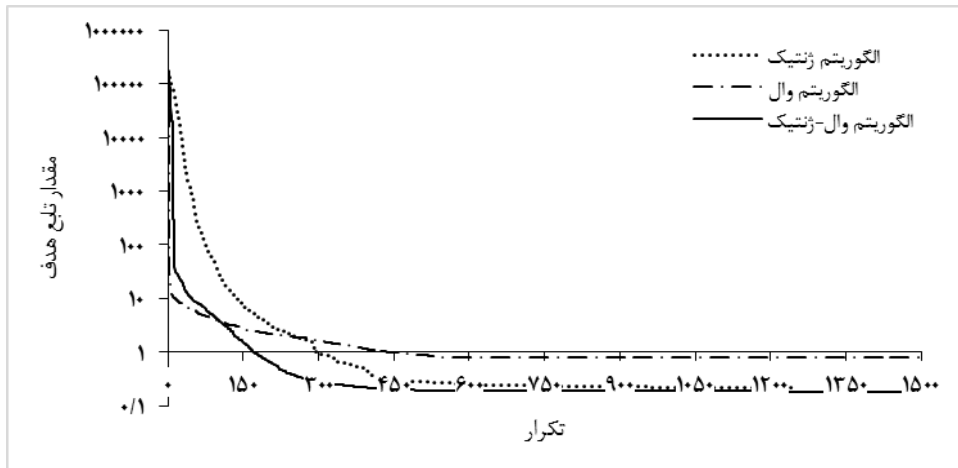
چگونگی همگرایی جواب‌های بهینه الگوریتم‌های فراابتکاری استفاده‌شده در بهره‌برداری از مخزن سد سلمان فارسی در شکل ۲ نشان داده شده است. نمودار همگرایی به صورت نیمه‌لگاریتمی ترسیم شده است. محور افقی در مقیاس خطی و محور عمودی در مقیاس لگاریتمی است. شکل ۲ نشان می‌دهد الگوریتم هیبریدی وال-ژنتیک عملکرد بهتری نسبت به الگوریتم ژنتیک و الگوریتم وال دارد.

برگشت‌پذیری، الگوریتم ژنتیک با مقدار ۰/۵۳۶ دارای بیشترین مقدار در بین مدل‌هاست و مدل‌های الگوریتم هیبریدی وال-ژنتیک، برنامه‌ریزی غیرخطی و الگوریتم وال به ترتیب با ۶/۷، ۴/۴ و ۶/۲۴ درصد کاهش نسبت به الگوریتم ژنتیک در رتبه‌های بعدی قرار دارند. از نظر آسیب‌پذیری، مدل برنامه‌ریزی غیرخطی با مقدار ۰/۶۶۱ دارای کمترین مقدار در بین مدل‌هاست و مدل‌های الگوریتم هیبریدی وال-ژنتیک، الگوریتم ژنتیک و الگوریتم وال به ترتیب با ۱۰/۱، ۴/۷ و ۵/۳۲ درصد افزایش نسبت به مدل برنامه‌ریزی غیرخطی در رتبه‌های بعدی قرار دارند. از نظر پایداری، الگوریتم هیبریدی وال-ژنتیک با مقدار ۰/۱۲۱ دارای بیشترین مقدار در بین مدل‌هاست و مدل‌های برنامه‌ریزی غیرخطی، الگوریتم ژنتیک و الگوریتم وال به ترتیب با ۸/۳، ۲/۹ و ۱/۸۱ درصد کاهش نسبت به الگوریتم وال-ژنتیک در رتبه‌های بعدی قرار دارند.

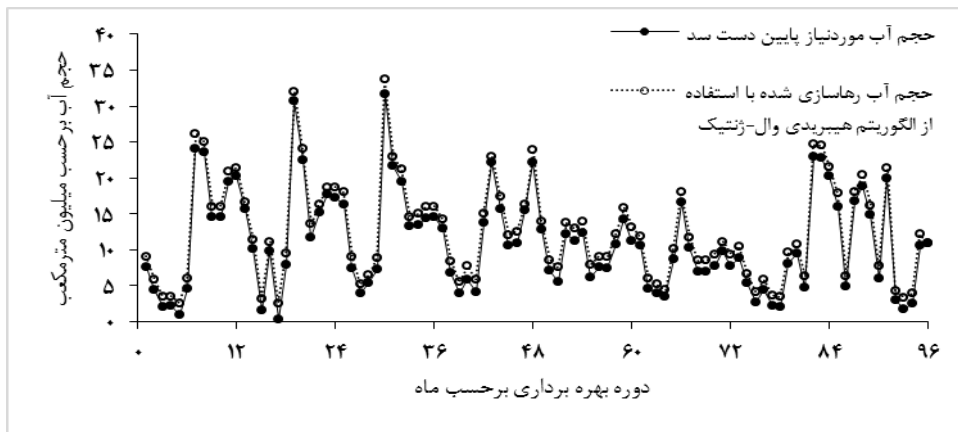
مقادیر ماتریس تصمیم‌گیری در جدول ۷ نشان داده شده است. مدل‌های برنامه‌ریزی غیرخطی، الگوریتم ژنتیک، الگوریتم وال و الگوریتم هیبریدی وال-ژنتیک به ترتیب به عنوان گزینه‌های اول تا چهارم ماتریس تصمیم‌گیری و همچنین تابع هدف و شاخص‌های اطمینان‌پذیری، برگشت‌پذیری، آسیب‌پذیری و پایداری به ترتیب به عنوان معیارهای اول تا پنجم ماتریس تصمیم‌گیری انتخاب شده‌اند.

وزن معیارهای به‌دست‌آمده از روش آنتروپی و همچنین مثبت یا منفی بودن معیارها در جدول ۸ نشان داده شده‌اند. افزایش مقدار در معیارهای مثبت سبب بهبود در عملکرد سیستم می‌شود و در معیارهای منفی به عکس است. نتایج به‌دست‌آمده از روش آنتروپی نشان می‌دهد دو معیار تابع هدف و پایداری به ترتیب دارای بیشترین وزن در بین معیارها هستند و معیارهای اطمینان‌پذیری، آسیب‌پذیری و برگشت‌پذیری به ترتیب در رتبه‌های بعدی قرار دارند.

مقادیر شاخص شباهت به‌دست‌آمده از روش تاپسیس به ازای گزینه‌های ماتریس تصمیم‌گیری در جدول ۹ نشان داده شده‌اند. شاخص شباهت عددی بین صفر و یک است. هر چقدر این شاخص در گزینه‌ای به عدد یک نزدیک‌تر باشد، نشان‌دهنده برتری آن گزینه است. نتایج به‌دست‌آمده از تاپسیس نشان می‌دهد عملکرد الگوریتم هیبریدی وال-ژنتیک در رتبه اول قرار دارد و عملکرد



شکل ۲. مقایسه همگرایی جواب های بهینه حاصل از الگوریتم های فراابتکاری مختلف



شکل ۳. مقایسه حجم آب مورد نیاز و رهاسازی شده از مخزن با استفاده از الگوریتم هیبریدی وال-ژنتیک

بهینه‌سازی از سه بخش اصلی متغیرهای تصمیم، تابع هدف و قیود مسئله تشکیل شده است. در مسئله بهینه‌سازی حاضر، حجم رهاسازی از مخزن به عنوان متغیر تصمیم تعیین شد. تابع هدف مدل بهینه‌سازی به صورت کمینه‌سازی کل کمبود طی دوره بهره‌برداری تعریف شد. محدودیت‌های معادله پیوستگی مخزن، حجم ذخیره مخزن و حجم رهاسازی از مخزن به تابع هدف مسئله بهینه‌سازی اعمال شدند. عملکرد الگوریتم‌های پیشنهادی با عملکرد الگوریتم ژنتیک به عنوان یکی از الگوریتم‌های رایج در این زمینه و برنامه‌ریزی غیرخطی به عنوان بهینه‌یاب مطلق مقایسه شد. عملکرد مدل‌ها براساس معیارهای اطمینان‌پذیری، برگشت‌پذیری، آسیب‌پذیری و پایداری ارزیابی شدند.

نتایج به دست آمده از جواب‌های بهینه نشان دادند مقدار جواب بهینه مطلق با استفاده از نرم افزار لینگو و با استفاده از روش برنامه ریزی غیرخطی برابر با مقدار ۰/۱۸۱ به دست

نمودار حجم آب مورد نیاز پایین دست سد و حجم آب رهاسازی از مخزن سد سلمان فارسی با استفاده از الگوریتم هیبریدی وال-ژنتیک طی دوره شبیه‌سازی در شکل ۳ نشان داده شده است.

نتیجه‌گیری کلی

در پژوهش حاضر عملکرد الگوریتم وال به تنهایی و در حالت ترکیب با الگوریتم ژنتیک در بهینه‌سازی مسئله بهره‌برداری از مخزن سد ارزیابی شده است. منطقه مطالعه شده سد مخزنی سلمان فارسی است که در استان فارس و جنوب شرقی شیراز روی رودخانه قره‌آغاج در محل تنگه کارزین واقع شده است. افق برنامه‌ریزی شامل یک دوره ۹۶ ماهه از مهر ۱۳۸۹ تا شهریور ۱۳۹۷ می‌شود. اطلاعات استفاده شده شامل سری زمانی ماهانه حجم آورد رودخانه، حجم تبخیر از سطح مخزن و حجم نیازهای پایین دست سد هستند. هر مسئله

- conditions. The 10th Biennial Conference of Iran's Agricultural Economics. 2016;
- [3]. Farzin S., Karami H., Valikhan Anaraki M., Ehteram M. The Application of Bat Algorithm for Economical Design of Open Channels. Iranian Journal of Irrigation and Drainage. 2018; 12(3): 635-646.
- [4]. Hosseini-Moghari S. M., Banihabib M. E. Optimizing operation of reservoir for agricultural water supply using firefly Algorithm. J. of Water and Soil Resources Conservation. 2014; 3(4): 17-31.
- [5]. Akbarifard S., Qaderi K., Bakhtiari B. Codification of optimal operation policies of reservoirs in the Gorganrood basin using Wolf Search Algorithm (WSA). Journal of Dam and Hydroelectric PowerPlant. 2015; 6(21): 75-90.
- [6]. Bozorg-Haddad O, Azarnivand A, Hosseini-Moghari SM, Loáiciga HA. Optimal operation of reservoir systems with the symbiotic organisms search (SOS) algorithm. Journal of Hydroinformatics. 2017 Jul 1; 19(4):507-21.
- [7]. Afshar MH, Azizipour M, Oghbaee B, Kim JH. Exploring the efficiency of harmony search algorithm for hydropower operation of multi-reservoir systems: a hybrid cellular automata-harmony search approach. In International Conference on Harmony Search Algorithm 2017 Feb 22 (pp. 252-260). Springer, Singapore.
- [8]. Dashti R., Sattari M., Nourani V. Performance evaluation of differential evolution algorithm in optimum operating of Eleviyan single-reservoir dam system. J. of Water and Soil Resources Conservation. 2017; 6(3): 61-75.
- [9]. Yaseen ZM, Karami H, Ehteram M, Mohd NS, Mousavi SF, Hin LS, Kisi O, Farzin S, Kim S, El-Shafie A. Optimization of Reservoir Operation Using New Hybrid Algorithm. KSCE Journal of Civil Engineering. 2018:1-3.
- [10]. Kumar V, Yadav SM. Optimization of Reservoir Operation with a New Approach in Evolutionary Computation Using TLBO Algorithm and Jaya Algorithm. Water Resources Management. 2018 Oct 1; 32(13):4375-91.
- [11]. Karami H, Mousavi SF, Farzin S, Ehteram M, Singh VP, Kisi O. Improved Krill Algorithm for Reservoir Operation. Water Resources Management. 2018:1-20.
- [12]. Ehteram M, Karami H, Mousavi SF, Farzin S, Celeste AB, Shafie AE. Reservoir Operation by a New Evolutionary Algorithm: Kidney Algorithm. Water Resources Management. 2018 Nov 1; 32(14):4681-706.

آمد و مدل‌های الگوریتم وال-ژنتیک، الگوریتم ژنتیک و الگوریتم وال به ترتیب با ۲/۹، ۲۴/۲ و ۳۳۷/۰ درصد افزایش نسبت به جواب بهینه مطلق در رتبه‌های اول تا سوم قرار دارند. نتایج به دست آمده از شاخص‌های ارزیابی عملکرد مدل‌ها نشان دادند از نظر اطمینان‌پذیری، عملکرد مدل برنامه‌ریزی غیرخطی در رتبه اول قرار دارد و مدل‌های الگوریتم هیبریدی وال-ژنتیک، الگوریتم ژنتیک و الگوریتم وال به ترتیب در رتبه‌های بعدی قرار دارند. از نظر برگشت‌پذیری، عملکرد الگوریتم ژنتیک در رتبه اول قرار دارد و مدل‌های الگوریتم هیبریدی وال-ژنتیک، برنامه‌ریزی غیرخطی و الگوریتم وال به ترتیب در رتبه‌های بعدی قرار دارند. از نظر آسیب‌پذیری، عملکرد مدل برنامه‌ریزی غیرخطی در رتبه اول قرار دارد و مدل‌های الگوریتم هیبریدی وال-ژنتیک، الگوریتم ژنتیک و الگوریتم هیبریدی وال-ژنتیک، الگوریتم ژنتیک و الگوریتم هیبریدی وال به ترتیب در رتبه‌های بعدی قرار دارند. از نظر پایداری، عملکرد الگوریتم هیبریدی وال-ژنتیک در رتبه اول قرار دارد و مدل‌های برنامه‌ریزی غیرخطی، الگوریتم ژنتیک و الگوریتم وال به ترتیب در رتبه‌های بعدی قرار دارند. به منظور انتخاب برترین مدل براساس تابع هدف و شاخص‌های ارزیابی عملکرد مدل‌ها از روش تاپسیس استفاده شد. نتایج به دست آمده از تاپسیس نشان داد عملکرد الگوریتم هیبریدی وال-ژنتیک در رتبه اول قرار دارد و عملکرد مدل‌های برنامه‌ریزی غیرخطی، الگوریتم ژنتیک و الگوریتم وال به ترتیب در رتبه‌های دوم تا چهارم قرار دارند.

نتایج پژوهش حاضر با نتایج پژوهش یاسین و همکارانش [۹] که نشان دادند الگوریتم هیبریدی عملکرد بهتری نسبت به هر یک از الگوریتم‌های تشکیل‌دهنده الگوریتم هیبریدی دارند نیز مطابقت دارد. در ادامه، پیشنهاد می‌شود کارایی مدل‌های الگوریتم وال و الگوریتم هیبریدی وال-ژنتیک در بهره‌برداری از سیستم‌های چندمخزنه مرجع بررسی شود.

منابع

- [1]. Sabzehie, M., Kolivand, S. The Social Problem of Water with Sustainable Development Perspective: A Sociological Analysis. Social Sciences, 2017; 24(77): 404-433.
- [2]. Tarazkar M. H., Zibae M., Soltani GH. Optimization of operation role curve of Droozan Dam reservoir under drought

- [13]. Mansouri A, Aminnejad B, Ahmadi H. Introducing modified version of penguins search optimization algorithm (PeSOA) and its application in optimal operation of reservoir systems. *Water Science and Technology: Water Supply*. 2018 Aug 1; 18(4):1484-96.
- [14]. Rabiei MH, Aalami MT, Talatahari S. RESERVOIR OPERATION OPTIMIZATION USING CBO, ECBO AND VPS ALGORITHMS. *Iran University of Science & Technology*. 2018 Oct 15; 8(3):489-509.
- [15]. Allawi MF, Jaafar O, Hamzah FM, Ehteram M, Hossain MS, El-Shafie A. Operating a reservoir system based on the shark machine learning algorithm. *Environmental Earth Sciences*. 2018 May 1; 77(10): 366.
- [16]. Rouzegari N., Hassanzadeh Y., Sattari M. T. Optimization of Reservoir Operational Policy Using Simulated Annealing Algorithm (Case Study: Mahabad reservoir). *Water and Soil Science*. 2018; 28(1): 173-185.
- [17]. Farahnakian T.S., Moeini R., Mousavi S.F. Optimal operation of single-reservoir system of Dez dam using Charged System Search Algorithm. *J. of Water and Soil Conservation*. 2018; 25(1):107-125.
- [18]. <http://www.frrw.ir/>
- [19]. Hosseini-Moghari, S., Bozorg-Haddad, O. Application of Biogeography-Based Optimization (BBO) in an Optimal Operation of Reservoirs (Case Study: The Karon4 Dam). , 2017; 10(33): 61-72.
- [20]. Nadiri A.A., Taheri, Z., Barzghari, G., Dideban, K. A Framework to Estimation of Potential Subsidence of the Aquifer Using Algorithm Genetic. *Iran Water Resources Research*, 2018; 14(2): 182-194.
- [21]. Tarin N., Azar A., Ebrahimi S.A. Integrated reverse logistics network design considering the quality of returned products using genetic algorithms. *Journal of Operational Research and Its Applications*. 2017; 14(1): 137-156.
- [22]. Bagheri F., Dehghan M., Ziaratban M., Afkhaminia F. Selecting the most proper location to construct hospitals and health centers in a city by Genetic Algorithm. *Jorjani Biomedicine Journal*. 2017; 5(2): 78-90.
- [23]. Olfat, L., Amiri, M., Jafarian, A. Vehicle routing problem in cross-dock using genetic algorithm, Case: Iran Khodro Company. *Industrial Management Studies*, 2017; 15(45): 97-120.
- [24]. Mirjalili S, Lewis A. The whale optimization algorithm. *Advances in Engineering Software*. 2016 May 1; 95:51-67.
- [25]. Nabinejad, S., Mousavi, S. Simulation-optimization for Basin-wide Optimum Water Allocation Considering System's Performance and Equity Measures. *Journal of Water and Wastewater (parallel title); Ab va Fazilab (in persian)*, 2013; 24(2): 70-79.
- [26]. Hafezparast M., Araghinejad Sh., Sharifazari S. Sustainability Criteria in Assessment of Integrated Water Resources Management in the Aras Basin Based on DPSIR Approach. *J. of Water and Soil Conservation*. 2015; 22(2): 61-77.
- [27]. parsamehr, A.H., khosravani, Z. Determination of drought Using Multi Criteria Decision Making Based on TOPSIS Method (A case study of selective Isfahan Province Stations). *Iranian J. of Rangeland and Desert Research*. 2017; 24(1): 16-29.
- [28]. Fallahi, F., Beheshti, M., Marashi, S. Ranking the environmental sustainability in selected Iranian provinces: A comparison of AHP and TOPSIS methods. *J. of Quantitative Economics*, 2017; 14(1): 97-118.
- [29]. Behzad, A. Impact of environmental factors on destruction of archaeological sites by TOPSIS model (case study archaeological sites of Darreh Shahr and Abdanan of Ilam province). *Territory*. 2017; 14(53): 1-20.