

Optimization of Concrete Gravity Dam Section using New Meta-heuristic Algorithms

Somayeh Emami¹, Javad Parsa^{2*}

1- Ph.D. Student of Hydraulic Structures, Department of Water Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

2- Assistant Professor of Hydraulic Structures, Department of Water Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

ABSTRACT

According to design criteria, site specifications and required height, different dimensional options are considered for geometric parameters, while design gravity dams. Among options, an option that provides sustainability and low costs is considered as an executive option. In this study, the Koyna concrete gravity dam section in India and the Kalat Zavin concrete gravity dam in Khorasan Razavi province were optimized using election meta-heuristic algorithm (EA) with regard to the stability conditions. In this model, geometric parameters were considered as decision variables and dam weight as an objective function. The model obtains geometric parameters in such a way that the dam weight is minimized. In order to evaluate the proposed method, Koyna dam and Kalat Zavin dam data set was used and the results were compared with Genetic (GA), Honey Bee Mating Optimization (HBMO) and Imperialist Competitive (ICA) algorithms. The results of EA method indicate a 9.87% and 10.40% decrease in volume of concrete consumption and a reduction in area for Koyna and Kalat Zavin dams. Based on the comparisons, the EA algorithm showed better performance in optimizing the dam section than the Genetic algorithm (GA), Honey Bee Mating algorithm (HBMO) and Imperialist Competitive algorithm (ICA) optimization models. Also, the improvement rate of the EA algorithm in comparison with ICA, HBMO, and GA algorithms is equal to 8%, 6%, and 11%, respectively.

ARTICLE INFO

Receive Date: 27 October 2020

Revise Date: 26 December 2020

Accept Date: 25 May 2021

Keywords:

Election Algorithm

Koyna Dam

Kalat Zavin Dam

Optimal Section

Stability Conditions

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2021.253952.2272>

*Corresponding author: Javad Parsa

Email address: jparsa@tabrizu.ac.ir

بهینه‌سازی مقطع سدهای بتنی وزنی با استفاده از الگوریتم فراابتکاری انتخابات

سمیه امامی^۱، جواد پارسا^{۲*}

۱- دانشجوی دکتری مهندسی آب، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

۳- استادیار مهندسی آب، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

چکیده

در هنگام طراحی سدهای بتنی وزنی، با توجه به ضوابط طراحی، مشخصات ساختگاه و ارتفاع مورد نیاز، گزینه‌هایی با ابعاد مختلف برای پارامترهای هندسی در نظر گرفته می‌شود. در بین گزینه‌ها، گزینه‌ای که شرایط پایداری را تأمین نماید و هزینه‌ی کم‌تری داشته باشد، به‌عنوان گزینه‌ی اجرایی در نظر گرفته می‌شود. در این پژوهش، به بهینه‌سازی ابعاد سدهای بتنی وزنی کوینا (Koyna) در هندوستان و سد زاوین کلات واقع در استان خراسان رضوی با استفاده از الگوریتم فراابتکاری انتخابات (EA)، با لحاظ شرایط پایداری پرداخته شد. در این مدل، پارامترهای هندسی، به‌عنوان متغیرهای تصمیم و وزن سد به‌عنوان تابع هدف، در نظر گرفته شد. مدل، پارامترهای هندسی را به‌گونه‌ای به‌دست می‌آورد که حجم مصالح مورد استفاده در سد کمینه شود. به‌منظور ارزیابی روش پیشنهادی، از مجموعه داده سد کوینا و سد زاوین کلات استفاده شد و نتایج حاصل با الگوریتم‌های ژنتیک (GA)، جفت‌گیری زنبورعسل (HBMO) و رقابت استعماری (ICA) مقایسه گردید. جواب‌های حاصل از روش EA به‌ترتیب بیانگر کاهش ۹/۸۷٪ و ۱۰/۴۰٪ درصدی حجم بتن مصرفی و کاهش مساحت برای سدهای کوینا و زاوین کلات نسبت به مقطع واقعی ساخته شده آن‌ها می‌باشد. بر اساس مقایسه‌های انجام شده، الگوریتم EA در دستیابی به ابعاد بهینه مقطع سد نسبت به مدل‌های بهینه‌سازی ژنتیک (GA)، جفت‌گیری زنبورعسل (HBMO) و رقابت استعماری (ICA) کارایی بهتری از خود نشان داد. هم‌چنین میزان بهبود الگوریتم EA در مقایسه با الگوریتم‌های ICA، HBMO و GA به‌ترتیب برابر با ۸٪، ۶٪ و ۱۱٪ می‌باشد.

کلمات کلیدی: الگوریتم انتخابات، سد کوینا، سد زاوین کلات، مقطع بهینه، شرایط پایداری.

شناخته دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2021.253952.2272	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	10.22065/jsce.2021.253952.2272	۱۴۰۰/۱۲/۲۹	۱۴۰۰/۰۳/۰۴	۱۴۰۰/۰۳/۰۴	۱۳۹۹/۱۰/۰۶	۱۳۹۹/۰۸/۰۶
جواد پارسا jparsa@tabrizu.ac.ir					*نویسنده مسئول: پست الکترونیکی:	

۱- مقدمه

سدها برای اهداف مختلفی از قبیل کنترل سیلاب، تولید انرژی برقایی، ذخیره‌ی آب جهت تأمین نیازهای شرب، صنعتی، کشاورزی و جهت خنک کردن تأسیسات نیروگاه‌ها و کارخانجات ساخته می‌شوند. یک سد وزنی عبارت است از سازه‌ای سنگین، ساخته شده از بتن یا مصالح بنایی که در عرض رودخانه به منظور افزایش حجم و ارتفاع آب در بالادست خود ساخته می‌شود و شکل و طراحی آن به گونه‌ای است که پایداری سازه در مقابل کلیه نیروهای وارده توسط وزن سد تأمین می‌شود [۱]. از آنجایی که معمولاً طراحان بیش‌تر توجه خود را به تأمین شرایط پایداری طرح معطوف می‌کنند، به دست آوردن ابعاد بهینه برای سد، مورد غفلت واقع می‌شود. همین موضوع باعث تحمیل هزینه‌ی بالای اجرای طرح به‌ویژه جهت تهیه مصالح ساختمانی سازه می‌شود که شاید یکی از دلایل، نبود اطلاعات کافی و یا به صورت دقیق‌تر، عدم آگاهی طراحان از روش‌های نوین در طراحی بهینه‌ی سازه می‌باشد. رایج‌ترین روش طراحی این نوع سدها، تعیین مثلث اساسی سد، تعیین شرایط بارگذاری و تعیین شرایط پایداری سد در برابر نیروهای اصلی و در انتها، اضافه کردن اجزاء و تمهیدات مربوط دیگر به سد مانند ارتفاع آزاد، پهن‌شدگی بالادست و ادوات بهره‌برداری و غیره می‌باشد [۱ و ۲]. از آنجا که انجام محاسبات به شیوه‌ی دستی در دنیای امروز توجه‌پذیر نبوده و ممکن است خطای انسانی را نیز به همراه داشته باشد و همچنین نظر به این‌که روش‌های به کار رفته در طراحی معمولاً از روش سنتی آزمون و خطا استفاده کرده و این روش‌ها خالی از خطا نمی‌باشند، لزوم استفاده از روش‌های بهینه‌سازی غیرخطی ریاضی (مبتنی بر گرادیان) هم‌چون روش لاگرانژ و مدل‌هایی هم‌چون GAMS نیازمند زمان زیادی است و در مواردی نیز ممکن است قادر به حل مسئله نشوند. روش‌های نوین فراکاوشی بهینه‌سازی هم‌چون الگوریتم ژنتیک^۱ (GA)، هوش جمععی ذرات^۲ (PSO)، جفت‌گیری زنبورعسل^۳ (HBMO) و دیگر الگوریتم‌های فراکاوشی کارآیی خود را در حل مسائل پیچیده ریاضی به اثبات رسانده‌اند. در ارتباط با کاربرد این روش‌ها در حل مسائل سدسازی و مهندسی آب می‌توان به مطالعات (نیکلاو و همکاران [۳]، افشار و همکاران [۴]، افشار و همکاران [۵] و محمدزاده رومیانی و معصومی [۶]) اشاره کرد.

در دو دهه اخیر تلاش‌های بسیاری توسط محققین جهت یافتن طرح بهینه برای سدهای بتنی وزنی صورت گرفته است. از جمله مطالعات اخیر انجام شده می‌توان به مطالعات نورانی و همکاران [۷]، خطیبی‌نیا و خسروی [۸] و دیپیکا و سوریبابو [۹] اشاره کرد که با استفاده از الگوریتم‌های فرا ابتکاری، ابعاد بهینه سدهای بتنی وزنی را تعیین نموده‌اند. هاشمی و همکاران [۱۰] یک روش حل کارای مبتنی بر الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) را برای طراحی بهینه سدهای بتنی وزنی ارائه نمودند. در این روش با در نظر گرفتن تمامی نیروهای وارد بر بدنه سد، پارامترهای هندسی مقطع سد به گونه‌ای تعیین می‌گردد که علاوه بر تأمین پایداری در برابر لغزش^۴، واژگونی^۵ و کنترل تنش‌ها در سطوح بالادست و پایین دست بدنه سد، حجم بتن ریزی تا حد ممکن کاهش یافته و طرح از لحاظ اقتصادی بهینه شود. نتایج به دست آمده از این مقایسات بیانگر کاهش معنی‌دار حجم بتن مصرفی در طرح‌های بهینه حاصل از روش پیشنهادی نسبت به طرح واقعی سدها و طرح‌های به دست آمده از الگوریتم ژنتیک است. گل‌کار حمزبی یزد و عربشاهی [۱۱] با استفاده از الگوریتم ازدحام ذرات (PSO) که یک الگوریتم تکاملی بر مبنای جستجوی پرندگان است، مسئله بهینه‌سازی وزن سد بتنی وزنی را بررسی کردند. نتایج نشان داد جواب‌های به دست آمده از الگوریتم PSO نسبت به روش‌های توصیه شده سنتی اختلاف داشته و می‌تواند به راحتی وزن سد را با وجود قیود غیرخطی بهینه نماید. اصلانی و همکاران [۱۲] بهترین مقادیر برای عملگرهای الگوریتم ژنتیک به منظور استفاده در حل مسأله بهینه‌سازی مقطع سد وزنی میدل فورک^۶ واقع در بلینگهام را تعیین نمودند. بهترین تعداد تکرار، اندازه جمعیت، نرخ جهش و نرخ انتخاب برابر با ۳۰،

¹ Genetic algorithm

² Particle swarm optimization

³ Honey-bee mating optimization

⁴ Sliding

⁵ Overturning force

⁶ Middle Fork

۵۰، ۰/۳ و ۰/۵ حاصل شد که در مورد سد میدل فورک، الگوریتم ژنتیک، به پارامتر نرخ تکرار بیشترین حساسیت را داشت. حقیقت‌اندیش و همکاران [۱۳] ابعاد هسته رسی سدهای خاکی را با استفاده از روش تکامل رقابتی جوامع^۷ (SCE)، بهینه‌سازی نمودند. نتایج مطالعه‌ی ایشان بیانگر کاهش ۸/۵ درصدی حجم مصالح لازم برای ساخت پوسته سد و کاهش ۲۴ درصدی مصالح سد بود. علی‌نژاد و علیشاهی [۱۴] از الگوریتم چرخه آب^۸ (WCA) به منظور بهینه‌یابی هندسه سد بتنی وزنی بلواستون^۹ واقع در ویرجینیا (ایالتی در منطقه آتلانتیک جنوبی ایالات متحده) استفاده و نتیجه گرفتند که الگوریتم چرخه آب در مقایسه با سایر روش‌های فراکاوشی که در این مطالعه به کار رفته‌اند، از لحاظ سرعت همگرایی و رسیدن به بهترین جواب، کارآتر می‌باشد. خردمند سعیدی [۱۵] به طراحی بهینه سدهای وزنی بتنی با در نظر گرفتن اندرکنش سد و مخزن تحت بارهای دینامیکی و استاتیکی با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌یابی نوین جستجوی سیستم ذرات باردار^{۱۰} (CSS)، برخورد اجسام^{۱۱} (CBO) و برخورد اجسام توسعه یافته پرداختند. نتایج حاصل از بهینه‌سازی نشان‌دهنده کارایی خوب روش‌های به کار رفته در بهینه‌سازی سدهای وزنی است. قدوسی و اسکوهی [۱۶] ابعاد سد بتنی وزنی کوینا^{۱۲} هند را با در نظر گرفتن شرایط پایداری با استفاده از مدل جفت‌گیری زنبور عسل (HBMO) در محیط نرم‌افزار متلب بهینه‌سازی کردند. نتایج مطالعه‌ی آن‌ها نشان داد که حجم بتن مصرفی در سد مورد مطالعه در حالت مقطع بهینه به ۳۳۱۲/۵۲ مترمکعب یعنی ۸/۸۲ درصد کاهش یافت. محمدزاده رومیانی و معصومی [۶] به بررسی کارایی الگوریتم رقابت استعماری^{۱۳} (ICA) در حل مسئله تعیین ابعاد بهینه سد بتنی وزنی کوینا هند پرداختند. نتایج نشان داد الگوریتم ICA از کارایی بالایی در بهینه‌سازی ابعاد سد بتنی وزنی با کاهش ۹/۷ درصد حجم بتن مصرفی برخوردار است. قدوسی و همکاران [۱۷] به منظور طراحی بهینه سدهای خاکی با هدف حداقل نمودن سطح مقطع سد خاکی بزرگ در فاصله حدود ۵ کیلومتری جنوب‌شرق روستای بزرگ و ۶۵ کیلومتری جنوب شهرستان کاشان، از الگوریتم فراکاوشی تکامل رقابتی جوامع (SCE) و مدل LINGO۱۱ استفاده نمودند. نتایج نشان داد که هر دو روش بهینه‌سازی در برآورد مقادیر ابعاد بهینه و در نتیجه حجم مصالح بدنه، عملکرد یکسانی دارند. مساحت مقطع سد در طراحی بهینه برابر با ۲۷۲۵/۳ مترمربع به دست آمد، در صورتی که در طرح اولیه، مساحت مقطع آن برابر ۴۴۰۰/۷ مترمربع تعیین شده بود. قدوسی و وکیلی تنها [۱۸] کارایی الگوریتم‌های دسته ماهی‌های مصنوعی^{۱۴} (AFSA)، تکامل رقابتی جوامع (SCE) و نورد شبیه‌سازی شده^{۱۵} (SA) را در بهینه‌سازی مقطع سد خاکی بزرگ مورد مقایسه قرار دادند. کارایی روش‌های بهینه‌سازی در تعیین نقطه‌ی بهینه سراسری، بر حسب میانگین عملکرد و متوسط زمان لازم برای محاسبات با یکدیگر مقایسه شد. براساس نتایج به دست آمده، در دستیابی به ابعاد بهینه مقطع سد خاکی بزرگ روش SCE نسبت به روش‌های SA و AFSA کارایی بهتری از خود نشان داد. دهقانی و همکاران [۱۹] از الگوریتم ژنتیک و شبکه‌ی عصبی مصنوعی جهت بهینه‌سازی ابعاد سدهای بتنی وزنی استفاده کردند و نتیجه گرفتند که روش‌های مورد استفاده (الگوریتم ژنتیک و شبکه‌ی عصبی مصنوعی) در بهینه‌سازی و تخمین مقطع بهینه نتایج قابل قبولی ارائه می‌دهند. ورعی و احمدی ندوشن [۲۰] به بهینه‌سازی مقطع سدهای وزنی بتنی با استفاده از الگوریتم ژنتیک پرداختند که کاهش در حجم بتن مصرفی در ساخت سد از نتایج اصلی این بهینه‌سازی بود. سلماسی [۲۱] با استفاده از الگوریتم ژنتیک اقدام به طراحی سد بتنی وزنی نمود، به نحوی که با فرض عرض تاج سد به صورت درصدی از ارتفاع آب، به محاسبه بهینه پارامترهای مقطع سد شامل عرض ماهیچه در پایین دست، عرض ماهیچه در بالادست، عرض کل کف و عرض تاج پرداخت. فردوسی و همکاران [۲۲]

⁷ Shuffled complex evolution

⁸ Water cycle algorithm

⁹ Bluestone

¹⁰ Charged system search algorithm

¹¹ Colliding bodies optimization

¹² Koyana

¹³ Imperialist competitive algorithm

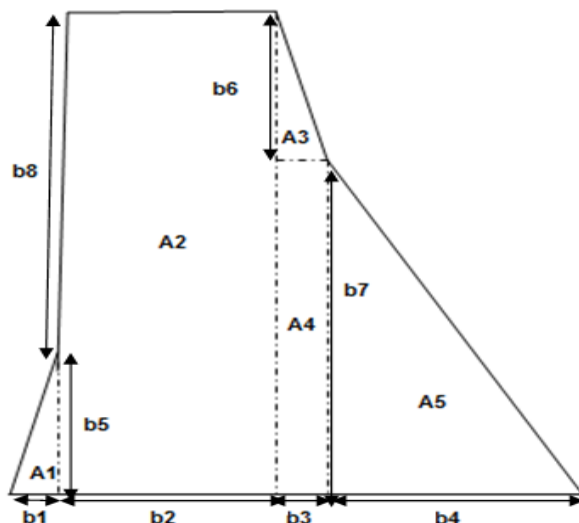
¹⁴ Artificial fish swarm algorithm

برای یافتن بهترین مقطع سد بتنی وزنی تیلاری در هندوستان از الگوریتم علف‌های هرز^{۱۶} (IWO) استفاده کردند. نتایج نشان داد استفاده از الگوریتم علف‌های هرز، موجب کاهش ۲۶٪ در حجم بتن مصرفی در مقایسه با مقطع موجود شد. با توجه به حجم بالای بتن مصرفی در سدهای بتنی وزنی، یافتن راهکاری جهت کاهش حجم بتن مصرفی با حفظ پایداری و در حالت کلی، بهینه‌سازی مقطع این نوع سدها موجب کاهش هزینه‌ها و پایداری مطلوب‌تر در برابر نیروهای وارده به آن، کمک شایانی می‌نماید. لذا در پژوهش حاضر به‌منظور بررسی عملکرد و اثبات کارایی الگوریتم انتخابات^{۱۷} (EA)، که یک الگوریتم تکرارشونده بوده و از انتخابات ریاست جمهوری الهام گرفته و با مجموعه‌ای از راه‌حل‌های شناخته شده به عنوان جمعیت کار می‌کند، به‌عنوان روش تکاملی نوین و هم‌چنین سازگاری این الگوریتم با تعداد کم‌تری از پارامترها، به بهینه‌سازی ابعاد و کاهش حجم بتن مصرفی و صرفه‌جویی در هزینه‌های سد بتنی وزنی کوینا در هند و سد زاوین کلات واقع در استان خراسان رضوی پرداخته شده است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه مورد مطالعه (سد کوینا در هندوستان و سد زاوین کلات در ایران)

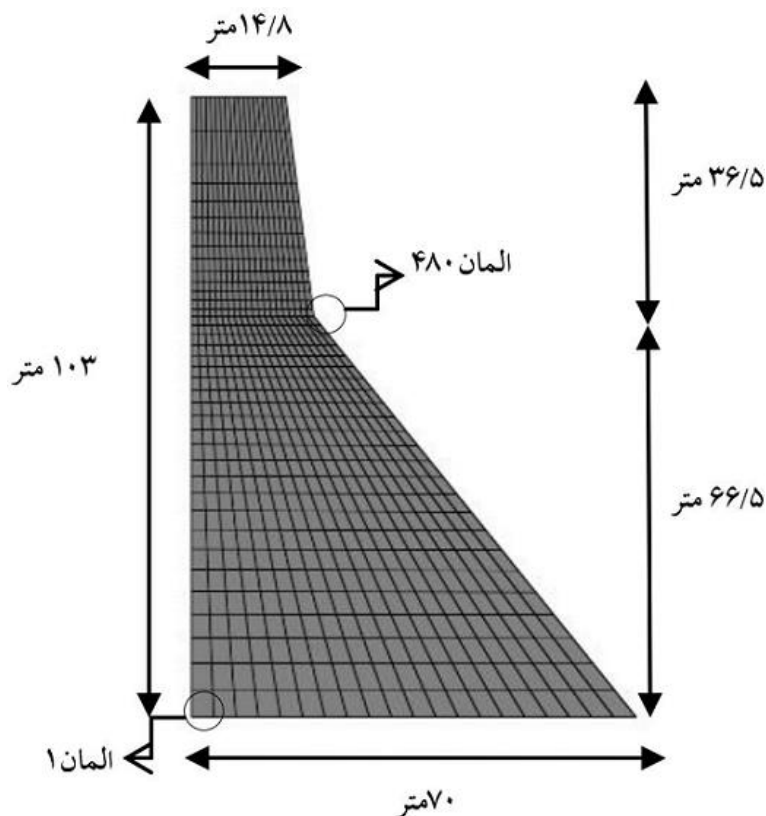
سد بتنی وزنی کوینا بزرگ‌ترین سد برقایی احداث شده هندوستان می‌باشد که بهره‌برداری از آن در سال ۱۹۶۴ آغاز گردید. ظرفیت تولید سالانه انرژی برقایی این سد ۱۹۶۰ مگاوات می‌باشد. مساحت حوضه آبریز این سد ۸۹۲ کیلومترمربع و حجم مخزن آن ۲۷۹۷/۴ میلیون مترمکعب می‌باشد. هدف از ساخت این سد، کنترل سیلاب می‌باشد. ارتفاع تراز سیلابی و تراز نرمال این سد به ترتیب ۱۰۳ و ۹۱/۷۵ متر از سطح پی می‌باشد. نمای دو بعدی و ابعاد هندسی- هیدرولیکی سد بتنی وزنی کوینا و مقطع غیر سرریز از سد به ترتیب در شکل‌های ۱ و ۲ ارائه شده است [۲۳]. دلیل انتخاب این سد به عنوان مطالعه موردی در این تحقیق، امکان مقایسه نتایج با تحقیقات قبلی انجام شده می‌باشد.



شکل ۱: نمایی دو بعدی از سد بتنی وزنی کوینا به همراه متغیرهای تصمیم [۲۳]

¹⁶ Invasive weed optimization

¹⁷ Election algorithm



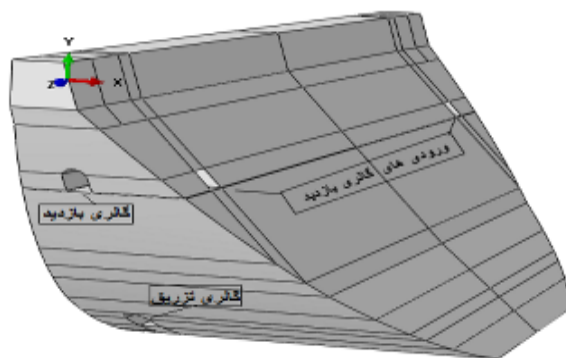
شکل ۲: مقطع غیر سرریز از سد بتنی وزنی کوینا [۲۳]

مقادیر مندرج در شکل ۱ به صورت پارامتری در جدول ۱ ارائه شده‌اند. در این جدول، H_u تراز آب بالادست سد در حالت نرمال، H_d تراز آب پائین دست سد در حالت نرمال، H_{uf} تراز آب بالادست در حالت سیلابی و H_{df} برابر با تراز آب پائین دست در حالت سیلابی خواهد بود. هم‌چنین متغیرهای b_1 تا b_8 مربوط به ابعاد سد بتنی وزنی کوینا در جدول ۱ ارائه شده‌اند.

جدول ۱: ابعاد هندسی - هیدرولیکی سد بتنی وزنی کوینا [۲۳]

H_{df} (m)	H_{uf} (m)	H_d (m)	H_u (m)	b_8 (m)	b_7 (m)	b_6 (m)	b_5 (m)	b_4 (m)	b_3 (m)	b_2 (m)	b_1 (m)	متغیر حجم بدنه سد (m^3)	مقدار
۰	۱۰۳	۰	۹۱/۷۵	۶۴	۶۶/۵	۳۶/۵	۳۹	۴۸/۱۹	۵/۶	۱۴/۸	۱/۶۳	۳۶۳۳	

جهت بررسی نتایج، به‌طور مقایسه‌ای با نمونه داخل کشور، سد بتنی وزنی زاوین کلات برای مطالعه موردی انتخاب گردید. سد زاوین کلات در ۱۰۰ کیلومتری مشهد مقدس و ۵۰ کیلومتری شهر کلات در استان خراسان رضوی واقع شده است (شکل ۳). سد زاوین کلات از نوع بتنی وزنی بوده و دارای حجم مخزنی برابر با ۲/۷ میلیون متر مکعب می‌باشد. کنترل سیلاب‌های فصلی و ذخیره‌سازی آب رودخانه زاوین، تأمین آب آشامیدنی مناطق اطراف، پرورش آبزیان و آبیاری ۳۳۴ هکتار از اراضی پایین دست، از اهداف ساخت این سد است. در جدول ۲، مشخصات سد زاوین کلات ارائه شده است [۲۴].



شکل ۳: هندسه سه بعدی بدنه سد زاوین کلات [۲۴]

جدول ۲: مشخصات سد زاوین کلات [۲۴]

پارامتر	طول تاج	ارتفاع از پی	ارتفاع پی	عرض تاج سد	طول پی سد	تراز تاج سد	تراز نرمال سطح آب	تراز پایاب	ارتفاع از بستر	حجم نرمال مخزن	حجم مفید
مقدار	۱۴۲ متر	۵۱/۲۰ متر	۵ متر	۷ متر	۱۶۰ متر	۱۳۰۴/۱ متر	۱۳۰۲ متر	۱۲۵۸/۳ متر	۴۱ متر	۶۹/۲ میلیون مترمکعب	۴۲/۱ میلیون مترمکعب

۲-۲- الگوریتم‌های مورد استفاده

۲-۲-۱- الگوریتم انتخابات

الگوریتم انتخابات (EA) از پدیده انتخابات الهام گرفته شده است. الگوریتم EA، یک استراتژی چند عاملی و مبتنی بر جمعیت است که در آن هر عامل جستجو یک فرد نامیده می شود [۲۵]. برای یک مسئله با متغیرهای p_1, p_2, \dots, p_N ، هر فرد P_i از آرایه‌ای از مقادیر ممکن برای متغیرها تشکیل شده است:

$$P_i = x_1, x_2, \dots, x_N \quad (1)$$

شایستگی هر فرد با ارزیابی تابع E بر روی مقادیر متغیرها متناسب با تابع هدف مسئله محاسبه می شود. برخی از بهترین افراد در جمعیت انتخاب می شوند تا به عنوان کاندیدا باشند و مابقی افراد رأی‌دهندگان را تشکیل می دهند که هر کدام به عنوان حامی یک کاندیدا می باشد. رأی‌دهندگان بر اساس تشابه عقاید، بین کاندیداها تقسیم می شوند. برای انجام این کار، رأی‌دهنده v_k به عنوان حامی کاندیدا c_i انتخاب می شود اگر معادله ۲ برقرار باشد:

$$P_i = v_k : \|E_{v_k} - E_{c_i}\| < \|E_{v_k} - E_{c_j}\| \quad \forall 1 \leq j \leq N_c \quad (2)$$

P_i حزب i و N_c تعداد کاندیدهای اولیه می باشند. E_{v_k} و E_{c_i} به ترتیب شایستگی کاندیدا c_i و رأی‌دهنده v_k را نشان می دهد. در اینجا، هر رأی‌دهنده دقیقاً به یک کاندیدا اختصاص داده می شود. در پیاده‌سازی‌های صورت گرفته ۷٪ از جمعیت اولیه به عنوان تعداد کاندیداها در نظر گرفته می شوند. پس از تشکیل احزاب سیاسی، کاندیداها تبلیغات انتخاباتی را شروع می کنند. تبلیغات انتخاباتی بنیان الگوریتم EA را تشکیل می دهد که شامل سه مؤلفه تبلیغات مثبت، تبلیغات منفی و ائتلاف است. در الگوریتم EA، تبلیغات مثبت، با انتقال برخی از صفات هر کاندیدا به حامیان خود شبیه‌سازی شده است. برای انجام این کار، در درون هر حزب، متغیرهای N_s از کاندیدا به صورت تصادفی انتخاب می شود و با متغیرهای انتخابی از رأی‌دهندگان جایگزین می شود. N_s به صورت زیر محاسبه می شود:

$$N_s = \lceil X_s \times S_c \rceil \quad (3)$$

S_c تعداد متغیرهای کاندیدا و X_c نرخ انتخاب است.

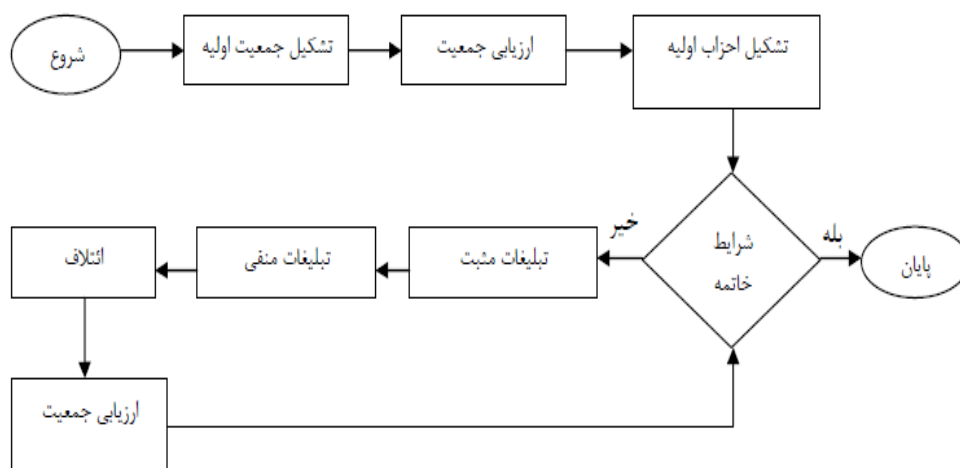
متغیرهای انتخاب شده با ضریب ω وزن دهی می شوند و سپس در رأی دهندگان جایگزین می شوند. مقدار جدید متغیر i در یک رأی دهنده در مرحله تبلیغات مثبت به صورت زیر محاسبه می شود.

$$x_{i_{new}} = \omega \cdot x_{i_{old}} \quad (4)$$

ω به صورت زیر تعریف شده است:

$$\omega = \frac{1}{|E_{c_i} - E_{v_i}| + 1} \quad (5)$$

در مرحله تبلیغات منفی، کاندیداها سعی می کنند رأی دهندگان دیگر کاندیداها را به سمت خود جذب کنند. اگر کاندیدای یک حزب در مقایسه با دیگر کاندیداها ضعیف ترین فرد باشد، در این صورت آن حزب ضعیف در نظر گرفته می شود. برای مدل سازی تبلیغات منفی، ابتدا تعدادی از رأی دهندگان از حزب ضعیف انتخاب می شوند. سپس مسابقه ای بین احزاب قدرتمند صورت می گیرد تا مشخص شود رأی دهندگان انتخاب شده به کدام حزب ملحق شوند. برای انتخاب رأی دهندگان ضعیف از ضعیف ترین حزب، فاصله شایستگی بین رأی دهندگان و ضعیف ترین کاندیدا محاسبه می شود و سپس ۵٪ از دورترین کاندیداها انتخاب می شوند. فاصله بین رأی دهندگان انتخاب شده و کاندیداها قدرتمند محاسبه شده و رأی دهندگان به نزدیک ترین کاندیداها تخصیص داده می شوند. در مرحله ائتلاف، چندین کاندیدا به همدیگر ملحق شده و یک حزب جدید تشکیل می دهند. بین کاندیداها تلاش می کنند به همدیگر ملحق شوند، یک کاندیدا به صورت تصادفی انتخاب می شود تا به عنوان کاندیدای پیشرو^{۱۸} باشد و کاندیداها باقی مانده به عنوان کاندیدای تبعیت کننده^{۱۹} در نظر گرفته می شوند. در ائتلاف، تمامی تبعیت کنندگان و حامیان آن ها به عنوان رأی دهندگان جدید کاندیدای پیشرو در نظر گرفته می شود. تا هنگامی که شرایط خاتمه الگوریتم ارضا نشده است، عملگرهای تبلیغات مثبت، تبلیغات منفی و ائتلاف به صورت مکرر بر روی جمعیت اعمال می شود تا جمعیت را برای نیل به بهینه سراسری سوق دهد. در نهایت، فرآیند بهنگام سازی خاتمه می یابد و کاندیدایی با بیش ترین رأی به عنوان برنده انتخابات اعلام می شود. برنده معادل با بهترین راه حل یافته شده برای مسئله بهینه سازی است [۲۵]. شکل ۴ فلوجارت الگوریتم EA را نشان می دهد.



شکل ۴: فلوجارت الگوریتم انتخابات [۲۵]

¹⁸ Leader Candidate

¹⁹ Follower Candidates

۲-۳- نیروهای مؤثر بر پایداری سدهای وزنی بتنی

نیروهایی که در جهت پایداری سدهای بتنی وزنی عمل می‌کنند، عبارت‌اند از: نیروهای ناشی از وزن سد، مؤلفه رو به پائین وزن آب روی وجه شیبدار بالادست، زمین‌لرزه و و نیروی ناشی از وزن رسوبات به سمت قائم بر بدنه سد. از نیروهایی که در خلاف پایداری عمل می‌کنند، می‌توان به مؤلفه افقی نیروی هیدروستاتیک فشار آب مخزن، نیروی بالابرنده و نیروی افقی ناشی از رسوبات اشاره کرد.

نیروهای وارد بر مقطع سدهای بتنی وزنی عبارت‌اند از (شکل ۵):

با توجه به شیب غیر قائم بالادست، فشار هیدروستاتیک بالادست، دارای دو مؤلفه افقی و عمودی است. مؤلفه افقی در خلاف جهت پایداری و مؤلفه قائم در جهت پایداری عمل می‌کنند (معادله‌های ۶ و ۷). نقطه اثر نیروی هیدروستاتیک، در یک سوم ارتفاع آب در نظر گرفته می‌شود.

۲-۳-۱- نیروی هیدروستاتیک ناشی از آب در بالادست (F_1)

$$F_1 = \frac{1}{2} \gamma_w h^2 \quad (6)$$

$$Fh_v = \gamma_w V_w \quad (7)$$

در این روابط، h تراز نرمال آب در مخزن سد، γ_w وزن مخصوص آب و V_w حجم آب روی شیب بالادست می‌باشد.

۲-۳-۲- نیروی وزن سد (W, W, W)

با توجه به شیب‌های بالادست و پایین‌دست و بخش مرکزی سد، وزن‌های مربوطه تعیین گردیده و مجموع آن‌ها به عنوان وزن سد در نظر گرفته می‌شود. نیروی وزن در سدهای وزنی بتنی، نقش اصلی پایداری را بر عهده دارد. برای محاسبه‌ی این نیرو، مقطع سد را به صورت سه شکل هندسی تقسیم کرده و محاسبات لازم برای عرض واحد انجام می‌گردد (معادله‌های ۸ تا ۱۰):

$$W_1 = \frac{1}{2} \gamma_c \cdot m \cdot b \cdot h \quad (8)$$

$$W_2 = \gamma_c \cdot T \cdot (F_b + h) \quad (9)$$

$$W_3 = \gamma_c \cdot \frac{h \cdot (b - m \cdot b - T)}{2(b - m \cdot b)} \quad (10)$$

۲-۳-۳- نیروی وزن آب روی شیب بالادست (F_2)

$$F_2 = \frac{1}{2} m \cdot b \cdot h \quad (11)$$

در این معادله‌ها، F_b ارتفاع آزاد، b عرض کف، m نسبتی از عرض کف که در بالادست قرار دارد، T عرض تاج سد، γ_c وزن مخصوص بتن و h ارتفاع آب بالادست می‌باشند.

۲-۳-۴- نیروی بالابرنده

نیروی بالابرنده عبارت است از نیروی فشاری که توسط آب نفوذی از زیر بدنه سد و در جهت کاهش وزن سد، عمل می‌کند (معادله ۱۲). نقطه اثر این نیرو، مرکز ثقل منشور فشار می‌باشد. نیروی بالابرنده با کاهش وزن مؤثر سد باعث ایجاد لغزش و با ایجاد گشتاور حول پنجه، باعث ایجاد واژگونی در سد می‌شود. به‌طور کلی می‌توان گفت مقدار نیروی بالابرنده تابع دو عامل اصلی ضریب سطح و دیگری شدت فشار بالابرنده می‌باشد [۲۶، ۲۷ و ۲۸].

$$U = \frac{1}{2} \gamma_w b \cdot h \quad (12)$$

۲-۳-۵- نیروی ناشی از تجمع رسوبات در بالادست

فشار رسوبات به صورت افقی و قائم بر سد وارد شده و محاسبه می شود. محل اثر فشار افقی، ثلث ارتفاع رسوبات انباشته شده و محل اثر فشار قائم، مرکز ثقل رسوبات انباشته شده بر روی شیب می باشد (روابط ۱۴ و ۱۵):

$$P_{SH} = 1/2 \times \gamma_s \times h_s^2 \times \frac{1-\sin\phi}{1+\sin\phi} \quad (14)$$

$$P_{SV} = 1/2 \times \gamma_s \times h_s^2 \times \tan\theta \quad (15)$$

در این روابط، h_s ارتفاع رسوبات، ϕ زاویه اصطکاک داخلی رسوبات، γ_s وزن حجمی رسوبات و θ زاویه شیب بدنه می باشد. قابل ذکر است.

۲-۳-۶- نیروهای ناشی از یخبندان

از این نیرو در تحلیل سدهایی که در مناطق دارای آب و هوای گرم و خشک قرار دارندف صرف نظر می شود. مقدار این نیرو طبق رابطه ۱۶ به دست می آید:

$$M_{Ice} = F_{Ice}(h' - 0.5It) \quad (16)$$

که در این رابطه، F_{Ice} نیروی یخ و I_t ضخامت یخ می باشد.

۲-۳-۷- نیروی باد و امواج

مقادیر این نیروها در مقایسه با سایر نیروها کم تر بوده و قابل صرف نظر می باشند.

۲-۳-۸- نیروی ناشی از زمین لرزه

۲-۳-۸-۱- نیروی ناشی از زمین لرزه در بدنه ی سد

رایج ترین روشی که برای محاسبه ی نیروی افقی ناشی از زلزله مورد استفاده قرار می گیرد، به صورت رابطه ۱۷ می باشد:

$$F_{e_i} = \alpha W_i \quad (17)$$

در این رابطه، F_{e_i} ، نیروی ثقلی بدنه ی سد، α ضریب زمین لرزه و W_i مقدار وزن می باشد.

۲-۳-۸-۲- نیروی ناشی از زمین لرزه در مخزن سد

نیروی زلزله در مخزن سد تا عمق y از رابطه ی ۱۸ به دست می آید:

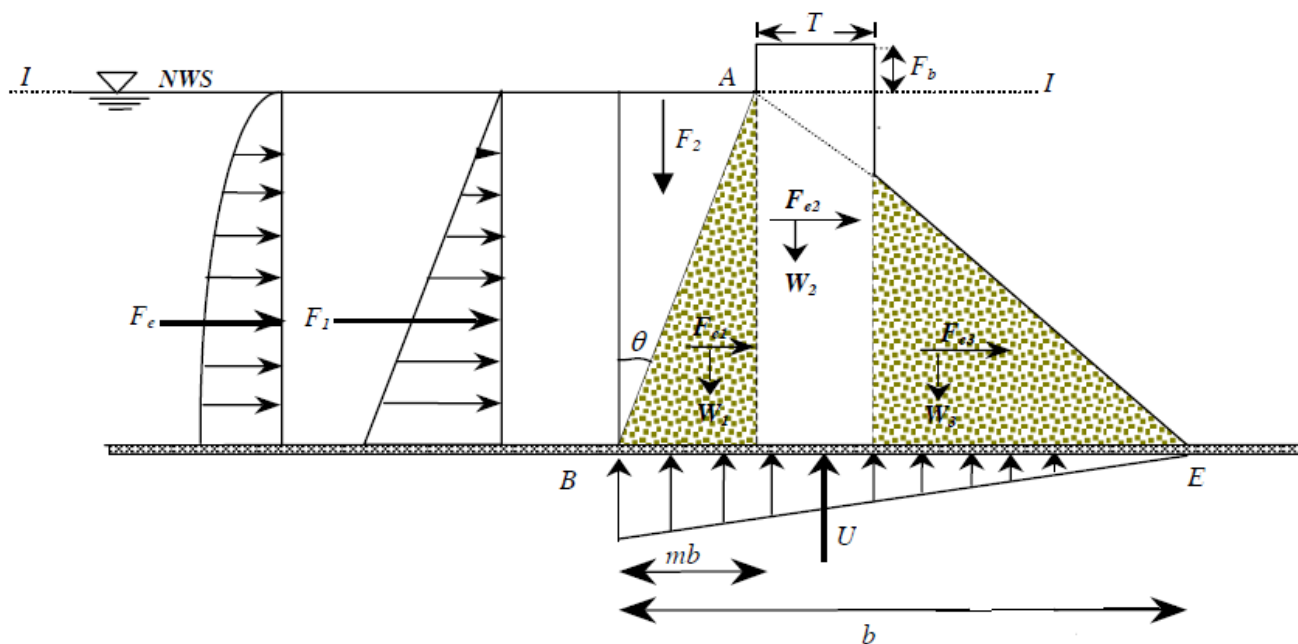
$$F_e = 0.726 \cdot p_e \cdot y \quad (18)$$

که در این رابطه p_e فشار هیدرودینامیکی ناشی از زلزله در ارتفاع y از سطح آب است و به صورت زیر محاسبه می شود:

$$P_e = c \cdot \alpha \cdot \gamma_w \cdot y \quad (19)$$

که ضریب c را می توان برحسب θ (زاویه ی وجه بالادست با خط قائم) و نسبت (y/h) محاسبه کرد (رابطه ۲۰):

$$c = \frac{0.73 \cdot 90 - \theta}{2 \cdot \theta} \left[\left(2 - \frac{y}{h} \right) + \sqrt{\frac{y}{h} \left(2 - \frac{y}{h} \right)} \right] \quad (20)$$



شکل ۵: مقطع سد بتنی وزنی و نیروهای وارد بر آن [۱۹]

۴-۲- فرمول بندی مسئله

فرمول بندی ریاضی مسئله شامل تابع هدف و قیود مربوطه به صورت ذیل می باشد.

۴-۲-۱- تابع هدف

تابع هدف مورد نظر در این پژوهش، کمینه سازی حجم بتن مصرفی در ساخت سد می باشد، به گونه ای که کلیه قیدها (ضرایب اطمینان در برابر واژگونی و لغزش) را ارضا نماید (روابط ۲۱ و ۲۲). همچنین متغیرهای b_1 تا b_8 (ابعاد سد بتنی وزنی کوینا)، به عنوان متغیرهای تصمیم در نظر گرفته شدند.

$$C = \text{Min } V(x) \quad (21)$$

$$C = \text{Min} \left[\left(\frac{1}{2} \times b_1 \times b_5 \right) + (b_2 \times (b_8 + b_5)) + \left(\frac{1}{2} \times b_3 \times b_6 \right) + (b_3 \times b_7) + \left(\frac{1}{2} \times b_4 \times b_7 \right) \right] \quad (22)$$

در این رابطه ها، $V(x)$ حجم بتن مصرفی و پارامترهای b_1 تا b_8 ابعاد سد بتنی وزنی کوینا (متغیرهای تصمیم) می باشد.

۴-۲-۲- قیود

پایداری سد از سه منظر (پایداری در برابر لغزش، پایداری در برابر واژگونی و پایداری در برابر تنش های فشاری وارده بر بدنه) در معادلات شماره ۲۳ تا ۲۶ در نظر گرفته شده اند.

الف) ضریب اطمینان در برابر لغزش

ضریب اطمینان در برابر لغزش عبارت است از نسبت کل نیروهای افقی مقاوم در برابر لغزش به نیروهای افقی لغزشی.

با فرض صرف نظر کردن از مقاومت برشی مقطع، تنها نیروی مقاوم، اصطکاک بین سد و فونداسیون در محل قاعده است (رابطه

:۲۰)

$$SF_s = \mu \frac{\sum F_V}{\sum F_H} \quad (23)$$

که در این رابطه، $\sum F_V$ مجموع نیروهای قائم وارد بر مقطع، $\sum F_H$ مجموع نیروهای افقی وارد بر مقطع و μ ضریب اصطکاک بین مصالح دو قطعه‌ی بالایی و پایینی می‌باشد که مقدار آن برای بتن، مصالح بنایی و سنگ بین ۰/۶۵ تا ۰/۸ متغیر است که اغلب ۰/۷۵ انتخاب می‌شود. با توجه به نیروهای زلزله و زیر فشار، این ضریب تا حدود ۱ کاهش می‌یابد [۲۹].

(ب) پایداری در برابر واژگونی

برابر است با نسبت لنگر نیروهای مقاوم در مقابل واژگونی حول پنجه سد (مقطع) به لنگر نیروهای واژگونی نسبت به همان نقطه [۳۰].

$$SF_o = \frac{\sum M_R}{\sum M_o} \geq (F_m)_{all} \quad (24)$$

که در این رابطه، $\sum M_R$ گشتاور نیروهای مقاوم، $\sum M_o$ گشتاور نیروهای محرک وارد بر سد و SF_o ضریب اطمینان در برابر واژگونی می‌باشند. $(F_m)_{all}$ حداقل ضریب اطمینان در برابر واژگونی برای سدهای وزنی برابر با ۱/۵ در نظر گرفته می‌شود [۱].

در سدهای وزنی بتنی، برآیند نیروها بایستی از یک سوم میانی قاعده عبور نماید که در این حالت، ضریب اطمینان در برابر واژگونی معادل ۲ در نظر گرفته می‌شود [۲۹ و ۳۰].

(ج) تنش قائم در سطح بدنه سد

تنش قائم در سطح بدنه سد در سراب و پایاب با استفاده از رابطه‌های ۲۲ و ۲۳، محاسبه می‌شود:

$$\sigma_u = \frac{\sum F_V}{b} - \frac{6 \sum M_o}{b^2} \quad (25)$$

$$\sigma_d = \frac{\sum F_V}{b} + \frac{6 \sum M_o}{b^2} \quad (26)$$

در این رابطه‌ها، σ_u و σ_d ، به ترتیب برابر با تنش قائم در سطح بدنه‌ی سد در سراب و پایاب و $\sum M_o$ مجموع گشتاور نیروهای وارد بر سد تا سطح مورد بررسی نسبت به مرکز سطح، $\sum F_V$ مجموع نیروهای قائم می‌باشند. برای این که سد در برابر تنش قائم ایجاد شده پایدار باشد، باید σ_u و σ_d در شرایط پر یا خالی بودن مخزن مثبت باشند. بدین معنی که تنش کششی مجاز نیست. مثبت بودن علامت تنش، مقدار تنش فشاری و منفی بودن، مقدار تنش کششی را بیان می‌کند. هم‌چنین مقدار تنش فشاری نباید از مقاومت فشاری مجاز بتن بیش‌تر گردد [۲۹]. معمولاً مقاومت فشاری بتن برای سدها را در محدوده ۱۴۰ تا ۳۵۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع در نظر می‌گیرند [۳۰].

لازم به ذکر است که بارگذاری سد بر اساس بحرانی‌ترین حالت انتخاب می‌گردد و به همین دلیل در این پژوهش برای تحلیل سد ترکیبات بارگذاری در حالت بارگذاری فوق‌العاده در نظر گرفته شده است [۳۱].

۵-۲- معیارهای کارایی

با استفاده از پارامترهای ضریب تبیین (R^2) ^{۲۰}، مجذور مربعات خطا (RMSE)^{۲۱} و معیار کارایی (NSE)^{۲۲} مطابق روابط ۲۷ و ۲۸، قابلیت روش‌های پیشنهادی مورد ارزیابی قرار گرفت [۳۲].

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(Y_i - \bar{Y})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2} \right]^2 \quad (27)$$

$$RMSE = \left[\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - y_i)^2}{N} \right]^{0.5} \quad (28)$$

¹ Determination Coefficient

² Root Mean Square error

³ Nash-Sutcliffe

که در این روابط، X_i مقادیر محاسباتی، Y_i ها مقادیر موجود، \bar{x} میانگین x ها و \bar{Y} میانگین Y ها می باشد.

۳- آزمایش‌ها و بحث

در این بخش به منظور نشان دادن کارایی روش پیشنهادی (الگوریتم EA)، این روش برای طرح بهینه مقطع دو سد بتنی وزنی ساخته شده مورد استفاده قرار گرفته و نتایج الگوریتم EA برای این دو سد ارائه می شوند. دو سدی که مورد بررسی قرار گرفته اند، سدهای بتنی وزنی کوینا و زاوین کلات هستند که در جدول های ۱ و ۲ پارامترهای هندسی سدهای مذکور ارائه شده است. در الگوریتم های بهینه سازی پارامترهایی وجود دارند که تغییرات آنها باعث تغییر عملکرد الگوریتم می گردد و در سرعت همگرایی و مرغوبیت جوابها تأثیرگذار خواهند بود. به دست آوردن بهترین پارامترها با سعی و خطا همراه است. لذا به منظور بهتر شدن کارایی الگوریتم EA، سعی و خطاهایی برای به دست آوردن بهترین مقدار برای هر پارامتر انجام شد که این پارامترها در جدول ۳ ارائه شده است.

همچنین داده های مورد استفاده به هر دو مدل مطابق رابطه ۲۹ استانداردسازی شدند، زیرا وارد کردن داده ها به صورت خام باعث کاهش سرعت و دقت مدل می شود، از این رو ورودی ها و خروجی ها باید بین ۰ و ۱ استاندارد شوند [۳۳]:

$$Z_n = \frac{Z - Z_{\min}}{Z_{\max} - Z_{\min}} \quad (29)$$

که در آن، Z معرف داده به صورت خام، Z_n داده های نرمالیزه شده، Z_{\min} مینیمم داده ها، Z_{\max} ماکزیمم داده ها می باشد.

جدول ۳: پارامترهای مورد استفاده در الگوریتم EA

پارامتر	مقدار
تعداد جمعیت اولیه	۱۰۰
تعداد کاندیداها	۷
تعداد رأی دهندگان	۹۳
نرخ ائتلاف	۰/۲
نرخ انتخاب	۰/۳

۳-۱- بهینه یابی مقطع سدهای بتنی وزنی

۳-۱-۱- طرح بهینه سد بتنی وزنی کوینا

در جدول ۴، نتایج به دست آمده از ابعاد سد (متغیرهای تصمیم) و تابع هدف در ۱۰۰ بار اجرای برنامه آورده شده است.

جدول ۴: مقادیر تابع هدف و متغیرهای تصمیم در ۱۰۰ بار اجرای برنامه برای سد کوبینا

										تعداد تکرار
۱۰۰	۹۰	۸۰	۷۰	۶۰	۵۰	۴۰	۳۰	۲۰	۱۰	پارامتر
۱/۲۴	۱/۱۲	۱/۵۰	۱/۵۲	۱/۸۶	۱/۸۴	۱/۶۰	۱/۵۲	۱/۳۲	۱/۸۰	b1(m)
۱۳/۲۰	۱۲/۸۰	۱۳/۴۲	۱۳/۵۰	۱۱/۲۰	۱۴/۱۰	۱۳/۷۰	۱۲/۲	۱۳/۱۰	۱۳/۲	b2(m)
۴/۰۲	۴/۷۴	۳/۹۰	۳/۵۲	۵/۳۵	۳/۶	۵/۵	۴/۱۲	۵/۳۴	۵/۲	b3(m)
۴۶/۹۴	۴۶/۶۵	۴۶/۹۰	۴۷/۰۱	۴۷/۳۶	۴۷/۲	۴۹/۴۶	۴۹/۳۵	۴۶/۶	۴۶/۴	b4(m)
۳۸/۹۵	۴۱/۷۰	۴۱/۲۴	۴۱/۳۶	۴۰/۶۴	۳۹/۷۵	۴۲/۱۲	۳۸/۸۰	۴۱/۱۰	۴۰/۶۰	b5(m)
۳۴/۹۰	۳۴/۶۰	۴۱/۰۲	۳۸/۴۰	۴۳/۹۰	۴۴/۳۲	۳۹/۸۰	۳۷/۳۰	۳۶/۳۰	۳۷/۶۰	b6(m)
۶۱/۷۶	۶۱/۷۲	۶۰/۶۲	۶۱/۲۰	۶۴/۰۴	۶۳/۹۵	۶۱/۳۰	۶۳/۸۰	۶۱/۴۰	۶۲/۵۰	b7(m)
۶۳/۴۰	۶۰/۳۲	۶۰/۷۵	۶۲/۴۵	۶۱/۲۰	۶۲/۹۰	۶۰/۱	۶۳/۶۲	۶۱/۴۵	۶۱/۳	b8(m)
۳۲۷۴/۲۳	۳۴۰۴/۶۲	۳۴۱۰/۱	۳۴۱۹/۴	۳۳۷۹/۸۸	۳۳۴۵/۳۴	۳۴۱۸/۴۱	۳۳۵۰/۷	۳۳۵۸/۲	۳۳۸۵/۷	تابع هدف (m ³)

با توجه به نتایج حاصل، بهترین مقدار تابع هدف در ۱۰۰ بار اجرای برنامه برابر با ۳۲۷۴/۲۳ مترمکعب به دست آمد که بیانگر حجم بهینه‌ی بتن مصرفی برای ساخت سد بتنی وزنی کوبینا می‌باشد.

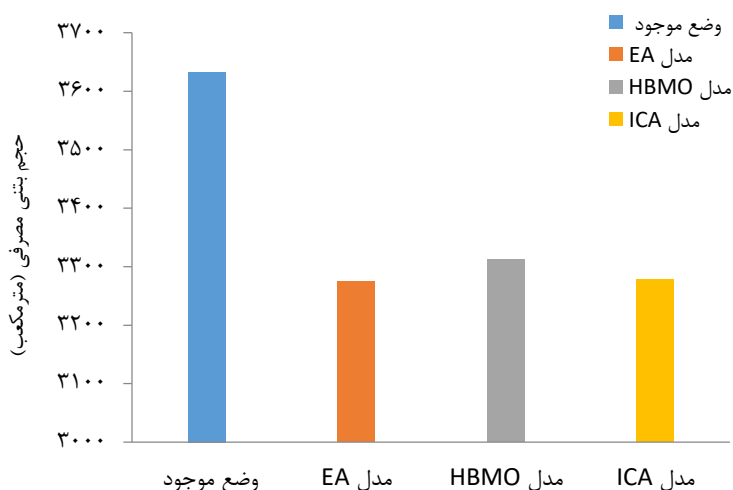
در جدول ۵، مقادیر بهینه تابع هدف و ابعاد سد (متغیرهای تصمیم) با وضعیت موجود و نتایج حاصل از مطالعات قدوسی و همکاران (۱۳۹۵) با الگوریتم جفت‌گیری زنبور عسل (HBMO) و محمدزاده رومیانی و معصومی (۱۳۹۶) با الگوریتم رقابت استعماری (ICA) و وضعیت موجود مقایسه شده است.

جدول ۵: ابعاد هندسی محاسباتی با الگوریتم EA, HBMO, ICA و وضعیت موجود برای سد کوبینا

b8(m)	b7(m)	b6(m)	b5(m)	b4(m)	b3(m)	b2(m)	b1(m)	حجم سد (m ³)	
۶۴	۶۶/۵	۳۶/۵	۳۹	۴۸/۱۹	۵/۶	۱۴/۸	۱/۶۳	۳۶۳۳	وضعیت موجود
۶۳/۴۰	۶۱/۷۶	۳۴/۹۰	۳۸/۹۵	۴۶/۹۴	۴/۰۲	۱۳/۲۰	۱/۲۴	۳۲۷۴/۲۳	مقدار بهینه حاصل از الگوریتم IEA
۶۴/۱۱	۶۱/۸۹	۳۵/۰۲	۳۹/۳۹	۴۷/۱۴	۴/۵۷	۱۳/۵۲	۱/۳۵	۳۲۷۸/۲۴	مقدار بهینه حاصل از الگوریتم ICA
۶۳/۹۹	۶۲/۴۹	۳۵/۷۸	۳۹/۶۴	۴۷/۵۴	۴/۵۴	۱۳/۹۴	۱/۳۲	۳۳۱۲/۵۲	مقدار بهینه حاصل از الگوریتم HBMO

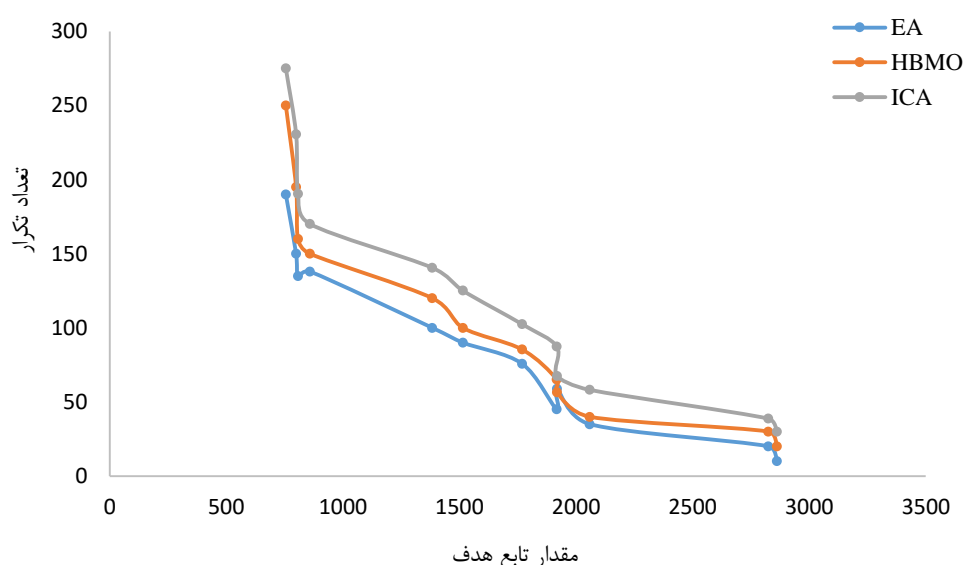
همان گونه که از جدول ۵، مشخص است الگوریتم EA، توانسته مقدار تابع هدف (حجم بدنه سد) را نسبت به وضع موجود ۹/۸۷ درصد کاهش دهد. مقدار حجم بدنه سد به دست آمده از این الگوریتم نسبت به نتایج الگوریتم‌های HBMO و ICA، به ترتیب ۱/۲ درصد و

۰/۲ درصد کمتر می‌باشد که حاکی از کارایی و توانایی بهتر الگوریتم EA در حل این مسئله می‌باشد. هم‌چنین زمان اجرای برنامه با کامپیوتر ۸ هسته‌ای با رم ۴ گیگ، برای الگوریتم EA، ۸ دقیقه به طول انجامید که در مقایسه با الگوریتم ICA (۱۷ دقیقه)، از سرعت مناسبی برخوردار است. مقادیر حجم بتن مصرفی در حالت مقاطع موجود برای سد کوینا و بهینه‌سازی شده با الگوریتم EA در شکل ۶، نشان داده شده است.



شکل ۶: مقادیر حجم بتن مصرفی در حالت مقاطع موجود و بهینه‌سازی شده برای سد کوینا

نحوه تغییرات تابع هدف به‌ازای تعداد تکرار برای الگوریتم‌های EA، HBMO، ICA در شکل ۷ نشان داده شده است.



شکل ۷: نحوه تغییرات تابع هدف به‌ازای تعداد تکرار الگوریتم‌ها برای سد کوینا

با توجه به شکل ۷، مقدار تابع هدف در الگوریتم EA نسبت به دو الگوریتم دیگر HBMO و ICA به میزان مطلوب‌تری به جواب بهینه همگرا شده است که این امر بیانگر توانایی، کارایی و سرعت مناسب این الگوریتم در رسیدن به جواب نزدیک بهینه می‌باشد. هم‌چنین پس از تکرار ۲۰۰ ام، جواب مسئله به سمت پاسخ بهینه همگرا شده و روند ثابتی را طی می‌کند. هم‌چنان‌که از این نمودار بر می‌آید الگوریتم EA برای دستیابی به مقدار تابع هدفی برابر با تابع هدف دو الگوریتم دیگر، به تعداد کم‌تری تکرار نیاز دارد که حاکی از سرعت همگرایی و دقت بیشتر این الگوریتم می‌باشد.

در جدول‌های ۶ و ۷، نتایج حاصل از آموزش و صحت‌سنجی الگوریتم‌های EA، HBMO و ICA در برآورد مقادیر حجم بتن مصرفی ارائه شده است.

جدول ۶: ارزیابی کارایی الگوریتم‌های EA، HBMO و ICA در برآورد مقادیر حجم بتن مصرفی در دوره‌ی واسنجی

ICA		HBMO		EA	
RMSE	R ²	RMSE	R ²	RMSE	R ²
۰/۰۴۱	۰/۹۱	۰/۰۲۷	۰/۹۲	۰/۰۲۴	۰/۹۶

جدول ۷: ارزیابی کارایی الگوریتم‌های EA، HBMO و ICA در برآورد مقادیر حجم بتن مصرفی در دوره‌ی آزمون

ICA		HBMO		EA	
RMSE	R ²	RMSE	R ²	RMSE	R ²
۰/۰۴۵	۰/۸۵	۰/۰۴۰	۰/۹۰	۰/۰۲۸	۰/۹۳

همان‌گونه که از جدول‌های ۶ و ۷ مشخص است، الگوریتم EA به ترتیب دارای کم‌ترین مقدار مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE=0.028) و بیش‌ترین ضریب تبیین (R²=0.93) در مقایسه با دو الگوریتم HBMO و ICA می‌باشد. بنابراین می‌توان این‌گونه اظهار کرد که الگوریتم EA نسبت به دو الگوریتم دیگر مورد استفاده، از قابلیت بالایی در برآورد مقادیر حجم بتن مصرفی برخوردار است.

در جدول ۸، مقادیر ضریب اطمینان در برابر واژگونی (SF_o)، ضریب اطمینان در برابر لغزش (SF_s) و تنش در سطح بدنه سد بر حسب تن بر متر مربع حاصل از الگوریتم‌های EA، ICA، HBMO و وضعیت موجود مورد مقایسه قرار گرفته است.

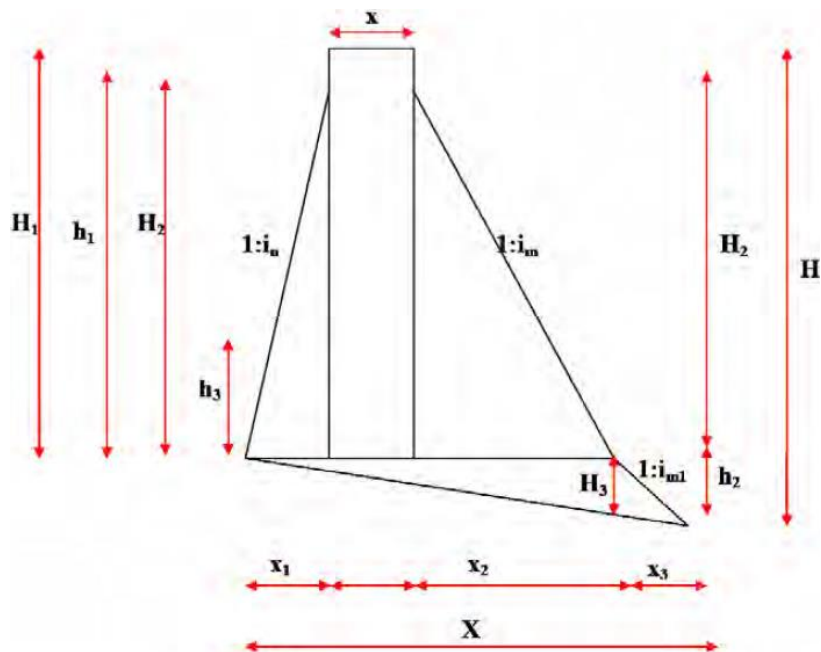
جدول ۸: ضرایب اطمینان و نیز تنش سطحی محاسباتی سد کوینا با الگوریتم‌های EA، ICA، HBMO و وضعیت موجود

بارگذاری فوق‌العاده	SF _s	SF _o	σ _u (تن بر مترمربع)
وضعیت موجود	۱/۶۴	۱/۵۸	۹۰/۳۹
الگوریتم EA	۱/۵۱	۱/۵۴	۱۳۱/۲
الگوریتم ICA	۱/۵۲	۱/۵۴	۱۳۲
الگوریتم HBMO	۱/۵۳	۱/۵۴	۱۳۰/۲۴

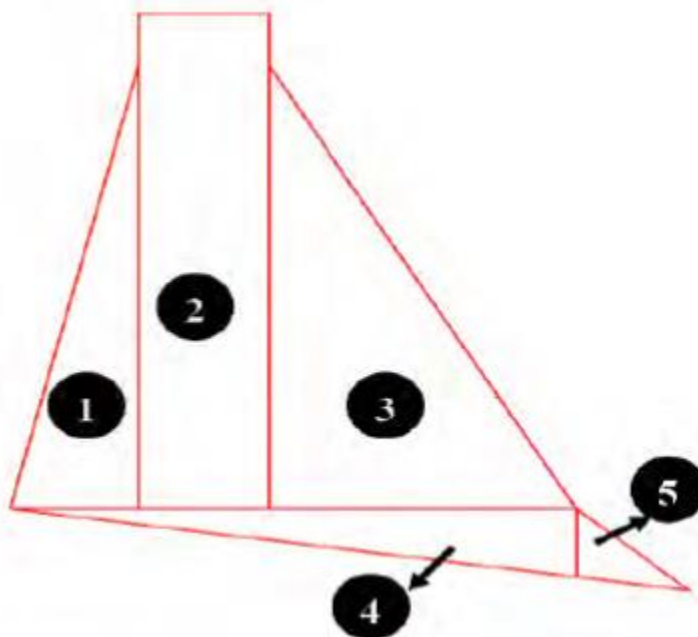
با توجه به نتایج ارائه شده در جدول ۸، مقادیر محاسباتی با الگوریتم EA، بهبود بسیار مناسبی را نسبت به وضع موجود نشان می‌دهد. هم‌چنین با توجه به مقادیر استاندارد برای ضرایب واژگونی، لغزش و تنش در سطح بدنه سد، سد بتنی وزنی کوینا با ابعاد بهینه شده با استفاده از الگوریتم EA، در برابر نیروهای وارده، پایدار خواهد بود.

۳-۱-۲- طرح بهینه سد بتنی وزنی زاوین کلات

برای محاسبه‌ی مساحت مقطع این سد، مقطع سد به پنج قسمت تقسیم شد (شکل‌های ۸ و ۹).



شکل ۸: پارامترها و ابعاد مقطع سد



شکل ۹: تقسیم‌بندی مساحت مقطع سد

هم‌چنین تابع هدف مسئله به صورت رابطه ۳۰ تعریف شد:

$$\text{Minimize } \sum_{i=1}^n A(X) \tag{30}$$

Subject to $F_i(X) \leq 0$

که در این رابطه، A مساحت هر مقطع، $F_i(X)$ تابعی از متغیرهای تصمیم در هدف i و n تعداد مساحت‌های تقسیم شده مقطع موردنظر می‌باشد.

نیروهای وارد بر مقطع سد بتنی وزنی زاوین کلات و فرمول بندی مسئله مطابق آن چه که در بخش های قبلی پژوهش حاضر ذکر گردید، در نظر گرفته شد.

برای طرح بهینه مقطع عرضی سد بتنی وزنی زاوین کلات با استفاده از الگوریتم پیشنهادی در این پژوهش (الگوریتم EA) نتایج زیر حاصل شد و با نتایج مطالعه‌ی باعزم و ناصری (۱۳۹۵) که با استفاده از الگوریتم ژنتیک (GA) به بهینه سازی ابعاد سد مذکور پرداخته بودند، مقایسه گردیده است (جدول ۹).

جدول ۹: مقایسه ابعاد اولیه و بهینه‌ی سد زاوین کلات با استفاده از الگوریتم های EA و GA

نوع الگوریتم	ابعاد سد		مساحت (m ²)						درصد کاهش مساحت	
	H ₁	H ₂	H	x	x ₁	x ₂	x ₃	X		
وضعیت موجود	۵۱/۲۰	۴۸	۵۶/۲۰	۷	۲۶	۱۲۰	۷	۱۶۰	۴۵۲۰	-
GA	۵۱/۲۰	۴۷	۵۶/۲۰	۷	۲۳	۱۱۱	۵	۱۴۶	۴۰۶۰	۱۰/۱۸
EA	۵۱	۴۶/۲	۵۴/۸	۶/۲	۲۱/۶	۱۰۸	۵	۱۴۰	۳۸۷۰	۱۴/۴۰

در این جدول، H₁ ارتفاع کل سد، H₂ ارتفاع شیب بالادست و پایین دست سد، X عرض تاج سد می باشد.

همان گونه که در جدول ۹، مشاهده می شود برای سد زاوین کلات، جواب های روش پیشنهادی (الگوریتم EA) بیشترین میزان کاهش مساحت را نسبت به وضعیت موجود سد و نتایج الگوریتم GA ارائه داده است که در نتیجه این میزان کاهش مساحت (۱۴/۴۰ درصد)، سبب کاهش چشمگیر هزینه های ساخت سد و اقتصادی تر شدن ساخت آن می شود.

۴- نتیجه گیری

در این پژوهش، با استفاده از الگوریتم انتخابات (EA)، به عنوان یک روش نوین بهینه سازی، به تعیین مقطع بهینه سد بتنی وزنی کوینا واقع در هند و سد زاوین کلات در استان خراسان رضوی پرداخته شد. دلیل انتخاب این سدها، امکان مقایسه نتایج مدل فراکاوشی موجود با نتایج مدل های فراکاوشی دیگر در مطالعات پیشین بود. مقایسه نتایج حاصل از الگوریتم EA با وضع موجود برای دو سد مورد نظر با در نظر گرفتن تأثیر نیروهای وارده بر سدها (شامل نیروهای مقاوم و مخرب)، نشانگر آن است که برای هر دو سد مورد نظر، جواب های روش پیشنهادی کمترین مقدار حجم بتن و کاهش مساحت را دارا است و الگوریتم پیشنهادی از کارایی بالایی در حل مسئله مذکور برخوردار است. هم چنین مقایسه ی نتایج به دست آمده از اجرای الگوریتم بهینه سازی EA و الگوریتم های GA، ICA و HBMO حاکی از آن است که هر چهار روش بهینه سازی در بهینه سازی مقطع سد و در نتیجه برآورد حجم مصالح بدنه عملکرد موفقیت آمیزی دارند ولی الگوریتم EA با مقدار کمینه تابع هدف یعنی ۳۲۷۴/۲۳ مترمکعب حجم بتن مصرفی در ۱۰۰ بار اجرای برنامه برای سد کوینا و میزان کاهش مساحت ۱۴/۴۰ درصدی برای سد زاوین کلات و هم چنین از نظر زمان اجرا و نیز دقت نتایج، نسبت به سه الگوریتم بهینه سازی دیگر موفق تر عمل می نماید. پیشنهاد می شود. با توجه به کارایی و دقت مناسب الگوریتم EA در مسئله بهینه سازی مقاطع سدها، در مطالعات آتی، کاربرد الگوریتم EA برای طراحی بهینه سدهای خاکی نیز استفاده گردد.

مراجع

- [1] Abrishami J. (2001). Concrete dams; Design and Implementation, First Edition, Astan Quds Razavi Publishing, 544 pages.
- [2] Abdolmaleki, M., Golnari, S. and Jalalifar, H. (2015). The stability analysis of the slopes and body of Zavin gravity dam by earthquake force. 10th International Conference on Civil Engineering, Faculty of Civil Engineering, Tabriz, Iran.
- [3] Nicklow, J., Reed, P., Savic, D., Dessalengna, T., Harrell, L., Chanhilton, A., Karamouz, M., Minsker, B., Ostfeld, A., Singh, A. and Zechman, E. (2009). State of the art for genetic algorithms and beyond in water resources planning and management, Journal of Water Resources Planning and Management. 136(4): 412-432.
- [4] Afshar, A., Emami Skardi, M. J. and Masoumi, F. (2012). Optimizing water supply and -6 hydropower reservoir operation rule curves: An imperialist competitive algorithm approach, Engineering Optimization. 47(9): 1208-1225.
- [5] Afshar, A., Masoumi, F. and Marino, M. A. (2015). A review of ant colony optimization application in water resource management problems. Water Resource Management. 29: 3891-3904.
- [6] Mohammadzadeh Romanian, H. and Masoumi, F. (2017). Optimization of Dimensions of Weighted Concrete Dams using Imperialist Competitive Algorithm (ICA), 16th Iranian Hydraulic Conference, Faculty of Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, 15-16 September, Ardabil, Iran.
- [7] Nourani V. Mohebbi A. Bazzazian Bonab S. and Nabi M. 2011. Honey bee mating optimization (HBMO) implementation in concrete gravity dam layout optimization, Global Journal of Researches in Engineering, Civil and Structural Engineering.
- [8] Khatibinia, M. and Khosravi, S. (2014). A hybrid approach based on an improved gravitational search algorithm and orthogonal crossover for optimal shape design of concrete gravity dams, Applied Soft Computing. 16: 223-233.
- [9] Deepika, R. and Suribabu, C. (2015). Optimal design of gravity dam using differential evolution algorithm. International Journal of Optimization in Civil Engineering. 5(3): 255-266.
- [10] Hashemi, H., Moradloo, J. and Moosavi S. M. (2011). Optimal design of gravity dam using PSO algorithm, 6th National Congress of Civil Engineering, University of Semnan, Semnan, Iran.
- [11] Gholkar Hamzeie Yazdi, H. R. and Arabshai, S. J. (2012). Optimization of concrete gravity dam using particle swarm algorithm (PSO), 11th Hydraulic Conference of Iran, 16-18 November, University of Urmia, Urmia, Iran.
- [12] Aslani, M. (2011). Optimization of gravity dams using Genetic algorithm under numerical analysis of stress constraints, Msc. Thesis, Faculty of Agricultural Engineering, Sari University of Agriculture Sciences and Natural Resources.
- [13] Haghghatandish, S., Ghaderi, K., Mohammadi, M. and Barani, Gh. A. (2015). Optimization of clay dimensions of earthen dams by shuffled complex evolution (SCE) method, Iranian Journal of Water Research. 9(3): 19-26.
- [14] Alinejad, B. and Alishahi, M. (2016). Optimization of concrete gravity dams geometry using Water Cycle algorithm. 4th International Congress on Civil, Architecture and Urban Development, Tehran, Permanent Secretariat of the Conference, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.
- [15] Kheradmand-Saadi, A. R. (2016). Optimal density partition design using new meta-heuristic algorithms. Msc. thesis of Civil Engineering, Sirjan University of Technology.
- [16] Ghodousi, H. and Oskouhi, M. (2016). Optimization of optimal dimensions of concrete gravity dams using Honey Bee Mating (HBMO) model. Journal of Applied Research in Irrigation and Drainage Structures Engineering. 17(66): 1-14.
- [17] Ghodoosi, H., Vakili Tanha, F. and Shahverdi. K. (2018). Application of SCE fractional algorithm and LINGO11 model in optimizing earth dams dimensions (case study: Barzak dam), Iranian Water and Soil Research. 49(2): 233-242.
- [18] Ghodoosi, H. and Vakili Tanha, F. (2017). Performance comparison of artificial fish swarm, shuffled complex evolution and simulated annealing algorithms in the optimization of earth dams cross section (case study: Barzak dam), Irrigation and Drainage Structures Engineering. 18(68): 97-112.
- [19] Dehghani, A. A., Montazer, Gh. A., Nasiri, F. and Ghodsian, M. (2006). Using Genetic algorithm and artificial neural network to optimize concrete gravity dams, Journal of Civil Engineering of Modarres.
- [20] Varaei H. Ahmadi-Nadoushan B. 2008. Comparison of classic optimization techniques and intelligent in determining the optimum section of concrete gravity dams, Proceeding of the Fourth National Congress of Civil Engineering, University of Tehran.
- [21] Salmasi, F. (2011). Design of Dam by Genetic Algorithms, World Academy of Science, Engineering and Technology. 844-860.
- [22] Ferdowsi, A., Hoseini, S. M., Farzin, S., Faramarzpour, M. and Mousavi, S. F. (2020). Shape optimization of gravity dams using a Nature Inspired approach, Journal of Soft Computing in Civil Engineering. 4(3): 65-78.

- [23] Oskouhi, M. (2014). Determination of optimal dimensions of concrete gravity dams using Honey Bee Mating (HBMO) model, Msc. thesis, Water Structures, Faculty of Agriculture, Zanjan University.
- [24] Baazm Z. and Naseri M. (2016). Optimization of gravity dam dimensions using genetic algorithm (case study: Kalat Zavin dam), 4th National Conference on Applied Research in Civil Engineering, Architecture and Urban Management, 7-8 February, Tehran, Iran.
- [25] Emami, H. and Derakhshan, F. (2015). Election algorithm: A new socio-politically inspired strategy. *AI Communications*. 28: 591–603.
- [26] Samani M. V. (2008). Design of Hydraulic Structures, Dez Water Consultant Engineering Co, 495 pages, Tehran.
- [27] United States Department of the Interior, Bureau of Reclamation. Design of gravity dams, Design Manual for concrete dams. (1976). U. S. Government Printing Office.
- [28] United States Army Corps of Engineering. Gravity Design Dams. 1995. Engineering and Design Engineer Manual.
- [29] United States Department of the Interior, Bureau of Reclamation. Design of small dams. 1987. A Water Resources Technical Publication.
- [30] USBR. (1987). Design of Small Dams, USA, Denver.
- [31] Anon. Design of Gravity Dams. (1976). United States Department of the Interior Bureau of Reclamation (USBR), A Water Resources Technical Press. Colorado.
- [32] Ghorbani, M. A. Dehghani, R. (2017). Comparisons of Bayesian neural networks and artificial neural network to estimate suspended sediments in the rivers (case study: Simineh road). *Journal of Environmental Science and Technology*, 19(2): 1-13.
- [33] Larose, D. T. (2005). Discovering knowledge in data: an introduction to data mining. Jhon Wiley & Sons Inc, 240 p.