

ارزیابی عملکرد الگوریتم‌های فراابتکاری در طراحی بهینه شمع‌های سازه نگهبان ترانشه‌های عمیق

فرشاد طیاری*

استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، تهران، ایران.

پست الکترونیکی نویسنده:

f-taiyari@tvu.ac.ir

چکیده:

مقاله حاضر به بررسی تاثیر الگوریتم‌های فراابتکاری در طراحی بهینه شمع‌های سازه نگهبان ایستگاه شماره ۳ متروی تبریز می‌پردازد. برای این منظور ابتدا ترانشه مورد نظر در نرم‌افزار اپن‌سیس مدلسازی و فرآیند گام به گام خاک‌برداری آن، مطابق روند اجرایی، شبیه‌سازی گردید. چهار الگوریتم فراابتکاری متداول یعنی الگوریتم‌های مبتنی بر جغرافیای زیستی، ژنتیک، ازدحام ذرات و زنبور عسل برای طراحی بهینه استفاده شدند تا علاوه بر مقایسه عملکرد هر یک در حل مساله مذکور، احتمال دستیابی به بهترین پاسخ افزایش یابد. نتایج بدست آمده حاکی از عملکرد بسیار خوب الگوریتم ژنتیک نسبت به سایر الگوریتم‌های مورد استفاده در دستیابی به طرح بهینه می‌باشد. به منظور بررسی بهتر، توزیع تنش خاک در اطراف سازه نگهبان و همچنین تغییر شکل المان‌های شمع مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از مهار متقابل جهت ایجاد تعادل تغییر شکل‌های قسمت فوقانی و تحتانی شمع‌ها و کاهش عمق مدفون المان‌های شمع ضروری به نظر می‌رسد.

واژگان کلیدی:

الگوریتم فراابتکاری، طراحی بهینه، ترانشه عمیق، سازه نگهبان، شمع‌های درجا.

Evaluation of the efficiency of metaheuristic algorithms in optimal design of pile wall retaining systems

F. Taiyari

Assistant professor, Department of Civil Engineering, Technical and Vocational University (TVU), ۱۴۳۵۷-۶۱۱۳۷, Tehran, Iran.

Abstract:

The effectiveness of the application of the metaheuristic algorithms in the optimal design of retaining structures is investigated in this paper. For this purpose, an on-going Tabriz metro station project with a deep excavation pit is selected here as a case study. The retaining system of the project consists of secant pile walls supported by a layer of struts. The piles have circular section consisting of reinforced concrete cores covered by steel sleeves and the struts are made of steel rectangular hollow sections. A detailed finite element model is developed in OpenSees platform including all the constructional process in order to perform static analyses. Four different metaheuristic algorithms, namely Genetic, Particle swarm optimization, Bee, and Biogeography-based algorithms are chosen for the optimization problem. The pile external diameter, the steel tube stiffness, the number of longitudinal bars inside the concrete core and their diameters, the center-to-center spaces of the pile elements, the dimensions of struts and their center-to-center spaces, the location of the struts in depth and the buried depth of pile elements are selected as optimization variables. The total cost of the retaining system is considered as an objective function which should be minimized in the design space of the variables. For the optimization purpose, an integration of OpenSees software with MATLAB platform is done to join the modeling space with the mentioned optimization algorithms. The number of iterations for each run is assumed to be ۴۰۰, which is also considered as a termination criterion. The optimization process is performed ۵۰ times and the best response is reported here. The results demonstrate an excellent performance of Genetic algorithm in obtaining the optimum solution respect to other three considered algorithms. It exhibits a proper standard deviation and convergence rate in producing the optimum response. It is shown that the soil stress is increased in the depth where struts are installed, while they are reduced near the ground level, where the deflection of piles creates the active situation for soil. This is true considering the results of all algorithms. Proceeding the excavation phase increases the soil stress as well as the pile deformation. It can be also obtained that providing a layer of strut seems necessary for reducing pile movements as well as their buried depth.

Keywords: Metaheuristic algorithm, Optimal design, Deep excavation, Pile wall retaining system.

امروزه به سبب توسعه روز افزون شهرها، افزایش تراکم جمعیت و به تبع آن کمبود زمین و قیمت قابل توجه آن، ساخت وسازه‌های زیرزمینی رونق بیشتری یافته است که به موجب آن، نیاز به گودبرداری و ایجاد ترانشه‌های قائم در نقاط پرتراکم شهری بیش از پیش حس می‌گردد.

به طور کلی گودبرداری‌ها به دو دسته حفاظت (مهاربندی) شده و نشده تقسیم می‌شوند. در گودبرداری‌های حفاظت نشده، پایداری شیب‌ها و یا جداره‌های قائم گودبرداری‌ها بدون استفاده از سیستم مهاربندی الحاقی، توسط شرایط مکانیکی خاک تأمین می‌گردد؛ حال آنکه که در صورت عدم کفایت مقاومت برشی خاک در مقابل نیروهای وارده، مقاومت لازم توسط سیستم مهاربندی موسوم به سازه نگهبان تأمین می‌گردد که از جمله مرسوم‌ترین آنها می‌توان به شمع‌های درجا اشاره نمود. سیستم شمع‌های درجا براساس قرارگیری تعدادی از المان‌های شمع در یک ردیف تعریف می‌گردند. این المان‌ها به صورت مدفون در زمین قرار گرفته و برای مقابله با لغزش خاک پشتی طراحی می‌شوند.

یکی از مسائل مهم در طراحی سیستم شمع علاوه بر توجیه اقتصادی، تأمین قابلیت اعتماد مناسب در طراحی آنها می‌باشد. امروزه اکثر سیستم‌های سازه نگهبان براساس روش دیاگرام طراحی می‌شوند [۱-۲]. این روش توسط چنگ و ونگ [۳] برای استفاده در خاک‌های رسوبی اصلاح شده است. با این وجود نتایج بررسی‌های انجام گرفته در مرجع [۳] بر روی روش دیاگرام حاکی از پایین بودن نیروهای اولیه طراحی نسبت به حالت واقعی آن می‌باشد. علاوه بر این، روش ساده شده ریچاردز و الماس [۴] نیز به منظور طراحی لرزه‌های شمع‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. براساس این روش می‌توان میزان نیروی زلزله را به صورت بار استاتیکی جانبی معادل تخمین زد. در سال‌های اخیر پژوهش‌های بسیاری به منظور بررسی رفتار لرزه‌های شمع‌های مختلف و ارزیابی روش فوق صورت گرفته است. به عنوان مثال در مرجع [۵] رفتار لرزه‌های شمع‌ها در برابر زمین‌لرزه‌های با زمان تناوب کوتاه مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج بدست آمده حاکی از دقت پایین روش مذکور در استخراج رفتار لرزه‌های شمع‌ها در مقایسه با بهره‌گیری از تحلیل‌های دقیق می‌باشد. مطالعه مشابه دیگری [۶] نیز در این زمینه نشان می‌دهد که در هنگام زمین‌لرزه

لنجر خمشی شدیدی در سازه‌های نگهبان ایجاد می‌شود که اثرات آن در محاسبات استاتیکی منظور نمی‌گردد. در سال ۲۰۱۷، کو و همکاران [۷] مدلی برای ارزیابی شمع‌های صفحه‌ای پیشنهاد کردند که قادر به تخمین نیروهای اندرکنشی بین سازه و خاک براساس مقادیر مختلف حداکثر شتاب زمین می‌باشد. لین و همکاران [۸] به بررسی رفتار لرزه‌ای سازه‌های نگهبان شمع‌های صفحه‌ای انکر شده پرداختند. در مطالعه مذکور رفتار شمع‌ها براساس مدل‌سازی عددی و آزمایش میز لرزان ارزیابی و مود خرابی آنها در زلزله‌های مختلف بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد که انکرها در زمان‌های ابتدایی وقوع زلزله خراب شده و تنش محوری آنها با افزایش دامنه زمین‌لرزه افزایش می‌یابد. همچنین مطالعات نشان می‌دهد که علاوه بر ملاحظات نیرویی، تغییرمکان سازه‌های نگهبان نیز باید در طراحی مورد توجه قرار گیرد. تغییرمکان زیاد موجب لغزش و جابجایی بیشتر خاک و سازه روی آن می‌گردد که منجر به وقوع نشست، ترک‌خوردگی و حتی خرابی سازه‌ها می‌شود. برای این منظور غالباً در آیین‌نامه‌های طراحی مقدار بیشینه تغییرمکان سازه‌های نگهبان به درصدی از ارتفاع آن‌ها محدود می‌شود. تعیین این مقدار بیشینه به عمق حفاری، سختی سازه نگهبان و مشخصات خاک محل بستگی دارد [۹]. در سال‌های اخیر روش‌های مختلفی برای تخمین این تغییرمکان در سیستم‌های مختلف سازه نگهبان ارائه شده است. از جمله در سال ۲۰۱۶، مو و همکاران [۱۰] روش جدیدی بر مبنای کرنش‌های کوچک برای تخمین میزان جابجایی گودهای مهاربندی شده با سازه نگهبان ارائه دادند. براساس مطالعات آنها جابجایی گود یکی از پارامترهای کلیدی در طراحی سازه‌های نگهبان می‌باشد و مقدار آن بر اساس میزان جابجایی مجاز خاک زیر سازه‌های اطراف گود بدست می‌آید. ژنگ و همکاران [۱۱] نیز توانستند براساس مطالعات عددی سازه‌های نگهبان بر روی خاک‌های رسی روش تخمینی ساده‌ای را برای تعیین جابجایی آنها ارائه دهند.

با توجه به اینکه اکثر مسائل ژئوتکنیکی به صورت مسائل چند متغیره هستند، لذا یافتن پاسخ‌های بهینه براساس روش‌های کلاسیک در اکثر مواقع امکان‌پذیر نیست. با این وجود استفاده از روش‌های بهینه‌سازی فراابتکاری در طراحی مسائل ژئوتکنیکی بسیار موفق عمل کرده است و در سال‌های اخیر بیش از پیش مورد توجه محققان و پژوهشگران قرار گرفته است. این الگوریتم‌ها قادر هستند

تأثیر فضای جستجوی وسیعی را برای یافتن پاسخ بهینه مورد نظر مورد ارزیابی قرار دهند. با این وجود پاسخ بهینه بدست آمده از این الگوریتم‌ها به دلیل ماهیت جستجوی تصادفی آنها ممکن است متضمن دستیابی به پاسخ بهینه کلی نباشد. بنابراین توصیه می‌گردد که برای حل یک مساله مشخص از چندین روش مختلف بهینه‌سازی استفاده گردد [۱۲].

اخیراً مطالعات بسیاری برای ارائه طرح بهینه سیستم‌های سازه نگهبان از جمله دیوارهای حائل تحت الگوریتم‌های مختلف بهینه‌سازی از جمله الگوریتم ازدحام ذرات، الگوریتم جستجوی گرانشی، روش بهینه‌سازی CO_2 ، روش کلونی، الگوریتم هارمونی تطابقی و چند الگوریتم بهینه‌سازی دیگر انجام گرفته است [۱۲-۲۰]. کالمسی و همکاران [۲۱] از تکنیک بهینه‌سازی گرگ خاکستری برای طراحی دیوار حائل طره‌ای بتن مسلح استفاده کردند. برای این منظور آنها از روابط طراحی ارائه شده بر مبنای آیین‌نامه آمریکا بهره گرفتند. کویالی‌پور و همکاران [۲۲] یک الگوریتم جدید هوشمند برای طراحی بهینه دیوارهای حائل ارائه نمودند. در این بررسی آنها پنج پارامتر ارتفاع و ضخامت دیوار حائل، چگالی و ضریب اصطکاک خاک و چگالی مخلوط مصالح سنگی و سیمان را به عنوان پارامترهای کلیدی مطرح کردند که در تعیین رفتار دیوارهای حائل تأثیر بسزایی دارند. گندمی و همکاران [۱۲] طرح بهینه دو سازه حائل طره‌ای را بر اساس تکنیک‌های هوش دسته‌جمعی ارائه دادند. آیدوقلو [۲۳] در سال ۲۰۱۷ از یک روش جدید بهینه‌سازی بر مبنای جغرافیای زیستی و ترکیب آن با الگوریتم دیگر برای طراحی بهینه دیوارهای حائل طره‌ای تحت شرایط لرزه‌ای استفاده نمود. بهینه‌سازی ضریب اطمینان دیوارهای حائل با استفاده از تکنیک‌های بهینه‌سازی نوین در سال ۲۰۱۹ توسط گردال و همکاران [۲۴] انجام گرفته است. برای این منظور آنها ضریب اطمینان دیوارهای حائل را تحت بارگذاری‌های استاتیکی و دینامیکی مورد ارزیابی قرار دادند. سرانیک و همکاران [۱۵] و پیس و همکاران [۱۶] هزینه طراحی دیوارهای حائل طره‌ای بتنی مسلح را با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی کمینه نمودند. علاوه بر مطالعات مذکور، اخیراً پژوهش‌هایی در رابطه با تعیین طرح بهینه سیستم‌های سازه نگهبان با شمعی‌های درجای بتنی و فولادی نیز توسط نویسنده انجام شده است [۲۵-۲۶]. در پژوهش‌های [۲۵-۲۶] و پژوهش حاضر، قسمت‌های مختلف

سازه‌های نگهبان و خاک‌های اطراف آن در نرم‌افزار المان محدود به طور دقیق مدل شده و بهینه‌سازی بر مبنای مدلسازی واقعی صورت گرفته است. این درحالی است که اغلب مطالعات قبلی بر روی سیستم‌های دیوار حائل طره‌ای و براساس روابط طراحی ساده‌سازی شده آنها در آیین‌نامه‌های طراحی استوار بوده است. علاوه بر این به دلیل نبود چنین روابطی برای شمعی‌های سازه نگهبان و لزوم مدلسازی دقیق آنها، بهینه‌سازی آنها تا کنون صورت نگرفته است و به نظر می‌رسد که توسعه چنین روش‌هایی با بهره‌گیری از مدلسازی‌های دقیق و منطبق با شرایط واقعی برای این نوع سیستم‌ها و سیستم‌های مختلف دیگری که دارای روابط طراحی صریحی نیستند ضروری باشد.

در این مطالعه از الگوریتم‌های مختلف بهینه‌سازی برای دستیابی به طرح بهینه سازه نگهبان ایستگاه ۳ متروی تبریز استفاده شده است. سازه نگهبان ایستگاه مذکور به صورت سیستم مهار متقابل فولادی به همراه المان‌های شمعی قائم می‌باشد. در این پژوهش از شمعی‌های کامپوزیت شامل غلاف فولادی و هسته بتنی مسلح به عنوان المان‌های قائم استفاده شده است. به منظور انجام پروسه بهینه‌سازی از چهار الگوریتم متداول فراابتکاری یعنی الگوریتم ژنتیک، الگوریتم ازدحام ذرات، الگوریتم زنبور عسل و الگوریتم بهینه‌سازی بر مبنای جغرافیای زیستی بهره گرفته شده تا میزان اثر بخشی هر یک از الگوریتم‌ها برای حل مساله حاضر سنجیده شود. در این بررسی از معیار هزینه مصالح به عنوان تابع هدف استفاده شده است. به این ترتیب که به ازای گستره‌ای از مقادیر معقول پارامترهای طراحی سیستم سازه نگهبان، تابع هدف تعیین می‌گردد و آن مقادیری که منجر به ارائه سیستمی با کمترین میزان هزینه شود، به عنوان متغیرهای بهینه انتخاب می‌شوند. برای این منظور قطر خارجی شمعی، ضخامت غلاف فولادی، تعداد و نمره آرماتورهای طولی هسته بتنی، فاصله مرکز به مرکز شمعی‌ها، ابعاد، ضخامت، عمق قرارگیری و فاصله استرات‌ها و همچنین عمق مدفون شمعی به عنوان متغیرهای طراحی در نظر گرفته شدند.

۲- مشخصات کلی خط ۲ قطار شهری تبریز

خط دو قطار شهری تبریز از محل کارخانه کود آلی در غرب شهر آغاز گشته و پس از عبور از مرکز شهر در محل نمایشگاه بین‌المللی،



شکل ۱: موقعیت ایستگاه مورد بررسی

واقع در میدان بسیج، در بخش شرقی شهر به پایان می‌رسد. این خط دارای ۲۰ ایستگاه مشابه بوده و مسیر عبوری آن دارای طول تقریبی ۲۲/۴ کیلومتر است. پژوهش حاضر به تحلیل و طراحی بهینه سازه نگهبان ایستگاه ۳ خط دو قطار شهری تبریز می‌پردازد. این ایستگاه سومین ایستگاه خط ۲ است که در غرب تقاطع خیابان‌های خطیب و قدس (آخونی) قرار دارد (شکل ۱). همانطور که مشخص است، زمین ایستگاه در منطقه پرجمعیت و مملو از ساختمان واقع شده است که این امر تغییر مکان جانبی دیواره‌های گود را با محدودیت‌هایی مواجه و حساسیت طراحی و اجرای آن را دو چندان می‌کند.

زمین ایستگاه به شکل مستطیل و با طول و عرض ۷۰ در ۲۵ متر می‌باشد و تراز ریل در عمق ۲۲ متری از سطح زمین قرار دارد. برای پایدارسازی دیواره گودبرداری از روش مهار متقابل به همراه سیستم شمع استفاده می‌شود. اجرای این سیستم در چند فاز مختلف انجام می‌گیرد؛ به این صورت که ابتدا شمع‌ها در طولی به میزان $(22+X6)$ متر در تمامی دیواره‌های گود اجرا می‌شود که در آن $X6$ عمق مدفون شمع در خاک زیرین است. سپس خاک‌برداری به صورت گام به گام و در ۲۲ مرحله انجام می‌گیرد و در هر مرحله لایه‌ای از خاک به ضخامت ۱ متر برداشته می‌شود. در تراز ارتفاعی $X5$ ، سیستم مهار متقابل برای کاهش میزان تغییر مکان جانبی شمع‌ها نصب می‌گردد. جزئیات آرایش المان‌های شمع و سیستم مهار متقابل در شکل ۲ نشان داده شده است. همچنین نتایج مطالعات ژئوتکنیکی خاک محل در جدول ۱ قابل مشاهده می‌باشد. شایان ذکر است که سطح آب زیرزمینی در تراز ۱۲ متری زیر سطح زمین قرار دارد.

۲- روند بهینه‌سازی

در حالت کلی روند بهینه‌سازی به منظور تعیین بهترین راه‌حل از میان تمامی راه‌حل‌های موجود تعریف می‌گردد. در این رویکرد از کمینه‌سازی یک تابع هدف $f(x)$ در حضور محدودیت‌های خاص اعمال شده برای مساله مورد نظر بهره گرفته می‌شود. این محدودیت‌ها در حالت کلی به سه دسته قیدهای نامساوی $(g(x))$ ، قیدهای مساوی $(h(x))$ و محدوده‌های بیشینه و کمینه مقادیر متغیرها $(U$ و $L)$ مطابق رابطه (۱) تعریف می‌شوند.

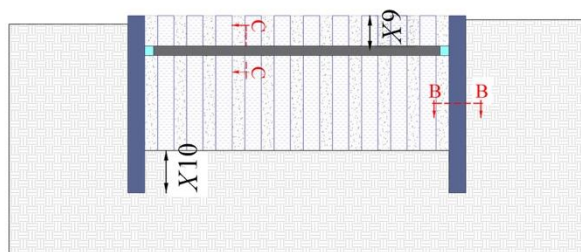
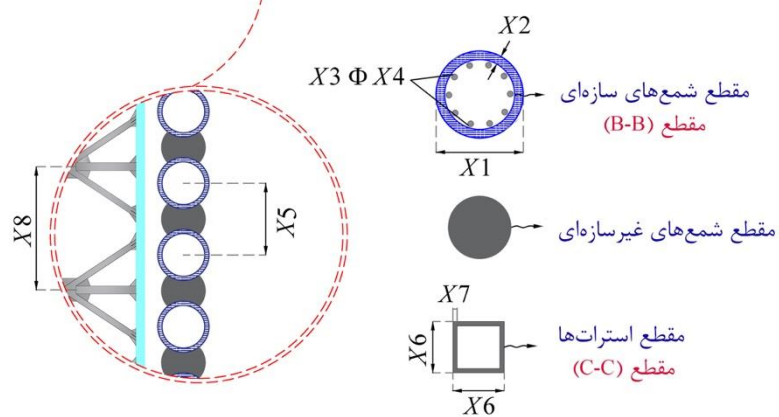
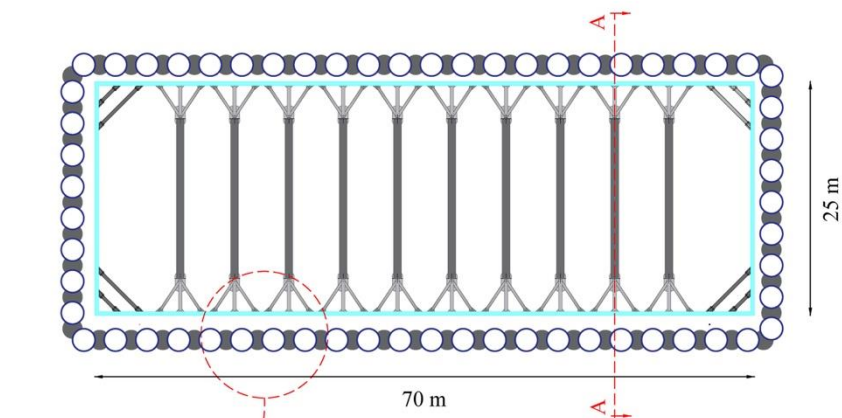
$$\begin{aligned} g_i(x) &\leq 0 & i = 1, 2, \dots, n \\ h_j(x) &= 0 & j = 1, 2, \dots, p \\ L_k &\leq X_k \leq U_k & k = 1, 2, \dots, m \end{aligned} \quad (1)$$

۳-۱- تعریف تابع هدف

تابع هدف باید به گونه‌ای انتخاب شود که بتواند بازگو کننده شرایط واقعی حاکم بر مساله باشد. در این پژوهش از هزینه مصالح مصرفی به عنوان تابع هدف بهینه‌سازی مطابق رابطه (۲) استفاده می‌شود.

$$f(x) = c_s W_s + c_b W_b + c_c W_c \quad (2)$$

در رابطه فوق، W_s وزن مصالح فولادی استفاده شده در استرات‌ها و غلاف‌های فولادی شمع‌ها، W_b وزن میلگردهای مسلح‌کننده بتن شمع، V_c حجم بتن مصرفی در شمع و پارامترهای c_s ، c_b و c_c ضرایب متناظر واحد هزینه مصالح مصرفی می‌باشند.



مقطع (A-A)

شکل ۲: جرئیات سیستم سازه نگهبان مورد استفاده در این پژوهش

جدول ۱: پارامترهای ژئوتکنیکی خاک در محدوده ایستگاه مورد بررسی

مشخصات لایه‌های خاک	جنس لایه	ضخامت (m)	وزن مخصوص (kN/m^3)	چسبندگی (kPa)	زاویه اصطکاک ($^\circ$)	مدول برشی (MPa)	مدول بالک (MPa)
لایه ۱	CL-ML	۱۲	۱۶/۵	۱۵	۲۲	۷۱۹۴	۳۰۳۰۳
لایه ۲	SM-ML	۱۳	۱۹/۵	۱۵	۲۷	۱۲۹۶۳	۳۸۸۸۹
لایه ۳	SM-ML	۱۴	۱۹/۵	۲۰	۳۱	۱۹۰۸۴	۴۳۸۶۰

جدول ۲: متغیرهای مساله به همراه قیود هندسی آنها

متغیرهای طراحی	واحد	حد پایین	حد بالا
قطر خارجی شمع (X1)	m	۰/۵	۲
ضخامت غلاف فولادی (X2)	m	۰/۰۰۵	۰/۰۵
تعداد آرماتور طولی (X3)	-	۶	۴۰
نمره آرماتور طولی (X4)	-	۸	۳۶
فاصله مرکز به مرکز شمع‌ها (X5)	m	۱	۵
ابعاد استرات (X6)	m	۰/۱	۱
ضخامت استرات (X7)	m	۰/۰۰۵	۰/۰۵
فاصله استرات‌ها از هم (X8)	m	۱	۱۰
عمق قرارگیری استرات‌ها (X9)	m	۱	۱۵
عمق مدفون شمع (X10)	m	۱	۱۰

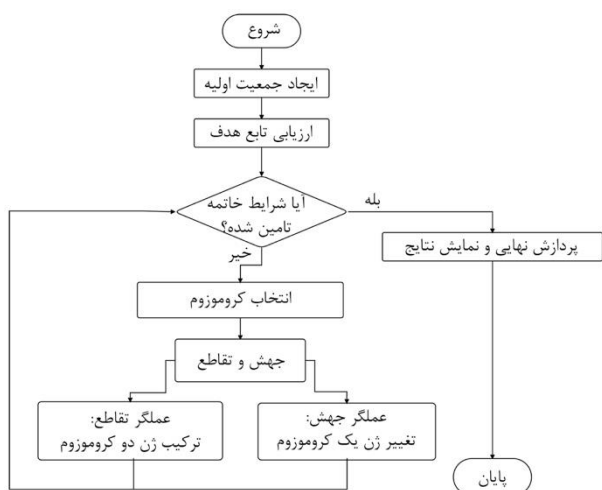
۳-۲- تعریف قیود

قیود مساله در حالت کلی به دو صورت قیود رفتاری و قیود هندسی تقسیم می‌گردند. قیود رفتاری در واقع بیانگر ظرفیت برشی و خمشی شمع‌ها، مقاومت واژگونی و ظرفیت لغزشی آنها است که بایستی کمتر از مقدار مجاز تعیین شده براساس آیین‌نامه باشند [۲۷]. علاوه بر این، قیود هندسی نیز شرایط مرزی مساله را مشخص می‌کنند. در واقع این قیود بیانگر حد بالا و پایین مقادیر متغیرهای مساله هستند. قیود هندسی مورد استفاده در این مقاله در جدول ۲ آورده شده است.

۳-۳- الگوریتم‌های بهینه‌سازی

۳-۳-۱- الگوریتم ژنتیک

ایده استفاده از الگوریتم ژنتیک در بهینه‌سازی مهندسی ابتدا در دهه هفتاد میلادی توسط جان هالند و بر پایه اصول انتخابی داروین مطرح گردید و سپس در سال ۱۹۸۹ توسط دیوید گلدبرگ [۲۸] گسترش یافت. اساس کار این الگوریتم بر پایه انتقال خصوصیات موروثی ژن‌های یک نسل به نسل دیگر توسط کروموزوم‌های آنها می‌باشد.



شکل ۳: فرایند بهینه‌سازی با الگوریتم ژنتیک

۳-۳-۲- الگوریتم ازدحام ذرات

ایده اولیه این الگوریتم توسط راسل ابرهارت و جیمز کندی در سال ۱۹۹۵ ارائه شد [۲۹]. این الگوریتم از رفتار جمعی پرندگان و ماهی‌ها الگوبرداری می‌کند. به این ترتیب که در فضای جستجو، جمعیت اولیه‌ای متشکل از مجموعه‌ای از ذرات به طور تصادفی ایجاد می‌شود و تابع هدف آنها ارزیابی می‌گردد. سپس موقعیت و سرعت حرکت ذرات با توجه به میزان شایستگی آنها در جهت دستیابی به جواب بهینه مطابق رابطه (۳) بروز می‌شود.

$$X_i^{t+1} = X_i^t + V_i^{t+1} \quad (3)$$

در رابطه فوق X_i^t موقعیت فعلی ذره i ام، X_i^{t+1} و V_i^{t+1} به ترتیب موقعیت و سرعت بروز شده آنها می‌باشند.

بنابراین حرکت ذرات ناشی از سرعتی است که هر ذره در طول مساله به خود می‌گیرد. میزان و جهت سرعت هر ذره، حاصل جمع حد فاصل موقعیت فعلی با بهترین تجربه شده توسط ذره و همچنین حد فاصل موقعیت فعلی با بهترین موقعیت بدست آمده در بین تمامی ذرات از ابتدای حل مساله تاکنون می‌باشد. به این ترتیب میزان و جهت هر ذره با ذره دیگر متفاوت خواهد بود و از رابطه (۴) قابل محاسبه می‌باشد.

$$V_i^{t+1} = W V_i^t + C_1 r_1 (P_i - X_i^t) + C_2 r_2 (P_g - X_i^t) \quad (4)$$

در رابطه فوق V_i^t و V_i^{t+1} به ترتیب سرعت‌های فعلی و بروز شده ذره i ام، P_i بهترین موقعیت یافته شده توسط ذره i ام (بهترین موقعیت

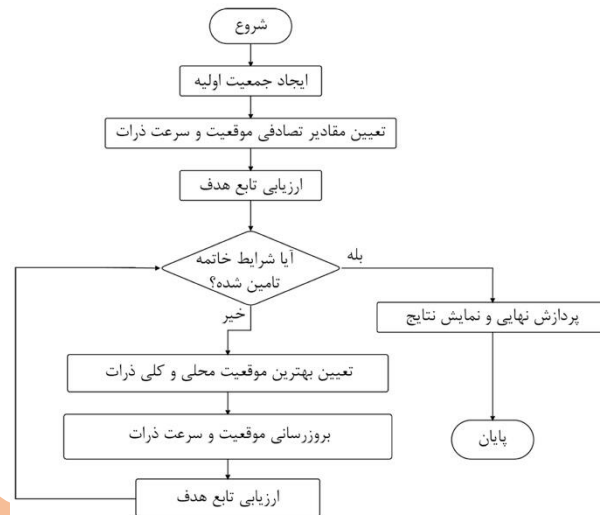
نسل اول که انتقال‌دهنده ژن هستند، والدین و نسل بعد فرزندان نامیده می‌شوند. بدیهی است که انتقال تمام کروموزوم‌های والدین به فرزندان، موجب تشابه کامل خصوصیات دو نسل خواهد بود. چنین حالتی در واقعیت به دلیل وجود دو رخداد اتفاق نمی‌افتد. رخداد اول جهش است که در آن مشخصات برخی ژن‌ها به صورت کاملاً تصادفی تغییر می‌یابند. در این حالت خصوصیات فرزندان مشابه هیچ یک از خصوصیات والدین نخواهد بود. رخداد دیگر که احتمال وقوع آن بسیار بیشتر است، چسبیدن ابتدای یک کروموزوم به انتهای کروموزوم دیگر است که با نام تقاطع شناخته می‌شود. در این حالت فرزندان تعدادی از خصوصیات هر یک از والدین را با هم به ارث می‌برند و از شبیه شدن فرزند به تنها یکی از والدین جلوگیری می‌شود. بهینه‌سازی در الگوریتم ژنتیک یک روند تصادفی هدایت‌شده می‌باشد. در این روش، ابتدا مجموعه‌ای از پارامترهای طراحی به صورت کاملاً اتفاقی برای یک جمعیت اولیه (والدین) و در فضای جستجوی معرفی شده اختصاص می‌یابد، پس از اجرای الگوریتم تابع هدف مورد نظر برای هر یک از اعضای جمعیت ارزیابی می‌گردد. در گام بعد نسل دوم براساس توضیحات فوق شکل گرفته و بار دیگر تابع هدف اعضا مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. این چرخه تا تامین شرایط تعریف شده جهت خاتمه روند بهینه‌سازی ادامه خواهد یافت. این الگوریتم به اعضای با شایستگی بالاتر شانس بیشتری برای بقا و تولیدمثل قائل می‌شود؛ هر چند که اعضای با شایستگی کمتر نیز به طور کامل کنار گذاشته نمی‌شوند. این ویژگی به طور خاص برای توابع با تغییرات ناگهانی و دارای چندین نقطه بهینه موضعی مناسب بوده و احتمال دسترسی به نقطه بهینه کلی را افزایش می‌دهد. فرایند الگوریتم ژنتیک در شکل ۳ آورده شده است.

زنبورهای کارگر ارائه نشود، محدوده مورد بررسی کوچکتر شده و جستجوها به منبع پیشنهادی اولیه متمرکز می‌گردد و به این ترتیب بهترین منبع غذایی در این منطقه ثبت می‌گردد و منطقه مورد نظر ترک شده و دیده‌بان جدیدی به‌طور تصادفی حاصل می‌گردد. فرایند بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم زنبور عسل در شکل ۵ آورده شده است.

۳-۳-۴- الگوریتم مبتنی بر جغرافیای زیستی

الگوریتم مبتنی بر جغرافیای زیستی یک الگوریتم تکاملی بر پایه جمعیت است که از پدیده مهاجرت حیوانات و پرندگان بین جزایر الهام گرفته شده است [۳۱]. جزایر محل سکونت گونه‌های مختلف، معادل محدوده جستجو در این الگوریتم می‌باشد. مهاجرت گونه‌ها بین جزایر و جهش، دو عملگر مهم در الگوریتم مبتنی بر جغرافیای زیستی می‌باشند. عملگر مهاجرت موجب ایجاد تغییرات در برخی از متغیرهای طراحی می‌شود که میزان این تغییرات با دو شاخص صلاحیت (HSI) و (SIV) قابل کنترل هستند. به این ترتیب، جزایری که اسکان مناسبی را برای گونه‌ها تامین می‌کنند (راه‌حل بهتری را ارائه می‌دهند)، دارای شاخص HSI بالا هستند. چنین جزایری دارای گونه‌های بسیار زیادی هستند که تمایل به مهاجرت به جزایر مجاور دارند. به طوری که نرخ مهاجرت به داخل در آنها به دلیل کمبود فضای کافی پایین می‌باشد. به همین ترتیب جزایر با HSI پایین به دلیل کمی جمعیت دارای نرخ مهاجرت به داخل بالایی هستند. در مقابل، عملگر جهش برای افزایش جمعیت جزایر مورد استفاده قرار می‌گیرد که موجب ایجاد یک راه‌حل جدید در فضای جستجو می‌شود. فرایند الگوریتم مبتنی بر جغرافیای زیستی در شکل ۶ آورده شده است.

محل)، P_g بهترین موقعیت کلی بدست آمده در بین مجموعه ذرات، ω ضریب اینرسی در محدوده $(0-1/2)$ ، C_1 و C_2 ضرایب یادگیری فردی و اجتماعی در محدوده $(0-2)$ و r_1 و r_2 مقادیر تصادفی در محدوده $(0-1)$ می‌باشند. فرایند بهینه‌سازی الگوریتم ازدحام ذرات در شکل ۴ آورده شده است.

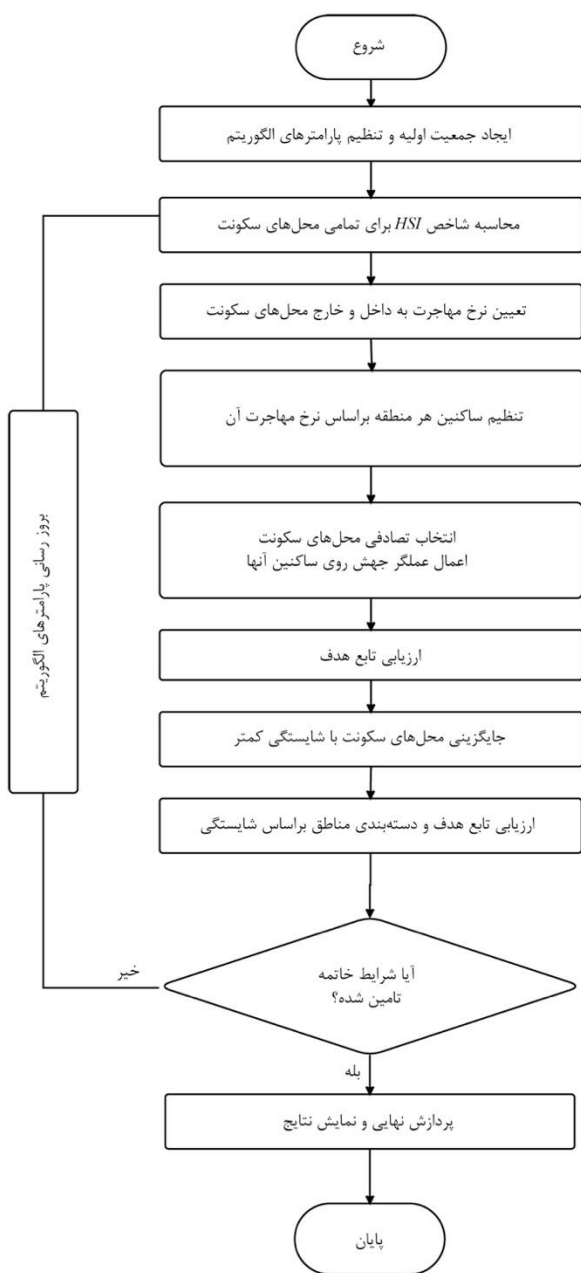


شکل ۴: فرایند بهینه‌سازی با الگوریتم ازدحام ذرات

۳-۳-۳- الگوریتم زنبور عسل

الگوریتم زنبور عسل یکی دیگر از الگوریتم‌های جستجوی مبتنی بر جمعیت است که در سال ۲۰۰۵ توسط فام و همکاران [۳۰] مطرح گردید. این الگوریتم برگرفته از رفتار زنبورهای عسل در جستجوی مواد غذایی می‌باشد.

مرحله اول این الگوریتم با تولید تصادفی زنبورهای عسل دیده‌بان در فضای جستجو و ارزیابی اولیه آنها آغاز می‌گردد. هر راه‌حل در این الگوریتم به عنوان یک منطقه با منبع غذایی در نظر گرفته می‌شود که توسط زنبورهای عسل دیده‌بان جستجو می‌گردد. اطلاعات هر منبع غذایی اعم از میزان غنی بودن آن توسط رقص زنبورهای دیده‌بان به زنبورهای کارگر انتقال می‌یابد. میزان حرکات رقص و همچنین تعداد زنبورهای کارگر اعزام شده به محل، به شایستگی منبع غذایی بستگی دارد به این ترتیب زنبورهای کارگر استخدام شده توسط هر دیده‌بان به جستجوی محدوده منبع غذایی می‌پردازند. در صورتی که یکی از زنبورهای کارگر استخدام شده منبع غنی‌تری نسبت به منبع مطرح شده توسط دیده‌بان ارائه دهد، تبدیل به زنبور دیده‌بان می‌شود؛ در غیر این صورت، اگر هیچ منبع بهتری توسط



شکل ۶: فرایند بهینه‌سازی با الگوریتم مبتنی بر جغرافیای زیستی



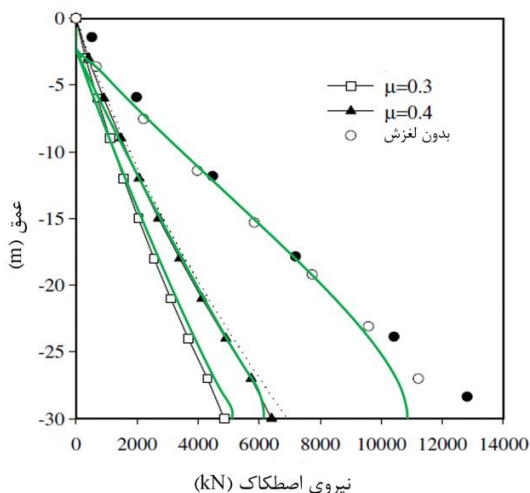
شکل ۵: فرایند بهینه‌سازی با الگوریتم زنبور عسل

۴- مدلسازی عددی

۴-۱- صحت‌سنجی نرم‌افزاری

به منظور کسب اطمینان از صحت مدل‌سازی انجام گرفته برای سیستم شمع، خاک پشت آن و اندرکنش آنها، ابتدا مدل ارائه شده

شکل ۷: تصویر شماتیک مدل بررسی شده در مرجع [۳۳]



شکل ۸: مقایسه نتایج مرجع [۳۳] و نتایج حاصل از مدل‌سازی در اپن‌سیس

نمودارهای شکل ۸ تغییرات نیروی اصطکاکی را در طول شمع در هر سه حالت تعریف‌شده فوق نشان می‌دهد. در این شکل خطوط ممتد (سبز رنگ) نتایج حاصل از نرم‌افزار اپن‌سیس می‌باشند. همانطور که مشاهده می‌گردد همخوانی خوبی بین نتایج بدست آمده از اپن‌سیس و نتایج مرجع [۳۳] در هر سه حالت تعریف شده وجود دارد.

۴-۲- روش مدل‌سازی و تحلیل مورد استفاده در این پژوهش

جزئیات سیستم سازه نگهبان مورد مطالعه به همراه متغیرهای طراحی مساله (جدول ۲ ملاحظه گردد) به صورت شماتیک در شکل ۲ آورده شده است. به دلیل تقارن هندسی مقطع گود، تنها نیمی از مقطع در نرم‌افزار مدل‌سازی می‌گردد. همچنین به منظور کاهش اثرات نامطلوب و غیر واقعی شرایط مرزی در رفتار دیواره جانبی گود و سازه نگهبان، خاک‌های اطراف مقطع مورد بررسی تا فاصله ۲۵ متری از المان شمع مدل‌سازی شده‌اند. ارتفاع مقطع به منظور در نظرگیری عمق مدفون شمع‌ها به صورت متغیر و برابر با $(25+X6)$ متر اختیار شده است که در آن $X6$ معرف عمق مدفون شمع در زیر زمین می‌باشد.

مدلسازی خاک با استفاده از المان‌های چهار گرهی مستطیلی *quad* در ابعاد ۰/۵ متر و با در نظرگیری دو درجه آزادی انتقالی انجام شده است. شرایط مرزی در محدوده انتهایی مقطع به صورتی تعریف شده‌اند که از حرکت قائم خاک در مرز پایین و حرکت افقی در

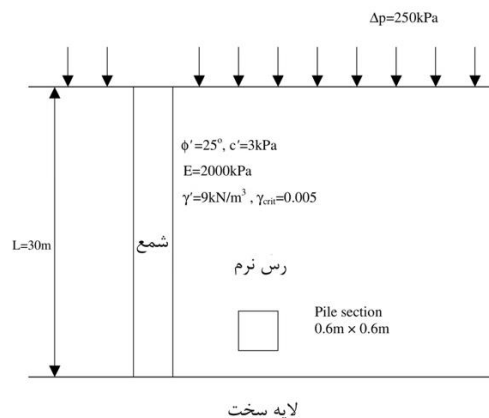
در مراجع [۳۲-۳۳] در نرم‌افزار اپن‌سیس مدل‌سازی شد و نتایج حاصله با نتایج متناظر مراجع فوق صحت‌سنجی گردید.

مدل مورد بررسی جهت صحت‌سنجی شامل یک لایه خاک به همراه یک شمع مدفون در آن است. شکل ۷ تصویر شماتیک مدل مورد بررسی را به همراه پارامترهای مختلف آن نشان می‌دهد. مرجع فوق به بررسی نیروی اصطکاکی که بین شمع و خاک اطراف آن اتفاق می‌افتد، می‌پردازد. برای این منظور علاوه بر خاک اطراف و سیستم شمع، اندرکنش خاک و سازه نیز مدل‌سازی می‌گردد. در نهایت نیروی اصطکاک بین شمع و خاک از رابطه (۵) و براساس تنش وارده بر جداره شمع محاسبه می‌شود.

$$P_D = 2\pi r \sigma_v \quad (5)$$

که در آن P_D معرف نیروی اصطکاکی، r شعاع شمع و σ_v تنش عمودی در جداره شمع می‌باشد.

شکل ۸ مقایسه نتایج حاصل از مدل‌سازی در نرم‌افزار اپن‌سیس را با نتایج مرجع فوق‌الذکر نشان می‌دهد. مدل‌سازی انجام شده به صورت دوبعدی و از نوع کرنش مسطح می‌باشد و در آن از المان‌های چهارضلعی برای مدل‌سازی خاک استفاده شده است. برای مدل‌سازی اندرکنش خاک - سازه مطابق مراجع [۳۲-۳۳] از سه حالت مختلف الف) با اصطکاک ۰/۳، ب) با اصطکاک ۰/۴ و پ) بدون لغزش استفاده شده است.



مرزهای طرفین اجتناب شود. خصوصیات رفتاری خاک‌های ماسه‌ای و رسی به ترتیب با دستورهای *PressureDependMultiYield02* و *PressureIndependMultiYield* در نرم‌افزار اپن‌سیس معرفی شده‌اند. پارامترهای مورد نیاز برای تعریف این رفتارها براساس مشخصات جدول ۱ و پیشنهادات ارائه شده در مرجع [۳۴] صورت گرفته است.

المان‌های شمع در نرم‌افزار مطابق فرآیند اجرایی آن در واقعیت مدلسازی شده‌اند. به این صورت که ابتدا المان‌های خاک واقع در موقعیت شمع با استفاده از دستور *remove* برداشته شده و سپس المان‌های شمع با دستور *element dispBeamColumn* تعریف شده‌اند. در این المان‌ها ۱۰ نقطه انتگرال‌گیری گائوس - لوباتو در نظر گرفته شده است و مقطع آنها با استفاده از دستور فایبر و اختصاص رفتارهای تنش - کرنش *uniaxialMaterial Concrete02* و *uniaxialMaterial Steel02* به ترتیب برای مصالح بتن و فولاد (میلگردهای داخل بتن، غلاف فولادی و استرات‌ها) شبیه‌سازی شده است. برای غلاف‌ها از فولادهای S۳۵۵ استفاده شده است که مقاومت تسلیم و نهایی آن به ترتیب برابر با ۳۵۵ و ۵۲۰ مگاپاسکال می‌باشد. همچنین مدول الاستیسیته آن برابر ۲۰۵ گیگاپاسکال است. بتن‌های مصرفی از رده C۲۵ هستند و رفتار تنش - کرنش آن‌ها مطابق رفتار محصور شده مندر تعریف شده است [۳۵]. میلگردها از رده S۴۰۰ با تنش تسلیم و نهایی ۴۰۰ و ۶۰۰ مگاپاسکال و مدول الاستیسیته ۲۰۵ گیگاپاسکال در نظر گرفته شده‌اند. سه درجه آزادی برای المان‌های شمع در نظر گرفته شده است و تنها درجه آزادی قائم آن در پایه المان مقید شده است.

اثر اندرکنش خاک و سازه با استفاده از روش لاگرانژ و تعریف رفتار *ContactMaterial2D* اعمال شده است. این رفتار بر روی المان *element BeamContact2D* تعریف می‌گردد. برای تعیین ضریب اصطکاک در مدل رفتاری فوق از رابطه (۶) استفاده شده است [۳۶-۳۷].

$$m = \tan(d) \quad (6)$$

$$d = \tan^{-1} \left(\sin j \cdot \frac{\cos j}{1 + \sin^2 j} \right) \quad (7)$$

استرات‌های سیستم مهار متقابل برای مقابله با نیروهای فشاری وارده از طرفین جداره گود، با مقطع مربعی توخالی و مصالح فولادی

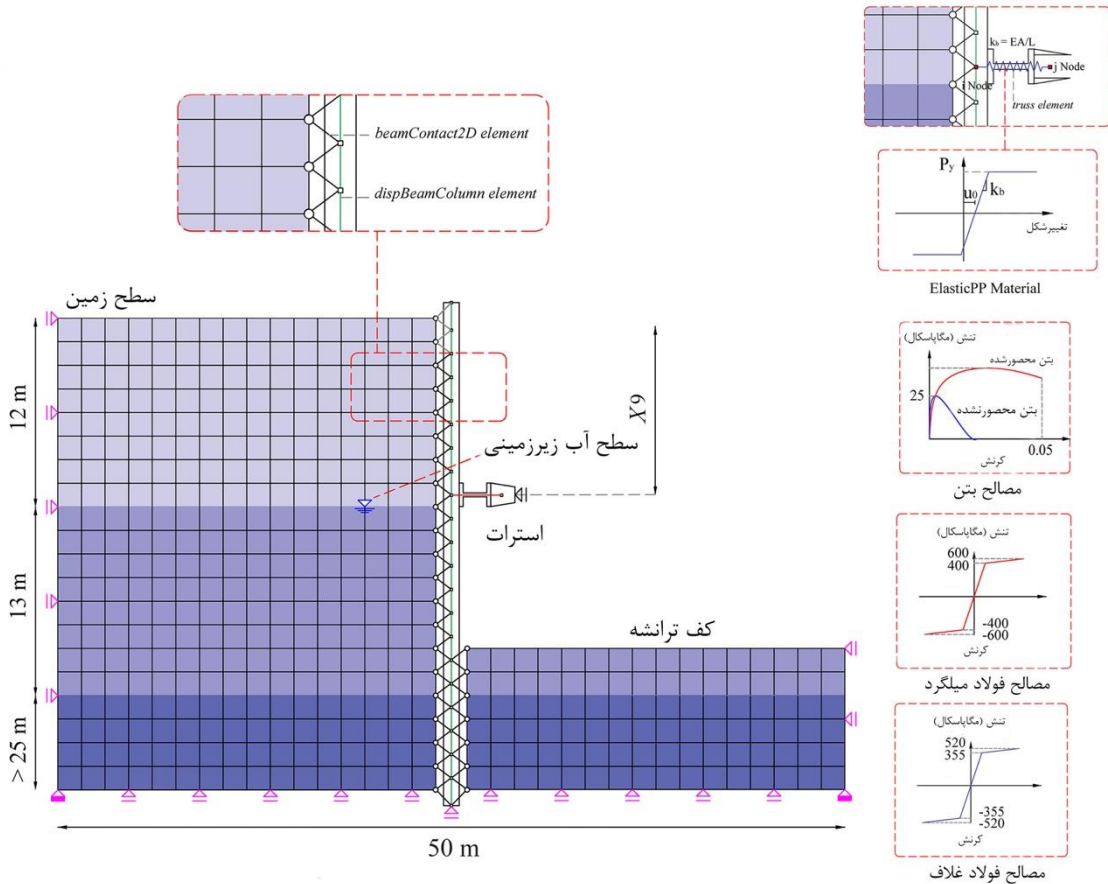
S۳۵۵ در نظر گرفته شده‌اند. طراحی استرات‌ها معمولاً به گونه‌ای است که در تمامی شرایط رفتار الاستیک داشته باشند تا موجب اختلال در عملکرد شمع‌ها نشوند؛ بنابراین، مدلسازی این عناصر در نرم‌افزار توسط المان‌های خریایی و اختصاص رفتار الاستیک *uniaxialMaterial ElasticPP* تعریف شده است. جزئیات مدلسازی مقطع و نحوه اعمال دستورات فوق در شکل ۹ نشان داده شده است. فشار سطح خاک در تحلیل‌ها برابر با مقدار ثابت ۵۰ کیلو نیوتن بر مترمربع و تاثیر فشار آب حفره‌ای با توزیع مثلثی در نظر گرفته شده‌اند.

به منظور شبیه‌سازی دقیق رفتار خاک در نرم‌افزار و شکل‌گیری تنش‌های اولیه در خاک، ابتدا یک تحلیل اولیه با در نظرگیری بارگذاری ثقلی انجام گرفت. به این ترتیب رفتار خاک مطابق واقعیت و به صورت عادی تحکیم‌یافته می‌گردد. تحلیل اولیه با استفاده از دستور *nDMaterial InitialStateAnalysisWrapper* انجام شد. در مرحله بعد با بروز رسانی رفتار خاک، حفاری آغاز گردید و مطابق با فرآیند اجرای گود در واقعیت، تحلیل‌های حفاری به صورت گام به گام و در ۲۲ مرحله انجام و تغییرشکل‌ها و تنش‌های جداره گود و المان‌های شمع در هر مرحله ارزیابی شد. در نهایت با اتمام مراحل خاکبرداری، مقطع مورد مطالعه مطابق شکل ۹ شده و تنش‌های خاک تنها توسط المان‌های شمع و استرات‌ها تحمل می‌گردد.

به منظور انجام فرایند بهینه‌سازی از اتصال نرم‌افزار اپن‌سیس و متلب برای بهره‌گیری از الگوریتم‌های فراابتکاری در طراحی سازه نگهبان ایستگاه موردنظر استفاده شده است. برای این منظور از چهار الگوریتم متداول یعنی الگوریتم ژنتیک، الگوریتم ازدحام ذرات، الگوریتم زنبورعسل و الگوریتم بهینه‌سازی مبتنی بر جغرافیای زیستی بهره گرفته شد. هدف از انتخاب الگوریتم‌های مختلف امکان مقایسه نتایج الگوریتم‌ها و تعیین بهترین پاسخ از میان آنها می‌باشد. مشخصات متغیرهای طراحی به همراه فضای جستجو (بازه تغییرات) آنها در جدول ۲ آورده شده است. بازه‌های در نظر گرفته شده در جدول ۲ براساس محدوده‌های منطقی پارامترها انتخاب شده‌اند. با توجه به اینکه الگوریتم‌های بهینه‌سازی معمولاً به صورت کمینه‌سازی عمل می‌کنند، لذا در این بخش از هزینه مصالح مصرفی به عنوان تابع هزینه بهینه‌سازی استفاده شده است. مقدار حداکثر گام‌های بهینه‌سازی برابر با ۴۰۰ در نظر گرفته شده است و این مقدار تعیین

است. بنابراین، در کل تعداد مدل‌های تحلیل شده برای دستیابی به مقادیر بهینه برابر (۴۰۰۰۰ = ۱۰۰ × ۴۰۰) است. حال با تکرار این عملیات در حدود ۵۰ بار، تعداد آنالیز کل ۵۰ برابر می‌شود که برابر ۲۰۰۰۰۰۰ است. در نهایت بهترین پاسخ از بین جواب‌های موجود بدست آمده به عنوان نتایج طراحی بهینه معرفی می‌گردد.

کننده پایان عملیات بهینه‌سازی می‌باشد. در واقع در هر یک از گام‌های بهینه‌سازی توسط ساز و کار ویژه هر الگوریتم به متغیرها مقدار دهی می‌شود، این مقادیر به نرم‌افزار اپن‌سیس منتقل شده و تحلیل استاتیکی براساس بارهای وارده انجام می‌گیرد. در نهایت خروجی حاصل از اپن‌سیس به متلب منتقل شده و عملیات ارزیابی براساس دستورالعمل خاص هر الگوریتم صورت می‌گیرد. در هر یک از الگوریتم‌ها میزان جمعیت اولیه برابر با ۱۰۰ در نظر گرفته شده

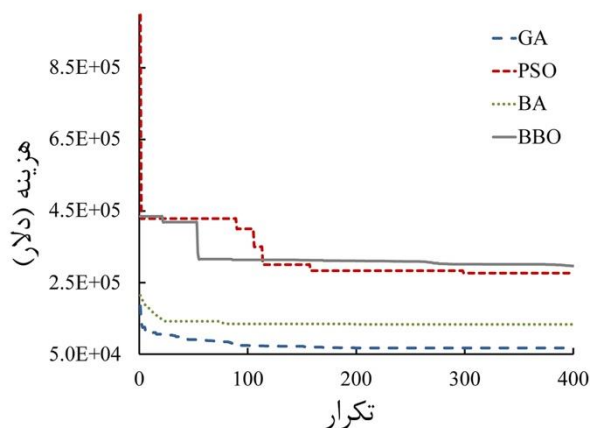


شکل ۹: جزئیات مدسازی در مقطع مورد بررسی

است. مقایسه نتایج نشان می‌دهد که استفاده از الگوریتم ژنتیک در روند طراحی سیستم سازه نگهبان منجر به ارائه طرح بهینه‌تری می‌گردد. براساس نتایج بدست آمده، هزینه طرح‌های حاصل از الگوریتم‌های ازدحام ذرات، مبتنی بر جغرافیای زیستی و زنبور عسل به ترتیب ۴/۱، ۴/۴ و ۲/۰ برابر هزینه متناظر بهترین طرح (یعنی طرح ارائه شده براساس الگوریتم ژنتیک) می‌باشد.

۵- نتایج

طراحی بهینه شم‌های سیستم سازه نگهبان ایستگاه شماره ۳ متروی تبریز براساس متغیرهای طراحی جدول ۲ و با استفاده از چهار الگوریتم فراابتکاری مبتنی بر جغرافیای زیستی، ژنتیک، ازدحام ذرات و زنبور عسل انجام گرفت. بهترین پاسخ‌های بدست آمده از ۵۰ تحلیل مجزا به همراه میانگین و انحراف معیار نتایج در جدول ۳ آورده شده



شکل ۱۰: مقایسه روند همگرایی سیستم مورد نظر براساس چهار الگوریتم

همانطور که در بخش ۴ نیز ذکر گردید، تحلیل ایستگاه مورد بررسی در ۲۲ مرحله انجام گرفته است. به این ترتیب که در مرحله صفر ابتدا تنش‌های برجا بر خاک اعمال گردید و سپس رفتار خاک از حالت الاستیک به حالت پلاستیک تبدیل شد. سپس حفاری در ۲۲ مرحله انجام گرفت که در هر مرحله ارتفاع ۱ متری خاک برداشته شد. به این ترتیب نرم‌افزار قادر خواهد بود در هر مرحله با شرایط جدید انطباق پیدا کند. لذا محاسبات عددی از دقت بالایی برخوردار می‌گردد. شکل ۱۱ تنش جانبی خاک در مرحله آخر گودبرداری برای سیستم سازه نگهبان طراحی شده براساس چهار الگوریتم مورد نظر را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌گردد تغییرات تنش جانبی در هر چهار طرح تا حد زیادی مشابه هم هستند و تغییرات اندک مشاهده شده به دلیل عمق‌های مدفون متفاوت شمع‌ها و همچنین محل‌های متفاوت قرارگیری استرات‌ها در روش‌های مختلف می‌باشد که برای الگوریتم‌های ژنتیک، ازدحام ذرات، زنبور عسل و الگوریتم بهینه‌سازی مبتنی بر جغرافیای زیستی به ترتیب برابر با ۳، ۱، ۲، ۳ و ۱۱/۷، ۱۳/۲، ۱۱/۷، ۱۴/۸ متر می‌باشند. ملاحظه می‌گردد که محل قرارگیری استرات‌ها در نحوه تغییر شکل شمع‌ها و در نتیجه در نحوه شکل‌گیری تنش‌های جانبی خاک تاثیر بسزایی دارد. به این صورت که نواحی متصل به استرات موجب تحمیل تنش موضعی بالایی به خاک پشتی می‌گردد؛ این درحالی است که فشار خاک قسمت‌های دیگر توسط تغییر شکل شمع تحمل می‌گردد و به دلیل امکان حرکت شمع حالت فعال در خاک ایجاد می‌شود که موجب کاهش تنش جانبی می‌گردد. این موارد در اشکال به ترتیب به با طیف‌های رنگی

شکل ۱۰ تغییرات تابع هزینه را در گام‌های مختلف بهینه‌سازی برای هر یک از الگوریتم‌ها نمایش می‌دهد. در این نمودار محور قائم معرف هزینه کل اجرای سازه نگهبان ایستگاه مورد نظر است و محور افقی تعداد تکرارها را نشان می‌دهد. نتایج مذکور به منظور کاهش تعداد ارقام و همچنین امکان مقایسه با نتایج متناظر پژوهش‌های قبلی [۲۵-۲۶] بر حسب دلار تنظیم شده‌اند.

جدول ۳: خلاصه نتایج تابع هدف در پروسه بهینه‌سازی

الگوریتم‌های بهینه‌سازی	هزینه (دلار)		
	انحراف معیار	میانگین نتایج	بهترین نتیجه
PSO	۱۲۵۴/۲۵	۲۹۴۴۳۱/۴۰	۲۷۶۵۹۳/۶۷
GA	۳۲۵/۳۵	۷۴۳۲۵/۹۳	۶۷۴۹۸/۸۳
BBO	۸۳۵/۰۵	۳۰۲۳۰/۱/۹۱	۲۹۶۴۲۷/۰۷
BA	۶۵۱/۰۱	۱۳۹۰۴۳/۵۴	۱۳۳۲۲۴/۹۸

مطابق شکل ۱۰، تعداد گام‌های طی شده در الگوریتم‌های ژنتیک، ازدحام ذرات، زنبور عسل و الگوریتم مبتنی بر جغرافیای زیستی برای دستیابی به پاسخ بهینه به ترتیب برابر با ۹۰، ۳۰۰، ۷۵ و ۲۸۰ می‌باشد. مشاهده می‌گردد که الگوریتم‌های بهینه‌سازی زنبور عسل و ژنتیک در کمترین و الگوریتم‌های بهینه‌سازی مبتنی بر جغرافیای زیستی و ازدحام ذرات در بیشترین گام به جواب بهینه رسیده‌اند. این امر نشان می‌دهد که الگوریتم ژنتیک علاوه بر عملکرد مناسب در ارائه نتایج بهینه‌تر، قابلیت همگرایی سریعی نیز دارد. مقادیر هر یک از متغیرهای طراحی در گام آخر فرآیند بهینه‌سازی و برای هر یک از الگوریتم‌های مورد بررسی در جدول ۴ آورده شده است.

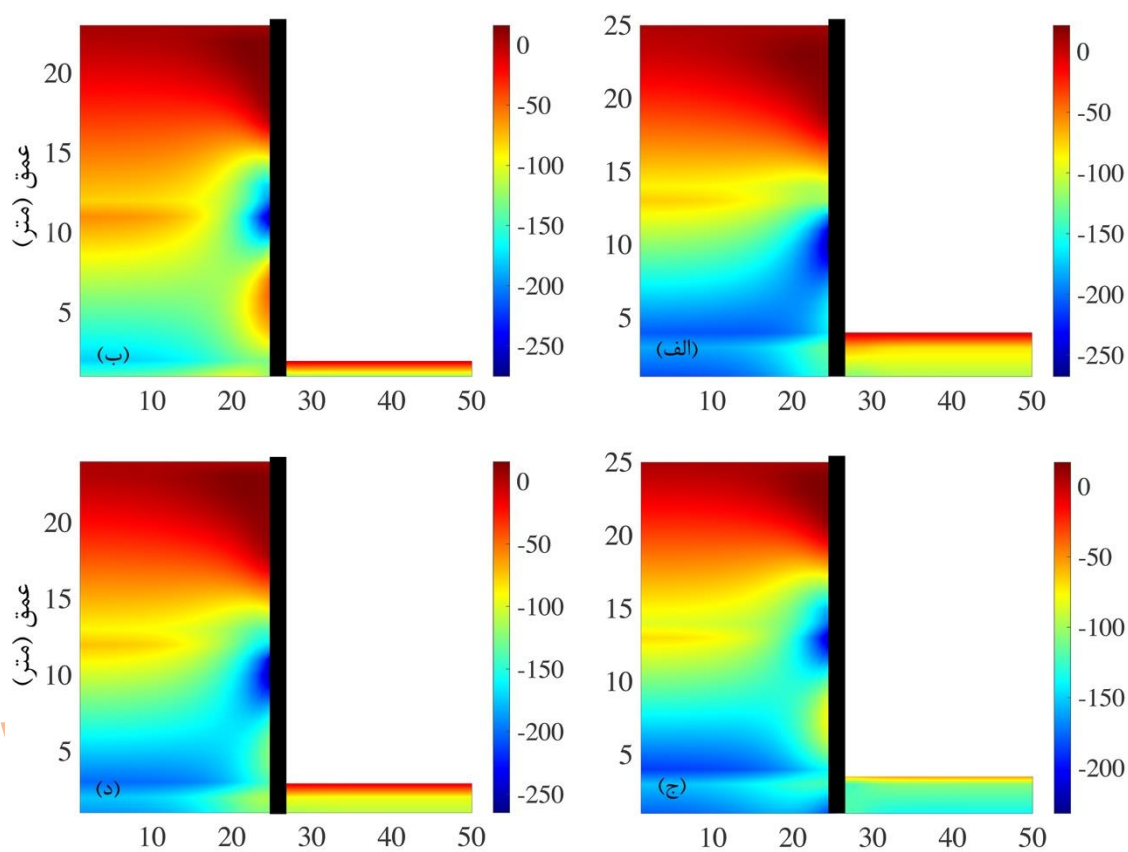
پیشرفت مراحل حفاری، تغییر شکل شمع افزایش می‌یابد و شمع‌ها تغییر شکل‌های ماندگاری را تجربه خواهند کرد. همچنین براساس نتایج بدست آمده مشاهده می‌گردد که وجود یک ردیف استرات برای نگهداری از سازه نگهبان مذکور در محدوده تغییر مکان داده شده کافی است و نیازی به استفاده از تعداد ردیف‌های بیشتر استرات نیست.

مقایسه نتایج بدست آمده با نتایج متناظر مطالعات قبلی [۲۵-۲۶] نشان می‌دهد که استفاده از شمع‌های مختلط موجب کاهش هزینه نسبت به حالت‌های استفاده از شمع‌های بتنی و فولادی توخالی می‌گردد. این کاهش با در نظرگیری هزینه شمع‌های بتنی و فولادی به ترتیب برابر با ۲ و ۱۰۲ درصد می‌باشند. علاوه بر پایین بودن هزینه اجرای شمع‌های مختلط، این شمع‌ها مزیت‌های دیگری نیز دارند که از جمله آنها می‌توان به راحتی اجرای آنها و عملکرد قالبی آنها برای بتن اشاره کرد؛ این در حالی است که در شمع‌های بتنی دیواره خاک به عنوان قالب عمل می‌کند و از کفایت پوشش بتن نمی‌توان اطمینان حاصل نمود. همچنین قطر شمع نیز در صورت استفاده از مصالح مختلط نسبت به حالت‌های قبل کاهش یافته است. با این وجود با توجه به در نظرگیری تغییر مکان مجاز یکسان در هر سه نمونه، توزیع تنش خاک و نحوه تغییر شکل شمع در تمامی سه حالت فوق تا حد زیادی مشابه هم هستند.

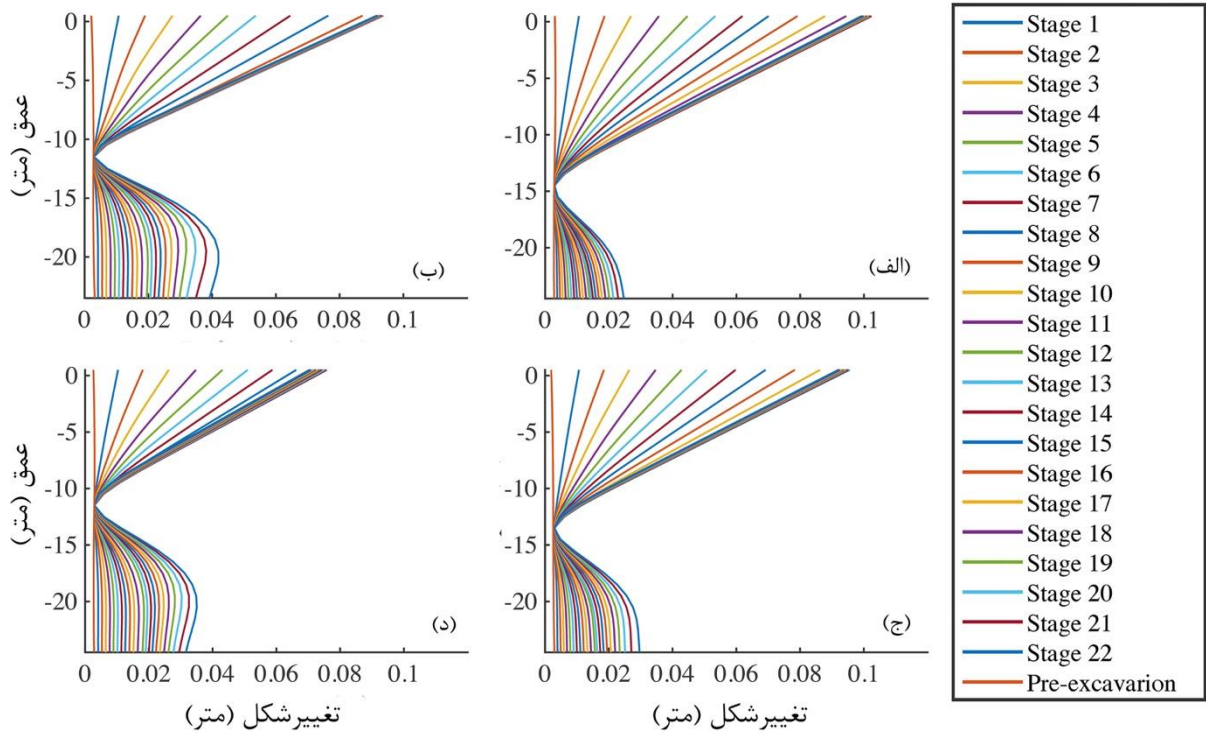
آبی و قرمز قابل مشاهده هستند. شایان ذکر است که در صورت شبیه‌سازی یک‌مرته‌ه خاکبرداری در نرم‌افزار، تاثیر مراحل مختلف گودبرداری قابل رصد نبوده و قابلیت اطمینان نتایج کمتر می‌باشد. روند تغییر شکل شمع‌ها در مراحل مختلف حفاری در شکل ۱۲ نشان داده شده است. کاهش عمق قرارگیری استرات‌ها موجب افزایش تغییر شکل قسمت تحتانی شمع‌ها خواهد شد و برعکس. بدیهی است که عمق مدفون شمع نیز در میزان تغییر شکل آن مخصوصاً در نواحی تحتانی تاثیر زیادی دارد؛ با این وجود افزایش بسیار زیاد آن موجب بیشتر شدن طول شمع مصرفی و هزینه تمام شده آن می‌گردد. بنابراین انتخاب نقطه مناسب برای نصب استرات‌ها از جهت ایجاد تعادل در تغییر شکل‌های نواحی فوقانی و تحتانی شمع از اهمیت بالایی برخوردار است. در نتایج بدست آمده از الگوریتم‌های مختلف مشاهده می‌گردد که در تمامی آنها عمق بهینه قرارگیری استرات‌ها تا حد زیادی مشابه می‌باشد. تغییر مکان بیشینه شمع‌ها برای منظور طراحی به ۱۰ سانتی‌متر محدود شده است. همانطور که ملاحظه می‌گردد حداکثر تغییر مکان در تمامی طرح‌ها در قسمت فوقانی آنها اتفاق افتاده است که با توجه به آزاد بودن انتهای شمع‌ها طبیعی به نظر می‌رسد. این نواحی همانطور که در شکل ۱۱ نیز مطرح شد باعث ایجاد حالت فعال در خاک پشتی شده که موجب کاهش تنش جانبی آن می‌گردد. در این شکل خط اول نشان‌گر تغییر شکل اندک اولیه شمع در اثر تنش‌های برجا می‌باشد و با

جدول ۴: مقادیر متغیرهای طراحی در گام آخر فرآیند بهینه‌سازی

الگوریتم بهینه‌سازی	X1 (m)	X2 (m)	X3	X4	X5 (m)	X6 (m)	X7 (m)	X8 (m)	X9 (m)	X10 (m)
PSO	۰/۹۳	۰/۰۱۹	۱۴	۲۸	۲/۹۵	۰/۶۰	۰/۰۳۶	۷/۳۷	۱۱/۷۲	۳
GA	۰/۶۴	۰/۰۲۴	۸	۱۶	۳/۹۷	۰/۷۰	۰/۰۲۰	۷/۴۲	۱۳/۱۹	۱
BBO	۱/۰۰	۰/۰۱۷	۸	۱۶	۴/۶۶	۰/۶۷	۰/۰۲۴	۶/۶۷	۱۱/۷۴	۲
BA	۰/۷۶	۰/۰۲۵	۱۰	۲۵	۳/۳۸	۰/۶۱	۰/۰۲۶	۶/۸۴	۱۴/۸۳	۳



شکل ۱۱: توزیع تنش خاک در دیواره گود در مرحله آخر فرآیند گودبرداری برای الگوریتم‌های: (الف) ازدحام ذرات، (ب) ژنتیک، (ج) زنبور عسل و (د) مبتنی بر جغرافیای زیستی.



شکل ۱۲: تغییر مکان شمع در مراحل مختلف گودبرداری برای الگوریتم‌های: (الف) ازدحام ذرات، (ب) ژنتیک، (ج) زنبور عسل و (د) مبتنی بر جغرافیای زیستی.

۶ - نتیجه‌گیری

در این مقاله، طرح بهینه سیستم سازه نگهبان ایستگاه شماره ۳ متروی تبریز با استفاده از شمع‌های مختلط فولادی - بتنی به همراه مهار متقابل فولادی مورد بررسی قرار گرفته است. به منظور انجام فرآیند بهینه‌سازی از تحلیل‌های استاتیکی بر روی مدل المان محدود مقطع مورد بررسی، استفاده شده است. برای این منظور از چهار الگوریتم بهینه‌سازی مبتنی بر جغرافیای زیستی، ژنتیک، ازدحام ذرات و زنبور عسل بهره گرفته شده است. تعداد ۱۰ متغیرهای طراحی در این مساله در نظر گرفته شده است که با کمینه کردن هزینه مصالح مصرفی تعیین می‌گردند. اهم نتایج بدست آمده به صورت زیر می‌باشد:

- ۱- از میان چهار الگوریتم استفاده شده، بهترین پاسخ بدست آمده مربوط به الگوریتم ژنتیک و با هزینه مصالح مصرفی برابر ۶۷۴۹۸/۸۳ دلار می‌باشد.

- ۲- عمق قرارگیری سیستم مهار متقابل و عمق مدفون شمع‌ها در توزیع تنش خاک و تغییر شکل المان شمع تاثیر زیادی دارد. عمق‌های مدفون شمع‌ها و عمق قرارگیری استرات‌ها در الگوریتم‌های ژنتیک، ازدحام ذرات، زنبور عسل و الگوریتم بهینه‌سازی مبتنی بر جغرافیای زیستی به ترتیب برابر با ۳، ۱، ۲، ۳ و ۱۱/۷، ۱۳/۲، ۱۱/۷، ۱۴/۸ متر بدست آمده است.
- ۳- وجود سیستم مهار متقابل موجب افزایش تنش خاک در ناحیه اتصال استرات‌ها با شمع می‌گردد. این در حالی است که در نواحی فوقانی به دلیل امکان جابجایی آزاد شمع و ایجاد وضعیت فعال در خاک میزان تنش‌ها حداقل است.
- ۴- مقایسه نتایج با مطالعات پیشین نشان می‌دهد که استفاده از شمع‌های مختلط نسبت به شمع‌های بتنی و فولادی هزینه

excavation in clays. Computers and Geotechnics, ۶۳, pp.۶۷-۷۲.

<https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2014.09.001>

۱۲. Gandomi, A.H., Kashani, A.R., Roke, D.A. and Mousavi, M., ۲۰۱۵. Optimization of retaining wall design using recent swarm intelligence techniques. Engineering Structures, ۱۰۳, pp.۷۲-۸۴.

<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2015.08.034>

۱۳. Khajehzadeh, M., Taha, M.R., El-Shafie, A. and Eslami, M., ۲۰۱۰. Economic design of retaining wall using particle swarm optimization with passive congregation. Australian Journal of Basic and Applied Sciences, ۴(۱۱), pp.۵۵۰-۵۵۰۷.

۱۴. Khajehzadeh, M. and Eslami, M., ۲۰۱۲. Gravitational search algorithm for optimization of retaining structures. Indian Journal of Science and Technology, ۵(۱), pp.۱۸۲۱-۱۸۲۷.

<https://doi.org/10.1۷۴۸۵/ijst/۲۰۱۲/v۵i1,۷>

۱۵. Ceranic, B., Fryer, C. and Baines, R.W., ۲۰۰۱. An application of simulate annealing to the optimum design of reinforced concrete retaining structures. Computers and Structures, ۷۹(۱۷), pp.۱۵۶۹-۱۵۸۱.

[https://doi.org/10.1016/S0045-7949\(01\)003۷۲-۲](https://doi.org/10.1016/S0045-7949(01)003۷۲-۲)

۱۶. Yepes, V., Alcalá, J., Perea, C. and Gonzalez-Vidoso, F., ۲۰۰۸. A parametric study of optimum earth-retaining walls by simulated annealing. Engineering Structures, ۳۰(۳), pp.۸۲۱-۸۳۰.

<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2007.05.023>

۱۷. Kaveh, A. and Shakouri, M.A.A., ۲۰۱۱. Harmony search based algorithm for the optimum cost design of reinforced concrete cantilever retaining walls. International Journal of Civil Engineering, ۹(۱), pp.۱-۸.

۱۸. Öztürk, H.T., Dede, T. and Türker, E., ۲۰۲۰. Optimum design of reinforced concrete counterfort retaining walls using TLBO, Jaya algorithm. Structures, ۲۵, pp.۲۸۵-۲۹۶.

<https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.03.020>

۱۹. Camp, C.V. and Akin, A., ۲۰۱۲. Design of retaining walls using big bang-big crunch optimization. Journal of Structural Engineering, ۱۳۸(۳), pp.۴۳۸-۴۴۸.

[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0000461](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000461)

۲۰. Kaveh, A., Biabani Hamedani, K. and Zaeerza, A., ۲۰۲۱. A set theoretical shuffled shepherd optimization algorithm for optimal design of cantilever retaining wall structures. Engineering with Computers, ۳۷, pp.۳۲۶۵-۳۲۸۲.

<https://doi.org/10.1007/s00366-020-0999-9>

۲۱. Kalemci, E.N., İkizler, S.B., Dede, T. and Angın, Z., ۲۰۲۰. Design of reinforced concrete cantilever retaining wall using Grey wolf optimization algorithm. Structures, ۲۳, pp.۲۴۵-۲۵۳.

<https://doi.org/10.1016/j.istruc.2019.09.013>

۲۲. Koopialipoor, M., Murlidhar, B.R., Hedayat, A., Armaghani, D.J., Gordan, B. and Mohamad, E.T., ۲۰۲۰. The

پایین‌تری داشته و همچنین از نظر اجرایی نیز عملکرد

بهتری دارند.

منابع

۱. Peck, R.B., ۱۹۶۹. Deep excavations and tunneling in soft ground. State of the art volume, ۷th ICSMFE, pp.۲۲۵-۲۹۰.

۲. Terzaghi, K., Peck, R.B. and Mesri, G., ۱۹۹۶. Soil mechanics in engineering practice. John Wiley & Sons.

۳. Chang, J.D. and Wong, K.S., ۱۹۹۶. Apparent pressure diagram for braced excavations in soft clay with diaphragm wall. In Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground, pp.۸۷-۹۲.

۴. Rechards Jr, R. and Elms, D.G., ۱۹۷۹. Seismic behavior of gravity retaining walls. Journal of the geotechnical engineering division, ۱۰۵(۴), pp.۴۹۹-۴۶۴.

<https://doi.org/10.1061/AJGEB6.0000783>

۵. Gazetas, G., Psarropoulos, P.N., Anastasopoulos, I. and Gerolymos, N., ۲۰۰۴. Seismic behaviour of flexible retaining systems subjected to short-duration moderately strong excitation. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, ۲۴(۷), pp.۵۳۷-۵۵۰.

<https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2004.02.005>

۶. Madabhushi, S.P.G. and Zeng, X., ۲۰۰۶. Seismic response of flexible cantilever retaining walls with dry backfill. Geomechanics and Geoengineering: An International Journal, ۱(۴), pp.۲۷۵-۲۸۹.

<https://doi.org/10.1080/17448620601039170>

۷. Qu, H.L., Luo, H., Liu, L. and Liu, Y., ۲۰۱۷. Analysis of dynamic coupling characteristics of the slope reinforced by sheet pile wall. Shock and Vibration, pp.۱-۱۰.

<https://doi.org/10.1155/2017/943518>

۸. Lin, Y.L., Cheng, X.M., Yang, G.L. and Li, Y., ۲۰۱۸. Seismic response of a sheet-pile wall with anchoring frame beam by numerical simulation and shaking table test. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, ۱۱۵, pp.۳۵۲-۳۶۴.

<https://doi.org/10.1016/j.sildyn.2018.07.028>

۹. Hashash, Y.M. and Whittle, A.J., ۱۹۹۶. Ground movement prediction for deep excavations in soft clay. Journal of geotechnical engineering, ۱۲۲(۶), pp.۴۷۴-۴۸۶.

[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)07339410\(1996\)122:6\(474\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)07339410(1996)122:6(474))

۱۰. Mu, L. and Huang, M., ۲۰۱۶. Small strain based method for predicting three-dimensional soil displacements induced by braced excavation. Tunnelling and Underground Space Technology, ۵۲, pp.۱۲-۲۲.

<https://doi.org/10.1016/j.tust.2015.11.001>

۱۱. Zhang, W., Goh, A.T. and Xuan, F., ۲۰۱۵. A simple prediction model for wall deflection caused by braced

۳۵. Mander, J.B., Priestley, M.J. and Park, R., ۱۹۸۸. Theoretical stress-strain model for confined concrete. *Journal of structural engineering*, ۱۱۴(۸), pp.۱۸۰۴-۱۸۲۶.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)07339445\(1988\)114:8\(1804](https://doi.org/10.1061/(ASCE)07339445(1988)114:8(1804)
۳۶. Randolph, M.F. and Wroth, C.P., ۱۹۸۱. Application of the failure state in undrained simple shear to the shaft capacity of driven piles. *Geotechnique*, ۳۱(۱), pp.۱۴۳-۱۵۷.
<https://doi.org/10.1680/geot.1981.31.1.143>
۳۷. Loukidis, D. and Salgado, R., ۲۰۰۸. Analysis of the shaft resistance of non-displacement piles in sand. *Géotechnique*, ۵۸(۴), pp.۲۸۳-۲۹۶.
<https://doi.org/10.1680/geot.2008.58.4.283>
- use of new intelligent techniques in designing retaining walls. *Engineering with Computers*, ۳۶, pp.۲۸۳-۲۹۴.
<https://doi.org/10.1007/s00366-018-0070-1>
۲۳. Aydogdu, I., ۲۰۱۷. Cost optimization of reinforced concrete cantilever retaining walls under seismic loading using a biogeography-based optimization algorithm with Levy flights. *Engineering Optimization*, ۴۹(۳), pp.۳۸۱-۴۰۰.
<https://doi.org/10.1080/0305215X.2016.1191837>
۲۴. Gordan, B., Koopialipoor, M., Clementking, A., Tootoonchi, H. and Mohamad, E., ۲۰۱۹. Estimating and optimizing safety factors of retaining wall through neural network and bee colony techniques. *Engineering with Computers*, ۳۵, pp.۹۴۵-۹۵۴.
<https://doi.org/10.1007/s00366-018-0642-2>
۲۵. Taiyari, F., Kharghani, M. and Hajihassani, M., ۲۰۲۰. Optimal design of pile wall retaining system during deep excavation using swarm intelligence technique. *Structures*, ۲۸, pp.۱۹۹۱-۱۹۹۹.
<https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.10.044>
۲۶. Taiyari, F., Hajihassani, M. and Kharghani, M., ۲۰۲۲. Efficiency of the evolutionary methods on the optimal design of secant pile retaining systems in a deep excavation. *Neural Computing and Applications*, ۳۴(۲۲), pp.۲۰۳۱۳-۲۰۳۲۵.
<https://doi.org/10.1007/s00521-022-07591-w>
۲۷. Iranian National Building Codes Compilation Office, ۲۰۲۰. Iranian National Building Code, Part ۹: Reinforced Concrete Buildings Design, Ministry of Housing and Urban Development (MHUD).
۲۸. Goldberg, D.E., ۲۰۱۰. Genetic algorithms in search, Optimization and machine learning. MA: Addison-Wesley, Reading.
۲۹. Kennedy, J. and Eberhart, R., ۱۹۹۵. Particle swarm optimization. In *Proceeding of the ICNN'۹۵-international conference on neural networks*, ۴, pp.۱۹۴۲-۱۹۴۸.
۳۰. Pham, D.T., Ghanbarzadeh, A., Koc, E., Otri, S., Rahim, S. and Zaidi, M., ۲۰۰۶. The bees Algorithm-a novel tool for complex optimization problems. In *Intelligent production machines and systems*, pp. ۴۵۴-۴۵۹.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-08-045157-2/50081-X>
۳۱. Simon, D., ۲۰۰۸. Biogeography-Based Optimizatio. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, ۱۲(۶), pp.۷۰۲-۷۱۳.
۳۲. Jeong, S., ۱۹۹۲. Nonlinear three-dimensional analysis of downdrag on pile groups. PhD thesis, Texas A&M University.
۳۳. Jeong, S., Lee, J. and Lee, C.J., ۲۰۰۴. Slip effect at the pile-soil interface on dragload. *Computers and Geotechnics*, ۳۱(۷), pp.۱۱۵-۱۲۶.
<https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2004.01.009>
۳۴. Yang, Z., Lu, J. and Elgamal, A., ۲۰۰۸. OpenSees soil models and solid-fluid fully coupled elements. user's manual, ۱(۲۷).