



Sharif University of Technology

<https://sjce.journals.sharif.edu>



Research Note

Evaluation of the Efficiency of Metaheuristic Algorithms in the Optimal Design of Pile Wall Retaining Systems

Farshad Taiyari *

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

* corresponding author:(f-taiyari@tvu.ac.ir)

Article Info

Article history:

Received: 25 December 2023

Revised: 11 February 2024

Accepted: 3 March 2024

Keywords:

Metaheuristic algorithm,
optimal design,
deep excavation,
Pile wall retaining system.

Abstract

The effectiveness of the application of metaheuristic algorithms in the optimal design of retaining structures is investigated in this paper. For this purpose, an ongoing 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 a 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 the OpenSees platform, including all the construction processes, 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 that should be minimized in the design space of the variables. For optimization purposes, an integration of the OpenSees software with the 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 400, which is also considered a termination criterion. The optimization process is performed 50 times, and the best response is reported here. The results demonstrate an excellent performance of the Genetic algorithm in obtaining the optimum solution with respect to the 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 an active situation for the soil. This is true considering the results of all algorithms. Proceeding with the excavation phase increases the soil stress as well as the pile deformation. It can also be obtained that providing a layer of strut seems necessary for reducing pile movements as well as their buried depth.

Funding

This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

Conflicts of interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

To Cite this article:

Taiyari, F. 2025. Evaluation of the Efficiency of Metaheuristic Algorithms in the Optimal Design of Pile Wall Retaining Systems, Sharif Civil Engineering Journal, 41, 1, pp.59-71. <https://doi.org/10.24200/J30.2024.63750.3285>

E-ISSN: 2676-4776 © 2025 The Author(s). Sharif Civil Engineering Journal, Publish by Sharif University of Technology

This is an open access article under the [CC-BY 4.0 license](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).



ارزیابی عملکرد الگوریتم‌های فراابتکاری در طراحی بهینه‌ی شمع‌های سازه‌ی نگهبان ترانشه‌های عمیق

فرشاد طیاری

گروه مهندسی عمران، دانشگاه ملی مهارت، تهران، ایران.
(f-taiyari@tvu.ac.ir)

چکیده

در نوشتار حاضر به بررسی تأثیر الگوریتم‌های فراابتکاری در طراحی بهینه‌ی شمع‌های سازه‌ی نگهبان ایستگاه شماری ۳ متروی تبریز پرداخته شده است. برای این منظور، ابتدا ترانشه‌ی موردنظر در نرم‌افزار آپن‌سیس مدل‌سازی و فرآیند گام به گام خاک‌برداری آن، مطابق روند اجرایی، شبیه‌سازی شده است. چهار الگوریتم فراابتکاری متداول، یعنی الگوریتم‌های مبتنی بر جغرافیای زیستی، ژنتیک، ازدحام ذرات، و زنبور عسل برای طراحی بهینه استفاده شده‌اند، تا علاوه بر مقایسه‌ی عملکرد هر یک در حل مسئله‌ی مذکور، احتمال دستیابی به بهترین پاسخ افزایش یابد. نتایج به‌دست‌آمده حاکی از عملکرد بسیار خوب الگوریتم ژنتیک نسبت به سایر الگوریتم‌های استفاده‌شده در دستیابی به طرح بهینه بوده است. به‌منظور بررسی بهتر، توزیع تنش خاک در اطراف سازه‌ی نگهبان و همچنین تغییر شکل المان‌های شمع بررسی شده و نتایج نشان داده‌اند که استفاده از مهار متقابل جهت ایجاد تعادل تغییر شکل‌های قسمت فوقانی و تحتانی شمع‌ها و کاهش عمق مدفون المان‌های شمع ضروری به‌نظر می‌رسد.

اطلاعات مقاله

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۰/۰۴
تاریخ اصلاحیه: ۱۴۰۲/۱۱/۲۲
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۲/۱۳

واژگان کلیدی:

الگوریتم فراابتکاری،
طراحی بهینه،
ترانشه‌ی عمیق،
سازه‌ی نگهبان،
شمع‌های درجا.

۱. مقدمه

امروزه به سبب توسعه‌ی روزافزون شهرها، افزایش تراکم جمعیت و به تبع آن کمبود زمین و قیمت قابل توجه آن، ساخت‌وسازهای زیرزمینی رونق بیشتری یافته‌اند؛ که به موجب آن، نیاز به گودبرداری و ایجاد ترانشه‌های قائم در نقاط پرتراکم شهری بیش از پیش احساس می‌شود.

به‌طور کلی گودبرداری‌ها به دو دسته‌ی حفاظت‌شده (مهاربندی‌شده) و حفاظت‌نشده تقسیم می‌شوند. در گودبرداری‌های حفاظت‌نشده، پایداری شیب‌ها و یا جداره‌های قائم گودبرداری‌ها بدون استفاده از سیستم مهاربندی الحاقی، توسط شرایط مکانیکی خاک تأمین می‌شود؛ حال آنکه در صورت عدم کفایت مقاومت برشی خاک در مقابل نیروهای وارده، مقاومت لازم توسط سیستم مهاربندی موسوم به سازه‌ی نگهبان تأمین می‌شود، که از جمله مرسوم‌ترین آن‌ها می‌توان به شمع‌های درجا اشاره کرد. سیستم شمع‌های درجا براساس قرارگیری تعدادی از المان‌های شمع در یک ردیف تعریف می‌شوند؛ که به‌صورت مدفون در زمین قرار می‌گیرند و برای مقابله با لغزش خاک پشتی طراحی می‌شوند.

یکی از مسائل مهم در طراحی سیستم شمع‌ها، علاوه بر توجیه اقتصادی، تأمین قابلیت اعتماد مناسب در طراحی آن‌هاست. امروزه بیشتر سیستم‌های سازه‌ی

نگهبان براساس روش دیاگرام طراحی می‌شوند؛^[۱] که توسط چنگ و ونگ^[۲] (۱۹۹۶)،^[۳] برای استفاده در خاک‌های رسوبی اصلاح شده است. با وجود این، نتایج بررسی‌های انجام‌گرفته در نوشتار اخیر، بر روی روش دیاگرام حاکی از پایین‌بودن نیروهای اولیه‌ی طراحی نسبت به حالت واقعی آن است. علاوه بر این، روش ساده‌شده‌ی ریچاردز و المس^[۴] (۱۹۷۹)،^[۵] نیز به منظور طراحی لرزه‌ای شمع‌ها استفاده می‌شود. براساس روش اخیر می‌توان میزان نیروی زلزله را به صورت بار استاتیکی جانبی معادل تخمین زد. در سال‌های اخیر، پژوهش‌های بسیاری به‌منظور بررسی رفتار لرزه‌ای شمع‌های مختلف و ارزیابی روش ذکرشده صورت گرفته است. به عنوان مثال، در نوشتار گازیتاس^[۶] و همکاران (۲۰۰۴)،^[۷] رفتار لرزه‌ای شمع‌ها در برابر زمین‌لرزه‌های با زمان تناوب کوتاه بررسی شده است. نتایج به‌دست‌آمده حاکی از دقت پایین روش مذکور در استخراج رفتار لرزه‌ای شمع‌ها در مقایسه با بهره‌گیری از تحلیل‌های دقیق است. مطالعه‌ی مادابھوشی و زنگ^[۸] (۲۰۰۶)،^[۹] نیز در این زمینه نشان می‌دهد که در هنگام زمین‌لرزه، لنگر خمشی شدیدی در سازه‌های نگهبان ایجاد می‌شود، که آثار آن در محاسبات استاتیکی منظور نمی‌شود. کو^[۱۰] و همکاران (۲۰۱۷)،^[۱۱] مدلی برای ارزیابی شمع‌های صفحه‌ای پیشنهاد کرده‌اند که قادر به تخمین نیروهای اندرکنشی بین سازه و خاک براساس مقادیر مختلف بیشینه‌ی شتاب زمین است. لین^[۱۲] و همکاران (۲۰۱۸)،^[۱۳] در مطالعه‌ای به بررسی رفتار لرزه‌ای

⁴ Madabhushi & Zeng

⁵ Qu

⁶ Lin

¹ Chang & Wong

² Rechards & Elms

³ Gazetas



بسزایی دارند. گندمی و همکاران (۲۰۱۵)^[۱۲] طرح بهینه‌ی دو سازه‌ی حائل طره‌ای را براساس روش‌های هوش دسته‌جمعی ارائه داده‌اند. آیدوقلو^۵ (۲۰۱۷)^[۲۳] از یک روش جدید بهینه‌سازی بر مبنای جغرافیای زیستی و ترکیب آن با الگوریتم دیگر برای طراحی بهینه‌ی دیوارهای حائل طره‌ای تحت شرایط لرزه‌ای استفاده کرده است. همچنین بهینه‌سازی ضریب اطمینان دیوارهای حائل با استفاده از روش‌های بهینه‌سازی نوین توسط گردان^۶ و همکاران (۲۰۱۹)^[۲۴] انجام شده است. برای این منظور، ایشان ضریب اطمینان دیوارهای حائل را تحت بارگذاری‌های استاتیکی و دینامیکی ارزیابی کرده‌اند. سرانیک^۷ و همکاران (۲۰۰۱)^[۱۵] و پیس^۸ و همکاران (۲۰۰۸)^[۱۶] هزینه‌ی طراحی دیوارهای حائل طره‌ای بتنی مسلح را با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی کمینه ساخته‌اند. علاوه بر مطالعات مذکور، اخیراً پژوهش‌هایی در رابطه با تعیین طرح بهینه‌ی سیستم‌های سازه‌ی نگهبان با شمعی‌های درجای بتنی و فولادی نیز توسط طیار^۹ انجام شده است؛^[۲۵ و ۲۶] که در آن‌ها و در پژوهش حاضر، قسمت‌های مختلف سازه‌های نگهبان و خاک‌های اطراف آن در نرم‌افزار المان محدود دقیقاً مدل شده و بهینه‌سازی بر مبنای مدل‌سازی واقعی صورت گرفته است. این در حالی است که اغلب مطالعات پیشین بر روی سیستم‌های دیوار حائل طره‌ای و براساس روابط طراحی ساده‌سازی‌شده‌ی آن‌ها در آیین‌نامه‌های طراحی استوار بوده است. علاوه بر این، به دلیل نبود چنین روابطی برای شمعی‌های سازه‌ی نگهبان و لزوم مدل‌سازی دقیق آن‌ها، بهینه‌سازی آن‌ها تا کنون صورت نگرفته است و به نظر می‌رسد که توسعه‌ی چنین روش‌هایی با بهره‌گیری از مدل‌سازی‌های دقیق و منطبق با شرایط واقعی برای سیستم‌های مذکور و سیستم‌های مختلف دیگری، که روابط طراحی صریحی ندارند، ضروری باشد.

در مطالعه‌ی حاضر، از الگوریتم‌های مختلف بهینه‌سازی برای دستیابی به طرح بهینه‌ی سازه‌ی نگهبان ایستگاه ۳ متروی تبریز استفاده شده است. سازه‌ی نگهبان ایستگاه ۳ به صورت سیستم مهار متقابل فولادی به همراه المان‌های شمعی قائم است. در پژوهش حاضر، از شمعی‌های کامپوزیت شامل غلاف فولادی و هسته‌ی بتنی مسلح به عنوان المان‌های قائم استفاده شده است. به منظور انجام پروسه‌ی بهینه‌سازی از چهار الگوریتم متداول فراابتکاری، یعنی الگوریتم‌های ژنتیک، ازدحام ذرات، زنبورعسل، و بهینه‌سازی بر مبنای جغرافیای زیستی استفاده شده است، تا میزان اثربخشی هر یک از آن‌ها برای حل مسئله‌ی حاضر سنجیده شود و نیز از معیار هزینه‌ی مصالح به عنوان تابع هدف استفاده شده است. به این ترتیب که به ازاء گستره‌ای از مقادیر معقول پارامترهای طراحی سیستم سازه‌ی نگهبان، تابع هدف تعیین و آن مقادیری که منجر به ارائه‌ی سیستمی با کمترین میزان هزینه شود، به عنوان متغیرهای بهینه انتخاب شده‌اند. برای این منظور، قطر خارجی شمعی، ضخامت غلاف فولادی، تعداد و نمره‌ی آرماتورهای طولی هسته‌ی بتنی، فاصله‌ی مرکز به مرکز شمعی‌ها، ابعاد، ضخامت، عمق قرارگیری و فاصله‌ی استرات‌ها، و همچنین عمق مدفون شمعی به عنوان متغیرهای طراحی در نظر گرفته شده‌اند.

۲. مشخصات کلی خط ۲ قطار شهری تبریز

خط ۲ قطار شهری تبریز از محل کارخانه‌ی کود آلی در غرب شهر آغاز می‌شود

سازه‌های نگهبان شمعی‌های صفحه‌ای انکرشده پرداخته‌اند؛ که در آن رفتار شمعی‌ها براساس مدل‌سازی عددی و آزمایش میز لرزان ارزیابی و مود خرابی آن‌ها در زلزله‌های مختلف بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهند که انکرها در زمان‌های ابتدایی وقوع زلزله خراب می‌شوند و تنش محوری آن‌ها با افزایش دامنه‌ی زمین‌لرزه افزایش می‌یابد. همچنین مطالعات نشان می‌دهند که علاوه بر ملاحظات نیرویی، باید به تغییرمکان سازه‌های نگهبان نیز در طراحی توجه کرد. تغییرمکان زیاد موجب لغزش و جابجایی بیشتر خاک و سازه‌ی روی آن می‌شود، که منجر به وقوع نشست، ترک خوردگی، و حتی خرابی سازه‌ها می‌شود. برای این منظور غالباً در آیین‌نامه‌های طراحی، مقدار بیشینه‌ی تغییرمکان سازه‌های نگهبان به درصدی از ارتفاع آن‌ها محدود می‌شود؛ که مقدار آن به عمق حفاری، سختی سازه‌ی نگهبان، و مشخصات خاک محل بستگی دارد.^[۹] در سال‌های اخیر، روش‌های مختلفی برای تخمین تغییرمکان در سیستم‌های مختلف سازه‌های نگهبان ارائه شده است. از جمله مو^۱ و همکاران (۲۰۱۶)^[۱۰]، روش جدیدی بر مبنای کرنش‌های کوچک برای تخمین میزان جابجایی گودهای مهاربندی‌شده با سازه‌ی نگهبان ارائه داده‌اند. براساس مطالعات آن‌ها جابجایی گود یکی از پارامترهای کلیدی در طراحی سازه‌های نگهبان است و مقدار آن براساس میزان جابجایی مجاز خاک زیر سازه‌های اطراف گود به دست می‌آید. ژنگ^۲ و همکاران (۲۰۱۵)^[۱۱] نیز توانسته‌اند براساس مطالعات عددی سازه‌های نگهبان بر روی خاک‌های رسی، روش تخمینی ساده‌ای را برای تعیین جابجایی آن‌ها ارائه دهند.

با توجه به اینکه بیشتر مسائل ژئوتکنیکی به صورت مسائل چندمتغیره هستند، لذا یافتن پاسخ‌های بهینه براساس روش‌های کلاسیک در بیشتر مواقع امکان‌پذیر نیست. با وجود این، استفاده از روش‌های بهینه‌سازی فراابتکاری در طراحی مسائل ژئوتکنیکی بسیار موفق عمل کرده و در سال‌های اخیر بیش از پیش مورد توجه محققان و پژوهشگران قرار گرفته است. این الگوریتم‌ها قادر هستند تا فضای جستجوی وسیعی را برای یافتن پاسخ بهینه‌ی موردنظر ارزیابی کنند. با وجود این، پاسخ بهینه‌ی به دست آمده از آن‌ها به دلیل ماهیت جستجوی تصادفی آن‌ها ممکن است متضمن دستیابی به پاسخ بهینه‌ی کلی نباشد. بنابراین توصیه می‌شود که برای حل یک مسئله‌ی مشخص از چندین روش مختلف بهینه‌سازی استفاده شود.^[۱۲]

اخیراً مطالعات بسیاری برای ارائه‌ی طرح بهینه‌ی سیستم‌های سازه‌ی نگهبان از جمله دیوارهای حائل تحت الگوریتم‌های مختلف بهینه‌سازی، از جمله: الگوریتم ازدحام ذرات، الگوریتم جستجوی گرانشی، روش بهینه‌سازی CO₂، روش کلونی، الگوریتم هارمونی تطابقی، و چند الگوریتم بهینه‌سازی دیگر انجام شده است.^[۲۰-۲۲] کالمسی^۳ و همکاران (۲۰۲۰)^[۲۱] از روش بهینه‌سازی گرگ خاکستری برای طراحی دیوار حائل طره‌ای بتنی مسلح با استفاده از روابط طراحی ارائه‌شده بر مبنای آیین‌نامه‌ی آمریکا بهره گرفته‌اند. کوپالی‌پور^۴ و همکاران (۲۰۲۰)^[۲۲] یک الگوریتم جدید هوشمند برای طراحی بهینه‌ی دیوارهای حائل ارائه و در آن 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 کرده‌اند، که در تعیین رفتار دیوارهای حائل تأثیر

⁶ Gordan

⁷ Ceranic

⁸ Yepes

⁹ Taiyari

¹ Mu

² Zhang

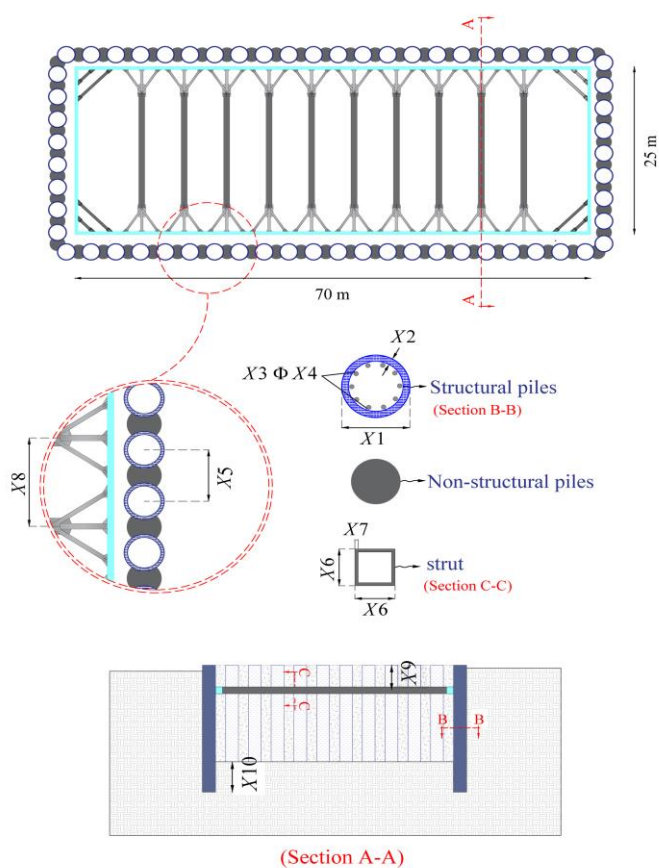
³ Kalemci

⁴ Koopialipoor

⁵ Aydogdu



شکل ۱. موقعیت ایستگاه بررسی شده.



شکل ۲. جزئیات سیستم سازه‌ی نگهبان استفاده شده در پژوهش حاضر.

جدول ۱. پارامترهای ژئوتکنیکی خاک در محدوده‌ی ایستگاه بررسی شده.

Bulk modulus (MPa)	Shear modulus (MPa)	Friction angle (°)	Cohesion (kPa)	Weight density (kN/m ³)	Thickness (m)	Soil group	Layer
30303	7194	22	15	16.5	12	CL-ML	1
38889	12963	27	15	19.5	13	SM-ML	2
43860	19084	31	20	19.5	14	SM-ML	3

و پس از عبور از مرکز شهر در محل نمایشگاه بین‌المللی، واقع در میدان بسیج، در بخش شرقی شهر به پایان می‌رسد. مسیر عبوری خط ۲ با ۲۰ ایستگاه مشابه، به طول تقریبی ۲۲/۴ کیلومتر است. پژوهش حاضر به تحلیل و طراحی بهینه‌ی سازه‌ی نگهبان ایستگاه ۳ در خط ۲ قطار شهری تبریز پرداخته است، که در غرب تقاطع خیابان‌های خطیب و قدس (آخونی) قرار دارد (شکل ۱). همان‌طور که مشخص است، زمین ایستگاه در منطقه‌ی 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 × ۲۵ متر است و تراز ریل در عمق ۲۲ متری از سطح زمین قرار دارد. برای پایدارسازی دیواره‌ی گودبرداری از روش مهار متقابل به همراه سیستم شمع استفاده شده است. اجرای این سیستم در چند فاز مختلف انجام می‌گیرد؛ به این صورت که ابتدا شمع‌ها در طولی به میزان (۲۲+X۶) متر در تمامی دیواره‌های گود اجرا می‌شوند، که در آن X۶ 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 X۵، سیستم مهار متقابل برای کاهش میزان تغییر مکان جانبی شمع‌ها نصب می‌شود. جزئیات آرایش المان‌های شمع و سیستم مهار متقابل در شکل ۲ مشاهده می‌شود. همچنین نتایج مطالعات ژئوتکنیکی خاک محل در جدول ۱ ارائه شده است. شایان ذکر است که سطح آب زیرزمینی در تراز ۱۲ متری زیر سطح زمین قرار دارد.

۳. روند بهینه‌سازی

در حالت کلی، روند بهینه‌سازی به‌منظور تعیین بهترین راه‌حل از میان تمامی راه‌حل‌های موجود تعریف می‌شود. در این رویکرد از کمینه‌سازی یک تابع هدف $f(x)$ در حضور محدودیت‌های خاص اعمال شده برای مسئله‌ی موردنظر استفاده می‌شود. این محدودیت‌ها در حالت کلی به سه دسته‌ی: قیدهای نامساوی $(g(x))$ ، قیدهای مساوی $(h(x))$ ، و محدوده‌های بیشینه و کمینه‌ی مقادیر متغیرها $(U$ و $L)$ مطابق رابطه‌ی ۱ تعریف می‌شوند.

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

۱.۳. تعریف تابع هدف

تابع هدف باید به گونه‌ای انتخاب شود که بتواند بازگوکننده‌ی شرایط واقعی حاکم بر مسئله باشد. در پژوهش حاضر از هزینه‌ی مصالح مصرفی به‌عنوان تابع هدف بهینه‌سازی مطابق رابطه‌ی ۲ استفاده شده است:

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

که در آن، W_s وزن مصالح فولادی استفاده‌شده در استرات‌ها و غلاف‌های فولادی شمع‌ها، W_b وزن میلگردهای مسلح‌کننده‌ی بتن شمع، V_c حجم بتن مصرفی در شمع، و پارامترهای c_s ، c_b و c_c ضرایب متناظر واحد هزینه‌ی مصالح مصرفی هستند.

۲.۳. تعریف قیدها

قیدهای مسئله در حالت کلی به دو صورت قیدهای رفتاری و هندسی تقسیم می‌شوند. قیدهای رفتاری، در واقع بیانگر ظرفیت برشی و خمشی شمع‌ها، مقاومت واژگونی، و ظرفیت لغزشی آن‌ها هستند، که باید کمتر از مقدار مجاز تعیین‌شده براساس آیین‌نامه باشند.^[۲۷] علاوه بر این، قیدهای هندسی نیز شرایط مرزی مسئله را مشخص می‌کنند. در واقع، قیدهای هندسی، بیانگر حد بالا و پایین مقادیر متغیرهای مسئله هستند. قیدهای هندسی استفاده‌شده در نوشتار حاضر در جدول ۲ ارائه شده‌اند.

۳.۳. الگوریتم‌های بهینه‌سازی

۱.۳.۳. الگوریتم ژنتیک

ایده‌ی استفاده از الگوریتم ژنتیک در بهینه‌سازی مهندسی، ابتدا در دهه‌ی هفتاد میلادی توسط جان هالند و بر پایه‌ی اصول انتخابی داروین مطرح شد و سپس در سال ۲۰۱۰ توسط دیوید گلدبرگ^[۲۸] گسترش یافت. اساس کار الگوریتم ژنتیک بر پایه‌ی انتقال خصوصیات موروثی ژن‌های یک نسل به نسل دیگر توسط کروموزوم‌های آن‌هاست. نسل اول، که انتقال‌دهنده‌ی 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

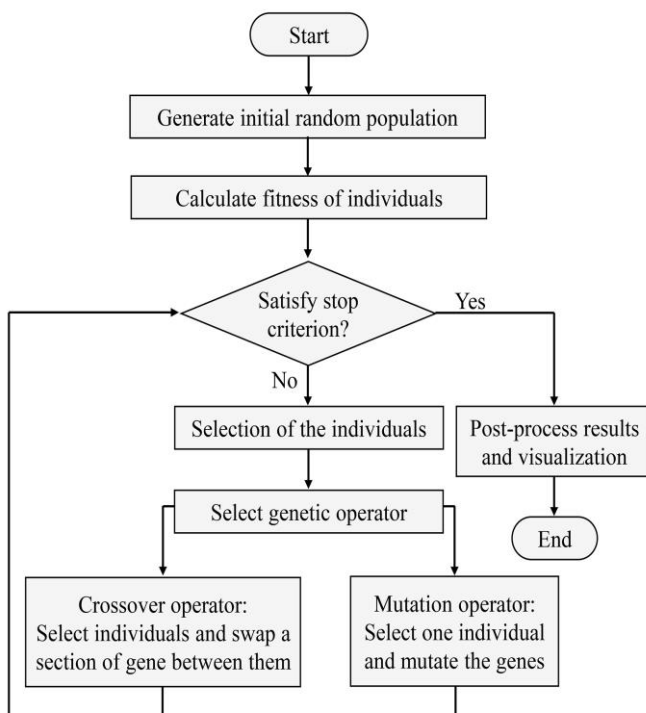
حالتی در واقعیت به دلیل وجود دو رخداد اتفاق نمی‌افتد. رخداد اول، جهش است که در آن مشخصات برخی ژن‌ها به صورت کاملاً تصادفی تغییر می‌یابند. در این حالت خصوصیات فرزندان مشابه هیچ‌یک از خصوصیات والدین نخواهد بود. رخداد دیگر، که احتمال وقوع آن بسیار بیشتر است، چسبیدن ابتدای یک کروموزوم به انتهای کروموزوم 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 شبیه‌شدن فرزند به فقط یکی از والدین جلوگیری می‌شود. بهینه‌سازی در الگوریتم ژنتیک، یک روند تصادفی هدایت‌شده است. در این روش، ابتدا مجموعه‌ای از پارامترهای طراحی به صورت کاملاً اتفاقی برای یک جمعیت اولیه (والدین) و در فضای جستجوی معرفی‌شده اختصاص می‌یابند. پس از اجرای الگوریتم، تابع هدف موردنظر برای هر یک از اعضاء جمعیت ارزیابی می‌شود. در گام بعد، نسل دوم براساس توضیحات اخیر شکل می‌گیرد و بار دیگر تابع هدف اعضا ارزیابی می‌شود. این چرخه تا تأمین شرایط تعریف‌شده جهت خاتمه‌ی روند بهینه‌سازی ادامه خواهد یافت. این الگوریتم به اعضاء با شایستگی بالاتر، شانس بیشتری برای بقا و تولیدمثل قائل می‌شود؛ هر چند که اعضاء با شایستگی کمتر نیز به‌طور کامل کنار گذاشته نمی‌شوند. این ویژگی به‌طور خاص برای توابع با تغییرات ناگهانی و دارای چند نقطه‌ی بهینه‌ی موضعی مناسب است و احتمال دسترسی به نقطه‌ی بهینه‌ی کلی را افزایش می‌دهد. فرایند الگوریتم ژنتیک در شکل ۳ مشاهده می‌شود.

۲.۳.۳. الگوریتم ازدحام ذرات

ایده‌ی اولیه‌ی الگوریتم ازدحام ذرات، توسط ابره‌ارت و کندی^۲ (۱۹۹۵) ارائه شده است،^[۲۹] که از رفتار جمعی پرندگان و ماهی‌ها الگوبرداری می‌کند. به این ترتیب که در فضای جستجو، جمعیت اولیه‌ی متشکل از مجموعه‌ای از ذرات به‌طور تصادفی ایجاد می‌شود و تابع هدف آن‌ها ارزیابی می‌شود. سپس موقعیت

جدول ۲. متغیرهای مسئله به همراه قیدهای هندسی آن‌ها.

Upper bound	Lower bound	Unit	Design variables
2	0.5	m	X1
0.05	0.005	m	X2
40	6	-	X3
36	8	-	X4
5	1	m	X5
1	0.1	m	X6
0.05	0.005	m	X7
10	1	m	X8
15	1	m	X9
10	1	m	X10



شکل ۳. فرایند بهینه‌سازی با الگوریتم ژنتیک.

² Kennedy & Eberhart

¹ Goldberg

مرحله اول الگوریتم زنبورعسل با تولید تصادفی زنبورهای عسل دیده‌بان در فضای جستجو و ارزیابی اولیه آن‌ها آغاز می‌شود. هر راه‌حل در الگوریتم مذکور به‌عنوان یک منطقه با منبع غذایی در نظر گرفته می‌شود، که توسط زنبورهای عسل دیده‌بان جستجو می‌شود. 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 اعزام‌شده به محل، به شایستگی منبع غذایی بستگی دارد، به این ترتیب زنبورهای کارگر استخدام‌شده توسط هر دیده‌بان به جستجوی محدوده‌ی منبع غذایی می‌پردازند. در صورتی که یکی از زنبورهای کارگر استخدام‌شده، منبع غنی‌تری نسبت به منبع مطرح‌شده توسط دیده‌بان ارائه دهد، تبدیل به زنبور دیده‌بان می‌شود؛ در غیر این صورت، اگر هیچ منبع بهتری توسط زنبورهای کارگر ارائه نشود، محدوده‌ی مورد بررسی کوچک‌تر و جستجوها به منبع پیشنهادی اولیه متمرکز می‌شود و به این ترتیب، بهترین منبع غذایی در آن منطقه ثبت می‌شود و منطقه‌ی موردنظر ترک و دیده‌بان جدیدی به‌طور تصادفی حاصل می‌شود. فرایند بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم زنبورعسل در شکل ۵ مشاهده می‌شود.

۴.۳.۳. الگوریتم مبتنی بر جغرافیای زیستی

الگوریتم مبتنی بر جغرافیای زیستی، یک الگوریتم تکاملی بر پایه‌ی جمعیت است، که از پدیده‌ی مهاجرت حیوانات و پرندگان بین جزایر الهام گرفته شده است.^[۳۱] جزایر محل سکونت گونه‌های مختلف، معادل محدوده‌ی جستجو در الگوریتم ذکر شده است. مهاجرت گونه‌ها بین جزایر و جهش، دو عملگر مهم در

و سرعت حرکت ذرات با توجه به میزان شایستگی آن‌ها در جهت دستیابی به جواب بهینه مطابق رابطه‌ی ۳ به‌روز می‌شود.

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

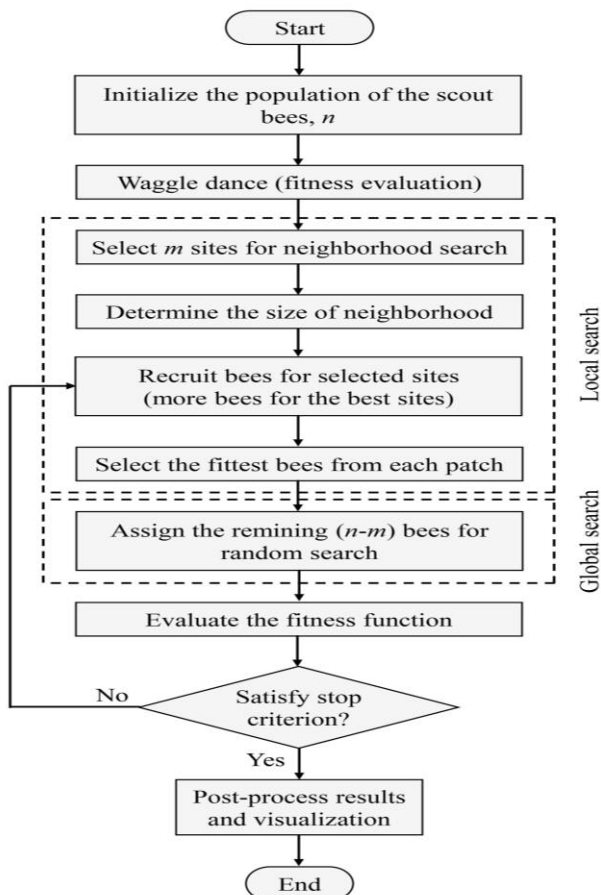
که در آن، X_i^t موقعیت فعلی ذره‌ی i ام، V_i^{t+1} و X_i^{t+1} به ترتیب موقعیت و سرعت به‌روزشده‌ی آن‌ها هستند. بنابراین حرکت ذرات ناشی از سرعتی است که هر ذره در طول مسئله به‌خود می‌گیرد. میزان و جهت سرعت هر ذره، حاصل جمع حد فاصل موقعیت فعلی با بهترین موقعیت تجربه‌شده توسط ذره و همچنین حد فاصل موقعیت فعلی با بهترین موقعیت به‌دست‌آمده در بین تمامی ذرات از ابتدای حل مسئله تاکنون است. به این ترتیب میزان و جهت هر ذره با ذره‌ی دیگر متفاوت خواهد بود و مطابق رابطه‌ی ۴ محاسبه می‌شود.

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

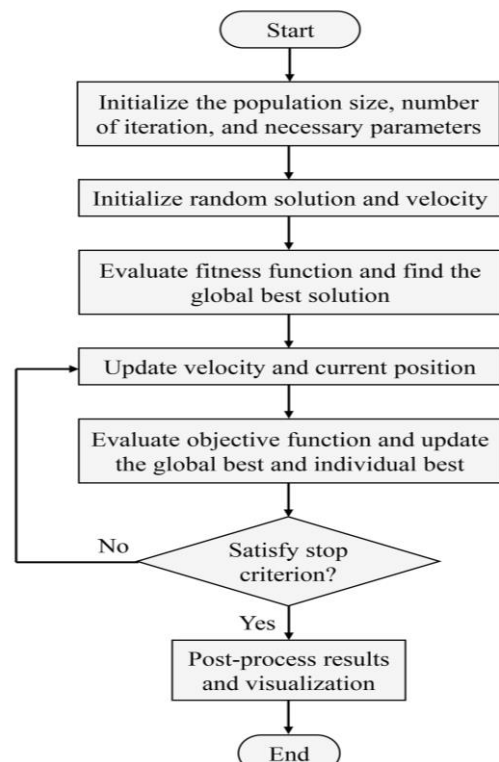
که در آن، V_i^t و V_i^{t+1} به ترتیب سرعت‌های فعلی و به‌روزشده‌ی ذره‌ی i ام، P_i بهترین موقعیت یافته‌شده توسط ذره‌ی i ام (بهترین موقعیت محلی)، P_g بهترین موقعیت کلی به‌دست‌آمده در بین مجموعه‌ی ذرات، ω ضریب اینرسی در محدوده‌ی $(0.1, 1)$ ، C_1 و C_2 ضرایب یادگیری فردی و اجتماعی در محدوده‌ی $(0.1, 2)$ و r_1 و r_2 مقادیر تصادفی در محدوده‌ی $(0, 1)$ هستند. فرایند بهینه‌سازی الگوریتم ازدحام ذرات در شکل ۴ مشاهده می‌شود.

۳.۳.۳. الگوریتم زنبورعسل

الگوریتم زنبورعسل، یکی دیگر از الگوریتم‌های جستجویی مبتنی بر جمعیت است، که توسط فام^۱ و همکاران (۲۰۰۵،^[۳۰] مطرح شده است. این الگوریتم برگرفته از رفتار زنبورهای عسل در جستجوی مواد غذایی است.



شکل ۵. فرایند بهینه‌سازی با الگوریتم زنبورعسل.



شکل ۴. فرایند بهینه‌سازی با الگوریتم ازدحام ذرات.

¹ Pham

مدل بررسی جهت راستی‌آزمایی، شامل یک لایه خاک به همراه یک شمع مدفون در آن بوده است. در شکل ۷، تصویر شماتیک مدل بررسی‌شده به همراه پارامترهای مختلف آن مشاهده می‌شود. برخی نوشتارهای اخیر، به بررسی نیروی اصطکاکی که بین شمع و خاک اطراف آن اتفاق می‌افتد، پرداخته‌اند. برای این منظور علاوه بر خاک اطراف و سیستم شمع، اندرکنش خاک و سازه نیز مدل‌سازی می‌شود. در نهایت، نیروی اصطکاک بین شمع و خاک مطابق رابطه‌ی ۵ و براساس تنش وارده بر جداره‌ی شمع محاسبه می‌شود:

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

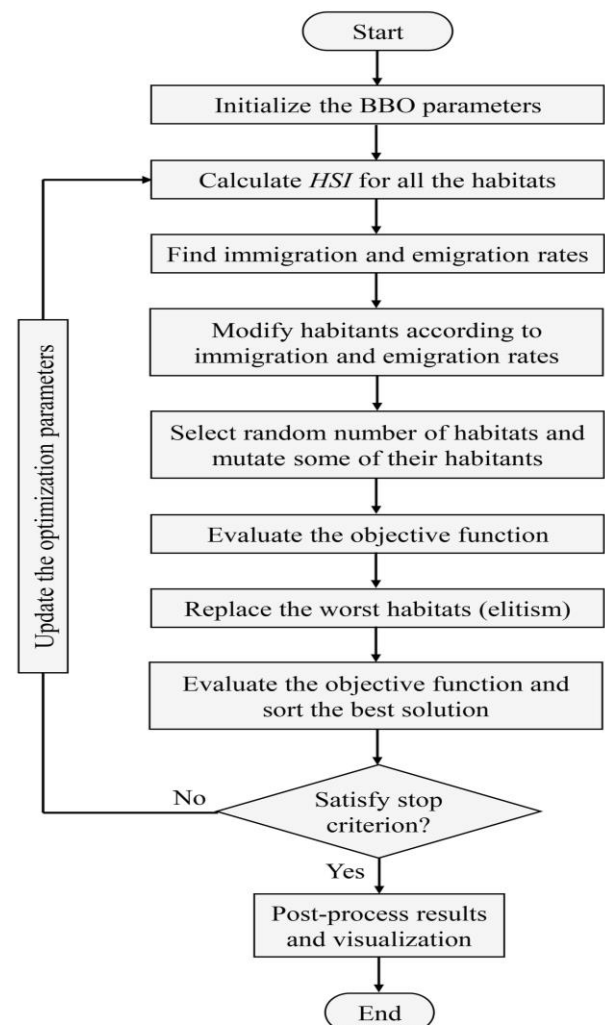
که در آن، P_D معرف نیروی اصطکاکی، r شعاع شمع، و σ_v تنش عمودی در جداره‌ی شمع هستند. همچنین در شکل ۸، مقایسه‌ی نتایج حاصل از مدل‌سازی

الگوریتم مبتنی بر جغرافیای زیستی هستند. عملکرد مهاجرت موجب ایجاد تغییرات در برخی از متغیرهای طراحی می‌شود، که میزان آن‌ها با دو شاخص صلاحیت (HSI) و (SIV) قابل کنترل هستند. به این ترتیب، جزایری که اسکان مناسبی را برای گونه‌ها تأمین می‌کنند (راه‌حل بهتری را ارائه می‌دهند)، شاخص HSI بالا دارند. چنین جزایری گونه‌های بسیار زیادی دارند، که تمایل به مهاجرت به جزایر مجاور دارند. به‌طوری که نرخ مهاجرت به داخل در آن‌ها به دلیل کمبود فضای کافی پایین است. به همین ترتیب جزایر با HSI پایین به دلیل کمی جمعیت، نرخ مهاجرت به داخل بالایی دارند. در مقابل، عملکرد جهش برای افزایش جمعیت جزایر استفاده‌شده قرار می‌گیرد، که موجب ایجاد یک راه‌حل جدید در فضای جستجو می‌شود. فرایند الگوریتم مبتنی بر جغرافیای زیستی در شکل ۶ مشاهده می‌شود.

۴. مدل‌سازی عددی

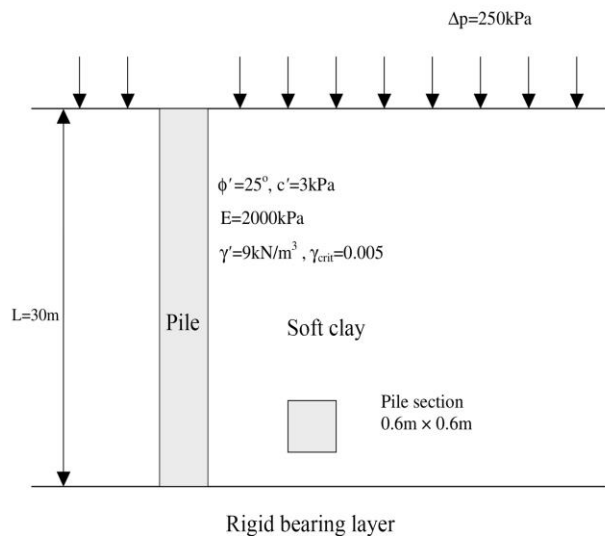
۴.۱. راستی‌آزمایی نرم‌افزاری

به‌منظور کسب اطمینان از راستی‌آزمایی مدل‌سازی انجام‌شده برای سیستم شمع، خاک پشت آن، و اندرکنش آن‌ها، ابتدا مدل ارائه‌شده در برخی نوشتارها،^{[۳۲] و [۳۳]} در نرم‌افزار آپن‌سیس^۱ مدل‌سازی و نتایج به‌دست‌آمده با نتایج متناظر نوشتارهای اخیر راستی‌آزمایی شده‌اند.

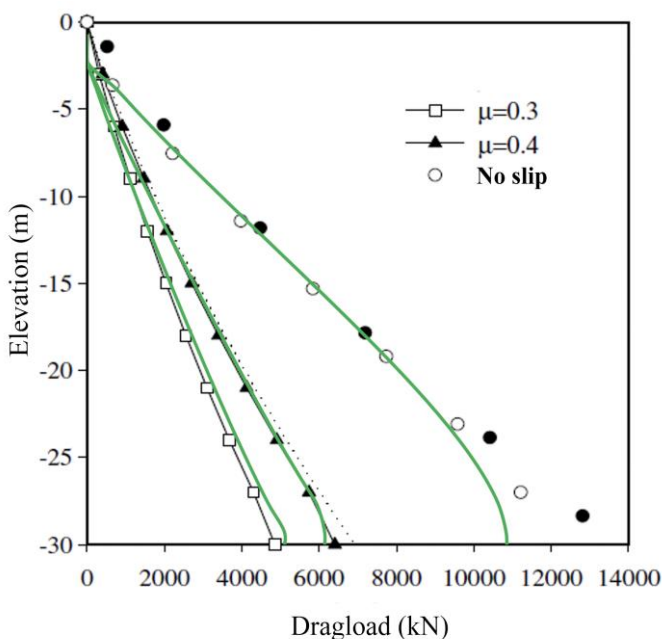


شکل ۶. فرایند بهینه‌سازی با الگوریتم مبتنی بر جغرافیای زیستی.

^۱ OpenSees



شکل ۷. تصویر شماتیک مدل بررسی‌شده در نوشتار ژئونگ^[۳۲] (۱۹۹۲).



شکل ۸. مقایسه‌ی نتایج نوشتار ژئونگ و همکاران (۲۰۰۴)،^[۳۳] و نتایج حاصل از مدل‌سازی در آپن‌سیس.

تسلیم و نهایی ۴۰۰ و ۶۰۰ مگاپاسکال و مدول کشسانی ۲۰۵ گیگاپاسکال در نظر گرفته شده‌اند. سه درجه‌ی آزادی برای المان‌های شمع در نظر گرفته شده و فقط درجه‌ی آزادی قائم آن در پایه‌ی المان مقید بوده است.

اثر اندرکنش خاک و سازه با استفاده از روش لاگرانژ و تعریف رفتار ۲D ContactMaterial اعمال شده است. رفتار اخیر بر روی المان ۲D element BeamContact تعریف شده است. برای تعیین ضریب اصطکاک در مدل رفتاری اخیر از رابطه‌ی ۶ استفاده شده است.^[۳۶ و ۳۷]

$$\mu = \tan(\delta) \quad (۶)$$

که در آن، δ مطابق رابطه‌ی ۷ محاسبه می‌شود:

$$\delta = \tan^{-1} \left(\sin \varphi \cdot \frac{\cos \varphi}{1 + \sin^2 \varphi} \right) \quad (۷)$$

استرات‌های سیستم مهار متقابل برای مقابله با نیروهای فشاری وارده از طرفین جداره‌ی گود، با مقطع مربعی توخالی و مصالح فولادی S۳۵۵ در نظر گرفته شده‌اند. طراحی استرات‌ها معمولاً به گونه‌ای است که در تمامی شرایط رفتار کشسان داشته باشند تا موجب اختلال در عملکرد شمع‌ها نشوند؛ بنابراین، مدل‌سازی عناصر مذکور در نرم‌افزار توسط المان‌های خرابایی و اختصاص رفتار کشسان uniaxialMaterial ElasticPP تعریف شده است. جزئیات مدل‌سازی مقطع و نحوه‌ی اعمال دستورات ذکرشده در شکل ۹ مشاهده می‌شود.

فشار سطح خاک در تحلیل‌ها برابر با مقدار ثابت ۵۰ کیلونیوتن بر مترمربع و تأثیر فشار آب حفره‌ای با توزیع مثلی در نظر گرفته شده‌اند.

به منظور شبیه‌سازی دقیق رفتار خاک در نرم‌افزار و شکل‌گیری تنش‌های اولیه در خاک، ابتدا یک تحلیل اولیه با در نظر گرفتن بارگذاری ثقیل انجام شده است. به این ترتیب رفتار خاک مطابق واقعیت و به صورت عادی تحکیم‌یافته می‌شود. تحلیل اولیه با استفاده از دستور nDMaterial InitialStateAnalysisWrapper انجام شده است. در مرحله‌ی بعد، با به‌روزرسانی رفتار خاک، حفاری آغاز و مطابق با فرآیند اجرای گود در واقعیت، تحلیل‌های حفاری به صورت گام به گام و در ۲۲ مرحله انجام و تغییرشکل‌ها و تنش‌های جداره‌ی گود و المان‌های شمع در هر مرحله ارزیابی شده است. درنهایت، با اتمام مراحل خاک‌برداری، مقطع مطالعه‌شده مطابق شکل ۹ است و تنش‌های خاک فقط توسط المان‌های شمع و استرات‌ها تحمل می‌شوند. به‌منظور انجام فرایند بهینه‌سازی از اتصال نرم‌افزار آپن‌سیس و متلب^۳ برای بهره‌گیری از الگوریتم‌های فراابتکاری در طراحی سازه‌ی نگهدارنده ایستگاه موردنظر استفاده شده است. برای این منظور، از ۴ الگوریتم متداول، یعنی الگوریتم‌های: ژنتیک، ازدحام ذرات، زنبورعسل، و بهینه‌سازی مبتنی بر جغرافیای زیستی استفاده شده است. هدف از انتخاب الگوریتم‌های مختلف، امکان مقایسه‌ی نتایج الگوریتم‌ها و تعیین بهترین پاسخ از میان آن‌ها بوده است. مشخصات متغیرهای طراحی به‌همراه فضای جستجوی (بازه‌ی تغییرات) آن‌ها در جدول ۲ ارائه شده است. بازه‌های در نظر گرفته‌شده در جدول ۲ براساس محدوده‌های منطقی پارامترها انتخاب شده‌اند. با توجه به اینکه الگوریتم‌های بهینه‌سازی معمولاً به صورت کمینه‌سازی عمل می‌کنند، لذا در بخش حاضر از هزینه‌ی مصالح مصرفی به‌عنوان تابع هزینه‌ی بهینه‌سازی استفاده شده است.

در نرم‌افزار آپن‌سیس با نتایج نوشتارهای مذکور مشاهده می‌شود. مدل‌سازی انجام‌شده به‌صورت دو بُعدی و از نوع کرنش مسطح بوده و در آن از المان‌های چهارضلعی برای مدل‌سازی خاک استفاده شده است. برای مدل‌سازی اندرکنش خاک-سازه مطابق نوشتارهای اخیر،^[۳۲ و ۳۳] از سه حالت مختلف: (الف) با اصطکاک ۰/۳، (ب) با اصطکاک ۰/۴، و (پ) بدون لغزش استفاده شده است.

نمودارهای شکل ۸، تغییرات نیروی اصطکاک را در طول شمع در هر سه حالت تعریف‌شده‌ی اخیر نشان می‌دهند. در شکل ۸، خطوط ممتد (سبز رنگ) نتایج حاصل از نرم‌افزار آپن‌سیس هستند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، همخوانی خوبی بین نتایج به‌دست‌آمده از آپن‌سیس و نتایج نوشتار ژئونگ و همکاران (۲۰۰۴)،^[۳۳] در هر سه حالت تعریف‌شده وجود دارد.

۲.۴. روش مدل‌سازی و تحلیل استفاده‌شده در پژوهش حاضر

جزئیات سیستم سازه‌ی نگهدارنده مطالعه‌شده به‌همراه متغیرهای طراحی مسئله (جدول ۲ ملاحظه شود) به صورت شماتیک در شکل ۲ مشاهده می‌شود. به‌دلیل تقارن هندسی مقطع گود، فقط نیمی از مقطع در نرم‌افزار مدل‌سازی شده است. همچنین به‌منظور کاهش آثار نامطلوب و غیرواقعی شرایط مرزی در رفتار دیواره‌ی جانبی گود و سازه‌ی نگهدارنده، خاک‌های اطراف مقطع بررسی‌شده تا فاصله‌ی ۲۵ متری از المان شمع مدل‌سازی شده‌اند. ارتفاع مقطع به‌منظور در نظر گرفتن عمق مدفون شمع‌ها به‌صورت متغیر و برابر با (۲۲+X۶) متر اختیار شده است، که در آن X۶ معرف عمق مدفون شمع در زیر زمین است.

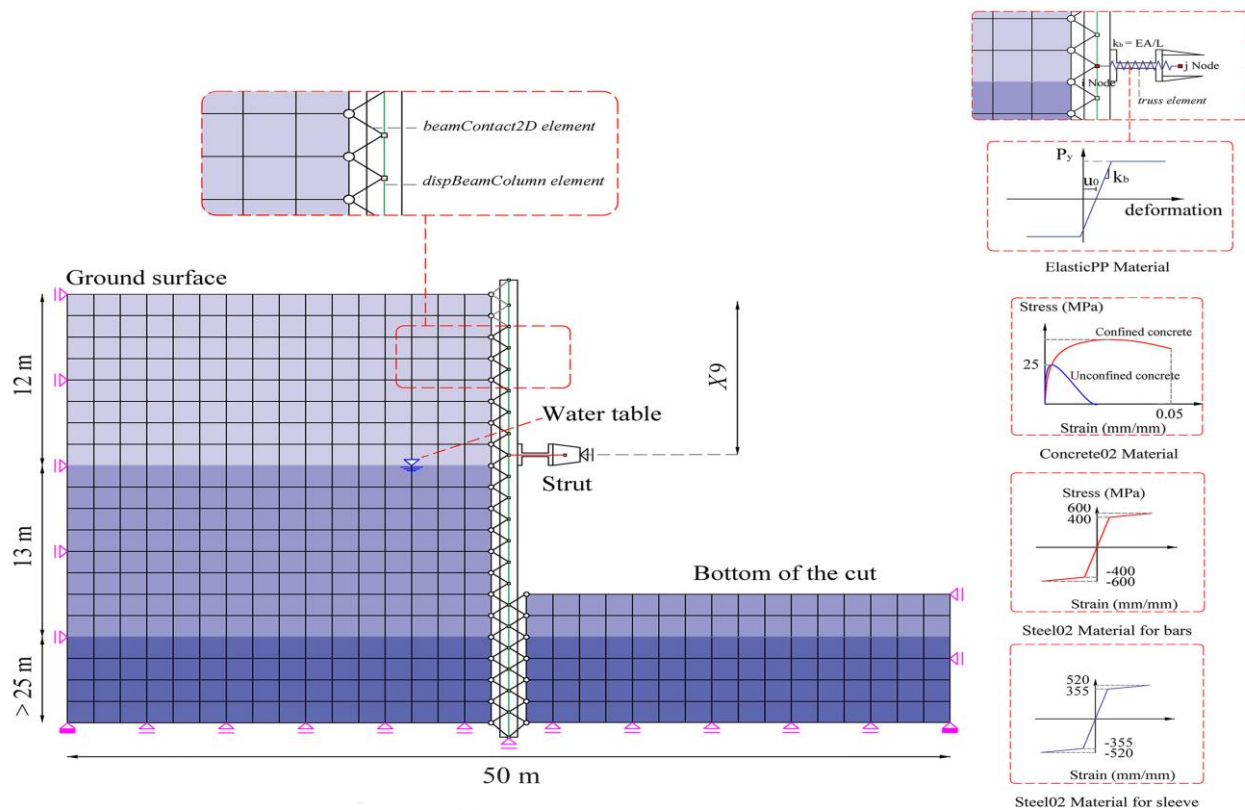
مدل‌سازی خاک با استفاده از المان‌های ۴ گره‌ی مستطیلی quad در ابعاد ۰/۵ متر و با در نظر گرفتن دو درجه‌ی آزادی انتقالی انجام شده است. شرایط مرزی در محدوده‌ی انتهایی مقطع به‌صورتی تعریف شده‌اند که از حرکت قائم خاک در مرز پایین و حرکت افقی در مرزهای طرفین اجتناب شود. خصوصیات رفتاری خاک‌های ماسه‌ای و رسی به ترتیب با دستورهای PressureDependMultiYield و PressureIndependMultiYield در نرم‌افزار آپن‌سیس معرفی شده‌اند. پارامترهای موردنیاز برای تعریف رفتارهای ذکرشده براساس مشخصات جدول ۱ و پیشنهادهای ارائه‌شده در نوشتار یانگ^۱ و همکاران (۲۰۰۸)،^[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 شده‌اند. سپس المان‌های شمع با دستور element dispBeamColumn تعریف شده‌اند. در المان‌های شمع، ۱۰ نقطه‌ی انتگرال‌گیری گائوس-لوباتو در نظر گرفته شده است. سپس مقطع آن‌ها با استفاده از دستور فایبر و اختصاص رفتارهای تنش-کرنش ۰/۲ uniaxialMaterial Concrete و ۰/۲ uniaxialMaterial Steel 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 است. همچنین مدول کشسانی آن برابر ۲۰۵ گیگاپاسکال است. بتن‌های مصرفی از رده‌ی C۲۵ بوده و رفتار تنش-کرنش آن‌ها مطابق رفتار محصورشده‌ی مندر^۲ تعریف شده است.^[۳۵] میلگردها از رده‌ی S۴۰۰ با تنش

^۳ MATLAB

^۱ Yang

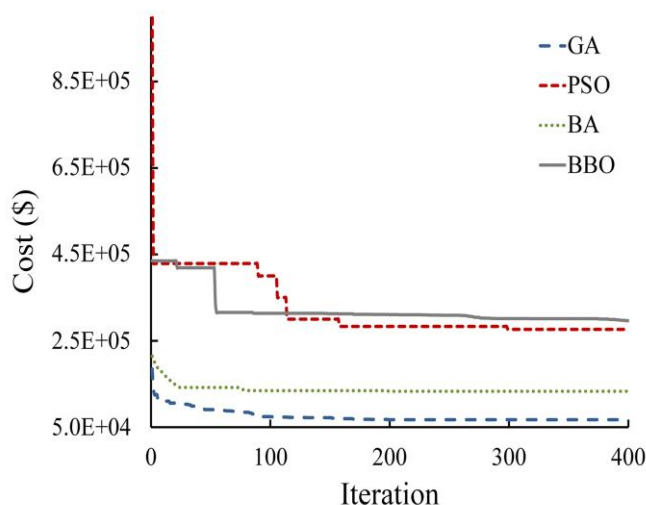
^۲ Mander



شکل ۹. جزئیات مدسازی در مقطع بررسی شده.

جدول ۳. خلاصه‌ی نتایج تابع هدف در پروسه‌ی بهینه‌سازی.

Cost (\$)			Optimization algorithm
SD	Mean	Best	
1254.25	294431.40	276593.67	PSO
325.35	74325.93	67498.83	GA
835.05	302301.91	296427.07	BBO
651.01	139043.54	133224.98	BA



شکل ۱۰. مقایسه‌ی روند همگرایی سیستم موردنظر براساس ۴ الگوریتم.

مقدار بیشینه‌ی گام‌های بهینه‌سازی برابر با ۴۰۰ در نظر گرفته شده است، که تعیین‌کننده‌ی پایان عملیات بهینه‌سازی است. در واقع، در هر یک از گام‌های بهینه‌سازی توسط سازوکار ویژه‌ی هر الگوریتم به متغیرها مقداردهی می‌شود و مقادیر مذکور به نرم‌افزار آپن‌سیس منتقل و تحلیل استاتیکی براساس بارهای وارده انجام می‌شود. درنهایت، خروجی حاصل از آپن‌سیس به متلب منتقل می‌شود 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 است. بنابراین، در کل تعداد مدل‌های تحلیل‌شده برای دستیابی به مقادیر بهینه برابر $(400 \times 100 = 40000)$ بوده است. حال با تکرار این عملیات در حدود ۵۰ بار، تعداد آنالیز کل، ۵۰ برابر می‌شود که برابر ۲۰۰۰۰۰ است. درنهایت، بهترین پاسخ از بین جواب‌های موجود به‌دست‌آمده، به‌عنوان نتایج طراحی بهینه معرفی می‌شود.

۵. نتایج

طراحی بهینه‌ی شمعی‌های سیستم سازه‌ی نگهدارنده‌ی ایستگاه شماره‌ی ۳ متروی تبریز براساس متغیرهای طراحی جدول ۲ و با استفاده از چهار الگوریتم: فراابتکاری مبتنی بر جغرافیای زیستی، ژنتیک، ازدحام ذرات، و زنبورعسل انجام گرفته است. بهترین پاسخ‌های به‌دست‌آمده از ۵۰ تحلیل مجزا به همراه میانگین و انحراف معیار نتایج در جدول ۳ ارائه شده است. مقایسه‌ی نتایج نشان می‌دهند که استفاده از الگوریتم ژنتیک در روند طراحی سیستم سازه‌ی نگهدارنده منجر به ارائه‌ی طرح بهینه‌تری شده است. براساس نتایج به‌دست‌آمده، هزینه‌ی طرح‌های حاصل از الگوریتم‌های ازدحام ذرات، مبتنی بر جغرافیای زیستی و زنبورعسل به ترتیب ۴/۱، ۴/۴، و ۲/۰ برابر هزینه‌ی متناظر بهترین طرح (یعنی طرح ارائه‌شده براساس الگوریتم ژنتیک) بوده است.

در شکل ۱۰، نمودار تغییرات تابع هزینه در گام‌های مختلف بهینه‌سازی برای

سریعی نیز دارد. مقادیر هر یک از متغیرهای طراحی در گام آخر فرآیند بهینه‌سازی و برای هر یک از الگوریتم‌های بررسی‌شده در جدول ۴ ارائه شده‌اند.

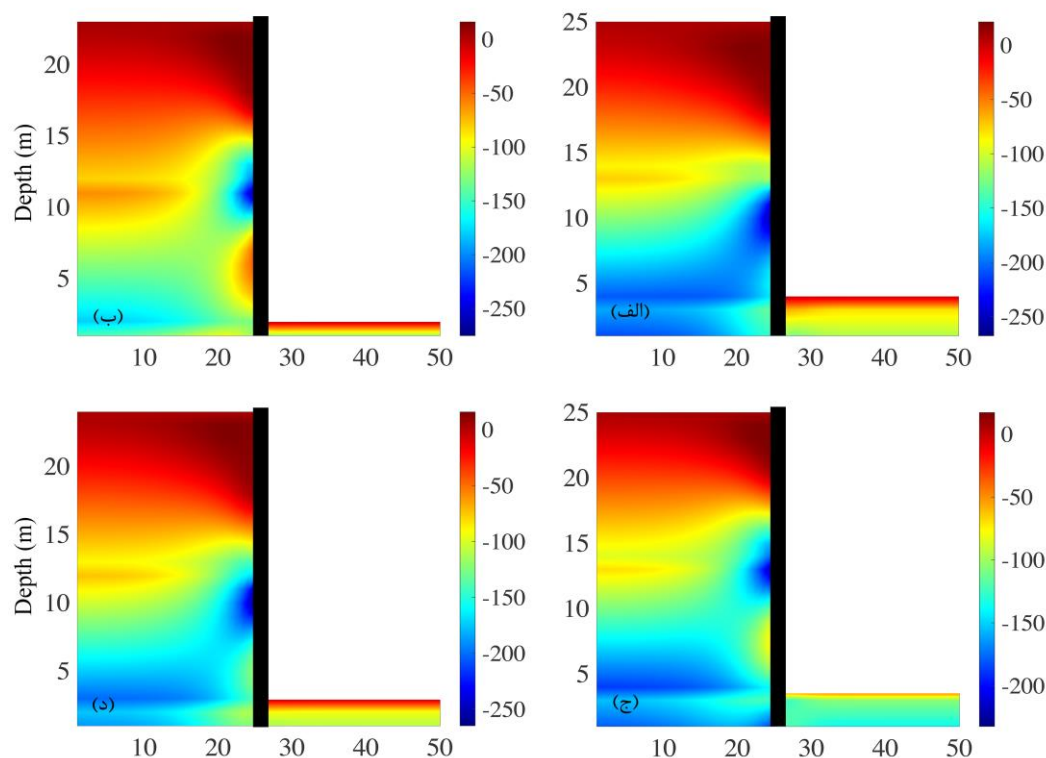
همان‌طور که در بخش ۴ نیز ذکر شد، تحلیل ایستگاه بررسی‌شده در ۲۲ مرحله انجام شده است. به این ترتیب که در مرحله‌ی صفر، ابتدا تنش‌های برجا بر خاک اعمال و سپس رفتار خاک از حالت کشسان به حالت خمیری تبدیل شده است. سپس حفاری در ۲۲ مرحله انجام گرفته است، که در هر مرحله ارتفاع ۱ متر از خاک برداشته شده است. به این ترتیب نرم‌افزار قادر خواهد بود در هر مرحله با شرایط جدید انطباق پیدا کند. لذا محاسبات عددی، دقت بالایی خواهند داشت. در شکل ۱۱، تنش جانبی خاک در مرحله‌ی آخر گودبرداری برای سیستم سازه‌ی نگهدارنده طراحی‌شده براساس ۴ الگوریتم موردنظر مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن، تغییرات تنش جانبی در هر ۴ طرح تا حد زیادی مشابه

هر یک از الگوریتم‌ها مشاهده می‌شود؛ که در آن، محور قائم معرف هزینه‌ی کل اجرای سازه‌ی نگهدارنده موردنظر است و محور افقی تعداد تکرارها را نشان می‌دهد. نتایج مذکور به‌منظور کاهش تعداد ارقام و همچنین امکان مقایسه با نتایج متناظر پژوهش‌های پیشین،^[۲۵ و ۲۶] بر حسب دلار تنظیم شده‌اند.

مطابق شکل ۱۰، تعداد گام‌های طی‌شده در الگوریتم‌های ژنتیک، ازدحام ذرات، زنبورعسل، و الگوریتم مبتنی بر جغرافیای زیستی برای دستیابی به پاسخ بهینه به ترتیب برابر با ۹۰، ۳۰۰، ۷۵، و ۲۸۰ بوده است. مشاهده می‌شود که الگوریتم‌های بهینه‌سازی زنبورعسل 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 ارائه‌ی نتایج بهینه‌تر، قابلیت همگرایی

جدول ۴. مقادیر متغیرهای طراحی در گام آخر فرآیند بهینه‌سازی.

X10 (m)	X9 (m)	X8 (m)	X7 (m)	X6 (m)	X5 (m)	X4	X3	X2 (m)	X1 (m)	Optimization algorithms
3	11.72	7.37	0.036	0.60	2.95	28	14	0.019	0.93	PSO
1	13.19	7.42	0.020	0.70	3.97	16	8	0.024	0.64	GA
2	11.74	6.67	0.024	0.67	4.66	16	8	0.017	1.00	BBO
3	14.83	6.84	0.026	0.61	3.38	25	10	0.025	0.76	BA



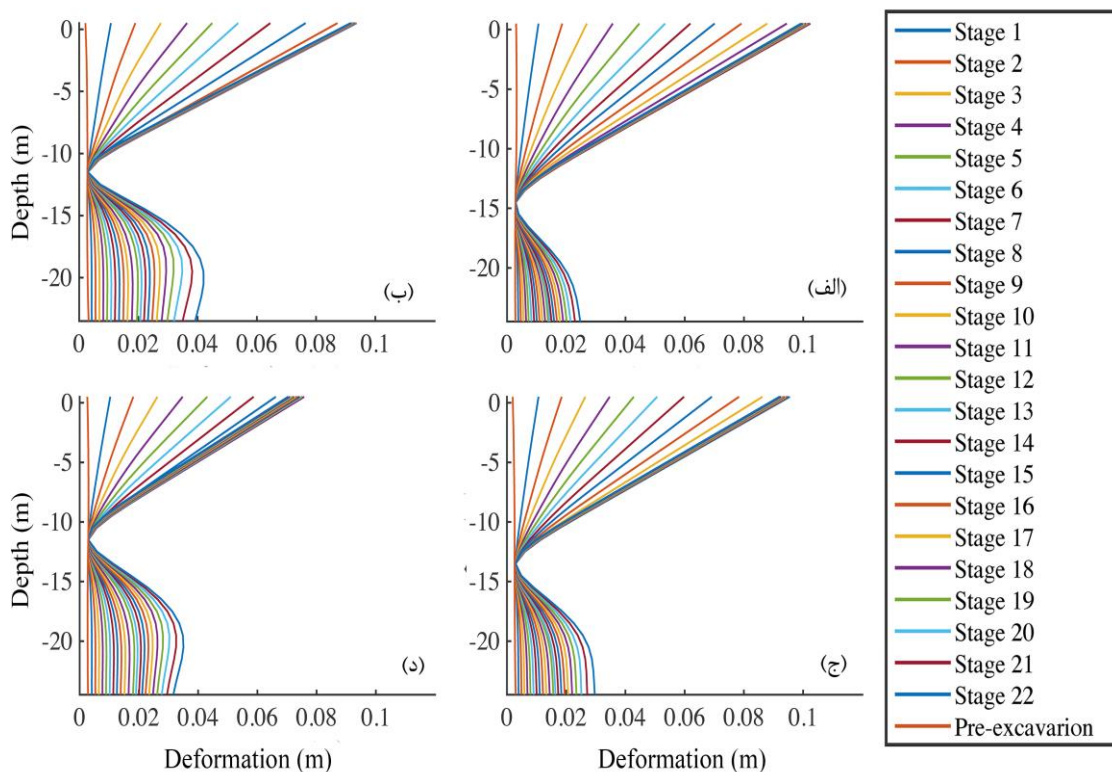
شکل ۱۱. توزیع تنش خاک در دیواره‌ی گود در مرحله‌ی آخر فرآیند گودبرداری برای الگوریتم‌های: (الف) ازدحام ذرات، (ب) ژنتیک، (ج) زنبورعسل، و (د) مبتنی بر جغرافیای زیستی.

تغییرمکان بیشینه‌ی شمعی‌ها به‌منظور طراحی به ۱۰ سانتی‌متر محدود شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، بیشینه‌ی تغییرمکان در تمامی طرح‌ها در قسمت فوقانی آن‌ها اتفاق افتاده است، که با توجه به آزادبودن انتهای شمعی‌ها طبیعی به‌نظر می‌رسد. نواحی مذکور همان‌طور که در شکل ۱۱ نیز مشاهده می‌شود، باعث ایجاد حالت فعال در خاک پشتی شده است، که موجب کاهش تنش جانبی آن می‌شود. در شکل ۱۲، خط اول نشانگر تغییرشکل اندک اولیه‌ی شمعی در اثر تنش‌های برجاست و با پیشرفت مراحل حفاری، تغییرشکل شمعی افزایش یافته و شمعی‌ها تغییرشکل‌های ماندگاری را تجربه کرده‌اند. همچنین براساس نتایج به‌دست‌آمده مشاهده می‌شود که وجود یک ردیف استرات برای نگهداری از سازه‌ی نگهدارنده‌ی مذکور در محدوده‌ی تغییرمکان داده‌شده کافی است و نیازی به استفاده از تعداد ردیف‌های بیشتر استرات نیست.

مقایسه‌ی نتایج به‌دست‌آمده با نتایج متناظر برخی مطالعات پیشین، [۲۵ و ۲۶] نشان می‌دهد که استفاده از شمعی‌های مختلط موجب کاهش هزینه نسبت به حالت‌های استفاده از شمعی‌های بتنی و فولادی توخالی می‌شود؛ که با درنظرگرفتن هزینه‌ی شمعی‌های بتنی و فولادی به ترتیب برابر با ۲ و ۱۰۲ درصد هستند. علاوه‌بر پایین‌بودن هزینه‌ی اجرای شمعی‌های مختلط، شمعی‌های مختلط مزیت‌های دیگری نیز دارند که از جمله‌ی آن‌ها می‌توان به راحتی اجرا و عملکرد قالبی آن‌ها برای بتن اشاره کرد؛ این در حالی است که در شمعی‌های بتنی، دیواره‌ی خاک به‌عنوان قالب عمل می‌کند و از کفایت پوشش بتن نمی‌توان اطمینان حاصل کرد. همچنین قطر شمعی نیز در صورت استفاده از مصالح مختلط نسبت به حالت‌های قبل کاهش یافته است. با وجود این، با توجه به درنظرگرفتن تغییرمکان مجاز یکسان در هر سه نمونه، توزیع تنش خاک و نحوه‌ی تغییرشکل شمعی در تمامی سه حالت فوق تا حد زیادی مشابه هم هستند.

هم هستند و تغییرات اندک مشاهده‌شده به دلیل عمق‌های مدفون متفاوت شمعی‌ها و همچنین محل‌های متفاوت قرارگیری استرات‌ها در روش‌های مختلف است، که برای الگوریتم‌های ژنتیک، ازدحام ذرات، زنبورعسل و الگوریتم بهینه‌سازی مبتنی بر جغرافیای زیستی به ترتیب برابر با ۳، ۱، ۲ و ۱۱/۷، ۱۳/۲، ۱۱/۷، ۱۴/۸ متر هستند. ملاحظه می‌شود که محل قرارگیری استرات‌ها در نحوه‌ی تغییرشکل شمعی‌ها و در نتیجه در نحوه‌ی شکل‌گیری تنش‌های جانبی خاک تأثیر بسزایی دارد. به این صورت که نواحی متصل به استرات موجب تحمیل تنش موضعی بالایی به خاک پشتی می‌شود؛ این در حالی است که فشار خاک قسمت‌های دیگر توسط تغییرشکل شمعی تحمل می‌شود. لذا به‌دلیل امکان حرکت شمعی حالت فعال در خاک ایجاد می‌شود، که موجب کاهش تنش جانبی می‌شود. این موارد در شکل‌ها به ترتیب با طیف‌های رنگی آبی و قرمز مشاهده می‌شوند. شایان ذکر است که در صورت شبیه‌سازی یک‌مرتب‌ه‌ی خاک‌برداری در نرم‌افزار، تأثیر مراحل مختلف گودبرداری قابل رصد نیست و قابلیت اطمینان نتایج کمتر است.

روند تغییرشکل شمعی‌ها در مراحل مختلف حفاری در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود. کاهش عمق قرارگیری استرات‌ها موجب افزایش تغییرشکل قسمت تحتانی شمعی‌ها خواهد شد و برعکس. بدیهی است که عمق مدفون شمعی نیز در میزان تغییرشکل آن مخصوصاً در نواحی تحتانی تأثیر زیادی دارد؛ با وجود این، افزایش بسیار زیاد آن موجب بیشترشدن طول شمعی مصرفی و هزینه‌ی تمام‌شده‌ی آن می‌شود. بنابراین، انتخاب نقطه‌ی مناسب برای نصب استرات‌ها از جهت ایجاد تعادل در تغییرشکل‌های نواحی فوقانی و تحتانی شمعی، اهمیت بسیاری دارد. در نتایج به‌دست‌آمده از الگوریتم‌های مختلف مشاهده می‌شود که در تمامی آن‌ها عمق بهینه‌ی قرارگیری استرات‌ها تا حد زیادی مشابه بوده است.



شکل ۱۲. تغییرمکان شمعی در مراحل مختلف گودبرداری برای الگوریتم‌های: (الف) ازدحام ذرات، (ب) ژنتیک، (ج) زنبورعسل، و (د) مبتنی بر جغرافیای زیستی.

۶. نتیجه‌گیری

در نوشتار حاضر، طرح بهینه‌ی سیستم سازه‌ی نگهبان ایستگاه شماره‌ی ۳ متروی تبریز با استفاده از شمع‌های مختلط فولادی-بتنی به همراه مهار متقابل فولادی بررسی شده است. به منظور انجام فرآیند بهینه‌سازی از تحلیل‌های استاتیکی بر روی مدل المان محدود مقطع بررسی شده، استفاده شده است. برای این منظور، از ۴ الگوریتم: بهینه‌سازی مبتنی بر جغرافیای زیستی، ژنتیک، ازدحام ذرات، و زنبورعسل استفاده شده است. تعداد ۱۰ متغیر طراحی در مسئله‌ی حاضر در نظر گرفته شده است، که با کمینه‌سازی هزینه‌ی مصالح مصرفی تعیین شده‌اند. اهم نتایج به‌دست‌آمده به این صورت است:

۱- از میان ۴ الگوریتم استفاده‌شده، بهترین پاسخ به‌دست‌آمده مربوط به الگوریتم ژنتیک و با هزینه‌ی مصالح مصرفی برابر ۶۷۴۹۸/۸۳ دلار بوده است.

- ۲- عمق قرارگیری سیستم مهار متقابل و عمق مدفون شمع‌ها در توزیع تنش خاک و تغییرشکل المان شمع تأثیر زیادی دارد. عمق‌های مدفون شمع‌ها و عمق قرارگیری استرات‌ها در الگوریتم‌های ژنتیک، ازدحام ذرات، زنبورعسل، و الگوریتم بهینه‌سازی مبتنی بر جغرافیای زیستی به ترتیب برابر با ۳، ۲، ۱، ۳ و ۱۱/۷، ۱۳/۲، ۱۱/۷، ۱۴/۸ متر به‌دست آمده است.
- ۳- وجود سیستم مهار متقابل موجب افزایش تنش خاک در ناحیه‌ی اتصال استرات‌ها با شمع می‌شود. این در حالی است که در نواحی فوقانی به‌دلیل امکان جابجایی آزاد شمع و ایجاد وضعیت فعال در خاک، تنش‌ها به‌میزان کمینه هستند.
- ۴- مقایسه‌ی نتایج به‌دست‌آمده با مطالعات پیشین نشان می‌دهد که استفاده از شمع‌های مختلط نسبت به شمع‌های بتنی و فولادی، هزینه‌ی پایین‌تر و نیز از نظر اجرایی عملکرد بهتری دارند.

References - منابع

1. Peck, R.B., 1969. Deep excavations and tunneling in soft ground. State of the art volume, In *7th ICSMFE*, pp.225-290.
2. Terzaghi, K., Peck, R.B. and Mesri, G., 1996. *Soil Mechanics in Engineering Practice*. John Wiley & Sons.
3. Chang, J.D. and Wong, K.S., 1996. Apparent pressure diagram for braced excavations in soft clay with diaphragm wall. In *Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground*, pp.87-92.
4. Rechards Jr, R. and Elms, D.G., 1979. Seismic behavior of gravity retaining walls. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 105(4), pp.449-464. doi.org/10.1061/AJGEB6.0000783
5. Gazetas, G., Psarropoulos, P.N., Anastasopoulos, I. and Gerolymos, N., 2004. Seismic behaviour of flexible retaining systems subjected to short-duration moderately strong excitation. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 24(7), pp.537-550. doi.org/10.1016/j.soildyn.2004.02.005
6. Madabhushi, S.P.G. and Zeng, X., 2006. Seismic response of flexible cantilever retaining walls with dry backfill. *Geomechanics and Geoengineering: An International Journal*, 1(4), pp.275-289. doi.org/10.1080/17486020601039170
7. Qu, H.L., Luo, H., Liu, L. and Liu, Y., 2017. Analysis of dynamic coupling characteristics of the slope reinforced by sheet pile wall. *Shock and Vibration*, pp.1-10. doi.org/10.1155/2017/9043518
8. Lin, Y.L., Cheng, X.M., Yang, G.L. and Li, Y., 2018. Seismic response of a sheet-pile wall with anchoring frame beam by numerical simulation and shaking table test. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 115, pp.352-364. doi.org/10.1016/j.soildyn.2018.07.028
9. Hashash, Y.M. and Whittle, A.J., 1996. Ground movement prediction for deep excavations in soft clay. *Journal of Geotechnical Engineering*, 122(6), pp.474-486. doi.org/10.1061/(ASCE)07339410(1996)122:6(474)
10. Mu, L. and Huang, M., 2016. Small strain based method for predicting three-dimensional soil displacements induced by braced excavation. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 52, pp.12-22. doi.org/10.1016/j.tust.2015.11.001
11. Zhang, W., Goh, A.T. and Xuan, F., 2015. A simple prediction model for wall deflection caused by braced excavation in clays. *Computers and Geotechnics*, 63, pp.67-72. doi.org/10.1016/j.compgeo.2014.09.001
12. Gandomi, A.H., Kashani, A.R., Roke, D.A. and Mousavi, M., 2015. Optimization of retaining wall design using recent swarm intelligence techniques. *Engineering Structures*, 103, pp.72-84. doi.org/10.1016/j.engstruct.2015.08.034
13. Khajehzadeh, M., Taha, M.R., El-Shafie, A. and Eslami, M., 2010. Economic design of retaining wall using particle swarm optimization with passive congregation. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 4(11), pp.5500-5507.
14. Khajehzadeh, M. and Eslami, M., 2012. Gravitational search algorithm for optimization of retaining structures. *Indian Journal of Science and Technology*, 5(1), pp.1821-1827.
15. Ceranic, B., Fryer, C. and Baines, R.W., 2001. An application of simulate annealing to the optimum design of reinforced concrete retaining structures. *Computers and Structures*, 79(17), pp.1569-1581. doi.org/10.1016/S0045-7949(01)00037-2
16. Yepes, V., Alcalá, J., Perea, C. and Gonzalez-Vidosa, F., 2008. A parametric study of optimum earth-retaining walls by simulated annealing. *Engineering Structures*, 30(3), pp.821-830. doi.org/10.1016/j.engstruct.2007.05.023

17. Kaveh, A. and Shakouri, M.A.A., 2011. Harmony search based algorithm for the optimum cost design of reinforced concrete cantilever retaining walls. *International Journal of Civil Engineering*, 9(1), pp.1–8.
18. Öztürk, H.T., Dede, T. and Türker, E., 2020. Optimum design of reinforced concrete counterfort retaining walls using TLBO, Jaya algorithm. *Structures*, 25, pp.285-296.
doi.org/10.1016/j.istruc.2020.03.020
19. Camp, C.V. and Akin, A., 2012. Design of retaining walls using big bang-big crunch optimization. *Journal of Structural Engineering*, 138(3), pp.438–448.
doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000461
20. Kaveh, A., Biabani Hamedani, K. and Zaeerza, A., 2021. A set theoretical shuffled shepherd optimization algorithm for optimal design of cantilever retaining wall structures. *Engineering with Computers*, 37, pp.3265-3282.
doi.org/10.1007/s00366-020-00999-9
21. Kalemci, E.N., İközler, S.B., Dede, T. and Angin, Z., 2020. Design of reinforced concrete cantilever retaining wall using Grey wolf optimization algorithm. *Structures*, 23, pp.245-253.
doi.org/10.1016/j.istruc.2019.09.013
22. Koopialipour, M., Murlidhar, B.R., Hedayat, A., Armaghani, D.J., Gordan, B. and Mohamad, E.T., 2020. The use of new intelligent techniques in designing retaining walls. *Engineering with Computers*, 36, pp.283-294.
doi.org/10.1007/s00366-018-00700-1
23. Aydogdu, I., 2017. Cost optimization of reinforced concrete cantilever retaining walls under seismic loading using a biogeography-based optimization algorithm with Levy flights. *Engineering Optimization*, 49(3), pp.381-400.
doi.org/10.1080/0305215X.2016.1191837
24. Gordan, B., Koopialipour, M., Clementking, A., Tootoonchi, H. and Mohamad, E., 2019. Estimating and optimizing safety factors of retaining wall through neural network and bee colony techniques. *Engineering with Computers*, 35, pp.945-954.
doi.org/10.1007/s00366-018-0642-2
25. Taiyari, F., Kharghani, M. and Hajihassani, M., 2020. Optimal design of pile wall retaining system during deep excavation using swarm intelligence technique. *Structures*, 28, pp.1991-1999.
doi.org/10.1016/j.istruc.2020.10.044
26. Taiyari, F., Hajihassani, M. and Kharghani, M., 2022. Efficiency of the evolutionary methods on the optimal design of secant pile retaining systems in a deep excavation. *Neural Computing and Applications*, 34(22), pp.20313-20325.
doi.org/10.1007/s00521-022-07591-w
27. Iranian National Building Codes Compilation Office, 2020. *Iranian National Building Code, Part 9: Reinforced Concrete Buildings Design*, Ministry of Housing and Urban Development (MHUD).
28. Goldberg, D.E., 2010. *Genetic algorithms in search, optimization and machine learning*. MA: Addison-Wesley, Reading.
29. Kennedy, J. and Eberhart, R., 1995. Particle swarm optimization. In *Proceeding of the ICNN'95-international conference on neural networks*, 4, pp.1942–1948.
30. Pham, D.T., Ghanbarzadeh, A., Koc, E., Otri, S., Rahim, S. and Zaidi, M., 2006. The bees algorithm-a novel tool for complex optimization problems. In *Intelligent Production Machines and Systems*, pp. 454-459.
doi.org/10.1016/B978-008045157-2/50081-X
31. Simon, D., 2008. Biogeography-based optimization. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 12(6), pp.702–713.
32. Jeong, S., 1992. Nonlinear three-dimensional analysis of downdrag on pile groups. PhD Thesis, Texas A&M University.
33. Jeong, S., Lee, J. and Lee, C.J., 2004. Slip effect at the pile-soil interface on dragload. *Computers and Geotechnics*, 31(2), pp.115-126.
doi.org/10.1016/j.compgeo.2004.01.009
34. Yang, Z., Lu, J. and Elgamal, A., 2008. OpenSees soil models and solid-fluid fully coupled elements. user's manual, 1(27).
35. Mander, J.B., Priestley, M.J. and Park, R., 1988. Theoretical stress-strain model for confined concrete. *Journal of Structural Engineering*, 114(8), pp.1804-1826.
doi.org/10.1061/(ASCE)07339445(1988)114:8(1804
36. Randolph, M.F. and Wroth, C.P., 1981. Application of the failure state in undrained simple shear to the shaft capacity of driven piles. *Geotechnique*, 31(1), pp.143-157.
doi.org/10.1680/geot.1981.31.1.143
37. Loukidis, D. and Salgado, R., 2008. Analysis of the shaft resistance of non-displacement piles in sand. *Géotechnique*, 58(4), pp.283-296.
doi.org/10.1680/geot.2008.58.4.283