



Semnan University

Journal of Transportation Infrastructure Engineering

Journal homepage: <https://jtie.semnan.ac.ir/?lang=en>

ISSN: 2821-0549



Review Article

A Numerical and Data-Driven Assessment of Modular Flowerbox Systems for Enhancing Flowerbox Systems on the Stability of Urban Trenches in Arid Climates

Mojtaba Ameri ^{a*}, Seyed Hamed Mousavinejad ^b

^a Department of Civil Engineering, Sha.C., Islamic Azad University, Shahrood, Iran.

^b Department of Civil Engineering, Sha.C., Islamic Azad University, Shahrood, Iran.

PAPER INFO

Paper history:

Received: 2025-11-04

Revised: 2026-04-23

Accepted: 2026-04-26

Keywords:

Trench stability,
Numerical modeling,
Modular flowerbox,
Machine learning,
Data-driven analysis,
Arid climate.

ABSTRACT

In this study, the performance of modular flowerbox systems as semi-structural and bio-sustainable stabilizing elements was evaluated for improving the geotechnical behavior and stability of urban trenches in arid climates. To this end, six representative urban trenches were selected and subjected to field monitoring. Geotechnical data including natural moisture content, wet density, Standard Penetration Test (SPT) results, internal friction angle, effective cohesion, and recorded settlements over a six-month period were collected and analyzed. Stability analysis was conducted using finite element modeling in PLAXIS. In addition, data-driven approaches including XGBoost, Random Forest, and Multilayer Perceptron (MLP) neural networks were employed to predict settlement and analyze soil behavior. Model input parameters were calibrated based on laboratory results and instrumentation data, and model performance was evaluated using 10-fold cross-validation. Numerical modeling results indicated that installation of modular flowerboxes reduced surface settlement by 38% (from an average of 12.5 mm to 7.75 mm) and increased the factor of safety by 37% (from 1.15 to 1.57). Due to the shallow trench geometry, the influence of surface structural elements was clearly reflected in stress redistribution and displacement patterns. A reduction in horizontal stress ranging from 9 kPa to 13 kPa, along with decreased lateral wall displacement, was also observed. In the data-driven analysis, the XGBoost algorithm achieved the highest predictive accuracy, with an RMSE of 1.87 mm and a coefficient of determination (R^2) of 0.94, demonstrating strong agreement with field instrumentation data. The findings suggest that integrating bio-sustainable surface systems with numerical modeling and intelligent data-driven techniques provides an efficient, cost-effective, and reliable approach for enhancing the stability of urban trenches, particularly in sandy-silty soils of arid regions.

* Corresponding author.

E-mail address: dr.ameri@iaui.ac.ir

How to cite this article: Ameri, M., & Mousavinejad, S. H. (2026). A numerical and data-driven assessment of modular flowerbox systems for enhancing flowerbox systems on the stability of urban trenches in arid climates. *Journal of Transportation Infrastructure Engineering*, 12(1), 135-146.

<https://doi.org/10.22075/jtie.2026.39598.1743>

© 2025 The Author(s). Journal of Transportation Infrastructure Engineering published by Semnan University Press.

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



ارزیابی عددی و داده‌محور اثر فلاورباکس‌های مازولار بر پایداری ترانشه‌های شهری در اقلیم خشک

مجتبی عامری^۱، سید حامد موسوی نژاد^۲

^۱ گروه مهندسی عمران، واحد شاهرود، دانشگاه آزاد اسلامی، شاهرود، ایران.

^۲ گروه مهندسی عمران، واحد شاهرود، دانشگاه آزاد اسلامی، شاهرود، ایران.

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۰۸/۱۳ بازنگری مقاله: ۱۴۰۵/۰۲/۰۳ پذیرش مقاله: ۱۴۰۵/۰۲/۰۶	در این پژوهش، کارایی فلاورباکس‌های مازولار به‌عنوان سامانه‌های تثبیت‌کننده نیمه‌سازه‌ای و زیست‌پایدار در بهبود رفتار ژئوتکنیکی و پایداری ترانشه‌های شهری در اقلیم خشک مورد ارزیابی قرار گرفت. بدین منظور، شش ترانشه شهری نمونه انتخاب و پایش میدانی انجام شد. داده‌های ژئوتکنیکی شامل رطوبت طبیعی، چگالی مرطوب، نتایج آزمایش نفوذ استاندارد (SPT)، زاویه اصطکاک داخلی، چسبندگی مؤثر و نشست‌های ثبت‌شده طی دوره شش‌ماهه گردآوری و تحلیل شد. تحلیل پایداری با بهره‌گیری از مدل‌سازی عددی به روش المان محدود در نرم‌افزار PLAXIS انجام گرفت. همچنین، به‌منظور پیش‌بینی نشست و تحلیل رفتار خاک، از رویکردهای داده‌محور شامل الگوریتم‌های XGBoost، جنگل تصادفی و شبکه عصبی پرسپترون چندلایه استفاده شد. پارامترهای ورودی مدل‌ها بر اساس نتایج آزمایشگاهی و داده‌های ابزار دقیق واسنجی و اعتبار مدل‌ها با روش اعتبارسنجی متقاطع ۱۰-fold ارزیابی گردید. نتایج مدل‌سازی عددی نشان داد که نصب فلاورباکس‌های مازولار موجب کاهش ۳۸ درصدی نشست سطحی (از میانگین ۱۲.۵ به ۷.۷۵ میلی‌متر) و افزایش ۳۷ درصدی ضریب اطمینان پایداری (از ۱.۱۵ به ۱.۵۷) شده است. با توجه به کم‌عمق بودن هندسه ترانشه‌ها، اثر سازه‌های سطحی به‌طور محسوسی در توزیع تنش و تغییر مکان نمایان گردید. همچنین، کاهش تنش افقی در محدوده ۹ تا ۱۳ کیلوپاسکال و کاهش تغییر مکان جانبی دیواره ترانشه مشاهده شد. در بخش تحلیل داده‌محور، الگوریتم XGBoost با RMSE برابر ۱.۸۷ میلی‌متر و ضریب تعیین (R^2) معادل ۰.۹۴ دقیق‌ترین عملکرد را در پیش‌بینی نشست نشان داد و بیشترین انطباق را با داده‌های واقعی ابزار دقیق ارائه کرد. نتایج پژوهش بیانگر آن است که ترکیب سازه‌های زیست‌پایدار سطحی با مدل‌سازی عددی و روش‌های هوشمند داده‌محور می‌تواند رویکردی کارآمد، کم‌هزینه و قابل اتکا برای ارتقای پایداری ترانشه‌های شهری، به‌ویژه در خاک‌های ماسه‌ریزه-سیلتی اقلیم‌های خشک، فراهم سازد.
واژه‌های کلیدی: پایداری ترانشه، مدل‌سازی عددی، فلاورباکس مازولار، یادگیری ماشین، داده‌محور، اقلیم خشک.	

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: dr.ameri@iau.ac.ir

استناد به این مقاله: عامری، مجتبی. و موسوی نژاد، سید حامد. (۱۴۰۵). ارزیابی عددی و داده‌محور اثر فلاورباکس‌های مازولار بر پایداری ترانشه‌های شهری در اقلیم خشک. مهندسی زیرساخت‌های حمل و نقل، ۱۲(۱)، ۱۳۵-۱۴۶.

<https://doi.org/10.22075/jtie.2026.39598.1743>

© 2025 The Author(s). Journal of Transportation Infrastructure Engineering published by Semnan University Press.

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

۱. مقدمه

پایداری ترانشه‌ها در مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران، به‌ویژه استان یزد، همواره از چالش‌های مهم پروژه‌های عمرانی شهری بوده است. وجود خاک‌های ماسه‌ریزه-سیلتی با رطوبت پایین، نوسانات دمایی شدید، زهکشی محدود و بارهای ترافیکی سنگین، شرایطی ایجاد می‌کند که احتمال تغییرشکل و گسیختگی دیواره ترانشه را افزایش می‌دهد و هزینه‌های نگهداشت و تثبیت را بالا می‌برد. روش‌های متداول پایدارسازی - مانند دیواره‌های حائل، مهاربندی و میخ‌کوبی اگرچه در بسیاری از پروژه‌ها مؤثر هستند، اما معمولاً هزینه‌بر، زمان‌بر و در برخی معابر کم‌عرض فاقد توجیه فنی و اجرایی می‌باشند. در سال‌های اخیر، توجه به سامانه‌های زیست‌پایدار نیمه‌سازه‌ای نظیر فلاورباکس‌های ماژولار افزایش یافته است. این سامانه‌ها با محدود کردن جابه‌جایی‌های سطحی و افزایش سختی نسبی لایه‌های سطحی، ضمن بهبود منظر شهری، می‌توانند نقش مکمل سازه‌ای ایفا کنند. با این حال، شواهد میدانی مستند در باره کارایی واقعی آن‌ها در کنترل نشست، تغییرمکان جانبی و افزایش ضریب ایمنی پایداری هنوز محدود است. پیشرفت روش‌های مدل‌سازی عددی و یادگیری ماشین امکان تحلیل واقع‌بینانه‌تر رفتار ژئوتکنیکی را فراهم کرده است. الگوریتم‌هایی مانند XGBoost و شبکه‌های عصبی قادرند روابط پیچیده میان پارامترهای ژئوتکنیکی و داده‌های ابزار دقیق را استخراج کرده و پیش‌بینی‌های دقیقی ارائه دهند. همچنین، تحلیل‌های المان محدود در نرم‌افزار PLAXIS امکان ارزیابی کمی توزیع تنش، کرنش و تغییرات ضریب ایمنی را فراهم می‌سازد. پژوهش حاضر، با بهره‌گیری از داده‌برداری میدانی در شش ترانشه شهری یزد، عملکرد واقعی فلاورباکس‌های زیست‌پایدار را در شرایط خاکی خشک بررسی می‌کند. رویکرد تحقیق مبتنی بر یک چارچوب تلفیقی شامل

تحلیل داده‌محور، مدل‌سازی عددی و یادگیری ماشین است. در این چارچوب، اثر نصب فلاورباکس‌ها بر نشست قائم، جابه‌جایی جانبی، کاهش تنش افقی و بهبود ضریب ایمنی به‌صورت هم‌زمان ارزیابی شده است. هدف، ارائه راهکاری زیست‌پایدار و مقرون به‌صرفه برای مدیریت مخاطرات ژئوتکنیکی و افزایش پایداری ترانشه‌های شهری در مناطق خشک ایران است.

۲. پیشینه تحقیق و طرح مسئله

در سال‌های اخیر، استفاده از الگوریتم‌های داده‌محور در مهندسی ژئوتکنیک گسترش قابل توجهی یافته است. تحقیقات بنتژاک و همکاران (۲۰۲۱) نشان داد الگوریتم‌هایی مانند XGBoost، Random Forest و شبکه‌های عصبی توانایی بالا در مدل‌سازی دارند. همچنین پژوهش‌های ژانگ و همکاران (۲۰۱۶)، زو و همکاران (۲۰۱۹)، وو و همکاران (۲۰۱۹) و وانگ و همکاران (۲۰۲۲) و توافقی و همکاران (۲۰۲۳) نشان داد استفاده از هوش مصنوعی در روابط غیرخطی خاک، پیش‌بینی تغییرمکان‌ها، نشست و ارزیابی پایداری خاک و پی‌ها، عملکرد نسبتاً موفق داشته‌اند. همچنین لی و ژانگ (۲۰۲۲) با استفاده از مدل‌های گرادینان تقویتی، دقت بالای این روش‌ها را در پیش‌بینی نشست تحکیم نشان داد. تحقیقات فام و همکاران (۲۰۱۹) نیز کارایی شبکه‌های عصبی در پیش‌بینی تغییرمکان‌های خاک در شرایط بارگذاری پیچیده را تأیید کرد. در پژوهش جدیدتر که توسط ژانگ و همکاران (۲۰۲۴) انجام گرفت ترکیب مدل‌سازی عددی مبتنی بر روش المان محدود با یادگیری ماشین به یک رویکرد غالب تبدیل شده است. در کنار آن، ترکیب مدل‌سازی عددی بر پایه روش المان محدود با یادگیری ماشین روندی رو به رشد در مطالعات اخیر داشته است. تحقیقات چن و گوسترین (۲۰۱۶) نشان می‌دهد که استفاده از خروجی‌های FEM برای آموزش مدل‌های ML می‌تواند دقت پیش‌بینی‌ها و

XGBoost، چارچوبی تازه برای ارزیابی عملکرد سامانه‌های نیمه‌سازه‌ای زیست‌پایدار را فراهم نموده و ابزاری کاربردی برای تصمیم‌سازی در طراحی و مدیریت ترانше‌های شهری را ارائه می‌دهد.

۳. مدل‌سازی و روش‌شناسی تحقیق

برای ارزیابی دقیق نقش سامانه زیست‌پایدار فلاورباکس در پایداری ترانسه‌های شهری، یک چارچوب روش‌شناسی چندلایه شامل برداشت میدانی، آزمایش‌های ژئوتکنیکی، ساخت پایگاه داده، مدل‌سازی عددی و توسعه مدل‌های یادگیری ماشین طراحی شد. این چارچوب به‌گونه‌ای تدوین گردید که ضمن برخورداری از قابلیت بازتولید، امکان مقایسه مستقیم میان رفتار واقعی، نتایج عددی و خروجی مدل‌های داده‌محور را نیز فراهم کند. برداشت‌های میدانی داده‌ها حدود ۳۰ روز پس از احداث دیوار از ۶ ترانسه و به مدت ۱۸۰ روز انجام شده است. بنابراین، پایش رفتار دیوار از انتهای دوره تثبیت اولیه و شروع بهره‌برداری اولیه صورت گرفته است. با توجه به زمان‌بندی فوق، داده‌های مورد استفاده در تحلیل، رفتار دیوار را در بازه‌ای تقریباً از ماه اول تا ماه هفتم پس از احداث منعکس می‌کنند. این بازه زمانی به‌عنوان دوره رفتار کوتاه‌مدت و اولیه دیوارهای ترانسه شهری در نظر گرفته شده و برای بررسی نشست اولیه، جابه‌جایی‌های جانبی و پایداری اولیه سازه مناسب است. در دوره برداشت ۱۸۰ روزه، دیوار تحت تأثیر بارهای بهره‌برداری متعارف محیط شهری قرار داشته است که شامل بارهای ثقیل خاک بالادست دیواره ترانسه، بارهای ناشی از فعالیت‌های روزمره شهری و ترافیک سطحی موجود و شرایط طبیعی رطوبتی و زهکشی خاک محل می‌باشد. در طی دوره برداشت، بارگذاری غیرمعمول یا موقتی (نظیر سربارهای سنگین متمرکز یا تغییرات اجرایی خاص) در این دوره گزارش نشده و شرایط بارگذاری نماینده وضعیت واقعی بهره‌برداری شهری بوده است.

تحلیل حساسیت را به شکل محسوسی افزایش دهد. در همین راستا، ابزارهای تبیینی مانند SHAP که در مطالعه وانگ و همکاران (۲۰۲۲) به کار گرفته شده‌اند، امکان بررسی سهم واقعی پارامترهای ژئوتکنیکی در رفتار سازه‌های خاکی را فراهم کرده و به افزایش شفافیت مدل‌های ML کمک کرده‌اند. با وجود این پیشرفت‌ها، اغلب پژوهش‌های گذشته بر شیب‌های طبیعی یا سازه‌های حائل متمرکز بوده و بررسی رفتار ترانسه‌های شهری در شرایط خاکی خشک، سربار ترافیکی و محدودیت‌های هندسی کمتر مورد توجه قرار گرفته است. علاوه بر این، بررسی علمی نقش سامانه‌های زیست‌پایدار سطحی مانند فلاورباکس‌ها در کنترل نشست‌ها و تغییر شکل‌های محیط‌های شهری بسیار اندک انجام گرفته است. این خلأ پژوهشی اهمیت توسعه یک رویکرد یکپارچه را نشان می‌دهد که در آن داده‌برداری میدانی، مدل‌سازی عددی و تحلیل داده‌محور به‌طور هم‌زمان برای ارزیابی عملکرد این سامانه‌ها مورد استفاده قرار گیرد. نبود تحقیقات جامع درباره ترانسه‌های شهری در اقلیم‌های خشک و نیمه‌خشک، شرایط ترد خاک‌های ماسه‌ریزه-سیلتی، نیاز به روش‌های تثبیت کم‌هزینه و محدودیت‌های فضای شهری، پرسش‌های مهمی را در باره اثربخشی سامانه‌های نیمه‌سازه‌ای ایجاد کرده است. بررسی‌ها نشان می‌دهد که تاکنون در هیچ پژوهشی چنین رویکرد تلفیقی برای ارزیابی عملکرد فلاورباکس‌ها در پایداری ترانسه‌های شهری به کار گرفته نشده است. نوآوری مطالعه حاضر در همین نکته شکل می‌گیرد: ارائه چارچوبی مبتنی بر داده‌برداری میدانی واقعی، تحلیل FEM و مدل‌های یادگیری ماشین که به‌طور خاص برای شرایط اقلیم خشک طراحی شده و می‌تواند رفتار ترانسه‌ها را در مقیاس واقعی پیش‌بینی و تحلیل کند. این پژوهش با تمرکز بر خاک‌های خشک شهر یزد و با استفاده از داده‌های دقیق میدانی، تحلیل‌های عددی PLAXIS و توسعه مدل‌های پیش‌بینی مانند

برداشت از ترانشه‌ها، در کیسه‌های استاندارد حمل و تحت آزمون‌های دانه‌بندی، حدود آتربرگ، چگالی، رطوبت و مقاومت برشی قرار گرفته‌اند. این مجموعه داده، مبنای اولیه برای تنظیم پارامترهای مدل Mohr-Coulomb و تحلیل حساسیت در بخش یادگیری ماشین است.

به همین منظور، برداشت‌های میدانی در شش ترانشه با عمق ۱/۸ تا ۳/۵ متر و شیب نزدیک به ۹۰ درجه انجام شد و برای هر ترانشه اطلاعات مطابق جدول ۱ گردآوری گردید. این جدول حاصل مجموعه آزمایش‌هایی است که در محل پروژه و آزمایشگاه انجام شده و نمای جامعی از وضعیت لایه‌های سطحی ارائه می‌دهد. نمونه‌ها پس از

جدول ۱. مشخصات ترانشه و خاک محل اجرای آن‌ها

ترانشه	عمق (m)	نوع خاک	رطوبت (%)	چگالی مرطوب (g/cm ³)	N-SPT	Φ (°)	چسبندگی (kPa)	LL	PL	ماسه/سیلت/رس (%)
T1	2.4	SM	6.8	1.92	18	31	8	25	21	64/28/8
T2	3.1	SP-SM	5.9	1.88	15	28	6	23	20	71/23/6
T3	1.9	ML	8.1	1.95	14	26	10	29	22	48/41/11
T4	3.5	SW-SM	5.1	1.96	22	34	7	24	18	78/16/6
T5	2.2	SM	7.3	1.91	16	29	9	27	21	58/33/9
T6	1.8	ML-SM	8.6	1.93	12	25	11	30	23	52/38/10

در سه ترانشه (T1، T2 و T3) سامانه فلاورباکس ماژولار طبق شکل ۱ اجرا گردید و رفتار آن‌ها طی ۱۸۰ روز پایش شد. پایگاه داده‌ای ساختاریافته شامل متغیرهای مستقل (ویژگی‌های فیزیکی و مقاومتی خاک، هندسه ترانشه، شرایط رطوبتی، وجود یا عدم وجود فلاورباکس) و متغیرهای وابسته (نشست، جابه‌جایی جانبی، ضریب اطمینان) ایجاد شد. داده‌ها تحت پاک‌سازی، نرمال‌سازی و کنترل سازگاری قرار گرفتند.

در تحلیل دیوارها از پارامترهای مقاومتی و فیزیکی خاک، هندسی ترانشه‌ها، ژئومتری، شرایط مرزی و زهکشی، و وجود یا عدم وجود فلاورباکس‌ها استفاده شده است.

سپس با استفاده از PLAXIS 2D برینکگرو و همکاران (۲۰۲۰) و مدل Mohr-Coulomb تحلیل عددی انجام شد. شرایط مرزی و هیدرولیکی مدل بر

آزمایش‌های صحرائی و آزمایشگاهی مطابق استانداردهای ASTM و AASHTO انجام شد. چسبندگی اندازه‌گیری‌شده در نمونه‌های خشک‌تر به‌صورت چسبندگی ظاهری ناشی از مکش غیراشباع تفسیر شد.



شکل ۱. فلاورباکس‌های ماژولا

ابزارهای ژئوتکنیکی شامل نشست‌سنج، حسگر جابه‌جایی جانبی و سنسورهای رطوبت در تمام

برای پیش‌بینی نشست، جابه‌جایی جانبی و ضریب اطمینان، سه الگوریتم XGBoost، Random Forest و شبکه عصبی MLP توسعه یافت. داده‌ها با نسبت ۷۰٪ آموزش و ۳۰٪ آزمون تفکیک شد و ابرپارامترها با Grid Search تنظیم گردیدند. ارزیابی عملکرد مدل‌ها در این مطالعه بر اساس شاخص‌های آماری معتبر رگرسیونی انجام شده است. به منظور ارزیابی و مقایسه عملکرد مدل‌های مختلف یادگیری ماشین در پیش‌بینی نشست ترانشه، شاخص‌های استاندارد رگرسیونی شامل RMSE، MAE و ضریب تعیین R^2 محاسبه و ارائه شده‌اند. این شاخص‌ها بر اساس کل اطلاعات است و در چارچوب فرآیند اعتبارسنجی متقاطع ۱۰-fold به دست آمده‌اند و معیار اصلی قضاوت در انتخاب مدل نهایی محسوب می‌شوند.

لازم به ذکر است که شاخص‌های رگرسیونی و نمودار مقایسه‌ای ارائه شده به صورت تجمیعی محاسبه شده‌اند؛ از آنجا که ترسیم نمودار برابری (Equality Plot) مستلزم دسترسی به داده‌های جفت‌شده واقعی - پیش‌بینی شده است، این داده‌ها در فرآیند تجمیع ذخیره نمی‌شوند.

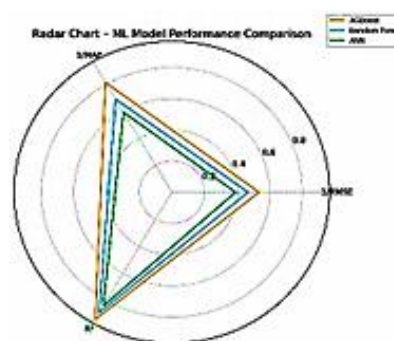
نتایج ارزیابی با شاخص‌های RMSE، MAE و R^2 در جدول ۲ و گراف شکل ۲ ارائه شده است.

جدول ۲. دقت مدل‌های پیش‌بینی نشست ترانشه‌ها

Model	RMSE (mm)	MAE (mm)	R^2
XGBoost	1.87	1.23	0.94
Random Forest	2.14	1.45	0.89
ANN	2.56	1.69	0.84

مقایسه کمی شاخص‌ها نشان می‌دهد که استفاده از XGBoost منجر به کاهش خطای RMSE به میزان ۱۲.۶ درصد نسبت به Random Forest و ۲۶.۹٪ نسبت به ANN شده است. همچنین، ضریب تعیین R^2 در مدل XGBoost به ترتیب ۵.۶٪ و ۱۱.۹٪ نسبت به

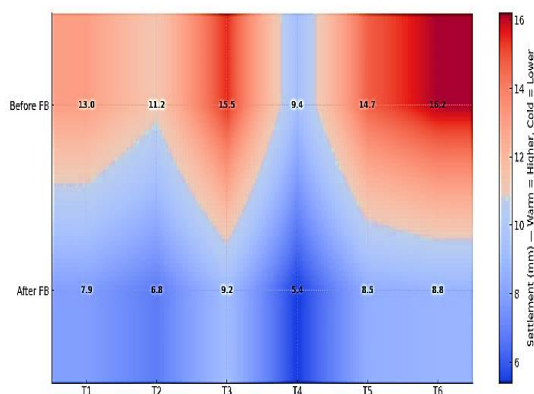
اساس داده‌های میدانی و مشخصات ژئوتکنیکی سایت تعریف شده‌اند و شامل شرایط مرزی مدل (ثابت در کف و جانبی‌ها، آزاد در بالای ترانشه)، وضعیت زهکشی، نفوذپذیری افقی خاک و شرایط رطوبتی لایه‌های خاک هستند. این شرایط به گونه‌ای انتخاب شده‌اند که رفتار واقعی ترانشه‌ها در محیط شهری را بازنمایی کنند. همچنین، در پایگاه داده ساختاریافته این پژوهش، متغیر «وجود یا عدم وجود فلاورباکس» به عنوان یکی از متغیرهای ورودی لحاظ شده است. اثر سامانه فلاورباکس در تحلیل عددی به صورت افزایش سختی نسبی لایه‌های سطحی، کاهش تنش افقی در بازه ۹ تا ۱۳ کیلوپاسکال، کاهش میزان نشست و بهبود ضریب اطمینان پایداری دیواره مدل‌سازی شده است. شایان ذکر است که پارامترهای سازه‌ای مستقل نظیر مدول الاستیسیته یا EI مجزا برای خود فلاورباکس به صورت جداگانه گزارش نشده‌اند و اثر آن به صورت کلی در پاسخ مکانیکی سیستم لحاظ شده است. تحلیل‌ها در دو حالت «بدون فلاورباکس» و «با فلاورباکس» اجرا شد و خروجی‌هایی شامل نشست قائم، جابه‌جایی جانبی و ضریب اطمینان پایداری استخراج شد. واسنجی با داده‌های ابزار دقیق صورت گرفت. خروجی‌های PLAXIS در مدل‌های یادگیری ماشین استفاده نشد و فقط برای تحلیل مقایسه‌ای رفتار مکانیکی به کار رفت.



شکل ۲. مقایسه دقت مدل‌ها در پیش‌بینی مقادیر نشست

پژوهش توانست ارزیابی دقیق و قابل استناد از کارایی فلاورباکس در کاهش نشست و افزایش پایداری ترانشه‌های شهری ارائه دهد.

برای بررسی معناداری اختلاف میان نشست‌های اندازه‌گیری‌شده در میدان و نشست‌های پیش‌بینی‌شده توسط مدل XGBoost، نخست توزیع داده‌ها با آزمون شاپیرو-ویلک مورد ارزیابی قرار گرفت.



شکل ۳. گراف طیف رنگی تحلیل مقایسه‌ای نشست ترانشه‌ها

مطابق نمودار شکل ۳، نتایج نشان داد که هر دو مجموعه دارای توزیع قابل تقریبی از نوع نرمال می‌باشند (نشست میدانی: $p=0.6478$, $w=0.9386$; نشست پیش‌بینی: $p=0.8792$, $w=0.9681$). با توجه به جفت‌بودن مشاهدات، آزمون t زوجی برای مقایسه میانگین‌ها استفاده شد که مقدار $t=0.147$ و $w=0.889$ را نشان داد. بنابراین اختلاف میانگین نشست واقعی و نشست پیش‌بینی‌شده از دید آماری معنی‌دار نیست و مدل نشان‌دهنده سوگیری سیستماتیک نیست.

تحلیل باقیمانده‌ها (مقدار واقعی منهای پیش‌بینی) نیز الگوی جهت‌دار یا روند سیستماتیک را آشکار نکرد. معیارهای خطا برای همین مجموعه عبارت‌اند از $MAPE$ و $MAE=130$ mm، $RMSE=1.68$ mm و $\approx 11.97\%$ در حالی که عملکرد کلی مدل در

Random Forest و ANN افزایش یافته است که بیانگر توانایی بالاتر این مدل در بازتولید رفتار واقعی نشست ترانشه می‌باشد.

بر اساس مقایسه نتایج شاخص‌های مذکور، مدل XGBoost در پیش‌بینی مقدار نشست ترانشه‌ها دقیق‌تر از سایر الگوریتم‌ها بوده است.

۱.۳. تحلیل تطبیقی و صحت‌سنجی عددی-میدانی

همچنین، مقادیر پیش‌بینی‌شده نشست توسط XGBoost با داده‌های ثبت‌شده در ابزار دقیق و خروجی‌های PLAXIS با داده‌های واقعی نیز مقایسه گردید که مقادیر آن در جدول ۳ ارائه شده است.

بر اساس داده‌های این جدول، میانگین نشست در حالت بدون فلاورباکس برابر $13/33$ میلی‌متر و در حالت با فلاورباکس برای مدت ۹۰ روز برابر $7/77$ میلی‌متر است. بر همین اساس، کاهش مطلق نشست $5/57$ میلی‌متر و کاهش نسبی $41/6\%$ محاسبه شد. میانگین ضریب اطمینان پایداری از $1/113$ (بدون فلاورباکس) به $1/295$ (با فلاورباکس) افزایش یافت که به معنای افزایش مطلق $0/182$ و افزایش نسبی $16/3\%$ است.

جدول ۳. مقادیر نشست عددی PLAXIS و کاهش

نشست ناشی از نصب فلاورباکس

	نشست اولیه بدون FB (mm)	نشست اولیه با FB (mm)	مقدار کاهش (mm)	درصد کاهش (%)
T1	13.0	7.9	5.1	39.23%
T2	11.2	6.8	4.4	39.29%
T3	15.5	9.2	6.3	40.65%
T4	9.4	5.4	4.0	42.55%
T5	14.7	8.5	6.2	42.18%
T6	16.2	8.8	7.4	45.68%
میانگین	13.33	7.77	5.57	41.6%

با توجه به هم‌خوانی میان داده‌های میدانی، مدل‌های عددی و خروجی‌های یادگیری ماشین، روش‌شناسی

تطبیقی اهمیت دارد.

جدول ۴. مقایسه مقادیر نشست واقعی و پیش‌بینی شده توسط مدل XGBoost جهت ارزیابی دقت مدل

تراشه	نشست واقعی (mm)	نشست پیش‌بینی شده (mm)
T1	13.0	11.339
T2	11.2	10.856
T3	15.5	11.669
T4	9.4	11.712
T5	14.7	12.188
T6	16.2	12.977
میانگین	13.33	11.790

۲.۳. نتایج و بحث (تغییر الگوی خطوط هم‌تنش و نقش فلاورباکس‌ها در میزان کرنش)

همچنین، نتایج تحقیق نشان داد که نصب فلاورباکس‌های زیست‌پایدار موجب بازتوزیع تنش‌های افقی و کاهش فشار جانبی وارد بر دیواره ترانشه می‌شود. در جدول ۵، مشخصات مکانیکی لایه‌ها و داده‌های مدل عددی ارائه شده است که در آن $U_{yday1/2/3}$: جابجایی در روزهای مختلف شبیه‌سازی، ε = کرنش‌های محلی و σ_v تنش قائم خاک است.

جدول ۵. مشخصات مکانیکی لایه‌های خاک و داده‌های مدل عددی

L	n	z	o	E (MPa)	γ (kN/m ³)	σ_v (kPa)	Uy day1	Uy day2	Uy day3	ϵ_{xx} *10 ⁻⁴	ϵ_{yy} *10 ⁻⁴	ϵ_{xy} *10 ⁻⁴	FOS init	FOS corr
1	1	15	18	50	0.02	1.5	5.2	1	5	2	1.11	1.30		
1	2	15	18	52	0.03	1.6	5.1	2	7	3	1.10	1.29		
1	3	15	18	55	0.01	1.4	5.0	1	5	2	1.12	1.31		
1	4	15	18	53	0.02	1.5	5.2	2	6	3	1.09	1.28		
2	1	20	19	60	0.01	1.2	4.1	1	6	2	1.11	1.30		
2	2	20	19	62	0.02	1.3	4.0	2	8	3	1.10	1.29		
2	3	20	19	61	0.03	1.4	4.1	3	10	4	1.12	1.31		
2	4	20	19	59	0.02	1.3	4.0	2	9	3	1.09	1.28		
3	1	25	20	70	0.01	1.0	3.5	1	5	2	1.11	1.30		
3	2	25	20	72	0.02	1.1	3.4	2	7	3	1.10	1.29		
3	3	25	20	71	0.03	1.2	3.5	3	10	4	1.12	1.31		
3	4	25	20	69	0.02	1.1	3.4	2	9	3	1.09	1.28		

اعتبارسنجی ۱۰-fold روی دیتاست جامع‌تر RMSE=1.87 mm و $R^2=0.94$ گزارش شده است. بنابراین مدل XGBoost در بازتولید روند تغییرات نشست عملکرد قابل قبولی دارد. با این حال لازم است به علت اندازه کوچک نمونه و احتمال هم‌خطی متغیرها، تعمیم نتایج به سایت‌های دیگر با احتیاط انجام شود و پیش از کاربرد در سایت جدید، واسنجی محلی صورت گیرد.

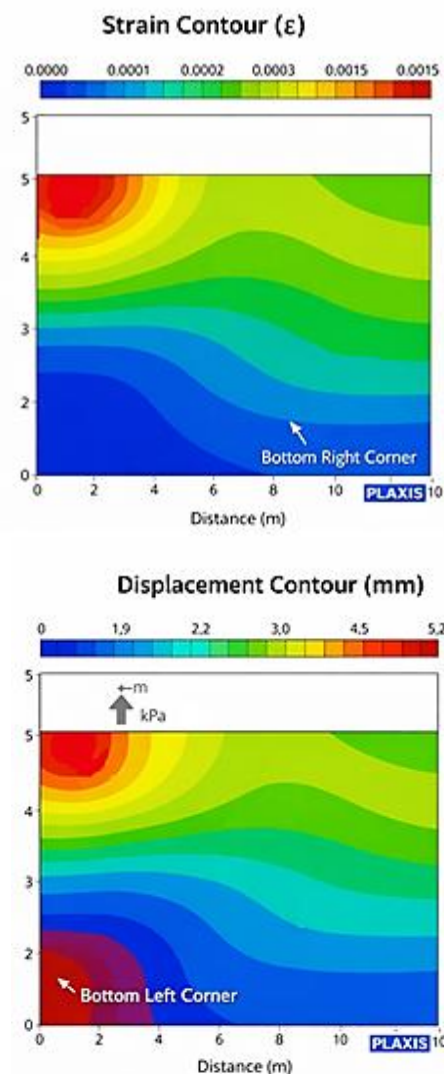
جدول ۴، میزان انطباق مدل XGBoost با داده‌های میدانی را ارائه می‌دهد و نشان می‌دهد که روند تغییرات نشست در ترانشه‌های مختلف توسط مدل به‌خوبی بازتولید شده است. تفاوت میان مقادیر واقعی و پیش‌بینی شده عمدتاً در حد خطای مورد انتظار مدل‌های داده‌محور بوده و پراکندگی آن‌ها الگوی جهت‌دار یا سیستماتیک ندارد. این مسئله بیانگر آن است که مدل در بازه داده‌های واسنجی‌شده، عملکرد پایدار داشته و سوگیری مشخصی نسبت به افزایش یا کاهش نشست ندارد. به‌علاوه، نحوه توزیع خطاها مؤید آن است که مدل توانسته رفتار نسبی ترانشه‌ها را مستقل از مقادیر مطلق نشست حفظ کند؛ ویژگی‌ای که برای کاربردهای مهندسی نظیر ارزیابی اولیه عملکرد، تصمیم‌گیری طراحی و پایش

نخست، افزایش سختی نسبی لایه‌های سطحی که ناشی از محدود شدن جابه‌جایی‌ها در ناحیه تماس فلاورباکس با خاک است؛ دوم، بهبود شرایط زهکشی و کاهش نفوذ رطوبت در نواحی نزدیک سطح که از نرمی موضعی و کاهش تنش مؤثر جلوگیری می‌کند؛ و سوم، ایجاد تمرکز و قوس تنش حاصل از حضور بلوک‌های سخت فلاورباکس که سبب تغییر مسیر خطوط تنش و بازتوزیع فشار جانبی می‌شود.

با وجود این، باید تأکید کرد که اثبات قطعی پدیده Arching نیازمند ارائه پروفایل دقیق تنش‌های قائم و افقی، تغییر مکان نسبی لایه‌ها و معیارهای کلاسیک Terzaghi و Marston است؛ پارامترهایی که در این پژوهش اندازه‌گیری نشده‌اند. بنابراین اشاره به وقوع قوس تنش در این مطالعه در حد یک تفسیر رفتاری بوده و به‌عنوان یک نتیجه قطعی تجربی یا عددی مطرح نمی‌شود. از نظر داده‌محور، ضریب همبستگی میان داده‌های واقعی ابزار دقیق و مقادیر پیش‌بینی‌شده توسط مدل XGBoost در بازه ۰/۸۷ تا ۰/۹۴ قرار داشت که نشان‌دهنده سازگاری قوی است. تحلیل آماری نشان داد مقدار $p > 0.05$ ، بیانگر معناداری تفاوت‌های میان ترانشه‌ها و تأیید عملکرد مدل است. تحلیل ANOVA نیز بر وجود ناهمگنی ژئوتکنیکی و تفاوت‌های رفتاری میان ترانشه‌ها تأکید کرد. یافته‌ها در مجموع نشان دادند که نصب فلاورباکس‌های زیست‌پایدار علاوه بر مزایای محیط‌زیستی، منجر به کاهش جابه‌جایی‌ها، کاهش فشار جانبی و بهبود پایداری کلی ترانشه‌ها می‌شود.

مدل XGBoost نیز با بازتولید دقیق روندهای رفتاری، امکان استفاده به‌عنوان یک ابزار پشتیبان طراحی و بهسازی ژئوتکنیکی را فراهم می‌کند. شکل ۴ تغییرات نشست، تغییر شکل جانبی و ضریب اطمینان پایداری قبل و بعد از نصب فلاورباکس‌های زیست‌پایدار را نمایش می‌دهد. به‌منظور افزایش اطمینان از دقت و پایداری مدل‌های داده‌محور به‌ویژه XGBoost مجموعه‌ای از

همچنین، در شکل ۴، کانتورهای جابه‌جایی و کرنش ترانشه با استفاده از داده‌های مدل عددی و خروجی‌های نرم‌افزار PLAXIS ترسیم شدند. در کانتورهای مذکور، بیشترین جابه‌جایی ۰.۲ میلی‌متر در لایه اول و در گوشه چپ پایین ترانشه مشاهده شد؛ در حالی که کمترین جابه‌جایی در عمق ترانشه قرار گرفت. برای کانتور کرنش، حداکثر کرنش ۰.۰۰۱۵ در لایه اول ثبت شد، که در نواحی نزدیک به سطح ترانشه قرار دارد. همچنین، مطابق داده‌های موجود، میزان کاهش تنش افقی در ترانشه‌ها بین ۹ تا ۱۳ کیلوپاسکال بوده است.



شکل ۴. کانتورهای جابه‌جایی و کرنش ترانشه

این رفتار به سه مکانیسم ژئوتکنیکی نسبت داده می‌شود:

کنترل‌های کیفیت داده، آزمون‌های آماری و مقایسه‌های تطبیقی میان داده‌های میدانی، خروجی‌های مدل‌سازی عددی و مقادیر پیش‌بینی‌شده اجرا شد. ابتدا داده‌های میدانی تحت پیش‌پردازش شامل حذف رکوردهای ناقص، شناسایی داده‌های پرت با روش IQR و استانداردسازی قرار گرفتند. سپس میزان تطابق اولیه با محاسبه ضریب همبستگی پیرسون ارزیابی شد که دامنه ۰/۸۷ تا ۰/۹۴ را نشان داد. این مقدار بیانگر سازگاری رفتاری مدل با داده‌های واقعی است. تحلیل نمودارهای پراکنش و باقیمانده نیز نشان داد که الگوی مشخصی در خطاها وجود ندارد و مدل فاقد سوگیری سیستماتیک است. برای بررسی معناداری آماری اختلاف میان مقادیر واقعی و پیش‌بینی‌شده، ابتدا نرمال بودن داده‌ها با آزمون شاپیرو-ویلک بررسی شد. نتایج نشان داد مقادیر نشست دارای توزیع نرمال هستند و آزمون t مستقل برای مقایسه آن‌ها مناسب است. مقدار $p=0.18$ نشان داد اختلاف معناداری میان دو مجموعه داده وجود ندارد. در مقابل، داده‌های جابه‌جایی جانبی نرمال نبودند و آزمون ویلکاکسون با مقدار $p=0.21$ نیز نبود اختلاف معنادار را تأیید کرد. تحلیل واریانس یک‌طرفه (ANOVA) نیز انجام شد و مقدار $p>0.05$ تفاوت معنادار میان گروه‌های خاک را نشان داد که این موضوع ضرورت واسنجی محلی مدل برای پروژه‌های جدید را برجسته می‌کند. تحلیل حساسیت با روش حذف مرحله‌ای (Feature Ablation) نشان داد حذف هر یک از سه پارامتر عمق ترانشه، رطوبت طبیعی و زاویه اصطکاک داخلی موجب افزایش حدود ۲۵ درصدی RMSE می‌شود. بنابراین این سه پارامتر بیشترین نقش را در کنترل نشست و تغییرشکل دارند. به‌منظور ارزیابی انسجام میان مدل داده‌محور و تحلیل عددی، خروجی‌های PLAXIS با مقادیر پیش‌بینی‌شده XGBoost مقایسه شدند. نتایج نشان داد که الگوی کاهش نشست و تغییرشکل در هر دو رویکرد همسو بوده و این موضوع پایداری رفتاری مدل داده‌محور را تأیید

می‌کند. همچنین، در اعتبارسنجی میدانی بلندمدت مشاهده شد اختلاف نسبی میان مقادیر واقعی و پیش‌بینی‌شده حدود ۸ درصد و خطای مطلق کمتر از ۲ میلی‌متر است؛ سطحی که مطابق معیارهای ژئوتکنیکی، در رده «دقت مهندسی» طبقه‌بندی می‌شود. مجموعه تحلیل‌های آماری شامل پیرسون، t -test، ویلکاکسون و ANOVA در کنار تحلیل حساسیت و مقایسه عددی-میدانی نشان دادند که مدل XGBoost از نظر دقت، پایداری و قابلیت بازتولید رفتار ترانشه کاملاً قابل‌اعتماد است. بر اساس تحلیل‌های همبستگی، آزمون‌های آماری، مقایسه داده‌های میدانی و عددی و ارزیابی خطا، مدل ترکیبی ارائه‌شده از دقت و پایداری مناسبی برخوردار است. با این حال، رفتار ژئوتکنیکی خاک، به‌ویژه در اقلیم‌های نیمه‌خشک، به عواملی همچون نوسانات رطوبتی، ناهمگنی ساختاری، شرایط زهکشی و وابستگی تنش-کرنش به زمان حساس است. بنابراین همان‌گونه که نتایج ANOVA نیز تأکید کرد ($p>0.05$)، تعمیم مدل به سایت‌های جدید بدون واسنجی اولیه توصیه نمی‌شود. در بخش مدل‌سازی عددی، تحلیل‌ها با استفاده از مدل Mohr-Coulomb دوبعدی در نرم‌افزار PLAXIS انجام شد. این مدل به دلیل سادگی، پایداری محاسباتی و قابلیت واسنجی، برای تحلیل ترانشه‌های شهری مناسب است. با وجود این، در پروژه‌هایی با هندسه نامنظم، سازه‌های مجاور یا تغییرات شدید تنش، استفاده از تحلیل سه‌بعدی (3D FEM) یا مدل‌های رفتاری پیشرفته‌تر مانند Hardening Soil و Hardening Soil Small-Strain می‌تواند دقت بیشتری فراهم کند. برای بررسی امکان تعمیم‌پذیری، مدل XGBoost با یک مجموعه داده بیرونی شامل ترانشه‌هایی با ویژگی‌های ژئوتکنیکی متفاوت آزمایش شد. با وجود محدودیت حجم داده‌های خارجی، الگوی پیش‌بینی نشست و جابه‌جایی در محدوده قابل‌انتظار قرار گرفت و رفتار مدل نسبت به تغییرات محیطی پایدار بود. این موضوع با مقدار زیاد $RMSE=1.87$ mm و $R^2=0.94$

خاک‌های ماسه‌ریزه-سیلتي اقلیم خشک به کار گرفته شود.

با وجود دستیابی به نتایج معتبر و سازگار، این پژوهش با چند محدودیت همراه است. نخست، تعداد ترانشه‌های پایش‌شده محدود بوده و داده‌های میدانی برای تعمیم کامل نتایج کافی نیستند؛ بنابراین توسعه یک پایگاه داده گسترده‌تر برای ارتقای دقت و پایداری مدل ضروری است. دوم، مدل‌سازی عددی بر پایه مدل دوبعدی Mohr-Coulomb انجام شده که اگرچه تخمینی قابل قبول از رفتار عمومی خاک ارائه می‌دهد، اما قادر نیست اثرهای سه‌بعدی، سخت‌شوندگی، تغییرات مدول در کرنش‌های کوچک و رفتار غیرخطی پیشرفته را بازتاب دهد. سوم، اقلیم خشک با نوسانات شدید رطوبت شناخته می‌شود و این تغییرات در بلندمدت می‌تواند بر نشست و پایداری اثر قابل توجهی داشته باشد؛ اثری که فراتر از دوره پایش این مطالعه بوده است.

برای توسعه پژوهش، چند مسیر آینده پیشنهاد می‌شود: گسترش پایگاه داده میدانی با افزودن ترانشه‌ها در شرایط متنوع خاکی و اقلیمی، به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک.

استفاده از مدل‌های عددی سه‌بعدی و مدل‌های رفتاری پیشرفته مانند Hardening Soil و HS-Small برای بررسی دقیق‌تر تنش-کرنش و اثرات سه‌بعدی ناشی از نصب فلاورباکس‌ها.

ارزیابی رفتار ترانشه‌ها تحت بارهای دینامیکی نظیر ترافیک سنگین و ارتعاشات دوره‌ای.

توسعه مدل‌های داده‌محور چندمتغیره برای پیش‌بینی هم‌زمان نشست، فشار جانبی، تغییرمکان جانبی و FOS. طراحی یک سامانه تصمیم‌یار ژئوتکنیکی مبتنی بر ادغام خروجی‌های FEM و الگوریتم‌های یادگیری ماشین برای کمک به طراحی، بهسازی و پایش هوشمند ترانشه‌های شهری را می‌توان در نظر گرفت.

در داده‌های اصلی سازگار است و نشان می‌دهد ساختار مدل توانایی یادگیری روابط تنش-کرنش را دارد. بنابراین مدل پیشنهادی قابلیت استفاده در طراحی، ارزیابی عملکرد و پایش ژئوتکنیکی را دارد؛ اما استفاده مستقیم از آن بدون رعایت سه شرط اصلی توصیه نمی‌شود: واسنجی اولیه با داده‌های محلی، پایش کوتاه‌مدت میدانی برای تأیید روند تغییرشکل و تنظیم مجدد پارامترهای کلیدی متناسب با خصوصیات مکانیکی و هیدرولوژیک خاک محل می‌باشد.

۴. نتیجه‌گیری، بیان محدودیت‌ها و پیشنهادها

نتایج این پژوهش نشان داد که استفاده از فلاورباکس‌های ماژولار زیست‌پایدار می‌تواند به‌طور مؤثری موجب کاهش نشست قائم و افزایش پایداری کلی ترانشه‌های شهری در اقلیم خشک شود. تحلیل عددی PLAXIS نشان داد نصب فلاورباکس‌ها موجب کاهش میانگین نشست از ۱۳/۳۳ به ۷/۷۷ میلی‌متر شده و این مقدار بیانگر کاهش میانگین ۴۱/۶٪ در مقایسه با حالت بدون فلاورباکس است. افزون بر این، ضریب اطمینان پایداری نیز از میانگین ۱/۱۱ به ۱/۳۰ افزایش یافته که نشان‌دهنده بهبود ۱۷ درصدی در پایداری کلی ترانشه‌ها است. این الگو با نتایج مدل‌های داده‌محور نیز هم‌سو است، به‌گونه‌ای که مدل XGBoost با $RMSE=1.87\text{ mm}$ و $R^2=0.94$ توانست رفتار نشست را با دقت بالا بازسازی کند و هم‌پوشانی مناسبی میان داده‌های میدانی و خروجی‌های FEM ایجاد نماید. تحلیل حساسیت مدل یادگیری ماشین نشان داد که عمق ترانشه، درصد رطوبت طبیعی و زاویه اصطکاک داخلی بیشترین نقش را در کنترل نشست دارند؛ موضوعی که با روندهای مشاهده‌شده در مدل‌سازی عددی و داده‌های واقعی کاملاً سازگار است.

در مجموع، نتایج نشان می‌دهد که استفاده از فلاورباکس‌های تقویتی می‌تواند به‌عنوان یک راهکار نیمه‌سازه‌ای کارآمد، اقتصادی و زیست‌پایدار در کنترل تغییرمکان‌ها و ارتقای ایمنی ترانشه‌های شهری در

۵. تقدیر و قدردانی

کلیه نویسندگان در تهیه مقاله همکاری داشته‌اند.

از دانشگاه آزاد اسلامی واحد شاهرود و همکارانی که در این زمینه مساعدت کردند تشکر و قدردانی می‌شود.

۸. منابع مالی

این اثر تحت حمایت هیچ سازمان یا موسسه ای انجام نشده است.

۶. تأییدیه اخلاقی

نویسندگان متعهد می‌شوند که مطالب این مقاله را در هیچ مجله دیگری به چاپ نرسانده‌اند.

۹. تعارض منافع

نویسندگان مقاله اعلام می‌کنند که در مورد انتشار این مقاله تعارض منافع وجود ندارد.

۷. مشارکت‌های نویسندگان

۱۰. مراجع

- Chen, T., & Guestrin, C. (2016). "XGBoost: A scalable tree boosting system". In: Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining, pp. 785–794. <https://doi.org/10.1145/2939672.2939785>. <https://doi.org/10.1145/2939672.2939785>
- Bentéjac, C., Csörgő, A., & Martínez-Muñoz, G. (2021). "A comparative analysis of gradient boosting algorithms". *Artif. Intell. Rev.*, 54: 1937–1967. <https://doi.org/10.1007/s10462-020-09896-5>
- Brinkgreve, R. B. J., Engin, E., & Swolfs, W. M. (2020). "PLAXIS 3D Reference Manual". Bentley Systems.
- Li, X., & Zhang, J. (2022). "AI-based geotechnical parameter estimation: Current trends and future directions". *Auto. Constr.*, 140: 104385. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104385>
- Pham, B. T., Prakash, I., & Singh, S. K. (2019). "Machine learning methods in geotechnical engineering". *Geotech. Eng. J. SEAGS & AGSSEA*, 50(4): 44–53.
- Ren, L., Wang, T., Seklouli, A. S., Zhang, H., & Bouras, A. (2023). "A review on missing values for main challenges and methods". *Inform. Syst.*, 119: 102268. <https://doi.org/10.1016/j.is.2022.102268>
- Tavafoghi, H., et al. (2023). "Application of XGBoost and random forest for soil settlement prediction in urban excavations". *Comput. Geotech.*, 160: 105–115. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2023.105515>
- Wang, Y., Su, F., Guo, Y., Yang, H., Ye, Z., & Wang, L. (2022). "Predicting the microbiologically induced concrete corrosion in sewer based on XGBoost algorithm". *Case Stud. Constr. Mater.*, 17: e01649. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01649>
- Wu, H., Bian, K., Qiu, J., Ye, X., Chen, C., & Fu, B. (2019). "Prediction of foundation pit deformation based on genetic backpropagation neural network". *J. Comput. Meth. Sci. Eng.*, 19(3): 707–717. <https://doi.org/10.3233/JCM-193889>
- Zhang, D., & Goh, A. T. C. (2016). "Multivariate adaptive regression spline model for prediction of pile capacity". *Geotech. Geolog. Eng.*, 34: 1057–1067. <https://doi.org/10.1007/s10706-016-0030-0>
- Zhang, W. S., Yuan, Y., Long, M., Yao, R. H., Jia, L., & Liu, M. (2024). "Prediction of surface settlement around subway foundation pits based on spatiotemporal deep learning models". *Comput. Geotech.*, 168: 106149. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2023.106149>
- Zhou, Y., Li, S., Zhou, C., & Luo, H. (2019). "Intelligent approach based on random forest for safety risk prediction of deep foundation pit in subway stations". *J. Comput. Civ. Eng.*, 33(2): 05018004. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CP.1943-5487.0000807](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000807)