

New empirical equations to estimate the ground surface settlement induced by circular tunnels excavations in cohesive soils with gene expression programming algorithm

Ghafar Nejadi Khashab¹, MohammadAli Rahgozar^{2*}, MohammadMehdi Zafarani³, Niloufar Salemi³

1- Ph.D. Student, Department of Civil Engineering, Isfahan (Khorasgan) Branch, Islamic Azad University, Isfahan, Iran

2- Assistant Professor, Department of Civil and Transportation, Isfahan University, Isfahan, Iran

3- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Isfahan (Khorasgan) Branch, Islamic Azad University, Isfahan, Iran

ABSTRACT

The present paper aimed to estimate the ground surface settlement induced by circular tunnel excavation in cohesive soils by considering the uncertainties of geometrical and geotechnical parameters. To this end, after numerical simulation of the tunnel based on the two-dimensional finite difference method in $FLAC^{2D}$, the ground surface settlement profiles were analyzed using regression analysis (Gaussian equation). The effect of parametric changes of geometrical and geotechnical parameters on ground surface settlement has been studied based on dimensionless ratios including depth to tunnel diameter (C/D), soil strength ($\gamma D/S_u$) and soil stiffness (E/S_u). The results showed that by increase in the C/D (increase of overburden pressure of the tunnel), the settlement increases. As $\gamma D/S_u$ increases (soil weakening), the amount of settlement increases at a constant C/D and E/S_u . The rate of change of settlement increase in $\gamma D/S_u$ ratios occurs with more intensity than the increase in C/D . This indicates the greater impact of geotechnical parameters of the soil around the tunnel on surface settlement in comparison with geometric parameters. There is an inverse relationship between E/S_u changes and surface settlement, and with increasing E/S_u (soil stiffness), settlement decrease. Then, using the Gene Expression Programming (GEP) algorithm and forming a database containing of 1000 different simulations in terms of a combination of changes in C/D , $\gamma D/S_u$ for constant E/S_u (inputs) and S_{max}/H results (output), two new empirical equations were proposed as optimal empirical models for estimating the normalized ground surface settlement. The results of this study confirm that instead of measuring the time-consuming and complex conditions of ground surface settlement due to tunnel excavation on a real scale, soft calculations can be used to predict such features faster and more economically in tunnel excavation.

ARTICLE INFO

Receive Date: 09 August 2022

Revise Date: 09 October 2022

Accept Date: 13 October 2022

Keywords:

Ground surface settlement,
Circular tunnels,
Cohesive soils,
Gene expression programming,
New empirical equations

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://doi.org/10.22065/jsce.2022.354866.2893>

*Corresponding author: MohammadAli Rahgozar

Email address: rahgozar@eng.ui.ac.ir

معادلات تجربی جدید برای تخمین نشست سطحی زمین در اثر حفر تونل‌های دایره‌ای

در خاک‌های چسبنده با الگوریتم برنامه‌ریزی بیان ژن

غفار نجاتی خشاب^۱، محمدعلی رهگذر^{۲*}، محمدمهدی زعفرانی^۳، نیلوفر سالمی^۴

۱- دانشجوی دکتری رشته مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد اصفهان (خوراسگان)، اصفهان، ایران

۲- استادیار، دانشکده عمران و حمل و نقل، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران

۳- استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد اصفهان (خوراسگان)، اصفهان، ایران

چکیده

هدف مقاله حاضر تخمین نشست سطحی زمین ناشی از حفر تونل دایره‌ای شکل در خاک‌های چسبنده با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های پارامترهای هندسی و ژئوتکنیکی می‌باشد. بدین منظور پس از شبیه‌سازی عددی تونل بر مبنای روش تفاضل محدود دوبعدی در نرم‌افزار $FLAC^{2D}$ ، پروفیل‌های نشست سطحی زمین با استفاده از تحلیل رگرسیون (رابطه گاوسی) تعیین شد. تاثیر تغییرات پارامتریک پارامترهای هندسی و ژئوتکنیکی بر مبنای نسبت‌های بدون بعد عمق به قطر تونل (C/D)، مقاومت خاک ($\gamma D/S_{II}$) و مدول الاستیسیته به مقاومت برشی زهکشی نشده یا سختی خاک (E/S_{II}) بر نشست سطحی زمین مطالعه گردید. نتایج نشان داد که با افزایش C/D (افزایش سربار موجود در بالای تونل)، نشست سطحی افزایش می‌یابد. با افزایش $\gamma D/S_{II}$ (ضعیف‌تر شدن خاک)، نشست در یک C/D و E/S_{II} ثابت در حال افزایش است. نرخ افزایش نشست در نسبت‌های $\gamma D/S_{II}$ بیشتر با شدت مضاعفی نسبت به افزایش C/D رخ می‌دهد. این موضوع بیانگر تاثیر بیشتر پارامترهای ژئوتکنیکی خاک اطراف تونل بر نشست در مقایسه با پارامترهای هندسی است. بین تغییرات E/S_{II} و نشست رابطه عکس برقرار است و با افزایش E/S_{II} (سخت‌تر شدن خاک)، مقادیر نشست کاهش می‌یابد. در ادامه با استفاده از الگوریتم برنامه‌ریزی بیان ژن (GEP) و تشکیل یک پایگاه داده مشتمل بر ۱۰۰۰ مدل‌سازی مختلف برحسب ترکیبی از تغییرات C/D ، $\gamma D/S_{II}$ و E/S_{II} (ورودی‌های مدل) و نتایج S_{max}/H (خروجی مدل)، دو معادله تجربی جدید به‌عنوان مدل‌های تجربی بهینه برای تخمین نشست سطحی نرمالایز شده زمین پیشنهاد شد. نتایج این مطالعه مؤید این است که به‌جای اندازه‌گیری زمان‌بر و شرایط پیچیده نشست سطحی زمین در اثر حفر تونل در مقیاس واقعی، می‌توان از محاسبات نرم برای پیش‌بینی سریع‌تر و اقتصادی‌تر چنین ویژگی‌هایی در حفاری تونل بهره برد.

کلمات کلیدی: نشست سطحی زمین، تونل‌های دایره‌ای، خاک‌های چسبنده، برنامه‌ریزی بیان ژن، معادلات تجربی جدید.

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	https://doi.org/10.22065/jsce.2022.354866.2893	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	10.22065/jsce.2022.354866.2893	۱۴۰۲/۰۵/۳۱	۱۴۰۱/۰۷/۲۱	۱۴۰۱/۰۷/۲۱	۱۴۰۱/۰۷/۱۷	۱۴۰۱/۰۵/۱۸
محمدرحمان رهگذر rahgozar@eng.ui.ac.ir					*نویسنده مسئول: پست الکترونیکی:	

۱- مقدمه

امروزه احداث سازه‌های زیرزمینی همچون تونل‌ها نقش ویژه‌ای را در پیشرفت جوامع شهری ایفا می‌نمایند. یکی از مسائلی که همواره تونل‌سازی در فضاهای شهری را با چالش‌های جدی مواجه می‌سازد، ناشناخته بودن رفتار تغییرشکلی و امکان ایجاد جابجایی‌های افقی و عمودی زیاد در محیط اطراف تونل می‌باشد. خاک در شرایط عادی تحت فشار ناشی از تنش‌های طبیعی است. از همین رو هرگونه دست خوردگی طبیعی و یا ساختگی مانند حفر تونل در آن، ضمن حذف بخشی از محیط خاک اطراف تونل، سبب ایجاد تغییرات قابل توجهی در وضعیت تنش و رفتار تغییرشکلی آن می‌گردد. این موضوع وضعیت تنش محیط خاک اطراف تونل را تغییر داده و ایجاد کرنش‌های برشی زیاد و نتیجتاً تغییرمکان‌های قابل توجه در اطراف تونل و در نتیجه در سطح زمین را به همراه دارد. این تغییرمکان‌ها در سطح زمین عمدتاً به صورت جابجایی‌های قائم (نشست) ظاهر می‌شوند [۱ و ۲]. در برخی موارد این نشست‌ها قابل توجه بوده و ایمنی تونل و سازه‌های سطحی مجاور آن را به خطر می‌اندازد [۳]. از همین رو بررسی تاثیر حفر تونل‌ها بر رفتار تغییرشکلی (نشست) محیط اطراف و همچنین تاثیرات آن بر روی سازه‌های مجاور همواره از اهمیت ویژه‌ای برخوردار می‌باشد [۴].

واکنش زمین به حفر تونل به عوامل مختلفی همچون شرایط زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه، ویژگی‌های ژئوتکنیکی، ابعاد تونل، شرایط و حالت تنش موجود در محل و روند حفاری بستگی دارد [۵ و ۶]. خاک به‌طور طبیعی ماده‌ای است که از طریق فرآیندهای زمین‌شناسی، زیست‌محیطی و فیزیکی-شیمیایی تشکیل می‌شود. بسیاری از این فرآیندها ممکن است در طول زمان ادامه پیدا کنند و ضمن اصلاح رفتار توده خاک، عملکرد آن را به شدت تحت تاثیر قرار دهند و سبب تغییرات خصوصیات خاک در موقعیت‌های مختلف شوند [۱ و ۷]. چنین تغییراتی به علت فرآیندهای طبیعی منجر به عدم قطعیت‌های قابل توجهی در طراحی سازه‌های ژئوتکنیک می‌گردد [۸]. تونل‌ها نیز عمدتاً در محیط‌های خاکی با عدم قطعیت‌های زیاد حفر می‌شوند. این عدم قطعیت‌ها، بعضاً موجب مغایرت نتایج حاصل از تحلیل‌های مهندسی با واقعیت‌های موجود می‌گردد. روش‌های فعلی طراحی تونل‌ها عمدتاً بر مبنای تجارب مهندسی بوده و در تمامی این روش‌ها یک مقدار قطعی به‌عنوان پاسخ نهایی تونل تعیین می‌گردد [۹]. چنین رویکردی از چارچوب نظری کافی برای لحاظ نمودن عدم قطعیت‌های زیاد ناشی از خصوصیات شدیداً متغیر خاک محیط اطراف تونل برخوردار نیست. روش مرسوم که بیشتر مهندسیین طراحی تونل در برخورد با عدم قطعیت‌ها در نظر می‌گیرند، نادیده گرفتن آنها و معرفی یک کمیت به نام ضریب اطمینان به‌عنوان نماینده تمام عدم قطعیت‌ها است [۱۰]. دیدگاه طراحی براساس ضریب اطمینان گاه به طراحی‌های محافظه‌کارانه می‌انجامد که نتیجه آن افزایش هزینه‌های تونلسازی است؛ در سمت مقابل یک طراحی مقرون به صرفه شاید به اندازه کافی ایمنی عملکرد تونل را تامین نکند. بنابراین ضروری است یک تعادل منطقی بین ایمنی تونل و هزینه تونلسازی برقرار شود. جهت تامین شرایط ایمن در سرویس‌دهی تونل، قبل از حفاری آن لازم است عدم قطعیت‌های موجود به نحو صحیحی در طراحی نهایی تونل مد نظر قرار بگیرند [۱۱]. بر همین اساس، تخمین سطوح نشست برای طراحی ایمن تونل‌ها نیازمند شناخت و تعیین ویژگی‌های احتمالی موثر در تحلیل رفتار تغییرشکلی تونل با انجام تحلیل‌های پارامتریک تحت اثر عدم قطعیت‌های مذکور می‌باشد [۱۲ و ۱۳].

در گذشته معادلات تجربی زیادی برای تخمین نشست سطحی زمین ناشی از حفر تونل با استفاده از نتایج استخراج شده از رفتار تغییرشکلی تونل‌های واقعی توسط محققین مختلف [۱۴، ۱۵، ۱۶ و ۱۷] پیشنهاد شده است. اگرچه این معادلات برای تخمین مقدماتی نشست سطحی زمین مفید هستند، اما به دلیل عدم در نظر گرفتن اثرات همزمان تمامی عوامل موثر بر نشست، از توانایی کافی برخوردار نمی‌باشند. از همین رو در شرایط عدم قطعیت خصوصیات خاک و موقعیت‌های مختلف قرارگیری تونل، استفاده از روش‌های عددی مبتنی بر نرم‌افزارهای محاسباتی جهت پیش‌بینی دقیق‌تری از واقعیت مسئله و پیشنهاد معادلات تجربی جدید برای پاسخ نشست تونل ضروری است. بر همین اساس در مقاله حاضر تلاش بر این است تا با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های موجود در پارامترهای هندسی تونل و ژئوتکنیکی خاک، به ارزیابی نشست سطحی زمین ناشی از حفر تونل‌های دایره‌ای شکل در خاک‌های چسبنده پرداخته شود. این کار با انجام مطالعات پارامتریک در گستره وسیعی از تغییرات پارامترهای مذکور و با استفاده از آنالیزهای عددی بر مبنای روش تفاضل محدود دوبعدی در نرم‌افزار FLAC^{2D} صورت گرفته است. پس از تعیین اثرگذاری عدم قطعیت‌های ناشی از پارامترهای مذکور بر پاسخ نشست

سطحی زمین در اثر حفر تونل و مقایسه آن با روش‌های تجربی موجود، اقدام به توسعه معادلات تجربی جدیدی برای تخمین این نشست با استفاده از الگوریتم برنامه‌ریزی بیان ژن^۱ (GEP) شده است.

۲- تئوری و پیش‌زمینه (تخمین نشست سطحی زمین در اثر حفر تونل)

حفر فضاهای زیرزمینی به دلیل ماهیت پیچیده و عوامل مختلف موثر بر تونل زنی همچون آزادسازی تنش‌ها و مواردی از این دست، منجر به تغییرات تنش برجا در محیط خاک می‌شود. این تغییرات به نوبه خود موجبات نشست زمین را فراهم می‌آورد [۱۸]. پیش‌بینی و تخمین دقیق نشست زمین و تغییرشکل‌های ناشی از حفر تونل همواره از اهمیت بالایی برخوردار است؛ به طوری که با ارزیابی صحیح و نزدیک به واقعیت نشست زمین در اطراف تونل می‌توان ایمنی سازه‌های سطحی، لوله‌های زیرزمینی، جاده‌ها و سایر زیرساخت‌های موجود در مناطق شهری که در مسیر اجرای تونل قرار گرفته‌اند را در برابر عوامل خطرآفرین تضمین نمود [۱۹]. اطلاعات بدست آمده نه تنها ما را از ایمنی چنین زیرساخت‌هایی مطمئن می‌کند بلکه می‌توان از آنها به‌عنوان ابزاری منطقی برای اتخاذ تصمیمات مطلوب برای مقابله با نشست‌های بیش از حد (مقادیر مجاز نشست مد نظر طراحان و مهندسين) استفاده نمود [۲۰].

به‌طور کلی روش‌های رایج تخمین نشست سطحی زمین ناشی از حفر تونل به چهار دسته روش‌های فیزیکی، تحلیلی، تجربی و عددی تقسیم می‌شوند. روش‌های تحلیلی با استفاده از معادلات ریاضی پاسخ نشست سطحی زمین در اثر حفر تونل را تخمین زده و از دقت قابل قبولی برخوردارند [۲۱ و ۲۲]. با این حال به دلیل در نظر گرفتن فرضیات ساده کننده در این روش‌ها، شبیه‌سازی دقیق رفتار تغییرشکلی تونل امکانپذیر نیست [۶]. روش‌های فیزیکی برای تخمین نشست شامل آزمایش‌های استاندارد انجام شده در آزمایشگاه در ابعاد کوچک و یا آزمایش‌های بزرگ مقیاس برجا در محل تونل می‌باشند [۲۳]. علیرغم دقت زیاد روش‌های فیزیکی، به دلیل هزینه بالای آزمایش‌ها و تجهیزات لازم، استفاده از این روش‌ها چندان مقرون به صرفه نیست [۲۴].

روش‌های تجربی رایج‌ترین و ساده‌ترین روش‌ها برای تخمین نشست سطحی زمین ناشی از حفر تونل به شمار می‌روند. در این روش‌ها با استفاده از نتایج حاصل از تحقیقات گذشته بر روی تونل‌های واقعی، یک سری معادلات تجربی برای پیش‌بینی نشست پیشنهاد می‌شود. همچنین در این روش‌ها، پاسخ نشست تونل‌ها عمدتاً با استفاده از منحنی‌هایی تحت عنوان پروفیل‌های نشست^۲ نشان داده می‌شود. این رویکرد نخستین بار توسط مارتوس^۳ [۱۴] و براساس مشاهدات وی در خصوص تطابق بالای معادلات پیشنهادی برای تخمین الگوهای استقرار حفاری‌های عمیق تونل حاصل شده است. در ادامه، تحقیقات پک [۱۵] نشان‌دهنده تطابق بالای نتایج تجربی و مشاهده‌ای برای کاربرد خاص این معادله در تونل‌ها بوده است. او یک فرم هندسی ویژه مطابق شکل ۱ را برای تخمین پروفیل نشست ارائه نمود. مطابق این شکل، توزیع نشست در سطح زمین و در بالای تونل مشابه یک منحنی توزیع آماری نرمال (گوسی^۴) می‌باشد [۱۶]. در شکل ۱، D قطر تونل، H فاصله عمقی از سطح زمین تا محور تونل، C عمق مدفون یا مقدار روباره بر روی تونل می‌باشند. S_x نشست عمودی در فاصله x در سطح، S_{max} ماکزیمم نشست عمودی، V_s افت حجم^۵ در سطح (به‌عنوان درصدی از سطح مقطع تونل) و i_x پارامتر عرض فرورفتگی^۶ است که از نظر فیزیکی برابر فاصله‌ای از محور تونل تا نقطه عطف پروفیل نشست می‌باشد. فرم معادله ارائه شده توسط پک به‌صورت معادله (۱) می‌باشد:

$$S_x = S_{max} \exp\left(-\frac{x^2}{2i_x^2}\right) \quad (1)$$

¹ Gene Expression Programming

² settlement profiles

³ Martos

⁴ Gaussian distribution curve

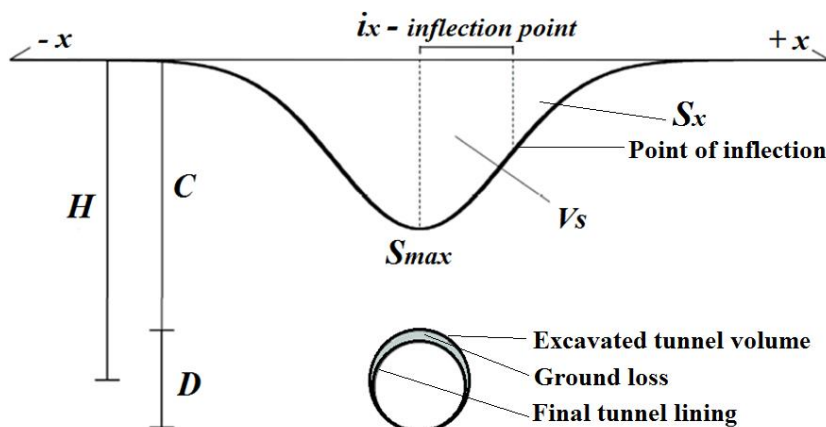
⁵ the volume loss

⁶ trough parameter

این معادله که بعدها توسط اوریلی و نیو^۷ [۱۷] و کوردینگ^۸ [۲۵] به عنوان یک مدل پایه برای تخمین پروفیل نشست تأیید شده است، به ورودی یک پارامتر فرورفتگی (i_x) در نقطه عطف پروفیل نشست نیاز دارد که بر عرض فیزیکی پروفیل تأثیرگذار بوده و افت حجم (V_s) و ماکزیمم نشست (S_{max}) را براساس معادله (۲) تعیین می نماید [۲۶]:

$$V_s = \sqrt{2\pi} \cdot i_x \cdot S_{max} \quad (2)$$

در عمل، براساس نتایج آزمایشگاهی یا ابزار دقیق موجود و همچنین تجربه طراح، یک مقدار کاهش حجم هدف مشخص می گردد. از این مقدار V_s و تخمین زده شده می توان برای تعیین S_{max} استفاده کرد و سپس از آن در معادله (۱) بهره گرفت.



شکل ۱: شمای کلی مقطع تونل و پروفیل های پاسخ نشست سطحی زمین ناشی از حفر تونل [۱۴]

تاکنون مطالعات زیادی بر مبنای مدل سازی های فیزیکی و عددی برای سنجش این معادله تجربی انجام شده است. به عنوان نمونه، نتایج حاصل از مطالعات اتکینسون و پاتس^۹ [۲۷]، مایر [۲۳]، باکر^{۱۰} و همکاران [۲۸]، مایر و تیلور^{۱۱} [۲۹]، گرانت^{۱۲} و تیلور [۳۰]، وو و لی^{۱۳} [۳۱]، عثمان^{۱۴} و همکاران [۳۲]، احمد و اسکندر^{۱۵} [۳۳] و شریف زاده و همکاران [۳۴] تأییدکننده این روش تجربی برای تخمین نشست سطحی تونل ها بوده اند. علاوه بر این، ارزیابی رفتار تونل ها در گزارش های مختلف ارائه شده توسط اتول و فارمر^{۱۶} [۳۵]، کوردینگ و هانس میر^{۱۷} [۳۶]، آریلی و نیو [۱۷]، رانکین^{۱۸} [۳۷]، فینوج^{۱۹} [۳۸] و دوربندت^{۲۰} [۳۹]، حسینی و همکاران [۴۰]، فتاح و همکاران [۴۱]، چاکری^{۲۱} و همکاران [۴۲ و ۴۳]، منگ^{۲۲} و همکاران [۴۴] همگی مؤید نتایج مطلوب حاصل از مقایسه با این معادله گاوسی بوده است.

اگرچه مطالعات مذکور برای تخمین مقدماتی نشست سطحی زمین ناشی از حفر تونل مفید بوده اند، اما ذکر این نکته ضروری است که روش های پیشنهادی در این مطالعات قادر به در نظر گرفتن اثرات همزمان تمامی عوامل موثر بر نشست سطحی زمین ناشی از

⁷ O'Reily and New

⁸ Cording

⁹ Atkinson and Potts

¹⁰ Bakker

¹¹ Mair and Taylor

¹² Grant

¹³ Wu and Lee

¹⁴ Osman

¹⁵ Ahmad and Iskander

¹⁶ Attewell and Farmer

¹⁷ Cording and Hansmire

¹⁸ Rankin

¹⁹ Phienwej

²⁰ Devriendt

²¹ Chakeri

²² Meng

حفر تونل نمی‌باشند [۱۹]. از همین رو در شرایط عدم قطعیت خاک و هندسه‌های متفاوت موقعیت تونل، محققین استفاده از روش‌های عددی مبتنی بر نرم‌افزارها و روش‌های محاسباتی را جهت پیش‌بینی دقیق‌تری از واقعیت مسئله پاسخ نشست تونل پیشنهاد نموده‌اند [۴۵].

۳- مواد و روش‌ها

۳-۱- مدلسازی عددی

امروزه با توجه به پیشرفت سریع علوم کامپیوتر، استفاده از روش‌های عددی برای حل مسائل نشست در تونلسازی گسترش چشمگیری یافته است [۶]. نرم‌افزار FLAC [۴۶] یک «برنامه تفاضل محدود» از مجموعه نرم‌افزارهای ایتسکا می‌باشد که از توانایی بالایی برای مدلسازی عددی محیط‌های پیوسته در مهندسی ژئوتکنیک برخوردار است. این برنامه بر پایه «تحلیل لاگرانژی^{۲۳}» استوار بوده و قادر به مدلسازی دقیق رفتار خاک و پاسخ رفتار سازه‌های ژئوتکنیکی می‌باشد. مدل‌های رفتاری متنوعی که در این برنامه تعریف شده است، امکان مدلسازی و آنالیز مسائل مختلف ژئوتکنیکی تحت تحلیل‌های غیرخطی را برای مهندسی فراهم می‌سازد. در FLAC برای حل معادلات جبری از یک روش صریح وابسته به زمان استفاده می‌شود. در این روش ابتدا از معادلات تعادل (حرکت) استفاده شده تا سرعت‌ها و جابجایی‌های جدید ناشی از اعمال تنش‌ها و نیروها بر مبنای معادلات رفتاری (رابطه تنش- کرنش) استخراج شود. سپس با تخمین نرخ‌های کرنش از سرعت‌های جدید، مقادیر جدید تنش بر حسب نرخ‌های کرنش جدید به دست می‌آیند. هر یک از این چرخه‌های محاسباتی در یک گام زمانی اتفاق می‌افتد و این روند تا رسیدن به مرحله تعادل ادامه می‌یابد و در صورت رسیدن به شرایط مطلوب مسئله، حل متوقف می‌شود [۴۶]. روی هم رفته FLAC یکی از بهترین روش‌های عددی برای آنالیز رفتار تغییرشکلی سیستم‌های دارای کرنش بزرگ و ناپایدار همچون تونل به‌شمار می‌رود. از همین رو در تحقیق حاضر برای مدلسازی و آنالیز رفتار نشست سطحی زمین در اثر حفر تونل، از تحلیل کرنش مسطح با استفاده از نرم‌افزار FLAC^{2D} بر مبنای روش ترخیص یا رهاسازی تنش‌های برجا بهره گرفته شده است.

تمرکز اصلی تحقیق حاضر، پیش‌بینی نشست سطحی زمین در اثر حفر تونل و توسعه روابط تجربی جدید با در نظر گرفتن اثرات عدم قطعیت و تغییرات پارامترهای هندسی تونل و خصوصیات مقاومتی خاک می‌باشد. از اینرو فرض می‌شود که محل احداث تونل‌ها بدون حضور سازه‌های سطحی و عاری از هرگونه ترافیک روزمینی بوده و اصطلاحاً تونل مورد بررسی در سایت سبز (زمین بکر) در نظر گرفته شده است [۴۴] و تنها بارگذاری موجود بر روی آن ناشی از فشار سربار خاک موجود بر روی تونل است. اولین گام در اجرای یک مدل تحلیلی در FLAC^{2D}، ساخت هندسه تونل با انتخاب محدوده مناسب مدل و زون‌بندی آن است. شمای کلی مسئله مدلسازی تونل دایره‌ای در تحقیق حاضر در شکل ۲ نشان داده شده است. در این شکل، C عمق مدفون، D قطر، H فاصله عمقی تونل (ارتفاع روباره) و W و L نیز محدوده مدل می‌باشند. در تحلیل رفتار تونل‌ها، همواره محدود تونل از دو منظر (۱) فاصله جانبی اطراف دامنه از خط مرکزی تونل (W) و (۲) فاصله کف تونل تا مرز پایین دامنه (L) حائز اهمیت است. در این تحقیق محدوده مدل طبق پیشنهاد ارائه شده توسط مایسنر^{۲۴} [۴۷] و مولر^{۲۵} [۴۸] و از طریق آنالیز حساسیت تعیین شد. بدین منظور با در نظر گرفتن محدوده‌های مختلف برای مرزهای مدل، محدوده‌ای که در آن تنش‌های ایجادشده تحت اثر مرزهای مدل قرار نمی‌گیرند، به عنوان محدوده نهایی انتخاب شد. بر این اساس ابعاد مناسب برای تحلیل رفتار تونل به اندازه سه برابر عمق مدفون در طرفین تونل ($W = 3C$) و دو برابر قطر ($L = 2D$) در زیر تونل در نظر گرفته شد. در جدول ۱ مقادیر اولیه پارامترهای هندسی برای شبیه‌سازی تونل مورد مطالعه در تحقیق حاضر ارائه شده است.

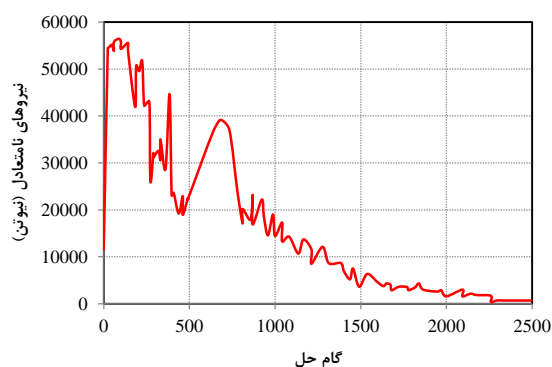
پس از ساخت هندسه مسئله، باید یک مدل رفتاری مناسب به مصالح مدلسازی شده اختصاص داده شود. یکی از پرکاربردترین مدل‌های رفتاری در مسائل ژئوتکنیک، مدل موهر-کولمب ($M-C$) است که در شرایط رس زهکشی نشده (محیط خاکی صرفاً چسبنده) با نام Tresca شناخته می‌شود [۴۹]. با توجه به وجود خاک چسبنده زهکشی نشده در اطراف تونل در مطالعه حاضر، از این مدل رفتاری برای شبیه‌سازی رفتار خاک استفاده شده و پارامترهای آن در جدول ۲ آمده است. در ادامه شرایط مرزی و تنش‌های اولیه مطابق با شرایط

²³ Lagrangian analysis

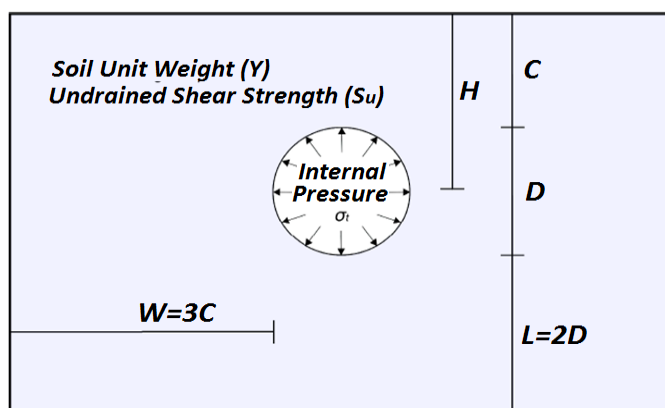
²⁴ Meissner

²⁵ Möller

واقعی زمین قبل از حفر تونل بر روی مدل اعمال گردید. با توجه به اینکه در اغلب موارد تعیین مقدار دقیق تنش‌های برجا امکانپذیر نیست، حرکت تمامی گره‌ها در مرزهای کناری تونل در جهت قائم آزاد بوده و در جهت افقی ثابت در نظر گرفته شد. همچنین مرز پایین مدل در همه جهات ثابت و مرز فوقانی آن نیز آزاد گذاشته شد تا امکان تغییر مکان (نشست) در جهت قائم فراهم گردد. پس از اعمال شرایط مرزی و تنش‌های برجا، اقدام به حل مدل برای رسیدن به تعادل می‌شود. در این مرحله برای در نظر گرفتن شرایط مرزی واقعی قبل از حفر تونل و تعادل مدل، تنش‌های اولیه ایجاد شده و جابجایی‌ها صفر گردید. مطابق شکل ۳ نیروهای نامتعادل مدل عددی بعد از گام‌های زمانی مشخصی به صفر میل کرده و مدل به تعادل رسیده است. پس از واقعی ساختن شرایط تنش‌ها و صفر کردن جابجایی‌ها، در ادامه عملیات اجرایی تونل با استفاده از روش رهاسازی تنش‌های برجا بر روی مدل اعمال گردید. روند کار با این روش بدین صورت است که پس از مدل‌سازی هندسه تونل، تخصیص خصوصیات خاک و شرایط مرزی مسئله، حفاری تونل بر روی مدل، با رهاسازی تنش طی چندین گام صورت می‌پذیرد. در هر یک از گام‌های رهاسازی تنش، نشست‌های سطحی زمین ثبت و ذخیره می‌شوند. این کاهش تنش‌ها تا جایی ادامه می‌یابد که نیروهای داخلی تحمل فشارهای اعمالی از طرف خاک و حرکت آن به سمت درون حفره را ندارند. در این روش از یک گام مشخص به بعد، مقادیر نیروهای نامتعادل کننده به صفر میل نکرده و افزایش می‌یابند و از آنجا به بعد می‌توان تونل را ناپایدار تلقی کرد. بنابراین، زمان گسیختگی مدل‌سازی انجام شده را می‌توان به خوبی با بررسی تاریخچه نیروهای نامتعادل کننده تعیین نمود. در آخرین مرحله به حل نهایی مدل پرداخته شد و نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های عددی جهت تخمین نشست سطحی زمین ناشی از حفر تونل‌های دایره‌ای شکل تفسیر گردید. همانگونه که پیش از این بیان شد، پاسخ نشست تونل‌ها عمدتاً با استفاده از پروفیل‌های نشست تعیین می‌گردد و رایج‌ترین روش برای تخمین این پروفیل‌ها، استفاده از رابطه گاوسی تجربی ارائه شده توسط پک (معادله (۱)) است. در تحقیق حاضر نیز از این پروفیل‌ها و معادله مذکور برای ارزیابی رفتار نشست بهره گرفته شد.



شکل ۳: نمودار نیروهای نامتعادل کننده بعد از تعادل اولیه مدل



شکل ۲: شمائی از ابعاد هندسی و وضعیت نسبی تونل شبیه‌سازی شده در محدوده مدل در $FLAC^{2D}$

جدول ۲: خصوصیات ژئوتکنیکی خاک محیط اطراف تونل شبیه سازی شده

در مطالعه حاضر [۵]	
مقدار	پارامتر (واحد)
۱۶۶۷	چگالی، ρ [Kg/m^3]
۲۰	مدول الاستیسیته، E [MPa]
۱۶/۶۶۷	مدول بالک، K [MPa]
۷/۶۹۲	مدول برشی، G [MPa]
۰/۳	نسبت پواسون، ν [-]
۵۰	مقاومت برشی زهکشی نشده، S_u [KPa]
۰	زاویه اصطکاک داخلی، ϕ [Degree]
۰	زاویه اتساع، ϕ_s [Degree]
۰	مقاومت کششی، σ_t [KPa]
۷۰۰۰۰۰	فشار سربار، Q [Pa]

جدول ۱: مقادیر پارامترهای هندسی تونل شبیه سازی شده در مطالعه حاضر

پارامتر هندسی تونل	مقدار (متر)
C	۲۴
D	۶
W	۷۲
L	۱۲
H	۲۷

۳-۲- الگوریتم برنامه‌ریزی بیان ژن (GEP)

الگوریتم GEP یک برنامه کامپیوتری تعمیم‌یافته مبتنی بر تئوری داروین و محاسبات تکاملی است که نخستین بار توسط فریرا^{۲۶} [۵۰] ابداع گردید. این الگوریتم با یکپارچه‌سازی دو تکنیک هوش مصنوعی تکامل‌یافته یعنی الگوریتم ژنتیک^{۲۷} (GA) و برنامه‌ریزی ژنتیک^{۲۸} (GP)، برای تخمین مدل‌های بهینه مورد استفاده قرار می‌گیرد. GEP پس از انتخاب جمعیتی از افراد براساس برازندگی، با استفاده از یک یا چند عملگر، تغییرات ژنتیکی را بر روی آنها اعمال می‌نماید. تفاوت اصلی بین سه الگوریتم مذکور ناشی از ماهیت افراد انتخابی در آنهاست. در GEP افراد به صورت رشته‌های خطی با طول ثابت (کروموزوم) کدگذاری شده (مشابه با GA) و سپس به شکل نهادهای غیرخطی با اندازه‌ها و اشکال متفاوت (یعنی نمایش دیاگرام ساده با بیان درختی مشابه در GP) اظهار می‌شوند [۵۰].

در تحقیق حاضر برای طراحی الگوریتم GEP جهت توسعه معادلات تجربی برای تخمین نشست سطحی زمین در اثر حفر تونل در خاک‌های چسبنده، از نرم‌افزار GenuXproTools 4.0 [۵۱] بهره گرفته شده است. جهت اجرای الگوریتم GEP با استفاده از این نرم‌افزار، ابتدا یک پایگاه داده یا جمعیت اولیه‌ای از راه‌حل‌ها از طریق فرآیندهای تصادفی و با استفاده از اطلاعات اولیه درخصوص مسئله تولید می‌شود. سپس با ارزیابی کروموزوم‌ها با استفاده از یک تابع برازش، ساختار آنها به صورت بیان درختی مطابق شکل ۴(ب) نشان داده می‌شود. اگر کیفیت رضایت‌بخش از یک راه‌حل پیدا شود و یا نسل‌ها به تعداد معینی برسند، تکامل متوقف شده و بهترین راه حل حاصل می‌گردد. در غیر این صورت، بهترین راه حل از نسل حاضر نگه داشته شده و بقیه راه‌حل‌ها به فرآیند گزینشی واگذار می‌شوند. براساس گزینش، بهترین افراد شانس بیشتری برای تولید فرزندان دارند. کل این روند برای چندین نسل تکرار شده و با پیشروی نسل به جلو، انتظار می‌رود که کیفیت جمعیت نیز به طور متوسط بهبود یابد [۵۲ و ۵۳]. شکل ۴(الف) مراحل اصلی الگوریتم GEP را به صورت شماتیک نشان می‌دهد. جزئیات مربوط به نحوه طراحی الگوریتم GEP در تحقیق حاضر به صورت مرحله به مرحله به شرح زیر است:

(۱) تعیین تابع برازش مناسب: سیستم طراحی شده با استفاده از تابع برازش مناسب، قادر به یافتن راه‌حل بهینه برای مسئله است. در مطالعه حاضر از توابع ضریب همبستگی^{۲۹} (R^2)، جذر میانگین مربعات خطا^{۳۰} (RMSE) و میانگین قدرمطلق خطاها^{۳۱} (MAE) به عنوان توابع برازش مناسب جهت ارزیابی مدل انتخاب شدند. این معیارها را می‌توان به ترتیب طبق معادلات (۳) تا (۵) محاسبه نمود:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (x_{iMes.} - x_{iPre.})^2}{\sum_{i=1}^n (x_{iMes.} - \bar{x})^2} \quad (۳)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (x_{iMes.} - x_{iPre.})^2} \quad (۴)$$

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n |x_{iMes.} - x_{iPre.}| \quad (۵)$$

که در این معادلات، $x_{iPre.}$ و $x_{iMes.}$ به ترتیب مقادیر پیش‌بینی شده و مقادیر اندازه‌گیری شده را نشان می‌دهند. \bar{x} نشان‌دهنده میانگین داده‌های اندازه‌گیری شده است و n نیز تعداد داده‌های هر مجموعه داده را نشان می‌دهد [۵۵، ۵۶ و ۵۷].

²⁶ Ferreira

²⁷ Genetic Algorithm

²⁸ Genetic Programming

²⁹ Correlation Coefficient

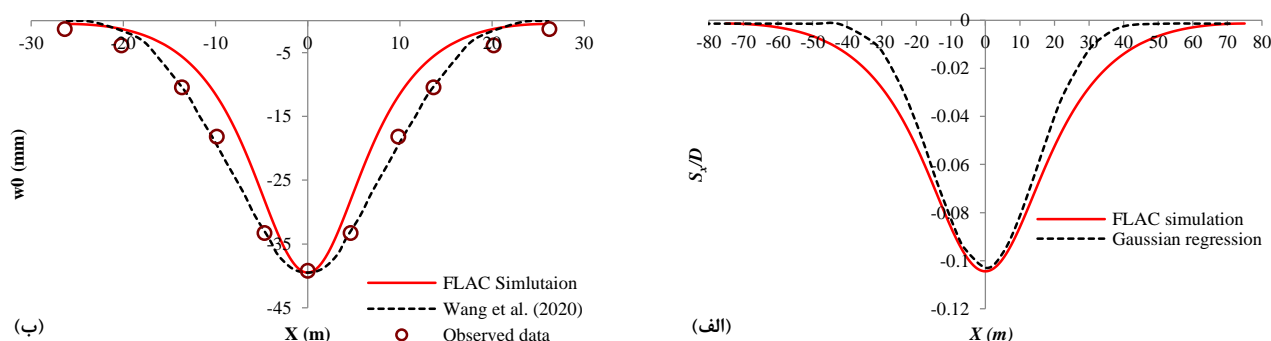
³⁰ Root Mean Square Error

³¹ Mean Absolute Error

در تحقیق حاضر برای صحت‌سنجی نرم‌افزار FLAC جهت مدل‌سازی عددی تونل از دو رویکرد مختلف بهره گرفته شده است. در رویکرد اول با استفاده از زبان برنامه‌نویسی FISH در FLAC و برازش منحنی از روی رابطه گاوسی (معادله (۱)) و مقایسه آن با نتایج پروفیل‌های نشست سطحی زمین در لحظه گسیختگی یک تونل واقعی با مشخصات هندسی و خصوصیات خاک ارائه شده در جداول ۱ و ۲، اقدام به صحت‌سنجی شد. شکل ۵(الف) مقایسه پروفیل‌های نشست زیرسطحی تونل حاصل از رابطه گاوسی و مدل‌سازی عددی را نشان می‌دهد. براساس نتایج مشاهده می‌شود که مدل عددی شبیه‌سازی شده برای تعیین نشست ماکزیمم (δ_{max})، از انطباق قابل قبولی با رابطه گاوسی برخوردار است. در رویکرد دوم برای صحت‌سنجی نرم‌افزار، به مقایسه نتایج پروفیل‌های نشست زیرسطحی تونل هیترو اکسپرس^{۳۸} در شهر لندن (انگلستان) (مطابق با خصوصیات ژئوتکنیکی و هندسی ارائه شده در جدول ۲) حاصل از مدل شبیه‌سازی شده با نتایج حاصل از مطالعه وانگ^{۳۹} و همکاران [۵۹] پرداخته شد. شکل ۵(ب) نتایج پروفیل‌های نشست زیرسطحی تونل حاصل از شبیه‌سازی عددی در تحقیق حاضر با نتایج حاصل از مطالعه وانگ و همکاران و داده‌های واقعی مشاهده شده را نشان می‌دهد. مقایسه نتایج بیانگر تطابق بالای نتایج شبیه‌سازی عددی در تحقیق حاضر با رفتار واقعی نشست سطحی زمین ناشی از حفر تونل در سایت و مقادیر اندازه‌گیری شده برای آن توسط مدل پیشنهادی توسط وانگ و همکاران [۵۸] می‌باشد.

جدول ۲: خصوصیات ژئوتکنیکی خاک و خصوصیات هندسی تونل هیترو اکسپرس [۵۹] جهت صحت‌سنجی

پارامتر هندسی	مقدار (متر)	خصوصیات ژئوتکنیکی (واحد)	مقدار
C	۱۹	چگالی، ρ [Kg/m ³]	۱۷۱۳
D	۸/۵	مدول الاستیسیته، E [MPa]	۳۵
H	۲۳/۲۵	نسبت پواسون، ν [-]	۰/۲۹
		مقاومت برشی زهکشی نشده، S_u [kPa]	۵۰
		زاویه اصطکاک داخلی، ϕ [Degree]	۰



شکل ۵: (الف) مقایسه نتایج پروفیل‌های نشست سطحی حاصل از شبیه‌سازی عددی FLAC با رگرسیون حاصل از معادله گاوسی، (ب) مقایسه نتایج پروفیل‌های پاسخ نشست سطحی زمین حاصل از شبیه‌سازی عددی FLAC با مطالعات گذشته [۵۹]

۴- نتایج و بحث

هدف مقاله حاضر ارزیابی نشست سطحی زمین ناشی از حفر تونل دایره‌ای شکل در خاک‌های چسبنده است. بدین منظور پس از شبیه‌سازی عددی تونل، پروفیل‌های نشست سطحی ایجادشده در سطح زمین در لحظه گسیختگی کامل و با استفاده از فرآیند تحلیل رگرسیون (رابطه گاوسی) تحلیل شد. به‌طور کلی مهمترین پارامترهای موثر بر ارزیابی نشست سطحی زمین ناشی از حفر تونل به دو دسته متغیر مستقل شامل خصوصیات هندسی تونل (مانند عمق مدفون، قطر، ضخامت پوشش تونل) و خصوصیات ژئوتکنیکی خاک اطراف تونل (همچون خصوصیات مقاومتی و تغییرشکلی خاک) دسته‌بندی می‌شوند. در تحقیق حاضر برای توصیف پاسخ نشست تونل، تاثیر تغییرات

³⁸ Heathrow Express

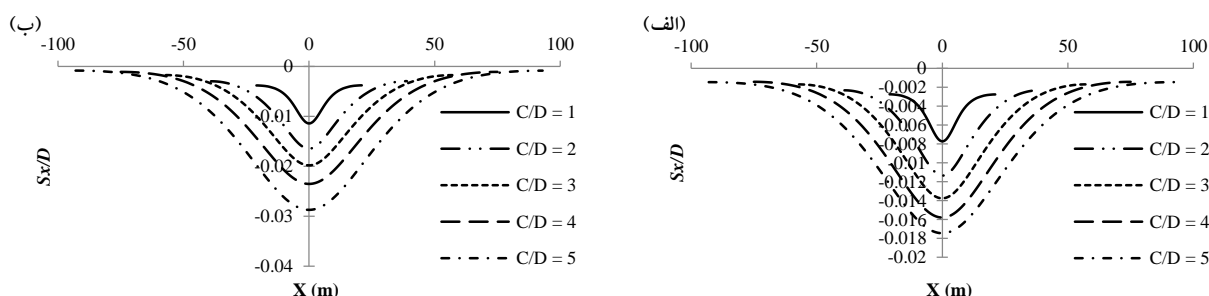
³⁹ Wang

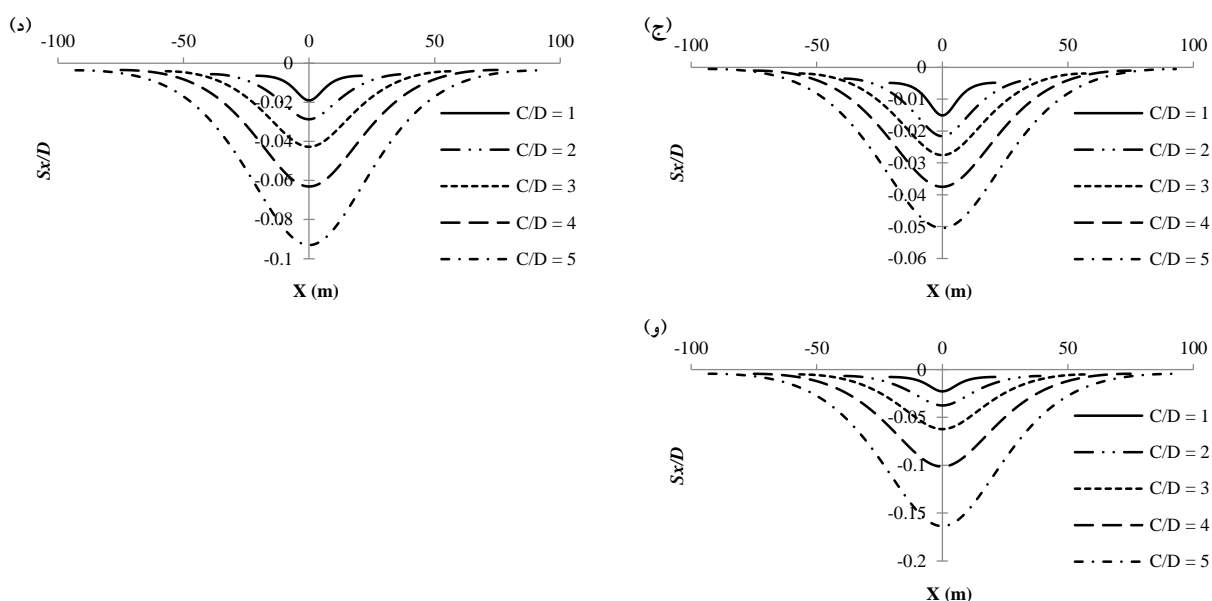
پارامتریک هر دو دسته از پارامترهای مذکور بر مبنای یک سری نسبت‌های بدون بعد بر نشست سطحی زمین مورد مطالعه قرار گرفت. لازم به ذکر است که تعریف این نسبت‌ها به منظور سهولت در تحلیل نتایج و توسعه معادلات تجربی جدید برای تخمین نشست مورد استفاده قرار گرفته است. بنابراین نمودارهای طراحی (پروفیل‌های نشست) با استفاده از نسبت‌های بدون بعد ارائه شدند. با این رویکرد، امکان مقایسه نتایج به صورت هدفمند با نمودارهای طراحی عملی و معادلات تجربی قدیمی امکانپذیر شده است. مقادیر نسبت‌های مذکور به گونه‌ای انتخاب شد که عملی‌ترین محدوده را برای ساخت تونل‌های دایره‌ای در خاک‌های چسبنده پوشش دهد. بدین منظور از سه نسبت بدون بعد یعنی نسبت عمق به قطر تونل (C/D)، نسبت مقاومت خاک ($\gamma D/S_{II}$) و نسبت مدول الاستیسیته به مقاومت برشی زهکشی نشده (E/S_{II}) بهره گرفته شد. برای سهولت تحلیل نتایج، از این پس در کل متن مقاله، C/D نسبت عمق، $\gamma D/S_{II}$ نسبت مقاومت خاک و E/S_{II} نسبت سختی خاک نامیده می‌شوند. برای انجام آنالیزهای عددی پارامتریک در مطالعه حاضر، ابتدا محدوده‌های پارامتری مختلفی از سه نسبت مذکور شامل C/D از ۱ تا ۵ با فاصله میانی ۱، $\gamma D/S_{II}$ از ۲ تا ۶ با فاصله میانی ۱ و E/S_{II} از ۱۰۰ تا ۱۶۰۰ با فاصله میانی دو برابر نسبت به مقدار قبلی در نظر گرفته شد و تاثیر این تغییرات بر پروفیل نشست مورد بررسی قرار گرفت. پس از تحلیل پروفیل‌های پاسخ نشست تونل در شرایط مختلف، در ادامه با توجه به تغییرات پارامترهای هندسی و ژئوتکنیکی مذکور، یک سری معادلات تجربی جدید برای تخمین نشست سطحی زمین در اثر حفر تونل‌های دایره‌ای شکل پیشنهاد شد.

۴-۱- آنالیز پارامتریک تغییرات پارامترهای هندسی و ژئوتکنیکی بر پاسخ نشست سطحی زمین ناشی از حفر تونل

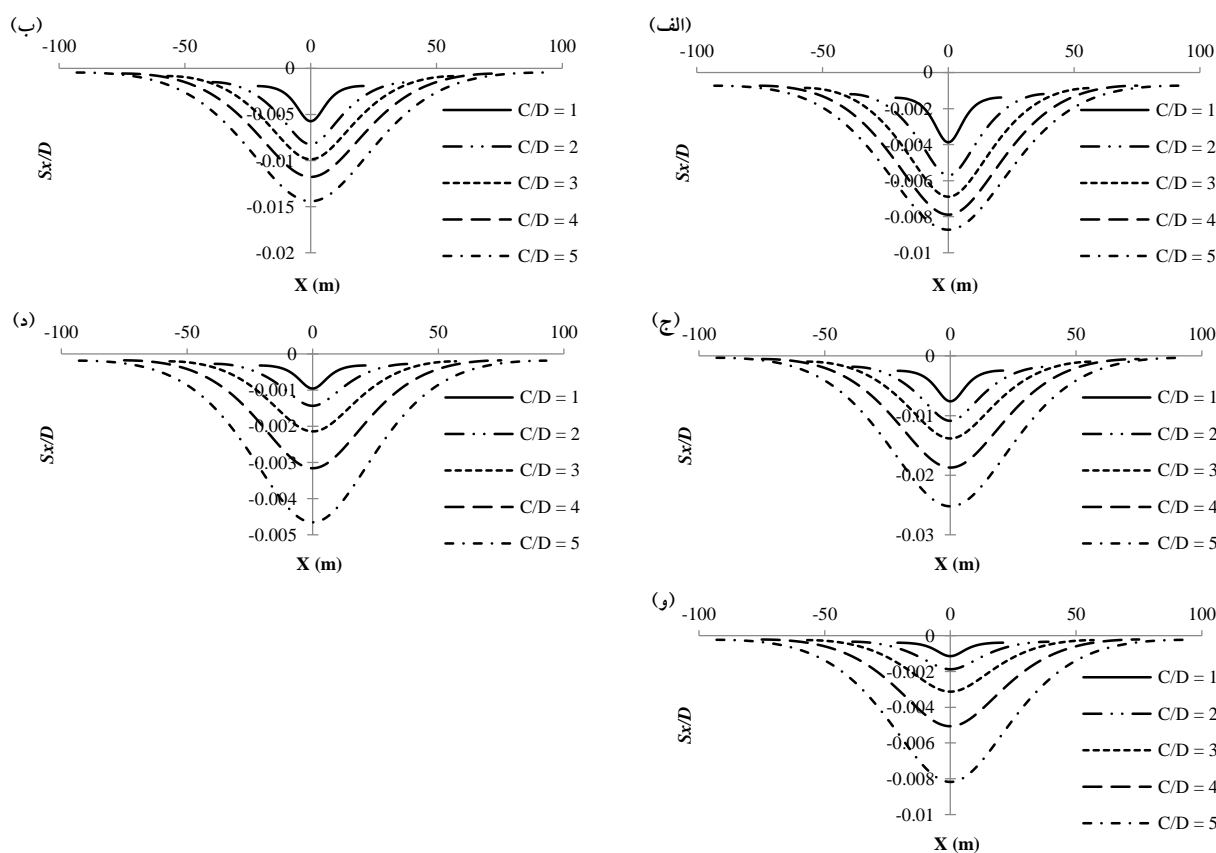
۴-۱-۱- اثر تغییرات نسبت عمق (C/D) بر پروفیل نشست

شکل ۶ نتایج پروفیل‌های نشست به ازای مقادیر مختلف نسبت عمق (C/D) با ثابت نگه داشتن نسبت سختی خاک ($E/S_{II} = 100$) و تغییرات نسبت مقاومت خاک ($\gamma D/S_{II}$) را نشان می‌دهد. با مشاهده پروفیل‌های نشست زیر سطحی می‌توان دریافت که تغییر در مقدار حرکت برای هر مرحله از حفاری تونل و رهاسازی تنش تا گسیختگی کامل افزایش می‌یابد. در یک روند کلی و مطابق انتظار مشاهده می‌شود که با افزایش C/D ، به طور مداوم یک فرورفتگی عمیق‌تر و گسترده‌تر در پروفیل نشست ایجاد می‌گردد. همچنین مشاهده می‌شود که با افزایش C/D ، مقادیر ماکزیمم نشست سطحی در حال افزایش می‌باشد. دلیل اصلی این رفتار، افزایش سربار موجود در بالای تونل با افزایش نسبت عمق می‌باشد. با معکوس در نظر گرفتن مقدار C/D می‌توان دریافت که افزایش قطر تونل (D) منجر به کاهش نشست سطحی می‌گردد. همچنین با مقایسه نتایج شکل‌های ۶ (الف تا و) مشاهده می‌گردد که با ثابت نگه داشتن نسبت سختی خاک ($E/S_{II} = 100$) و افزایش $\gamma D/S_{II}$ ، مقدار نشست در یک C/D ثابت در حال افزایش است. دلیل مشاهده این رفتار این است که با افزایش $\gamma D/S_{II}$ ، خاک ضعیف‌تر شده و همین موضوع منجر به افزایش نشست در لحظه گسیختگی می‌گردد. به عنوان یک نتیجه کلی مشاهده گردید که درصد افزایش نشست ناشی از افزایش $\gamma D/S_{II}$ بسیار بیشتر از درصد افزایش نشست ناشی از افزایش C/D می‌باشد. به عبارت دیگر، نرخ تغییرات افزایش نشست در نسبت‌های $\gamma D/S_{II}$ بیشتر با شدت مضاعفی نسبت به افزایش C/D رخ می‌دهد. دلیل این رفتار را می‌توان به تاثیر بیشتر خصوصیات ژئوتکنیکی خاک اطراف تونل در نشست‌های سطحی زمین در مقایسه با نسبت عمق تونل وابسته دانست.

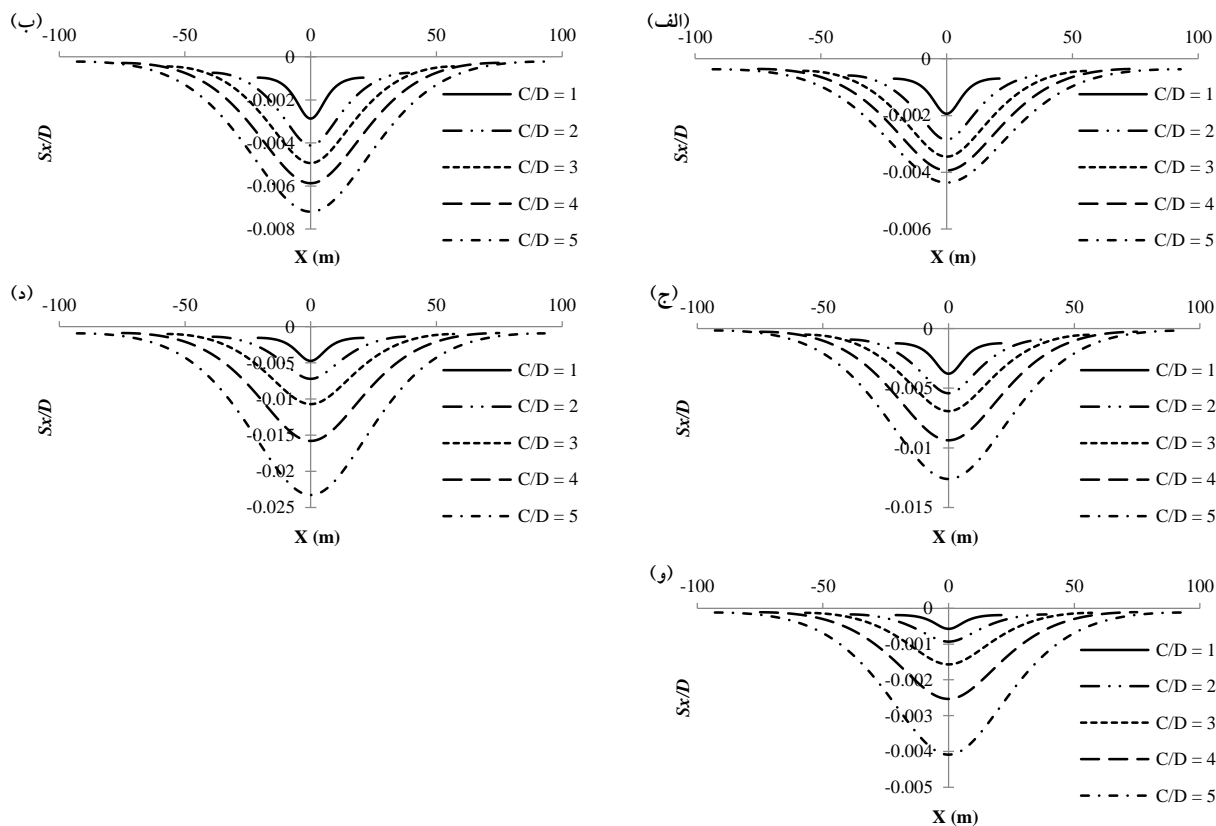




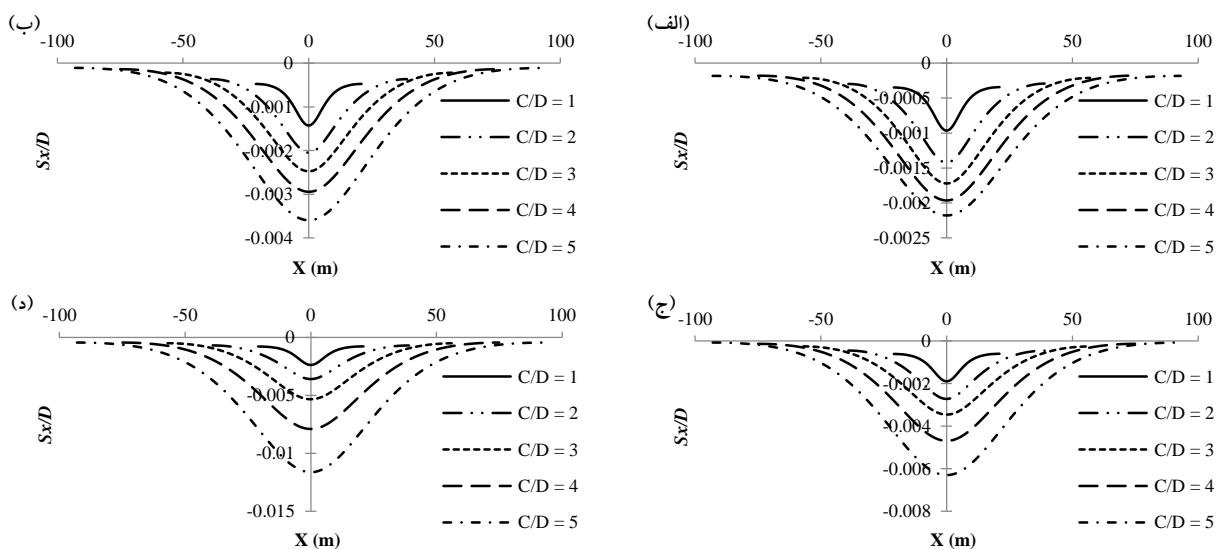
شکل ۶: پروفیل‌های نشست سطحی به‌ازای مقادیر مختلف C/D در $E/S_{II} = 100$ ثابت؛ (الف) $\gamma D/S_{II} = 2$ ، (ب) $\gamma D/S_{II} = 3$ ، (ج) $\gamma D/S_{II} = 4$ ، (د) $\gamma D/S_{II} = 5$ و (و) $\gamma D/S_{II} = 6$. شکل‌های ۷ الی ۱۰ نتایج پروفیل‌های نشست در لحظه گسیختگی را به‌ازای مقادیر مختلف نسبت عمق تونل (C/D) و تغییرات نسبت مقاومت خاک ($\gamma D/S_{II}$) با ثابت نگه داشتن نسبت سختی خاک (E/S_{II}) در مقادیر ۲۰۰، ۴۰۰، ۸۰۰ و ۱۶۰۰ نشان می‌دهند. نتایج نشان می‌دهد که بین تغییرات E/S_{II} و نشست رابطه عکس برقرار است. به‌طوری‌که با افزایش E/S_{II} مقادیر نشست کاهش می‌یابد. دلیل این موضوع این است که با افزایش مدول الاستیسیته، خاک سخت‌تر شده و همین موضوع منجر به کاهش نشست سطحی زمین می‌گردد.

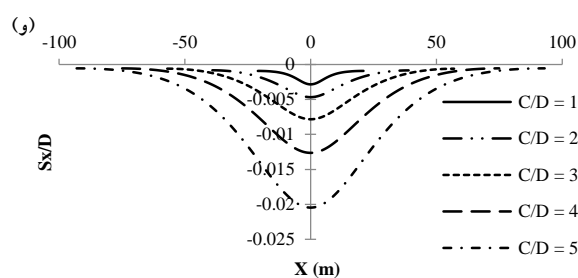


شکل ۷: پروفیل‌های نشست سطحی به‌ازای مقادیر مختلف C/D در $E/S_u = 200$ ثابت؛ (الف) $\gamma D/S_u = 2$ ، (ب) $\gamma D/S_u = 3$ ، (ج) $\gamma D/S_u = 4$ ، (د) $\gamma D/S_u = 5$ و (و) $\gamma D/S_u = 6$

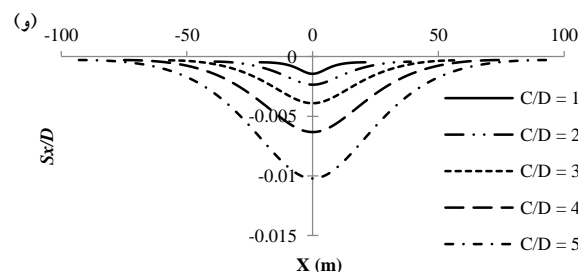
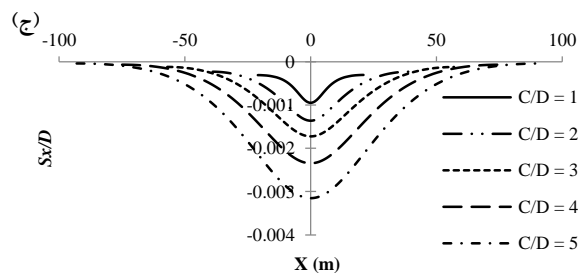
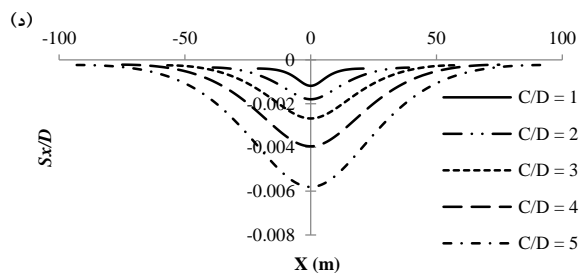
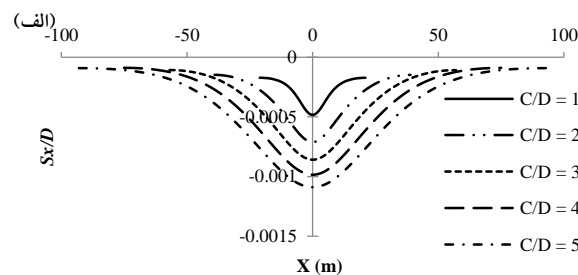
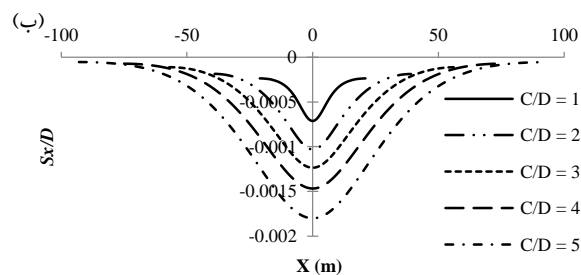


شکل ۸: پروفیل‌های نشست سطحی به‌ازای مقادیر مختلف C/D در $E/S_u = 400$ ثابت؛ (الف) $\gamma D/S_u = 2$ ، (ب) $\gamma D/S_u = 3$ ، (ج) $\gamma D/S_u = 4$ ، (د) $\gamma D/S_u = 5$ و (و) $\gamma D/S_u = 6$





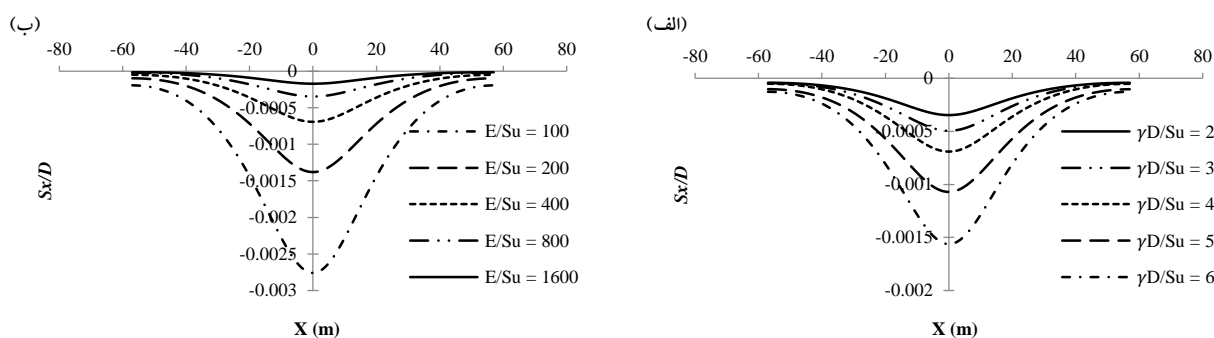
شکل ۹: پروفیل‌های نشست سطحی به‌ازای مقادیر مختلف C/D در $E/S_u = 800$ ثابت؛ (الف) $\gamma D/S_u = 2$ ، (ب) $\gamma D/S_u = 3$ ، (ج) $\gamma D/S_u = 4$ ، (د) $\gamma D/S_u = 5$ و (و) $\gamma D/S_u = 6$



شکل ۱۰: پروفیل‌های نشست سطحی به‌ازای مقادیر مختلف C/D در $E/S_u = 1600$ ثابت؛ (الف) $\gamma D/S_u = 2$ ، (ب) $\gamma D/S_u = 3$ ، (ج) $\gamma D/S_u = 4$ ، (د) $\gamma D/S_u = 5$ و (و) $\gamma D/S_u = 6$

۴-۲-۱-۴ اثر تغییرات نسبت مقاومت خاک ($\gamma D/S_u$) و نسبت سختی خاک (E/S_u) بر پروفیل نشست

اگرچه روند تغییرات پروفیل‌های پاسخ نشست تونل به‌ازای مقادیر مختلف نسبت مقاومت خاک ($\gamma D/S_u$) با ثابت نگه داشتن نسبت عمق (C/D) و نسبت سختی خاک (E/S_u) از شکل‌های قبلی قابل استخراج است، اما به‌منظور درک رفتار این روند، شکل ۱۱ (الف)، رفتار پروفیل‌های نشست را به‌ازای تغییرات $\gamma D/S_u$ در یک مقدار ثابت نسبت عمق و نسبت سختی خاک ($C/D = 3$ و $E/S_u = 400$) نشان می‌دهد. مطابق این شکل ملاحظه می‌گردد که با افزایش $\gamma D/S_u$ که در حقیقت معادل ضعیف‌تر شدن خاک محدوده اطراف تونل می‌باشد، نشست سطحی زمین در حال افزایش است. نتیجه دیگر از تغییرات $\gamma D/S_u$ این است که با افزایش دانسیته خاک (γ) نشست در سطح زمین در حال افزایش می‌باشد. به‌طور مشابه در شکل ۱۱ (ب) تأثیر تغییرات E/S_u بر پاسخ پروفیل‌های نشست با ثابت نگه داشتن $C/D = 3$ و $\gamma D/S_u = 400$ نشان داده شده است. براساس نتایج حاصله مشاهده می‌شود که با افزایش E/S_u که به معنی سخت‌تر شدن خاک در محدوده اطراف تونل می‌باشد، مقادیر نشست کمتری به‌دست آمده است.



شکل ۱۱: پروفیل‌های نشست سطحی به‌ازای (الف) مقادیر مختلف $\gamma D/S_u$ در $C/D=3$ و $E/S_u=400$ ، (ب) مقادیر مختلف E/S_u در $C/D=3$ و $\gamma D/S_u=4$

۲-۴- توسعه معادلات تجربی جدید برای تخمین نشست سطحی زمین ناشی از حفر تونل در خاک‌های چسبنده با استفاده از الگوریتم GEP

یکی از اهداف اصلی مطالعه حاضر ارائه معادلات تجربی رابطه قابل اعتماد برای پیش‌بینی نشست سطحی زمین ناشی از حفر تونل است. در این بخش نتایج حاصل از پیاده‌سازی الگوریتم GEP جهت توسعه معادلات تجربی جدید تشریح شده است. از آنجایی که ماکزیمم نشست سطحی (S_{max}) به‌ازای ترکیبی از پارامترهای هندسی و ژئوتکنیکی تونل دارای مقادیر متفاوتی است، لذا می‌توان از مقادیر نرمالایز شده S_{max} برای ارائه معادلات تجربی جدید استفاده نمود. به‌عبارت دیگر، می‌توان با نرمالایز کردن S_{max} برحسب فاصله عمقی تونل (H) تحت مدلسازی‌های مختلف، اثرات تغییرات خصوصیات هندسی تونل و خصوصیات ژئوتکنیکی خاک در توسعه معادلات جدید را حذف نمود. با این کار معادلات پیشنهادی به سایر تونل‌های دایره‌ای شکل با ابعاد مختلف در خاک‌های چسبنده با خصوصیات ژئوتکنیکی متفاوت قابل تعمیم است. از همین رو در تحقیق حاضر، با استفاده از الگوریتم GEP و تعیین ارتباط بین ماکزیمم نشست نرمالایز شده سطحی زمین در اثر حفر تونل (S_{max}/H) به‌عنوان خروجی و ترکیبی از تغییرات خصوصیات ژئوتکنیکی خاک (نسبت مقاومت خاک ($\gamma D/S_u$) و نسبت سختی ثابت (E/S_u)) و مشخصات هندسی تونل (نسبت عمق تونل (C/D)) به‌عنوان سه ورودی مستقل، معادلات تجربی جدیدی جهت تخمین نشست سطحی پیشنهاد شده است. بنابراین انتظار می‌رود رابطه‌ای به‌صورت $S_{max}/H = f(\gamma D/S_u, E/S_u, C/D)$ برای تعیین بیشینه نشست سطحی نرمالایز شده سطحی زمین در اثر حفر تونل با استفاده از روش GEP به‌دست آید. بدین منظور ابتدا از طریق فرآیندهای تصادفی یک پایگاه داده (جمعیت اولیه‌ای از تغییرات S_{max}/H برحسب تغییرات خصوصیات مقاومتی خاک و خصوصیات هندسی تونل) تهیه گردید و تابع برازش آن تعیین شد. طول محدوده انتخابی ۱۰۰ و مجموعه‌ای شامل ۱۰ برازش انتخاب گردید، لذا مقدار تابع برازش برابر با ۱۰۰۰ در نظر گرفته شد. بر این اساس، پایگاه داده بر مبنای ۱۰۰۰ مدلسازی مختلف برای پوشش سناریوهای مختلفی از عدم قطعیت‌های ناشی از موقعیت‌های مختلف قرارگیری تونل (تغییرات هندسی) و خصوصیات ژئوتکنیکی خاک تشکیل شد. جدول ۳ محدوده تغییرات پارامترهای هندسی تونل و پارامترهای ژئوتکنیکی خاک (ورودی‌ها) را نشان می‌دهد.

جدول ۳: محدوده تغییرات پارامترهای هندسی تونل و خصوصیات ژئوتکنیکی خاک

پارامتر	مقادیر	میانگین	انحراف استاندارد
C/D	۱-۵/۵	۳/۲۵	۰/۰۳۵
$\gamma D/S_u$	۲-۶/۵	۴/۲۵	۲/۵۱۶۷
E/S_u	۱۰۰-۱۶۰۰	۸۵۰	۱/۶۶۶۷

در مرحله بعد با تخصیص تعدادی عملگر حسابی (Cte, +, -, ×, /, X^2 , X^3 , $\sqrt{\quad}$, $\sqrt[3]{\quad}$, Power, Exp, Log)، پایانه‌ها و توابع مناسب برای تولید کروموزوم‌ها با هدف دستیابی به بالاترین دقت به مدل تخصیص داده شدند.

پس از تهیه پایگاه داده و تنظیم تابع برازش، برای رسیدن به نتایج دقیق‌تر اقدام به پیش‌پردازش داده‌ها شد. بدین منظور با تقسیم‌بندی داده‌ها به دو دسته داده‌های آموزشی و آزمایشی، کارآیی مدل GEP مورد سنجش قرار گرفت. برای انجام پیش‌پردازش داده‌ها، طبق یک قاعده کلی براساس مطالعات پیشین [۵۴، ۵۸ و ۶۰]، از ۸۰ درصد داده‌های موجود در پایگاه داده (معادل ۸۰۰ نتیجه از آنالیزهای S_{max}/H) برای آموزش و از ۲۰ درصد داده‌های باقیمانده (معادل ۲۰۰ نتیجه) برای آزمون مدل استفاده شد. جدول ۴ مشخصه‌های آماری

داده‌های انتخاب شده برای دو بخش آموزشی و آزمایشی را برحسب S_{max}/H نشان می‌دهد. علاوه بر این، نحوه پراکندگی داده‌های S_{max}/H در دو بخش آموزشی و آزمایشی با استفاده از نمودارهای جعبه‌ای به ترتیب در شکل ۱۲ نشان داده شده است. براساس نمودارهای جعبه‌ای نشان داده شده در شکل ۱۲، مقادیر حداکثر، صدک ۷۵ام، میانه، صدک ۲۵ام و حداقل S_{max}/H مشخص است. طول عمودی جعبه نیز بیانگر دامنه بین چارک‌ها است. نمودارهای جعبه‌ای نشان می‌دهند که مقادیر منتخب S_{max}/H برای هر دو بخش آموزشی و آزمایشی دارای محدوده نسبتاً یکسانی هستند و هر دو بخش داده‌ها از مطلوبیت پراکندگی قابل قبولی برخوردارند. با توجه به عدم نزدیکی خط میانه در وسط جعبه می‌توان دریافت که داده‌های منتخب برای هر دو بخش آموزشی و آزمایشی قرینه نیستند. همچنین با توجه به نزدیکی خط میانه به لبه پایینی جعبه برای داده‌های آموزشی و آزمایشی، این نتیجه حاصل می‌شود که داده‌ها به سمت مقادیر کمتر بوده و چولگی منفی است. نقاطی که از جعبه خارج شده و حداکثر تا ۱/۵ برابر طول جعبه پیش رفته‌اند، به‌عنوان بزرگترین و کوچکترین مشاهده که از لحاظ آماری پرت نیستند، در نظر گرفته شدند. مقادیر پرت که اندازه‌ای بین ۱/۵ تا ۳ برابر طول جعبه از لبه بالا و پایین جعبه اختیار می‌کنند و مقادیر انتهایی (غیرعادی) که اندازه‌ای بیشتر از ۳ برابر طول جعبه داشته‌اند، اصلاح شده و از فرآیند آنالیز حذف می‌گردند.

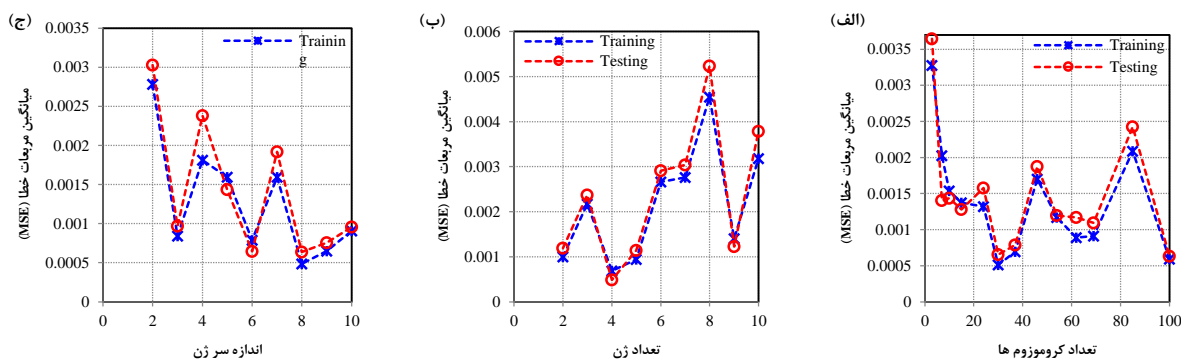
جدول ۴: مشخصه‌های آماری داده‌های خروجی برحسب تغییرات ماکزیم نشست نرمالایز شده سطحی زمین در اثر حفر تونل (S_{max}/H) برای داده‌های منتخب در دو بخش آموزش و آزمایش مدل

مشخصه	آموزشی					آزمایشی				
	میانگین	ماکزیم	میانه	انحراف استاندارد	مینیم	میانگین	ماکزیم	میانه	انحراف استاندارد	مینیم
مقدار	۰/۰۰۳۳۹۱	۱/۰۰۰	۰/۰۵۵۳۳	۰/۹۵۸۴	۰/۱۱۴۳۳۵	۰/۰۴۳۴	۰/۸۳۳۵۲۱	۰/۰۵۵۳۲۳	۰/۰۹۷۲۶	۰/۱۱۹۴۲



شکل ۱۲: نمودارهای جعبه‌ای نشان‌دهنده پراکندگی ماکزیم نشست نرمالایز شده سطحی زمین در اثر حفر تونل (S_{max}/H) برای داده‌های منتخب آموزشی و آزمایشی در ادامه مقادیر بهینه ساختار کروموزوم‌ها (تعداد کروموزوم‌ها، تعداد ژن‌ها و طول سر ژن) از طریق آزمون و خطا تعیین شد. بدین منظور، هزار نسل مختلف اجرا گردیده و در هر اجرا، با ثابت نگه داشتن سایر پارامترها، مقدار یکی از پارامترهای مدل تغییر یافت. برای هر نسل، میانگین مربعات خطا^{۴۰} (MSE) در هر دو مجموعه آموزشی و آزمایشی ثبت شد و مقادیری با کمترین MSE شناسایی شدند. نتایج آنالیز عملکرد الگوریتم GEP برای تعیین معادلات تجربی جهت تخمین S_{max}/H بازای مقادیر مختلف پارامترهای مدل در شکل ۱۳ نشان داده شده است. با توجه به شکل ۱۳ (الف تا ج) مشاهده می‌شود که مدل یا مدل‌هایی با ۳۰ کروموزوم، ۴ ژن در هر کروموزوم و اندازه سر ژن برابر با ۸ دارای کمترین MSE در مجموعه‌های آموزشی و آزمایشی بوده و بهترین عملکرد را دارا هستند. در ادامه تابع جمع به‌عنوان مناسب‌ترین تابع برای پیوند ژن‌های انتخابی (زیردرخت‌ها) انتخاب شد. در انتها با انتخاب ترکیبی از عملگرها و توابع بهینه‌سازی ژنتیکی و تعیین نرخ آنها [۵۰ و ۵۳]، فرآیند پیاده‌سازی GEP تکمیل شد. جدول ۵ پارامترهای مورد استفاده و نرخ آنها را به‌عنوان ورودی‌های نرم‌افزار GeneXpro Tools 4.0 جهت تعیین مدل‌های GEP برای تخمین S_{max}/H نشان می‌دهد.

⁴⁰ Mean Squared Errors

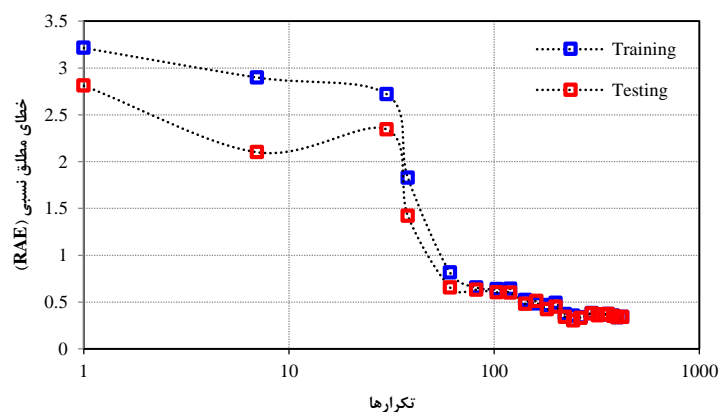


شکل ۱۳: تأثیر پارامترهای استفاده شده بر عملکرد الگوریتم GEP. (الف) تعداد کروموزوم‌ها، (ب) تعداد نرون و (ج) اندازه سر نرون

جدول ۵: پارامترهای ورودی برای تنظیم الگوریتم GEP

مقادیر	پارامترهای مدل GEP
۰/۱	نرخ انتقال IS
۰/۱	نرخ انتقال RIS
۰/۱	نرخ ترانهش
۰/۰۳۳	نرخ جهش
۰/۰۰۵	نرخ وارون‌سازی
۰/۲	نرخ ترکیب مجدد نرون‌ها

با ایجاد تغییراتی در الگوریتم و انجام رگرسیون غیرخطی، تعدادی معادله با حداقل خطا در مقایسه با پایگاه داده اندازه‌گیری شده به دست آمد. در این فرآیند، کارایی الگوریتم براساس مجموع اختلافات خطای مطلق نسبی RAE ^{۳۴} بین مقادیر برآورد شده و محاسبه شده برای پیش‌بینی S_{max}/H کنترل شد. تکرارها زمانی که مقدار خطا برای داده‌های آموزشی و آزمایشی با کاهش قابل ملاحظه‌ای مواجه نبود، متوقف گردید. شکل ۱۴ تغییرات RAE بین آموزش و آزمایش داده‌ها را برای تعیین مدل‌های بهینه نشان می‌دهد. همانگونه که در این شکل مشاهده می‌گردد برای آموزش داده‌ها، خطای مدل از $۳/۲۱۵$ در تکرار اول به حدود $۰/۳۴۰$ پس از ۴۲۱ تکرار کاهش یافت. برای آزمون داده‌ها نیز خطا از $۲/۸۱۲$ به حدود $۰/۳۴۱$ برای همین تعداد تکرار کاهش یافته است.



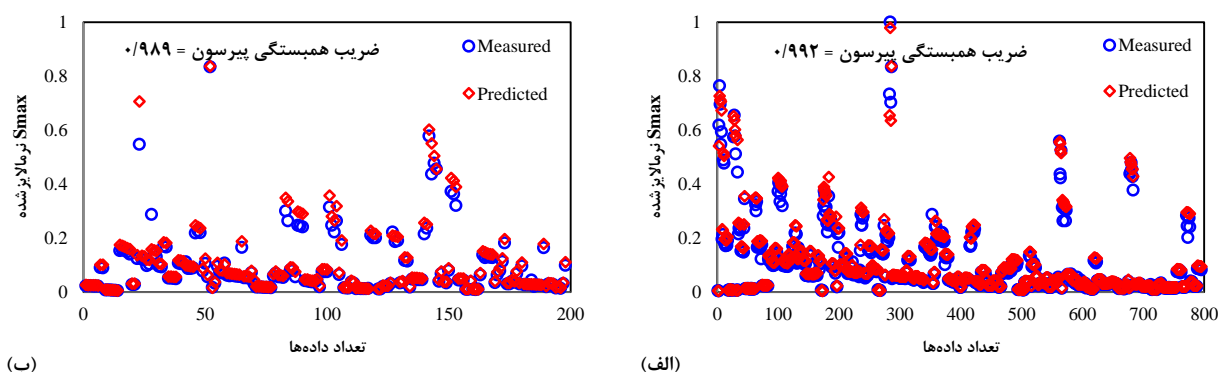
شکل ۱۴: تغییرات خطای مطلق نسبی بین آموزش و آزمایش داده‌ها برحسب تعداد تکرارها برای تعیین مدل GEP بهینه

جدول ۶ مقادیر به دست آمده برای شاخص‌های R^2 ، $RMSE$ و MAE را به‌ازای مدل‌های مختلف در هر دو مرحله آموزش و آزمایش داده‌ها نشان می‌دهد. مدلی با کمترین $RMSE$ و MAE و همچنین بیشترین R^2 به‌عنوان قابل اعتمادترین مدل انتخاب می‌شود. براساس نتایج، دو معادله تجربی (معادلات (۶) و (۷)) دارای مقادیر بهینه از شاخص‌های مذکور به‌عنوان مناسب‌ترین مدل‌های تخمین S_{max}/H با الگوریتم GEP انتخاب شده‌اند:

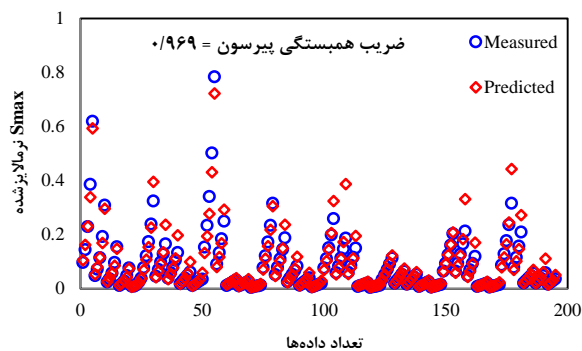
$$\frac{S_{\max}}{H} = \frac{-0.127}{2^{(\gamma D/S_u)} + (E/S_u)^{(C/D)}} - \frac{0.19(\gamma D/S_u)}{(E/S_u) - 0.16(E/S_u)(0.218 \times \gamma D/S_u)^{(C/D)}} \quad (6)$$

$$\frac{S_{\max}}{H} = \frac{(\gamma D/S_u)}{(C/D) \exp(0.659(\gamma D/S_u)) - 4.64(E/S_u)} \quad (7)$$

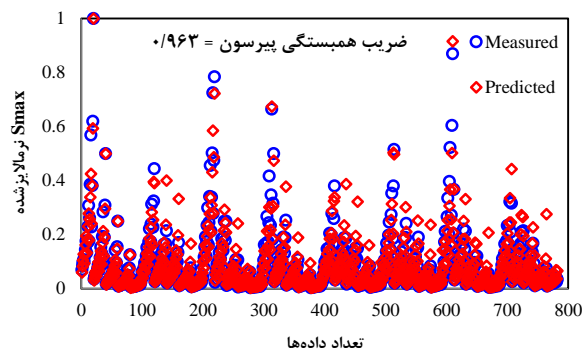
شکل‌های ۱۵ و ۱۶ به ترتیب نمودار پیرسون و ضریب همبستگی بیانگر نحوه پراکندگی داده‌های خروجی بر حسب S_{\max} نرمالایز شده از مدل تجربی ۱ (معادله (۶)) و مدل تجربی ۲ (معادله (۷)) به‌ازای داده‌های آموزشی و آزمایشی را نشان می‌دهد. علاوه بر این، در شکل‌های ۱۷ و ۱۸ مقایسه بین مقادیر پیش‌بینی شده در مقابل مقادیر اندازه‌گیری شده حداکثر نشست سطحی نرمالایز شده برای داده‌های آموزشی و آزمایشی مدل به‌ترتیب به‌ازای مدل‌های تجربی ۱ و ۲ نشان داده شده است. بر مبنای شاخص R^2 مشاهده می‌شود که مدل تجربی ۲ به‌ترتیب با مقادیر ۰/۹۸۴ و ۰/۹۸۰ برای داده‌های آموزشی و آزمایشی در مقایسه با مدل تجربی ۱ با مقادیر ۰/۹۲۸ و ۰/۹۴۰، دارای عملکرد بهتری است. با مقایسه شاخص $RMSE$ مشاهده می‌شود که مدل ۱ در هر دو بخش آموزشی و آزمایشی داده‌ها دارای دقت بالاتری نسبت به مدل ۲ می‌باشد. در نهایت بر مبنای شاخص MAE مشاهده می‌گردد که مدل ۱ در بخش آموزشی دارای عملکرد بهتری نسبت به مدل ۲ می‌باشد؛ اما در بخش آموزش مدل ۱ دارای عملکرد بهتری بر مبنای شاخص $RMSE$ است. با مقایسه کلی نتایج به‌دست آمده مشاهده می‌شود که اختلافات بین شاخص‌های ارزیابی عملکرد مدل‌های تجربی پیشنهادی تقریباً ناچیز می‌باشند. بر این اساس همبستگی خوبی بین معیارهای تجربی پیشنهادی برای تخمین نشست سطحی نرمالایز شده حاصل از مدل‌سازی GEP و داده‌های اندازه‌گیری شده برای مجموعه‌های آموزشی و آزمایشی وجود دارد. با توجه به محدوده نسبتاً زیاد تغییرات پارامترهای هندسی تونل (عمق مدفون (C) ، قطر (D) ، فاصله عمقی (H)) و پارامترهای ژئوتکنیکی خاک (وزن مخصوص (γ) ، مدول الاستیسیته (E) و مقاومت برشی زهکشی نشده (S_u))، معادلات تجربی ارائه شده برای تخمین حداکثر نشست سطحی زمین ناشی از تونل حفاری شده در خاک‌های چسبنده از دقت بالایی برخوردار هستند.



شکل ۱۵: نمودار پیرسون و ضریب همبستگی بیانگر پراکندگی داده‌های خروجی بر حسب S_{\max} نرمالایز شده از مدل تجربی ۱ در بخش: (الف) آموزشی و (ب) آزمایشی



(ب)

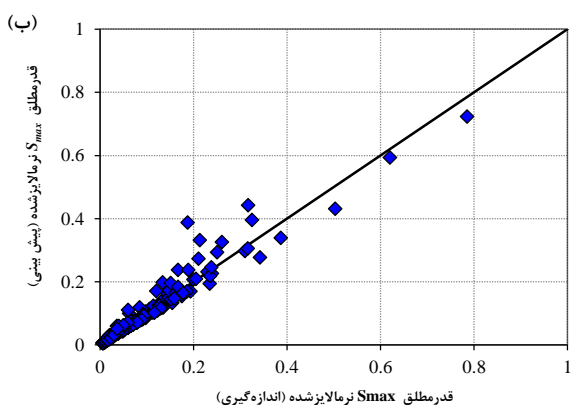


(الف)

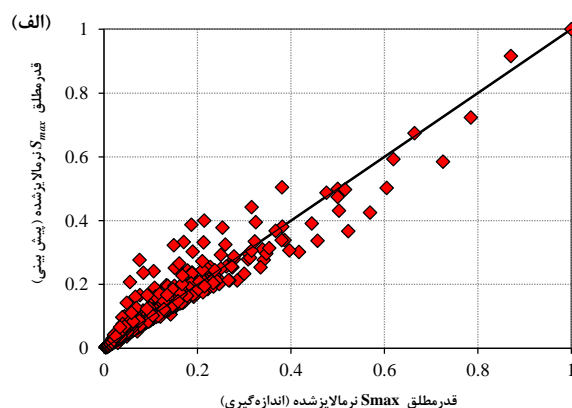
شکل ۱۶: نمودار پیرسون و ضریب همبستگی بیانگر پراکندگی داده‌های خروجی بر حسب S_{max} نرمالایزشده از مدل تجربی ۲ در بخش: (الف) آموزشی و (ب) آزمایشی

جدول ۶: نتایج توابع برازش برای ارزیابی کارایی مدل‌های نهایی GEP

آزمایشی			آموزشی			مدل‌ها (معادلات تجربی)
MAE	RMSE	R^2	MAE	RMSE	R^2	
۰/۰۱۲۳	۰/۰۲۳۱	۰/۹۴۰	۰/۰۱۱۰	۰/۰۱۹۰	۰/۹۲۸	مدل تجربی ۱ (معادله ۶)
۰/۰۱۱۷	۰/۰۲۶۲	۰/۹۸۰	۰/۰۱۲	۰/۰۲۹۲	۰/۹۸۴	مدل تجربی ۲ (معادله ۷)

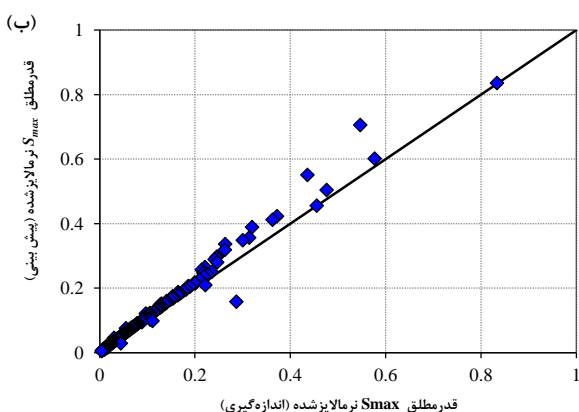


(ب)

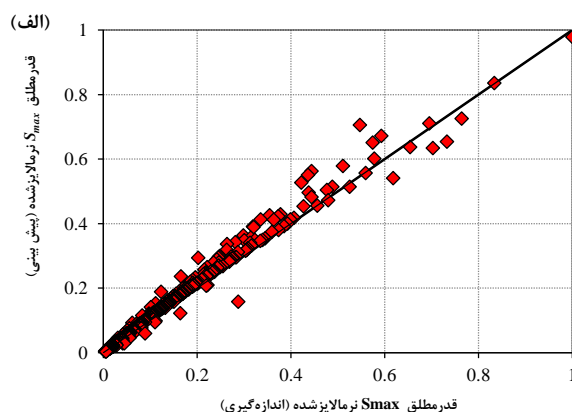


(الف)

شکل ۱۷: نتایج تحلیل رگرسیون برای مقادیر حداکثر نشست سطحی نرمالایزشده (S_{max}) پیش‌بینی شده در مقابل مقادیر اندازه‌گیری شده براساس معادله تجربی اول (معادله ۶) به‌ازای داده‌های: (الف) آموزشی و (ب) آزمایشی



(ب)



(الف)

شکل ۱۸: نتایج تحلیل رگرسیون برای مقادیر حداکثر نشست سطحی نرمالایزشده (S_{max}) پیش‌بینی شده در مقابل مقادیر اندازه‌گیری شده براساس معادله تجربی دوم (معادله ۷) به‌ازای داده‌های: (الف) آموزشی و (ب) آزمایشی

۵- نتیجه گیری

در تحقیق حاضر به بررسی تاثیر تغییرات پارامترهای هندسی تونل و تغییرات خصوصیات ژئوتکنیکی خاک بر نشست سطحی زمین ناشی از حفر تونل‌های دایره‌ای شکل در خاک‌های چسبنده پرداخته شد. این کار با انجام مطالعات پارامتریک و با استفاده از آنالیزهای عددی مبتنی بر روش تفاضل محدود دوبعدی در نرم‌افزار FLAC^{2D} صورت گرفت. پس از تعیین اثرگذاری پارامترهای مذکور بر پاسخ نشست تونل (پروفیل‌های نشست)، دو معادله تجربی جدید برای تخمین این نشست با استفاده از الگوریتم برنامه‌ریزی بیان ژن (GEP) توسعه داده شد. نتایج کلی تحقیق حاضر را به شرح زیر می‌توان بیان نمود:

- ۱- با افزایش نسبت عمق (C/D)، یک فرورفتگی عمیق‌تر در پروفیل نشست ایجاد گردیده و نتیجتاً مقادیر ماکزیمم نشست سطحی در حال افزایش می‌باشد. دلیل این رفتار، افزایش سربار موجود در بالای تونل با افزایش C/D است. با معکوس در نظر گرفتن C/D می‌توان دریافت که افزایش قطر تونل (D) منجر به کاهش نشست سطحی زمین می‌گردد.
- ۲- با ثابت نگه داشتن نسبت سختی ($E/S_u = 100$) و افزایش نسبت مقاومت خاک ($\gamma D/S_u$)، مقدار نشست در یک C/D ثابت در حال افزایش است. دلیل بروز این رفتار، ضعیف‌تر شدن خاک در اثر افزایش $\gamma D/S_u$ و نتیجتاً افزایش نشست است.
- ۳- درصد افزایش نشست ناشی از افزایش $\gamma D/S_u$ بسیار بیشتر از درصد افزایش نشست ناشی از افزایش C/D می‌باشد. به عبارت دیگر، نرخ تغییرات افزایش نشست در نسبت‌های $\gamma D/S_u$ بیشتر با شدت مضاعفی نسبت به افزایش C/D رخ می‌دهد. دلیل این رفتار ناشی از تاثیر بیشتر پارامترهای ژئوتکنیکی بر نشست‌های سطحی در مقایسه با پارامترهای هندسی وابسته دانست.
- ۴- بین تغییرات نسبت سختی خاک (E/S_u) و نشست رابطه عکس برقرار است. دلیل این موضوع سخت‌تر شدن خاک ناشی از افزایش مدول الاستیسیته و نتیجتاً کاهش نشست سطحی زمین است. با افزایش $\gamma D/S_u$ که معادل ضعیف‌تر شدن خاک محدوده اطراف تونل می‌باشد، نشست سطحی افزایش می‌یابد.
- ۵- نتایج نشان داد که همبستگی خوبی بین معادلات تجربی پیشنهادی برای تخمین نشست سطحی نرمالایزشده حاصل از مدل‌سازی GEP و داده‌های واقعی برای مجموعه‌های آموزشی و آزمایشی وجود دارد. با توجه به محدوده نسبتاً زیاد تغییرات پارامترهای هندسی تونل (عمق مدفون (C)، قطر (D)، فاصله عمقی (H)) و پارامترهای ژئوتکنیکی خاک (وزن مخصوص (γ))، مدول الاستیسیته (E) و مقاومت برشی زهکشی نشده (S_u))، روابط تجربی ارائه شده برای تخمین حداکثر نشست سطحی زمین ناشی از تونل حفاری شده (S_{max}) در خاک‌های چسبنده از دقت بالایی برخوردار هستند. مزیت اصلی روابط تجربی پیشنهادی در این تحقیق برای تخمین S_{max} پاسخ دقیق آنها در مقابل تعداد محدود پارامترهای مورد نیاز است.

مراجع

- [1] Zhang, W.G., and Goh, A.T.C. (2012). Reliability assessment on ultimate and serviceability limit states and determination of critical factor of safety for underground rock caverns. *Tunneling and Underground Space Technology*, 32, 221–230.
- [2] Wang, X.-t., Schmettow, T., Chen, X.-s., and Xia, C.-q., (2022). Prediction of ground settlements induced by twin shield tunnelling in rock and soil – A case study, *Underground Space*, <https://doi.org/10.1016/j.undsp.2021.12.001>.
- [3] Janin, J.P., (2012). *Tunnels en milieu urbain: Prévisions des tassements avec prise en compte des effets des pré-soutènements* (renforcement du front de taille et voute-parapluie), Ph.D. dissertation, N d'ordre 2012ISAL0038, Ecole doctorale MEGA de Lyon, Français.
- [4] Mollon, G., Dias, D., & Soubra, A.-H. (2011a). Rotational failure mechanisms for the face stability analysis of tunnels driven by a pressurized shield. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 35(12), 1363–1388.
- [5] Mair, R. J. (1979). *Centrifugal modeling of tunnel of tunnel construction in soft clay*. Ph.D. Thesis, Cambridge University.
- [6] Olsen, T., Kasper, T., and Wit, J. (2022). Immersed tunnels in soft soil conditions experience from the last 20 years, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 121, <https://doi.org/10.1016/j.tust.2021.104315>.
- [7] Zeng, P., Senent, S., & Jimenez, R. (2016). Reliability analysis of circular tunnel face stability obeying hoek–brown failure criterion considering different distribution types and correlation structures. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 30(1), 04014126.

- [8] Zeng, P., Senent, S., Jimenez, R. (2014). Reliability analysis of circular tunnel face stability obeying Hoek–Brown failure criterion considering different distribution types and correlation structures. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 30(1), 1–9.
- [9] Zhang, N., Zhou, A., Pan, Y., and Shen, S.–L. (2021). Measurement and prediction of tunnelling–induced ground settlement in karst region by using expanding deep learning method, *Measurement*, 183, <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.109700>.
- [10] Zhou, J., Chen, D., Wang, D., Zhang, L.L., Zhang, L.M., (2018). Failure Probability of Transverse Surface Settlement Induced by EPB Shield Tunneling in Clayey Soils. *ASCE–ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems, Part A: Civil Engineering*. 4(3), 04018030.
- [11] Wang, Q., Fang, H., and Shen, L. (2016). Reliability analysis of tunnels using a metamodeling technique based on augmented radial basis functions. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 56, 45–53.
- [12] Li, H.Z., and Low, B.K., (2010). Reliability analysis of circular tunnel under hydrostatic stress field. *Computers and Geotechnics*, 37(1), 50–58.
- [13] Mollon, G., Phoon, K.K., Dias, D., Soubra, A.H. (2010). A new 2D failure mechanism for face stability analysis of a pressurized tunnel in spatially variable sands. In *GeoFlorida 2010: Advances in Analysis, Modeling & Design*, 2052–2061.
- [14] Martos, F. (1958). Concerning an approximate equation of the subsidence trough and its time factors, *In International strata control congress*, Leipzig, 191–205.
- [15] Peck, R.B. (1969). Deep excavations and tunneling in soft ground, In an approximate equation of the subsidence trough and its time factors, In: *Proceedings of the 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Mexico City, State-of-the-art Volume, 225–290.
- [16] Secen, M. (2006). *Tunnel induced settlements and structural forces in lining*, Ph.D. thesis Tunnel induced settlements and structural forces in lining (2006), Stuttgart. Tunnel induced settlements and structural forces in lining.
- [17] O'Reilly, M.P., and New, B.M. (1982). Settlements above tunnels in United Kingdom—their magnitude and prediction, *In: Tunnelling '82*, London, 173–181.
- [18] Ocak, I., (2008). Control of surface settlements with umbrella arch method in second stage excavations of Istanbul Metro, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 23(6), 674–681.
- [19] Wang, Z., Yao, W., Cai, Y., Xu, B., Fu, Y., and Wei, G. (2019). Analysis of ground surface settlement induced by the construction of a large–diameter shallow–buried twin–tunnel in soft ground, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 83, 520–532.
- [20] Wang, F., Gou, B., and Qin, Y. (2013). Modeling tunneling–induced ground surface settlement development using a wavelet smooth relevance vector machine, *Computers and Geotechnics*, 54(0), 125–132.
- [21] Wang, X., Tan, W., Ni, P., Chen, Z., and Hu, S. (2020). Propagation of settlement in soft soils induced by tunneling, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 99, <https://doi.org/10.1016/j.tust.2020.103378>.
- [22] Lu, H., Shi, J., Wang, Y., and Wang, R. (2019). Centrifuge modeling of tunneling–induced ground surface settlement in sand, *Underground Space*, 4(4), 302–309.
- [23] Zhao, D., Chen, C., Lei, P., Xu, T., Jiao, W., and Zhang, Y. (2022). Experimental study on temperature profile and smoke movement in a model–branched tunnel fire under longitudinal ventilation, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 121, <https://doi.org/10.1016/j.tust.2021.104324>.
- [24] Zhang, L., Wu, X., Liu, W., and Skibniewski, M.J., (2019). Optimal Strategy to Mitigate Tunnel–Induced Settlement in Soft Soils: Simulation Approach, *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 33(5), [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CF.1943-5509.0001322](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0001322).
- [25] Cording, E.J., (1991). Control of ground movements around tunnels in soil, *Proceedings of 9th Pan–Am Conference on soil Mechanics*, Santiago, Chile, 2195–2244.
- [26] Mair, R.J. (2008). Tunnelling and geotechnics: new horizons, *Geotechnique*, 58(9), 695–736.
- [27] Atkinson, J.H., and Potts, D.M., (1977). Subsidence above shallow tunnels in soft ground, *Journal of the geotechnical engineering division*, 103(4), 307–325.
- [28] Bakker, K.J., Van Scheldt, W., Plekkenpol, J.W., (1996). Predictions and a monitoring scheme with respect to the boring of the Second Heinenoord tunnel. *Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground*. 459–644.
- [29] Mair, R.J., and Taylor, R.N., (1997). Theme lecture: Bored tunneling in the urban environment, *In Proceedings of 14th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Hamburg, Balkema, Rotterdam, Netherlands, 2353–2385.
- [30] Grant, R.J., and Taylor, R.N. (2000). Tunnelling–induced ground movements in clay, *Proceedings of the ICE–Geotechnical Engineering*, 143(1), 43–55.
- [31] Wu, B.R., and Lee, C.J. (2003). Ground movements and collapse mechanisms induced by tunneling in clayey soil, *International Journal of the Physical Modelling in Geotechnics*, 3(4), 15–29.
- [32] Osman, A.S., Mair, R.J., and Bolton, M.D., (2006a). On the kinematics of 2D tunnel collapse in undrained clay,

- Geotechnique*, 56(9), 585–595.
- [33] Ahmad, M., and Iskander, M. (2010). Analysis of tunneling-induced ground movements using transparent soil models, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 137(5), 525–535.
- [34] Sharifzadeh, M., Kolivand, F., Ghorbani, M., and Yasrobi, S. (2013). Design of sequential excavation method for large span urban tunnels in soft ground – Niayesh tunnel, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 35, 178–188.
- [35] Cording, E.J., and Hansmire, W.H., (1975). Displacement around soft ground tunnels, General Report: Session IV, Tunnels in soil, *In Proceedings of the 5th Panamerican Congress on Soil Mechanics and Foundation Engineering*.
- [36] Attewell, P., and Farmer, I., (1974). Ground deformations resulting from shield tunnelling in London Clay, *Canadian Geotechnical Journal*, 11(3), 380–395.
- [37] Rankin, W. (1988). Ground movements resulting from urban tunneling: predictions and effects, Geological Society, London, *Engineering Geology Special publications*, 5(1), 79–92.
- [38] Phienweij, N. (1997). Ground movements in shield tunneling in Bangkok soils, *Proceedings of the 14th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Hamburg, 3, 1469–1472.
- [39] Devriendt, M., (2010). Risk analysis for tunneling ground movement assessments, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers–Geotechnical Engineering*. 168(3), 109–118.
- [40] Hosseini, S.A., Mohammadnejad, M., Hoseini, S.M., Mikaeil, R., and Tolooiyan, A. (2012). Numerical and analytical investigation of ground surface settlement due to subway excavation. *Geosciences*, 2(6), 185–191.
- [41] Fattah, M.Y., Shlash, K.T., and Salim, M.N., (2013). Prediction of settlement through induced by tunneling in cohesive ground, *Acta Geotechnica*, 8(2), 167–179.
- [42] Chakeri, H., Ozcelik, Y., and Unver, B., (2013). Effects of important factors on surface settlement prediction for metro tunnel excavated by EPB, *Tunnelling and underground Space Technology*, 36(1), 14–23.
- [43] Chakeri, H., and Unver, B., (2014). A new equation for estimating the maximum above tunnels excavated in soft ground, *Environmental earth science*, 71(7), 3195–3210.
- [44] Meng, F.y., Chen, R.–p., and Kang, X. (2018). Effects of tunneling-induced soil disturbance on the post-construction settlement in structured soft soils, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 80, 53–63.
- [45] Guglielmetti, V., Grasso, P., Mahtab, A., and Xu, S. (Eds.) (2008). Mechanized tunneling in urban areas: design methodology and construction control, *Taylor and Francis*, Ch. 5.
- [46] FLAC, 2012. Fast Lagrangian Analysis of Continua, Version 5.0, User's Manual. Itasca Consulting Group, Inc., USA.
- [47] Meissner, H. (1996). Tunnelbau unter Tage – Empfehlungen des Arbeitskreises 1.6 Numerik in der Geotechnik. *Geotechnik*, 19(2), 99–108.
- [48] Möller, S.C. (2006). *Tunnel induced settlements and structural forces in linings*. Ph.D thesis. Universität Stuttgart, Institut für Geotechnik, Stuttgart, Germany.
- [49] Sams, S.M., (2016). *Numerical investigation of stability settlement of tunnels in undrained clay*. M.Sc thesis, the University of Southern Queensland, Australia.
- [50] Ferreira, C., (2001). Gene expression programming: A new adaptive algorithm for solving problems, *Complex Systems*, 13, 87–129.
- [51] GEPSOFT. GeneXproTools. Version 4.0, <http://www.gepssoft.com>.
- [52] Lopes, H.S., and Weinert, W.R. (2004). EGIPSYS: An enhanced gene expression programming approach for symbolic regression problems, *International Journal of Applied Mathematics and Computer Science*, 14(3), 375–384.
- [53] Ferreira, C. (2002). *Gene expression programming in problem solving*. In Soft computing and industry, 635-653, Springer, London.
- [54] Jahed Armaghani, D., Safari, V., Fahimifar, A., Monjezi, M. and Mohammadi, M.A. (2018). Uniaxial compressive strength prediction through a new technique based on gene expression programming. *Neural Computing and Applications*, 30(11), 3523-3532.
- [55] Sarkhani Benemaran, R., Esmaeili-Falak, M. and Javadi, A. (2022). Predicting resilient modulus of flexible pavement foundation using extreme gradient boosting based optimised models. *International Journal of Pavement Engineering*, 1-20.
- [56] Sarkhani Benemaran, R., Esmaeili-Falak, M. and Javadi, A. (2022). Predicting resilient modulus of flexible pavement foundation using extreme gradient boosting based optimised models. *International Journal of Pavement Engineering*, 1-20.
- [57] Wang, J., and Wu, F. (2022). New hybrid support vector regression methods for predicting fresh and hardened properties of self-compacting concrete, *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, Pre-press, 1-15. <https://doi.org/10.3233/JIFS-220744>.
- [58] Shirani Faradonbeh, R., Jahed Armaghani, D., Abd Majid, M.Z., Md Tahir, M., Ramesh Murlidhar, B., Monjezi, M. and Wong, H.M. (2016). Prediction of ground vibration due to quarry blasting based on gene expression programming: a new model for peak particle velocity prediction. *International journal of environmental science and technology*, 13(6), 1453-1464.
- [59] Wang, X., Tan, W., Ni, P., Chen, Z. and Hu, S. (2020). Propagation of settlement in soft soils induced by

- tunneling. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 99, p.103378.
- [60] Faradonbeh, R.S., Armaghani, D.J., Monjezi, M. and Mohamad, E.T. (2016). Genetic programming and gene expression programming for flyrock assessment due to mine blasting. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 88, 254-264.