

(مقاله پژوهشی)

بررسی تأثیر سه‌بعدی تغییرپذیری مکانی مدول یانگ بر اساس تحلیل احتمالاتی نشست سطح زمین در تونل‌زنی NATM (مطالعه موردی)

محمدعلی طهماسبی^۱، رضا شیرین‌آبادی^{۱*}، اسماعیل رحیمی^۱، احسان موسوی^۱، امیرحسین بانگیان تبریزی^۱

۱- گروه معدن و نفت، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب، تهران، ایران
(دریافت: بهمن ۱۳۹۹، پذیرش: آذر ۱۴۰۰)

چکیده

یکی از مهم‌ترین مواردی که در طراحی، تحلیل و ساخت تونل‌های شهری NATM مورد توجه قرار می‌گیرد میزان نشست سطح زمین در حین ساخت تونل است. نشست بیش‌ازحد زمین معمولاً به تأسیسات، ساختمان‌های مجاور و زیرساخت‌های شهری آسیب‌های جبران‌ناپذیری وارد می‌کند؛ جهت تحلیل واقعی و بررسی دقیق نشست سطح زمین در حفاری تونل‌های شهری لازم است تا شرایط واقعی خاک مورد توجه قرار گیرد. روش‌های استفاده‌شده مرسوم در ارزیابی نشست سطح زمین معمولاً تغییرپذیری مکانی خصوصیات خاک را در نظر نمی‌گیرند بلکه خصوصیات خاک به صورت قطعی در محاسبات لحاظ می‌شود بنابراین در این مطالعه سعی شده جهت مدل‌سازی شرایط واقعی خاک، تغییرپذیری مکانی مدول یانگ خاک با استفاده از یک میدان تصادفی سه‌بعدی مدل شده و با روش عددی تفاضل محدود ترکیب شود سپس با تحلیل‌های پارامتریک از مقیاس‌های مختلف نوسان توسط شبیه‌سازی مونت‌کارلو، برای هر میدان تصادفی ایجادشده حداکثر نشست سطح زمین به دست آید. نتایج نشان می‌دهد که مقدار میانگین و ضریب تغییرات مربوط به حداکثر نشست به ترتیب با افزایش مقیاس نوسان از ۲۸ میلی‌متر به ۳۱ میلی‌متر و از ۰/۲ به ۰/۳۵ افزایش می‌یابد. همچنین تغییرپذیری خصوصیات خاک هم در بزرگی و هم در توزیع تغییر شکل زمین در سه بعد، مؤثر بوده و نادیده گرفتن آن منجر به دست‌کم گرفتن خطر نشست بیش‌ازحد سطح زمین می‌شود.

کلمات کلیدی

میدان تصادفی، مقیاس نوسان، تغییرپذیری مکانی خصوصیات خاک، نشست سطح زمین، تونل‌زنی NATM

* عهده‌دار مکاتبات: r_shirinabadi@azad.ac.ir

۱- مقدمه

نشست سطح زمین در هنگام حفاری تونل مخصوصاً تونل‌های شهری، به دلیل ایجاد خطر بالقوه برای سازه‌های مجاور و زیرساخت‌ها، تأسیسات و غیره مورد توجه ویژه قرار گرفته است. در این راستا، ارزیابی بزرگی و توزیع جابجایی واقعی خاک که بخش اساسی در طول برنامه‌ریزی، طراحی و بهره‌برداری از تونل‌های شهری هست تنها با لحاظ کردن عدم قطعیت رفتار مصالح خاکی امکان‌پذیر است [۱]. موضوع تنوع مکانی ویژگی‌های خاک به‌طور جدی در تونل‌سازی مورد توجه قرار گرفته است و نادیده گرفتن این مسئله منجر به تفسیر نادرست از طراحی تونل‌های شهری می‌شود [۲]. در شرایط طبیعی، خاک به‌صورت افقی و با تغییر فضایی در پارامتر آن لایه‌بندی می‌شود [۳] در حقیقت، خصوصیات خاک به دلیل فرآیندهای رسوبی معمولاً تغییرات شدید مکانی را نشان می‌دهند [۴، ۵] از طرف دیگر، روش‌های مرسوم و قطعی توانایی توصیف تنوع مکانی تصادفی پارامترهای خاک را ندارند [۶] و باید از روش‌های احتمالاتی جدید استفاده نمود. یکی از این روش‌ها، روش تئوری میدان تصادفی^۱ است. یک میدان تصادفی، در ساده‌ترین شکل، بخشی غیر همبسته است که کاملاً و فقط با یک متغیر تصادفی آماری توصیف می‌شود. بر اساس تئوری میدان تصادفی، می‌توان تأثیر تنوع مکانی پارامترهای خاک را برای تونل‌های شهری مطالعه کرد. به‌منظور تولید میدان تصادفی، از یکی از پیچیده‌ترین روش‌های تولید آن یعنی روش میدان تصادفی اجزای محدود^۲ استفاده می‌شود [۷]. میدان تصادفی اجزای محدود ترکیبی از نظریه میدان تصادفی، روش اجزای محدود و شبیه‌سازی مونت کارلو^۳ است. میدان تصادفی اجزای محدود به قدرت محاسباتی و برنامه‌نویسی قابل توجهی نیاز دارد، بخصوص اگر این نوع تحلیل به‌صورت سه‌بعدی برای تعداد قابل توجهی از شبیه‌سازی مونت کارلو انجام شود. این موضوع می‌تواند یکی از دلایل محدود بودن مقالاتی باشد که به مطالعه اثرات سه‌بعدی تغییرپذیری مکانی ویژگی‌های خاک در عملیات تونل‌سازی NATM می‌پردازد. اخیراً، تعدادی از محققان تأثیر تنوع خصوصیات خاک را در نشست سطح ناشی از ساخت تونل مطالعه کرده‌اند. مولون و همکاران [۸] یک روش عددی تصادفی دوبعدی را بر اساس شبیه‌سازی مونت کارلو برای مطالعه تأثیر تغییرات زاویه

اصطکاک خاک ارائه دادند و با بررسی نتایج به‌دست‌آمده فشار وارد بر پی نواری را برای حالت‌های مختلف بررسی کردند. چنگ و همکاران [۴] پایداری جبهه کار حفاری را در خاک‌های مختلف بررسی کردند و سپس اثر مقاومت برشی خاک بر قابلیت اطمینان و مکانیسم خرابی جبهه کار تونل مورد ارزیابی قرار دادند. میرو و همکاران [۹] انواع توزیع پارامترهای خاک را بر روی سطح زمین مطالعه کردند و روشی را برای کاهش عدم قطعیت پارامترهای خاک پیشنهاد کردند. خاصیت تغییرپذیری خاک به‌طور گسترده توسط محققان بررسی شده و تأثیر آن بر سازه‌های زیرزمینی در ادبیات گذشته مورد توجه قرار گرفته است [۱۰-۱۲]. با توجه به این واقعیت که از بین پارامترهای خاک، مدول یانگ، بیشترین تأثیر را بر تغییر شکل خاک دارد [۱۳] مدول یانگ خاک با استفاده از یک میدان تصادفی سه‌بعدی با روش سری فوریه و در نظر گرفتن اثرات مقیاس نوسان^۴ مدل‌سازی شده و با روش تفاضل محدود ترکیب می‌شود و نهایتاً مطالعات حساسیت برای به دست آوردن مقادیر حداکثر نشست سطح زمین^۵ از طریق شبیه‌سازی مونت کارلو انجام می‌شود. ساختار این مطالعه به شرح زیر است:

الف) پارامترهای مورد نیاز برای ایجاد میدان تصادفی بررسی می‌شود. سپس توابع لازم برای ایجاد میدان تصادفی سه‌بعدی ارائه می‌شود.

ب) یک مدل عددی سه‌بعدی تفاضل محدود بر اساس شرایط زمین‌شناسی و روش حفاری پروژه ضربعلی‌زاده ایجاد می‌شود و مدل عددی با داده‌های میدانی از ابزارهای تونلی تأیید می‌شود.

ج) میدان‌های تصادفی سه‌بعدی برای مدول یانگ تولید می‌شوند و به شبکه تفاضل محدود اختصاص داده می‌شود. سرانجام، تحلیل پارامتریک بر اساس شبیه‌سازی مونت کارلو برای بررسی تأثیر تغییرپذیری مکانی خصوصیات خاک بر حداکثر نشست سطح زمین انجام می‌شود.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- ایجاد میدان‌های تصادفی

به‌منظور ایجاد میدان‌های تصادفی از توابع تولید میدان استفاده می‌شود. توابع بسیاری در این زمینه معرفی شده است که هرکدام پارامترهای خاص خود را دارد یکی از

عمودی، به‌عنوان مقدار نماینده برای محاسبات انتخاب می‌شود. برای مطالعه میدان تصادفی، لازم است توزیع آماری متناسب نیز با شرایط زمین‌شناسی پروژه تعریف شود. در میان توابع توزیع تجمعی، توزیع لاگ-نرمال منطبق با مشخصات آماری و فرایندهای رسوب‌گذاری خاک است. بر این اساس، توزیع لاگ-نرمال در اینجا برای توصیف تنوع مدول یانگ در نظر گرفته شده است [۱۹].

۲-۱-۲ توابع میدان‌های تصادفی

کاربرد تئوری میدان تصادفی برای اولین بار در دهه ۱۹۶۰ گزارش شد [۲۰]. در دهه‌های اخیر، با پیشرفت فناوری و افزایش قدرت محاسباتی رایانه‌ها، استفاده از نظریه میدان تصادفی برای در نظر گرفتن تغییرات مکانی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار شده است. انواع مختلفی از توابع همبستگی پارامترهای خاک وجود دارد، یکی از توابع همبستگی رایج که برای تولید میدان تصادفی استفاده می‌شود، تابع مارکوف^۲ است که به‌صورت رابطه (۱) تعریف می‌شود [۲۱]:

$$\rho(\tau_x, \tau_y, \tau_z) = \exp\left(\frac{-2|\tau_x|}{\theta_x} + \frac{-2|\tau_y|}{\theta_y} + \frac{-2|\tau_z|}{\theta_z}\right) \quad (1)$$

که در آن تابع همبستگی $\rho(\tau_x, \tau_y, \tau_z)$ تابعی از فاصله افقی τ_x, τ_y و فاصله عمودی τ_z بین هر دو نقطه از نظر مکانی است. پارامترهای $\theta_x, \theta_y, \theta_z$ به ترتیب مقیاس نوسان در جهت x, y و z هستند. از آنجاکه همبستگی بین داده‌ها در توزیع لاگ-نرمال لگاریتمی است، نمی‌توان همبستگی در مقیاس واقعی را تضمین کرد؛ بنابراین، با یک تبدیل مناسب، میدان‌های تصادفی لاگ-نرمال باید به میدان‌های تصادفی تبدیل شوند که خصوصیات خاک را در یک مقیاس واقعی مدل کنند. اگر مدول یانگ میدان تصادفی لاگ-نرمال در نظر گرفته شود با استفاده از رابطه (۲)، میدان تبدیل‌شده به‌وسیله یک میدان تصادفی نرمال $(X(x))$ ایجاد می‌شود [۲۲، ۲۳]

$$Y(x) = \exp(X(x)) \quad (2)$$

همچنین تابع چگالی احتمال $Y(x)$ برای یک نقطه معین مانند x ، با رابطه (۳) تعیین می‌شود که به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$Y(t) = \begin{cases} \frac{1}{t\sigma_{\ln Y}\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln t - \mu_{\ln Y}}{\sigma_{\ln Y}}\right)^2\right\}, & t > 0 \\ 0, & t \leq 0 \end{cases} \quad (3)$$

مهم‌ترین پارامترهای استفاده‌شده در این توابع که نقش اساسی در تغییرات میدان را ایفا می‌کند پارامتر مقیاس نوسان است.

۱-۱-۲ تعیین پارامتر مقیاس نوسان

به‌منظور ایجاد میدان‌های تصادفی ابتدا لازم است پارامتر مقیاس نوسان به‌درستی تعیین شود. از آنجاکه خاک به‌صورت افقی لایه‌بندی می‌شود، تنوع مکانی ذاتی خواص خاک ناشی از فرایندهای رسوب‌گذاری یکی از مشکلات اصلی پایداری جبهه کار تونل در زمین‌های نرم و کم‌عمق شهری است [۴]. برای توصیف دقیق رفتار خاک، تئوری میدان تصادفی می‌تواند یک روش مطلوب برای بررسی ساختار مکانی پارامترهای خاک باشد. در تئوری میدان تصادفی، مقدار مقیاس نوسانات برای تعیین کمیت فضایی مطرح می‌شود. به‌عبارت‌دیگر، یک روش مناسب برای اندازه‌گیری میزان تغییرپذیری میدان تصادفی مقیاس نوسانات است [۱۴]. به عبارتی اگر فاصله بین دو نقطه مشخص از مقدار مقیاس نوسان کمتر باشد، خصوصیات خاک در این نقاط به‌شدت مرتبط و همبسته هستند و بالعکس اگر فاصله بین دو نقطه از مقیاس نوسان بیشتر باشد، ارتباط و همبستگی ضعیفی رخ می‌دهد. به‌عبارت‌دیگر، مقدار زیاد مقیاس نوسان نشان می‌دهد که خصوصیات خاک در مقیاس بزرگ بسیار همبسته هستند. بنابراین میدان تصادفی نرم‌تری ایجاد می‌شود [۱۵]. هنگامی که حد مقیاس نوسان به بی‌نهایت میل کند، به دلیل تأثیرات ضریب تغییر میدان تصادفی متناوب و متنوع برای هر میدان تصادفی تولید می‌شود [۱۶، ۱۷] از طرف دیگر، چروبینی [۱۸] نیز اظهار داشت که مقادیر مقیاس نوسان عمودی به‌مراتب کمتر از افقی است و معمولاً خاک‌ها همبستگی شدیدتری را در جهت افقی نسبت به جهت قائم نشان می‌دهند. روش‌هایی برای تعیین مقیاس نوسان قائم (تغییرپذیری نسبت به عمق) تعریف شده است، اما برای مقیاس نوسان افقی توسعه مطلوبی نداشته است. از آنجاکه هیچ اطلاعاتی در مورد مقیاس نوسان افقی خاک پروژه تونل ضربعلی‌زاده در دسترس نیست، برای مقادیر مختلف مقیاس نوسان افقی، یک مطالعه پارامتریک انجام‌شده و هر دو مقیاس نوسان افقی برابر فرض می‌شوند ($\theta_x = \theta_y$). با توجه به زمان‌بر بودن محاسبات در حالت سه‌بعدی، فقط یک مقدار ثابت مقیاس نوسان

$$\sigma_Y^2 \approx \frac{1}{4}(a-b)^2 \frac{s^2}{4\pi^2 + s^2} \quad (8)$$

۲-۲- بررسی اجمالی پروژه مورد مطالعه

پروژه زیرگذر ضربعلی‌زاده در تهران واقع شده است که از زیر راه‌آهن مترو و خطوط ریلی عبور کرده و خیابان ضربعلی‌زاده را به خیابان مداح متصل می‌کند. هدف از اجرای این پروژه در منطقه ۱۶ تهران اتصال بخش‌های شرقی- غربی بین دو منطقه شهری است (شکل ۱). ارتفاع بین کف و تاج تونل ۱۱/۵۵ متر و عرض آن در بیشترین قسمت مقطع حفاری ۱۴/۴۴ متر است (شکل ۳). طول تونل ۴۴ متر و پوشش روباره روی تونل ۳/۵ متر است (شکل ۲). این تونل با روش NATM حفر شده و تجزیه و تحلیل و طراحی این پروژه بر اساس مراجع معتبری مانند: FHWA-NHI-10-034، FHWA-NJ-2005-002، AASHTO، ACI 318-05 و راهنمای انجمن بین‌المللی تونل سازی و فضای زیرزمینی^۸ انجام شده است. لازم به ذکر است که این پروژه در سال ۲۰۱۸ توسط این انجمن به‌عنوان پروژه برجسته تونل سازی شناخته شده است [۲۴].

که $\mu_{\ln Y}$ و $\sigma_{\ln Y}$ به ترتیب انحراف معیار و میانگین X (همستند) انحراف استاندارد σ_Y و مقدار میانگین μ_Y مربوط به $Y(x)$ به‌وسیله روابط (۴) و (۵) با $\mu_{\ln Y}$ و $\sigma_{\ln Y}$ ارتباط پیدا می‌کنند [۲۲].

$$[Y] = \mu_Y = \exp\left(\mu_{\ln Y} + \frac{1}{2}\sigma_{\ln Y}^2\right) \quad (4)$$

$$\sigma_Y^2 = \mu_Y^2(\exp(\sigma_{\ln Y}^2) - 1) \quad (5)$$

همچنین برای در نظر گرفتن دامنه مدول یانگ، فنتون و گریفیث رابطه (۶) را ارائه دادند [۲۲]:

$$Y(X) = a + \frac{1}{2}(b-a) \left[1 + \tanh\left(\frac{m + sX_0(x)}{2\pi}\right)\right] \quad (6)$$

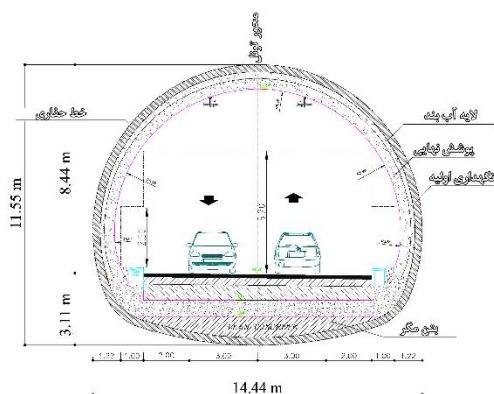
که در آن $X_0(x)$ متغیر تصادفی نرمال استاندارد است. m و s پارامترهای توزیع هستند. تابع چگالی احتمال $Y(x)$ به‌صورت رابطه (۷) تعریف می‌شود [۲۱]:

$$f(t) = \begin{cases} \frac{\sqrt{\pi}(b-a)}{\sqrt{2s}(t-a)(b-t)} \times \\ \exp\left\{-\frac{1}{2s^2}\left[\pi \ln\left(\frac{t-a}{b-t}\right) - m\right]^2\right\}, t > 0 \\ t \leq 0 \end{cases} \quad (7)$$

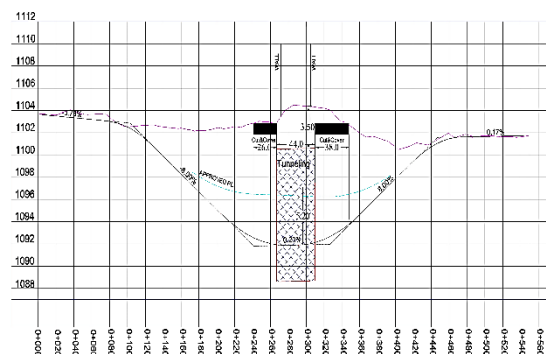
و رابطه تقریب (۸) با استفاده از بسط مرتبه سوم تیلور به دست می‌آید.



شکل ۱- موقعیت پروژه تونل ضربعلی‌زاده [۲۴]



شکل ۳- ابعاد و خصوصیات هندسی مقطع تونل [۲۴]



شکل ۲- پروفیل طولی مسیر تونل ضربعلی‌زاده شامل رمپ‌ها و مناطق کند و پوش [۲۴]

۲-۲-۱ شرایط زمین‌شناسی مهندسی

با توجه به نتایج آزمایش‌های برجا و آزمایشگاهی، مشخصات ژئوتکنیکی لایه‌های مختلف پروژه در جدول ۱ و ۴ نشان داده شده است. مطابق شکل ۴، مسیر تونل در لایه زمین‌شناسی "D2-1" واقع شده است؛ بنابراین، از خصوصیات خاک این ناحیه برای تحلیل‌های عددی استفاده می‌شود. طبق مطالعات انجام‌شده، آب زیرزمینی نسبتاً عمیق است و زیرگذر ضریبی‌زاده در بالای آن واقع شده است [۲۴].

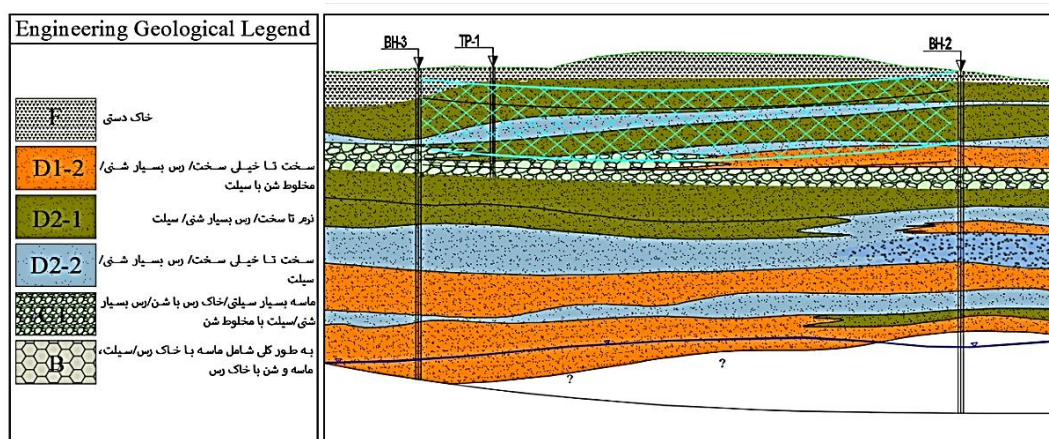
۲-۲-۲ روش حفاری

در فضاهای شهری، حرکت زمینی ناشی از حفاری تونل ممکن است آسیب جدی به سازه‌های اطراف وارد کند. یکی از روش‌های پرکاربرد برای طراحی و ساخت تونل در مناطق

شهری، NATM است [۲۵]. به دلیل انعطاف‌پذیری در سازگاری با شرایط مختلف زمین‌شناسی و استفاده از تجهیزات ساده، این روش برای حفاری تونل‌های شهری در بسیاری از کشورها استفاده می‌شود. جابجایی‌های ناشی از تونل‌سازی NATM را می‌توان با تنظیم سرعت حفاری، کاهش فاصله بین جبهه کار تونل و سیستم‌های نگهداری، انتخاب حفاری چند مقطعی بجای حفاری تمام مقطع و کاهش زمان بستن کف تونل کنترل کرد [۲۶]. یکی از رایج‌ترین الگوهای تونل‌سازی به روش NATM روش حفاری جانبی^۱ است که به‌طور گسترده در زمین‌های نرم از طریق کاهش سطح مقطع حفاری استفاده می‌شود. با توجه به طول بسیار کم روباره و دهانه بزرگ تونل ضریبی‌زاده، حفاری تمام مقطع امکان‌پذیر نبوده و بنابراین، روش حفاری جانبی برای این پروژه انتخاب شده است.

جدول ۱- خصوصیات ژئوتکنیکی لایه‌های خاک [۲۴]

نوع خاک	مدول الاستیک (g/cm^3)			وزن مخصوص (g/cm^3)		
	چسبندگی (kg/cm^2)	زاویه اصطکاک (deg)	E	Sat	Wet	Dry
D2-1	۰٫۳۰	۲۸	280 ± 50	۱٫۶۰	۱٫۸۵	۱٫۸۰
D1-2	۰٫۳۱	۳۰	300 ± 50	۱٫۶۵	۱٫۸۵	۱٫۸۰



شکل ۴- مشخصات زمین‌شناسی مهندسی مسیر تونل [۲۴]

۲-۲-۳ سیستم‌های نگهداری

سیستم‌های نگهداری مورد استفاده در تونل ضریبی‌زاده شامل سیستم‌های پیش نگهدارنده و سیستم‌های نگهدارنده اصلی هستند.

الف) سیستم‌های پیش نگهدارنده

• تیر پیشرو^۱ (نوعی سیستم پیش نگهدارنده نوآورانه برای تثبیت خاک): می‌توان آن را تونلی با سطح مقطع بسیار کوچک (حدود ۰٫۷ مترمربع) نامید که به‌صورت

✓ نگهداری دائمی^۳: که از یک‌لایه مش و لتیس سه بار از نوع AIII (Ø=20 & 28)، که در یک آستر شاتکریت به ضخامت ۳۰ سانتی‌متر قرار دارد، تشکیل شده است (شکل ۸).

✓ نگهداری موقتی^۴: که از یک‌لایه مش و لتیس ۳ بار از نوع AIII (Ø=18 & 25)، که در یک آستر شاتکریت به ضخامت ۲۵ سانتی‌متر قرار دارد، تشکیل شده است (شکل ۸).

• پوشش نهایی: پارامترهای فیزیکی ساختار پوشش نهایی و طراحی مورد استفاده در تجزیه و تحلیل به شرح زیر است [۲۷]:

✓ بتن با مقاومت فشاری برابر با $f_c = 300 \text{ kg / cm}^2$
 مدول الاستیک برابر با $E_c = 26 \times 10^4 \text{ kg / cm}^2$
 و وزن مخصوص برابر با $\rho_c = 2500 \text{ kg / cm}^3$ است.

✓ فولاد تقویت‌کننده از نوع AIII با مقاومت فشاری برابر با $f_y = 4000 \text{ kg / cm}^2$ که میزان مدول الاستیسیته آن برابر با $E_c = 2 \times 10^6 \text{ kg / cm}^2$ است.

ضخامت مقطع لاینینگ ۵۰ سانتی‌متر است. (شکل ۸-ب).



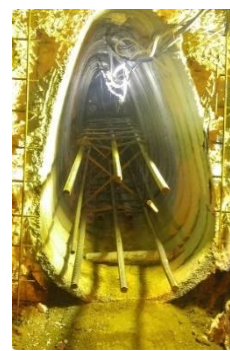
(الف)



(ب)



(ج)



(د)



(ه)

تمام مقطع حفر شده و با حلقه‌های تقویت‌کننده^{۱۱} آستر می‌شود. سپس در داخل هر یک از این تونل‌ها، شبکه‌های آرماتوربندی شده مربعی^{۱۲} قرار داده شده و با بتن پر می‌شوند (شکل ۵).

• در این پروژه پنج تیر پیشرو به طول ۴۴ متر (برابر با طول مسیر تونل) در نظر گرفته شد که جانمایی آن‌ها در شکل ۶ نشان داده شده است.

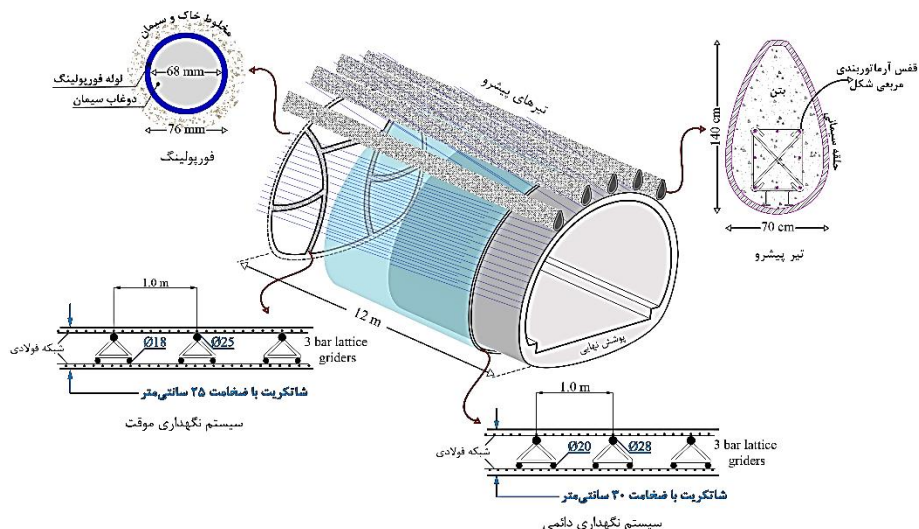
• فورپولینگ: که در هر مقطع مجموعاً از ۳۶ لوله فولادی با قطر خارجی ۷۶ میلی‌متر، طول ۸ متر، زاویه نصب ۸ درجه و فاصله مرکز تا مرکز ۵۰ سانتی‌متر تشکیل شده است. لوله‌های فورپولینگ به فاصله هر ۲ متر نصب می‌شود تا یک همپوشانی ۶ متری متوالی در طول محور تونل ایجاد شود (شکل ۷).

• جانمایی و مکان‌های نصب فورپولینگ‌ها در شکل ۶ نشان داده شده است.

ب) سیستم نگهداری اصلی

• سیستم نگهداری ترکیبی: این یک سیستم جزء سیستم‌های نگهداری اولیه است که بلافاصله پس از حفاری برای جلوگیری از تغییر شکل بیش‌ازحد زمین و افزایش پایداری تونل نصب می‌شود (شکل ۸-الف).

شکل ۵- تیر پیشرو: (الف) حلقه تقویت‌کننده، (ب) عملیات حفاری، (ج) نصب نگهداری، (د) قرار دادن شبکه آرماتوربندی مربعی به همراه بتن‌ریزی و (ه) جانمایی [۲۷]



شکل ۶- نمایی از سیستم های پیش نگهدارنده و سیستم های نگهداری اصلی برای ۱۲ متر از طول تونل [۲۷]



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۷- سیستم نگهداری فورپولینگ: (الف) لوله های فورپولینگ، (ب) حفاری جهت نصب فورپولینگ و (ج) نمایی از فورپولینگ های نصب شده [۲۷]



(الف)



(ب)

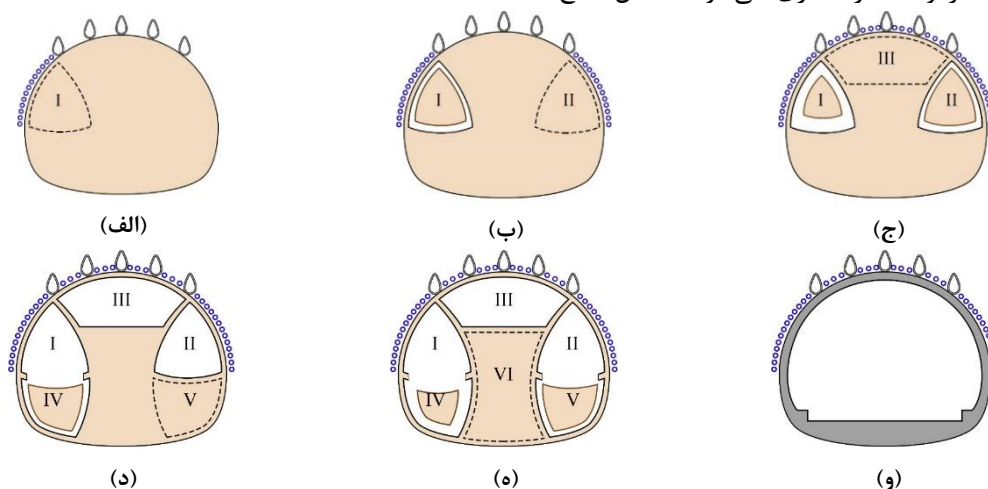
شکل ۸- سیستم های نگهداری اصلی شامل: (الف) سیستم نگهداری ترکیبی (ب) پوشش نهایی [۲۷]

شرقی و غربی آغاز می شود. قبل از حفاری دریافت شماره ۱، تعداد مشخصی از فورپولینگ ها در اطراف بخشی از دریافت شماره ۱ مطابق شکل ۹-الف نصب می شوند و سپس حفاری این دریافت آغاز می شود. گام پیشروی و دهانه نگهداری نشده (که به عنوان فاصله بین جبهه کار حفاری و

۴-۲-۲ روند ساخت تونل

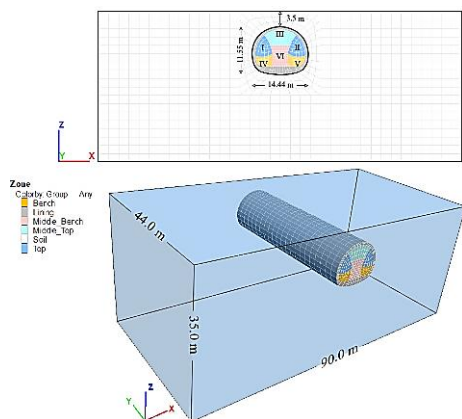
قبل از شروع عملیات حفاری، ابتدا تیرهای پیشرو در امتداد مسیر تونل به طول ۴۴ متر حفاری و تحکیم می شود. عملیات حفاری به طور هم زمان از هر دو پورتال

عملیات حفاری و نصب سیستم نگهداری ترکیبی در دررفت شماره ۳ آغاز می‌شود (با شروع حفاری دررفت شماره ۳، اولین قوس چتری فورپولینگ شکل خواهد گرفت). دررفت‌های فوقانی (شماره ۱، ۲ و ۳) قبل از حفاری دررفت‌های تحتانی (شماره ۴، ۵ و ۶) به‌طور کامل حفاری می‌شوند (شکل ۹-۵). حفاری دررفت‌های تحتانی با تخریب دیوار موقت و کف بند موقت ادامه پیدا می‌کند (شکل ۹-۵) و نهایتاً با تخریب کامل نگهداری موقت، پوشش نهایی اجرا می‌شود (شکل ۹-۶) [۲۷].



شکل ۹- مراحل ساخت تونل شامل مراحل حفاری و نصب سیستم‌های نگهداری [۲۷]

عددی اعمال می‌شود (بار ناشی از عبور قطار). رفتار خاک توسط یک مدل کاملاً الاستیک - پلاستیکی بر اساس معیار شکست موهر کلوبب تعریف شده است. نسبت تنش‌های افقی به عمودی از معادله جکی [۲۹] محاسبه می‌شود و تنش برجا با استفاده از تابع FISH، دستور گرانش و σ_{zz} ایجاد می‌شود.



شکل ۱۰- شبکه تفاضل محدود، هندسه مراحل حفاری و مرزهای مدل عددی

نزدیک‌ترین سیستم نگهداری نصب شده تعریف می‌شود (۱ متر در نظر گرفته می‌شود؛ بنابراین سیستم نگهداری ترکیبی همواره در فاصله ۱ متری از جبهه کار حفاری قرار دارد. هنگامی که دررفت شماره ۱ به طول ۴ متر حفاری می‌شود، عملیات حفاری و نصب سیستم نگهداری ترکیبی در دررفت شماره ۲ (مانند دررفت شماره ۱) آغاز می‌شود (شکل ۹-۶). توالی حفاری مطابق با شماره دررفت‌ها است و فاصله بین دررفت‌ها (حدود ۴ متر) تا زمان اتمام حفاری حفظ شود. در ادامه، هنگامی که دررفت شماره ۱ و شماره ۲ به ترتیب ۸ متر و ۴ متر حفاری می‌شوند (شکل ۹-۷)،

۳-۲- شبیه‌سازی عددی

۱-۳-۲ هندسه و فرضیات مربوط به مدل عددی

شبیه‌سازی فرایند تونل سازی به روش حفاری جانبی تونل ضربعلی‌زاده با استفاده از نرم‌افزار $FLAC^{3D}$ و با انتخاب هندسه مدل در سه بعد آغاز می‌شود. برای مدل‌سازی دقیق عددی با توجه به روند ساخت تونل (شکل ۹)، مدل عددی با گروه‌بندی مناسب ایجاد می‌شود. برای اطمینان از عدم وجود اثرات مرزی، مدل با ابعاد ۹۰ متر (طول) \times ۴۴ متر (عرض) \times ۳۵ متر (عمق) ساخته می‌شود (شکل ۱۰). از آنجاکه مدل نامتقارن است (به دلیل عدم تقارن توالی‌های حفاری دررفت‌های تونل)، کل طول مدل در نظر گرفته می‌شود؛ جابجایی در مرز پایین مدل در تمام جهات مختصاتی ثابت است و جابجایی در ۴ مرز کناری فقط در راستای محور X و Y ثابت است اما مرز بالایی مدل آزاد است و می‌تواند در راستای محور Z حرکت کند. بار قطار حدود ۹۳ کیلو پاسکال است [۲۸] که از سطح مدل

۲-۳-۲ شبیه‌سازی سیستم‌های نگهداری

همان‌طور که قبلاً ذکر شد، برای نگهداری از دریافت‌های تونل، از دو نوع سیستم نگهداری استفاده می‌شود. تیرهای پیشرو و فورپولینگ با المان Pile شبیه‌سازی می‌شوند (جدول ۲). شبکه فولادی، شاتکریت و لتیس‌گریدر با المان Shell (جدول ۳) بر اساس روش مقطع معادل ارائه‌شده توسط کرانزا تورس [۳۰] روابط (۹) و (۱۰) شبیه‌سازی می‌شوند.

$$t_{eq} = \sqrt{12 \frac{K_1 + K_2}{D_1 + D_2}} \quad (9)$$

$$E_{eq} = \frac{n(D_1 + D_2)}{bt_{eq}} \quad (10)$$

که t_{eq} و E_{eq} به ترتیب ضخامت و مدول یانگ مقطع معادل موردنظر است. n نیز تعداد لتیس استفاده‌شده در b متر از عرض مقطع ترکیبی هست. همچنین K_i و D_i ($i=1,2$) به ترتیب ضریب انعطاف‌پذیری و ضریب تراکم‌پذیری مرتبط به لتیس و شاتکریت هست که از روابط (۱۱) و (۱۲) ارائه‌شده توسط کرانزا تورس [۳۰] محاسبه می‌شود.

$$D_i = \frac{E_i A_i}{1 - \nu_i^2} \quad (11)$$

$$K_i = \frac{E_i I_i}{1 - \nu_i^2} \quad (12)$$

که مقادیر E ، A ، I و ν به ترتیب مدول یانگ، سطح مقطع، ممان اینرسی مقطع و نسبت پواسن هست. نتایج محاسبات مقطع معادل در جدول ۳ آمده است. درنهایت، پوشش نهایی و خاک-بتن^{۱۵} ایجادشده در اطراف لوله‌های فورپولینگ، به‌صورت المان حجمی مدل‌سازی می‌شوند (شکل ۱۱ و جدول ۴). لازم به ذکر است که به المان‌های حجمی، مدل موهر کلومب اختصاص داده می‌شود [۳۱]، [۳۲]. فرآیند ساخت کامل تونل با تجزیه و تحلیل عددی از طریق یک روش گام‌به‌گام شبیه‌سازی می‌شود. فاصله دهانه نگهداری نشده در مدل‌سازی عددی در نظر گرفته می‌شود تا شرایط واقعی حفاری تونل مورد مطالعه را دقیق و واقع‌بینانه شبیه‌سازی شود. همچنین، با استفاده از روش کاهش تنش، تأخیر در نصب سیستم نگهداری و تقسیم بار بین زمین و سیستم نگهداری لحاظ می‌شود.

جدول ۲- ویژگی‌های سیستم‌های پیش نگهدارنده استفاده‌شده در مدل‌سازی عددی

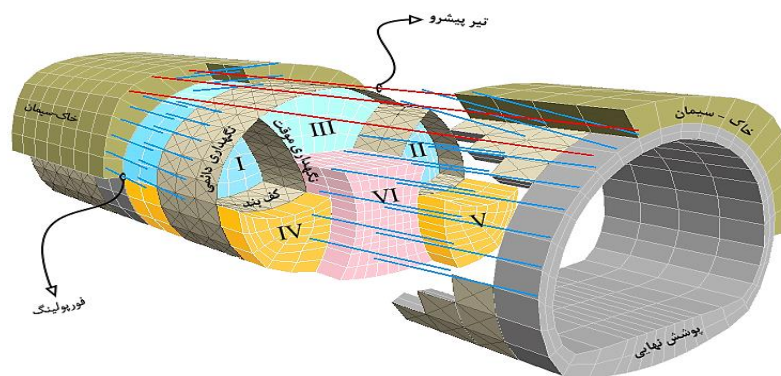
نوع سیستم پیش نگهدارنده	ممان اینرسی قطبی J (m4)	ممان اینرسی حول z Iz (m4)	ممان اینرسی حول y Iy (m4)	محیط P (m)	سطح مقطع A (m2)	نسبت پواسن ν	مدول یانگ E (GPa)
تیر پیشرو	۰٫۰۴۲۱	۰٫۰۳۳۱	۰٫۱۰۵۲	۳٫۵۳۲	۰٫۸۵۴	۰٫۳	۳۰
فورپولینگ	۰٫۰۰	۰٫۰۱۹۰	۰٫۰۱۹۰	۰٫۲۳۸۸	۰٫۰۰۴۵	۰٫۳	۲۰۰

جدول ۳- ویژگی‌های سیستم‌های نگهداری ترکیبی استفاده‌شده در مدل‌سازی عددی [۳۰]

سیستم نگهداری ترکیبی	ضخامت d (cm)	نسبت پواسن ν	مدول یانگ E (GPa)
نگهداری دائمی	۳۰	۰٫۳	۱۵
نگهداری موقت	۲۵	۰٫۲۵	۱۰

جدول ۴- خصوصیات عناصر حجمی مورد استفاده در مدل‌سازی [۲۴]

عناصر حجمی	زاویه اصطکاک φ (°)	چسبندگی C (Kpa)	وزن مخصوص (Kg/m3)	نسبت پواسن ν	مدول یانگ E (GPa)	ضخامت d (cm)
خاک	۲۸	۲۹٫۵	۱۶۰۰	۰٫۳	۰٫۲۷۵	-
خاک-سیمان	۳۵	۴۲۰۰	۲۳۰۰	۰٫۲۵	۲٫۶	-
پوشش نهایی	-	-	۲۴۰۰	۰٫۲	۲۰	۵۰

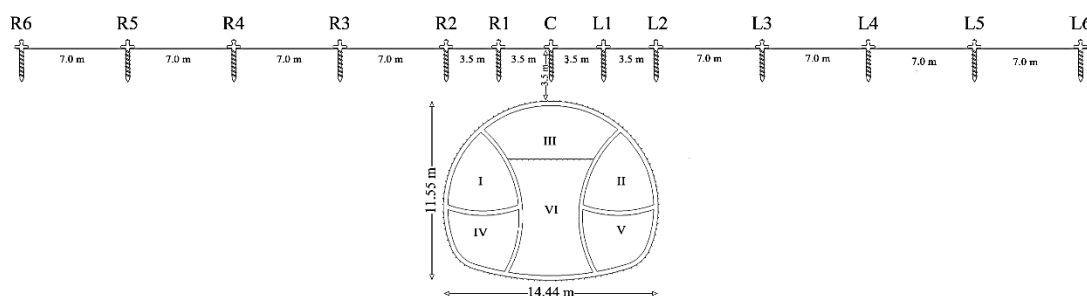


شکل ۱۱- مراحل حفاری تونل و سیستم‌های نگهداری شبیه‌سازی شده در مدل عددی

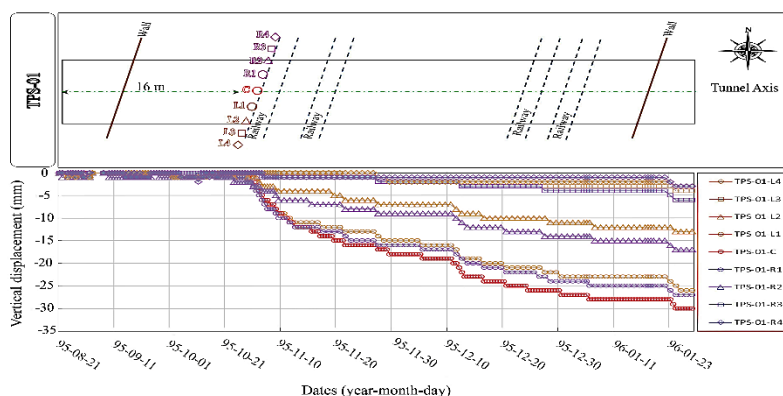
۲-۴- صحت سنجی مدل عددی

قبل از اختصاص میدان تصادفی به شبکه تفاضل محدود، مدل عددی باید بر اساس داده‌های به‌دست‌آمده از ابزارهای سطحی صحت سنجی شود. به‌منظور تأیید مدل عددی، داده‌های به‌دست‌آمده از یک ایستگاه ابزاربندی (در فاصله ۱۶ متری از پرتال شرقی تونل) مدنظر قرار گرفته است. شکل ۱۲ سطح مقطع ایستگاه ابزاربندی سطحی و محل جانمایی هر یک از نقاط نشست سنجی را نشان می‌دهد.

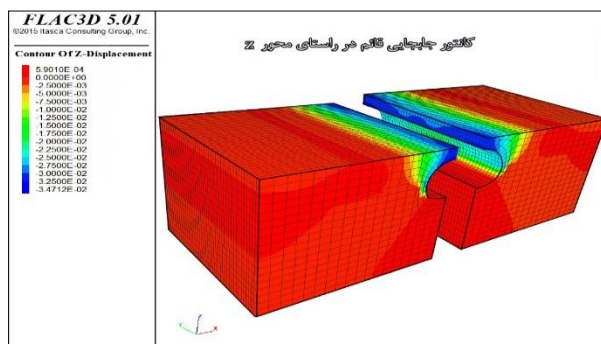
همچنین شکل ۱۳ منحنی‌های زمان - نشست سطح زمین را برای هر یک از نقاط نشست سنجی نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۱۴ نشان داده شده است اطلاعات به‌دست‌آمده از مدل عددی در فاصله ۱۶ متری از پرتال شرقی [۳۳]، مطابقت بسیار بالایی با داده‌های حاصل از ابزارهای نشست سنجی ایستگاه (TPS-01) نشان می‌دهد؛ بنابراین می‌توان گفت که مدل عددی با توجه به خصوصیات خاک در نظر گرفته شده و روش اجرای حفاری تونل به نحو مناسبی ایجاد شده است و می‌توان برای اعمال تغییرات، بسط و گسترش مدل از مدل تأیید شده^{۱۶} استفاده کرد.



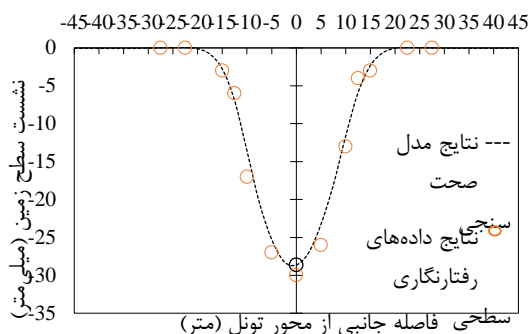
شکل ۱۲- سطح مقطع یک ایستگاه نشست سنجی و جانمایی نقاط اندازه‌گیری و فواصل آن‌ها از محور تونل [۳۳]



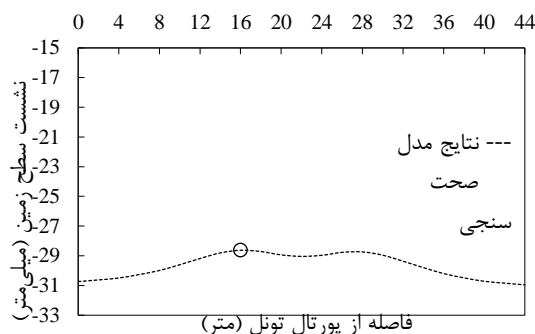
شکل ۱۳- نمودار جابجایی قائم نقاط اندازه‌گیری نشست سطح زمین نسبت به زمان [۳۳]



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۱۴- (الف) کانتورهای جابجایی قائم برای مدل عددی تأیید شده (Verified FDM) (ب) مقایسه نتایج مدل عددی تأیید شده با داده‌های به‌دست آمده از ایستگاه نشست سنجی TPS-01 (ج) پروفیل طولی به‌دست آمده از مدل عددی تأیید شده

۲-۵- روش تفاضل محدود تصادفی

در سال‌های اخیر، با پیشرفت فناوری نرم‌افزاری، میدان تصادفی عناصر محدود پیشرفت زیادی کرده است تا بتواند تأثیر تغییرپذیری مکانی پارامترهای خاک را در نشست سطح به دلیل تونل‌سازی بررسی کند. در اینجا، میدان‌های تصادفی پارامترهای خاک به مدل عددی اختصاص داده می‌شوند و سپس از کد عناصر محدود برای انجام تجزیه و تحلیل استفاده می‌شود؛ اما در این بخش، کدهای المان محدود در میدان تصادفی عناصر محدود با کدهای تفاضل محدود جایگزین می‌شود؛ بنابراین، همان‌طور که قبلاً ذکر شد، از نرم‌افزار تفاضل محدود $FLAC^{3D}$ برای شبیه‌سازی حفاری تونل استفاده شده است. زبان FISH تعبیه شده در این نرم‌افزار ابزاری کارآمد برای ادغام میدان‌های تصادفی در مدل عددی است.

۲-۵-۱ ایجاد میدان تصادفی در شبکه تفاضل محدود

با استفاده از مدل عددی تأیید شده در بخش قبلی، می‌توان میدان‌های تصادفی را در فضای سه‌بعدی شبیه‌سازی کرد. برای این منظور، مختصات مرکز تمام عناصر مدل عددی استخراج می‌شوند و سپس می‌توان یک

نگاشت یک‌به‌یک از میدان تصادفی به شبکه تفاضل محدود را با زبان FISH ایجاد کرد؛ بنابراین، یک برنامه مبتنی بر FISH در این مقاله برای رسیدن به این هدف تکامل یافته و گسترش پیدا کرده است. همان‌طور که در بخش دو ذکر شد، از بین پارامترهای خاک فقط مدول یانگ به صورت تصادفی فرض می‌شود و مابقی پارامترهای خاک از جمله نسبت پواسن، وزن، زاویه اتساع، ضریب چسبندگی و زاویه اصطکاک مقادیر غیر تصادفی بر اساس جدول ۴ در نظر گرفته می‌شود. همچنین در اینجا از توزیع لاگ-نرمال برای توصیف تنوع مدول یانگ [۱۹] با میانگین ۲۷ مگاپاسکال و ضریب تغییرات ۰/۲ استفاده می‌شود. همان‌طور که در بخش ۲ ذکر شد، برای تولید میدان تصادفی از تابع‌نمایی (۱) به وسیله الگوریتم ارائه شده توسط چنگ و جی‌ها [۳۴] بر اساس بسط سری فوریه استفاده شده است. زیرا تابع‌نمایی همبستگی (رابطه ۱) باید به تعداد بسیار زیاد در دامنه‌ای به طول فضای شبیه‌سازی تکرار شود. بنابراین می‌توان با استفاده از کد نویسی در Matlab این تابع را به صورت یک تابع متناوب بر اساس سری فوریه برای کل مدل تعریف کرد. همچنین در میدان تصادفی ایجاد شده برای هر نقطه در فضا، مقادیر

ضریب تغییرات حداکثر نشست سطح با مقیاس نوسان را در ۷ مورد نشان می‌دهد. میانگین مقادیر حداکثر نشست سطح به دست آمده توسط میدان تصادفی تقریباً برابر حداکثر نشست سطحی به دست آمده توسط مدل عددی تأیید شده است. شکل ۱۶-ب نشان می‌دهد که ضریب تغییرات حداکثر نشست سطح با افزایش مقیاس نوسان افزایش یافته و برای مقادیر بالاتر از ۶۰ متر تثبیت می‌شود؛ زیرا وقتی مقیاس نوسان بیش از ۲/۸ عرض تونل است، قوی‌ترین مناطق همبسته در داخل و خارج از محدوده تأثیر ناشی از تونل‌زنی شکل می‌گیرد.

از آنجاکه تنش ناشی از حفاری تونل به سرعت در منطقه تأثیر کاهش می‌یابد [۳۵]، تغییرات ضریب تغییرات حداکثر نشست سطح نیز به شدت کاهش می‌یابد. بنابراین جهت بررسی و تحلیل اثرات میدان تصادفی بر روی نشست سطح زمین به بررسی میدان‌های تصادفی می‌پردازیم که مقیاس نوسانات آن ۶۰ متر هست. به عنوان نمونه میدان تصادفی ایجاد شده با مقیاس نوسان افقی ۶۰ متر، هنگامی که شماره تکرار شبیه‌سازی مونت کارلو ۶۳۸ هست (شکل ۱۷)، در نظر گرفته می‌شود. با توجه به شکل ۱۷-الف، افزایش میزان مقیاس نوسانات سبب همبستگی بیشتر فضایی مدول یانگ شده و مناطق همبسته قوی‌تر و نرم‌تری ایجاد می‌شود. همچنین وجود مناطق ضعیف ایجاد شده از حوالی پرتال غربی تا اواسط تونل، سبب افزایش قابل توجهی از میزان جابجایی قائم (شکل ۱۷-ب) در این محدوده می‌شود. با استخراج مقادیر جابجایی قائم از سطح مدل (شکل ۱۷-ب)، میزان حداکثر نشست ۸۷/۴۱ میلی‌متر به دست می‌آید که با مقایسه آن با نتایج مدل عددی تأیید شده (مدلی بدون تغییرپذیری مکانی پارامترهای خاک)، مکان آن روی محور تونل نبوده (شکل ۱۷-ج) و در فاصله ۸ متری از پرتال غربی ظاهر می‌شود (شکل ۱۷-د).

شکل ۱۸ تغییرات منحنی نشست به ازای ۱۰۰۰ شبیه‌سازی مونت کارلو هنگامی که مقیاس افقی نوسان ۶۰ متر است را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است ایجاد میدان تصادفی در مدول یانگ خاک سبب ایجاد دامنه بزرگی از تغییرات نشست سطح زمین بین ۵ میلی‌متر تا ۸۰ میلی‌متر می‌شود که در محاسبات طراحی سیستم نگهداری و نوع روش اجرا حفاری تونل باید لحاظ گردد.

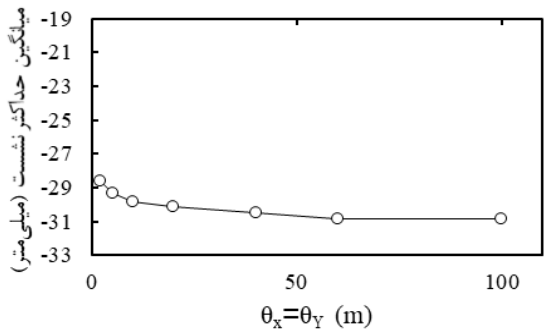
x ، y و z و تغییرات مدول یانگ مشخص است. با توجه به اینکه قبل از تولید میدان تصادفی، مختصات مرکز زون‌های مدل استخراج شده و در شبیه‌سازی میدان تصادفی به کار برده می‌شود، می‌توان با دستورات Fish به صورت نگاشت یک به یک بر اساس مختصات زون‌ها، تغییرات مدول یانگ ایجاد شده در میدان تصادفی توسط سری فوریه را به کل مدل اختصاص داد. در شکل ۱۵ فرایند تولید میدان تصادفی در حلقه‌های مونت کارلو ارائه شده است.

با توجه به اینکه سری فوریه میدان‌های تصادفی نرمال ایجاد می‌کند، در نتیجه برای زمینه تصادفی لاگ-نرمال مدول یانگ، پارامترهای توزیع نرمال ابتدا با حل روابط (۴) و (۵) به دست می‌آیند سپس رابطه (۲) به مقادیر ایجاد شده اعمال می‌شود و میدان تصادفی استاندارد نرمال تولید شده با استفاده از رابطه (۶) تبدیل می‌شود. همچنین برخی فرضیه‌هایی برای به دست آوردن مقادیر مقیاس نوسان در نظر گرفته می‌شود. مقیاس نوسان عمودی ثابت (۱ متر) و هر دو مقیاس نوسان افقی (یعنی θ_x و θ_y برابر فرض می‌شوند [۲۶]). برای یک تحلیل پارامتریک هفت مورد مقیاس نوسان مختلف افقی (به عنوان مثال ۲، ۵، ۱۰، ۲۰، ۴۰، ۶۰ و ۱۰۰ متر) در نظر گرفته می‌شوند. روش مورد استفاده برای نمونه‌گیری آماری در مطالعه حاضر روش مونت کارلو است.

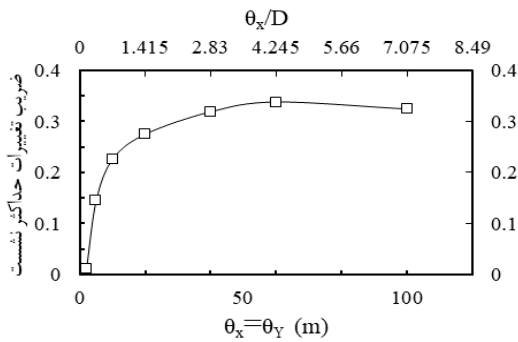
لازم به ذکر است که شبیه‌سازی مونت کارلو از مزایای سادگی مفهومی و دقت در نتایج برخوردار است. باین حال، اگر از شبیه‌سازی مونت کارلو و روش‌های عددی باهم استفاده شود، معمولاً بسیار وقت گیر است [۴]. بنابراین در اینجا جهت افزایش جامعه آماری، برای هر مقدار مقیاس نوسان، ۱۰۰۰ عملیات تصادفی به وسیله شبیه‌سازی مونت کارلو انجام می‌شود

۳- نتایج و بحث

همان‌طور که در بخش قبل ذکر شد، برای هر مقیاس نوسان در نظر گرفته شده ۱۰۰۰ تکرار تصادفی با شبیه‌سازی مونت کارلو انجام می‌شود؛ بنابراین به ازای هر مقیاس نوسان ۱۰۰۰ منحنی نشست به دست می‌آید که با استخراج مقادیر نشست از هر منحنی نشست، میانگین و ضریب تغییرات حداکثر نشست سطح به ازای هر مقیاس نوسان محاسبه می‌شود. شکل ۱۶ تغییرات میانگین و

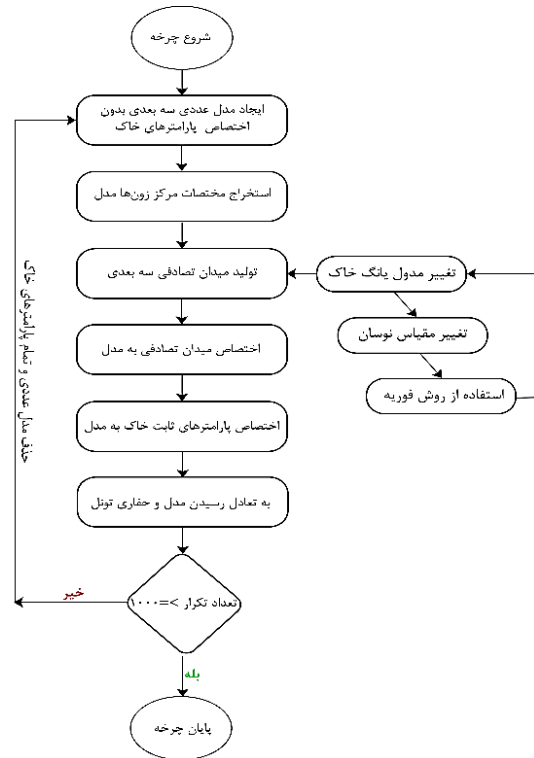


(الف)

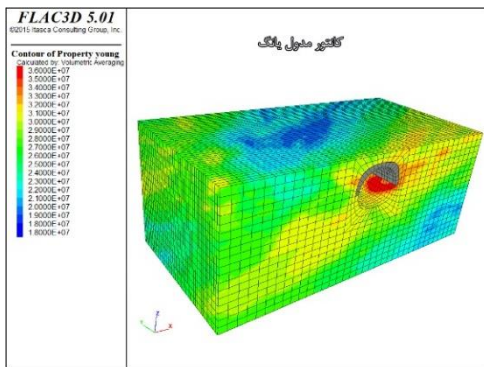


(ب)

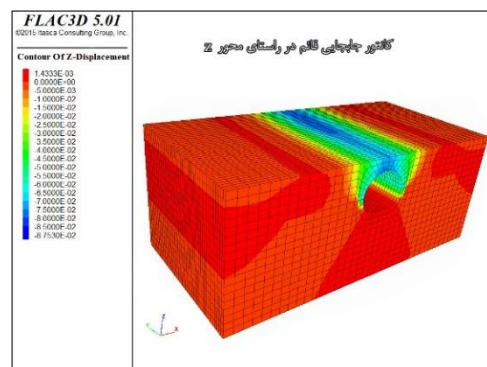
شکل ۱۶- تغییرات (الف) میانگین حداکثر نشست و (ب) ضریب تغییرات حداکثر نشست با مقیاس نوسان های مختل



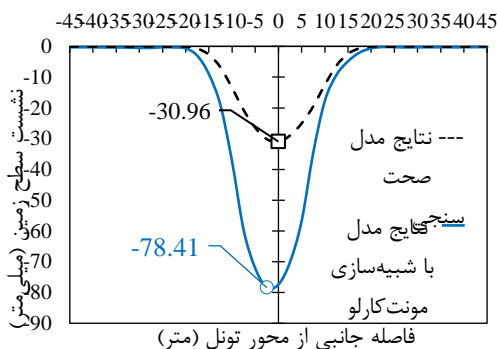
شکل ۱۵- فلوجارت تولید میدان تصادفی در چرخه مونت کارلو



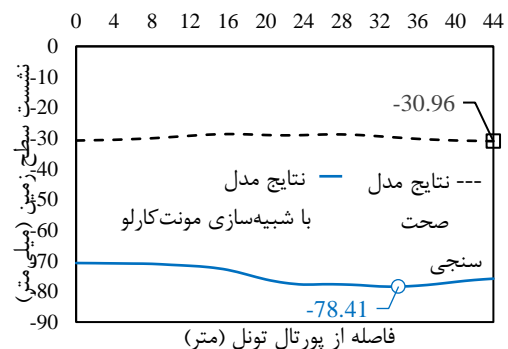
(الف)



(ب)

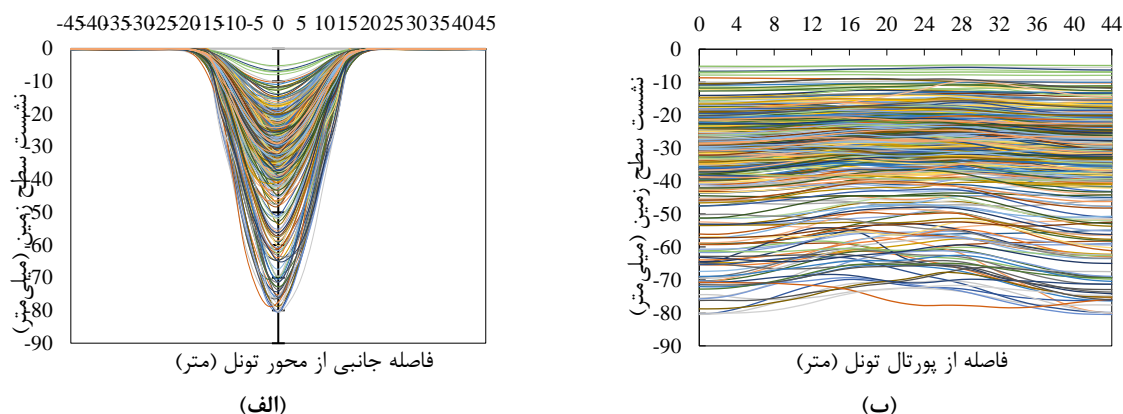


(ج)



(د)

شکل ۱۷- (الف) کانتورهای مدول یانگ، (ب) کانتورهای جایابی قائم، (ج) منحنی نشست سطحی شامل حداکثر نشست سطح، در یک مقطع عرضی و (د) منحنی نشست سطحی شامل حداکثر نشست سطح، در یک پروفیل طولی هنگامی که مقیاس نوسانات ۶۰ متر و شماره تکرار شبیه سازی مونت کارلو ۶۳۸ هست.



شکل ۱۸- منحنی‌های نشست سطحی شامل حداکثر نشست (الف) در یک مقطع عرضی و (ب) در یک پروفیل طولی هنگامی که مقیاس نوسانات ۶۰ متر است و شبیه‌سازی مونت کارلو ۱۰۰۰ مرتبه اجرا می‌شود

با دست‌کم گرفتن پارامترهای طراحی در محاسبات مربوط به روش اجرا و همچنین طراحی سیستم‌های نگهداری، خطرات زیادی را برای ساختمان‌ها و تأسیسات اطراف محل حفاری تونل ایجاد می‌کند.

مراجع

[1] Moosavi, E., R. Shirinabadi, E. Rahimi, and M. Gholinejad. "Numerical Modeling of Ground Movement Due to Twin Tunnel Structure of Esfahan Subway, Iran." *Journal of Mining Science* 53, no. 4 (2018): 663-75.

[2] Xiao, L., H. Huang, and J. Zhang. "Effect of Soil Spatial Variability on Ground Settlement Induced by Shield Tunnelling." In *Geo-Risk 2017*, 330-39, 2017.

[3] Fenton, G. A., and D. Griffiths. "Three-Dimensional Probabilistic Foundation Settlement." *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 131, no. 2 (2005): 232-39.

[4] Zhou, X.-P., B.-Z. Zhu, C.-H. Juang, and L. N. Y. Wong. "A Stability Analysis of a Layered-Soil Slope Based on Random Field." *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 78, no. 4 (2019): 2611-25.

[5] Dasaka, S., and L. Zhang. "Spatial Variability of in Situ Weathered Soil." *Géotechnique* 62, no. 5 (2012): 375-84.

[6] Marinos, V., A. Goricki, and E. Malandrakis. "Determining the Principles of Tunnel Support Based on the Engineering Geological Behaviour Types: Example of a Tunnel in Tectonically Disturbed Heterogeneous Rock in Serbia." *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 78, no. 4 (2019): 2887-902.

[7] Griffiths, D. V., and G. Fenton. "Risk Assessment in Geotechnical Engineering." *John Wiley & Sons, Inc* (2008): 381-400.

[8] Mollon, G., D. Dias, and A.-H. Soubra. "Probabilistic Analyses of Tunneling-Induced Ground Movements." *Acta Geotechnica* 8, no. 2 (2013): 181-99.

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله به بررسی تأثیر تغییرپذیری مکانی مدول یانگ خاک بر روی حداکثر نشست زمین ناشی از تونل سازی به روش NATM پرداخته شده است. یافته‌های تحقیق به شرح زیر خلاصه می‌شود.

الف - مقادیر میانگین حداکثر نشست در تحلیل‌های تصادفی عددی هنگامی که مقیاس نوسان ۶۰ متر است تقریباً برابر با حداکثر نشست به دست آمده از مدل عددی صحت سنجی شده است زیرا با افزایش مقیاس نوسان میزان همبستگی فضایی پارامتر مدول یانگ افزایش می‌یابد و به خصوصیات خاک محل احداث تونل بیشتر نزدیک می‌شود. همچنین ضریب تغییرات حداکثر نشست سطح نیز با افزایش مقیاس نوسان به مقدار ثابت ۰٫۳ متمایل می‌شود ولی در مجموع افزایش قابل توجهی پیدا می‌کند (از ۰٫۱ به ۰٫۳) که باعث تغییرات در بزرگی دامنه حداکثر نشست سطح زمین (بین ۵ تا ۸۰ میلی‌متر) می‌شود؛ بنابراین نادیده گرفتن تغییرپذیری مکانی می‌تواند به دست‌کم گرفتن خطر نشست بیش از حد زمین و طراحی ضعیف‌تر سیستم نگهداری منجر شود.

ب - تغییرپذیری مکانی مدول یانگ باعث تغییر در بزرگی میزان نشست سطح زمین و همچنین تغییر در مکان ایجاد آن می‌شود بنابراین تحلیل‌های عددی سه‌بعدی قابلیت نمایش دقیق‌تر تغییر مکان حداکثر نشست سطح را هم در یک مقطع قائم و هم در مقطع طولی تونل دارند.

ج - نادیده گرفتن تغییرپذیری مکانی پارامتر مدول یانگ خاک باعث نشست‌های بزرگ سطح زمین می‌شود و

Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering 128, no. 5 (2002): 381-90.

- [24] Sahel. Consultant Engineers Institute. "Report of Engineering Geology of Zarbalizadeh-Maddah Underpass Tunnel." (2016). (In Persian).
- [25] Taromi, M., A. Eftekhari, J. K. Hamidi, and A. Aalianvari. "A Discrepancy between Observed and Predicted Natm Tunnel Behaviors and Updating: A Case Study of the Sabzkuh Tunnel." *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 76, no. 2 (2017): 713-29.
- [26] Kawa, M., and W. Puła. "3d Bearing Capacity Probabilistic Analyses of Footings on Spatially Variable C-Φ Soil." *Acta Geotechnica* (2019).
- [27] Consultant Engineers Institute. "Report of Method Statements and Support System Design of Zarbalizadeh-Maddah Underpass Tunnel." (2016). (In Persian).
- [28] Karamniayi, F. M., and A. Dehghan. "The Effect of Pre-Support System (Forepoling) on the Control of Ground Surface Subsidence Caused by Sem/Natm in Shallow Urban Road Tunnels under Railway Traffic Loading) "(2019).
- [29] Jaky, J. "Pressure in Silos." *Proc. 2nd ICSM, 1948*.
- [30] Carranza-Torres, C., and M. Diederichs. "Mechanical Analysis of Circular Liners with Particular Reference to Composite Supports. For Example, Liners Consisting of Shotcrete and Steel Sets." *Tunnelling and Underground Space Technology* 24, no. 5 (2009): 506-32.
- [31] Dehghani, N. L., M. Rahimi, A. Shafieezadeh, and J. E. Padgett. "Parameter Estimation of a Fractional Order Soil Constitutive Model Using Kik-Net Downhole Array Data: A Bayesian Updating Approach." Paper presented at the Geo-Congress 2020: Geotechnical Earthquake Engineering and Special Topics, 2020.
- [32] Rahimi, M., Z. Wang, A. Shafieezadeh, D. Wood, and E. J. Kubatko. "Exploring Passive and Active Metamodeling-Based Reliability Analysis Methods for Soil Slopes: A New Approach to Active Training." *International Journal of Geomechanics* 20, no. 3 (2020): 04020009.
- [33] Sahel. Consultant Engineers Institute. "Report of Instrumentation and Monitoring of Zarbalizadeh-Maddah Underpass Tunnel." (2016). (In Persian).
- [34] Jha, S. K., and J. Ching. "Simplified Reliability Method for Spatially Variable Undrained Engineered Slopes." *Soils and foundations* 53, no. 5 (2013): 19-708.
- [35] Gong, W., Z. Luo, C. H. Juang, H. Huang, J. Zhang, and L. Wang. "Optimization of Site Exploration Program for Improved Prediction of Tunneling-Induced Ground Settlement in Clays." *Computers and Geotechnics* 56 (2014): 69-79.
- [9] Miro, S., M. König, D. Hartmann, and T. Schanz. "A Probabilistic Analysis of Subsoil Parameters Uncertainty Impacts on Tunnel-Induced Ground Movements with a Back-Analysis Study." *Computers and Geotechnics* 68 (2015): 38-53.
- [10] Cheng, H., J. Chen, R. Chen, J. Huang, and J. Li. "Three-Dimensional Analysis of Tunnel Face Stability in Spatially Variable Soils." *Computers and Geotechnics* 111 (2019): 76-88.
- [11] Cheng, H., J. Chen, R. Chen, and G. Chen. "Comparison of Modeling Soil Parameters Using Random Variables and Random Fields in Reliability Analysis of Tunnel Face." *International Journal of Geomechanics* 19, no. 1 (2019): 04018184.
- [12] Cheng, H., J. Chen, and J. Li. "Probabilistic Analysis of Ground Movements Caused by Tunneling in a Spatially Variable Soil." *International Journal of Geomechanics* 19, no. 12 (2019): 04019125.
- [13] Vanmarcke, E. *Random Fields: Analysis and Synthesis*. World Scientific, 2010.
- [14] Vanmarcke, E. "Random fields: Analysis and Synthesis." The MIT Press, Cambridge, Mass, 1983.
- [15] Jaksa, M. B., P. I. Brooker, and W. S. Kaggwa. "Inaccuracies Associated with Estimating Random Measurement Errors." *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 123, no. 5 (1997): 393-401.
- [16] Cami, B., S. Javankhosdel, K.-K. Phoon, and J. Ching. "Scale of Fluctuation for Spatially Varying Soils: Estimation Methods and Values." *ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems, Part A: Civil Engineering* 6, no. 4 (2020): 03120002.
- [17] Bagińska, I., M. Kawa, and W. Janecki. "Estimation of Spatial Variability of Lignite Mine Dumping Ground Soil Properties Using Cptu Results." *Studia Geotechnica et Mechanica* 38, no. 1 (2020) : 393-401.
- [18] Cherubini, C. "Data and Considerations on the Variability of Geotechnical Properties of Soils." Paper presented at the Proceedings of the Conference on Advances in Safety and Reliability, ESREL, 1997.
- [19] Huang, J., A. Lyamin, D. Griffiths, K. Krabbenhoft, and S. Sloan. "Quantitative Risk Assessment of Landslide by Limit Analysis and Random Fields." *Computers and Geotechnics* 53 (2013): 60-67.
- [20] Lumb, P. "The Variability of Natural Soils." *Canadian Geotechnical Journal* 3, no. 2 (1966): 74-97.
- [21] Fenton, G. A., and D. V. Griffiths. *Risk Assessment in Geotechnical Engineering*. Vol. 461: John Wiley & Sons New York, 2008.
- [22] Fenton, G. A., and D. Griffiths. "Bearing-Capacity Prediction of Spatially Random C Φ Soils." *Canadian geotechnical journal* 40, no. 1 (2003): 54-65.
- [23] Fenton, G. A., and D. Griffiths. "Probabilistic Foundation Settlement on Spatially Random Soil."

-
- ¹Random Field
 - ² Random Field Finite Element (RFEM)
 - ³ Monte Carlo Simulation (MCS)
 - ⁴ Scale of fluctuation (SOF)
 - ⁵ Maximal Surface Settlement (Smax)
 - ⁶ Coefficient Of variation (COV)
 - ⁷ Markov Function
 - ⁸International Tunnelling and Underground Space Association (ITA)
 - ⁹ Side Drift Method (SDM)
 - ¹⁰ Progressive Beam
 - ¹¹ Reinforcing Hoop
 - ¹² Reinforcing Mesh Cage
 - ¹³ Permenant Support
 - ¹⁴ Temporary Support
 - ¹⁵ Soilcrete
 - ¹⁶ Verified Model