

تأثیر سه بعدی سیستم پیش نگهدارنده تیر پیشرو بر نشست سطح زمین در شرایط تغییرپذیری مکانی مدول یانگ در تونل زنی NATM (مطالعه موردی)

محمدعلی طهماسبی^۱؛ رضا شیرین آبادی^{۲*}؛ اسماعیل رحیمی^۲؛ احسان موسوی^{۲،۳}؛ امیر حسین بانگیان تبریزی^۲

۱- دانشجوی دکتری مهندسی معدن، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۲- استادیار گروه مهندسی نفت و معدن، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۳- مرکز تحقیقات مدل سازی و بهینه سازی در علوم و مهندسی، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

پذیرش: ۱۴۰۰/۰۷

دریافت: ۱۳۹۹/۰۶

چکیده

یکی از مهم ترین مسائلی که در حفاری تونل های شهری مورد توجه قرار می گیرد، نشست بیش از حد سطح زمین است. این موضوع زمانی اهمیت ویژه پیدا می کند که ارتفاع روباره تونل کم است، بنابراین برای کاهش میزان نشست سطح زمین در این شرایط معمولاً از روش های حفاری متوالی یا تکنیک های تقویت خاک، یا ترکیبی از هر دو استفاده می شود. در تونل ضربعلی زاده، به دلیل ارتفاع کم روباره از هر دو روش یعنی تونل زنی اتریشی و استفاده از دو سیستم پیش نگهدارنده جهت طراحی و اجرا تونل استفاده شده است. برای بررسی تأثیر سیستم پیش نگهدارنده تیر پیشرو بر روی حداکثر نشست سطح زمین، رفتار واقعی خاک باید به دقت ارزیابی شود. در این راستا، از روش تفاضل محدود تصادفی برای توصیف شرایط واقعی رفتار خاک استفاده شده است. سپس مقادیر حداکثر نشست سطح برای وجود و عدم وجود تیر پیشرو به دست آمد و با یکدیگر مقایسه شد. نتایج این تحقیق نشان می دهد که در صورت عدم استفاده از سیستم های پیش نگهدارنده تیر پیشرو، درصد تغییرات میانگین و همچنین ضریب تغییرات حداکثر نشست سطح زمین به ترتیب ۳۵/۵٪ و ۶۱/۷٪ افزایش می یابد.

واژگان کلیدی

مقیاس نوسان، نشست سطح زمین، تغییرپذیری مکانی، سیستم های پیش نگهدارنده، میدان تصادفی

۱- مقدمه

شود. در شرایط طبیعی، خاک به صورت افقی و با تغییر فضایی در پارامتر آن لایه بندی می شود [۴]. در حقیقت، خواص خاک به دلیل فرایندهای رسوبی معمولاً تغییرپذیری مکانی را نشان می دهند [۵] و [۶]. از طرف دیگر، روش های متداول توانایی توصیف تنوع مکانی تصادفی پارامترهای خاک را ندارند [۷] و باید از روش های جدید برای توصیف شرایط واقعی خاک استفاده کرد. یکی از این روش ها تئوری میدان های تصادفی (Random field) است. به عبارتی یک میدان تصادفی، در ساده ترین شکل، بخشی غیر همبسته است که فقط به صورت آماری از یک متغیر کاملاً تصادفی توصیف می شود. بر اساس تئوری میدان تصادفی، می توان تأثیر تنوع مکانی پارامترهای خاک را برای تونل های شهری مطالعه کرد. جهت تولید

نشست بیش از حد سطح زمین یکی از مهم ترین مشکلاتی است که هنگام ساخت تونل های کم عمق در زمین های نرم با آن روبرو می شویم. در چنین شرایطی، معمولاً از سیستم های پیش نگهدارنده برای پایداری سینه کار حفاری و کاهش تغییر شکل محیط اطراف تونل استفاده می شود [۱] و [۲]. تاکنون، به منظور بررسی تأثیر سیستم های پیش نگهدارنده، موضوع تنوع مکانی ویژگی های خاک در نظر گرفته نشده است. نادیده گرفتن این مسئله منجر به دست کم گرفتن خطر نشست بیش از حد سطح زمین می شود [۳] و در نتیجه، ما نمی توانیم تفسیر دقیقی از تأثیر سیستم پیش نگهدارنده داشته باشیم. در این راستا لازم است خصوصیات خاک به طور دقیق تعیین

*نویسنده مسئول: استادیار دانشکده مهندسی نفت و معدن، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی

پست الکترونیک: r_shirinabadi@azad.ac.ir

تجزیه و تحلیل‌های پارامتری بر اساس مقادیر مختلف مقیاس نوسان به کمک روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو برای بررسی تأثیر سیستم پیش نگهدارنده تیر پیشرو بر حداکثر نشست سطح زمین (*Maximal Surface settlement* (S_{max})) انجام می‌شود.

۲- مفاهیم اساسی میدان تصادفی

جهت ایجاد یک میدان تصادفی باید از توابع تولید میدان استفاده شود که مهم‌ترین پارامتر این توابع، پارامتر مقیاس نوسان است. در ادامه جهت استفاده از توابع تولید میدان به بررسی و انتخاب پارامتر مقیاس نوسان در سه بعد پرداخته می‌شود.

۲-۱- تعیین مقیاس نوسان

در شرایط طبیعی، خاک به‌صورت افقی لایه‌بندی می‌شود. تنوع فضایی ذاتی خواص خاک ناشی از فرآیندهای رسوب‌گذاری یکی از مشکلات اصلی پایداری جبهه کار تونل در زمین‌های نرم و کم‌عمق شهری است [۱۶]. برای توصیف دقیق رفتار خاک، تئوری میدان تصادفی می‌تواند یک روش مطلوب برای بررسی ساختار مکانی پارامترهای خاک باشد. در تئوری میدان تصادفی، مقیاس نوسان برای تعیین کمیت فضایی مطرح شده است. به عبارت دیگر، یک روش مناسب برای اندازه‌گیری میزان تغییرپذیری میدان تصادفی، مقیاس نوسان است [۱۷]. یعنی اگر فاصله بین ۲ نقطه از مقدار مقیاس نوسان کمتر باشد، خصوصیات خاک در این نقاط به‌شدت همبسته است و بالعکس. اگر فاصله از مقیاس نوسان بیشتر باشد، ارتباط ضعیفی رخ می‌دهد. به عبارت دیگر، مقدار زیاد مقیاس نوسان نشان می‌دهد که خصوصیات خاک در مقیاس بزرگ بسیار همبسته هستند. بنابراین میدان تصادفی یکنواخت و نرمی ایجاد می‌شود [۱۸]. هنگامی که حد مقیاس نوسان به بی‌نهایت متمایل باشد، با ثابت بودن مقیاس نوسان، میدان تصادفی متناوب و متنوع برای هر بار اجرای شبیه‌سازی مونت‌کارلو تولید می‌شود (به دلیل تأثیرات ضریب تغییر (*Coefficient Of Variation*)) به ازای هر بار شبیه‌سازی مونت‌کارلو [۱۹]. از طرف دیگر، برجید و همکاران [۲۰] اظهار داشتند که مقادیر مقیاس نوسان عمودی معمولاً کمتر از مقیاس نوسان افقی است و معمولاً خاک‌ها همبستگی شدیدی را در جهت افقی نشان می‌دهند. تاکنون، روش‌هایی برای تعیین مقیاس نوسان عمودی تعریف شده است، اما برای مقیاس نوسان افقی توسعه مطلوبی حاصل نشده است. از آنجاکه در ادبیات قبلی هیچ اطلاعاتی در مورد *SOF* افقی خاک پروژه ضربعلی‌زاده موجود نیست، بنابراین، برای مقادیر مختلف مقیاس نوسان افقی، یک مطالعه پارامتریک انجام می‌شود. هر دو مقیاس نوسان افقی و عمودی برابر فرض می‌شوند. با توجه به زمان‌بر بودن محاسبات به‌صورت سه‌بعدی، فقط یک مقدار ثابت از مقیاس نوسان عمودی به‌عنوان مقدار نماینده برای محاسبات انتخاب

میدان‌های تصادفی، روش‌های متنوعی وجود دارد که یکی از پیچیده‌ترین روش‌های تولید میدان‌های تصادفی، روش میدان تصادفی عناصر محدود (*Random Field finite Element Method (RFEM)*) است [۸] که ترکیبی از نظریه میدان‌های تصادفی، روش اجزای محدود و روش شبیه‌سازی احتمالاتی مونت‌کارلو (*Mont Carlo Simulation (MCS)*) است. روش میدان تصادفی عناصر محدود به قدرت محاسباتی قابل‌توجهی نیاز دارد، به‌خصوص اگر این نوع تحلیل برای تعداد قابل‌توجهی از شبیه‌سازی مونت‌کارلو به‌صورت سه‌بعدی انجام شود. این می‌تواند یکی از دلایل محدود بودن مقالاتی باشد که به مطالعه اثرات سه‌بعدی تغییر در ویژگی‌های خاک در عملیات تونل‌سازی *NATM* می‌پردازد. به‌تازگی، تعدادی از محققان اثر تنوع خاک بر نشست سطح ناشی از ساخت تونل را مطالعه کرده‌اند. مولون و همکاران [۹] یک روش عددی تصادفی دوبعدی را بر اساس شبیه‌سازی مونت‌کارلو برای مطالعه تأثیر تغییرات زاویه اصطکاک خاک ارائه دادند. چنگ و همکاران [۵] پایداری جبهه کار حفاری را به‌صورت دوبعدی در خاک‌های مختلف بررسی کردند و سپس تأثیر مقاومت برشی خاک بر قابلیت اطمینان و مکانیسم خرابی آن را مورد بررسی قرار دادند. میرو و همکاران [۱۰] انواع توزیع پارامترهای خاک را مطالعه مورد بررسی قرار داده و روشی را برای کاهش عدم قطعیت پارامترهای خاک پیشنهاد کردند. ویژگی تغییرپذیری خصوصیات خاک به‌طور گسترده توسط محققان مورد تأیید قرار گرفته است و تأثیر آن در سازه‌های زیرزمینی در ادبیات مورد توجه قرار گرفته است [۱۱]، [۱۲] و [۵]. با توجه به این واقعیت که از بین پارامترهای خاک، مدول یانگ، بیشترین تأثیر را بر تغییر شکل خاک دارد [۱۳]، [۱۴] و [۱۵]، بنابراین در این تحقیق تنوع مکانی مدول یانگ با استفاده از یک میدان تصادفی سه‌بعدی مدل می‌شود. همچنین، از پارامتر اصلی مقیاس نوسان (*Scale Of Fluctuation (SOF)*) برای اندازه‌گیری همبستگی پارامتر مدول یانگ استفاده می‌شود. میدان‌های تصادفی مدول یانگ خاک با استفاده از معادلات میدان تصادفی و استفاده از روش سری فوریه توسط نرم‌افزار متلب (*MatLab*) تولید می‌شود و سپس به شبکه تفاضل محدود اعمال می‌شوند. مطالعات با حساسیت بیشتر نیز از طریق شبیه‌سازی مونت‌کارلو انجام می‌شود.

ساختار این مطالعه به شرح زیر است. ابتدا پارامترهای مورد نیاز برای ایجاد میدان تصادفی بررسی شده و سپس توابع لازم برای ایجاد میدان تصادفی سه‌بعدی ارائه می‌شود. دوم، یک مدل عددی بر اساس شرایط زمین‌شناسی و روش حفاری برای پروژه ضربعلی‌زاده ایجاد شده و مدل عددی با داده‌های میدانی به‌دست‌آمده از ابزارهای سطحی ایستگاهی نشست سنجی تأیید می‌شود. سوم، میدان‌های تصادفی سه‌بعدی برای مدول یانگ تولید می‌شوند و به شبکه تفاضل محدود سه‌بعدی اختصاص داده می‌شود. سرانجام،

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

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

همچنین برای در نظر گرفتن دامنه مدول یانگ، فنتون و گریفیت [۲۳] تبدیل ۶ را ارائه دادند:

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

که در آن $X_0(X)$ متغیر تصادفی نرمال استاندارد است. s و m پارامترهای توزیع هستند. مقادیر a و b نیز به ترتیب کمترین و بیشترین مقدار مدول یانگ خاک می‌باشند. در نهایت تابع چگالی احتمال $Y(X)$ به صورت تابع γ تعریف می‌شود:

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

و تابع تقریب ۸ با استفاده از بسط مرتبه سوم تیلور به دست می‌آید.

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

۳- بررسی 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. طول تونل ۴۴ متر و پوشش روباره روی تونل ۳/۵ متر است. ارتفاع بین کف و تاج تونل ۱۱/۵۵ متر و عرض آن در بیشترین قسمت مقطع حفاری ۱۴/۱۴ متر است. این تونل با روش NATM حفر شده و تجزیه و تحلیل و طراحی این پروژه بر اساس مراجع معتبری مانند: AASHTO, FHWA-NJ-2005-002, FHWA-NHI-10-034 و ACI 318-05 و راهنمای انجمن بین‌المللی تونل سازی و فضای زیرزمینی (ITA) انجام شده است. لازم به ذکر است که این پروژه در سال ۲۰۱۸ توسط این انجمن به عنوان پروژه برجسته تونل سازی شناخته شد. شکل ۱ موقعیت مکانی پروژه را نشان می‌دهد.

می‌شود. برای مطالعه میدان تصادفی، لازم است توزیع آماری متناسب با شرایط زمین‌شناسی پروژه تعریف شود. در میان توابع توزیع آماری، توزیع نرمال منطبق با مشخصات آماری و فرایندهای رسوبگذاری خاک است. بر این اساس، توزیع نرمال در اینجا برای توصیف تنوع مدول یانگ در نظر گرفته شده است [۲۱].

تولید میدان تصادفی

کاربرد تئوری میدان تصادفی برای اولین بار در دهه ۱۹۶۰ مورد استفاده قرار گرفت [۲۲]. در سال‌های 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 است که به صورت زیر تعریف می‌شود [۲۳]

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

که در آن تابع همبستگی $\rho(\tau_x, \tau_y, \tau_z)$ تابعی از فاصله افقی τ_x و τ_y و فاصله عمودی τ_z بین هر دو نقطه از نظر مکانی است. پارامترهای θ_x ، θ_y و θ_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 [۱۴]. اگر مدول یانگ میدان تصادفی لاگ-نرمال در نظر گرفته شود با استفاده از تابع ۲، میدان تبدیل شده به وسیله یک میدان تصادفی نرمال $(X(x))$ ایجاد می‌شود [۲۳]

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

همچنین تابع چگالی احتمال $Y(x)$ برای یک نقطه معین مانند

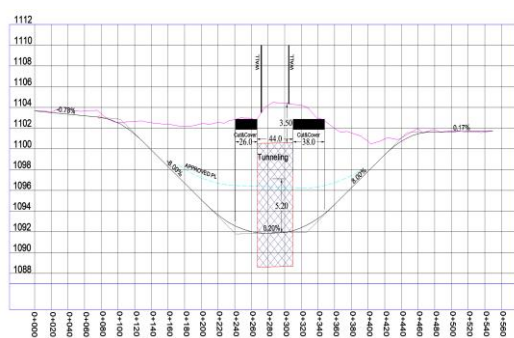
x ، با معادله (۳) تعیین می‌شود که به صورت زیر تعریف می‌شود

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

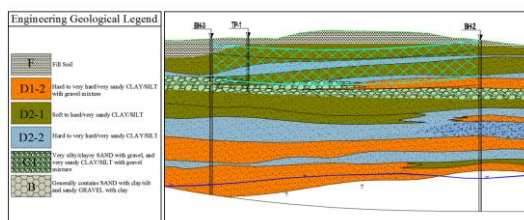
که $\sigma_{\ln Y}$ و $\mu_{\ln Y}$ به ترتیب انحراف معیار و میانگین $X(x)$ هستند. انحراف استاندارد σ_Y و مقدار میانگین μ_Y مربوط به $Y(x)$ به وسیله توابع ۴ و ۵ با $\sigma_{\ln Y}$ و $\mu_{\ln Y}$ ارتباط پیدا می‌کنند.



شکل ۱- موقعیت پروژه تونل ضریعی زاده



شکل ۳- نیمرخ طولی مسیر پروژه



شکل ۴- مشخصات زمین‌شناسی مهندسی مسیر تونل

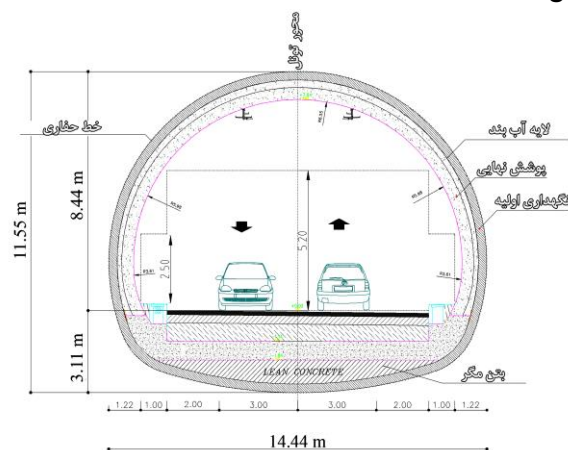
جدول ۱- خصوصیات ژئوتکنیکی لایه‌های خاک.

نوع	چسبندگی (kg/cm^2)	زاویه اصطکاک (deg)	مدول یانگ (kg/cm^2)	وزن مخصوص (kg/cm^3)
D2-2	۰/۳۲	۲۷	۲۶۰	۱/۶۵
D2-1	۰/۳۰	۲۸	۲۸۰	۱/۶۰
D1-2	۰/۳۱	۰/۳۰	۳۰۰	۱/۶۵
C1	۰/۲۰	۰/۲۵	۵۲۰	۱/۷۰
B	۰/۱۲	۰/۲	۶۰۰	۱/۸۰

شکل ۲ مقطع عرضی به همراه ابعاد تونل و شکل ۳ نیمرخ طولی مسیر اصلی پروژه و محل قرارگیری تونل زیرگذر ضریعی زاده را نشان می‌دهد.

۳-۱- بررسی پروژه مورد مطالعه

با توجه به نتایج آزمایش‌های برجا و آزمایشگاهی، مشخصات ژئوتکنیکی لایه‌های مختلف پروژه در جدول ۱ و مشخصات واحدهای زمین‌شناسی طول مسیر تونل در شکل ۴ نشان داده شده است [۲۴] مطابق شکل ۳، مسیر تونل در لایه زمین‌شناسی "D2-1" واقع شده است. بنابراین، از خصوصیات خاک این ناحیه برای تحلیل‌های عددی استفاده می‌شود. طبق مطالعات انجام شده، آب زیرزمینی نسبتاً عمیق است و زیرگذر ضریعی زاده در بالای آن واقع شده است.



شکل ۲- خصوصیات هندسی مقطع تونل

۳-۲- 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 تونل سازی *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 تونل سازی به روش *NATM* روش حفاری جانبی (*Side Drift Method (SDM)*) 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 ضربعلی‌زاده، حفاری تمام مقطع امکان‌پذیر نبوده و بنابراین، روش حفاری جانبی برای این پروژه انتخاب شده است.

۳-۳- سیستم‌های نگهداری

سیستم‌های نگهداری مورد استفاده در تونل ضربعلی‌زاده شامل سیستم‌های پیش نگهدارنده و سیستم‌های نگهداری اصلی هست.

۳-۳-۱- سیستم‌های پیش نگهدارنده

الف) تیر پیشرو (*Progressive Beam*): نوعی سیستم پیش نگهدارنده نوآورانه برای تثبیت خاک است. می‌توان آن را تونلی با سطح مقطع بسیار کوچک (حدود ۰/۷ مترمربع) نامید که به‌صورت تمام مقطع حفر شده و با حلقه‌های تقویت‌کننده (*Reinforcing Hoop*) آستر می‌شود. سپس در داخل هر یک از این تونل‌ها، شبکه‌های آرماتوربندی شده مربعی (*Reinforcing Mesh Cage*) قرار داده شده و با بتن پر می‌شوند. در این پروژه پنج تیر پیشرو به طول ۴۴ متر (برابر با طول مسیر تونل) در نظر گرفته شد که

جانمایی آن‌ها در شکل ۵ نشان داده شده است.

ب) فورپولینگ: که در هر مقطع مجموعاً از ۳۸ 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 ۵).

۳-۳-۲- سیستم نگهداری اصلی

الف) 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 ۵).

۱- نگهداری دائم (*Permanent Support*): که از یک‌لایه مش و لیتس سه بار از نوع $AIII (\varnothing=20 \text{ \& } 28)$ که در یک آستر شاتکریت به ضخامت ۳۰ سانتی‌متر قرار دارد، تشکیل شده است.

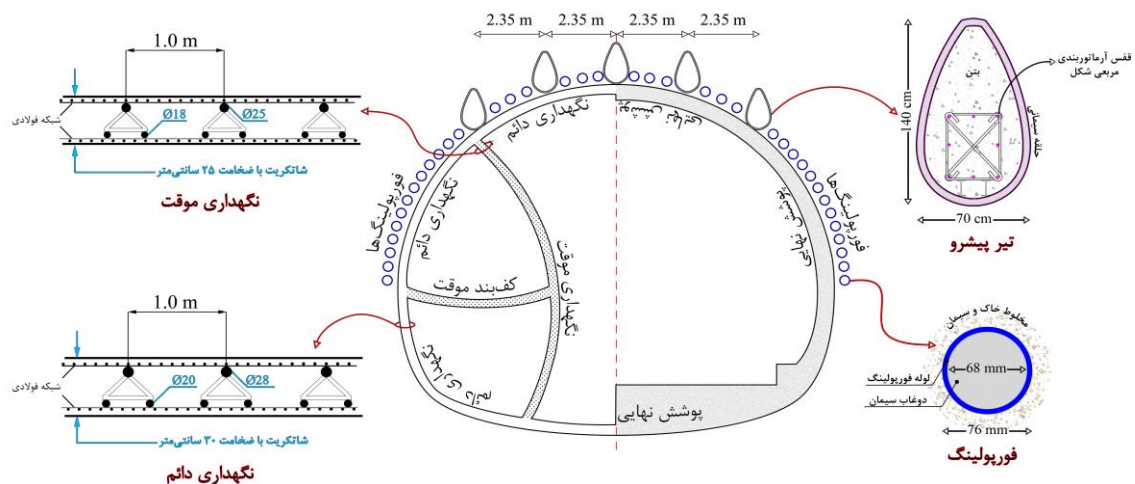
۲- نگهداری موقت (*Temporary Support*): که از یک‌لایه مش و لیتس ۳ بار از نوع $AIII (\varnothing=18 \text{ \& } 25)$ که در یک آستر شاتکریت به ضخامت ۲۵ سانتی‌متر قرار دارد، تشکیل شده است.

ب) پوشش نهایی (*Final Lining*): پارامترهای فیزیکی ساختار پوشش نهایی و طراحی مورد استفاده در تجزیه و تحلیل به شرح زیر است:

- بتن استفاده شده در پوشش نهایی دارای مقاومت فشاری برابر با $f_c = 300 \text{ kg/cm}^2$ ، مقدار مدول الاستیک برابر با $E_c = 26 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$ و وزن مخصوص آن نیز برابر با $\rho_c = 2500 \text{ kg/cm}^3$ است.

- فولاد استفاده شده در پوشش نهایی از نوع *AIII* هست که مقاومت فشاری آن برابر با $f_y = 4000 \text{ kg/cm}^2$ و مدول الاستیسیته آن برابر با $E_c = 2 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$ است.

ضخامت مقطع پوشش نهایی ۵۰ سانتی‌متر است.

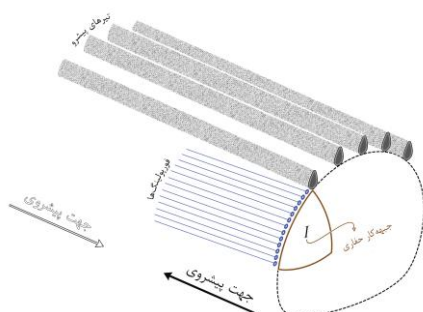


شکل ۵- نمای کلی از سیستم‌های پیش نگهدارنده و سیستم نگهداری اصلی

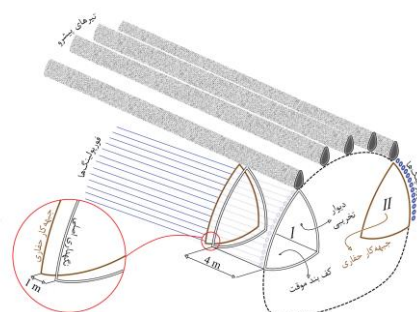
۳ - ۴- روش اجرا در ساخت تونل

قبل از شروع عملیات حفاری، ابتدا تیرهای پیشرو در امتداد مسیر تونل به طول ۴۴ متر حفاری و تحکیم می‌شود. عملیات حفاری به‌طور هم‌زمان از هر دو پورتال شرقی و غربی آغاز می‌شود. قبل از حفاری دررفت شماره ۱، تعداد مشخصی از فورپولینگ‌ها در اطراف بخشی از دررفت شماره ۱ مطابق شکل ۸-۱ نصب می‌شوند و سپس حفاری این دررفت آغاز می‌شود. گام پیشروی و دهانه نگهداری نشده (که به‌عنوان فاصله بین جبهه کار حفاری و نزدیک‌ترین سیستم نگهداری نصب‌شده 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

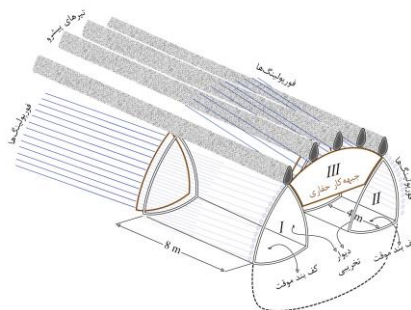
دررفت شماره ۲ (مانند دررفت شماره ۱) آغاز می‌شود (شکل ۸-۲). توالی حفاری مطابق با شماره دررفت‌ها است و فاصله بین دررفت‌ها (حدود ۴ متر) تا زمان اتمام حفاری حفظ شود. در ادامه، هنگامی که دررفت شماره ۱ و شماره ۲ به ترتیب ۸ متر و ۴ متر حفاری می‌شوند (شکل ۸-۳)، عملیات حفاری و نصب سیستم نگهداری ترکیبی در دررفت 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 ۸-۴). حفاری دررفت‌های تحتانی با تخریب دیوار موقت و کف بند موقت ادامه پیدا می‌کند (شکل ۸-۵) و نهایتاً با تخریب کامل نگهداری موقت، پوشش نهایی اجرا می‌شود (شکل ۸-۶).



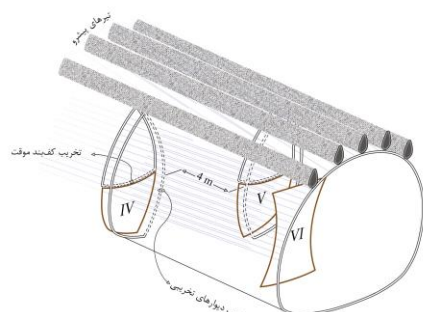
(۱)



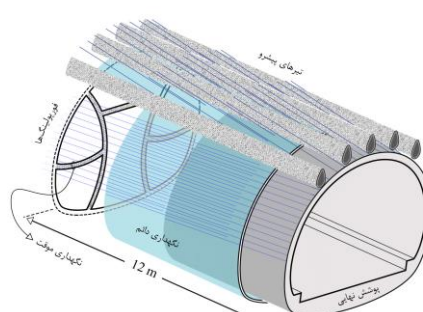
(۲)



(۳)



(۴)



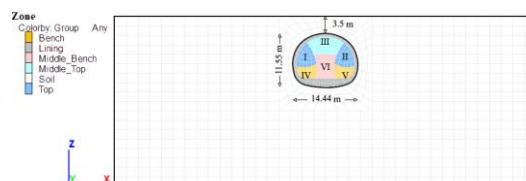
(۵)

شکل ۶- مراحل حفاری و نصب سیستم نگهداری در تونل ضربعلی‌زاده برای یک فاصله ۱۲ متری از پرتال

۴- مدل سازی عددی

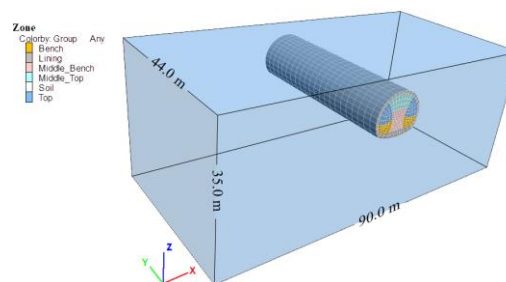
۴-۱- هندسه و فرضیات ایجاد مدل عددی

شبیه سازی فرایند تونل سازی به روش حفاری جانبی تونل ضربعلی زاده با استفاده از نرم افزار $FLAC^{3D}$ و با انتخاب هندسه مدل در سه بعد آغاز می شود. برای مدل سازی دقیق عددی با توجه به روند ساخت تونل (شکل ۶)، مدل عددی با گروه بندی و ابعاد مناسب ایجاد می شود (شکل ۷).



شکل ۷- گروه بندی مدل عددی بر اساس ترتیب و توالی حفاری دریافت ها

برای اطمینان از عدم وجود اثرات مرزی، مدل با ابعاد ۹۰ متر (طول) × ۴۴ متر (عرض) × ۳۵ متر (عمق) ساخته می شود. از آنجاکه مدل نامتقارن است (به دلیل عدم تقارن توالی های حفاری دریافت های تونل)، کل طول مدل در نظر گرفته می شود؛ بنابراین شبکه ایجاد شده حدود ۴۴۲۳۵ نقطه شبکه ای (Grid Point) و ۸۵۰۶۷ ناحیه (Zone) هست. 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 می تواند در راستای محور Z حرکت کند (شکل ۸).



شکل ۸- مرزهای مدل عددی

بار قطار حدود ۹۳ کیلو پاسکال است [۲۴] که از سطح مدل اعمال می شود (بار ناشی از عبور قطار). رفتار خاک توسط یک مدل کاملاً الاستیک - پلاستیکی بر اساس معیار شکست موهر کلوبم تعریف شده است. نسبت تنش های افقی به عمودی از معادله جکی [۲۷] محاسبه می شود و تنش برجا با استفاده از تابع $FISH$ ، دستور گرانث و σ_{zz} ایجاد می شود (شکل ۹).

۴-۲- شبیه سازی سیستم های نگهداری

همان طور که قبلاً ذکر شد، برای نگهداری از دریافت های تونل، از دو نوع سیستم نگهداری استفاده می شود. تیرهای پیشرو و فورپولینگ با المان $Pile$ شبیه سازی می شوند (جدول ۳). شبکه فولادی، شاتکریت و لتیس گریدر با المان $Shell$ (جدول ۴) بر اساس روش مقطع معادل ارائه شده توسط کرانزا تورس [۲۸] شبیه سازی می شوند. در نهایت، پوشش نهایی و خاک بتن ($Soil-Crete$) ایجاد شده در اطراف لوله های فورپولینگ، به صورت المان حجمی مدل سازی می شوند (شکل ۷ و جدول ۲). لازم به ذکر است که به المان های حجمی مدل موهر کلوبم اختصاص داده می شود [۲۹] و [۳۰]. فرآیند ساخت کامل تونل با تجزیه و تحلیل عددی از طریق یک روش گام به گام شبیه سازی می شود. فاصله دهانه نگهداری نشده در مدل سازی عددی در نظر گرفته می شود تا شرایط واقعی حفاری تونل مورد مطالعه را دقیق و واقع بینانه شبیه سازی شود. همچنین، با استفاده از روش کاهش تنش، تأخیر در نصب سیستم نگهداری و تقسیم بار بین زمین و سیستم نگهداری لحاظ می شود [۳۱].

جدول ۲- خصوصیات عناصر حجمی در مدل سازی

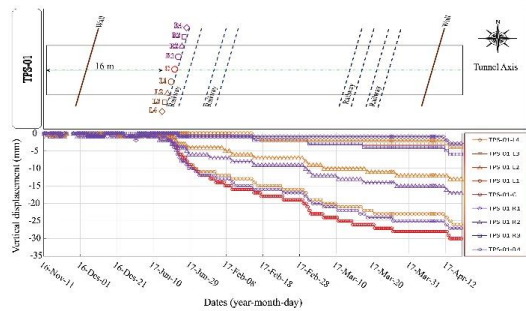
وزن kg/m^3	مدول یانگ Gpa	پواسون	زاویه اصطکاک deg	چسبندگی KPa	نوع
۱۶۰۰	۰/۲	۰/۳	۲۸	۲۹/۵	خاک
۲۳۰۰	۲/۶	۰/۲۵	۳۵	۴۲۰۰	بتن-خاک
۲۴۰۰	۲۰	۰/۲	-	-	لاینینگ

جدول ۳- خصوصیات سیستم های پیش نگهدارنده

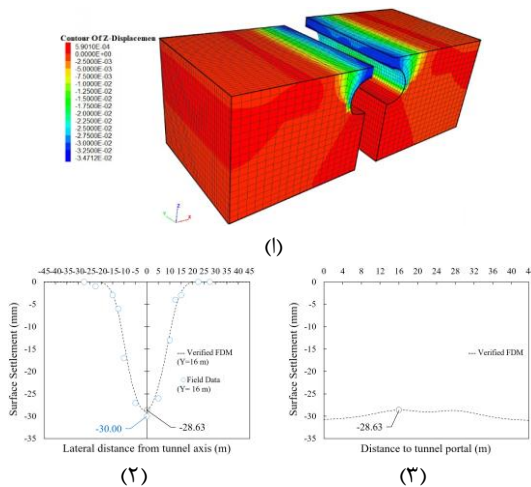
وزن kg/m^3	مدول یانگ Gpa	پواسون	محیط m	گشتاور قطبی m^4	نوع
۱۶۰۰	۳۰	۰/۳	۳/۳۲	۲۹/۵	تیر پیشرو
۲۳۰۰	۲۰۰	۰/۳	۰/۲۸	۴۲۰۰	فورپولینگ

جدول ۴- خصوصیات سیستم های نگهداری ترکیبی

مدول یانگ Gpa	پواسون	ضخامت cm	نوع
۰/۲	۰/۳	۲۵	سیستم نگهداری دائمی
۲/۶	۰/۲۵	۳۵	سیستم نگهداری موقت



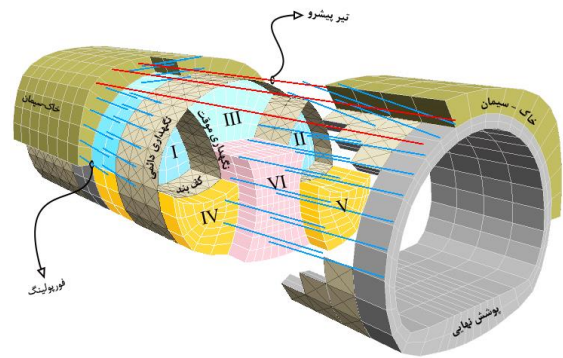
شکل ۱۱- نمودار جابجایی قائم نقاط اندازه‌گیری نشست سطح زمین نسبت به زمان



شکل ۱۲- (۱) کانتورهای جابجایی قائم برای مدل عددی تأیید شده
(۲) مقایسه نتایج مدل عددی تأییدشده با *Verified FDM*
داده‌های به‌دست آمده از ایستگاه نشست‌سنجی *TPS-01* (۳)
پروفیل طولی به‌دست آمده از مدل عددی تأیید شده

۵- روش تفاضل محدود تصادفی

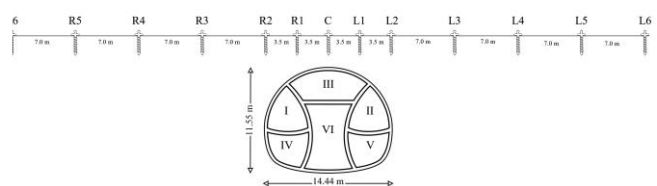
اخیراً، با پیشرفت دانش نرم‌افزاری و فناوری، استفاده از تئوری میدان تصادفی عناصر محدود بیشتر مورد استفاده قرار گرفته است تا بتوان از طریق آن تأثیر تغییرپذیری مکانی پارامترهای خاک را بر روی نشست سطح به دلیل تونل سازی بررسی کرد. بنابراین برای استفاده از این روش، میدان تصادفی پارامترهای خاک به مدل عددی عناصر محدود اختصاص داده شده و از دستورات عناصر محدود برای انجام تجزیه و تحلیل‌های احتمالاتی استفاده می‌شود؛ در این بخش، سعی می‌شود تا دستورات تفاضل محدود جهت تولید میدان تصادفی جایگزین دستورات المان محدود شود؛ برای این منظور از نرم‌افزار تفاضل محدود $FLAC^{3D}$ و زبان $FISH$ تعبیه شده در این نرم‌افزار که ابزاری کارآمد برای اعمال میدان‌های تصادفی به مدل عددی است، استفاده شده است.



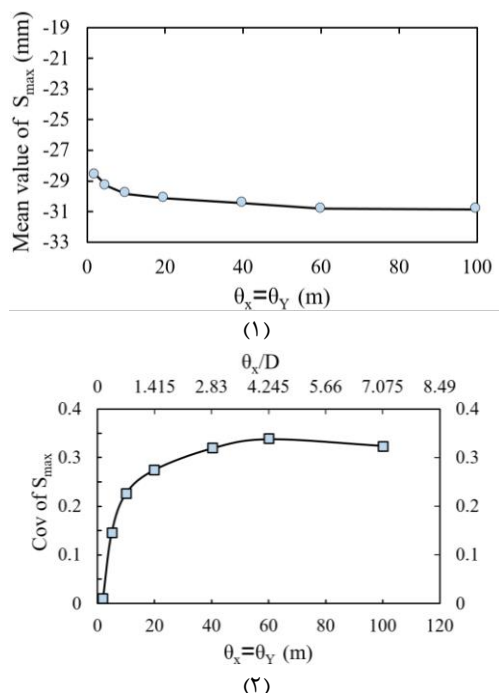
شکل ۹- مراحل حفاری تونل و سیستم‌های نگهداری شبیه‌سازی شده در مدل عددی

۴-۳- صحت سنجی مدل عددی

قبل از اختصاص میدان تصادفی به شبکه تفاضل محدود، مدل عددی باید بر اساس داده‌های به‌دست آمده از ابزارهای سطحی صحت سنجی شود. برای این منظور جهت تأیید مدل عددی، داده‌های به‌دست آمده از یک ایستگاه ابرابندی (در فاصله ۱۶ متری از پرتال شرقی تونل) مدنظر قرار گرفته است. شکل ۱۱ سطح مقطع ایستگاه ابرابندی سطحی و محل جانمایی هریک از نقاط نشست سنجی را نشان می‌دهد. همچنین شکل ۱۲ منحنی‌های زمان - نشست سطح زمین را برای هریک از نقاط نشست سنجی نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۱۳ نشان داده شده است اطلاعات به‌دست آمده از مدل عددی در فاصله ۱۶ متری از پرتال شرقی، 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 تأییدشده (*Verified Model*) استفاده کرد.



شکل ۱۰- سطح مقطع یک ایستگاه نشست سنجی و جانمایی نقاط اندازه‌گیری و فواصل آن‌ها از محور تونل



شکل ۱۳- (۱) تغییرات میانگین و (۲) ضریب تغییرات حداکثر نشست سطح زمین به ازای مقیاس نوسان

همان‌طور که از شکل ۱۳ مشخص است تغییرات میانگین و ضریب تغییرات حداکثر نشست سطح زمین برای مقیاس نوسان ۶۰ متر به یک مقدار ثابت میل می‌کند. در این حالت شرایط تنوع فضایی مدول یانگ میدان تصادفی در مدل عددی به شرایط تغییرات مدول یانگ خاک پروژه مورد مطالعه بیشتر نزدیک می‌شود و به عبارتی می‌توان گفت شرایط خاک برای مدل عددی بیشتر به واقعیت نزدیک می‌شود. بنابراین تغییرپذیری مکانی مدول یانگ خاک با مقیاس نوسان ۶۰ متر به‌عنوان پایه محاسبات بعدی جهت بررسی تأثیر سیستم پیش نگهدارنده تیر پیشرو لحاظ می‌گردد.

۶- تأثیر تیر پیشرو بر نشست سطح زمین

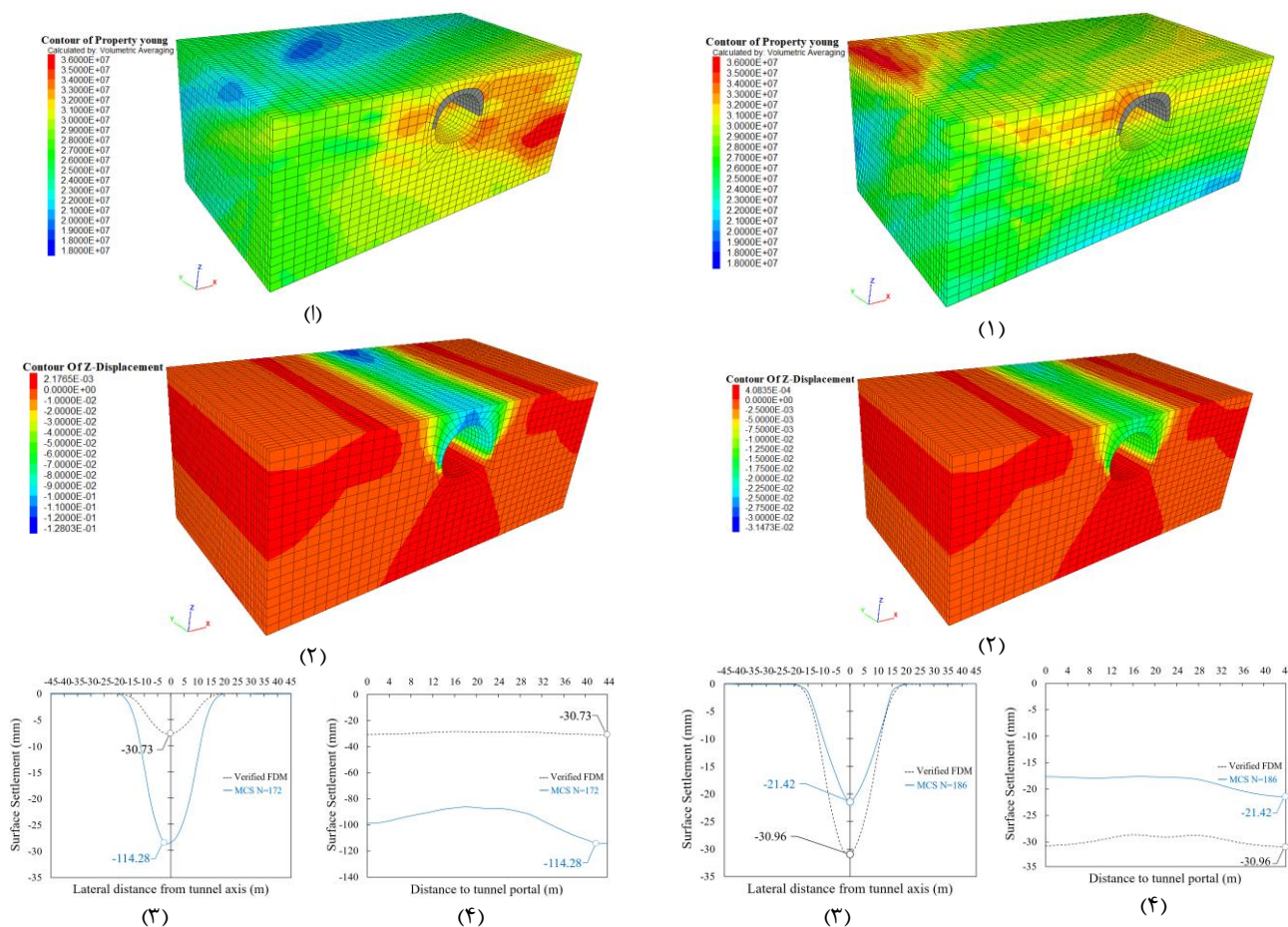
جهت بررسی سیستم پیش نگهدارنده تیر پیشرو بر روی نشست سطح زمین، فقط مدول یانگ به‌صورت متغیر در یک میدان تصادفی سه‌بعدی با مقیاس نوسان ۶۰ متر در محاسبات لحاظ می‌شود. سپس دو سناریوی وجود تیر پیشرو و عدم وجود تیر پیشرو برای تحلیل نشست سطح زمین مورد توجه قرار گرفت. به‌طور مثال شکل ۱۴ میدان تصادفی مدول یانگ خاک و جابجایی‌های قائم (مقیاس نوسان برابر با ۶۰ متر و شبیه‌سازی مونت‌کارلو شماره ۱۸۶ می‌باشد) را هنگامی که از سیستم پیش نگهدارنده تیر پیشرو استفاده شده است، نشان می‌دهد.

۵-۱- نحوه ایجاد میدان تصادفی

با مدل عددی تأییدشده در بخش قبل، می‌توان میدان‌های تصادفی را در فضای سه‌بعدی شبیه‌سازی کرد. برای این منظور، مختصات مرکز تمام زون‌های 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 تکامل‌یافته و گسترش پیدا کرده است. همان‌طور که در بخش دو ذکر شد، از بین پارامترهای خاک فقط مدول یانگ به‌صورت تصادفی فرض می‌شود و مابقی پارامترهای خاک از جمله نسبت پواسون، وزن، زاویه اتساع، ضریب چسبندگی و زاویه اصطکاک مقادیر غیر تصادفی بر اساس جدول ۱ در نظر گرفته می‌شود. همچنین در اینجا از توزیع لاگ-نرمال برای توصیف تنوع مدول یانگ [۳۲] با میانگین ۲۷ مگا پاسکال و ضریب تغییرات ۰/۲ استفاده می‌شود. همان‌طور که در بخش ۲ ذکر شد، برای تولید میدان تصادفی از تابع‌نمایی (۱) به‌وسیله الگوریتم ارائه‌شده توسط چنگ و جی‌ها [۳۳] بر اساس بسط سری فوریه استفاده 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 با حل معادلات (۴) و (۵) به دست می‌آیند و میدان تصادفی استاندارد نرمال تولیدشده با استفاده از تابع (۶) ایجاد 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 (به‌عنوان مثال ۲، ۵، ۱۰، ۲۰، ۴۰، ۶۰ و ۱۰۰ متر) در نظر گرفته می‌شوند. روش مورد استفاده برای نمونه‌گیری آماری در مطالعه حاضر روش مونت‌کارلو است. لازم به ذکر است که شبیه‌سازی مونت‌کارلو از مزایای سادگی مفهومی و دقت در نتایج برخوردار است. با این حال، اگر از شبیه‌سازی مونت‌کارلو و روش‌های عددی باهم استفاده شود، معمولاً بسیار وقت‌گیر است [۱۶]. بنابراین در اینجا جهت افزایش جامعه آماری، برای هر مقدار مقیاس نوسان، ۱۰۰۰ عملیات تصادفی به‌وسیله شبیه‌سازی مونت‌کارلو انجام می‌شود.

۵-۲- تأثیر تغییرپذیری مکانی مدول یانگ

همان‌طور که در بخش قبل ذکر شد به ازای هر مقیاس نوسان ۱۰۰۰ شبیه‌سازی مونت‌کارلو انجام می‌شود. سپس برای هر بار اجرای روش مونت‌کارلو حداکثر نشست سطح زمین (*Maximal Surface Settlement* (S_{max})) به دست می‌آید و بر اساس آن منحنی نشست سطح زمین ترسیم می‌شود. شکل ۱۳-۱ و ۱۳-۲ به ترتیب تغییرات میانگین و ضریب تغییرات (*Coefficient Of Variation (COV)*) حداکثر نشست سطح زمین را به ازای هر مقیاس نوسان نشان می‌دهد.



شکل ۱۴- (۱) کانتورهای مدول یانگ، (۲) کانتورهای جابجایی‌های قائم، (۳) منحنی شامل بیشترین نشست قائم در یک مقطع عرضی و (۴) در یک مقطع طولی در صورت استفاده از تیر پیشرو ($SO = 60$ m و $MCS = 186$).

شکل ۱۵- (۱) کانتورهای مدول یانگ، (۲) کانتورهای جابجایی‌های قائم، (۳) منحنی بیشترین نشست قائم در یک مقطع عرضی و (۴) در یک مقطع طولی در صورت عدم استفاده از تیر پیشرو ($SO = 60$ m و $MCS = 172$).

با توجه به شکل ۱۵-۲ و ۱۵-۳ حداکثر نشست سطح زمین در مکانی خارج از محور تونل ایجاد می‌شود و بزرگی نشست سطح زمین در پرتال شرقی نسبت به پرتال غربی مشهود است (شکل ۱۵-۲ و ۱۵-۴). در نهایت برای هر دو حالت در نظر گرفته شده (وجود و عدم وجود سیستم پیش نگهدارنده تیر پیشرو) ۱۰۰۰ شبیه‌سازی مونت‌کارلو با مقیاس نوسان ۶۰ متر انجام می‌شود (شکل ۱۶ و ۱۷). با توجه به شکل‌های ۱۶ و ۱۷ حداکثر نشست سطح زمین هنگامی که از سیستم پیش نگهدارنده تیر پیشرو استفاده نمی‌شود ۴۹ درصد افزایش می‌یابد. جدول ۵ نیز مقادیر و درصد تغییرات را برای دو سناریو مورد نظر نشان می‌دهد.

با توجه به شکل ۱۴-۴ تغییرات در بزرگی نشست سطح زمین در پرتال غربی ($Y=44$) بیشتر از پرتال شرقی ($Y=0$) است زیرا به دلیل تغییرپذیری مکانی مدول یانگ، مناطق ضعیف‌تر در این ناحیه قرار می‌گیرند (شکل ۱۴-۱). لازم به ذکر است با اینکه مناطق قوی در پرتال غربی ایجاد شده است ولی چون در محدوده تأثیر تونل نیست اثری بر کاهش نشست حداکثر سطح ندارد.

شکل ۱۵ نیز میدان تصادفی مدول یانگ خاک و جابجایی‌های قائم (مقیاس نوسان برابر با ۶۰ متر و شبیه‌سازی مونت‌کارلو شماره ۱۷۲ هست) را هنگامی که از سیستم پیش نگهدارنده تیر پیشرو استفاده نشده است، نشان می‌دهد. در اینجا نیز به دلیل تغییرپذیری مکانی مدول یانگ مناطق ضعیف‌تر در محدوده پرتال غربی ایجاد می‌شود (شکل ۱۵-۱).

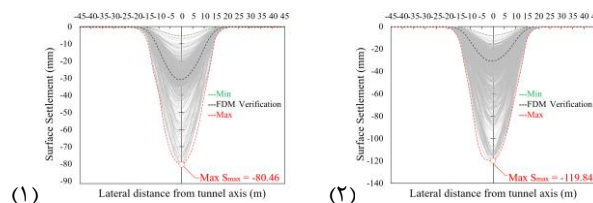
تصادفی ضعیف و یا قوی در مدل می‌شود. بنابراین مکان حداکثر نشست سطح به صورت تصادفی است که باید برای تحلیل اثر سیستم پیش نگهدارنده تیر پیشرو بر نشست سطح، تغییرپذیری خصوصیات خاک در محاسبات لحاظ شود.

۳- با توجه به دو سناریو در نظر گرفته شده می‌توان به نقش اساسی سیستم پیش نگهدارنده تیر پیشرو در کاهش قابل توجه حداکثر نشست سطح زمین از ۱۲۰ میلی‌متر به ۸۰ میلی‌متر اشاره کرد (جدول ۵).

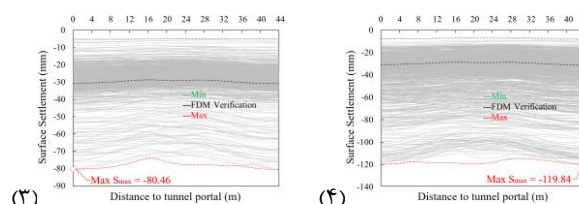
۴- مکان حداکثر نشست سطح زمین فقط وابسته به تغییرپذیری مکانی مدول یانگ خاک هست درحالی‌که بزرگی آن هم به سیستم پیش نگهدارنده تیر پیشرو و هم تغییرپذیری مکانی مدول یانگ وابسته است.

۸- منابع ها

- [1] Moosavi, E., Shirinabadi, R., Rahimi, E., & Gholinejad, M. (2018). Numerical Modeling of Ground Movement due to Twin Tunnel Structure of Esfahan Subway, Iran. *Journal of mining science*, 53(4), 663-675. DOI:10.1134/S1062739117042655. ISSN:1062-7391
- [2] Shirinabadi, R., & Moosavi, E. (2016). Twin tunnel behavior under static and dynamic loads of Shiraz metro, Iran. *Journal of mining science*, 52(3), 461-472. DOI:10.1134/S1062739116030669. ISSN:1062-7391
- [3] Polanin, P., Kowalski, A., & Walentek, A. (2019). Numerical simulation of subsidence caused by roadway system. *Archives of Mining Sciences*, 64(2). DOI:10.24425/ams.2019.128690. ISSN:0860-7001
- [4] Wu, Y., Bao, H., Wang, J., & Gao, Y. (2021). Probabilistic analysis of tunnel convergence on spatially variable soil: The importance of distribution type of soil properties. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 109, 103747. DOI:10.1016/j.tust.2020.103747. ISSN:0886-7798
- [5] Cheng, H., Chen, J., Chen, R., & Chen, G. (2019). Comparison of Modeling Soil Parameters Using Random Variables and Random Fields in Reliability Analysis of Tunnel Face. *International Journal of Geomechanics*, 19(1), 04018184. DOI:10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0001330. ISSN: 5622.0001330.
- [6] Dasaka, S., & Zhang, L. (2012). Spatial variability of in situ weathered soil. *Géotechnique*, 62(5), 375-384. DOI:10.1680/geot.8.P.151.3786. ISSN:0016-8505
- [7] Marinos, V., Goricki, A., & Malandrakis, E. (2019). Determining the principles of tunnel support based on the engineering geological behaviour types: example of a tunnel in tectonically disturbed heterogeneous rock in



شکل ۱۶- منحنی حداکثر نشست سطح زمین در یک مقطع قائم (۱) باوجود تیر پیشرو و (۲) بدون تیر پیشرو با ۱۰۰۰ شبیه‌سازی مونت کارلو و مقیاس نوسان ۶۰ متر



شکل ۱۷- منحنی حداکثر نشست سطح زمین در یک مقطع افقی (۱) باوجود تیر پیشرو و (۲) بدون تیر پیشرو با ۱۰۰۰ شبیه‌سازی مونت کارلو و مقیاس نوسان ۶۰ متر

جدول ۵- نتایج سناریوها بر اساس ۱۰۰۰ شبیه‌سازی مونت کارلو

درصد افزایش	بدون تیر پیشرو	با تیر پیشرو	میانگین نشست
۳۵٪/۵	۴۱/۸ mm	۳۰/۹ mm	میانگین نشست
۵۲٪/۸	۸/۱ mm	۵/۳ mm	حداقل نشست
۴۹٪	۱۲۰ mm	۸۰/۵ mm	حداکثر نشست
۶۱٪/۷	۰/۵۵	۰/۳۴	ضریب تغییرات

۷- نتیجه گیری

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

۱- مقدار میانگین نشست سطح زمین در یک میدان تصادفی تقریباً برابر با مقدار حداکثر نشست زمین به دست آمده از داده‌های ابزار دقیق است، اما با توجه به تغییرات قابل توجه ضریب تغییرات، نادیده گرفتن تغییرپذیری مکانی می‌تواند به دست کم گرفتن خطر نشست بیش از حد زمین منجر شود.

۲- تغییرپذیری مکانی مدول یانگ خاک الگوهای مختلفی را در شکل کانتورهای مدول یانگ ایجاد می‌کند که سبب ایجاد مناطق

- Random Measurement Errors. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 123(5), 393-401. DOI:10.1061/(ASCE)1090-0241(1997)123:5(393). ISSN:
- [19] Bagińska, I., Kawa, M., & Janecki, W. (2016). Estimation of spatial variability of lignite mine dumping ground soil properties using CPTu results. *Studia Geotechnica et Mechanica*, 38(1), 3-13. DOI:10.1515/sgem-2016-0001. ISSN:2083-831X
- [20] Cami, B., Javankhoshdel, S., Phoon, K.-K., & Ching, J. (2020). 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(4), 03120002. DOI:10.1061/AJRUA6.0001083.
- [21] Wang, M.-Y., Liu, Y., Ding, Y.-N., & Yi, B.-L. (2020). Probabilistic stability analyses of multi-stage soil slopes by bivariate random fields and finite element methods. *Computers and Geotechnics*, 122, 103529, 0266-352X
- [22] Lumb, P. (1966). The variability of natural soils. *Canadian geotechnical journal*, 3(2), 74-97. DOI:10.1139/t66-009. ISSN:0008-3674
- [23] Fenton, G. A., & Griffiths, D. V. (2008). *Risk assessment in geotechnical engineering* (Vol. 461). John Wiley & Sons New York. ISBN:978-0-470-17820-1.
- [24] Karamniayi, F. M., & Dehghan, A. (2019). 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.
- [25] Taromi, M., Eftekhari, A., Hamidi, J. K., & Aalianvari, A. (2017). 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(2), 713-729. DOI:10.1007/s10064-016-0862-x. ISSN:1435-9529
- [26] Kawa, M., & Puła, W. (2019). 3D bearing capacity probabilistic analyses of footings on spatially variable c - ϕ soil. *Acta Geotechnica*. DOI:10.1007/s11440-019-00853-3. ISSN:1861-1125/1861-1133
- [27] Alpan, I. (1967). The empirical evaluation of the coefficient K_0 and K_{OR} . *Soils and foundations*, 7(1), 31-40. DOI:10.3208/sandf1960.7.31. ISSN:0038-0806
- [28] Carranza-Torres, C., & Diederichs, M. (2009). 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(5), 506-532. DOI:10.1016/j.tust.2009.02.001. ISSN:0886-7798
- [29] Dehghani, N. L., Rahimi, M., Shafieezadeh, A., & Padgett, J. E. (2020). Parameter Estimation of a Fractional Order Soil Constitutive Model Using KiK-Net Downhole Array Data: A Bayesian Updating Approach. Geo-Congress 2020: Geotechnical Serbia. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 78(4), 2887-2902. DOI:10.1007/s10064-018-1277-7. ISSN:1435-9529
- [8] Griffiths, D. V., Huang, J., & Fenton, G. A. (2012). Risk Assessment in Geotechnical Engineering: Stability Analysis of Highly Variable Soils. In *Geotechnical Engineering State of the Art and Practice* (pp. 78-101). <https://doi.org/10.1061/9780784412138.0004>
- [9] Mollon, G., Dias, D., & Soubra, A.-H. (2013). Probabilistic analyses of tunneling-induced ground movements. *Acta Geotechnica*, 8(2), 181-199. DOI:10.1007/s11440-012-0182-7. ISSN:1861-1125
- [10] Miro, S., König, M., Hartmann, D., & Schanz, T. (2015). A probabilistic analysis of subsoil parameters uncertainty impacts on tunnel-induced ground movements with a back-analysis study. *Computers and Geotechnics*, 68, 38-53. DOI:10.1016/j.compgeo.2015.03.012. ISSN:0266-352X
- [11] Rangelova, E., & Quinn, A. (1999). Analysis and synthesis of three-dimensional Gaussian Markov random fields. Proceedings 1999 International Conference on Image Processing (Cat. 99CH36348),
- [12] Cheng, H., Chen, J., Chen, R., Huang, J., & Li, J. (2019). Three-dimensional analysis of tunnel face stability in spatially variable soils. *Computers and Geotechnics*, 111, 76-88. DOI:10.1016/j.compgeo.2019.03.005. ISSN:0266352 X
- [13] Phoon, K.-K., & Kulhawy, F. H. (1999). Characterization of geotechnical variability. *Canadian geotechnical journal*, 36(4), 612-624. DOI:10.1139/t99-038. ISSN:0008-3674
- [14] Fenton, G. A., & Griffiths, D. (2003). Bearing-capacity prediction of spatially random c ϕ soils. *Canadian geotechnical journal*, 40(1), 54-65. DOI:10.1139/t02-086. ISSN:0008-3674
- [15] Li, D.-Q., Jiang, S.-H., Cao, Z.-J., Zhou, W., Zhou, C.-B., & Zhang, L.-M. (2015). A multiple response-surface method for slope reliability analysis considering spatial variability of soil properties. *Engineering Geology*, 187, 60-72. DOI:10.1016/j.enggeo.2014.12.003. ISSN:0013-7952
- [16] Zhou, X.-P., Zhu, B.-Z., Juang, C.-H., & Wong, L. N. Y. (2019). A stability analysis of a layered-soil slope based on random field. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 78(4), 2611-2625. DOI:10.1007/s10064-018-1266-x. ISSN:1435-9529
- [17] Liu, W. K., Belytschko, T., & Mani, A. (1986). Random field finite elements. *International journal for numerical methods in engineering*, 23(10), 1831-1845. DOI:10.1002/nme.1620231004. ISSN:0029-5981
- [18] Jaksa, M. B., Brooker, P. I., & Kaggwa, W. S. (1997). Inaccuracies Associated with Estimating

[32]Huang, J., Lyamin, A., Griffiths, D., Krabbenhoft, K., & Sloan, S. (2013). Quantitative risk assessment of landslide by limit analysis and random fields. *Computers and Geotechnics*, 53, 60-67.DOI:10.1016/j.compgeo.2013.04.009.ISSN:0266-352X

[33]Jha, S. K., & Ching, J. (2013). Simplified reliability method for spatially variable undrained engineered slopes. *Soils and foundations*, 53(5), 708-719.DOI:10.1016/j.sandf.2013.08.008.ISSN:0038-0806

Earthquake Engineering and Special Topics,

[30]Dehghani, N. L., Rahimi, M., Shafieezadeh, A., & Padgett, J. E. (2020). Parameter Estimation of a Fractional Order Soil Constitutive Model Using KiK-Net Downhole Array Data: A Bayesian Updating Approach. In *Geo-Congress 2020* (pp. 346-356). <https://doi.org/10.1061/9780784482810.037>

[31]Möller, S. C. (2006). *Tunnel induced settlements and structural forces in linings*. Univ. Stuttgart, Inst. f. Geotechnik Stuttgart, Germany.ISBN:3921837545.