

بررسی عدم قطعیت پارامترهای ژئوتکنیکی در تحلیل اثر ساخت تونل جدید بر تونل موجود در محل تقاطع غیر هم سطح

مهسا تجدید خواجه، مسعود رنجبرنیا^{*}، وحید نورانی

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۲۵ دی ۱۳۹۶
بازنگری: ۱۰ فروردین ۱۳۹۷
پذیرش: ۲۶ اردیبهشت ۱۳۹۷
ارائه آنلاین: ۲ خرداد ۱۳۹۷

کلمات کلیدی:

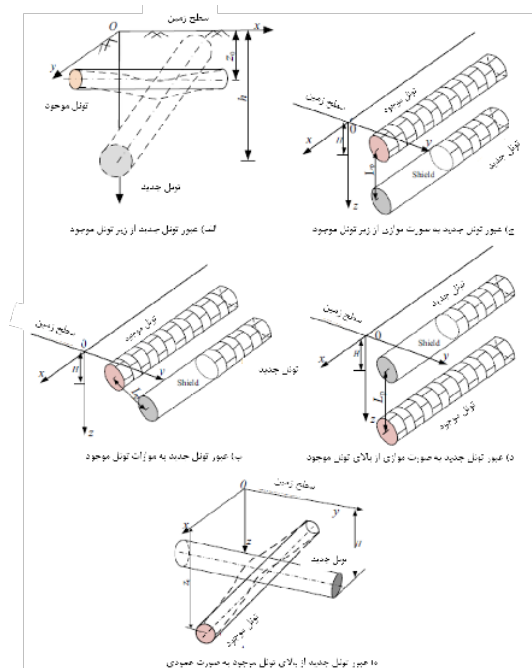
تونل‌های متقاطع
تحلیل احتمالاتی
روش مونت کارلو
پایداری
توزیع‌های احتمالاتی

چکیده: به دلیل وجود عدم قطعیت در تعیین پارامترهای ژئوتکنیکی، لازم است مسائل و به طور کلی پروژه‌های با اهمیت زیاد از دیدگاه احتمالاتی مورد مطالعه قرار گیرند. با توجه به اهمیت پایداری محل تقاطع غیر هم سطح تونل‌های شهری و به عبارتی اثر ساخت تونل جدید متقاطع غیر هم سطح بر تونل موجود، در این مطالعه محل عبور خط ۷ متروی تهران از بالای خط ۶ تحلیل گردید. بر این اساس، از نرم افزار $FLAC^{3D}$ جهت مدل سازی عددی مسئله مورد نظر و از روش مونت کارلو برای تولید اعداد تصادفی و اختصاص توزیع‌های احتمالاتی متغیرهای ژئوتکنیکی استفاده شد. برای هر مجموعه‌ای اعداد تصادفی، جابه‌جایی‌ها در چهار نقطه از تونل موجود ثبت شده و توزیع احتمالاتی مناسب با توجه به مقادیر میانه، میانگین و چولگی اختصاص داده شد. با استفاده از این توزیع‌ها می‌توان در مورد احتمال وقوع جابه‌جایی‌هایی بیشتر یا کمتر از مقداری خاص در هر نقطه و به طور کلی میزان ریسک موجود، قضاوت مهندسی انجام داد. نتایج نشان داد که علی‌رغم اینکه متغیرهای ورودی از توزیع نرمال تبعیت می‌کنند، پارامترهای خروجی توزیع متقارنی ندارند و از توزیع نرمال تبعیت نمی‌کنند. همچنین جابه‌جایی‌های به دست آمده از تحلیل با استفاده از روش قطعی با مقادیر میانگین به دست آمده از تحلیل‌های احتمالاتی یکسان نیست. به ازای کلیه پارامترهای تصادفی، احتمال وقوع جابه‌جایی‌های بزرگتر از مقدار میانگین در کف و سمت راست تونل موجود به دلیل حفاری تونل جدید به ترتیب ۵۶٪ و ۵۵/۵٪ است؛ در حالی که در تاج و سمت چپ، جابه‌جایی‌های بیش‌تر و کم‌تر از مقدار میانگین از احتمال یکسانی برای وقوع برخوردارند.

۱- مقدمه

امروزه به دلیل گسترش حمل و نقل شهری و نیاز به بهبود شرایط ترافیکی، تونل‌های شهری متعددی احداث می‌شوند. اغلب اوقات، این تونل‌ها به صورت موازی در مجاورت یکدیگر قرار گرفته و گاهی اوقات با یکدیگر متقاطع شده و تقاطع‌های غیر هم سطحی را تشکیل می‌دهند. در این حال با ساخت تونل جدید، شرایط تنش و تغییرشکل‌های زمین تغییر می‌یابد؛ به طوری که ایمنی و سرویس‌پذیری تونل موجود ممکن است به مخاطره بیافتد. لذا ضروری است تا اندرکنش بین ساخت تونل جدید و تونل موجود مورد مطالعه قرار گیرد.

در شکل ۱، نحوه‌ی قرارگیری تونل‌ها نسبت به هم نشان داده شده است که در پنج حالت مختلف می‌توانند مورد بررسی قرار گیرند (در شکل زیر، X و Y نشان دهنده‌ی جهت مثبت محورها، Z_0 فاصله مرکز تونل بالایی از سطح زمین، L_p فاصله مرکز به مرکز دو تونل و H فاصله مرکز تونل موجود از سطح زمین می‌باشد).



شکل ۱. موقعیت‌های نسبی تونل‌ها نسبت به هم [۱]

Fig. 1. Relative position of tunnels [1]

^{*}نویسنده عهده‌دار مکاتبات: m.ranjbarnia@tabrizu.ac.ir

موجود پیرامون تاج می‌شود. لذا پوشش شاتکریت موجود در تاج باید قبل از عبور تونل جدید ضخیم‌تر شود. بنابراین آثار اندرکنش بین تونل‌های متقاطع عمود بر هم می‌تواند با دقت در انتخاب توالی ساخت آن‌ها به حداقل رسانده شود.

استانداردینگ و همکاران با مدل‌سازی عددی و تطابق نتایج آن با مشاهده‌های محلی به تأثیر ساخت تونل جدید از زیر تونل موجود در لندن پرداختند. در این مطالعه توزیع تنش در سیستم نگهداری تونل موجود و همچنین جابه‌جایی‌های سطح زمین و تونل موجود مورد بررسی قرار گرفت و نتایج مشاهده‌های محلی به دست آمده از ابزارگذاری و مدل‌سازی عددی تطابق مناسبی را نشان دادند [۶].

جمع‌بندی پژوهش‌های انجام شده نشان می‌دهد که تحلیل این مسأله (و به طور کلی تقریباً تمام مسائل ژئوتکنیکی) و همچنین نتیجه‌گیری آن‌ها با استفاده از مقادیر به اصطلاح "قطعی" صورت می‌گیرد به این مفهوم که یک مقدار میانگین برای تمامی پارامترهای مؤثر در نظر گرفته می‌شود و نتیجه تحلیل و مدل‌سازی حاصل از آن نیز به صورت یک مقدار مشخص بیان می‌شود. این در حالی است که تمامی فرآیندهای طبیعی و از طرفی پروژه‌های طراحی شده توسط انسان‌ها در معرض عدم قطعیت^۳ و تغییر می‌باشند [۷] و استفاده از یک مقدار مشخص و قطعی ممکن است انطباق نتایج تحلیل‌های انجام شده با واقعیت را با چالش مواجه کند. بر این اساس، جهت لحاظ نمودن عدم قطعیت‌های موجود در مسائل، استفاده از روش‌های احتمالاتی و تصادفی مطرح می‌شود که اخیراً توسط پژوهشگران ژئوتکنیک، به ویژه در مسائل حساس و پروژه‌های با اهمیت زیاد توصیه می‌شود تا علاوه بر حل موارد اشاره شده، بتوان قضاوت مهندسی را در تحلیل‌ها و طراحی کمی‌سازی کرد.

در رابطه با نگرش احتمالاتی به مسائل ژئوتکنیک، هوک احتمال گسیختگی شیروانی سائومائوپینگ^۵ را با استفاده از روش احتمالاتی هایپر لاتین کیوب^۶ تحلیل کرد [۸]. در این مطالعه، پارامترهای زاویه اصطکاک، چسبندگی، عمق ترک کششی، عمق آب در ترک کششی و نسبت شتاب زلزله به شتاب ثقل به عنوان متغیرهای تصادفی با توزیع‌های احتمالاتی مورد نظر (نرمال یا نمایی) در نظر گرفته شدند. نتایج نشان داد که توزیع بتا^۷ بر ضریب اطمینان پایداری شیروانی مورد نظر حاکم است، به طوری که احتمال گسیختگی شیروانی و از طرفی بیشترین احتمال مربوط با پایداری را نشان می‌داد.

ونگ و همکاران نیز از روش مونت کارلو در تحلیل احتمالاتی پایداری شیروانی استفاده کردند [۹]. در این مطالعه، تحلیل احتمالاتی گسیختگی شیروانی با استفاده از نمونه‌های تولید شده با روش مونت کارلو انجام گرفت و

در خصوص اندرکنش تونل‌ها پژوهش‌هایی با روش‌های مدل‌سازی فیزیکی و مشاهدات محلی، روش‌های تجربی، تحلیلی و مدل‌سازی عددی انجام گرفته است. فنگ و همکاران اثر ساخت تونل دوقلو از زیر تونل دوقلوی موجود را با استفاده از داده‌های به دست آمده از مشاهده‌های محلی مطالعه کردند [۲]. در این مطالعه از روش جمع آثار برای به دست آوردن پروفیل نشست تونل‌های موجود و سطح زمین استفاده شد. مقایسه بین پروفیل نشست کل تونل و سطح زمین نشان می‌دهد که پروفیل نشست تونل موجود و سطح زمین به ترتیب به شکل U و W می‌باشند که به دلیل تفاوت در سربار آن‌ها است. شکل W پروفیل نشست، نشان از انعطاف‌پذیری پوشش سگمندی تونل دارد. انعطاف‌پذیری تونل‌های موجود نیز سبب تغییر شکل پیوسته و ملایم زمین بالای تونل‌های جدید می‌شود.

دو و همکاران با مدل‌سازی سه بعدی در نرم‌افزار $FLAC^{3D}$ اثر حفاری تونل جدید به موازات و هم‌سطح تونل موجود را شبیه‌سازی کردند [۳]. هدف اصلی این مطالعه، ایجاد یک مدل سه بعدی کامل بود تا نیروهای سازه‌ای ایجاد شده در پوشش تونل‌های موجود و جابه‌جایی زمین اطراف تونل مورد بررسی قرار گیرد. نتایج به دست آمده نشان از تأثیر قابل توجه حفاری تونل جدید بر رفتار تونل موجود به ویژه در نواحی نزدیک‌تر به تونل موجود را دارد. آنها همچنین تأثیر حفاری تونل جدید موازی از بالا یا پایین تونل موجود را مدل‌سازی کردند [۴] و حداکثر و حداقل جابه‌جایی‌های قائم در پوشش تونل پایینی را به دست آوردند.

لیانگ و همکاران از یک روش تحلیلی برای مطالعه عبور تونل جدید متقاطع از بالای تونل موجود استفاده کردند [۱]. تونل موجود به عنوان یک تیر اولر-برنولی با سختی پیچشی مشخصی در نظر گرفته شد و تنش باربرداری با روش میندلین^۱ محاسبه شد و اندرکنش خاک و تونل با مدل وینکلر^۲ مدل‌سازی گردید. آن‌ها در این مطالعه به این نتیجه رسیدند که ناحیه‌ی واقع در فاصله‌ی سه برابر قطر تونل از طرفین محور مرکزی تونل موجود به عنوان منطقه تحت تأثیر نامیده می‌شود و خارج از این محدوده، تونل موجود تحت تأثیر حفاری تونل جدید قرار نمی‌گیرد.

لیو و همکاران با مدل‌سازی عددی $ABAQUS$ به مطالعه اثرات حفاری تونل جدید در منطقه‌ی سیدنی بر روی سیستم نگهدارنده‌ی تونل متقاطع غیر هم‌سطح عمود بر آن پرداختند [۵]. آن‌ها در مطالعات خود توجه ویژه‌ای به واکنش سیستم نگهدارنده‌ی تونل موجود در برابر ساخته شدن یک تونل جدید متقاطع متعامد غیرهم‌سطح و همچنین تفاوت رفتار سیستم نگهدارنده‌ی تونل موجود، هنگامی که تونل جدید از زیر یا بالای آن عبور کند، کردند. نتایج حاصل از این مطالعه نشان داد که آثار اندرکنش بین تونل‌های متقاطع غیر هم‌سطح عمود برهم در حین حفاری تونل جدید بیشتر از زمان اتمام ساخت است. همچنین عبور تونل متعامد جدید از بالای تونل موجود موجب افزایش قابل ملاحظه‌ی نیروهای کششی در سنگ‌دوزهای

3 Deterministic

4 Uncertainty

5 Sau Mau Ping

6 Hyper Latin cube

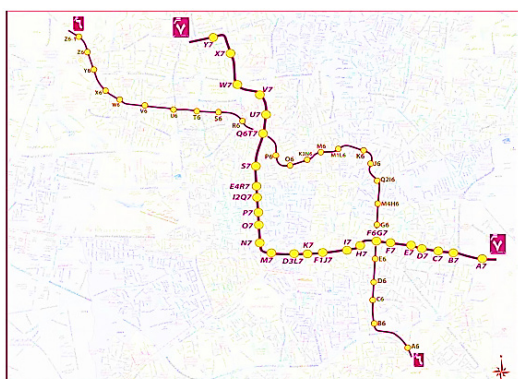
7 Beta Distribution

1 Mindlin

2 Winkler

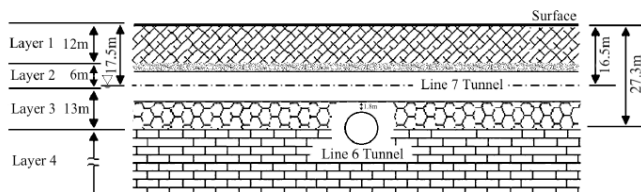
۲- مشخصات پروژه مورد مطالعه

خطوط ۶ و ۷ متروی تهران به ترتیب دارای طول تقریبی ۳۱ و ۲۷ کیلومتر هستند که در طول مسیر خود در دو نقطه با هم تقاطع غیرهم سطح تشکیل می‌دهند. تقاطع این دو خط در محل ایستگاه‌های F6 و G7 مورد مطالعه تحقیق حاضر است (شکل ۲) که در آن، تونل خط ۷ به فاصله‌ی ۱/۸ متری از بالای تونل خط ۶ عبور می‌کند. شکل ۳ پروفیل زمین‌شناسی محل تقاطع را نشان می‌دهد که از ۴ واحد خاکی تشکیل شده است و سطح آب زیرزمینی در عمق ۱۷/۵ متری از سطح زمین قرار دارد. خصوصیات ژئوتکنیکی لایه‌های مختلف بر اساس اطلاعات حاصل از گمانه‌های حفاری در نزدیکی محل تقاطع شامل عمق لایه‌های موجود، وزن مخصوص (γ_d)، درصد رطوبت (W)، چسبندگی (C)، زاویه اصطکاک (ϕ)، مدول الاستیسیته (E) و ضریب فشار جانبی حالت سکون (K_0) در جدول ۱ ارائه شده است [۱۵].



شکل ۲. پلان تقاطع خطوط ۶ و ۷ متروی تهران [۱۶]

Fig. 2. Plan view of intersections of Tehran subway lines 6 and 7 [16]



شکل ۳. پروفیل زمین‌شناسی محل تقاطع خطوط ۶ و ۷ متروی تهران [۱۶]

Fig. 3. Typical geological profile of intersection point of Tehran subway lines 6 and 7 [16]

تأثیر عدم قطعیت‌های مختلف بر احتمال گسیختگی شیروانی ارزیابی شد. در مطالعه‌ای دیگر که توسط پن و همکاران انجام شد، چهار پارامتر معیار خرابی هوک-براون یعنی مقاومت تک محوری سنگ بکر (σ_{ci}) و ثابت مقاومتی آن (m)، شاخص ژئولوژیکی توده سنگ (GSI) و فاکتور خرابی (D)، سه پارامتر ارتفاع، زاویه و نسبت عرض به ارتفاع شیروانی و وزن مخصوص سنگ به عنوان متغیرهای تصادفی انتخاب گردید [۱۰]. نتایج نشان داد که همبستگی بین خصوصیات مقاومتی توده سنگ، تأثیر ناچیزی بر توزیع احتمالاتی و احتمال گسیختگی دارد.

در رابطه با تحلیل پایداری تونل، هوک و مارینوس برای بخش ناپایداری از تونلی عمیق، شاخص ژئولوژیکی توده سنگ (GSI)، مقاومت فشاری تک محوری سنگ بکر و عمق تونل را به عنوان متغیرهای تصادفی با توزیع نرمال انتخاب کردند [۱۱]. کرنش تونل در دو حالت بدون سیستم نگهداری و با سیستم نگهداری برای مقادیری که از روش مونت کارلو برای متغیرها به دست آمده بود؛ محاسبه شده و توزیع احتمالاتی آن نیز به دست آمد. اورسته نیز از تکنیک مونت کارلو توزیع‌هایی را برای شاخص ژئولوژیکی توده سنگ و مشخصات مکانیکی مصالح سازه نگهبان به دست آورد [۱۲]. طبق نتایج این مطالعه می‌توان توزیع‌های احتمالاتی را برای ضرایب اطمینان به دست آورد و در نهایت از آنها در طراحی سازه نگهبان استفاده کرد.

از پژوهش‌های دیگر در زمینه تونل‌ها با رویکرد احتمالاتی می‌توان به تحقیقات پن و دیاس اشاره کرد که در آن امکان تغییرپذیری مکانی خصوصیات مقاومتی خاک‌ها (شامل چسبندگی و زاویه اصطکاک) بر پایداری جبهه‌ی حفاری تونل (مشکل از دو نوع خاک) مورد بررسی قرار گرفت [۱۳]. از روش مونت کارلو برای توزیع مقادیر استفاده شد و ملاحظه گردید که اثر همبستگی و تغییرپذیری مکانی این دو پارامتر تأثیر بسزایی در توزیع احتمالاتی فشار جبهه‌ی حفاری و احتمال خرابی آن دارد. همچنین مولون و همکاران با انجام تحلیل احتمالاتی بر تونل کم عمق دایروی که در آن پارامترهای مقاومت برشی و مدول الاستیسیته جزء متغیرهای تصادفی در نظر گرفته شده بود، نتیجه گرفتند که توزیع‌هایی غیر از توزیع نرمال برای متغیرهای تصادفی تأثیری بر مقدار شاخص اطمینان فشار جبهه‌ی حفاری ندارد [۱۴].

لیکن تاکنون مسئله اندرکنش تونل‌ها به صورت آنالیز تصادفی مورد بررسی قرار نگرفته است که خود یک مسئله با اهمیت بوده و عدم قطعیت‌های متعددی در آن دخالت دارند. از این رو در تحقیق حاضر، مسئله اندرکنش تونل‌های متقاطع غیر هم سطح با رویکرد احتمالاتی مطالعه شد. به این منظور، محل تقاطع غیر هم سطح خطوط ۶ و ۷ متروی تهران به عنوان مطالعه موردی انتخاب شد. مدل سازی مسئله مورد نظر با نرم افزار $FLAC^{3D}$ انجام شد و توزیع متغیرهای حاکم نیز به روش مونت کارلو به دست آمد. در نهایت نتایج حاصل در قالب توزیع‌های آماری ارائه شد.

جدول ۱. پارامترهای مهندسی مورد استفاده در طراحی‌های ژئوتکنیکی [۱۵]

Table 1. Engineering parameters used in geotechnical designs [15]

شماره لایه	شرح	عمق (m)	γ_d (kN/m ³)	w (%)	C (kg/cm ²)	ϕ (deg)	E (kg/cm ²)	K_0
۱	GC/SC	۰ - ۱۲	۱۶/۵	۴/۲	۰/۲	۳۰	۸۰۰	۰/۵
۲	SC/CL	۱۲ - ۱۸	۱۵/۵	۱۵	۰/۳	۲۵	۳۵۰	۰/۵۷۷
۳	GC/SM	۱۸ - ۳۱	۱۶	۱۸	۰/۱۵	۳۰	۱۳۰۰	۰/۵
۴	GC/SC	۳۱ <	۱۶	۱۹	۰/۱۲	۳۲	۱۲۰۰	۰/۴۷

۳- مدل سازی عددی با نرم افزار FLAC^{3D}

نرم افزار FLAC^{3D} یک برنامه تفاضل محدود از مجموعه نرم افزارهای ایتسکا می باشد که برای محیط های پیوسته به کار می رود. FLAC^{3D} بر اساس تحلیل لاگرانژی استوار است که برای مدل سازی تغییر شکل های بزرگ نیز مناسب می باشد. با این نرم افزار می توان مدل رفتاری سازه های خاکی، سنگی و یا سایر مواد را که دارای جریان پلاستیک در هنگام رسیدن به حد تسلیم هستند، شبیه سازی کرد. برای آنالیز تنش ها و تغییر مکان ها، مواد را به صورت شبکه هایی سه بعدی که از المان های چندوجهی تشکیل شده است، تعریف می کنند. هر المان مطابق با یک قانون تنش- کرنش خطی یا غیرخطی و در واکنش به نیروهای وارده یا شرایط مرزی رفتار می کند. این برنامه از قابلیت های زیادی برای تحلیل مسائل برخورددار است که عمده ترین کاربرد آن در مسائل ژئوتکنیک می باشد [۱۷].

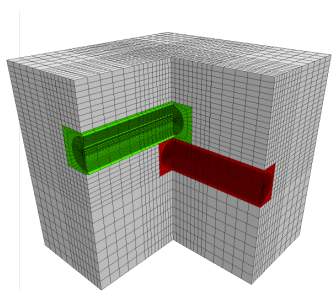
از نرم افزار FLAC^{3D} جهت مدل سازی سه بعدی مسئله مورد نظر استفاده شد. شکل ۶ مدل ساخته شده در نرم افزار و موقعیت تونل ها نسبت به هم را نشان می دهد که ابعاد $60\text{ m} \times 60\text{ m} \times 60\text{ m}$ با حساسیت سنجی میزان تغییر شکل تونل ها نسبت به تغییر محل مرزهای مدل به عنوان ابعاد مناسب آن انتخاب شده است.

لازم به ذکر است به منظور انتخاب ابعاد مناسب برای مدل سازی، آنالیز حساسیت بر اندازه مدل مورد نظر صورت گرفته است. ابعاد مناسب برای تونل از ۵ تا ۱۰ برابر شعاع تونل در اطراف متغیر است [۱۷]. از این رو در این مطالعه ابتدا ابعاد $90\text{ m} \times 90\text{ m} \times 90\text{ m}$ انتخاب شد و با توجه به زمان بر بودن تحلیل ها با تغییر ابعاد و مقایسه نتایج ابعاد مناسب انتخاب شد. به منظور کنترل، نقطه اول تاج تونل در صفحه ی $y=0$ و نقطه ی متناظر آن در سطح زمین به عنوان نقطه دوم انتخاب شدند. ابعاد مدل ها و همچنین نتایج به دست آمده در جدول ۲، شکل ۴ و شکل ۵ ارائه شده است.

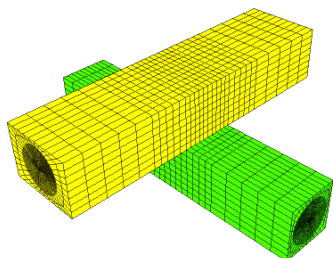
جدول ۲. ابعاد انتخاب شده برای مدل ها و مقایسه نتایج

Table 2. Selected dimensions for models and comparison of results

شماره مدل	ابعاد مدل در جهت X,Y,Z	مختصات نقطه ۱	مختصات نقطه ۲	جابه جایی قائم نقطه ۱ (cm)	جابه جایی قائم نقطه ۲ (cm)
۱	۹۰×۹۰×۹۰	(۴۵ ، ۰ ، -۲۳/۸۵)	(۴۵ ، ۰ ، ۰)	-۴/۸۷۴	-۲/۱۹۶
۲	۷۰×۷۰×۷۰	(۳۵ ، ۰ ، -۲۳/۸۵)	(۳۵ ، ۰ ، ۰)	-۴/۵۶۷	-۱/۹۷۸
۳	۶۰×۶۰×۶۵	(۳۰ ، ۰ ، -۲۳/۸۵)	(۳۰ ، ۰ ، ۰)	-۴/۲۱	-۱/۹۳۷
۴	۶۰×۶۰×۶۰	(۳۰ ، ۰ ، -۲۳/۸۵)	(۳۰ ، ۰ ، ۰)	-۴/۱۸۹	-۱/۹۱۳
۵	۵۰×۵۰×۵۰	(۲۵ ، ۰ ، -۲۳/۸۵)	(۲۵ ، ۰ ، ۰)	-۴/۱۸۱	-۱/۹۰۸



(الف)



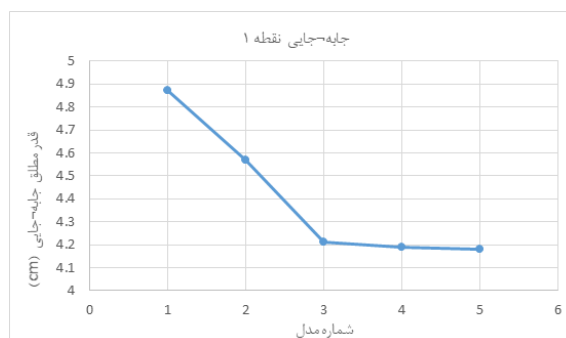
(ب)

شکل ۶. الف) شمای کلی مدل ساخته شده؛ ب) موقعیت تونل‌ها نسبت به هم

Fig. 6. a) Perspective view of generated model, b) Position of tunnels relative to each other

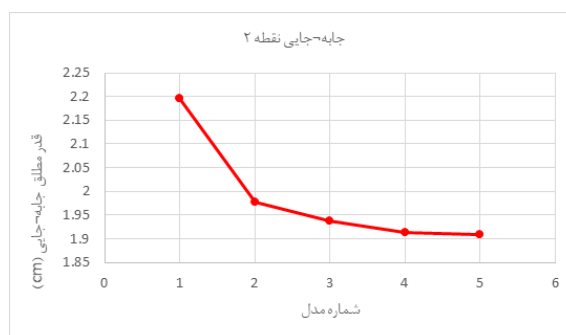
ابتدا تونل موجود (خط ۶) حفاری شده و پایدار شد و برقراری تعادل مدل موجود نیز مورد بررسی قرار گرفت. سپس تغییرشکل‌های به وجود آمده به مقدار صفر تنظیم گردید تا صرفاً تغییرشکل‌های تونل موجود در اثر احداث تونل جدید مطالعه شود. پس از آن، حفاری تونل جدید (خط ۷) به فاصله قائم ۱/۸ متری از بالای تونل موجود انجام شد. به دلیل استفاده از ماشین‌های حفاری سپری مکانیزه (TBM)، این حفاری بایستی به صورت گام‌به‌گام و تدریجی (و از سمت چپ به راست) و به قطر ۹ متر مدل‌سازی شود که برای این منظور، کدنویسی انجام گرفته است. هر گام حفاری به اندازه‌ی ۱/۵ متر بوده که برابر عرض یک حلقه سیستم نگهداری سگمنتی است.

در هر گام پس از حفاری، فشار نگهداری جبهه‌ی حفاری با توزیع دوزنقه‌ای و عمود بر جبهه‌ی حفاری اعمال شده که مقدار آن از فشار افقی وارد بر خاک در حالت سکون محاسبه شده است (شکل ۷). وزن ماشین حفاری (TBM) در ۶۰ درجه کف تونل مطابق معادله ۱ محاسبه شده [۱۸] و با فرض طول ۱۰/۵ متری TBM اعمال شده است (شکل ۸) [۳]. با هر گام پیشروی، دستگاه حفاری TBM نیز به اندازه‌ی ۱/۵ متر به جلو رانده می‌شود. در جدول ۳ مشخصات سپر دستگاه حفار آورده شده است.



شکل ۴. نمودار جابه‌جایی نقطه ۱ در مدل‌ها با ابعاد مختلف

Fig. 4. Displacement diagram of point 1 in models with different dimensions



شکل ۵. نمودار جابه‌جایی نقطه ۲ در مدل‌ها با ابعاد مختلف

Fig. 5. Displacement diagram of point 2 in models with different dimensions

با توجه به جدول ۲ مشاهده می‌شود که با انتخاب اندازه ابعاد کمتر از ۶۰ متر در هر جهت برای مدل مورد نظر جابه‌جایی در نقاط مورد نظر تغییر قابل ملاحظه‌ای نشان نمی‌دهد، بنابراین می‌توان گفت که ابعاد $60 \text{ m} \times 60 \text{ m}$ مناسبی برای مدل است و مرزها تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر سازه‌ی مدل‌سازی شده نخواهند داشت.

حرکت تمامی گره‌ها در طرفین مدل در هر دو جهت افقی مهار شد تا محیط بی‌نهایت در جهت افقی را مدل‌سازی کند و در ضمن امکان تغییر مکان در جهت قائم را داشته باشند. علاوه بر آن، گره‌های موجود در صفحه افقی کف مدل در جهت قائم نیز مهار شده‌اند. با توجه به جنس و تراکم خاک، از مدل رفتاری موهر-کولمب استفاده شد که رفتار تنش-کرنش آن، الاستیک پلاستیک کامل می‌باشد و مخصوص خاک‌های دانه‌ای و نرم می‌باشد.

که در این معادله W_{TBM} وزن کلی ماشین حفاری و L_{TBM} و D به ترتیب طول و قطر سپر می باشد. پس از هر مرحله حفاری، سیستم نگهداری سگمنتی با مشخصات مطابق جدول ۳ نصب می شود. با توجه به وجود فضای خالی بین جداره‌ی تونل و سیستم نگهداری، در هر گام از حفاری پس از نصب سیستم نگهداری، دوغاب تزریق می شود و فشار دوغاب که با استفاده از معادله (۲) محاسبه می شود، بر سیستم نگهداری و جداره‌ی تونل وارد می شود.

$$\sigma_{inj} = 1.2 \times \sigma_v \quad (2)$$

که در این معادله σ_v فشار سربار ناشی از وجود خاک در تاج تونل است [۳].

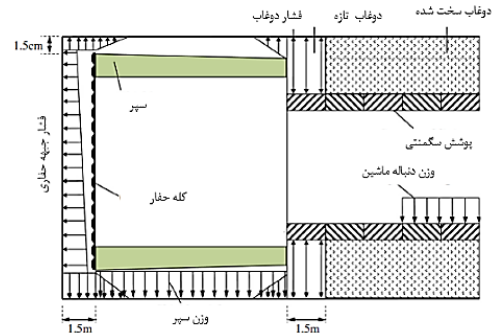
لازم به ذکر است که تغییر شکل های تونل موجود، پس از حفاری تونل جدید و فاصله گرفتن کافی از محل تقاطع ثبت شده و در قسمت نتایج بحث می شود.

۴- روش های آماری

در مسائل ژئوتکنیکی، متغیرهایی نظیر پارامترهای مقاومتی محیط، سربار وارد بر سازه و ... به لحاظ مکانی و گاهی به لحاظ زمانی مقادیر ثابتی نداشته بلکه مجموعه ای از مقادیر را اختیار می کنند [۸]. برای تحلیل در چنین شرایطی، استفاده از روش های احتمالاتی مطرح می شود؛ به ویژه اگر متغیرها از عدم قطعیت بالایی برخوردار بوده یا به طور کلی مسأله مورد نظر از اهمیت و حساسیت زیادی برخوردار باشد.

روش مونت کارلو^۱ تکنیکی است که بر مبنای انتخاب اعداد تصادفی با توزیع های احتمالاتی استوار است و روش مناسبی برای در نظر گرفتن عدم قطعیت ها است [۱۹]. در این روش، برای مجموعه مقادیر موجود هر پارامتر، یک توزیع احتمالاتی اختصاص داده می شود و یا اینکه با توجه به مقادیر میانگین و انحراف معیار و فرض حاکم بودن یک نوع توزیع مشخص برای یک پارامتر، اعداد تصادفی آن در دامنه ی مشخص تولید می شوند و یک توزیع احتمالاتی مناسب به آنها اختصاص داده می شود. مزیت استفاده از روش هایی مانند مونت کارلو هوشمندانه بودن تولید و انتخاب اعداد تصادفی است.

در مطالعه ی حاضر، پارامترهای چسبندگی و زاویه اصطکاک خاک لایه ی سوم که تونل موجود در آن قرار دارد و همچنین سربار موجود در سطح زمین به عنوان متغیرهای تصادفی در نظر گرفته شد. مقادیر میانگین و انحراف معیار این متغیرهای تصادفی با توجه به بیشترین و کمترین مقادیر احتمالی آن متغیر در جدول ۴ ارائه شده است. تولید اعداد تصادفی با توجه به مقادیر میانگین و انحراف معیار و سپس اختصاص توزیع احتمالاتی مربوط برای هر پارامتر در نرم افزار متلب (MATLAB) انجام گرفته است (شکل ۹). در این مطالعه فرض بر این است که پارامترهای ذکر شده از



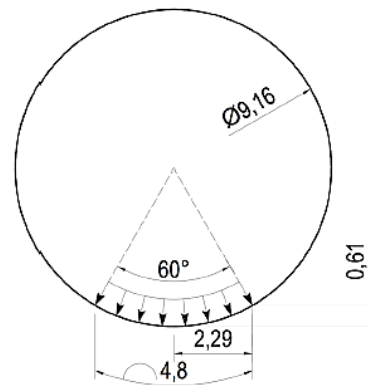
شکل ۷. مدل TBM پیشنهادی [۳]

Fig. 7. Layout of presented TBM model [3]

جدول ۳. مشخصات سپر دستگاه حفار و سگمنت های تونل ها [۱۶]

Table 3. Specifications of shield of tunnel boring machine and tunnel linings [16]

مشخصات سپر دستگاه حفار		
مدول الاستیسیته (GPa)	ضخامت (cm)	ضریب پواسون
۲۰۰	۱۰	۰/۳
مشخصات سگمنت های تونل های خط ۶ و ۷		
۳۰/۲	۳۵	۰/۲



شکل ۸. فشار ناشی از وزن TBM [۱۶]

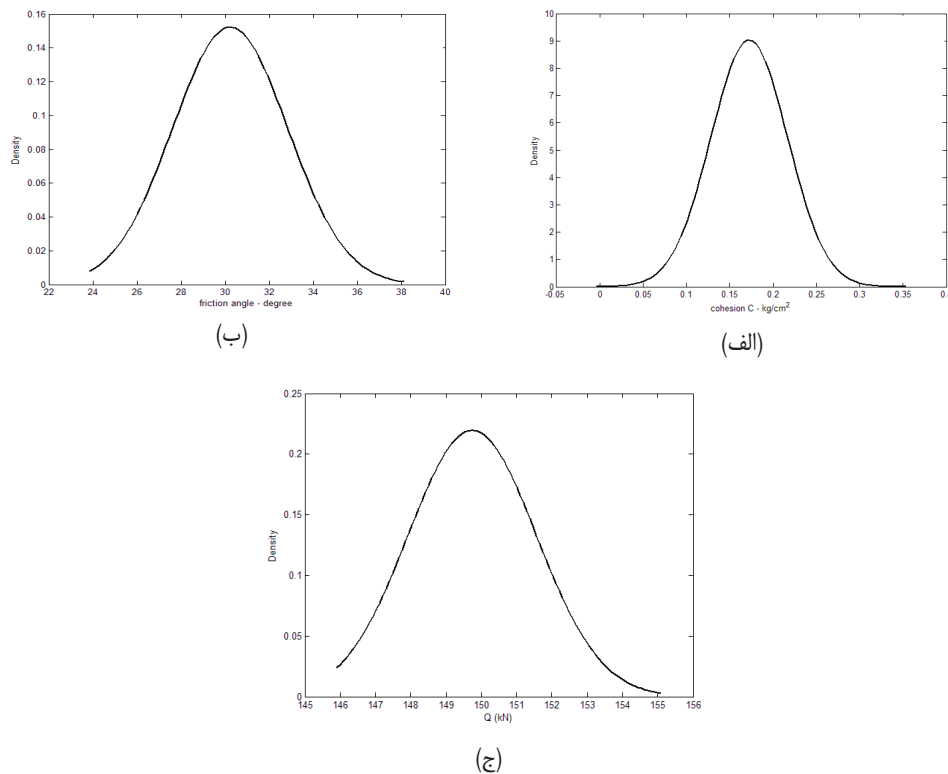
Fig. 8. Self-weight scheme of TBM [16]

$$P_{TBM} = \frac{W_{TBM}}{L_{TBM} \times \left(\frac{\pi \times D}{6}\right)} = \frac{7000}{10.5 \times \left(\frac{\pi \times 9.164}{6}\right)} = 139 \text{ kN} / \text{m}^2 \quad (1)$$

(جدول ۵) [۷]. مزیت استفاده از روش‌هایی مانند مونت کارلو در تولید اعداد تصادفی، هوشمندانه بودن آن و اختصاص توزیع مناسب برای اعداد مورد نظر است. به عبارتی، روش مونت کارلو به صورت تصادفی اما هوشمندانه این ۵ عدد را از توزیع نرمال انتخاب می‌کند، به گونه‌ای که نزدیک به مقادیر حداقل، حداکثر یا میانگین نباشند. جهت انجام تحلیل‌های عددی، اعداد انتخاب شده با یکدیگر ترکیب شده (جدول ۶) و به عنوان ورودی در نرم‌افزار $FLAC^{3D}$ مورد استفاده قرار گرفت تا رفتار تصادفی پارامترها مد نظر قرار گیرد و تأثیر تصادفی بودن پارامترها مورد بررسی قرار گیرد.

توزیع نرمال تبعیت می‌کنند و هدف به دست آوردن توزیع‌های احتمالاتی جابه‌جایی سیستم نگهداری تونل موجود می‌باشد. با توجه به نرمال بودن توزیع‌های احتمالاتی بیشترین احتمال وقوع مختص مقادیر میانگین است. لازم به ذکر است که در مواردی که اطلاعات کافی از مجموعه داده‌ها برای پارامترها در اختیار نباشد، در نظر گرفتن توزیع نرمال فرض صحیحی برای پارامترهای ژئوتکنیکی است [۸].

پس از تولید ۵۰ عدد تصادفی و اختصاص توزیع مناسب، برای هر پارامتر ۵ مقدار به عنوان اعداد تصادفی و بر مبنای روش مونت کارلو انتخاب شد



شکل ۹. نمودار توزیع احتمالاتی متغیرهای تصادفی، الف) چسبندگی، ب) زاویه اصطکاک، ج) سربار

Fig. 9. Probabilistic distributions of random variables, a) cohesion, b) friction angle, c) surcharge

جدول ۴. میانگین و انحراف معیار متغیرهای تصادفی

Table 4. Mean and standard deviation of random variables

پارامتر	میانگین	انحراف معیار
C (kg/cm ²)	۰/۱۵	۰/۰۳۵
φ (deg)	۳۰	۲/۵۱۶۶
Q (kN)	۱۵۰	۱/۶۶۶۷

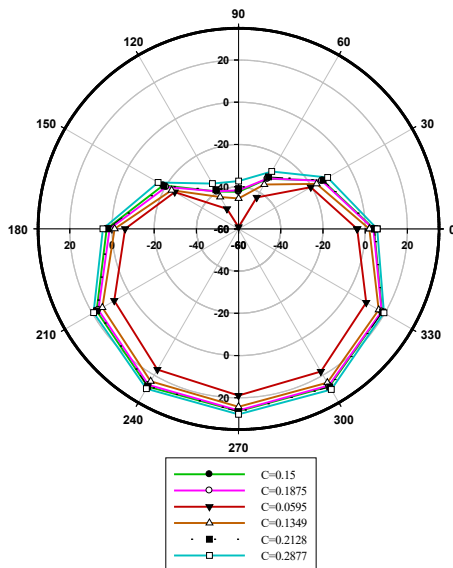
۵- نتایج و بحث

با توجه به اهمیت تغییر شکل تونل موجود، نتایج در قالب جابه‌جایی یکی از مقاطع محل تقاطع ارائه می‌شود. این نتایج به صورت نمودارهای قطبی جابه‌جایی و توزیع‌های احتمالاتی نشان داده می‌شود.

۵-۱- مطالعه پارامتریک اثر متغیرهای تصادفی بر جابه‌جایی‌های تونل

همانگونه که در شکل ۱۰ تا شکل ۱۲ مشاهده می‌شود، به دلیل فشار بار ناشی از وزن TBM و حفاری تونل جدید (خط ۷)، طرفین تونل عمیق‌تر (خط ۶) به سمت کناره‌ها و تاج و کف تونل به سمت پایین تغییر مکان می‌دهند که موجب توزیع مجدد تنش‌ها در آن محدوده می‌گردند. این تغییر مکان‌ها در تاج و کف تونل موجود بزرگ‌تر و در طرفین آن کوچک‌تر است که با کاهش پارامترهای مقاومتی چسبندگی و زاویه اصطکاک، این تغییر مکان‌ها بیش‌تر نیز می‌شوند. تغییرات سربار نیز تأثیر قابل ملاحظه‌ای در جابه‌جایی طرفین تونل ندارد و بیشترین جابه‌جایی در تاج تونل به ازای کم‌ترین مقدار سربار ایجاد می‌شود.

مقادیر تغییر مکان‌های ایجاد شده در تاج و کف تونل با افزایش چسبندگی به ازای مجموعه اعداد تصادفی به ترتیب ۰/۲۴۶٪، کاهش و ۰/۱٪ افزایش داشته است. همچنین این مقادیر به ازای تغییرات مجموعه اعداد تصادفی زاویه اصطکاک برای تاج و کف تونل به ترتیب نشان‌دهنده ۰/۱۶٪ کاهش و ۰/۰۵٪ افزایش است.



شکل ۱۰. نمودارهای جابه‌جایی سیستم نگهداری تونل موجود به ازای مجموعه اعداد تصادفی پارامتر چسبندگی

Fig. 10. Displacement in lining of existing tunnel for set of random numbers of cohesion

جدول ۵. اعداد تصادفی انتخاب شده برای پارامترها

Table 5. Selected random numbers for parameters

اعداد تصادفی C	اعداد تصادفی Φ	اعداد تصادفی Q (kN)
۰/۰۵۹۵	۲۵/۴۶۸۶	۱۴۶/۴۳۶
۰/۱۳۴۹	۲۷/۴۴۴۳	۱۴۷/۷۷
۰/۱۸۷۵	۲۸/۶۵۵	۱۴۹/۱۱۰۷
۰/۲۱۲۸	۳۲/۱۵۰۹	۱۵۲/۲۵۷۷
۰/۲۸۷۷	۳۶/۸۴	۱۵۴/۸۴۶۸

جدول ۶. ترکیب اعداد تصادفی جهت تحلیل‌های عددی در نرم افزار FLAC^{3D}

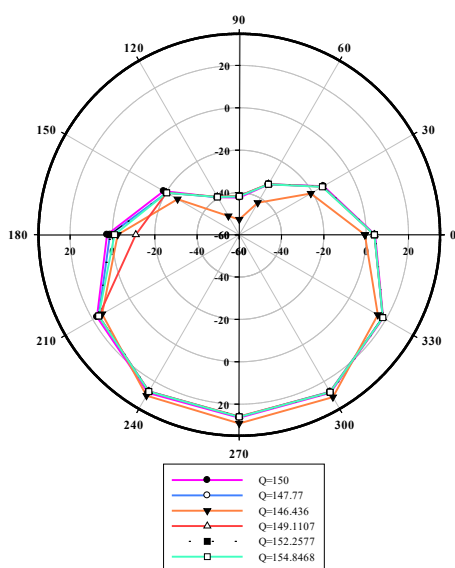
Table 6. Combination of random numbers for numerical analysis in FLAC^{3D} software

ردیف	C (kg/cm ²)	Φ (deg)	Q (kN)
۱	۰/۱۸۷۵	۲۷/۴۴۴۳	۱۴۷/۷۷
۲	۰/۰۵۹۵	۲۷/۴۴۴۳	۱۴۷/۷۷
۳	۰/۱۳۴۹	۲۷/۴۴۴۳	۱۴۷/۷۷
۴	۰/۲۱۲۸	۲۷/۴۴۴۳	۱۴۷/۷۷
۵	۰/۲۸۷۷	۲۷/۴۴۴۳	۱۴۷/۷۷
۶	۰/۱۸۷۵	۲۵/۴۶۸۶	۱۴۷/۷۷
۷	۰/۱۸۷۵	۲۸/۶۵۵	۱۴۷/۷۷
۸	۰/۱۸۷۵	۳۲/۱۵۰۹	۱۴۷/۷۷
۹	۰/۱۸۷۵	۳۶/۸۴	۱۴۷/۷۷
۱۰	۰/۱۸۷۵	۲۷/۴۴۴۳	۱۴۸/۴۳۶
۱۱	۰/۱۸۷۵	۲۷/۴۴۴۳	۱۴۹/۱۱۰۷
۱۲	۰/۱۸۷۵	۲۷/۴۴۴۳	۱۵۲/۲۵۷۷
۱۳	۰/۱۸۷۵	۲۷/۴۴۴۳	۱۵۴/۸۴۶۸
۱۴	۰/۱۵	۳۰	۱۵۰

جدول ۷. مقادیر جابه‌جایی (mm) به ازای مقادیر حداقل و حداکثر متغیرهای تصادفی

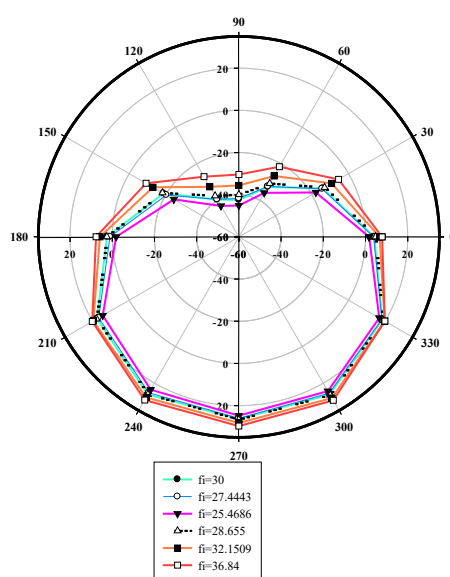
Table 7. Displacement values (mm) for minimum and maximum values of random variables

سربار (Q)		زاویه اصطکاک (ϕ)		چسبندگی (C)		پارامتر / موقعیت
max	min	max	min	max	min	
۳/۸۲۵	۳/۸۲۴	۷/۸۵۴	۱/۷۴۴	۵/۶۸۴	-۳/۷۹	سمت راست
-۴۱/۸۵	-۴۱/۶۵	-۳۰/۴۳۶	-۴۵/۱۱	-۳۷/۳۲	-۵۹/۱	تاج
-۱/۰۵۲	۱/۰۶۷	۷/۷۰۲	-۱/۸۲۹	۴/۲۵۸	-۶/۲۳	سمت چپ
۲۵/۹۵۸	۲۵/۸	۲۹/۶۶۴	۲۴/۷۰۳	۲۷/۸۲	۱۸/۸۸	کف



شکل ۱۲. نمودارهای جابه‌جایی سیستم نگهداری تونل موجود به ازای مجموعه اعداد تصادفی پارامتر سربار

Fig. 12. Displacement in lining of existing tunnel for set of random numbers of surcharge



شکل ۱۱. نمودارهای جابه‌جایی سیستم نگهداری تونل موجود به ازای مجموعه اعداد تصادفی پارامتر زاویه اصطکاک

Fig. 11. Displacement in lining of existing tunnel for set of random numbers of friction angle

تبعیت می‌کنند و چولگی منفی بر آن حاکم است (شکل الف) به این مفهوم که، تمرکز مقادیر داده‌ها در داده‌های بیشتر از میانگین است. به عبارتی، در صورتی که تنها پارامتر چسبندگی به لحاظ مکانی تغییر کند، در سمت راست تونل، احتمال وقوع جابه‌جایی‌های بیشتر از میانگین، بیشتر از احتمال وقوع جابه‌جایی‌های کمتر از آن است. در این خصوص، در سمت چپ و کف تونل مقدار میانه بیشتر از میانگین است (شکل‌های ج و د). در واقع، در این دو مجموعه از داده‌ها چولگی منفی حاکم است و داده‌ها از توزیع مقدار حدی^۳ تبعیت می‌کنند. با توجه به توزیع‌های احتمالاتی در سمت راست، سمت چپ

۵- ۲- توزیع‌های احتمالاتی جابه‌جایی تونل موجود جابه‌جایی‌های تونل موجود به ازای هر مجموعه از اعداد تصادفی در چهار نقطه‌ی سمت راست، تاج، سمت چپ و کف تونل ثبت شده و توزیع احتمالاتی متناظر برای هر مجموعه با توجه به مقادیر میانه، میانگین و چولگی^۱ اختصاص داده شد.

در شکل ۱۳ و جدول ۸ مقادیر پارامترهای مرکزی و چولگی جابه‌جایی‌ها به ازای تغییرات پارامتر چسبندگی ارائه شده است. مشاهده می‌شود که جابه‌جایی‌ها در سمت راست سیستم نگهداری تونل از توزیع لجستیک^۲

3 Extreme Value Distribution

1 Skewness

2 Logistic Distribution

توزیع احتمالاتی جابه‌جایی تونل موجود به ازای تغییرات سربار در چهار نقطه مورد بحث از توزیع متقارنی برخوردار نیستند (شکل ۱۵). با توجه به مقادیر جدول ۸، در سمت راست و کف تونل، مجموعه داده‌ها دارای چولگی مثبت و در سمت چپ و تاج دارای چولگی منفی هستند. توزیع لجستیک بر مجموعه جابه‌جایی‌های سمت راست و کف تونل و توزیع مقدار حدی بر مجموعه داده‌های سمت چپ و تاج تونل حاکم است. در واقع، احتمال وقوع جابه‌جایی‌های بیش‌تر از میانگین نسبت به جابه‌جایی‌های کم‌تر از آن در سمت چپ و تاج تونل به ازای صرفاً تغییرات سربار بیشتر است؛ در حالی که این نسبت در سمت راست و کف تونل معکوس است. با تغییرات پارامتر سربار به ازای مجموعه اعداد تصادفی، احتمال وقوع جابه‌جایی‌های بیشتر از میانگین در سمت راست و کف تونل ۵۱٪ و احتمال وقوع جابه‌جایی‌های کمتر از میانگین در سمت چپ و تاج تونل به ترتیب ۴۳٪ و ۳۱/۵٪ می‌باشد.

و کف تونل احتمال وقوع جابه‌جایی‌های بیشتر از میانگین به ترتیب ۶۲٪، ۵۳٪ و ۶۵٪ می‌باشد.

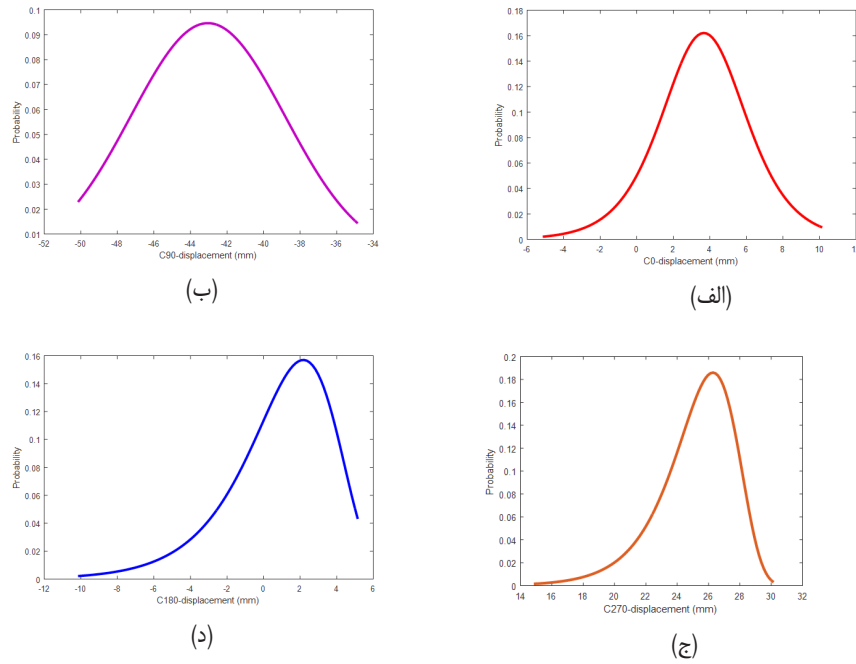
تفاوت ناچیز مقدار میانگین و میانه به ازای مجموعه مقادیر جابه‌جایی‌ها در تاج تونل (شکل ب) و همچنین مقدار کم چولگی نشان می‌دهد که توزیع متقارنی بر مجموعه داده‌ها در تاج تونل حاکم است و جابه‌جایی‌های بیشتر و کمتر از مقدار میانگین از احتمال برابری برای وقوع برخوردارند.

در رابطه با تأثیر تغییرات زاویه اصطکاک، در شکل ۱۴ ملاحظه می‌شود که توزیع نرمال بر تغییر مکان تونل در هر چهار نقطه حاکم است. از مقایسه مقادیر جدول ۸ نیز مشاهده می‌شود که تفاوت ناچیزی بین میانه و میانگین وجود دارد و احتمال وقوع جابه‌جایی‌های بیش‌تر و کم‌تر از میانگین یکسان است.

جدول ۸. مقادیر میانه، میانگین و چولگی به ازای متغیرهای تصادفی

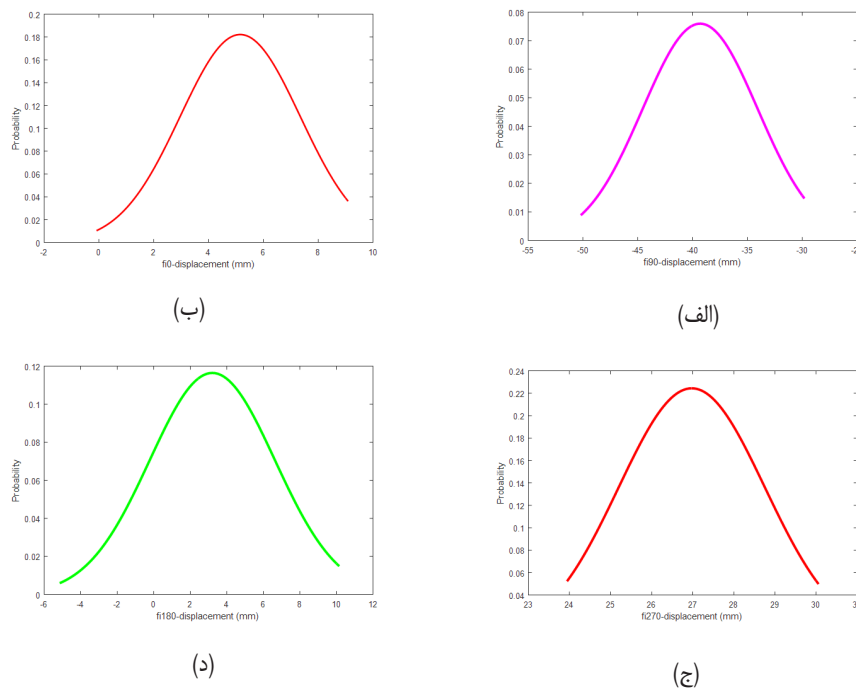
Table 8. Mean, median, and skewness of random variables

پارامتر تصادفی	موقعیت	میانگین	میانه	چولگی
چسبندگی (kg/cm ²)	۰	۳/۱۱۱۵۷	۴/۲۹۶۴	-۱/۷۶۲۴۲
	۹۰	-۴۳/۰۴۶۱	-۴۲/۱۴۴۳	-۰/۷۰۱۳۱
	۱۸۰	۰/۷۳۴۵	۱/۷۹۱۷	-۱/۱۱۱۸۴
زاویه اصطکاک (deg)	۲۷۰	۲۴/۹۳۲۶	۲۶/۲۹۸۲	-۱/۸۵۶۶۸
	۰	۵/۱۵۲۵	۴/۷۵۵۹	۰/۰۴۰۲۸
	۹۰	-۳۹/۳۱۲	-۴۰/۸۶۴۴	۰/۹۲۷۵
سربار (kN)	۱۸۰	۳/۲۰۳۸	۲/۷۷۶۴	۰/۰۷۵۹
	۲۷۰	۲۶/۹۷۵۲	۲۶/۶۰۳۱	۰/۶۰۳۱
	۰	۴/۲۰۸۷۹	۴/۱۷۱۸۵	۲/۲۴۰۳۸
کلیه متغیرهای تصادفی	۹۰	-۴۳/۳۶۲۶	-۴۱/۷۷۷۳	-۲/۵۹۱۸
	۱۸۰	۱/۰۱۷۰۴	۱/۳۰۹۵۸	-۱/۸۷۵۷
	۲۷۰	۲۶/۰۸۲۸	۲۵/۹۹۵۰۵	۲/۰۰۳۴۷۲
	۰	۳/۸۳۴۷	۴/۱۷۸	-۱/۰۶۶۶۸
	۹۰	-۴۱/۹۴۰۷	-۴۱/۷۴۶۶	۰/۰۴۴۹۵
	۱۸۰	۱/۵۱۰۴۵	۱/۳۱۸۵۹	-۰/۰۳۸۳۹
	۲۷۰	۲۶/۱۳۰۹۱	۲۶/۱۰۵	-۱/۸۲۵۸



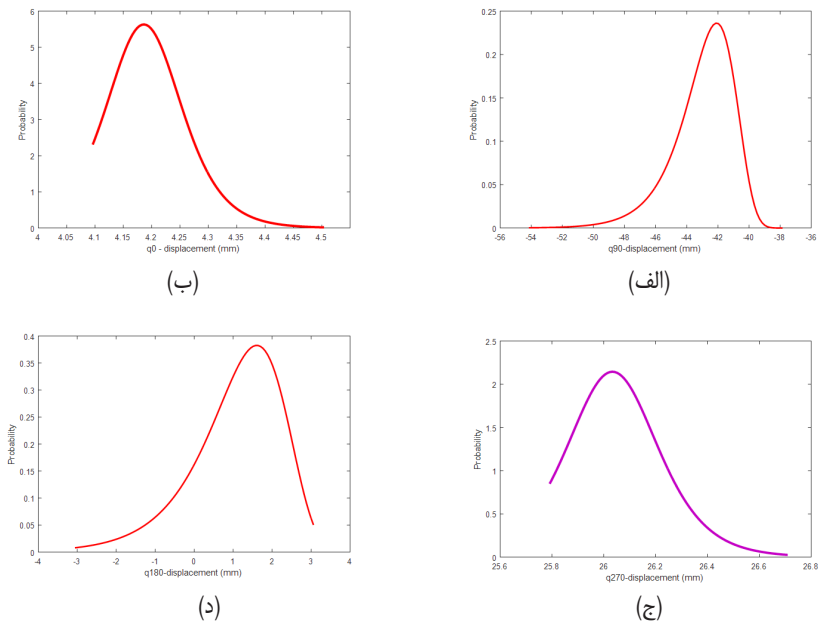
شکل ۱۳. توزیع احتمالاتی جابجایی قائم به ازای مجموعه اعداد تصادفی پارامتر چسبندگی (الف) سمت راست تونل، (ب) تاج تونل، (ج) سمت چپ تونل، (د) کف تونل

Fig. 13. Probabilistic distribution of normal displacement for set of random numbers of cohesion: a) right side of tunnel, b) tunnel crown, c) left side of tunnel, d) bottom of tunnel



شکل ۱۴. توزیع احتمالاتی جابجایی قائم به ازای مجموعه اعداد تصادفی زاویه اصطکاک: (الف) سمت راست تونل، (ب) تاج تونل، (ج) سمت چپ تونل، (د) کف تونل

Fig. 14. Probabilistic distribution of normal displacement for set of random numbers of friction angle: a) right side of tunnel, b) tunnel crown, c) left side of tunnel, d) bottom of tunnel



شکل ۱۵. توزیع احتمالاتی جابجایی قائم به ازای مجموعه اعداد تصادفی سرپار: الف) سمت راست تونل، ب) تاج تونل، ج) سمت چپ تونل، د) کف تونل

Fig. 15. Probabilistic distribution of normal displacement for set of random numbers of surcharge: a) right side of tunnel, b) tunnel crown, c) left side of tunnel, d) bottom of tunnel

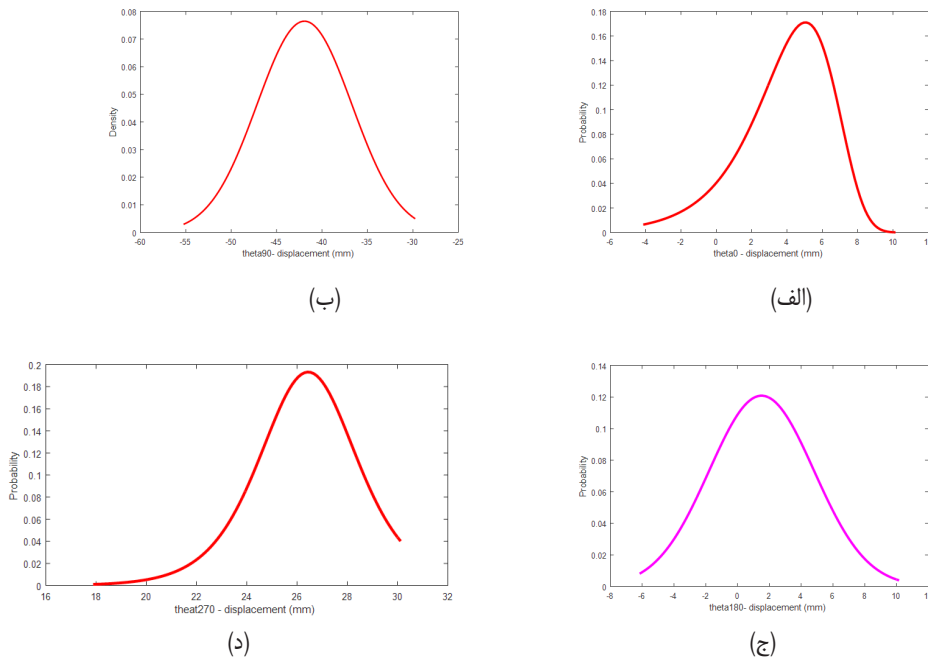
بیشترین احتمال وقوع نیست و لازم است تا در مسائل با حساسیت بالا، از تحلیل‌های احتمالاتی استفاده شود. لازم به ذکر است که جهت و امتداد حفاری تونل جدید (خط ۷) در محل تقاطع، از سمت چپ به سمت راست تونل موجود (خط ۶) انجام می‌گیرد.

از دیگر مزایای روش احتمالاتی در مسأله فوق این است که با استفاده از توزیع‌های احتمالاتی به دست آمده می‌توان احتمال وقوع تغییر مکان‌های بیشتر یا کمتر از یک مقدار مشخص را به دست آورد. به عنوان مثال، اگر تغییر مکان مجاز تاج تونل ۴۵ میلی‌متر باشد، احتمال وقوع آن ۶/۵٪ می‌باشد. احتمال وقوع جابه‌جایی‌های بیشتر از این مقدار نیز با محاسبه مساحت زیر نمودار به دست می‌آید که برابر ۲۶٪ خواهد بود. به این معنی که از هر ۱۰۰ پروژه اجرا شده در شرایط مشابه، در حدود ۲۶ مورد از آن‌ها دچار خرابی خواهند شد که می‌توان بر اساس اهمیت پروژه در مورد قابل قبول بودن یا نبودن طراحی اظهار نظر کرد.

با توجه به وجود عدم قطعیت‌های ذاتی در پارامترهای مهندسی استفاده از آنالیز احتمالاتی روش مناسبی برای در نظر گرفتن این عدم قطعیت‌ها است. با استفاده از آنالیز احتمالاتی برای هر یک از پارامترهای خروجی محدوده‌ای از مقادیر ممکن به دست می‌آید و امکان پیش‌بینی خرابی و گسیختگی را فراهم می‌کند که یکی از مزیت‌های استفاده از آنالیز احتمالاتی به شمار می‌رود و این در حالی است که در استفاده از روش‌های قطعی با به دست آمدن یک مقدار برای هر یک از پارامترهای خروجی چنین امکانی وجود دارد.

در ارتباط با اثر توأم تغییرات یا همان تصادفی بودن کلیه پارامترها با توجه به شکل ۱۶ مشاهده می‌شود که برای توزیع جابه‌جایی‌های کف تونل و سمت راست تونل پایین‌تر (خط ۶)، چولگی منفی وجود دارد و برای جابه‌جایی‌ها در تاج و سمت چپ این تونل، توزیع نرمال حاکم است (مقداری چولگی منفی نیز در توزیع جابه‌جایی‌ها وجود دارد که قابل صرف نظر است). در واقع، احتمال اینکه جابه‌جایی کف و سمت راست تونل خط ۶ از مقدار میانگین بزرگ‌تر باشد به ترتیب برابر با ۵۶٪ و ۵۵/۵٪ است؛ در حالی که در تاج و سمت چپ تونل، جابه‌جایی‌های بیشتر و کمتر از مقدار میانگین از احتمال یکسانی برای وقوع برخوردارند.

اگر این مسأله با استفاده از روش قطعی تحلیل شود و یا به عبارتی، برای پیش‌بینی مقادیر جابه‌جایی تونل از مقادیر متوسط متغیرها به عنوان مقادیر قطعی استفاده شود (که در تحلیل‌های معمول رایج است)، جابه‌جایی در سمت راست، تاج، سمت چپ و کف تونل به ترتیب ۴/۲، ۴۲/۴۱، ۲/۵ و ۲۶/۳۴ میلی‌متر به دست می‌آید که این مقادیر برای سمت راست، تاج و کف تونل در بازه $\pm 10\%$ از مقدار میانگین تحلیل‌های احتمالاتی قرار می‌گیرند. به عبارتی در این نقاط، تحلیل قطعی تقریباً دارای بیشترین احتمال وقوع با خطای حداکثر ۱۰٪ است. لیکن برای نقطه سمت چپ، تفاوت فاحشی بین جابه‌جایی حاصل از روش قطعی (۲/۵ میلی‌متر) و جابه‌جایی دارای بیشترین احتمال وجود دارد (۱/۷ میلی‌متر). اگر چه این تفاوت در مقیاس کلی و با توجه به مقادیر خام جابه‌جایی‌ها قابل صرف نظر است، لیکن مشاهده می‌شود که نتایج حاصل از تحلیل قطعی لزوماً دارای



شکل ۱۶. توزیع احتمالاتی جابه‌جایی‌های قائم تونل موجود به ازای کلیه اعداد تصادفی؛ الف) سمت راست تونل، ب) تاج تونل، ج) سمت چپ تونل و د) کف تونل

Fig. 16. Probabilistic distribution of normal displacement for all random numbers: a) right side of tunnel, b) tunnel crown, c) left side of tunnel, d) bottom of tunnel

۶- نتیجه‌گیری

با توجه به پیچیدگی اندرکنش بین تونل‌ها و همچنین به دلیل وجود عدم قطعیت‌های متعدد در مسائل مهندسی، در این مطالعه به تحلیل تصادفی اثر ساخت تونل جدید بر تغییر شکل‌های تونل موجود در محل تقاطع غیر هم‌سطح خط ۶ و ۷ متروی تهران پرداخته شد. از نرم‌افزار $FLAC^{3D}$ برای مدل‌سازی عددی و شبیه‌سازی فرآیند تونل‌سازی استفاده شد که مدل سه بعدی ایجاد شده در این نرم‌افزار، امکان بررسی جابه‌جایی‌ها و نیروهای ایجاد شده در سیستم نگهداری تونل موجود را فراهم می‌سازد. متغیرهای تصادفی مسأله شامل چسبندگی و زاویه اصطکاک لایه سوم خاک و همچنین سربار موجود در سطح زمین بوده که با استفاده از مقادیر میانگین و انحراف معیار و با فرض توزیع نرمال مقادیر تصادفی در متلب (MATLAB) ایجاد شده است و به منظور تحلیل عددی در نرم‌افزار $FLAC^{3D}$ وارد شده است.

نتایج به صورت جابه‌جایی‌های سمت راست، تاج، سمت چپ و کف تونل موجود ثبت شد که نشان می‌دهد با افزایش چسبندگی، مقادیر جابه‌جایی در تاج تونل ۲۵٪ کاهش و در کف تونل ۱٪ افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش زاویه اصطکاک، جابه‌جایی‌ها به ازای مقادیر تصادفی در تاج و کف تونل به ترتیب ۱۶٪ کاهش و ۰٫۵٪ افزایش را نشان می‌دهد. توزیع احتمالاتی متناظری برای این مقادیر جابه‌جایی‌های ثبتی تصادفی نیز ارائه شد. این نتایج نشان می‌دهد که احتمال وقوع جابه‌جایی‌های بزرگ‌تر از مقدار میانگین در کف و سمت راست تونل موجود (خط ۶) به دلیل حفاری

تونل جدید (خط ۷) به ترتیب ۵۶٪ و ۵۵/۵٪ می‌باشد، در حالی که در تاج و سمت چپ، جابه‌جایی‌های بیش‌تر و کم‌تر از مقدار میانگین از احتمال یکسانی برای وقوع برخوردارند.

همچنین نتایج نشان می‌دهد که در صورت تغییر پارامتر چسبندگی، احتمال وقوع جابه‌جایی‌های بیش‌تر از میانگین در سمت راست، سمت چپ و کف تونل به ترتیب ۶۲٪، ۵۳٪ و ۶۵٪ است. در صورتی که اگر سربار به عنوان متغیر تصادفی در نظر گرفته شود، احتمال وقوع جابه‌جایی‌های بیشتر از میانگین در سمت راست و کف تونل ۵۱٪ و احتمال وقوع جابه‌جایی‌های کمتر از میانگین در سمت چپ و تاج تونل به ترتیب ۴۳٪ و ۳۱/۵٪ است. از طرفی، علی‌رغم اینکه متغیرهای ورودی از توزیع نرمال تبعیت می‌کنند، پارامترهای خروجی لزوماً توزیع متقارنی ندارند و از توزیع نرمال تبعیت نمی‌کنند. همچنین جابه‌جایی‌های به دست آمده از تحلیل با استفاده از روش قطعی با مقادیر میانگین به دست آمده از تحلیل‌های احتمالاتی یکسان نیست.

از مزایای استفاده از آنالیزهای احتمالاتی می‌توان به امکان بررسی خروجی‌ها در یک محدوده و احتمال وقوع یا عدم وقوع مقادیر بیش‌تر یا کم‌تر از مقدار مورد نظر اشاره کرد که با توجه به وجود عدم قطعیت در مسائل مهندسی، یک مزیت بزرگ برای آنالیزهای احتمالاتی به شمار می‌رود. در طراحی‌ها نیز در صورت استفاده از آنالیز احتمالاتی امکان به دست آوردن طراحی بهینه فراهم می‌شود.

- [6] D.M.P. J.R. Standing, R. Vollum, J.B. Burland, A. Tsiamposi and S. Afshan, Investigating the Effect of Tunnelling on Existing Tunnels, in: Underground Design and Construction Conference, Hong Kong, 2015.
- [7] N.T. Kottogoda, APPLIED STATISTICS FOR CIVIL AND ENVIRONMENTAL ENGINEERS.
- [8] E. Hoek, Practical Rock Engineering, 1987-1993.
- [9] Y. Wang, Z. Cao, S.-K. Au, Efficient Monte Carlo Simulation of parameter sensitivity in probabilistic slope stability analysis, Computers and Geotechnics, 37(7-8) (2010) 1015-1022.
- [10] Y.-J.J.a.D.D. Qiuqing Pan, Probabilistic Stability Analysis of a Three-Dimensional Rock Slope Characterized by the Hoek-Brown Failure Criterion, (2017).
- [11] E.H.a.P. Marinou, Predicting tunnel squeezing problems in weak heterogeneous rock masses, (2000).
- [12] P. Oreste, A probabilistic design approach for tunnel supports, Computers and Geotechnics, 32(7) (2005) 520-534.
- [13] Q. Pan, D. Dias, Probabilistic evaluation of tunnel face stability in spatially random soils using sparse polynomial chaos expansion with global sensitivity analysis, Acta Geotechnica, (2017).
- [14] G.M.D.D.a.A.-H. Soubra, Probabilistic Analysis of Circular Tunnels in Homogeneous Soil Using Response Surface Methodology, GEOTECHNICAL AND GEOENVIRONMENTAL ENGINEERING, (2009).
- [15] S.E. Company, Complementary Geotechnical Investigations for Station of Tehran Metro Line 7, Geotechnical studies Report of station G7, 2010 / March.
- [16] A. Afshar, Investigating the interaction between transverse cross-sectional tunnels (in persian) Tabriz University, 2014.
- [17] I.C. group, FLAC 3D Manual, 2012.
- [18] JSCE, Japanese Standard for shield tunnelling, in, 1996.
- [19] M.H.K.a.P.A. Whitlock, Monte Carlo Methods, 1997.

با توجه به اهمیت استفاده از تحلیل احتمالاتی در مطالعات مهندسی و به طور کلی در پروژه‌های دارای اهمیت زیاد پیشنهاد می‌شود که با در نظر گرفتن متغیرهای تصادفی بیش‌تر و در نظر گرفتن همبستگی بین متغیرها آنالیز احتمالاتی برای سایر حالات تقاطع تونل‌ها و در کل کلیه پروژه‌های مهندسی انجام گیرد.

فهرست علائم

علائم انگلیسی

W_{TBM}	وزن ماشین حفاری،	kN
L_{TBM}	طول سپر ماشین حفاری،	m
D	قطر ماشین حفاری،	m
P_{TBM}	فشار ناشی از وزن ماشین حفاری،	kN/m ²
σ_{inj}	فشار تزریق دوغاب،	kN/m ²
σ_v	فشار سربار ناشی از وجود خاک در تاج تونل،	kN/m ²

مراجع

- [1] R. Liang, T. Xia, Y. Hong, F. Yu, Effects of above-crossing tunnelling on the existing shield tunnels, Tunnelling and Underground Space Technology, 58 (2016) 159-176.
- [2] Q. Fang, D. Zhang, Q. Li, L.N.Y. Wong, Effects of twin tunnels construction beneath existing shield-driven twin tunnels, Tunnelling and Underground Space Technology, 45 (2015) 128-137.
- [3] D.D. Ngoc-Anh Doa, Pierpaolo Oreste, Irini Djeran-Maigre, Three-dimensional numerical simulation of a mechanized twin tunnels in soft ground, Tunnelling and Underground Space Technology, (2014).
- [4] N.-A. Do, D. Dias, P. Oreste, Three-dimensional numerical simulation of mechanized twin stacked tunnels in soft ground, Journal of Zhejiang University SCIENCE A, 15(11) (2014) 896-913.
- [5] H.Y. Liu, J.C. Small, J.P. Carter, D.J. Williams, Effects of tunnelling on existing support systems of perpendicularly crossing tunnels, Computers and Geotechnics, 36(5) (2009) 880-894.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Please cite this article using:

M. Tajdid Khajeh, M. Ranjbaria, V. Nourani, Study of Geotechnical Parameters Uncertainties in Analysis of New Tunnel Construction Over the Existing Tunnel, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 51(4) (2019) 817-830.

DOI: 10.22060/ceej.2018.13969.5522

