

آنالیز حساسیت بر روی عوامل تأثیرگذار در میزان نشست زمین حین عملیات لوله‌رانی به روش میکروتونلینگ

منصوره کدخدای بلقور (کارشناس ارشد)

دانشکده عمران، دانشگاه سمنان

عبدالحسین حداد (دانشیار)

دانشکده‌ی مهندسی، دانشگاه سمنان

حجت دهستانی* (مربی)

دانشکده مهندسی، دانشگاه صنعتی قوچان

مهندسی عمران شریف، (بهار ۱۳۹۷)
دوره ۲ - ۳۴، شماره ۱/۱، ص. ۸۵-۷۷، (پاداشت فنی)

جابه‌جایی‌های ناشی از حفاری در عمق زمین به عوامل زیادی، از جمله: وضعیت زمین‌شناسی، وضعیت آب‌های زیرزمینی، هندسه و عمق حفاری، روش حفاری، کیفیت و مدیریت ساخت وابسته است. آگاهی از میزان تأثیر هر کدام از پارامترهای تأثیرگذار می‌تواند باعث انجام اقدامات پیش‌گیرانه به منظور جلوگیری از ایجاد صدمه به ساختارهای سطحی و یا کاهش آن شود. هدف از انجام مطالعه حاضر، مقایسه‌ی تغییر شکل‌های واقعی رخ داده در سطح زمین حاصل از رفتارسنجی با مقادیر تحلیل عددی و بررسی تأثیر پارامترهای مختلف در میزان نشست خاک است. نتایج حاصل از آنالیز حساسیت نشان می‌دهد برای یک نسبت ثابت از ارتفاع خاک روی لوله به قطر لوله، با افزایش زاویه‌ی اصطکاک و افزایش عمق استقرار لوله علاوه بر کاهش مقدار نشست، شیب تغییرات نشست نیز کاهش می‌یابد. شکل کلی نمودارها نشان می‌دهد در حالت کلی با ثابت نگه داشتن ضخامت لایه‌ی خاکی، با افزایش قطر لوله، میزان نشست افزایش می‌یابد و زیاد شدن زاویه‌ی اصطکاک نیز به افزایش مذکور کمک می‌کند. همچنین هر چه نسبت ارتفاع لایه‌ی خاکی به قطر لوله، عدد کمتری باشد، مقادیر نشست بزرگ‌تری به دست می‌آید.

واژگان کلیدی: میکروتونلینگ، لوله‌رانی، تغییر شکل خاک، تحلیل عددی، آنالیز حساسیت.

m.civil.k@yahoo.com
ahadad@semnan.ac.ir
dehestani@qiet.ac.ir

۱. مقدمه

کشف علت به‌وجود آمدن آنها و سپس دنبال کردن روشی جهت اجتناب از رخ دادن این‌گونه نشست‌هاست. در این صورت احتمال بروز نشست‌های بزرگ به شدت کاهش می‌یابد. تغییر شکل‌های سیستماتیک به کمک توزیع احتمالی منحنی‌ها که در پژوهشی در سال ۱۹۶۹ ارائه شده است،^[۱] قابل تخمین است. جهت تخمین نشست‌های سیستماتیک، آنالیز حساسیت برای سنجش نسبت اهمیت پارامترهای مستقل در میزان نشست‌های سیستماتیک، روش مناسبی است. نشست‌های اندازه‌گیری شده در محل، در صورتی که کمتر از ۱/۲ یا ۱/۳ مقادیر محاسبه شده باشند، فرض بر این است که تغییرات حجم خاک ناچیز و قابل چشم‌پوشی است.

نشست‌های بیشتر از مقدار ذکر شده و برای حالتی که نسبت عمق حفاری به قطر تونل بیشتر از ۳ است، قابل قبول نیست. برآمدگی‌ها ممکن است ناشی از فشار بیش از حد سیال به‌کار برده در حفاری، ضخامت لایه‌ی خاکی ناکافی نسبت به قطر حفاری و یا به دلیل خاصیت تورم‌پذیری خاک‌های رسی با حالت خمیری بالا باشد.

جابه‌جایی‌های ناشی از حفاری در عمق زمین به عوامل زیادی، از جمله: وضعیت زمین‌شناسی، وضعیت آب‌های زیرزمینی، هندسه و عمق حفاری، روش حفاری، کیفیت و مدیریت ساخت وابسته است. آگاهی از میزان تأثیر هر کدام از پارامترهای تأثیرگذار می‌تواند باعث انجام اقدامات پیش‌گیرانه به منظور جلوگیری از ایجاد صدمه به ساختارهای سطحی و یا کاهش آن شود.^[۱] تغییر شکل‌های زمین در ۳ دسته تقسیم‌بندی می‌شوند: تغییر شکل‌های بزرگ، تغییر شکل‌های سیستماتیک و برآمدگی‌ها. نشست‌های بزرگ بیشترین نگرانی را در پروژه‌های میکروتونلینگ ایجاد می‌کنند و تاکنون هیچ روشی جهت تخمین شدت و اندازه‌ی واقعی تغییر شکل‌های مذکور به دست نیامده است. یک راهکار مناسب برای جلوگیری از بروز نشست‌های بزرگ،

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۴/۸/۵، اصلاحیه ۱۳۹۵/۴/۸، پذیرش ۱۳۹۵/۵/۴.

DOI:10.24200/J30.2018.1328

در عملیات میکروتولینگ، معمولاً میزان بزرگی برآمدگی‌های مذکور و ناحیه‌یی که تحت تأثیر قرار می‌گیرد، به‌حدی است که نیازی به نگرانی جهت وارد آمدن خسارت به سازه‌های مجاور نیست.

۲. مروری بر مطالعات پیشین

بخشی از جابه‌جایی زمین حین عملیات میکروتولینگ، نتیجه‌ی رویدادهای غیرقابل انتظار و نشست‌های بزرگ و بخشی به صورت نشست‌های سیستماتیک و قابل پیش‌بینی است. با پیشرفت تکنولوژی در زمینه‌ی کنترل فشار دستگاه جهت ایجاد تعادل میان فشار ناشی از سطح آب زیرزمینی و فشار خاک، مشکل ذکر شده به‌شدت کاهش یافته است. همچنین ضروری است با توجه به نیازهای پروژه، محدودیت‌های لازم جهت اجرای صحیح در نظر گرفته شود. نشست‌های سیستماتیک یا نرمال به تغییر شکل‌های به وجود آمده در فضای حلقوی حفاری یا بالای لوله وابسته‌اند. نشست‌های سیستماتیک کوچک ممکن است در نتیجه‌ی تغییر شکل‌های ناشی از پیشانی حفاری باشند، لذا در گروه تغییر شکل‌های بزرگ قرار نمی‌گیرند.

ارتباط بین فضای حلقوی، ضخامت خاک بالای لوله، قطر و نشست سیستماتیک توسط پژوهشگران برای تغییر شکل‌های حاصل از حفاری تونل‌های با سپر محافظ با قطرهای بزرگ در خاک‌های نرم بررسی شده است. برخی از پژوهشگران در مطالعات خود در رابطه با حفاری‌های عمیق تونلینگ، روش‌هایی برای پیش‌بینی نشست اطراف تونل در خاک‌های رسی نرم ارائه داده‌اند.^[۲۰] در این مطالعات در شرایطی که نسبت پایداری در رابطه‌ی ۱ کمتر از عدد ۴ باشد، می‌توان از مقدار نشست سیستماتیک خاک صرف‌نظر کرد:

$$R = (\sigma_z - P_a) / S_u \quad (۱)$$

که در آن، R نسبت پایداری؛ σ_z تنش عمودی؛ P_a فشار هوا (فشار لازم جهت ایجاد تعادل در قسمت کانرهد) و S_u مقاومت برشی زهکشی نشده‌ی خاک هستند. در این خاک‌ها نشست اندازه‌گیری شده با نسبت H/D (نسبت ارتفاع خاک روی تاج لوله به قطر) رابطه‌ی عکس دارد و تقریباً با قطر لوله متناسب است. برای مصالح دانه‌یی غیرچسبیده، اگر در حین حفاری از رانش زمین جلوگیری شود و آب زیرزمینی با تزریق دوغاب سیمان و یا خشک کردن محل مهار شود، نشست‌ها به کمتر از ۲٪ از حجم تونل محدود می‌شود که این مقدار نشست نشانه‌یی از حسن انجام عملیات است. در صورت مواجهه با نشست‌های بزرگ‌تر از مقدار توصیه شده، باید لایه‌بندی خاک و روش مورد استفاده در خشک کردن خاک محل کنترل شود.^[۲۱] نتایج بررسی‌های نشست روی خاک‌های مختلف نشان می‌دهد که خاک‌های رسی نرم تا کمی سخت، بیشترین نشست را نسبت به خاک‌های دیگر دارند. در خاک‌های رسی، نشست‌های تحکیمی ثانویه اهمیت زیادی دارند. با توجه به نتایج به‌دست آمده از مطالعاتی در سال ۱۹۶۹،^[۲۲] بر روی ۷ پروژه در خاک‌های رسی نرم تا سخت، بیشترین میزان نشست برای خاک‌های رسی نرم حدود ۹/۱۴ میلی‌متر در حفاری تونل مترو در تورنتو به قطر ۵۳۳ سانتی‌متر و نشست‌ی حدود ۷۳۱/۵۲ میلی‌متر در حفاری تونل راه‌آهن در نورژ به قطر ۷۹۲ سانتی‌متر در خاک رسی با حساسیت بالا و لایه‌های سیلت اندازه‌گیری شده است (لازم به ذکر است در دو مورد ذکر شده، حفاری به‌وسیله‌ی سپر محافظ صورت گرفته است). معمولاً به‌جز مورد به‌دست آمده از تونل راه‌آهن نورژ، نشست‌ها برای خاک‌های رسی کمتر از ۱۲/۹۲ میلی‌متر گزارش شده است. نتایج به‌دست آمده از مطالعات مذکور را می‌توان برای تخمین نشست ناشی از تونل‌زنی با مته‌ی حفاری محافظ به‌کار برد.^[۲۳] در مطالعات

دیگری (۱۹۷۶) بر روی تونل‌های مترو در واشنگتن،^[۲۴] علت تغییر شکل‌های زمین شناسایی و دسته‌بندی صورت گرفته و نتیجه‌گیری شده است که تأثیر شرایط زمین، روش ساخت و کیفیت کار در اندازه و توزیع تغییر شکل زمین اهمیت زیادی دارد. همچنین مطالعات دیگری برای تخمین نشست تونل با استفاده از منحنی‌های توزیع پک روی ۱۸ تونل در شرایط زمین متفاوت صورت گرفته است: ۵ تونل در رس سخت ترک خورده، ۶ تونل در رس‌های نرم سیلنتی، ۲ تونل در خاک‌های سست دانه‌یی، ۳ تونل در سنگ و ۲ تونل در زمین‌های سست. با توجه به برخی از نتایج به‌دست آمده از مطالعات ذکر شده می‌توان اظهار کرد که رابطه‌ی مشخصی بین سستی زمین و نسبت پایداری وجود ندارد.

منظور از نسبت پایداری، نسبت تفاضل تنش عمودی و فشار هوا به مقاومت برشی زهکشی نشده است. در نوشتار ارائه شده‌ی مربوط به تغییر شکل زمین در عملیات میکروتولینگ (۱۹۶۹) اظهار شده است روشی که برای تخمین نشست در تونل‌های بزرگ به کار می‌رود، قابل استفاده در پروژه‌های میکروتولینگ است. زیرا میکروتونل‌ها و تونل‌های بزرگ از نظر روند ساخت بسیار به هم شباهت دارند.^[۲۵]

همچنین در بررسی اثر اجرای میکروتولینگ در خاک‌های ماسه‌یی و نرم چندلایه (۲۰۱۳) از لوله‌های فولادی ۷۰۰ میلی‌متری با پوشش PVC ۴۰۰ میلی‌متری در خاک‌های نرم استفاده شده و در نهایت، راهکاری برای اجرای مناسب لوله‌رانی در خاک‌های نرم ارائه شده است.^[۲۶] در مطالعه‌ی دیگری (۲۰۱۰)، به افزایش نشست، تورم و واژگونی ماشین‌های میکروتولینگ به علت از بین رفتن یا تنظیم نامناسب شیب لوله‌رانی در خاک‌های بسیار شل، غیرچسبیده و خیلی نرم اشاره شده و پیشنهادهایی به جای استفاده از تزریق ملات جهت تثبیت زمین، راهکارهایی نظیر: استفاده از تیوب‌های ریلی، لوله‌های اکتشافی در ماشین‌های میکروتولینگ، استفاده از میله‌های داخلی و خارجی جهت تنظیم شیب لوله‌رانی، استفاده از ماشین‌های سیک و کنترل شیب خاک‌برداری ارائه شده است. همچنین شرایط مؤثر در تنظیم شیب لوله‌رانی در خاک‌های نرم و شل بررسی شده است.^[۲۷]

در پژوهش دیگری (۲۰۱۰) به مزایای روش میکروتولینگ در کنترل شیب لوله‌رانی و نصب سیستم لوله‌های فاضلاب بدون پوشش اشاره شده و عوامل تأثیرگذاری که ممکن است باعث شکست و گسیختگی در طی مراحل اجرای میکروتولینگ شوند، نیز بررسی شده است. در نهایت با بررسی یک پروژه‌ی موردی به بررسی عوامل مذکور پرداخته و راهکاری مناسب پیشنهاد شده است.^[۲۸] در نوشتاری دیگر (۲۰۱۵)، روش میکروتولینگ برای اجرای لوله‌های فاضلاب با خطوط، شیب و فواصل دقیق معرفی و با تغییر در عمق پوشش‌ها، طول فرو رفتن لوله، تغییر قطر لوله‌ها و تعیین محل مناسب لوله‌گذاری، نیروی بهیسه در روش میکروتولینگ ارزیابی شده است.^[۲۹] همچنین مطالعاتی (۲۰۱۲) بر روی تحلیل عددی سه بعدی رفتار خاک در روش لوله‌رانی انجام شده است که هدف آن کارگذاری لوله‌ی بتنی مسلح به قطر ۲/۴ متر و طول ۲۳/۸۵ متر در زیر بزرگراه بوده است که برای جلوگیری از جابه‌جایی ناشی از لوله‌رانی، دوغاب با فشاری بیشتر از 1 kgf/cm^2 موردنیاز بوده است.

تأثیر پارامترهای خاک در نتایج نهایی بررسی نشده و فقط به شرایط خاص پروژه محدود شده است.^[۳۰] در پژوهش دیگری (۲۰۱۳)، تأثیر پارامترهایی مانند: عمق، فشار روباره، ابعاد تونل و فشار سیته‌ی کار در حفاری مکانیزه با روش متعادل کننده‌ی فشار زمین بر روی کنترل نشست‌های سطحی بررسی شده است.^[۳۱] در بررسی نشست حاصل از حفاری تونل‌های چندگانه در تایوان (۲۰۱۲) نیز با استفاده از روش‌های تجربی و عددی، کارایی بالاتر روش‌های عددی نتیجه‌گیری شده است.^[۳۲] در مطالعات دیگری (۱۹۹۸) بر روی نشست‌های سیستماتیک ناشی از

حفاری تونل استفاده می‌شود. با روش مذکور می‌توان خطوط بسیار طولانی با قطرهای بالا اجرا کرد. مهم‌ترین مزیت‌های فنی روش میکروتونلینگ به این قرار است:

استحکام ذاتی

- جداری داخلی یک‌دست و صاف و سیالی مناسب؛

- عدم نیاز به اجرای پوشش ثانوی؛

- اتصالات بسیار کمتر در مقایسه با تونل‌های سگمندی؛

- جلوگیری از نفوذ آب‌های زیرزمینی از طریق استفاده از لوله‌هایی با اتصالاتی ناتروا و آب بند؛

- خطر نشست بسیار کمتر نسبت به روش‌های سنتی؛

- ایجاد کمینگی اختلال در سطح زمین؛

- کمینگی‌سازی عملیات ترمیمی (برگردان به حالت اول)؛

- کاهش جابه‌جایی و تغییر مسیر تأسیسات زیرزمینی در مناطق شهری. [۱۸]

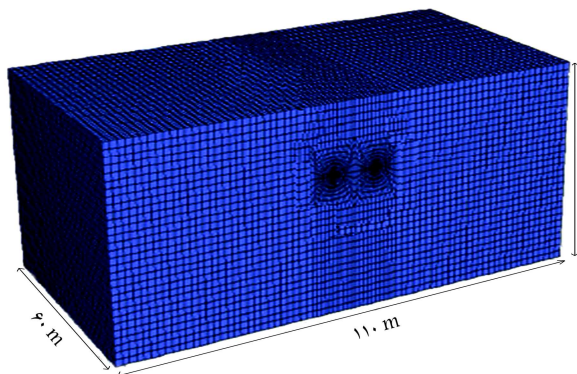
از معایب روش میکروتونلینگ می‌توان به هزینه‌ی بالا جهت تأمین تجهیزات میکروتونلینگ اشاره کرد. این دستگاه در خاک‌هایی که قاره سنگ با قطر بزرگ‌تر از ۲۰٪ و یا ۳۰٪ قطر ماشین دارند، مشکل دارد و همچنین در مواجهه با موانعی مانند سازه‌های پیش‌ساخته شده در مسیر دچار مشکل می‌شود. یکی از محدودیت‌های بزرگ روش مذکور، عدم به‌کارگیری لوله‌های انعطاف‌پذیر و یا با مقاومت کم مانند لوله‌های PE، PVC است.

۴. صحت‌سنجی مدل و نحوه‌ی مدل‌سازی عملیات

حفاری و لوله‌رانی با استفاده از نرم‌افزار

جهت صحت‌سنجی مدل‌سازی عددی، حدود ۶۰ متر از مسیر خط ۱ مترو تبریز در نرم‌افزار FLAC^{3D} مدل‌سازی و تحلیل شده است. نتایج حاصل با نتایج به‌دست آمده از نرم‌افزار ANSYS در پژوهش حسینی و همکاران، [۱۹] مقایسه شده است. نمای سه بعدی مدل عددی در شکل ۲ نشان داده شده است. رفتار خاک به‌صورت کشسان خمیری و بر طبق معیار موهر - کلمب بوده و پارامترهای مورد استفاده در جدول‌های ۱ و ۲ ارائه شده‌اند.

تحلیل برای فاصله‌های مختلف دو تونل از هم (فواصل ۷، ۳٫۵ و ۱۰ متر) انجام شده است. خط مرکزی تونل اول به‌عنوان خط مبنا در نظر گرفته شده و منحنی‌های نشست مطابق شکل ۳، برای سه حالت موردنظر به‌دست آمده‌اند.



شکل ۲. نمای سه بعدی مدل عددی تونل‌های دوقلوی خط ۱ مترو تبریز. [۱۹]

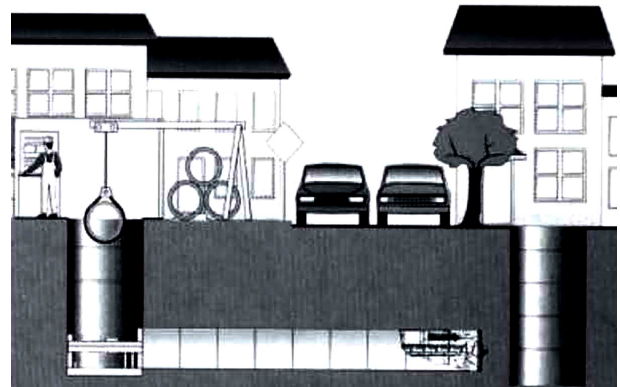
میکروتونلینگ روابطی ارائه شده است که نشست سیستماتیک را مانند منحنی توزیع نرمال وارونه در نظر می‌گیرد. [۱۵] در نوشتار حاضر، نشست‌های سیستماتیک از روش ذکر شده‌ی اخیر محاسبه شده‌اند. جهت تخمین نشست‌های سیستماتیک، آنالیز حساسیت برای سنجش نسبت اهمیت پارامترهای مستقل در میزان نشست‌های مذکور، روش مناسبی است.

۳. معرفی روش میکروتونلینگ

در روش میکروتونلینگ (MT) از جک‌های هیدرولیکی بسیار قوی برای راندن لوله‌هایی با طراحی مخصوص در اعماق مختلف خاک استفاده می‌شود. لوله‌ها در پشت جک قرار می‌گیرند و هم‌زمان با حفر زمین، با استفاده از جک هیدرولیکی به درون زمین رانده می‌شوند. حاصل روش میکروتونلینگ، احداث یک خط لوله‌ی انعطاف‌پذیر، ناتروا و به لحاظ سازه‌ی مقاوم است.

گرچه ممکن است ملاحظات مهندسی و اقتصادی، محدودیت‌هایی را ایجاد کنند، ولی به لحاظ نظری هیچ‌گونه محدودیتی در مورد طول رانش وجود ندارد. رانش‌هایی به طول چند ۱۰۰ متر، چه در یک خط مستقیم و چه در شعاع‌های مختلف، قابل اجرا هستند و لوله‌هایی با قطرهای ۱۵۰ تا ۳۰۰۰ میلی‌متر و حتی بیشتر را می‌توان با استفاده از سیستم مناسب نصب کرد. تعریفی از میکروتونلینگ که در کشورهای اروپایی متداول است، عبارت است از عملیات جک‌زنی برای مسیریابی با قطر کمتر یا مساوی ۳۶ اینچ که نیازی به کارگر در داخل مجرا ندارد. در حالی که در آمریکای شمالی، روش میکروتونلینگ حتی برای قطرهای بزرگ‌تر و آدم‌روها نیز استفاده می‌شود. دستگاه‌های میکروتونلینگ جدید که مجهز به لیزر و کنترل از راه دور هستند، قادرند خط لوله را هدایت و با دقت کارگذاری کنند. در روش میکروتونلینگ، پیشینه‌ی انحراف مجاز از مسیر لوله‌رانی در امتداد افقی و قائم، ۱ اینچ است. [۱۶] شکل ۱، نحوه‌ی جک‌زنی لوله توسط دستگاه میکروتونلینگ را نشان می‌دهد.

کاربردهای اصلی میکروتونلینگ، شامل: احداث سازه‌های زهکشی و دفع فاضلاب، جایگزین کردن و تأمین پوشش خطوط موجود فاضلاب، خطوط اصلی گاز و آب، خطوط نفت، گاز، برق، مخابرات و غیره می‌شود. از روش مذکور همچنین می‌توان جهت عبور از موانعی، مانند: بزرگراه‌ها، خطوط قطار، رودخانه‌ها، کانال‌ها، ساختمان‌ها و فرودگاه‌ها که در مسیر خط لوله قرار دارند با هدف کمینگی‌سازی اختلال در عبور و مرور و سایر فعالیت‌هایی که در سطح زمین انجام می‌شود، استفاده کرد. میکروتونلینگ معمولاً به‌عنوان جایگزین برای روش‌های ترانشه‌ی باز و سایر روش‌های



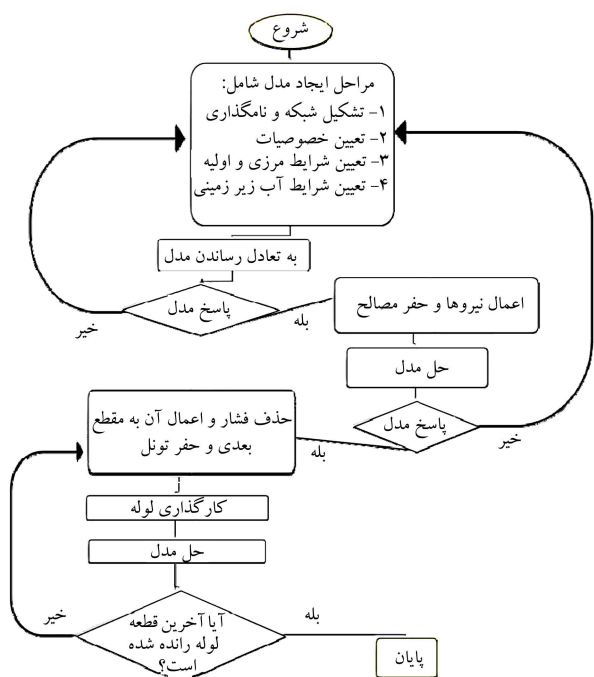
شکل ۱. نحوه‌ی جک‌زنی لوله با استفاده از دستگاه میکروتونلینگ. [۱۷]

جدول ۱. مشخصات مصالح خاک. [۱۹]

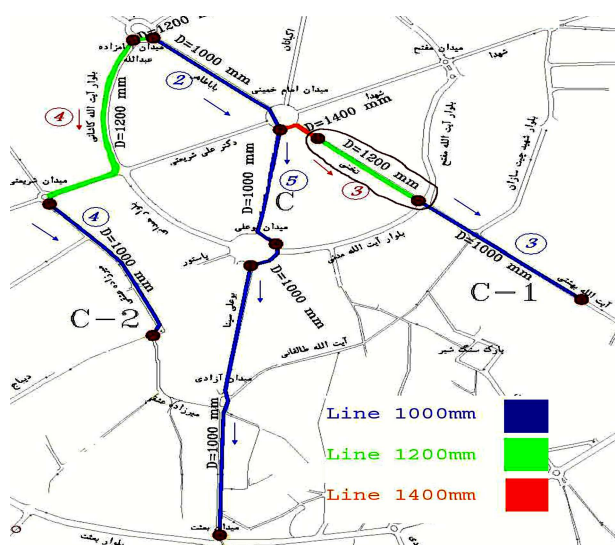
واحد	لایه‌ی				نام	پارامتر
	چهارم	سوم	دوم	اول		
-	موهر - کلمب	موهر - کلمب	موهر - کلمب	موهر - کلمب	مدل	مدل رفتاری
MPa	۳۳,۳۴	۳۳,۳۴	۲۲,۳	۱۵,۶۲	K	مدول حجمی
MPa	۱۱,۲	۱۵,۴	۷,۴	۵,۶	G	مدول برشی
MPa	۰,۰۲۵	۰	۰,۰۱۵	۰	C	ثابت چسبندگی
O	۳۴	۳۳	۱۵	۵	φ	زاویه‌ی اصطکاک
M	۲۰	۱۵	۸	۵		ضخامت لایه
M				۶		سطح آب

جدول ۲. مشخصات تونل. [۱۹]

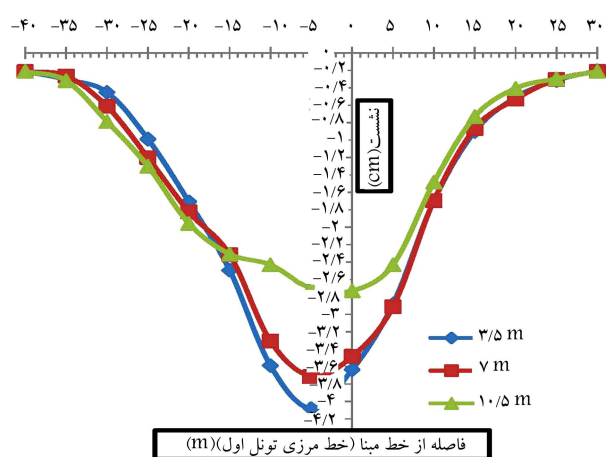
ضریب پواسون	مدول کشسانی (GPa)	پارامتر
۰,۲۵	۲۰۰	سپر
۰,۲۰	۲۵,۲	پوشش سنگمنت



شکل ۴. روند حل مسئله‌ی حفاری و لوله با استفاده از نرم‌افزار FLAC3D.



شکل ۵. محدوده‌ی مورد مطالعه خط لوله‌ی پروژه‌ی میکروتونلینگ شهر همدان. [۲۱]



شکل ۳. نشست سطح زمین برای فاصله‌های مختلف تونل‌های موازی از هم در قسمتی از خط ۱ مترو تبریز.

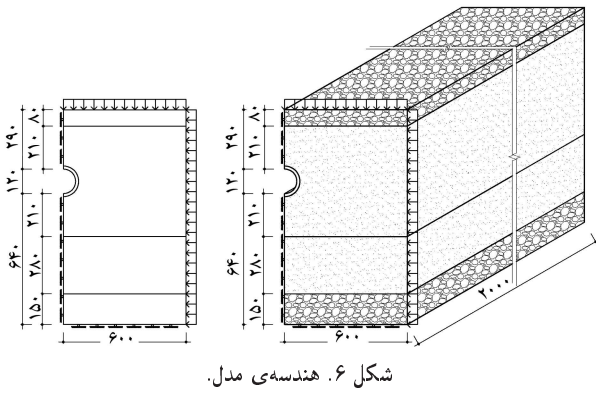
میزان اختلاف مقادیر نشست با نتایج حاصل از نوشتار حسینی و همکاران، [۱۹] حدود ۶٪ است که قابل قبول است. برای ایجاد یک مدل و اجرای شبیه‌سازی آن، باید اجزاء اساسی برای مسئله تعریف شوند، که عبارت‌اند از:

- ایجاد شبکه‌ی تقاضا محدود،
- تعریف رفتار و خصوصیات مواد،
- تعیین شرایط مرزی و اولیه.

روند کلی حل مسئله توسط نرم‌افزار در شکل ۴ ارائه شده است. [۲۰]

۵. معرفی مسئله‌ی مورد تحلیل

جهت برآورد نشست سطح زمین، قسمتی از خط لوله‌ی پروژه‌ی شهر همدان بررسی و در نرم‌افزار FLAC3D مدل‌سازی شده است. در شکل ۵، موقعیت مسیر نشان داده شده است. با استفاده از نتایج مربوط به رفتارسنجی خاک در مسیر

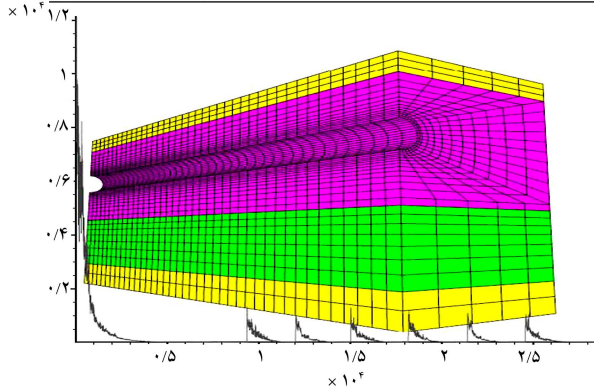


شکل ۶. هندسه‌ی مدل.

جدول ۳. مشخصات مصالح خاک. [۱۹]

پارامتر	نام	بولدر	لایه‌ی خاکی تا عمق ۹ متر	واحد
مدل رفتاری	مدل	موهر- کلمب	موهر- کلمب	-
مدول حجمی	K	۲۲۲	۳۴٫۹	MPa
مدول برشی	G	۱۶۶٫۷	۱۳٫۳	MPa
ثابت چسبندگی	C	۰٫۰۲	۰٫۰۰۴	MPa
زهیکنشی نشده				
زاویه اصطکاک	φ	۴۰	۳۶	O
ضریب پواسون	ν	۰٫۲	۰٫۳۳	-

Job Title: microtunneling

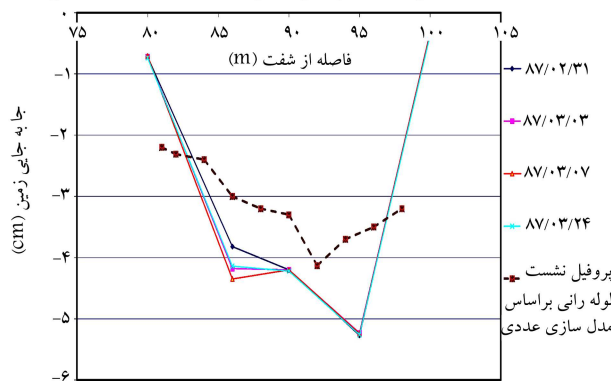


شکل ۷. مدل سازی ۲۰ متر از خط لوله‌ی پروژه توسط نرم افزار FLAC3D.

جدول ۴. مشخصات مصالح لوله. [۲۱]

پارامتر	نام	مقدار	واحد
نوع رفتاری	نوع	الاستیک	-
سختی نرمال	EA	$۱٫۰۵ \times ۱۰^۷$	KN/m
صلابت خمشی	EI	$۳٫۵ \times ۱۰^۴$	KN/m ^۲ /m
ضریب پواسون	ν	۰٫۱۵	-
مدول یانگ	E	۱۰٫۵	GPa

نمودار رفتار سنجی آسفالت و پروفیل حاصل از مدل سازی در مسیر لوله رانی



شکل ۸. مقایسه‌ی پروفیل نشست زمین بر روی نمودار رفتارسنجی آسفالت با مقادیر محاسبه شده.

۶. مشخصات مدل

انتخابی، مقادیر تغییر شکل‌های به‌وجود آمده حین لوله‌رانی ثبت شده است. به دلیل طولانی بودن مسیر و همچنین با توجه به نمودارهای حاصل از رفتارسنجی خاک در زمان‌های مختلف قسمتی از مسیر که بیشترین نشست در آن اتفاق افتاده است، تحلیل شده است. به کمک نرم افزار FLAC3D، حدود ۲۰ متر از مسیر لوله‌رانی به روش میکروتونلینگ تحلیل شده و نتایج حاصل از آن با مقادیر واقعی مقایسه شده است.

پارامترهایی مانند: سطح آب زیرزمینی، جنس خاک، میزان نفوذپذیری خاک، نیروی اصطکاک‌ای ایجاد شده توسط ماشین حفاری، سر بار وارده به محل و ... در میزان تغییر شکل خاک اطراف لوله نقش دارند و باعث بروز مشکلاتی، مانند: نشست و یا برآمدگی سطح زمین می‌شوند. با استفاده از مطالعات صحرایی و آزمایش‌های آزمایشگاهی، مشخصات خاک محل و سطح آب زیرزمینی شناسایی شده و به کمک نرم افزار، تغییر شکل‌های به‌وجود آمده در خاک در حین لوله‌رانی محاسبه و با مقادیر واقعی حاصل از رفتارسنجی خاک مقایسه شده‌اند. از رایج‌ترین آزمایش‌های درجا جهت تعیین خصوصیات فیزیکی و مکانیکی لایه‌های زمین، آزمایش نفوذ استاندارد (SPT) است. براساس تقسیم‌بندی ترقاقی، تراکم لایه‌های موجود متوسط تا متراکم است. براساس عدد SPT یعنی N می‌توان با استفاده از روابط تجربی، برخی از پارامترهای مقاومت برشی و تغییر شکل خاک را به‌دست آورد. در جدول‌های ۳ و ۴، به‌ترتیب مشخصات خاک و لوله ارائه شده است. لازم به‌ذکر است که پارامترهای به‌دست آمده از نتایج آزمایش‌های صحرایی و کتب مرجع با نتایج حاصل از آزمایش‌های آزمایشگاهی تطبیق داده شده است. شکل ۶، شرایط هندسه‌ی مدل را نشان می‌دهد.

۷. مدل سازی

شکل ۷، نحوه‌ی مدل‌سازی و شبکه‌بندی ۲۰ متر از خط لوله‌ی پروژه را در نرم افزار FLAC3D نشان می‌دهد. در شکل ۸، نیز مسیری از خط لوله واقع در فاصله‌ی بین ۸۰ تا ۱۰۰ متر از گودال رانش که محدوده‌ی نشست‌ها در این بازه متغیر بوده است، بررسی شده است.

پروفیل به‌دست آمده از تحلیل عددی در شکل ۸ به‌صورت خط‌چین نمایش داده شده است. با توجه به اینکه بنا به دلایلی، مانند: میزان دقت در آزمایش‌های مختلف، خطای دستگاه، انتخاب نوع آزمایش و نوع روابط تئوری جهت تفسیر

جدول ۵. آنالیز حساسیت - عامل قطر لوله.

شاخص حساسیت (SI)		میزان نشست (cm)		میزان تغییر	قطر لوله (cm)
مدل سازی	سیستماتیک	مدل سازی	سیستماتیک		
۰٫۳۷۰۵	۱٫۵۰۹۸	۱٫۷۵	۰٫۹۸۳۸	-۳۳	۸۰
۰٫۳۸۲۴	۱٫۶۰۱۹	۲٫۳۵	۱٫۴۵۱۹	-۱۷	۱۰۰
-	-	۲٫۵۱	۱٫۹۸۰۷	۰	۱۲۰
۰٫۵۳۰۶	۱٫۷۵۸۵	۲٫۷۳۲	۲٫۵۶۱۳	۱۷	۱۴۰
۰٫۶۴۰۶	۱٫۸۲۵۶	۳٫۰۴۶	۳٫۱۸۶۱	۳۳	۱۶۰

جدول ۶. آنالیز حساسیت - عامل زاویه اصطکاک.

شاخص حساسیت (SI)		میزان نشست (cm)		میزان تغییر	زاویه اصطکاک (cm)
مدل سازی	سیستماتیک	مدل سازی	سیستماتیک		
۰٫۸۴۷۹	۰٫۴۷۶۳	۲٫۵	۱٫۴۳۰۳	۵۷	۱۵
۰٫۱۳۰۵	۰٫۴۹۹۲	۲٫۵	۱٫۵۴۴۷	۴۳	۲۰
۱٫۶۵۹۷	۰٫۵۲۵۲	۲٫۵۵	۱٫۶۷۰۳	۲۹	۲۵
۳٫۲۹۰۷	۰٫۵۵۴۶	۲٫۵۷	۱٫۸۰۹۵	۱۴	۳۰
-	-	۲٫۵۸	۱٫۹۶۵۲	۰	۳۵
-۳٫۲۷۶۲	۰٫۶۲۷۱	۲٫۵۸	۲٫۱۴۱۳	-۱۴	۴۰

۳.۸. تأثیر تغییرات هم‌زمان زاویه اصطکاک خاک و قطر و ضخامت لایه‌ی خاکی در میزان نشست

در بخش کنونی، برای مقادیر مختلف زاویه اصطکاک، پارامترهای قطر لوله و ضخامت لایه‌ی خاکی روی لوله بررسی شده است. ابتدا، زاویه اصطکاک برای ۶ مقدار مختلف از نسبت که در آن با ثابت نگه داشتن قطر حفاری (معادل $d = 1.5m$) مقدار ضخامت خاک بالای لوله تغییر پیدا کرده است، بررسی شده است. میزان تغییرات لایه‌ی خاک از ۲٫۴ تا ۷٫۵ متر در نظر گرفته شده است. در شکل ۱۰، نتایج تحلیل به صورت نمودار ارائه شده است که مطابق آنها هر چه نسبت ارتفاع لایه‌ی خاکی به قطر لوله، عدد کمتری باشد (به عبارتی هر چه عمق حفاری کاهش یابد)، شیب تغییرات نشست افزایش و مقادیر نشست بزرگ‌تری به دست می‌آید. با بررسی تک‌تک نمودارها برای یک نسبت ثابت از H/D می‌توان دریافت با افزایش زاویه اصطکاک، میزان نشست افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش عمق استقرار لوله، علاوه بر کاهش مقدار نشست، شیب تغییرات نشست نیز کاهش می‌یابد. به عنوان مثال، اگر نسبت H/D معادل با ۲٫۵ در نظر گرفته شود، با افزایش زاویه اصطکاک از مقدار ۵ به ۴۰ درجه، تغییرات نشست از ۲٫۰۹ به ۲٫۹۲ میلی‌متر افزایش می‌یابد. در حالی که برای نمودارهای با نسبت H/D بیشتر، این تغییر بسیار کم و برای نسبت‌های کمتر بسیار بالاتر است.

بار دیگر برای ۹ مقدار مختلف از نسبت H/D ، با ثابت نگه داشتن ضخامت خاک بالای لوله، مقدار قطر حفاری تغییر پیدا کرده است. در این حالت ضخامت لایه‌ی خاکی، ۳٫۷۵ متر در نظر گرفته شده و بازه‌ی تغییرات قطر لوله از ۰٫۶۵ الی ۱٫۹ بوده است. شکل ۱۱، میزان نشست را نشان می‌دهد که مطابق آن با ثابت نگه داشتن ضخامت لایه‌ی خاکی، با افزایش قطر لوله، میزان نشست افزایش می‌یابد. همچنین زیاد شدن زاویه اصطکاک نیز به این افزایش کمک می‌کند.

با توجه به رابطه‌ی ۴ با افزایش زاویه اصطکاک، عرض مقطع نشست افزایش می‌یابد، زیرا در این صورت مقدار β در حال کاهش است. در جدول ۶، برای نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی و رابطه‌ی نشست سیستماتیک، مقدار شاخص حساسیت محاسبه شده است.

همان‌طور که ملاحظه می‌شود، میزان نشست محاسبه شده از روی مدل‌سازی عددی نسبت به نتایج سیستماتیک مقادیر بیشتری نشان می‌دهد. احتمالاً علت را می‌توان این‌گونه تفسیر کرد: از آنجایی که نشست سیستماتیک بر پایه‌ی هندسه‌ی مدل است، تأثیر برخی از پارامترها، مانند: سطح آب زیرزمینی، تأثیر لایه‌های خاکی دیگر و... در نظر گرفته نمی‌شود.

در حالت مبنا برای زاویه اصطکاک 35° ، میزان نشست سیستماتیک ۱٫۹۶ سانتی‌متر و نشست حاصل از مدل‌سازی ۲٫۵۸ به دست آمده است. با اعمال ۲۹٪ تغییر در زاویه اصطکاک و انتخاب زاویه اصطکاک 25° ، نتیجه بر روی شاخص SI بررسی شده است. در این حالت برای نشست سیستماتیک، میزان شاخص حساسیت 0.5252 به دست آمده است. به این معنی که با اعمال ۲۹٪ تغییر در عامل زاویه اصطکاک، در میزان نشست سیستماتیک به میزان $15.23\% = 0.5252 \times 0.29$ تغییر خواهد بود. میزان شاخص حساسیت برای نشست حاصل از مدل‌سازی عددی ۱٫۶۵۹۷ است، یعنی با اعمال ۲۹٪ تغییر در عامل اندازه‌ی قطر لوله، در میزان نشست حاصل از مدل‌سازی عددی به مقدار $48.13\% = 1.6597 \times 0.29$ تغییر خواهد بود. با مقایسه‌ی میزان نشست برای دو حالت مذکور ملاحظه می‌شود که اگرچه مقدار نشست در حالت مدل‌سازی بیشتر از حالت سیستماتیک است، ولی میزان تغییرات آن کمتر است و در نهایت با در نظر گرفتن شاخص حساسیت، تأثیر نشست حاصل از مدل‌سازی بیشتر می‌شود.

• با مقایسه‌ی نتایج حاصل از شاخص حساسیت در قطر لوله و زاویه اصطکاک ملاحظه می‌شود که پارامتر تغییر در قطر لوله بیشتر در نشست سیستماتیک اثر می‌گذارد و زاویه اصطکاک غالباً در نشست حاصل از مدل‌سازی تأثیرگذار است.

۹. نتیجه گیری

پارامترهایی مانند: سطح آب زیرزمینی، جنس خاک، میزان نفوذپذیری خاک، نیروی اصطکاکی ایجاد شده توسط ماشین حفاری، سر بار وارده به محل و... در میزان تغییر شکل خاک اطراف لوله نقش دارند و باعث بروز مشکلاتی مانند نشست و با برآمدگی سطح زمین می‌شوند. یکی از روش‌های بررسی تأثیر پارامترهای مختلف، ارزیابی حساسیت پارامترهاست. در رابطه با سطح آب زیرزمینی با افزایش سطح آب زیرزمینی، علی‌رغم اینکه میزان نیروی جک‌زنی برای هر دو نوع خاک‌های نفوذپذیر و نفوذناپذیر کاهش می‌یابد، با افزایش سطح آب زیرزمینی، نشست افزایش می‌یابد. تأثیر افزایش فشار آب زیرزمینی در خاک‌های با نفوذپذیری کم، قابل چشم‌پوشی است. زیرا به دلیل سرعت بالای تونل‌زنی، اجازه‌ی زهکشی به خاک داده نمی‌شود و می‌توان شرایط زهکشی نشده را در این حالت در نظر گرفت. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، میزان نشست محاسبه شده از روی مدل‌سازی عددی نسبت به نتایج سیستماتیک، مقادیر بیشتری نشان می‌دهد. احتمالاً علت را می‌توان این‌گونه تفسیر کرد از آنجایی که نشست سیستماتیک بر پایه‌ی هندسه‌ی مدل است، تأثیر برخی از پارامترها مانند: سطح آب زیرزمینی، تأثیر لایه‌های خاکی دیگر و... در نظر گرفته نمی‌شود. با مقایسه‌ی نتایج حاصل از شاخص حساسیت در قطر لوله و زاویه‌ی اصطکاک ملاحظه می‌شود که پارامتر تغییر در قطر لوله، بیشتر در نشست سیستماتیک اثر می‌گذارد و زاویه‌ی اصطکاک غالباً در نشست حاصل از مدل‌سازی مؤثر است.

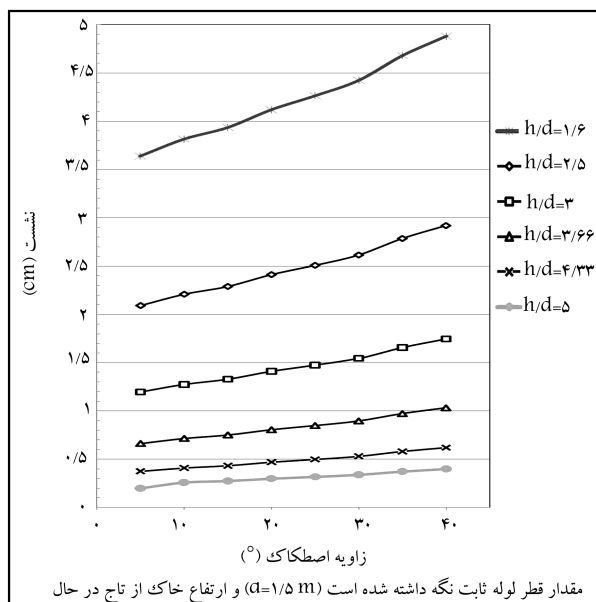
هر چه نسبت ارتفاع لایه‌ی خاکی به قطر لوله، عدد کمتری باشد (به عبارتی هر چه عمق حفاری کاهش یابد)، شیب تغییرات نشست افزایش و مقادیر نشست بزرگ‌تری به دست می‌آید. با بررسی تک‌تک نمودارها برای یک نسبت ثابت از H/D می‌توان دریافت با افزایش زاویه‌ی اصطکاک، میزان نشست افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش عمق استقرار لوله، علاوه بر کاهش مقدار نشست، شیب تغییرات نشست نیز کاهش می‌یابد. با ثابت نگه داشتن ضخامت لایه‌ی خاکی، با افزایش قطر لوله، میزان نشست افزایش می‌یابد و زیاد شدن زاویه‌ی اصطکاک نیز به آن کمک می‌کند.

تقدیر و تشکر

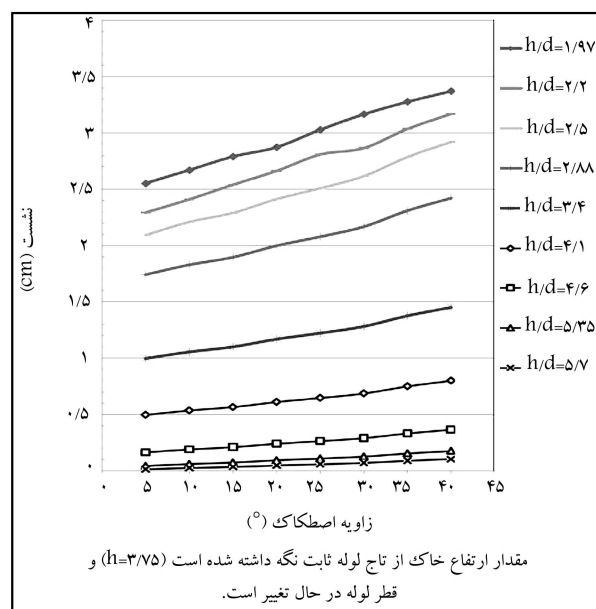
در پایان لازم است از همکاری صمیمانه‌ی جناب آقای مهندس سلطان سنجر، رئیس کارگاه پروژه‌ی میکروتونلینگ شبکه‌ی جمع‌آوری فاضلاب مشارکت کیسون- مشرف تشکر و قدردانی شود.

منابع (References)

1. Leca, E. and New, B. "Settlements induced by tunneling in Soft Ground", *Tunneling and Underground Space Technology*, **22**, pp. 119-147 (2007).
2. Peck, R.B. "Deep excavations and tunneling in soft



شکل ۱۰. تأثیر هم‌زمان تغییرات پارامترها در میزان نشست با مقدار قطر لوله ثابت.



شکل ۱۱. تأثیر هم‌زمان تغییرات پارامترها در میزان نشست با مقدار ارتفاع خاک قطر لوله در حال تغییر است.

ground", State of the Art Report, *Proceedings, of 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, pp. 225-325, State of Mexico City, Mexico (1969).

3. Schmid, L.B. "Settlements and ground, l'v10vements associated with tunneling in Soil", Ph.D. Thesis, University of Illinois, Urbana, IL, pp. 1-22 (1969).

4. Bennett, R.D., *Jacking Loads and Ground Deformations Associated with Microtunneling*, Mississippi State University (1986).
5. Peck, R.B., Hendron, A.J. and Mohraz, B. "State of the art of the soft ground tunneling", *Proceedings of first North American Rapid Excavation and Tunneling Conference (RET C)*, AIME, 1, Chapter 19, pp. 259-286 (1972).
6. Rogers. C. "Comparison of ground disturbance for trenching and pipe Bursting Operations: Part t", *VO-DIG Engineering*, **2**(4), pp.9-20 (1995).
7. Cording, E., Hansmire, J., MacPherson, W.H., Lenzini, H.H. and Vanderohe A.P. "Displacements around tunnels in soil", Report No. DOT-TST-TGT-21, U.S. Department of Transportation (Aug 1976).
8. Atalah, A. "Case history of microtunneling through a very soft soil condition", *International Journal of Economics and Management Engineering (IJEME)*, **3**(1), pp. 23-28 (Mar 2013).
9. Boyce, G., Havekost, M., Camp, C. and Joyal, N. "Grade control for microtunnels in very loose and very soft soils", North American Society for Trenchless Technology (NASTT), Paper B-5-02 (May 2-7 2010).
10. Wen, G., Koo, D.H. and Liu, W. "Analysis on failure factors and a case study for a microtunneling pipe installation", American Society of Civil Engineers (2011).
11. Olson, P.O., Ariaratnam, S.T. and Lueke, J.S., "Jacking force and productivity analysis of pilot tube microtunneling installations", American Society of Civil Engineers (2015).
12. Liu, W.-T. and Lu, X.-Y. "3D numerical analysis of soil structure interaction behaviors of pipe jacking construction", *Applied Mechanics and Materials*, **2**, pp. 534-538 (2012).
13. Chakeri, H., Ozcelik, Y. and Unver, B. "Effects of important factors on surface Settlement prediction for metro tunnel excavated by EPB", *Tunnelling and Underground Space Technology*, **36**, pp. 14-23 (2013).
14. Chen, S.L., Gui, M.W. and Yang, M.C. "Applicability of the principle of superposition in estimating ground surface settlement of twin-and quadruple-tube tunnels", *Tunnelling and Underground Space Technology*, **28**, pp. 135-149 (2012).
15. Bennett, D. "Jacking force and ground deformations associated with microtunneling", Urbana, IL., Ph.D. Dissertation, The University of Illinois (1998).
16. Najafi, M. and Iseley, D.T. "Evaluation of PVC Pipe for Microtunneling", *In Proceedings of the Symposium on Buried Plastic Pipe Technology*, Philadelphia, American Society for Testing Material (1994).
17. *Micro Tunneling and Horizontal Drilling*, French National Project Microtunnels Guidelines /FSTT (2006).
18. *Technologies without Trench by Pipe Jacking and Microtunneling*, Kison Company (2005).
19. Hossaini, S.M., Shaban, M. and Talebnejad, A. "Relationship between twin tunnels distance and surface subsidence in soft ground of Tabriz Metro-IRAN", *Coal Operators' Conference* (2012).
20. ITASCA, FL3D Version 3.0, "Fast lagrangian analysis of continua in 3 dimensions", ITASCA Consulting Group Inc. (2005).
21. *Report of Geo-Technnic Study for Sewage Scheme of Hamedan*, Mahab Ghods Consulting Engineering Company (2005).