نشریه علمی-پژوهشی "مهندسی معدن"
Iranian Journal of Mining Engineering (IRJME)
دوره پنجم، شماره دهم، سال ۱۳۸۹، صفحه ۳۹ تا ۴۶
Vol. 5, No.10, 2010, pp.39-46

تاثیر طول گام و مراحل حفر در روش حفاری مرحله ای بر میزان نشست سطح زمین در خط ۴ متروی تهران

مصطفی شریف زاده[۱]*; محمد عفیفی پور [۲]; مهدی تسوجی زاده[۳]

۱- استادیار دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، Email: sharifzadeh@aut.ac.ir
۲- دانشجوی دکترای مکانیک سنگ، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی دانشگاه صنعتی امیرکبیر Email:afifipour@aut.ac.ir
۳- دانشجوی کارشناسی ارشد راه و ترابری، دانشکده مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم تحقیقات(حصارک)

(دریافت ۲۸ آذر ۱۳۸۸ ، پذیرش ۲۱ شهریور ۱۳۸۹)

چکیده

برای کنترل نشست ناشی از حفر تونل در مناطق شهری و ایمنی سازه‌های مجاور، عوامل تاثیرگذار در عملیات حفر باید با توجه به شرایط ژئوتکنیکی منطقه و روش اجرا به درستی تعیین شود. در روش حفاری مرحله ای، طول گام و توالی مراحل حفاری اصلی‌ترین عوامل تاثیرگذار از بعد اقتصادی و اجرائی هستند. این دو عامل ارتباط تنگاتنگی با زمان و هزینه اجرای تونل‌ها به روش حفاری مرحله ای دارند، بنابراین تعیین بهینه آنها یکی از چالش‌های اصلی به شمار می‌آید. در این مقاله، تاثیر تغییرات طول گام و مراحل حفاری در خط ۴ متروی تهران، با توجه به در حال اجرا بودن آن، بر میزان نشست سطح مورد بررسی قرار گرفت. از روش سه‌بعدی اجزای محدود برای تخمین نشست در حالت‌های مختلف طول گام و توالی مراحل حفاری استفاده شد. نتایج نشان داد که با توجه به خواص ژئوتکنیکی منطقه و ابعاد حفریه، طول گام‌های حفاری محافظه‌کارانه تعیین شده و پیشنهاد می‌شود برای بالا بردن راندمان اجرائی، واحد طول گام حفاری در زیر خیابانها در قسمت فوقانی ۲ متر و در قسمت زیرین ۳متر، و در زیر ساختمانها واحد طول گام حفاری در قسمت فوقانی ۱ متر و در قسمت زیرین ۳متر انتخاب شود.

کلمات کلیدی

حفاری مرحله ای تونل ، طول گام حفاری، نرم‌افزارplaxis 3D، نشست سطح، مراحل حفاری

* نویسنده مسئول و عهده‌دار مکاتبات

۱- مقدمه

در مناطق شهری با توجه به کمبود فضای سطحی، حفاری تونل‌ها به منظور توسعه سیستم حمل‌ونقل امری ضروری است. نشست ناشی از حفر تونل‌ها ممکن است باعث ایجاد صدماتی بر سازه‌های مجاور تونل شود. در این قبیل پروژه‌ها اصلی‌ترین چالش، کنترل نشست و آسیب وارده به سازه‌های سطحی و زیرسطحی است[۱].

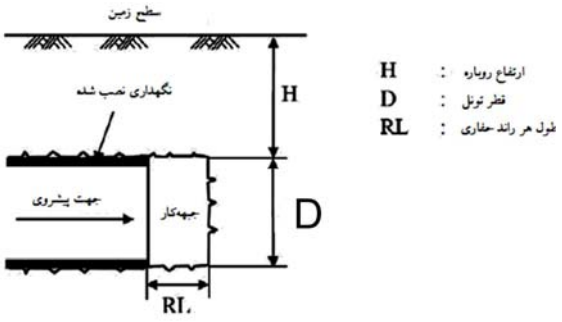
با توجه به واقع شدن مناطق شهری در محیط‌های خاکی سست و نرم، حفاری اغلب بوسیله ماشین‌های حفاری مکانیزه تمام مقطع و یا روش حفاری مرحله ای انجام می‌گیرد. برای کنترل میزان نشست در هر روش، ابتدا باید عوامل تاثیرگذار در هر روش و میزان تاثیر آنها مورد بررسی قرار گیرد. مطالعات متعددی در این خصوص انجام شده است که از جدیدترین آنها می‌توان به مطالعه ورمیر(۲۰۰۲) اشاره کرد که به کمک نرم افزار PFC و با اعتبارسنجی داده‌های ورودی نرم‌افزار با تست‌های سه‌محوری ،پایداری جبهه‌کار در طول گام‌های مختلف را مورد بررسی قرار داد[۲]. در همین چارچوب، لی و شوبرت(۲۰۰۸) با ساخت مدل‌های فیزیکی مکانیزم و ارتباط بین همگرایی تونل و طول گام حفاری را تعیین کردند[۳].

این مقاله به بررسی عوامل اصلی تاثیرگذار در میزان نشست ناشی از حفر تونل به روش حفاری مرحله ای و تعیین بهینه آن در خط ۴ متروی تهران پرداخته شده است. داده‌های مربوط به زمین‌شناسی، ژئوتکنیک منطقه و مشخصات تونل از مقطع دروازه دولت در خط ۴ متروی تهران انتخاب شده است. دلیل انتخاب این مسیر، در حال اجرا بودن و روند توسعه و گسترش متروی تهران در این ناحیه است. بنابراین با توجه به روش حفاری، بهینه کردن این عوامل در روش اجرا تونل در این مسیر و مسیرهای احتمالی عبوری از این منطقه در آینده بسیار حائز اهمیت است.

در روش حفاری مرحله ای اصلی‌ترین عوامل تاثیرگذار در میزان نشست سطح، طول گام و توالی مراحل حفاری تونل است. به طور کلی، طول گام (RL) به عنوان فاصله یا طولی از دهانه نگهداری نشده بیان می‌شود که در یک مرحله اجرا می‌شود[۴]. در شکل۱ شماتیکی از تعریف طول گام حفاری نشان داده شده است.

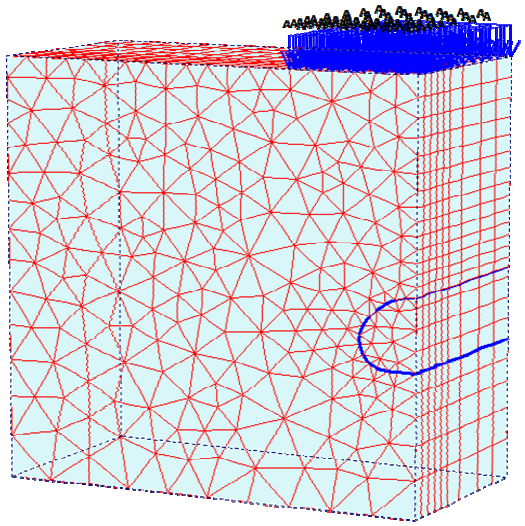
۲-معرفی مساله

برای بررسی میزان تاثیر عوامل طول گام و توالی مراحل حفاری، مدل سه‌بعدی مشابه شکل ۲ ساخته شده است.



شکل۱:معرفی طول گام حفاری[۲]

مطابق شکل، مقطع تونل به صورت نعل اسبی با شعاع ۴/۵ متر در قسمت تاج و فاصله تاج تونل تا سطح زمین ۱۴ متر است. سطح آب زیرزمینی در کل مسیر در زیر تراز تونل قرار دارد. در شکل۲، بارگسترده سطحی ناشی از ترافیک سطح خیابان را نشان می دهد که مقدار آن $2ton/m^2$ برآورد شده است[۵]. با توجه به تقارن مساله، نیمی از تونل تحلیل قرار شده است. این به دلیل، کوچک شدن ماتریس سختی حاصل در روش اجزاء محدود و افزایش سرعت اجرای برنامه کامپیوتری است.



شکل۲: هندسه سه‌بعدی مدل با اعمال بار ترافیکی در سطح خیابان

برای بررسی این مساله، از داده‌های مربوط به ایستگاه دروازه دولت خط ۴ متروی تهران استفاده شده است. در جدول ۱ خواص ژئوتکنیکی لایه خاک نشان داده شده است. واقع شدن تهران روی یک مخروط افکنه باعث شده که در امتداد شرقی- غربی تغییرات نا چیزی در خواص ژئوتکنیکی و دانه بندی‌ها مشاهده شود[۵]. بنابراین نتایج این تحلیل برای ادامه خط ۴ و همچنین خطوطی که احتمالاً در آینده از محدوده این مسیر

عبور می‌کند، به عنوان تخمین و دید اولیه در مورد این عوامل قابل استفاده است.

۳-بررسی تاثیر توالی مراحل حفاری

یکی از عوامل مهم در کاهش نشست زمین در محیط‌های سست، حفاری مرحله‌ای است. گرچه حفاری مرحله‌ای باعث کند شدن روند اجرای پروژه می‌شود ولی در عوض پایداری و ایمنی بیشتری در چنین محیط‌هائی را مهیا می‌کند.[۱و۳].

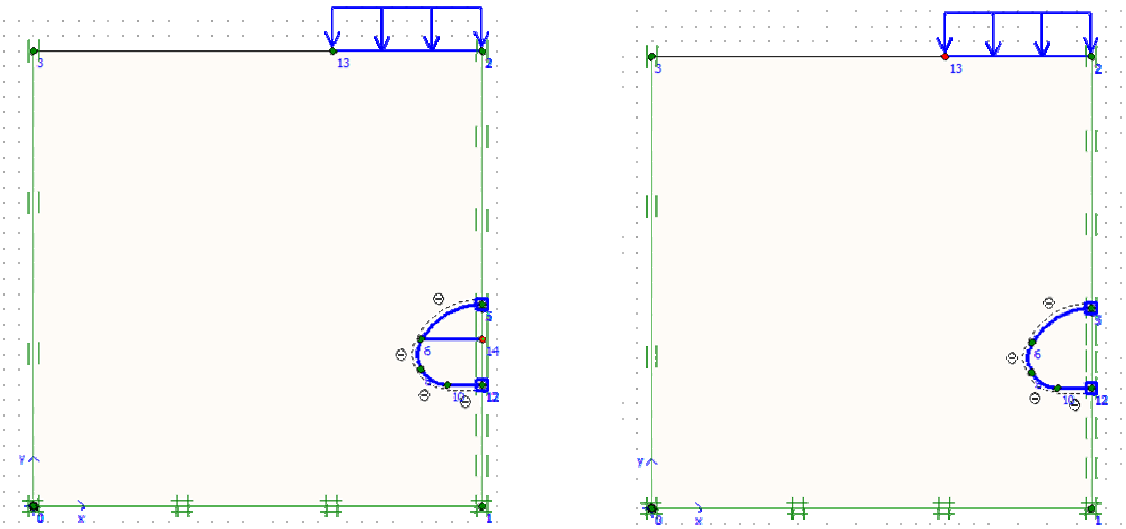
با توجه به قطر تونل و خواص ژیو مکانیکی خاک محل، گرچه ممکن است حفاری تمام مقطع نیز جوابگو باشد. اما با توجه به شهری بودن محیط، ایمنی و تاثیر روی سازه‌های سطحی چالش اصلی در این قبیل پروژه‌ها است و باید حرکت زمین و جابجائی‌های حاصل از تونلسازی در حد مجاز باشند. بنابر این حفر مرحله ای برای کنترل جابجایی های زمین ضروری است.

در این بخش به کمک نرم افزار Plaxis 2D، مقایسه‌ای بین حفاری تمام مقطع و حفاری دو مرحله‌ای در محیط مورد نظر انجام شد که در شکل ۳ مقطع مدل‌ها نشان داده شده است.

منحنی نشست حاصل از حفر تونل در حالت تمام مقطع و مراحل دوگانه در حفاری مرحله‌ای در شکل۴ نشان داده شده است. میزان نشست مجاز اعلام شده از طرف مشاور طراح عبارت از: ۱ سانتی‌متر زیر ساختمان‌ها و ۲ سانتی‌متر زیر خیابان‌ها اعلام شده بود[۴]. مقادیر نشست در حالت حفاری مرحله‌ای کمتر از این مقادیر مجاز است، ولی در حفاری تمام مقطع مقدار نشست از مقدار نشست مجاز در زیر ساختمان‌ها بیشتر است. در عمل نیز در اجرای تونل‌ها در خط ۴ متروی تهران، حفاری به صورت دو مرحله‌ای انتخاب شده است.

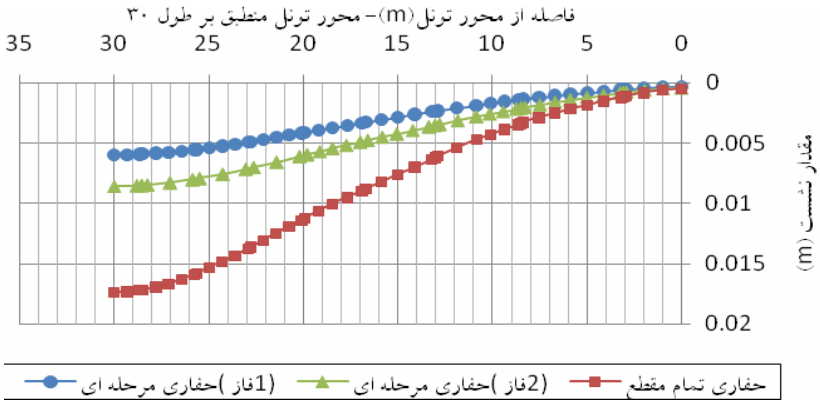
جدول۱: خواص ژئوتکنیکی محدوده دروازه دولت در خط ۴ متروی تهران[۵]

چگالی خشک (ton/m^3)	چگالی اشباع (ton/m^3)	مدول دگر شکلی (kg/cm^2)	چسبندگی (kg/cm^2)	زاویه اصطکاک (°)	ضریب پواسون (υ)	زاویه اتساع (°)	مدل رفتاری
۲	۲/۱	۹۰۰	۰/۲۵	۳۸	۰/۳	۱۰	M-C



الف ب

شکل۳: مقطع عرضی مدل در حالت حفاری تمام مقطع(الف)، و مرحله‌ای(ب)



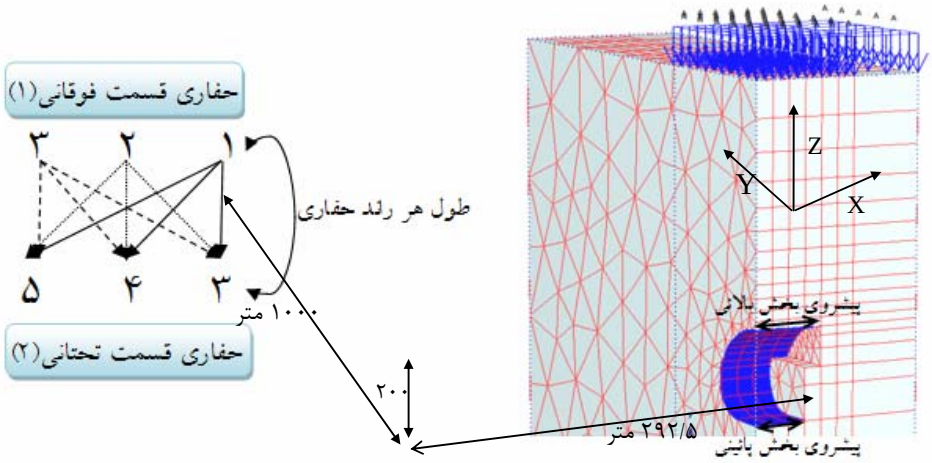
شکل۴: منحنی نشست برای حفاری مرحله‌ای و تمام مقطع

۴-تاثیر طول گام حفاری

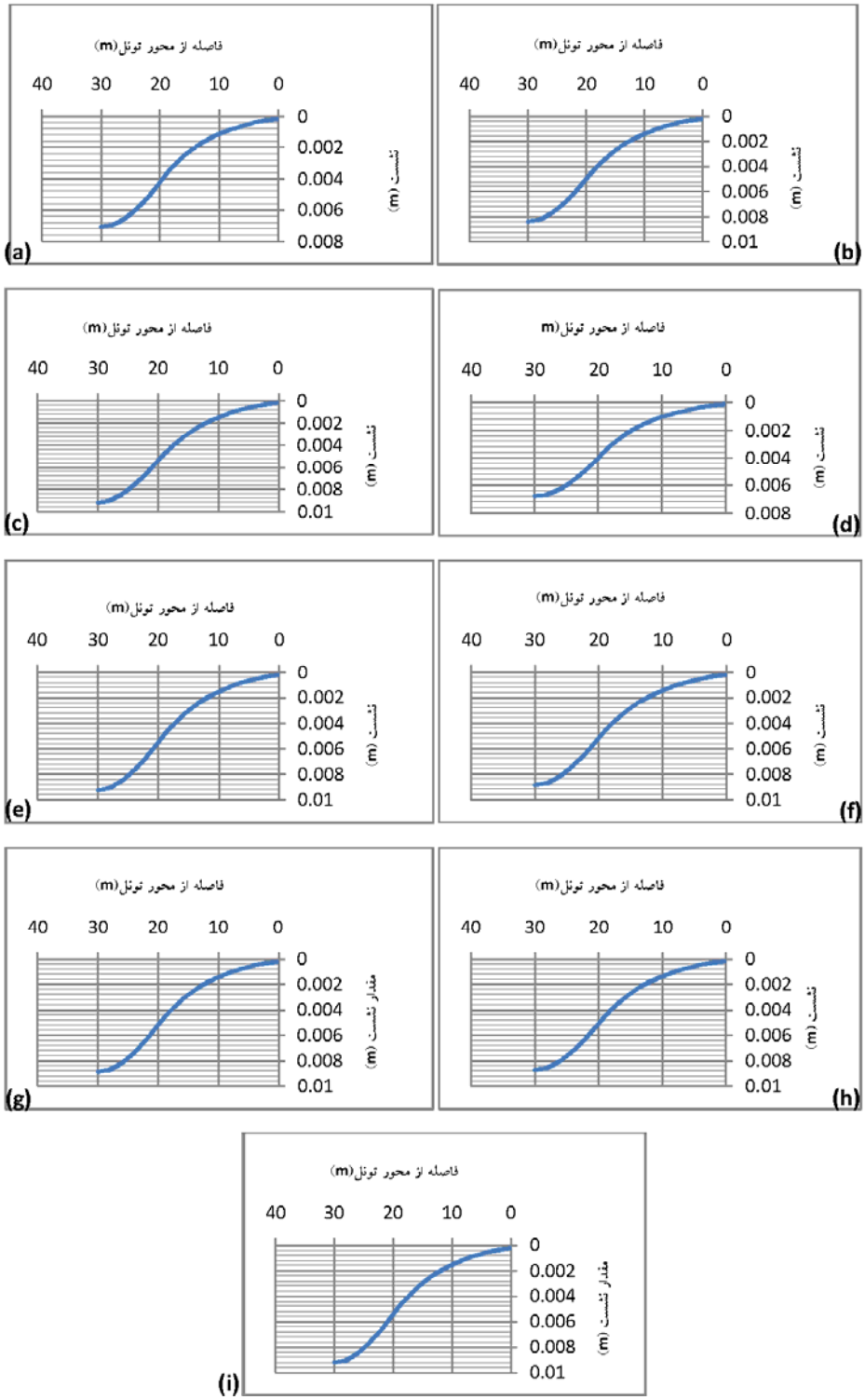
یکی دیگر از عوامل مهم و موثر در میزان نشست سطح زمین ناشی از حفر یک تونل در روش حفاری مرحله ای، طول هر گام حفاری در هر جبهه‌کار است. اکثر محققین بر این عقیده‌اند که طول هر گام حفاری تاثیر قابل ملاحظه‌ای روی پتانسیل ریزش جبهه‌کار و دهانه خود پایدار و در کل، پایداری تونل دارد. علاوه بر موارد گفته شده، هزینه و زمان برای اجرای یک تونل، وابستگی شدیدی به انتخاب این عامل دارد[۷]. در اجرای تونل خط ۴، مقدار هر گام حفاری در قسمت فوقانی را ۱ متر و در قسمت زیرین بین ۳ تا ۴ متر در نظر گرفته شده است[۶]. در این تحقیق مقدار نشست به ازای مقادیر مختلف طول گام برآورد، و مقدار مناسب برای حفر تونل پیشنهاد شده است.

۴-۱- مراحل تحلیل

برای انجام تحلیل‌ها از نرم افزار سه بعدی Plaxis 3D استفاده شد که قابلیت بالائی در مدلسازی محیط‌های خاکی دارد. بدین منظور برای حفاری قسمت فوقانی سه مقدار ۱، ۲ و ۳ متر و برای قسمت زیرین نیز سه مقدار ۳، ۴ و ۵ متر را به عنوان طول هر گام حفاری در نظر گرفته شد و در هر تحلیل مقادیر نشست حداکثر برای هر مقدار گام حفاری تعیین شد. انتخاب این مقادیر براساس مقادیر واقعی در اجرای تونل انتخاب شده است. به طور کلی ۹ حالت مختلف ترکیب گامهای حفاری قسمت فوقانی و تحتانی وجود که در شکل ۵ به صورت شماتیک ارائه شده است[۶]. برای هر یک از حالات نه‌گانه، یک مدلسازی و تحلیل مستقل برای حفر مرحله‌ای تونل انجام گرفت. در شکل ۶، منحنی نشست حاصل از تحلیل برای هر حالت نشان داده شده است.



شکل۵: زوج‌های ممکن از طول گام‌های حفاری در قسمت زیرین و فوقانی



شکل۶: منحنی نشست برای طول گامهای مختلف، (**a**) حالت ۳-۱، (**b**) حالت ۴-۱، (**c**) حالت۵-۱، (**d**) حالت ۳-۲، (**e**)حالت ۴-۲، (**f**)حالت ۵-۲، (**g**)حالت ۳-۳، (**h**)حالت ۴-۳، (**i**)حالت ۵-۳. (عددسمت چپ: طول گام قسمت بالائی و عدد سمت راست طول گام قسمت پائینی است)

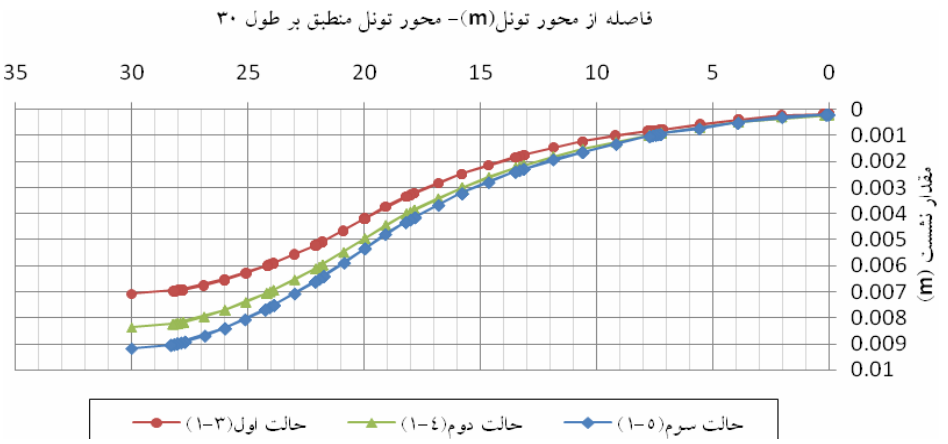
البته لازم به ذکر است که در حفاری مرحله‌ای، باید همواره جبهه‌کار فوقانی زودتر حفاری شده و نسبت به جبهه‌کار زیرین جلوتر باشد[۶]. به‌همین ترتیب، در حالت‌های نه‌گانه، واحد طول گام بیان شده است و پیشروی جبهه‌کارها به گونه‌ای انجام می‌شود که همواره جبهه‌کار فوقانی جلوتر از پائینی قرار داشته باشد، به عنوان نمونه برای حالت ۳-۲، دوبار پیشروی در قسمت بالائی به طول ۲ متر و یک‌بار در قسمت پائینی به طول ۳ متر انجام می‌گیرد.

مقادیرحداکثر نشست سطح و جابجائی تاج تونل در حالت‌های مختلف در جدول ۲ نشان داده شده است. براساس نتایج بدست آمده، که حالت چهارم و با طول گام حفاری ۲ متر برای قسمت فوقانی و۳ متر برای قسمت زیرین کمترین میزان نشست سطح و جابجائی تونل را در پی دارد. اما در صورتیکه با توجه به فاصله قابهای فلزی نگهداری و کیفیت زمین امکان اجرای حالت ۴ وجود نداشته باشد، گزینه مطلوب حالت ۱ خواهد بود که در آن طول گام حفاری ۱ متر برای قسمت فوقانی و۳ متر برای قسمت زیرین میزان نشست سطح و جابجائی تونل کمتری را نسبت به سایر گزینه ها دارد. پیشنهاد می‌شود که در ادامه روند اجرای تونل با توجه به کیفیت زمین و فاصله قابها یکی از دو حالت ۴ یا ۱ برای طول گام حفاری انتخاب شود.

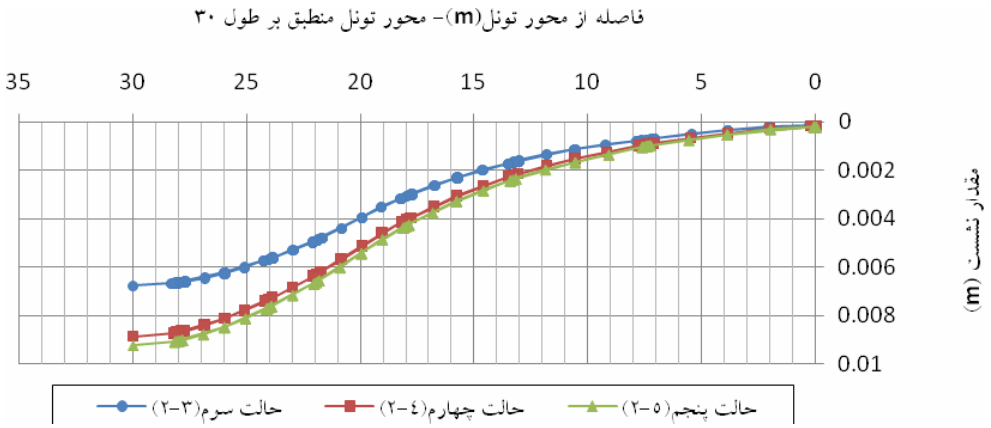
به منظور مقایسه تغییر طول گام حفاری در هر قسمت جبهه‌کار با ثابت بودن طول گام در قسمت دیگر بین مقادیر نشست به ازای مقادیر ثابت طول گام در قسمت فوقانی و تغییر در قسمت زیرین مقایسه شده و در شکل‌های ۷، ۸، ۹ نشان داده شده است. مقایسه شکل‌ها نشان می‌دهد که هرچه اختلاف بین دو واحد طول گام قسمت فوقانی و زیرین کمتر باشد، اختلاف بین جابجائی‌ها و روند تغییرات کمتر می‌شود.

جدول ۲: مقایسه مقادیر نشست و جابجائی حداکثر به ازای مقادیر مختلف واحد طول گام حفاری

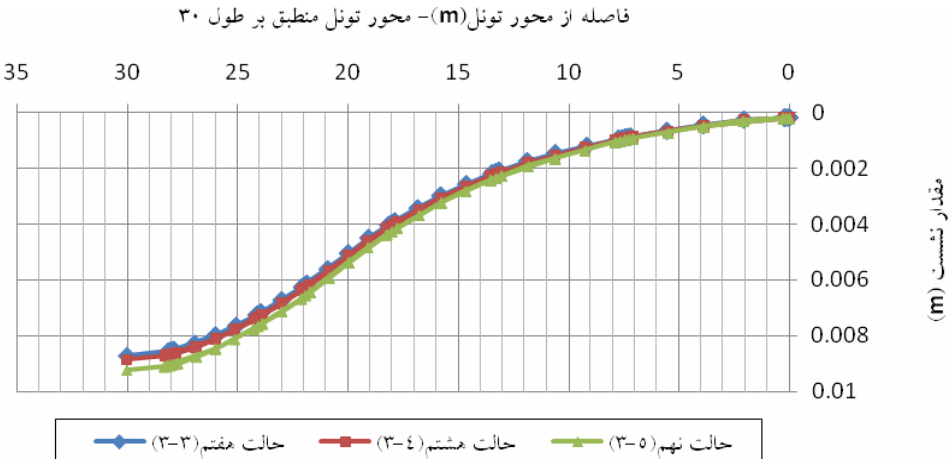
حالت	واحد طول گام در قسمت فوقانی (۱)	واحد طول گام در قسمت تحتانی (۲)	حداکثر نشست در سطح (mm)	ماکزیمم تاج تونل (mm)
۱	۱	۳	۷/۰۳	۱۸/۱۲
۲	۱	۴	۸/۴۱	۲۱/۶۹
۳	۱	۵	۹/۲۱	۲۴/۱۴
۴	۲	۳	۶/۷۸	۱۶/۱۷
۵	۲	۴	۸/۸۸	۲۱/۴۲
۶	۲	۵	۹/۲۵	۲۲/۰
۷	۳	۳	۸/۷۵	۱۹/۷۹
۸	۳	۴	۸/۸۸	۱۹/۸۳
۹	۳	۵	۹/۲۴	۲۰/۳۶



شکل۷: منحنی‌های نشست به‌ازای مقدار ثابت واحد طول گام ۱متر برای بخش فوقانی و تغییر آن در بخش زیرین



شکل۸: مقایسه منحنی نشست به‌ازای مقدار ثابت واحد طول گام۲ متری برای بخش فوقانی و تغییر آن در بخش زیرین



شکل ۹: مقایسه منحنی نشست به‌ازای مقدار ثابت واحد طول گام ۳متری برای بخش فوقانی و تغییر آن در بخش زیرین

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله به بررسی تاثیر طول گام حفاری در اجرای تونل خط ۴ متروی تهران، با توجه به در حال اجرا بودن آن، و با هدف تعیین زوج طول گام حفاری مناسب در قسمت فوقانی و زیرین مقطع تونل پرداخته شد. انتخاب این عامل تاثیر زیادی در هزینه و زمان اجرای یک تونل دارد. با توجه به واحد طول گام حفاری در خط ۴، ۹ زوج طول گام حفاری مورد تحلیل قرار گرفت. نتایج نشان داد که در حالت چهارم با واحد طول گام در قسمت فوقانی ۲ متر و قسمت زیرین ۳ متر و در حالت اول با چهارم با واحد طول گام در قسمت فوقانی ۱ متر و قسمت زیرین ۳ متر باعث مقدار نشست کمتری در سطح و جابجایی تاج تونل حاصل می‌شود. با افزایش مقدار گام حفاری در قسمت زیرین با ثابت بودن مقدار طول گام در قسمت فوقانی مقدار نشست حداکثر زیاد می‌شود. علاوه بر آن، با کم شدن اختلاف بین واحد طول گام حفاری در دو قسمت فوقانی و زیرین (مقایسه شکل‌های ۷، ۸ و۹) مقدار جابجائی‌ها و روند تغییرات کم می‌شود. با توجه به مقادیر نشست حداکثر بدست آمده در حالت‌های مختلف، می‌توان گفت که مقادیر واقعی انتخاب شده برای طول گام حفاری در اجرای این تونل تا حدی محافظه‌کارانه بوده است و می‌توان برای افزایش راندمان و سرعت در روند اجرای تونل، مقادیر بزرگتری را برای طول گام حفاری در نظر گرفت. نکته مهم دیگر اختلاف بین مقادیر نشست مجاز در زیر ساختمان‌ها و زیر خیابان‌ها است. با این مقادیر، البته با توجه به امکان اجرایی آن توسط پیمانکار و تجهیزات موجود، می‌توان در زیر خیابان‌ها در این محیط و با این خواص، مقدار طول گام در هر قسمت را افزایش داد. ولی

در زیر ساختمان‌ها به‌دلیل نزدیکی مقادیر نشست حداکثر با مقادیر نشست مجاز، طول گام حفاری کوچک‌تری پیشنهاد می‌شود.

منابع

[1] Marcio Muniz de Farias, Alvaro Henrique Moraes Junior, Andre Pacheco de Assis, 2004. "*Displacement control in tunnels excavated by NATM: 2-D numerical simulation*". Journal of Tunneling and Underground Space Technology, Vol. 19, pp. 283-293.

[2] Vermeer, P.A., Ruse, N., Marcher, T., 2002. "Tunnel heading stability in drained ground". Felsbau 20 Vol. 6, pp. 8–18.

[3] Young-Zoo Lee, Wulf Schubert, 2008. "*Determination of the round length for tunnel excavation in weak rock*". Journal of Tunneling and Underground Space Technology,Vol. 23, pp. 221-231.

[4] M. Karakus, R.J. Fowell, 2003. "*Effects of different tunnel face advance excavation on the settlement by FEM*". Journal of Tunneling and Underground Space Technology, Vol. 18, pp. 513-523.

[۵] مهندسین مشاور پی سنگ، ۱۳۸۴، "مطالعات ژئوتکنیک خط ۴ مترو تهران".

[۶] مهدی تسوجی زاده، ۱۳۸۸، "**بررسی نشست زمین در اثر حفر تونل‌های کم عمق با تعمیم به خط چهار متروی تهران، مقطع دروازه دولت**"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد واحد علوم تحقیقات، صفحه ۱۱۰-۱۱۵.

[7] C.W.W. Ng, K.M. Lee, D.K.W. Tang, 2004, *"Three-dimensional numerical investigations of new Austrian tunneling method (NATM) twin tunnel interactions".* Canadian Geotechnical Journal, Vol. 41, pp. 523-539.