

تأثیر طول گام و مراحل حفر در روش حفاری مرحله ای بر میزان نشست سطح زمین در خط 4 متروی تهران

مصطفی شریف زاده^{1*}؛ محمد عفیفی پور²؛ مهدی تسوجی زاده³

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

(دریافت 28 آذر 1388، پذیرش 21 شهریور 1389)

چکیده

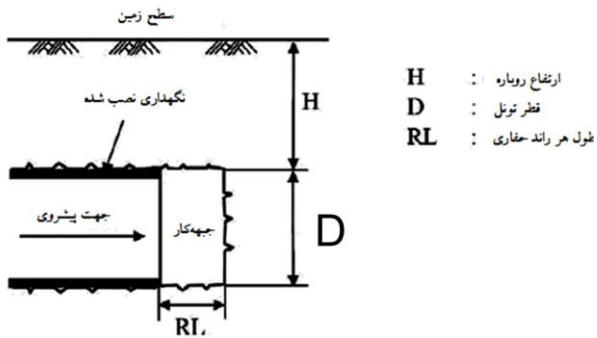
برای کنترل نشست ناشی از حفر تونل در مناطق شهری و ایمنی سازه‌های مجاور، عوامل تأثیرگذار در عملیات حفر باید با توجه به شرایط ژئوتکنیکی منطقه و روش اجرا به درستی تعیین شود. در روش حفاری مرحله ای، طول گام و توالی مراحل حفاری اصلی‌ترین عوامل تأثیرگذار از بعد اقتصادی و اجرایی هستند. این دو عامل ارتباط تنگاتنگی 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، تأثیر تغییرات طول گام و مراحل حفاری در خط 4 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 حفاری، طول گام‌های حفاری محافظه‌کارانه تعیین شده و پیشنهاد می‌شود برای بالا بردن راندمان اجرایی، واحد طول گام حفاری در زیر خیابانها در قسمت فوقانی 2 متر و در قسمت زیرین 3 متر، و در زیر ساختمانها واحد طول گام حفاری در قسمت فوقانی 1 متر و در قسمت زیرین 3 متر انتخاب شود.

کلمات کلیدی

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

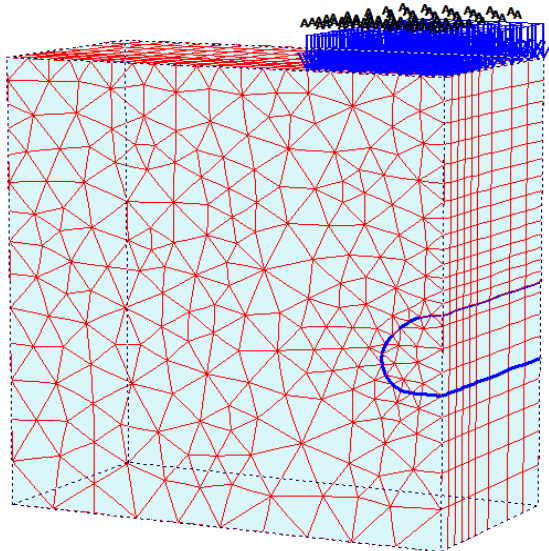
* نویسنده مسئول و عهده‌دار مکاتبات

1- مقدمه



شکل 1: معرفی طول گام حفاری [2]

مطابق شکل، مقطع تونل به صورت نعل اسبی با شعاع 4/5 متر در قسمت تاج و فاصله تاج تونل تا سطح زمین 14 متر است. سطح آب زیرزمینی در کل مسیر در زیر تراز تونل قرار دارد. در شکل 2، بارگسترده سطحی ناشی از ترافیک سطح خیابان را نشان می دهد که مقدار آن $2 \text{ ton} / \text{m}^2$ برآورد شده است [5]. 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.



شکل 2: هندسه سه بعدی مدل با اعمال بار ترافیکی در سطح خیابان

برای بررسی این مساله، از داده های مربوط به ایستگاه دروازه دولت خط 4 متروی تهران استفاده شده است. در جدول 1 خواص ژئوتکنیکی لایه خاک نشان داده شده است. واقع شدن تهران روی یک مخروط افکنه باعث شده که در امتداد شرقی-غربی تغییرات ناچیزی در خواص ژئوتکنیکی و دانه بندی ها مشاهده شود [5]. بنابراین نتایج این تحلیل برای ادامه خط 4 و همچنین خطوطی که احتمالاً در آینده از محدوده این مسیر

در مناطق شهری با توجه به کمبود فضای سطحی، حفاری تونل ها به منظور توسعه سیستم حمل و نقل امری ضروری است. نشست ناشی از حفر تونل ها ممکن است باعث ایجاد صدماتی بر سازه های مجاور تونل شود. در این قبیل پروژه ها اصلی ترین چالش، کنترل نشست و آسیب وارده به سازه های سطحی و زیرسطحی است [1].

با توجه به واقع شدن مناطق شهری در محیط های خاکی سست و نرم، حفاری اغلب بوسیله ماشین های حفاری مکانیزه تمام مقطع و یا روش حفاری مرحله ای انجام می گیرد. 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 می توان به مطالعه ورمیر (2002) اشاره کرد که به کمک نرم افزار PFC و با اعتبارسنجی داده های ورودی نرم افزار با تست های سه محوری، پایداری جبهه کار در طول گام های مختلف را مورد بررسی قرار داد [2]. در همین چارچوب، لی و شوبرت (2008) با ساخت مدل های فیزیکی مکانیزم و ارتباط بین همگرایی تونل و طول گام حفاری را تعیین کردند [3].

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 4 متروی تهران پرداخته شده است. داده های مربوط به زمین شناسی، ژئوتکنیک منطقه و مشخصات تونل از مقطع دروازه دولت در خط 4 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 اصلی ترین 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 می شود که در یک مرحله اجرا می شود [4]. در شکل 1 شماتیکی از تعریف طول گام حفاری نشان داده شده است.

2- معرفی مساله

برای بررسی میزان تاثیر عوامل طول گام و توالی مراحل حفاری، مدل سه بعدی مشابه شکل 2 ساخته شده است.

بنابر این حفر مرحله ای برای کنترل جابجایی های زمین ضروری است.

در این بخش به کمک نرم افزار Plaxis 2D، مقایسه ای بین حفاری تمام مقطع و حفاری دو مرحله ای در محیط مورد نظر انجام شد که در شکل 3 مقطع مدل ها نشان داده شده است. منحنی نشست حاصل از حفر تونل در حالت تمام مقطع و مراحل دوگانه در حفاری مرحله ای در شکل 4 نشان داده شده است. میزان نشست مجاز اعلام شده از طرف مشاور طراح عبارت از: 1 سانتی متر زیر ساختمان ها و 2 سانتی متر زیر خیابان ها اعلام شده بود [4]. مقادیر نشست در حالت حفاری مرحله ای کمتر از این مقادیر مجاز است، ولی در حفاری تمام مقطع مقدار نشست از مقدار نشست مجاز در زیر ساختمان ها بیشتر است. در عمل نیز در اجرای تونل ها در خط 4 متروی تهران، حفاری به صورت دو مرحله ای انتخاب شده است.

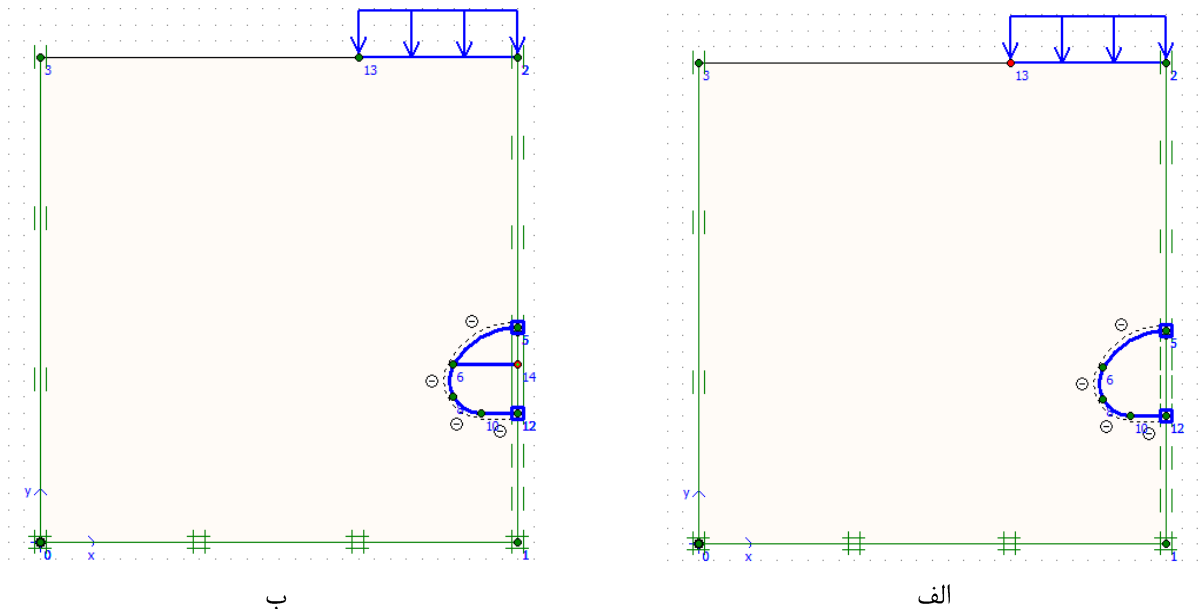
عبور می کند، به عنوان تخمین و دید اولیه در مورد این عوامل قابل استفاده است.

3- بررسی تاثیر توالی مراحل حفاری

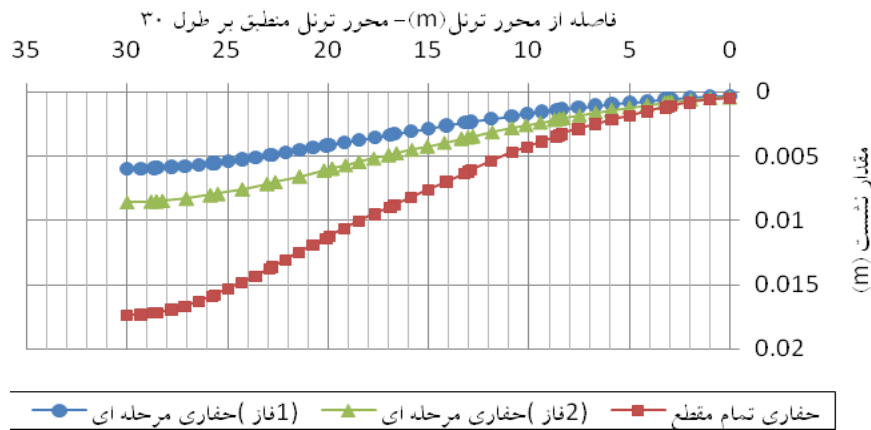
یکی از عوامل مهم در کاهش نشست زمین در محیط های سست، حفاری مرحله ای است. گرچه حفاری مرحله ای باعث کند شدن روند اجرای پروژه می شود ولی در عوض پایداری و ایمنی بیشتری در چنین محیط هایی را مهیا می کند. [1 و 3]. با توجه به قطر تونل و خواص ژئو مکانیکی خاک محل، گرچه ممکن است حفاری تمام مقطع نیز جوابگو باشد. اما با توجه به شهری بودن محیط، ایمنی و تاثیر روی سازه های سطحی چالش اصلی در این قبیل پروژه ها است و باید حرکت زمین و جابجایی های حاصل از تونلسازی در حد مجاز باشند.

جدول 1: خواص ژئوتکنیکی محدوده دروازه دولت در خط 4 متروی تهران [5]

مدل رفتاری	زاویه اتساع ($^{\circ}$)	ضریب پواسون (ν)	زاویه اصطکاک ($^{\circ}$)	چسبندگی (kg/cm^2)	مدول دگر شکلی (kg/cm^2)	چگالی اشباع (ton/m^3)	چگالی خشک (ton/m^3)
M-C	10	0/3	38	0/25	900	2/1	2



شکل 3: مقطع عرضی مدل در حالت حفاری تمام مقطع (الف)، و مرحله ای (ب)



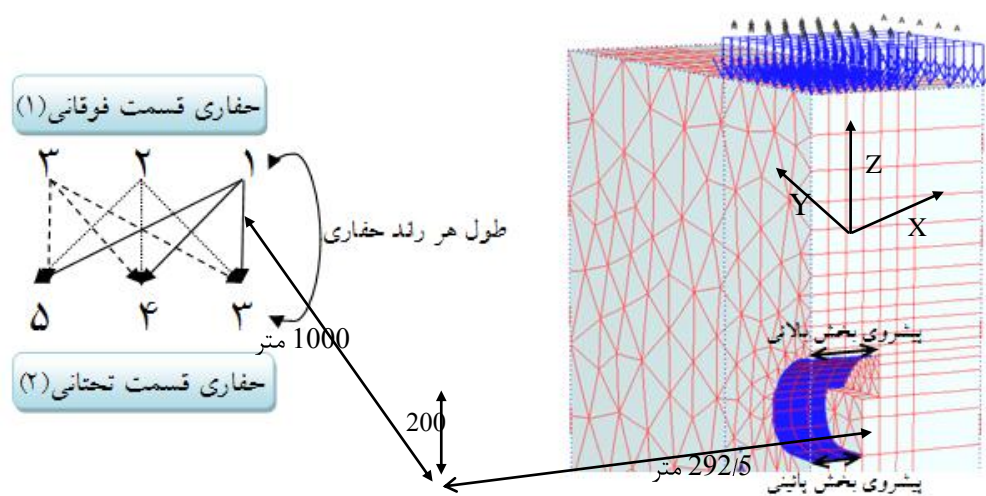
شکل 4: منحنی نشست برای حفاری مرحله‌ای و تمام مقطع

4-1- مراحل تحلیل

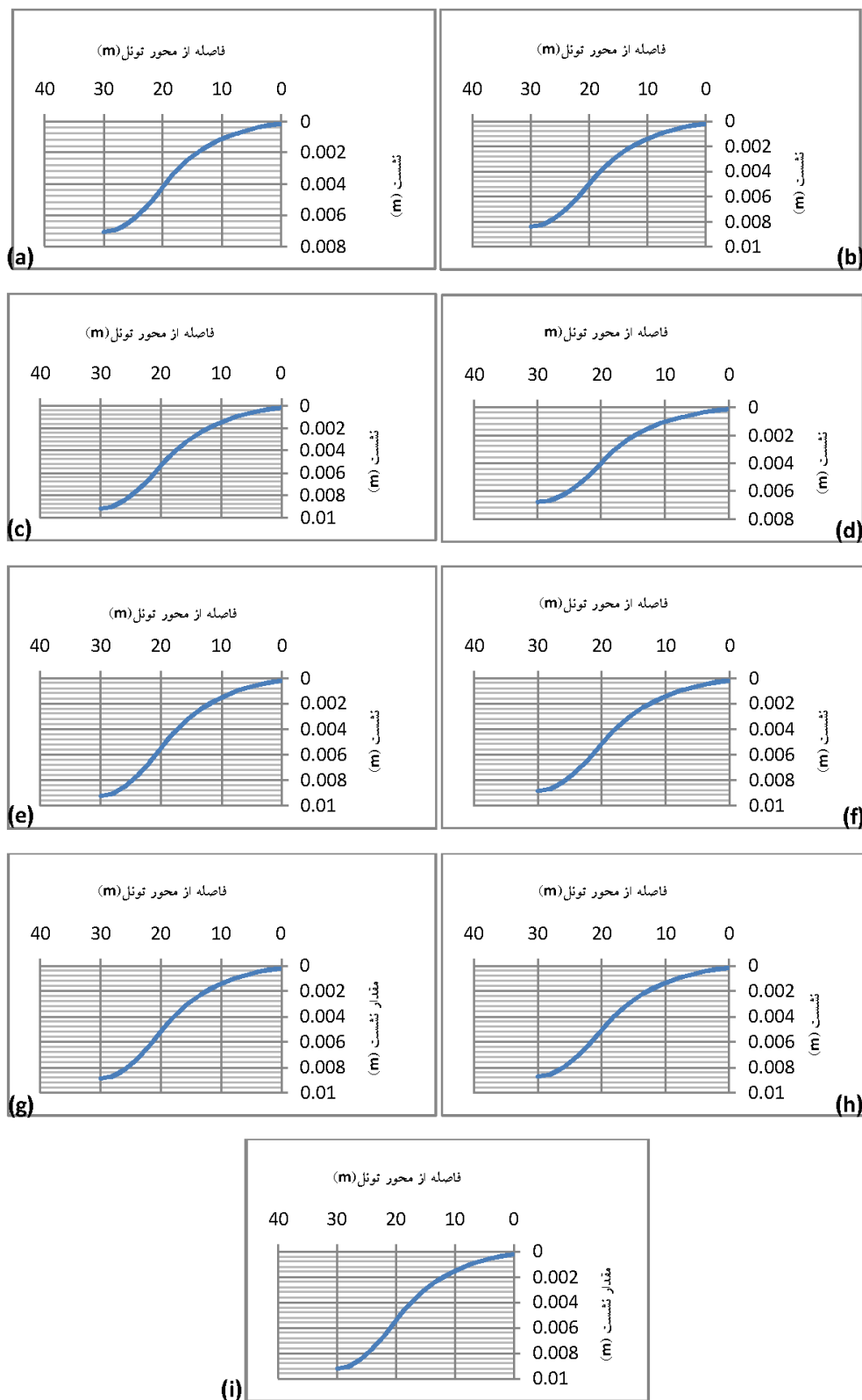
برای انجام تحلیل‌ها از نرم افزار سه بعدی Plaxis 3D استفاده شد که قابلیت بالایی در مدلسازی محیط‌های خاکی دارد. بدین منظور برای حفاری قسمت فوقانی سه مقدار 1، 2 و 3 متر و برای قسمت زیرین نیز سه مقدار 3، 4 و 5 متر را به عنوان طول هر گام حفاری در نظر گرفته شد و در هر تحلیل مقادیر نشست حداکثر برای هر مقدار گام حفاری تعیین شد. انتخاب این مقادیر براساس مقادیر واقعی در اجرای تونل انتخاب شده است. به طور کلی 9 حالت مختلف ترکیب گامهای حفاری قسمت فوقانی و تحتانی وجود که در شکل 5 به صورت شماتیک ارائه شده است [6]. برای هر یک از حالات نه‌گانه، یک مدلسازی و تحلیل مستقل برای حفر مرحله‌ای تونل انجام گرفت. در شکل 6، منحنی نشست حاصل از تحلیل برای هر حالت نشان داده شده است.

4-2- تاثیر طول گام حفاری

یکی دیگر از عوامل مهم و موثر در میزان نشست سطح زمین ناشی از حفر یک تونل در روش حفاری مرحله‌ای، 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 [7]. در اجرای تونل خط 4، مقدار هر گام حفاری در قسمت فوقانی را 1 متر و در قسمت زیرین بین 3 تا 4 متر در نظر گرفته شده است [6]. در این تحقیق مقدار نشست به ازای مقادیر مختلف طول گام برآورد، و مقدار مناسب برای حفر تونل پیشنهاد شده است.



شکل 5: زوج‌های ممکن از طول گام‌های حفاری در قسمت زیرین و فوقانی



شکل 6: منحنی نشست برای طول گامهای مختلف، (a) حالت 1-3، (b) حالت 1-4، (c) حالت 1-5، (d) حالت 1-3، (e) حالت 2-4، (f) حالت 2-5، (g) حالت 3-3، (h) حالت 3-4، (i) حالت 3-5 (عدد سمت چپ: طول گام قسمت بالائی و عدد سمت راست طول گام قسمت پائینی است)

اجرای حالت 4 وجود نداشته باشد، گزینه مطلوب حالت 1 خواهد بود که در آن طول گام حفاری 1 متر برای قسمت فوقانی و 3 متر برای قسمت زیرین میزان نشست سطح و جابجائی تونل کمتری را نسبت به سایر گزینه ها دارد. پیشنهاد می شود که در ادامه روند اجرای تونل با توجه به کیفیت زمین و فاصله قابها یکی از دو حالت 4 یا 1 برای طول گام حفاری انتخاب شود.

به منظور مقایسه تغییر طول گام حفاری در هر قسمت جبهه کار 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 شکل های 7، 8، 9 نشان داده شده است. مقایسه شکل ها نشان می دهد که هرچه اختلاف بین دو واحد طول گام قسمت فوقانی و زیرین کمتر باشد، اختلاف بین جابجائی ها و روند تغییرات کمتر می شود.

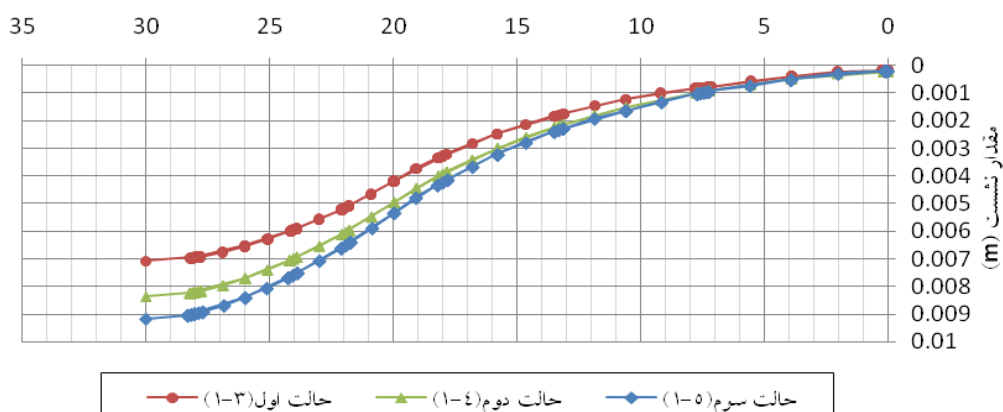
البته لازم به ذکر است که در حفاری مرحله ای، باید همواره جبهه کار فوقانی زودتر حفاری شده و نسبت به جبهه کار زیرین جلوتر باشد [6]. به همین ترتیب، در حالت های نه گانه، واحد طول گام بیان شده است و پیشروی جبهه کارها به گونه ای انجام می شود که همواره جبهه کار فوقانی جلوتر از پائینی قرار داشته باشد، به عنوان نمونه برای حالت 3-2، دوبار پیشروی در قسمت بالائی به طول 2 متر و یکبار در قسمت پائینی به طول 3 متر انجام می گیرد.

مقادیر حداکثر نشست سطح و جابجائی تاج تونل در حالت های مختلف در جدول 2 نشان داده شده است. براساس نتایج بدست آمده، که حالت چهارم و با طول گام حفاری 2 متر برای قسمت فوقانی و 3 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

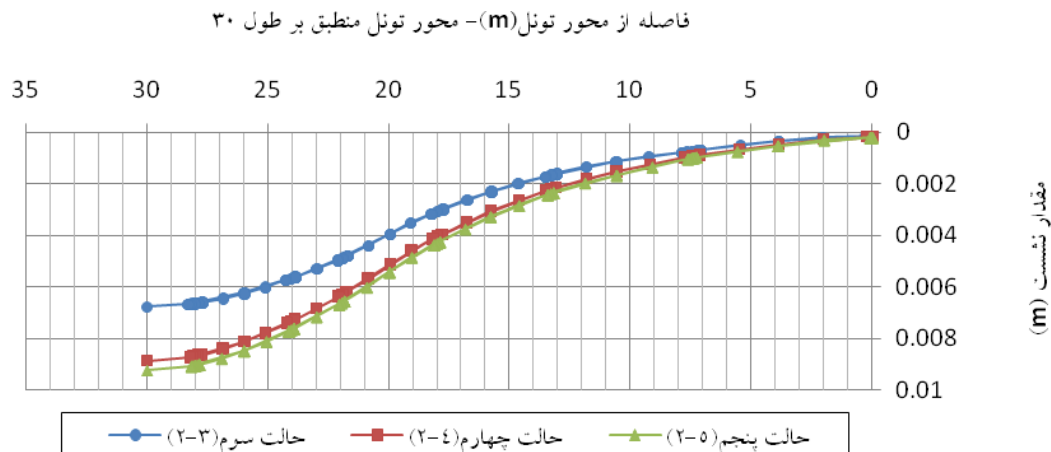
جدول 2: مقایسه مقادیر نشست و جابجائی حداکثر به ازای مقادیر مختلف واحد طول گام حفاری

حالت	واحد طول گام در قسمت فوقانی (1)	واحد طول گام در قسمت تحتانی (2)	حداکثر نشست در سطح (mm)	ماکزیمم تاج تونل (mm)
1	1	3	7/03	18/12
2	1	4	8/41	21/69
3	1	5	9/21	24/14
4	2	3	6/78	16/17
5	2	4	8/88	21/42
6	2	5	9/25	22/0
7	3	3	8/75	19/79
8	3	4	8/88	19/83
9	3	5	9/24	20/36

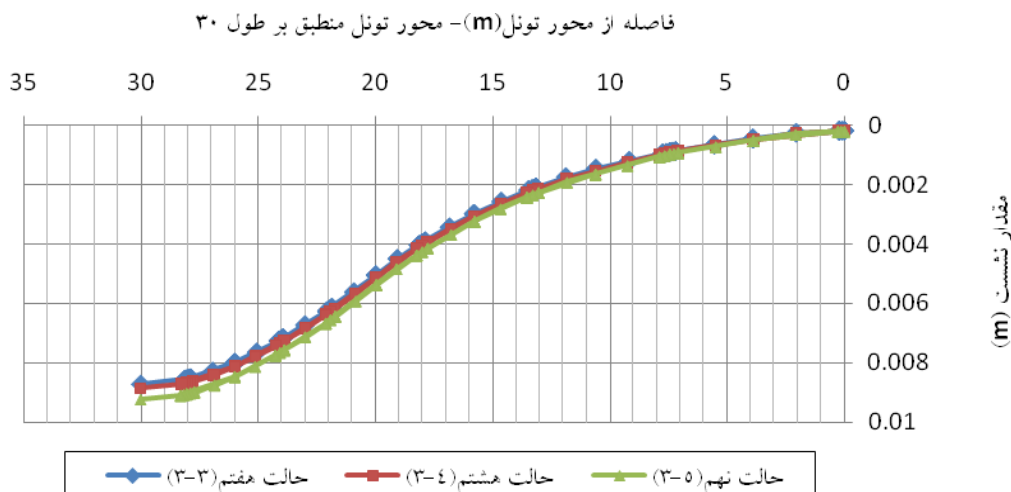
فاصله از محور تونل (m) - محور تونل منطبق بر طول 30



شکل 7: منحنی های نشست به ازای مقدار ثابت واحد طول گام 1 متر برای بخش فوقانی و تغییر آن در بخش زیرین



شکل 8: مقایسه منحنی نشست به ازای مقدار ثابت واحد طول گام 2 متری برای بخش فوقانی و تغییر آن در بخش زیرین



شکل 9: مقایسه منحنی نشست به ازای مقدار ثابت واحد طول گام 3 متری برای بخش فوقانی و تغییر آن در بخش زیرین

5- نتیجه گیری

در این مقاله به بررسی تأثیر طول گام حفاری در اجرای تونل خط 4 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 تأثیر زیادی در هزینه و زمان اجرای یک تونل دارد. با توجه به واحد طول گام حفاری در خط 4، 9 زوج طول گام حفاری مورد تحلیل قرار گرفت. نتایج نشان داد که در حالت چهارم با واحد طول گام در قسمت فوقانی 2 متر و قسمت زیرین 3 متر و در حالت اول با چهارم با واحد طول گام در قسمت فوقانی 1 متر و قسمت زیرین 3 متر باعث مقدار نشست کمتری در سطح و جابجایی تاج تونل حاصل می شود. با افزایش مقدار گام حفاری در قسمت زیرین با ثابت بودن مقدار طول گام در قسمت

فوقانی مقدار نشست حداکثر زیاد می شود. علاوه بر آن، با کم شدن اختلاف بین واحد طول گام حفاری در دو قسمت فوقانی و زیرین (مقایسه شکل های 7، 8 و 9) مقدار جابجایی ها و روند تغییرات کم می شود. با توجه به مقادیر نشست حداکثر بدست آمده در حالت های مختلف، می توان گفت که مقادیر واقعی انتخاب شده برای طول گام حفاری در اجرای این تونل تا حدی محافظه کارانه بوده است و می توان 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 ساختمان ها و زیر خیابان ها است. با این مقادیر، البته با توجه به امکان اجرایی آن توسط پیمانکار و تجهیزات موجود، می توان در زیر خیابان ها در این محیط و با این خواص، مقدار طول گام در هر قسمت را افزایش داد. ولی

[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.

[5] مهندسين مشاور پی سنگ، 1384، "مطالعات ژئوتکنیک خط 4 مترو تهران".

[6] مهدی تسوجی زاده، 1388، "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 110-115.

[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.

در زیر ساختمان‌ها به دلیل 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.