

اثر فشار تزریق بر نشست تونل های کم عمق حفاری شده به روش مکانیزه در محیط های شهری

محمد رضا سقازاده^۱، احمد رضا محبوبی^۲، سعید قربان بیگی^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد دانشگاه صنعت آب و برق (شهید عباسپور)، دانشکده مهندسی آب، تهران

۲- دانشیار دانشگاه صنعت آب و برق (شهید عباسپور)، دانشکده مهندسی آب، تهران

۳- استادیار دانشگاه صنعت آب و برق (شهید عباسپور)، دانشکده مهندسی آب، تهران

mo.re.saghazadeh@gmail.com

خلاصه

عوامل موثر در نشست سطح زمین در روش حفاری مکانیزه را می توان عمدتاً به سه دسته عوامل هندسی، عوامل ژئومکانیکی و نیز پارامترهای کاری ماشین حفاری تقسیم بندی کرد. عوامل هندسی شامل عمق و قطر تونل می باشند پارامترهای کاری ماشین شامل فشار وارد بر جبهه حفاری، فشار تزریق در پشت سگمنت ها و نیز میزان تغییر قطر (کاهش قطر دستگاه در طول) دستگاه می باشد و پارامترهای ژئومکانیکی شامل مشخصات مکانیکی لایه های خاک مابین تونل تا سطح زمین می باشد. در حفاری مکانیزه (TBM) با پیشروی دستگاه حفار، عملیات سگمنت گذاری پوشش که شامل نصب سگمنت ها و تزریق در پشت لاینینگ است صورت می گیرد. به دلیل مسائل اجرایی، قطر حفاری شده توسط دستگاه از قطر خارجی حلقه بتنی مقداری بیشتر است و همواره فضایی پشت پوشش بتنی قرار دارد که بایستی با عملیات تزریق پر شود تا از ریزش احتمالی خاک و همگرا شدن تونل و در نتیجه نشست های سطحی زمین، علی الخصوص در تونل های کم عمق، جلوگیری به عمل آید. فشار تزریق در این عملیات از اهمیت خاصی برخوردار است. افزایش بیش از حد این فشار باعث ایجاد تورم خاک در سطح زمین شده و فشار اضافی نیز به لاینینگ وارد می سازد. همچنین کم بودن فشار تزریق نیز می تواند منجر به نشست سطحی گردد. نشست یا تورم سطح زمین می تواند خساراتی را به سازه های سطحی وارد می سازد به ویژه در محیط های شهری که با انبوهی از ساخت و سازهای سطحی مواجه هستیم. در این مقاله پارامتری بعد جدیدی که وابسته به فشار تزریق و خصوصیات مقاومتی خاک و تنش های اولیه در خاک است تعریف شده است و سپس رابطه نشست با توجه به این پارامتر با مدل سازی عددی با نرم افزار PLAXIS 3D Tunnel تعیین گردیده است که منجر به ارائه رابطه جدیدی برای تعیین نشست ماکزیمم قائم در سطح زمین می شود. همچنین می توان بکمک آن مقدار نشست ماکزیمم سطحی زمین را با توجه به فشار تزریق اعمال شده بطور مناسبی تعیین نمود.

کلمات کلیدی: فشار تزریق، تونل های کم عمق، حفاری مکانیزه، TBM، EPB

۱. مقدمه

با توجه به اهمیت روزافزون تونل و فضاهای زیرزمینی، لزوم جهت دهی به مطالعات، طرح ها و مسائل اجرایی این نوع سازه ها بیش از پیش مشهود می باشد. تونل ها امروزه تنها به تونل های ارتباطی یا حمل و نقلی مختص نمی شوند و می توانند محل عبور کابل ها و لوازم و ادوات تاسیساتی نیز باشند. برای حفاری تونل ها از دهه های گذشته راه ها و روش های مختلفی وجود داشته و امروزه دستگاه ها و لوازم پیشرفته جدیدی به منظور حفاری در شرایط مختلف زمین از جمله زمین های سنگی، زمین های رسی و زمین های آبرفتی ساخته شده است. یکی از این روش های حفاری، حفاری مکانیزه با استفاده از دستگاه TBM است. این روش حفاری امروزه یکی از محبوب ترین روش ها در مهندسی تونل است به طوری که حفاری با این روش در حال حاضر در بیش از بیست شهر کشور چین در حال اجراست. این روش در مقایسه با روش حفاری سنتی قدیمی از مزایایی از جمله: عدم اعمال لرزه به خاک، عدم اعمال دست خوردگی زیاد به خاک اطراف تونل، بهبود شرایط ایمنی کار، شرایط کاری آسان تر برای کارگران، کاهش زمان ساخت و کاهش هزینه ها برخوردار است. از جمله ملاحظات که در ارتباط با حفاری مکانیزه تونل وجود دارد نشست زمین می باشد. چنانچه میزان نشست از حدی تجاوز کند باعث بروز خسارت در سازه های سطحی شده و می تواند منجر به تخریب آنها شود. این امر بویژه در مناطق شهری پر

جمعیت بیشتر حائز اهمیت است. همچنین مقوله نشست سطحی در تونل ها بیشتر برای تونل های کم عمق مورد توجه و بررسی قرار می گیرد چرا که به طور طبیعی اگر تونلی در عمق زیاد از سطح زمین حفر شود تاثیر حفاری بر تغییرات قائم سطح زمین بسیار ناچیز خواهد بود. (Suwansawat, 2002)

۲. عملیات تزریق

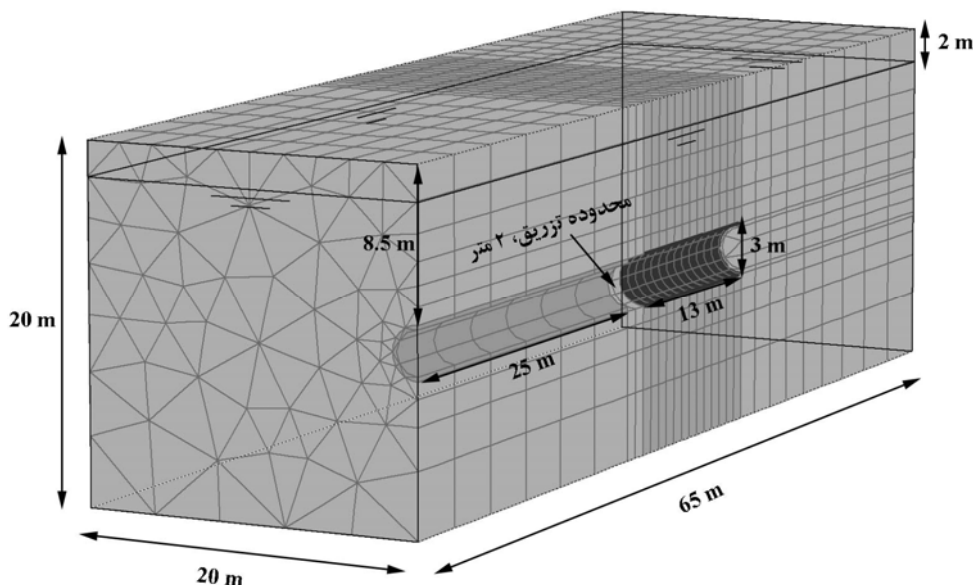
در دستگاه حفاری مکانیزه شیلد دار با روش فشار تعادلی (سپر EPB)، قطعات بتنی در داخل و قسمت انتهایی شیلد دستگاه برای نصب جا گذاری می شوند. همچنین قطر شیلد از خارجی حلقه بتنی بیشتر است در نتیجه فضای خالی بین پوشش بتنی و خاک حفاری شده وجود دارد. این حجم فضای خالی را فضای انتهایی خالی می نامند. این فضای خالی انتهایی با گذر و عبور شیلد فولادی تمایل به پر شدن توسط خاک اطراف تونل را دارد در واقع با عبور شیلد فولادی خاک اطراف تونل به سمت داخل تونل ریزش خواهد کرد و در نتیجه آن این همگرایی خاک داخل تونل باعث ایجاد نشست در سطح زمین خواهد شد. اندازه این فضای خالی انتهایی باید به قدری بزرگ باشد تا هم فضای لازم جهت عملیات نصب پوشش را تامین کند هم قدرت مانور دستگاه را در مواقعی که دستگاه از مسیر خود منحرف شده است فراهم کند تا دستگاه بتواند با تصحیح مسیر خود بر اساس نقشه ادامه مسیر دهد. با توجه به مطالب ذکر شده می توان به اهمیت فشار تزریق در کنترل نشست های سطحی زمین پی برد. (Reilly, 1982)

۳. مدلسازی با استفاده از نرم افزار PLAXIS 3D Tunnel

برنامه PLAXIS یکی از نرم افزار های اجزاء محدود می باشد که توانایی های متعدد در حل مسائل مختلف ژئوتکنیکی دارد. مراحل اصلی مدل سازی در این نرم افزار به منظور مطالعه رفتار خاک در اثر حفر تونل، عمدتاً عبارت است از:

۳-۱ هندسه طرح

در مدل سازی صورت گرفته در این مقاله طول شیلد دستگاه TBM، ۱۳ متر و قطر آن ۳ متر در نظر گرفته شده است. مرکز تونل در عمق ۱۰ متری از سطح زمین قرار دارد. همچنین سطح آب زیرزمینی به صورت افقی و در عمق ۲ متر از سطح زمین قرار دارد. مدل سه بعدی تعریف شده در برنامه دارای عرض و ارتفاع یکسان ۲۰ متر در راستای X و Y و طول ۶۵ متر در راستای Z می باشد. با این ابعاد در نظر گرفته شده مدل به اندازه کافی بزرگ خواهد بود تا اثر شرایط مرزی مسئله در تحلیل تاثیر گذار نباشد. شکل ۱ شمایی سه بعدی از ابعاد و هندسه طرح را نشان می دهد.



شکل ۱ - شمایی سه بعدی از ابعاد و هندسه مدل

۲-۳ مش بندی طرح

نوع اجزاء می تواند به صورت مثلثی با ۶ گره و یا ۱۵ گره انتخاب شود. همچنین اندازه هر یک از اجزاء در این برنامه به پنج صورت خیلی ریز، ریز، متوسط، درشت و خیلی درشت می تواند تعریف شود که در این مدل سازی از اجزاء ۱۵ گره ای با اندازه درشت استفاده شده که این اندازه در مناطق مهم اعم از سطح زمین و مش های اطراف شیلد به صورت موضعی ریز تر شده است. با این کار مدل هم از دقت کافی در مدل سازی برخوردار است هم حجم محاسبات به صورت قابل ملاحظه ای کاهش پیدا می کند (PLAXIS, 2001).

۳-۳ مشخصات خاک

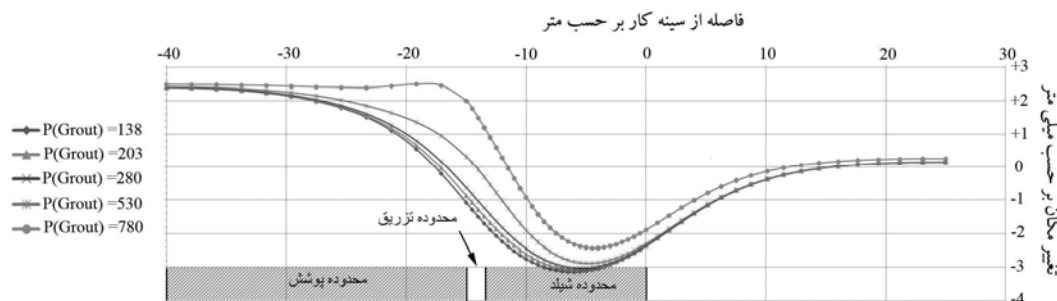
در این مقاله دو نمونه خاک با خصوصیات متفاوت تعریف شده است. مدل ۱- یک خاک چسبنده و مدل ۲- یک خاک دانه ای را نشان می دهد. در مدل سه بعدی در هر آنالیز از یکی از این دو مدل خاک استفاده شده است. همچنین مدل رفتاری موهر-کولمب برای مدل سازی این نوع خاک ها بکار گرفته شده است. علت استفاده از این مدل رفتاری مدل سازی واقع گرایانه تر بودن این مدل رفتاری نسبت به حالت الاستیک خطی و همچنین نیاز به پارامترهای ساده و رایج نسبت به دیگر مدل های پیچیده رفتاری است. جدول ۱ مشخصات خاک در هر یک از دو مدل را نشان می دهد. مقدار Ψ برای هر دو مدل یکسان و برابر صفر در نظر گرفته شده است.

جدول ۱- مشخصات مکانیکی محیط (خاک)

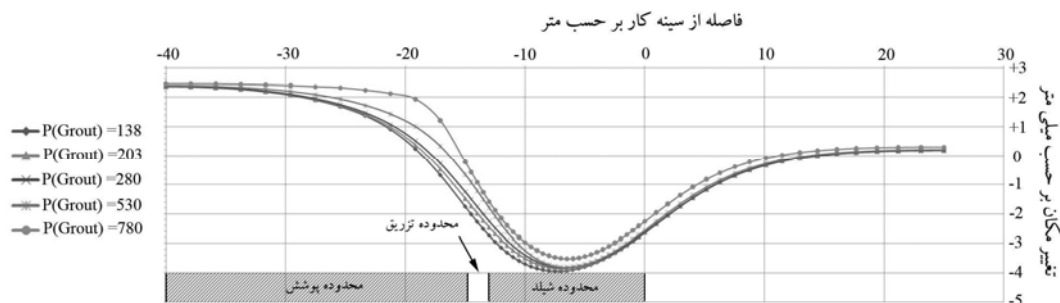
پارامتر	مدل-۱ خاک چسبنده	مدل-۲ خاک غیر چسبنده
γ_{unsat} (kN/m ³)	۱۸	۱۸
γ_{sat} (kN/m ³)	۲۰	۲۰
E (kN/m ²)	۱۸۰۰۰	۱۸۰۰۰
ν	۰/۳۲	۰/۳۲
C (kN/m ²)	۵۰	۱۰
ϕ (°)	۱۵	۳۰

۴. تاثیر فشار توزیق بر نشست سطحی زمین

برای بررسی اثر فشار تزریق بر میزان نشست سطحی زمین، تحلیل‌های متعددی انجام شد و پروفیل طولی نشست در سطح زمین در فشارهای مختلف تزریق برای هر دو مدل ذکر شده، ترسیم شده است. شایان ذکر است که پارامترهای دیگر تأثیر گذار در نشست سطحی زمین برای تحلیل‌ها ثابت در نظر گرفته شد تا تنها اثر فشار تزریق بر نشست سطح خاک بررسی شود. به عنوان مثال فشار سینه کار در مرکز تونل برای تمامی مدل‌ها ۱۵۰ کیلوپاسکال در نظر گرفته شده است. شکل ۲ و ۳ به ترتیب پروفیل طولی نشست سطحی را در فشارهای مختلف تزریق برای مدل‌های ۱ و ۲ نشان می‌دهد.



شکل ۲- مقطع طولی نشست سطح زمین در مدل ۱

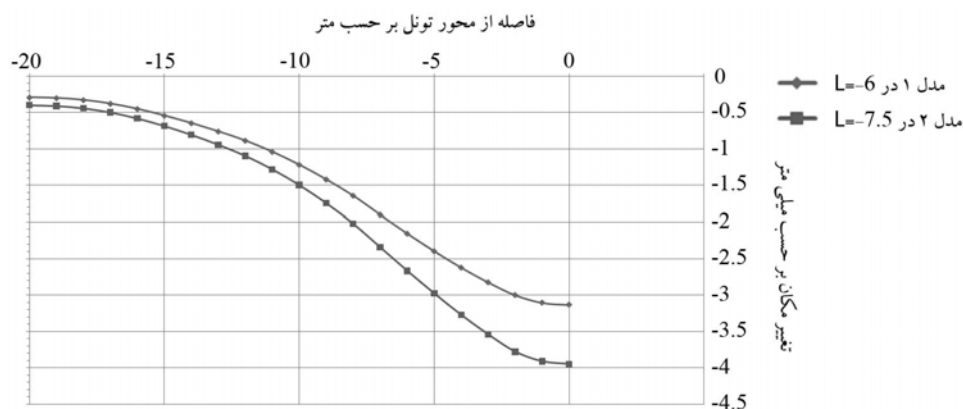


شکل ۳- مقطع طولی نشست سطح زمین در مدل ۲

در شکل های ۲ و ۳ تغییر مکان قائم مثبت به معنای تورم و تغییر مکان قائم منفی به معنای نشست است. همچنین محور افقی هر دو شکل فاصله از سینه کار تونل را نشان می دهد که جهت مثبت نشانگر جلوی سینه کار می باشد. با توجه شکل های ۲ و ۳ می توان مشاهده کرد که در هر دو مدل با افزایش فشار تزریق مقدار نشست سطحی زمین کاهش پیدا کرده است. فشار تزریق در هر دو مدل برحسب kN/m^2 بیان شده است.

۵. مقایسه مقطع عرضی دو مدل در فشار تزریق یکسان

برای بررسی اثر پارامترهای ژئومکانیکی خاک، دو مدل ۱ و ۲ را در یک فشار تزریق یکسان آنالیز شده و مقطع عرضی هر دو مدل در فشار یکسان ۱۳۸ کیلوپاسکال در شکل شماره ۴ نشان داده شده اند. لازم به ذکر است که مقاطع عرضی برای هر مدل در مقطعی که بیشترین نشست سطحی روی می دهد ترسیم شده اند. این مقطع برای مدل ۱ در $L=6$ و در مدل ۲ در $L=7.5$ قرار داشته است. (L فاصله افقی از سینه کار می باشد)



شکل ۴- مقطع عرضی نشست سطحی در دو مدل ۱ و ۲

همان گونه که در شکل ۴ مشاهده می شود نشست در مدل ۱ کمتر از نشست در مدل ۲ می باشد که بیانگر آن است که در یک فشار تزریق یکسان میزان نشست با تغییر مشخصات ژئومکانیکی خاک تغییر می کند.

۶. فاکتور نسبت تزریق (M) و فاکتور نسبت تزریق اصلاح شده (M_0)

برای کنترل و حدس اولیه فشار تزریق پارامتر بی بعدی به نام نسبت تزریق M توسط محققین زیادی تعریف شده است که در واقع بیانگر نسبت فشار تزریق به تنش قائم کل در مرکز تونل است. نسبت تزریق (M) به صورت زیر تعریف می شود (Greenwood, 2001):

$$M = \frac{P_G}{\sigma_{V_0}} \quad (1)$$

که در آن P_G فشار متوسط تزریق در مرکز تونل و σ_{V_0} تنش عمودی کل در مرکز تونل می باشد. با افزایش این فاکتور مقدار نشست سطحی زمین کاهش می یابد و به عبارت دیگر این فاکتور با مقدار نشست سطحی زمین نسبت عکس دارد. همانطور که مشاهده می شود اثر تغییر در مشخصات ژئومکانیکی خاک ها تاثیری بر مقدار M نخواهد داشت. به منظور اصلاح این موضوع و در نظر گرفتن تاثیر مقاومت برشی خاک، بدین منظور پارامتر بی بعد دیگری به نام فاکتور نسبت تزریق اصلاح شده (M_0) تعریف می شود که بر خلاف فاکتور M با تغییر مشخصات ژئومکانیکی خاک تغییر می کند. پارامتر M_0 در واقع نسبت فشار تزریق به مقاومت برشی خاک است و به صورت رابطه زیر قابل بیان است:

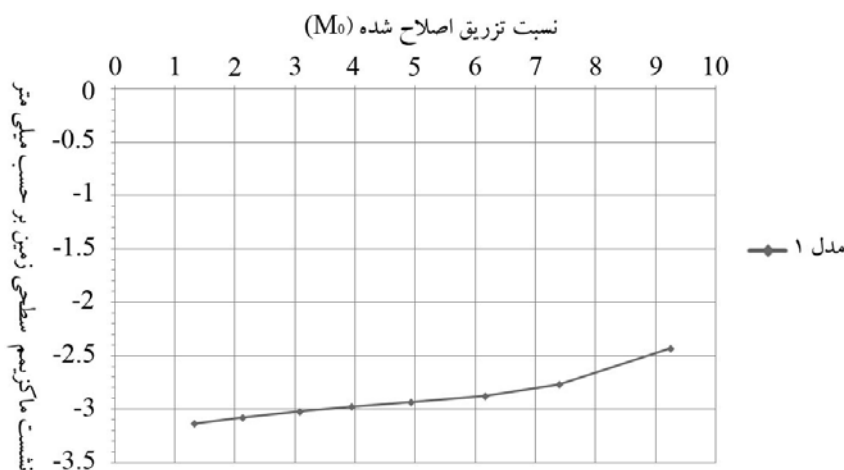
$$M_0 = \frac{P_G}{\tau} \quad (2)$$

$$\tau = C + \sigma'_p \tan \varphi \quad (3)$$

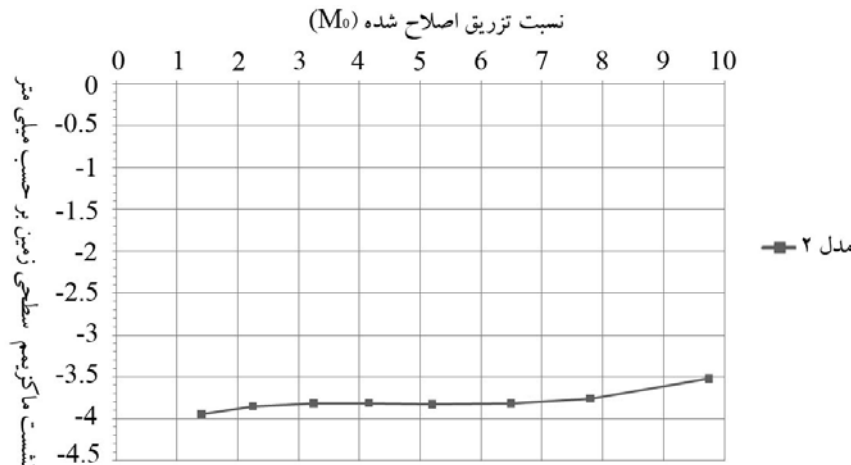
که C و φ در این رابطه پارامترهای اصطکاکی و چسبندگی خاک بوده و σ'_p تنش موثر نرمال است. همچنین P_G فشار متوسط تزریق در مرکز تونل و τ مقاومت برشی خاک می باشند.

با استفاده از رابطه (۳) و جایگزینی آن در رابطه (۲) می توان نتیجه گیری کرد که با افزایش مقاومت برشی، نسبت فشار تزریق اصلاح شده کاهش می یابد. بنابراین می توان چنین استنباط کرد که فاکتور نسبت تزریق اصلاح شده با فشار تزریق نسبت مستقیم و با مقاومت برشی خاک و همچنین نشست سطحی زمین نسبت عکس دارد. این فاکتور در واقع علاوه بر اثر تغییر عمق تونل اثرات تغییر مشخصات مکانیکی خاک از جمله چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی بین ذرات خاک را نیز شامل می شود.

شکل ۵ و ۶ به ترتیب رابطه فاکتور نسبت تزریق اصلاح شده (M_0) با نشست ماکزیمم سطحی زمین را برای مدل های ۱ و ۲ در فشارهای ۱۳۸، ۲۰۳، ۲۸۰، ۳۵۰، ۴۳۰، ۵۳۰، ۶۳۰ و ۷۸۰ کیلوپاسکال را نشان می دهد.



شکل ۵ - رابطه فاکتور نسبت تزریق اصلاح شده (M_0) با نشست ماکزیمم سطحی در مدل ۱



شکل ۶ - رابطه فاکتور نسبت تزریق اصلاح شده (M_0) با نشست ماکزیمم سطحی در مدل ۲

با توجه به شکل های ۵ و ۶ می توان گفت که با افزایش مقدار نسبت فشار تزریق اصلاح شده مقدار نشست ماکزیمم سطحی زمین کاهش پیدا می کند. همچنین شایان ذکر است که علت افزایش فاکتور نسبت فشار تزریق اصلاح شده در این نمودار به دلیل افزایش فشار تزریق است.

۷. نتیجه گیری:

اثر فشار تزریق و پارامتر های ژئومکانیکی خاک بر نشست سطحی حاصل از حفاری مکانیزه یک تونل سطحی مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج حاصل از شبیه سازی های عددی انجام شده را می توان به صورت زیر دسته بندی و بیان کرد:

- الف) همانطور که انتظار می رفت با افزایش فشار تزریق نشست های سطحی زمین کاهش پیدا می کند.
- ب) افزایش بیش از حد فشار تزریق باعث ایجاد تورم در سطح زمین می شود.
- ج) با افزایش زاویه اصطکاک داخلی خاک (ϕ) مقدار نشست کاهش می یابد.
- د) در حفاری تونل نشست خاک های چسبنده (رسی) بیشتر از خاک های دانه ای (ماسه ای) می باشد.
- ه) با استفاده از نسبت فشار تزریق اصلاح شده M_0 می توان علاوه بر اثر عمق تونل، اثر تغییر پارامتر های ژئومکانیکی را بر مقدار نشست های ماکزیمم سطحی زمین در نظر گرفت.
- و) با افزایش مقدار فشار تزریق فاصله مقطعی که حداکثر نشست را داراست به سینه کار (جبهه حفاری) نزدیک تر می گردد.

۸. مراجع

1. Suwansawat, S., (2002), "Earth pressure balance (EPB) shield tunneling in Bangkok: ground response and prediction of surface settlements using artificial neural networks," Ph.D. thesis, Massachusetts Institute of Technology, USA.
2. Reilly, B. J., (1982), "EPBMs for the North East Line project", Tunneling and underground Space Technology, 14 (4), pp 491-508.
3. PLAXIS 3D Tunnel User's Manual, (2001). Edited by R. J. B. Brinkgreve, and P. A. Vermeer, Balkema Publishers.
4. Kasper, T., Meschke, G., (2006). "On the influence of face pressure, grouting pressure and TBM design in soft ground tunnelling, Tunneling and Underground Space Technology, 21, pp 160-171.
5. Greenwood, J., (2001), "Three-dimensional analysis of surface settlement in soft ground tunneling", Master thesis, Massachusetts Institute of Technology, USA.