فصلنامه علمی پژوهشی زمین شناسی محیط زیست
سال هفتم، شماره ۲٤، پاییز ۱۳۹۲

پیش‌بینی نشست زمین ناشی از حفاری مکانیزه در تونل متروی تهران

سعید حسینی[۱]، کورش شهریار[۲]، مسعود منجزی[۳]، محمد رضا بیطرفان[٤]

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد استخراج معدن، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب Saeed.hosseini63@gmail.com

۲- استاد دانشکده مهندسی معدن، متالورژی و نفت، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

۳- دانشیار دانشکده معدن، دانشگاه تربیت مدرس

٤- کارشناس ارشد معدن، شرکت مهندسی سپاسد

تاریخ دریافت مقاله: ۹۰/۱۰/۲۱ تاریخ تصویب: ۹۱/٦/۱۳

چکیده

موضوع اصلی تونل سازی در محیط‌های شهری پیش‌بینی نشست‌های زمین در اثر حفر تونل است، که ممکن است موجب آسیب زدن به سازه‌های سطحی شود. در این مقاله به منظور پیش‌بینی نشست‌های سطحی زمین در حین ساخت بخشی از تونل خط ۳ متروی تهران که با استفاده از ماشین حفاری EPB (فشار تعادلی زمین) ایجاد می‌شود، از روش‌های تجربی، تحلیلی و المان محدود سه بعدی با نرم افزار ABAQUS استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد که مدل المان محدود سه بعدی مقدار نشست سطحی را واقع‌گرایانه‌تر پیش‌بینی می‌کند و منحنی‌های نشست سطحی حاصل از روش‌های تجربی و تحلیلی نسبت به روش عددی دارای گودی باریکتری است. علاوه بر این مقدار نشست سطحی پیش‌بینی شده با هر سه روش از مقدار مجاز پیشنهادی بیشتر است.

واژگان کلیدی: تونل‌های کم‌عمق، نشست‌های زمین، مدل سازی سه بعدی، ABAQUS، روش تجربی، روش تحلیلی

مقدمه

ساخت تونل در زمین‌های نرم بر روی تنش‌های موجود در زمین و شرایط ژئولوژیکی آن تأثیر گذار است. تغییر شرایط تنش‌های طبیعی زمین با جابجایی‌های زمین و نشست آن همرام است. جابجایی‌های ناشی از ساخت تونل‌های کم عمق در حفظ ایمنی سازه‌های سطحی و زیرسطحی مجاورشان مؤثرند. تونل‌های شهری عمدتاً دارای عمق کمی هستند و در محیط‌های خاکی و آبرفتی ایجاد می‌شوند.

بنابراین پیش‌بینی جابجایی‌های زمین و ارزیابی پتانسیل تأثیرات مخرب آن‌ها بر روی سازه‌های موجود در طراحی، برنامه‌ریزی و ساخت تونل در نواحی شهری از اهمیت بسزایی برخوردار است. صرف نظر از روش حفاری، تغییر شکل های کوتاه مدت و بلند مدت سطحی و زیر سطحی باید پیش بینی شوند و اقداماتی چاره ساز در برابر هر یک از خسارت های اعمالی به سازه های موجود قبل از شروع ساخت طراحی شود. در واقع هزینه‌های تونل

سازی در اثر نشست زمین به علت خسارت به سازه‌ها افزایش می‌یابد.

به طور کلی سه روش عمده در پیش‌بینی نشست‌های ناشی از حفر تونل وجود دارد: ۱) روش‌های تجربی، ۲) روش‌های تحلیلی و ۳) روش‌های عددی.

در این مقاله از هر سه روش به منظور پیش‌بینی نشست ناشی از تونل سازی سپری EPB در محدوده ایستگاه C3 از مسیر خط ۳ متروی تهران استفاده شده است. مدلسازی عددی به صورت سه بعدی با استفاده از نرم افزار المان محدود ABAQUS انجام شده و نتایج بدست آمده از این سه روش با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

معرفی پروژه

خط ۳ متروی تهران بطول حدود ۳۰ کیلومتر از جنوب غربی به سمت شمال شرقی تهران امتداد می‌یابد. این خط تماماً زیرزمینی با ۲۸ ایستگاه از دپوی آزادگان (تقاطع بزرگراه آزادگان و بزرگراه آیت الله سعیدی) شروع شده و پس از عبور از بزرگراه آیت الله سعیدی وارد خیابان زمزم شده و از آنجا از زیر بزرگراه نواب و محدوده راه‌آهن جمهوری اسلامی ایران به میدان راه‌آهن رسیده و از آنجا در امتداد شمالی جنوبی، خیابان ولیعصر را تا تقاطع خیابان شهید دکتر بهشتی طی مسیر نموده و پس از عبور از طول خیابان دکتر بهشتی و خیابان قدوسی وارد بزرگراه صیاد شیرازی شده و در امتداد شمالی جنوبی بزرگراه صیاد شیرازی پس از عبور از تقاطع‌های بزرگراه رسالت، همت و بابائی (صدر) تا بزرگراه لشگرک امتداد یافته و در بزرگراه لشگرک به سمت شرق ادامه می‌یابد [۱].

براساس قرارداد، شرکت سابیر بین الملل مسئولیت طراحی و اجرای تونل‌های قطعه ٤ از مسیر خط ۳ را در حد فاصل ایستگاه قلعه مرغی (B3) در کیلو متراژ (197.690 +0) تا ا یستگاه تقاطعی انقلاب و ولیعصر (I3G4) در کیلومتراژ 186.497 +7 برعهده دارد که اجرای تونل‌ها از ایستگاه قلعه مرغی (B3) آغاز خواهد شد [۱].

مسیر حفاری تونل خط ۳، در محیط‌های آبرفتی از ریز دانه رسی در بخش‌های اولیه شروع حفاری و سپس به مرور به بخش‌های دارای لایه‌های درشت دانه ماسه و گراول به تناوب در بخش‌های پایانی، خواهد رسید. طبق مطالعات ژئوتکنیک انجام شده توسط شرکت مهندسان مشاور دریا-خاک-پی، تونل در بخش‌هایی از مسیر خود در زیر سطح ایستابی حفاری خواهد شد.

دستگاه TBM با سپر تعادلی فشار زمین (Earth Pressure Balance) (شکل ۱) جهت حفاری تونل انتخاب شده است [۱].

شکل ۱- ماشین حفاری EPB خط ۳

مشخصات ژئوتکنیکی و هندسه طرح مورد مطالعه

خط ۳ متروی تهران در قطعه چهارم از مسیر خـود از ایستگاه C3 عبور می‌کند. جنس خاک در این محدوده

از مسیر تونل اغلب رس، سیلت و لای است که وجود آب زیرزمینی در عمق ۱۱ متری خاک را به دو بخش تقسیم می‌کند و مقدار وزن مخصوص کل خاک ۱۹ کیلونیوتن بر متر مکعب می‌باشد. تونل در عمق ۱۱/٦ متری از سطح زمین قرار دارد، بنابراین تونل در زیر سطح ایستابی حفر می‌شود. مشخصات پارامترهای ژئوتکنیکی در این منطقه در جدول (۱) آورده شده است، از نظر خصوصیات مقاومتی خاک این بخش در رده‌بندی خاک‌های ضعیف قرار دارد [۱].

قطر تونل خط ۳ متروی تهران که با دستگاه EPB حفر می‌شود ۹/۱۹ متر، قطر خارجی پوشش بتنی (سگمنت‌ها) ۸/۸۵ متر و ضخامت آن‌ها ۳۵ سانتیمتر است. طول سپر ماشین حفاری ۹ متر با قطر خارجی ۹/۱٤ متر است و سپر ماشین ۲ سانتیمتر مخروطی می‌باشد [۲].

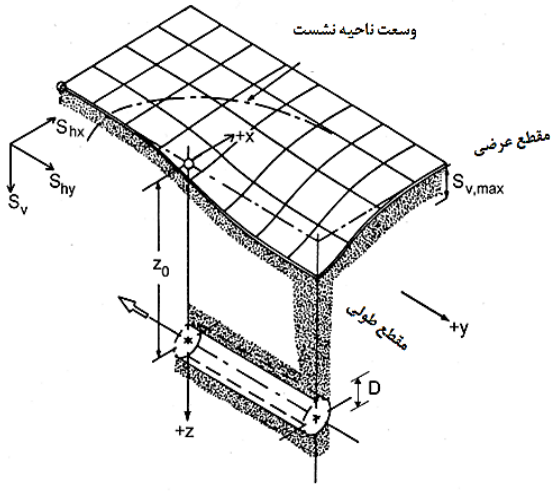
جدول ۱- مشخصات ژئوتکنیکی مسیر تونل[۱]

پارامترهای ژئوتکنیکی	مقادیر
مدول الاستیسیته (MPa)	۲۵
زاویه اصطکاک (درجه)	۲۵
چسبندگی (KPa)	۲۸
ضریب پواسون	۰/۳۵
وزن مخصوص خاک در حالت خشک (KN/m3)	۱۷
وزن مخصوص خاک در حالت اشباع (KN/m3)	۲۱

نشست سطحی

پارامترهای اساسی و موثر در تغییر شکل‌های زمین، شامل شرایط زمین، پارامترهای فنی و محیطی و روش‌های تونلسازی یا اجرا است [٤]. دلیل اصلی برای جابجایی‌های زمین در بالای تونل که نشست سطحی نامیده می‌شود، همگرایی زمین به داخل تونل بعد از حفاری است که حالت تنش‌های برجای زمین را تغییر می‌دهد و ناشی از وقوع آزاد سازی تنش‌ها است [۵]. رفتار وابسته به زمان برای زمین و وجود آب زیرزمینی وجه تمایز نشست‌های کوتاه مدت و بلند مدت است. نشست‌های کوتاه مدت در طول حفاری و یا بعد از گذشت چند روز از حفاری با فرض شرایط زهکشی نشده حاکم بر خاک رخ می‌دهند. نشست‌های بلند مدت اساساً به علت پدیده خزش، توزیع مجدد تنش و تحکیم خاک بعد از زهکشی آب زیرزمینی و حذف فشار منفذی آب در داخل خاک رخ خواهند داد، که ممکن است در طی چندین ماه تا چندین سال تا رسیدن به یک مقدار ثابت ادامه یابد. در شرایط خاک خشک نشست‌های طولانی مدت ممکن است به صورت بسیار محدودی ایجاد شوند [٦].

با پیشروی حفر تونل یک منحنی نشست سه بعدی در سطح خاک گسترش می‌یابد [٦] (شکل ۲).



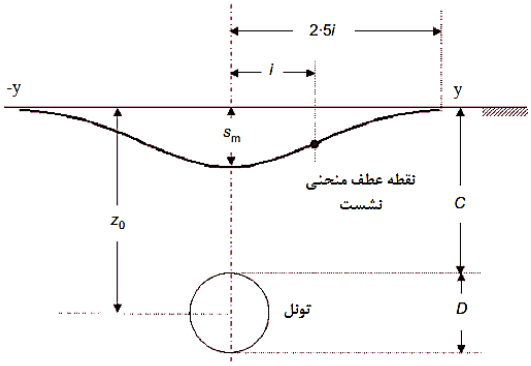
شکل ۲- منحنی نشست سه بعدی در اثر حفر تونل [٦]

مشاهدات اجرایی توسط Peck در سال ۱۹٦۹ نشان می‌دهد که منحنی عرضی نشست در زمین بکر را

می‌توان توسط یک منحنی توزیع نرمال گوسی با دو پارامتر S_{max} نشست در محور تونل (نشست حداکثر) و i فاصله نقطه عطف تا محور تونل تخمین زد (شکل ۳). پهنای منحنی نشست برابر با $2/5i$ است و منحنی توزیع از رابطه (۱) به دست می‌آید [۷].

$$S = S_{max} \exp(\frac{-y^2}{2i^2}) \qquad (۱)$$

دراین رابطه، S نشست سطحی در فواصل مختلف از مرکز تونل و y فاصله افقی عرضی از مرکز تونل است.



شکل ۳- پروفیل نشست عرضی در بالای تونل [۷]

این روند بعدها توسط محققین دیگری مانند O'Reilly & New در سال ۱۹۸۲ پیگیری شد و در عموم مطالعات در نظر گرفتن منحنی گوسی برای نشست پذیرفته شده است. آنها این فرضیه را پیشنهاد کردند که پهنای منحنی می‌تواند با یک پارامتر تجربی K ارزیابی شود، مانند $i = KZ_0$ (Z_0 عمق محور تونل) که به شرایط زمین وابسته است و این جابجایی‌های سطحی به سمت مرکز تونل هدایت می‌شوند [۵]. بر اساس مشاهدات متعدد، Mair & Taylor (۱۹۹۷) نتیجه گرفتند که مقدار K بین ۰/۲۵ تا ۰/۴۵ برای شن و ماسه، و نزدیک به ۰/۵ برای نشست کوتاه مدت در رس‌ها (در شرایط سخت یا نرم) خواهد بود [۸].

چندین روش مختلف برای پیش‌بینی طول نقطه عطف منحنی نشست تا خط مرکز تونل (i) و جود دارد. روابط (۲-۵) نشان دهنده برخی از این روابط است [۹]:

$$i = \frac{i_1 + i_2 + i_3}{3} \qquad (۲)$$

$$i_1 = 0.386 \cdot Z_0 + 2.84 \qquad (۳)$$

$$i_2 = 0.5 \cdot Z_0 \qquad (۴)$$

$$i_3 = 1.392 \cdot \left(\frac{D}{2}\right) \cdot \left(\frac{Z_0}{D}\right)^{0.704} \qquad (۵)$$

در این روابط Z_0 عمق محوری تونل از سطح زمین، و D قطر تونل است. محاسبه مقدار i در این بررسی بر اساس متوسط اندازه‌گیری برخی روش‌های تجربی ارائه شده در روابط ۲ تا ۵ انجام شده است.

چندین روش تجربی برای پیش‌بینی نشست سطحی ماکزیمم (S_{max}) وجود دارد. Herzog در سال ۱۹۸۵ رابطه (۶) را برای تعیین ماکزیموم میزان نشست سطح زمین برای حالت حفاری تونل‌های منفرد ارائه نموده است [۹]:

$$S_{max} = 0.785 \cdot (\gamma Z_0 + P_S) \cdot \left(\frac{D^2}{iE}\right) \qquad (۶)$$

که در این رابطه، γ میانگین وزن مخصوص طبیعی، Zعمق محور تونل، P_S بار اضافی ناشی از بار خیابان، D قطر تونل، E میانگین مدول الاستیسیته و i طول نقطه عطف است.

روابط تجربی (۲-٦) بر اساس داده های حفاری هر دو روش تونلسازی سپری و تونلسازی اتریشی به دست آمده اند [۹].

روش تحلیلی Bobet در سال ۲۰۰۱ برای بررسی نشست و تغییر شکلهای زمین در اثر حفر تونل در مناطق کم عمق و در محیط های اشباع با شرط نسبت عمق به شعاع بیش از ۱/۵ ارائه شده است. در شرایط آستر بسیار انعطاف پذیر و غیر قابل تراکم، برای حفاری تونل بدون اعمال هوای فشرده، میزان نشست ماکزیمم از رابطه (۷) بدست می آید [۱۰].

$$S_{max}=\frac{-wr_0}{h}+\frac{1+\upsilon}{E}\left\{-\frac{1}{2}\gamma r_0^2\ln h+\gamma_b h(1-k)r_0\left[-\frac{r_0}{h}+\frac{3}{4}\left(\frac{r_0}{h}\right)^3-\frac{1}{4}\left(\frac{r_0}{h}\right)^5\right]\right\} \quad (۷)$$

در این رابطه؛ w میزان پارامتر گپ، r_0 شعاع تونل، υ ضریب پواسون، E مدول الاستسیته خاک، γ وزن مخصوص کل خاک، γ_b وزن مخصوص غوطه‌وری، h عمق تونل و k نسبت تنش افقی به قائم است.

پارامتر گپ می‌تواند با جمع سه مؤلفه ارائه شده توسط Lee و همکارانش در سال ۱۹۹۲ به صورت زیر محاسبه شود [۱۱]:

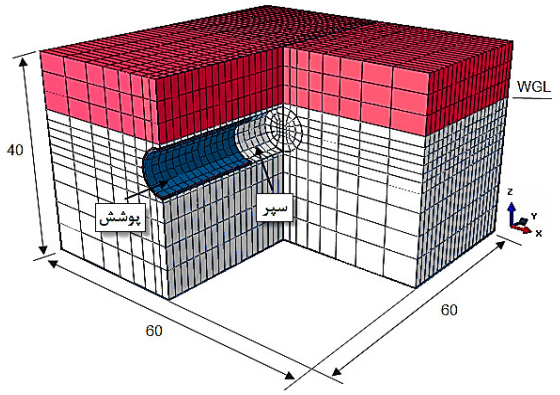
$$w=G_P+U_{3D}+\omega \quad (۸)$$

که G_P گپ فیزیکی معرف فاصله هندسی بین پوسته خارجی سپر و پوشش تونل، U_{3D} تغییرشکل الاستوپلاستیک معادل سه بعدی در سینه کار تونل و ω مقداری است که کیفیت مهارت کارکنان را در نظر می‌گیرد. اگر عملیات تزریق برای پر کردن فضای بین دیواره تونل و پوشش بکار رود، مقدار گپ فیزیکی کاهش خواهد یافت و مقدار آن ۷-۱۰٪ مقدار اولیه‌اش فرض می‌شود [۱۱].

تحلیل عددی سه بعدی از حفر تونل

در این بررسی به منظور مدلسازی از پروسه حفاری به صورت سه بعدی از یک شبکه المان محدود و نرم‌افزار ABAQUS استفاده شده است [۱۲]. مدل دارای پهنا و امتداد ٦۰ متر و ارتفاع ٤۰ متر است که برای این مدل سازی از المان‌های مکعبی استفاده شده است (شکل ٤).

این مدل سازی شامل اکثر مؤلفه‌های تونل سازی سپری نظیر خاک، وجود ماشین حفاری و اصطکاک آن با خاک، سگمنت ها، تزریق دوغاب در فضای خالی سگمنت و خاک، فشار سینه کار، فشار تزریق و سخت شدن دوغاب است و یکی از کاملترین مدل سازی‌های عددی انجام شده در این زمینه است [۳]. پوشش سگمنتی تونل و دوغاب به صورت یکپارچه و الاستیک با المان‌های مکعبی حجمی در نظر گرفته شده است، که خصوصیات در نظر گرفته شده برای سگمنت‌ها و دوغاب در جداول (۲و۳) مشاهده می‌شود.



شکل ٤- مقطع تونل و مدل المان محدود سه بعدی

جدول ٢- خصوصیات سگمنت تونل[٢]

ضخامت (cm)	مدول الاستیسیته (GPa)	ضریب پواسون	وزن مخصوص (KN/m3)
٣٥	٣٠	٠/٢	٢٥

جدول ٣- خصوصیات دوغاب تزریقی[٢]

مقاومت فشاری ١ روزه (MPa)	مقاومت فشاری ٢٨ روزه (MPa)	وزن مخصوص (KN/m3)	ضریب پواسون
٠/١	٣	١٢	٠/٢٥

میزان گام پیشروی در هر مرحله از حفاری ١/٥ متر است و سربار ترافیکی ٢/٤ تن بر متر مربع بر سطح مدل اعمال شده‌است. در مدلسازی رفتار خاک از مدل رفتاری موهر کولمب استفاده شده و نسبت تنش افقی به قائم برابر با ٠/٥ در نظر گرفته شده است. فشار نگهداری جبهه‌کار در مرکز تونل ١١٢ کیلو نیوتن بر متر مربع است که با گرادیان ١٥ کیلو نیوتن بر متر مربع در نظر گرفته می‌شود. میزان فشار تزریق در تاج تونل ١٥٠ کیلو نیوتن بر متر مربع می‌باشد و با توجه به وزن دوغاب رو به پایین افزایش می‌یابد [٢]. اصطکاک بین پوسته سپر و خاک طبق معیار موهرکولمب ٠/٢ در نظر گرفته شده است [٣].

مقایسه و بررسی نتایج

در این بررسی از روش‌های تجربی، تحلیلی و عددی ارائه شده به منظور پیش‌بینی تغیرشکل خاک در اثر حفر تونل خط ٣ متروی تهران استفاده شده است. به منظور پیش‌بینی نشست سطحی حداکثر در بالای محور تونل و شکل عرضی منحنی نشست از روش‌های پک، هرزوگ، بابت و ABAQUS استفاده شده و طول نقطعه عطف (i) منحنی نشست که در روش‌های تجربی و تحلیلی به کار می‌رود از روابط (٢-٦) به دست آمده است.

در نتیجه با توجه به روابط ارائه شده، مقدار متوسط i مورد استفاده در روابط پک و هرزوگ در این بررسی ٨/٩ متر محاسبه شده است.

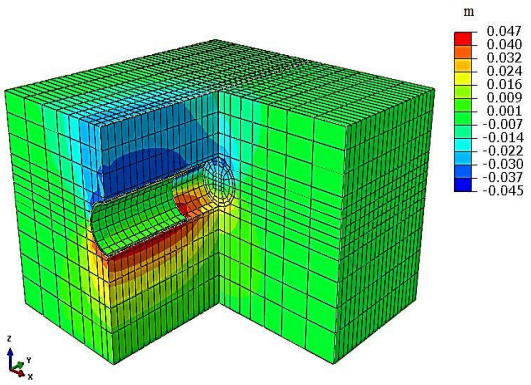
با توجه به رابطه پیشنهادی هرزوگ (رابطه ٦) میزان حداکثر نشست سطحی ٩/٨ سانتیمتر به دست می‌آید. رابطه تحلیلی بابت به مقدار پارامتر گپ (w) وابسته است. مقدار این پارامتر با توجه به رابطه (٨) به دست می آید. مقدار پارامتر گپ در این بررسی ٠/٠٢٣٨ متر ارزیابی شده است. با جاگذاری پارامترهای مورد نیاز در این رابطه (رابطه ٧) مقدار نشست سطحی حداکثر از روش تحلیلی بابت ٤/٢ سانتیمتر محاسبه شده است.

با استفاده از مدل سازی عددی المان محدود سه بعدی که با در نظر گرفتن اکثر مؤلفه‌های تونلسازی سپری و حفر کامل مدل انجام شده ، میزان جابجایی حداکثر ٢/٤ سانتیمتر بدست می‌آید، که نسبت به دو روش دیگر از مقدار کمتری برخوردار است. نتایج به دست آمده از هر سه روش در جدول (٤) ارائه شده است.

جدول ٤- مقادیر نشست حداکثر محاسبه شده

روش پیش‌بینی	Herzog	Bobet	ABAQUS FEM
حداکثر نشست سطحی (cm)	٩/٨	٤/٢	٢/٤

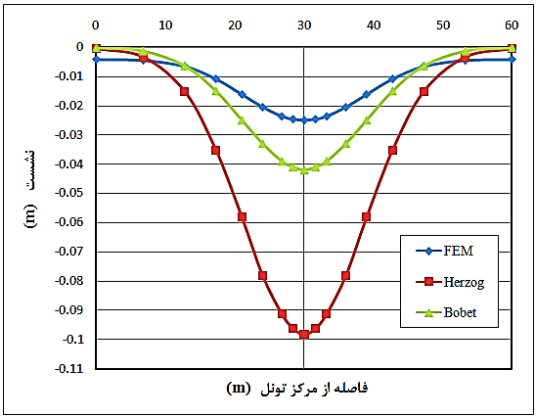
شکل (۵) نشان دهنده جابجایی‌های عمودی شبیه‌سازی شده بعد از ۳۰ متر حفاری و پیشروی TBM است.



شکل ۵- حوزه تغییر شکل عمودی به دست آمده از شبیه سازی عددی بعد از ۳۰ متر حفاری

همانطور که اشاره شد روش‌های هرزوگ و بابت تنها نشست سطحی حداکثر را محاسبه می‌کنند، لذا جهت ترسیم پروفیل عرضی نشست برای این دو روش از رابطه پک استفاده شده است.

نتایج همه روش‌های مذکور از پیش‌بینی منحنی عرضی نشست سطح زمین در شکل (٦) مشاهده می‌شود.



شکل ٦- مقایسه منحنی‌های عرضی نشست سطحی محاسبه شده

طول نقطه عطف منحنی نشست (i) که از روش عددی بدست آمده، ۹ متر است. همانطور که در شکل (٦) و جدول (٤) مشاهده می‌شود روش تجربی هرزوگ نشست سطحی را بیشتر از دو روش دیگر پیش‌بینی می‌کند و روش بابت نسبت به روش هرزوگ اختلاف کمتری با شبیه‌سازی عددی دارد.

با توجه به اهمیت این موضوع شرکت سوفرتوی فرانسه به عنوان مسئول مطالعات مرحله اول متروی تهران مقدار نشست مجاز را در زیر ساختمان‌ها ۱ سانتیمتر و در سطح خیابان ۲ سانتیمتر تعیین کرده است [۳]. درنتیجه مقدار نشست سطحی بدست آمده از هر سه روش از مقدار مجاز آن بیشتر است.

نتیجه گیری

با توجه به اهمیت بروز نشست‌های ناشی از حفر تونل در مناطق شهری و ایجاد خسارات احتمالی ایجاد شده توسط آن‌ها، در این مقاله با استفاده از سه روش تجربی، تحلیلی و عددی به بررسی و پیش‌بینی نشست‌های سطحی در حفاری مکانیزه بخشی از مسیر خط ۳ متروی تهران پرداخته شده است. شبیه سازی‌های عددی از جابجایی‌های ایجاد شده به وسیله تونل سازی سپری EPB مسئله حساس و پیچیده‌ای است. پیش‌بینی این تغییر شکل‌ها با استفاده از یک مدل المان محدود سه بعدی با در نظر گرفتن اکثر مؤلفه‌های تونل سازی سپری انجام شده است. پیش‌بینی‌ها نشان می‌دهد که شبیه‌سازی‌های عددی مقدار حداکثر نشست کمتر و واقع‌بینانه‌تری را نسبت به روش‌های تجربی و تحلیلی نشان می‌دهند. مقایسه منحنی‌های نشست به دست‌آمده از روش‌های مختلف نشان می‌دهد که منحنی نشست روش‌های تجربی و

تحلیلی نسبت به روش عددی دارای گودی باریکتری است. از دلایل اصلی اختلاف روش‌های تجربی و تحلیلی با روش عددی این است که روش‌های تجربی و تحلیلی پارامترهای کمتری را در محاسبات خود در نظر می‌گیرند، همچنین در این روش‌ها پارامترهای نظیر فشار سینه‌کار و فشار تزریق که نقش عمده‌ای در مقدار همگرایی‌های اطراف تونل دارند دخالت ندارند. نتایج نشان می‌دهد که مقدار نشست سطحی محاسبه شده با هر سه روش برای تونل خط ۳ در محدوده مورد بررسی از مقدار نشست مجاز پیشنهادی بیشتر است، بنابراین باید در حین ساخت تونل اقدامات مناسبی از قبیل بهسازی زمین جهت کنترل مقدار نشست در این ناحیه صورت گیرد.

منابع

۱- مهندسین مشاور پژوهش، (۱۳۸۷). گزارش مطالعات ژئوتکنیک مسیر تونل قطعه ٤ خط ۳ متروی تهران.۱۱۲ص.

۲- مهندسین مشاور پژوهش، (۱۳۸۸). گزارش فشار جبهه کار در ماشین EPB قطعه ٤ خط ۳ متروی تهران.۲۱۳ص.

۳- حسینی، س.، (۱۳۹۰). تحلیل پایداری تونل‌های همجوار بزرگ مقطع در زمین‌های نرم و کم عمق (مطالعه موردی؛ تقاطع خطوط ۷ و ۳ متروی تهران)، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب.۷۸ص.

4- Suwansawat, S., Einstein, H.H., (2006). Artificial neural networks for predicting the maximum surface settlement caused by EPB shield tunneling. Tunneling and underground space Technology, 21, 133–150pp.

5- O'Reilly MP, New BM, (1982). Settlement above tunnels in the United Kingdom–their magnitude and prediction. Proceedings of the Tunneling 82 Conference, Brighton, 173–181pp.

6- Attewell, P.B., Yeates, J., Selby, A.R., (1986). Soil Movements Induced By Tunnelling and Their Effects On Pipelines and Structures. Blackies and Sons Ltd, London,1234-1301pp.

7- Peck, R.B., (1969). Deep excavations and tunnelling in soft ground. State of the art report, Proc 7th Int Conf SMFE, Mexico City, State of the Art Volume, 225-290pp.

8- Mair, R.J, Taylor R.N., (1997). Bored tunnelling in the urban environment.16th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering Hambourg. Millpress Rotterdm, 4, 2353-2383pp.

9- Arioglu, E., (1992). Surface movements due to tunneling activities in urban areas and minimization of building demages. Short Course, Istanbul Technical University, Mining Eng. Dept,121-134pp.

10- Bobet, A., (2001). Analytical solutions for shallow tunnels in saturated ground. ASCE J. Eng. Mech. 127(12):1258-1266pp.

11- Lee K, Rowe RK, Lo KJ., (1992). Subsidence owing to tunneling. I: Estimating the gap parameter. Can. Geotech. J., (29):929–40pp.