

اثر پارامترهای عملیاتی مؤثر بر نشست سطح زمین در حفاری با دستگاه تعادلی فشار زمین EPBM (مطالعه موردی؛ تونل توسعه جنوبی خط ۶ متروی تهران)

مقاله پژوهشی

احسان باقری^۱؛ علی نقی دهقان^{۲*}؛ کاوه آهنگری^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد؛ گروه مهندسی معدن، دانشکده فنی و مهندسی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران
ehsanbagheri89@gmail.com

۲- استادیار؛ گروه مهندسی معدن، دانشکده فنی و مهندسی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران
a.dehghan1984@srbiau.ac.ir

۳- دانشیار؛ گروه مهندسی معدن، دانشکده فنی و مهندسی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی؛ تهران
ahangari@srbiau.ac.ir

دریافت دست‌نوشته: ۱۳۹۸/۰۵/۰۶؛ پذیرش دست‌نوشته: ۱۳۹۸/۱۰/۰۸

شماره صفحات: ۸۳ تا ۱۰۰

شناسه دیجیتال (DOI): 10.22044/tuse.2019.8743.1373

واژگان کلیدی	چکیده
نشست سطح زمین دستگاه حفاری مکانیزه EPB مدل‌سازی عددی 3D روش تفاضل محدود (FDM) فشار سینه‌کار آنالوس و گروت خط ۶ متروی تهران	در مطالعه حاضر اثر برخی از مهمترین پارامترهای عملیاتی دستگاه تعادلی فشار زمین (EPBM) در زمان حفاری تونل بر میزان تغییرشکل و نشست سطح زمین مورد بررسی قرار گرفته است. اساس این تحقیق، به‌صورت مدل‌سازی عددی به روش تفاضل محدود (FDM) و با استفاده از نرم‌افزار $FLAC^{3D}$ است. مدل عددی ابتدا بر اساس شرایط هندسی و مشخصات فیزیکی و مکانیکی تونل خط ۶ متروی تهران در بخش توسعه جنوبی (کیلومتر ۰۲+۶۰۰) ساخته شده و سپس بر پایه روش «تونل‌نامرئی» کالیبره و صحت‌سنجی شده است. از این‌رو، در قالب تحلیل‌های پارامتریکی، اثر تنش ژئواستاتیکی در سینه‌کار تونل و فضای اطراف سپر (آنالوس) و نیز فشار تزریق گروت/ملات در پشت سگمنت بر میزان نشست سطح زمین مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که با کاهش میزان فشار مرزی معادل (از 508 kPa تا 335 kPa) بر روی سینه‌کار و فضای آنالوس، تغییر زیادی در افزایش میزان نشست (از بازه $1/18$ تا $1/48$ میلی‌متر) مشاهده نمی‌شود. همچنین نتایج حاصل از تحلیل پارامتریکی فشار گروت نشان داد که اعمال فشار گروت معادل با تنش ژئواستاتیکی قائم (335 kPa) نسبت به تنش ژئواستاتیکی افقی (357 kPa) در سینه‌کار تونل، اثر بیشتری در کنترل نشست سطح زمین دارد (به ترتیب $1/45$ و $1/20$ میلی‌متر). ضریب فشار جانبی زمین کمتر از یک ($K_0 < 1$)، منجر به تخمین کمتر مقدار تنش ژئواستاتیکی افقی نسبت به تنش ژئواستاتیکی قائم شده است و در نتیجه اثرگذاری کمتر آن در کنترل میزان نشست سطح زمین مشاهده می‌شود. افزایش فشار گروت نسبت به تنش ژئواستاتیکی قائم منجر به کاهش قابل توجه نشست سطح زمین می‌گردد، اما افزایش بیش از اندازه این مقدار می‌تواند منجر به تغییرشکل و جابجایی‌های رو به بالا به‌صورت بالامدگی زمین در فاصله عرضی بیش از ۲۰ متر (حدود ۲ برابر قطر تونل) از محور تونل گردد.

تنش‌های موجود در زمین دارد و تنش‌ها باعث ایجاد نشست‌هایی در سطح زمین می‌شود که در صورت عدم توجه،

۱- پیش‌گفتار

حفاری و اجرای تونل‌ها اثرات غیر قابل اجتنابی بر روی

صورت می‌گیرد. با توجه به عبور مسیر تونل از یک بافت شهری پرجمعیت و قدیمی و ساختمان‌های کوتاه و بلند با کاربردهای تجاری، مسکونی و اداری می‌بایست در زمان حفاری و ساخت به آن توجه بیشتری داشت. در چنین شرایطی تغییر شکل‌ها و جابجایی‌های به وجود آمده در محیط بسیار حائز اهمیت‌اند. در مطالعه حاضر تلاش شده است تا بر مبنای مدل‌سازی عددی سه‌بعدی و با استفاده از نرم‌افزار تفاضل محدود $FLAC^{3D}$ نشست سطح زمین ناشی از عملیات حفاری در مسیر تونل با لحاظ نمودن برخی از مهمترین پارامترهای عملیاتی دستگاه حفاری *TBM*، از جمله فشار سینه‌کار، فشار میان سپر و زمین (فضای آنالوس) و نیز فشار ناشی از تزریق دوغاب در پشت پوشش نگهداری تونل (سگمنت) مورد تحلیل و بررسی قرار گیرد.

۲- مشخصات پروژه تونل‌سازی مورد مطالعه

۲-۱- معرفی پروژه

تونل توسعه جنوبی خط ۶ متروی تهران به طول تقریبی ۶ کیلومتر از منطقه دولت‌آباد در جنوب تهران شروع شده و پس از عبور از اتوبان امام علی (ع) در طول بلوار بسیج ادامه یافته و پس از آن در امتداد خیابان گیوری (جاده سوم شهر ری) امتداد می‌یابد. این مسیر پس از رسیدن به میدان بسیج مستضعفین (سه راه ورامین) در خیابان فدائیان اسلام امتداد یافته و پس از رسیدن به میدان حضرت عبدالعظیم به مسیر خود تا انتهای خط در خیابان شهید احمد قمی ادامه می‌دهد. در انتها نیز این بخش از مسیر خط ۶، در نزدیکی کمربندی ورامین به پایان می‌رسد. شروع حفاری تونل به صورت مکانیزه (*TBM*) از محدوده ایستگاه *A6* بوده و در طول مسیر از ۴ ایستگاه (*A6-1-A6-4*) و همچنین از زیر اتوبان امام علی (ع) (دومرتبه) عبور می‌نماید (شکل ۱).

۲-۲- وضعیت زمین‌شناسی مهندسی و ژئوتکنیکی

در راستای مطالعات زمین‌شناسی مهندسی و ژئوتکنیک پروژه، ضمن مطالعات زمین‌شناسی تعداد ۲۰ گمانه (*Borehole*) با عمق ۸/۵ تا ۴۰ متر و تعداد ۵ چاهک (*Test Pit*) به عمق ۹/۵ تا ۳۴ متر برای مطالعه شرایط زیرسطحی حفاری شده است. در حین حفاری گمانه‌ها، آزمایش‌های صحرایی شامل آزمایش ضربه و نفوذ استاندارد

اغلب به سازه‌ها و شریان‌های حیاتی آسیب‌های جبران ناپذیری می‌رسانند. البته هنگام حفر تونل در زمین‌های سخت، غیر از حالت زمین‌های با خاصیت مچالیدگی، حرکت‌های زمین عموماً مشکل‌ساز نیست و توسعه حرکت‌های زمین اطراف تونل جز در حالت‌های کم‌عمق و یا هنگامی که آب‌زیرزمینی موجود در لایه نرم بالایی تحت تاثیر قرار می‌گیرد، به سطح زمین نمی‌رسد. اما در مورد زمین‌های خاکی، حفر تونل ممکن است سبب بوجود آمدن تنش‌هایی در خاک شده که موجب نشست لایه‌های خاک بالای تونل می‌شود (*Leca and New, 2007*، *Sadeghi, et al., 2016*، *Dehghan, et al., 2012* و *Karamniayi Far & Dehghan, 2019*). یکی از روش‌های حفاری که امروزه به‌منظور کنترل نشست زمین به‌خصوص در زمین‌های آبرفتی و محیط‌های شهری که نشست سطح زمین و سازه‌های مجاور آن از اهمیت و حساسیت زیادی برخوردار می‌باشند، استفاده از دستگاه‌های حفاری *TBM* با کنترل فشار زمین در سینه‌کار حفاری می‌باشد. این نوع دستگاه‌های حفاری، می‌توانند با اعمال فشار لازم در سینه‌کار و نیز فضای پیرامونی حفاری، عملکرد بسیار مناسبی در کنترل نشست در سطح زمین به‌خصوص در محیط‌های شهری داشته باشند. از آنجایی که استفاده از دستگاه‌های سپر بسته (*SPB* و *EPB*) نقش مهم و سازنده‌ای در کنترل و محدود نمودن نشست در زمین‌های با خصوصیات مکانیکی ضعیف دارند، بنابراین لازم است درک درستی از رابطه میان تغییرشکل زمین و فشارهای اعمالی از طرف دستگاه حفاری در بخش‌های مختلف وجود داشته باشد. عدم توجه به اعمال فشار متناسب با شرایط زمین منجر به تغییرشکل‌های (نشست و یا بالادگی زمین) بیش از حد مجاز و غیرقابل قبول در اطراف فضای حفاری و در نتیجه در سطح زمین خواهد شد (*Mooney, et al., 2016*، *Kavvas, et al., 2017*، *Fang, et al., 2017*، *Lai, et al., 2017*، *Mori, et al., 2018*، *Avunduk & Copur, 2018*، *Goh, et al., 2018*، *2018*، *Alebouyeh, et al., 2019*). پروژه تونل توسعه جنوبی خط ۶ متروی تهران یکی از پروژه‌های تونلی مهم به واسطه شرایط زمین‌شناسی، موقعیت، طول و ابعاد هندسی آن در شهر تهران است که حفاری آن توسط یک دستگاه تعادلی فشار زمین (*EPBM*)

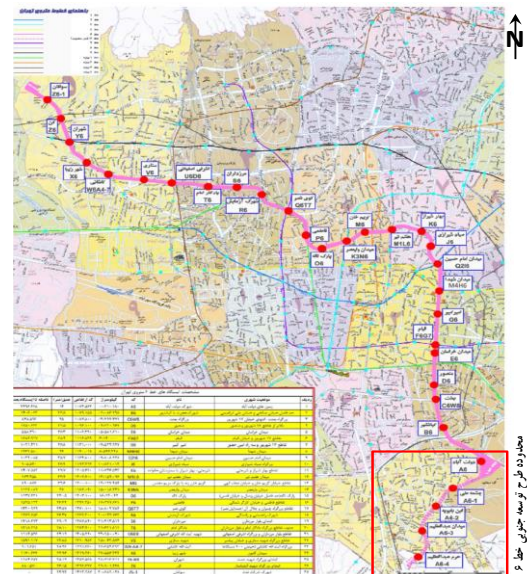
درصد رده‌شده از الک ۲۰۰ (سیلت و رس) در این واحد بین ۱۰ تا ۳۰ درصد است. ذرات تشکیل‌دهنده واحد خاکی *ET-3* از ماسه رسی به همراه شن و همچنین رس و سیلت ماسه‌ای تشکیل شده و درصد رده‌شده از الک ۲۰۰ (ذرات ریزدانه) آن بین ۳۰ تا ۶۰ درصد می‌باشد. ذرات تشکیل‌دهنده واحد خاکی *ET-4* عمدتاً از سیلت و رس ماسه‌ای و رس به همراه ماسه تشکیل شده است. مقدار درصد رده‌شده از الک ۲۰۰ (سیلت و رس) این واحد همواره بیشتر از ۵۰ درصد است. این واحد خاکی طبق استاندارد *USCS* در گروه خاک‌های *CL* و *ML* قرار می‌گیرد و عمدتاً در محدوده ابتدایی و انتهایی تونل گسترش یافته‌اند. مشخصات فیزیکی و مکانیکی واحدهای مختلف زمین-شناسی مهندسی با بررسی و تحلیل آماری نتایج حاصل از مطالعات صحرایی (لاگ گمانه‌ها و آزمایش‌های صحرایی) و آزمون‌های آزمایشگاهی برآورد و تعیین شده است. همچنین خلاصه‌ای از پارامترهای آماری برای نتایج به‌دست آمده از آزمون‌های مذکور (به تفکیک هر واحد) در جدول ۱، ارائه شده است.

به‌طور کلی مطالعات هیدروژئولوژی مسیر تونل نشان می‌دهد عمق برخورد به سطح در محدوده مسیر تونل از شمال به جنوب افزایش می‌یابد. به نحوی که این عمق از بیش از ۳۰ متر در نواحی جنوبی به کمتر از ۱۰ متر در نواحی شمالی و محدوده چشمه‌علی می‌رسد. با توجه به فاصله پیرومترها از مسیر تونل، بایستی به عمق آب در چاه‌های بهره‌برداری نیز توجه نمود. از مترای ۶۴۰ به بعد بایستی انتظار ورود آب به تونل را داشت. در نواحی سنگی اختلاف سطح آب از کف تونل به حدود ۸ متر می‌رسد. از مترای ۲۴۰۰ الی مترای ۳۳۰۰ ارتفاع سطح آب از سقف تونل همواره بالاتر بوده و به بیش از ۱۰ متر می‌رسد.

۲-۳- حفاری و پوشش نگهداری تونل

تونل بخش توسعه جنوبی خط ۶ متروی تهران به‌صورت مکانیزه و توسط یک دستگاه تعادلی فشار زمین (*EPBM*) با مقطع دایره‌ای شکل به طول حدود ۹۸ متر و وزنی بالغ بر ۱۱۰۰ تن، حفاری و سگمنت‌گذاری می‌گردد (شکل ۳). قطر صفحه حفاری و سپر دستگاه به ترتیب ۹/۱۹ و ۹/۱۵ متر است. تعداد ۳۳ جک جلوبرنده وظیفه حرکت *TBM* را به جلو دارند. تعداد سگمنت‌های مورد استفاده برای یک

(*SPT*)، آزمایش پرسیومتری، آزمایش نفوذپذیری صحرایی به روش لوفران و لوژان، آزمایش لرزه‌ای به روش ته چاهی (*Down Hole*) و همچنین تعیین شاخص کیفی توده سنگ (*RQD*) انجام شده است. همچنین در حین حفاری گمانه‌ها، نمونه‌های لازم جهت انجام آزمون‌های آزمایشگاهی اخذ شده و آزمایش‌های مورد نیاز (بر اساس دستورالعمل‌های ژئوتکنیکی) انجام شده است.



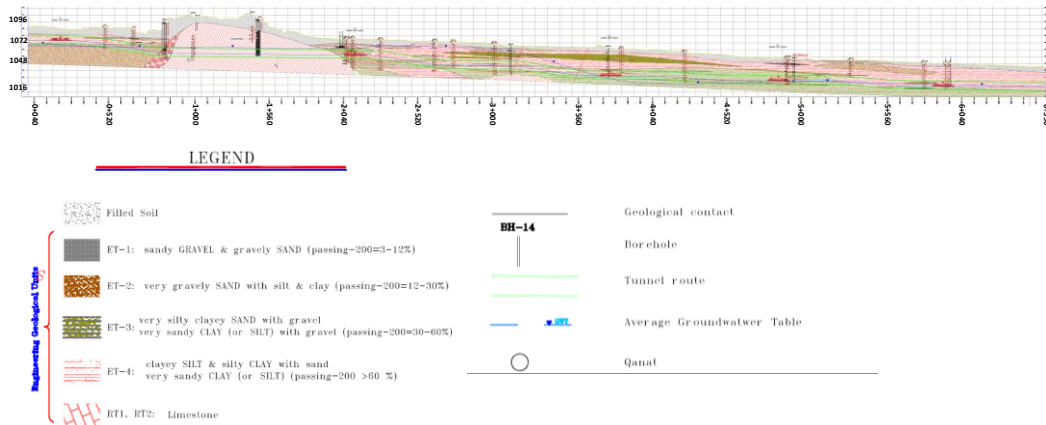
شکل ۱- موقعیت مسیر خط ۶ متروی تهران به همراه مسیر توسعه جنوبی

بر اساس نتایج به‌دست‌آمده از مطالعات صحرایی و آزمایشگاهی و همچنین با در نظر گرفتن مقیاس نقشه، لایه‌های خاکی دربرگیرنده مسیر تونل، به چهار واحد زمین‌شناسی مهندسی تفکیک شده‌اند. موقعیت و گسترش واحدهای خاکی مذکور در مسیر تونل بر روی برش زمین‌شناسی مهندسی مسیر تونل نشان داده شده است (شکل ۲). جنس واحد خاکی *ET-1* از شن ماسه‌ای و در بعضی از محدوده‌ها از ماسه شنی تشکیل شده است. مقدار درصد رده‌شده از الک ۲۰۰ (سیلت و رس) برای واحد *ET-1* کمتر از ۱۵ درصد می‌باشد. این واحد خاکی تقریباً در مسیر تونل حضور ندارد و تنها در بخش‌هایی به محور تونل نزدیک می‌شود. واحد خاکی *ET-2* مانند واحد *ET-1* در رده خاک‌های درشت دانه قرار می‌گیرد و جنس آن عمدتاً از ماسه شنی به همراه سیلت و رس تشکیل شده است. مقدار

اثر پارامترهای عملیاتی مؤثر بر نشست سطح زمین در حفاری با ...، احسان باقری و ...، ص ۸۳-۱۰۰

محیطی جهت اتصال دو رینگ مجاور به یکدیگر از میله‌های اتصال‌دهنده کانکس (Conex dowel) استفاده می‌شود.

رینگ کامل پوشش تونل شامل ۸ قطعه دوزنقه‌ای شکل به همراه یک کلید است. در درزهای طولی شیاری جهت تعبیه و نصب میله‌های هادی پیش‌بینی شده و در درزهای



شکل ۲- پروفیل طولی زمین شناسی مهندسی مسیر تونل

جدول ۱- پارامترهای ژئوتکنیکی واحدهای خاکی زمین‌شناسی مهندسی مسیر تونل

وزن واحد حجم γ (g/cm^3)	چسبندگی c (kPa)		زاویه اصطکاک ϕ		مدول پرسیومتری E (MPa)	نسبت پوآسون (ν)	واحد زمین‌شناسی مهندسی	
	اشباع γ_{sat}	طبیعی γ_{unsat}	اشباع	رطوبت طبیعی				اشباع
۲/۰۵	۱/۹۵	۰/۳۰	۵۰-۶۰	۳۷-۴۰	۳۸-۴۲	۱۲-۱۷	۱۹-۲۴	ET-1
۱/۹۵	۱/۹۰	۰/۳۲	۵۰-۶۰	۲۱-۳۷	۳۵-۴۰	۲۰-۲۷	۳۰-۳۵	ET-2
۱/۹۵	۱/۹۰	۰/۳۲	۴۵-۵۵	۲۵-۳۰	۲۵-۳۲	۲۸-۳۵	۳۵-۴۰	ET-3
۱/۸۰	۱/۷۵	۰/۳۵	۴۰-۵۰	۱۵-۲۰	۱۸-۲۲	۳۰-۴۰	۴۰-۵۰	ET-4

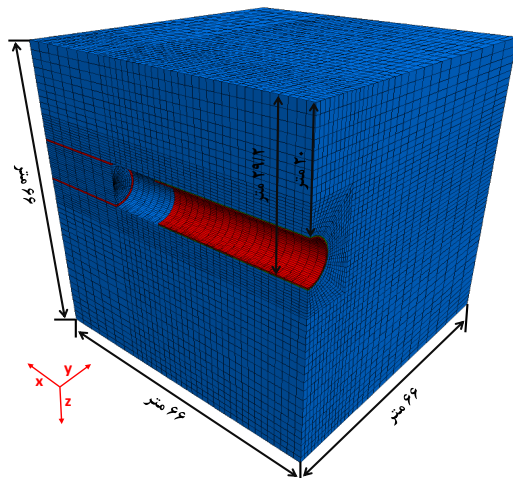
سگمنت‌های مورد استفاده دارای ۱/۵ متر طول و ۳۵ سانتی‌متر ضخامت دارند. هر رینگ از دو سمت مخروطی‌اند و تفاوت بیشترین و کمترین طول معادل ۶۰ میلی‌متر است که امکان اجرای قوس با شعاع حداقل ۲۲۱/۲۵ متر را ایجاد می‌نماید.

قطر خارجی هر رینگ ۸/۸۵ متر و قطر داخلی آن ۸/۱۵ متر است. جهت اعمال فشار در سینه‌کار از مخلوط فوم و مصالح حفاری شده در اتاقک حفاری (Muck Chamber) استفاده می‌گردد. همچنین پس از نصب رینگ‌های سگمنتی، به‌منظور پر نمودن فضای میان آن‌ها و زمین حفاری شده که در حدود ۱۷ سانتی‌متر است، توسط گروت (دوغاب) سیمانی با فشار معین انجام می‌گیرد.



شکل ۳- تصاویری از دستگاه حفاری EPB و مراحل مونتاژ آن در خط ۶ متروی تهران

حفره‌ای و هدایت هیدرولیکی (k) 1×10^{-7} متر بر ثانیه (m/sec) در نظر گرفته شده است. به جهت شرایط تقارن محوری محیط و سازه دایره‌ای شکل تونل و به منظور کاهش محاسبات و افزایش سرعت مدل‌سازی، تنها نیمی از مدل مورد نظر، شبیه‌سازی گردید. ابعاد مدل به گونه‌ای در نظر گرفته شده تا ضمن جلوگیری از تأثیر مرزهای مدل بر نتایج به دست آمده و ایجاد خطا، مانع از افزایش حجم و زمان محاسبات گردد. ابعاد مدل در راستای محورهای x ، y و z به صورت تابعی از قطر تونل (D) و عمق آن (H) در شکل ۴، نشان داده شده است. همانگونه که در شکل ۴، نشان داده شده است، طول و عرض مدل بر مبنای $2(H+4D)$ و ارتفاع مدل بر مبنای $(H+4D)$ در نظر گرفته شده است (*Castellanza, et al. 2008*). از این رو با توجه به شرط تقارن محوری، بعد عرضی مدل در جهت مثبت محور x برابر ۶۶ متر، در جهت مثبت محور y برابر ۶۶ متر و در جهت منفی محور z برابر ۶۶ متر در نظر گرفته شد (شکل ۴).



شکل ۴- مشخصات هندسی مدل سه بعدی ساخته شده در محیط نرم افزار $FLAC^{3D}$

همچنین در شکل ۵، جزئیاتی از مراحل حفاری تونل بوسیله دستگاه سپری EPB به همراه المان‌های مختلف از جمله پوشش سگمنتی، گروت سیمانی، موقعیت سینه‌کار، طول سپر دستگاه، موقعیت تزریق گروت و غیره نشان داده شده است. در مقطع مورد نظر تونل در عمق ۲۹/۲ متری از سطح زمین با روباره ۲۰ متر قرار دارد که روی هم رفته نسبت

مشخصات فیزیکی و مکانیکی پوشش نگهداری تونل در جدول ۲، با در نظر گرفتن ضریب تعدیل جهت مدل‌سازی عددی، ارائه شده است.

جدول ۲- مشخصات سیستم نگهداری سگمنتی و گروت یا ملات سیمانی تزریقی و سخت شده

پارامتر	E (MPa)	ν (NU)	d (cm)	γ (kg/m^3)
ملات تزریقی (سیال)	۱۰۰۰	۰/۲۵	۱۷	۱۸۰۰
ملات سخت شده	۱۰۰۰۰	۰/۲۵	۱۷	۲۳۰۰
سگمنت بتنی	۳۰۰۰۰	۰/۲۵	۳۵	۲۵۰۰

۳- اثر پارامترهای عملیاتی دستگاه حفاری

EPB بر نشست سطح زمین

۳-۱- مدل‌سازی عددی $3D$

شبیه‌سازی عددی بررسی نشست سطح زمین در حین عملیات حفاری با دستگاه سپری تعادلی فشار زمین به روش تفاضل محدود و به کمک نرم افزار $FLAC^{3D}$ انجام گرفته است. روش تفاضل محدود برای تحلیل نشست سطح زمین ابزاری قدرتمند بوده و انعطاف پذیری بیشتری نسبت به سایر روش‌های عددی دارد (*Chakeri, et al., 2013*).

به منظور بررسی نشست زمین در زمان عملیات حفاری تونل، بر اساس پروفیل زمین‌شناسی مهندسی (شکل ۲) و نیز مشخصات ژئوتکنیکی خاک در مسیر تونل (جدول ۱)، کیلومتر ۲+۶۰۰ به عنوان یکی از حساس‌ترین مقاطع در مسیر تونل انتخاب گردید. از مهم‌ترین دلایل انتخاب این مقطع جهت تحلیل و بررسی نشست سطح زمین، می‌توان به وجود ضعیف‌ترین لایه زمین‌شناسی مسیر ($ET-4$)، قرار گرفتن تونل در زیر تراز آب زیرزمینی با بیشترین ارتفاع بار آبی، عمق قرارگیری تونل (روباره نسبتاً زیاد)، پیش‌بینی فشار سینه‌کار بالا و غیره اشاره کرد.

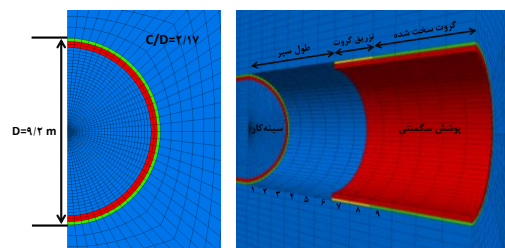
از این رو در مدل‌سازی عددی، محیط خاکی به صورت همگن ($ET-4$)، همسان‌گرد با رفتار الاستوپلاستیک و معیار موهر-کولمب (به صورت المان‌های ۸ گره‌ای) فرض شد. آب زیرزمینی در محدوده مورد مطالعه نسبت به سطح زمین در تراز ۶ متری قرار دارد که در مدل‌سازی به صورت فشار آب

سیمانی سیال و سخت‌شده) در جدول ۲، ارائه داده شده است. به‌طور خلاصه، مدل‌سازی سه‌بعدی کوپل‌شده (همبسته) خاک-تونل-سیال (مواد حفاری مخلوط‌شده با فوم جهت اعمال فشار در سینه‌کار و فضای آنالوس و نیز گروت یا ملات تزریقی در پشت سگمنت) شامل تعداد ۱۰۱۷۰۰ زون و ۱۰۷۹۱۸ نقاط گره‌ای است. از این‌رو پروسه حفاری و نصب سگمنت تونل در ۳۰ کورس با گام‌های ۱/۵ متری مدل‌سازی شده است.

در مدل‌سازی عددی حفاری تونل با دستگاه *TBM*، یک فشار مرزی (*Boundary pressure*) ناشی از مصالح حفاری‌شده به همراه مواد افزودنی (برای مثال فوم) در اتاق حفاری، در سینه‌کار و فضای آنالوس اطراف سپر اعمال می‌گردد (هر چند در دستگاه *EPB* با توجه به ماهیت (ویسکوزیته) مصالح اعمال فشار نسبت به دستگاه *SPB* که عمدتاً دوغاب بنتونیتی است، نمی‌باشد اما در این مسئله یک فشار پیوسته و برابر از سینه‌کار تا فضای پشت سپر فرض شده است). لازم به ذکر است که در مدل‌سازی عددی حفاری تونل با دستگاه *TBM*، صراحتاً ساختار دستگاه مدل‌سازی نمی‌گردد بلکه اثرات دستگاه از جمله فشارهای اعمالی در سینه‌کار، فضای اطراف سپر، فشار تزریق در پشت سگمنت و نیز شبیه‌سازی گروت سخت‌شده و سگمنت‌های بتنی لحاظ می‌گردد.

در مدل‌سازی، طول سپر برابر ۹ متر و معادل ۶ رینگ در نظر گرفته شده است. برای اعمال فشار سینه‌کار، فضای پشت سپر و تزریق دوغاب در پشت سگمنت همانند شکل ۵، اقدام شده است. همان‌طور که در شکل ۵، نشان داده شده است، فشار نگهداری اعمال شده بر روی سینه‌کار و فضای محیطی سپر از رینگ ۱ تا ۶ انجام می‌گیرد. فشار نگهداری سینه‌کار با توجه به وزن مخصوص مصالح عمل-آوری شده (*Soil Conditioning*) با فوم در محفظه حفاری که معادل ۱۶ کیلونیوتن بر مترمکعب است، از تاج به کف تونل به‌صورت بار گسترده خطی افزایش می‌یابد. فشار صفحه حفاری (کاترهد) بر روی خاک نادیده گرفته شده است (به پیشنهاد محققین پیشین، فشار کاترهد می‌تواند نادیده گرفته شود و فشار سینه‌کار معادل با فشار محفظه حفاری در نظر گرفته شود (Bezuijen & Talmon, 2014)). همچنین فشار گروت به‌صورت شعاعی بر روی سطح خاک

عمق روباره (*Cover depth*) (*C*) به قطر تونل (*Tunnel Diameter*) (*D*) در حدود ۲/۱۷ است. قطر تونل در زمان حفاری نیز در حدود ۹/۱۹ متر در نظر گرفته شده است.



شکل ۵- مشخصات هندسی المان‌های مختلف تونل در زمان حفاری

همچنین فرض شده است که حفاری تونل تا موقعیت ۴۵ متری در طول مدل به‌صورت سکانشی ادامه می‌یابد. جهت ایجاد شرایط مرزی، گره‌های اطراف مدل در جهت‌های افقی (*X* و *Y*) بر روی صفحات *X-Z* و *Y-Z* ثابت (گیردار) شدند، در حالی که گره‌های کف مدل در جهت عمودی (*Z*) بر روی صفحات *X-Z* و *Y-Z* ثابت شد. با توجه به ابعاد مدل مختصات نقاط ثابت شده به ترتیب $X=0$ ، $X=66$ و $Y=0$ و $Y=66$ و در نهایت $Z=-66$ هستند. بنابراین در مرزهای مدل جابجایی‌های افقی در صفحات *X-Z* و *Y-Z* و جابجایی عمودی در صفحات *X-Y* وجود ندارد. بار سطحی ۲۰ کیلوپاسکال به‌عنوان بار ترفیکی به‌طور یکنواخت به مرز فوقانی مدل اعمال شده است. همچنین تنش‌های برجای قائم در مدل به‌صورت ثقلی و نسبت تنش‌های افقی به قائم برابر با ضریب فشار خاک در حال سکون ($k=I-\sin(\varphi)$) در نظر گرفته شده است. طول المان‌های مدل در امتداد حفاری تونل برابر با عرض یک رینگ (حلقه) نگهداری به میزان ۱/۵ متر لحاظ شده است. پوشش بتنی مسلح شده تونل (سگمنت) و گروت سیمانی سخت‌شده در اطراف آن با استفاده از المان‌های ۸ گره‌ای و به‌صورت الاستیک و با استفاده از المان‌های سازه‌ای پوسته مدل‌سازی شده‌اند (شکل ۵). به دلیل وجود درزه‌های سگمنتی انعطاف‌پذیر نسبی در طول تونل، بر اساس رابطه وُود (Wood, 1975)، فاکتور کاهش ۰/۶۴ به‌عنوان سختی خمشی برای پوشش تونل لحاظ شد (Avanaki & Dehghan, 2019). مشخصات سازه‌ای (سیستم نگهداری) تونل و نیز مصالح مورد استفاده جهت پرکننده فضای پشت سگمنت (ملات

لازم به ذکر است که فرآیند مدل‌سازی حفاری سکانشی تنها به‌منظور تحلیل پارامتریکی اثر فشار تزریق گروت بر نشست سطح زمین به‌کار گرفته شده (بخش ۳-۴) و در مرحله اعتبارسنجی مدل (بخش ۳-۲) و نیز تحلیل پارامتریکی اثر تنش ژئواستاتیکی بر نشست زمین (بخش ۳-۳)، لحاظ نشده است. در بخش ۳-۲ و ۳-۳، بسته به نوع و شرایط تحلیل، اثر حفاری سکانشی و امان‌های نگهداری تونل (پوشش و گروت تزریقی و سخت شده) در مدل‌سازی اعمال نشده است.

۳-۲- اعتبارسنجی مدل

به‌منظور اعتبار سنجی مدل عددی ساخته شده جهت بررسی سایر پارامترهای عملیاتی مؤثر دستگاه بر میزان نشست سطح زمین از روش تونل نامرئی (*Invisible Tunnel*) استفاده شده است. این روش توسط برخی محققین (*Mooney, et al., 2016* و *Grasmick, et al., 2015*)، به‌منظور بررسی اثرات حفاری بر نشست زمین در متروی نیویورک مورد استفاده قرار گرفت. در این روش با اعمال فشارهای مرزی معادل با تنش‌های ژئواستاتیک در دیواره تونل، سعی بر کنترل جابجایی و عدم نشست زمین می‌شود. در واقع در این روش با اعمال فشارهای معادل، هیچ تغییرشکلی در سطح زمین رخ نمی‌دهد. در این مطالعه نیز با توجه به عقب بودن سینه‌کار حفاری نسبت به کیلومترژ مورد نظر و نیز عدم دسترسی به داده‌های ابزار دقیق، از این روش به‌منظور اعتبارسنجی مدل ساخته شده با روش تفاضل محدود اکتفاء شده است. همچنین با توجه به عدم داده‌های عملیاتی دستگاه حفاری از جمله فشار سینه‌کار در محدوده مورد نظر، از رابطه *COB* برای برآورد فشار سینه‌کار در قسمت‌های مختلف مقطع تونل استفاده شده است. مطابق روش «تونل نامرئی»، فشارهای ژئواستاتیک زمین در سقف یا تاج (*Crown*) و نیز کف (*Invert*) تونل با استفاده از روابط مشخص، برآورد گردید. مقادیر تنش ژئواستاتیک به‌ترتیب در سقف و کف تونل برابر ۳۵۷ و ۵۲۲ کیلوپاسکال است. همچنین مقادیر فشار سینه‌کار در کف تونل برابر ۵۰۸ کیلوپاسکال، در مرکز تونل (*Springline*) برابر ۴۲۱ کیلوپاسکال و در تاج تونل برابر ۳۳۵ کیلوپاسکال برآورد گردید (شکل ۶).

از این رو با اعمال تنش‌های ژئواستاتیکی برآورد شده در

در دو رینگ ۷ و ۸ اعمال شده است (محدوده زرد رنگ). فشار گروت نیز همانند فشار سینه‌کار بر اساس وزن مخصوص گروت (۱۸ کیلو نیوتن بر مترمکعب) از تاج به کف تونل به‌صورت بار گسترده خطی افزایش می‌یابد. فشار تزریق گروت سیمانی در پشت سگمنت براساس تنش‌های ژئواستاتیکی افقی و قائم زمین در نظر گرفته می‌شود. فشار نگهداری سینه‌کار تونل بر اساس رابطه *The Dutch COB (Center Onderground Bowen (COB)*)، برآورد می‌شود (*Guglielmetti, et al., 2008*):

$$S_a = K_a \sigma'_v + u + 20 \text{ kPa} \quad (1)$$

جایی که K_a ضریب فشار فعال خاک؛ $\sigma'_v = \gamma h$ ؛ فشار قائم مؤثر ($K_a = \tan^2(45 - \frac{\phi}{2})$) و u ؛ فشار منفذی است.

از رینگ ۹ به بعد امان پوسته‌ای به‌صورت شبیه‌سازی گروت سخت‌شده و سگمنت‌های بتنی در نظر گرفته می‌شود (پس از دو رینگ از سپر که با فشار گروت، نگهداری زمین صورت می‌گیرد، فضای پشت سگمنت در سایر رینگ‌ها با گروت سخت‌شده مدل‌سازی می‌شود).

به‌طور کلی فرآیند حفاری و نگهداری تونل به‌شکل واقعی و به‌صورت سکانشی مدل‌سازی شده است. سکانشی‌های مربوطه به‌صورت زیر طراحی و سپس به‌کمک کدهای فیش (*Fish Codes*) اعمال می‌شوند:

- حفاری تونل به طول معادل طول یک سگمنت (حدود ۱/۵ متر)

- اعمال فشار نگهداری همزمان به سینه‌کار و فضای اطراف سپر دستگاه (فضای آنالوس) در مقطع جدید حفاری شده

- حل مدل به اندازه ۱۵۰۰ گام/مرحله (*Step*) تا رسیدن به تعادل (کاهش نیروهای نامتعادل کننده به کمتر از 10^{-5})

- شروع گام بعدی با برداشت فشار اعمالی به سینه‌کار و فضای آنالوس

- تکرار مراحل فوق

بعد از ۹ متر پیشروی که معادل ۶ گام حفاری خواهد بود، گام‌های ۷ و ۸ برای اعمال فشار گروت تزریقی در نظر گرفته می‌شود. همچنین از گام ۸ به بعد امان پوسته جهت شبیه‌سازی سگمنت و گروت سخت‌شده اعمال می‌شود.

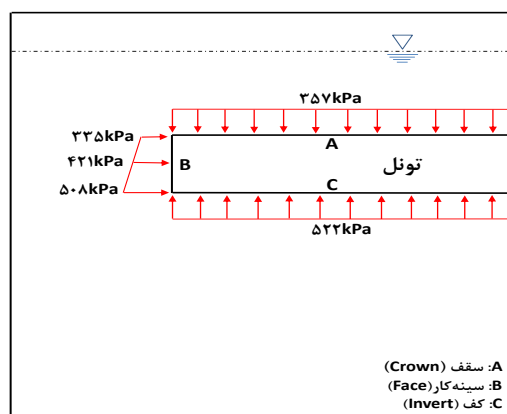
طول ۱/۵ متر معادل یک کورس حفاری تونل، این میزان فشار به صورت بار یکنواخت خطی از تاج به کف تونل افزایش یافته است و به مقدار ۵۰۸ کیلوپاسکال می‌رسد. همچنین به منظور شبیه‌سازی فشار ژئواستاتیکی به صورت شعاعی در اطراف تونل، مقدار ۳۵۷ کیلوپاسکال فشار به صورت محیطی در اطراف تونل به طول ۴۳/۵ متر (معادل ۲۹ کورس حفاری) و با فرض گرادیان فشار در فضای آنالوس به میزان ۱۸ کیلوپاسکال بر متر، این میزان فشار به صورت خطی و یکنواخت از تاج به کف تونل افزایش یافته است و به میزان فشار ژئواستاتیکی تخمین زده شده به مقدار حدود ۵۲۲ کیلوپاسکال می‌رسد.

در شکل ۷، نحوه اعمال تنش‌های مرزی معادل با تنش‌های ژئواستاتیکی در سینه‌کار و اطراف تونل به صورت مدل‌سازی عددی و بر اساس الگوی شماتیک ارائه شده در شکل ۶، نشان داده شده است.

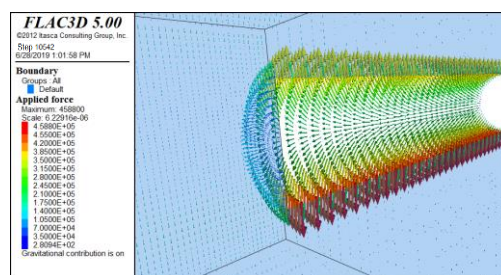
لازم به ذکر است که به منظور محاسبه تنش قائم مؤثر در بخش‌های مختلف، یک لایه خاک دستی (پرکننده) به ضخامت حدود ۳ متر واقع در سطح زمین با دانسیته 1750 kg/m^3 ، در نظر گرفته شده است. منحنی‌های طولی نشست سطح زمین در سه نقطه مختلف به ترتیب در جلو سینه‌کار (حدود یک برابر قطر تونل $\Delta x = -D$)، (شکل ۸-الف)، سینه‌کار $\Delta x = 0$ (شکل ۸-ب) و پشت سینه‌کار (در حدود سه برابر قطر تونل $\Delta x = -3D$)، (شکل ۸-پ) نشان داده شده است Δx به عنوان فاصله طولی میان سینه‌کار در حال پیشروی تونل و موقعیت نقاط برداشت نشست سطح زمین است.

در طول محور تونل و در سطح زمین به فواصل مختلف (۳ متری)، نقاطی به منظور کنترل نشست در نظر گرفته شده است (شکل ۹). هر چند میزان نشست به دست آمده از مدل عددی صفر نبوده اما بسیار ناچیز (کمتر از ۰/۱ میلی‌متر) و مطابق منحنی الگوی نشست، میزان جابجایی‌های ثابت شده در جلو سینه‌کار حفاری در مرز مدل (فاصله حدود ۲۱ متری تا سینه‌کار) صفر بوده و به مرور با پیشروی سینه‌کار و نزدیک شدن به نقطه مورد نظر، این مقدار کمی افزایش یافته و در فاصله حدود ۳ برابری قطر تونل در پشت سینه‌کار (فاصله حدود ۲۷ متری)، نرخ نشست نسبتاً ثابت شده است (شکل ۹).

بخش‌های مختلف تونل، مدل‌سازی عددی مورد نظر انجام گرفت. مدل‌سازی عددی بدون در نظر گرفتن المان سگمندی و نیز المان‌های دوغاب تزریقی و دوغاب سخت‌شده انجام شده است. لازم به ذکر است که در این بخش از مطالعه به منظور اعتبارسنجی مدل عددی، فشار مرزی مورد نظر به صورت دو بخش مجزا، یکی در سینه‌کار و دیگری در فضای اطراف تونل (فضای آنالوس) برخلاف آنچه در دستگاه حفاری تعادلی فشار زمین (و حتی تعادلی فشار دوغاب) وجود دارد، اعمال گردید. مقادیر فشارهای ژئواستاتیکی به صورت فشارهای مرزی در اطراف تونل و سینه‌کار حفاری از ابتدای تونل تا موقعیت سینه‌کار نهایی به طول ۴۵ متر معادل ۳۰ مرحله حفاری اعمال شدند (شکل ۷).

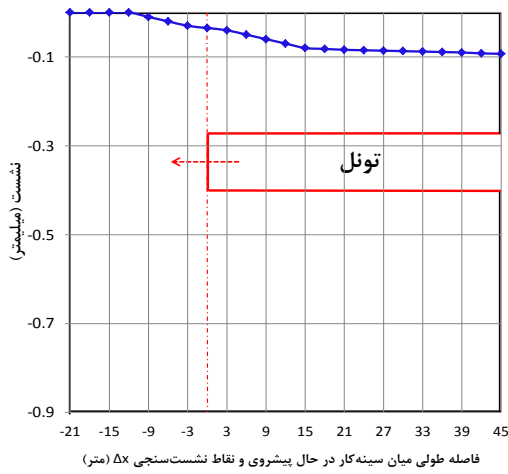


شکل ۶- تصویری شماتیک از مقادیر تنش قائم و فشار سینه‌کار در بخش‌های مختلف تونل



شکل ۷- شرایط اعمال تنش‌های مرزی معادل (ژئواستاتیکی) در اطراف تونل و سینه‌کار

در واقع، به منظور اعمال صحیح فشار سینه‌کار به صورت افقی، فشار اعمالی در تاج تونل به میزان ۳۳۵ کیلوپاسکال لحاظ شد که با در نظر گرفتن یک المان حجمی با وزن واحد حجم ۱۸۸۰ کیلوگرم بر مترمکعب به-



شکل ۹- پروفیل طولی نشست سطح زمین

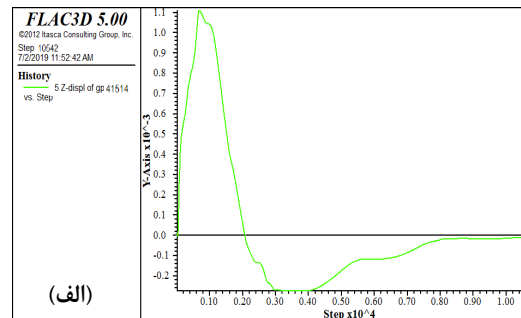
۳-۳- تحلیل پارامتریکی اثر تنش ژئواستاتیکی

بررسی تغییرشکل و نشست سطح زمین در زمان حفاری تونل با دستگاه سپری تعادلی فشار زمین که فشار سینه‌کار و اطراف سپر به‌صورت نسبتاً پیوسته و یکسان اعمال می‌شود، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در این مرحله از مطالعه سه سناریو از مسئله تغییر شکل و نشست سطح زمین با در نظر گرفتن مقادیر مختلف فشار سینه‌کار (برآورد شده بر اساس تنش ژئواستاتیکی افقی) به‌ترتیب در کف، مرکز و تاج تونل مورد تحلیل و بررسی قرار می‌گیرد. در واقع در هر سناریو، مقادیر فشار سینه‌کار و فضای آنالوس که با یکدیگر برابر هستند (بر اساس عملکرد دستگاه حفاری) به‌صورت مدل‌سازی عددی در مقابل تنش‌های ژئواستاتیکی (قائم و افقی)، اعمال شده و نشست سطح زمین مورد بررسی قرار می‌گیرد.

قابل ذکر است که در این مرحله از تحلیل‌های پارامتری نشست سطح زمین، مدل‌سازی عددی تنها با در نظر گرفتن المان فشارهای مرزی در سینه‌کار و اطراف تونل همانند آنچه در فرآیند اعتبارسنجی مدل عددی انجام شده، صورت گرفته است. بنابراین در این مرحله هیچ المانی از خصوصیات پوشش سگمنتی تونل و نیز دوغاب (تزریقی و یا سخت شده) لحاظ نشده و سعی شده است تنها با در نظر گرفتن المان فشاری مرزی معادل فشار سینه‌کار (کف، وسط و یا تاج تونل)، تحلیلی از نشست سطح زمین انجام گیرد.

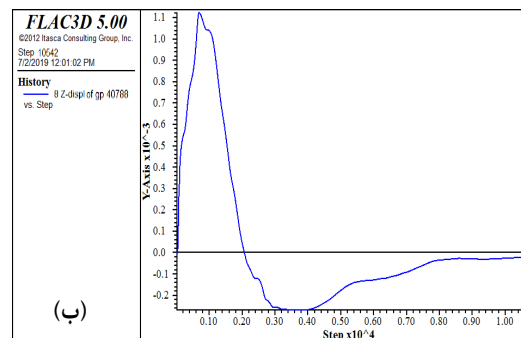
الف) سناریوی اول: اعمال فشار سینه‌کار و فضای اطراف تونل بر مبنای فشار تخمینی در کف سینه‌کار تونل

مدل عددی پس از طی نمودن ۱۰۵۴۲ مرحله، به تعادل رسیده است (براساس تاریخچه نقاط جابجایی و سرعت و نیروهای نامتعادل کننده). بر اساس نتایج قابل قبول به‌دست آمده از مدل‌سازی به‌روشن تونل‌نامرئی در کنترل تغییرشکل و نشست سطح زمین، می‌توان مدل عددی تفاضل محدود ساخته شده را برای تحلیل‌های پارامتریکی مورد استفاده قرار داد.



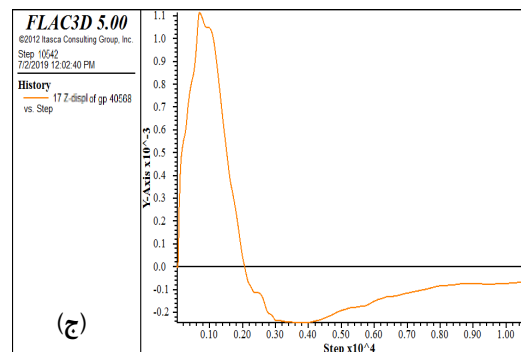
(الف)

الف) موقعیت قبل از سینه‌کار (فاصله $\Delta x = -D$)



(ب)

ب) موقعیت سینه‌کار (فاصله $\Delta x = 0$)



(ج)

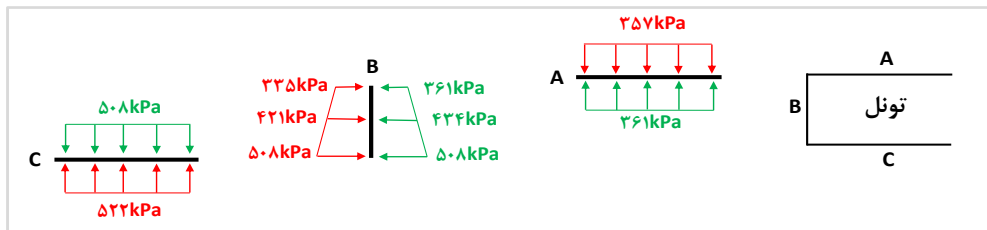
ج) موقعیت بعد از سینه‌کار (فاصله $\Delta x = 3D$)

شکل ۸- نمودار نشست سطح زمین

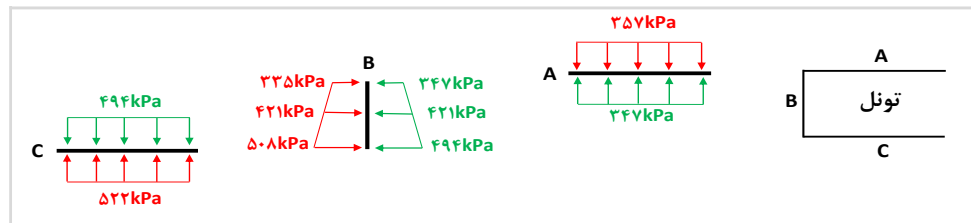
اطراف تونل بر مبنای فشار تخمینی در مرکز سینه کار تونل (۴۲۱ کیلوپاسکال): در این مرحله فشارهای مرزی اعمال شده بر روی سینه کار و فضای آنالوس اطراف تونل بر مبنای میزان فشار تخمینی سینه کار تونل در بخش میانی سینه کار می باشد (شکل ۱۰-ب). از این رو در مدل سازی عددی میزان فشار اعمالی در تاج تونل (سینه کار و فضای آنالوس) برابر ۳۴۷ کیلوپاسکال در نظر گرفته شده است. میزان فشار لحاظ شده در تاج تونل در یک المان حجمی با گرادیان ۱۶ کیلوپاسکال بر متر (معادل وزن واحد حجم مصالح حفاری مخلوط شده با فوم در محفظه حفاری به میزان ۱۶۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب)، به ترتیب در بخش میانی و کف تونل به میزان ۴۲۱ و ۴۹۴ کیلوپاسکال افزایش می یابد (شکل ۱۰-ب). نتایج تحلیل عددی انجام شده برای سناریوی دوم به صورت پروفیل نشست طولی سطح زمین در شکل ۱۱، نشان داده شده است.

(۵۰۸ کیلوپاسکال): در این مرحله فشارهای مرزی اعمال شده بر روی سینه کار و فضای آنالوس اطراف تونل بر مبنای میزان فشار تخمینی سینه کار تونل در بخش پایینی یعنی کف سینه کار است (شکل ۱۰-الف). از این رو در مدل سازی عددی میزان فشار اعمالی در تاج تونل (سینه کار و فضای آنالوس) برابر ۳۶۱ کیلوپاسکال در نظر گرفته شده است که این میزان فشار در یک المان حجمی با گرادیان ۱۶ کیلوپاسکال بر متر (معادل وزن واحد حجم مصالح حفاری مخلوط شده با فوم در محفظه حفاری به میزان ۱۶۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب)، به ترتیب در بخش میانی و کف تونل به میزان ۴۳۴ و ۵۰۸ کیلوپاسکال افزایش می یابد (شکل ۱۰-الف). نتایج تحلیل عددی انجام شده برای سناریوی اول به صورت پروفیل نشست طولی سطح زمین در شکل ۱۱، نشان داده شده است.

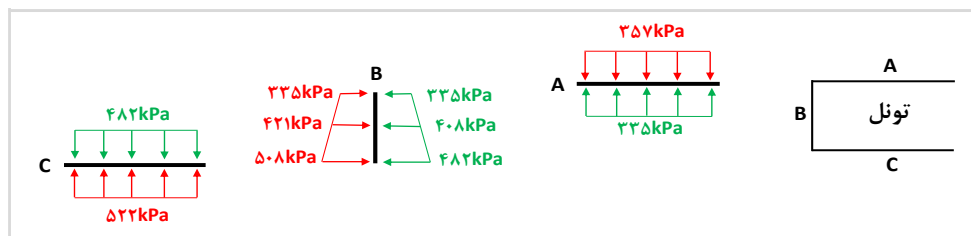
(ب) سناریوی دوم؛ اعمال فشار سینه کار و فضای



الف) سناریوی اول



ب) سناریوی دوم



پ) سناریوی سوم

شکل ۱۰- سناریوهای اعمال فشارهای مرزی معادل تنش های ژئواستاتیکی در سینه کار تونل

میلی‌متر رسیده است. فشارهای مرزی معادل تنش‌های ژئواستاتیکی برآورد شده از بخش‌های مختلف سینه‌کار تونل که برای اعمال در سینه‌کار و فضای اطراف تونل در نظر گرفته شده است (هر سه سناریو)، از تنش‌های ژئواستاتیکی قائم در بخش‌های فوقانی (تاج) و تحتانی (کف) تونل کمتر بوده (به‌علت ضریب فشار جانبی K_0 کمتر از یک) و در نتیجه منجر به ایجاد نشست در سطح زمین شده است.

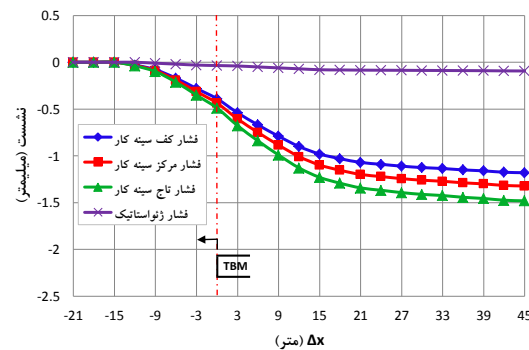
۳-۴- تحلیل پارامتریکی اثر فشار گروت

در این مرحله، مدل‌سازی عددی برآورد نشست سطح زمین به‌صورت حفاری سکاسی و با در نظر گرفتن المان‌های مختلف از جمله المان پوسته‌ای (*Shell*) برای پوشش سگمندی تونل و گروت سخت‌شده در پشت فضای سگمنت و همچنین المان حجمی برای اعمال فشار تزریق گروت در پشت سگمنت (خارج از محدوده سپر دستگاه) و اعمال فشار مرزی یکسان بر روی سینه‌کار و فضای اطراف تونل (سپر) انجام شده است. از این‌رو بر پایه اعتبارسنجی مدل عددی با استفاده از روش تونل نامرئی، سه سناریو برای بررسی نشست سطح زمین با در نظر گرفتن مقادیر مختلف فشار تزریق گروت در نظر گرفته شده است. هدف از بررسی سناریوهای مختلف، درک صحیح و درستی از اعمال فشارهای مرزی معادل با تنش‌های ژئواستاتیکی زمین (افقی و قائم) در زمان عملیات حفاری تونل با دستگاه سپری تعادلی فشار زمین به‌منظور کنترل نشست سطح است.

فشار مرزی (در سینه‌کار (P_F ، Face pressure) و فضای اطراف سپر (P_A ، Annulus pressure)) برای سناریوهای مورد نظر برابر با فشار سینه‌کار در تاج تونل در نظر گرفته شده است (۳۳۵ کیلوپاسکال معادل ۳/۳۵ بار). از آنجایی که بیشترین تغییر شکل و نشست ثبت‌شده در مرحله تحلیل اثر تنش ژئواستاتیکی (بخش ۳-۳)، مربوط به سناریوی سوم بوده است، از این‌رو میزان فشار مربوط به سینه‌کار در تاج تونل برای آنالیز این مرحله انتخاب شده است. هدف از این کار، افزایش ضریب ایمنی در اعمال فشار مرزی به زمین اطراف تونل برای کنترل بیشتر نشست سطح است.

الف) سناریوی اول: در این سناریو، فشار گروت (P_G) برابر با تنش ژئواستاتیکی افقی (σ_{xx}) سینه‌کار در مرکز تونل ($P_G = \sigma_{xx}$)، معادل (۴۲۱ kPa) در نظر گرفته شده است

پ) سناریوی سوم: اعمال فشار سینه‌کار و فضای اطراف تونل بر مبنای فشار تخمینی در تاج سینه‌کار تونل (۳۳۵ کیلوپاسکال): در این مرحله فشارهای مرزی اعمال شده بر روی سینه‌کار و فضای آنالوس اطراف تونل بر مبنای میزان فشار تخمینی سینه‌کار تونل در بخش بالایی یعنی تاج سینه‌کار است (شکل ۱۰-پ). از این‌رو در مدل‌سازی عددی میزان فشار اعمالی در تاج تونل (سینه‌کار و فضای آنالوس) برابر ۳۳۵ کیلوپاسکال در نظر گرفته شده است. این میزان فشار (۳۳۵ kPa) در یک المان حجمی با گرادیان ۱۶ کیلوپاسکال بر متر (معادل وزن واحد حجم مصالح حفاری مخلوط شده با فوم در محفظه حفاری به میزان ۱۶۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب)، به‌ترتیب در بخش میانی و کف تونل به میزان ۴۰۸ و ۱۸۲ کیلوپاسکال افزایش می‌یابد (شکل ۱۰-پ). نتایج تحلیل عددی انجام شده برای سناریوی سوم نیز به‌صورت پروفیل نشست طولی سطح زمین در شکل ۱۱، نشان داده شده است.



شکل ۱۱- پروفیل نشست سطح زمین ناشی از تحلیل عددی بر پایه فشارهای مختلف سینه‌کار تونل

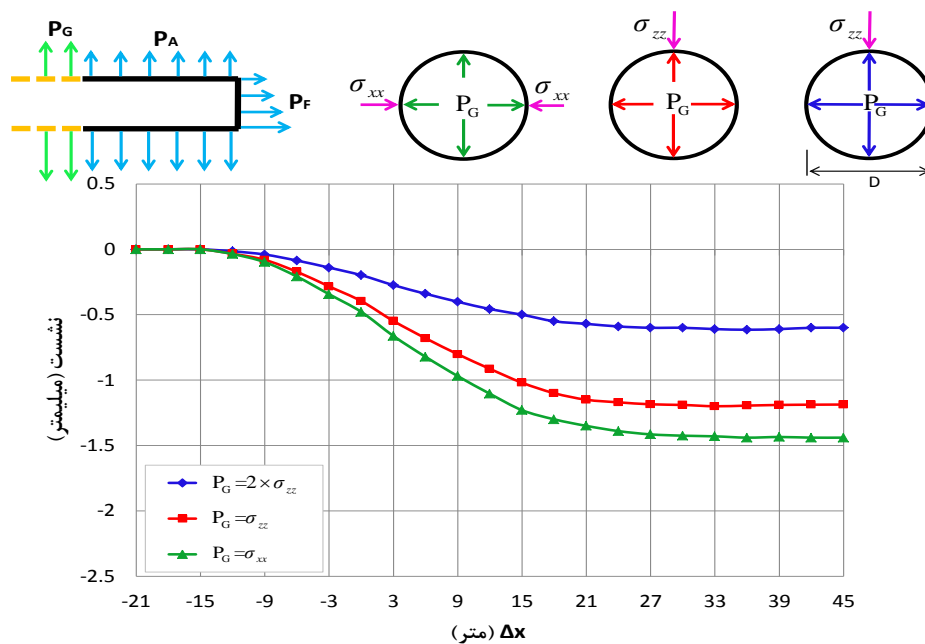
همان‌طور که در شکل ۱۱، نشان داده شده است، مقادیر نشست سطح زمین با کاهش میزان فشار اعمالی به سینه‌کار و فضای اطراف تونل (از سناریوی اول به سناریوی سوم به‌ترتیب از مقادیر فشار مرزی ۵۰۸ kPa به ۳۳۵ kPa)، افزایش قابل توجهی نداشته است. نشست سطح زمین برای هر سه سناریو در فاصله تقریباً کمتر از دو برابر شعاع تونل آغاز شده و میزان نشست کم‌کم با رسیدن به سینه‌کار افزایش یافته تا اینکه در فاصله حدود بیش از سه برابری شعاع تونل برای فشارهای کف، مرکز و تاج سینه‌کار تونل، به‌ترتیب به مقدار حداکثر خود ۱/۱۸، ۱/۳۲ و ۱/۴۸

مقادیر نشست حداکثری ثبت شده در مرحله پایانی حفاری تونل برای هر سه سناریو (سناریوهای اول تا سوم) در سطح زمین و در فاصله حدود سه برابری قطر تونل در پشت سینه کار ($\Delta x = -3D$) به ترتیب در حدود ۱/۴۵، ۱/۲۰ و ۰/۶ میلی‌متر است (شکل ۱۲). همانگونه که در شکل ۱۲، نشان داده شده است، با افزایش فشار تزریق گروت در تاج تونل از ۳۳۵ به ۷۱۴ کیلوپاسکال، نشست سطح زمین کاهش قابل توجهی داشته است. به عبارتی، زمانیکه فشار مرزی تزریق گروت معادل فشار سینه کار (تنش ژئواستاتیکی افقی) در نظر گرفته می‌شود، میزان نشست سطح زمین در مقایسه با حالتی که فشار مرزی تزریق گروت معادل تنش ژئواستاتیکی قائم در سقف تونل است، بیشتر می‌باشد (شکل ۱۲). همچنین افزایش فشار تزریق گروت به دو برابر تنش ژئواستاتیکی قائم، سبب کاهش قابل توجه نشست سطح زمین شده است (شکل ۱۲).

که این میزان فشار در تاج تونل معادل 335 kPa است. در این حالت فشار مرزی اعمالی بر روی سینه کار و فضای آنالوس پشت سپر با فشار تزریق گروت برابر است.

ب) سناریوی دوم: در این سناریو فشار گروت (P_G) برابر با تنش ژئواستاتیکی قائم (σ_{zz}) در سقف تونل ($P_G = \sigma_{zz}$)، معادل 357 kPa در نظر گرفته شده است. در این حالت فشار تزریق گروت در حدود ۲۲ کیلوپاسکال (۰/۲۲ بار) بیشتر از فشار مرزی اعمالی بر روی سینه کار و فضای آنالوس پشت سپر دستگاه است.

پ) سناریوی سوم: در سناریوی سوم، فشار گروت (P_G) دو برابر تنش ژئواستاتیکی قائم (σ_{zz}) در سقف تونل ($P_G = 2\sigma_{zz}$)، معادل 714 kPa در نظر گرفته شده است. در این مرحله، فشار تزریق گروت در حدود 379 kPa بیشتر از فشار مرزی اعمالی بر روی سینه کار و فضای آنالوس پشت سپر دستگاه است.



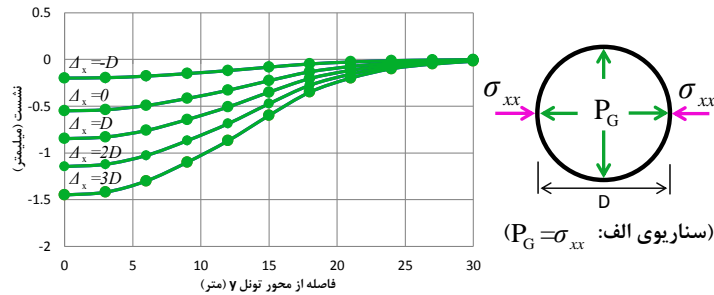
شکل ۱۲- پروفیل طولی نشست سطح زمین برای فشارهای مختلف تزریق گروت (P_G)

مشاهده می‌شود، منحنی‌های نشست زمین به شکل گوسی بوده و میزان نشست زمین با رسیدن و عبور سینه کار از محل برداشت مقادیر نشست، افزایش یافته است. در سناریوی سوم زمانیکه فشار گروت خیلی بیشتر از تنش ژئواستاتیکی قائم است ($P_G \geq \sigma_{zz}$)، بالآمدگی

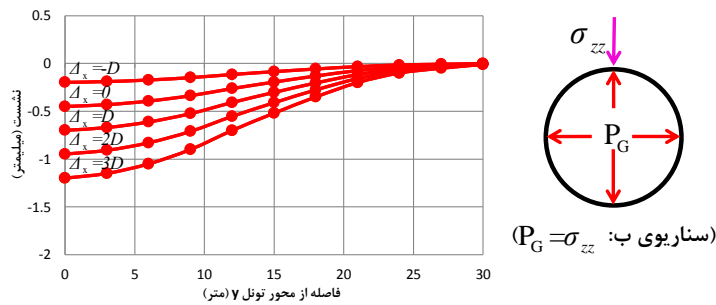
در شکل ۱۳ (الف، ب و پ)، پروفیل عرضی نشست برای هر سه سناریوی تزریق فشار گروت در مقاطع تقریباً کمتر از یک برابری قطر تونل در جلو سینه کار تا سه برابر قطر تونل در پشت سینه کار نشان داده شده است ($\Delta x = -D, 0, D, 2D, 3D$). همانگونه که در شکل ۱۳،

تونل (797 kPa) نسبت به تنش ژئواستاتیکی افقی (kPa) (421) در مرکز تونل به دلیل اثر ضریب تنش جانبی زمین باشد. هر چند عمق تونل نیز در این مسئله می‌تواند اثرگذار باشد (عمق روباره تونل حدود 20 متر است). حداکثر میزان بالآمدگی ثبت شده در حدود 0.2 میلی‌متر است.

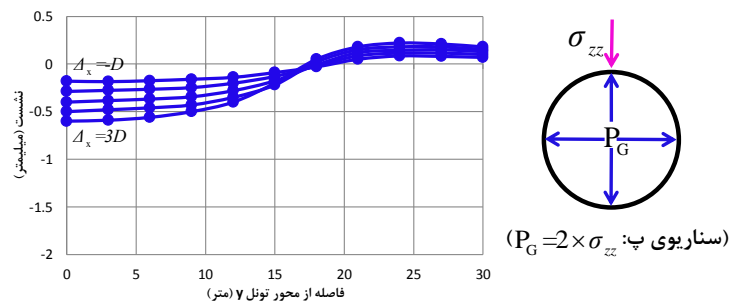
(Heaving) سطح زمین در فاصله حدود بیش از 18 متری مشاهده می‌گردد (شکل ۱۳-پ). دلیل این امر می‌تواند ناشی از ترکیب شدن دو اثر، یکی افزایش فشار گروت در تاج تونل (714 kPa) نسبت به تنش ژئواستاتیکی قائم در تاج تونل (357 kPa) و دیگری افزایش فشار گروت در مرکز



الف) فشار تزریق گروت برابر با تنش ژئواستاتیکی افقی در سینه‌کار تونل (335 kPa)



ب) فشار تزریق گروت برابر با تنش ژئواستاتیکی قائم در تاج تونل (357 kPa)



پ) فشار تزریق گروت دوبرابر تنش ژئواستاتیکی قائم در تاج تونل (714 kPa)

شکل ۱۳- پروفیل عرضی نشست زمین در مقاطع طولی مختلف تونل ($Ax = -D, 0, D, 2D, 3D$) برای سه حالت مختلف فشار تزریق گروت

آنالوس) و فشار تزریق گروت از مهمترین پارامترهای عملیاتی دستگاه تعادلی فشار زمین (EPB) در زمان حفاری تونل است که نقش موثری در کنترل و کاهش نشست سطح

۴- نتیجه‌گیری

مهم‌ترین نتایج حاصل از تحقیق حاضر به شرح ذیل است:
۱- فشار سینه‌کار، فشار فضای مابین سپر و زمین (فضای

تغییر شکل زمین نیز کاهش می‌یابد و می‌توان کنترل بهتری از نشست زمین و در نتیجه آسیب کمتری به سازه‌های سطحی و زیرسطحی را انتظار داشت.

۷- از آنجا که مکانیسم عملکرد دستگاه‌های حفاری سپری تعادلی فشار زمین و تعادلی فشار دوغاب (بتنونیته) به یکدیگر نزدیک بوده و در این مطالعه نیز شبیه‌سازی انجام شده این مسئله را به خوبی لحاظ نموده است (خصوصاً در نظر گرفتن فضای آنالوس میان سپر و زمین اطراف آن)، از این رو می‌توان نتایج به دست آمده از این مطالعه را برای به کارگیری دستگاه حفاری سپری تعادلی فشار دوغاب (SPB) در زمین‌های نرم و آبرفتی در نظر گرفت.

۵- سیاهه‌ی نمادها

تمامی نمادهای مورد استفاده در متن مقاله در جدول ۳، ارائه شده است.

جدول ۳- سیاهه‌ی نمادها

شرح	واحد	نماد
قطر تونل	m	D
روپاره تونل	m	C
عمق تونل	m	H
ضخامت معادل	m	d
وزن مخصوص طبیعی	kN/m^3	γ_{unsat}
وزن مخصوص اشباع	kN/m^3	γ_{sat}
مدول الاستیسیته	MPa	E
مدول پرسیمتری	MPa	E_M
نسبت پواسون	NU	ν
چسبندگی	kPa	c
زاویه اصطکاک داخلی	$deg.$	ϕ
زاویه اتساع	$Deg.$	ψ
ضریب فشار فعال خاک	NU	K_a
فشار نگهداری سینه‌کار	MPa	S_a
تنش قائم	MPa	σ'_v
تنش ژئواستاتیکی افقی	MPa	σ_{xx}
تنش ژئواستاتیکی قائم	MPa	σ_{zz}
فشار گروت	MPa	P_G
فشار مرزی در اطراف سپر (آنالوس)	MPa	P_A
فشار مرزی در سینه‌کار	MPa	P_F
ضریب فشار جانبی در حالت سکون	NU	k_0
هدایت هیدرولیکی/نفوذپذیری	m/sec	k
فاصله طولی میان سینه‌کار و نقاط ثبت نشست	m	Δ_x

زمین دارند و نتیجه آن کاهش آسیب به سازه‌های سطحی و زیرسطحی خواهد بود.

۲- در آنالیز پارامتریکی اثر تنش ژئواستاتیکی، به علت اعمال فشارهای مرزی معادل با تنش‌های ژئواستاتیکی بخش‌های مختلف تونل (تاج، مرکز و کف) بر روی سینه‌کار و اطراف آن، مقدار نشست ناچیز و در بازه ۱/۱۸ تا ۱/۴۸ میلی‌متر هستند.

۳- با افزایش فشار مرزی معادل تنش ژئواستاتیکی افقی (از تاج به کف سینه‌کار تونل)، میزان نشست سطح زمین نیز کاهش می‌یابد. در واقع اعمال فشار مرزی در سینه‌کار و فضای آنالوس معادل با تنش ژئواستاتیکی افقی در کف سینه‌کار تونل ($5.08 kPa$)، منجر به کاهش میزان نشست از ۱/۴۸ میلی‌متر (معادل فشار مرزی $335 kPa$) به ۱/۱۸ میلی‌متر می‌گردد.

۴- هرچه میزان فشار تزریق گروت به تنش‌های ژئواستاتیکی قائم زمین نزدیک‌تر باشد، میزان نشست سطح زمین نیز کمتر می‌گردد. به عبارتی، اثر فشار تزریق گروت معادل تنش ژئواستاتیکی قائم در تاج تونل ($335 kPa$) نسبت به تنش ژئواستاتیکی افقی در سینه‌کار تونل (kPa) 357) جهت کنترل نشست سطح زمین بیشتر است (میزان نشست بترتیب ۱/۴۵ و ۱/۲۰ میلی‌متر است). میزان فشار اعمالی معادل تنش ژئواستاتیکی افقی به دلیل اثرگذاری ضریب تنش افقی زمین در آن (کمتر از ۱)، کمتر از تنش ژئواستاتیکی قائم بوده است و در نتیجه میزان نشست سطح زمین بیشتر خواهد بود.

۵- اعمال بیش از اندازه فشار تزریق گروت معادل تنش ژئواستاتیکی قائم، علاوه بر اینکه منجر به کاهش چشمگیر نشست سطح زمین در راستای محور طولی تونل می‌گردد (از ۱/۲۰ به ۰/۶ میلی‌متر)، می‌تواند سبب جابجایی رو به بالا و ایجاد پدیده بالآمدگی زمین (حداکثر ۰/۲۰ میلی‌متر) در فاصله عرضی مشخصی نسبت به محور تونل گردد.

۶- روی هم رفته هر چه میزان فشارهای مرزی اعمالی به بخش‌های مختلف تونل از جمله سینه‌کار، فضای آنالوس در طول سپر و فضای تزریق گروت در پشت سگمنت به میزان تنش‌های ژئواستاتیکی زمین نزدیک‌تر باشد، میزان

۶- مراجع

- Alebouyeh, A., Dehghan, A. N., Goshtasbi, K. (2019). Identifying the geological hazards during mechanized tunneling in urban areas – the case of Tehran alluvium conditions. In *Tunnels and Underground Cities. Engineering and Innovation Meet Archaeology, Architecture and Art* (pp. 5264-5274). CRC Press.
- Avanaki, M. J., & Dehghan, A. N. (2019). Seismic performance of steel fiber reinforced concrete segmented lining tunnels. In *Tunnels and Underground Cities. Engineering and Innovation Meet Archaeology, Architecture and Art* (pp. 5685-5691). CRC Press.
- Avunduk, E., & Copur, H. (2018). Empirical modeling for predicting excavation performance of EPB TBM based on soil properties. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 71, 340-353.
- Bezuijien, A., & Talmon, A. M. (2014). Soil pressures at the cutting wheel and the pressure bulkhead of an EPB-shield. In *8th International symposium on Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground (IS-Seoul)* (pp. 523-529). CRC Press.
- Castellanza, R., Betti, D., & Lambrughi, A. (2008). Three-dimensional numerical models for mechanised excavations in urban areas. In *Jornada tecnica tuneles con EPB* (pp. 105-128).
- Chakeri, H., Ozcelik, Y., Unver, B. (2013). Effects of important factors on surface settlement prediction for metro tunnel excavated by EPB. *Tunn Undergr Space Technol*, 36, pp 14–23.
- Dehghan, A. N., Shafiee, S. M., & Rezaei, F. (2012). 3-D stability analysis and design of the primary support of Karaj metro tunnel: Based on convergence data and back analysis algorithm. *Engineering geology*, 141, 141-149.
- Fang, Y., He, C., Nazem, A., Yao, Z., & Grasmick, J. (2017). Surface settlement prediction for EPB shield tunneling in sandy ground. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 21(7), 2908-2918.
- Guglielmetti, V., Grasso, P., Mahtab, A., & Xu, S. (2008). *Mechanized tunnelling in urban areas: design methodology and construction control*. CRC Press.
- Grasmick, J., Rysdahl, B., Mooney, M. A., Robinson, B., Prantil, E., & Thompson, A. (2015). Evaluation of slurry TBM design support pressures using east side access Queens bored tunnels data. In *Rapid Excavation and Tunneling Conference (RETC)*.
- Goh, A. T. C., Zhang, W., Zhang, Y., Xiao, Y., & Xiang, Y. (2018). Determination of earth pressure balance tunnel-related maximum surface settlement: a multivariate adaptive regression splines approach. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 77(2), 489-500.
- Kavvadas, M., Litsas, D., Vazaios, I., & Fortsakis, P. (2017). Development of a 3D finite element model for shield EPB tunnelling. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 65, 22-34.
- Karamniayi Far M., Dehghan A.N., (2019). The Effect of Pre-Support System (Forepoling) on the Control of Ground Surface Subsidence caused by SEM/NATM in Shallow Urban Road Tunnels under Railway Traffic Loading. *Tunneling & Underground Space Engineering (TUSE)*, 7(2), 63-85.
- Leca E., New B., (2007). "Settlements induced by tunneling in soft ground", *Tunnelling and Underground Space Technology*, 22 (2) 119-149.

Lai, H., Zhao, X., Kang, Z., & Chen, R. (2017). A new method for predicting ground settlement caused by twin-tunneling under-crossing an existing tunnel. *Environmental Earth Sciences*, 76(21), 726.

Mooney, M. A., Grasmick, J., Kenneally, B., & Fang, Y. (2016). The role of slurry TBM parameters on ground deformation: Field results and computational modelling. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 57, 257-264.

Mori, L., Mooney, M., & Cha, M. (2018). Characterizing the influence of stress on foam conditioned sand for EPB tunneling. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 71, 454-465.

Sadeghi, M., Pourhashemi, S. M., Dehghan, A. N., & Ahangari, K. (2016). The Effect of Excavation Progress on the Behavior of Hakim Highway Tunnel Using Geotechnical Instrumentation. In *ITA-AITES World Tunnel Congress* (pp. 22-28).

Wood, A. M. (1975). The circular tunnel in elastic ground. *Geotechnique*, 25(1), 115-127.

The Effect of Operational Parameters Affecting Ground Surface in Excavation with Earth Pressure Balance Shield Machine - EPBM (the Case of Southern Extension Tunnel of Line 6 of Tehran Subway)

E. Bagheri¹, A.N. Dehghan^{2*}, K. Ahangari³

1- M.Sc. in Mining Engineering; Faculty of Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, ehsanbagheri89@gmail.com

2- Assistant Professor; Department of Mining Engineering, Faculty of Engineering; Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, a.dehghan1984@srbiau.ac.ir

3- Associate Professor; Department of Mining Engineering, Faculty of Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, ahangari@srbiau.ac.ir

Received: 28 July 2019; Accepted: 29 Dec 2019

DOI: 10.22044/tuse.2019.8743.1373

Keywords

*Ground surface subsidence
EPB shield machine
3D numerical modeling
Finite difference method (FDM)
Face, annulus and grout pressure
Line 6 of Tehran Subway*

Extended Abstract

Summary

Pressurized-face tunneling generates a set of support pressures at the tunnel face (face pressure), along the shield skin (annulus pressure) and behind the tail shield outside the lining segments (grouting pressure). The applied support pressures act against the total earth pressure (effective stress and pore water pressure) along the TBM and tunnel boundary, and consequently, control ground deformation. In this study, the effect of some of the most important operational parameters of the earth pressure balance tunnel boring machine (EPBM) has been investigated at the time of the tunnel excavation on the ground deformation and surface subsidence. For this, finite difference method (FDM) using FLAC^{3D} software has been applied in this research. The numerical model has first been constructed based on geotechnical parameters (physical and mechanical characteristics) of southern extension tunnel of line 6 of Tehran subway, and then, the model has been calibrated and verified using the "invisible tunnel" method.

Introduction

Tunneling in soft ground inevitably induces ground deformations, and thus, it is a critical issue with regard to the safety of people and nearby structures especially in crowded urban areas having congested underground spaces. Damage to existing buildings and utilities due to tunneling-induced ground deformations has been encountered world-wide. Therefore, systems that minimize the ground movements caused by the tunneling process will be beneficial. A method of reducing tunneling-induced ground movements is to use the pressurized-face methods of tunnel boring machines (TBM) such as earth pressure balance (EPB) and slurry pressure balance (SPB). These shield machines are increasingly employed in urban tunnel construction to control ground deformation.

Methodology and Approaches

This study has been conducted using three-dimensional (3D) numerical modeling of the effect of TBM-EPB operational parameters on the deformation and surface subsidence in soft grounds using FLAC^{3D} finite difference software.

Results and Conclusions

The results of this research shows that by decreasing the boundary pressure on the face and the annulus, there is no significant change in the level increase of the surface subsidence. Moreover, the results of parametric analysis of the injection pressure of the grout indicate that applying the pressure of the grout equivalent to the vertical geostatic stress in respect to the horizontal geostatic stress in the tunnel face has more effect on the control of surface deformation and

subsidence.
