نشریه‌ی مهندسی تونل و فضاهای زیرزمینی
TUNNELING & UNDERGROUND SPACE ENGINEERING (TUSE)
http://tuse.shahroodut.ac.ir/
دوره‌ی ۱- شماره‌ی ۱/زمستان ۱۳۹۱

بررسی تاثیر فشار جبهه‌کار بر نشست سطح زمین در تونلسازی مکانیزه در زمین نرم- مطالعه‌ی موردی: تونل قطعه‌ی شرقی- غربی خط ۷ متروی تهران

رضا حیدری شیبانی[۱]؛ شکرالله زارع[۲*]؛ حسین میرزائی نصیرآباد[۳]؛ محمد فروغی[۴]
۱- دانش‌آموخته‌ی کارشناسی‌ارشد مهندسی معدن؛ گرایش استخراج؛ دانشگاه صنعتی شاهرود
۲ و ۳- استادیار؛ دانشکده‌ی مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک؛ دانشگاه صنعتی شاهرود
۴- کارشناس مطالعات مهندسی حین ساخت پروژه‌ی تونل خط ۷ تهران، قطعه‌ی شرقی- غربی؛ موسسه‌ی مهندسین مشاور ساحل

دریافت دست‌نوشته: ۱۳۹۱/۰۶/۲۹؛ پذیرش مقاله: ۱۳۹۱/۱۰/۲۷

واژگان کلیدی
نشست
EPB
تونل متروی تهران
ابزار بندی
مدلسازی عددی

چکیده

در تونل‌های مناطق شهری که بیش‌تر در عمق کم و در بستر خاکی حفر می‌شوند، فشار جبهه‌کار می‌تواند یکی از عوامل پیشگیری کننده‌ی نشست سطح زمین باشد. در پروژه‌ی خط ۷ متروی تهران، تونل با ماشین حفاری مکانیزه از نوع متعادل کننده‌ی فشار زمین (*EPB*) حفر می‌شود. در این تحقیق با تمرکز بر روی چهار مقطع از این تونل، تاثیر فشار جبهه‌کار بر نشست سطح زمین مورد تحلیل قرار گرفته است. فشار جبهه‌کار در چهار حالت فشار اولیه، ۱/۵، ۲ و ۴ برابر فشار اولیه و فشار تزریق در ۵ حالت بدون اعمال تزریق، برابر فشار جبهه‌کار، ۰/۵، ۱ و ۲ بار بیش‌تر از فشار جبهه‌کار با استفاده از نرم‌افزار اجزا محدود *PLAXIS3D* مورد ارزیابی قرار گرفته است. اعتبارسنجی نتایج با استفاده از ابزاربندی در سطح زمین و بر روی دو مقطع از تونل انجام گرفته است. مقایسه‌ی نتایج مدلسازی و نتایج حاصل از ابزاربندی بیانگر صحت روند مدلسازی است. برای حالت $H<2D$ تاثیرات فشار جبهه‌کار بر نشست سطح به مراتب بیش‌تر از حالت $H>2D$ است. همچنین نتایج نشان می‌دهد افزایش ۴ برابری فشار جبهه‌کار، حداکثر سبب کاهش ۵ میلی‌متری بیش‌ترین نشست می‌شود. بنابراین افزایش فشار جبهه‌کار، میزان نشست را کاهش می‌دهد اما این مقدار بسیار ناچیز است.

۱- مقدمه

در محیط‌های شهری به دلیل وجود سازه‌های گوناگون از جمله ساختمان‌ها، تاسیسات و خیابان‌ها محدودیت‌های زیادی برای میزان نشست ناشی از ساخت تونل وجود دارد. اکثر این فضاها به علت نزدیک بودن به سطح زمین در بستر خاکی حفر می‌شوند. در چنین شرایطی پایداری جبهه‌کار یکی از مهم‌ترین و پرمخاطره‌ترین عوامل در حفاری تونل بوده و نیازمند بررسی و تحلیل دقیق است. بکارگیری روش‌های تونلسازی مکانیزه دارای مزایایی از جمله کاهش زمان ساخت و در نتیجه کاهش هزینه‌های اجرا است. کاربرد دستگاه‌های حفار مکانیزه‌ی مجهز به سامانه‌ی متعادل کننده‌ی فشار زمین دارای محدودیت‌هایی است. به عنوان نمونه در خاک‌های نامناسب این سامانه‌ها با مشکلات زیادی روبرو شده و در برخی موارد حتی ممکن است ادامه‌ی پروژه امکان‌پذیر نباشد. اما آنچه سبب بکارگیری این سامانه‌ها برای حفاری در زمین‌های نرم شده است، توانایی آن‌ها در مهار تغییر شکل محیط اطراف تونل است **[1]**.

برای مهار تغییر شکل‌های قائم و افقی ناشی از تونلسازی در یک محدوده‌ی معین، لازم است فشارهای برداشته شده از روی جبهه‌کار به آن برگردانده شوند تا پیش از پایان زمان خودپایداری جبهه‌کار تعادل نیروها دوباره برقرار شود. روش‌های مختلفی برای ارزیابی فشار جبهه‌کار

* سمنان؛ شاهرود؛ میدان هفت تیر؛ بلوار دانشگاه؛ دانشگاه صنعتی شاهرود؛ دانشکده‌ی مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک؛ طبقه‌ی دوم؛ کدپستی: ۳۶۱۹۹۹۵۱۶۱؛ شماره‌ی تلفن و دورنگار: ۳۳۹۵۵۰۹-۰۲۷۳؛ رایانامه: zare@shahroodut.ac.ir

وجود دارد. موحکم (*Mohkam*) در سال ۱۹۸۹ یک مدل سه بعدی بر مبنای نظریه‌ی تعادل حدی برای تحلیل پایداری تونل و ارزیابی نشست، پیش از نصب نگهداری صلب ارایه کرده است **[2]**. جانسز (*Jancsecz*) در سال ۱۹۹۴ فشار جبهه‌کار را برای تونل‌های حفر شده در خاک‌های دانه‌ای و غیر چسبنده محاسبه نموده است **[3]**. بروير (*Broere*) در سال ۱۹۹۸ بر اساس مدل پایداری گوه که اساس آن از روش سیلو و گوه گرفته شده، روشی برای محاسبه‌ی فشار جبهه‌کار ارایه داده است **[4]**. در مجموع روش‌های مختلف تجربی **[5]**، **[6]** و **[7]**، مدل‌سازی فیزیکی **[8]** و عددی برای ارزیابی تغییر شکل محیط اطراف تونل و بررسی تاثیر عوامل گوناگون از جمله فشار جبهه‌کار بر جابجایی و نشست سطح زمین در تونلسازی در زمین نرم بکار گرفته شده است.

مطالعات مختلفی با استفاده از نتایج ابزاربندی برای بررسی تاثیر فشار جبهه‌کار و پارامترهای تاثیرگذار ماشین حفار بر نشست ناشی از تونلسازی در زمین نرم صورت گرفته است. از جمله‌ی این تحقیقات می‌توان به مطالعات کلوث و همکاران (*Clough, et al.*) در سال ۱۹۸۳ بر روی تونل انتقال آب سانفرانسیسکو **[9]**، تحقیقات لکا (*Leca*) در سال ۱۹۸۹ بر روی تونل شهری واشنگتن **[10]**، مطالعه‌ی وانگ (*Hwang*) در سال ۱۹۹۴ سال بر روی تونل قطار سریع‌السیر تایپه **[11]**، تحقیقات ماتسوشیتا و همکاران (*Matsushita, et al.*) در سال ۱۹۹۴ بر روی متروی فوکاکای ژاپن **[12]**، مطالعات چیوربولی و مارچسلی (*Chiorboli & Marchesili*) در سال ۱۹۹۶ بر روی تونل متروی میلان **[13]**، مطالعه‌ی سوانسات (*Suwansawat*) در سال ۲۰۰۲ بر روی تونل متروی بانکوک **[14]**، تحقیق کرو (*Crow*) در سال ۲۰۰۳ بر روی تونل انتقال آب لوس‌آنجلس **[15]** و مطالعه‌ی آنلوتپ (*Unlutepe*) در سال ۲۰۰۹ بر روی متروی ازمیر **[16]** اشاره نمود.

تحلیل‌های عددی از روش‌های پرکاربرد هستند که امکان بررسی مراحل ساخت، رفتار سه بعدی جبهه‌کار و همچنین برهم‌کنش بین تونل و پوشش بتنی را فراهم می‌سازند. با این وجود صحت نتایج این روش‌ها کاملا به داده‌های اولیه‌ی مسئله بستگی دارد. در سال ۲۰۰۳ گرین‌وود (*Greenwood*) با استفاده از روش اجزا محدود به بررسی تاثیر فشار جبهه‌کار و فشار تزریق بر نشست سطح زمین پرداخته است **[17]**. در سال ۲۰۰۶، کسپر (*Kasper*) با استفاده از روش اجزا محدود و مدلسازی سه بعدی با نرم‌افزار *TSIM3D*، تاثیر پارامترهای ماشین حفار متعادل کننده‌ی فشار زمین شامل فشار جبهه‌کار، فشار تزریق، وزن ماشین و مخروطی بودن سپر ماشین بر نشست سطح زمین را مطالعه کرده است **[18]**. در سال ۲۰۱۲ لامبروگی (*Lambrughi*) با استفاده از نرم‌افزار تفاضل محدود *FLAC3D* به تحلیل حساسیت مدل‌های رفتاری گوناگون خاک و بررسی تاثیر فشار جبهه‌کار و فشار تزریق بر نشست سطح زمین برای پروژه‌ی متروی مادرید پرداخته است. لامبروگی پروفیل‌های طولی نشست را در حالت‌های مختلف بدست آورده و نتایج مدلسازی را با اطلاعات حاصل از ابزاربندی مقایسه کرده است **[19]**. برتوز (*Bertoz*) در سال ۲۰۱۲، با استفاده از مدلسازی فیزیکی و شبیه‌سازی فرآیند تونلسازی با *EPB*، روابطی برای فشار جبهه‌کار ارایه داده است **[20]**.

در این پژوهش با استفاده از مدلسازی عددی سه بعدی تاثیر فشار جبهه‌کار بر نشست سطح زمین در پروژه‌ی تونل خط ۷ متروی تهران مطالعه و بررسی شده است. از آنجایی که محیط در برگیرنده‌ی تونل، محیط خاکی و پیوسته است، در این مطالعه نرم‌افزار *PLAXIS3D* بکار برده شده است. این نرم‌افزار ابزار بسیار مناسبی برای تحلیل و مدلسازی شرایط تونلسازی با ماشین *EPB* است.

۲- زمین‌شناسی و خصوصیات ژئوتکنیکی مسیر خط ۷ متروی تهران

خط ۷ متروی تهران به دو قطعه‌ی شمالی- جنوبی و شرقی- غربی تقسیم شده است. مطالعات انجام شده در این تحقیق مربوط به بخش شرقی- غربی است. این تونل دارای طول ۱۲ کیلومتر است. تونل با یک دستگاه ماشین حفار متعادل کننده‌ی فشار زمین با قطر ۹٫۱۶۴ متر حفاری می‌شود. پوشش نهایی تونل بصورت تراگونال، با ضخامت ۳۵۰ میلی‌متر، عرض ۱٫۵ متر و قطر خارجی ۸٫۸۵ متر است. تاکنون بیش از ۲ کیلومتر از تونل حفاری شده است. در طی مطالعات مقدماتی، تعداد ۱۵ گمانه و چاهک اکتشافی بر روی بخش شرقی- غربی حفر شده است. سپس در طی

مطالعات تکمیلی ۱۳ گمانه و ۵ چاهک بر روی مسیر تونل و همچنین ۳۳ گمانه و ۸ چاهک بر روی ایستگاه‌های مسیر حفر شده است.

بطور کلی جنوب تهران و ساختگاه این تونل بیش‌تر از رسوبات سیلتی با عدسی‌های کم‌ضخامت ماسه و شن تشکیل شده است [۲۱]. رسوبات آبرفتی تهران در مسیر متروی خط ۷، بیش‌تر شامل ترکیبی از رسوبات ریزدانه، شن، ماسه و قلوه‌سنگ است و به شکل روکشی روی رسوبات قدیمی‌تر را پوشانده است. در مجموع از شرق به غرب رسوبات دانه‌ریزتر می‌شوند؛ بطوریکه در قسمت‌های غربی مسیر تونل، لایه‌ی ریزدانه‌ی رسی توسعه‌ی بیش‌تری دارد.

بر اساس مطالعات هیدروژئولوژی انجام شده، جهت جریان آب‌های زیرزمینی در محدوده‌ی مسیر تونل، از شمال شرق به جنوب غرب است. با توجه به متوسط سطح آب اندازه‌گیری شده در گمانه‌ها، ۳۵ درصد مسیر تونل بالاتر از سطح ایستابی قرار می‌گیرد. در این مناطق، ممکن است ورود آب‌های منطقه‌ی غیر اشباع، فاضلاب و کاریزها، مشکلاتی را ایجاد نماید. در حدود ۶۵ درصد از مسیر تونل نیز در زیر سطح ایستابی قرار می‌گیرد [۲۱].

۳- انتخاب مقاطع حفاری و مدلسازی عددی با نرم‌افزار *PLAXIS3D*

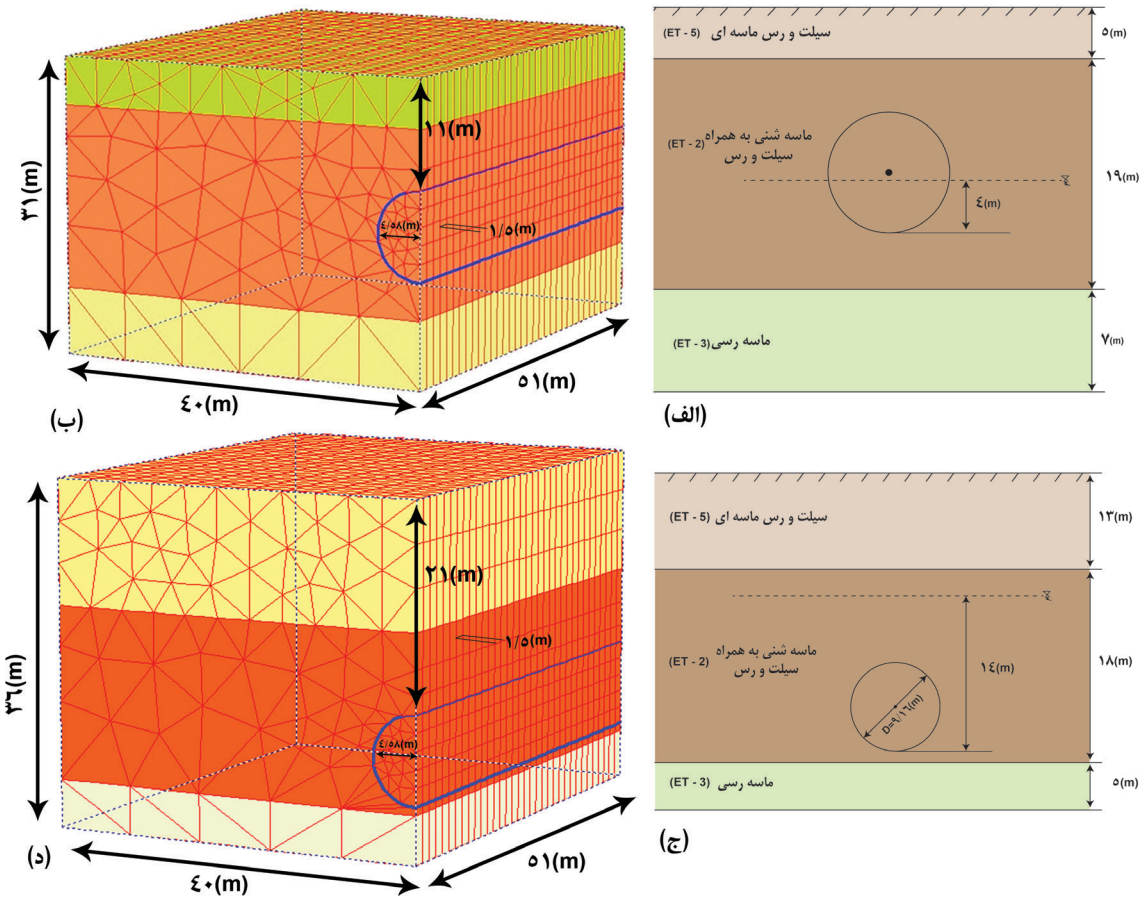
برای مدلسازی و بررسی تاثیر فشار جبهه‌کار در این پژوهش، ۴ مقطع از تونل انتخاب شده است. دو مقطع از تونل در کیلومتراژ ۵+۲۰۰ و ۸+۲۰۰، به دلایلی مانند شرایط زمین‌شناسی، سطح ایستابی آب زیرزمینی و ضخامت روباره برای تحلیل حساسیت فشار جبهه‌کار و فشار تزریق، انتخاب شده است. بدین سبب که درصد زیادی از جبهه‌کار مسیر تونل در ماسه‌ی شنی به همراه سیلت و رس (*ET-2*) قرار دارد و ماشین حفار بیش‌تر با این شرایط زمین‌شناسی مواجه خواهد شد، هر دو مقطع، دارای شرایط یکسان هستند؛ با این تفاوت که روباره‌ی تونل در مقطع کیلومتراژ ۵+۲۰۰، ۱۱ متر (*H<2D*) و در کیلومتراژ ۸+۲۰۰، ۲۱ متر (*H>2D*) است. هر دو مقطع تونل در زیر سطح آب زیرزمینی قرار گرفته است. ذکر این نکته ضروری است که در زمان تهیه‌ی این مقاله، تونل در این دو مقطع هنوز حفر نشده است. دو مقطع کیلومتراژ ۱۰+۵۵۰ و ۱۰+۵۰۰ تونل که به تازگی حفر شده‌اند نیز برای بررسی صحت مدلسازی با استفاده از نتایج ابزاربندی انتخاب شده است.

خصوصیات ژئوتکنیکی واحدهای دو مقطع تونل در کیلومتراژ ۵+۲۰۰ و ۸+۲۰۰ در **جدول ۱** معرفی شده است. با توجه به نتایج بدست آمده از مطالعات صحرایی و آزمایشگاهی، لایه‌های خاکی دربرگیرنده‌ی مسیر تونل به سه گونه‌ی زمین‌شناسی مهندسی شامل *ET-2*، *ET-3* و *ET-5* تفکیک شده‌اند. وضعیت لایه‌بندی، جنس لایه‌ها، ابعاد هندسی مدل سه بعدی اجزا محدود و نحوه‌ی مش‌بندی دو مقطع نیز در **شکل ۱** نشان داده شده است. برای مدلسازی عددی، ابتدا هندسه‌ی مدل تعریف شده و سپس شرایط اولیه و مرزی با توجه به طبیعت مسئله، اعمال شده است. بدین منظور در سطح مدل بار ۲۰ کیلونیوتنی اعمال شده است.

ویژگی‌های مکانیکی پوشش بتنی و المان سپر در **جدول ۲** آورده شده است. رفتار مکانیکی توده‌ی خاک محیط اطراف تونل با مدل موهر-کلمب توصیف شده و همان‌طور که بیان شد، برای خواص ژئومکانیکی لایه‌های مختلف خاک نظیر وزن مخصوص خشک، مدول الاستیسیته، نسبت پواسون، زاویه‌ی اصطکاک داخلی و چسبندگی خاک، از اطلاعات **جدول ۱** استفاده شده است.

جدول ۱- پارامترهای ژئوتکنیکی برای واحدهای زمین‌شناسی مهندسی مسیر تونل [۲۱]

گونه‌ی زمین‌شناسی	چسبندگی (*kPa*)	زاویه‌ی اصطکاک داخلی (درجه)	مدول الاستیسیته (*MPa*)	نسبت پواسون	وزن مخصوص خشک خاک (g/cm^3)
ET-2	۱۵	۳۳	۷۵	۰٫۳	۱٫۸۴
ET-3	۳۰	۳۳	۵۰	۰٫۳۲	۱٫۹
ET-5	۳۱	۲۸	۳۵	۰٫۳۵	۱٫۷



شکل ۱- لایه بندی، شرایط زمین شناسی، سطح آب و موقعیت تونل در کیلومتراژ ۵+۲۰۰ (الف وب) و ۸+۲۰۰ تونل (ج و د)

جدول ۲- خصوصیات ماشین *EPB* و پوشش بتنی تونل خط ۷ متروی تهران قطعه‌ی شرقی- غربی

پارامتر	علایم	مقدار		واحد
		EPB	**پوشش بتنی**	
نوع مواد	-	الاستیک	الاستیک	-
صلبیت محوری	*EA*	۱۰۰۰۰	۱۰۰۰۰	*MN/m*
صلبیت خمشی	*EI*	۵۰	۱۰۲	MNm^2/m
ضخامت	*d*	۰٫۲۴۵	۰٫۳۵۰	*m*
وزن	*w*	۴۸٫۸	۸٫۴	*KN/m/m*
نسبت پواسون	*ν*	۰٫۲	۰٫۲	-

۴- اعتبارسنجی نتایج مدلسازی عددی

به منظور اعتبارسنجی و بررسی صحت روند مدلسازی عددی سه بعدی اجزا محدود در دو مقطع ۱۰+۵۰۰ و ۱۰+۵۵۰ تونل از نتایج ابزاربندی و رفتارنگاری استفاده شده است. برای مدلسازی عددی این مقاطع، نقطه‌ای در سطح زمین به فاصله‌ی ۳۰ متری از جبهه‌کار درکیلومتراژ ۱۰+۵۰۰ و به فاصله‌ی ۳۵ متری از جبهه کار در کیلومتراژ ۱۰+۵۵۰ برای پایش نشست انتخاب شده است. در **جدول ۳** نتایج مدلسازی عددی و نتایج حاصل از ابزاربندی برای دو مقطع فوق برای مقایسه آورده شده است. با توجه به این جدول،

جابجایی نقطه‌ی مورد نظر برای کیلومتراژ ۵۰۰+۱۰، ۱۰ میلی‌متر است. در این مقطع تونل با فشار جبهه‌کار ۶۰ کیلوپاسکال و فشار تزریق ۱۱۰ کیلوپاسکال حفر شده است. میزان نشست سطح زمین در این مقطع توسط جابجایی سنج ۵/۵ میلی‌متر ثبت شده است. همچنین برای کیلومتراژ ۵۵۰+۱۰ جابجایی نقطه‌ی انتخابی ۸ میلی‌متر بدست آمده است. باید توجه شود، علاوه بر فشار جبهه‌کار پارامترهای دیگری همچون فشار تزریق، شرایط زمین‌شناسی، زاویه‌ی کج شدگی سپر، نرخ نفوذ، عمق تونل و فاصله از محل ایستگاه نیز بر نشست سطح زمین تاثیرگذار هستند.

جدول ۳: مقایسه‌ی نتایج حاصل از ابزاربندی و مدلسازی عددی کیلومتراژهای ۵۰۰+۱۰ و ۵۵۰+۱۰

کیلومتراژ	فشار جبهه‌کار (*kPa*)	فشار تزریق (*kPa*)	بیش‌ترین نشست سطح زمین (*mm*)		
			ابزاربندی	مدلسازی	درصد خطا
۱۰+۵۰۰	۶۰	۱۱۰	۵/۵	۱۰	۴/۵
۱۰+۵۵۰	۷۰	۱۲۰	۴/۵	۸	۳/۵

۵- بررسی تاثیر فشار جبهه‌کار بر نشست سطح زمین

در این بخش با تمرکز بر روی دو مقطع کیلومتراژ ۵+۲۰۰ و ۸+۲۰۰ تونل، تاثیر فشار جبهه کار بر نشست سطح زمین با استفاده از روش عددی و مدلسازی سه بعدی اجزا محدود (*PLAXIS3D Tunnel*) مورد ارزیابی قرار گرفته است.

۵-۱- کیلومتراژ ۵+۲۰۰

در این مقطع ضخامت روباره ۱۱ متر ($H<2D$) و سطح آب از کف تونل ۴ متر است. در طول ۵۱ متر از مدل به ازای ۱۶/۵ متر حفاری، نتایج مدلسازی عددی برای حالت‌های مختلف فشار جبهه‌کار و فشار تزریق بررسی شده است. بدین منظور تاثیر مقادیر مختلف فشار جبهه‌کار بر نشست سطح زمین در دو حالت با احتساب تزریق و بدون تزریق تحلیل شده است. مقادیر مختلف فشار جبهه‌کار عبارت است از:

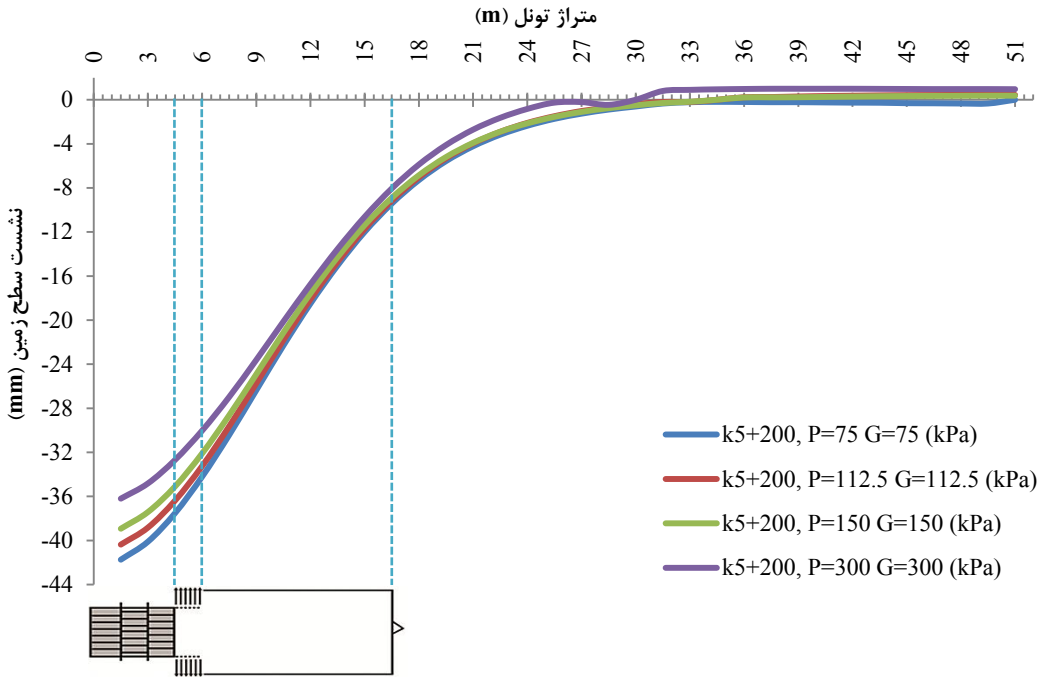
۱- فشار جبهه‌کار اولیه (۷۵ کیلوپاسکال)
۲- ۱/۵ برابر فشار اولیه (۱۱۲/۵ کیلوپاسکال)
۳- دو برابر فشار اولیه (۱۵۰ کیلوپاسکال)
۴- چهار برابر فشار اولیه (۳۰۰ کیلوپاسکال)

شیب فشار بین تاج و کف تونل در داخل اتاقک حفاری به اندازه‌ی ۱۶ کیلوپاسکال بر متر در نظر گرفته شده است. در حالت اعمال فشار تزریق، برای هر حالت از فشار جبهه‌کار، پنج حالت فشار تزریق مدلسازی شده است. **شکل ۲-الف** تاثیر فشار جبهه‌کار بر پروفیل طولی نشست سطح زمین را در حالت برابر بودن فشار تزریق با فشار جبهه‌کار، نشان می‌دهد. به ازای فشار جبهه‌کار برابر با ۷۵ کیلوپاسکال، بیش‌ترین نشست سطح زمین ۴۱/۷۴ میلی‌متر، با افزایش ۱/۵ برابری فشار جبهه‌کار (۱۱۲/۵ کیلوپاسکال) مقدار نشست ۴۰/۳۷ میلی‌متر، با افزایش ۲ برابری فشار جبهه‌کار (۱۵۰ کیلو پاسکال) این مقدار ۳۸/۹۳ میلی‌متر و با افزایش ۴ برابری فشار جبهه‌کار، بیش‌ترین نشست سطح زمین ۳۶/۲ میلی‌متر محاسبه شده است. این نتایج نشان می‌دهد با افزایش ۱/۵ برابری فشار جبهه‌کار، نشست زمین به طور نسبی ۱/۳۷ میلی‌متر، با افزایش ۲ برابری فشار، ۲/۸۱ میلی‌متر و با افزایش ۴ برابری فشار جبهه‌کار، نشست زمین ۵/۵۴ میلی‌متر کاهش یافته است.

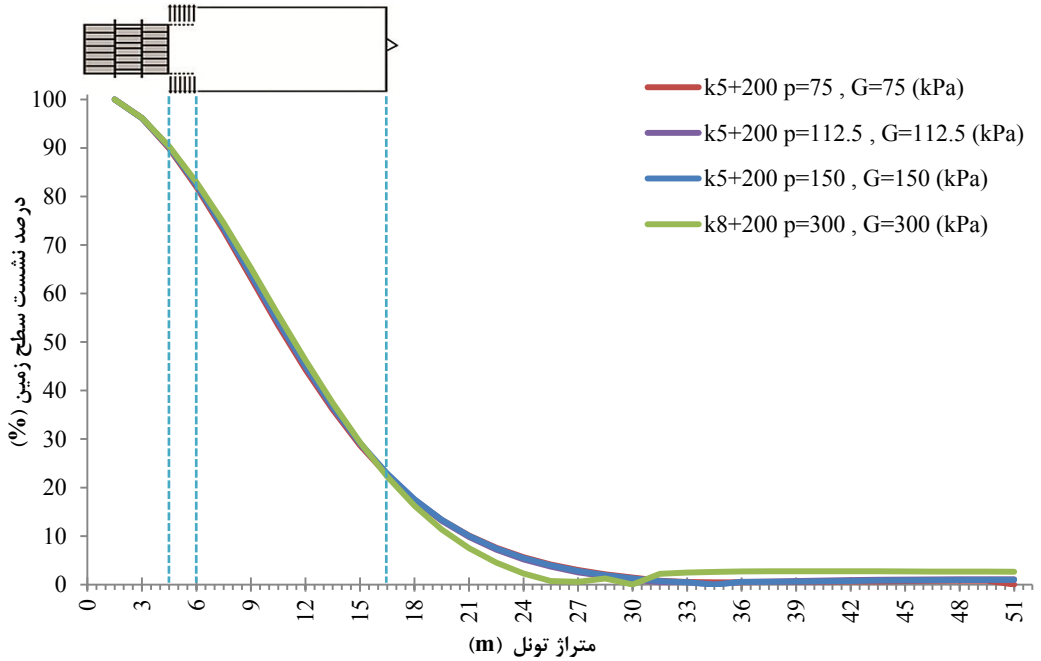
درصد نشست سطح زمین از تقسیم نشست هر مقطع به بیش‌ترین نشست بدست می‌آید. **شکل ۲-ب** درصد نشست سطح زمین را به ازای مقادیر مختلف فشار جبهه‌کار و با فشار تزریق برابر با فشار جبهه‌کار نشان می‌دهد. با توجه به این شکل، کمتر از ۲۰ درصد نشست در جلوی جبهه‌کار، ۲۰ تا ۸۲ درصد نشست در بالای سپر و ۸۲ تا ۱۰۰ درصد آن پس از عبور سپر رخ داده است. به بیان دیگر، اگر چه میزان نشست و بیش‌ترین نشست در هر حالت با یکدیگر متفاوت است، اما نسبت آن‌ها یکسان است.

درصد نشست در جلوی جبهه‌کار، بالای سپر و پس از عبور سپر به ازای حالات مختلف فشار جبهه‌کار و فشار تزریق در کیلومتراژ ۵+۲۰۰ در **جدول ۴** درج شده است. در این جدول، حرف P نمایانگر فشار جبهه‌کار و حرف G نشانگر فشار تزریق است. با توجه به **جدول ۴**، به ازای فشار

تزریق ۵۰ کیلوپاسکال بیش‌تر از فشار جبهه‌کار، کمتر از ۲۵ درصد نشست در جلو سپر، ۲۵ تا ۸۸ درصد نشست در بالای سپر و ۸۸ تا ۱۰۰ درصد نشست پس از عبور سپر صورت گرفته است. در دو حالت دیگر یعنی فشار تزریق ۱۰۰ و ۲۰۰ کیلوپاسکال بیش‌تر از فشار جبهه‌کار نیز روند یکسانی مشاهده شده است.



الف- پروفیل طولی نشست سطح زمین در حالت‌های مختلف مدلسازی (فشار تزریق برابر با فشار جبهه‌کار)



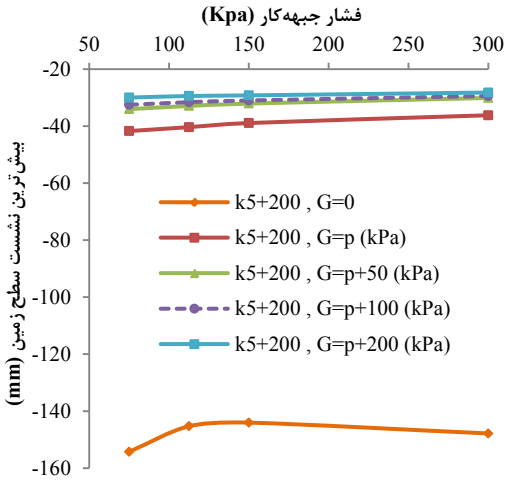
ب- درصد نشست سطح زمین (فشار تزریق برابر با فشار جبهه‌کار)

شکل ۲- تاثیر فشار جبهه‌کار و فشار تزریق بر نشست سطح زمین در کیلومتراژ ۵+۲۰۰

بیش‌ترین نشست سطح زمین به ازای مقادیر مختلف فشار جبهه‌کار برای کیلومتراژ ۵+۲۰۰ تونل در **شکل ۳** نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، شیب کم نمودار برای حالات مختلف فشار جبهه‌کار، تاثیر نه چندان زیاد فشار جبهه‌کار بر بیش‌ترین نشست سطح زمین را نشان می‌دهد. این در حالی است که تاثیر فشار تزریق در میزان نشست کلی بوضوح دیده می‌شود. میزان نشست در دو وضعیت بدون فشار تزریق و با فشار تزریق کاملاً متفاوت است. با اعمال فشار تزریق کاهش میزان نشست چشمگیر است. در حالت اعمال فشار تزریق، به ازای مقادیر بیش‌تر از ۵۰ کیلوپاسکال بیش از فشار جبهه‌کار (*P+50*)، تغییرات نشست سطح زمین ناچیز است.

جدول ۴- درصد نشست سطح زمین در حالات مختلف فشار جبهه‌کار در کیلومتراژ ۵+۲۰۰

شرایط مدلسازی	نشست جلوی جبهه‌کار (٪)	نشست در بالای سپر(٪)	نشست پس از عبور سپر (٪)
G=0* و *P	<۱۰	۴۵-۱۰	۱۰۰-۴۵
G=P* و *P	<۲۰	۸۲-۲۰	۱۰۰-۸۲
G=P+50* و *P	<۲۵	۸۸-۲۵	۱۰۰-۸۸
G=P+100* و *P	<۲۶	۸۸-۲۶	۱۰۰-۸۸
G=P+200* و *P	<۲۸	۸۸-۲۸	۱۰۰-۸۸



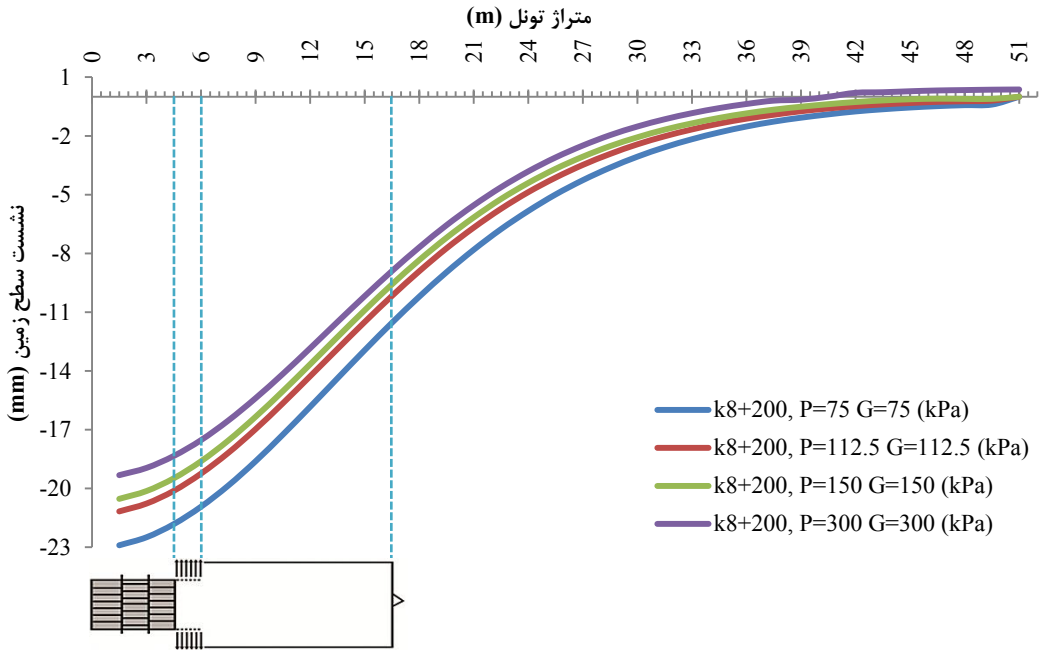
شکل ۳- فشار جبهه کار در برابر بیش‌ترین نشست سطح زمین در کیلومتراژ ۵+۲۰۰

۵-۲- کیلومتراژ ۸+۲۰۰

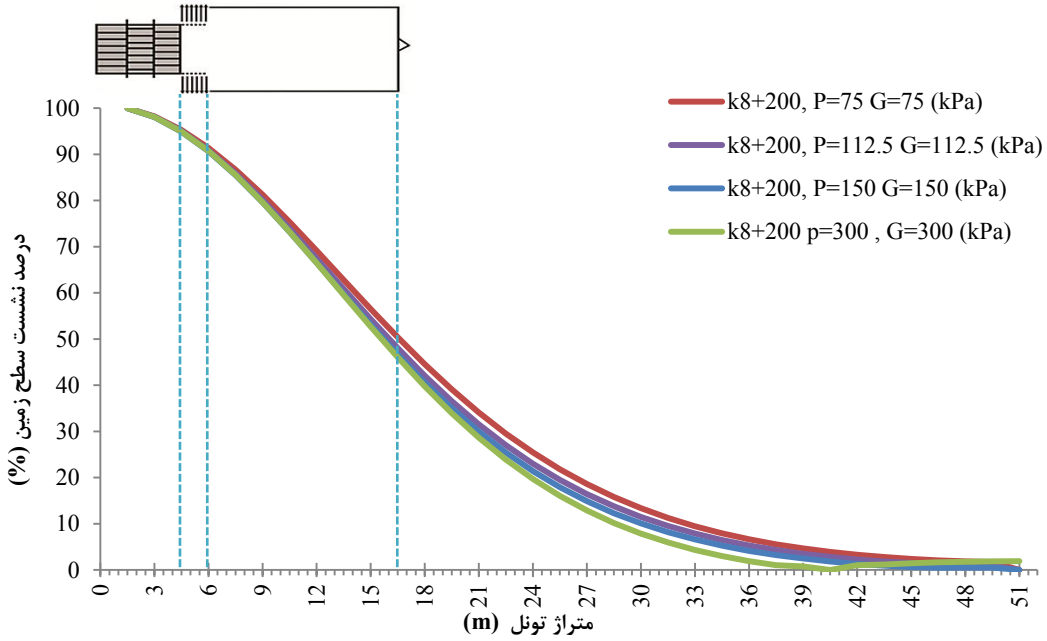
در این مقطع از تونل، روباره ۲۱ متر و بیش‌تر از دو برابر قطر تونل است (*H>2D*). طول مدل ۵۱ متر و سطح آب از کف تونل ۱۴ متر است. نتایج مدلسازی عددی پس از ۱۶٫۵ متر حفاری مورد ارزیابی قرار گرفته است. برای تحلیل بهتر نتایج، تاثیر فشار جبهه‌کار در این مقطع همانند مقطع کیلومتراژ ۵+۲۰۰ انجام شده است.

در **شکل ۴-الف** تاثیر فشار جبهه‌کار بر پروفیل طولی نشست سطح زمین در حالت فشار جبهه‌کار برابر با فشار تزریق در کیلومتراژ ۸+۲۰۰ نشان داده شده است. به ازای فشار جبهه‌کار ۷۵ کیلوپاسکال، بیش‌ترین نشست سطح برابر با ۲۲٫۹ میلی‌متر محاسبه شده است. با افزایش ۱٫۵ برابری فشار جبهه‌کار، نشست ۲۱٫۱۷ میلی‌متر، با افزایش ۲ برابری فشار جبهه‌کار، مقدار آن ۲۰٫۵۳ میلی‌متر و با افزایش ۴ برابری فشار جبهه‌کار، بیش‌ترین نشست برابر با ۱۹٫۳۲ میلی‌متر محاسبه شده است. بنابراین با افزایش ۱٫۵ برابری فشار جبهه‌کار، نشست به طور نسبی، ۱٫۷۳ میلی‌متر کاهش یافته است. با افزایش ۲ برابری فشار، ۲٫۳۷ میلی‌متر و با افزایش ۴ برابری فشار جبهه‌کار، نشست زمین ۳٫۶ میلی‌متر کاهش نشان داده است که چندان زیاد نیست. **شکل ۴-ب** درصد نشست سطح زمین در این مقطع را به ازای مقادیر مختلف فشار جبهه‌کار و فشار تزریق برابر فشار جبهه‌کار نشان می‌دهد. با توجه به شکل کمتر از ۴۸ درصد نشست در جلوی جبهه‌کار، ۴۸ تا ۹۰ درصد نشست در بالای سپر و ۹۰ تا ۱۰۰ درصد نشست پس از عبور سپر رخ داده است.

درصد نشست در جلوی جبهه‌کار، بالای سپر و پس از عبور سپر به ازای حالات مختلف فشار جبهه‌کار و فشار تزریق در کیلومتراژ ۸+۲۰۰ در **جدول ۵** درج شده است. در این کیلومتراژ با افزایش فشار جبهه‌کار، بیش‌ترین نشست سطح کاهش می‌یابد؛ اما این تغییرات قابل توجه نیست.



الف- پروفیل طولی نشست سطح زمین (فشار تزریق برابر با فشار جبهه‌کار)

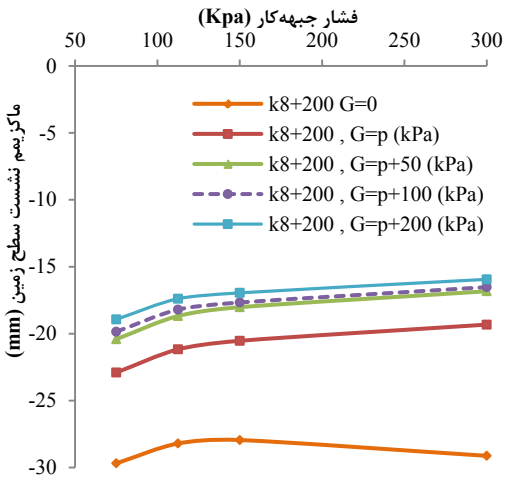


ب- درصد نشست سطح زمین (فشار تزریق برابر با فشار جبهه‌کار)

شکل ۴- تاثیر فشار جبهه‌کار و فشار تزریق بر نشست سطح زمین در کیلومتراژ ۸+۲۰۰

بیش‌ترین نشست سطح زمین به ازای مقادیر مختلف فشار جبهه‌کار برای کیلومتراژ ۸+۲۰۰ تونل در **شکل ۵** نشان داده شده است. مطابق شکل در این مقطع نیز شیب نمودار برای حالات مختلف فشار جبهه‌کار کم بوده و بیانگر تاثیر نه چندان زیاد فشار جبهه‌کار بر بیش‌ترین نشست سطح زمین است. افزایش ۴ برابری فشار جبهه‌کار حداکثر

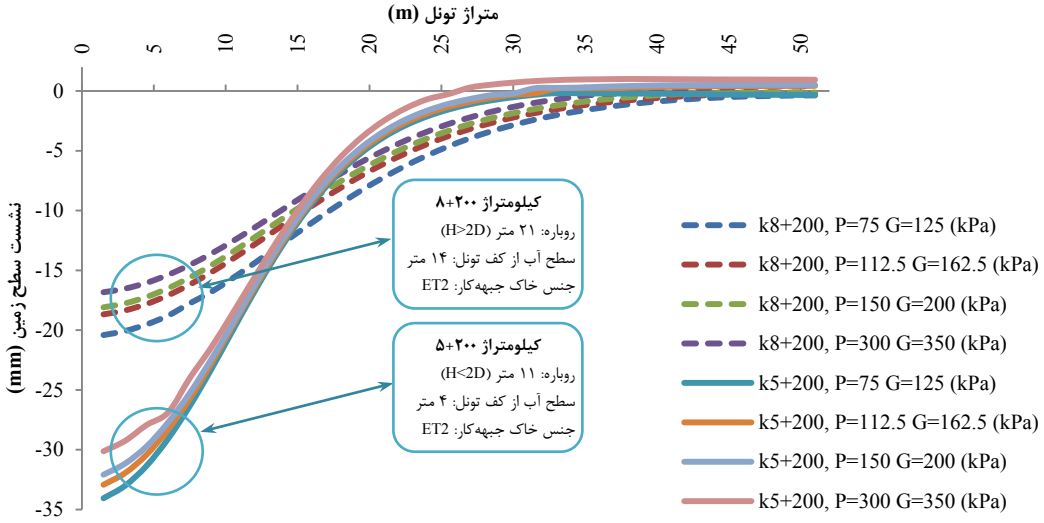
باعث کاهش ۵ میلی‌متری بیش‌ترین نشست شده است. ولی همانند مقطع قبلی تاثیر فشار تزریق در نشست کلی قابل توجه است. نشست در دو وضعیت بدون فشار تزریق و با فشار تزریق کاملاً متفاوت و با اعمال فشار تزریق کاهش نشست زیاد است. در حالت اعمال فشار تزریق، به ازای مقادیر بیش‌تر از مقدار ۵۰ کیلوپاسکال بیش از فشار جبهه‌کار (*P+50*)، نرخ تغییرات نشست سطح زمین نسبتاً کم است. در این مقطع افزایش چند برابری فشار جبهه‌کار بدون اعمال فشار تزریق موجب بالازدگی سطح زمین می‌شود. لازم به ذکر است که بیش‌ترین نشست مشاهده شده در مقطع ۵+۲۰۰ از بیش‌ترین نشست مقطع ۸+۲۰۰ بیش‌تر است. این امر به سبب کمتر بودن روباره در این مقطع رخ داده است (**شکل ۶**).



شکل ۵- فشار جبهه‌کار در برابر بیش‌ترین نشست سطح زمین در کیلومتراژ ۸+۲۰۰

جدول ۵- درصد نشست سطح زمین در حالات مختلف فشار جبهه‌کار در کیلومتراژ ۸+۲۰۰

شرایط مدلسازی	نشست جلوی جبهه‌کار (٪)	نشست در بالای سپر (٪)	نشست پس از عبور سپر (٪)
P* و *G=0	<۴۰	۹۰-۴۰	۱۰۰-۹۰
P* و *G=P	<۴۸	۹۰-۴۸	۱۰۰-۹۰
P* و *G=P+50	<۵۰	۹۰-۵۰	۱۰۰-۹۰
P* و *G=P+100	<۵۰	۹۰-۵۰	۱۰۰-۹۰
P* و *G=P+200	<۵۰	۹۰-۵۰	۱۰۰-۹۰



شکل ۶- مقایسه‌ی تاثیر فشار جبهه‌کار در دو مقطع ۵+۲۰۰ و ۸+۲۰۰ بر پروفیل طولی نشست سطح زمین (فشار تزریق ۵۰ کیلوپاسکال بیش‌تر از فشار جبهه‌کار)

۶- نتیجه‌گیری

در این تحقیق تاثیر فشار جبهه‌کار بر نشست سطح زمین در تونل خط ۷ متروی تهران با مدلسازی سه بعدی اجزا محدود و با استفاده از نرم افزار *PLAXIS3D Tunnel v.12* مطالعه و بررسی شده است. بدین منظور ابتدا دو مقطع کیلومتراژ ۱۰+۵۵۰ و ۱۰+۵۰۰ تونل که به تازگی حفر شده‌اند، انتخاب و صحت نتایج مدلسازی عددی با استفاده از نتایج ابزاربندی در بالای سطح، ارزیابی شد. سپس در دو مقطع کیلومتراژ ۵+۲۰۰ و ۸+۲۰۰ تونل، به ازای مقادیر مختلف فشار جبهه‌کار در دو حالت بدون فشار تزریق و با اعمال فشار تزریق، تاثیر فشار جبهه‌کار بر نشست سطح زمین مورد مطالعه دقیق قرار گرفته است. فشار جبهه‌کار در چهار حالت فشار اولیه، ۱٫۵ برابر فشار اولیه، ۲ برابر فشار اولیه و ۴ برابر فشار اولیه و فشار تزریق در ۵ حالت بدون اعمال تزریق، برابر فشار جبهه کار، ۰٫۵ بار بیش‌تر از فشار جبهه کار، ۱ بار بیش‌تر از فشار جبهه‌کار و ۲ بار بیش‌تر از فشار جبهه‌کار مدلسازی شده است. بر اساس نتایج، در هر دو مقطع کیلومتراژ ۵+۲۰۰ و ۸+۲۰۰ قطعه‌ی شرقی- غربی تونل خط ۷، با افزایش فشار جبهه‌کار، بیش‌ترین نشست سطح زمین کاهش می‌یابد ولی این تغییرات قابل توجه نیست؛ بطوری‌که افزایش ۴ برابری فشار جبهه‌کار باعث می‌شود بیش‌ترین نشست سطح زمین، حداکثر ۵ میلی‌متر کاهش یابد. با این وجود، فشار تزریق به طور قابل ملاحظه‌ای سبب کاهش نشست سطح زمین می‌شود. همچنین مقایسه‌ی حداکثر نشست محاسبه شده در مقطع ۵+۲۰۰ و ۸+۲۰۰ ، نشست کمتری را در مقطع ۵+۲۰۰ نشان داده است. دلیل این امر کمتر بودن روباره در این مقطع است. لازم به ذکر است در بررسی نشست زمین علاوه بر فشار جبهه‌کار و فشار تزریق، پارامترهایی نظیر اختلاف قطر حفاری و سپر و شرایط هندسی نیز موثر هستند.

۷- سپاس‌گزاری

از آقایان مهندس صادق طریق ازلی و مهندس محسن رضایی و همچنین موسسه‌ی مهندسین مشاور ساحل به سبب همکاری در مراحل تحقیق و در اختیار قراردادن اطلاعات لازم تشکر و قدردانی می‌شود.

۸- منبع‌ها

[1] Guglielmetti, V., Grasso, P., Mahtab, A., & Xu, S. (2007). *Mechanized Tunneling in Urban Areas: Design Methodology and Construction Control.* (V. Guglielmetti, Ed.) London: Taylor and Francis e-Library. ISBN: 978-0-203-393851-5 (eBook).

[2] Mohkam, M., & Wong, Y. W. (1989). Three Dimensional Stability Analysis of The Tunnel Face Under Fluid Pressure. *Numerical Methods in Geomechanics* (pp. 2271-2287). Rotterdam: A. A. Balkema.

[3] Jancsecz, S., & Steiner, W. (1994). Face Support for a Large Mix-Shield in Heterogeneous Ground Conditions. *Tunnelling '94: Seventh International Symposium Organized by the Institution of Mining and Metallurgy and the British Tunnelling Society* (pp. 531-541). London: Chapman and Hall. ISBN: 9780412598609.

[4] Broere, W. (1998). Face Stability Calculation for a Slurry Sheild in Hetrogeneous Soft Soils. In Nego, & Ferreira (Ed.), *Proceedings of the World Tunnel Congress'98 on Tunnels and Metropolises* (pp. 215-218). Sao Paolo, Brazil. Taylor & Francis. ISBN: 9789054109365.

[5] Atkinson, J. H., & Potts, D. M. (1977). Subsidence above Shallow Tunnels in Soft Ground. *Journal of the Geotechnical Engineering Division, 103(4),* 307-325.

[6] Attewell, P. B., & Woodman, J. P. (1982). Predicting the Dynamics of Ground Settlement and its Derivatives Caused by Tunneling in Soil. *Ground Engineering, 15(8),* 13-22.

[7] Baligh, M. (1985). Strain Path Method. *Journal of Geotechnical Engineering, 111(9),* 1108-1136. http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1985)111:9(1108).

[8] Chambon, P., & Corte, J. F. (1994). Shallow Tunnels in Cohesionless Soil: Stability of Tunnel Face. *Journal of Geotechnical Engineering, 120(7),* 1148–1165. http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1994)120:7(1148).

[9] Clough, G. W., Sweeney, B. P., & Finno, R. J. (1983). Measured Soil Response to EPB Shield Tunneling. *Journal of Geotechnical Engineering, 109(2),* 131-149. http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1983)109:2(131).

[10] Leca, E. (1989). *Analysis of NATM and Shield Tunneling in Soft Ground.* Blacksburg: Doctoral Thesis, Virginia Institute and State University.

[11] Hwang, R. N., & Moh, Z. C. (1996). Pore Pressures Induced in Soft Ground due to Tunneling. In R. J. Mair, & R. N. Taylor (Ed.), *Proceedings of the International Symposium on Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground* (pp. 695-700). Rotterdam: A. A. Balkema. ISBN: 9789054108566.

[12] Matsushita, Y., Iwasakl, Y., Hashimoto, T., & Imanishi, H. (1994). Behavior of Subway Tunnel Driven by Large Slurry Shield. *Proceedings of the International Symposium on Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground* (pp. 253-256). Rotterdam: A. A. Balkema.

[13] Chiorboli, M. A., & Marchesili, P. P. (1996). Analysis and Control of Subsidence due to Earth Pressure Shield Tunneling in Pass ante Ferroviario of Milano. In L. Ozdemr (Ed.), *Proceedings of the International Conference on North American Tunneling'96* (pp. 97-106). Rotterdam: A. A. Balkema. ISBN: 9054108037.

[14] Suchatvee, S. (2002). Earth Pressure Balance (EPB) Shield Tunneling in Bangkok: Ground Response and Prediction of Surface Settlements Using Artificial Neural Networks. Doctoral Thesis, Massachusetts Institute of Technology (MIT), Department of Civil and Environmental Engineering. http://hdl.handle.net/1721.1/32222.

[15] Crow, M., & Holzhäuser, J. (2003). Performance of Four EPB-TBMs Above and Below the Groundwater Table on the ECIS Project, Los Angeles, CA, USA. In R. A. Robinson, & J. M. Marquardt (Ed.), *Rapid Excavation and Tunneling Conference Proceedings* (pp. 905-926). New Orleans: Society for Mining, Metallurgy and Exploration. ISBN: 9780873352307.

[16] Unlutepe, A., Tellioglu, V., & Arioglu, B. (2009). Redicted and Observed Ground Deformations due to TBM Tunnel Excavations on the IZMIR Metro Project (Stage 1). In P. Kocsonya (Ed.), *ITA-AITES World Tunnel Congress: Safe Tunnelling for the City and Environment Conference Proceedings* (pp. 234-240). Budapest, Hungary: Hungarian Tunnelling Association. ISBN: 9789630672399.

[17] Greenwood, J. D. (2003). *Three Dimension Analysis of Surface Settlement in Soft Ground Tunneling.* Master of Engineering Thesis, Massachusetts Institute of Technology (MIT), Department of Civil and Environmental Engineering. http://hdl.handle.net/1721.1/29558.

[18] Kasper, T., & Meschke, G. (2006). On the Influence of Face Pressure, Grouting Pressure and TBM Design in soft Ground Tunneling . *Tunnelling and Underground Space Technology, 21(2),* 160-171. http://dx.doi.org/10.1016/j.tust.2005.06.006.

[19] Lambrughi, A., Rodríguez, L. M., & Castellanza, R. (2012). Development and validation of a 3D Numerical Model for TBM–EPB Mechanized Excavations. *Computers and Geotechnics Journal, 40*, 97-113. http://dx.doi.org/10.1016/j.compgeo.2011.10.004.

[20] Nicolas, B., Branque, D., Subrin, D., Wong, H., & Humbert, E. (2012). Face Failure in Homogeneous and Stratified Soft Ground: Theoretical and Experimental Approaches on 1g EPBS Reduced Scale Model. *Tunnelling and Underground Space Technology, 30*, 25–37. http://dx.doi.org/10.1016/j.tust.2012.01.005.

[۲۱]موسسه‌ی مهندسین مشاور ساحل. (۱۳۸۹). گزارش مطالعات زمین‌شناسی مهندسی و ژئوتکنیک مسیر تونل خط ۷ متروی تهران، قطعه‌ی شرقی- غربی. تهران، ایران.

TUNNELING & UNDERGROUND SPACE ENGINEERING (TUSE)
نشریه‌ی مهندسی تونل و فضاهای زیرزمینی
http://tuse.shahroodut.ac.ir/
Volume 1-Issue 1\Winter 2013

Numerical Study of Face Pressure Effect on Surface Settlement in Soft Ground Mechanized Tunneling- A Case Study: Tehran Metro Line 7

R. Heidari Sheibani[1]; S. Zare[2]; H. Mirzaei[3]; M. Foroughi[4]
1- M.Sc. in Mining Engineering; Shahrood University of Technology
2 & 3- Assistant Professor; Faculty of Mining Eng., Petroleum and Geophysics; Shahrood University of Technology
4- M.Sc.; Sahel Consulting Engineers

Received: 19 Sep 2012; Accepted: 16 Jan 2013

Keywords

Settlement
EPB
Tehran Subway Tunnel
Instruments' Data
Numerical Modeling

Extended Abstract

Tehran's metro line 7 project has been excavated by an Earth Pressure Balance (EPB) machine. Four sections of the line 7 tunnel have been selected in this study, and the influence of face and backfill grout pressures on surface settlement has been numerically investigated. The obtained numerical results have been confirmed by the monitoring data using the installed instruments on site. Then, the results of various numerical models for different amounts of face pressure and backfill grouting pressure have been discussed. In this research, the influence of backfill grouting pressure is found to be significant.

Introduction

Various underground spaces such as tunnels are constructed in urban areas for different purposes. These spaces are often located in soil media near the ground surface. Therefore surface settlement control is a critical task in the construction of these spaces. In EPB mechanized tunneling, the face pressure and backfill grouting pressure are the most important factors to prevent surface settlement.

Methodology and Approaches

In this study, the PLAXIS3D software has been employed for carrying out 3D numerical modeling of face pressure influence on the surface settlement. In addition, the Mohr-Coulomb criterion has been considered for geo-mechanical behavior of soil material surrounding the tunnel. In two sections of the tunnel, the results of numerical models have been verified by the data obtained from monitoring instruments installed in the site. In the other two sections of tunnel, four states of face pressure: P=P0 (estimated initial pressure), P=1.5P0, P=2P0 and P=4P0 and for each state, five states of backfill grouting pressure: G=0, G=P, G=P+0.5 bar, G=P+1 bar and G=P+2 bar have been considered and surface settlement in each case has been analyzed.

Results and Conclusions

The obtained numerical results show that a %400 increase of face pressure, leads to a decrease of maximum 5 mm in the surface settlement. Thus, the influence of face pressure seems to be trivial but the influence of backfill grouting pressure appears to be significant.