

بررسی تاثیر فشار جبهه کار بر نشست سطح زمین در تونلسازی مکانیزه در زمین نرم - مطالعه موردی: تونل قطعه شرقی - غربی خط ۷ متروی تهران

رضا حیدری شیبانی^۱؛ شکرالله زارع^{۲*}؛ حسین میرزائی نصیرآباد^۳؛ محمد فروغی^۴

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد مهندسی معدن؛ گرایش استخراج؛ دانشگاه صنعتی شاهرود

۲ و ۳- استادیار؛ دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک؛ دانشگاه صنعتی شاهرود

۴- کارشناس مطالعات مهندسی حین ساخت پروژه تونل خط ۷ تهران، قطعه شرقی - غربی؛ موسسه مهندسی مشاور ساحل

دریافت دست نوشته: ۱۳۹۱/۰۶/۲۹؛ پذیرش مقاله: ۱۳۹۱/۱۰/۲۷

واژگان کلیدی	چکیده
نشست <i>EPB</i> تونل متروی تهران ابزار بندی مدلسازی عددی	در تونل‌های مناطق شهری که بیش تر در عمق کم و در بستر خاکی حفر می‌شوند، فشار جبهه کار می‌تواند یکی از عوامل پیشگیری کننده نشست سطح زمین باشد. در پروژه خط ۷ متروی تهران، تونل با ماشین حفاری مکانیزه از نوع متعادل کننده فشار زمین (<i>EPB</i>) حفر می‌شود. در این تحقیق با تمرکز بر روی چهار مقطع از این تونل، تاثیر فشار جبهه کار بر نشست سطح زمین مورد تحلیل قرار گرفته است. فشار جبهه کار در چهار حالت فشار اولیه، ۱،۵، ۲ و ۴ برابر فشار اولیه و فشار تزریق در ۵ حالت بدون اعمال تزریق، برابر فشار جبهه کار، ۰،۵، ۱ و ۲ بار بیش تر از فشار جبهه کار با استفاده از نرم افزار اجزا محدود <i>PLAXIS3D</i> مورد ارزیابی قرار گرفته است. اعتبارسنجی نتایج با استفاده از ابزاربندی در سطح زمین و بر روی دو مقطع از تونل انجام گرفته است. مقایسه نتایج مدلسازی و نتایج حاصل از ابزاربندی بیانگر صحت روند مدلسازی است. برای حالت $H < 2D$ تاثیرات فشار جبهه کار بر نشست سطح به مراتب بیش تر از حالت $H > 2D$ است. همچنین نتایج نشان می‌دهد افزایش ۴ برابری فشار جبهه کار، حداکثر سبب کاهش ۵ میلی متری بیش ترین نشست می‌شود. بنابراین افزایش فشار جبهه کار، میزان نشست را کاهش می‌دهد اما این مقدار بسیار ناچیز است.

۱- مقدمه

کننده 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 امکان پذیر 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 جبهه کار به آن برگردانده شوند تا پیش از پایان زمان خودپایداری جبهه کار تعادل نیروها دوباره برقرار شود. روش‌های مختلفی برای ارزیابی فشار جبهه کار

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 جبهه کار 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

* سمنان؛ شاهرود؛ میدان هفت تیر؛ بلوار دانشگاه؛ دانشگاه صنعتی شاهرود؛ دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک؛ طبقه دوم؛ کدپستی:

۳۶۱۹۹۵۱۶۱ شماره‌ی تلفن و دورنگار: ۰۲۷۳-۳۳۹۵۵۰۹؛ رایانامه: zare@shahroodut.ac.ir

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 ایزاربنندی مقایسه کرده است [19]. برتوز (*Bertoz*) در سال ۲۰۱۲، با استفاده از مدل‌سازی فیزیکی و شبیه‌سازی فرآیند تونلسازی با *EPB*، روابطی برای فشار جبهه‌کار ارائه 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 تتراگونال، 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

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 ارائه 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]. برویر (*Broere*) در سال ۱۹۹۸ بر اساس مدل پایداری گوه که اساس آن از روش سیلو و گوه گرفته شده، روشی برای محاسبه‌ی فشار جبهه‌کار ارائه 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 ایزاربنندی 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 کلوت 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 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 لوس آنجلس [15] و مطالعه‌ی آنلوتپ (*Unlutep*) 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 کاملاً به داده‌های اولیه‌ی مسئله بستگی دارد. در سال ۲۰۰۳ گرین‌وود (*Greenwood*) با استفاده از روش اجزا محدود به

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 کیلومتر ۸+۲۰۰، ۵+۲۰۰ و ۱۱ متر ($H < 2D$) و در کیلومتر 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 کیلومتر ۱۰+۵۵۰ و ۱۰+۵۰۰ تونل که به تازگی حفر شده‌اند نیز برای بررسی صحت مدلسازی با استفاده از نتایج ایزاربنندی انتخاب شده است.

خصوصیات ژئوتکنیکی واحدهای دو مقطع تونل در کیلومتر 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 کیلو نیوتنی 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.

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 سیلنتی 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 *PIAXIS3D*

برای مدلسازی و بررسی تاثیر فشار جبهه‌کار در این پژوهش، ۴ مقطع از تونل انتخاب شده است. دو مقطع از تونل در کیلومتر 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

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)
<i>ET-2</i>	۱۵	۳۳	۷۵	۰٫۳	۱٫۸۴
<i>ET-3</i>	۳۰	۳۳	۵۰	۰٫۳۲	۱٫۹
<i>ET-5</i>	۳۱	۲۸	۳۵	۰٫۳۵	۱٫۷

۱۰+۵۵۰ جابجایی نقطه‌ی مورد نظر برای کیلومترهای ۱۰، ۱۰+۵۰۰، ۱۰+۵۵۰ 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 کیلومترهای ۱۰+۵۵۰ جابجایی نقطه‌ی مورد نظر برای کیلومترهای ۱۰، ۱۰+۵۰۰، ۱۰+۵۵۰ میلی‌متر 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.

۱۰+۵۵۰ جابجایی نقطه‌ی مورد نظر برای کیلومترهای ۱۰، ۱۰+۵۰۰، ۱۰+۵۵۰ 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 کیلومترهای ۱۰+۵۵۰ جابجایی نقطه‌ی مورد نظر برای کیلومترهای ۱۰، ۱۰+۵۰۰، ۱۰+۵۵۰ میلی‌متر 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 کیلومترهای ۱۰+۵۵۰ و ۱۰+۵۰۰

کیلومترهای	فشار جبهه‌کار (kPa)	فشار تزریق (kPa)	بیش‌ترین نشست سطح زمین (mm)	
			ابزاربندی	مدلسازی
۱۰+۵۰۰	۶۰	۱۱۰	۵،۵	۱۰
۱۰+۵۵۰	۷۰	۱۲۰	۴،۵	۸

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 کیلوپاسکال) 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 کیلومترهای ۱۰+۵۵۰ 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

۵- بررسی تاثیر فشار جبهه‌کار بر نشست سطح زمین

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

۵-۱- کیلومترهای ۵+۲۰۰

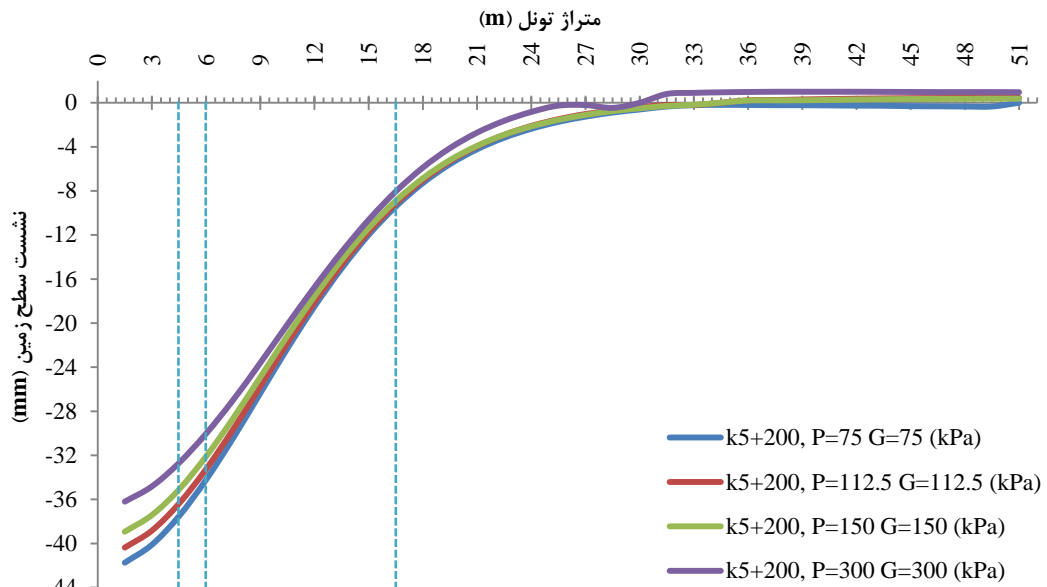
در این مقطع ضخامت روباره ۱۱ متر ($H < 2D$) و سطح آب از کف تونل ۴ متر است. در طول ۵۱ متر از مدل به ازای ۱۶،۵ متر حفاری، نتایج مدلسازی عددی برای حالت‌های مختلف فشار جبهه‌کار و فشار تزریق بررسی شده است. بدین منظور تاثیر مقادیر مختلف فشار جبهه‌کار بر نشست سطح زمین در دو حالت با احتساب تزریق و بدون تزریق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

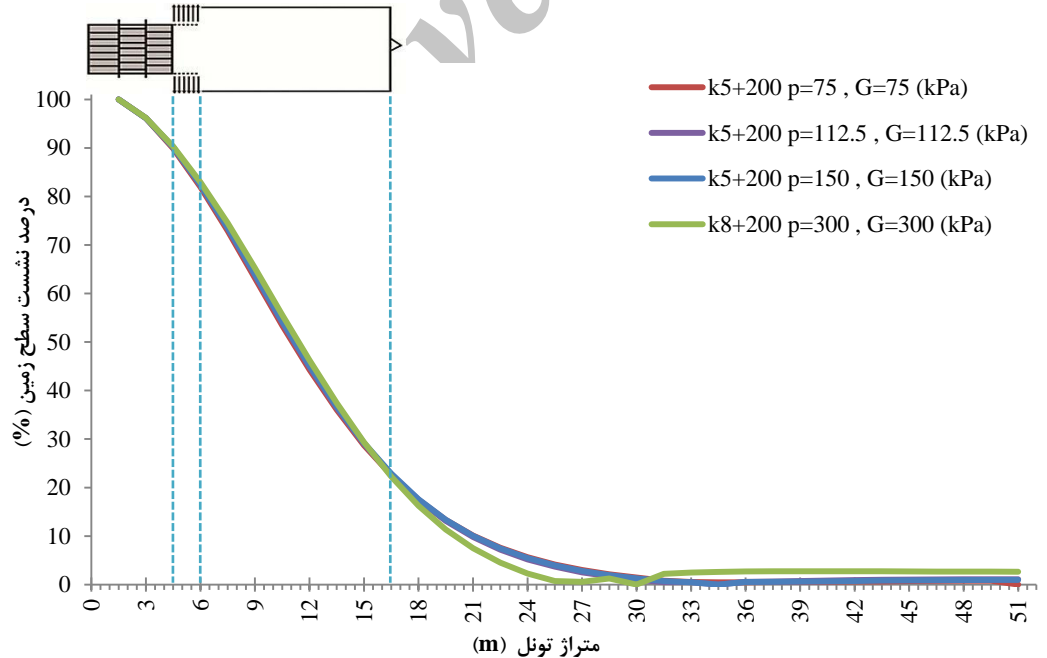
شیب فشار بین تاج و کف تونل در داخل اتاقک حفاری به اندازه‌ی ۱۶ کیلوپاسکال بر متر در نظر گرفته شده است. در حالت اعمال فشار تزریق، برای هر حالت از فشار جبهه‌کار، پنج حالت فشار تزریق مدلسازی شده است. شکل ۲-الف تاثیر فشار جبهه‌کار بر پروفیل طولی نشست سطح زمین را در حالت برابر بودن فشار تزریق با فشار جبهه‌کار،

بررسی تاثیر فشار جبهه کار بر نشست سطح زمین در تونلسازی مکانیزه در زمین نرم- تونل شرقی غربی خط ۷ متروی تهران: ص ۵۷-۶۸

تزریق ۵۰ کیلوپاسکال بیش تر از فشار جبهه کار، 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 بیش تر از فشار جبهه کار نیز روند یکسانی مشاهده شده است.



الف- پروفیل طولی نشست سطح زمین در حالت های مختلف مدلسازی (فشار تزریق برابر با فشار جبهه کار)



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

شکل ۲- تاثیر فشار جبهه کار و فشار تزریق بر نشست سطح زمین در کیلومتر ۵+۲۰۰

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.

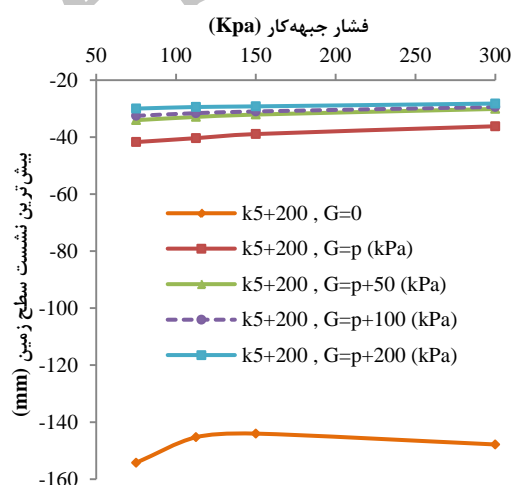
بیش‌ترین نشست سطح زمین به ازای مقادیر مختلف فشار جبهه‌کار برای کیلومتر ۵+۲۰۰ تونل در شکل ۳ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، شیب کم نمودار برای حالات مختلف فشار جبهه‌کار، تاثیر نه چندان زیاد فشار جبهه‌کار بر بیش‌ترین نشست سطح زمین را نشان می‌دهد. این در حالی است که تاثیر فشار تزریق در

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

شرایط مدلسازی	نشست جلوی جبهه‌کار (%)	نشست در بالای سپر (%)	نشست پس از عبور سپر (%)
P و $G=0$	<10	۴۵-۱۰	۱۰۰-۴۵
P و $G=P$	<20	۸۲-۲۰	۱۰۰-۸۲
P و $G=P+50$	<25	۸۸-۲۵	۱۰۰-۸۸
P و $G=P+100$	<26	۸۸-۲۶	۱۰۰-۸۸
P و $G=P+200$	<28	۸۸-۲۸	۱۰۰-۸۸

نشست سطح زمین در حالت فشار جبهه‌کار برابر با فشار تزریق در کیلومتر ۵+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 کیلومتر ۵+۲۰۰ در جدول ۵ درج شده است. در این کیلومتر ۵+۲۰۰ با افزایش فشار جبهه‌کار، بیش‌ترین نشست سطح کاهش می‌یابد؛ اما این تغییرات قابل توجه نیست.

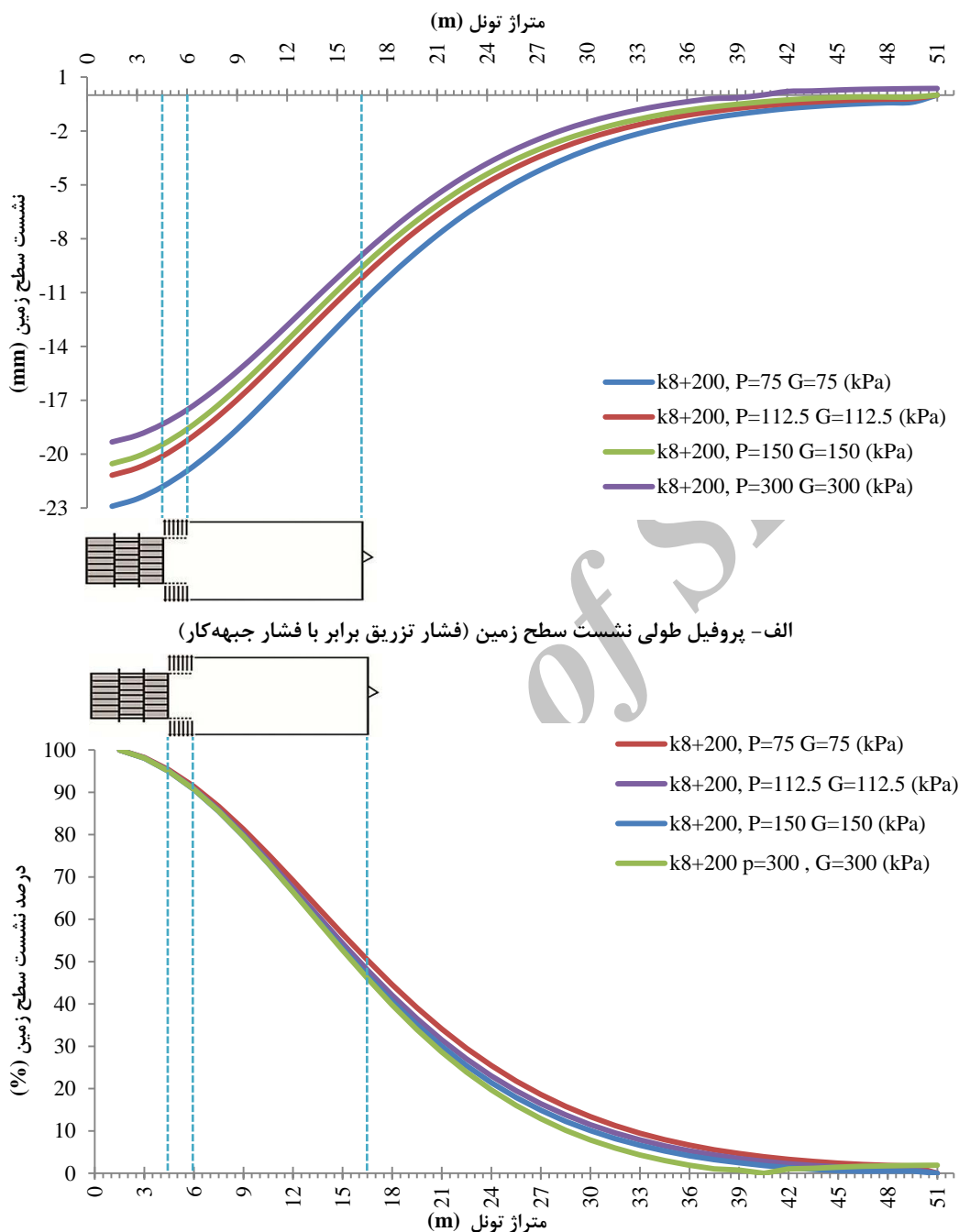


شکل ۳- فشار جبهه‌کار در برابر بیش‌ترین نشست سطح زمین در کیلومتر ۵+۲۰۰

۵-۲- کیلومتر ۵+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 کیلومتر ۵+۲۰۰ انجام شده است.

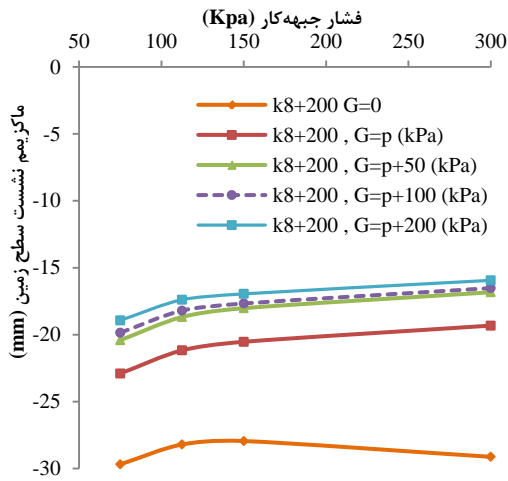
در شکل ۴-الف تاثیر فشار جبهه‌کار بر پروفیل طولی



شکل ۴- تاثیر فشار جبهه کار و فشار تزریق بر نشست سطح زمین در کیلومتر ۸+۲۰۰

نمودار برای حالات مختلف فشار جبهه کار کم بوده و بیانگر تاثیر نه چندان زیاد فشار جبهه کار بر بیشترین نشست سطح زمین است. افزایش ۴ برابری فشار جبهه کار حداکثر

بیشترین نشست سطح زمین به ازای مقادیر مختلف فشار جبهه کار برای کیلومتر ۸+۲۰۰ تونل در شکل ۵ نشان داده شده است. مطابق شکل در این مقطع نیز شیب

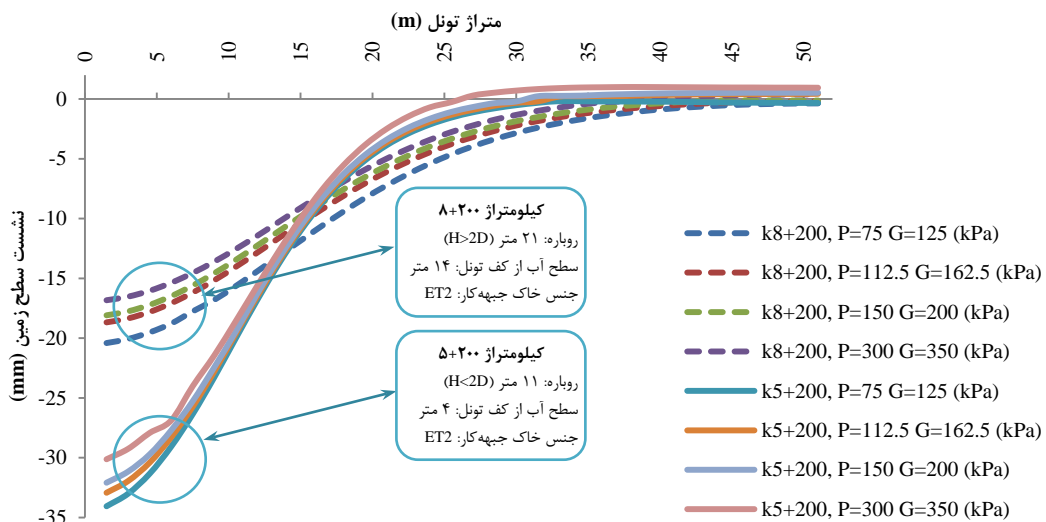


شکل ۵- فشار جبهه‌کار در برابر بیش‌ترین نشست سطح زمین در کیلومتر ۸+۲۰۰

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).

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

شرایط مدلسازی	نشست جلوی جبهه‌کار (%)	نشست در بالای سپر (%)	نشست پس از عبور سپر (%)
P و $G=0$	< 40	۹۰-۴۰	۱۰۰-۹۰
P و $G=P$	< 48	۹۰-۴۸	۱۰۰-۹۰
P و $G=P+50$	< 50	۹۰-۵۰	۱۰۰-۹۰
P و $G=P+100$	< 50	۹۰-۵۰	۱۰۰-۹۰
P و $G=P+200$	< 50	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- نتیجه گیری

۷، با افزایش فشار جبهه کار، بیشترین نشست سطح زمین کاهش می یابد ولی این تغییرات قابل توجه نیست؛ بطوری که افزایش ۴ برابری فشار جبهه کار باعث می شود بیشترین نشست سطح زمین، حداکثر ۵ میلی متر کاهش یابد. با این وجود، فشار تزریق به طور قابل ملاحظه ای سبب کاهش نشست سطح زمین می شود. همچنین مقایسه ای 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 جبهه کار و فشار تزریق، پارامترهایی نظیر اختلاف قطر حفاری و سپر و شرایط هندسی نیز موثر هستند.

۷- سپاس گذاری

از آقایان مهندس صادق طریقی ازلی و مهندس محسن رضایی و همچنین موسسه مهندسی مشاور ساحل به سبب همکاری در مراحل تحقیق و در اختیار قراردادن اطلاعات لازم تشکر و قدردانی می شود.

در این تحقیق تاثیر فشار جبهه کار 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 شده اند، 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 جبهه کار در دو حالت بدون فشار تزریق و با اعمال فشار تزریق، تاثیر فشار جبهه کار بر نشست سطح زمین مورد مطالعه دقیق قرار گرفته است. فشار جبهه کار 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 بیش تر از فشار جبهه کار، ۱ بار بیش تر از فشار جبهه کار و ۲ بار بیش تر از فشار جبهه کار مدلسازی شده است. بر اساس نتایج، در هر دو مقطع کیلومتراژ ۵+۲۰۰ و ۸+۲۰۰ قطعه ی شرقی- غربی تونل خط

۸- منابع

- [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 Shield in Heterogeneous Soft Soils. In Nego, & Ferreira (Ed.), *Proceedings of the World Tunnel Congress'98 on Tunnels and Metropolises* (pp. 215-218). Sao Paulo, 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\(1108\)](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\(1148\)](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\(131\)](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., Iwasaki, 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. Ozdemir (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] Unlutep, 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>.

بررسی تاثیر فشار جبهه کار بر نشست سطح زمین در تونلسازی مکانیزه در زمین نرم - تونل شرقی غربی خط ۷ متروی تهران: ص ۵۷ - ۶۸

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

Archive of SID