Archive of SID

دومین کنفرانس ملی مهندسی ژئوتکنیک ایران
کرمانشاه، ۹ و ۱۰ مهر ماه ۱۳۹۳

مدلسازی عددی سه بعدی نشست سطح زمین تحت تاثیر حفاری EPB-TBM در زمین نرم

حامد کریم نیا[۱]، حسین میرزائی نصیرآباد[۲]، شکرالله زارع[۳]

۱- کارشناس ارشد استخراج معدن، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه شاهرود

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

hamedkarimnia@yahoo.com

خلاصه

بررسی نشست سطح زمین تحت تاثیر حفاری تونل‌های شهری توسط دستگاه تعادل فشار زمین (EPB) یکی از فاکتورهای بسیار مهم بخصوص در حفاری تونل‌های کم‌عمق می باشد. در این مقاله به دلیل اهمیت موضوع عبور از بافت فرسوده شهری و تقلیل خسارات وارده، محدوده ما بین ایستگاه‌های شماره ۱۱ و ۱۲ خط یک قطار شهری تبریز که دارای بافت فرسوده بوده و شامل سازه‌هائی با قدمت زیاد و عدم استحکام کافی می باشد توسط نرم‌افزار المان محدود PLAXIS 3D Tunnel مورد مطالعه و تحقیق قرار گرفته است. با توجه به وجود سازه‌های خطرناک و با درجه اهمیت زیاد در دو مقطع مسیر، بررسی نشست ها در این دو مقطع صورت گرفته است. نتایج نشان می دهد که پس از حفر تونل ها میزان نشست سطح زمین و ساختمان‌ها بیش از مقدار مجاز نشست در مناطق شهری بوده و نیاز است که فرایندهای کنترلی نشست در این مقاطع صورت بگیرد.

کلمات کلیدی: نشست سطح زمین، دستگاه تعادل فشار زمین، مدلسازی عددی، مقاطع بحرانی، تونل دوقلو

۱. مقدمه

احداث تونل در زیر مناطق شهری به سادگی احداث در فضاهای غیر مسکونی و غیر شهری نیست. هر پروژه‌ای که در مناطق شهری انجام می شود، با موانع و مشکلاتی روبرو می شود که یکی از این محدودیت‌ها مسئله نشست سطح زمین حین حفاری تونل می باشد. با توجه به اهمیت موضوع نشست در مناطق شهری، در چند دهه اخیر استفاده از سپرهای متعادل کننده فشار زمین برای حفاری تونل‌ها در مناطق شهری به دلایل زیاد مانند کاهش نشست های ایجاد شده، سرعت حفاری بالا و ایمنی به یک روش متداول تبدیل شده است. از سال ۱۹۵۶، روش‌های تجربی، تحلیلی و آزمایشگاهی متعددی به منظور تخمین نشست ناشی از تونلسازی توسط محققین مختلف ارائه شده است. در این تحلیل‌ها پارامترهای فراوانی بحث شده، ولی در اکثر آن ها تاثیر پارامترهای اجرایی نظیر گام پیشروی، فشار تزریق، فشار سینه‌کار، بار ساختمان‌ها و ... بر روی نشست سطح زمین در نظر گرفته نشده است. با توجه به این محدودیت های روش های تحلیلی و تجربی، خوشبختانه روش های عددی در طی چند دهه گذشته توسعه زیادی یافته‌اند و قادر به حل تقریبی این گونه مسائل با شرایط پیچیده می باشند. روش های عددی مختلفی برای ارزیابی نشست سطح زمین و ساختمان‌ها در اثر حفاری تونل وجود دارد. دولزالوا (۲۰۰۲) با در نظر گرفتن رفتار الاستیک خطی- کاملا پلاستیک برای مصالح، با استفاده از نرم افزار CRISP به بررسی نشست سطح زمین پرداخت [۱]. اوچاک (۲۰۰۹) نشست های کوتاه مدت سطح و تاثیرات آن ها بر روی ساختمان‌ها را برای تونل‌های دوقلوی متروی استانبول با استفاده از روش اجزاء محدود بررسی کرد [۲]. ماحموت اوغلو (۲۰۱۰) با استفاده از روش اجزاء محدود فاکتورهای مختلفی را بر روی نشست تونل‌های دوقلوی مترو استانبول که با استفاده از دستگاه EPB حفاری می شوند، مورد بررسی قرار داد [۳]. چن (۲۰۱۰) فشار آب، نشست‌های سطح زمین و زیر سطح زمین و جابجایی های افقی در طول ساخت تونل‌های موازی دوقلو مترو Hangzhou در چین را مورد مطالعه قرار داد [۴]. از جمله روش های عددی، می توان به روش المان محدود اشاره کرد که در این تحقیق بر اساس این روش و با استفاده از نرم‌افزار PLAXIS 3D Tunnel به بررسی وضعیت نشست سطح زمین در اثر حفاری تونل‌های دوقلوی خط یک قطار شهری تبریز در دو مقطع بحرانی پرداخته شده است.

---

[۱] کارشناس ارشد استخراج معدن
[۲] استادیار دانشگاه شاهرود
[۳] استادیار دانشگاه شاهرود

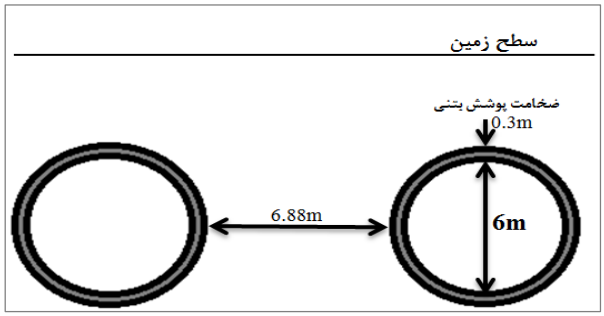
www.SID.ir

Archive of SID

۲. مشخصات زمین شناسی و معرفی پروژه خط یک متروی تبریز

پروژه در شهر تبریز، مرکز استان آذربایجان شرقی قرار دارد. به طور کلی شهر تبریز بر روی رسوبات دوره‌ای مختلف دوران های سوم و چهارم زمین شناسی بنا شده است. این رسوبات شامل سنگ رس، ماسه سنگ، کنگلومرا، توف، ژیپس و رسوبات آبرفتی از قبیل رس، لای، ماسه، شن و قلوه سنگ می باشد. به علاوه واریزه‌های کوه پایه‌ای و همچنین لایه‌هایی از خاکریزهای دستی در قسمت هایی از شهر دیده می شوند [۵]. خط یک قطار شهری تبریز از لحاظ فیزیکی بصورت هم‌سطح، نیمه‌عمیق، عمیق و در ارتفاع طراحی شده است. در محدوده مورد مطالعه در این مقاله که حد فاصل ایستگاه ۱۱ تا ۱۲ می باشد، عملیات حفاری تونل‌ها با استفاده از دو دستگاه TBM-EPB انجام می پذیرد. قطر حفاری تونل‌ها ۶/۸۸ متر و قطر خارجی سگمنت‌ها ۶/۶ متر و قطر داخلی تونل‌ها ۶ متر است که دارای ۱۴ سانتیمتر فاصله بین قطر حفاری و قطر خارجی سگمنت‌ها است که بوسیله بتن تزریقی پر می شود. شکل ۱ نشان دهنده شمای کلی مسیرهای ۴ گانه قطار شهری تبریز و محدوده مورد مطالعه می باشد. همچنین مشخصات هندسی مقطع تونل‌ها در شکل ۲ نشان داده شده است [۶].

شکل ۱- طرح خطوط مترو تبریز و محدوده مورد مطالعه[٦]



شکل(۲): مشخصات هندسی تونل‌های خط یک متروی تبریز

۱.۲. معرفی مقاطع بحرانی مورد مطالعه

در محدوده مورد مطالعه در این تحقیق، ۵۰ ساختمان بطور مستقیم یا غیر مستقیم تحت تاثیر حفاری تونل قرار دارند. بعد از جمع‌آوری داده‌های مورد نیاز و تحلیل آن‌ها، مشخص شد که در دو مقطع از مسیر ساختمان‌های مربوط به میراث فرهنگی تحت تاثیر حفاری قرار خواهند گرفت. به دلیل قدمت زیاد و اهمیت بالای این سازه‌ها، در این تحقیق بررسی نشست سطح زمین و این ساختمان‌ها با استفاده از نرم‌افزار PLAXIS 3D Tunnel مد نظر قرار گرفته شده است. شکل ۳ محدوده مورد مطالعه و ساختمان‌های دو مقطع را نشان می‌دهد. همچنین موقعیت و محل گمانه‌های حفر شده جهت شناسایی لایه‌های زیرین نسبت به راستای تونل‌ها در شکل ۳ نشان داده شده است.

www.SID.ir

Archive of SID

شکل (۳): ساختمان‌ها و مقاطع مورد بررسی

۳. فرایند مدلسازی عددی

روش های عددی با لحاظ کردن خواص ژئومکانیکی مواد و هم‌چنین شرایط مرزی مسئله و دستگاه حفاری (فشار تزریق و فشار سینه‌کار) و قابلیت شبیه-سازی هندسه‌های مختلف و همچنین حل مسائل غیرخطی، منجر به جواب های نزدیک به واقعیت می شود که برخلاف روش های تحلیلی و تجربی امکان تطبیق دادن اجزاء مختلف مسائل اندرکنش در یک تحلیل را فراهم می‌آورد.

PLAXIS 3D Tunnel، یک بسته نرم‌افزاری اجزاء محدود می باشد که به منظور تجزیه و تحلیل تغییر شکل و پایداری در پروژه‌های مهندسی ژئوتکنیک ابداع شده است [۷]. این نرم افزار قابلیت مدلسازی خاک، عضو سازه‌ای، اندرکنش بین خاک و سازه و تحلیل سازه‌های ژئوتکنیکی پیچیده را دارا می باشد. در این مقاله به منظور در نظر گرفتن رفتار پلاستیک مصالح از میان مدل‌های رفتاری در نرم‌افزار، از مدل رفتاری خاک سخت شونده برای مدلسازی رفتار خاک استفاده شده است. اندازه طول و عرض بهینه مدل (فاصله از مرزهای مدل) با ساخت چند مدل با طول و عرض مختلف و تحلیل تاثیر آن‌ها بر روی نتایج به دست آمده است. در جدول ۱ نتایج حاصل از تحلیل حساسیت انجام گرفته در راستای طولی با توجه به فاصله ابتدا و انتهای ساختمان‌ها از مرزهای مدل بر اساس ضریبی از قطر تونل (D) ارائه شده است. بر اساس این نتایج، میزان نشست تقریبا در فاصله ۳ برابر قطر تونل از مقطع ابتدایی و انتهایی ساختمان‌ها ایستا می شود (α نسبت نشست به نشست ماکزیمم در مدل‌های ساخته شده می باشد).

جدول ۱- تحلیل حساسیت به منظور بدست آوردن ابعاد مدل بهینه

تحلیل حساسیت	S(mm)	S_{max}(mm)	$\alpha = \frac{S}{S_{max}}$
۰/۵D	۷/۸۳	۲۱/۷۱	۰/۳۶
D	۶/۲۰	۲۱/۷۱	۰/۲۹
۱/۵D	۴/۳۲	۲۱/۷۱	۰/۲
۲D	۲/۵۶	۲۱/۷۱	۰/۱۲
۲/۵D	۱/۰۲	۲۱/۷۱	۰/۰۵
۳D	۰/۲۳	۲۱/۷۱	۰/۰۱۸
۳/۵D	۰/۰۰۴۲	۲۱/۷۱	۰

جابجایی مرزهای کناری در جهت قائم آزاد بوده و در جهت افقی ثابت می شوند و مرز پایین نیز در همه جهات ثابت و مرز بالایی آزاد گذاشته می‌شود. با توجه به اینکه محدوده مورد مطالعه در این تحقیق از زیر مناطق مسکونی عبور می کند، تنش قائم بر اساس بار ناشی از سازه‌های سطحی به صورت گسترده در نظر گرفته شده است. بر اساس استاندارد (ASHTO 2002) برای ساختمان‌ها به ازای هر طبقه، ۱۰ کیلونیوتن بر متر مربع بار در نظر گرفته شده است. پارامترهای ژئوتکنیکی ۲ مقطع مورد مطالعه بر اساس اطلاعات گمانه‌های حفاری شده در این مقاطع در جدول ۲ ارائه شده است. لازم به ذکر است که سطح آب زیرزمینی در محل این دو مقطع به ترتیب در عمق ۹/۴ و ۸/۴ متری از سطح زمین قرار دارد.

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ۲- پارامترهای ژئوتکنیکی گمانه های مقاطع ۱ و ۲ [۵]

شماره مقطع	عمق (متر)	نوع خاک	γ_{sat} (kN/m^3)	γ_{dry} (kN/m^3)	ϕ' (°)	C (kN/m^2)	E_{50} (kN/m^2)	ν
مقطع ۱	۰-۱۵	Clay	۱۸	۱۵	۲۵	۲۵	۹۰۰۰	۰/۴
	۱۵-۳۱	Sand	۲۱	۱۸	۳۲	۰	۲۴۰۰۰	۰/۳۳
	۳۱-۴۰	Clay	۱۸	۱۵	۲۷	۲۰	۱۰۰۰۰	۰/۴
مقطع ۲	۰-۲/۷	Clay	۱۶	۱۵	۲۵	۲۵	۸۵۰۰	۰/۴
	۲/۷-۷/۷	Silty sand	۲۱	۱۸	۲۹	۵	۲۰۰۰۰	۰/۳۵
	۷/۷-۱۸/۶۰	Sand	۱۹	۱۸	۳۵	۰	۱۵۰۰۰	۰/۳
	۱۸/۶۰-۳۱	Silty sand	۲۱	۲۰	۳۲	۵	۲۵۰۰۰	۰/۳۵
	۳۱-۴۰	Sand	۲۰	۱۸/۷	۳۵	۰	۲۴۰۰۰	۰/۳

خصوصیات مکانیکی پوشش بتنی و المان سپر دستگاه حفاری سپر دستگاه حفاری مورد استفاده در متروی تبریز جهت مدلسازی در جدول ۳ ارائه شده است.

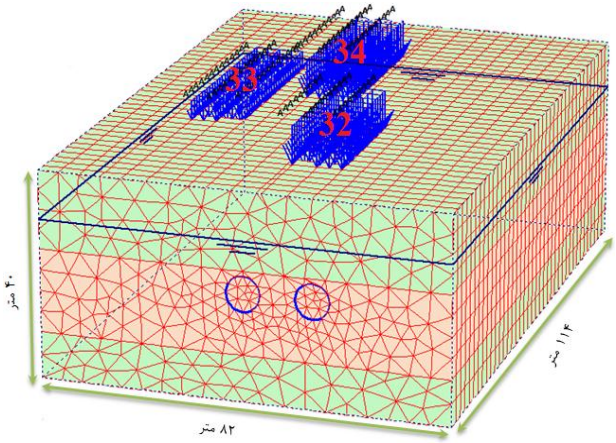
عاملی که باعث شد این دو مقطع برای مدلسازی مد نظر قرار بگیرند، وجود سازه های خطرناک و با درجه اهمیت زیاد (ساختمان‌های مربوط به میراث فرهنگی) در این دو مقطع بود.

جدول ۳- خصوصیات پوشش بتنی و سپر دستگاه حفاری خط یک متروی تبریز

	سختی محوری EA(kN/m)	سختی خمشی EI(kNm²/m)	نوع المان	ضخامت معادل d(m)	وزن حجمی W(kN/m/m)	ضریب پواسون (υ)
پوشش بتنی	۱/۹۶×۱۰⁶	۲۳۴۰۰	Elastic	۰/۳	۷/۵	۰/۲
سپر	۱×۱۰⁷	۵۰۰۰۰	Elastic	۰/۲۴۵	۲۸/۸	۰/۲

۱.۳. مدل عددی ساخته شده برای مقطع ۱

طول، عرض و ارتفاع هندسه مدل برای این مقطع با توجه به تحلیل حساسیت صورت گرفته به ترتیب برابر ۱۱۴ متر، ۸۲ متر و ۴۰ متر و نوع مش بندی نیز متوسط در نظر گرفته شده است. همچنین برای هر یک از تونل‌ها با توجه به تحلیل حساسیت انجام شده، ۳۸ فاز حفاری در نظر گرفته شده که در مجموع برای کل مدل ۷۶ فاز حفاری تا انتهای مدل صورت گرفته است. وضعیت لایه بندی، ابعاد هندسی مدل سه بعدی اجزاء محدود، نحوه مش بندی و وضعیت قرارگیری ساختمان های این مقطع همراه با موقعیت تونل ها در مدل ساخته شده در شکل ۴ نشان داده شده است.



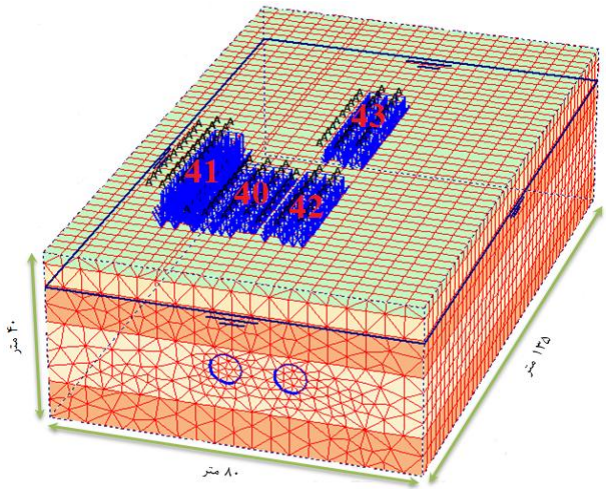
شکل ٤- مدل سه بعدی اجزاء محدود و موقعیت قرارگیری ساختمان‌های مقطع ۱

www.SID.ir

Archive of SID

۲.۳. مدل عددی ساخته شده برای مقطع ۲

طول، عرض و ارتفاع هندسه مدل برای این مقطع نیز با توجه به تحلیل حساسیت صورت گرفته به ترتیب ۱۳۵ متر، ۸۰ متر و ۴۰ متر و نوع مش بندی متوسط در نظر گرفته شده است. همچنین برای هر یک از تونل‌ها با توجه به تحلیل حساسیت انجام شده، ۴۵ فاز حفاری در نظر گرفته شده که در مجموع برای کل مدل ۹۰ فاز حفاری تا انتهای مدل صورت گرفته است وضعیت لایه بندی، ابعاد هندسی مدل سه بعدی اجزاء محدود، نحوه مش بندی و وضعیت قرارگیری ساختمان های این مقطع همراه با موقعیت تونل ها در مدل ساخته شده در شکل ۵ نشان داده شده است.



شکل ۵- مدل سه بعدی اجزاء محدود و موقعیت قرارگیری ساختمان‌های مقطع ۲

لازم به توضیح است که هر فاز حفاری بر اساس طول سیستم نگهداری در نظر گرفته شده است. با توجه به اینکه طول سیستم نگهداری به کار برده شده در خط یک متروی تبریز ۱/۵ متر می باشد، هر فاز حفاری نیز به اندازه ۱/۵ متر در مدل در نظر گرفته شده است.

مشخصات هندسی مدل‌های ساخته شده و تاثیر بار هر یک از ساختمان‌های دو مقطع بر اساس استاندارد ASHTO به ترتیب در جداول ۴ و ۵ ارائه شده است.

جدول ٤- مشخصات هندسی مدل اجزاء محدود مقاطع مورد بررسی

شماره مقطع	روباره(متر)	عمق کف تونل(متر)	عرض مدل(متر)	ارتفاع مدل(متر)	طول مدل(متر)	تعداد المان‌ها	تعداد فازها
۱	۱۵/۸	۲۲/۶۸	۸۲	۴۰	۱۱۴	۱۰۴۷۹	۷۶
۲	۱۷/۹	۲۴/۷۸	۸۰	۴۰	۱۳۵	۶۳۰۲	۹۰

جدول ۵- مشخصات بار و پی ساختمان‌های مقاطع مورد بررسی

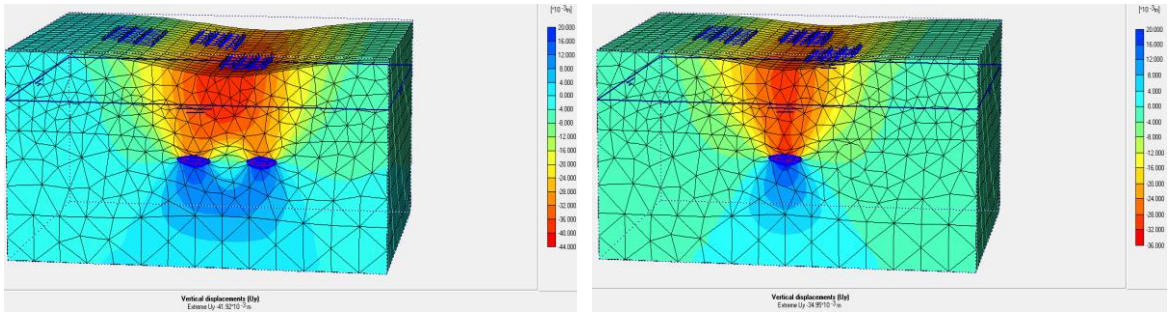
شماره ساختمان	بار گسترده (KN)
۳۲	۲۰
۳۳	۱۰
۳۴	۲۰
۴۰	۱۰
۴۱	۲۰
۴۲	۱۰
۴۳	۱۰

www.SID.ir

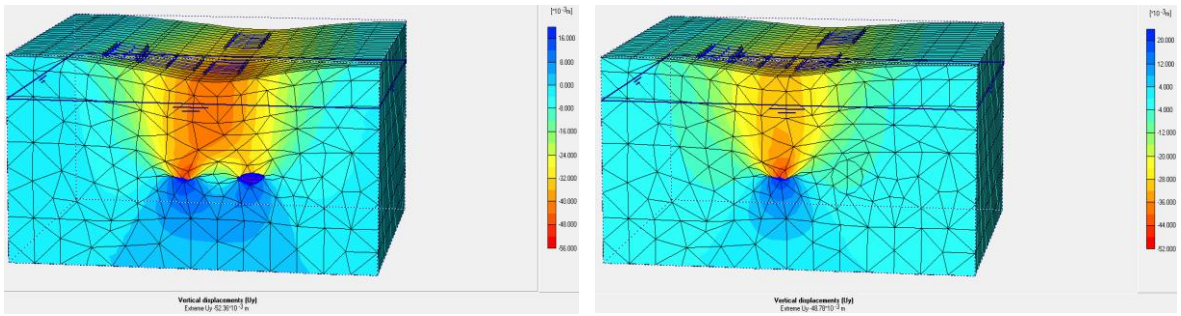
Archive of SID

۴. تحلیل نشست سطح زمین بر اساس مدل های ساخته شده

برای تحلیل نتایج عددی نشست توسط نرم‌افزار، تمامی فازهای محاسباتی برای هر دو مقطع اجرا شده و سپر دستگاه حفاری که دارای ۱۰ متر طول می‌باشد از انتهای هر دو مدل به طور کامل خارج شده است. پروفیل نشست سطح زمین و ساختمان ها پس از حفاری تونل اول و تونل دوم تا انتهای مدل برای هر دو مقطع در شکل‌های ۶ و ۷ نشان داده شده است.



شکل ٦- جابجایی سه بعدی سطح زمین و ساختمان‌های مقطع ۱ پس از حفاری تونل اول و دوم



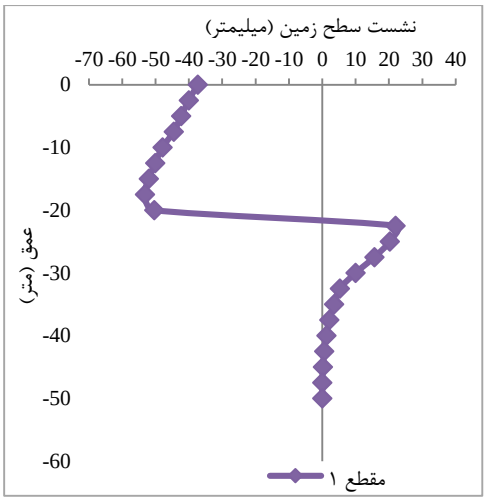
شکل ۷- جابجایی سه بعدی سطح زمین و ساختمان‌های مقطع ۲ پس از حفاری تونل اول و دوم

برای مقطع ۱، ماکزیمم نشست سطح زمین پس از حفاری تونل اول ۳۰ میلیمتر و پس از حفاری تونل دوم ۳۷/۳۵ میلیمتر می باشد. همانطور که در کانتورهای نشست مقطع ۱ مشاهده می شود، ماکزیمم جابجایی قائم سطح زمین پس از حفر تونل اول، دقیقا روی محور تونل اول و پس از حفر تونل دوم این مقدار مابین دو تونل اتفاق افتاده است. در مقطع ۲ نیز، ماکزیمم نشست سطح زمین پس از حفاری تونل اول ۲۴/۱۲ میلیمتر و پس از حفاری تونل دوم ۴۰ میلیمتر می باشد. همانطور که در کانتورهای نشست مقطع ۲ مشاهده می شود، ماکزیمم جابجایی قائم سطح زمین پس از حفر تونل اول، دقیقا روی محور تونل اول و پس از حفر تونل دوم این مقدار مابین دو تونل و نزدیک تونل اول (تونل سمت چپ) اتفاق افتاده است.

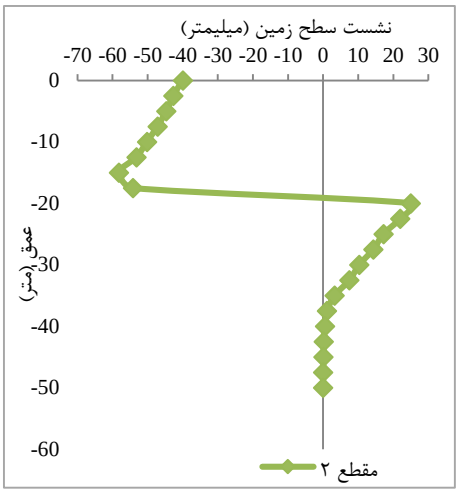
منحنی‌های نشست سطح زمین نسبت به عمق پس از حفاری تونل ها برای دو مقطع مورد مطالعه در اشکال ۸ و ۹ ارائه شده است. همان‌گونه که در این منحنی‌ها دیده می شود، از سطح زمین تا عمق مرکز تونل، جابجایی‌ها به صورت نشست بوده و بیشترین میزان نشست برای مقطع ۱ در عمق ۱۷/۵ متری و در دیواره سمت راست تونل اول و برای مقطع ۲ در عمق ۱۷/۹ متری و در تاج تونل اول اتفاق می‌افتد. از عمق مرکز تونل به پایین جابجایی‌ها به صورت بالا آمدگی نمود پیدا کرده، که حداکثر مقدار آن برای مقطع ۱ در عمق ۲۲/۵ متری و کف تونل اول و برای مقطع ۲ در عمق ۲۵ متری و کف تونل اول اتفاق افتاده است. بنابراین نقاط دیواره، تاج و کف تونل بیشترین میزان جابجایی‌ها را در مقاطع مورد بررسی داشته‌اند.

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۸- منحنی نشست سطح زمین نسبت به عمق برای مقطع ۱



شکل ۹- منحنی نشست سطح زمین نسبت به عمق برای مقطع ۲

۵. نتیجه گیری

در این تحقیق با استفاده از نرم‌افزار PLAXIS 3D Tunnel به بررسی وضعیت نشست سطح زمین در محدوده ایستگاه‌های ۱۱ و ۱۲ تونل‌های دوقلو قطار شهری تبریز پرداخته شد. بررسی نشست در دو مقطع از مسیر به دلیل وجود سازه‌های خطرناک و با درجه اهمیت زیاد انجام گرفت. نظر به اهمیت بروز نشست‌های ناشی از حفر تونل در مناطق شهری، شرکت مشاوره هلندی آرته به عنوان مسئول مطالعات مرحله اول متروی تبریز، مقادیر نشست مجاز را در زیر ساختمان‌ها ۲۰ میلیمتر برای تراز هشداردهنده و ۴۰ میلیمتر برای تراز اعلان خطر تعیین کرده است. با توجه به بررسی‌های صورت گرفته، میزان نشست در هر دو مقطع پس از حفاری تونل اول و تونل دوم، بیشتر از مقدار مجاز تراز اعلان خطر می باشد. بر اساس این نتایج، اتخاذ تدابیر و راه کارهایی جهت جلوگیری از این تغییر مکان‌ها در این مقاطع ضروری به نظر می رسد و انجام فرایندهای کنترلی نشست مانند تزریق در این مقاطع باید صورت بگیرد. همچنین رسم منحنی‌های نشست سطح زمین نسبت به عمق نشان داد که از سطح زمین تا عمق مرکز تونل، جابجایی ها به صورت نشست بوده و از عمق مرکز تونل به پایین جابجایی ها به صورت بالا آمدگی نمود پیدا کرده است.

۶. مراجع

1. Franzius, J.N., *Behavior of building due to tunnel induced settlement*. PHD thesis, Imperial College of Science Technology and Medicine,2003.

2. Ocak, I., *Environmental effects of tunnel excavation in soft and shallow ground with EPBM: the case of Istanbul*. Environ Earth Sci, 2009: p.347-352.

3. Mahmutoglu, Y., *Surface subsidence induced by twin subway tunneling in soft ground conditions in Istanbul*. Bull Eng Geol Environ, 2010.

4. R.P.Chen, J.Z., W.Liu,X.W.Tang, *Ground movement induced by parallel EPB tunnels in silty soils*. Tunneling and Underground Technology,2010.

۵. سازمان قطار شهری تبریز، گزارش نتایج بررسی‌های زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی خط یک قطار شهری تبریز، ۱۳۸۴

۶. شرکت مهندسین مشاور گنو، گزارش مطالعات ژئوتکنیک خط یک قطار شهری تبریز، ۱۳۸۷

7. R.B.J.Brinkgreve & P.A.Vermer,*PLAXIS 3D TUNNEL user manual*, TOKYO. A.A.Balkema,2001.

www.SID.ir