Archive of SID

مجله انجمن زمین‌شناسی مهندسی ایران
پاییز و زمستان ۱۳۹٤، جلد هشتم، شماره ۳ و ٤، صفحه ۳۱ تا٤٦

مخاطرات حفاری مکانیزه تونل در بافت فرسوده شهری

قدرت برزگری*[۱]

تاریخ دریافت: ۹۳/۰٤/۰۱ تاریخ پذیرش: ۹۵/۰٤/۳۰

چکیده

ایجاد فضاهای زیرزمینی و حفاری‌های تونل در زیر مناطق شهری که عمدتاً دارای سازه‌هایی متراکم با بافت فرسوده و غیرمهندسی هستند حتی علیرغم استفاده از ماشین‌آلات حفاری پیشرفته با چالش‌هایی همراه است. در این مقاله، مخاطراتی که در حفاری مکانیزه تونل‌ها با استفاده از ماشین حفار نوع سپر تعادلی در محیط‌های شهری باعث آسیب‌پذیری سازه‌ها و ساختمان‌های مجاور می‌شوند مورد بررسی قرار گرفته‌اند.
خط یک متروی تبریز به طول ۱۷/۲ کیلومتر از میدان ائل‌گلی آغاز و پس از عبور از مرکز و بافت فرسوده شهری در کوی لاله خاتمه می‌یابد. حدود ۸ کیلومتر از مسیر به صورت تونل عمیق با دو دستگاه ماشین حفار از نوع سپر تعادلی در حال حفاری می‌باشد. بررسی مخاطرات حفاری در بافت شهری نشان می‌دهد ایجاد ترک‌های بزرگ و جزئی در ساختمان‌ها به ترتیب حدود ۱۳ و ۳۱ درصد را بخود اختصاص داده و نفوذ فوم حفاری و دوغاب تزریقی از طریق حفرات مدفون با فروانی ۱۱ درصد، از آسیب‌هایی هستند که در زمان حفاری با آنها مواجه شده است. وجود حفره‌های مدفون در شهرهای تاریخی و با سابقه زلزله‌خیزی مثل تبریز از عوامل تشدید کننده آسیب‌های حفاری تونل می‌باشد. بر اساس نتایج ابزار دقیق، بیشترین نشست در زمان عبور ماشین حفار اتفاق افتاده و مقدار آن با عمق افزایش پیدا می‌کند. نتایج این مقاله می‌تواند در پیش‌بینی و کاهش مخاطرات حفاری سایر خطوط متروی تبریز و یا شهرهای مشابه نقش مؤثری داشته باشد.

کلید واژه‌ها: *تونل‌های شهری، مخاطرات، حفاری مکانیزه، متروی تبریز*

۱. استادیار گروه علوم زمین، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز gbarzegari@tabrizu.ac.ir
* مسئول مکاتبات

www.SID.ir

Archive of SID

۱. مقدمه

در طول دهه گذشته، صنعت تونل‌سازی در ایران توسعه چشمگیری داشته است و استفاده از حفاری مکانیزه بویژه از نوع سپر تعادلی (Earth Pressure Balance TBM) با توجه به قابلیت‌های آن، در محیط‌های شهری و حتی در زیر مناطق مسکونی با بافت فرسوده متداول شده است. با توجه به تراکم بیشتر و ساخت و ساز غیر اصولی در بافت‌های فرسوده و قدیمی کلانشهرها، امکان استفاده از فضاهای زیرزمینی با ریسک پایین از جمله زیر خیابان‌ها و بزرگراه‌ها در تمام طول مسیر متروها وجود نداشته و عبور از زیر سازه‌ها و مناطق مسکونی با بافت فرسوده اجتناب‌ناپذیر است.

حفاری تونل در زمین‌های نرم ممکن است با نشست سطح زمین همراه باشد و موجب آسیب‌دیدگی سازه‌های مجاور گردد مگر اینکه آنالیز ریسک با دقت بالا انجام شده و تمهیدات نگهداری مناسب برای آنها اندیشیده شود. این یکی از مسائل اساسی و مهم در حفاری محیط‌های شهری می‌باشد، جایی که ممکن است بیشتر از صدها ساختمان در مسیر تونل مورد حفاری قرار گرفته باشد (Julie, 2014).

در سال‌های اخیر همزمان با افزایش رشد جمعیت، محدودیت فضا و مسائل زیست‌محیطی، پروژه‌های حفاری تونل‌های شهری بطور چشمگیری افزایش یافته است. فرآیند توسعه فضاهای زیرزمینی با افزایش وقایع نیز همراه بوده است از آن جمله می‌توان به واقعه کولون در آلمان در سال ۲۰۰۹ اشاره نمود که در اثر آن هزاران سند تاریخی از دست رفت (Curry, 2009).

جدول ۱. وقایع حفاری تونل در زمین‌های نرم (Lace and Anderson, 2006)

سال	درصد وقایع حفاری تونل در محیط‌های شهری (درصد)
۱۹۷۰-۱۹۷۹	۲۲
۱۹۸۰-۱۹۸۹	۳۲
۱۹۹۰-۱۹۹۹	٤٦
۲۰۰۰-۲۰۰۵	۵۳

در جدول ۱، تعداد وقایع مرتبط با حفاری‌های تونلی در چند دهه گذشته ارائه شده است که دارای روند افزایشی در سالهای اخیر می‌باشد و علت آن را می‌توان به افزایش حجم و تعداد حفارهای زیرزمینی نسبت داد.

وقایع ناگوار مختلفی که در منابع مختلف گزارش شده و یا آنهایی فقط با ترک‌هایی جزیی همراه بوده و گزارش نشده‌اند هزینه‌های اضافی را بر پروژه تحمیل کرده‌اند. برای مثال پروژه تونل بندر دوبلین ایرلند با ۳۳٤ گزارش خسارت ساختمان (تقریباً ۱ مورد از هر ۸ ساختمان)، با افزایش حدود ۳/۵ میلیون پوندی هزینه‌های انجام پروژه همراه بود (Brennan, 2007). در حالیکه هزینه انجام بررسی‌ها و اندازه‌گیری دقیق به منظور پیشگیری از آسیب‌ها، درصد خیلی کمی از پروژه‌ها را شامل می‌شود. برای مثال می‌توان به پروژه کراسریل لندن اشاره نمود که تعداد ٤۲۸ ساختمان واقع در مسیر با جزئیات کامل بررسی شده و برای ۸۹ ساختمان کنترل‌های حفاظتی در نظر گرفتند (Peterson and Black, 2001) که تاکنون بزرگترین قرارداد ابزار دقیق و کنترل در انگلستان می‌باشد (ITMSOIL, 2010). مقدار هزینه‌های اضافی وارده بر پروژه بر اساس آسیب‌های وارده را می‌توان به شرح جدول ۲ طبقه‌بندی کرد.

جدول ۲. آسیب و یا هزینه‌های وارده به سازه‌های مجاور (Eskesen et al., 2004)

رده‌بندی	مقدار (x) به میلیون یورو
ناگوار	$x>۳$
شدید	$۰/۳<x<۳$
جدی	$۰/۰۳<x<۰/۳$
کم	$۰/۰۰۳<x<۰/۰۳$
غیر مهم	$x<۰/۰۰۳$

در پروژه‌های حفاری تونل، نشست زمین و آسیب‌های ناشی از آن به بناهای فرهنگی و ساختمان‌ها تهدید جدی به شمار می‌رود. امروزه روش‌های مختلفی برای پیش‌بینی این نشست‌ها و آسیب‌های آن وجود دارد. اخیراً از مدلسازی عددی برای پیش‌بینی آسیب‌های وارده بر سازه‌های مجاور استفاده می‌شود در این رابطه (Potts and Addenbrooke,

www.SID.ir

Archive of SID

1997) استفاده از نتایج آنالیز در شرایط ساده بدون وجود سازه (green field) را محافظه‌کارانه دانسته و نشان دادند در شرایط وجود ساختمان بدلیل تأثیر صلبیت پی، از میزان نشست کاسته می‌شود.

Dimmock and Mair (2007) با مقایسه نشست‌های اندازه‌گیری شده با مقادیر پیش‌بینی شده، فاکتورهای اصلاحی را ارائه دادند. با پیشرفت مطالعات و برنامه‌های کامپیوتری از آنالیزهای سه بعدی که در آن تغییر ترک‌ها بعد از عبور ماشین حفار نیز قابل بررسی بودند توسعه یافت (Houlsby et al. 1999). بررسی میزان نشست ناشی از حفاری تونل‌های دوقلوی شهر استانبول ترکیه نشان داد که با حفاری تونل دوم، افزایش قابل ملاحظه‌ای در میزان نشست‌ها اتفاق می‌افتد (Mahmutoglu, 2010). نشست ناشی از حفاری تونل‌های تکی و دوقلو با استفاده از ماشین حفار از نوع سپر تعادلی توسط (Koukoutas and Sofianos, 2015) بررسی شده است.

مطالعه تحقیقات انجام یافته در این زمینه نشان می‌دهد در برآورد میزان ریسک ناشی از حفاری تونل در محیط‌های شهری، در اغلب موارد فقط میزان نشست‌ها و آسیب‌های ناشی از آن بر ساختمان‌ها مورد بررسی قرار گرفته می‌شود این در حالی است که در شهرهای تاریخی با بافت فرسوده شهری مثل تبریز که چندین زمین‌لرزه ویران کننده را تجربه نموده است سایر عوامل باعث آسیب به سازه‌های مجاور می‌شوند که از آن جمله می‌توان به وجود حفره‌های مدفون در زیر ساختمان‌ها اشاره نمود. بر این اساس بررسی تمامی پارامترهای دخیل در آسیب‌های ناشی از تونل‌سازی به سازه‌های مجاور و در نظر گرفتن آنها در ارزیابی ریسک امری ضروری است.

۲. مشخصات طرح مورد مطالعه

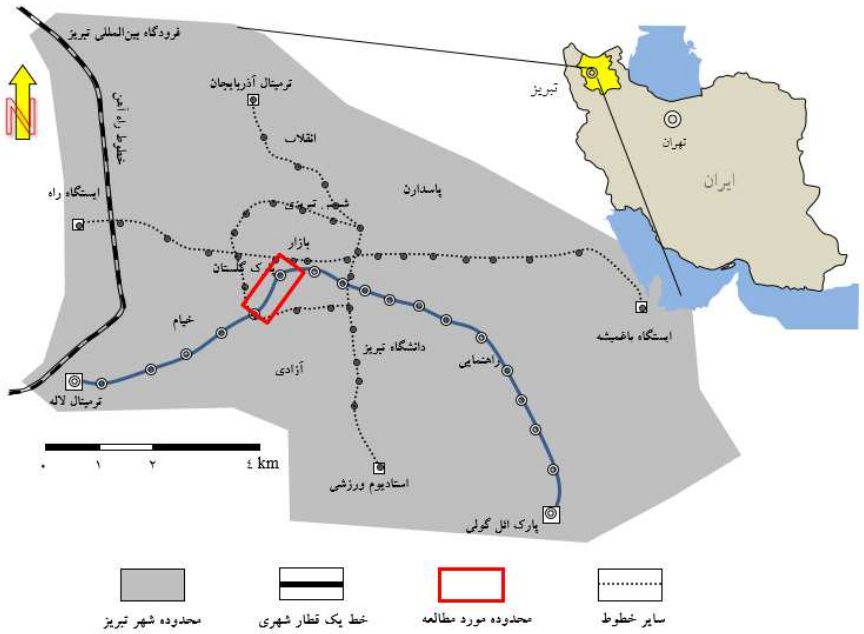
شبکه قطار شهری تبریز شامل چهار مسیر با طول کلی ۶۰ کیلومتر طراحی شده است. مسیرخط یک متروی تبریز به طول تقریبی ۱۸ کیلومتر بصورت شرقی – غربی می‌باشد. حدود ۸ کیلومتر از مسیر این خط بصورت تونل عمیق (دو رشته تونل موازی) با قطر حفاری ۶/۸۸ متر و با فاصله حدود ۶ متر از یکدیگر می‌باشد که به وسیله دو دستگاه ماشین حفار تونل از نوع سپر تعادلی در حال حفاری است. ضخامت روباره تونل‌ها از ۸ تا ۲۲ متر متغیر بوده و بیشتر مسیر در زیر سطح آب‌زیرزمینی قرار می‌گیرد. بخشی از مسیر تونل‌ها از محدوده مرکز شهر و از زیر مناطق مسکونی با بافت فرسوده شهری عبور می‌نماید. ضخامت روباره در محدوده مذکور بین ۱۲/۵ تا ۱۳/۵ متر و سطح آب‌زیرزمینی تا حدود ۷ متر بالای تاج تونل قرار دارد. در شکل ۱ جانمایی شبکه خطوط متروی تبریز و محدوده مورد مطالعه نشان داده شده است.

۳. زمین‌شناسی مهندسی طرح

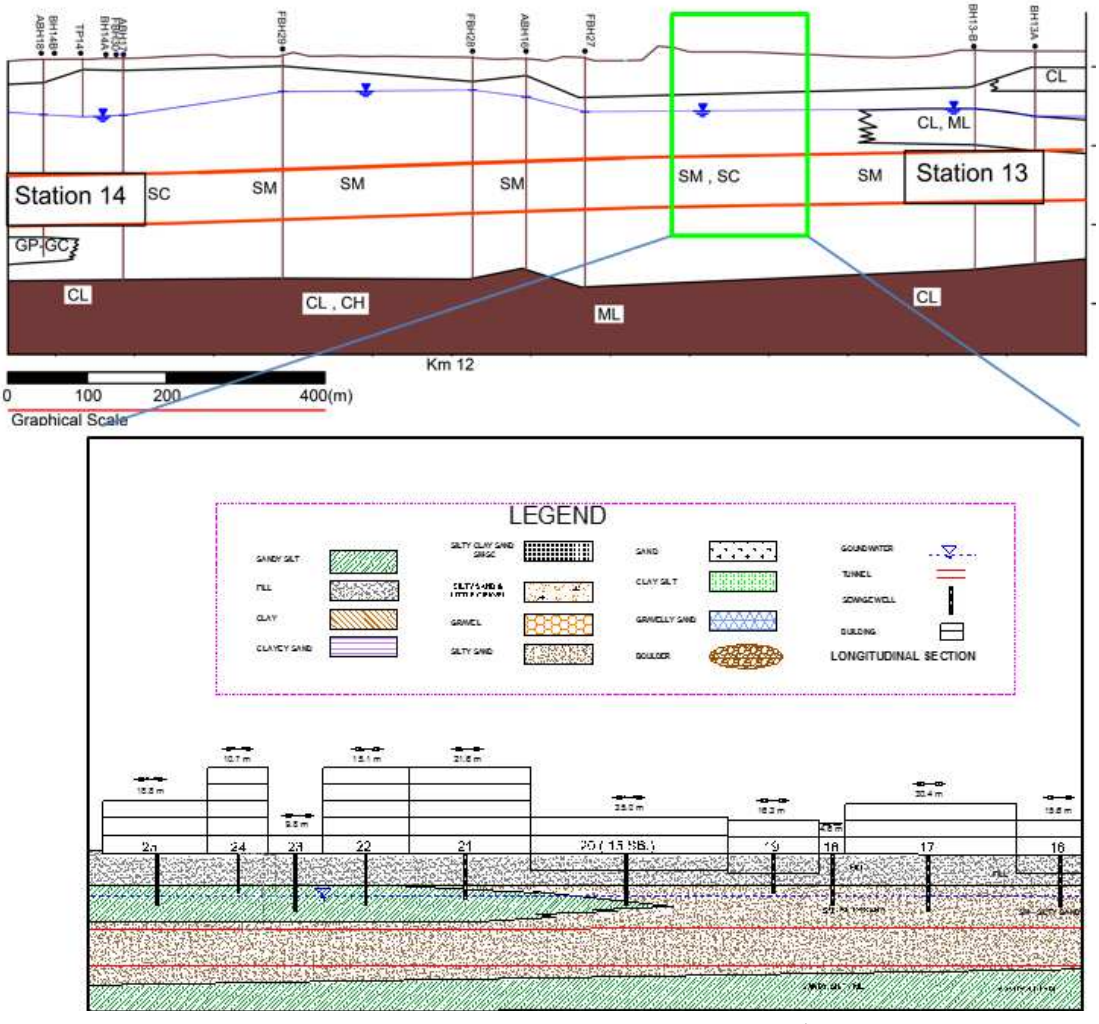
مسیر تونل از رسوبات آبرفتی تشکیل شده است. عمده‌ی رسوبات تشکیل‌دهنده‌ی مسیر بر اساس طبقه‌بندی یونیفاید، از نوع ماسه سیلتی (SM) می‌باشد. دانه‌بندی رسوبات مسیر به ترتیب فراوانی شامل SP-SM، SW-SM، SW و GP و در بعضی موارد GP-GM و GW-GM است. در برخی موارد، میان لایه‌های ریزدانه (CL و ML) و درشت‌دانه (قلوه‌سنگ و بولدر) نیز در بین سایر رسوبات وجود دارد. عمق سطح آب‌زیرزمینی در قسمت شرقی تونل زیر تراز کف تونل ولی بعد از حدود ۱/۵ کیلومتر به سمت غرب، تراز تونل تدریجاً در زیر سطح ایستابی قرار می‌گیرد بطوری که در محدوده زیر بافت فرسوده حدود ۷ متر در بالای تاج تونل قرار دارد. عدد SPT مسیر تونل در محدوده زیر بافت فرسوده بین ۱۵ تا ۵۰ تغییر می‌کند که حاکی از تراکم متوسط تا بالای خاک مورد حفاری است. در پاره‌ای از موارد لایه‌هایی با SPT پایین وجود دارد که نشان‌دهنده‌ی وجود لنزهای سست و بویژه در مناطق زیر سطح آب‌زیرزمینی دارای پتانسیل روانگرا می‌باشد. شکل ۲ نیمرخ زمین‌شناسی مسیر در محدودهٔ زیر بافت فرسوده را نشان می‌دهد.

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۱. جانمایی شبکه خطوط قطار شهری تبریز



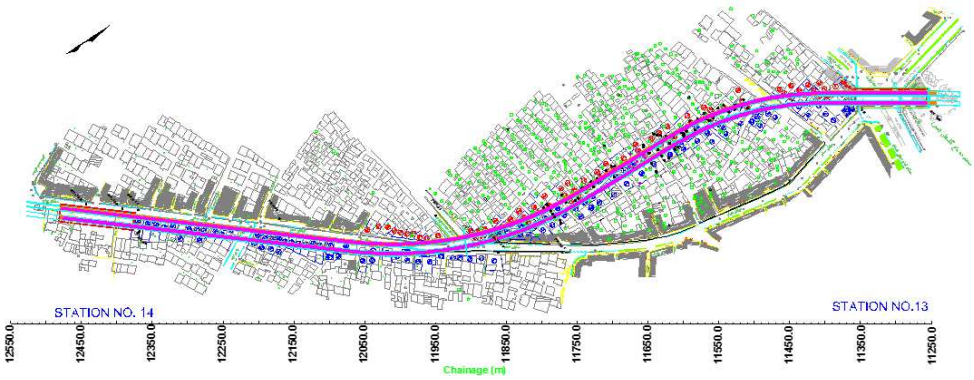
شکل ۲. نیمرخ زمین‌شناسی مسیر در محدوده مورد مطالعه

www.SID.ir

Archive of SID

٤. مخاطرات خط یک متروی تبریز در محدوده مورد مطالعه

خط یک متروی تبریز در محدوده حدفاصل بین ایستگاه ۱۳ تا ۱٤ در مرکز شهر، از زیر مناطق مسکونی با بافت فرسوده شهری عبور می‌نماید در این محدوده از مسیر، حدود ۱٦۰ ساختمان مسکونی در بالای تونل‌ها قرار دارند. شکل۳ جانمایی عمومی مسیر تونل‌ها و ساختمان‌های واقع در مسیر مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

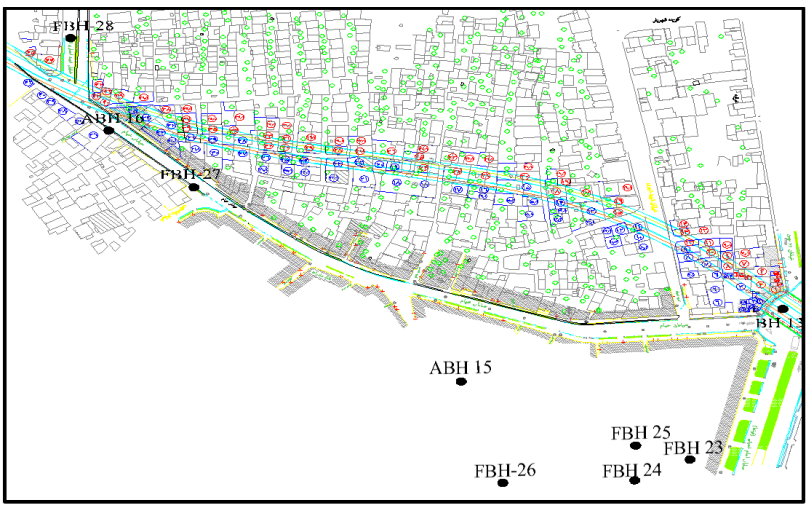


شکل۳. جانمایی محدوده مورد مطالعه در زیر مناطق مسکونی با بافت فرسوده

عمده مخاطراتی که در حین حفاری این محدوده از مسیر با آنها مواجه گردید عبارتند از:

٤-۱.عدم امکان دسترسی برای انجام مطالعات ژئوتکنیکی

یکی از دلایل عمده آسیب‌پذیری ساختمان در اثر حفاری تونل‌های مترو بویژه در محدوده زیر بافت فرسوده شهری، تراکم بیش از حد بافت ساختمان‌های مسکونی و عدم امکان دسترسی جهت حفاری گمانه‌های ماشینی و تکمیل اطلاعات زیرسطحی می‌باشد. در این شرایط برای محاسبات پارامترهای اساسی برای حفاری و راهبری ماشین حفار از جمله فشارهای تعادلی (که عامل اساسی در پایداری جبهه حفاری و تغییر شکل زمین اطراف تونل است) و تزریق دوغاب پشت لاینینگ (مؤثر در نشست‌های ایجاد شده)، از گمانه‌هایی که در فاصله‌های نسبتاً دورتری (در امتداد خیابان خیام) حفاری شده‌اند استفاده شده است. در این‌صورت عدم اطمینان از تغییرات سطح آب‌زیرزمینی و شرایط زمین‌شناسی مسیر ممکن است خطرات جدی را بدنبال داشته باشد. در شکل ٤ موقعیت گمانه‌های حفاری شده و فاصله آنها از مسیر تونل‌ها نشان داده شده است.



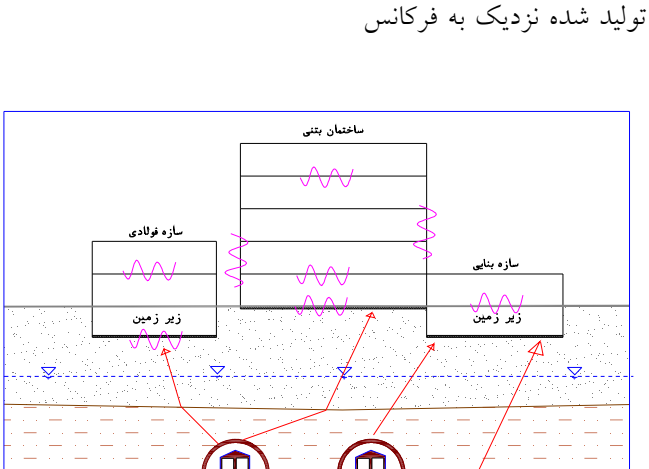
شکل ٤. پلان گمانه ها و فاصله آنها با مسیر تونل ها در زیر مناطق مسکونی با بافت فرسوده شهری

www.SID.ir

Archive of SID

٤-۱. لرزش‌ها و ارتعاشات

تأثیر امواج ناشی از فعالیت ماشین حفاری و عبور و مرور لوکوموتیوها و انعکاس آنها در مرز بین لایه‌ها، با توجه به بزرگی و طول موجی که دارند بر روی سازه‌ها بسیار پیچیده بود و در بعضی از موارد بر اساس سفتی لایه‌های خاک ممکن است تضعیف و یا تشدید شوند (Eitzenberger, 2008). رزونانس یا تشدید عبارت است از تمایل سیستم به نوسان با بیشینه دامنه در فرکانس‌هایی خاص که به آنها فرکانس تشدید می‌گویند. در چنین فرکانس‌هایی انرژی ارتعاشی در جسم ذخیره می‌شود و در نتیجه نیرویی کوچک و متناوب می‌تواند باعث حرکت نوسانی با دامنه بزرگ شود. پدیده تشدید زمانی اتفاق می‌افتد که فرکانس امواج تولید شده نزدیک به فرکانس اجزای مختلف سازه‌ها (سقف، کف، تیرها، دیوارها) باشد. این پدیده در سطح زمین توسط افراد بصورت لرزش‌های نسبتاً محسوس و یا بصورت صدا احساس می‌گردد. این پدیده بویژه در ساختمان‌های چوبی و المان‌های با رفتار شلاقی همانند تیرهای افقی، عمودی و راه‌پله ها بیشتر مشاهده می‌شود و یکی از عوامل آسیب های ناشی از حفاری تونل در مناطق شهری می‌باشد. در شکل ۵ مکانسیم تولید امواج در اثر حرکت لوکوموتیو و تأثیر آن در اجزای سازه‌ای نشان داده شده است. شکل ٦، نمونه‌ای از موارد مورد مشاهده در سمیر مورد مطالعه را نشان می‌دهد که در آن سرامیک کف واقع بر روی طبقه زیرزمین بلند شده بود.



شکل ۵. شماتیکی از تأثیر امواج و ارتعاشات ناشی از ماشین حفار در نقاط مختلف سازه

شکل ٦. بالازدگی سرامیک کف طبقه همکف بالای زیرزمین در اثر لرزش (سمت چپ) و سقف طبقه زیرزمین آن (سمت راست)

www.SID.ir

Archive of SID

یکی دیگر از عوامل ایجاد کننده و یا تشدید لرزش‌های ناشی از حفاری مکانیزه با استفاده از ماشین‌های سپر تعادلی بویژه در شرایط برخورد با قطعات سنگی درشت دانه در اندازه‌های بولدر و بلوک‌های سنگی است. این قطعات سنگی معمولاً بصورت پراکنده در بین رسوبات آبرفتی وجود داشته و در حین حفاری در داخل محفظه حفاری ماشین و یا جلوی کله حفار جمع می‌شوند و موجب افزایش گشتاور چرخش کله حفار، کاهش میزان نفوذ ماشین حفار و افزایش لرزش‌ها و ارتعاشات می‌شوند. تأثیر این لرزش‌ها در افزایش میزان نشست ساختمان‌های مجاور بویژه در زمین‌های ماسه‌ای با تراکم پایین بسیار بیشتر است. در شکل ۷ تصاویری از نشست‌های ناشی از تراکم خاک‌های درشت‌دانه ماسه‌ای نشان داده شده است.

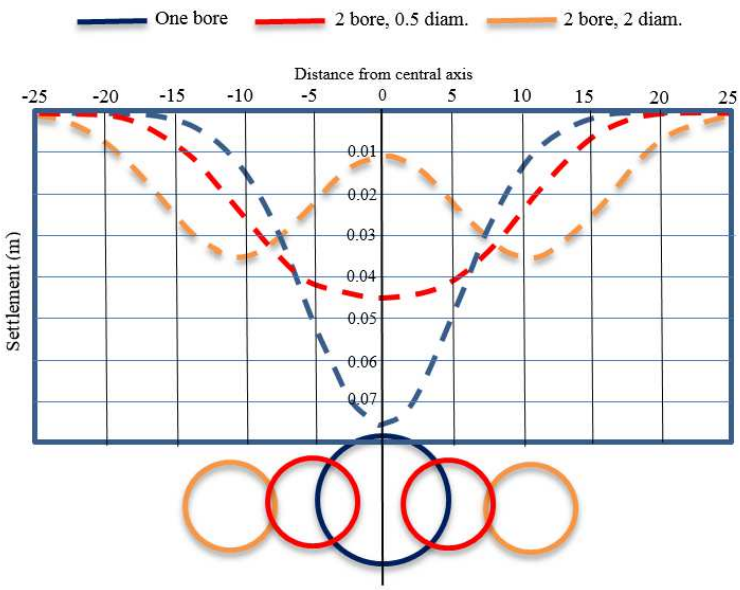
شکل ۷. تراکم خاک‌های درشت‌دانه در اثر لرزش ناشی از ماشین‌حفار و نشست ناشی از آن در باغچه (سمت چپ) و زیر دیوار ساختمان (سمت راست)

٤-٢. دوقلو بودن تونل‌ها

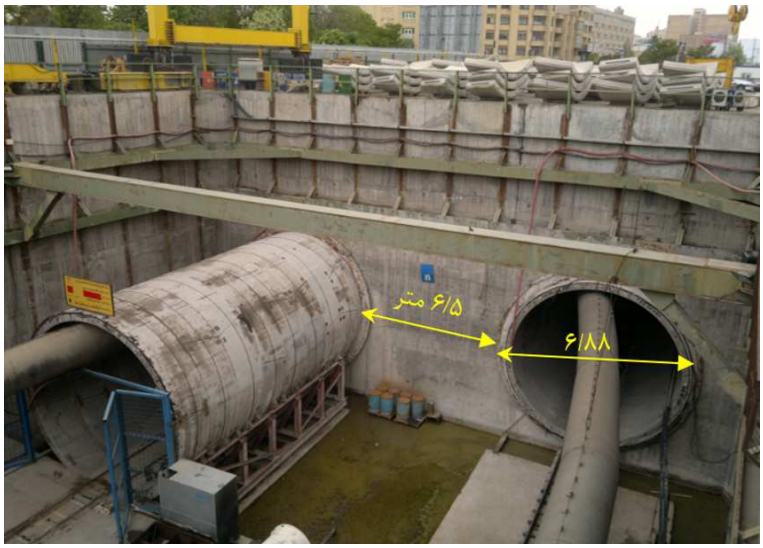
دوقلو بودن تونل‌ها نیز از عوامل مؤثر در تشدید آسیب دیدگی ساختمان‌های مجاور تونل‌هاست. بدین معنی که با عبور تونل دوم، بدلیل افزایش شعاع تأثیر حفاری تونل‌ها، شدت آسیب‌های ناشی از تونل اول بیشتر شده و یا آسیب‌های جدیدی در ساختمان‌های مجاور ایجاد می‌گردد (شکل ۸). در شکل ۹ تصویری از تونل‌های دوقلوی خط یک متروی تبریز نشان داده شده است. با توجه به امکان تشدید لرزش‌ها و احتمال انتقال فوم و دوغاب تزریقی حین حفاری تونل‌ها، لازم است از حفاری همزمان ماشین‌های حفار در تونل‌های دوقلو بطور موازی اجتناب شود و فاصله‌ای حداقل برابر با شعاع تأثیر حداکثر (مساوی یا بیشتر از ۳ برابر قطر تونل) بصورت طولی بین جبهه‌های حفاری در نظر گرفته شود. با توجه به قطر تونل حدود ۷ متر در طرح مورد مطالعه، حدود ۲۱ متر فاصله طولی بین ماشین‌های حفار لازم است. با در نظر گرفتن حفاری ۵ رینگ (۷ متر) در هر شیفت، هر ساختمان برای عبور یک ماشین حفار به مدت ٦ شیف کاری (۷۲ ساعت) تحت تأثیر قرار می‌گیرد که در صورت دو قلو بودن تونل این زمان دو برابر شده و به ١٤٤ ساعت یعنی ٦ شبانه‌روز می‌رسد. بنابراین افزایش زمان عبور و ارتعاشات، باعث افزایش تراکم خاک‌های ماسه‌ای و نشست‌ها شده و به تبع آن آسیب‌های وارده به ساختمان‌های مجاور بیشتر می‌گردد (شکل ۱۰).

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۸ . تأثیر دوقلو بودن تونل در گسترش تأثیر آنها در طرفین تونل



شکل ۹. تصویری از تونل‌های دوقلوی متروی تبریز

شکل ۱۰. مدت زمان تأثیر ارتعاشات تونل‌تکی و دوقلو

www.SID.ir

Archive of SID

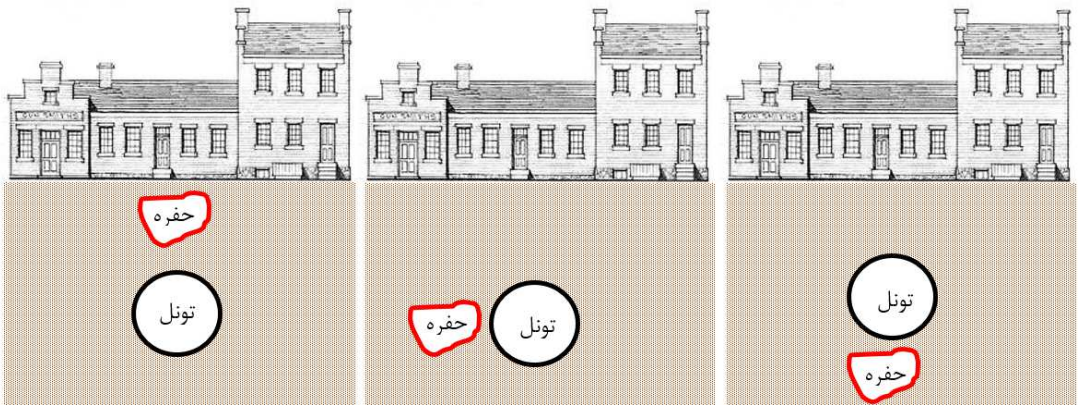
٤-٤. فرسودگی ساختمان‌ها

ساختمان‌های قدیمی با قدمت بیش از عمر مفید که در شعاع تأثیر حفاری تونل‌ها واقع شده‌اند اغلب دارای اسکلت چوبی بوده و نکات مهندسی در آنها رعایت نشده است. لذا این نوع ساختمان‌ها در برابر نشست‌ها، لرزش‌ها و سایر تأثیرات ناشی از حفاری تونل‌ها حساس بوده و از پتانسیل خطرپذیری بیشتری برخوردار هستند.

٤-٥. وجود حفرات خالی

وجود حفرات خالی از جمله حفرات باقی‌مانده از زلزله‌های گذشته، قنوات مدفون و سایر حفرات مصنوعی از جمله موارد مهم در حفاری تونل در زیر مناطق مسکونی هستند. شناسایی اینگونه موارد بصورت کامل ممکن نبوده و تنها اطلاعات قابل حصول شامل اطلاعات ساکنین محلی می‌باشد. نبود نقشه جامع قنوات شهری، یکی از نواقص اصلی در اجرای طرح-های عمرانی در محیط‌های شهری است.

از علایم وجود اینگونه حفرات در مراحل اولیه می‌توان به تخلیه سریع اتاقک حفاری، کاهش حجم تخلیه مصالح حفاری شده از طریق نقاله مارپیچی و افت آنی فشار EPB و در مراحل بعدی افزایش حجم دوغاب تزریقی پشت سگمنت اشاره نمود. بسته به موقعیت قرارگیری این حفرات نسبت به تونل (شکل ۱۱)، اثرات متفاوتی ممکن است در پی داشته باشد. زمانی که حفره در بالای تونل قرار گیرند در این حالت، در صورتی که حفره موجود به سطح زمین نزدیکتر باشد احتمال نفوذ فوم و دوغاب تزریقی به زیر ساختمان‌ها و یا سطح زمین وجود داشته و امکان بالازدگی، جابجایی سازه و نشست نامتقارن آن وجود خواهد داشت. وقتی که حفره در تراز تونل و در طرفین آن قرار داشته باشد ممکن است تخلیه خاک حفاری و افت فشار داخل اطاقک حفاری، انحراف تونل و کاهش نیروی فشاری جک‌های تراست و مفصلی در طرفین اتفاق بیافتد. حالت سوم زمانی است که حفرات در زیر تونل قرار داشته باشند. این مورد بویژه در ورودی‌ها و خروجی‌های تونل که عمق تونل کمتر بوده و تراز بالاتری نسبت به قنوات و حفرات دارد بیشتر احتمال دارد. که علاوه بر افت فشار EPB، ممکن است نشست ماشین‌حفار، انحراف تونل و جابجایی سگمنت‌ها را به همراه داشته باشد. در مسیر مورد مطالعه بدلیل عمق زیاد تونل‌ها، عمدتاً حفرات در بالای تونل‌ها قرار داشتند و مشکلات ناشی از این امر بیشتر به شکل نفوذ و راهیابی فوم و دوغاب تزریقی پشت لاینینگ به سطح خیابان و داخل ساختمان‌ها و یا تخلیه فشار محفظه حفاری در حین عملیات هایپرباریک بود. در شکل ۱۲ تصاویری از این موارد نشان داده شده است.



شکل ۱۱. شماتیکی از حالات مختلف قرارگیری حفرات زیرزمینی در محدوده حفاری تونل

www.SID.ir

Archive of SID

شکل ١٢. نفوذ دوغاب بنتونیت و خروج هوای تحت فشار به داخل منزل مسکونی در حین عملیات هایپرباریک (سمت چپ) خروج فوم از سطح خیابان در حین حفاری (سمت راست)

٤-٦. وجود طبقات زیرزمین و چاه‌ها

وجود طبقات زیرزمین در مسیر خط یک متروی باعث کاهش ضخامت روباره تونل شده و بویژه زمانی که خاک زیر پی آنها نفوذپذیر باشد باعث نفوذ و راهیابی فوم و دوغاب تزریقی به داخل ساختمان می‌شود. این مسئله در صورت وجود هرگونه چاه در محدوده تشدید شده و احتمال راهیابی فوم و دوغاب تزریقی را بیشتر می‌کند از مخاطرات اصلی این پدیده تخلیه سریع اتاق حفاری، افت آنی فشار داخل اتاقک و یا شستشو و تخلیه خاک زیر پی ساختمان می‌باشد. که ممکن است با نشست‌های بیشتر و حتی ریزش ساختمان همراه باشد. در شکل ١٣ تصاویری از نفوذ دوغاب به ساختمان‌های مجاور نشان داده شده است. لذا توجه به این امر در حفاری تونل زیر مناطق شهری بسیار مهم است. در شکل ١٤ موقعیت چاه‌های موجود در مسیر تونل‌ها در یک قسمت از مسیر مورد مطالعه نشان داده شده است.

شکل ١٣. نفوذ مخلوط فوم و خاک حفاری و پرشدن چاه جذبی (چپ) و راهیابی آن به حیاط یک ساختمان (راست)

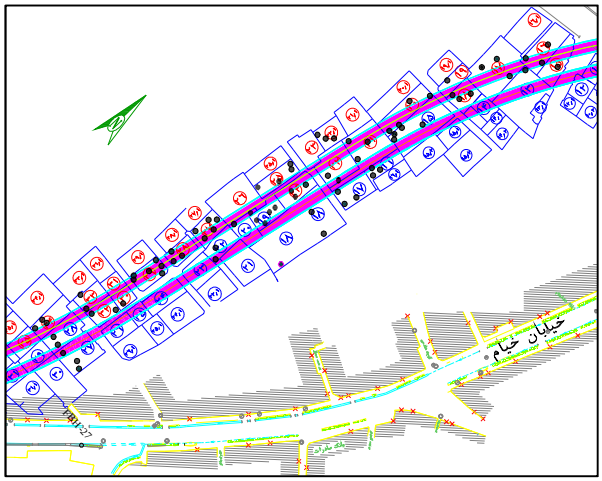
٤-٧. روباره کم

زمانی که روباره تونل کمتر از ٢ برابر قطر تونل باشد پدیده قوس‌شدگی در خاک روباره تونل ایجاد نشده و احتمال ریزش بویژه زمانی که خاک تشکیل‌دهنده مسیر از نوع درشت‌دانه و بدون چسبندگی باشد بیشتر است (Jancsecz and Steiner ,1994). در این شرایط فشار موردنیاز برای نگهداری پایداری جبهه حفاری تونل نیز بیشتر است در عین حال، در محیط‌های شهری به دلیل وجود محدودیت‌های

www.SID.ir

Archive of SID

مختلف ذکر شده (وجود حفرات، چاه‌ها و ...)، اعمال فشار مذکور برای کنترل پایداری، باعث نفوذ فوم و دوغاب تزریقی به داخل ساختمان‌های مجاور می‌شود. در مسیر مورد مطالعه بسیاری از ساختمان‌ها دارای طبقات زیرزمین بودند که میزان روباره را به کمتر از ۱۲ متر کاهش می‌داد. در این شرایط فشار لازم برای تأمین پایداری، راهیابی دوغاب حفاری به داخل ساختمان‌ها را ناگزیر می‌ساخت.



شکل ١٤. جانمایی چاه‌های شناسایی شده در مسیر تونل‌ها

٤-٨ ساینداگی رسوبات

ساینداگی رسوبات تشکیل‌دهنده مسیر باعث آسیب‌دیدگی ابزارهای حفاری شده و بازدید و تعویض ابزارها را بصورت مداوم الزام می‌نماید. با توجه به قرار گرفتن تونل‌ها در زیر سطح آب زیرزمینی با ارتفاع ۷ متر، ورود به داخل اطاقک حفاری و جلوی کله حفار جهت تعویض ابزارهای حفاری بدون اعمال نیروی تعادلی فشار زمین به جبهه کار تونل، جهت جلوگیری از ریزش، امکان‌پذیر نمی‌باشد. بدین منظور بعد از تزریق دوغاب بنتونیت و آب‌بندی نمودن خاک جبهه حفاری شده تونل، با تزریق فشار هوا پایداری جبهه کار تونل تأمین می‌گردد و افراد تحت فشار هوا به فضای جلوی کله حفار وارد شده و عملیات تعویض ابزارهای حفاری را انجام می‌دهند. با توجه به نفوذپذیری بیشتر خاک نسبت به هوا در مقایسه با آب، هوابندی خاک جبهه کار و تأمین ایمنی لازم برای نگهداری پایداری جبهه کار از چالش‌های اساسی در محدوده مورد مطالعه را به خود اختصاص می‌دهد. رسوبات تشکیل‌دهنده مسیر مورد مطالعه از رسوبات آبرفتی تشکیل شده‌اند که تا حدود ٤٠ تا ٦٠ درصد حاوی سنگدانه‌های آذرین در اندازه‌های ماسه تا شن از نوع آندزیت تا داسیت بوده و حاوی بلورهای سخت از نوع کوارتز و فلدسپار می‌باشد که در مجموع خاک ساینده‌ای را تشکیل داده و تعویض مداوم ابزارها را ضروری می‌نماید. برای جزئیات بیشتر به (برزگری و ارومیه‌ای، ۱۳۹۱) مراجعه شود. در شکل ۱۵ تصویر میکروسکوپی خاک تشکیل‌دهنده مسیر و نمونه‌ای از ابزارهای ساییده شده نشان داده شده است

شکل ١٥. چپ) مقطع میکروسکوپی از خاک مسیر مورد مطالعه، راست) سایش ابزارهای حفاری

٥. بررسی آماری آسیب‌های ایجاد شده در مطالعه موردی

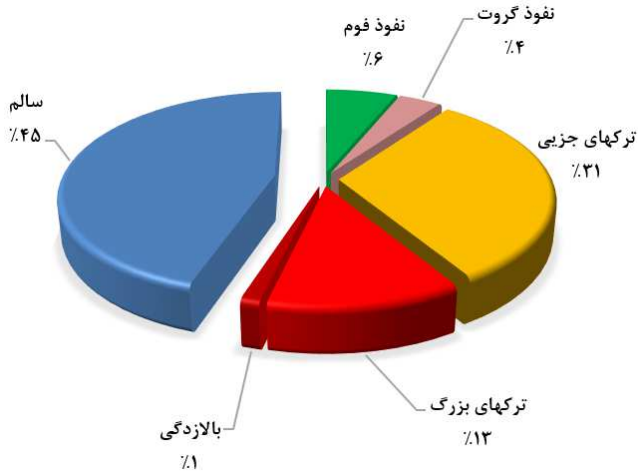
در محدوده مورد مطالعه، تونل‌های دوقلوی خط یک قطار شهری تبریز از زیر ١٦٠ ساختمان مسکونی با بافت فرسوده عبور کرده است. برای بررسی میزان آسیب‌های وارده و فراوانی آنها، هرگونه آسیب وارده به هر ساختمان در حین اجرا ثبت گردید. فراوانی هر کدام از آسیب‌های وارده

www.SID.ir

Archive of SID

بصورت درصد در شکل ۱۶ نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود نفوذ فوم و دوغاب حدود ۱۰ درصد از آسیب‌ها را بخود اختصاص داده‌اند. البته با درنظر گرفتن بالازدگی به عنوان پیامد وجود حفره در زیر ساختمان، فراوانی این مورد به ۱۱ درصد می‌رسد.از آسیب‌های وارده میزان ترک‌های ناشی از نشست، حدود ۴۴ درصد را تشکیل میدهند که به دو دسته‌ی ترک‌های بزرگ (قابل ملاحظه) و ترک‌های جزئی (قابل چشم‌پوشی) تقسیم شدند. در شکل ۱۷ تصاویری از ترک‌های ایجاد شده در ساختمان‌های مجاور نشان داده شده است.

میزان نشست‌های اندازه‌گیری شده در ساختمان‌های مسیر و درصد فراوانی آنها به ترتیب در جدول ۳ و شکل ۱۸ ارائه شده است. نشست‌های غیرمجاز (>۲۵ میلی‌متر) حدود ۴/۵ درصد را شامل می‌شود.



شکل ۱۶. درصد آسیب‌های ناشی از حفار تونل در زیر بافت فرسوده شهری در محدوده مورد مطالعه

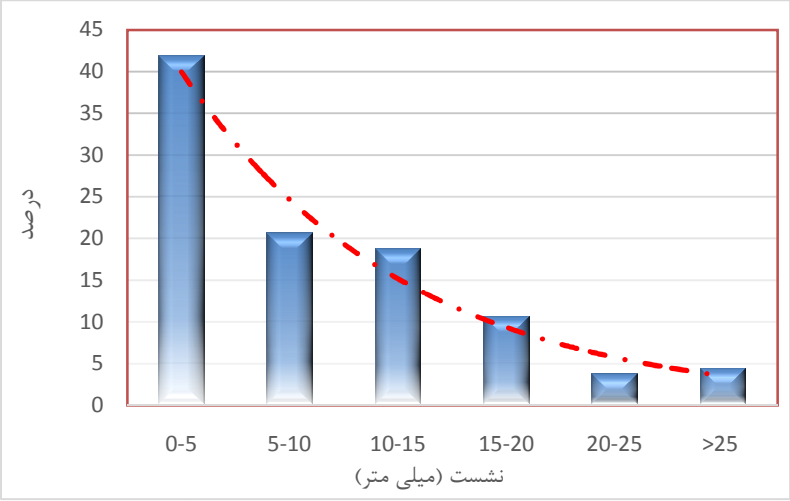
شکل ۱۷. تصویری از ترک‌های ایجاد شده در ساختمان‌های مسکونی محدوده مورد مطالعه

جدول ۳. فراوانی میزان نشست ساختمان‌ها در محدوده مورد مطالعه

میزان نشست (میلی‌متر)	تعداد ساختمان‌ها در تونل سهند	تعداد ساختمان‌ها در تونل سبلان	حداکثر نشست (میلی متر)
۰-۵	۷	۱۷	۵
۵-۱۰	۱۶	۱۷	۱۰
۱۰-۱۵	۱۱	۱۹	۱۵
۱۵-۲۰	۲	۱۵	۲۰
۲۰-۲۵	۳	۳	۲۵
>۲۵ (غیر مجاز)	۱	۶	۷۷ (ساختمان شماره ۱۱)
تعداد کل ساختمان	۶۳	۹۷	-

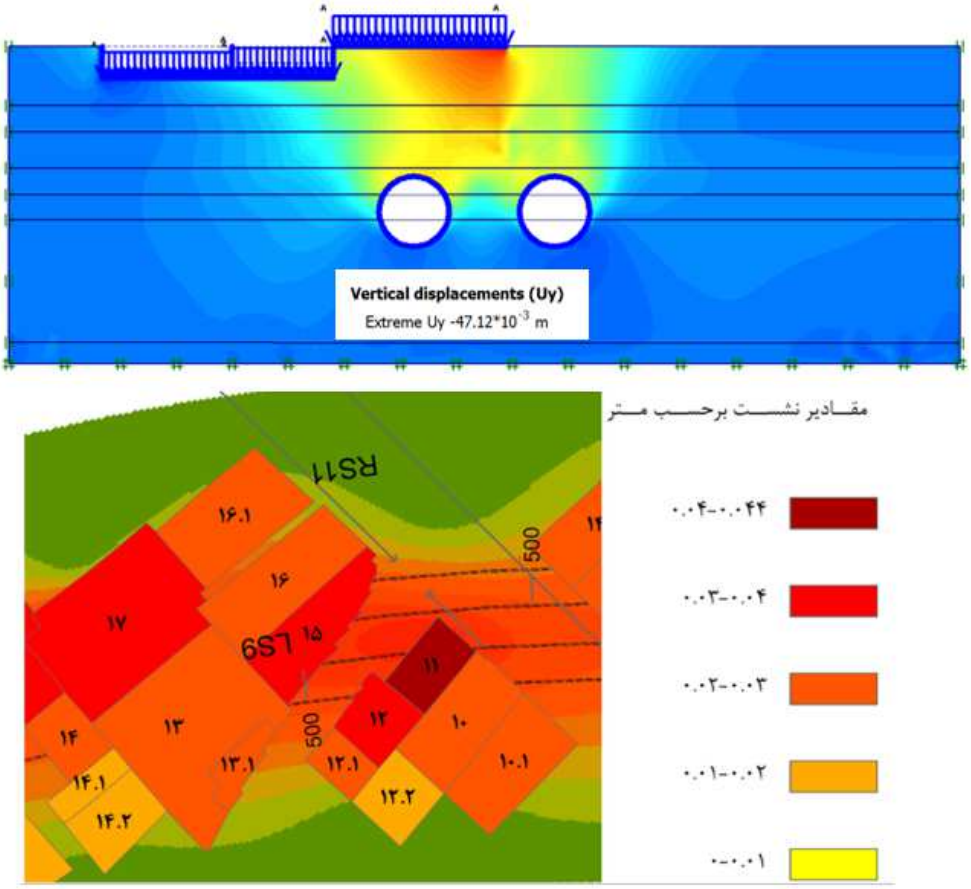
www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۱۸. طبقه‌بندی میزان نشست ساختمان‌ها در محدوده مورد مطالعه

بیشترین نشست اندازه‌گیری شده با بزرگی حدود ۷۷ میلی‌متر مربوط به ساختمان شماره ۱۱ می‌باشد. ساختمان مذکور با ۵ طبقه (۱طبقه تجاری + ٤ طبقه مسکونی) و دارای دو حلقه چاه ۸ متری با اسکلات فلزی بوده و عمری کمتر از ۱۰ سال دارد. دو حلقه چاه به عمق ۸ متر در زیرزمین این ساختمان وجود دارد. آنالیزهای انجام یافته میزان نشست آن در محل پی را تا ٤۳ میلی‌متر پیش‌بینی کرده بود (شکل ۱۹).



شکل ۱۹. نتایج تحلیل عددی ساختمان شماره ۱۱ (شرکت مهندسی پل و ساختمان الموت، ۱۳۹۱)

www.SID.ir

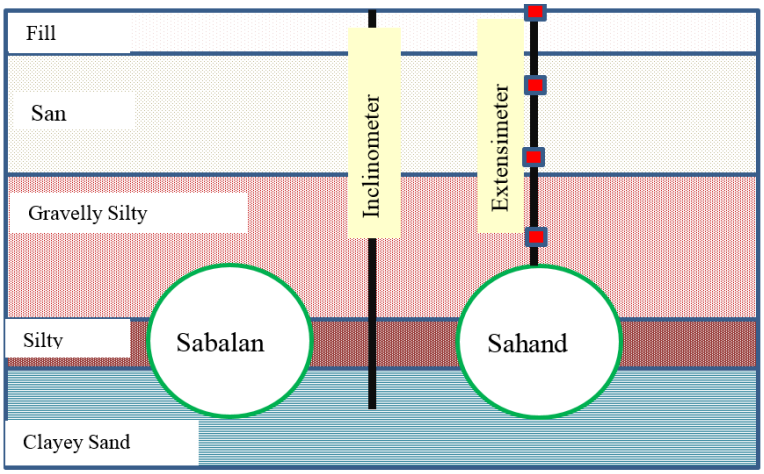
Archive of SID

بررسی علت اختلاف نشست ایجاد شده با نتایج تحلیل‌های انجام یافته نشان داد در زمان عبور ماشین‌حفار از زیر ساختمان مذکور، جریان فوم در امتداد خیابان (زیر پیاده‌رو) باعث بالازدگی آسفالت (تا ۵ سانتی‌متر) شده و در این امتداد موجب شکستگی و بالازدگی موزاییک‌های مقابل ساختمان گردیده است. به عبارتی در امتداد ضلع شمالی ساختمان و نزدیک به پی آن، حفره خالی مدفون (قنات، کانال و ...) وجود داشته که نشست ساختمان در این قسمت را بیشتر کرده است (شکل ۲۰).

برای بررسی میزان نشست ایجاد شده در حین حفاری تونل‌ها و تغییرات آن نسبت به عمق از ابزار دقیق استفاده گردید. در شکل ۲۱ مقطع نصب ابزارهای مذکور نشان داده شده است.

روند نشست‌های ثبت شده توسط اکستنسیومتر سه نقطه‌ای قبل از رسیدن ماشین‌های حفار تا بعد از عبور هر دو ماشین حفار در عمق‌های مختلف در شکل ۲۲ ارائه شده است. نتایج اندازه‌گیری شده نشان می‌دهد بیشترین نشست در زمان عبور ماشین حفار سهند ایجاد شده است که ناشی از رهایی تنش در جبهه حفاری توأم با لرزش‌های ناشی از ماشین حفار می‌باشد. با توجه به اینکه ابزار دقیق در بالای تونل سهند نصب شده است، میزان نشست ناشی از عبور ماشین‌حفار تونل سبلان به طور کامل ثبت نشده و مقدار تأثیر آن در محل بالای تونل سهند در تراز ۸-متری تا بیش از ۱۷ میلی‌متر اندازه‌گیری شده است.

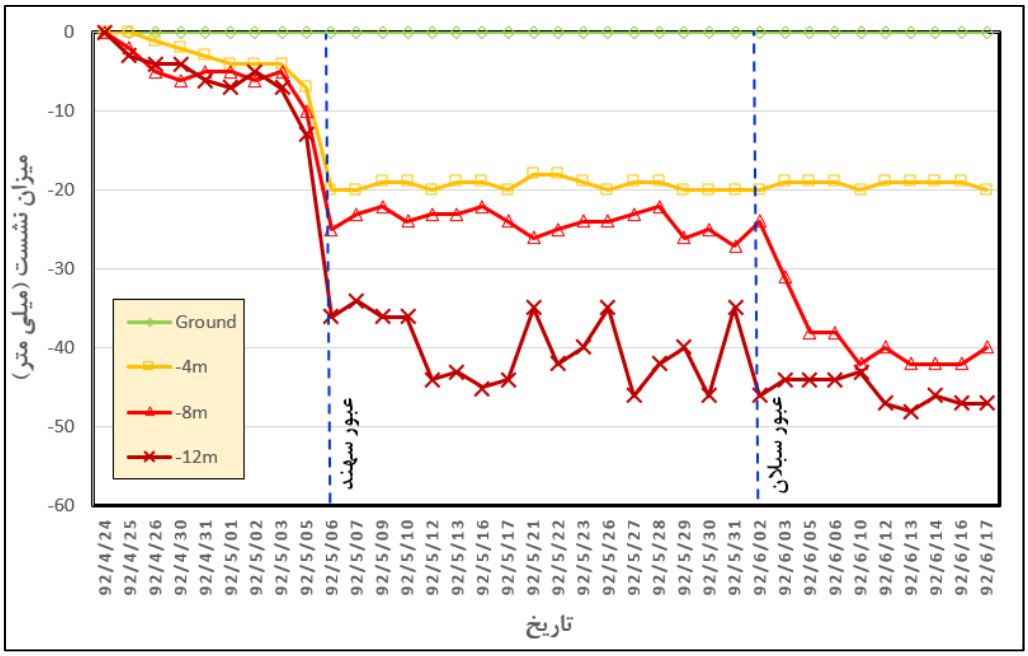
شکل ۲۰. شماتیکی از آرایش ابزار دقیق در مقطع تونل‌های خط یک متروی تبریز



شکل ۲۱. شماتیکی از وضعیت زمین‌شناسی و آرایش ابزار دقیق نصب شده در مسیر مورد مطالعه

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۲۲. میران نشست ثبت شده بوسیله اکستنسیومتر (سازمان قطار شهری تبریز، ۱۳۹۲)

٦. نتیجه‌گیری

حفر تونل در بافت فرسوده شهری بسته به روش حفاری، آسیب‌های اجتماعی، اقتصادی و زیست محیطی خاص خود را دارد که لازم است در مراحل شناخت و تعیین مسیر در نظر گرفته شوند. بر اساس تجربیات بدست آمده از طرح مورد مطالعه، کلیه عواملی که به نوعی تشدید کننده آسیب‌های وارده به سازه‌های مجاور هستند بایستی در ارزیابی و آنالیز ریسک مورد توجه قرار گیرند از جمله این عوامل می‌توان به وجود حفرات، ساینده‌گی خاک، فرسودگی ساختمان‌ها، قنوات و چاه‌ها، لرزش و ارتعاشات ماشین‌حفار و برخورد با قطعات سنگی درشت‌دانه اشاره نمود.

بررسی محدوده مورد مطالعه نشان داد ایجاد ترک‌های جزئی در دیواره ساختمان‌ها بیشترین مقدار با ۳۱ درصد و ترک‌های بزرگ حدد ۱۳ درصد را بخود اختصاص داده و نفوذ دوغاب و فوم حفاری و بالازدگی زمین در اثر جمع شدن دوغاب تزریقی در حفرات با فروانی حدود ۱۱ درصد از آسیب‌هایی بودند که در زمان حفاری با آنها مواجه گردید.

نتایج اندازه‌گیری‌های انجام شده با استفاده از ابزار دقیق نشان داد بیشترین نشست در زمان عبور ماشین حفار از محل مورد نظر و در عمق نزدیک به تاج تونل اتفاق می‌افتد و مقدار آن تا سطح زمین کاهش پیدا می‌کند. میزان تأثیر حفاری تونل دوم در نشست‌های بالای تونل در تراز ۸- متری تا حدود ۱۷ میلی‌متر ثبت شده است.

بررسی‌های بعمل آمده از ساختمان شماره ۱۱ نشان داد که یکی از مسائل اساسی در اجرای فضاهای زیرزمینی در محیط‌های شهری، عدم وجود اطلاعات کافی از مسیر قنوات و یا حفره‌ای مدفون است که می‌تواند میزان آسیب وارده را تشدید نماید.

تشکر و قدردانی: از سازمان قطار شهری تبریز، مهندسین مشاور گنو و شرکت مهندسی پل و ساختمان الموت که در تهیه و جمع‌آوری اطلاعات میدانی مساعدت نموده و امکان نشر این تجربیات ارزنده را فراهم نمودند تشکر و قدردانی می‌شود.

www.SID.ir

Archive of SID

منابع

برزگری ق.، ارومیه‌ای ع.، ۱۳۹۱. ارزیابی ساینده‌گی خاک‌ها در حفاری مکانیزه تونل‌های شهری با نگرشی ویژه به خط یک قطار شهری تبریز. مجله زمین‌شناسی مهندسی ایران، جلد ۵. شماره ۱ و ۲، ۵۸-۴۱

سازمان قطار شهری تبریز، ۱۳۹۲. گزارش رفتارنگاری متروی تبریز.

شرکت مهندسی پل و ساختمان الموت، ۱۳۹۱. گزارش آنالیز ریسک ساختمان‌ها.

Brennan, M., 2007. The Irish Independent 'Many still awaiting tunnel claim payouts.' <www.independent.ie/national-news/many-still-awaitingtunnelclaim - payouts-1214977.html>

Curry, A., 2009. Archive Collapse Disaster for Historians. Spiegel Online International. <www.spiegel.de/international/germany/0,1518,611311,00.html

Dimmock, P.S., Mair, R.J. 2007. Effect of building stiffness on tunnelling-induced ground movement. Tunnelling and Underground Space Technology, 23: 438–450.

Eitzenberger, A., 2008. Train-induced Vibrations in Tunnels – A Review. Technical Report, Luleå University of Technology, Department of Civil, Mining and Environmental Engineering, Division of Mining and Geotechnical Engineering.

Eskesen, S.D., Tengbor, P., Kampmann, J., Veicherts, T.H., 2004. Guidelines for tunnelling risk management: International Tunnelling Association, working group no. 2. Tunnelling and Underground Space Technology 19: 217–237.

Houlsby, G.T., Burd, H.J, Augarde, C.E., 1999. Analysis of tunnel-induced settlement damage to surface structures. Geotechnical Engineering for Transportation Infrastructure, Proceedings of 12th European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Amsterdam, Vo1. 1, pp. 147–152.

ITMSOIL, 2010. ITMSOIL Wins UK's Largest Ever Instrumentation and Monitoring Contract. <www.itmsoil.com>

Jancsecz, S., Steiner, W., 1994. Face support for a large Mix-Shield in heterogeneous ground conditions. Tunnelling 94, London.

Koukoutas, S. P., Sofianos A. I., 2015. Settlements Due to Single and Twin Tube Urban EPB Shield tunnelling. Geotechnical and Geological Engineering, 33:487–510

Lance, G.A., Anderson, J.M., 2006. The Risk to Third Parties from Bored Tunnelling in Soft Ground. Research Report 453, Health and Safety, Executive, Norwich.

Mahmutoglu Y., 2011. Surface subsidence induced by twin subway tunnelling in soft ground conditions in Istunbul. Bulletin of Engineering Gelogy and the Environment, 70 (1): 115-131.

Potts, D.M., Addenbrooke, T.I., 1997. A structure's influence on tunnelling-induced ground movements. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Geotechnical Engineering, 125 (2): 109–125.

Peterson, G.E., Black, M.G., 2001. Geotechnical investigation and assessment of potential building damage arising from ground movements: crossrail. ICE Proceedings, Transport, 147 (2): 107–119.

www.SID.ir