نشریه‌ی مهندسی تونل و فضاهای زیرزمینی
Tunneling & Underground Space Engineering (TUSE)
tuse.shahroodut.ac.ir
دوره‌ی ۸- شماره‌ی۲/تابستان ۱۳۹۸

عبور دستگاه TBM از ایستگاه ساخته‌شده با استفاده از روش تکیه‌گاه سگمنتی

یادداشت فنی

مهدی بستامی[۱]؛ سید مصلح افتخاری[۲*]؛ کاوه آهنگری[۳]؛ غلامحسن سهامی[۴]
۱- دانشجوی کارشناسی ارشد؛ گروه مهندسی معدن، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران
۲- استادیار؛ گروه مهندسی معدن، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران
۳- دانشیار؛ گروه مهندسی معدن، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران
۴- کارشناس؛ شرکت مهندسی آهاب، تهران

دریافت دست‌نوشته: ۱۳۹۷/۰۸/۱۲؛ پذیرش دست‌نوشته: ۱۳۹۷/۱۱/۲۹
شناسه دیجیتال (DOI):10.22044/TUSE.2019.7626.1350

واژگان کلیدی
ایستگاه مترو
ماشین حفار تمام مقطع
قطعه بتنی پیش‌ساخته
تکیه‌گاه سگمنتی
سازه تکیه‌گاهی

چکیده

یکی از فعالیت‌های مهم تونل‌سازی مکانیزه در اجرای خطوط مترو روش عبور از ایستگاه ساخته شده است. در این مقاله با توجه به مشکلات و سختی‌های استفاده از سازه تکیه‌گاهی در عبور ماشین *TBM* از ایستگاه ساخته‌شده و شروع مجدد حفاری، روشی مبتنی بر استفاده از رینگ‌های با قطعات بتنی پیش‌ساخته موردبررسی قرارگرفته است. در این روش به منظور ایجاد تکیه‌گاهی جهت اعمال نیروی پیشران ماشین از الگویی متفاوت از نصب رینگ‌های ناقص استفاده شده است به نحوی که علاوه بر بهره بردن از مزایای استفاده از تکیه‌گاه سگمنتی به گونه‌ای اجرا شود که رینگ کاملی در فضای باز اجرا نشود. الگوی پیشنهادی به گونه‌ای است که از سه عدد قطعه بتنی پیش‌ساخته کف تا فاصله حدود ۵ تا ۶ رینگ از سینه کار استفاده شود تا به این صورت دستگاه حفار از طول ایستگاه عبور کند. پس از آن، در چند رینگ تعداد قطعات بتنی پیش‌ساخته به ۴ و سپس ۵ قطعه بتنی پیش‌ساخته در هر رینگ افزایش می‌یابد تا اینکه کله حفار به محل حفاری می‌رسد و از این مرحله به بعد حفاری تونل با نصب رینگ‌های ناقص پنج‌تایی و شش‌تایی ادامه داشته تا جایی که دستگاه به‌طور کامل داخل تونل قرار گیرد بطوریکه اولین رینگ کامل در ابتدای دهانه تونل نصب شود. بررسی‌ها نشان می‌دهد که با استفاده از ۵ و ۶ قطعه بتنی پیش‌ساخته می‌توان حفاری را شروع کرد اما تا حدودی ۶ قطعه بتنی پیش‌ساخته نسبت به ۵ قطعه بتنی پیش‌ساخته برتری دارد. الگوی پیشنهادی در ایستگاه‌هایی از خط ۶ مترو تهران مورد ارزیابی قرار گرفته و نتایج نشان می‌دهد که علاوه بر کارآمد بودن این روش انحرافی بیش از حد مجاز اتفاق نیفتاده است؛ بنابراین روش پیشنهادی را می‌توان با اطمینان مورداستفاده قرار داد.

۱- مقدمه

یکی از فعالیت‌های مهم حفاری با دستگاه *TBM* (*Tunnel Boring Machine*) در خطوط مترو، عبور ماشین حفار از محل ایستگاه‌ها است که به دو صورت امکان‌پذیر است. در یک روش، هیچ‌گونه عملیات اجرایی و حفاری در تراز سکوی ایستگاه انجام‌نشده و ماشین حفار، حفاری تونل را به‌طور معمول انجام داده و بعد از آن عملیات اجرایی در ایستگاه ادامه می‌یابد (*Vittorio, et al., 2008*). در این روش لازم است که تونل ساخته‌شده و قطعات بتنی پیش‌ساخته (*Segment*) نصب‌شده پس از عبور دستگاه و جمع آوری تجهیزات تونلی، تخریب و جمع‌آوری شوند. در روش دیگر، ابتدا عملیات اجرایی و حفاری تا تراز سکو در ایستگاه انجام و سپس ماشین حفار از فضای باز ایجادشده عبور خواهد کرد (*Vittorio, et al., 2008*). در این حالت برای ادامه حرکت

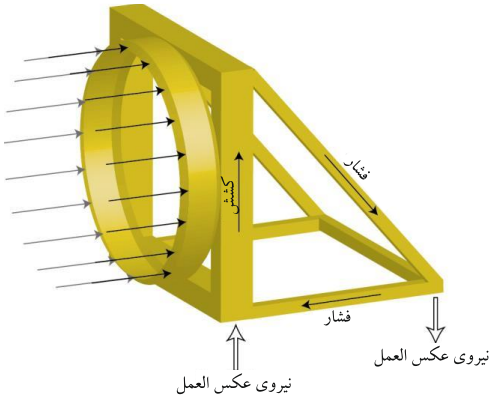
* نویسنده مسوول- تهران؛ دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات؛ دانشکده فنی و مهندسی؛ گروه مهندسی معدن؛ رایانامه: eftekhari_mosleh@yahoo.com

www.SID.ir

Archive of SID

و شروع مجدد حفاری با *TBM* نیاز به تمهیدات خاصی از جمله تأمین تکیه‌گاه جهت حرکت ماشین *TBM* است. با توجه به عدم نیاز به اجرا و همچنین تخریب قطعات بتنی پیش‌ساخته نصب‌شده در طول ایستگاه شبیه به حالت قبل، هزینه‌های عملیات اجرایی در محدوده ایستگاه در این حالت تا حد قابل‌توجهی تقلیل می‌یابد (*Gharouni-nik, et al., 2013*).

با وجود نقاط قوت عبور دستگاه حفار از ایستگاه اجراشده نسبت به روش اول، مشکلات و دشواری‌هایی جهت ساخت ایستگاه و عبور با این روش وجود دارد و همواره محققانی به بررسی چالش‌ها و پیشنهاد روش‌هایی جهت مرتفع نمودن آن‌ها پرداخته‌اند (*El-Nahhas, et al., 2006*)، (*Feng-yuan, 2009*)، (*Giuseppe, et al., 2013*)، (*Liu, et al., 2000*)، (*Pöllath, et al., 2007*)، (*Wang, et al., 2007*)، (*Yun, et al., 2010*) و (*Zhu, et al., 2012*). به طور کلی، عبور دستگاه *TBM* از ایستگاه دارای سه مرحله متفاوت است. در مرحله اول دستگاه وارد فضای باز و ساخته‌شده ایستگاه می‌شود و در مرحله دوم از طول ایستگاه عبور کرده و در آخرین مرحله حفاری مجدد آغاز می‌شود. از جمله چالش‌برانگیزترین مراحل عبور از ایستگاه اجرا شده، شروع مجدد حفاری پس از عبور دستگاه از طول ایستگاه است. استفاده از سازه تکیه‌گاهی (*Push Frame*) از متداول‌ترین روش‌ها جهت شروع مجدد حفاری است که در اکثر پروژه‌های اجراشده و همچنین در مطالعات محدودی که در این خصوص انجام شده است ملاحظه می‌گردد (*Gharouni-nik, et al., 2013*)، (*Le Van, et al., 2009*)، (*Oldenhave, 2014*) و (*Mike, et al., 2017*) که از این سازه به عنوان تکیه‌گاهی جهت اعمال نیروی پیشران استفاده می‌شود. استفاده از این روش در محل ابتدایی شروع حفاری تونل که فضا و دسترسی مناسب جهت اجرای آن وجود دارد، امکان‌پذیر است و در عین حال به دلیل لزوم وجود تکیه‌گاه جهت اعمال نیروی پیشران این روش در محل ورودی تونل ضروری است همان‌طور که در شکل ۱، نشان داده شده است. به منظور استفاده از این روش جهت شروع مجدد حفاری در انتهای ایستگاه، بعد از عبور دستگاه بر روی بستر بتنی (*Cradle*) در طول ایستگاه و نزدیک شدن کله حفار (*Cutter head*) به سینه کار و توقف ماشین حفار، سازه تکیه‌گاهی در انتهای سپر که فاصله آن تا سینه کار حفاری به اندازه طول دستگاه است نصب می‌شود.



الف-نمایی از سازه تکیه‌گاهی و توزیع نیرو در آن (Oldenhave, 2014)

ب- نمایی از اجرای آن جهت شروع حفاری دستگاه TBM

شکل ۱- نمایش توزیع نیرو و نحوه اجرای سازه تکیه‌گاهی

اما باید در نظر داشت که اجرای این سازه علاوه بر زمان‌بر بودن، نیازمند فضا و امکانات کافی جهت اجرا است و این در حالی است که در برخی از ایستگاه‌ها به لحاظ موقعیت قرارگیری ایستگاه اجرای فضای باز یا شفت وجود ندارد و بنابراین حمل و اجرای سازه تکیه‌گاهی بسیار سخت و زمان‌بر خواهد شد. از این‌رو مطالعاتی در خصوص رفع این

www.SID.ir

Archive of SID

چالش انجام گرفته است (*Feng-yuan, 2009*) و (*Yanjun, 2012*)؛ اما یکی از روش‌هایی که به تعداد اندکی مورد بررسی قرار گرفته و به مرحله اجرا رسیده است استفاده از رینگ‌های ناقص به جای سازه تکیه‌گاهی جهت تکیه‌گاه اعمال نیروی جک‌های ماشین است که در این مقاله از آن به تکیه‌گاه سگمنتی نامبرده می‌شود. در این روش به جای استفاده از سازه تکیه‌گاهی از نصب و آرایش خاصی از قطعات بتنی پیش‌ساخته به‌صورت پلکانی تا ایجاد و تکمیل رینگ کامل برای ایجاد تکیه‌گاه استفاده می‌شود. ماشین حفار در طول ایستگاه بر روی بستر بتنی عبور کرده و برای تأمین نیروی پیشران لازم، بسته به ابعاد دستگاه و قسمت پشتیبان آن یک تا سه قطعه بتنی پیش‌ساخته کف نصب می‌شود. در ادامه با نزدیک شدن کله حفار به سینه کار با ترتیب خاصی شروع به نصب قطعات بیشتری از قطعات بتنی پیش‌ساخته کرده تا جایی که به سمت ایجاد رینگ کامل پیش رود. تاکنون از روش تکیه‌گاه سگمنتی با الگوهای متفاوت در چند پروژه مترو استفاده شده است (*Alamir, et al., 2006*)، (*Changi, et al., 2007*) و (*Khosrowtash, et al., 2009*). از روش تکیه‌گاه سگمنتی در پروژه مترو شیراز با دستگاهی به قطر ۶٫۸۸ متر و ۱+۵ قطعه بتنی پیش‌ساخته در یک رینگ استفاده شده است. در این پروژه ابتدا ماشین حفار با نصب یک قطعه بتنی پیش‌ساخته در کف بروی بستر بتنی در طول ایستگاه حرکت کرده و بعد از آن تعداد قطعات بتنی پیش‌ساخته به ترتیب اضافه و به ۲ تا ۵ قطعه و در نهایت رینگ کامل تشکیل شده است. تعداد ۱۷ رینگ کامل پس از چیدمان چندتایی قطعات بتنی پیش‌ساخته نیز نصب گردیده که در مجموع ۲۲ رینگ به طول ۲۸٫۶ متر ایجاد و نصب شده است (*Alamir, et al., 2006*). همچنین از این روش در پروژه خط ۲ مترو مشهد با دستگاهی به قطر ۹٫۴۳ متر و ۱+۱+۷ قطعه بتنی پیش‌ساخته در یک رینگ کامل که دارای یک عدد قطعه بتنی پیش‌ساخته کلید و یک قطعه بتنی پیش‌ساخته اینورت است، استفاده شده. در این پروژه نیز ماشین حفار طول ایستگاه را با نصب ۲ قطعه بتنی پیش‌ساخته کف طی نموده و با نزدیک شدن کله حفار به ۶ متری سینه کار با تشکیل ۴ رینگ ناقص به ترتیب سه‌تایی، چهارتایی، پنج‌تایی و شش‌تایی کله حفار به محل حفاری رسیده و در رینگ بعدی خود که یک رینگ کامل بوده حفاری را آغاز می‌کند و در ادامه و با توجه به طول دستگاه چهار رینگ کامل نیز در فضای باز نصب تا ماشین حفار به‌طور کامل در داخل تونل قرار گیرد. در مجموع با ۴+۵ رینگ ناقص و کامل به طول ۱۳٫۵ متر در فضای ایستگاه تشکیل و انجام شده است (*Changi, et al., 2007*).

ملاحظه می‌گردد که در پروژه‌هایی که از تکیه‌گاه سگمنتی جهت شروع مجدد حفاری استفاده شده است، تعدادی رینگ کامل در محدوده ایستگاه اجرا شده است که به دلیل نیاز به پایدارسازی این رینگ‌های کامل در فضای باز ایستگاه و همچنین مشکلات ایمنی و هزینه‌های تخریب رینگ‌های کامل در محل ایستگاه، اجرای روش تکیه‌گاه سگمنتی به لحاظ اجرایی ممکن است با مشکلاتی مواجه گردد؛ بنابراین در مقاله حاضر به تحلیل و بررسی روشی نوین جهت اجرای روش تکیه‌گاه سگمنتی در ایستگاه‌های مترو با هدف کاهش مشکلات و افزایش ایمنی و کارایی به گونه‌ای که رینگ کاملی در فضای باز اجرا نشود و اولین رینگ کامل درون تونل تشکیل گردد پرداخته می‌شود. علاوه بر تأمین نیروی لازم جهت شروع مجدد حفاری با تکیه‌گاه سگمنتی، یکی دیگر از موارد حائز اهمیت، انحراف دستگاه از مسیر پروژه است که در مطالعات گذشته به این مسئله پرداخته نشده است اما در مقاله حاضر میزان انحراف دستگاه با استفاده از روش تکیه‌گاه سگمنتی نیز مدنظر قرار می‌گیرد. بررسی‌های صورت گرفته در این تحقیق، در ایستگاه‌هایی از خط ۶ مترو تهران انجام شده است.

۲- معرفی خط ۶ مترو تهران

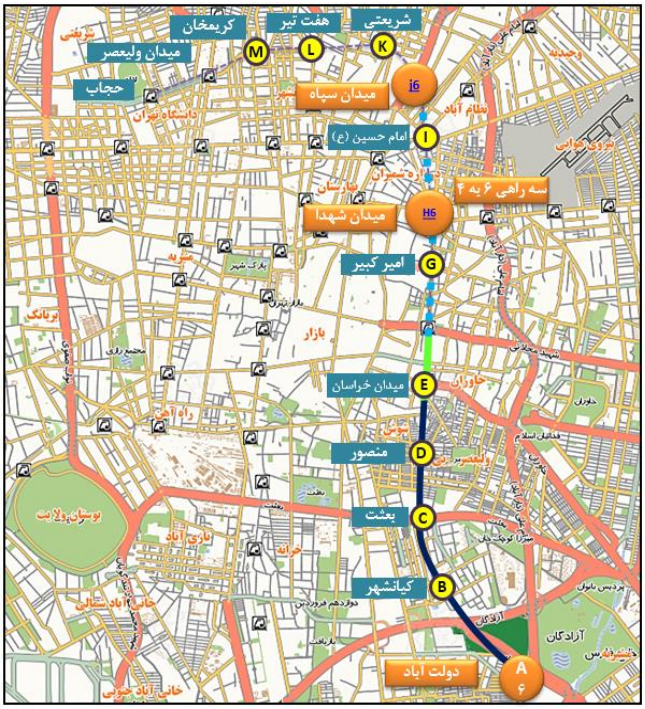
خط ۶ مترو تهران به عنوان یکی از خطوط اصلی متروی شهر تهران با ۲۷ ایستگاه، به صورت قطری شمال غرب پایتخت را به جنوب شرقی آن متصل می‌نماید. از کل طول ۳۸ کیلومتری، ۶ کیلومتر در طرح توسعه و نزدیک به ۱۱ کیلومتر با ماشین حفار انجام شده است. خط ۶ با ماشین *TBM* از نوع تعادل فشار زمین *EPB (Earth Pressure Balance)* و با قطر ۹٫۱۹ متر حفاری می‌شود. نگهداری تونل با ۱+۸ قطعه بتنی پیش‌ساخته انجام می‌شود که اندازه قطر خارجی و داخلی رینگ‌های اجرا شده به ترتیب ۸٫۸۵ و ۸٫۱۵ متر است. ماشین حفار در اجرای حفاری تونل در این

www.SID.ir

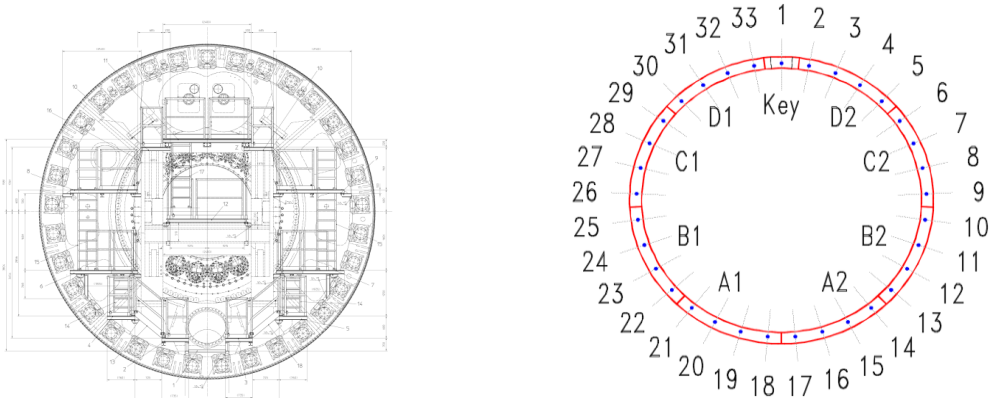
Archive of SID

۱۱ کیلومتر از ایستگاه‌های کیانشهر، بعثت، قیام و میدان خراسان به‌صورت حفاری تونل و قبل از اجرای ایستگاه عبور کرده و در ادامه از ایستگاه‌های امیرکبیر، میدان شهدا، سه‌راهی و تقاطع خط ۴ با ۶ و میدان امام حسین (ع) به‌صورت عبور از ایستگاه اجرا شده و در فضای باز انجام شده است. شکل ۲، نمایی از مسیر خط ۶ و محل ایستگاه‌ها را نشان می‌دهد.

دستگاه *TBM* مورداستفاده در قطعه جنوبی خط ۶ مترو تهران، مدل S۵۶۶ است که نیروی محرکه آن توسط ۳۳ جک به میزان ۷۳۲۷۵ کیلو نیوتن تأمین می‌گردد که هر جک حداکثر ۲۲۲۰ کیلو نیوتن نیرو وارد می‌کند. آرایش جک‌های *TBM* مورداستفاده در قطعه جنوبی خط ۶ مترو تهران در شکل ۳، نشان داده شده است (*Ahab, 2016*).



شکل ۲- نمایش بخشی از مسیر خط ۶ مترو تهران و محل قرارگیری ایستگاه‌های مترو (Ahab, 2016)



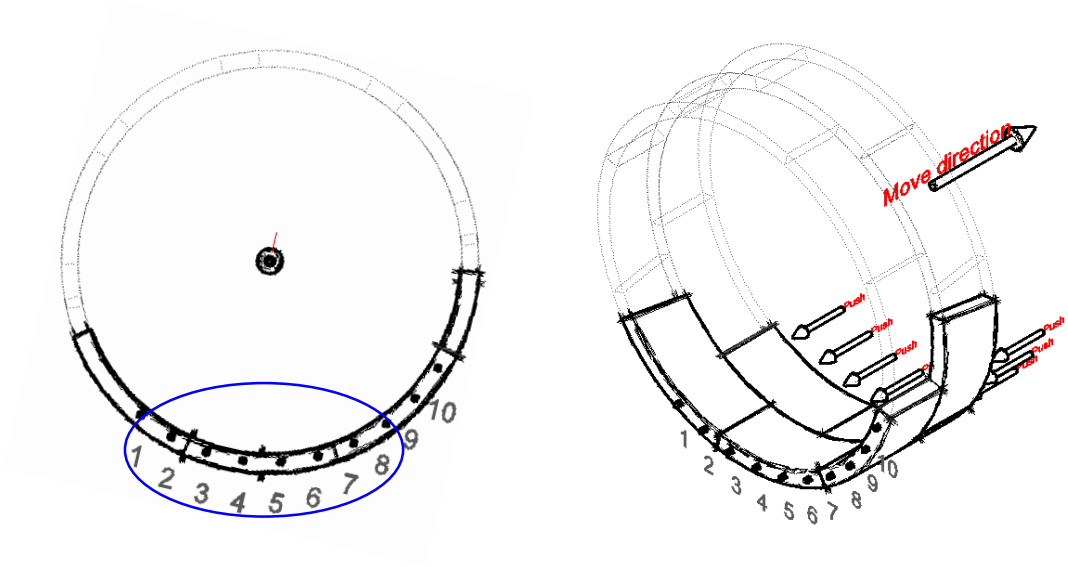
شکل ۳- آرایش جک‌های TBM-S566 مورداستفاده در قطعه جنوبی خط ۶ مترو تهران

www.SID.ir

Archive of SID

۳- روش پیشنهادی عبور از ایستگاه در خط مترو تهران

عبور ماشین حفار از ایستگاه ساخته‌شده، طی سه مرحله ورود به ایستگاه، عبور از طول ایستگاه و خروج از ایستگاه و شروع مجدد حفاری اجرا می‌شود. با توجه به ابعاد ماشین حفار، نصب سه قطعه بتنی پیش‌ساخته بر روی بستر بتنی کف در طول ایستگاه در مرحله عبور ماشین حفار از طول ایستگاه پیشنهاد شده است. با نصب قطعات بتنی پیش‌ساخته ردیف پایین، این امکان برای *TBM* فراهم می‌گردد تا با استفاده از جک‌های پایین خود و فشار آوردن به قطعات بتنی پیش‌ساخته مذکور، با لغزش بر روی پروفیل‌های تعبیه شده، به سمت جلو حرکت نماید. نصب سه قطعه بتنی پیش‌ساخته به طول ایستگاه منهای ۹ یا ۱۰ رینگ آخر اجرا می‌گردد. مطابق شکل ۴ در چیدمان قطعات بتنی پیش‌ساخته ۳ تایی کف، تعداد ۱۰ جک در تماس با قطعات بتنی پیش‌ساخته قرار دارد اما به جهت جلوگیری از انحراف دستگاه به طرفین و کاهش تنش برشی در قطعات بتنی پیش‌ساخته بغل، می‌بایست از ۸ جک جهت تأمین نیروی پیشران استفاده گردد.



الف- نمایش سه بعدی از وضعیت قرارگیری قطعات کف

ب- نمایش قرارگیری جک‌ها در قطعات کف

شکل ۴- نمایش جک‌های درگیر با قطعات بتنی پیش‌ساخته کف

بنابراین حداکثر مقدار نیروی قابل اعمال توسط این جک‌ها با توجه به مقدار حداکثر نیروی هر یک از جک‌ها که طبق مشخصات دستگاه نیروی اسمی هر جک (F_1) ۲۲۲۰ کیلو نیوتن است، به صورت زیر قابل محاسبه است.

$$Ft = ۲۲۲۰ * ۸ * K = ۱۳۳۲۰ \text{ کیلو نیوتن} \quad (۱)$$

که در آن، K: ضریب حداکثر توان بارگیری از هر جک ٪۷۵ است.

از طرف دیگر، این مقدار نیرو باید بتواند سبب حرکت دستگاه حفار در طول ایستگاه گردد که با توجه به مقدار وزن دستگاه (Wt) و ضریب اصطکاک به صورت زیر قابل محاسبه است.

$$Fn = W_s * \mu_s + W_b * \mu_b =$$
$$(۶۹۱*۰/۴) + (۲۰۹*۰/۱) = ۲۹۷/۳ \text{ تن} \quad (۲)$$
$$Fn = ۲۹۷۳ \text{ کیلو نیوتن}$$

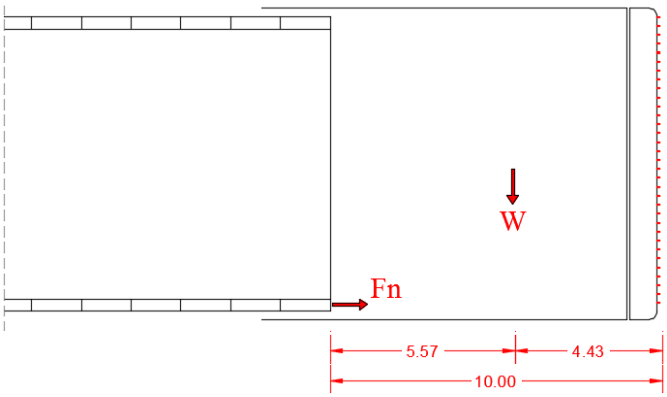
که در آن، W_s وزن دستگاه بدون سیستم پشتیبان که ۶۹۱ تن و W_b وزن سیستم پشتیبان که ۲۰۹ تن است و μ_b و μ_s ضریب اصطکاک فولاد به فولاد به ترتیب با گریس کاری ۰/۱ و بدون گریس کاری ۰/۴ است.

بنابراین نیروی اعمالی جهت حرکت دستگاه کافی بوده و باید بررسی گردد تا هیچ نقطه‌ای از دستگاه از روی بستر بتنی بلند نشود. طبق محاسبات، نیروی مورد نیاز پیشران

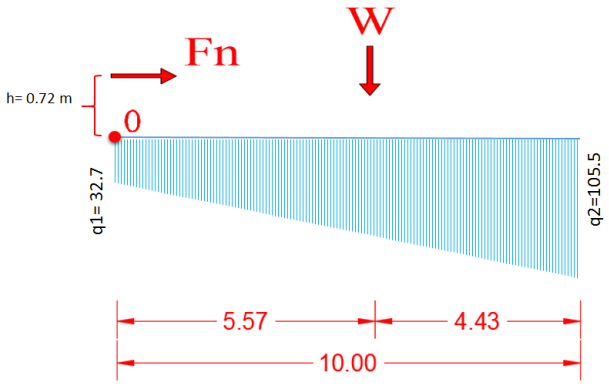
www.SID.ir

Archive of SID

دستگاه (بدون حفاری) در مرحله اول عبور از ایستگاه، ۲۹۷۳ کیلو نیوتن است، مرکز ثقل ۸ جک پایین از قسمت زیرین کله حفار ۰/۷۲ متر و مرکز ثقل دستگاه (بدون ملحقات)، از ابتدای کله حفار ۴/۴۳ متر است که در شکل ۵، نشان داده شده است. از رابطه تعادل نیرو و گشتاور، مقدار نیروهای عکس‌العمل به صورت زیر قابل محاسبه است همان‌طور که در شکل ۶ ، نشان داده شده است.



شکل ۵- مرکز ثقل دستگاه (بدون ملحقات) از ابتدای کله حفار



شکل ۶- نمایش مقدار نیروهای عکس‌العمل در طول ایستگاه

$$\sum F_y = 0 \qquad (q1+q2)/2 * 10 - W = 0 \qquad (۳)$$

$$\sum F_x = 0 \qquad F_n - 297.3 = 0$$

$$\sum M_o = 0 \qquad q1 * 10 * \frac{10}{2} + (q2-q1) * \frac{10}{2} * \left(10 * \frac{2}{3}\right) - F_n * h_n - W * 5.57 = 0$$

که در آن، h_n فاصله مرکز ثقل جک‌ها از قسمت زیرین کله‌حفار، W وزن قسمت جلوی دستگاه حفار و $q1$ و $q2$ نیروی‌های عکس‌العمل تکیه‌گاهی است.

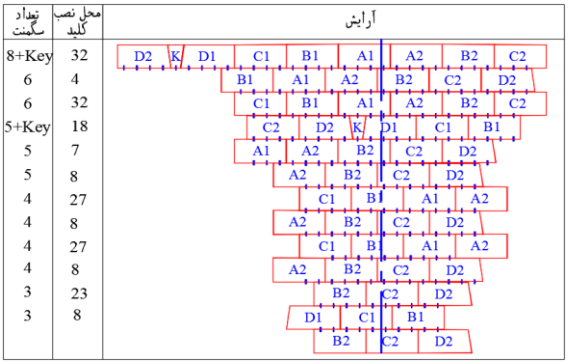
ملاحظه می‌گردد که عکس‌العمل تکیه‌گاهی دو سمت دستگاه مثبت است، بنابراین در طول حرکت دستگاه انحرافی وجود نخواهد داشت. استفاده از سه عدد قطعه بتنی پیش‌ساخته کف تا فاصله حدود ۵ تا ۶ رینگ از سینه‌کار ادامه می‌یابد تا به این صورت دستگاه حفار از طول ایستگاه عبور کند. پس از آن، بر اساس پلان زیر (شکل ۷) در چند رینگ تعداد قطعات بتنی پیش‌ساخته به ۴ و سپس ۵ قطعه بتنی پیش‌ساخته در هر رینگ افزایش می‌یابد تا اینکه کله حفار به محل حفاری می‌رسد و از این مرحله به بعد حفاری

www.SID.ir

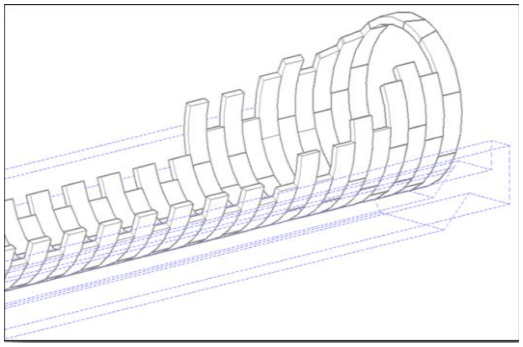
Archive of SID

تونل با نصب رینگ‌های ناقص پنج‌تایی و شش‌تایی ادامه داشته تا جایی که دستگاه به‌طور کامل داخل تونل قرار گیرد به طوری که اولین رینگ کامل در ابتدای دهانه تونل نصب شود.

با نصب ۴ قطعه بتنی پیش‌ساخته مطابق شکل ۷، ۱۶ جک در چیدمان قطعات بتنی پیش‌ساخته ۴ تایی در مدار قرار می‌گیرند ولی با مشاهده قطعات بتنی پیش‌ساخته از نمای روبرو و به جهت جلوگیری از انحراف به طرفین، ۱۴ جک مورد استفاده قرار می‌گیرد که در شکل ۸، نشان داده شده است.



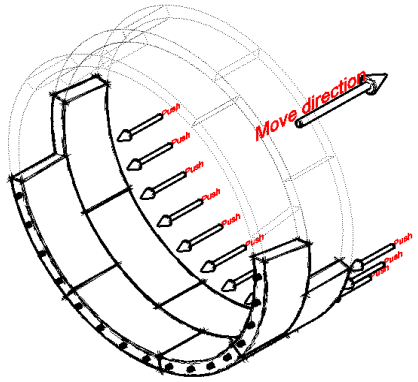
الف- پلان قطعات پیش ساخته در طول ایستگاه



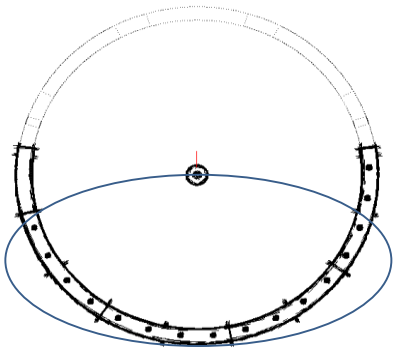
ب- نمایش سه بعدی از چیدمان و اجرای قطعات در طول ایستگاه

شکل ۷- الگوی کلی آرایش قطعات بتنی پیش‌ساخته در رینگ‌های ناقص جهت عبور دستگاه *TBM* از ایستگاه خط ۶ مترو تهران

به‌منظور بررسی کارایی ۴ قطعه بتنی پیش‌ساخته ابتدا محل اعمال برآیند نیروهای جک‌ها مطابق جدول ۱، محاسبه می‌گردد که فاصله آن از پایین‌ترین نقطه کله حفار ۱٫۴۷ متر است. به‌منظور جلوگیری از انحراف دستگاه به طرفین می‌بایست بررسی گردد تا هیچ نقطه‌ای از دستگاه از روی بستر بتنی بلند نشود. طبق محاسبات قبلی، نیروی موردنیاز پیش‌ران دستگاه (بدون حفاری) در مرحله اول عبور از ایستگاه، ۲۹۷۳ کیلو نیوتن است، مرکز ثقل ۱۴ جک پایین از قسمت زیرین کله حفار ۱٫۴۷ متر و مرکز ثقل دستگاه (بدون ملحقات) مطابق محاسبات صفحه قبل، از ابتدای کله حفار ۴٫۴۳ متر است. از رابطه تعادل نیروها مقدار نیروهای عکس‌العمل در طول ایستگاه با ۴ قطعه بتنی پیش-ساخته به صورت زیر است که در شکل ۹، نشان داده شده است.



الف- نمایش سه بعدی از وضعیت قرارگیری قطعات



ب- نمایش قرارگیری جک‌ها در قطعات

شکل ۸- نمایش نصب ۴ قطعه بتنی پیش‌ساخته و قرارگیری جک‌ها بر روی آن‌ها

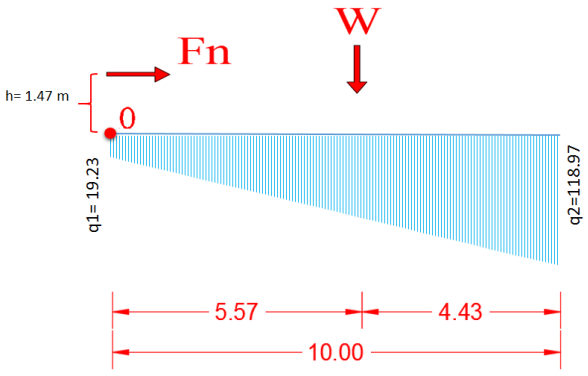
www.SID.ir

Archive of SID

جدول ۱- تعیین محل اعمال برآیند نیروهای ۱۴ جک اعمالی به رینگ

شماره جک	حداکثر نیرو F	فاصله جک از پایین کاترهد h	F*H	شماره جک	حداکثر نیرو F	فاصله جک از پایین کاترهد h	F*H	مقیاس خطی نیروهای جک‌ها
۰	۰	۰	۰					
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	
۷	۲۱۲/۲۹	۳/۱۸۵	۶۷۶/۱۴	۲۷	۲۱۲/۲۹	۳/۱۸۵	۶۷۶/۱۴	
۶	۲۱۲/۲۹	۲/۴۴۵	۵۱۹/۰۵	۲۸	۲۱۲/۲۹	۲/۴۴۵	۵۱۹/۰۵	
۵	۲۱۲/۲۹	۱/۷۹۵	۳۸۱/۰۶	۲۹	۲۱۲/۲۹	۱/۷۹۵	۳۸۱/۰۶	
۴	۲۱۲/۲۹	۱/۲۳۵	۲۶۲/۱۸	۳۰	۲۱۲/۲۹	۱/۲۳۵	۲۶۲/۱۸	
۳	۲۱۲/۲۹	۰/۷۹۵	۱۶۸/۷۷	۳۱	۲۱۲/۲۹	۰/۷۹۵	۱۶۸/۷۷	
۲	۲۱۲/۲۹	۰/۴۹۵	۱۰۵/۰۸	۳۲	۲۱۲/۲۹	۰/۴۹۵	۱۰۵/۰۸	
۱	۲۱۲/۲۹	۰/۳۴۵	۷۳/۲۴	۳۳	۲۱۲/۲۹	۰/۳۴۵	۷۳/۲۴	
جمع	۱۴۸۶		۲۱۸۵	جمع	۱۴۸۶		۲۱۸۵	

= کل نیروی وارده توسط جکها	۲۹۷۲	کیلو نیوتن
مرکز ثقل جکها از مرکز کاترهد	۱/۴۷	متر



شکل ۹- نمایش مقدار نیروهای عکس‌العمل در طول ایستگاه با ۴ قطعه بتنی پیش‌ساخته

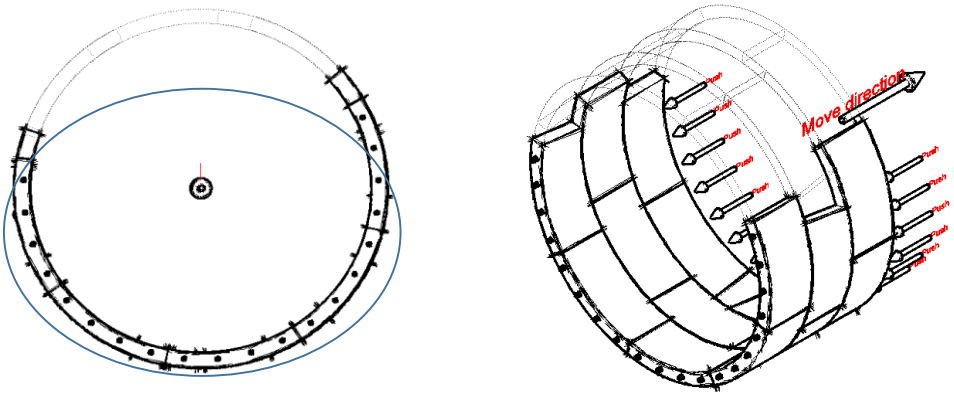
ملاحظه می‌گردد که مشابه سه عدد قطعه بتنی پیش-ساخته تمام بخش‌ها روی بستر بتنی باقی می‌ماند. با توجه به نیروی پیشران موردنیاز، شروع حفاری می‌تواند با رینگ‌های ناقص با ۵ یا ۶ قطعه بتنی پیش‌ساخته شروع

www.SID.ir

Archive of SID

گردد به ترتیبی که اولین رینگ کامل درون تونل نصب گردد. بدین منظور پس از نصب ۴ قطعات بتنی پیش‌ساخته کف رینگ‌های ناقص با ۵ قطعه بتنی پیش‌ساخته نصب می‌شود. امکان شروع حفاری با نصب رینگ ناقص با ۵ قطعه بتنی پیش‌ساخته بررسی می‌شود. با نصب ۵ قطعه بتنی پیش‌ساخته مطابق شکل ۱۰، تعداد ۱۸ جک مورد استفاده قرار می‌گیرد.

نیروی مورد نیاز در این مرحله شامل نیروی لازم جهت حرکت دستگاه که طبق محاسبات قبل (رابطه ۲) معادل ۲۹۷ تن است و همچنین نیروی لازم جهت شروع مجدد حفاری است. نیروی مورد نیاز برای شروع مجدد حفاری با توجه به میزان نیروی پیشران در حین اجرا در شرایط مختلف حفاری در مسیر تونل محاسبه شده است که نیرویی معادل ۸۰۰ تن است و جهت اطمینان از قابلیت کاربرد مناسب تعداد جک‌های مورد استفاده در روش تکیه-گاه سگمنتی جهت اعمال میزان نیروی پیشران کافی در حفاری دیواره بتن غیرمسلح این مقدار معادل ۱۲۰۰ تن در نظر گرفته شده است. به منظور بررسی کارایی ۵ قطعه بتنی پیش‌ساخته جهت حفاری ابتدا محل اعمال برآیند نیروهای جک‌ها مطابق جدول ۲ محاسبه می‌گردد که فاصله آن از پایین‌ترین نقطه کله حفار ۲٫۱۲ متر است.



الف- نمایش سه بعدی از وضعیت قرارگیری قطعات

ب- نمایش قرارگیری جک‌ها در قطعات

شکل ۱۰- نمایش نصب ۵ قطعه بتنی پیش‌ساخته و قرارگیری جک‌ها بر روی آن‌ها

حال با توجه به تعادل نیرو و گشتاور، نیروهای عکس‌العمل تکیه‌گاهی در شروع حفاری دستگاه *TBM* محاسبه و نتایج آن در شکل ۱۱، نشان داده شده است. همان‌گونه که در شکل ۱۱، مشاهده می‌گردد عکس‌العمل تکیه‌گاهی زمین در قسمت بالای کله حفار عدد منفی را نشان می‌دهد و این بدان معنی است که تعادل، فشار جک‌ها، وزن دستگاه و عکس‌العمل جبهه حفاری به نحوی است که نیروی پیشران مورد نیاز حفاری در بخش فوقانی تأمین نمی‌شود و می‌تواند سبب انحراف دستگاه حفار گردد. جهت برقراری تعادل دستگاه و تأمین نیروی پیشران مورد نیاز در شروع حفاری مطابق جدول ۳، از جک‌ها به نحوی بارگیری می‌گردد که محل برآیند نیروها در بالاترین سطح خود قرار گیرد.

این بار نیز با توجه به تعادل نیرو و گشتاور، نیروهای عکس‌العمل تکیه‌گاهی در شروع حفاری دستگاه *TBM* محاسبه شده و نتایج آن در شکل ۱۲، نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌گردد عکس‌العمل تکیه‌گاهی زمین در قسمت بالای کله حفار مثبت‌شده است اما عکس‌العمل جبهه حفاری در بالا و پایین اختلاف قابل‌توجهی دارند و به نحوی است که همچنان احتمال انحراف دستگاه وجود دارد؛ بنابراین امکان شروع حفاری با ۶ عدد قطعه بتنی پیش-ساخته مورد بررسی قرار می‌گیرد. با نصب ۶ قطعه بتنی پیش‌ساخته تعداد ۲۰ جک مورد استفاده قرار می‌گیرد. به منظور بررسی کارایی ۶ قطعه بتنی پیش‌ساخته جهت حفاری ابتدا محل اعمال برآیند نیروهای جک‌ها محاسبه شده که فاصله آن از پایین‌ترین نقطه کله حفار ۴٫۰۲ متر

www.SID.ir

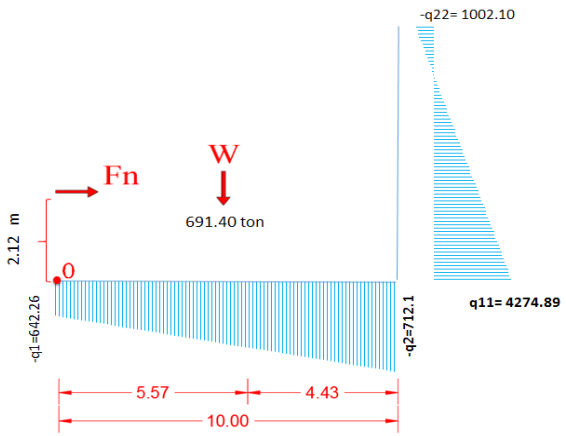
Archive of SID

است و با توجه به تعادل نیرو و گشتاور، نیروهای عکس‌العمل تکیه‌گاهی در شروع حفاری دستگاه *TBM* محاسبه شده و نتایج آن در شکل ۱۳، نشان داده شده است.

جدول ۲- تعیین محل اعمال برآیند نیروهای ۱۸ جک اعمالی به ۵ رینگ

مقیاس خطی نیروهای جک‌ها	F*H	فاصله جک از پایین کاترهد h	حداکثر نیرو F	شماره جک	F*H	فاصله جک از پایین کاترهد h	حداکثر نیرو F	شماره جک
					۰	۰	۰	۰
	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
	۳۹۷۵	۴/۷۸	۸۳۲/۵	۲۵	۳۹۷۵	۴/۷۸	۸۳۲/۵	۹
	۳۳۰۹	۳/۹۸	۸۳۲/۵	۲۶	۳۳۰۹	۳/۹۸	۸۳۲/۵	۸
	۲۶۵۲	۳/۱۹	۸۳۲/۵	۲۷	۲۶۵۲	۳/۱۹	۸۳۲/۵	۷
	۲۰۳۵	۲/۴۵	۸۳۲/۵	۲۸	۲۰۳۵	۲/۴۵	۸۳۲/۵	۶
	۱۴۹۴	۱/۸۰	۸۳۲/۵	۲۹	۱۴۹۴	۱/۸۰	۸۳۲/۵	۵
	۱۰۲۸	۱/۲۴	۸۳۲/۵	۳۰	۱۰۲۸	۱/۲۴	۸۳۲/۵	۴
	۶۶۲	۰/۸۰	۸۳۲/۵	۳۱	۶۶۲	۰/۸۰	۸۳۲/۵	۳
	۴۱۲	۰/۵۰	۸۳۲/۵	۳۲	۴۱۲	۰/۵۰	۸۳۲/۵	۲
	۲۸۷	۰/۳۵	۸۳۲/۵	۳۳	۲۸۷	۰/۳۵	۸۳۲/۵	۱
	۱۵۸۵۵		۷۴۹۳	جمع	۱۵۸۵۵		۷۴۹۳	جمع

= کل نیروی وارده توسط جکها	۱۴۹۸۵	کیلو نیوتن	
مرکز ثقل جکها از مرکز کاترهد	۲/۱۲	متر	



شکل ۱۱- نیروهای عکس‌العمل تکیه‌گاهی در شروع حفاری با ۵ قطعه بتنی پیش‌ساخته

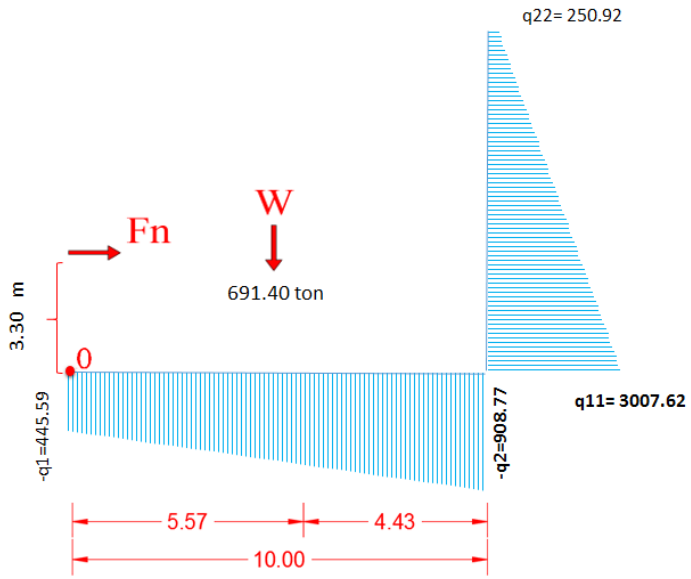
www.SID.ir

Archive of SID

جدول ۳- تغییر مقادیر نیروی جک‌ها و تعیین محل اعمال برآیند آن‌ها

شماره جک	حداکثر نیرو F	فاصله جک از پایین کاترهد h	F*H	شماره جک	حداکثر نیرو F	فاصله جک از پایین کاترهد h	F*H	مقیاس خطی نیروهای جک‌ها
۰	۰	۰	۰					
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	
۹	۱۶۶۵	۴/۷۸	۷۹۵۰	۲۵	۱۶۶۵	۴/۷۸	۷۹۵۰	
۸	۱۶۶۵	۳/۹۸	۶۶۱۸	۲۶	۱۶۶۵	۳/۹۸	۶۶۱۸	
۷	۱۶۶۵	۳/۱۹	۵۳۰۳	۲۷	۱۶۶۵	۳/۱۹	۵۳۰۳	
۶	۱۶۶۵	۲/۴۵	۴۰۷۱	۲۸	۱۶۶۵	۲/۴۵	۴۰۷۱	
۵	۱۶۶/۵	۱/۸۰	۲۹۹	۲۹	۱۶۶/۵	۱/۸۰	۲۹۹	
۴	۱۶۶/۵	۱/۲۴	۲۰۶	۳۰	۱۶۶/۵	۱/۲۴	۲۰۶	
۳	۱۶۶/۵	۰/۸۰	۱۳۲	۳۱	۱۶۶/۵	۰/۸۰	۱۳۲	
۲	۱۶۶/۵	۰/۵۰	۸۲	۳۲	۱۶۶/۵	۰/۵۰	۸۲	
۱	۱۶۶/۵	۰/۳۵	۵۷	۳۳	۱۶۶/۵	۰/۳۵	۵۷	
جمع	۷۴۹۲/۵		۲۴۷۱۹	جمع	۷۴۹۲/۵		۲۴۷۱۹	

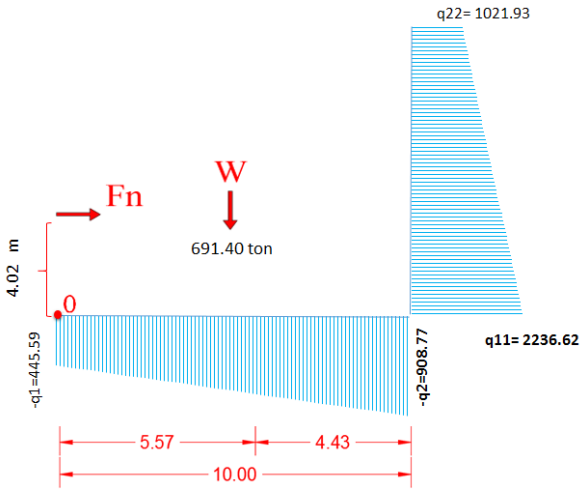
= کل نیروی وارده توسط جکها	۱۴۹۸۵	کیلو نیوتن
مرکز ثقل جکها از مرکز کاترهد	۳/۳۰	متر



شکل ۱۲- نیروهای عکس‌العمل تکیه‌گاهی در شروع حفاری با ۵ قطعه بتنی پیش‌ساخته با تغییر مقادیر نیروی جک‌ها

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۱۳- نیروهای عکس‌العمل تکیه‌گاهی در شروع حفاری با ۶ قطعه بتنی پیش‌ساخته

مشاهده می‌گردد تعادل فشار جک‌ها، وزن دستگاه و عکس‌العمل جبهه حفاری به نحوی است که نیروی پیشران مورد نیاز حفاری در بخش فوقانی نسبت به ۵ قطعه بتنی پیش‌ساخته مناسب‌تر است بنابراین با این روش از بارگیری جک‌ها می‌توان حفاری مجدد را شروع کرد. نتایج نشان می‌دهد که با توجه به میزان نیروی قابل‌اعمال توسط جک‌ها (رابطه ۱)، دستیابی به نیروی پیشران مورد نیاز حفاری با استفاده از روش تکیه‌گاه سگمنتی میسر بوده و حتی در شرایطی که میزان نیروی پیشران بیشتری مورد نیاز باشد نیز قابل‌استفاده و تأمین است. با این حال، در استفاده از این روش علاوه بر پیشروی دستگاه حفار با استفاده از تکیه‌گاه سگمنتی باید میزان انحراف آن نیز به طور ویژه‌ای مورد توجه قرار گیرد. از این‌رو، به منظور ارزیابی محاسبات صورت گرفته و ثبت میزان انحراف دستگاه با استفاده از این روش، از الگوی پیشنهادی در ایستگاه‌های بخش جنوبی خط ۶ مترو تهران استفاده شده است. بدین منظور میزان ثبت‌شده انحراف دستگاه در ایستگاه‌هایی از خط ۶ در شکل‌های ۱۴ و ۱۵ نمایش داده شده‌اند. در این شکل‌ها محل دیواره انتهایی ایستگاه که به عبارتی محل شروع مجدد حفاری است با خط‌چین قرمز مشخص شده است. در سمت چپ خط‌چین مذبور، حرکت دستگاه حفار بر روی بستر بتنی را نشان می‌دهد. همچنین تعداد قطعات بتنی پیش‌ساخته در هر رینگ پیشروی در طول ایستگاه با استفاده از سایه خاکستری‌رنگ مشخص شده است که نشان می‌دهد شروع مجدد حفاری با رینگ ناقص با ۶ عدد قطعه پیش‌ساخته انجام شده است.

همان‌گونه که مشاهده می‌شود در طول ایستگاه‌ها مقادیری از انحراف در پروفیل طولی ثبت‌شده است که به دلیل موقعیت‌های نصب بستر بتنی است و همچنین در شروع حفاری در انتهای ایستگاه *I6* و *H6* به ترتیب مقادیر ۸ و ۳۶ میلی‌متر انحراف که مقادیر قابل قبولی از انحراف هستند ثبت گردیده است. در ضمن بخشی از انحراف ۳۶ میلی‌متری در ایستگاه *H6* ناشی از موقعیت بستر بتنی است که مقداری برابر ۲۲ میلی‌متر است و به عبارت دیگر میزان انحراف شروع حفاری معادل ۱۴ میلی‌متر است که این مقدار انحراف نیز در رینگ‌های بعد حفاری اصلاح شده است. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از این روش دارای میزان انحراف در محدوده مجاز است و از این‌رو می‌توان با اطمینان از عملکرد آن مورد استفاده قرار گیرد.

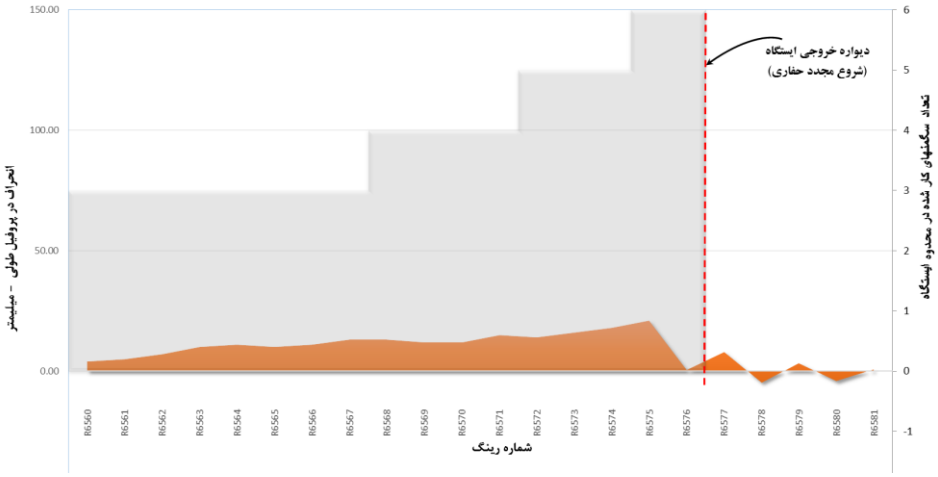
۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله به بررسی روش تکیه‌گاه سگمنتی جهت شروع مجدد حفاری در عبور دستگاه حفار از ایستگاه ساخته‌شده، پرداخته شده است. به گونه‌ای که به دلیل مشکلات اجرای رینگ کامل در فضای باز و نیاز به تمهیدات ویژه جهت اجرای آن، رینگ کاملی در فضای باز ایستگاه اجرا نگردد. به

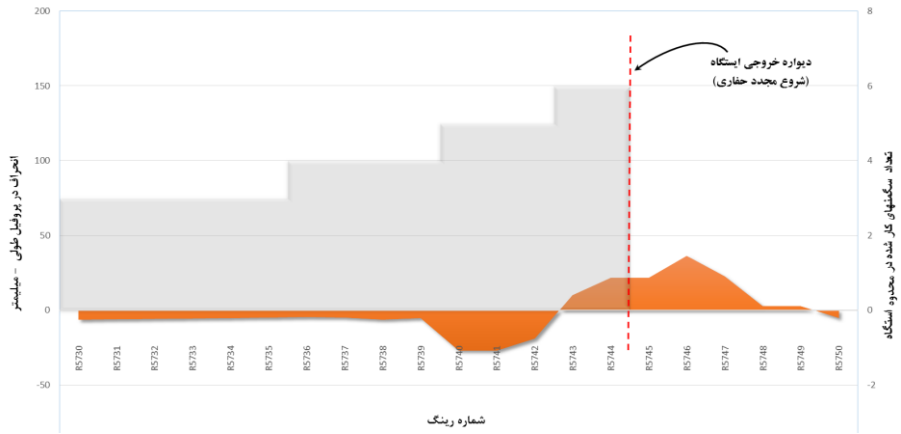
www.SID.ir

Archive of SID

منظور اطمینان از کارایی روش پیشنهادی، در عین حالی که شرایط لازم جهت شروع مجدد حفاری باید مهیا باشد دستگاه حفار نباید بیش‌ازحد مجاز نسبت به مسیر طراحی‌شده منحرف شود. بررسی‌ها نشان داد که با توجه به الگوی پیشنهادی در این پژوهش به گونه‌ای که از سه عدد قطعه بتنی پیش‌ساخته کف تا فاصله حدود ۵ تا ۶ رینگ از سینه کار استفاده شود تا به این صورت دستگاه حفار از طول ایستگاه عبور کند. پس از آن، در چند رینگ تعداد قطعات بتنی پیش‌ساخته به ۴ و سپس ۵ قطعه بتنی پیش‌ساخته در هر رینگ افزایش می‌یابد تا اینکه کله حفار به محل حفاری می‌رسد و از این مرحله به بعد حفاری تونل با نصب رینگ‌های ناقص پنج‌تایی و شش‌تایی ادامه داشته تا جایی که دستگاه به‌طور کامل داخل تونل قرار گیرد به طوری که اولین رینگ کامل در ابتدای دهانه تونل نصب شود. بررسی شروع حفاری با استفاده از رینگ‌های دارای ۵ و ۶ قطعه بتنی پیش‌ساخته نشان می‌دهد که ۶ قطعه بتنی پیش-ساخته نسبت به ۵ قطعه بتنی پیش‌ساخته برتری دارد. الگوی پیشنهادی در ایستگاه‌هایی از خط ۶ مورد ارزیابی قرارگرفته و نتایج نشان می‌دهد که علاوه بر کارآمد بودن این روش انحرافی بیش‌ازحد مجاز اتفاق نیفتاده است؛ بنابراین روش پیشنهادی را می‌توان با اطمینان مورد استفاده قرار داد.



شکل ۱۴- میزان ثبت‌شده انحراف دستگاه در ایستگاه I6 خط ۶ مترو تهران



شکل ۱۵- میزان ثبت‌شده انحراف دستگاه در ایستگاه H6 خط ۶ مترو تهران

www.SID.ir

Archive of SID

۵- مراجع

Ahab, c. c. (2016). *Technical reports of Tehran metro line 6*.

Alamir, P., Izadi, A. R., Jamshidi, H., Sotoode, A., & Khosrowtash, M. (2006). A new transit method of shield TBMs from excavated space (Case Study: Metro Shiraz). *7th Iranian Tunnelling Conference*.

Changi, K., Ghasabiyan, E., & Mardanshah, A. (2007). Comparison of Semi-ring support and push frame for starting excavation in mechanized excavation - case study the 2nd line of subway in Mashhad. *Research consulting engineers*.

El-Nahhas, F. M., Abdel-Rahman, M. T., & Iskander, G. M. (2006). Utilization of grouting techniques for construction of underground structures in urban areas.

Feng-yuan, L. (2009). Application of shield station-passing construction technology. *Construction Mechanization*, 2, 041.

Gharouni-nik, M., Zaeimi-feshani, M., & Fakhri, B. (2013). Technical and economic studies of station excavation and passing metro tunnels in urban areas. t*hird International Conference on Recent Advances in Railway Engineering*.

Giuseppe, l., Mancinelli, L., & Massimiliano, A. (2013). Milan M5 metro extension–the construction of Lotto station. *Tunnelling in Mediterranean Region*, Croatia.

Khosrowtash, M., Khosrowtash, M., Katebi, S., & Nabiree, N. (2009). Comparing deferent method for starting excavation with shield TBM. *8th Iranian Tunnelling Conference*, Tehran, Iran.

Le Van, C., Leoutsakos, G., & Doulakis, I. (2009). Athens Metro–Elliniko Extension TBM Tunnel Construction. *BHM Berg-und Hüttenmännische Monatshefte*, 154(10), 450.

Liu, W., Luo, F., & Mei, J. (2000). A new construction method for a metro station in Beijing. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 15(4), 409-413.

Mike, K., Ivor, T., & Andy, S. (2017). Crossrail project: machine-driven tunnels on the Elizabeth line, London. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Civil Engineering*.

Oldenhave, A. (2014). *Starting a large diameter TBM from surface: Feasibility study for the Netherlands*, Technical University of Delft, Netherlands .

Pöllath, K., Haehnig, F., & Glückert, J. (2007). Deep Diaphragm Wall Activities at RandstadRail Project in Rotterdam, The Netherlands. *DFI Journal-The Journal of the Deep Foundations Institute*, 1(1), 19-27.

Vittorio, G., Piergiorgio, G., Ashraf, M., & Shulin, X. (2008). *Mechanized tunnelling in urban areas: design methodology and construction control*: CRC Press.

Wang, X., Yang, B., & Liu, W.-b. (2007). Construction Technique on Station-crossing Movement for Shield Machine. *Tunnel Construction*, 4, 013.

Yanjun, X. (2012). Technologies for Local Semi-ring Assembly Shield Passing through Intermediate Ventilation Tunnel. *Tunnel Construction*, S1.

www.SID.ir

Archive of SID

Yun, B., Zhiren, D., & Huiming, W. (2010). Analysis on Adaptability of Shield Machine for Passing through Metro Station. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 1, 028.

Zhu, W., Weng, C., & Chen, J. (2012). Station-crossing Technologies of Open TBM: Case Study on No. 6 Line of Chongqing MRT. *Tunnel Construction*, 5, 028.

www.SID.ir

tuse.shahroodut.ac.ir

Tunneling & Underground Space Engineering

(TUSE)

Volume 8-Issue2\Summer 2019

نشریه‌ی مهندسی تونل و فضاهای زیرزمینی

TBM Crossing of Metro Station Using Semi-Ring Support

Technical Note

M. Bastami[1]; M. Eftekhari[1]; K. Ahangari[1]; GH. Sahami[2]

1- Department of Mining Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

2- Ahab Construction Company, Tehran, Iran.

Received:03 Nov 2018; Accepted: 18 Feb 2019

DOI: 10.22044/TUSE.2019.7626.1350

Keywords

Metro Station
Tunnel Boring Machine (TBM)
Segment
Semi-Ring Support
Push Frame

Extended Abstract

Summary

In this paper, a novel method based on a semi-ring support has been developed and proposed to facilitate TBM passing of metro stations and restarting the excavation. The results show that the proposed method can be safely used.

Introduction

Crossing of metro stations is one of the most challenging problems in construction of metro lines. Considering the difficulties and problems of using the push frame in the TBM passing of metro station and restarting excavation, this study presents a method based on the use of segmental rings that has been developed for the use in the underground stations.

Methodology and Approaches

In the proposed method, in order to create a support for applying the force of TBM thrust, a different pattern of the installation of the incomplete rings has been used so that it contains the advantages of using the semi-ring support in such a way that any complete ring has not been installed in the space of the underground station. The proposed pattern is such that three floor segments are used to a distance of about 5 to 6 rings to the end of the station; so that the TBM passes through the length of the station. Thereafter, in a few rings, the number of segments increases to 4, and then, 5 segments per ring until the cutter head reaches the end of the station. From this stage, the tunnel excavation continues with the installation of the semi-rings of 5 and 6 segments, until the boring machine is completely inserted into the tunnel so that the first complete ring is installed at the beginning of the tunnel.

Results and Conclusions

The results of this study show that excavation can begin using 5 and 6 segments, but semi-ring of 6 segments is somewhat superior to 5 segments. The proposed model has been evaluated at some stations of line 6 of Tehran metro and the results show that, in addition to the effectiveness of this method, any over-the-counter deviation does not occur. Therefore, the proposed method can be safely used.

www.SID.ir