بررسی عملکرد ماشین حفاری مکانیزه تمام مقطع در محیط‌های شهری

امیر حسن رضائی فرعی(نویسنده مسئول)، استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان؛

علی اکبر احترامی، دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی ژئوتکنیک، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان.

rezaei.ah@azaruniv.ac.ir

چکیده

نیاز به احداث سریع و بصرفه تونل همراه با تأمین ایمنی سازه‌های سطحی، سبب افزایش کاربرد ماشین‌های حفار تمام مکانیزه در محیط شهری گردیده است. در مقاله حاضر تونلسازی مکانیزه سپری به عنوان یکی از روش‌های مدرن تونلسازی معرفی و انواع ماشین‌های حفاری تمام مقطع برای زمین‌های نرم و سنگ سخت ارائه می‌شود. در ادامه مکانیزم کارکرد ماشین حفار سپر تعادلی فشار زمین (TBM-EPB) به عنوان رایج‌ترین ماشین حفاری در محیط‌های شهری به همراه مزایای استفاده از این دستگاه بیان و فناوری‌های نوین در طراحی ماشین‌های حفاری تمام مقطع بررسی می‌گردد. امکان حفاری در سنگ سخت و زمین نرم توسط TBMهای جدید و همچنین امکان نصب پوشش همزمان با حفاری تونل در زمین‌های نرم از جمله فناوری‌های نوین در نسل جدید TBMها به شمار می‌آیند. با توجه به اهمیت نشست زمین در محیط‌های شهری، کنترل فشار سینه‌کار، تزریق پیوسته دوغاب و کنترل حجم مواد حفاری شده از مهم‌ترین راه‌کارهای جلوگیری از نشست زمین در تونلسازی با استفاده از ماشین حفاری مکانیزه می‌باشد. در این مطالعه توسط نرم‌افزار المان‌محدود Plaxis به بررسی اثر کیفیت تزریق دوغاب سیمانی بین سطح خارجی آسترهای بتنی و سپر ماشین حین عملیات حفاری تونل بر نشست‌های سطحی زمین پرداخته می‌شود.

کلمات کلیدی: *تونلسازی مکانیزه ، TBM، EPB، ایمنی سازه‌های سطحی، plaxis*

Study of Mechanized Tunnel Boring Machines Performance in Urban Areas

Amir Hasan Rezaie Farie (Corresponding Author), Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Shahid Madani University, Tabriz, Iran

Ali Akbar Ehterami, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Shahid Madani University, Tabriz, Iran
rezaei.ah@azaruniv.ac.ir

Abstract
The need for rapid construction of the tunnel along with the safety of surface structures has increased the use of mechanized tunnel boring machines in the urban environment. In this paper, shield mechanized tunneling is introduced as one of the modern tunneling methods. In the following, the mechanism of operation of the TBM-EPB as the most commonly used boring machine in urban environments, along with the benefits of using this device, and the new technologies in the design of all-section boring machines, are introduced. Considering the importance of surface settlement in urban environments, controlling soil pressure, continuous injection of grout and controlling the volume of excavated materials, is one of the most important ways of preventing surface settlement in tunneling using a mechanized boring machine. In this study, the Plaxis software is used to investigate the effect of cement grout injections between the outer surface of concrete linings and the shield of the machine during tunnel boring operations on the surface settlement.

Keywords: *Mechanized Tunneling, TBM, EPB, Surface Settlement, Plaxis.*

۱– مقدمه

با افزایش روز افزون شهرنشینی، گسترش شهرها و رشد فزآینده جمعیت نیاز به تأسیسات زیربنایی و راه‌های ارتباطی افزایش می‌یابد. از طرف دیگر معمولاً در مناطق شهری دسترسی به فضای لازم جهت ساخت این راه‌ها وجود ندارد و به خاطر وجود سازه‌های مختلف سطحی امکان ساخت وجود نداشته و یا در صورت وجود نیز هزینه بالایی دارد و موجب مشکلات ترافیکی و معیشتی در زمان اجرا می‌گردد. همچنین فقدان سیستم حمل و نقل مناسب ما را در مدیریت حمل و نقل شهری با مشکلات بیشماری از جمله تأخیر و طولانی بودن سفرهای درون شهری، اتلاف وقت شهروندان، افزایش میزان مصرف سوخت، افزایش آلودگی هوا و در نهایت افزایش هزینه سفر مواجه نموده است. با توجه به عوامل فوق و نیاز فزآینده به زمین بویژه در مناطق شلوغ و پرتراکم شهرها، استفاده از فضای زیرزمینی و پروژه‌های تونلسازی جهت ایجاد راه‌های ارتباطی، خطوط مترو و زیر ساختارها افزایش چشمگیری در سال‌های اخیر در سرتاسر دنیا داشته است و استفاده از فضاهای زیرزمینی به عنوان بخشی از نیازهای شهری امری اجتناب ناپذیر می‌باشد [۱]. امروزه با پیشرفت تکنولوژی، استفاده از حفاری مکانیزه در محیط‌های شهری بنا به دلایلی مانند ایجاد اختلال کم در ترافیک شهری، سرعت بالا، سهولت و ایمنی بیشتر در عملیات اجرایی حفاری، افزایش قابل ملاحضه‌ای یافته است. در مقاله حاضر با تمرکز بر پروژه‌های مترویی تونلسازی مکانیزه سپری به عنوان یکی از روش‌های مدرن تونلسازی معرفی شده و مهمترین ویژگی‌های آن مورد بررسی قرار گرفته است. در ادامه انواع ماشین‌های تمام مقطع مکانیزه برای زمین‌های نرم و سنگ سخت بررسی گردیده. فناوری‌های جدید تونلسازی مکانیزه سپری، امکان ساخت تونل‌های طویل را در شرایط مختلف ژئوتکنیکی زمین از قبیل ضخامت کم روباره، زمین‌های ناپایدار، حضور آب زیرزمینی و وجود سازه‌های سطحی بدون برهم زدگی سطح زمین و یا بروز نشست‌های قابل ملاحظه فراهم می‌سازد. بروز نشست‌های سطحی در عملیات تونلسازی شهری حتی با به کارگیری تکنولوژی‌های جدید اجرایی امری اجتناب‌ناپذیر می‌باشد. به دلیل تأثیر زیاد پارامترهای هندسی تونل و مشخصات ژئوتکنیکی خاک پیرامون آن بر افزایش یا کاهش نشست سطحی زمین، در مقاله حاضر به عنوان مطالعه موردی محدوده مجاور ایستگاه چهار خط۲ مترو تبریز به علت سربار کم تونل و عرض کم خیابان در ناحیه مذکور جهت بررسی عددی اثر کیفیت تزریق دوغاب در فاصله ایجاد شده بین سطح خارجی آسترهای بتنی و سپر ماشین حین عملیات حفاری تونل بر نشست‌های سطحی زمین انتخاب گردیده است.

۲– حفاری مکانیزه در محیط شهری

امروزه روش‌های مختلفی جهت حفر تونل در محیط‌های شهری وجود دارد. عواملی چون سطح مقطع تونل، میزان پیشروی، میزان سرمایه مورد نیاز، مدت انجام پروژه و مهم‌تر از همه نوع خاک و سنگ و وضعیت آب زیرزمینی، نقش اساسی در انتخاب روش حفاری در محیط‌های شهری را دارند. با احداث تونل تعادل طبیعی زمین از بین می‌رود، به همین علت بایستی روشی انتخاب شود که تغییرات زمین به حداقل برسد.

ماشین‌هایی که برای تونلسازی مکانیزه استفاده می‌گردند TBM نامیده می‌شوند. در این دستگاه‌ها تمام عملیات حفاری، نصب پوشش و انتقال مواد حفاری شده به بیرون از تونل توسط خود دستگاه و بصورت مکانیزه انجام می‌شود. این نوع دستگاه‌ها در انواع زمین‌ها از سنگ سخت تا خاک نرم و آبدار قابل بکارگیری می‌باشد. در زمین‌های سست، این گونه دستگاه‌ها دارای سیستمی

جهت حفاظت جدار قسمت حفاری شده بین جبهه پیشروی و پوشش دائمی تونل، می‌باشند. این سیستم حفاظتی که یک ورق فلزی ضخیم و مقاوم می باشد، سپر نامیده می‌شود. معمولاً سپر دارای چند متر طول بوده و در انتهای آن، حفاظت از زمین حفاری شده توسط قطعات پیش ساخته بتنی (segment) که به شکل معین روی هم کار گذارده می‌شود، انجام می‌شود. سپر بایستی در برابر فشار زمین‌های اطراف مقاومت کرده و در صورت وجود آب از ورود آن جلوگیری کند. پیشروی ماشین معمولاً توسط یک سری جک‌هایی که به پوشش بتنی تونل متکی می‌شوند، انجام می‌شود. در قسمت جلو سپر، سرمته حفاری (cutter head) مجهز به مجموعه‌ای از تیغه‌های برنده است که با استفاده از آن‌ها عملیات حفاری انجام می‌شود [۲]. در شکل ۱ نمونه‌ای از حفاری TBM در محیط شهری به همراه نمونه‌ای از دستگاه نشان داده شده است.

مهمترین مزایای حفاری مکانیزه عبارتند از:

- مکانیزاسیون و نرخ‌های پیشروی بالا
- ایجاد مقطع دقیق تونل
- حداقل تأثیر ممکن بر سازه‌های سطح زمین
- ایمنی بالا برای افراد
- سازگار با محیط زیست، حفظ سطح آب زیرزمینی و سروصدای کم
- پوشش اقتصادی و با کیفیت بالای تونل
- امکان حفاری تونل‌های با قطر بزرگ

۳- انواع ماشین حفاری مکانیزه

با توجه به نوع و جنس زمین می‌توان ماشین‌های حفاری مکانیزه را به دو دسته کلی تقسیم‌بندی کرد. ماشین حفاری مکانیزه برای سنگ سخت و ماشین حفاری مکانیزه برای زمین‌های سست. تفاوت اصلی بین این دو نوع دستگاه طراحی سرمته حفار و نوع نگهداری سینه‌کار است. جدول ۱ مهم‌ترین ویژگی این دو نوع دستگاه را مقایسه می‌کند [۳].

(الف)

(ب)

شکل ۱: *الف) حفاری TBM در محیط شهری ب) نمونه‌ای از دستگاه TBM*

جدول ۱: *مقایسه دستگاه TBM برای سنگ سخت و زمین نرم [۳]*

	زمین نرم	سنگ سخت
ابزار برش‌دهنده	تیغه‌های قلمی	دیسک غلطکی
نگهداری سینه کار	EPB و slurry	نیاز نیست (نگهداری طبیعی)
Thrust method	Shield jack	Thrust jack
عکس العمل در برابر نیروی محوری و گشتاور	توسط جک‌های سپر که به سگمنت اعمال می‌شود	توسط گریپر که به دیواره اعمال می‌شود
توان مورد نیاز سرمته حفار	توان کم، گشتاور زیاد و سرعت کم	توان بالا، گشتاور کم، سرعت بالا
نوع نگهداری تونل	سگمنت	نگهداری رینگ، شاتکریت، بدون نگهداری
زمان نصب سیستم نگهداری	نصب سگمنت بعد از حفاری	نصب سگمنت همزمان با حفاری (دو سپری)

۳-۱- ماشین حفاری مکانیزه برای زمین‌های سست

ماشین حفاری مکانیزه برای زمین‌های سست بر اساس تأمین پایداری سینه‌کار و نگهداری دیواره تونل توسط سگمنت طراحی می‌شوند. به منظور حفظ پایداری سینه‌کار انواع روش‌های نگهداری توسعه پیدا کرده‌اند که مهم‌ترین آن‌ها عبارتند از:

- نگهداری طبیعی سینه‌کار
- نگهداری مکانیکی سینه‌کار
- نگهداری سینه‌کار با استفاده از هوای فشرده
- نگهداری سینه‌کار با استفاده از دوغاب (نگهداری دوغابی)
- نگهداری سینه‌کار به روش فشار تعادلی زمین (شکل ۲)

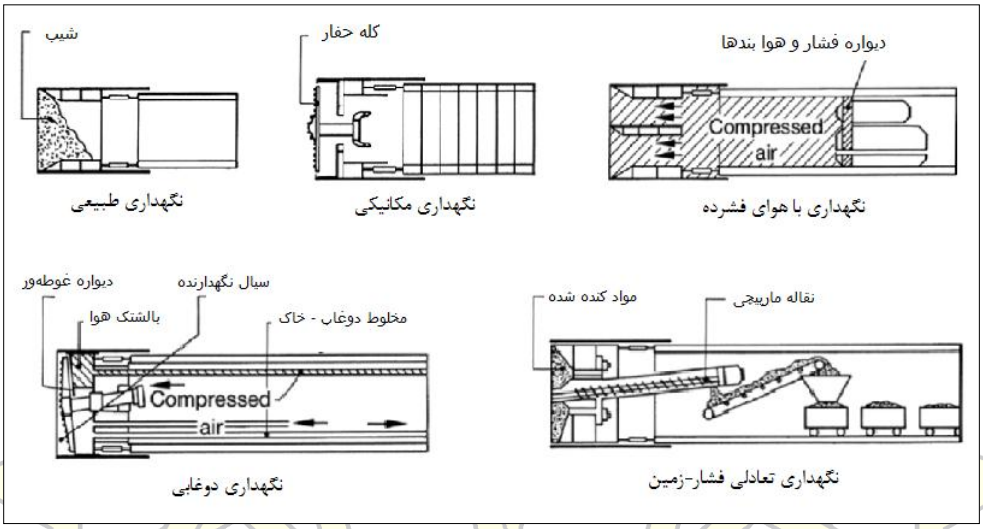
برای حفاری در محیط شهری بیشتر از دو روش نگهداری دوغابی و نگهداری فشار تعادلی زمین استفاده می‌شود که در زیر توضیح داده شده است.

۳-۱-۱- نگهداری دوغابی سینه‌کار (Slurry)

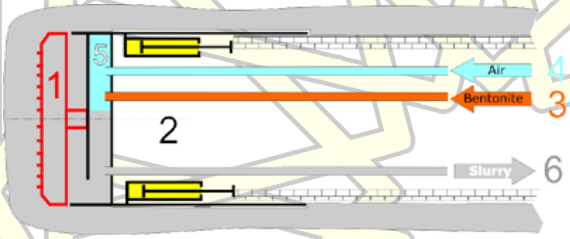
در این روش سینه‌کار تونل بوسیله سیال تحت فشار نگهداری می‌شود. علارغم عملکرد بهتر نگهداری سینه‌کار تونل با دوغاب در مقایسه با نگهداری مکانیکی یا هوای فشرده، کاربرد این روش به خاطر ضرورت نصب سیستم جداسازی دوغاب مورد استفاده برای نگهداری سینه‌کار مشکلات بیشتری دارد (شکل ۳).

۳-۱-۲- نگهداری فشار تعادلی زمین (EPB)

در این روش از خود مصالح حفاری شده برای نگهداری سینه‌کار تونل استفاده می‌شود. مصالح حفاری شده پس از اضافه شدن آماده‌سازها (آب، سوسپانسیون رسی یا بنتونیتی، افزودنی‌های شیمیایی مانند فوم و...) بصورت یک دوغاب در آمده (دوغاب زمین) و درون محفظه حفاری ماشین ریخته می‌شوند. این دوغاب تحت فشار قابل کنترل قرار گرفته و در حالت تعادل با نیروهای اعمالی به سینه کار تونل از طرف محیط خاکی و آب زیر زمینی تنظیم می گردد. به دلیل قابلیت تنظیم دقیق فشار در سینه‌کار حفاری و عملکرد ایمن دستگاه، این روش نگهداری مناسب‌ترین روش در محیط‌های شهری بوده و اساس کار ماشین‌های حفار سپر تعادلی زمین را تشکیل می‌دهد (شکل ۴).

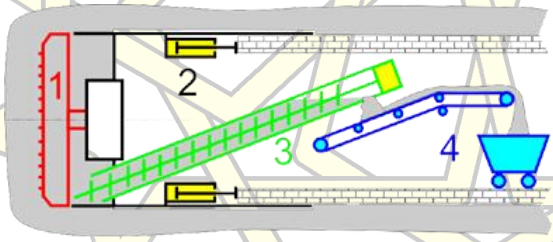


شکل ۲: *روش‌های نگهداری زمین در سینه‌کار تونل [۴]*



۱. کله حفار
۲. سپر
۳. تزریق بنتونیت
۴. رگلاتور هوا
۵. حباب هوا
۶. خروج دوغاب همراه با خاک

شکل ۳: *اجزای اصلی ماشین‌های دوغابی (Slurry)*



۱. کله حفار
۲. سپر
۳. نقاله مارپیچی
۴. نوار نقاله و حمل مواد حفاری شده

شکل ۴: *اجزای اصلی ماشین‌های فشار تعادلی زمین (EPB)*

۳-۲- ماشین حفاری مکانیزه برای سنگ سخت

ماشین حفاری مکانیزه برای سنگ سخت بر اساس استفاده از دیسک‌های غلطکی در کله‌حفار و افزایش توان و گشتاور به صورتی که دستگاه بتواند توده‌سنگ را حفاری کند، طراحی می‌شوند. در این نوع دستگاه‌ها اغلب نیاز به نگهداری سینه‌کار نیست. دستگاه‌های حفاری مکانیزه برای سنگ سخت به سه دسته تک سپری، دو سپری و Gripper تقسیم می‌شوند.

۳-۲-۱- ماشین حفاری مکانیزه تک سپری برای سنگ سخت

در این نوع دستگاه، از سگمنت (پوشش تونل) جهت جلو راندن دستگاه استفاده می‌شود. در این نوع دستگاه ۸۰ درصد زمان اجرایی صرف حفاری و ۲۰ درصد صرف نصب سگمنت می‌شود.

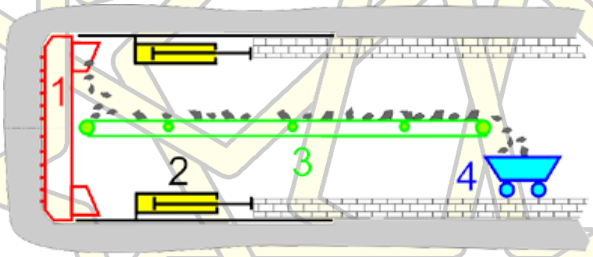
۳-۲-۲- ماشین حفاری مکانیزه دو سپری برای سنگ سخت

طراحی این نوع دستگاه به گونه‌ای است که امکان نصب سگمنت به طور همزمان با حفاری تونل وجود دارد، به همین دلیل مدت زمان حفاری صد درصد مدت زمان اجرایی می‌باشد (شکل۶). این نوع ماشین در سه مرحله کار می‌کند.

۱) اتصال سپر عقبی (rear shield) به دیواره حفاری شده تونل
۲) حفاری تونل توسط کله حفار و نصب سیستم نگهداری
۳) پیشروی سپر عقبی به موقعیت جدید و جلو کشیده شدن دستگاه

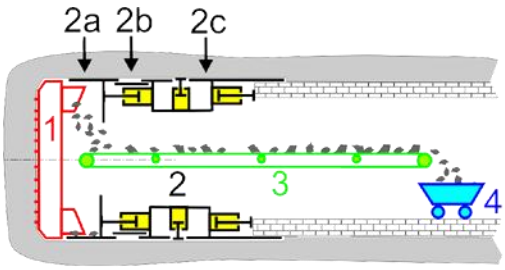
۳-۲-۳- گیره‌ها (Gripper)

کفشک‌هایی هستند که به صورت شعاعی به دیواره حفاری شده تونل، نیرو اعمال می‌کنند. بر خلاف دستگاه‌های سپری این نوع ماشین حفاری از سیستم نگهداری به عنوان تکیه‌گاه استفاده نمی‌کند.



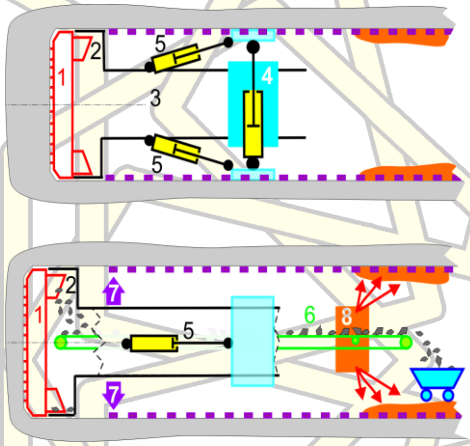
۱. کله حفار
۲. سپر
۳. نوار نقاله
۴. حمل مواد حفاری شده

شکل ۵: *اجزای اصلی ماشین تک سپری برای سنگ سخت*



۱. کله حفار
۲. سپر
2a- سپر جلویی
2b- سپر Double
2c- سپر عقب
۳. نوار نقاله
۴. حمل مواد حفاری شده

شکل ۶: *اجزای اصلی ماشین دو سپری برای سنگ سخت*



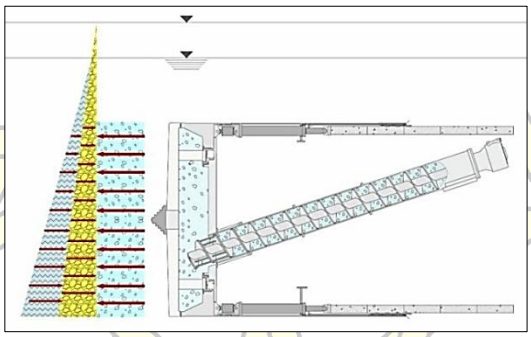
۱. کله حفار
۲. سپر جلویی
۳. تیر اصلی
۴. Gripper trolley
۵. thrust cylinders
۶. نوار نقاله
۷. Ring beam erector structure
۸. شاتکریت

شکل ۷: *اجزای اصلی ماشین Gripper برای سنگ سخت*

۴- عملکرد دستگاه سپر تعادلی فشار زمین (TBM-EPB)

با توجه به کاربرد گسترده ماشین سپر تعادلی فشار زمین در محیط شهری در این قسمت عملکرد این ماشین بررسی می‌شود. دراین نوع TBMها نگهداری سینه‌کار بدون وجود ابزار نگهداری ثانویه (هوای فشرده، دوغاب، صفحات فشارنده سینه‌کار) و توسط بخشی از مواد حفاری شده انجام می‌گیرد از اینرو این قبیل TBMها را EPB می‌نامند. زمین بوسیله ابزار برشی روی کله حفار کنده شده و از طریق دریچه‌های موجود بر روی سر مته به صورت فشرده شده وارد اتاقک حفاری می‌گردد. مصالح حفاری شده موجود در اتاقک حفاری توسط یک نقاله حلزونی از درون اتاقک قابل تخلیه می‌باشد که با تنظیم نرخ تخلیه مصالح می‌توان فشار اعمالی به سینه‌کار را تنظیم کرد. بعبارت دیگر همزمان با باز شدن جک‌های پیشران دستگاه، دوغاب مصالح درون اتاقک تحت فشار قرار گرفته و این فشار به سینه‌کار اعمال می‌گردد و تنظیم میزان فشار با کنترل نرخ تخلیه مصالح توسط نقاله حلزونی انجام می‌گیرد. معمولاً فشار وارد به سینه حفاری درحدی تنظیم می‌شود که حالت تعادلی بین فشار وارده از سوی دستگاه به سینه حفاری و فشار برجای خاک وجود داشته باشد. در شکل۸ نحوه تنظیم فشار تعادلی سینه‌کار بصورت شماتیک نشان داده شده است. اگر

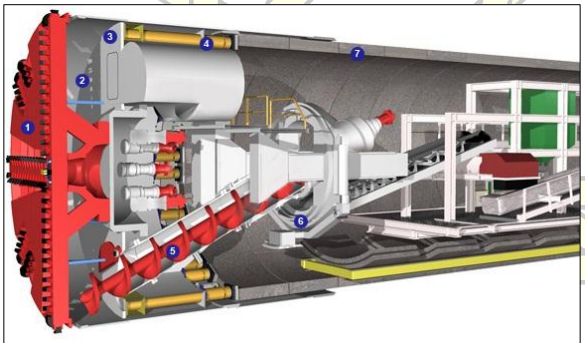
فشار نگهداری دوغاب زمین تا بالاتر از میزان تعادل افزایش یابد به بالا آمدگی زمین در جلو سپر منجر می شود. همچنین در صورت تخلیه مصالح با سرعت بالا، به دلیل خالی شدن اتاقک حفاری و با کاهش فشار در سینه‌کار، خاک زمین ممکن است به داخل محفظه ریزش کرده و سبب ایجاد نشست در سطح زمین گردد.



***شکل ۸:** تعادل فشار زمین [۵]*

همزمان با حفاری و پیشروی دستگاه، در انتهای سپر فلزی قطعات پیش ساخته بتنی (سگمنت) نصب می‌شوند که نسبت به خط حفاری شده زمین فاصله دارند .پس از تمام شدن طول سپر، این قطعات در تماس با سطح حفاری شده قرار گرفته و وظیفه نگهداری زمین را بر عهده خواهند داشت. برای جلوگیری از تغییر شکل زمین و نشست های سطحی ، فضای خالی مابین پشت سگمنت های بتنی تا زمین با استفاده از گروت، تزریق و پر می شود. با گذشت زمان و پیشرفت عملیات این گروت به تدریج سخت گردیده و نیروهای ناشی از زمین اطراف به پوشش تونل منتقل می گردد. شکل ۹ نمایی از یک ماشین حفار TBM-EPB و اجزا آن را نمایش می‌دهد.

کنترل نشست زمین یکی از مهم‌ترین مزیت‌ها در حفاری تونل با TBM-EPB می‌باشد. به طور کلی نشست زمین در حفاری مکانیزه ناشی از اضافه حفاری دستگاه، کاهش فشار سینه کار در اتاقک حفاری و تزریق ناکافی فضای خالی پشت سگمنت می‌باشد. با راهبری صحیح دستگاه، کنترل دقیق فشار سینه‌کار و تنظیم مناسب نرخ تخلیه مصالح از درون اتاقک حفاری متناسب با نرخ پیشروی دستگاه و همچنین تزریق پیوسته دوغاب همراه با پیشروی تونل به منظور اطمینان از پرشدن فضای خالی پشت سگمنت، می‌توان نشست سطحی و در نتیجه آسیب به سازه‌های سطحی را به حداقل مقدار ممکن رساند [۵].



***شکل ۹:** طرح شماتیکی از قسمت‌های اصلی دستگاه EPB*

۵- معرفی فناوری‌های جدید در طراحی TBM

با پیشرفت صنعت تونلسازی تقاضا برای احداث سریع تونل با طول و عمق زیاد افزایش یافته، لذا امکان تغییر شرایط ژئوتکنیکی مسیر تونل از سنگ سخت به زمین نرم، وجود دارد [۵]. از این رو TBMهای جدید، جهت حفاری دستگاه در شرایط مختلف زمین‌شناسی توسعه یافته‌اند که در زیر برخی از فناوری‌های به کاربرده شده، معرفی می‌شود.

۵-۱- حفاری و نصب سگمنت همزمان برای ماشین‌های حفاری زمین نرم

طراحی این نوع دستگاه به گونه‌ای است که امکان نصب سگمنت همزمان با حفاری تونل وجود دارد. شکل۱۰ دستگاه سپر دوغابی (Slurry) با قطر ۳/۶۲ متر را نشان می‌دهد که حفاری و نصب سیستم نگهداری به طور همزمان انجام می‌گیرد.

۵-۲- ماشین‌های DUAL MODE

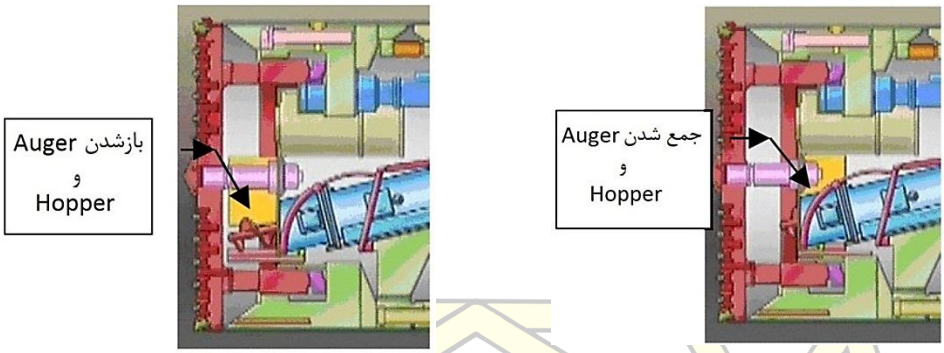
این نوع دستگاه قابلیت حفاری در زمین‌های نرم و سنگ سخت را دارد، هنگام مواجه شدن با زمین نرم، فشار سینه‌کار ایجاد شده و در حالت مواجه شدن با سنگ سخت دستگاه در حالت فشار اتمسفر کار می‌کند. شکل۱۱ نمونه‌ای از این نوع دستگاه را نشان می‌دهد.

۵-۳- EPB و Slurry برای سنگ سخت

امروزه محدوده استفاده از EPB و Slurry در زمین‌های نرم و سنگ سخت گسترش یافته است. استفاده از فشار سینه‌کار امکان حفاری در زمین های سست و استفاده از دیسک‌های غلطکی امکان به کارگیری در سنگ‌های سخت را فراهم می‌کند. شکل۱۲ نمونه‌ای از این نوع دستگاه در خط ۹ متروی سئول را نشان می‌دهد.

الف) روند حفاری و نصب سگمنت ب) سپر دوغابی (Slurry)

شکل ۱۰: *حفاری و نصب سگمنت همزمان برای ماشین‌های حفاری زمین نرم*



الف) حفاری در حالت بسته (برای زمین نرم) ب) حفاری در حالت باز (برای سنگ سخت)

شکل ۱۱: *ماشین‌های حفاری DUAL MODE*

شکل ۱۲: *ماشین حفاری خط ۹ متروی سئول*

۶- کاربری فضاهای زیرزمینی در محیط‌های شهری

استفاده از پتانسیل فضای زیرزمینی شهرها علاوه بر مواردی همچون حمل و نقل می‌تواند شامل کاربری‌های دیگری مانند فضاهای تفریحی، تجاری، اداری و خدماتی نیز باشد. توسعه شهری با رویکرد استفاده از فضاهای زیرزمینی یکی از رهیافت‌های نوین در زمینه شهرسازی معاصر در اکثر شهرهای بزرگ دنیا می‌باشد. در سال‌های اخیر پروژه‌های مهمی در فضای زیرین مناطق شهری و غیرشهری طراحی، اجرا و مورد بهره‌برداری قرار گرفته‌اند، که در ادامه این مطالعه به معرفی چند مورد از پروژه‌های تونلسازی مکانیزه سپری پرداخته می‌شود.

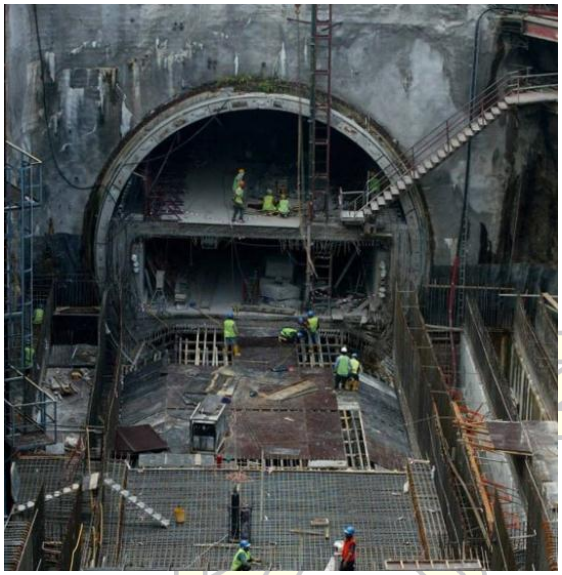
۶-۱- تونل Smart مالزی

تونل اسمارت به عنوان نخستین تونل دو منظوره جهان به طول ۹/۷ کیلومتر در کوالالامپور احداث گردیده. ساخت این تونل از سال ۲۰۰۳ شروع و در ژوئن ۲۰۰۷ بهره‌برداری از آن آغاز شد. این تونل ابتدا به عنوان مسیری برای انحراف آب‌های خروشان و سیلاب‌های رودخانه‌ای که از به هم

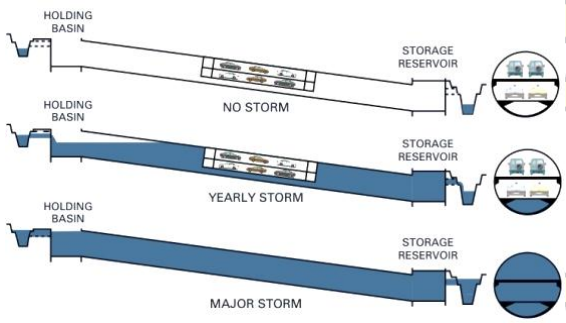
پیوستن دو رودخانه بزرگ در مرکز شهر حاصل می‌شوند، در نظر گرفته شده بود. سپس با یک ایده خلاق و با در نظر گرفتن قطر داخلی ۱۱/۸ متر، تونل به گونه‌ای طراحی شد که بتوان در زمان‌های غیر اضطراری که جریان آب چندان قوی نیست به عنوان تونلی رفت و آمدی برای وسایل نقله جهت کم کردن بار ترافیکی یکی از شاهراه‌های مهم و شلوغ شهر مورد استفاده قرار بگیرد [۶]. شکل۱۳ مقطعی از این تونل سه طبقه را نشان می‌دهد که قسمت پایینی آن در شرایط مناسب جوی برای انتقال آب و دو طبقه فوقانی برای عبور و مرور وسایل نقلیه استفاده می‌شود.

مطابق شکل ۱۴ برای بهره‌برداری از این تونل ۳ حالت پیش‌بینی شده است:

۱) حالتی که جریان آب رودخانه به قدری کم است که اساساً نیازی به انحراف توسط تونل ندارد.
۲) زمانی است که طوفان‌های کوچک یا متوسط رخ می‌دهد ولی فشار جریان آب زیاد نیست. در چنین حالتی جریان آب به داخل تونل منحرف شده و از طریق مسیر فرعی به پایین‌ترین قسمت تونل هدایت می‌شود. در این حالت دو مسیر عبور و مرور بالایی تونل همچنان بر روی وسایل نقلیه باز است.
۳) حالتی است که در فصل طوفان‌های سهمگین رخ می‌دهد. در چنین حالتی کل تونل بر روی وسایل نقلیه بسته می‌شود و پس از خارج شدن کلیه ماشین‌ها جریان سیلاب به طور خودکار به داخل تونل هدایت می‌گردد. ظرفیت آب تونل در چنین حالتی به سه میلیون مترمکعب می‌رسد.



شکل ۱۳: *مقطعی از تونل Smart*



شکل ۱۴: *سه حالت استفاده از تونل Smart*

۶-۲- تونل Gotthard Base اروپا

طولانی‌ترین تونل جهان که در سال ۲۰۱۶ افتتاح گردید تونل گوتارد بیس با طول ۵۷ کیلومتر می‌باشد که از میان رشته کوه‌های آلپ عبور می‌کند و شمال و جنوب سوئیس را به هم متصل می‌نماید. این تونل در فاصله‌ی ۲۳۰۰ متری زیر رشته‌کوه آلپ قرار دارد و با این حساب عمیق‌ترین تونل جهان هم می‌باشد. این تونل از میان صخره‌هایی می‌گذرد که دمای آن‌ها در برخی نقاط به ۴۶ درجه سانتیگراد می‌رسد و برای ساختن آن بیش از ۲۸ میلیون تن سنگ از کوه‌ها خارج شده است. در ساخت تونل گوتارد حدود ۴

میلیون متر مکعب بتن مصرف شده که ۸۴ برابر بتن به کار رفته در ساختمان امپایر استیت در نیویورک است. دولت سوئیس برای تکمیل این تونل حدود ۱۱ میلیارد دلار هزینه کرده است و برآورد شده که روزانه ۲۶۰ قطار باربری و ۶۵ قطار مسافربری بتوانند از آن رفت و آمد کنند. این قطارها مسیر تونل را تنها در ۱۷ دقیقه طی خواهند کرد. رکورد طولانی‌ترین تونل جهان پیش از این متعلق به تونل سیکان با طول ۵۴ کیلومتر در کشور ژاپن بود. تونل مانش نیز که فرانسه را به بریتانیا وصل می‌کند با ۵۰ کیلومتر در جایگاه سوم قرار دارد. شکل ۱۵، مته حفاری ۹/۵ متری استفاده شده در این پروژه را که از ۵۸ دندانه تشکیل شده و شکل۱۶ فضای داخلی این پروژه بزرگ را نشان می‌دهند[۷].

شکل ۱۵: *مته حفار تونل گوتارد*

شکل ۱۶: *فضای داخلی تونل گوتارد*

۶-۳- شهر زیرزمینی RÉSO مونترال

شهر زیرزمینی مونترال با اسم رسمی RÉSO برگرفته از کلمه فرانسوی Réseau به معنی شبکه، سیستمی از مجموعه‌های به هم پیوسته در مناطق مختلف مونترال کانادا می‌باشد. این مجموعه زیرزمینی دارای ۳۲ کیلومتر تونل مترو با مساحت ۱۲ کیلومتر مربع و ۶۰ مرکز تجاری و اداری با مساحتی بیش از ۳/۶ کیلومتر مربع فضای زمینی می‌باشد. از کاربری‌های این شهر زیرزمینی می‌توان به چندین مرکز خرید، هتل، بانک، موزه، سالن‌های کنسرت، تئاتر و سینما، بیمارستان، یک دانشگاه و هفت ایستگاه مرکزی مترو اشاره نمود. ۱۲۰ نقطه دسترسی خارجی از سطح زمین به این شهر زیرزمینی وجود دارد. بیش از نیم میلیون نفر به طور روزانه مخصوصاً در شرایط ترافیک یا سرمای شدید زمستان و گرمای تابستان مونترال از این شهر استفاده می‌کنند. علاوه بر کاربری‌های ذکرشده این شهر به یکی از جالب‌ترین نقاط توریستی کانادا تبدیل شده است و سالانه توریست‌های بسیاری از RÉSO دیدن می‌کنند. شکل۱۷ فضای میدان اصلی این شهر زیرزمینی را نشان می‌دهد.

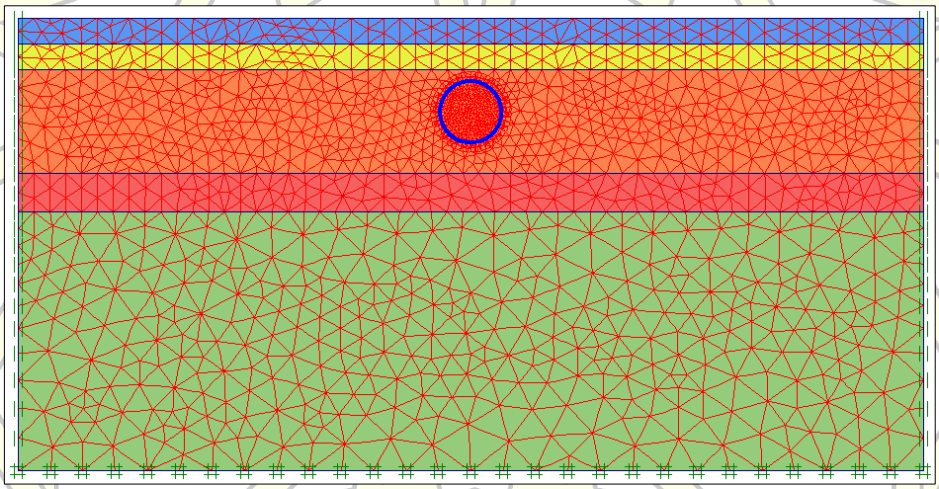
شکل ۱۷: فضای داخلی شهر زیرزمینی مونترال

۷- بررسی عددی تأثیر پارامتر انقباض تونل بر نشست سطح زمین

با پیشرفت‌های سخت‌افزاری و نرم‌افزاری رایانه‌ها، در دهه‌های اخیر، استقبال از مطالعات مهندسی با روش‌های عددی بیشتر شده است. روش‌های عددی بر مبنای گسسته‌سازی به دو روش حجمی و مرزی تقسیم می‌شوند که روش المان محدود و تفاضل محدود از مهم‌ترین روش‌های المان‌بندی حجمی می‌باشند [۸]. در این مطالعه جهت مدل‌سازی از نرم افزار المان محدود Plaxis8.6 استفاده گردیده، این نرم افزار قابلیت مدلسازی خاک، عضو سازه‌ای، اندرکنش بین خاک و سازه و تحلیل سازه‌های ژئوتکنیکی پیچیده را دارا می‌باشد. در این مطالعه مشخصات ژئوتکنیکی خاک محدوده ایستگاه چهار خط۲ متروی تبریز جهت مدلسازی و بررسی در نظر گرفته شده است. جدول۲ مشخصات لایه‌های خاکی ناحیه مذکور را نشان می‌دهد. همچنین قطر حفاری تونل دایره‌ای شکل خط ۲ متروی تبریز ۹/۴۹ متر بوده و فاصله تاج تونل تا سطح زمین در محدوده ایستگاه چهار، برابر قطر تونل می‌باشد. عمق کل مدل برابر ۷۰ متر و عرض مدل ۱۴۰ متر انتخاب و از شبکه‌بندی متوسط و ریز برای مش‌بندی استفاده شده است. شکل۱۸ نمونه‌ای از مش‌بندی مدل‌های مورد مطالعه را نشان می‌دهد. مشخصات پوشش تونل مطابق مشخصات واقعی تونل خط۲ مترو تبریز بوده و پارامترهای آن در جدول۳ قید گردیده‌اند.

جدول ۲: *مشخصات ژئوتکنیکی لایه‌های زمین در مقطع انتخابی جهت مدلسازی*

عمق متوسط لایه (m)	۰-٤	۸-۲٤	۲٤-۳۰	۳۰-۷۰
جنس غالب	سیلتی	ماسه‌ای	سیلتی- رسی	ماسه‌ای	**سیلتی- رسی**
γ_{unsat} (kN/m^3)	۱۷/۵	۱۷/۵	۱۷/۵	۱۸	**۱۷/۵**
γ_{sat} (kN/m^3)	۱۸/۵	۱۹	۱۹	۱۹/۵	**۱۹/۵**
C (kN/m^2)	۱۵	۱۵	۲۵	۲۵	**۳۵**
φ (degree)	۲۳	۲۷	۲۵	۲۹	**۲۷**
مدل رفتاری	Hardening Soil				



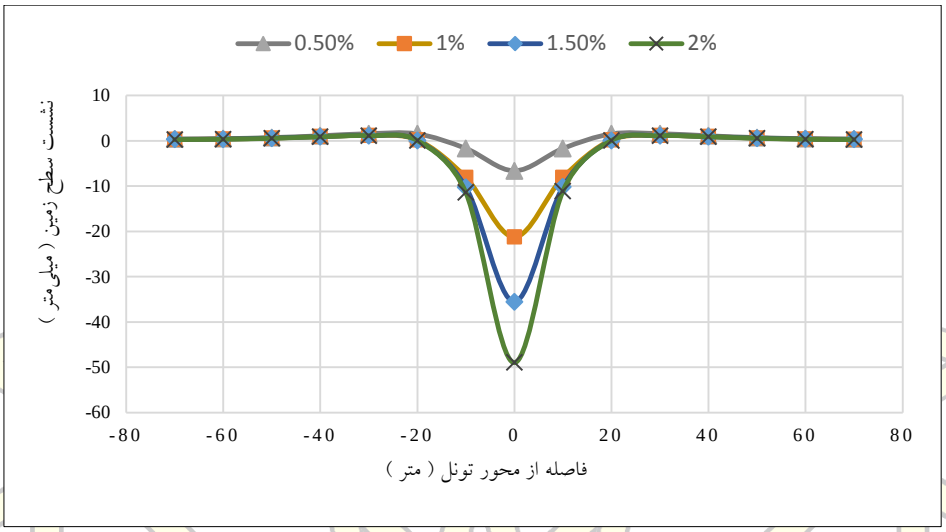
شکل ۱۸: *نمونه مش‌بندی مدل‌های مورد تحلیل*

جدول ۳: *مشخصات پوشش بتنی تونل (سگمنت)*

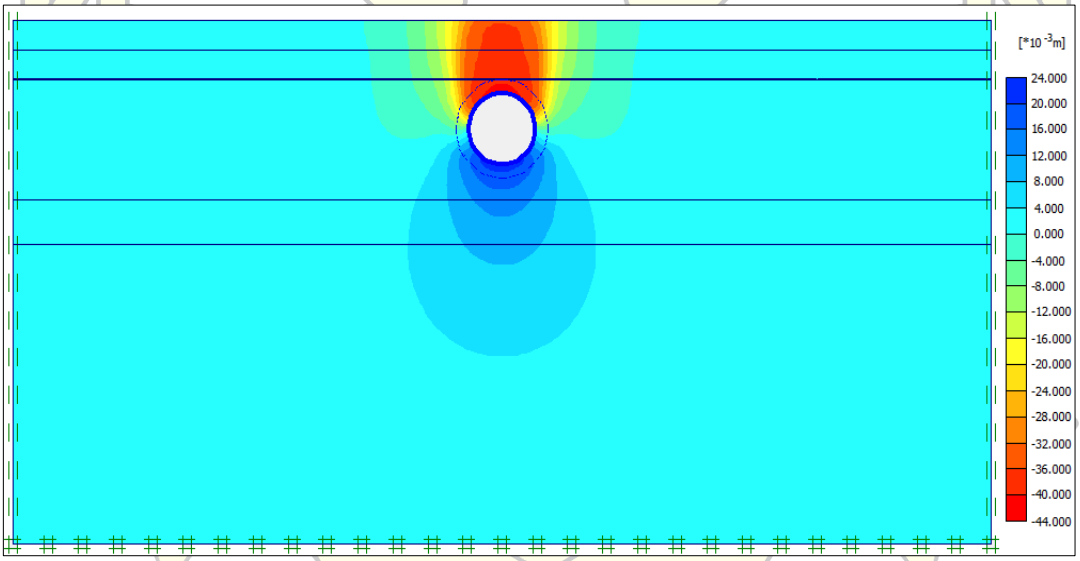
	EA (kN/m)	EI (kNm^2/m)	d (m)	W (kN/m/m)	ν
پوشش بتنی (الاستیک)	۱۱۰۲۵۰۰۰	۱۱۲۵۰۰	۰/۳۵	۸/٤	۰/۱۵

در عمل اضافه حفاری ناشی از اختلاف قطر خارجی سپر ماشین حفار و سرمته حفاری به همراه مخروطی بودن سپر سبب ایجاد جابجایی در فضای اطراف تونل می‌شود. همچنین در انتهای سپر ماشین فاصله مابین سطح خاک حفاری‌شده و سطح خارجی پوشش باید بلافاصله بعد از نصب سگمنت‌ها با تزریق پرشود که در صورت عدم تزریق کامل دوغاب پشت سگمنت جابجایی ها و نشست سطح زمین افزایش خواهد یافت. بطور کلی حجم اضافی خاکی که علاوه بر حجم تئوری تونل حفاری می شود، افت حجم (V_L) نامیده شده و بصورت درصدی از حجم تئوری تونل در واحد طول بیان می‌شود. بر اساس مشخصات هندسی ماشین حفار و همچنین کیفیت تزریق دوغاب پشت سگمنت میزان افت حجم در پروژه های مختلف تونلسازی مکانیزه در بازه ۰/۲ الی ۲ درصد قرار دارد [۹]. با توجه به تأثیر و اهمیت زیاد این پارامتر در میزان ماکزیمم نشست سطحی زمین، در مطالعه حاضر مقادیر

٪۰/۵، ٪۱، ٪۱/۵ و ٪۲ برای افت حجم در نظر گرفته شده است. شکل۱۹ میزان نشست سطح زمین بر اساس درصدهای مختلف افت حجم را نشان می‌دهد. بر اساس شکل و مطابق انتظار با کاهش کیفیت تزریق دوغاب پشت سگمنت و راهبری دستگاه میزان افت حجم افزایش یافته و میزان نشست سطحی زمین بیشتر خواهد شد.



***شکل ۱۹** : میزان نشست سطح زمین بر اساس درصدهای مختلف پارامتر انقباض تونل*



***شکل ۲۰** : میزان نشست سطح زمین و تاج تونل با ضریب انقباض ٪۱/۵*

کیفیت عملیات ساخت تونل خود را در پارامتر انقباض نشان می‌دهد، زیرا اگر عملیات تزریق با راندمان بالا و بموقع صورت پذیرد، نتیجه آن کاهش میزان انقباض تونل خواهد بود. مطابق شکل ۲۰ بیشینه نشست سطحی در راستای خط مرکزی تونل در سطح زمین اتفاق می‌افتد، ، اما بیشترین میزان نرخ جابجایی در کل مدل مربوط به تاج تونل است که میزان آن از بیشینه نشست سطحی بیشتر است. در حالت کلی سازه‌های زیر سطحی تحت جابجایی‌های بیشتری نسبت به سازه‌های سطحی در اثر حفاری تونل قرار می‌گیرند.

۸- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

تونلسازی مکانیزه سپری به عنوان یکی از روش‌های تونلسازی، کاربرد گسترده‌ای در حفاری فضاهای زیرزمینی در محیط‌های شهری دارد. ایمنی بالا، نرخ پیشروی بالا، ایجاد مقطع دقیق تونل و حداقل تأثیر ممکن بر سازه‌های مجاور موجود از مهم‌ترین مزایای استفاده از دستگاه‌های حفاری مکانیزه است. استفاده موفقیت آمیز این روش مستلزم انجام مطالعات دقیق مسیر تونل، طراحی دقیق دستگاه و پوشش تونل و پشتیبانی عملیات است. دستگاه TBM-EPB به عنوان یکی از کاربردی‌ترین دستگاه‌های حفاری مکانیزه شهری مورد استفاده قرار می‌گیرد. کنترل نشست زمین یکی از مهم‌ترین پارامترها در حفاری تونل با EPB می‌باشد.کنترل فشار EPB، تزریق پیوسته دوغاب، و کنترل حجم مواد حفاری شده از مهم‌ترین راه‌کارهای جلوگیری از نشست زمین در حفاری با EPB می‌باشد. نسل جدید TBMها امکان حفاری در سنگ سخت و زمین نرم را دارند. تغییر مکانیزم دستگاه از حالت سپر باز به سپر بسته و توسعه دستگاه‌های EPB و Slurry جهت حفاری در سنگ سخت یکی از راهکارهای حفاری در سنگ سخت و زمین نرم می‌باشد. امکان نصب سگمنت همزمان با حفاری در زمین‌های نرم و همچنین روش‌های نوین در تعویض سریع ابزار برش‌دهنده از فناوری های جدید بشمار می‌آیند.

۹- مراجع

۱. کریمی, م. و نگین تاجی, ص. (۱۳۸۹). جایگاه فضاهای زیرزمینی در طرح‌های شهری. تهران: مرکز مطالعات و برنامه‌ریزی شهری.

2. Maidl, B., Herrenknecht, M., Maidl, U., & Wehrmeyer, G. (2013). Mechanised shield tunnelling. John Wiley & Sons.

3. Kondo, Y., Iihara, A., & Kishimoto, K. (2006). The start of a new generation of TBMs. Tunnelling and Underground Space Technology, 21(3-4).

۴. شریف‌زاده, م.، خادمی, ج.، و ترکمنی قطب, ا. (۱۳۸۶). تونلسازی مکانیزه سپری. تهران: جهاد دانشگاهی واحد صنعتی امیرکبیر.

5. Slinchenko, D. (2006). control of ground settlement in EPB tunneling. LOVAT Inc. 1-5.

6. Abdullah, K. (2004, July). Stormwater Management and Road Tunnel (SMART) a lateral approach to flood mitigation works. In International Conference on Bridge Engineering and Hydraulic Structures, Selangor, Malaysia (pp. 59-79).

7. Hagedorn, H., Stadelmann, R., & Husen, S. (2008). Gotthard base tunnel rock burst phenomena in a fault zone, measuring and modelling results. In world tunnel congress (pp. 419-430).

۸. پنجی، م.، انصاری، ب. و اصغری مارنانی، ج. (۱۳۹۵). تحلیل تنشی تونل‌های سطحی در خاک‌های لایه‌ای با استفاده از روش اجزای مرزی نیم‌صفحه. مهندسی زیرساخت‌های حمل و نقل، ۲(۱): ۳۲-۱۷

9. Guglielmetti, V., Grasso, P., Mahtab, A., & Xu, S. (2008). Mechanized tunneling in urban areas: design methodology and construction control: CRC Press.