

راهنمای طراحی، ساخت و نظارت بر  
تونلسازی با ماشین TBM از نوع  
متعادل کننده فشار زمین

نویسنده:

Jerome B. O'Carroll جروم بی. اوکارول

مترجمین:

دکتر مرتضی اسماعیلی (عضو هیئت علمی دانشکده علم و صنعت ایران)

مهندس علیرضا بابایی

مهندس پیمان یوسفی مجیر



انتشارات پلیکان

سرشناسه

: اوکارول، جروم. بی.

عنوان و پدیدآور

: راهنمای طراحی، ساخت و نظارت بر تونلسازی با ماشین TBM از نوع متعادل کننده فشار زمین/نویسنده [جروم. بی. اوکارول] مترجمین مرتضی اسماعیلی، علیرضا بابایی، پیمان یوسفی مجیر.

مشخصات نشر

: تهران: پلیکان، ۱۳۸۷.

مشخصات ظاهری

: ۲۰۰ ص.

شابک

: 978-964-8690-93-4

وضعیت فهرست نویسی: فیبا

یادداشت  
عنوان اصلی  
A guide to planning, constructing, and supervising earth pressure balance TBM tunnelling, c2005

موضوع

: تونلسازی -- ابزار و وسایل

موضوع

: حفاری -- ماشین آلات

شناسه نزوده

: اسماعیلی، مرتضی، مترجم، بابایی، علیرضا، ۱۳۶۰ - مترجم، یوسفی مجیر، پیمان، ۱۳۶۰ - مترجم.

ردمبندی کنگره

: ۶۲۰/۲۱۸/۵/۸/۲

ردمبندی دیویی

: ۶۲۰/۲۱۸/۵

شماره کتابشناسی ملی: ۶۰۵



انتشارات پلیکان

راهنمای طراحی، ساخت و نظارت بر تونلسازی با ماشین TBM

از نوع متعادل کننده فشار زمین

نویسنده: Jerome B. O'Carroll

مترجمین: دکتر مرتضی اسماعیلی (عضو هیئت علمی دانشگاه علامه و نعت ایران)،

مهندس علیرضا بابایی، مهندس پیمان یوسفی مجیر

نوبت چاپ: اول زمستان (۱۳۹۳) / تیراژ: ۱۰۰۰ نسخه

لیتوگرافی: طاووس رایانه / چاپخانه: نقره آبی

شابک: ۹۷۸-۹۶۴-۸۶۹۰-۹۳-۴

قیمت: ۱۰۰۰۰ تومان

تهران، خیابان انقلاب، خیابان فخر رازی، کوچه شهدای ژاندارمری، پلاک ۵۸، واحد ۱۴

تلفن: ۶۶۹۷۲۰۹۴-۵

## فهرست:

|    |                                                                        |
|----|------------------------------------------------------------------------|
| ۱  | ۱- تاریخچه مختصر تونلسازی با سپر                                       |
| ۱۱ | ۲- مبانی تونلسازی با TBM نوع EPB                                       |
| ۱۵ | ۳- توسعه فن آوری TBM نوع EPB                                           |
| ۱۶ | ۳-۱- پیشرفتهای کانادا در TBM نوع EPB                                   |
| ۲۲ | ۳-۲- پیشرفتهای ژاپن در دهه گذشته                                       |
| ۲۵ | ۳-۳- پیشرفتهای اروپاییها                                               |
| ۲۹ | ۴- مباحثی در خصوص پروژه تونلسازی با TBM های نوع EPB                    |
| ۳۰ | ۴-۱- تنظیم قرارداد برای پروژههای تونلسازی با ماشین EPB                 |
| ۳۱ | ۴-۲- انتخاب گاهی برای پروژههای تونلسازی با ماشین TBM نوع EPB           |
| ۳۳ | ۴-۳- بهینه سازی فاصله بین شفتهای دسترسی در تونل های طویل               |
| ۳۴ | ۴-۴- تخلیه مصالح حفاری شده                                             |
| ۳۵ | ۴-۵- گزینه سفارش TBM توسط کارفرما                                      |
| ۳۹ | ۵- مشخصات مورد نظر یک ماشین TBM نوع EPB                                |
| ۴۰ | ۵-۱- آیا ماشین TBM تحمل فشار در جبهه کار تونل را دارد؟                 |
| ۴۱ | ۵-۲- آیا ماشین TBM توان و گشتاور مناسب را دارد؟                        |
| ۴۳ | ۵-۳- آیا اجزاء ماشین برای شرایط زمین به طور مناسب طراحی شده اند؟       |
| ۴۴ | ۵-۴- آیا ماشین توان حفاری از میان لایه سنگها را دارد؟                  |
| ۴۴ | ۵-۵- طرحریزی مسیر تونل: آیا شرایط جبهه کار مختلط تونل مورد انتظار است؟ |
| ۴۵ | ۵-۶- آیا سیستم هدایت مسیر ماشین مناسب است؟                             |
| ۴۹ | ۶- محاسبه و کنترل فشارهای خاک در تونلسازی با ماشین TBM                 |
| ۵۱ | ۶-۱- روش های محاسبه فشار خاک                                           |
| ۵۵ | ۶-۲- طبقه بندی خاک                                                     |

|     |                                                                  |
|-----|------------------------------------------------------------------|
| ۵۹  | ۳-۶- مقایسه فشارهای پیش بینی شده و اندازه گیری شده در خاک        |
| ۶۱  | ۴-۶- تأثیر عوامل واقعی فشار بسیج شده زمین                        |
| ۶۶  | ۷- پیشرفته ترین TBM های نوع EPB                                  |
| ۶۶  | ۱-۷- اجزای اصلی                                                  |
| ۶۹  | ۲-۷- نیروی سر حفار                                               |
| ۷۰  | ۳-۷- گشتاور سر حفار                                              |
| ۷۱  | ۴-۷- اتصال مفصلی                                                 |
| ۷۲  | ۵-۷- سیستم های بهسازی خاک                                        |
| ۷۴  | ۶-۷- طراحی سر حفار                                               |
| ۷۸  | ۷-۷- ابزارهای برشی                                               |
| ۸۱  | ۸-۷- آییندگی انتهای سب                                           |
| ۸۳  | ۸- پایش و تحلیل داده های BM نوع E                                |
| ۸۴  | ۱-۸- پارامترهای مهم بهره برداری                                  |
| ۸۷  | ۲-۸- ارزیابی داده ها                                             |
| ۹۲  | ۳-۸- یکارگیری TBM                                                |
| ۹۷  | ۹- گشتاور، نیروی رانش و عملکرد TBM                               |
| ۹۹  | ۱-۹- ارزیابی تجربی الزامات گشتاور و نیرو                         |
| ۱۰۳ | ۲-۹- فشار خاک، ریزش خاک و نرخ های نفوذ                           |
| ۱۰۴ | ۳-۹- گشتاور، نیروی رانش و عملکرد TBM                             |
| ۱۱۰ | ۴-۹- جابجایی های زمین (خاک) ناشی از تونلسازی                     |
| ۱۱۵ | ۱۰- بهسازی خاک                                                   |
| ۱۱۷ | ۱-۱۰- عوامل بهسازی خاک                                           |
| ۱۲۲ | ۲-۱۰- مزایای انتخاب مناسب ترین نوع بهسازی خاک از نظر بهره برداری |
| ۱۲۳ | ۳-۱۰- مشاهدات میدانی در خصوص استفاده از قوم ها و پلیمرها         |

- ۱۰-۴- تحقیقات اخیر در خصوص استفاده از فوم ها و پلیمرها برای تونل سازی به روش  
EPB ۱۲۵
- ۱۱- پوشش بتنی پیش ساخته تونل ۱۲۹
- ۱۱-۱- طراحی پوشش ۱۳۰
- ۱۱-۲- نوارهای آببندی ۱۳۳
- ۱۱-۳- تزریق دوغاب در فضای بین پوشش تونل و دیواره حفاری شده تونل ۱۳۵
- ۱۱-۴- درزگیر فشاری ۱۳۵
- ۱۲- طراحی TBM از نوع EPB - ویژگی های طراحی ۱۳۷
- ۱۳- نظارت، کارگاهی پروژه های حفاری تونل با استفاده از TBM های نوع EPB ۱۴۳
- ۱۳-۱- تضمین کیفیت ۱۴۴
- ۱۳-۲- ایمنی، با ایمنی و تعمیر و نگهداری ۱۴۵
- واژه نامه ۱۵۳

## پیشگفتار.

امروزه تونل‌ها با کاربردهای گوناگونی اعم از راه، راه‌آهن، مترو، خطوط انتقال آب و غیره، نقش مهمی در توسعه کشورها ایفا می‌کنند. در عین حال در مقوله احداث و راه‌اندازی فضاهای زیر زمینی، سرعت و دقت اجرا از اهمیت و جایگاه ویژه‌ای برخوردار است. روش‌های متعدد اجرای فضاهای زیر زمینی که به سه بخش عمده حفاری سنتی، نیمه مکانیزه و تمام مکانیزه تقسیم می‌شود، بی‌شک حفاری تمام مکانیزه به دلیل سرعت و دقت قابل توجه خود در بسیاری از پروژه‌ها به عنوان گزینه‌ای مطلوب از نظر فنی و اقتصادی تلقی می‌شود.

در کشور عزیز ما ایران، ساخت و اجرای فضاهای زیر زمینی با کاربری‌های متنوع از دیر باز مورد توجه بوده است. در سالهای اخیر، با توجه به معضلات عمده کشور در زمینه های انتقال آب و فاضلاب و همچنین حمل و نقل شهری، مبحث تسریع در اجرای پروژه‌ها با ورود تکنولوژی حفاری تمام مکانیزه به کمک دستگاه TBM رونق ویژه‌ای یافته و با اتمام چند پروژه موفق در کشور، اقبال مدیران کشور به استفاده بیشتر از این روش حفاری افزایش یافته است. در این خصوص و به طور نمونه آغاز روند طراحی و اجرای پروژه‌های قطار شهری کشور با اولویت کلان شهرها به صورت EPC و به طور عمده با استفاده از دستگاه TBM شاهدی بر این مدعا است.

در این راستا خوشبختانه تلاش‌های زیادی در جهت انتقال تکنولوژی حفاری با TBM در زمینه‌های شناخت مکانیزم عملکرد دستگاه و اجزای آن، نحوه پشتیبانی دستگاه حین حفاری، راهبری، تعمیر و نگهداری و مباحث قراردادی وابسته به خرید دستگاه و تجهیزات مربوطه صورت گرفته است، و البته تکمیل این روند نیازمند مرور زمان و افزایش تجربه مدیران و کارکنان این صنعت می‌باشد. قطعاً مجموعه‌های مهندسين مشاور و

پیمانکاران مرتبط با پروژه هایی از این نوع، نقش عمده ای در انتقال تکنولوژی و فرهنگ سازی فنی در این زمینه دارند.

انجمن تونل ایران که با هدف تمرکز بر انجام فعالیت های آموزشی و پژوهشی در صنعت تونلسازی تشکیل شده است، تلاش نموده تا با بهره گیری از تجربه و دانش مهندسان و متولیان صنعت تونلسازی ایران، رسالت خود را در زمینه توسعه دانش فنی این رشته به نحو مطلوبی به انجام برساند. در اولین گام، این انجمن اقدام به چاپ نشریه تخصصی "تونل" نموده و در این قالب مطالب فنی متنوعی را در اختیار علاقمندان به این رشته قرار داده است. در ادامه این روند، انجمن با معرفی کتاب حاضر به عنوان اولین مجموعه تخصصی ترجمه شده در راستای معرفی دستگاه حفار متعادل کننده فشار زمین EPB، که قطعاً مورد استفاده مهندسین و متخصصان صنعت تونل سازی، کشور قرار خواهد گرفت، دریچه تازه ای را جهت نشر آثار سودمند برای جامعه مهندسی کشور گشوده است. امید است تمامی عزیزان و علاقمندان دست اندرکار صنعت تونلسازی با عنایت به انجام فعالیت های مشابه در سایر بخش های فنی کشور سهیم گردند.

انجمن تونل ایران

پائیز ۱۳۸۷

## پیشگفتار مولف

این مجموعه به عنوان کتاب مرجع مهندسين جديد شرکت PARSONS BRINCKERHOFF (PB) می باشد که می تواند مورد استفاده مهندسين باتجربه و مديران پروژه در گروه های ژئوتکنیک، تونلسازی و سازه های زیرزمینی شرکت PB نیز قرار گیرد. این مجموعه همچنین دربردارنده اطلاعاتی مفید و به روز از پروژه های این شرکت است. امید است که این کتاب یک زبان مشترک بین گروه های مختلف طراحی در شرکت PB و همچنین ارتباطی مناسب بین مهندسين درگیر در پروژه های طراحی و ساخت ایجاد کند.

موضوعات ارائه شده در این مجموعه مشتمل بر مواردی مختلف در ارتباط با پروژه های تونلسازی با ماشین TBM (TBM) از قبیل خرید ماشین، طراحی سایت کارگاهی، کنترل حرکات زمین، ضوابط اصلی کارکرد دستگاه، مطالعه ماشین های TBM، نوع متعادل کننده فشار زمین (EPB)، ملاحظات ایمنی و همچنین نظارت بر پروژه های تونلسازی با ماشین TBM نوع EPB می باشد.

یکی از اهداف تالیف این مجموعه دسترس پذیری آخرین تجربیات این شرکت در استفاده از ماشین TBM نوع EPB در شرایط مختلف ژئوتکنیکی می باشد. فول ۶ الی ۱۲ این مجموعه بر اساس تجربیات این شرکت در ارتباط با استفاده از این نوع ماشین در پروژه های مختلف با شرایط ژئوتکنیکی متفاوت در ایالات متحده آمریکا و آسیای جنوب شرقی است که قطر ماشین حفاری TBM در این پروژه بین ۳/۳ متر الی ۷/۲ متر است و در زمان تالیف این مجموعه این پروژه ها به اتمام رسیده و یا در حال اجرا می باشند.

بیش از ۷۰ کیلومتر از تونلها در این پروژه ها در شرایط زمین های روان، رس های نرم، انواع سنگهای رسوبی ضعیف و گرانیت های فاقد هوازدگی در عمقهای ۲۰ الی ۵۰ متر راجع شده است.

این مجموعه همچنین مراحل اولیه ای از یک طرح را نیز ارائه می دهد که این شرکت PB قصد دارد اطلاعات اخذ شده از پروژه های تونلسازی با ماشین TBM نوع EPB را جمع آوری کرده تا با انجام تجزیهات خود را به صورت موثرتر در طراحی و ساخت پروژه های تونلسازی در خاک نرم در سرتاسر دنیا با توجه به شرایط معنایی و جغرافیایی منطقه به کار گیرد.

تونلسازی و سازه های زیرزمینی جزء زیرمجموعه های اصلی و هسته اصلی شرکت PB از ابتدای فعالیت آن بوده است و این شرکت راهکارهایی برای پروژه هایی که با محدودیت های فن آوری دست به گریبان بوده اند، ارائه داده است. این شرکت اطلاعات فنی مهمی را در ارتباط با مهندسی تونل و طراحی سازه های زیرزمینی در انتشارات خود ارائه داده است. مهمترین این مراجع عبارتند از:

- SUBWAY ENVIRONMENTAL HANDBOOK, 2ND EDITION, 1975.
- THE INSPECTION AND REHABILITATION OF TRANSIT TUNNELS, 4TH EDITION, 1991.
- SEISMIC DESIGNS OF TUNNELS, 1993.
- THE TUNNEL ENGINEERING HANDBOOK, 2ND EDITION, 1996.
- THE U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS MANUAL ON TUNNELS AND SHAFTS IN ROCK, 1997.
- THE DROP STRUCTURE DESIGN FOR WASTEWATER AND STORMWATER COLLECTION SYSTEMS, 2001.

این مرجع (راهنمای طراحی، ساخت و نظارت بر تونلسازی با ماشین TBM نوع متعادل کننده زمین) از تمامی تجربیات قبلی استفاده کرده و مشتمل بر آخرین اطلاعات در ارتباط با حفاری مکانیزه تونل در خاکهای نرم با استفاده از ماشین TBM می باشد.

اصلی ترین مورد کاربرد ماشین TBM از نوع EPB در رسهای نرم، رس لای دار و ماسه های لای دار است. علاوه بر بسیاری از پروژه های تونلسازی با ماشین TBM در سنگ سخت، شرکت PB دارای تجربه این نوع پروژه ها در خاک نرم نیز می باشد. جدول زیر آخرین به روز رسانی های اجرا شده یا در حال اجرای شرکت در این ارتباط را ارائه می دهد.

| مترو قاهره                         | قاهره، مصر                     |
|------------------------------------|--------------------------------|
| قطعه FI در مترو واشنگتن            | واشنگتن، ایالات متحده آمریکا   |
| تونلهای عمیق سیستم فاضلاب، فاز اول | سنگاپور                        |
| سیستم فاضلاب، بخش غربی             | پرتلند، ایالات متحده آمریکا    |
| سیستم فاضلاب، بخش شرقی             | اس آنجلس، ایالات متحده آمریکا  |
| سیستم فاضلاب، بخش شمال شرقی        | اس آنجلس، ایالات متحده آمریکا  |
| سیستم فاضلاب، بخش شمال غربی        | ساکرامنتو، ایالات متحده آمریکا |
| مترو King Country                  | سیاتل، ایالات متحده آمریکا     |
| سیستم فاضلاب، بخش شرقی             | پرتلند، ایالات متحده آمریکا    |

همچنین در آینده پروژه های تونلسازی در خاک نرم ارائه شده در جدول زیر که در طراحی آنها این شرکت از آخرین تجربیات و فن آوری مربوط به کاربرد ماشین TBM نوع EPB استفاده کرده است، اجرا می گردند.

|                             |                                    |
|-----------------------------|------------------------------------|
| بخش شرقی پروژه LRT          | لس آنجلس، ایالات متحده آمریکا      |
| سیستم فاضلاب، بخش شمالی     | بوستون، ایالات متحده آمریکا        |
| بخش شرقی پروژه مترو نیویورک | نیویورک، ایالات متحده آمریکا       |
| مترو MUNI                   | سان فرانسیسکو، ایالات متحده آمریکا |
| تونل بندر میامی             | فلوریدا، ایالات متحده آمریکا       |
| LRT شهر سیاتل               | سیاتل، ایالات متحده آمریکا         |

JOE O'CARROLL، شرکت PB، سپتامبر ۲۰۰۴