نشریه علمی- پژوهشی "مهندسی معدن"
Iranian Journal of Mining Engineering (IRJME)

دوره هفتم، شماره پانزدهم، سال ۱۳۹۱، صفحه ۷۷ تا ۸۶
Vol. 7, No. 15, 2012, pp. 77-86

انتخاب ماشین حفاری مکانیزه مناسب برای حفر تونل قطعه شرقی- غربی خط 7 مترو تهران

اسماعیل فصیحی[1]، شکرا... زارع[2*]، صادق طریق ازلی[3]

1- کارشناسی ارشد مهندسی معدن ، موسسه مهندسین مشاور ساحل
2- استادیار دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، zare@shahroodut.ac.ir
3- دانشجوی دکتری زمین شناسی مهندسی، دانشکده زمین شناسی دانشگاه فردوسی مشهد

(دریافت 21 اسفند 1389، پذیرش 31 اردیبهشت1391

چکیده

یکی از مهم‌ترین مسائل تونل‌سازی مکانیزه در نواحی شهری انتخاب ماشین حفاری مناسب است. شرایط زمین‌شناسی و ژئوتکنیک بستر و نوع مصالح تشکیل‌دهنده ، تغییرات لایه‌ها، میزان سطح آب زیرزمینی، موقعیت و شرایط خاص شهری و غیره موارد مهمی هستند که برانتخاب ماشین و روش اجرای تونل‌های شهری مؤثر هستند. در این مقاله ضمن بررسی شرایط ژئوتکنیکی، انواع ماشین‌های حفر تونل ، عوامل مؤثر بر کارکرد ماشین‌های حفر تونل، روش‌ها و دستورالعمل‌های انتخاب ماشین، مناسب‌ترین دستگاه برای حفر تونل قطعه شرقی- غربی خط 7 متروی تهران با قطر 9/15 متر، حد فاصل ایستگاه A_7 در ورزشگاه تختی تا ایستگاه N_7 در بزرگراه نواب صفوی، به طول 12360 متر، پیشنهاد شده است. در نهایت از میان ماشین‌های سپری زمین‌های نرم با توجه به جنس خاک، شرایط محیطی مسیر تونل، سطح آب زیرزمینی، برنامه زمان‌بندی پروژه، و توانایی‌ها و محدودیت‌های ماشین‌های مختلف، ماشین سپر EPB انتخاب و پیشنهاد شده است.

کلمات کلیدی

انتخاب ماشین، تونل مترو، ماشین‌های حفر تونل، EPB.

*نویسنده مسئول مکاتبات

۱- مقدمه

هم‌اکنون با توجه به نیاز به گسترش شبکه‌های مترو و راه‌های ارتباطی در شهرهای پر جمعیت و بزرگ، همچنین محدودیت‌های نواحی شهری، استفاده از روش‌های مکانیزه تونل‌سازی در نواحی شهری اجتناب‌ناپذیر است[1] و [2] . استفاده از روش‌های مکانیزه حفاری تونل مستلزم انتخاب ماشین مناسب با در نظر گرفتن شرایط پروژه، ویژگی‌های زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی طول مسیر، تجربه و دانش فنی موجود و الزامات پروژه به‌خصوص زمان‌بندی پروژه است. برای انتخاب ماشین مناسب باید توانایی‌های ماشین‌های حفاری در زمین‌های نرم، دامنه کاربرد و محدودیت‌های خاص هر یک با توجه به شرایط زمین مسیر تونل را در نظر گرفت[3]. اگرچه با پیشرفت تکنولوژی ماشین‌های حفاری و با استفاده از روش‌های به‌سازی و افزودنی‌های مختلف، محدوده کاربرد ماشین‌های مختلف تا حد زیادی به هم نزدیک شده است، به‌گونه‌ای‌که انواع سپرهای بسته در بازه گسترده‌ای از خاک‌های مختلف با موفقیت استفاده می‌شود [4]، حفاری تونل با راندمان مورد نظر و کمترین هزینه و مشکلات اجرایی به انتخاب مناسب‌ترین ماشین بستگی دارد. بنابراین علاوه بر شرایط زمین و قابلیت بکارگیری دستگاه، دیگر عوامل به‌ویژه راندمان حفاری و هزینه‌های مربوط نیز مدنظر قرار خواهد گرفت.

موضوع مهم دیگر که در تونل‌سازی در نواحی شهری اهمیت زیادی دارد بحث نشست و تخریب سطح زمین است که به مختل شدن عبور و مرور یا خسارت به بناها در سطح زمین منجر می‌شود. امروزه با استفاده از روش‌های تونل‌سازی مکانیزه، تونل‌هایی با نشست صفر نیز تجربه شده است [5].

در این مقاله ضمن معرفی پروژه مترو خط 7 تهران (قطعه شرقی- غربی)، شرایط ژئوتکنیکی پروژه، ماشین‌های حفر تونل [3] و جدیدترین روش‌ها و معیارهای انتخاب ماشین[6] ، دستگاه مناسب برای حفر تونل قطعه شرقی-غربی خط 7 متروی تهران و فرایند منتهی به این انتخاب ارائه شده است.

۲- معرفی پروژه

خط 7 مترو تهران به طول حدود 27 کیلومتر از ورزشگاه تختی در شرق تهران شروع شده و پس از طی حدود 12 کیلومتر در جهت شرقی-غربی، با رسیدن به بزرگراه شهید نواب صفوی، تغییر جهت داده و راستای شمالی- جنوبی تا شمال سعادت آباد ادامه می‌یابد. این خط در مجموع شامل 28 ایستگاه بوده و شرق تهران را به شمال غرب متصل می‌کند. تونل خط 7 مترو تهران برای اجرا به دو قطعه شمالی- جنوبی و شرقی- غربی تقسیم شده است. تونل قطعه شرقی- غربی خط 7 مترو تهران به طول حدود 12 کیلومتر، حدفاصل ایستگاه A7 در شهرک امیرالمؤمنین و ایستگاه N_7 در تقاطع خیابان قزوین و بزرگراه شهید نواب صفوی قرار دارد [7]. مشخصات تونل به‌طور خلاصه در جدول 1 ارائه شده است. شکل 1 مسیر پروژه را نشان می‌دهد.

جدول 1: مشخصات تونل قطعه شرقی- غربی خط 7 مترو تهران

مشخصات عمومی تونل	کاربری تونل: مترو
	طول تونل: 12360 متر
	بیشترین روباره تونل: 24 متر
	کمترین روباره تونل: 6/1 متر
مشخصات هندسی تونل	مقطع تونل: دایره ای
	قطر حفاری تونل: 9/15 متر
	حد اکثر شیب تونل: 1/9 درصد
	حداقل شعاع قوس مسیر تونل: 300 متر
مشخصات پوشش نهایی تونل	نوع پوشش: سگمنت بتنی تراگونال
	ضخانت سگمنت‌ها: 35 سانتیمتر
	عرض سگمنت: 1/5 متر
	تعداد قطعات سگمنت در هر رینگ: 6+1+1 (قطعه سگمنت کف)

شکل 1: پلان مسیر پروژه قطعه شرقی-غربی خط 7 مترو تهران

۳- زمین‌شناسی و ویژگی‌های ژئوتکنیکی مسیر

لایه‌های خاکی در محدوده مسیر تونل، با توجه به نتایج آزمون‌های آزمایشگاهی و صحرایی به چهار دسته زمین‌شناسی مهندسی طبقه‌بندی شده‌اند. در جدول 3 گروه‌های خاکی مسیر و پارامترهای ژئوتکنیکی خاک برای چهار گروه زمین‌شناسی مهندسی، ارائه شده است. بر اساس مطالعات زمین‌شناسی مسیر، وجود تخته‌سنگ و قطعات درشت سنگی در طول مسیر پیش‌بینی نشده است. مقطع زمین‌شناسی و ژئوتکنیک در طول مسیر تونل در شکل 2 نشان داده شده است. در شکل 3 محدوده دانه‌بندی خاک‌های مسیر تونل به تفکیک گروه‌های خاک نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، آبرفت‌های مسیر از نظر دانه‌بندی، محدوده گسترده‌ای از رس تا شن را پوشش می‌دهد.

جدول 2: طول مسیر در دسته های زمین شناسی مهندسی [7]

طبقه بندی زمین‌شناسی	طول مسیر (متر)	درصد از کل مسیر	طول مسیر زیر تراز آب (متر)	درصد از کل مسیر*
I - II - IV	2315	%19	2315	%19
II	4600	%38	2280	%19
II – III , II - IV	5135	%43	3235	%27
مجموع	12050	%100	7830	%65

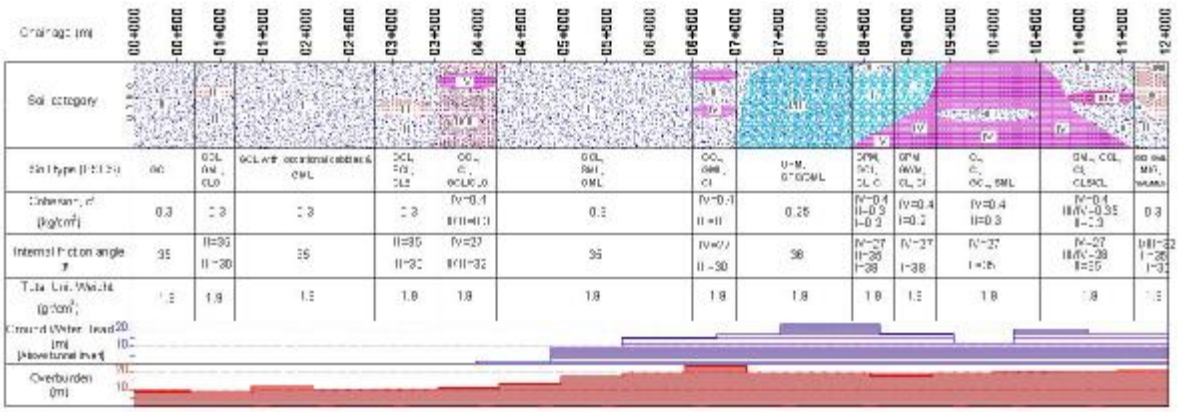
* درصدی از طول مسیر در واحد زمین‌شناسی که زیر تراز آب زیرزمینی قرار دارد.

همان‌گونه که در شکل 2 مشاهده می‌شود، بخش عمده‌ای از مسیر تونل، از آبرفت‌های گروه II که شامل شن و ماسه رسی است تشکیل شده است. تراز آب زیرزمینی در بیش از نیمی از مسیر بالاتر از تراز تونل قرار دارد. در جدول 2 طول مسیر در گروهای مختلف خاکی و همچنین طولی از مسیر که زیر تراز آب قرار دارد ارائه شده است.

جدول 3: طبقه بندی خاک برای طراحی ژئوتکنیکی [7]

دسته‌بندی زمین‌شناسی مهندسی خاک	وزن واحد حجم		پارامترهای مقاومت برشی موهر- کلمب		پارامترهای تغییر شکل پذیری		k (cm/s)
	γt (gr/cm3)	γb (gr/cm3)	c′ (kg/cm2)	φ′ (deg.)	Et (kg/cm2)	μr --	
I	1/9	1	0/2	38	1000	0/27	10^{-2}
II			0/3	35	800	0/27	10^{-3}
III			0/3	30	500	0/30	10^{-5}
IV			0/4	27	300	0/35	10^{-6}

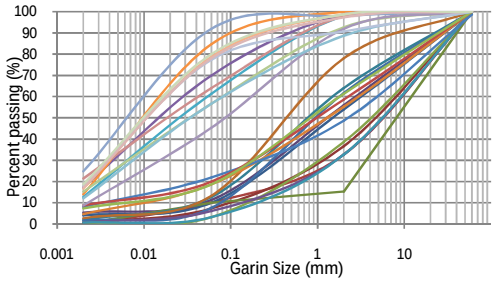
γt: وزن واحد حجم کل، γb: وزن واحد حجم غوطه‌ور، c': چسبندگی مؤثر ، φ': زاویه اصطکاک داخلی مؤثر، Et: مدول یانگ ،μ_r: ضریب نسبی تغییر شکل جانبی ، k : ضریب نفوذپذیری



شکل 2- جنس و ویژگی‌های ژئوتکنیکی واحدهای خاکی در طول مسیر [7]

۴- ماشین‌های مکانیزه حفر تونل

ماشین‌های مکانیزه حفر تونل را می‌توان با توجه به محدوده کاربرد، روش حفاری، روش نگهداری جبهه کار و تأمین نیروی پیشران تقسیم‌بندی کرد. تاکنون تقسیم‌بندی‌های مختلفی توسط مراجع مختلف انجام شده است. جدول 4 با توجه به تقسیم‌بندی ارائه شده توسط کمیته سازهای زیرزمینی آلمان (DAUB) تهیه شده است [8]



شکل 3- محدوده دانه بندی خاکهای مسیر [7]

جدول 4- سپرهای حفاری تونل در زمینهای نرم با توجه به تقسیم بندی DAUB

	روش حفاری جبهه کار	روش نگهداری جبهه‌کار	توضیحات
ماشین‌های حفر تونل در زمین‌های نرم	حفاری تمام مقطع جبهه‌کار	بدون نگهداری جبهه‌کار (**SM-V1**)	کاترهد از میله‌های مجهز شده به ابزارهای حفاری تشکیل شده است و خاک حفاری‌شده با نوار نقاله از جبهه‌کار تخلیه می‌شود. جبهه‌کار باید به‌طور طبیعی پایدار باشد.
		نگهداری مکانیکی جبهه‌کار (**SM-V2**)	جبهه‌کار توسط کاترهد که توسط صفحات فولادی پوشانده شده است، نگهداری می‌شود. خاک حفاری شده از طریق شیارهای تعبیه شده در سطح کاترهد به فضای پشت کاترهد و از آنجا توسط نوارنقاله یا جمع‌کننده‌های هیدرولیکی و زنجیری تخلیه می‌شود. عرض بازشوهای کاترهد با توجه به حداکثر ابعاد ذرات خاک و همچنین امکان کنترل نشت زمین، بهینه می‌شود.
		نگهداری جبهه‌کار با هوای فشرده (**SM-V3**)	در صورتی که سپرهای **SM-V1** و **SM-V2** در زیر تراز آب زیرزمینی استفاده شوند، از هوای فشرده برای نگهداری جبهه‌کار و کنترل نشت آب به داخل تونل استفاده می‌شود.
		نگهداری جبهه‌کار با سیال (دوغاب) (**SM-V4**)	جبهه‌کار با استفاده از سیال تحت فشار نگهداری می‌شود. مشخصات سیال مانند دانسیته و ویسکوزیته تابع نفوذپذیری زمین است. اغلب از دوغاب بنتونیت برای این منظور استفاده می‌شود.
		نگهداری جبهه‌کار با فشار تعادلی زمین (**SM-V5**)	چمبر (فضای پشت کاترهد) با خاک حفاری شده که به صورت خمیر در آمده انباشته شده و با تعادل بین میزان حفاری و تخلیه خاک، فشار لازم برای نگهداری جبهه کار اعمال می شود. مناسب برای خاک‌های چسبنده آبدار با مقدار خاک‌های ریزدانه (< 0/06 **mm**) بیش از 30 درصد.
	حفاری جبهه کار به صورت جزء مقطع	بدون نگهداری جبهه کار (**SM-T1**)	مشابه **SM-V1**
		نگهداری موضعی جبهه کار (**SM-T2**)	در خاکهای رسی ماسه ای با چسبندگی کم با توجه به زاویه اصطکاک داخلی که با نگهداری موضعی و تقسیم بندی جبهه کار پایداری تأمین شود.
		نگهداری جبهه کار با هوای فشرده (**SM-T3**)	محدوده کاربرد این سپر، محدوده کاربرد **SM-T1** و **SM-T2** در زیر تراز آب زیرزمینی است.
		نگهداری جبهه کار با سیال (دوغاب) (**SM-T4**)	در صورت حفاری در مخلوط رس و ماسه در زیر تراز آب زیرزمینی

۵- معیارهای انتخاب ماشین حفاری مناسب

ماشین حفاری مناسب باید با توجه به قابلیت‌های ماشین‌های حفر تونل و تناسب با شرایط پروژه انتخاب شود. فاکتورهای زیر بر انتخاب ماشین مؤثر است [3].

- تناسب با شرایط پیش‌بینی شده زمین‌شناسی
  - نوع خاک و خصوصیات دانه‌بندی
  - نفوذپذیری و شرایط هیدروژئولوژیکی
- شرایط محیطی
  - در دسترس بودن فضاهای لازم برای تجهیزات جانبی مورد نیاز در کنار دستگاه و اطراف شفت یا تونل دسترسی
  - حفرات و فضاهای خالی زیرمینی مانند قنات
  - معارضین و سازه‌های مهم در مسیر تونل
- هزینه سرمایه‌گذاری
- تجربه تونل‌سازی مکانیزه در کشور
- ایمنی تونل‌سازی و سایر عملیات مرتبط
- آلودگی منابع آب زیرزمینی

۵-۱- تناسب با شرایط پیش‌بینی شده زمین‌شناسی

در تونل‌های بلند و تونل‌هایی که در مسیرهای با تنوع زیاد شرایط زمین‌شناسی حفر می‌شود، شرایط خاک یکسان نیست. در این شرایط که سپر با توجه به جنس و ویژگی‌های زمین غالب انتخاب می‌شود، باید به شرایط زمین‌شناسی خاص توجه ویژه‌ای داشت. ماشین انتخاب‌شده باید بر اساس شرایط زمین-شناسی غالب پروژه طراحی شود ولی در عین حال بایستی توانایی حفاری در شرایط دشوار زمین‌شناسی را نیز داشته باشد. این شرایط عبارتند از [3]:

- خاک‌های رسی نرم حساس و ریزشی
- شن و ماسه‌های با آب زیاد
- وجود تخته‌سنگ و قلوه سنگ‌های درشت در خاک
- سازندهایی که همزمان دارای لایه‌های سخت و نرم است.
- لایه‌هایی که دارای آبرفت‌های رودخانه‌ای (مانند چوب و خاشاک) و مواد آلی و فاسدشدنی است.

بنابراین برای انتخاب ماشین مناسب، شرایط غالب زمین-شناسی مسیر مدنظر قرار گرفته و حفاری در شرایط خاص ممکن است نیازمند تمهیدات جانبی باشد.

5-1-1 - نوع خاک و خصوصیات دانه‌بندی

دامنه کاربرد ماشین‌های مختلف حفر تونل با توجه به شرایط زمین، توسط مراجع مختلف مانند شرکت‌های طراح و سازنده ماشین، انجمن‌ها و کمیته‌های بین‌المللی تونل با توجه به مهم‌ترین عوامل مؤثر بر عملکرد انواع ماشین‌ها ارائه شده است. بدین منظور برای انتخاب ماشین بر اساس جنس و خصوصیات دانه‌بندی خاک، از دو روش شامل جداول استاندارد و توصیه های تجربی و منحنی‌های دانه‌بندی استفاده می‌شود.

در این مطالعه برای انتخاب ماشین بر اساس جداول استاندارد از معیار ارائه‌شده توسط کمیته سازه‌های زیرزمینی آلمان [8] استفاده شده است که در جدول 5 به‌طور خلاصه ارائه شده است.

طبق جدول 5، در زمین‌های نرم و خاکی در صورت بالا بودن تراز آب زیرزمینی، استفاده از سپرهای با جبهه کار بسته (شامل سپرهای هوای فشرده، دوغاب یا فشار تعادلی زمین)، پیشنهاد می‌شود. سپرهای هوای فشرده به دلیل مشکلات و مسائل فنی، امروزه کمتر استفاده می‌شود. بنابراین انتخاب نهایی در این پروژه باید از میان سپرهای دوغابی و سپرهای فشار تعادلی زمین انجام شود.

انواع سپرهای EPB و دوغابی، به طور عمده در شرایط متداول زمین، نیازی به اقدامات کمکی و جنبی ندارند. با این حال در شرایط ویژه مانند روباره کم و خاک‌های بولدردار و شرایط خاص دیگر، تزریق‌های شیمیایی، انجماد، خرد کردن تخته سنگ‌ها و اقداماتی از این قبیل برای پیشروی لازم است.

با افزودنی‌های مختلف و تکنیک‌های به‌سازی خاک، امکان به‌کارگیری سپرهای بسته در خاک‌های خارج از محدوده عملکرد تعریف شده وجود دارد [3، 4، 6، 9]، با این حال این قسمت‌ها باید در طول تونل، محدود و موضعی باشد. فاکتور اصلی برای تصمیم‌گیری در این موارد، هزینه‌های مربوط و توجیه اقتصادی است [3].

همان‌طور که اشاره شد، یکی از روش‌های متداول در انتخاب سپرهای حفاری در خاک‌ها و زمین‌های نرم، استفاده از منحنی‌های دانه‌بندی است. محدوده کاربرد سپرهای مختلف بر اساس منحنی دانه‌بندی، توسط مراجع مختلف از جمله سازندگان ماشین‌های حفاری ارائه شده است. در این روش منحنی‌های دانه‌بندی خاک برای قسمت‌های مختلف در طول مسیر ترسیم شده و بر روی یک نمودار واحد رسم شده است.

بدین ترتیب محدوده‌ای از دانه‌بندی به‌دست می‌آید. محدوده ارائه شده در این نمودار، با محدوده کاری که برای هر یک از دستگاه‌ها ارائه شده است، مقایسه و ماشین یا ماشین‌های مناسب، از این نظر انتخاب می‌شوند.

دامنه کاربرد ماشین‌های حفر تونل با توجه به منحنی‌های دانه‌بندی، توسط مراجع مختلفی ارائه شده و در سال‌های اخیر با توجه به روش‌های به‌سازی خاک گسترش یافته است.

محدوده کاربرد سپرهای EPB و دوغابی با توجه به منحنی دانه‌بندی خاک در شکل 4 نشان داده شده است [6]. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در گستره وسیعی از خاک‌ها، امکان استفاده از هر دونوع سپر وجود دارد.

جدول 5: محدوده کاربرد ماشین‌های تونل‌سازی [8]

پارامترهای ژئوتکنیک / جنس زمین		سنگ سخت		خاک/سنگ نرم			
		پایدار	ناپایدار	چسبنده پایدار	چسبنده ناپایدار	شرایط مختلط	غیر چسبنده
مقاومت فشاری (MN/m^2)		50 تا 300	5 تا 50	1	0/1		
مقاومت کششی (MN/m2)		5 تا 25	0/5تا 5				
RQD (%)		50 تا 100	10 تا 50				
فاصله درزه ها (m)		0/6 تا 2 و	0/06 تا 0/6				
چسبندگی (kN/m^2)				≤ 30	5 تا 30	5 تا 30	
دانه‌بندی	< 0/02 (%)			30	30		10
	< 0/06 (%)			≤ 30	≤ 30		
نوع ماشین*	TBM o.W	■	▒				
	TBM m.W	■	▒				
	TBM -S o.W	▒	■				
	TBM -S m.W	▒	■				
	SM-V1 o.W	▒	▒	■			
	SM-V1 m.W	▒	■				
	SM-V2 o.W			▒	■	■	▒
	SM-V2 m.W						
	SM-V3 o.W						
	SM-V3 m.W				▒	■	
	SM-V4 o.W	▒	▒				▒
	SM-V4 m.W					▒	■
	SM-V5 o.W			▒	■	▒	▒
	SM-V5 m.W			▒	■	▒	▒
	SM-T1 o.W	▒	▒	■			
	SM-T1 m.W						
	SM-T2 o.W					▒	■
	SM-T2 m.W						
	SM-T3 o.W						
	SM-T3 m.W				▒	■	
	SM-T4 o.W						
	SM-T4 m.W				▒	▒	■

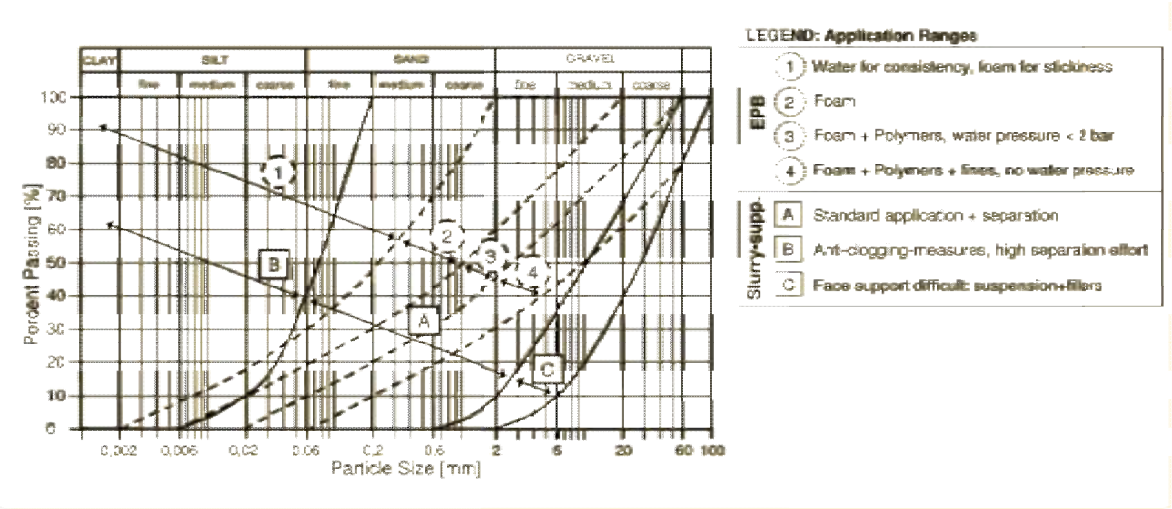
* نوع ماشین با توجه به جدول --

o.W : بدون آب زیرزمینی یا بالاتر از تراز آب

m.W : آبدار یا زیر تراز آب زیرزمینی

■ محدوده اصلی کاربرد

▒ قابل استفاده

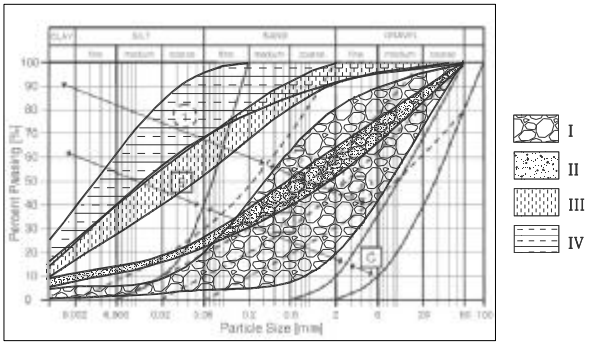


شکل 4: محدوده به‌کارگیری سپرهای EPB و دوغابی با توجه به منحنی دانه‌بندی خاک [6]

با توجه به شکل 4خاکهای مناسب برای بکارگیری سپرهای EPB خاکهایی است که منحنی دانه بندی آن در ناحیه 1 قرار گیرد. در این خاکها، به منظور کاهش چسبندگی خاک، در صورت نیاز از انواع فوم ها استفاده می شود. در ناحیه 2 به دلیل کاهش مواد ریزدانه، نفوذ پذیری افزایش یافته و برای کنترل آن از فوم استفاده می شود. در ناحیه 3، استفاده از سپرهای EPB در شرایط فشار جبهه کار کمتر از 2 بار، با افزودنی های مختلف شامل انواع پلیمرها و فومها استفاده می شود. در ناحیه 4، این سپرها در صورت عدم وجود فشار آب در جبهه کار، قابل استفاده است [6].

محدوده کاربرد سپرهای دوغابی نیز در شکل 4 نشان داده شده است. دامنه مناسب برای کاربرد این سپرها، محدوده A است. در این محدوده حفاری، نگهداری جبهه کار، تخلیه مواد و جداسازی آنها با مشکلات کمتری مواجه است. در ناحیه B به دلیل درصد زیاد مصالح ریز دانه مشکلات زیادی در ترابری و جداسازی دوغاب از خاک وجود دارد. درصورت به کار بردن سپرهای دوغابی در این شرایط، باید افزودنی هایی برای جلوگیری از بندش ذرات رسی و سیلتی استفاده کرد. در ناحیه C نیز به دلیل نفوذپذیری خیلی زیاد خاک و هرز رفتن دوغاب مشکلاتی برای نگهداری جبهه کار وجود دارد [6].

در شکل 5، دانه بندی خاکهای مسیر به تفکیک گروههای زمین شناسی مهندسی، با توجه به محدوده کاربرد سپرهای EPB و Slurry نشان داده شده است.



شکل 5: دانه‌بندی خاک‌های مسیر به تفکیک گروه‌های زمین‌شناسی مهندسی با توجه به محدوده کاربرد سپرهای EPB و Slurry

رسوبات گروه I که در حدود 20 درصد از طول مسیر را تشکیل می‌دهد، از نظر دانه بندی و ذرات ریز دانه رسی و سیلتی در محدوده مناسب کاربرد سپرهای دوغابی قرار دارند. امکان استفاده از ماشین EPB نیز در این بخش در صورت عدم وجود فشار آب وجود دارد. با توجه به شکل 2 در این بخش فشار آب وجود دارد. بنابراین استفاده از ماشین EPB در این بخش باید به همراه تمهیدات جنبی مانند تحکیم یا زهکشی باشد.

آبرفتهای گروه II که بخش عمده مسیر را تشکیل داده است، از نظر دانه بندی برای کاربرد هر دو نوع سپر (دوغابی و EPB) مناسب است. با این حال درصد اجزای ریزدانه این رسوبات فراتر از مقدار ایده‌آل در سپرهای دوغابی است و مشکلاتی برای حمل هیدرولیکی و جداسازی دوغاب به وجود

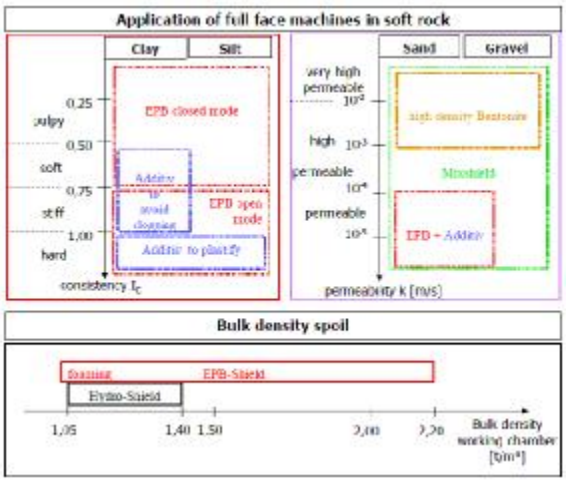
می‌آورد. استفاده از ماشین‌های EPB در این آبرفت‌ها مستلزم استفاده از فوم و افزودنی‌ها برای به‌سازی شرایط خاک است.

رسوبات گروه III و IV، از نظر دانه‌بندی برای کاربرد سپرهای EPB مناسب است و برای کاربرد سپرهای دوغابی مناسب نیست. این آبرفت‌ها که اغلب رسی و سیلتی است در بیش از 20 درصد از طول مسیر به صورت غالب و در بخش زیادی از مسیر نیز به صورت میان لایه و لنز مشاهده شده است.

با توجه به مطالب بالا، از نظر دانه‌بندی استفاده از سپرهای EPB نسبت به ماشین‌های Slurry برای این پروژه مناسب‌تر است.

2-1-5 - نفوذپذیری و شرایط هیدروژئولوژیکی

یکی از معیارهای ژئوتکنیکی مؤثر در انتخاب ماشین، ضریب نفوذپذیری خاک است. بر اساس پیشنهاد هرنکنشت (شکل 6) حداکثر نفوذپذیری قابل قبول برای کاربرد موفق ماشین‌های EPB برابر با $10E^{-4}$ m/sec است [9].



شکل 6- دامنه کاربرد ماشین‌های EPB در خاکهای مختلف [9]

عامل محدودکننده دیگر از نظر هیدروژئولوژیکی، فشار آب در جبهه‌کار تونل است. به‌طوری که کاربرد ماشین‌های EPB برای حفاری در شرایط فشار آب کمتر از 3 بار مناسب است [2،6،10،11].

با توجه به این‌که در بیشتر مسیر تونل مقدار نفوذپذیری کمتر از 10E-5 m/sec است و همچنین مقدار فشار آب در کل مسیر تونل کمتر از 3 بار است، بنابراین بر اساس این پارامتر، ماشین EPB انتخاب مناسب‌تری است. نکته قابل توجه در این قسمت نفوذ پذیری زیاد و تراز بالای آب زیرزمینی آبرفت‌های گروه I است. به‌طوری‌که نفوذپذیری تا $10E^{-4}$ m/sec برآورد و ارتفاع آب از کف تونل نیز تا 23 متر گزارش شده است. بنابراین در این بخش‌ها ممکن است مشکلاتی در حین حفاری با ماشین EPB بروز کند.

با توجه به دستورالعمل‌های ارائه‌شده توسط ITA، برای حفر این تونل در بخش زیادی از مسیر به دلیل وجود آب، باید از سپرهای بسته استفاده کرد. بنابراین درصورتی که بنابر استفاده از یک نوع ماشین برای حفاری این قطعه باشد، انتخاب نهایی باید بین ماشین‌های EPB و دوغابی انجام گیرد. از نظر درصد اجزای خیلی ریزدانه، به جز آبرفت‌های گروه I، در سایر خاک‌های مسیر، این اجزا بیش از 10 درصد است. در آبرفت-های گروه III و IV، این اجزا تا 70 درصد نیز می‌رسد. بنابراین با توجه به این معیارها و جنس خاک، استفاده از سپرهای دوغابی به جز برای بخش محدودی از مسیر، مناسب نیست.

شرایط مناسب برای کاربرد سپرهای EPB با توجه به دستورالعمل‌های ITA، خاک‌های چسبنده با حداقل 30 درصد اجزای ریزدانه (کمتر از 0/06 میلی‌متر) است. این اجزا در آبرفت‌های گروه I کمتر از 10 درصد و در آبرفت‌های گروه II در حدود 20 درصد است. با این حال این آبرفت‌ها به همراه لنزهای رسی است. بنابراین درصد رس در جبهه‌کار بیش از این مقدار خواهد بود. آبرفت‌های گروه III و IV، با توجه به معیارهای ارائه شده، برای کاربرد سپرهای EPB مناسب است.

به‌طورکلی برتری سپرهای دوغابی کنترل دقیق‌تر جبهه‌کار ، دسترسی ساده‌تر به جبهه‌کار، فرسایش کمتر ابزار حفاری و کاترهد و کنترل دقیق نشست است. در حالی که برتری اصلی سپرهای EPB در جنبه‌های اقتصادی و راندمان بالاتر است. بنابراین به‌طور طبیعی در شرایطی که امکان استفاده از هردونوع ماشین باشد، گزینه اول سپر EPB است [3].

۵-۲- دیگر پارامترهای مؤثر بر نوع سپر

همانگونه که ذکر شد، در انتخاب دستگاه مناسب برای این پروژه، علاوه بر جنس زمین، عوامل تأثیرگذار دیگری نیز وجود دارد، که در زیر به آن اشاره شده است.

- فضاهای مورد نیاز برای مونتاژ و دمونتاژ دستگاه و فضاهای موجود
- فضاهای کارگاهی مورد نیاز و موجود
- پیچیدگی‌های سیستم و دانش فنی مورد نیاز

- راندمان و نرخ پیشروی مورد نیاز
- هزینه سرمایه گذاری اولیه و هزینه های جاری
- ایمنی حین کار و نشست سطحی

سپرهای EPB و دوغابی با توجه به عوامل بالا در جدول 6 به‌طور خلاصه مقایسه شده است. نتیجه مقایسه این دو نوع ماشین در جدول 7 ارائه شده است [4].

جدول 6- مزایا و معایب سپرهای EPB و Slurry [4]

	EPB	Slurry
مزایا	- هزینه سرمایه‌ای کمتر - فضای مورد نیاز کمتر برای شفت مونتاژ و تجهیز کارگاه - سادگی سیستم از نظر کاربری و نگهداری - میزان نشست محدود در صورت ریزش ناگهانی جبهه کار - قابل استفاده در مدهای مختلف با توجه به شرایط زمین	- سیستم تعیین و کنترل خودکار فشار جبهه کار - گشتاور مورد نیاز کمتر - توان کاترهد مورد نیاز کمتر - امکان استفاده از سنگ شکن - عدم تماس و آلودگی داخل تونل با مصالح حفاری
معایب	- فشار مورد نیاز جبهه کار باید در حین پیشروی محاسبه شود - توان و گشتاور زیاد کاترهد - آلودگی زیاد تونل با مصالح حفاری	- سیستم پیچیده از نظر آموزش، کاربری و نگهداری - افزودنی‌های زیاد مورد نیاز - نیاز به کارخانه پیچیده جداسازی دوغاب - نیاز به فضای کارگاهی وسیع - هزینه سرمایه‌ای بالاتر - نیاز کلی بیشتر به برق

جدول 7- مقایسه سپرهای EPB و Slurry از نظر پارامترهای اجرایی [4]

معیار	EPB	Slurry
توان و گشتاور کاترهد	بالاتر	پایین تر
برق مورد نیاز کارگاه	کمتر	بیشتر
استفاده از افزودنی‌ها	نیاز است	نیاز است
هزینه سرمایه‌گذاری	کمتر	بیشتر
فضای مورد نیاز کارگاه	کمتر	بیشتر
تخلیه مصالح	ساده تر	پیچیده تر
سرعت پیشروی	سریعتر	کند تر
محاسبه فشار موردنیاز جبهه کار	محاسبه از قبل	خودکار

با توجه به این جدول مشاهده می شود که سپرهای EPB با توجه به شرایط پروژه و پارامترهای اجرایی نسبت به نوع دوغابی برتری دارند.

۶- نتیجه‌گیری

با توجه به بالا بودن تراز آب در مسیر تونل (در بیش از 60 درصد از طول مسیر)، برای حفاری این بخش، استفاده از سپرهای بسته ضروری است. صرف‌نظر از تجهیزات جانبی مورد نیاز، هزینه‌های کمتر و راندمان بالاتر سپرهای EPB نسبت به دیگر سپرهای بسته، با توجه به شرایط زمین‌شناسی پروژه نیز استفاده از سپرهای EPB گزینه مناسبی است.

سپرهای EPB به دلیل برتری‌هایی که نسبت به دیگر سپرهای بسته به‌ویژه سپرهای دوغابی دارد و بازه گسترده‌تر استفاده از آن، سهولت حفاری در مدهای مختلف (باز، نیمه باز، بسته و حتی با استفاده از دوغاب) و تناسب بیشتر با شرایط زمین مسیر تونل، برای حفر این تونل، پیشنهاد می‌شود. با این حال با توجه به تنوع آبرفت‌های مسیر، به‌ویژه وجود بیش از 2 کیلومتر آبرفت‌های درشت‌دانه، در طراحی ماشین باید تنوع جنس خاک و امکان کار در مدهای مختلف در نظر گرفته شود.

منابع

[1] Jerome B. O'Carroll, 2005, *A Guide to Planning, Constructing and Supervising EARTH PRESSURE BALANCE TBM TUNNELING*, Parsons Brinckerhoff Inc.

[2] Guglielmetti V., Grasso P., Mahtab A., Xu S., 200, *Mechanized Tunneling in Urban Areas Design Methodology and Construction Control*, Taylor & Francis e-Library.

[3] ITA – AITES, WG Mechanized Tunneling, 2000, *Recommendations and Guidelines for Tunnel Boring Machines (TBMs)*, pp. 1 - 118.

[4] Lovat R. P., 2006, *TBM Design Considerations: Selection of Earth Pressure Balance or Slurry Pressure Balance Tunnel Boring Machines*, International symposium on utilization of underground space in urban areas, Egypt.

[5] Eisenstein, T., 2007, *Tunnels in Metropolis*, Keynote lecture ITA-AITES WTC, PRAGUE.

[6] Thewes M., 2007, *TBM tunneling challenges redefining the state of the art*, Keynote lecture ITA-AITES WTC, PRAGUE.

[7] موسسه مهندسین مشاور ساحل، 1387، **بررسی مطالعات ژئوتکنیک مرحله اول**.

[8] DAUB, 1997, *Recommendations for selecting and evaluating tunnel boring machines*.

[9] Herrenknecht M., Rehm U., 2003, *Earth Pressure Balanced Shield Technology*, Soft ground and hard rock mechanical tunneling technology seminar, CSM, Colorado.

[10] Maidl B., Herrenknecht M., 1996, *Mechanized Shield Tunneling*, VCH Publishing Group.

[11] BTS, 2005. *Closed-Face Tunneling Machines and Ground Stability. British Tunneling Society (Closed-Face Working Group) in association with the Institution of Civil Engineers*: Thomas Telford Publishing, London, 77 p.