یادداشت پژوهشی

انتخاب دستگاه حفاری در تونل‌های با شرایط متنوع زمین شناسی (مطالعه موردی تونل متوسلیان)

کریم روشن بخت، دانش آموخته دکتری، سازمان مشاور فنی و مهندسی شهر تهران، ایران
کیوان آقابیک*، استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشکده فنی دانشگاه تهران، تهران، ایران
فرهاد بکیاسا، دانش آموخته کارشناسی، مدیر گروه تونل سازمان مشاور فنی و مهندسی شهر تهران، ایران
*پست الکترونیکی نویسنده مسئول:kayvan.aghabayk@ut.ac.ir

دریافت: ۹۶/۱۱/۲۰- پذیرش: ۹۷/۰۴/۱۸
صفحه۳۳۷-۳۲۳

چکیده

یکی از مهمترین مسائل تونلسازی مکانیزه در محیط‌های شهری، انتخاب ماشین حفاری مناسب است. عواملی مانند شرایط زمین شناسی و ژئوتکنیکی مسیر تونل، وضعیت سطح آب زیرزمینی، هزینه های تمام شده و عوامل فنی و محیطی موارد مهمی هستند که برانتخاب ماشین و روش اجرای تونلهای شهری مؤثر هستند. تونل متوسلیان به طول حدود ۱۰ کیلومتر در ادامه بزرگراه صیاد، از شمال میدان سپاه تا بزرگراه آزادگان پیش‌بینی شده است. با توجه به امتداد شمالی- جنوبی مسیر تونل، طیف متنوعی از واحدهای زمین‌شناسی شناسایی شده است. مسیر تونل با توجه به شرایط زمین‌شناسی به سه بخش شمالی، میانی و جنوبی تقسیم شده که شرایط متفاوتی را در ارتباط با نوع ماشین حفار دارند. این امر منجر به بروز پیچیدگی هایی جهت انتخاب نوع دستگاه شده است. در این مقاله سعی شده با بررسی شرایط زمین شناسی و ژئوتکنیکی و لحاظ نمودن سایر عوامل مؤثر بر کارکرد ماشینهای حفر تونل، بر اساس روشها و دستورالعملهای انتخاب ماشین، مناسبترین دستگاه حفاری برای حفر تونل پیشنهاد شود. لذا با استفاده از معیار تصمیم گیری چند متغیره، آنالیزهایی در سناریوهای مختلف انجام و در مجموع برای کل مسیر تونل، با احتساب عامل هزینه و عوامل فنی- محیطی، ماشین EPB با برتری اندکی نسبت به ماشین Slurry انتخاب شد.

واژه‌های کلیدی: تونلسازی شهری، انتخاب TBM، EPB، شرایط زمین شناسی، تصمیم گیری چند متغیره

۱- مقدمه

در مناطق شهری تراکم ترافیک، کمبود فضا و عوامل زیست محیطی موجب ایجاد تقاضا برای استفاده بیشتر از فضاهای زیرزمینی است (Anagnostou and Rizos 2009). با توجه به نیاز به گسترش شبکه‌های مترو و راههای ارتباطی، استفاده از روشهای مکانیزه تونلسازی در نواحی شهری اجتناب ناپذیر است. استفاده از روشهای مکانیزه حفاری تونل مستلزم انتخاب ماشین مناسب با در نظر گرفتن شرایط پروژه است (Jerome B. O'Carroll 2007). شرایط زمین‌شناسی پیش‌بینی شده در

امتداد مسیر تونل برای انتخاب دستگاه اهمیت حیاتی دارد. اهمیت این بررسی‌ها به وضوح در توصیه‌های سازمان‌های بزرگ تخصصی مانند BTS 2005، DAUB 2000 و AFTES 2005 انعکاس یافته است. برای انتخاب ماشین مناسب باید توانایی‌های ماشین‌های حفار در زمینهای نرم، دامنه کاربرد و محدودیت‌های خاص هر یک با توجه به شرایط زمین مسیر تونل مد نظر قرار گیرد (AFTES 2005). شرایط خاک در تونل‌های بلند و تونل‌هایی که در مسیرهای با تنوع زیاد در شرایط زمین‌شناسی حفر می‌شود، ثابت نبوده و تغییراتی در عمق و طول نشان می دهد. ماشین انتخاب شده باید بر اساس شرایط زمین‌شناسی غالب پروژه طراحی شود ولی در عین حال بایستی توانایی حفاری در شرایط دشوار زمین‌شناسی را نیز داشته باشد (Lovat 2006). انتخاب دستگاه مناسب موضوع تحقیقات فراوانی بوده است (Erickson et all 2008, Marinos et all 2008, Tarigh Azali et all 2013, Diponio et all 2007, KhademiHamidi et all 2009). اگرچه بدلیل پیشرفت تکنولوژی بکار رفته در ماشینهای حفاری و همچنین استفاده از روشهای بهسازی و افزودنی‌های مختلف، محدوده کاربرد ماشینهای مختلف تا حد زیادی به هم نزدیک شده است (Lovat 2006)، ولیکن حفاری تونل با راندمان مناسب و کمترین هزینه و مشکلات اجرایی به انتخاب مناسبترین ماشین بستگی دارد. البته شرایط زمین و قابلیت بکارگیری دستگاه تنها عامل تعیین کننده نبوده و عوامل دیگری مانند عوامل فنی و محیطی، راندمان حفاری و هزینه‌های آن نیز دارای اهمیت می‌باشند. در تونل‌های بلند که تناسب شرایط زمین با نوع دستگاه در بخش‌های مختلف مسیر متفاوت است، تصمیم‌گیری در مورد نوع دستگاه پیچیده تر بوده و نقش سایر عوامل در انتخاب نوع دستگاه، پر رنگ تر خواهد بود. در این شرایط روش‌های مختلفی جهت تصمیم گیری در مورد نوع دستگاه مناسب بکار گرفته شده است که می‌توان به استفاده از منطق فازی (Lehner and Hartmann 2007, Yazdani-Chamzini and Yakhchali 2012)، روش تحلیل سلسله مراتبی AHP (Fahimdanesh and Hafezi Moghadas 1014) یا مدل تصمیم‌گیری چند معیاره (Edalat et all 2011, Kalamaras ea all 2007) اشاره نمود. در این مقاله سعی شده تا روش انتخاب دستگاه مناسب بعنوان یک تجربه مناسب در تونل متوسلیان با لحاظ نمودن جمیع پارامترهای موثر و با استفاده از روش تصمیم گیری چند متغیره، ارائه شود.

۲- پیشینه تحقیق

بزرگراه شهید صیاد شیرازی بعنوان ارتباط‌دهنده مناطق شمال شرق تهران با مرکز شهر دارای اهمیت و نقش بسزای ترافیکی است که امتداد آن بدلیل مشکلات عدیده مانند هزینه تملک در میدان سپاه خاتمه یافته است. براساس مطالعات ترافیکی، توسعه و ادامه بزرگراه به سمت جنوب به منظور افزایش دسترسی‌ها و بهبود شاخص‌های ترافیکی در این محدوده ضروری است. به این منظور تونل متوسلیان در ادامه بزرگراه صیاد شیرازی به طول تقریبی ۱۰ کیلومتر از شمال میدان سپاه تا بزرگراه آزادگان پیش‌بینی شده است (شکل ۱). این تونل، یک تونل دوطبقه با دو خط عبور در هر طبقه است. تونل با مقطع دایره‌ای با قطر حفاری۱۳/۰۴و قطر داخلی ۱۱/٦٤ متر است. عمق حداکثر تونل ٤۰ متر و با TBM حفاری خواهد گردید. هر رینگ شامل ۹ سگمنت همراه با یک قطعه کلید است. ضخامت سگمنت‌ها ۵۰ سانتی‌متر است.

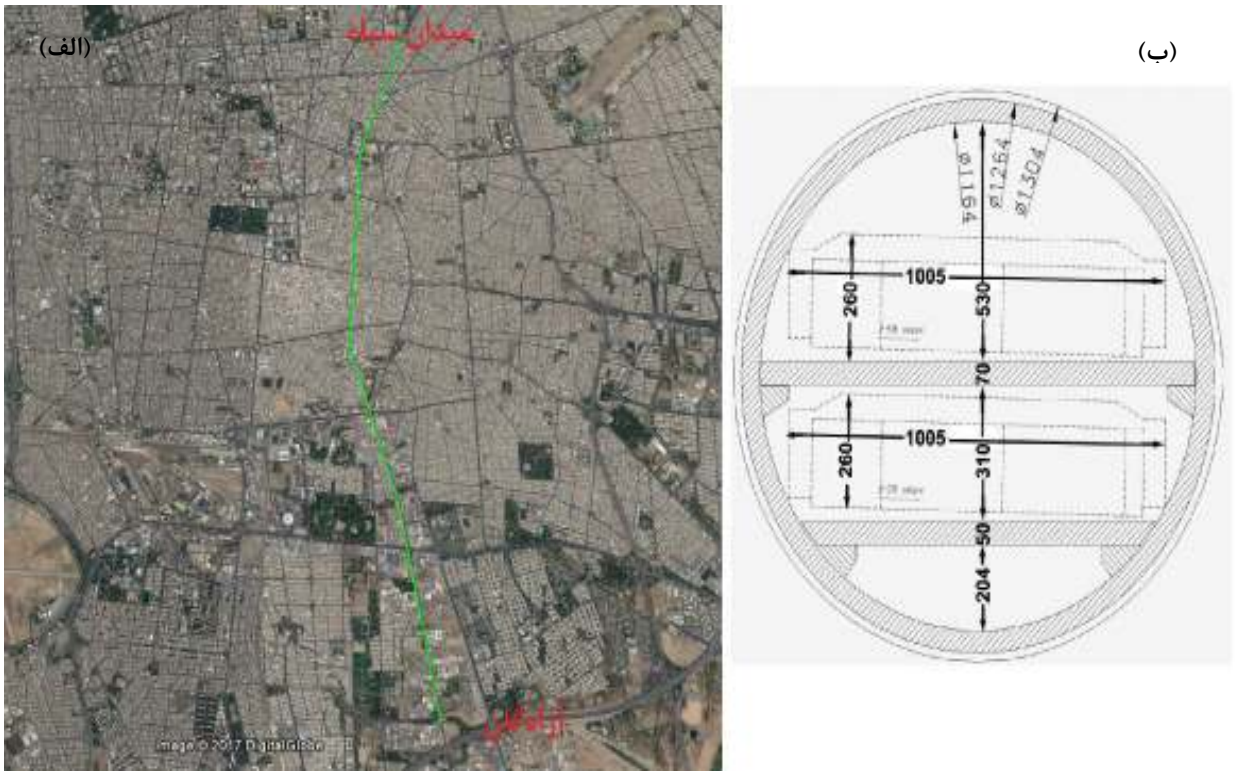
۳- شرایط کلی زمین شناسی و ژئوتکنیک

پروژه در محدوده شهر تهران و روی نهشته‌های آبرفتی دوران چهارم بنا شده است. بخش شمالی مسیر در محدوده گسترش آبرفت C واقع شده ولیکن بیشتر طول مسیر در بخش جنوبی، درمحدوده آبرفت سازند D قرار گرفته است. سازند C شامل آبرفت‌های جوان مخروط افکنه‌ای است که در نزدیکی کوهپایه‌ها شکل مخروط افکنه واضحی داشته و به سمت جنوب تبدیل به لایه‌های سیلتی کم‌شیب می‌شود. از دیدگاه مقاومت مکانیکی، این سازند عموما دارای مقاومت نسبی بالا بوده و پتانسیل ذخیره آب را دارد.

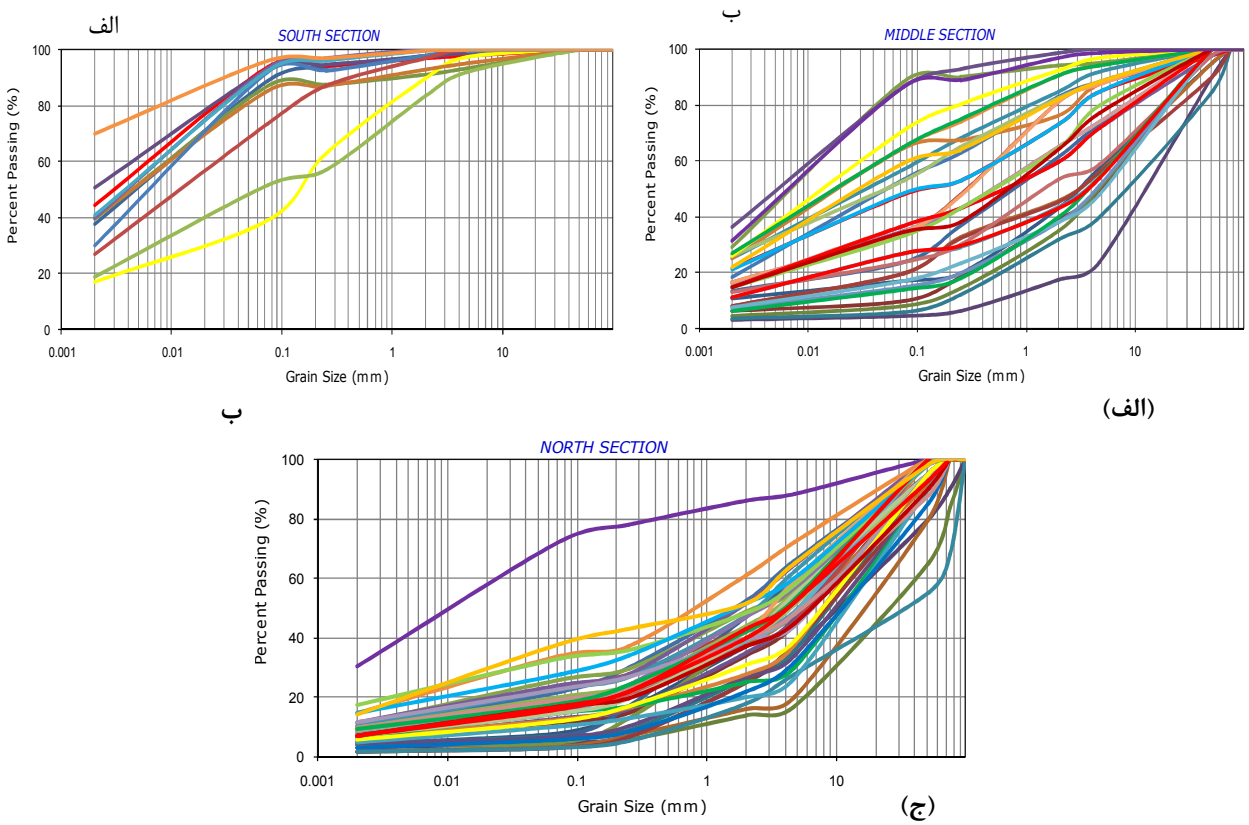
آبرفت‌های سازند D متشکل از جوانترین نهشته‌های رودخانه‌ای و یا سیلابی بوده و در جنوب تهران، این سازند از

رسوبات ریزدانه سیلتی ـ رسی تشکیل شده است. مقاومت مکانیکی واحدهای این سازند بسیار متغیر است.

بر اساس نتایج بررسی‌های ژئوتکنیکی، واحدهای خاکی در برگیرنده مسیر تونل از لحاظ جنس مصالح تغییرات بسیاری داشته و از لحاظ زمین‌شناسی‌مهندسی، مسیر تونل به سه بخش شمالی، میانی و جنوبی قابل تقسیم است. بخش جنوبی از شمال بزرگراه آزادگان تا میدان شوش ادامه دارد. این بخش اساساً از مصالح ریزدانه تشکیل شده که جنس آنها غالباً رس (CL) بوده و در آن لنزهای ماسه‌ای و سیلتی (SC و ML) دیده می‌شود البته در نواحی شمالی‌تر در اعماق بیشتر، مصالح شنی (GC) نیز مشاهده شده است. منحنی دانه‌بندی مصالح این بخش در شکل ۲- الف نمایش داده شده است.



شکل۱. (الف) موقعیت مسیرتونل متوسلیان و (ب) مقطع تونل



شکل ۲. منحنی دانه‌بندی مصالح تشکیل دهنده جبهه کار تونل تونل الف) در بخش جنوبی، ب) بخش میانی و ج) بخش شمالی

بخش میانی که از قسمت‌های جنوبی میدان شوش شروع و تا چهار راه سرچشمه ادامه دارد، در واقع ناحیه انتقال از مصالح ریزدانه جنوب به مصالح درشت‌دانه در شمال مسیر است و مجموعه‌ای از لایه‌های ریزدانه و درشت‌دانه در آن مشاهده گردیده است. بطور کلی در این بخش از مسیر تونل، رسوبات ماسه ای و سیلتی (SC و SM) در مقایسه با دیگر واحدهای خاکی گسترش بیشتری دارند. به سمت شمال این بخش، بر میزان مصالح ماسه ای افزوده شده و از میزان حضور لایه‌های رسی کاسته می‌گردد و همچنین لایه‌های شنی با ضخامت ۳ تا ۵ متر نیز در پروفیل ظاهر می‌شوند. منحنی دانه بندی مصالح این بخش در شکل ۲- ب نمایش داده شده است. بخش شمالی از نزدیکی چهار راه سرچشمه شروع شده و تا ابتدای مسیر (بالاتر از میدان سپاه و جنوب پل شیخ صفی) ادامه می‌یابد. جنس غالب مصالح در این بازه خاکهای درشت‌دانه (شنی و ماسه‌ای) است. در شمال مسیر، مصالح درشت‌دانه بوده و از لایه‌های ضخیم شن رسی (GC) و شن سیلتی (GM) تشکیل شده است که با حرکت به سمت جنوب لایه‌هایی از جنس SC نیز دیده می شوند. منحنی دانه‌بندی مصالح این بخش در شکل ۲- ج نمایش داده شده است. متغیرهای ژئوتکنیکی نهایی برای هرتیپ خاک با استفاده از میانگین‌گیری وزنی بین متغیرهای ژئوتکنیکی حاصل از آزمایشات آزمایشگاهی و آزمایشات صحرایی، تحلیل آنها و قضاوت مهندسی بر اساس اعتبار نتایج آزمایشات و همچنین مقایسه با تجربیات قبلی تعیین شده و پارامترهای مورد نظر براساس مدل رفتاری موهر کلمب انتخاب و در جدول ۱ ارائه شده است. در نهایت پروفیل ژئوتکنیکی مسیر تونل تهیه و در شکل ۳ ارائه شده است. وضعیت آب زیرزمینی: نتایج حاصل از برداشت سطح آب زیرزمینی در گمانه‌ها و چاهک‌های حفر شده طی مطالعات ژئوتکنیک،

حاکی از کاهش عمق سطح آب زیرزمینی از شمال به جنوب است. در قسمت‌های شمالی حفاری تا عمق ۵۰ متربا سطح آب زیر زمینی برخورد نکرده است. به سمت جنوب، عمق سطح آب به تدریج کم شده و به ۹ متر می‌رسد. سطح آب زیرزمینی در پروفیل ژئوتکنیکی مسیر تونل نمایش داده شده است.

جدول ۱. تیپ بندی نهایی انواع خاک به همراه پارامترهای منتسب در مسیر تونل

No	Description	N_{spt}	γ_d (kN/m3)	γ_{sat} (kN/m3)	C' (kPa)	Φ' (Deg.)	C_u (kPa)	E (MPa)	C_c	C_s	k (m/sec)	ν	K_o
1	Clay Type 1(Hard)	>40	19	20	-	-	200	50					
2	Clay Type 2 (Very Stiff)	>20	17	19	-	-	160	40					
3	Clay Type 3 (Stiff)	>10	16	18	-	-	120	24	0.2	.02	10^{-7}	.37	0.6
4	Clay Type 4(Firm)	>5	14	16	-	-	50	12					
5	Sand Type 1(Very Dense)	>42	21	22	4	38	-	150	-	-			.49
6	Sand Type 2(Dense)	>25	19	21	4	36	-	100	-	-	2×10^{-5}		
7	Sand Type 3(Medium)	>8	17	20	4	32	-	70	-	-			.56
8	Gravel Type 1 (Very Dense)	>42	21	22	6	40	--	200	-	-		.33	.38
9	Gravel Type 2(Dense)	>25	19	21	6	38	-	120	-	-	2×10^{-4}		
10	Gravel Type 3(Medium Dense)	>8	17	20	6	34	-	90	-	-			.44
11	Silt (Medium Dense)	>8	17	20	4	24	-	20	-	-	10^{-7}	.35	0.6

٤- مخاطرات ژئوتکنیکی مسیر تونل متوسلیان

مخاطرات ژئوتکنیکی تونل متوسلیان، شامل تراوش آب به درون تونل، ناپایداری جبهه کار در حین حفاری، ماسه سست اشباع شده، رفتار چسبناکی و خطر انسداد، خاکهای متورم شونده، خطر سایش و ساینده‌گی زمین، جمع شدگی جدار تونل، جبهه کار مختلط، روانگرایی، وجود تخته سنگ یا بولدر و وجود فروچاله‌ها است. اهمیت هر یک از این مخاطرات در طول مسیر مورد بررسی قرار گرفته و نتایج آن در زیر برش ژئوتکنیکی مسیر تونل با هاشور برای هر مخاطره نمایش داده شده است (شکل ۳).

خطر چسبناکی و انسداد: برای ارزیابی خطر چسبناکی و انسداد از رده‌بندی (Thewes & Burger 2004) استفاده شد که بر اساس آن خطر متوسط انسداد برای بخش جنوبی و خطر متوسط تا کم در بخش میانی و خطر کم در بخش شمالی مسیر متصور می‌باشد.

نفوذپذیری زمین دربرگیرنده جبهه کار تونل: در اکثر آزمایشات لفران، مقدار نفوذپذیری کمتر از 10E-5 متر بر ثانیه بوده و تنها در یک قطعه مقدار نفوذپذیری بیشتر از 10E-5 متر بر ثانیه بوده است.

خطر وجود بولدر و قطعات سنگی: در بیشتر گمانه‌ها و چاهک‌ها، بولدر و قطعات سنگی مشاهده نشده است. از سوی دیگر در مواردی که این قطعات سنگی مشاهده شده‌اند، ابعاد و اندازه آنها بزرگتر از ۲۵ سانتیمتر نبوده است.

فشار ستون آب: بطور کلی عمق سطح آب زیرزمینی از شمال به جنوب، در طول مسیر کاهش یافته است. سطح آب از کیلومتر حدود ۲+۵۰۰ تا ۷+۰۰۰ بالاتر از سطح تونل بوده و حداکثر ارتفاع سطح آب از کف تونل حدود ۳۳ متر است.

خطر سایش و ساینده‌گی زمین: لایه‌های خاکی تشکیل دهنده جبهه‌کار تونل بر اساس جنس و اندازه دانه ها، بافت ذرات تشکیل دهنده و نتایج پتروگرافی، دارای پتانسیل سایش بالا تا فوق‌العاده بالا می باشند. در بخش جنوبی، تونل از میان زمین‌هایی با پتانسیل سایش کم عبور خواهد نمود و در بخش‌های میانی و شمالی در زمین‌هایی با پتانسیل سایش بی‌نهایت بالا و بسیار بالا حفر خواهد شد. البته خطر سایش بیشتر از آنکه روی انتخاب ماشین موثر باشد، بر روی مشخصات فنی و طراحی ابزار و کاترهد ماشین TBM تاثیر گذار است.

۵- انتخاب نوع دستگاه حفاری

۵-۱- بررسی امکان پذیری کلی

ابتدا امکانپذیری کلی استفاده از سپرهای مختلف بر اساس جداول استاندارد معیارهای ارائه شده توسط کمیته سازه های زیرزمینی آلمان بررسی شده است. در زیر خلاصه ای از بررسی ها با توجه به ویژگی‌های زمین‌شناسی تونل، ارائه شده است:

– سپر باز در شرایطی که آب زیرزمینی وجود نداشته باشد و یا قبلاً سطح آب پایین آورده شده باشد، قابل استفاده است. لذا استفاده از آن برای حفاری تونل صیاد پیشنهاد نمی‌شود.

– سپر هوای فشرده: در این روش برای جلوگیری از ورود آب به سینه کار تونل از هوای فشرده استفاده می گردد. با توجه به مشکلات عدیده از قبیل ایمنی اجرایی و ایمنی پرسنل، امروزه کاربرد سیستمهای هوای فشرده تقریباً منسوخ شده است.

– سپر دوغابی (Slurry-TBM): یک روش ایمن و مطمئن به منظور ایجاد تونل با حداقل نشست در سطح می باشد. بکار گیری این روش در انواع زمین های سست آبدار یا بدون آب امکان پذیر است. این روش بعنوان یکی از گزینه های محتمل برای حفاری تونل صیاد پیشنهاد می شود.

– سپر تعادلی زمین (EPB-TBM): این روش به منظور جلوگیری از ریزش خاک، جلوگیری از ورود آب به تونل و کنترل نشست‌ها در سطح زمین توسعه یافته است و قادر به تحمل فشار زمین و آب می‌باشد. این نوع سپر نیز به عنوان یکی از گزینه‌های محتمل برای حفاری تونل صیاد مطرح می‌باشد.

– ترکیب دو ماشین تحت عنوان سپر ترکیبی یا MIX SHIELD شناخته می شود که قابلیت بکارگیری همزمان دو روش را دارد (مانند EPB و دوغابی). نگهداری سینه کار در شرایط متغیر زمین شناسی و هیدروژئولوژی محلی که تونل در آن حفر می شود، قابل انطباق است. این نوع از سپر نیز می‌تواند یکی از گزینه‌های محتمل برای حفاری تونل صیاد باشد.

– سپرهای تیغه‌ای، سپرهای دایره‌ای چند بخشی در رده سپرهای خاص محسوب می‌گردند و به سبب تکنولوژی خاص بکار رفته در آنها در همه نقاط دنیا معمول نمی‌باشند.

۵-۲- انتخاب‌نوع ماشین TBM با توجه به عوامل موثر

ماشین حفاری مناسب باید با توجه به قابلیتهای ماشینهای حفر تونل و تناسب با شرایط پروژه انتخاب شود. مهمترین عواملی که می‌بایست در انتخاب دستگاه مورد توجه قرار گیرند شامل موارد ذیل می‌باشند:

عامل زمین شناسی:

- تطابق ماشین با تغییرات توزیع دانه‌بندی خاک
- وجود بولدر و قطعات سنگی در رسوبات آبرفتی
- نفوذپذیری زمین دربرگیرنده جبهه کار
- فشار ستون آب

- رفتار چسبناکی مصالح حفاری شده

عامل هزینه:

- هزینه ساخت ماشین TBM و تجهیزات وابسته
- هزینه تونلسازی با هر یک از ماشین‌های EPB و Slurry

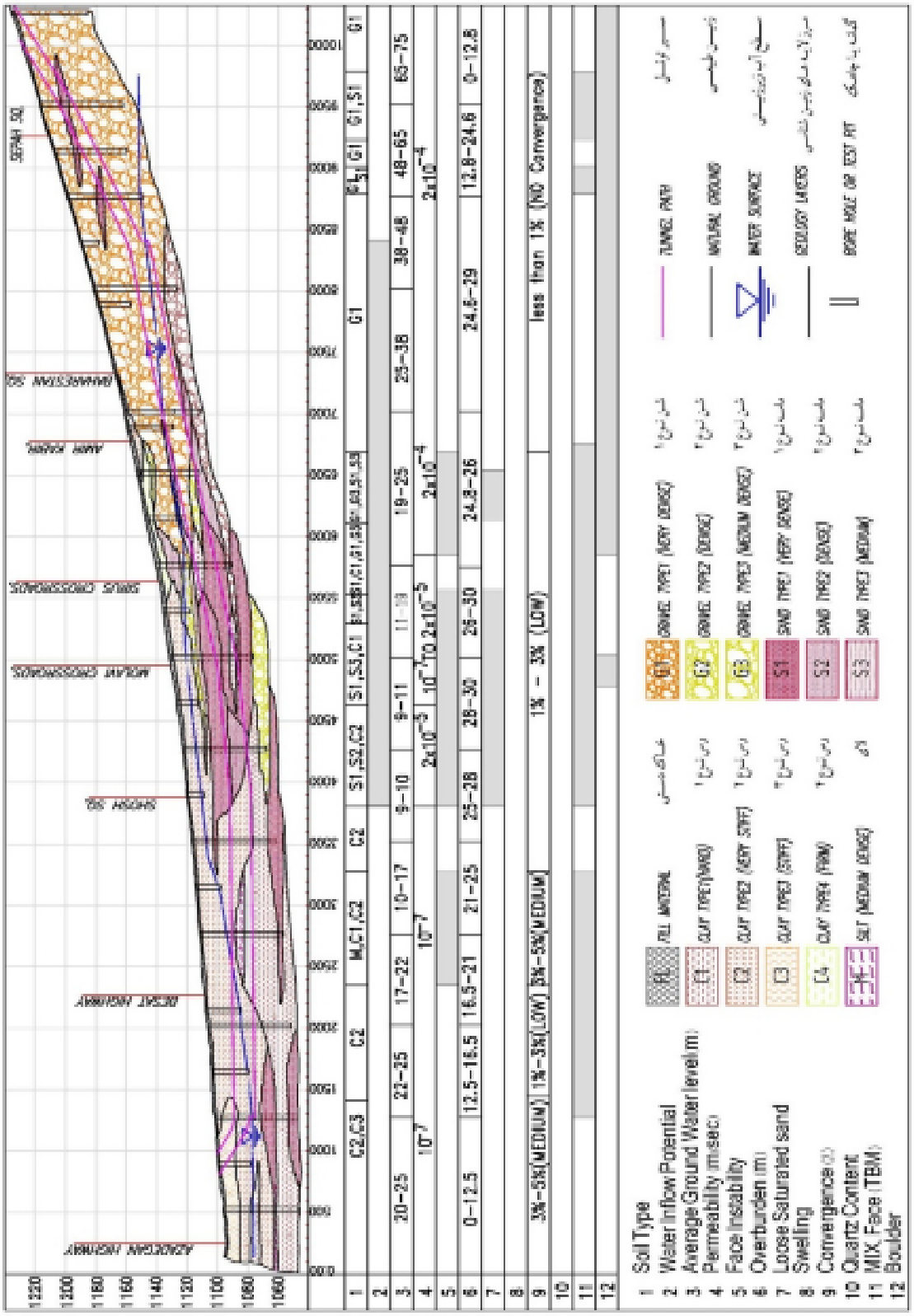
عامل فنی-محیطی:

- آلودگی آب زیرزمینی
- دفع مصالح حاصل از حفاری
- فراهم بودن فضای مورد نیاز در شهر
- خطر برخورد به قنات‌ها و حفرات زیرزمینی
- تجربه تونلسازی مکانیزه (زمین نرم) در ایران

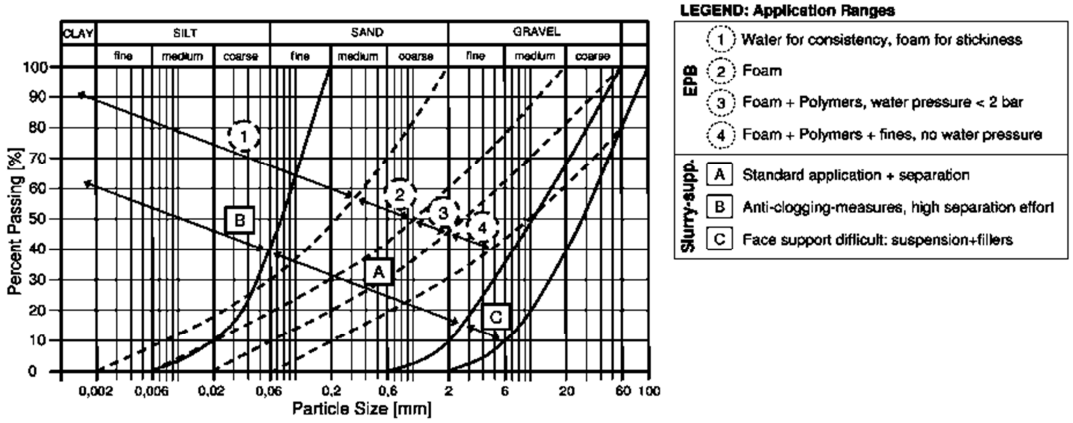
۵-۲-۱- عامل زمین شناسی

تناسب با دانه‌بندی خاک: هر یک از ماشین‌های EPB-TBM یا Slurry-TBM در محدوده خاصی از دانه‌بندی دارای بیشترین راندمان و کاربری می‌باشد. دامنه کاربرد ماشینهای مختلف حفر تونل با توجه به شرایط زمین، توسط مراجع مختلف مانند شرکتهای طراح و سازنده ماشین، انجمنها و کمیته‌های بین المللی تونل با توجه به مهمترین عوامل مؤثر بر عملکرد انواع ماشینها ارائه شده است. محدوده کاربری ماشین‌های مختلف با گذشت زمان و پیشرفت تکنولوژی حفاری و همچنین توسعه استفاده از مواد افزودنی، گسترش یافته است. در این تحقیق، از معیار (Thewes 2007) استفاده شده است (شکل٤).

این معیار در ماشین‌های EPB برای خاک‌هایی که منحنی دانه‌بندی آنها در ناحیه ۱ قرار گیرند به منظور کاهش چسبناکی خاک باید از انواع فوم‌های ضد رس استفاده نمود. در ناحیه ۲ به دلیل کاهش مصالح ریزدانه، نفوذپذیری افزایش یافته و برای کنترل آن از فوم استفاده می‌شود. همچنین خاک‌هایی که دانه‌بندی آنها در محدوده ناحیه ۳ قرار دارند با شرط اینکه فشار آب کمتر از ۲ بار باشد قابل حفاری است و اگر خاکی در محدوده ناحیه ٤ واقع شود چنانچه هیچگونه آبی وجود نداشته باشد در دامنه کاربری EPB قرار می‌گیرد (Thewes 2007). همچنین طبق معیار Thewes دامنه کاربری مناسب برای سپرهای Slurry در محدوده A واقع شده است. در این محدوده عملیات حفاری، نگهداری جبهه کار، تخلیه مواد و جداسازی آنها با مشکلات کمتری مواجه خواهد شد. در ناحیه B به دلیل درصد زیاد مصالح ریزدانه مشکلات زیادی در ترابری و جداسازی دوغاب از خاک وجود دارد. در ناحیه C نیز به دلیل نفوذپذیری خیلی زیاد خاک و هرز رفتن دوغاب مشکلاتی برای نگهداری جبهه کار وجود خواهد داشت (Thewes 2007).

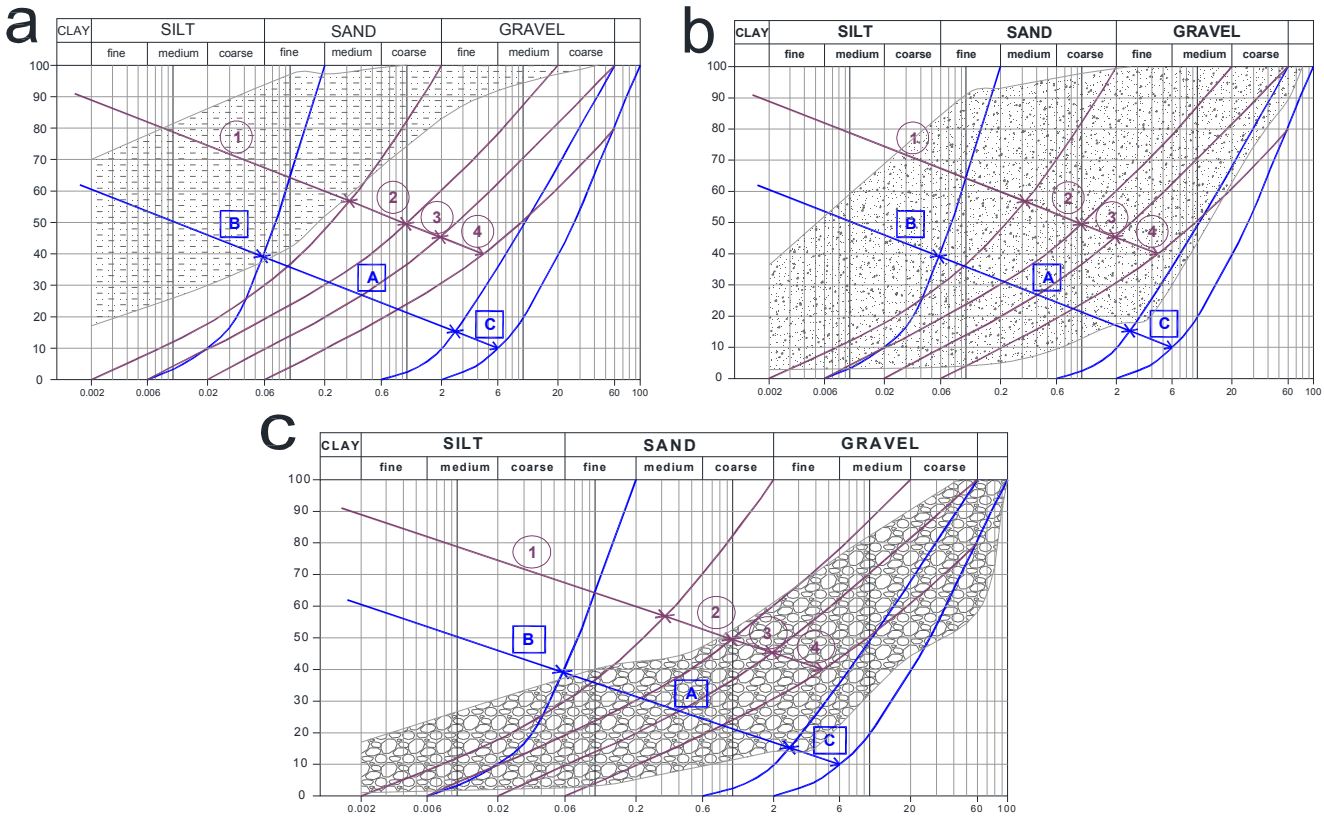


شکل ۳. پروفیل ژئوتکنیکی مسیر تونل



شکل ٤. دامنه کاربری مناسب برای سپرهای Slurry و EPB با توجه به دانه بندی خاک (Thewes 2007)

جهت ارزیابی وضعیت زمین شناسی، منحنی‌های دانه‌بندی خاک در سه بخش جنوبی، میانی و شمالی روی محدوده‌های معرفی شده برای کاربری ماشین‌های مختلف ترسیم شده (شکل ۵) و با مقایسه آنها شرایط زمین از نظر کاربری برآورد شده است. در بخش جنوبی، زمین تشکیل دهنده جبهه‌کار تونل تطابق خوبی با ماشین EPB دارد و در مقابل در بخش شمالی، تطابق خوبی با ماشین Slurry مشاهده می‌شود. در بخش میانی نیز، زمین تشکیل‌دهنده جبهه‌کار تونل در محدوده کاربری هر دو ماشین EPB و Slurry واقع شده است.



شکل ۵. مقایسه دانه بندی با محدوده‌های کاربرد سپرهای مختلف در بخش a) جنوبی، b) میانی و c) شمالی

وجود بولدر و قطعات سنگی در مسیر تونل: خطر برخورد به بولدر همواره یکی از مخاطرات بسیار مهم در تونل‌هایی است که در خاک و رسوبات آبرفتی حفاری می‌شوند. در این زمینه ماشین EPB در مقایسه با ماشین Slurry آسیب‌پذیرتر می‌باشد. بر اساس نتایج مطالعات ژئوتکنیک، در مواردی که قطعات سنگی و بولدر مشاهده شده‌اند، ابعاد و اندازه آنها بزرگتر از ۲۵ سانتیمتر نبوده است. بطور کلی احتمال برخورد به مجموعه‌ای از بولدرها در مسیر تونل اندک می‌باشد.

مقدار نفوذپذیری زمین جبهه‌کار تونل: یکی از مخاطرات هیدروژئولوژیکی محسوب می‌گردد که در انتخاب نوع TBM نقش مهمی را ایفا می‌نماید. در مورد مقدار نفوذپذیری زمین، انجمن تونلسازی بریتانیا (BTS, 2005) مرز بین ماشین‌های EPB و Slurry را 10E-5 m/sec پیشنهاد کرده است. به عبارت دیگر چنانچه مقدار نفوذپذیری زمین دربرگیرنده تونل بیشتر از این مقدار باشد، ماشین Slurry مناسبتر است و اگر کمتر باشد ماشین EPB ترجیح داده خواهد شد. ضریب نفوذپذیری زمین دربرگیرنده مسیر تونل در بخش جنوبی عمدتاً از 10E-5 m/s تا 10E-8 m/s متغیر است در بخش میانی مسیر متوسط نفوذپذیری حدود ۲×10E-5 m/s و در بخش شمالی در حدود 10E-4 m/s، ارزیابی می‌شود. بنابراین در بخش جنوبی و میانی هر دو ماشین EPB و Slurry قابل استفاده بوده، اما در بخش شمالی ماشین Slurry مناسبتر می‌باشد.

فشار ستون آب: بطور کلی مسلم است که ماشین Slurry برای شرایطی که فشار ستون آب زیاد است، مناسبتر می‌باشد. در این باره انجمن تونلسازی بریتانیا (BTS, 2005) بطور کلی پیشنهاد کرده است که ماشین EPB برای شرایطی که فشار ستون آب بالای تونل بیشتر از ۳ بار (bar) باشد ترجیحا مناسب نیست. بیشترین ارتفاع ستون آب در متراژ ۳۰۰+۰۳ تا ۴۰۰+۰۵ و به مقدار ۱۵ تا ۲۱ متر بالاتر از سقف تونل (۲۸ تا ۳۳,۵ متر از کف تونل) تعیین شده است. مطالب فوق حاکی از این است که اگر چه هر دو ماشین EPB-TBM و Slurry-TBM از لحاظ فشار ستون آب با شرایط هیدروژئولوژیکی منطقه مطابقت دارند ولی این امکان وجود دارد که ارتفاع ستون آب در قسمتی از مسیر تونل (متراژ ۳۰۰+۰۳ تا ۴۰۰+۰۵) در محدوده ۳ بار باشد.

رفتار چسبناکی مصالح حفاری شده: بیشتر از آنکه روی انتخاب ماشین موثر باشد، می‌تواند بر روی مشخصات فنی و طراحی کاترهد تاثیرگذار باشد.

بر طبق مستندات ژئوتکنیکی، شدت خطر متوسط انسداد برای بخش جنوبی و خطر متوسط تا کم در بخش میانی مسیر تونل متصور می‌باشد.

۵-۲-۲- عامل هزینه

اگرچه هزینه تمام شده برای خرید دستگاه تابع عوامل متعددی است، ولیکن هزینه خرید ماشین و سیستم پشتیبانی و تجهیزات اصلی وابسته برای ماشین EPB-TBM نسبت به Slurry-TBM حدود ۱۵ تا ۲۰ درصد ارزانتر است. همچنین تخمین زده می‌شود که هزینه حفاری با ماشین Slurry-TBM در مقایسه با ماشین EPB-TBM نیز مقدار کمی بالاتر باشد.

۵-۲-۳- عامل فنی- محیطی

آلودگی آب زیرزمینی: در ماشین Slurry، با توجه به استفاده از محلول دوغاب، نفوذ بنتونیت در زمین و آب زیرزمینی می‌تواند سبب آلودگی آنها و زیان‌های زیست محیطی قابل توجهی در منطقه شوند. ولی وقوع چنین خطری در ماشین EPB بسیار کمتر متصور می‌باشد.

دفع مصالح حاصل از حفاری: در تونلسازی با ماشین Slurry-TBM مصالح حفاری شده، آغشته به بنتونیت می‌باشد که یک عامل آلوده کننده برای محیط زیست محسوب می‌گردد.

فراهم بودن فضای مورد نیاز در شهر: عیب بزرگ سپرهای دوغابی (Slurry) نیاز آن به تاسیسات جدا سازی در سطح زمین (فضا و انرژی مورد نیاز) می‌باشد. در حالیکه ماشین‌های EPB چنین محدودیتی ندارند.

خطر برخورد به قنات و حفرات زیرزمینی: چنانچه ماشین Slurry در طی حفاری با حفراتی مانند قنات‌ها، کوره‌ها، فاضلاب‌ها و چاه‌های جذبی قدیمی برخورد نماید، به دلایل ذیل بسیار خطرناک‌تر از ماشین EPB خواهد بود:

• از دست رفتن فشار جبهه‌کار و خطر وقوع نشست زیاد و یا گسیختگی همراه با تاثیر بر روی سازه‌های سطحی.

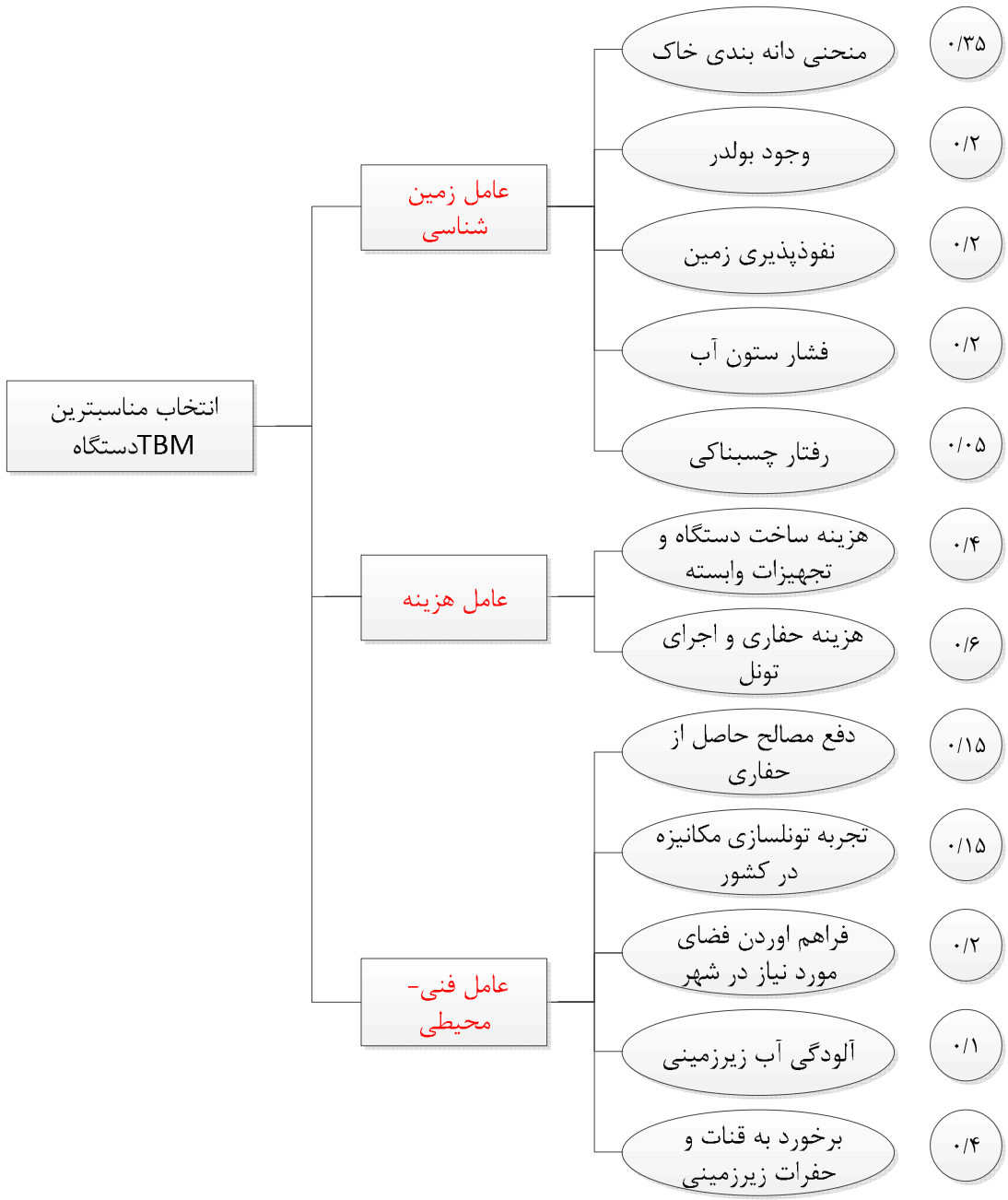
• هدر رفتن دوغاب‌ای ورودی به داخل چاه و همراه با خروج آن به سطح زمین که می‌تواند سبب آلودگی آب گردد.

تجربه تونلسازی مکانیزه در کشور: وجود تجربه EPB و در مقابل عدم وجود تجربه Slurry در ایران، یک پارامتر مهم و تاثیرگذار در انتخاب نوع ماشین است.

٦- تصمیم گیری جهت انتخاب ماشین مناسب

با توجه به تنوع پارامترهای ژئوتکنیکی و عوامل موثر در تصمیم گیری، در این مطالعه نیز از روش تصمیم گیری یا انتخاب چند معیاره برای انتخاب TBM مناسب استفاده شده است. به این منظور ابتدا درخت تصمیم بر اساس معیارهای موثر در تصمیم گیری در سه سطح (شامل معیارها، اهداف فرعی و در نهایت هدف اصلی) معرفی شده و سپس برای هر یک از معیارها وزنی تعیین و اختصاص داده شده است. وزن‌ها این امکان را فراهم می‌کنند تا اهمیت نسبی هر عامل در مقایسه با دیگر عامل‌ها مشخص گردد.

در شکل ٦ درخت تصمیم معرفی معرفی شده و وزن اختصاص یافته برای هر یک از معیارهای موثر، ارائه شده است. بر مبنای درخت تصمیم باید دو گزینه مورد نظر (EPB و Slurry) بررسی و نهایتاً یکی از آنها انتخاب شود. نظر به اینکه مسیر تونل با توجه به شرایط متنوع زمین شناسی به ۳ ناحیه یا مقطع قابل تقسیم می باشد، ماتریس عملکرد برای هر بخش، بر اساس معیارهای معرفی شده، مقایسه و آنالیز شده است. در نهایت ارزیابی کل مسیر نیز بر اساس وزن هر یک از بخش ها انجام شده است. وزن هر بخش بر مبنای طول آن نسبت به کل مسیر تعیین گردیده است.



شکل ٦. درخت تصمیم و وزن اختصاص یافته برای هر یک از معیارهای موثر

٦-١- نتایج تحلیل چند معیاره (MCA)

امتیاز کلی برای هر یک از اهداف فرعی به تفکیک بخش‌های مختلف تونل و کل مسیر تونل، با توجه به امتیازهای تخصیص داده شده به معیارهای مختلف و با اعمال وزن هر یک از معیارها، تعیین گردیده و در جدول شماره ۲ ارائه شده است.

جدول ۲. امتیاز اهداف فرعی (عوامل موثر) به تفکیک بخش‌های مختلف مسیر تونل

اهداف فرعی (عوامل موثر)		امتیاز گزینه‌های نوع ماشین	
		Slurry-TBM	EPB-TBM
عامل زمین شناسی	بخش جنوبی	۰/۹۳	۰/۹۸
	بخش میانی	۰/۹۳	۰/۸۷
	بخش شمالی	۰/۹۸	۰/۸۱
عامل زمین شناسی در کل مسیر		۰/۹۵	۰/۸۸
عامل هزینه		۰/۸٦	۱/۰۰
عامل فنی- محیطی		۰/۷٦	۱/۰۰

جدول ۳. نتایج آنالیز چند معیاره (MCA) برای بخش‌های مختلف و کل مسیر تونل در سناریوهای مختلف

بخش مسیر	بخش جنوبی			بخش میانی			بخش شمالی			کل مسیر تونل		
سناریو	۱	۲	۳	۱	۲	۳	۱	۲	۳	۱	۲	۳
Slurry-TBM	۰/۸۹	۰/۸۷	۰/۹۳	۰/۸۹	۰/۸۷	۰/۹۳	۰/۹۲	۰/۹	۰/۹۸	۰/۹	۰/۸۸	۰/۹۵
EPB-TBM	۰/۹۸	۰/۹۹	۰/۹۸	۰/۹۱	۰/۹۴	۰/۸۷	۰/۸۷	۰/۹۱	۰/۸۱	۰/۹۱	۰/۹۴	۰/۸۸

برای تصمیم گیری نهایی می بایست امتیاز هدف اصلی، یعنی انتخاب نوع ماشین TBM، تعیین گردد. این امر بطور مستقیم به وزن اختصاص یافته به هر یک از اهداف فرعی (عوامل موثر)، وابسته است. برای اینکه اثر وزن اهداف فرعی یا همان عوامل مختلف بخوبی مورد بررسی قرار گرفته و شرایط تصمیم گیری روشنتر گردد، سناریوهای مختلفی برای انتخاب نوع ماشین مورد ارزیابی قرار گرفته است.

در سناریوی اول، وزن عامل زمین شناسی از دو عامل دیگر بیشتر در نظر گرفته شده (۰/۷) و برای عامل هزینه، وزن ۰/۱ و برای عامل فنی-محیطی، وزن ۰/۲ پیش بینی شده است. در سناریوی دوم عامل زمین شناسی بیشتر از دو عامل دیگر (۰/۵) و وزن دو عامل دیگر مساوی (۰/۲۵) فرض شده است. در سناریوی سوم فقط عامل زمین شناسی (۱) در نظر گرفته شده است. برای کلیه سناریوها امتیاز هدف اصلی محاسبه شده و نتایج آنالیز در جدول ۳ نشان داده شده است.

مشاهده می‌شود در صورتی که سناریوی ۳ یعنی فقط شرایط زمین شناسی در نظر گرفته شود، به جز بخش جنوبی، در سایر موارد، اولویت با Slurry-TBM است. ولیکن با در نظر گرفتن سایر شرایط، و افزایش وزن آنها، ماشین EPB اولویت می یابد. بر اساس سناریوی اول که وزن عامل زمین شناسی از دو عامل دیگر بیشتر در نظر گرفته شده (۰/۷) و منطبق بر تجارب بوده و منطقی تر از سایر سناریوها نیز می باشد، در بخش جنوبی مسیر ماشین EPB نسبت به Slurry-TBM برتری دارد. در بخش میانی، ماشین EPB با اختلاف بسیار اندکی نسبت به ماشین Slurry ارجحیت دارد. در بخش شمالی تقریباً عکس بخش جنوبی است و ماشین Slurry برتری دارد ولیکن درمجموع برای کل مسیر تونل، با احتساب عامل هزینه و عامل فنی- محیطی، ماشین EPB نسبت به ماشین Slurry برتری اندکی نشان می‌دهد. بنابراین با توجه به جمیع جهات، ماشین EPB-TBM (سپر تعادلی با فشار زمین) به عنوان گزینه برتر

انتخاب و پیشنهاد می‌گردد. البته لازم به توضیح است که این انتخاب نشانه ارجحیت EPB در همه زمینه‌ها نمی‌باشد. کما اینکه امتیاز عامل زمین‌شناسی برای ماشین Slurry در بخش‌های میانی و شمالی بیشتر از ماشین EPB بوده است. به عبارت دیگر ارجحیت ماشین EPB یک قیاس نسبی است. بنابراین جهت حفاری بهینه در تمام طول تونل، باید تمهیدات مناسبی جهت کاهش مخاطرات ژئوتکنیکی و همچنین کاهش گشتاور ماشین لحاظ نمود. با توجه به پیشرفت تکنولوژی افزودنیهای شیمیایی جهت بهسازی خاک، امروزه دامنه کاری ماشینهای سپر EPB-TBM گسترش بسیار زیادی یافته است.

۷- نتیجه‌گیری

نتایج بررسی‌های ژئوتکنیک حاکی از تنوع زیادی در واحدهای آبرفتی مسیر تونل است. بخش جنوبی مسیر از شمال بزرگراه آزادگان تا میدان شوش عمدتا از مصالح ریزدانه تشکیل شده است. بخش میانی که از قسمت های جنوبی میدان شوش شروع و تا چهار راه سرچشمه ادامه دارد، ناحیه انتقال از مصالح ریزدانه جنوب به مصالح درشت دانه در شمال مسیر بوده و رسوبات ماسه‌ای و سیلتی غالب است. در بخش‌های شمالی عمدتا خاک‌های درشت‌دانه شنی و ماسه‌ای وجود دارند. تنوع در شرایط زمین شناسی بخش‌های مختلف، انتخاب دستگاه را با چالش جدی روبرو می‌سازد. استفاده از سپرهای بسته با توجه به بالا بودن تراز آب در بخش زیادی از مسیر تونل، برای حفاری این بخش ضروری است. پس از بررسی‌های اولیه مشخص شد ماشین‌های EPB-TBM یا Slurry-TBM به لحاظ فنی قابلیت استفاده را دارند. بررسی‌های دقیقتر جهت انتخاب TBM با لحاظ نمودن مباحث زمین شناسی، هزینه و شرایط فنی و محیطی صورت گرفت. با توجه به تغییرات شرایط ژئوتکنیکی در طول مسیر، در برخی شرایط EPB-TBM در اولویت بوده ور برخی شرایط Slurry-TBM ارجحیت دارد. لذا با استفاده از معیار تصمیم گیری چند متغیره، آنالیزهایی در سناریوهای مختلف انجام و در مجموع برای کل مسیر تونل، با احتساب عامل هزینه و عامل فنی- محیطی، ماشین EPB نسبت به ماشین Slurry با برتری اندکی انتخاب شد. البته لازم به توضیح است که این انتخاب نشانه ارجحیت EPB در همه زمینه‌ها نمی‌باشد. کما اینکه امتیاز عامل زمین‌شناسی برای ماشین Slurry در بخش‌های میانی و شمالی بیشتر از ماشین EPB بوده است. بنابراین جهت حفاری بهینه در تمام طول تونل، باید تمهیدات مناسبی جهت کاهش مخاطرات ژئوتکنیکی و همچنین کاهش گشتاور ماشین لحاظ گردد.

۸-سپاسگزاری

از سازمان مشاور فنی و مهندسی شهر تهران در کسوت کارفرمای طرح و شرکت مهندسی مشاور هندسه پارس بعنوان مشاور طرح که اطلاعات لازم برای این تحقیق را فراهم نمودند صمیمانه سپاسگزاری می‌گردد.

۹-مراجع

-AFTES, French National Tunnelling Association, (2005), "Choosing mechanized tunnelling techniques". Paris.

-Anagnostou, G. and Rizos, D. (2009), "Geotechnical and contractual aspects of urban tunneling with closed shields". In: ITA-AITES World Tunnel Congress: Safe Tunelling for the City and Environment. City: Budapest, Hungary.

-BTS, British Tunnelling Society in association with the Institution of Civil Engineers. (2005), "Closed-Face Tunnelling Machines and Ground Stability: A guideline for best practice". Thomas Telford Ltd, London, pp.77.

-DAUB, ÖGG & FGU (2000), "Recommendations for Design and Operation of Shield Machines. Tunnel, 6/00, pp.54-76.

-Diponio, M., Chapman, D., Bournes, C. (2007), "EPB tunnel boring machine design for boulder conditions, in Proceedings of the Rapid Excavation and Tunneling Conference", chapter 20 – Difficult Ground Conditions II, pp.14.

-Tarigh Azali, S., Ghafoori, M., Lashkaripour, G., Hassanpour, J. (2013), "Engineering geological investigations of mechanized tunneling in soft ground: A case study, East–West lot of line 7", Tehran Metro, Iran, Engineering Geology.

-Yazdani-Chamzini, A., Haji Yakhchali, S. (2012), "Tunnel Boring Machine (TBM) selection using fuzzy multicriteria decision making methods", Tunnelling and Underground Space Technology, pp.194-204.

-Lehner, K., Hartmann, D. (2007), "Using knowledge-based Fuzzy Logic components in the design of underground engineering structures", in ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Tunneling (EURO: TUN), Vienna, Austria, August 27–29, pp.1–13.

-Kalamaras, G., Brino, L., Carrieri, G., Pline, C., Grasso, P. (2001), "Application of multicriteria analysis to select the best highway alignment, Tunnelling and Underground Space Technology" 15(4), pp.415–420.

-Fahimdanesh, S., Hafezi Moghadas, N., (2014), "Tunneling machine selection model based on geologic parameters using AHP method case study: NOSOUD water tunnel". Indian J. Sci. Res. 9 (1): pp. 137-145.

-Thewes, M., & Burger, W. (2004), "Clogging risks for TBM drives in clay". Tunnels & Tunneling International, pp. 28-31.

-Thewes M. (2007), "TBM tunneling challenges redefining the state of the art". Keynote lecture ITAAITES WTC, PRAGUE.

-Edalat, K., Vahdatirad, M., Ghodrat, H., Firouzianbandpey, S., Barari, A. (2010), "Choosing TBM for Tabriz Subway using Multi Criteria Method". Journal of Civil Engineering and Management. 16(4), pp.531-539.

–Erickson, L., Raleigh, P., Romero, V. (2008), Geotechnical conditions and TBM selection for the Bay tunnel, in Proceedings North American Tunneling 2008, pp.389–398.

–Jerome B. O'Carroll, (2005), "A Guide to Planning, Constructing, and Supervising Earth Pressure Balance TBM Tunneling". Parsons Brinckerhoff Inc, pp.146.

-KhademiHamidi, J., Shahriar, K., Rezai, B., Rostami, J., Bejari, H. (2009). Risk assessment based selection of rock TBM for adverse geological conditions using Fuzzy-AHP, Bulletin of Engineering Geology and the Environment.

–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.

-Marinos, P. G., Novack, M., Benissi, M., Panteliadou, M., Papouli, D., Stoumpos, G., Marinos, V., Korkaris, K. (2008). Ground information and selection of TBM for the Thessaloniki metro, Environmental and Engineering Geoscience 14(1): pp.17–30.