

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک

رشته‌ی مهندسی معدن گرایش تونل و فضاها‌ی زیرزمینی

پایان‌نامه کارشناسی ارشد

انتخاب ماشین حفاری مکانیزه در محیط‌های خاکی (مطالعه موردی خط هفت

مترو تهران (قطعه‌ی شمالی - جنوبی))

نگارنده: امیرسعید گرانی

استاد راهنما:

دکتر شکراله زارع

دکتر محمد عطایی

استاد مشاور:

دکتر رامین رفیعی

تیرماه ۱۳۹۷

شماره: ۴۹۷/۲۶
تاریخ: ۹۷/۶/۲۱

باسمه تعالی



مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره (۳) صورتجلسه نهایی دفاع از پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

با نام و یاد خداوند متعال، ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد خانم / آقای امیرسعید گرانی با شماره دانشجویی ۹۴۱۵۱۴۴ رشته مهندسی معدن گرایش تونل و فضاها، زیرزمینی تحت عنوان انتخاب ماشین حفاری مکانیزه در محیط‌های خاک (مطالعه موردی خط هفت مترو تهران (قطعه‌ی شمالی - جنوبی)) که در تاریخ ۹۷/۰۴/۲۴ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می‌گردد:

قبول (با درجه: ☒ خوب) ☐ مردود			
نوع تحقیق: ☐ عملی ☒ نظری			
عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنمای اول	دکتر شکراله زارع	دانشیار	
۲- استاد راهنمای دوم	دکتر محمد عطایی	استاد	
۳- استاد مشاور	دکتر رامین رفیعی	استادیار	
۴- نماینده تحصیلات تکمیلی	دکتر اصغر عزیزی	استادیار	
۵- استاد ممتحن اول	دکتر رضا خالوکاکائی	استاد	
۶- استاد ممتحن دوم	دکتر احمد رمضان زاده	استادیار	

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده:

تاریخ و امضاء و مهر دانشکده:



تبصره: در صورتی که کسی مردود شود حداکثر یکبار دیگر (در مدت مجاز تحصیل) می‌تواند از پایان نامه خود دفاع نماید (دفاع مجدد نباید زودتر از ۴ ماه برگزار شود).

تقدیم به

تقدیم به پدر و مادر عزیزتر از جانم که چون کوهی استوار، حامی من در طول تمام زندگی بوده‌اند

و در نومی‌های سنگ صوری، آرامش بخش.

تقدیم به خواهر چون جانم که وجودش خود آرامش است.

تقدیم به روح پدر بزرگ و مادر بزرگ عزیزم که بخش بزرگی از قطعات وجودم را می‌یون آنها

هستم.

سپاسگزاری

خدای را بسی شاکرم که از روی کرم، پدر و مادری فداکار نصیم ساخته تا در سایه درخت پر بار
وجودشان می‌سایم و از ریشه آنها شاخ و برگ گیرم و از سایه وجودشان در راه کسب علم و دانش تلاش
نمایم. والدینی که بودنشان تاج افتخاری است بر سرم و نشان دلیلی است بر بودنم، چرا که این دو
وجود، پس از پروردگار، مایه هستی ام بوده اند دستم را گرفتند و راه رفتن را در این وادی زندگی پر از
فراز و نشیب آموختند.

تشکر از اساتید محترم، جناب آقای دکتر شکراله زارع و جناب آقای پرفور محمد عطایی که زحمات
راهنمایی این پایان نامه را بر عهده گرفتند، و بار راهنمایی های صورت گرفته، را گشا بوده اند.

تشکر فراوان از جناب آقای دکتر راسین رفیعی که همچون چراغی در تاریکی، در بسیاری از مقاطع انجام

این پایان نامه، مراراً همتایی فرمودند.

مشارکت ویژه از جناب آقای مهندس اینی دین مجری خط ۷ متروی تهران، جناب آقای مهندس

نجفی مدیر فنی خط ۷ متروی تهران، جناب آقای مهندس نعمتی مدیریت پروژه خط ۷ متروی تهران

در شرکت مهندسی سپاسد، جناب آقای مهندس عباسی و جناب آقای مهندس ماهیار از پروژه‌ی خط

۷ که در دادن اطلاعات مورد نیاز جهت انجام این پژوهش مرا یاری کردند.

و در انتها مشارکت از تمام عزیزان به ویژه مهندس نوید افراسیابی، علی اکبری، مهندس علی شریف مقدم

، مهندس وحید کردلو، دکتر حسین ابراهیمی، دکتر بابک عابدی، مهندس اوشین قلی‌نیا، دکتر مهدی

باجولوند و وحید کوجانی که در نگارش این پژوهش یار و همراه بنده بودند.

تعهدنامه

اینجانب **امیرسعید گرانی** دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته تونل و فضاهاى زیرزمینی دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه با موضوع **انتخاب ماشین حفاری مکانیزه در محیط‌های خاکی (مطالعه موردی خط هفت مترو تهران (شمالی - جنوبی))** تحت راهنمایی دکتر شکراله زارع و دکتر محمد عطایی متعهد می‌شوم:

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش‌های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد و مقالات مستخرج با نام **دانشگاه صنعتی شاهرود** و یا **Shahrood University of Technology** به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت‌های آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

تاریخ :

امضاء دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات، مستخرج، کتاب، برنامه‌های رایانه ای، نرم‌افزارها و تجهیزات ساخته شده) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

چکیده

با توجه به رشد روزافزون شهرها و عدم وجود فضای کافی برای ساخت و ساز، احداث فضاهای زیرزمینی با اهداف مختلف، امری ضروری است. در این میان، تونل به عنوان یک فضای زیرزمینی پرکاربرد از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. استفاده از ماشین حفاری مکانیزه تمام مقطع یک راه سریع، امن و ارزان در مقایسه با سایر روش‌ها، جهت حفر تونل است. انتخاب ماشین حفاری مکانیزه متناسب با شرایط مختلف یک پروژه، یکی از مهم‌ترین مراحل مطالعاتی برای حفر یک تونل است. در صورت انتخاب درست ماشین حفاری، دستیابی به بهبود روند حفاری، صرفه‌جویی در زمان و کاهش هزینه‌های پروژه ممکن می‌شود، بنابراین انتخاب ماشین حفاری یکی از مهم‌ترین چالش‌ها در ارتباط با حفر تونل است. ماشین‌های مناسب برای محیط‌های خاکی از بین ماشین‌های حفاری مکانیزه، با توجه به پروژه‌های مشابه و نیز توصیه‌نامه‌های مربوط به آن، سه ماشین حفاری متعادل کننده فشار زمین، دوغابی و ترکیبی انتخاب شده است. در میان روش‌های انتخاب نوع ماشین حفاری مکانیزه در پروژه‌های تونل‌زنی، مطابقت تجربه با علم از جمله روش‌های انتخاب به شمار می‌رود. در این پژوهش، عوامل مؤثر بر انتخاب ماشین حفاری مکانیزه با استفاده از استانداردهای رایج در این زمینه و همچنین پروژه‌های انجام شده در ایران، معیارهای ساختگاهی (زمین‌شناسی و ژئوتکنیک)، هندسی، زیست‌محیطی، انسانی و هزینه‌ای به عنوان معیارهای اصلی انتخاب شده است. به منظور استفاده از نظر کارشناسان و خبرگان حفاری تونل، پرسش‌نامه‌هایی بر اساس روش تحلیل سلسله مراتبی دلفی فازی به عنوان یکی از روش‌های متداول تصمیم‌گیری چندمعیاره تهیه شده است. اطلاعات جمع‌آوری شده از این پرسش‌نامه‌ها برای تشکیل ماتریس مقایسه زوجی و نیز وزن‌دهی به معیارهای انتخاب شده، به کار گرفته شده است. همچنین با هدف تشکیل ماتریس مقایسه زوجی بین ماشین‌های یاد شده، با تطبیق کاربری هر یک از ماشین‌ها در بازه‌ی داده‌های مربوط به مورد مطالعاتی، وزن هر ماشین تعیین شده است. بر اساس نتایج به دست آمده، ماشین حفاری مکانیزه متعادل کننده فشار زمین برای حفاری در مورد مطالعاتی خط ۷ شمالی-

جنوبی متروی تهران پیشنهاد شده است.

کلمات کلیدی: انتخاب ماشین حفاری مکانیزه، ماشین متعادل کننده فشار زمین، ماشین دوغابی،

ماشین ترکیبی، تحلیل سلسله مراتبی دلفی فازی، خط ۷ متروی تهران، قطعه‌ی شمالی- جنوبی،

زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی، هندسی، زیست‌محیطی، انسانی و هزینه‌ای، ماتریس مقایسه زوجی.

لیست مقالات مستخرج از پایان نامه:

گرانی ا.، زارع ش.، عطایی م.، رفیعی ر.، (اردیبهشت ۱۳۹۷)، "رتبه‌بندی عوامل ژئوتکنیک و زمین‌شناسی مؤثر بر انتخاب ماشین حفاری مکانیزه‌ی تمام مقطع"، اولین کنفرانس ملی مدلسازی در مهندسی معدن و علوم وابسته، قزوین.

فهرست مطالب

فصل اول: کلیات	۱
۱-۱- مقدمه	۲
۲-۱- ضرورت انجام تحقیق	۳
۳-۱- هدف از انجام پایان نامه	۵
۴-۱- ساختار پایان نامه	۶
فصل دوم: روش های تصمیم گیری چندمعیاره	۹
۱-۲- مقدمه	۱۰
۲-۲- روش های تصمیم گیری	۱۰
۳-۲- شباهت به گزینه ی ایده آل فازی	۱۲
۴-۲- تحلیل سلسله مراتبی فازی	۱۴
۵-۲- تحلیل سلسله مراتبی دلفی فازی	۱۶
۱-۵-۲- نظرسنجی از کارشناسان	۱۷
۲-۵-۲- محاسبه اعداد فازی	۱۷
۳-۵-۲- تشکیل ماتریس معکوس فازی	۱۹
۴-۵-۲- محاسبه وزن فازی نسبی پارامترها	۲۰
۵-۵-۲- غیر فازی کردن وزن پارامترها	۲۰
۶-۲- جمع بندی	۲۰
فصل سوم: پیشینه ی پژوهش	۲۳

۲۴	۱-۳- مقدمه
۲۴	۲-۳- محیط سنگی
۳۱	۳-۳- محیط خاکی
۳۶	۴-۳- جمع‌بندی
۳۹	فصل چهارم: ماشین‌های حفاری مکانیزه و معیارهای مؤثر در انتخاب آنها
۴۰	۱-۴- مقدمه
۴۰	۲-۴- انواع ماشین‌های حفاری تمام مقطع سپری
۴۶	۳-۴- ماشین‌های مخصوص زمین‌های نرم
۴۸	۱-۳-۴- ماشین‌های متعادل کننده فشار زمین
۵۰	۲-۳-۴- ماشین‌های دوغابی
۵۳	۳-۳-۴- ماشین‌های ترکیبی
۵۴	۴-۴- پارامترهای تأثیرگذار در انتخاب ماشین حفاری مکانیزه
۵۵	۱-۴-۴- پارامترهای زمین شناسی و ژئوتکنیک (ساختگاهی)
۵۵	۱-۱-۴-۴- توزیع اندازه ذرات
۵۷	۲-۱-۴-۴- نفوذپذیری
۵۸	۳-۱-۴-۴- شاخص دوام
۵۹	۴-۱-۴-۴- فشار جبهه‌کار و فشار هیدرواستاتیک
۶۰	۵-۱-۴-۴- رفتار تورمی
۶۱	۶-۱-۴-۴- حضور تخته‌سنگ

- ۶۱ ۷-۱-۴-۴- جبهه کار ترکیبی
- ۶۲ ۸-۱-۴-۴- گل گرفتگی
- ۶۳ ۹-۱-۴-۴- چگالی
- ۶۴ ۱۰-۱-۴-۴- زاویه ی اصطکاک داخلی
- ۶۴ ۱۱-۱-۴-۴- چسبندگی
- ۶۵ ۱۲-۱-۴-۴- شرایط آب زیرزمینی
- ۶۵ ۲-۴-۴- پارامترهای هندسی تونل
- ۶۵ ۱-۲-۴-۴- قطر تونل
- ۶۶ ۲-۲-۴-۴- طول تونل
- ۶۶ ۳-۲-۴-۴- شعاع قوس تونل
- ۶۷ ۳-۴-۴- پارامترهای زیست محیطی، انسانی و هزینه ای
- ۶۷ ۱-۳-۴-۴- نشست سطح زمین
- ۶۷ ۲-۳-۴-۴- حضور گاز
- ۶۹ ۳-۳-۴-۴- تجربه ملی با هر روش
- ۷۰ ۴-۳-۴-۴- در دسترس بودن مواد افزودنی و هزینه ی آن
- ۷۰ ۵-۳-۴-۴- تملک زمین
- ۷۰ ۶-۳-۴-۴- هزینه ی سرمایه گذاری
- ۷۱ ۷-۳-۴-۴- نیاز به آموزش پرسنل
- ۷۱ ۸-۳-۴-۴- سازگاری با محیط زیست

۷۲	۵-۴- جمع‌بندی
۷۵	فصل پنجم: پروژه خط ۷ قطعه‌ی شمالی- جنوبی متروی تهران
۷۶	۱-۵- مقدمه
۷۶	۲-۵- موقعیت جغرافیایی شهر تهران
۷۶	۳-۵- بررسی وضعیت زمین‌شناسی محدوده طرح
۸۱	۴-۵- معرفی خط ۷ متروی تهران
۸۳	۱-۴-۵- مطالعات ژئوتکنیک
۸۶	۲-۴-۵- بررسی اطلاعات کلی خط ۷ (شمالی- جنوبی) متروی تهران
۹۰	۱-۲-۴-۵- توزیع اندازه ذرات
۹۲	۲-۲-۴-۵- نفوذپذیری
۹۴	۳-۲-۴-۵- شاخص دوام
۹۴	۴-۲-۴-۵- فشار جبهه‌کار
۹۵	۵-۲-۴-۵- حضور تخته سنگ
۹۵	۶-۲-۴-۵- جبهه‌کار ترکیبی
۹۶	۷-۲-۴-۵- گل گرفتگی
۹۷	۸-۲-۴-۵- چگالی
۹۷	۹-۲-۴-۵- زاویه اصطکاک داخلی
۹۸	۱۰-۲-۴-۵- چسبندگی
۹۸	۱۱-۲-۴-۵- شرایط آب زیرزمینی

۱۰۰.....	۵-۴-۲-۱۲- حضور گاز
۱۰۰.....	۵-۵- جمع بندی
۱۰۱.....	فصل ششم: انتخاب ماشین حفاری مکانیزه خط ۷ قطعه‌ی شمالی- جنوبی متروی تهران
۱۰۲.....	۶-۱- مقدمه
۱۰۲.....	۶-۲- ارزیابی پارامترهای مؤثر بر انتخاب ماشین حفاری مکانیزه
۱۰۷.....	۶-۲-۱- تعیین میزان تأثیر پارامترهای زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی (ساختگاهی)
۱۱۳.....	۶-۲-۲- تعیین میزان تأثیر پارامترهای هندسی
۱۱۵.....	۶-۲-۳- تعیین میزان تأثیر پارامترهای زیست‌محیطی، انسانی و هزینه‌ای
۱۱۹.....	۶-۲-۴- تعیین میزان تأثیر شاخص‌های اصلی
۱۲۱.....	۶-۳- تعیین وزن ماشین‌ها
۱۲۱.....	۶-۳-۱- تشکیل ماتریس مقایسه فازی زوجی ماشین‌ها
۱۲۴.....	۶-۴- اولویت‌بندی ماشین‌های حفاری مکانیزه
۱۲۶.....	۶-۵- جمع بندی
۱۲۷.....	فصل هفتم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات
۱۲۸.....	۷-۱- نتیجه‌گیری
۱۳۰.....	۷-۲- پیشنهادات
۱۳۱.....	منابع

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۲: نحوه‌ی عملکرد روش شباهت به گزینه‌ی ایده‌آل فازی ۱۳
- شکل ۲-۲: تابع عضویت مثلثی در روش فازی دلفی ۱۹
- شکل ۱-۴: ماشین متعادل کننده فشار زمین جهت حفاری مترو پورتو با قطر ۸/۷ متر ۴۲
- شکل ۲-۴: (تصویر راست مربوط به EPB TBM برای متروی شهر شیراز با قطر ۶/۸۸ متر و تصویر سمت چپ مربوط به Slurry TBM برای خط متروی شهر مادرید با قطر ۱۵/۱ متر ۴۲
- شکل ۳-۴: نمونه‌ای از ماشین حفاری تونل Herrenknecht Double shield TBM - Railway Tunnel - Spain ۴۳
- شکل ۴-۴: شماتیکی از انواع ماشین‌های حفاری مکانیزه ۴۷
- شکل ۵-۴: ماشین حفاری مکانیزه با سپر هوای فشرده ۴۷
- شکل ۶-۴: مهار فشار جبهه‌کار در حفاری با EPB ۴۹
- شکل ۷-۴: سیستم داخلی ماشین‌های حفاری از نوع تعادلی ۵۰
- شکل ۸-۴: مهار فشار جبهه‌کار در ماشین دوغابی ۵۲
- شکل ۹-۴: سیستم‌های داخلی ماشین‌های حفاری از نوع دوغابی ۵۲
- شکل ۱۰-۴: بازیابی مواد افزودنی در ماشین‌های دوغابی ۵۳
- شکل ۱۱-۴: ماشین‌های ترکیبی با قطر ۱۴/۲ و ۱۵/۶ متر ۵۴
- شکل ۱۲-۴: محدوده بهینه عملکرد ماشین‌های حفاری بر اساس توزیع ذرات با ابعاد مختلف در زمین‌های نرم ۵۶
- شکل ۱۳-۴: مقایسه محدوده کاربرد ماشین‌های EPB و Slurry بر اساس ابعاد ذرات ۵۶
- شکل ۱۴-۴: نمودار پتانسیل وقوع گل گرفتگی ارائه شده برای ماشین ۶۳
- شکل ۱۵-۴: حس گر گاز متان نصب شده بر روی TBM ۶۸
- شکل ۱۶-۴: پارامترهای تأثیرگذار در انتخاب نوع ماشین حفاری ۶۹

- شکل ۵-۱: نقشه هوایی منطقه ۷۷
- شکل ۵-۲: مسیر خط ۷ متروی تهران ۸۲
- شکل ۵-۳: تصویر احداث یک حلقه گمانه مته‌ای و جعبه نمونه در مسیر شمالی - جنوبی پروژه خط ۷ مترو تهران در محدوده پل گیشا ۸۳
- شکل ۵-۴: تصویر احداث یک حلقه چاه دستی در مسیر شمالی - جنوبی پروژه خط ۷ مترو تهران در محدوده بزرگراه شهید نواب صفوی ۸۴
- شکل ۵-۵: موقعیت جغرافیایی گمانه‌های اکتشافی خط ۷ (شمالی - جنوبی) ۸۹
- شکل ۵-۶: توزیع اندازه ذرات در طول مسیر پروژه‌ی خط ۷ قطعه‌ی شمالی - جنوبی متروی تهران ۹۱
- شکل ۵-۷: خطر گل گرفتگی برای ماشین حفاری مکانیزه پروژه‌ی خط ۷ شمالی - جنوبی متروی تهران ۹۶
- شکل ۶-۱: نمودار سلسله مراتبی انتخاب ماشین حفاری مکانیزه ۱۰۴
- شکل ۶-۲: نمودار ستونی وزن نهایی دلفی فازی معیارهای ساختگاهی ۱۱۱
- شکل ۶-۳: نمودار ستونی وزن نهایی دلفی فازی معیارهای هندسی ۱۱۴
- شکل ۶-۴: نمودار ستونی وزن نهایی دلفی فازی معیارهای زیست‌محیطی، انسانی و هزینه‌ای ۱۱۸

فهرست جداول

جدول ۱-۲: متغیرهای زبانی برای ارزیابی اهمیت معیارها	۱۸
جدول ۲-۲: مقایسه روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره فازی	۲۲
جدول ۱-۴: مزایا و معایب تونل‌سازی با استفاده از TBM نسبت به روش نیمه مکانیزه و سنتی	۴۴
جدول ۲-۴: انواع ماشین‌های حفاری تمام مقطع در زمین‌های نرم و سخت	۴۵
جدول ۳-۴: محدوده کاربرد انواع ماشین حفاری بر اساس توزیع ابعاد ذرات کوچکتر از ۰/۰۶ میلی‌متر	۵۷
جدول ۴-۴: محدوده کاربرد انواع ماشین حفاری بر اساس نفوذپذیری	۵۸
جدول ۵-۴: طبقه بندی خاک‌های چسبنده	۵۸
جدول ۶-۴: محدوده کاربرد انواع ماشین حفاری بر اساس شاخص دوام خاک	۵۹
جدول ۷-۴: محدوده کاربرد انواع ماشین حفاری بر اساس فشار جبهه کار	۶۰
جدول ۸-۴: محدوده کاربرد انواع ماشین حفاری بر اساس قابلیت رفتار متورم شوندگی خاک	۶۰
جدول ۹-۴: محدوده کاربرد انواع ماشین حفاری بر اساس وزن مخصوص خاک	۶۳
جدول ۱۰-۴: ارزیابی ماشین آلات حفاری از لحاظ معیار هزینه	۷۱
جدول ۱۱-۴: مشخصات و محدودیت‌های انواع ماشین محیط‌های خاکی	۷۳
جدول ۱-۵: آبرفت تهران بر اساس طبقه‌بندی ربین	۸۰
جدول ۲-۵: منطقه‌بندی طول مسیر خط ۷ قطعه‌ی شمالی- جنوبی (شرکت مهندسی سپاسد، ۱۳۸۷)	۸۷
جدول ۳-۵: نوع زمین‌شناسی مهندسی	۸۸
جدول ۴-۵: موقعیت جغرافیایی گمانه‌های اکتشافی خط ۷ (شمالی- جنوبی) متروی تهران	۸۹
ادامه‌ی جدول ۴-۵: موقعیت جغرافیایی گمانه‌های اکتشافی خط ۷ (شمالی- جنوبی) متروی تهران	۹۰

- جدول ۵-۵: نوع زمین‌شناسی در منطقه‌های طول مسیر خط ۷ (شمالی - جنوبی) ۹۱
- ادامه‌ی جدول ۵-۵: نوع زمین‌شناسی در منطقه‌های طول مسیر خط ۷ (شمالی - جنوبی) ۹۲
- جدول ۵-۶: رده‌بندی خاک پروژه‌ی خط ۷ (شمالی - جنوبی) مترو تهران بر پایه‌ی روش USCS ۹۲
- ادامه‌ی جدول ۵-۶: رده‌بندی خاک پروژه‌ی خط ۷ (شمالی - جنوبی) مترو تهران بر پایه‌ی روش USCS ۹۳
- جدول ۵-۷: درصد طولی محدوده‌ی نفوذپذیری پروژه خط ۷ قطعه‌ی شمالی - جنوبی متروی تهران ۹۳
- جدول ۵-۸: مقدار نفوذپذیری بر اساس نوع ماده ۹۴
- جدول ۵-۹: مقادیر شاخص دوام در گستره‌ی خط ۷ (شمالی - جنوبی) متروی تهران ۹۴
- جدول ۵-۱۰: مقادیر چگالی در طول مسیر ۹۷
- جدول ۵-۱۱: زاویه اصطکاک داخلی در گستره‌ی پروژه خط ۷ (شمالی - جنوبی) ۹۷
- جدول ۵-۱۲: چسبندگی در گستره‌ی پروژه خط ۷ قطعه‌ی شمالی - جنوبی ۹۸
- جدول ۵-۱۳: شرایط آب زیرزمینی در طول مسیر پروژه ۹۹
- جدول ۵-۱۴: واژه‌های توصیفی وضعیت آب زیرزمینی بر اساس میزان جریان تخمینی ۹۹
- جدول ۶-۱: فرم پرسشنامه‌های ارسالی برای کارشناسان ۱۰۵
- جدول ۶-۲: ماتریس مقایسه‌ی زوجی کارشناس شماره ۱ برای پارامترهای زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی ۱۰۸
- جدول ۶-۳: وزن نهایی فازی نسبی و غیر فازی میان پارامترهای زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی (ساختگاهی) ۱۰۹
- جدول ۶-۴: ماتریس مقایسه زوجی کارشناس شماره ۱ برای پارامترهای هندسی ۱۱۳
- جدول ۶-۵: ماتریس مقایسه زوجی کارشناس شماره ۱ برای پارامترهای زیست محیطی، انسانی و

هزینه‌ای ۱۱۵

جدول ۶-۶: ماتریس مقایسه زوجی فازی دلفی میان پارامترهای زیست محیطی، انسانی و هزینه‌ای

..... ۱۱۶

جدول ۶-۷: وزن نهایی فازی نسبی و غیر فازی میان پارامترهای هندسی ۱۱۷

جدول ۶-۸: ماتریس مقایسه زوجی کارشناس ۱ برای شاخص‌های اصلی ۱۱۹

جدول ۶-۹: ماتریس مقایسه زوجی فازی دلفی میان شاخص‌های اصلی ۱۲۰

جدول ۶-۱۰: وزن نهایی فازی نسبی و غیر فازی میان شاخص‌های اصلی ۱۲۱

جدول ۶-۱۱: ماتریس مقایسه زوجی تشکیل شده میان TBM ها در زیرمعیار توزیع اندازه ذرات

..... ۱۲۲

جدول ۶-۱۲: وزن ماشین‌های حفاری مکانیزه در پارامترهای مختلف ۱۲۲

ادامه جدول ۶-۱۳: وزن ماشین‌های حفاری مکانیزه در پارامترهای مختلف ۱۲۳

جدول ۶-۱۴: وزن کلی ماشین‌ها در پارامترهای مختلف ۱۲۵

جدول ۶-۱۵: وزن کلی ماشین‌های حفاری مکانیزه ۱۲۶

فصل اول

کلیات

با توجه به رشد روزافزون محدوده‌ی شهرها، احداث فضاهای زیرزمینی با اهداف مختلف، امری ضروری است. در این میان، تونل به عنوان یک فضای زیرزمینی پرکاربرد از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. امکان اجرای عملیات حفاری تونل در برخی از شرایط زمین‌شناسی به دلیل ناپایداری‌های موجود با روش سنتی میسر نبوده و حفر مکانیزه به دلیل کاهش مخاطرات احتمالی بهترین گزینه است. همچنین استفاده از روش‌های حفاری مکانیزه تونل با توجه به اهمیت زمان اجرایی پروژه‌ها کاربرد گسترده‌ای یافته است. پروژه‌های تونل‌سازی به دلیل شرایط آنها (عدم شناخت کافی از وضعیت زمین، شرایط پیرامونی و عدم قطعیت‌های مرتبط با آن) در مقایسه با پروژه‌های مشابه، همواره با درصد بالایی از ریسک همراه هستند. مدیریت درست و به موقع این ریسک‌ها موجب حداقل کردن احتمال وقوع یا اثر پیامدهای منفی بر اهداف پروژه می‌گردد. در کشور ما نیز تجربه‌هایی در زمینه حفر مکانیزه تونل با کاربری‌های متفاوت مانند تونل‌های قطار شهری، راه و انتقال آب وجود دارد. انتخاب صحیح نوع ماشین حفار با توجه به قیمت بسیار بالای دستگاه‌های حفاری مکانیزه که می‌تواند اقتصادی بودن پروژه را تحت تأثیر قرار دهند، یکی از حساس‌ترین مسائل در رابطه با اجرای مکانیزه تونل‌ها است.

در نظر گرفتن شرایط ژئومکانیکی و ژئوتکنیکی محیط در برگیرنده تونل از کلیدی‌ترین موارد در اجرای تونل‌ها است. از آنجایی که در مراحل اولیه‌ی طراحی، در نظر گرفتن تمامی پارامترهای تأثیرگذار بر انتخاب ماشین حفاری در محل احداث تونل غیرممکن است، بنابراین تصمیم‌گیری مناسب که بر اساس شناخت یا پیش‌بینی شرایط ژئومکانیکی و ژئوتکنیکی محل احداث تونل انجام می‌شوند، الزامی است.

انتخاب نوع ماشین حفاری با توجه به وجود معیارهای مختلف که گاهی ممکن است در تضاد با یکدیگر باشند، یک تصمیم‌گیری پیچیده و چندمعیاره است. با توجه به شرایط متغیر زمین‌شناسی، سطح آب زیرزمینی، همچنین تنش منطقه (در صورت وجود گسل و یا عوامل بحرانی از این قبیل) و

عدم قطعیت‌های مربوط به هریک از موارد مذکور در فرآیند تونل‌سازی مکانیزه، می‌توان استفاده از روش تصمیم‌گیری چندمعیاره را یکی از راه حل با قابلیت اطمینان بالا برای انتخاب نوع ماشین حفاری دانست. این عدم قطعیت‌ها شامل عدم اندازه‌گیری دقیق، عدم پردازش مناسب، عدم وجود داده‌های کافی، عدم دقت در مدل‌سازی و یا پیچیدگی بیش از حد روابط بین کمیت‌ها می‌شود.

در روش‌هایی که امروزه برای انتخاب ماشین حفاری مکانیزه^۱ به کار گرفته می‌شود، اغلب یک یا چند پارامتر محدود به عنوان معیارهای اصلی انتخاب می‌شوند. هزینه سرمایه‌ای، مقاومت محیط، سطح آب زیرزمینی، نزدیک بودن به منطقه مسکونی و محدودیت‌های خاص آن و توالی لایه‌های مختلف منطقه را می‌توان به عنوان نمونه‌هایی از این پارامترهای محدودکننده انتخاب نوع ماشین ذکر کرد. این در حالی است که در نظر گرفتن یک یا چند پارامتر به تنهایی نمی‌تواند یک انتخاب مناسب از نظر فنی و اقتصادی را در پی داشته باشد. با توجه به عدم قطعیت‌های ناشی از عدم شناخت کافی از محیط پیرامونی تونل و نیز عدم اطمینان در داده‌های بدست آمده، با استفاده از منطق فازی نتایج دقیق حاصل خواهد شد. روش فازی به دلیل قابلیت به حداقل رساندن عدم قطعیت‌های موجود در مسئله، بهترین گزینه برای تکمیل روش تصمیم‌گیری چندمعیاره است که در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفته است.

۲-۱- ضرورت انجام تحقیق

انتخاب ماشین حفاری مکانیزه‌ی مناسب برای حفاری در شرایط مختلف زمین از اهمیت بالایی برخوردار است، و بخش مهمی از برنامه‌ریزی یک پروژه تونل‌سازی را تشکیل می‌دهد. در مرحله‌ی طراحی و برنامه‌ریزی، بررسی انواع مختلف ماشین، متناسب با شرایط پروژه، امکان‌پذیر است اما در صورتی که انتخاب نوع ماشین به درستی انجام نشود و ماشین در کارگاه قرار گیرد، هر نوع اصلاح اساسی و به روز کردن و یا بیرون کشیدن آن بسیار زمان‌بر و پرهزینه است. در صورتی که انتخاب به درستی

^۱ Tunnel Boring Machines (TBM)

انجام گیرد، منجر به بهبود روند حفاری و کاهش هزینه‌ها و صرفه‌جویی در زمان پروژه می‌شود. انتخاب مناسب از نظر فنی و اقتصادی مستلزم در نظر گرفتن پارامترهای مختلفی از قبیل عوامل زمین‌شناسی، ژئوتکنیکی، هندسی، زیست‌محیطی، انسانی و هزینه‌ای که درک صحیحی از آنها لازم است. همچنین با توجه به وجود عدم قطعیت‌هایی در پروژه‌های تونل‌سازی، انتخاب مناسب ماشین حفار کاری بسیار پیچیده است. از این رو، همان‌طور که پیش‌تر بیان شد، عدم انتخاب صحیح ماشین حفاری می‌تواند باعث توقف طولانی مدت یا حتی گیر افتادن ماشین و اعمال خسارت‌های مالی جبران ناپذیر بر طرح شود. بنابراین استفاده از روشی که قادر به از بین بردن عدم قطعیت‌های موجود در مسئله و همچنین توانایی در نظر گرفتن هم زمان طیف گسترده‌ای از پارامترهای مؤثر در انتخاب ماشین حفاری مکانیزه داشته باشد، ضرورت پیدا می‌کند. با زیاد شدن عوامل اثرگذار، فرآیند تصمیم‌گیری برای رسیدن به راه‌حل منطقی و معقول برای تصمیم‌گیران با مشکلات جدی، روبه‌رو است. بر این اساس یک سیستم تصمیم‌گیری پشتیبان^۱ می‌تواند تصمیم‌گیرنده را به سمت انتخاب مناسب دستگاه هدایت کند. استانداردها و توصیه‌نامه‌های متعددی در زمینه‌ی انتخاب ماشین حفاری مکانیزه وجود دارد. این پیشنهادها برای شرایط هر کشور متفاوت است، برای مثال نشریات انجمن‌های تونل آلمان^۲ (DAUB)، و انگلستان^۳ (BTS) و توصیه‌نامه‌هایی از انجمن بین‌المللی تونل و فضاهای زیرزمینی^۴ (ITA) و شرکت ساخت ماشین حفاری لووت^۵ که در این پیشنهادها، عوامل تأثیرگذار در انتخاب ماشین حفاری مکانیزه معرفی و برای برخی از آنها، بازه‌هایی مشخص شده است. اما این استانداردها و توصیه‌نامه‌ها یکسری دستوالعمل‌های کلی برای انتخاب روش‌های حفاری تونل، در اختیار قرار می‌دهند. با توجه به موارد یاد شده، می‌توان نتیجه گرفت برای انتخاب ماشین حفاری مکانیزه هنوز یک استاندارد جهان شمول وجود ندارد و استفاده از پیشنهادها موجود، مناسب با شرایط ژئوتکنیک و زمین‌شناسی ایران، نیاز به بازبینی

^۱ Decision Support System

^۲ Deutsche Ausschuss für Unterirdisches Bauen (German Tunnelling Committee)

^۳ British Tunnelling Society in association with the Institution of Civil Engineers

^۴ International Tunnelling and Underground Space Association

^۵ LOVAT

دارد. بنابراین فرآیند انتخاب ماشین حفاری مکانیزه هنوز یک فرآیند تجربی است. فرآیند تصمیم‌گیری برای انتخاب مناسب‌ترین ماشین حفاری تونل که با شرایط موجود در ایران سازگار باشد، یک آنالیز تصمیم منطقی نیاز دارد.

انتخاب مناسب از نظر فنی و اقتصادی مستلزم در نظر گرفتن پارامترهای متعددی است که با توجه به وجود عدم قطعیت‌ها در پروژه‌های تونل‌سازی کاری بسیار پیچیده است. از آنجایی که عوامل مختلفی در انتخاب مناسب ماشین حفاری مکانیزه تأثیرگذار است، در صورت تصمیم‌گیری بر اساس هر یک از آنها به صورت جداگانه، گزینه انتخابی متفاوت خواهد بود، لازم است تا این مسئله با روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره فازی^۱ همچون شباهت به گزینه ایده‌آل فازی^۲، تحلیل سلسله مراتبی فازی^۳ و یا تحلیل سلسله مراتبی دلفی فازی^۴ حل شود. این روش‌ها به تصمیم‌گیرندگان کمک می‌کنند تا هم زمان معیارهایی که امکان دارد در تضاد با یکدیگر باشند، را مورد ارزیابی قرار دهند. مزایای روش‌های فازی در کنار استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره، برای مدل نمودن الگوهای موجود در داده‌ها سبب شده است تا این رویکرد نسبت به روش‌های کلاسیک، برتری و ضرورت استفاده از آن، در زمینه‌ی انتخاب ماشین حفاری مکانیزه را روشن سازد.

۱-۳- هدف از انجام پایان‌نامه

پروژه‌های تونل‌سازی به دلیل ماهیت ساختاری (عدم شناخت کافی از وضعیت زمین، شرایط پیرامونی و عدم قطعیت‌های مرتبط با آن که در بسیاری موارد منجر به خسارت‌های سنگینی می‌شود) در مقایسه با پروژه‌های مشابه، همواره با درصد بالایی از خطر^۵ همراه هستند. مدیریت درست و به موقع این ریسک‌ها موجب حداقل کردن احتمال وقوع یا اثر پیامدهای منفی بر اهداف پروژه می‌گردد.

^۱ Fuzzy Multiple Criteria Decision Making (FMCDM)

^۲ Fuzzy Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS)

^۳ Fuzzy Analytic hierarchy process (FAHP)

^۴ Fuzzy Delphi Analytic hierarchy process (FDAHP)

^۵ Risk

ماشین حفاری مکانیزه تمام مقطع را می‌توان به عنوان یک ابزار حفاری مناسب، تحت شرایط ایده‌آل زمین‌شناسی (منظور از زمین‌شناسی ایده‌آل درصد تخلخل پایین، دانه‌بندی همگن، هدایت هیدرولیکی و عدم وجود جبهه‌کارترکیبی است) در نظر گرفت. اما طبیعت به‌ندرت شرایط زمین‌شناسی ایده‌آل را فراهم می‌سازد. مشکل اساسی همیشه ناشی از ناهمگونی فیزیکی و ژئوتکنیکی محیطی است که تونل در آن حفر می‌شود. از سوی دیگر در صورتی که انتخاب ماشین حفاری مکانیزه به درستی انجام نشود، عملکرد آن ضعیف‌تر از میزان پیش‌بینی شده خواهد بود. از این‌رو فرآیند انتخاب ماشین یکی از مؤثرترین عوامل موفقیت در اجرای یک پروژه تونل‌زنی به حساب می‌آید. تا به حال روش‌های مختلفی برای انتخاب روش‌های تونل‌زنی با در نظر گرفتن یک یا چند پارامتر در سنگ و زمین نرم ارائه شده است. در این پژوهش با تعیین عوامل مؤثر بر انتخاب ماشین حفاری مکانیزه از دیدگاه استانداردها، توصیه‌نامه‌ها و پروژه‌های مشابه و در نظر گرفتن هم‌زمان معیارهای مذکور با استفاده از روش تصمیم‌گیری تحلیل سلسله‌مراتبی فازی دلفی، ماشین حفاری مکانیزه‌ی مناسب جهت حفاری خط هفت شمالی- جنوبی متروی تهران پیشنهاد شده است.

همچنین در این پژوهش پارامترهای مؤثر در انتخاب ماشین حفاری مکانیزه مورد بررسی، بر اساس میزان تأثیر آنها اولویت‌بندی شده است.

۴-۱- ساختار پایان‌نامه

پژوهش حاضر شامل ۷ فصل است. فصل اول این پژوهش بیان کلیات مسئله از جمله اهمیت، ضرورت و اهداف آن را در بر گرفته است. در فصل دوم به معرفی روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره، شامل بیان مفهوم تصمیم‌گیری و انواع روش‌ها و تفاوت آنها و در نهایت روش بهره‌گیری از تصمیم‌گیری چندمعیاره‌ی دلفی فازی اقدام شده است. در فصل سوم، مروری بر تحقیقات گذشته در زمینه‌های مشابه با انتخاب ماشین حفاری مکانیزه و بیان وجه تمایز این پژوهش با پژوهش‌های گذشته آورده شده است. در فصل چهارم ابتدا به معرفی ماشین‌های حفاری مکانیزه و روش کار ماشین‌های حفاری مکانیزه در محیط‌های خاکی پرداخته شده است. سپس پارامترهای مؤثر بر انتخاب

ماشین حفاری مکانیزه که با توجه به مطالعات گذشته، نظر کارشناسان و توصیه‌نامه‌های تونل‌سازی مکانیزه انتخاب شده است را معرفی و محدوده‌ی کاربری هر یک از ماشین‌ها آورده شده است. در فصل پنجم، اطلاعات کلی مطالعه‌ی موردی و محدوده‌ی قرارگیری مقدار پارامترهای اندازه‌گیری در محیط پروژه آورده شده است. فصل ششم شامل تعیین میزان تأثیرگذاری پارامترها با استفاده از روش تصمیم‌گیری چندمعیاره‌ی دلفی فازی و سپس تعیین وزن ماشین‌های مکانیزه در هر یک از پارامترها با استفاده از روش سلسله‌مراتبی فازی و بردار ویژه، و در انتها تعیین اولویت‌بندی ماشین‌های حفاری مکانیزه است. در نهایت، در فصل هفتم این پژوهش به ارائه‌ی نتایج حاصل از تحقیق پرداخته شده است و پیشنهاداتی برای تحقیقات آتی ارائه شده است.

روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره

۲-۱- مقدمه

بر اساس توصیه نامه‌های ارائه شده در ارتباط با انتخاب ماشین حفاری مکانیزه، پارامترهای مختلفی را معرفی کرده‌اند که هر یک در انتخاب ماشین حفار تأثیرگذار هستند. در صورتی که انتخاب ماشین حفار را براساس هر کدام از این پارامترها به صورت جداگانه بررسی کنند، با گزینه‌های گوناگونی مواجه خواهند شد. حال برای انتخابی مناسب با حداکثر تطبیق نسبت به شرایط پروژه، نیاز به بررسی تأثیر تمامی عوامل مؤثر، به صورت هم زمان خواهد بود که در راستای انجام آن، روش‌های نوین تصمیم‌گیری مانند روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره برای انتخاب ماشین حفاری مکانیزه مناسب، دارای این قابلیت هستند. در این صورت نتیجه‌ای با اعتبار بالا در مقایسه با روش‌های سنتی بدست می‌آید. در این فصل به بررسی روش‌های مختلف تصمیم‌گیری پرداخته شده است.

۲-۲- روش‌های تصمیم‌گیری

در طول فرآیند تصمیم‌گیری، تصمیم‌گیرندگان اغلب نیاز به جمع‌آوری اطلاعات زیادی دارند تا تصمیم منطقی اتخاذ کنند. چنین اطلاعاتی می‌تواند ناقص، نامطلوب و حتی متناقض با یکدیگر باشند. تصمیم‌گیری چندمعیاره به تصمیم‌هایی از نوع ترجیحی مانند ارزیابی، اولویت‌گذاری و یا انتخاب از بین گزینه‌های موجود (که گاه باید بین چند معیار متضاد انجام شود) اطلاق می‌گردد (Qu et al., 2018). پردازش داده‌های کمی بدست آمده از زمین (شامل خصوصیات مختلف خاک) همواره با عدم قطعیت همراه است، زیرا مواد و مصالح زمین یکنواخت نیستند و حتی مواردی که در طبقه‌بندی‌های مختلف در یک گروه قرار می‌گیرند نیز رفتاری متغیر از خود نشان می‌دهند. اکثر روش‌های طراحی مرتبط با خاک یک عدد را برای هر یک از پارامترهای ورودی مورد استفاده قرار می‌دهند. انتخاب یک عدد برای یک پارامتر خاص که بتواند رفتار خاک را نشان دهد، با اطمینان کامل همراه نخواهد بود. برای به حداقل رساندن این قبیل عدم قطعیت، این پارامترها به صورت اعداد فازی (فاصله‌ای شامل یک کران بالا و پایین از پارامتر مورد نظر) بیان می‌شوند تا بتوان رفتار خاک را در دامنه گسترده‌تری از تغییرات

زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی مشاهده کرد.

از جمله روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره می‌توان از روش وزن‌دهی ساده، روش برنامه‌ریزی توافقی، روش VIKOR، روش شباهت به گزینه ایده‌آل، روش تسلط تقریبی، روش تحلیل سلسله مراتبی، روش تحلیل شبکه نام برد (عطایی، ۱۳۹۴).

در تصمیم‌گیری‌های چندمعیاره کلاسیک برای تعیین تأثیر عوامل مختلف در تصمیم‌گیری، از مفاهیم ریاضی استفاده شده است. در یک مجموعه کلاسیک ویژگی مجموعه کاملاً واضح است و تابع درجه‌ی عضویت یک شی در این مجموعه برابر ۰ یا ۱ خواهد بود. اما بیان اکثر عوامل با منطق ریاضی کلاسیک امکان‌پذیر نیست. در صورتی که عضویت برخی از این عوامل و پارامترها دقیقاً مشخص نباشد، یک مجموعه‌ی فازی به وجود آمده است. بدین صورت که یک عضو می‌تواند تا درصدی به مجموعه تعلق داشته باشد، پس برد تابع عضویت این مجموعه بازه‌ی [۰ و ۱] خواهد بود. بنابراین در بسیاری از موارد، تمام و یا قسمتی از داده‌های یک مسأله تصمیم‌گیری چندمعیاره، به صورت فازی هستند. با توجه به مطالب ذکر شده، اگر مسأله با استفاده از داده‌های قطعی مدل و فرموله شود، جواب درست و دقیقی به دست نخواهد آمد در نتیجه گزینه‌ی با توجه به اولویت آنها انتخاب نخواهد شد. از طرف دیگر عدم قطعیت همیشه در دنیای واقعی وجود داشته و عدم اطمینان همواره در مراحل مختلف مطالعه و بررسی یک مسأله وجود دارد. در چنین تصمیم‌گیری‌های غیردقیقی نمی‌توان به هدف و مقصود مورد نظر دست یافت. لذا در مدل‌های تصمیم‌گیری که داده‌های آن فازی یا فاصله‌ای هستند باید با وجود محاسبات و عملیات بیشتر به طور منطقی و دقیق برخورد کرد و عدم قطعیت را در مدل تصمیم‌گیری لحاظ کرد. مدل کردن عدم قطعیت در مسائل تصمیم‌گیری به وسیله‌ی تئوری مجموعه‌های فازی امکان‌پذیر است. منطق فازی ابزار قدرتمندی به منظور مدل‌سازی عدم قطعیت ذاتی در متغیرها و فرآیند تصمیم‌گیری است. نارسائی‌ها و محدودیت‌هایی که در روش‌های تصمیم‌گیری کلاسیک وجود دارد، علت معرفی روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره فازی بوده است (رفیعی و عطایی، ۱۳۸۸؛ عطایی، ۱۳۹۴؛ Yazdani-

(Chamzini and Yakhchali, 2012).

منطق فازی^۱ اولین بار توسط زاده در سال ۱۹۶۵ ارائه شد. از مهم‌ترین مسائل مشترک در تئوری مجموعه فازی توانایی آن در ارائه داده‌های مبهم است. سیستم‌های فازی از یک روش استدلال تقریبی استفاده می‌کنند، بنابراین برای دانش نادقیق و نامطمئن، چهارچوبی ارائه می‌دهد (Hagras et al., 2003). در دو دهه‌ی اخیر با شناخت این واقعیت که بسیاری از معیارهای درگیر در فرآیند تصمیم‌گیری به صورت دقیق و یا روشن نیستند، ایده‌ی استفاده از منطق فازی در تصمیم‌گیری چندمعیاره به صورت گسترده مورد بحث قرار گرفته است. منطق فازی به جای عضویت ۰ یا ۱ در یک مجموعه، درجه عضویت بین [۰ و ۱] برای آن قائل می‌شود. منطق فازی اجازه می‌دهد اطلاعات، دانش و مفاهیم مبهم را به شیوه‌ی دقیق ریاضی مورد استفاده قرار گیرد. متغیرهای زبانی مورد استفاده در این منطق، رسانایی لازم برای توصیف حالت‌های پیوسته و هم‌پوشانی را تأمین می‌کند. این امر اظهارات استدلالی کیفی و غیردقیق را قادر به ارتباط با الگوریتم‌های فازی یا قواعد منطق فازی، مدل‌های با رفتار قابل درک و ساده‌تر می‌سازد (Qu et al., 2018).

از جمله روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره فازی عبارتند از: شباهت به گزینه‌ی ایده‌آل فازی^۲، تحلیل سلسله مراتبی فازی^۳، تحلیل سلسله مراتبی دلفی فازی^۴.

۲-۳- شباهت به گزینه‌ی ایده‌آل فازی

روش شباهت به گزینه‌ی ایده‌آل یکی از روش‌های اولویت‌بندی گزینه‌ها محسوب می‌شود. این روش توسط هوانگ و یون^۵ در سال ۱۹۸۱ پیشنهاد شد (Qu et al., 2018). در این روش تصمیم‌گیری، گزینه‌های مورد نظر را با توجه به معیارهای مختلف، امتیازدهی انجام می‌گیرد. فلسفه‌ی کلی روش TOPSIS به این صورت است که نسبت به گزینه‌های موجود، دو گزینه فرضی تعریف می‌شود. یکی از

^۱ Fuzzy logic

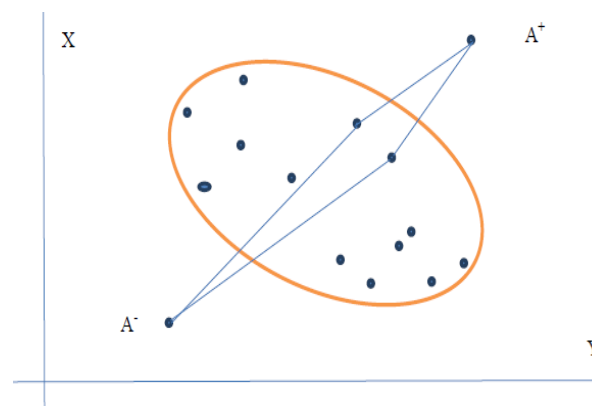
^۲ Fuzzy Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution (FTOPSIS)

^۳ Fuzzy Analytical Hierarchy Process (FAHP)

^۴ Fuzzy Delphi Analytical Hierarchy Process (FDAHP)

^۵ Hwang & Yoon

این گزینه‌ها مجموعه‌ای است از بهترین گزینه مقادیر مشاهده شده در ماتریس تصمیم‌گیری است که این گزینه را اصطلاحاً گزینه‌ی ایده‌آل (بهترین حالت ممکن) می‌نامند. همچنین یک گزینه‌ی فرضی دیگر تعریف می‌شود که شامل بدترین حالت‌های ممکن است، این گزینه ضد ایده‌آل نام دارد (شکل ۱-۲). معیارها می‌توانند دارای تأثیرات مثبت یا منفی باشند، همچنین واحد اندازه‌گیری آنها نیز می‌تواند متفاوت باشد (شریعتی و همکاران، ۱۳۹۲؛ عطایی، ۱۳۹۴). اساس این روش بر این نکته استوار است که گزینه‌ی انتخابی باید کم‌ترین فاصله را با گزینه‌ی ایده‌آل و بیشترین فاصله را با گزینه‌ی ضد ایده‌آل داشته باشد. مشخصاً، راه‌حلی که معیارهای سود را به حداکثر برساند و نیز معیارهای اقتصادی را به حداقل برساند، بهترین انتخاب خواهد بود. در این روش یک نمره برای هر گزینه محاسبه می‌شود و گزینه‌ها مطابق با این نمرات، رتبه‌بندی می‌شوند (Qu et al., 2018; Sun, 2010).



شکل ۱-۲: نحوه‌ی عملکرد روش شباهت به گزینه‌ی ایده‌آل فازی (Qu et al., 2018)

این روش به هدف رتبه‌بندی و برای به دست آوردن بهترین عملکرد در تصمیم‌گیری چندمعیاره استفاده می‌شود، همچنین از ذهنیات افراد برای انتخاب گزینه استفاده نمی‌کند از این رو سرعت اجرای آن در عمل بسیار بالاست. بر اساس مفاهیم پایه‌ای تکنیک TOPSIS این روش می‌تواند به صورت هم زمان چندین گزینه‌ی ممکن را در نظر گرفته و آنها را به صورت نزولی امتیازدهی کند (Fouladgar et al., 2011; Lashgari et al., 2011). در TOPSIS وزن معیار و رتبه‌بندی از گزینه‌های دیگر با دقت مشخص می‌شود، با این حال تحت بسیاری از شرایط به اندازه‌ی کافی به مدل مشکلات تصمیم‌گیری در مسأله‌ی واقعی شبیه نیستد، بنابراین Fuzzy TOPSIS پیشنهاد شده است که در آن وزن معیار و

رتبه‌بندی جایگزین متغیرهای زبانی است که توسط اعداد فازی بیان شده است، تا جامعیت و عقلانیت فرآیند تصمیم‌گیری را تقویت کند (Kelemenis et al., 2011; Qu et al., 2018).

شش گام زیر برای حل مسأله به این روش، لازم است (عطایی، ۱۳۹۴):

- (۱) تشکیل ماتریس تصمیم
- (۲) تعیین ماتریس وزن معیارها
- (۳) بی‌مقیاس کردن ماتریس تصمیم فازی
- (۴) تعیین ماتریس تصمیم فازی وزن‌دار
- (۵) یافتن راه‌حل ایده‌آل فازی (A^+) و راه‌حل ضد ایده‌آل فازی (A^-)
- (۶) محاسبه‌ی فاصله از حل ایده‌آل و ضد ایده‌آل فازی

۲-۴- تحلیل سلسله مراتبی فازی

روش تحلیل سلسله مراتبی در سال ۱۹۸۰ توسط ساعتی^۱ ارائه شد (Qu et al., 2018). روش سلسله مراتبی یکی از ابزارهای تصمیم‌گیری چندمعیاره است که به وسیله فرمول‌بندی، مسائل چندمعیاره با معیارهای مشخص و یا غیرقابل لمس مورد استفاده قرار می‌گیرد (Bouzon et al., 2016). فرآیند تحلیل سلسله مراتبی از مفهوم مقایسه‌های زوجی استفاده می‌کند تا ارزیابی ترکیب معیارهای کیفی و کمی را به طور هم زمان امکان‌پذیر سازد و با تجزیه‌ی مسائل دشوار و پیچیده، آنها را به شکلی ساده تبدیل می‌کند. این روش تصمیم‌گیرندگان را قادر می‌سازد اثرات متقابل و هم زمان بسیاری از شرایط پیچیده و نامعین را تعیین کنند. این روش کاربردهای فراوانی در مسائل مهندسی پیدا کرده است. این فرآیند به تصمیم‌گیرندگان کمک می‌کند تا اولویت‌ها را براساس دانش و تجربه‌ی خود تنظیم نمایند به صورتی که تفکرات و احساسات خود را به طور کامل در نظر بگیرند (Asghari et al., 2017; Qu et al., 2018; Sun, 2010). در این روش فرآیند تصمیم‌گیری در سه مرحله ساخت سلسله مراتب، محاسبه وزن و

^۱ Saaty

محاسبه سازگاری سیستم انجام می‌گیرد. در گام اول با ایجاد یک هرم از مسئله، هدف، معیارها و گزینه‌ها نشان داده می‌شوند. برای مثال در این پژوهش که هدف آن انتخاب ماشین حفاری مکانیزه است، باید انتخاب ماشین حفاری را در بالاترین سطح، معیارهای مورد نظر در سطح بعدی، زیرمعیارها در سطح بعدی و در پایین‌ترین سطح از هرم انواع ماشین‌های پیشنهادی قرار می‌گیرد. در گام بعدی عناصر هر سطح نسبت به عناصر مربوط به خود در سطح بالاتر، به صورت زوجی مقایسه شده و وزن نسبی آنها محاسبه می‌شود. سپس با تلفیق وزن نسبی، وزن نهایی گزینه‌ها مشخص شده که وزن مطلق نامیده می‌شود. در انتها وزن معیارها متناسب با هدف پژوهش تعیین شده و با ترکیب آنها وزن نهایی گزینه‌ها مشخص می‌گردد (Qu et al., 2018).

روش تحلیل سلسله مراتبی توسط افراد مختلفی با متدولوژی فازی ترکیب شده است. روش سلسله مراتب فازی قادر است گزینه‌های موجود را بر اساس اهمیت هر گزینه نسبت به شاخص‌های مورد نظر اولویت‌بندی کرده و با استفاده از روش تلفیقی مناسب سبب بهبود نتایج می‌شود. روش فازی برای وارد کردن عدم اطمینان حاصل از نظر کارشناسان و صاحب‌نظران در مدل‌سازی قابل استفاده است و نتایج دقیق‌تر و با دنیای واقعی منطبق‌تر خواهد بود (Nezarat et al., 2015; Asghari et al., 2017). شریف سامانی و همکاران، ۱۳۹۳؛ عطایی، ۱۳۹۴؛ مازندرانیان و همکاران، ۱۳۹۲).

مراحل روش تحلیل سلسله مراتبی فازی به روش چانگ^۱ به شرح زیر است (Veerabathiran and Srinath, 2012):

- (۱) رسم نمودار سلسله مراتبی معیارها و گزینه‌ها
- (۲) تعریف اعداد فازی به منظور انجام مقایسه‌های زوجی
- (۳) تشکیل ماتریس مقایسه زوجی ($\tilde{A}$) با به کارگیری اعداد فازی
- (۴) محاسبه S_i برای هر یک از سطرهای ماتریس مقایسه زوجی
- (۵) محاسبه درجه بزرگی S_i ها نسبت به همدیگر

^۱ Chang

(۶) محاسبه وزن معیارها و گزینه‌ها در ماتریس‌های مقایسه زوجی

(۷) محاسبه بردار وزن نهایی

۲-۵- تحلیل سلسله مراتبی دلفی فازی

روش دلفی ابزار تحقیق قابل اعتمادی برای استفاده از نظرات کارشناسان است (Chong et al., 2012). در اوایل دهه ۱۹۵۰، روش دلفی جهت استفاده از قضاوت متخصصین برای بررسی میزان خسارت انفجار بمب اتمی مورد استفاده قرار گرفت (عطایی، ۱۳۹۴). در دنیای پیرامون ما نمی‌توان موضوعات را به چند دسته‌ی سفید و سیاه تقسیم کرد، بلکه هر موضوع در یک طیف می‌گنجد. استفاده از اعداد قطعی در حل مسائل منجر به نتایجی خواهد شد که به دور از واقعیت هستند. از طرفی در بسیاری از موارد از جمله پیش‌بینی آینده‌ی سازمان استفاده از متغیرهای زبانی^۱ توسط خبرگان متداول‌تر و راحت‌تر است. این نکات موجب پدیدآمدن روش دلفی فازی شده است. روش دلفی سنتی، شامل مجموعه‌ای از جلسات است که با بازخورد اجماع از نظر کارشناسان همراه است (Chong et al., 2012). لینستون^۲ و توراف^۳ فرآیند دلفی را روشی برای ساختاردهی یک فرآیند ارتباط گروهی دانسته‌اند، به‌طوری که این فرآیند به افراد گروه به عنوان یک کل اجازه می‌دهد به گونه‌ی مؤثرتری یک مسئله پیچیده را حل کنند (Linstone and Turoff, 2002).

روش دلفی فازی در سال ۱۹۸۸ توسط کوفمان^۴ و گوپتا^۵ ارائه شده است (Cheng and Tang, 2009). در این روش خبرگان از توانایی‌های ذهنی و شایستگی‌های خود برای نظردهی استفاده می‌کنند و این موضوع بیان‌کننده‌ی آن است که عدم قطعیت حاکم بر این روش از نوع امکانی است. امکانی بودن عدم قطعیت حاکم بر این روش با مجموعه‌ی فازی سازگاری دارد، بنابراین بهتر است با بهره‌گیری از

^۱ متغیرهای زبانی، متغیرهایی هستند که مقادیر آنها کلمات یا عبارات زبان طبیعی هستند.

^۲ Linstone

^۳ Turoff

^۴ Kaufman

^۵ Gupta

اعداد فازی به پیش‌بینی بلندمدت و تصمیم‌گیری در دنیای واقعی پرداخت. از این روش به منظور تصمیم‌گیری و دسترسی به مطمئن‌ترین توافق گروهی خبرگان برای مسائلی که اهداف و پارامترها به صراحت مشخص نیستند و اطلاعات کافی از آنها وجود ندارد، منجر به نتایج ارزنده‌ای می‌شود. ویژگی مهم این روش، ارائه چارچوبی انعطاف‌پذیر است (عطایی، ۱۳۹۴). روش سلسله مراتبی دلفی فازی تصمیم‌گیرندگان را قادر می‌سازد اثرات متقابل و هم‌زمان بسیاری از وضعیت‌های پیچیده و نامعین را تعیین کنند. این فرآیند، تصمیم‌گیرندگان را یاری می‌کند تا اولویت‌ها را بر اساس اهداف، دانش و تجربه خود تنظیم نمایند، به نحوی که احساسات و قضاوت‌های خود را به طور کامل در نظر گیرند (Asghari et al., 2017; Chong et al., 2012; Zarei and Maleki Rad, 1388).

در این پژوهش با توجه به روش انجام پرسش‌نامه، وزن‌دهی و انتخاب ماشین حفاری مکانیزه با استفاده از تحلیل سلسله مراتبی دلفی فازی انجام گرفته است. مراحل اجرای روش تحلیل سلسله مراتبی فازی به شرح زیر است:

۲-۵-۱- نظرسنجی از کارشناسان

در این مرحله بعد از تعیین معیارهای مؤثر در مسئله، از کارشناسان مختلف در مورد این معیارها مؤثر بر تصمیم یا یک پدیده به صورت کیفی با استفاده از متغیرهای زبانی یا در صورت امکان، کمی نظرسنجی به عمل می‌آید (Liu and Chen, 2007; عطایی، ۱۳۹۴) (جدول ۱-۲)

۲-۵-۲- محاسبه اعداد فازی

برای محاسبه‌ی اعداد فازی ($\tilde{a}_{ij}$) نظرهای حاصل از نظرسنجی از کارشناسان به صورت مستقیم مد نظر قرار می‌گیرند. اعداد فازی در این مرحله را می‌توان بر اساس توابع عضویت مختلف همچون روش مثلثی شکل ۲-۲ و یا حالت دوزنقه‌ای محاسبه کرد. اما با توجه به سهولت و کاربرد زیاد روش مثلثی، روش مثلثی بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرد. در روش فازی دلفی، یک عدد فازی به صورت رابطه (۱-۲) تا (۴-۲) تعریف می‌شود (Liu and Chen, 2007).

جدول ۱-۲: متغیرهای زبانی برای ارزیابی اهمیت معیارها (Saaty, 2008)

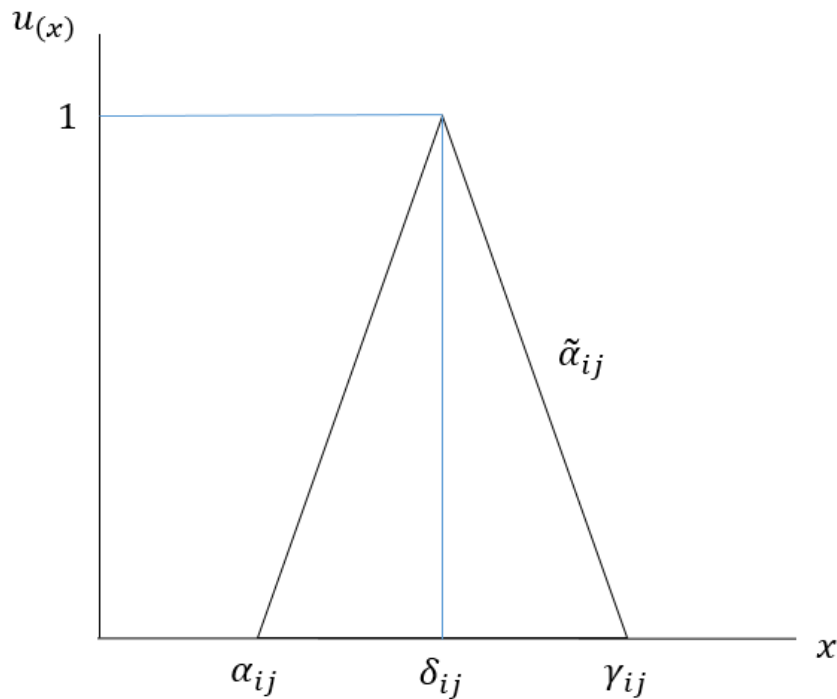
توضیحات	اعداد فازی
اهمیت یکسان	$\tilde{1} = (1.1.1)$
اهمیت بین یکسان و ضعیف	$\tilde{2} = (1.2.3)$
اهمیت ضعیف	$\tilde{3} = (2.3.4)$
اهمیت بین ضعیف و قوی	$\tilde{4} = (3.4.5)$
اهمیت قوی	$\tilde{5} = (4.5.6)$
اهمیت بین قوی و خیلی قوی	$\tilde{6} = (5.6.7)$
اهمیت خیلی قوی	$\tilde{7} = (6.7.8)$
اهمیت بین خیلی قوی و مطلق	$\tilde{8} = (7.8.9)$
اهمیت مطلق	$\tilde{9} = (8.9.10)$

$$a_{ij} = (\alpha_{ij} \cdot \delta_{ij} \cdot \gamma_{ij}) \quad (۱-۲)$$

$$\alpha_{ij} = \text{Min}(\beta_{ijk}). k = 1, 2, \dots, n \quad (۲-۲)$$

$$\delta_{ij} = \left(\prod_{k=1}^n \beta_{ijk} \right)^{1/n} . k = 1, 2, \dots, n \quad (۳-۲)$$

$$\gamma_{ij} = \text{Max}(\beta_{ijk}). k = 1, 2, \dots, n \quad (۴-۲)$$



شکل ۲-۲: تابع عضویت مثلثی در روش فازی دلفی (Liu and Chen, 2007)

در روابط فوق β_{ijk} نشان‌دهنده اهمیت نسبی پارامتر i بر پارامتر j از دیدگاه متخصص k ام، γ_{ij} و α_{ij} به ترتیب حد بالا و پائین نظرهای پرسش‌دهندگان و γ_{ij} میانگین هندسی نظرهای پرسش‌دهندگان است. بدیهی است که مولفه‌های عدد فازی به گونه‌ای تعریف شده‌اند که: $\alpha_{ij} \leq \delta_{ij} \leq \gamma_{ij}$ در ضمن مقادیر این مولفه‌ها در بازه $[1/9, 9]$ تغییر می‌کنند.

۲-۵-۳- تشکیل ماتریس معکوس فازی

در این مرحله با توجه به اعداد فازی بدست آمده در مرحله قبل، ماتریس مقایسه‌ی زوجی فازی بین پارامترهای مختلف از رابطه (۲-۵) تشکیل می‌شود (Liu and Chen, 2007).

$$\tilde{A} = [\tilde{a}_{ij}] \quad \tilde{a}_{ij} \times \tilde{a}_{ji} \approx 1 \quad (2-5)$$

$$\forall i, j = 1, 2, \dots, n$$

یا به عبارتی دیگر:

$$\tilde{A} = \begin{bmatrix} (1.1.1) & (\alpha_{ij} \cdot \delta_{ij} \cdot \gamma_{ij}) & (\alpha_{ij} \cdot \delta_{ij} \cdot \gamma_{ij}) \\ (1/\gamma_{ij} \cdot 1/\delta_{ij} \cdot 1/\alpha_{ij}) & (1.1.1) & (\alpha_{ij} \cdot \delta_{ij} \cdot \gamma_{ij}) \\ (1/\gamma_{ij} \cdot 1/\delta_{ij} \cdot 1/\alpha_{ij}) & (1/\gamma_{ij} \cdot 1/\delta_{ij} \cdot 1/\alpha_{ij}) & (1.1.1) \end{bmatrix}$$

۲-۵-۴- محاسبه وزن فازی نسبی پارامترها

وزن فازی نسبی پارامترها، از روابط زیر محاسبه می‌شوند (Liu and Chen, 2007).

$$\tilde{Z} = [\tilde{a}_{ij} \otimes \dots \otimes \tilde{a}_{in}] \quad (۶-۲)$$

$$\tilde{Z}_i = \tilde{Z}^{1/n} \quad (۷-۲)$$

$$\tilde{W}_i = \tilde{Z}_i \otimes (\tilde{Z}_1 \oplus \dots \oplus \tilde{Z}_n)^{-1} \quad (۸-۲)$$

که در آن $\tilde{a}_1 \otimes \tilde{a}_2 = (\alpha_1 \times \alpha_2, \delta_1 \times \delta_2, \gamma_1 \times \gamma_2)$ بوده و $\otimes$ نماد ضرب اعداد فازی و $\oplus$ نماد جمع اعداد فازی است. $\tilde{W}_i$ یک بردار سطری است که نشان دهنده وزن فازی پارامتر i ام می‌باشد.

۲-۵-۵- غیر فازی کردن وزن پارامترها

در این مرحله به منظور غیر فازی کردن وزن پارامترها، طبق رابطه زیر میانگین هندسی مؤلفه‌های عددی فازی وزن پارامترها به دست می‌آید و بدین ترتیب وزن پارامترها به صورت یک عدد قطعی بیان می‌شوند (Liu and Chen, 2007).

$$W_i = \left(\prod_{j=1}^3 W_{ij} \right)^{1/3} \quad (۹-۲)$$

۲-۶- جمع‌بندی

با توجه به مطالعات صورت گرفته در زمینه‌ی انتخاب ماشین حفاری مکانیزه، روش تصمیم‌گیری چند معیاره می‌تواند تأثیر تمامی پارامترهای مؤثر بر انتخاب TBM را به صورت هم زمان در نظر بگیرد، بنابراین بهترین روش برای انتخاب ماشین حفاری مکانیزه است.

روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره با مرور زمان رو به تکامل رفته‌اند. منطق فازی عدم قطعیت‌های موجود در مسئله را به حداقل می‌رساند، بنابراین با توجه به این امر که محیط زیرزمینی با عدم قطعیت‌های متعددی موجه هستند، از این روی روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره‌ی فازی که ترکیبی از روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره و منطق فازی است، برای حل مسئله نسبت به سایر روش‌های تصمیم‌گیری برتری دارند.

با توجه به مطالب گفته شده در این فصل، در روش شباهت به گزینه‌ی ایده‌آل فازی مقایسه‌ای بین گزینه‌ها صورت نمی‌گیرد و وزن گزینه‌ها بدون مقایسه با سایر گزینه‌ها محاسبه می‌شود، از طرفی وزن معیارها به صورت متمایز و بدون انجام مقایسه زوجی با سایر معیارها محاسبه می‌شود. در حالی که در فرآیند تحلیلی سلسله مراتبی فازی، اولیت‌بندی گزینه‌ها بر مبنای معیارها و وزن آنها انجام می‌گیرد و میان گزینه‌ها نسبت به هم، در هر معیار مقایسه زوجی صورت می‌گیرد و به امتیاز گزینه‌ها در هر پارامتر (عدم اعمال مقایسه زوجی با سایر گزینه‌ها) محدود نمی‌شود و در نهایت با تلفیق وزن‌های عناصر سطوح پایین با عناصر سطوح بالای مربوط در سلسله مراتب، وزن شاخص و گزینه‌ها به دست می‌آید و در نهایت گزینه‌ای که بیش‌ترین وزن را دارد، بالاترین اولویت را به دست خواهد آورد. روش تحلیل سلسله مراتبی دلفی فازی نیز از فرآیند روش تحلیل سلسله مراتبی فازی پیروی می‌کند، در حالی که به اطلاعات کم‌تری نیاز دارد و زمان تصمیم‌گیری را کاهش می‌دهد. در جدول ۲-۲ سه روش FAHP، FTOPSIS و FDAHP مقایسه شده است. روش دلفی فازی می‌تواند عدم قطعیت موجود در فضای تصمیم‌گیری را به حداقل برساند و مزایای روش‌های آماری را ترکیب کند.

با توجه به محیط مطالعه‌ی موردی این پژوهش، محدودیت‌های مختلف در اطلاعات طول مسیر پروژه و فرآیند روش‌های مختلف تصمیم‌گیری چند معیاره‌ی فازی، روش سلسله مراتبی دلفی فازی جهت انتخاب ماشین حفاری مکانیزه در این پژوهش برگزیده شده است.

جدول ۲-۲: مقایسه روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره فازی

ردیف	روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره فازی	توصیف	مزایا	معایب
۱	FTOPSIS	گزینه‌ی انتخابی باید کم‌ترین فاصله را با راه‌حل ایده‌آل مثبت و بیش‌ترین فاصله را با راه‌حل ایده‌آل منفی داشته باشد.	انتخاب سریع از بین گزینه‌ها، با توجه به قابلیت هر یک در مقابل پارامتری یکسان.	عدم وزن‌دهی معیارها به روش مقایسه زوجی (مقایسه معیارها با یکدیگر)
۲	FAHP	شامل مقایسه زوجی از گزینه‌های مختلف برای معیارهای مختلف است	شهودی و بررسی معیارهای متناقض - از آنجا که مسئله به یک ساختار سلسله مراتبی ساخته شده، اهمیت هر یک از عناصر روشن می‌شود - معیارها با هم مقایسه می‌شود و وزن هر یک در مقایسه با سایر معیارها مشخص می‌شود.	تناقضات در رتبه‌بندی - افزودنی تجمع استفاده شده است. بنابراین امکان دارد داده‌ها از دست داده شود. - تعداد زیادی مقایسه زوجی مورد نیاز است.
۳	FDAHP	روشی کاربردی در تصمیم‌گیری، و تکامل یافته روش FAHP می‌باشد، معیارهای قابل سنجش در این روش به صورت عدد مطلق نیستند و همگرایی نظرات خبرگان مهم است	انعطاف‌پذیری - دقت بالا - اطلاعات کم‌تری نیاز دارد - زمان تصمیم‌گیری را کاهش می‌دهد - در نظر گرفتن ماهیت فازی در طی مصاحبه.	در صورت عدم رعایت اصل امانت‌داری محقق، نتایج تطبیقی با نظر کارشناسان نخواهد داشت.

فصل سوم

پیشینه پژوهش

۳-۱- مقدمه

با توجه به گسترش استفاده از ماشین‌های حفاری مکانیزه (TBM) برای حفر تونل‌ها در دهه‌های اخیر، انجام مطالعات و بررسی‌های لازم در زمینه استفاده صحیح و مناسب از این ماشین‌ها حائز اهمیت است. در این خصوص، فرآیند انتخاب ماشین مناسب برای حفاری با توجه به شرایط مختلف پروژه است، یکی از مهم‌ترین مراحل مطالعاتی برای حفر یک تونل است که اگر به درستی انجام گیرد می‌تواند منجر به بهبود روند حفاری، صرفه‌جویی در زمان پروژه و کاهش هزینه‌ها شود. به طور کلی محیط مطالعاتی که در گذشته انجام شده، به دو محیط نرم و سخت تقسیم شده است. در تحقیقات پیشین، پارامترهای تأثیرگذار در انتخاب مناسب‌ترین ماشین، متناسب با شرایط محیط مورد مطالعه آمده است. محققین کشورهای مختلف جهت انتخاب ماشین حفاری مکانیزه متناسب با شرایط مختلف کشور استandarدهایی تالیف کرده‌اند، اما در حال حاضر یک استاندارد جامع برای انتخاب ماشین حفاری مکانیزه در سراسر جهان وجود ندارد. بدین ترتیب انتخاب ماشین حفار یک فرآیند طراحی مهندسی بر مبنای تجارب کار در شرایط یکسان تلقی می‌شود. تصمیم‌گیری برای انتخاب ماشین مناسب یک مرحله‌ی بسیار دشوار و حساس در پروژه‌های حفاری مکانیزه و با در نظر گرفتن سرمایه‌گذاری بزرگ و محدودیت در شرایط زمین اساساً یک فرآیند برگشت ناپذیر است، و زمانی که ماشین به داخل زمین فرستاده می‌شود بیرون کشیدن و تغییر آن تقریباً غیرممکن است. از این رو، این مرحله از مطالعات باید به درستی و با دقت انجام شود.

بخشی از مطالعاتی که در گذشته در زمینه‌های مختلف حفر تونل از جمله انتخاب ماشین حفاری مکانیزه، انتخاب روش حفاری و یا استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره انجام پذیرفته است، به صورت مختصر آمده است.

۳-۲- محیط سنگی

شهریار و همکاران (۱۳۸۵)، انتخاب ماشین تونل‌زنی تمام مقطع در سنگ براساس کاهش مخاطرات

ژئوتکنیکی را مورد بررسی قرار داده‌اند. در این مقاله با توجه به عدم قطعیت‌ها در شرایط پیش‌بینی نشده زمین و نیز مسائل زمین‌شناسی، در انتخاب ماشین تونل‌زنی از روش درخت تصمیم‌گیری استفاده شد. در این مقاله مناسب‌ترین ماشین حفاری، ماشینی معرفی شده که کم‌ترین میزان ریسک را چه قبل و چه بعد از اجرای روش‌های تقلیل مخاطرات ژئوتکنیکی داشته باشد. در نهایت ماشین حفاری مکانیزه باز با توجه به معیارهای رایج هم‌چون زمان و هزینه پروژه به عنوان یک انتخاب مناسب معرفی شده، اما با توجه به ملاحظات مربوط به مخاطرات ژئوتکنیکی می‌تواند بدترین انتخاب باشد. بر اساس روش درخت تصمیم‌گیری، مناسب‌ترین ماشین تونل‌زنی برای حفر تونل مورد مطالعه یک ماشین سپری بوده که با توجه به میزان ریسک‌پذیری کم، یک ماشین تلسکوپی پیشنهاد شده است (شهریار و همکاران، ۱۳۸۵).

شریف‌زاده و همکاران (۱۳۸۵)، اجرای تونل به روش مکانیزه با استفاده از TBM در توده سنگ‌های ضعیف را مورد بررسی قرار داده‌اند. در این مقاله بر روی گیرکردن و توقف TBM در تونل انتقال آب قمرود که شامل توده‌سنگ دارای لایه بندی و شکستگی مطالعه شده است. توده‌سنگ دارای لایه بندی ضعیف گاهی به همراه سنگ‌های خرد شده بوده که این امر باعث به وجود آمدن تغییر شکل‌های بزرگ پس از حفاری، ناپایداری در برخی مقاطع و ریزش سنگ سینه‌کار و همگرایی تونل باعث افزایش بارهای وارده به پوسته سپر و ناپایداری موضعی توده‌سنگی شده است. براساس مطالعات انجام شده عواملی که باعث بوجود آمدن مشکلاتی در دستگاه TBM می‌شد بررسی شده و تمهیدات مناسب با آنها پیشنهاد شده است. در این تحقیق پیشنهاد شده که به منظور داشتن دامنه دید وسیع از شرایط زمین‌شناسی پیچیده در اعماق مختلف بدون استفاده از مطالعات ساختگاهی مفصل و اطلاعات واقع‌نگاری، تهیه یک مدل زمین‌شناسی ساختار کلی قبل از شروع حفر تونل لازم است (شریف‌زاده و همکاران، ۱۳۸۵).

در این پژوهش با توجه به مشاهدات میدانی و ثبت وقایع رخ داده، به بررسی علل توقف دستگاه حفاری مکانیزه پرداخته شده است. در صورتی که از مدل‌سازی‌های رایج و مطالعات مقدماتی جهت بهتر شناختن محیط، می‌توانستند پیش‌بینی‌های لازم را انجام داده و وقوع آنها را به حداقل برسانند. روش تصمیم‌گیری چندمعیاره‌ی فازی با در نظر گرفتن وجوه مختلف محیط پروژه، یکی از بهترین روش‌های

حال حاضر است.

رنجبر و همکاران (۱۳۸۹) به بررسی روشی برای انتخاب ماشین تونل‌زنی تمام مقطع برحسب شرایط زمین‌شناسی و مخاطرات ژئوتکنیکی پرداخته‌اند. در این مقاله روشی برای انتخاب ماشین تونل‌زنی تمام مقطع در سنگ، برحسب پارامترهای زمین‌شناسی، ژئوتکنیکی و ریسک ناشی از مخاطرات ژئوتکنیکی با استفاده از روش تصمیم‌گیری شباهت به گزینه ایده‌آل فازی ارائه شده است. در این بررسی تونل انتقال آب بلند زاگرس به عنوان مورد مطالعاتی در نظر گرفته شده است. همچنین در این تحقیق با در نظر گرفتن قضاوت‌های متخصصان تونل‌زنی، محدوده کاربری ماشین تونل‌زنی تمام مقطع باز، تک سپری و تلسکوپی در دامنه‌های مختلف از سه پارامتر مقاومت فشاری تک محوری ماده سنگ، مقاومت کششی ماده سنگ و RQD برحسب اعداد فازی مثلثی به‌دست آمده است. در نهایت با استفاده از تکنیک تصمیم‌گیری شباهت به گزینه ایده‌آل فازی، ارجح‌ترین ماشین حفاری تمام مقطع برحسب شرایط زمین‌شناسی و مخاطرات ژئوتکنیکی، ماشین تونل‌زنی تمام مقطع تلسکوپی نتیجه‌گیری شده است. اگر چه ممکن است ماشین تونل‌زنی باز با توجه به معیارهای رایج و مؤثر هم‌چون زمان و هزینه پروژه یک انتخاب مناسب باشد، اما با توجه به ملاحظات مربوط به مخاطرات ژئوتکنیکی می‌تواند بدترین انتخاب باشد (رنجبر و همکاران، ۱۳۸۹).

گلستانی‌فر و همکاران (۲۰۱۱)، به بررسی یک رویکرد چند بعدی برای ارزیابی روش‌های مختلف حفاری تونل پرداخته‌اند. در این تحقیق تأثیر پارامترهای زمین‌شناسی عوامل عملیاتی، اقتصادی، عوامل محیطی در انتخاب روش‌های حفاری در سنگ، پرداخت شده است. در نظر گرفتن تمامی پارامترهای ذکر شده با استفاده از یک روش ترکیبی امکان‌پذیر خواهد بود. از طرفی اندازه‌گیری‌های کیفی و عدم اطمینان مربوط به این معیارها باعث پیچیدگی در مسئله می‌شود. برای این منظور از روش ترکیبی تصمیم‌گیری چندمعیاره و تئوری مجموعه‌ی فازی استفاده شده است. در این مطالعه از روش تحلیل سلسله مراتبی فازی (FAHP) برای تعیین وزن معیارها، و روش شباهت به گزینه‌ی ایده‌آل فازی (FTOPSIS) برای رتبه‌بندی روش‌های حفاری تونل استفاده شده است. مورد مطالعاتی تونل قمرود

برای نشان دادن نتایج حاصل از این طرح، ارائه شده است. ماشین حفاری مکانیزه به عنوان اولویت در این مطالعه بیان شده است (Golestanifar et al., 2011).

رنجبر پاشاکلانی و همکاران (۱۳۹۰)، به بررسی نقش پارامترهای زمین‌شناسی و مخاطرات ژئوتکنیکی در انتخاب ماشین تونل‌زنی پرداخته‌اند. در این مطالعه توجه به نقش پارامترهای زمین‌شناسی و مخاطرات ژئوتکنیکی برای بکارگیری و انتخاب ماشین حفاری مکانیزه پرداخته شده است. همچنین با توجه به چندمعیاره بودن فرآیند انتخاب ماشین حفاری تونل از روش تصمیم‌گیری چند شاخصه تحلیل سلسله مراتبی برای انتخاب مناسب ماشین تونل‌زنی در محیط سنگی تونل بلند زاگرس، از دیدگاه پارامترهای زمین‌شناسی و مخاطرات ژئوتکنیکی پرداخت شده است. در این تحقیق از زیرمعیارهای مقاومت فشاری توده‌سنگ، RQD، فاصله‌داری درزه‌ها، نشت گاز، مچاله شوندگی، ناپایداری سینه‌کار و دیواره‌ها، ناحیه گسلی و حضور آب استفاده شده است. بعد از محاسبات و قضاوت مهندسی، وزن‌دهی به معیارها و زیرمعیارها انجام شده است. در نهایت ماشین تلسکوپی بالاترین امتیاز را از میان گزینه‌های هدف کسب نمود (رنجبر پاشاکلانی و همکاران، ۱۳۹۰).

یزدانی - چمیزی و حاجی‌یخچالی (۲۰۱۲)، به بررسی انتخاب ماشین حفاری مکانیزه با استفاده از روش چندمعیاره‌ی فازی پرداخته‌اند. در این تحقیق، یک مدل ارزیابی براساس فرآیند تحلیل سلسله مراتبی فازی (FAHP) و روش فرآیند شباهت به گزینه‌ی ایده‌آل (FTOPSIS) برای کمک به طراحان تونل‌سازی در فرآیند انتخاب TBM توسط روش‌های فازی توسعه داده شده است تا ابهام‌ها و عدم قطعیت‌ها با استفاده از متغیرهای زبانی و عدد فازی متناظر آنها برطرف شود. در این پژوهش، روش FAHP برای تعیین ماتریس وزن معیارها و مسائل ساختاری انتخاب TBM، و از FTOPSIS برای رتبه‌بندی گزینه‌ها براساس وزن‌دهی انجام شده، استفاده شده است. برای نشان دادن توانایی‌ها مدل ارائه شده، در یک مورد مطالعاتی واقعی (تونل قمرود) مورد بررسی قرار گرفته است. در این پژوهش از زیر معیارهای پایداری جبهه‌کار، نفوذپذیری توده‌سنگ، توزیع اندازه ذرات، ایمنی، سرعت حفاری، کنترل آب‌های زیرزمینی، هزینه، ریسک و نشست سطح زمین برای انتخاب بهینه‌ی ماشین حفاری مکانیزه

استفاده شده است. از بین ماشین‌های حفاری مکانیزه، در نهایت با محاسبات صورت گرفته ماشین حفاری مکانیزه‌ی تلسکوپی^۱ در اولویت گزینه‌ها قرار گرفته است (Yazdani-Chamzini and Yakhchali, 2012).

مازندرانیان و همکاران (۱۳۹۲)، به بررسی انتخاب روش حفاری بهینه از لحاظ فنی و اقتصادی حفاری تونل انتقال آب چم‌شیر پرداخته‌اند. در این تحقیق از تحلیل سلسله مراتبی برای انتخاب روش حفاری بهینه از بین سه گزینه‌ی انفجار، حفاری با رودهدر و حفاری با TBM استفاده شده است. در این مقاله ۷ معیار اصلی (زمین‌شناسی و خواص ژئومکانیکی سنگ، هندسه تونل، پارامترهای عملیاتی، شرایط هیدرولیکی، عوامل مدیریتی، عوامل زیست محیطی، هزینه عملیات) و ۲۰ زیر معیار (طبقه‌بندی ژئومکانیکی توده سنگ، قابلیت عبور از گسل یا ناحیه خرد شده، مخاطرات ناشی از نفوذ یا هجوم آب، مخاطرات ناشی از نفوذ گازهای سمی، زمین‌های آماس‌پذیر، زمین‌های مچاله‌شونده؛ شکل تونل، مساحت تونل، طول تونل، شیب و قوس تونل؛ زمان انجام کار، قابلیت دسترسی به سینه کار، قابلیت انعطاف‌پذیری، کیفیت بتن لاینینگ، تلورانس بتن لاینینگ، ریسک، سهولت تأمین منابع مورد نیاز، ایمنی در حین اجرا؛ آلودگی محیط زیست، خشک شدن چشمه‌های منطقه) مورد سنجش قرار گرفته است. در نهایت با محاسبات صورت گرفته، روش حفاری به وسیله‌ی TBM بهترین روش انتخاب شده است. در بین معیارهای انتخاب گزینه برتر، زمین‌شناسی و خواص ژئومکانیکی سنگ بالاترین امتیاز و عوامل زیست محیطی کم‌ترین امتیاز را اختیار کردند (مازندرانیان و همکاران، ۱۳۹۲). در این تحقیق که در محیط سنگی صورت گرفته است، بین روش‌های حفاری می‌باشد که روش ماشین حفاری مکانیزه تمام مقطع یکی از آنهاست. از دیگر جهت می‌توان گفت از فرآیند کلاسیک تحلیل سلسله مراتبی استفاده کرده که این مسئله عدم قطعیت‌های موجود در پارامترها را به حداقل نمی‌رساند. برای از بین بردن این عدم قطعیت از ترکیبی بین روش تصمیم‌گیری چندمعیاره و مجموعه‌ی فازی استفاده می‌شود.

^۱ Double Shield TBM

کرمی و همکاران (۱۳۹۳)، به بررسی تأثیر عوامل زمین‌شناسی و خصوصیات ژئومکانیکی توده‌سنگ بر انتخاب ماشین حفاری تمام مقطع در تونل انتقال آب سبزکوه پرداخته‌اند. در این تحقیق به تعیین مهم‌ترین خواص ژئومکانیکی و شرایط زمین‌شناسی توده‌سنگ منطقه اقدام شده است زیرا همواره اجرای تونل‌ها را تحت‌الشعاع قرار داده و می‌تواند در انتخاب نوع TBM مناسب، نقش به‌سزایی داشته باشد. فعالیت‌های تکتونیکی که در دامنه زاگرس وجود دارد و همچنین سنگ‌شناسی مقاطع مختلف طول تونل به خوبی شناسایی و بررسی شده است. با تعیین خواص ژئومکانیکی و شرایط زمین‌شناسی توده‌سنگ منطقه‌ی پژوهش، و تفسیر نتایج حاصل از گمانه‌های ژئوتکنیکی، بررسی‌های آزمایشگاهی و تدقیق آنها با مشاهدات و برداشت‌های صحرایی، توده‌سنگی مسیر تونل با سه سیستم طبقه‌بندی مهندسی Q، RMR و GSI به سه ناحیه ژئوتکنیکی تفکیک شد. سپس عمل کرد^۱ انواع TBM های باز، تک سپری و دوسپری برای حفاری در سنگ در هر ناحیه، بررسی شد. بر اساس تجزیه و تحلیل و تفسیر پارامترهای زمین‌شناسی، طبقه‌بندی مهندسی سنگ و تعیین مهم‌ترین خواص ژئومکانیکی سنگ‌بکر و توده‌سنگی مسیر تونل، TBM دو سپری به عنوان مناسب‌ترین دستگاه حفاری تونل سبزکوه پیشنهاد شد (کرمی و همکاران، ۱۳۹۳). در این تحقیق انتخاب ماشین حفاری مکانیزه بر اساس روشی انجام شده که پارامترهای تأثیرگذار را به صورت خاص و منفرد مورد بررسی قرار داده و از طرفی پارامترهای کمی و کیفی بیشتری را می‌توانستند مورد ارزیابی قرار دهند. به این صورت که در هر کدام از پارامترها، کدام‌یک از TBM ها مورد استفاده قرار می‌گیرد، و در نهایت ماشین حفاری که در اکثر شرایط و پارامترها قابل استفاده است، انتخاب شده است. این روش مطالعه نمی‌تواند تمام جوانب و شرایط را به صورت هم زمان مورد بررسی قرار دهد و به طور تک وجهی صورت گرفته است.

شریف سامانی و همکاران (۱۳۹۳)، به بررسی انتخاب بهینه ماشین حفار تمام مقطع تونل (TBM) با استفاده از تحلیل سلسله مراتبی فازی (FAHP) پرداخته‌اند. در این مطالعه که در محیط سنگی صورت پذیرفته از معیارها و زیرمعیارهای؛ پارامترهای ژئوتکنیکی و زمین‌شناسی (پایداری جبهه‌کار،

^۱ Mechanism

قابلیت نفوذپذیری سنگ، توزیع دانه‌بندی سنگ، آب‌های زیرزمینی)، پارامترهای فنی (ایمنی، سرعت حفاری، ریسک)، پارامترهای اقتصادی (هزینه‌های عملیاتی، هزینه‌های سرمایه‌ای)، پارامترهای زیست محیطی (نشست زمین، آلودگی‌های زیست محیطی) جهت اولویت‌بندی ماشین حفاری مکانیزه استفاده شده است. انتخاب ماشین حفار تونل در پروژه بهشت آباد با استفاده از متدولوژی تلفیقی از تحلیل سلسله‌مراتبی و منطق فازی انجام شده است. مزایای استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره، در جهت مدل نمودن الگوهای موجود در اطلاعات سبب شده است این رویکرد به عنوان یکی از روش‌های پیشرو در ارزیابی و انتخاب ماشین آلات محسوب شود. این تحقیق با استفاده از روش تحلیل سلسله‌مراتبی فازی گزینه‌های موجود را براساس اهمیت هر گزینه نسبت به شاخص‌های مورد نظر اولویت‌بندی کرده است. در نهایت نتایج نشان از آن دارد که ماشین حفر تونل با سپرتلسکوپی نسبت به سایر ماشین‌ها (ماشین‌های حفر تونل باز و تک سپره) در اولویت قرار دارد (شریف سامانی و همکاران، ۱۳۹۳).

حاجی‌میری و همکاران (۱۳۹۵)، انتخاب ماشین مناسب برای حفاری قطعه دوم تونل امامزاده هاشم از دیدگاه زمین‌شناسی مهندسی را مورد مطالعه قرار داده‌اند. این مطالعه ویژگی‌های زمین‌شناسی مهندسی منطقه از مهم‌ترین پارامترهای در تعیین ماشین حفاری مناسب دانسته است. در این تحقیق، با در نظر گرفتن پارامترهای مهم در انتخاب ماشین از نظر انجمن تونل آلمان و بهره‌گیری از نظرات متخصصان و استفاده از روش شباهت به گزینه ایده‌آل فازی، اقدام به انتخاب بهترین ماشین از بین ۴ نوع ماشین پیشنهادی برای حفاری انتخاب کردند. پارامترهای استفاده شده UCS, RMR, RQD, جریان آب، تورم، ساینده‌گی و فشار جبهه کار می‌باشند، که با نظر کارشناسان، وزن‌دهی و امتیاز دهی به آنها صورت گرفته است. در نهایت با در نظر گرفتن تمام عوامل یاد شده، ماشین‌های سپر تلسکوپی یا تک سپر را مناسب‌ترین گزینه برای حفاری در مسیر تونل انتخاب شده است. از بین ماشین‌های حفاری مورد بررسی، در حالی که ماشین باز با فاصله‌ی اندکی در اولویت اول قرار گرفته است. اما به دلیل برتری ماشین‌های سپری تکی و تلسکوپی از نظر زمان‌بندی اجرای کامل تونل به عنوان گزینه‌های مناسب

انتخاب شده‌اند. و از میان این دو نمونه ماشین حفاری، ماشین تلسکوپي به دليل انجام هم زمان فعاليت حفاری و سگمنت‌گذاري و در نتيجه بهره‌وري بالاتر، گزينه مناسب‌تري محسوب شده است (حاجي ميري و همکاران، ۱۳۹۵). در اين تحقيق معيارهاي ژئوتكنيكي را در انتخاب ماشين حفاري مورد بررسي قرار داده است. در صورتي كه در انتخاب ماشين حفاري مكانيزه، معيارهاي زمين‌شناسي، هندسي و غيره تأثير به سزايي دارد.

نظارت و همکاران (۲۰۱۵) تأثير مخاطرات زمين‌شناسي بر روي تونل‌سازي مكانيزه را با استفاده از تكنيك سلسله مراتبي فازی (FAHP) را مورد ارزيابي قرار دادند. در اين مطالعه با در نظر گرفتن تجارب تكنسين‌ها و مطالعات زمين‌شناسي در تونل گلاب واقع در شمال غرب اصفهان هشت معيار همچون نشت گاز، ناپايداري جبهه‌كار، ناپايداري ديواره‌ي تونل، مچاله‌شوندگي، آماس در سنگ، جريان آب زيرزميني، شرايط تركيبي زمين، چسبندگي رس را در نظر گرفته‌اند. تأثيرات اين معيارها را بر عواملی چون احتمال وقوع، تأثيرگذاري بر هزينه، زمان و كيفيت پروژه، عدم اطمينان از برآورد، توانايي انجام عكس‌العمل در برابر خطر مورد بررسي قرار داده‌اند. اين مطالعه نشان مي‌دهد كه مچاله‌شوندگي و ناپايداري جبهه‌كار داراي بيشتريين سطح ريسك، و نيز نشت گاز و چسبندگي رس كمترين سطح ريسك را شامل شده است. در اين پژوهش تأثير گذارترين معيارها را مورد بررسي قرار داده‌اند (Nezarat et al., 2015).

۳-۳- محیط خاکی

رجب‌زاده و همکاران (۱۳۸۸)، در مقاله‌ای به رتبه‌بندی ريسك در پروژه‌هاي تونل‌سازي به كمك روش شباهت به گزينه ایده‌آل (TOPSIS) پرداخته‌اند. در اين تحقيق کاربرد روش شباهت به گزينه ایده‌آل در رتبه‌بندی ريسك پروژه‌هاي تونل‌سازي بررسي و جهت رتبه‌بندی ريسك‌هاي يك پروژه ساخت تونل (خط سوم مترو تهران) به كار گرفته شد. در ادامه محاسبات به روش سنتي ماتريس اثر- احتمال ريسك تکرار گرديد. مقايسه نتايج، مؤيد برتري روش TOPSIS (به عنوان يکي از روش‌هاي تصميم‌گيري چندمعياره در رتبه‌بندی ريسك‌ها) بر روش سنتي است. اين برتري از آن جهت است كه امکان در نظر

گرفتن هم زمان چندین شاخص، لحاظ نمودن وزن متفاوت برای شاخص، انعطاف‌پذیری روش و نیز تحلیلی‌تر بودن نتایج آن است. در این مقاله به طبقه‌بندی ریسک‌های چون ریزش، دیرکرد پرداختی‌ها، طراحی اشتباه، عدم ایمنی کارگران و تجهیزات، خرابی و تصادف، قیمت‌های محلی، آلودگی زیست محیطی، خرابی تجهیزات و آسیب به تاسیسات شهری پرداخت شده است. برای این پارامترها عدم قطعیت‌هایی از بابت عدم دقت در اندازه‌گیری، عدم پردازش درست (عطایی، ۱۳۹۴) دارند که برای به حداقل رساندن آن از روش فازی به همراه روش تصمیم‌گیری چندمعیاره می‌توانستند استفاده کنند.

جعفری‌مقدم (۱۳۸۸) انتخاب ماشین حفاری مناسب تونل‌زنی کوچک مقطع با استفاده از روش تصمیم‌گیری چندمعیاره فازی (مطالعه موردی: فاضلاب شهری همدان) را مورد بررسی قرار داده‌اند. این پژوهش مهم‌ترین اصل در موفقیت پروژه را انتخاب ماشین حفاری مکانیزه (کوچک مقطع) متناسب با شرایط زمین‌شناسی و ژئوتکنیک منطقه می‌داند. انتخاب نامناسب روش حفاری، سبب پایین آمدن کارائی و حتی در بعضی موارد نیز منجر به تعطیلی زود هنگام پروژه می‌شود. همچنین دخالت عوامل و پارامترهای تأثیرگذار، فرآیند تصمیم‌گیری برای انتخاب ماشین تونل‌زنی مناسب بسیار پیچیده است. در این پایان‌نامه انتخاب روش حفاری تونل کوچک مقطع با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی فازی برای فاضلاب شهری همدان مورد بررسی قرار گرفته است. چهار نوع ماشین حفاری مکانیزه کوچک مقطع دوطبقه، تعادل فشار زمین، آگری و لوله‌رانی به عنوان گزینه‌های احتمالی برای پروژه در نظر گرفته شده است. معیارهای مورد بررسی قرار گرفته عبارتند از: ساختگاهی، دستگاهی، سازه‌ای، محیطی و انسانی که ۱۸ زیرمعیار را شامل می‌شود. زیرمعیارهای جنس خاک، نفوذپذیری، سایش، دانه‌بندی، مقاومت، رفتار وابسته به زمان، پلاستیسیته، سطح آب زیرزمینی، تنش مؤثر؛ انعطاف‌پذیری دستگاه، گشتاور، نیروی رانشی؛ طول رانش، قطر سازه، عمق قرارگیری سازه؛ نشست مجاز پروژه، انسداد سطح زمین، تجربه و تخصص مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به نتایج به دست آمده، ماشین زمین تعادل فشار زمین مناسب‌ترین ماشین برای ادامه کار شناخته شده است (جعفری‌مقدم، ۱۳۸۸). در این پایان‌نامه تونل‌های کوچک مقطع مورد بررسی قرار گرفته، در حالی که تونل‌های مترو شهری که

مقطع‌های به مراتب بزرگ‌تری را شامل می‌شوند از نظر مقاومت سازه‌ای، ضریب ایمنی، بازدارندگی‌ها و غیره، متفاوت با میکروتونل‌ها هستند.

فصیحی و همکاران (۱۳۹۱) به انتخاب ماشین حفاری مکانیزه مناسب برای حفر تونل قطعه شرقی، غربی خط ۷ متروی تهران پرداخته‌اند. در این پژوهش، نوع خاک و منحنی دانه‌بندی، نفوذپذیری و شرایط هیدرولوژیکی و پارامترهای مؤثر بر انتخاب ماشین حفار نظیر فضاهای مورد نیاز برای اتصال قطعات^۱ و جداسازی قطعات مختلف دستگاه و فضای 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 هزینه‌های جاری و ایمنی حین کار و نشست سطحی را در جهت انتخاب ماشین حفاری مکانیزه مناسب مورد بررسی قرار داده‌اند. این تحقیق با توجه به بالا بودن تراز آب در بیش از ۶۰٪ از طول تونل، استفاده از ماشین‌های با سپر بسته را ضروری دانسته است. در این مطالعه ماشین حفاری متعادل کننده‌ی فشار زمین را صرف نظر از تجهیزات جانبی مورد نیاز، هزینه‌های کمتر و راندمان بالاتر این ماشین، با توجه به شرایط زمین‌شناسی پروژه مناسب‌ترین گزینه از بین ماشین‌های سپر بسته دانسته است. این پژوهش با توجه به آبرفت‌های مسیر، به ویژه وجود بیشتر از ۲ کیلومتر (۱۲ کیلومتر طول کلی مورد مطالعاتی) آبرفت‌های درشت‌دانه، امکان کار ماشین حفاری انتخاب شده را در مدهای مختلف و تنوع جنس خاک لازم دانسته است (فصیحی و همکاران، ۱۳۹۱). برای انتخاب ماشین حفاری مکانیزه مناسب برای یک پروژه، نیاز است تا پارامترهای مختلف را به صورت هم زمان در نظر گرفت. با توجه به دستورالعمل‌ها و توصیه نامه‌های متعدد در کشورهای مختلف، معیارهای دیگری نیز در انتخاب ماشین حفاری مکانیزه مانند فشار جبهه کار، رفتار تورمی، قطر، طول، تراز قوسی و غیره تأثیرگذار هستند، که در این تحقیق مورد بررسی قرار نگرفته‌اند.

خوش‌قلب و همکاران (۱۳۹۱) به چگونگی انتخاب نوع ماشین حفاری تمام مقطع تونل نسبت به شرایط ژئوتکنیکی محل حفر پرداخته‌اند. این تحقیق نشان دهنده تفاوت کامل محدوده‌های عملکرد دو

^۱ Montge

روش EPB و Slurry است، بنابراین به ندرت در انتخاب بین این دو ماشین اختلاف نظر وجود دارد. با توجه به ویژگی‌های هر دستگاه از یک جهت، و نیز محدوده‌ی دانه‌بندی مناسب برای هر یک، به انتخاب نوع ماشین پرداخته‌اند. بطور کلی در خاک‌های درشت دانه اشباع، توصیه می‌شود که از دستگاه Slurry استفاده شود و در سایر موارد، EPB کاربرد بهتری دارد. تجربیات بدست آمده در پروژه‌های مختلف نیز مؤید این مطلب است که ظرفیت و قابلیت تکنولوژی EPB چنان گسترده است که به مراتب بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرد (خوش‌قلب و همکاران، ۱۳۹۱). در این تحقیق فقط محدود به بررسی انتخاب ماشین بر اساس دانه‌بندی پرداخته در صورتی که پارامترهای مختلف ژئوتکنیکی و زمین‌شناسی در نوع ماشین به کار گرفته شده، تأثیرگذار است.

نظرپور شیخ‌آبادی و همکاران (۱۳۹۱) به بررسی نوع TBM مناسب برای خط A متروی قم براساس شرایط زمین پرداخته‌اند. در این تحقیق وضعیت زمین و پارامترهایی مانند دانه‌بندی خاک، وضعیت هیدرولیکی آب زیرزمینی، وجود قطعات سنگی، نفوذپذیری و وزن واحد حجم خاک را جهت معرفی TBM مناسب مورد بررسی قرار گرفته است. در این بررسی که با شناخت از ماشین‌های حفاری مکانیزه و نیز شرایط محیطی که با توجه به مهندسی زمین‌شناسی در نظر گرفته شده است به انتخاب ماشین حفار مناسب پرداخته شده است. با توجه تمام موارد یاد شده و استحکام مناسب خاک و زاویه اصطکاک داخلی پایین خاک، EPB ماشین حفاری مکانیزه مناسب برای حفاری خط A متروی قم تشخیص داده شده است (نظرپور شیخ‌آبادی و همکاران، ۱۳۹۱). در این مطالعه با در نظر گرفتن معیارها مورد نظر به صورت جداگانه مورد بررسی قرار گرفته است. در حالی که بحث انتخاب ماشین حفار یک مسئله چندمعیاره است که باید به صورت هم زمان در نظر گرفته شوند و با تعیین وزن هر یک جهت مشخص شدن میزان تأثیر هر معیار در انتخاب ماشین حفاری، نوع ماشین حفاری مکانیزه را اولویت بندی کرد. در این مورد مطالعاتی در بعضی مناطق از مسیر تونل با نفوذپذیری بالا و درصد ریزدانه کمتر از ۱۰ درصد مواجه شده‌اند که این شرایط باعث ایجاد مخاطراتی برای ماشین حفاری مکانیزه EPB ایجاد کرده است، در حالی که در مطالعات اولیه این شرایط را در نظر نگرفته‌اند.

قرارگاه سازندگی خاتم النبیا (ص)- قرب قائم- موسسه فاطر (۱۳۹۲)، به انتخاب دستگاه حفاری TBM برای حفاری تونل خط ۲ قطار شهری تبریز، به مقایسه‌ی ماشین‌های حفاری مکانیزه متعادل کننده فشار زمین و دوغابی با کمک روش انتخاب چند معیاره پرداخته‌اند. در این تحقیق با در نظر گرفتن معیارهای توزیع اندازه ذرات، حضور تخته سنگ، چسبندگی، مدیریت فشار جبهه کار، پایداری جبهه کار، کنترل نشست سطح زمین، نگهداری، محیط زیست، سیستم تخلیه مواد، کارایی چرخه کار، تملک زمین، سهولت عملیات و تجربه کار با ماشین، هزینه به عنوان معیارهای مؤثر بر انتخاب ماشین حفاری در نظر گرفته شده است. در وزن‌های اختصاص یافته برای معیارها بر اساس قضاوت خبرگان، حضور تخته سنگ، هزینه‌ی سرمایه گذاری اولیه و تملک زمین از اهمیت بالاتری نسبت به سایر معیارهای برخوردارند (موسسه فاطر، ۱۳۹۲).

اوزفیرات^۱ (۲۰۱۵)، به انتخاب ماشین حفاری مکانیزه در زمین نرم با روش تحلیل سلسله مراتبی فازی پرداخته است. در این مطالعه به بررسی تأثیر پارامترهای زمین‌شناسی (هیدروژئولوژی، توپوگرافی)، شرایط زمین (ویژگی‌های مکانیکی، مشخصات فیزیکی، آزمایش‌های صحرایی، پایداری جبهه کار، سیستم طبقه‌بندی خاک، نشست سطح زمین)، ویژگی‌های تونل (طول تونل، هندسه تونل، عمق تونل، نوع پشتیبانی تونل)، خطر زیست‌محیطی، ویژگی‌های فنی ماشین و ویژگی‌های پروژه‌ی (مدت زمان پروژه، هزینه، قابلیت اطمینان سازنده) مورد مطالعه بر انتخاب ماشین حفاری پرداخته است. در این مطالعه با استفاده از روش کمی برای انتخاب ماشین حفاری به جای یک روش بصری، اشتباهات را کاهش داده است، در نتیجه به تصمیم‌های صحیح منجر شده است. بعد از محاسبه‌های انجام شده با استفاده از روش سلسله مراتبی فازی، ماشین EPB در اولویت قرار گرفت، و ماشین دوغابی با فاصله‌ای کم در اولویت دوم قرار گرفته است. با توجه به پارامترهای مورد بررسی، سایر ماشین‌های نمره‌های بسیار کمتر از دو ماشین اول کسب کردند (Ozfirat, 2015).

آمون و همکاران (۱۳۹۵)، به تعیین الزامات فنی ماشین حفاری مکانیزه خط ۲ متروی تبریز

^۱ Ozfirat.

پرداخته‌اند. در این مطالعه با بررسی ملاحظات شهری، مخاطرات زمین‌شناسی، خطر برخورد با قنات‌های فعال و متروکه، خطر روانگرایی خاک، برخورد با لایه‌های سست و نواحی خرد شده، وجود قطعات سنگی بزرگ، هجوم آب زیرزمینی و موضعی و برخورد با مسیر رودخانه‌های قدیمی و مدفون را برای انتخاب ماشین حفاری مکانیزه و نوع تجهیزات لازم جهت اجرای تونل مورد مطالعه، انجام شده است. در این مطالعه‌ی موردی با توجه به بالا بودن تراز آب در مسیر تونل، استفاده از ماشین سپر بسته ضرورت دارد. در این مطالعه با توجه به شرایط پروژه امکان استفاده از ماشین‌های Slurry نیز محتمل بوده است، اما با توجه به این که قسمت عمده مسیر را ذرات ریزدانه در بر گرفته است، هزینه‌های زیادی را جهت جدایش مصالح حفاری از دوغاب حفاری در پی خواهد داشت. همچنین با در نظر گرفتن کلیه مخاطرات محتمل در پروژه، با هدف دستیابی به بیش‌ترین راندمان در حین اجرا، ماشین حفاری مکانیزه متعادل کننده فشار زمین پیشنهاد شده است (آمون و همکاران، ۱۳۹۵). این مطالعه بدون وزن‌دهی به مخاطرات و پارامترهای مؤثر، به انتخاب ماشین حفاری پرداخته است. در صورتی که با تعیین میزان سهم هر پارامتر به صورت جداگانه، انتخاب ماشین حفاری دارای قابلیت اعتماد بالاتری خواهد بود.

۳-۴- جمع‌بندی

به طور کلی مطالعات صورت گرفته در زمینه‌های مشابه با پژوهش انجام شده، در دو محیط سنگی و خاکی دسته‌بندی می‌شود. در محیط‌های خاکی انتخاب ماشین حفاری مکانیزه محدودتر بوده است. انتخاب ماشین حفاری مکانیزه متناسب با شرایط مختلف محیط، یکی از مهم‌ترین مراحل مطالعاتی برای حفر یک تونل است که اگر به درستی انجام پذیرد منجر به بهبود روند حفاری و کاهش هزینه‌ها و صرفه‌جویی در زمان پروژه می‌شود. پس برای تحقق این امر، لازم است اکثر پارامترهای تأثیرگذار در انتخاب ماشین حفار را در نظر گرفت. از جمله پارامترهای مربوط به محیط‌های خاکی که در مطالعات صورت گرفته آمده است می‌توان به پارامترهای زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی (توزیع دانه‌بندی خاک، وجود قطعات سنگی، نفوذپذیری، رفتار تورمی، شرایط ترکیبی زمین، فشار جبهه کار، چسبندگی، چگالی، زاویه

اصطکاک خاک)، پارامترهای هندسی (قطر تونل، طول تونل و شعاع قوسی تونل)، پارامترهای محیط زیستی و مدیریتی (نشست سطح زمین، حضور گاز، تأثیر بر محیط زیست و آلودگی آن، فضاهای کارگاهی مورد نیاز و موجود، تجربه و تخصص) اشاره کرد.

در برخی مطالعات گذشته، با تعداد محدودی از پارامترهای تأثیرگذار براساس شرایط محیطی و تطبیق آنها با استانداردهای متعدد، انتخاب ماشین حفار صورت گرفته است. هنوز برای انتخاب ماشین حفاری مکانیزه استاندارد جامعی در سراسر جهان وجود ندارد پس انتخاب ماشین حفاری یک فرآیند طراحی مهندسی بر مبنای تجارب کار در شرایط یکسان تلقی می‌شود. با توجه به فصل دوم، روش تصمیم‌گیری چندمعیاره، پارامترهای متعدد را مورد ارزیابی قرار می‌دهد، وزن هر کدام را محاسبه کرده و اهمیت نسبی آنها را نشان می‌دهد. به این ترتیب تأثیر پارامترها، متناسب با میزان اهمیت آنها در انتخاب ماشین حفاری مشخص می‌شود و انتخاب ماشین حفاری مکانیزه با حداکثر قابلیت اطمینان صورت خواهد گرفت.

فصل چهارم

ماشین‌های حفاری مکانیزه و

معیارهای مؤثر در انتخاب آنها

ماشین حفاری مکانیزه بزرگ مقطع هزینه‌ی سرمایه‌گذاری اولیه قابل توجهی را شامل می‌شود. از این رو انتخاب اشتباه ماشین حفار بسیار پرهزینه خواهد بود و باعث تاخیر در اتمام پروژه می‌شود. انتخاب ماشین حفاری مناسب با توجه به ویژگی‌های مختلف یک پروژه، یکی از مهم‌ترین مراحل مطالعاتی برای حفر یک تونل است. از جمله پارامترهایی که نقش تعیین کننده در فرآیند انتخاب ماشین حفاری مکانیزه دارد، پارامترهای زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی (ساختگاهی)، هندسی، زیست‌محیطی، انسانی و هزینه‌ای است. برای آن‌که انتخاب ماشین مناسبی برای حفاری تونل صورت گیرد، شناخت مکانیسم ماشین‌هایی که قابلیت استفاده در شرایط پروژه را دارند، ضروری است. بررسی تأثیر پارامترهای مختلف بر ماشین‌ها و توجه به استانداردهای موجود، احتمال انتخاب اشتباه ماشین حفاری مکانیزه را به حداقل می‌رساند.

در این فصل انواع ماشین‌های حفاری مورد بررسی قرار گرفته است و در ادامه‌ی آن پارامترهایی که بر اساس استانداردهای انجمن تونل آلمان و انگلستان، توصیه‌نامه‌های انجمن بین‌المللی تونل و فضاهای زیرزمینی و شرکت لووت و نیز تجربه‌های پروژه‌های انجام شده، معرفی شده، بررسی شده است.

۴-۲- انواع ماشین‌های حفاری تمام مقطع سپری

امروزه استفاده از روش مکانیزه با توجه به محدودیت‌های موجود در زمین‌های نرم و سست مناطق شهری روش غالب تونل‌سازی در این مناطق است. با توجه به تمایلات زیاد برای استفاده از روش مکانیزه تونل‌سازی، وجود چالش‌های تونل‌سازی در زمین‌های نرم منجر به نوآوری‌های گوناگون و پیشرفت تکنولوژی در طراحی ماشین‌های حفاری مکانیزه شده است. ماشین‌آلات حفاری مکانیکی را می‌توان به دو دسته کلی "ماشین‌های حفاری مکانیزه تمام مقطع" و "ماشین‌های حفار بازویی" تقسیم نمود. انواع دیگری از ماشین‌های حفاری تونل نیز طراحی شده‌اند که عموماً دارای کاربری‌های خاص می‌باشند. در سال‌های اخیر، احداث تونل‌هایی با ابعاد بی‌سابقه از نظر طول، عمق (بیشتر از ۶۰ متر در زمین نرم با

وجود آب زیرزمینی) و قطر (ماشین‌های حفاری تونل‌زنی با قطر بیش از ۱۵ متر) با استفاده از ماشین حفاری مکانیزه تمام مقطع ممکن شده است (Spencer et al., 2009).

استفاده از روش حفاری مکانیزه تمام مقطع به دلیل سرعت و دقت قابل توجه خود در بسیاری از پروژه‌های به عنوان گزینه‌ای مطلوب از نظر فنی و اقتصادی تلقی می‌شود. تونل‌زنی سپری^۱ امکان ساخت فضاهای زیرزمینی با قطر و طول‌های مختلف را در شرایط سخت زمین، در زمین سست و ریزشی، ضخامت کم روباره، در زمین ناپایدار، در حضور آب زیرزمینی و غیره بدون برهم‌زدگی سطح زمین و یا بروز نشست‌های ثابت ملاحظه را فراهم می‌سازد. در ماشین‌های تمام مقطع سپری، بخش اصلی سپر یک استوانه فولادی می‌باشد که پس از نصب تجهیزات از جمله کله حفار، جک‌های پیش برنده، سیستم تخلیه مصالح، سیستم نصب پوشش نهایی و غیره، در راستای محور تونل عمل حفاری را انجام داده و به جلو رانده می‌شود و این استوانه فولادی فضای خالی حفر شده را تا زمانی که پوشش اولیه یا نهایی تونل نصب شود محافظت می‌کند. سپر باید در برابر فشار زمین‌های اطراف مقاومت کرده و در صورت وجود آب از ورود آن جلوگیری کند. ماشین‌های حفاری تمام مقطع بر اساس اقدامات تکمیلی که می‌بایست برای محافظت از جبهه‌کار با توجه به شرایط زمین و آب‌های زیرزمینی در زمان حفاری و نصب پوشش نهایی انجام گیرد، طراحی و ساخته می‌شوند. علاوه بر روش خاص نگهداری جبهه‌کاری، روش ویژه حفاری خاک نیز از جمله ویژگی‌های مهم ماشین‌های سپری است. سایر اجزای ماشین حفاری سپری مانند نیروی محرکه تأمین گشتاور چرخشی، سیستم انتقال و تخلیه مصالح نیز بر اساس این دو اصل مهم و متناسب با آنها طراحی و ساخته می‌شوند (Guglielmetti et al., 2008; Maidl et al., 2014).

امروزه TBM ها با توجه به شرایط ژئوتکنیکی و زمین شناسی محل حفاری، کاربری و مشخصات تونل طراحی و ساخته می‌شوند. در انتخاب نوع ماشین، تمامی متغیرهای فنی- اجرایی، شرایط

^۱ Shield Machines

زمین‌شناسی محیط، وضعیت ناپیوستگی‌ها، تغییرات لایه‌ها، میزان نفوذپذیری، مسائل اقتصادی و غیره باید در نظر گرفته شود. شکل ۴-۱ ماشین متعادل کننده‌ی فشار زمین شرکت هرکنشت^۱ با قطر ۸/۷ متر برای حفر مترو شهر پورتو پرتغال را نشان می‌دهد، همچنین در شکل ۴-۲ دو ماشین حفاری مکانیزه متعادل کننده‌ی فشار زمین و دوغابی با قطرهای ۶/۸۸ و ۱۵/۱ متر نشان داده شده است.



شکل ۴-۱: ماشین متعادل کننده فشار زمین جهت حفاری مترو پورتو با قطر ۸/۷ متر (Guglielmetti et al., 2008)



شکل ۴-۲: (تصویر راست مربوط به EPB TBM برای متروی شهر شیراز با قطر ۶/۸۸ متر (آجورلو، ۱۳۹۴) و تصویر سمت چپ مربوط به Slurry TBM برای خط متروی شهر مادرید با قطر ۱۵/۱ متر (Maidl et al., 2014))

TBM مجموعه پیچیده‌ای از وسائل و دستگاه‌هایی است که برای حفاری تونل در کنار یکدیگر قرار

^۱ Herrenknecht

گرفته‌اند و در واقع کارخانه عظیم و متحرک تونل‌سازی است. صرفه نظر از نوع و روش حفاری، همه آنها شامل دو بخش ماشین و بخش پشتیبانی^۱ می‌باشند.

ماشین حفاری از یک بدنه یا سپر تشکیل شده است که محور اصلی دستگاه را تشکیل می‌دهد. صفحه حفاری در جلوی سپر قرار گرفته و ابزارهای برش بر روی آن نصب می‌شوند. تجهیزات مربوط به انتقال نیروی محرکه، جک‌های پیش برنده، سیستم نصب پوشش نهایی و ... در داخل سپر قرار می‌گیرند. قسمت پشتیبانی شامل تریلرهایی می‌باشد که تجهیزات پشتیبانی از عملیات حفاری از جمله کابین کنترل و راهبری، کمپرسورهای هوا، پمپ‌های تزریق، سیستم آب، سیستم هیدرولیک، سیستم روشنایی، سیستم‌های کنترلی، سیستم‌های ایمنی و غیره بر روی آنها قرار می‌گیرند (شکل ۳-۴).



شکل ۳-۴: نمونه‌ای از ماشین حفاری تونل Herrenknecht Double shield TBM - Railway Tunnel - Spain
با شروع حفاری، کله حفار به کمک ابزارهای برشی زمین را کنده و به قسمت پشت صفحه منتقل می‌کند. مصالح حفاری شده توسط سیستم تخلیه به انتهای قسمت پشتیبانی منتقل شده و توسط واگن حمل به خارج از تونل حمل می‌شوند. فضای خالی سپر بعد از حفاری نیز توسط پوشش نهایی^۲ به صورت سگمنت گذاری پر می‌شود که از ورود آب و خاک به داخل تونل جلوگیری کرده و کارکنان و اجزای دستگاه را در برابر خطرات ریزش محافظت می‌کند.

علی رغم کلیه اتوماسیون‌های انجام شده در TBM، هنوز حضور اپراتور^۳ در محل، جهت راهبری نیاز

^۱ Back Up

^۲ lining

^۳ Operator (TBM Pilot)

است. فقط یک اپراتور با تجربه می‌تواند تنظیمات مورد نیاز ماشین تونل‌زنی را بر اساس تغییر شرایط انجام داده و سپر را درست هدایت کند. بی‌شک تجربه و توان اپراتور دستگاه در موفقیت عملیات حفاری تونل بعد از انتخاب نوع ماشین مناسب مهم است.

تعمیر و نگهداری^۱ منظم، انجام سرویس‌های به موقع و پشتیبانی از عملیات حفاری از عوامل بسیار تأثیرگذار در سرعت حفاری و پیشروی در تونل‌سازی با TBM است که جدا از شرایط زمین و انتخاب نوع دستگاه بوده و به تجربه و دانش پرسنل و مدیریت و برنامه‌ریزی در این زمینه وابسته است. در جدول ۴-۱ مزایا و معایب تونل‌سازی با استفاده از روش مکانیزه نسبت به روش‌های نیمه مکانیزه و سنتی ارائه شده است:

جدول ۴-۱: مزایا و معایب تونل‌سازی با استفاده از TBM نسبت به روش نیمه مکانیزه و سنتی (Maidl et al., 2013)

مزایا	معایب
سرعت پیشروی بالا	غیراقتصادی بودن جهت حفر مسیرهای کوتاه
عملیات پیوسته و مداوم	طولانی بودن زمان آماده سازی اولیه محل حفاری و ساخت دستگاه
ایمنی بیشتر پرسنل و تجهیزات	زمان‌بر بودن آشنایی افراد با کارکرد اجرا
نگهداری کمتر	انعطاف پذیری کم نسبت به تغییرات وضعیت زمین
حداقل تأثیر بر سازه‌های سطح زمین	(با مشکل مواجه شدن در زمین‌های ریزشی و مجاله شونده)
ایجاد مقطع دقیق تونل	شکل هندسی ثابت حفاری
مصالح حفاری شده یکنواخت‌تر	
پوشش نهایی اقتصادی و با کیفیت	نیاز به سرمایه اولیه زیاد

^۱ Maintenance

(مطالعات زمین‌شناسی، خرید دستگاه، آماده سازی کارگاه).

از آنجایی که روش حفاری و نگهداری تونل به وسیله TBM با توجه به وضعیت زمین‌شناسی مسیر تونل تعیین می‌شود لذا آنها را بر این اساس به دو دسته کلی مخصوص زمین‌های نرم^۱ و سنگ‌های سخت^۲ تقسیم‌بندی می‌کنند و در هر دسته دستگاه‌های خاص با روش‌های مختلف حفاری و نگهداری قرار می‌گیرند (جدول ۴-۲).

جدول ۴-۲: انواع ماشین‌های حفاری تمام مقطع در زمین‌های نرم و سخت (Guglielmetti et al., 2008; Maidl et al., 2013; Maidl et al., 2008)

سپر باز	سپر تلسکوپی	تک سپر	ماشین‌های سنگ سخت
سپر ترکیبی ^۶	سپر دوغابی ^۵	سپر متعادل کننده فشار زمین ^۴	ماشین‌های زمین نرم ^۳

تفاوت اساسی آنها در شکل صفحه حفار و ابزارهای برشی نصب شده بر روی آن، روش حفاری و نگهداری جبهه کاری و روش تخلیه مصالح می‌باشد که در شکل ۴-۴ به صورت شماتیک نشان داده شده است.

هدف این پژوهش، انتخاب ماشین حفاری مکانیزه در زمین‌های نرم شهری است، به همین منظور در ادامه ماشین‌های حفاری تمام مقطع در زمین‌های نرم مورد بررسی قرار گرفته است.

^۱ Soft Ground

^۲ Hard Rock

^۳ Soft Ground TBM

^۴ Earth Pressure Balance TBM (EPB)

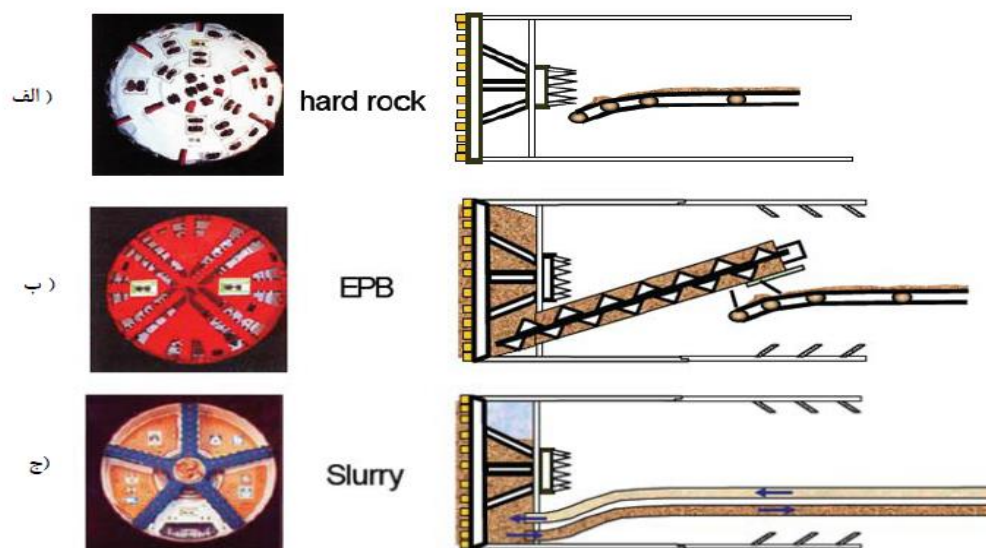
^۵ Slurry Shield TBM (Slurry)

^۶ Combined(Mix) Shield TBM

۴-۳- ماشین‌های مخصوص زمین‌های نرم

در مناطق شهری با توجه به اهمیت سازه‌ها و تأسیسات در سطح زمین ایجاد فضاهای زیرزمینی با تونل‌سازی برای مصارفی از جمله راه، فاضلاب، مترو و غیره بسیار حساس است. در این گونه زمین‌ها که عموماً سست و ناپایدار به همراه آب می‌باشند با روش‌های معمول نمی‌توان اقدام به حفاری نمود. تونل‌سازی در زمین‌های شهری باید به کم‌ترین جابه‌جایی لایه‌های طبیعی خاک و نشست سطح زمین در هنگام پیشروی و بعد از آن منجر شود. همچنین سست‌شدگی و به هم‌خوردگی لایه‌بندی زمین در اطراف فضای خالی حفر شده سبب شده تا ماشین‌های مدرن سپری قادر به جلوگیری از نشست سطح زمین به طور کامل نباشند. با این وجود استفاده از تکنولوژی‌های جدید در ماشین‌های TBM از طریق کنترل کامل جبهه‌کار و نیز استفاده از پایدار سازها، پیشرفت‌های قابل ملاحظه‌ای در حفاری تونل‌های کم عمق مناطق شهری در خاک نرم با حداقل نشست سطحی را ایجاد نموده و سبب ساخت ماشین‌های مختلف شده است. این ماشین‌ها در خاک‌های ضعیف غیرچسبنده، سست و ریزشی، خاک‌های رسی و خمیری به کار می‌روند. جلوگیری از نشست، پیش شرط اصلی، نگهداری پیوسته جبهه‌کار و فضای اطراف است. دانش کنترل جبهه‌کار تونل در ابتدا با کمک هوای فشرده انجام گرفته است که ماشین‌های حفاری از این نوع را سپر هوای فشرده^۱ می‌نامند (شکل ۴-۵) (Maidl et al., 2013).

^۱ Compressed Air Shield



شکل ۴-۴: شماتیکی از انواع ماشین‌های حفاری مکانیزه (Thewes, 2009)

گرچه این روش می‌توانست جبهه کار را در هنگام حفاری و بعد از آن نگهداری نماید، اما در زمین‌های متخلخل و خاک‌های نرم به علت مشکلات در اجرا و خطرات آن برای پرسنل به تدریج جای خود را به روش‌های جدید حفاری داد.



شکل ۴-۵: ماشین حفاری مکانیزه با سپر هوای فشرده (Maidl et al., 2013)

تونل‌سازی در زمین‌های نرم منجر به ساخت ماشین‌هایی از نوع دوغابی و متعادل کننده فشار زمین شده است که در جهت جلوگیری از ریزش خاک و به حداقل رساندن نشست‌های سطحی با استفاده از پایدار سازها در نگهداری جبهه کار توسعه یافته است. تفاوت این ماشین‌ها در روش نگهداری و تخلیه

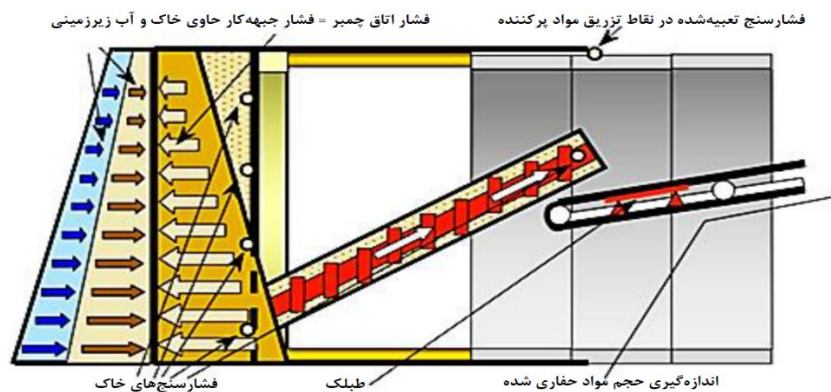
مصالح حفاری است.

۴-۳-۱- ماشین‌های متعادل کننده فشار زمین

تونل‌سازی با ماشین حفاری مکانیزه مجهز به سامانه‌ی EPB برای اولین بار در دهه‌ی ۱۹۷۰ در ژاپن به کار برده شد و امروزه در محیط‌های خاکی، به دلیل ایمنی بالا، توانایی پیشگیری از جابجایی و همگرایی زیاد تونل و پیشرفت سریع بخش‌های الکترونیکی و مکانیکی دستگاه، به کارگیری این ماشین‌ها بسیار متداول شده است. در این میان، بهسازی خاک یک عامل کلیدی برای حفاری موفقیت‌آمیز تونل در محدوده‌ی وسیعی از شرایط خاک است. بهسازی خاک موجب تغییر در مشخصات خاک می‌شود. این تغییرات، خاک را به حالت خمیری تبدیل کرده و از آن برای کنترل فشار و انتقال صحیح آن به اتاقک حفاری (در امتداد نقاله‌ی مارپیچ) استفاده می‌شود (Quebaud et al., 1998).

ماشین‌های EPB در زمین‌های سست زیر سطح ایستابی به خصوص برای زمین‌های رسی-سیلتی و ماسه‌ای-سیلتی کاملاً مناسب می‌باشند و حفاری در زمین‌های بسیار چسبنده با افزودنی‌های مناسب و تبدیل به دوغاب خمیری نیز با آنها ممکن است. اصول کار در ماشین‌های EPB از طریق ایجاد تعادل بین فشار زمین و فشار آب در جبهه کار در مقابل فشار ماشین می‌باشد. فشار ماشین از طریق سرعت چرخش صفحه حفار، اعمال فشار جک‌های پیشروی و سرعت چرخش نقاله مارپیچ^۱ حاصل می‌گردد، کنترل می‌شود (شکل ۴-۶).

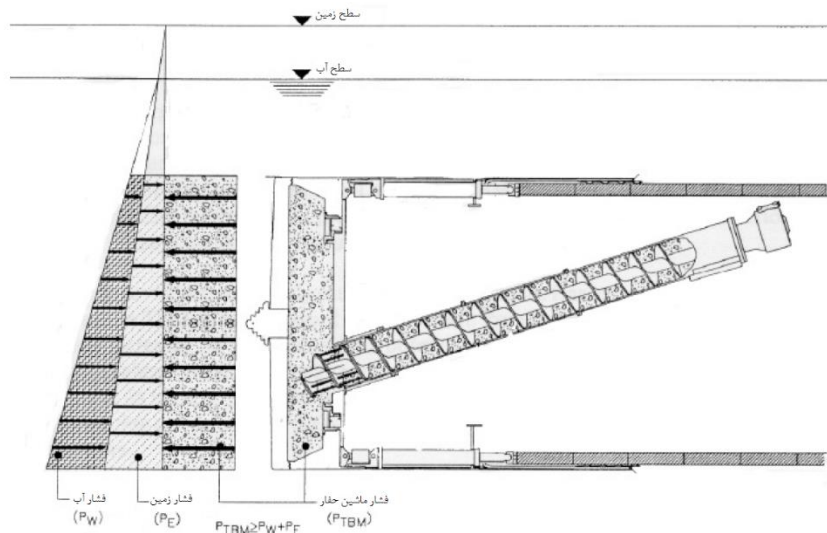
^۱ Screw Conveyor



شکل ۴-۶: مهار فشار جبهه کار در حفاری با EPB (امنیه بخشنده و همکاران، ۲۰۱۳)

حفار در آنها معمولاً به شکل ستاره‌ای و قطاعی می‌باشند و دریچه‌هایی برای انتقال خاک در نظر گرفته شده است. ابزارهای برشی در آنها شامل ناخن‌ها، رنده‌ها و تیغه‌های برشی هستند.

در حین چرخش صفحه‌ی حفار، خاک جبهه‌کاری مستقیماً به داخل محفظه حفاری وارد نمی‌شود بلکه با سیالی که در جبهه‌کاری تزریق می‌شود (آماده سازها) به صورت فشرده شده، وارد محفظه می‌گردد و در آنجا با اضافه شدن سیال (پایدار سازها) به حالت خمیری تبدیل شده و توسط نقاله مارپیچ تخلیه می‌شود. سیال مورد استفاده معمولاً شامل محلول فوم، آب، بنتونیت و افزودنی‌ها با نسبت خاص می‌باشد. با تزریق فوم، زمین نفوذپذیر و غیرچسبنده را می‌توان به شرایط مورد نظر رساند. مواد حفاری شده در محفظه پشت صفحه حفار جمع و متراکم می‌شوند و به عنوان یک نگهدارنده جبهه‌کاری عمل کرده و از ورود آب به داخل شیلد و ریزش ناگهانی خاک به داخل محفظه جلوگیری می‌کنند که این عامل را می‌توان مزیت ماشین EPB نسبت به Slurry برشمرد. تعادلی هنگامی ایجاد می‌شود که فشار وارده از سوی زمین و آب با فشار وارده از سوی ماشین یکسان باشد. افزایش فشار از سوی ماشین سبب فرورفتگی (نشست) در سطح زمین می‌شود (شکل ۴-۷).



شکل ۴-۷: سیستم داخلی ماشین‌های حفاری از نوع تعادلی (Thewes, 2009)

توسعه و گسترش تولید فوم در جهت پایدارسازی خاک در حضور آب زیرزمینی زیاد و بکارگیری آن در سیستم بهبود شرایط خاک^۱ در ماشین‌های EPB، از نظر زیست‌محیطی با مخاطرات کمتری مواجه بوده و دامنه کاربرد سپرهای EPB را افزایش می‌دهد بطوری‌که در بسیاری موارد می‌توان از آنها به جای سپرهای دوغابی استفاده نمود. مسئله مهم در استفاده از سپرهای EPB خطرات زیست‌محیطی ناشی از آماده‌سازها و پایدارسازهایی نظیر فوم و پلیمر است که باید مورد توجه قرار گیرد.

کاربرد دستگاه‌های حفاری مکانیزه‌ی مجهز به سامانه‌ی متعادل کننده فشار زمین دارای محدودیت‌هایی است. برای مثال در خاک‌های نامناسب، این سامانه با مشکلات زیادی روبرو شده و در برخی موارد حتی احتمال آن است که ادامه‌ی پروژه امکان پذیر نباشد. اما آنچه سبب بکارگیری این سامانه‌ها برای حفاری در محیط‌های خاکی شده است، توانایی آنها در مهار تغییر شکل محیط اطراف تونل است (شیبانی و همکاران، ۱۳۹۱).

۴-۳-۲- ماشین‌های دوغابی

در ماسه‌های سست یا شن‌ها در حضور فراوان آب‌های زیرزمینی، نگهداری جبهه‌کاری با هوای فشرده

^۱ Soil Conditioning

مناسب نیست زیرا آبکشی باعث افزایش پایداری زمین نمی‌شود. در این حالت نگهداری با دوغاب مزایای زیادی دارد. سپرهای دوغابی در شرایط بسیار متغیر و پیچیده زمین و دارای آب فراوان به کار گرفته می‌شوند. این ماشین‌ها در زمین با شرایط خاک‌های شن و ماسه‌ای غیردانه‌ای تا ماسه‌های درشت دانه مناسب و برای زمین‌های دارای رس بسیار چسبنده که باعث مسدود شدن دریچه‌ها و افزایش گشتاور صفحه‌ی حفار می‌شوند، نامناسب می‌باشند (Willis, 2011).

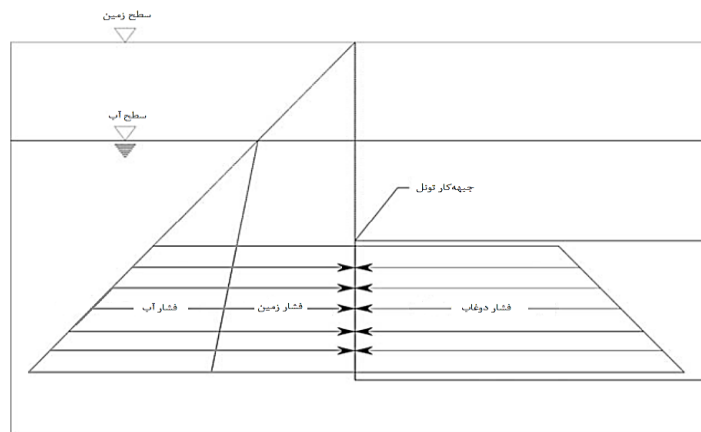
اصول کار در ماشین دوغابی از طریق پایداری جبهه‌کار توسط سیال (دوغاب) می‌باشد که در محفظه پشت کله‌ی حفار تزریق می‌شود. نوع دوغاب با توجه به نوع زمین عموماً یک سوسپانسیون^۱ متشکل از آب و کانی‌های رسی مانند بنتونیت^۲ و در صورت نیاز به همراه افزودنی‌ها^۳ است. بنتونیت خاصیت خمیری و تورم دارد و با توجه به ذرات جامدی که در آن وجود دارد باعث عایق‌بندی جبهه‌کار می‌شود. سیال تحت فشار در جبهه‌کار، باعث ایجاد یک پوشش نازک نفوذپذیر می‌شود که فشار مورد نیاز را در جهت نگهداری تأمین می‌کند.

صفحه‌ی حفار در این نوع ماشین‌ها معمولاً مسطح و تقریباً بسته به همراه منفذهای عبوری می‌باشد و ابزارهای برشی آن نیز شامل ناخن‌ها و دندانه‌های برش می‌شوند. با چرخش صفحه‌ی حفار، مواد کنده شده به محفظه پشت صفحه‌ی حفار ریخته شده و با سیال که با لوله به این قسمت پمپاژ می‌شود مخلوط می‌گردد. این دوغاب با فشار ایجاد شده از سوی پمپ در محفظه‌ی حفاری، فشار زمین و آب را متعادل می‌کند. دوغاب به همراه مصالح حفاری شده از طریق لوله دیگری به خارج از تونل منتقل شده و در تأسیسات جداسازی که معمولاً در سطح زمین واقع شده‌اند قرار می‌گیرند (شکل ۴-۸).

^۱ Suspension

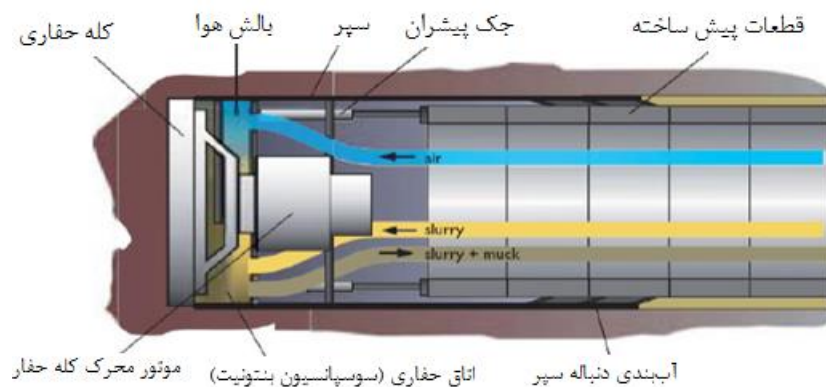
^۲ Bentonite

^۳ Additives

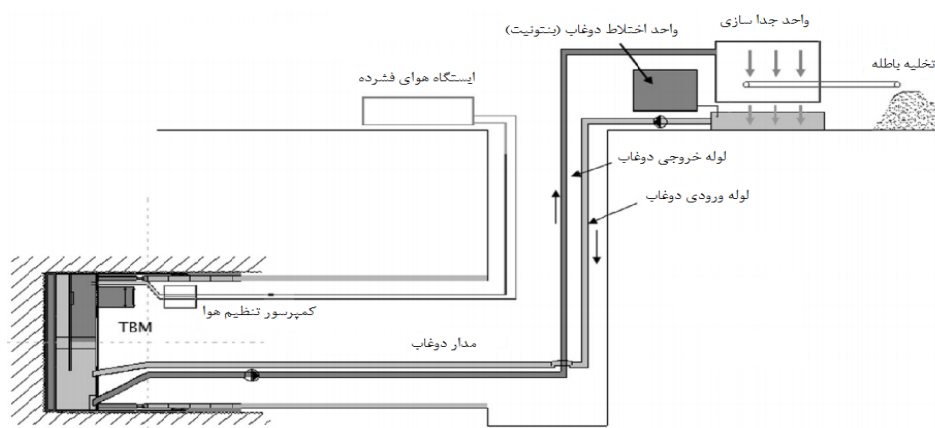


شکل ۴-۸: مهار فشار جبهه کار در ماشین دوغابی (Thewes, 2009)

در حوضچه‌های ویژه‌ای سیال حفاری از خاک جدا شده و پس از اضافه شدن بنتونیت جدید (در صورت نیاز) مجدداً با لوله به تونل پمپ شده و در جبهه کار تزریق می‌شود (شکل ۴-۹). در استفاده از TBM‌های نوع دوغابی باید فضایی در محوطه کارگاه جهت ته‌نشینی و جداسازی بنتونیت از مصالح حفاری در نظر گرفته شود که در این راستا باید خطرات زیست‌محیطی نیز مورد توجه قرار گیرد (شکل ۴-۱۰) (Maidl et al., 2014).



شکل ۴-۹: سیستم‌های داخلی ماشین‌های حفاری از نوع دوغابی (Thewes, 2009)



شکل ۴-۱۰: بازیابی مواد افزودنی در ماشین‌های دوغابی (Duhme et al., 2016)

۴-۳-۳- ماشین‌های ترکیبی

مواجه شدن با شرایط متغیر و پیش‌بینی نشده زمین در تونل‌سازی مناطق شهری سازندگان ماشین‌های حفاری (به خصوص در ژاپن) را برآن داشت تا ماشین‌ها با قابلیت‌ها و ویژگی‌های چندگانه بسازند. این ماشین‌ها از سوی شرکت‌های سازنده با عناوین مختلفی از جمله چندسپری^۱، سپر ترکیبی^۲ و میکس^۳ معرفی شده است. پرکاربردترین ماشین‌های ترکیبی مزایای سپرهای دوغابی و تعادلی را با هم دارا می‌باشند، به این صورت که قابلیت استفاده همزمان به دو صورت متعادل کننده فشار زمین و دوغابی را دارند. لازم به یادآوری است که Mix Shield یک نام تجاری است که توسط شرکت هرکنکشت^۴ ارائه شده است و در آنها قابلیت تعادلی فشار زمین به ماشین‌های دوغابی اضافه شده است (شکل ۴-۱۱). بعضی از سازندگان نیز ترکیب ماشین‌های شبه سنگ سخت را که در آنها نقاله مارپیچ به همراه نقاله نواری و یا بدون آن استفاده شده است را در این گروه قرار می‌دهند. با توجه به گسترش این ماشین‌ها و استقبال از آنها در ساخت تونل‌های شهری بعضی از سازندگان، این‌گونه ماشین‌های حفاری را به عنوان

^۱ Poly Shield

^۲ Combined Shield

^۳ Mix Shield

^۴ Herrenknecht

نوع سوم ماشین‌های حفاری زمین نرم^۱ مدنظر قرار می‌دهند.



شکل ۴-۱۱: ماشین‌های ترکیبی با قطر ۱۴/۲ و ۱۵/۶ متر (Maidl et al., 2013)

معمولاً ماشین‌های حفاری مکانیزه تمام مقطع به صورت استوانه‌ای با مقطع دایره طراحی می‌شوند ولی به لطف پیشرفت‌های جدید در تکنولوژی سپرهای ترکیبی و چند سپره به ویژه در ژاپن، ماشین‌های حفاری مکانیزه با سطح مقطع مستطیل و بیضی و چندقلوئی با چند کله حفار و کله حفار چرخشی نیز ساخته شده‌اند. از این ماشین‌ها به عنوان سپرهای یونیورسال نیز یاد می‌شود که ساخت آنها متأثر از پیشرفت‌های اخیر تکنولوژی سیستم محرکه و یاتاقان می‌باشد. در چنین پروژه‌هایی هزینه‌های سرمایه‌گذاری، کاربری و مشخصات تونل به جهت مقرون به صرفه بودن باید در نظر گرفته شود. به طور کلی محدوده‌ی کاربری ماشین‌های حفاری مکانیزه بخصوص ماشین‌های مجهز به سامانه‌ی دوغابی و فشار تعادلی زمین به شدت افزایش یافته است، هرچند بعضی از پروژه‌ها بر خلاف انتظار با موفقیت کم‌تری روبرو شده است که این موضوع نیازمند شناخت بیشتر به جنبه‌های مختلف ماشین‌های حفاری زمین نرم دارد (Thewes, 2007).

۴-۴- پارامترهای تأثیرگذار در انتخاب ماشین حفاری مکانیزه

با مطالعات صورت گرفته، پارامترهای مؤثر بر انتخاب ماشین حفاری مکانیزه در محیط‌های خاکی به صورت شاخص‌های اصلی زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی (ساختگاهی)، هندسی، زیست‌محیطی، انسانی و هزینه‌ای تقسیم‌بندی شده است. هر کدام از این شاخص‌های اصلی دارای زیرمعیارهایی است که در

^۱ Soft Ground

ادامه آمده است.

۴-۴-۱- پارامترهای زمین شناسی و ژئوتکنیک (ساختگاهی)

از مهم‌ترین پارامترهای تأثیرگذار در انتخاب و عملکرد ماشین حفاری مکانیزه می‌تواند به پارامترهای ساختگاه پروژه اشاره کرد. محدوده‌ی این پارامترها بر اساس استانداردها و توصیه‌نامه‌های مختلف برای انتخاب ماشین حفاری مکانیزه آورده شده است.

۴-۴-۱-۱- توزیع اندازه ذرات

بر اساس استاندارد انگلیسی محدوده کاربرد ماشین‌های حفاری مختلف در توزیع ذرات با ابعاد مختلف در شکل ۴-۱۲ ارائه شده است. اگر مقدار ذرات کوچکتر از $0/06$ میلی‌متر (یا دارای قابلیت عبور از مش 200) بیشتر از 20 درصد باشد، استفاده از ماشین Slurry زیر سؤال می‌رود، بنابراین در این محدوده از توزیع ذرات ریزدانه کاربرد ندارد. در این شرایط جدا کردن مواد حفر شده از سیال تزریقی بسیار دشوار است. ماشین EPB زمانی که زمین سیلتی است و درصد بالایی از ذرات کوچکتر از $0/06$ میلی‌متر دارد عملکرد بهتری دارد. زمین سیلتی و وجود ذرات کوچکتر از $0/06$ میلی‌متر جریان آب زیرزمینی را کنترل کرده و به تشکیل مواد قابل حمل روی نوار نقاله کمک می‌کند. ممکن است وجود کمتر از 10 درصد از ذرات کوچکتر از $0/06$ میلی‌متر برای عملکرد ماشین EPB مطلوب نباشد.

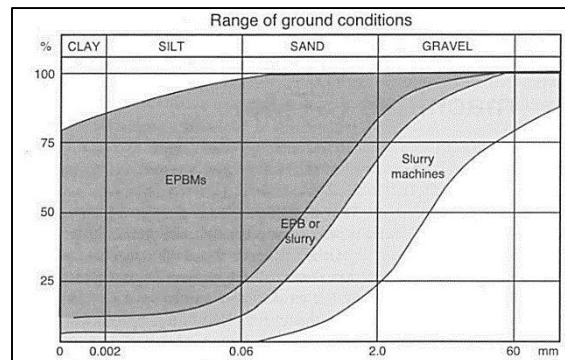
برای یک ماشین EPB مواجه شدن با زمینی دارای درجه کمی از ذرات ریزدانه باعث بالا رفتن هزینه مربوط به استفاده از سیالات بهسازی زمین می‌شود و ممکن است در بیشتر موارد، ناچار به استفاده از دستگاه‌های جابجایی مثبت^۱ مانند پیستون‌های تخلیه یا فیدرهای چرخنده در محل نوار نقاله برای نگه داشتن فشار EPB می‌شوند (Maidl et al., 2014).

بر اساس توصیه‌ی لووت^۲ (۲۰۰۶) در ابعاد ذرات کمتر از $0/06$ میلی‌متر نیز استفاده از EPB پیشنهاد شده است. به طور سنتی از ماشین‌های EPB برای ذرات ریزتر و از ماشین Slurry برای خاک‌هایی با

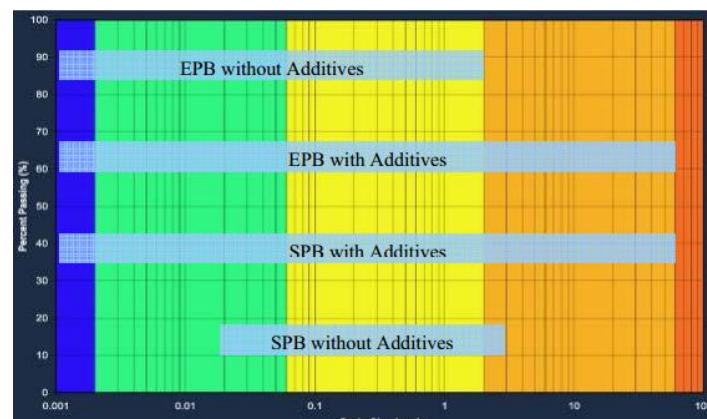
^۱ Positive displacement

^۲ Lovat

ذرات درشت‌تر استفاده می‌شود. در سالهای اخیر پیشرفت در ساخت مواد افزونه و همچنین سیستم‌های تزریق آنها به هر دو نوع ماشین امکان حفاری طول‌های کوتاهی از انواع خاک را فراهم کرده است. در شکل کاربرد بهینه ماشین‌های حفاری فشار تعادلی زمین و دوغابی در محدوده مختلف ذرات با ابعاد مختلف بر اساس استاندارد لووت ارائه شده است (شکل ۴-۱۳) (Lovat, 2006).



شکل ۴-۱۲: محدوده بهینه عملکرد ماشین‌های حفاری بر اساس توزیع ذرات با ابعاد مختلف در زمین‌های نرم (Telford, 2004)



شکل ۴-۱۳: مقایسه محدوده کاربرد ماشین‌های EPB و Slurry بر اساس ابعاد ذرات (Lovat, 2006)

انجمن تونل آلمان نیز در استاندارد DAUB محدوده بهینه عملکرد ماشین‌های EPB و Slurry بر اساس توزیع ابعاد ذرات کوچکتر از ۰/۰۶ میلی‌متر را ارائه کرده است (جدول ۴-۳). بر اساس این استاندارد، هر دو نوع ماشین کاربرد وسیعی در حضور درصدهای مختلف مواد ریزدانه دارند. تنها عملکرد بحرانی به ازای مقدار کمتر از ۵ درصد مواد کوچکتر از ۰/۰۶ میلی‌متر برای ماشین EPB است (Maidl et al., 2014).

در مورد استفاده از ماشین‌های تونل زنی با سپر ترکیبی این نکته قابل ذکر است که کاربرد اصلی

این نوع ماشین در زمین‌های ماسه‌ای و گراولی است که محدوده ابعاد بزرگتر از ۰/۰۶ میلی‌متر دارند. بنابراین اگر زمین دارای درصدی از ابعاد ریزدانه باشد کاربرد ماشین سپر ترکیبی توصیه نمی‌شود (Maidl et al., 2013).

جدول ۳-۴: محدوده کاربرد انواع ماشین حفاری بر اساس توزیع ابعاد ذرات کوچکتر از ۰/۰۶ میلی‌متر (Maidl et al., 2014)

محدوده کاربرد				پارامتر ژئوتکنیکی
< ۴۰٪	۱۵-۴۰٪	۵-۱۵٪	> ۵٪	ابعاد > ۰/۰۶ میلی‌متر
+	+	+	o	ماشین حفاری Slurry
+	+	o	o	ماشین حفاری EPB

+ : اصلی‌ترین زمینه کاربرد o : ممکن است، - : کاربرد بحرانی

۴-۱-۲- نفوذپذیری

نفوذپذیری از مهم‌ترین پارامترهای خاک است که نقش تعیین کننده‌ای در انتخاب نوع ماشین حفاری دارد. بر اساس استاندارد DAUB استفاده از انواع ماشین‌های EPB و Slurry در مقادیر بالای نفوذپذیری بحرانی خواهد بود. بنابراین، در مواردی که میزان نفوذپذیری خاک بیش از 10^{-2} (m/s) باشد، استفاده از ماشین‌های حفاری ترکیبی با قابلیت مواجهه با چنین شرایطی پیشنهاد شده است. در جدول ۴-۴ پیشنهاد عملکرد ماشین‌های EPB و Slurry در محدوده‌های مختلف نفوذپذیری زمین ارائه شده است (Maidl et al., 2014).

همچنین در استاندارد انگلیسی انتخاب ماشین حفاری بر اساس پارامتر نفوذپذیری خاک، مقدار نفوذپذیری 10^{-5} به عنوان مرجع انتخاب و پیشنهاد شده است که در زمین‌هایی با نفوذپذیری بیشتر از 10^{-5} از ماشین Slurry و در زمین‌هایی با نفوذپذیری کمتر از این مقدار EPB استفاده شود. اگر چه ماشین‌های EPB با به کار گرفتن فوم‌ها در بخش Plenum می‌توانند در زمین‌هایی با نفوذپذیری بالاتر از 10^{-5} نیز کاربرد داشته باشند.

جدول ۴-۴: محدوده کاربرد انواع ماشین حفاری بر اساس نفوذپذیری (DAUB) (Maidl et al., 2014)

محدوده کاربرد				پارامتر ژئوتکنیکی
$10^{-6} <$	$10^{-4}-10^{-6}$	$10^{-2}-10^{-4}$	$10^{-2} <$	نفوذ پذیری (m/s)
(پایین)	(نفوذپذیر)	(بالا)	(خیلی بالا)	
0	+	0	-	ماشین حفاری (Slurry)
+	0	-	-	ماشین حفاری (EPB)

+ : اصلی ترین زمینه کاربرد 0 : ممکن است، - : کاربرد بحرانی

۴-۱-۳- شاخص دوام

شاخص دوام به عنوان نسبت اختلاف بین محدوده مایع و آب محتوای طبیعی و شاخص پلاستیک تعریف می شود (رابطه ((۱-۴)) (Venkatramaiah, 2006):

$$I_c = (LL - W) / PI \quad (1-4)$$

در رابطه ی فوق I_c شاخص دوام، LL حد مایع، W رطوبت طبیعی و PI نشانه ی خمیری است.

بر اساس بل^۱ (۲۰۰۰) شش دسته بندی خاک با توجه به شاخص دوام خاک های چسبنده در جدول ۴-۵ ارائه شده است.

جدول ۴-۵: طبقه بندی خاک های چسبنده (Bell, 2000)

دوام	شاخص دوام (I_c)
خیلی سفت تا سخت	> 1
سفت	$0.75 - 1$
متوسط	$0.5 - 0.75$
نرم	$0.25 - 0.5$
خیلی نرم	$0 - 0.25$
مایع	< 0

^۱ Bell

برای انتخاب ماشین حفاری با توجه به پارامتر شاخص دوام، باید بر اساس کارآیی هر یک از این ماشین‌ها در شرایط مختلف خاک از لحاظ شاخص دوام تصمیم‌گیری صورت گیرد. بر این اساس مطابق پیشنهاد استاندارد DAUB که در جدول ارائه شده است، ماشین EPB گستره کاربرد وسیع‌تری دارد. همچنین در خاک‌هایی با شاخص دوام بین ۰ تا ۰/۵ کاربرد ماشین Slurry بحرانی خواهد بود (جدول ۴-۶) (Maidl et al., 2014).

جدول ۴-۶: محدوده کاربرد انواع ماشین حفاری بر اساس شاخص دوام خاک (Maidl et al., 2014)

پارامتر ژئوتکنیکی					محدوده کاربرد						
شاخص دوام		۰-۰/۵ (خمیری)		۰/۵-۰/۷۵ (نرم)		۰/۷۵-۱ (سفت)		۱-۱/۲۵ (نیمه جامد)		۱/۲۵-۱/۵ (سخت)	
ماشین حفاری Slurry		-		0		0		0		0	
ماشین حفاری EPB		0		+		+		0		0	

+ : اصلی‌ترین زمینه کاربرد 0 : ممکن است، - : کاربرد بحرانی

۴-۱-۴-۴- فشار جبهه کار و فشار هیدرواستاتیک

سطح آب زیرزمینی و فشار هیدرواستاتیک ناشی از آن در طول مسیر تونل، نگرانی قابل توجهی را برای انتخاب ماشین حفاری اضافه می‌کند. در شرایطی که ارتفاع سطح هیدرواستاتیک با نفوذپذیری بالا یا شکاف‌هایی ترکیب شود، ممکن است حالتی مشکل‌ساز و گیرکردن نوار نقاله برای EPB ایجاد کند. بر اساس پیشنهاد استاندارد انگلیسی، تحت چنین شرایطی، یک ماشین Slurry ممکن است بهترین انتخاب باشد، به ویژه اگر از بنتونیت برای سیال تزریقی با هدف آب‌بندی جبهه کار استفاده شود. اما اگر فشار هیدرواستاتیک بسیار بالا باشد، با توجه به قابلیت ماشین‌های حفاری با سپر ترکیبی ساخته شده توسط شرکت هرکنشت، استفاده از سپرهای ترکیبی با قابلیت تحمل بیش از ۱۵bar پیشنهاد شده است.

بر این اساس مطابق استاندارد DAUB محدوده عملکرد بهینه دو نوع ماشین در جدول ۷-۴ ارائه شده است. بر اساس پیشنهاد ITA نیز در زمین‌هایی با فشار آب زیرزمینی بالا استفاده از ماشین حفاری Slurry کارایی بهتری دارد.

جدول ۷-۴: محدوده کاربرد انواع ماشین حفاری بر اساس فشار جبهه کار (DAUB) (Hollmann and Thewes, 2013)

محدوده کاربرد					پارامتر ژئوتکنیکی
۳-۴	۲-۳	۱-۲	۰-۱	۰	فشار جبهه کار (bar)
+	+	+	+	o	ماشین حفاری Slurry
-	o	+	+	+	ماشین حفاری EPB

+ : اصلی‌ترین زمینه کاربرد o : ممکن است، - : کاربرد بحرانی

۴-۱-۵- رفتار تورمی

زمین‌های دارای خاک‌های زیردانه چسبنده که در اثر جذب آب متورم می‌شوند، زمین‌های متورم شونده می‌نامند (Chen, 2012). این رفتار اغلب در رس‌های بیش تحکیم یافته یا محتوای رسی تشکیل دهنده کانی‌های رسی قابلیت وقوع دارد. بر اساس استاندارد انگلیسی، هر دو نوع ماشین‌های حفاری EPB و Slurry ممکن است در زمین‌های دارای رفتار متورم شونده کاربردی باشند. اما آنچه که در استاندارد DAUB پیشنهاد شده است، بیان کننده عدم کارایی این ماشین‌ها در مواجهه با زمین‌های دارای حد متوسط به بالا متورم شوندگی است (جدول ۸-۴) (Maidl et al., 2013; Telford, 2004). جدول ۸-۴: محدوده کاربرد انواع ماشین حفاری بر اساس قابلیت رفتار متورم شوندگی خاک (Maidl et al., 2014)

محدوده کاربرد				پارامتر ژئوتکنیکی
بالا	متوسط	جزئی	ندارد	قابلیت رفتار متورم شوندگی
-	o	+	+	ماشین حفاری Slurry
-	o	+	+	ماشین حفاری EPB

+ : اصلی‌ترین زمینه کاربرد o : ممکن است، - : کاربرد بحرانی

۴-۴-۱-۶- حضور تخته سنگ

تخته سنگ‌ها به طور تصادفی در زمین پراکنده شده‌اند که شناسایی آنها با استفاده از روش‌های سنتی دشوار است. روبرو شدن با تخته سنگ، در ابعاد مختلف، در مسیر پیش روی ماشین حفاری نیز بسیار غافل گیر کننده است. بنابراین، تجهیز ماشین حفاری با ابزارهایی به منظور مواجهه با این عامل پیش‌بینی شده و یا غیرمنتظره بسیار مهم است. کله حفار ماشین EPB قابلیت شکستن تخته سنگ‌ها با اندازه‌هایی مناسب برای انتقال توسط نوار نقاله را دارد. در ماشین‌های Slurry سنگ شکن‌های قدرتمندی کنار لوله تزریق سیال برای کاهش ابعاد تخته سنگ‌ها نصب شده است تا بتواند ابعاد سنگ‌ها را تا حدی که به وسیله‌ی پمپ قابل انتقال باشند، کاهش دهد. به منظور مواجهه با این عامل، رعایت ملاحظات هم‌چون تجهیز کله حفار در ماشین‌های اسلاری، نصب سنگ شکن، توسعه نوار نقاله ماشین حفاری EPB و مواردی از این قبیل ضرورت دارد (Telford, 2004). بنابراین در زمین‌هایی با احتمال مواجهه با تخته سنگ، استفاده از ماشین EPB تجهیز شده، از آن جهت که تجهیز ماشین Slurry به سنگ شکن و اصلاح کله حفار آن هزینه‌ی بالاتری را در بر دارد، کاربردی‌تر است.

۴-۴-۱-۷- جبهه کار ترکیبی

سخت‌ترین شرایط برای تونل‌سازی با استفاده از ماشین‌های حفاری تمام مقطع، مواجهه با انواع مختلف زمین چه در طول تونل به صورت ناحیه‌ای و در بعضی مواقع در هر متر از طول تونل و چه وجود جنس‌های مختلف در یک جبهه کار است. به طور ایده‌آل به منظور دوری از شرایط جبهه کار ترکیبی تا حد امکان بهینه کردن تراز قائم می‌تواند کارساز باشد. اگر چه در تونل‌سازی مناطق شهری تعیین این تراز قائم ممکن است تحت تأثیر ملاحظات دیگری قرار بگیرد.

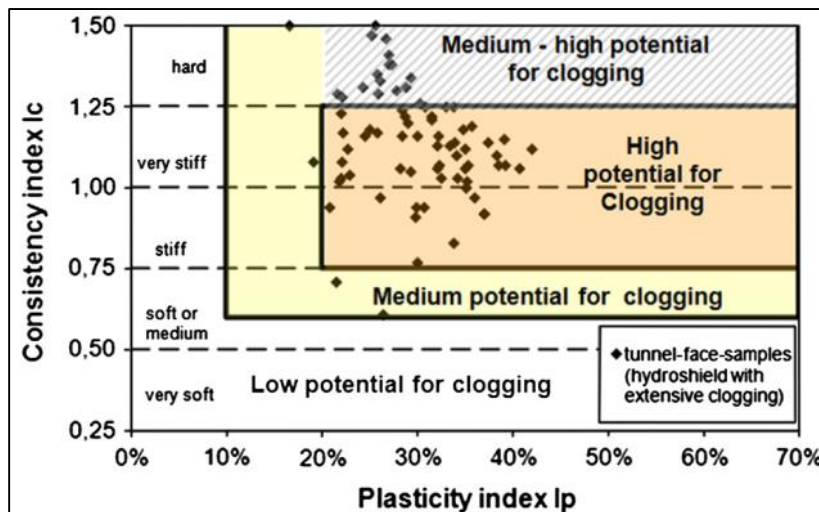
برای تغییرات نوع زمین در طول تونل، ماشین حفاری ممکن است به اجبار به حالت EPB و یا به حالت باز و بدون فشار به منظور جلوگیری از تحت تنش قرار گرفتن بیش از حد ماشین زمانی که با زمین‌های سخت‌تر مواجه می‌شود، تغییر حالت بدهد. چنین تغییراتی ممکن است نیازمند ارتقاء ماشین حفاری است.

در مورد زمین‌های ترکیبی در یک جبهه‌کار، ماشین حفاری اکثر اوقات مجبور خواهد بود در حالتی آسیب‌پذیر عمل کند. از جمله مسائل رایج به عنوان مثال می‌توان به مواجه شدن با مواد سخت در کف و مواد روان‌شونده در بالای جبهه‌کار اشاره کرد. در این موارد ماشین حفاری، تا حفاری زمین سخت پیشروی آرامی دارد، که ممکن است تمایل به روان شدن مواد ناپایدار بالای جبهه‌کار، منجر به اضافه حفاری در ناحیه مربوط به مواد روان‌شونده و در نتیجه آن نشست در سطح شود. وجود انواع مختلف زمین در بالای تونل نیز قابل اهمیت خواهد بود. به عنوان مثال، در مواقعی که بیش حفاری صورت می‌گیرد، درصدی از مواد روان‌شونده در افق بالای تونل پتانسیل زمین را برای فرونشست افزایش داده و دوباره منجر به نشست خواهد شد. مشکلی دیگر در این زمینه را می‌توان زمانی بیان کرد که یک لایه مقاوم بالاتر از زمین دارای پتانسیل روان شوندگی در مواقعی که وقوع اضافه حفاری در بالای تونل و زیر مواد مقاوم، موجب به افزایش پتانسیل ناپایداری دراز مدت شود (Das, 2013; Maidl et al., 2014).

۴-۱-۸-۴ گل گرفتگی

قابلیت رس در توسعه رفتار چسبندگی که نتیجه آن گل گرفتگی است وابسته به تعداد پارامترهایی از قبیل نوع خاک، توزیع ابعاد ذرات، نوع کانی رسی، پلاستیسیته خاک، آب محتوی و درصد آب که داشتن اطلاعاتی از این پارامترها به دلیل بالا بردن ریسک گل گرفتگی ماشین حفاری بسیار حائز اهمیت است (Hollmann and Thewes, 2013). نمودار پتانسیل وقوع گل گرفتگی برای ماشین حفاری Slurry به ازای دو پارامتر شاخص دوام و شاخص پلاستیسیته خاک در شکل ارائه شده است. بر این اساس به ازای پلاستیسیته و شاخص دوام بالا پتانسیل وقوع گل گرفتگی بسیار بالا است (شکل ۴-۱۴).

در مورد ماشین‌های حفاری EPB نیز احتمال وقوع گل گرفتگی ابزار برش و یا نوارنقاله طی تونل‌زنی و انتقال مواد وجود دارد. این اتفاق سبب بروز مشکلات بزرگی در انتقال و بازیابی یا انباشتن، صرف انرژی زیاد، پس‌زدگی یا شکسته شدن ابزار برش، گل گرفتگی نوارنقاله، مشکل در پایداری طی بازیابی ناشی از مقاومت برشی پایین‌تر مواد حفاری شده و غیره می‌شود.



شکل ۴-۱۴: نمودار پتانسیل وقوع گل گرفتگی ارائه شده برای ماشین Slurry (Hollmann and Thewes, 2013)

۴-۱-۹- چگالی

از دیگر پارامترهای خاک که بر انتخاب نوع ماشین حفاری بسیار تأثیر گذار است، وزن مخصوص خاک است. در استاندارد DAUB سه محدوده خاک با تراکم کم، نسبتاً متراکم و خاک با تراکم بالا برای تعیین عملکرد مناسب هر یک از انواع ماشین‌های حفاری ارائه شده است.

جدول ۴-۹: محدوده کاربرد انواع ماشین حفاری بر اساس وزن مخصوص خاک (Maidl et al., 2014)

محدوده کاربرد			پارامتر ژئوتکنیکی
بالا	نسبتاً متراکم	کم	حد تراکم
+	+	O	ماشین حفاری Slurry
+	+	+	ماشین حفاری EPB

+ : اصلی‌ترین زمینه کاربرد O : ممکن است، - : کاربرد بحرانی

بر اساس این دسته بندی، عملکرد بهینه ماشین حفاری EPB را می‌توان در تمام محدوده تراکم خاک مشاهده کرد. این در حالی است که برای به کار بردن ماشین حفاری Slurry در خاک‌هایی با تراکم پایین مستلزم رعایت ملاحظات است. در جدول ۴-۹، محدوده تراکم خاک و عملکرد ماشین‌های

حفاری EPB و Slurry مطابق استاندارد DAUB ارائه است (Guglielmetti et al., 2008; Maidl et al., 2013).

۴-۴-۱۰- زاویه اصطکاک داخلی

مقاومت خاک معمولاً بر اساس رابطه موهر-کلمب که در زیر ارائه شده است شناخته می‌شود:

$$\tau_{ff} = c + \sigma_{ff} \times \tan \varphi \quad (۲-۴)$$

که در آن τ_{ff} مقاومت برشی، C چسبندگی، σ_{ff} مقاومت نرمال و φ زاویه اصطکاک داخلی است. زاویه اصطکاک ذرات تشکیل دهنده یکی از پارامترهای تعیین کننده مقاومت خاک است که باعث افزایش سختی سطح ذرات می‌شود. تعیین این پارامتر که با استفاده از آزمون‌های آزمایشگاهی صورت می‌گیرد، نقش مهمی در تعیین میزان مواد افزودنی مورد نیاز با هدف کاهش مقاومت برشی و در نتیجه آن حفر پذیری و افزایش قابلیت انتقال است (Peña Duarte, 2007).

۴-۴-۱۱- چسبندگی

بر اساس استاندارد DIN ۱۰۵۴ خاک‌ها به دو گروه چسبنده و غیر چسبنده تقسیم شده‌اند. در خاک‌های غیر چسبنده کانی‌های منفرد یا قطعات سنگی در کنار یکدیگر و تنها تحت تأثیر اصطکاک ذرات قرار می‌گیرند. بیشتر خصوصیات این نوع خاک متأثر از ابعاد ذرات، توزیع ذرات با ابعاد مختلف، شکل دانه‌ها و زاویه دانه‌ها است. طبق DIN ۱۰۵۴ خاک‌های غیر چسبنده شامل ماسه، شن، کوبلر و ترکیبی از آنها زمانی که وزن ذرات کوچکتر از ۰/۰۶ میلی‌متر کمتر از ۱۵ درصد باشد و همچنین خاک با دانه‌های ترکیبی حاوی ۵ تا ۱۵ درصد ذرات با ابعاد کوچکتر از ۰/۰۶ میلی‌متر می‌باشد (Maidl et al., 2013).

در خاک‌های چسبنده کانی‌ها یا مواد در اثر اعمال نیروهای الکترواستاتیک سطحی به یکدیگر چسبیده و یک توده چسبنده را شکل می‌دهند. خصوصیات در این نوع خاک‌ها به میزان آب محتوی، ابعاد ذرات و محتوای کانی‌های رسی بستگی دارند. بر اساس DIN 1054 دسته خاک‌های چسبنده شامل

رس، سیلت رسی و سیلت و ترکیب آنها، خاک‌های غیرچسبنده با محتوای بیش از ۴۰ درصد ذرات کوچکتر از ۰/۰۶ میلی‌متر می‌شود.

ماشین‌هایی EPB دارای قابلیت پیشروی و عملکرد بالایی در زمین‌های دارای چسبندگی و حاوی مقادیر بالای رس و سیلت می‌باشند. در حالی که هدف استفاده از ماشین‌های Slurry، مواجهه با زمین‌های غیر چسبنده و دانه‌ای است (Guglielmetti et al., 2008).

۴-۱-۱۲- شرایط آب زیرزمینی

درصد آب زیرزمینی یکی از پارامترهای مهمی است که خصوصیات خاک را تحت تأثیر قرار می‌دهد. اگر سطح آب زیرزمینی در تراز تونل و یا بالاتر از آن قرار داشته باشد، فرآیند تونل‌سازی در مراحل طراحی و اجرا به مقدار آب زیرزمینی وابسته است. بررسی آب زیرزمینی از هر دو دیدگاه فنی و زیست‌محیطی قابل اهمیت است. مطالعه آب‌های زیرزمینی از دیدگاه زیست محیطی در درجه اول برای تعیین وضعیت واقعی منابع آب و در درجه دوم برای ارزیابی تخریب احتمالی ناشی از حفاری تونل ضرورت دارد. تجزیه و تحلیل فنی آب‌های زیرزمینی شامل بررسی ویژگی‌های ذاتی خاک، یعنی مطالعه سفره‌های متخلخل آب زیرزمینی از نظر نفوذپذیری، نوع تخلخل و قابلیت انتقال آب به مناطق اشباع است (Guglielmetti et al., 2008).

۴-۲-۴- پارامترهای هندسی تونل

پارامترهای سازه‌ی تونل تأثیر قابل توجهی در انتخاب نوع و ویژگی‌های ماشین حفاری مکانیزه تمام مقطع دارد. این پارامترهای هندسی به شرح زیر هستند.

۴-۲-۱- قطر تونل

قطر تونل یکی از پارامترهای محدود کننده عملکرد ماشین‌های حفاری است. افزایش قطر تونل نیاز به استفاده از ماشین‌هایی با قابلیت حفاری قطر بالا هست. هر چه قطر تونل بیشتر باشد، نیاز به نیروی

گشتاور کله حفاری بیشتر و توان بالاتر نیروی محرکه بخش چرخنده^۱ دارد که می‌تواند برای ماشین حفاری محدودیت ایجاد کند. همچنین هر چه قطر حفاری بیشتر باشد احتمال مواجهه با جبهه‌کار ترکیبی و شرایط پیچیده آن افزایش می‌یابد. بر اساس پیشنهاد شرکت هرکنشت^۲ ماشین‌های حفاری EPB در تونل‌هایی با قطر ۱/۷ متر تا ۱۶ متر کاربرد دارند. محدوده عملکرد ماشین حفاری Slurry نیز در تونل‌هایی با قطر تا بیش از ۱۵ متر عملکرد خوبی دارند. در این بین برای دستیابی به قطر بالاتر از ۱۶ متر ماشین‌های Mix shield با قابلیت حفاری ۴/۸ تا ۱۹ متر پیشنهاد شده است (Maidl et al., 2013).

۴-۲-۲- طول تونل

از خصوصیات بسیار راهبردی تونل، طول تونل است که از جنبه‌های مختلف ژئومکانیکی و اقتصادی می‌تواند عملکرد ماشین حفاری را با محدودیت‌های جدی مواجه کند. از دید ژئومکانیکی، با افزایش طول تونل امکان برخورد با نواحی دارای شرایط ژئومکانیکی و هیدروژئولوژی مختلف افزایش می‌یابد. در این صورت اگر حفر کل تونل با یک ماشین حفر انجام شود، با افزایش احتمال برخورد با نواحی مختلف استفاده از ماشین‌های حفاری با سپر ترکیبی اجتناب ناپذیر است که هزینه‌های بالا و زمان بالای تعویض حالت می‌تواند پروژه را با مشکل مواجه کند. این در حالی است که با تقسیم تونل به بخش‌هایی با یک نوع ساختاری و حتی استفاده از دو ماشین مختلف عملکرد بهتری را برای پروژه به دنبال خواهد داشت (Moncrieff and Rona Consulting, 2012).

۴-۲-۳- شعاع قوس تونل

از جمله محدودیت‌های تونل‌سازی مکانیزه در نواحی شهری، امکان برخورد با موانعی مانند زیرساخت‌های شهری، عبور از مناطق تاریخی، نزدیک شدن به سازه‌های حساس به نشست مانند پل، برج و یا تونل‌های از قبل موجود است که رعایت عمق‌های به حد کافی ایمن را در طراحی مسیر تونل

^۱ Main bearing

^۲ Herrenknecht

تحمیل می‌کند. به این منظور تراز تونل با رعایت یه قوس مشخص به عمق مورد نظر که حداقل می‌بایست ۱/۵ تا ۲ برابر قطر حفاری باشد می‌رسد (Guo et al., 2014). شعاع قوس و در نتیجه آن شیب (به طور معمول ۳ درصد و در مواقع خاص ۵ تا ۶ درصد) ایجاد شده در مسیر تونل می‌تواند برای ماشین حفاری محدودیت‌های راهبردی و عملکردی را ایجاد کند (Guglielmetti et al., 2008; Hung et al., 2009). تغییر شرایط خاک، تغییر فشار هیدرواستاتیک، اعمال نیروهای پیشران و گشتاور خارج از محور اصلی و افزایش احتمال ساییدگی کله حفار را برای ماشین حفاری در پی خواهد داشت.

۴-۳-۴ پارامترهای زیست محیطی، انسانی و هزینه‌ای

امروزه تونل‌سازی در شهرها با محدودیت‌های قابل توجهی مواجه است. این محدودیت‌ها خود را در پارامترهای زیست محیطی، انسانی و هزینه‌ای نشان می‌دهند. از این روش در این بخش به بررسی این پارامترها اقدام شده است.

۴-۳-۴-۱ نشست سطح زمین

ماشین‌های حفاری دوغابی و متعادل کننده‌ی فشار زمین در کنترل جابجایی زمین و نشست سطحی قابلیت‌های بالایی دارند. بر اساس پیشنهاد استاندارد انگلیسی، اگر چه ممکن است کنترل نشست معیار مهمی در انتخاب نوع ماشین حفاری نباشد، اما می‌بایست هزینه‌های مربوط به کمینه کردن نشست در نظر گرفته شود. به عنوان مثال، در صورت استفاده از EPB در خاک‌های دانه‌ای با سیمان‌شدگی ضعیف ممکن است مقدار زیادی مواد افزودنی برای بهسازی زمین، کاهش خطر اضافه حفاری و کنترل نشست مورد نیاز باشد (Telford, 2004).

۴-۳-۴-۲ حضور گاز

زمین‌های گازدار به عنوان یک شرایط زمین شناختی نامطلوب همیشه محیط خطرناکی در پروژه‌های حفاری زیرزمینی بوده که جریان گاز می‌تواند فعالیت‌های کاری طبیعی را مختل کند. گازهای موجود در زمین ممکن است در حفاری با هوا مخلوط شوند و شرایط مستعد انفجار، فضای سمی یا اشباع شده

تولید کنند. وجود گاز بیش از حد مجاز در محل حفاری می‌تواند سلامت پرسنل و ایمنی پروژه را با خطر مواجه کند. بیشتر حوادث و زیان‌های مالی مربوط به گاز، نتیجه خطاهای اندازه‌گیری و نگهداری ابزارهای اندازه‌گیری است. این امر ناشی از عدم آگاهی از ماهیت گازهای زیرزمینی است (Doyle, 2001). بنابراین شناخت طبیعت گاز یک کار اساسی است و با اندازه‌گیری‌های کنترلی قابل اطمینان‌تر، می‌تواند حفاری‌ها را امن‌تر سازد. به‌طور ویژه، در مناطق شهری، خطر برخورد با تجمعات گازی ناشی از نشت مخازن یا شکست لوله‌های انتقال گاز وجود دارد. بنابراین نصب حس‌گرهای تشخیص انواع گازهای CH_4 ، CO ، O_2 و SO_x بر روی ماشین‌های حفاری مکانیزه تونل‌های شهری بسیار ضروری است (شکل ۴-۱۵).



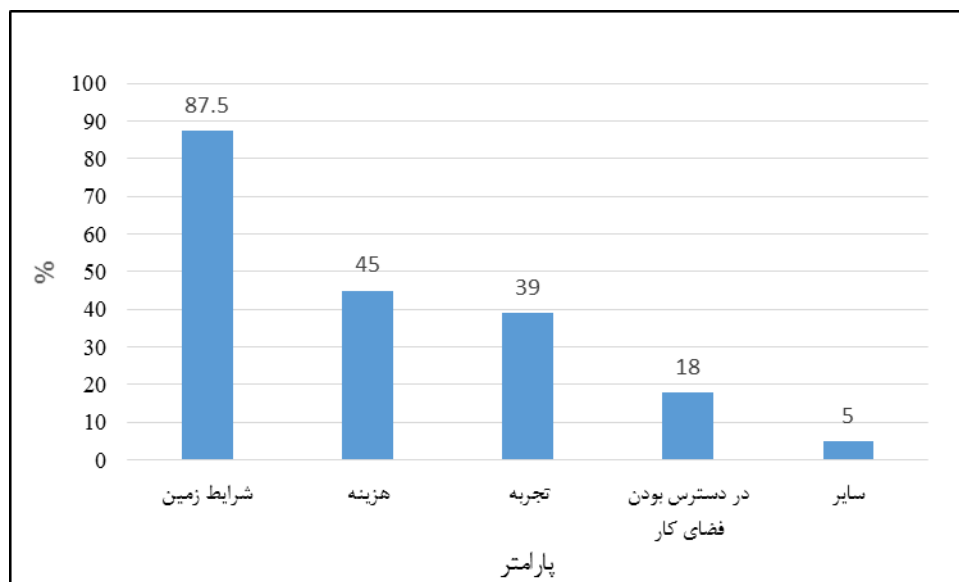
شکل ۴-۱۵: حس‌گر گاز متان نصب شده بر روی TBM (Guglielmetti et al., 2008)

به این ترتیب، برای انتخاب نوع ماشین حفاری و تجهیزات کمکی همواره باید درصد گاز طبیعی در مطالعات زمین‌شناسی مورد بررسی قرار گیرد. به عنوان مثال، رادون ($Rn-222$)، گاز بی اثر تولید شده از فرسایش رادیوایزوتوپ اورانیوم در سنگ است. گاز رادون را می‌توان به دلیل محلول بودن در آب بسیار دورتر از منبع تولیدش یافت. این گاز در آب زیرزمینی حل شده و از طریق شکستگی موجود در سنگ‌ها می‌گذرد و در مناطق کارستی متمرکز می‌شود. استنشاق رادون و عناصر تولید شده حاصل از آن برای مدت طولانی به میزان قابل توجهی خطر ابتلا به سرطان را افزایش می‌دهد. کنترل سطوح رادون با نصب دوزیمتر در TBM و در امتداد تونل ضروری است (Guglielmetti et al., 2008). همچنین در قطعه دوم تونل انتقال آب زاگرس که در نزدیکی مناطق نفت‌خیز و روی میدان‌های نفتی غرب کشور حفر شده است، وجود گازهای محبوس (عمدتاً متان) در توده سنگ‌های منطقه، مشکلات زیادی را برای

پروژه ایجاد کرده بود (حسن پور و شمسی، ۱۳۹۰).

۳-۳-۴-۴- تجربه ملی با هر روش

انتخاب ماشین حفاری برای یک پروژه علاوه بر اینکه مستلزم شناخت دقیق از شرایط محل حفاری است، از تجارب موفق پروژه‌های پیشین در شرایط مشابه نیز تأثیر می‌پذیرد. در مواردی که به کار بردن هر یک از ماشین‌ها امکان پذیر است، انتخاب نوع ماشین می‌تواند بر اساس تجربه مشخص شود. تجربه کار کردن با ماشین‌های مختلف امتیاز بزرگی است. به عنوان مثال در ماشین‌های Slurry سیالیت و چگالی مواد داخل محفظه چمبر به صورت اتوماتیک قابل اندازه‌گیری هستند، اما تعیین شرایط ماشین باید از قبل صورت گرفته باشد که این تعیین تکلیف، نیازمند تجربه بالا است. بر اساس بررسی‌های صورت گرفته توسط شرکت رابینز^۱ در سال ۲۰۱۱ تجربه در کارهای قبلی پس از شرایط خاک و هزینه، سومین پارامتر تأثیرگذار در انتخاب بین ماشین حفاری EPB و Slurry است (شکل ۴-۱۶) (Robbins company survey, 2011).



شکل ۴-۱۶: پارامترهای تأثیرگذار در انتخاب نوع ماشین حفاری (Robbins company survey, 2011)

^۱ Robbins company

۴-۳-۴-۴- در دسترس بودن مواد افزودنی و هزینه‌ی آن

استفاده از مواد افزودنی در ماشین‌های حفاری با هدف بهسازی شرایط محیط حفاری، مستلزم در دسترس بودن این مواد به مقدار کافی در محل پروژه است. در تونل‌سازی با استفاده از ماشین حفاری EPB جبهه کار تونل با استفاده از فشار ناشی از مواد حفاری شده از زمین نگهداری می‌شود و از نظر هزینه و دسترسی به مواد افزودنی کمترین محدودیت را نسب به ماشین حفاری Slurry و Mix shield دارد. در ماشین Slurry دوغاب مورد استفاده اغلب از نوع بنتونیت و آب است و در بعضی مواقع نیز از سایر مواد افزودنی استفاده می‌شود (Haghshenas et al., 2017). در صورت استفاده از ماشین‌های Slurry و Mix shield و عدم تأمین مواد افزودنی مورد نیاز، عملیات حفاری با تأخیر انجام خواهد شد.

۴-۳-۴-۵- تملک زمین

تونل‌سازی در مناطق شهری مستلزم رعایت ملاحظات مختلفی مانند ملاحظات زیست‌محیطی، حمل و نقل است. از مهم‌ترین محدودیت‌های تونل‌سازی در محیط‌های شهری می‌توان به کمبود فضای کار به دلیل عبور از مناطق مسکونی، تجاری و گذرگاه‌های اغلب پر ترافیک اشاره کرد. در تونل‌سازی با استفاده از ماشین‌های حفاری مکانیزه، فضای مورد نیاز برای احداث پرتال‌های ورودی تونل‌ها، نیاز به حفر چاه‌ها و یا تونل‌های دسترسی در بعضی مواقع از جمله مهم‌ترین مواردی هستند که به هنگام انتخاب ماشین باید مد نظر قرار بگیرند. بر اساس پیشنهاد استاندارد انگلیسی، در مواردی که استفاده از هر دو ماشین حفاری EPB و Slurry کاربردی باشد، استفاده از ماشین EPB به دلیل نیاز به فضای کمتر برای ورود به تونل پیشنهاد می‌شود (Telford, 2004).

۴-۳-۴-۶- هزینه‌ی سرمایه‌گذاری

هزینه سرمایه‌گذاری در تونل‌سازی مکانیزه پارامتری وابسته به چندین عامل است. هزینه خرید ماشین حفاری یکی از این عوامل است که بخش بزرگی از هزینه سرمایه‌گذاری را تشکیل می‌دهد. با توجه به ارزیابی هزینه سرمایه‌گذاری برای خط ۷ متروی تهران (بخش غربی-شرقی) برای ماشین‌های مختلف، از میان ماشین‌های حفاری EPB، Slurry و Mix shield ماشین حفاری EPB

قیمت پایین‌تری نسبت به سایر ماشین‌ها در ایران دارد (جدول ۴-۱۰) (Haghshenas et al., 2017).

جدول ۴-۱۰: ارزیابی ماشین آلات حفاری از لحاظ معیار هزینه (Haghshenas et al., 2017)

نوع ماشین حفاری	EPB	Slurry	Mix shield
قیمت (میلیون یورو)	۱۷	۲۲	۳۴

۴-۳-۷- نیاز به آموزش پرسنل

در تونل‌سازی به روش مکانیزه، حضور یک تیم از گرایش‌های مختلف مکانیک، الکترونیک، شیمی، عمران و تونل‌سازی بسیار ضرورت دارد. حضور این تیم با تجربه کافی در زمینه تونل‌سازی با ماشین‌های حفاری تونل و شناخت کافی از چالش‌های فیزیکی، الکتریکی و شیمیایی پیش روی ماشین حفاری، به‌خوبی می‌تواند آسیب‌های احتمالی در زمان کار ماشین را کاهش دهد. بر اساس استاندارد انگلیسی، حضور یک تیم کامل و با تجربه بالا پیشنهاد شده است. همچنین در این استاندارد با بررسی چندین پروژه تونل اجرا شده با انواع ماشین‌های EPB و Slurry تعداد حوادث رخ داده برای هر یک از این ماشین‌های حفاری مورد بررسی قرار گرفته است. بر این اساس تعداد حوادث ناشی از خطای اپراتور^۱ که برای ماشین EPB به ثبت رسیده بسیار بیشتر از بروز این‌گونه حوادث در ماشین Slurry بوده است. بیشتر بودن تعداد این حوادث به هیچ وجه نشان دهنده آسیب‌پذیری بیشتر نوع EPB نمی‌باشد بلکه گستردگی زمینه استفاده از این نوع ماشین حفاری را معین می‌کند. در میان خطاهای اپراتور مهم‌ترین بخش را می‌توان به تعیین فشار جبهه کار ماشین اختصاص داد. بر اساس این استاندارد، تعیین حداقل فشار توسط تیم تصمیم‌گیری و اجرای آن توسط اپراتور این خطا را کاهش خواهد داد (Telford, 2004).

۴-۳-۸- سازگاری با محیط زیست

به غیر از آلودگی‌های صوتی ناشی از فعالیت‌های سطحی، فرآیند تونل‌زنی منجر به ایجاد دو دسته از اختلالات محیطی بالقوه می‌شود که عبارتند از؛ وقوع جابجایی در لایه‌های زمین در اثر تونل‌زنی (نشست)، سر و صدا و ارتعاش. هر دو گروه آسیب‌ها به علت نزدیکی به ساختمان‌های موجود در سطح

^۱ Human error

زمین و زیرساخت‌ها در محیط شهری، می‌توانند مشکلاتی را به وجود آورند. همچنین فعالیت تونل‌سازی در محیط‌های شهری می‌تواند از نظر امکان کاهش غیرمعمول تراز آب‌های زیرزمینی پر اهمیت باشد. همچنین فعالیت تونل‌سازی ممکن است باعث نشست یا تخریب ساختارهای شمع و پی ساختمانهای قدیمی در مراکز تاریخی شهرها شود. جابه‌جایی زمین و تأثیر آن بر زیربنای موجود، یک نگرانی عمده در توسعه طرح تونل زنی شهری است. بر اساس استاندار انگلیسی، انواع خاصی از زیرساخت‌ها نیز به تأثیرات جابه‌جایی زمین حساس هستند. نمونه‌هایی از انواع زیرساخت‌هایی که ممکن است خطر خاصی را شامل می‌شوند عبارتند از؛ پی و شمع‌سازه‌های سطحی، پل‌ها، تونل‌های از قبل موجود، ساختار رودخانه‌ها، سیستم‌های فاضلاب، شبکه کابل‌های انتقال برق و ساختارهایی از این قبیل. همچنین سرو صدای حفاری زمین و ارتعاش ممکن است مشکلاتی را ایجاد کند. سرو صدا و ارتعاش به سطح رسیده حین عملیات به ندرت آسیب‌های فیزیکی قابل توجهی را ایجاد می‌کنند. با این اوصاف، شکایات مربوط به این سرو صدا و ارتعاشات ممکن است منجر به اختلال در اجرای کارهای تونل زنی شود و باید به عنوان خطرات احتمالی در نظر گرفته شود (Telford, 2004).

۴-۵- جمع‌بندی

بر اساس پیشنهادات صورت گرفته ۳ نوع ماشین حفاری مکانیزه برای حفاری تونل در محیط‌های خاکی مناسب است. ماشین حفاری متعادل کننده فشار زمین، مواد حفاری شده پس از عبور از محفظه‌های مربوطه به داخل محفظه اختلاط (پشت کله حفاری) وارد و آن را پر می‌کند. مواد حفر شده در مقابل فشار زمین عکس‌العمل نشان داده و مانع از ریزش آن می‌شوند. خاک موجود توسط نوار نقاله مارپیچی بطور کنترل شده‌ای هماهنگ با میزان پیشروی ماشین تخلیه می‌گردد. در حالی که ماشین حفاری دوغابی از یک سیال تحت فشار (معمولاً مخلوط آب و بنتونیت) برای پایدارسازی سینه‌کار استفاده می‌کند (جدول ۴-۱۱).

در جدول ۴-۱۱، به بیان مشخصات شاخص و نیز محدودیت‌هایی ماشین‌های حفاری مکانیزه که در عمل با آن مواجه هستند، پرداخته شده است.

جدول ۴-۱۱: مشخصات و محدودیت‌های انواع ماشین محیط‌های خاکی

نوع ماشین حفاری مکانیزه	مشخصات	محدودیت‌ها
ماشین متعادل کننده فشار زمین	عدم وقوع افت ناگهانی سیال نگهداری در هنگام مواجه با فضای خالی در زمین- عدم نیاز به تاسیسات جداسازی- امکان استفاده از ریل و واگن به منظور انتقال مواد- نداشتن مشکل تجمع مواد زائد- آسان تر بودن حفر و انتقال مواد جامد سنگی	نیاز به نیروی زیاد در تونل‌های با قطر بالا جهت نگهداری سینه کار- عدم وجود کیک فیا تر در جلوی سینه کار، خطر هجوم آب در زمین‌های ناپایدار
ماشین دوغایی	قابلیت تعیین و اعمال دقیق فشار سینه کار- امکان جابه‌جا نمودن موانع و تعویض مته‌ها در شرایط هوای فشرده به کمک فیلتر در جلوی جبهه کار- سهولت در جابه‌جایی مواد در صورت استفاده از پمپ.	مسدود شدن دریچه‌های جلو تیغه نگهداری در خاک‌های چسبنده، امکان گیر کردن کله‌ی حفاری در صورت برخورد با لایه‌های رسی- نیاز به عملیات بیش تر به منظور عایق‌سازی تیغه برشی- نیازمند تجهیزات و فضای زیاد به منظور جداسازی مواد حفر شده از محلول نگهداری- زیان‌های زیست‌محیطی در صورت عدم جداسازی کامل بنتونیت از مواد زمین- نیاز به عملیات انتقال سیال وسیع، بروز استهلاک زیاد در لوله‌ها و پمپ‌ها به ویژه در زمین‌های کوارتزی.

ادامه‌ی جدول ۴-۱۱: مشخصات و محدودیت‌های انواع ماشین محیط‌های خاکی

سرمایه‌گذاری بالا برای تهیه دستگاه- زمان‌بر بودن فرآیند تغییر حالت دستگاه	قابلیت کار در حالات مختلف سنگی و یا خاکی- مناسب برای زمین‌های غیرچسبنده و نرم با مشخصات ژئوتکنیکی متغیر در مقیاس بالا- توانایی تغییر حالت دستگاه به دو صورت EPB و Slurry	ماشین ترکیبی
--	---	---------------------

با توجه به توصیه‌نامه‌ها و تجربه‌های مختلف در حفاری مکانیزه تونل، محدوده‌ی کاربری ماشین‌های حفاری مکانیزه در پارامترهای مختلف و روش‌های مقابله با برخی پارامترهای گزارش شده در مسیر پروژه آورده شده است.

فصل پنجم

پروژه خط ۷ قطعه‌ای

شمالی - جنوبی متروی تهران

۵-۱- مقدمه

شهر تهران پایتخت کشور ایران، طبق سرشماری سال ۱۳۹۷ بالغ بر ۱۳ میلیون نفر جمعیت را در خود دارد. بنابراین برای حمل و نقل این جمعیت مدیران شهری، گسترش خطوط حمل و نقل عمومی را در پیش گرفته‌اند. بر اساس طرح‌های پیش‌بینی شده، ۱۰ خط راه آهن شهری (مترو) برای شهر تهران در نظر گرفته شده است.

در این فصل به بررسی موقعیت جغرافیایی شهر تهران، وضعیت زمین‌شناسی آن و گستره‌ی خط ۷ متروی تهران، و نیز بررسی مطالعات ژئوتکنیکی و زمین‌شناسی و گزارش‌های طول طرح خط ۷ قطعه‌ی شمالی - جنوبی متروی تهران پرداخته شده است.

۵-۲- موقعیت جغرافیایی شهر تهران

شهر تهران از نظر موقعیت جغرافیایی در $۵۱^{\circ}۸'$ تا $۵۱^{\circ}۳۷'$ طول شرقی و $۳۷^{\circ}۳۴'$ تا $۳۵^{\circ}۵۰'$ عرض شمالی قرار گرفته است و ارتفاع آن از ۱۷۰۰ متر در شمال، به ۱۲۰۰ متر در مرکز و بالاخره ۱۱۰۰ متر در جنوب می‌رسد. تهران پهنه‌ای بین دو وادی کوه و کویر و در دامنه‌های جنوبی البرز گسترده شده است. از سمت جنوب به کوه‌های ری و بی‌بی شهربانو و دشت‌های هموار شهریار و از شمال به واسطه کوهستان محصور گردیده است (شکل ۵-۱) (مهندسین مشاور زمین فن‌آوران (زفا)، ۱۳۸۸).

۵-۳- بررسی وضعیت زمین‌شناسی محدوده طرح

منطقه‌ی تهران در شمال ایالت زمین‌ساختی ایران مرکزی و مجاور ارتفاعات چین‌خورده البرز، که همه جز بلوک‌های شمالی گندوانائی و بخشی از سیستم فعال و متحرک آلپ- هیمالیا در بین صفحات اوراسیای شمالی و عربستان - آفریقای جنوبی است، قرار گرفته است.

فشارهای ژئوتکنیک، حرکات و عکس‌العمل بلوک‌های تشکیل دهنده دگرشکل‌ها و جابه‌جایی‌های مختلف در این منطقه وجود داشته است که زمان حال تعیین کننده چهارچوب تکتونیکی و ساینز موتکتونیکی آن به‌همراه تأثیری از ساختارهای قدیمی‌تر تکتونیکی می‌باشد (گزارش زمین‌ساخت مترو

تهران، ۱۳۶۷).



شکل ۵-۱: موقعیت منطقه‌ی مورد مطالعاتی (Google map, 2018)

ارتفاعات واقع در شمال تهران بخشی از ارتفاعات البرز است که به نام البرز مرکزی نامیده می‌شود. این ارتفاعات از سری سنگ‌های چین‌خورده و رانده شده پالئوزوئیک و مزوزوئیک و ترشیر است. ارتفاعات جنوب شرقی تهران که کوه‌های سپاهیه را تشکیل می‌دهد به صورت تاقدیسی، دشت تهران را از سوی جنوب شرقی احاطه کرده است. مطالعات زمین‌شناسی نشان می‌دهد که زمین‌شناسی این بخش کاملاً متفاوت از چین‌های کوه‌های البرز است.

اولین بار ریبین^۱ بر پایه‌ی ویژگی‌های چینه‌شناسی، رسوبات آبرفتی دامنه‌های جنوبی البرز را مورد مطالعه قرار داد و نهشته‌های مذکور را به چهار بخش به نام سری‌های A، B، C، D تقسیم نمود که در بین آنها نهشته‌های A قدیمی‌تر و سری D جدیدترین سازندها محسوب می‌شوند. همین تقسیم‌بندی ریبین، پایه‌ای برای مطالعات بعدی گردیده و از آن زمان تاکنون تغییر عمده‌ای در این تقسیم‌بندی به عمل نیامده است.

^۱ Rieben

بررسی نهشته‌های آبرفتی گسترده تهران و پیرامون، تأثیر دوفاز کوه‌زایی بر روی آنها را نشان می‌دهد. در فاز اول کوه زایی، نهشته‌های آبرفتی سری A به شدت چین‌خورده است، در فاز دوم کوه‌زایی که ضعیف‌تر بوده است، لایه‌های آبرفتی سری B در بیشتر قسمت‌ها شیب‌دار (۵ تا ۱۰ درجه) شده است. نهشته‌های سری C که بر روی نهشته‌های قدیمی‌تر قرار گرفته است، دارای لایه‌بندی افقی می‌باشد. تقلیل اندازه دانه‌ها از شمال و جنوب بیان‌گر آن است که عامل رسوب‌گذاری جریانهای سیلابی مهمی بوده است که از البرز سرچشمه می‌گرفته‌اند. بخش کوه‌پایه‌ای تهران دارای شکل فیزیوگرافی یکنواختی نبوده و در نتیجه عملکرد گسل‌ها؛ می‌تواند چند بلندی و فرونشست جداگانه را در آن تشخیص داد. در چنین حالتی بلندی‌ها متشکل از رسوبات آبرفتی کهن (سری‌های A و B) بوده، در حالی که فرونشست‌ها پوشیده از آبرفت‌های جوان (سری C) هستند. سازند آبرفتی تهران (سری D) از نوع رسوبات مخروط افکنه‌ای، سیلابی، جور نشده، حاصل هوازدگی و نهشت دوباره‌ی آبرفت‌های قدیمی‌تر به ویژه سازنده کهریزک است (Hashemnejad and Hassanpour, 2017). براساس سن مطلق لایه‌های آغازی آبرفت تهران را حدود ۵۰۰۰ سال و سن قسمت بالایی آن را حدود ۷۰۰۰ سال می‌دانند. این آبرفت‌ها به تقریب افقی و رسوبات مناطق نیمه خشک هستند و جنس آنها از ابتدا تا انتهای دشت متفاوت است، ولی از نظر دانه‌بندی نسبت به سازند کهریزک نظم بیشتری دارد. آبرفت‌های کنونی جوان‌ترین آبرفت‌های کواترنری تهران است که از نوع رسوبات منفصل بستر رودها، مسیل‌ها و یا سطح رویه آبرفت‌های قدیمی است، به همین رو گسترش و ضخامت محدودی دارند (جدول ۵-۱).

با توجه به نقشه‌ی پروفیل طولی موجود، پروژه‌ی مورد مطالعه حدوداً در تراز ارتفاعی ۱۱۱۵ تا ۱۵۳۳ متر از سطح دریای آزاد قرار گرفته است. رسوبات آبرفتی تهران اکثراً از فعالیت رودخانه‌ها و سیلاب‌های فصلی منشاء گرفته از ارتفاعات شمال تهران حاصل شده است در حالی که سطح اساس نهایی آن، کویر ایران مرکزی به حدود ۶۵۰ متر از سطح دریا است (شرکت مهندسی سپاسد، ۱۳۸۷).

شهر تهران بر روی رسوبات آبرفتی نسبتاً ضخیم دوران چهارم زمین‌شناسی قرار دارد که در طول گسل معکوس شمال تهران، بر روی توده‌های سنگی سازند کرج رانده شده است. این آبرفت‌ها به ترتیب

قدمت به چهار سازند A, B, C و D تقسیم می‌شوند. سازند A، موسوم به سازند هزار دره متشکل از مخلوط نسبتاً همگن شن و ماسه همراه با مقداری لای و رس، با تراکم و سیمان‌تاسیون بالا است که تحت اثر نیروهای تکتونیکی، چین خورده شده و مناطق تپه‌ماهوری شمال شهر تهران را تشکیل داده است. بر روی بخش‌هایی از سازند A، رسوبات شن و ماسه‌ای سازند B با شیب کم (۵ تا ۱۰ درجه) قرار گرفته است که ویژگی مهم آن ناهمگنی و وجود قطعات بزرگ سنگ در بعضی نقاط و لایه‌های ریزدانه نفوذناپذیر ضخیم در نقاط دیگر است.

بخش‌های مرکزی و جنوبی شهر تهران بر روی سازند C (دارای لایه‌بندی افقی) قرار دارند که جنس آن از مخلوط شن و ماسه همراه با مقداری رس و لای، همگن و با سیمان‌تاسیون و تراکم متوسط در مرکز، تا لایه‌های ضخیم رس و لای با خاصیت خمیری کم در جنوب شهر تهران، تغییر می‌کند. این سازند در فاصله تقریبی بین محورهای خیابان انقلاب و خیابان شوش، ترکیبی از لایه‌های درشت‌دانه و ریزدانه در محدوده انتقالی تشکیل شده است، که در آن از شمال به جنوب لایه‌ها و میان لایه‌های درشت‌دانه جای خود را به لایه‌های خاک ریزدانه رسی می‌دهند.

سازند D، موسوم به سازند کهریزک، از رسوبات ریزدانه با ضخامت کم تشکیل شده است که در بخش‌هایی از مرکز و جنوب شهر بر روی سازند C قرار می‌گیرد (Ghayoumian et al., 2009). از ویژگی‌های مهم این آبرفت‌ها در ارتباط با اجرای تونل‌ها، می‌توان به موارد زیر اشاره نمود (مهندسین مشاور زمین فن‌آوران (زفا)، ۱۳۸۸):

- وجود تعداد زیادی رشته گسل فرعی در بخش‌های چین‌خورده شمالی شهر.
- وجود سفره‌های آب زیرزمینی موضعی در ناودیس‌های بخش‌های چین‌خورده.
- وجود جریانهای آب زیرزمینی در امتداد شیب کلی زمین (شمال به جنوب).
- تشکیل موضعی سفره‌های آب زیرزمینی معلق بر روی لایه‌های بانفوذپذیری کمتر در بخش‌های شمالی (به ویژه در سازند B) و مرکزی.

- حضور لنزهای^۱ شن و ماسه سیمانی شده بسیار مقاوم در برخی نقاط و بر عکس، و حضور لنزهای شن و یا ماسه فاقد ریزدانه و ریزشی در برخی نقاط دیگر در سازندهای A و C.
 - وجود شیل‌های رسی بسیار متراکم در برخی نقاط در سازند A (مانند شهرک غرب).
 - وجود بلوک‌های سنگی بسیار بزرگ در برخی نقاط در سازند B.
- که مطالب فوق به صورت خلاصه در جدول ۵-۱ آورده شده است.

جدول ۵-۱: آبرفت تهران بر اساس طبقه‌بندی ربین (Cheshomi et al., 2009)

مشخصات	A	B	C	D
سن	۵ میلیون سال	۷۰۰ هزار سال	۵۰ هزار سال	۱۰ هزار سال
سنگ‌شناسی	کنگلومرا همگن	کنگلومرا ناهمگن	آبرفت‌های بادبزی	آبرفت‌های جوان
سیمانی شدن	به شدت سیمانی شده	متغیر، اما غالباً با سیمان ضعیف	نسبتاً سیمانی شده	سیمانی نشده
اندازه دانه‌ها	۱۰۰-۲۵۰ میلی‌متر	بسیار متغیر تا قطعات چند متری	خاک رس از ۱۰۰-۲۰۰ میلی‌متر	خاک رس تا قطعات چند متری
شیب لایه (درجه)	۰-۹۰	۰-۱۵	افقی	افقی
ضخامت	حداکثر ۱۲۰۰ متر	حداکثر ۶۰ متر (ضخامت به سمت جنوب کاهش می‌یابد)	حداکثر ۶۰ متر	کمتر از ۱۰ متر
مشخصات	A	B	C	D
محیط رسوبی	رودخانه‌ای	رودخانه‌ای و نهشته‌ای حاصل از ذوب یخچال‌های	سیلابی-رودخانه‌ای	سیلابی-رودخانه‌ای

^۱ Lense

ادامه جدول ۵-۱: آبرفت تهران بر اساس طبقه‌بندی ریبن (Cheshomi et al., 2009)

آبرفت‌های جوان (بستر و مسیر رودخانه‌های کنونی و مسیل‌های قدیمی)	سازند آبرفتی تهران (بخش مهمی از شهر تهران بر روی این رسوبات ساخته شده است)	سازند همگن آبرفتی شمال تهران (باغ فیض، شهرک غرب، حوالی دانشگاه شهید بهشتی، ولیعصر و شریعتی)	سازند آبرفتی هزار دره (در محدوده کن، اوین، قیطریه، عباس‌آباد، گردنه قوچک و ابتدای جاده هراز)	نام منطقه
---	--	--	--	-----------

۵-۴- معرفی خط ۷ متروی تهران

پروژه خط ۷ متروی تهران یکی از طولانی‌ترین (۲۶ کیلومتر) و عمیق‌ترین (حدوداً ۲۷ متر) خطوط متروی شهر تهران است. با توجه به گذر از تمامی آبرفت‌های شهر و مواجهه با شرایط ژئوتکنیکی مختلف، قرارگیری بخشی از تونل در زیر سطح آب زیرزمینی، عمق قرارگیری یکی از پروژه‌های خاص تونل‌های شهری بوده است.

پروژه‌ی خط ۷ متروی تهران از شهرک امیرالمؤمنین (ع) واقع در منطقه‌ی جنوب شرقی تهران در امتداد شرقی- غربی شروع شده و پس از عبور از تقاطع بزرگراه محلاتی- خیابان ۱۷ شهریور و میدان محمدیه، در تقاطع نواب- پل قزوین تغییر جهت داده و در امتداد جنوبی- شمالی (در راستای بزرگراه نواب صفوی) مسیر آن ادامه یافته و ضمن گذر از کنار تونل توحید و عبور از کنار برج میلاد و میدان صنعت، در منطقه‌ی سعادت آباد (میدان بوستان) واقع در شمال غرب تهران پایان می‌یابد.

کل مسیر پروژه به صورت زیرزمینی اجرا گردیده و یک تعمیرگاه و پارکینگ در ابتدا (ورزشگاه تختی) و یک پارکینگ در انتهای خط (سعادت آباد- میدان بوستان) در نظر گرفته شده است (شکل ۵-۲). طول این خط حدود ۲۶ کیلومتر بوده و عمق حدوداً ۲۷ متر، دارای ۲۵ ایستگاه است (مهندسین مشاور پژوهش عمران راهوار، ۱۳۹۰).

۵-۴-۱- مطالعات ژئوتکنیک

مطالعات ژئوتکنیک مسیر خط ۷ متروی تهران از دو بخش شمالی - جنوبی (N7-Y7) و شرقی - غربی (A7-N7)، در ۳ فاز مرحله مفهومی، مقدماتی و تکمیلی توسط شرکت ساحل انجام پذیرفته است. در مرحله مفهومی مطالعات، با توجه به مطالعات پیشین زمین‌شناسی، هیدرولوژی و ژئوتکنیکی محدوده مسیر، برآوردی تقریبی در خصوص وضعیت ژئوتکنیکی پروژه بدست آمد. براین مبنا و با توجه به الزامات مطالعات ژئوتکنیک پروژه‌های مترو، شرح خدمات مطالعات ژئوتکنیک مرحله مقدماتی پایه‌ریزی و انجام گردید.

در مباحث ژئوتکنیک یکی از موضوع‌های مهم، تعیین میزان و احجام مطالعات و جلوگیری از ریسک‌های ناشی از ایجاد مشکلات، در مراحل طراحی، ساخت و همچنین مرحله بهره‌برداری است. از این لحاظ مقادیر و احجام مطالعات در بخش‌های مختلف پروژه، با رویکرد ارزیابی ریسک مورد بررسی قرار گرفته است. کاوش‌ها و برداشت‌های صحرایی بر پایه دستورالعمل‌ها و مشخصات فنی با حفاری ۲۹ حلقه گمانه‌ته‌ای^۱ و حلقه چاه دستی^۲ در نقاط مناسب در طول مسیر طرح، در مرحله مقدماتی ژئوتکنیک انجام گرفت (شکل ۵-۳) (شکل ۵-۴) (مهندسین مشاور ساحل، ۱۳۸۸).



شکل ۵-۳: تصویر احداث یک حلقه گمانه‌ته‌ای و جعبه نمونه در مسیر شمالی - جنوبی پروژه خط ۷ مترو تهران در محدوده پل گیشا (مهندسین مشاور ساحل، ۱۳۸۸).

^۱ Borehole

^۲ Test pit

در مرحله تکمیلی مطالعات ژئوتکنیک در بخش شرقی - غربی به دلیل حساسیت مطالعه مسیر، گمانه زنی‌هایی به فواصل ۳۵۰ متر انجام پذیرفته است، ولی مرحله تکمیلی مطالعات مسیر در بخش شمالی - جنوبی انجام نشده است. شایان ذکر است که مطالعات ژئوتکنیک ایستگاه‌های پروژه خط ۷ متروی تهران به صورت تکمیلی انجام گردیده است یعنی با این فرض در محدوده مسیر شمالی - جنوبی در محدوده ایستگاه‌ها مطالعات ژئوتکنیک موجود است ولی در محدوده بین ایستگاه‌ها، مطالعات ژئوتکنیک تکمیلی وجود ندارد. علت این شرایط این است که دو مسیر به دو پیمانکار مجزا به صورت طرح و ساخت واگذار گردیده و مسئولیت انجام مطالعات میدانی و طراحی و اجرا نیز بر عهده پیمانکاران مربوطه بوده است. در این حالت پیمانکاری که در بخش شمالی - جنوبی فعالیت می‌کند صرفاً به مطالعات ژئوتکنیک فاز یک بسنده نموده است و از بابت کافی بودن یا ناکافی بودن مطالعات ژئوتکنیکی، مسیر بخش شمالی - جنوبی، دارای ریسک عدم شناخت مکفی شرایط ژئوتکنیکی و در نتیجه موجب عدم قطعیت است (مهندسین مشاور ساحل، ۱۳۸۸).



شکل ۴-۵: تصویر احداث یک حلقه چاه دستی در مسیر شمالی - جنوبی پروژه خط ۷ مترو تهران در محدوده بزرگراه شهید نواب صفوی (مهندسین مشاور ساحل، ۱۳۸۸).

در ارتباط با مطالعات ژئوتکنیکی بخش شمالی - جنوبی باید این موضوع را متذکر شده است که با توجه به وضعیت توپوگرافی آن، گستره‌ی زمین‌شناسی و ژئوتکنیک شهر تهران از شمال به جنوب در زمینه‌ی مطالعات ژئوتکنیک، بیشترین تغییرات را دارا است. این موضوع با توجه به نتایج حاصل از حفاری‌ها، نمونه‌برداری‌ها، نتایج آزمایش‌های آزمایشگاهی، آزمایش‌های برجا و همچنین وضعیت آب

زیرزمینی در طول مسیر شمالی- جنوبی پروژه به اثبات رسیده است. در ادامه به احجام مطالعات ژئوتکنیک فاز ۱ (مرحله‌ی مقدماتی) اشاره گردیده و مخاطرات موجود در خصوص وضعیت مطالعات مورد بررسی قرار گرفته است (عماد، ۱۳۸۸).

آزمایشات مکانیک سنگ نیز برای شناسایی پارامترهای فیزیکی و مقاومتی قطعه سنگ‌های موجود در مسیر، انجام گرفته است.

لایه‌های زمین از رسوبات آبرفتی متعلق به دوره‌ی کواترنری در طول مسیر خط ۷ مترو شهری تهران گسترش دارد، که به سازند آبرفتی تهران (آبرفت‌های C) مرسوم است. در مطالعات صورت گرفته، ضخامت این رسوبات در گستره طرح برابر ۶۰ متر آمده است، که در عمق و طول مسیر طرح، از توزیع دانه‌بندی متغیری برخوردار می‌باشد. این سازند از لایه‌های متناوب خاک‌های ریزدانه و درشت‌دانه تشکیل یافته، که می‌تواند در انتخاب ماشین حفار برای این مسیر اثرگذار باشد.

رسوبات آبرفتی محل از اجزای درشت (قلوه سنگ‌ها و تخته سنگ‌ها) تشکیل یافته که بیشتر از سنگ‌های آذرین و آذرآواری تشکیل شده‌اند، در حالی که ساینده، سخت و بسیار مقاوم می‌باشند. این دانه‌ها اغلب در بخش شمالی گستره طرح (در میان اجزای ریزتر) پراکنده می‌باشند.

در بخش شمالی- جنوبی طرح، با توجه به مطالعات قبلی در مورد وضعیت زمین‌شناسی و ژئوتکنیک، تمرکز گمانه‌زنی‌ها تا حدود زیادی مشخص شده است. به این معنا که هر چه تغییرات مسیر طرح از بابت نوع زمین، شرایط هیدروژئولوژیکی و پارامترهای مقاومتی بیشتر باشد بایستی تمرکز گمانه‌زنی‌ها نیز افزایش یابد و هر چه این تغییرات کمتر و یکنواخت‌تر باشد، فواصل گمانه‌ها بیشتر توصیه می‌گردد. این شرایط از مرحله‌ی مفهومی تا مرحله‌ی مقدماتی و سپس مرحله‌ی تکمیلی، با پیشرفت مطالعات شفاف‌تر می‌شود. برای بخش شمالی، جنوبی با توجه به بررسی‌های صورت گرفته در طول مسیر تونل، فواصل ۲۰۰ تا ۲۵۰ متر جهت گمانه‌زنی انجام پذیرفته است (مهندسین مشاور ساحل، ۱۳۸۸).

با توجه به مطالب فوق، حدفاصل بین گمانه‌زنی‌های انجام شده با عدم قطعیت که از کمبود اطلاعات نشئت گرفته می‌شود، مواجهه بوده است.

در این بخش به بررسی اطلاعات بدست آمده از مطالعات ژئوتکنیکی و زمین‌شناسی خط ۷ قطعه‌ی شمالی- جنوبی متروی تهران و همچنین گزارش‌های مبتنی بر حفر گمانه‌ها در فواصل مختلف پرداخته شده است. با توجه به مطالب گفته شده، بخش شمالی- جنوبی خط ۷ متروی تهران از لحاظ گستره‌ی توزیع اندازه ذرات، شرایط آب زیرزمینی، تغییر در ساختگاه، وجود قطعه سنگ و غیره شرایط خاصی را شامل شده است. از این رو با مطالعه‌ی این گزارش‌ها، جهت تطبیق آنها با قابلیت‌های ماشین‌های مختلف جهت وزن‌دهی هر یک از آنها در فصل ۶ استفاده شده است.

۵-۴-۲- بررسی اطلاعات کلی خط ۷ (شمالی- جنوبی) متروی تهران

مسیر خط ۷ قطعه‌ی شمالی- جنوبی با طول ۱۴/۱۵۲ کیلومتر، دارای ۲۹ منطقه (جدول ۵-۲) بوده است. در مسیر پروژه مورد مطالعاتی با توجه به داده‌های در دسترس، و نیز پارامترهای تأثیرگذار بر انتخاب ماشین حفاری مکانیزه انتخاب شده است که در این فصل به بررسی مقادیر اندازه‌گیری این پارامترها پرداخته شده است.

مسیر خط ۷ (شمالی- جنوبی) به ۶ نوع زمین‌شناسی مهندسی طبقه‌بندی شده است. این طبقه‌بندی‌ها بر اساس شباهت زمین‌شناسی هر بخش صورت گرفته است (جدول ۵-۳) (شرکت مهندسی سپاسد، ۱۳۸۷).

شکل ۵-۵، موقعیت گمانه‌های اکتشافی خط ۷ قطعه‌ی شمالی- جنوبی را نشان می‌دهد. حفاری این گمانه‌ها به منظور مطالعات زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی صورت گرفته است. که در جدول ۵-۴ موقعیت قرارگیری آنها آورده شده است.

وجود عدم قطعیت در شناخت وضعیت محیط پیرامون تونل‌ها، به دفعات به عنوان یکی از دلایل اصلی گسیختگی آنها عنوان شده است و متخصصین بسیاری در خصوص تأثیرگذاری پارامترهای مرتبط با این عوامل در یک پروژه خاص تونل تاکید داشته‌اند (Seidenfuß, 2006). در این زمینه، یکی از مهم‌ترین چالش‌ها، عدم امکان شناسایی کامل شرایط زمین‌شناسی، ژئوتکنیکی در محدوده حفاری

است. برای آن که بتوان از پیچیدگی‌ها و مشکلات خاصی که در خصوص عدم شناخت شرایط زمین اطراف تونل وجود دارد، تا حد زیادی کاست، باید منابع مالی، نیروی کار و زمان به منظور جمع‌آوری اطلاعات زمین‌شناسی، ژئوتکنیکی و بررسی اکتشافی در پروژه‌های حفاری تونل تخصیص یابد تا به حد امکان از پیچیدگی‌ها و مشکلات خاصی که در خصوص عدم شناخت شرایط زمین اطراف تونل وجود دارد تا حد زیادی کاست. از این رو با مطالعه‌ی اطلاعات موجود در ادامه سعی در به حداقل رساندن این عدم قطعیت پرداخته شده است.

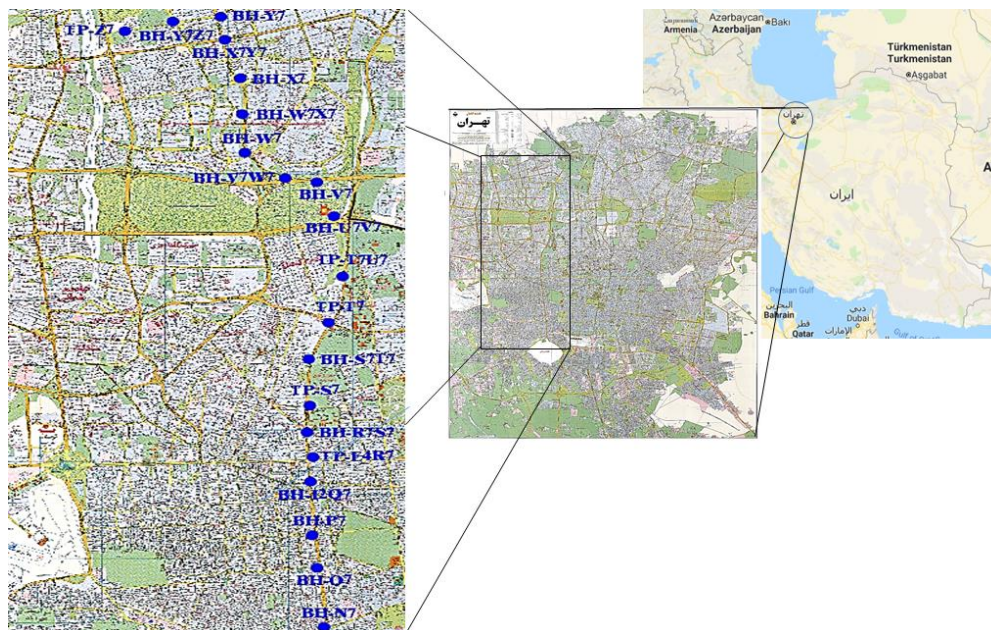
جدول ۵-۲: منطقه‌بندی طول مسیر خط ۷ قطعه‌ی شمالی - جنوبی (شرکت مهندسی سپاسد، ۱۳۸۷)

طول (متر)	فاصله از مبدا (A۷) (متر)	منطقه	طول (متر)	فاصله از مبدا (A۷) (متر)	منطقه
۹۸	۱۹۱۸۰-۱۹۲۷۸	۱۶	۳۹۰	۱۲۱۴۰-۱۲۵۳۰	۱
۶۲۲	۱۹۲۷۸-۱۹۹۰۰	۱۷	۷۳۸	۱۲۵۳۰-۱۳۲۶۸	۲
۴۱۲	۱۹۹۰۰-۲۰۳۱۲	۱۸	۶۰۲	۱۳۲۶۸-۱۳۸۷۰	۳
۱۲۴	۲۰۳۱۲-۲۰۴۳۶	۱۹	۹۰	۱۳۸۷۰-۱۳۹۶۰	۴
۳۱۴	۲۰۴۳۶-۲۰۷۵۰	۲۰	۴۱۰	۱۳۹۶۰-۱۴۳۷۰	۵
۳۴۵	۲۰۷۵۰-۲۱۰۹۵	۲۱	۳۳۵	۱۴۳۷۰-۱۴۷۰۵	۶
۱۱۰۵	۲۱۰۹۵-۲۲۲۰۰	۲۲	۵۱۰	۱۴۷۰۵-۱۵۲۱۵	۷
۳۸۰	۲۲۲۰۰-۲۲۵۸۰	۲۳	۲۶۰	۱۵۲۱۵-۱۵۴۷۵	۸
۴۸۰	۲۲۵۸۰-۲۳۰۶۰	۲۴	۱۳۹۰	۱۵۴۷۵-۱۶۸۶۵	۹
۲۶۵	۲۳۰۶۰-۲۳۳۲۵	۲۵	۲۵۵	۱۶۸۶۵-۱۷۱۲۰	۱۰
۴۵۰	۲۳۳۲۵-۲۳۷۷۵	۲۶	۶۷۰	۱۷۱۲۰-۱۷۷۹۰	۱۱
۲۸۵	۲۳۷۷۵-۲۴۰۶۰	۲۷	۲۳۰	۱۷۷۹۰-۱۸۰۲۰	۱۲
۱۲۴۰	۲۴۰۶۰-۲۵۳۰۰	۲۸	۳۲۰	۱۸۰۲۰-۱۸۳۴۰	۱۳
۹۹۶	۲۵۳۰۰-۲۶۲۹۶	۲۹	۲۵۵	۱۸۳۴۰-۱۸۵۹۵	۱۴
			۵۸۵	۱۸۵۹۵-۱۹۱۸۰	۱۵

جدول ۵-۳: نوع زمین‌شناسی مهندسی (شرکت مهندسی سپاسد، ۱۳۸۷)

ET-1	شن ماسه‌ای و ماسه‌ی شنی (درصد عبوری از مش شماره ۲۰۰، ۳ تا ۱۲)
ET-2	شن رس‌دار و لای‌دار، بسیار ماسه شنی همراه با لای و رس (درصد عبوری از مش شماره ۲۰۰، ۱۲ تا ۳۰)
ET-3	ماسه‌ی بسیار لای دار رسی همراه شن، شن بسیار ماسه‌ای رسی (درصد عبوری از مش شماره ۲۰۰، ۳۰ تا ۶۰)
ET-3*	سیمانی شده‌ی ماسه‌ای لای دار رسی و شن
ET-4	ماسه لای‌دار رسی همراه با شن (درصد عبوری از مش شماره ۲۰۰، ۲۲ تا ۳۴)
ET-5	لای رسی و رس لای‌دار همراه با ماسه، رس بسیار ماسه‌ای یا لای‌دار (درصد عبوری از مش شماره‌ی ۲۰۰، بیشتر از ۶۰)
خاک دستی ^۱	

^۱ Filled soil



شکل ۵-۵: موقعیت جغرافیایی گمانه‌های اکتشافی خط ۷ (شمالی - جنوبی) (مهندسین مشاور زمین فن‌آوران، ۱۳۸۸)

جدول ۴-۵: موقعیت جغرافیایی گمانه‌های اکتشافی خط ۷ (شمالی - جنوبی) متروی تهران (مهندسین مشاور زمین فن‌آوران (زفا)، ۱۳۸۸)

موقعیت	شماره گمانه	موقعیت	شماره گمانه
Hakim and Chamran Highways Crossroad	BH-U7V7	Under Ghazvin Bridge	BH ^۱ -N7
Hemmat Highway	BH-V7	Under the Komeil Bridge	BH-O7
Hemmat and Chamran Highways Crossroad	BH-V7W7	Navab St. and Imam Khomeini St. Crossroad	BH-P7
Sanat Square	BH-W7	Jomhori Square	BH-I2Q7
Paknejad Boulevard	BH-W7X7	Navab St. and Azadi St.	TP-E4R7
Paknejad and Poonak Boulevards Crossroad	BH-X7	Tohid Square	BH-R7S7
Panknejat Boulevard and Niyaesh Highway Crossroad	BH-X7Y7	Fatemi St. and Chamran Highway	TP-S7

^۱ Borehole No.

ادامه‌ی جدول ۵-۵: موقعیت جغرافیایی گمانه‌های اکتشافی خط ۷ (شمالی - جنوبی) متروی تهران (مهندسين مشاور زمین فن‌آوران (زفا)، ۱۳۸۸)

Sarv Square	BH-Y7	Chamran Highway	BH-S7T7
Boustan Square	BH-Y7Z7	Gisha Bridge	TP ^۱ -T7
Kouhestan Street	TP-Z7	Chamran Highway and Fazel St. Crossroad	TP-T7U7

۵-۴-۲-۱- توزیع اندازه ذرات

با انجام آزمون دانه‌بندی بر روی نمونه‌های خاک در طول مسیر پروژه، در آزمایشگاه، با روش ترکیبی سرند کردن و چگالی سنجی (هیدرومتری)، ترکیب دانه‌بندی خاک محل مورد مطالعه قرار گرفته است. همانطور که پیش از این نیز ذکر شد، دانه‌های تشکیل دهنده‌ی لایه‌های خاک در گستره‌ی طرح در بازه‌ی وسیعی، از اجزای بسیار درشت تا رس‌های کلوئیدی قرار گرفته‌اند. همچنین، به دلیل عدم جور شدگی، لایه‌های خاک درشت‌دانه طرح، به صورت خوب دانه‌بندی شده^۲ و یا گسسته دانه‌بندی شده^۳، فاقد دانه‌بندی یکنواخت است.

نتایج آزمون‌های مزبور به صورت منحنی دانه‌بندی خاک در کل پروژه‌ی قطعه‌ی شمالی - جنوبی، بر پایه‌ی استانداردهای ASTM و BS، به صورت شکل ۵-۶ آمده است.

شکل ۵-۶ نشان دهنده‌ی آن است که در طول مسیر پروژه، به گستره‌ی متغیری از اندازه ذرات مواجه بوده است. این شکل در توزیع اندازه ذرات خاک مسیر تونل را به صورت درصد اجزای تشکیل دهنده آورده است.

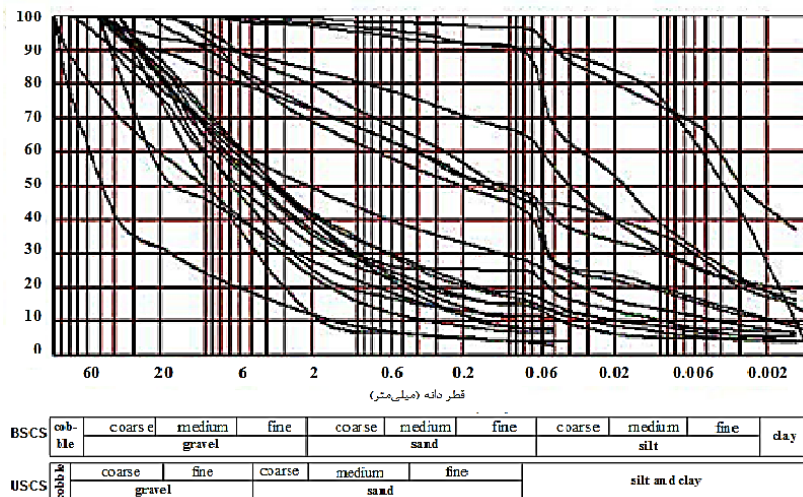
همچنین با در نظر گرفتن ناحیه بندی صورت گرفته در طول پروژه (جدول ۵-۳)، جدول ۵-۵ موقعیت قرارگیری آنها را نشان می‌دهد.

^۱ Test Pit No.

^۲ Well graded

^۳ Gap graded

از سوی دیگر اندازه ذرات پروژه‌ی خط ۷ (شمالی - جنوبی)، بر اساس سیستم طبقه‌بندی متحد^۱ نیز مشخص شده است. نتایج حاصل در جدول ۵-۶ آورده شده است، توضیحات مرتبط با آن در پیوست ۱ آمده است.



شکل ۵-۶: توزیع اندازه ذرات در طول مسیر پروژه‌ی خط ۷ قطعه‌ی شمالی - جنوبی متروی تهران (مهندسین مشاور زمین فن آوران (زفا)، ۱۳۸۸)

جدول ۵-۶: نوع زمین‌شناسی در منطقه‌های طول مسیر خط ۷ (شمالی - جنوبی) (شرکت مهندسی سپاسد، ۱۳۸۷)

منطقه	نوع زمین‌شناسی مهندسی	منطقه	نوع زمین‌شناسی مهندسی
۱	ET-1, ET-5	۱۶	ET-2, ET-3, ET-3*
۲	ET-3, ET-3*, ET-2	۱۷	ET-3, ET-3*
۳	ET-2	۱۸	ET-2, ET-3, ET-3*
۴	ET-1, ET-2	۱۹	ET-3, ET-3*, ET-5
۵	ET-2	۲۰	ET-5
۶	ET-2, ET-4	۲۱	ET-4, ET-5
۷	ET-2	۲۲	ET-5
۸	ET-2, ET-4	۲۳	ET-4, ET-5
۹	ET-2	۲۴	ET-5

^۱ Unified Soil Classification System (USCS)

ET-2, ET-3, ET-3*, ET-5	۲۵	ET-2, ET-3, ET-3*	۱۰
ET-3, ET-3*	۲۶	ET-2	۱۱

ادامه‌ی جدول ۷-۵: نوع زمین‌شناسی در منطقه‌های طول مسیر خط ۷ (شمالی - جنوبی) (شرکت مهندسی سپاسد، ۱۳۸۷)

ET-2, ET-3, ET-3*	۲۷	ET-2, ET-4	۱۲
ET-3, ET-3*	۲۸	ET-1, ET-2, ET-4	۱۳
ET-2, ET-3, ET-3*, ET-5	۲۹	ET-2, ET-4	۱۴
		ET-2	۱۵

۵-۴-۲- نفوذپذیری

نفوذپذیری یکی از عوامل تأثیرگذار در انتخاب ماشین حفاری است، مقادیر آن در طول مسیر مورد مطالعاتی بر اساس آزمایش‌های صورت گرفته، در جدول ۵-۱۰ آمده است.

با توجه به جدول ۵-۱۰، مشاهده می‌شود که ۶۶/۴۶ درصد طولی مسیر پروژه‌ی خط ۷ (شمالی - جنوبی) متروی تهران بر اساس جدول ۴-۴ در محدوده‌ی نفوذپذیر بوده است.

نفوذپذیری ردیف ۱ و ۲، در منطقه‌ی ۱۳ (جدول ۵-۲) (۲/۲۶۱٪ از قطعه‌ی شمالی - جنوبی) و نیز نفوذپذیری ردیف ۲ و ۳ در مناطق ۲۴ و ۲۹ (۱۰/۴۲۹٪ از قطعه‌ی شمالی - جنوبی) دارای هم‌پوشانی هستند. همچنین در منطقه‌ی ۲۷ هیچ اطلاعاتی در دسترس نبوده است (۲/۰۱۳٪ از قطعه‌ی شمالی - جنوبی).

جدول ۵-۸: رده‌بندی خاک پروژه‌ی خط ۷ (شمالی - جنوبی) مترو تهران بر پایه‌ی روش USCS (شرکت مهندسی سپاسد، ۱۳۸۷)

منطقه	USCS	منطقه	USCS
۱	GM & GP, ML& CL	۱۶	GC & SC
۲	GC & SC	۱۷	GC & SM, SC
۳	GM & GC	۱۸	GC & SM, SC

GC & CL, ML	۱۹	GM & GC	۴
CL & ML	۲۰	GM & GC, SM	۵

ادامه‌ی جدول ۹-۵: رده‌بندی خاک پروژه‌ی خط ۷ (شمالی - جنوبی) مترو تهران بر پایه‌ی روش USCS

(شرکت مهندسی سپاسد، ۱۳۸۷)

CL & SC	۲۱	GC & SC	۶
CL & ML	۲۲	GM & GC	۷
CL & SC	۲۳	GC & SC	۸
CL & ML	۲۴	GM, GC & SM, SC	۹
SC, CL & GP-GC	۲۵	GM, SM & SC, CL	۱۰
GC & SM, SC	۲۶	GP-GC, SM & ML	۱۱
SC, SM, GC & GM	۲۷	GC, GM & SC, SM	۱۲
GC & SM, SC	۲۸	GW, GP & SM, GC	۱۳
SC, CL & GP-GC	۲۹	GC, GM & SC, SM	۱۴
		GS & SC, SM	۱۵

جدول ۱۰-۵: درصد طولی محدوده‌ی نفوذپذیری پروژه خط ۷ قطعه‌ی شمالی - جنوبی متروی تهران (شرکت مهندسی سپاسد، ۱۳۸۷)

ردیف	محدوده نفوذپذیری (cm/sec)	طول مسیر (درصد)
۱	۱۰-۴ - ۱۰-۵	۲/۲۶۱
۲	۱۰-۵ - ۱۰-۶	۶۴/۳۷۹
۳	۱۰-۶ - ۱۰-۷	۴۴/۰۶۴

در جدول ۱۱-۵ نوع ماده بر حسب مقادیر نفوذپذیری آورده شده است.

جدول ۱۱-۵: مقدار نفوذپذیری بر اساس نوع ماده (Dorhat, 2017)

نوع ماده	محدوده نفوذپذیری (cm/sec)
ماسه‌ی لای‌دار، ماسه ریز	10^{-3} - 10^{-5}
ماسه، لای ماسه‌ای، ماسه‌ی رسی تا رس	10^{-4} - 10^{-9}

۵-۴-۲-۳- شاخص دوام

بر اساس مفهوم شاخص دوام (بخش ۴-۴-۱-۳-) و اطلاعات خط ۷ قطعه‌ی شمالی- جنوبی جدول ۱۲-۵ آورده شده است.

جدول ۱۲-۵: مقادیر شاخص دوام در گستره‌ی خط ۷ (شمالی- جنوبی) متروی تهران (شرکت مهندسی سپاسد، ۱۳۸۷)

شاخص دوام	محدوده کاربری	طول مسیر (درصد)
سخت	$1/5$ - $1/25$	$81/33$
نیمه جامد	$1/25$ - 1	$15/759$
سفت	$1-0/75$	$2/911$

بدین ترتیب بخش قابل ملاحظه‌ای از مسیر پروژه‌ی خط ۷ قطعه‌ی شمالی- جنوبی متروی تهران دارای شاخص دوام سخت گزارش شده است.

۵-۴-۲-۴- فشار جبهه‌کار

با ارزیابی‌های صورت گرفته روی ماشین حفاری Slurry و EPB در ژاپن، به این نتیجه رسیدند که در اغلب موارد، فشار فعال زمین کمترین فشاری است که برای فشار جبهه‌کار ماشین حفار ($\sigma_T = \sigma_{K_0}$) مد نظر قرار گرفته شده است (جهت جلوگیری از تغییر شکل جبهه‌کار و پایداری آن). بررسی‌های

دیگری نیز توسط برور^۱ در مرکز تونل سازی زیرزمینی باون هلند^۲ انجام شد که مقادیر فشار جبهه کار را کمی بالاتر از فشار فعال زمین پیشنهاد داده است (رابطه (۱-۵)) (Guglielmetti et al., 2008).

$$\sigma_T = k_a \cdot \sigma'_v + \sigma_w + 20KPa \quad (۱-۵)$$

با استفاده از رابطه‌ی (۱-۵)، در فواصل ۵۰ متری، مقدار فشار جبهه کار محاسبه شده است. نتایج حاصل در فاصله‌ی ۲۵/۳۳۸ و ۵۳/۲۷، و به طور میانگین ۳۹/۵۱۷ کیلوپاسکال است.

۵-۴-۲-۵- حضور تخته سنگ

یکی از جنبه‌های مهم انتخاب و طراحی ماشین حفر تونل برای ساخت خط متروی شهری، وجود قطعات بزرگ اندازه (تخته سنگ‌ها) با قطر تا ۸۰۰ میلی‌متر است. این قطعات که بیشتر از سنگ‌های آذرین و آذرآواری تشکیل یافته‌اند، بسیار مقاوم (حدوداً ۲۰۰-۳۵۰ مگاپاسکال)، سخت (سختی موس ۷-۵) و ساینده ارزیابی شده است. این دانه‌ها اغلب در بخش شمالی گستره‌ی طرح (در بین اجزای ریزتر) پراکنده است (مهندسین مشاور زمین فن‌آوران (زفا)، ۱۳۸۸). حضور تخته سنگ از محدوده‌ی تقاطع بزرگراه نواب با آذربایجان، تا ابتدای ورودی شهرک غرب به صورت قابل توجهی مشهود گزارش شده است. با مطالعات صورت گرفته ۴۴/۸۲۷ درصد از طول مسیر پروژه، وجود قطعات بزرگتر از ۳۵ سانتی‌متر گزارش شده است (شرکت مهندسی سپاسد، ۱۳۸۷).

۵-۴-۲-۶- جبهه کار ترکیبی

در طول مسیر مطالعه‌ی موردی این پژوهش، با مطالعات ژئوتکنیکی صورت گرفته لایه‌های خاک با رفتارهای مختلف (دانه‌ای یا چسبنده) همراه با بخش‌های سیمانی شده و یا تماس با سنگ بستر گزارش شده است. بر اساس مطالعات مقدماتی و گزارش‌های ثبت شده ۳۳/۷۳٪ از طول مسیر پروژه‌ی خط ۷ قطعه‌ی شمالی- جنوبی متروی تهران دارای شرایط جبهه کار ترکیبی بوده است (شرکت مهندسی سپاسد، ۱۳۸۷)..

^۱ Wout Broere

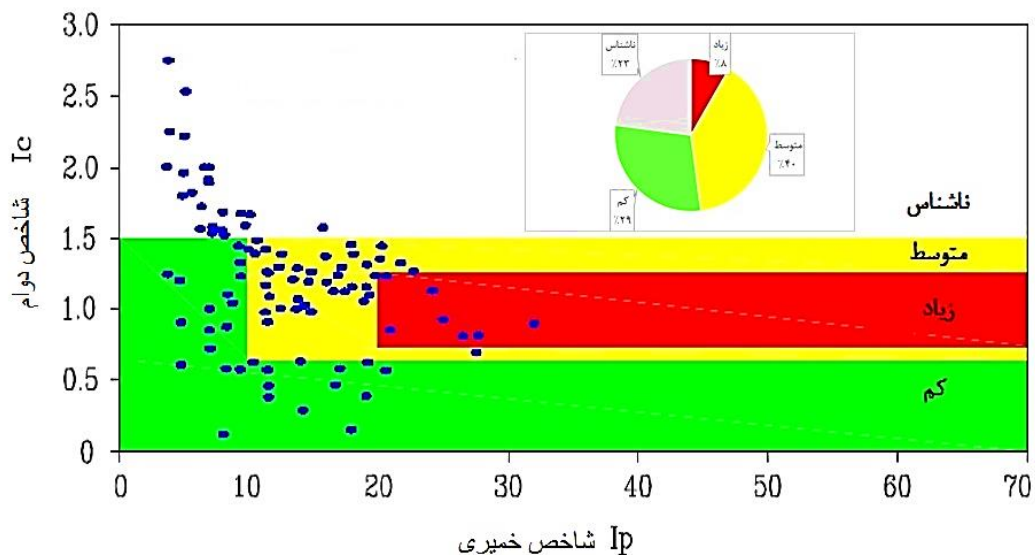
^۲ Dutch Center Underground Bowen (COB)

۵-۴-۷- گل گرفتگی

رفتار چسبناکی^۱ کانی‌های رسی گزارش شده در مطالعات ژئوتکنیکی مقدماتی، یکی از موضوعات حساس در انتخاب ماشین حفاری مکانیزه است. منظور از گل گرفتگی، چسبندگی کانی‌های رسی به قسمت‌های مختلف صفحه‌ی حفار است که می‌تواند سبب انسداد^۲ در باکت و تیغه‌ها شود (Skok, 2015).

شکل ۵-۷ نشان دهنده‌ی خطر گل گرفتگی در طول مسیر خط ۷ قطعه‌ی شمالی- جنوبی متروی تهران است.

شاخص خمیری از ویژگی‌های ذاتی و ثابت کانی‌های رسی است. ولی درصد رطوبت طبیعی در بخش‌های مختلف مسیر تونل متفاوت است، بنابراین شاخص استحکام نیز می‌تواند در بخش‌های مختلف تونل متفاوت باشد، در نتیجه خطر گل گرفتگی متفاوتی در گستره‌ی خط ۷ (شمالی- جنوبی) در شکل ۵-۷ مشاهده می‌شود (شرکت مهندسی سپاسد، ۱۳۸۷).



شکل ۵-۷: خطر گل گرفتگی برای ماشین حفاری مکانیزه پروژه‌ی خط ۷ شمالی- جنوبی متروی تهران (شرکت مهندسی سپاسد، ۱۳۸۷)

^۱ Sticky

^۲ Clogging

۵-۴-۲-۸- چگالی

بر اساس تجارب بدست آمده در پروژه‌های اجرا شده به وسیله‌ی ماشین حفاری مکانیزه تمام مقطع در کشورهای مختلف، مقدار چگالی برای هر یک از ماشین‌های حفاری مکانیزه دارای مقادیر خاصی است، و در انتخاب آن تأثیرگذار بوده است. در پروژه‌ی خط ۷ قطعه‌ی شمالی- جنوبی متروی تهران، با توجه به اندازه‌گیری‌های صورت گرفته، مقادیر چگالی بدست آمده در طول مسیر در جدول ۵-۱۳ آورده شده است (شرکت مهندسی سپاسد، ۱۳۸۷).

جدول ۵-۱۳: مقادیر چگالی در طول مسیر (مهندسی مشاور فن‌آوران (زفا)، ۱۳۸۸)

مقادیر				
میانگین	حداکثر	حداقل	واحد	
۱/۸۳	۲/۱۳	۱/۳۱	گرم بر سانتی‌متر مکعب	چگالی کل (γ_t)
۱/۶۳	۱/۹۱	۱/۲۹		چگالی خشک (γ_d)

۵-۴-۲-۹- زاویه اصطکاک داخلی

زاویه اصطکاک داخلی یکی از عوامل تأثیرگذار در مقاومت خاک است. از این روی در تعیین مقدار مواد افزودنی مورد نیاز برای کاهش مقاومت خاک نقش قابل توجهی دارد. در جدول ۵-۱۴ مقادیر زاویه‌ی اصطکاک داخلی در دو حالت زهکشی شده (ϕ') و زهکشی نشده‌ی تحکیم یافته (ϕ_{cu}) آورده شده است.

جدول ۵-۱۴: زاویه اصطکاک داخلی در گستره‌ی پروژه خط ۷ (شمالی- جنوبی) (شرکت مهندسی سپاسد، ۱۳۸۷)

نوع زمین‌شناسی مهندسی	ϕ' (درجه)	ϕ_{cu} (درجه)
ET-1	۳۵	۳۰
ET-2	۳۴	۳۰
ET-3	۳۲	۲۹
ET-3*	۳۵	۳۰

ET-4	۳۰	۲۶
ET-5	۲۷	۲۴

۵-۴-۲-۱۰- چسبندگی

یکی از عوامل تأثیرگذار در انتخاب مکانیزم نگهداری جبهه کار، چسبندگی مسیر پروژه است. در مطالعات مقدماتی ژئوتکنیکی صورت گرفته، مقدار چسبندگی در دو حالت زهکشی شده (C') و زهکشی نشده تحکیم یافته (C_{CU}) با در نظر گرفتن جدول ۵-۶ در جدول ۵-۱۵ آورده شده است.

جدول ۵-۱۵: چسبندگی در گستره‌ی پروژه خط ۷ قطعه‌ی شمالی- جنوبی (شرکت مهندسی سپاسد، ۱۳۸۷)

نوع زمین‌شناسی مهندسی	C' (kpa)	C_{CU} (kpa)
ET-1	۲۰	۱۵
ET-2	۲۵	۲۰
ET-3	۳۰	۲۵
ET-3*	۳۵	۴۰
ET-4	۳۵	۴۰
ET-5	۴۰	۵۰

۵-۴-۲-۱۱- شرایط آب زیرزمینی

انتخاب ماشین حفاری مکانیزه در محیط‌های شهری از دیدگاه مواجه با آب‌های ورودی به داخل تونل دارای اهمیت قابل توجهی است، چرا که عدم شناخت وضعیت آب زیرزمینی و راهکارهای مقابله با آن، موجب افزایش بیش از حد هزینه‌های دوره‌ی اجرا و یا افزایش زمان پروژه می‌گردد. با توجه به برش طولی ژئوتکنیکی مسیر، حدود ۶۰ درصد طولی تونل با آب‌های زیرزمینی برخورد داشته است. بنابراین، وضعیت آب‌های زیرزمینی نقش تعیین‌کننده‌ای را در طراحی و ساخت سازه‌های زیرزمینی موردنظر ایفا کرده است (شرکت مهندسی سپاسد، ۱۳۸۷).

جهت و شیب جریان آب زیرزمینی در طول مسیر مترو مورد نظر، از شمال به جنوب، با شیب

هیدرولیکی ۰/۱ تا ۶ درصد بوده است. جهت و شیب جریان آب زیرزمینی در طول مسیر خط ۷ (شمالی - جنوبی) متروی تهران در جدول ۵-۱۶ آورده شده است (مهندسی مشاور فن آوران (زفا)، ۱۳۸۸).

جدول ۵-۱۶: شرایط آب زیرزمینی در طول مسیر پروژه (مهندسی مشاور فن آوران (زفا)، ۱۳۸۸)

فاصله از مبدا (N۷)(کیلومتر)	جهت جریان	شیب جریان (درصد)
۳/۳ تا ۲/۳	شرق به غرب	۰/۷ تا ۱
۵/۷ تا ۳/۳	غرب به شرق	۰/۷ تا ۰/۰۵
۹/۵ تا ۵/۷	شرق به غرب	۰/۳ تا ۰/۹
۱۱/۸ تا ۹/۵	غرب به شرق	۰/۱ تا ۰/۷

به منظور ارزیابی وضعیت آب‌های زیرزمینی و برآورد میزان جریان آب به داخل تونل (درحین حفاری)، تراوایی تخمینی زمین در ارتباط با سطح ایستابی اندازه‌گیری شده نسبت به کف تونل، در بخش‌های مختلف خط پروژه، مورد توجه قرار گرفته است. نتیجه ارزیابی مذکور، در برش طولی ژئوتکنیکی مسیر، با واژه‌های توصیفی زیر عرضه گردیده است (جدول ۵-۱۷) (مهندسی مشاور فن آوران (زفا)، ۱۳۸۸).

جدول ۵-۱۷: واژه‌های توصیفی وضعیت آب زیرزمینی بر اساس میزان جریان تخمینی (مهندسی مشاور فن آوران (زفا)، ۱۳۸۸)

میزان جریان تخمینی در هر ۱۰ متر طول تونل (لیتر در دقیقه)	واژه‌های توصیفی وضعیت آب زیرزمینی
بدون جریان آب	مرطوب (Damp)
۱۰ تا ۲۵	خیس (Wet)
۲۵ تا ۱۲۵	چکان (Dripping)

همچنین آب زیرزمینی در عمق کم در بخش‌های شمالی گستره‌ی پروژه مورد مطالعه وجود دارد. از کیلومتر ۱۹ تا انتهای مسیر با تونل برخورد داشته است. دلیل تشکیل این آبخوان‌ها وجود لایه‌هایی از

رسوبات ریزدانه در بین رسوبات درشت‌دانه، در بخش شمال غربی شهر تهران است (مهندسين مشاور زمین فن‌آوران (زفا)، ۱۳۸۸).

۵-۴-۱۲- حضور گاز

حضور گاز یکی دیگر از پارامترهای تأثیرگذار در انتخاب ماشین حفاری مکانیزه است. بر اساس گزارشات، حضور گاز در محدوده‌ی قطعه‌ی شمالی- جنوبی در منطقه‌ی تقاطع خیابان فاطمی با بزرگراه نواب اعلام شده است (مهندسی مشاور فن‌آوران (زفا)، ۱۳۸۸). بدین ترتیب به علت آنکه ماشین Slurry در قسمت جلوی جبهه‌کار لایه‌ای نفوذناپذیر تشکیل می‌دهد، می‌تواند در جهت پیشگیری در برابر حضور گاز برتری نسبت به ماشین EPB داشته باشد.

۵-۵- جمع‌بندی

بر اساس مطالعات صورت گرفته بر روی گزارش‌های زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی پروژه‌ی خط ۷ قطعه‌ی شمالی- جنوبی متروی تهران، محیط این پروژه در محیطی ریزدانه است در حالی که به مرور از سمت جنوب به شمال به اندازه ذرات تشکیل دهنده‌ی محیط افزایش یافته است. همچنین با بررسی داده‌های موجود مورد استفاده در حفاری خط ۷ قطعه‌ی شمالی- جنوبی، بازه‌های پارامترهای مختلف که برای انتخاب ماشین حفاری مکانیزه انتخاب در این فصل با بررسی داده‌ها موجود، زمینه‌ای برای مقایسه با محدوده‌های ارائه شده در فصل چهار، در فصل بعدی آماده شده است. در فصل بعد به مقایسه‌ی محدوده‌ی کاربری معرفی شده در استانداردها و توصیه‌نامه‌های بررسی شده و محدوده‌ی داده‌های بدست آمده از مطالعات انجام شده در پروژه و تعیین میزان تأثیر آنها و همچنین تعیین میزان تأثیر پارامترهای مختلف با استفاده از روش تصمیم‌گیری چندمعیاره‌ی سلسله‌مراتبی دلفی فازی اقدام شده است.

فصل ششم

انتخاب ماشین حفاری مکانیزه

خط ۷ قطعه‌ی شمالی - جنوبی

متروی تهران

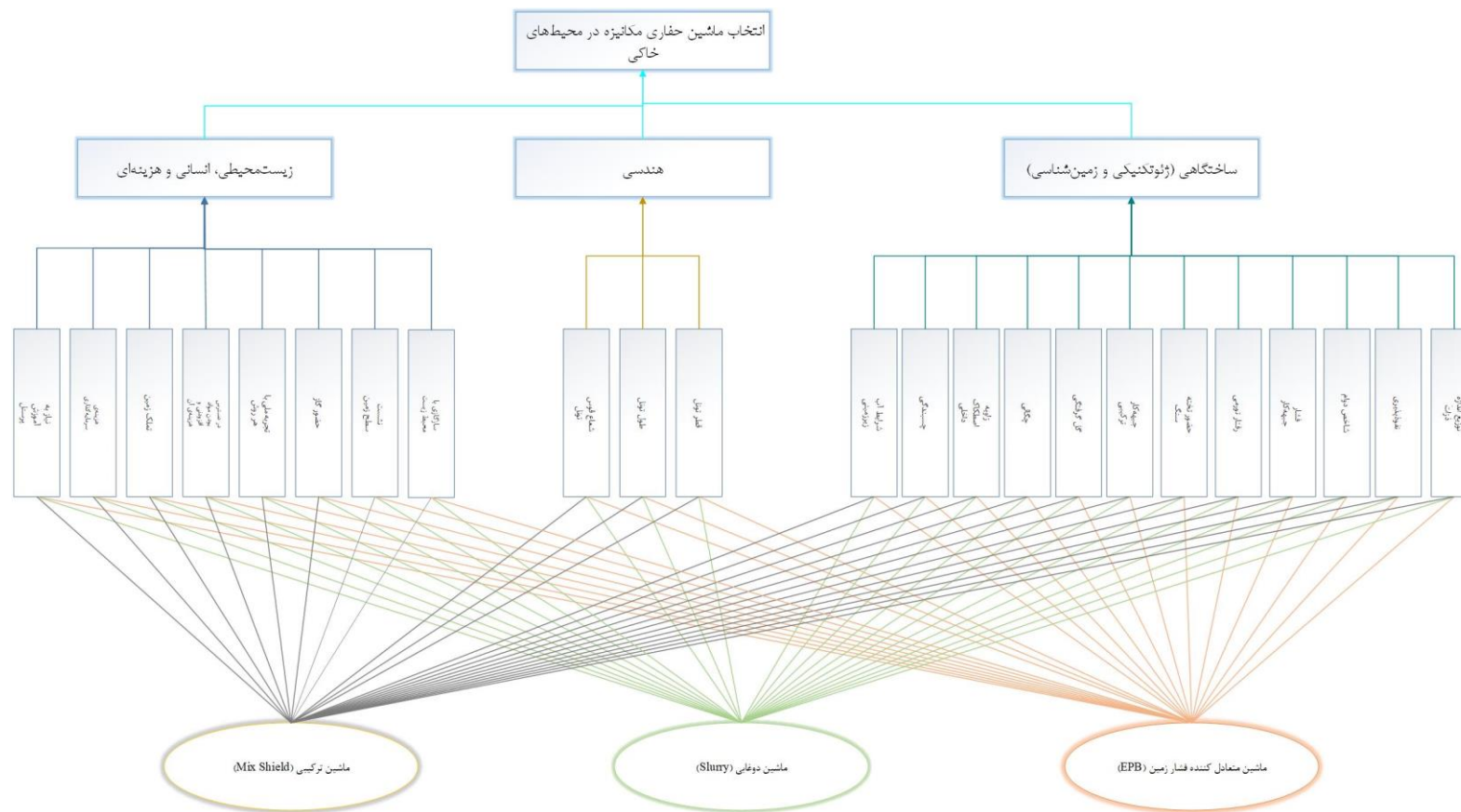
۶-۱- مقدمه

در این فصل به بررسی مراحل مختلف انتخاب ماشین حفاری مکانیزه در محیط خاکی با استفاده از روش تصمیم‌گیری سلسله‌مراتبی دلفی فازی اقدام شده است. پارامترهای مختلفی در انتخاب TBM تأثیرگذارند، از این رو ابتدا باید میزان تأثیر هر یک از آنها را با توجه به نظر کارشناسان تونل‌سازی با توجه به اطلاعات طول خط ۷ متروی تهران قطعه‌ی شمالی- جنوبی بدست آورد. پس از تعیین میزان تأثیر هر یک از شاخص‌های اصلی و زیر پارامترهای آنها، به تعیین وزن هر یک از ماشین‌های حفاری مکانیزه با مقایسه‌ی توصیه‌های موجود در ارتباط با محدوده‌ی کاربرد ماشین‌های حفاری و داده‌های طول مسیر پروژه که به ترتیب در بخش‌های ۴-۳ و ۵-۴ آورده شده است، حاصل شده است. در نهایت با ضرب وزن هر یک از این پارامترها در وزن هر ماشین در آن پارامتر اولویت‌بندی ماشین‌های حفاری مکانیزه بدست آمده است.

۶-۲- ارزیابی پارامترهای مؤثر بر انتخاب ماشین حفاری مکانیزه

به منظور جمع‌آوری نظر کارشناسان و خبرگان تونل‌سازی پرسش‌نامه‌هایی طراحی شد و در میان آنها توزیع شد. این پرسش‌نامه‌ها شامل چهار بخش پارامترهای ساختگاهی (ژئوتکنیکی و زمین‌شناسی)، پارامترهای هندسی، پارامترهای زیست‌محیطی، انسانی و هزینه‌ای و دسته‌های پارامترها بوده و برای تکمیل شدن به ۱۹ تن از متخصصان دانشگاهی و فنی تونل‌سازی همراه با اطلاعات خط ۷ متروی تهران (شمالی- جنوبی) جهت آشنایی با این خط، ارسال شده است. از میان فرم‌های ارسال شده، ۱۱ فرم تکمیل و دریافت شد که برای ورودی روش تحلیل سلسله‌مراتبی دلفی فازی مورد استفاده قرار گرفتند. در ادامه پیاده‌سازی روش برای هر یک از بخش‌های یاد شده در قسمتی مجزا تشریح شده است. جدول ۶-۱، فرم‌های نظرسنجی ارسال شده را نشان می‌دهند. در این فرم‌ها از کارشناسان خواسته شده بود بسته به نظر شخصی خویش، میزان شناخت از محیط پروژه‌ی خط ۷ (شمالی- جنوبی) یا با توجه به اطلاعات ضمیمه به پرسش‌نامه و نیز اهمیت هر یک از پارامترها را با استفاده از جدول ۶-۲

تکمیل کنند.



شکل ۶-۱: نمودار سلسله مراتبی انتخاب ماشین حفاری مکانیزه

جدول ۶-۱: فرم پرسشنامه‌های ارسالی برای کارشناسان

[illegible]

ادامه‌ی جدول ۶-۱: فرم پرسشنامه‌های ارسالی برای کارشناسان

حضور تخته سنگ	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	چسبندگی
حضور تخته سنگ	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	شرایط آب زیرزمینی
حضور تخته سنگ	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	خطر گل گرفتگی
حضور تخته سنگ	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	جبهه کار ترکیبی
زاویه‌ی اصطکاک داخلی	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	چسبندگی
زاویه‌ی اصطکاک داخلی	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	شرایط آب زیرزمینی
زاویه‌ی اصطکاک داخلی	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	خطر گل گرفتگی
زاویه‌ی اصطکاک داخلی	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	جبهه کار ترکیبی
چسبندگی	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	شرایط آب زیرزمینی
چسبندگی	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	خطر گل گرفتگی
چسبندگی	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	جبهه کار ترکیبی
شرایط آب زیرزمینی	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	خطر گل گرفتگی
شرایط آب زیرزمینی	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	جبهه کار ترکیبی
خطر گل گرفتگی	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	جبهه کار ترکیبی

پارامترهای هندسی																	
معیار	ترجیح معیار ۱ بر معیار ۲								اهمیت یکسان	ترجیح معیار ۱ بر معیار ۲							
قطر تونل	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹
قطر تونل	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹
طول تونل	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹

پارامترهای زیست محیطی، انسانی و هزینه‌ای																	
معیار	ترجیح معیار ۱ بر معیار ۲								اهمیت یکسان	ترجیح معیار ۱ بر معیار ۲							
نشست سطح زمین	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹
نشست سطح زمین	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹
نشست سطح زمین	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹
نشست سطح زمین	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹
نشست سطح زمین	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹
نشست سطح زمین	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹
حضور گاز	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹
حضور گاز	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹
حضور گاز	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹
حضور گاز	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹
حضور گاز	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹
در دسترس بودن مواد افزودنی و هزینه‌ها	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹
در دسترس بودن مواد افزودنی و هزینه‌ها	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹
در دسترس بودن مواد افزودنی و هزینه‌ها	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹
در دسترس بودن مواد افزودنی و هزینه‌ها	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹
در دسترس بودن مواد افزودنی و هزینه‌ها	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹
تملك زمین	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹
تملك زمین	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹
تملك زمین	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹
هزینه‌ی سرمایه گذاری	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹
هزینه‌ی سرمایه گذاری	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹
نیاز به آموزش پرسنل	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹
نیاز به آموزش پرسنل	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹
سازگاری با محیط زیست	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹
سازگاری با محیط زیست	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹

شاخص‌های کلی																	
معیار	ترجیح معیار ۱ بر معیار ۲								اهمیت یکسان	ترجیح معیار ۱ بر معیار ۲							
هندسی	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹
زیست محیطی، انسانی و هزینه‌ای	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹
زیست محیطی، انسانی و هزینه‌ای	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹

جدول ۶-۲: طبقه‌بندی کمی و کیفی برای مقایسه زوجی معیارها (Saaty, 2008)

اعداد فازی	
$\tilde{1} = (1,1,1)$	اهمیت یکسان
$\tilde{2} = (1,2,3)$	اهمیت بین یکسان و ضعیف
$\tilde{3} = (2,3,4)$	اهمیت ضعیف
$\tilde{4} = (3,4,5)$	اهمیت بین ضعیف و قوی
$\tilde{5} = (4,5,6)$	اهمیت قوی
$\tilde{6} = (5,6,7)$	اهمیت بین قوی و خیلی قوی
$\tilde{7} = (6,7,8)$	اهمیت خیلی قوی
$\tilde{8} = (7,8,9)$	اهمیت بین خیلی قوی و مطلق
$\tilde{9} = (8,9,10)$	اهمیت مطلق

با توجه به جدول ۶-۱ نظر کارشناسان در مورد وزن و اهمیت هر معیار در رابطه با پارامترهای مربوط به شاخص‌های مورد نظر، گرفته شد. به عنوان مثال، مقایسه معیارهای "توزیع اندازه ذرات" و "نفوذپذیری"، از کارشناسان خواسته شده تا در شاخص ساختگاهی، کدامیک نسبت به دیگر از اهمیت بیشتری برخوردار است و این اهمیت تا چه میزان است. اگر عدد ۱ را انتخاب نمایند به معنای آن است که این دو معیار در انتخاب ماشین حفاری مکانیزه برای شاخص ساختگاهی، اهمیت یکسان به معیار نفوذپذیری دارد. همچنین اگر عدد ۸ به سمت معیار نفوذپذیری (سمت چپ) را انتخاب کنند به معنای آن است که معیار نفوذپذیری نسبت به معیار توزیع اندازه ذرات از اهمیت بین خیلی قوی و مطلق برخوردار است. در ادامه انجام روش برای هر یک از شاخص‌ها در قسمت‌های جداگانه آورده شده است.

۶-۲-۱- تعیین میزان تأثیر پارامترهای زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی (ساختگاهی)

با در نظر گرفتن پرسشنامه‌های موجود، ماتریس مقایسه زوجی فازی متناظر با هر یک از پارامترها از نظر کارشناسان مختلف به صورت جداگانه برای هر کارشناس تشکیل شده است. این ماتریس‌ها با توجه به رابطه‌ی (۲-۵) تشکیل شده‌اند که برای نمونه یکی از این ماتریس‌ها در جدول ۶-۲ آورده شده است و سایر جداول در پیوست شماره‌ی ۲ آورده شده است.

پس از دریافت نظرهای کارشناسان، ماتریس مقایسه زوجی فازی دلفی بین پارامترهای ساختگاهی محاسبه شده است و نتایج آن در جدول ۴-۶ آورده شده است. همچنین با استفاده از روابط (۲-۶) تا (۸-۲) عدد فازی ($\tilde{Z}_i$)، وزن فازی ($\tilde{W}_i$) و وزن غیر فازی محاسبه شده است که در جدول ۳-۶ آورده شده است. سرانجام نتایج شکل ۲-۶ بدست آمده در نمایش داده شده است.

شکل ۲-۶، نشان می‌دهد که از نظر کارشناسان تونل‌سازی، پارامترهای توزیع اندازه ذرات و حضور تخته سنگ در مسیر پروژه دارای بیشترین تأثیر و پارامترهای رفتار تورمی و چگالی دارای تأثیر پایین‌تری نسبت به دیگر پارامترهای ساختگاهی مورد بررسی، هستند.

جدول ۲-۶: ماتریس مقایسه‌ی زوجی کارشناس شماره ۱ برای پارامترهای زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی

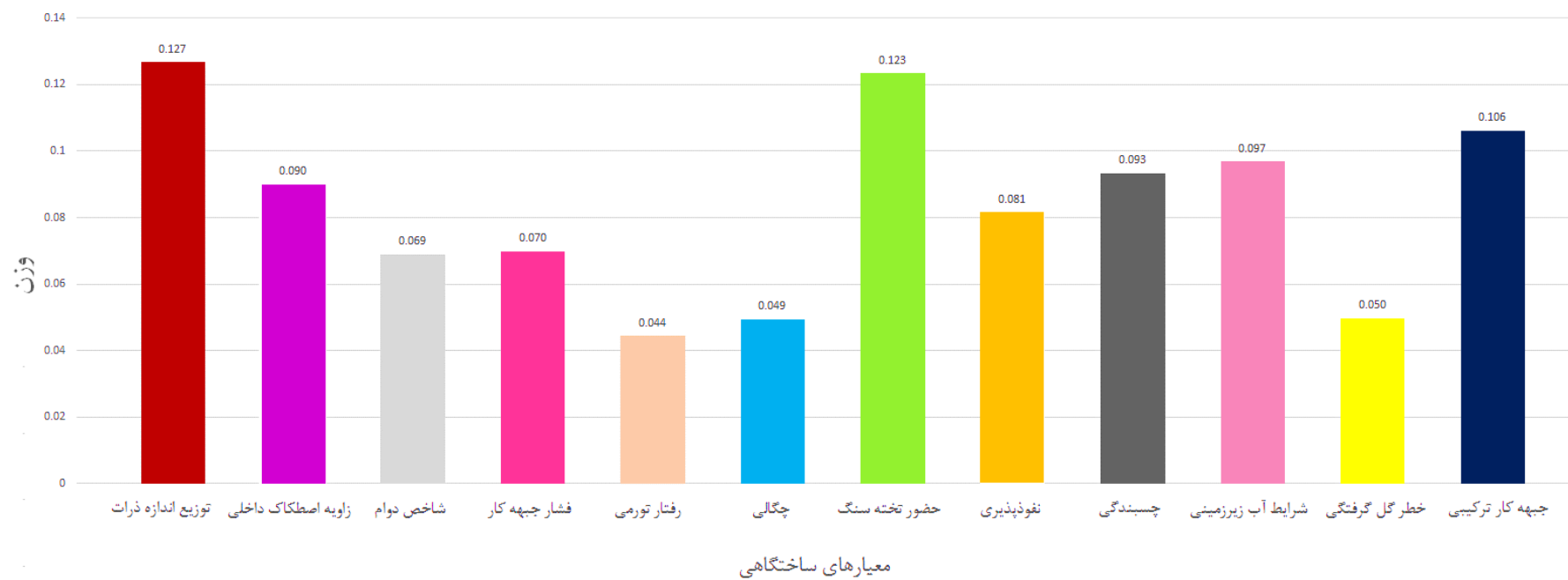
ماتریس مقایسه زوجی با توجه به نظرهای کارشناس ۱												
Mf	Rc	Uwc	C	ϕ	Bp	D	Sb	Fp	Ic	P	PsD	
۱	۵	۱	۱	۱	۵	۹	۹	۱	۵	۱	۱	توزیع اندازه ذرات (PsD)
۳	۳	۱	۵	۵	۴	۹	۵	۱	۶	۱	۱	نفوذپذیری (P)
۱	۱	۱	۱	۱	۱	۶	۵	۱	۱	۰/۱۶۷	۰/۲	شاخص دوام (Ic)
۱	۱	۱	۴	۴	۶	۹	۷	۱	۱	۱	۱	فشار جبهه کار (Fp)
۰/۱۴۳	۰/۱۴۳	۰/۱۴۳	۰/۱۶۷	۰/۱۶۷	۰/۲	۸	۱	۰/۱۴۳	۰/۲	۰/۲	۰/۱۱۱	رفتار تورمی (Sb)
۰/۱۲۵	۰/۱۲۵	۰/۱۲۵	۰/۱۶۷	۰/۱۶۷	۰/۱۶۷	۱	۰/۱۲۵	۰/۱۱۱	۰/۱۶۷	۰/۱۱۱	۰/۱۱۱	چگالی (D)
۴	۴	۳	۱	۱	۱	۶	۵	۰/۱۶۷	۱	۰/۲۵	۰/۲	حضور تخته سنگ (Bp)
۱	۱	۱	۱	۱	۱	۶	۶	۰/۲۵	۱	۰/۲	۱	زاویه اصطکاک داخلی (ϕ)
۱	۱	۱	۱	۱	۱	۶	۶	۰/۲۵	۱	۰/۲	۱	چسبندگی (C)
۱	۱	۱	۱	۱	۰/۳۳۳	۸	۷	۱	۱	۱	۱	شرایط آب زیرزمینی (Uwc)
۱	۱	۱	۱	۱	۱	۸	۷	۱	۱	۰/۳۳۳	۰/۲	خطر گل گرفتگی (Rc)
۱	۱	۱	۱	۱	۲	۸	۷	۱	۱	۰/۳۳۳	۱	جبهه کار ترکیبی (Mf)

جدول ۳-۶: وزن نهایی فازی نسبی و غیر فازی میان پارامترهای زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی (ساختگاهی)

وزن غیرفازی مولفه‌ها	$\tilde{W}_i$ (وزن فازی مولفه‌ها)	$\tilde{Z}_i$ ($a_{ij}, \delta_{ij}, \gamma_{ij}$)	
0.127	(0.093, 0.126, 0.17)	(0.333, 2.296, 5.529)	توزیع اندازه ذرات
0.081	(0.08, 0.08, 0.085)	(0.211, 1.048, 5.058)	نفوذپذیری
0.069	(0.06, 0.069, 0.08)	(0.182, 0.786, 4.765)	شاخص دوام
0.07	(0.05, 0.06, 0.102)	(0.158, 0.736, 6.086)	فشار جبهه کار
0.044	(0.039, 0.04, 0.056)	(0.147, 0.527, 2.332)	رفتار تورمی
0.049	(0.04, 0.048, 0.056)	(0.149, 0.594, 2.846)	چگالی
0.123	(0.103, 0.111, 0.16)	(0.272, 2.173, 6.635)	حضور تخته سنگ
0.09	(0.084, 0.09, 0.097)	(0.221, 1.189, 5.771)	زاویه اصطکاک داخلی
0.093	(0.08, 0.094, 0.099)	(0.248, 1.155, 5.901)	چسبندگی
0.097	(0.09, 0.096, 0.105)	(0.278, 1.185, 5.744)	شرایط آب زیرزمینی
0.05	(0.04, 0.046, 0.063)	(0.167, 0.55, 2.774)	خطر گل گرفتگی
0.106	(0.103, 0.104, 0.11)	(0.272, 1.47, 6.225)	جبهه کار ترکیبی
		(2.637, 13.71, 59.67)	$(\tilde{Z}_i \oplus \dots \oplus \tilde{Z}_i)$
		(0.017, 0.073, 0.379)	$(\tilde{Z}_i \oplus \dots \oplus \tilde{Z}_i)^{-1}$
$\sum = 1.00$			

جدول ۴-۶: ماتریس مقایسه زوجی فازی دلفی میان پارامترهای زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی (ساختمانی)

جبهه کار ترکیبی	خطر گل گرفتگی	شرایط آب زیرزمینی	چسبندگی	زاویه اصطکاک داخلی	حضور تخته سنگ	چگالی	رفتار توری	فشار جبهه کار	شاخص دوام	نفوذپذیری	توزیع اندازه ذرات	
(0.333,1.56,5)	(2.5,18,7)	(0.111,0.964,4)	(0.111,3.774,7)	(0.111,2.475,7)	0.111,0.746,5	(1.5,88,9)	(1,3.7994,9)	(0.111,1.531,6)	(0.167,3.414,7)	(1,3.314,7)	(1,1,1)	توزیع اندازه ذرات
(0.125,0.69,6)	(0.333,2.542,7)	(0.333,1.853,9)	(0.166,0.757,7)	(0.25,2.158,7)	(0.125,0.46,6)	(0.143,0.821,9)	(0.125,0.668,5)	(0.125,1.327,8)	(0.333,3.291,7)	(1,1,1)	(0.143,0.302,1)	نفوذپذیری
(0.111,1.04,8)	(0.125,1.945,9)	(0.125,0.354,2)	(0.125,0.626,3)	(0.167,0.535,8)	(0.125,0.518,5)	(0.333,1.536,7)	(0.333,3.834,9)	(0.125,0.928,7)	(1,1,1)	(0.143,0.304,3)	(0.143,0.293,6)	شاخص دوام
(0.125,0.323,4)	(0.167,0.582,9)	(0.125,0.457,3)	(0.125,0.74,8)	(0.125,0.748,8)	(0.143,1.027,8)	(0.125,1.407,9)	(0.111,0.698,9)	(1,1,1)	(0.143,1.078,8)	(0.125,0.753,8)	(0.167,0.653,9)	فشار جبهه کار
(0.111,0.367,1)	(0.111,0.989,5)	(0.111,0.218,1)	(0.125,0.452,1)	(0.125,0.307,1)	(0.125,0.385,3)	(0.143,0.677,8)	(1,1,1)	(0.111,1.423,9)	(0.111,0.283,3)	(0.2,1.496,8)	(0.111,0.263,1)	رفتار توری
(0.111,0.406,2)	(0.125,0.703,4)	(0.111,0.333,2)	(0.167,0.875,5)	(0.167,2.388,8)	(0.111,0.23,0.5)	(1,1,1)	(0.125,1.477,7)	(0.111,0.711,8)	(0.143,0.651,3)	(0.111,1.218,7)	(0.111,0.17,1)	چگالی
(0.167,1.925,8)	(1.4,567,8)	(0.111,2.15,7)	(0.125,3.96,7)	(0.125,2.388,8)	(1,1,1)	(2.4,343,9)	(0.333,2.595,8)	(0.125,0.974,7)	(0.2,1.93,8)	(0.167,2.179,8)	(0.2,1.341,9)	حضور تخته سنگ
(0.125,1.132,7)	(0.2,2.083,6)	(0.25,2.054,8)	(0.333,2.02,7)	(1,1,1)	(0.125,0.42,8)	(0.167,1.398,6)	(1,3.253,8)	(0.125,1.337,8)	(0.125,1.869,6)	(0.143,0.463,4)	(0.143,0.404,9)	زاویه اصطکاک داخلی
(0.125,1.36,7)	(0.5,2.402,8)	(0.25,2.054,8)	(1,1,1)	(0.143,0.495,3)	(0.143,0.337,8)	(0.2,1.422,8)	(1,2.293,8)	(0.125,1.352,8)	(0.333,2.16,8)	(0.143,1.321,6)	(0.143,0.5,9)	چسبندگی
(0.143,0.51,8)	(0.25,2.639,8)	(1,1,1)	(0.125,0.487,4)	(0.143,0.533,4)	(0.143,0.465,9)	(0.5,3,9)	(1.4,581,9)	(0.333,2.187,8)	(0.5,2.823,8)	(0.111,0.54,3)	(0.25,1.038,9)	شرایط آب زیرزمینی
(0.111,0.492,1)	(1,1,1)	(0.125,0.38,4)	(0.125,0.41,2)	(0.167,0.48,5)	(0.125,0.22,1)	(0.25,1.422,8)	(0.2,1.01,9)	(0.111,1.718,6)	(0.111,0.514,8)	(0.143,0.393,3)	(0.143,0.193,0.5)	خطر گل گرفتگی
(1,1,1)	(1.2,031,9)	(0.125,1.967,7)	(0.143,1.438,8)	(0.143,0.883,8)	(0.125,0.475,6)	(0.5,2.465,9)	(1.4,223,9)	(0.25,3.098,8)	(0.125,1.333,9)	(0.167,1.451,8)	(0.2,0.675,3)	جبهه کار ترکیبی



شکل ۶-۲: نمودار ستونی وزن نهایی دلفی فازی معیارهای ساختمانی

۶-۲-۲- تعیین میزان تأثیر پارامترهای هندسی

با توجه به پرسش‌نامه‌های دریافتی، ماتریس مقایسه فازی زوجی متناظر با هر یک از پارامترهای هندسی از دیدگاه کارشناسان به صورت جداگانه تشکیل شده است. این ماتریس‌ها با استفاده از رابطه‌ی (۲-۵) تشکیل شده‌اند که برای نمونه یکی از این ماتریس‌ها در جدول ۴-۶ آورده شده است و سایر جداول در پیوست شماره‌ی ۳ آورده شده است.

جدول ۴-۶: ماتریس مقایسه زوجی کارشناس شماره ۱ برای پارامترهای هندسی

ماتریس مقایسه زوجی با توجه به نظرهای کارشناس ۱			
Tav	Tl	Td	
۷	۷	۱	قطر تونل (Td)
۷	۱	۰/۱۴۳	طول تونل (Tl)
۱	۰/۱۴۳	۰/۱۴۳	شعاع قوس تونل (Tav)

پس از دریافت نظرهای کارشناسان، ماتریس مقایسه زوجی فازی دلفی بین پارامترهای هندسی محاسبه شد و نتایج آن در جدول ۶-۶ آورده شده است.

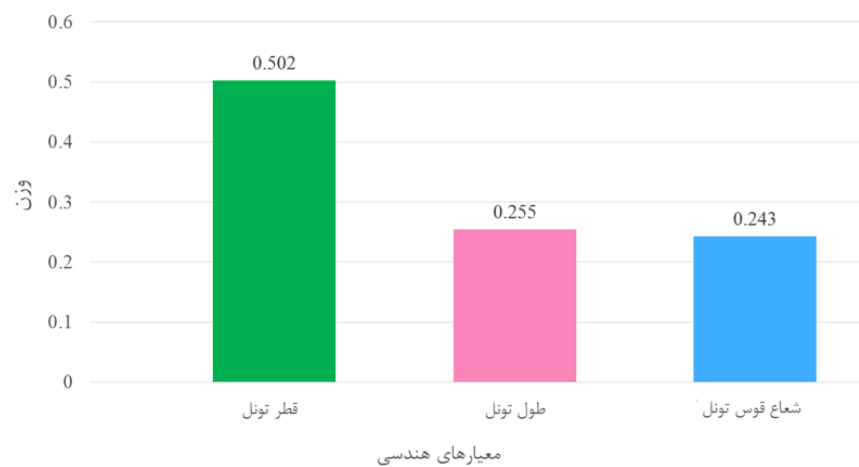
جدول ۶-۵: وزن نهایی فازی نسبی و غیر فازی میان پارامترهای هندسی

وزن غیر فازی	$\widetilde{W}_i$ (وزن فازی مولفه‌ها)	$\widetilde{Z}_i$ ($a_{ij}, \delta_{ij}, \gamma_{ij}$)	
0.502	(0.439, 0.473, 0.587)	(0.464, 2.031, 4.326)	قطر تونل
0.255	(0.241, 0.244, 0.27)	(0.264, 0.833, 2.41)	طول تونل
0.243	(0.17, 0.256, 0.315)	(0.251, 0.59, 3.107)	شعاع قوس تونل
		(0.98, 3.455, 9.844)	$(\widetilde{Z}_i \oplus \dots \oplus \widetilde{Z}_i)$
$\sum = 1/00$		(0.101, 0.289, 1.02)	$(\widetilde{Z}_i \oplus \dots \oplus \widetilde{Z}_i)^{-1}$

با استفاده از روابط (۲-۶) تا (۲-۸) عدد فازی $(\widetilde{Z}_i)$ ، وزن فازی $(\widetilde{W}_i)$ و وزن غیر فازی مولفه‌ها محاسبه شده است که در جدول ۵-۶ آورده شده است. در نهایت نتایج بدست آمده در شکل ۶-۳ نمایش داده شده است.

جدول ۶-۶: ماتریس مقایسه زوجی فازی دلفی میان پارامترهای هندسی

شعاع قوس تونل	طول تونل	قطر تونل	
(0.2,3.467,9)	(0.5,2.418,9)	(1,1,1)	قطر تونل
(0.167,1.401,7)	(1,1,1)	(0.111,0.413,2)	طول تونل
(1,1,1)	(0.143,0.713,6)	(0.111,0.288,5)	شعاع قوس تونل



شکل ۶-۳: نمودار ستونی وزن نهایی دلفی فازی معیارهای هندسی

همان‌طور که در شکل ۳-۶ مشاهده می‌شود از بین پارامترهای مؤثر هندسی، قطر تونل دارای بیشترین تأثیرگذاری را نسبت به سایر پارامترهای هندسی دارد.

۳-۲-۶- تعیین میزان تأثیر پارامترهای زیست‌محیطی، انسانی و هزینه‌ای

با توجه به پرسشنامه‌های موجود، ماتریس مقایسه فازی زوجی متناظر با هر یک از پارامترهای زیست‌محیطی، انسانی و هزینه‌ای از دیدگاه کارشناسان به صورت جداگانه تشکیل شده است. این ماتریس‌ها با استفاده از رابطه‌ی (۲-۵) تشکیل شده‌اند که برای نمونه یکی از این ماتریس‌ها در جدول ۵-۶ آورده شده است و سایر جداول در پیوست شماره‌ی ۴ آورده شده است.

جدول ۵-۶: ماتریس مقایسه زوجی کارشناس شماره ۱ برای پارامترهای زیست‌محیطی، انسانی و هزینه‌ای

ماتریس مقایسه زوجی با توجه به نظرهای کارشناس ۱							
Ea	Np	Co	Op	Aa&C	Pg	Gs	
۱	۰/۱۶۷	۰/۱۶۷	۰/۱۶۷	۵	۵	۱	نشست سطح زمین (Gs)
۰/۱۱۱	۰/۱۱۱	۰/۱۱۱	۰/۱۱۱	۱	۱	۰/۲	حضور گاز (Pg)
۰/۱۴۳	۰/۱۴۳	۰/۱۱۱	۰/۱۱۱	۱	۱	۰/۲	در دسترس بودن مواد افزودنی و هزینه‌ها (Aa&C)
۶	۶	۱	۱	۹	۹	۶	تملک زمین (Op)
۶	۶	۱	۱	۹	۹	۶	هزینه سرمایه‌گذاری (Co)
۱	۱	۰/۱۶۷	۰/۱۶۷	۷	۹	۶	نیاز به پرسنل (Np)
۱	۱	۰/۱۶۷	۰/۱۶۷	۷	۹	۱	سازگاری با محیط زیست (Ea)

پس از دریافت نظر کارشناسان، ماتریس مقایسه فازی زوجی دلفی بین پارامترهای شاخص زیست‌محیطی، انسانی و هزینه‌ای مؤثر بر انتخاب ماشین حفاری مکانیزه تشکیل شده که نتایج آن در جدول ۶-۶ آورده شده است.

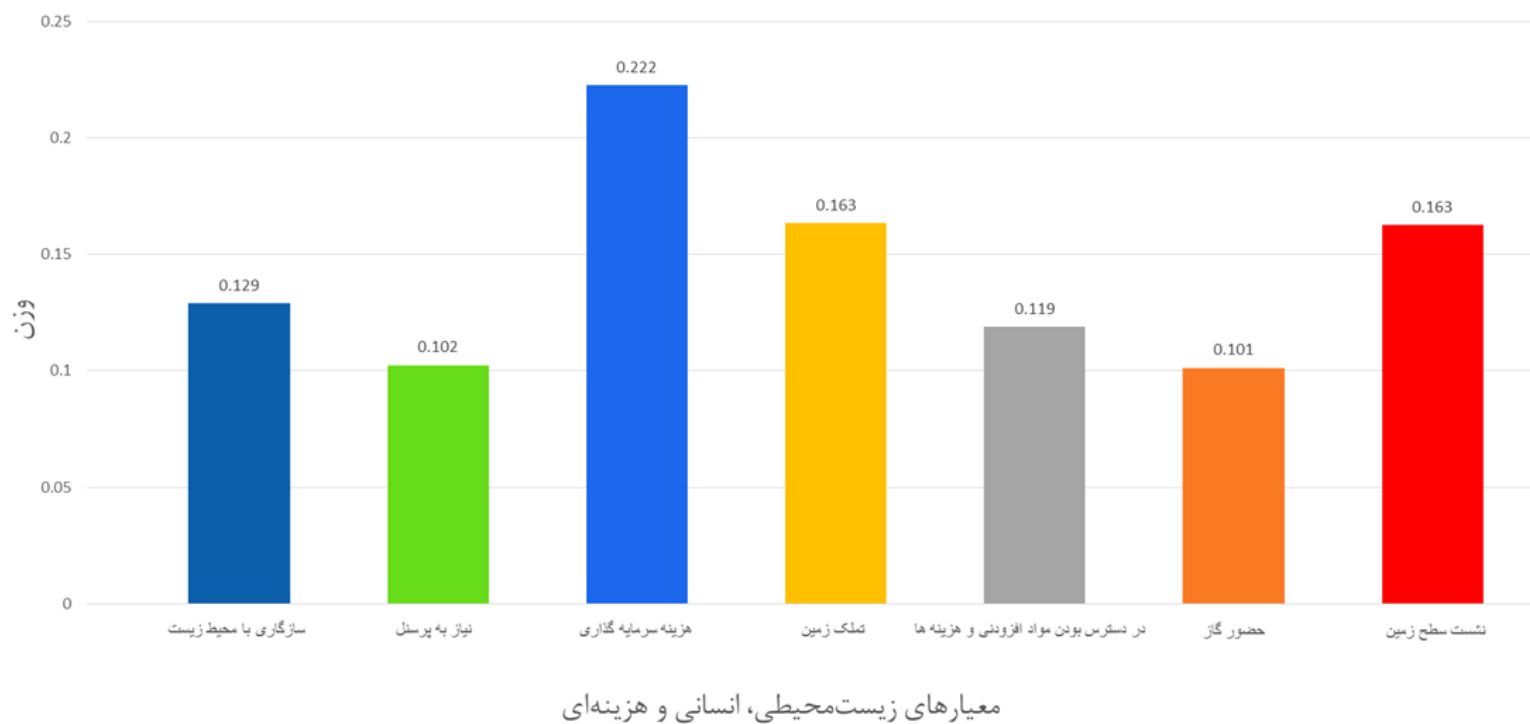
با در نظر گرفتن جدول ۶-۶ و با استفاده از روابط (۲-۶) تا (۲-۸) عدد فازی $(\tilde{Z}_i)$ ، وزن فازی $(\tilde{W}_i)$ و وزن غیر فازی مولفه‌ها محاسبه شده است که در جدول ۶-۷ آورده شده است. در نهایت نتایج بدست آمده در شکل ۴-۶ نمایش داده شده است.

جدول ۶-۶: ماتریس مقایسه زوجی فازی دلفی میان پارامترهای زیست محیطی، انسانی و هزینه‌ای

سازگاری با محیط زیست	نیاز به پرسنل	هزینه سرمایه‌گذاری	تملك زمین	در دسترس بودن مواد افزودنی و هزینه‌ها	حضور گاز	نشست سطح زمین	
(0.111,1.177,9)	(0.111,1.237,8)	(0.111,0.877,8)	(0.167,0.852,8)	(0.125,1.22,8)	(1,2.928,8)	(1,1,1)	نشست سطح زمین
(0.111,1.28,6)	(0.111,1.571,6)	(0.111,0.323,4)	(0.111,0.627,5)	(0.2,0.827,5)	(1,1,1)	(0.125,0.341,1)	حضور گاز
(0.143,1.286,7)	(0.143,1.112,5)	(0.111,0.404,2)	(0.111,0.89,5)	(1,1,1)	(0.2,1.208,5)	(0.125,0.819,8)	در دسترس بودن مواد افزودنی و هزینه‌ها
(0.25,2.031,6)	(0.333,3.095,6)	(0.2,0.617,3)	(1,1,1)	(0.2,1.123,9)	(0.2,1.6,9)	(0.125,1.173,6)	تملك زمین
(0.333,3.613,7)	(0.333,4.502,7)	(1,1,1)	(0.333,1.618,5)	(0.5,2.473,9)	(0.25,3.087,9)	(0.125,1.14,9)	هزینه سرمایه‌گذاری
(0.2,0.592,1)	(1,1,1)	(0.143,0.222,3)	(0.167,0.323,3)	(0.2,0.9,7)	(0.167,0.636,9)	(0.125,0.808,9)	نیاز به پرسنل
(1,1,1)	(1,1.69,5)	(0.143,0.276,3)	(0.167,0.492,4)	(0.143,0.777,7)	(0.167,0.781,9)	(0.111,0.85,9)	سازگاری با محیط زیست

جدول ۶-۷: وزن نهایی فازی نسبی و غیر فازی میان پارامترهای هندسی

وزن غیرفازی مولفه‌ها	$\tilde{W}_i$ (وزن فازی مولفه‌ها)	$\tilde{Z}_i$ ($a_{ij}, \delta_{ij}, \gamma_{ij}$)	
0.163	(0.136, 0.158, 0.192)	(0.224, 1.214, 6.045)	نشست سطح زمین
0.101	(0.095, 0.102, 0.103)	(0.168, 0.734, 3.221)	حضور گاز
0.119	(0.11, 0.118, 0.124)	(0.18, 0.908, 3.911)	در دسترس بودن مواد افزودنی و هزینه‌ها
0.163	(0.15, 0.16, 0.175)	(0.261, 1.35, 4.723)	تملك زمین
0.222	(0.18, 0.21, 0.282)	(0.344, 2.173, 5.63)	هزینه سرمایه‌گذاری
0.102	(0.074, 0.108, 0.13)	(0.213, 0.57, 3.386)	نیاز به پرسنل
0.129	(0.096, 0.14, 0.152)	(0.251, 0.737, 4.44)	سازگاری با محیط زیست
		(1.643, 7.688, 31.354)	$(\tilde{Z}_1 \oplus \dots \oplus \tilde{Z}_i)$
$\sum = 1.00$		(0.032, 0.13, 0.608)	$(\tilde{Z}_1 \oplus \dots \oplus \tilde{Z}_i)^{-1}$



شکل ۴-۶: نمودار ستونی وزن نهایی دلفی فازی معیارهای زیست محیطی، انسانی و هزینه‌ای

با توجه به شکل ۴-۶ از بین پارامترهای زیست محیطی، انسانی و هزینه‌ای مؤثر بر انتخاب ماشین حفاری مکانیزه، معیار هزینه‌ی سرمایه گذاری دارای بیشترین اهمیت و حضور گاز از کمترین اهمیت برخوردارند.

۴-۲-۶- تعیین میزان تأثیر شاخص‌های اصلی

با توجه به پرسشنامه‌های موجود، ماتریس مقایسه زوجی فازی متناظر با هر یک از شاخص‌های اصلی از نظر کارشناسان مختلف به صورت جداگانه برای هر متخصص تشکیل شده است. این ماتریس‌ها با استفاده از رابطه‌ی (۲-۵) تشکیل شده‌اند که برای نمونه یکی از این ماتریس‌ها در جدول ۸-۶ آورده شده است و سایر جداول در پیوست شماره‌ی ۵ آورده شده است.

جدول ۸-۶: ماتریس مقایسه زوجی کارشناس ۱ برای شاخص‌های اصلی

ماتریس مقایسه زوجی با توجه به نظرهای کارشناس ۱			
E,H&C	TG	G	
۱	۷	۱	ساختمانی (G)
۰/۱۲۵	۱	۰/۱۴۳	هندسی (TG)
۱	۸	۱	زیست محیطی، انسانی و هزینه‌ای (E,H&C)

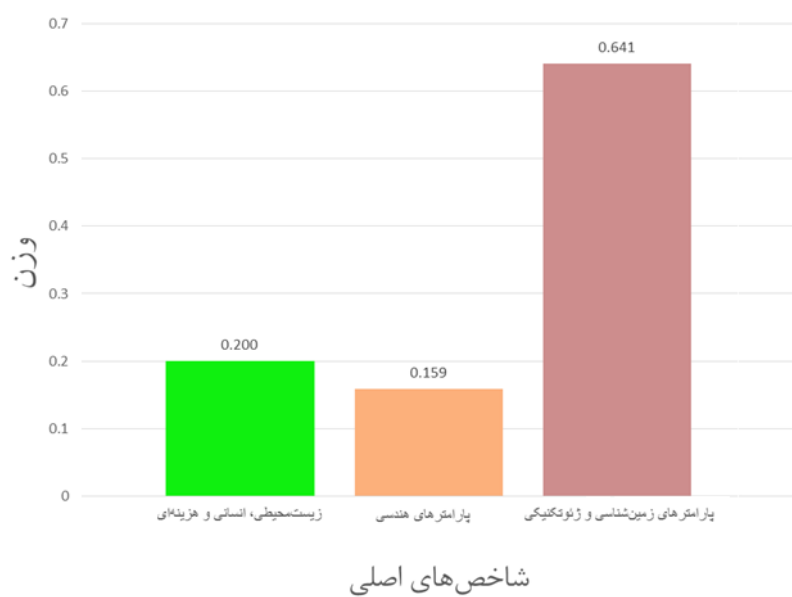
پس از دریافت نظر کارشناسان، ماتریس مقایسه زوجی بین پارامترهای شاخص هندسی مؤثر بر انتخاب ماشین حفاری مکانیزه تشکیل شده که نتایج آن در جدول ۹-۶ آورده شده است.

با در نظر گرفتن جدول ۹-۶ و با استفاده از روابط (۲-۶) تا (۲-۸) عدد فازی $(\tilde{Z}_i)$ ، وزن فازی $(\tilde{W}_i)$ و وزن غیر فازی مولفه‌ها محاسبه شده است که در جدول ۱۰-۶ آورده شده است. در نهایت نتایج بدست آمده در شکل ۵-۶ نمایش داده شده است.

همان‌طور که در شکل ۵-۶ مشاهده می‌شود از میان شاخص‌های اصلی، شاخص ساختمانی دارای بیشترین تأثیرگذاری را نسبت به سایر شاخص‌ها دارد.

جدول ۶-۹: ماتریس مقایسه زوجی فازی دلفی میان شاخص‌های اصلی

زیست‌محیطی، انسانی و هزینه‌ای	هندسی	ساختمانی (ژئوتکنیکی و زمین‌شناسی)	
(1,3.427,7)	(2,5.047,9)	(1,1,1)	ساختمانی (ژئوتکنیکی و زمین‌شناسی)
(0.125,0.93,6)	(1,1,1)	(0.111,0.198,0.5)	هندسی
(1,1,1)	(0.167,1.075,8)	(0.143,0.291,1)	زیست‌محیطی، انسانی و هزینه‌ای



شکل ۶-۵: نمودار ستونی وزن نهایی دلفی فازی معیارهای اصلی

جدول ۶-۱۰: وزن نهایی فازی نسبی و غیر فازی میان شاخص‌های اصلی

وزن غیر فازی مولفه‌ها	$\bar{W}_i$ (وزن فازی مولفه‌ها)	$\tilde{Z}_i$ ($a_{ij}, \delta_{ij}, \gamma_{ij}$)	
0.641	(0.536, 0.674, 0.704)	(1.26, 2.586, 3.98)	ساختمانی (ژئوتکنیکی و زمین‌شناسی)
0.159	(0.134, 0.148, 0.194)	(0.24, 0.57, 1.442)	هندسی
0.2	(0.161, 0.177, 0.27)	(0.287, 0.68, 2)	زیست محیطی، انسانی و هزینه‌ای
		(1.787, 3.834, 7.421)	$(\tilde{Z}_1 \oplus \dots \oplus \tilde{Z}_i)$
$\sum = 1.00$		(0.134, 0.26, 0.56)	$(\tilde{Z}_1 \oplus \dots \oplus \tilde{Z}_i)^{-1}$

۶-۳- تعیین وزن ماشین‌ها

پس از تعیین وزن هر یک از پارامترهای مورد نظرسنجی، به تعیین وزن ماشین حفاری مکانیزه با توجه به تطبیق قابلیت هر یک از ماشین‌های حفاری مورد استفاده در محیط خاکی با اطلاعات موجود و گزارشات ثبت شده در طول مسیر پروژه خط ۷ شمالی - جنوبی متروی تهران، وزن‌دهی ماشین‌ها با تشکیل ماتریس مقایسه فازی زوجی و سپس استفاده از روش بردار ویژه برای تعیین وزن هر یک از ماشین‌های بررسی شده در فصل ۴ استفاده شده است.

۶-۳-۱- تشکیل ماتریس مقایسه فازی زوجی ماشین‌ها

وزن هر کدام از ماشین‌ها برای انتخاب نوع ماشین حفاری مکانیزه در مطالعه‌ی موردی، تأثیر قابل توجهی دارد. بر اساس اطلاعات مسیر خط ۷ قطعه‌ی شمالی - جنوبی متروی تهران و گزارشات موجود، هر کدام از ماشین‌های حفاری مکانیزه با توجه به قابلیت‌های آنها در هر کدام از پارامترها، نسبت به یک‌دیگر با استفاده از روش سلسله مراتبی فازی (FAHP) مقایسه شده است. برای مثال، در جدول

۱۱-۶ ماشین EPB در درصد بالایی از ذرات کوچکتر از 0.06 میلی‌متر عملکرد بهتری دارد. با توجه به اطلاعات توزیع اندازه ذرات طول مسیر پروژه، ماشین EPB نسبت به ماشین Slurry عدد فازی ۴ را اخذ کرده است. به همین ترتیب ماشین Mix Shield نسبت به ماشین EPB نمره ۷ را اخذ کرده است. همچنین ماشین ترکیبی در مقایسه با ماشین Slurry در پارامتر توزیع اندازه ذرات عدد فازی ۸ را گرفته است.

جدول ۱۱-۶: ماتریس مقایسه زوجی تشکیل شده میان TBMها در زیرمعیار توزیع اندازه ذرات

توزیع اندازه ذرات			
Mix Shield	Slurry	EPB	
0.143	۴	۱	ماشین متعادل کننده فشار زمین (EPB)
0.125	۱	0.25	ماشین دوغابی (Slurry)
۱	۸	۷	ماشین ترکیبی (Mix Shield)

به همین ترتیب سایر جداول در پیوست شماره ۶، ماتریس‌های مقایسه زوجی فازی بین ماشین‌های حفاری مکانیزه در هر یک از پارامترها آورده شده است. در این جداول برای هر ۲۳ زیرمعیار (پارامتر)، ماتریس مقایسه زوجی بین سه ماشین‌ها متعادل کننده فشار زمین، دوغابی و ترکیبی تشکیل شده است.

با ورودی قرار دادن ماتریس‌های فوق الذکر در نرم افزار Matlab، بردار ویژه این ماتریس‌ها گرفته شده است. با این عمل، وزن هر یک از ماشین‌ها را در پارامتر مورد نظر بدست آمده است که در جدول ۱۲-۶ آورده شده است.

جدول ۱۲-۶: وزن ماشین‌های حفاری مکانیزه در پارامترهای مختلف

Mix Shield	Slurry	EPB	
0.77	0.063	0.167	توزیع اندازه ذرات
0.717	0.088	0.195	نفوذپذیری
0.111	0.444	0.444	شاخص دوام
0.2	0.4	0.4	فشار جبهه کار

ادامه جدول ۶-۱۳: وزن ماشین‌های حفاری مکانیزه در پارامترهای مختلف

۰/۵	۰/۲۵	۰/۲۵	رفتار تورمی
۰/۵۰۸	۰/۱۱۳	۰/۳۷۹	چگالی
۰/۲۳	۰/۱۲۲	۰/۶۴۸	حضور تخته سنگ
۰/۲۰۸	۰/۶۶۱	۰/۱۳۱	زاویه اصطکاک داخلی
۰/۲	۰/۶۸۳	۰/۱۱۷	چسبندگی
۰/۱۲۳	۰/۱۷	۰/۷۰۸	شرایط آب زیرزمینی
۰/۲۱۸	۰/۶۹۱	۰/۰۹۱	خطر گل گرفتگی
۰/۱۳۷	۰/۶۲۵	۰/۲۳۹	جبهه کار ترکیبی
۰/۳۳۳	۰/۳۳۳	۰/۳۳۳	قطر تونل
۰/۳۳۳	۰/۳۳۳	۰/۳۳۳	طول تونل
۰/۳۳۳	۰/۳۳۳	۰/۳۳۳	شعاع قوس تونل
۰/۱۳۷	۰/۶۲۵	۰/۲۳۹	نشست سطح زمین
۰/۳۳۳	۰/۳۳۳	۰/۳۳۳	حضور گاز
۰/۱۰۶	۰/۱۵	۰/۷۴۵	در دسترس بودن مواد افزودنی و هزینه ها
۰/۱۵	۰/۲۳۹	۰/۶۱۱	تملك زمین
۰/۰۷۳	۰/۲۷۹	۰/۶۴۸	هزینه سرمایه گذاری
۰/۰۸۱	۰/۱۳۵	۰/۷۸۴	نیاز به پرسنل
۰/۱۲۱	۰/۱۱۵	۰/۷۶۴	سازگاری با محیط زیست

بدین ترتیب وزن هر کدام از ماشین‌ها در پارامترهای مختلف بدست آورده شده است. با توجه به وزن هر یک از پارامترها و شاخص‌های اصلی، اولویت‌بندی ماشین‌های حفاری مکانیزه در مطالعه‌ی موردی این پژوهش بدست می‌آید.

۴-۶- اولویت‌بندی ماشین‌های حفاری مکانیزه

با توجه به بخش‌های گذشته، و با در نظر گرفتن شکل ۶-۱ با ضرب مقدار وزن ماشین در پارامتر مشخص، و وزن آن پارامتر و وزن شاخص اصلی پارامتر مذکور، وزن هر ماشین در پارامترها بدست آمده است. برای مثال وزن کلی ماشین حفاری مکانیزه متعادل کننده فشار زمین در پارامتر توزیع اندازه ذرات از ضرب وزن EPB در این پارامتر (۰/۱۶۷) (جدول ۶-۱۲) و وزن پارامتر توزیع اندازه ذرات (۰/۱۲۷) (جدول ۶-۳) و وزن شاخص اصلی آن یعنی شاخص ساختگاهی (۰/۶۴۱) (جدول ۶-۱۰) بدست آمده است. به همین صورت برای هر ماشین در تمام پارامترها عملیات بالا انجام شده است که نتایج آن در جدول ۶-۱۴ آورده شده است.

جدول ۶-۱۵، حاصل جمع تمامی آرایه‌های هر ستون جدول ۶-۱۴، تعیین کننده‌ی وزن کلی هر ماشین و نیز اولویت‌بندی ماشین‌های حفاری مکانیزه در پروژه‌ی خط ۷ قطعه‌ی شمالی- جنوبی متروی تهران است.

جدول ۶-۱۴: وزن کلی ماشین‌ها در پارامترهای مختلف

Mix Shield	Slurry	EPB	
۰/۰۶۳	۰/۰۰۵	۰/۰۱۴	توزیع اندازه ذرات
۰/۰۳۷	۰/۰۰۵	۰/۰۱	نفوذپذیری
۰/۰۰۵	۰/۰۲	۰/۰۲	شاخص دوام
۰/۰۰۹	۰/۰۱۸	۰/۰۱۸	فشار جبهه کار
۰/۰۱۴	۰/۰۰۷	۰/۰۰۷	رفتار تورمی
۰/۰۱۶	۰/۰۰۴	۰/۰۱۲	چگالی
۰/۰۱۸	۰/۰۱	۰/۰۵۱	حضور تخته سنگ
۰/۰۱۲	۰/۰۳۸	۰/۰۰۸	زاویه اصطکاک داخلی
۰/۰۱۲	۰/۰۴۱	۰/۰۰۷	چسبندگی
۰/۰۰۸	۰/۰۱۱	۰/۰۴۴	شرایط آب زیرزمینی
۰/۰۰۷	۰/۰۲۲	۰/۰۰۳	خطر گل گرفتگی
۰/۰۰۹	۰/۰۴۳	۰/۰۱۶	جبهه کار ترکیبی
۰/۰۲۷	۰/۰۲۷	۰/۰۲۷	قطر تونل
۰/۰۱۳	۰/۰۱۳	۰/۰۱۳	طول تونل
۰/۰۱۳	۰/۰۱۳	۰/۰۱۳	شعاع قوس تونل
۰/۰۰۴	۰/۰۲	۰/۰۰۸	نشست سطح زمین
۰/۰۰۷	۰/۰۰۷	۰/۰۰۷	حضور گاز
۰/۰۰۲	۰/۰۰۴	۰/۰۱۷	در دسترس بودن مواد افزودنی و هزینه ها
۰/۰۰۵	۰/۰۰۸	۰/۰۲	تملك زمین
۰/۰۰۳	۰/۰۱۲	۰/۰۲۸	هزینه سرمایه گذاری
۰/۰۰۲	۰/۰۰۳	۰/۰۱۶	نیاز به پرسنل
۰/۰۰۳	۰/۰۰۳	۰/۰۱۹	سازگاری با محیط زیست

جدول ۶-۱۵: وزن کلی ماشین‌های حفاری مکانیزه

Mix Shield	Slurry	EPB	وزن کلی TBMها
۰/۲۹	۰/۳۳۱	۰/۳۷۸	

به این ترتیب، ماشین حفاری مکانیزه متعادل کننده فشار زمین با بالاترین وزن، دارای اولویت اول، و ماشین حفاری مکانیزه دوغابی و ترکیبی در اولویت‌های بعدی قرار گرفته‌اند.

۶-۵- جمع‌بندی

با استفاده روش تصمیم‌گیری چندمعیاره‌ی سلسله مراتبی دلفی فازی وزن پارامترها و شاخص‌های اصلی بدست آمده است. با توجه به اطلاعات مربوط به خط ۷ قطعه‌ی شمالی- جنوبی و کاربری هر کدام از ماشین‌ها، وزن ماشین‌ها با استفاده از روش تصمیم‌گیری چندمعیاره‌ی سلسله مراتبی فازی بدست آمده است. با ضرب وزن‌های هر پارامتر در وزن شاخص اصلی خود و در وزن ماشین در پارامتر مربوطه وزن کلی ماشین در پارامترهای مختلف بدست آمده است. سپس با جمع حاصل این ضرایب مربوط به هر ماشین، وزن آن ماشین بدست آمده است. با توجه به این نتایج، ماشین حفاری EPB در اولویت اول با وزن ۰/۳۷۸، ماشین Slurry با وزن ۰/۳۳۱ در اولویت دوم و ماشین Mix Shield با وزن ۰/۲۹ در اولویت سوم پیشنهاد شده است.

فصل هفتم

نتیجه گیری و پیشنهادات

۷-۱- نتیجه‌گیری

۱) با توجه به این امر که مطالعات لازم در مورد مسیر تونل به زمان و بودجه‌ی کافی نیاز است تا نتیجه‌ی مطلوب حاصل شود، اما کارفرما با عدم اختصاص هزینه و فشار بر پیمانکار جهت اجرا هرچه زودتر پروژه، روش‌های ترکیبی با منطق فازی استفاده شود تا عدم داشتن اطلاعات مکفی را به حداقل برساند و از طرفی با ادغام تجربه خبرگان این حوزه با علم تونل‌سازی، مشکلات حفاری تونل را با در نظر گرفتن تجربه‌ی مهندسی و علم آنها به حداقل برسانند.

۲) در انتخاب ماشین حفاری مکانیزه، پارامترهای متعددی تأثیرگذار است که بسته به شرایط محیطی پروژه، متفاوت خواهند بود. در این پژوهش پارامترهای اصلی زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی، هندسی، زیست‌محیطی، انسانی و هزینه‌ای و زیرپارامترهای آنها برای تعیین میزان تأثیرگذاری هر یک برای انتخاب ماشین حفاری مکانیزه، برگزیده شده‌اند.

۳) انتخاب ماشین حفاری مکانیزه یک فرآیند علمی و مهندسی است، از این روی، روشی که بتواند از هر دو دیدگاه برای این مسئله، پاسخی پیدا کند، روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره بوده است.

۴) با توجه به عدم قطعیت‌های موجود در محیط‌های زیرزمینی، بهترین روش تصمیم‌گیری چند معیاره برای انتخاب ماشین حفاری مکانیزه، روش تحلیل سلسله مراتبی دلفی فازی بوده است.

۵) با طی کردن مراحل سلسله مراتبی دلفی فازی، میزان تأثیر شاخص‌های اصلی تعیین شده است. شاخص زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی با وزن $0/641$ دارای بالاترین تأثیرگذاری در میان شاخص‌های اصلی بوده است.

۶) با طی کردن مراحل سلسله مراتبی دلفی فازی، میزان تأثیر پارامترهای زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی تعیین شده است. پارامترهای توزیع اندازه ذرات و حضور تخته سنگ به ترتیب

با وزن ۰/۱۲۷ و ۰/۱۲۳ دارای بالاترین تأثیرگذاری در میان پارامترهای زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی بوده‌اند.

(۷) با طی کردن مراحل سلسله مراتبی دلفی فازی، میزان تأثیر پارامترهای هندسی تعیین شده است. پارامتر قطر تونل با وزن ۰/۵۰۲ دارای بالاترین تأثیرگذاری در میان پارامترهای هندسی بوده است.

(۸) با طی کردن مراحل سلسله مراتبی دلفی فازی، میزان تأثیر پارامترهای زیست‌محیطی، انسانی و هزینه‌ای تعیین شده است. پارامترهای هزینه‌ی سرمایه‌گذاری و تملک زمین به ترتیب با وزن ۰/۲۲۲ و ۰/۱۶۳ دارای بالاترین تأثیرگذاری در میان پارامترهای زیست‌محیطی، انسانی و هزینه‌ای بوده‌اند.

(۹) با استفاده از روش سلسله مراتبی فازی، وزن ماشین‌های حفاری مکانیزه در مقایسه با یکدیگر، در پارامترهای یکسان مشخص شده است. در مجموع شاخص‌های زمین‌شناسی و ژئوتکنیک (پارامترهای ساختگاهی) ماشین دوغابی با وزن ۰/۴۸۳ دارای بالاترین اولویت است.

(۱۰) با استفاده از روش سلسله مراتبی فازی، وزن ماشین‌های حفاری مکانیزه در مقایسه با یکدیگر، در پارامترهای یکسان مشخص شده است. در مجموع شاخص‌های هندسی ماشین‌ها نسبت به یکدیگر ارجحیتی نداشته‌اند.

(۱۱) با استفاده از روش سلسله مراتبی فازی، وزن ماشین‌های حفاری مکانیزه در مقایسه با یکدیگر، در پارامترهای یکسان مشخص شده است. در مجموع شاخص‌های زیست‌محیطی، انسانی و هزینه‌ای، ماشین متعادل کننده‌ی فشار زمین با وزن ۰/۵۸۹ دارای بالاترین اولویت است.

(۱۲) با احتساب میزان تأثیر پارامترها و وزن ماشین‌ها در هر یک از پارامترها، ماشین حفاری مکانیزه متعادل کننده‌ی فشار زمین با وزن ۰/۳۷۸ اولویت اول، ماشین دوغابی با وزن

۰/۳۳۱ اولویت دوم و ماشین ترکیبی با وزن ۰/۲۹ اولویت سوم انتخاب ماشین حفاری مکانیزه در پروژه‌ی خط ۷ قطعه‌ی شمالی- جنوبی متروی تهران بوده است.

۷-۲- پیشنهادات

(۱) وجود عدم قطعیت در شناخت وضعیت محیط پیرامون تونل‌ها، به دفعات به عنوان یکی از دلایل اصلی گسیختگی آن‌ها عنوان شده است و متخصصین بسیاری در خصوص تأثیرگذاری پارامترهای مرتبط با این عوامل در یک پروژه خاص تونل تأکید داشته‌اند. در این زمینه، یکی از مهم‌ترین چالش‌ها، عدم امکان شناسایی کامل شرایط زمین‌شناسی، ژئوتکنیکی در محدوده حفاری است. برای آن‌که بتوان از پیچیدگی‌ها و مشکلات خاصی که در خصوص عدم شناخت شرایط زمین اطراف تونل وجود دارد، تا حد زیادی کاست، باید منابع مالی، نیروی کار و زمان به منظور جمع‌آوری اطلاعات زمین‌شناسی، ژئوتکنیکی و بررسی اکتشافی در پروژه‌های حفاری تونل تخصیص یابد تا بتوان از پیچیدگی‌ها و مشکلات خاصی که در خصوص عدم شناخت شرایط زمین اطراف تونل وجود دارد تا حد زیادی کاهش داد. که این عمل موجب به حداقل رساندن عدم قطعیت می‌شود و در صورت استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره، به خبرگان مورد نظرسنجی در راستای شناخت بیشتر از محیط پروژه کمک می‌کند.

(۲) تشکیل کارگروهی از صاحب نظران تونل‌سازی و یا دست اندرکاران آن، جهت ارائه‌ی پرسش‌نامه‌هایی در امور متعدد مربوط به تونل‌سازی تا بتوان با این عمل، نظر کارشناسان را در جهت انتخاب و ارزیابی امور تونل‌سازی تأثیر داد.

منابع

آجلو ه، (۱۳۹۴) " روش های اجرای تونل های شهری و چالش های مرتبط مطالعه موردی: تونل های رسالت، نیایش و مترو اهواز "، مرکز مطالعات و برنامه ریزی شهر تهران، تهران، ص ۲۶.

آمون ص، معظمی نژاد غ، طاهری د، دوستی م، (۱۳۹۵)، تعیین الزامات فنی ماشین حفاری مکانیزه خط ۲ متروی تبریز، ششمین کنفرانس مکانیک سنگ ایران، تهران، ایران.

امنیه بخشنده ز، صابر م، موسوی س.ا، ازلی طریق ص، (۲۰۱۳)، " انتخاب مناسب ترین مجموعه ی بهسازی خاک در حفاری مکانیزه ی تونل خط ۷ متروی تهران "، مهندسی تونل و فضاهای زیرزمینی، ۲(۲): ۱۴۵-۱۵۴.

تقوائی م، روانشادنیامی م، شعبانی ش، (۱۳۹۵)، " انتخاب روش مناسب اجرای تونل های طویل با استفاده از روش TOPSIS تصمیم گیری "، کنفرانس بین المللی پژوهش در علوم و مهندسی، ترکیه، دبیرخانه دائمی همایش، دانشگاه استانبول، https://www.civilica.com/Paper-ICRSIE01-ICRSIE01_732.html

جعفری مقدم ع، (۱۳۸۸)، پایان نامه ارشد، " انتخاب ماشین حفاری مناسب تونل زنی کوچک مقطع با استفاده از روش تصمیم گیری چندمعیاره فازی (مطالعه موردی: فاضلاب شهری همدان) "، دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود.

حاجی میری م.ا، حسن پور ج، رستمی ج، (۱۳۹۵)، " انتخاب ماشین مناسب برای حفاری قطعه دوم تونل امامزاده هاشم از دیدگاه زمین شناسی مهندسی "، چهارمین کنگره بین المللی عمران، معماری و توسعه شهری، http://www.civilica.com/Paper-ICSAU04-ICSAU04_0176.html

حسن پور ج، شمسی غ، (۱۳۹۰)، " نقش مطالعات زمین شناسی و ژئوتکنیک در تونلسازی مکانیزه در شرایط دشوار زمین شناسی "، نهمین همایش ملی تونل، تهران، انجمن تونل ایران، https://www.civilica.com/Paper-ITC09-ITC09_147.html

حلاجی دیباور ب، سبزی زاده ل، چاکری ج، (۱۳۹۳)، " بهسازی خاک و شناسایی مخاطرات زمین شناسی مؤثر در تونل های حفاری شده با ماشین حفاری تمام مقطع (EPB-TBM) در زمین های نرم (مطالعه موردی خط ۲ متروی تبریز) "، اولین کنفرانس ملی مکانیک خاک و مهندسی پی، http://www.civilica.com/Paper-SMFE01-SMFE01_357.html

خدمات مهندسی پروژه خط ۷ متروی تهران، قطعه شرقی - غربی، گزارش مطالعات زمین شناسی تکمیلی پروژه خط ۷ متروی تهران، مهندسین مشاور ساحل.

خوش قلب آ، یوسفی راد م، مشایخی م، (۱۳۹۱)، " چگونگی انتخاب نوع ماشین حفاری تمام مقطع تونل نسبت به شرایط ژئوتکنیکی محل حفر "، دومین کنفرانس ملی سازه، زلزله و ژئوتکنیک، http://www.civilica.com/Paper-NCSEG02-NCSEG02_151.html

رضان‌نیا س. ر، عطایی م، میرزایی نصیرآباد ح، (۲۰۱۵)، اولویت بندی ریسک های زمین شناسی در تونل سازی مکانیزه با استفاده از روش های تصمیم گیری چند معیاره فازی، روش های تحلیلی و عددی در مهندسی معدن، ۵(۱۰)، ۴۹-۶۲.

رنجبر پاشاکلایی م، مهدی نژاد نوری ع، خادمی حمیدی ج، (۱۳۹۰)، " نقش پارامترهای زمین شناسی و مخاطرات ژئوتکنیکی در انتخاب ماشین تونلزنی "، نهمین همایش ملی تونل، http://www.civilica.com/Paper-ITC09-ITC09_011.html

شریعتی ش، یزدانی چمزینی ع، سلسانی آ، (۱۳۹۲)، " رتبه‌بندی ریسک در پروژه‌های تونلسازی با استفاده از روش ترکیبی AHP Fuzzy و Fuzzy TOPSIS "، کنفرانس بین المللی عمران، معماری و توسعه پایدار شهری، http://www.civilica.com/Paper-ICCAU01-ICCAU01_0707.html

شریف زاده م، شهریار ک، ترکمنی قطب ا، همتی شعبانی ع، (۱۳۸۵)، " اجرای تونل بروش مکانیزه با استفاده از TBM در توده سنگهای ضعیف (مطالعه موردی گیر کردن و توقف دستگاه TBM در تونل انتقال آب قمرود) "، هفتمین کنفرانس تونل ایران، http://www.civilica.com/Paper-ITC07-ITC07_092.html

شریف سامانی م، ابراهیم آبادی آ، بانگیان تبریزی ا، (۱۳۹۳)، " انتخاب بهینه ماشین حفار تمام مقطع تونل (TBM) با استفاده از تحلیل سلسله مراتبی فازی (FAHP) مطالعه موردی: تونل بهشت آباد. کنفرانس ملی علوم معدنی، http://www.civilica.com/Paper-ICMSM01-ICMSM01_079.html

شهریار ک، شریف زاده م، خادمی حمیدی ج، حدادی م، (۱۳۸۵)، " انتخاب ماشین تونلزنی تمام مقطع در سنگ بر اساس کاهش مخاطرات ژئوتکنیکی "، هفتمین کنفرانس تونل ایران، http://www.civilica.com/Paper-ITC07-ITC07_098.html

شیبانی ح، زارع ش، میرزائی نصیرآباد ح، فروغی م، (۱۳۹۱)، " بررسی تأثیر فشار جبهه کار بر نشست سطح زمین در تونلسازی مکانیزه در زمین نرم- مطالعه‌ی موردی: تونل قطعه‌ی شرقی-غربی خط ۷ متروی تهران "، مهندسی تونل و فضاهای زیرزمینی، ۱، v. 1، no. 1، p. 57-67.

صیادی ا. ر، رجب‌زاده ع، حسین‌پور سجیدان م، حیاتی م، (۱۳۸۸)، " رتبه‌بندی ریسک در پروژه‌های تونل‌سازی به کمک روش شباهت به گزینه ایده‌آل (TOPSIS) "، هشتمین کنفرانس تونل ایران، http://www.civilica.com/Paper-ITC08-ITC08_076.html.

عطایی م، (۱۳۹۴)، " تصمیم‌گیری چندمعیاره فازی "، چاپ دوم، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود.

فصیحی ا، زارع ش. ا، ازلی طریق ص، (۱۳۹۱)، " انتخاب ماشین حفاری مکانیزه مناسب برای حفر تونل قطعه شرقی- غربی خط ۷ مترو تهران "، نشریه علمی- پژوهشی مهندسی معدن، ۷(۱۵): ۷۷-۸۶.

عماد م، پرورش ع، نعمتی ت، طالبی‌نژاد ع، اسدی ا، قراباغی م، (۱۳۸۸)، ارزیابی ریسک در پروژه‌های حفاری مکانیزه تونل‌های مترو از نظر مسائل ژئوتکنیکی، دانشکده معدن، دانشگاه آزاد واحد تهران- جنوب.

کرمی م، باقرپور ر، رئیسی گهروبی د، فرامرزی ل، (۱۳۹۳)، " بررسی تأثیر عوامل زمین شناسی و خصوصیات ژئومکانیکی توده سنگ بر انتخاب ماشین حفاری تمام مقطع در تونل انتقال آب سبزکوه "، نشریه زمین شناسی مهندسی، ۸(۲): ۲۱۶۹-۲۱۹۸.

- گزارش مطالعات مقدماتی ژئوتکنیکی مسیر پروژه خط ۷ متروی تهران، مهندسین مشاور زمین فن آوران.
- مازندرانیان، ا.، سلطانی محمدی، س.، رسولی علی آبادی، م. (۱۳۹۲)، "انتخاب روش حفاری بهینه از لحاظ فنی و اقتصادی تونل انتقال آب چم شیر"، اولین کنفرانس ملی مهندسی ژئوتکنیک، http://www.civilica.com/Paper-GEOTEC01-GEOTEC01_587.html.
- مطالعات پایه تونل، مرحله فاز پیشرفته، گزارش روش اجرا و انتخاب دستگاه و مشخصات فنی دستگاه TBM خط ۷ متروی تهران، شرکت مهندسی سپاسد.
- نظرپور شیخ آباد، ا.، اجل لوثیان، ر.، حسن پور، ج.، کهکی، ا. (۱۳۹۱)، "بررسی نوع TBM مناسب برای خط A متروی قم بر اساس شرایط زمین"، شانزدهمین همایش انجمن زمین شناسی ایران، http://www.civilica.com/Paper-SGSI16-SGSI16_309.html.
- Asghari, M., Nassiri, P., Monazzam, M. R., Golbabaie, F., Arabalibeik, H., Shamsipour, A. A., and Allahverdy, A., 2017, Determination and weighting the effective criteria in selecting a heat stress index using the Delphi technique and Fuzzy Analytic Hierarchy Process (FAHP): Health and Safety at Work, v. 7, no. 1, p. 23-32.
- BELL, F., 2000, Engineering Properties of Soils and Rocks: Blackwell Science Ltd, Oxford.
- Bouzon, M., Govindan, K., Rodriguez, C. M. T., and Campos, L. M. S., 2016, Identification and analysis of reverse logistics barriers using fuzzy Delphi method and AHP: Resources, Conservation and Recycling, v. 108, no. Supplement C, p. 182-197.
- Chen, F. H., 2012, Foundations on expansive soils, Elsevier.
- Cheng, J.-H., and Tang, C.-H., 2009, An application of fuzzy Delphi and fuzzy AHP for multi-criteria evaluation on bicycle industry supply chains: WSEAS Transactions on Systems and Control, v. 4, no. 1, p. 21-34.
- Cheshomi, A., Fakher, A., and Jones, C., 2009, A correlation between friction angle and particle shape metrics in Quaternary coarse alluvia: Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, v. 42, no. 2, p. 145-155.
- Chong, H.-Y., Adnan, H., and Zin, R. M., 2012, A FEASIBLE MEANS OF METHODOLOGICAL ADVANCE FROM DELPHI METHODS: A CASE STUDY: International Journal of Academic Research, v. 4, no. 2.
- Das, B. M., 2013, Advanced soil mechanics, CRC Press.
- DAUB Recommendations for the Selection of Tunnelling Machines: Mechanised Shield

Tunnelling, 2014a, Second Edition, p. 401-447.

Dorhat, A., 2017, Engineering Properties of Materials for Geologic.

Doyle, B., 2001, Hazardous gases underground: Applications to tunnel engineering, CRC Press.

Duhme, R., Rasanavaneethan, R., Pakianathan, L., and Herud, A., 2016, Theoretical basis of slurry shield excavation management systems: Tunnelling and Underground Space Technology, v. 57, p. 211-224.

Fouladgar, M. M., Yazdani-Chamzini, A., and Zavadskas, E. K., 2011, An integrated model for prioritizing strategies of the Iranian mining sector: Irano kasybos sektoriaus strategijų prioriteto nustatymo integruotas modelis: Technological and Economic Development of Economy, v. 17, no. 3, p. 459-483.

Ghayoumian, J., Fatemi Aghda, S., Maleki, M., and Shoaee, Z., 2009, Engineering geology of quaternary deposits of Greater Tehran, Iran: Engineering geology of tomorrow's cities. Geological Society, London, Engineering Geology Special Publication, v. 22.

Golestanifar, M., Goshtasbi, K., Jafarian, M., and Adnani, S., 2011, A multi-dimensional approach to the assessment of tunnel excavation methods: International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, v. 48, no. 7, p. 1077-1085.

Guglielmetti, V., Grasso, P., Mahtab, A., and Xu, S., 2008, Mechanized tunnelling in urban areas: design methodology and construction control, CRC Press.

Guo, J., Ding, L., Luo, H., Zhou, C., and Ma, L., 2014, Wavelet prediction method for ground deformation induced by tunneling: Tunnelling and Underground Space Technology, v. 41, p. 137-151.

Haghshenas, S. S., Haghshenas, S. S., Mikaeil, R., Ardalan, T., Sedaghati, Z., and Heris, P. K., 2017, Selection of an Appropriate Tunnel Boring Machine Using TOPSIS-FDAHP Method (Case Study: Line 7 of Tehran Subway, East-West Section).

Hagras, H., Callaghan, V., Colley, M., and Clarke, G., 2003, A hierarchical fuzzy-genetic multi-agent architecture for intelligent buildings online learning, adaptation and control: Information Sciences, v. 150, no. 1, p. 33-57.

Handbook of Tunnel Engineering II: Basics and Additional Services for Design and

Construction, 2014c, John Wiley & Sons.

Hashemnejad, A., and Hassanpour, J., 2017, Proposed soil classification based on the experiences of soft-ground tunneling in Iran: *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, v. 76, no. 2, p. 731-750.

Hollmann, F. S., and Thewes, M., 2013, Assessment method for clay clogging and disintegration of fines in mechanised tunnelling: *Tunnelling and Underground Space Technology*, v. 37, no. Supplement C, p. 96-106.

Hung, C. J., Monsees, J., Munfah, N., and Wisniewski, J., 2009, Technical manual for design and construction of road tunnels—civil elements: US Department of Transportation, Federal Highway Administration, National Highway Institute, New York.

Kelemenis, A., Ergazakis, K., and Askounis, D., 2011, Support managers' selection using an extension of fuzzy TOPSIS: *Expert Systems with Applications*, v. 38, no. 3, p. 2774-2782.

Lashgari, A., Fouladgar, M. M., Yazdani-Chamzini, A., and Skibniewski, M. J., 2011, Using an integrated model for shaft sinking method selection: *Journal of Civil Engineering and Management*, v. 17, no. 4, p. 569-580.

Linstone, H. A., and Turoff, M., 2002, *The Delphi method: Techniques and applications*, Addison-Wesley Publishing Company, Advanced Book Program.

Liu, Y.-C., and Chen, C.-S., 2007, A new approach for application of rock mass classification on rock slope stability assessment: *Engineering geology*, v. 89, no. 1, p. 129-143.

Lovat, R. P., 2006, TBM Design Considerations: Selection of Earth Pressure Balance or Slurry Pressure Balance Tunnel Boring Machines, in *Proceedings Int. Symp. on Utilization of underground space in urban areas*, p. 6-7.

Maidl, B., Herrenknecht, M., Maidl, U., and Wehrmeyer, G., 2013, *Mechanised shield tunnelling*, John Wiley & Sons.

Maidl, B., Schmid, L., Ritz, W., and Herrenknecht, M., 2008, *Hardrock tunnel boring machines*, John Wiley & Sons.

Maidl, B., Thewes, M., and Maidl, U., 2014, *Handbook of Tunnel Engineering II*, Wiley Online Library.

Moncrieff, R. L., and Rona Consulting, C. o., 2012, The first large diameter slurry TBM in India - Selection of the tunneling system for the Bangalore Metro, WTC World Tunneling Conference Bangkok.

Nezarat, H., Sereshki, F., and Ataei, M., 2015, Ranking of geological risks in mechanized tunneling by using Fuzzy Analytical Hierarchy Process (FAHP): Tunnelling and Underground Space Technology, v. 50, p. 358-364.

Ozfirat, M. K., 2015, Selection of tunneling machines in soft ground by fuzzy analytic hierarchy process: Acta Montanistica Slovaca, v. 20, no. 2.

Peña Duarte, M. Á., 2007, Foam as a soil conditioner in tunnelling: physical and mechanical properties of conditioned sands: University of Oxford.

Qu, Z., Wan, C., Yang, Z., and Lee, P. T.-W., 2018, A Discourse of Multi-criteria Decision Making (MCDM) Approaches, Multi-Criteria Decision Making in Maritime Studies and Logistics, Springer, p. 7-29.

Quebaud, S., Sibai, M., and Henry, J.-P., 1998, Use of chemical foam for improvements in drilling by earth-pressure balanced shields in granular soils: Tunnelling and underground space technology, v. 13, no. 2, p. 173-180

Robbins, S.P. & Judge, T. A., (2011), Organizational Behaviour, 12th Edition. Toronto: Pearson/Prentice Hall Publications.

Saaty, T. L., 2008, Decision making with the analytic hierarchy process: International journal of services sciences, v. 1, no. 1, p. 83-98.

Seidenfub, T., 2006, Collapses in Tunnelling, Master Thesis, Stuttgart, Germany.

Skok, E., 2015, Asphalt Paving Technology 2014: Volume 83, Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, DEStech Publications, Inc.

Spencer, M., Stolf, A., Bentz, E., Cross, S., Blueckert, C., Forder, J., London, W., Wannick, H., and Gallagher, B. G. R., 2009, „Tunnel Boring Machines.“: IMIA Working Group Paper WGP, v. 60, no. 09.

Sun, C.-C., 2010, A performance evaluation model by integrating fuzzy AHP and fuzzy TOPSIS methods: Expert Systems with Applications, v. 37, no. 12, p. 7745-7754.

Telford, T., 2004, The British Tunnelling Society and The Institution of Civil Engineers,

Tunnel lining design guide.

Thewes, M., 2007, TBM Tunnelling challenges –redefining the state of the art. Underground Space: The 4th Dimension of Metropolises: Proceedings of the 33rd ITA-AITES World Tunnel Congress: Taylor & Francis.

Thewes, M., 2009, Bentonite Slurry Shield Machines, State of the Art and Important Aspects for Application, in Proceedings Invited lecture at the workshop “Operacion y mantenimiento de escudos: Presente y futuro, Jornada Tecnica, Barcelona.

Veerabathiran, R., and Srinath, K., 2012, Application of the extent analysis method on fuzzy AHP: Int J Eng Sci Technol, v. 4, no. 7, p. 3472-3480.

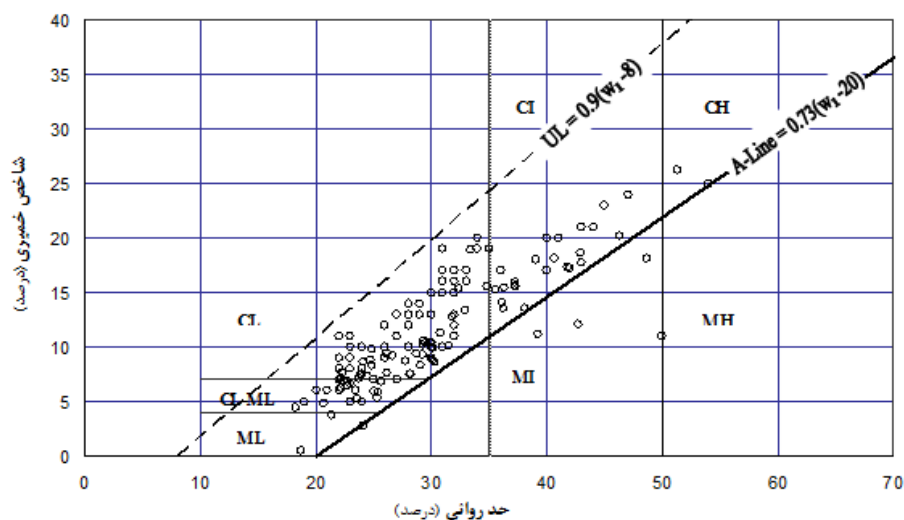
Venkatramaiah, C., 2006, Geotechnical Engineering. sl: New Age International, New Delhi, India (926 pp.).

Willis, D., 2011, Innovations and Limitations of Two Long-Standing Soft Ground TBM Designs: Tunnel, no. 5, p. 42.

Yazdani-Chamzini, A., and Yakhchali, S. H., 2012, Tunnel Boring Machine (TBM) selection using fuzzy multicriteria decision making methods: Tunnelling and Underground Space Technology, v. 30, p. 194-204.

Zarei, Abalfazl, and Maleki Rad, B., 2009, Using Fuzzy Delphi Method in Analytic Hierarchy Process to Select Optimum Maintenance Strategy: Published in: 01st Conference on Executive MBA.

پیوست ۱



نمودار خمیری (Das & Sobhan, 2013)

سیستم طبقه‌بندی متحد-علائم خاک‌های شنی (Das & Sobhan, 2013)

علامت	توضیحات بر پایه‌ی مصالح عبوری از الک ۷۵ میلی‌متر (بر پایه‌ی ASTM-D-2487)
GW	عبوری از الک نمرة ۲۰۰ کمتر از ۵ درصد، C_U^1 بزرگتر یا مساوی ۴ و C_C^2 بین ۱ و ۳ (شن خوب دانه‌بندی شده در حضور یا عدم حضور ماسه)
GP	عبوری از الک نمرة ۲۰۰ کمتر از ۵ درصد، شرایط GW را شامل نمی‌شود (شن بد دانه‌بندی شده در حضور یا عدم حضور ماسه).
GM	عبوری از الک نمرة ۲۰۰ بزرگتر از ۱۲ درصد، حدود اتربرگ زیر خط A قرار می‌گیرد یا نشانه خمیری کمتر از ۴ است (شن لای‌دار در حضور یا عدم حضور ماسه).
GC	عبوری از الک نمرة ۲۰۰ بزرگتر از ۱۲ درصد، حدود اتربرگ بالای خط A قرار می‌گیرد یا نشانه خمیری بزرگتر از ۷ است (شن رس‌دار در حضور یا عدم حضور ماسه).
GC-GM	عبوری از الک نمرة ۲۰۰ بزرگتر از ۱۲ درصد، حدود اتربرگ در ناحیه CL-ML قرار می‌گیرد (شن رس و لای‌دار در حضور یا عدم حضور ماسه).
GW-GM	عبوری از الک نمرة ۲۰۰ بین ۵ تا ۱۲ درصد، شامل توضیحات GW و GM می‌شود (شن خوب دانه‌بندی شده با لای در حضور یا عدم حضور ماسه).
GW-GC	عبوری از الک نمرة ۲۰۰ بین ۵ تا ۱۲ درصد، شامل توضیحات GW و GC می‌شود (شن خوب دانه‌بندی شده با رس در حضور یا عدم حضور ماسه).

^۱ ضریب یکواختی

^۲ ضریب دانه‌بندی

GP-GM	ادامه‌ی جدول سیستم طبقه‌بندی متحد- علائم خاک‌های شنی عبوری از الک نمره ۲۰۰ بین ۵ تا ۱۲ درصد، شامل توضیحات GP و GM می‌شود (شن بد دانه‌بندی شده با لای در حضور یا عدم حضور ماسه).
GP-GC	عبوری از الک نمره ۲۰۰ بین ۵ تا ۱۲ درصد، شامل توضیحات GP و GC می‌شود (شن بد دانه‌بندی شده با رس در حضور یا عدم حضور ماسه).

سیستم طبقه‌بندی متحد- علائم خاک‌های ماسه‌ای (Das & Sobhan, 2013)

علامت	توضیحات بر پایه‌ی مصالح عبوری از الک ۷۵ میلی‌متر (بر پایه‌ی ASTM-D-2487)
SW	عبوری از الک نمره ۲۰۰ کمتر از ۵ درصد، C_U بزرگتر یا مساوی ۶ و C_C بین ۱ و ۳ (ماسه خوب دانه‌بندی شده در حضور یا عدم حضور شن)
SP	عبوری از الک نمره ۲۰۰ کمتر از ۵ درصد، شرایط SW را شامل نمی‌شود (ماسه بد دانه‌بندی شده حضور یا عدم حضور شن).
SM	عبوری از الک نمره ۲۰۰ بزرگتر از ۱۲ درصد، حدود اتربرگ زیر خط A قرار می‌گیرد یا نشانه خمیری کمتر از ۴ است (ماسه‌ی لای‌دار در حضور یا عدم حضور شن).
SC	عبوری از الک نمره ۲۰۰ بزرگتر از ۱۲ درصد، حدود اتربرگ بالای خط A قرار می‌گیرد یا نشانه خمیری بزرگتر از ۷ است (ماسه رس‌دار در حضور یا عدم حضور شن).
SC-SM	عبوری از الک نمره ۲۰۰ بزرگتر از ۱۲ درصد، حدود اتربرگ در ناحیه CL-ML قرار می‌گیرد (ماسه لای و رس‌دار در حضور یا عدم حضور شن).
SW-SM	عبوری از الک نمره ۲۰۰ بین ۵ تا ۱۲ درصد، شامل توضیحات SW و SM می‌شود (ماسه خوب دانه‌بندی شده با لای در حضور یا عدم حضور شن).
SW-SC	عبوری از الک نمره ۲۰۰ بین ۵ تا ۱۲ درصد، شامل توضیحات SW و SC می‌شود (ماسه خوب دانه‌بندی شده در حضور یا عدم حضور شن).
SP-SM	عبوری از الک نمره ۲۰۰ بین ۵ تا ۱۲ درصد، شامل توضیحات SP و SM می‌شود (ماسه بد دانه‌بندی شده با لای در حضور یا عدم حضور شن).
SP-SC	عبوری از الک نمره ۲۰۰ بین ۵ تا ۱۲ درصد، شامل توضیحات SP و SC می‌شود (ماسه بد دانه‌بندی شده با رس در حضور یا عدم حضور شن).

سیستم طبقه‌بندی متحد- علائم خاک‌های رسی و لای‌دار (Das & Sobhan, 2013)

علامت	توضیحات بر پایه‌ی مصالح عبوری از الک ۷۵ میلی‌متر (بر پایه‌ی ASTM-D-2487)
CL	غیر آلی، $LL < 50$ ، $(w_i) PL > 7$ و منطبق با بالای خط A (رس لاغر)
ML	غیر آلی، $LL < 50$ ، $PL > 7$ و منطبق با زیر خط A (لای)
OL	آلی، $LL < 0.75$ (خشک نشده) / LL (خشک شده) و $LL < 50$ (رس آلی و لای آلی)
CH	غیر آلی، $LL > 50$ و PL منطبق و یا بالاتر از خط A (رس چاق)
MH	غیر آلی، $LL > 50$ و PL زیر خط A (لای الاستیک)
OH	آلی، $LL < 0.75$ (خشک نشده) / LL (خشک شده) و $LL > 50$ (رس آلی و لای آلی)
CL- ML	غیر آلی (رس لای‌دار)
Pt	تورب، ماک و یا سایر خاک‌های آلی

Abstract

It is necessary to build underground spaces with different purposes Due to the growing of cities and space limitation for construction. It is clear that Tunnels have great importance among underground spaces because of their applications in urban area. Using TBM machines is the quick, safe and inexpensive way to drill a tunnel in comparison with other methods. Choosing a mechanized drilling machine in accordance with different conditions of a project is one of the most important stages in drilling a tunnel. It is possible to achieve a better drilling process, save time and reduce project costs by choosing correct TBM. Then choosing machine is one of the most important challenges associated with drilling a tunnel. The earth pressure balance, Slurry ad mix-shield machines have been selected as three suitable TBM for Tunneling in soft ground according to similar projects and related recommendations. The matching of experience with science is one of the best methods for choosing TBMs. In this research, the factors influencing the choice of TBM machine using the common standards in this field as well as projects carried out in Iran, geotechnical, geological, environmental, manpower and cost criteria have been selected as the main criteria. In order to use the expert's opinions in tunneling, a questionnaire based on the method of analyzing the hierarchical Delphi fuzzy method has been developed as a common method of multi-criteria decision making. The dates collected from this questionnaire was used to formulate a paired matrix as well as weight to selected criteria. Also, for creating a paired comparison matrix between the maintained machines, the weight of each machine is determined by matching the usage of each machine in the data range of the study case. Based on the results, EPB machine is proposed for drilling on the north-south subway line 7 of Tehran Metro.

Keywords: Choosing Mechanized Drilling Machine, Earth pressure Balance Machine, Slurry Machine, Mix-shield Machine, Delphi Fuzzy Analytical Hierarchy, North-South 7 Line, Site, Geometric, Environmental, Manpower and Cost, Paired Comparison Matrix, Experts Opinion.



Shahrood University of Technology
Faculty of Mining, Petroleum & Geophysics Engineering

MSc Thesis in Tunnel and Underground Spaces Engineering

**Tunnel Boring Machine Selection in Soft Ground (Case Study:
Tehran Metro-Line 7 (North-South Section))**

Amirsaeed Gerani

Supervisor:

Dr. Shokrollah Zare
Dr. Mohammad Ataei

Advisor:

Dr. Ramin Rafiee

July 2018