

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک
پایان نامه کارشناسی ارشد تونل و فضاهاى زیرزمینی

ارزیابی و رتبه‌بندی پارامترهای مؤثر بر پایداری تونل مبتنی بر روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره

نگارنده: فاطمه محمدی

اساتید راهنما

دکتر مرتضی جوادی اصطهباناتی

دکتر رامین رفیعی

بهمن ۱۴۰۰

شماره: ۸۶/۱۰۴
تاریخ: ۱۴۰۱/۰۵/۲۱

باسمه تعالی



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 خاتم / آقای فاطمه محمدی با شماره دانشجویی ۹۷۱۴۶۸۴ رشته مهندسی معدن گرایش تونل و فضاهای زیرزمینی تحت عنوان ارزیابی و رتبه‌بندی پارامترهای مؤثر بر پایداری تونل مبتنی بر روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره که در تاریخ ۱۴۰۰/۱۱/۱۶ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می‌گردد:

☐ الف) درجه عالی: نمره ۲۰-۱۹	☐ ب) درجه خیلی خوب: نمره ۱۸-۱۷/۹۹
☐ ج) درجه خوب: نمره ۱۶-۱۷/۹۹	☐ د) درجه متوسط: نمره ۱۵-۱۴/۹۹
☐ ه) کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول و نیاز به دفاع مجدد دارد	
نوع تحقیق: ☒ نظری ☐ عملی	

عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنمای اول	دکتر مرئسی جوادی اصطهباناتی	استادیار	
۲- استاد راهنمای دوم	دکتر رامین رفیعی	استادیار	
۳- استاد مشاور	-	-	-
۴- نماینده تحصیلات تکمیلی	دکتر مهدی نوروزی	استادیار	
۵- استاد امتحن اول	دکتر محمد عطایی	استاد	
۶- استاد امتحن دوم	دکتر شکراله زارع	دانشیار	

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده: دکتر فریدون کوشکی

تاریخ و امضاء و مهر



تقدیم اثر

به پدر و مادر عزیز و مهربانم که در سختی ها و دشواری های زندگی، همواره یاور و دلسوز و فداکار و پشتیبان محکم
برایم بوده اند.

مَشْکُرو قدردانی

این پایان نامه را ضمن تشکر و سپاس بیکران و در کمال افتخار و امتنان تقدیم می نمایم به:

محضر ارزشمند پدر و مادر عزیزم به خاطر تمام تلاش های محبت آمیزی که در دوران مختلف زندگی ام انجام داده اند و با مهربانی چگونه زیستن را به من آموخته اند.

به استادان فرزانه و فرهیخته ای که در راه کسب علم و معرفت مرایاری نمودند.

به آنان که در راه کسب دانش را بنمایم بودند.

پروردگار احسن عاقبت، سلامت و سعادت را برای آنان مقدر نما.

تهدنامه

این جانب فاطمه محمدی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته تونل و فضاهای زیرزمینی دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه ارزیابی و رتبه بندی پارامترهای مؤثر بر پایداری تونل مبتنی بر روش های تصمیم گیری چندمعیاره تحت راهنمایی دکتر مرتضی جوادی اصطهباناتی و دکتر رامین رفیعی متعهد می شوم.

- تحقیقات در این پایان نامه توسط این جانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است .
- در استفاده از نتایج پژوهش های 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 می باشد و مقالات مستخرج بانام « 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 می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت های آن ها) 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

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج ، کتاب ، برنامه های رایانه ای ، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد . این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود . استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

ناپایداری و ریزش در فضاهاى زیرزمینی همواره به عنوان یکی از مهم ترین و بحرانی ترین ریسک های اجرایی مطرح شده که در صورت وقوع، تبعات بسیار منفی بر پروژه ها تحمیل می کند. با توجه به اهمیت ناپایداری فضاهاى زیرزمینی، شناخت کافی از عوامل و پارامترهای مؤثر در وقوع ناپایداری و پیش بینی این پدیده در فازهای مطالعات و طراحی، تحکیمات و حتی پس از اجرای تونل، امری الزامی خواهد بود. پارامترهای متعددی در بحث پایداری تونل اثرگذار هستند؛ اما مطالعه جامعی برای ارزیابی و شناسایی تمام این پارامترها ارائه نشده است. بنابراین، در این پژوهش، شناسایی پارامترها و عوامل مؤثر بر وقوع ناپایداری تونل، دسته بندی این عوامل و رتبه بندی اهمیت نسبی آنها به عنوان اهداف اصلی در نظر گرفته شد. برای رسیدن به این اهداف، روش تصمیم گیری چندمعیاره مبتنی بر نظرسنجی از افراد خبره، مورد استفاده قرار گرفت. بدین منظور، ابتدا، با بررسی مطالعات پیشین، مهم ترین عوامل مؤثر بر ناپایداری تونل شناسایی و دسته بندی شد. در ادامه، به منظور ارزیابی و وزن دهی اولیه عوامل، فرایند تحلیل سلسله مراتبی AHP به کار گرفته شد و مجدداً عوامل اصلاح و دسته بندی شدند. این عوامل پس از تجزیه و تحلیل اولیه شامل ۳۸ پارامتر و در قالب ۶ شاخص اصلی شامل، عوامل ژئومکانیکی، مطالعات و طراحی، سیستم نگهداری، تحکیمات و کنترل زمین، شرایط زمین شناسی و جغرافیایی ساختگاه، عوامل عمومی، اجرایی و قراردادی و شرایط خاص (تکنیکی ها) دسته بندی شدند. به منظور ارزیابی و رتبه بندی نهایی عوامل، از ادغام روش های تحلیل شبکه ANP و آزمایشگاه ارزیابی و آزمون تصمیم گیری DEMATEL استفاده شد. وزن های نسبی اجزا با استقرار فرایند تحلیل شبکه تعیین شد. در نهایت، برای اعتبارسنجی نتایج، یک مطالعه نسبتاً جامع و وسیع از نتایج ناپایداری ها و ریزش های واقعی در پروژه ها انجام شد و نتایج با یکدیگر مقایسه شد. نتایج حاصل از این مطالعه نشان می دهد که از بین شاخص های اصلی، عوامل ژئومکانیکی، سطح مطالعات و طراحی دارای بیشترین اهمیت و عوامل عمومی، اجرایی و قراردادی دارای کمترین اهمیت در بحث ناپایداری تونل بوده است. در بین پارامترها، عوارض زمین شناسی در گروه شرایط زمین شناسی و جغرافیایی ساختگاه، انتخاب صحیح روش اجرایی و تحکیمات در گروه مطالعات و طراحی، زون های شدیداً خرد شده و گسله در گروه شرایط خاص و کیفیت توده سنگ در گروه عوامل ژئومکانیکی به ترتیب دارای اوزان ۰/۳۸، ۰/۳۳، ۰/۲۹ و ۰/۲۸ بیشتری نسبت به سایر پارامترها بوده اند. مقایسه انجام شده بین نتایج روش رتبه بندی ANP-DEMATEL و مطالعه آماری ناپایداری واقعی در تونل ها، گویای آن است که رویکرد پیشنهادی نسبتاً منطقی و مؤثر بوده است؛ که می تواند به عنوان یک ابزار یا چارچوب مؤثر برای مقابله با بسیاری از مسائل و مشکلات ناپایداری در زمینه های مختلف تونل سازی به کار گرفته شود.

کلمات کلیدی: پایداری تونل، رتبه بندی، روش تحلیل سلسله مراتبی AHP، روش های تصمیم گیری چند معیاره، روش تحلیل شبکه ANP، آزمون تصمیم گیری DEMATEL.

لیست مقالات مستخرج از پایان نامه

- ۱- محمدی ف.، جوادی اصطهباناتی م.، رفیعی ر.، (۱۴۰۰)، "کاربرد تکنیک فرایند تحلیل سلسله-مراتبی (AHP) در رتبه‌بندی پارامترهای مؤثر بر پایداری تونل". دومین کنفرانس بین‌المللی متالوژی، مکانیک و معدن، تهران.

فهرست مطالب

ع	فهرست جداول
ق	فهرست اشکال
۱	فصل ۱: کلیات تحقیق
۲	۱-۱ مقدمه
۳	۲-۱ ضرورت انجام تحقیق
۴	۳-۱ اهداف تحقیق
۴	۴-۱ روش انجام تحقیق
۵	۵-۱ ساختار پایان نامه
۷	فصل ۲: مفاهیم کاربردی و سابقه علمی موضوع
۸	۱-۲ مقدمه
۸	۲-۲ مفاهیم کاربردی
۹	۳-۲ مروری بر مطالعات گذشته
۱۰	۱-۳-۲ مطالعات سیستم‌های طبقه‌بندی تجربی
۱۹	۲-۳-۲ مطالعات ناپایداری و فروریزش
۲۵	۳-۳-۲ سیستم‌های مهندسی سنگ
۲۷	۴-۳-۲ روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره
۲۹	۴-۲ جمع‌بندی
۳۱	فصل ۳: روش‌شناسی
۳۲	۱-۳ مقدمه
۳۲	۲-۳ روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره
۳۳	۳-۳ روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP)
۳۳	۱-۳-۳ ساختن سلسله مراتبی
۳۳	۲-۳-۳ محاسبه وزن پارامترها در AHP
۳۵	۳-۳-۳ محاسبه نرخ ناسازگاری
۳۵	۴-۳ روش تحلیل شبکه (ANP)
۳۷	۱-۴-۳ تعیین ساختار شبکه‌ای مسئله
۳۷	۲-۴-۳ ایجاد سوپر ماتریس مسئله
۳۸	۳-۴-۳ محاسبه توزیع سوپر ماتریس
۳۸	۵-۳ روش آزمایشگاه ارزیابی و آزمون تصمیم‌گیری (DEMATEL)

۳۹	۱-۵-۳ جمع‌آوری نظرات کارشناسان
۴۰	۲-۵-۳ تشکیل ماتریس میانگین
۴۰	۳-۵-۳ قابلیت اعتماد در روش DEMATEL
۴۱	۴-۵-۳ نرمال کردن ماتریس میانگین
۴۱	۵-۵-۳ محاسبه ماتریس روابط کلی
۴۲	۶-۵-۳ ترسیم نمودار علی
۴۳	۷-۵-۳ ترسیم نقشه روابط شبکه‌ای (NRM)
۴۳	۶-۳ تلفیق دو روش ANP و DEMATEL
۴۴	۷-۳ جمع‌بندی

فصل ۴: تعیین عوامل و پارامترهای مؤثر بر پایداری تونل

۴۶	۱-۴ مقدمه
۴۶	۲-۴ رویکرد تلفیقی حذف عوامل
۴۹	۳-۴ عوامل ژئومکانیکی
۴۹	۱-۳-۴ تنش‌های برجا
۴۹	۲-۳-۴ آنیزوتروپی توده‌سنگ
۵۰	۳-۳-۴ کیفیت توده‌سنگ
۵۰	۴-۳-۴ نوع سنگ و مشخصات سنگ بکر
۵۱	۵-۳-۴ وجود پتانسیل لهیدگی یا مچاله شوندگی
۵۱	۶-۳-۴ وجود پتانسیل تورم
۵۲	۷-۳-۴ زون‌های ضعیف
۵۲	۴-۴ مطالعات و طراحی
۵۲	۱-۴-۴ سطح مطالعات اکتشافی پیش از ساخت
۵۳	۲-۴-۴ پیش‌بینی صحیح رفتار و شرایط زمین
۵۴	۳-۴-۴ سطح محاسبات طراحی و فرضیات طراحی
۵۶	۴-۴-۴ انتخاب صحیح روش اجرایی و تحکیمات
۵۷	۵-۴-۴ به‌کارگیری بازطراحی و بازنگری حین اجرا
۵۹	۵-۴ سیستم نگهداری، تحکیمات و کنترل زمین
۶۰	۱-۵-۴ مشخصات فنی اجرایی نگهداری، تحکیمات و کنترل زمین
۶۰	۲-۵-۴ مشخصات فنی اجرایی سیستم بهسازی
۶۳	۳-۵-۴ انعطاف‌پذیری سیستم نگهداری با توجه به شرایط مختلف
۶۳	۴-۵-۴ زمان و فاصله نصب سیستم نگهداری از سینه‌کار
۶۳	۵-۵-۴ کنترل اضافه حفاری و پر کردن فضای خالی پشت حفاری

۶۴	۴-۵-۶ نوع سیستم زهکشی و درستی عملکرد آن
۶۵	۴-۵-۷ نحوه واکنش به شرایط پیش‌بینی نشده
۶۵	۴-۶ عوامل زمین‌شناسی و جغرافیایی ساختگاه
۶۵	۴-۶-۱ وضعیت توپوگرافی و سطح الارض ساختگاه
۶۶	۴-۶-۲ نوع ساختگاه و معارضین پروژه
۶۶	۴-۶-۳ وضعیت آب‌وهوایی و بلایای طبیعی
۶۷	۴-۶-۴ سطح و وضعیت آب زیرزمینی
۶۷	۴-۶-۵ نوع عوارض زمین‌شناسی
۶۸	۴-۶-۶ جهت‌داری ناپیوستگی با محور تونل
۶۸	۴-۷ عوامل عمومی، اجرایی و قراردادی
۶۹	۴-۷-۱ سطح حساسیت و اهمیت پروژه
۶۹	۴-۷-۲ انعطاف قرارداد در خصوص مسائل مالی، فنی و اجرایی
۶۹	۴-۷-۳ تأمین مالی و هزینه‌های اجرایی
۷۰	۴-۷-۴ رعایت مشخصات کیفی و فنی
۷۰	۴-۷-۵ سطح توانمندی، مهارت و تجهیزات پیمانکار
۷۰	۴-۷-۶ روش حفاری تونل
۷۱	۴-۷-۷ هندسه تونل
۷۳	۴-۸ شرایط خاص (تکنیکی‌ها)
۷۳	۴-۸-۱ سینه‌کار مختلط
۷۳	۴-۸-۲ زون‌های شدیداً خردشده و گسله
۷۴	۴-۸-۳ وجود گل‌ولای آبدار و لنزهای شن و ماسه
۷۴	۴-۸-۴ وجود سازه‌های مجاور در مجاورت و نزدیکی تونل
۷۴	۴-۸-۵ روباره کم یا بسیار زیاد
۷۵	۴-۸-۶ زون پرتالی، تقاطع تونل‌ها و اینترسکشن
۷۵	۴-۹ جمع‌بندی

فصل ۵: ارزیابی پایداری در تونل‌سازی

۷۷	
۷۸	۵-۱ مقدمه
۷۸	۵-۱-۱ دسته‌بندی و ترکیب پارامترهای مؤثر
۷۸	۵-۱-۲ تنظیم پرسش‌نامه با توجه به روش ارزیابی
۷۸	۵-۲ ارزیابی پایداری تونل با استفاده از AHP
۷۹	۵-۲-۱ اجرای AHP برای دسته پارامترها و پارامترها
۷۹	۵-۲-۲ محاسبه وزن نهایی پارامترهای مؤثر بر پایداری تونل با روش AHP

۳-۵	توسعه مدل کیفی پایداری تونل	۸۴
۴-۵	اجرای روش DEMATEL برای دسته پارامترها	۸۴
۵-۵	پیاپی سازی روش DEMATEL برای تمام پارامترها	۸۷
۶-۵	پیاپی سازی روش ANP در پایداری تونل	۹۵
۷-۵	جمع بندی	۱۰۵

فصل ۶: بررسی عملکرد نتایج با مطالعات واقعی

۱-۶	مقدمه	۱۰۸
۲-۶	نتایج امتیازبندی مطالعات موردی برای دسته پارامترها	۱۰۸
۳-۶	نتایج امتیازبندی مطالعات موردی برای تمامی پارامترها	۱۰۹
۴-۶	بررسی عملکرد ANP-DEMATEL	۱۱۶
۵-۶	جمع بندی	۱۱۹

فصل ۷: نتیجه گیری و پیشنهادها

۱-۷	نتیجه گیری	۱۲۲
۲-۷	پیشنهادها برای تحقیقات آتی	۱۲۴

منابع و مراجع

پیوست ۱: فرم های نظرسنجی پرسش نامه در روش AHP

پ ۱-۱	فرم ارسال شده برای دسته پارامترها	۱۳۶
پ ۲-۱	فرم های ارسال شده برای پارامتر عوامل زمین شناسی	۱۳۷
پ ۳-۱	فرم های ارسال شده برای پارامتر عوامل ژئومکانیکی	۱۳۷
پ ۴-۱	فرم های ارسال شده برای پارامتر زون های ضعیف	۱۳۸
پ ۵-۱	فرم های ارسال شده برای پارامتر عوامل هندسی	۱۳۸
پ ۶-۱	فرم های ارسال شده برای پارامتر سیستم نگهداری و تحکیمات تونل	۱۳۹
پ ۷-۱	فرم های ارسال شده برای پارامتر عوامل اجرایی	۱۴۰
پ ۸-۱	فرم های ارسال شده برای پارامتر مطالعات و طراحی	۱۴۰
پ ۹-۱	فرم های ارسال شده برای پارامتر شرایط جغرافیایی ساختگاه تونل	۱۴۱
پ ۱۰-۱	فرم های ارسال شده برای پارامتر مسائل قراردادی (پیمان) و عمومی	۱۴۲

پیوست ۲: فرم های نظرسنجی پرسش نامه در روش DEMATEL

پ ۱-۲	فرم ارسال شده برای دسته پارامترها در روش DEMATEL	۱۴۴
پ ۲-۲	فرم ارسال شده برای عوامل ژئومکانیکی در روش DEMATEL	۱۴۴
پ ۳-۲	فرم ارسال شده برای مطالعات و طراحی	۱۴۴
پ ۴-۲	فرم ارسال شده برای سیستم نگهداری، تحکیمات و کنترل زمین	۱۴۵
پ ۵-۲	فرم ارسال شده برای شرایط زمین شناسی و جغرافیایی ساختگاه	۱۴۵

- پ ۲-۶ فرم ارسال شده برای عوامل عمومی، اجرایی و قراردادی ۱۴۶
- پ ۲-۷ فرم ارسال شده برای شرایط خاص (تکنیکی ها) ۱۴۶
- پیوست ۳: پیاده سازی روش DEMATEL برای تمام پارامترها** ۱۴۷
- پ ۳-۱ ماتریس میانگین نظرات برای تمامی پارامترها ۱۴۸
- پ ۳-۲ ماتریس روابط مستقیم نرمال شده برای تمامی پارامترها ۱۴۹
- پ ۳-۳ ماتریس روابط کلی برای تمامی پارامترها ۱۵۰
- پ ۳-۴ نتایج نهایی علت و معلولی DEMATEL ۱۵۱
- پیوست ۴: فرم های نظر سنجی پرسش نامه در روش ANP** ۱۵۳
- پ ۴-۱ فرم ارسال شده برای دسته پارامترها ۱۵۴
- پ ۴-۲ فرم ارسال شده برای پارامترهای عوامل ژئومکانیکی ۱۵۴
- پ ۴-۳ فرم ارسال شده برای پارامترهای مطالعات و طراحی ۱۵۵
- پ ۴-۴ فرم ارسال شده برای پارامترهای شرایط زمین شناسی و جغرافیایی ساختگاه ۱۵۵
- پ ۴-۵ فرم ارسال شده برای پارامترهای شرایط خاص (تکنیکی ها) ۱۵۵
- پ ۴-۶ فرم ارسال شده برای پارامترهای سیستم نگهداری، تحکیمات و کنترل زمین ۱۵۶
- پ ۴-۷ فرم ارسال شده برای پارامترهای عوامل عمومی، اجرایی و قراردادی ۱۵۷
- پ ۴-۸ فرم ارسال شده جهت تعیین روابط درونی در دسته پارامتر سیستم نگهداری، تحکیمات و کنترل زمین ۱۵۷
- پ ۴-۹ فرم ارسال شده جهت تعیین روابط درونی در دسته پارامتر عوامل ژئومکانیکی ۱۵۸
- پ ۴-۱۰ فرم ارسال شده جهت تعیین روابط درونی در دسته پارامتر شرایط زمین شناسی و جغرافیایی ساختگاه ۱۵۸
- پ ۴-۱۱ فرم ارسال شده جهت تعیین روابط درونی در دسته پارامتر شرایط خاص (تکنیکی ها) ۱۵۸
- پ ۴-۱۲ فرم ارسال شده جهت تعیین روابط درونی در پارامتر تنش های برجا ۱۵۸
- پ ۴-۱۳ فرم ارسال شده جهت تعیین روابط درونی در پارامتر آنیزوتروپی توده سنگ ۱۵۹
- پ ۴-۱۴ فرم ارسال شده جهت تعیین روابط درونی در پارامتر کیفیت توده سنگ ۱۵۹
- پ ۴-۱۵ فرم ارسال شده جهت تعیین روابط درونی در پارامتر نوع سنگ و مشخصات سنگ بکر ۱۵۹
- پ ۴-۱۶ فرم ارسال شده جهت تعیین روابط درونی در پارامتر زونهای ضعیف ۱۶۰
- پ ۴-۱۷ فرم ارسال شده جهت تعیین روابط درونی در پارامتر سطح مطالعات اکتشافی پیش از ساخت ۱۶۰
- پ ۴-۱۸ فرم ارسال شده جهت تعیین روابط درونی در پارامتر پیش بینی صحیح رفتار و شرایط زمین ۱۶۰
- پ ۴-۱۹ فرم ارسال شده جهت تعیین روابط درونی در پارامتر سطح محاسبات طراحی و فرضیات طراحی ۱۶۰

- پ ۴-۲۰ فرم ارسال شده جهت تعیین روابط درونی در پارامتر انتخاب صحیح روش اجرایی و تحکیمات ۱۶۰
- پ ۴-۲۱ فرم ارسال شده جهت تعیین روابط درونی در پارامتر مشخصات فنی اجرایی سیستم نگهداری، تحکیمات و کنترل زمین ۱۶۱
- پ ۴-۲۲ فرم ارسال شده جهت تعیین روابط درونی در پارامتر قابلیت تغییر سیستم نگهداری با توجه به شرایط مختلف ۱۶۱
- پ ۴-۲۳ فرم ارسال شده جهت تعیین روابط درونی در پارامتر مشخصات فنی اجرایی سیستم بهسازی زمین ۱۶۲
- پ ۴-۲۴ فرم ارسال شده جهت تعیین روابط درونی در پارامتر زمان و فاصله نصب سیستم نگهداری از سینه کار ۱۶۲
- پ ۴-۲۵ فرم ارسال شده جهت تعیین روابط درونی در پارامتر وضعیت توپوگرافی و سطح الارض ساختگاه ۱۶۳
- پ ۴-۲۶ فرم ارسال شده جهت تعیین روابط درونی در پارامتر نوع ساختگاه (شهری، راه و ...) و معارضین ۱۶۳
- پ ۴-۲۷ فرم ارسال شده جهت تعیین روابط درونی در پارامتر وضعیت آب و هوایی ۱۶۳
- پ ۴-۲۸ فرم ارسال شده جهت تعیین روابط درونی در پارامتر سطح و وضعیت آب زیرزمینی ۱۶۳
- پ ۴-۲۹ فرم ارسال شده جهت تعیین روابط درونی در پارامتر عوارض زمین شناسی (گسل، چین-خوردگی، کارست و...) ۱۶۳
- پ ۴-۳۰ فرم ارسال شده جهت تعیین روابط درونی در پارامتر جهت داری ناپیوستگی ها نسبت به محور تونل ۱۶۳
- پ ۴-۳۱ فرم ارسال شده جهت تعیین روابط درونی در پارامتر سطح حساسیت و اهمیت پروژه ۱۶۳
- پ ۴-۳۲ فرم ارسال شده جهت تعیین روابط درونی در پارامتر انعطاف قرارداد در خصوص مسائل فنی-مالی-اجرایی ۱۶۳
- پ ۴-۳۳ فرم ارسال شده جهت تعیین روابط درونی در پارامتر تأمین مالی و هزینه های اجرایی ۱۶۴
- پ ۴-۳۴ فرم ارسال شده جهت تعیین روابط درونی در پارامتر رعایت مشخصات کیفی و فنی ۱۶۴
- پ ۴-۳۵ فرم ارسال شده جهت تعیین روابط درونی در پارامتر سطح توانمندی، مهارت و تجهیزات پیمانکار ۱۶۴
- پ ۴-۳۶ فرم ارسال شده جهت تعیین روابط درونی در پارامتر شکل هندسی، شیب، ابعاد و سطح مقطع تونل ۱۶۴
- پ ۴-۳۷ فرم ارسال شده جهت تعیین روابط درونی در پارامتر روش حفاری تونل (TBM, D&B, SEM, NATM,...) ۱۶۴
- پ ۴-۳۸ فرم ارسال شده جهت تعیین روابط درونی در پارامتر زون های شدیداً خرد شده و گسله ۱۶۴

پ ۳۹-۴ فرم ارسال شده جهت تعیین روابط درونی در پارامتر روباره کم یا بسیار زیاد ۱۶۵
پ ۴۰-۴ فرم ارسال شده جهت تعیین روابط درونی در پارامتر زون پرتالی، تقاطع تونل و اینترسکشن
..... ۱۶۵

پیوست ۵: پیاده سازی روش ANP برای تمام پارامترها

پ ۱-۵ ماتریس مقایسه زوجی و بردارهای وزن تمامی پارامترها ۱۶۸
پ ۲-۵ ماتریس مقایسه زوجی روابط درونی تمامی پارامترها ۱۶۹
پ ۳-۵ سوپرماتریس غیر موزون در روش ANP ۱۷۳
پ ۴-۵ سوپرماتریس موزون در روش ANP ۱۷۴
پ ۵-۵ سوپرماتریس حدی در روش ANP ۱۷۵

پیوست ۶: امتیازدهی مطالعات موردی تحت ناپایداری یا ریزش

۱۷۷

فهرست جداول

جدول ۱-۲ تعاریف انواع رفتارهای سنگی.....	۱۵
جدول ۲-۲ نوع رفتار بر اساس دستورالعمل‌های اتریشی برای برنامه‌ریزی ژئومکانیکی.....	۱۶
جدول ۳-۲ رفتار تونل در توده‌های سنگی.....	۱۷
جدول ۴-۲ مقایسه پارامترهای اصلی رفتارهای سنگی.....	۱۸
جدول ۵-۲ مطالعات انجام‌گرفته در زمینه پارامترهای ژئومکانیکی مؤثر در ناپایداری.....	۲۱
جدول ۶-۲ مطالعات انجام‌گرفته در زمینه مطالعات طراحی و اجرا.....	۲۲
جدول ۷-۲ مطالعات انجام‌گرفته در زمینه نگهداری تونل.....	۲۳
جدول ۸-۲ مطالعات انجام‌گرفته در زمینه شرایط زمین‌شناسی و جغرافیایی ساختگاه مؤثر در ناپایداری.....	۲۴
جدول ۹-۲ مطالعات انجام‌گرفته در زمینه شرایط خاص مؤثر در ناپایداری.....	۲۵
جدول ۱۰-۲ خلاصه‌ای از مطالعات انجام‌گرفته در زمینه سیستم‌های مهندسی سنگ.....	۲۶
جدول ۱۱-۲ خلاصه‌ای از مطالعات انجام‌گرفته با روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره.....	۲۸
جدول ۱-۳ طبقه‌بندی کمی و کیفی برای مقایسه زوجی معیارها.....	۳۴
جدول ۲-۳ طیف امتیازدهی در روش DEMATRL.....	۳۹
جدول ۳-۳ مقایسه روش‌های ترکیبی DEMATL و ANP.....	۴۳
جدول ۱-۵ وزن نهایی تمام پارامترهای مؤثر بر پایداری تونل در روش AHP.....	۸۱
جدول ۲-۵ ماتریس میانگین نظرات برای دسته پارامترها در روش DEMATEL.....	۸۵
جدول ۳-۵ ماتریس روابط مستقیم نرمال شده برای دسته پارامترها در روش DEMATEL.....	۸۵
جدول ۴-۵ ماتریس روابط کلی برای دسته پارامترها در روش DEMATEL.....	۸۵
جدول ۵-۵ بردارهای تأثیر گذاشته‌شده، تأثیر گرفته‌شده، برتری و ارتباط برای دسته پارامترها.....	۸۶
جدول ۶-۵ بردارهای تأثیر گذاشته‌شده، تأثیر گرفته‌شده، برتری و ارتباط برای تمام پارامترها.....	۸۸
جدول ۷-۵ نمودار بردارهای تأثیر گذاشته و تأثیر گرفته و نمودار علی تمام پارامترهای مؤثر بر پایداری تونل.....	۸۹
جدول ۸-۵ ماتریس مقایسه زوجی دسته پارامترها نسبت به هدف.....	۹۶
جدول ۹-۵ وزن نهایی دسته پارامترها در روش ANP.....	۹۷
جدول ۱۰-۵ ماتریس مقایسه زوجی دسته پارامترها نسبت به خوشه عوامل ژئومکانیکی.....	۹۷
جدول ۱۱-۵ وزن روابط درونی دسته پارامترها نسبت به خوشه عوامل ژئومکانیکی.....	۹۷
جدول ۱۲-۵ ماتریس مقایسه زوجی دسته پارامترها نسبت به خوشه سیستم نگهداری، تحکیمات و کنترل زمین.....	۹۸

جدول ۵-۱۳ وزن روابط درونی دسته پارامترها نسبت به خوشه سیستم نگهداری، تحکیمات و کنترل زمین.....	۹۸
جدول ۵-۱۴ ماتریس مقایسه زوجی دسته پارامترها نسبت به خوشه شرایط زمین‌شناسی و جغرافیایی ساختگاه.....	۹۸
جدول ۵-۱۵ وزن روابط درونی دسته پارامترها نسبت به خوشه شرایط زمین‌شناسی و جغرافیایی ساختگاه.....	۹۸
جدول ۵-۱۶ ماتریس مقایسه زوجی دسته پارامترها نسبت به خوشه شرایط خاص (تکینگی‌ها).....	۹۹
جدول ۵-۱۷ وزن روابط درونی دسته پارامترها نسبت به خوشه شرایط خاص (تکینگی‌ها).....	۹۹
جدول ۵-۱۸ ماتریس مقایسه زوجی پارامترهای عوامل ژئومکانیکی.....	۱۰۰
جدول ۵-۱۹ بردار وزن پارامترهای عوامل ژئومکانیکی.....	۱۰۰
جدول ۵-۲۰ ماتریس مقایسه زوجی روابط درونی پارامترهای عوامل ژئومکانیکی نسبت به تنش‌های برجا.....	۱۰۱
جدول ۵-۲۱ بردار وزن روابط درونی پارامترهای عوامل ژئومکانیکی نسبت به تنش‌های برجا.....	۱۰۱
جدول ۵-۲۲ وزن نهایی پارامترهای مؤثر بر پایداری تونل.....	۱۰۴
جدول ۶-۱ طیف امتیازدهی اختصاص‌یافته به مطالعات موردی تحت ناپایداری یا ریزش.....	۱۰۹
جدول ۶-۲ نتایج امتیازبندی مطالعات موردی برای دسته پارامترها.....	۱۱۰
جدول ۶-۳ نتایج امتیازبندی مطالعات موردی برای دسته پارامترها بر حسب درصد.....	۱۱۰
جدول ۶-۴ نتایج امتیازبندی مطالعات موردی تحت ناپایداری و ریزش برای پارامترهای عوامل ژئومکانیکی.....	۱۱۲
جدول ۶-۵ نتایج امتیازبندی مطالعات موردی برای عوامل ژئومکانیکی بر حسب درصد.....	۱۱۲
جدول ۶-۶ نتایج امتیازبندی مطالعات موردی تحت ناپایداری و ریزش تونل برای پارامترهای مطالعات و طراحی.....	۱۱۲
جدول ۶-۷ نتایج امتیازبندی مطالعات موردی برای مطالعات و طراحی بر حسب درصد.....	۱۱۲
جدول ۶-۸ نتایج امتیازبندی مطالعات موردی برای سیستم نگهداری، تحکیمات و کنترل زمین.....	۱۱۲
جدول ۶-۹ نتایج امتیازبندی مطالعات موردی برای سیستم نگهداری، تحکیمات و کنترل زمین بر حسب درصد.....	۱۱۳
جدول ۶-۱۰ نتایج امتیازبندی مطالعات موردی برای شرایط زمین‌شناسی و جغرافیایی ساختگاه.....	۱۱۳
جدول ۶-۱۱ نتایج امتیازبندی مطالعات موردی برای شرایط زمین‌شناسی و جغرافیایی ساختگاه بر حسب درصد.....	۱۱۳
جدول ۶-۱۲ نتایج امتیازبندی مطالعات موردی تحت ناپایداری و ریزش برای عوامل عمومی، اجرایی و قراردادی.....	۱۱۳

جدول ۶-۱۳ نتایج امتیازبندی مطالعات موردی برای عوامل عمومی، اجرایی و قراردادی بر حسب درصد.	۱۱۴
جدول ۶-۱۴ نتایج امتیازبندی مطالعات موردی تحت ناپایداری و ریزش برای شرایط خاص (تکینگی‌ها).	۱۱۴
جدول ۶-۱۵ نتایج امتیازبندی مطالعات موردی برای شرایط خاص (تکینگی‌ها).	۱۱۴

فهرست اشکال

شکل ۱-۱	مراحل روش انجام تحقیق.....	۶
شکل ۱-۲	روابط اصلی بین رفتار زمین و مهندسی سنگ و طراحی.....	۱۰
شکل ۲-۲	بخشی از انواع رفتارها در دهانه‌های زیرزمینی.....	۱۴
شکل ۱-۳	مقایسه ساختارهای سلسله مراتبی و شبکه‌ای.....	۳۶
شکل ۲-۳	ساختار کلی سوپرماتریس در روش تحلیل شبکه.....	۳۷
شکل ۳-۳	حالت ساده شده سوپرماتریس روش تحلیل شبکه.....	۳۸
شکل ۴-۳	گراف ارتباط مستقیم در DEMATEL.....	۴۰
شکل ۱-۴	پارامترهای اولیه مؤثر بر پایداری تونل.....	۴۷
شکل ۲-۴	پارامترهای نهایی مؤثر بر پایداری تونل.....	۴۸
شکل ۳-۴	مراحل و اجزای مطالعات ساختگاهی در پروژه‌های تونل‌سازی.....	۵۳
شکل ۴-۴	نمودار فرآیند مقدماتی طراحی نگهداری و حفاری سازه‌های زیرزمینی.....	۵۵
شکل ۵-۴	ابزارهای اصلی در فرایند طراحی سنگ.....	۵۶
شکل ۶-۴	فرایند بازبینی مدیریتی برای رفتارسنجی داخل تونل.....	۵۸
شکل ۷-۴	روش‌های حفاری تونل.....	۷۲
شکل ۱-۵	وزن‌های اولیه و نسبی پارامترها و دسته پارامترها.....	۸۰
شکل ۲-۵	نمودار وزن نهایی پارامترهای مؤثر بر پایداری تونل در روش AHP.....	۸۳
شکل ۳-۵	نمودار بردارهای تأثیر گذاشته و گرفته‌شده توسط دسته پارامترها.....	۸۶
شکل ۴-۵	نمودار علی دسته پارامترهای مؤثر بر پایداری تونل.....	۸۷
شکل ۵-۵	نقشه روابط شبکه‌ای پارامترهای مؤثر بر پایداری تونل.....	۹۳
شکل ۶-۵	سوپرماتریس روش تحلیل شبکه.....	۹۵
شکل ۷-۵	ماتریس بردار وزنی روابط درونی پارامترها (W33).....	۱۰۳
شکل ۸-۵	نمودار ستونی وزن نهایی پارامترهای مؤثر بر پایداری تونل.....	۱۰۵
شکل ۱-۶	نمودار دایره‌ای نتایج حاصل از مطالعات موردی برای دسته پارامترها.....	۱۱۱
شکل ۲-۶	نمودار میله‌ای نتایج حاصل از مطالعات موردی برای پارامترها.....	۱۱۵
شکل ۳-۶	بررسی نتایج حاصل از اوزان ANP-DEMATEL و مطالعات موردی در دسته پارامترها.....	۱۱۷
شکل ۴-۶	بررسی نتایج حاصل از اوزان ANP-DEMATEL و مطالعات موردی در پارامترها.....	۱۱۸

فصل ۱: کلیات تحقیق

۱-۱ مقدمه

با افزایش روزافزون جمعیت و توسعه شهرها، جابجایی و حمل و نقل مناسب و سریع بین شهری اهمیت ویژه‌ای یافته است. تونل‌ها به علت قرارگیری در محیط‌های با عدم قطعیت بالا، با مخاطرات زیادی مواجه می‌شوند. در محیط‌های سنگی، عوارض زمین‌شناسی مختلفی از قبیل گسل، چین‌خوردگی، کارست، شکستگی‌ها و لایه‌بندی‌ها وجود دارند. حضور این عوامل با دامنه تأثیر مختلف، باعث ایجاد ناپایداری و ناهمگنی شدید محیط می‌شود. در مصالح ساختاری پیچیده مانند توده‌سنگ، چندین مکانیسم مختلف شکست و یا ناپایداری وجود دارد، که این مکانیسم‌ها به عوامل متعددی از جمله ترکیب توده‌سنگ، اثرات تنش و فشار آب زیرزمینی و همچنین اندازه حفریات زیرزمینی وابسته به آن بستگی دارد. از جمله دلیل بروز این مخاطرات می‌توان به ناشناخته بودن شرایط زمین، محدود بودن سطح داده‌ها در مطالعات اکتشافی و خطا در مراحل طراحی و محاسبات اشاره کرد.

برای طراحی و ارزیابی رفتار زمین درون‌گیر فضاهای زیرزمینی، ابزارهای مختلفی قابل به‌کارگیری هستند که هر یک از این ابزارها در دامنه خاصی از رفتار مهندسی سنگ قابل استفاده می‌باشند. در حقیقت، یک مؤلفه مهم و الزامی برای سیستم‌های طبقه‌بندی و همچنین سایر ابزارهای طراحی این است که روش طراحی مهندسی سنگ به‌اندازه کافی رفتار زمین اطراف تونل را تحت پوشش قرار دهد. در این میان استفاده از مدل‌های مفهومی می‌تواند یک دیدگاه کلی و کیفی را ارائه داده و به‌عنوان یک ابزار ساده مورد استفاده قرار گیرد. تعریف رفتار زمین بدون آگاهی کافی از شرایط زمین‌شناسی و همچنین ویژگی‌های مربوط به پروژه میسر نمی‌باشد و در نتیجه نمی‌توان اقدامات طراحی مناسب را اتخاذ کرد.

بررسی پارامترهای مؤثر بر ناپایداری در فعالیت‌های مهندسی سنگ، نیازمند شناخت عوامل مؤثر و روابط بین آن‌ها است. پارامترهای اصلی و ویژگی‌های تعیین‌کننده رفتار زمین اطراف فضاهای زیرزمینی، شامل اثرات تحریک ناشی از آن‌ها (نیروهای گرانشی، پارامترهای توده‌سنگ، تنش ناشی از فشار و آب) و ویژگی‌های مربوط به پروژه (ابعاد، هندسه تونل، عمق، طول دهانه و روش حفاری) می‌باشند.

تحلیل پایداری سازه‌های زیرزمینی به علت تنوع در نوع سنگ و خاک، ساختار زمین‌شناسی و شرایط تنش‌های منطقه امری پیچیده و مشکل است. لذا دستیابی به یک طراحی منطقی و مناسب مستلزم شناسایی پارامترهای مؤثر، روابط بین آن‌ها و چگونگی تأثیرگذاری هم‌زمان آن‌ها بر یکدیگر است. با توجه به این موارد، استفاده از روش‌های مبتنی بر تصمیم‌گیری، می‌تواند روشی مناسب برای تحلیل اندرکنش پارامترهای مختلف این فرایند باشد.

۱-۲ ضرورت انجام تحقیق

پارامترهای زیادی در ارزیابی پایداری فضا‌های زیرزمینی اثرگذار هستند. این عوامل به‌صورت یک سیستم چند متغیره عمل می‌کنند که با افزایش تعداد عوامل، تجزیه و تحلیل ارزیابی پایداری را با مشکل مواجه می‌کنند. هدف ارزیابی و رتبه‌بندی پارامترهای مؤثر بر پایداری تونل است. صنعت حفاری زیرزمینی تمایل دارد بر رویکردهای تجربی مانند روش‌های طبقه‌بندی توده سنگ تکیه کند، که وسیله‌ای برای ارزیابی رتبه‌بندی پارامترهای توده سنگ و الزامات سریع مناسب برای ناپایداری را ارائه می‌دهد. تمام مسائل چند معیاره مبتنی بر نظر کارشناس بوده که منجر به عدم قطعیت در تصمیم‌گیری می‌شود. در مواقعی که اطلاعات کامل و قابل اعتماد در مورد شاخص‌ها وجود ندارد، ترکیب روش‌های تجربی با روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره می‌تواند روش مناسبی برای حل مسائل ناپایداری باشد. عوامل متعددی مانند تنش‌های برجا، ساختار توده-سنگ، روش‌های حفاری، عمق حفاری، ابعاد و شکل حفاری و کیفیت توده سنگ، پایداری فضا‌های زیرزمینی را تحت شعاع قرار می‌دهند. با افزایش تعداد عوامل، مدل‌سازی به‌وسیله روش‌های مرسوم مشکل می‌شود. بنابراین نیاز به استفاده از روش‌های تحلیلی جدید برای تجزیه و تحلیل فرایندهای پیچیده مهندسی سنگ ضروری است. این پژوهش یک راهکار جایگزین برای ارزیابی پایداری تونل‌ها در مراحل طراحی و ساخت بر اساس تحلیل‌های چندمعیاره است. با توجه به وجود روابط پیچیده بین معیارها و زیرمعیارهای مختلف که گاه در تضاد با یکدیگرند، استفاده از روش‌های متداول تصمیم‌گیری کارگشا نیست. هدف این پروژه استفاده

از روش ANP-DEMATEL جهت شناسایی روابط بین معیارهای تأثیرگذار در ناپایداری تونل‌ها و میزان تأثیر آن‌ها می‌باشد.

۱-۳ اهداف تحقیق

هدف اصلی این تحقیق تعیین پارامترهای مؤثر بر پایداری تونل و فضاهاى زیرزمینی است. در طی این تحقیق سعی شده است تا با بررسی منابع علمی معتبر و تحقیقات انجام‌شده پیشین به بررسی مسئله موردتحقیق پرداخته شود. به‌طورکلی هدف از انجام این تحقیق شامل موارد زیر است:

۱. تعیین عوامل اثرگذار بر روی پایداری تونل‌ها و فضاهاى زیرزمینی
۲. بررسی اندرکنش عوامل با یکدیگر و چگونگی تغییرات و تأثیرات آن‌ها بر پایداری تونل
۳. ارزیابی و رتبه‌بندی عوامل اثرگذار بر روی پایداری تونل
۴. بررسی عملکرد نتایج با مطالعات واقعی

۱-۴ روش انجام تحقیق

مرحله اول: ابتدا با استفاده از مطالعات کتابخانه‌ای، توصیفی و بر اساس نظرات کارشناسان و گروه‌های مختلف، عوامل مؤثر بر پایداری تونل مشخص می‌شوند. از این طریق می‌توان با استفاده از یک روش نظام‌مند عوامل مؤثر در هر گروه را مشخص کرد. پس از انتخاب پارامترهای مؤثر، بازه‌ی تغییرات هر یک از آن‌ها برای پوشش تمام شرایط تعیین می‌شود.

مرحله دوم: پس از شناسایی پارامترها و دسته‌بندی، به دلیل وجود اندرکنش بین آن‌ها باید مقدار و نحوه‌ی اثرگذاری آن‌ها بر روی یکدیگر مشخص شود. در این مرحله از روش آزمون تصمیم‌گیری یا DEMATEL استفاده خواهد شد.

مرحله سوم: وزن هر یک از پارامترها و دسته عوامل آن‌ها با استفاده از روش DEMATEL و فرایند تحلیل شبکه ANP بر اساس نظرات خبرگان در این مرحله تعیین می‌شود. در حقیقت برای محاسبه ارتباط داخلی میان عناصر در این روش به تعداد زیادی ماتریس مقایسه زوجی موردنیاز است که این امر منجر به پیچیدگی و صرف زمان زیادی برای حل مسئله می‌شود؛ در برخورد با این محدودیت از نتایج روش

DEMATEL استفاده خواهد شد. در این مرحله نیز با توجه به عدم قطعیت در پاسخ کارشناسان روش ANP مورد استفاده قرار می گیرد.

مرحله چهارم: با توجه به اینکه دامنه رفتار تونل زیاد بوده و گستره عمده‌ای از رفتارها را شامل می‌شود، بنابراین لازم است نتایج سیستم پیشنهادی با نتایج واقعی بررسی شوند. مراحل ذکر شده در شکل ۱-۱ نمایش داده شده است.

۱-۵ ساختار پایان نامه

پژوهش حاضر مشتمل بر ۷ فصل می‌باشد که به صورت مختصر تشریح شده است.

فصل اول که فصل جاری است، به کلیات تحقیق پرداخته شده است. در این فصل پس از بیان اهمیت مسئله، سوال‌های تحقیق، ضرورت و اهداف آن تشریح شده و سپس روند اجرای آن تعیین می‌گردد.

فصل دوم، با مروری بر ادبیات تحقیق با معرفی مفاهیم کاربردی آغاز و پس از آن بیان تاریخچه‌ای مختصر از مطالعات صورت گرفته در زمینه پایداری تونل، بیان شده است.

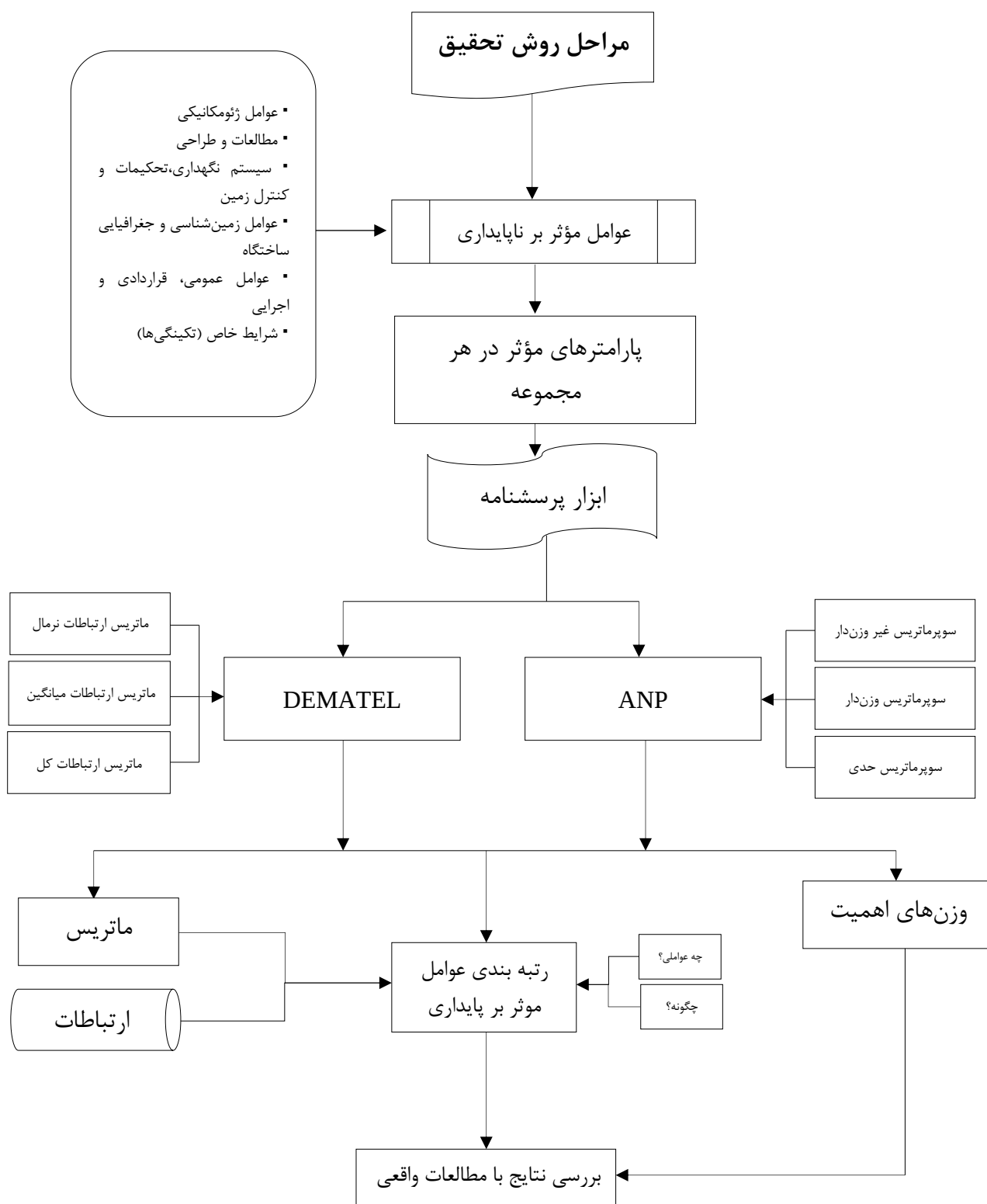
فصل سوم، کلیات تمامی روش‌های بکار رفته در این تحقیق شامل روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره ذکر شده است.

در فصل چهارم، عوامل مؤثر بر پایداری تونل به صورت کامل تشریح شده است و در ادامه آن، پارامترهای اساسی مؤثر بر پایداری تونل تعیین شده‌اند.

فصل پنجم به عنوان فصل کلیدی پایان‌نامه، مراحل ارائه نتایج همراه با ارزیابی آن‌ها به تفصیل و به صورت گام به گام تشریح شده است.

فصل ششم، به منظور بررسی عملکرد روش ANP-DEMATEL با نتایج حاصل از یک مطالعه آماری نسبتاً جامع از ناپایداری‌ها و ریزش‌های رخ داده طی سال‌های گذشته پرداخته شده است.

و در نهایت در فصل هفتم به بررسی نتایج حاصل شده، مزایا و معایب مدل ارائه شده و ارائه پیشنهادهایی برای مطالعات آینده اختصاص یافته است.



شکل ۱-۱ مراحل روش انجام تحقیق.

فصل ۲: مفاهیم کاربردی و سابقه علمی موضوع

۲-۱ مقدمه

امروزه یکی از مهم‌ترین مشکلات در صنعت تونل‌سازی که هزینه‌های زیادی را بر این صنعت وارد می‌کند، حوادث ناشی از ناپایداری‌های تونل است. متأسفانه تونل‌سازی و فضاهای زیرسطحی در تمام بخش‌های درگیر پروژه، همواره تحت تأثیر ناپایداری‌ها و حوادث، به‌ویژه در اثر فروریزش بوده است؛ اما از طریق شناخت دقیق رفتار تونل و سازه‌های زیرزمینی تحت شرایط مختلف و پارامترهای مؤثر بر ناپایداری‌ها، می‌توان احتمال وقوع یا تأثیر پیامدهای نامطلوب آن‌ها را کاهش داد. از این‌رو در این فصل سعی گردیده است به بررسی و توضیح جنبه‌های اصلی مربوط به مفاهیم ناپایداری، رفتار سنگ، هدف از انجام آن و تعیین عوامل مؤثر بر ناپایداری و اهمیت آن در تونل‌های مختلف پرداخته و در قسمت بعد سابقه علمی موضوع به‌صورت جامع ارائه و مرور شده است.

۲-۲ مفاهیم کاربردی

ناپایداری با تعاریف مختلفی بررسی می‌شود از جمله؛ جابجایی بیش‌ازحد^۱، حرکت توده‌ای^۲ و فروریزش^۳. باهدف توصیف ناپایداری یا انجام بررسی در مورد ریزش تونل‌ها، تقسیم‌بندی آن‌ها در دسته‌های مختلف عملی است. آن‌ها را می‌توان با توجه به عوامل زیر ترتیب داد.

فروریزش به معنای آزاد شدن ناگهانی و غیرقابل کنترل زمین است که منجر به از بین رفتن بیشتر یا تمام سطح مقطع یک تونل یا ریزش قابل‌توجهی از مواد می‌شود. علاوه‌براین، بسیاری از دسته‌های مختلف از فروریزش متفاوت در مکان، میزان، اثرات، پیامدها، دلایل و مکانیسم‌ها وجود دارد. در اصل، فروریزش‌ها، نه‌تنها سازه‌های زیرزمینی را تحت تأثیر قرار می‌دهد، بلکه به سطح نیز می‌رسد و ممکن است به زیرساخت‌ها و ساختمان‌ها آسیب برساند. فروریزش‌های زیرزمینی^۴ مانند ریزش سینه‌کار^۵، ریزش سقف^۶، ریزش دیواره

¹ Maximum Settlement

² Mass movement or Mass wasting

³ Collapse

⁴ Underground Collapse

⁵ Face Collapse

⁶ Roof Collapse

جانبی^۱ و برخی دیگر از انواع آن مانند هجوم آب^۲، انفجار سنگ^۳ و ریزش پورتال^۴ هستند (Seidenfuss, 2006).

پیش‌بینی آسیب ناشی از رفتار زمین ناشی از ساخت‌وساز، عامل اصلی در طراحی فضای زیرزمینی است. طراحی حفريات زیرزمینی در سنگ در بسیاری از مقالات و کتاب‌های متنی در سراسر جهان مورد بحث قرار گرفته است (Bieniawski, 1984, Bieniawski, 1989, Hoek et al., 1980).

رفتار زمین عبارت است از عکس‌العمل زمین در پاسخ به شرایط توده‌سنگ، نیروهای عمل‌کننده و ویژگی‌های مربوط به پروژه قبل از نصب سیستم‌های نگهدارنده است. اگر رفتار زمین به‌درستی پیش‌بینی شود، مشخصات پروژه به‌عنوان یک عامل کنترل‌کننده مورد استفاده قرار می‌گیرد؛ به عبارت دیگر انتخاب روش اجرایی، تأمین مالی و هزینه‌های اجرایی و تهیه برنامه زمانی تونل بر اساس رفتار زمین به‌گونه‌ای طراحی شود که مشخصات پروژه نقش بازدارنده در وقوع مخاطرات داشته باشد. شکل ۱-۲ ویژگی‌های اصلی زمین-شناسی و توپوگرافی تأثیرگذار بر رفتار زمین و استفاده از ابزارهای مهندسی سنگ مورد استفاده برای طراحی را نشان می‌دهد.

۲-۳ مروری بر مطالعات گذشته

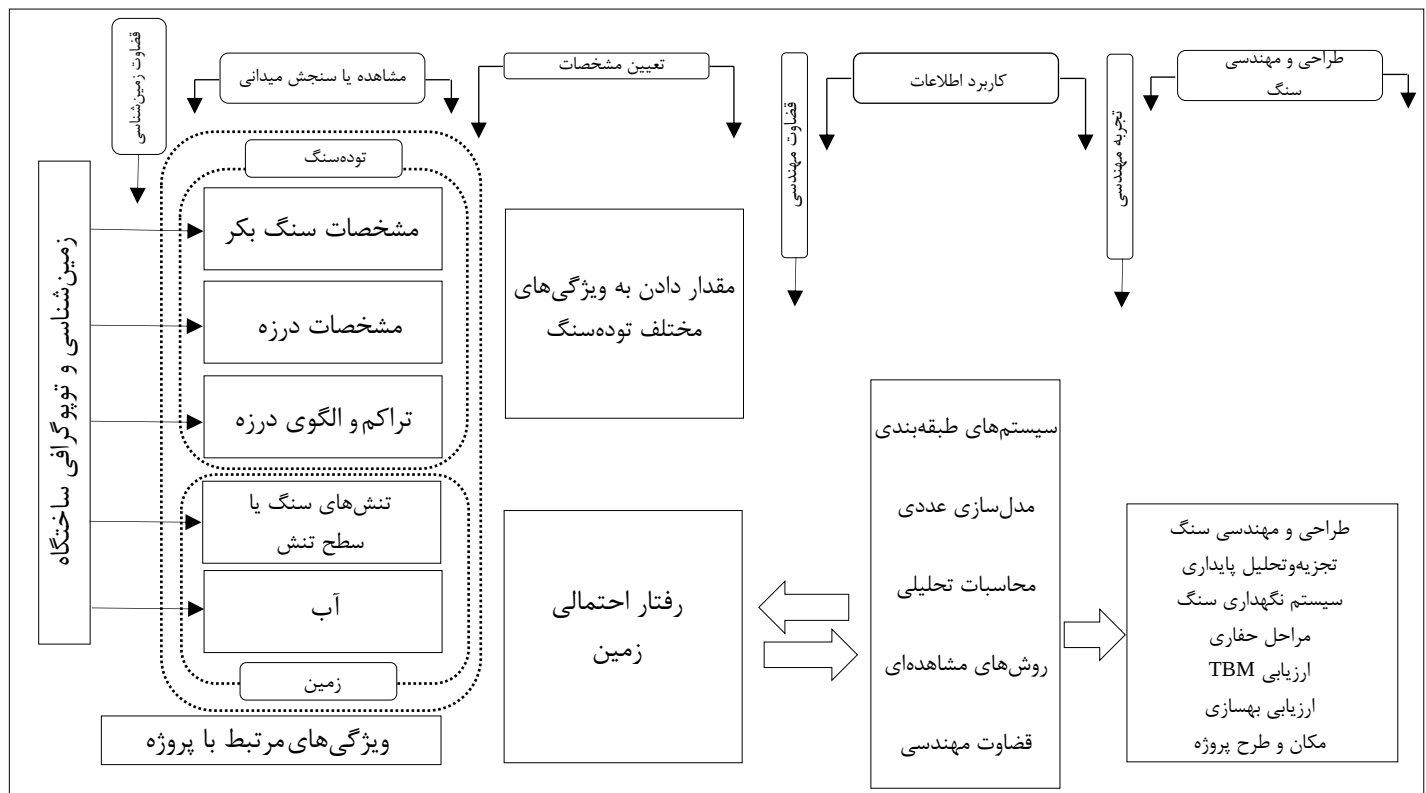
روش‌های متعددی به‌منظور تحلیل پایداری فضاهای زیرزمینی وجود دارد که هرکدام مزایا و معایب مخصوص به خود را دارند بنابراین مهندس طراح باید بسته به شرایط کار و دقت مورد نظر روشی را انتخاب نماید تا علاوه بر رعایت جنبه‌های اقتصادی و فنی، از نظر کاربری ساده بوده و نتایج آن با رعایت ضریب اطمینان کافی، از درجه اعتبار مناسب برخوردار باشد. در ادامه انواع مطالعات صورت گرفته در این زمینه تشریح می‌شود.

¹ Side-Wall Caving

² Inrush of water/Ingress of water

³ Rock Burst

⁴ Portal Collapse



شکل ۲-۱ روابط اصلی بین رفتار زمین و مهندسی سنگ و طراحی (Stille et al., 2003).

۲-۳-۱ مطالعات سیستم های طبقه بندی تجربی

استفاده گسترده از سیستم های طبقه بندی را می توان به استفاده آسان اندازه گیری ها و مشاهدات ساده نسبت داد تا یک شاخص کمی از کیفیت توده سنگ ارائه دهد. پیشینه روش های تجربی بسیار بیشتر از ۳۰ سال است. برخی از سیستم های توسعه یافته برای توصیف توده سنگ به طور کلی به تعریف خصوصیات توده سنگ هدایت می شوند و برخی سیستم های دیگر برای استفاده در طراحی توسعه یافته اند.

تئوری ترزاقی^۱ را شاید بتوان به عنوان اولین تئوری در خصوص طبقه بندی توده سنگ به منظور اهداف مهندسی دانست. ترزاقی در سال ۱۹۴۰ فاکتور بارگذاری سنگ H_p را ارائه داد که همان ارتفاع زون سست شده در بالای سقف تونل است. ترزاقی در سال ۱۹۴۶ با ترکیب نتایج حاصل از مطالعات آزمایشگاهی و تخمین میزان بارهای سنگ فاکتور بارگذاری را محاسبه و مشخصات کلاس توده سنگ را به صورت کیفی در ۹ بخش ارائه داد (Terzaghi, 1946). دیر^۲ و همکاران در سال ۱۹۷۰ مطرح کردند که کیفیت توده سنگ

^۱ Terzaghi

^۲ Deer

به عنوان جزء جدایی ناپذیر سیستم نگهداری و طبقه بندی ترزاقی را توسط شاخص کیفی سنگ (RQD) کمی کردند. سیسیل^۱ در سال ۱۹۷۰ مشخص نمود که طبقه بندی ترزاقی اطلاعات کمی مرتبط با خواص توده-سنگ را در نظر نمی گیرد (Palmstrom et al., 2007). سیستم طبقه بندی ژئومکانیکی یا امتیاز توده سنگ (RMR) اولین بار در انجمن پژوهش های علمی و صنعتی^۲ (CSIR) آفریقای جنوبی توسط بینیاویسکی^۳ در سال ۱۹۷۳ ارائه گردید. این طبقه بندی پارامترهای مهندسی سنگ را دخیل کرد. در ابتدا سیستم RMR دربرگیرنده اطلاعات حاصل از ۴۹ گزارش موردی بود. سپس این طبقه بندی دست خوش تغییرات اساسی قرار گرفت (Bieniawski, 1973). بینیاویسکی در سال ۱۹۸۴ دستورالعمل هایی جهت انتخاب سیستم نگهداری تونل ارائه نموده است. این دستورالعمل ها به فاکتورهایی از قبیل عمق سازه زیرزمینی از سطح زمین (فشار روباره یا تنش برجا)، ابعاد تونل، شکل و روش حفر تونل بستگی دارد (Bieniawski, 1984). در سال ۱۹۸۳ اونال^۴ رابطه ای را جهت برآورد فشار سیستم نگهداری قائم و افقی با استفاده از RMR ارائه نمود (Ranasooriya, 2009). گوئل^۵ و جتوا^۶ در سال ۱۹۹۱ در تونل های سنگی اندازه گیری کردند و فشار حاصله را مورد ارزیابی قرار دادند (Goel & Jethwa, 1991). بر اساس نظریه بینیاویسکی می توان نسبت مدول تغییر شکل پذیری توده سنگ به مدول الاستیک را برحسب RQD محاسبه کرد. در مورد توده سنگ هایی که مدت زمان خود ایستایی آن ها بالاست، این امر نباید تصور غلطی از پایداری دائمی سنگ به وجود آورد، لافر^۷ در سال ۱۹۸۸ بررسی نمود که در یک کلاس معین از توده سنگ بر اساس طبقه بندی RMR، در اثر حفر با TBM^۸ مدت زمان خود ایستایی بهبود می یابد. بارتن و همکارانش در سال ۱۹۷۴ در موسسه ژئوتکنیک نروژ^۹ (NGI) سیستم Q را به منظور طبقه بندی توده سنگ بر اساس گزارش ها موردی ۲۰۰ تونل و مغار ارائه دادند (Barton et al., 1974).

¹ Cecil

² Council of Scientific & Industrial Research (CSIR)

³ Bieniawski

⁴ Onal

⁵ Goel

⁶ Jetwa

⁷ Lauffer

⁸ Tunnel Boring Machine

⁹ Norwegian Geotechnical Institute

بر اساس نظریه کومار^۱ در بین طبقه‌بندی‌های موجود، سیستم Q بهترین گزینه جهت انتخاب سیستم نگهداری تونل‌هاست (Kumar et al., 2004). سینگ^۲ در سال ۱۹۹۲ رابطه‌ای جهت برآورد فشار وارد بر نگهداری در دو حالت موقت و نگهداری دائمی ارائه نمودند. بر اساس نظریه گوئل در سال ۱۹۹۵ رابطه بارتون در مورد تونل‌های بزرگ مقطع در زمین‌هایی که با خاصیت مچاله شوندگی بالا حفر می‌شوند غیر ایمن خواهد بود. بارتون^۳ و همکاران در سال ۱۹۷۴ مدعی شدند که فشار وارد بر سیستم نگهداری مستقل از عرض فضای حفاری در تونل‌هاست. با انجام آنالیز اندرکنش سیستم نگهداری تونل و توده‌سنگ توسط ورمن در سال ۱۹۹۳ نتیجه گرفت که فشار سیستم نگهداری مستقل از پهنای تونل است. گوئل و همکاران در سال ۱۹۹۵ تأثیر بسیار اندک ابعاد تونل بر فشار سیستم نگهداری را مورد بررسی قرار دادند (Goel et al., 1996). سینگ و همکاران در سال ۱۹۹۵ فشار سیستم نگهداری اندازه‌گیری شده از تونل‌ها و مغارها را با فشار نگهداری حاصل از تئوری بارگذاری ترزاقی مورد مقایسه قرار دادند که فشار سیستم نگهداری در تونل‌ها و مغارهای سنگی به‌طور مستقیم با افزایش ابعاد حفاری که توسط ترزاقی فرض شده بود، افزایش نمی‌یابد (Ranasooriya, 2009).

رایج‌ترین سیستم‌های طراحی تجربی سیستم‌های طبقه‌بندی RMR و Q هستند. به نظر ریدمولر^۴ و شوبرت^۵، این دو سیستم از مزایایی از قبیل کاربری ساده و طراحی نگهداری برخوردار هستند، که این امر منجر به پذیرش گسترده بین‌المللی آن‌ها شده است (Riedmüller & Schubert, 1999).

طبق اظهارات شوبرت و ریدمولر این دو سیستم طبقه‌بندی دارای کاستی‌های شدیدی از جمله اعمال آن برای تمام انواع توده‌سنگ است. در شرایط زمین ناپایدار و نامناسب، این روش‌های طبقه‌بندی ممکن است نتایج گمراه‌کننده ارائه دهد. طبق تجربه محققان، سیستم Q در شرایط زمینی که احتمال سقوط بلوک وجود دارد، به بهترین وجه کاربرد دارد؛ اما در زون‌های ضعیف با وجود احتمال پتانسیل مچاله شوندگی و

¹ Kumar

² Singh

³ Barton

⁴ Redmuller

⁵ Schubert

آماس، سیستم قابل اعتماد نیست. همچنین کاربرد فاکتور کاهش تنش (SRF) برای شرایط کماتش و ترکیدن سنگ در زونهای ضعیف نامشخص است. در مورد سیستم Q، تأثیر آب بر پایداری و الزامات نگهداری سنگ نامشخص است (Schubert et al., 2001).

سیستم امتیازدهی ساختار توده سنگ^۱ (RSR) مدلی برای پیش‌بینی سیستم‌های نگهداری توسط ویکهام^۲ در سال ۱۹۷۲ ارائه گردید. این سیستم طبقه‌بندی اولین سیستم امتیازدهی توده سنگ بود که در آن تعدادی از پارامترهای زمین‌شناسی و پارامترهای ساختاری که شامل اندازه، ابعاد تونل، جهت پیشروی و روش حفاری است؛ برای توصیف کیفیت توده سنگ و نگهداری مناسب زمین (مخصوصاً برای قاب‌های فولادی) در نظر گرفته می‌شد (Wickham et al., 1972). طبقه‌بندی RMI^۳ توسط پالمستروم^۴ در سال ۱۹۹۵ ارائه گردید. هدف آن طبقه‌بندی توده سنگ و ارائه سیستم نگهداری در سازه‌های زیرزمینی می‌باشد. در این طبقه‌بندی مقاومت تک‌محوره سنگ با در نظر گرفتن پارامترهای درزه توصیف قابل قبولی از توده-سنگ را ارائه می‌دهد (Palmström, 2014).

هوک^۵ و براون^۶ سال‌ها پیش دریافته‌اند که معیار شکست سنگ بدون در نظر گرفتن خصوصیات زمین‌شناسی صحیح نیست. پارامترهای ساختاری و آب زیرزمینی در RMR و پارامترهای تنش و آب زیرزمینی در Q که در تحلیل عددی تنش مؤثر و نیز ارتباط این پارامترها با خواص توده سنگ نقش مهمی دارند، از صحت زیادی برخوردار نیستند؛ زیرا اساساً هدف از ارائه طبقه‌بندی Q و RMR در نظر گرفتن شرایط زمین‌شناسی منطقه نبوده بلکه هدف تخمین نگهداری و حفاری زیرزمینی می‌باشد (Ranasooriya, 2009). علاوه بر این، مارتین^۷ و همکاران بر اساس کار هوک و همکاران انواع رفتار حفاریات زیرزمینی را با توجه به حالت‌های مختلف شکست بررسی کرده‌اند؛ که در شکل ۲-۲ نشان داده شده است.

¹ Rock Structure Rating (RSR)

² Wickham

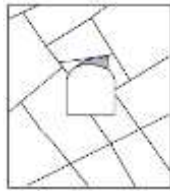
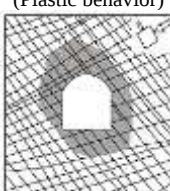
³ Rock Mass Index

⁴ Palmstrom

⁵ Hoek

⁶ Brown

⁷ Martin

پایدار (Stable)  پاسخ الاستیک سنگ‌های اطراف دهانه	ریزش بلوکی (Block fall)  سقوط یا لغزش بلوک و گوه	سقوط سقف یا یک ساختار مشابه در زیرزمین (Cave-in)  شکست سنگ بکر در امتداد ناپیوستگی
کمانش (Buckling)  شل شدن قطعات سنگ در امتداد تورق یا لایه‌برداری شکننده	ترکیدن (Rupturing)  شکست شکننده موضعی سنگ بکر و حرکت بلوک‌ها	برش (Slabbing)  شکست شکننده در مجاورت مرز حفاری
انفجار سنگ (Rock burst)  شکست شکننده در اطراف حفاری	رفتار پلاستیکی (Plastic behavior)  رفتار پلاستیکی (اولیه)	مچاله شوندگی زمین متورم شونده (Squeezing of the Swelling ground)  به صورت الاستوپلاستیک

شکل ۲-۲ بخشی از انواع رفتارها در دهانه‌های زیرزمینی (Martin et al., 1999 , Hoek et al., 2000).

پالمستروم در سال ۲۰۰۰ روش نگهداری RMi (شاخص توده‌سنگ) را از مقدار اصلی RMi تنظیم‌شده توسط تنش‌های برجا و آب زیرزمینی برای توصیف شرایط زمین و نسبت بین اندازه بلوک و اندازه تونل برای جهت‌داری درزه و تعداد دسته‌درزه در نظر می‌گیرد. این سیستم رویکردهای مختلفی را برای برآورد نگهداری از سنگ در زمین‌های ناپیوسته اعمال می‌کند (Stille et al., 2008).

همان‌طور که توسط استیل و پالمستروم در سال ۲۰۰۳ مورد بحث قرار گرفت، شوبرت و همکاران تجربه طراحی تونل‌ها و نوع رفتار زمین در حفاریات زیرزمینی در سه گروه رفتارهای ناشی از وزن، رفتارهای ناشی از تنش‌های القایی و رفتارهای ناشی از وجود آب را طبق جدول ۱-۲ خلاصه کرده و از آن برای ارائه یک رویکرد مهندسی سنگ استفاده کرده است. (Palmstrom et al., 2007).

جدول ۲-۱ تعاریف انواع رفتارهای سنگی (Terzaghi, 1946 , Schubert et al., 2001).

نوع رفتار			تعاریف	اظهارات	
نوع ۱	الف) پایدار		محیط دربرگیرنده تا چند روز یا بیشتر بدون نگهداری پایدار است.	سنگ‌های توده‌ای در اعماق کم و متوسط	
	ب) ریزش بلوکی	تک بلوک	پایدار با پتانسیل ریزش بلوک‌های منفرد.	شکست ناشی از ناپیوستگی‌ها.	
		چندین بلوک	پایدار با پتانسیل ریزش چندین بلوک		
وزنی	ج) تخریب		حرکت سریع و روبه‌داخل حجم زیادی از قطعات سنگ خردشده.	در هنگام مواجهه با سنگ‌های به‌شدت خورد شده و درزه‌دار	
	د) زمین‌های روان شونده		مواد بسیار ریز به‌سرعت به داخل تونل حمله می‌آورند تا یک شیب پایدار شکل بگیرد. زمان خود نگهداری صفر و یا نزدیک صفر است.	نمونه‌ها: ماسه‌های متوسط و درشت و شن‌ها بالاتر از سطح ایستابی هستند.	
نوع ۲	الف) کمانش (پیچ‌خورنده)		شکستن قطعات در سطح تونل.	در سنگ‌های ناهمسانگرد، سخت و شکننده تحت بار کافی و به دلیل شکست ساختارهای سنگی رخ می‌دهد.	رفتار شکننده
	ب) گسیختگی ناشی از تنش	ج) تکه‌تکه شدن، ورق‌ورق شدن	به‌تدریج قطعات تونل، تکه‌تکه یا قطعات شکسته می‌شوند.	اثر وابسته به زمان تکه‌تکه شدن یا ترکیدن سنگ ناشی از توزیع مجدد تنش‌ها.	
			جدایش ناگهانی و شدید قطعات نازک سنگ از دیواره و یا سقف.	تعدیل فشار زیاد و شکننده. شامل ترکیدن یا ورقه ورقه شدن است.	
			بسیار شدیدتر از هم‌مجزاشدگی است و حجم قابل‌توجهی را شامل می‌شود (انواع بزرگ و سنگین آن اغلب به‌عنوان یک رویداد لرزه‌ای ثبت می‌شود).	بیش‌تنشی بسیار زیاد در سنگ‌های سخت و توده‌ای و ترد.	
تنش القایی	ه) رفتار پلاستیکی (اولیه)		تغییر شکل‌های اولیه ناشی از شکست برشی در ترکیب با شکست ناشی از درزه‌ها و ناپیوستگی‌ها در توده‌سنگ.	چنین رفتاری در سنگ‌های پلاستیک (شکل‌پذیر) به دلیل بیش‌تنش شدن اتفاق می‌افتد و عموماً از مجاله شوندگی شروع می‌شود.	رفتار پلاستیکی
	و) مجاله شوندگی		تغییر شکل وابسته به زمان، ذاتاً مربوط به خزش ناشی از بیش‌تنشی همراه است. تغییرشکل‌ها ممکن است در طول ساخت‌وساز متوقف شوند و یا در یک دوره زمانی طولانی ادامه یابد.	توده سنگ‌ها و مواد پلاستیک بیش‌تنش حاوی کانی‌های صفحه‌ای همچون میکا و یا کانی‌های رسی با ظرفیت آماسی کم و محدود.	
نوع ۳	الف) وارفتگی به دلیل آب		زمین به‌طور تدریجی به قطعات و خورده‌ریزه تبدیل می‌شود.	ازهم مجزا شدگی برخی از مواد با چسبندگی متوسط و شکننده؛ مانند گل‌سنگ و رس سفت و شکافدار.	آبدار شدن
	ب) تورم (آماس)	در سنگ‌های بخصوص	پیشروی زمین دربرگیرنده تونل به دلیل جذب آب. این فرآیند گاهی ممکن است با لهیدگی اشتباه گرفته شود.	تورم در سنگ‌هایی اتفاق می‌افتد که در آن انهدیریت، هالیت و مواد معدنی رسی مانند اسمکتیت (مونتموریلونیت) بخش قابل‌توجهی را تشکیل می‌دهند.	مواد معدنی
		لایه‌ها با پرشدگی رسی	آماس لایه‌های رسی ناشی از جذب آب؛ که منجر به شل شدن بلوک‌ها و کاهش مقاومت برشی رس می‌شود.	آماس در لایه‌هایی که پرکننده‌هایی از جنس کانی‌هایی رسی (اسمکتیت، مونتموریلونیت) دارند، اتفاق می‌افتد.	تورم یافته
	ج) زمین‌های جریانی		مخلوطی از آب و ذرات جامد به‌سرعت از تمام جوانب به داخل تونل هجوم می‌آورند.	ممکن است در تونل‌های زیر سطح آب‌های زیرزمینی در مواد ذره‌ای با چسبندگی اندک یا کم رخ دهد.	آب
	د) ورود آب		آب تحت‌فشار از طریق کانال‌ها یا بازشدگی‌های موجود در سنگ‌ها به داخل فضا هجوم می‌آورند.	ممکن است در سنگ‌های متخلخل یا قابل‌حل، یا در امتداد شکاف‌ها یا کانال‌های موجود در شکستگی یا درزه رخ دهد.	جریانی

شاخص مقاومت زمین‌شناسی^۱ (GSI) در ابتدا توسط هوک در سال ۱۹۹۴ معرفی و سپس توسط مارینوس و هوک در سال ۲۰۰۰ اصلاح شد. تخمینی برای مقاومت توده‌سنگ بر اساس توصیفات مبتنی بر مشاهدات صحرایی و برجا، ایجاد کرده است. لازم به توجه است که پارامترهای ورودی برای نشان دادن مقاومت سنگ بکر در سیستم GSI وجود ندارد، این سیستم توسط مارینوس در سال ۲۰۰۵ اصلاح شد (Hoek et al., 2005). در این مورد انواع رفتار سنگ (پایدار، شکست گوه‌ای، شکست دودکشی^۲، زمین جریانی، شکست برشی، مچاله شوندگی) در جدول ۲-۳ ارائه شده است. داده‌های مورد استفاده در این جدول از تونل‌های حفاری شده با روش مرسوم در یک محیط غیرشهری با پوشش روباره تا چند صد متر (عموماً از ۵۰۰ متر بیشتر) با قطر تونل ۱۲ متر به دست آمده است. این جدول به روباره بسیار زیاد (بیشتر از ۱۰۰۰ متر)، جایی که مقیاس و مکانیسم شکست ممکن است تفاوت داشته باشد اشاره ندارد. هدف از این نمودار پیش‌بینی مکانیسم شکست چندین نوع توده‌سنگی متداول است (Marinos, 2014).

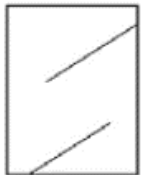
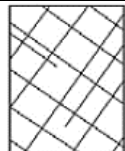
جدول ۲-۲ نوع رفتار بر اساس دستورالعمل‌های اتریشی برای برنامه‌ریزی ژئومکانیکی (Schubert & Goricki, 2004).

نوع رفتار	توصیف روش و مکانیک شکست محتمل در حفاری تونل
پایدار	توده‌سنگ پایدار با احتمال ریزش یا لغزش محلی بلوک‌های کوچک در اثر وزن.
پایدار با احتمال سقوط بلوک در اثر ناپیوستگی‌ها	سقوط و لغزش بلوک‌ها در اثر وزن، ناپیوستگی و کشش عمقی در اثر شکست برشی محلی.
شکست برشی کم‌عمق	تنش‌های کم‌عمق منجر به شکست برشی در ترکیب با شکست‌های ناشی از وزن و ناپیوستگی در توده‌سنگ می‌شود.
شکست برشی عمیق	تنش‌های عمیق باعث شکست‌های برشی و تغییر شکل‌های بزرگ می‌شود.
ریزش ناگهانی و پرفشار سنگ (انفجار سنگ)	شکست ناگهانی و شدید توده‌سنگ ناشی از تنش بالا، وجود سنگ‌های ترد و شکننده و آزاد شدن ناگهانی و سریع انرژی کرنشی ذخیره شده.
شکست خمشی	کمانش سنگ‌ها با یک مجموعه ناپیوستگی با فاصله‌داری کم، غالباً به دلیل شکست برشی.
شکست برشی تحت فشار محصورکننده کم	احتمال بروز بیش شکستگی زیاد و شکست برشی پیش‌رونده با ایجاد شکست دودکشی، عمدتاً به دلیل کمبود فشار جانبی.
زمین روان شونده و ریزشی	جریان سنگ به شدت خرد شده، خاک مرطوب یا خشک و بدون چسبندگی.
زمین‌های جاری شونده	جریان سنگ‌های شدیداً خرد شده یا خاک با محتوای آب زیاد.
زمین‌های آماسی	افزایش حجم وابسته به زمان توده‌سنگ ناشی از واکنش فیزیکوشیمیایی سنگ و آب در ترکیب با آزادسازی تنش، منجر به حرکت سنگ به سمت داخل تونل می‌شود.
رفتار عموماً متغیر	تغییر سریع تنش و تغییر شکل، ناشی از شرایط ناهمگن توده‌سنگ یا وضعیت سنگ بلوکی در برخورد با شرایط تکتونیکی (زون شدیداً خرد شده و گسله).

¹ Geological strength index

² Chimney failure

جدول ۲-۳ رفتار تونل در توده‌های سنگی (Marinos, 2014).

ساختمان توده سنگ	روباره کم	روباره زیاد	ساختمان توده سنگ	روباره کم	روباره زیاد
 سنگ بکر یا سنگ درجا	مقاومت سنگ بکر (σ_d) حد نشانگر: $\sim 15 \text{ mpa}$ (σ_{ci}) کم σ_{ci} زیاد σ_{ci} 	مقاومت سنگ بکر (σ_d) حد نشانگر: $\sim 15 \text{ mpa}$ (σ_{ci}) کم σ_{ci} زیاد σ_{ci} 	 بلوکی	مقاومت سنگ بکر (σ_d) حد نشانگر: $\sim 15 \text{ mpa}$ (σ_{ci}) کم σ_{ci} زیاد σ_{ci} 	مقاومت سنگ بکر (σ_d) حد نشانگر: $\sim 15 \text{ mpa}$ (σ_{ci}) کم σ_{ci} زیاد σ_{ci} 
حد روباره (H): ~ 150 متر	نمونه سنگ بکر یا سنگ عظیم درجا با چند ناپیوستگی		حد روباره (H): ~ 150 متر	توده سنگ دست نخورده متشکل از بلوک تشکیل شده توسط سه مجموعه ناپیوستگی تقاطع متعامد به خوبی در هم قفل شده است.	
 بسیار بلوکی	مقاومت سنگ بکر (σ_d) حد نشانگر: $\sim 15 \text{ mpa}$ (σ_{ci}) کم σ_{ci} زیاد σ_{ci} 	مقاومت سنگ بکر (σ_d) حد نشانگر: $\sim 15 \text{ mpa}$ (σ_{ci}) کم σ_{ci} زیاد σ_{ci} 	 بلوکی، آشفته، درزه دار	مقاومت سنگ بکر (σ_d) حد نشانگر: $\sim 15 \text{ mpa}$ (σ_{ci}) کم σ_{ci} زیاد σ_{ci} 	مقاومت سنگ بکر (σ_d) حد نشانگر: $\sim 15 \text{ mpa}$ (σ_{ci}) کم σ_{ci} زیاد σ_{ci} 
حد روباره (H): ~ 70 متر	توده سنگ تا حدودی مختل شده با بلوک‌های زاویه‌ای چند وجهی تشکیل شده توسط چهار یا چند مجموعه ناپیوستگی		حد روباره (H): ~ 70 متر	توده سنگ تا حدودی مختل شده با بلوک‌های زاویه‌ای چند وجهی تشکیل شده توسط چهار یا چند مجموعه ناپیوستگی	
 متلاشی شده	مقاومت سنگ بکر (σ_d) حد نشانگر: $\sim 15 \text{ mpa}$ (σ_{ci}) کم σ_{ci} زیاد σ_{ci} 	مقاومت سنگ بکر (σ_d) حد نشانگر: $\sim 15 \text{ mpa}$ (σ_{ci}) کم σ_{ci} زیاد σ_{ci} 	 متورق، برشی	مقاومت سنگ بکر (σ_d) حد نشانگر: $\sim 15 \text{ mpa}$ (σ_{ci}) کم σ_{ci} زیاد σ_{ci} 	مقاومت سنگ بکر (σ_d) حد نشانگر: $\sim 15 \text{ mpa}$ (σ_{ci}) کم σ_{ci} زیاد σ_{ci} 
حد روباره (H): ~ 70 متر	توده سنگ بسیار ضعیف مخلوطی از قطعات سنگی زاویه دار و شکسته شده		حد روباره (H): ~ 70 متر	ورقه در اثر تکتونیک منجر به توده سنگ ضعیف می‌شود. بیش از هر مجموعه ناپیوستگی دیگری غالب است و منجر به انسداد کامل نمی‌شود.	

بسیاری از محققان رفتار سنگ و پارامترهای اصلی آن را در جدول ۲-۴ مطالعه کرده‌اند. در مصالح ساختاری پیچیده مانند توده‌سنگ، چند حالت مختلف شکست وجود دارد که به چندین عامل مانند ترکیب توده‌سنگ، اثرات تنش و فشار آب زیرزمینی و همچنین اندازه حفريات زیرزمینی بستگی دارد.

جدول ۲-۴ مقایسه پارامترهای اصلی رفتارهای سنگی (Kim et al., 2008).

ردیف	محققان	نوع رفتار سنگ	پارامترهای اصلی
۱	(Martin et al., 1999)	۱۰ نوع: پایدار، ریزش بلوکی، تخریب، کمانش، پارگی، پاشیدن، ورقه‌ورقه شدن، ترکیدن سنگ، رفتار پلاستیک، مچاله شوندگی یا تورم رس	RMR, UCS, تنش زمین
۲	(Hoek et al., 2000)	تنش ناشی از حفاری کم، تنش ناشی از حفاری متوسط، تنش ناشی از حفاری زیاد	RMR, UCS, تنش زمین و در اثر تنش
۳	(Martin et al., 2003)	تنش‌های پلاستیکی ناشی از گرانش، حرکت بلوک ناشی از تنش، پوسته‌پوسته شدن	GSI, UCS, تنش زمین
۴	(Schubert & Goricki, 2004)	۱۱ نوع: پایدار، پایدار با پتانسیل کنترل افتادن بلوک به‌صورت ناپیوسته، شکست برشی کم‌عمق، شکست برشی نیمه عمیق، ترکیدن سنگ، کمانش، شکست برشی در فشار کم، زمین پیچ‌خورده، زمین جریانی، آماس، توده‌سنگ ناهمگن با خصوصیات تغییر شکل	نوع سنگ، آب زیرزمینی، جهت‌داری درزه، تنش، اندازه و شکل تونل
۵	(Palmstrom & Stille, 2007)	ناشی از جاذبه (۴ نوع): پایدار، ریزش گوه‌ای، تخریب، زمین‌های روان شونده. ناشی از تنش (۶ نوع): کمانش، بیش‌تنش، ورقه‌ورقه شدن، ترکیدن سنگ، رفتار پلاستیکی، لهیدگی. ناشی از آب‌های زیرزمینی (۳ نوع): وارفتگی به دلیل آب، آماس، زمین جریانی	نوع سنگ، آب زیرزمینی، جهت‌داری درزه، تنش زمین، اندازه و شکل تونل
۶	(Kim et al., 2008)	مدول سنگ بکر، مدول سنگ، تعداد دسته‌درزه، فاصله‌داری درزه، RQD، وضعیت درزه (زبری، پرشدگی، هوازدگی)، اندازه و طول درزه، پایداری، جهت‌داری درزه، تنش درجا، آب زیرزمینی، وضعیت دینامیکی (زلزله، انفجار)، اندازه حفاری، شکل حفریه، روش ساخت، خسارت انفجار	پارامترهای سنگ بکر و توده‌سنگ، پارامترهای درزه، پارامترهای خارجی توده‌سنگ و پارامترهای طراحی

رفتار سنگ را می‌توان با ترکیبی از چندین پارامتر مؤثر تشخیص داد. پارامترهای مؤثر بر رفتار سنگ مطابق با جدول ۲-۴ شامل سه دسته پارامترهای ذاتی توده‌سنگ، پارامترهای خارجی توده‌سنگ و پارامترهای طراحی هستند. در بین پارامترهای ذاتی، از مقاومت فشاری تک‌محوره، RQD، شرایط سطح درزه، فاصله‌داری درزه و جهت‌داری درزه استفاده شده است. در بین پارامترهای خارجی، آب زیرزمینی و شرایط تنش اولیه و اندازه حفاری و ویژگی‌های طراحی برای تعیین شاخص کمی رفتار سنگ قابل‌استفاده است (Rafiee, 2014).

۲-۳-۲ مطالعات ناپایداری و فروریزش

ریزش یکی از مخاطرات شایع و فاجعه‌بار در مهندسی تونل است که تهدیدات جدی برای ایمنی کارکنان و تأثیر زیادی بر برنامه حفاری دارد. فضاهای زیرزمینی به علت قرارگیری در محیطی با عدم قطعیت بالا همچون زمین ناشناخته، وجود آب زیرزمینی، مسائل لجستیکی و شرایط کاری نامناسب ناپایداری‌های مختلفی را شامل می‌شوند. برخی از عوامل عمده ریزش‌ها و خسارات در سازه‌های زیرزمینی شامل مطالعات ناکافی قبل از ساخت، خطا در مرحله طراحی و محاسبه و عوارض زمین‌شناسی موجود در حین ساخت است.

مطالعاتی که در سال‌های اخیر انجام شده عمدتاً مکانیسم‌های مختلف شکست توده‌سنگ‌های اطراف تونل‌ها به‌طور گسترده مورد بررسی قرار داده‌اند که عمدتاً با روش‌های تجربی^۱، روش‌های تحلیلی^۲، آزمایش-های مدل‌سازی^۳، شبیه‌سازی عددی^۴، روش‌های مشاهده‌ای^۵ و بر مبنای مانیتورینگ و ابزار دقیق^۶ متمرکز شده است.

فرالدی^۷ و همکاران طی سال‌های ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۱ با معیار شکست هوک-براون^۸ یک راه‌حل دقیق برای پیش‌بینی ریزش در تونل‌ها و حفره‌های طبیعی ارائه دادند (Fraldi et al., 2009). یانگ^۹ و همکاران مکانیسم ریزش یک تونل کم‌عمق را بر اساس معیار شکست غیرخطی هوک-براون بررسی کردند (Yang et al., 2011).

وانگ^{۱۰} و همکاران با توجه به روش تجزیه و تحلیل حدی یک حالت شکست لغزش چند بلوکی دوبعدی را با توجه به تحلیل حدی ایجاد کرد (Wang et al., 2012). هوانگ^{۱۱} و همکاران با استفاده از آزمون‌های مدل

¹ Experimental methods

² Analytical methods

³ Modeling experiments

⁴ Numerical simulation

⁵ Observational methods

⁶ Monitoring and instrumentation

⁷ Faraldi

⁸ Hoek-Brown

⁹ Yang

¹⁰ Wang

¹¹ Huang

مقیاس^۱ اثر لایه ضعف میانی بر الگوی شکست توده‌های سنگی اطراف در یک تونل را مورد مطالعه قرارداد (Huang et al., 2013).

چن^۲ و همکاران مکانیسم پایداری سنگ‌های اطراف را با تئوری فشار کلاسیک مطالعه کردند (Chen et al., 2015). زو^۳ و همکاران از روش المان محدود برای شبیه‌سازی روند شکست پیش‌رونده در اطراف حفاری‌های زیرزمینی با اشکال رایج U شکل، دایروی، بیضوی و معکوس استفاده کرد (Zhu et al., 2005).

جیانگ^۴ و همکاران با محاسبه خودکار پارامترهای هندسی و ضرایب پایداری بلوک‌ها، پایداری سنگ اطراف را تعیین کرد (Jiang et al., 2013). چی^۵ مجموعه‌ای از مدل‌ها را برای پیش‌بینی تغییر شکل سنگ اطراف با استفاده از الگوریتم ژنتیک ایجاد کرد (Qi et al., 2013). شوهان و همکاران از طریق رفتار سنجی و تجسم سه بعدی توسط سیستم (CMS^۶) ناپایداری را بررسی کرده‌اند (Shuhan et al., 2014).

روش‌های پیش‌بینی مؤثر بر پایداری برای مهندسی تونل لازم است، بررسی ناپایداری‌های موجود در سازه‌های زیرزمینی ابزاری اساسی برای درک مکانیسم‌های آن در هنگام ساخت و ساز است. ریزش تونل به شدت تحت تأثیر تغییرات خصوصیات مکانیک سنگ قرار دارد. علاوه بر این، ریزش تونل می‌تواند نه تنها توسط این عوامل طبیعی بلکه همچنین توسط عوامل انسانی، از جمله شرایط ساخت، طراحی نگهداری و شکست‌های غیرمنتظره در پروژه ایجاد شود. عمده مطالعات به تحلیل علل ناپایداری بعد از ریزش پرداخته‌اند، مطالعاتی هم وجود دارند که با شناسایی عوامل مؤثر بر ناپایداری‌ها از ریزش جلوگیری کرده‌اند.

جدول ۲-۵ تا جدول ۲-۹ تعدادی از مطالعات انجام گرفته به تفکیک زمینه‌های مؤثر (عوامل ژئومکانیکی، خطا در مطالعات طراحی و اجرا، نگهداری تونل، شرایط زمین‌شناسی و ژئومورفولوژی و شرایط خاص) ارائه شده است.

¹ Scaled model tests

² Chen

³ Zhu

⁴ Jiang

⁵ Qi

⁶ Cavity monitoring system

جدول ۲-۵ مطالعات انجام گرفته در زمینه پارامترهای ژئومکانیکی مؤثر در ناپایداری.

ردیف	مؤلفان	خلاصه
۱	(Muir Wood et al., 1971)	بزرگ‌ترین خطر احتمالی در تونل باربری فرودگاه هیترو لندن نامناسب بودن پوشش رسی بود که تا حد امکان از طریق بررسی تاریخیچه کاربری محلی و همچنین انجام عملیات مطالعاتی برطرف شد.
۲	(Wang & Djordjevic, 2014)	یک مطالعه در مورد تجزیه و تحلیل پایداری و نظارت بر تونل در خاک‌های سست و ضعیف در حین ساخت است. طبق این مطالعه ابتدا از FEM برای تحلیل پایداری قسمت کم‌عمق تونل برای بهبود خاک‌های فوقانی استفاده می‌شود و ریزش سینه‌کار با موفقیت پیش‌بینی می‌شود و نتایج پایش تأثیر سفره‌های آب زیرزمینی در سنگ‌های ضعیف اطراف را بر پایداری نشان می‌دهد.
۳	(Shin et al., 2009)	این مقاله شامل آماری اساسی از داده‌های تهیه‌شده با ترکیب روش‌های تجربی و ANN که سطح پایداری را بررسی کرده است. سیستم ارزیابی به بخشی از تونل SYK کره اعمال می‌شود که قبلاً فرو ریخته است. سطح تنش در اطراف این تونل، عامل مهمی در ریزش است، آب‌های زیرزمینی و لهیدگی نیز عوامل مؤثری در ریزش بوده است.
۴	(Barla et al., 2010)	تونل Saint Martin یکی از تونل‌های دسترسی برای تونل لیون-تورین بود. این تونل شامل توده سنگ‌های دارای مقاومت کم و روباره بسیار زیاد بود که در آن احتمال وقوع پتانسیل مجاله شوندگی بالا بود.
۵	(Mao et al., 2015)	پایداری تونل راه زیر دریایی Finnfast که حاوی زون ضعیف آماس پذیر است را با استفاده از اطلاعات ابزار نگاری و شبیه‌سازی مورد مطالعه قرار داده است.
۶	(Lin et al., 2015)	آزمایش‌های مدل ژئومکانیکی را برای بررسی تغییر شکل، تنش، ترک‌خوردگی و شکست احتمالی تونل‌ها در ایستگاه برق آبی Jinping II انجام داد.
۷	(Asghar et al., 2017)	ناپایداری تونل گلاب را بررسی کرده که دارای لهیدگی در سنگ‌های فشارنده، ریزش در پهنه-های گسله و خردشده، سینه‌کار مختلط و انفجار سنگ است. این تونل به‌وسیله دستگاهی که قطعات ۳ و ۴ تونل قمرود که مشابه تونل گلاب بود به اتمام رسید. تجربیات مخاطرات زمین-شناسی تونل قمرود نقش بسزایی در روند حفاری این تونل داشته است.
۸	(Merlini et al., 2018)	تونل پایه ceneri دارای ناپایداری‌هایی چون روباره نسبتاً زیاد که باعث به وجود آمدن خاصیت مجاله شوندگی و آنیزوتروپی شده است. عملیات نگهداری و تزریق با موفقیت انجام شده است. بخش جنوبی پرتال نیز دارای روباره بسیار کم و کیفیت نامناسب سنگ است. به‌منظور محدود کردن ارتعاشات ناشی از انفجار، به تکنیک‌های خاص انفجار نیاز دارد.
۹	(Liu et al., 2019)	تنش‌های برجا در تونل Yangshan قبل از ریزش اندازه‌گیری نشده و در نتیجه، طراحی و حفاری کاملاً به تجربه متکی بود. تونل یانگشان پس از دو ریزش شدید، تنش‌های برجا ابتدا با آزمایش شکست هیدرولیکی نزدیک به منطقه اول ریزشی اندازه‌گیری شد و سپس بررسی علل ریزش، یعنی تنش انحرافی بسیار زیاد در سقف و پارامترهای اولیه نگهداری در مناطق ریزشی انجام شد. از روش پایش میکرو لرزه‌ای ^۱ برای مطالعه روند شکست پیش‌رونده توده سنگ اطراف و هشدار نسبت به خطر شکست‌ها در محل تنش است.
مطالعات داخلی		
۱	(جوذکی و همکاران، ۱۳۹۷)	پایداری قطعه ۳ و ۴ تونل قمرود را بررسی کرده‌اند. دستگاه TBM به دلیل وقوع ریزش‌های وسیع و یا خزش توده سنگ (پدیده لهیدگی) در زون‌های گسله دفعات متعدد متوقف شده است. در این زمینه استفاده از مدل‌های رفتاری تابع زمان در تحلیل و طراحی سیستم نگهداری مناسب به‌منظور کاهش نرخ تغییر شکل تونل‌ها در زمین‌های مجاله شونده الزامی است. سیستم نگهداری انعطاف‌پذیر به زمین اجازه همگرایی کنترل‌شده را داده و مانع فشار زیاد روی سیستم نگهداری می‌شود.

¹ Microseismic (MS)

جدول ۲-۶ مطالعات انجام گرفته در زمینه مطالعات طراحی و اجرا.

ردیف	مؤلفان	خلاصه
۱	(Muir Wood et al., 1971)	تونل فرودگاه هیترود در لندن به دلیل عدم رعایت نکات ایمنی کابل فشارقوی برق منطقه قطع شد. در صورت وجود هرگونه شک و شبهه بهتر است یک عملیات اکتشافی فیزیکی یا ژئوفیزیکی برای یافتن و رفع چنین مشکلاتی انجام گیرد. این تونل نیز مجموعه‌ای از خطاهای طراحی و مدیریت همراه با عملکرد ضعیف و کنترل کیفیت را داشت. اقدامات اصلاحی باعث هرج و مرج در فرودگاه هیترود شد هزینه بازیابی ۱۵۰ میلیون پوند (۳ برابر مبلغ قرارداد اصلی) بود، در پیگیری کاهش زمان و هزینه، مسائل فنی حیاتی را از دست ندهید. درحالی‌که تعدادی از عوامل در ریزش نقش داشتند، نیمی از آن‌ها مربوط به مسائل مدیریت بود.
۲	(Muir Wood, 2000)	ساخت تونل Thames در سال ۱۸۳۵ آغاز شد و بالاخره پس از گذراندن یک دوره زمانی دشوار و دست‌وپنجه نرم کردن با شرایط پیش‌بینی نشده زمین، طغیان رودخانه و مشکلات مربوط به پیشروی سپر در شرایط بسیار سخت و نور ضعیف که برخی از مهندسان کم تجربه را مأیوس کرده بود عملیات ساخت تونل در سال ۱۸۴۱ به اتمام رسید.
۳	(Šejnoha et al., 2009)	این مطالعه روشی را برای تعریف خطرات حفاری مربوط به حوادث غیرقابل پیش‌بینی با استفاده از روش‌های ETA و FTA ارائه داده است که ممکن است به عنوان راهنمای طراحی تونل و تصمیم‌گیری جهت مقابله با این خطرات استفاده شود.
۴	(Hoek & Guevara, 2009)	پایداری تونل Yacambú-Quibor در ایالت لارا در ونزوئلا را بررسی کردند. این تونل دارای خاصیت مجاله شونده بود، اما پس از ۳۲ سال به دلیل مشکلات مالی، قراردادی و سیاسی توانستند بر این عامل ناپایداری غلبه کنند. تلاش‌های اولیه برای استفاده از Open TBM و تلاش برای استفاده از نگهداری سنگین برای مقاومت در برابر لهیدگی بی‌نتیجه ماند.
۵	(Frodl et al., 2010)	در سال‌های اخیر پیرامون بهره‌برداری انرژی ژئوترمال با استفاده از پوشش بتنی دیواره تونل‌های مکانیزه، گزارش‌های متعددی نظیر تونل Jenbach و مترو Fasanenhof اتریش منتشر شده است.
۶	(Geimer, 2013)	بهره‌برداری از انرژی ژئوترمال در آلمان به‌ویژه در تونل‌های طویل و عمیق کوهستانی که نیازمند مطالعات گسترده زمین‌شناسی و شناخت دقیق عوارض (گسل‌ها، جریان آب زیرزمینی و...) را بررسی کرده است.
۷	(Moussaei et al., 2019)	اثرات شیب بستر، فاصله ناپیوستگی و ابعاد تونل بر ناپایداری تونل را در معیار شکست سنگ مطالعه کرد.
۸	(Li et al., 2020)	تونل بزرگراه در Qingdao چین هنگام ساخت و ساز فرو ریخت. عوامل اصلی مؤثر بر پایداری اطراف آن توالی حفاری، سطح مقطع حفاری، زمان فاصله نصب سیستم نگهداری از سینه کار، مقاومت بتن است. نتایج شبیه‌سازی عددی نشان می‌دهد که تونل با نگهداری دیواره جانبی پایدارتر از آن است که بدون نگهداری سنگ اطراف است. پس از استفاده از این روش، درصد کاهش نرخ نشست ۸۶/۱۸ درصد و درصد کاهش همگرایی ۸۷/۳۵ درصد است. این روش یک روش مؤثر برای حفظ پایداری سنگ اطراف آن در بالای تونل است.
مطالعات داخلی		
۱	(شریف‌زاده و همکاران، ۱۳۸۶)	با عریض شدن پهنای زون‌های گسله وجود آب زیرزمینی در زون‌های خرد شده بسیار محتمل است. ناپایداری‌ها شامل انحراف دستگاه TBM در جهت قائم و افقی، ترک خوردگی پوشش سگمنت و... اشاره کرد. در این زمینه می‌توان به تونل انتقال آب قمرود، تونل انتقال آب سبزکوه، تونل پیسا، تونل انتقال آب کرج، تونل زاگرس، تونل البرز، تونل گاوشان، تونل امام‌زاده هاشم اشاره کرد. در این زمینه اقدامات اجرایی شامل تغییرات مشخصات دستگاه TBM، استفاده از اپراتورهای مجرب، بهره‌گیری از پیش تحکیم و ... است.

جدول ۷-۲ مطالعات انجام گرفته در زمینه نگهداری تونل.

ردیف	مؤلفان	خلاصه
۱	(Murayama & Yagi, 1966)	بر اساس سازوکار شکست یک صفحه لغزشی دوبعدی حداقل فشارهای نگهداری را که برای تضمین پایداری صورت تونل مورد نیاز است، به دست آورد.
۲	(Weeks et al., 1987)	با استفاده از روش تعادل حدی، حداقل فشارهای نگهداری را با یک مکانیسم شکست نیم دایره‌ای و کروی محاسبه کرد.
۳	(Xuan et al., 2010)	به بررسی علل تجزیه و تحلیل ریزش برخی از تونل‌ها و اقدامات دیگر پرداختند. بر اساس تجزیه و تحلیل وضعیت سینه‌کار و بررسی روند ساخت و ساز برای چندین ماه، نشان داده شده است که اقدامات اضطراری نامناسب اتخاذ شده علت اصلی ریزش بوده است. با این حال، فواصل طولی نامناسب در بین کارهای انجام شده و نقص کیفیت سازه‌های نگهداری از دلایل اصلی است. پس از مطالعه علیت، عملیات بهسازی یکپارچه ارائه شده است، از جمله بهبود پارامترهای نگهداری، تزریق در سنگ اطراف، تقویت و اتخاذ اقدامات مهندسی ترکیبی و غیره است.
۴	(Chen et al., 2011)	با استفاده از روش‌های عددی المان مجزا مکانیسم شکست و محدود کردن فشار نگهداری سطح تونل در زمین ماسه‌ای خشک را بررسی کرد.
۵	(Wang et al., 2012)	تجزیه و تحلیل علت ریزش زمین نرم مختلط در تونل Xinkailing با تحلیل عددی عناصر محدود و راه حل‌های منطقی منطبق با آن است. جدای از وجود زون‌های ضعیف و آب‌های زیرزمینی دلایل اصلی ریزش تونل عبارت‌اند از: توصیف نامناسب سینه‌کار تونل، تجزیه و تحلیل به موقع برای پیش‌بینی صحیح وضعیت زمین‌شناسی اطراف تونل انجام نگرفته بود، عدم اطمینان از قضاوت دقیق طبقه‌بندی سنگ اطراف و برآوردن مقاومت مورد نیاز پارامترهای نگهداری است.
۶	(Marschall et al., 2018)	با روش اجزا محدود، ترکیبی را برای شبیه‌سازی تشکیل منطقه آسیب ناشی از حفاری و روند آب‌بندی مکانیکی اطراف یک میکرو تونل در خاک رس در سوئیس توسعه داد.
۷	(Zheng et al., 2017a)	شکست نسبی آسترهای ^۱ تونل را با مکانیسم ریزش پیش‌رونده ارزیابی کرد.
۸	(Esmailzadeh et al., 2017)	به تجزیه و تحلیل فنی ریزش تونل سد سردشت پرداخته‌اند. در این پروژه وجود آب‌های زیرزمینی، وضعیت زمین‌شناسی خاص و وجود آب‌های سطحی شرایطی را به وجود آورد که حتی با به کارگیری چندین عملیات اجرایی و بهسازی تونل به وضعیت پایدار نرسید و ریزش کرد. آن‌ها با مطالعه ۵ نوع ریزش یک سیستم نگهداری جدید پیشنهاد کردند.
۹	(Zhang et al., 2020)	ریزش تونل کم عمق کوهستانی Chaoyang را بررسی کردند. روش CRD باید به عنوان طرح حفاری انتخاب می‌شد اما به دلیل محدود بودن هزینه ساخت از آن جلوگیری شد و باعث افزایش سطح مقطع حفاری شد و نتیجه شبیه‌سازی نشان می‌دهد که عدم نگهداری از دیواره سمت راست دلیل اصلی این امر است. به دلیل ناقص بودن سیستم نگهداری، توده سنگ بالای تونل ناپایدار بود و در نهایت فرو ریخت.

¹ Linings

جدول ۸-۲ مطالعات انجام گرفته در زمینه شرایط زمین‌شناسی و جغرافیایی ساختگاه مؤثر در ناپایداری.

ردیف	مؤلفان	خلاصه
۱	(Luiyan et al., 1999)	تجزیه و تحلیل پایداری و طراحی سیستم نگهداری تونل انحرافی سد خرسان ۳ مورد بررسی قرار گرفت. این تونل از بسترهای سنگ آهکی سازند آسماری عبور می‌کند. این منطقه در ناحیه زاگرس چین خورده قرار گرفته است و همین امر باعث ایجاد چندین گسل و ناپیوستگی در مسیر تونل شده است. آن‌ها پس از طبقه‌بندی ژئومکانیکی توده سنگ مسیر تونل، یک سیستم نگهداری را طراحی کردند.
۲	(Kolymbas, 2005a)	هجوم آب در تونل‌های FUSSEN و SIMPLON را بررسی کرده است.
۳	(Niknia et al., 2011)	در این مطالعه، طبقه‌بندی توده سنگ هم‌زمان با حفر تونل انتقال آب Ab-yoord انجام شد و اقدامات مناسب باعث کاهش خطر خطرات مانند سیل و ریزش سنگ در مسیر تونل شد.
۴	(Qin et al., 2015)	اثر آب منفذی بر ریزش سنگ‌های اطراف را ارزیابی کرد.
۵	(Cui et al., 2015)	مشخصات هفت منطقه کارستی در چین را به‌طور مفصل توصیف کرد و روشی را برای کنترل خطرات زمین‌شناسی ناشی از مغارهای کارستی در حوالی حفاری تونل ارائه داد.
۶	(Kiani et al., 2016)	یک رویکرد آزمایشی برای ارزیابی منحنی‌های آسیب‌پذیری برای تونل‌های قطعه‌ی شهری در معرض گسل‌های طبیعی ارائه داده است.
۷	(Zheng et al., 2017a)	برای مطالعه مکانیسم ریزش یک تونل سپری ناشی از شکست جزئی در خاک شنی، ۴ مجموعه مدل آزمایشی با عمق متفاوت انجام شد.
۸	(Wu et al., 2018)	تأثیر دما، آب و مکانیک در فرونشست زمین ناشی از حفر تونل را تجزیه و تحلیل کرد.
۹	(Lu & Hwang, 2019)	تجزیه و تحلیل تاریخچه زمانی را برای تجزیه و تحلیل مکانیسم ریزش متروی Daikai در طول زلزله Kobe توسط FLAC _{2D} انجام دادند.
۱۰	(Wang et al., 2019)	فاصله بحرانی افقی بین تونل‌های کارستی و مغارهای کارستی را با استفاده از شبیه‌سازی عددی و با تجزیه و تحلیل تأثیر پارامترهای متنوع بر فاصله افقی بحرانی محاسبه کرد که نشان می‌دهد دامنه مغار کارستی مهم‌ترین تأثیر را دارد.
۱۱	(Huang et al., 2019b)	با تلفیق فرآیند سلسله مراتبی تحلیلی و اطلاعات آماری مهندسی مرتبط، مدلی را برای ارزیابی تأثیر مغارهای کارستی بر پایداری سنگ اطراف تونل‌ها در مناطق کارستی ارائه داد که در برخی از پروژه‌ها اعمال شده است.
۱۲	(Lyu et al., 2020)	مکانیسم‌های فروریزش تونل‌های مستطیلی و دایره‌ای شکل را در زیر یک مغار کارستی با استفاده از تجزیه و تحلیل حدی و اصل تنوع تغییر داد.
مطالعات داخلی		
۱	(رشیددل و همکاران، ۱۳۹۴)	راهکارهایی برای وجود آب در تونل‌های مکانیزه که ایجاد ناپایداری کرده‌اند، ارائه داده‌اند. می‌توان به تونل‌هایی چون تونل زاگرس، البرز، سبزکوه، گاوشان، کوه‌رنگ، اوما اويا، امام‌زاده هاشم (ع) و قمرود اشاره کرد. شناسایی شرایط پیشرو می‌توان به روش‌های ژئوفیزیکی (لرزه‌ای) و حفاری چال پیشرو به‌صورت سیستماتیک از داخل سوراخ‌های تعبیه‌شده در داخل شیلد، پیش‌بینی محل سفره‌های آب زیرزمینی با روش‌های مثل ژئوالکتریک و ... اشاره کرد.
۲	(جودکی و همکاران، ۱۳۹۴)	قطعات ۱ و ۲ تونل قمرود هجوم آب در پهنه‌های آبرفتی و سنگ‌های خردشده که به دلیل عدم آموزش کافی برای کارکنان و دشواری کار در شیب منفی عملیات حفاری از راندمان مناسبی برخوردار نبود. ناپایداری‌ها ترکیبی از وجود آب زیرزمینی و مشکلات روش اجرایی بود.

جدول ۹-۲ مطالعات انجام گرفته در زمینه شرایط خاص مؤثر در ناپایداری.

ردیف	مؤلفان	خلاصه
۱	(Seidenfuss, 2006)	در حین ساخت و ساز از مترو Toulouse یک دستگاه حفر تونل EPB تحت تأثیر لنزهای شن قرار گرفت. تشکیلات زمین‌شناسی، لجن رسی با لنزهای ماسه گنجانده شده تحت فشار آب بود و باعث ناپایداری محلی شد.
۲	(Li et al., 2010)	مکانیسم هجوم گل از گسل‌های کششی، گسل‌های برشی و گسل‌های فشاری را بر اساس مدل CUSP تجزیه و تحلیل کرد و عملکرد بالقوه را برای هجوم آب یا گل در معرض خطر ایجاد کرد.
۳	(Shin et al., 2011)	با استفاده از شبیه‌سازی عددی و آزمون‌های مدل، اثرات هیدرولیکی بر روی نواحی شکسته تونل زیر دریایی Xiangnan را بررسی کردند.
۴	(Chen et al., 2011)	با استفاده از روش‌های عددی المان مجزا مکانیسم شکست و محدود کردن فشار نگهداری سطح تونل در زمین ماسه‌ای خشک را بررسی کرد.
۵	(Annan & Zhiwu, 2011)	این مقاله یک روش بهینه‌سازی پارامترهای لنگر را بر اساس محاسبات بهینه‌سازی و آزمایش عددی در طراحی پیشنهاد می‌کند. این روش ابتدا حساسیت پارامترهای لنگر مؤثر بر پایداری سنگ اطراف و تابع رگرسیون را با استفاده از داده‌های آزمایش عددی تجزیه و تحلیل کرد. این روش در تونل متروی شهر دالیان ^۱ چین استفاده می‌شود که دلیل اصلی ناپایداری تونل مورد نظر ناپایداری‌های موجود در سازه‌های مجاور است.
۶	(Schneider et al., 2018)	راهکارهای نوآورانه برای تقاطع تونل و ایستگاه TBM در خط ۵ مترو Riyadh ارائه داده‌اند. تجزیه و تحلیل آسترهای پیش‌ساخته را می‌توان با استفاده از روش معادله الاستیک، روش Beam-Spring یا شبیه‌سازی FEM یا DEM انجام می‌شود که در این مطالعه از روش دوم استفاده شده است.
۷	(Huang et al., 2019a)	به مطالعه و تشخیص گل‌ولای آبدار در تونل زیر آب تشخیص آب با اشعه مادون قرمز و تشخیص میدانی پرداخته‌اند.
۸	(Liang et al., 2020)	بر اساس آزمایش‌های آزمایشگاهی و میدانی برای یک تونل بزرگراه متقابل رودخانه در چین، علل ریزش مورد بررسی قرار گرفت. برای اطمینان از پایداری تونل‌زنی سپری، عملیات بهسازی انجام شد و سپس اثر آن به‌طور جامع ارزیابی شد. نتایج نشان داد که خصوصیات شن و ماسه، کیفیت گردش دوغاب، تنظیم فشار نگهداری و نوسانات فشار آب منفذی از دلایل اصلی ریزش در زمین‌های حاوی لنزهای شن و ماسه است. تجزیه و تحلیل مقایسه‌ای ضریب نفوذپذیری لایه و پارامترهای تونل‌زنی سپری نشان داد که اثر تقویت بهسازی روی لایه ماسه واضح است و می‌توان به‌طور مؤثر اختلال در لایه را کنترل کرد. با این حال، او توضیح نداد که چگونه علت ۹۲ ریزش را تعیین کند.

ادبیات مختلفی در مورد ریزش تونل وجود داشته است؛ این تحقیقات برای درک مکانیسم ریزش تونل و بهبود وضعیت پایداری تونل‌ها مفید است. با این حال، در میان بسیاری از مطالعات، محققان روش تعیین علل ریزش را معرفی نکرده‌اند، در حالی که برخی از محققان با توجه به علل ریزش اقدامات هدفمندانه‌ای ارائه نداده‌اند. هیچ‌یک از تجزیه و تحلیل‌های نظری، آزمایش مدل‌سازی و شبیه‌سازی عددی قادر به تفسیر واکنش پیچیده مکانیکی ریزش تونل و پیش‌بینی علل مؤثر بر پایداری تونل نیست؛ بدین منظور انواع سیستم‌های ارزیابی عوامل مؤثر ارائه شده است.

۲-۳-۳ سیستم‌های مهندسی سنگ

تحلیل پایداری سازه‌های زیرزمینی به علت تغییر در نوع سنگ و خاک، تغییر در ساختار زمین‌شناسی، شرایط تنش‌های منطقه، مراحل حفاری و ایجاد فضای زیرزمینی، از محلی به محل دیگر امری مشکل و

¹ Dalian

پیچیده است. لذا با استفاده از روش‌های مختلف تحلیل پایداری و مقایسه بین نتایج حاصل از آن‌ها و با قضاوت مهندسی مناسب، وضعیت ناپایداری در سازه موردنظر بررسی می‌شود. سیستم‌های مهندسی سنگ^۱ برای اولین بار توسط هادسون^۲ در سال ۱۹۹۲ برای شناسایی و ارائه پارامترهای مکانیک سنگ با شناسایی تمام مکانیسم‌ها و اصطلاحات تعاملی جفت شده، معرفی شده است (Hudson & Harrison, 1992). به این ترتیب، برای نخستین بار تحلیل‌های سیستمی وارد مهندسی سنگ و کاربردهای مشابه گردید. در این زمینه می‌توان به مطالعات صورت گرفته در جدول ۲-۱۰ اشاره کرد.

جدول ۲-۱۰ خلاصه‌ای از مطالعات انجام گرفته در زمینه سیستم‌های مهندسی سنگ.

ردیف	محققان	توضیح مختصر
۱	(Shang et al., 2000)	مکان‌یابی نیروگاه ذخیره‌سازی Shisan-Ling در چین است. برای مرحله اول، انتخاب مکان برای حالت کلی، ۱۱ پارامتر مربوط به زمین‌شناسی، ژئومورفولوژی، طرح مهندسی، محیط‌زیست، هزینه ساخت‌وساز در نظر گرفته شده است. برای مرحله دوم، هفت پارامتر دیگر مرتبط با گسل‌ها، درزه‌ها، آب‌های زیرزمینی و غیره ارزیابی می‌شود. رتبه‌بندی‌های اختصاص داده شده به پارامترهای مختلف، همراه با فاکتورهای وزنی، امکان ایجاد یک شاخص مناسب (CSI) جامع را فراهم کرد.
۲	(Benardos & Kaliampakos, 2004)	روش ارائه شده در این مقاله باهدف شناسایی مناطق مستعد خطر و عدم قطعیت شرایط زمین در تونل‌های حفاری شده با TBM در زمین نرم است عوامل در نظر گرفته در این روش شامل ۱۱ عامل از جمله: نشست‌های سطحی، آب ورودی، RQD، RMR، هوازدگی توده سنگ، بار اضافه، UCS، روباره، نفوذپذیری و شرایط هیدروژئولوژیکی.
۳	(Kim et al., 2008a)	انواع رفتار سنگ در قالب هفت پارامتر مؤثر از جمله: مقاومت فشاری توده سنگ، کیفیت سنگ (RQD)، وضعیت سطح درزه، تنش، آب زیرزمینی، زلزله و دهانه تونل. این روش پیشنهادی که در مورد واقعی انجام شده نشان می‌دهد که احتمال ریزش سنگ و cave-in در تمام مقاطع بیشتر از تغییر شکل پلاستیک است.
۴	(Naghadehi et al., 2011)	برای ارزیابی اهمیت ۹ پارامتر که بر پایداری شیب‌های صخره‌ای در منطقه خوش ییلاق در ایران تأثیر می‌گذارند استفاده می‌شود. وجود «ناپایداری‌های قبلی» مهم‌ترین پارامتر است و زمین‌شناسی و سنگ‌شناسی و خواص مکانیکی ناپیوستگی‌ها نیز پارامترهای بسیار مهمی هستند. عدم قطعیت در تخصیص کدها با استفاده از احتمالاتی که به هر مقدار کدگذاری خاص اختصاص داده می‌شود، بیان شده است.
۵	(Rafiee, 2014)	استفاده از شاخصی برای ارزیابی رفتار سنگ در اطراف تونل پارسیان جنوب ایران شرح داده شده است. ۸ پارامتر موردتوجه در این مقاله عبارت‌اند از: مقاومت فشاری تک‌محوره، RQD، شرایط سطح درزه، فاصله‌داری درزه، جهت‌داری درزه، شرایط تنش اولیه، آب زیرزمینی و دهانه حفاری.

مطالعات داخلی

۱	(صادقی و همکاران، ۱۳۹۲)	با استفاده از ماتریس اندرکنش عواملی چون خواص مقاومتی ناپیوستگی‌ها، مقاومت فشاری، RQD، فاصله‌داری، نسبت مساحت به محیط حفاری و وضعیت آب زیرزمینی، چند طیف شاخص ناپایداری ارائه داده است.
---	-------------------------	--

^۱ Rock Engineering System

^۲ Hudson

۲-۳-۴ روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره

هیچ‌کدام از مطالعات و سیستم‌های طبقه‌بندی شناخته‌شده پیشین نمی‌توانند به‌عنوان یک سیستم طبقه‌بندی واقعی تلقی شوند؛ بنابراین، می‌توانند با دقت بیشتری به‌عنوان ابزار طراحی سنگ شناخته شوند. هدف ارائه رویکرد جدیدی است که مکانیسم‌ها و فاکتورهای بکار گرفته نشده در مطالعات پیشین را پوشش دهد. برای تحلیل عوامل مؤثر بر پایداری تونل به‌تنهایی نمی‌توان از روش‌های تجربی استفاده کرد و همراه آن از روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره نیز استفاده خواهیم کرد. روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره^۱ (MCDM) یکی از روش‌هایی است که می‌تواند در تعیین پارامترهای تأثیرگذار بر یک مسئله به کار رود. از این‌رو کاربرد فنون و روش‌های تصمیم‌گیری به‌خصوص روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره در مسائل مختلف متداول شده است که به فراخور نیاز مورد استفاده قرار می‌گیرد (Danesh Shakib & Fazli, 2009).

یکی از روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره فرایند تحلیل شبکه^۲ (ANP) می‌باشد که در آن روابط درونی گزینه‌ها و معیارها بررسی می‌شود. فرایند تحلیل شبکه در سال ۱۹۷۱ به‌وسیله‌ی ساعتی بعد از فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی^۳ (AHP) به‌عنوان یک ابزار تصمیم‌گیری چندمعیاره با جایگزینی شبکه بجای سلسله‌مراتب توسعه داده شد. همان‌طور که AHP بستری را برای ساختارهای سلسله‌مراتبی با روابط یک‌سویه فراهم می‌کند، ANP نیز روابط پیچیده شبکه‌ای بین سطوح‌های مختلف تصمیم و معیارها را مهیا می‌سازد. این روش در بین سال‌های ۱۹۷۲ و ۱۹۷۶ به‌عنوان ابزاری مفید و علمی برای نمایش ساختار پیچیده روابط علی و معلولی به‌وسیله نمودار و یا ماتریس مورد استفاده قرار گرفت (Najafi, 2010, Azar et al., 2007, Gogus et al., 1998). برای تعیین روابط درونی لازم است از یک ساختار تصمیم‌گیری دیگری استفاده نمود تا بتوان به یک ساختار مناسب روابط علی دست‌یافت. یکی از این روش‌ها DEMATEL می‌باشد. نظریه^۴ DEMATEL یا به‌عبارتی تصمیم‌گیری بر اساس آزمون و ارزیابی آزمایشگاهی، برای اولین بار توسط گابیوس

¹ Multiple-criteria decision analysis

² Analytical Network Process

³ Analytical Hierarchy Process

⁴ Decision Making Trial and Evaluation

و فونتلا^۱ در سال ۱۹۷۰ در پژوهشگاه باتل در ایالات متحده، ارائه شد. این نظریه برای تجزیه و تحلیل فاکتورهای سیستم با استفاده از ابزار ماتریس و نظریه گراف می‌باشد. تکنیک DEMATEL روش جامع و مناسبی برای ساخت و تحلیل مدل علی بین عوامل، در مسائل پیچیده است. (Gabus & Fontela, 1972), (Wu & Lee, 2007).

با توجه به اینکه در ارزیابی پایداری تونل بایستی برآورد صحیح و منطقی از عوامل تأثیرگذار که دارای روابط داخلی هستند داشته باشیم؛ لذا استفاده از روش‌های ANP و DEMATEL می‌تواند بسیار اثربخش باشد. این روش‌ها با در نظر گرفتن بازخورد روابط به صورت متقابل، ساختاردهی به عوامل پیچیده در قالب گروه‌های علت و معمولی و تعامل بیشتر بین تصمیم‌گیرنده و کارشناسان میزان اثرگذاری و اثرپذیری معیارهای یک سیستم را تعیین می‌کند. در جدول ۲-۱۱ خلاصه‌ای از تمام مطالعات انجام گرفته داخلی و خارجی در زمینه پایداری تونل به صورت کامل جمع‌آوری شده است.

جدول ۲-۱۱ خلاصه‌ای از مطالعات انجام گرفته با روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره.

ردیف	محققان	توضیح مختصر	روش پژوهش
۱	(Liang & Ma, 2010)	به بررسی و تجزیه و تحلیل خطرات موجود در ساخت و ساز در مهندسی پی پرداخته‌اند.	DEMATEL
۲	(Jiang et al., 2011)	از میان عوامل متعدد مؤثر بر پایداری تونل، پارامترهایی از جمله مقاومت فشاری، تعداد درزه‌ها، شاخص کیفیت سنگ و عمق تونل به عنوان پارامترهای ورودی مدل انتخاب شده و رتبه پایداری سنگ اطراف به عنوان پارامتر خروجی در نظر گرفته می‌شود.	DEMATEL و (PCA) (GPR)
۳	(Guo et al., 2013)	16 پارامتر تأثیرگذار در ریسک ساخت تونل بزرگراه Wulong در ۷ گروه اصلی ریسک‌های زمین-شناسی، ریسک ساخت و ساز، ریسک مدیریت، ایمنی کارکنان، ریسک بقا، ریسک هزینه و سازمان‌دهی و همبستگی‌های بین عوامل تأثیرگذار به دست می‌آید؛ سپس یک ضریب تأثیرگذاری جامع از عوامل خطر مختلف توسط یک ماتریس تأثیرگذار جامع محاسبه می‌شود.	DEMATEL
۴	(Heravi & Charkhakan, 2014)	چهارچوبی برای پیش‌بینی و ردیابی سناریوهای تغییر شکل (CFS) در پروژه‌های ساختمانی است. 19 پارامتر تأثیرگذار در ۳ گروه اصلی مورد بررسی قرار داده است. روش توسعه یافته در پروژه ساخت ایستگاه مترو اجرا شد و صرفاً به قضاوت‌های تخصصی پیمانکار محدود شد.	DEMATEL
۵	(Zhang et al., 2015)	مدل تحلیلی برای ارزیابی خطر ریزش تونل کوهستانی در حین ساخت پیشنهاد شده و بهبودی برای قابلیت اطمینان ارزیابی ریسک در ایمنی تونل استفاده می‌شود.	تئوری RS
۶	(Nezarat et al., 2015)	ارزیابی ریسک تونل گلاب در شمال غرب اصفهان (ایران) در ۸ پارامتر اصلی جریان آب، انتشار گاز، ناپایداری سینه کار تونل، ناپایداری دیواره، پدیده لهیدگی، پدیده تورم رس، سینه کار مختلط، گرفتگی خاک رس بررسی شده‌اند. مؤثرترین عامل وجود پتانسیل لهیدگی است.	تحلیل سلسله-مراتبی فازی (FAHP)
۷	(Navaei & Omidvari, 2015)	این تحقیق باهدف ارزیابی و رتبه‌بندی پارامترهای تأثیرگذار در صنعت تونل‌سازی با تلفیق روش‌های تجربی و ابزارهای ANP-DEMATEL می‌تواند بسیار اثربخش باشد.	ANP-DEMATEL
۸	(Wang et al., 2016)	خطرات مربوط به آسیب به تأسیسات و سازه‌های مجاور و عوامل تأثیرگذار بر نشست متروی ووهان چین را بررسی می‌کنند. یکی از عوامل اصلی این حوادث ناتوانی پیمانکار ساخت و ساز است.	(SD), (BBN) و (sRVM)

¹ Gabus & Fontella

ANP روش‌های آماری آزمون χ^2 (chi-square)	۱۸ پارامتر تأثیرگذار در ۴ گروه اصلی در ساخت پروژه برق‌آبی موردبررسی قرار گرفته است. این روش‌های آماری برای حل عیوب رابطه یک‌طرفه بین سطوح مجاور که در مطالعات قبلی با آن مواجه شده بودند، معرفی شده است. ترکیب روش‌های آماری و روش‌های تصمیم‌گیری رویکرد مناسبی را برای حل مسائل محاسبه وزن فراهم می‌کند.	(Zheng et al., 2017b)	۹
مدل ترکیبی (PCE) و (RBF) (EFAS) و	باهداف یافتن پارامترهای تأثیرگذار برای پایداری حفاری، این مطالعه چارچوبی از تحلیل حساسیت جهانی (GSA) را با استفاده از سه مدل مختلف برای طبقه‌بندی اهمیت پارامترها بکار گرفته است.	(Liu & Ding, 2020)	۱۰

۲-۴ جمع‌بندی

در این فصل تاریخچه پایداری تونل، بررسی وضعیت ناپایداری و انواع رفتارها و مکانیسم‌های شکست در تونل‌سازی موردبررسی قرار گرفت. همچنین با دقت در مطالعات انجام‌شده قبلی به‌وضوح آشکار می‌شود که نتایج این تحقیقات درمجموع به یک نتیجه واحد و یک رویکرد اساسی برای ارزیابی پایداری نمی‌انجامد. مشکل عمده مطالعات پیشین، مطالعه جداگانه تعدادی از عوامل مؤثر بر پایداری بوده است؛ در صورتی که پایداری تونل وابسته به عوامل جامعی که در ارتباط تنگاتنگ باهم نیز هستند. بنابراین رسیدن به یک روش جامع که بتوان با استفاده از آن پایداری تونل را موردبررسی و ارزیابی قرارداد، یکی از اهداف کلیدی در این زمینه به شمار می‌رود که لازمه آن شناخت و بررسی پارامترهای تأثیرگذار در این فرایند است. در فصل آتی به بررسی همه‌جانبه تحلیل‌های مورد استفاده پرداخته شده است.

فصل ۳: روش شناسی

۳-۱ مقدمه

در این فصل با توجه به مرور کلیه منابع معتبر و نیز شناسایی و جمع‌آوری پارامترهای مهم و مؤثر بر پایداری در تونل، سعی شده است تا این پارامترها در یک سیستم دسته‌بندی و به‌صورت یک روش هوشمند برای ارزیابی پایداری تونل ارائه شود. روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره می‌توانند در شرایط عدم اطمینان در صحت داده‌ها نتیجه‌ای نزدیک به واقعیت بدهند. با توجه به طبیعت عوامل مؤثر بر پایداری تونل که بسیار گسترده و دارای سطوح بالایی از وابستگی می‌باشند استفاده از تحلیل‌های پیش‌رو مناسب به نظر می‌رسد. برای این منظور در ابتدا به علت تعدد عوامل از مقایسات زوجی تحلیل فرایند سلسله‌مراتبی (AHP) استفاده شده پس از بررسی و آنالیز اولیه پارامترهای اصلی شناسایی شدند، پس از شناسایی پارامترها به-منظور اهمیت، وزن دهی پارامترها و بررسی اندرکنش بین آن‌ها در این تحقیق یک روش ترکیبی از تلفیق روش‌های ANP و DEMATEL مورد استفاده قرار گرفته است که در ادامه روش‌ها و هم شیوه ترکیب آن‌ها تشریح شده است.

۳-۲ روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره

به مجموعه فنونی اطلاق می‌شود که به دنبال ارزیابی راه‌حل‌های ممکن بر اساس بیش از یک معیار برای انتخاب بهترین راه‌حل می‌باشند. فنون تصمیم‌گیری چندمعیاره خود به دودسته تصمیم‌گیری چند هدفه^۱ (MODM) و تصمیم‌گیری چند شاخصه^۲ (MADM) تقسیم می‌شوند. هدف از تصمیم‌گیری انتخاب بهترین گزینه یا وزن‌دهی به عوامل تصمیم‌گیری است. هر روش تصمیم‌گیری وظیفه خاصی دارد یکی هدف وزن-دهی به معیارها، یکی هدف رتبه‌بندی گزینه‌ها و دیگری هدف ارزیابی معیارها و زیرمعیارها می‌باشد. (عطایی، ۱۳۸۹).

در این تحقیق ابتدا روش تحلیل سلسله‌مراتبی AHP و سپس تلفیق روش‌های تحلیل شبکه ANP و آزمایشگاه ارزیابی و آزمون تصمیم‌گیری DEMATEL مورد استفاده قرار گرفته است.

¹ Multi-Objective decision Making (MODM)

² Multiple Attribute Decision Making (MADM)

۳-۳ روش تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP)

فرایند تجزیه و تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) در سال ۱۹۸۰ توسط توماس ال ساعتی ارائه شد. در این روش مسئله تصمیم‌گیری به سطوح مختلف هدف^۱، معیارها^۲ و زیرمعیارها^۳ و گزینه‌ها^۴ تقسیم می‌شود تا تصمیم‌گیرنده بتواند به راحتی در کوچک‌ترین تصمیم‌گیری تمرکز نماید. مهم‌ترین قابلیت روش تحلیل سلسله‌مراتبی در توانایی تبدیل ساختار سلسله‌مراتبیک مسئله پیچیده چند شاخصه به ساختار بسط داده شده برای درک بهتر تصمیم‌گیرنده از مسئله تصمیم‌گیری می‌باشد. مهم‌ترین مزیت روش تحلیل سلسله‌مراتبی استفاده از مقایسه‌های زوجی^۵ برای مشخص کردن اهمیت نسبی آن‌هاست (Saaty, 1985). فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی با ساختن سلسله‌مراتبی آغاز و پس از محاسبه ضریب اهمیت معیارها و محاسبه نرخ ناسازگاری^۶ سیستم مناسب‌ترین گزینه (یا زیرمعیار) انتخاب می‌شود. مراحل فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی به ترتیب زیر است.

۳-۳-۱ ساختن سلسله‌مراتبی

اولین قدم در فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی ساختن سلسله‌مراتب مسئله است که معمولاً به ترتیب در آن هدف، معیارها، زیرمعیارها و گزینه‌ها نشان داده می‌شود. روش ساختن سلسله‌مراتبی بستگی به نوع تصمیم اتخاذ شده دارد و به صورت مختلفی ساخته می‌شود. در یک سلسله‌مراتب محدودیتی برای تعداد سطوح وجود ندارد. زیرمعیارهای هر معیار ممکن است به صورت فاصله‌های عددی و پارامترهای کیفی مانند زیاد، متوسط یا کم باشد.

۳-۳-۲ محاسبه وزن پارامترها در AHP

محاسبه وزن عناصر به دو صورت می‌باشد:

الف- وزن نسبی^۷

¹ Goal

² Criteria

³ SubCriteria

⁴ Alternative

⁵ Pairwise Comparison

⁶ Incompatibility rate

⁷ Local Priority

محاسبه وزن نسبی در تحلیل سلسله‌مراتبی، عناصر هر سطح نسبت به عنصر مربوط به خود در سطح بالاتر به صورت زوجی مقایسه شده و ماتریس مقایسه زوجی تشکیل می‌شود. تخصیص امتیازات عددی مربوط به مقایسه زوجی اهمیت دو گزینه یا دو شاخص بر اساس جدول زیر صورت می‌گیرد (BAŞÇETİN, 2003).

جدول ۱-۳ طبقه‌بندی کمی و کیفی برای مقایسه زوجی معیارها (Saaty & Alexander, 1981).

مقایسه نسبی شاخص‌ها (قضاوت شفاهی)	امتیاز عددی
اهمیت مطلق	۹
اهمیت خیلی قوی	۷
اهمیت قوی	۵
اهمیت ضعیف	۳
اهمیت یکسان	۱
ترجیحات بین فواصل فوق	۲، ۴، ۶، ۸

با استفاده از ماتریس مقایسه زوجی، وزن نسبی عناصر محاسبه می‌شود. روش‌های مختلفی برای محاسبه وزن نسبی بر اساس ماتریس مقایسه زوجی وجود دارد که عبارت‌اند از: روش حداقل مربعات، روش حداقل مربعات لگاریتمی، روش بردار ویژه و روش‌های تقریبی می‌باشند. از بین این روش‌ها روش بردار ویژه ارجح‌تر است. در این روش W_i به گونه‌ای تعیین می‌شود که رابطه (۱-۳) برقرار باشد (Saaty, 1980).

$$A \cdot W = \lambda \cdot W \quad (1-3)$$

که در آن λ و W به ترتیب مقدار و بردار ویژه ماتریس مقایسه زوجی A می‌باشد. در حالتی که ابعاد ماتریس بزرگ‌تر باشد، محاسبه این مقادیر بسیار وقت‌گیر است. لذا برای محاسبه λ مقدار دترمینان ماتریس $A - \lambda \cdot I$ مساوی با صفر قرار داده می‌شود و با قرار دادن بزرگ‌ترین مقدار λ حاصله در رابطه زیر مقادیر W_i محاسبه می‌شود (Saaty, 1980).

$$A - \lambda_{max} \cdot I = 0 \quad (2-3)$$

ب- وزن نهایی^۱

وزن نهایی هر گزینه در یک فرایند سلسله‌مراتبی، از مجموع حاصل ضرب وزن هر معیار در امتیاز گزینه موردنظر به دست می‌آید. مجموع امتیازات به دست آمده برای هر گزینه از رابطه زیر حاصل می‌شود:

¹ Overall Priority

$$AHP_{SCORE} = \sum_{j=1}^n a_{ij} \cdot W_{ij} \quad i=1,2,\dots,m \quad (3-3)$$

که در آن a_{ij} بیانگر اهمیت نسبی گزینه i ام به ازای شاخص C_j و W_j نشان گر اهمیت شاخص C_j می باشد. همچنین لازم است که مقادیر گزینه ها و وزن شاخص ها با استفاده از روابط زیر نرمالیزه شود.

$$\sum_{i=1}^m a_{ij} = 1 \quad j=1,2,\dots,m \quad (4-3)$$

$$\sum_{i=1}^n W_j = 1 \quad (5-3)$$

۳-۳-۳ محاسبه نرخ ناسازگاری

محاسبه نرخ ناسازگاری نیز از اهمیت بالایی در روش AHP برخوردار است. در حالت کلی می توان گفت که میزان قابل قبول ناسازگاری یک سیستم بستگی به تصمیم گیرنده دارد، اما ساعتی عدد ۰/۱ را به عنوان حد قابل قبول ارائه می نماید و معتقد است چنانچه میزان ناسازگاری بیشتر از ۰/۱ باشد بهتر است در قضاوت ها تجدیدنظر شود. شاخص ناسازگاری^۱، شاخص ناسازگاری تصادفی^۲، و نرخ ناسازگاری^۳ سلسله مراتبی به ترتیب با توجه به روابط (۶-۳) تا (۸-۳) محاسبه می شود (Marinoni, 2004).

$$I \cdot I = \frac{\lambda_{max} - n}{n-1} \quad (6-3)$$

$$R \cdot I \cdot I = 1.98 \frac{n-2}{n} \quad (7-3)$$

$$I \cdot R = \frac{I \cdot I}{R \cdot I \cdot I} \quad (8-3)$$

که در آن $I.I$ شاخص ناسازگاری، $R.I.I$ شاخص ناسازگاری تصادفی، $R.I$ نرخ ناسازگاری، λ_{max} بزرگ ترین مقدار ویژه ماتریس و n اندازه ماتریس می باشد.

۴-۳ روش تحلیل شبکه (ANP)

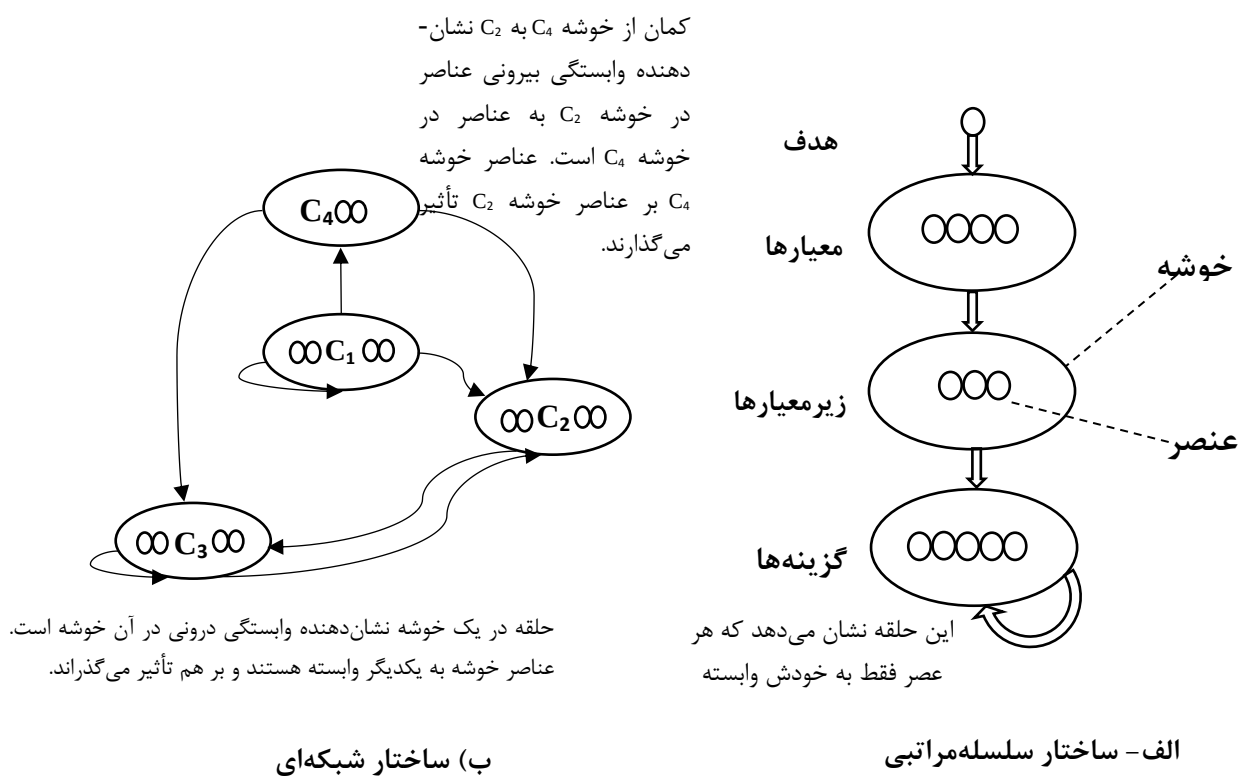
یکی از روش های تصمیم گیری چندمعیاره فرایند تحلیل شبکه (ANP) می باشد که در سال ۱۹۹۶ توسط توماس ال ساعتی و به عنوان حالت کلی روش شناخته شده تحلیل سلسله مراتبی (AHP) ارائه شد. به دلیل

¹ Inconsistency Index

² Random Inconsistency Index

³ Inconsistency Ratio

ضعف روش AHP و ساختار سلسله‌مراتبی آن در مواجهه با چنین مسائلی، روش ANP بر اساس ساختاری شبکه‌ای ارائه شد. روش تحلیل شبکه علاوه بر تمام ویژگی‌های تحلیل سلسله‌مراتبی از جمله برخورداری از مبانی تئوری قوی، سادگی، انعطاف‌پذیری، به‌کارگیری هم‌زمان معیارهای کمی و کیفی، قابلیت بررسی سازگاری در قضاوت‌ها و امکان رتبه‌بندی نهایی گزینه‌ها، می‌تواند بر محدودیت جدی آن یعنی در نظر گرفتن وابستگی‌های متقابل بین عناصر تصمیم چارچوب مناسبی را برای تحلیل مسائل پیچیده فراهم آورد. علاوه‌براین در روش ANP هدف از انجام مقایسات زوجی میزان تأثیر پارامترها بر یکدیگر است و به همین دلیل تأثیرگذاری، مفهومی اساسی در آن است که در شکل ۳-۱ مشاهده می‌شود. (Saaty, 1999, عطایی، ۱۳۹۵).



شکل ۳-۱ مقایسه ساختارهای سلسله‌مراتبی و شبکه‌ای (Saaty, 1999, عطایی، ۱۳۹۵).

روش تحلیل شبکه تاکنون برای حل مسائل مختلفی از جمله ارزیابی و رتبه‌بندی گزینه‌های موردتوجه یک مسئله، تجزیه و تحلیل معیارهای دخیل در یک مسئله و پیش‌بینی مقدار یک پارامتر در حوزه‌های مختلف با موفقیت مورد استفاده قرار گرفته است و استفاده از آن به جای AHP در اغلب زمینه‌ها افزایش پیدا کرده است.

به‌طور کلی حل مسئله با روش تحلیل شبکه‌ای شامل ۳ مرحله اصلی به‌صورت مشخص کردن شبکه مسئله، ایجاد سوپرماتریس و محاسبه توزیع مانا سوپرماتریس است.

۳-۴-۱ تعیین ساختار شبکه‌ای مسئله

در این مرحله نیاز است تا پس از تشریح و تبیین مسئله، ساختار شبکه‌ای آن شامل وابستگی بیرونی و درونی تعیین و ترسیم شود. برای این منظور می‌توان از روش‌های متفاوتی مانند نظرات کارشناسان یا روش‌هایی مانند DEMATEL استفاده کرد.

۳-۴-۲ ایجاد سوپرماتریس مسئله

سوپرماتریس در حقیقت ماتریسی از روابط بین اجزای شبکه است که از بردارهای اولویت این روابط به دست می‌آید. این ماتریس چارچوبی برای مشخص کردن اهمیت نسبی گزینه‌ها پس از انجام مقایسات زوجی در اختیار قرار می‌دهد. از این رو برای ایجاد سوپرماتریس مسئله نیاز است مشابه روش تحلیل سلسله‌مراتبی، ماتریس‌های مقایسات زوجی تأثیر معیارها و زیرمعیارها با در نظر گرفتن سطوح بالاتر و بر اساس ساختار شبکه‌ای مسئله تشکیل شود تا بتوان به کمک آن‌ها وزن عناصر را به دست آورد. این وزن‌ها همانند روش AHP بر اساس تعریف ساعتی (جدول ۳-۱) از ۱ (اهمیت یکسان) تا ۹ (اهمیت مطلق) تغییر می‌کنند. به‌منظور محاسبه بردارهای وزن در روش تحلیل شبکه، فرایند محاسباتی همانند روش تحلیل سلسله‌مراتبی است. در حالت کلی سوپرماتریس به‌صورت شکل ۳-۲ است.

$$W = \begin{matrix} & \begin{matrix} C_1 & C_2 & \cdots & C_m \end{matrix} \\ \begin{matrix} C_1 \\ C_2 \\ \vdots \\ C_m \end{matrix} & \begin{bmatrix} e_{11} & e_{12} & \cdots & e_{1m} \\ e_{21} & e_{22} & \cdots & e_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ e_{m1} & e_{m2} & \cdots & e_{mm} \end{bmatrix} \end{matrix}$$

شکل ۳-۲ ساختار کلی سوپرماتریس در روش تحلیل شبکه (Saaty, 1999، عطایی، ۱۳۹۵).

در شکل ۳-۲، C_m نشان‌دهنده خوشه m ام، e_m نشان‌دهنده عنصر m ام در خوشه m ام و ماتریس‌های W_{ij} بردار ویژه حاصل از مقایسات زوجی است. این سوپرماتریس برای یک مسئله دارای سطوح هدف (G)، معیارها (C)، زیرمعیارها (SC) در روش مورد استفاده برای این تحقیق به صورت شکل ۳-۳ است.

$$W = \begin{matrix} & \begin{matrix} G & C & SC \end{matrix} \\ \begin{matrix} \text{Goal (G)} \\ \text{Criteria (C)} \\ \text{Sub-Criteria (SC)} \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ W_{21} & W_{22} & 0 \\ 0 & W_{32} & W_{33} \end{bmatrix} \end{matrix}$$

شکل ۳-۳ حالت ساده شده سوپرماتریس روش تحلیل شبکه.

۳-۴-۳ محاسبه توزیع سوپرماتریس

محاسبه توزیع ماندار سوپرماتریس به دست آمده از مرحله قبل به عنوان ماتریس غیر موزون^۱ است. با نرمال کردن ماتریس مرحله پیش به صورتی که مجموع درایه‌های روی ستون‌ها برابر با ۱ شود، سوپرماتریس موزون^۲ مسئله حاصل می‌شود. خروجی نهایی روش تحلیل شبکه توزیع مانا سوپرماتریس و به نام سوپرماتریس حدی^۳ است که با به توان رساندن سوپرماتریس موزون به دست می‌آید. در سوپرماتریس حدی، اوزان پارامترها و اولویت‌بندی گزینه‌ها مشخص می‌شود.

۳-۵ روش آزمایشگاه ارزیابی و آزمون تصمیم‌گیری (DEMATEL)

روش آزمایشگاه ارزیابی و آزمون تصمیم‌گیری از جمله روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره بر اساس مقایسات زوجی است که بین سال‌های ۱۹۷۲ تا ۱۹۷۶ توسط فونتلا و گابوس طی برنامه علوم بشر مؤسسه باتل در مرکز تحقیقاتی ژنو توسعه یافته است (Gabus & Fontela, 1972).

این روش ابزاری علمی و مفید به خصوص برای نمایش ساختار پیچیده روابط علت و معلولی به وسیله نمودار و یا ماتریس است که در آن با بهره‌گیری از نظرت خبرگان عناصر یک سیستم و وابستگی آن‌ها

¹ Unweighted Supermatrix

² Weighted Supermatrix

³ Limited Supermatrix

ساختاری نظام‌مند پیدا می‌کنند. در این روش با به‌کارگیری اصول نظریه گراف، ساختار سلسله‌مراتبی از عوامل موجود در سیستم همراه با روابط تأثیرگذاری و تأثیرپذیری متقابل عناصر مذکور به‌صورت کمی محاسبه می‌شود. بر این اساس ارتباط بین عناصر مختلف توسط گراف‌های جهت‌دار مشخص می‌شود. این گراف‌های جهت‌دار رابطه میان عناصر یک سیستم را به تصویر می‌کشند به‌طوری‌که اعداد روی آن‌ها بیانگر شدت تأثیر یک عنصر بر عنصر دیگر است (Wu, 2008, Falatoonitoosi et al., 2013). مهم‌ترین دلیل استفاده از این روش در تصمیم‌گیری چندمعیاره، توانمندی آن در ساختاردهی به روابط داخلی بین معیارها است. برای استفاده از روش DEMATEL به نظرات کارشناسان نیاز است. با توجه به مطالعات انجام‌شده رویه بررسی در این مطالعه به شش مرحله تقسیم می‌شود.

- ✓ گام اول- جمع‌آوری نظرات کارشناسان از طریق پرسش‌نامه
- ✓ گام دوم- تشکیل ماتریس میانگین
- ✓ گام سوم- نرمال کردن ماتریس میانگین
- ✓ گام چهارم- محاسبه ماتریس روابط کلی
- ✓ گام پنجم- ترسیم نمودار علی
- ✓ گام ششم- رسم نقشه روابط شبکه‌ای

۳-۵-۱ جمع‌آوری نظرات کارشناسان

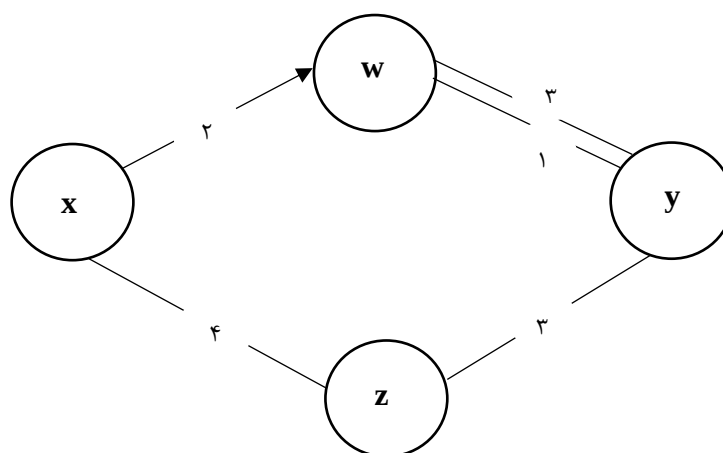
در این حالت برای تعیین شدت اثرگذاری پارامترها بر روی یکدیگر در ماتریس‌های نظرسنجی با کاربرد قضاوت دوبعدی توسط معیارهای مشخص، ادراک هر فرد از میزان تأثیر بین شاخص‌ها می‌تواند موردسنجش قرار گیرد. از افراد خواسته شد تا درجه همبستگی اثر مستقیم شاخص i بر روی شاخص j را با مقیاس تأثیر ۰، ۱، ۲، ۳، ۴ علامت بزنند که به ترتیب نشان‌دهنده «بدون تأثیر (۰)»، «تأثیر جزئی (۱)»، «تأثیر متوسط (۲)»، «تأثیر عمده (۳)»، «تأثیر بزرگ (۴)» است.

جدول ۳-۲ طیف امتیازدهی در روش DEMATEL

تأثیرات	بدون تأثیر	تأثیر بسیار کم	تأثیر کم	تأثیر زیاد	تأثیر خیلی زیاد
۰	۱	۲	۳	۴	

۳-۵-۲ تشکیل ماتریس میانگین

یک ماتریس تأثیر مستقیم $n \times n$ ، $A=[a_{ij}]_{n \times n}$ را می‌توان از پاسخ‌های فراهم‌شده توسط افراد به دست آورد. نتایج می‌بایست درجه ارتباط مستقیم بین معیارها را مشخص کند. گرافی که نشان‌دهنده روابط بین معیارها می‌باشد در شکل ۳-۴ نشان داده شده است. به‌طور مثال برداری که از w به y رفته است، نشان‌دهنده تأثیر w بر y بوده و امتیاز این تأثیر ۱ می‌باشد. درایه‌های ماتریس شماره ۱ که ماتریس ارتباط مستقیم نیز نامیده می‌شود بر مبنای تأثیر معیار i بر j شکل خواهد گرفت (Si et al., 2018).



شکل ۳-۴ گراف ارتباط مستقیم در DEMATEL (Si et al., 2018).

۳-۵-۳ قابلیت اعتماد در روش DEMATEL

قابلیت اعتماد^۱ در یک آزمون می‌تواند از موقعیتی به موقعیت دیگر متفاوت باشد. برای محاسبه ضریب قابلیت اعتماد در این تحلیل از روش سنجش سازگاری درونی با استفاده از شاخصی تحت عنوان سطح اطمینان معنی‌دار^۲ ارزیابی می‌شود. به‌منظور سنجش میزان قابلیت اطمینان داده‌ها از رابطه زیر استفاده می‌شود (Chiu et al., 2013).

$$g = \frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{|d_c^{ij(p)} - d_c^{ij(p-1)}|}{d_c^{ij(p)}} \times 100 \quad (۹-۳)$$

^۱ Reliability

^۲ Significant Confidence

- g نرخ ناسازگاری
- n تعداد معیارها
- p نشان دهنده تعداد پاسخ دهندگان
- (p-1) نشان دهنده تعداد پاسخ دهندگان با حذف یکی از آنها
- $d_c^{ij(p)}$ نشان دهنده درایه های ماتریس میانگین نظرات کلیه خبرگان
- $d_c^{ij(p-1)}$ درایه های ماتریس میانگین نظرات خبرگان با حذف خبره ی iam

قابلیت اطمینان نیز از رابطه زیر به دست می آید:

$$(10-3) \quad \text{قابلیت اطمینان} = \left(1 - \frac{g}{100}\right) \times 100$$

چنانچه مقدار قابلیت اطمینان بالای ۹۵٪ باشد، قابلیت اطمینان به داده ها، مورد تأیید قرار می گیرد.

۳-۵-۴ نرمال کردن ماتریس میانگین

ماتریس تأثیر مستقیم A را می توان به وسیله معادلات (۳-۱۱) و (۳-۱۲) نرمال سازی نمود و ماتریس تأثیر مستقیم بعد از نرمال سازی برابر می شود با $D=[d_{ij}]_{n \times n}$ که یک ماتریس با قطر صفر است.

$$D = kA \quad (3-11)$$

$$K = \min\{1/\max_i \sum_{j=1}^n a_{ij}, 1/\max_j \sum_{i=1}^n a_{ij}\} \quad i, j \in \{1, 2, \dots, n\} \quad (3-12)$$

۳-۵-۵ محاسبه ماتریس روابط کلی

پس از به دست آوردن ماتریس تأثیر مستقیم نرمال سازی شده، معادله (۳-۱۲) را می توان برای ساخت ماتریس تأثیر کلی T نمودار ارتباط شبکه که در آن I، یک ماتریس هویت است، استفاده نمود.

$$T = D + D^2 + D^3 + \dots + D^k = D(I + D + D^2 + \dots + D^{k-1}) [(I - D)(I - D)^{-1}] = D(I - D^k)(I - D)^{-1} \quad (3-13)$$

$$T = D(I - D)^{-1}, \text{ when } k \rightarrow \infty, D^k = [0]_{n \times n} \quad (3-14)$$

$$\text{Where } D = [d_{ij}]_{n \times n}, \quad 0 \leq d_{ij} < 1, \quad 0 < \sum_{j=1}^n d_{ij} \leq \sum_{i=1}^n d_{ij} \leq 1$$

۳-۵-۶ ترسیم نمودار علی

جمع زدن در امتداد ستون‌ها ($\sum_{j=1}^n t_{ij} = t_i$) و جمع زدن در امتداد سطرها ($\sum_{i=1}^n t_{ij} = t_j$) ماتریس فوق‌الذکر برای ساخت بردارهای شاخص تأثیر $D = (D_1, \dots, D_i, \dots, D_n)'$ و $R = (R_1, \dots, R_j, \dots, R_n)'$ استفاده می‌شود که توسط معادلات (۳-۱۵) و (۳-۱۷) تعریف شده‌اند، که در آن D نشان‌دهنده توانایی تأثیرگذاری بر شاخص‌های دیگر است و R نشان‌دهنده تأثیرپذیری از شاخص‌های دیگر است. بردار محور افقی ($D+R$) را می‌توان با جمع کردن D و R به دست آورد. این مقدار نشان‌دهنده درجه همبستگی بین شاخص‌ها است و به‌عنوان تسلط نامیده می‌شود. به‌طور مشابه، بردار عمودی ($D-R$) با تفریق R از D به دست می‌آید. این مقدار نشان‌دهنده شدت‌های تأثیرگذاری یا تأثر از شاخص‌هاست و همچنین رابطه نامیده می‌شود. به‌طور کلی می‌توان گفت وقتی ($D-R$) مثبت است، این نشان می‌دهد که این شاخص در گروه علت است. به‌طور خلاصه، اگر ($D-R$) منفی باشد، این نشان می‌دهد که این شاخص در گروه معلول (اثر) است.

$$T = [t_{ij}]_{n \times n}, \quad i, j = 1, 2, \dots, n \quad (۳-۱۵)$$

$$D = \left[\sum_{j=1}^n t_{ij} \right]_{n \times 1} = [t_i]_{n \times 1} = (D_1, \dots, D_i, \dots, D_n)' \quad (۳-۱۶)$$

$$R = \left[\sum_{i=1}^n t_{ij} \right]'_{n \times 1} = [t_j]_{n \times 1} = (R_1, \dots, R_i, \dots, R_n)' \quad (۳-۱۷)$$

جایی که بردار D و بردار R به‌ترتیب نشان‌دهنده جمع زدن سطرها یا ستون‌های ماتریس کلی $T = [t_{ij}]_{n \times n}$ هستند. درباره نتایج DEMATEL می‌توان این‌چنین گفت که با توجه به نمودار علی و معلولی، عواملی که میزان تعامل بیشتری با سیستم دارند، یعنی $D+R$ بزرگ‌تر دارند، یا تأثیر زیادی بر عوامل دیگر دارند D بزرگ، یا تأثیر زیادی از سایر عوامل می‌گیرند R بزرگ، و یا $R-D$ مثبتی داشته باشند برای ما اهمیت بیشتری دارند و علت نامیده می‌شوند. در مورد عوامل تأثیرپذیر که $R-D$ منفی داشته باشند شاخص - تر هستند و معلول نام دارند.

۳-۵-۷ ترسیم نقشه روابط شبکه‌ای (NRM)

جهت تعیین نقشه روابط شبکه^۱ بایستی ارزش آستانه^۲ آن محاسبه شود. با این روش می‌توان از روابط جزئی صرف‌نظر کرده و شبکه روابط درخور را ترسیم کرد. تنها روابطی که مقادیر آن‌ها در ماتریس از مقدار آستانه بزرگ‌تر باشد در NRM نمایش داده خواهد شد. برای محاسبه مقدار آستانه روابط کافی است تا میانگین مقادیر ماتریس T محاسبه شود. بعد از آن که شدت آستانه تعیین شد، تمامی مقادیر ماتریس که کوچک‌تر از آستانه باشد صفر شده یعنی آن رابطه علی در نظر گرفته نمی‌شود.

۳-۶ تلفیق دو روش ANP و DEMATEL

روش‌های ANP و DEMATEL هر یک دارای مزیت‌ها و معایب مخصوص به خود هستند. در روش DEMATEL گرچه بررسی ارتباطات بین پارامترها و تعیین ساختار آن‌ها به‌سادگی حاصل می‌شود اما امکان رتبه‌بندی در آن وجود ندارد. در سوی مقابل ساختار مسئله برای تحلیل ANP به‌عنوان مبنای این روش یکی از چالش‌های آن به‌حساب می‌آید. افزون بر این برای محاسبه ارتباط داخلی میان عناصر در این روش تعداد زیادی ماتریس مقایسه زوجی نیاز است؛ این امر منجر به پیچیدگی و صرف زمان زیاد برای حل مسئله می‌شود (محمدی، ۱۳۹۷). در سال‌های اخیر این دو روش با اهداف متفاوتی به‌صورت ترکیبی بکار برده شده‌اند. کاربردهای مختلف روش DEMATEL در ترکیب با روش ANP در ۴ گروه مختلف نمایش داده‌شده در جدول زیر نمایش داده‌شده است.

جدول ۳-۳ مقایسه روش‌های ترکیبی ANP و DEMATEL (Gölcüka & Baykasoglua, 2015).

گروه			
تعیین ساختار	محاسبه ارتباطات داخلی	محاسبه ارتباطات خارجی	خوشه‌بندی وزن‌دار
ANP	ANP	ANP	ANP
نظرات خبرگان / DEMATEL	DEMATEL	ANP	ANP
DEMATEL	ANP	ANP	DEMATEL
DEMATEL	DEMATEL	DEMATEL	DEMATEL

ترسیم نقشه روابط شبکه‌ای (NRM) در ANP
محاسبه ارتباطات داخلی در ANP
خوشه‌بندی وزن‌دار ANP (Cluster-Weighted)
ANP مبتنی بر DEMATEL (DANP)

¹ Network Relation Map (NRM)

² Threshold

در گروه اول از تحلیل DEMATEL تنها برای تعیین نقشه روابط شبکه‌ای مسئله استفاده شده است. در این دسته بررسی ارتباطات درونی و بیرونی و سپس تشکیل سوپرماتریس وزن دار ANP انجام شده است. در دسته دوم بررسی ارتباطات داخلی شاخص‌ها از طریق DEMATEL واقع شده است. در این دسته تعیین ساختار مسئله به صورت معمول با استفاده از نظرات خبرگان و یا از طریق تحلیل DEMATEL حاصل می‌شود. پس از انجام این مراحل تعیین ارتباطات درونی و وزن دهی خوشه‌ها توسط ANP انجام می‌گیرد. سختی انجام مقایسات زوجی در روش ANP انگیزه اصلی این نوع از کاربرد DEMATEL در ترکیب با ANP بوده است. مقالات دسته سوم از DEMATEL برای وزن دهی خوشه‌ها و ترسیم NRM استفاده کرده‌اند. در حقیقت همان ماتریس روابط کلی برای ساختار بندی مسئله و وزن دهی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این دسته علت اصلی از ترکیب این دو روش دخیل کردن تأثیر اوزان مختلف خوشه‌ها در ساختار سوپرماتریس است. نهایتاً مقالات گروه چهارم تحلیل DEMATEL را مبنای مراحل ANP برای اهداف تعیین ساختار، محاسبه ارتباطات داخلی و بیرونی و وزن دهی به خوشه‌ها مطابقت داده‌اند (Gölcüka & Baykasoglua, 2015).

در این تحقیق از گروه دوم برای ایجاد مدل ترکیبی پایداری تونل استفاده شده است. برای این منظور در ابتدا ساختار مسئله بر اساس نتایج به دست آمده از نقشه روابط شبکه‌ای میان خوشه‌ها تشکیل می‌شود. سپس بر اساس اینکه عناصر هر خوشه فقط با خود و یا با عناصر دیگر خوشه‌ها دارای ارتباط هستند، ارتباطات درونی کل عناصر مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این مرحله ماتریس‌های روابط کلی میان خوشه‌ها و کل عناصر در سوپرماتریس غیر موزون قرار گرفته و مراحل مربوطه برای به دست آمدن اوزان نهایی پارامترها در سوپرماتریس موزون و حدی طی می‌شود.

۷-۳ جمع بندی

در این فصل روش‌های استفاده شده در این تحقیق ارائه شد. برای این منظور روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره باهدف ارزیابی پایداری تونل به اجرا درآمد. استفاده از سه تحلیل AHP، ANP و DEMATEL و تلفیق ANP-DEMATEL تشریح شد و در فصل چهارم به تعریف نقش هرکدام از پارامترهای مؤثر بر پایداری تونل پرداخته شده است.

فصل ۴ : تعیین عوامل و پارامترهای مؤثر بر پایداری تونل

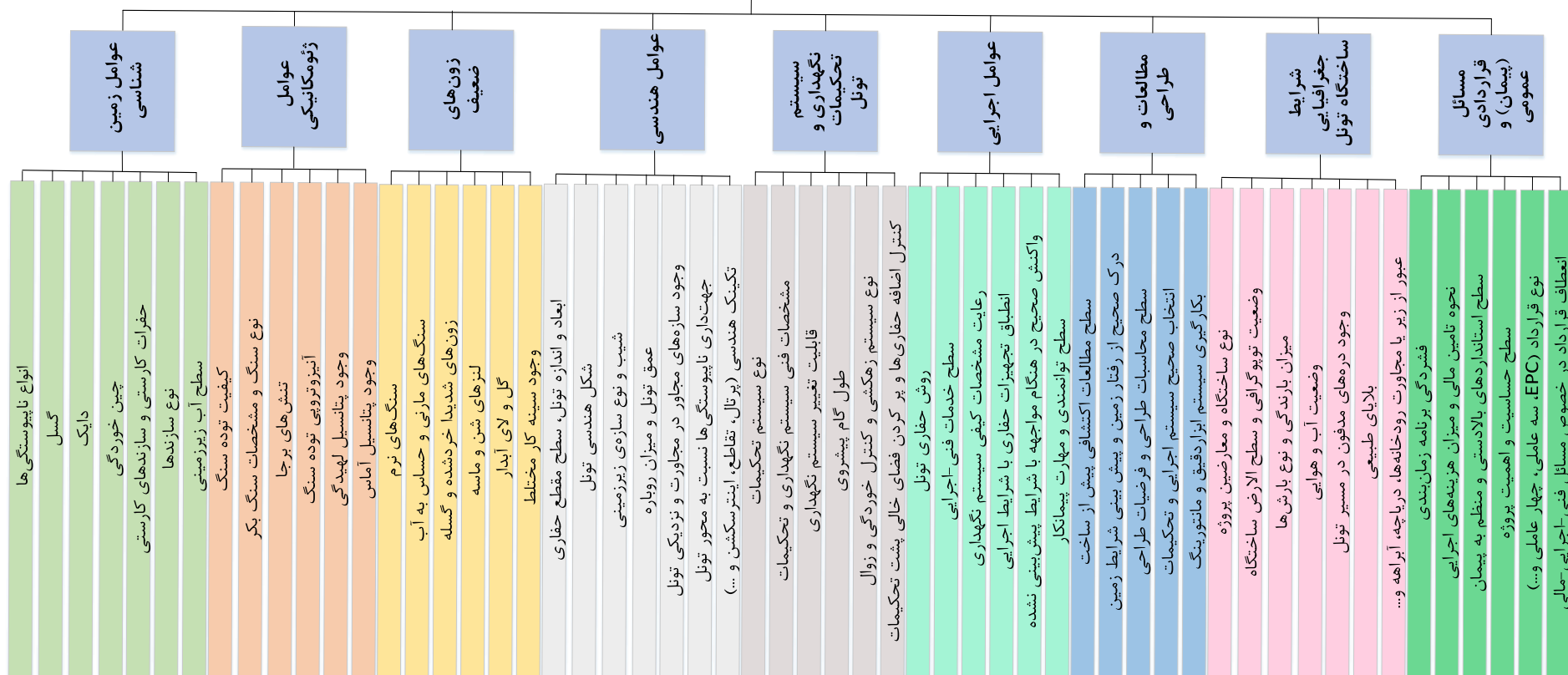
۴-۱ مقدمه

تونل‌ها و فضاهای زیرزمینی یکی از بااهمیت‌ترین سازه‌های مهندسی هستند که مزایا و کاربردهای بسیار ارزشمندی دارند. حفاری‌های زیرزمینی در ترازهای مختلف و متفاوت زمین باعث ایجاد فعل‌وانفعالاتی در محیط تونل و پیرامون آن می‌شود. از مهم‌ترین اقدامات قبل از تصمیم‌گیری برای احداث تونل‌ها کسب اطلاعات کافی از شرایط کلی زمین اطراف تونل‌ها برای پیش‌بینی رفتار زمین و ساختار توده‌سنگ در فضاهای زیرزمینی است. پایداری فضاهای زیرزمینی از مهم‌ترین مسائل مربوط به پژوهش‌های عمرانی و معدنی به شمار می‌آید. عوامل متعددی بر پایداری فضاهای زیرزمینی اثر می‌گذارند؛ لذا می‌بایست پارامترهای مؤثر بر ناپایداری را موردبررسی قرارداد. در این فصل به بررسی همه‌جانبه عوامل مؤثر بر ناپایداری تونل در صنعت تونل‌سازی، بر اساس منابع معتبر موجود پرداخته‌شده است. این پارامترها با استفاده از مطالعه منابع معتبر علمی و نیز استفاده از تجربیات متخصصان در زمینه تونل‌سازی شناسایی و دسته‌بندی شدند. در ادامه به توضیح هرکدام از این عوامل مؤثر بر پایداری پرداخته‌شده است.

۴-۲ رویکرد تلفیقی حذف عوامل

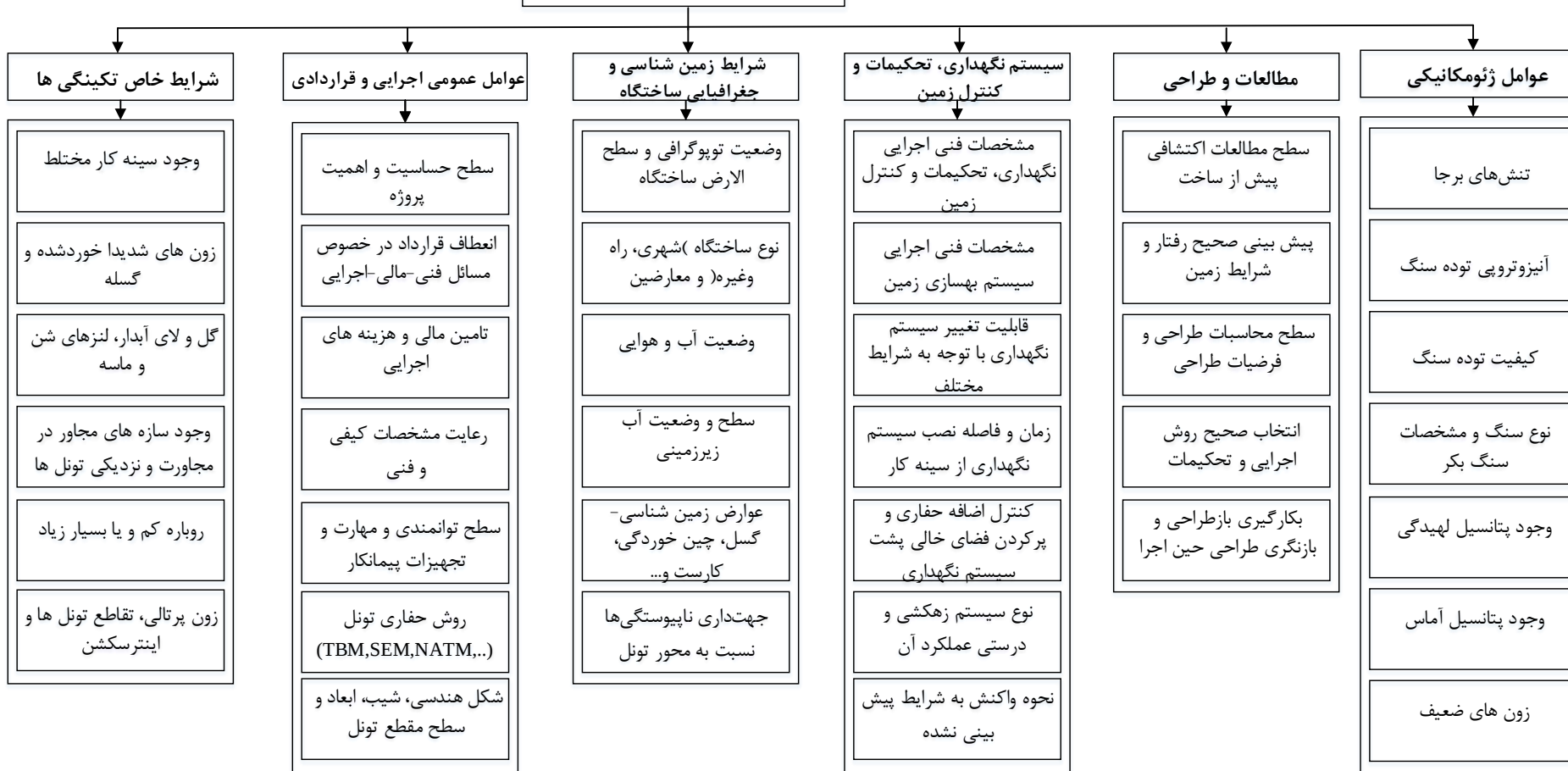
عوامل مؤثر بر پایداری تونل در وهله اول در ۹ گروه اصلی مطابق شکل ۴-۱ تقسیم‌بندی شده‌اند. به منظور کاهش تعداد عوامل در این بخش پس از تجزیه و تحلیل اولیه از عوامل مؤثر بر پایداری تونل، با استفاده از رویکرد تلفیقی حاصل از اوزان نهایی تحلیل سلسله مراتبی AHP و همچنین به صورت مقایسه‌ای تعدادی از عوامل حذف و تعدادی در هم ادغام شدند. این عوامل در نهایت به ۶ گروه اصلی تقسیم‌بندی شدند که در شکل ۴-۲ نشان داده‌شده است، این عوامل نیز دارای زیرشاخه‌هایی هستند که در ادامه نقش هر کدام از آن‌ها در پایداری تونل توضیح داده می‌شود.

عوامل مؤثر بر پایداری



شکل ۴-۱ پارامترهای اولیه مؤثر بر پایداری توپوگرافی.

عوامل موثر بر پایداری



شکل ۴-۲ پارامترهای نهایی مؤثر بر پایداری تونل.

۴-۳ عوامل ژئومکانیکی^۱

عوامل ژئومکانیکی از مهم‌ترین پارامترهای تأثیرگذار در ارزیابی پایداری در تونل‌سازی است. عوامل ژئومکانیکی شامل شش پارامتر: تنش‌های برجا، آنیزوتروپی توده‌سنگ، کیفیت توده‌سنگ، نوع سنگ و مشخصات سنگ بکر، وجود پتانسیل لهیدگی، وجود پتانسیل آماس و زون‌های ضعیف است که در ادامه به توضیح هر کدام از آن‌ها می‌پردازیم.

۴-۳-۱ تنش‌های برجا^۲

تنش‌های برجا یا بکر تنش‌هایی هستند طبیعی که قبل از حفر فضای زیرزمینی در توده‌سنگ وجود دارند. تنش‌های طبیعی موجود در توده‌سنگ با رخدادهای زمین‌شناسی منطقه در طول زمان مرتبط می‌باشد. به‌طور کلی این تنش‌ها با وزن طبقات فوقانی و زمین‌شناسی توده‌سنگ مرتبط است و میدان تنش طبیعی و بکر در اثر فعالیت‌های تونل‌سازی به هم می‌خورند که در این حالت تعادل این تنش‌ها باعث تمرکز تنش در اطراف حفاریات زیرزمینی می‌شود. با افزودن این تنش‌ها به تنش‌های فوق‌الذکر اگر مجموع آن‌ها از مقاومت سنگ بیشتر شود باعث تسلیم سنگ‌های اطراف شده و همچنین باعث ایجاد ناپایداری خواهد شد. ناپایداری حاصل می‌تواند به‌صورت دگرشکلی‌های فوق‌العاده زیاد باعث جمع‌شدگی تونل شود. ریزش سنگ از سقف یا دیواره جانبی در حالت تمرکز تنش فوق‌العاده زیاد، به‌صورت انفجار سنگ^۳ خود را نشان می‌دهد (Goel & Singh, 2011).

۴-۳-۲ آنیزوتروپی توده‌سنگ^۴

از ویژگی‌های مهم سنگ‌های لایه‌ای و شیبی، آنیزوتروپی توده‌سنگ می‌باشد. در تعیین ویژگی‌های سنگ همچون RQD ممکن است انحرافات وابسته به جهت رخ دهد؛ این مورد باید در کلیه نتایج خصوصاً در شرایطی که ممکن است ناهمسانگردی (آنیزوتروپی) وجود داشته باشد، در نظر گرفته شود. این ویژگی که کمتر به آن توجه شده است؛ نقش تعیین‌کننده‌ای بر روی رفتار مهندسی سنگ و خصوصیات فیزیکی و

¹ Geomechanical factors

² Virgin or Primitive stress

³ Rock Burst

⁴ Anisotropy

مکانیکی آن در طراحی سازه‌های مرتبط با محیط سنگی دارند و موجب تغییرات گسترده در پارامترهای مقاومتی و مدول سنگ در زوایای مختلف می‌شود (Ramamurthy et al., 1993, Bewick, 2008).

۴-۳-۳ کیفیت توده سنگ^۱

به منظور بررسی دقیق رفتار مهندسی پروژه‌های مهمی نظیر تونل و فضا‌های زیرزمینی، شناخت ویژگی‌های مهندسی توده سنگ‌های ساختگاه، از جمله کیفیت توده سنگ، ضروری به نظر می‌رسد. میزان ناپیوستگی‌های موجود در سنگ است بیانگر کیفیت توده سنگ است. یکی از روش‌های رایج بررسی کیفیت توده سنگ‌ها، سیستم رده‌بندی توده سنگ^۲ (RMR) است. با طبقه‌بندی توده سنگ‌های ساختگاه در واحدهای مشابه می‌توان اقدامات لازم را برای طراحی و نگهداری آن‌ها فراهم نمود یا از طریق مغزه‌گیری از سنگ با توجه به اطلاعات موجود در پروژه یا مربوط به شاخص کیفیت توده سنگ^۳ (RQD) به دست می‌آید (Deere & Bieniawski, 1973, Deere, 1988).

۴-۳-۴ نوع سنگ و مشخصات سنگ بکر^۴

تمام بخش‌های طبقه‌بندی، حفاری، استخراج و اکتشاف و پایداری سازه‌های سنگی، لرزه‌شناسی، مقاومت توده‌های سنگی، روش‌های اجرایی و غیره مستلزم شناخت ویژگی‌های سنگ‌ها است؛ زیرا خواص فیزیکی و مکانیکی سنگ‌ها تقریباً با تمام این بخش‌ها مرتبط است. انواع سنگ‌ها شامل سنگ‌های سخت^۵، سنگ‌های متوسط و ضعیف ساختاری^۶، سنگ‌های حساس به آب^۷ و سنگ‌های تبخیری^۸ هستند (Javadi & Sharifzadeh, 2017). مشخصات سنگ بکر نیز شامل خصوصیات مکانیکی که عبارت‌اند از خصوصیات ارتجاعی و مقاومتی آن، منحنی تنش کرنش انواع شکست‌ها و سپس رفتار شاخص سنگ‌ها در تراکم تک‌محوری و در فشارهای محدودکننده، مقاومت کششی، سختی سنگ و در مورد خصوصیات فیزیکی سنگ

¹ Rock Mass Quality

² Rock Mass Rating (RMR)

³ Rock Quality Designation (RQD)

⁴ Rock Type and Characteristics of Intact Rock

⁵ Hard and competent Rocks (HR)

⁶ Medium and structurally weak Rocks (MR)

⁷ Sensitive Rocks (SR)

⁸ Evaporite Rocks (ER)

بکر که طبیعت سنگ‌ها در حالت‌های مختلفی قرار داشته و منافذ خالی موجود در آن‌ها یا با هوا یا با آب و با سیالات دیگر اشغال شده است را شامل می‌شود که این مطلب در هر دو مورد خاک و سنگ صدق می‌کند. خواص فیزیکی سنگ‌ها را در حالت کلی می‌توان به خواص فیزیکی وزن مخصوص و تخلخل، لایه‌بندی، تورق و غیره تقسیم کرد (Schön, 2011).

۴-۳-۵ وجود پتانسیل لهیدگی یا مچاله شوندگی^۱

از پدیده‌هایی که ممکن است باعث بروز مشکلات اساسی در حین عملیات تونل‌سازی، نگهداری و بهره‌برداری از تونل شود، مچاله شوندگی سنگ‌های مسیر آن است. مچاله شوندگی به همگرایی‌های بزرگ وابسته به زمان تونل‌ها در حین و بعد از حفاری گفته می‌شود. این پدیده با خزش^۲ آغاز می‌شود و ترکیب تنش‌های القایی و مواد ضعیف، باعث ایجاد تنش‌های القایی فراتر از مقاومت برشی شده و این بخش از اطراف تونل به داخل هجوم می‌آورد. این تغییر مکان‌ها ممکن است در طی حفاری تونل یا در دوره زمانی طولانی ادامه داشته باشد. میزان همگرایی تونل، نرخ تغییر مکان‌ها و وسعت حوزه ناحیه پلاستیک در اطراف تونل به خواص ژئوتکنیکی منطقه، تنش‌های برجا، جریان آب، فشار آب حفره‌ای و خواص توده‌سنگ بستگی دارد (Barla et al., 2011).

۴-۳-۶ وجود پتانسیل تورم^۳

از مشکلاتی که پایداری سازه‌های زیرزمینی را مختل می‌کند، زمین‌های تورمی و انحلالی است. کانی‌های رسی به علت خاصیت تورمی و نیز کانی‌هایی که پتانسیل انحلال دارند، خطراتی را در حین عملیات تونل‌سازی و یا پس از نصب نگهداری ایجاد می‌کنند. سنگ‌های حاوی کانی‌های رسی فراوان یا ذراتی در اندازه‌های رس مکانی برای تشدید تورم در سنگ‌هاست. تورم در توده سنگ‌ها می‌تواند در نتیجه تورم ماده سنگ، تورم مواد پرکننده ناپیوستگی‌های توده‌سنگ و یا ترکیبی از دو تورم فوق باشد. کاهش میزان رطوبت باعث انقباض و افزایش میزان رطوبت سبب افزایش تورم در خاک یا سنگ مستعد تورم خواهد شد و در کل درجه

¹ Squeezing Potential

² Creep

³ Swelling Potential

تغییر حجم بستگی به میزان رطوبت اولیه، کیفیت آب، منابع آب زیرزمینی، چگالی خشک اولیه، وضعیت تنش برجا و بافت سنگ دارد (موسوی و همکاران، ۱۳۹۷، Suarez-Reynoso, 1976).

۴-۳-۷ زون‌های ضعیف^۱

مناطق ضعف نقش مهمی در حفر تونل سنگ سخت دارند. آن‌ها نه تنها باعث افزایش هزینه‌های تونل‌سازی و پروژه می‌شوند، بلکه در بسیاری از موارد برای تکمیل ایمن یک پروژه اهمیت حیاتی دارند و در مواقعی می‌توانند باعث تأخیرهای قابل توجهی شوند. پایداری کم و زمان خود ایستایی کوتاه که گاهی اوقات با ورود آب همراه است، چالش‌های اصلی هستند که ممکن است در چنین توده‌های سنگی ایجاد شوند. نواحی ضعیف، معمولاً در امتداد ۱۵-۱٪ یک تونل رخ می‌دهند که در آن خواص توده سنگ به طور قابل توجهی ضعیف‌تر از مواد اطراف است. دانستن الگوی نقاط ضعف منطقه‌ای برای ارزیابی تراز بهینه تونل مهم است (Palrnstrom & Berthelsen, 1988).

۴-۴ مطالعات و طراحی^۲

اجرای مطالعات به منظور ارزیابی محل‌های پیشنهادی برای اجرای پروژه از مهم‌ترین اصول مهندسی تونل به حساب می‌آید. در این بخش مطالعات مقدماتی زمین‌شناسی، مطالعات تفصیلی زمین‌شناسی، پروفیل زمین‌شناسی و مطالعات تکمیلی تونل مورد ارزیابی قرار می‌گیرند و عدم قطعیت‌های موجود بررسی می‌شوند. به علت نقش گسترده این عامل در این تحقیق سعی شده است تا به بررسی همه‌جانبه پارامترهای مطالعات و طراحی پرداخته شود.

۴-۴-۱ سطح مطالعات اکتشافی پیش از ساخت^۳

قبل از حفر و احداث تونل، بایستی منطقه مورد نظر را مورد مطالعه قرار داد و مناسب‌ترین مسیر تونل را برگزید و آنگاه مسیر را مطالعه کرد. مطالعات اکتشافی ساختگاه تونل به طور کامل در ۸ بخش از مراحل اولیه

¹ Weakness Zone

² Studies and Design

³ Level of pre-construction exploratory studies

که شامل جمع‌آوری اطلاعات، بررسی نقشه‌های توپوگرافی و مطالعات زمین‌شناسی تا مراحل انتهایی به‌طور

کامل در شکل ۳-۴ تشریح شده است (Panthi, 2006).



شکل ۳-۴ مراحل و اجزای مطالعات ساختگاهی در پروژه‌های تونل‌سازی (Panthi, 2006).

۴-۲-۴ پیش‌بینی صحیح رفتار و شرایط زمین^۱

رفتار زمین عبارت است از عکس‌العمل زمین در مقابل حفاری تمام مقطع تونل قبل از نصب سیستم‌های نگهدارنده است. نوع رفتار زمین در حفاریات زیرزمینی در سه گروه شامل رفتارهای ناشی از نیروی وزن، رفتارهای ناشی از تنش‌های القایی و رفتارهای ناشی از وجود آب قرار می‌گیرند. رفتار زمین به ویژگی توده

¹ Correctly Predict the Behavior and Conditions of the Earth

سنگ و شرایط زمین‌شناسی محیطی که تونل در آن قرار گرفته بستگی دارد. در تونل‌های سنگی، توده‌سنگ به‌عنوان مصالح اصلی دربرگیرنده تونل، هم نقش یک عامل پایدار و ایمن کننده دارد و هم به‌عنوان مصالح ناپایدار ممکن است عامل وقوع مخاطرات باشد؛ بنابراین تعیین ویژگی‌های توده‌سنگ نقش مهمی در شناسایی رفتار زمین دارد. جهت و مقدار تنش‌های برجا، وجود آب زیرزمینی، وجود گازهای مضر، مکانیسم گسلش و نوع چین‌خوردگی کنترل‌کننده ویژگی زمین‌شناسی محیط دربرگیرنده توده‌سنگ است. ویژگی‌های توده‌سنگ و ویژگی‌های زمین‌شناسی محیط تعیین‌کننده رفتار زمین در حفاری تونل است. عدم تطابق شرایط پیش‌بینی‌نشده زمین در مطالعات و شرایط واقعی در زمان حفاری یکی از چالش‌های اصلی در ساخت تونل‌های سنگی است؛ این عدم تطابق به علت عدم کیفیت یا عدم دقت در مطالعات زمین‌شناسی مهندسی است که خود ناشی از عدم توجه به اهمیت این مطالعات بوده است (Kolymbas, 2005b).

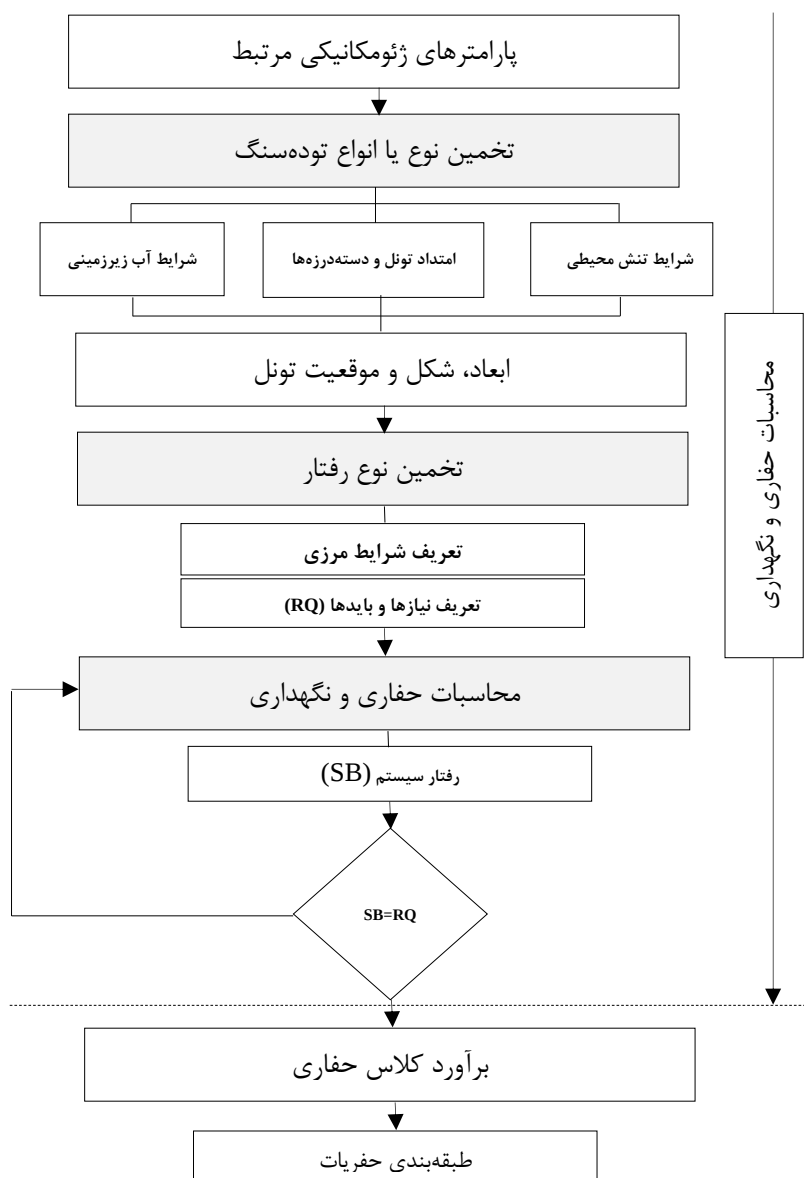
۴-۴-۳ سطح محاسبات طراحی و فرضیات طراحی^۱

پایداری یک سازه زیرزمینی وابسته به رفتار زمین دربرگیرنده آن است. گونه‌های مختلف رفتاری، نیازمند روش‌های محاسباتی و ارزیابی‌های مختلف (ابزارهای مهندسی سنگ) برای ایجاد یک طرح مقبول که بتواند شرایط واقعی را پوشش دهد. لذا به‌عنوان یک پیش‌شرط لازم برای طراحی نگهداری سنگ یا سایر ارزیابی‌ها، درک رفتار واقعی زمین و چگونگی آن ضروری است.

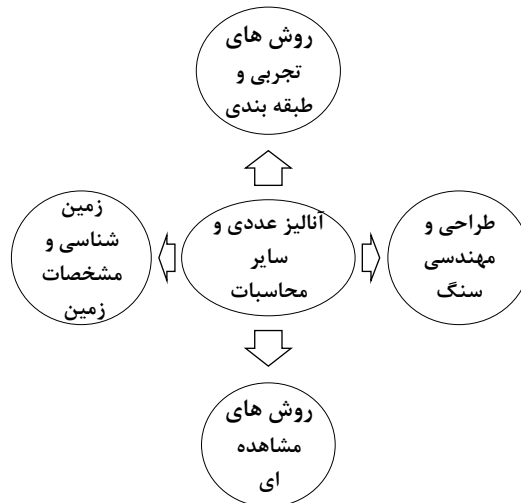
شوبرت تجارب خود در زمینه طراحی تونل را در شکل ۴-۴ خلاصه و از آن برای ارائه یک روش مهندسی از مرحله قبل از اجرا تا مرحله ساخت تونل، استفاده کرد (Schubert & Goricki, 2004). این روش بر مبنای آزمایش‌های و تجارب زیاد تکمیل شده است و در تمام شرایط توده‌سنگ قابل‌اعمال است. مراحل اول و دوم این در فصل دوم توضیح داده شد، مرحله نهایی را می‌توان از راه‌های مختلف انجام داد. روش کلاسیک استفاده از تجربیات ذهنی تحت‌عنوان قضاوت مهندسی، قواعد تجربی طراحی، برخی روش‌های محاسباتی و یا ترکیبی از هر سه روش به‌عنوان مبنای طراحی است. در بسیاری از کاربردهای مکانیک سنگ روش

¹ Level of design calculations and design assumptions

مشاهده‌ای ارجح است و در استانداردهای طراحی جدید نیز در نظر گرفته شده است. ابزارهای اصلی در طراحی مهندسی در شکل ۴-۵ نمایش داده شده است (Stille et al., 2003).



شکل ۴-۴ نمودار فرآیند مقدماتی تخمین رفتار و طراحی نگهداری و حفاری سازه‌های زیرزمینی (Schubert & Goricki, 2004).



شکل ۴-۵ ابزارهای اصلی در فرایند طراحی سنگ (Stille et al., 2003).

۴-۴-۴ انتخاب صحیح روش اجرایی و تحکیمات^۱

اساسی ترین و برگشتناپذیرترین جنبه ساخت تونل به انتخاب روش اجرایی و تحکیمات مربوط می شود چراکه تمام جنبه های برنامه ریزی عملیات اجرایی، ماشین آلات و تدارکات به واسطه آن صورت می گیرد و مفهوم کلی پروژه به طور کامل بر اساس آن تعریف می شود. به طور کلی انتخاب صحیح سیستم نگهداری در تونل ها با توجه به شکل هندسی و موقعیت آن ها از اهمیت قابل ملاحظه ای برخوردار بوده و اجرای تحکیمات دائم و موقت نیز می بایست دربرگیرنده مقتضیات فنی هر یک از قسمت های هندسی تونل باشد.

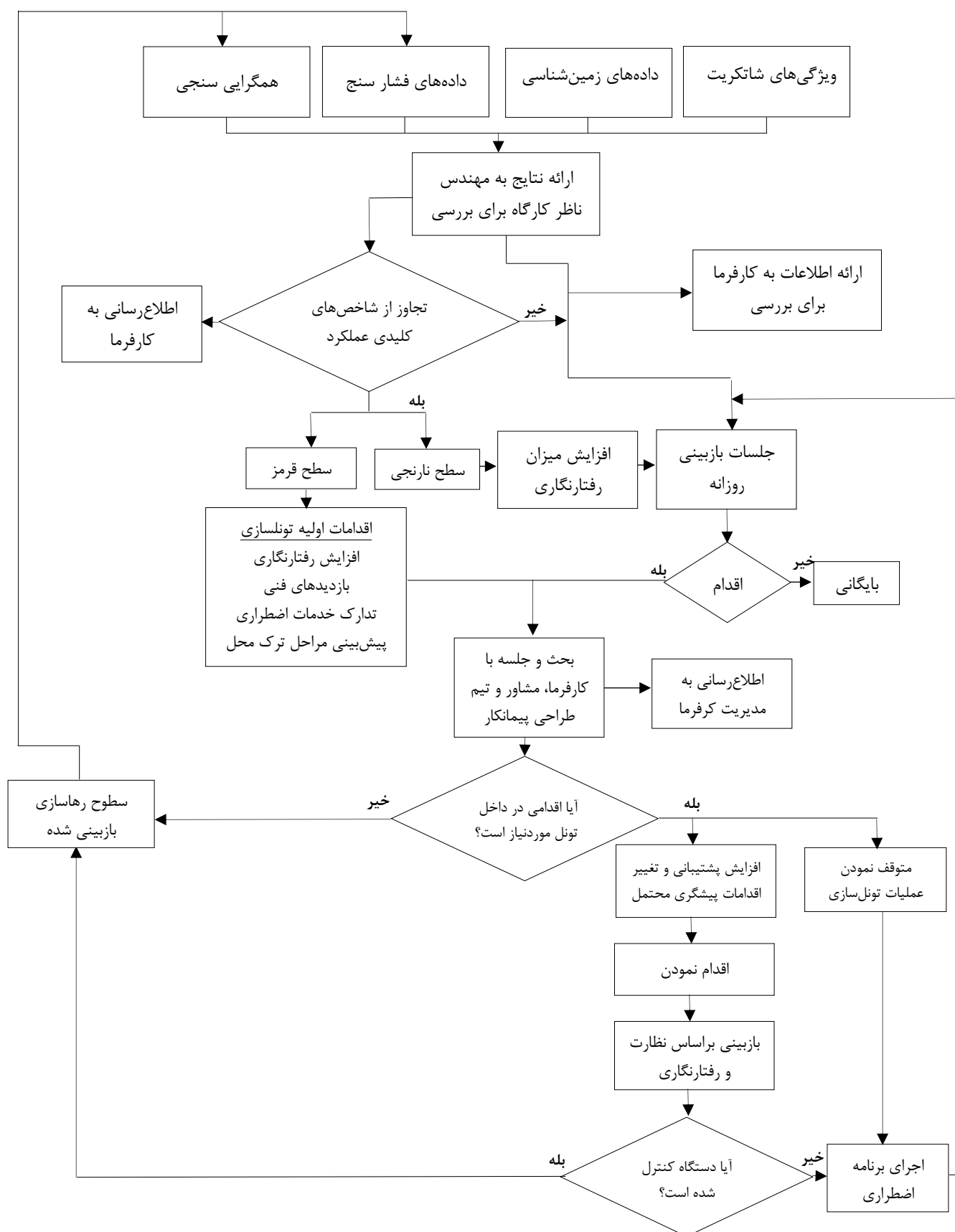
این جنبه بر نیاز به برنامه ریزی مطالعاتی که با توجه به فرایندهای ساخت پیش از انجام عملیات تأکید می نماید. این وابستگی، بر اهمیت استفاده از روش های منطقی قدم به قدم در برنامه ریزی و طراحی پروژه برای هدایت مطالعات می افزاید. استفاده از گالری های آزمایشی قبل از تصمیم گیری در مورد طرح اجرایی می تواند مزایای به کارگیری ابتکارات و روش های جدید در انتخاب روش اجرا به منظور کاهش عدم قطعیت ها در یک محل ناآشنا را توجیه نماید. برای این مورد باید زمان کافی جهت ارائه و دخیل نمودن نتایج در راه حل بهینه در نظر گرفته شود چراکه برای مشاهدات مورد نیاز و اصلاحات احتمالی زمان لازم است (Lane, 1975).

¹ Choosing the right implementation method and consolidations

۴-۴-۵ به کارگیری بازطراحی و بازنگری حین اجرا^۱

به کارگیری بازطراحی و بازنگری حین اجرا از عوامل بسیار مهم در بخش طراحی می باشد که شامل بازبینی مدل و رفتار زمین، مانیتورینگ و پایش تونل در طول عملیات ساخت و اجرا است که باید طبق برنامه انجام شوند و بازرسی های جایگزین نیز در صورت نیاز به کار گرفته شوند. در نتایج رفتار سنجی ها، باید مشخصات و بررسی مجاز عبور از شاخص ها در مراحل مناسبی از کار بررسی شوند و برنامه های جایگزین و اصلاحات برنامه ریزی شده در عملیات اجرایی در هنگام لزوم اجرا گردند و در نهایت ارزیابی پیشرفت کار صورت پذیرد. فرایند سازمان یافته یک پروژه که شامل طراحی مشاهداتی نیز می باشد در شکل ۴-۶ نمایش داده شده است (Muir Wood, 2000 ,Shen et al., 2015).

¹ Apply redesign and revision during execution



شکل ۴-۶ فرایند بازبینی مدیریتی برای رفتارسنجی داخل تونل (Research and Information Association, 1999).

۴-۵ سیستم نگهداری، تحکیمات و کنترل زمین^۱

اولین قدم بعد از انتخاب روش حفاری تونل، کنترل پایداری تونل‌ها جهت تأمین ایمنی لازم در زمان حفاری و همین‌طور پایداری بلندمدت آن‌ها است. به‌طور کلی زمین در شرایط طبیعی، تحت نیروی ثقل و نیروهای تکتونیکی قرار دارد. در اثر حفر تونل تعادل میان این نیروها به هم می‌خورد و وضعیت تنش جدیدی به وجود می‌آید که ممکن است زمین اطراف تونل را به مرحله گسیختگی ببرد. به‌طور مثال در توده سنگ‌ها، درزه‌های طبیعی و درزه‌های ایجادشده در اثر حفاری تونل می‌تواند موجب ناپایداری زمین اطراف تونل شده و ممکن است که این ناپایداری به‌صورت سقوط چند بلوک تا فروریزش کامل زمین اطراف تونل بیانجامد. نصب سیستم نگهداری به سه طریق ذیل باعث جلوگیری از ناپایداری تونل‌ها خواهد شد (مدنی، ۱۳۸۸):

✓ نگهداری بلوک‌های رهاشده

✓ اعمال فشار محصور به زمین اطراف دیواره تونل

✓ بهسازی و تحکیم زمین

بهسازی زمین یا تقویت آن برای تونل‌سازی در زمین‌های نرم و شرایط ژئوتکنیکی مشکل، ضرورت دارد. در زمین‌های رانشی همچون ماسه‌ای با لایه‌های آبدار، سنگ‌های فشارنده یا خرد شده و جاهایی که بدون نگهداری ماندن ناحیه‌ای کوچک برای زمان کوتاه، خطرناک باشد و در حقیقت زمان خود پایداری به اندازه‌ای کم باشد که نصب نگهداری باید جلوتر از حفاری صورت گیرد، انجام پیش نگهداری ضروری خواهد بود. برای حل مشکلات نگهداری تونل، در سنگ‌های ناسالم و زمین‌های ریزشی اعم از قبل حفاری و یا ضمن حفاری، راه‌حل عمومی وجود ندارد بلکه بسته به شرایط خاص پروژه روش اجرایی متناسب با آن در نظر گرفته می‌شود. انواع سیستم‌های نگهداری شامل نگهداری موقت برای تأمین پایداری در طول عملیات حفاری و نگهداری دائم برای تأمین پایداری در طی بهره‌برداری می‌باشد. نگهداری اولیه برای پایداری و حفظ مقاومت توده سنگ طراحی شده و نگهداری ثانویه مکمل نگهداری اولیه بوده است. نگهداری فعال در زمان نصب به توده سنگ بار وارد می‌کند؛ اما نگهداری غیرفعال تنها در صورت جابجایی توده سنگ بار وارد می‌کند و

¹ support system, consolidation and Ground control

نگهداری افزایشی در مواقع نیاز بر اساس مشاهدات می‌توان در آن اصلاحات ضروری انجام داد.

۴-۵-۱ مشخصات فنی اجرایی نگهداری، تحکیمات و کنترل زمین^۱

فضاهای زیرزمینی بلافاصله پس از انجام عملیات حفاری بایستی با روش‌های خاصی مورد نگهداری اولیه قرار بگیرند. بستگی به ساختار زمین‌شناسی توده‌سنگ دربرگیرنده فضای زیرزمینی میزان حجم نگهداری متفاوت خواهد بود. برای اجرای تحکیمات تونل نیاز به داشتن اطلاعات کافی از وضعیت زمین‌شناسی، میزان آب زیرزمینی موجود در توده‌سنگ، مقاومت مکانیکی توده‌سنگ با توجه به شکل هندسی داخلی فضای ایجادشده می‌باشد. پس از کسب آگاهی از وضعیت سنگ دربرگیرنده، میزان تحکیمات موردنیاز بر اساس کلاس‌بندی خاصی تعیین‌شده و وارد مرحله اجرا می‌شود. اجرای عملیات نگهداری بایستی طبق روش اجرای مدون و بهینه که دربرگیرنده انواع ماشین‌آلات موردنیاز، تعداد نیروی انسانی، مواد و مصالح باشد انجام بگیرد. در صورت نداشتن روش اجرای بهینه، شروع و ادامه عملیات نگهداری با مشکلات فراوانی مواجه خواهد بود و مستلزم صرف هزینه‌های گزاف در راستای برطرف نمودن مشکلات به وجود آمده، خواهد بود (سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور، ۱۳۹۶). ناپایداری‌های موجود در سازه‌های زیرزمینی اغلب ناشی از مدیریت نادرست نگهداری زمین است. در این زمینه، مشخصات فنی اجرایی نگهداری، تحکیمات و کنترل زمین نقش زیادی در تأمین بلندمدت پایداری حفاریات دارند. به دلیل اهمیت بالای بازرسی و تخصصی بودن کار، بازرسی زیرزمینی باید توسط گروه مجرب با تخصص‌های موردنیاز انجام شود که در آن عوامل زیادی تأثیرگذارند؛ به علت متعدد بودن سیستم‌های نگهداری و مشخصات فنی و اجرایی آن‌ها مبحث موردنظر به علت گستردگی در این قسمت نمی‌گنجد.

۴-۵-۲ مشخصات فنی اجرایی سیستم بهسازی^۲

برای حل مشکلات تونل‌سازی در سنگ‌های ناسالم و زمین‌های ریزشی اعم قبل از حفاری و یا ضمن حفاری راه‌حل عمومی وجود ندارد بلکه بسته به شرایط خاص پروژه روش اجرایی متناسب به آن ارائه می‌گردد.

^۱ Executive technical specifications of support system, consolidation and ground control

^۲ Technical specifications of the improvement system

روش‌های مختلف بهسازی زمین جهت تسهیل در حفاری تونل و جلوگیری از ریزش به صورت روش‌های ذیل می‌باشد (Safe Work Australia, 2013):

۴-۵-۲-۱ تزریق^۱

تزریق روشی است که به وسیله آن مخلوطی از سیمان و آب و یا تلفیقی از چند ماده مختلف (آمیزه تزریق^۲) با فشار مناسب به داخل خلل و فرج و درز و شکاف و یا حفره‌های تشکیلات سنگی و خاکی رانده می‌شود تا موجب بهبود مشخصات فیزیکی و مکانیکی آن‌ها گردد. در حقیقت این عمل باعث کاهش نفوذپذیری، کاهش به هم فشردگی، افزایش مدول تغییر شکل و افزایش مقاومت و ظرفیت باربری محیط می‌شود. مشخصات فنی اجرایی در این روش شامل موارد زیر است:

- ✓ بررسی کیفیت سیمان یا خاک شیمیایی دوغاب
- ✓ بررسی شکست زمین و آسیب به ساختمان‌ها یا سازه‌های مجاور.
- ✓ کنترل فشار مشخص گروت، طول شیلنگ، اندازه کیسه سیمانی، به همراه داشتن تجهیزات حفاظت فردی^۳ (PPE) مانند دستکش، ماسک گردوغبار و محافظ چشم و صورت اشاره کرد.

۴-۵-۲-۲ روش‌های پیش‌تیرزنی یا فورپلینگ^۴

در روش‌های فورپلینگ عمدتاً چال‌هایی به موازات محور تونل از بالای سینه‌کار حفر می‌شود و تثبیت سینه کار و زمین اطراف با نصب لوله‌های فولادی، پلی‌اتیلن و فایبرگلاس و انجام تزریق در این چال‌ها و اطراف آن، صورت می‌گیرد. در این زمینه می‌توان به رعایت موارد زیر اشاره کرد:

- ✓ رعایت حفر چال‌های مناسب با زوایای موردنظر، حفاری و نصب لوله به صورت هم‌زمان.
- ✓ در روش پلکانی قاب باید دقیقاً زیر لوله‌ها قرار گیرد تا با انتقال بار در جهت تحکیم سقف عمل نماید.
- ✓ در روش مستقیم پس از قرارگیری قاب، نسبت به استقرار یک کنسول پیشرو در بالای قاب اول اقدام شود.

¹ Injection

² Injection mixture

³ Personal Protective Equipment

⁴ Forepooling

۴-۵-۲-۳ زهکشی^۱

شامل تکنیک‌هایی است که هدف از اجرای آن‌ها دور کردن آب از محیط، خارج کردن آن از توده سنگ و خاک و تحت کنترل درآوردن و هدایت آن به خارج از محدوده پروژه است. در صورت زهکشی و حذف بار هیدرولیکی وارد بر سینه کار پایداری بهتری برای جبهه کار پیشروی ایجاد می‌شود. در این زمینه می‌توان به رعایت موارد زیر اشاره کرد.

- ✓ کنترل خوردگی و زوال بخصوص اگر در مجاورت هوا قرار داشته باشد.
- ✓ نوع و روش اجرا
- ✓ سیستم زهشکی باید دارای ابعاد مناسب بوده و به‌طور منظم مورد بازبینی قرار گیرد.
- ✓ شیب و گرادیان تونل باید طوری باشد که مناسب زهکشی ثقلی باشد.

۴-۵-۲-۴ هوای فشرده^۲

هوای فشرده برای بهبود زمین‌های ناپایدار مورداستفاده قرار می‌گیرد. عمده کاربرد این روش جلوگیری از ریزش مواد ریزشی و نرم به محوطه حفاری است. فشار هوا در جبهه کار تونل آب را در توده سنگ پس‌زده و ضمن خشک نمودن آن مقاومت زمین را بالا می‌برد. فشار هوا نباید تا آن حد بالا باشد که موجب راندن آب به سطح زمین یا تخریب ساختار خاک گردد. در این زمینه می‌توان به رعایت موارد زیر اشاره کرد:

- ✓ تأمین هوای مطمئن و پایدار
- ✓ مراقبین کمپرسور برای مراقبت از دستگاه و تجهیزات، گروه امداد و نجات اضطراری.

۴-۵-۲-۵ انجماد^۳

در این روش هدف پایین آوردن دمای آب موجود در فضاهای خالی توده خاکی و سنگی به زیر نقطه انجماد آن است. فرآیند انجماد آب باعث افزایش حجم آب موجود در محیط می‌شود که ممکن است مشکلات زیادی برای پروژه به دنبال داشته باشد. نشست سطح زمین پس از انجام عملیات حفاری زیرزمینی از جمله مشکلات اصلی این روش به شمار می‌رود. انجماد روشی پرهزینه بوده و فقط در شرایط خاص و استثنایی کاربرد دارد. در این زمینه می‌توان به رعایت موارد زیر اشاره کرد:

¹ Drainage

² compressed air

³ Freezing

✓ بررسی مقاومت فشاری و برشی

✓ بهبود پاسخ توده خاک نسبت به بارهای دینامیکی، مدول برشی دینامیکی، پتانسیل روانگرایی و شکل-پذیری خاک

۴-۵-۳ انعطاف پذیری سیستم نگهداری با توجه به شرایط مختلف^۱

پس از ارزیابی وضعیت، اندازه گیری پارامترهای مقاومتی توده سنگ، برآورد وضعیت تنش و تغییر شکل تونل و رسیدن به یک نتیجه مطلوب نیاز به انعطاف در سیستم نگهداری با توجه به شرایط مختلف است، یعنی زمانی که شرایط تغییر می یابد به راحتی بتوان در مشخصات فنی از جمله تغییر در ابعاد، فاصله داری، ضخامت، تعداد و غیره در سیستم نگهداری تغییر ایجاد کرد. سگمنت و قطعات پیش ساخته در تونل های مکانیزه بدترین حالت ممکن را داشته اما در تونل های NATM^۲ به راحتی می توان آن را تغییر داد. بولت و توری (مش) بالاترین انعطاف را داشته و به راحتی می توان مشخصات آن را تغییر داد. مشخصات راکبولت و شاتکریت را به راحتی می توان تغییر داد، قاب های فلزی انعطاف پذیری پایین تری داشته و آخرین گزینه و دشوارترین سیستم نسبت به انعطاف پذیری و تغییر در مشخصات است.

۴-۵-۴ زمان و فاصله نصب سیستم نگهداری از سینه کار^۳

بهترین زمان نصب سیستم نگهدارنده در تونل ها از مهم ترین مسائل در زمان حفاری تونل ها می باشد و نقش مهمی در پایداری آن ها ایفا می نماید. در تونل های ساخته شده در سنگ های نرم یا در سنگ های به شدت درزه داری که در پایداری هر بلوک به تنهایی تردید وجود دارد، نگهداری در زمان حفاری باید نزدیک به سینه کار قرار گیرد و این مورد باید در کل فرایند طراحی مورد توجه باشد. پایداری سینه کار یا نزدیک سینه کار تونل در خاک و سنگ های نرم وابسته به زمان می باشد (Chapman et al., 2017).

۴-۵-۵ کنترل اضافه حفاری و پر کردن فضای خالی پشت حفاری

۴-۵-۵-۱ کنترل اضافه حفاری^۴

کنترل اضافه حفاری یکی از مهم ترین عملیات در حفاری تونل می باشد. کنترل اضافه حفاری منوط به روش

^۱ Flexibility of the maintenance system according to different conditions

^۲ New Austrian Tunneling Method

^۳ Time and distance of installing the support system of the face

^۴ Overdrive control

اجرایی مناسب، حفر چال‌های صحیح انفجاری و جلوگیری از انفجار چال‌ها، اجرای صحیح انفجار و جلوگیری از خردشدگی دیواره تونل، نصب به موقع تحکیمات برای جلوگیری از ریزش بلوک‌های با ناپایداری موضعی در نزدیکی سینه کار می‌باشد (Slinchenko, 2006).

۴-۵-۲ پر کردن فضای خالی پشت حفاری^۱

وجود فضای خالی در قسمت بالایی پوشش بتنی حفاریات، یکی از مشکلات رایج است که به علت بتن‌ریزی نادرست و غیر مؤثر به وجود می‌آید. طاق حفاریات ممکن است به‌طور کامل پر نشده باشد و فضاهای خالی قابل توجهی به عمق ۲۰ تا ۵۰ سانتی‌متر بین سطح سنگ و رویه بتنی باقی بماند. در مورد دیگر پوشش‌ها نیز ممکن است مشکل فضای خالی وجود داشته باشد. با راهبری صحیح دستگاه، کنترل دقیق فشار سینه کار و تنظیم مناسب نرخ تخلیه مصالح از درون اتاقک حفاری متناسب با نرخ پیشروی دستگاه و همچنین تزریق پیوسته دوغاب همراه با پیشروی تونل به‌منظور اطمینان از پر شدن فضای خالی پشت نگهداری، می‌توان نشست سطحی و در نتیجه آسیب به سازه‌های سطحی را به حداقل مقدار ممکن رساند. پر کردن فضای خالی پشت قاب‌های فولادی و چوبی، به‌طور کامل امکان‌پذیر نیست و کنترل آن باید در بازرسی‌های دوره‌ای انجام گیرد (ذوالفقاری و مقصودی، ۱۳۹۴).

۴-۵-۶ نوع سیستم زهکشی و درستی عملکرد آن^۲

یکی از مهم‌ترین مسائل و مشکلات پیش‌رو در عملیات تونل‌سازی در مقاطع سنگی، جریان آب به درون محیط تونل است که از طریق ناپیوستگی‌ها و خلل و فرج در دیواره‌ی تونل صورت می‌پذیرد. یکی از اقدامات برای مقابله با مشکلات ناشی از خطر نشست آب به درون تونل‌ها استفاده از یک سیستم بهینه زهکشی با در نظر گرفتن پارامترهای تأثیرگذار در این انتخاب است. سیستم‌های زهکشی به‌صورت زیر می‌باشند (انوری و همایون، ۱۳۹۳):

✓ چال‌های زهکش و پیش زهکش^۳

✓ پیش تزریق^۱

^۱ Fill in the blanks behind the drill

^۲ Type of drainage system and its correct operation

^۳ Pre drainage

✓ تزریق^۲ (شیمیایی و سیمانی)

✓ تونل پایلوت^۳

۴-۵-۷ نحوه واکنش به شرایط پیش‌بینی نشده^۴

در حفاری و ساخت تونل و فضاهای زیرزمینی در صورتی که حوادث به شیوه دقیق پیش‌بینی نشده و از وقوع آنها پیشگیری نشود، ممکن است فاجعه به بارآورند. در صورتی که سیستم کاملاً ساختارمند و منظم با کنترل‌های روزانه و نقشه‌های موردنیاز در قالب نقشه‌های اصلی موجود باشد، یک تصمیم مساعد در شرایط پیش‌بینی نشده اتخاذ شده و انعطاف‌پذیری بسیار زیادی در تغییرات سیستم نگهداری و روش اجرایی نسبت به شرایط جدید انطباق داده می‌شود؛ در غیر این صورت سیستم به صورت سردرگم و آشفته و روش اجرایی فاقد انعطاف‌پذیری نسبت به شرایط جدید خواهد بود و واکنش مناسبی در جهت وقوع شرایط پیش‌بینی نشده صورت نمی‌گیرد.

۴-۶ عوامل زمین‌شناسی و جغرافیایی ساختگاه^۵

قرارگیری تونل‌ها در میان مصالح طبیعی یعنی سنگ و خاک، باعث شده است که شرایط زمین‌شناسی و جغرافیایی ساختگاه نقش اساسی را در پایداری ایفا نمایند. این پارامتر به توپوگرافی، وضعیت آب‌وهوایی و وضعیت آب زیرزمینی در منطقه مورد مطالعه می‌پردازد و نقش تأثیرگذار عوارض طبیعی در اطراف محوطه تونل سازی بر پایداری را مشخص می‌کند.

۴-۶-۱ وضعیت توپوگرافی و سطح الارض ساختگاه^۶

با استفاده از شاخص موقعیت توپوگرافی (TPI)، سطح زمین به تعداد دسته‌هایی تقسیم‌بندی می‌شود. شاخص TPI شاخصی از وضعیت زمین است. این شاخص اختلاف ارتفاع هر سلول نسبت به ارتفاع متوسط سلول‌های همسایه را نشان می‌دهد. مقادیر مثبت این شاخص نشان‌دهنده این است که سلول در ارتفاع پایین‌تری نسبت به سلول‌های همسایه واقع شده است. به منظور محاسبه آن طبق معادله ارتفاع هر سلول در مدل رقومی ارتفاع

¹ Pre Grouting

² Ground Injection

³ Pilot

⁴ How to react to unforeseen circumstances

⁵ Geological and geographical factors of the site

⁶ Topographic condition and ground level of the site

با میانگین ارتفاع سلول‌های همسایه بررسی و درنهایت، ارتفاع میانگین از مقدار ارتفاع در مرکز کم می‌شود (الیکائی، ۱۳۹۷).

$$TPI = Z_o - \sum_{n=1} Z_n/n \quad (1-4)$$

۴-۶-۲ نوع ساختگاه و معارضین پروژه^۱

نوع کاربری و ساختگاه تونل، خود تعیین‌کننده میزان سطح پایداری در مرحله طراحی و اجرای تونل است. برای ارزیابی نوع کاربری و میزان اهمیت تونل در این مطالعه تونل‌ها بر اساس نوع کاربری و میزان اهمیت تقسیم‌بندی شدند. هر چه میزان اهمیت تونل بیشتر باشد از نظر پایداری وضعیت بهتری دارد. از مسائل مهم در امر تونل‌سازی در محیط شهری، بررسی تأثیر عبور تونل از زیر سازه‌ها و معارضین مختلف می‌باشد. وجود معارضین ناشناخته در مسیر حفر تونل‌ها و عدم شناسایی و ارائه مطالعات آن‌ها از سوی کارفرما، ازجمله معضلات اصلی است که پیمان‌کاران با آن‌ها دست‌به‌گریبان هستند و موارد متعددی از آن‌ها در طی حفر تونل‌های خطوط مختلف متروی تهران مشکلاتی را برای پیمان‌کاران به وجود آورده است (Suarez-Reynoso, 1976).

۴-۶-۳ وضعیت آب‌وهوایی و بلایای طبیعی

۴-۶-۳-۱ وضعیت آب‌وهوایی^۲

بین عوامل طبیعی، آب‌وهوا نقش بسیار مهمی را در فعالیت‌های انسانی دارد. مساعدت یا عدم مساعدت آب‌وهوا بیش از سایر عوامل طبیعی در زمینه گسترش اماکن شهری و روستایی مؤثر می‌باشد که شامل انواع آب‌وهوا و تغییرات سالیانه یا فصلی آن، نقش درجه حرارت در ساخت تونل‌ها، ریزش‌های جوی در فصول مختلف سال، بالا یا پائین بودن درصد رطوبت است.

¹ Type of site and project opponents

² Weather condition

۴-۳-۲-۲ بلایای طبیعی^۱

بلایای طبیعی به مجموعه‌ای از حوادث زیان‌بار گفته می‌شود که منشأ انسانی ندارند. این حوادث معمولاً غیرقابل پیش‌بینی بوده و یا حداقل از مدت‌های طولانی قبل نمی‌توان وقوع آن‌ها را پیش‌بینی نمود. ارزیابی بلایای طبیعی در این مطالعه به‌وسیله متوسط دوره زمانی بازگشت بلایای طبیعی انجام می‌شود.

۴-۳-۴ سطح و وضعیت آب زیرزمینی^۲

وجود آب‌های زیرزمینی در مقادیر بسیار زیاد علاوه بر ایجاد مشکلات عملیاتی در رابطه با ساخت تونل، به عنوان یک خطر اساسی شناخته شده است. مشکلات بالقوه ناشی از ورود آب‌های زیرزمینی در حین تونل‌زنی را می‌توان در بسیاری از مواقع با یک بررسی جامع سایت با استفاده از گمانه‌های عمیق پیش‌بینی کرد. انواع سنگ‌هایی که سفره‌های قابل توجه شناخته شده یا بالقوه‌ای را تشکیل می‌دهند، می‌توانند به‌طور کلی شناسایی شوند و مقررات مناسبی برای کنترل یا مقابله با مشکل ورود آب ارائه می‌شود (مدنی، ۱۳۸۹). رویکردهای تجربی برای پیش‌بینی آب‌های زیرزمینی برای تهیه یک پایگاه داده برای برنامه‌ریزی و ارزیابی اولیه مفید است. پیش‌بینی دقیق مقادیر احتمالی ورود جریان آب، دشوار است و نظارت دقیق و بررسی منظم شرایط همراه با اقدامات ویژه‌ای مانند برنامه‌های آب‌بندی یا تزریق، لازم است مورد توجه قرار گیرد.

۴-۳-۵ نوع عوارض زمین‌شناسی^۳

به‌طور کلی در ارتباط با عوارض زمین‌شناسی محیط، طراحی و احداث هر نوع سازه‌ای در طبیعت باید به‌گونه‌ای انجام شود که تعادل متقابل بین سازه و شرایط زمین‌شناسی به وجود آید. عوارض زمین‌شناسی نقش بسیار مهمی در پایداری یا ناپایداری تونل‌ها دارند. ساختارهای زمین‌شناسی مختلفی وجود دارد که بعضی از بعضی دیگر پایدارترند. ساخت‌های متنوع موجود در سنگ‌ها را می‌توان به دو گروه عمده «ساخت‌های اولیه» که هم‌زمان با تشکیل سنگ ایجاد شده‌اند و ساخت‌های ثانویه که نتیجه تغییرات بعدی به روی سنگ هستند، تقسیم‌بندی کرد. لایه‌بندی و انواع ساخت‌های موجود در سطح و داخل لایه‌ها از ساخت‌های اولیه سنگ‌های رسوبی هستند. اشکالی مانند باتولیت، دایک و جریان گدازه نیز جزء ساخت‌های اولیه سنگ‌های آذرین

¹ Natural disaster

² Groundwater level and status

³ Type of geological complications

به حساب می‌آیند. ساخت‌های ثانویه اغلب بر اثر نیروهایی پس از تشکیل سنگ ایجاد می‌شوند. مجموعه فرآیندهایی که باعث تغییر شکل فیزیکی ثانوی سنگ‌ها و ایجاد ساخت‌های مختلف در آن‌ها می‌شوند تکتونیک نام دارد. عمده ساخت‌های ثانویه را می‌توان چین‌خوردگی، گسل، درزه و غیره نام برد (سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور، ۱۳۹۴).

۴-۶-۶ جهت‌داری ناپیوستگی با محور تونل^۱

جهت‌داری ناپیوستگی‌ها در توده‌سنگ تأثیر مهمی در جابه‌جایی‌ها و مکانیسم شکست اتفاق افتاده در اطراف یک حفاری زیرزمینی را دارند. درزه‌ها اغلب به صورت یک دسته‌ی منظم و موازی ایجاد می‌شوند. اثر فاصله-داری و جهت‌داری درزه در مقاومت توده‌سنگ در فضا‌های زیرزمینی در طبقه‌بندی توده‌سنگ (RMR) وجود دارد که اگر درزه عمود به محور تونل باشد رفتار بهتری نسبت به حالتی دارد که موازی با محور تونل باشد (گشتاسبی و همکاران، ۱۳۸۰).

۴-۷ عوامل عمومی، اجرایی و قراردادی^۲

پیچیده بودن روزافزون ساخت‌وساز در کنار پیشرفت سریع آن و همچنین ابهامات و کمبودهای شرایط حقوقی حاکم و عدم شناخت و نبودن اعتماد کامل طرفین قرارداد نسبت به تعهدات و قوانین حاکم بر آن، از مهم‌ترین دلایل اختلاف در پروژه‌های داخلی به حساب می‌آیند. از قسمت‌های مهم در ساخت و توسعه پروژه-های تونل‌سازی مشخص کردن نحوه اجرا و تأمین مالی و هزینه‌های پروژه‌هاست که مهم‌ترین نقش را در ساخت و توسعه بهینه پروژه‌ها و طرح‌ها ایفا می‌کند. این پارامتر شامل عواملی مانند سطح حساسیت و اهمیت پروژه‌ها، انعطاف قرارداد در خصوص مسائل مالی، فنی و اجرایی، تأمین مالی و هزینه‌های اجرایی، رعایت مشخصات کیفی و فنی، سطح توانمندی، مهارت و تجهیزات پیمانکار، روش حفاری تونل و هندسه تونل است.

^۱ Direction of discontinuity with the tunnel axis

^۲ General, executive and contractual factors

۴-۷-۱ سطح حساسیت و اهمیت پروژه^۱

سطح حساسیت و میزان اهمیت پروژه، خود تعیین کننده میزان سطح پایداری در مرحله طراحی و اجرای تونل است. در مواردی که پروژه دارای حساسیت و اهمیت می باشند، توجه و تفسیر داده های مربوط به ملاحظات عدم قطعیت ها، حساسیت ها و دقت طراحی ها بالا می رود و امکان وقوع شرایط پیش بینی نشده کاهش می یابد. پس هر چه سطح حساسیت و اهمیت تونل ها بالاتر باشد دقت در مسائل اجرایی بیشتر و عموماً ریزش ها و ناپایداری ها کمتر است.

۴-۷-۲ انعطاف قرارداد در خصوص مسائل مالی، فنی و اجرایی^۲

تونل ها و پروژه های زیرزمینی در بسیاری موارد شامل ارتباط میان فرایندها و عملیات جداگانه و همچنین قراردادهای جداگانه می باشند. این فرایند می تواند به صورت عملیات همزمان یا متوالی صورت گیرد. تاریخ های بحرانی باید با دقت بسیار انتخاب شوند. انعطاف برنامه ها ممکن است به دلیل محدودیت های جدید از بین برود و حتی اگر در مجموع باعث از دست رفتن زمان پروژه نشود، ممکن است منجر به تغییر یا لغو برخی دستورات برای انجام عملیات خاص شود. تغییرات ایجاد شده در اثر مشکلات قراردادی می توانند بسیار هزینه بر باشند. بهترین روش عملکرد حفظ انعطاف پذیری بین بخش های مختلف اجرا و پذیرفتن این امر که درک مناسب از عوامل ضروری برای هر یک از عوامل دخیل به منظور رسیدن به بهترین راه حل از ضروریات می باشد (Muir Wood, 2000).

۴-۷-۳ تأمین مالی و هزینه های اجرایی^۳

دسترسی به یک سیستم منطقی برآورد هزینه از همان مراحل اولیه پروژه برای به روزرسانی اطلاعات مربوط به مباحث اقتصادی پروژه بودجه بندی و تأمین منابع مالی پروژه ضروری به نظر می رسد. مباحث مربوط به عدم مدیریت صحیح و تأمین مالی ساخت و بهره برداری از تونل ها باعث طولانی شدن اجرای پروژه ها و ناکارآمدی پیمانکار می شود. مشخص نبودن دقیق هزینه های تونل سازی به عنوان متغیر وابسته در تونل سازی، منجر به برآوردهای نادرستی از هزینه ها می شود (خیرآبادی، ۱۳۹۲).

^۱ Level of sensitivity and importance of the project

^۲ Flexibility of the contract regarding financial, technical and executive issues

^۳ Financing and executive costs

۴-۷-۴ رعایت مشخصات کیفی و فنی^۱

بهره‌گیری از ضوابط، معیارها و استانداردهای فنی و کیفی در تمامی مراحل طراحی، اجرا، بهره‌برداری و نگهداری طرح‌های تونل‌سازی با رویکرد کاهش هزینه و زمان و ارتقای کیفیت، از اهمیت ویژه برخوردار بوده است. این عامل نیز شامل موارد متعددی است که در این بحث نمی‌گنجد.

۴-۷-۵ سطح توانمندی، مهارت و تجهیزات پیمانکار^۲

پیمانکار، باید دارای توانمندی، مهارت و تجربه در حرفه‌ها و مشاغل مربوط به خود باشد. پیمانکار، باید ساخت تجهیزات، تولید و ساخت مصالح و اجرای تمام کارها را منطبق با چگونگی تعیین‌شده در پیمان باکیفیت مرغوب و با دقت و بر اساس روش‌های معتبر و شناخته‌شده خوب و با استفاده از امکانات مجهز و مصالح بی‌خطر، انجام دهد. شرح کلی خدمات پیمانکار، از نظر تکمیل طراحی یا طراحی برحسب مورد و تأمین مصالح و تجهیزات، ساختمان و نصب و راه‌اندازی است. برای عبور از چالش‌ها نیاز به تجهیزات و مهارت خاصی است؛ اگر تجهیزات به‌طور مناسبی در دسترس نباشد با مهارت کافی برای مقابله با چالش‌ها وجود نداشته باشد، وقوع ریزش و ناپایداری در تونل به شدت افزایش می‌یابد (سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور، ۱۳۸۶).

۴-۷-۶ روش حفاری تونل^۳

برای انتخاب روش حفاری تونل معیارهای گوناگونی می‌تواند تأثیرگذار باشد که بسیاری از این معیارها در تضاد و تناقض با یکدیگر می‌باشند؛ بنابراین انتخاب روش درست حفاری تصمیمی پیچیده بوده که نیاز به در نظر گرفتن بسیاری از فاکتورهای فنی، اقتصادی و محیطی دارد. برای یک تونل، یک روش مشخص حفاری وجود ندارد و معمولاً دو یا چند روش عملی می‌باشد. نوع روش حفاری تونل‌سازی در پایداری تونل بسیار تأثیرگذار است. ارزیابی نوع روش تونل‌سازی در این مطالعه به‌وسیله انتخاب یکی از روش‌های حفاری ارائه در شکل ۴-۷ صورت گرفته است.

¹ Observance of quality and technical specifications

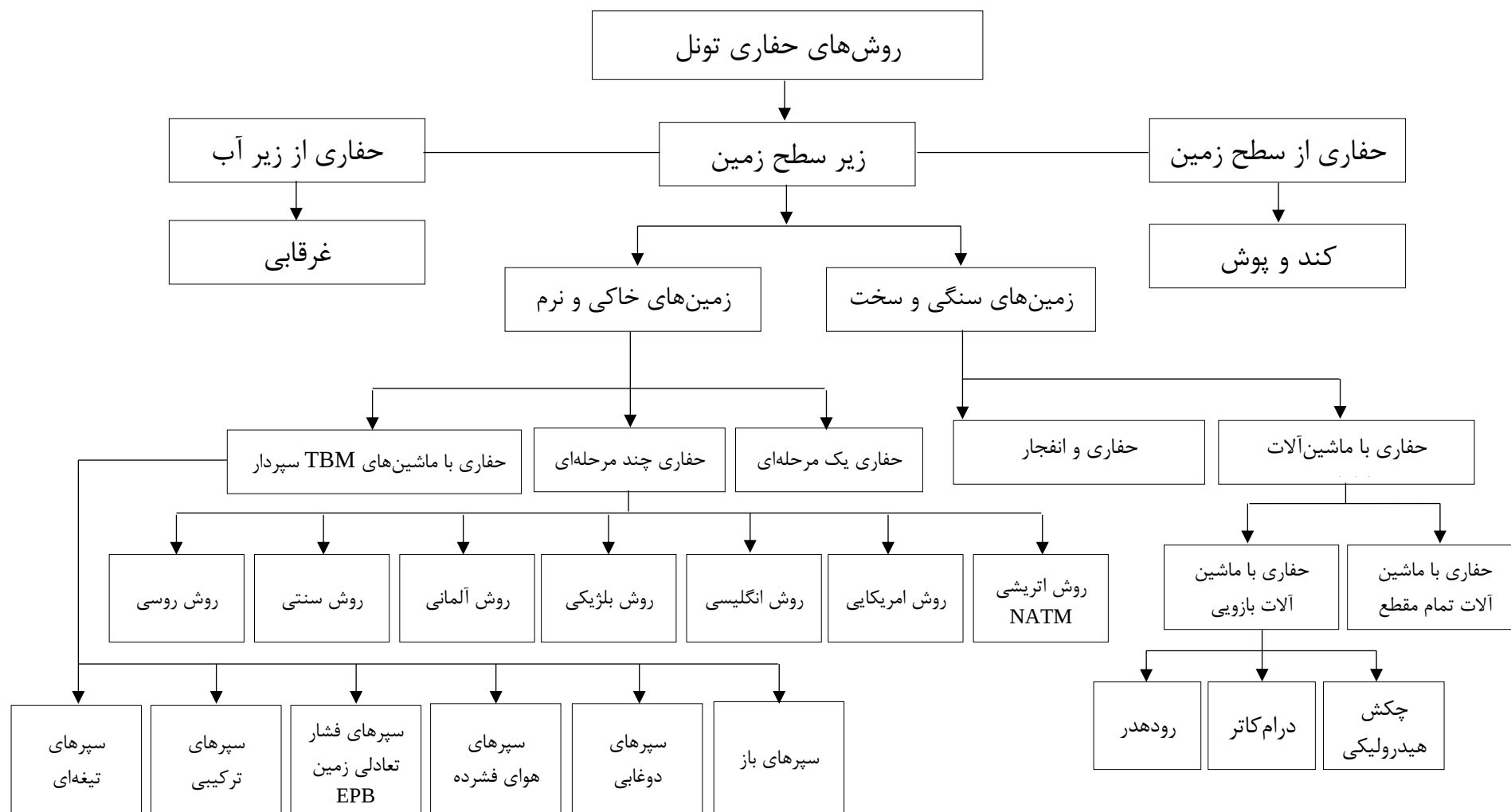
² Level of competence, skills and equipment of the contractor

³ Tunnel drilling method

۷-۷-۴ هندسه تونل^۱

از جمله عوامل مؤثر بر پایداری تونل‌ها و میزان تنش وارده، هندسه تونل می‌باشد. هندسه تونل شامل چهار بخش طول تونل، سطح مقطع، شکل و شیب تونل است. ارزیابی هندسه تونل در این مطالعه به‌وسیله این چهار عامل با توجه به روش اجرا، نوع کاربری، محدودیت‌های فنی و غیره انتخاب می‌شود.

¹ Tunnel geometry



شکل ۴-۷ روش‌های حفاری تونل (سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور، ۱۳۹۴).

۴-۸ شرایط خاص (تکینگی‌ها)^۱

این پارامتر به مجموعه شرایط خاص و حادی در مسیر تونل اطلاق می‌شود که بایستی به آن‌ها توجه ویژه‌ای صورت گیرد. طبیعت فعالیت‌های تونل‌سازی تا اندازه‌ای شامل عدم قطعیت می‌باشد. شاید بتوان این پارامترها را تعیین نمود ولی نمی‌توان اندازه و شرایط خاص رخداد آن‌ها را مشخص کرد و همچنین حذف کامل آن‌ها در عمل ممکن نیست. این پارامتر شامل مجموعه‌ای از عوامل ناپایداری شامل سینه‌کار مختلط، زون‌های شدیداً خردشده و گسله، وجود گل‌ولای آبدار و لنزهای شن و ماسه، وجود سازه‌های مجاور در مجاورت و نزدیکی تونل، روباره کم یا بسیار زیاد و زون پرتالی و تقاطع تونل‌ها می‌باشد.

۴-۸-۱ سینه‌کار مختلط^۲

سینه‌کار مختلط را شرایطی از زمین بیان می‌کند که در آن ترکیب مختلفی از سنگ و خاک، ترکیب چندین نوع سنگ با لایه‌بندی مختلف و یا دگرشیبی در ماتریس آن وجود دارند. جنس و ترکیب سینه‌کار مورد حفاری از عوامل تأثیرگذار بر راندمان حفاری می‌باشد. در بهترین حالت در حفر تونل یکپارچگی سینه‌کار حفاری است و هر چه اجزای این ترکیب بیشتر باشد روند حفاری کندتر است (Tóth et al., 2013).

۴-۸-۲ زون‌های شدیداً خردشده و گسله^۳

گسل‌ها از جمله ناپیوستگی‌های زمین هستند که باعث ناپایداری فضاها و زیرزمینی می‌شوند، لذا آشنایی با بخش‌های مختلف گسل اعم از هسته گسل، زون خرد شده و زون دارای شکستگی و ویژگی‌های آن از جمله تعداد، امتداد و امکان فعالیت آن ضروری می‌باشد. مبنای تأثیر این پارامترها بر روی تونل، زون پلاستیک ایجادشده در اطراف تونل و حداکثر جابجایی رخ داده در توده‌سنگ و ناپایداری تونل می‌باشد (رمضان‌نیا و همکاران، ۱۳۹۶).

¹ Singularities

² Mixed Face

³ Severely crushed and fault zones

۴-۸-۳ وجود گل‌ولای آبدار و لنزهای شن و ماسه^۱

علی‌رغم تحقیقات زمینی قبل از ساخت‌وساز، رایج‌ترین ویژگی زمین‌شناسی غیرقابل‌پیش‌بینی که منجر به فروپاشی می‌شود وقوع ساختارهای فرسوده یا فرسایش در زمین است. این اغلب به دلیل لنزهای پیش‌بینی‌نشده ماسه یا شن و گل‌ولای است. فشار جریان آب زیرزمینی با دبی زیاد بر روی لایه‌های سست، جریان گل را به وجود می‌آورد. وجود لنزهای شن و ماسه احتمال ریزش یا جاری شدن شرایط شن و ماسه را افزایش می‌دهد که منجر به ناپایداری محلی یا سراسری می‌شود (Seidenfuss, 2006).

۴-۸-۴ وجود سازه‌های مجاور در مجاورت و نزدیکی تونل^۲

حفاری تونل‌ها به‌خصوص در مناطق شهری به دلیل نزدیکی آن‌ها به ساختمان‌های مجاور و تونل‌های موجود دارای اهمیت ویژه‌ای از نظر پایداری موضعی سازه‌های مجاور و تونل می‌باشند و لازم است جهت کنترل مسئله، اثر متقابل این سازه‌ها بر یکدیگر در نظر گرفته شود. از آنجایی که در طول اجرای تونل‌ها امکان توقف بهره‌برداری از تونل وجود ندارد و تونل‌ها باید با ظرفیت کامل و به‌صورت شبانه‌روزی سرویس‌دهی کنند، بنابراین باید اقدامات و پیش‌بینی‌های لازم در جهت پیشگیری از تغییر مکان و تغییر شکل بیش‌ازحد مجاز تونل، وجود و اندرکنش سازه‌های معمولی اعم از خیابان‌های با تردد متوسط، ایستگاه‌های مترو و ساختمان‌های مهم و پرتردد در مجاورت تونل‌ها بررسی شود (لشگری و همکاران، ۱۳۹۳، Chan, 1995).

۴-۸-۵ روباره کم یا بسیار زیاد^۳

ارتفاع روباره تونل، تأثیر قابل‌توجهی در پایداری و یا ناپایداری تونل‌های سطحی دارد. به علت وجود روباره در توده‌های سنگ، تنش‌های برجا در آن‌ها ایجاد می‌شود. از طرفی فشار وارد بر نگهدارنده تونل ناشی از همین تنش‌های برجا است؛ بنابراین عمق تونل و یا ارتفاع روباره، پارامتری مهم در طراحی تونل است. هوک و براون تنش‌های برجای زیادی را در نقاط مختلف جهان اندازه گرفتند و متوجه شدند که تقریباً مقدار تنش قائم،

¹ Existence of watery mud and sand lenses

² Existence of adjacent structures in the vicinity

³ little or too much overburden

معادل با تنش حاصل از ارتفاع روباره است. این پارامتر به علت اینکه ناپایداری‌های گزارش شده عموماً با افزایش عمق فضای زیرزمینی کاهش می‌یابد از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. غالباً در اعماق بیشتر از ۵۰ متر ناپایداری و آسیب‌پذیری کم بوده است. در اعماق کمتر از ۵۰ متر و تونل‌های سطحی، احتمال ناپایداری بسیار زیادتر بوده است (Hoek et al., 1980).

۴-۸-۶ زون پرتالی، تقاطع تونل‌ها و اینترسکشن^۱

زون پرتالی و تقاطع تونل‌ها جزء نواحی بسیار حساس در مانیتورینگ هستند. از هر عاملی که باعث انحراف یا تغییر جهت ناگهانی در ترافیک درون تونل شده باید دوری شود، به همین دلیل تقاطع‌ها باید بافاصله کافی و مناسب از دهانه‌های تونل قرار گیرند. بهترین حالت در این بخش زمانی است که تونل در حالت عادی و بدون تقاطع قرارداد.

۴-۹ جمع‌بندی

در این فصل با استفاده از مطالعه منابع علمی معتبر به تعیین شاخص‌های مؤثر بر پایداری تونل پرداخته شد. شش عامل اصلی: عوامل ژئومکانیکی، سطح مطالعات و طراحی، سیستم نگهداری-تحکیمات و کنترل زمین، عوامل زمین‌شناسی، عوامل عمومی-اجرایی و قراردادی و شرایط خاص (تکینگی‌ها) انتخاب شد و همچنین برای هرکدام از این عوامل، زیرشاخه‌هایی تعیین شد. سپس به تعریف هرکدام از این عوامل به‌طور مجزا پرداخته شد. در فصل پنجم به وزن‌دهی پارامترهای مؤثر بر پایداری تونل با روش‌های مختلف پرداخته شده است.

¹ Portal zone and intersection of tunnels

فصل ۵: ارزیابی پایداری در تونل سازی

۵-۱ مقدمه

به‌طور کلی در کلیه مطالعات پیشین، چنانچه در فصل سوم و چهارم مورد بحث قرار گرفت، روش کامل و جامعی که شامل کلیه پارامترهای مؤثر بر پایداری در تونل‌سازی باشد ارائه نشده است. با توجه به‌مرور کلیه منابع و نیز شناسایی و جمع‌آوری پارامترهای مهم مؤثر، سعی شده است تا این پارامترها در یک سیستم دسته‌بندی و به‌صورت یک روش هوشمندانه برای ارزیابی پایداری در تونل ارائه شود. با توجه به طبیعت علل مؤثر بر ناپایداری‌ها که بسیار گسترده و دارای سطوح بالایی از وابستگی می‌باشند، استفاده از روش‌های تحلیل سلسله‌مراتبی AHP، روش تحلیل شبکه ANP مبتنی بر روش آزمایشگاه ارزیابی و آزمون تصمیم‌گیری DEMATEL برای ارزیابی این عوامل مناسب به نظر می‌رسد.

۵-۱-۱ دسته‌بندی و ترکیب پارامترهای مؤثر

در این مرحله با توجه به تعدد و میزان همبستگی که بین عوامل مؤثر وجود دارد، عوامل دسته‌بندی شده و از روش تحلیل سلسله‌مراتبی جهت ترکیب عوامل، در صورت هم‌پوشانی و یا کاهش آن‌ها از طریق نتایج رتبه‌بندی مورد استفاده قرار گرفت.

۵-۱-۲ تنظیم پرسش‌نامه با توجه به روش ارزیابی

هر یک از روش‌های ارزیابی و وزن دهی سبک مشخصی از پرسش‌نامه را طلب می‌کند. لازم است نحوه پرسش کردن به‌گونه‌ای انتخاب شود تا بتوان نتایج نظرسنجی را به‌طور صحیح و به سهولت مورد ارزیابی قرارداد.

۵-۲ ارزیابی پایداری تونل با استفاده از AHP

به‌منظور جمع‌آوری داده‌های لازم پرسش‌نامه‌هایی طراحی شد و در میان متخصصان توزیع شد. این پرسش‌نامه‌ها شامل نه بخش پارامترهای عوامل زمین‌شناسی، عوامل ژئومکانیکی، زون‌های ضعیف، عوامل هندسی، سیستم نگهداری و تحکیمات تونل، عوامل اجرایی، مطالعات و طراحی، شرایط جغرافیایی ساختگاه تونل و

مسائل قراردادی (پیمان) و عمومی بوده و برای تکمیل شدن از نظر ۵ تن از متخصصان برجسته در زمینه تونل و فضاهای زیرزمینی استفاده شد. در ادامه پیاده‌سازی روش برای هر یک از بخش‌های ذکر شده در قسمت-های مجزا تشریح شده است. نمونه فرم‌های نظرسنجی ارسال شده در پیوست ۱ ارائه شده است. در این فرم‌ها از متخصصان خواسته شده بود بسته به نظر خویش، اهمیت هر یک از عوامل را نسبت به یکدیگر مشخص کنند. با استفاده از این جداول نظر متخصصان در مورد وزن و اهمیت هر معیار در رابطه با شاخص‌های مربوطه در نظر گرفته شد.

۵-۲-۱ اجرای AHP برای دسته پارامترها و پارامترها

با توجه به پرسشنامه‌های موجود، ماتریس مقایسه زوجی متناظر با هر یک از پارامترها از نظر متخصصان مختلف به صورت جداگانه برای هر متخصص تشکیل شده است (پیوست ۴). پس از دریافت نظرات متخصصین ماتریس مقایسه زوجی بین مؤلفه‌های مؤثر در پایداری تونل و نرخ ناسازگاری، طبق روابط (۳-۱) تا (۳-۸) محاسبه شد و نتایج در شکل ۵-۱ برای دسته پارامترها و پارامترها نمایش داده شده است.

۵-۲-۲ محاسبه وزن نهایی پارامترهای مؤثر بر پایداری تونل با روش AHP

به منظور محاسبه وزن نهایی پارامترهای مؤثر بر پایداری تونل با استفاده از فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی AHP، پس از ضرب نمودن وزن هر پارامتر در وزن دسته پارامتر مربوط به خودش، وزن نهایی و نرخ ناسازگاری پارامترهای تأثیرگذار در ارزیابی پایداری تونل به دست آمده که نتایج آن در جدول ۵-۱ و شکل ۵-۲ درج شده است.

عوامل هندسی (۰/۰۸۲) عمق تونل و میزان روباره ۰/۲۰۸ جهتداری ناپیوستگی هانست به محور تونل ۰/۱۹۲ وجود سازه‌های مجاور در نزدیکی تونل ۰/۱۶۳ شیب و نوع سازه زیرزمینی ۰/۱۳ تکنیکی هندسی (پرتال، تقاطع و...) ۰/۱۱۶ ابعاد و اندازه تونل، سطح مقطع حفاری ۰/۱۱۲ شکل هندسی تونل ۰/۰۷۹ نرخ ناسازگاری ۰/۰۸	زون‌های ضعیف (۰/۱۰۲) وجود سینه کار مختلط ۰/۲۸۶ زون‌های شدیداً خورد شده و گسله ۰/۲۲۳ گل‌ولای آبدار ۰/۱۳۸ سنگ‌های مارنی و حساس به آب ۰/۱۳۷ لنزهای شن و ماسه ۰/۱۳۱ سنگ‌های نرم ۰/۰۸۶ نرخ ناسازگاری ۰/۰۳	عوامل ژئومکانیکی (۰/۲۲۴) تنش‌های برجا ۰/۳۵۳ وجود پتانسیل لهیدگی ۰/۱۵۵ آنیزوتروپی توده سنگ ۰/۱۵۴ کیفیت توده سنگ ۰/۱۳۲ وجود پتانسیل آماس ۰/۱۱۱ نوع سنگ و مشخصات سنگ بکر ۰/۰۹۵ نرخ ناسازگاری ۰/۰۳	عوامل زمین‌شناسی (۰/۰۸۵) سطح آب زیرزمینی ۰/۲۰۳ انواع ناپیوستگی‌ها ۰/۱۶۵ نوع سازندها ۰/۱۶۲ گسل ۰/۱۵۲ حفرات کاستی و سازندهای کارستی ۰/۱۳۷ دایک ۰/۱۰۲ چین‌خوردگی ۰/۰۷۹ نرخ ناسازگاری ۰/۰۴	دسته پارامترها عوامل ژئومکانیکی ۰/۲۲۴ مطالعات و طراحی ۰/۱۵۵ سیستم نگهداری و تحکیمات تونل ۰/۱۴۱ زون‌های ضعیف ۰/۱۰۲ شرایط جغرافیایی ساختمان تونل ۰/۰۹ عوامل زمین‌شناسی ۰/۰۸۵ عوامل هندسی ۰/۰۸۲ مسائل قراردادی (پیمان) و عمومی ۰/۰۶۳ عوامل اجرایی ۰/۰۵۸ نرخ ناسازگاری ۰/۰۸
مسائل قراردادی (پیمان) و عمومی (۰/۰۶۳) سطح حساسیت و اهمیت پروژه ۰/۲۶۲ انعطاف‌قرارداد در مسائل فنی، اجرایی و... ۰/۲۱۸ نحوه تامین مالی و هزینه‌های اجرایی ۰/۱۷۵ استانداردهای بالادستی و منظم به پیمان ۰/۱۵۳ نوع قرارداد (سه عاملی، چهار عاملی و...) ۰/۱۱ فشرده‌گی برنامه زمان‌بندی ۰/۰۸۲ نرخ ناسازگاری ۰/۰۲	شرایط جغرافیایی ساختمان تونل (۰/۰۹) وضعیت توپوگرافی و سطح‌الارض ساختگاه ۰/۲۵۴ نوع ساختگاه و معارضین پروژه ۰/۱۷۵ عبور از زیر یا مجاورت رودخانه‌ها، دریاچه و... ۰/۱۴۳ وجود دره‌های مدفون در مسیر تونل ۰/۱۳۶ وضعیت آب و هوایی ۰/۱۱۶ میزان بارندگی و نوع بارش‌ها ۰/۱۱۴ بلاایای طبیعی ۰/۰۶۲ نرخ ناسازگاری ۰/۰۲	مطالعات و طراحی (۰/۱۵۵) سطح مطالعات اکتشافی پیش از ساخت ۰/۲۵۲ درک صحیح رفتار و پیش‌بینی شرایط زمین ۰/۲۵۲ سطح محاسبات و فرضیات طراحی ۰/۱۹۶ انتخاب صحیح سیستم اجرایی و تحکیمات ۰/۱۸۶ بکارگیری سیستم ابزار دقیق و مانیتورینگ ۰/۱۱۴ نرخ ناسازگاری ۰/۰۵	عوامل اجرایی (۰/۰۵۸) رعایت مشخصات کیفی سیستم نگهداری ۰/۲۷۱ سطح توانمندی و مهارت پیمانکار ۰/۱۸۶ روش حفاری تونل ۰/۱۶ واکنش صحیح در شرایط پیش‌بینی نشده ۰/۱۴۴ انطباق تجهیزات حفاری با شرایط اجرایی ۰/۱۲۶ سطح خدمات فنی و اجرایی ۰/۱۱۳ نرخ ناسازگاری ۰/۰۲	سیستم نگهداری و تحکیمات تونل (۰/۱۴۱) مشخصات فنی سیستم نگهداری و تحکیمات ۰/۲۴۶ قابلیت تغییر سیستم ۰/۲۱۷ طول گام پیشروی ۰/۱۵۹ نوع سیستم زهکشی و کنترل خوردگی و زوال ۰/۱۳۳ نوع سیستم تحکیمات ۰/۱۲۵ کنترل اضافه حفاری و پر کردن فضای خالی ۰/۱۲ نرخ ناسازگاری ۰/۰۵

شکل ۵-۱ وزن‌های اولیه و نسبی پارامترها و دسته پارامترها.

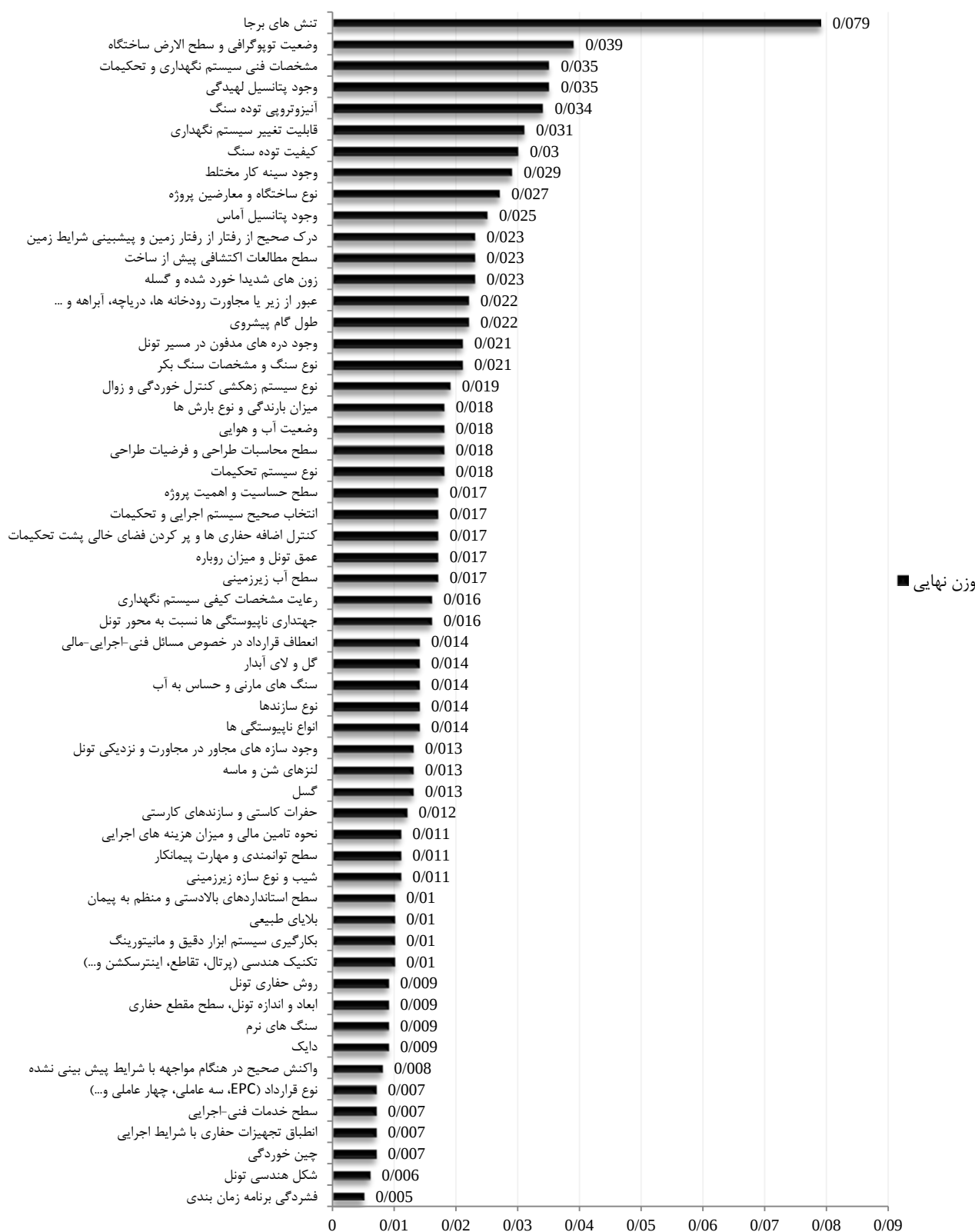
جدول ۵-۱ وزن نهایی تمام پارامترهای مؤثر بر پایداری تونل در روش AHP.

وزن دسته پارامترها	پارامترها	وزن نهایی	رتبه بندی نهایی
عوامل ژئومکانیکی ۰/۲۲۴	تنش های برجا	۰/۰۷۹	۱
	وجود پتانسیل لهیدگی	۰/۰۳۵	۳
	آنیزوتروپی توده سنگ	۰/۰۳۴	۵
	کیفیت توده سنگ	۰/۰۳	۷
	وجود پتانسیل آماس	۰/۰۲۵	۱۰
	نوع سنگ و مشخصات سنگ بکر	۰/۰۲۱	۱۶
مطالعات و طراحی ۰/۱۵۵	سطح مطالعات اکتشافی پیش از ساخت	۰/۰۲۳	۱۲
	درک صحیح از رفتار از رفتار زمین و پیش بینی شرایط زمین	۰/۰۲۳	۱۳
	سطح محاسبات طراحی و فرضیات طراحی	۰/۰۱۸	۲۰
	انتخاب صحیح سیستم اجرایی و تحکیمات	۰/۰۱۷	۲۶
	به کارگیری سیستم ابزار دقیق و مانیتورینگ	۰/۰۱	۴۳
سیستم نگهداری و تحکیمات تونل ۰/۱۴۱	مشخصات فنی سیستم نگهداری و تحکیمات	۰/۰۳۵	۴
	قابلیت تغییر سیستم نگهداری	۰/۰۳۱	۶
	طول گام پیشروی	۰/۰۲۲	۱۴
	نوع سیستم زهکشی کنترل خوردگی و زوال	۰/۰۱۹	۱۸
	نوع سیستم تحکیمات	۰/۰۱۸	۱۹
	کنترل اضافه حفاری ها و پر کردن فضای خالی پشت تحکیمات	۰/۰۱۷	۲۵
زون های ضعیف ۰/۱۰۲	وجود سینه کار مختلط	۰/۰۲۹	۸
	زون های شدیداً خورد شده و گسله	۰/۰۲۳	۱۱
	گل ولای آبدار	۰/۰۱۴	۳۳
	سنگ های مارنی و حساس به آب	۰/۰۱۴	۳۲
	لنزهای شن و ماسه	۰/۰۱۳	۳۶
	سنگ های نرم	۰/۰۰۹	۴۷
شرایط جغرافیایی ساختگاه تونل ۰/۰۹	وضعیت توپوگرافی و سطح الارض ساختگاه	۰/۰۳۹	۲
	نوع ساختگاه و معارضین پروژه	۰/۰۲۷	۹
	عبور از زیر یا مجاورت رودخانه ها، دریاچه، آبراهه و ...	۰/۰۲۲	۱۵
	وجود دره های مدفون در مسیر تونل	۰/۰۲۱	۱۷
	وضعیت آب وهوایی	۰/۰۱۸	۲۱
	میزان بارندگی و نوع بارش ها	۰/۰۱۸	۲۲
	بلایای طبیعی	۰/۰۱	۴۴
عوامل زمین شناسی ۰/۰۸۵	سطح آب زیرزمینی	۰/۰۱۷	۲۳
	انواع ناپیوستگی ها	۰/۰۱۴	۳۰
	نوع سازندها	۰/۰۱۴	۳۱
	گسل	۰/۰۱۳	۳۵
	حفرات کاستی و سازندهای کارستی	۰/۰۱۲	۳۸
	دایک	۰/۰۰۹	۴۶

۵۱	۰/۰۰۷	چین خوردگی	ادامه جدول ۵-۱
۲۴	۰/۰۱۷	عمق تونل و میزان روباره	عوامل هندسی ۰/۰۸۲
۲۸	۰/۰۱۶	جهت‌داری ناپیوستگی‌ها نسبت به محور تونل	
۳۷	۰/۰۱۳	وجود سازه‌های مجاور در مجاورت و نزدیکی تونل	
۳۹	۰/۰۱۱	شیب و نوع سازه زیرزمینی	
۴۲	۰/۰۱	تکنیکی هندسی (پرتال، تقاطع، اینترسکشن و...)	
۴۸	۰/۰۰۹	ابعاد و اندازه تونل، سطح مقطع حفاری	
۵۵	۰/۰۰۶	شکل هندسی تونل	
۲۷	۰/۰۱۷	سطح حساسیت و اهمیت پروژه	مسائل قراردادی (پیمان) و عمومی ۰/۰۶۳
۳۴	۰/۰۱۴	انعطاف قرارداد در خصوص مسائل فنی-اجرایی-مالی	
۴۱	۰/۰۱۱	نحوه تأمین مالی و میزان هزینه‌های اجرایی	
۴۵	۰/۰۱	سطح استانداردهای بالادستی و منظم به پیمان	
۵۴	۰/۰۰۷	نوع قرارداد (EPC، سه عاملی، چهار عاملی و...)	
۵۶	۰/۰۰۵	فشرده‌گی برنامه زمان‌بندی	
۲۹	۰/۰۱۶	رعایت مشخصات کیفی سیستم نگهداری	عوامل اجرایی ۰/۰۵۸
۴۰	۰/۰۱۱	سطح توانمندی و مهارت پیمانکار	
۴۹	۰/۰۰۹	روش حفاری تونل	
۵۰	۰/۰۰۸	واکنش صحیح در هنگام مواجهه با شرایط پیش‌بینی نشده	
۵۲	۰/۰۰۷	انطباق تجهیزات حفاری با شرایط اجرایی	
۵۳	۰/۰۰۷	سطح خدمات فنی و اجرایی	

چنانچه در شکل ۵-۲ مشاهده می‌شود تنش‌های برجا، وضعیت توپوگرافی و سطح الارض ساختگاه و مشخصات فنی سیستم نگهداری و تحکیمات تونل به ترتیب بیش‌ترین امتیازها و فشرده‌گی برنامه زمان‌بندی، شکل هندسی تونل و چین خوردگی به ترتیب کمترین امتیازها را کسب کرده‌اند.

با استفاده از تجزیه و تحلیل اولیه با روش فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی و با استفاده از رویکرد تلفیقی حاصل از وزن‌های نهایی و به‌صورت مقایسه‌ای تعداد ۳۸ عامل را اولویت قرارداده که در ادامه نتایج تجزیه و تحلیل نهایی با رویکرد تلفیقی ANP-DEMATEL شرح داده شده است.



شکل ۵-۲ نمودار وزن نهایی پارامترهای مؤثر بر پایداری تونل در روش AHP.

۵-۳ توسعه مدل کیفی پایداری تونل

به منظور توسعه مدل کیفی از ترکیب روش‌های ANP و DEMATEL باهدف تعیین ساختار و شبکه مسئله است. در این راستا روش ANP برای تعیین ارتباطات داخلی به کار برده شده است. در مرحله بعد سوپرماتریس مربوطه تشکیل و با رسیدن به سوپرماتریس حدی، اوزان هریک از پارامترها محاسبه شده است. از آنجایی که توسعه مدل کیفی با استفاده از روش تصمیم‌گیری چند معیاره صورت گرفته است، بنابراین برای دریافت نظرات کارشناسان از پرسشنامه‌هایی استفاده شده است. گروه کارشناسان و خبرگان مورد استفاده در این تحقیق شامل اساتید و خبرگان و فعالان داخلی و خارجی در صنعت تونل‌سازی بوده است. پس از دریافت پرسشنامه‌ها و بررسی آن‌ها در نهایت از ۴۰ پرسشنامه برای تحلیل‌ها استفاده شده است.

با استفاده از پرسشنامه‌های موجود، نظر متخصصان در مورد وزن و اهمیت هر معیار در رابطه با شاخص‌های مربوطه در نظر گرفته شد (پیوست ۲). به عنوان مثال در مورد معیار "شرایط خاص" عامل "سینه کار مختلط" با تمامی عوامل این دسته مقایسه می‌شوند. در این مورد از متخصصان خواسته شد که مشخص نمایند کدامیک از معیارها برای شاخص شرایط خاص، نسبت به دیگری دارای اهمیت بیشتری است. اگر عدد صفر را انتخاب نمایند به معنای آن است که این معیار با توجه به هدف پژوهش برای پایداری، بی‌تأثیر است. اگر عدد ۱ را انتخاب کنند به معنای آن است که معیار سینه کار مختلط تأثیر خیلی کمی نسبت به سایر عوامل دارد و اگر عدد ۴ را انتخاب کنند به معنای آن است که این معیار تأثیر بسیار بیشتری از سایر عوامل دارد. در ادامه پیاده‌سازی روش برای هر یک از بخش‌های ذکر شده در قسمت‌های مجزا تشریح شده است.

۵-۴ اجرای روش DEMATEL برای دسته پارامترها

در این قسمت کارشناسان با توجه به پرسشنامه‌های موجود شدت اثرگذاری دسته عوامل را مشخص کرده‌اند. در گام اول ماتریس میانگین نظرات طبق رابطه (۳-۱۱) محاسبه و در جدول ۵-۲ درج شده است. قابلیت اطمینان داده‌ها طبق رابطه‌های (۳-۹) و (۳-۱۰) ۹۹٪ به دست آمد که مؤید اعتبار بالایی در نظرات خبرگان است.

جدول ۲-۵ ماتریس میانگین نظرات برای دسته پارامترها در روش DEMATEL

F	E	D	C	B	A	(A)
۲/۴	۲/۵۵	۲/۶۵	۳/۳۲۵	۳/۳	۰	A
۲/۲۵	۲/۸۵	۲	۲/۶۲۵	۰	۲/۰۷۵	B
۲	۲/۵۵	۲/۰۵	۰	۲/۵۷۵	۲/۱۷۵	C
۲/۵۵	۲/۵	۰	۲/۷۷۵	۳/۱۵	۲/۹۵	D
۱/۴۵	۰	۱/۴	۲/۳۷۵	۲/۶۷۵	۱/۲۷۵	E
۰	۲/۳۲۵	۲/۲۷۵	۲/۷۵	۲/۷۵	۲/۱۷۵	F

بیشینه مقدار جمع سطری و ستونی بر اساس جدول ۲-۵ برابر ۱۴/۴۵ به دست آمده است؛ بنابراین ماتریس روابط مستقیم نرمال شده با استفاده از رابطه (۳-۱۱) محاسبه و در جدول ۳-۵ درج شده است.

جدول ۳-۵ ماتریس روابط مستقیم نرمال شده برای دسته پارامترها در روش DEMATEL

F	E	D	C	B	A	(D)
۰/۱۶۶	۰/۱۷۶	۰/۱۸۳	۰/۲۳	۰/۲۲۸	۰	A
۰/۱۵۶	۰/۱۹۷	۰/۱۳۸	۰/۱۸۲	۰	۰/۱۴۴	B
۰/۱۳۸	۰/۱۷۶	۰/۱۴۲	۰	۰/۱۷۸	۰/۱۵۱	C
۰/۱۷۶	۰/۱۷۳	۰	۰/۱۹۲	۰/۲۱۸	۰/۲۰۴	D
۰/۱	۰	۰/۹۷	۰/۱۶۴	۰/۱۸۵	۰/۸۸	E
۰	۰/۱۶۱	۰/۱۵۷	۰/۱۹	۰/۱۹	۰/۱۵۱	F

در گام نهایی ماتریس روابط کلی (T) با استفاده از رابطه (۳-۱۴) محاسبه و در جدول ۴-۵ درج شده است.

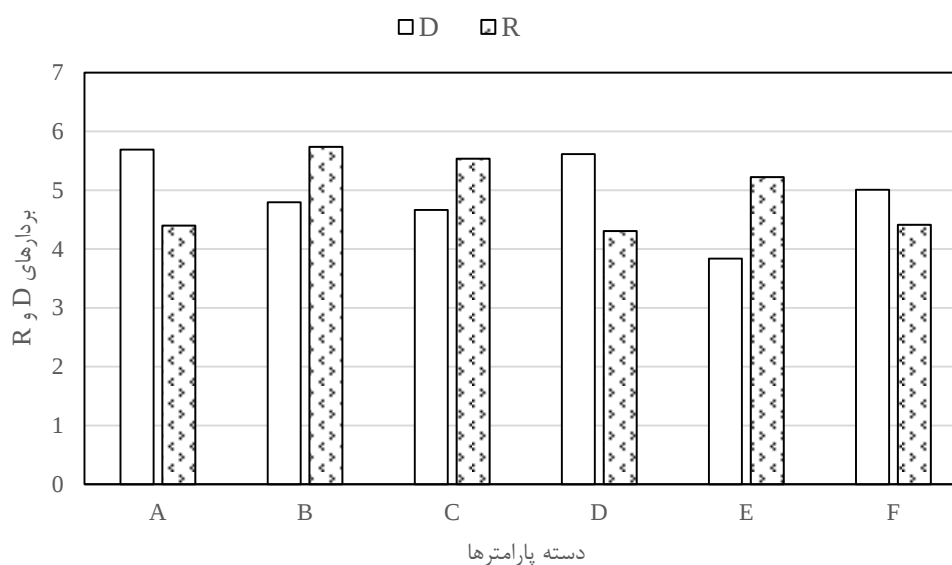
جدول ۴-۵ ماتریس روابط کلی برای دسته پارامترها در روش DEMATEL

F	E	D	C	B	A	(T)
۰/۸۶۸	۱/۹	۰/۸۶۳	۱/۹۸	۱/۱۲۹	۰/۷۲۳	A
۰/۷۴۴	۰/۸۸۹	۰/۷۱۶	۰/۹۲	۰/۷۹۳	۰/۷۲۳	B
۰/۷۱۵	۰/۸۵۴	۰/۷۰۳	۰/۷۴۵	۰/۹۲۳	۰/۷۲۲	C
۰/۸۶۶	۰/۹۹۵	۰/۶۹۹	۱/۶	۱/۱۱	۰/۸۸۴	D
۰/۵۸	۰/۵۸	۰/۵۶۵	۰/۷۵۳	۰/۷۹	۰/۵۶۹	E
۰/۶۳۸	۰/۸۹۵	۰/۷۵۸	۰/۹۶	۰/۹۸۹	۰/۷۶۷	F

در حقیقت ماتریس روابط درونی دسته پارامترها برای قرارگیری در سوپرماتریس روش ANP حاصل می-شود؛ بنابراین ماتریس روابط کلی دسته پارامترها با استفاده از رابطه (۳-۱۴) به صورت جدول ۴-۵ محاسبه شده است. مقادیر تأثیر گذاشته و تأثیر گرفته شده هر دسته پارامتر و همچنین مقادیر برتری و ارتباط آنها بر اساس ماتریس روابط کلی طبق رابطه های (۳-۱۶) و (۳-۱۷) محاسبه و در جدول ۵-۵ درج شده است.

جدول ۵-۵ بردارهای تأثیر گذاشته شده، تأثیر گرفته شده، برتری و ارتباط برای دسته پارامترها.

D-R	D+R	R	D	دسته پارامترها
۱/۲۹۳	۱۰/۰۸۸	۴/۳۹۷	۵/۶۹	عوامل ژئومکانیکی (A)
-۰/۹۴۱	۱۰/۵۲۹	۵/۷۳۵	۴/۷۹۴	عوامل زمین شناسی (B)
-۰/۸۷۳	۱۰/۱۹۹	۵/۵۳۶	۴/۶۶۳	سیستم نگهداری، تحکیمات و کنترل زمین (C)
۱/۳۰۹	۹/۹۱۷	۴/۳۰۴	۵/۶۱۳	شرایط زمین شناسی و جغرافیایی ساختگاه (D)
-۱/۳۸۵	۹/۰۶	۵/۲۲۲	۳/۸۳۷	عوامل عمومی، اجرایی و قراردادی (E)
۰/۵۹۷	۹/۴۱۷	۴/۴۱	۵/۰۰۷	شرایط خاص (تکنیکی ها) (F)



شکل ۳-۵ نمودار بردارهای تأثیر گذاشته و گرفته شده توسط دسته پارامترها.

شکل ۳-۵ نمودار بردارهای تأثیرگذاری و تأثیرپذیری پارامترهای مؤثر بر دسته پارامترها را نمایش می دهد. بر

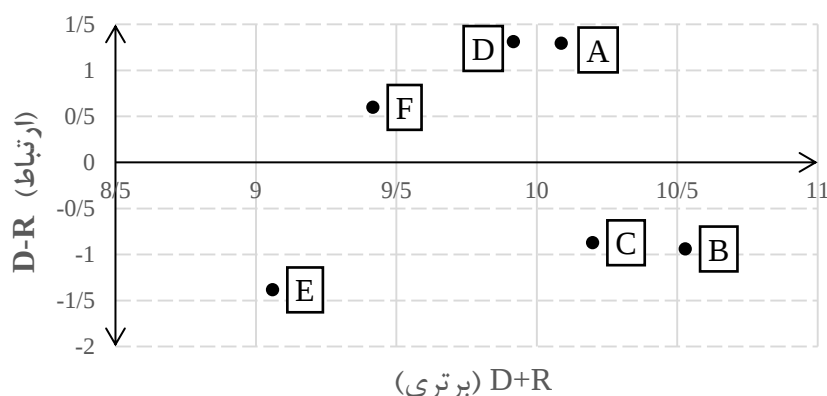
اساس شکل نتایج زیر حاصل می شود:

✓ عوامل ژئومکانیکی بیشترین و عوامل عمومی، اجرایی و قراردادی کمترین تأثیرگذاری را دارا هستند.

ترتیب آن ها بدین صورت است: $A \gg D \gg F \gg B \gg C \gg E$

✓ مطالعات و طراحی بیشترین تأثیرپذیری و شرایط زمین شناسی و جغرافیایی ساختگاه کمترین

تأثیرپذیری را دارند. ترتیب آن ها بدین صورت است: $B \gg C \gg E \gg F \gg A \gg D$



شکل ۴-۵ نمودار علی دسته پارامترهای مؤثر بر پایداری تونل.

شکل ۴-۵ نمودار علی دسته پارامترهای مؤثر بر پایداری تونل را نمایش می‌دهد بر اساس شکل نتایج زیر به دست می‌آید:

- ✓ مطالعات و طراحی بیشترین برتری و عوامل عمومی، اجرایی و قراردادی کمترین برتری را دارا هستند.
- ✓ عوامل ژئومکانیکی بیشترین ارتباط و عوامل عمومی، اجرایی و قراردادی کمترین ارتباط هستند.
- ✓ عوامل ژئومکانیکی، شرایط زمین‌شناسی و جغرافیایی ساختگاه و شرایط خاص (تکنیکی‌ها) به‌عنوان علت شناسایی شدند.
- ✓ مطالعات و طراحی، سیستم نگهداری، تحکیمات و کنترل زمین و عوامل عمومی، اجرایی و قراردادی به‌عنوان معلول شناسایی شدند.

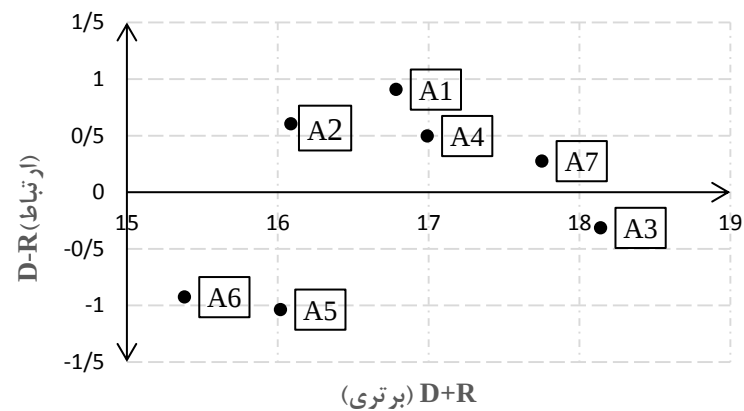
۵-۵ پیاده‌سازی روش DEMATEL برای تمام پارامترها

در این قسمت کارشناسان بر اساس جداول موجود شدت اثرگذاری تمامی پارامترها بر یکدیگر را مشخص کردند (پیوست ۲). بر اساس ماتریس میانگین نظرات کارشناسان بیشینه مقدار جمع سطری و ستونی برای عوامل ژئومکانیکی، مطالعات و طراحی، سیستم نگهداری، تحکیمات و کنترل زمین، عوامل عمومی، اجرایی و قراردادی و شرایط خاص (تکنیکی‌ها) به ترتیب برابر با ۱۷/۷۵، ۱۲/۵۲۵، ۱۸/۷۷۵، ۱۲/۰۲۵، ۱۸/۳۴۷، ۱۳/۹۷۵ به‌دست‌آمده است؛ مقادیر تأثیر گذاشته و تأثیر گرفته‌شده هر پارامتر و همچنین مقادیر برتری و ارتباط آن‌ها بر اساس ماتریس روابط کلی محاسبه و در جدول ۵-۵ درج‌شده است. بردارهای تأثیر گذاشته و تأثیر گرفته تمامی پارامترهای مؤثر بر پایداری تونل به‌صورت کامل در پیوست ۳ و جدول ۵-۶ و همچنین نمودار علی آن‌ها در جدول ۷-۵ ارائه‌شده است.

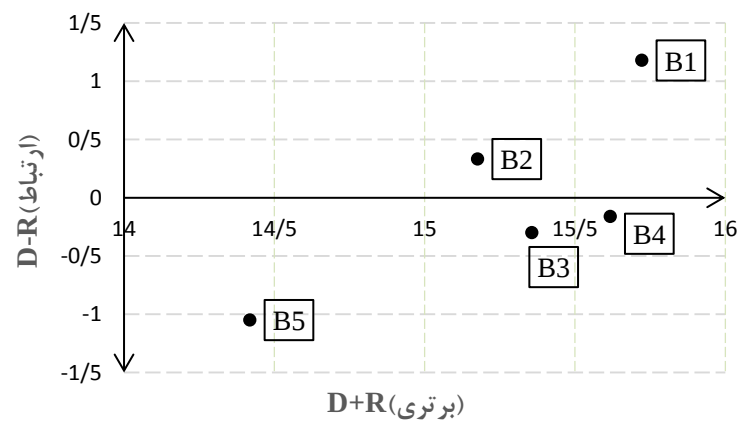
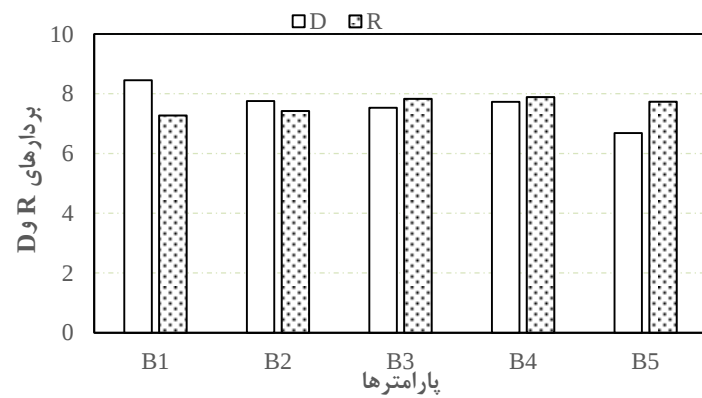
جدول ۵-۶ بردارهای تأثیر گذاشته شده، تأثیر گرفته شده، برتری و ارتباط برای تمام پارامترها.

پارامترها					
D-R	D+R	R	D		
۰/۹۰۷	۱۶/۷۸۵	۷/۹۳۹	۸/۸۴۶	تنش های برجا (A1)	عوامل ژئومکانیکی
۰/۶۰۳	۱۶/۰۸۸	۷/۷۴۲	۸/۳۴۵	آنیزوتروپی توده سنگ (A2)	
- ۰/۳۱۵	۱۸/۱۴۲	۹/۲۲۹	۸/۹۱۳	کیفیت توده سنگ (A3)	
۰/۴۹۶	۱۶/۹۹۲	۸/۲۴۸	۸/۷۴۴	نوع سنگ و مشخصات سنگ بکر (A4)	
- ۱/۰۳۸	۱۶/۰۱۹	۸/۵۲۸	۷/۴۹	وجود پتانسیل لهیدگی (A5)	
- ۰/۹۲۷	۱۵/۳۸۲	۸/۱۵۵	۷/۲۲۸	وجود پتانسیل آماس (A6)	
۰/۲۷۴	۱۷/۷۵۱	۸/۷۳۹	۹/۰۱۳	زون های ضعیف (A7)	
۱/۱۷۹	۱۵/۷۲۳	۷/۲۷۲	۸/۴۵۱	سطح مطالعات اکتشافی پیش از ساخت (B1)	مطالعات و طراحی
۰/۳۳۲	۱۵/۱۷۶	۷/۴۲۲	۷/۷۵۴	پیش بینی صحیح رفتار و شرایط زمین (B2)	
- ۰/۳	۱۵/۳۵۷	۷/۸۲۹	۷/۵۲۹	سطح محاسبات طراحی و فرضیات طراحی (B3)	
- ۰/۱۶۲	۱۵/۶۱۷	۷/۸۹	۷/۷۲۸	انتخاب صحیح روش اجرایی و تحکیمات (B4)	
- ۱/۰۴۹	۱۴/۴۱۹	۷/۷۳۴	۶/۶۸۵	به کارگیری بازطراحی و بازنگری حین اجرا (B5)	
۰/۷۲۱	۱۵/۵۳۱	۷/۴۰۵	۸/۱۲۶	مشخصات فنی و اجرایی سیستم نگهداری و تحکیمات (C1)	سیستم نگهداری، تحکیمات کنترل زمین
- ۰/۰۷۷	۱۴/۷۸۷	۷/۴۳۲	۷/۳۵۵	مشخصات فنی سیستم بهسازی زمین (C2)	
- ۰/۱۱۵	۱۴/۵۰۵	۷/۳۱	۷/۱۹۵	قابلیت تغییر سیستم نگهداری با توجه به شرایط مختلف (C3)	
۰/۲۵۲	۱۵/۰۵۸	۷/۴۰۳	۷/۶۵۵	زمان و فاصله نصب سیستم نگهداری از سینه کار (C4)	
- ۰/۱	۱۳/۹۹	۷/۰۴۵	۶/۹۴۵	کنترل اضافه حفاری و پر کردن فضای خالی پشت تحکیمات (C5)	
- ۰/۲۶۷	۱۳/۵۱۸	۶/۸۹۳	۶/۶۲۵	نوع سیستم زهکشی و درستی عملکرد آن (C6)	
- ۰/۴۱۴	۱۴/۱۷۲	۷/۲۹۳	۶/۸۷۹	نحوه واکنش به شرایط پیش بینی نشده (C7)	
۱/۱۸۷	۱۸/۸۹۷	۸/۸۵۵	۱۰/۰۴۲	وضعیت توپوگرافی و سطح الارض ساختگاه (D1)	شرایط زمین شناسی و جغرافیایی ساختگاه
- ۰/۴۹۳	۱۶/۱۴۵	۸/۳۱۹	۷/۸۲۶	نوع ساختگاه (شهری، راه و ...) و معارضین (D2)	
۱/۳۱۲	۱۴/۶۲۴	۶/۶۵۶	۷/۹۶۸	وضعیت آب و هوایی (D3)	
- ۱/۱۰۵	۱۷/۳۰۹	۹/۲۰۷	۸/۱۰۲	سطح و وضعیت آب زیرزمینی (D4)	
- ۰/۴۲۱	۱۸/۳۶۳	۹/۳۹۲	۸/۹۷۱	عوارض زمین شناسی (گسل، چین خوردگی، کارست و ...) (D5)	
- ۰/۴۸	۱۶/۲۸۱	۸/۳۸۱	۷/۹	جهت داری ناپیوستگی ها نسبت به محور تونل (D6)	
۰	۱۹/۰۳۴	۹/۵۱۷	۹/۵۱۷	سطح حساسیت و اهمیت پروژه (E1)	عوامل عمومی، اجرایی و قراردادی
۰/۱۴۹	۱۸/۷۳۹	۹/۲۹۵	۹/۴۴۴	انعطاف قرارداد در خصوص مسائل مالی، فنی و اجرایی (E2)	
- ۰/۲۱۱	۲۰/۴۲۷	۱۰/۳۱۹	۱۰/۱۰۸	تأمین مالی و هزینه های اجرایی (E3)	
- ۰/۶۰۵	۱۹/۹۲۹	۱۰/۲۶۷	۹/۶۶۲	رعایت مشخصات کیفی و فنی (E4)	
- ۰/۹۸۴	۲۰/۶۴۱	۱۰/۸۱۲	۹/۸۲۸	سطح توانمندی، مهارت و تجهیزات پیمانکار (E5)	
۰/۱۸۸	۲۱/۳۸	۱۰/۵۹۶	۱۰/۷۸۴	روش حفاری تونل (TBM, SEM, NATM, D&B) (E6)	
۰/۷۰۸	۱۸/۲۱	۸/۷۵۱	۹/۴۵۹	شکل هندسی، شیب، ابعاد و سطح مقطع تونل (E7)	
- ۰/۴۰۸	۲۵/۳۷	۱۲/۸۸۹	۱۲/۴۸۱	وجود سینه کار مختلط (F1)	شرایط خاص (تکیگی ها)
۰/۸۱۶	۲۷/۲۲	۱۳/۲۰۲	۱۴/۰۱۸	زون های شدیداً خرد شده و گسله (F2)	
- ۰/۶۳۲	۲۵/۸۲۶	۱۳/۲۲۹	۱۲/۵۹۷	گل ولای آبدار، لنزهای شن و ماسه (F3)	
- ۰/۸۶۲	۲۵/۶۶۹	۱۳/۲۶۶	۱۲/۴۰۳	وجود سازه های مجاور در مجاورت و نزدیکی تونل (F4)	
۱/۲۵	۲۶/۵۱	۱۲/۶۳	۱۳/۸۸	روبار کم یا بسیار زیاد (F5)	
- ۰/۱۶۵	۲۷/۷۱۶	۱۳/۹۴	۱۳/۷۷۶	زون پرتالی، تقاطع تونل و اینترسکشن (F6)	

جدول ۷-۵ نمودار بردارهای تأثیر گذاشته و تأثیر گرفته و نمودار علی تمام پارامترهای مؤثر بر پایداری تونل.

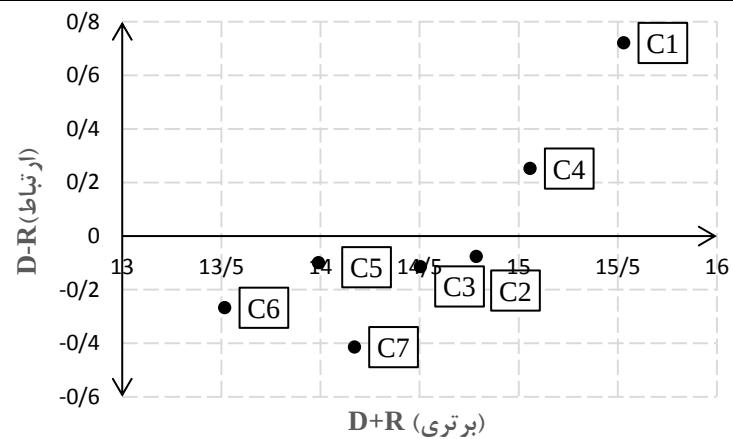
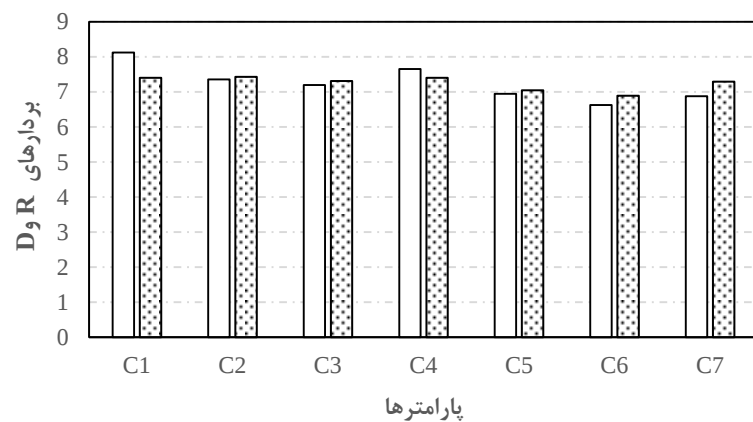


عوامل ژئومکانیکی

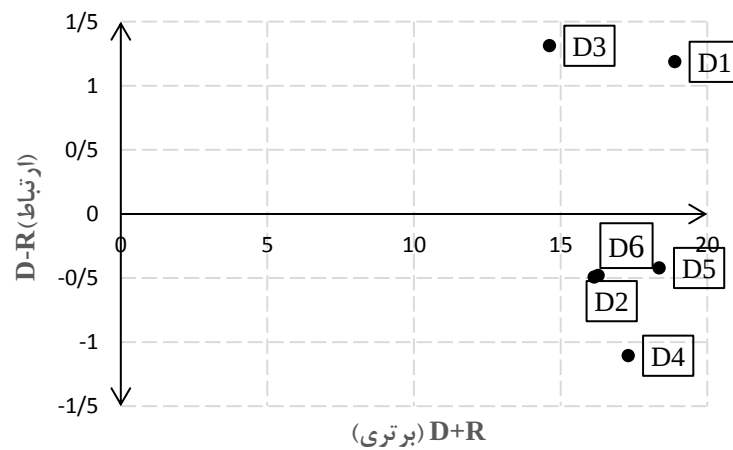
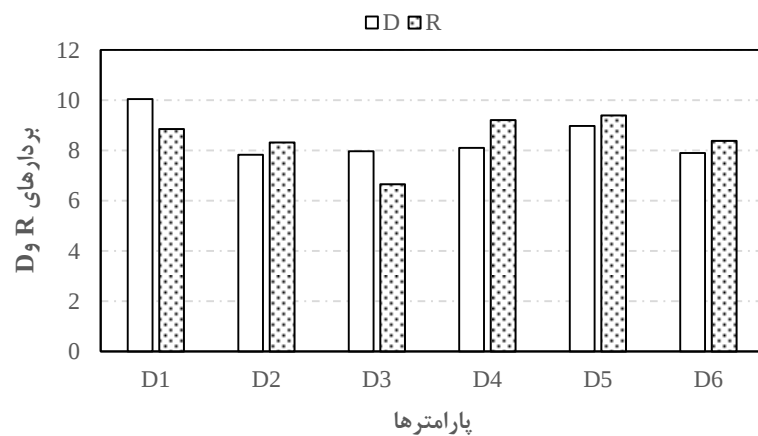


مطالعات و طراحی

ادامه جدول ۵-۷

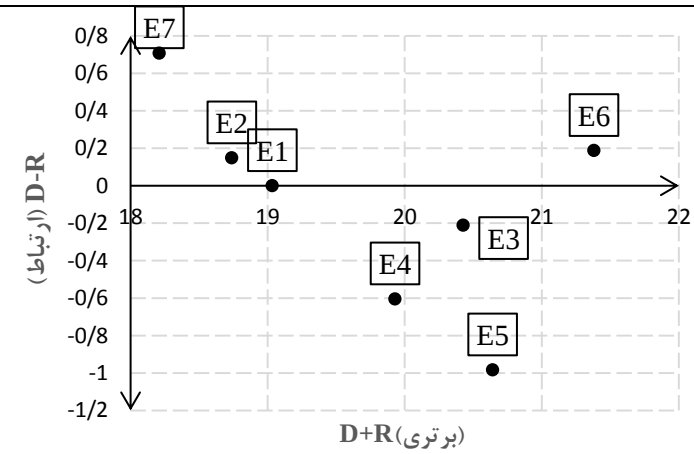
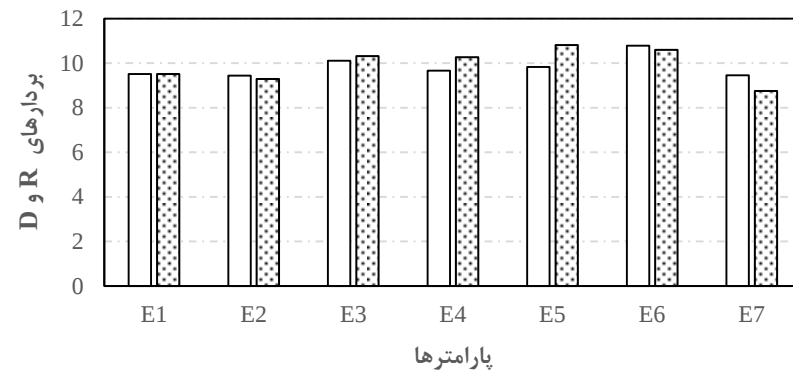


نمونه: لکتری ۶، تاشکوتی ۵، اهری، لمیست

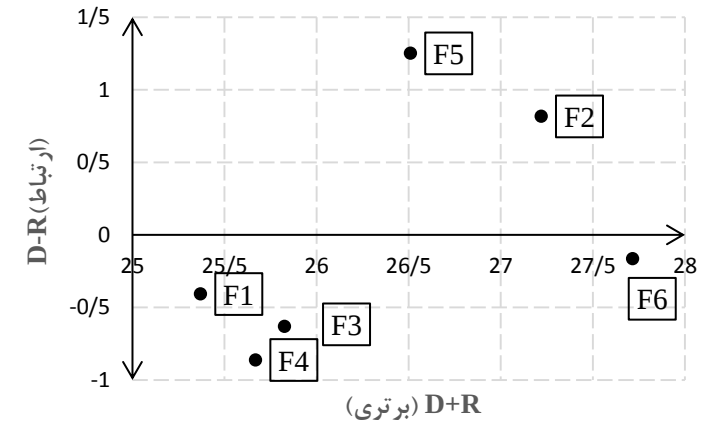
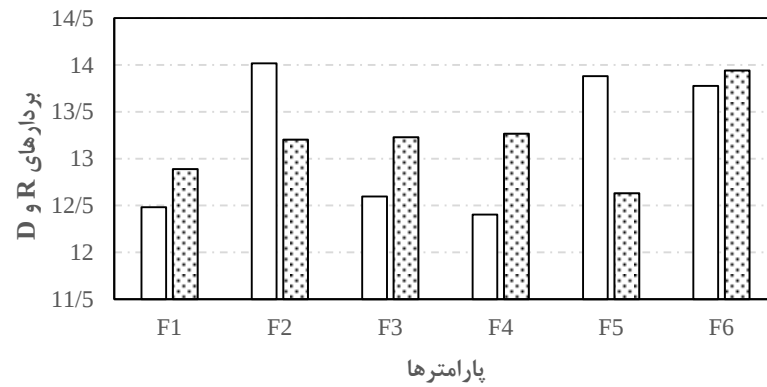


شرایط زمین شناسی و جغرافیایی ساختگاه

ادامه جدول ۵-۷



عوامل عمومی، اجرایی و قراردادی

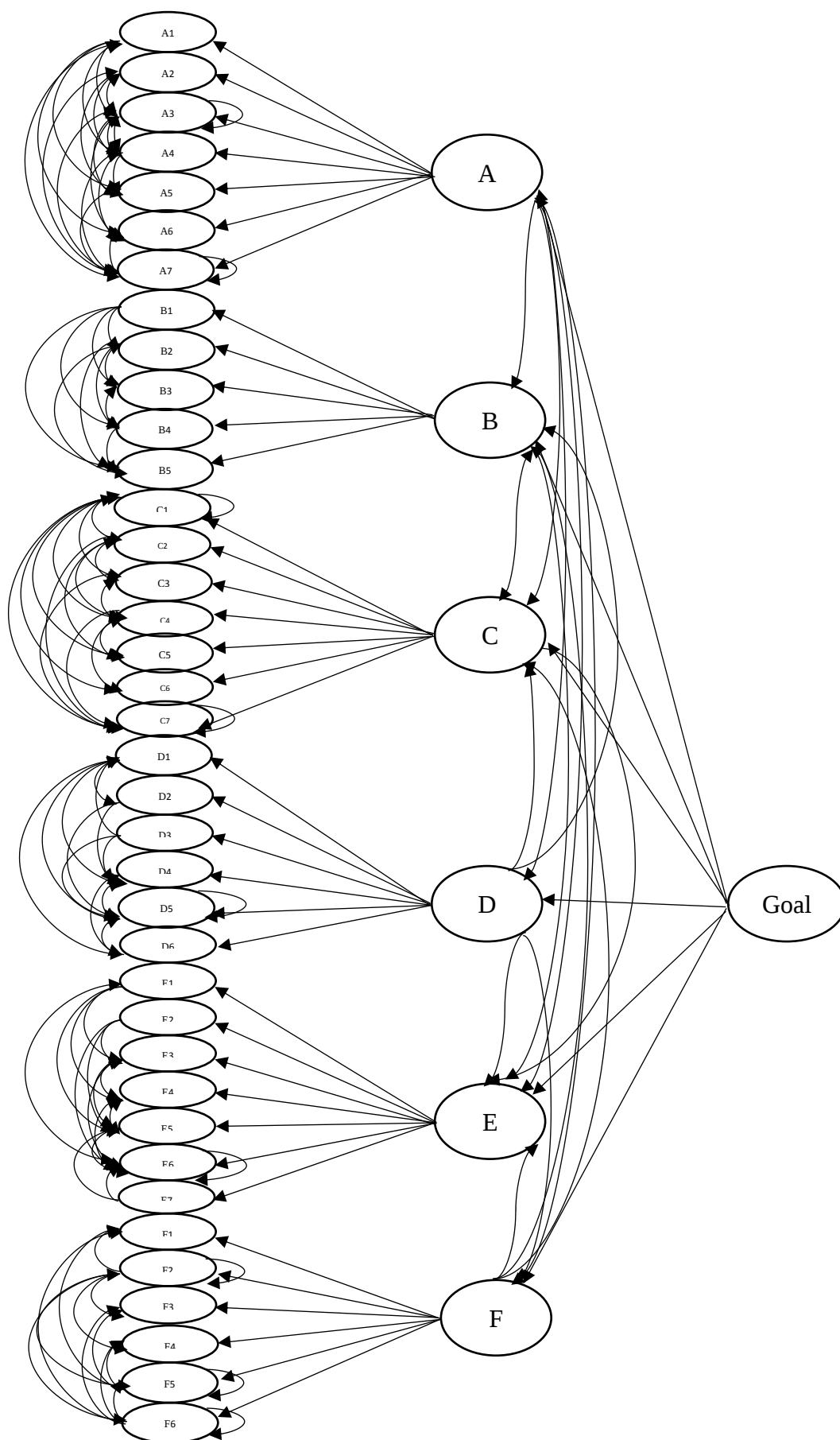


شرایط خاص (تکنیکی ها)

در بخش نهایی استفاده از این روش، نقشه روابط شبکه‌ای پارامترهای انتخاب‌شده به‌منظور نمایش ساختار میان آن‌ها در شکل ۵-۵ ترسیم‌شده است. برای این منظور حد آستانه ارتباط کلی آن‌ها بر اساس مقدار میانگین ارتباط کلی دسته پارامترها برابر با ۱/۲۱۳ در نظر گرفته‌شده است. این بدان معنا است که یال‌های جهت‌دار این شبکه دارای مجموع تأثیرهای مستقیم و غیرمستقیم بیش از ۱/۲۱۳ از رأس مبدأ به رأس مقصد است. به عبارت دیگر می‌توان از روابط جزئی؛ تمامی روابط با مقادیر کوچک‌تر از حد آستانه در ماتریس مورد نظر صرف‌نظر کرده و مقادیر آن‌ها را صفر نمود و آن رابطه علی را در نظر نگرفت و شبکه روابط قابل اعتنا را ترسیم نمود.

در بین پارامترها نیز عوامل ژئومکانیکی، مطالعات و طراحی، سیستم نگهداری، تحکیمات و کنترل زمین، شرایط زمین‌شناسی و جغرافیایی ساختگاه، عوامل عمومی، اجرایی و قراردادی و شرایط خاص (تکنیکی‌ها) به ترتیب دارای مقادیر حد آستانه ۱/۱۹۶، ۱/۵۲۶، ۱/۰۳۶، ۱/۴۱۱، ۱/۴۲۰، ۲/۱۹۹ هستند. بدین صورت که یال‌های جهت‌دار این شبکه‌ها دارای مجموع تأثیرهای مستقیم و غیرمستقیم بیش از مقادیر آستانه‌ای مربوط به هر کدام از عوامل. از رأس مبدأ به رأس مقصد است.

شکل ۵-۵ نقشه روابط شبکه‌ای پارامترهای ذاتی مؤثر بر پایداری تونل را به‌منظور تبیین ساختار داخلی آن‌ها نمایش می‌دهد. به‌منظور ایجاد شبکه مسئله باید این نکته را در نظر گرفت که اگر فقط دو پارامتر از یک خوشه با یکدیگر در ارتباط باشند، باید برای خوشه موردنظر وابستگی درونی ترسیم کرد. ملاحظه می‌شود که تمامی خوشه‌ها دارای وابستگی درونی هستند. همچنین ارتباط میان هر دو خوشه در این ساختار به‌صورت بازخور است. این ساختار با در نظر گرفتن بازخور روابط به‌صورت متقابل، ساختاردهی به عوامل پیچیده در قالب گروه‌های علت و معلولی دارای بیشترین پیچیدگی ممکن برای یک مسئله است.



شکل ۵-۵ نقشه روابط شبکه‌ای پارامترهای مؤثر بر پایداری تونل.

بر اساس شکل شکل ۵-۵ نتایج زیر قابل دریافت است:

- ✓ بیشترین تأثیر گذاشته شده (بیشترین یال خروجی) متعلق به عوامل ژئومکانیکی است؛ یعنی تغییرات عوامل ژئومکانیکی منجر به تغییرات در تعداد بیشتری پارامتر خواهد شد.
- ✓ کمترین تأثیر گذاشته شده نیز متعلق به عوامل عمومی، اجرایی و قراردادی است؛ یعنی تغییرات این پارامتر کمتر باعث ایجاد تغییرات در دیگر پارامترها خواهد شد.
- ✓ بیشترین تأثیر دریافت شده (بیشترین یال ورودی) متعلق به مطالعات و طراحی و سیستم نگهداری، تحکیمات و کنترل زمین است. این یعنی تغییرات تعداد بیشتری از پارامترها منجر به تغییرات در این دو پارامتر خواهد شد. کمترین تأثیر گرفته شده مربوط به شرایط زمین‌شناسی و جغرافیایی ساختگاه است.
- ✓ در عوامل ژئومکانیکی بیشترین تأثیرگذاری مربوط به زون‌های ضعیف و کمترین تأثیرگذاری مربوط به وجود پتانسیل آماس است. بیشترین تأثیرپذیری مربوط به کیفیت توده سنگ و کمترین تأثیرپذیری مربوط به آنیزوتروپی توده سنگ است.
- ✓ در مطالعات و طراحی بیشترین تأثیرگذاری مربوط به سطح مطالعات اکتشافی پیش از ساخت و کمترین تأثیرگذاری مربوط به به کارگیری بازطراحی و بازنگری حین اجرا است، یعنی تغییرات این پارامتر کمتر باعث ایجاد تغییرات در دیگر پارامترها خواهد شد. بیشترین تأثیرپذیری مربوط به انتخاب صحیح روش اجرایی و تحکیمات است.
- ✓ در سیستم نگهداری، تحکیمات و کنترل زمین بیشترین تأثیرگذاری مربوط به مشخصات فنی اجرایی نگهداری، تحکیمات و کنترل زمین و کمترین تأثیرگذاری مربوط به نوع سیستم زهکشی و درستی عملکرد آن است. بیشترین تأثیرپذیری مربوط به مشخصات فنی اجرایی سیستم بهسازی زمین و کمترین تأثیرپذیری نیز مربوط به نوع سیستم زهکشی و درستی عملکرد آن است؛ یعنی تغییرات این پارامتر کمتر باعث ایجاد تغییرات در دیگر پارامترها و تغییرات پارامترهای کمی موجب تغییر در نوع سیستم زهکشی و درستی عملکرد آن خواهد شد.
- ✓ در شرایط زمین‌شناسی و جغرافیایی ساختگاه بیشترین تأثیر گذاشته شده متعلق به وضعیت توپوگرافی و سطح الارض ساختگاه است؛ یعنی تغییرات وضعیت توپوگرافی و سطح الارض ساختگاه منجر به تغییرات در تعداد بیشتری پارامتر خواهد شد. بیشترین تأثیرپذیری متعلق به عوارض زمین‌شناسی (گسل، چین‌خوردگی، کارست و...) است؛ یعنی تغییرات تعداد بیشتری از پارامترها منجر به تغییرات در این پارامتر

خواهد شد. کم‌ترین تأثیرپذیری مربوط به وضعیت آب‌وهوایی است؛ از آنجایی که هیچ یالی به این رأس وارد نشده یعنی تغییرات هیچ پارامتری موجب ایجاد تغییرات در وضعیت آب‌وهوایی نخواهد شد.

✓ در عوامل عمومی، اجرایی و قراردادی بیش‌ترین تأثیرگذاری متعلق به روش حفاری تونل (TBM, SEM, NATM, D&B) و کمترین تأثیرگذاری مربوط به انعطاف قرارداد در خصوص مسائل مالی، فنی، اجرایی است. بیش‌ترین تأثیرپذیری متعلق به سطح توانمندی و مهارت و تجهیزات پیمانکار و کمترین تأثیرپذیری مربوط به شکل هندسی، شیب، ابعاد و سطح مقطع تونل است؛ از آنجایی که هیچ یالی به این رأس وارد نشده یعنی تغییرات هیچ پارامتری موجب ایجاد تغییرات در شکل هندسی، شیب، ابعاد و سطح مقطع تونل نخواهد شد.

✓ در شرایط خاص (تکینگی‌ها) بیش‌ترین تأثیرگذاری متعلق به زون‌های شدیداً خورد شده و گسله و کمترین تأثیرگذاری مربوط به سینه‌کار مختلط است. بیش‌ترین تأثیرپذیری متعلق به زون پرتالی، تقاطع تونل‌ها و اینترسکشن و کمترین تأثیرپذیری متعلق به روباره کم یا بسیار زیاد است.

۵-۶ پیاده‌سازی روش ANP در پایداری تونل

در این قسمت اوزان پارامترهای تأثیرگذار بر پایداری تونل به‌منظور ارائه شاخص پایداری به‌وسیله روش ANP محاسبه شده است. اولین مرحله برای تحقق این امر تبیین ساختار مسئله و تشکیل شبکه آن است. در قسمت قبل اشاره شد که یکی از اهداف استفاده از روش DEMATEL تعیین ساختار و شبکه مسئله برای روش تحلیل شبکه-ای است. بر اساس این ساختار سوپرماتریس مسئله به‌صورت شکل ۵-۶ تشکیل می‌شود:

$$W = \begin{matrix} & \begin{matrix} \text{پارامترها} \\ \text{دسته پارامترها} \\ \text{پایداری تونل (هدف)} \end{matrix} \\ \begin{matrix} \text{پارامترها} \\ \text{دسته پارامترها} \\ \text{پایداری تونل (هدف)} \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ W_{21} & W_{22} & 0 \\ 0 & W_{32} & W_{33} \end{bmatrix} \end{matrix}$$

شکل ۵-۶ سوپرماتریس روش تحلیل شبکه.

پس از تعیین ساختار مسئله باید مقایسه‌های زوجی بر مبنای معیارهای کنترلی صورت بگیرد. در این مسئله مقایسه‌های زوجی شامل موارد زیر است:

✓ مقایسه زوجی خوشه‌ها (دسته پارامترها) نسبت به پایداری تونل (W_{21})

✓ مقایسه زوجی وابستگی درونی خوشه‌ها (W_{22})

✓ مقایسه زوجی نسبت به هریک از خوشه‌ها (W_{32})

✓ مقایسه زوجی وابستگی درونی پارامترها (W_{33})

مقایسه‌های زوجی وابستگی‌های درونی از طریق روش DEMATEL در مرحله قبل انجام شد. بر این اساس ماتریس روابط کلی دسته پارامترها بیانگر ماتریس W_{22} و ماتریس روابط کلی پارامترها متناظر با ماتریس W_{33} است که در سوپر ماتریس غیر موزون جایگذاری می‌شوند؛ بنابراین در این قسمت نیاز است تا مقایسه‌های زوجی خوشه‌ها نسبت به هدف و پارامترها نسبت به خوشه‌ها، ماتریس‌های W_{21} و W_{32} محاسبه شوند. جداول موجود در پیوست ۴ نمونه‌هایی از فرم‌های نظرسنجی ارسال شده در روش ANP را نشان می‌دهد. در این فرم‌ها از متخصصان خواسته شده بود بسته به نظر خویش، اهمیت هر یک از عوامل را نسبت به یکدیگر مشخص کنند. پس از دریافت نظرات متخصصین در رابطه با مقایسه زوجی خوشه‌ها، ماتریس مقایسه زوجی متعلق به هر یک از آن‌ها در جدول ۸-۵ تشکیل شده است.

جدول ۸-۵ ماتریس مقایسه زوجی دسته پارامترها نسبت به هدف.

هدف	A	B	C	D	E	F
A	۱	۱/۴۵۴	۴/۹۵	۱/۱۴۹	۲/۱۶۹	۱/۲۸۵
B	۰/۶۸۸	۱	۲/۶۰۵	۱/۴۳۱	۳/۶۹۵	۱/۵۸
C	۰/۲۴۴	۰/۳۸۴	۱	۰/۷۲۵	۱/۸۴۹	۰/۸۰۳
D	۰/۸۷۱	۰/۶۹۹	۱/۳۸	۱	۲/۲۲۵	۱/۴۳۱
E	۰/۴۶۱	۰/۲۷۱	۰/۵۴۱	۰/۴۴۹	۱	۰/۶۰۹
F	۰/۷۷۸	۰/۹۴۵	۱/۲۴۶	۰/۶۹۹	۱/۶۴۲	۱
نرخ ناسازگاری			۰/۰۲۹			

پس از تعیین ماتریس مقایسه زوجی باید نرخ ناسازگاری آن بررسی شود، نرخ ناسازگاری جدول ۵-۶ حاکی از مناسب بودن آن است. پس از انجام محاسبات مربوطه، بردار وزن اولیه و درنهایت بردار وزن نهایی دسته پارامترها به صورت جدول ۹-۵ به دست آمده است.

جدول ۹-۵ وزن نهایی دسته پارامترها در روش ANP.

خوشه	وزن نهایی
عوامل ژئومکانیکی (A)	۰/۲۵۸
مطالعات و طراحی (B)	۰/۲۲۵
سیستم نگهداری، تحکیمات و کنترل زمین (C)	۰/۱۰۶
شرایط زمین‌شناسی و جغرافیایی ساختگاه (D)	۰/۱۷۸
عوامل عمومی، اجرایی و قراردادی (E)	۰/۰۷۹
شرایط خاص (تکینگی‌ها) (F)	۰/۱۵۴

بر این اساس ماتریس W_{21} برای قرارگیری در سوپر ماتریس به صورت زیر است:

$$W_{21} = \begin{bmatrix} 0.258 \\ 0.225 \\ 0.106 \\ 0.178 \\ 0.079 \\ 0.154 \end{bmatrix} \quad (۱-۵)$$

ماتریس مقایسات زوجی وابستگی درونی دسته پارامتر عوامل ژئومکانیکی در جدول ۱۰-۵ و وزن روابط درونی آن در جدول ۱۱-۵ حاصل شده است.

جدول ۱۰-۵ ماتریس مقایسه زوجی دسته پارامترها نسبت به خوشه عوامل ژئومکانیکی.

F	E	D	C	B	A
۱/۴۲۸	۱/۵۵	۰/۷۹۱	۰/۵۲۱	۱	B
۲/۷۴۱	۲/۹۷۴	۱/۵۱۹	۱	۱/۹۱۹	C
۱/۸۰۵	۱/۹۵۸	۱	۰/۶۵۸	۱/۳۶۳	D
۰/۹۲۲	۱	۰/۵۱۱	۰/۳۳۶	۰/۶۴۵	E
۱	۱/۰۸۵	۰/۵۵۴	۰/۳۶۵	۰/۷	F
نرخ ناسازگاری					۰

جدول ۱۱-۵ وزن روابط درونی دسته پارامترها نسبت به خوشه عوامل ژئومکانیکی.

خوشه	وزن نهایی
مطالعات و طراحی (B)	۰/۱۸۱
سیستم نگهداری، تحکیمات و کنترل زمین (C)	۰/۳۴۷
شرایط زمین‌شناسی و جغرافیایی ساختگاه (D)	۰/۲۲۹
عوامل عمومی، اجرایی و قراردادی (E)	۰/۱۱۷
شرایط خاص (تکینگی‌ها) (F)	۰/۱۲۷

ماتریس مقایسات زوجی وابستگی درونی دسته پارامترها نسبت به خوشه سیستم نگهداری، تحکیمات و کنترل زمین در جدول ۵-۱۲ حاصل شده است. دو خوشه «مطالعات و طراحی» و «عوامل عمومی، اجرایی و قراردادی» فاقد ماتریس مقایسه زوجی روابط درونی در دسته پارامترها هستند.

جدول ۵-۱۲ ماتریس مقایسه زوجی دسته پارامترها نسبت به خوشه سیستم نگهداری، تحکیمات و کنترل زمین.

B	E	C
۱/۴۱۳	۱	B
۱	۰/۷۰۸	E
۰	نرخ ناسازگاری	

جدول ۵-۱۳ وزن روابط درونی دسته پارامترها نسبت به خوشه سیستم نگهداری، تحکیمات و کنترل زمین.

خوشه	وزن نهایی
مطالعات و طراحی (B)	۰/۵۸۶
عوامل عمومی، اجرایی و قراردادی (E)	۰/۴۱۴

ماتریس مقایسات زوجی وابستگی درونی دسته پارامترها نسبت به خوشه شرایط زمین‌شناسی و جغرافیایی ساختگاه در جدول ۵-۱۴ حاصل شده است.

جدول ۵-۱۴ ماتریس مقایسه زوجی دسته پارامترها نسبت به خوشه شرایط زمین‌شناسی و جغرافیایی ساختگاه.

F	E	C	B	A	D
۲/۸۲۵	۴/۳۱۷	۰/۸۲۲	۱/۷۱۹	۱	A
۱/۷۸۳	۳/۷۶۴	۰/۹۹۶	۱	۰/۵۸۲	B
۳/۳۹۳	۳/۲۴۵	۱	۱/۰۰۴	۱/۲۱۷	C
۰/۷۵۸	۱	۰/۳۰۸	۰/۲۶۶	۰/۲۳۲	E
۱	۱/۳۲	۰/۲۹۵	۰/۵۶۱	۰/۳۵۴	F
۰/۰۱۵			نرخ ناسازگاری		

جدول ۵-۱۵ وزن روابط درونی دسته پارامترها نسبت به خوشه شرایط زمین‌شناسی و جغرافیایی ساختگاه.

خوشه	وزن نهایی
مطالعات و طراحی (B)	۰/۳۰۴
سیستم نگهداری، تحکیمات و کنترل زمین (C)	۰/۲۲۸
شرایط زمین‌شناسی و جغرافیایی ساختگاه (D)	۰/۲۹۲
عوامل عمومی، اجرایی و قراردادی (E)	۰/۰۷۳
شرایط خاص (تکنیکی‌ها) (F)	۰/۱۰۳

ماتریس مقایسات زوجی وابستگی درونی دسته پارامترها نسبت به خوشه شرایط خاص (تکینگی‌ها) در جدول ۱۳-۵ حاصل شده است.

جدول ۱۶-۵ ماتریس مقایسه زوجی دسته پارامترها نسبت به خوشه شرایط خاص (تکینگی‌ها).

E	C	B	F
۲/۴۰۲	۰/۶۰۸	۱	B
۳/۹۳۶	۱	۱/۶۴۴	C
۱	۰/۲۵۴	۰/۴۱۶	E
۰		نرخ ناسازگاری	

جدول ۱۷-۵ وزن روابط درونی دسته پارامترها نسبت به خوشه شرایط خاص (تکینگی‌ها).

وزن نهایی	خوشه
۰/۳۲۷	مطالعات و طراحی (B)
۰/۵۳۷	سیستم نگهداری، تحکیمات و کنترل زمین (C)
۰/۱۳۶	عوامل عمومی، اجرایی و قراردادی (E)

بر اساس وزن روابط درونی دسته پارامترها نسبت به خوشه‌های موردنظر، ماتریس W22 برای قرارگیری در سوپرماتریس به صورت زیر است:

$$W_{22} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0/304 & 0 & 0 \\ 0/181 & 0 & 0/586 & 0/228 & 0 & 0/327 \\ 0/347 & 0 & 0 & 0/292 & 0 & 0/537 \\ 0/229 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0/117 & 0 & 0/414 & 0/073 & 0 & 0/136 \\ 0/127 & 0 & 0 & 0/103 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2-5)$$

نتیجه مقایسه‌های زوجی هر دسته با معیار کنترلی همان خوشه در نهایت منجر به شکل‌گیری ماتریس W32 می‌شود که در آن در هر ستون وزن نهایی به دست آمده قرار می‌گیرد و دیگر درایه‌های ستون برابر با صفر است. از این رو در این قسمت مقایسه زوجی مجزا صورت گرفته است. ماتریس مقایسه زوجی پارامترهای خوشه عوامل ژئومکانیکی به صورت جدول ۱۸-۵ حاصل شده است.

جدول ۵-۱۸ ماتریس مقایسه زوجی پارامترهای عوامل ژئومکانیکی.

A7	A6	A5	A4	A3	A2	A1	A
۰/۲۵۸	۲/۵۰۲	۲/۴۷۷	۳/۵۹۱	۳/۲۴۵	۲/۴۹۱	۱	A1
۰/۶۲۵	۲/۹۸۵	۱/۸۸۸	۰/۷۳۸	۰/۹۱۶	۱	۰/۴۰۱	A2
۰/۵۷	۳/۶۴۱	۲/۷۸۷	۱/۵۷۲	۱	۱/۰۹۲	۰/۳۰۸	A3
۰/۴۲۵	۳/۸۰۷	۳/۸۰۷	۱	۰/۶۳۶	۱/۳۵۶	۰/۲۷۸	A4
۰/۳۳۱	۲/۷۲۲	۱	۰/۲۶۳	۰/۳۵۹	۰/۵۳	۰/۴۰۴	A5
۰/۲۶۷	۱	۰/۳۶۷	۰/۲۶۳	۰/۲۷۵	۰/۳۳۵	۰/۴	A6
۱	۳/۷۴۲	۳/۰۲	۲/۳۵۲	۱/۷۵۵	۱/۶	۳/۸۷۸	A7
۰/۰۸۹				نرخ ناسازگاری			

بررسی نرخ ناسازگاری ماتریس مقایسه زوجی جدول ۵-۱۸ نشان‌دهنده وجود سازگاری در ماتریس است. مقادیر وزن نرمال و ایده‌آل این پارامترها در جدول ۵-۱۹ درج شده است. ماتریس‌های مقایسه زوجی و بردارهای وزن سایر پارامترها در پیوست ۵ درج شده است.

جدول ۵-۱۹ بردار وزن پارامترهای عوامل ژئومکانیکی.

وزن نرمال	پارامترها
۰/۲۲۶	تنش‌های برجا (A1)
۰/۱۱۱	آنیزوتروپی توده‌سنگ (A2)
۰/۱۳۴	کیفیت توده‌سنگ (A3)
۰/۱۲۶	نوع سنگ و مشخصات سنگ بکر (A4)
۰/۰۶۷	وجود پتانسیل لهیدگی (A5)
۰/۰۴۵	وجود پتانسیل آماس (A6)
۰/۲۹۱	زون‌های ضعیف (A7)

بر اساس بردارهای وزن این ۶ ماتریس مقایسه زوجی، ماتریس W_{32} به منظور قرارگیری در سوپرماتریس به رابطه (۵-۳) حاصل می‌شود. نتیجه مقایسه‌های زوجی روابط درونی پارامترهای هر دسته در نهایت منجر به شکل‌گیری ماتریس W_{33} می‌شود که مربوط به مقادیر وزنی روابط درونی تمامی پارامترها است. ماتریس مقایسه زوجی روابط درونی پارامترهای خوشه عوامل ژئومکانیکی نسبت به تنش‌های برجا به صورت جدول ۵-۲۰ حاصل شده است.

جدول ۲۰-۵ ماتریس مقایسه زوجی روابط درونی پارامترهای عوامل ژئومکانیکی نسبت به تنش‌های برجا.

A7	A6	A5	A4	A3	A1
۱/۲۰۱	۰/۸۹۴	۱/۳۶۹	۰/۷۵۸	۱	A3
۱/۶۴۴	۰/۷۴	۱/۲۷۲	۱	۱/۳۲	A4
۱/۸۸۸	۱/۳۲	۱	۰/۷۸۶	۰/۷۳۱	A5
۱/۹۲۸	۱	۰/۷۵۸	۱/۳۵۱	۱/۱۱۸	A6
۱	۰/۵۱۹	۰/۵۳	۰/۶۰۸	۰/۸۳۳	A7
۰/۰۲۲		نرخ ناسازگاری			

بررسی نرخ ناسازگاری ماتریس مقایسه زوجی جدول ۲۰-۵ نشان‌دهنده وجود سازگاری در ماتریس است. مقادیر وزنی این پارامترها در جدول ۲۱-۵ ارائه شده است؛ و بدین ترتیب ماتریس‌ها و بردارهای وزن روابط درونی تمام پارامترهای ژئومکانیکی در پیوست ۲-۵ درج شده است.

جدول ۲۱-۵ بردار وزن روابط درونی پارامترهای عوامل ژئومکانیکی نسبت به تنش‌های برجا.

وزن نهایی	پارامترها
۰/۲۰۱	کیفیت توده سنگ (A3)
۰/۲۲۵	نوع سنگ و مشخصات سنگ بکر (A4)
۰/۲۱۳	وجود پتانسیل لهیدگی (A5)
۰/۲۳	وجود پتانسیل آماس (A6)
۰/۱۳۱	زون‌های ضعیف (A7)

$W_{32} =$

•/۲۲۶	•	•	•	•	•
•/۱۱۱	•	•	•	•	•
•/۱۳۴	•	•	•	•	•
•/۱۲۶	•	•	•	•	•
•/۰۶۷	•	•	•	•	•
•/۰۴۵	•	•	•	•	•
•/۲۹۱	•	•	•	•	•
•	•/۱۵۷	•	•	•	•
•	•/۲۲۴	•	•	•	•
•	•/۲۰۴	•	•	•	•
•	•/۱۰۱	•	•	•	•
•	•/۳۱۳	•	•	•	•
•	•	•/۲۲۵	•	•	•
•	•	•/۲۹۳	•	•	•
•	•	•/۱۲۲	•	•	•
•	•	•/۱۳۱	•	•	•
•	•	•/۰۹۵	•	•	•
•	•	•/۰۸۲	•	•	•
•	•	•/۰۵۲	•	•	•
•	•	•	•/۲۳۷	•	•
•	•	•	•/۱۶۹	•	•
•	•	•	•/۱۹۷	•	•
•	•	•	•/۲۰۵	•	•
•	•	•	•/۰۹۶	•	•
•	•	•	•/۰۹۷	•	•
•	•	•	•	•/۱۹۸	•
•	•	•	•	•/۱۸۹	•
•	•	•	•	•/۱۶۱	•
•	•	•	•	•/۱۰۶	•
•	•	•	•	•/۱۳۹	•
•	•	•	•	•/۰۹۲	•
•	•	•	•	•/۱۱۵	•
•	•	•	•	•	•/۲۴۶
•	•	•	•	•	•/۲۰۷
•	•	•	•	•	•/۱۶۳
•	•	•	•	•	•/۱۰۵
•	•	•	•	•	•/۱۵۸
•	•	•	•	•	•/۱۲۱

(۳-۵)

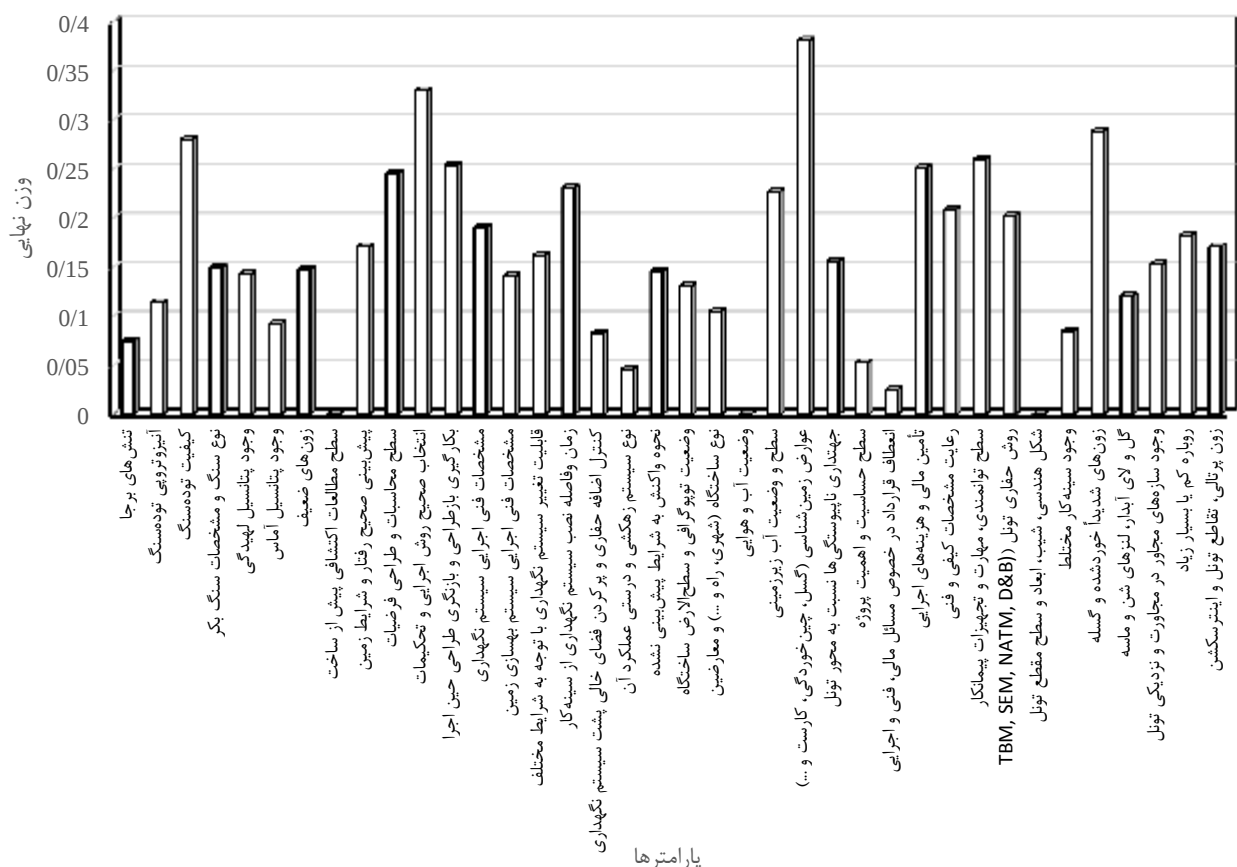
$$\begin{bmatrix}
 \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0/114 & 0/074 & 0 & 0 & 0/149 \\ 0 & 0 & 0/256 & 0 & 0 & 0 & 0/19 \\ 0/201 & 0/251 & 0 & 0/298 & 0 & 0 & 0/214 \\ 0/225 & 0/167 & 0/26 & 0 & 0 & 0 & 0/154 \\ 0/213 & 0/305 & 0/109 & 0/161 & 0 & 0 & 0/145 \\ 0/23 & 0 & 0/113 & 0/14 & 0 & 0 & 0/148 \\ 0/131 & 0/277 & 0/148 & 0/327 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 0 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 0 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 0 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 0 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 0 \end{bmatrix} \\
 \begin{bmatrix} 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 0 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0/287 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0/165 & 0/312 & 0 & 0/309 & 0 \\ 0/253 & 0/303 & 0/716 & 0 & 0 \\ 0/296 & 0/385 & 0/284 & 0/358 & 0 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 0 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 0 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 0 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 0 \end{bmatrix} \\
 \begin{bmatrix} 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 0 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 0 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 0 & 0/249 & 0/306 & 0/253 & 0 & 0 & 0 \\ 0/198 & 0 & 0/156 & 0/173 & 0 & 0 & 0 \\ 0/165 & 0/238 & 0 & 0/225 & 0 & 0 & 0 \\ 0/206 & 0/13 & 0/321 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0/127 & 0/108 & 0 & 0/089 & 0 & 0 & 0 \\ 0/119 & 0 & 0 & 0/101 & 0 & 0 & 0 \\ 0/186 & 0/276 & 0/217 & 0/159 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 0 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 0 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 0 \end{bmatrix} \\
 \begin{bmatrix} 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 0 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 0 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 0 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0/161 & 0/246 & 0/197 & 0 \\ 0/135 & 0 & 0 & 0 & 0/228 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0/161 & 0 & 0 & 0 & 0/3 & 0/269 \\ 0/313 & 0/48 & 0/405 & 0/754 & 0 & 0/731 \\ 0/391 & 0/52 & 0/434 & 0 & 0/276 & 0 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 0 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 0 \end{bmatrix} \\
 \begin{bmatrix} 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 0 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 0 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 0 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 0 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0/26 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0/122 & 0 \\ 0/15 & 0/289 & 0 & 0/329 & 0/542 & 0/128 & 0 \\ 0/211 & 0 & 0/384 & 0 & 0/212 & 0/231 & 0 \\ 0/38 & 0/21 & 0/369 & 0/432 & 0 & 0/259 & 0/276 \\ 0/259 & 0/5 & 0/247 & 0/239 & 0/246 & 0 & 0/724 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 0 \end{bmatrix} \\
 \begin{bmatrix} 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 0 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 0 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 0 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 0 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 0 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 0 & 0/121 & 0 & 0 & 0/131 & 0/155 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0/341 & 0/265 \\ 0 & 0/185 & 0 & 0 & 0/236 & 0/146 \\ 0 & 0/186 & 0 & 0 & 0/291 & 0/273 \\ 0 & 0/207 & 0 & 0 & 0 & 0/162 \\ 0 & 0/302 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}
 \end{bmatrix}$$

شکل ۵-۷ ماتریس بردار وزنی روابط درونی پارامترها (W33).

ماتریس مقایسه زوجی روابط درونی سایر خوشه‌ها در پیوست ۵ حاصل شده است. بر اساس بردارهای وزن این ۲۹ ماتریس بردار وزنی روابط درونی، ماتریس W_{33} به منظور قرارگیری در سوپرماتریس به صورت شکل ۵-۷ حاصل می‌شود. براساس ماتریس‌های به دست آمده در مراحل قبل، سوپرماتریس غیر موزون به صورت جدول در پیوست ۵-۳ حاصل شده است. در مرحله بعد ماتریس غیر موزون به وسیله نرمال سازی ستونی به ماتریس موزون در پیوست ۵-۴ تبدیل شده است. در نهایت سوپرماتریس حدی به صورت پیوست ۵-۵ حاصل شده است. در نهایت وزن هریک از پارامترهای مؤثر در نظر گرفته شده در پایداری تونل بر اساس روش ترکیبی ANP-DEMATEL به صورت جدول ۵-۲۲ حاصل شده است.

جدول ۵-۲۲ وزن نهایی پارامترهای مؤثر بر پایداری تونل.

خوشه	پارامتر	وزن نهایی	وزن نهایی (%)
عوامل ژئومکانیکی	تنش‌های برجا (A1)	۰/۰۷۵	۱
	آنیزوتروپی توده‌سنگ (A2)	۰/۱۱۴	۲
	کیفیت توده‌سنگ (A3)	۰/۲۸	۵
	نوع سنگ و مشخصات سنگ بکر (A4)	۰/۱۵	۳
	وجود پتانسیل لهیدگی (A5)	۰/۱۴۳	۲
	وجود پتانسیل آماس (A6)	۰/۰۹۲	۲
	زون‌های ضعیف (A7)	۰/۱۴۸	۲
ملاحظات و طراحی	پیش‌بینی صحیح رفتار و شرایط زمین (B2)	۰/۱۷۱	۳
	سطح محاسبات و طراحی فرضیات (B3)	۰/۲۴۶	۴
	انتخاب صحیح روش اجرایی و تحکیمات (B4)	۰/۳۳	۶
	به‌کارگیری بازطراحی و بازنگری طراحی حین اجرا (B5)	۰/۲۵۴	۴
سیستم نگهداری، کنترل زمین، تحکیمات و	مشخصات فنی اجرایی سیستم نگهداری (C1)	۰/۱۹۱	۳
	مشخصات فنی اجرایی سیستم بهسازی زمین (C2)	۰/۱۴۱	۲
	قابلیت تغییر سیستم نگهداری با توجه به شرایط مختلف (C3)	۰/۱۶۲	۳
	زمان و فاصله نصب سیستم نگهداری از سینه‌کار (C4)	۰/۲۳۱	۴
	کنترل اضافه حفاری و پر کردن فضای خالی پشت سیستم نگهداری (C5)	۰/۰۸۳	۱
	نوع سیستم زهکشی و درستی عملکرد آن (C6)	۰/۰۴۶	۱
	نحوه واکنش به شرایط پیش‌بینی‌نشده (C7)	۰/۱۴۶	۲
شرایط زمین‌شناسی و جغرافیایی ساختگاه	وضعیت توپوگرافی و سطح الارض ساختگاه (D1)	۰/۱۳۱	۲
	نوع ساختگاه (شهری، راه و ...) و معارضین (D2)	۰/۱۰۵	۲
	سطح و وضعیت آب زیرزمینی (D4)	۰/۲۲۷	۴
	عوارض زمین‌شناسی (گسل، چین‌خوردگی، کارست و ...) (D5)	۰/۳۸۱	۶
	جهت‌داری ناپیوستگی‌ها نسبت به محور تونل (D6)	۰/۱۵۶	۳
	سطح حساسیت و اهمیت پروژه (E1)	۰/۰۵۳	۱
عوامل عمومی، اجرایی و قراردادی	انعطاف قرارداد در خصوص مسائل مالی، فنی و اجرایی (E2)	۰/۰۲۵	۱
	تأمین مالی و هزینه‌های اجرایی (E3)	۰/۲۵۱	۴
	رعایت مشخصات کیفی و فنی (E4)	۰/۲۰۹	۳
	سطح توانمندی، مهارت و تجهیزات پیمانکار (E5)	۰/۲۶	۴
	روش حفاری تونل (TBM, SEM, NATM, D&B) (E6)	۰/۲۰۲	۳
	وجود سینه‌کار مختلط (F1)	۰/۰۸۵	۱
شرایط خاص (تکنیکی‌ها)	زون‌های شدیداً خردشده و گسله (F2)	۰/۲۸۸	۵
	گل‌ولای آبدار، لنزهای شن و ماسه (F3)	۰/۱۲۱	۲
	وجود سازه‌های مجاور در مجاورت و نزدیکی تونل (F4)	۰/۱۵۳	۳
	روباره کم یا بسیار زیاد (F5)	۰/۱۸۲	۳
	زون پرتالی، تقاطع تونل و اینترسکشن (F6)	۰/۱۷۱	۳



شکل ۵-۸ نمودار ستونی وزن نهایی پارامترهای مؤثر بر پایداری تونل.

۵-۷ جمع بندی

در این فصل پارامترهای مؤثر بر پایداری در پروژه های تونل سازی و فضاهای زیرزمینی در ابتدا با استفاده از فرایند تحلیل سلسله مراتبی (AHP) بررسی و تعداد عناصر تقلیل یافت و برای ورودی روش ترکیبی ANP-DEMATEL به کار گرفته شد. داده های ورودی این روش ها نظرات کارشناسان و متخصصانی است که با استفاده از پرسش نامه های مخصوص به خود جمع آوری شده است. پس از ارزیابی و اجرای این روش، ماتریس اندرکنش و اثرگذاری و اثرپذیری هر یک از عوامل بر یکدیگر مشخص و درصد وزن اولیه و نهایی هر کدام از شاخص ها تعیین شد. در فصل بعدی به جمع بندی نهایی و نتیجه گیری پژوهش حاضر و ارائه پیشنهادهایی برای تحقیقات آتی پرداخته شده است.

فصل ۶: بررسی عملکرد نتایج با مطالعات واقعی

۱-۶ مقدمه

در این بخش با استفاده از نتایج حاصل از فصل‌های پیشین در رتبه‌بندی و ارزیابی پارامترهای مؤثر بر پایداری تونل، به‌منظور اعتبارسنجی، نتایج رتبه‌بندی با نتایج یک مطالعه جامع آماری از ریزش و ناپایداری تونل‌ها و فضاها، زیرزمینی طی سال‌های گذشته در جهان مقایسه شده است. پس از مطالعه علل ناپایداری‌های موجود در تونل‌ها و امتیازدهی آن‌ها در گروه‌های مختلف، نتایج آن با نتایج حاصل از روش ANP-DEMATEL مقایسه شده است. این پژوهش به وضوح نشان داد که کمک این روش، ناپایداری‌ها با توجه به پارامترهای گوناگون، بهتر ارزیابی و در نتیجه واقع‌بینانه‌تر رتبه‌دهی می‌شوند.

۲-۶ نتایج امتیازبندی مطالعات موردی برای دسته پارامترها

جدول موجود در پیوست ۶ مقادیر امتیازدهی به تعداد ۲۰۰ مطالعه موردی ریزش یافته یا تحت ناپایداری طی سال‌های ۱۸۳۵-۲۰۲۱ را بر اساس اولویت عوامل مؤثر شناخته شده در ایجاد ناپایداری را نمایش می‌دهد. با مطالعه منابع موردنظر که شامل مقالات و گزارش‌ها بوده است، با توجه به اینکه در پایداری تونل عوامل مختلفی دخیلند؛ بسیاری از این موارد علاوه بر عامل اصلی شامل عوامل فرعی نیز بوده است، به‌منظور بررسی همه‌جانبه نتایج؛ تمامی عوامل اعم از اصلی و فرعی بررسی شدند. به این صورت که طبق جدول ۱-۶ عوامل با اولویت اول و اصلی در ایجاد ناپایداری عدد ۱ را به خود اختصاص داده است، عوامل با الویت دوم و فرعی عدد ۲ را به خود اختصاص داده است، عوامل با الویت سوم عدد ۳ و عوامل با الویت ناچیز در ایجاد ناپایداری‌ها با اعداد بزرگ‌تر از ۳ امتیازدهی شده است.

- ✓ تعداد کل عوامل با الویت اول شامل ۲۰۰ مطالعه موردی است.
- ✓ تعداد کل عوامل با الویت دوم شامل ۱۸۱ مطالعه موردی است.
- ✓ تعداد کل عوامل با الویت سوم شامل ۱۵۷ مطالعه موردی است.
- ✓ تعداد کل عوامل با الویت ناچیز که شامل امتیازدهی با اعداد بزرگ‌تر از ۳ است، دارای ۱۱۹ مورد با الویت چهارم، ۶۵ مورد با الویت پنجم، ۴۱ مورد با الویت ششم، ۲۷ مورد با الویت هفتم، ۱۵ مورد با الویت هشتم و ۶ مورد با الویت نهم است.

جدول ۱-۶ طیف امتیازدهی اختصاص یافته به مطالعات موردی تحت ناپایداری یا ریزش.

اولویت اصلی	اولویت فرعی و مهم	الویت فرعی و نسبی	اولویت ناچیز
۱	۲	۳	>۳

نتایج امتیازدهی مطالعات موردی برای دسته پارامترها در جداول جدول ۲-۶ و جدول ۳-۶ درج شده است. بدین صورت که بیشترین تعداد مطالعات موردی با الویت ۱ مربوط به عوامل ژئومکانیکی با ۵۸ مورد یا ۲۹٪، عوامل مطالعات و طراحی و شرایط زمین‌شناسی و جغرافیایی ساختگاه نیز هر دو ۴۴ مورد یا ۲۲٪ و کمترین عامل مؤثر بر پایداری مربوط به سیستم نگهداری، تحکیمات و کنترل زمین با ۴ مورد در اولویت اول قرار دارد. همانطور که مشخص است عوامل ژئومکانیکی و شرایط زمین‌شناسی و جغرافیایی ساختگاه در تمامی الویت‌های مؤثر بر پایداری تونل نقش مؤثری داشته‌اند. شکل ۱-۶ نمودار دایره‌ای نتایج حاصل از مطالعات موردی برای دسته پارامترها را نمایش می‌دهد.

۳-۶ نتایج امتیازبندی مطالعات موردی برای تمامی پارامترها

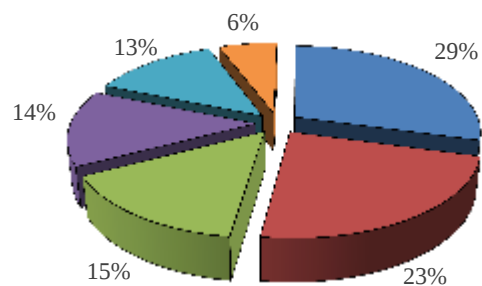
نتایج امتیازدهی مطالعات موردی برای تمامی پارامترها در جدول ۳-۶ تا جدول ۱۵-۶ درج شده است. بدین صورت که بیشترین تعداد مطالعات موردی با الویت ۱ مربوط به زون‌های ضعیف با ۳۵ مورد یا ۱۷/۵٪، به‌کارگیری بازطراحی و بازنگری حین اجرا با ۲۵ مورد و ۱۲/۵٪ و پس از آن سطح و وضعیت آب زیرزمینی با ۲۱ مورد و ۱۰/۵٪، زون‌های شدیداً خرد شده و گسله با ۱۶ مورد و ۸٪ بیشترین امتیازها را به خود اختصاص داده‌اند. شکل ۲-۶ نمودار ستونی نتایج حاصل از مطالعات موردی برای پارامترها را نمایش می‌دهد.

جدول ۲-۶ نتایج امتیازبندی مطالعات موردی برای دسته پارامترها.

الویت بندی	عوامل ژئومکانیکی	مطالعات و طراحی	سیستم نگهداری، تحکیمات و کنترل زمین	شرایط زمین شناسی و جغرافیایی ساختگاه	عوامل عمومی، اجرایی و قراردادی	شرایط خاص (تکنیکی ها)	مجموع
مجموع تعداد کیس های با الویت ۱	۵۸	۴۴	۴	۴۴	۱۴	۳۶	۲۰۰
مجموع تعداد کیس های با الویت ۲	۵۳	۲۴	۱۱	۴۱	۲۵	۲۷	۱۸۱
مجموع تعداد کیس های با الویت ۳	۴۰	۱۶	۱۲	۳۹	۱۹	۳۱	۱۵۷
مجموع تعداد کیس های با الویت بیش از ۳	۷۶	۳۰	۲۵	۶۲	۳۶	۴۶	۲۷۵

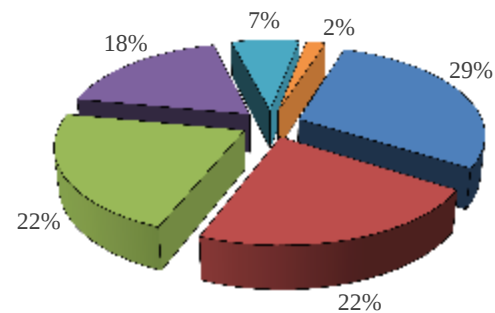
جدول ۳-۶ نتایج امتیازبندی مطالعات موردی برای دسته پارامترها بر حسب درصد.

در اولویت اول		در اولویت دوم		در اولویت سوم		در اولویت چهارم	
عوامل ژئومکانیکی	٪ ۲۹	عوامل ژئومکانیکی	٪ ۲۹	عوامل ژئومکانیکی	٪ ۲۵	عوامل ژئومکانیکی	٪ ۲۸
مطالعات و طراحی	٪ ۲۲	شرایط زمین شناسی و جغرافیایی ساختگاه	٪ ۲۳	شرایط زمین شناسی و جغرافیایی ساختگاه	٪ ۲۵	شرایط زمین شناسی و جغرافیایی ساختگاه	٪ ۲۳
شرایط زمین شناسی و جغرافیایی ساختگاه	٪ ۲۲	شرایط خاص (تکنیکی ها)	٪ ۱۵	شرایط خاص (تکنیکی ها)	٪ ۲۰	شرایط خاص (تکنیکی ها)	٪ ۱۷
شرایط خاص (تکنیکی ها)	٪ ۱۸	عوامل عمومی، اجرایی و قراردادی	٪ ۱۴	عوامل عمومی، اجرایی و قراردادی	٪ ۱۲	عوامل عمومی، اجرایی و قراردادی	٪ ۱۳
عوامل عمومی، اجرایی و قراردادی	٪ ۷	مطالعات و طراحی	٪ ۱۳	مطالعات و طراحی	٪ ۱۰	مطالعات و طراحی	٪ ۱۱
سیستم نگهداری، تحکیمات و کنترل زمین	٪ ۲	سیستم نگهداری، تحکیمات و کنترل زمین	٪ ۶	سیستم نگهداری، تحکیمات و کنترل زمین	٪ ۸	سیستم نگهداری، تحکیمات و کنترل زمین	٪ ۹



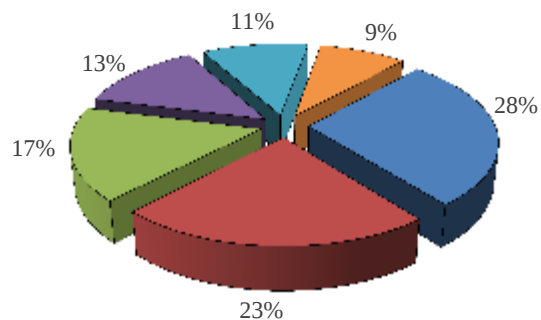
عوامل ژئومکانیکی
شرایط زمین شناسی و جغرافیایی ساختمان
عوامل عمومی، اجرایی و قراردادی ساختمان
سیستم نگهداری، تحکیمات و کنترل زمین
شرایط خاص (تکنیکی ها)
مطالعات و طراحی

اولویت دوم



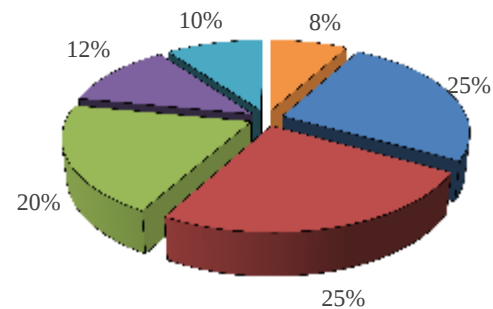
مطالعات و طراحی
شرایط خاص (تکنیکی ها)
عوامل ژئومکانیکی
شرایط زمین شناسی و جغرافیایی ساختمان
عوامل عمومی، اجرایی و قراردادی ساختمان
سیستم نگهداری، تحکیمات و کنترل زمین

اولویت اول



عوامل ژئومکانیکی
شرایط زمین شناسی و جغرافیایی ساختمان
عوامل عمومی، اجرایی و قراردادی ساختمان
سیستم نگهداری، تحکیمات و کنترل زمین
شرایط خاص (تکنیکی ها)
مطالعات و طراحی

اولویت چهارم



عوامل ژئومکانیکی
شرایط زمین شناسی و جغرافیایی ساختمان
عوامل عمومی، اجرایی و قراردادی ساختمان
سیستم نگهداری، تحکیمات و کنترل زمین
شرایط خاص (تکنیکی ها)
مطالعات و طراحی

اولویت سوم

شکل ۶-۱ نمودار دایره‌ای نتایج حاصل از مطالعات موردی برای دسته پارامترها.

جدول ۴-۶ نتایج امتیازبندی مطالعات موردی تحت ناپایداری و ریزش برای پارامترهای عوامل ژئومکانیکی.

الویت بندی	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	مجموع
مجموع تعداد کیس‌های با الویت ۱	۸	۰	۰	۳	۹	۳	۳۵	۵۸
مجموع تعداد کیس‌های با الویت ۲	۱۳	۱	۴	۱۰	۳	۲	۲۰	۵۳
مجموع تعداد کیس‌های با الویت ۳	۱۱	۰	۴	۳	۳	۳	۱۶	۴۰
مجموع تعداد کیس‌های با الویت بیش از ۳	۲۲	۸	۷	۱۲	۱۱	۶	۱۰	۷۶

جدول ۵-۶ نتایج امتیازبندی مطالعات موردی برای عوامل ژئومکانیکی بر حسب درصد.

عوامل ژئومکانیکی	در اولویت اول	در اولویت دوم	در اولویت سوم	در اولویت چهارم
تنش‌های برجا (A1)	٪ ۴	٪ ۷	٪ ۶	٪ ۱۱
آنیزوتروپی توده‌سنگ (A2)	٪ ۰	٪ ۱	٪ ۰	٪ ۴
کیفیت توده‌سنگ (A3)	٪ ۰	٪ ۲	٪ ۲	٪ ۴
نوع سنگ و مشخصات سنگ بکر (A4)	٪ ۲	٪ ۵	٪ ۲	٪ ۶
وجود پتانسیل لهیدگی (A5)	٪ ۵	٪ ۲	٪ ۲	٪ ۶
وجود پتانسیل آماس (A6)	٪ ۲	٪ ۱	٪ ۲	٪ ۳
زون‌های ضعیف (A7)	٪ ۱۸	٪ ۱۰	٪ ۸	٪ ۵

جدول ۶-۶ نتایج امتیازبندی مطالعات موردی تحت ناپایداری و ریزش تونل برای پارامترهای مطالعات و طراحی.

الویت بندی	B1	B2	B3	B4	B5	مجموع
مجموع تعداد کیس‌های با الویت ۱	۳	۵	۷	۴	۲۵	۴۴
مجموع تعداد کیس‌های با الویت ۲	۳	۱	۶	۵	۹	۲۴
مجموع تعداد کیس‌های با الویت ۳	۲	۱	۱	۲	۱۰	۱۶
مجموع تعداد کیس‌های با الویت بیش از ۳	۶	۲	۸	۴	۱۰	۳۰

جدول ۷-۶ نتایج امتیازبندی مطالعات موردی برای مطالعات و طراحی بر حسب درصد.

مطالعات و طراحی	در اولویت اول	در اولویت دوم	در اولویت سوم	در اولویت چهارم
سطح مطالعات اکتشافی پیش از ساخت (B1)	٪ ۲	٪ ۲	٪ ۱	٪ ۳
پیش بینی صحیح رفتار و شرایط زمین (B2)	٪ ۳	٪ ۱	٪ ۱	٪ ۱
سطح محاسبات طراحی و فرضیات طراحی (B3)	٪ ۴	٪ ۳	٪ ۱	٪ ۴
انتخاب صحیح روش اجرایی و تحکیمات (B4)	٪ ۲	٪ ۳	٪ ۱	٪ ۲
بکارگیری بازطراحی و بازنگری حین اجرا (B5)	٪ ۱۳	٪ ۵	٪ ۵	٪ ۵

جدول ۸-۶ نتایج امتیازبندی مطالعات موردی برای سیستم نگهداری، تحکیمات و کنترل زمین.

الویت بندی	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	مجموع
مجموع تعداد کیس‌های با الویت ۱	۲	۱	۰	۰	۱	۰	۰	۴
مجموع تعداد کیس‌های با الویت ۲	۳	۵	۰	۱	۰	۲	۰	۱۱
مجموع تعداد کیس‌های با الویت ۳	۸	۳	۰	۰	۱	۰	۰	۱۲
مجموع تعداد کیس‌های با الویت بیش از ۳	۱۰	۵	۱	۲	۳	۳	۱	۲۵

جدول ۹-۶ نتایج امتیازبندی مطالعات موردی برای سیستم نگهداری، تحکیمات و کنترل زمین بر حسب درصد.

سیستم نگهداری، تحکیمات و کنترل زمین	در اولویت اول	در اولویت دوم	در اولویت سوم	در اولویت چهارم
مشخصات فنی اجرایی نگهداری، تحکیمات و کنترل زمین (C1)	٪ ۱	٪ ۲	٪ ۴	٪ ۵
مشخصات فنی اجرایی سیستم بهسازی زمین (C2)	٪ ۱	٪ ۳	٪ ۲	٪ ۳
قابلیت تغییر سیستم نگهداری با توجه به شرایط مختلف (C3)	٪ ۰	٪ ۰	٪ ۰	٪ ۱
زمان فاصله نصب سیستم نگهداری از سینه کار (C4)	٪ ۰	٪ ۱	٪ ۰	٪ ۱
کنترل اضافه حفاری و پرکردن فضای خالی پشت نگهداری (C5)	٪ ۱	٪ ۰	٪ ۱	٪ ۲
نوع سیستم زهکشی و درستی عملکرد آن (C6)	٪ ۰	٪ ۱	٪ ۰	٪ ۲
نحوه واکنش به شرایط پیش بینی نشده (C7)	٪ ۰	٪ ۰	٪ ۰	٪ ۱

جدول ۱۰-۶ نتایج امتیازبندی مطالعات موردی برای شرایط زمین‌شناسی و جغرافیایی ساختگاه.

الویت‌بندی	D1	D2	D3	D4	D5	D6	مجموع
مجموع تعداد کیس‌های با الویت ۱	۱	۰	۱۱	۲۱	۱۱	۰	۴۴
مجموع تعداد کیس‌های با الویت ۲	۰	۰	۶	۱۹	۱۵	۱	۴۱
مجموع تعداد کیس‌های با الویت ۳	۲	۰	۰	۱۸	۱۹	۰	۳۹
مجموع تعداد کیس‌های با الویت بیش از ۳	۳	۰	۵	۲۶	۲۱	۷	۶۲

جدول ۱۱-۶ نتایج امتیازبندی مطالعات موردی برای شرایط زمین‌شناسی و جغرافیایی ساختگاه بر حسب درصد.

شرایط زمین‌شناسی و جغرافیایی ساختگاه	در اولویت اول	در اولویت دوم	در اولویت سوم	در اولویت چهارم
وضعیت توپوگرافی و سطح الارض ساختگاه (D1)	٪ ۱	٪ ۰	٪ ۱	٪ ۲
نوع ساختگاه شهری، راه و معارضین (D2)	٪ ۰	٪ ۰	٪ ۰	٪ ۰
وضعیت آب و هوایی و بلایای طبیعی (D3)	٪ ۶	٪ ۳	٪ ۰	٪ ۳
سطح و وضعیت آب زیرزمینی (D4)	٪ ۱۱	٪ ۱۰	٪ ۹	٪ ۱۳
عوارض زمین‌شناسی (گسل، چین‌خوردگی، کارست و...) (D5)	٪ ۶	٪ ۸	٪ ۱۰	٪ ۱۱
جهت‌داری نایوستگی‌ها نسبت به محور تونل (D6)	٪ ۰	٪ ۱	٪ ۰	٪ ۴

جدول ۱۲-۶ نتایج امتیازبندی مطالعات موردی تحت ناپایداری و ریزش برای عوامل عمومی، اجرایی و قراردادی.

الویت‌بندی	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	مجموع
مجموع تعداد کیس‌های با الویت ۱	۰	۰	۰	۱	۰	۱۳	۰	۱۴
مجموع تعداد کیس‌های با الویت ۲	۰	۱	۱	۴	۴	۱۲	۳	۲۵
مجموع تعداد کیس‌های با الویت ۳	۰	۰	۱	۲	۳	۹	۴	۱۹
مجموع تعداد کیس‌های با الویت بیش از ۳	۰	۳	۸	۳	۳	۱۲	۷	۳۶

جدول ۶-۱۳ نتایج امتیازبندی مطالعات موردی برای عوامل عمومی، اجرایی و قراردادی بر حسب درصد.

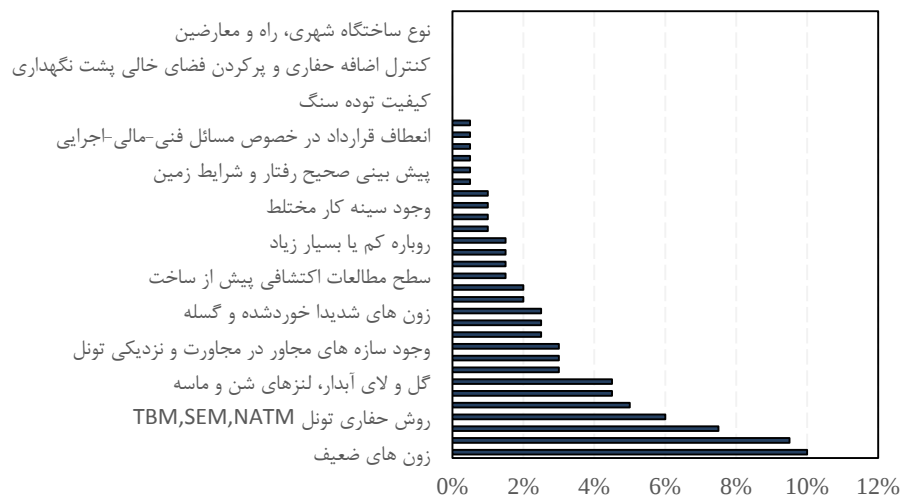
عوامل عمومی، اجرایی و قراردادی	در اولویت اول	در اولویت دوم	در اولویت سوم	در اولویت چهارم
سطح حساسیت و اهمیت پروژه (E1)	٪ ۰	٪ ۰	٪ ۰	٪ ۰
انعطاف قرارداد در خصوص مسائل فنی-مالی-اجرایی (E2)	٪ ۰	٪ ۱	٪ ۰	٪ ۲
تأمین مالی و هزینه‌های اجرایی (E3)	٪ ۰	٪ ۱	٪ ۱	٪ ۴
رعایت مشخصات کیفی و فنی (E4)	٪ ۱	٪ ۲	٪ ۱	٪ ۲
سطح توانمندی و مهارت و تجهیزات پیمانکار (E5)	٪ ۰	٪ ۲	٪ ۲	٪ ۲
روش حفاری تونل (TBM, SEM, NATM, ...) (E6)	٪ ۷	٪ ۶	٪ ۵	٪ ۶
شکل هندسی، شیب، ابعاد و سطح مقطع تونل (E7)	٪ ۰	٪ ۲	٪ ۲	٪ ۴

جدول ۶-۱۴ نتایج امتیازبندی مطالعات موردی تحت ناپایداری و ریزش برای شرایط خاص (تکینگی‌ها).

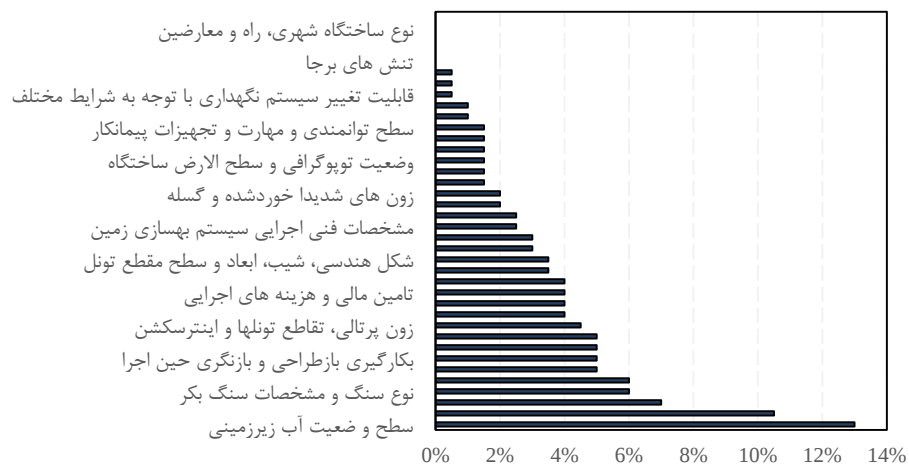
الویت‌بندی	F1	F2	F3	F4	F5	F6	مجموع
مجموع تعداد کیس‌های با الویت ۱	۱	۱۶	۸	۷	۲	۲	۳۶
مجموع تعداد کیس‌های با الویت ۲	۲	۵	۹	۶	۳	۲	۲۷
مجموع تعداد کیس‌های با الویت ۳	۲	۴	۶	۷	۹	۳	۳۱
مجموع تعداد کیس‌های با الویت بیش از ۳	۱	۴	۸	۱۴	۱۰	۹	۴۶

جدول ۶-۱۵ نتایج امتیازبندی مطالعات موردی برای شرایط خاص (تکینگی‌ها).

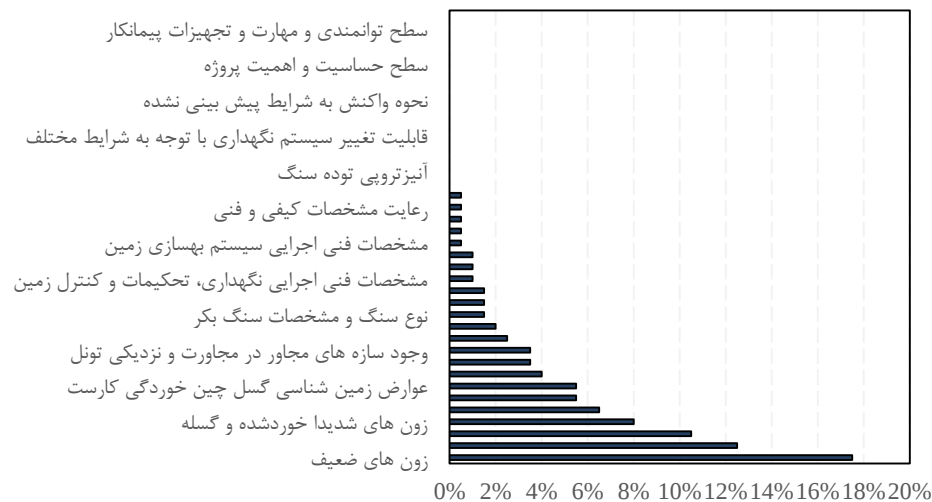
شرایط خاص (تکینگی‌ها)	در اولویت اول	در اولویت دوم	در اولویت سوم	در اولویت چهارم
وجود سینه‌کار مختلط (F1)	٪ ۱	٪ ۱	٪ ۱	٪ ۱
زون‌های شدیداً خوردشده و گسله (F2)	٪ ۸	٪ ۳	٪ ۲	٪ ۲
گل و لای آبدار، لنزهای شن و ماسه (F3)	٪ ۴	٪ ۵	٪ ۳	٪ ۴
وجود سازه‌های مجاور در مجاورت و نزدیکی تونل (F4)	٪ ۴	٪ ۳	٪ ۴	٪ ۷
روباره کم یا بسیار زیاد (F5)	٪ ۱	٪ ۲	٪ ۵	٪ ۵
زون پرتالی، تقاطع تونل‌ها و اینترسکشن (F6)	٪ ۱	٪ ۱	٪ ۲	٪ ۵



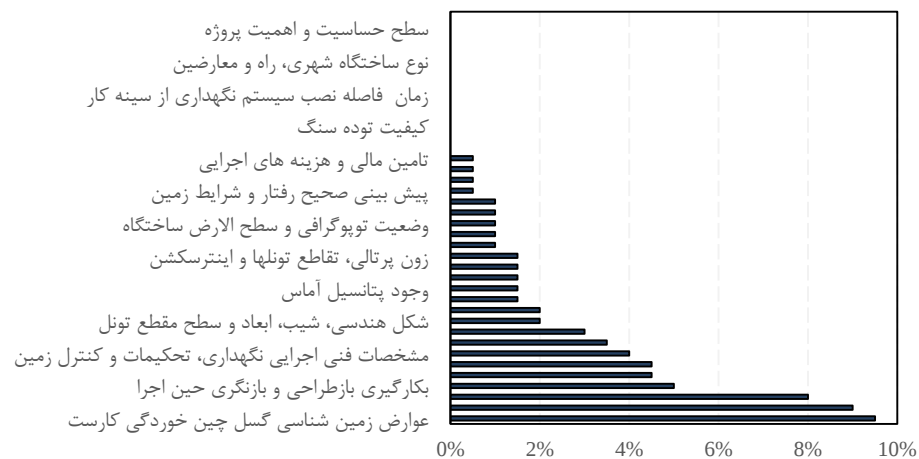
اولویت دوم



اولویت چهارم



اولویت اول



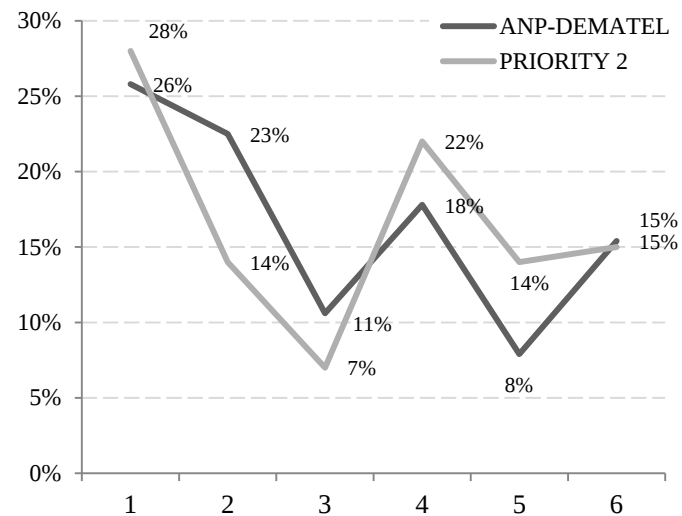
اولویت سوم

شکل ۶-۲ نمودار میله‌ای نتایج حاصل از مطالعات موردی برای پارامترها.

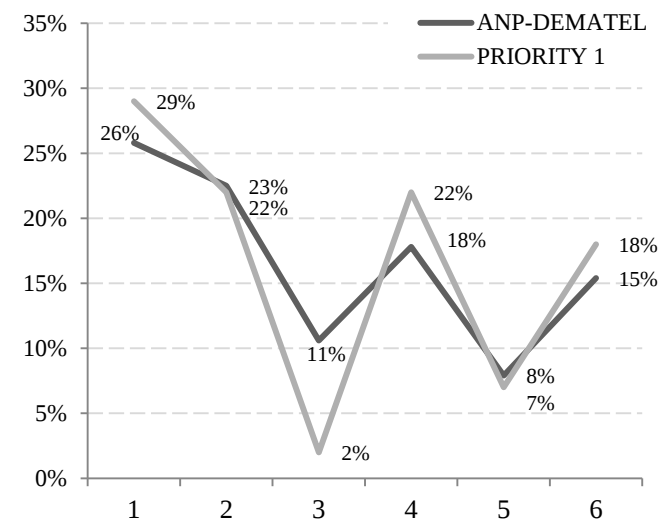
۴-۶ بررسی عملکرد ANP-DEMATEL

در این بخش نتایج حاصل از روش ترکیبی ANP-DEMATEL با نتایج حاصل از مطالعات جامع ناپایداری و ریزش تونل که شامل چهار زیرگروه اولویت در ایجاد ناپایداری‌ها و ریزش بوده در شکل ۳-۶ و شکل ۴-۶ مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته است. همانطور که ملاحظه می‌شود از بین مؤلفه‌های مؤثر بر ناپایداری تونل در زیرگروه اول برای دسته پارامترها مقادیر تقریباً برابر ارزیابی شده و دارای همبستگی ۰/۹ می‌باشد و بیش‌ترین اهمیت مربوط به مؤلفه عوامل ژئومکانیکی و کمترین اهمیت در ANP-DEMATEL مربوط به مؤلفه عوامل عمومی اجرایی و قراردادی با مقدار وزنی ۷٪ و در مطالعات آماری مربوط به سیستم نگهداری، تحکیمات و کنترل زمین با مقدار وزنی ۲٪ است.

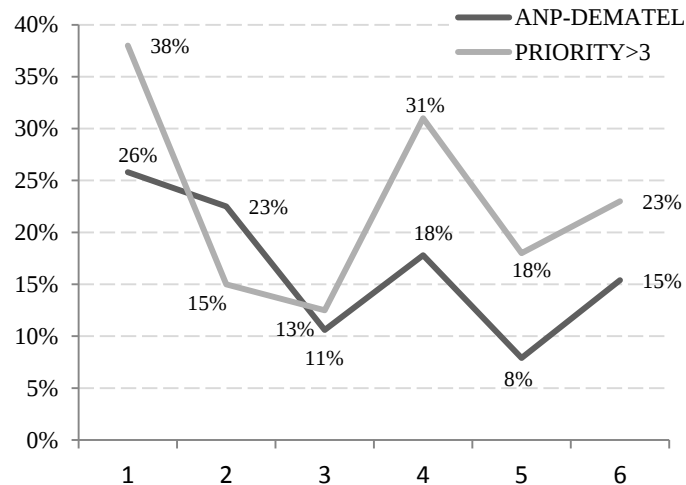
در بخش نهایی نتایج حاصل از روش ترکیبی ANP-DEMATEL با نتایج حاصل از مطالعات جامع ناپایداری و ریزش تونل در سی و هشت پارامتر شناسایی شده مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته است. چنانچه در شکل ۴-۶ مشاهده می‌شود مقادیر تا حدودی نزدیک به هم ارزیابی شده و روش ANP-DEMATEL در محاسبه وزن پارامترهای مؤثر بر پایداری تونل تا حدودی موفق عمل کرده است. مهم‌ترین عوامل در مطالعات واقعی زون‌های ضعیف، سطح و وضعیت آب زیرزمینی، عوارض زمین‌شناسی (چین‌خوردگی، گسل، کارست و...) و به‌کارگیری بازطراحی و بازنگری حین اجرا می‌باشند؛ اما در روش وزن‌دهی ANP-DEMATEL عوامل عوارض زمین‌شناسی (چین‌خوردگی، گسل، کارست و...)، انتخاب صحیح روش اجرایی و تحکیمات، زون‌های شدیداً خوردشده و گسله به ترتیب بیش‌ترین امتیازها را کسب کرده‌اند.



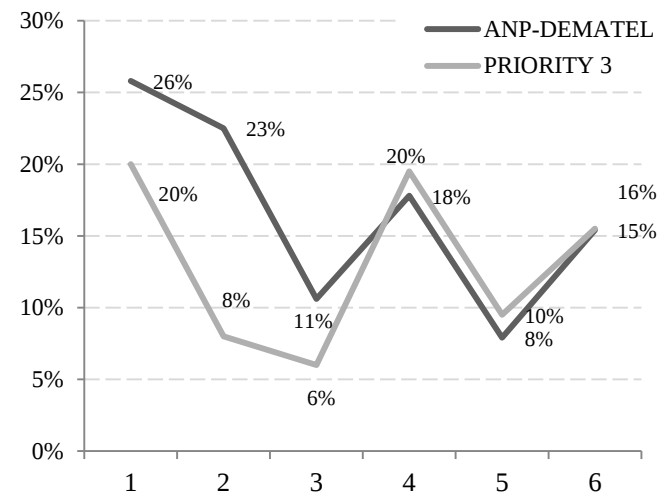
CORRELATION	ANP-DEMATEL	PRIORITY 3
ANP-DEMATEL	1	0/5
PRIORITY 3	1	1



CORRELATION	ANP-DEMATEL	PRIORITY 1
ANP-DEMATEL	1	0/9
PRIORITY 1	1	1

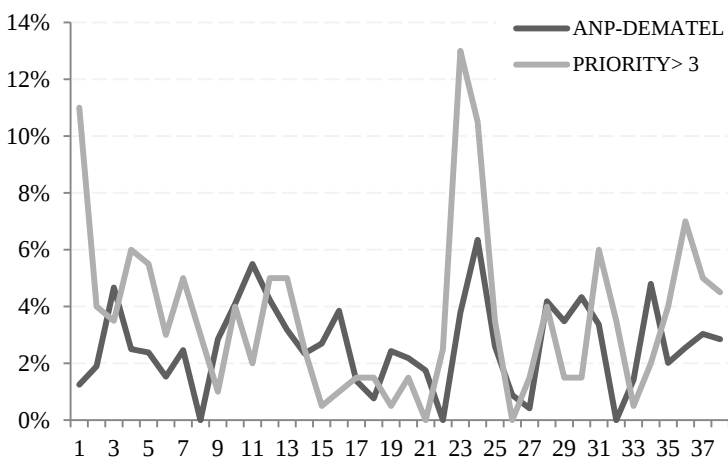
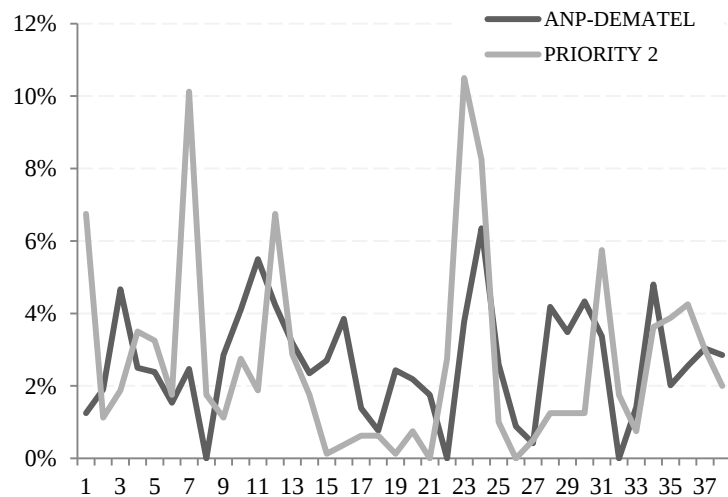


CORRELATION	ANP-DEMATEL	PRIORITY>3
ANP-DEMATEL	1	0/6
PRIORITY>3	1	1

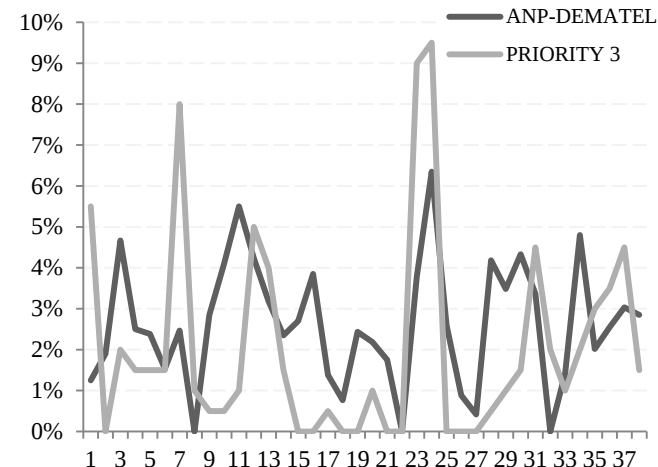
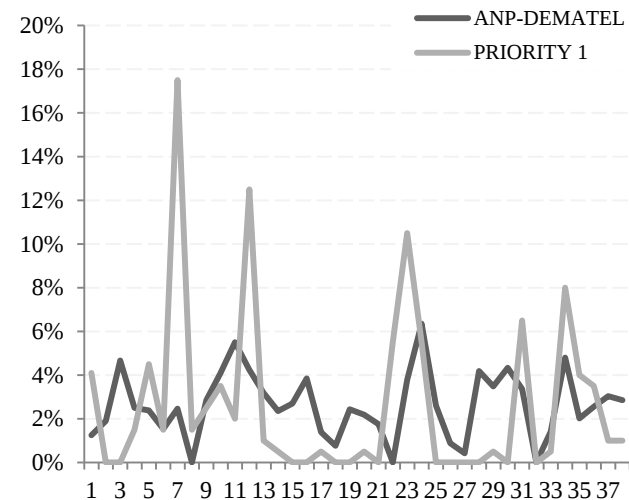


CORRELATION	ANP-DEMATEL	PRIORITY 3
ANP-DEMATEL	1	0/5
PRIORITY 3	1	1

شکل ۳-۶ بررسی نتایج حاصل از اوزان ANP-DEMATEL و مطالعات موردی در دسته پارامترها.



CORRELATION	ANP-DEMATEL	PRIORITY 2
ANP-DEMATEL	1	0/3
PRIORITY 2	1	1



CORRELATION	ANP-DEMATEL	PRIORITY 1
ANP-DEMATEL	1	0/2
PRIORITY 1	1	1

CORRELATION	ANP-DEMATEL	PRIORITY 3
ANP-DEMATEL	1	0/4
PRIORITY 3	1	1

شکل ۴-۶ بررسی نتایج حاصل از اوزان ANP-DEMATEL و مطالعات موردی در پارامترها.

۵-۶ جمع‌بندی

در این فصل بررسی عملکرد روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره در رتبه‌بندی پارامترهای مؤثر بر پایداری تونل به‌طور دقیق و کاربردی انجام گرفته است. پس از جمع‌آوری اولیه و خام به پایش این داده‌ها پرداخته شده و در نهایت یک تحقیق میدانی فراگیر از تمامی تونل‌های ریزش‌یافته در ۱۵۰ سال گذشته صورت گرفته است. به منظور بررسی عملکرد روش ترکیبی ANP-DEMATEL، در رتبه‌بندی پارامترهای مؤثر بر ناپایداری و ریزش تونل، درصد تکرار مؤلفه‌های مؤثر بر ریزش تونل‌ها در مطالعات واقعی مورد بررسی قرار گرفته است. در این تحلیل مقایسه‌ای، دسته پارامترها مقادیر نزدیک بهم داشته و روش ANP-DEMATEL موفق عمل کرده است و عوامل ژئومکانیکی از رتبه اول برخوردار گردیده است. در رتبه‌بندی پارامترها هم این روش تا حدودی مقادیر نزدیک بهم داشته و مهم‌ترین عوامل در ریزش-های واقعی زون‌های ضعیف، سطح و وضعیت آب زیرزمینی، عوارض زمین‌شناسی (چین‌خوردگی، گسل، کارست و...) و به‌کارگیری بازطراحی و بازنگری حین اجرا جزء عوامل اصلی هستند؛ اما در روش وزن‌دهی ANP-DEMATEL عوامل عوارض زمین‌شناسی (چین‌خوردگی، گسل، کارست و...)، انتخاب صحیح روش اجرایی و تحکیمات، زون‌های شدیداً خوردشده و گسله به‌ترتیب بیش‌ترین امتیازها را کسب کرده‌اند. نتایج حاصل از این تحقیق تا حد بسیار زیادی منطبق بر واقعیات موجود بوده است. فصل بعد به تحلیل و بررسی نتایج حاصله و ارائه پیشنهادهایی برای تحقیقات آتی اختصاص یافته است.

فصل ۷ : نتیجه گیری و پیشنهادها

۷-۱ نتیجه گیری

مسئله پایداری تونل‌ها به علت قرارگیری در محیط‌های با عدم قطعیت بالا، ناشناخته بودن شرایط زمین و محدود بودن سطح داده‌ها و نمونه‌های قابل دسترس، توجه مطالعات محدود پیش از اجرا، خطا در مراحل طراحی و محاسبات به عنوان چالش‌های این عرصه به شمار می‌رود و احتمال ناپایداری و مخاطرات افزایش می‌یابد. بنابراین در این پایان‌نامه، ارزیابی پایداری در تونل‌سازی مورد مطالعه قرار گرفته است. این تحقیق شامل سه مرحله اصلی است:

مرحله اول، مطالعات مهم در حوزه ارزیابی پایداری در طی سال‌های اخیر ارائه شده‌اند مورد بررسی قرار گرفتند. با بررسی دقیق مطالعات پیشین، نقاط ضعف و قوت این مطالعات تعیین شد که با استفاده از این مطالعات پارامترهای مهم پایداری در تونل‌سازی تعیین گردید.

مرحله دوم، پارامترهای مهم و مؤثر بر پایداری تونل و فضاهای زیرزمینی مورد ارزیابی قرار گرفتند که در نهایت پس از انجام تجزیه و تحلیل اولیه سی‌وهشت پارامتر برای ارزیابی ایمنی در تونل‌سازی در شش دسته عوامل ژئومکانیکی، مطالعات و طراحی، سیستم نگهداری، تحکیمات و کنترل زمین، شرایط زمین‌شناسی و جغرافیایی ساختگاه، عوامل عمومی، اجرایی و قراردادی و شرایط خاص (تکنیکی‌ها) انتخاب شد. در ادامه فرم‌های نظرسنجی آماده شد و در میان متخصصان توزیع شد، نظرات کیفی ۴۵ نفر از متخصصان جمع‌آوری شد، با بررسی نتایج به دست آمده از نظرسنجی‌های انجام شده مشخص شد که هر شش پارامتر پایداری از اهمیت ویژه‌ای برخوردارند. با توجه به بررسی مطالعات دقیق گذشتگان مشخص شد تاکنون روش جامعی جهت ارزیابی پایداری در تونل‌سازی ارائه نشده بود و در این تحقیق سعی شد تا یک رویکرد جدید برای ارزیابی پایداری در تونل و فضاهای زیرزمینی ارائه شود.

مرحله سوم، وزن و اهمیت پارامترهای مؤثر بر پایداری با استفاده از روش ترکیبی ANP-DEMATEL محاسبه شده است. رویکرد DEMATEL با یک ارزیابی حرفه‌ای برای بررسی رابطه علت و معلولی بین عناصر و میزان تأثیر بر پایداری تونل استفاده شده است. پس‌از آن، مقادیر ارزیابی DEMATEL بعد از

استفاده از روش ANP برای ساخت مدل گروه، وزن مطلوب هر یک از پارامترهای تأثیرگذار به دست می-آید.

مرحله چهارم، بعد از محاسبه وزن هر پارامتر با استفاده از روش ترکیبی ANP-DEMATEL، به منظور ارزیابی عملکرد نتایج، یک تحقیق میدانی فراگیر از تونل‌های ریزش‌یافته یا تحت ناپایداری صورت گرفته است. به منظور بررسی عملکرد روش ترکیبی ANP-DEMATEL، در رتبه‌بندی پارامترها، درصد تکرار مؤلفه‌های مؤثر بر ریزش تونل‌ها در مطالعات واقعی مورد بررسی قرار گرفته است. در این تحلیل مقایسه‌ای دسته‌پارامترها مقادیر نزدیک به هم داشته و روش ANP-DEMATEL موفق عمل کرده است و عوامل ژئومکانیکی از رتبه اول برخوردار گردیده است. در رتبه‌بندی پارامترها هم این روش تا حدودی مقادیر نزدیک به هم داشته و نتایج حاصل از این تحقیق نسبتاً منطبق بر واقعیات موجود بوده است. نتایج حاصله شامل موارد زیر است:

- ✓ بیشترین وزن را به پارامترهای «عوارض زمین‌شناسی (گسل، چین‌خوردگی، کارست و...)» و «انتخاب صحیح روش اجرایی و تحکیمات» و «کیفیت توده‌سنگ» اختصاص داده‌اند. در بین دیگر عوامل مهم می‌توان به سطح توانمندی، مهارت و تجهیزات پیمانکار و انتخاب صحیح روش اجرایی و تحکیمات نیز اشاره کرد.
- ✓ کم‌ترین وزن در بین تمام پارامترها نیز مربوط به پارامترهای «شکل هندسی، شیب، ابعاد و سطح مقطع تونل» و «وضعیت آب‌وهوایی و بلایای طبیعی» و «سطح مطالعات اکتشافی پیش از ساخت» می‌باشد.
- ✓ طبق نظر کارشناسان فاکتور «عوامل ژئومکانیکی به‌عنوان مهم‌ترین عامل و عوامل عمومی، اجرایی و قراردادی دارای اهمیت کمتری نسبت به سایر عوامل در ارزیابی پایداری یک پروژه تونل‌سازی می‌باشد.
- ✓ طبق نتایج تحلیل مقایسه‌ای نتایج رتبه‌بندی ANP-DEMATEL تا حدودی منطبق با ماهیت ناپایداری‌های واقعی تونل‌ها و فضاهاى زیرسطحی بوده است.

۲-۷ پیشنهادها برای تحقیقات آتی

به منظور ارزیابی پایداری تونل تلاش شد که این رویکرد پیشنهادی به بهترین نحو ممکن در پیش‌بینی میزان پایداری تونل اجرا شود. نتایج حاصل از این تحقیق تا حد بسیار زیادی منطبق بر واقعیت‌های موجود بوده و پس از یک تحقیق میدانی فراگیر از ناپایداری‌های موجود در تونل‌های مختلف تحت ناپایداری، مشخص شد نتایج به دست آمده بسیار دقیق و سنجیده است و از اعتبارسنجی بالایی برخوردار است. جهت بهبود تحقیقات آتی در این حوزه ادامه پیشنهادهایی ارائه می‌شود:

- ✓ افزایش تعداد مطالعات موردی تحت ناپایداری و یا ریزش جهت به دست آمدن نتایج با روایی بیشتر.
- ✓ استفاده از سایر روش‌های رتبه‌بندی و روش‌های فازی جهت به دست آوردن نتایج انعطاف‌پذیر و پویا.
- ✓ همچنین پیشنهاد می‌شود براساس نتایج این تحقیق، یک شاخص برای پیش‌بینی سطح ناپایداری ارائه شود.

منابع و مراجع

- اجل لوئیان ر.، دادخواه ر. و هاشمی م. (۱۳۸۷)، "تحلیل پایداری و طراحی سیستم نگهدارنده تونل انحراف سد خرساں ۳" مجله علوم دانشگاه تهران.
- الیکائی ز. (۱۳۹۷)، پایان نامه کارشناسی ارشد: "شناسایی، رتبه بندی و ارزیابی عوامل مؤثر بر ایمنی در تونلسازی، مطالعه موردی: منطقه یک آزادراه تهران شمال"، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود.
- جودکی و. و اجل لوئیان ر. (۱۳۹۷). "مقایسه نتایج برگردان دوبعدی داده های مقاومت سنجی با شرایط زمین شناسی در مسیر حفاری قطعه ۳ و ۴ تونل قمروود." زمین شناسی مهندسی ایران سال یازدهم: ۴۹-۶۴.
- خیرآبادی س.ر.ب.، (۱۳۹۰)، پایان نامه کارشناسی ارشد: "تحلیل و دسته بندی قراردادهای عمرانی"، دانشگاه علوم تحقیقات کرمان.
- ذوالفقاری فر، س. ی. و مقصودی فر م. (۱۳۹۴)، "تحلیل و بررسی وضعیت و دلایل اضافه حفاری در تونل مطالعه موردی-تونل شهید حکیم تهران" دومین کنفرانس ملی مکانیک خاک و مهندسی پی، تهران.
- رشیددل ع.، میرزانیان م. و عبدالمهی ج. (۱۳۹۴)، "بررسی و ارائه راهکار برای مقابله با زون های گسله و جریان آب در حفاری مکانیزه" کنگره بین المللی تخصصی علوم و زمین.
- رمضان نیا، س. ر.، عطایی، م. و میرزایی، ح. (۱۳۹۳) "ارزیابی چالش ها و مخاطرات زمین شناسی حفاری مکانیزه در نواحی کوهستانی. اولین کنفرانس سراسری توسعه محوری مهندسی عمران، معماری، برق و مکانیک ایران، گلستان.
- سازمان برنامه و بودجه کشور. (۱۳۹۶)، "دستورالعمل بازرسی و تعمیر سیستم های نگهداری در حفاریات معدنی" ضابطه شماره ۷۲۶.
- سازمان مدیریت و برنامه ریزی کشور. (۱۳۸۶)، "آیین نامه طبقه بندی و تشخیص صلاحیت پیمان کاران".
- سازمان مدیریت و برنامه ریزی کشور. (۱۳۹۴)، "راهنمای طراحی و اجرای پوشش داخلی تونل های راه و راه آهن" ضابطه شماره ۶۸۴.
- شریف زاده م.، ترکمنی ا.، خادمی. و همتی ع. (۱۳۸۶)، "تأثیر زون های گسلی و خرد شده بر توقف دستگاه TBM در تونل انتقال آب قمروود. سومین کنفرانس مکانیک سنگ ایران.
- صادقی م.، و رسولی و. (۱۳۸۶)، "کاربرد سیستم های مهندسی سنگ در ارزیابی پایداری فضا های زیرزمینی"، مهندسی عمران و محیط زیست امیرکبیر سال چهل و سوم: ۸۹-۹۵.
- عطایی، م. (۱۳۸۹) "تصمیم گیری چند معیاره" دانشگاه صنعتی شاهرود.

عطایی، م. (۱۳۹۵) "تصمیم‌گیری چند معیاره" دانشگاه صنعتی شاهرود.

گشتاسبی، ک.، احمدی، م.، فخرایی، ز.، سابکی، ا.، پیری، ح. و آچاک، م.ی. (۱۳۸۰) "تأثیر نسبت تنش افقی به عمودی و جهت ناپیوستگی‌ها در پایداری تونل‌ها" وزارت علوم، تحقیقات و فناوری - دانشگاه تربیت مدرس.

لشگری، ا.، سیاوش‌نیا، م. و بهزادنیا، ا. (۱۳۹۳)، "ارزیابی عددی تأثیر حفر گود عمیق بر رفتار تونل‌های مجاور آن" اولین کنفرانس ملی مکانیک خاک و مهندسی پی، تهران.

محمدی س. (۱۳۹۷)، رساله دکتری: "ارائه مدل کیفی و کمی ارزیابی قابلیت تخریب لایه‌های سقف در روش استخراج جبهه کار طولانی مکانیزه زغال سنگ"، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود.

مدنی، ح. (۱۳۸۸) "تونل‌سازی: حفاری و اجرا" دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران).

مدنی، ح. (۱۳۸۹) "آبکشی و آبرسانی در معادن" دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران).

موسوی، ا.، شیرین‌آبادی، ر. و متولی، م. ح. (۱۳۹۷)، "شاخص‌های تأثیرگذار در وقوع پدیده آماس در تونل‌سازی سازندهای رس و سولفات-تونل مترو اصفهان" اولین کنفرانس ملی مدلسازی در مهندسی معدن، قزوین.

نوری ع. ع. و کتیبه ه. (۱۳۹۳)، "ارایه الگو درانتخاب سیستم زهکشی بهینه تونل‌ها با توجه به شرایط زمین‌شناسی مهندسی ساختگاه" سومین همایش و نمایشگاه سد و تونل ایران، تهران.

- Annan, J., & Zhiwu, W. (2011) "Optimizing supporting parameters of metro tunnel based on improved particle swarm optimization arithmetic". *Procedia Engineering*, 15, 4857-4861.
- Australia, S.W.J. (2013) "Safe Work Australia".
- Azar, A., Nahavandi, B., & Rajab-Zadeh, A. (2007) "Planning and improving the quality performance expansion by using fuzzy analytic network process and goal programming". *Humanity Science Quarterly*, 4, 31-67.
- Barla, G., Bonini, M., & Semeraro, M. (2011) "Analysis of the behaviour of a yield-control support system in squeezing rock". *Tunnelling and Underground Space Technology*, 26(1), 146-154.
- Barla, G., M. Bonini and D. Debernardi (2010) "Time dependent deformations in squeezing tunnels". *ISSMGE International Journal of Geoengineering Case Histories* 2(1): 40-65.
- Barton, N., Lien, R., & Lunde, J. (1974) "Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support". *Rock mechanics*, 6(4), 189-236.
- BAŞÇETİN, A. (2003) "A decision support system for optimal equipment selection in open pit mining: Analytical hierarchy process". *İstanbul Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yerbilimleri Dergisi*, 16(2), 1-11.
- Benardos, A. G., & Kaliampakos, D. C. (2004) "A methodology for assessing geotechnical hazards for TBM tunnelling—illustrated by the Athens Metro", Greece. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 41(6), 987-999.
- Bewick, R. P. (2008) "Effects of anisotropic rock mass characteristics on excavation stability". In *Masters Abstracts International* (Vol. 47, No. 03).
- Bieniawski, Z. T. (1973) "Engineering classification of jointed rock masses". *Civil Engineering, Sivele Ingenieursweze*, 1973(12), 335-343.
- Bieniawski, Z. T. (1989) "Engineering rock mass classifications: a complete manual for engineers and geologists in mining, civil, and petroleum engineering". John Wiley & Sons.
- Chan, C. W. (1995). "Displacement of MRT Tunnels due to an Adjacent Excavation" (Doctoral dissertation, Nanyang Technological University, School of Civil and Structural Engineering).
- Chapman, D., Metje, N., & Stärk, A. (2017) "Introduction to tunnel construction". Crc Press.
- Chen, R. P., Tang, L. J., Yin, X. S., Chen, Y. M., & Bian, X. C. (2015) "An improved 3D wedge-prism model for the face stability analysis of the shield tunnel in cohesionless soils". *Acta Geotechnica*, 10(5), 683-692.
- Chen, Y., Hu, R., Zhou, C., Li, D., & Rong, G. (2011) "A new parabolic variational inequality formulation of Signorini's condition for non- steady seepage problems with complex seepage control systems". *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 35(9), 1034-1058.
- Chiu, W. Y., Tzeng, G. H., & Li, H. L. (2013) "A new hybrid MCDM model combining DANP with VIKOR to improve e-store business". *Knowledge-Based Systems*, 37, 48-61.
- Construction Industry Research and Information Association, (1999) "Standardisation and pre-assembly: Adding value to construction projects", CIRIA Report, (176).
- Cui, Q. L., Wu, H. N., Shen, S. L., Xu, Y. S., & Ye, G. L. (2015) "Chinese karst geology and measures to prevent geohazards during shield tunnelling in karst region with

- caves". *Natural Hazards*, 77(1), 129-152..
- Danesh Shakib, M., & Fazli, S. (2009) "Differentiation of successful and unsuccessful companies by using compound method (FAHP-TOPSIS) in Tehran's Stock Exchange". *Iran's Managing Sciences Quarterly*, 15, 87-115.
- Deere, D. (1988) "The rock quality designation (RQD) index in practice. In *Rock classification systems for engineering purposes*". ASTM International.
- Esmailzadeh, A., Shirzad, P. J., & Haghshenas, S. S. (2017) "Technical analysis of collapse in tunnel excavation and suggestion of preventing appropriate applicable methods (case study: sardasht dam second diversion tunnel) ". *Civ Eng J*, 3(9), 682-689.
- Falatoonitoosi, E., Leman, Z., Sorooshian, S., & Salimi, M. (2013) "Decision-making trial and evaluation laboratory". *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, 5(13), 3476-3480.
- Fraldi, M., & Guarracino, F. (2009) "Limit analysis of collapse mechanisms in cavities and tunnels according to the Hoek–Brown failure criterion". *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 46(4), 665-673.
- Frodl, S., Franzius, J. N., & Bartl, T. (2010) "Design and construction of the tunnel geothermal system in Jenbach". *Geomechanics and Tunnelling*, 3(5), 658-668.
- Gabus, A., & Fontela, E. (1972) "World problems, an invitation to further thought within the framework of DEMATEL". Battelle Geneva Research Center, Geneva, Switzerland, 1-8.
- Geimer, C. (2013) "Metro tunnels enable geothermal air-conditioning. Geothermal plants can be integrated into new tunnel structures in inner cities; Klimatisieren mit Erdwaerme aus U-Bahn-Tunnel". *Geothermische Anlagen lassen sich in neue Tunnelbauwerke in Innenstaedten integrieren*.
- Goel, R. K., & Jethwa, J. L. (1991, December) "Prediction of support pressure using RMR classification". In *Proc. Indian Getech. Conf, Surat, India* (pp. 203-205).
- Goel, R. K., & Singh, B. (2011) "Engineering rock mass classification", tunnelling, foundations and landslides. Elsevier.
- Goel, R. K., Jethwa, J. L. & Paithankar, A. G. (1996) "Correlation between Barton's Q and Bieniawski's RMR-A new approach". In *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts* (Vol. 7, No. 33, p. 308A).
- Gogus, O., & Boucher, T. O. (1998) "Strong transitivity, rationality and weak monotonicity in fuzzy pairwise comparisons". *Fuzzy Sets and Systems*, 94(1), 133-144.
- Gölcük, İ., & Baykasoğlu, A. (2016) "An analysis of DEMATEL approaches for criteria interaction handling within ANP". *Expert Systems with Applications*, 46, 346-366.
- Guo, W., Deng, Q., & Pan, X. D. (2013) "Risk evaluation of highway tunnel construction based on DEMATEL method". In *Applied Mechanics and Materials* (Vol. 368, pp. 1472-1476). Trans Tech Publications Ltd.
- Heravi, G., & Charkhakan, M. H. (2014) "Predicting and tracing change-formation scenarios in construction projects using the DEMATEL technique". *Journal of Management in Engineering*, 30(6), 04014028.
- Hoek, E., & Guevara, R. (2009) "Overcoming squeezing in the Yacambú-Quibor tunnel, Venezuela". *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 42(2), 389-418.
- Hoek, E., Kaiser P. K. and Bawden W. F. (2000) "Support of underground excavations in hard rock", CRC Press.
- Hoek, E., Marinos, P. G. and Marinos, V. P. (2005) "Characterisation and engineering properties of tectonically undisturbed but lithologically varied sedimentary rock masses". 42(2): 277-285.
- Huang, F., Zhu, H., Xu, Q., Cai, Y., & Zhuang, X. (2013) "The effect of weak interlayer on the

- failure pattern of rock mass around tunnel–Scaled model tests and numerical analysis”. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 35, 207-218.
- Huang, L., Liu, Z., Wu, C., & Liang, J. (2019) “The scattering of plane P, SV waves by twin lining tunnels with imperfect interfaces embedded in an elastic half-space”. *Tunnelling and underground space technology*, 85, 319-330.
- Huang, X., Li, S. C., Xu, Z. H., Guo, M., Shi, X. S., Gao, B., ... & Liu, L. (2019) “An attribute recognition model for safe thickness assessment between concealed karst cave and tunnel”. *Journal of Central South University*, 26(4), 955-969.
- Hudson, J. A., & Harrison, J. P. (1992) “A new approach to studying complete rock engineering problems”. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 25(2), 93-105.
- Jiang, A. N., Wang, S. Y., & Tang, S. L. (2011) “Feedback analysis of tunnel construction using a hybrid arithmetic based on Support Vector Machine and Particle Swarm Optimisation”. *Automation in Construction*, 20(4), 482-489.
- Jiang, Q., Liu, X., Wei, W., & Zhou, C. (2013) “A new method for analyzing the stability of rock wedges”. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 60, 413-422.
- Kiani, M., Akhlaghi, T., & Ghalandarzadeh, A. (2016) “Experimental modeling of segmental shallow tunnels in alluvial affected by normal faults”. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 51, 108-119.
- Kim, M. K., Yoo, Y. I., & Song, J. J. (2008) “Methodology to quantify rock behavior around shallow tunnels by rock engineering systems”. *Geosystem Engineering*, 11(2), 37-42.
- Kolymbas, D. (2005) “Tunnelling and tunnel mechanics: A rational approach to tunnelling”. Springer Science & Business Media.
- Kumar, N., Samadhiya, N. K., & Anbalagan, R. (2004) “Application of rock mass classification systems for tunneling in Himalaya, India”. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*.
- Lane, K. S. (1975) “Field test sections save cost in tunnel support” (No. NSF/RA/T-75-035).
- Li, S., Li, S., Zhang, Q., Xue, Y., Liu, B., Su, M., ... & Wang, S. (2010) “Predicting geological hazards during tunnel construction”. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2(3), 232-242.
- Li, Z., Wang, L., Feng, B., Xiao, J., Zhang, Q., Li, L., & Liang, J. (2020) “Comprehensive collapse investigation and treatment: an engineering case from Qingdao expressway tunnel”. *Journal of Cleaner Production*, 270, 121879.
- Liang, Y. K., & Ma, Z. D. (2010) “Construction risk analysis of foundation engineering based on DEMATEL method”. *Journal of Engineering Management*, 2, 164-167.
- Liang, Y., Chen, X., Yang, J., Zhang, J., & Huang, L. (2020) “Analysis of ground collapse caused by shield tunnelling and the evaluation of the reinforcement effect on a sand stratum”. *Engineering Failure Analysis*, 115, 104616.
- Lin, P., Liu, X., Zhou, W., Wang, R., & Wang, S. (2015) “Cracking, stability and slope reinforcement analysis relating to the Jinping dam based on a geomechanical model test”. *Arabian Journal of Geosciences*, 8(7), 4393-4410.
- Liu, F., Ma, T., Liu, X., & Chen, F. (2019) “A case study of collapses at the Yangshan tunnel of the Coal Transportation Channel from the Western Inner Mongolia to the Central China”. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 92, 103063.
- Liu, W., & Ding, L. (2020) “Global sensitivity analysis of influential parameters for excavation stability of metro tunnel”. *Automation in Construction*, 113, 103080.
- Lu, C. C., & Hwang, J. H. (2019) “Nonlinear collapse simulation of Daikai Subway in the 1995 Kobe earthquake: Necessity of dynamic analysis for a shallow

- tunnel". *Tunnelling and Underground Space Technology*, 87, 78-90.
- Lyu, C., Yu, L., Wang, M., Xia, P., & Sun, Y. (2020) "Upper bound analysis of collapse failure of deep tunnel under karst cave considering seismic force". *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 132.
- Mao, D., Nilsen, B., Feng, S., Zhao, H., & Lu, M. (2015) "A case study of tunnel instability in weakness zone containing swelling clay".
- Marinoni, O. (2004) "Implementation of the analytical hierarchy process with VBA in ArcGIS". *Computers & Geosciences*, 30(6), 637-646.
- Marinos, V. (2014) "Tunnel behaviour and support associated with the weak rock masses of flysch". *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 6(3), 227-239.
- Marschall, P., Giger, S., De La Vassière, R., Shao, H., Leung, H., Nussbaum, C., ... & Alcolea, A. (2018). Hydro-mechanical evolution of the EDZ as transport path for radionuclides and gas: insights from the Mont Terri rock laboratory (Switzerland)". In *Mont Terri Rock Laboratory, 20 Years* (pp. 175-196). Birkhäuser, Cham.
- Martin, C. D., Kaiser, P. K., & Christiansson, R. (2003) "Stress, instability and design of underground excavations". *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 40(7-8), 1027-1047.
- Martin, C., Kaiser, P. Tannant D. and Yazici S. (1999) "Stress path and instability around mine openings". 9th ISRM Congress, OnePetro.
- Merlini, D., Stocker, D., Falanesca, M., & Schuerch, R. (2018) "The ceneri base tunnel: construction experience with the southern portion of the flat railway line crossing the swiss alps". *Engineering*, 4(2), 235-248.
- Moussaei, N., Sharifzadeh, M., Sahriar, K., & Khosravi, M. H. (2019) "A new classification of failure mechanisms at tunnels in stratified rock masses through physical and numerical modeling". *Tunnelling and Underground Space Technology*, 91, 103017.
- Muir Wood, A. (2000) "Tunnelling: Management by design", Taylor & Francis.
- Muir Wood, A. M., WOOD, A., & GIBB, F. (1971) "Design and construction of the Cargo Tunnel at Heathrow Airport, London". *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, 48(1), 11-34.
- Murayama, S., & Yagi, N. (1966, September) "Swelling of mudstone due to sucking of water. In 1st ISRM Congress". OnePetro.
- Naghadehi, M. Z., Jimenez, R., KhaloKakaie, R., & Jalali, S. M. E. (2011) "A probabilistic systems methodology to analyze the importance of factors affecting the stability of rock slopes". *Engineering Geology*, 118(3-4), 82-92.
- Najafi, A. (2010) "Structure and environmental challenges analysis in projects management using analytical". *International Journal of Industrial Engineering & Production Management*, 21(1), 63-76.
- Navaei, A. Z., & Omidvari, M. (2015) "Development of Failure Mode Effects Analysis Using DEMATEL and ANP Models, Inter. In Conference on management Economics and humanities", Istanbul, Turkey.
- Nezarat, H., Sereshki, F., & Ataei, M. (2015) "Ranking of geological risks in mechanized tunneling by using Fuzzy Analytical Hierarchy Process (FAHP)". *Tunnelling and Underground Space Technology*, 50, 358-364.
- Niknia, N., Keshavarzi, A. R., & Hosseini-pour, E. Z. (2011) "Improvement the trap efficiency of vortex chamber for exclusion of suspended sediment in diverted water". In *World Environmental and Water Resources Congress 2011: Bearing Knowledge for Sustainability* (pp. 4124-4134).
- Palmström, A. (2014) "An introduction to the Rock Mass index (R_{Mi}) and its applications".
- Palmstrom, A. & Stille, H. (2007) "Ground behaviour and rock engineering tools for

- underground excavations". *Tunnelling and Underground Space Technology*, 22(4), 363-376.
- Palmstrom, A., & Stille, H. (2007) "Ground behaviour and rock engineering tools for underground excavations". *Tunnelling and Underground Space Technology*, 22(4), 363-376.
- Palmstrom, A., & Berthelsen, O. (1988, September) "The significance of weakness zones in rock tunnelling". In *ISRM International Symposium*. OnePetro.
- Panthi, K. K. (2006) "Analysis of engineering geological uncertainties related to tunnelling in Himalayan rock mass conditions".
- Qi, S., Zhou, D., Wang, L., & Xu, G. (2013) "Deformation prediction of tunnel surrounding rock based on the Grey-Markov chain". *Xiandai Suidao Jishu*, 50(1), 80-86.
- Qin, C., Chian, S. C., Yang, X., & Du, D. (2015) "2D and 3D limit analysis of progressive collapse mechanism for deep-buried tunnels under the condition of varying water table". *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 80, 255-264.
- Rafiee, R. (2014) "Development rock behavior index around underground space using a rock engineering system". 6(4): 46-56.
- Rahmati, A., Faramarzi, L., & Darbor, M. (2017) "Squeezing rock conditions at phyllite-slate zone in Golab water conveyance tunnel, Iran: A case study". *Journal of Central South University*, 24(10), 2475-2485.
- Ramamurthy, T., Rao, G. V., & Singh, J. (1993) "Engineering behaviour of phyllites". *Engineering Geology*, 33(3), 209-225.
- Ranasooriya, J. (2009) "The reliability of rock mass classification systems as underground excavation support design tools" (Doctoral dissertation, Curtin University).
- Riedmüller, G., & Schubert, W. (1999) "Critical comments on quantitative rock mass classifications". *Felsbau*, 17(3), 164-167.
- Saaty, T. L. (1985) "Decision making for leaders". *IEEE transactions on systems, man, and cybernetics*, (3), 450-452.
- Saaty, T. L. (1999) "Basic theory of the analytic hierarchy process: how to make a decision". *Revista de la Real Academia de Ciencias Exactas, Fisicas y Naturales*, 93(4), 395-423.
- Saaty, T. L., & Alexander, J. M. (1981) "Thinking with models: mathematical models in the physical, biological, and social sciences". RWS Publications.
- Schneider, G. R., Molina, A. G. F., Mendiola, V. T., & Lavin, J. A. (2018) "Innovative solutions for intersection of TBM tunnel and station in Riyadh Line 5 metro". *Tunnelling and Underground Space Technology*, 80, 26-37.
- Schön, J. (2011) "Physical properties of rocks: A workbook" (Vol. 8). Elsevier.
- Schubert, W., & Goricki, A. (2004, March) "Probabilistic assessment of rock mass behaviour as basis for stability analyses of tunnels". In *Proc. Rock Mechanics Meeting, SvBeFo*, Stockholm.
- Schubert, W., Goricki, A., Button, E. A., Riedmüller, G., Pölsler, P., Steindorfer, A., & Vanek, R. (2001, June) "Excavation and support determination for the design and construction of tunnels". In *Rock Mechanics a Challenge for Society, ISRM Reg. Symp. Eurock* (pp. 383-388).
- Seidenfuss, T. (2006) "Collapses in tunnelling [Master thesis], University of Stuttgart, Stuttgart, Germany.
- Šejnoha, J., Jarušková, D., Špačková, O., & Novotná, E. (2009) "Risk quantification for tunnel excavation process". *International Journal of Mechanical Aerospace Industrial Mechatronic and Manufacturing Engineering*, 3(10).
- Shang, Y. J., Wang, S. J., Li, G. C., & Yang, Z. F. (2000) "Retrospective case example using a

- comprehensive suitability index (CSI) for siting the Shisan-Ling power station, China". *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 37(5), 839-853.
- Javadi, M., & Sharifzadeh, M. (2017) "Groundwater and underground excavations: From theory to practice". *Rock Mechanics and Engineering*.
- Shen, B., Nash, T. R., Bertuzzi, R., & Clarke, S. J. (2015, September) "Use of monitoring data during construction to refine cavern design". In *Proceedings of the Ninth Symposium on Field Measurements in Geomechanics* (pp. 397-408). Australian Centre for Geomechanics.
- Shin, H. S., Kwon, Y. C., Jung, Y. S., Bae, G. J., & Kim, Y. G. (2009) "Methodology for quantitative hazard assessment for tunnel collapses based on case histories in Korea". *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 46(6), 1072-1087.
- Shin, J. H., Choi, K. C., Yoon, J. U., & Shin, Y. J. (2011) "Hydraulic significance of fractured zones in subsea tunnels". *Marine Georesources & Geotechnology*, 29(3), 230-247.
- Shuhan, L., Biao, Y., & Zhouquan, L. (2014) "Three-dimensional information acquisition and visualization application in goaf". *Procedia Engineering*, 84, 860-867.
- Si, S. L., You, X. Y., Liu, H. C., & Zhang, P. (2018) "DEMATEL technique: A systematic review of the state-of-the-art literature on methodologies and applications". *Mathematical Problems in Engineering*, 2018.
- Slinchenko, D. (2006) "Control of ground settlement in EPB Tunneling". LOVAT Inc, 1-5.
- Stille, H. and Palmström, A. (2008) "Ground behaviour and rock mass composition in underground excavations". 23(1): 46-64.
- Stille, H., & Palmström, A. (2003) "Classification as a tool in rock engineering". *Tunnelling and underground space technology*, 18(4), 331-345.
- Suarez-Reynoso, S. (1976) "Project planning and control in tunnel construction" (Doctoral dissertation, Massachusetts Institute of Technology).
- Terzaghi, K. (1946) "Rock defects and loads on tunnel supports. Rock tunnelling with steel supports".
- Tóth, Á., Gong, Q., & Zhao, J. (2013) "Case studies of TBM tunneling performance in rock-soil interface mixed ground". *Tunnelling and Underground Space Technology*, 38, 140-150.
- Wang, D. D., Qiu, G. Q., Xie, W. B., & Wang, Y. (2012) "Deformation prediction model of surrounding rock based on GA-LSSVM-markov".
- Wang, F., Ding, L., Love, P. E., & Edwards, D. J. (2016) "Modeling tunnel construction risk dynamics: Addressing the production versus protection problem". *Safety science*, 87, 101-115.
- Wang, K., Zhang, C., Chen, H., Yue, Y., Zhang, W., Zhang, M., ... & Fu, Z. (2019) "Karst landscapes of China: patterns, ecosystem processes and services". *Landscape Ecology*, 34(12), 2743-2763.
- Wang, Y. and N. Djordjevic (2014) "Thermal stress FEM analysis of rock with microwave energy". *International Journal of Mineral Processing* 130: 74-81.
- Weeks, F. C., Trueblood, T. B., Krause, A., & Wyllie, D. C. (1987) "Tunnel'daylighting'on the Alaska Railroad". *Transportation research record*, 1119, 115-118.
- Wickham, G. E., Tiedemann, H., & Skinner, E. H. (1972, June) "Support determinations based on geologic predictions". In *N Am Rapid Excav & Tunnelling Conf Proc* (Vol. 1).
- Wu, W. W. (2008) "Choosing knowledge management strategies by using a combined ANP and DEMATEL approach". *Expert systems with applications*, 35(3), 828-835.
- Wu, W. W., & Lee, Y. T. (2007) "Developing global managers' competencies using the fuzzy

- DEMATEL method". *Expert systems with applications*, 32(2), 499-507.
- Wu, Y. Q., Wang, K., Zhang, L. Z., & Peng, S. H. (2018) "Sand-layer collapse treatment: An engineering example from Qingdao Metro subway tunnel. *Journal of Cleaner Production*", 197, 19-24.
- Xuan, C. Z., Chen, Z., Wu, P., Zhang, Y., & Guo, W. (2010, June) "Study of fuzzy neural network on wind velocity control of low-speed wind tunnel". *International Conference on Electrical and Control Engineering* (pp. 2024-2027). IEEE.
- Yang, X. L., & Huang, F. (2011) "Collapse mechanism of shallow tunnel based on nonlinear Hoek–Brown failure criterion". *Tunnelling and Underground Space Technology*, 26(6), 686-691.
- Zhang, G. H., Jiao, Y. Y., Chen, L. B., Wang, H., & Li, S. C. (2015) "Analytical model for assessing collapse risk during mountain tunnel construction". *Canadian Geotechnical Journal*, 53(2), 326-342.
- Zhang, X., Nguyen, H., Bui, X. N., Le, H. A., Nguyen-Thoi, T., Moayedi, H., & Mahesh, V. (2020) "Evaluating and predicting the stability of roadways in tunnelling and underground space using artificial neural network-based particle swarm optimization". *Tunnelling and Underground Space Technology*, 103.
- Zheng, G., Cui, T., Cheng, X., Diao, Y., Zhang, T., Sun, J., & Ge, L. (2017) "Study of the collapse mechanism of shield tunnels due to the failure of segments in sandy ground". *Engineering Failure Analysis*, 79, 464-490.
- Zheng, X. Z., Wang, F., & Zhou, J. L. (2017) "A hybrid approach for evaluating faulty behavior risk of high-risk operations using ANP and evidence theory". *Mathematical Problems in Engineering*, 2017.
- Zhu, W. C., Liu, J. S., Tang, C. A., Zhao, X. D., & Brady, B. H. (2005) "Simulation of progressive fracturing processes around underground excavations under biaxial compression". *Tunnelling and Underground Space Technology*, 20(3), 231-247.

پیوست ۱: فرم‌های نظرسنجی پرسش‌نامه «روش *AHP*

ب ۱-۱ فرم ارسال شده برای دسته پارامترها

معیار j	اولویت‌ها																	معیار i
عوامل ژئومکانیکی	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	عوامل زمین‌شناسی
زون‌های ضعیف	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	عوامل زمین‌شناسی
عوامل هندسی	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	عوامل زمین‌شناسی
سیستم نگهداری و تحکیمات تونل	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	عوامل زمین‌شناسی
عوامل اجرایی	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	عوامل زمین‌شناسی
شرایط جغرافیایی ساختگاه تونل	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	عوامل زمین‌شناسی
مطالعات و طراحی	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	عوامل زمین‌شناسی
مسائل قراردادی (پیمان) و عمومی	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	عوامل زمین‌شناسی
زون های ضعیف	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	عوامل ژئومکانیکی
عوامل هندسی	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	عوامل ژئومکانیکی
سیستم نگهداری و تحکیمات تونل	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	عوامل ژئومکانیکی
عوامل اجرایی	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	عوامل ژئومکانیکی
شرایط جغرافیایی ساختگاه تونل	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	عوامل ژئومکانیکی
مطالعات و طراحی	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	عوامل ژئومکانیکی
مسائل قراردادی (پیمان) و عمومی	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	عوامل ژئومکانیکی
عوامل هندسی	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	زون‌های ضعیف
سیستم نگهداری و تحکیمات تونل	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	زون‌های ضعیف
عوامل اجرایی	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	زون‌های ضعیف
شرایط جغرافیایی ساختگاه تونل	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	زون‌های ضعیف
مطالعات و طراحی	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	زون‌های ضعیف
مسائل قراردادی (پیمان) و عمومی	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	زون‌های ضعیف
سیستم نگهداری و تحکیمات تونل	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	عوامل هندسی
عوامل اجرایی	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	عوامل هندسی
شرایط جغرافیایی ساختگاه تونل	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	عوامل هندسی
مطالعات و طراحی	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	عوامل هندسی
مسائل قراردادی (پیمان) و عمومی	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	عوامل هندسی
عوامل اجرایی	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	سیستم نگهداری و تحکیمات تونل
شرایط جغرافیایی ساختگاه تونل	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	سیستم نگهداری و تحکیمات تونل
مطالعات و طراحی	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	سیستم نگهداری و تحکیمات تونل
مسائل قراردادی (پیمان) و عمومی	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	سیستم نگهداری و تحکیمات تونل
شرایط جغرافیایی ساختگاه تونل	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	عوامل اجرایی
مطالعات و طراحی	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	عوامل اجرایی
مسائل قراردادی (پیمان) و عمومی	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	عوامل اجرایی
مطالعات و طراحی	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	شرایط جغرافیایی ساختگاه تونل
مسائل قراردادی (پیمان) و عمومی	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	شرایط جغرافیایی ساختگاه تونل
مسائل قراردادی (پیمان) و عمومی	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	مطالعات و طراحی

پ ۱-۲ فرم‌های ارسال شده برای پارامتر عوامل زمین‌شناسی

معیار i	اولویت‌ها																معیار j	
انواع ناپیوستگی‌ها	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	گسل
انواع ناپیوستگی‌ها	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	دایک
انواع ناپیوستگی‌ها	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	چین خوردگی
انواع ناپیوستگی‌ها	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	حفرات کارستی و سازندهای کارستی
انواع ناپیوستگی‌ها	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	نوع سازندها
انواع ناپیوستگی‌ها	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	سطح آب زیرزمینی
گسل	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	دایک
گسل	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	چین خوردگی
گسل	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	حفرات کارستی و سازندهای کارستی
گسل	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	نوع سازندها
گسل	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	سطح آب زیرزمینی
دایک	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	چین خوردگی
دایک	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	حفرات کارستی و سازندهای کارستی
دایک	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	نوع سازندها
دایک	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	سطح آب زیرزمینی
چین خوردگی	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	حفرات کارستی و سازندهای کارستی
چین خوردگی	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	نوع سازندها
چین خوردگی	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	سطح آب زیرزمینی
حفرات کارستی و سازندهای کارستی	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	نوع سازندها
حفرات کارستی و سازندهای کارستی	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	سطح آب زیرزمینی
نوع سازندها	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	سطح آب زیرزمینی

پ ۱-۳ فرم‌های ارسال شده برای پارامتر عوامل ژئومکانیکی

معیار i	اولویت‌ها																معیار j	
کیفیت توده‌سنگ	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	نوع سنگ و مشخصات سنگ بکر
کیفیت توده‌سنگ	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	تنش‌های برجا
کیفیت توده‌سنگ	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	آنیزوتروپی توده‌سنگ
کیفیت توده‌سنگ	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	وجود پتانسیل لهیدگی
کیفیت توده‌سنگ	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	وجود پتانسیل آماس
نوع سنگ و مشخصات سنگ بکر	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	تنش‌های برجا
نوع سنگ و مشخصات سنگ بکر	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	آنیزوتروپی توده‌سنگ
نوع سنگ و مشخصات سنگ بکر	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	وجود پتانسیل لهیدگی
نوع سنگ و مشخصات سنگ بکر	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	وجود پتانسیل آماس
تنش‌های برجا	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	آنیزوتروپی توده‌سنگ
تنش‌های برجا	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	وجود پتانسیل لهیدگی
تنش‌های برجا	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	وجود پتانسیل آماس
آنیزوتروپی توده‌سنگ	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	وجود پتانسیل لهیدگی
آنیزوتروپی توده‌سنگ	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	وجود پتانسیل آماس
وجود پتانسیل لهیدگی	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	وجود پتانسیل آماس

ب ۱-۴ فرم‌های ارسال شده برای پارامتر زون‌های ضعیف

معیار i	اولویت‌ها																معیار j	
سنگ‌های نرم	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	سنگ‌های مارینی و حساس به آب
سنگ‌های نرم	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	زون‌های شدیداً خردشده و گسله
سنگ‌های نرم	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	لنزهای شن و ماسه
سنگ‌های نرم	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	گل‌ولای آبدار
سنگ‌های نرم	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	وجود سینه کار مختلط
سنگ‌های مارینی و حساس به آب	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	زون‌های شدیداً خردشده و گسله
سنگ‌های مارینی و حساس به آب	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	لنزهای شن و ماسه
سنگ‌های مارینی و حساس به آب	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	گل‌ولای آبدار
سنگ‌های مارینی و حساس به آب	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	وجود سینه‌کار مختلط
زون‌های شدیداً خردشده و گسله	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	لنزهای شن و ماسه
زون‌های شدیداً خردشده و گسله	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	گل‌ولای آبدار
زون‌های شدیداً خردشده و گسله	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	وجود سینه‌کار مختلط
لنزهای شن و ماسه	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	گل‌ولای آبدار
لنزهای شن و ماسه	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	وجود سینه‌کار مختلط
گل‌ولای آبدار	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	وجود سینه‌کار مختلط

ب ۱-۵ فرم‌های ارسال شده برای پارامتر عوامل هندسی

معیار i	اولویت‌ها																معیار j	
ابعاد و اندازه تونل، سطح مقطع حفاری	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	شکل هندسی تونل
ابعاد و اندازه تونل، سطح مقطع حفاری	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	شیب و نوع سازه‌ی زیرزمینی
ابعاد و اندازه تونل، سطح مقطع حفاری	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	عمق تونل و میزان روباره
ابعاد و اندازه تونل، سطح مقطع حفاری	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	وجود سازه‌های مجاور در مجاورت و نزدیکی تونل
ابعاد و اندازه تونل، سطح مقطع حفاری	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	جهت‌داری ناپیوستگی‌ها نسبت به محور تونل
ابعاد و اندازه تونل، سطح مقطع حفاری	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	تکینگی هندسی (پرتال، تقاطع، اینترسکشن و ...)
شکل هندسی تونل	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	شیب و نوع سازه‌ی زیرزمینی
شکل هندسی تونل	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	عمق تونل و میزان روباره
شکل هندسی تونل	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	وجود سازه‌های مجاور در مجاورت و نزدیکی تونل
شکل هندسی تونل	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	جهت‌داری ناپیوستگی‌ها نسبت به محور تونل
شکل هندسی تونل	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	تکینگی هندسی (پرتال، تقاطع، اینترسکشن و ...)
شیب و نوع سازه‌ی زیرزمینی	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	عمق تونل و میزان روباره
شیب و نوع سازه‌ی زیرزمینی	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	وجود سازه‌های مجاور در مجاورت و نزدیکی تونل
شیب و نوع سازه‌ی زیرزمینی	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	جهت‌داری ناپیوستگی‌ها نسبت به محور تونل
شیب و نوع سازه‌ی زیرزمینی	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	تکینگی هندسی (پرتال، تقاطع، اینترسکشن و ...)
عمق تونل و میزان روباره	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	وجود سازه‌های مجاور در مجاورت و نزدیکی تونل
عمق تونل و میزان روباره	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	جهت‌داری ناپیوستگی‌ها نسبت به محور تونل
عمق تونل و میزان روباره	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	تکینگی هندسی (پرتال، تقاطع، اینترسکشن و ...)
وجود سازه‌های مجاور در مجاورت و نزدیکی تونل	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	جهت‌داری ناپیوستگی‌ها نسبت به محور تونل
وجود سازه‌های مجاور در مجاورت و نزدیکی تونل	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	تکینگی هندسی (پرتال، تقاطع، اینترسکشن و ...)
جهت‌داری ناپیوستگی‌ها نسبت به محور تونل	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	تکینگی هندسی (پرتال، تقاطع، اینترسکشن و ...)

پ ۱-۶ فرم‌های ارسال شده برای پارامتر سیستم نگهداری و تحکیمات تونل

معیار i	اولویت‌ها																معیار j	
نوع سیستم تحکیمات	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	مشخصات فنی سیستم نگهداری و تحکیمات
نوع سیستم تحکیمات	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	قابلیت تغییر سیستم نگهداری
نوع سیستم تحکیمات	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	طول گام پیشروی
نوع سیستم تحکیمات	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	نوع سیستم زهکشی و کنترل خوردگی و زوال
نوع سیستم تحکیمات	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	کنترل اضافه حفاری‌ها و پر کردن فضای خالی پشت تحکیمات
مشخصات فنی سیستم نگهداری و تحکیمات	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	قابلیت تغییر سیستم نگهداری
مشخصات فنی سیستم نگهداری و تحکیمات	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	طول گام پیشروی
مشخصات فنی سیستم نگهداری و تحکیمات	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	نوع سیستم زهکشی و کنترل خوردگی و زوال
مشخصات فنی سیستم نگهداری و تحکیمات	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	کنترل اضافه حفاری‌ها و پر کردن فضای خالی پشت تحکیمات
قابلیت تغییر سیستم نگهداری	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	طول گام پیشروی
قابلیت تغییر سیستم نگهداری	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	نوع سیستم زهکشی و کنترل خوردگی و زوال
قابلیت تغییر سیستم نگهداری	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	کنترل اضافه حفاری‌ها و پر کردن فضای خالی پشت تحکیمات
طول گام پیشروی	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	نوع سیستم زهکشی و کنترل خوردگی و زوال
طول گام پیشروی	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	کنترل اضافه حفاری‌ها و پر کردن فضای خالی پشت تحکیمات
نوع سیستم زهکشی و کنترل خوردگی و زوال	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	نوع سیستم زهکشی و کنترل خوردگی و زوال

ب ۱-۷ فرم‌های ارسال شده برای پارامتر عوامل اجرایی

معیار i	اولویت‌ها																معیار j	
روش حفاری تونل	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	سطح خدمات فنی-اجرایی
روش حفاری تونل	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	رعایت مشخصات کیفی سیستم نگهداری
روش حفاری تونل	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	انطباق تجهیزات حفاری با شرایط اجرایی
روش حفاری تونل	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	واکنش در هنگام مواجهه با شرایط پیش‌بینی‌نشده
روش حفاری تونل	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	سطح توانمندی و مهارت پیمانکار
سطح خدمات فنی-اجرایی	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	رعایت مشخصات کیفی سیستم نگهداری
سطح خدمات فنی-اجرایی	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	انطباق تجهیزات حفاری با شرایط اجرایی
سطح خدمات فنی-اجرایی	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	واکنش در هنگام مواجهه با شرایط پیش‌بینی‌نشده
سطح خدمات فنی-اجرایی	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	سطح توانمندی و مهارت پیمانکار
رعایت مشخصات کیفی سیستم نگهداری	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	انطباق تجهیزات حفاری با شرایط اجرایی
رعایت مشخصات کیفی سیستم نگهداری	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	واکنش در هنگام مواجهه با شرایط پیش‌بینی‌نشده
رعایت مشخصات کیفی سیستم نگهداری	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	سطح توانمندی و مهارت پیمانکار
انطباق تجهیزات حفاری با شرایط اجرایی	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	واکنش در هنگام مواجهه با شرایط پیش‌بینی‌نشده
انطباق تجهیزات حفاری با شرایط اجرایی	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	سطح توانمندی و مهارت پیمانکار
واکنش در هنگام مواجهه با شرایط پیش‌بینی‌نشده	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	سطح توانمندی و مهارت پیمانکار

ب ۱-۸ فرم‌های ارسال شده برای پارامتر مطالعات و طراحی

معیار i	اولویت‌ها																	معیار j
سطح مطالعات اکتشافی پیش از ساخت	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	درک صحیح از رفتار زمین و پیش‌بینی شرایط زمین
سطح مطالعات اکتشافی پیش از ساخت	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	سطح محاسبات طراحی و فرضیات طراحی
سطح مطالعات اکتشافی پیش از ساخت	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	انتخاب صحیح سیستم اجرایی و تحکیمات
سطح مطالعات اکتشافی پیش از ساخت	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	به‌کارگیری سیستم ابزار دقیق و مانیتورینگ
درک صحیح از رفتار زمین و پیش‌بینی شرایط زمین	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	سطح محاسبات طراحی و فرضیات طراحی
درک صحیح از رفتار زمین و پیش‌بینی شرایط زمین	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	انتخاب صحیح سیستم اجرایی و تحکیمات
درک صحیح از رفتار زمین و پیش‌بینی شرایط زمین	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	به‌کارگیری سیستم ابزار دقیق و مانیتورینگ
سطح محاسبات طراحی و فرضیات طراحی	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	انتخاب صحیح سیستم اجرایی و تحکیمات
سطح محاسبات طراحی و فرضیات طراحی	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	به‌کارگیری سیستم ابزار دقیق و مانیتورینگ
انتخاب صحیح سیستم اجرایی و تحکیمات	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	به‌کارگیری سیستم ابزار دقیق و مانیتورینگ

پ ۱-۹ فرم‌های ارسال شده برای پارامتر شرایط جغرافیایی ساختگاه تونل

معیار i	اولویت‌ها																	معیار j
نوع ساختگاه و معارضین پروژه	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	وضعیت توپوگرافی و سطح الارض ساختگاه
نوع ساختگاه و معارضین پروژه	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	میزان بارندگی و نوع بارش‌ها
نوع ساختگاه و معارضین پروژه	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	وضعیت آب‌وهوایی
نوع ساختگاه و معارضین پروژه	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	وجود دره‌های مدفون در مسیر تونل
نوع ساختگاه و معارضین پروژه	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	بلایای طبیعی
نوع ساختگاه و معارضین پروژه	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	عبور از زیر یا مجاورت رودخانه‌ها، دریاچه و آبراهه
وضعیت توپوگرافی و سطح الارض ساختگاه	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	میزان بارندگی و نوع بارش‌ها
وضعیت توپوگرافی و سطح الارض ساختگاه	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	وضعیت آب‌وهوایی
وضعیت توپوگرافی و سطح الارض ساختگاه	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	وجود دره‌های مدفون در مسیر تونل
وضعیت توپوگرافی و سطح الارض ساختگاه	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	بلایای طبیعی
وضعیت توپوگرافی و سطح الارض ساختگاه	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	عبور از زیر یا مجاورت رودخانه‌ها، دریاچه و آبراهه
میزان بارندگی و نوع بارش‌ها	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	وضعیت آب‌وهوایی
میزان بارندگی و نوع بارش‌ها	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	وجود دره‌های مدفون در مسیر تونل
میزان بارندگی و نوع بارش‌ها	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	بلایای طبیعی
میزان بارندگی و نوع بارش‌ها	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	عبور از زیر یا مجاورت رودخانه‌ها، دریاچه و آبراهه
وضعیت آب‌وهوایی	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	وجود دره‌های مدفون در مسیر تونل
وضعیت آب‌وهوایی	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	بلایای طبیعی
وضعیت آب‌وهوایی	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	عبور از زیر یا مجاورت رودخانه‌ها، دریاچه و آبراهه
وجود دره‌های مدفون در مسیر تونل	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	بلایای طبیعی
وجود دره‌های مدفون در مسیر تونل	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	عبور از زیر یا مجاورت رودخانه‌ها، دریاچه و آبراهه
بلایای طبیعی	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	عبور از زیر یا مجاورت رودخانه‌ها، دریاچه و آبراهه

پ ۱-۱۰ فرم‌های ارسال شده برای پارامتر مسائل قراردادی (پیمان) و عمومی

معیار i	اولویت‌ها																معیار j	
فشردگی برنامه زمان‌بندی	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	نحوه تأمین مالی و میزان هزینه‌های اجرایی
فشردگی برنامه زمان‌بندی	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	سطح استانداردهای بالادستی و منظم به پیمان
فشردگی برنامه زمان‌بندی	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	سطح حساسیت و اهمیت پروژه
فشردگی برنامه زمان‌بندی	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	نوع قرارداد (EPC، سه عاملی، چهار عاملی و...)
فشردگی برنامه زمان‌بندی	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	انعطاف قرارداد درخصوص مسائل فنی-اجرایی-مالی
نحوه تأمین مالی و میزان هزینه‌های اجرایی	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	سطح استانداردهای بالادستی و منظم به پیمان
نحوه تأمین مالی و میزان هزینه‌های اجرایی	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	سطح حساسیت و اهمیت پروژه
نحوه تأمین مالی و میزان هزینه‌های اجرایی	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	نوع قرارداد (EPC، سه عاملی، چهار عاملی و...)
نحوه تأمین مالی و میزان هزینه‌های اجرایی	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	انعطاف قرارداد درخصوص مسائل فنی-اجرایی-مالی
سطح استانداردهای بالادستی و منظم به پیمان	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	سطح حساسیت و اهمیت پروژه
سطح استانداردهای بالادستی و منظم به پیمان	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	نوع قرارداد (EPC، سه عاملی، چهار عاملی و...)
سطح استانداردهای بالادستی و منظم به پیمان	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	انعطاف قرارداد درخصوص مسائل فنی-اجرایی-مالی
سطح حساسیت و اهمیت پروژه	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	نوع قرارداد (EPC، سه عاملی، چهار عاملی و...)
سطح حساسیت و اهمیت پروژه	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	انعطاف قرارداد درخصوص مسائل فنی-اجرایی-مالی
نوع قرارداد (EPC، سه عاملی، چهار عاملی و...)	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	انعطاف قرارداد درخصوص مسائل فنی-اجرایی-مالی

پیوست ۲: فرم‌های نظرسنجی پرسش‌نامه در روش *DEMATEL*

پ ۲-۱ فرم ارسال شده برای دسته پارامترها در روش DEMATEL

عوامل اصلی	عوامل ژئومکانیکی	مطالعات و طراحی	سیستم نگهداری، تحکیمات و کنترل زمین	شرایط زمین شناسی و جغرافیایی ساختگاه	عوامل عمومی، اجرایی و قراردادی	شرایط خاص (تکنیکی ها)
عوامل ژئومکانیکی	•					
مطالعات و طراحی		•				
سیستم نگهداری و تحکیمات و کنترل زمین			•			
شرایط زمین شناسی و جغرافیایی ساختگاه				•		
عوامل عمومی، اجرایی و قراردادی					•	
شرایط خاص (تکنیکی ها)						•

پ ۲-۲ فرم ارسال شده برای عوامل ژئومکانیکی در روش DEMATEL

عوامل ژئومکانیکی	تنش های برجا	آنیزوتروپی توده سنگ	کیفیت توده سنگ	نوع سنگ و مشخصات سنگ بکر	وجود پتانسیل لهیدگی	وجود پتانسیل آماس	زون های ضعیف
تنش های برجا	•						
آنیزوتروپی توده سنگ		•					
کیفیت توده سنگ			•				
نوع سنگ و مشخصات سنگ بکر				•			
وجود پتانسیل لهیدگی					•		
وجود پتانسیل آماس						•	
زون های ضعیف							•

پ ۲-۳ فرم ارسال شده برای مطالعات و طراحی

مطالعات و طراحی	سطح مطالعات اکتشافی پیش از ساخت	پیش بینی صحیح رفتار و شرایط زمین	سطح محاسبات طراحی و فرضیات طراحی	انتخاب صحیح روش اجرایی و تحکیمات	به کارگیری بازطراحی و بازنگری طراحی حین اجرا
سطح مطالعات اکتشافی پیش از ساخت	•				
پیش بینی صحیح رفتار و شرایط زمین		•			
سطح محاسبات طراحی و فرضیات طراحی			•		
انتخاب صحیح روش اجرایی و تحکیمات				•	
به کارگیری بازطراحی و بازنگری طراحی حین اجرا					•

پ ۲-۴ فرم ارسال شده برای سیستم نگهداری، تحکیمات و کنترل زمین

سیستم نگهداری، تحکیمات و کنترل زمین	مشخصات فنی اجرایی نگهداری، تحکیمات و کنترل زمین	مشخصات فنی اجرایی سیستم بهسازی زمین	قابلیت تغییر سیستم نگهداری با توجه به شرایط مختلف	زمان و فاصله نصب سیستم نگهداری از سینه کار	کنترل اضافه حفاری و پر کردن فضای خالی پشت سیستم نگهداری	نوع سیستم زهکشی و درستی عملکرد آن	نحوه واکنش به شرایط پیش‌بینی نشده
مشخصات فنی اجرایی نگهداری، تحکیمات و کنترل زمین	•						
مشخصات فنی اجرایی سیستم بهسازی زمین		•					
قابلیت تغییر سیستم نگهداری با توجه به شرایط مختلف			•				
زمان و فاصله نصب سیستم نگهداری از سینه کار				•			
کنترل اضافه حفاری و پر کردن فضای خالی پشت سیستم نگهداری					•		
نوع سیستم زهکشی و درستی عملکرد آن						•	
نحوه واکنش به شرایط پیش‌بینی نشده							•

پ ۲-۵ فرم ارسال شده برای شرایط زمین‌شناسی و جغرافیایی ساختگاه

شرایط زمین‌شناسی و جغرافیایی ساختگاه	وضعیت توپوگرافی و سطح الارض ساختگاه	نوع ساختگاه (شهری، راه و ...)	وضعیت آب‌وهوایی	سطح و وضعیت آب زیرزمینی	عوارض زمین‌شناسی (گسل، چین‌خوردگی، کارست و...)	جهت‌داری ناپیوستگی‌ها نسبت به محور تونل
وضعیت توپوگرافی و سطح الارض ساختگاه	•					
نوع ساختگاه (شهری، راه و ...)		•				
وضعیت آب‌وهوایی			•			
سطح و وضعیت آب زیرزمینی				•		
عوارض زمین‌شناسی (گسل، چین‌خوردگی، کارست و...)					•	
جهت‌داری ناپیوستگی‌ها نسبت به محور تونل						•

پ ۲-۶ فرم ارسال شده برای عوامل عمومی، اجرایی و قراردادی

عوامل عمومی، اجرایی و قراردادی	سطح حساسیت و اهمیت پروژه	انعطاف قرارداد در خصوص مسائل فنی-مالی-اجرایی	تأمین مالی و هزینه‌های اجرایی	رعایت مشخصات کیفی و فنی	سطح توانمندی و مهارت و تجهیزات پیمانکار	روش حفاری تونل (TBM,D&B,NATM,...)	شکل هندسی، شیب، ابعاد و سطح مقطع تونل
سطح حساسیت و اهمیت پروژه	•						
انعطاف قرارداد در خصوص مسائل فنی-مالی-اجرایی		•					
تأمین مالی و هزینه‌های اجرایی			•				
رعایت مشخصات کیفی و فنی				•			
سطح توانمندی و مهارت و تجهیزات پیمانکار					•		
روش حفاری تونل (TBM,D&B,NATM,...)						•	
شکل هندسی، شیب، ابعاد و سطح مقطع تونل							•

پ ۲-۷ فرم ارسال شده برای شرایط خاص (تکنیکی‌ها)

شرایط خاص (تکنیکی‌ها)	وجود سینه کار مختلط	زون‌های شدیداً خورد شده و گسله	گل‌ولای آبدار، لنزهای شن و ماسه	وجود سازه‌های مجاور در مجاورت و نزدیکی تونل	روبار کم و یا بسیار زیاد	زون پرتالی، تقاطع تونل‌ها و اینترسکشن
وجود سینه کار مختلط	•					
زون‌های شدیداً خورد شده و گسله		•				
گل‌ولای آبدار، لنزهای شن و ماسه			•			
وجود سازه‌های مجاور در مجاورت و نزدیکی تونل‌ها				•		
روبار کم و یا بسیار زیاد					•	
زون پرتالی، تقاطع تونل‌ها و اینترسکشن						•

پیوست ۲ پیاده سازی روش *DEMATEL* برای تمام پارامترها

پ ۳-۱ ماتریس میانگین نظرات برای تمامی پارامترها

عوامل ژئومکانیکی

(A)	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7
A1	۰	۲/۶۷۵	۲/۹۷۵	۲/۶۲۵	۲/۹۵	۲/۹	۲/۸
A2	۲/۴۵	۰	۲/۹۲۵	۲/۷	۲/۶۲۵	۲/۳۲۵	۲/۷۲۵
A3	۲/۵۷۵	۲/۶۷۵	۰	۲/۸۵	۲/۹۷۵	۲/۸	۳/۱۷۵
A4	۲/۴۷۵	۲/۵۵	۲/۳۷۵	۰	۲/۷۵	۲/۷۲۵	۲/۷۷۵
A5	۲/۴۲۵	۲/۱۵	۲/۵۷۵	۲/۳	۰	۱/۸۲۵	۲/۶
A6	۲/۲	۱/۷۲۵	۲/۶۷۵	۲/۴	۱/۷۷۵	۰	۲/۵۵
A7	۲/۷۷۵	۲/۷	۲/۳۲۵	۲/۷	۳/۰۷۵	۲/۸	۰

مطالعات و طراحی

(A)	B1	B2	B3	B4	B5
B1	۰	۲/۴	۳/۲۲۵	۳/۱	۲/۸
B2	۲/۸۵	۰	۲/۹	۲/۸۷۵	۲/۶۵
B3	۲/۷۵	۲/۵۵	۰	۲/۸۲۵	۲/۷۷۵
B4	۲/۸۲۵	۲/۵۷۵	۲/۸۵	۰	۳/۰۲۵
B5	۲/۰۲۵	۲/۲۲۵	۲/۴۷۵	۲/۷۵	۰

سیستم نگهداری، تحکیمات و کنترل زمین

(A)	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
C1	۰	۳/۴۷۵	۳/۱۷۵	۳/۲۲۵	۳	۲/۸۷۵	۳/۰۲۵
C2	۲/۹۷۵	۰	۲/۷۲۵	۲/۹	۲/۸۷۵	۲/۷۲۵	۲/۵۲۵
C3	۳/۲	۲/۶۷۵	۰	۲/۳۷۵	۲/۵۷۵	۲/۴۲۵	۳/۰۵
C4	۲/۹۵	۲/۸	۳/۰۷۵	۰	۲/۸۵	۲/۸۵	۳/۰۲۵
C5	۲/۷۷۵	۲/۷۲۵	۲/۴	۲/۸۲۵	۰	۲/۴۲۵	۲/۵
C6	۲/۵۵	۲/۷۵	۲/۲۵	۲/۶۲۵	۲/۳۲۵	۰	۲/۴۵
C7	۲/۴۲۵	۲/۵۲۵	۲/۹۷۵	۲/۹۲۵	۲/۴	۲/۲۵	۰

شرایط زمین‌شناسی و جغرافیایی ساختگاه

(A)	D1	D2	D3	D4	D5	D6
D1	۰	۲/۵۷۵	۲/۵۷۵	۲/۵۷۵	۳	۲/۴۲۵
D2	۲/۱۲۵	۰	۱/۲۲۵	۲	۲/۳۵	۲/۰۲۵
D3	۲/۴	۱/۷۵	۰	۲/۸۲۵	۱/۷۷۵	۱/۱۷۵
D4	۲/۱۵	۱/۸۵	۱/۹۲۵	۰	۲/۳۲۵	۱/۹
D5	۲/۴۷۵	۲/۲۵	۱/۳	۲/۶	۰	۲/۸۵
D6	۲/۲	۲/۰۲۵	۱/۰۷۵	۱/۹۲۵	۲/۵۷۵	۰

عوامل عمومی، اجرایی و قراردادی

(A)	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7
E1	۰	۲/۸۲۵	۳	۳/۱	۳/۳۷۵	۲/۸	۲/۲۰۵
E2	۲/۵۵	۰	۳/۰۲۵	۲/۵۲۵	۲/۷۵	۲/۵۷۵	۲/۲۸۲
E3	۲/۷۲۵	۲/۹	۰	۲/۸۷۵	۳/۱۷۵	۳/۱۷۵	۲/۱۰۳
E4	۲/۹۵	۲/۳	۲/۸	۰	۲/۹۷۵	۲/۶۲۵	۲/۴۶۲
E5	۲/۷	۲/۲۷۵	۲/۹	۲/۹۷۵	۰	۳/۲۷۵	۲/۲۵۶
E6	۲/۹	۲/۹۵	۳/۱۷۵	۳/۰۲۵	۳/۲	۰	۳/۰۷۷
E7	۱/۹۲۳	۲/۱۵۴	۲/۴۶۲	۲/۷۶۹	۲/۸۷۲	۳/۵۱۳	۰

شرایط خاص (تکینگی‌ها)

(A)	F1	F2	F3	F4	F5	F6
F1	۰	۲/۵۷۵	۲/۷۲۵	۲/۰۲۵	۲/۵۵	۲/۲۷۵
F2	۲/۷۷۵	۰	۳/۱۵	۲/۵۷۵	۲/۴	۳/۰۷۵
F3	۲/۶	۲/۵۷۵	۰	۲/۳۲۵	۲/۲۵	۲/۵۵
F4	۲/۱۷۵	۲/۳۵	۲/۳	۰	۲/۳۵	۲/۸۷۵
F5	۲/۶۷۵	۲/۷۵	۲/۲۷۵	۲/۹۷۵	۰	۳/۱
F6	۲/۴۲۵	۲/۷۵	۲/۵۷۵	۳/۱۵	۲/۷۷۵	۰

پ ۳-۲ ماتریس روابط مستقیم نرمال شده برای تمامی پارامترها

مطالعات و طراحی

(D)	B1	B2	B3	B4	B5
B1	۰	۰/۳۷۱	۰/۲۵۷	۰/۲۴۸	۰/۲۲۴
B2	۰/۳۲۸	۰	۰/۲۳۲	۰/۲۳	۰/۲۱۲
B3	۰/۲۲	۰/۲۰۴	۰	۰/۲۲۶	۰/۲۲۲
B4	۰/۲۳۶	۰/۳۰۶	۰/۲۲۸	۰	۰/۲۴۲
B5	۰/۱۶۲	۰/۱۷۸	۰/۱۹۸	۰/۲۲	۰

عوامل ژئومکانیکی

(D)	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7
A1	۰	۰/۱۵۱	۰/۱۶۸	۰/۱۴۸	۰/۱۶۶	۰/۱۶۳	۰/۱۵۸
A2	۰/۱۳۸	۰	۰/۱۶۵	۰/۱۵۲	۰/۱۴۸	۰/۱۳۱	۰/۱۵۴
A3	۰/۱۴۵	۰/۱۵۱	۰	۰/۱۶۱	۰/۱۶۸	۰/۱۵۸	۰/۱۷۹
A4	۰/۱۳۹	۰/۱۴۴	۰/۱۹	۰	۰/۱۵۵	۰/۱۵۴	۰/۱۵۶
A5	۰/۱۳۷	۰/۱۲۱	۰/۱۴۵	۰/۱۳	۰	۰/۱۰۳	۰/۱۴۶
A6	۰/۱۲۴	۰/۰۹۷	۰/۱۵۱	۰/۱۳۵	۰/۱	۰	۰/۱۴۴
A7	۰/۱۵۶	۰/۱۵۲	۰/۱۸۲	۰/۱۵۲	۰/۱۷۳	۰/۱۵۸	۰

شرایط زمین‌شناسی و جغرافیایی ساختگاه

(D)	D1	D2	D3	D4	D5	D6
D1	۰	۰/۲۱۴	۰/۲۱۴	۰/۲۱۴	۰/۲۴۹	۰/۲۰۲
D2	۰/۱۷۷	۰	۰/۱۰۲	۰/۱۶۶	۰/۱۹۵	۰/۱۶۸
D3	۰/۲	۰/۱۴۶	۰	۰/۲۳۵	۰/۱۴۸	۰/۰۹۸
D4	۰/۱۷۹	۰/۱۵۴	۰/۱۶	۰	۰/۱۹۳	۰/۱۵۸
D5	۰/۲۰۶	۰/۱۸۷	۰/۱۰۸	۰/۲۱۶	۰	۰/۲۳۷
D6	۰/۱۸۳	۰/۱۶۸	۰/۰۸۹	۰/۱۶	۰/۲۱۴	۰

سیستم نگهداری، تحکیمات و کنترل زمین

(D)	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
C1	۰	۰/۱۸۵	۰/۱۶۹	۰/۱۷۲	۰/۱۶	۰/۱۵۳	۰/۱۶۱
C2	۰/۱۵۸	۰	۰/۱۴۵	۰/۱۵۴	۰/۱۵۳	۰/۱۴۵	۰/۱۳۴
C3	۰/۱۷	۰/۱۴۲	۰	۰/۱۲۶	۰/۱۳۷	۰/۱۲۹	۰/۱۶۲
C4	۰/۱۵۷	۰/۱۴۹	۰/۱۶۴	۰	۰/۱۵۲	۰/۱۶۱	۰/۱۶۱
C5	۰/۱۴۸	۰/۱۴۵	۰/۱۲۸	۰/۱۵	۰	۰/۱۲۹	۰/۱۳۳
C6	۰/۱۳۶	۰/۱۴۶	۰/۱۲	۰/۱۴	۰/۱۱۹	۰	۰/۱۳
C7	۰/۱۲۹	۰/۱۳۴	۰/۱۵۸	۰/۱۵۶	۰/۱۲۸	۰/۱۲	۰

شرایط خاص (تکنیکی‌ها)

(D)	F1	F2	F3	F4	F5	F6
F1	۰	۰/۱۸۴	۰/۱۹۵	۰/۱۴۵	۰/۱۸۲	۰/۱۶۳
F2	۰/۱۹۹	۰	۰/۲۲۵	۰/۱۸۴	۰/۱۷۲	۰/۲۲
F3	۰/۱۸۶	۰/۱۸۴	۰	۰/۱۶۶	۰/۱۶۱	۰/۱۸۲
F4	۰/۱۵۶	۰/۱۶۸	۰/۱۶۵	۰	۰/۱۶۸	۰/۲۰۶
F5	۰/۱۹۱	۰/۱۹۷	۰/۱۶۳	۰/۲۱۳	۰	۰/۲۲۲
F6	۰/۱۷۴	۰/۱۹۷	۰/۱۸۴	۰/۲۲۵	۰/۱۹۹	۰

عوامل عمومی، اجرایی و قراردادی

(D)	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7
E1	۰	۰/۱۵۴	۰/۱۶۴	۰/۱۶۹	۰/۱۸۴	۰/۱۵۳	۰/۱۲
E2	۰/۱۳۹	۰	۰/۱۶۵	۰/۱۳۸	۰/۱۵	۰/۱۴	۰/۱۲۴
E3	۰/۱۴۹	۰/۱۵۸	۰	۰/۱۵۷	۰/۱۷۳	۰/۱۷۳	۰/۱۱۵
E4	۰/۱۶۱	۰/۱۲۵	۰/۱۵۳	۰	۰/۱۶۲	۰/۱۴۳	۰/۱۳۴
E5	۰/۱۴۷	۰/۱۲۴	۰/۱۵۸	۰/۱۶۲	۰	۰/۱۷۹	۰/۱۲۳
E6	۰/۱۵۸	۰/۱۶۱	۰/۱۷۳	۰/۱۶۵	۰/۱۷۴	۰	۰/۱۶۸
E7	۰/۱۰۵	۰/۱۱۷	۰/۱۳۴	۰/۱۵۱	۰/۱۵۷	۰/۱۹۱	۰

پ ۳-۳ ماتریس روابط کلی برای تمامی پارامترها

عوامل ژئومکانیکی

A7	A6	A5	A4	A3	A2	A1	(T)
۱/۳۳۳	۱/۲۵۷	۱/۳۱۱	۱/۲۵۹	۱/۴۰۷	۱/۱۹۱	۱/۰۸۷	A1
۱/۲۶۳	۱/۱۷	۱/۲۳۲	۱/۱۹۸	۱/۳۳۴	۱/۰۰۱	۱/۱۴۸	A2
۱/۳۵۸	۱/۲۶۲	۱/۳۲۱	۱/۲۷۷	۱/۲۷۴	۱/۲	۱/۲۲۳	A3
۱/۳۱۹	۱/۲۳۷	۱/۲۸۹	۱/۱۱۷	۱/۴۱	۱/۱۷۴	۱/۱۹۸	A4
۱/۱۴۲	۱/۰۴	-۰/۹۹۱	۱/۰۷۲	۱/۱۹۷	۱/۰۰۷	۱/۰۴۲	A5
۱/۱۰۴	-۰/۹۱۴	۱/۰۴۷	۱/۰۴۳	۱/۱۶۴	-۰/۹۵۷	-۰/۹۹۹	A6
۱/۲۲	۱/۲۷۴	۱/۳۳۸	۱/۲۸۳	۱/۴۴۲	۱/۲۱۳	۱/۲۴۳	A7

مطالعات و طراحی

B5	B4	B3	B2	B1	(T)
۱/۷۳۳	۱/۷۸	۱/۷۷۵	۱/۷۰۳	۱/۴۵۹	B1
۱/۵۹۸	۱/۶۳۸	۱/۶۲۹	۱/۳۶۶	۱/۵۲۴	B2
۱/۵۶۳	۱/۵۹۳	۱/۳۹۸	۱/۴۹۵	۱/۴۷۹	B3
۱/۶۱۳	۱/۴۴۷	۱/۶۲۱	۱/۵۳۱	۱/۵۱۷	B4
۱/۲۲۷	۱/۴۳۱	۱/۴۰۶	۱/۳۲۷	۱/۲۹۴	B5

سیستم نگهداری، تحکیمات و کنترل زمین

C7	C6	C5	C4	C3	C2	C1	(T)
۱/۱۸۳	۱/۱۱۹	۱/۱۴۶	۱/۲۰۶	۱/۱۹۱	۱/۲۲	۱/۰۶	C1
۱/۰۶۴	۱/۰۲	۱/۰۴۶	۱/۰۹۳	۱/۰۷۴	-۰/۹۶۳	۱/۰۹۶	C2
۱/۰۶۴	-۰/۹۸۸	۱/۰۱۴	۱/۰۵۱	-۰/۹۲۷	۱/۰۶۷	۱/۰۸۴	C3
۱/۱۲۲	۱/۰۶۱	۱/۰۸۲	-۰/۹۹۸	۱/۱۲۷	۱/۱۳۲	۱/۱۳۴	C4
۱/۰۱	-۰/۹۵۸	-۰/۸۶۲	۱/۰۳۷	۱/۰۰۸	۱/۰۳۶	۱/۰۳۵	C5
-۰/۹۶۶	-۰/۸۰۵	-۰/۹۲۸	-۰/۹۸۷	-۰/۹۶	-۰/۹۹۵	-۰/۹۸۴	C6
-۰/۸۸۴	-۰/۹۴۲	-۰/۹۶۷	۱/۰۳۱	۱/۰۲۳	۱/۰۱۹	۱/۰۱۲	C7

شرایط زمین‌شناسی و جغرافیایی ساختگاه

D6	D5	D4	D3	D2	D1	(T)
۱/۶۷۷	۱/۸۹۱	۱/۸۳۴	۱/۳۷۴	۱/۶۷۴	۱/۵۹۴	D1
۱/۳۲۴	۱/۴۸۳	۱/۴۳۲	۱/۰۲۷	۱/۱۶۸	۱/۳۹۲	D2
۱/۲۸۸	۱/۴۷	۱/۵۰۹	-۰/۹۵۶	۱/۳۱۵	۱/۴۳۱	D3
۱/۳۵۵	۱/۵۲۶	۱/۳۳۷	۱/۱۰۵	۱/۳۴۲	۱/۴۳۷	D4
۱/۵۴۵	۱/۵۱۳	۱/۶۵۵	۱/۱۶۸	۱/۴۹۶	۱/۵۹۳	D5
۱/۱۹۳	۱/۵۰۹	۱/۴۴	۱/۰۲۶	۱/۳۲۴	۱/۴۰۸	D6

عوامل عمومی، اجرایی و قراردادی

E7	E6	E5	E4	E3	E2	E1	(T)
۱/۲۹۷	۱/۵۷۳	۱/۶۲۶	۱/۵۴۱	۱/۵۴۴	۱/۳۹۷	۱/۲۹۵	E1
۱/۲۰۴	۱/۴۴۷	۱/۴۸۲	۱/۴۰۴	۱/۴۳۲	۱/۱۶۲	۱/۳۱۲	E2
۱/۲۷۴	۱/۵۶۵	۱/۵۹۴	۱/۵۰۹	۱/۳۸۱	۱/۳۸۱	۱/۴۰۴	E3
۱/۲۳۷	۱/۴۸	۱/۵۲۳	۱/۳۱۳	۱/۴۵۲	۱/۳	۱/۳۵۶	E4
۱/۲۴۹	۱/۵۳	۱/۴۰۷	۱/۴۷۶	۱/۴۷۹	۱/۳۲	۱/۳۶۷	E5
۱/۳۹۳	۱/۵۱۳	۱/۶۹۲	۱/۶۰۷	۱/۶۲	۱/۴۶۵	۱/۴۹۵	E6
۱/۰۹۷	۱/۴۸۹	۱/۴۸۹	۱/۴۱۷	۱/۴۱	۱/۲۶۹	۱/۲۸۸	E7

شرایط خاص (تکنیکی‌ها)

F6	F5	F4	F3	F2	F1	(T)
۲/۲۰۸	۲/۰۲۷	۲/۰۹۴	۲/۱۲۶	۲/۱۱۴	۱/۹۱۲	F1
۲/۵۰۲	۲/۲۵	۲/۳۶۵	۲/۳۸۹	۲/۱۹۹	۲/۳۱۳	F2
۲/۲۴۱	۲/۰۲۹	۲/۱۲۸	۱/۹۸۱	۲/۱۳۲	۲/۰۸۶	F3
۲/۲۲۶	۲/۰۰۶	۱/۹۵۶	۲/۰۹۱	۲/۰۹	۲/۰۳۴	F4
۲/۴۸۲	۲/۰۸۴	۲/۳۶۵	۲/۳۲۲	۲/۳۴۲	۲/۲۸۶	F5
۲/۲۸۳	۲/۲۳۳	۲/۳۵۷	۲/۳۲۱	۲/۳۲۵	۲/۲۵۷	F6

پ ۳-۴ نتایج نهایی علت و معلولی DEMATEL

معیارها	علت	معلول
عوامل ژئومکانیکی	تنش‌های برجا آنیزوتروپی توده سنگ نوع سنگ و مشخصات سنگ بکر زون‌های ضعیف	کیفیت توده سنگ وجود پتانسیل لهیدگی وجود پتانسیل آماس
مطالعات و طراحی	سطح مطالعات اکتشافی پیش از ساخت پیش‌بینی صحیح رفتار و شرایط زمین	سطح محاسبات طراحی و فرضیات طراحی انتخاب صحیح روش اجرایی و تحکیمات به‌کارگیری بازطراحی و بازنگری طراحی حین اجرا
سیستم نگهداری، تحکیمات و کنترل زمین	مشخصات فنی اجرایی نگهداری، تحکیمات و کنترل زمین زمان و فاصله نصب سیستم نگهداری از سینه‌کار	مشخصات فنی اجرایی سیستم بهسازی زمین قابلیت تغییر سیستم نگهداری با توجه به شرایط مختلف کنترل اضافه حفاری و پر کردن فضای خالی پشت نگهداری نوع سیستم زهکشی و درستی عملکرد آن نحوه واکنش به شرایط پیش‌بینی نشده
شرایط زمین-شناسی و جغرافیایی ساختگاه	وضعیت توپوگرافی و سطح الارض ساختگاه وضعیت آب‌وهوایی	نوع ساختگاه (شهری، راه و ...) و معارضین سطح و وضعیت آب زیرزمینی عوارض زمین‌شناسی (گسل، چین‌خوردگی، کارست و...) جهت‌داری ناپیوستگی‌ها نسبت به محور تونل
عوامل عمومی، اجرایی و قراردادی	سطح حساسیت و اهمیت پروژه انعطاف قرارداد در خصوص مسائل فنی-مالی-اجرایی روش حفاری تونل شکل هندسی، شیب، ابعاد و سطح مقطع تونل	تأمین مالی و هزینه‌های اجرایی رعایت مشخصات کیفی و فنی سطح توانمندی و مهارت و تجهیزات پیمانکار
شرایط خاص (تکینگی‌ها)	زون‌های شدیداً خورد شده و گسله روباره کم و یا بسیار زیاد	وجود سینه‌کار مختلط گل‌ولای آبدار، لنزهای شن و ماسه وجود سازه‌های مجاور در مجاورت و نزدیکی تونل زون پرتالی، تقاطع تونل‌ها و اینترسکشن

پیوست ۴: فرم های نظرسنجی پرسش نامه در روش *ANP*

پ ۴-۱ فرم ارسال شده برای دسته پارامترها

معیار i	اولویت‌ها																	معیار j
عوامل ژئومکانیکی	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	مطالعات و طراحی
عوامل ژئومکانیکی	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	سیستم نگهداری و تحکیمات و کنترل زمین
عوامل ژئومکانیکی	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	شرایط زمین‌شناسی و جغرافیایی ساختگاه
عوامل ژئومکانیکی	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	عوامل عمومی، اجرایی و قراردادی
عوامل ژئومکانیکی	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	شرایط خاص (تکینگی‌ها)
مطالعات و طراحی	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	سیستم نگهداری و تحکیمات و کنترل زمین
مطالعات و طراحی	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	شرایط زمین‌شناسی و جغرافیایی ساختگاه
مطالعات و طراحی	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	عوامل عمومی، اجرایی و قراردادی
مطالعات و طراحی	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	شرایط خاص (تکینگی‌ها)
سیستم نگهداری و تحکیمات و کنترل زمین	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	شرایط زمین‌شناسی و جغرافیایی ساختگاه
سیستم نگهداری و تحکیمات و کنترل زمین	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	عوامل عمومی، اجرایی و قراردادی
سیستم نگهداری و تحکیمات و کنترل زمین	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	شرایط خاص (تکینگی‌ها)
شرایط زمین‌شناسی و جغرافیایی ساختگاه	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	عوامل عمومی، اجرایی و قراردادی
شرایط زمین‌شناسی و جغرافیایی ساختگاه	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	شرایط خاص (تکینگی‌ها)
عوامل عمومی، اجرایی و قراردادی	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	شرایط خاص (تکینگی‌ها)

پ ۴-۲ فرم ارسال شده برای پارامترهای عوامل ژئومکانیکی

معیار i	اولویت‌ها																معیار j	
تنش‌های برجا	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	آنیزوتروپی توده‌سنگ
تنش‌های برجا	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	کیفیت توده‌سنگ
تنش‌های برجا	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	نوع سنگ و مشخصات سنگ بکر
تنش‌های برجا	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	وجود پتانسیل لهیدگی
تنش‌های برجا	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	وجود پتانسیل آماس
تنش‌های برجا	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	زون‌های ضعیف
آنیزوتروپی توده‌سنگ	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	کیفیت توده‌سنگ
آنیزوتروپی توده‌سنگ	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	نوع سنگ و مشخصات سنگ بکر
آنیزوتروپی توده‌سنگ	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	وجود پتانسیل لهیدگی
آنیزوتروپی توده‌سنگ	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	وجود پتانسیل آماس
آنیزوتروپی توده‌سنگ	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	زون‌های ضعیف
کیفیت توده‌سنگ	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	نوع سنگ و مشخصات سنگ بکر
کیفیت توده‌سنگ	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	وجود پتانسیل لهیدگی
کیفیت توده‌سنگ	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	وجود پتانسیل آماس
کیفیت توده‌سنگ	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	زون‌های ضعیف
نوع سنگ و مشخصات سنگ بکر	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	وجود پتانسیل لهیدگی
نوع سنگ و مشخصات سنگ بکر	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	وجود پتانسیل آماس
نوع سنگ و مشخصات سنگ بکر	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	زون‌های ضعیف
وجود پتانسیل لهیدگی	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	وجود پتانسیل آماس
وجود پتانسیل لهیدگی	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	زون‌های ضعیف
وجود پتانسیل آماس	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	زون‌های ضعیف

پ ۴-۳ فرم ارسال شده برای پارامترهای مطالعات و طراحی

معیار i	اولویت‌ها																معیار j
سطح مطالعات اکتشافی پیش از ساخت	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	پیش‌بینی صحیح رفتار و شرایط زمین
سطح مطالعات اکتشافی پیش از ساخت	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	سطح محاسبات و طراحی فرضیات
سطح مطالعات اکتشافی پیش از ساخت	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	انتخاب صحیح روش اجرایی و تحکیمات
سطح مطالعات اکتشافی پیش از ساخت	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	به‌کارگیری بازطراحی و بازنگری طراحی حین اجرا
پیش‌بینی صحیح رفتار و شرایط زمین	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	سطح محاسبات و طراحی فرضیات
پیش‌بینی صحیح رفتار و شرایط زمین	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	انتخاب صحیح روش اجرایی و تحکیمات
پیش‌بینی صحیح رفتار و شرایط زمین	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	به‌کارگیری بازطراحی و بازنگری طراحی حین اجرا
سطح محاسبات و طراحی فرضیات	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	انتخاب صحیح روش اجرایی و تحکیمات
سطح محاسبات و طراحی فرضیات	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	به‌کارگیری بازطراحی و بازنگری طراحی حین اجرا
انتخاب صحیح روش اجرایی و تحکیمات	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	به‌کارگیری بازطراحی و بازنگری طراحی حین اجرا

پ ۴-۴ فرم ارسال شده برای پارامترهای شرایط زمین‌شناسی و جغرافیایی ساختگاه

معیار i	الویت‌ها																معیار j
وضعیت توپوگرافی و سطح الارض ساختگاه	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	نوع ساختگاه (شهری، راه و ...) و معارضین
وضعیت توپوگرافی و سطح الارض ساختگاه	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	وضعیت آب‌وهوایی
وضعیت توپوگرافی و سطح الارض ساختگاه	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	سطح و وضعیت آب زیرزمینی
وضعیت توپوگرافی و سطح الارض ساختگاه	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	عوارض زمین‌شناسی (گسل، چین‌خوردگی و ...)
وضعیت توپوگرافی و سطح الارض ساختگاه	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	جهت‌داری ناپیوستگی‌ها نسبت به محور تونل
نوع ساختگاه (شهری، راه و ...) و معارضین	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	وضعیت آب‌وهوایی
نوع ساختگاه (شهری، راه و ...) و معارضین	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	سطح و وضعیت آب زیرزمینی
نوع ساختگاه (شهری، راه و ...) و معارضین	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	عوارض زمین‌شناسی (گسل، چین‌خوردگی و ...)
نوع ساختگاه (شهری، راه و ...) و معارضین	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	جهت‌داری ناپیوستگی‌ها نسبت به محور تونل
وضعیت آب‌وهوایی	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	سطح و وضعیت آب زیرزمینی
وضعیت آب‌وهوایی	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	عوارض زمین‌شناسی (گسل، چین‌خوردگی و ...)
وضعیت آب‌وهوایی	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	جهت‌داری ناپیوستگی‌ها نسبت به محور تونل
سطح و وضعیت آب زیرزمینی	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	عوارض زمین‌شناسی (گسل، چین‌خوردگی و ...)
سطح و وضعیت آب زیرزمینی	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	جهت‌داری ناپیوستگی‌ها نسبت به محور تونل
عوارض زمین‌شناسی (گسل، چین‌خوردگی و ...)	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	جهت‌داری ناپیوستگی‌ها نسبت به محور تونل

پ ۴-۵ فرم ارسال شده برای پارامترهای شرایط خاص (تکینگی‌ها)

معیار i	اولویت‌ها																معیار j
وجود سینه‌کار مختلط	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	زون‌های شدیداً خورد شده و گسله
وجود سینه‌کار مختلط	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	گل‌ولای آبدار، لنزهای شن و ماسه
وجود سینه‌کار مختلط	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	وجود سازه‌های مجاور در مجاورت و نزدیکی تونل
وجود سینه‌کار مختلط	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	روباره کم و یا بسیار زیاد
وجود سینه‌کار مختلط	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	زون پرتالی، تقاطع تونل‌ها و اینترسکشن
زون‌های شدیداً خورد شده و گسله	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	گل‌ولای آبدار، لنزهای شن و ماسه
زون‌های شدیداً خورد شده و گسله	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	وجود سازه‌های مجاور در مجاورت و نزدیکی تونل
زون‌های شدیداً خورد شده و گسله	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	روباره کم و یا بسیار زیاد
زون‌های شدیداً خورد شده و گسله	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	زون پرتالی، تقاطع تونل‌ها و اینترسکشن
گل‌ولای آبدار، لنزهای شن و ماسه	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	وجود سازه‌های مجاور در مجاورت و نزدیکی تونل
گل‌ولای آبدار، لنزهای شن و ماسه	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	روباره کم و یا بسیار زیاد
گل‌ولای آبدار، لنزهای شن و ماسه	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	زون پرتالی، تقاطع تونل‌ها و اینترسکشن
وجود سازه‌های مجاور در نزدیکی تونل‌ها	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	روباره کم و یا بسیار زیاد
وجود سازه‌های مجاور در نزدیکی تونل‌ها	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	زون پرتالی، تقاطع تونل‌ها و اینترسکشن
روباره کم و یا بسیار زیاد	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	زون پرتالی، تقاطع تونل‌ها و اینترسکشن

پ ۴-۶ فرم ارسال شده برای پارامترهای سیستم نگهداری، تحکیمات و کنترل زمین

معیار i	اولویت‌ها																معیار j	
مشخصات فنی اجرایی نگهداری، تحکیمات و کنترل زمین	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	مشخصات فنی اجرایی سیستم بهسازی زمین
مشخصات فنی اجرایی نگهداری، تحکیمات و کنترل زمین	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	قابلیت تغییر سیستم نگهداری با توجه به شرایط مختلف
مشخصات فنی اجرایی نگهداری، تحکیمات و کنترل زمین	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	زمان و فاصله نصب سیستم نگهداری از سینه‌کار
مشخصات فنی اجرایی نگهداری، تحکیمات و کنترل زمین	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	کنترل اضافه حفاری و پر کردن فضای خالی پشت سیستم نگهداری
مشخصات فنی اجرایی نگهداری، تحکیمات و کنترل زمین	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	نوع سیستم زهکشی و درستی عملکرد آن
مشخصات فنی اجرایی نگهداری، تحکیمات و کنترل زمین	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	نحوه واکنش به شرایط پیش‌بینی‌نشده
مشخصات فنی اجرایی سیستم بهسازی زمین	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	قابلیت تغییر سیستم نگهداری با توجه به شرایط مختلف
مشخصات فنی اجرایی سیستم بهسازی زمین	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	زمان و فاصله نصب سیستم نگهداری از سینه‌کار
مشخصات فنی اجرایی سیستم بهسازی زمین	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	کنترل اضافه حفاری و پر کردن فضای خالی پشت سیستم نگهداری
مشخصات فنی اجرایی سیستم بهسازی زمین	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	نوع سیستم زهکشی و درستی عملکرد آن
مشخصات فنی اجرایی سیستم بهسازی زمین	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	نحوه واکنش به شرایط پیش‌بینی‌نشده
قابلیت تغییر سیستم نگهداری با توجه به شرایط مختلف	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	زمان و فاصله نصب سیستم نگهداری از سینه‌کار
قابلیت تغییر سیستم نگهداری با توجه به شرایط مختلف	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	کنترل اضافه حفاری و پر کردن فضای خالی پشت سیستم نگهداری
قابلیت تغییر سیستم نگهداری با توجه به شرایط مختلف	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	نوع سیستم زهکشی و درستی عملکرد آن
قابلیت تغییر سیستم نگهداری با توجه به شرایط مختلف	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	نحوه واکنش به شرایط پیش‌بینی‌نشده
زمان و فاصله نصب سیستم نگهداری از سینه‌کار	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	کنترل اضافه حفاری و پر کردن فضای خالی پشت سیستم نگهداری
زمان و فاصله نصب سیستم نگهداری از سینه‌کار	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	نوع سیستم زهکشی و درستی عملکرد آن
زمان و فاصله نصب سیستم نگهداری از سینه‌کار	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	نحوه واکنش به شرایط پیش‌بینی‌نشده
کنترل اضافه حفاری و پر کردن فضای خالی پشت سیستم نگهداری	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	نوع سیستم زهکشی و درستی عملکرد آن
کنترل اضافه حفاری و پر کردن فضای خالی پشت سیستم نگهداری	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	نوع سیستم زهکشی و درستی عملکرد آن

پ ۴-۷ فرم ارسال شده برای پارامترهای عوامل عمومی، اجرایی و قراردادی

معیار i	اولویت‌ها																	معیار j
سطح حساسیت و اهمیت پروژه	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	انعطاف قرارداد درخصوص مسائل فنی-مالی-اجرایی
سطح حساسیت و اهمیت پروژه	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	تأمین مالی و هزینه های اجرایی
سطح حساسیت و اهمیت پروژه	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	رعایت مشخصات کیفی و فنی
سطح حساسیت و اهمیت پروژه	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	سطح توانمندی و مهارت و تجهیزات پیمانکار
سطح حساسیت و اهمیت پروژه	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	روش حفاری تونل (TBM, D&B, SEM, NATM,...)
سطح حساسیت و اهمیت پروژه	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	شکل هندسی، شیب، ابعاد و سطح مقطع تونل
انعطاف قرارداد درخصوص مسائل فنی-مالی-اجرایی	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	تأمین مالی و هزینه های اجرایی
انعطاف قرارداد درخصوص مسائل فنی-مالی-اجرایی	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	رعایت مشخصات کیفی و فنی
انعطاف قرارداد درخصوص مسائل فنی-مالی-اجرایی	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	سطح توانمندی و مهارت و تجهیزات پیمانکار
انعطاف قرارداد درخصوص مسائل فنی-مالی-اجرایی	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	روش حفاری تونل (TBM, D&B, SEM, NATM,...)
انعطاف قرارداد درخصوص مسائل فنی-مالی-اجرایی	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	شکل هندسی، شیب، ابعاد و سطح مقطع تونل
تأمین مالی و هزینه‌های اجرایی	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	رعایت مشخصات کیفی و فنی
تأمین مالی و هزینه‌های اجرایی	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	سطح توانمندی و مهارت و تجهیزات پیمانکار
تأمین مالی و هزینه‌های اجرایی	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	روش حفاری تونل (TBM, D&B, SEM, NATM,...)
تأمین مالی و هزینه‌های اجرایی	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	شکل هندسی، شیب، ابعاد و سطح مقطع تونل
رعایت مشخصات کیفی و فنی	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	سطح توانمندی و مهارت و تجهیزات پیمانکار
رعایت مشخصات کیفی و فنی	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	روش حفاری تونل (TBM, D&B, SEM, NATM,...)
رعایت مشخصات کیفی و فنی	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	شکل هندسی، شیب، ابعاد و سطح مقطع تونل
سطح توانمندی و مهارت و تجهیزات پیمانکار	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	روش حفاری تونل (TBM, D&B, SEM, NATM,...)
سطح توانمندی و مهارت و تجهیزات پیمانکار	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	شکل هندسی، شیب، ابعاد و سطح مقطع تونل
روش حفاری تونل (TBM, D&B, SEM, NATM,...)	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	شکل هندسی، شیب، ابعاد و سطح مقطع تونل

پ ۴-۸ فرم ارسال شده جهت تعیین روابط درونی در دسته پارامتر سیستم نگهداری، تحکیمات و کنترل زمین

معیار j	اولویت‌ها																معیار i	
عوامل عمومی، اجرایی و قراردادی	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	مطالعات و طراحی

پ ۴-۹ فرم ارسال شده جهت تعیین روابط درونی در دسته پارامتر عوامل ژئومکانیکی

معیار i	اولویت‌ها																معیار j
مطالعات و طراحی	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	سیستم نگهداری و تحکیمات و کنترل زمین
مطالعات و طراحی	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	شرایط زمین‌شناسی و جغرافیایی ساختگاه
مطالعات و طراحی	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	عوامل عمومی، اجرایی و قراردادی
مطالعات و طراحی	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	شرایط خاص (تکنیکی‌ها)
سیستم نگهداری و تحکیمات و کنترل زمین	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	شرایط زمین‌شناسی و جغرافیایی ساختگاه
سیستم نگهداری و تحکیمات و کنترل زمین	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	عوامل عمومی، اجرایی و قراردادی
سیستم نگهداری و تحکیمات و کنترل زمین	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	شرایط خاص (تکنیکی‌ها)
شرایط زمین‌شناسی و جغرافیایی ساختگاه	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	عوامل عمومی، اجرایی و قراردادی
شرایط زمین‌شناسی و جغرافیایی ساختگاه	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	شرایط خاص (تکنیکی‌ها)
عوامل عمومی، اجرایی و قراردادی	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	شرایط خاص (تکنیکی‌ها)

پ ۴-۱۰ فرم ارسال شده جهت تعیین روابط درونی در دسته پارامتر شرایط زمین‌شناسی و جغرافیایی ساختگاه

معیار i	اولویت‌ها																معیار j
عوامل ژئومکانیکی	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	مطالعات و طراحی
عوامل ژئومکانیکی	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	سیستم نگهداری و تحکیمات و کنترل زمین
عوامل ژئومکانیکی	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	عوامل عمومی، اجرایی و قراردادی
عوامل ژئومکانیکی	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	شرایط خاص (تکنیکی‌ها)
مطالعات و طراحی	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	سیستم نگهداری و تحکیمات و کنترل زمین
مطالعات و طراحی	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	عوامل عمومی، اجرایی و قراردادی
مطالعات و طراحی	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	شرایط خاص (تکنیکی‌ها)
سیستم نگهداری، تحکیمات و کنترل زمین	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	عوامل عمومی، اجرایی و قراردادی
سیستم نگهداری، تحکیمات و کنترل زمین	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	شرایط خاص (تکنیکی‌ها)
عوامل عمومی، اجرایی و قراردادی	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	شرایط خاص (تکنیکی‌ها)

پ ۴-۱۱ فرم ارسال شده جهت تعیین روابط درونی در دسته پارامتر شرایط خاص (تکنیکی‌ها)

معیار i	اولویت‌ها																معیار j
مطالعات و طراحی	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	سیستم نگهداری و تحکیمات و کنترل زمین
مطالعات و طراحی	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	عوامل عمومی، اجرایی و قراردادی
سیستم نگهداری و تحکیمات و کنترل زمین	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	عوامل عمومی، اجرایی و قراردادی

پ ۴-۱۲ فرم ارسال شده جهت تعیین روابط درونی در پارامتر تنش‌های برجا

معیار i	اولویت‌ها																معیار j
کیفیت توده سنگ	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	نوع سنگ و مشخصات سنگ بکر
کیفیت توده سنگ	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	وجود پتانسیل لهیدگی
کیفیت توده سنگ	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	وجود پتانسیل آماس
کیفیت توده سنگ	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	زون‌های ضعیف
نوع سنگ و مشخصات سنگ بکر	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	وجود پتانسیل لهیدگی
نوع سنگ و مشخصات سنگ بکر	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	وجود پتانسیل آماس
نوع سنگ و مشخصات سنگ بکر	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	زون‌های ضعیف
وجود پتانسیل لهیدگی	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	وجود پتانسیل آماس
وجود پتانسیل لهیدگی	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	زون‌های ضعیف
وجود پتانسیل آماس	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	زون‌های ضعیف

پ ۴-۱۳ فرم ارسال شده جهت تعیین روابط درونی در پارامتر آنیزوتروپی توده سنگ

معیار i																		اولویت‌ها																		معیار j
کیفیت توده‌سنگ																		۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	نوع سنگ و مشخصات سنگ بکر	
کیفیت توده‌سنگ																		۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	وجود پتانسیل لهیدگی	
کیفیت توده‌سنگ																		۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	زون‌های ضعیف	
نوع سنگ و مشخصات سنگ بکر																		۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	وجود پتانسیل لهیدگی	
نوع سنگ و مشخصات سنگ بکر																		۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	زون‌های ضعیف	
وجود پتانسیل لهیدگی																		۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	زون‌های ضعیف	

پ ۴-۱۴ فرم ارسال شده جهت تعیین روابط درونی در پارامتر کیفیت توده سنگ

معیار i	اولویت‌ها																معیار j	
تنش‌های برجا	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	آنیزوتروپی توده‌سنگ
تنش‌های برجا	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	نوع سنگ و مشخصات سنگ بکر
تنش‌های برجا	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	وجود پتانسیل لهیدگی
تنش‌های برجا	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	وجود پتانسیل آماس
تنش‌های برجا	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	زون‌های ضعیف
آنیزوتروپی توده‌سنگ	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	نوع سنگ و مشخصات سنگ بکر
آنیزوتروپی توده‌سنگ	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	وجود پتانسیل لهیدگی
آنیزوتروپی توده‌سنگ	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	وجود پتانسیل آماس
آنیزوتروپی توده‌سنگ	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	زون‌های ضعیف
نوع سنگ و مشخصات سنگ بکر	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	وجود پتانسیل لهیدگی
نوع سنگ و مشخصات سنگ بکر	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	وجود پتانسیل آماس
نوع سنگ و مشخصات سنگ بکر	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	زون‌های ضعیف
وجود پتانسیل لهیدگی	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	وجود پتانسیل آماس
وجود پتانسیل لهیدگی	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	زون‌های ضعیف
وجود پتانسیل آماس	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	زون‌های ضعیف

پ ۴-۱۵ فرم ارسال شده جهت تعیین روابط درونی در پارامتر نوع سنگ و مشخصات سنگ بکر

معیار i	اولویت‌ها																معیار j	
تنش‌های برجا	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	کیفیت توده‌سنگ
تنش‌های برجا	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	وجود پتانسیل لهیدگی
تنش‌های برجا	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	وجود پتانسیل آماس
تنش‌های برجا	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	زون‌های ضعیف
کیفیت توده‌سنگ	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	وجود پتانسیل لهیدگی
کیفیت توده‌سنگ	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	وجود پتانسیل آماس
کیفیت توده‌سنگ	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	زون‌های ضعیف
وجود پتانسیل لهیدگی	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	وجود پتانسیل آماس
وجود پتانسیل لهیدگی	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	زون‌های ضعیف
وجود پتانسیل آماس	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	زون‌های ضعیف

پ ۴-۱۶ فرم ارسال شده جهت تعیین روابط درونی در پارامتر زون های ضعیف

معیار i	اولویت‌ها																معیار j	
تنش‌های برجا	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	آنیزوتروپی توده‌سنگ
تنش‌های برجا	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	کیفیت توده‌سنگ
تنش‌های برجا	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	نوع سنگ و مشخصات سنگ بکر
تنش‌های برجا	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	وجود پتانسیل لهیدگی
تنش‌های برجا	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	وجود پتانسیل آماس
آنیزوتروپی توده‌سنگ	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	کیفیت توده‌سنگ
آنیزوتروپی توده‌سنگ	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	نوع سنگ و مشخصات سنگ بکر
آنیزوتروپی توده‌سنگ	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	وجود پتانسیل لهیدگی
آنیزوتروپی توده‌سنگ	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	وجود پتانسیل آماس
کیفیت توده‌سنگ	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	نوع سنگ و مشخصات سنگ بکر
کیفیت توده‌سنگ	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	وجود پتانسیل لهیدگی
کیفیت توده‌سنگ	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	وجود پتانسیل آماس
نوع سنگ و مشخصات سنگ بکر	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	وجود پتانسیل لهیدگی
نوع سنگ و مشخصات سنگ بکر	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	وجود پتانسیل آماس
وجود پتانسیل لهیدگی	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	وجود پتانسیل آماس

پ ۴-۱۷ فرم ارسال شده جهت تعیین روابط درونی در پارامتر سطح مطالعات اکتشافی پیش از ساخت

اولویت‌ها																		معیار i
																		معیار j
۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	پیش‌بینی صحیح رفتار و شرایط زمین	
۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	پیش‌بینی صحیح رفتار و شرایط زمین	
۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	پیش‌بینی صحیح رفتار و شرایط زمین	
۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	سطح محاسبات طراحی و فرضیات طراحی	
۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	سطح محاسبات طراحی و فرضیات طراحی	
۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	انتخاب صحیح روش اجرایی و تحکیمات	
۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	به‌کارگیری بازطراحی و بازنگری طراحی حین اجرا	

پ ۴-۱۸ فرم ارسال شده جهت تعیین روابط درونی در پارامتر پیش بینی صحیح رفتار و شرایط زمین

اولویت‌ها																		معیار i																	
معیار j																																			
انتخاب صحیح روش اجرایی و تحکیمات																		۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	سطح محاسبات طراحی و فرضیات طراحی
به‌کارگیری بازطراحی و بازنگری طراحی حین اجرا																		۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	سطح محاسبات طراحی و فرضیات طراحی
به‌کارگیری بازطراحی و بازنگری طراحی حین اجرا																		۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	انتخاب صحیح روش اجرایی و تحکیمات

پ ۴-۱۹ فرم ارسال شده جهت تعیین روابط درونی در پارامتر سطح محاسبات طراحی و فرضیات طراحی

اولویت‌ها																	معیار i	
معیار j																		
انتخاب صحیح روش اجرایی و تحکیمات	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	به‌کارگیری بازطراحی و بازنگری طراحی حین اجرا

پ ۴-۲۰ فرم ارسال شده جهت تعیین روابط درونی در پارامتر انتخاب صحیح روش اجرایی و تحکیمات

معیار i																		اولویت‌ها										معیار j							
پیش‌بینی صحیح رفتار و شرایط زمین																		۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	سطح محاسبات طراحی و فرضیات طراحی
پیش‌بینی صحیح رفتار و شرایط زمین																		۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	به‌کارگیری بازطراحی و بازنگری طراحی حین اجرا
سطح محاسبات طراحی و فرضیات طراحی																		۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	به‌کارگیری بازطراحی و بازنگری طراحی حین اجرا

پ ۴-۲۱ فرم ارسال شده جهت تعیین روابط درونی در پارامتر مشخصات فنی اجرایی سیستم نگهداری، تحکیمات و کنترل زمین

معیار i	اولویت‌ها																معیار j	
مشخصات فنی اجرایی سیستم بهسازی زمین	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	قابلیت تغییر سیستم نگهداری با توجه به شرایط مختلف
مشخصات فنی اجرایی سیستم بهسازی زمین	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	زمان و فاصله نصب سیستم نگهداری از سینه کار
مشخصات فنی اجرایی سیستم بهسازی زمین	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	کنترل اضافه حفاری و پر کردن فضای خالی پشت سیستم نگهداری
مشخصات فنی اجرایی سیستم بهسازی زمین	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	نوع سیستم زهکشی و درستی عملکرد آن
مشخصات فنی اجرایی سیستم بهسازی زمین	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	نحوه واکنش به شرایط پیش‌بینی نشده
قابلیت تغییر سیستم نگهداری با توجه به شرایط مختلف	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	زمان و فاصله نصب سیستم نگهداری از سینه کار
قابلیت تغییر سیستم نگهداری با توجه به شرایط مختلف	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	کنترل اضافه حفاری و پر کردن فضای خالی پشت سیستم نگهداری
قابلیت تغییر سیستم نگهداری با توجه به شرایط مختلف	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	نوع سیستم زهکشی و درستی عملکرد آن
قابلیت تغییر سیستم نگهداری با توجه به شرایط مختلف	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	نحوه واکنش به شرایط پیش‌بینی نشده
زمان و فاصله نصب سیستم نگهداری از سینه کار	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	کنترل اضافه حفاری و پر کردن فضای خالی پشت سیستم نگهداری
زمان و فاصله نصب سیستم نگهداری از سینه کار	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	نوع سیستم زهکشی و درستی عملکرد آن
زمان و فاصله نصب سیستم نگهداری از سینه کار	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	نحوه واکنش به شرایط پیش‌بینی نشده
کنترل اضافه حفاری و پر کردن فضای خالی پشت سیستم نگهداری	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	نوع سیستم زهکشی و درستی عملکرد آن
کنترل اضافه حفاری و پر کردن فضای خالی پشت سیستم نگهداری	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	نحوه واکنش به شرایط پیش‌بینی نشده
نوع سیستم زهکشی و درستی عملکرد آن	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	نحوه واکنش به شرایط پیش‌بینی نشده

پ ۴-۲۲ فرم ارسال شده جهت تعیین روابط درونی در پارامتر قابلیت تغییر سیستم نگهداری با توجه به شرایط مختلف

معیار i																		اولویت‌ها																		معیار j
مشخصات فنی اجرایی نگهداری، تحکیمات و کنترل زمین																		۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	مشخصات فنی اجرایی سیستم بهسازی زمین	
مشخصات فنی اجرایی نگهداری، تحکیمات و کنترل زمین																		۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	زمان و فاصله نصب سیستم نگهداری از سینه‌کار	
مشخصات فنی اجرایی نگهداری، تحکیمات و کنترل زمین																		۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	نحوه واکنش به شرایط پیش‌بینی نشده	
مشخصات فنی اجرایی سیستم بهسازی زمین																		۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	زمان و فاصله نصب سیستم نگهداری از سینه‌کار	
مشخصات فنی اجرایی سیستم بهسازی زمین																		۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	نحوه واکنش به شرایط پیش‌بینی نشده	
زمان و فاصله نصب سیستم نگهداری از سینه‌کار																		۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	نحوه واکنش به شرایط پیش‌بینی نشده	

پ ۴-۲۳ فرم ارسال شده جهت تعیین روابط درونی در پارامتر مشخصات فنی اجرایی سیستم بهسازی زمین

معیار i	اولویت‌ها																معیار j
مشخصات فنی اجرایی نگهداری، تحکیمات و کنترل زمین	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	قابلیت تغییر سیستم نگهداری با توجه به شرایط مختلف
مشخصات فنی اجرایی نگهداری، تحکیمات و کنترل زمین	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	زمان و فاصله نصب سیستم نگهداری از سینه‌کار
مشخصات فنی اجرایی نگهداری، تحکیمات و کنترل زمین	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	کنترل اضافه حفاری و پر کردن فضای خالی پشت سیستم نگهداری
مشخصات فنی اجرایی نگهداری، تحکیمات و کنترل زمین	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	نحوه واکنش به شرایط پیش‌بینی نشده
قابلیت تغییر سیستم نگهداری با توجه به شرایط مختلف	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	زمان و فاصله نصب سیستم نگهداری از سینه‌کار
قابلیت تغییر سیستم نگهداری با توجه به شرایط مختلف	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	کنترل اضافه حفاری و پر کردن فضای خالی پشت سیستم نگهداری
قابلیت تغییر سیستم نگهداری با توجه به شرایط مختلف	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	نحوه واکنش به شرایط پیش‌بینی نشده
زمان و فاصله نصب سیستم نگهداری از سینه‌کار	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	کنترل اضافه حفاری و پر کردن فضای خالی پشت سیستم نگهداری
زمان و فاصله نصب سیستم نگهداری از سینه‌کار	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	نحوه واکنش به شرایط پیش‌بینی نشده
کنترل اضافه حفاری و پر کردن فضای خالی پشت سیستم نگهداری	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	نحوه واکنش به شرایط پیش‌بینی نشده

پ ۴-۲۴ فرم ارسال شده جهت تعیین روابط درونی در پارامتر زمان و فاصله نصب سیستم نگهداری از سینه‌کار

معیار i	اولویت‌ها																معیار j
مشخصات فنی اجرایی نگهداری، تحکیمات و کنترل زمین	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	مشخصات فنی اجرایی سیستم بهسازی زمین
مشخصات فنی اجرایی نگهداری، تحکیمات و کنترل زمین	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	قابلیت تغییر سیستم نگهداری با توجه به شرایط مختلف
مشخصات فنی اجرایی نگهداری، تحکیمات و کنترل زمین	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	کنترل اضافه حفاری و پر کردن فضای خالی پشت نگهداری
مشخصات فنی اجرایی نگهداری، تحکیمات و کنترل زمین	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	نوع سیستم زهکشی و درستی عملکرد آن
مشخصات فنی اجرایی نگهداری، تحکیمات و کنترل زمین	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	نحوه واکنش به شرایط پیش‌بینی نشده
مشخصات فنی اجرایی سیستم بهسازی زمین	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	قابلیت تغییر سیستم نگهداری با توجه به شرایط مختلف
مشخصات فنی اجرایی سیستم بهسازی زمین	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	کنترل اضافه حفاری و پر کردن فضای خالی پشت نگهداری
مشخصات فنی اجرایی سیستم بهسازی زمین	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	نوع سیستم زهکشی و درستی عملکرد آن
مشخصات فنی اجرایی سیستم بهسازی زمین	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	نحوه واکنش به شرایط پیش‌بینی نشده
قابلیت تغییر سیستم نگهداری با توجه به شرایط مختلف	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	کنترل اضافه حفاری و پر کردن فضای خالی پشت نگهداری
قابلیت تغییر سیستم نگهداری با توجه به شرایط مختلف	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	نوع سیستم زهکشی و درستی عملکرد آن
قابلیت تغییر سیستم نگهداری با توجه به شرایط مختلف	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	نحوه واکنش به شرایط پیش‌بینی نشده
نوع سیستم زهکشی و درستی عملکرد آن	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	کنترل اضافه حفاری و پر کردن فضای خالی پشت نگهداری
نوع سیستم زهکشی و درستی عملکرد آن	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	نحوه واکنش به شرایط پیش‌بینی نشده
کنترل اضافه حفاری و پر کردن فضای خالی پشت نگهداری	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	نحوه واکنش به شرایط پیش‌بینی نشده

پ ۴-۲۵ فرم ارسال شده جهت تعیین روابط درونی در پارامتر وضعیت توپوگرافی و سطح الارض ساختگاه

معیار i																		اولویت‌ها										معیار j							
نوع ساختگاه (شهری، راه و ...) و معارضین																		۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	سطح و وضعیت آب زیرزمینی
نوع ساختگاه (شهری، راه و ...) و معارضین																		۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	عوارض زمین‌شناسی (گسل، چین‌خوردگی و...)
نوع ساختگاه (شهری، راه و ...) و معارضین																		۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	جهت‌داری ناپیوستگی‌ها نسبت به محور تونل
سطح و وضعیت آب زیرزمینی																		۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	عوارض زمین‌شناسی (گسل، چین‌خوردگی و...)
سطح و وضعیت آب زیرزمینی																		۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	جهت‌داری ناپیوستگی‌ها نسبت به محور تونل
عوارض زمین‌شناسی (گسل، چین‌خوردگی و...)																		۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	جهت‌داری ناپیوستگی‌ها نسبت به محور تونل

پ ۴-۲۶ فرم ارسال شده جهت تعیین روابط درونی در پارامتر نوع ساختگاه (شهری، راه و ...) و معارضین

معیار i																	اولویت‌ها	معیار j																
جهت‌داری ناپیوستگی‌ها نسبت به محور تونل																	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	عوارض زمین‌شناسی (گسل، چین‌خوردگی و...)

پ ۴-۲۷ فرم ارسال شده جهت تعیین روابط درونی در پارامتر وضعیت آب‌وهوایی

اولویت‌ها																		معیار i																	
																		معیار j																	
سطح و وضعیت آب زیرزمینی																		۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	وضعیت توپوگرافی و سطح الارض ساختگاه
عوارض زمین‌شناسی (گسل، چین‌خوردگی و...)																		۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	وضعیت توپوگرافی و سطح الارض ساختگاه
عوارض زمین‌شناسی (گسل، چین‌خوردگی و...)																		۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	سطح و وضعیت آب زیرزمینی

پ ۴-۲۸ فرم ارسال شده جهت تعیین روابط درونی در پارامتر سطح و وضعیت آب زیرزمینی

معیار i																	اولویت‌ها										معیار j							
وضعیت توپوگرافی و سطح الارض ساختگاه																	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	عوارض زمین‌شناسی (گسل، چین خوردگی و...)

پ ۴-۲۹ فرم ارسال شده جهت تعیین روابط درونی در پارامتر عوارض زمین‌شناسی (گسل، چین‌خوردگی، کارست و ...)

معیار i																		اولویت‌ها										معیار j							
وضعیت توپوگرافی و سطح الارض ساختگاه																		۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	نوع ساختگاه (شهری، راه و ...)و معارضین
وضعیت توپوگرافی و سطح الارض ساختگاه																		۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	سطح و وضعیت آب زیرزمینی
وضعیت توپوگرافی و سطح الارض ساختگاه																		۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	جهت‌داری ناپیوستگی‌ها نسبت به محور تونل
نوع ساختگاه (شهری، راه و ...)و معارضین																		۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	سطح و وضعیت آب زیرزمینی
نوع ساختگاه (شهری، راه و ...)و معارضین																		۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	جهت‌داری ناپیوستگی‌ها نسبت به محور تونل
سطح و وضعیت آب زیرزمینی																		۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	جهت‌داری ناپیوستگی‌ها نسبت به محور تونل

پ ۴-۳۰ فرم ارسال شده جهت تعیین روابط درونی در پارامتر جهت‌داری ناپیوستگی‌ها نسبت به محور تونل

اولویت‌ها																	معیار i
معیار j																	سطح و وضعیت آب زیرزمینی
عوارض زمین‌شناسی (گسل، چین‌خوردگی و...)	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹

پ ۴-۳۱ فرم ارسال شده جهت تعیین روابط درونی در پارامتر سطح حساسیت و اهمیت پروژه

معیار i																		اولویت‌ها										معیار j							
تأمین مالی و هزینه‌های اجرایی																		۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	رعایت مشخصات کیفی و فنی
تأمین مالی و هزینه‌های اجرایی																		۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	سطح توانمندی و مهارت و تجهیزات پیمانکار
تأمین مالی و هزینه‌های اجرایی																		۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	روش حفاری تونل (TBM, D&B, SEM, NATM,...)
رعایت مشخصات کیفی و فنی																		۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	سطح توانمندی و مهارت و تجهیزات پیمانکار
رعایت مشخصات کیفی و فنی																		۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	روش حفاری تونل (TBM, D&B, SEM, NATM,...)
سطح توانمندی و مهارت و تجهیزات پیمانکار																		۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	روش حفاری تونل (TBM, D&B, SEM, NATM,...)

پ ۴-۳۲ فرم ارسال شده جهت تعیین روابط درونی در پارامتر انعطاف قرارداد در خصوص مسائل فنی-مالی-اجرایی

معیار i																		اولویت‌ها																		معیار j
تأمین مالی و هزینه‌های اجرایی																		۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	سطح توانمندی و مهارت و تجهیزات پیمانکار	
تأمین مالی و هزینه‌های اجرایی																		۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	روش حفاری تونل (TBM, D&B, SEM, NATM,...)	
سطح توانمندی و مهارت و تجهیزات پیمانکار																		۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	روش حفاری تونل (TBM, D&B, SEM, NATM,...)	

پ ۴-۳۳ فرم ارسال شده جهت تعیین روابط درونی در پارامتر تأمین مالی و هزینه های اجرایی

اولویت‌ها																		معیار i																	
																		معیار j																	
سطح توانمندی و مهارت و تجهیزات پیمانکار																		۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	رعایت مشخصات کیفی و فنی
روش حفاری تونل (TBM, D&B, SEM, NATM,...)																		۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	رعایت مشخصات کیفی و فنی
روش حفاری تونل (TBM, D&B, SEM, NATM,...)																		۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	سطح توانمندی و مهارت و تجهیزات پیمانکار

پ ۴-۳۴ فرم ارسال شده جهت تعیین روابط درونی در پارامتر رعایت مشخصات کیفی و فنی

اولویت‌ها																		معیار i																
																		معیار j																
سطح توانمندی و مهارت و تجهیزات پیمانکار																		۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹
روش حفاری تونل (TBM, D&B, SEM, NATM,...)																		۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹
روش حفاری تونل (TBM, D&B, SEM, NATM,...)																		۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹

پ ۴-۳۵ فرم ارسال شده جهت تعیین روابط درونی در پارامتر سطح توانمندی، مهارت و تجهیزات پیمانکار

اولویت‌ها																		معیار i
معیار j																		
رعایت مشخصات کیفی و فنی																		تأمین مالی و هزینه‌های اجرایی
روش حفاری تونل (TBM, D&B, SEM, NATM,...)																		تأمین مالی و هزینه‌های اجرایی
روش حفاری تونل (TBM, D&B, SEM, NATM,...)																		رعایت مشخصات کیفی و فنی

پ ۴-۳۶ فرم ارسال شده جهت تعیین روابط درونی در پارامتر شکل هندسی، شیب، ابعاد و سطح مقطع تونل

معیار i										اولویت‌ها										معیار j							
سطح توانمندی، مهارت و تجهیزات پیمانکار										۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	روش حفاری تونل (TBM, D&B, SEM, NATM,...)

پ ۴-۳۷ فرم ارسال شده جهت تعیین روابط درونی در پارامتر روش حفاری تونل (TBM, D&B, SEM, NATM,...)

معیار i																		اولویت‌ها										معیار j							
سطح حساسیت و اهمیت پروژه																		۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	انعطاف قرارداد در خصوص مسائل فنی-مالی-اجرایی
سطح حساسیت و اهمیت پروژه																		۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	تأمین مالی و هزینه‌های اجرایی
سطح حساسیت و اهمیت پروژه																		۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	رعایت مشخصات کیفی و فنی
سطح حساسیت و اهمیت پروژه																		۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	سطح توانمندی، مهارت و تجهیزات پیمانکار
انعطاف قرارداد در خصوص مسائل فنی-مالی-اجرایی																		۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	تأمین مالی و هزینه‌های اجرایی
انعطاف قرارداد در خصوص مسائل فنی-مالی-اجرایی																		۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	رعایت مشخصات کیفی و فنی
انعطاف قرارداد در خصوص مسائل فنی-مالی-اجرایی																		۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	سطح توانمندی، مهارت و تجهیزات پیمانکار
تأمین مالی و هزینه‌های اجرایی																		۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	رعایت مشخصات کیفی و فنی
تأمین مالی و هزینه‌های اجرایی																		۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	سطح توانمندی، مهارت و تجهیزات پیمانکار
رعایت مشخصات کیفی و فنی																		۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	سطح توانمندی، مهارت و تجهیزات پیمانکار

پ ۴-۳۸ فرم ارسال شده جهت تعیین روابط درونی در پارامتر زون های شدیداً خرد شده و گسله

معیار i	اولویت‌ها																معیار j	
وجود سینه‌کار مختلط	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	گل‌ولای آبدار، لنزهای شن و ماسه
وجود سینه‌کار مختلط	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	وجود سازه‌های مجاور در مجاورت تونل‌ها
وجود سینه‌کار مختلط	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	روباره کم و یا بسیار زیاد
وجود سینه‌کار مختلط	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	زون پرتالی، تقاطع تونل‌ها و اینترسکشن
گل‌ولای آبدار، لنزهای شن و ماسه	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	وجود سازه‌های مجاور در مجاورت تونل‌ها
گل‌ولای آبدار، لنزهای شن و ماسه	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	روباره کم و یا بسیار زیاد
گل‌ولای آبدار، لنزهای شن و ماسه	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	زون پرتالی، تقاطع تونل‌ها و اینترسکشن
وجود سازه‌های مجاور در مجاورت تونل‌ها	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	روباره کم و یا بسیار زیاد
وجود سازه‌های مجاور در مجاورت تونل‌ها	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	زون پرتالی، تقاطع تونل‌ها و اینترسکشن
روباره کم و یا بسیار زیاد	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	زون پرتالی، تقاطع تونل‌ها و اینترسکشن

پ ۳۹-۴۰ فرم ارسال شده جهت تعیین روابط درونی در پارامتر روباره کم یا بسیار زیاد

اولویت‌ها																		معیار i
																		معیار j
وجود سینه‌کار مختلط	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	زون‌های شدیداً خورد شده و گسله
وجود سینه‌کار مختلط	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	گل‌ولای آبدار، لنزهای شن و ماسه
وجود سینه‌کار مختلط	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	وجود سازه‌های مجاور در نزدیکی تونل‌ها
زون‌های شدیداً خورد شده و گسله	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	گل‌ولای آبدار، لنزهای شن و ماسه
زون‌های شدیداً خورد شده و گسله	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	وجود سازه‌های مجاور در نزدیکی تونل‌ها
گل‌ولای آبدار، لنزهای شن و ماسه	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	وجود سازه‌های مجاور در نزدیکی تونل‌ها

پ ۴۰-۴۱ فرم ارسال شده جهت تعیین روابط درونی در پارامتر زون پرتالی، تقاطع تونل و اینترسکشن

اولویت‌ها																		معیار i
معیار j	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	معیار i
زون‌های شدیداً خورد شده و گسله	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	وجود سینه‌کار مختلط
گل‌ولای آبدار، لنزهای شن و ماسه	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	وجود سینه‌کار مختلط
وجود سازه‌های مجاور در نزدیکی تونل‌ها	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	وجود سینه‌کار مختلط
روباره کم و یا بسیار زیاد	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	وجود سینه‌کار مختلط
گل‌ولای آبدار، لنزهای شن و ماسه	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	زون‌های شدیداً خورد شده و گسله
وجود سازه‌های مجاور در نزدیکی تونل‌ها	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	زون‌های شدیداً خورد شده و گسله
روباره کم و یا بسیار زیاد	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	زون‌های شدیداً خورد شده و گسله
وجود سازه‌های مجاور در نزدیکی تونل‌ها	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	گل‌ولای آبدار، لنزهای شن و ماسه
روباره کم و یا بسیار زیاد	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	گل‌ولای آبدار، لنزهای شن و ماسه
روباره کم و یا بسیار زیاد	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	وجود سازه‌های مجاور در نزدیکی تونل‌ها

پیوست ۵: پیاده‌سازی روش ANP برای تمام پارامترها

پ ۵-۱ ماتریس مقایسه زوجی و بردارهای وزن تمامی پارامترها

B5	B4	B3	B2	B1	B
۰/۲۶۵	۱/۹۲۲	۰/۳۷۷	۱/۵۱۸	۱	B1
۰/۸۵۵	۲/۵۸۳	۱/۷۴۸	۱	۰/۶۵۹	B2
۰/۶۶۹	۱/۴۷۸	۱	۰/۵۷۲	۲/۶۵۴	B3
۰/۴۵۳	۱	۰/۶۷۷	۰/۳۸۷	۰/۵۲	B4
۱	۲/۲۰۹	۱/۴۹۵	۱/۱۷	۳/۷۷۶	B5
۰/۰۹۴			نرخ ناسازگاری		

مطالعات و طراحی	
پارامترها	وزن نرمال
سطح مطالعات اکتشافی پیش از ساخت (B1)	۰/۱۵۷
پیش‌بینی صحیح رفتار و شرایط زمین (B2)	۰/۲۲۴
سطح محاسبات طراحی و فرضیات طراحی (B3)	۰/۲۰۴
انتخاب صحیح روش اجرایی و تحکیمات (B4)	۰/۱۰۱
به‌کارگیری بازطراحی و بازنگری حین اجرا (B5)	۰/۳۱۳

C7	C6	C5	C4	C3	C2	C1	C
۳/۷۶۴	۲/۳۵۲	۱/۲۶۲	۲/۱۴۱	۲/۹۹۳	۰/۹۴۴	۱	C1
۵/۴۹۴	۲/۰۴۸	۲/۶۶۷	۴/۴۷۸	۲/۷۲۲	۱	۱/۰۵۹	C2
۱/۸۶۴	۲/۵۱۲	۱/۷۴۱	۰/۹۲۶	۱	۰/۳۶۷	۰/۳۳۴	C3
۲/۶۵۲	۱/۹۰۴	۲/۵۱۲	۱	۱/۰۸	۰/۲۲۳	۰/۴۶۷	C4
۱/۹۷۴	۱/۰۵۹	۱	۰/۳۹۸	۰/۵۷۴	۰/۳۷۵	۰/۷۹۲	C5
۱/۴۲۲	۱	۰/۹۴۴	۰/۵۲۵	۰/۳۹۸	۰/۴۸۸	۰/۴۲۵	C6
۱	۰/۷۰۳	۰/۵۰۶	۰/۳۷۷	۰/۵۳۶	۰/۱۸۲	۰/۲۶۶	C7
۰/۰۴۴				نرخ ناسازگاری			

سیستم نگهداری، تحکیمات و کنترل زمین	
پارامترها	وزن نرمال
مشخصات فنی اجرایی نگهداری، تحکیمات و کنترل زمین (C1)	۰/۲۲۵
مشخصات فنی اجرایی سیستم بهسازی زمین (C2)	۰/۲۹۳
قابلیت تغییر سیستم نگهداری با توجه به شرایط مختلف (C3)	۰/۱۲۲
زمان و فاصله نصب سیستم نگهداری از سینه‌کار (C4)	۰/۱۳۱
کنترل اضافه حفاری و پر کردن فضای خالی پشت نگهداری (C5)	۰/۰۹۵
نوع سیستم زهکشی و درستی عملکرد آن (C6)	۰/۰۸۲
نحوه واکنش به شرایط پیش‌بینی‌نشده (C7)	۰/۰۵۲

D6	D5	D4	D3	D2	D1	D
۱/۶۰۵	۴/۳۳۸	۰/۹۲۲	۱/۳۰۳	۱/۳۸	۱	D1
۲/۹۹۳	۱/۳۰۴	۰/۸۵۳	۰/۶۵۹	۱	۰/۷۲۴	D2
۳/۲۰۱	۱/۷۴۱	۰/۶۰۹	۱	۱/۵۱۸	۰/۷۶۸	D3
۱/۳۳۲	۱/۸۳۸	۱	۱/۶۴۱	۱/۱۷۲	۱/۰۸۴	D4
۱/۰۴۹	۱	۰/۵۴۴	۰/۵۷۴	۰/۷۶۷	۰/۲۳۱	D5
۱	۰/۹۵۳	۰/۷۵	۰/۳۱۲	۰/۳۳۴	۰/۶۲۳	D6
۰/۰۴۶			نرخ ناسازگاری			

شرایط زمین‌شناسی و جغرافیایی ساختگاه	
پارامترها	وزن نرمال
وضعیت توپوگرافی و سطح الارض ساختگاه (D1)	۰/۲۳۷
نوع ساختگاه (شهری، راه و...) و معارضین (D2)	۰/۱۶۹
وضعیت آب‌وهوایی (D3)	۰/۱۹۷
سطح و وضعیت آب زیرزمینی (D4)	۰/۲۰۵
عوارض زمین‌شناسی (گسل، چین‌خوردگی، کارست و...) (D5)	۰/۰۹۶
جهت‌داری ناپیوستگی‌ها با محور تونل (D6)	۰/۰۹۷

E7	E6	E5	E4	E3	E2	E1	E
۱/۶۴۴	۱/۷۸۷	۰/۹۴۴	۲/۶۶۶	۱/۳۵۲	۱/۶۰۷	۱	E1
۰/۶۴۵	۱/۷۳۱	۱/۹۰۹	۱/۷۸۳	۲/۶۰۳	۱	۰/۶۲۲	E2
۱/۵۲	۱/۸۶۱	۲/۰۹۵	۱/۷۸۳	۱	۰/۳۸۴	۰/۷۴	E3
۱/۸۸۸	۰/۹۷۴	۰/۸۰۲	۱	۰/۵۶۱	۰/۵۶۱	۰/۳۷۵	E4
۲/۰۶۳	۱/۶۵۷	۱	۱/۲۴۶	۰/۴۷۷	۰/۵۲۴	۱/۰۵۹	E5
۰/۸۴۷	۱	۰/۶۰۴	۱/۰۲۷	۰/۵۳۷	۰/۵۷۸	۰/۵۶	E6
۱	۱/۱۸۱	۰/۴۸۵	۰/۵۳	۰/۶۵۸	۱/۵۵۱	۰/۶۰۸	E7
۰/۰۶۳				نرخ ناسازگاری			

عوامل عمومی، اجرایی و قراردادی	
پارامترها	وزن نرمال
سطح حساسیت و اهمیت پروژه (E1)	۰/۱۹۸
انعطاف قرارداد در خصوص مسائل فنی-مالی-اجرایی (E2)	۰/۱۸۹
تأمین مالی و هزینه‌های اجرایی (E3)	۰/۱۶۱
رعایت مشخصات کیفی و فنی (E4)	۰/۱۰۶
سطح توانمندی و مهارت و تجهیزات پیمانکار (E5)	۰/۱۳۹
روش حفاری (TBM, D&B, SEM, NATM,...) (E6)	۰/۰۹۲
شکل هندسی، شیب، ابعاد و سطح مقطع تونل (E7)	۰/۱۱۵

F6	F5	F4	F3	F2	F1	F
۱/۵۱۶	۰/۹۳۵	۲/۴۳۸	۲/۸۸۵	۱/۳	۱	F1
۱/۳۹۸	۲/۷۸۷	۱/۱۰۸	۱/۲۴۶	۱	۰/۷۶۹	F2
۱/۶۶۵	۱/۶۰۵	۱/۶۴۴	۱	۰/۸۰۳	۰/۳۴۷	F3
۰/۹۷	۰/۳۸۴	۱	۰/۶۰۸	۰/۹۰۳	۰/۴۱	F4
۱/۱۴۹	۱	۲/۶۰۵	۰/۶۲۳	۰/۳۵۹	۱/۰۷	F5
۱	۰/۸۷۱	۱/۰۳۱	۰/۶۰۱	۰/۷۱۵	۰/۶۶	F6
۰/۰۶۳			نرخ ناسازگاری			

شرایط خاص (تکنیکی‌ها)	
پارامترها	وزن نرمال
وجود سینه‌کار مختلط (F1)	۰/۳۴۶
زون‌های شدیداً خورد شده و گسله (F2)	۰/۳۰۷
گل‌ولای آبدار، لنزهای شن و ماسه (F3)	۰/۱۶۳
وجود سازه‌های مجاور در مجاورت یا نزدیکی تونل‌ها (F4)	۰/۱۰۵
روباره کم و یا بسیار زیاد (F5)	۰/۱۵۸
زون پرتالی، تقاطع تونل‌ها و اینترسکشن (F6)	۰/۱۲۱

پ ۵-۲ ماتریس مقایسه زوجی روابط درونی تمامی پارامترها

نسبت به آنیزوتروپی توده سنگ	
پارامترها	وزن نرمال
کیفیت توده سنگ (A3)	۰/۲۵۱
نوع سنگ و مشخصات سنگ بکر (A4)	۰/۱۶۷
وجود پتانسیل لهدیگی (A5)	۰/۳۰۵
زون های ضعیف (A7)	۰/۲۷۷

A7	A5	A4	A3	A2
۰/۷۳۱	۰/۹۷۷	۱/۶۲۳	۱	A3
۰/۸۳۳	۰/۴۱۵	۱	۰/۶۱۶	A4
۱	۱	۲/۴۰۸	۱/۰۲۴	A5
۱	۱	۱/۲۰۱	۱/۳۶۹	A7
۰/۰۲۶		نرخ ناسازگاری		

نسبت به کیفیت توده سنگ	
پارامترها	وزن نرمال
تنش های برجا (A1)	۰/۱۱۴
آنیزوتروپی توده سنگ (A2)	۰/۲۵۶
نوع سنگ و مشخصات سنگ بکر (A4)	۰/۲۶
وجود پتانسیل لهدیگی (A5)	۰/۱۰۹
وجود پتانسیل آماس (A6)	۰/۱۱۳
زون های ضعیف (A7)	۰/۱۴۸

A7	A6	A5	A4	A2	A1	A3
۰/۸۵۹	۱/۰۱۳	۱/۶۴۴	۰/۲۵۱	۰/۴۳۲	۱	A1
۱/۲۶۸	۲/۵۳۷	۱/۵۰۷	۱/۶۷۹	۱	۲/۳۱۶	A2
۱/۸۷۸	۱/۶۹۵	۲/۶۳۱	۱	۰/۵۹۶	۳/۹۸۷	A4
۰/۵۸۷	۱/۲۸۵	۱	۰/۳۸	۰/۶۶۳	۰/۶۰۸	A5
۰/۹۶۴	۱	۰/۷۷۸	۰/۵۹	۰/۳۹۴	۰/۹۸۷	A6
۱	۱/۰۳۷	۱/۷۰۵	۰/۵۳۳	۰/۷۸۹	۱/۱۶۵	A7
۰/۰۳۸		نرخ ناسازگاری				

نسبت به نوع سنگ و مشخصات سنگ بکر	
پارامترها	وزن نرمال
تنش های برجا (A1)	۰/۰۷۴
کیفیت توده سنگ (A3)	۰/۲۹۸
وجود پتانسیل لهدیگی (A5)	۰/۱۶۱
وجود پتانسیل آماس (A6)	۰/۱۴
زون های ضعیف (A7)	۰/۳۲۷

A7	A6	A5	A3	A1	A4
۰/۳۳۱	۰/۴۰۷	۰/۳۳۴	۰/۳۰۱	۱	A1
۱/۴۷۶	۱/۶۴۴	۱/۸۲۱	۱	۳/۳۲۳	A3
۰/۳۲۷	۱/۳۲	۱	۰/۵۴۹	۲/۹۹۳	A5
۰/۳۰۸	۱	۰/۷۵۸	۰/۶۰۸	۲/۴۶	A6
۱	۳/۲۴۶	۳/۰۵۹	۰/۶۷۸	۳/۰۲۲	A7
۰/۰۴۳		نرخ ناسازگاری			

نسبت به زون های ضعیف	
پارامترها	وزن نرمال
تنش های برجا (A1)	۰/۱۴۹
آنیزوتروپی توده سنگ (A2)	۰/۱۹
کیفیت توده سنگ (A3)	۰/۲۱۴
نوع سنگ و مشخصات سنگ بکر (A4)	۰/۱۵۴
وجود پتانسیل لهدیگی (A5)	۰/۱۴۵
وجود پتانسیل آماس (A6)	۰/۱۴۸

A6	A5	A4	A3	A2	A1	A7
۱/۰۲۴	۱/۱۷۶	۱/۲۴۶	۰/۶۱۶	۰/۶۸۴	۱	A1
۱/۶۲۳	۲/۰۳۶	۰/۷۲۵	۰/۵۶۱	۱	۱/۴۶۱	A2
۱/۰۲۳	۱/۱۴۹	۱/۳۶۹	۱	۱/۷۸۳	۱/۶۲۳	A3
۱/۰۲۱	۰/۷۷۸	۱	۰/۷۳۱	۱/۳۸	۰/۸۰۳	A4
۱	۱	۱/۲۸۵	۰/۸۷۱	۰/۴۹۱	۰/۸۵	A5
۱	۱	۰/۹۷۹	۰/۹۷۸	۰/۶۱۶	۰/۹۷۷	A6
۰/۰۳۱		نرخ ناسازگاری				

نسبت به سطح مطالعات اکتشافی پیش از ساخت	
پارامترها	وزن نرمال
پیش بینی صحیح رفتار و شرایط زمین (B2)	۰/۲۸۷
سطح محاسبات طراحی و فرضیات طراحی (B3)	۰/۱۶۵
انتخاب صحیح روش اجرایی و تحکیمات (B4)	۰/۲۵۳
به کارگیری بازطراحی و بازنگری حین اجرا (B5)	۰/۲۹۶

B5	B4	B3	B2	B1
۰/۶۶	۱/۲۴۶	۲/۲۶۸	۱	B2
۰/۷۰۶	۰/۶۸	۱	۰/۴۴۱	B3
۱/۰۳۷	۱	۱/۴۷	۰/۸۰۳	B4
۱	۰/۹۶۴	۱/۴۱۷	۱/۵۱۶	B5
۰/۰۳		نرخ ناسازگاری		

نسبت به پیش بینی صحیح رفتار و شرایط زمین	
پارامترها	وزن نرمال
سطح محاسبات طراحی و فرضیات طراحی (B3)	۰/۳۱۲
انتخاب صحیح روش اجرایی و تحکیمات (B4)	۰/۳۰۳
به کارگیری بازطراحی و بازنگری حین اجرا (B5)	۰/۳۸۵

B5	B4	B3	B2
۰/۷۵۸	۱/۰۹۹	۱	B3
۰/۸۳۹	۱	۰/۹۱	B4
۱	۱/۱۹۱	۱/۳۲	B5
۰/۰۰۴		نرخ ناسازگاری	

نسبت به سطح محاسبات طراحی و فرضیات طراحی	
پارامترها	وزن نرمال
انتخاب صحیح روش اجرایی و تحکیمات (B4)	۰/۷۱۶
به کارگیری بازطراحی و بازنگری حین اجرا (B5)	۰/۲۸۴

B5	B4	B3
۲/۵۱۸	۱	B4
۱	۰/۳۹۷	B5
۰		نرخ ناسازگاری

B5	B3	B2	B4
۰/۸۰۳	۱/۲۴۶	۱	B2
۱	۱	۰/۸۰۳	B3
۱	۱	۱/۲۴۶	B5
نرخ ناسازگاری			
۰/۰۲۱			

C7	C6	C5	C4	C3	C2	C1
۱/۰۳۷	۱/۳۸	۱/۹۷۴	۱/۰۸۴	۱/۳۵۱	۱	C2
۰/۴۶۱	۱/۷۱۹	۱/۱۴۹	۱/۴۳۱	۱	۰/۷۴	C3
۱/۰۹۹	۱/۸۸۸	۲/۸۸۵	۱	۰/۶۹۹	۰/۹۲۲	C4
۰/۸۷۱	۱/۶۴۴	۱	۰/۳۴۷	۰/۸۷۱	۰/۵۰۶	C5
۱/۰۹۹	۱	۰/۶۰۸	۰/۵۳	۰/۵۸۲	۰/۷۲۵	C6
۱	۰/۹۱	۱/۱۴۹	۰/۹۱	۲/۱۶۹	۰/۹۶۴	C7
نرخ ناسازگاری						
۰/۰۵						

C7	C5	C4	C3	C1	C2
۰/۶۹	۱/۶۵۷	۲/۲۶۸	۱/۵۱۶	۱	C1
۰/۷۵۸	۳/۲۷۲	۱/۹۷۴	۱	۰/۶۶	C3
۰/۵۸۷	۱/۳۲	۱	۰/۵۰۶	۰/۴۴۱	C4
۰/۴۵	۱	۰/۷۵۸	۰/۳۰۶	۰/۶۰۳	C5
۱	۲/۲۲۱	۱/۷۰۵	۱/۳۲	۱/۴۵	C7
نرخ ناسازگاری					
۰/۰۲۷					

C7	C4	C2	C1	C3
۱/۱۹۱	۰/۸۷۱	۲/۵۱۲	۱	C1
۰/۷۸۶	۰/۵۶۱	۱	۰/۳۹۸	C2
۱/۵۸۵	۱	۱/۷۸۳	۱/۱۴۹	C4
۱	۰/۶۳۱	۱/۲۷۲	۰/۸۳۹	C7
نرخ ناسازگاری				
۰/۰۱۲				

C7	C6	C5	C4	C3	C1	C4
۰/۸۳۳	۳/۳۴۷	۲/۸۲۵	۱/۱۱۸	۲/۰۳۶	۱	C1
۱/۲۰۱	۱/۶۴۴	۲/۱۴۱	۱/۰۴۶	۱	۰/۴۹۱	C2
۱/۵۱۶	۳/۷۶۴	۱/۸۸۸	۱	۰/۹۵۶	۰/۸۹۴	C3
۰/۶۹۹	۰/۶۳۱	۱	۰/۵۳	۰/۴۶۷	۰/۳۵۴	C5
۰/۹۲۲	۱	۱/۵۸۵	۰/۲۶۶	۰/۶۰۸	۰/۲۹۹	C6
۱	۱/۰۸۴	۱/۴۳۱	۰/۶۶	۰/۸۳۳	۱/۲۰۱	C7
نرخ ناسازگاری						
۰/۰۳۸						

D6	D5	D4	D2	D1
۰/۳۷۵	۰/۴۱۲	۰/۸۲۲	۱	D2
۰/۴۵	۰/۴۶۱	۱	۱/۲۱۷	D4
۰/۶۸۳	۱	۲/۱۶۹	۲/۴۲۶	D5
۱	۱/۴۶۵	۲/۲۲۱	۲/۶۶۷	D6
نرخ ناسازگاری				
۰/۰۰۵				

D5	D4	D2
۰/۹۲۲	۱	D4
۱	۱/۰۸۴	D5
نرخ ناسازگاری		
۰		

D5	D4	D1	D3
۰/۳۴۹	۰/۴۲۲	۱	D1
۰/۹۸۷	۱	۲/۳۷۱	D4
۱	۱/۰۱۳	۲/۸۶۲	D5
نرخ ناسازگاری			
۰/۰۰۳			

نسبت به انتخاب صحیح روش اجرایی و تحکیمات	
وزن نرمال	پارامترها
۰/۳۳۳	پیش‌بینی صحیح رفتار و شرایط زمین (B2)
۰/۳۰۹	سطح محاسبات طراحی و فرضیات طراحی (B3)
۰/۳۵۸	به‌کارگیری بازطراحی و بازنگری حین اجرا (B5)

نسبت به مشخصات فنی اجرایی سیستم نگهداری، تحکیمات و کنترل زمین	
وزن نرمال	پارامترها
۰/۱۹۸	مشخصات فنی اجرایی سیستم بهسازی زمین (C2)
۰/۱۶۵	قابلیت تغییر سیستم نگهداری با توجه به شرایط مختلف (C3)
۰/۲۰۶	زمان و فاصله نصب سیستم نگهداری از سینه کار (C4)
۰/۱۲۷	کنترل اضافه حفاری و پر کردن فضای خالی پشت نگهداری (C5)
۰/۱۱۹	نوع سیستم زهکشی و درستی عملکرد آن (C6)
۰/۱۸۶	نحوه واکنش به شرایط پیش‌بینی نشده (C7)

نسبت به مشخصات فنی اجرایی سیستم بهسازی زمین	
وزن نرمال	پارامترها
۰/۲۴۹	مشخصات فنی اجرایی سیستم نگهداری (C1)
۰/۲۳۸	قابلیت تغییر سیستم نگهداری با توجه به شرایط مختلف (C3)
۰/۱۱۳	زمان و فاصله نصب سیستم نگهداری از سینه کار (C4)
۰/۱۰۸	کنترل اضافه حفاری و پر کردن فضای خالی پشت نگهداری (C5)
۰/۲۷۶	نحوه واکنش به شرایط پیش‌بینی نشده (C7)

نسبت به قابلیت تغییر سیستم نگهداری با توجه به شرایط مختلف	
وزن نرمال	پارامترها
۰/۳۰۶	مشخصات فنی اجرایی سیستم نگهداری (C1)
۰/۱۵۶	مشخصات فنی اجرایی سیستم بهسازی زمین (C2)
۰/۳۲۱	زمان و فاصله نصب سیستم نگهداری از سینه کار (C4)
۰/۳۱۷	نحوه واکنش به شرایط پیش‌بینی نشده (C7)

نسبت به زمان و فاصله نصب سیستم نگهداری از سینه‌کار	
وزن نرمال	پارامترها
۰/۲۵۳	مشخصات فنی اجرایی سیستم نگهداری (C1)
۰/۱۷۳	مشخصات فنی اجرایی سیستم بهسازی زمین (C2)
۰/۲۲۵	قابلیت تغییر سیستم نگهداری با توجه به شرایط مختلف (C3)
۰/۰۸۹	زمان و فاصله نصب سیستم نگهداری از سینه کار (C4)
۰/۱۰۱	کنترل اضافه حفاری و پر کردن فضای خالی پشت نگهداری (C5)
۰/۱۵۹	نحوه واکنش به شرایط پیش‌بینی نشده (C7)

نسبت به وضعیت توپوگرافی و سطح الارض ساختگاه	
وزن نرمال	پارامترها
۰/۱۳۵	نوع ساختگاه (شهری، راه و ...) و معارضین (D2)
۰/۱۶۱	سطح و وضعیت آب زیرزمینی (D4)
۰/۳۱۳	عوارض زمین‌شناسی (گسل، چین‌خوردگی، کارست و ...) (D5)
۰/۳۹۱	جهت‌داری ناپوستگی‌ها نسبت به محور تونل (D6)

نسبت به نوع ساختگاه و معارضین پروژه	
وزن نرمال	پارامترها
۰/۴۸	سطح و وضعیت آب زیرزمینی (D4)
۰/۵۲	عوارض زمین‌شناسی (گسل، چین‌خوردگی، کارست و ...) (D5)

نسبت به وضعیت آب‌وهوایی	
وزن نرمال	پارامترها
۰/۱۶۱	وضعیت توپوگرافی و سطح الارض ساختگاه (D1)
۰/۴۰۵	سطح و وضعیت آب زیرزمینی (D4)
۰/۴۳۴	عوارض زمین‌شناسی (گسل، چین‌خوردگی، کارست و ...) (D5)

نسبت به سطح و وضعیت آب زیرزمینی	
وزن نرمال	پارامترها
۰/۲۴۶	وضعیت توپوگرافی و سطح الارض ساختگاه (D1)
۰/۷۵۴	عوارض زمین‌شناسی (گسل، چین‌خوردگی، کارست و ...) (D5)

نسبت به عوارض زمین‌شناسی (گسل، چین‌خوردگی، کارست و...)	
وزن نرمال	پارامترها
۰/۱۹۷	وضعیت توپوگرافی و سطح الارض ساختگاه (D1)
۰/۲۲۸	نوع ساختگاه (شهری، راه و ...) و معارضین (D2)
۰/۳	سطح و وضعیت آب زیرزمینی (D4)
۰/۲۷۶	جهت‌داری ناپیوستگی‌ها نسبت به محور تونل (D6)

نسبت به جهت‌داری ناپیوستگی‌ها نسبت به محور تونل	
وزن نرمال	پارامترها
۰/۲۶۹	سطح و وضعیت آب زیرزمینی (D4)
۰/۷۳۱	عوارض زمین‌شناسی (گسل، چین‌خوردگی، کارست و ...) (D5)

نسبت به سطح حساسیت و اهمیت پروژه	
وزن نرمال	پارامترها
۰/۱۵	تأمین مالی و هزینه‌های اجرایی (E3)
۰/۲۱۱	رعایت مشخصات کیفی و فنی (E4)
۰/۳۸	سطح توانمندی، مهارت و تجهیزات پیمانکار (E5)
۰/۲۵۹	روش حفاری تونل (E6) (TBM, D&B, SEM, NATM,...)

نسبت به انعطاف قرارداد در خصوص مسائل مالی فنی، اجرایی	
وزن نرمال	پارامترها
۰/۲۸۹	تأمین مالی و هزینه‌های اجرایی (E3)
۰/۲۱	سطح توانمندی، مهارت و تجهیزات پیمانکار (E5)
۰/۵	روش حفاری تونل (E6) (TBM, D&B, SEM, NATM,...)

نسبت به تأمین مالی و هزینه‌های پروژه	
وزن نرمال	پارامترها
۰/۳۸۴	رعایت مشخصات کیفی و فنی (E4)
۰/۳۶۹	سطح توانمندی، مهارت و تجهیزات پیمانکار (E5)
۰/۲۴۷	روش حفاری تونل (E6) (TBM, D&B, SEM, NATM,...)

نسبت به رعایت مشخصات کیفی و فنی	
وزن نرمال	پارامترها
۰/۳۲۹	تأمین مالی و هزینه‌های اجرایی (E3)
۰/۴۳۲	سطح توانمندی، مهارت و تجهیزات پیمانکار (E5)
۰/۲۳۹	روش حفاری تونل (E6) (TBM, D&B, SEM, NATM,...)

نسبت به سطح توانمندی و مهارت و تجهیزات پیمانکار	
وزن نرمال	پارامترها
۰/۵۴۲	تأمین مالی و هزینه‌های اجرایی (E3)
۰/۲۱۲	رعایت مشخصات کیفی و فنی (E4)
۰/۲۴۶	روش حفاری تونل (E6) (TBM, D&B, SEM, NATM,...)

نسبت به شکل هندسی، شیب، ابعاد و سطح مقطع تونل	
وزن نرمال	پارامترها
۰/۲۷۶	سطح توانمندی، مهارت و تجهیزات پیمانکار (E5)
۰/۷۲۴	روش حفاری تونل (E6) (TBM, D&B, SEM, NATM,...)

D5	D1	D4
۰/۳۲۶	۱	D1
۱	۳/۰۶۴	D5
۰	نرخ ناسازگاری	

D6	D4	D2	D1	D5
۰/۶۴۴	۰/۷۲۵	۰/۸۷۱	۱	D1
۰/۹۷۷	۰/۶۴۴	۱	۱/۱۴۹	D2
۱/۰۲۱	۱	۱/۵۵۲	۱/۳۸	D4
۱	۰/۹۷۹	۱/۰۲۴	۱/۵۵۲	D6
۰/۰۰۷		نرخ ناسازگاری		

D5	D4	D6
۰/۳۶۷	۱	D4
۱	۲/۷۲۴	D5
۰	نرخ ناسازگاری	

E6	E5	E4	E3	E1
۰/۷۵۸	۰/۳۵۲	۰/۶۰۲	۱	E3
۰/۶۲۷	۰/۶۰۸	۱	۱/۶۶	E4
۱/۴۹۵	۱	۱/۶۴۴	۲/۸۳۷	E5
۱	۰/۶۶۹	۱/۵۹۴	۱/۳۲	E6
۰/۰۱۸		نرخ ناسازگاری		

E6	E5	E3	E2
۰/۵۹۴	۱/۳۳۸	۱	E3
۰/۴۰۹	۱	۰/۷۴۷	E5
۱	۲/۴۴۶	۱/۶۸۳	E6
۰/۰۰۱		نرخ ناسازگاری	

E6	E5	E4	E3
۱/۴۳۱	۱/۱۳۴	۱	E4
۱/۶۲۳	۱	۰/۸۸۲	E5
۱	۰/۶۱۶	۰/۶۹۹	E6
۰/۰۰۷		نرخ ناسازگاری	

E6	E5	E3	E4
۱/۲۰۱	۰/۸۷۱	۱	E3
۲/۰۶۴	۱	۱/۱۴۹	E5
۱	۰/۴۸۴	۰/۸۳۳	E6
۰/۰۱۷		نرخ ناسازگاری	

E6	E4	E3	E5
۲/۰۶۴	۲/۷۲۴	۱	E3
۰/۹۲۲	۱	۰/۳۶۷	E4
۱	۱/۰۸۴	۰/۴۸۴	E6
۰/۰۰۴		نرخ ناسازگاری	

E6	E5	E7
۰/۳۸۲	1	E5
1	۲/۶۲	E6
۰	نرخ ناسازگاری	

نسبت به روش حفاری تونل (TBM, SEM, NATM,...)	
وزن نرمال	پارامترها
۰/۲۶	سطح حساسیت و اهمیت پروژه (E1)
۰/۱۲۲	انعطاف قرارداد در خصوص مسائل مالی، فنی و اجرایی (E2)
۰/۱۲۸	تأمین مالی و هزینه‌های اجرایی (E3)
۰/۲۳۱	رعایت مشخصات کیفی و فنی (E4)
۰/۲۵۹	سطح توانمندی، مهارت و تجهیزات پیمانکار (E5)

نسبت به زون‌های شدیداً خورد شده و گسله	
وزن نرمال	پارامترها
۰/۱۲۱	وجود سینه‌کار مختلط (F1)
۰/۱۸۵	گل‌ولای آبدار، لنزهای شن و ماسه (F3)
۰/۱۸۶	وجود سازه‌های مجاور در مجاورت و نزدیکی تونل (F4)
۰/۲۰۷	روباره کم و یا بسیار زیاد (F5)
۰/۳۰۲	زون پرتالی، تقاطع تونل‌ها و اینترسکشن (F6)

نسبت به روباره کم یا بسیار زیاد	
وزن نرمال	پارامترها
۰/۱۳۱	وجود سینه‌کار مختلط (F1)
۰/۳۴۱	زون‌های شدیداً خورد شده و گسله (F2)
۰/۲۳۶	گل‌ولای آبدار، لنزهای شن و ماسه (F3)
۰/۳۹۱	وجود سازه‌های مجاور در مجاورت و نزدیکی تونل (F4)

نسبت به زون پرتالی، تقاطع تونل‌ها و اینترسکشن	
وزن نرمال	پارامترها
۰/۱۵۵	وجود سینه‌کار مختلط (F1)
۰/۲۶۵	زون‌های شدیداً خورد شده و گسله (F2)
۰/۱۴۶	گل‌ولای آبدار، لنزهای شن و ماسه (F3)
۰/۲۷۳	وجود سازه‌های مجاور در مجاورت و نزدیکی تونل (F4)
۰/۱۶۲	روباره کم و یا بسیار زیاد (F5)

E5	E4	E3	E2	E1	E6
۰/۶۶	۲/۱۸۷	۱/۴۹۶	۱/۸۸۸	۱	E1
۰/۴۳۱	۰/۴۸۸	۱/۲۰۱	۱	۰/۵۳	E2
۰/۴۸۸	۰/۶۰۸	۱	۰/۸۳۳	۰/۶۶۸	E3
۱/۵۲۸	۱	۱/۶۴۴	۲/۰۴۸	۰/۴۵۷	E4
۱	۰/۶۵۴	۲/۰۴۸	۲/۳۲۲	۱/۵۱۶	E5
۰/۰۵		نرخ ناسازگاری			

F6	F5	F4	F3	F1	F2
۰/۵۲۵	۰/۴۵	۰/۶۴۴	۰/۶۶	۱	F1
۰/۵۸۲	۱/۰۵۹	۰/۹۴۲	۱	۱/۵۱۶	F3
۰/۴۳۷	۱/۱۷۶	۱	۱/۰۶۲	۱/۵۵۲	F4
۰/۸۰۳	۱	۰/۸۵	۰/۹۴۴	۲/۲۲۱	F5
۱	۱/۲۴۶	۲/۲۹	۱/۷۱۹	۱/۹۰۴	F6
۰/۰۱۸		نرخ ناسازگاری			

F4	F3	F2	F1	F5
۰/۵	۰/۴۴۱	۰/۴۴۱	۱	F1
۱/۳۸۸	۱/۴۳۱	۱	۲/۲۶۸	F2
۰/۶۲۷	۱	۰/۶۹۹	۲/۲۶۸	F3
۱	۱/۵۹۴	۰/۷۲۱	2	F4
۰/۰۱۷		نرخ ناسازگاری		

F5	F4	F3	F2	F1	F6
۰/۵۸۲	۰/۵۹	۱/۱۷۶	۰/۸۰۳	۱	F1
۱/۶۴۴	۱/۱۱۸	۲/۲۶۸	۱	۱/۲۴۶	F2
۱/۱۸۵	۰/۵۹	۱	۰/۴۴۱	۰/۸۵	F3
۲/۳۳۹	۱	۱/۶۹۵	۰/۸۹۴	۱/۶۹۵	F4
۱	۰/۴۲۸	۰/۸۴۴	۰/۶۰۸	۱/۷۱۹	F5
۰/۰۲۸		نرخ ناسازگاری			

پ ۳-۵ سوپر ماتریس غیر موزون در روش ANP

GOAL	A	B	C	D	E	F	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	B1	B2	B3	B4	B5	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	D1	D2	D3	D4	D5	D6	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	F1	F2	F3	F4	F5	F6			
A	-/TDP	-	-	-	-/T+P	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
B	-/TDP	-/T+A	-	-/DAP	-/T+A	-	-/T+Y	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
C	-/T+P	-/T+A	-	-	-/T+A	-	-/D+Y	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
D	-/T+A	-/T+Y	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
E	-/T+A	-/T+Y	1	-/T+A	-/T+Y	-	-/T+P	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
F	-/D+P	-	-	-	-/T+P	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
A1	-	-/T+P	-	-	-	-	-	-	-/T+A	-/T+Y	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
A2	-	-/T+A	-	-	-	-	-	-	-/D+P	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
A3	-	-/T+P	-	-	-	-	-/T+Y	-/T+A	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
A4	-	-/T+P	-	-	-	-	-/T+A	-/T+Y	-/T+P	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
A5	-	-/T+P	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
A6	-	-/T+A	-	-	-	-	-/T+Y	-	-/T+A	-/T+P	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
A7	-	-/T+A	-	-	-	-	-/T+Y	-/T+A	-/T+Y	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
B1	-	-	-/D+Y	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
B2	-	-	-/T+P	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
B3	-	-	-/T+P	-	-	-	-																																								

پ ۴-۵ سوپر ماتریس موزون در روش ANP

	GOAL	A	B	C	D	E	F	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	B1	B2	B3	B4	B5	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	D1	D2	D3	D4	D5	D6	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	F1	F2	F3	F4	F5	F6		
GOAL	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
A	-/TQ8	-	-	-	-/I5T	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
B	-/T25	-/A5	-	-/T8T	-/I1F	-	-/I6F	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
C	-/I1P	-/I1F	-	-	-/I4F	-	-/T8A	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
D	-/I1A	-/I1F	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
E	-/V9	-/A5	-/5	-/T-V	-/T-V	-	-/A8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
F	-/I5F	-/A8T	-	-	-/A1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
A1	-	-/I1T	-	-	-	-	-	-	-	-/I1T	-/A7F	-	-	-/I1F	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
A2	-	-/A5P	-	-	-	-	-	-	-	-/T5P	-	-	-	-/I1F	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
A3	-	-/A7F	-	-	-	-	-	-/T01	-/T51	-	-/T8A	1	-	-/T1F	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
A4	-	-/A8T	-	-	-	-	-	-/T25	1P8AV	-/T6	-	-	-	-/I5F	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
A5	-	-/A7T	-	-	-	-	-	-/T1T	-/T5	-/A9	-/I61	-	-	-/I1F	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
A6	-	-/A7T	-	-	-	-	-	-/T1T	-	-/I1T	-/I1F	-	-	-/I1A	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
A7	-	-/I1F	-	-	-	-	-	-/I1T	-/T7V	-/I1A	-/T7V	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
B1	-	-	-/A9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
B2	-	-	-/I1T	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-/T8V	-	-	-/T1T	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
B3	-	-	-/I1T	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-/I65	-/I1T	-	-/T09	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
B4	-	-	-/A1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-/T5T	-/T0T	-/I1P	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
B5	-	-	-/I5V	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-/T8P	-/T85	-/T8F	-/T5A	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
C1	-	-	-	-/I1T	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-/T1F	-/T0P	-/T5T	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
C2	-	-	-	-/I1F	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-/I1A	-	-/I5P	-/I1T	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
C3	-	-	-	-/A1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-/I65	-/T1A	-	-/T55	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
C4	-	-	-	-/P5P	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-/T0P	-/I1T	-/T11	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
C5	-	-	-	-/A7F	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-/I1V	-/I0A	-	-/A9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
C6	-	-	-	-/A1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-/I1F	-	-/I01	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
C7	-	-	-	-/A8P	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-/I1P	-/T7P	-/T1V	-/I59	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
D1	-	-	-	-	-/I1A	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
D2	-	-	-	-	-/A8T	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
D3	-	-	-	-	-/A9A	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
D4	-	-	-	-	-/I0T	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
D5	-	-	-	-	-/A8A	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
D6	-	-	-	-	-/A8A	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
E1	-	-	-	-	-	-/I1A	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
E2	-	-	-	-	-	-/I1A	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
E3	-	-	-	-	-	-/I61	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
E4	-	-	-	-	-	-/I0P	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
E5	-	-	-	-	-	-/I1F	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
E6	-	-	-	-	-	-/A9T	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
E7	-	-	-	-	-	-/I15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
F1	-	-	-	-	-	-	-/I1T	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-/I1T	-/I55
F2	-	-	-	-	-	-	-/A8F	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-/T11	-/T55	
F3	-	-	-	-	-	-	-/A8T	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-/T1P	-/I4P	
F4	-	-	-	-	-	-	-/A5T	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-/T11	-/T7T	
F5	-	-	-	-	-	-	-/A9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-/T0A	-/I5T
F6	-	-	-	-	-	-	-/A1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

پ ۵-۵ سوپر ماتریس حدی در روش ANP

	GOAL	A	B	C	D	E	F	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	B1	B2	B3	B4	B5	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	D1	D2	D3	D4	D5	D6	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	F1	F2	F3	F4	F5	F6		
GOAL	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	
A	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*		
B	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*		
C	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*		
D	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*		
E	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*		
F	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*		
A1	+/+1	+/+17	*	*	+/+6	*	*	+/+70	+/+70	+/+70	+/+70	+/+70	+/+70	+/+70	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	
A2	+/+16	+/+56	*	*	+/+9	*	*	+/+14	+/+14	+/+14	+/+14	+/+14	+/+14	+/+14	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*		
A3	+/+29	+/+17	*	*	+/+22	*	*	+/+28	+/+28	+/+28	+/+28	+/+28	+/+28	+/+28	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	
A4	+/+21	+/+22	*	*	+/+22	*	*	+/+15	+/+15	+/+15	+/+15	+/+15	+/+15	+/+15	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	
A5	+/+2	+/+7	*	*	+/+11	*	*	+/+22	+/+22	+/+22	+/+22	+/+22	+/+22	+/+22	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	
A6	+/+12	+/+50	*	*	+/+7	*	*	+/+92	+/+92	+/+92	+/+92	+/+92	+/+92	+/+92	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	
A7	+/+2	+/+22	*	*	+/+12	*	*	+/+28	+/+28	+/+28	+/+28	+/+28	+/+28	+/+28	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	
B1	+/+2	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	
B2	+/+22	+/+16	+/+82	+/+20	+/+18	*	*	+/+24	*	*	*	*	*	*	+/+171	+/+171	+/+171	+/+171	+/+171	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	
B3	+/+27	+/+22	+/+18	+/+26	+/+26	*	*	+/+20	*	*	*	*	*	*	+/+226	+/+226	+/+226	+/+226	+/+226	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	
B4	+/+22	+/+21	+/+58	+/+29	+/+20	*	*	+/+27	*	*	*	*	*	*	+/+22	+/+22	+/+22	+/+22	+/+22	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	
B5	+/+28	+/+24	+/+22	+/+28	+/+27	*	*	+/+26	*	*	*	*	*	*	+/+202	+/+202	+/+202	+/+202	+/+202	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	
C1	+/+20	+/+22	*	+/+90	+/+2	*	*	+/+21	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	+/+191	+/+191	+/+191	+/+191	+/+191	+/+191	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	
C2	+/+18	+/+16	*	+/+7	+/+10	*	*	+/+22	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	+/+141	+/+141	+/+141	+/+141	+/+141	+/+141	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*		
C3	+/+21	+/+19	*	+/+81	+/+17	*	*	+/+26	*	*	*	*	*	*	+/+162	+/+162	+/+162	+/+162	+/+162	+/+162	+/+162	+/+162	+/+162	+/+162	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	
C4	+/+2	+/+27	*	+/+10	+/+20	*	*	+/+28	*	*	*	*	*	*	+/+221	+/+221	+/+221	+/+221	+/+221	+/+221	+/+221	+/+221	+/+221	+/+221	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	
C5	+/+11	+/+1	*	+/+22	+/+9	*	*	+/+14	*	*	*	*	*	*	+/+82	+/+82	+/+82	+/+82	+/+82	+/+82	+/+82	+/+82	+/+82	+/+82	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*		
C6	+/+6	+/+5	*	+/+22	+/+5	*	*	+/+8	*	*	*	*	*	*	+/+26	+/+26	+/+26	+/+26	+/+26	+/+26	+/+26	+/+26	+/+26	+/+26	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*		
C7	+/+19	+/+17	*	+/+22	+/+16	*	*	+/+24	*	*	*	*	*	*	+/+26	+/+26	+/+26	+/+26	+/+26	+/+26	+/+26	+/+26	+/+26	+/+26	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*		
D1	+/+12	+/+7	*	*	+/+22	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	+/+121	+/+121	+/+121	+/+121	+/+121	+/+121	+/+121	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
D2	+/+1	+/+6	*	*	+/+5	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	+/+105	+/+105	+/+105	+/+105	+/+105	+/+105	+/+105	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	
D3	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	
D4	+/+21	+/+12	*	*	+/+8	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	+/+227	+/+227	+/+227	+/+227	+/+227	+/+227	+/+227	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	
D5	+/+26	+/+2	*	*	+/+81	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	+/+281	+/+281	+/+281	+/+281	+/+281	+/+281	+/+281	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	
D6	+/+10	+/+8	*	*	+/+22	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	+/+106	+/+106	+/+106	+/+106	+/+106	+/+106	+/+106	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	
E1	+/+19	+/+11	+/+27	+/+19	+/+11	+/+52	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	+/+102	+/+102	+/+102	+/+102	+/+102	+/+102	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*			
E2	+/+9	+/+5	+/+12	+/+9	+/+5	+/+20	+/+7	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	+/+205	+/+205	+/+205	+/+205	+/+205	+/+205	+/+205	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*		
E3	+/+92	+/+52	+/+21	+/+89	+/+51	+/+201	+/+22	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	+/+201	+/+201	+/+201	+/+201	+/+201	+/+201	+/+201	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*		
E4	+/+26	+/+22	+/+19	+/+22	+/+29	+/+29	+/+29	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	+/+209	+/+209	+/+209	+/+209	+/+209	+/+209	+/+209	+/+209	+/+209	+/+209	+/+209	+/+209	+/+209	+/+209	+/+209	+/+209	+/+209	+/+209	+/+209	+/+209	+/+209	+/+209	+/+209	+/+209	+/+209			
E5	+/+90	+/+50	+/+26	+/+92	+/+52	+/+26	+/+26	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	+/+209	+/+209	+/+209	+/+209	+/+209	+/+209	+/+209	+/+209	+/+209	+/+209	+/+209	+/+209	+/+209	+/+209	+/+209	+/+209	+/+209	+/+209	+/+209	+/+209	+/+209	+/+209	+/+209	+/+209	+/+209			
E6	+/+22	+/+22	+/+10	+/+21	+/+21	+/+22	+/+29	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	+/+202	+/+202	+/+202	+/+202	+/+202	+/+202	+/+202	+/+202	+/+202	+/+202	+/+202	+/+202	+/+202	+/+202	+/+202	+/+202	+/+202	+/+202	+/+202	+/+202	+/+202	+/+202	+/+202	+/+202	+/+202	+/+202		
E7	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*		
F1	+/+7	+/+2	*	*	+/+2	*	*	+/+24	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	+/+80	*	*	+/+80	+/+80	+/+80	+/+80		
F2	+/+22	+/+1	*	*	+/+9	*	*	+/+16	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	+/+288	*	*	+/+288	+/+288	+/+288	+/+288			
F3	+/+1	+/+4	*	*	+/+4	*	*	+/+49	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	+/+121	*	*	+/+121	+/+121	+/+121	+/+121				
F4	+/+12	+/+5	*	*	+/+5	*	*	+/+22	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	+/+102	*	*	+/+102	+/+102	+/+102	+/+102				
F5	+/+10	+/+6	*	*	+/+5	*	*	+/+22	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	+/+182	*	*	+/+182	+/+182	+/+182	+/+182				
F6	+/+12	+/+6	*	*	+/+5	*	*	+/+29	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	+/+171	*	*	+/+171	+/+171	+/+171	+/+171				

پیوست ۶ : امتیازدهی مطالعات موردی تحت نمایندگی یاریرش

مطالعات موردی		عوامل ژئومکانیکی							مطالعات و طراحی					سیستم نگهداری، تحکیمات و کنترل زمین							شرایط زمین شناسی و جغرافیایی ساختگاه						عوامل عمومی، اجرایی و قراردادی							شرایط خاص (تکنیکی‌ها)						
		A 1	A 2	A 3	A 4	A 5	A 6	A 7	B 1	B 2	B 3	B 4	B 5	C 1	C 2	C 3	C 4	C 5	C 6	C 7	D 1	D 2	D 3	D 4	D 5	D 6	E 1	E 2	E 3	E 4	E 5	E 6	E 7	F 1	F 2	F 3	F 4	F 5	F 6	
۱-	تونل Called (ترکیه ۱۸۷۴)				۴					۱																									۲	۳				
۲-	تونل Yose (ژاپن ۱۹۲۳)						۲															۱		۳	۴														۵	
۳-	تونل Seikan (ژاپن ۱۹۷۰)							۲	۱					۴										۵	۳															
۴-	تونل تأمین آب Darbyshire (انگلیس ۱۹۰۷)														۱												۲													
۵-	تونل Honsho (چین ۱۹۷۴)							۴				۳													۲	۱														
۶-	تونل مترو لوس آنجلس (امریکا ۱۹۷۵)				۵	۴		۳													۶				۱									۲						
۷-	پروژه هیدروالکتریک Cahora-Bassa (هند ۱۹۷۷)				۳			۱																۲																
۸-	تونل Inatory (ژاپن ۱۹۷۸)																						۱		۲															
۹-	معادن Sheridan (ویانومینگ ۱۹۸۰)																							۳											۲	۱	۴			
۱۰-	تونل Nabetachiyama (ژاپن ۱۹۸۰)							۲																																
۱۱-	معادن Jinchuan (چین ۱۹۸۰)								۱																															
۱۲-	تونل Nakayama (ژاپن ۱۹۸۲)							۳									۲							۱				۴												
۱۳-	تونل جاده ای Corchia (ایتالیا ۱۹۸۲)																							۱																

۱۶	تونل مترو (سنگاپور ۲۰۰۱)	۱
۱۶	تونل Bantaki (ژاپن ۲۰۰۱)	۱
۱۶	تونل Moda Collector (ترکیه ۱۹۷۷)	۲ ۱
۵۱	تونل مترو Porto (امریکا ۲۰۰۱)	۳ ۲ ۴ ۱
۵۱	تونل Lotschberg (سوئیس ۲۰۰۲)	۴ ۳ ۲ ۱
۸۵	تونل Devils Slide (سوئیس ۲۰۰۲)	۴ ۳ ۲ ۱
۷۵	تونل مترو SaoPaulo (برزیل ۲۰۰۲)	۳ ۱ ۲
۶۱	تونل Grilo (پرتغال ۲۰۰۲)	۳ ۲ ۱
۰۵	تونل مترو Baixa-Chiado (لیسبون ۲۰۰۲)	۴ ۲ ۱ ۳
۱۵	پروژه هیدروالکتریک Holjebro (سوئد ۱۹۹۳)	۲ ۳ ۱ ۴
۱۵	تونل راه آهن Docklands Light (انگلیس ۱۹۹۸)	۱ ۲
۱۵	تونل Zhegushan (چین ۲۰۰۳)	۲ ۳ ۱
۴۵	تونل انتقال آب گاوشان (ایران ۲۰۰۳)	۱ ۲
۵۵	تونل Navarra (اسپانیا ۲۰۰۳)	۲ ۱ ۳

[illegible]

Abstract

Instability and collapse in underground spaces have always been considered as one of the most important and critical operational risks, which, if they occur, will impose very negative consequences on projects. Due to the importance of instability of underground spaces, sufficient cognition of the factors and parameters affecting the occurrence of instability and predicting this phenomenon in the phases of studies and design, consolidation and even after the construction of the tunnel, will be necessary. Numerous parameters are influential in the discussion of tunnel stability; However, a comprehensive study to evaluate and identify all these parameters has not been provided. Therefore, in this study, identifying the parameters and factors affecting the occurrence of tunnel instability, classifying these factors and ranking their relative importance were considered as the main objectives. To achieve these goals, a multi-criteria decision-making method based on a survey of experts was used. For this purpose, first, by reviewing previous studies, the most important factors affecting tunnel instability were identified and categorized. Then, in order to evaluate and initial weight the factors, AHP hierarchical analysis process was used and the factors were modified and categorized again. After the initial analysis, these factors include 38 parameters and in the form of 6 main indicators, including geomechanical factors, studies and design, support system, consolidation and Ground control, geological and geographical conditions of the site, general, executive and contractual factors and singularities were categorized. In order to evaluate and finalize the factors, the integration of ANP network analysis methods and DEMATEL decision evaluation laboratory and test was used. The relative weights of the components were determined by establishing the network analysis process. Finally, to validate the results, a relatively comprehensive study of the results of actual instabilities and collapses in the projects was performed and the results were compared. The results of this study show that among the main indicators, geomechanical factors, level of studies and design are the most important and general, executive and contractual factors are the least important in the discussion of tunnel instability. Among the parameters, geological features in the group of geological and geographical conditions of the site, correct choice of execution method and consolidations in the group of studies and design, severely fragmented and fault zones in the group of singularities and rock mass quality in the group of geomechanical factors; They had weights of 38%, 33%, 29% and 28% more than other parameters, respectively. A comparison between the results of the ANP-DEMATEL rating method and the statistical study of real instability in tunnels shows that the proposed approach has been relatively reasonable and effective; Which can be used as an effective tool or framework to deal with many issues and problems of instability in various fields of tunneling.

Keywords: Tunnel Stability, Ranking, AHP Hierarchical Analysis Method, Multi-Criteria Decision Making Methods, ANP Network Analysis Method, DEMATEL Decision Making Test.



Shahrood University of Technology

Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics Engineering

M.Sc Thesis in Tunnels and underground spaces

Evaluation and ranking of effective parameters on tunnel stability based on multi-criteria decision making methods

By: Fatemeh Mohammadi

Supervisors:

Dr. Morteza Javadi Estahbanati

Dr. Ramin Rafiee

February 2022