





دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک

پایان نامه کارشناسی ارشد تونل و فضاهاى زیرزمینی

شناسایی، رتبه‌بندی و ارزیابی عوامل مؤثر بر ایمنی در تونل‌سازی، مطالعه

موردی: منطقه یک آزادراه تهران-شمال

نگارنده: زهره الیکائی

اساتید راهنما

دکتر محمد عطائی

دکتر مرتضی جوادى اصطهباناتی

استاد مشاور

مهندس آری طهماسیان

شهریور ۱۳۹۷

شماره: ۳۰۶۴/۳۰۶۴
تاریخ: ۹۵-۷-۱
باسمه تعالی
پایان نامه
کارشناسی ارشد
رشته مهندسی معماری
موضوع: طراحی و اجرای
ساختمان مسکونی



مدیریت تحصیلات تکمیلی

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

با نام و یاد خداوند متعال، ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد خانم زهره الیکائی با شماره دانشجویی ۹۵۰۱۸۶۴ رشته مهندسی معدن گرایش تونل و فضاهای زیرزمینی تحت عنوان شناسایی، رتبه بندی و ارزیابی عوامل موثر بر ایمنی در تونل سازی که در تاریخ ۱۳۹۷/۶/۲۰ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می گردد:

قبول (یا درجه): ☒ ☐ مردود
نوع تحقیق: ☐ نظری ☐ عملی

اعضای	مرتبه علمی	نام و نام خانوادگی	عضو هیأت داوران
	استاد	جناب آقای دکتر محمد عطایی	۱- استاد راهنمای اول
	استادیار	جناب آقای دکتر مرتضی جوادی اصطهباناتی	۲- استاد راهنمای دوم
	مشاور صنعتی	جناب آقای مهندس آریی طهماسبیان	۳- استاد مشاور
	استادیار	جناب آقای دکتر کیومرث سیف پناهی	۴- نماینده تحصیلات تکمیلی
	استاد	جناب آقای دکتر فرهنگ سرشکی	۵- استاد ممتحن اول
	استادیار	جناب آقای دکتر رامین رفیعی	۶- استاد ممتحن دوم

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده: دکتر محمد عطایی

تاریخ و امضاء و مهر دانشکده:

تبدیل: در صورتی که کسی مردود شود حداکثر یکبار دیگر (در مدت مجاز تحصیل) می تواند از پایان نامه خود دفاع نماید (دفاع

مجدد نباید زودتر از ۴ ماه برگزار شود).

پاسکزار کسافی، مستم که سر آغاز تولد من، مستند. استادى که سپیدی را بر تنه سیاه زندگی ام محاشث و مادى که تار مویى از او به پای من سیاه نماند.

تقدیم به

مقدس ترین واژه ماد لغت نامه دلم، پدر، مهربانى شفق، بردبار و حامی.

ماد مهربانم که زندگی ام را دیون مهر و عطوفت آن می دانم.

همسر عزیزم و خواهر و برادرم، همراهان، همگی و پشتوانه زندگی ام.

تقدیر و شکر

پاس خدای را که سخوران، در ستودن او مانند شمارندگان، شمردن نعمت های او مانند و کوشندگان، حق او را کزاردن نتوانند.

بدون شک جایگاه و منزلت معلم، اجل از آن است که در مقام قدردانی از زحمات بی شائبه ی او، با زبان قاصر و دست ناتوان، چیزی بجاگیریم؛ اما از آنجایی که تجلیل از معلم، پاس از انسانی است که هدف و غایت آفرینش راهنمینی می کند و سلامت امانت داری را که به دستش سپرده اند، تضمین؛ بر حسب وظیفه و از باب "من لم یسکر النعم من المخلوقین لم یسکر الله عزوجل:"

از پدر و مادر عزیزم... این دو معلم بزرگوارم... که، همواره بر کوتاهی و دشتی من، قلم خنکیده و گریانه از کنار غفلت هایم گذشته اند و در تمام عرصه های زندگی یار و یابری بی چشم داشت برای من بوده اند؛

از اساتید باکالات و شایسته ام؛ جناب آقایان پر نور محمد عطائی و دکتر مرتضی جوادی اصطهباناتی که در کمال سه صدر، با حسن خلق و فروتنی، از هیچ گلی در این عرصه بر من دریغ نمودند و زحمت راهنمینی این پایان نامه را بر عهده گرفتند؛

از استاد مشاور صبورم، جناب آقای مهندس آربی طماسیان صمیمانه پاس کز ارم بی شک انجام این تحقیق بدون راهنمایی ها و تلاش های مجدانی ایشان امکان پذیر نبوده است؛

و از اساتید فرزانه و دلسوزم؛ جناب آقایان دکتر فرهنگ سرشکی و دکتر امین رفیعی که زحمت داوری این پایان نامه را متقبل شدند؛ کمال شکر و قدردانی را دارم.

باشد که این خردترین، بخشی از زحمات آنان را پاس گوید.

تعهد نامه

اینجانب زهره الیکائی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد تونل و فضاهای زیرزمینی دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه شناسایی، رتبه بندی و ارزیابی عوامل مؤثر بر ایمنی در تونل سازی، مطالعه موردی: منطقه یک آزادراه تهران-شمال تحت راهنمایی دکتر محمد عطایی و دکتر مرتضی جوادی اصطهباناتی متعهد می شوم.

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب 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 است و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا «Shahrood University of Technology» به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت 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 افزارها 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.

*متن این صفحه نیز باید در ابتدای نسخه های تکثیر شده پایان نامه وجود داشته باشد.

چکیده

در مطالعه حاضر، شناسایی، رتبه‌بندی و ارزیابی عوامل مؤثر بر ایمنی در تونل سازی با مطالعه موردی منطقه یک آزادراه تهران - شمال ارائه شده که این ارزیابی را می‌توان به‌عنوان ارائه راهکارهای مقابله با خطرات و آسیب‌ها در تونل سازی دانست که سبب کاهش هزینه‌های مستقیم و غیرمستقیم در برنامه‌ریزی‌های کوتاه‌مدت و بلندمدت می‌شود. به‌منظور دستیابی به اهداف این تحقیق، ابتدا مطالعات قبلی مورد بررسی قرار گرفته است و مهم‌ترین پارامترهای مؤثر بر ایمنی در تونل سازی مشخص شد. در ادامه پرسشنامه‌هایی، به‌منظور درک اهمیت هر یک از پارامترهای مؤثر بر ایمنی در تونل سازی تعیین و از متخصصان نظرخواهی شد. به‌منظور اعتبارسنجی پرسشنامه‌ها از روش محاسبه ضریب آلفای کرونباخ استفاده شد که پایایی خوبی را برای پرسشنامه‌ها نشان می‌داد. سپس با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی دلفی فازی (FDAHP) وزن و اهمیت هر یک از پارامترهای مؤثر بر ایمنی در تونل سازی تعیین شد. در ادامه با استفاده از نتایج حاصل از روش مذکور سیستم طبقه‌بندی جدیدی ارائه شد. این سیستم که اندیس ایمنی تونل سازی نامیده شده است (TSi) درمجموع به تونل‌ها امتیازی از ۱۰ تا ۱۰۰ را اختصاص می‌دهد. سپس ارزیابی ایمنی در تونل سازی در ۵ کلاس خیلی خوب، خوب، متوسط، ضعیف و خیلی ضعیف طبقه‌بندی می‌شوند. پس از ارائه سیستم طبقه‌بندی جدید، به‌منظور بررسی کارایی روش، اطلاعات تونل‌های دو قطعه B_2 و AB_1 از منطقه یک آزادراه تهران - شمال شامل تونل‌های ۶ (دابل آرک)، ۷-۱ چپ و ۷-۱ راست از قطعه AB_1 و تونل‌های ۹ چپ، ۹ راست، ۱۱ دابل آرک، ۱۲ چپ و ۱۲ راست از قطعه B_2 جمع‌آوری شد. در ادامه این تونل‌ها با استفاده از سیستم طبقه‌بندی امتیازدهی و با وضعیت عمومی تونل‌ها مقایسه شد که مقایسه‌ها تطابق خوبی را نشان داد.

کلمات کلیدی: ایمنی، عوامل مؤثر بر ایمنی در تونل سازی، رتبه‌بندی، روش تحلیل سلسله مراتبی دلفی فازی (FDAHP)، اندیس ایمنی تونل سازی (TSi)، منطقه یک آزادراه تهران - شمال.

مقاله مستخرج از پایان نامه:

الیکائی ز، عطائی م، جوادی اصطهباناتی م، طهماسیان آ، (۱۳۹۷) "شناسایی و رتبه‌بندی فاکتورهای مؤثر بر ایمنی در تونل سازی با استفاده از روش FDAHP"، سومین کنفرانس بین-المللی یافته‌های نوین عمران، معماری و صنعت ساختمان ایران، دانشگاه تهران.

فهرست مطالب

۱- فصل اول:	۱
۱-۱- مقدمه	۲
۲-۱- اهمیت انجام تحقیق	۲
۳-۱- طرح مسئله و ضرورت انجام تحقیق	۳
۴-۱- اهداف تحقیق	۴
۵-۱- روش انجام تحقیق	۴
۶-۱- مطالعه موردی	۶
۱-۶-۱- شرح مسیر و مشخصات آزادراه تهران - شمال	۶
۲-۶-۱- معرفی منطقه یک آزادراه تهران - شمال	۹
۷-۱- ساختار پایان نامه	۹
۲- فصل دوم:	۱۳
۱-۲- مقدمه	۱۴
۲-۲- تاریخچه ایمنی در جهان	۱۴
۳-۲- تاریخچه ایمنی در صنعت ساخت و ساز و دیگر صنایع	۱۶
۴-۲- تاریخچه ایمنی در صنعت تونل سازی	۱۹
۵-۲- جمع بندی	۲۱
۳- فصل سوم:	۲۳
۱-۳- مقدمه	۲۴
۲-۳- روش تحلیل سلسله مراتبی فازی دلفی (FDAHP)	۲۴
۳-۳- جمع بندی	۲۸
۴- فصل چهارم:	۲۹
۱-۴- مقدمه	۳۰
۲-۴- عوامل مؤثر بر ارزیابی ایمنی در تونل سازی	۳۰
۱-۲-۴- پارامتر عوامل انسانی (HF)	۳۲
۲-۲-۴- پارامتر ماشین آلات و تجهیزات (EM)	۳۵
۳-۲-۴- پارامتر ویژگی های تونل (TCF)	۳۸
۴-۲-۴- پارامتر شرایط ژئوتکنیکی، زمین شناسی مهندسی و هیدرولوژی (GEHF)	۴۰
۵-۲-۴- پارامتر شرایط جغرافیایی و اقلیمی (GCF)	۴۲
۶-۲-۴- عوامل قراردادی-اجرایی (CEF)	۴۴
۳-۴- جمع بندی	۴۶
۵- فصل پنجم:	۴۷
۱-۵- مقدمه	۴۸
۲-۵- ارزیابی ایمنی در تونل سازی با استفاده از FDAHP	۴۸
۳-۵- اعتبارسنجی پرسشنامه ها	۵۲

۵۲	۵-۳-۱- تعریف پایایی و روش های تعیین آن
۵۳	۵-۳-۲- روش های همسانی درونی
۵۴	۵-۳-۳- روش ضریب آلفای کرونباخ
۵۵	۵-۳-۴- اجرای FDAHP برای دسته پارامترها
۵۸	۵-۳-۵- اجرای FDAHP برای پارامترهای عوامل انسانی
۶۱	۵-۳-۶- اجرای FDAHP برای پارامترهای ماشین آلات و تجهیزات
۶۳	۵-۳-۷- اجرای FDAHP برای پارامترهای ویژگی های تونل
۶۶	۵-۳-۸- اجرای FDAHP برای پارامترهای شرایط ژئوتکنیکی، زمین شناسی مهندسی و هیدرولوژی
۶۹	۵-۳-۹- اجرای FDAHP برای پارامترهای شرایط جغرافیایی و اقلیمی
۷۲	۵-۳-۱۰- اجرای FDAHP برای پارامترهای عوامل قراردادی-اجرائی
۷۵	۵-۳-۱۱- محاسبه وزن نهایی پارامترهای مؤثر بر ارزیابی ایمنی در تونل سازی با روش FDAHP
۷۹	۵-۴- سیستم طبقه بندی جدید برای ارزیابی ایمنی در تونل سازی
۸۶	۵-۵- تعریف اندیس ایمنی تونل سازی (TSI)
	۵-۵-۱- ارزیابی سیستم طبقه بندی در مجموعه تونل های قطعه B2 منطقه یک آزادراه تهران-شمال از نظر ایمنی
۸۸	
۹۵	۵-۶- اقدامات لازم برای افزایش ایمنی
۹۶	۵-۷- نتیجه گیری
۹۷	۶- فصل ششم:
۹۸	۶-۱- جمع بندی و نتیجه گیری
۱۰۰	۶-۲- پیشنهادها برای تحقیقات آتی

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۱: مراحل انجام تحقیق ۵
- شکل ۲-۱: پلان مسیر آزادراه تهران - شمال ۷
- شکل ۳-۱: تقسیم‌بندی مسیر آزادراه تهران - شمال ۸
- شکل ۴-۱: قطعه های مختلف منطقه یک آزادراه تهران - شمال ۹
- شکل ۵-۱: ساختار پایان نامه ۱۱
- شکل ۱-۳: تابع عضویت در روش فازی دلفی ۲۶
- شکل ۱-۴: فاکتورهای مؤثر بر ایمنی در تونل سازی ۳۱
- شکل ۲-۴: تجهیزات حفاظت فردی ۳۵
- شکل ۱-۵: نمودار ستونی وزن نهایی فازی دلفی بین مؤلفه های مؤثر بر ایمنی ۵۷
- شکل ۲-۵: نمودار ستونی وزن نهایی فازی دلفی بین مؤلفه های مؤثر بر شاخص انسانی ۶۰
- شکل ۳-۵: نمودار ستونی وزن نهایی فازی دلفی بین مؤلفه های مؤثر بر ماشینآلات و تجهیزات ۶۳
- شکل ۴-۵: نمودار ستونی وزن نهایی فازی دلفی بین مؤلفه های مؤثر بر ویژگیهای تونل ۶۵
- شکل ۵-۵: نمودار ستونی وزن نهایی فازی دلفی بین مؤلفه های مؤثر بر شرایط ژئوتکنیکی ۶۸
- شکل ۶-۵: نمودار ستونی وزن نهایی فازی دلفی بین مؤلفه های مؤثر بر شرایط جغرافیایی و اقلیمی ۷۱
- شکل ۷-۵: نمودار ستونی وزن نهایی فازی دلفی بین مؤلفه های مؤثر بر عوامل قراردادی-اجرایی ۷۴
- شکل ۸-۵: نمودار ستونی وزن نهایی فازی دلفی پارامترهای مؤثر بر ارزیابی ایمنی در تونل سازی ۷۷
- شکل ۹-۵: نمودار سلسله مراتبی پارامترهای مؤثر بر ایمنی در تونل سازی ۷۸
- شکل ۱۰-۵: انواع مکانیسم ناپایداری ۸۵

فهرست جدول‌ها

جدول ۱-۲: خلاصه‌ای از کارهای انجام گرفته شده مدیریت ایمنی در ساخت و ساز و دیگر صنایع.....	۱۷
جدول ۲-۲: خلاصه‌ای از کارهای انجام گرفته شده مدیریت ایمنی در تونل سازی.....	۱۹
جدول ۱-۵: فرم ارسال شده برای دسته پارامترها.....	۴۹
جدول ۲-۵: فرم‌های ارسال شده برای پارامتر عوامل انسانی.....	۴۹
جدول ۳-۵: فرم‌های ارسال شده برای پارامتر ماشین آلات و تجهیزات.....	۵۰
جدول ۴-۵: فرم ارسال شده برای پارامتر ویژگی‌های تونل.....	۵۰
جدول ۵-۵: فرم ارسال شده برای پارامتر شرایط ژئوتکنیکی، زمین‌شناسی مهندسی و هیدرولوژی.....	۵۱
جدول ۶-۵: فرم ارسال شده برای پارامتر شرایط جغرافیایی و اقلیمی.....	۵۱
جدول ۷-۵: فرم ارسال شده برای پارامتر عوامل قراردادی-اجرایی.....	۵۱
جدول ۸-۵: ماتریس مقایسه زوجی ۶ پارامتر اصلی با توجه به نظرات متخصصان.....	۵۵
جدول ۹-۵: ماتریس مقایسه زوجی فازی دلفی بین مؤلفه‌های مؤثر بر ایمنی.....	۵۶
جدول ۱۰-۵: وزن نهایی فازی نسبی و غیر فازی بین مؤلفه‌های مؤثر بر ایمنی.....	۵۷
جدول ۱۱-۵: قابلیت اعتماد ارزیابی شاخص‌های اصلی با توجه به نظر متخصصان.....	۵۸
جدول ۱۲-۵: ماتریس مقایسه زوجی ۵ پارامتر عوامل انسانی با توجه به نظر یکی از متخصصین.....	۵۸
جدول ۱۳-۵: ماتریس مقایسه زوجی فازی دلفی بین فاکتورهای مؤثر بر شاخص عوامل انسانی.....	۵۹
جدول ۱۴-۵: وزن نهایی فازی نسبی و غیر فازی بین فاکتورهای مؤثر بر شاخص عوامل انسانی.....	۵۹
جدول ۱۵-۵: قابلیت اعتماد شاخص عوامل انسانی با توجه به نظر متخصصان.....	۶۰
جدول ۱۶-۵: ماتریس مقایسه زوجی ۶ پارامتر ماشین آلات و تجهیزات با توجه به نظر یکی از متخصصان.....	۶۱
جدول ۱۷-۵: ماتریس مقایسه زوجی فازی دلفی بین فاکتورهای مؤثر بر شاخص ماشین آلات و تجهیزات.....	۶۲
جدول ۱۸-۵: وزن نهایی فازی نسبی و غیر فازی بین فاکتورهای مؤثر بر شاخص ماشین آلات و تجهیزات.....	۶۲
جدول ۱۹-۵: قابلیت اعتماد شاخص ماشین آلات و تجهیزات با توجه به نظر متخصصان.....	۶۳
جدول ۲۰-۵: ماتریس مقایسه زوجی ۶ پارامتر ویژگی‌های تونل با توجه به نظر یکی از متخصصان.....	۶۴
جدول ۲۱-۵: ماتریس مقایسه زوجی فازی دلفی بین فاکتورهای مؤثر بر شاخص ویژگی‌های تونل.....	۶۴
جدول ۲۲-۵: وزن نهایی فازی نسبی و غیر فازی بین فاکتورهای مؤثر بر شاخص ویژگی‌های تونل.....	۶۵
جدول ۲۳-۵: قابلیت اعتماد شاخص ویژگی‌های تونل با توجه به نظر متخصصان.....	۶۶
جدول ۲۴-۵: ماتریس مقایسه زوجی ۵ پارامتر شرایط ژئوتکنیکی با توجه به نظر یکی از متخصصان.....	۶۶
جدول ۲۵-۵: ماتریس مقایسه زوجی فازی دلفی بین فاکتورهای مؤثر بر شاخص شرایط ژئوتکنیکی.....	۶۷
جدول ۲۶-۵: وزن نهایی فازی نسبی و غیر فازی بین فاکتورهای مؤثر بر شاخص شرایط ژئوتکنیکی.....	۶۸

جدول ۵-۲۷: قابلیت اعتماد شاخص شرایط ژئوتکنیکی، زمین‌شناسی مهندسی و هیدرولوژی با توجه به نظر متخصصان	۶۹
جدول ۵-۲۸: ماتریس مقایسه زوجی ۵ پارامتر شرایط جغرافیایی و اقلیمی با توجه به نظر یکی از متخصصان	۶۹
جدول ۵-۲۹: ماتریس مقایسه زوجی فازی دلفی بین فاکتورهای مؤثر بر شاخص شرایط جغرافیایی و اقلیمی	۷۰
جدول ۵-۳۰: وزن نهایی فازی نسبی و غیر فازی بین فاکتورهای مؤثر بر شاخص شرایط جغرافیایی و اقلیمی	۷۱
جدول ۵-۳۱: قابلیت اعتماد شاخص شرایط جغرافیایی و اقلیمی با توجه به نظر متخصصان	۷۲
جدول ۵-۳۲: ماتریس مقایسه زوجی ۵ پارامتر عوامل قراردادی-اجرایی با توجه به نظر یکی از متخصصان	۷۲
جدول ۵-۳۳: ماتریس مقایسه زوجی فازی دلفی بین فاکتورهای مؤثر بر شاخص عوامل قراردادی-اجرایی	۷۳
جدول ۵-۳۴: وزن نهایی فازی نسبی و غیر فازی بین فاکتورهای مؤثر بر شاخص عوامل قراردادی-اجرایی	۷۴
جدول ۵-۳۵: قابلیت اعتماد شاخص عوامل قراردادی-اجرایی با توجه به نظر متخصصان	۷۵
جدول ۵-۳۶: وزن نهایی غیر فازی پارامترهای مؤثر بر ارزیابی ایمنی در تونل سازی	۷۶
جدول ۵-۳۷: منوهای رده‌بندی در نظر گرفته شده برای پارامترها	۷۹
جدول ۵-۳۸: مرتب‌سازی ماشین‌آلات و تجهیزات بر اساس حداکثر زمان فعالیت در یک چرخه عملیات تونل سازی	۸۳
جدول ۵-۳۹: مرتب‌سازی ماشین‌آلات و تجهیزات بر اساس حداکثر زمان فعالیت در مکان‌های مختلف	۸۳
جدول ۵-۴۰: انواع تحکیم تونل در تونل سازی	۸۴
جدول ۵-۴۱: انواع زمان و موقعیت نصب تحکیمات در تونل سازی	۸۴
جدول ۵-۴۲: بازه‌بندی اندیس ایمنی در تونل سازی	۸۸
جدول ۵-۴۳: ارزیابی ایمنی تونل ۹ راست قطعه B2 از منطقه یک آزادراه تهران - شمال	۸۹
جدول ۵-۴۴: ارزیابی ایمنی تونل ۶ دابل آرک قطعه AB1 از منطقه یک آزادراه تهران - شمال	۹۱
جدول ۵-۴۵: وضعیت تونل‌های قطعه B2 آزادراه تهران - شمال	۹۴
جدول ۵-۴۶: وضعیت تونل‌های قطعه AB1 آزادراه تهران - شمال	۹۴

فصل اول:

کلیات تحقیق

۱-۱- مقدمه

امروزه، استفاده از فضاهای زیرزمینی از قبیل تونل رشد بسیار چشمگیری در افزایش سطح رفاهی جوامع داشته و این نوع سازه‌ها، با کاربری‌های متنوعی در خدمت جامعه بشری قرار گرفته‌اند. باوجود رشد فناوری در عرصه ساخت و احداث تونل‌ها، کماکان مسئله ایمنی و ارتقا سطح ایمنی این نوع سازه‌ها به‌ویژه در زمان احداث، به‌عنوان یکی از چالش‌های این عرصه مهندسی به شمار می‌رود.

آمار سال ۱۹۸۶ مرکز OSHA^۱ سازمان ایمنی و بهداشت حرفه‌ای در آمریکا نشان می‌دهد که آمار حوادث خطرناک و حوادث منجر به مرگ در فضاهای زیرزمینی ۲ تا ۳ برابر دیگر کارگاه‌های عمرانی بوده است؛ بنابراین در صورتی که خطرات پنهانی و بالقوه فعالیت‌های تونل سازی که نرخ مرگ‌ومیر در آن‌ها نسبتاً بالا است به‌طور دقیق شناسایی نشود ممکن است حوادث فاجعه‌آمیزی رخ دهد که بدون شک موجب از بین رفتن نیروی انسانی، توقف موقت فعالیت و طولانی‌تر شدن زمان پروژه و تحمیل هزینه‌های سنگین مالی خواهد شد؛ بنابراین ضرورت دارد که ایمنی در تونل سازی در نظر گرفته شده و پارامترهای مؤثر بر آن شناسایی و ارزیابی شود. در این پایان‌نامه به بررسی ارزیابی ایمنی در تونل سازی پرداخته شده است.

۱-۲- اهمیت انجام تحقیق

با رشد فزاینده میزان پروژه‌های زیرزمینی به‌ویژه تونل‌ها در کشورهای در حال توسعه و به علت عدم توجه به مسئله ایمنی، میزان حوادث و سوانح وقوع یافته در پروژه‌ها به‌شدت افزایش یافته است. پروژه‌های زیرزمینی به دلیل طبیعت منحصر به فرد خود، یکی از خطرناک‌ترین صنایع شناخته شده است و حوادث آن نسبت به دیگر صنایع از تمرکز نگران‌کننده‌ی توجه اجتماعی برخوردار است.

مقدار زیاد حوادث صنعت تونل سازی، تأثیر مستقیمی هم بر افراد درگیر و هم بر شرایط کار

^۱ Occupational Safety and Health Administration

تونل دارد و منجر به صدمات و مرگ و میر کارگران، بیماری‌های شغلی، تأخیر و بسیاری از تلفات و صدمات مستقیم و غیرمستقیم می‌شود. تونل سازی به دلیل استفاده گسترده از ابزارآلات پیچیده، تجهیزات، روش‌های نوین ساخت، چند رشته‌ای و چندوظیفه‌ای بودن نیروی کار پروژه، عموماً پیچیده و اغلب ناامن است در سایت‌های تونل سازی، کارگران در معرض ریسک بالا از قبیل انجام کار در ارتفاع، کار با ماشین‌آلات و تجهیزات هستند. ایمنی سایت‌های تونل سازی باید افزایش یابد، زیرا پروژه‌های تونل سازی روزبه‌روز پیچیده‌تر می‌شوند.

۱-۳- طرح مسئله و ضرورت انجام تحقیق

در گذشته به ازای هر ۸۰۰ متر ساخت تونل، حیات یک نفر با مخاطره مواجه می‌شد. امروزه افزایش آگاهی در زمینه احداث تونل، منجر به بهبود شرایط کاری در کارگاه‌های زیرزمینی شده است؛ به‌طوری‌که آمار حوادث مرگبار و خطرناک به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای کاهش پیدا کرده است (اردشیر و کارآموزیان، ۱۳۹۱). عدم آگاهی از شرایط محیط کار به هنگام حفر تونل باکس هیل در انگلستان منجر به کشته شدن ۱۰۰ نفر از کارگران شد و همچنین نشت گاز قابل اشتعال متان از لایه‌های شیل، در حین حفاری تونل آپنین موجب انفجار و آتش‌سوزی شد (مدنی، ۱۳۸۹). در سال ۲۰۰۶ در حین حفاری یک تونل گازدار در غرب ایران، ۴ نفر جان خود را در اثر گازگرفتگی ناشی از گاز کشنده سولفید هیدروژن از دست دادند (Jafari, Gharari, & Sheikhi, 2009)؛ بنابراین محرز است که باید خطرات موجود در صنعت تونل سازی به‌طور دقیق و کامل شناسایی و همچنین ارزیابی شود.

بدیهی است امروزه با گسترش ساخت‌وساز فضا‌های زیرزمینی در کشور، نیاز بیشتری به بهبود شرایط ایمنی برای کارکنان فعال در کارگاه‌های زیرزمینی اعم از تونل کاران یا معدن کاران احساس می‌شود. با توجه به اهمیت و نقش تعیین کننده ایمنی در موفقیت پروژه‌ها و ارتقاء عملکرد سازمان‌ها، رعایت مباحث این پایان‌نامه می‌تواند موجب حاکمیت ایمنی در مراحل مختلف طراحی و اجرای پروژه‌های تونل سازی و در نتیجه ارتقاء فعالیت‌های مهندسی و بهبود شرایط انسانی و اقتصادی پروژه-

های اجرایی کشور شود.

۴-۱- اهداف تحقیق

هدف اصلی این تحقیق تعیین پارامترهای مؤثر بر ایمنی در تونل سازی است. در طی این تحقیق سعی شده است تا با بررسی منابع علمی معتبر و تحقیقات انجام شده پیشین به بررسی مسئله مورد تحقیق پرداخته شود. به طور کلی هدف از انجام این تحقیق شامل موارد زیر است:

الف- تعیین شاخص های اثرگذار بر روی ایمنی در تونل سازی

ب- ارزیابی شاخص های اثرگذار بر روی ایمنی در تونل سازی

ج- ارزیابی کلی ایمنی در تونل سازی

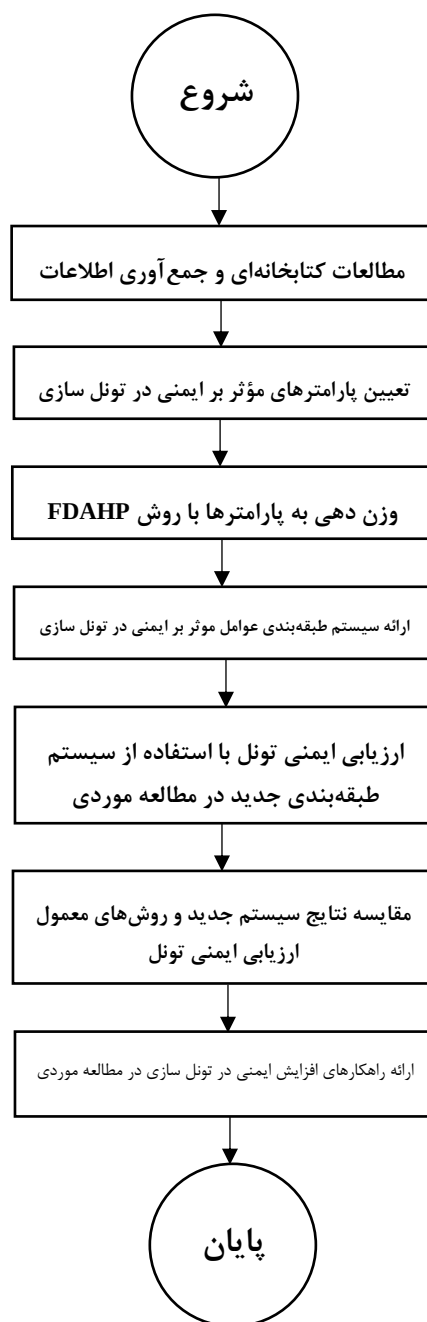
د- مشخص کردن راهکارهای پیشگیرانه برای نیل به اهداف ایمنی در تونل سازی

۵-۱- روش انجام تحقیق

پارامترهای مؤثر در ارزیابی ایمنی از تعداد بالایی برخوردارند بنابراین باید کلیه پارامترهای مؤثر بر ایمنی در تونل سازی تعیین و به بررسی آنها پرداخته شود و میزان اهمیت آنها از طریق روش های تصمیم گیری چند معیاره مورد ارزیابی قرار گیرند. با توجه به شکل ۱-۱ مراحل انجام تحقیق به صورت زیر است:

- انجام مطالعات اولیه و جمع آوری اطلاعات لازم
- تعیین شاخص های مؤثر بر ایمنی
- استفاده از روش تصمیم گیری چند معیاره به منظور ارزیابی ایمنی در تونل سازی
- ارائه سیستم طبقه بندی جدیدی به منظور ارزیابی ایمنی در تونل سازی
- پیاده سازی سیستم طبقه بندی بر روی تونل های منطقه یک آزادراه تهران - شمال

- تطابق سیستم ارائه شده با یکی از روش‌های معمول ارزیابی ایمنی
 - ارائه راه‌حلی به‌منظور افزایش ایمنی در منطقه مورد مطالعه
- رویکرد ارائه شده از داده‌های تونل‌های منطقه یک آزادراه تهران - شمال پیاده‌سازی خواهد شد.



شکل ۱-۱: مراحل انجام تحقیق

۱-۶- مطالعه موردی

۱-۶-۱- شرح مسیر و مشخصات آزادراه تهران - شمال

آزادراه تهران - شمال بخشی از آزادراه سراسری شمال - جنوب است که کوتاه‌ترین مسیر ارتباطی دریای خزر با خلیج فارس را ایجاد نموده و در ترانزیت منطقه نقش عمده‌ای بر عهده دارد. مسیر ۱۲۱ کیلومتری آزادراه تهران - شمال با ۱۷۸ دستگاه تونل دوقلو (رفت و برگشت) جمعاً به طول تقریبی ۹۶ کیلومتر، ۸۲ دستگاه پل بزرگ (رفت و برگشت) جمعاً به طول حدود ۱۳ کیلومتر و حجم عملیات خاکی (مجموع عملیات خاک‌برداری و خاک‌ریزی) حدود ۴۲ میلیون مترمکعب، از تقاطع غیر هم‌سطح با بزرگراه ۷۶ متری شهید همت و بزرگراه آزادگان شروع و در امتداد دره کن پس از گذشتن از حاشیه روستای سولقان به تدریج از منطقه کوهستانی توچال عبور کرده و سپس توسط تونل‌های بلند تالون به طول ۵ کیلومتر این رشته‌کوه را قطع نموده و در دامنه‌های شمالی آن در منطقه دوآب شهرستانک قرار می‌گیرد. پس از آن، مسیر به موازات جاده قدیم کرج - چالوس امتداد می‌یابد و در دره سرهنگ وارد تونل‌های بلند البرز به طول ۶/۴ کیلومتر شده و در پل زنگوله خارج می‌شود. سپس با عبور از ارتفاعات البرز به موازات جاده موجود کرج - چالوس با گذر از کنار شهر مرزن‌آباد تا شهر چالوس ادامه یافته و در نهایت با یک تقاطع غیر هم‌سطح به کمربندی چالوس - تنکابن متصل می‌گردد. در شکل ۱-۲ پلان مسیر آزادراه تهران - شمال نشان داده شده است (سایت آزادراه تهران-شمال).



شکل ۱-۲: پلان مسیر آزادراه تهران - شمال

این آزادراه با کوتاه کردن فاصله تهران - چالوس از حدود ۲۰۰ کیلومتر به ۱۲۱ کیلومتر، میانگین زمان مسافرت را از ۴/۵ ساعت به ۱/۵ ساعت کاهش خواهد داد. میانگین سرعت در طول آزادراه حدود ۸۸ کیلومتر در ساعت است. ظرفیت این آزادراه در شرایط مناسب روزانه معادل ۲۵۰۰۰ خودروی سبک و سنگین خواهد بود. این آزادراه دارای ۲ خط عبور در هر باند (در فرازهای تند ۳ خط عبور) است. حداکثر شیب طولی مسیر ۶٪ و حداقل شعاع قوس‌ها در اکثر مسیر ۴۵۰ متر است. از مهم‌ترین اهداف و مزایای احداث این آزادراه می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- سفری ایمن و مطمئن به سواحل دریای خزر
- گسترش و توسعه محور شمال - جنوب
- دستیابی سریع به کشورهای آسیای میانه

- کوتاه شدن راه و بالا رفتن کیفیت مسیر
- کاهش خسارت‌های مالی و جانی
- توسعه اقتصادی و فرهنگی سواحل دریای خزر
- ایجاد فرصت‌های شغلی و جاذبه‌های توریستی

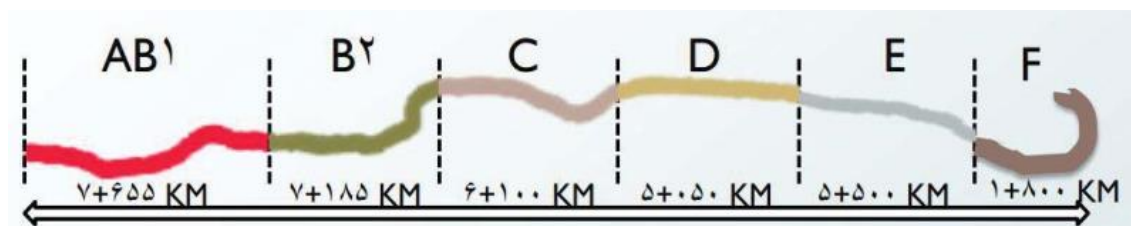
با هدف بهره‌برداری سریع‌تر از آزادراه و به‌منظور "بهینه‌سازی زمان بهره‌برداری و هزینه‌های احداث" مسیر آزادراه، مطابق شکل ۱-۳ به چهار منطقه تقسیم شده است تا با احداث هر یک از مناطق به‌صورت مستقل و در ترکیب با راه موجود، بخشی از مشکلات ترافیکی و ترددی مسیر حل گردد (سایت آزادراه تهران-شمال).



شکل ۱-۳: تقسیم‌بندی مسیر آزادراه تهران - شمال

۱-۶-۲- معرفی منطقه یک آزادراه تهران - شمال

این منطقه حد فاصل تهران - دوآب شهرستانک به طول ۳۲ کیلومتر است و از تقاطع آزادگان - همت شروع و با عبور از مناطق کن سولقان و امامزاده عقیل و روستای رندان به تونل تالون ختم می-گردد و در دوآب شهرستانک به منطقه دو متصل می-شود. اجرای تنها این قسمت که طول آن تقریباً ۳۲ کیلومتر است و احداث آن در اولویت اول است، باعث می-شود که تا راه فعلی که از کرج می-گذرد حذف شده و مسیر فعلی حدود ۶۰ کیلومتر کوتاه‌تر شود. به‌منظور بهره‌برداری سریع‌تر از منطقه یک، شرکت آزادراه تهران - شمال آن را به چند قطعه تقسیم‌بندی کرده و به‌صورت مستقل به پیمانکاران طرح واگذار کرده است. در این مطالعه به دلیل در دسترس بودن اطلاعات، منطقه یک آزادراه برای مطالعه موردی انتخاب شد. در شکل ۱-۴ قطعه‌های مختلف منطقه یک به همراه طول آن‌ها نشان داده شده است (سایت آزادراه تهران-شمال).



شکل ۱-۴: قطعه‌های مختلف منطقه یک آزادراه تهران - شمال

۱-۷- ساختار پایان‌نامه

تحقیق حاضر مشتمل بر ۶ فصل است که شکل ۱-۵ ساختار پایان‌نامه را به‌صورت سازمان‌دهی فصل‌ها نشان می‌دهد.

در **فصل اول**، بیان کلی مسئله موردبررسی، ضرورت و اهداف تحقیق است.

در **فصل دوم**، با عنوان مروری بر ادبیات تحقیق که در ابتدا در مورد ایمنی در صنایع ساخت-وساز و دیگر صنایع توضیح داده شده و پس از آن بیان تاریخچه‌ای مختصر از کارهای صورت گرفته در

زمینه تونل سازی، آورده شده است.

در فصل سوم، کلیات روش FDAHP ذکر شده است.

در فصل چهارم، تأثیر پارامترهای مختلف بر ایمنی در تونل سازی مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور با استفاده منابع علمی معتبر بین‌المللی و با مرور کارهای تحقیقاتی گذشته، کلیه این عوامل به‌طور مناسبی شناسایی، طبقه‌بندی و تشریح شدند.

در فصل پنجم، ارزیابی ایمنی در تونل سازی با تمرکز بر مطالعه موردی انجام شده است. با استفاده از روش FDAHP نظرسنجی‌های از متخصصان در زمینه صنعت تونل سازی انجام گرفته شده است. در ادامه وزن و اهمیت پارامترها بر اساس روش پیشنهادی ارائه شده است؛ درنهایت سیستم طبقه‌بندی جدیدی به‌منظور ارزیابی ایمنی در تونل سازی ارائه شده که این سیستم طبقه‌بندی بر روی تونل‌های منطقه یک آزادراه تهران-شمال پیاده شده است.

نهایتاً در فصل ششم، به جمع‌بندی مطالب پایان‌نامه و مروری بر نتایج به دست آمده پرداخته می‌شود. در این فصل پیشنهادهایی نیز برای تحقیقات آتی ارائه شده است.



شکل ۱-۵: ساختار پایان‌نامه

فصل دوم:

سابقہ علمی موضوع

تونل سازی و عملیات ساختمانی زیرزمینی در همه قسمت‌های درگیر در پروژه، همواره تحت تأثیر مخاطرات و حوادث بوده، اما از طریق مدیریت ایمنی مناسب می‌توان احتمال وقوع یا تأثیر پیامدهای نامطلوب آن‌ها را کاهش داد. ازجمله علل اصلی طولانی شدن و افزایش هزینه‌های پروژه-های تونل سازی، مدیریت ناقص و ضعیف به ویژه مدیریت ریسک ایمنی گزارش شده است (Wagner, 2006)؛ مدیریت ریسک ایمنی مستلزم شناسایی، ارزیابی و رتبه‌بندی ریسک‌های مختلف است. رتبه-بندی ریسک‌ها، قسمت کلیدی این فرایند به شمار می‌روند؛ زیرا با انجام رتبه‌بندی، برتری هر ریسک در مقابل سایر ریسک‌ها مشخص و در نتیجه تصمیم‌گیرنده می‌تواند در مورد میزان تخصیص منابع موجود برای مقابله با هر ریسک برنامه‌ریزی نماید (Ghosh & Jintanapakanont, 2004)؛ بنابراین می‌بایستی به شناسایی دقیق مخاطرات و کنترل صحیح آن‌ها در پروژه‌های تونل سازی به‌طور کامل پرداخته شود.

۲-۲- تاریخچه ایمنی در جهان

یکی از نخستین شواهد کنترل مخاطرات کار مربوط به دوران روم باستان در سده دوم پیش از میلادی است. در آن زمان معدنچیان با استفاده از پارچه‌ای جلو دهان خود را می‌بستند تا از استنشاق گردوغبار جلوگیری نمایند. در همین زمینه پزشکان و دانشمندانی چند، پا به میدان گذاشتند و گام‌هایی جهت اعتلای تندرستی نیروی کار برداشتند. به‌عنوان مثال، نخستین بار بقراط در سده چهاردهم پیش از میلاد، مسمومیت کارگران با سرب را تشخیص داد. پلنی^۱ در سده نخستین پس از میلاد، خطرات سولفور روی را بازشناخت و توصیه کرد که افراد برای جلوگیری از خطرات گردوغبار از ماسک تنفسی استفاده کنند و خود را در کیسه‌ای بپوشانند (بهارانچی، ۱۳۸۷).

¹ Planny

در سال ۱۴۷۳ النبوغ^۱ نخستین نشریه بهداشتی در مورد بیماری‌ها و آسیب‌های شغلی را در بین معدنچیان انتشار داد. او همچنین در مورد سمیت منواکسید کربن، جیوه، سرب و اسید نیتریک مطالبی نگاشت. در سال ۱۵۵۶، پزشکی به نام آگریکولا^۲ برای کارگران معادن و بیماری‌های آن‌ها مطالعاتی انجام داد و حاصل مطالعات خود را در کتابی منتشر نمود. در سال ۱۵۶۷ پزشکی از سوئیس به نام پاراسلسوس^۳ کتابی در مورد بیماری‌های شغلی معدنچیان و فلزکاران نوشت. نخستین کتاب معتبر در طب کار در سال ۱۷۰۰ به‌وسیله رامازینی^۴ که او را پدر طب کاری می‌نامند، منتشر شد. او نخستین فردی بود که به پزشکان توصیه کرد در ضمن پرسش‌های خود از بیمار، پیشه او را نیز جویا شوند، زیرا ممکن است ارتباطی نزدیک میان شغل فرد و بیماری وی وجود داشته باشد. او مطالعاتی بالارزش بر روی معدنچیان و کیمیاگران، شیشه‌سازان، آهنگران و دباغان انجام داد (بهارانچی، ۱۳۸۷).

پس از انقلاب صنعتی (در نیمه دوم سده هجدهم)، صنعت و فناوری رشد چشمگیری یافت، اما برخلاف بهبود وضع زندگی، افزایش سطح تولید و راحت‌تر شدن کارها که ناشی از پیشرفت علمی و فنی بود، مشکلات و گرفتاری‌های بسیاری برای انسان به وجود آمد و سبب شد انسان معاصر در معرض خطرات و تهدیدهای بی‌شماری قرار گیرد که از آن جمله می‌توان به بیماری‌ها و حوادث ناشی از کار و کهولت‌های زود هنگام که در اثر شرایط نامطلوب کاری ایجاد می‌شوند، اشاره کرد (بهارانچی، ۱۳۸۷).

پیدایش چنین معضلاتی نیاز شدید و اساسی به فراگیری و رعایت اصول ایمنی و بهداشت کار را نمایان ساخت و انسان را بر آن داشت تا درصدد چاره‌جویی‌های بنیادی برآید و برای حفظ نیروی انسانی و تأمین تندرستی، ایمنی و بهداشت آن تدابیری بیندیشد و با مسئله به‌گونه‌ای علمی و نهادین

^۱ Ellenbog

^۲ Agricola

^۳ Paracelsus

^۴ Ramazzini

برخورد کند. بدین ترتیب نظام علمی نوینی به نام بهداشت حرفه‌ای رو به تکامل گذاشت. امروزه این علم تمام مسائل گوناگون پزشکی، بهداشتی و ایمنی را در هر پیشه در برمی‌گیرد.

امروزه بهداشت حرفه‌ای بدین‌صورت تعریف می‌شود: علم و هنر پیشگیری از اثرات سوئی که در طرز کار، محیط کار و خصلت کار وجود دارد و سلامت شاغل را به خطر انداخته و باعث ایجاد بیماری‌های حرفه‌ای، مسمومیت‌های شغلی و حوادث ناشی از کار می‌شود (بهارانچی، ۱۳۸۷).

کمیته مشترک سازمان بهداشت جهانی (WHO) و سازمان بین‌المللی کار (ILO) که در سال ۱۹۵۳ در ژنو تشکیل شده، اهداف بهداشت حرفه‌ای را چنین ترسیم نمودند (بهارانچی، ۱۳۸۷):

الف) تأمین، حفظ و ارتقای سطح سلامت جسمانی، روانی و اجتماعی کارکنان در هر پیشه‌ای که هستند.

ب) پیشگیری از بیماری‌ها و حوادث ناشی از کار.

ج) انتخاب کارگر یا کارمند برای محیط و شغلی که از نظر جسمانی و روانی توانایی انجام آن را دارد و یا به‌طور اختصار تطبیق کار با انسان و در صورت عدم امکان، تطبیق انسان با کار.

۲-۳- تاریخچه مطالعات ایمنی در صنعت ساخت‌وساز و دیگر صنایع

تحقیقاتی درباره تاریخچه مدیریت ایمنی در صنعت ساخت‌وساز انجام شده است که با توجه به اقتضای تحقیق حاضر و دسترسی کم منابع معتبر علمی برخی از مهم‌ترین مطالعات انجام‌شده پیشین به‌دقت مورد مطالعه قرار گرفته‌اند که خلاصه‌ای از کارهای انجام گرفته شده در جدول ۲-۱ آورده شده است.

جدول ۱-۲: خلاصه‌ای از کارهای انجام گرفته شده مدیریت ایمنی در ساخت‌وساز و دیگر صنایع

مؤلف (سال انتشار)	توضیح مختصر
Mattila (1985)	هدف از این مطالعه، ایجاد روش ساده و استاندارد برای تحقیق در محیط کار برای استفاده از مراقبت‌های بهداشتی شغلی بوده است. این روش شامل: (۱) شناسایی خطرات از طریق مشاهدات و مصاحبه‌ها در محل کار و با پرسشنامه، (۲) ارزیابی یافته‌ها به‌عنوان کار گروهی، (۳) ارزیابی نتایج این ارزیابی‌ها برای انجام نتایج و پیشنهادهای که توسط کارکنان بهداشت حرفه‌ای انجام شده است. این روش بسیاری از امکانات جدید را برای کنترل خطرات شغلی و مطالعه روابط بین شرایط کار و سلامت کارگران ارائه داده است.
Jannadi (1996)	به مطالعه عوامل مؤثر بر ایمنی صنعت ساخت‌وساز از طریق پرسشنامه پرداخته شده است. شش فاکتور مهم ایمنی در نظر گرفته شد. از نظر سنجی که از افسران و کارکنان ایمنی در مورد شش فاکتور مهم به دست آمد، نخستین آن‌ها حفظ شرایط کاری ایمن، ایجاد آموزش ایمنی و آموزش کارکنان و سرپرستان، نتیجه‌گیری شد.
Tam and Fung (1998)	به بررسی نگرش‌ها، شیوه‌ها و ویژگی‌های ایمنی شرکت‌های ساختمانی در هنگ‌کنگ و ارتباط آن‌ها با عملکرد ایمنی در سایت‌های ساختمانی پرداخته شده است.
Sawacha et al (1999)	در این مطالعه به بررسی عوامل مؤثر بر ایمنی در سایت‌های ساخت‌وساز پرداخته شده است. تأثیرات مسائل تاریخی، اقتصادی، روان‌شناختی، فنی، رویه‌ای و زیست‌محیطی از لحاظ چگونگی ارتباط این عوامل با سطح ایمنی سایت در نظر گرفته شده است. نتایج تجزیه و تحلیل عوامل نشان داد متغیرهای مربوط به سیاست سازمان بیشترین اثر را بر عملکرد ایمنی در صنعت ساخت‌وساز بریتانیا دارد. پنج مسئله مهم که با ایمنی سایت ارتباط داشتند: (۱) بحث مدیریت ایمنی، (۲) ارائه جزوات ایمنی، (۳) ارائه تجهیزات ایمنی، (۴) فراهم نمودن شرایط ایمن، (۵) انتصاب نماینده ایمنی آموزش دیده شده در محل، بودند.
Hee et al (1999)	این مطالعه به سیستم مدیریت ایمنی در یک سیستم عملیات دریایی با استفاده از نتایج آزمایش میدانی و با استفاده از شناسایی و ارزیابی مدیریت عوامل انسانی و سازمانی پرداخته است.
Langford et al (2000)	این مطالعه عوامل مهم را که بر نگرش کارگران ساختمانی نسبت به رفتار ایمن در سایت‌های ساختمانی تأثیر می‌گذارد را شناسایی کرده است.
Haslam et al (2005)	به عوامل مؤثر بر حوادث ساخت‌وساز پرداخته شده است. عوامل کلیدی شامل: گروه کاری، مسائل مربوط به محل کار، کمبود تجهیزات، مشکلات مربوط به مناسب بودن شرایط مواد و نقص مدیریت ریسک بودند که سطوح مشارکت هر کدام از این عوامل کلیدی در حوادث ساخت‌وساز مشخص شد.
Carter and Smith (2006)	به شناسایی خطر ایمنی در پروژه‌های مختلف ساخت‌وساز پرداخته شده است. نتایج نشان می‌دهد که حداکثر شناسایی خطر ایمنی در پروژه‌های مختلف دور از ایده آل بوده است.
Shapira and Simcha (2009)	این مطالعه به ارزیابی ایمنی سایت‌های ساختمانی با جرثقیل برج (تاور کرین) از طریق وزن دهی عوامل مؤثر بر ایمنی پرداخته است. نتایج حاکی از تسلط اپراتور جرثقیل در چشم‌انداز ایمنی سایت و همچنین کاهش نقش خطرات سایت مانند خطوط برق بوده است.
Torner and Pousette (2009)	هدف از این مطالعه بررسی کلی پیش‌شرط‌ها و اجزای استانداردهای ایمنی بالا در صنعت ساخت-وساز از دیدگاه کارکنان ساختمانی باتجربه و مدیران رده اول بوده است. نتایج به دست آمده می‌تواند شرکت‌های ساختمانی را در برنامه‌ریزی و اجرای پروژه‌های ساختمانی به استاندارد ایمنی بالا هدایت کند.

مؤلف (سال انتشار)	توضیح مختصر
Fung et al (2010)	به منظور بررسی ایمنی ساخت و ساز به ارائه یک مدل ارزیابی ریسک و نیز بررسی نیاز به افراد درگیر در ساخت و ساز، برای ارزیابی ریسک های سیستماتیک و مؤثر در شغل های مختلف پرداخته است. علاوه بر روش ها و معیارهای ارزیابی ریسک مناسب، ۱۴ نوع از مشاغل، حوادث آنها و علل حوادث آنها را مورد بررسی قرار داده است.
Ismail et al (2012)	این مطالعه از طریق پرسشنامه به تعیین عوامل ایمنی تأثیرگذار بر موفقیت یک سیستم مدیریت ایمنی برای سایت های ساختمانی می پردازد. پرسشنامه ها نشان دادند که تأثیرگذارترین عامل ایمنی آگاهی شخصی بر ارتباطات است.
Bahn and Barratt-Pugh (2012)	این مطالعه با استفاده از یافته های یک تحقیق انتقادی-واقع گرایانه در استرالیا به بررسی و ارزیابی تأثیر آموزش بهداشت و ایمنی در رابطه با معرفی یک قانون ملی بهداشت و ایمنی کار می پردازد.
Aminbakhsh et al (2013)	به ارزیابی ریسک ایمنی با استفاده از روش سلسله مراتبی تحلیلی (AHP) در طی برنامه ریزی و بودجه بندی پروژه های ساخت و ساز پرداخته شده است.
Guo et al (2013)	این مطالعه به مدیریت ایمنی مبتنی بر VP در پروژه های بزرگ ساختمانی و همچنین به منظور بهبود عملکرد مدیریت ایمنی به شناسایی عوامل کلیدی که باعث حوادث می شود پرداخته است. VP شامل سه جزء: مدل سازی و شبیه سازی، شناسایی عوامل ناامن و آموزش ایمنی بوده است که بر روی یک مطالعه موردی پیاده سازی شده است. نتایج نشان می دهد که این روش می تواند به طور مؤثر به مدیریت ایمنی و بهبود عملکرد ایمنی پروژه های ساختمانی کمک کند.
Oster et al (2013)	این مطالعه به بررسی تاریخیچه اقتصادی مربوط به ایمنی هواپیما و همچنین سابقه ایمنی حمل-ونقل هوایی تجاری را در ایالات متحده و خارج از کشور را تجزیه و تحلیل پرداخته است.
Zhang et al (2014)	این مقاله یک رویکرد سیستماتیک با مراحل گام به گام دقیق برای مدیریت ایمنی ساختمان های مجاور حفاری های تونل سازی ایجاد کرده است. پتانسیل ریسک ایمنی یک ساختمان با شرایط خاص نزدیک به حفاری های تونل سازی در چین در چهار سطح ریسک مختلف مورد ارزیابی قرار گرفت.
Zhou et al (2015)	سه گروه تحقیقاتی ایمنی به منظور بررسی و تجزیه و تحلیل مطالعات مدیریت ایمنی در صنعت ساخت و ساز شناسایی شدند. اولین گروه تحقیقاتی فرایندهای مدیریت ایمنی مانند ارزیابی ایمنی و برنامه های ایمنی را بررسی کردند. گروه دوم ویژگی های فردی و گروهی در ارتباط با ایمنی ساخت-وساز را مورد بررسی قرار دادند و گروه سوم از داده های حادثه/واقعه استفاده کردند تا عملکرد ایمنی را بهبود بخشند. چهار یافته اصلی تحقیق: دیدگاه های تحقیقاتی در ایمنی ساخت و ساز، روند تحقیقاتی ایمنی ساخت و ساز، کاربردهای فن آوری نوآورانه در ایمنی ساخت و ساز و جریان اطلاعات ایمنی به دست آمد.
El et al (2015)	این تحقیق به شناسایی، مطالعه و ارزیابی اثر عوامل مؤثر بر هزینه و زمان احتمالی پرداخته است. اطلاعات از شانزده شرکت ساختمانی در مصر جمع آوری شده است. داده های جمع آوری شده، نمودارهای خروجی و تجزیه و تحلیل ها برای توسعه مدل کامپیوتری RIAM استفاده شده است.
Pereira et al (2017)	در این مطالعه به رتبه بندی ریسک ها و ارزیابی آنها برای درک پیچیدگی سیستم مدیریت ایمنی با روش پرسشنامه از ۹۶ کارمند ساختمانی در آلبرتا کانادا پرداخته شده است. نتایج نشان داد که برنامه قرارداد، در دسترس بودن کارکنان ماهر و تغییر دستورالعمل های سیستم مدیریت ایمنی در بالاترین اولویت ها قرار دارند.

۴-۲- تاریخچه مطالعات ایمنی در صنعت تونل سازی

با توجه به اهمیت مدیریت ایمنی در صنعت تونل سازی، مطالعاتی که منجر به شناسایی و رتبه-بندی عوامل مؤثر بر ایمنی شده‌اند در اینجا آورده شده‌اند که در جدول ۲-۲ به آن اشاره شده است.

جدول ۲-۲: خلاصه‌ای از کارهای انجام گرفته شده مدیریت ایمنی در تونل سازی

مؤلف (سال انتشار)	توضیح مختصر
Watanabe et al (1992)	این مطالعه تجزیه و تحلیل موارد فاجعه جمع آوری شده را ارائه داده و مشکلات بالقوه مربوط به توسعه آینده استفاده از فضاهای زیرزمینی در مقیاس‌های بزرگ را با روش‌های چندگانه بیشتر و در سطوح عمیق‌تر بررسی کرده است و همچنین معیارهای احتمالی مورد نیاز برای چنین توسعه‌ای را مورد بحث قرار داده است.
Arends et al (2005)	به ارزیابی ایمنی تونل با رویکرد بهینه‌سازی اقتصادی در ایمنی با استفاده از سه معیار: ریسک فردی، اجتماعی و اقتصادی که یک روش پیشنهادی است، پرداخته است.
Paul and Maiti (2007)	به بررسی نقش عوامل رفتاری در وقوع حوادث و آسیب‌های فضاهای زیرزمینی در یک مطالعه موردی در هندوستان پرداخته شده است. تجزیه و تحلیل مسیر مدل حوادث نشان می‌داد که تأثیر منفی، نارضایتی شغلی و رفتارهای پر ریسک، افزایش تعداد آسیب‌ها در فضاهای زیرزمینی را پیش‌بینی کرده است.
Paul (2009)	به منظور ارزیابی ریسک آسیب به کارگران معدن عوامل مختلف آسیب‌زا در معدن مورد مطالعه هند با استفاده از پرسشنامه شناسایی شدند. پیش‌بینی آسیب‌های کار در معادن با استفاده از یک مدل رگرسیون چندمرحله‌ای لجستیک گام به گام با استفاده از نرم افزار و بر اساس چهار متغیر: سن، تأثیرات منفی، عدم رضایت شغلی و خطرات فیزیکی انجام شد. تجزیه و تحلیل‌ها نشان می‌داد که کارگران با تأثیرات منفی ۲/۵۴ برابر آسیب‌های بیشتری نسبت به کارگران کمتر تحت تأثیر اثرات منفی قرار می‌گیرند و این عامل مهم‌ترین عامل خطر برای معادن مورد مطالعه است.
Beard (2010)	این مطالعه به درخواست پارلمان اروپا انجام شده است تا توصیه‌هایی را برای بررسی در مورد سیاست‌های آینده ایمنی تونل، به ویژه در مورد تصمیم‌گیری و ارزیابی ریسک ارائه دهد.
Ding et al (2012)	فرایند ارزیابی ریسک ایمنی در مرحله قبل از شروع ساخت مترو، به وسیله سیستم شناسایی ریسک ایمنی (SRIS) به منظور شناسایی خطرات احتمالی ایمنی انجام شد.
Kazaras et al (2012)	به معرفی یک روش ارزیابی ایمنی که مبتنی بر تفکر سیستماتیک و بر مدل STAMP تمرکز دارد برای تونل جاده‌ای پرداخته است.
Barkhordari et al (2012)	به شناسایی خطرات و ارزیابی ریسک فرایند تونل سازی با به کارگیری از تکنیک آنالیز ایمنی شغلی پرداخته شده است.
Ardeshtir and Karamooziyan (2012)	در این مطالعه با تعریف ایمنی و اهمیت آن، نقش مهندس ایمنی و شرح وظایف آن در پروژه-های عمرانی بخصوص در کارگاه‌های زیرزمینی نظیر احداث تونل ارائه شد و خطرات موجود در طول عملیات ساخت تونل و موارد ایمنی مورد نیاز جهت کاهش رخداد حوادث خطرناک

مؤلف (سال انتشار)	توضیح مختصر
	مورد بررسی بیشتر قرار گرفت.
Hejazi and Sepahvand (2012)	این مطالعه به منظور ارائه روش جدید برای ارزیابی کمی ایمنی در تونل‌های راه انجام شده است. روش مورد استفاده در این تحقیق بر اساس ایجاد وابستگی خطی بین ایمنی تونل و هر یک از عوامل مؤثر بر آن پایه گذاری شده است. هر یک از عوامل مؤثر بر ایمنی به نسبت وزن و اهمیت خود در رابطه خطی یاد شده منظور شده اند و در نهایت رابطه کلی ارزیابی کمی ایمنی تونل ارائه شده است.
Bahn (2013)	شناسایی خطرات محیط کار و مدیریت آن‌ها با استفاده از برگزاری دو کارگاه آموزشی با مشارکت ۷۷ کارمند عملیات استخراج معادن زیرزمینی در استرالیا انجام شد. خطرات به چهار دسته: آشکار، بدیهی، در حال ظهور و پنهان تقسیم بندی شدند. در ادامه راهکارهایی به منظور مقابله با این حوادث ارائه شد.
Zhou et al (2013)	این مطالعه یک رویکرد برای مدیریت ایمنی با استفاده از فناوری تجسم ارائه داد. اطلاعات از مرحله طراحی در مورد اجزای ساخت مترو و برنامه ریزی برای ایجاد مدل ۴ بعدی جمع آوری شده است. نتایج نشان می داد که رویکرد پیشنهادی می تواند یک ابزار همکاری، تحلیل و پیش بینی مجازی برای طراحان، مدیران سایت پروژه، مهندسان ایمنی و سایر شرکت کنندگان باشد.
Ding et al (2014)	به مدیریت ایمنی در ساخت تونل مترو Wuhan Yangtze چین با استفاده از رویکرد سیستماتیک فرایند کلی مدیریت ایمنی (OPSM) شامل: طراحی، آنالیز، کنترل و ارزیابی اثرات سیستم ایمنی پرداخته است.
Yu et al (2014)	به منظور بهبود مدیریت ایمنی و شناسایی عوامل ایمنی کلیدی در ساخت مترو در چین پرسشنامه ای درباره دیدگاه شرکت کنندگان و هماهنگی رتبه بندی آن‌ها تنظیم شد. شرکت کنندگان اصلی شامل: مشتریان، مشاوران، پیمانکاران، طراحان و سرپرستان کارگاه‌ها بودند. نتایج نشان می داد که پنج عامل کلیدی که بر ایمنی ساخت مترو تأثیر می گذارد شامل: نگرش ایمنی، ایمنی ساخت، نظارت دولت، محدودیت های بازار و غیر قابل پیش بینی بودن کار هستند.
Kirytopoulos et al (2014)	در این مقاله یک سیستم منطقی (لجستیک) فازی مبتنی بر روش CREAM برای تجزیه و تحلیل قابلیت اطمینان ایمنی عامل انسانی و همچنین برای ارائه تخمین های پیچیده تر از عملکرد اپراتور تونل در شرایط بحرانی ایمنی پیشنهاد شده است.
Mahdevari et al (2014)	مدیریت ریسک بهداشت و ایمنی در معادن زغال سنگ زیرزمینی به وسیله روش مبتنی بر TOPSIS فازی برای ارزیابی خطرات مرتبط با سلامت انسان به منظور مدیریت اقدامات کنترلی و حمایتی تصمیم گیری پیشنهاد شد که می تواند تعادل مناسب بین نگرانی های مختلف مانند ایمنی و هزینه ها را ارائه دهد. برای این منظور اطلاعاتی از سه معدن زغال سنگ خطرناک واقع در کرمان جمع آوری شد. در مجموع ۸۶ خطر شناسایی و در هشت گروه: خطرات ژئومکانیکی، ژئوشیمیایی، الکتریکی، مکانیکی، شیمیایی، محیط زیست، شخصی و اجتماعی، فرهنگی و مدیریتی طبقه بندی شد. نتایج نشان می داد روش پیشنهادی می تواند یک روش قابل اعتماد برای مدیریت خطرات باشد.
Pamukcu (2015)	این مطالعه به تجزیه و تحلیل و مدیریت ریسک های مربوط به TBM در ساخت تونل با استفاده از روش درخت رویداد پرداخته است. پس از شناسایی تمام خطراتی که در ساخت تونل به وسیله TBM مواجه می شوند مورد بررسی قرار گرفت، این خطرات مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند.

مؤلف (سال انتشار)	توضیح مختصر
	خطرات با نمرات بالا به چهار دسته: حوادث ناشی از حفاری، حوادث ناشی از تحکیمات، حوادث ناشی از شرایط زمین‌شناسی، حوادث ناشی از کارهای کمکی و حوادث ناشی از قرارداد پروژه تقسیم‌بندی شدند.
Huang and Zhang (2015)	این مطالعه به مدیریت ریسک کمی ژئوتکنیک برای پروژه‌های تونل سازی در چین با استفاده از روش درخت خطا فازی برای شناسایی خطرات، زنجیره مارکوف شرطی برای تجزیه و تحلیل احتمال عدم قطعیت فضایی خاک، تجزیه و تحلیل آسیب‌پذیری کمی برای ارزیابی پیامدها و همچنین استفاده از آمار مبتنی بر داده‌های میدانی برای تجزیه و تحلیل خطر اثرات زیست‌محیطی پرداخته است.
Mohammadi and Izadi (2015)	این مطالعه به شناخت و اولویت‌بندی عوامل تأثیرگذار بر سطح ایمنی جریان ترافیک داخل تونل پرداخته است. عوامل مؤثر در سه طبقه انسانی، راه و محیط اطراف آن و وسیله نقلیه بررسی و هرکدام از این سه شاخص اصلی شامل زیرمعیارهای مختلفی هستند که به هر یک توسط یک روش اولویت‌بندی امتیازی تخصیص داده شده است.
Khoshnava et al (2016)	این مطالعه به شناسایی خطرات ریسک‌پذیری در پروژه‌های تونل سازی انتقال آب در استان کرمانشاه با استفاده از روش ماتریس خطر پرداخته است. نتایج نشان داد که از 39 خطر شناسایی شده 28.2% در محدوده غیرقابل قبول، 46.2% در محدوده ناخواسته، 23% در محدوده قابل قبول است اما نیاز به تجدیدنظر دارد و 2.6% در محدوده قابل قبول است و نیاز به تجدیدنظر ندارد.
Wang and Chen (2017)	با استفاده از روش پیشنهادی رویکرد سیستماتیک پشتیبانی - تصمیم‌گیری، به ارزیابی ریسک ایمنی با استفاده از یک شبکه جامع بی‌نظمی فازی (FCBN) که ترکیبی از روش ارزیابی جامع فازی (FCFM) و یک شبکه بیس (BN) است، برای پروژه‌های ساخت‌وساز مترو پرداخته است. نتایج ارزیابی ریسک ایمنی شامل سه منظر: احتمال وقوع ریسک، از بین رفتن ریسک و قابلیت کنترل ریسک بوده است.
Gharibi et al (2017)	این مطالعه به صورت مقطعی و توصیفی-تحلیلی بررسی در یک شرکت قراردادی تخصصی تونل سازی با استفاده از روش پرسشنامه به رابطه بین نگرش‌های امنیتی کارکنان و وضعیت باور آن‌ها به سرنوشت، شانس و درک اهمیت برنامه‌های HSE در پیشگیری از حوادث ناشی از کار پرداخته است. نتایج نشان می‌داد که کارکنانی که فاکتورهایی مانند شانس و سرنوشت را به عنوان تنها دلایل وقوع حوادث شغلی در نظر می‌گیرند اعتقاد کمتری نسبت به اهمیت کنترل اقدامات ایمنی در پیشگیری از حوادث دارند.

۲-۵- جمع‌بندی

در این فصل تاریخچه ایمنی در جهان، بررسی وضعیت ایمنی در تونل سازی مورد بررسی قرار گرفت. هیچ‌کدام از این مطالعات گذشته تمامی پارامترهای بحرانی و کلیدی را مورد توجه قرار ندادند و جامعیت لازم را ندارند. همچنین با دقت در مطالعات انجام‌شده قبلی به وضوح آشکار می‌شود که نتایج

این تحقیقات درمجموع به یک نتیجه واحد و یک رهیافت اساسی برای ارزیابی ایمنی نمی‌انجامد. مشکل عمده مطالعات پیشین، مطالعه جداگانه پارامترهای مؤثر بر ایمنی یا بررسی آن‌ها به صورت کیفی است. در صورتی که ایمنی به پارامترهای بسیاری وابسته است که این پارامترها در ارتباط تنگاتنگ باهم می‌باشند؛ بنابراین رسیدن به یک روش جامع که بتوان با استفاده از آن ایمنی در تونل سازی را مورد بررسی و ارزیابی قرار داد، یکی از اهداف کلیدی محققان علم ایمنی به شمار می‌رود که لازمه آن شناخت و بررسی پارامترهای تأثیرگذار در این فرایند است که در فصل چهارم به بررسی این موارد پرداخته خواهد شد.

فصل سوم:

روش‌شناسی

در این تحقیق با توجه به مرور کلیه منابع معتبر و شناخته شده جهانی و نیز شناسایی و جمع-آوری پارامترهای مهم و مؤثر بر ایمنی در صنعت تونل سازی، سعی شده است تا این پارامترها در یک سیستم دسته‌بندی و به‌صورت یک روش هوشمند برای ارزیابی ایمنی در تونل سازی ارائه شود. از این‌رو در این تحقیق به تحلیل ساختار پارامترهای مؤثر بر ارزیابی ایمنی از دیدگاه بررسی اهمیت هر یک از آن‌ها پرداخته شده است. برای این منظور در ابتدا با استفاده از منابع پارامترهای مختلف عوامل مؤثر بر ایمنی در تونل سازی مشخص شده‌اند. پس از شناسایی پارامترها برای اهمیت و وزن دهی پارامترها از روش تحلیل سلسله مراتبی دلفی فازی (FDAHP)^۱ استفاده شده است. لذا در این فصل روش مذکور به‌صورت خلاصه توضیح داده می‌شود.

۳-۲- روش تحلیل سلسله مراتبی فازی دلفی (FDAHP)

تصمیم‌گیری در مورد انتخاب پارامترهای مؤثر در ارزیابی ایمنی تونل سازی و تعیین وزن هر یک از آن‌ها از جمله مهم‌ترین و اساسی‌ترین مسائل موجود در ارائه یک سیستم ارزیابی جامع است. با توجه به طبیعت فرایند ایمنی ارزیابی نهایی برای رسیدن به یک وزن مشخص و دقیق برای هر یک از پارامترها کمی دشوار است. همچنین بسیاری از مسائل ارزیابی شامل اطلاعات ناقصی هستند که مشکلات فراوانی به همراه دارند. از جمله این مشکلات می‌توان به تصمیم‌گیری‌های انجام شده توسط متخصصان اشاره کرد که این تصمیم‌گیری‌ها بر اساس شایستگی فردی بوده و به قدرت تفکر آن‌ها بستگی دارد. به دلیل اینکه به‌کارگیری اعداد قطعی سبب نتایجی دور از واقعیت خواهد شد؛ بنابراین بهتر است به‌جای اعداد معین و قطعی از اعداد فازی برای ارزیابی استفاده شود (Kahraman, Cebeci, & Ruan, 2004).

¹ Fuzzy Delphi Analytic Hierarchy Process

تحلیل سلسله مراتبی فازی دلفی (FDAHP) یکی از جامع‌ترین سیستم‌های طراحی شده برای تصمیم‌گیری با معیارهای چندگانه است. روش دلفی فازی در سال ۱۹۸۸ توسط کوفمان^۱ و گوپتا^۲ ارائه شده است. در روش دلفی، پیش‌بینی‌های ارائه شده توسط افراد خبره در قالب اعداد قطعی بیان می‌شوند، درحالی‌که استفاده از اعداد قطعی برای پیش‌بینی‌های بلندمدت، آن را از دنیای واقعی دور می‌سازد. از طرفی افراد خبره از شایستگی‌ها و توانایی‌های ذهنی خود برای پیش‌بینی استفاده می‌کنند و این نشان می‌دهد که عدم قطعیت حاکم بر این شرایط از نوع امکانی است نه احتمالی. امکانی بودن عدم قطعیت، با مجموعه‌های فازی سازگاری دارد و بنابراین بهتر آن است که با استفاده از مجموعه‌های فازی (به‌کارگیری اعداد فازی) به پیش‌بینی بلندمدت و تصمیم‌گیری در دنیای واقعی پرداخت. ازجمله روش‌های مناسب برای وزن دهی به پارامترهای مؤثر در ارزیابی ایمنی، روش‌های تحلیل سلسله فازی دلفی است. در این روش، از نظریات و تجربیات متخصصان برای دستیابی به یک وزن مشخص استفاده می‌شود. بدین ترتیب دایره تجربیات افراد پشوانه این روش خواهد بود. گونه‌های مختلف از اعداد فازی را می‌توان برای اخذ نظرهای خبرگان مورد استفاده قرار داد. بدین ترتیب می‌توان اطلاعات لازم را در قالب زبان طبیعی از خبرگان اخذ نمود و مورد تحلیل قرار داد. در این تحقیق برای انجام محاسبات از اعداد فازی مثلی استفاده خواهد شد. مراحل اجرای روش دلفی در ادامه آمده است (Cheng & Tang, 2009; Liu & Chen, 2007).

مرحله اول: نظرسنجی متخصصان: در این مرحله ابتدا از متخصصان در مورد پارامترهای مؤثر

بر یک پدیده یا تصمیم به‌صورت کیفی یا در صورت امکان کمی نظرسنجی به عمل می‌آید.

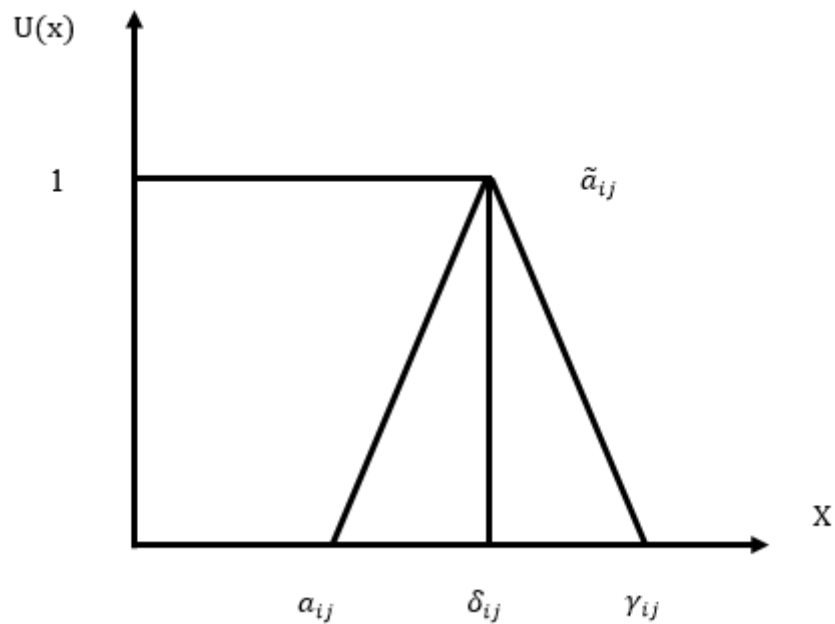
مرحله دوم: محاسبه اعداد فازی: برای محاسبه اعداد فازی ($\tilde{a}_{ij}$) نظرهای حاصل از

نظرسنجی از متخصصان به‌طور مستقیم مدنظر قرار می‌گیرند. اعداد فازی در این مرحله را می‌توان بر

¹ Kaufman

² Gupta

اساس توابع عضویت مختلف همچون روش مثلثی و یا دوزنقه‌ای محاسبه کرد. در اکثر مطالعات از روش مثلثی به دلیل سهولت استفاده زیادی شده است که در شکل ۱-۳ نشان داده شده است. در این حالت در روش فازی دلفی یک عدد فازی به صورت رابطه ۱-۳ تا ۴-۳ تعریف می‌شود.



شکل ۱-۳: تابع عضویت در روش فازی دلفی

$$\tilde{a}_{ij} = (a_{ij}, \delta_{ij}, \gamma_{ij}) \quad (1-3)$$

$$a_{ij} = \min(\beta_{ijk}), k = 1, 2, \dots, n \quad (2-3)$$

$$\delta_{ij} = (\prod_{k=1}^n \beta_{ijk})^{\frac{1}{n}}, k = 1, 2, \dots, n \quad (3-3)$$

$$\gamma_{ij} = \max(\beta_{ijk}), k = 1, 2, \dots, n \quad (4-3)$$

در روابط فوق β_{ijk} نشان دهنده اهمیت نسبی پارامتر i بر پارامتر j از دیدگاه متخصص k ام است و a_{ij} و γ_{ij} به ترتیب حد بالا و پایین نظرهای پرسش‌شوندگان است. بدیهی است که مؤلفه‌های

عدد فازی به گونه‌ای تعریف شده‌اند که $a_{ij} \leq \delta_{ij} \leq \gamma_{ij}$. در ضمن مقادیر این مؤلفه‌ها در بازه [۹، ۱/۹] تغییر می‌کند.

مرحله سوم: تشکیل ماتریس معکوس فازی: در این مرحله با توجه به اعداد فازی به دست آمده در مرحله قبل، ماتریس مقایسه زوجی فازی بین پارامترهای مختلف به شرح رابطه ۳-۵ تشکیل می‌شود.

$$\tilde{A} = [\tilde{a}_{ij}], \tilde{a}_{ij} \times \tilde{a}_{ji} \approx 1, \forall i, j = 1, 2, \dots, n \quad (5-3)$$

یا به صورت:

$$\tilde{A} = \begin{bmatrix} (1,1,1) & (a_{12}, \delta_{12}, \gamma_{12}) & (a_{13}, \delta_{13}, \gamma_{13}) \\ (\frac{1}{\gamma_{12}}, \frac{1}{\delta_{12}}, \frac{1}{a_{12}}) & (1,1,1) & (a_{23}, \delta_{23}, \gamma_{23}) \\ (\frac{1}{\gamma_{13}}, \frac{1}{\delta_{13}}, \frac{1}{a_{13}}) & (\frac{1}{\gamma_{23}}, \frac{1}{\delta_{23}}, \frac{1}{a_{23}}) & (1,1,1) \end{bmatrix}$$

مرحله چهارم: محاسبه وزن فازی نسبی پارامترها: وزن فازی نسبی پارامترها از روابط زیر محاسبه می‌شوند.

$$\tilde{Z}_i = [\tilde{a}_{ij} \otimes \dots \otimes \tilde{a}_{in}]^{\frac{1}{n}} \quad (6-3)$$

$$\tilde{W}_i = \tilde{Z}_i \otimes (\tilde{Z}_i \oplus \dots \oplus \tilde{Z}_n)^{-1} \quad (7-3)$$

که در آن $a_1 \otimes a_2 = (a_1 \times a_2, \delta_1 \times \delta_2, \gamma_1 \times \gamma_2)$ بوده و $\otimes$ نماد ضرب اعداد فازی و $\oplus$ نماد جمع اعداد فازی است. $\tilde{W}_i$ یک بردار سطری است که نشان‌دهنده وزن فازی پارامتر i ام است.

مرحله پنجم: غیر فازی کردن وزن پارامترها: در این مرحله به منظور غیر فازی کردن وزن

پارامترها، طبق رابطه ۸-۳ میانگین هندسی مؤلفه‌های عدد فازی وزن پارامترها به دست می‌آید و بدین ترتیب وزن پارامترها به صورت یک عدد قطعی بیان می‌شوند.

$$W_i = (\prod_{j=1}^3 w_{ij})^{\frac{1}{3}} \quad (۸-۳)$$

۳-۳- جمع‌بندی

در این فصل به توضیح روش FDAHP به منظور بحث درباره درجه اهمیت هر یک از پارامترهای تأثیرگذار بر ایمنی در تونل سازی پرداخته شده و در فصل پنجم وزن هر کدام از پارامترهای مؤثر بر ایمنی در تونل سازی با استفاده از این روش مشخص شده است.

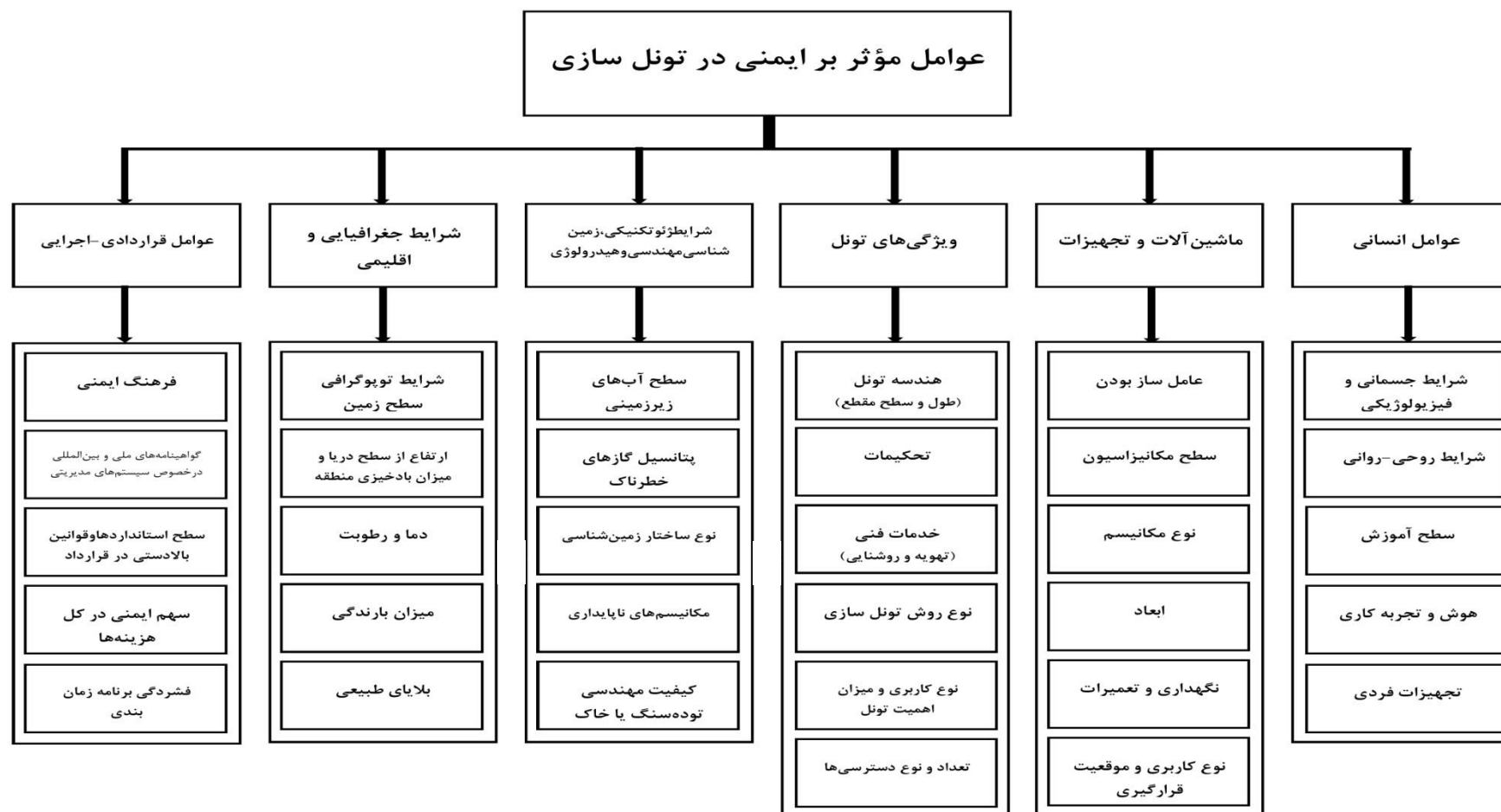
فصل چهارم:

تعیین عوامل و پارامترهای ایمنی در تونل سازی

در سال‌های اخیر، پروژه‌های تونل سازی در ایران رو به رشد است. ۳۱۵ پروژه تونل‌زنی در حال ساخت و ۲۳۳ در فاز مطالعاتی در ایران در سال ۲۰۱۴ وجود داشته است که حوادث و آسیب‌های ناشی از آن موجب زیان‌های عمده اقتصادی در کشورهای در حال توسعه می‌شود. زیان‌های اقتصادی این حوادث در کشورهای در حال توسعه ۲۳۰ میلیون دلار، در مقایسه با ۳۶ میلیون دلار در کشورهای توسعه یافته رو به افزایش است. در یک مطالعه موردی مربوط به برآورد زیان‌های اقتصادی حوادث شغلی در صنایع ساخت‌وساز ایران در سال ۲۰۱۲، پروژه‌های تونل سازی به‌عنوان بخشی از این صنایع، مشخص شده است که هزینه کل حوادث ۳۲۰۰۰ دلار بوده است. بسیاری از حوادث ذکر شده به‌وسیله کاربرد نقش مؤثر ایمنی و اقدامات ایمنی در محل کار قابل اجتناب است (Gharibi et al., 2017). رعایت مسائل ایمنی، علاوه بر ایمن ساختن تونل، در بازدهی کار نیز مؤثر است. ایمنی تونل با سلامتی کارگران و نیز کاهش حوادث ناگهانی و خشونت‌بار مرتبط است. بعضی از افراد آمادگی قبول خطر حادثه را دارند ولی اکثر آن‌ها اگر از خطرات موجود و روش‌های محافظتی آگاه شوند، از سلامتی خود محافظت خواهند کرد (مدنی، ۱۳۷۳) لذا می‌بایستی پارامترهای مؤثر بر ایمنی را مورد بررسی قرار داد. در این فصل، از آنجایی که هدف، ارزیابی ایمنی در تونل سازی است لذا به بررسی همه‌جانبه پارامترهای مختلف مؤثر بر ایمنی در صنعت تونل سازی، بر اساس منابع معتبر موجود پرداخته شده است. این پارامترها با استفاده از مطالعه منابع معتبر علمی و نیز استفاده از تجربیات متخصصان در زمینه تونل سازی شناسایی و دسته‌بندی شدند. در ادامه به توضیح هر کدام از این عوامل مؤثر بر ایمنی پرداخته شده است.

۴-۲- عوامل مؤثر بر ارزیابی ایمنی در تونل سازی

عوامل مؤثر بر ایمنی عمدتاً در ۶ گروه اصلی تقسیم‌بندی شده‌اند که در شکل ۴-۱ نشان داده شده است، این عوامل دارای زیرشاخه‌هایی هستند که در ادامه توضیح داده می‌شود.



شکل ۴-۱: فاکتورهای مؤثر بر ایمنی در تونل سازی

۴-۲-۱- پارامتر عوامل انسانی^۱ (HF)

پارامتر عوامل انسانی از مهم‌ترین پارامترهای تأثیرگذار در ارزیابی ایمنی در تونل سازی است. پارامتر عوامل انسانی شامل پنج پارامتر: شرایط جسمانی و فیزیولوژیکی، عوامل روحی-روانی، سطح آموزش، هوش و تجربه کاری و تجهیزات فردی است که در ادامه به توضیح هرکدام از آن‌ها می‌پردازیم.

۴-۲-۱-۱- شرایط جسمانی و فیزیولوژیکی^۲ (PP)

منظور از شرایط جسمانی یا فیزیولوژیکی، مجموعه آمادگی‌ها، مهارت‌ها و توانایی‌های جسمی لازم در فرد، برای انجام وظایف و مسئولیت‌های محوله است. فرد باید توانایی‌ها و قابلیت‌های لازم را برای انجام کار محوله داشته باشد. ایجاد برخی حوادث در محیط کار، ناشی از شرایط بدنی و نارسایی‌ها و معایب فیزیولوژیکی است، نظیر نارسایی در بینایی و شنوایی، نداشتن قدرت بدنی کافی، داشتن حساسیت نسبت به برخی بوها، احساس سرگیجه در ارتفاعات و امثال آن که ممکن است در وقوع سوانح در محیط کار تأثیر داشته باشد لذا پس از معاینات طبی و تشخیص پزشک و تلاش در رفع این معایب، افراد به مشاغل گمارده شوند که دارای توانایی‌های جسمی لازم برای انجام وظایف مزبور باشند. البته نباید تصور شود افرادی را که دارای توانایی‌ها و آمادگی‌های جسمی لازم نیستند، کاملاً کنار گذارده و اصلاً بکار گرفته نشوند، بلکه لازم است علی‌رغم عیوب بدنی و نقاط ضعفشان، آن‌ها را به کارهای مفید و منطبق با توانایی‌های جسمانی‌شان منصوب و تشویق کرد. شرایط جسمانی و فیزیولوژیکی در این تحقیق با استفاده از نتایج معاینات طب کار که از کارکنان حاضر در پروژه‌های تونل سازی دریافت می‌شود ارزیابی شده است.

¹ Human Factors

² Physical and physiological conditions

۴-۲-۱-۲- عوامل روحی - روانی^۱ (SP)

ارزیابی عوامل روحی - روانی را می‌توان با مواردی مانند میزان آمادگی ذهنی کارگر در محیط کار، میزان تازه بودن فرد برای انجام کار و هر موردی که با روح و روان انسان سروکار دارد بررسی کرد. همچنین وقوع حوادث بیش از آنکه به خستگی جسمی مربوط باشد، به وضع روانی کارگر مربوط است بنابراین میزان رضایت خاطر و علاقه‌مندی کارگر به نوع و محیط کار در میزان شدت و سرعت خسته شدن کارگر بسیار مؤثر است شیوه رفتار سرپرست و نحوه مدیریت سازمان و کلاً روابط صنعتی نیز (روابط بین کارگر و کارفرما و مجموع مقررات و ضوابط حاکم در محیط کار) در این امر بسیار مؤثر است. عوامل روحی - روانی در این تحقیق با استفاده از میزان رضایت شغلی افراد درگیر در پروژه تونل سازی ارزیابی شده است.

۴-۲-۱-۳- سطح آموزش^۲ (TL)

نقش آموزش حفاظت و بهداشت کار در جهت بالا بردن سطح دانش ایمنی کارکنان، برای جلوگیری از حوادث ناگوار و ایجاد و ترویج فرهنگ ایمنی امری ضروری و اجتناب‌ناپذیر است. آموزش دادن می‌تواند فرد را قادر سازد که در صورت لزوم با به‌کارگیری از دستورالعمل‌های ایمنی، خود را به-موقع درگیر نماید. در این تحقیق ارزیابی سطح آموزش بر اساس درصد افرادی است که آموزش حرفه‌ای متناسب با کار با کیفیت بالا دریافت کرده‌اند (نبوتی و افضلی راد، ۱۳۹۱).

۴-۲-۱-۴- هوش و تجربه کاری^۳ (IWE)

یکی از مهم‌ترین عوامل موفقیت در پروژه‌های تونل سازی وجود افراد با تجربه کاری بالا و داشتن هوش کاری بالا است. افراد از نظر تجربه کاری به دو دسته باتجربه و کم‌تجربه تقسیم‌بندی می‌شوند.

¹ Spiritual and physiological Factors

² Training level

³ Intelligence and work experience

منظور از افراد باتجربه، افراد با سابقه کاری بالای ۱۵ سال و منظور از افراد کم‌تجربه افرادی با سابقه کاری کمتر از ۳ سال است. منظور از هوش کاری، داشتن قدرت عکس‌العمل و واکنش سریع در برابر مخاطرات و حوادث ناگهانی کاری است. هرچه میزان هوش کاری بیشتر باشد عکس‌العمل فرد نسبت به حوادث ناگهانی بیشتر و در نتیجه حادثه کمتر پیش می‌آید. ارزیابی هوش و تجربه کاری در این تحقیق با توجه به ارزیابی سابقه کاری افراد حاضر در پروژه انجام شده است.

۴-۲-۱-۵- تجهیزات فردی^۱ (PPE)

وسایل حفاظت فردی شامل گستره وسیعی از لوازم، وسایل و تجهیزات است که به منظور حفاظت قسمت‌های مختلف بدن افراد در برابر خطرات احتمالی در محیط‌های کاری طراحی و ساخته می‌شوند. تجهیزات حفاظت فردی به سه منظور استفاده می‌شود:

- ۱- به عنوان مکمل اقدامات اساسی ایمنی بر روی محیط و پیرامون فرد و آنچه در اختیار دارد.
- ۲- به عنوان ابزار کار تلقی شده که بدون آن‌ها پرداختن به شغل موردنظر غیرممکن است.
- ۳- در شرایطی که اقدام اساسی برای تأمین ایمنی مشکل و یا محتاج زمان است در این صورت تنها گزینه ممکن، ایجاد شرایط ایمنی برای افراد به‌طور موقت خواهد بود.

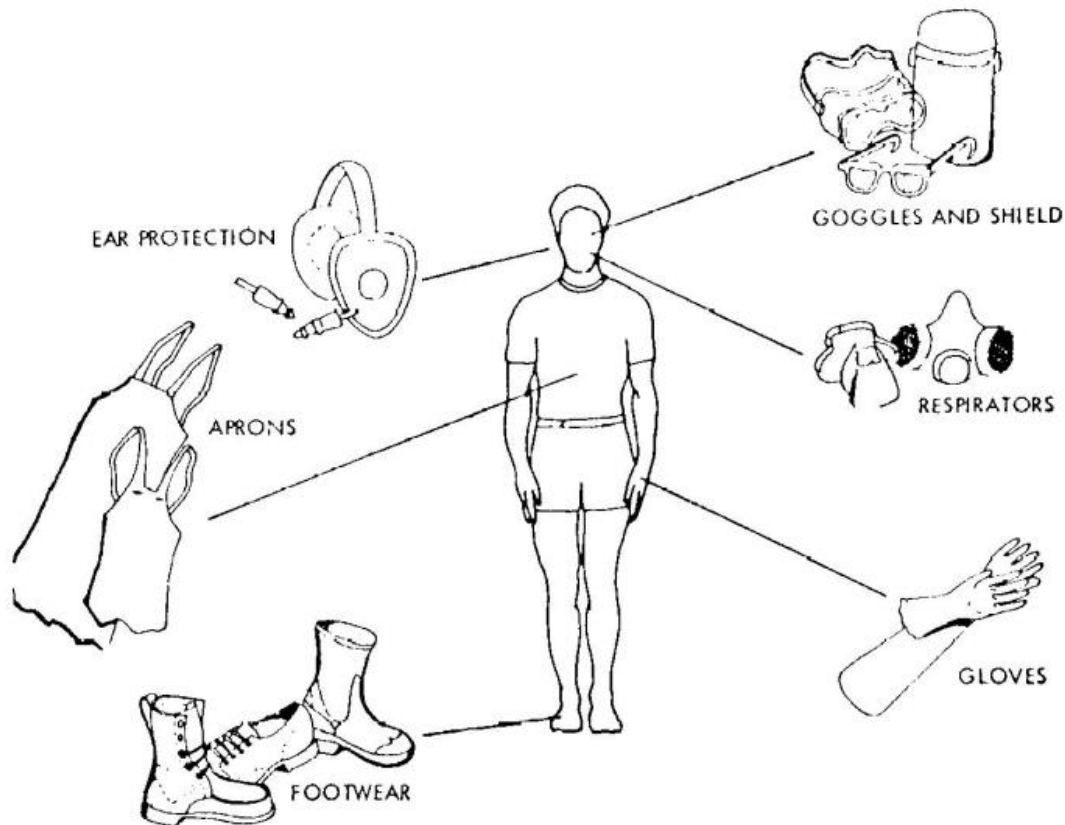
اقدامات تجهیزات حفاظت فردی

در حالت کلی تجهیزات حفاظت فردی با توجه به نوع مصرف، احتمال خطر و به‌منظور جلوگیری از حوادث غیر خواسته برای اعضای بدن، مطابق شکل ۴-۲ به شرح ذیل است:

- لباس کار
- پیش‌بندهای حفاظتی
- کفش‌های ایمنی

¹ Personal Protective Equipment

- تجهیزات حفاظت از دست‌ها
- تجهیزات حفاظت از گوش
- تجهیزات حفاظت از چشم و صورت
- تجهیزات حفاظت از سر



شکل ۴-۲: تجهیزات حفاظت فردی

ارزیابی تجهیزات فردی در این تحقیق با استفاده از میزان به همراه داشتن تجهیزات ایمنی انجام شده است.

۴-۲-۲- پارامتر ماشین‌آلات و تجهیزات^۱ (EM)

پارامتر ماشین‌آلات و تجهیزات یکی از مهم‌ترین پارامترهای مورد بررسی در این تحقیق است.

¹ Equipment and machinery factor

ماشین‌آلات و تجهیزات در ایمنی صنعت تونل سازی نقش بسیار گسترده‌ای دارند؛ بنابراین در این تحقیق سعی شده است تا به بررسی همه‌جانبه پارامترهای ماشین‌آلات و تجهیزات پرداخته شود.

۴-۲-۱- عامل ساز بودن^۱ (OF)

منظور از عامل ساز بودن، پتانسیل ایجاد خطر در ماشین‌آلات و تجهیزات است. ارزیابی عامل ساز بودن ماشین‌آلات و تجهیزات در این تحقیق بدین گونه است که از نظر افراد حاضر در پروژه‌های تونل سازی چند درصد از ماشین‌آلات و تجهیزات موجود در پروژه می‌توانند عاملی برای ایجاد خطر باشند.

۴-۲-۲- سطح مکانیزاسیون^۲ (ML)

منظور از سطح مکانیزاسیون در ماشین‌آلات و تجهیزات انجام کار به وسیله ماشین بدون دخالت مستقیم انسان است. هرچقدر میزان مکانیزاسیون ماشین‌آلات و تجهیزات در پروژه بالاتر باشد ایمنی پروژه بیشتر خواهد بود به دلیل اینکه میزان دخالت و مشارکت انسان در کار با ماشین‌آلات و تجهیزات به حداقل می‌رسد. ارزیابی سطح مکانیزاسیون ماشین‌آلات و تجهیزات در این مطالعه به وسیله درصد ماشین‌آلات و تجهیزات مکانیزه موجود در پروژه است.

۴-۲-۳- نوع مکانیسم^۳ (TM)

ماشین‌آلات و تجهیزات از نظر نوع مکانیسم به دو گروه اصلی ماشین‌های ساده و ماشین‌های پیچیده تقسیم می‌شوند. سطح شیب‌دار، چرخ و محور، اهرم، قرقره، گوه و پیچ در دسته ماشین‌های ساده قرار می‌گیرند و سایر ماشین‌ها، همگی پیچیده‌اند. ماشین‌های پیچیده از کنار هم قرار گرفتن مجموعه‌ای از ماشین‌های ساده به وجود می‌آیند. ارزیابی نوع مکانیسم ماشین‌آلات و تجهیزات در این

¹ Operating factor

² Mechanization level

³ Type of mechanism

مطالعه به وسیله درصدی از ماشین آلات و تجهیزات در پروژه که دارای مکانیسم پیچیده هستند انجام می شود.

۴-۲-۴-۴ ابعاد^۱ (D)

ابعاد ماشین آلات و تجهیزات از لحاظ کم شدن میدان دید و همچنین پر کردن فضای مفید، ایجاد خطر می کنند. هر چه میزان ابعاد ماشین آلات و تجهیزات در پروژه افزایش یابد خطر بیشتری متوجه افرادی است که در اطراف ماشین آلات و تجهیزات فعالیت می کنند. ارزیابی ابعاد ماشین آلات و تجهیزات در این مطالعه از طریق درصد فضای مفید باقی مانده و همچنین میزان عرض مفید تونل پس از استقرار ماشین آلات و تجهیزات در تونل انجام می گیرد.

۴-۲-۴-۵ نگهداری و تعمیرات^۲ (MR)

نگهداری و تعمیرات به کلیه اعمالی گفته می شود که در جهت حفظ ماشین آلات، تجهیزات و اماکن در وضعیت مطلوب و مطابق با استاندارد قابل قبول، صورت می گیرد. سیستم نگهداری و تعمیرات مجموعه ای متشکل از روش ها و فرم ها است که هدف های مذکور را برآورده می سازد. ارزیابی نگهداری و تعمیرات در این مطالعه با استفاده از بررسی چک لیست های پر شده توسط اپراتور تجهیزات و یا نماینده ایمنی انجام می شود.

۴-۲-۴-۶ نوع کاربری و موقعیت قرارگیری^۳ (TUP)

نوع کاربری و موقعیت قرارگیری ماشین آلات و تجهیزات نقش مهمی در ایمنی پروژه ایفا می کند. ارزیابی نوع کاربری و موقعیت قرارگیری ماشین آلات و تجهیزات در این مطالعه به وسیله محاسبه شاخص نوع کاربری و موقعیت قرارگیری که تعریف کرده ایم انجام می شود. محاسبه شاخص نوع

¹ Dimensions

² Maintenance and Repairs

³ Type of use and Positioning

کاربری و موقعیت قرارگیری بدین صورت است که ابتدا پنج ماشین و تجهیزاتی که در پروژه دارای بیشترین زمان فعالیت در یک چرخه عملیاتی را هستند، مرتب کرده و به هرکدام ضربی تعلق می-گیرد، سپس پنج ماشین و تجهیزاتی که حداکثر زمان فعالیت در هر یک از مناطق نامبرده شده در جدول ارائه شده را دارند، در جدول مرتب سازی و به هرکدام از آن ها ضربی تعلق می-گیرد سپس با توجه به مجموع حاصل ضرب هرکدام از این مقادیر به دست آمده، شاخص نوع کاربری و موقعیت قرارگیری به دست خواهد آمد. هر چه میزان شاخص نوع کاربری و موقعیت قرارگیری ماشین آلات و تجهیزات کمتر باشد از نظر ایمنی بهتر است و بالعکس.

۴-۲-۳- پارامتر ویژگی های تونل^۱ (TCF)

پارامتر ویژگی های تونل یکی از پارامترهای تأثیرگذار در ایمنی تونل ها است. ارزیابی پارامترهای ویژگی های تونل توسط ارزیابی: هندسه تونل، تحکیمات تونل، خدمات فنی، نوع روش تونل سازی، نوع کاربری و موقعیت قرارگیری و تعداد و نوع دسترسی ها انجام می شود.

۴-۲-۳-۱- هندسه تونل^۲ (TG)

هندسه تونل شامل دو بخش طول تونل و سطح مقطع تونل است. ارزیابی هندسه تونل در این مطالعه به وسیله اندازه طول و سطح مقطع تونل انجام می شود.

۴-۲-۳-۲- تحکیمات^۳ (C)

تحکیمات تونل جزء بسیار مهمی از ویژگی های تونل هستند که نقش بسیار مهمی در ارزیابی ایمنی در تونل سازی دارند. ارزیابی تحکیمات تونل در این مطالعه به وسیله محاسبه شاخص تحکیمات که ارائه کرده ایم، محاسبه می شود. محاسبه شاخص تحکیمات به وسیله مجموع حاصل ضرب طولی از

¹ Tunnel characteristics Factor

² Tunnel geometry

³ Consolidation

تونل که دارای یکی از تحکیمات نامبرده که در جدول ارزیابی موجود است، در زمان و موقعیت نصب تحکیمات، تقسیم بر کل طول تونل انجام می‌شود. هرچقدر میزان شاخص تحکیمات کمتر باشد تونل از نظر تحکیمات ایمن‌تر است.

۴-۲-۳- خدمات فنی^۱ (TS)

منظور از خدمات فنی در تونل، تهویه و روشنایی تونل است. به‌منظور ارزیابی تهویه تونل میزان هوای ورودی به تونل را محاسبه و با میزان هوای طراحی شده برای تونل مقایسه می‌کنیم. بدین ترتیب هرچقدر میزان هوای ورودی نسبت به میزان هوای طراحی شده برای معدن بیشتر شود معدن از نظر تهویه بهتر و در نتیجه ایمن‌تر است. روشنایی در تونل با توجه به حداقل میزان روشنایی لازم در تونل ارزیابی می‌شود بنابراین هرچقدر میزان روشنایی نسبت به میزان لازم روشنایی تونل بیشتر شود تونل از نظر روشنایی بهتر و در نتیجه ایمن‌تر است.

۴-۲-۴- نوع روش تونل سازی^۲ (TTM)

نوع روش تونل سازی در ایمنی بسیار تأثیرگذار است و مشخص کننده سطح ایمنی در طراحی و اجرای یک تونل است. ارزیابی نوع روش تونل سازی در این مطالعه به‌وسیله انتخاب یکی از روش‌های تونل سازی ارائه شده شامل: 'Drill and blast'، 'Open TBM'، 'shield TBM'، 'Cut and Cover'، 'Mechanical excavation' صورت گرفته است که به هر روش ضریبی داده می‌شود. مسلم است که هر چه نوع روش تونل سازی مکانیزه‌تر باشد و انسان در آن کمتر دخیل باشد از نظر ایمنی بهتر است.

۴-۲-۵- نوع کاربری و میزان اهمیت تونل^۳ (TUIT)

نوع کاربری و میزان اهمیت تونل، خود تعیین کننده میزان سطح ایمنی در مرحله طراحی و

¹ Technical services

² Type of tunneling procedure

³ Type of use and importance of the tunnel

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 ایمنی وضعیت بهتری دارد.

۴-۲-۳-۶- تعداد و نوع دسترسی‌ها^۱ (NTA)

دسترسی‌ها در هر تونلی نقش مهمی را در بالا بردن سطح ایمنی ایفا می‌کنند بطوریکه اگر تعداد دسترسی‌ها به بیش از دو عدد برسد و همچنین اگر نوع دسترسی‌ها مناسب باشد، از نظر ایمنی بسیار وضعیت خوبی داریم. ارزیابی تعداد و نوع دسترسی‌ها در این مطالعه به وسیله تعداد و نوع دسترسی انجام می‌شود.

۴-۲-۴- پارامتر شرایط ژئوتکنیکی، زمین‌شناسی مهندسی و هیدرولوژی^۲ (GEHF)

پارامتر شرایط ژئوتکنیکی، زمین‌شناسی مهندسی و هیدرولوژی یکی از تأثیرگذارترین عوامل در ایمنی تونل سازی است و این پارامتر به دلیل غیرقابل پیش‌بینی بودن شرایط، تقریباً غیرقابل تغییر است؛ بنابراین برای مقابله با شرایطی که ایجاد خطر ایمنی می‌کند تمهیداتی را می‌بایست اندیشید.

۴-۲-۴-۱- سطح آب‌های زیرزمینی^۳ (GL)

علم هیدرولوژی علمی است که به آب‌های موجود در پهنه خشکی‌های کره زمین مربوط می‌گردد و در آن از چگونگی وقوع، گردش، توزیع و انتقال و خواص فیزیکی و شیمیایی و کنش و واکنش آب نسبت به محیط بحث می‌کند. لایه‌های رسوبی تخلخل زیادی دارند ولی آذین متراکم‌اند و بسیار نفوذناپذیرند. لذا آب وقتی به این سنگ‌ها می‌رسد شروع به اشباع خاک بالای خود می‌کند و به ارتفاع خاصی می‌رسد که دیگر بالاتر نمی‌رود. هر جا سطح آب زیرزمینی به سطح زمین رسیدند تشکیل

¹ Number and type of access

² Geotechnical Condition, Engineering Geology and Hydrology Factor

³ Groundwater level

چشمه می‌دهند.

آب‌های زیرزمینی ممکن است در هر تونلی وجود داشته باشد، اما گاهی سبب به خطر انداختن ایمنی و مختل شدن کار تونل سازی شود که باید از بروز آن جلوگیری کرد. ارزیابی سطح آب‌های زیرزمینی در این مطالعه به وسیله میزان گذر آب‌های زیرزمینی نسبت به طول تونل در نظر گرفته می‌شود.

۲-۴-۲-۴ پتانسیل گازهای خطرناک^۱ (PDG)

گازهای خطرناک یکی از مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر ایمنی در تونل سازی است بطوریکه اگر به آن توجه جدی نشود باعث به خطر افتادن جان و سلامتی افراد و همچنین تجهیزات خواهد شد. ارزیابی پتانسیل گازهای خطرناک در این مطالعه توسط محاسبه احتمال گاز خیزی در تونل و نیز بودن یا نبودن ساختار Trap (تله) انجام می‌شود.

۲-۴-۳-۴ نوع ساختار زمین‌شناسی^۲ (TGS)

ساختارهای زمین‌شناسی نقش بسیار مهمی در پایداری یا ناپایداری تونل‌ها دارند و از این جهت در ایمنی تأثیرگذارند. ساختارهای زمین‌شناسی مختلفی وجود دارد که بعضی از بعضی دیگر ایمن‌ترند. ارزیابی نوع ساختار زمین‌شناسی در این مطالعه به وسیله شرایط زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه دارد. به هر ساختار زمین‌شناسی امتیاز خاص خود تعلق می‌گیرد.

۲-۴-۴-۴ مکانیسم‌های ناپایداری^۳ (IM)

انواع مکانیسم‌های ناپایداری در جدول ارزیابی آورده شده است. با توجه به مطالعات زمین‌شناسی منطقه و با توجه به مشخص شدن مکانیسم ناپایداری منطقه مطابق جدول به هر مکانیسم ناپایداری

¹ Potential dangerous gases

² Type of geological structure

³ Instability mechanisms

امتیازی تعلق می‌گیرد که مشخص کننده سطح ایمنی است.

۴-۲-۴-۵- کیفیت مهندسی توده سنگ یا خاک^۱ (QRSE)

کیفیت مهندسی توده سنگ و خاک بیانگر میزان ناپیوستگی‌های موجود در سنگ و خاک است و از طریق مغزه گیری از سنگ و نمونه‌گیری از خاک به دست می‌آید. با توجه به اطلاعات موجود در پروژه که یا مربوط به RQD و یا مربوط به SPT است، ارزیابی کیفیت مهندسی توده سنگ یا خاک در این مطالعه امتیازدهی از طریق عدد به دست آمده برای RQD یا SPT است.

۴-۲-۴-۵- پارامتر شرایط جغرافیایی و اقلیمی^۲ (GCF)

این پارامتر به توپوگرافی، ارتفاع، میزان بادخیزی، دما و رطوبت، میزان بارندگی و بلایای طبیعی در منطقه مورد مطالعه می‌پردازد و نقش تأثیرگذار عوارض طبیعی در اطراف محوطه تونل سازی بر ایمنی را مشخص می‌کند.

۴-۲-۴-۱- شرایط توپوگرافی سطح زمین^۳ (TS)

با استفاده از شاخص موقعیت توپوگرافی (TPI)، سطح زمین به پنج دسته تقسیم‌بندی شد. شاخص TPI شاخصی از وضعیت چشم‌انداز زمین است. این شاخص اختلاف ارتفاع هر سلول نسبت به ارتفاع متوسط سلول‌های همسایه را نشان می‌دهد. مقادیر مثبت این شاخص نشان دهنده این است که سلول در ارتفاع پایین‌تری نسبت به سلول‌های همسایه واقع شده است (Jenness, 2006).

به‌منظور محاسبه TPI طبق معادله ارتفاع هر سلول در مدل رقومی ارتفاع با میانگین ارتفاع سلول‌های همسایه بررسی و درنهایت، ارتفاع میانگین از مقدار ارتفاع در مرکز کم می‌شود.

¹ Quality of rock and soil engineering

² Geographical and climatic conditions factore

³ Topographic conditions on the surface of the earth

$$TPI = Z_0 - \sum_{n=1} Z_n/n$$

۴-۲-۵-۲- ارتفاع از سطح دریا و میزان بادخیزی منطقه^۱ (HW)

ارتفاع از سطح دریا عبارتی است که به میزان ارتفاع یک عارضه یا نقطه در خشکی یا هوا از سطح متوسط آب‌های آزاد اشاره دارد. جابه‌جایی مکانی یک توده هوایی را باد می‌نامند. ارزیابی ارتفاع از سطح دریا برای تونل‌ها در این مطالعه به‌وسیله اندازه تراز تونل نسبت به ارتفاع آب‌های آزاد اندازه‌گیری می‌شود و همچنین برای ارزیابی میزان بادخیزی منطقه از سرعت وزش باد در منطقه مورد مطالعه استفاده شده است.

۴-۲-۵-۳- دما و رطوبت^۲ (TH)

طبق تعریف، شرایط آسایش حرارتی محدوده‌ای است از دما و رطوبت که در آن سازوکار تنظیم حرارت بدن در حداقل فعالیت باشد (Givoni, 1969). دما و رطوبت در منطقه تونل سازی نقش بسیار مهم و تأثیرگذاری در ایمنی تونل دارد بطوریکه برای تغییر این شرایط طبیعی منطقه، همواره تمهیداتی بکار گرفته می‌شود تا اگر دما و رطوبت جو مناسب نباشد و یا بیشتر و یا کمتر از حد دما و رطوبت آسایش باشد، دما و رطوبت را به حد آسایش برساند. ارزیابی دما و رطوبت در این مطالعه به‌وسیله دما و رطوبت اندازه‌گیری شده در منطقه مورد مطالعه انجام می‌شود که به هر دما و رطوبتی امتیازی تعلق می‌گیرد.

۴-۲-۵-۴- میزان بارندگی^۳ (R)

میزان بارندگی در کارهای تونل سازی بسیار مهم و در ایمنی تأثیرگذار است. ارزیابی میزان بارندگی در این مطالعه به‌وسیله شدت بارندگی و مدت بارندگی تعیین می‌شود. شدت بارندگی، مقدار

¹ Height above sea level and the area windiness

² Temperature and humidity

³ Rainfall

بارندگی در واحد زمان را نشان می‌دهد (mm/h) و مدت بارندگی فاصله زمانی بین شروع و پایان بارندگی به واحد ساعت را نشان می‌دهد.

۴-۲-۵-۵- بلاایای طبیعی^۱ (ND)

بلاایای 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 بلاایای طبیعی در این مطالعه به‌وسیله متوسط دوره زمانی بازگشت بلاایای طبیعی انجام می‌شود که در هر منطقه بنا بر جای قرارگیری متفاوت است.

۴-۲-۶- عوامل قراردادی-اجرایی^۲ (CEF)

عوامل قراردادی-اجرایی بخش بسیار مهمی در پروژه‌های تونل‌سازی است که شامل پنج بخش: فرهنگ ایمنی، گواهی‌نامه‌های ملی و بین‌المللی در خصوص سیستم‌های مدیریتی، سطح استانداردها و قوانین بالادستی در قرارداد، سهم ایمنی در کل هزینه‌ها و فشردگی برنامه زمان‌بندی است که در ادامه به هر بخش به‌صورت مجزا پرداخته می‌شود.

۴-۲-۶-۱- فرهنگ ایمنی^۳ (SC)

اصطلاح "فرهنگ ایمنی" برای اولین بار در گزارش اتمی سال ۱۹۸۷ در مورد فاجعه چرنوبیل استفاده شد (Gibbons, 2007). فرهنگ ایمنی چیزی است که همه در مورد مسائل ایمنی نگران هستند (Bodur & Filiz, 2009). فرهنگ ایمنی به‌عنوان "ایده‌ها و باورهایی که همه اعضای یک سازمان در مورد ریسک، حوادث و بیماری‌ها به اشتراک می‌گذارند، تعریف شده است" (DESTER & BLOCKLEY, 1995). ارزیابی فرهنگ ایمنی در این مطالعه به‌وسیله میزان اعتقاد و الزام و تعهد در

¹ natural disaster

² Contractor-Executive Factors

³ Safety Culture

کلیه سطوح سازمانی که بر اساس ارزیابی مدیران HSE تعیین می‌شود، انجام می‌شود.

۴-۲-۶-۲ گواهینامه‌های ملی و بین‌المللی در خصوص سیستم‌های مدیریتی^۱ (CMS)

پیمانکاران در پروژه‌های تونل‌سازی ملزم به دریافت گواهینامه‌های ملی و بین‌المللی در حیطه فعالیت خود هستند. هر چه میزان این گواهینامه‌ها بیش‌تر شود وضعیت از نظر ایمنی مطلوب‌تر است. ارزیابی گواهینامه‌های ملی و بین‌المللی در خصوص سیستم‌های مدیریتی در این مطالعه از نظر دارا بودن استانداردهای مدیریتی در کلیه زمینه‌های مربوطه بر اساس الزامات بین‌المللی انجام می‌شود. هر چه میزان گواهینامه‌های ملی و بین‌المللی بیشتر باشد از نظر ایمنی وضعیت بهتری داریم.

۴-۲-۶-۳ سطح استانداردها و قوانین بالادستی در قرارداد^۲ (LSL)

سطح استانداردها و قوانین بالادستی در هر پروژه بیان‌کننده سطح اجرای فرمان‌ها و قوانین ایمنی در آن پروژه است بنابراین عامل سطح استانداردها و قوانین در ایمنی بسیار تأثیرگذار است. ارزیابی سطح استانداردها و قوانین بالادستی در این مطالعه به‌وسیله دارا بودن استانداردهای مدیریتی در زمینه‌های مربوطه، بر اساس اسناد مناقصه به‌صورت واقعی انجام می‌شود. هر چه میزان استانداردهای پروژه بیشتر باشد از نظر ایمنی وضعیت بهتری داریم.

۴-۲-۶-۴ سهم ایمنی در کل هزینه‌ها^۳ (SC)

سهم هزینه در نظر گرفته شده برای بخش ایمنی در قرارداد، نقش بسیار مهمی در میزان ایمنی دارد. ارزیابی سهم ایمنی در کل هزینه‌ها در این مطالعه به‌وسیله هزینه در نظر گرفته شده برای بخش ایمنی نسبت به کل هزینه‌های پروژه انجام می‌شود. هر چه سهم ایمنی در کل هزینه‌ها بیشتر باشد وضعیت ایمنی بهبود می‌یابد.

¹ National and International Certificates on Management Systems

² Levels of standards and Upstream laws in the contract

³ Safety contribution in total costs

۴-۲-۵- فشردگی برنامه زمان‌بندی^۱ (CTS)

برنامه زمان‌بندی در پروژه‌ها مشخص‌کننده مدت انجام فعالیت‌ها و شروع و خاتمه و همچنین شناوری فعالیت‌هاست. شاخص فشردگی هم باید شناوری در فعالیت‌ها و هم میزان تداخل و چند جبهه کاری فعالیت‌های فعال را در نظر بگیرد. ارزیابی فشردگی برنامه زمان‌بندی در این مطالعه به‌وسیله شاخص فشردگی انجام می‌شود. هر چه شاخص فشردگی بیشتر باشد از نظر ایمنی نامطلوب است.

۴-۳- جمع‌بندی

در این فصل با استفاده از مطالعه منابع علمی معتبر به تعیین شاخص‌های مؤثر بر ایمنی در تونل سازی پرداخته شد. شش عامل اصلی: عوامل انسانی، ماشین‌آلات و تجهیزات، ویژگی‌های تونل، شرایط ژئوتکنیکی، زمین‌شناسی مهندسی و هیدرولوژی، شرایط جغرافیایی و اقلیمی و عوامل قراردادی-اجرایی انتخاب شد و همچنین برای هر کدام از این عوامل، زیر شاخه‌هایی تعیین شد. سپس به تعریف هر کدام از این عوامل به طور مجزا پرداخته شد.

¹ Compact Timing Schedule

فصل پنجم:

ارزیابی ایمنی در تونل سازی با تمرکز بر مطالعه مورد

۵-۱- مقدمه

تاکنون مطالعات کمی در مورد پارامترهای مؤثر بر ایمنی در تونل سازی انجام شده است. 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 ایمنی در تونل سازی باشد ارائه نشده است.

در این تحقیق با توجه به‌مرور کلیه منابع معتبر و شناخته‌شده جهانی 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 ایمنی در تونل سازی ارائه شود. در بررسی یک فرایند یا سیستم قدم اول تعیین پارامترهای مؤثر در آن به همراه شناخت و تحلیل آن‌ها است. برای این منظور در ابتدا با استفاده از منابع پارامترهای مختلف عوامل مؤثر بر ایمنی در تونل سازی مشخص شدند. پس از شناسایی پارامترها برای شناسایی اهمیت و وزن دهی آن‌ها از روش تحلیل سلسله مراتبی دلفی فازی (FDAHP) استفاده شده است. در ادامه سیستم طبقه‌بندی جدیدی به‌منظور ارزیابی ایمنی در تونل سازی ارائه شده است. به‌منظور پایایی و اعتبارسنجی پرسشنامه‌ها از روش آلفای کرونباخ استفاده شده است.

۵-۲- ارزیابی ایمنی در تونل سازی با استفاده از FDAHP

به‌منظور جمع‌آوری داده‌های لازم پرسشنامه‌هایی طراحی شد و در میان متخصصان توزیع شد. این پرسشنامه‌ها شامل هفت بخش: دسته پارامترها، پارامترهای عوامل انسانی، پارامترهای ماشین‌آلات و تجهیزات، پارامترهای ویژگی‌های تونل، پارامترهای شرایط ژئوتکنیکی، زمین‌شناسی مهندسی و هیدرولوژی، پارامترهای شرایط جغرافیایی و اقلیمی و پارامترهای عوامل قراردادی-اجرایی بوده و برای تکمیل شدن از نظر ۳۰ تن از متخصصان برجسته در داخل کشور استفاده شد که برای ورودی روش تحلیل سلسله مراتبی فازی دلفی مورد استفاده قرار گرفتند. در ادامه پیاده‌سازی روش برای هر یک از بخش‌های ذکر شده در قسمت‌های مجزا تشریح شده است.

جدول ۵-۱ تا ۷ نمونه‌هایی از فرم‌های نظرسنجی ارسال شده را نشان می‌دهد. در این فرم‌ها از متخصصان خواسته شده بود بسته به نظر شخصی خویش، اهمیت هر یک از عوامل را نسبت به همدیگر مشخص کنند.

جدول ۵-۱: فرم ارسال شده برای دسته پارامترها

شاخص عوامل انسانی	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹
شاخص عوامل انسانی									۱								
شاخص عوامل انسانی									۱								
شاخص عوامل انسانی									۱								
شاخص عوامل انسانی									۱								
شاخص ماشین‌آلات و تجهیزات									۱								
شاخص ماشین‌آلات و تجهیزات									۱								
شاخص ماشین‌آلات و تجهیزات									۱								
شاخص ماشین‌آلات و تجهیزات									۱								
شاخص ویژگی‌های تونل									۱								
شاخص ویژگی‌های تونل									۱								
شاخص ویژگی‌های تونل									۱								
شاخص ویژگی‌های تونل									۱								
شاخص شرایط ژئوتکنیکی زمین‌شناسی مهندسی و هیدرولوژی									۱								
شاخص شرایط ژئوتکنیکی زمین‌شناسی مهندسی و هیدرولوژی									۱								
شاخص شرایط ژئوتکنیکی زمین‌شناسی مهندسی و هیدرولوژی									۱								
شاخص شرایط ژئوتکنیکی زمین‌شناسی مهندسی و هیدرولوژی									۱								
شاخص شرایط ژئوتکنیکی زمین‌شناسی مهندسی و هیدرولوژی									۱								
شاخص شرایط ژئوتکنیکی زمین‌شناسی مهندسی و هیدرولوژی									۱								
شاخص شرایط ژئوتکنیکی زمین‌شناسی مهندسی و هیدرولوژی									۱								

جدول ۵-۲: فرم‌های ارسال شده برای پارامتر عوامل انسانی

شرایط جسمانی و فیزیولوژیکی	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹
شرایط جسمانی و فیزیولوژیکی									۱								
شرایط جسمانی و فیزیولوژیکی									۱								
شرایط جسمانی و فیزیولوژیکی									۱								
شرایط روحی-روانی									۱								
شرایط روحی-روانی									۱								
شرایط روحی-روانی									۱								
سطح آموزش									۱								
سطح آموزش									۱								
هوش و تجربه کاری									۱								
هوش و تجربه کاری									۱								

جدول ۳-۵: فرم‌های ارسال شده برای پارامتر ماشین‌آلات و تجهیزات

عامل ساز بودن	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	سطح مکانیزاسیون
عامل ساز بودن									۱									نوع مکانیسم
عامل ساز بودن									۱									ابعاد
عامل ساز بودن									۱									نگهداری و تعمیرات
عامل ساز بودن									۱									نوع کاربری و موقعیت قرارگیری
سطح مکانیزاسیون									۱									نوع مکانیسم
سطح مکانیزاسیون									۱									ابعاد
سطح مکانیزاسیون									۱									نگهداری و تعمیرات
سطح مکانیزاسیون									۱									نوع کاربری و موقعیت قرارگیری
نوع مکانیسم									۱									ابعاد
نوع مکانیسم									۱									نگهداری و تعمیرات
نوع مکانیسم									۱									نوع کاربری و موقعیت قرارگیری
ابعاد									۱									نگهداری و تعمیرات
ابعاد									۱									نوع کاربری و موقعیت قرارگیری
نگهداری و تعمیرات									۱									نوع کاربری و موقعیت قرارگیری

جدول ۴-۵: فرم ارسال شده برای پارامتر ویژگی‌های تونل

هندسۀ تونل	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	تحکیمات
هندسۀ تونل									۱									خدمات فنی
هندسۀ تونل									۱									نوع روش تونل سازی
هندسۀ تونل									۱									نوع کاربری و میزان اهمیت تونل
هندسۀ تونل									۱									تعداد و نوع دسترسی‌ها
تحکیمات									۱									خدمات فنی
تحکیمات									۱									نوع روش تونل سازی
تحکیمات									۱									نوع کاربری و میزان اهمیت تونل
تحکیمات									۱									تعداد و نوع دسترسی‌ها
خدمات فنی									۱									نوع روش تونل سازی
خدمات فنی									۱									نوع کاربری و میزان اهمیت تونل
خدمات فنی									۱									تعداد و نوع دسترسی‌ها
نوع روش تونل سازی									۱									نوع کاربری و میزان اهمیت تونل
نوع روش تونل سازی									۱									تعداد و نوع دسترسی‌ها
نوع کاربری و میزان اهمیت تونل									۱									تعداد و نوع دسترسی‌ها

جدول ۵-۵: فرم ارسال شده برای پارامتر شرایط ژئوتکنیکی، زمین‌شناسی مهندسی و هیدرولوژی

سطح آب‌های زیرزمینی	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹
سطح آب‌های زیرزمینی									۱								
سطح آب‌های زیرزمینی									۱								
سطح آب‌های زیرزمینی									۱								
پتانسیل گازهای خطرناک									۱								
پتانسیل گازهای خطرناک									۱								
پتانسیل گازهای خطرناک									۱								
نوع ساختار زمین شناسی									۱								
نوع ساختار زمین شناسی									۱								
مکانیسم‌های ناپایداری									۱								

جدول ۵-۶: فرم ارسال شده برای پارامتر شرایط جغرافیایی و اقلیمی

شرایط توپوگرافی سطح زمین	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹
شرایط توپوگرافی سطح زمین									۱								
شرایط توپوگرافی سطح زمین									۱								
شرایط توپوگرافی سطح زمین									۱								
ارتفاع از سطح دریا و میزان بادخیزی منطقه									۱								
ارتفاع از سطح دریا و میزان بادخیزی منطقه									۱								
ارتفاع از سطح دریا و میزان بادخیزی منطقه									۱								
دما و رطوبت									۱								
دما و رطوبت									۱								
میزان بارندگی									۱								

جدول ۵-۷: فرم ارسال شده برای پارامتر عوامل قراردادی-اجرایی

فرهنگ ایمنی	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹
فرهنگ ایمنی									۱								
فرهنگ ایمنی									۱								
فرهنگ ایمنی									۱								
گواهینامه‌های ملی و بین‌المللی									۱								
گواهینامه‌های ملی و بین‌المللی									۱								
گواهینامه‌های ملی و بین‌المللی									۱								
سطح استانداردها و قوانین بالادستی									۱								
سطح استانداردها و قوانین بالادستی									۱								
سهام ایمنی در کل هزینه‌ها									۱								

با استفاده از جداول بالا نظر متخصصان در مورد وزن و اهمیت هر معیار در رابطه با شاخص‌های مربوطه در نظر گرفته شد. به‌عنوان مثال در مورد معیار "شاخص عوامل انسانی" با "شاخص ماشین-آلات و تجهیزات" مقایسه می‌شوند. به‌عنوان مثال در مورد معیار "شرایط جسمانی و فیزیولوژیکی" با معیار "شرایط روحی-روانی" مقایسه می‌شوند. در این مورد از متخصصان خواسته شد که مشخص نمایند کدامیک از معیارها برای شاخص عوامل انسانی، نسبت به دیگری دارای اهمیت بیشتری است. اگر عدد ۱ را انتخاب نمایند به معنای آن است که این دو معیار با توجه به هدف پژوهش برای شاخص عوامل انسانی، از اهمیت یکسانی برخوردار هستند. اگر عدد ۷ سمت راست شرایط جسمانی و فیزیولوژیکی را انتخاب کنند به معنای آن است که معیار شرایط جسمانی و فیزیولوژیکی را خیلی بیشتر نسبت به معیار شرایط روحی-روانی مهم‌تر می‌دانند و برعکس، اگر عدد ۷ سمت چپ را انتخاب کنند به معنای آن است که متخصصان معیار شرایط روحی-روانی را خیلی بیشتر نسبت به شرایط جسمانی و فیزیولوژیکی مهم‌تر می‌دانند. در ادامه پیاده‌سازی روش برای هر یک از بخش‌های ذکر شده در قسمت‌های مجزا تشریح شده است.

۵-۳- اعتبارسنجی پرسشنامه‌ها

یک آزمون خوب باید از تعدادی ویژگی مطلوب مانند عینیت، سهولت اجرا، عملی بودن، سهولت تعبیر و تفسیر، روایی و پایایی برخوردار باشد. مهم‌ترین مورد ذکر شده در این ویژگی‌ها، پایایی (اعتبارسنجی) است (مؤمنی و قیومی، ۱۳۹۱)؛ که در ادامه به تعریف پایایی و مهم‌ترین روش‌های تعیین پایایی و نیز روش مورد استفاده برای پایایی پرسشنامه‌های استفاده شده در این تحقیق پرداخته خواهد شد.

۵-۳-۱- تعریف پایایی و روش‌های تعیین آن

پایایی یک معیار اندازه‌گیری است که عمدتاً به دقت نتایج حاصل از آن اشاره می‌کند. پایایی به دقت، اعتمادپذیری، ثبات یا تکرارپذیری نتایج آزمون اشاره می‌کند. روش‌های تعیین پایایی متنوع

هستند و به شرح زیر دسته‌بندی می‌شوند (مؤمنی و قیومی، ۱۳۹۱).

۱- روش پایایی مصححان^۱

۲- روش باز آزمایی^۲

۳- روش فرم‌های هم‌ارز^۳

۴- روش‌های همسانی درونی^۴ (روش دو نیمه کردن^۵، روش کودر- ریچاردسون^۶، روش ضریب آلفا^۷ (کرونباخ^۸)).

که در اینجا تنها به روش ضریب آلفا (کرونباخ) که یکی از مهم‌ترین روش‌ها برای ارزیابی پایایی است، اشاره می‌شود.

۵-۳-۲- روش‌های همسانی درونی

در روش‌های همسانی درونی، بر همسانی یا یکنواختی ماده‌ها یا اجزای تشکیل دهنده یک آزمون تأکید می‌شود. بدین منظور، آزمون موردنظر را یک‌بار با گروه واحدی از آزمون‌شوندگان اجرا می‌کنند و به اصطلاح پیش‌آزمون تهیه می‌شود (تعداد آزمون‌شوندگان در پیش‌آزمون وابسته به نظر محقق است که با توجه به اهمیت آزمون و موارد مشابه دیگر تعیین می‌شود). سپس متناسب با نوع آزمون با یکی از روش‌های دو نیمه کردن، روش کودر- ریچاردسون، روش ضریب آلفای کرونباخ به تعیین ضریب پایایی آن می‌پردازند (مؤمنی و قیومی، ۱۳۹۱).

^۱ - Examiners (Scorers) Reliability

^۲ - Test- Retest

^۳ - Equivalent Forms

^۴ - Internal Consistency

^۵ - Split- Halves

^۶ - Kuder- Richardson

^۷ - Coefficient alpha

^۸ - Cronbach

۵-۳-۳- روش ضریب آلفای کرونباخ

ضریب آلفای کرونباخ توسط کرونباخ در سال ۱۹۵۱ میلادی ابداع شد و یکی از متداول‌ترین روش‌های اندازه‌گیری اعتمادپذیری و یا پایایی پرسش‌نامه‌ها است. به این روش، ضریب آلفا یا حتی آلفا نیز گفته می‌شود. ضریب آلفای کرونباخ، برای سنجش میزان تک بعدی بودن نگرش‌ها، عقاید و غیره بکار می‌رود. درواقع می‌خواهیم ببینیم تا چه حد برداشت پاسخگویان از سؤالات یکسان بوده است. اساس این ضریب بر پایه مقیاس‌ها است (مؤمنی و قیومی، ۱۳۹۱).

مقیاس‌ها عبارت‌اند از دسته‌ای از اعداد که بر روی یک پیوستار به افراد، اشیا یا رفتارها در جهت به کمیّت کشاندن کیفیت‌ها اختصاص داده می‌شود. روش آلفای کرونباخ در شرایطی که نمرات سؤالات نه تنها برای گزینه‌های دو ارزشی صفر و یک، بلکه برای گزینه‌های چند ارزشی (مانند طیف پنج گزینه‌ای لیکرت) که در تحقیقات اجتماعی استفاده می‌شود نیز به کار می‌رود (مؤمنی و قیومی، ۱۳۹۱).

در مقیاس لیکرت اساس کار بر فرض هم‌وزن بودن گویه‌ها استوار است. بدین ترتیب به هر گویه نمراتی (مثلاً از ۱ تا ۹ برای مقیاس لیکرت ۵ گویه‌ای) داده می‌شود که مجموع نمراتی که هر فرد از گویه‌ها می‌گیرد نمایانگر گرایش او خواهد بود (مؤمنی و قیومی، ۱۳۹۱).

آلفای کرونباخ به‌طور کلی با استفاده از یکی روابط ۵-۱ یا ۵-۲ محاسبه می‌شود.

$$r_{\alpha} = \left(\frac{k}{k-1} \right) \left(1 - \frac{\sum_{j=1}^k \sigma_j^2}{\sigma^2} \right) \quad (۱-۵)$$

$$\alpha = \frac{k\bar{C}}{\bar{V} + (k-1)\bar{C}} \quad (۲-۵)$$

که در این روابط (Cronbach, 1951):

k: تعداد سؤالات (بخش‌های) آزمون؛

σ_j^2 : واریانس نمرات سؤال (بخش) j ام؛

σ^2 : واریانس نمرات کل سؤالات (آزمون)؛

$\bar{C}$: میانگین کوواریانس بین سؤالات؛

$\bar{V}$: واریانس میانگین سؤالات می‌باشند.

بدیهی است هرچقدر شاخص آلفای کرونباخ به ۱ نزدیک‌تر باشد، همبستگی درونی بین سؤالات بیشتر و در نتیجه پرسش‌ها همگن‌تر خواهند بود. کرونباخ ضریب پایایی ۴۵٪ را کم، ۷۵٪ را متوسط و قابل قبول و ضریب ۹۵٪ را زیاد پیشنهاد کرده است (Cronbach, 1951). بدیهی است در صورت پایین بودن مقدار آلفا، بایستی بررسی شود که با حذف کدام پرسش‌ها مقدار آن را می‌توان افزایش داد. اما به‌طور کلی اگر ضریب آلفا بیشتر از ۰/۷ باشد، آزمون از پایایی قابل قبولی برخوردار است (مؤمنی و قیومی، ۱۳۹۱).

۵-۳-۴- اجرای FDAHP برای دسته پارامترها

با توجه به پرسشنامه‌های موجود، ماتریس مقایسه زوجی متناظر با هر یک از پارامترها از نظر متخصصان مختلف به‌صورت جداگانه برای هر متخصص تشکیل شده است. یک نمونه از ماتریس‌های مذکور در جدول ۵-۸ آورده شده است.

جدول ۵-۸: ماتریس مقایسه زوجی ۶ پارامتر اصلی با توجه به نظرات متخصصان

ماتریس مقایسه زوجی با توجه به نظر یکی از متخصصان						
	HF	EM	TF	GEH	GC	CA
(HF) عوامل انسانی	1	3	3	0.3333	5	0.2
(EM) ماشین‌آلات و تجهیزات	0.3333	1	3	0.2	5	3
(TF) ویژگی‌های تونل	0.3333	0.3333	1	0.3333	5	5
(GEH) شرایط ژئوتکنیکی، زمین‌شناسی مهندسی و هیدرولوژی	3	5	3	1	5	5
(GC) شرایط جغرافیایی و اقلیمی	0.2	0.2	0.2	0.2	1	3
(CA) عوامل قراردادی-اجرایی	5	0.3333	0.2	0.2	0.3333	1

پس از دریافت نظرات متخصصین ماتریس مقایسه زوجی فازی بین مؤلفه‌های مؤثر در ایمنی تونل‌سازی، طبق روابط ۳-۱ تا ۳-۴ محاسبه شد و نتایج در جدول ۵-۹ نمایش داده شده است.

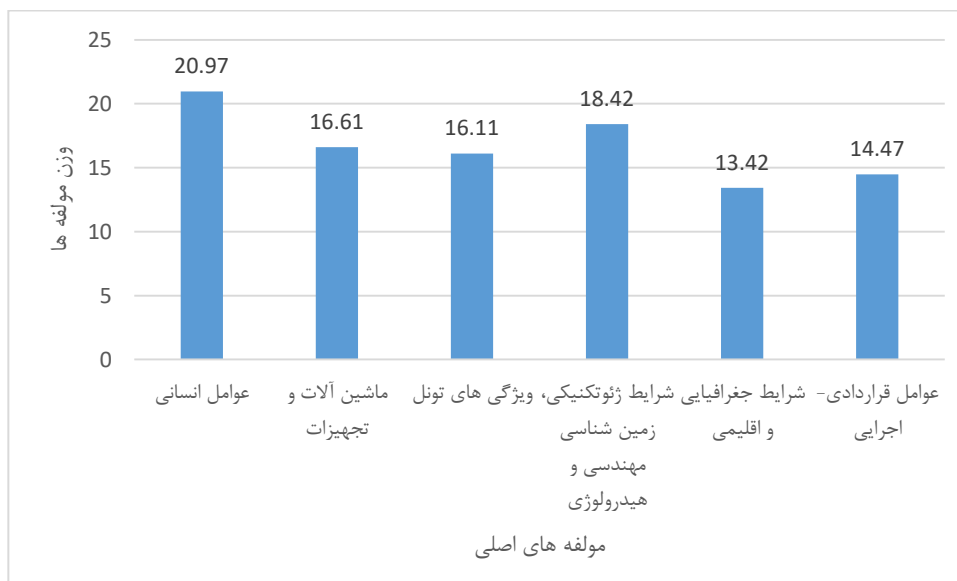
جدول ۵-۹: ماتریس مقایسه زوجی دلفی بین مؤلفه‌های مؤثر بر ایمنی

عوامل انسانی	ماشین‌آلات و تجهیزات	ویژگی‌های تونل	شرایط ژئوتکنیکی	شرایط جغرافیایی	عوامل قراردادی
(1,1,1)	(0.125,2.5709,9)	(0.1666,1.801,9)	(0.1428,1.0944,9)	(0.1666,3.0913,9)	(0.1111,1.498,9)
(0.1111,0.3889,8)	(1,1,1)	(0.1111,1.2565,7)	(0.1111,0.9605,8)	(0.1111,2.1991,8)	(0.1111,2.0361,9)
(0.1111,0.5552,6)	(0.1428,0.7958,9)	(1,1,1)	(0.1111,0.7386,9)	(0.1111,1.6066,9)	(0.1111,1.4753,9)
(0.1111,0.9136,7)	(0.125,1.041,9)	(0.1111,1.3538,9)	(1,1,1)	(0.1111,3.4708,9)	(0.1111,1.8783,9)
(0.1111,0.3234,6)	(0.125,0.4547,9)	(0.1111,0.6224,9)	(0.1111,0.2881,9)	(1,1,1)	(0.1111,1.2385,9)
(0.1111,0.6675,9)	(0.1111,0.4911,9)	(0.1111,0.6778,9)	(0.1111,0.5323,9)	(0.1111,0.8074,9)	(1,1,1)

با استفاده از روابط ۳-۶ تا ۳-۸ عدد فازی $\tilde{Z}_i$ ، وزن فازی $\tilde{W}_i$ ، و وزن غیر فازی جدول ۵-۱۰ محاسبه شده است و نتایج در جدول ۵-۱۰ و شکل ۵-۱ نمایش داده شده است.

جدول ۵-۱: وزن نهایی فازي نسبي و غير فازي بين مؤلفه‌های مؤثر بر ایمنی

وزن غير فازي مؤلفه‌ها	$\tilde{W}_i$ (وزن فازي مؤلفه‌ها)	$\tilde{Z}_i$ $(a_{ij}, \delta_{ij}, \gamma_{ij})$	پارامترها
0.2097	(0.1932, 0.2623, 0.1744)	(0.195, 1.692, 6.2402)	عوامل انسانی
0.1661	(0.1587, 0.1754, 0.1577)	(0.1602, 1.1318, 5.642)	ماشین‌آلات و تجهیزات
0.1611	(0.1655, 0.1485, 0.163)	(0.1671, 0.9581, 5.8324)	ویژگی‌های تونل
0.1842	(0.1618, 0.221, 0.1672)	(0.1634, 1.4256, 5.9842)	شرایط ژئوتکنیکی
0.1342	(0.1618, 0.0876, 0.163)	(0.1634, 0.5654, 5.8324)	شرایط جغرافیایی
0.1447	(0.1587, 0.1048, 0.1744)	(0.1602, 0.6761, 6.2402)	عوامل قراردادی-اجرایی
		$(1.0095, 6.4491, 35.7717)$	$(\tilde{Z}_i \oplus \dots \oplus \tilde{Z}_n)$
$\sum = 1.000$		$(0.9905, 0.155, 0.0279)$	$(\tilde{Z}_i \oplus \dots \oplus \tilde{Z}_i)^{-1}$



شکل ۵-۱: نمودار ستونی وزن نهایی فازي دلفی بين مؤلفه‌های مؤثر بر ایمنی

همان‌طور که در شکل ۵-۱ ملاحظه می‌شود، از بین مؤلفه‌های مؤثر بر ایمنی در تونل سازی، مؤلفه عوامل انسانی دارای بیشترین اهمیت و مؤلفه شرایط جغرافیایی و اقلیمی دارای کمترین اهمیت است. امتیازات اختصاص یافته به دسته پارامترها توسط متخصصان، وارد نرم‌افزار SPSS 20 شده و خروجی‌های موردنظر از نرم‌افزار دریافت می‌شود که در جدول ۵-۱۱ آورده شده است. از آنجایی که مقدار آلفای کرونباخ بزرگ‌تر از ۰/۷ است، پرسشنامه‌ها از پایایی قابل‌قبولی برخوردارند.

جدول ۵-۱۱: قابلیت اعتماد ارزیابی شاخص‌های اصلی با توجه به نظر متخصصان

Case Processing Summary			
		N	%
Cases	Valid	15	100.0
	Excluded ^a	0	.0
	Total	15	100.0
a. Listwise deletion based on all variables in the procedure.			
Reliability Statistics			
Cronbach's Alpha		N of Items	
0.704		30	

۵-۳-۵- اجرای FDAHP برای پارامترهای عوامل انسانی

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. یک نمونه از ماتریس‌های مذکور در جدول ۵-۱۲ آورده شده است.

جدول ۵-۱۲: ماتریس مقایسه زوجی ۵ پارامتر عوامل انسانی با توجه به نظر یکی از متخصصین

ماتریس مقایسه زوجی با توجه به نظر یکی از متخصصین					
	PP	SP	TL	IWE	IE
(PP) شرایط جسمانی و فیزیولوژیکی	1	0.3333	0.3333	3	0.3333
(SP) شرایط روحی-روانی	3	1	0.3333	3	0.3333
(TL) سطح آموزش	3	3	1	3	1
(IWE) هوش و تجربه کاری	0.3333	0.3333	0.3333	1	0.3333
(IE) تجهیزات فردی	3	3	1	3	1

پس از دریافت نظرات متخصصین، ماتریس مقایسه زوجی بین پارامترهای عوامل انسانی در ایمنی در تونل سازی، طبق روابط ۳-۱ تا ۴-۳ محاسبه شد و نتایج در جدول ۵-۱۳ نمایش داده شده

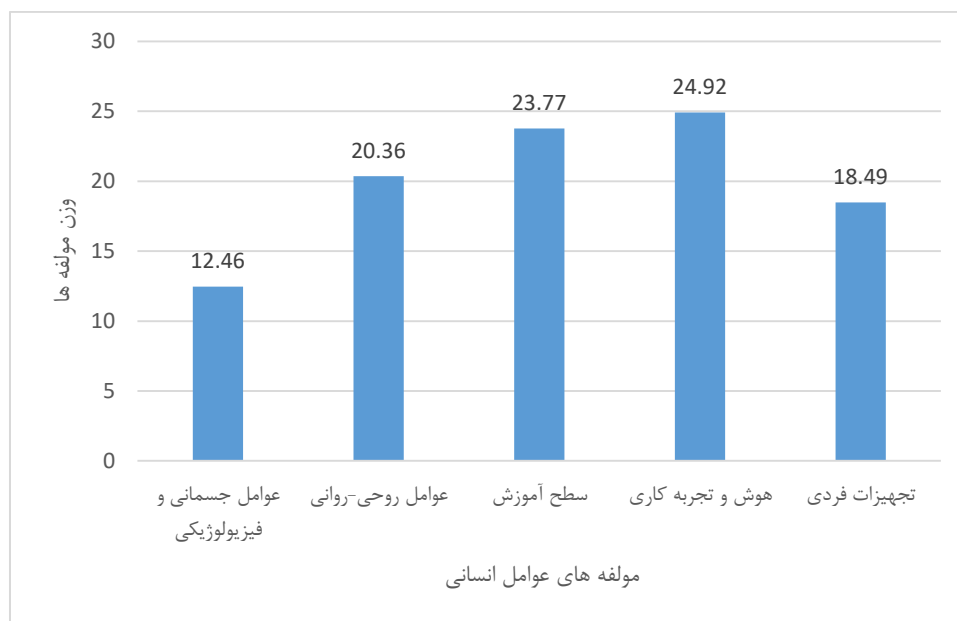
است. در ادامه با استفاده از روابط ۳-۶ تا ۳-۸ عدد فازی $\tilde{Z}_i$ وزن فازی $\tilde{W}_i$ و وزن غیر فازی محاسبه شده است که در جدول ۵-۱۴ آورده شده است و در نهایت در شکل ۵-۲ نمایش داده شده است.

جدول ۵-۱۳: ماتریس مقایسه زوجی فازی دلفی بین فاکتورهای مؤثر بر شاخص عوامل انسانی

جسمانی و فیزیولوژیکی	روحی-روانی	سطح آموزش	هوش و تجربه کاری	تجهیزات فردی
(1,1,1)	(0.1111,0.5704,6)	(0.1111,0.2519,3)	(0.1111,0.2483,3)	(0.1111,0.539,8)
(0.1666,1.7529,9)	(1,1,1)	(0.125,0.7913,9)	(0.125,0.7537,9)	(0.125,0.8931,9)
(0.3333,3.9692,9)	(0.1111,1.2636,8)	(1,1,1)	(0.1428,0.7482,7)	(0.1428,1.5855,9)
(0.3333,4.027,9)	(0.1111,1.3266,8)	(0.1428,1.3364,7)	(1,1,1)	(0.1428,1.688,9)
(0.125,1.8551,9)	(0.1111,1.1195,8)	(0.1111,0.6306,7)	(0.1111,0.5923,7)	(1,1,1)

جدول ۵-۱۴: وزن نهایی فازی نسبی و غیر فازی بین فاکتورهای مؤثر بر شاخص عوامل انسانی

پارامترها	$\tilde{Z}_i$ ($a_{ij}, \delta_{ij}, \gamma_{ij}$)	$\tilde{W}_i$ (وزن فازی مؤلفه‌ها)	وزن غیر فازی مؤلفه‌ها
شرایط جسمانی و فیزیولوژیکی	(0.1724,0.4537,3.3658)	(0.1682,0.083,0.1343)	0.1246
شرایط روحی-روانی	(0.2006,0.9864,5.7995)	(0.1958,0.1805,0.2314)	0.2036
سطح آموزش	(0.2375,1.4286,5.3868)	(0.2317,0.2614,0.2149)	0.2377
هوش و تجربه کاری	(0.2375,1.6451,5.3868)	(0.2317,0.301,0.2149)	0.2492
تجهیزات فردی	(0.1765,0.9505,5.1227)	(0.1722,0.1739,0.2044)	0.1849
$(\tilde{Z}_i \oplus \dots \oplus \tilde{Z}_n)$			(1.0246,5.4645,25.0618)
$(\tilde{Z}_i \oplus \dots \oplus \tilde{Z}_i)^{-1}$			(0.9759,0.1829,0.0399)
$\sum = 1$			



شکل ۵-۲: نمودار ستونی وزن نهایی فازی دلفی بین مؤلفه‌های مؤثر بر شاخص انسانی

همان‌طور که در شکل ۵-۲ ملاحظه می‌شود از بین مؤلفه‌های مؤثر بر ایمنی در تونل سازی، مؤلفه هوش و تجربه کاری دارای بیشترین اهمیت و مؤلفه شرایط جسمانی و فیزیولوژیکی دارای کمترین اهمیت است. امتیازات اختصاص یافته به پارامترهای عوامل انسانی توسط متخصصان، وارد نرم‌افزار SPSS 20 شده و خروجی‌های موردنظر از نرم‌افزار دریافت می‌شود که در جدول ۵-۱۵ آورده شده است. از آنجایی که مقدار آلفای کرونباخ بزرگ‌تر از ۰/۷ است، پرسشنامه‌ها از پایایی قابل‌قبولی برخوردارند.

جدول ۵-۱۵: قابلیت اعتماد شاخص عوامل انسانی با توجه به نظر متخصصان

Case Processing Summary			
		N	%
Cases	Valid	10	100.0
	Excluded ^a	0	.0
	Total	10	100.0
a. Listwise deletion based on all variables in the procedure.			
Reliability Statistics			
Cronbach's Alpha		N of Items	
0.831		30	

۵-۳-۶- اجرای FDAHP برای پارامترهای ماشین‌آلات و تجهیزات

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. یک نمونه از ماتریس‌های مذکور در جدول ۵-۱۶ آورده شده است.

جدول ۵-۱۶: ماتریس مقایسه زوجی ۶ پارامتر ماشین‌آلات و تجهیزات با توجه به نظر یکی از متخصصان

ماتریس مقایسه زوجی با توجه به نظر یکی از متخصصان						
	OF	ML	TM	D	MR	TUP
(OF) عامل ساز بودن	1	3	3	3	3	3
(ML) سطح مکانیزاسیون	0.3333	1	0.3333	3	0.3333	3
(TM) نوع مکانیسم	0.3333	3	1	3	3	3
(D) ابعاد	0.3333	0.3333	0.3333	1	0.3333	0.3333
(MR) نگهداری و تعمیرات	0.3333	3	0.3333	3	1	1
(TUP) نوع کاربری و موقعیت قرارگیری	0.3333	0.3333	0.3333	3	1	1

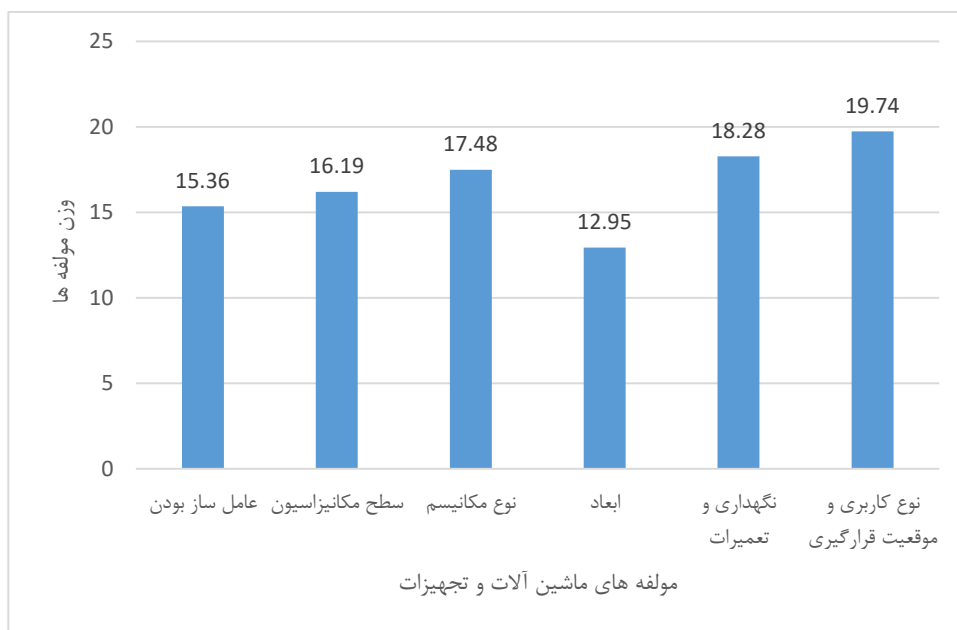
پس از دریافت نظرات متخصصین، ماتریس مقایسه زوجی بین پارامترهای ماشین‌آلات و تجهیزات ایمنی در تونل سازی طبق رابطه ۳-۱ تا ۳-۴ محاسبه شد و نتایج در جدول ۵-۱۷ نمایش داده شده است. در ادامه با استفاده از روابط ۳-۶ تا ۳-۸ عدد فازی $\tilde{Z}_i$ ، وزن فازی $\tilde{W}_i$ و وزن غیر فازی محاسبه شده است که در جدول ۵-۱۸ آورده شده است و در نهایت در شکل ۵-۳ نمایش داده شده است.

جدول ۵-۱۷: ماتریس مقایسه زوجی فازی دلفی بین فاکتورهای مؤثر بر شاخص ماشین‌آلات و تجهیزات

عامل ساز بودن	سطح مکانیزاسیون	نوع مکانیسم	ابعاد	نگهداری و تعمیرات	نوع کاربری
عامل ساز بودن	(1,1,1)	(0.1111,0.797,9)	(0.1111,0.7255,8)	(0.1111,1.1941,9)	(0.1111,0.8045,8)
مکانیزاسیون	(0.1111,1.2546,9)	(1,1,1)	(0.125,0.9904,8)	(0.125,1.6837,8)	(0.1111,0.7487,6)
نوع مکانیسم	(0.125,1.3782,9)	(0.125,1.0096,8)	(1,1,1)	(0.2,2.0172,8)	(0.1428,0.7592,9)
ابعاد	(0.1111,0.8374,9)	(0.125,1.3396,9)	(0.125,0.4957,5)	(1,1,1)	(0.125,0.3904,5)
نگهداری و تعمیرات	(0.125,1.4414,9)	(0.125,1.3396,9)	(0.1111,1.317,7)	(0.1428,2.6151,8)	(1,1,1)
نوع کاربری	(0.125,1.2428,9)	(0.1666,1.3355,9)	(0.1428,1.3933,9)	(0.2,2.5609,8)	(0.125,1.0709,9)

جدول ۵-۱۸: وزن نهایی فازی نسبی و غیر فازی بین فاکتورهای مؤثر بر شاخص ماشین‌آلات و تجهیزات

پارامترها	$\tilde{Z}_i$ ($a_{ij}, \delta_{ij}, \gamma_{ij}$)	$\tilde{W}_i$ (وزن فازی مؤلفه‌ها)	وزن غیر فازی مؤلفه‌ها
عامل ساز بودن	(0.1602,0.853,5.8833)	(0.1496,0.1365,0.1738)	0.1536
سطح مکانیزاسیون	(0.1666,1.0264,5.4989)	(0.1556,0.1643,0.1625)	0.1619
نوع مکانیسم	(0.1916,1.0734,5.7538)	(0.179,0.1718,0.17)	0.1748
ابعاد	(0.1733,0.5767,4.8238)	(0.1618,0.0923,0.1425)	0.1295
نگهداری و تعمیرات	(0.1737,1.3557,5.7538)	(0.1623,0.217,0.17)	0.1828
نوع کاربری	(0.205,1.3605,6.1189)	(0.1915,0.2178,0.1808)	0.1974
$(\tilde{Z}_i \oplus \dots \oplus \tilde{Z}_n)$	(1.0708,6.246,33.8328)		
$(\tilde{Z}_i \oplus \dots \oplus \tilde{Z}_i)^{-1}$	(0.9338,0.1601,0.0295)		$\sum = 1.000$



شکل ۳-۵: نمودار ستونی وزن نهایی فازی دلفی بین مؤلفه‌های مؤثر بر ماشین‌آلات و تجهیزات

همان‌طور که در شکل ۳-۵ ملاحظه می‌شود از بین فاکتورهای مؤثر بر شاخص ماشین‌آلات و تجهیزات نوع کاربری و موقعیت قرارگیری دارای بیشترین اهمیت و ابعاد دارای کمترین اهمیت است. امتیازات اختصاص یافته به پارامترهای ماشین‌آلات و تجهیزات توسط متخصصان، وارد نرم‌افزار SPSS شده و خروجی‌های موردنظر از نرم‌افزار دریافت می‌شود که در جدول ۱۹-۵ آورده شده است. از آنجایی که مقدار آلفای کرونباخ بزرگ‌تر از 0.7 است، پرسشنامه‌ها از پایایی قابل‌قبولی برخوردارند.

جدول ۱۹-۵: قابلیت اعتماد شاخص ماشین‌آلات و تجهیزات با توجه به نظر متخصصان

Case Processing Summary			
		N	%
Cases	Valid	15	100.0
	Excluded ^a	0	.0
	Total	15	100.0
a. Listwise deletion based on all variables in the procedure.			
Reliability Statistics			
Cronbach's Alpha		N of Items	
0.754		30	

۳-۵-۷- اجرای FDAHP برای پارامترهای ویژگی‌های تونل

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. یک نمونه از ماتریس‌های مذکور در جدول ۵-۲۰ آورده شده است.

جدول ۵-۲۰: ماتریس مقایسه زوجی ۶ پارامتر ویژگی‌های تونل با توجه به نظر یکی از متخصصان

ماتریس مقایسه زوجی با توجه به نظر یکی از متخصصان						
	TG	C	TS	TTM	TUIT	NTA
هندسه تونل (TG)	1	0.2	0.2	0.2	1	3
تحکیمات (C)	5	1	3	3	4	4
خدمات فنی (TS)	5	0.3333	1	0.2	1	3
روش تونل سازی (TTM)	5	0.3333	5	1	1	1
نوع کاربری (TUIT)	1	0.25	1	1	1	1
دسترسی‌ها (NTA)	0.3333	0.25	0.3333	1	1	1

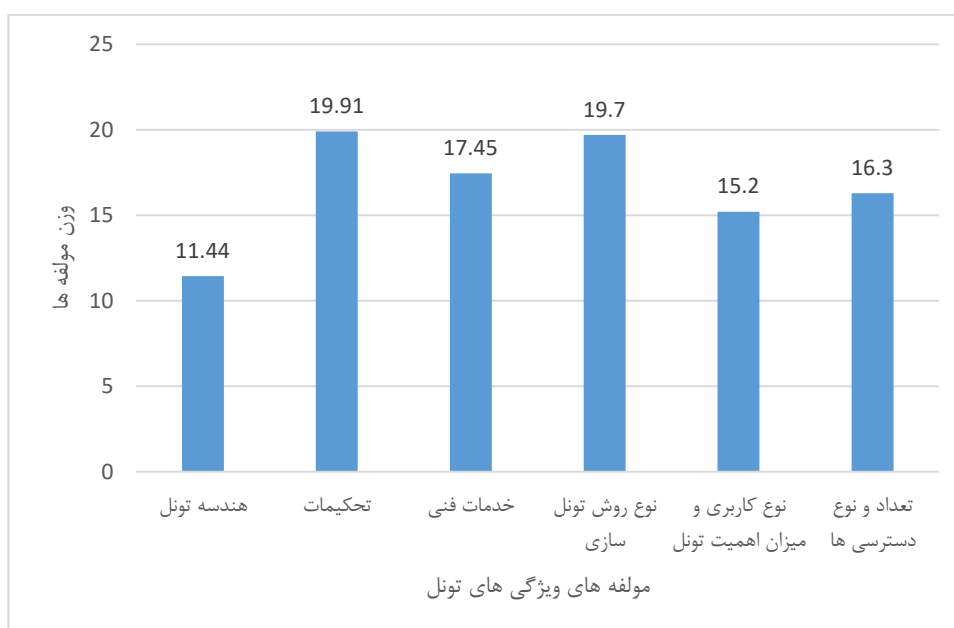
پس از دریافت نظرات متخصصین، ماتریس مقایسه زوجی بین پارامترهای ویژگی‌های تونل در تونل سازی طبق روابط ۳-۱ تا ۳-۴ محاسبه شد و نتایج در جدول ۵-۲۱ نمایش داده شده است. در ادامه با استفاده از روابط ۳-۶ تا ۳-۸ عدد فازی $\tilde{Z}_i$ وزن فازی $\tilde{W}_i$ و وزن غیر فازی محاسبه شده است که در جدول ۵-۲۲ آورده شده است و در نهایت در شکل ۵-۴ نمایش داده شده است.

جدول ۵-۲۱: ماتریس مقایسه زوجی فازی دلفی بین فاکتورهای مؤثر بر شاخص ویژگی‌های تونل

هندسه تونل	تحکیمات	خدمات فنی	روش تونل سازی	نوع کاربری	دسترسی‌ها
(1,1,1)	(0.1111,0.2832,5)	(0.1111,0.4803,8)	(0.1111,0.2544,8)	(0.1111,0.4191,5)	(0.1111,0.5622,7)
(0.2,3.5308,9)	(1,1,1)	(0.1111,1.5619,9)	(0.1428,0.8882,9)	(0.125,1.6517,9)	(0.1111,1.5707,9)
(0.125,2.0817,9)	(0.1111,0.6402,9)	(1,1,1)	(0.1111,0.9425,8)	(0.1666,1.4549,8)	(0.1428,1.105,8)
(0.125,3.9307,9)	(0.1111,1.1258,7)	(0.125,1.0609,9)	(1,1,1)	(0.1428,2.6356,9)	(0.1111,1.9618,8)
(0.2,2.386,9)	(0.1111,0.6054,8)	(0.125,0.6873,6)	(0.1111,0.3794,7)	(1,1,1)	(0.1111,1.0968,6)
(0.1428,1.7787,9)	(0.1111,0.6366,9)	(0.125,0.9049,7)	(0.125,0.5097,9)	(0.1666,0.9117,9)	(1,1,1)

جدول ۵-۲۲: وزن نهایی فازی نسبی و غیر فازی بین فاکتورهای مؤثر بر شاخص ویژگی‌های تونل

پارامترها	$\tilde{Z}_i$ ($a_{ij}, \delta_{ij}, \gamma_{ij}$)	$\tilde{W}_i$ (وزن فازی مؤلفه‌ها)	وزن غیر فازی مؤلفه‌ها
هندسه تونل	(0.1602, 0.4486, 4.73)	(0.1496, 0.0685, 0.1398)	0.1144
تحکیمات	(0.1879, 1.5276, 6.2402)	(0.1755, 0.2332, 0.1844)	0.1991
خدمات فنی	(0.1823, 1.1242, 5.8833)	(0.1703, 0.1716, 0.1738)	0.1745
نوع روش تونل سازی	(0.1737, 1.7016, 5.8679)	(0.1623, 0.2598, 0.1734)	0.197
نوع کاربری تونل	(0.1802, 0.863, 5.1261)	(0.1683, 0.1317, 0.1515)	0.152
دسترسی‌ها	(0.1859, 0.8837, 5.9842)	(0.1736, 0.1349, 0.1768)	0.163
$(\tilde{Z}_i \oplus \dots \oplus \tilde{Z}_n)$			(1.0705, 6.5489, 33.832)
$(\tilde{Z}_i \oplus \dots \oplus \tilde{Z}_i)^{-1}$			(0.9341, 0.1526, 0.0295)
$\sum = 1.000$			



شکل ۵-۴: نمودار ستونی وزن نهایی فازی دلفی بین مؤلفه‌های مؤثر بر ویژگی‌های تونل

همان‌طور که در شکل ۴-۵ ملاحظه می‌شود از بین فاکتورهای مؤثر بر شاخص ویژگی‌های تونل تحکیمات دارای بیشترین اهمیت و هندسه تونل دارای کمترین اهمیت است. امتیازات اختصاص یافته به پارامترهای ویژگی‌های تونل توسط متخصصان، وارد نرم‌افزار SPSS 20 شده و خروجی‌های موردنظر از نرم‌افزار دریافت می‌شود که در جدول ۵-۲۳ آورده شده است. از آنجایی که مقدار آلفای کرونباخ بزرگ‌تر از ۰/۷ است، پرسشنامه‌ها از پایایی قابل‌قبولی برخوردارند.

جدول ۵-۲۳: قابلیت اعتماد شاخص ویژگی‌های تونل با توجه به نظر متخصصان

Case Processing Summary			
		N	%
Cases	Valid	15	100.0
	Excluded ^a	0	.0
	Total	15	100.0
a. Listwise deletion based on all variables in the procedure.			
Reliability Statistics			
Cronbach's Alpha		N of Items	
0.844		30	

۵-۳-۸- اجرای FDAHP برای پارامترهای شرایط ژئوتکنیکی، زمین‌شناسی مهندسی و

هیدرولوژی

با توجه به پرسشنامه‌های موجود، ماتریس مقایسه زوجی متناظر با هر یک از پارامترها از نظر متخصصان مختلف به‌صورت جداگانه برای هر متخصص تشکیل شده است. یک نمونه از ماتریس‌های مذکور در جدول ۵-۲۴ آورده شده است.

جدول ۵-۲۴: ماتریس مقایسه زوجی ۵ پارامتر شرایط ژئوتکنیکی با توجه به نظر یکی از متخصصان

ماتریس مقایسه زوجی با توجه به نظر یکی از متخصصین					
	GWL	PDG	TGS	IM	RSEQ
(GWL) سطح آب‌های زیرزمینی	1	0.2	0.3333	0.2	0.2
(PDG) پتانسیل گازهای خطرناک	5	1	5	5	5
(TGS) نوع ساختار زمین‌شناسی	3	0.2	1	0.3333	0.3333
(IM) مکانیسم‌های ناپایداری	5	0.2	3	1	0.3333
(RSEQ) کیفیت مهندسی توده سنگ یا خاک	5	0.2	3	3	1

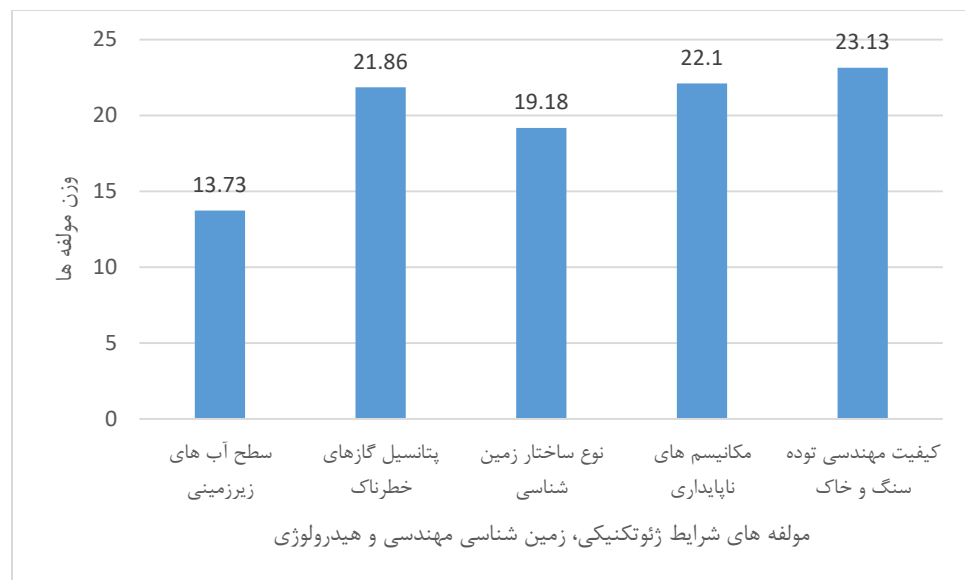
پس از دریافت نظرات متخصصین، ماتریس مقایسه زوجی بین پارامترهای شرایط ژئوتکنیکی، زمین‌شناسی مهندسی و هیدرولوژی ایمنی در تونل سازی طبق روابط ۳-۱ تا ۳-۴ محاسبه شد و نتایج در جدول ۵-۲۵ نمایش داده شده است. در ادامه با استفاده از روابط ۳-۶ تا ۳-۸ عدد فازی $\tilde{Z}_i$ وزن فازی $\tilde{W}_i$ و وزن غیر فازی محاسبه شده است که در جدول ۵-۲۶ آورده شده است و درنهایت در شکل ۵-۵ نمایش داده شده است.

جدول ۵-۲۵: ماتریس مقایسه زوجی فازی دلفی بین فاکتورهای مؤثر بر شاخص شرایط ژئوتکنیکی

آب‌های زیرزمینی	گازهای خطرناک	ساختار زمین‌شناسی	مکانیسم‌های ناپایداری	کیفیت مهندسی توده سنگ یا خاک
(1,1,1)	(0.1111,0.3443,8)	(0.1111,0.4453,5)	(0.1111,0.323,7)	(0.1111,0.307,7)
(0.125,2.9042,9)	(1,1,1)	(0.125,1.2104,9)	(0.125,0.9185,9)	(0.125,0.9452,9)
(0.2,2.2453,9)	(0.1111,0.8261,8)	(1,1,1)	(0.125,0.5474,7)	(0.125,0.6431,6)
(0.1428,3.0959,9)	(0.1111,1.0886,8)	(0.1428,1.8266,8)	(1,1,1)	(0.125,0.8196,7)
(0.1428,3.2571,9)	(0.1111,1.0579,8)	(0.1666,1.5547,8)	(0.1428,1.22,8)	(1,1,1)

جدول ۵-۲۶: وزن نهایی فازی نسبی و غیر فازی بین فاکتورهای مؤثر بر شاخص شرایط ژئوتکنیکی

پارامترها	$\tilde{Z}_i$ $(a_{ij}, \delta_{ij}, \gamma_{ij})$	$\tilde{W}_i$ (وزن فازی مؤلفه‌ها)	وزن غیر فازی مؤلفه‌ها
سطح آب‌های زیرزمینی	(0.1724, 0.4329, 4.5546)	(0.1782, 0.0795, 0.1752)	0.1373
پتانسیل گازهای خطرناک	(0.1894, 1.25, 5.7995)	(0.1958, 0.2298, 0.2231)	0.2186
نوع ساختار زمین‌شناسی	(0.2032, 0.9183, 4.9672)	(0.2101, 0.1688, 0.1911)	0.1918
مکانیسم‌های ناپایداری	(0.1952, 1.3822, 5.2614)	(0.2018, 0.2541, 0.2024)	0.221
کیفیت مهندسی توده سنگ یا خاک	(0.2067, 1.4556, 5.4038)	(0.2137, 0.2676, 0.2079)	0.2313
$(\tilde{Z}_i \oplus \dots \oplus \tilde{Z}_n)$			(0.9671, 5.4392, 25.9866)
$(\tilde{Z}_i \oplus \dots \oplus \tilde{Z}_i)^{-1}$			$\sum = 1$
			(1.0339, 0.1838, 0.0384)



شکل ۵-۵: نمودار ستونی وزن نهایی فازی دلفی بین مؤلفه‌های مؤثر بر شرایط ژئوتکنیکی

همان‌طور که در شکل ۵-۵ ملاحظه می‌شود از بین فاکتورهای مؤثر بر شاخص شرایط ژئوتکنیکی، زمین‌شناسی مهندسی و هیدرولوژی کیفیت مهندسی توده سنگ یا خاک دارای بیشترین اهمیت و سطح آب‌های زیرزمینی دارای کمترین اهمیت است. امتیازات اختصاص یافته به پارامترهای شرایط ژئوتکنیکی، زمین‌شناسی مهندسی و هیدرولوژی توسط متخصصان، وارد نرم‌افزار SPSS 20 شده و خروجی‌های موردنظر از نرم‌افزار دریافت می‌شود که در جدول ۵-۲۷ آورده شده است. از آنجایی که مقدار آلفای کرونباخ بزرگ‌تر از ۰/۷ است، پرسشنامه‌ها از پایایی قابل‌قبولی برخوردارند.

جدول ۵-۲۷: قابلیت اعتماد شاخص شرایط ژئوتکنیکی، زمین‌شناسی مهندسی و هیدرولوژی با توجه به نظر متخصصان

Case Processing Summary			
		N	%
Cases	Valid	10	100.0
	Excluded ^a	0	.0
	Total	10	100.0
a. Listwise deletion based on all variables in the procedure.			
Reliability Statistics			
Cronbach's Alpha		N of Items	
0.748		30	

۵-۳-۹- اجرای FDAHP برای پارامترهای شرایط جغرافیایی و اقلیمی

با توجه به پرسشنامه‌های موجود، ماتریس مقایسه زوجی متناظر با هر یک از پارامترها از نظر متخصصان مختلف به‌صورت جداگانه برای هر متخصص تشکیل شده است. یک نمونه از ماتریس‌های مذکور در جدول ۵-۲۸ آورده شده است.

جدول ۵-۲۸: ماتریس مقایسه زوجی ۵ پارامتر شرایط جغرافیایی و اقلیمی با توجه به نظر یکی از متخصصان

ماتریس مقایسه زوجی با توجه به نظر یکی از متخصصین					
	TS	HW	TH	R	ND
(TS) توپوگرافی سطح زمین	1	3	0.3333	1	1
(HW) ارتفاع از سطح دریا و بادخیزی	0.3333	1	0.2	1	1
(TH) دما و رطوبت	3	5	1	3	3
(R) میزان بارندگی	1	1	0.3333	1	1
(ND) بلایای طبیعی	1	1	0.3333	1	1

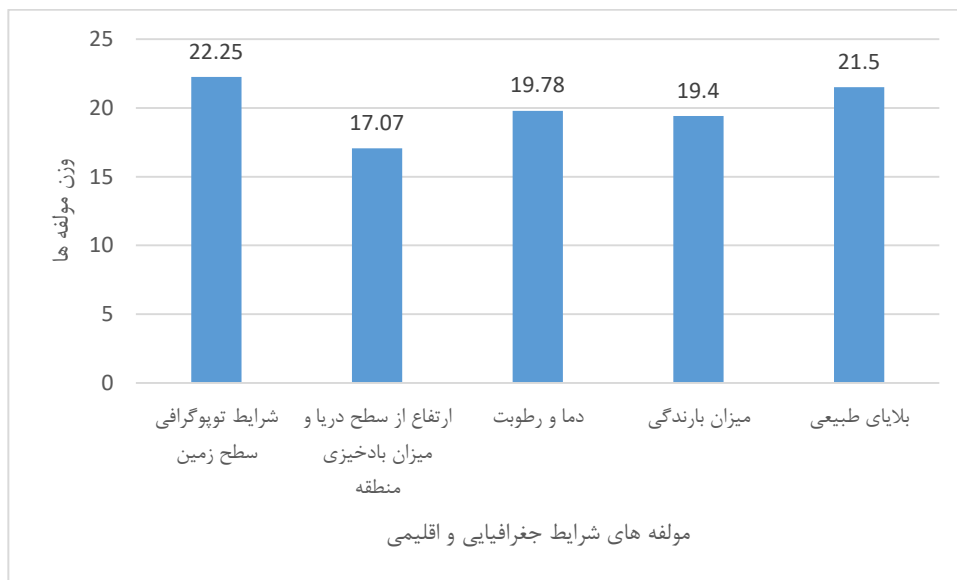
پس از دریافت نظرات متخصصین، ماتریس مقایسه زوجی بین پارامترهای شرایط جغرافیایی و اقلیمی ایمنی در تونل سازی طبق روابط ۱-۳ تا ۴-۳ محاسبه شد و نتایج در جدول ۵-۲۹ نمایش داده شده است. در ادامه با استفاده از روابط ۳-۶ تا ۳-۸ عدد فاز $\tilde{Z}_i$ ، وزن فاز $\tilde{W}_i$ و وزن غیر فاز محاسبه شده است که در جدول ۵-۳۰ آورده شده است و در نهایت در شکل ۵-۶ نمایش داده شده است.

جدول ۵-۲۹: ماتریس مقایسه زوجی فاز دلفی بین فاکتورهای مؤثر بر شاخص شرایط جغرافیایی و اقلیمی

توپوگرافی سطح زمین	ارتفاع از سطح دریا و بادخیزی	دما و رطوبت	میزان بارندگی	بلایای طبیعی
(1,1,1)	(0.1111,2.3294,8)	(0.1111,1.8019,8)	(0.1111,1.4357,8)	(0.125,1.105,9)
(0.125,0.4292,9)	(1,1,1)	(0.1111,0.6231,9)	(0.1111,0.5779,8)	(0.125,0.5678,9)
(0.125,0.5549,9)	(0.1111,1.6047,9)	(1,1,1)	(0.1666,1.0409,9)	(0.125,0.512,9)
(0.125,0.6964,9)	(0.125,1.7303,9)	(0.1111,0.9606,6)	(1,1,1)	(0.125,0.6134,9)
(0.1111,0.9049,8)	(0.1111,1.761,8)	(0.1111,1.9531,8)	(0.1111,1.63,8)	(1,1,1)

جدول ۵-۳: وزن نهایی فازی نسبی و غیر فازی بین فاکتورهای مؤثر بر شاخص شرایط جغرافیایی و اقلیمی

وزن غیر فازی مؤلفه‌ها	$\tilde{W}_i$ (وزن فازی مؤلفه‌ها)	$\tilde{Z}_i$ $(a_{ij}, \delta_{ij}, \gamma_{ij})$	پارامترها
0.2225	(0.1938, 0.278, 0.1965)	(0.1765, 1.4611, 5.4038)	شرایط توپوگرافی سطح زمین
0.1707	(0.1984, 0.1169, 0.206)	(0.1807, 0.6147, 5.6645)	ارتفاع از سطح دریا و میزان بادخیزی
0.1978	(0.2152, 0.1639, 0.2109)	(0.196, 0.8615, 5.7995)	دما و رطوبت
0.194	(0.2031, 0.1777, 0.1945)	(0.185, 0.9338, 5.3478)	میزان بارندگی
0.215	(0.1893, 0.2633, 0.1919)	(0.1724, 1.3837, 5.278)	بلایای طبیعی
		(0.9107, 5.255, 27.4937)	$(\tilde{Z}_i \oplus \dots \oplus \tilde{Z}_n)$
$\sum = 1$		(1.0979, 0.1902, 0.0363)	$(\tilde{Z}_i \oplus \dots \oplus \tilde{Z}_i)^{-1}$



شکل ۵-۶: نمودار ستونی وزن نهایی فازی دلفی بین مؤلفه‌های مؤثر بر شرایط جغرافیایی و اقلیمی

همان‌طور که در شکل ۵-۶ ملاحظه می‌شود از بین فاکتورهای مؤثر بر شاخص شرایط جغرافیایی و اقلیمی شرایط توپوگرافی سطح زمین دارای بیشترین اهمیت و ارتفاع از سطح دریا و میزان بادخیزی منطقه دارای کمترین اهمیت است. امتیازات اختصاص یافته به پارامترهای شرایط جغرافیایی و اقلیمی توسط متخصصان، وارد نرم‌افزار SPSS 20 شده و خروجی‌های موردنظر از نرم‌افزار دریافت می‌شود که در جدول ۵-۳۱ آورده شده است. از آنجایی که مقدار آلفای کرونباخ بزرگ‌تر از ۰/۷ است، پرسشنامه‌ها از پایایی قابل‌قبولی برخوردارند.

جدول ۵-۳۱: قابلیت اعتماد شاخص شرایط جغرافیایی و اقلیمی با توجه به نظر متخصصان

Case Processing Summary			
		N	%
Cases	Valid	10	100.0
	Excluded ^a	0	.0
	Total	10	100.0
a. Listwise deletion based on all variables in the procedure.			
Reliability Statistics			
Cronbach's Alpha		N of Items	
0.773		30	

۵-۳-۱۰- اجرای FDAHP برای پارامترهای عوامل قراردادی-اجرایی

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. یک نمونه از ماتریس‌های مذکور در جدول ۵-۳۲ آورده شده است.

جدول ۵-۳۲: ماتریس مقایسه زوجی ۵ پارامتر عوامل قراردادی-اجرایی با توجه به نظر یکی از متخصصان

ماتریس مقایسه زوجی با توجه به نظر یکی از متخصصین					
	CS	CMS	LSL	SS	SC
(CS) فرهنگ ایمنی	1	3	3	3	1
(CMS) گواهینامه‌های ملی و بین‌المللی	0.3333	1	0.3333	0.3333	0.3333
(LSL) سطح استانداردها	0.3333	3	1	3	0.3333
(SS) سهم ایمنی در کل هزینه‌ها	0.3333	3	0.3333	1	1
(SC) فشردگی برنامه زمان‌بندی	1	3	3	1	1

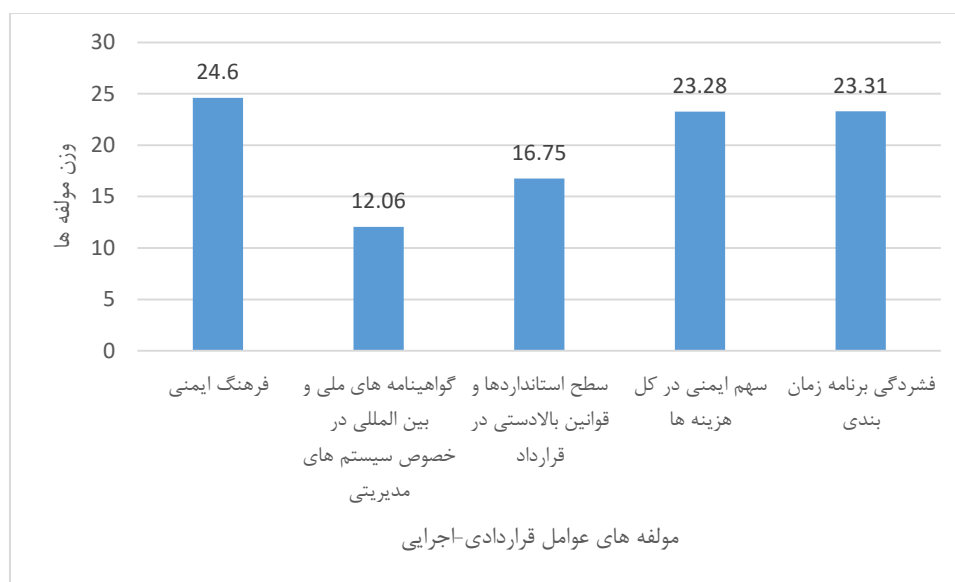
پس از دریافت نظرات متخصصین، ماتریس مقایسه زوجی بین پارامترهای عوامل قراردادی-اجرایی ایمنی در تونل سازی طبق روابط ۳-۱ تا ۳-۴ محاسبه شد و نتایج در جدول ۵-۳۳ نمایش داده شده است. در ادامه با استفاده از روابط ۳-۶ تا ۳-۸ عدد فاز $\tilde{Z}_i$ وزن فاز $\tilde{W}_i$ و وزن غیر فاز محاسبه شده است که در جدول ۵-۳۴ آورده شده است و در نهایت در شکل ۵-۷ نمایش داده شده است.

جدول ۵-۳۳: ماتریس مقایسه زوجی فاز دلفی بین فاکتورهای مؤثر بر شاخص عوامل قراردادی-اجرایی

فرهنگ ایمنی	گواهینامه‌ها	سطح استانداردها	سهم ایمنی در کل هزینه	فشرده‌گی برنامه زمان‌بندی
(1,1,1)	(0.1666,3.7802,9)	(0.1428,3.1371,9)	(0.1111,1.712,9)	(0.1111,0.9484,9)
(0.1111,0.2645,6)	(1,1,1)	(0.1111,0.3916,4)	(0.1111,0.2819,3)	(0.1111,0.2943,9)
(0.1111,0.3187,7)	(0.25,2.5529,9)	(1,1,1)	(0.1111,0.4106,6)	(0.1111,0.338,8)
(0.1111,0.5841,9)	(0.3333,3.5471,9)	(0.1666,2.4353,9)	(1,1,1)	(0.1111,0.7191,9)
(0.1111,1.0544,9)	(0.1111,3.3974,9)	(0.125,2.958,9)	(0.1111,1.3905,9)	(1,1,1)

جدول ۵-۳۴: وزن نهایی فازی نسبی و غیر فازی بین فاکتورهای مؤثر بر شاخص عوامل قراردادی-اجرایی

وزن غیر فازی مؤلفه‌ها	$\tilde{W}_i$ (وزن فازی مؤلفه‌ها)	$\tilde{Z}_i$ $(a_{ij}, \delta_{ij}, \gamma_{ij})$	پارامترها
0.246	(0.2003, 0.309, 0.2229)	(0.1966, 1.8068, 5.7995)	فرهنگ ایمنی
0.1206	(0.1757, 0.066, 0.1403)	(0.1724, 0.3862, 3.6501)	گواهینامه‌های ملی و بین‌المللی
0.1675	(0.2066, 0.1105, 0.1909)	(0.2027, 0.6465, 4.9672)	سطح استانداردها
0.2328	(0.2373, 0.2213, 0.2229)	(0.2329, 1.294, 5.7995)	سهم ایمنی در کل هزینه‌ها
0.2331	(0.1798, 0.2929, 0.2229)	(0.1765, 1.7126, 5.7995)	فشاردهی برنامه زمان‌بندی
		(0.9813, 5.8463, 26.016)	$(\tilde{Z}_1 \oplus \dots \oplus \tilde{Z}_n)$
$\sum = 1$		(1.019, 0.171, 0.0384)	$(\tilde{Z}_1 \oplus \dots \oplus \tilde{Z}_i)^{-1}$



شکل ۵-۷: نمودار ستونی وزن نهایی فازی دلفی بین مؤلفه‌های مؤثر بر عوامل قراردادی-اجرایی

همان‌طور که در شکل ۵-۷ ملاحظه می‌شود از بین فاکتورهای مؤثر بر شاخص عوامل قراردادی-اجرایی، فرهنگ ایمنی دارای بیشترین اهمیت و گواهینامه‌های ملی و بین‌المللی در خصوص سیستم-های مدیریتی دارای کمترین اهمیت است. امتیازات اختصاص یافته به پارامترهای عوامل قراردادی-اجرایی توسط متخصصان، وارد نرم‌افزار SPSS 20 شده و خروجی‌های موردنظر از نرم‌افزار دریافت می‌شود که در جدول ۵-۳۵ آورده شده است. از آنجایی که مقدار آلفای کرونباخ بزرگ‌تر از ۰/۷ است، پرسشنامه‌ها از پایایی قابل‌قبولی برخوردارند.

جدول ۵-۳۵: قابلیت اعتماد شاخص عوامل قراردادی-اجرایی با توجه به نظر متخصصان

Case Processing Summary			
		N	%
Cases	Valid	10	100.0
	Excluded ^a	0	.0
	Total	10	100.0
a. Listwise deletion based on all variables in the procedure.			
Reliability Statistics			
Cronbach's Alpha		N of Items	
0.951		30	

۵-۳-۱۱- محاسبه وزن نهایی پارامترهای مؤثر بر ارزیابی ایمنی در تونل سازی با روش

FDAHP

درنهایت پس از ضرب نمودن وزن هر پارامتر در وزن دسته پارامترها مربوط به خودش، وزن نهایی پارامترهای تأثیرگذار در ارزیابی ایمنی در تونل سازی به‌دست آمده که نتایج آن در جدول ۵-۳۶ و شکل ۵-۸ آورده شده است. همچنین نمودار سلسله مراتبی در شکل ۵-۹ رسم شده است که وزن پارامترها بر روی آن نشان داده شده است.

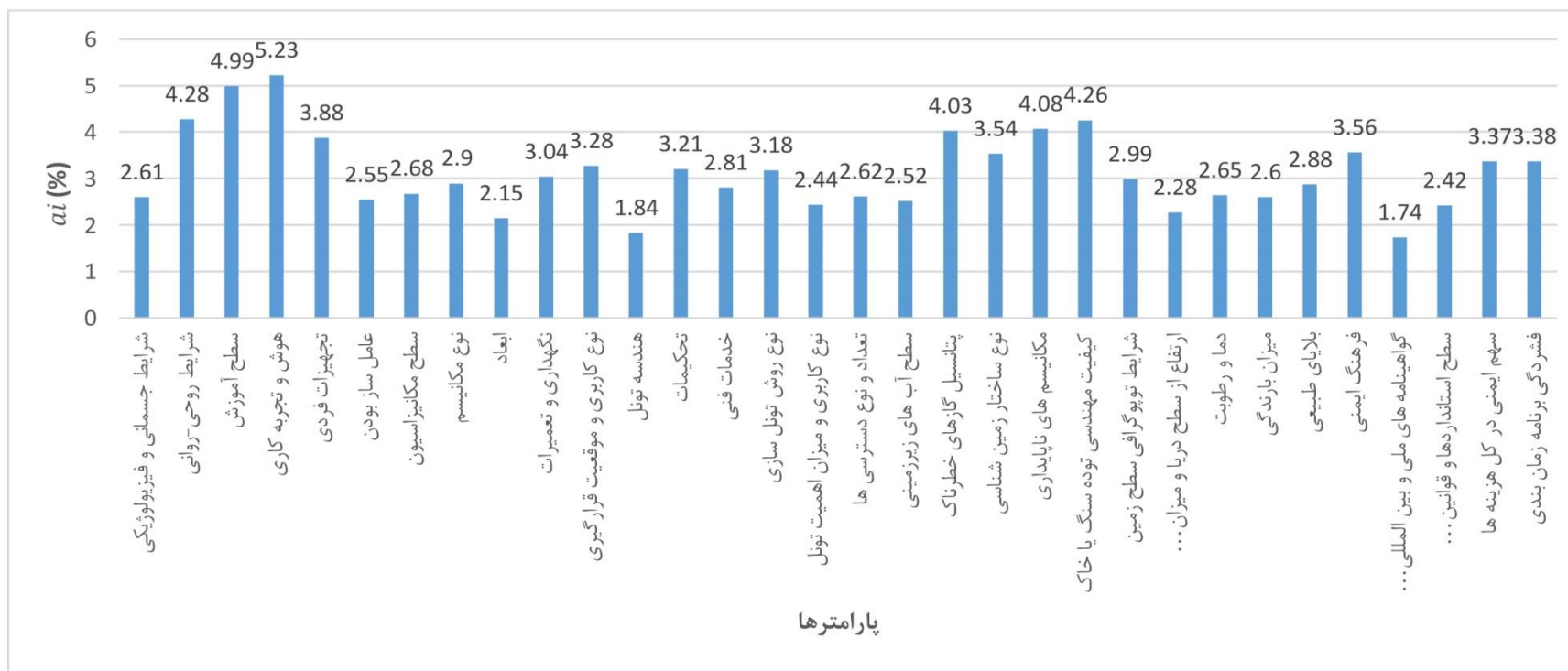
جدول ۵-۳۶: وزن نهایی غیر فازی پارامترهای مؤثر بر ارزیابی ایمنی در تونل سازی

وزن نهایی	وزن نهایی	پارامتر	وزن دسته پارامترها
2	0.02	شرایط جسمانی و فیزیولوژیکی	عوامل انسانی 0.2
4	0.04	شرایط روحی-روانی	
5	0.05	سطح آموزش	
5	0.05	هوش و تجربه کاری	
4	0.04	تجهیزات فردی	
2	0.02	عامل ساز بودن	ماشین آلات و تجهیزات 0.15
2	0.02	سطح مکانیزاسیون	
3	0.03	نوع مکانیسم	
2	0.02	ابعاد	
3	0.03	نگهداری و تعمیرات	
3	0.03	نوع کاربری و موقعیت قرارگیری	ویژگی های تونل 0.15
1	0.01	هندسه تونل (طول تونل)	
1	0.01	هندسه تونل (سطح مقطع تونل)	
3	0.03	تحکیمات	
1.5	0.015	خدمات فنی (روشنایی)	
1.5	0.015	خدمات فنی (تهویه)	
3	0.03	نوع روش تونل سازی	
2	0.02	نوع کاربری و میزان اهمیت تونل	
1	0.01	تعداد دسترسی ها	
1	0.01	نوع دسترسی ها	شرایط ژئوتکنیکی 0.2
3	0.03	سطح آب های زیرزمینی	
4	0.04	پتانسیل گازهای خطرناک	
4	0.04	نوع ساختار زمین شناسی	
4	0.04	مکانیسم های ناپایداری	
5	0.05	SPT یا RQD	شرایط جغرافیایی و اقلیمی 0.15
3	0.03	توپوگرافی سطح زمین	
3	0.03	ارتفاع از سطح دریا و میزان بادخیزی منطقه	
3	0.03	دما و رطوبت	
3	0.03	میزان بارندگی	
3	0.03	بلایای طبیعی	عوامل قراردادی-اجرایی 0.15
4	0.04	فرهنگ ایمنی	
2	0.02	گواهینامه های ملی و بین المللی	
3	0.03	سطح استانداردها و قوانین	
3	0.03	سهم ایمنی در کل هزینه ها	
3	0.03	فشاردهی برنامه زمان بندی	

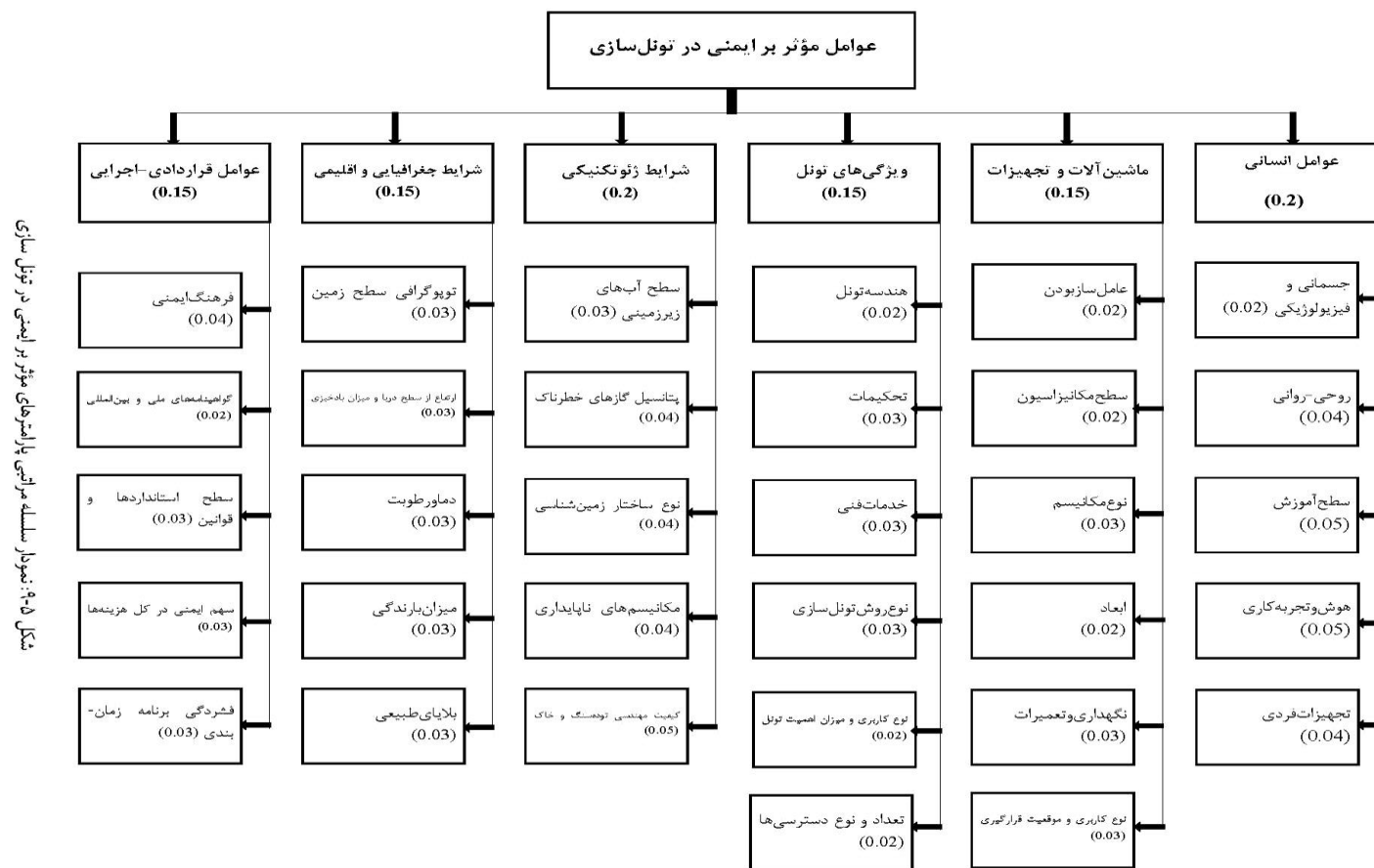
چنانچه مشاهده می شود هوش و تجربه کاری، سطح آموزش و عوامل روحی-روانی به ترتیب

بیشترین امتیازها و گواهینامه های ملی و بین المللی در خصوص سیستم های مدیریتی، هندسه تونل و

ابعاد ماشین آلات و تجهیزات به ترتیب کمترین امتیازها را کسب کرده اند.



شکل ۵-۸: نمودار ستونی وزن نهایی فازی دلفی پارامترهای مؤثر بر ارزیابی ایمنی در تونل سازی



شکل ۵-۹: نمودار سلسله مراتبی پارامترهای مؤثر بر ایمنی در تونل سازی

شکل ۵-۹: نمودار سلسله مراتبی پارامترهای مؤثر بر ایمنی در تونل سازی

۵-۴- سیستم طبقه‌بندی جدید برای ارزیابی ایمنی در تونل سازی

با توجه به اینکه تا این مرحله از کار، وزن نهایی اهمیت پارامترها از طریق تحلیل سلسله مراتبی دلفی فازی به دست آمده است، لازم است که مقادیر واقعی پارامترها نیز وارد شود. برخی از پارامترها کیفی و برخی دیگر کمی توضیح داده شده‌اند. به همین دلیل، امکان وارد کردن مقادیر واقعی پارامتر به صورت مستقیم در محاسبه اندیس ایمنی تونل ممکن نبوده است و به همین دلیل یک رده‌بندی برای مقادیر مختلف پارامترها تعیین شده است. در سیستم طبقه‌بندی جدید به منظور امتیازدهی به مقادیر مختلف هر پارامتر، بیشترین امتیاز به بهترین وضعیت (خیلی خوب) یعنی شماره ۵ داده شده است. برای امتیاز حالت‌های خیلی خوب، خوب، متوسط، ضعیف و خیلی ضعیف به ترتیب ۵، ۴، ۳، ۲ و ۱ اختصاص یافته است. جدول ۵-۳۷ این سیستم طبقه‌بندی جدید را به همراه ردیف‌های ارزش متعلق به هر پارامتر را نشان می‌دهد. برخی پارامترها در جدول ۵-۳۷ نیاز به انجام محاسبات و توضیحات دارند که با علامت ستاره مشخص شده‌اند و در انتهای جدول توضیح داده می‌شوند.

جدول ۵-۳۷: منوهای رده‌بندی در نظر گرفته شده برای پارامترها

پارامتر (واحد)	رده‌بندی اختصاص داده شده				
	۱	۲	۳	۴	۵
شرایط جسمانی و فیزیولوژیکی	بالای ۱۰٪ افراد دارای عدم صلاحیت برای انجام کار هستند	زیر ۱۰٪ افراد دارای عدم صلاحیت برای انجام کار هستند	بالای ۸۰٪ افراد سلامت کامل و بلا مانع دارند و کسی عدم صلاحیت ندارد	بالای ۹۰٪ افراد سلامت کامل و بلا مانع دارند و کسی عدم صلاحیت ندارد	بالای ۹۵٪ افراد سلامت کامل و بلا مانع دارند و کسی عدم صلاحیت ندارد
شرایط روحی-روانی	کمتر از ۲۵٪ افراد رضایت شغلی دارند	بین ۲۵٪-۵۰٪ افراد رضایت شغلی دارند	بین ۵۰٪-۷۵٪ افراد رضایت شغلی دارند	بیش از ۷۵٪ افراد رضایت شغلی دارند	بیش از ۹۵٪ افراد رضایت شغلی دارند
سطح آموزش	کمتر از ۲۵٪ افراد آموزش حرفه‌ای متناسب با کار با کیفیت بالا دریافت کرده‌اند	بین ۲۵٪-۵۰٪ افراد آموزش حرفه‌ای متناسب با کار با کیفیت بالا دریافت کرده‌اند	بین ۵۰٪-۷۵٪ افراد آموزش حرفه‌ای متناسب با کار با کیفیت بالا دریافت کرده‌اند	بیش از ۷۵٪ افراد آموزش حرفه‌ای متناسب با کار با کیفیت بالا دریافت کرده‌اند	بیش از ۹۵٪ افراد آموزش حرفه‌ای متناسب با کار با کیفیت بالا دریافت کرده‌اند
هوش و تجربه کاری	کمتر از ۵٪ افراد باتجربه و بیش از ۳۰٪ افراد کم-تجربه هستند	کمتر از ۱۰٪ افراد باتجربه و بیش از ۲۰٪ افراد کم-تجربه هستند	بیش از ۱۰٪ افراد باتجربه و کمتر از ۲۰٪ افراد کم-تجربه هستند	بیش از ۱۵٪ افراد باتجربه و کمتر از ۱۰٪ افراد کم-تجربه هستند	بیش از ۲۰٪ افراد باتجربه و کمتر از ۵٪ افراد کم-تجربه هستند
تجهیزات فردی	بیش از ۲۵٪ افراد دارای تجهیزات حفاظت فردی ناقص هستند	بیش از ۷۵٪ افراد تجهیزات حفاظت فردی را با نقص جزئی دارند و کمتر از ۲۵٪ افراد دارای	بیش از ۸۰٪ افراد تجهیزات حفاظت فردی کامل و ۲۰٪ افراد تجهیزات حفاظت فردی	بیش از ۹۰٪ افراد تجهیزات حفاظت فردی کامل و ۱۰٪ افراد تجهیزات حفاظت فردی	۱۰۰٪ افراد تجهیزات حفاظت فردی کامل و همچنین در مواقعی تجهیزات اضطراری

پارامتر (واحد)	رده‌بندی اختصاص داده شده				
	۱	۲	۳	۴	۵
	تجهیزات حفاظت فردی ناقص هستند	را با نقص جزئی دارند	را با نقص جزئی دارند	دارند	
عامل ساز بودن ماشین آلات و تجهیزات	بیش از ۹۵٪ ماشین آلات و تجهیزات خطرناک به نظر می‌رسند	بیش از ۷۵٪ ماشین- آلات و تجهیزات خطرناک به نظر می- رسند	بین ۷۵٪-۵۰٪ ماشین- آلات و تجهیزات خطرناک به نظر می‌رسند	بین ۵۰٪-۲۵٪ ماشین- آلات و تجهیزات خطرناک به نظر می- رسند	کمتر از ۲۵٪ ماشین- آلات و تجهیزات خطرناک به نظر می- رسند
سطح مکانیزاسیون ماشین آلات و تجهیزات	کمتر از ۲۵٪ ماشین آلات و تجهیزات در پروژه مکانیزه هستند	بین ۲۵٪-۵۰٪ ماشین- آلات و تجهیزات در پروژه مکانیزه هستند	بین ۷۵٪-۵۰٪ ماشین- آلات و تجهیزات در پروژه مکانیزه هستند	بیش از ۷۵٪ ماشین- آلات و تجهیزات در پروژه مکانیزه هستند	بیش از ۹۵٪ ماشین- آلات و تجهیزات در پروژه مکانیزه هستند
مکانیسم ماشین- آلات و تجهیزات	بیش از ۹۵٪ ماشین آلات و تجهیزات در پروژه دارای مکانیسم پیچیده هستند	بیش از ۷۵٪ ماشین- آلات و تجهیزات در پروژه دارای مکانیسم پیچیده هستند	بین ۷۵٪-۵۰٪ ماشین- آلات و تجهیزات در پروژه دارای مکانیسم پیچیده هستند	بین ۵۰٪-۲۵٪ ماشین- آلات و تجهیزات در پروژه دارای مکانیسم پیچیده هستند	کمتر از ۲۵٪ ماشین- آلات و تجهیزات در پروژه دارای مکانیسم پیچیده هستند
ابعاد ماشین آلات و تجهیزات	در مجاورت ماشین آلات و تجهیزات زیر ۳۰٪ فضای مفید داریم و همچنین عرض مفید مجاور ماشین آلات و تجهیزات کمتر از ۳ متر است	در مجاورت ماشین آلات و تجهیزات زیر ۳۰٪ فضای مفید داریم و همچنین عرض مفید مجاور ماشین آلات و تجهیزات بیشتر از ۳ متر است	در مجاورت ماشین آلات و تجهیزات زیر ۳۰٪ فضای مفید داریم و همچنین عرض مفید مجاور ماشین آلات و تجهیزات بیشتر از ۳ متر است	در مجاورت ماشین آلات و تجهیزات بین ۳۰٪- ۵۰٪ فضای مفید داریم و همچنین عرض مفید مجاور ماشین آلات و تجهیزات بیشتر از ۳ متر است	در مجاورت ماشین- آلات و تجهیزات بالای ۵۰٪ فضای مفید داریم و همچنین عرض مفید مجاور ماشین آلات و تجهیزات بیشتر از ۳ متر است
نگهداری و تعمیرات ماشین- آلات و تجهیزات	نگهداری و تعمیرات زیر ۲۵ درصد مطابق دستورالعمل و چک‌لیست انجام می- شود	نگهداری و تعمیرات بین ۵۰-۷۵ درصد مطابق دستورالعمل و چک‌لیست انجام می‌شود	نگهداری و تعمیرات بین ۵۰-۷۵ درصد مطابق دستورالعمل و چک‌لیست انجام می‌شود	نگهداری و تعمیرات بیش از ۷۵ درصد مطابق دستورالعمل و چک‌لیست انجام می- شود	نگهداری و تعمیرات بیش از ۹۰ درصد مطابق دستورالعمل و چک‌لیست انجام می- شود
نوع کاربری و موقعیت قرارگیری ماشین آلات و تجهیزات*	اگر شاخص نوع کاربری و موقعیت قرارگیری بین ۸-۱۰	اگر شاخص نوع کاربری و موقعیت قرارگیری بین ۶-۸	اگر شاخص نوع کاربری و موقعیت قرارگیری بین ۴-۶	اگر شاخص نوع کاربری و موقعیت قرارگیری بین ۲-۴	اگر شاخص نوع کاربری و موقعیت قرارگیری بین ۰-۲
هندسه تونل (طول تونل)	طول تونل بالای ۳۰۰۰ متر	طول تونل بین ۳۰۰۰- ۲۰۰۰ متر	طول تونل بین ۲۰۰۰- ۱۰۰۰ متر	طول تونل بین ۱۰۰۰- ۵۰۰ متر	طول تونل کمتر از ۵۰۰ متر
هندسه تونل (سطح مقطع تونل)	سطح مقطع بیشتر از ۲۵۰ مترمربع یا کمتر از ۲۰ مترمربع	سطح مقطع بین ۲۵۰- ۲۲۰ مترمربع یا ۴۰-۲۰ مترمربع	سطح مقطع بین ۲۲۰- ۲۰۰ مترمربع یا ۶۰-۴۰ مترمربع	سطح مقطع بین ۲۰۰- ۱۵۰ مترمربع یا ۸۰-۶۰ مترمربع	سطح مقطع بین ۱۵۰-۸۰ مترمربع
تحکیمات تونل**	شاخص تحکیمات تونل بالای ۷/۵	شاخص تحکیمات تونل بین ۵-۷/۵	شاخص تحکیمات تونل بین ۵-۲/۵	شاخص تحکیمات تونل زیر ۲/۵	-
خدمات فنی (روشنایی تونل)	حداقل روشنایی تونل کمتر از ۱۰ لوکس	حداقل روشنایی تونل بین ۲۰-۱۰ لوکس	حداقل روشنایی تونل بین ۳۰-۲۰ لوکس	حداقل روشنایی تونل بین ۵۰-۳۰ لوکس	حداقل روشنایی تونل بالای ۵۰ لوکس
خدمات فنی (تهویه تونل)	میزان هوای ورودی به تونل کمتر از ۲۰٪ میزان هوای طراحی شده برای تونل است	میزان هوای ورودی به تونل کمتر از ۱۰٪ میزان هوای طراحی شده برای تونل است	میزان هوای ورودی به تونل همان میزان هوای طراحی شده برای تونل است	میزان هوای ورودی به تونل بالای ۱۰٪ میزان هوای طراحی شده برای تونل است	میزان هوای ورودی به تونل بالای ۲۰٪ میزان هوای طراحی شده برای تونل است
نوع روش تونل سازی	روش Mechanical excavation	روش Drill and blast	روش Open TBM	روش Shield TBM	روش Cut and Cover

رده‌بندی اختصاص داده شده					پارامتر (واحد)
۵	۴	۳	۲	۱	
نیروگاه‌های هسته‌ای، ایستگاه‌های راه آهن، مراکز ورزشی و عمومی و کارخانجات زیرزمینی	نیروگاه‌های برق زیرزمینی، تونل‌های اصلی راه و راه آهن، حفريات زیرزمینی دفاعی شهری، محل تقاطع تونل‌ها	اتاق‌های ذخیره، تصفیه‌خانه‌های زیرزمینی، تونل‌های فرعی راه و راه آهن، محفظه‌های تنظیم فشار و تونل‌های دسترسی	تونل‌های معدنی دائمی، تونل‌های آب‌رسانی به نیروگاه‌های برق‌آبی (به‌استثنای تونل‌های تحت فشار)، تونل‌های پیشاهنگ، تونل‌های دنباله رو برای حفريات زیرزمینی بزرگ	تونل‌های معدنی موقت	نوع کاربری و اهمیت تونل
-	-	بیش از دو دسترسی	دو دسترسی	یک دسترسی	دسترسی‌های تونل (تعداد دسترسی‌ها)
-	-	جاده	رمپ	چاه	دسترسی‌های تونل (نوع دسترسی)
گذر آب از ۱۰ متر طول تونل اگر ۰ لیتر بر متر باشد	گذر آب از ۱۰ متر طول تونل اگر کمتر از ۱ لیتر بر متر باشد	گذر آب از ۱۰ متر طول تونل اگر بین ۱-۲ لیتر بر متر باشد	گذر آب از ۱۰ متر طول تونل اگر بین ۲-۵ لیتر بر متر باشد	گذر آب از ۱۰ متر طول تونل اگر بیش از ۵ لیتر بر متر باشد	سطح آب‌های زیرزمینی
احتمال گازخیزی وجود ندارد	احتمال گازخیزی از لایه‌های مستعد گازخیز مشکوک به نظر می‌رسد اما در این ناحیه ساختار Trap وجود ندارد	احتمال گازخیزی از لایه‌های مستعد گازخیز مشکوک به نظر می‌رسد و در این ناحیه ساختار Trap وجود دارد	احتمال گازخیزی از لایه‌های مستعد گازخیز وجود دارد اما در این ناحیه ساختار Trap دیده نمی‌شود	احتمال گازخیزی از لایه‌های مستعد گازخیز وجود دارد و همچنین در این ناحیه ساختار Trap دیده می‌شود	پتانسیل گازهای خطرناک
سنگ بلوکی و با درزه‌دار کم	خاک‌های چسبنده و متراکم، توده‌های دایکی	سنگ به‌شدت درزه‌دار، خاک‌های ضعیف، چین‌خوردگی و کارست	زون‌های برشی، خاک غیر چسبنده و سینه کار مختلط	زون‌های گسله و کارست‌های آبدار	نوع ساختار زمین‌شناسی
زمین پایدار	سقوط بلوک، زمین خردشونده و انفجار زمین	پوسته شوندگی، زمین پلاستیک، لهیدگی، زمین به‌شدت ناپایدار، آماسی و هجوم آب	زمین‌های روان و آب شستگی	زمین‌های غرقابی	مکانیسم‌های ناپایداری***
۹۰٪-۱۰۰٪	۷۵٪-۹۰٪	۵۰٪-۷۵٪	۲۵٪-۵۰٪	۲۵٪-۰٪	کیفیت مهندسی توده سنگ (RQD)
بالاتر از ۵۰	۳۰-۵۰	۱۰-۳۰	۵-۱۰	۰-۵	کیفیت مهندسی خاک (SPT)
دشت	شیب‌های باز	زهکش‌های شیب میانی، دره‌های کم‌عمق، یال‌های شیب میانی و تپه‌های کوچک موجود در دره	زهکش‌های مناطق مرتفع، شیب‌های بالایی، قله کوه و یال‌های مرتفع	دره‌های باریک، آبراهه‌ها، دره‌های U شکل، یال‌های موضعی و تپه‌های موجود در دره	توپوگرافی سطح زمین
اگر تراز تونل بین ۷۵۰-۰ متر باشد و سرعت وزش باد بین ۵-۰ متر بر ثانیه	اگر تراز تونل بین ۱۵۰۰-۷۵۰ متر باشد و سرعت وزش باد بین ۵-۰ متر بر ثانیه	اگر تراز تونل بین ۲۲۰۰-۱۵۰۰ متر باشد و سرعت وزش باد بین ۱۰-۵ متر بر ثانیه	اگر تراز تونل بین ۳۰۰۰-۲۲۰۰ متر باشد و سرعت وزش باد بالای ۱۰ متر بر ثانیه	اگر تراز تونل بیشتر از ۳۰۰۰ متر باشد و سرعت وزش باد بالای ۱۰ متر بر ثانیه	میزان ارتفاع از سطح دریا و بادخیزی منطقه
دما متوسط بین ۱۷-۲۲ درجه سانتی‌گراد و رطوبت بین ۳۰-۶۰ درصد	دما متوسط بین ۲۷-۲۲ درجه سانتی‌گراد و رطوبت زیر ۶۰٪ و یا دما متوسط بین ۱۷-۱۲ درجه سانتی‌گراد و رطوبت بیشتر از ۳۰٪	دما متوسط بین ۳۰-۲۷ درجه سانتی‌گراد و رطوبت زیر ۶۰٪ و یا دما متوسط بین ۱۲-۷ درجه سانتی‌گراد و رطوبت بیشتر از ۳۰٪	متوسط دما بین ۳۳-۳۰ درجه سانتی‌گراد با رطوبت زیر ۶۰٪ و یا متوسط دما بین ۷-۰ درجه سانتی‌گراد و رطوبت بیشتر از ۳۰٪	متوسط دما بیشتر از ۳۳ درجه سانتی‌گراد و رطوبت بیشتر از ۶۰٪ و یا متوسط دما زیر ۰ درجه سانتی‌گراد و رطوبت کمتر از ۳۰٪	میزان دما و رطوبت در منطقه
شدت بارندگی کمتر	شدت بارندگی بین	شدت بارندگی بیشتر از	شدت بارندگی بیشتر از	شدت بارندگی بیشتر از	میزان بارندگی

رده‌بندی اختصاص داده شده					پارامتر (واحد)
۵	۴	۳	۲	۱	
در منطقه	از ۲/۵ میلی‌متر بر ساعت و مدت بارندگی کمتر از شش ساعت و یا بین ۶-۲۴ ساعت	۷/۵ میلی‌متر بر ساعت و مدت بارندگی کمتر از شش ساعت و یا شدت بارندگی کمتر از ۲/۵ میلی‌متر بر ساعت و مدت بارندگی بیشتر از ۲۴ ساعت	۷/۵ میلی‌متر بر ساعت و مدت بارندگی بین ۶-۲۴ ساعت و یا شدت بارندگی بین ۲/۵-۷/۵ میلی‌متر بر ساعت و مدت بارندگی بیشتر از ۲۴ ساعت	۷/۵ میلی‌متر بر ساعت و مدت بارندگی بیشتر از ۲۴ ساعت و یا شدت بارندگی بین ۲/۵-۷/۵ میلی‌متر بر ساعت و مدت بارندگی بیشتر از ۲۴ ساعت	
میزان بلایای طبیعی در منطقه	متوسط دوره زمانی بازگشت بلایای طبیعی با شدت متوسط در منطقه بین ۲۰-۵۰ سال است	متوسط دوره زمانی بازگشت بلایای طبیعی با شدت متوسط در منطقه بین ۱۰-۲۰ سال است	متوسط دوره زمانی بازگشت بلایای طبیعی با شدت متوسط در منطقه بین ۵-۱۰ سال است	متوسط دوره زمانی بازگشت بلایای طبیعی با شدت متوسط در منطقه زیر ۵ سال است	
فرهنگ ایمنی مجموعه	بیش از ۷۵٪ مجموعه فرمان‌ها ایمنی بر اساس تعهدات ایمنی پایبند هستند	بین ۵۰٪-۷۵٪ مجموعه فرمان‌ها ایمنی بر اساس تعهدات ایمنی پایبند هستند	بین ۲۵٪-۵۰٪ مجموعه فرمان‌ها ایمنی بر اساس تعهدات ایمنی پایبند هستند	زیر ۲۵٪ مجموعه فرمان‌ها ایمنی بر اساس تعهدات ایمنی پایبند هستند	
گواهینامه‌های ملی و بین‌المللی پروژه	پروژه بیش از ۷۵٪ استانداردهای لازم را دارا است	پروژه بین ۵۰٪-۷۵٪ استانداردهای لازم را دارا است	پروژه بین ۲۵٪-۵۰٪ استانداردهای لازم را دارا است	پروژه کمتر از ۲۵٪ استانداردهای لازم را دارا است	
سطح استانداردها و قوانین بالادستی پروژه	پروژه بیش از ۷۵٪ استانداردهای لازم را در اسناد مناقصه دارا است	پروژه بین ۵۰٪-۷۵٪ استانداردهای لازم را در اسناد مناقصه دارا است	پروژه بین ۲۵٪-۵۰٪ استانداردهای لازم را در اسناد مناقصه دارا است	پروژه کمتر از ۲۵٪ استانداردهای لازم را در اسناد مناقصه دارا است	
سهم ایمنی در کل هزینه‌ها	هزینه در نظر گرفته شده برای ایمنی بیشتر از ۱ درصد کل هزینه‌های پروژه است	هزینه در نظر گرفته شده برای ایمنی بین ۰/۵-۰/۷۵ درصد کل هزینه‌های پروژه است	هزینه در نظر گرفته شده برای ایمنی بین ۰/۲۵-۰/۵ درصد کل هزینه‌های پروژه است	هزینه در نظر گرفته شده برای ایمنی زیر ۰/۲۵ درصد کل هزینه‌های پروژه است	
فشاردهی برنامه زمان‌بندی ****	اگر شاخص فشاردهی بین ۲۰-۴۰ درصد باشد	اگر شاخص فشاردهی بین ۴۰-۶۰ درصد باشد	اگر شاخص فشاردهی بین ۶۰-۸۰ درصد باشد	اگر شاخص فشاردهی بین ۸۰-۱۰۰ درصد باشد	

برای محاسبه شاخص نوع کاربری و موقعیت قرارگیری ماشین‌آلات و تجهیزات از رابطه ۳-۵

استفاده می‌شود.

جدول ۵-۳۸: مرتب‌سازی ماشین‌آلات و تجهیزات بر اساس حداکثر زمان فعالیت در یک چرخه عملیات تونل‌سازی

ضریب i_1	مرتب‌سازی ماشین‌آلات و تجهیزات پروژه برحسب حداکثر زمان فعالیت در یک چرخه عملیاتی پروژه
۳	E1
۲/۵	E2
۲	E3
۱/۵	E4
۱	E5

جدول ۵-۳۹: مرتب‌سازی ماشین‌آلات و تجهیزات بر اساس حداکثر زمان فعالیت در مکان‌های مختلف

ضریب i_2	مرتب‌سازی ماشین‌آلات و تجهیزاتی که حداکثر زمان فعالیت در هر یک از مناطق زیر را دارند
۱	ماشین‌آلات و تجهیزاتی که در نزدیکی سینه کار و در محل تجمع نیروی انسانی فعالیت می‌کنند
۰/۵	ماشین‌آلات و تجهیزاتی که در فاصله دور از سینه کار و در مجاورت نیروی انسانی و دیگر تجهیزات فعالیت می‌کنند
۰	ماشین‌آلات و تجهیزاتی که در فاصله بسیار دور از نیروی انسانی و دیگر تجهیزات فعالیت می‌کنند

$$PTI = \sum i_1 \times i_2 \quad (۵-۳)$$

که ضرایب i_1 و i_2 از جدول‌های ۵-۳۸ و ۵-۳۹ محاسبه می‌شوند.

نیروی انسانی: منظور از نیروی انسانی تعداد یک یا دو نفر است.

تجمع نیروی انسانی: منظور از تجمع نیروی انسانی تعداد بیش از دو نفر است.

برای محاسبه شاخص تحکیمات تونل از رابطه ۵-۴ استفاده می‌شود.

جدول ۵-۴۰: انواع تحکیم تونل در تونل سازی

ضریب i_1	نوع تحکیم
۵	تونل بدون تحکیمات
۴	تحکیمات تونل شامل شاتکریت و مش
۳	تحکیمات تونل شامل سگمنت و قطعات پیش ساخته
۲	تحکیمات تونل شامل راک بولت (بدون حضور شاتکریت)
۱	تحکیمات تونل شامل قاب فولادی و قطعات سنگین و پیش ساخته دستی

جدول ۵-۴۱: انواع زمان و موقعیت نصب تحکیمات در تونل سازی

ضریب i_2	زمان و موقعیت نصب تحکیمات
۲/۵	تحکیمات در فاصله بین ۱۰-۵ متری نسبت به سینه کار نصب شده است
۱/۷۵	تحکیمات در فاصله کمتر از ۵ متر نسبت به سینه کار نصب شده است (حالت چسبیده به سینه کار)
۱	تحکیمات در فاصله بیش از ۱۰ متر نسبت به سینه کار نصب شده است (سینه کار بدون نگهداری)

$$MTI = \frac{\sum i_3 \times i_4 \times i_5}{\text{کل طول تونل}} \quad (۴-۵)$$

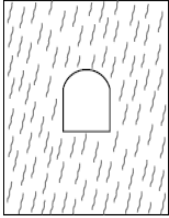
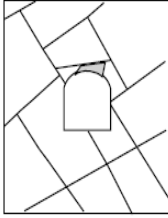
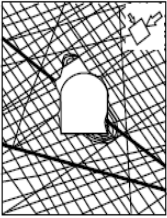
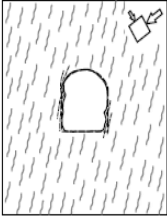
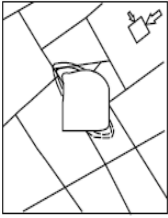
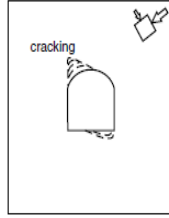
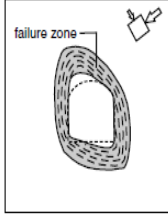
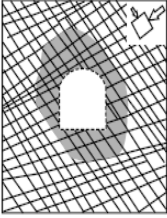
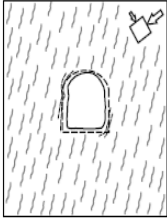
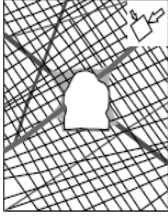
که ضرایب i_3 و i_4 از جدول های ۴۰-۵ و ۴۱-۵ محاسبه می شوند.

i_3 : نوع تحکیم تونل

i_4 : زمان و موقعیت نصب تحکیمات

i_5 : قسمتی از طول تونل که تحکیم خاص خود را دارد

انواع مکانیسم ناپایداری در تونل‌سازی در شکل ۵-۱۰ نشان داده شده است.

STABLE  Elastic response of the rocks around the opening	BLOCK FALL(S)  Falling or sliding of blocks and wedges	CAVE-IN  Localized brittle failure of intact rock and unravelling along discontinuities	BUCKLING  Loosening of rock fragments along foliation or layering	RUPTURING  Localized brittle failure of intact rock and movement of blocks
SLABBING  Brittle failure adjacent to excavation boundary	ROCK BURST  Brittle failure around the excavation	PLASTIC BEHAVIOUR  Initial squeezing or swelling of rocks.	SQUEEZING or SWELLING GROUND  Squeezing rocks and swelling rocks. Elastic/plastic continuum	SWELLING CLAY  Swelling of clay seams in blocky rocks

شکل ۵-۱۰: انواع مکانیسم ناپایداری

برای محاسبه شاخص فشردگی از روابط ۵-۵ تا ۵-۹ استفاده می‌شود.

$$I_1 = 0.5 \times \left(1 - \frac{\text{مجموع شناوری‌ها}}{\text{کل زمان فعالیت‌ها}} \right) \quad (۵-۵)$$

$$m = \frac{\text{زمان کل (هفته)}}{\text{یک هفته}} \quad (۶-۵)$$

$$\alpha = \frac{\sum_{i=1}^m n l_i}{m} \quad (۷-۵)$$

$$I_2 = 0.5 \times \left(\frac{\alpha}{K} \right) \quad (۸-۵)$$

$$I = (I_1 + I_2) \times 100 \quad (۹-۵)$$

m : تعداد واحد زمان

α : تعداد متوسط فعالیت‌های هر زمان

nl_i : تعداد فعالیت‌های قطع شده توسط خط i ام

K : تعداد کل فعالیت‌های موجود برنامه زمان بندی

I_1 : شاخص مربوط به شناوری

I_2 : شاخص مربوط به توازی فعالیت‌ها

I : شاخص فشردگی

۵-۵- تعریف اندیس ایمنی تونل سازی (TSi)

آسیب‌پذیری^۲ به‌عنوان حد و توانایی عناصر ایجاد کننده یک سیستم از قبیل افراد و تجهیزات در پاسخ به یک خطر و پیامدهای آن است که تحت شرایط کاری خاص مربوط به خود در ریسک قرار می‌گیرند. اندیس آسیب‌پذیری به‌عنوان یک ترکیب خطی از وزن پارامترها a_i و مقدار این پارامترها (P_i) بیان می‌شود. رابطه اندیس آسیب‌پذیری به‌صورت معادله ۵-۱۰ بیان می‌شود (Mazzoccola & Hudson, 1996):

$$VI = \sum_{i=1} a_i \frac{P_i}{P_{Max}} \quad (۵-۱۰)$$

که در این رابطه:

i: شمارنده تعداد پارامترهای اصلی

a_i : وزن پارامتر i ام در سیستم

¹ Tunnel Safety index

² Vulnerability

P_i : مقدار پارامتر λ_i

P_{Max} : حداکثر مقداری است که یک پارامتر می‌تواند داشته باشد (فاکتور یکه کردن).

بدین ترتیب می‌توان اندیس ایمنی تونل سازی (TSi) را از معادله ۵-۱۱ محاسبه کرد.

$$TSi = \sum_{i=1}^{35} a_i \frac{P_i}{P_{Max_i}} \quad (۵-۱۱)$$

که در این رابطه:

i: مربوط به پارامترها (از ۱ تا ۳۵ پارامتر)

a_i : ضریب وزنی پارامتر λ_i که از جدول ۵-۳۶ به دست می‌آید.

P_i : امتیاز پارامتر λ_i در هر کلاس از منوی رده‌بندی (جدول ۵-۳۷)

P_{Max_i} : حداکثر امتیاز هر پارامتر در منوی رده‌بندی شده (جدول ۵-۳۷)

در سیستم طبقه‌بندی جدید یک اندیس کمی جدید با نام اندیس ایمنی تونل سازی (TSi) معرفی می‌شود. شاخص به دست آمده از این سیستم طبقه‌بندی می‌تواند به عنوان یک شاخص مهم و کاربردی برای ارزیابی ایمنی در تونل سازی مورد استفاده قرار بگیرد. با استفاده از این شاخص جدید، در مجموع به ایمنی امتیازی از ۱۰ تا ۱۰۰ اختصاص داده شده که برای انجام محاسبات رابطه ۵-۱۱ در نظر گرفته شده است و همچنین شاخص ایمنی در پنج کلاس خیلی خوب، خوب، متوسط، ضعیف و خیلی ضعیف طبقه‌بندی می‌شوند (جدول ۵-۴۲).

جدول ۵-۴۲: بازه‌بندی اندیس ایمنی در تونل سازی

اندیس ایمنی تونل سازی	۸۰-۱۰۰	۶۰-۸۰	۴۰-۶۰	۲۰-۴۰	۱۰-۲۰
ایمنی	خیلی خوب	خوب	متوسط	ضعیف	خیلی ضعیف

۵-۵-۱- ارزیابی سیستم طبقه‌بندی در مجموعه تونل‌های قطعه B_2 منطقه یک آزادراه

تهران-شمال از نظر ایمنی

در این بخش از تحقیق به بررسی و ارزیابی سیستم طبقه‌بندی پرداخته می‌شود. با استفاده از جداول ۵-۳۷ و ۵-۴۲ تونل‌های قطعه‌های B_2 یعنی تونل ۹ راست، تونل ۹ چپ، تونل ۱۱ دابل آرک، تونل ۱۲ راست و تونل ۱۲ چپ و تونل‌های قطعه AB_1 یعنی تونل ۶ دابل آرک، تونل ۷-۱ راست و تونل ۷-۱ چپ از منطقه یک آزادراه تهران-شمال از لحاظ ایمنی مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. از هر کدام از این قطعات یک نمونه ارزیابی ایمنی تونل‌ها در اینجا آورده شده است و برای بقیه تونل‌ها کار مشابه انجام شده است. نتایج حاصل از این بررسی‌ها در جدول‌های ۵-۴۳ و ۵-۴۴ آورده شده است. مقادیر اختصاص داده شده به هر پارامتر در هر محل با توجه به رده‌بندی‌های تعریف شده در جدول ۵-۳۷ آورده شده است. نتایج حاصل از بررسی‌ها نشان می‌دهد که مجموعه تونل‌های قطعه B_2 منطقه یک آزادراه تهران-شمال از سطح ایمنی خوب برخوردار است و همچنین مجموعه تونل‌های قطعه AB_1 منطقه یک آزادراه تهران-شمال از سطح ایمنی متوسط برخوردار است. به‌منظور تعیین سطح و ماهیت ایمنی در طبقه‌بندی انجام شده از گزارش‌ها و آمار حوادث موجود و مستند تونل‌های مورد بررسی نیز برای تعیین ایمنی تونل‌های قطعه‌های B_2 و AB_1 از منطقه یک آزادراه تهران-شمال و همچنین مقایسه این دو قطعه استفاده شده است. از مقایسه این دو قطعه نتیجه گرفته می‌شود که سیستم طبقه‌بندی معرفی شده نتایج قابل قبولی را ارائه کرده است.

جدول ۵-۴۳: ارزیابی ایمنی تونل ۹ راست قطعه B₂ از منطقه یک آزادراه تهران - شمال

دسته پارامترها	پارامترها	مقدار یا وضعیت	امتیاز
عوامل انسانی	شرایط جسمانی و فیزیولوژیکی	بالای ۸۰٪ افراد سلامت کامل و با مانع دارند و کسی عدم صلاحیت ندارد	۳
	عوامل روحی-روانی	بین ۵۰٪-۷۵٪ افراد رضایت شغلی دارند	۳
	سطح آموزش	بین ۵۰٪-۷۵٪ افراد آموزش حرفه‌ای متناسب با کار با کیفیت بالا دریافت کرده‌اند	۳
	هوش و تجربه کاری	بیش از ۱۰٪ افراد با تجربه و کمتر از ۲۰٪ افراد کم تجربه هستند	۳
	تجهیزات فردی	بیش از ۸۰٪ افراد تجهیزات حفاظت فردی کامل و ۲۰٪ افراد تجهیزات حفاظت فردی را با نقص جزئی دارند	۳
$\sum_{i=1}^5 a_i \frac{P_i}{P_{max_i}} = 12$			
ماشین‌آلات و تجهیزات	عامل ساز بودن	بین ۷۵٪-۵۰٪ ماشین‌آلات و تجهیزات خطرناک به نظر می‌رسند	۳
	سطح مکانیزاسیون	بین ۷۵٪-۵۰٪ ماشین‌آلات و تجهیزات در پروژه مکانیزه هستند	۳
	نوع مکانیزم	بین ۷۵٪-۵۰٪ ماشین‌آلات و تجهیزات در پروژه دارای مکانیزم پیچیده هستند	۳
	ابعاد	در مجاورت ماشین‌آلات و تجهیزات زیر ۳۰٪ فضای مفید داریم و همچنین عرض مفید مجاور ماشین-آلات و تجهیزات بیشتر از ۳ متر است	۳
	نگهداری و تعمیرات	نگهداری و تعمیرات زیر ۲۵ درصد مطابق دستورالعمل و چک لیست انجام می‌شود	۱
	نوع کاربری و موقعیت قرارگیری	اگر شاخص نوع کاربری و موقعیت قرارگیری بین ۱۰-۸	۱
	$\sum_{i=1}^6 a_i \frac{P_i}{P_{max_i}} = 6.6$		
ویژگی‌های تونل	طول تونل	طول تونل کمتر از ۵۰۰ متر	۵
	سطح مقطع تونل	سطح مقطع بین ۸۰-۱۵۰ مترمربع	۵
	تحکیمات	شاخص تحکیمات تونل بین ۷/۵-۵	۲
	روشنایی تونل	حداقل روشنایی تونل کمتر از ۱۰ لوکس	۱
	تهویه تونل	میزان هوای ورودی به تونل بالای ۱۰٪ میزان هوای طراحی شده برای تونل است	۴

دسته پارامترها	پارامترها	مقدار یا وضعیت	امتیاز
	نوع روش تونل سازی	روش Drill and blast	۲
	نوع کاربری و میزان اهمیت تونل	نیروگاه‌های برق زیرزمینی، تونل‌های اصلی راه و راه آهن، حفاریات زیرزمینی دفاعی شهری، محل تقاطع تونل‌ها	۴
	تعداد دسترسی‌ها	دو دسترسی	۲
	نوع دسترسی‌ها	جاده	۳
	$\sum_{i=1}^9 a_i \frac{P_i}{P_{max_i}} = 9.4$		
شرایط ژئوتکنیکی، زمین‌شناسی مهندسی و هیدرولوژی	سطح آب‌های زیرزمینی	گذر آب از ۱۰ متر طول تونل اگر ۰ لیتر بر متر باشد	۴
	پتانسیل گازهای خطرناک	احتمال گازخیزی وجود ندارد	۵
	نوع ساختار زمین‌شناسی	سنگ بلوکی و با درزه‌دار کم	۵
	مکانیسم‌های ناپایداری	سقوط بلوک، زمین خردشونده و انفجار زمین	۴
	کیفیت مهندسی توده سنگ (RQD)	۷۵٪-۵۰٪	۳
$\sum_{i=1}^5 a_i \frac{P_i}{P_{max_i}} = 16.6$			
شرایط ژئوتکنیکی، زمین‌شناسی مهندسی و هیدرولوژی	شرایط توپوگرافی سطح زمین	زهکش‌های مناطق مرتفع، شیب‌های بالایی، قله کوه و یال‌های مرتفع	۲
	ارتفاع از سطح دریا و میزان بادخیزی منطقه	اگر تراز تونل بین ۲۲۰۰-۱۵۰۰ متر باشد و سرعت وزش باد بین ۱۰-۵ متر بر ثانیه	۳
	دما و رطوبت	دما متوسط بین ۱۷-۲۲ درجه سانتی‌گراد و رطوبت بین ۶۰-۳۰ درصد	۵
	میزان بارندگی	شدت بارندگی بیشتر از ۷/۵ میلی‌متر بر ساعت و مدت بارندگی بین ۶-۲۴ ساعت و یا شدت بارندگی بین ۷/۵-۲/۵ میلی‌متر بر ساعت و مدت بارندگی بیشتر از ۲۴ ساعت	۲
	بلاای طبیعی	متوسط دوره زمانی بازگشت بلاای طبیعی با شدت متوسط در منطقه بین ۲۰-۱۰ سال است	۳
$\sum_{i=1}^5 a_i \frac{P_i}{P_{max_i}} = 9$			
عوامل قراردادی-اجرایی	فرهنگ ایمنی	بین ۷۵٪-۵۰٪ مجموعه نسبت به اجرای فرمان‌ها ایمنی بر اساس تعهدات ایمنی پابند هستند	۳
	گواهینامه‌های ملی و بین‌المللی	پروژه بین ۷۵٪-۵۰٪ استانداردهای لازم را دارا است	۳
	سطح استانداردها و قوانین بالادستی	پروژه کمتر از ۲۵٪ استانداردهای لازم را در استناد مناقصه دارا است	۱

دسته پارامترها	پارامترها	مقدار یا وضعیت	امتیاز
	سهام ایمنی در کل هزینه‌ها	هزینه در نظر گرفته شده برای ایمنی بین ۰/۵-۰/۲۵ درصد کل هزینه‌های پروژه است	۲
	فشاردهی برنامه زمان‌بندی	اگر شاخص فشاردهی بین ۴۰-۶۰ درصد باشد	۳
	$\sum_{i=1}^5 a_i \frac{P_i}{P_{max_i}} = 7.5$		

جدول ۵-۴۴: ارزیابی ایمنی تونل ۶ دابل آرک قطعه AB₁ از منطقه یک آزادراه تهران - شمال

دسته پارامترها	پارامترها	مقدار یا وضعیت	امتیاز
عوامل انسانی	شرایط جسمانی و فیزیولوژیکی	زیر ۱۰٪ افراد دارای عدم صلاحیت برای انجام کار هستند	۲
	عوامل روحی-روانی	بین ۲۵٪-۵۰٪ افراد رضایت شغلی دارند	۲
	سطح آموزش	بین ۲۵٪-۵۰٪ افراد آموزش حرفه‌ای متناسب با کار با کیفیت بالا دریافت کرده‌اند	۲
	هوش و تجربه کاری	کمتر از ۱۰٪ افراد با تجربه و بیش از ۲۰٪ افراد کم تجربه هستند	۲
	تجهیزات فردی	بیش از ۸۰٪ افراد تجهیزات حفاظت فردی کامل و ۲۰٪ افراد تجهیزات حفاظت فردی را با نقص جزئی دارند	۳
$\sum_{i=1}^5 a_i \frac{P_i}{P_{max_i}} = 8.8$			
ماشین‌آلات و تجهیزات	عامل ساز بودن	بیش از ۹۵٪ ماشین‌آلات و تجهیزات خطرناک به نظر می‌رسند	۱
	سطح مکانیزاسیون	بین ۵۰٪-۷۵٪ ماشین‌آلات و تجهیزات در پروژه مکانیزه هستند	۳
	نوع مکانیسم	بیش از ۷۵٪ ماشین‌آلات و تجهیزات در پروژه دارای مکانیسم پیچیده هستند	۲
	ابعاد	در مجاورت ماشین‌آلات و تجهیزات زیر ۳۰٪ فضای مفید داریم و همچنین عرض مفید مجاور ماشین-آلات و تجهیزات کمتر از ۳ متر است	۱
	نگهداری و تعمیرات	نگهداری و تعمیرات بیش از ۷۵ درصد مطابق دستورالعمل و چک‌لیست انجام می‌شود	۴
	نوع کاربری و موقعیت قرارگیری	اگر شاخص نوع کاربری و موقعیت قرارگیری بین ۱۰-۸	۱

دسته پارامترها	پارامترها	مقدار یا وضعیت	امتیاز
ویژگی های تونل	$\sum_{i=1}^6 a_i \frac{P_i}{P_{max_i}} = 6.2$		
	طول تونل	طول تونل کمتر از ۵۰۰ متر	۵
	سطح مقطع تونل	سطح مقطع بین ۲۲۰-۲۵۰ مترمربع یا ۲۰-۴۰ مترمربع	۲
	تحکیمات	شاخص تحکیمات تونل بین ۲/۵-۵	۳
	روشنایی تونل	حداقل روشنایی تونل بین ۲۰-۱۰ لوکس	۲
	تهویه تونل	میزان هوای ورودی به تونل کمتر از ۱۰٪ میزان هوای طراحی شده برای تونل است	۲
	نوع روش تونل سازی	روش Mechanical excavation	۱
	نوع کاربری و میزان اهمیت تونل	نیروگاه های برق زیرزمینی، تونل های اصلی راه و راه آهن، حفريات زیرزمینی دفاعی شهری، محل تقاطع تونل ها	۴
	تعداد دسترسی ها	یک دسترسی	۱
	نوع دسترسی ها	جاده	۳
شرایط ژئوتکنیکی، زمین شناسی مهندسی و هیدرولوژی	$\sum_{i=1}^9 a_i \frac{P_i}{P_{max_i}} = 8.3$		
	سطح آب های زیرزمینی	گذر آب از ۱۰ متر طول تونل اگر بین ۵-۲ لیتر بر متر باشد	۲
	پتانسیل گازهای خطرناک	احتمال گاز خیزی از لایه های مستعد گاز خیز مشکوک به نظر می رسد اما در این ناحیه ساختار Trap وجود ندارد	۴
	نوع ساختار زمین شناسی	زون های برشی، خاک غیر چسبنده و سینه کار مختلط	۲
	مکانیسم های ناپایداری	زمین های روان و آب شستگی	۲
	کیفیت مهندسی توده سنگ (RQD)	۷۵٪-۵۰٪	۳
شرایط جغرافیایی و اقلیمی	$\sum_{i=1}^5 a_i \frac{P_i}{P_{max_i}} = 10.6$		
	شرایط توپوگرافی سطح زمین	دره های باریک، آبراهه ها، دره های U شکل، یال های موضعی و تپه های موجود در دره	۱
	ارتفاع از سطح دریا و میزان بادخیزی منطقه	اگر تراز تونل بین ۲۲۰۰-۱۵۰۰ متر باشد و سرعت وزش باد بین ۱۰-۵ متر بر ثانیه	۳
	دما و رطوبت	دما متوسط بین ۲۲-۲۷ درجه سانتی گراد و رطوبت زیر ۶۰٪ و یا دما متوسط بین ۱۷-۱۲ درجه سانتی گراد و رطوبت بیشتر از ۳۰٪	۴

دسته پارامترها	پارامترها	مقدار یا وضعیت	امتیاز
عوامل قراردادی-اجرایی	میزان بارندگی	شدت بارندگی بیشتر از ۷/۵ میلی‌متر بر ساعت و مدت بارندگی کمتر از شش ساعت و یا شدت بارندگی کمتر از ۲/۵ میلی‌متر بر ساعت و مدت بارندگی بیشتر از ۲۴ ساعت	۳
	بلاهای طبیعی	متوسط دوره زمانی بازگشت بلاهای طبیعی با شدت متوسط در منطقه بین ۲۰-۱۰ سال است	۳
	$\sum_{i=1}^5 a_i \frac{P_i}{P_{max_i}} = 8.4$		
	فرهنگ ایمنی	بین ۵۰٪-۷۵٪ مجموعه نسبت به اجرای فرمان‌ها ایمنی بر اساس تعهدات ایمنی پایبند هستند	۳
	گواهینامه‌های ملی و بین‌المللی	پروژه بین ۵۰٪-۷۵٪ استانداردهای لازم را دارا است	۳
	سطح استانداردها و قوانین بالادستی	پروژه کمتر از ۲۵٪ استانداردهای لازم را در اسناد مناقصه دارا است	۱
	سهم ایمنی در کل هزینه‌ها	هزینه در نظر گرفته شده برای ایمنی زیر ۲۵٪ درصد کل هزینه‌های پروژه است	۱
	فشاردگی برنامه زمان‌بندی	اگر شاخص فشردگی بین ۱۰۰-۸۰ درصد باشد	۱
	$\sum_{i=1}^5 a_i \frac{P_i}{P_{max_i}} = 5.5$		

با توجه به مجموعه امتیازات به دست آمده از جدول ۵-۴۳، امتیاز نهایی از سیستم طبقه‌بندی برای ارزیابی تونل ۹ راست قطعه B₂ از منطقه یک آزادراه تهران-شمال ۶۱/۱ به دست آمد که در بازه بندی اندیس ایمنی در تونل سازی در رده خوب قرار می‌گیرد و نشان‌دهنده وضعیت خوب ایمنی تونل ۹ راست قطعه B₂ از منطقه یک آزادراه تهران-شمال است. روند امتیازدهی فوق بطور مشابه برای تونل‌های ۹ چپ، ۱۱ دابل آرک، ۱۲ چپ و ۱۲ راست قطعه B₂ انجام شده و با توجه به شباهت جدول‌های و محاسبات از ارائه آن‌ها صرف‌نظر شده و نتایج بطور خلاصه در جدول ۵-۴۵ آورده شده است.

جدول ۵-۴۵: وضعیت تونل‌های قطعه B_2 آزادراه تهران - شمال

تونل	امتیاز	وضعیت ایمنی
9_R	۶۱/۱	خوب
9_L	۵۹/۱	متوسط
11_D	۶۱/۵	خوب
12_R	۵۹/۱	متوسط
12_L	۵۹/۷	متوسط

با توجه به مجموعه امتیازات به دست آمده از جدول ۵-۴۴، امتیاز نهایی از سیستم طبقه‌بندی برای ارزیابی تونل ۶ دابل آرک قطعه AB_1 از منطقه یک آزادراه تهران-شمال ۴۷/۹ به دست آمد که در بازه بندی اندیس ایمنی در تونل سازی در رده متوسط قرار می‌گیرد که نشان‌دهنده وضعیت متوسط ایمنی تونل ۶ دابل آرک قطعه AB_1 از منطقه یک آزادراه تهران-شمال است. روند امتیازدهی فوق بطور مشابه برای تونل‌های ۷-۱ چپ و ۷-۱ راست برای قطعه AB_1 انجام شده و با توجه به شباهت جدول‌ها و محاسبات از ارائه آن‌ها صرف‌نظر شده و نتایج بطور خلاصه در جدول ۵-۴۶ آورده شده است.

جدول ۵-۴۶: وضعیت تونل‌های قطعه AB_1 آزادراه تهران - شمال

تونل	امتیاز	وضعیت ایمنی
6_D	۴۷/۹	متوسط
$7 - 1_R$	۶۳/۷	خوب
$7 - 1_L$	۶۳/۴	خوب

قطعه B_2 با امتیاز ۶۰/۱ که از میانگین امتیاز تونل‌های قطعه B_2 بدست آمده، در وضعیت ایمنی خوب، با گزارش حوادث در چهار ماه سال (مهر، آبان، آذر و مرداد) ۱۳۹۶ با ثبت ۱۲ حادثه و ۴۷ Anomaly (اعمال و شرایط ناایمن) و قطعه AB_1 با امتیاز ۵۱/۸ که ۷۵ درصد امتیاز آن متعلق به تونل ۶ دابل آرک (به دلیل طول ۷ برابری نسبت به تونل ۷-۱ راست و چپ) و ۵ درصد آن متعلق به میانگین امتیاز تونل ۷-۱ چپ و ۷-۱ راست، در وضعیت ایمنی متوسط با گزارش حوادث در همان چهار ماه در سال ۱۳۹۶ با ثبت ۱۵ حادثه و ۷۱ Anomaly است.

از مقایسه این دو قطعه نتیجه گرفته می‌شود که وضعیت ایمنی بطور نسبی در قطعه B_2 از نظر ایمنی خوب است و امتیاز بیشتری نسبت به قطعه AB_1 دریافت کرده است، اما در قطعه AB_1 ، امتیاز تعلق گرفته به ایمنی متوسط است و امتیاز کمتری، بویژه در تونل ۶ دابل آرک نسبت به تونل‌های ۱-۷ چپ و ۱-۷ راست دریافت کرده است و همچنین از مقایسه وضعیت شاخص حوادث و آنومالی‌های ثبت شده در گزارش‌ها، برای قطعه B_2 نسبت به قطعه AB_1 حوادث و گزارش‌های کمتری ثبت شده که نشان دهنده وضعیت بهتر ایمنی در منطقه B_2 است.

۵-۶- اقدامات لازم برای افزایش ایمنی

همان‌طور که در بخش ۵-۵ ملاحظه شد، مجموعه تونل‌های قطعه B_2 از منطقه یک آزادراه تهران-شمال از سطح ایمنی خوب برخوردار است، بدین منظور، اقدامات برای رسیدن وضعیت ایمنی از خوب به خیلی خوب ضروری به نظر می‌رسد.

- توجه نمودن به مسائل آموزش ایمنی به کارکنان حاضر در پروژه.
- تهیه و پر کردن چک لیست‌های ایمنی ماشین‌آلات و تجهیزات توسط راننده و یا اپراتور و نماینده ایمنی در پروژه.
- باید فرهنگ‌سازی ایمنی از دوران طراحی شروع گردد و باید این تفکر در وجود هر فردی نهادینه شود که رعایت ایمنی ابتدا سبب بهبود کیفیت زندگی خودمان می‌گردد و اولین نافع آن خود فرد است.
- برای افزایش ایمنی در پروژه باید سهم ایمنی در هزینه‌ها بالا برود.
- در برنامه‌ریزی فعالیت‌های پروژه زمان به حد کافی باشد تا سطح مخاطرات به علت فشردگی برنامه زمان‌بندی کاهش پیدا کرده و ما شاهد وضعیت ایمن‌تری باشیم.

۵-۷- نتیجه‌گیری

در این فصل ابتدا با استفاده از روش FDAHP وزن پارامترهای مؤثر بر ایمنی در تونل سازی مشخص و تعیین شد و در نهایت شاخصی برای ارزیابی ایمنی در مجموعه تونل‌های قطعه B_2 و AB_1 از منطقه یک آزادراه تهران-شمال ارائه شد.

با تمرکز بر روش FDAHP طبقه‌بندی جدیدی ارائه شده است. در نهایت، نتایج حاصل از طبقه‌بندی جدید نشان می‌دهد که مجموعه تونل‌های قطعه B_2 از منطقه یک آزادراه تهران-شمال یعنی تونل‌های ۹چپ، ۹ راست، ۱۱ دابل آرک، ۱۲ چپ و ۱۲ راست از سطح ایمنی خوب برخوردار است و مجموعه تونل‌های ۶ دابل آرک و ۷-۱ چپ و ۷-۱ راست از قطعه AB_1 از منطقه یک آزادراه تهران-شمال از سطح ایمنی متوسط برخوردار است و همچنین مقایسه نتایج حاصل از بررسی گزارش حوادث و آنومالی‌ها و همچنین مقایسه وضعیت ایمنی تونل‌های دو قطعه در منطقه مورد مطالعه نشان داد که تطابق نسبتاً خوبی بین نتایج حاصل از مقایسه‌ها و سیستم طبقه‌بندی ارائه شده وجود دارد. در فصل بعدی به جمع‌بندی نهایی و نتیجه‌گیری پژوهش حاضر پرداخته می‌شود.

فصل ششم:

نتیجہ گیری و پیشہ داری

۶-۱- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

با توجه به وقایع مختلف که ممکن است منجر به آسیب‌های کشنده یا غیرکشنده شود، تونل سازی به عنوان یکی از خطرناک‌ترین عملیات در سراسر جهان شناخته شده است. با توجه به عوامل خطرساز متعدد و عدم اطمینان ذاتی در محیط‌های پیچیده، معمولاً سرپیچی از اجرای فرمان‌های ایمنی در ساخت‌وساز تونل صورت می‌گیرد و خطرات بسیار پنهانی برای ایمنی عموم ایجاد می‌کند (LY Ding et al., 2012)؛ بنابراین در این پایان‌نامه، ارزیابی ایمنی در تونل سازی مورد مطالعه قرار گرفته است. این تحقیق شامل شش مرحله اصلی است:

مرحله اول، مطالعات مهم و مؤثر در حوزه ارزیابی ایمنی 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 ایمنی در تونل سازی تعیین گردید.

مرحله دوم، پارامترهای مهم و مؤثر بر ایمنی در تونل سازی مورد ارزیابی و بررسی قرار گرفتند که سی‌وپنج پارامتر برای ارزیابی ایمنی در تونل سازی در شش دسته عوامل انسانی، ماشین‌آلات و تجهیزات، ویژگی‌های تونل، شرایط ژئوتکنیکی، زمین‌شناسی مهندسی و هیدرولوژی، شرایط جغرافیایی و اقلیمی و عوامل قراردادی-اجرایی انتخاب شد. در ادامه فرم‌های نظرسنجی آماده شد و در میان متخصصان توزیع شد، نظرات کیفی ۳۰ نفر از متخصصان جمع‌آوری شد، با بررسی نتایج به دست آمده از نظرسنجی‌های انجام شده مشخص شد که در صنعت تونل سازی هر شش پارامتر ایمنی از اهمیت ویژه‌ای برخوردارند. با توجه به بررسی مطالعات دقیق گذشتگان مشخص شد تاکنون یک روش جامع جهت ارزیابی ایمنی در تونل سازی ارائه نشده بود و در این تحقیق سعی شد تا یک رهیافت جدید برای ارزیابی ایمنی در تونل سازی ارائه شود.

مرحله سوم، وزن و اهمیت پارامترهای مؤثر بر ایمنی با استفاده از FDAHP محاسبه شده است.

مرحله چهارم، بعد از محاسبه وزن هر پارامتر با استفاده از روش FDAHP، سیستم طبقه‌بندی جدیدی بر مبنای ۳۵ پارامتر (شرایط جسمانی و فیزیولوژیکی، عوامل روحی-روانی، سطح آموزش، هوش و تجربه کاری، تجهیزات فردی، عامل ساز بودن، سطح مکانیزاسیون، نوع مکانیسم، ابعاد، نگهداری و تعمیرات، نوع کاربری و موقعیت قرارگیری، هندسه تونل (طول تونل و سطح مقطع تونل)، سیستم نگهداری، خدمات فنی (تهویه و روشنایی)، نوع روش تونل سازی، نوع کاربری و میزان اهمیت تونل، تعداد و نوع دسترسی‌ها، سطح آب‌های زیرزمینی، پتانسیل گازهای خطرناک، نوع ساختار زمین-شناسی، مکانیسم‌های ناپایداری، کیفیت مهندسی توده سنگ، کیفیت مهندسی خاک، شرایط توپوگرافی سطح زمین، ارتفاع از سطح دریا و میزان بادخیزی منطقه، دما و رطوبت، میزان بارندگی، بلایای طبیعی، فرهنگ ایمنی، گواهینامه‌های ملی و بین‌المللی در خصوص سیستم‌های مدیریتی، سطح استانداردها و قوانین بالادستی در قرارداد، سهم ایمنی در کل هزینه‌ها، فشردگی برنامه زمان‌بندی) مؤثر بر ایمنی پیشنهاد شد. این سیستم که اندیس ایمنی تونل سازی (TSi) نامیده شده است، امتیازی از ۱۰ تا ۱۰۰ را به ایمنی اختصاص می‌دهد. ارزیابی ایمنی در تونل سازی در پنج کلاس خیلی خوب، خوب، متوسط، ضعیف و خیلی ضعیف طبقه‌بندی می‌شوند.

مرحله پنجم، به‌منظور ارزیابی ایمنی سیستم طبقه‌بندی پیشنهاد شده، وضعیت ایمنی مجموعه تونل‌های قطعه‌های B_2 و AB_1 از منطقه یک آزادراه تهران-شمال برای انجام مطالعات موردی انتخاب شدند. با توجه به مطالعات انجام شده با استفاده از سیستم طبقه‌بندی جدید، مشخص شد که مجموعه تونل‌های قطعه B_2 از منطقه یک آزادراه تهران-شمال در سطح ایمنی خوب قرار دارند و مجموعه تونل‌های قطعه AB_1 از منطقه یک آزادراه تهران-شمال در سطح ایمنی متوسط قرار دارند.

مرحله ششم، به‌منظور درستی سیستم طبقه‌بندی جدید از مقایسه بین ارزیابی ایمنی تونل‌های دو قطعه B_2 و AB_1 و همچنین مقایسه بین گزارش حوادث و آنومالی‌های تونل‌های مورد مطالعه استفاده شد. بین مقایسه‌های انجام شده و سیستم طبقه‌بندی در منطقه مورد مطالعه، تطابق نسبتاً

خوبی وجود داشت.

۶-۲- پیشنهادها برای تحقیقات آتی

به منظور ارزیابی ایمنی تلاش شد که این ارزیابی پیشنهادی به بهترین نحو ممکن در زمان مورد نظر اجرا شود. در همین راستا، به منظور بهبود تحقیقات آتی در ادامه پیشنهادهایی ارائه می شود که بتوان با صرف زمان بیشتر به سمت ایده های جدیدتر حرکت نمود و همچنین بتوان به عنوان خط-مشی جهت انجام تحقیقات بعدی استفاده کرد.

- در این پایان نامه پرسشنامه ها توسط متخصصان پروژه های تونل سازی داخل کشور تکمیل گردید، پیشنهاد می شود این پرسشنامه ها برای متخصصان بین المللی نیز فرستاده شود تا سیستم ارزیابی جامع تری داشته باشیم.
- در این پایان نامه سیستم طبقه بندی برای تونل های منطقه یک آزادراه تهران-شمال پیاده سازی شد و نتایج قابل قبولی از نظر ارزیابی ایمنی حاصل شد. لذا پیشنهاد می شود که در سایر تونل ها این سیستم در آن ها پیاده سازی و نتایج بررسی شود.
- در این پایان نامه اندیس TS_i ارائه شده با استفاده از وزن دهی با روش تحلیل سلسله مراتبی دلفی فازی (FDAHP) محاسبه شده است. لذا پیشنهاد می شود با استفاده از روش تحلیل شبکه (ANP) این اندیس محاسبه و نتایج آن با شاخص ارائه شده مقایسه شود.

منابع فارسی

- اردشیر ع و کارآموزیان ا، (۱۳۹۱)، "مدیریت ایمنی در پروژه‌های عمرانی تونل سازی"، دومین کنفرانس ملی مهندسی و مدیریت ساخت، بندرعباس، دانشگاه صنعتی امیرکبیر.
- برخورداری ا و شیرازی ج و حلوانی غ، (۱۳۹۱)، "شناسایی خطرات و ارزیابی ریسک فرآیند تونل سازی با به‌کارگیری از تکنیک آنالیز ایمنی شغل". طلوع بهداشت؛ ۱۱ (۳): ۱۰۳-۱۱۲.
- بهارانچی، س ر (۱۳۸۷)، "مدیریت ایمنی"، انتشارات جهان جام جم، صفحه ۲.
- حجازی س ج و سپهوند س، (۱۳۹۱)، "ارائه روشی جدید برای ارزیابی کمی ایمنی در تونل‌های راه"، دوازدهمین کنفرانس مهندسی حمل‌ونقل و ترافیک ایران، تهران، سازمان حمل‌ونقل و ترافیک تهران، معاونت حمل‌ونقل و ترافیک شهرداری تهران.
- محمدی ز و ایزدی ا، (۱۳۹۴)، "شناسایی و اولویت‌بندی عوامل تأثیرگذار بر ایمنی تونل‌های بین‌شهری و ارائه چک لیست ایمنی تونل"، اولین کنفرانس سالانه بین‌المللی عمران، معماری و شهرسازی، شیراز، موسسه عالی علوم و فناوری خوارزمی.
- مدنی ح، (۱۳۷۳)، "بازرسی در معادن"، موسسه آموزشی پژوهشی، وزارت معادن و فلزات.
- مدنی ح، (۱۳۸۹)، "تونل سازی"، انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)، صفحه ۸۲، ۱، ۱۲.
- مؤمنی م و قیومی ف، (۱۳۹۱)، "تحلیل‌های آماری با استفاده از SPSS"، (چاپ هفتم)، انتشارات گنج شایگان.
- نبوتی ح و افضلی راد م، (۱۳۹۱)، "ارتقاء عملکرد HSE از طریق ارزیابی و ارتقاء فرهنگ HSE"، سومین همایش بازرسی و ایمنی در صنایع نفت و انرژی، تهران، هم اندیشان انرژی کیمیا.

سایت آزادراه تهران-شمال (<http://www.tsfc.ir>)

- Aminbakhsh, S., Gunduz, M., & Sonmez, R. (2013). Safety risk assessment using analytic hierarchy process (AHP) during planning and budgeting of construction projects. *Journal of safety research*, 46, 99-105.
- Arends, B., Jonkman, S. N., Vrijling, J., & Van Gelder, P. (2005). Evaluation of tunnel safety: towards an economic safety optimum. *Reliability Engineering & System Safety*, 90(2-3), 217-228.
- Bahn, S. (2013). Workplace hazard identification and management: The case of an underground mining operation. *Safety science*, 57, 129-137.
- Bahn, S., & Barratt-Pugh, L. (2012). Emerging issues of Health and Safety training delivery in Australia: Quality and transferability. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 62, 213-222.
- Beard, A. N. (2010). Tunnel safety, risk assessment and decision-making. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 25(1), 91-94.
- Bodur, S., & Filiz, E. (2009). A survey on patient safety culture in primary healthcare services in Turkey. *International Journal for Quality in Health Care*, 21(5), 348-355.
- Carter, G., & Smith, S. D. (2006). Safety hazard identification on construction projects. *Journal of construction engineering and management*, 132(2), 197-205.
- Cheng, J.-H., & Tang, C.-H. (2009). An application of fuzzy Delphi and fuzzy AHP for multi-criteria evaluation on bicycle industry supply chains. *WSEAS Transactions on Systems and Control*, 4(1), 21-34.
- Cronbach, L. J. (1951). Coefficient alpha and the internal structure of tests. *psychometrika*, 16(3), 297-334.
- DESTER, W. S., & BLOCKLEY, D. I. (1995). Safety—behaviour and culture in construction. *Engineering, Construction and Architectural Management*, 2(1), 17-26.
- Ding, L., Yu, H., Li, H., Zhou, C., Wu, X., & Yu, M. (2012). Safety risk identification system for metro construction on the basis of construction drawings. *Automation in Construction*, 27, 120-137.

- Ding, L., Zhang, L., Wu, X., Skibniewski, M. J., & Qunzhou, Y. (2014). Safety management in tunnel construction: Case study of Wuhan metro construction in China. *Safety science*, 62, 8-15.
- El, M. S. B. A. A., El Nawawy, O. A. M., & Abdel-Alim, A. M. (2015). Identification and assessment of risk factors affecting construction projects. *HBRC Journal*.
- Fung, I. W., Tam, V. W., Lo, T. Y., & Lu, L. L. (2010). Developing a risk assessment model for construction safety. *International Journal of Project Management*, 28(6), 593-600.
- Gharibi, V., Mortazavi, S. B., Jafari, A. J., & Malakouti, J. (2017). The relationship between workers' safety attitudes and their beliefs in destiny, chance and the rule of control measures in prevention of tunneling accidents. *International journal of occupational hygiene*, 8(4), 192-199.
- Ghosh, S., & Jintanapakanont, J. (2004). Identifying and assessing the critical risk factors in an underground rail project in Thailand: a factor analysis approach. *International Journal of Project Management*, 22(8), 633-643.
- Gibbons, A. M. (2007). A review of safety culture theory and its potential application to traffic safety.
- Givoni, B. (1969). Man, climate and architecture. *Elsevier*;().
- Guo, H., Li, H., & Li, V. (2013). VP-based safety management in large-scale construction projects: A conceptual framework. *Automation in Construction*, 34, 16-24.
- Haslam, R. A., Hide, S. A., Gibb, A. G., Gyi, D. E., Pavitt, T., Atkinson, S., & Duff, A. (2005). Contributing factors in construction accidents. *Applied ergonomics*, 36(4), 401-415.
- Hee, D. D., Pickrell, B., Bea, R., Roberts, K., & Williamson, R. (1999). Safety Management Assessment System (SMAS): a process for identifying and evaluating human and organization factors in marine system operations with field test results. *Reliability Engineering & System Safety*, 65(2), 125-140.
- HUANG, H., & ZHANG, D. (2015). *Quantitative geotechnical risk management for tunneling projects in China*. Paper presented at the Geotechnical Safety & Risk V, Proceedings of the 5th International Symposium on Safety & Risk, Rotterdam, 13–16 October 2015.

- Ismail, Z., Doostdar, S., & Harun, Z. (2012). Factors influencing the implementation of a safety management system for construction sites. *Safety science*, 50(3), 418-423.
- Jafari, M. J., Gharari, N.-a., & Sheikhi, H. R. (2009). The reliability of a tunnel boring machine. *International journal of occupational hygiene*, 1(1), 20-25.
- Jannadi, M. O. (1996). Factors affecting the safety of the construction industry: A questionnaire including 19 factors that affect construction safety was mailed to the top 200 construction contractors in the UK. Safety officers and workers were asked to indicate how effective each factor was in improving construction safety. *Building Research and Information*, 24(2), 108-112.
- Jenness, J. (2006). Topographic position index (TPI) v. 1.2. Jenness Enterprises.
- Kahraman, C., Cebeci, U., & Ruan, D. (2004). Multi-attribute comparison of catering service companies using fuzzy AHP: The case of Turkey. *International Journal of Production Economics*, 87(2), 171-184.
- Kazaras, K., Kirytopoulos, K., & Rentizelas, A. (2012). Introducing the STAMP method in road tunnel safety assessment. *Safety science*, 50(9), 1806-1817.
- Khoshnavaz, a. k., meisam moradi, afshin darsanj, sara shah hosseini and hamed yarmohammadi. (2016). Hazard identification and risk rating in tunnel construction projects through risk matrix method. *International Journal Of Current Science*.
- Kirytopoulos, K., Konstandinidou, M., Nivolianitou, Z., & Kazaras, K. (2014). Embedding the human factor in road tunnel risk analysis. *Process Safety and Environmental Protection*, 92(4), 329-337.
- Langford, D., Rowlinson, S., & Sawacha, E. (2000). Safety behaviour and safety management: its influence on the attitudes of workers in the UK construction industry. *Engineering, Construction and Architectural Management*, 7(2), 133-140.
- Liu, Y.-C., & Chen, C.-S. (2007). A new approach for application of rock mass classification on rock slope stability assessment. *Engineering geology*, 89(1-2), 129-143.
- Mahdevari, S., Shahriar, K., & Esfahanipour, A. (2014). Human health and safety risks

management in underground coal mines using fuzzy TOPSIS. *Science of the Total Environment*, 488, 85-99.

Mattila, M. (1985). Job load and hazard analysis: a method for the analysis of workplace conditions for occupational health care. *Occupational and Environmental Medicine*, 42(10), 656-666.

Mazzoccola, D., & Hudson, J. (1996). A comprehensive method of rock mass characterization for indicating natural slope instability. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 29(1), 37-56.

Oster Jr, C. V., Strong, J. S., & Zorn, C. K. (2013). Analyzing aviation safety: Problems, challenges, opportunities. *Research in transportation economics*, 43(1), 148-164.

Pamukcu, C. (2015). Analysis and management of risks experienced in tunnel construction. *Acta Montanistica Slovaca*, 20(4).

Paul, P. (2009). Predictors of work injury in underground mines—an application of a logistic regression model. *Mining Science and Technology (China)*, 19(3), 282-289.

Paul, P. S., & Maiti, J. (2007). The role of behavioral factors on safety management in underground mines. *Safety science*, 45(4), 449-471.

Pereira, E., Ahn, S., Han, S., & Abourizk, S. (2017). Identification and Association of High-Priority Safety Management System Factors and Accident Precursors for Proactive Safety Assessment and Control. *Journal of Management in Engineering*, 34(1), 04017041.

Sawacha, E., Naoum, S., & Fong, D. (1999). Factors affecting safety performance on construction sites. *International Journal of Project Management*, 17(5), 309-315.

Shapira, A., & Simcha, M. (2009). AHP-based weighting of factors affecting safety on construction sites with tower cranes. *Journal of construction engineering and management*, 135(4), 307-318.

Tam, C., & Fung IV, I. W. (1998). Effectiveness of safety management strategies on safety performance in Hong Kong. *Construction Management & Economics*, 16(1), 49-55.

- Törner, M., & Pousette, A. (2009). Safety in construction—a comprehensive description of the characteristics of high safety standards in construction work, from the combined perspective of supervisors and experienced workers. *Journal of safety research*, 40(6), 399-409.
- Wagner, H. (2006). *Risk evaluation and control in underground construction*. Paper presented at the International Symposium on Underground Excavation and Tunneling.
- Wang, Z., & Chen, C. (2017). Fuzzy comprehensive Bayesian network-based safety risk assessment for metro construction projects. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 70, 330-342.
- Watanabe, I., Ueno, S., Koga, M., Muramoto, K., Abe, T., & Goto, T. (1992). Safety and disaster prevention measures for underground space: an analysis of disaster cases. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 7(4), 317-324.
- Yu, Q., Ding, L., Zhou, C., & Luo, H. (2014). Analysis of factors influencing safety management for metro construction in China. *Accident Analysis & Prevention*, 68, 131-138.
- Zhang, L., Wu, X., Chen, Q., Skibniewski, M. J., & Hsu, S.-C. (2014). Towards a safety management approach for adjacent buildings in tunneling environments: Case study in China. *Building and Environment*, 75, 222-235.
- Zhou, Y., Ding, L., & Chen, L. (2013). Application of 4D visualization technology for safety management in metro construction. *Automation in Construction*, 34, 25-36.
- Zhou, Z., Goh, Y. M., & Li, Q. (2015). Overview and analysis of safety management studies in the construction industry. *Safety science*, 72, 337-350.

Abstract

In this study, the identification, ranking and evaluation of factors affecting safety in tunneling with a case study of a Tehran-Shomal Freeway-Lot1 have been presented. This assessment can be considered as providing solutions to the risks and damage in tunneling, which reduces the direct and indirect costs of short-term and long-term planning. In order to achieve the objectives of this study, the previous studies were first studied and the most important parameters affecting safety in tunneling were identified. Subsequently, questionnaires were designed to understand the importance of each of the parameters affecting safety in tunneling and questionnaire experts. Cronbach's alpha coefficient was used to validate the questionnaires, which showed good reliability for the questionnaires. Then, using Fuzzy Delphi Hierarchy Process analysis (FDAHP), weights and significance of each of the parameters affecting safety in tunneling were determined. Using the results of this method, a new classification system was presented. This system, called the Tunneling Safety Index (TSi), allocates a score of 10 to 100 in total to the tunnels. Then the safety assessment in tunneling is classified into five classes: very good, good, moderate, weak and very weak. After introducing a new classification system, in order to investigate the efficiency of the method, the information of two tunnel tunnels B_2 and AB_1 from the Tehran-Shomal freeway-Lot1 consists of tunnels 6 (double arches), 1-7 left and 1-7 right of AB_1 and The 9 left, 9 right, 11 double arches, 12 left and 12 right tunnels from the B_2 were collected. The tunnels were then compared with the classification system and compared with the general condition of the tunnels, which showed good comparisons.

Keywords: Safety, Factors Affecting Safety in Tunneling, Ranking, Fuzzy Delphi Hierarchy Process Analysis (FDAHP), Tunneling Safety Index (TSi), Tehran-Shomal Freeway-Lot1.



Shahrood University of Technology

Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics Engineering

MSc Thesis in Tunnels and underground spaces

**Identification, ranking and evaluation of factors affecting
safety in tunneling, Case Study: Tehran-Shomal Freeway-
Lot1**

By: Zohre Elikayee

Supervisors:

Dr Mohammad Ataei

Dr Morteza Javadi Estahbanati

Advisor:

Eng. Arbi Tahmasian

September 2018