

تحلیل فازی و مدیریت ریسک هجوم آب زیرزمینی در تونل راه امامزاده هاشم (ع) با رویکرد تحلیل عددی و *FMEA* در شرایط عدم قطعیت

زهیر صداقتی^۱، رضا میکائیل^{۲*}، عزالدین بخت‌آور^۳، مجتبی محمدنژاد^۴

۱- کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی معدن و مواد، دانشگاه صنعتی ارومیه

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی معدن و مواد، دانشگاه صنعتی ارومیه

۳- دانشیار، دانشکده مهندسی معدن و مواد، دانشگاه صنعتی ارومیه

۴- کارشناس ارشد مهندسی معدن، شرکت زم آسیا

(دریافت: اسفند ۱۳۹۴ پذیرش: تیر ۱۳۹۸)

چکیده

بدون تردید یکی از پیچیده‌ترین شرایط برای تونل‌سازی، حفاری در زیر سطح آب‌های زیرزمینی است. در مناطقی که ارتفاع سطح آب از تراز تونل زیاد باشد، امکان وقوع مخاطرات مختلفی وجود دارد. احتمال ورود آب با فشار بالا، تبدیل هجوم آب به جریان گل در مناطق سست، آسیب به کارکنان و تجهیزات، سخت شدن فعالیت در محیط کار و کاهش راندمان حفاری از جمله مهم‌ترین پیامدهای تونل‌سازی در زیر سطح ایستایی آب‌های زیرزمینی به شمار می‌رود. این مخاطرات می‌توانند هزینه‌های زیادی برای پروژه داشته باشند، به ویژه در روش حفاری مکانیزه که سرمایه‌گذاری بالای مالی نیاز دارد. پروژه قطعه دوم تونل راه امامزاده هاشم (ع) واقع در شمال شرق استان تهران، طولانی‌ترین تونل راه کشور است که طبق برنامه‌ریزی انجام شده، عملیات اجرایی آن به روش مکانیزه انجام خواهد شد. در این تحقیق، با مطالعه مشخصات مسیر، دبی آب ورودی به تونل با روش عددی و استفاده از نرم‌افزار *FLAC2D* محاسبه شده است. در ادامه با بررسی پروژه‌های مشابه در خارج از کشور و وضعیت آن‌ها در برخورد با پدیده هجوم آب، ریسک این مخاطره به صورت کلاسیک و با روش *FMEA* ارزیابی و مدیریت شده است. در ادامه به منظور افزایش دقت نتایج به دست آمده، تحلیل فازی بر مبنای روش *FMEA* انجام گرفته است. نتایج به دست آمده از تحلیل فازی و کلاسیک نشان می‌دهد که در ناحیه میانی مسیر تونل، به دلیل احتمال هجوم آب با فشار بالا همراه با تبدیل به جریان گل ریسک تونل‌سازی زیاد است. همچنین مقایسه نتایج تحلیل کلاسیک و فازی دقیق‌تر بودن فرآیند تحلیل فازی را به دلیل بهره‌گیری از نظرات تیم کارشناسی نشان می‌دهد.

کلیدواژه‌ها

تونل، ریسک، تحلیل فازی، هجوم آب

*عهده دار مکاتبات: reza.mikaeil@gmail.com

۱- مقدمه و سابقه موضوع تحقیق

ظهور نشانه‌های وجود آب در هنگام تونل‌سازی، برای عوامل اجرایی و طراحان به عنوان نشانه‌های هشدار دهنده به شمار می‌رود. کاهش مقاومت توده سنگ و احتمال ریزش همراه با فشار بالای آب، سخت شدن شرایط کاری و استهلاک تجهیزات از جمله مهم‌ترین پیامدهای تونل‌سازی در این شرایط هستند. این پیامدها می‌توانند موجب تأخیرهای پی در پی و افزایش هزینه‌های پروژه به ویژه در روش مکانیزه شوند. در همین راستا ارزیابی ریسک هجوم آب زیرزمینی از اهمیت زیادی برخوردار است. ریسک معیاری است که می‌تواند میزان پرخطر بودن مخاطرات محتمل را با روش‌های مختلف به صورت کمی یا کیفی مشخص کند. تاریخچه مدیریت ریسک به بعد از جنگ جهانی دوم بر می‌گردد، اما مدیریت ریسک به شکل امروزی از سال‌های ۱۹۵۶ و ۱۹۶۴ گسترش پیدا کرد [۱]. در صنعت تونل‌سازی گرچه در دهه‌های پایانی قرن بیستم به موضوع ریسک پرداخته شده است اما ورود جدی مدیریت ریسک به حوزه تونل‌سازی را می‌توان در سال ۲۰۰۴ با انتشار دستورالعمل مدیریت ریسک انجمن بین‌المللی تونل دانست [۲]. از این تاریخ تا کنون پژوهش‌های متعددی در خصوص ارزیابی ریسک در تونل‌سازی انجام شده که آب زیرزمینی و مسائل مرتبط با آن یکی از پارامترهای اصلی تحقیق بوده است.

شهریار و همکاران در سال ۲۰۰۸ با استفاده از روش‌های درخت تصمیم و ماتریس ریسک و با در نظر گرفتن پارامترهای ژئوتکنیکی از جمله آب زیرزمینی به انتخاب ماشین حفاری تمام مقطع مناسب برای تونل نوسود پرداخته‌اند [۳]. در سال ۲۰۱۰، موضوع انتخاب TBM مناسب برای تونل زاگرس توسط خادمی و همکاران، بر اساس پارامترهای ژئوتکنیکی مانند هجوم آب و با استفاده از نظریه فازی در روش تحلیل سلسله مراتبی مورد بررسی قرار گرفته است [۴]. ساندر^۱ و همکاران در سال ۲۰۱۲ به بررسی مخاطرات خسارت‌زا در طول ۳۰ کیلومتری تونل گاتهارد^۲ پرداخته‌اند. در این پژوهش هجوم آب زیرزمینی به داخل تونل که در برخی موارد دمای آن به ۴۸ درجه سانتی‌گراد می‌رسید، اصلی‌ترین دلیل توقف‌های حفاری در طول زمان اجرای پروژه عنوان شده است [۵]. در سال ۲۰۱۲ موضوع آنالیز ریسک متروی شهر پروتو توسط سوسا^۳ و همکاران با روش شبکه‌های بی‌زین بررسی شده است. احتمال برخورد با

شرایط زمین‌شناسی، سطح پی‌زومتری آب‌های زیرزمینی، احتمال وجود آسیب‌های سطح زمین، ترکیب گروه کلاس‌های زمین‌شناسی، سطح آسیب‌ها از جمله ویژگی‌هایی بوده‌اند که در این پژوهش مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند [۶]. جورادو^۴ و همکاران در سال ۲۰۱۲ به ارزیابی ریسک مخاطرات ساخت یک ایستگاه مترو با روش آنالیز درخت خطا پرداختند. در این تحقیق مشخص شد هجوم آب با فشار بالا دارای بیشترین میزان ریسک در بین مخاطرات محتمل است [۷].

در سال ۲۰۱۳ از روش ماتریس ریسک در پژوهش مرادی و همکاران و با در نظر گرفتن مسائلی نظیر آب زیرزمینی، هجوم گاز، حفرات کارستی استفاده شده است [۸]. لی^۵ و لی در سال ۲۰۱۴ طی مطالعاتی با عنوان «پژوهش روی سیستم‌های ارزیابی ریسک برای هجوم آب در طول ساخت تونل در ساختارهای کارستی» به بررسی ریسک هجوم آب با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی فازی در این تونل‌ها پرداخته‌اند [۹]. در سال ۲۰۱۵ از روش آنالیز درخت خطا و تحلیل سلسله مراتبی، برای ارزیابی ریسک تونل‌سازی مکانیزه در سه حوزه شرایط ژئوتکنیکی، TBM و مسائل مدیریت ساخت، در پژوهش چانگ و همکاران استفاده شده است [۱۰]. معراج و همکاران در سال ۲۰۱۵ با به کارگیری شبکه عصبی به ارزیابی ریسک نشست زمین در تونل‌سازی مکانیزه در محیط‌های شهری و با استفاده از روش FMEA فازی پرداخته‌اند [۱۱]. مطالعات انجام گرفته نشان می‌دهد که آب زیرزمینی همواره جزء مسائل اصلی در ارزیابی ریسک‌های ژئوتکنیکی بوده است. از دیگر نتایج می‌توان به کاربرد بیشتر روش‌های ماتریس ریسک و آنالیز درخت خطا در اکثر پژوهش‌ها اشاره کرد. در این تحقیق، تلاش بر این است تا با استفاده از روش‌های عددی، دبی آب ورودی به تونل قطعه دوم امامزاده هاشم (ع) محاسبه شود. در ادامه با بررسی وضعیت پروژه‌های مشابه در برخورد با پدیده هجوم آب، ریسک این مخاطره با استفاده از روش FMEA به صورت کلاسیک و فازی به طور مجزا، محاسبه خواهد شد.

۲- معرفی پروژه قطعه دوم تونل راه امامزاده هاشم (ع)

قطعه دوم تونل راه امامزاده هاشم (ع) به عنوان طولانی‌ترین تونل راه کشور، بخشی از طرح توسعه جاده‌ای

حدود ۱۲/۲۷ متر و شیب طولی تونل ۲/۵ درصد است. مطابق برنامه‌ریزی‌های انجام شده قرار است عملیات حفاری تونل به صورت مکانیزه و با استفاده از یک دستگاه حفاری تمام مقطع D.S.TBM انجام شود [۱۲]. مشخصات ژئوتکنیکی مسیر تونل قطعه دوم امامزاده هاشم (ع) در جدول ۱ ارائه شده است.

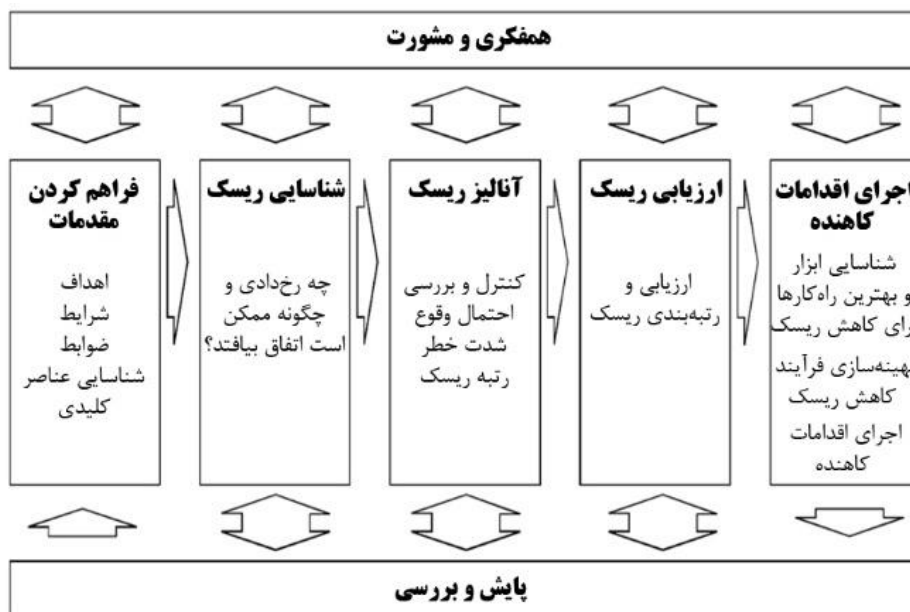
است که وظیفه افزایش ظرفیت حمل و نقل و کاهش حوادث جاده‌ای در محدوده حادثه خیز امامزاده هاشم (ع) را بر عهده دارد. طول تونل حدود ۳۲۰۰ متر و به لحاظ موقعیت مکانی در محدوده شمال شرقی استان تهران و در حد فاصل دره مشاء (در شمال) و دره جنوب شرقی ابعلی واقع شده است. این منطقه جزء نواحی کوهستانی رشته کوه البرز به حساب می‌آید. مقطع عرضی تونل به صورت دایروی با قطر حفاری

جدول ۱: مشخصات ژئوتکنیکی مسیر تونل قطعه دوم امامزاده هاشم (ع) [۱۲]

مقطع	لیتولوژی	متوسط ارتفاع سطح آب زیرزمینی (متر)	RMR	Q	تعداد دسته درزه
۹+۴۸۰-۹+۳۶۰	ماسه‌سنگ و سنگ‌آهک	۳۵	۱۹	۰/۰۲	-
۸+۷۰۰-۹+۳۶۰	مصالح ولکانیکی	۱۲۵	۶۳	۹	۳
۸+۲۸۰-۸+۷۰۰	ماسه‌سنگ	۲۶۵	۴۳	۰/۴۹	۵
۷+۸۸۰-۸+۰۴۰	سنگ‌آهک	۲۷۰	۵۵	۱/۹۵	-
۶+۶۸۰-۷+۸۸۰	دولومیت و سنگ‌آهک تیره	۱۹۵	۵۹	۸	۵
۶+۴۸۰-۶+۶۸۰	دولومیت و سنگ‌آهک	۷۰	۴۴	۲/۵۲	۵
۶+۲۴۰-۶+۴۰۰	شیل و ماسه‌سنگ	۲۵	۵۰	۲	-

استرالیایی AS/NZS 4360 است، مشاهده می‌شود که این چرخه، ریسک و اثرات آن را بر روی مجموعه بررسی کرده و برای کاهش آن راهکارهای ممکن را ارائه می‌دهد. این فرآیند تا زمانی که ریسک به حد قابل قبول خود برسد ادامه پیدا می‌کند.

هدف فرآیند مدیریت ریسک، شناسایی و مدیریت ریسک‌های قابل توجه است. در بیشتر پروژه‌ها مدیریت ریسک با سایر مراحل همپوشانی دارد و بیشتر مراحل تحت این فرآیند اجرا و عملیاتی می‌شوند [۱۳]. با توجه به شکل ۱ که بیانگر مراحل مدیریت ریسک مطابق با استاندارد



شکل ۱: مراحل مدیریت ریسک مطابق با استاندارد AS/NZS 4360 [۱۳، ۱۴]

احتمال هجوم آب زیرزمینی در آن وجود دارد. در ادامه برای آنالیز ریسک روش FMEA مورد استفاده قرار گرفته است

در این پژوهش، مطابق با استاندارد AS/NZS 4360، هدف تونلسازی مکانیزه در یک محیط سخت است که

می‌شوند [۱۵]. در این رویکرد با بررسی احتمال وقوع مخاطره و شدت آن و همچنین بررسی میزان احتمال کشف خطر به ارزیابی ریسک پرداخته می‌شود. مطابق با این رویکرد، عدد اولویت ریسک از رابطه (۱) به دست می‌آید.

$$RPN = P \times C \times R \quad (1)$$

که در آن، RPN، عدد اولویت ریسک؛ P، نرخ احتمال وقوع مخاطره؛ C، نرخ شدت پی‌آمد مخاطره؛ R، نرخ احتمال کشف خطر است.

به‌منظور محاسبه پارامترهای عدد ریسک از جدول‌های مختلفی استفاده می‌شود که با استفاده از آنها می‌توان ریسک منابع خطر و پی‌آمدهای مربوط به آنها را محاسبه نمود. با توجه به کلی بودن جدول‌های مطرح شده در منابع مرتبط با روش FMEA و تفاوت‌هایی که در مخاطرات پروژه‌های تونلسازی با سایر موضوعات وجود دارد، برای رسیدن به یک معیار واحد، جدولی مطابق جدول ۲ برای ارزیابی ریسک‌های ژئوتکنیکی در تونلسازی مکانیزه و به خصوص پروژه قطعه دوم تونل راه امامزاده هاشم ارائه شده است.

جدول ۲: مقادیر مربوط به احتمال وقوع، شدت خطر و نرخ احتمال کشف خطر در پروژه دوم تونل امامزاده هاشم (ع)

۴۰۰	۲۰۰	۱۲۰	۴۰	۲۰
۲۰۰	۱۰۰	۷۵	۲۰	۱۰
۸۰	۴۰	۲۴	۸	۴
۴۰	۲۰	۱۲	۴	۲
۲۰	۱۰	۶	۲	۰/۲۵
عدد اولویت ریسک = احتمال وقوع × شدت خطر × نرخ احتمال کشف خطر				
نرخ احتمال کشف خطر		شدت خطر		احتمال وقوع
<p>۴: غیر قابل کشف: با روش‌های علمی قابل شناسایی نیست و به‌صورت ناگهانی رخ می‌دهد</p> <p>۳: متوسط: با روش‌های علمی قابل شناسایی نیست ولی به‌صورت ناگهانی رخ نمی‌دهد</p> <p>۲: زیاد: با روش‌های علمی قابل شناسایی است و به‌صورت ناگهانی رخ می‌دهد</p> <p>۱: خیلی زیاد: با روش‌های علمی قابل شناسایی است و به‌صورت ناگهانی رخ نمی‌دهد.</p>		<p>۱۰: پرخطر: اثر بیشتر از ۲/۹٪ روی مبلغ قرارداد</p> <p>۵: زیاد: تأثیر روی مبلغ قرارداد بین ۰/۹۶ تا ۲/۹٪</p> <p>۳: متوسط: تأثیر روی مبلغ قرارداد بین ۰/۴۳ تا ۰/۹۶٪</p> <p>۱: کم: تأثیر روی مبلغ قرارداد بین ۰/۲۱ تا ۰/۴۳٪</p> <p>۰/۵: قابل چشم‌پوشی: اثر کمتر از ۰/۰۳٪ روی مبلغ قرارداد</p>		<p>۱۰: مکرر: به تناوب تکرار می‌شود.</p> <p>۵: گاه و بی‌گاه: ممکن است یک بار اتفاق بیفتد.</p> <p>۲: تصادفی: رویداد آن در این پروژه مورد انتظار نیست اما در دیگر پروژه‌ها گاهی اوقات رخ داده است.</p> <p>۱: به ندرت: رویداد آن در این پروژه قابل انتظار نیست و در دیگر پروژه‌ها نیز به ندرت رخ داده است.</p> <p>۰/۵: بعید: احتمال وقوع آن نزدیک صفر است.</p>

معادلات دیفرانسیل با مقادیر مرزی است. در روش تفاضل محدود هر مشتق در معادلات حاکم مستقیماً توسط یک عبارت جبری که تابع متغیرهای میدان (تنش و تغییر مکان در نقاط دلخواه در فضا) است، جایگزین می‌شود. FLAC

که با توجه به نظر کارشناسان پروژه و موارد معمول در پروژه‌های مشابه، حد قابل قبول برای عدد ریسک انتخاب می‌شود. با توجه به نتایج به دست آمده از آنالیز ریسک، در صورت غیر قابل قبول بودن عدد ریسک در برخی مقاطع، راه‌کارهای ممکن برای کاهش ریسک انتخاب شده و برای بررسی تأثیر این اقدامات، دوباره ارزیابی ریسک انجام می‌شود. با توجه به اینکه در طی چند سال اخیر در کشور، پیمانکار اجرایی مسئولیت ساخت پروژه را بر عهده می‌گیرد، در این پژوهش مسئولیت کامل ریسک بر عهده پیمانکار در نظر گرفته شده است.

۳-۱- ارزیابی ریسک هجوم آب با رویکرد FMEA

در این پژوهش، برای ارزیابی ریسک از رویکرد FMEA استفاده شده است. استانداردهای نظامی ایالات متحده - mil-1629 p با عنوان (روش آنالیز عیب، تأثیرات مربوط و میزان اهمیت آن) در ۱۹۴۹ انتشار یافت. در قالب این استاندارد خطاها یا اشکالات پیش آمده به لحاظ تأثیرگذاری آن‌ها در هدف نهایی و میزان ایمنی، کارکنان و تجهیزات طبقه‌بندی

جدول ۲: مقادیر مربوط به احتمال وقوع، شدت خطر و نرخ احتمال کشف خطر در پروژه دوم تونل امامزاده هاشم (ع)

در این پژوهش، به منظور برآورد احتمال وقوع هجوم آب زیرزمینی، از روش عددی تفاضل محدود (مدلسازی عددی با استفاده از نرم‌افزار FLAC 2D) استفاده شده است. روش تفاضل محدود یکی از قدیمی‌ترین روش‌های حل دسته

به توقف‌های رخ داده در پروژه‌های مشابه هزینه دوره توقف برآورد شده و با محاسبه درصد آن نسبت به مبلغ کل قرارداد، می‌توان نرخ شدت خطر را تعیین کرد. به منظور محاسبه هزینه توقف حفاری، پارامترهای هزینه نیروی انسانی، مواد مصرفی TBM، قیمت خرید TBM، ابزارآلات و خدمات فنی در طول دوره توقف استفاده شده است. با توجه به اینکه هزینه‌های یاد شده مربوط به سال ۱۳۹۰ است، با در نظر گرفتن نرخ تورم در سال‌های ۹۰ تا ۹۳ و همچنین نرخ تورم پیش‌بینی شده برای سال ۹۴ هزینه هر روز توقف برای سال ۱۳۹۴ حدود ۹۵۴ میلیون ریال، معادل حدود ۳۰ هزار دلار به دست آمده است. به منظور مقایسه نتایج تحلیل عددی در قطعه دوم تونل امامزاده هاشم (ع) با پروژه‌های مشابه، اطلاعات ۱۷ تونل در محیط‌های سخت که با دستگاه TBM حفاری شده‌اند مورد مطالعه قرار گرفته است. اکثر این پروژه‌ها با پدیده هجوم آب مواجه شده‌اند و به همین دلیل عملیات حفاری در آنها متوقف شده است. مشخصات کلی این پروژه‌ها در جدول ۳ ارائه شده است.

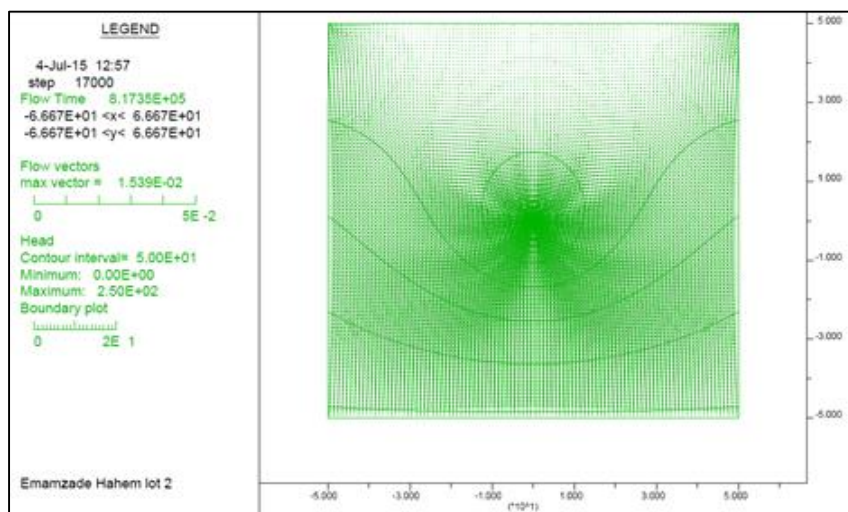
جدول ۳: مشخصات کلی پروژه‌هایی که با هجوم آب مواجه شده‌اند

نام تونل	نوع تونل	قطر حفاری (متر)	نوع ماشین حفاری	کشور
۱ جین پینگ ^۶	انتقال آب	۱۲/۴۳	سپر باز	چین [۱۶]
۲ اس ال بی سی ^۷	انتقال آب	۱۰	سپر تلسکوپی	هند [۱۷]
۳ گاتهارد	ریلی	۹/۳۳	سپر باز	سوئیس [۱۸-۲۷]
۴ گواداراما ^۸	راه	۹/۵۶	سپر تلسکوپی	اسپانیا [۲۶-۳۱]
۵ آبدل اجیس ^۹	راه	۱۰/۲	سپر تلسکوپی	اسپانیا [۳۲-۳۷]
۶ پاچارس ^{۱۰}	راه	۱۰/۱۲	سپر تلسکوپی	اسپانیا [۲۶، ۲۹، ۳۳، ۳۸، ۳۹]
۷ فراس نادلو ^{۱۱}	راه	۱۱/۸	سپر منفرد	ایتالیا [۳۳، ۳۷، ۴۰، ۴۱]
۸ سن پلگرینو ^{۱۲}	راه	۸	سپر تلسکوپی	ایتالیا [۴۲]
۹ لوچبرگ ^{۱۳}	ریلی	۹/۴۳	سپر باز	سوئیس [۴۳]
۱۰ هیمالیا ^{۱۴}	راه	۱۴/۴	سپر تلسکوپی	هند، نپال [۴۴، ۴۵]
۱۱ کین لینگ ^{۱۵}	ریلی	۱۰/۲	سپر باز	چین [۴۶]
۱۲ مونت راسلین ^{۱۶}	راه	بیشتر از ۱۰ متر	-	سوئیس [۴۷]
۱۳ بوزبرگ ^{۱۷}	راه	۱۱/۸۷	سپر منفرد	سوئیس [۴۷]
۱۴ کارگی کیزیلمارک ^{۱۸}	انحراف آب	۹/۸۴	سپر تلسکوپی	ترکیه [۴۸]
۱۵ هنگ کنگ ^{۱۹}	ریلی	۸/۸۵	سپر تلسکوپی	چین [۴۹، ۵۰]
۱۶ موتیر ^{۲۰}		۱۱/۷	سپر منفرد	سوئیس [۵۱]
۱۷ پینگ‌لین ^{۲۱}	انتقال آب	۱۱/۷۴	سپر منفرد	تایوان [۴۱؛ ۵۲؛ ۵۳؛ ۵۴]

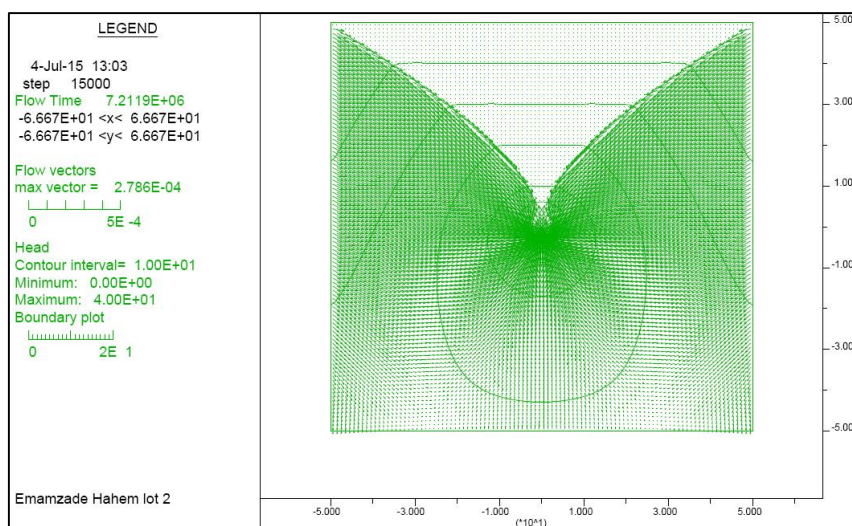
یک نرم‌افزار تفاضل محدود صریح است و قادر به مدل‌سازی رفتار خاک، سنگ یا دیگر مصالحی است که وقتی به حد تسلیم برسند جریان پلاستیک پیدا می‌کنند. مصالح به وسیله المان‌ها یا زون‌هایی که یک شبکه را تشکیل می‌دهند نمایش داده می‌شوند و نهایتاً کاربر با استفاده از این شبکه، شکل سازه مورد نظر را که باید مدل شود، ایجاد می‌نماید. هر المان مطابق قانون تنش-کرنش خطی یا غیرخطی از قبل تعریف شده، در عکس‌العمل با بارها یا مرزهای گیردار، رفتار می‌کند. همچنین این نرم‌افزار قادر است تا شرایط مختلف جریان سیال از قبیل اشباع یا غیراشباع و محصور یا غیرمحصور سفره را در حالت دوبعدی با تلفیق قانون داری و معادله پیوستگی در پروژه‌های مختلف ژئوتکنیکی، هیدروژئولوژیکی، زمین‌شناسی و معدن تحلیل نماید. از جمله قابلیت‌های دیگر این نرم‌افزار طراحی مسائل هیدروژئولوژی تونل با مقاطع هندسی مختلف و مدل‌سازی لایه‌های مختلف زمین‌شناسی با خصوصیات هیدرولیکی متفاوت است. بدین ترتیب با استفاده از تحلیل عددی می‌توان وضعیت دبی آب ورودی را مشاهده و آن را با پروژه‌های مشابه مقایسه کرد. در این راستا با توجه

عددی برای مقاطع مختلف مسیر تونل قطعه دوم امامزاده هاشم (ع) ارائه شده است

در شکل‌های ۲ و ۳ تحلیل عددی دبی آب ورودی به داخل تونل برای مقاطع مختلف مسیر تونل نشان داده شده است. در جدول (۴) میزان دبی آب ورودی حاصل از تحلیل



شکل ۲: تحلیل عددی آب ورودی به داخل تونل در محدوده ۷+۸۸۰ مسیر قطعه دوم امامزاده هاشم (ع) با استفاده از نرم‌افزار FLAC2D



شکل ۳: تحلیل عددی آب ورودی به داخل تونل در محدوده ۶+۶۰۰ مسیر قطعه دوم امامزاده هاشم (ع) با استفاده از نرم‌افزار FLAC2D

آورد. در این راستا ارزیابی ریسک هجوم آب می‌تواند آگاهی کارکنان را نسبت به شرایط پیش رو افزایش دهد. نتایج حاصل از ارزیابی ریسک هجوم آب در جدول ۵ ارائه شده است. با توجه به نتایج به دست آمده از تحلیل عددی، می‌توان نتیجه گرفت پدیده هجوم آب و پیامدهای ناشی از آن در مناطق ابتدایی و انتهایی تونل رخ نخواهد داد. بر همین اساس می‌توان احتمال وقوع را برای آن‌ها، بعید در نظر گرفت. در مقطع ۷+۸۴۰ گرچه دبی آب تخمین زده شده، هجوم آب محسوب نمی‌شود اما در برخی پروژه‌های مشابه منجر به توقف TBM شده [۱۹]، برای همین احتمال وقوع آن، تصادفی در نظر گرفته شده است. در خصوص شدت خطر نیز در دبی‌های مشابه برای مقاطع ۷+۸۸۰ و ۸+۳۶۰ توقف‌هایی بین ۲۵ تا ۳۴ روز ثبت شده که با در نظر گرفتن

جدول ۴: دبی آب ورودی محاسبه شده به داخل تونل قطعه دوم امامزاده هاشم (ع) بر اساس تحلیل عددی

مقطع	دبی آب ورودی به تونل (Lit/s)
۹+۴۸۰	۰/۰۴۵
۸+۸۸۰	۲/۶
۸+۳۶۰	۳۷۶
۷+۸۸۰	۵۵۰
۷+۸۴۰	۴۴/۷

نتایج تحلیل عددی نشان می‌دهد که مناطق میانی تونل مورد مطالعه پتانسیل هجوم آب بیشتری نسبت به سایر نواحی دارد. دبی آب ورودی بالا و فاصله زیاد این ناحیه نسبت به ورودی تونل و همچنین وجود مناطق گسله در اطراف آن می‌تواند مشکلات متعددی را برای عملیات حفاری به وجود

آب برای مقاطع مختلف قطعه دوم تونل راه امامزاده هاشم (ع) در جدول ۶ نشان داده شده است.

جدول ۶: ارزیابی ریسک باقیمانده هجوم آب در قطعه دوم تونل

راه امامزاده هاشم (ع)

مقطع	احتمال وقوع	شدت خطر	نرخ احتمال کشف خطر	عدد ریسک
۹+۴۸۰	۰/۵	۰/۵	۲	۰/۵
۸+۸۸۰	۰/۵	۰/۵	۲	۰/۵
۸+۳۶۰	۰/۵	۵	۲	۵
۷+۸۸۰	۰/۵	۵	۲	۵
۷+۸۴۰	۰/۵	۱	۲	۱
۶+۶۰۰	۰/۵	۰/۵	۲	۰/۵
۶+۳۴۰	۰/۵	۰/۵	۲	۰/۵

نتایج ارزیابی ریسک باقیمانده نشان می‌دهد که با اجرای اقدامات کاهنده، کاهش چشمگیری در عدد ریسک مناطق پر خطر مشاهده می‌شود. به طوری که در تمامی مقاطع احتمال وقوع به حداقل ممکن رسیده است. نکته قابل اشاره یکسان بودن مقدار شدت خطر برای مقاطع ۸+۳۶۰ و ۷+۸۸۰ است. باید اشاره کرد که این مسئله به دلیل طول زیاد و حدود ۵۳۰ متری ناحیه میانی تونل است. در ارزیابی ابتدایی تنها مدت زمان توقف عملیات در صورت بروز پدیده هجوم آب در نظر گرفته شده که اگر به این مسئله زمان لازم برای راه‌اندازی دوباره TBM و ادامه حفاری را اضافه کنیم، هزینه حفاری بیشتر می‌شود. این موضوع در میزان احتمال وقوع در نظر گرفته شده که باعث افزایش عدد ریسک ابتدایی شده است. در ارزیابی ریسک باقیمانده، به دلیل اجرای اقدامات کاهنده هجوم آب رخ نخواهد داد، اما به دلیل کاهش راندمان حفاری و طول زیاد ناحیه آب‌دار زمان لازم برای حفاری این منطقه نسبت به شرایط عادی افزایش پیدا می‌کند. مطابق با محاسبات انجام شده، هزینه این تفاوت زمانی با هزینه توقف TBM در این منطقه برابری می‌کند. در این راستا به دلیل اینکه در طول مدت حفاری TBM توقف ناشی از هجوم آب ندارد، کاهش قابل توجهی در ریسک باقیمانده نسبت به ریسک ابتدایی مشاهده می‌شود.

هزینه دوره توقف برای تونل دوم امامزاده هاشم (ع) می‌تواند میزان شدت خطر را برای این مقاطع، زیاد منظور کرد. در نهایت با توجه به قابل پیش‌بینی بودن دبی آب ورودی به تونل و ناگهانی رخ دادن پدیده هجوم آب، مقدار زیاد، برای نرخ احتمال کشف خطر در تمامی مقاطع منظور شده است. ارزیابی ریسک هجوم آب در تونل قطعه دوم امامزاده هاشم (ع) نشان می‌دهد ریسک این پدیده در مقاطع ۷+۸۸۰ و ۸+۳۶۰ که دبی آب ورودی به صورت چشمگیری افزایش پیدا می‌کند در محدوده پرخطر قرار می‌گیرد. برای همین به منظور کاهش ریسک باید اقداماتی که از ورود آب به تونل جلوگیری می‌کند بررسی و قبل از حفاری مناطق پر خطر اجرا شود.

جدول ۵: ارزیابی ریسک هجوم آب زیرزمینی در قطعه دوم

تونل راه امامزاده هاشم (ع)

مقطع	احتمال وقوع	شدت خطر	نرخ احتمال کشف خطر	عدد ریسک
۹+۴۸۰	۰/۵	۰/۵	۲	۰/۵
۸+۸۸۰	۰/۵	۰/۵	۲	۰/۵
۸+۳۶۰	۱۰	۵	۲	۱۰۰
۷+۸۸۰	۱۰	۵	۲	۱۰۰
۷+۸۴۰	۲	۱	۲	۴
۶+۶۰۰	۰/۵	۰/۵	۲	۰/۵
۶+۳۴۰	۰/۵	۰/۵	۲	۰/۵

۲-۳- ارزیابی ریسک باقیمانده هجوم آب در قطعه

دوم تونل امامزاده هاشم (ع)

مطابق با دستورالعمل انجمن بین‌المللی تونل، فرایند مدیریت ریسک علاوه بر ارزیابی مخاطرات شامل اجرای اقدامات کاهنده و ارزیابی دوباره ریسک بعد از مرحله است [۲]. در این راستا می‌توان به اقدامات کاهنده‌ای نظیر کاهش سطح ایستابی با انجام عملیات زهکشی در بخش‌های پائین دست، پیش تزریق در سینه کار در حین انجام عملیات حفاری، انجماد زمین قبل از انجام حفاری اشاره کرد [۴]. با بررسی وضعیت پروژه‌های مشابه میزان پیش‌روی TBM در این شرایط بین ۳-۵ متر در روز بود است. بر همین اساس با در نظر گرفتن نرخ پیش‌روی متوسط ۱۲ متر در روز در شرایط عادی تنها، هزینه تفاوت زمان حفاری در شرایط عادی با شرایط اجرای اقدامات کاهنده در نظر گرفته می‌شود. با توجه به مطالب گفته شده، ارزیابی ریسک باقیمانده هجوم

۳- تحلیل فازی ریسک هجوم آب در قطعه دوم
تونل راه امامزاده هاشم (ع)

۳-۱- نظریه فازی

$$\tilde{A} = \bigcup_{\alpha} \alpha A_{\alpha}, \quad 0 < \alpha \leq 1$$

$$A_{\alpha} = \{x \in X \mid \mu_{\tilde{A}}(x) \geq \alpha\} = [\min\{x \in X \mid \mu_{\tilde{A}}(x) \geq \alpha\}, \max\{x \in X \mid \mu_{\tilde{A}}(x) \geq \alpha\}] \quad (۳)$$

$$A_{\alpha}^L = \min\{x \in X \mid \mu_{\tilde{A}}(x) \geq \alpha\}$$

$$A_{\alpha}^U = \max\{x \in X \mid \mu_{\tilde{A}}(x) \geq \alpha\}$$

α : سطح مورد نظر در تحلیل فازی

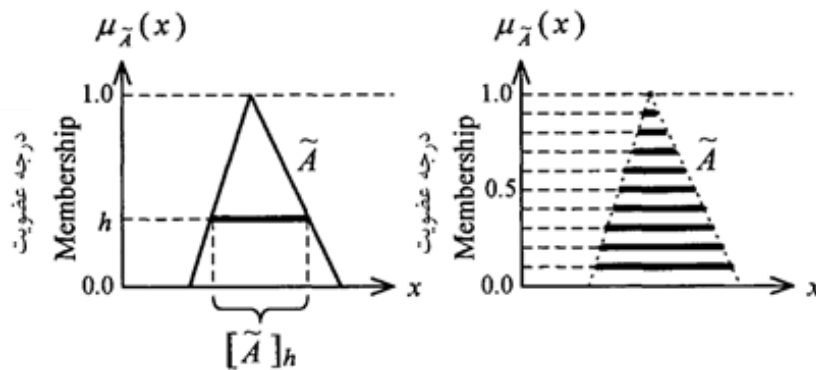
$\mu_{\tilde{A}}$: درجه عضویت عدد فازی در سطح α مورد نظر

A_{α}^L : حد پایین عدد فازی در سطح α

A_{α}^U : حد بالای عدد فازی در سطح α

نمونه‌ای از برش α در شکل ۴ نشان داده شده است.

تئوری مجموعه‌های فازی اولین بار توسط پروفیسور لطفعلی عسگرزاده، استاد ایرانی‌الاصل دانشگاه برکلی کالیفرنیا در سال ۱۹۶۵ در مقاله‌ای با عنوان «مجموعه‌های فازی» مطرح شد. برای نشان دادن مجموعه‌های فازی می‌توان آن‌ها را به صورت توابع ریاضی حاصل از نمودارهای مثلثی، ذوزنقه‌ای یا نمایی بیان کرد. مطابق با نظریه عسگرزاده، مجموعه‌های فازی را می‌توان به صورت رابطه (۳) نیز نشان داد که اصطلاحاً برش α نامیده می‌شود [۵۵].

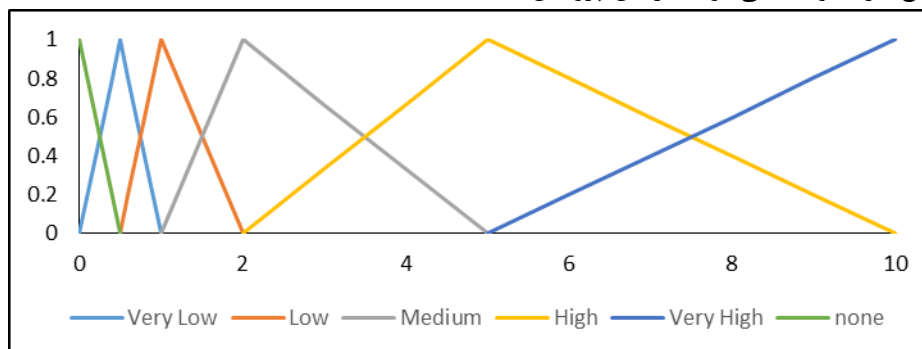


شکل ۴: نشان داده مجموعه فازی A به صورت برش α [۵۶]

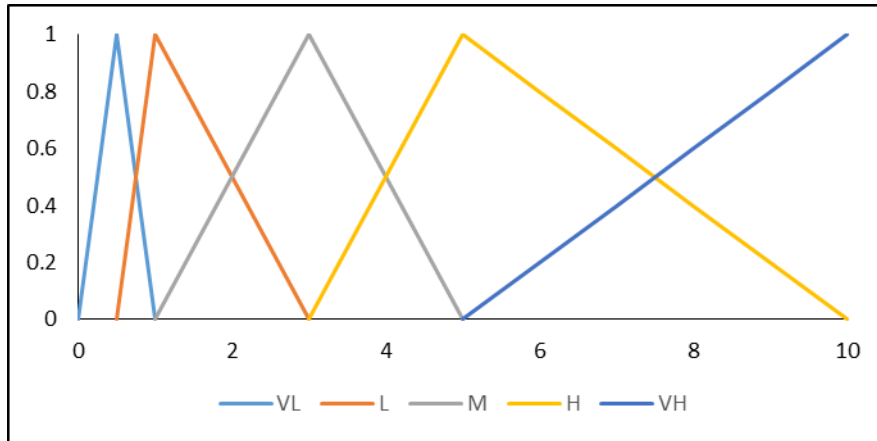
با در نظر گرفتن سادگی محاسبات و کاربرد بیشتر، از توابع فازی مثلثی استفاده شده است. به همین منظور برای ارزیابی ریسک تمامی مخاطرات ژئوتکنیکی در قطعه دوم تونل امامزاده هاشم (ع) توابعی مطابق با شکل‌های ۵ تا ۷ تهیه و ارائه شده است.

۳-۲- مدیریت ریسک فازی هجوم آب در قطعه دوم تونل
امامزاده هاشم (ع)

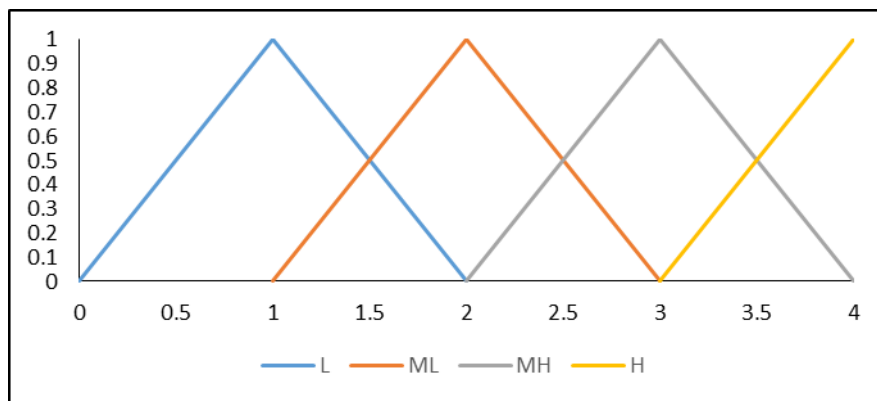
در تحلیل فازی ارزیابی ریسک به روش FMEA ابتدا سه پارامتر احتمال وقوع، شدت خطر و نرخ احتمال کشف خطر به صورت توابع فازی نوشته می‌شوند. در این پژوهش



شکل ۵: نمایش فازی احتمال وقوع در ارزیابی ریسک‌های ژئوتکنیکی قطعه دوم تونل امامزاده هاشم (ع)

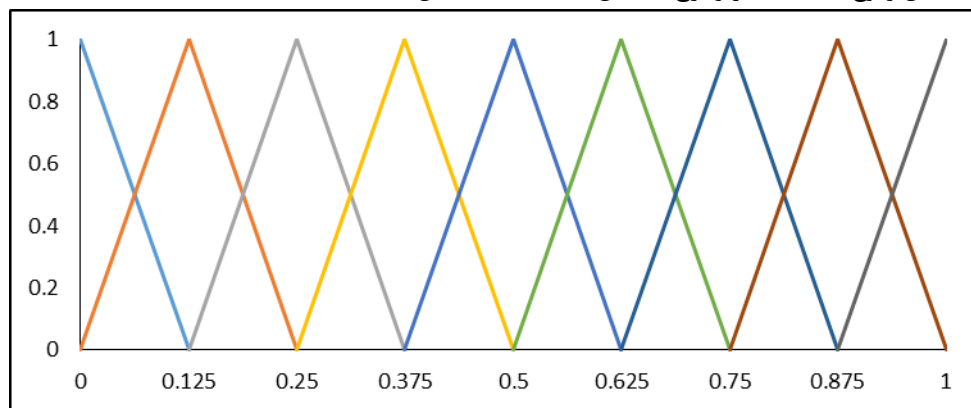


شکل ۶: نمایش فازی شدت خطر در ارزیابی ریسک‌های ژئوتکنیکی قطعه دوم تونل امامزاده هاشم (ع)



شکل ۷: نمایش فازی نرخ احتمال کشف خطر در ارزیابی ریسک‌های ژئوتکنیکی قطعه دوم تونل امامزاده هاشم (ع)

در روش FMEA فازی برای دقت بیشتر نتایج، به هر یک از پارامترهای احتمال وقوع، شدت خطر و نرخ احتمال کشف خطر وزن و درجه تأثیری اختصاص پیدا کرده که در شکل ۸ نشان داده شده است.



شکل ۸: نمایش فازی وزن پارامترهای محاسبه ریسک

$$\tilde{R}_i^S = \sum_{j=1}^m h_j \tilde{R}_{ij}^S = \left(\sum_{j=1}^m h_j R_{ijL}^S, \sum_{j=1}^m h_j R_{ijM}^S, \sum_{j=1}^m h_j R_{ijU}^S \right), \quad (5)$$

$i = 1, \dots, n$

$$\tilde{R}_i^D = \sum_{j=1}^m h_j \tilde{R}_{ij}^D = \left(\sum_{j=1}^m h_j R_{ijL}^D, \sum_{j=1}^m h_j R_{ijM}^D, \sum_{j=1}^m h_j R_{ijU}^D \right), \quad (6)$$

$i = 1, \dots, n$

$$\tilde{w}^O = \sum_{j=1}^m h_j \tilde{w}_j^O = \left(\sum_{j=1}^m h_j w_{jL}^O, \sum_{j=1}^m h_j w_{jM}^O, \sum_{j=1}^m h_j w_{jU}^O \right), \quad (7)$$

به منظور تحلیل فازی ریسک‌های ژئوتکنیکی ابتدا باید برای هر α مقادیر فازی مرتبط با احتمال وقوع، شدت خطر، نرخ احتمال کشف خطر مطابق رابطه (۳) و به صورت رابطه‌های (۴) تا (۹) محاسبه شوند [۵۷].

$$\tilde{R}_i^O = \sum_{j=1}^m h_j \tilde{R}_{ij}^O = \left(\sum_{j=1}^m h_j R_{ijL}^O, \sum_{j=1}^m h_j R_{ijM}^O, \sum_{j=1}^m h_j R_{ijU}^O \right), \quad (4)$$

$i = 1, \dots, n$

m : تعداد تیم متخصص فازی
 O, S, D : به ترتیب احتمال وقوع، شدت خطر و نرخ احتمال کشف خطر
 h_j : میزان اهمیت هر تیم متخصص فازی به صورتی که

$$\sum_{j=1}^m h_j = 1$$

در این پژوهش، با توجه به اینکه تنها از یک تیم متخصص فازی استفاده شده است مقادیر m و h برابر ۱ در نظر گرفته شده است. با توجه به حجم بودن محاسبات، تحلیل فازی ریسک هجوم آب به تونل در مقطع ۸+۳۶۰ به صورت نمونه ارائه شده و مقادیر فازی آن برای $\alpha = 0.1$ در جدول ۷ نشان داده شده است.

جدول ۷: مقادیر فازی پارامترهای رویکرد FMEA برای $\alpha = 0.1$ در مقطع ۸+۳۶۰

مقادیر فازی نرخ احتمال کشف خطر			مقادیر فازی شدت خطر			مقادیر فازی احتمال وقوع		
$(R^D)_\alpha^L$	$(R^D)_\alpha^M$	$(R^D)_\alpha^U$	$(R^S)_\alpha^L$	$(R^S)_\alpha^M$	$(R^S)_\alpha^U$	$(R^O)_\alpha^L$	$(R^O)_\alpha^M$	$(R^O)_\alpha^U$
۱	۲	۳	۳	۶/۵	۱۰	۵/۵	۷/۷۵	۱۰

در α مشخص
 $(w^S)_\alpha^L$ و $(w^S)_\alpha^U$: به ترتیب حد بالا و پایین وزن شدت خطر
 $(w^D)_\alpha^L$ و $(w^D)_\alpha^U$: به ترتیب حد بالا و پایین وزن نرخ احتمال کشف خطر در α مشخص
 $(R_i^O)_\alpha^L$ و $(R_i^O)_\alpha^U$: به ترتیب حد بالا و پایین احتمال وقوع در α مشخص
 $(R_i^S)_\alpha^L$ و $(R_i^S)_\alpha^U$: به ترتیب حد بالا و پایین شدت خطر در α مشخص
 $(R_i^D)_\alpha^L$ و $(R_i^D)_\alpha^U$: به ترتیب حد بالا و پایین وزن نرخ احتمال کشف خطر در α مشخص
 در رابطه‌های (۱۰) و (۱۱) مقدار Z از رابطه (۱۴) به دست می‌آید [۵۷].

$$Z = \frac{1}{w^O + w^S + w^D} \quad (14)$$

با بررسی سطح α های متفاوت، مقادیر مختلف عدد اولویت ریسک فازی مطابق با رابطه (۱۵) به دست می‌آید که برای مقطع ۸+۳۶۰ در جدول ۸ و شکل‌های ۹ و ۱۰ نمایش داده شده است.

$$FRPN_\alpha = \bigcup_{\alpha} \alpha \cdot [(FRPN_\alpha)_\alpha^L, (FRPN_\alpha)_\alpha^U], \quad 0 < \alpha \leq 1. \quad (15)$$

$$\tilde{w}^S = \sum_{j=1}^m h_j \tilde{w}_j^S = \left(\sum_{j=1}^m h_j w_{jL}^S, \sum_{j=1}^m h_j w_{jM}^S, \sum_{j=1}^m h_j w_{jU}^S \right), \quad (8)$$

$$\tilde{w}^D = \sum_{j=1}^m h_j \tilde{w}_j^D = \left(\sum_{j=1}^m h_j w_{jL}^D, \sum_{j=1}^m h_j w_{jM}^D, \sum_{j=1}^m h_j w_{jU}^D \right), \quad (9)$$

که
 $\tilde{R}_i^D, \tilde{R}_i^S, \tilde{R}_i^O$: به ترتیب اعداد فازی احتمال وقوع خطر، شدت خطر و نرخ احتمال کشف خطر برای سطح α مورد نظر
 $\tilde{w}^D, \tilde{w}^S, \tilde{w}^O$: به ترتیب اعداد فازی وزن‌های احتمال وقوع خطر، شدت خطر و نرخ احتمال کشف خطر برای سطح α مورد نظر
 n : تعداد حالات شکست

برای تعیین FRPN از یک مدل برنامه‌ریزی خطی مطابق رابطه‌های (۱۰) تا (۱۳) به ترتیب برای حد بالا و پایین FRPN و با استفاده از قابلیت solver در نرم‌افزار Excel بهره‌گیری شده است [۵۷].

$$\begin{aligned} \text{Min } z_1 &= u_1 \ln(R_i^O)_\alpha^L + u_2 \ln(R_i^S)_\alpha^L + u_3 \ln(R_i^D)_\alpha^L \\ \text{s.t. } & u_1 + u_2 + u_3 = 1, \\ & (w^O)_\alpha^L \cdot z \leq u_1 \leq (w^O)_\alpha^U \cdot z \\ & (w^S)_\alpha^L \cdot z \leq u_2 \leq (w^S)_\alpha^U \cdot z \\ & (w^D)_\alpha^L \cdot z \leq u_3 \leq (w^D)_\alpha^U \cdot z \\ & z \geq 0, \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \text{Max } z_2 &= u_1 \ln(R_i^O)_\alpha^U + u_2 \ln(R_i^S)_\alpha^U + u_3 \ln(R_i^D)_\alpha^U \\ \text{s.t. } & u_1 + u_2 + u_3 = 1, \\ & (w^O)_\alpha^L \cdot z \leq u_1 \leq (w^O)_\alpha^U \cdot z \\ & (w^S)_\alpha^L \cdot z \leq u_2 \leq (w^S)_\alpha^U \cdot z \\ & (w^D)_\alpha^L \cdot z \leq u_3 \leq (w^D)_\alpha^U \cdot z \\ & z \geq 0, \end{aligned} \quad (11)$$

$$(FRPN_i)_\alpha^L = \exp(z_1) \quad (12)$$

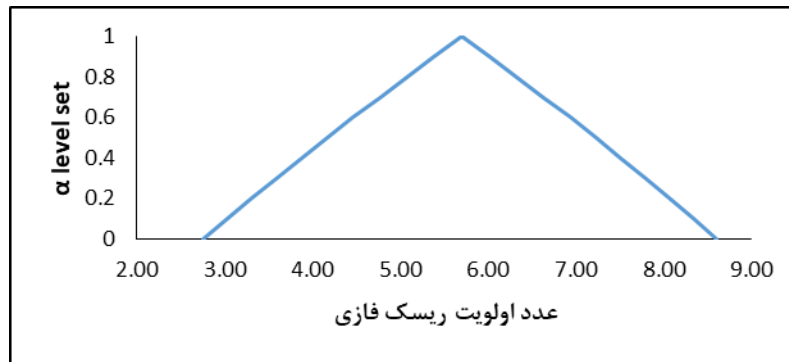
$$(FRPN_i)_\alpha^U = \exp(z_2) \quad (13)$$

که در رابطه‌های (۱۰) و (۱۱):

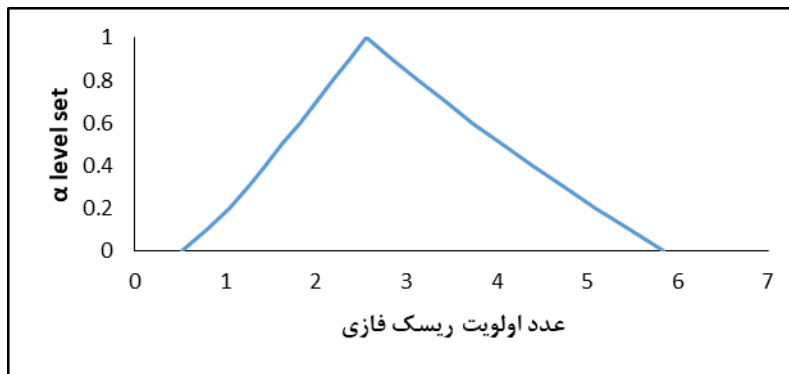
$(w^O)_\alpha^L$ و $(w^O)_\alpha^U$: به ترتیب حد بالا و پایین وزن احتمال وقوع در α مشخص

جدول ۸: مقادیر حد بالا و پایین عدد اولویت ریسک فازی برای مقطع ۸+۳۶۰

سطح α	۰	۰/۱	۰/۲	۰/۳	۰/۴	۰/۵	۰/۶	۰/۷	۰/۸	۰/۹	۱
$(FRPN_i)_\alpha^L$	۲/۷۶	۳/۰۳	۳/۳۱	۳/۵۹	۳/۸۸	۴/۱۷	۴/۴۶	۴/۷۶	۵/۰۷	۵/۳۸	۵/۷۰
$(FRPN_i)_\alpha^U$	۸/۶	۸/۳۴	۸/۰۷	۷/۷۹	۷/۵۱	۷/۲۳	۶/۹۴	۶/۶۴	۶/۳۳	۶/۰۲	۵/۷۰

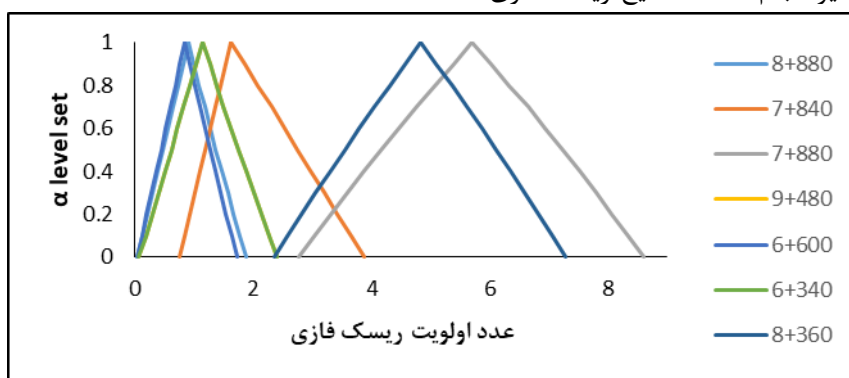


شکل ۹: تحلیل فازی عدد ریسک هجوم آب به داخل تونل در مقطع ۷+۳۶۰ قطعه دوم امامزاده هاشم (ع)

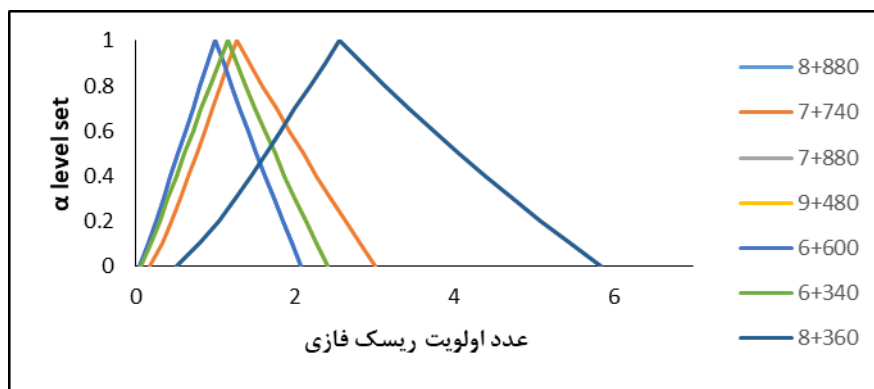


شکل ۱۰: تحلیل فازی عدد ریسک باقیمانده هجوم آب به داخل تونل در مقطع ۷+۳۶۰ قطعه دوم امامزاده هاشم (ع)

با توجه به مطالب گفته شده در بخش ۴-۲، همین فرآیند ابتدایی و باقیمانده آن به ترتیب در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ نشان در سایر مقاطع تونل نیز انجام شد که نتایج ریسک فازی داده شده است.



شکل ۱۱: تحلیل فازی ریسک هجوم آب به داخل تونل در مقاطع مختلف قطعه دوم امامزاده هاشم (ع)



شکل ۱۲: نمودار اعداد اولویت فازی ریسک باقیمانده هجوم آب به داخل تونل در مقاطع مختلف قطعه دوم امامزاده هاشم (ع)

$$\int_a^d x \mu_{\bar{A}}(x) dx = \frac{1}{6n} \left[((x)_{\alpha_0}^{2U} - (x)_{\alpha_0}^{2L}) + ((x)_{\alpha_n}^{2U} - (x)_{\alpha_n}^{2L}) \right] + 2 \sum_{i=1}^{n-1} ((x)_{\alpha_i}^{2U} - (x)_{\alpha_i}^{2L}) \quad (18)$$

$$\frac{1}{6n} \sum_{i=0}^{n-1} ((x)_{\alpha_i}^U \cdot (x)_{\alpha_{i+1}}^U - (x)_{\alpha_i}^L \cdot (x)_{\alpha_{i+1}}^L)$$

که

$$\alpha_i = \frac{i}{n}$$

با توجه به رابطه‌های (۱۷) و (۱۸) اعداد غیر فازی شده ریسک ابتدایی و ریسک باقیمانده هجوم آب در مقاطع مختلف مسیر تونل قطعه دوم امامزاده هاشم (ع) محاسبه شده و در جدول‌های ۹ و ۱۰ ارائه شده است.

برای مقایسه نتایج حاصل از تحلیل فازی ریسک ابتدایی و باقیمانده لازم است اعداد اولویت ریسک فازی به اعداد غیر فازی تبدیل شوند. برای غیر فازی سازی روش‌های مختلفی وجود دارد. در این تحقیق با توجه به کاربری آسان و دقت زیاد، از روش مرکز ثقل استفاده شده است. در این روش مطابق با رابطه (۱۶) می‌توان اعداد فازی را به اعداد غیر فازی تبدیل کرد [۵۸].

$$x_{\bar{A}} = \frac{\int_a^d x \mu_{\bar{A}}(x) dx}{\int_a^d \mu_{\bar{A}}(x) dx} \quad (16)$$

با توجه به اینکه در تحلیل فازی عدد ریسک، از برش α استفاده شده، رابطه (۱۶) را می‌توان به صورت رابطه‌های (۱۷) و (۱۸) تفکیک کرد.

$$\int_a^d \mu_{\bar{A}}(x) dx = \frac{1}{2n} \left[((x)_{\alpha_0}^U - (x)_{\alpha_0}^L) + ((x)_{\alpha_n}^U - (x)_{\alpha_n}^L) \right] + 2 \sum_{i=1}^{n-1} ((x)_{\alpha_i}^U - (x)_{\alpha_i}^L) \quad (17)$$

جدول ۹: اعداد ریسک ابتدایی و باقیمانده غیر فازی شده در مقاطع مختلف مسیر تونل قطعه دوم امامزاده هاشم (ع)

مقطع	۶+۳۴۰	۶+۶۰۰	۷+۸۴۰	۷+۸۸۰	۸+۳۶۰	۸+۸۸۰	۹+۴۸۰
عدد ریسک ابتدایی غیر فازی	۱/۸۹	۱/۹۲	۳/۴۲	۷/۱۰	۷/۸	۱/۹۱	۱/۸۹
عدد ریسک باقیمانده غیر فازی	۲/۲۷	۲/۰۵	۲/۶۵	۴/۶۲	۴/۶۲	۲/۰۵	۲/۲۷

در حدی نیست که نیاز به اجرای اقدامات کاهنده باشد و ماشین TBM می‌تواند بدون مشکل خاصی عملیات حفاری را ادامه دهد. در این شرایط تنها به دلیل سخت شدن شرایط محیط کار برای کارکنان شاغل در ماشین، ممکن است راندمان TBM کمی پایین‌تر از نرخ پیشروی متوسط باشد. اما در صورت اجرای اقدامات کاهنده، توقف‌های ناشی از اجرای عملیات، هزینه حفاری را در این شرایط نسبت به قبل بیشتر می‌کند. برای همین در صورت اجرای عملیاتی

نتایج حاصل از تحلیل فازی ریسک نشان می‌دهد که مقاطع ۷+۸۸۰ و ۸+۳۶۰ به دلیل دبی آب ورودی زیاد، عدد ریسک بزرگ‌تری نسبت به سایر مقاطع دارند. نکته‌ای که در این بخش مشاهده می‌شود، تفاوت عدد ریسک برخی از مقاطع قبل و بعد از اجرای اقدامات کاهنده است. در مقطعی مانند ۷+۸۸۰ و مانند آن با اجرای اقدامات کاهنده عدد ریسک کاهش یافته اما در مقاطع ۸+۸۸۰ و ۶+۶۰۰ عدد ریسک افزایش یافته است. دلیل این مسئله را می‌توان چنین بیان کرد که در این مناطق دبی آب ورودی به تونل

دیگر افزایش عدد ریسک باقیمانده برخی مقاطع نسبت به عدد ریسک ابتدایی آن‌ها در تحلیل فازی است. همان‌طور که قبلاً اشاره شد، دلیل این مسئله اجرای اقدامات کاهشنده در مناطقی است که اساساً نیازی به اجرای آن‌ها وجود ندارد. به طور مثال در محدوده ۹+۴۸۰ دبی آب ورودی ۰/۰۴۵ لیتر بر ثانیه است که در عمل محیطی خشک به حساب می‌آید و در صورت اجرای اقداماتی برای جلوگیری از ورود آب تنها زمان و هزینه به پروژه تحمیل شده است. با توجه به موارد اشاره شده می‌توان نتیجه گرفت نتایج تحلیل فازی نسبت به تحلیل کلاسیک دقیق‌تر و به واقعیت نزدیک‌تر است.

۵- تقدیر و تشکر

نویسندگان مقاله بدینوسیله مراتب قدردانی و تشکر خود را از موسسه مهندسی مشاور ساحل به دلیل همکاری و مساعدت‌های لازم جهت انجام این تحقیق اعلام می‌دارند.

منابع

- [1] G. Dionne, Risk management: History, definition, and critique. Risk Management and Insurance Review 16 (2013) 147-166.
- [2] S. Degn Eskesen, P. Tengborg, J. Kampmann, T. Holst Veicherts, Guidelines for tunnelling risk management: international tunnelling association, working group No. 2. Tunnelling and Underground Space Technology 19 (2004) 217-237.
- [3] K. Shahriar, M. Sharifzadeh, J.K. Hamidi, Geotechnical risk assessment based approach for rock TBM selection in difficult ground conditions. Tunnelling and Underground Space Technology 23 (2008) 318-325.
- [4] J.K. Hamidi, K. Shahriar, B. Rezai, J. Rostami, H. Bejari, Risk assessment based selection of rock TBM for adverse geological conditions using Fuzzy-AHP. Bulletin of engineering geology and the environment 69 (2010) 523-532.
- [5] M. Rehbock-Sander, Y. Boissonnas, Challenges in Design and Construction of a 30-km Hard Rock TBM Drive with an Overburden Reaching 2,400 Meters at the Gotthard Base Tunnel, North American tunnelling Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Colorado, 2012.
- [6] R.L. Sousa, H.H. Einstein, Risk analysis during tunnel construction using Bayesian Networks: Porto

نظیر تزریق، خود این اقدامات عاملی برای افزایش ریسک می‌شوند.

۴- نتیجه گیری

وجود آب در حفاری‌های زیرزمینی مشکلات زیادی را برای کارکنان و پروژه به وجود می‌آورد. تونل‌سازی مکانیزه به عنوان پیچیده‌ترین روش حفاری تونل نسبت به سایر روش‌های حفاری، انعطاف‌پذیری کمی در مقابل با پدیده هجوم آب دارد. آسیب به تجهیزات TBM، مختل شدن سیستم حمل و نقل ریلی و عدم کارایی صحیح سیستم نگهداری بتنی در دبی‌های بالا از جمله مهم‌ترین پیامدهای هجوم آب در روش مکانیزه هستند که با توجه به سرمایه‌گذاری مالی زیاد در این روش می‌توانند هزینه‌های زیادی برای پروژه داشته باشند. تحلیل عددی قطعه دوم تونل راه امامزاده هاشم (ع) نشان می‌دهد که ناحیه میانی تونل به طول ۵۳۰ متر پتانسیل زیادی برای بروز پدیده هجوم آب دارد. ضعف ساختاری توده سنگ با مقدار RMR ۴۱ و Q ۰/۴۹، سطح بالای آب زیرزمینی و همچنین وجود دسته درزه‌های متعدد شواهدی مبنی بر شرایط نامطلوب در این منطقه هستند. در این راستا ابتدا با بررسی وضعیت سایر پروژه‌ها با مشخصات و دبی مشابه، ارزیابی ریسک به صورت کلاسیک انجام شد که نتایج آن نشان دهنده بحرانی بودن شرایط در این منطقه است و در صورت عدم پیش‌بینی اقدامات لازم، عملیات حفاری با مشکلات متعددی مواجه می‌شود. همچنین با بررسی راه‌کارهای ممکن برای جلوگیری از ورود آب، ارزیابی ریسک بعد از اجرای آن‌ها نیز صورت گرفت که نتایج نشان‌دهنده کاهش چشمگیر عدد ریسک در ناحیه میانی بوده است. در ادامه با توجه به ضعف‌های روش کلاسیک در تخمین عدد ریسک که با یکسان شدن ریسک در ۴ منطقه مشاهده می‌شود، این فرآیند با کمک منطق فازی اصلاح شد. نتایج این مرحله نیز تأیید کننده بالا بودن میزان ریسک در ناحیه میانی تونل مورد مطالعه است. مقایسه نتایج تحلیل کلاسیک و فازی در مقاطع ابتدایی و انتهایی دارای تفاوت‌هایی است. در تحلیل کلاسیک، ریسک این مقاطع با توجه به تفاوت دبی آب یکسان در نظر گرفته شده است. اما در تحلیل فازی به دلیل بهره‌گیری از نظرات تیم کارشناسی، تنها دو مقطع با دبی آب بسیار پایین دارای عدد ریسک یکسان هستند. نکته

- [18] Y. Boissonnas, experience gained in mechanical and conventional excavations in long alpine tunnelling in Switzerland, Rapid excavation and tunnelling conference, SME, Las Vegas, 2009, pp. 471-488.
- [19] Y. Boissonnas, TBM drive in hard rock under high overburden at the Gotthard base tunnel in Switzerland, Rapid excavation and tunneling conference SME, San Francisco, 2011, pp. 654-667.
- [20] K. Bucher, I. Stober, U. Seelig, Water deep inside the mountains: Unique water samples from the Gotthard rail base tunnel, Switzerland. Chemical Geology 334 (2012) 240-253.
- [21] H. Duddeck, Challenges to tunnelling engineers. Tunnelling and Underground Space Technology 11 (1996) 5-10.
- [22] E. Eberhardt, Numerical modelling of three-dimension stress rotation ahead of an advancing tunnel face. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 38 (2001) 499-518.
- [23] H. Ehrbar, Gotthard Base Tunnel, Switzerland. Experiences with different Tunnelling Methods, Proc. 2^o Congresso Brasileiro de Túneis e Estruturas Subterrâneas, Sao Paulo, 2008.
- [24] M. Herrenknecht, O. Böckli, K. Böppler, Gotthard-Base Tunnel, Section Faido, Previous experience with the use of the TBM, Rapid excavation and tunnelling conference, Las Vegas, SME Inc. Littleton, 2009, pp. 1182-1205.
- [25] S. Loew, G. Barla, M. Diederichs, Engineering geology of Alpine tunnels: Past, present and future, Geologically active—Proceedings of the 11th IAEG Congress, 2010, pp. 201-253.
- [26] M. Ramoni, G. Anagnostou, Thrust force requirements for TBMs in squeezing ground. Tunnelling and Underground Space Technology 25 (2010) 433-455.
- [27] I. Vicenzi, S. Pedrazzini, A. Ferrari, G. Gubler, O. Böckli, Deep tunnelling in hardrock with large diameter TBM: What's up? An experience from the Gotthard Base Tunnel. (2007).
- [28] F. Mendana, Guadarrama tunnel construction with double shield TBMs, Rapid Excavation and Tunnelling Conference, USA, 2007, pp. 1079-1093.
- [29] J.R. Ortiz, Geomechanical problems in recent Spanish tunnels. Geotechnical Risk in Rock Tunnels: Selected Papers from a Course on Geotechnical Risk in Rock Tunnels, Aveiro, Portugal, 16-17 April 2004 (2006) 119.
- [30] M. Peláez González, J. Arroyo Cedrón, N. Alonso Fernández, Experience acquired in the Metro case study. Tunnelling and Underground Space Technology 27 (2012) 86-100.
- [7] A. Jurado, F. De Gaspari, V. Vilarrasa, D. Bolster, X. Sánchez-Vila, D. Fernández-García, D. Tartakovsky, Probabilistic analysis of groundwater-related risks at subsurface excavation sites. Engineering Geology 125 (2012) 35-44.
- [8] M.R. Moradi, M.A.E. Farsangi, Application of the Risk Matrix Method for Geotechnical Risk Analysis and Prediction of the Advance Rate in Rock TBM Tunneling. Rock Mechanics and Rock Engineering 47 (2013) 1951-1960.
- [9] X. Li, Y. Li, Research on risk assessment system for water inrush in the karst tunnel construction based on GIS: Case study on the diversion tunnel groups of the Jinping II Hydropower Station. Tunnelling and Underground Space Technology 40 (2014) 182-191.
- [10] K.-C. Hyun, S. Min, H. Choi, J. Park, I.-M. Lee, Risk analysis using fault-tree analysis (FTA) and analytic hierarchy process (AHP) applicable to shield TBM tunnels. Tunnelling and Underground Space Technology 49 (2015) 121-129.
- [11] M. Rafie, F. Samimi Namin, Prediction of subsidence risk by FMEA using artificial neural network and fuzzy inference system. International Journal of Mining Science and Technology 25 (2015) 655-663.
- [12] Design and construction studding of Emamzade Hashem lot2, Sahel consulting engineer, Tehran (in persian).
- [13] D.F. Cooper, Project risk management guidelines: managing risk in large projects and complex procurements. (2005)
- [14] D. Cooper, The Australian and New Zealand standard on risk management, AS/NZS 4360: 2004. Tutorial Notes: Broadleaf Capital International Pty Ltd (2004).
- [15] B.M. Ayyub, Risk Analysis in Engineering and Economics, CRC Press, 2003.
- [16] Q. Gong, L. Yin, Q. She, TBM tunneling in marble rock masses with high in situ stress and large groundwater inflow: a case study in China. Bulletin of Engineering Geology and the Environment 72 (2013) 163-172.
- [17] W. Brundan, Robbins 10m double shield tunnel boring machines on Srisailam left bank canal tunnel scheme, Alimineti Madhava Reddy project, Andhra Pradesh, India, Proceedings of the Rapid Excavation and Tunneling Conference, 2009.

- [41] G. Barla, S. Pelizza, TBM tunnelling in difficult ground conditions, ISRM International Symposium, International Society for Rock Mechanics ,2000.
- [42] B. Maidl, L. Schmid, W. Ritz, M. Herrenknecht, Hardrock tunnel boring machines, John Wiley & Sons, 2012.
- [43] J. Zhao, Q. Gong, Rock mechanics and excavation by tunnel boring machine—issues and challenges, Rock Mechanics in Underground Construction—Proceedings of the ISRM International Symposium, 2006, pp. 83-96.
- [44] T. Carter, Himalayan Ground Conditions challenge innovation for successful TBM Tunnelling, Invited paper in Proc. Hydrovision India 2011 Conf, Delhi. SESSION 5c:(Risk Management in Tunnelling), 20pp, 2011.
- [45] I. Mcfeat-Smith, Tunnelling in the Himalayas: risk assessment and management for tunnelling in extreme geological conditions, Proceedings of world tunnel Congress, 2008, pp. 1748-1760.
- [46] B. Khalighi, Highly successful ground support for high cover: A case study of the west Qinling rail tunnels, Rapid Excavation and Tunneling Conference Proceedings, Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Colorado, 2013, pp. 240-250.
- [47] K. Kovari, R. Fechtig, C. Amstad, Experience with large diameter tunnel boring machines in Switzerland. Developments in geotechnical engineering 74 (1993) 485-496.
- [48] J. Clark, S. Chorley, The Greatest Challenges in TBM Tunneling: Experiences from the Field. North American Tunneling: 2014 Proceedings (2014).
- [49] G. Exadaktylos, M. Stavropoulou, G. Xiroudakis, M. de Broissia, H. Schwarz, A spatial estimation model for continuous rock mass characterization from the specific energy of a TBM. Rock mechanics and rock engineering 41 (2008) 797-834.
- [50] R. Grandori, M. Sem, A. Lembo-Fazio, R. Ribacchi, Tunnelling by double shield TBM in the Hong Kong granite, 8th International Congress for Rock Mechanics, 1995, pp. 569-574.
- [51] O. Balmer, F. Chavan, Tunnel of Moutier, Switzerland: change from a TBM to the german excavation method, Rapid excavation and tunnelling conference, Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Colorado, USA, 2011, pp. 723-738.
- [52] X.Y.X.L.C. Daoci, Y. Cihao, Application of geological survey technique during Pinglin tunnel excavation of railway tunnels in Spain using tunnel boring machines, Safe tunnelling for the city and for the environment, ITA World Tunnel Congress, 2009.
- [31] I. Tardáguila, B. Celada, J.M. Galera, Geotechnical control during the excavation of the tunnel of Guadarrama. (2007).
- [32] J. Gisbert, Environmental and geotechnical problems in karstic terrains crossed by tunnels. A case study, Geophysical Research Abstracts, 2007, pp. 06244.
- [33] M.P. González, J.C.A. Cedrón, N.A. Fernandez, EXPERIENCE ACQUIRED IN THE EXCAVATION OF RAILWAY TUNNELS IN SPAIN USING TUNNEL BORING MACHINES, Proceedings of the World Tunnel Congress, Budapest, Hungary, 2009.
- [34] R. Grandori, Abdalajis east railway tunnel (Spain) – double shield universal TBM cope with extremely poor and squeezing formations. Tunnelling and Underground Space Technology 2 (2006) 268.
- [35] R. Grandori, Abdalajis east railway tunnel (Spain)? double shield universal TBM cope with extremely poor and squeezing formations. Tunnelling and Underground Space Technology 21 (2006) 268.
- [36] W. Gütter, P. Romualdi, New design for a 10 m universal double shield TBM for long railway tunnels in critical and varying rock conditions, Proceedings of Rapid excavation & Tunnelling Conference, 2003.
- [37] D. Peila, S. Pelizza, Ground probing and treatments in rock TBM tunnel to overcome limiting conditions. Journal of mining science 45 (2009) 602-619.
- [38] U. FCC-ACCIONA, SINGLE SHIELD TBM PERFORMANCE IN CARBONIFEROUS ROCK THE CASE STUDY OF PAJARES-SOTIELLO PERFORMANCE DES TUNNELIERS A BOUCLIER SIMPLE EN ROCHES CARBONIFERES ETUDE DU CAS DE PAJARES-SOTIELLO.
- [39] e. Fernández, P. navarro, A. sanz, TBM and NATM combined solution for a very deep tunnel - the "Pajares" case, Rapid Excavation and Tunneling Conference Proceedings, 2009, pp. 1218-1235.
- [40] G. Barla, Larger diameter TBM tunnel excavation in weak environmental conditions. News Journal, International Society for Rock Mechanics 5 (1999) 48-54.

construction [J]. Modern Tunnelling Technology 2 (2001) 008.

[53] D.-J. Tseng, B.-R. Tsai, L.-C. Chang, A case study on ground treatment for a rock tunnel with high groundwater ingress in Taiwan. Tunnelling and Underground Space Technology 16 (2006) 175-183.

[54] Y. Tseng, S. Wong, B. Chu, C. Wong, The Pinglin Mechanized Tunneling in difficult Ground. St 8th Congr. of IAEG, Vancouver (Canada) (1998) 21-25.

[55] L.A. Zadeh, Fuzzy sets. Information and control 8 (1965) 338-353.

[56] C.T. Leondes, Fuzzy logic and expert systems applications, Academic Press, 1998.

[57] Y.-M. Wang, K.-S. Chin, G.K.K. Poon, J.-B. Yang, Risk evaluation in failure mode and effects analysis using fuzzy weighted geometric mean. Expert Systems with Applications 36 (2009) 1195-1207.

[58] C. Shi-Jay, C. Shyi-Ming, Fuzzy risk analysis based on similarity measures of generalized fuzzy numbers. Fuzzy Systems, IEEE Transactions on 11 (2003) 45-56.

-
- 1- Sander
 - 2- Gotthard
 - 3- Sousa
 - 4- Jurado
 - 5- Li
 - 6- Jinping
 - 7- SLBC
 - 8- Guadarrama
 - 9- Abdalajis
 - 10- Pajares
 - 11- Frasnadello
 - 12- San Pellegrino
 - 13- Löttschberg
 - 14- Himalaya
 - 15- Qinling
 - 16- Mont Russelin
 - 17- Boezberg
 - 18- Kargi Kizilmark
 - 19- HongKong
 - 20- Moutier
 - 21- Pinglin