

انتخاب بهینه سیستم پایداری به منظور بهسازی تونل‌های راه‌آهن

سهیل غیاثوند^{۱*}؛ فریدون مقدس نژاد^۲

۱- دانشجوی دکترای عمران، راه و ترابری، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

۲- استاد، دانشکده عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

دریافت: ۱۳۹۹/۰۷/۰۱؛ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۷/۰۱

چکیده

در آستانه گذشت یک قرن از احداث راه‌آهن سراسری در ایران، هنوز مسیرهایی وجود دارد که از زمان افتتاح به همان صورت بهره‌برداری می‌شود؛ تونل‌ها بخش مهمی از این مسیرهای استراتژیک را تشکیل می‌دهند که نیازمند بررسی جامع و سیستماتیک هستند. پژوهش حاضر به منظور انتخاب بهینه طرح بهسازی و تقویت تونل‌های قدیمی انجام شده است. محور راه‌آهن تهران جنوب به عنوان مورد مطالعاتی این تحقیق انتخاب و پس از بررسی این مسیر، تونل شماره ۶۸ (تونل کشور) با توجه به تفاوت در تنوع خصوصیات ژئومکانیکی به عنوان نمونه شاهد انتخاب شد. این تونل توسط مطالعات ژئوتکنیکی به عمل آمده توسط نرم‌افزار عددی $FLAC^{3D}$ مدل‌سازی شد و بحرانی‌ترین مقطع برای مطالعه تأثیر اضافه کردن سیستم‌های نگهداری متداول بر ایمنی تونل مورد بررسی قرار گرفت. به منظور بررسی ایمنی، تنها مطالعات روی بخش بحرانی به نحوی انجام شد که ۴۷ سیستم نگهداری در نرم‌افزار $FLAC^{3D}$ شبیه‌سازی و تحلیل به منظور بررسی ضریب ایمنی انجام شد. در مرحله بعدی هزینه اجرای هر کدام از سیستم‌های نگهداری محاسبه و عوامل «قابلیت اجرا» و «زمان نصب و عدم تعارض با بهره‌برداری» توسط نظر خبرگان به صورت کمی معین و به صورت چند متغیره توسط مدل فازی تاپسیس بهینه‌سازی شد.

واژگان کلیدی

بهینه‌سازی، تونل راه‌آهن، تاپسیس، مدل‌سازی عددی، $FLAC^{3D}$

۱- مقدمه

برداشتن پوشش موجود میسر نیست. ملاحظه می‌شود که محدودیت‌های فراوان، متغیرهای گوناگون و عدم قطعیت‌های مختلف در بهسازی و مقاوم‌سازی تونل‌های موجود راه‌آهن وجود دارند. در این مطالعه تونل‌های راه‌آهن مسیر جنوب مورد بررسی قرار گرفته‌اند و پتانسیل ناپایداری در هر یک از این تونل‌ها به طور کلی مشخص شده است. در نهایت امکان استفاده از روش‌های مختلف پایدارسازی برای این تونل‌ها بررسی شده است. در ادامه ضمن انتخاب تونل ۶۸ ناحیه راه‌آهن لرستان به عنوان مطالعه موردی و جمع‌آوری اطلاعات جامع مربوط به وضعیت موجود آن و تحلیل پایداری آن، با تعیین پارامترهای مقاومتی برای بخش‌های مختلف تونل و مدل‌سازی عددی این تونل، روش بهینه مقاوم‌سازی آن با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ارائه می‌شود.

بهسازی تونل‌های موجود راه‌آهن با مشکلات و محدودیت‌های مختلفی مواجه هستند. از جمله عدم امکان مسدودی طولانی خطوط ریلی و قطع عبور و مرور قطارها از تونل است که در نتیجه مقاوم‌سازی باید همراه با بهره‌برداری انجام شود. همچنین در تونل‌های راه‌آهن به علت ابعاد محدود (سطح مقطع کم آن‌ها) و متناسب با ابعاد قطار، نمی‌توان از پوشش و سازه‌ای اضافی درون تونل استفاده کرد زیرا فضای موجود را کاهش می‌دهد، در نتیجه باید از روش‌هایی استفاده کرد که منجر به کاهش ابعاد موجود تونل نشود. از موانع عمده دیگر عدم امکان برداشتن مالون‌ها و پوشش موجود تونل است که هم با اصول اندرکنش بین پوشش و زمین در تضاد است و هم به علت فرسودگی زمین اطراف پوشش، خطر ناپایداری کلی و انهدام تونل دور از انتظار نیست و در صورت اطمینان از پایداری زمین اطراف به علت بهره‌برداری در طول بهسازی عملاً تخریب و

۲- مروری بر مطالعات و مبانی نظری تحقیق

منظور از تحلیل پایداری تونل‌ها و فضاهای زیرزمینی بررسی نحوه و میزان توزیع تنش در اطراف فضا، میزان تغییر شکل در نقاط مختلف و همچنین تعیین مکانیسم گسیختگی توده سنگ با دانستن کلیه پارامترهای مورد نیاز نظیر وضعیت بارگذاری، رفتار توده سنگ، شکل و ابعاد مقطع و غیره می‌باشد. در حالی که منظور از طراحی، تعیین پارامترهای مجهول فضا نظیر ابعاد، جهت یافتگی و یا حجم سیستم نگهدارنده با دانستن نحوه بارگذاری و رفتار توده سنگ می‌باشد.

ناپایداری ممکن است طی شرایط زیر رخ دهد:

- شکستگی توده‌های سنگی در اطراف فضاهای زیرزمینی در اثر تنش‌های خیلی زیاد.
- حرکت و ریزش قطعات بزرگ سنگ در اثر وجود ساختارهای زمین‌شناسی ناپایدار.
- ترکیب شکستگی‌های ناشی از تنش‌های القایی و ناپایداری‌های ساختاری.
- ناپایداری ناشی از سایر عوامل مثل نیروهای دینامیکی

هر چند امروزه تونل‌های معدودی به صورت آجری یا سنگی طراحی می‌شوند، ولی تونل‌های زیادی از گذشته به این شکل باقی مانده‌اند. مهندسی که مسئول بررسی یا تعمیر و نگهداری تونل‌های سنگی می‌شود باید درک کاملی از شرایط لازم جهت ایجاد پایداری در چنین تونل‌هایی داشته باشد. اولین لازمه این است که سازه باید نسبت به نیروهای خارجی وارد بر آن در حالت تعادل باشد. در حالت کلی یک قوس آجری نسبت به زمینی که نگهداری می‌نماید به دلیل وجود ملات میان اجزای آن نسبتاً انعطاف‌پذیر است. بار وارد بر چنین قوسی باید متناسب با ویژگی‌های زمین باشد و مقاومت آن و همچنین احتمال آماس و انبساط در نظر گرفته شود [۱].

قوس‌ها معمولاً از لحاظ استاتیکی دارای وضعیت نامشخصی هستند. موارد زیر جهت حصول اطمینان از مناسب بودن و کفایت قوس‌ها پیشنهاد می‌شود [۲]:

۱- حصول اطمینان از اینکه گسیختگی لغزشی میان بلوک‌ها رخ نخواهد داد. به عنوان مثال سطوح لایه‌بندی با مقاومت برشی پایین، دارای زاویه شیب زیادی نسبت به خط فشار اطراف قوس باشند.

۲- از مقاومت کششی طاق‌بندی صرف‌نظر شود.

۳- مقاومت فشاری سنگ نامحدود فرض می‌شود. هر چند این فرض اصولاً ایمنی نیست (مگر اینکه خطوط فشار داخل عرض قوس قرار بگیرند) ولی فشارها معمولاً مشکلی ایجاد نمی‌کنند. البته این مورد باید برای تونل عمیق قابل تعمیم نمی‌باشد.

Heyman با توجه به نکات فوق، حد پایین نظریه پلاستیسیته

برای قوس‌های آجری را به صورت زیر مطرح می‌کند [۲]:

«در صورتی که خط فشار محوری برای قوس تکمیل شده که نسبت به نیروهای خارجی وارد بر آن به حالت تعادل رسیده باشد، در داخل مصالح بنایی (سنگ یا آجر) حلقه قوس قرار بگیرد، آن قوس در شرایط ایمن قرار دارد.»

نکته مثبتی که در مورد نظریه حد پایین^۱ وجود دارد این است که تنها لازم است احتمال وجود خط فشار محوری مشخص شود ولی نیازی نیست که این خط دقیقاً ناشی از فشار باشد.

به عنوان مثال فرض شود که ویژگی‌های یک قوس باید در رابطه میان تنش‌های افقی و قائم زمین (K_0) صدق نماید، برای این کار لازم است نشان داده شود که منحنی فشار بیضوی شکلی که در آن محورهای قائم به افقی آن متناسب با K_0 است، درون قوس قرار خواهند گرفت. در شرایط ساده محاسبه چنین منحنی فشاری به صورت دستی قابل انجام خواهد بود. در عین حال برنامه‌های کامپیوتری نیز برای حالت‌های پیچیده‌تر موجود می‌باشد [۳].

۲-۱- پیشینه تحقیقات در زمینه بهینه‌سازی تونل

در سال ۲۰۰۰ میلادی آقای پائولو و همکارانش (*C. paolo. al*) با بررسی هزینه و زمان لازم برای حفاری تونل در توده سنگ‌های متفاوت، روش جدیدی را برای بهینه‌سازی حفاری تونل ارائه کردند. آنان علاوه بر دخالت دو عامل هزینه و زمان در بهینه‌سازی، پارامتر سومی به نام ریسک را در آن موثر دانستند. به دلیل عدم قطعیت اطلاعات عددی درباره شرایط زمین‌شناختی توده سنگ‌ها، پارامتر ریسک در روند بهینه‌سازی وجود دارد.

در این تحقیق از نرم‌افزار *modeFRONTIER* استفاده شده است. این نرم‌افزار برای یافتن مجموعه جواب بهینه برای چند تابع هدف در هر مساله بهینه‌سازی به کار می‌رود و دارای یک محیط گرافیکی برای تعریف مساله بهینه‌سازی است. در این تحقیق تکنولوژی حفاری و جهت حفاری بهینه شده‌اند.

این شیوه روی تونل برینر^۲ مورد مطالعه قرار گرفته است. آنان با مطالعه بر روی این تونل روشن کرده‌اند که تکنیک‌های بهینه‌سازی به ویژه در فضاهای زیرزمینی خیلی بزرگ، مانند تونل برنر بسیار مهم است. بهینه‌سازی قیمت، زمان، با در نظر گرفتن ریسک طرح، گام‌های سودمندی هستند که به انتخاب طرحی با بهترین مشخصات منجر می‌شود و هر چه شرایط تونل واقع گرایانه‌تر باشد روند بهینه‌سازی مفیدتر انجام می‌شود مثل این که عدم قطعیت پارامترهای زمین‌شناسی در نظر گرفته شود [۴].

ارزایی ریسک مربوط به طرح به پیمانکاران و مشاوران این اجازه را می‌دهد که یک موازنه میان قیمت و هزینه صرفه‌جویی شده و ریسک را در طول ساخت تونل برقرار کنند.

¹ Lower Bound Theorem

² Brenner

حجم خرابی توده سنگ اطراف فضای زیرزمینی و تغییر مکان در نقاط کلیدی به دست آمده است [۷].

در سال ۲۰۰۵ میلادی در مقاله‌ای با عنوان «تحلیل ریسک برای تعیین طرح حائل تونل» برای بهینه کردن حائل تونل و نرخ پیشروی^۵ در حفاری تونل هنگام حفر تونل از روش تحلیل ریسک استفاده کردند. آن‌ها یادآور شدند که در طبیعت توده سنگ همگن وجود ندارد، از این رو اطلاعات مورد نیاز طراحی سازه‌های زیرزمینی در سنگ‌ها به طور عمده از آزمایش‌ها در ساخت سازه‌های زیرزمینی همواره با نوعی عدم قطعیت روبه‌رو هستیم. بنابراین از یک سو در طراحی حائل تونل تعیین پارامترهایی از قبیل نرخ پیشروی و شیوه حفاری کار دشواری است و از سوی دیگر عدم تعیین این پارامترها به صورت صحیح یا سبب کاهش پایداری تونل خواهد گردید و یا موجب هدر رفت هزینه سنگین به سبب نصب حائل بیش از حد مورد نیاز خواهد شد [۸]. این نویسندگان برای حل این مشکل و تعیین طرح حائل بهینه و نرخ پیشروی، به تحلیل ریسک پرداختند. در این شیوه تحلیل ریسک با در نظر گرفتن هزینه ساخت تونل و هزینه هدررفته در صورت خرابی تونل مقایسه می‌گردد و طرح بهینه حائل و نرخ پیشروی به صورت کمی انجام می‌شود. روش تحلیل ریسک بر مبنای تکنیک شبیه‌سازی مونت کارلو صورت می‌پذیرد و در آن احتمال توزیع ضریب اطمینان تونل به دست می‌آید. در این تحقیق از مدل دو بعدی نرم افزار *FLAC* استفاده شده است که مدل کردن دقیق نرخ پیشروی در آن دشوار است و باید ارتباط صحیحی میان شاخص قابلیت اطمینان و صرف هزینه زائد برقرار شود. برای یک تحلیل ریسک واقع گرایانه‌تر در تعیین طرح حائل تونل، باید ارتباط صحیحی میان شاخص قابلیت اطمینان^۶ و هزینه ازدست‌رفته قابل پیش‌بینی، برقرار شود [۸]. در سال ۲۰۰۶ سانگ (*K.L.son*) و همکاران به بهینه‌سازی سیستم‌های پیش مسلح کننده برای حفارهای زیرزمینی وسیع پرداختند. فضاهای زیرزمینی وسیع معمولاً برای فروشگاه‌های تجاری زیرزمینی، ذخیره‌سازی گاز طبیعی و نفت، تونل بزرگراه‌ها با مقطع بزرگ حفر می‌شود. با افزایش ابعاد سازه زیرزمینی به علت افزایش عدم قطعیت در پارامترهای زمین و اثر کمتر قوس تونل، احتمال خرابی آن افزایش می‌یابد. در این سازه‌ها طراحی حائل‌های اولیه نظیر سنگ دوز و شاتکریت برای جلوگیری از خرابی تونل و کاهش تغییر مکان تونل لازم است. افزون بر آن، پیش از حفاری و در طول آن، حائل‌های پیش مسلح کننده باید اجرا شود، زیرا حائل‌های اولیه به تنهایی ایمنی تونل را تضمین نمی‌کنند. سیستم مسلح کننده با نصب لوله‌های فلزی و تزریق دوغاب در اطراف مقطع مورد نظر، قبل از حفاری ایجاد می‌شود [۹].

در سال ۲۰۰۲ تونن و همکاران (*Tonon et.al*) با در نظر گرفتن چند تابع هدف به بهینه‌سازی طراحی پوشش تونل پرداختند. در این تحقیق دو پرسش متداول در طراحی تونل مورد ارزیابی قرار می‌گیرد که عبارتند از [۵]:

- ۱- هنگامی که با چند تابع هدف متناقض روبه‌رو هستیم، چگونه یک طرح بهینه انتخاب کنیم.
- ۲- چگونه با اطلاعاتی که از عدم قطعیت و تصادف تاثیر می‌پذیرند برخورد کنیم.

در این تحقیق برای منحنی پاسخ زمین از شیوه تحلیلی براون و همکاران استفاده شده است. همچنین در این تحقیق رفتار بلند مدت تونل در نظر گرفته می‌شود، به بیان دیگر حائل هم باید پاسخگوی رفتار کوتاه مدت تونل باشد و هم پاسخگوی رفتار بلند مدت آن. در این تحقیق از سه نوع حائل زیر استفاده شده است [۵]:

- ۱- سنگ‌دوز و شاتکریت به اضافه پوشش نهایی
 - ۲- مجموعه فولادی (مش‌بندی) و شاتکریت همراه با پوشش نهایی
 - ۳- سنگ‌دوز، مجموعه فولادی و شاتکریت همراه با پوشش نهایی
- منظور از پوشش نهایی استفاده از پوشش بتنی درجا (لاینینگ) است. در این تحقیق، بهینه‌سازی با استفاده از تئوری مجموعه فازی و تئوری مجموعه تصادفی^۳ انجام شده است و هدف کمینه کردن قیمت تمام‌شده نصب و اجرای حائل برای کارفرما و برای پیمانکار و احتمال خرابی است. این محققان یک برنامه برای بهینه‌سازی طرح حائل نوشتند و از این برنامه برای طراحی حائل یک تونل ۴۰ کیلومتری در ایتالیا استفاده کردند و به این نتیجه رسیدند که بر اساس روش سنتی احتمال انتخاب طرح حائلی که سبب افزایش هزینه و کاهش ایمنی گردد حدوداً ۹۹ درصد است [۵].

در سال ۲۰۰۴ چن^۴ به بهینه‌سازی و حفاری برای سازه‌های عظیم زیرزمینی پرداختند. سنگ‌های ناهمگن و بتن شامل تعداد زیادی ریز ترک است. این ریز ترک‌ها باعث رفتار غیر الاستیک هستند و نهایتاً منجر به خرابی تحت فشار و برش می‌شوند. مراحل ساخت و پارامترهای حائل بر روی پایداری مغارهای عظیم تاثیر زیادی دارند. برای تحلیل پایداری سنگ، مهم‌ترین مساله شبیه‌سازی خرابی توده سنگ به علت حفاری است. تحقیقات اخیر به درک خرابی در توده سنگ‌های شکننده در طول حفاری کمک زیادی می‌کنند [۶].

در این تحقیق با کمک روش اجزای محدود سه بعدی، شبیه‌سازی عددی برای به دست آوردن مراحل ساخت بهینه مغارهای ساخته شده در نیروگاه برق آبی لانگتان (*Longtan*) در کشور چین انجام شده است که مراحل ساخت بهینه مغارها با مقایسه

^۵Advance Rate^۶Reliability index^۳Random set Theory^۴W.Z. Chen

جدول ۱- تونل‌های قدیمی شبکه راه آهن ایران

ناحیه	سنگی	جنس پوشش تونل (متر طول)		طول کل تونل‌ها (متر)
		سنگ بنایی	سنگی-بتنی	
شمال	-	۹۱۷۹	۱۱۴۱۵	۲۰۵۹۴
اراک	-	۱۶۵۸	-	۱۶۸
لرستان	-	۱۷۶۶	۵۳۹۴۷	۵۵۷۱۳
شمال غرب	-	۱۹۲۲۲	-	۱۹۲۲۲
آذربایجان	۱۵۳۰	۱۱۵۷۳	-	۱۳۱۰۳
اصفهان	۱۳۶۱	-	-	۱۳۶۱

پس از بررسی و مطالعه تونل شماره ۶۸ (تونل کشور) از محور نامبرده به عنوان نمونه شاهد و مورد مطالعاتی انتخاب شد. دلیل این امر گزارش‌های ایمنی ثبت شد و همچنین تنوع در پارامترهای ژئوتکنیکی و ارتفاع متغیر روباره در این تونل می‌باشد که قابل تعمیم به سایر تونل‌ها نیز می‌باشد.

۳- طراحی سیستم نگهداری تقویتی

با توجه به پیچیدگی هندسه و ناپیوستگی‌های ساختمانی مورد مطالعه نیاز به مدل‌سازی سه بعدی دیده می‌شود. به منظور بررسی تاثیر ناپیوستگی‌ها بر سازه تونل از نرم‌افزار *FLAC3D* استفاده شد. با توجه به پیچیدگی هندسه تونل، نقشه توپوگرافی به نرم‌افزار *Rhinoceros* وارد و پس از ساخت حجم، با توجه به ابعاد عوارض، بیشینه بعد ۷/۵ متر برای مش ابعاد مش‌ها انتخاب شد. هندسه مش بندی شده، توسط نرم‌افزار *KUBRIX* وارد نرم‌افزار *FLAC3D* شد. در شکل ۲ هندسه مدل اولیه به همراه گسل‌های منطقه نمایش داده شده است. در نهایت با توجه به تحلیل کرنش‌های تونل نتیجه گرفته شد محل برخورد گسل *F7* (شکل ۱) نقطه بحرانی پایداری می‌باشد. این محل در ادامه به تفصیل مورد بررسی قرار گرفته است.

۳-۱- ساده‌سازی مدل

المان‌های قابل تعریف در نرم‌افزار *FLAC3D* بر ۵ نوع است در طراحی‌های معمول المان‌های شش وجهی (آجری) برای حجم دادن به هندسه مورد استفاده قرار می‌گیرند ولیکن در مدل‌های پیچیده امکان استفاده از المان‌های شش وجهی وجود ندارد بدین دلیل در این مدل‌سازی از المان‌های ۴ وجهی (هرمی) بهره گرفته است. المان‌های ۴ وجهی امکان پر کردن تمامی سطوح را دارا هستند ولی به دلیل رعایت نشدن تناسب زوایا گوشه‌ها و اندازه یال‌های المان نسبت به المان‌های شش وجهی، اختلاف در محدوده نتایج بیشتر است (رواداری^۸ نتایج بالا است).

در سال ۲۰۰۷ رومرو و همکاران تحقیقی پیرامون بهینه‌سازی پوشش یک تونل با وجود رس متورم ارائه دادند. حدود ۳۰ سال پیش از ارائه این تحقیق در کشور اسپانیا، حفر تونل‌هایی با نام تراسواسور آغاز شد. این تونل‌ها در توده‌های سنگی با منشاء آتشفشانی و وجود لایه‌های رس قابل تورم حفر می‌شود. پس از مدتی به دلیل مشکلات ایجادشده ناشی از تورم زمین‌ساخت آن‌ها رها شد [۱۰].

پس از مدتی تصمیم گرفته شد با بهینه‌سازی سطح مقطع و پوشش تونل بار دیگر ساخت تونل از سر گرفته شود. سطوح تورم با توجه به سطح مقطع تونل در مناطق مختلفی مانند وسط دیواره‌ها، نزدیک کف یا روی تاج تونل ظاهر می‌شد. در چنین مواردی آنان توصیه کردند که از سطح مقطع مدور و یا مشابه آن استفاده شود زیرا این مقاطع نیروی ایجادشده توسط لایه‌های رس را به بهترین شکل تحمل می‌کنند. رومرو^۷ و همکاران به جمع‌آوری اطلاعات زمین شناختی پرداختند، سپس با حفر تونل‌های آزمایشی در نزدیکی تونل مورد نظر و اندازه‌گیری همگرایی آن و استفاده از تحلیل عددی از میان سطح مقطع‌های ممکن سطح مقطع دایره‌ای را پیشنهاد کردند. آن‌ها برای این سطح مقطع و شرایط موجود سه طرح حائل زیر را به عنوان حائل بهینه پیشنهاد کردند [۱۰]:

۱- شاتکریت (*Shotcrete*) به ضخامت ۱۳ تا ۱۵ سانتیمتر که با فایبر فولادی (*Steel Fiber*) مسلح شده، برای قسمت‌هایی که رس در تاج تونل وجود دارد.

۲- شاتکریت به ضخامت ۱۸ تا ۲۰ سانتی‌متر که با فایبر فولادی مسلح شده برای مناطقی که رس در دیواره تونل وجود دارد و همگرایی تونل کمتر از ۱ میلی‌متر ثبت شده است.

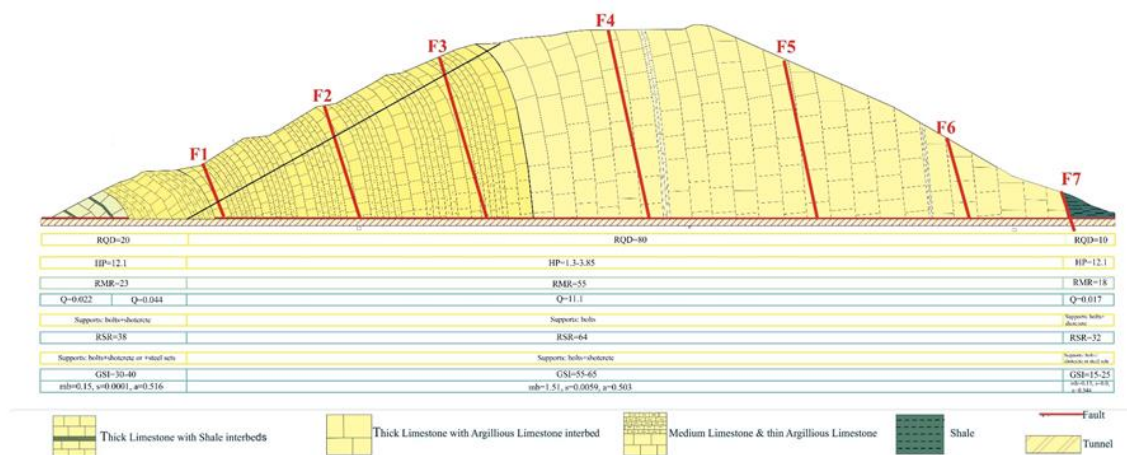
۳- شاتکریت به ضخامت ۱۸ تا ۲۰ سانتی‌متر که با فایبر فولادی مسلح شده به اضافه مش فولادی (*Steel mesh*) که با استفاده از میلگرد به قطر ۶ میلی‌متر شبکه‌های مربعی به ضلع ۱۵ سانتی‌متر تشکیل داده‌اند.

۲-۲- انتخاب مورد مطالعاتی طرح بهسازی تونل

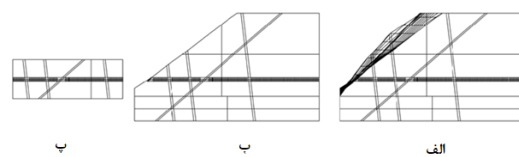
شبکه راه آهن ایران در سال ۱۳۹۸ دارای ۱۰۵ تونل (مجموعاً به طول ۱۲۰ کیلومتر) است. در این پژوهش هدف مطالعه تونل‌های قدیمی می‌باشد که عموماً توسط مصالح بنایی نگهداری شده‌اند و یا فاقد سیستم نگهداری می‌باشند.

با توجه به جدول ۱ مشخص می‌شود که منطقه لرستان که در مسیر راه آهن سراسری تهران به بندر امام خمینی قرار گرفته است، دارای بیشترین تعداد تونل است و همچنین براساس گزارش‌های بیشتر حوادث در این ناحیه رخ می‌دهد. با توجه به موارد مطرح‌شده، مطالعات تکمیلی در این ناحیه به منظور انتخاب، مطالعه موردی انتخاب شد.

⁸tolerance⁷Romero

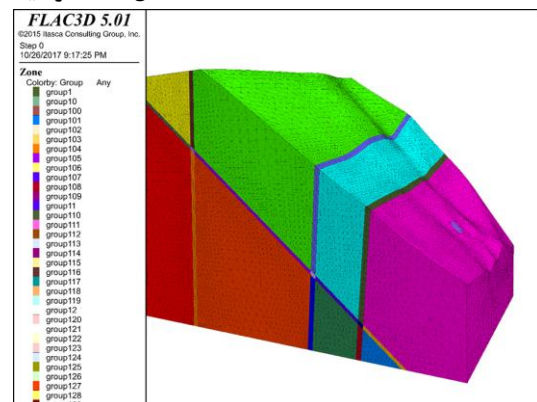


شکل ۱- خصوصیات ژئومکانیکی پروفیل طولی تونل کشور



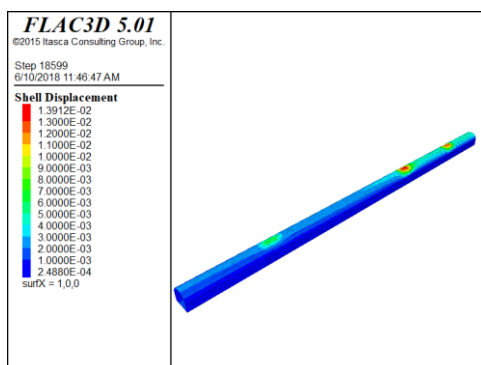
شکل ۴- مراحل ساده سازی هندسه مدل

در انتخاب خصوصیات سیستم نگهداری برجا تونل با توجه به عدم دسترسی به خواص مکانیکی ابنیه سنگی (سنگ چین)، به صورت سعی و خطا، مقادیر در ضخامت ۵۰ سانتی متر به نحوی انتخاب شد سیستم نگهداری با ضریب ایمنی یک پایدار باشد. در نهایت سیستم نگهداری برجا به صورت الاستیک در نظر گرفته شد و مقادیر مدول الاستیسیته و نسبت پواسون به ترتیب $14GPa$ و 0.18 و مقاومت فشاری 28 مگاپاسکل انتخاب شد.



شکل ۲- هندسه مدل همراه با ناپیوستگی ها

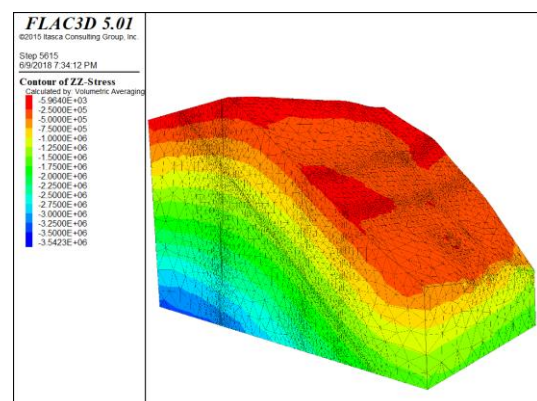
با توجه به اهمیت مقایسه در این پژوهش به منظور انتخاب سیستم نگهداری بهینه امکان پذیرش رواداری زیاد قابل قبول نمی باشد؛ از روی دیگر با توجه به بزرگ بودن ابعاد مدل و زیاد بودن زمان حل مدل، ساده سازی در هندسه مدل به صورت شکل ۴ انجام شد و بار متناظر با وزن روباره (شکل ۴-ب)، روی مدل اعمال شد.



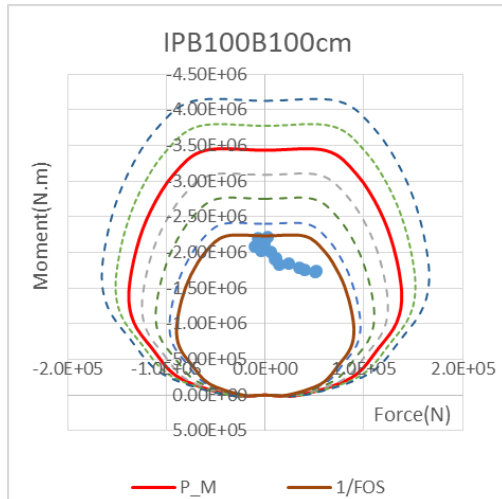
شکل ۵- مقادیر جابه جایی در پوشش اصلی تونل

۲-۳- تحلیل ایمنی سیستم نگهداری تقویتی

به منظور تحلیل سیستم های نگهداری مشابه سیستم های نگهداری بتنی، مقادیر بار و ممان خمشی قیاس شد.



شکل ۳- تنش های قائم برجا

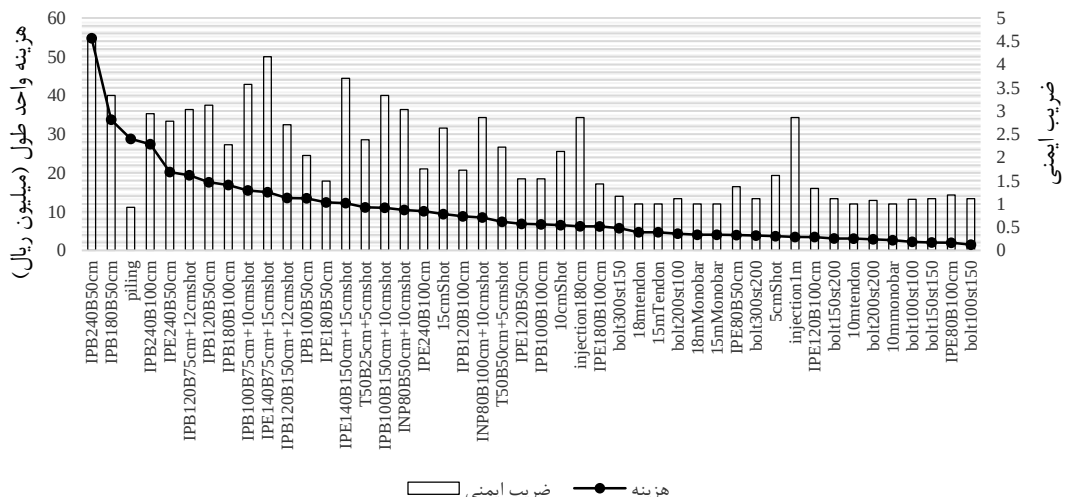


شکل ۶- مقادیر بار و ممان سیستم نگهداری پس از اضافه کردن پروفیل IPB100 در گام‌های ۱۰۰ سانتی‌متری

۳-۳- مطالعات فنی اقتصادی

تصمیم‌گیری سرمایه‌گذاری، بخش اساسی توسعه را تشکیل می‌دهد. تصمیم‌گیری درباره طرح‌های سرمایه‌گذاری بدون تردید موجب موفقیت و تحقق هدف‌های توسعه اقتصادی است. تصمیم‌گیری در میزان سرمایه‌گذاری سیستم‌های نگهداری یا عبارت دیگر، انتخاب نگهداری بهینه از دیدگاه اقتصادی هدف از این بخش است. برای رسیدن به این منظور، محاسبه هزینه‌های اجرای سیستم‌های نگهداری مختلف توسط نرخ‌های ارائه‌شده در فهرس آحاد بهار سال ۱۳۹۶ مورد بررسی قرار گرفت. در

جدول ۳ هزینه‌های تخمینی سیستم‌های نگهداری آورده شده است.



شکل ۷- مقایسه فنی - اقتصادی انواع سیستم‌های نگهداری تقویتی

خصوصیات مقطع عرضی در جدول ۲ آمده است. لازم به ذکر است در رسم منحنی بار و ممان ضریب کاهش تنش در نظر گرفته نشده است، هدف از این امر قیاس سیستم‌های نگهداری مختلف توسط معیار ضریب ایمنی بوده است. بدین منظور، همان طور که ذکر شد خصوصیات سیستم نگهداری در ضخامت ثابت ۵۰ سانتی‌متر به صورتی انتخاب شد که در بررسی نمودار بار-ممان با ضریب اطمینان کمی بزرگ‌تر از یک پایدار باشد (قسمت بحرانی در محل برخورد ناپیوستگی با توده سنگ بوده است)، سپس پس از الحاق سیستم‌های نگهداری تقویتی مقادیر بار-ممان سیستم نگهداری در محل برخورد ناپیوستگی با تونل قرائت و در پوش بار-ممان مجدداً بررسی شد؛ در مرحله بعد با تقسیم کردن مقادیر پوش اصلی بر بزرگ‌ترین عددی که بتواند مقادیر بار-ممان جدید را در برگیرد، منحنی جدیدی بدست آمد که ابعاد آن بیان‌کننده مقادیر ضریب ایمنی می‌باشد. به منظور انتخاب ضریب ایمنی تونل پس از الحاق سیستم نگهداری تقویتی، منحنی ظرفیت-اندرکنش بر مقدار ضریب ایمنی تقسیم شد به صورتی که تمام قرائت‌های مقادیر زوج داده بار محوری-ممان خمشی حاصل از نرم‌افزار $FLAC^{3D}$ در منحنی جدید محاط شوند. در

جدول ۳-ت ضرایب ایمنی سیستم‌های نگهداری مدل‌سازی شده، آورده شده است.

جدول ۲- مقادیر پارامترهای مکانیکی پوشش برجا تونل

مدول الاستیسیته	نسبت	مقاومت فشاری	وزن مخصوص
پوآسون			
14GPa	0.18	28MPa	2500Kg/m ³

جدول ۳- نتایج مطالعات اضافه کردن سیستم نگهداری تقویتی

ردیف	شرح	نماد	الف	ب	پ	ت
۱	پروفیل IPB240 در گام‌های ۵۰ سانتی‌متری	IPB240@50cm	۸	۸	۵۵	۴.۵۵
۲	پروفیل IPE140 در گام‌های ۷۵ سانتی‌متری و ۱۵ سانتی‌متر شاتکریت	IPE140@75cm+15cmshot	۸	۸	۳۴	۴.۱۷
۳	ورق‌های فولادی (ARMCO)	ARMCO	۳	۳	۲۹	۴.۰۰
۴	پروفیل IPE140 در گام‌های ۱۵۰ سانتی‌متری و ۱۵ سانتی‌متر شاتکریت	IPE140@150cm+15cmshot	۸	۸	۲۷	۳.۷۰
۵	پروفیل IPB100 در گام‌های ۷۵ سانتی‌متری و ۱۰ سانتی‌متر شاتکریت	IPB100@75cm+10cmshot	۸	۸	۲۰	۳.۵۷
۶	پروفیل IPB180 در گام‌های ۵۰ سانتی‌متری	IPB180@50cm	۸	۸	۱۹	۳.۳۳
۷	پروفیل IPB100 در گام‌های ۱۵۰ سانتی‌متری و ۱۰ سانتی‌متر شاتکریت	IPB100@150cm+10cmshot	۸	۸	۱۸	۳.۳۳
۸	پروفیل IPB120 در گام‌های ۵۰ سانتی‌متری	IPB120@50cm	۸	۸	۱۷	۳.۱۳
۹	پروفیل IPB120 در گام‌های ۷۵ سانتی‌متری و ۱۲ سانتی‌متر شاتکریت	IPB120@75cm+12cmshot	۸	۸	۱۵	۳.۰۳
۱۰	پروفیل INP80 در گام‌های نیم متری و ۱۰ سانتی‌متر شاتکریت	INP80@50cm+10cmshot	۸	۸	۱۵	۳.۰۳
۱۱	پروفیل IPB240 در گام‌های ۱۰۰ سانتی‌متری	IPB240@100cm	۸	۸	۱۴	۲.۹۴
۱۲	پروفیل INP80 در گام‌های یک متری و ۱۰ سانتی‌متر شاتکریت	INP80@100cm+10cmshot	۸	۸	۱۳	۲.۸۶
۱۳	تزریق تحکیمی شعاعی در عمق ۱۸۰ سانتی‌متری	injection180cm	۸	۸	۱۲	۲.۸۶
۱۴	تزریق تحکیمی شعاعی در عمق ۱۰۰ سانتی‌متری	injection1m	۸	۸	۱۲	۲.۸۶
۱۵	پروفیل IPB120 در گام‌های ۱۵۰ سانتی‌متری و ۱۲ سانتی‌متر شاتکریت	IPB120@150cm+12cmshot	۸	۸	۱۱	۲.۷۰
۱۶	۱۵ سانتی‌متر شاتکریت	15cmShot	۸	۸	۱۱	۲.۶۳
۱۷	پروفیل IPE240 در گام‌های ۵۰ سانتی‌متری	IPE240@50cm	۸	۸	۱۰	۲.۵۰
۱۸	پروفیل T50 در گام‌های ۲۵ سانتی‌متری و ۵ سانتی‌متر شاتکریت	T50@25cm+5cmshot	۸	۸	۱۰	۲.۳۸
۱۹	پروفیل IPB180 در گام‌های ۱۰۰ سانتی‌متری	IPB180@100cm	۱۰	۱۰	۹	۲.۲۷
۲۰	پروفیل T50 در گام‌های ۵۰ سانتی‌متری و ۵ سانتی‌متر شاتکریت	T50@50cm+5cmshot	۸	۸	۹	۲.۲۲
۲۱	۱۰ سانتی‌متر شاتکریت	10cmShot	۸	۸	۸	۲.۱۳
۲۲	پروفیل IPB100 در گام‌های ۵۰ سانتی‌متری	IPB100@50cm	۸	۸	۷	۲.۰۴
۲۳	پروفیل IPE240 در گام‌های ۱۰۰ سانتی‌متری	IPE240@100cm	۸	۸	۷	۱.۷۵
۲۴	پروفیل IPB120 در گام‌های ۱۰۰ سانتی‌متری	IPB120@100cm	۸	۸	۷	۱.۷۲
۲۵	۵ سانتی‌متر شاتکریت	5cmShot	۱۰	۱۰	۷	۱.۶۱
۲۶	پروفیل IPE120 در گام‌های ۵۰ سانتی‌متری	IPE120@50cm	۵	۴	۶	۱.۵۴
۲۷	پروفیل IPB100 در گام‌های ۱۰۰ سانتی‌متری	IPB100@100cm	۸	۸	۶	۱.۵۴
۲۸	پروفیل IPE180 در گام‌های ۵۰ سانتی‌متری	IPE180@50cm	۶	۴	۶	۱.۴۹
۲۹	پروفیل IPE180 در گام‌های ۱۰۰ سانتی‌متری	IPE180@100cm	۳	۳	۵	۱.۴۳
۳۰	شامل پروفیل IPE80 در گام‌های ۵۰ سانتی‌متری	IPE80@50cm	۳	۳	۵	۱.۳۷
۳۱	پروفیل IPE120 در گام‌های ۱۰۰ سانتی‌متری	IPE120@100cm	۶	۴	۴	۱.۳۳
۳۲	پروفیل IPE80 در گام‌های ۱۰۰ سانتی‌متری	IPE80@100cm	۳	۳	۴	۱.۱۹
۳۳	پیچ سنگ با آرایش سامانمند در فواصل ۱۵۰ سانتی‌متری به طول ۳ متر	Bolt300st150	۳	۳	۴	۱.۱۶
۳۴	پیچ سنگ با آرایش سامانمند در فواصل ۱۰۰ سانتی‌متری به طول ۲ متر	Bolt200st100	۸	۸	۴	۱.۱۱
۳۵	پیچ سنگ با آرایش سامانمند در فواصل ۲۰۰ سانتی‌متری به طول ۱/۵ متر	Bolt150st200	۶	۴	۴	۱.۱۱
۳۶	پیچ سنگ با آرایش سامانمند در فواصل ۲۵۰ سانتی‌متری به طول ۳ متر	bolt300st250	۱۰	۱۰	۴	۱.۱۱
۳۷	پیچ سنگ با آرایش سامانمند در فواصل ۱۵۰ سانتی‌متری به طول ۱/۵ متر	Bolt150st150	۵	۴	۳	۱.۱۱
۳۸	پیچ سنگ با آرایش سامانمند در فواصل ۱۵۰ سانتی‌متری به طول ۲۰۰ سانتی‌متر	Bolt100st150	۸	۸	۳	۱.۱۱
۳۹	پیچ سنگ با آرایش سامانمند در فواصل ۱۰۰ سانتی‌متری به طول ۱ متر	Bolt100st100	۶	۴	۳	۱.۱۰
۴۰	پیچ سنگ با آرایش سامانمند در فواصل ۲۰۰ سانتی‌متری به طول ۲ متر	Bolt200st200	۳	۳	۳	۱.۰۸
۴۱	تاندون‌های ۱۸ متری	18mtendon	۶	۴	۳	۱.۰۰
۴۲	تاندون‌های ۱۵ متری	15mTendon	۳	۳	۳	۱.۰۰
۴۳	مونوبارهای ۱۸ متری	18mMonobar	۶	۴	۲	۱.۰۰
۴۴	مونوبارهای ۱۵ متری	15mMonobar	۶	۴	۲	۱.۰۰
۴۵	تاندون‌های ۱۰ متری	10mtendon	۸	۸	۲	۱.۰۰
۴۶	مونوبارهای ۱۰ متری	10mmonobar	۸	۸	۲	۱.۰۰
۴۷	شمع*	piling	۶	۷	۱	۰.۹۳

ت- ضریب اطمینان

الف- قابلیت اجرا

* - لوله‌هایی به قطر ۷۶ میلی‌متر و فاصله‌داری ۲۰ سانتی‌متر به طول ۱۸ متر.

ب- زمان نصب و عدم تعارض با بهره‌برداری
پ- هزینه واحد متر (میلیون ریال)

حال دارای دورترین فاصله از راه ایده‌آل منفی باشد. واقعیات زیر بنائی از این روش بدین قرار است:

۱- مطلوبیت هر شاخص باید به طور یکنواخت افزایشی (یا کاهش) باشد. هرچه r_{ij} بیشتر، مطلوبیت بیشتر و برعکس و بدان صورت که بهترین ارزش موجود از یک شاخص نشان‌دهنده ایده‌آل آن بوده و بدترین ارزش موجود از آن مشخص‌کننده ایده‌آل منفی برای آن خواهد بود.

۲- فاصله یک گزینه از ایده‌آل (یا از ایده‌آل منفی) ممکن است به صورت فاصله اقلیدسی (از توان دوم) و یا به صورت مجموعه قدر مطلق از فواصل خطی (معروف به فواصل بلوکی) محاسبه گردد، که این امر بستگی به نرخ تبادل و جایگزینی در بین شاخص‌ها دارد.

پس از ارائه‌ی مدل تاپسیس و همچنین با بهره‌گیری از تئوری مجموعه‌های فازی، مدل‌های فازی تاپسیس زیادی توسعه داده شد [۱۱]. در ادامه روش حل تاپسیس فازی با اعداد فازی مثلثی که توسط چن در سال ۲۰۰۰ ارائه گردید، توضیح داده شده است:

گام اول: اگر $\tilde{D}$ ماتریس تصمیم فازی^۹ باشد به‌گونه‌ای که شامل n معیار^{۱۰} (C_1 الی C_n) و m گزینه^{۱۱} (A_1 الی A_m) باشد و $\tilde{x}_{ij} = (a_{ij}, b_{ij}, c_{ij})$ درایه‌های این ماتریس (بر اساس اعداد فازی مثلثی) باشند آنگاه بی‌مقیاس‌سازی (نرمال‌سازی) داده‌ها با استفاده از روابط زیر انجام می‌گیرد که نتیجه آن تشکیل ماتریس تصمیم نرمال فازی^{۱۲} ($\tilde{R}$) است.

$$\tilde{D} = (\tilde{x}_{ij})_{m \times n} = \begin{matrix} & \begin{matrix} C_1 & C_2 & \dots & C_n \end{matrix} \\ \begin{matrix} A_1 \\ A_2 \\ \vdots \\ A_m \end{matrix} & \begin{bmatrix} \tilde{x}_{11} & \tilde{x}_{12} & \dots & \tilde{x}_{1n} \\ \tilde{x}_{21} & \tilde{x}_{22} & \dots & \tilde{x}_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \tilde{x}_{m1} & \tilde{x}_{m2} & \dots & \tilde{x}_{mn} \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (۱)$$

$$\tilde{R} = (\tilde{r}_{ij})_{m \times n} = \begin{matrix} & \begin{matrix} C_1 & C_2 & \dots & C_n \end{matrix} \\ \begin{matrix} A_1 \\ A_2 \\ \vdots \\ A_m \end{matrix} & \begin{bmatrix} \tilde{r}_{11} & \tilde{r}_{12} & \dots & \tilde{r}_{1n} \\ \tilde{r}_{21} & \tilde{r}_{22} & \dots & \tilde{r}_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \tilde{r}_{m1} & \tilde{r}_{m2} & \dots & \tilde{r}_{mn} \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (۲)$$

برای معیارهای با جنبه اثرگذاری مثبت (معیارهای سودی^{۱۳}) و منفی (معیارهای هزینه‌ای^{۱۴}) به ترتیب از روابط ((۳) و ((۴) و روابط ((۵) و ((۶) استفاده می‌شود.

به منظور بررسی عوامل فنی که در طرح مؤثر می‌باشد، نظر نخبگان توسط پرسشنامه جمع‌آوری شد. در این پرسشنامه ملاک‌هایی همچون بهره‌وری، تهویه، تعمیر و نگهداری، آب‌بندی، اشغال شدن فضای گاباری، نصب و رفتار سنجی، سهولت تهیه در بازار، دانش فنی و تجربه در اجرا و غیره مورد بررسی قرار گرفتند و به صورت کمی از ۱ تا ۱۰ امتیاز گرفتند. نتیجه این بخش از مطالعات به صورت جامع در دو بخش «قابلیت اجرا» و «زمان نصب و عدم تعارض با بهره‌برداری» در

جدول ۳ نمایش داده شده است.

۴- انتخاب طرح بهینه

یکی از نکات بسیار مهم در احداث و بهره‌برداری از تونل‌ها، مقاوم‌سازی آن‌ها در مقابل خطرات ناپایداری‌های احتمالی است. سهل‌انگاری در این امر چه بسا زیان‌های جبران‌ناپذیری را به دنبال می‌آورد. باید توجه کرد که مقاوم‌سازی تونل‌ها همواره نیازمند هزینه‌های بسیار زیادی است. از این رو متخصصان تلاش خود را به این مسئله معطوف داشته‌اند که راهی بیابند تا با صرف کمترین هزینه بر میزان امنیت و مقاومت تونل‌ها بیفزایند. با افزایش روزافزون احتیاج بشر به تونل برای استفاده‌های گوناگون، بر اهمیت بهینه‌سازی تونل‌ها و یافتن راه‌های کم هزینه‌تر و مقاوم‌تر افزوده می‌شود.

۴-۱- انتخاب طرح بهینه به روش تاپسیس

واژه تاپسیس مخفف *Technique for Order Preference*

by Similarity to Ideal Solution به معنی روش‌های ترجیح براساس مشابهت به راه حل ایده‌آل است. این مدل توسط هوانگ و یون در سال ۱۹۸۱ پیشنهاد شد. در این روش m گزینه به وسیله n شاخص ارزیابی می‌شود. در روش تاپسیس امکان استفاده از شاخص‌های کمی و کیفی به طور هم‌زمان وجود دارد. این روش جزء یکی از روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره از نوع جبرانی است. منطق اصولی مدل تاپسیس راه حل ایده‌آل (مثبت) و راه حل ایده‌آل منفی را تعریف می‌کند. راه حل ایده‌آل (مثبت) راه حلی است که معیار سود را افزایش و معیار هزینه را کاهش می‌دهد. گزینه بهینه، گزینه‌ای است که کمترین فاصله از راه حل ایده‌آل مثبت و در عین حال دورترین فاصله از راه حل ایده‌آل منفی دارد. به عبارتی در رتبه‌بندی گزینه‌ها به روش تاپسیس گزینه‌هایی که بیشترین تشابه را با راه‌حل ایده‌آل داشته باشند، رتبه بالاتری کسب می‌کنند. تاپسیس یک مدل تصمیم‌گیری چند شاخصه است. در این روش علاوه بر در نظر گرفتن فاصله یک گزینه A_i از نقطه ایده‌آل، فاصله آن از نقطه ایده‌آل منفی هم در نظر گرفته می‌شود. بدان معنی که گزینه انتخابی باید دارای کمترین فاصله از راه حل ایده‌آل بوده و در عین

^۹Fuzzy decision matrix

^{۱۰}Criterion

^{۱۱}Alternative

^{۱۲}Fuzzy normalized decision matrix

^{۱۳}Benefit criteria

^{۱۴}Cost criteria

ضریب ایمنی، قابلیت اجرا و عدم تعارض با بهره‌برداری برای ارزیابی آن‌ها در نظر گرفته شده‌اند. معیارهای هزینه و ضریب ایمنی کمی هستند، به این ترتیب که مقادیر هزینه بر اساس متره و برآوره مطابق آخرین فهرست بها تعیین شده است و ضریب ایمنی هم بر اساس مدل‌سازی رفتار توده سنگ و سیستم نگهداری در نرم‌افزار FLAC به دست آمده است. معیارهای قابلیت اجرا و عدم تعارض با سیستم نگهداری کیفی هستند که با توجه به یک طیف امتیازدهی از ۱ تا ۱۰ تعیین شده‌اند. همچنین معیار هزینه دارای جنبه اثرگذاری منفی است به این معنی که هر چه مقدار آن برای یک گزینه بیشتر باشد آن گزینه دارای ارجحیت پایین‌تری است. سایر معیارها دارای جنبه اثرگذاری مثبت هستند. مطابق مراحل روش تاپسیس جداول زیر تشکیل شده است؛ و در نهایت مطابق

جدول ۳ گزینه شماره ۲ یعنی نگهداری (IPE140B75cm+15cmshot) به عنوان سیستم نگهداری بهینه از میان گزینه‌های موجود پیشنهاد می‌گردد.

۵- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این پژوهش هدف تحلیل پایداری تونل‌های راه‌آهن در شرایط مختلف به منظور انتخاب بهینه طرح بهسازی و رسیدن به متدولوژی است که طی آن الگوریتم مشخص و مدونی برای مطالعه، بهسازی و مقاوم‌سازی تونل‌های موجود راه‌آهن با تکیه بر روش‌های بهینه‌سازی ارائه و در عین اطمینان از صحت و دقت طرح، ملاحظات اقتصادی در نظر گرفته شد.

با مطالعه وضعیت پایداری برخی از قدیمی‌ترین تونل‌ها و بررسی انواع روش‌های پایدارسازی و مقاوم‌سازی، شناخت مناسبی از انواع تونل‌های بهره‌برداری شده و روش‌های حفاظت و نگهداری آن‌ها به دست آمد. در نهایت تونل‌های راه‌آهن مسیر جنوب مورد بررسی قرار گرفت و پتانسیل ناپایداری در هر یک از این تونل‌ها به طور کلی مشخص و امکان استفاده از روش‌های مختلف پایدارسازی برای این تونل‌ها بررسی شد و در نهایت تونل ۶۸ ناحیه راه‌آهن لرستان به عنوان مورد مطالعه انتخاب شد. در مرحله بعد با استفاده از مدل‌سازی عددی تأثیر پارامترهایی نظیر جنس توده سنگ و همچنین عمق تونل بر پایداری تونل مورد بررسی قرار گرفته است و تلاش شده است تا با در نظر گرفتن ضریب اطمینان مشخص، وضعیت پایداری تونل‌ها و عدم قطعیت‌ها در شرایط مختلف مورد ارزیابی قرار گیرد. به منظور مطالعه محیط به صورت عددی از نرم‌افزار FLAC^{3D} بهره گرفته شد. ۴۷ سیستم نگهداری متداول در نرم‌افزار مدل‌سازی شد و نتایج آن در منحنی‌های بار و ممان بررسی شد؛ به منظور مقایسه نیز تأثیر سیستم‌ها بر تقویت زمین محل

$$\tilde{r}_{ij} = \left(\frac{a_{ij}}{\max_i c_i}, \frac{b_{ij}}{\max_i c_i}, \frac{c_{ij}}{\max_i c_i} \right) \quad (3)$$

$$c_i^{\max} = \max\{c_{ij} \mid \tilde{x}_{ij} = (a_{ij}, b_{ij}, c_{ij})\} \quad (4)$$

$$\tilde{r}_{ij} = \begin{cases} \left(\frac{a_i^{\min}}{c_{ij}}, \frac{a_i^{\min}}{b_{ij}}, \frac{a_i^{\min}}{a_{ij}} \right), & a_i^{\min} \neq 0 \\ \left(1 - \frac{c_{ij}}{\max_i c_i}, 1 - \frac{b_{ij}}{\max_i c_i}, 1 - \frac{a_{ij}}{\max_i c_i} \right), & a_i^{\min} = 0 \end{cases} \quad (5)$$

$$a_i^{\max} = \min\{a_{ij} \mid \tilde{x}_{ij} = (a_{ij}, b_{ij}, c_{ij})\} \quad (6)$$

گام دوم: در این گام با توجه به درایه‌های ماتریس نرمال فازی ($\tilde{r}_{ij}$) و همچنین بردار وزن اهمیت معیارها ($\tilde{w}_j$) با توجه به رابطه تریس بی‌مقیاس وزین ۱۵ ($\tilde{V}$) به دس) بهی‌آید.

$$\tilde{V} = (\tilde{v}_{ij})_{m \times n}, \tilde{v}_{ij} = \tilde{w}_j \otimes \tilde{r}_{ij} \quad (7)$$

گام سوم: در این مرحله می‌توان راه‌حل ایده‌آل مثبت فازی (رابطه ۸) و راه‌حل ایده‌آل منفی فازی^{۱۶} (رابطه ۹) را تعریف کرد.

$$A_j^+ = (\tilde{v}_1^+, \tilde{v}_2^+, \dots, \tilde{v}_n^+) = \{(\max_i \tilde{v}_{ij} \mid i = 1, 2, \dots, m), j = 1, 2, \dots, n\} \quad (8)$$

$$A_j^- = (\tilde{v}_1^-, \tilde{v}_2^-, \dots, \tilde{v}_n^-) = \{(\min_i \tilde{v}_{ij} \mid i = 1, 2, \dots, m), j = 1, 2, \dots, n\} \quad (9)$$

گام چهارم: به منظور محاسبه فاصله هر گزینه از راه‌حل ایده‌آل مثبت و منفی. به ترتیب از رابطه (۱۰) و (۱۱) استفاده می‌شود.

$$d_i^+ = \sum_{j=1}^m d(\tilde{v}_{ij}, \tilde{v}_j^+), i = 1, 2, \dots, n \quad (10)$$

$$d_i^- = \sum_{j=1}^m d(\tilde{v}_{ij}, \tilde{v}_j^-), i = 1, 2, \dots, n \quad (11)$$

همچنین قابل ذکر است که فاصله دو عدد فازی مثلثی $\tilde{A}$ و $\tilde{B}$ به صورت زیر محاسبه می‌گردد [۱۲]:

$$d(\tilde{A}, \tilde{B}) = \sqrt{\frac{1}{3}[(a_1 - b_1)^2 + (a_2 - b_2)^2 + (a_3 - b_3)^2]} \quad (12)$$

گام پنجم: در آخرین گام به منظور رتبه‌بندی گزینه‌ها، شاخص نزدیکی نسبی^{۱۷} (C_i) محاسبه می‌شود (رابطه ۱۳) و لذا هر چه مقدار این شاخص برای گزینه‌ای بالاتر باشد آن گزینه از رتبه بالاتری برخوردار است.

$$C_i = \frac{d_i^-}{d_i^+ + d_i^-}, i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (13)$$

برای انتخاب سیستم نگهداری بهینه ابتدا ۴۷ سیستم نگهداری به عنوان گزینه‌های پیش رو مدل شده و تعداد ۴ معیار شامل هزینه،

¹⁵ fuzzyweighted normalized matrix

¹⁶ positive ideal and negative ideal solution

¹⁷ relative closeness

سیستم نگهداری کیفی هستند که با توجه به یک طیف امتیازدهی از ۱ تا ۱۰ تعیین شده‌اند. همچنین معیار هزینه دارای جنبه اثرگذاری منفی است به این معنی که هر چه مقدار آن برای یک گزینه بیشتر باشد آن گزینه دارای ارجحیت پایین‌تری است. سایر معیارها دارای جنبه اثرگذاری مثبت هستند. مطابق مراحل روش تاپسیس جداول زیر تشکیل شده است و در نهایت مطابق

جدول ۳ گزینه شماره ۲ یعنی نگهداری (IPE140B75cm+15cmshot) به عنوان سیستم نگهداری بهینه از میان گزینه‌های موجود پیشنهاد می‌گردد.

0.0210	0.0703	0.1217	0.0837	A44	bolt320st360
0.0203	0.0753	0.1623	0.1674	A45	IPE80B100cm
0.0151	0.0703	0.1623	0.1674	A46	bolt230st360
0.0228	0.2530	0.1217	0.1465	A47	ARMCO

جدول ۵- ماتریس وزن نسبی معیارها

0.0000	0.0000	0.0000	0.0833
0.0000	0.0000	0.3333	0.0000
0.0000	0.3333	0.0000	0.0000
0.2500	0.0000	0.0000	0.0000

جدول ۶- ماتریس نرمال وزن‌دار

0.0470	0.0959	0.0541	0.0418
0.0289	0.0703	0.0541	0.0418
0.0247	0.0195	0.0203	0.0157
0.0235	0.0620	0.0541	0.0418
0.0173	0.0586	0.0541	0.0418
0.0166	0.0639	0.0541	0.0418
0.0151	0.0659	0.0541	0.0418
0.0145	0.0479	0.0541	0.0418
0.0133	0.0753	0.0541	0.0418
0.0129	0.0879	0.0541	0.0418
0.0116	0.0570	0.0541	0.0418
0.0115	0.0430	0.0541	0.0418
0.0106	0.0315	0.0541	0.0418
0.0105	0.0781	0.0541	0.0418
0.0095	0.0502	0.0541	0.0418
0.0094	0.0703	0.0541	0.0418
0.0089	0.0639	0.0541	0.0418
0.0087	0.0370	0.0541	0.0418
0.0080	0.0555	0.0676	0.0523
0.0075	0.0364	0.0541	0.0418
0.0073	0.0602	0.0541	0.0418
0.0063	0.0469	0.0541	0.0418
0.0059	0.0324	0.0541	0.0418
0.0058	0.0324	0.0541	0.0418
0.0056	0.0449	0.0676	0.0523
0.0053	0.0602	0.0338	0.0209
0.0053	0.0301	0.0541	0.0418
0.0049	0.0245	0.0406	0.0209
0.0040	0.0211	0.0203	0.0157
0.0040	0.0211	0.0203	0.0157
0.0037	0.0234	0.0406	0.0209
0.0035	0.0211	0.0203	0.0157
0.0035	0.0211	0.0203	0.0157
0.0034	0.0289	0.0541	0.0418
0.0033	0.0234	0.0406	0.0209
0.0031	0.0340	0.0676	0.0523
0.0030	0.0602	0.0338	0.0209
0.0029	0.0281	0.0541	0.0418
0.0026	0.0234	0.0406	0.0209
0.0026	0.0211	0.0203	0.0157
0.0025	0.0227	0.0406	0.0209
0.0022	0.0211	0.0203	0.0157
0.0019	0.0232	0.0406	0.0209
0.0017	0.0234	0.0406	0.0209

برخورد ناپیوستگی با تونل (بحرانی‌ترین ناحیه تونل مذکور) مورد بررسی قرار گرفت و نتایج به صورت ضریب ایمنی گزارش شد.

برای انتخاب سیستم نگهداری بهینه ابتدا ۴۷ سیستم نگهداری به عنوان گزینه‌های پیش رو (آلترناتیو) مدل شده و تعداد ۴ معیار شامل هزینه، ضریب ایمنی، قابلیت اجرا و عدم تعارض با بهره‌برداری برای ارزیابی آن‌ها در نظر گرفته شده‌اند. معیارهای هزینه و ضریب ایمنی کمی هستند، به این ترتیب که مقادیر هزینه بر اساس متره و برآوره مطابق فهرست بها تعیین شده است و ضریب ایمنی هم بر اساس مدل‌سازی رفتار توده سنگ و سیستم نگهداری در نرم‌افزار FLAC به دست آمده است. معیارهای قابلیت اجرا و عدم تعارض با

۶- پیوست‌ها

a: زمان نصب و عدم تعارض با بهره‌برداری

c: ضریب اطمینان

b: قابلیت اجرا

d: هزینه واحد متر

جدول ۴- ماتریس نرمال

a	b	c	d		
0.5641	0.2876	0.1623	0.1674	A1	IPB240B50cm
0.3472	0.2109	0.1623	0.1674	A2	IPB180B50cm
0.2965	0.0586	0.0609	0.0628	A3	IPB180B50cm
0.2821	0.1861	0.1623	0.1674	A4	IPB240B100cm
0.2082	0.1757	0.1623	0.1674	A5	IPE240B50cm
0.1995	0.1917	0.1623	0.1674	A6	IPB120B75cm+12cmshot
0.1810	0.1977	0.1623	0.1674	A7	IPB120B50cm
0.1736	0.1438	0.1623	0.1674	A8	IPB180B100cm
0.1593	0.2259	0.1623	0.1674	A9	IPB100B75cm+10cmshot
0.1548	0.2636	0.1623	0.1674	A10	IPE140B75cm+15cmshot
0.1392	0.1710	0.1623	0.1674	A11	IPB120B150cm+12cmshot
0.1383	0.1291	0.1623	0.1674	A12	IPB100B50cm
0.1275	0.0944	0.1623	0.1674	A13	IPE180B50cm
0.1257	0.2343	0.1623	0.1674	A14	IPE140B150cm+15cmshot
0.1144	0.1506	0.1623	0.1674	A15	T50B25cm+5cmshot
0.1132	0.2109	0.1623	0.1674	A16	IPB100B150cm+10cmshot
0.1073	0.1917	0.1623	0.1674	A17	INP80B50cm+10cmshot
0.1041	0.1110	0.1623	0.1674	A18	IPE240B100cm
0.0965	0.1665	0.2029	0.2092	A19	15cmShot
0.0905	0.1091	0.1623	0.1674	A20	IPB120B100cm
0.0872	0.1807	0.1623	0.1674	A21	INP80B100cm+10cmshot
0.0760	0.1406	0.1623	0.1674	A22	T50B50cm+5cmshot
0.0705	0.0973	0.1623	0.1674	A23	IPE120B50cm
0.0692	0.0973	0.1623	0.1674	A24	IPB100B100cm
0.0671	0.1346	0.2029	0.2092	A25	10cmShot
0.0639	0.1807	0.1015	0.0837	A26	injection180cm
0.0637	0.0904	0.1623	0.1674	A27	IPE180B100cm
0.0590	0.0736	0.1217	0.0837	A28	bolt600st240
0.0482	0.0633	0.0609	0.0628	A29	18mtendon
0.0482	0.0633	0.0609	0.0628	A30	15mTendon
0.0442	0.0703	0.1217	0.0837	A31	bolt450st240
0.0416	0.0633	0.0609	0.0628	A32	18mMonobar
0.0416	0.0633	0.0609	0.0628	A33	15mMonobar
0.0407	0.0867	0.1623	0.1674	A34	IPE80B50cm
0.0393	0.0703	0.1217	0.0837	A35	bolt600st360
0.0376	0.1020	0.2029	0.2092	A36	5cmShot
0.0355	0.1807	0.1015	0.0837	A37	injection1m
0.0353	0.0843	0.1623	0.1674	A38	IPE120B100cm
0.0315	0.0703	0.1217	0.0837	A39	bolt320st240
0.0312	0.0633	0.0609	0.0628	A40	10mtendon
0.0295	0.0680	0.1217	0.0837	A41	bolt450st360
0.0270	0.0633	0.0609	0.0628	A42	10mmonobar
0.0226	0.0695	0.1217	0.0837	A43	bolt230st240

جدول ۸- فاصله گزینه‌ها از ایده‌آل مثبت و منفی

	dj+	dj-
A1	0.048845957	0.087483578
A2	0.041371351	0.068787999
A3	0.099789548	0.022302888
A4	0.043953613	0.064700365
A5	0.044054453	0.065058636
A6	0.039363944	0.068702919
A7	0.037160727	0.070691541
A8	0.052571589	0.060774453
A9	0.029303183	0.077962665
A10	0.02217712	0.087529239
A11	0.04369647	0.066974506
A12	0.056457524	0.060328761
A13	0.067265625	0.057398403
A14	0.026313762	0.081203472
A15	0.049439129	0.064605769
A16	0.031820989	0.076270483
A17	0.03704548	0.072429162
A18	0.06173725	0.060022373
A19	0.040924875	0.079966199
A20	0.06222131	0.060570058
A21	0.039950563	0.071174601
A22	0.052137229	0.06503591
A23	0.065837143	0.060717429
A24	0.065829309	0.060794046
A25	0.051168475	0.077073664
A26	0.058418529	0.060057107
A27	0.068035823	0.060654077
A28	0.08257458	0.047286078
A29	0.095810016	0.04302609
A30	0.095810016	0.04302609
A31	0.083472954	0.048283145
A32	0.095795802	0.043574197
A33	0.095795802	0.043574197
A34	0.069146628	0.061790918
A35	0.083462027	0.0486511
A36	0.061868149	0.075612893
A37	0.058301731	0.061722267
A38	0.069880558	0.061999425
A39	0.083448726	0.049241199
A40	0.095779799	0.044436159
A41	0.084103	0.049334974
A42	0.095775461	0.044791586
A43	0.083663488	0.049887525
A44	0.083438999	0.050030531
A45	0.072786203	0.062548866
A46	0.074412669	0.062741067
A47	0.033330078	0.084180577

0.0017	0.0251	0.0541	0.0418
0.0013	0.0234	0.0541	0.0418
0.0019	0.0843	0.0406	0.0366

جدول ۷- مقادیر ایده‌آل مثبت و منفی برای هر معیار

A+	0.001256413	0.09585144	0.067634	0.052310872
A-	0.047011152	0.019525293	0.0202902	0.015693262

جدول ۹- محاسبه شاخص شباهت و رتبه‌بندی گزینه‌ها

رتبه	به	CL
9	0.641706715	A1
12	0.624440858	A2
45	0.182672149	A3
16	0.595471664	A4
15	0.5962496	A5
11	0.63574455	A6
8	0.655447885	A7
20	0.536185048	A8
3	0.726817214	A9
1	0.797850184	A10
13	0.605167754	A11
21	0.516574022	A12
32	0.460424743	A13
2	0.755260057	A14
17	0.566494162	A15
5	0.705610549	A16
6	0.661606746	A17
25	0.492957938	A18
7	0.661473147	A19
24	0.49327619	A20
10	0.640490399	A21
18	0.555041119	A22
27	0.479772704	A23
26	0.480117163	A24
14	0.601001081	A25
23	0.506915251	A26
29	0.471319639	A27
40	0.364129356	A28
44	0.309905624	A29
44	0.309905624	A30
39	0.366458523	A31
43	0.312651199	A32
43	0.312651199	A33
28	0.471911381	A34
38	0.368253338	A35
19	0.549987779	A36
22	0.51424938	A37
30	0.470120059	A38
36	0.371099757	A39
42	0.316912283	A40
37	0.369722147	A41
41	0.318649265	A42
35	0.373546589	A43
34	0.374846087	A44
31	0.462177812	A45
33	0.457450662	A46
4	0.71636548	A47

۷- منابع ها

- [1] A. M. Wood, *Tunnelling: Management by Design*, vol. 2. E & FN Spon is an imprint of the Taylor & Francis Group, 2000.
- [2] J. Heyman, *The Masonry Arch*. Horwood, 1982.
- [3] W. J. Harvey, "APPLICATION OF THE MECHANISM ANALYSIS TO MASONRY ARCHES," *Struct. Eng.*, vol. 66, no. 5, pp. 77-84, 1988.
- [4] C. Paolo, F. Stefano, and L. Alessandro, "Optimization of the fundamental choices in tunnel excavation: the Brenner Base Tunnel example," 2000.
- [5] F. Tonon, A. Mammino, and A. Bernardini, "Multiobjective optimization under uncertainty in tunneling: application to the design of tunnel support/reinforcement with case histories," *Tunn. Undergr. Sp. Technol.*, vol. 17, no. 1, pp. 33-54, 2002.
- [6] W. Z. Chen, S. C. Li, W. S. Zhu, D. S. Yang, and W. M. Yang, "Excavation and optimization theory for giant underground multiple openings in high dipping laminar strata," in *TUNNELLING AND UNDERGROUND SPACE TECHNOLOGY. UNDERGROUND SPACE FOR SUSTAINABLE URBAN DEVELOPMENT. PROCEEDINGS OF THE 30TH ITA-AITES WORLD TUNNEL CONGRESS SINGAPORE, 22-27 MAY 2004*, 2004, vol. 19, no. 4-5.
- [7] T. Wang and Q. Fan, "Optimization of soft rock engineering with particular reference to coal mining," *Int. J. rock Mech. Min. Sci.*, vol. 37, no. 3, pp. 535-542, 2000.
- [8] K. You, Y. Park, and J. S. Lee, "Risk analysis for determination of a tunnel support pattern," *Tunn. Undergr. Sp. Technol.*, vol. 20, no. 5, pp. 479-486, 2005.
- [9] K.-I. Song, G.-C. Cho, Y.-J. Sim, and I.-M. Lee, "Optimization of a pre-improvement support system for large underground excavation," 2006.
- [10] J. Pérez-Romero, C. S. Oteo, and P. De la Fuente, "Design and optimisation of the lining of a tunnel in the presence of expansive clay levels," *Tunn. Undergr. Sp. Technol.*, vol. 22, no. 1, pp. 10-22, 2007.
- [11] D.-F. Li, "Compromise ratio method for fuzzy multi-attribute group decision making," *Appl. Soft Comput.*, vol. 7, no. 3, pp. 807-817, 2007.
- [12] C.-T. Chen, "Extensions of the TOPSIS for group decision-making under fuzzy environment," *Fuzzy sets Syst.*, vol. 114, no. 1, pp. 1-9, 2000.