

انتخاب ماشین تونل‌بری تمام مقطع (TBM) مناسب با استفاده از روش شباهت به گزینه ایده آل فازی (FTOPSIS) مطالعه موردی: قطعه دوم تونل امامزاده هاشم (ع)

رضا میکائیل*^۱؛ پیمان جعفر شیرزاد^۲؛ جعفر خادمی حمیدی^۳

- ۱- استادیار و عضو هیئت‌علمی دانشگاه صنعتی ارومیه
- ۲- دانشجوی کارشناسی مهندسی معدن دانشگاه صنعتی ارومیه
- ۳- استادیار و عضو هیئت‌علمی دانشگاه تربیت مدرس

پذیرش: ۱۳۹۶/۰۲

دریافت: ۱۳۹۵/۰۸

چکیده

استفاده از ماشین‌های تونل‌بری مکانیزه تمام مقطع تحت شرایط زمین‌شناسی مختلف، به‌منظور حفاری تونل‌های طویل در سال‌های اخیر گسترش زیادی پیدا کرده است. انتخاب ماشین تونل‌بری تمام مقطع مناسب، یکی از مراحل مهم و تعیین‌کننده در پیشبرد فرآیند حفاری است. در این راستا می‌توان با توجه به مشخصات محیط حفاری و ماشین تونل‌بر، مناسب‌ترین ماشین را انتخاب کرد. در گام نخست از این تحقیق معیارهایی از قبیل شاخص RQD، مقاومت فشاری، مقاومت کششی، ناپایداری سینه‌کار، ناپایداری دیواره‌ها، فاصله‌داری ناپیوستگی‌ها، هجوم آب مچاله شوندگی، زون‌های گسلی، حفرات انحلالی، قطر تونل، شیب تونل، شعاع انحنای مسیر در مسیر قطعه دوم تونل امامزاده هاشم (ع) مورد ارزیابی قرار گرفت و در گام بعد به بررسی و انتخاب مناسب‌ترین ماشین تونل‌بری مکانیزه از میان چهار ماشین پیشنهادی پرداخته شد. بدین ترتیب با استفاده از روش Fuzzy-TOPSIS و بهره‌گیری از نظرات خبرگان، مناسب‌ترین ماشین تونل‌بری مکانیزه برای حفاری قطعه دوم تونل امامزاده هاشم (ع) انتخاب شد. نتایج حاصل از بررسی نشان داد که با توجه به معیارهای مذکور ماشین تونل‌بری Double Shield Universal TBM مناسب‌ترین گزینه برای حفاری قطعه دوم تونل امامزاده هاشم (ع) می‌باشد.

انتخاب ماشین تونل‌بری تمام مقطع-روش Fuzzy-TOPSIS- تونل امامزاده هاشم (ع)- Double Shield Universal TBM

واژگان کلیدی

۱- مقدمه

توقف طولانی مدت یا حتی گیر افتادن همیشگی ماشین و اعمال خسارت‌های مالی جبران‌ناپذیری بر مسئولین طرح شود. از این رو سعی می‌شود تا در نخستین گام از طراحی با انجام مطالعات دقیق، بهترین ماشین تونل‌بر انتخاب شود. تاکنون مطالعات گسترده‌ای جهت بررسی و ارزیابی و انتخاب ماشین‌های تونل‌بر مکانیزه در شرایط مختلف ژئوتکنیکی و همچنین مخاطرات وابسته به آن‌ها صورت گرفته است. برخی از مهم‌ترین مطالعات انجام‌شده در این زمینه با توجه به مخاطرات ژئوتکنیکی و مشخصات زمین‌شناسی، در جداول ۱ و ۲ آورده شده است.

امروزه با توجه به افزایش جمعیت و به تبع آن افزایش رفت‌وآمد و ترافیک‌های جاده‌ای و همچنین به منظور کاهش زمان تردد، احداث تونل‌های راه با ماشین‌های تونل‌بری تمام مقطع (TBM) گسترش پیدا کرده است. تصمیم‌گیری برای انتخاب ماشین مناسب یک مرحله بسیار حساس و دشوار در پروژه‌های حفاری مکانیزه و اساساً یک فرآیند برگشت‌ناپذیر است و هنگامی که ماشین به داخل زمین فرستاده می‌شود بیرون کشیدن و تغییر آن تقریباً غیرممکن است. عدم انجام مطالعات ساخت‌گاهی کافی و در نتیجه عدم شناخت کافی از شرایط زمین می‌تواند اشتباهاتی را در فرآیند انتخاب در پی داشته باشد که باعث

جدول ۱: مطالعات انجام‌شده در زمینه انتخاب ماشین با توجه به معیارهای ژئوتکنیکی

مخاطرات ژئوتکنیکی مؤثر در انتخاب ماشین تونل‌بری تمام مقطع										
محققین	ناپایداری دیواره‌ها	ناپایداری سینه‌کار	فاصله‌داری ناپیوستگی‌ها	زون‌های گسلی	سختی و ساینده‌گی	حفرات انحلالی	انفجار سنگ	نشست زمین	هجوم آب	مچاله شونده‌گی
Shahriar et.al (2006) [۲۰]	•	•		•		•			•	•
Shahriar et.al (2008) [12]	•	•		•	•	•			•	•
Shiyong et.al (2008) [13]	•	•		•		•	•		•	•
Li Weibing et.al (2008) [14]	•	•		•	•	•			•	•
Khademi Hamidi et.al. (2010) [7]	•	•		•		•			•	•
Yazdani Chamzini et.al (2012)	•	•		•		•		•	•	•
Karami et.al (2014) [6]	•	•		•		•			•	•
Fahimdanesh et.al (2014) [3]	•	•		•		•			•	•

جدول ۲: مطالعات انجام‌شده در زمینه انتخاب ماشین با توجه به معیارهای زمین‌شناسی و مشخصات توده‌سنگ

معیارها و مخاطرات مؤثر در انتخاب ماشین تونل‌بری تمام مقطع					
محققین	شاخص RQD	مقاومت فشاری	مقاومت کششی	توزیع دانه‌بندی ذرات	نشت گاز
Shiyong et.al.(2008)[13]					•
Li Weibing et.al.(2008) [14]		•			•
Khademi Hamidi et.al. (2010) [7]					•
Yazdani Chamzini. (2012)[17]				•	•
Karami et.al. (2014)[6]		•			•
Fahimdanesh et.al. (2014)[3]	•	•			•

ژئومکانیکی و بررسی شرایط و مخاطرات زمین‌شناسی پیش رو قطعه دوم تونل امامزاده هاشم (ع) به ارزیابی و انتخاب گزینه مناسب ماشین تونل‌بری مکانیزه پرداخته شود.

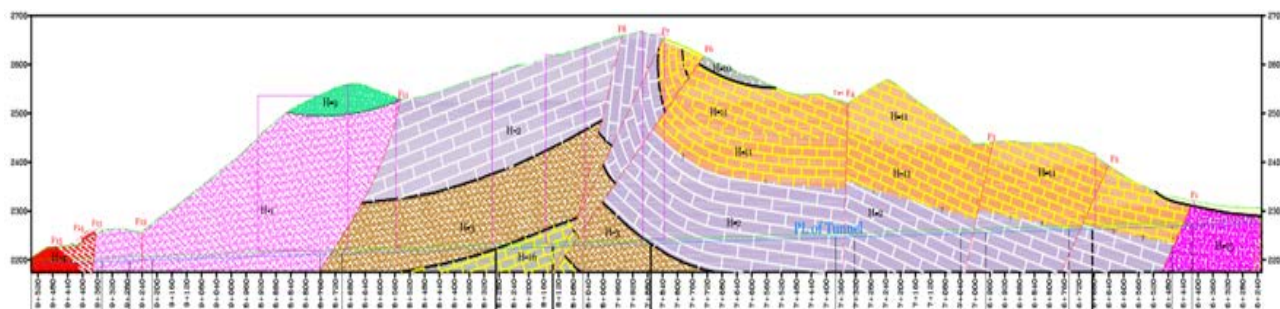
۲- معرفی ساختگاه

قطعه دوم تونل راه امامزاده هاشم (ع) بخشی از طرح توسعه جاده‌ای کشور است که وظیفه افزایش ظرفیت حمل‌ونقل و

نتایج نشان می‌دهد که در بیشتر این مطالعات معیارهایی از قبیل ناپایداری دیواره‌ها و سینه‌کار، زون‌های گسلی، حفرات انحلالی، هجوم آب و مچاله شونده‌گی مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته‌اند. همچنین در برخی از مطالعات، علاوه بر معیارهای اشاره‌شده، معیارهایی مانند ایمنی، ریسک، هزینه‌ها و سرعت حفاری مورد مطالعه قرار گرفتند. هم‌راستا با این مطالعات، در مقاله حاضر سعی می‌شود تا پس از تعیین مهم‌ترین مشخصات

البرز به حساب می‌آید. مقطع عرضی تونل به صورت دایروی با قطر حفاری حدود ۱۲/۲۷ متر و شیب طولی تونل ۲/۵٪ است [۱۹]. در شکل ۱ پروفیل طولی مسیر تونل نشان داده شده است. در جدول ۳ مشخصات ژئوتکنیکی واحدهای مختلف مسیر قطعه دوم تونل امامزاده هاشم (ع) آورده شده است.

کاهش حوادث جاده‌ای در محدوده حادثه‌خیز 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 حدفاصل دره مشاء (در شمال) و دره جنوب شرقی ابعلی واقع شده است. این منطقه جزء نواحی کوهستانی رشته‌کوه



شکل ۱: پروفیل طولی تونل قطعه دوم تونل راه امامزاده هاشم (ع) [۱۹]

جدول ۳: مطالعات انجام شده در زمینه قابلیت برش سنگ با توجه به مشخصات فیزیکی و مکانیکی سنگ [۱۹]

نام مقطع	لیتولوژی	طول (متر)	مقاومت تراکمی تک محوره (Mpa)	RMR	RQD	Q	وزن مخصوص (gr/cm ³)
H-4	توف برشی و گدازه آتوسن	۱۳۰	۳۵	۱۹	۲۵	۰/۰۲	۲/۶
H-1	توف داسیتی آتوسن	۶۰۰	۱۲۰	۶۳	۹۰	۹	۲/۶
H-3	سازند درود	۵۲۰	۵۵	۴۳	۵۵	۰/۴۹	۲/۶
H-16	سازند مبارک	۱۴۰	۷۵	۵۵	-	۱/۹۵	۲/۶
H-2	سازند روته	۱۰۲۰	۱۱۰	۵۹	۸۰	۸	۲/۶
H-11	سازند الیکا	۱۸۰	۴۰	۴۴	۶۳	۲/۵۲	۲/۶
H-15	سازند باروت	۱۳۰	۳۰	۵۰	-	۲	۲/۶
-	ناحیه‌های گسلی	۴۰۰	۳۰	۱۵	۱۵	۰/۰۲	۲/۶

۳- انتخاب ماشین تونل بری مناسب برای قطعه دوم

تونل امامزاده هاشم (ع)

توجه به مخاطرات ژئوتکنیکی و شرایط پیچیده زمین‌شناسی و تکتونیک در مسیر تونل امامزاده هاشم (ع) انتخاب ماشین تونل بری مناسب به منظور کاهش هزینه‌ها و افزایش سرعت حفاری، الزامی می‌باشد. در این بخش سعی می‌شود تا از بین گزینه‌های پیشنهادی، با توجه به معیارهای مؤثر، مناسب‌ترین ماشین انتخاب شود.

۳-۱- گزینه‌های پیشنهادی

در گام نخست برای حفاری قطعه دوم تونل امامزاده هاشم (ع) چهار ماشین تونل بری مکانیزه با قابلیت حفاری در محیط سخت به عنوان گزینه‌های پیشنهادی انتخاب شدند. مزایا و معایب ماشین‌های تونل بر پیشنهادی در جدول ۴ آورده شده‌اند.

۳-۲- معیارهای پیشنهادی

نحوه انتخاب معیارهای موردنظر در این تحقیق را می‌توان تلفیقی از مخاطرات موجود در مسیر حفاری، مشخصات توده سنگ و مشخصات ژئومتری با نگاه ویژه به مطالعات پیشین دانست. بدین ترتیب سیزده معیار شامل شاخص RQD، مقاومت فشاری، کششی، ناپایداری دیواره‌ها، ناپایداری سینه کار، هجوم آب، فاصله‌داری ناپیوستگی‌ها، زون‌های گسلی، مچاله شوندگی، حفرات انحلالی، قطر تونل، شیب تونل و شعاع انحنای مسیر برای ارزیابی و انتخاب گزینه مناسب حفاری انتخاب شدند. معیارهای کلی مورد مطالعه در این تحقیق به همراه زیر معیارها در جدول ۵ آورده شده‌اند.

جدول ۴: مزایا و معایب ماشین‌های پیشنهادی برای حفاری قطعه دوم امامزاده هاشم (ع) [۱]

Double shield Universal TBM	Double shield TBM	Single Shield TBM	Open TBM
<ul style="list-style-type: none"> - محدود کاربرد گسترده - ایمن - قابلیت نگهداری سینه کار با استفاده از سپر و صفحه حفار - قابلیت انجام عملیات پیش تزریق - قابلیت تبدیل به ماشین تونل‌بری تمام مقطع - سرعت پیشروی بالا - کار در شرایط دشوار 	<ul style="list-style-type: none"> - محدود کاربرد وسیع - ایمن - انعطاف‌پذیری سیستم نگهداری - سرعت پیشروی بالا - نصب هم‌زمان نگهداری نهایی - کار در شرایط دشوار زمین - امکان کنترل نفوذ آب با سپر بسته 	<ul style="list-style-type: none"> - محدود کاربرد وسیع - ایمن - نصب قطعات پیش‌ساخته - عملکرد بالا - امکان کار در زمین ریزشی 	<ul style="list-style-type: none"> - سهولت عملیات - قابل استفاده در سنگ سخت - سرعت پیشروی بالا - انعطاف‌پذیری سیستم نگهداری - هزینه اجرایی کمتر - هزینه سرمایه‌گذاری پایین
<ul style="list-style-type: none"> - هزینه سرمایه‌گذاری بالا - عملکرد پیچیده ماشین - مدت‌زمان زیاد برای تبدیل حالت به ماشین EPB 	<ul style="list-style-type: none"> - هزینه سرمایه‌گذاری بالا - عملکرد پیچیده ماشین - نیاز به پاک کردن محل اتصال - تلسکوپی ماشین - امکان گیرکردن سپر در زمین‌های با همگرایی زیاد 	<ul style="list-style-type: none"> - عملیات دومرحله‌ای - حفاری در زمین‌های سست - نیاز به نصب قطعات پیش‌ساخته - هزینه - سرمایه‌گذاری بالا - عملکرد پیچیده ماشین - نیاز به کارخانه سگمنت 	<ul style="list-style-type: none"> - عدم کارایی کفشک‌ها در سنگ‌های نرم و ناپایدار - نصب نگهداری در توده سنگ ناپایدار

جدول ۵: معیارهای مورد مطالعه به منظور انتخاب ماشین تونل‌بری مکانیزه مناسب برای قطعه دوم تونل امامزاده هاشم (ع)

معیارهای مورد مطالعه												
مشخصات ژئومتری تونل			مخاطرات ژئوتکنیکی					مشخصات توده سنگ				
C ₁₃	C ₁₂	C ₁₁	C ₁₀	C ₉	C ₈	C ₇	C ₆	C ₅	C ₄	C ₃	C ₂	C ₁
شعاع	شیب	قطر	حفرات	مجاله	زون‌های	فاصله‌داری	هجوم	ناپایداری	ناپایداری	مقاومت	مقاومت	شاخص
انحنای مسیر	تونل	تونل	انحلالی	شوندگی	گسلی	ناپیوستگی‌ها	آب	سینه کار	دیواره‌ها	کششی	فشاری	RQD

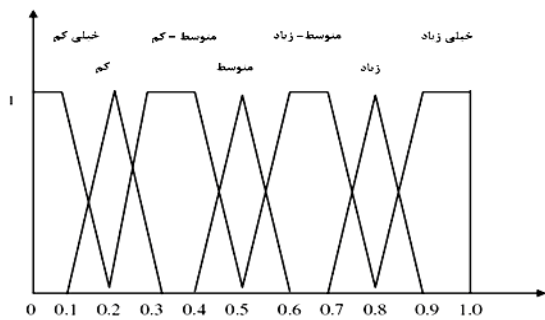
ارزیابی‌شده و بدین ترتیب بر مشکلات روش شباهت به گزینه ایده‌آل کلاسیک غلبه می‌شود [۲۱]. تحقیق‌هایی در زمینه‌های معدنی با استفاده از روش Fuzzy-TOPSIS انجام شده است که تعدادی از آن‌ها از سال ۲۰۰۹ تاکنون در جدول ۶ آورده شده است.

۳-۳- انتخاب گزینه برتر با روش Fuzzy-TOPSIS

روش شباهت به گزینه ایده‌آل فازی یکی از این روش‌های تصمیم‌گیری در شرایط عدم قطعیت است. در این روش عناصر ماتریس تصمیم‌گیری یا وزن معیارها و یا هردوی آن‌ها توسط متغیرهای زبانی که توسط اعداد فازی ارائه می‌شوند،

جدول ۶: مطالعات انجام‌شده در زمینه‌های مختلف معدن با استفاده از روش Fuzzy-TOPSIS و TOPSIS

عنوان	نام محققین
A decision support system using fuzzy analytical hierarchy process (FAHP) and TOPSIS approaches for selecting of the optimum underground mining method.	Mikaeil et. al (2009) [9]
Choosing shaft sinking method by using the combination of Fuzzy AHP & Fuzzy TOPSIS approaches.	Yazdani et.al (2010) [18]
Optimal tunneling method selection using fuzzy multiple attribute decision making technique.	Bejari et. al (2010) [2][1]
Porphyry Copper Mineral Prospectivity Mapping Using Interval Valued Fuzzy Sets TOPSIS Method in Central Iran.	Jafari rad et. al (2011) [5]
Using fuzzy TOPSIS method for mineral processing plant site selection.	Safari et. al (2012) [11]
Risk evaluation of tunneling projects.	Fouladgar et, al (2012) [4]
Equipment selection using Fuzzy multi criteria decision making model: case study of Gole Gohar Iron Mine.	Lashgari et al. (2012) [7]
Mining method optimization of Gu mountain stay ore based on AHP-TOPSIS evaluation model.	Xinmin et. al (2013) [15]
Porphyry Cu potential area selection using the combine AHP-TOPSIS methods, a case study in siahroud area (NW, IRAN).	Pazand et. al (2014) [10]
Selecting the most suitable blasting pattern using AHP-TOPSIS method: sungun copper mine.	Yari et. al (2014) [16]



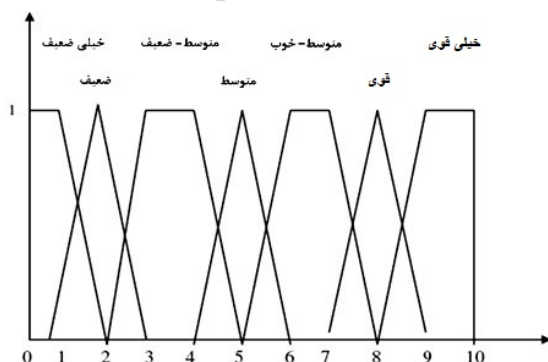
شکل ۲: نمایش گرافیکی از توابع دوزنقه‌ای فازی مورد استفاده برای معیارها [۲۱]

جدول ۸: متغیرهای زبانی معیارها به همراه اعداد فازی

معیارها	متغیر زبانی	عدد فازی
C _۱	متوسط	(۰/۴,۰/۵,۰/۵,۰/۶)
C _۲	کم	(۰/۱,۰/۲,۰/۲,۰/۳)
C _۳	کم	(۰/۱,۰/۲,۰/۲,۰/۳)
C _۴	زیاد	(۰/۷,۰/۸,۰/۸,۰/۹)
C _۵	خیلی زیاد	(۰/۸,۰/۹,۱,۱)
C _۶	زیاد	(۰/۷,۰/۸,۰/۸,۰/۹)
C _۷	متوسط	(۰/۴,۰/۵,۰/۵,۰/۶)
C _۸	خیلی زیاد	(۰/۸,۰/۹,۱,۱)
C _۹	خیلی زیاد	(۰/۸,۰/۹,۱,۱)
C _{۱۰}	متوسط - کم	(۰/۲,۰/۳,۰/۴,۰/۵)
C _{۱۱}	متوسط	(۰/۴,۰/۵,۰/۵,۰/۶)
C _{۱۲}	خیلی کم	(۰,۰,۰/۱,۰/۲)
C _{۱۳}	خیلی کم	(۰,۰,۰/۱,۰/۲)

جدول ۹: متغیرهای زبانی برای رتبه‌بندی گزینه‌ها

اهمیت	عدد فازی
خیلی ضعیف (VP)	(۰,۰,۱,۲)
ضعیف (P)	(۱,۲,۲,۳)
متوسط (F)	(۴,۵,۵,۶)
قوی (H)	(۷,۸,۸,۹)
خیلی قوی (VH)	(۸,۹,۱۰,۱۰)



شکل ۳: نمایش گرافیکی از توابع دوزنقه‌ای فازی مورد استفاده برای رتبه‌بندی گزینه‌ها [۲۱]

در این بخش از مقاله، پرسش‌نامه‌هایی به منظور امتیازدهی به چهار گزینه موردنظر به هنگام مواجهه با مخاطرات ژئوتکنیکی تحت شرایط خاص زمین‌شناسی در مسیر حفاری تهیه شده و در اختیار خبرگان قرار گرفت. ترکیب خبرگان در نظر گرفته شده در این تحقیق شامل ۳ کارشناس و ۵ عضو هیات علمی دانشگاه می‌باشد. در ادامه سعی می‌شود با توجه به نظرات خبرگان به ترتیب در هشت مرحله به صورت زیر مناسب‌ترین ماشین تونل‌بری انتخاب شود.

مرحله اول: ارزیابی اهمیت معیارها

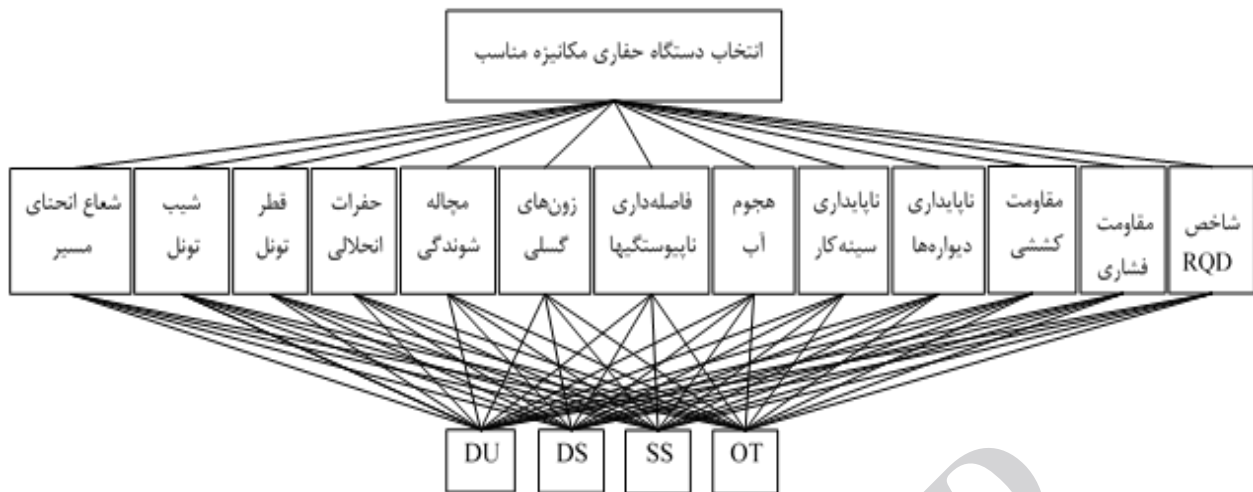
درجه اهمیت معیارها و مخاطرات با توجه به میزان تأثیر آنها در فرآیند حفاری، از تأثیر خیلی کم تا تأثیر خیلی زیاد تقسیم‌بندی شدند که در جدول ۷ آورده شده است. در این راستا نمایش گرافیکی توابع فازی دوزنقه‌ای مربوط به معیارها در شکل ۲ نشان داده شده است. همچنین متغیرهای زبانی معیارها به همراه اعداد فازی آنها در جدول ۸ آورده شده است.

مرحله دوم: تشکیل ماتریس تصمیم

هشت تصمیم‌گیرنده از متغیرهای زبانی ارائه شده در جدول ۹ برای رتبه‌بندی گزینه‌ها استفاده کردند. نمایش گرافیکی توابع فازی دوزنقه‌ای استفاده شده برای رتبه‌بندی گزینه‌ها در شکل ۳ آورده شده است. نکته قابل توجه این است که تأثیر معیارها در کارایی ماشین طبق نظرات خبرگان منفی در نظر گرفته شده است اما برای ساده‌سازی و استفاده از روابط، مثبت فرض می‌شوند. برای مثال ماشین Open TBM در هنگام مواجهه با آب‌های زیرزمینی طبق نظر همه کارشناسان امتیاز خیلی قوی را گرفته است که نشان از ضعف ماشین هنگام هجوم آب دارد. لذا در زمان رتبه‌بندی گزینه‌ای که کمترین شباهت را به گزینه ایده‌آل دارد به عنوان مناسب‌ترین ماشین انتخاب خواهد شد. ساختار سلسله مراتبی انتخاب ماشین تونل‌بری مناسب در شکل ۴ آورده شده است.

جدول ۷: متغیرهای زبانی برای ارزیابی اهمیت معیارها

اهمیت	عدد فازی
خیلی کم (VL)	(۰,۰,۰/۱,۰/۲)
کم (L)	(۰/۱,۰/۲,۰/۲,۰/۳)
متوسط - کم (ML)	(۰/۲,۰/۳,۰/۴,۰/۵)
متوسط (M)	(۰/۴,۰/۵,۰/۵,۰/۶)
متوسط - زیاد (MH)	(۰/۵,۰/۶,۰/۷,۰/۸)
زیاد (H)	(۰/۷,۰/۸,۰/۸,۰/۹)
خیلی زیاد (VH)	(۰/۹,۰/۹,۱,۱)



OT: Open TBM, SS: Single Shield TBM, DS: Double Shield TBM, DU: Double shield Universal

شکل ۴: ساختار سلسله مراتبی انتخاب ماشین تونل بر مناسب برای قطعه دوم امامزاده هاشم (ع)

بر این اساس گزینه اول از نظر معیار اول به صورت عدد فازی (۸،۹،۱۰،۱۰) ارزیابی خواهد شد. سایر درایه‌های ماتریس نیز به همین روش محاسبه می‌شوند. ماتریس تصمیم تشکیل شده در جدول ۱۱ نشان داده شده است.

مرحله سوم: تشکیل ماتریس تصمیم فازی بی مقیاس شده زمانی که درایه‌ها به صورت فازی هستند، مسلماً معیارها نیز فازی خواهند بود. برای بی مقیاس کردن به جای محاسبات پیچیده در روش شباهت به گزینه ایده‌آل کلاسیک، در این مرحله از تغییر مقیاس خطی برای تبدیل مقیاس معیارهای مختلف به مقیاس قابل مقایسه استفاده می‌شود. درایه‌های ماتریس تصمیم بی مقیاس برای معیارهای مثبت از رابطه زیر محاسبه می‌شود [۲۱]:

$$\tilde{r}_{ij} = \left(\frac{a_{ij}}{d_j^*}, \frac{b_{ij}}{d_j^*}, \frac{c_{ij}}{d_j^*}, \frac{d_{ij}}{d_j^*} \right) \quad (5)$$

ماتریس بی مقیاس شده فازی به دست آمده در جدول ۱۲ نشان داده شده است.

نظرات خبرگان در رابطه با گزینه‌ها در زمان مواجهه با معیارها بر اساس اعداد فازی تعریف شده، به صورت کمی در جدول ۱۰ آورده شده است.

پس از آن که متغیرهای زبانی ماتریس تصمیم، به اعداد فازی دوزنقه‌ای تبدیل شدند، باید ماتریس تصمیم فازی شکل گیرد.

تیم تصمیم‌گیرنده دارای k عضو باشد و رتبه‌بندی فازی k امین تصمیم‌گیرنده

دورنقه‌ای) به ازای $i = 1, 2, \dots, m$ و $j = 1, 2, \dots, n$ باشد،

رتبه‌بندی فازی ترکیبی $\tilde{x}_{ij} = (a_{ij}, b_{ij}, c_{ij}, d_{ij})$ گزینه‌ها را با توجه به معیارها می‌توان از روابط زیر به دست آورد [۲۱]:

$$a_{ij} = \text{Min}_k \{a_{ijk}\} \quad (1)$$

$$b_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^K b_{ijk}}{k} \quad (2)$$

$$c_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^K c_{ijk}}{k} \quad (3)$$

$$d_{ij} = \text{Max}_k \{d_{ijk}\} \quad (4)$$

جدول ۱۰: رتبه‌بندی گزینه‌ها بر اساس اعداد فازی توسط خبرگان با توجه به معیارهای موجود در مسیر حفاری

تصمیم‌گیرندگان									معیارها	گزینه‌ها
D8	D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1			
(۸,۹,۱۰,۱۰)	(۸,۹,۱۰,۱۰)	(۸,۹,۱۰,۱۰)	(۷,۸,۸,۹)	(۸,۹,۱۰,۱۰)	(۸,۹,۱۰,۱۰)	(۸,۹,۱۰,۱۰)	(۸,۹,۱۰,۱۰)	(۸,۹,۱۰,۱۰)	OT	C1
(۸,۹,۱۰,۱۰)	(۷,۸,۸,۹)	(۷,۸,۸,۹)	(۴,۵,۵,۶)	(۴,۵,۵,۶)	(۷,۸,۸,۹)	(۱,۲,۲,۳)	(۸,۹,۱۰,۱۰)	(۸,۹,۱۰,۱۰)	SS	
(۸,۹,۱۰,۱۰)	(۴,۵,۵,۶)	(۱,۲,۲,۳)	(۱,۲,۲,۳)	(۴,۵,۵,۶)	(۴,۵,۵,۶)	(۱,۲,۲,۳)	(۸,۹,۱۰,۱)	(۸,۹,۱۰,۱)	DS	
(۷,۸,۸,۹)	(۴,۵,۵,۶)	(۱,۲,۲,۳)	(۱,۲,۲,۳)	(۱,۲,۲,۳)	(۱,۲,۲,۳)	(۰,۰,۱,۲)	(۷,۸,۸,۹)	(۷,۸,۸,۹)	DU	
(۴,۵,۵,۶)	(۰,۰,۱,۲)	(۰,۰,۱,۲)	(۰,۰,۱,۲)	(۱,۲,۲,۳)	(۰,۰,۱,۲)	(۱,۲,۲,۳)	(۸,۹,۱۰,۱۰)	(۸,۹,۱۰,۱۰)	OT	C2
(۸,۹,۱۰,۱۰)	(۷,۸,۸,۹)	(۴,۵,۵,۶)	(۴,۵,۵,۶)	(۷,۸,۸,۹)	(۴,۵,۵,۶)	(۴,۵,۵,۶)	(۸,۹,۱۰,۱)	(۸,۹,۱۰,۱)	SS	
(۸,۹,۱۰,۱۰)	(۷,۸,۸,۹)	(۴,۵,۵,۶)	(۴,۵,۵,۶)	(۴,۵,۵,۶)	(۱,۲,۲,۳)	(۱,۲,۲,۳)	(۸,۹,۱۰,۱۰)	(۸,۹,۱۰,۱۰)	DS	
(۸,۹,۱۰,۱۰)	(۷,۸,۸,۹)	(۴,۵,۵,۶)	(۱,۲,۲,۳)	(۱,۲,۲,۳)	(۰,۰,۱,۲)	(۰,۰,۱,۲)	(۸,۹,۱۰,۱۰)	(۸,۹,۱۰,۱۰)	DU	
(۱,۲,۲,۳)	(۰,۰,۱,۲)	(۰,۰,۱,۲)	(۰,۰,۱,۲)	(۱,۲,۲,۳)	(۰,۰,۱,۲)	(۱,۲,۲,۳)	(۴,۵,۵,۶)	(۴,۵,۵,۶)	OT	C3
(۴,۵,۵,۶)	(۴,۵,۵,۶)	(۷,۸,۸,۹)	(۷,۸,۸,۹)	(۷,۸,۸,۹)	(۱,۲,۲,۳)	(۴,۵,۵,۶)	(۴,۵,۵,۶)	(۴,۵,۵,۶)	SS	
(۴,۵,۵,۶)	(۴,۵,۵,۶)	(۴,۵,۵,۶)	(۴,۵,۵,۶)	(۴,۵,۵,۶)	(۱,۲,۲,۳)	(۱,۲,۲,۳)	(۱,۲,۲,۳)	(۱,۲,۲,۳)	DS	
(۴,۵,۵,۶)	(۴,۵,۵,۶)	(۴,۵,۵,۶)	(۱,۲,۲,۳)	(۱,۲,۲,۳)	(۰,۰,۱,۲)	(۰,۰,۱,۲)	(۱,۲,۲,۳)	(۱,۲,۲,۳)	DU	
(۸,۹,۱۰,۱۰)	(۸,۹,۱۰,۱۰)	(۸,۹,۱۰,۱۰)	(۸,۹,۱۰,۱۰)	(۸,۹,۱۰,۱۰)	(۸,۹,۱۰,۱۰)	(۸,۹,۱۰,۱۰)	(۸,۹,۱۰,۱۰)	(۸,۹,۱۰,۱۰)	OT	C4
(۷,۸,۸,۹)	(۷,۸,۸,۹)	(۷,۸,۸,۹)	(۷,۸,۸,۹)	(۴,۵,۵,۶)	(۷,۸,۸,۹)	(۴,۵,۵,۶)	(۷,۸,۸,۹)	(۷,۸,۸,۹)	SS	
(۴,۵,۵,۶)	(۷,۸,۸,۹)	(۴,۵,۵,۶)	(۴,۵,۵,۶)	(۴,۵,۵,۶)	(۴,۵,۵,۶)	(۴,۵,۵,۶)	(۱,۲,۲,۳)	(۱,۲,۲,۳)	DS	
(۴,۵,۵,۶)	(۴,۵,۵,۶)	(۴,۵,۵,۶)	(۱,۲,۲,۳)	(۱,۲,۲,۳)	(۱,۲,۲,۳)	(۱,۲,۲,۳)	(۱,۲,۲,۳)	(۱,۲,۲,۳)	DU	
(۸,۹,۱۰,۱۰)	(۸,۹,۱۰,۱۰)	(۸,۹,۱۰,۱۰)	(۸,۹,۱۰,۱۰)	(۸,۹,۱۰,۱۰)	(۷,۸,۸,۹)	(۴,۵,۵,۶)	(۸,۹,۱۰,۱۰)	(۸,۹,۱۰,۱۰)	OT	C5
(۸,۹,۱۰,۱۰)	(۷,۸,۸,۹)	(۷,۸,۸,۹)	(۸,۹,۱۰,۱۰)	(۷,۸,۸,۹)	(۴,۵,۵,۶)	(۷,۸,۸,۹)	(۸,۹,۱۰,۱۰)	(۸,۹,۱۰,۱۰)	SS	
(۸,۹,۱۰,۱۰)	(۷,۸,۸,۹)	(۴,۵,۵,۶)	(۸,۹,۱۰,۱۰)	(۷,۸,۸,۹)	(۴,۵,۵,۶)	(۷,۸,۸,۹)	(۸,۹,۱۰,۱۰)	(۸,۹,۱۰,۱۰)	DS	
(۰,۰,۱,۲)	(۴,۵,۵,۶)	(۴,۵,۵,۶)	(۸,۹,۱۰,۱۰)	(۷,۸,۸,۹)	(۱,۲,۲,۳)	(۴,۵,۵,۶)	(۰,۰,۱,۲)	(۰,۰,۱,۲)	DU	
(۸,۹,۱۰,۱۰)	(۸,۹,۱۰,۱۰)	(۸,۹,۱۰,۱۰)	(۸,۹,۱۰,۱۰)	(۸,۹,۱۰,۱۰)	(۸,۹,۱۰,۱۰)	(۸,۹,۱۰,۱۰)	(۸,۹,۱۰,۱۰)	(۸,۹,۱۰,۱۰)	OT	C6
(۸,۹,۱۰,۱۰)	(۸,۹,۱۰,۱۰)	(۸,۹,۱۰,۱۰)	(۸,۹,۱۰,۱۰)	(۷,۸,۸,۹)	(۷,۸,۸,۹)	(۴,۵,۵,۶)	(۸,۹,۱۰,۱۰)	(۸,۹,۱۰,۱۰)	SS	
(۸,۹,۱۰,۱۰)	(۷,۸,۸,۹)	(۷,۸,۸,۹)	(۸,۹,۱۰,۱۰)	(۷,۸,۸,۹)	(۴,۵,۵,۶)	(۴,۵,۵,۶)	(۸,۹,۱۰,۱۰)	(۸,۹,۱۰,۱۰)	DS	
(۱,۲,۲,۳)	(۴,۵,۵,۶)	(۷,۸,۸,۹)	(۷,۸,۸,۹)	(۴,۵,۵,۶)	(۱,۲,۲,۳)	(۱,۲,۲,۳)	(۰,۰,۱,۲)	(۰,۰,۱,۲)	DU	
(۸,۹,۱۰,۱۰)	(۷,۸,۸,۹)	(۷,۸,۸,۹)	(۸,۹,۱۰,۱۰)	(۸,۹,۱۰,۱۰)	(۸,۹,۱۰,۱۰)	(۸,۹,۱۰,۱۰)	(۸,۹,۱۰,۱۰)	(۸,۹,۱۰,۱۰)	OT	C7
(۷,۸,۸,۹)	(۴,۵,۵,۶)	(۴,۵,۵,۶)	(۴,۵,۵,۶)	(۴,۵,۵,۶)	(۴,۵,۵,۶)	(۱,۲,۲,۳)	(۷,۸,۸,۹)	(۷,۸,۸,۹)	SS	
(۴,۵,۵,۶)	(۱,۲,۲,۳)	(۴,۵,۵,۶)	(۴,۵,۵,۶)	(۴,۵,۵,۶)	(۱,۲,۲,۳)	(۱,۲,۲,۳)	(۴,۵,۵,۶)	(۴,۵,۵,۶)	DS	
(۱,۲,۲,۳)	(۱,۲,۲,۳)	(۰,۰,۱,۲)	(۰,۰,۱,۲)	(۱,۲,۲,۳)	(۰,۰,۱,۲)	(۰,۰,۱,۲)	(۴,۵,۵,۶)	(۴,۵,۵,۶)	DU	
(۸,۹,۱۰,۱۰)	(۸,۹,۱۰,۱۰)	(۸,۹,۱۰,۱۰)	(۸,۹,۱۰,۱۰)	(۸,۹,۱۰,۱۰)	(۸,۹,۱۰,۱۰)	(۸,۹,۱۰,۱۰)	(۸,۹,۱۰,۱۰)	(۸,۹,۱۰,۱۰)	OT	C8
(۸,۹,۱۰,۱۰)	(۷,۸,۸,۹)	(۷,۸,۸,۹)	(۷,۸,۸,۹)	(۷,۸,۸,۹)	(۷,۸,۸,۹)	(۴,۵,۵,۶)	(۸,۹,۱۰,۱۰)	(۸,۹,۱۰,۱۰)	SS	
(۷,۸,۸,۹)	(۴,۵,۵,۶)	(۴,۵,۵,۶)	(۷,۸,۸,۹)	(۴,۵,۵,۶)	(۴,۵,۵,۶)	(۴,۵,۵,۶)	(۴,۵,۵,۶)	(۴,۵,۵,۶)	DS	
(۷,۸,۸,۹)	(۱,۲,۲,۳)	(۴,۵,۵,۶)	(۴,۵,۵,۶)	(۱,۲,۲,۳)	(۱,۲,۲,۳)	(۱,۲,۲,۳)	(۸,۹,۱۰,۱۰)	(۸,۹,۱۰,۱۰)	DU	
(۸,۹,۱۰,۱۰)	(۸,۹,۱۰,۱۰)	(۸,۹,۱۰,۱۰)	(۸,۹,۱۰,۱۰)	(۸,۹,۱۰,۱۰)	(۸,۹,۱۰,۱۰)	(۸,۹,۱۰,۱۰)	(۸,۹,۱۰,۱۰)	(۸,۹,۱۰,۱۰)	OT	C9
(۸,۹,۱۰,۱۰)	(۷,۸,۸,۹)	(۷,۸,۸,۹)	(۷,۸,۸,۹)	(۴,۵,۵,۶)	(۷,۸,۸,۹)	(۷,۸,۸,۹)	(۸,۹,۱۰,۱۰)	(۸,۹,۱۰,۱۰)	SS	
(۷,۸,۸,۹)	(۴,۵,۵,۶)	(۴,۵,۵,۶)	(۷,۸,۸,۹)	(۴,۵,۵,۶)	(۴,۵,۵,۶)	(۴,۵,۵,۶)	(۴,۵,۵,۶)	(۴,۵,۵,۶)	DS	
(۷,۸,۸,۹)	(۱,۲,۲,۳)	(۴,۵,۵,۶)	(۴,۵,۵,۶)	(۱,۲,۲,۳)	(۱,۲,۲,۳)	(۴,۵,۵,۶)	(۸,۹,۱۰,۱۰)	(۸,۹,۱۰,۱۰)	DU	
(۸,۹,۱۰,۱۰)	(۸,۹,۱۰,۱۰)	(۸,۹,۱۰,۱۰)	(۸,۹,۱۰,۱۰)	(۸,۹,۱۰,۱۰)	(۸,۹,۱۰,۱۰)	(۸,۹,۱۰,۱۰)	(۸,۹,۱۰,۱۰)	(۸,۹,۱۰,۱۰)	OT	C10
(۷,۸,۸,۹)	(۸,۹,۱۰,۱۰)	(۸,۹,۱۰,۱۰)	(۷,۸,۸,۹)	(۴,۵,۵,۶)	(۴,۵,۵,۶)	(۴,۵,۵,۶)	(۸,۹,۱۰,۱۰)	(۸,۹,۱۰,۱۰)	SS	
(۷,۸,۸,۹)	(۴,۵,۵,۶)	(۴,۵,۵,۶)	(۴,۵,۵,۶)	(۴,۵,۵,۶)	(۴,۵,۵,۶)	(۴,۵,۵,۶)	(۸,۹,۱۰,۱۰)	(۸,۹,۱۰,۱۰)	DS	
(۴,۵,۵,۶)	(۱,۲,۲,۳)	(۱,۲,۲,۳)	(۰,۰,۱,۲)	(۱,۲,۲,۳)	(۱,۲,۲,۳)	(۱,۲,۲,۳)	(۱,۲,۲,۳)	(۱,۲,۲,۳)	DU	
(۸,۹,۱۰,۱۰)	(۸,۹,۱۰,۱۰)	(۸,۹,۱۰,۱۰)	(۷,۸,۸,۹)	(۷,۸,۸,۹)	(۴,۵,۵,۶)	(۱,۲,۲,۳)	(۸,۹,۱۰,۱۰)	(۸,۹,۱۰,۱۰)	OT	C11
(۷,۸,۸,۹)	(۷,۸,۸,۹)	(۴,۵,۵,۶)	(۴,۵,۵,۶)	(۴,۵,۵,۶)	(۴,۵,۵,۶)	(۴,۵,۵,۶)	(۸,۹,۱۰,۱۰)	(۸,۹,۱۰,۱۰)	SS	
(۷,۸,۸,۹)	(۷,۸,۸,۹)	(۷,۸,۸,۹)	(۷,۸,۸,۹)	(۷,۸,۸,۹)	(۷,۸,۸,۹)	(۷,۸,۸,۹)	(۸,۹,۱۰,۱۰)	(۸,۹,۱۰,۱۰)	DS	
(۴,۵,۵,۶)	(۴,۵,۵,۶)	(۴,۵,۵,۶)	(۷,۸,۸,۹)	(۷,۸,۸,۹)	(۷,۸,۸,۹)	(۴,۵,۵,۶)	(۸,۹,۱۰,۱۰)	(۸,۹,۱۰,۱۰)	DU	
(۴,۵,۵,۶)	(۰,۰,۱,۲)	(۰,۰,۱,۲)	(۴,۵,۵,۶)	(۰,۰,۱,۲)	(۰,۰,۱,۲)	(۱,۲,۲,۳)	(۸,۹,۱۰,۱۰)	(۸,۹,۱۰,۱۰)	OT	C12
(۷,۸,۸,۹)	(۸,۹,۱۰,۱۰)	(۸,۹,۱۰,۱۰)	(۸,۹,۱۰,۱۰)	(۸,۹,۱۰,۱۰)	(۷,۸,۸,۹)	(۷,۸,۸,۹)	(۸,۹,۱۰,۱۰)	(۸,۹,۱۰,۱۰)	SS	
(۷,۸,۸,۹)	(۷,۸,۸,۹)	(۷,۸,۸,۹)	(۷,۸,۸,۹)	(۷,۸,۸,۹)	(۷,۸,۸,۹)	(۱,۲,۲,۳)	(۸,۹,۱۰,۱۰)	(۸,۹,۱۰,۱۰)	DS	
(۷,۸,۸,۹)	(۷,۸,۸,۹)	(۴,۵,۵,۶)	(۴,۵,۵,۶)	(۰,۰,۱,۲)	(۰,۰,۱,۲)	(۰,۰,۱,۲)	(۸,۹,۱۰,۱۰)	(۸,۹,۱۰,۱۰)	DU	
(۴,۵,۵,۶)	(۱,۲,۲,۳)	(۱,۲,۲,۳)	(۴,۵,۵,۶)	(۱,۲,۲,۳)	(۱,۲,۲,۳)	(۱,۲,۲,۳)	(۸,۹,۱۰,۱۰)	(۸,۹,۱۰,۱۰)	OT	C13
(۷,۸,۸,۹)	(۷,۸,۸,۹)	(۷,۸,۸,۹)	(۷,۸,۸,۹)	(۷,۸,۸,۹)	(۷,۸,۸,۹)	(۷,۸,۸,۹)	(۸,۹,۱۰,۱۰)	(۸,۹,۱۰,۱۰)	SS	
(۷,۸,۸,۹)	(۸,۹,۱۰,۱۰)	(۸,۹,۱۰,۱۰)	(۸,۹,۱۰,۱۰)	(۷,۸,۸,۹)	(۷,۸,۸,۹)	(۷,۸,۸,۹)	(۸,۹,۱۰,۱۰)	(۸,۹,۱۰,۱۰)	DS	
(۷,۸,۸,۹)	(۸,۹,۱۰,۱۰)	(۸,۹,۱۰,۱۰)	(۸,۹,۱۰,۱۰)	(۴,۵,۵,۶)	(۴,۵,۵,۶)	(۴,۵,۵,۶)	(۸,۹,۱۰,۱۰)	(۸,۹,۱۰,۱۰)	DU	

OT: Open TBM, SS: Single Shield TBM, DS: Double Shield TBM, DU: Double shield Universal

جدول ۱۱: ماتریس تصمیم تشکیل شده با توجه به معیارها و نظرات کارشناسان

معیارها	Open TBM	Single Shield TBM	Double Shield TBM	Double Shield Universal TBM
C ₁	(۷,۸/۸۷,۹/۷۵,۱۰)	(۱,۶/۷۵,۷,۱۰)	(۱,۴/۸۷,۵/۱۲,۱۰)	(۰,۳/۶۲,۳/۷۵,۹)
C ₂	(۰,۲/۲۵,۲/۷۵,۱۰)	(۴,۶/۷۵,۷,۱۰)	(۱,۵/۶۲,۵/۸۷,۱۰)	(۰,۴/۳۷,۴/۸۷,۱۰)
C ₃	(۰,۱/۳۷,۱/۸۷,۶)	(۱,۵/۷۵,۵/۷۵,۹)	(۱,۳/۸۷,۳/۸۷,۶)	(۰,۲/۶۲,۲/۸۷,۶)
C ₄	(۸,۹,۱۰,۱۰)	(۴,۷/۲۵,۷/۲۵,۹)	(۱,۵,۵,۹)	(۱,۳/۱۲,۳/۱۲,۶)
C ₅	(۴,۸/۳۷,۹/۱۲,۱۰)	(۴,۸,۸/۳۷,۱۰)	(۴,۷/۶۲,۸,۱۰)	(۰,۴/۲۵,۴/۶۲,۱۰)
C ₆	(۸,۹,۱۰,۱۰)	(۴,۸/۲۵,۸/۸۷,۱۰)	(۴,۷/۶۲,۸,۱۰)	(۰,۴,۴/۱۲,۹)
C ₇	(۷,۸/۷۵,۹/۵,۱۰)	(۱,۶/۶۲,۶/۶۲,۹)	(۱,۳/۸۷,۳/۸۷,۶)	(۰,۱/۳۷,۱/۸۷,۶)
C ₈	(۸,۹,۱۰,۱۰)	(۴,۷/۸۷,۸/۱۲,۱۰)	(۴,۵/۷۵,۵/۷۵,۹)	(۱,۴/۳۷,۴/۷۵,۱۰)
C ₉	(۸,۹/۱۲,۹,۱۰)	(۴,۷/۸۷,۸/۱۲,۱۰)	(۴,۶/۲۵,۶/۳۷,۱۰)	(۱,۴/۷۵,۴/۸۷,۱۰)
C ₁₀	(۸,۹,۱۰,۱۰)	(۴,۷/۲۵,۷/۶۲,۱۰)	(۴,۵/۸۷,۶,۱۰)	(۰,۲/۱۲,۲/۱۲,۶)
C ₁₁	(۱,۷/۳۷,۷/۸۷,۱۰)	(۴,۶/۲۵,۶/۳۷,۱۰)	(۷,۸/۱۲,۸/۲۵,۱۰)	(۴,۶/۶۲,۶/۷۵,۱۰)
C ₁₂	(۰,۲/۶۲,۳/۲۵,۱۰)	(۷,۸/۶۲,۹/۲۵,۱۰)	(۱,۷/۳۷,۷/۵,۱۰)	(۰,۴/۳۷,۴/۸۷,۱۰)
C ₁₃	(۱,۳/۶۲,۳/۷۵,۱۰)	(۷,۸/۱۲,۸/۲۵,۱۰)	(۷,۸/۵,۹,۱۰)	(۴,۷/۳۷,۷/۸۷,۱۰)

جدول ۱۲: ماتریس بی مقیاس شده فازی

معیارها	Open TBM	Single Shield TBM	Double Shield TBM	Double Shield Universal TBM
C ₁	(۰,۷,۰/۸۸۷,۰/۹۷۵,۱)	(۰/۱,۰/۶۷۵,۰/۷,۱)	(۰/۱,۰/۴۸۷,۰/۵۱۲,۱)	(۰,۰/۳۶۲,۰/۳۷۵,۰/۹)
C ₂	(۰,۰/۲۲۵,۰/۲۷۵,۱)	(۰/۴,۰/۶۷۵,۰/۷,۱)	(۰/۱,۰/۵۶۲,۰/۵۸۷,۱)	(۰,۰/۴۳۷,۰/۴۸۷,۱)
C ₃	(۰,۰/۱۵۲,۰/۲۰۷,۰/۶۶۶)	(۰/۱۱۱,۰/۶۳۸,۰/۶۳۸,۱)	(۰/۱۱۱,۰/۴۳,۰/۴۳,۰/۶۶۶)	(۰,۰/۲۹۱,۰/۳۱۸,۰/۶۶۶)
C ₄	(۰/۸,۰/۹,۱,۱)	(۰/۴,۰/۷۲۵,۰/۷۲۵,۰/۹)	(۰/۱,۰/۵,۰/۵,۰/۹)	(۰/۱,۰/۳۱۲,۰/۳۱۲,۰/۶)
C ₅	(۰/۴,۰/۸۳۷,۰/۹۱۲,۱)	(۰/۴,۰/۸,۰/۸۳۷,۱)	(۰/۴,۰/۷۶۲,۰/۸,۱)	(۰,۰/۴۲۵,۰/۴۶۲,۱)
C ₆	(۰/۸,۰/۹,۱,۱)	(۰/۴,۰/۸۲۵,۰/۸۸۷,۱)	(۰/۴,۰/۷۶۲,۰/۸,۱)	(۰,۰/۴,۰/۴۱۲,۰/۹)
C ₇	(۰/۷,۰/۸۷۵,۰/۹۵,۱)	(۰/۱,۰/۶۶۲,۰/۶۶۲,۰/۹)	(۰/۱,۰/۳۸۷,۰/۳۸۷,۰/۶)	(۰,۰/۱۳۷,۰/۱۸۷,۰/۶)
C ₈	(۰/۸,۰/۹,۱,۱)	(۰/۴,۰/۷۸۷,۰/۸۱۲,۱)	(۰/۴,۰/۵۷۵,۰/۵۷۵,۰/۹)	(۰/۱,۰/۴۳۷,۰/۴۷۵,۱)
C ₉	(۰/۱,۰/۸۱۲,۰/۹,۱)	(۰/۴,۰/۷۸۷,۰/۸۱۲,۱)	(۰/۴,۰/۶۲۵,۰/۶۳۷,۱)	(۰/۱,۰/۴۷۵,۰/۴۸۷,۱)
C ₁₀	(۰/۸,۰/۹,۱,۱)	(۰/۴,۰/۷۲۵,۰/۷۶۲,۱)	(۰/۴,۰/۵۸۷,۰/۶,۱)	(۰,۰/۲۱۲,۰/۲۱۲,۰/۶)
C ₁₁	(۰/۱,۰/۷۳۷,۰/۷۸۷,۱)	(۰/۴,۰/۶۲۵,۰/۶۳۷,۱)	(۰/۷,۰/۸۱۲,۰/۸۲۵,۱)	(۰/۴,۰/۶۶۲,۰/۶۷۵,۱)
C ₁₂	(۰,۰/۲۶۲,۰/۳۲۵,۱)	(۰/۷,۰/۸۶۲,۰/۹۲۵,۱)	(۰/۱,۰/۷۳۷,۰/۷۵,۱)	(۰,۰/۴۳۷,۰/۴۸۷,۱)
C ₁₃	(۰/۱,۰/۳۶۲,۰/۳۷۵,۱)	(۰/۷,۰/۸۱۲,۰/۸۲۵,۱)	(۰/۷,۰/۸۵,۰/۹,۱)	(۰/۴,۰/۷۳۷,۰/۷۸۷,۱)

$$\tilde{v}_{ij} = \tilde{F}_{ij} \cdot \tilde{W}_j \quad (۶)$$

ماتریس تصمیم بی مقیاس شده فازی وزن دار در جدول ۱۳ آورده شده است.

مرحله چهارم: تشکیل ماتریس تصمیم فازی بی مقیاس وزن دار

با توجه به وزن معیارهای ارائه شده در جدول، ماتریس تصمیم فازی وزن دار از ضرب کردن ضریب اهمیت مربوط به هر معیار در ماتریس بی مقیاس شده فازی و از رابطه زیر به دست می آید [۲۱]:

جدول ۱۳: ماتریس بی مقیاس شده فازی وزن دار

معیارها	Open TBM	Single Shield TBM	Double Shield TBM	Double Shield Universal TBM
C ₁	(۲۸/۰,۴۴۳/۰,۵۸۵/۰,۶/۰)	(۰/۰,۴,۰/۳۲۷,۰/۳۵,۰/۶)	(۰/۰,۴,۰/۲۴۳,۰/۲۵۶,۰/۶)	(۰,۰/۱۸۱,۰/۱۸۷,۰/۵۴)
C ₂	(۰,۰/۰,۴۵,۰/۰,۵۵,۳/۰)	(۰/۰,۴,۰/۱۳۵,۰/۱۴,۰/۳)	(۰/۰,۱,۰/۱۱۲,۰/۱۱۷,۰/۳)	(۰,۰/۰,۸۷,۰/۰,۹۷,۰/۳)
C ₃	(۰,۰/۰,۳,۰/۰,۴۱,۰/۱۹۹)	(۰/۰,۱۱,۰/۱۲۷,۰/۱۲۷,۰/۳)	(۰/۰,۱۱,۰/۰,۸۶,۰/۰,۸۶,۰/۱۹۹)	(۰,۰/۰,۵۸,۰/۰,۶۳,۰/۱۹۹)
C ₄	(۰/۵۶,۰/۷۲,۰/۸,۰/۹)	(۰/۲۸,۰/۵۸,۰/۵۸,۰/۸۱)	(۰/۰,۷,۰/۴,۰/۴,۰/۸۱)	(۰/۰,۷,۰/۲۹۴,۰/۲۹۴,۰/۵۴)
C ₅	(۰/۳۲,۰/۷۵۳,۰/۹۱۲,۱)	(۰/۳۲,۰/۷۲,۰/۸۳۷,۱)	(۰/۳۲,۰/۶۸۵,۰/۸,۱)	(۰,۰/۳۸۲,۰/۴۶۲,۱)
C ₆	(۰/۵۶,۰/۷۲,۰/۸,۰/۹)	(۰/۲۸,۰/۶۶,۰/۷۰۹,۰/۹)	(۰/۲۸,۰/۶۰۹,۰/۶۴,۰/۹)	(۰,۰/۳۲,۰/۳۲۹,۰/۸۱)
C ₇	(۰/۲۸,۰/۴۳۷,۰/۴۷۵,۰/۶)	(۰/۰,۴,۰/۳۳۱,۰/۳۳۱,۰/۵۴)	(۰/۰,۴,۰/۱۹۳,۰/۱۹۳,۰/۳۶)	(۰,۰/۰,۶۸,۰/۰,۹۳,۰/۳۶)
C ₈	(۰/۶۴,۰/۸۱,۱,۱)	(۰/۳۲,۰/۷۸۷,۰/۸۱۲,۱)	(۰/۳۲,۰/۵۱۷,۰/۵۷۵,۰/۹)	(۰/۰,۸,۰/۳۹۳,۰/۴۷۵,۱)
C ₉	(۰/۰,۸,۰/۷۳,۰/۹,۱)	(۰/۳۲,۰/۷۰۸,۰/۸۱۲,۱)	(۰/۳۲,۰/۵۶۲,۰/۶۳۷,۱)	(۰/۰,۸,۰/۴۲۷,۰/۴۸۷,۱)
C ₁₀	(۰/۱۶,۰/۲۷,۰/۴,۰/۵)	(۰/۰,۸,۰/۲۱۷,۰/۳۰۴,۰/۵)	(۰/۰,۸,۰/۱۷۶,۰/۲۴,۰/۵)	(۰,۰/۰,۶۳,۰/۰,۸۴,۰/۳)
C ₁₁	(۰/۰,۴,۰/۳۶۸,۰/۳۹۳,۰/۶)	(۰/۱۶,۰/۳۱۲,۰/۳۱۸,۰/۵)	(۰/۲۸,۰/۴۰۶,۰/۴۱۲,۰/۶)	(۰/۱۶,۰/۳۳۱,۰/۳۳۷,۰/۶)
C ₁₂	(۰,۰,۰/۰,۳۲,۰/۲)	(۰,۰,۰/۰,۹۲,۰/۲)	(۰,۰,۰/۰,۷۵,۰/۲)	(۰,۰,۰/۰,۴۸,۰/۲)
C ₁₃	(۰,۰,۰/۰,۳۷,۰/۲)	(۰,۰,۰/۰,۸۲,۰/۲)	(۰,۰,۰/۰,۸۵,۰/۲)	(۰,۰,۰/۰,۷۸,۰/۲)

$$\tilde{v}_j^* = \text{Max}_i \{ \tilde{v}_{ij3} \} \quad i=1,2,\dots,m, j=1,2,\dots,n \quad (9)$$

$$\tilde{v}_j^- = \text{Min}_i \{ \tilde{v}_{ij1} \} \quad i=1,2,\dots,m, j=1,2,\dots,n \quad (10)$$

گزینه‌هایی که در A^* و A^- قرار می‌گیرند، به ترتیب نشان‌دهنده گزینه‌های کاملاً بهتر و کاملاً بدتر هستند. حل ایده‌آل و ضد ایده‌آل فازی به ترتیب در جداول ۱۴ و ۱۵ آورده شده است.

جدول ۱۴: حل ایده‌آل فازی

$(0/16, 0/16, 0/16, 0/16), (0/33, 0/33, 0/33), (0/33, 0/33, 0/33), (0/9, 0/9, 0/9), (1, 1, 1)$	A^*
$(0/9, 0/9, 0/9, 0/9), (0/16, 0/16, 0/16, 0/16), (1, 1, 1, 1), (1, 1, 1, 1), (0/15, 0/15, 0/15, 0/15), (0/16, 0/16, 0/16, 0/16), (0/12, 0/12, 0/12), (0/12, 0/12, 0/12)$	

جدول ۱۵: حل ضد ایده‌آل فازی

$(0, 0, 0, 0), (0, 0, 0, 0), (0, 0, 0, 0), (0/7, 0/7, 0/7, 0/7), (0, 0, 0, 0), (0, 0, 0, 0), (0, 0, 0, 0), (0/8, 0/8, 0/8, 0/8)$	A^-
$(0/8, 0/8, 0/8, 0/8), (0, 0, 0, 0), (0/4, 0/4, 0/4, 0/4), (0, 0, 0, 0), (0, 0, 0, 0)$	

مرحله ششم: تعیین فاصله هر گزینه از حل ایده‌آل و ضد ایده‌آل (S^-, S^*)

$$d_i(\tilde{M}_1, \tilde{M}_2) = \sqrt{\frac{1}{4} [(a_1 - a_2)^2 + (b_1 - b_2)^2 + (c_1 - c_2)^2 + (d_1 - d_2)^2]} \quad (13)$$

فاصله هر گزینه از حل ایده‌آل و ضد ایده‌آل فازی به ترتیب از روابط زیر قابل محاسبه است [۲۱]:

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

قابل ذکر است که $d(\tilde{v}_{ij}, \tilde{v}_j^-)$ و $d(\tilde{v}_{ij}, \tilde{v}_j^*)$ اعداد قطعی هستند.

$$S_i^- = \sum_{j=1}^n d(\tilde{v}_{ij}, \tilde{v}_j^-) \quad , \quad i=1,2,\dots,m \quad (12)$$

فاصله از حل ایده‌آل و ضد ایده‌آل محاسبه شده برای گزینه‌ها به ترتیب در جداول ۱۶ و ۱۷ آورده شده است.

$d(\dots)$ فاصله بین دو عدد فازی است که اگر (a_1, b_1, c_1, d_1) و (a_2, b_2, c_2, d_2) دو عدد فازی ذوزنقه‌ای باشد، فاصله دو عدد برابر است با [۲۱]:

جدول ۱۶: فاصله از حل ایده‌آل محاسبه شده برای گزینه‌ها

Double Shield Universal TBM	Double Shield TBM	Single Shield TBM	Open TBM	معیارها
0/421227373	0/373960225	0/333642398	0/178377409	C ₁
0/210870221	0/195533245	0/173511527	0/231867419	C ₂
0/231804875	0/215240563	0/189327098	0/245041833	C ₃
0/570380575	0/547037476	0/386425931	0/198746069	C ₄
0/646615226	0/387822446	0/376619503	0/364401221	C ₅
0/608387418	0/366292574	0/345861605	0/198746069	C ₆
0/489303842	0/419075769	0/339824219	0/190127589	C ₇
0/610424852	0/470721255	0/368481004	0/203531224	C ₈
0/599561923	0/443286871	0/381774803	0/482001037	C ₉
0/404359061	0/295370953	0/271525781	0/211246302	C ₁₀
0/289452069	0/209391977	0/302517768	0/320262783	C ₁₁
0/160549058	0/154616461	0/151380316	0/1644487082	C ₁₂
0/154016233	0/152663846	0/153235113	0/163224539	C ₁₃
5/396952725	4/221013663	3/774127067	3/152060676	Σ

جدول ۱۷: فاصله از حل ضد ایده آل محاسبه شده برای گزینه‌ها

معیارها	Open TBM	Single Shield TBM	Double Shield TBM	Double Shield Universal TBM
C ₁	۰/۴۹۴۱۸۴۶۸۲	۰/۳۸۶۵۴۵۲۷۵	۰/۳۴۸۶۳۴۸۳۸	۰/۲۹۹۷۲۰۷۰۳
C ₂	۰/۱۵۴۱۵۰۹	۰/۱۷۹۸۷۸۴۳۱	۰/۱۷۰۵۳۸۱۱۹	۰/۱۶۳۱۴۴۸۷۴
C ₃	۰/۱۰۲۶۹۱۲۸۵	۰/۱۷۴۹۱۳۵۵	۰/۱۱۶۷۴۱۱۶۷	۰/۱۰۸۳۲۱۲۸۱
C ₄	۰/۶۸۶۳۶۷۲۴۹	۰/۵۲۷۲۳۳۳۴۵	۰/۴۳۷۴۳۵۷۱	۰/۳۵۷۴۸۲۸۶۷
C ₅	۰/۷۹۰۷۵۱۶۹۹	۰/۷۶۱۸۰۱۹۷۶	۰/۷۴۳۵۷۶۶۶	۰/۵۸۲۷۶۱۷۴۴
C ₆	۰/۷۵۵۳۱۴۵۰۴	۰/۶۷۵۷۷۳۸۱۶	۰/۶۴۵۹۲۵۸۸۶	۰/۴۶۵۴۹۴۶۲۹
C ₇	۰/۴۶۳۳۲۹۴۲۸	۰/۳۵۷۸۸۳۳۶۱	۰/۲۲۶۷۶۹۷۰۷	۰/۱۸۸۹۹۲۷۲۵
C ₈	۰/۷۹۶۷۵۹۰۶	۰/۶۹۶۳۶۰۷۱۸	۰/۵۳۹۹۰۶۰۱	۰/۵۲۴۴۹۸۳۳۲
C ₉	۰/۶۹۶۶۵۲۷۱۱	۰/۶۷۷۱۶۴۶۷۷	۰/۶۰۱۳۶۷۸۱۶	۰/۵۳۲۰۸۵۰۵
C ₁₀	۰/۳۵۶۵۴۵۹۳	۰/۳۱۴۶۰۴۹۱۱	۰/۲۹۳۶۷۳۲۸۸	۰/۱۵۸۹۲۲۱۵۱
C ₁₁	۰/۳۶۹۳۸۹۰۲۳	۰/۳۰۷۱۱۰۷۲۹	۰/۴۰۱۱۰۴۷۲۴	۰/۳۵۳۸۶۷۹۱۳
C ₁₂	۰/۱۰۱۲۷۱۹۱۱	۰/۱۱۰۰۷۲۷۰۳	۰/۱۰۶۸۰۰۰۴۷	۰/۱۰۲۸۳۹۶۸۱
C ₁₃	۰/۱۰۱۶۹۶۸۵۳	۰/۱۰۸۰۷۸۶۷۵	۰/۱۰۸۶۵۵۶۹	۰/۱۰۷۳۳۵۹۲۱
Σ	۵/۸۶۸۱۰۵۲۳۵	۵/۲۷۷۴۲۲۱۶۸	۴/۷۴۱۱۳۰۵۴۱	۳/۹۴۵۴۶۷۸۷۱

مرحله هفتم: محاسبه شاخص شباهت

شاخص شباهت نیز از رابطه زیر محاسبه می‌شود [۲۱]:

$$CC_i = \frac{S_i^-}{S_i^* + S_i^-} \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (14)$$

شاخص شباهت برای گزینه‌ها در جدول ۱۸ آورده شده است.

جدول ۱۸: شاخص شباهت محاسبه شده برای گزینه‌ها

شاخص شباهت	Open TBM	Single Shield TBM	Double Shield TBM	Double Shield Universal TBM
شاخص شباهت	۰/۶۵۰۵۵۴۰۲	۰/۵۸۳۰۴۰۸	۰/۵۲۸۴۲۷۸	۰/۴۲۲۳۱۷۵

مرحله هشتم: رتبه‌بندی گزینه‌ها

با توجه به این که تأثیر معیارها در شرایط واقعی منفی بوده و در محاسبات مثبت در نظر گرفته شده بودند، بنابراین گزینه‌ای به عنوان مناسب‌ترین ماشین انتخاب می‌شود که کمترین شباهت را به حالت ایده آل داشته باشد. نتایج به دست آمده گویای آن است که از میان گزینه‌ها، ماشین تونل‌بری Double Shield Universal TBM به عنوان مناسب‌ترین ماشین برای حفاری قطعه دوم تونل امامزاده هاشم (ع) انتخاب می‌شود.

۴- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

امروزه استفاده از ماشین‌های تونل‌بری تمام مقطع مکانیزه به منظور حفاری تونل‌ها به طور چشمگیری گسترش پیدا کرده است. انتخاب ماشین تونل‌بری مناسب منجر به بهبود روند حفاری و کاهش هزینه‌ها و صرفه‌جویی در زمان یک پروژه

می‌شود. در این تحقیق به منظور انتخاب ماشین تونل‌بری تمام مقطع برای قطعه دوم تونل راه امامزاده هاشم (ع)، در گام نخست چهار ماشین تونل‌بر تمام مقطع مکانیزه در زمینهای سنگی شامل Double Shield, Single Shield TBM, Open TBM و TBM Double shield Universal به عنوان گزینه‌های پیشنهادی مورد بررسی قرار گرفتند. در مرحله بعد پرسش‌نامه‌هایی به منظور مقایسه این چهار ماشین با توجه به معیارهایی نظیر شاخص RQD، مقاومت فشاری، مقاومت کششی، ناپایداری سینه‌کار، ناپایداری دیواره‌ها، هجوم آب، فاصله‌داری ناپیوستگی‌ها، زون‌های گسلی، مچاله شونده‌گی، حفرات انحلالی، قطر تونل، شیب تونل و شعاع انحنای مسیر تهیه و در اختیار خبرگان قرار گرفت. در زمینه انتخاب ماشین تونل‌بری مکانیزه برای اولین بار در این تحقیق به منظور افزایش دقت و

دلیل انتخاب ماشین تونل‌بری Double shield TBM را می‌توان انعطاف‌پذیری بالای این ماشین به هنگام مواجهه با مخاطرات موجود در مسیر قطعه دوم تونل امامزاده هاشم (ع) نظیر هجوم آب، ناپایداری‌ها، زون‌های گسلی، حفرات کارستی و مچاله شونده دانست. چراکه این مخاطرات به‌عنوان اصلی‌ترین و جدی‌ترین خطرات پیش‌روی حفاری تونل مطرح می‌باشند. ماشین‌های تونل‌بری Double Shield TBM, Single Shield TBM و Open TBM نیز در رتبه‌های بعدی قرار گرفتند.

نزدیک شدن به شرایط واقعی، علاوه بر مخاطرات ژئوتکنیکی و شرایط زمین‌شناسی، از معیارهای ژئومتری تونل نیز استفاده شد. به دلیل تنوع نظرات خبرگان و دستیابی به نتایج دقیق‌تر، روش شباهت به گزینه ایده‌آل (Fuzzy-TOPSIS) مورد استفاده قرار گرفت. وزن معیارها با توجه به درجه اهمیت آن‌ها در مسیر قطعه دوم تونل امامزاده هاشم (ع) مشخص و بعد از تشکیل ماتریس‌های تصمیم اقدام به رتبه‌بندی و انتخاب برترین گزینه شد. در نهایت ماشین تونل‌بری تمام مقطع Double TBM shield Universal به‌عنوان مناسب‌ترین ماشین انتخاب شد.

۵- فهرست نمادها

نماد	واحد	شرح
\tilde{r}_{ij}	—	درایه واقع در خانه ij
\tilde{w}_j	—	ضریب اهمیت معیار
\tilde{v}_i^*	—	بهترین مقدار معیار i از بین تمام گزینه‌ها
\tilde{v}_i^-	—	بدترین مقدار معیار i از بین تمام گزینه‌ها

۶- مراجع

[6] Karami, M., Faramarzi, L & ,Raisi Gahrooe, D . (2014). The influence of geological features and geomechanical properties of rock mass on TBM selection for SABZKOUH water conveyance tunnel . *Journal of engineering geology*, 2169-2198.

[7] Khademi Hamidi, J., Shahriar, K., Rezai, B., Rostami, J & ,Bejari, H.(2010). Risk assessment based selection of rock TBM for adverse geological conditions using Fuzzy-AHP . *Bullten of engineering geology and the environment*, 523-532.

[8] Lashgari, A., Yazdani Chamzini, A., Fouladgar, M. M., Zavadskas, E. K., shafiee, S & ,Abbate, N .(2012) . Equipment selection using Fuzzy multi criteria decision making model: case study of Gole Gohar Iron Mine . *Inzinerine Ekonomika- Engineering Economics* ,125-136.

[9] Mikaeil, R., Zare Naghadehi, M & ,Khalokakaie, R . (2009) .A decision support system using fuzzy analytical hierarchy process (FAHP) and TOPSIS approaches for selecting of the optimum underground mining method *Archives of mining science* ,349-368.

[10] Pazand, K & ,Hezarkhani, A .(2014) .Porphyry Cu potential area selection using the combine AHP-TOPSIS methods, a case study in siahrud area (NW,

[1] Barla, G & ,Pelizza, S .(2000) .TBM tunnelling in difficult ground conditions . *geoeng melbourne Australia* .

[2] Bejari, H., shahriar, k., khademi hamidi, j & . Akbarpour Shirazi, M .(2010) .Optimal Tunneling method selection using Fuzzy multiple Attribute decision making method . *ISRM International symposium* .

[3] Fahimdanesh, S & ,Hafezi Moghadas, N .(2014) . Tunneling machine selection model based on geologic parameters using AHP method . *Indian Journal of Scientific Research*, 137-145.

[4] Fouladgar , M. M .,Yazdani Chamzini, A & . Zavadskas, E. K .(2012) .Risk evaluation of tunneling projects . *Archives of Civil and Mechanical Engineering* , 1-12.

[5] Jafari Rad, A. R & ,Bucsh, W .(2011) .Porphyry Copper Mineral Prospectivity Mapping Using Interval Valued Fuzzy Sets Topsis Method in Central Iran . *Journal of Geographic Information System* ,312-317.

- [16] Yari, M., Monjezi, M & ,Bagherpour, R .(2014) . Selecting the most suitable blasting pattern using AHP-TOPSIS method: sungun copper mine *Mineral Mining Technology* ,967-975.
- [17] Yazdani Chamzini, A & ,Haji Yakhchali, S . (2012) .Tunnel Boring Machine (TBM) selection using fuzzy multicriteria decision making method *Tunnelling and Underground Space Technology* ,194-204.
- [18] Yazdani, A., Lashgari, A & ,Basiri, M. H .(2010) . Choosing shaft sinking method by using the combination of Fuzzy AHP& Fuzzy TOPSIS approaches *1st International applied geological congress, Islamic Azad University* .tehran.
- [۱۹] ساحل، م. م. (۱۳۸۲). خدمات مهندسی طرح و ساخت تونل قطعه دوم امامزاده هاشم (ع). تهران.
- [۲۰] کوروش، ش.، شریفزاده، م.، خادمی حمیدی، ج.، حدادی، م. (۱۳۸۵). انتخاب ماشین تونل‌زنی تمام مقطع در سنگ‌بر اساس کاهش مخاطرات ژئوتکنیکی. هفتمین کنفرانس تونل‌سازی تهران-ایران، (ص. ۱۰۵۹-۱۰۷۰). تهران.
- [۲۱] عطایی، م. (۱۳۸۹). تصمیم‌گیری چند معیاره فازی. (ک. محمد، تدوین) شاهرود: انتشارات دانشگاه صنعتی شاهرود.
- IRAN) *Earth Science Informations* ,207-220.
- [11] Safari, M., Kakaei, R., Ataei, M & .. Karazmoozian, M. (2011) .Using Fuzzy-TOPSIS method for material processing plant site selection . *Arabian journal of Geosciences* ,1011-1019.
- [12] Shahriar, K., Sharifzadeh, M & ,Khademi Hamidi, J .(2008) .Geotechnical risk assessment based approach for rock TBM selection in difficult ground conditions . *Tunnelling and Underground Space Technology* ,318-325.
- [13] Shiyong, W., Wang, G., jinsong, X & ,Jian, W . (2008) .Research on TBM Type-selection and key construction technology for Jippeng 2 hydropower station *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering* ,15.
- [14] Weibing, L & ,Bin, L .(2009) .Analyses of the Geological factors effecting on selecting type of TBM . *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering* .
- [15] Xinmin, W., Jianchun, Q., Qilini, Z., Wujiu, C & .. Xianlong, C .(2013) .Mining method optimization of Gu mountain stay ore based on AHP-TOPSIS evaluation model *Journal of Central south University (science and Technology)*.