



ارزیابی مخاطرات ژئوتکنیکی در پروژه‌های تونل‌زنی با استفاده از روش FDAHP-PROMETHEE (مورد مطالعاتی: قطعه دوم تونل امامزاده هاشم (ع))

رضا میکائیل^{۱*}، احسان جعفرنژاد قراحسنلو^۱، احمد آریافر^۲

^۱ گروه مهندسی معدن، مواد و متالورژی، دانشگاه صنعتی ارومیه، ارومیه، ایران

^۲ گروه مهندسی معدن، دانشکده مهندسی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳ خرداد ۱۳۹۵

بازنگری: ۷ آذر ۱۳۹۵

پذیرش: ۲۶ دی ۱۳۹۵

ارائه آنلاین: ۳ بهمن ۱۳۹۵

کلمات کلیدی:

حفاری مکانیزه
ریسک‌های ژئوتکنیکی
تحلیل سلسله مراتبی فازی دلفی
پرامیتی

چکیده: امروزه تونل‌ها بر مبنای نیازهای عمومی ممکن است در محل‌هایی احداث شوند که از نظر شرایط زمین‌شناسی مطلوب نباشند. در اغلب این شرایط، به منظور بهبود عملکرد و ایمنی، استفاده از تکنولوژی حفاری مکانیزه غیر قابل اجتناب است. تونل‌سازی مکانیزه در محیط‌های سخت با مخاطرات فراوانی از جمله برخورد به ناحیه‌های گسلی، هجوم آب و مچاله‌شوندگی روبرو است که می‌تواند عملیات تونل‌زنی را برای مدت طولانی متوقف سازد. به دلیل حجم بالای سرمایه‌گذاری در چنین پروژه‌هایی، پیش‌بینی و بررسی مخاطرات از اهمیت بالایی برخوردار است. در این تحقیق سعی شده است تا پس از بررسی مشخصات زمین‌شناسی و شناسایی مخاطرات ژئوتکنیکی قطعه دوم تونل امامزاده هاشم (ع) به ارزیابی و معرفی پرمخاطره‌ترین مقطع از طول مسیر حفاری تونل با استفاده از روش FDAHP-PROMETHEE پرداخته شود. بدین ترتیب پس از انتخاب معیارهای مسئله، شامل ناپایداری تونل، هجوم آب و مچاله‌شوندگی، وزن هر کدام از معیارها با توجه به شدت، نرخ و احتمال رخداد با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی فازی دلفی تعیین شد. در انتها پرمخاطره‌ترین مقطع در طول مسیر قطعه دوم تونل امامزاده هاشم (ع) با استفاده از روش پرامیتی مورد ارزیابی قرار گرفته شده است. نتایج حاصل از بررسی‌ها نشان داد که مقطع H-۳ به عنوان پرمخاطره‌ترین مقطع از میان مقاطع مورد بررسی از دیدگاه ژئوتکنیکی می‌باشد.

۱- مقدمه

با افزایش روزافزون جمعیت و توسعه شهرها در سال‌های اخیر، جابجایی و حمل و نقل مناسب و سریع بین شهری اهمیت ویژه‌ای یافته است. تونل‌های راه به علت قرارگیری در محیط‌های با عدم قطعیت بالا، با مخاطرات زیادی مواجه می‌شوند. از جمله دلایل بروز این مخاطرات می‌توان به ناشناخته بودن شرایط زمین و محدود بودن فضاهای در دسترس اشاره کرد؛ که با توجه مطالعات نامناسب پیش از اجرا، خطا در مراحل طراحی و محاسبات، احتمال رخداد مخاطرات افزایش می‌یابد. عملیات تونل‌زنی، شرایط پایدار محیط، دست‌خوش تغییر می‌شود که این مسئله علاوه بر اثرات قابل توجه در زمین، پی‌آمدهایی را نیز بر سطح آن می‌گذارد؛ بنابراین، از نظر طراحی و برنامه‌ریزی، پیشروی با هدف کمینه کردن مخاطرات و اثرات آن امری لازم و اجتناب‌ناپذیر به نظر می‌رسد [۱].

از جمله مهم‌ترین مخاطرات حفاری می‌توان به مخاطرات ژئوتکنیکی اشاره کرد. در خصوص حفاری با تی‌بی‌ام می‌توان این مخاطرات را شامل مواردی از قبیل؛ فشار سنگ و تغییر شکل تونل، وجود ساختارهای

زمین‌شناسی مانند گسل، حفرات کارستی^۱ و سفره‌های آب زیرزمینی، خطر چسبندگی در محیط‌های دارای رُس، خطر ناپایداری تونل در محیط‌های سست، فشار آماس، انتشار گاز، ناپایداری سینه کار تونل، اضافه حفاری در قسمت جلو یا بالای قسمت برنده، اضافه حفاری در فضای سپر، وجود بلوک‌های بزرگ قرار گرفته در ماتریس سنگ نرم، هجوم آب سطحی (به طور موقت یا دائمی)، توده سنگ دارای کوارتز بالا، تغییر شکل قسمت عقب سپر به علت فشار بیش از اندازه محیط در زون‌های گسلی و دیگر موارد دانست. شکل ۱ فراوانی پارامترهای به کار رفته در تحقیقات صورت گرفته از سال ۲۰۰۴ تا ۲۰۱۵ را در ارتباط با مخاطرات ژئوتکنیکی نشان می‌دهد. از میان پارامترهای به کار رفته ۵ پارامتر مچاله‌شوندگی، ناپایداری دیواره، سینه کار، چسبندگی و نفوذپذیری دارای بیشترین درصد فراوانی می‌باشند. این موضوع می‌تواند دلیلی بر اهمیت بالای پارامترها مذکور در بررسی مخاطرات ژئوتکنیکی باشد. در تحقیق پیشرو سعی می‌شود تا از دیدگاه مخاطرات ژئوتکنیکی به بررسی و ارزیابی قطعات مسیر حفاری تونل امام زاده هاشم (ع) با کمک روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره، تحلیل سلسله مراتبی دلفی فازی پرداخته شود.

*نویسنده عهده‌دار مکاتبات: reza.mikaeil@gmail.com

جدول ۱: مشخصات ژئومکانیکی واحدهای زمین‌شناسی مسیر تونل
قطعه دوم امامزاده هاشم (ع) [۲]

Table 1. Geomechanical characteristics of geological units of tunnel path of the second part of Emamzadeh Hashem

نام مقطع	لیتولوژی	طول (متر)	مقاومت تراکمی تک محوره (مگاپاسکال)	وزن مخصوص (گرم بر سانتی متر مکعب)
H-۴	توف برشی و گدازه آئوسن	۱۳۰	۳۵	۲/۶
H-۱	توف داسیتی آئوسن	۶۰۰	۱۲۰	۲/۶
H-۳	سازند درود	۵۲۰	۵۵	۲/۶
H-۱۶	سازند مبارک	۱۴۰	۷۵	۲/۶
H-۲	سازند روته	۱۰۲۰	۱۱۰	۲/۶
H-۱۱	سازند الیکا	۱۸۰	۴۰	۲/۶
H-۱۵	سازند باروت	۱۳۰	۳۰	۲/۶
-	ناحیه‌های گسلی	۴۰۰	۳۰	۲/۶

۲-۲- ساختار زمین‌شناسی مسیر تونل

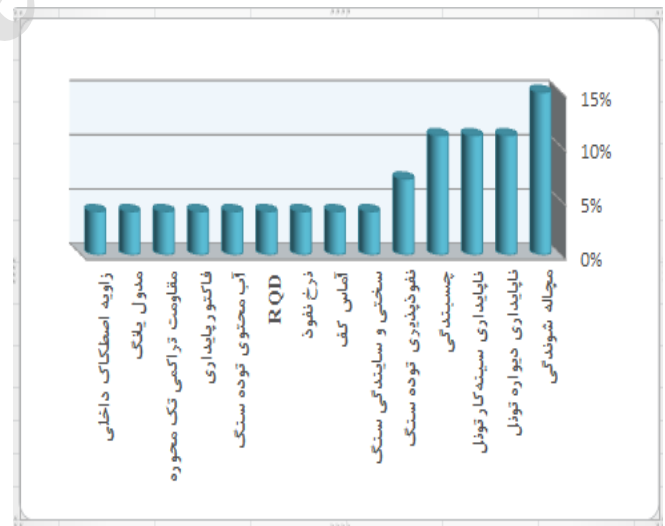
اندازه‌گیری‌های روی زمین نشان می‌دهد که سنگ‌های سازند الیکا به صورت یک تاقدیس موجدار محلی و یک ناودیس بی‌قرینه هستند. لایه‌ها در پهلوی جنوبی این ناودیس که امتداد آن تقریباً به صورت شرقی-غربی است، شیب بسیار تندی دارند. محور چین محلی که در سنگ‌های سازند الیکا در دامنه شمالی کوه دیده می‌شود دارای خواب محوری به سوی شمال شرقی است. شدت این چین خوردگی به سوی پایین کاهش یافته است. براساس پروفیل زمین‌شناسی، مسیر تونل با حدود ۷ تا ۸ گسل برخورد خواهد داشت که با توجه به ناحیه‌های گسلی آن‌ها در حدود ۴۰۰ متر از مسیر تونل را ناحیه‌های گسلی تشکیل می‌دهند. در جدول ۲، مشخصات ژئوتکنیکی ناحیه‌های گسلی قطعه دوم تونل امامزاده هاشم (ع) آورده شده است.

۲- معرفی ساختگاه قطعه دوم تونل امامزاده هاشم (ع)

قطعه دوم تونل راه امامزاده هاشم (ع) بخشی از طرح توسعه جاده‌ای کشور است که وظیفه افزایش ظرفیت حمل و نقل و 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 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 حدود ۱۲/۲۷ متر و شیب طولی تونل ۲/۵ درصد است. روش اجرای تونل به صورت مکانیزه و با استفاده از یک دستگاه حفاری تمام مقطع سپر تلسکوپی است [۲].

۲-۱- سنگ‌شناسی مسیر تونل

ناحیه مورد بررسی قسمتی از استان ساختاری-رسوبی البرز است که در جنوب گسله راندگی سراسری شاهرود-ایبک واقع شده است و واحدهای لیتولوژی آن را می‌توان، واحدهای چینه شناسی البرز نامید. با توجه به مطالعات انجام شده، ۷ سازند سر راه تونل خواهد بود که به ترتیب عبارت‌اند از: توف^۱ برشی و گدازه آئوسن^۲، توف داسیتی^۳ آئوسن، سازند درود، سازند مبارک، سازند روته، نازک لایه کرمینه‌ای و سازند باروت [۳] پروفیل طولی تونل قطعه دوم تونل راه امامزاده هاشم (ع) نشان داده شده است. در جدول ۱ مشخصات ژئوتکنیکی واحدهای مختلف مسیر قطعه دوم تونل امامزاده هاشم (ع) آورده شده است.



شکل ۱: فراوانی پارامترهای به کار رفته (مربوط به مخاطرات ژئوتکنیکی) در پژوهش‌های سال‌های ۲۰۰۴ تا ۲۰۱۵ [۱]

Fig. 1. The abundance of the parameters used (geotechnical hazards) in the research years 2004 to 2015

- 1 Tuff
- 2 Eocene
- 3 Dacite

مشخصات زمین‌شناسی و هیدروژئولوژی منطقه امامزاده هاشم (ع) نشان می‌دهد، کل مسیر تونل زیر سطح ایستایی آب‌های زیرزمینی قرار گرفته است. با توجه به وجود مناطق ضعیف همراه با دسته درزه‌های متعدد و تراز بالای آب در برخی مناطق احتمال هجوم آب در موقع حفاری وجود دارد. مشخصات هیدروژئولوژی مسیر تونل قطعه دوم امامزاده هاشم (ع) در جدول ۳ آورده شده است.

جدول ۲: مشخصات ژئوتکنیکی ناحیه‌های گسلی قطعه دوم تونل امامزاده هاشم (ع) [۲]

Table 2. Geotechnical characteristics of fault zones of the second part of Emamzadeh Hashem tunnel

مدول الاستیسیته (مگاپاسکال)	ضریب پواسون	زاویه اصطکاک داخلی (درجه)	مقاومت چسبندگی (مگاپاسکال)
۷۷۳/۶۸	۰/۲۵	۳۰	۰/۱

جدول ۳: مشخصات هیدروژئولوژی مسیر تونل قطعه دوم امامزاده هاشم (ع) [۲]

Table 3. Hydrographic profile of the tunnel route of the second part of Emamzadeh Hashem

ناحیه	کیلومتر	لیتولوژی	متوسط ارتفاع سطح آب زیرزمینی (متر)	تعداد دسته درزه	نفوذپذیری (متر بر ثانیه)
۱	۹+۴۸۰-۹+۳۶۰	ماسه‌سنگ و سنگ‌آهک	۳۵	-	۱۰ ^{-۷}
۲	۸+۷۰۰-۹+۳۶۰	مصالح ولکانیکی	۱۲۵	۳	۱۰ ^{-۵}
۳	۸+۲۸۰-۸+۷۰۰ ۷+۸۸۰-۸+۰۴۰	ماسه‌سنگ	۲۶۵	۵	۱۰ ^{-۳}
۴	۸+۱۸۰-۸+۲۸۰	سنگ‌آهک	۲۷۰	-	۱۰ ^{-۷}
۵	۶+۶۸۰-۷+۸۸۰	دولومیت و سنگ‌آهک تیره	۱۹۵	۵	۱۰ ^{-۴}
۶	۶+۴۸۰-۶+۶۸۰	دولومیت و سنگ‌آهک	۷۰	۵	۱۰ ^{-۶}
۷	۶+۲۴۰-۶+۴۰۰	شیل و ماسه‌سنگ	۲۵	-	۱۰ ^{-۷}

جدول ۴: مقادیر محاسبه شده برای مقاطع مختلف تونل

Table 4. Calculated values for different sections of the tunnel

مقطع	مچاله‌شوندگی (سانتی‌متر)	هجوم آب (لیتر بر ثانیه)	ناپایداری تونل (کرنش بحرانی)
H- ۴	۱/۳۴	۰/۰۴۵	۰/۰۰۶
H- ۱	۰/۵	۲/۶	۰/۰۰۲
H- ۳	۳/۲	۵۰۴	۰/۰۰۴
H- ۱۶	۱/۳۸	۰/۴۵	۰/۰۰۳
H- ۲	۰/۸۳	۴۴/۷	۰/۰۰۳
H- ۱۱	۰/۸۶	۸/۶۵	۰/۰۰۴
H- ۱۵	۰/۳۳	۰/۰۰۷	۰/۰۰۴

۴- تعیین پرمخاطره ترین مقطع در تونل امام زاده هاشم (ع) با استفاده از روش PROMETHEE

۴-۱- معرفی روش تصمیم‌گیری پرامیتی

پرامیتی یکی از روش‌های پشتیبان تصمیم‌گیری است که موجب ایجاد تحول در روش‌های رتبه‌بندی شده است. این روش اساساً به دلیل خواص ریاضی و به خصوص سهولت کار با آن‌ها موفقیت‌آمیز بوده است. از جمله

۳- مخاطرات ژئوتکنیکی تونل قطعه دوم تونل امامزاده هاشم (ع)

تونل‌سازی مکانیزه در محیط‌های سخت همیشه با مخاطرات فراوانی روبرو بوده است. کمتر پروژه تونل‌سازی در این نواحی را می‌توان یافت که توقف‌های طولانی مدت ناشی از شرایط خاص ژئوتکنیکی در آن رخ نداده باشد. مواردی همچون برخورد به ناحیه‌های گسلی، ناپایداری تونل، هجوم آب و گاز، مچاله‌شوندگی از جمله مخاطراتی هستند که می‌توانند حفاری تونل را به مدت طولانی متوقف سازند [۴]. با توجه به مطالعات زمین‌شناسی انجام گرفته در قطعه دوم تونل امامزاده هاشم (ع) و بررسی پروفیل مسیر، تعداد ۳ پی‌آمد محتمل خطر ژئوتکنیکی شناسایی شد. ناپایداری تونل، هجوم آب زیرزمینی و مچاله‌شوندگی از جمله این مخاطرات هستند. مناطق ضعیف، مشکل ناپایداری تونل را در زمان حفاری افزایش می‌دهند. این مساله که بیشتر به صورت ریزش سقف و یا دیواره بروز می‌کند می‌تواند موجب گیرافتادن کله‌حفار تی‌بی‌ام شود. در صورتی که شدت ریزش بالا باشد و به صورت پیاپی رخ دهد، این موضوع می‌تواند باعث توقف‌های طولانی مدت شود. در مسیر تونل قطعه دوم امامزاده هاشم (ع) نیز مقاطع مختلف با مشخصات ژئومکانیکی متفاوت وجود دارد. در جدول ۴ نتایج بدست آمده شامل کرنش بحرانی، میزان هجوم آب و مچاله‌شوندگی به تفکیک هر مقطع آمده است.

تکنیک‌های تصمیم‌گیری چند معیاره، روش پرامیتی از سوی دانشگاهیان و محققان مورد توجه بیشتری قرار گرفته و مقالات زیادی با بهره‌گیری از این روش در مجلات خارجی منتشر شده است. در جدول ۵ اطلاعاتی از مقالات مهندسی به چاپ رسیده در ارتباط با روش تصمیم‌گیری پرامیتی آورده شده است.

مزایای مهم دیگر این روش می‌توان به قابل فهم بودن و پایایی نتایج و عدم نیاز به اطلاعات بیش از اندازه و گیج‌کننده اشاره کرد [۵]. این روش برای یک مجموعه محدود گزینه‌ها و معیارها که اغلب با یکدیگر تداخل دارند به کار می‌رود. اساس این روش بر مبنای مقایسه زوجی گزینه‌ها استوار است. گزینه‌ها بر اساس معیارهای مختلف ارزیابی می‌شوند [۶]. از میان

جدول ۵: مقالات به چاپ رسیده در مورد روش تصمیم‌گیری PROMETHEE

Table 5. Published Articles related to PROMETHEE Method

عنوان مقاله
رتبه‌بندی سنگ‌های ابعادی بر اساس قابلیت برش به کمک روش تصمیم‌گیری پرامیتی، [۷] ۲۰۱۵.
مقایسه روش‌های تصمیم‌گیری AHP و PROMETHEE در انتخاب سیستم سازه ساختمان [۸].
اولویت رتبه‌بندی روش ارزیابی غنی‌سازی (PROMETHEE) [۹].
روشی برای تعیین معیارهای وزن در سیستم‌های مهندسی [۱۰].
روش اصلاح شده برای روش تصمیم‌گیری چند معیاره پرامیتی [۱۱].
عملکرد نرم‌افزار روش تصمیم‌گیری پرومته در معادن [۱۲].
انتخاب روش استخراج معدن توسط روش AHP و PROMETHEE [۱۳].
انتخاب تاسیسات به‌منظور خشک کردن لاشی دانه و مواد پودری با استفاده از روش تصمیم‌گیری پرامیتی [۱۴].
بهینه‌سازی مصرف انرژی با استفاده از روش تصمیم‌گیری پرامیتی [۱۵].
انتخاب مکان مناسب ساختمان با استفاده از روش تصمیم‌گیری پرامیتی [۱۶].
برنامه‌ریزی منابع آبی با استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری AHP و PROMETHEE [۱۷].

جدول ۷: ماتریس مقایسه زوجی برای احتمال وقوع هریک از معیارها

Table 7. Paired comparison matrix for the probability of occurrence of each criterion

معیار	مچاله‌شوندگی	هجوم آب	ناپایداری تونل
مچاله‌شوندگی	۱	۰/۲۵	۰/۱۶
هجوم آب	۴	۱	۰/۵
ناپایداری تونل	۶	۲	۱

۴-۲- تعیین وزن معیارها با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی فازی دلفی (FDAHP)

برای وارد کردن داده‌ها در این روش ابتدا با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی فازی دلفی به بررسی و تعیین وزن معیارهای موثر در انتخاب پرخطرترین مقطع تونل جهت تعیین وزن معیارها مطابق روش پیشنهادی ساعتی به میزان اهمیت هر یک از معیارها امتیاز اختصاص داده شد. بدین منظور سه ماتریس مقایسه زوجی برای احتمال وقوع، شدت خطر و احتمال کشف خطر معیارهای مورد نظر در مقاطع مختلف تشکیل داده شد که در جداول ۶، ۷ و ۸ آورده شده است.

جدول ۶: ماتریس مقایسه زوجی برای شدت خطر معیارها

Table 6. Pair Comparison Matrix for Severity Risk Criteria

معیار	مچاله‌شوندگی	هجوم آب	ناپایداری تونل
مچاله‌شوندگی	۱	۰/۱۴	۰/۱۱
هجوم آب	۷	۱	۰/۳۳
ناپایداری تونل	۹	۳	۱

جدول ۸: ماتریس مقایسه زوجی برای احتمال کشف خطر هریک از معیارها

Table 8. paired comparison matrix for the probability of detecting the risk of each of the criteria

معیار	مچاله‌شوندگی	هجوم آب	ناپایداری تونل
مچاله‌شوندگی	۱	۰/۲۵	۰/۲۵
هجوم آب	۴	۱	۱
ناپایداری تونل	۴	۱	۱

تشکیل ماتریس مقایسه زوجی فازی

در این مرحله با استفاده از اعداد فازی که از مرحله قبل به دست آمده ماتریس مقایسه زوجی فازی بین پارامترها مختلف با کمک رابطه ۵ تشکیل می‌شود.

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

یا به صورت:

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

ماتریس مربوط به مقایسه زوجی فازی برای مسئله در جدول ۹ نشان داده شده است. در این ماتریس C_i معرف هر یک از معیارهای مسئله می‌باشند که با توجه به اعداد فازی مذکور با یکدیگر مقایسه شدند.

جدول ۹: ماتریس مقایسه زوجی فازی

Table 9. Fuzzy Paired Comparison Matrix

(۱، ۱، ۱)	(۰/۱۴، ۰/۲۱، ۰/۲۵)	(۰/۱۱، ۰/۱۷، ۰/۲۵)
(۴، ۴/۸۲، ۷)	(۱، ۱، ۱)	(۰/۳۳، ۰/۵۵، ۱)
(۴، ۶، ۹)	(۱، ۱/۸۲، ۳)	(۱، ۱، ۱)

محاسبه وزن فازی هر یک از پارامترها

در این مرحله وزن فازی متعلق به هر پارامتر را می‌توان با استفاده از رابطه‌های ۶ و ۷ تعیین کرد [۱۸].

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

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

در رابطه بالا \otimes علامت ضرب اعداد فازی و \oplus علامت جمع اعداد فازی می‌باشد. در نهایت پارامتر \tilde{W}_i که یک بردار سطری است، معرف وزن فازی پارامتر i ام می‌باشد.

$$\tilde{Z}_1 = [\tilde{a}_{13} \otimes \tilde{a}_{12} \otimes \dots \otimes \tilde{a}_{13}]^{1/3} = [0.25, 0.33, 0.4]$$

$$\tilde{Z}_2 = [\tilde{a}_{21} \otimes \tilde{a}_{22} \otimes \dots \otimes \tilde{a}_{23}]^{1/3} = [1.1, 1.38, 1.91]$$

$$\tilde{Z}_3 = [\tilde{a}_{31} \otimes \tilde{a}_{32} \otimes \dots \otimes \tilde{a}_{33}]^{1/3} = [1.59, 2.2, 2.22, 3]$$

$$\sum \tilde{Z}_i = [2.94, 3.93, 5.31]$$

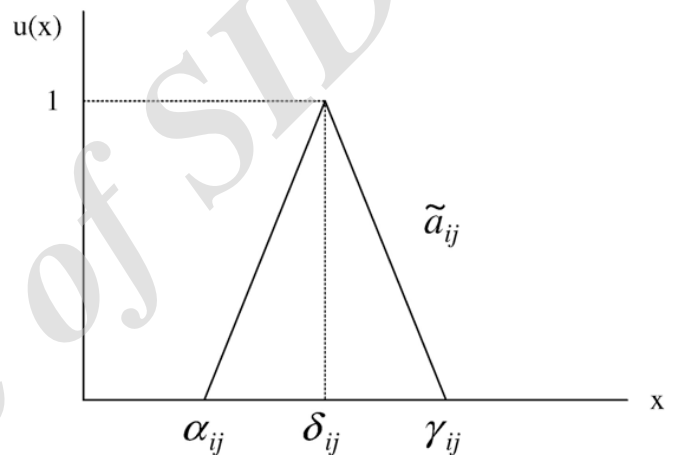
$$\tilde{W}_1 = \tilde{Z}_1 \otimes (\tilde{Z}_1 \oplus \tilde{Z}_2 \oplus \tilde{Z}_3)^{-1} = [0.09, 0.08, 0.07]$$

$$\tilde{W}_2 = \tilde{Z}_2 \otimes (\tilde{Z}_1 \oplus \tilde{Z}_2 \oplus \tilde{Z}_3)^{-1} = [0.37, 0.35, 0.36]$$

پس از تشکیل ماتریس‌های مقایسه زوجی، نتایج حاصل برای تشکیل ماتریس مقایسه زوجی فازی مورد استفاده قرار گرفتند. در تشکیل این ماتریس از روش تحلیل سلسله مراتبی فازی دلفی (FDAHP)، از تابع عضویت مثلثی و در نتیجه اعداد فازی مثلثی استفاده شده است. محاسبات مربوط به این روش شامل مراحل زیر است.

محاسبه اعداد فازی

برای محاسبه اعداد فازی (\tilde{a}_{ij}) نظرات حاصل از نظرسنجی از متخصصان به طور مستقیم مد نظر قرار می‌گیرد. اعداد فازی در این تحقیق بر اساس تابع عضویت مثلثی محاسبه شد. شکل ۲ محاسبه اعداد فازی با روش مثلثی را نشان می‌دهد. مطابق این شکل، در روش فازی دلفی یک عدد فازی با استفاده از رابطه‌های ۱ تا ۴ قابل محاسبه هستند [۱۸].



شکل ۲: تابع عضویت مثلثی در روش فازی دلفی [۱۸]

Fig. 2. Triangular membership function in Delphi fuzzy method

$$a_{ij} = (\alpha_{ij}, \delta_{ij}, \gamma_{ij}) \quad (1)$$

$$\alpha_{ij} = \text{Min}(\beta_{ijk}), k = 1, \dots, n \quad (2)$$

$$\delta_{ij} = \left(\prod_{k=1}^n \beta_{ijk} \right)^{1/n}, k = 1, \dots, n \quad (3)$$

$$\gamma_{ij} = \text{Max}(\beta_{ijk}), k = 1, \dots, n \quad (4)$$

در روابط بالا α_{ij} و γ_{ij} به ترتیب معرف حد بالا و حد پائین نظرات متخصصان می‌باشند. پارامتر β_{ijk} نیز معرف اهمیت نسبی پارامتر i نسبت به پارامتر j از دیدگاه متخصص k ام است [۱۸].

جدول ۱۱: ماتریس تصمیم

Table 11. Decision matrix

مقاطع	مچاله شونددگی (cm)	هجوم آب (lit/s)	ناپایداری تونل (کرنش بحرانی)
(A ₁) ۴-H	۱/۳۴	۰/۰۴۵	۰/۰۰۶
(A ₂) ۱-H	۰/۵	۲/۶	۰/۰۰۲۷
(A ₃) ۳-H	۳/۲	۵۰۴	۰/۰۰۴
(A ₄) ۱۶-H	۱/۳۸	۰/۴۵	۰/۰۰۳۵
(A ₅) ۲-H	۰/۸۳	۴۴/۷	۰/۰۰۳
(A ₆) ۱۱-H	۰/۸۶	۸/۶۵	۰/۰۰۴
(A ₇) ۱۵-H	۰/۳۳	۰/۰۰۷	۰/۰۰۴۲
مجموع مربع داده‌ها	۱۵/۷۲۷۴	۲۵۶۰۹۵/۸۷۷۱	۰/۰۰۰۱

جدول ۱۲: ماتریس تصمیم نرمالایز وزن دار

Table 12. Weighted Normalized Decision Matrix

مقاطع	مچاله شونددگی	هجوم آب	ناپایداری تونل
(A ₁) ۴-H	۰/۰۲۷	۰/۰۰۰۰۳	۰/۳۱
(A ₂) ۱-H	۰/۰۱	۰/۰۰۱	۰/۱۴
(A ₃) ۳-H	۰/۰۶۴	۰/۳۵۸	۰/۲۰۹
(A ₄) ۱۶-H	۰/۰۲۷	۰/۰۰۰۳	۰/۱۸۳
(A ₅) ۲-H	۰/۰۱۶	۰/۰۳	۰/۱۵۷
(A ₆) ۱۱-H	۰/۰۱۷	۰/۰۰۶	۰/۲۰۹
(A ₇) ۱۵-H	۰/۰۰۶	۰/۰۰۰۰۴	۰/۲۲

در گام دوم میزان اختلاف عددی بین ارزیابی دو گزینه بر اساس مقایسه دو به دو محاسبه می‌شود (جدول ۱۳).

$$d_i(a, b) = g_i(a) - g_i(b) \quad (9)$$

در این گام اگر نتیجه حاصل از تفاضل منفی شود، طبق شرطی که در معیار یکنواخت تعیین شده است، مقدار حاصل برابر صفر در نظر گرفته می‌شود در غیر این صورت مقدار حاصل قابل قبول خواهد بود. نتایج حاصل از این بخش در جدول ۱۴ نشان داده شده است.

$$\vec{W}_3 = \vec{Z}_3 \otimes (\vec{Z}_1 \oplus \vec{Z}_2 \oplus \vec{Z})^{-1} = [0.54, 0.56, 0.56]$$

غیر فازی کردن وزن اعداد فازی

پس از یافتن وزن های فازی مربوط به هر یک از پارامترها، تمامی اعداد با استفاده از رابطه ۸ به صورت غیر فازی تبدیل می‌شوند [۱۸].

$$\vec{W}_i = (\prod_{j=1}^3 \omega_j)^{1/3}$$

$$W_1 = (\prod_{j=1}^3 \omega_j)^{1/3} = 0.08$$

(۸)

$$W_2 = 0/36$$

$$W_3 = 0/56$$

بدین ترتیب وزن هر یک از معیارها با استفاده از روش سلسله مراتبی فازی دلفی محاسبه و مقادیر متعلق به هر یک از این معیارها در جدول ۱۰ آورده شده است.

جدول ۱۰: وزن هر یک از معیارها با استفاده از روش سلسله

مراتبی فازی دلفی

Table 10. Weight of criteria

وزن نهایی	معیار
۰/۰۸	C ₁ ، مچاله شونددگی
۰/۳۶	C ₂ ، هجوم آب
۰/۵۶	C ₃ ، ناپایداری تونل

بردار ویژه محاسبه شده برای مجموع معیارها پس از انجام محاسبات تحلیل سلسله مراتبی فازی دلفی به شرح زیر است:

$$W = [0/08, 0/36, 0/56]$$

۴-۳ الگوریتم مدل پیشنهادی

اساس روش پرامیتی بر مبنای مقایسه زوجی گزینه‌ها بوده و نتیجه حاصل از این مقایسات زوجی بین گزینه‌ها، درجه بندی غالب یکی بر دیگری است و به دنبال آن رتبه بندی کامل تولید می‌شود. در ذیل مراحل گام به گام این روش شرح داده شده است. در گام نخست، ماتریس تصمیم مربوط به مقاطع، تشکیل داده شده و سپس مجموع توان دوم هر یک از درایه‌های مقاطع مورد بررسی محاسبه شده (جدول ۱۱) و در نهایت جهت بی‌بعدسازی و نرمالایز کردن داده‌ها مقادیر مربوط به هر یک از درایه‌ها بر جذر مجموع توان دوم تقسیم می‌شود. در ادامه برای تشکیل ماتریس تصمیم نرمالایز وزن دار، هر یک از درایه‌ها در ستون‌های مربوطه در وزن هر یک از معیارها ضرب می‌شود. جدول ۱۲ ماتریس تصمیم نرمالایز وزن دار را برای هر یک از مقاطع نشان می‌دهد.

(A_6, A_3)	-/۰.۴۷۲	-/۰.۳۵۲۳	.
(A_6, A_4)	-/۰.۱۰۴	/۰.۰۵۸	-/۰.۲۶۲
(A_6, A_5)	/۰.۰۰۶	-/۰.۲۲۶	-/۰.۵۲۴
(A_6, A_7)	/۰.۱۰۶	/۰.۰۶۱	-/۰.۱۰۴
(A_7, A_1)	-/۰.۲۰۳	-/۰.۰۰۰۲	-/۰.۹۴۳
(A_7, A_2)	-/۰.۰۳۴	-/۰.۰۱۸	-/۰.۷۸۶
(A_7, A_3)	-/۰.۵۷۸	-/۰.۳۵۸۵	-/۰.۱۰۴
(A_7, A_4)	-/۰.۲۱۱	-/۰.۰۰۳	-/۰.۳۶۶
(A_7, A_5)	-/۰.۱۰۰۸	-/۰.۳۱۷	-/۰.۶۲۸
(A_7, A_6)	-/۰.۱۰۶	-/۰.۰۶۱	/۰.۱۰۴

جدول ۱۴: تعیین شاخص π

Table 14. Determination of π index

$(a,b)\pi$	ناپایداری تونل	هجوم آب	مچاله شوندگی
(A_1, A_2)	/۰.۵۶	.	/۰.۸
(A_1, A_3)	/۰.۵۶	.	.
(A_1, A_4)	/۰.۵۶	.	.
(A_1, A_5)	/۰.۶۴	.	/۰.۸
(A_1, A_6)	/۰.۶۴	.	/۰.۸
(A_1, A_7)	۱	/۰.۳۶	/۰.۸
(A_2, A_1)	/۰.۳۶	.	.
(A_2, A_3)	.	.	.
(A_2, A_4)	/۰.۳۶	.	.
(A_2, A_5)	.	.	.
(A_2, A_6)	.	.	.
(A_2, A_7)	/۰.۴۴	/۰.۳۶	/۰.۸
(A_3, A_1)	/۰.۴۴	.	/۰.۸
(A_3, A_2)	۱	/۰.۵۶	/۰.۳۶
(A_3, A_4)	۱	/۰.۵۶	/۰.۳۶
(A_3, A_5)	۱	/۰.۵۶	/۰.۳۶
(A_3, A_6)	/۰.۴۴	.	/۰.۸
(A_3, A_7)	/۰.۴۴	.	/۰.۸
(A_4, A_1)	/۰.۴۴	.	/۰.۳۶
(A_4, A_2)	/۰.۶۴	/۰.۵۶	/۰.۸
(A_4, A_3)	.	.	.
(A_4, A_5)	/۰.۶۴	.	/۰.۸

جدول ۱۳: میزان اختلاف عددی بین ارزیابی دو گزینه بر

اساس مقایسه زوجی

Table 13. The numerical difference between the two options based on the pair comparison

ناپایداری تونل	هجوم آب	مچاله شوندگی
(A_1, A_2)	-/۰.۰۱۸	/۰.۱۶۹
(A_1, A_3)	-/۰.۳۵۸۵	-/۰.۳۷۵
(A_1, A_4)	-/۰.۰۰۲	-/۰.۰۰۰۸
(A_1, A_5)	-/۰.۳۱۷	/۰.۱۰۲۸
(A_1, A_6)	-/۰.۰۶۱	/۰.۰۹۶
(A_1, A_7)	/۰.۰۰۰۲	/۰.۲۰۳
(A_2, A_1)	/۰.۰۱۸	-/۰.۱۶۹
(A_2, A_3)	-/۰.۳۵۶۶	-/۰.۵۴۴
(A_2, A_4)	/۰.۰۱۵	-/۰.۱۷۷
(A_2, A_5)	-/۰.۲۹۹	-/۰.۰۶۶
(A_2, A_6)	/۰.۰۴۳	-/۰.۰۷۲
(A_2, A_7)	/۰.۰۱۸	/۰.۰۳۴
(A_3, A_1)	/۰.۳۵۸۵	/۰.۳۷۵
(A_3, A_2)	/۰.۳۵۶۶	/۰.۵۴۴
(A_3, A_4)	/۰.۳۵۸۲	/۰.۳۶۷
(A_3, A_5)	/۰.۳۲۶۷	/۰.۴۷۸
(A_3, A_6)	/۰.۳۵۲۳	/۰.۴۷۲
(A_3, A_7)	/۰.۳۵۸۵	/۰.۵۷۸
(A_4, A_1)	/۰.۰۰۰۲	/۰.۰۰۰۸
(A_4, A_2)	-/۰.۰۱۵	/۰.۱۷۷
(A_4, A_3)	-/۰.۳۵۸۲	-/۰.۳۶۷
(A_4, A_5)	/۰.۳۱۴	/۰.۱۱
(A_4, A_6)	-/۰.۰۵۸	/۰.۱۰۴
(A_4, A_7)	/۰.۰۰۰۳	/۰.۲۱۱
(A_5, A_1)	/۰.۳۱۷	-/۰.۱۰۲
(A_5, A_2)	/۰.۲۹۹	/۰.۰۶۶
(A_5, A_3)	-/۰.۳۲۶۷	-/۰.۴۷۸
(A_5, A_4)	-/۰.۳۱۴	-/۰.۱۱
(A_5, A_6)	/۰.۲۵۶	-/۰.۰۰۰۶
(A_5, A_7)	/۰.۳۱۷	/۰.۱۰۰۸
(A_6, A_1)	/۰.۰۶۱	-/۰.۰۹۶
(A_6, A_2)	/۰.۰۴۳	/۰.۰۷۲

در روابط فوق $\phi^+(a)$ نشان‌دهنده برتری گزینه a و $\phi^-(a)$ نشان‌دهنده ضعف گزینه a نسبت به سایر گزینه‌ها است. بزرگ‌ترین $\phi^+(a)$ نشان‌دهنده برترین a و بزرگ‌ترین $\phi^-(a)$ نشان‌دهنده ضعیف‌ترین a است. با داشتن و بررسی جداگانه دو جریان ورودی و خروجی می‌توان یک رتبه‌بندی جزئی را انجام داد. برای رتبه‌بندی کامل گزینه‌ها می‌توان با استفاده از رابطه ۱۴ جریان خالص را محاسبه و رتبه‌بندی را برای هر گزینه تعریف نمود. این جریان، حاصل توازن جریان‌های رتبه‌بندی مثبت و منفی است. جریان خالص بالاتر، نشان‌دهنده گزینه برتر است [۱۹]. جدول ۱۵ جریان ورودی و خروجی را نشان می‌دهد.

جدول ۱۵: جریان ورودی و خروجی

Table 15. Inputting & Outputting flow

مقطع	جریان ورودی	جریان خروجی
H-۳	۰/۷۲	۰/۱۸
H-۴	۰/۶۷	۰/۳۲
H-۱۵	۰/۴۶	۰/۵۳
H-۱۱	۰/۵۶	۰/۳۴
H-۱۶	۰/۳۷	۰/۶۲
H-۲	۰/۴۲	۰/۵۸
H-۱	۰/۱۹	۰/۸

در نهایت پس از انجام محاسبات مربوط به روش PROMETHEE و به دست آوردن جریان خالص برای تمام مقاطع، برترین گزینه یا به بیان دیگر پرخطرترین مقطع قطعه دوم تونل امامزاده هاشم (ع) که مقطع H-۳ است معرفی می‌شود (جدول ۱۶).

جدول ۱۶: جریان خالص

Table 16. Net flow

رتبه	مقطع	جریان خالص
۱	H-۳	۰/۵۳
۲	H-۴	۰/۳۴
۳	H-۱۱	۰/۲۱
۴	H-۱۵	-۰/۰۶
۵	H-۲	-۰/۱۶
۶	H-۱۶	-۰/۲۵
۷	H-۱	-۰/۶۱

۵- نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر، با توجه به داده‌های موجود، ارزیابی مخاطرات

(A۴,A۶)	۰/۰۸	.	.	۰/۰۸
(A۴,A۷)	۰/۰۸	۰/۳۶	.	۰/۴۴
(A۵,A۱)	.	۰/۳۶	.	۰/۳۶
(A۵,A۲)	۰/۰۸	۰/۳۶	۰/۵۶	۱
(A۵,A۳)	.	.	.	.
(A۵,A۴)	.	۰/۳۶	.	۰/۳۶
(A۵,A۶)	.	۰/۳۶	.	۰/۳۶
(A۵,A۷)	۰/۰۸	۰/۳۶	.	۰/۴۴
(A۶,A۱)	.	۰/۳۶	.	۰/۳۶
(A۶,A۲)	۰/۰۸	۰/۳۶	۰/۵۶	۱
(A۶,A۳)	.	.	.	.
(A۶,A۴)	.	۰/۳۶	۰/۵۶	۰/۹۲
(A۶,A۵)	۰/۰۸	.	۰/۵۶	۰/۶۴
(A۶,A۷)	۰/۰۸	۰/۳۶	.	۰/۴۴
(A۷,A۱)	.	.	.	.
(A۷,A۲)	.	.	۰/۵۶	۰/۵۶
(A۷,A۳)	.	.	۰/۵۶	۰/۵۶
(A۷,A۴)	.	.	۰/۵۶	۰/۵۶
(A۷,A۵)	.	.	۰/۵۶	۰/۵۶
(A۷,A۶)	.	.	۰/۵۶	۰/۵۶

در گام بعدی پس از انجام مقایسات زوجی و استفاده از رابطه ۱۱ شاخص π برای تک تک حالت‌ها محاسبه می‌شود (جدول ۱۴).

$$\pi(a, b) = \sum_{j=1}^k w_j p_j(a, b) \leftarrow \left[\sum_{j=1}^k w_j = 1 \right] \quad (11)$$

در رابطه بالا $w_j (j=1,2,\dots,n)$ نشان‌دهنده وزن‌های نرمال شده هر شاخص به روش تحلیل سلسله مراتبی فازی دلفی (FDAHP) است. مقدار $\pi(a, b)$ در فاصله صفر و یک متغیر است و هر چه این مقدار بیشتر باشد، میزان اولویت و برتری گزینه a بر b در تمام شاخص‌ها بیشتر خواهد بود. در نهایت پس از محاسبه $\pi(a, b)$ برای هر گزینه a و b در نظر گرفتن گزینه‌های دیگر x ، جریان رتبه‌بندی زیر حاصل می‌شود.

$$\phi^+(a) = \frac{1}{n-1} \sum_x \pi(a, x) \quad \text{جریان رتبه‌بندی مثبت یا جریان خروجی} \quad (12)$$

$$\phi^-(a) = \frac{1}{n-1} \sum_x \pi(x, a) \quad \text{جریان رتبه‌بندی منفی یا جریان ورودی} \quad (13)$$

$$\phi(a) = \phi^+(a) - \phi^-(a) \quad (14)$$

- [5] E. Asgharizadeh, "Ranking the firms based on excellency model criteria- PROMETHEE method," 2007.
- [6] S. M. Seyyed Hosseini and M. Khadivar, "Economic Technical Evaluation Model Selection of Parking Mechanization Levels in Urban Areas," International Conference on Traffic & Transportation Engineering, vol. 11, p. (In Persian), 2011.
- [7] R. Mikaeil, M. Abdollahi Kamran, G. Sadegheslam, and M. Ataei, "Ranking sawability of dimension stone using PROMETHEE method," Journal of Mining and Environment, vol. 6, pp. 263-271, 2015.
- [8] V. Balali, B. Zahraie, and A. Roozbahani, "A comparison of AHP and PROMETHEE family decision making methods for selection of building structural system," American Journal of Civil Engineering and Architecture, vol. 2, pp. 149-159, 2014.
- [9] S. Deshmukh, "Preference ranking organization method of enrichment evaluation (Promethee)," International Journal of Engineering Science Invention, vol. 2, pp. 28-34, 2013.
- [10] V. Shukla and G. Auriol, "Methodology for Determining Stakeholders' Criteria Weights in Systems Engineering," in CSDM (Posters), 2013, pp. 1-12.
- [11] M. Radojicic, M. Zizovic, Z. Nestic, and J. V. Vasovic, "Modified approach to PROMETHEE for multi-criteria decision-making," Maejo International Journal of Science and Technology, vol. 7, p. 408, 2013.
- [12] V. Tomić, Z. Marinković, and D. Janošević, "PROMETHEE method implementation with multi-criteria decisions," Facta universitatis-series: Mechanical Engineering, vol. 9, pp. 193-202, 2011.
- [13] D. Bogdanovic, D. Nikolic, and I. Ilic, "Mining method selection by integrated AHP and PROMETHEE method," Anais da Academia Brasileira de Ciências, vol. 84, pp. 219-233, 2012.
- [14] S. Prvulovic, D. Tolmac, and L. Radovanovic, "Application of PROMETHEE-Gaia methodology in the choice of systems for drying paltry-seeds and powder materials," Strojniški vestnik-Journal of Mechanical Engineering, vol. 57, pp. 778-784, 2011.
- [15] S. Shiriskar and S. Patil, "Optimization of energy charges using improved PROMETHEE method," ISOR Journal and Communication Engineering, pp. 36-42, 2013.
- [16] V. M. Athawale and S. Chakraborty, "Facility location selection using PROMETHEE II method," in Proceedings of the 2010 international conference on industrial engineering and operations management, 2010, pp. 9-10.
- [17] K. Anagnostopoulos, C. Petalas, and V. Pinaras, "Water

ژئوتکنیکی به منظور شناسایی پرمخاطره‌ترین مقطع قطعه دوم تونل امامزاده هاشم (ع) انجام گرفت. در مسیر تونل، ۳ مخاطره ژئوتکنیکی شامل ناپایداری تونل، مجاله‌شوندگی و هجوم آب شناسایی شد. در ادامه با توجه به میزان شدت، نرخ و احتمال رخداد ماتریس مقایسه زوجی معیارها برای تعیین وزن نهایی تشکیل شد. در ادامه وزن نهایی معیارها با روش تحلیل سلسه مراتبی فازی دلفی (FDAHP) محاسبه شد. بر اساس وزن‌های تعیین شده و مقادیر محاسبه شده معیارها (با استفاده از روش‌های تحلیلی و عددی)، ماتریس تصمیم، تشکیل شد. در نهایت، به کمک روش تصمیم‌گیری چند معیاره پرامیتی، اقدام به رتبه‌بندی و در نهایت معرفی پرمخاطره‌ترین مقطع قطعه دوم تونل امامزاده هاشم (ع) شد. با توجه به خروجی‌های به دست آمده از این روش، مقطع H-3 بیش‌ترین امتیاز را کسب کرده و به عنوان پرمخاطره‌ترین مقطع تونل معرفی شد.

تقدیر و تشکر

از آقای مهندس زهیر صداقتی و همچنین آقای مهندس خوش‌سیرت که راهنمایی‌های فراوانی را در مسیر انجام این تحقیق داشتند نهایت تشکر و سپاس را داریم.

۶- فهرست علائم

\tilde{a}_{ij}	عدد فازی
\tilde{A}	ماتریس مقایسه زوجی فازی
α_{ij}	حد پائین نظرات متخصصان
β_{ijk}	اهمیت نسبی پارامتر i نسبت به پارامتر j از دیدگاه متخصص k
ام	
γ_{ij}	حد بالای نظرات متخصصان
\tilde{W}_i	وزن فازی پارامتر i
$\phi^+(a)$	جریان رتبه‌بندی مثبت یا جریان خروجی
$\phi^-(a)$	جریان رتبه‌بندی منفی یا جریان ورودی
$\phi(a)$	جریان خالص

مراجع

- [1] Z. Sedaghati, "Fuzzy analysis and management of geotechnical risks in second part of Emamzadeh Hashem tunnel," mining engineering, Urmia University of technology, 2015.
- [2] "Engineering services for the construction of Emamzadeh Hashem tunnel," Iran Sahel Consulting engineers.
- [3] G. Barla and S. Pelizza, "TBM tunnelling in difficult ground conditions," in ISRM International Symposium, 2000.
- [4] N. R. Barton, TBM tunnelling in jointed and faulted rock: CRC Press, 2000.

[19] M. Omidi, H. Razavi, and M. Mahpeikar, "Selection of project team members based on the Effectiveness by PROMETHEE method," *Journal of Industrial Management Perspective*, pp. 113-134, 2011.

resources planning using the AHP and PROMETHEE multicriteria methods: the case of Nestos River-Greece," 2005.

[18] Y.-C. Liu and C.-S. Chen, "A new approach for application of rock mass classification on rock slope stability assessment," *Engineering geology*, vol. 89, pp. 129-143, 2007.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Please cite this article using:

R. Mikaeil, E. Jafarnejad Gharahasanlou, A. Aryafar, Geotechnical Risks Assessment During the Second part of Emamzadeh Hashem (AS) Tunnel Using FDAHP-PROMETHEE. *Amirkabir J. Civil Eng.*, 49(4) (2018) 791-800.

DOI: 10.22060/ceej.2017.11768.5075



Archive of SID