

انتخاب مناسب‌ترین روش حفاری تونل انتقال آب بهشت آباد

مهدی نیک‌منش^۱، مهدی حسینی^{۲*}، صفر فضلی^۳

پذیرش مقاله: ۱۰۹۱/۶

دریافت مقاله: ۹۰/۱۱/۱۵

چکیده

تونل انتقال آب بهشت‌آباد به فلات مرکزی ایران به طول ۶۵ کیلومتر و قطر تمام شده ۶ متر به منظور انتقال آب از سرشاخه‌های کارون به بخش مرکزی ایران در دست مطالعه است. در این تحقیق ۱۷ کیلومتر اول برای انتخاب مناسب‌ترین روش حفاری مورد مطالعه قرار گرفت. ۱۷ کیلومتر اول با توجه به شرایط زمین‌شناسی و ژئومکانیکی به سه پهنه حفاری از متر ۰ تا ۵۴۵۰، ۵۴۵۰ تا ۷۸۰۰ و ۷۸۰۰ تا ۱۷۰۰۰ تقسیم شد. انتخاب روش مناسب حفاری تصمیمی پیچیده بوده که به در نظر گرفتن فاکتورهای بسیاری نیاز دارد. در این مقاله ابتدا با استفاده از فرآیند تحلیل سلسله مراتبی فازی، مدلی ساخته شد و بر اساس این مدل به بررسی سه روش حفاری و انفجار، حفاری با رودهدر و حفاری با TBM با در نظر گرفتن معیارهای شرایط زمین‌شناختی و ژئومکانیکی، شرایط اقتصادی، شرایط عملیاتی، شرایط زیست‌محیطی، هندسه تونل و عوامل مدیریتی پرداخته شد. بر اساس نتایج به دست آمده در هر سه پهنه، روش حفاری با TBM بیشترین امتیاز را کسب کرد. در نتیجه پیشنهاد می‌شود برای حفاری از یک دستگاه TBM استفاده شود.

کلید واژه‌ها: تونل انتقال آب بهشت آباد، روش حفاری، فرآیند تحلیل سلسله مراتبی فازی، TBM

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی معدن، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی، Mahdi.nikmanesh@gmail.com

۲. استادیار گروه مهندسی معدن، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره) meh_hosseini18@yahoo.com

۳. استادیار گروه مدیریت، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره) fazli@ikiu.ac.ir

* مسئول مکاتبات

۱. مقدمه

انتخاب روش درست حفاری، تصمیمی پیچیده بوده که نیاز به در نظر گرفتن بسیاری از فاکتورهای زمین‌شناختی، فنی، اقتصادی و محیطی دارد. برای یک تونل، یک روش خاص حفاری وجود ندارد، و معمولاً دو یا چند روش حفاری قابل اجراست. بنابراین برای انتخاب مناسب‌ترین روش حفاری باید تمامی معیارهای موجود در نظر گرفته شود. امروزه یکی از مهم‌ترین مسائل در امور مهندسی، بحث تصمیم‌گیری و انتخاب می‌باشد. در نتیجه مهندسیین به طور پیوسته مجبور هستند در مورد انجام هر کاری تصمیم‌گیری کنند. عمدتاً آنها نمی‌توانند نتیجه تصمیم خود را پیش‌بینی کنند، به ویژه در مباحث مهندسی سنگ و علوم وابسته به زمین، به دلیل عدم قطعیت زیاد در تعیین ویژگی‌ها و رفتارهای واقعی سنگ، لازم است یک تصمیم‌گیری دقیق و درست بر اساس تجارب و قضاوت مهندسی صورت گیرد. یکی از روش‌های موفقیت‌آمیز در فرآیند تصمیم‌گیری آن است که میزان تأثیر هر یک از این پارامترها بر روی هر یک از روش‌های اجرا، به صورت یک مقدار عددی بیان شود. برای بیان میزان اهمیت هر یک از پارامترها از روش‌های مختلفی می‌توان استفاده کرد که یکی از مناسب‌ترین این روش‌ها، روش فرآیند تحلیل سلسله مراتبی است. فرآیند تحلیل سلسله مراتبی (AHP) برای اولین بار توسط Saaty (1990) مطرح شد. فرآیند تحلیل سلسله مراتبی یک ابزار مؤثر و کارا در ایجاد ساختار و مدل‌سازی مسائل چندمعیاره است که به صورت موفقیت‌آمیزی در کاربردهای متنوع مدیریتی، مورد استفاده واقع شده است (Stewart et al., 2002). در بسیاری از موارد عملی، قضاوت‌های زوجی تصمیم‌گیرنده شامل مقداری عدم قطعیت است. این مورد زیاد دیده می‌شود که تصمیم‌گیرنده در مورد رتبه‌بندی گزینه‌ها مطمئن است اما در تخصیص مقادیر عددی دقیق به قضاوت‌هایش تردید دارد (Saaty et al., 1987). Chang (1996) برای غلبه بر عدم قطعیت در فرآیند تصمیم‌گیری، از ترکیب مجموعه‌های فازی و تحلیل سلسله مراتبی استفاده نمود و مدل ترکیبی فرآیند تحلیل سلسله مراتبی

فازی (Fuzzy Analytical Hierarchy Process, FAHP) را

ارائه نمود.

باید به این نکته توجه داشت که فرآیند تحلیل سلسله مراتبی سنتی، امکان انعکاس سبک تفکر انسانی را به طور کامل ندارد. به عبارت بهتر، استفاده از مجموعه‌های فازی، سازگاری بیشتری با توضیحات زبانی و بعضاً مبهم انسانی دارد و بنابراین بهتر است که با استفاده از مجموعه‌های فازی (به‌کارگیری اعداد فازی) به پیش‌بینی بلندمدت و تصمیم‌گیری در دنیای واقعی پرداخت.

پروژه‌هایی که در محیط سنگی و یا در محیط خاکی انجام می‌شود اغلب نیاز به تصمیم‌گیری‌های بسیار دقیق دارند. در تصمیم‌گیری برای انتخاب روش اجرای عملیات عمرانی در محیط‌های سنگی و خاکی، پژوهش‌های زیادی انجام شده است. بیشتر این پژوهش‌ها در زمینه کاربرد روش تحلیل سلسله مراتبی کلاسیک در این‌گونه پروژه‌ها است و در زمینه کاربرد روش تحلیل سلسله مراتبی فازی، پژوهش‌های کمی انجام شده است.

در متروی شیراز گزینه‌های مورد نظر شامل انواع دستگاه TBM از جمله سپر EPB، سپر ترکیبی، سپر دوغابی و سپر هوای فشرده هستند که انتخاب این گزینه‌ها بر اساس تجربیات حفاریات قبلی، موقعیت منطقه و مسائل مختلف تونل‌زنی صورت گرفته است. معیارهای انتخاب شده شامل دانه‌بندی، نفوذپذیری، ایمنی، فضای عملیاتی و سرمایه‌گذاری هستند. پس از محاسبات مربوط به روش، وزن نهایی در حفاری با سپر EPB بیشتر شده و این دستگاه به عنوان دستگاه حفاری انتخاب شد (میخک بیرانوند و همکاران، ۱۳۸۸).

در پروژه انتقال آب قمرود ابتدا با استفاده از فرآیند تحلیل سلسله مراتبی، مدلی فنی ساخته شد و بر اساس این مدل به ارزیابی سه روش حفاری و انفجار، حفاری با رودهدر و حفاری با TBM با در نظر گرفتن پارامترهای فنی که عبارتند از: زمین‌شناسی و خواص ژئومکانیکی سنگ منطقه، هندسه تونل، پارامترهای عملیاتی، احراز شرایط هیدرولیکی، عوامل مدیریتی و عوامل زیست‌محیطی انجام شد. بر اساس نتایج استخراج

روش تهویه انتخاب شد. فاکتورهای مدیریتی به عنوان مؤثرترین فاکتور در نظر گرفته شد و گزینه ۵ به عنوان مناسب‌ترین گزینه برای تهویه تونل انتقال آب کرج به تهران منظور شد. در مطالعات بعدی در این زمینه، میتوان از فرآیند تحلیل سلسله مراتبی فازی برای انتخاب دستگاه‌های تهویه استفاده کرد (Adnani et al., 2011).

هدف از مطالعه معدن بوکسیت جاجرم ارائه یک مدل فازی برای انتخاب روش بهینه استخراج معدن با استفاده از معیارهای مؤثر با در نظر گرفتن قضاوت‌های ذهنی تصمیم گیرندگان می‌باشد. در این تحقیق ۱۳ معیار شیب، شکل، ضخامت و عیار ماده معدنی، RMR سنگ‌های پایین، بالا و خود ماده معدنی، تکنولوژی، عمق و یکنواختی ماده معدنی، اختلاط، توان تولید و بازیابی و ۶ روش استخراج شامل کندن و پرکردن سنتی و مکانیزه، استخراج از طبقات فرعی، انبارهای استخراج ستونی و روش پله‌ای کردن به عنوان گزینه انتخاب شده‌اند. در نهایت شیب ماده معدنی، به عنوان مهم‌ترین معیار و روش کندن و پرکردن سنتی به عنوان روش بهینه استخراج معدن بوکسیت جاجرم انتخاب شدند (Zare Naghadehi et al., 2009).

در این مقاله از فرآیند تحلیل سلسله مراتبی فازی برای انتخاب مناسب‌ترین روش حفاری تونل انتقال آب بهشت‌آباد استفاده شده است.

۲. معرفی تونل انتقال آب بهشت‌آباد

تونل انتقال آب بهشت‌آباد به فلات مرکزی ایران به طول ۶۵ کیلومتر و قطر تمام شده ۶ متر (قطر حفاری ۶/۸ متر) و به منظور انتقال سالانه بیش از ۷۴۶ میلیون مترمکعب آب از سرشاخه‌های کارون به بخش مرکزی ایران در دست مطالعه است. جریان آب درون تونل تحت فشار خواهد بود. ورودی تونل درحالی شهر اردل و در بالادست تقاطع دو رود کوهرنگ و بهشت‌آباد و خروجی آن در نزدیکی باغ بهادران و بالادست سد چم آسمان قرار می‌گیرد.

شده در این بخش، حفاری با TBM به وزن ۰/۴۷۶ به عنوان مناسب‌ترین روش و روش‌های حفاری با رودهدر به وزن ۰/۳۰۶ و حفاری و انفجار با وزن ۰/۲۱۸ به عنوان روش‌های بعدی انتخاب شدند (دلیریان و همکاران، ۱۳۸۵).

برای انتخاب قطر بهینه تونل کاکارضا ۳ گزینه و ۵ معیار وجود دارد. که گزینه‌ها عبارتند از قطر ۲/۷، ۴/۳ و ۶ متر که انتخاب این گزینه‌ها خود بر اساس تجربیات حفاری تونل‌های قبلی، موقعیت منطقه و مسائل مختلف تونل‌زنی صورت گرفته است. معیارهای انتخاب شده شامل آتشیاری، تهویه حین حفاری، سیستم نگهداری تونل، زمان اجرای تونل و هزینه‌های اجرای تونل می‌باشد. در ابتدا یک سری فرم نظرخواهی تهیه شده و در اختیار کارشناسان قرار گرفت، کارشناسان امتیاز گزینه‌ها را نسبت به معیارهای مختلف در جداول مربوطه وارد کردند. با استفاده از داده‌های خام این فرم‌ها و استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی، قطر ۲/۷ به عنوان بهترین قطر برای حفاری تونل کاکارضا انتخاب شد (میخک بیرانوند، ۱۳۸۸).

برای انتخاب سیستم تهویه موقت تونل انتقال آب کرج ۴ معیار هزینه، فاکتورهای مدیریتی، زیست‌محیطی و فنی منظور گردید. بر اساس امکان‌پذیری حفر چاه، طراحی تهویه تونل کرج بر اساس با و بدون چاه در قالب گزینه‌های زیر بررسی گردید:

- طراحی سیستم تهویه با تأمین و انتقال هوا تنها از دهانه خروجی ET و فن‌های کمکی مستقر در طول تونل
 - طراحی سیستم تهویه با تأمین و انتقال هوا از دهانه خروجی ET و چاه تهویه متراژ ۷۳۵۰
 - طراحی سیستم تهویه با تأمین و انتقال هوا از دهانه خروجی ET و چاه تهویه متراژ ۹۳۵۰
 - طراحی سیستم تهویه با تأمین و انتقال هوا از دهانه خروجی ET و چاه‌های تهویه متراژ ۲۹۰۰ و ۷۳۵۰
 - طراحی سیستم تهویه با تأمین و انتقال هوا از دهانه خروجی ET و چاه‌های تهویه متراژ ۲۹۰۰ و ۹۳۵۰
- در نهایت پس از انتخاب معیارها، زیرمعیارها و گزینه‌ها، با استفاده از فرآیند تحلیل سلسله مراتبی فازی، به مناسب‌ترین

۳. زمین شناسی مسیر تونل

مسیر ۶۵ کیلومتری تونل بهشت آباد از دو زون ساختاری زاگرس رورانده و سنندج - سیرجان عبور می کند. راندگی اصلی زاگرس مرز شاخص بین این دو زون است. بخش زاگرس از ورودی تونل شروع شده و تا تراست زاگرس در حوالی کیلومتر ۱۷ ادامه می یابد و سپس تا انتهای تونل در زون سنندج - سیرجان واقع شده است.

در این تحقیق ۱۷ کیلومتر اول تونل با توجه به شرایط پیچیده زمین شناسی برای انتخاب مناسب ترین روش حفاری مورد مطالعه قرار گرفت. زمین شناسی منطقه در ۱۷ کیلومتر اول به ۱۲ پهنه تقسیم شده است (شرکت مهندسی مشاور زاینده آب، گزارش زمین شناسی مهندسی، ۱۳۸۷). خلاصه اطلاعات زمین شناسی پهنه های مختلف در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱. خصوصیات زمین شناسی ۱۲ پهنه تونل

پهنه (متر)	مقاومت تراکم تک محوری (مگاپاسکال)	RQD (%)	میزان روباره (متر)	وضعیت آب زیرزمینی	احتمال وجود گاز	وزن مخصوص (کیلونیوتن بر متر مکعب)	جنس سنگ ها
۰ - ۳۳۰	۷۰ تا ۹۰	کمتر از ۲۵	۰ تا ۱۷۰	پایین تر از کف تونل	ندارد	۲۷/۱۶	آهک ضخیم لایه
۳۳۰ - ۱۰۲۰	۷۰ تا ۷۰	۶۰ تا ۷۰	۱۷۰ تا ۳۷۰	پایین تر از کف تونل	ندارد	۲۵/۸۱	آهک و آهک مارنی متوسط تا نازک لایه
۱۰۲۰ - ۲۵۰۰	۸۰ تا ۸۰	۷۰ تا ۸۰	۳۵۰ تا ۱۳۰	بالتر از کف تونل	ندارد	۲۷/۴۰	آهک و دولومیت های ضخیم لایه تا توده ای
۲۵۰۰ - ۳۱۳۰	۸۰ تا ۸۰	۷۰ تا ۶۰	۳۳۰ تا ۹۲۰	بالتر از کف تونل	دارد	۲۵/۸۱	آهک و آهک مارنی متوسط تا نازک لایه با میان لایه های شیل و عدسی های چرت
۳۱۳۰ - ۵۴۵۰	۹۰ تا ۹۰	۹۰ تا ۱۰۰	۶۳۰ تا ۱۲۴۰	بالتر از کف تونل	دارد	۲۷/۱۶	آهک ضخیم لایه تا توده ای همراه با ندول های چرت
۵۴۵۰ - ۵۹۴۰	۶۰ تا ۶۰	۵۰ تا ۶۰	۱۱۸۰ تا ۱۲۴۰	بالتر از کف تونل	ندارد	۲۵/۶۰	کنگلو مرا، ماسه سنگ، سیلتستون همراه با سیمان سیلیسی و آهکی
۵۹۴۰ - ۷۸۰۰	۷۵	۹۵ تا ۱۰۰	۳۷۰ تا ۱۱۸۰	بالتر از کف تونل	ندارد	۲۵	تناوب آهک و دولومیت های نازک تا متوسط لایه و آهک و آهک مارنی متوسط تا ضخیم لایه
۷۸۰۰ - ۸۱۲۰	۴۰ تا ۴۰	۹۵ تا ۱۰۰	۳۱۰ تا ۳۶۰	بالتر از کف تونل	ندارد	۲۵/۴۰	مارلستون و مارن آهکی ضخیم لایه با بین لایه هایی از آهک مارنی و لوماشل
۸۱۲۰ - ۹۶۴۰	۷۵	۹۵ تا ۱۰۰	۲۸۵ تا ۳۰۵	بالتر از کف تونل	ندارد	۲۵	آهک ها و آهک های مارنی متوسط تا ضخیم لایه
۹۶۴۰ - ۱۰۷۹۰	۴۰ تا ۴۰	۹۵ تا ۱۰۰	۲۸۰ تا ۳۰۰	بالتر از کف تونل	ندارد	۲۵/۴۰	مارلستون و مارن آهکی ضخیم لایه با بین لایه هایی از آهک مارنی و لوماشل
۱۰۷۹۰ - ۱۲۱۳۰	۹۰ تا ۹۰	۹۵ تا ۱۰۰	۳۰۰ تا ۳۷۰	بالتر از کف تونل	ندارد	۲۷/۰۵	ماسه سنگ و کنگلو مرا با بین لایه های مادستون و سیلتستون با سیمان آهکی
۱۲۱۳۰ - ۱۶۹۲۰	۹۰ تا ۹۰	۹۵ تا ۱۰۰	۳۰۰ تا ۴۳۰	بالتر از کف تونل	ندارد	۲۵/۱۲	مادستون، سیلتستون با بین لایه هایی از ماسه سنگ و کنگلو مرا

لازم به ذکر است در تمام پهنه ها مناطقی که سنگ ها تحت تاثیر گسل قرا گرفته اند وجود دارند. در این مناطق سنگ ها بسیار خرد شده اند در پهنه های مختلف ضخامت مناطقی که تحت تاثیر گسل ها قرار گرفته اند متفاوت است.

در جدول ۲ مقادیر RMR_b (بدون در نظر گرفتن تصحیح امتداد تونل نسبت به وضعیت ناپیوستگی و با در نظر گرفتن شرایط

خشک برای تعیین GSI محاسبه شده است)، RMR و GSI هر پهنه مشخص شده است.

۱۷ کیلومتر اول با توجه به شرایط زمین شناسی و ژئوتکنیکی منطقه از قبیل طبقه بندی ژئومکانیکی توده سنگ، وجود گسل و نواحی خرد شده، هجوم آب، وجود گاز، مچاله شونده، احتمال آماس و سایندگی و سختی توده سنگ به سه پهنه برای

آشنایی اولیه با تئوری مجموعه فازی لازم است که در ابتدا به برخی از مفاهیم و تعاریف اولیه این تئوری پرداخته شود. در نظریه کلاسیک، یک مجموعه شامل تعدادی از اجزا است که به واسطه خصوصیات مشترک گرد هم جمع شده‌اند. راه‌های مختلفی برای نمایش مجموعه‌های کلاسیک وجود دارد که عبارتند از:

۱- نمایش عناصر مجموعه به صورت: $A = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$

۲- تعریف خصوصیات عناصر مجموعه به صورت $\{x\}$ خاصیت p را داشته باشد $A = \{x \in X \mid p\}$.

۳- استفاده از تابع مشخصه به صورت $\mu_A: X \rightarrow \{0,1\}$. تابع مشخصه مجموعه جهانی X را به دو مقدار صفر و یک، تصویر می‌کند. عناصری که مجموعه A هستند مقدار یک و در غیر این صورت مقدار صفر می‌گیرند.

همانطور که مشاهده می‌گردد در مجموعه‌های کلاسیک یک عنصر یا عضو مجموعه مورد نظر هست یا نیست. بنابراین مجموعه‌های کلاسیک برای مفاهیمی مناسب است که به طور قطعی و مشخص قابل تشخیص است. در حالی که مفاهیمی وجود دارد که نمی‌توان به طور مشخص و قطعی برای آنها حد و مرزی تعیین کرد. برای رفع این نقیصه در بیان مجموعه‌ها، نظریه مجموعه‌های فازی در سال ۱۹۶۵ میلادی توسط پروفیسور لطفی زاده ارائه شد (نقل از شوندی، ۱۳۸۵).

اگر X مجموعه‌ای از عناصر باشد که با x نشان داده می‌شوند، آنگاه مجموعه فازی \tilde{A} در X ، مجموعه زوج‌های مرتب شده‌ای به صورت رابطه ۱ می‌باشند.

$$\tilde{A} = \{(x, \mu_{\tilde{A}}(x)) : x \in X\} \quad (1)$$

که در آن $\mu_{\tilde{A}}(x)$ تابع عضویت یا درجه عضویت x در \tilde{A} است. اگر فضای تابع عضویت، تنها شامل اعداد صفر و یک باشد، آنگاه مجموعه مورد نظر یک مجموعه کلاسیک خواهد بود و اگر شامل اعداد حقیقی بین صفر و یک نیز باشد، آنگاه مجموعه مورد نظر یک مجموعه فازی است.

در ادبیات نظریه مجموعه‌های فازی، چند تابع از جمله تابع عضویت مثلثی، تابع عضویت ذوزنقه‌ای، تابع عضویت گوسی، تابع عضویت زنگوله‌ای، تابع عضویت سیگموئیدال و تابع

حفاری تقسیم شده است که از متر ۰ تا ۵۴۵۰ متر، ۵۴۵۰ تا ۷۸۰۰ متر، و ۷۸۰۰ تا ۱۷۰۰۰ متر می‌باشد.

جدول ۲. طبقه‌بندی مهندسی توده سنگ‌های مسیر تونل

(شرکت مهندسی مشاور زاینده‌آب، ۱۳۸۷).

پهنه (متر)	RMR	Q	RMR _b	GSI
۰-۳۳۰	۳۴-۴۰	۰/۲۵۰-۰/۳۱۳	۳۹-۴۵	۳۴-۴۰
۳۳۰-۱۰۲۰	۵۵-۵۹	۵-۵/۸۳	۶۰-۶۴	۵۵-۵۹
۱۰۲۰-۱۹۰۰	۶۶-۷۰	۱۱/۶۷-۱۳/۳۳	۷۱-۷۵	۶۶-۷۰
۱۹۰۰-۲۵۰۰	۴۹-۵۵	۰/۸۷۵-۲/۶۷	۷۱-۷۵	۶۶-۷۰
۲۵۰۰-۳۱۳۰	۵۰-۵۴	۱/۶۵-۲/۷۵	۶۰-۶۴	۵۵-۵۹
۳۱۳۰-۵۴۵۰	۶۰-۶۴	۱/۳۵-۴	۷۳-۷۷	۶۸-۷۲
۵۴۵۰-۵۹۴۰	۵۳-۶۰	۱/۱-۱/۹۸	۶۰-۶۷	۵۵-۶۲
۵۹۴۰-۷۸۰۰	۵۷-۶۲	۱/۳۵-۳	۷۷-۷۹	۷۲-۷۴
۷۸۰۰-۸۱۲۰	۵۰-۷۱	۲/۳۷۵-۱۳/۲	۶۷-۷۶	۶۲-۷۱
۸۱۲۰-۹۶۴۰	۵۷-۶۲	۲/۲۵-۱۰	۷۷-۷۹	۷۲-۷۴
۹۶۴۰-۱۰۷۹۰	۵۷-۶۹	۳/۹۲-۱۰	۶۷-۷۶	۶۲-۷۱
۱۰۷۹۰-۱۲۱۳۰	۵۶-۶۳	۳/۳۷۵-۱۰	۶۹-۷۶	۶۴-۷۱
۱۲۱۳۰-۱۶۹۲۰	۵۷-۵۹	۴/۵-۱۰	۶۷-۶۹	۶۲-۶۴

۴. انواع روش‌های حفر تونل

تونل‌ها نوعی سازه زیرزمینی هستند که از لحاظ کاربری به سه دسته کلی تونل‌های حمل و نقل، صنعتی و معدنی تقسیم می‌شوند. در این بین تونل‌های انتقال آب در زمره تونل‌های صنعتی قرار می‌گیرند (مدنی، ۱۳۸۳).

روش‌های مختلفی برای حفاری تونل‌ها وجود دارد که هر کدام دارای محدودیت‌ها، مزایا و معایب خاص خود می‌باشند. به جز برخی از روش‌های خاص حفر تونل که گسترش زیادی پیدا نکرده‌اند، روش‌های عمده حفاری تونل را می‌توان در سه دسته طبقه‌بندی کرد: چالزنی و آتشیاری، Drill & Blast (D&B)، ماشین‌های حفار بازویی (Roadheader) و ماشین‌های مکانیزه حفاری تمام مقطع (TBM).

۵. تئوری مجموعه‌های فازی

از آنجایی که برای انتخاب مناسب‌ترین روش حفاری از روش تحلیل سلسله مراتبی فازی استفاده خواهد شد در این بخش به بیان تئوری مجموعه‌های فازی پرداخته شده است. برای

$$\tilde{M}_1 + \tilde{M}_2 = (l_1 + l_2, m_1 + m_2, u_1 + u_2) \quad (۳)$$

$$\tilde{M}_1 - \tilde{M}_2 = (l_1 - l_2, m_1 - m_2, u_1 - u_2) \quad (۴)$$

$$\tilde{M}_1 - \tilde{M}_2 = (-l_2, -m_2, -u_2) \quad (۵)$$

باید توجه داشت که حاصل ضرب دو عدد فازی مثلثی، یا معکوس یک عدد فازی مثلثی، دیگر یک عدد فازی مثلثی نیست. روابط ۶، ۷ و ۸ فقط تقریبی از حاصل ضرب واقعی دو عدد فازی مثلثی و معکوس یک عدد فازی مثلثی را بیان می‌کنند.

$$\tilde{M}_1 \otimes \tilde{M}_2 = (l_1 * l_2, m_1 * m_2, u_1 * u_2) \quad (۶)$$

$$\tilde{M}_1^{-1} = \left(\frac{1}{u_1}, \frac{1}{m_1}, \frac{1}{l_1}\right) \quad (۷)$$

$$\tilde{M}_2^{-1} = \left(\frac{1}{u_2}, \frac{1}{m_2}, \frac{1}{l_2}\right) \quad (۸)$$

۶. متد تحلیل سلسله مراتبی فازی

در سال ۱۹۸۳ دو محقق هلندی به نام‌های لارهورن و پدریک روشی را برای فرآیند تحلیل سلسله مراتبی فازی پیشنهاد کردند که بر اساس روش حداقل مجذورات لگاریتمی بنا نهاده شده بود. پیچیدگی مراحل این روش باعث شده این روش چندان مورد استفاده قرار نگیرد. در سال ۱۹۹۶ روش دیگری تحت عنوان روش تحلیل توسعه‌ای توسط چانگ ارائه شد. اعداد مورد استفاده در این روش، اعداد مثلثی فازی هستند (نقل از آذر و فرجی، ۱۳۸۰).

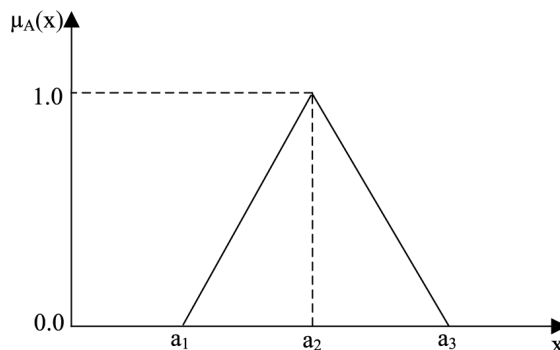
اگر مجموعه موضوعات به صورت $X = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_n\}$ و مجموعه هدف به صورت $G = \{g_1, g_2, g_3, \dots, g_n\}$ تعریف شوند، بر طبق روش تحلیلی چانگ هر موضوعی برای هر هدفی که به ترتیب انجام می‌شود مورد تحلیل قرار می‌گیرد. بنابراین تحلیل M ، برای هر هدفی ارزش‌گذاری می‌شود که می‌تواند از طریق رابطه ۹ به دست آید (Percin, 2008).

$$M_{gi}^1, M_{gi}^2, M_{gi}^3, \dots, M_{gi}^j, \dots, M_{gi}^n, \quad i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (۹)$$

که در آن M_{gi}^j ($j = 1, 2, 3, \dots, m$) همان اعداد فازی مثلثی هستند که پارامترهای آن l ، m و u است که به ترتیب عبارتند از کم‌احتمال‌ترین ارزش، محتمل‌ترین ارزش و بیشترین ارزش

عضویت خطی بطور استاندارد تعریف شده و کاربردهای بسیاری در عمل داشته‌اند. در ادامه به علت استفاده از تابع عضویت مثلثی در فرآیند تحلیل سلسله مراتبی فازی، به تعریف این تابع پرداخته شده است (شوندی، ۱۳۸۵).

تابع عضویت مثلثی توسط سه پارامتر $\{a_1, a_2, a_3\}$ تعریف می‌شود که شکل و رابطه آن به صورت شکل ۱ و رابطه ۲ است.



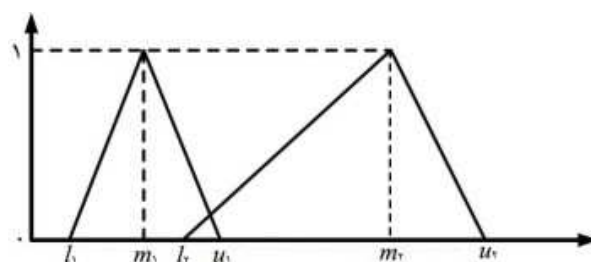
شکل ۱. تابع عضویت مثلثی (شوندی، ۱۳۸۵)

(۲)

$$\text{trn}(x : a_1, a_2, a_3) = \begin{cases} 0 & x < a_1 \\ \frac{x-a_1}{a_2-a_1} & a_1 \leq x \leq a_2 \\ \frac{a_3-x}{a_3-a_2} & a_2 \leq x \leq a_3 \\ 0 & x > a_3 \end{cases}$$

همانند مجموعه‌های کلاسیک بر روی مجموعه‌های فازی نیز کلیه عملیات ریاضی صورت می‌پذیرد.

دو عدد فازی مثلثی $\tilde{M}_1 = (l_1, m_1, u_1)$ و $\tilde{M}_2 = (l_2, m_2, u_2)$ را در نظر بگیرید، آنگاه عملیات ریاضی چهار عمل اصلی در اعداد فازی مثلثی به صورت شکل ۲ قابل تعریف است (روابط ۳، ۴ و ۵):



شکل ۲. اعداد مثلثی \tilde{M}_1 و \tilde{M}_2 (شوندی، ۱۳۸۵)

$$d'(A_i) = \min V(S_i \geq S_k) \quad k = 1, 2, 3, \dots, n \quad k \neq i \quad (17)$$

بنابراین بردار وزن نابهنجار به صورت رابطه ۱۸ خواهد شد:

$$W' = (d'(A_1), d'(A_2), \dots, d'(A_n))^T \quad (18)$$

گام ۴. در انتها بردار حاصل از گام سوم را نرمالیزه می‌کنیم و بردار وزن نهایی از رابطه ۱۹ به دست می‌آید:

$$W = (d(A_1), d(A_2), \dots, d(A_n))^T \quad (19)$$

که در اینجا W عددی غیرفازی می‌باشد.

۷. انتخاب مناسب‌ترین روش حفاری تونل انتقال آب

بهشت‌آباد با فرآیند تحلیل سلسله مراتبی فازی

بنابراین برای انتخاب مناسب‌ترین روش حفاری تونل انتقال آب بهشت‌آباد با فرآیند تحلیل سلسله مراتبی فازی، ابتدا پارامترها و معیارهای مؤثر شناسایی شدند و بر اساس آن مدلی در نظر گرفته شد. این مدل شامل پارامترهای فنی و اقتصادی می‌باشد.

با استفاده از مطالعات کتابخانه‌ای (Wittaker, 1990, Shinha, 1989, Robbins, 1997, Wood, 2000) و

تجربیات کارشناسان مختلف در طول جلسات متعدد و همچنین مشخصات فنی منطقه (تونل)، معیارها و زیرمعیارهای موجود در مدل سلسله مراتبی انتخاب شد و مدلی با مشخصات نشان داده شده در جدول ۳ طراحی گردید.

با توجه به اهمیت پارامترهای زمین‌شناختی و زمین‌شناختی مهندسی تأثیر این پارامترها بر انتخاب روش حفاری توضیح داده می‌شود.

ساختگاه تونل ممکن است حاوی سنگ‌های آذرین، رسوبی، دگرگونی و یا مخلوط آنها باشد. هر یک از این سنگ‌ها از نظر حفر و نگهداری تونل، وضعیت مختلفی دارند. سنگ‌های آذرین، مقاومت تراکمی بالایی دارند و به همان نسبت حفاری آنها مشکل است، اما به علت مقاومت خوبی که دارند، در بسیاری از موارد نیازی به نصب سیستم نگهداری در آنها وجود ندارد.

ممکن. یک عدد فازی مثلثی به صورت (l, m, u) نشان داده می‌شود. گام‌های تحلیل چانگ به شرح زیر است.

گام ۱. ارزش ترکیبی فازی با توجه به i امین مورد به صورت رابطه ۱۰ تعریف می‌شود.

$$S_i = \sum_{j=1}^m M_{gi}^j * \left[\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m M_{gi}^j \right]^{-1} \quad (10)$$

برای به دست آوردن $\sum_{j=1}^m M_{gi}^j$ عملیات جمع ارزش‌های تحلیل M برای یک ماتریس خاص به صورت رابطه ۱۱ انجام می‌شود.

$$\sum_{j=1}^m M_{gi}^j = (\sum_{j=1}^m l_{ij}, \sum_{j=1}^m m_{ij}, \sum_{j=1}^m u_{ij}) \quad (11)$$

برای به دست آوردن $\left[\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m M_{gi}^j \right]^{-1}$ عملیات جمع فازی ارزش‌های M_{gi}^j ($j = 1, 2, 3, \dots, m$) مطابق با رابطه ۱۲ محاسبه می‌شود:

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m M_{gi}^j = (\sum_{i=1}^n l_{ij}, \sum_{i=1}^n m_{ij}, \sum_{i=1}^n u_{ij}) \quad (12)$$

به صورتی که در رابطه ۱۳ داریم:

$$l_i = \sum_{j=1}^m l_{ij}, m_i = \sum_{j=1}^m m_{ij}, u_i = \sum_{j=1}^m u_{ij} \quad (13)$$

و سپس معکوس بردار فوق با استفاده از رابطه ۱۴ محاسبه می‌شود.

$$\left[\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m M_{gi}^j \right]^{-1} = \left(\frac{1}{\sum_{i=1}^n l_{ij}}, \frac{1}{\sum_{i=1}^n m_{ij}}, \frac{1}{\sum_{i=1}^n u_{ij}} \right) \quad (14)$$

گام ۲. پس از محاسبه S_i ها، باید درجه بزرگی آنها را نسبت به هم به دست آورد. به طور کلی اگر M_1 و M_2 دو عدد فازی مثلثی باشند، درجه بزرگی M_2 بر M_1 به صورت رابطه ۱۵ تعریف می‌شود.

$$(15)$$

$$V(M_2 \geq M_1) = \text{hgt}(M_2 \cap M_1) = \mu_{M_2}(d) =$$

$$\begin{cases} 1 & \text{if } m_2 \geq m_1 \\ 0 & \text{if } l_1 \geq l_2 \\ \frac{l_1 - u_2}{(m_2 - u_2) - (m_1 - l_1)} & \text{otherwise} \end{cases}$$

از سوی دیگر میزان بزرگی یک عدد فازی مثلثی از K عدد فازی مثلثی دیگر نیز از رابطه ۱۶ به دست می‌آید:

$$(16)$$

$$V(M \geq M_1, M_2, \dots, M_K) = [(M \geq M_1) \text{ and } (M \geq M_2) \text{ and } \dots \text{ and } (M \geq M_K)] = \min V(M \geq M_i), i = 1, 2, 3, \dots, k.$$

گام ۳. برای محاسبه وزن شاخص‌ها در ماتریس مقایسات زوجی، با توجه به گام دوم، داریم (رابطه ۱۷):

جدول ۳. معیارها و زیرمعیارهای سلسله مراتبی تونل انتقال آب بهشت‌آباد

گزینه‌ها	زیرمعیارها	معیارها	هدف
روش حفاری و انفجار (D.B)	C ₁₁ : طبقه بندی ژئومکانیکی توده سنگ	C ₁ : شرایط زمین‌شناختی و ژئومکانیکی	: G انتخاب مناسب‌ترین روش حفاری تونل انتقال آب بهشت‌آباد
	C ₁₂ : گسل و نواحی خرد شده		
	C ₁₃ : وجود آب		
	C ₁₄ : وجود گاز		
	C ₁₅ : احتمال مچاله شوندگی		
	C ₁₆ : احتمال آماس		
	C ₁₇ : ساینده‌گی و سختی توده سنگ		
روش حفاری با ماشین بازویی (R.H)	C ₂₁ : سرمایه گذاری اولیه	C ₂ : شرایط اقتصادی	
	C ₂₂ : هزینه عملیاتی		
	C ₂₃ : هزینه تمام شده پروژه		
روش حفاری با ماشین بازویی (R.H)	C ₃₁ : زمان‌بندی	C ₃ : شرایط عملیاتی	
	C ₃₂ : نرخ حفاری		
	C ₃₃ : ایمنی		
	C ₃₄ : انعطاف پذیری		
	C ₃₅ : کارگر بر بودن		
حفاری با ماشین‌های تونل‌زنی تمام مقطع (TBM)	C ₄₁ : آلودگی محیط زیست به سبب تزیقات و تحکیمات	C ₄ : شرایط زیست‌محیطی	
	C ₄₂ : خشک شدن چشمه‌ها		
تمام مقطع (TBM)	C ₅₁ : شیب و قوس مسیر تونل	C ₅ : هندسه تونل	
	C ₅₂ : طول تونل		
	C ₆₁ : سهولت تأمین منابع مورد نیاز	عوامل مدیریتی	
	C ₆₂ : ریسک		

سنگ‌های تونل از سیستم طبقه‌بندی RMR استفاده شد. معیار RMR شامل پنج پارامتر است که در نهایت به صورت یک عدد نمود پیدا می‌کند.

ب) گسل و نواحی خرد شده وجود گسل سبب ایجاد صفحات شکستگی در توده سنگ‌های مسیر می‌شود. در صورت حفر تونل در چنین توده سنگ‌هایی احتمال لغزش قطعات سنگ به داخل تونل وجود دارد. علاوه بر این وجود گسل در منطقه حفاری، موجب ایجاد معابری برای آب‌های زیرزمینی خواهد شد. صفحات خردشده‌ی گسل در منطقه، ممکن است به چندین متر برسد. بدیهی است که این منطقه از استحکام بسیار کمی برخوردار است. نحوه برخورد با محدوده‌ای که گسل از آن عبور کرده یا در آن زون خردشده‌ای وجود دارد به دلالت وجود ضعف و تغییرات در این محدوده، بسیار متفاوت با سایر مناطق تونل است. بنابراین عملکرد روش‌های مختلف حفاری هم در این مناطق فرق

سنگ‌های رسوبی در حالت کلی ضعیف‌تر از سنگ‌های آذرین‌اند و بنابراین برای حفر تونل در بسیاری از این سنگ‌ها، می‌توان از ماشین تونل‌کنی استفاده کرد. در عین حال، در بسیاری موارد، تونل‌هایی که در این سنگ‌ها حفر می‌شوند، به سیستم نگهداری نیاز دارند. از جمله مشخصات مهم سنگ‌های دگرگونی، وجود تورق و شیب‌توزیته در آنها است که از جمله صفحات ضعیف این سنگ‌ها به شمار می‌آیند. البته بعضی از سنگ‌های دگرگونی فاقد این ساخت‌اند. معیار زمین‌شناسی و زمین‌شناسی مهندسی به ۷ زیرمعیار تقسیم شده است که در ذیل به توضیح تک تک آنها پرداخته شده است.

الف) طبقه‌بندی ژئومکانیکی توده‌سنگ مشخص است که یک پارامتر ساده به تنهایی نمی‌تواند معرف رفتار توده‌سنگ در اطراف یک فضای زیرزمینی باشد. بنابراین در یک طبقه‌بندی خوب از چندین پارامتر برای پیش‌بینی رفتار سنگ استفاده می‌شود (حسینی، ۱۳۸۵). جهت طبقه‌بندی

تنش‌های القایی در ضمن حفاری تونل تعریف نمود. این پدیده زمانی روی می‌دهد که تنش‌های برشی القایی به وجود آمده در اثر حفاری بیشتر از مقاومت برشی توده سنگ‌های در برگیرنده حفره باشد. این پدیده می‌تواند موجب تحمیل هزینه‌ها، تأخیر در روند اجرای پروژه و حتی خرابی پوشش بتنی حین بهره‌برداری تونل شود (Barla, 2002).

تونل‌سازی در سنگ‌های با پتانسیل لهیدگی، اغلب سبب ایجاد تأخیرات طولانی در احداث پروژه و تحمیل هزینه‌های زیاد می‌گردد. از این رو انتخاب روش حفاری مناسب و نصب سیستم نگهداری متناسب و به موقع، نقش عمده‌ای در کنترل این پدیده و کاهش آثار نامطلوب آن خواهد داشت (غیاثوند، ۱۳۸۵).

به منظور تعیین شرایط مچاله شوندگی و پتانسیل بروز این پدیده، روش‌های کیفی و کمی مختلفی توسط محققین ارائه شده است. روش‌های کیفی (روش‌های تجربی) برسیستم‌های طبقه‌بندی سنگ استوارند ولی در روش‌های کمی شاخص‌هایی جهت ارزیابی پتانسیل مچاله شوندگی ارائه می‌شود. برای ارزیابی مچاله شوندگی تونل انتقال آب بهشت‌آباد، از سه روش سینگ، جتوا، هوک و مارینوس استفاده می‌شود، که نتایج این بررسی‌ها در جدول ۴ ارائه شده است.

جدول ۴. ارزیابی لهیدگی تونل بهشت‌آباد

بخش تونل	روش کیفی	
	روش سینگ	روش جتوا
۳۳۰-۱۰۲۰	از ۵۰۰ متر *	روش هوک و مارینوس
۱۹۰۰-۲۵۰۰	از ۲۴۰۰ متر *	
۲۵۰۰-۳۱۳۰	از ۲۷۰۰ متر #	
۳۱۳۰-۵۴۵۰	#	
۵۴۵۰-۵۹۴۰	#	*
۵۹۴۰-۷۸۰۰	تا ۷۵۰۰ متر #	(۵۹۴۰ تا ۶۰۵۰) ** و (۶۰۵۰ تا ۷۵۰۰) *
۷۸۰۰-۸۱۲۰	**	
۹۶۴۰-۱۰۷۹۰	*	
۱۲۱۳۰-۱۶۹۲۰	(تا ۱۵۸۰۰) * و (از ۱۵۸۰۰ تا ۱۶۹۲۰) **	

(# - دارای پتانسیل مچاله شوندگی، * - مچاله شوندگی کم، ** - مچاله شوندگی متوسط، *** - مچاله شوندگی زیاد) و احتمال آماس

خواهد کرد. در این معیار فرعی، با در نظر گرفتن چگونگی توانایی سه روش حفاری در عبور از این مناطق، به قضاوت در مورد سه روش حفاری و انجام مقایسات زوجی پرداخته شده است.

ج) وجود آب

وجود مقادیر زیادی آب زیرزمینی، از جمله مسائلی است که علاوه بر آنکه عملیات تونل‌سازی را با مشکل مواجه می‌سازد، خطراتی را نیز در پی دارد. با آگاهی از وضعیت آب زیرزمینی محل، می‌توان با انتخاب روش مناسب حفاری و آبکشی، با خطرات ناشی از آن مقابله کرد (مدنی، ۱۳۸۳). همان‌طور که پیش‌تر ذکر شد، تا کیلومتر ۸ احتمال برخورد با سفره‌های بزرگ آب زیرزمینی و همچنین چشمه‌های موجود در مسیر، وجود دارد. با آگاهی از وضعیت آب‌های زیرزمینی، و انتخاب روش مناسب حفاری و آبکشی، می‌توان با خطرات ناشی از هجوم یا نفوذ آب مقابله کرد. در این معیار فرعی، با در نظر گرفتن مخاطرات ناشی از هجوم آب به داخل تونل انتقال آب بهشت‌آباد، به قضاوت در مورد سه روش حفاری پرداخته شده است.

ی) وجود گاز

گاه در سنگ‌ها به طور طبیعی گازهایی وجود دارد که به هنگام حفر تونل، مشکلاتی را به وجود می‌آورند. مهم‌ترین این گازها دی‌اکسید کربن، متان، دی‌اکسید گوگرد، سولفید هیدروژن و ندرتاً هیدروژن هستند. وجود این گازها همواره خطراتی را به دنبال دارد (مدنی، ۱۳۸۳). در این تونل، از متر ۱۰۲۰ تا ۵۴۵۰ (پهنه اول حفاری) وجود گازهای خطرناک و احتمال ایجاد انفجار پیش‌بینی شده است. بنابراین در این معیار فرعی، به بررسی میزان اهمیت آن نسبت به سایر زیرمعیارها و همچنین مقایسه سه روش حفاری نسبت به زیرمعیار وجود گاز، پرداخته شده است.

ه) احتمال مچاله شوندگی

اصطلاح سنگ مچاله شونده از نخستین روزهای احداث تونل در کوه‌های آلپ متداول شد و تاکنون برای آن تعاریف مختلفی ارائه شده است. به طور کلی مچاله شوندگی را می‌توان به صورت جابجایی و همگرایی ناشی از ایجاد و ترکیب

۵- محاسبه اوزان معیارها، زیرمعیارها و گزینه‌ها با استفاده از تحلیل سلسله مراتبی فازی برای وزن‌دهی و مقایسات زوجی بین معیارها، زیرمعیارها و گزینه‌ها پرسشنامه‌ای طراحی و بین کارشناسان توزیع شد. پس از دریافت پرسشنامه‌های تکمیل شده، با استفاده از ماتریس‌های مقایسه زوجی حاصله و تکنیک تصمیم‌گیری تحلیل سلسله مراتبی فازی، وزن معیارهای تصمیم‌گیری محاسبه شد. واژه‌هایی که برای این مقایسه مورد استفاده قرار می‌گیرند به شرح جدول ۵ است. سپس اعتبار پرسشنامه‌های تحلیل سلسله مراتبی با توجه به نرخ سازگاری آنها مورد سنجش قرار می‌گیرد. بنابراین پیش از تعیین وزن معیارها می‌بایست نرخ ناسازگاری هریک از ماتریس‌های مقایسه زوجی تعیین شود تا اعتبار پرسشنامه‌ها تأیید شود. این پرسشنامه‌ها شامل مقایسه معیارهای اصلی با هم، مقایسه هریک از معیارهای فرعی و هر معیار اصلی با هم و همچنین مقایسه سه روش حفاری نسبت به هرگزینه است. از این‌رو نیاز به محاسبه سازگاری تمامی ماتریس‌های مقایسه زوجی است. در مرحله اول، پس از دریافت پرسشنامه، تعدادی از ماتریس‌های مقایسه زوجی ناسازگار بودند. بنابراین به جهت دستیابی به اعتبار بیشتر، ناگزیر اقدام به توزیع مجدد پرسشنامه‌ها در بین کارشناسان شد. در نهایت، پس از دریافت پرسشنامه‌های اصلاح شده، سازگاری کلیه ماتریس‌ها تأیید شد.

جدول ۵. مقیاس‌های زبانی برای بیان درجه اهمیت

مقیاس‌های زبانی برای درجه اهمیت	اعداد فازی مثلثی	معکوس اعداد فازی مثلثی
عیناً یکسان	(۱, ۱, ۱)	(۱, ۱, ۱)
اهمیت یکسان یا عدم ترجیح	(۰/۵, ۱, ۱/۵)	(۱, ۰/۶۶۷, ۰/۲)
نسبتاً مهم‌تر	(۱, ۱/۵, ۲)	(۰/۵, ۰/۶۶۷, ۱)
مهم‌تر	(۱/۵, ۲, ۲/۵)	(۰/۴, ۰/۵, ۰/۶۶۷)
خیلی مهم‌تر	(۲, ۲/۵, ۳)	(۰/۳۳۳, ۰/۴, ۰/۵)
بی‌نهایت (کاملاً) مهم‌تر	(۲/۵, ۳, ۳/۵)	(۰/۲۸۶, ۰/۳۳۳, ۰/۴)

در جداول ۶ تا ۸ وزن معیارها و زیرمعیارهای مربوط به سه بخش تونل آورده شده است.

منظور از زمین آماس‌پذیر، خاک‌ها و مواد سنگی سست و شکل‌پذیری است که در اثر آب و در نتیجه تأثیر نیروی وزن به سمت تونل رانده می‌شوند و وضعیت تنش در اطراف تونل را به هم می‌زنند. سنگ‌هایی از قبیل لای سنگ، سنگ رس و سنگ‌های دگرسان شده‌ی آذرآواری و نیز سنگ‌های میکادار معمولاً خاصیت آماس‌پذیری دارند (مدنی، ۱۳۸۳). بنابراین در این معیار فرعی، به بررسی میزان اهمیت آن نسبت به سایر زیرمعیارها و همچنین مقایسه سه روش حفاری نسبت به زیرمعیار احتمال آماس، پرداخته شده است.

ز) ساینده‌گی و سختی توده‌سنگ

در عملیات حفاری، به خاصیتی از سنگ که موجب از بین رفتن انواع سرهمه‌ها (از جنس فولاد، کربور تنگستن و یا الماس) می‌شود، ساینده‌گی گفته می‌شود. میزان ساینده‌گی سنگ یک پارامتر بسیار مهم و تعیین کننده در انتخاب نوع سیستم حفاری است (عطایی و همکاران، ۱۳۸۸). سختی به عنوان یک ویژگی فیزیکی مهم، نقش بسیار زیادی در سرعت حفاری دارد. در قسمت‌های مختلف ۱۷ کیلومتر اول، تونل به تناوب با سنگ‌های سیلیس‌دار مواجه می‌شود. هدف از بررسی این زیرمعیار، ارزیابی میزان تأثیر آن بر روش‌های مختلف تونل‌سازی می‌باشد.

۸. متدولوژی تحقیق

در این تحقیق به منظور انتخاب مناسب‌ترین روش حفاری تونل انتقال آب بهشت‌آباد از روش فرآیند تحلیل سلسله مراتبی فازی استفاده شده و متدولوژی انجام کار به شرح زیر است:

- ۱- مشخص کردن هدف، معیارها، زیرمعیارها و گزینه‌ها
- ۲- تعیین درجه اهمیت معیارها و زیرمعیارها و مشخص ساختن اهمیت نسبی آنها نسبت به یکدیگر
- ۳- تعیین درجه اهمیت گزینه‌ها (روش‌های حفاری) با توجه به زیرمعیارها
- ۴- تعیین اولویت کلی گزینه‌ها با توجه به گام‌های ۲ و ۳ به منظور انتخاب مناسب‌ترین روش حفاری تونل انتقال آب بهشت‌آباد

جدول ۶. وزن معیار و زیرمعیارهای سلسله مراتبی مترائز ۰ تا ۵۴۵۰ متر تونل انتقال آب بهشت‌آباد

وزن نهایی	وزن معیارهای فرعی هر معیار اصلی	زیرمعیارها	وزن معیارهای اصلی	معیارهای اصلی
۰/۰۵۳۸	۰/۱۹	C ₁₁ : طبقه‌بندی ژئومکانیکی توده سنگ	۰/۲۸۳	C ₁ : شرایط زمین شناسی و ژئومکانیکی
۰/۰۷۶۴	۰/۲۷	C ₁₂ : گسل و نواحی خرد شده		
۰/۰۴۸۱	۰/۱۷	C ₁₃ : وجود آب		
۰/۰۶۷۹	۰/۲۴	C ₁₄ : وجود گاز		
۰/۰۱۴۲	۰/۰۵	C ₁₆ : احتمال آماس		
۰/۰۱۹۸	۰/۰۷	C ₁₇ : ساینندگی و سختی توده سنگ	۰/۲۳۷	C ₂ : شرایط اقتصادی
۰/۰۶۱۶	۰/۲۶	C ₂₁ : سرمایه گذاری اولیه		
۰/۰۴۲۷	۰/۱۸	C ₂₂ : هزینه عملیاتی		
۰/۱۳۲۷	۰/۵۶	C ₂₃ : هزینه تمام شده پروژه	۰/۱۴۱	C ₃ : شرایط عملیاتی
۰/۰۴۰۹	۰/۲۹	C ₃₁ : زمان‌بندی		
۰/۰۲۸۱	۰/۱۹۹	C ₃₂ : نرخ حفاری		
۰/۰۴۲۳	۰/۳	C ₃₃ : ایمنی		
۰/۰۲۰۳	۰/۱۴۴	C ₃₄ : انعطاف پذیری		
۰/۰۱۰۹	۰/۰۷۷	C ₃₅ : کارگر بر بودن	۰/۱	C ₄ : شرایط زیست محیطی
۰/۰۵	۰/۵	C ₄₁ : آلودگی محیط زیست به سبب تزریقات و تحکیمات		
۰/۰۵	۰/۵	C ₄₂ : خشک شدن چشمه‌ها	۰/۱۲۷	C ₅ : هندسه تونل
۰/۰۵۷۲	۰/۴۵	C ₅₁ : شیب و قوس مسیر تونل		
۰/۰۶۹۹	۰/۵۵	C ₅₂ : طول تونل	۰/۱۱۲	عوامل مدیریتی
۰/۰۲۳۵	۰/۲۱	C ₆₁ : سهولت تأمین منابع مورد نیاز		
۰/۰۸۸۵	۰/۷۹	C ₆₂ : ریسک		

جدول ۷. وزن معیار و زیرمعیارهای سلسله مراتبی مترائز ۵۴۵۰ تا ۷۸۰۰ متر تونل انتقال آب بهشت‌آباد

وزن نهایی	وزن معیارهای فرعی هر معیار اصلی	زیرمعیارها	وزن معیارهای اصلی	معیارهای اصلی
۰/۰۵۳۸	۰/۱۹	C ₁₁ : طبقه‌بندی ژئومکانیکی توده سنگ	۰/۲۸۳	C ₁ : شرایط زمین شناسی و ژئومکانیکی
۰/۰۷۹۲	۰/۲۸	C ₁₂ : گسل و نواحی خرد شده		
۰/۰۵۰۹	۰/۱۸	C ₁₃ : وجود آب		
۰/۰۶۷۹	۰/۲۴	C ₁₅ : احتمال مجاله شوندگی		
۰/۰۱۱۳	۰/۰۴	C ₁₆ : احتمال آماس		
۰/۰۱۹۸	۰/۰۷	C ₁₇ : ساینندگی و سختی توده سنگ	۰/۲۳۷	C ₂ : شرایط اقتصادی
۰/۰۶۱۶	۰/۲۶	C ₂₁ : سرمایه گذاری اولیه		
۰/۰۴۲۷	۰/۱۸	C ₂₂ : هزینه عملیاتی		
۰/۱۳۲۷	۰/۵۶	C ₂₃ : هزینه تمام شده پروژه	۰/۱۴۱	C ₃ : شرایط عملیاتی
۰/۰۴۰۹	۰/۲۹	C ₃₁ : زمان‌بندی		
۰/۰۲۸۱	۰/۱۹۹	C ₃₂ : نرخ حفاری		
۰/۰۴۲۳	۰/۳	C ₃₃ : ایمنی		
۰/۰۲۰۳	۰/۱۴۴	C ₃₄ : انعطاف پذیری		
۰/۰۱۰۹	۰/۰۷۷	C ₃₅ : کارگر بر بودن	۰/۱	C ₄ : شرایط زیست محیطی
۰/۰۵	۰/۵	C ₄₁ : آلودگی محیط زیست به سبب تزریقات و تحکیمات		
۰/۰۵	۰/۵	C ₄₂ : خشک شدن چشمه‌ها	۰/۱۲۷	C ₅ : هندسه تونل
۰/۰۵۷۲	۰/۴۵	C ₅₁ : شیب و قوس مسیر تونل		
۰/۰۶۹۹	۰/۵۵	C ₅₂ : طول تونل	۰/۱۱۲	عوامل مدیریتی
۰/۰۲۳۵	۰/۲۱	C ₆₁ : سهولت تأمین منابع مورد نیاز		
۰/۰۸۸۵	۰/۷۹	C ₆₂ : ریسک		

جدول ۸. وزن معیار و زیرمعیارهای سلسله مراتبی مترائ ۷۸۰۰ تا ۱۷۰۰۰ متر تونل انتقال آب بهشت آباد

وزن معیارهای اصلی	وزن معیارهای فرعی هر معیار اصلی	زیرمعیارها	وزن معیارهای اصلی	معیارهای اصلی
۰/۰۷۰۸	۰/۲۵	C ₁₁ : طبقه بندی ژئومکانیکی توده سنگ	۰/۲۸۳	C ₁ : شرایط زمین شناسی و ژئومکانیکی
۰/۰۹۶۲	۰/۳۴	C ₁₂ : گسل و نواحی خرد شده		
۰/۰۹۳۴	۰/۲۳	C ₁₃ : وجود آب		
۰/۰۱۹۸	۰/۰۷	C ₁₆ : احتمال آماس		
۰/۰۲۸۳	۰/۱	C ₁₇ : سایندگی و سختی توده سنگ		
۰/۰۶۱۶	۰/۲۶	C ₂₁ : سرمایه گذاری اولیه	۰/۲۳۷	C ₂ : شرایط اقتصادی
۰/۰۴۲۷	۰/۱۸	C ₂₂ : هزینه عملیاتی		
۰/۱۳۲۷	۰/۵۶	C ₂₃ : هزینه تمام شده پروژه		
۰/۰۴۰۹	۰/۲۹	C ₃₁ : زمان بندی	۰/۱۴۱	C ₃ : شرایط عملیاتی
۰/۰۲۸۱	۰/۱۹۹	C ₃₂ : نرخ حفاری		
۰/۰۴۲۳	۰/۳	C ₃₃ : ایمنی		
۰/۰۲۰۳	۰/۱۴۴	C ₃₄ : انعطاف پذیری		
۰/۰۱۰۹	۰/۰۷۷	C ₃₅ : کارگر بر بودن		
۰/۰۵	۰/۵	C ₄₁ : آلودگی محیط زیست به سبب تزریقات و تحکیمات	۰/۱	C ₄ : شرایط زیست محیطی
۰/۰۵	۰/۵	C ₄₂ : خشک شدن چشمه ها		
۰/۰۵۷۲	۰/۴۵	C ₅₁ : شیب و قوس مسیر تونل	۰/۱۲۷	C ₅ : هندسه تونل
۰/۰۶۹۹	۰/۵۵	C ₅₂ : طول تونل		
۰/۰۲۳۵	۰/۲۱	C ₆₁ : سهولت تأمین منابع مورد نیاز	۰/۱۱۲	عوامل مدیریتی
۰/۰۸۸۵	۰/۷۹	C ₆₂ : ریسک		

و در انتها امتیاز هر روش حفاری با توجه به زیرمعیارها مشخص می شود که در جدول ۹ قابل مشاهده است.

جدول ۹. امتیاز هر روش حفاری با توجه به زیرمعیارها

زیرمعیارها	روش حفاری و انفجار (D&B)	روش حفاری با ماشین بازویی (R.H)	گزینه ها
C ₁₁ : طبقه بندی ژئومکانیکی توده سنگ	۰/۰۱۸	۰/۳۲۲	۰/۶۶
C ₁₂ : گسل و نواحی خرد شده	۰/۰۰۳	۰/۳۷۲	۰/۶۲۵
C ₁₃ : وجود آب	۰/۰۴۳	۰/۲۳۲	۰/۷۲۵
C ₁₄ : وجود گاز	۰/۱۹	۰/۳۳	۰/۴۸
C ₁₅ : احتمال مچاله شوندگی	۰/۶۲	۰/۳۸	۰
C ₁₆ : احتمال آماس	۰/۲۵	۰/۲۹	۰/۴۶
C ₁₇ : سایندگی و سختی توده سنگ	۰/۲۲۷	۰/۲۷۳	۰/۵
C ₂₁ : سرمایه گذاری اولیه	۰/۶۴	۰/۳۶	۰
C ₂₂ : هزینه عملیاتی	۰/۱۶	۰/۲۸	۰/۵۶
C ₂₃ : هزینه تمام شده پروژه	۰	۰/۱۷۵	۰/۸۲۵
C ₃₁ : زمان بندی	۰	۰/۳۱	۰/۶۹
C ₃₂ : نرخ حفاری	۰	۰/۳۱	۰/۶۹
C ₃₃ : ایمنی	۰	۰/۲۵	۰/۷۵
C ₃₄ : انعطاف پذیری	۰/۶	۰/۳۶۲	۰/۰۳۸
C ₃₅ : کارگر بر بودن	۰/۱۶	۰/۲۸	۰/۵۶
C ₄₁ : آلودگی محیط زیست به سبب تزریقات و تحکیمات	۰/۴۳۹	۰/۲۸۶	۰/۲۷۴
C ₄₂ : خشک شدن چشمه ها	۰/۲۵۶	۰/۲۸۸	۰/۴۵۷
C ₅₁ : شیب و قوس مسیر تونل	۰/۴۹۹	۰/۴۰۷	۰/۰۹۴
C ₅₂ : طول تونل	۰	۰	۱
C ₆₁ : سهولت تأمین منابع مورد نیاز	۰/۶۲	۰/۳۸	۰
C ₆₂ : ریسک	۰	۰/۰۸۸	۰/۹۱۲

وزن و اولویت اول را داشته و پس از آن به ترتیب حفاری به وسیله رودهدر و روش حفاری و انفجار قرار می‌گیرد.

۹. نتیجه گیری

نتایجی که از این تحقیق به دست می‌آید به شرح زیر است:

۱- فرآیند تحلیل سلسله مراتبی فازی (FAHP) برای انتخاب روش مناسب حفاری برای تونل انتقال آب بهشت‌آباد به کار گرفته شد. برای این کار مدلی متشکل از ۶ معیار اصلی و ۲۱ معیار فرعی و سه گزینه طراحی گردید. پس از محاسبات انجام شده، در هر سه پهنه حفاری با TBM بیشترین وزن و اولویت اول را داشته و پس از آن به ترتیب حفاری به وسیله رودهدر و روش حفاری و انفجار قرار می‌گیرد.

۲- بر اساس محاسبات انجام شده با فرآیند تحلیل سلسله مراتبی فازی (FAHP)، همان‌طور که ملاحظه شد، معیار شرایط زمین‌شناختی و ژئومکانیکی سنگ منطقه با وزن ۰/۲۸۳ مهم‌ترین معیار در انتخاب روش حفاری است، و عوامل اقتصادی، شرایط عملیاتی، هندسه تونل، عوامل مدیریتی و شرایط زیست‌محیطی به ترتیب در رتبه‌های بعدی قرار می‌گیرند.

۳- متأسفانه در ایران عدم توجه به عوامل زیست‌محیطی در بیشتر پروژه‌های صنعتی، معدنی و عمرانی به چشم می‌خورد و در این پروژه هم همان‌طور ملاحظه شد، شرایط زیست‌محیطی با وزن ۰/۱ کم‌اهمیت‌ترین معیار از بین ۶ معیار اصلی موجود است. این مطلب جای نگرانی دارد، زیرا در بسیاری از کشورهای در حال توسعه و پیشرفته رعایت نکات زیست‌محیطی از مهم‌ترین و ضروری‌ترین عوامل در اجرای یک پروژه محسوب می‌شود.

برای تعیین اولویت کلی گزینه‌ها که همان روش‌های حفاری هستند، وزن هر معیار اصلی را در زیرمعیار، و وزن زیرمعیار در وزن گزینه ضرب می‌شود. و در نهایت همه اوزان بدست آمده هر سه گزینه به طریقی که گفته شد با هم جمع می‌شود و در نتیجه وزن هر گزینه به دست می‌آید.

بنابراین وزن نهایی سه روش حفاری در سه پهنه محاسبه و مشخص شد که در جداول ۱۰ تا ۱۲ قابل مشاهده است.

جدول ۱۰. امتیاز نهایی روش‌های حفاری در

متر ۵۴۵۰ تا ۰ متر

روش حفاری	امتیاز
حفاری و انفجار	۰/۱۶۸۷
حفاری با رودهدر	۰/۲۶۳۱
حفاری با TBM	۰/۵۶۸۲

جدول ۱۱. امتیاز نهایی روش‌های حفاری در متر ۵۴۵۰ تا

۷۸۰۰ متر

روش حفاری	امتیاز
حفاری و انفجار	۰/۱۹۷۳
حفاری با رودهدر	۰/۲۶۶۷
حفاری با TBM	۰/۵۳۳۸

جدول ۱۲. امتیاز نهایی روش‌های حفاری در متر ۷۸۰۰ تا

۱۷۰۰۰ متر

روش حفاری	امتیاز
حفاری و انفجار	۰/۱۶۰۳
حفاری با رودهدر	۰/۲۶۱۶
حفاری با TBM	۰/۵۷۸۱

با توجه به نتایج به دست آمده که در در جداول ۱۰ تا ۱۲ مشاهده می‌شوند، در هر سه پهنه، حفاری با TBM بیشترین

منابع

- آذر، ع.، فرجی، ح.، ۱۳۸۶. علم مدیریت فازی، مرکز مطالعات مدیریت و بهره‌وری ایران (وابسته به دانشگاه تربیت مدرس). چاپ اول.
حسینی، م.، ۱۳۸۵. مقدمه‌ای بر مکانیک سنگ. انتشارات ایده گستر، چاپ اول.

دلیریان، ا.، گشتاسبی، ک.، شمسی، غ.، همتی شعبانی، ع.، ۱۳۸۵. انتخاب روش حفاری بهینه از لحاظ فنی برای تونل انتقال آب قمرود. هفتمین کنفرانس تونل ایران.

- شرکت مهندسی مشاور زاینده‌آب، ۱۳۸۷. جلد بیست و نهم گزارش‌های تونل بهشت آباد - گزارش زمین‌شناسی مهندسی. شرکت مهندسی مشاور زاینده‌آب، ۱۳۸۷. جلد سی‌ام گزارش‌های تونل بهشت‌آباد - گزارش مکانیک سنگ.
- شوئدی، حسن، ۱۳۸۵. نظریه مجموعه‌های فازی و کاربرد آن در مهندسی صنایع و مدیریت. انتشارات گسترش علوم پایه، چاپ اول.
- عطایی، م.، حسینی، س.، ه.، ۱۳۸۸. بررسی تأثیرساینده‌گی برقابلیت حفاری سنگ‌ها. مجله علوم زمین، سال نوزدهم، شماره ۷۴، صفحه ۱۳۷ تا ۱۴۲.
- غیاثوند، ص.، ۱۳۸۵. ارزیابی پتانسیل لهیدگی درتوده سنگ‌های مسیروتونل انتقال آب گلاب، هفتمین کنفرانس تونل ایران. مدنی، ح.، ۱۳۸۳. تونل‌سازی. جلد اول، انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر.
- میخک بیرانوند، ا.، قائدرحمتی، ر.، الماسی، س.، ۱۳۸۸. انتخاب TBM مناسب برای حفاری تونل متروی شیراز با استفاده از روش AHP. ششمین همایش زمین‌شناسی مهندسی و محیط زیست ایران، صفحات ۳۸۴-۳۷۷.
- میخک بیرانوند، ا.، ۱۳۸۸. انتخاب قطر بهینه تونل انتقال آب کاکارضا بر اساس پارامترهای هزینه و زمان. هشتمین کنفرانس تونل ایران.
- Adnani, S., Sereshki, F., Alinejad-Rokny, H., Kamali-Bandpey. H., 2011. Selection of temporary ventilation system for long tunnels by fuzzy multi attributes decision making technique (Fuzzy- Madm), case study: Karaj water conveyance tunnel (Part Et- K') in Iran. American Journal of Scientific Research, (29): 83-91.
- Barla, G., 2002. Tunnelling under Squeezing Rock Conditions, Department of Structural and Geotechnical Engineering. Politecnico di Torino.
- Chang, D.Y., 1996. Applications of the extent analysis method on fuzzy-AHP. European Journal of Operational Research, 95(3): 649-655.
- Percin, S., 2008. Use of fuzzy- AHP for evaluating the benefits of information-sharing decisions in a supply chain. Journal of Enterprise Information Management, 21(3): 263-284.
- Robbins, R.J., 1997. Hard rock tunneling machines for squeezing rock conditions. Three machine concepts. Balkema Rotterdam, Tunnel for people, Vol. 2 , Proc. Of the 23rd general assembly of the ITA, pp. 633-638.
- Saaty, T.L., 1990. Decision Making for Leaders. RWS Publications, USA.
- Saaty, T., Vargas, L., 1987. Uncertainty and rank order in the AHP. European Journal of Operational Research, 32(1): 107-117.
- Shinha, R.S., 1989. Underground Structures Design and Instrumentation. U.S.Bureau.
- Stewart, Rodney A., Mohamed, Sherif and Daet, Raul, 2002. Strategic implementation of IT / IS projects in construction: a case study, Automation in Construction 11(6): 681-694.
- Wittaker, N., and Russele, F., 1990. Tunneling, Design, Stability and Construction. The Institution of Mining and Metallurgy.
- Wood, A. M., 2000. Tunneling Management by Design. E & FN Spon, pp.1- 288 .
- Zare Naghadehi, M., Mikaeil, R., Ataei, M., 2009. The application of fuzzy analytic hierarchy process (FAHP) approach to selection of optimum underground mining method for Jajarm Bauxite Mine, Iran. Expert Systems with Applications, 36(4): 8218-8226.