

## اولویت‌بندی و انتخاب بهترین روش بررسی زیرسطحی تونل انتقال آب سبزکوه در کوه‌های زاگرس

مسعود زارع نقدهی؛ دانشگاه صنعتی همدان،  
سید داود محمدی\*، مصطفی کریمی؛ دانشگاه بوعلی سینا همدان

تاریخ: دریافت ۹۴/۱۰/۲۳ پذیرش ۹۵/۱۱/۲۴

### چکیده

اولویت‌بندی روش بررسی زیرسطحی نقش مهمی در مدیریت اقتصادی و ایمنی پروژه‌های زیرزمینی دارد. در این پژوهش شیوه جدیدی بر مبنای فرآیند تحلیل سلسله مراتبی (AHP) و شباهت به گزینه ایده‌آل (TOPSIS) برای اولویت‌بندی روش‌های بررسی مسیر تونل سبزکوه از میان طیف گسترده‌ای از روش‌های ژئوتکنیکی و ژئوفیزیکی پیشنهاد شده است. برای این کار ابتدا مهم‌ترین عامل مؤثر بر انتخاب بهترین روش بررسی زیرسطحی این پروژه بررسی شده و سپس با به‌کارگیری روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP) عوامل بررسی شده به صورت زوجی مقایسه و وزن هر یک از عوامل محاسبه شده است. علاوه بر این، از روش شباهت به گزینه ایده‌آل برای انتخاب نزدیک‌ترین روش به حالت ایده‌آل بررسی زیرسطحی مسیر تونل سبزکوه بهره گرفته شده است. در نهایت از بین ۶ گزینه بررسی زیرسطحی پیشنهاد شده برای تونل، در هر دو روش AHP و TOPSIS پژوهش‌های لرزه‌ای به‌عنوان بهترین گزینه، و بقیه گزینه‌ها با توجه به وزن مورد نظر در اولویت‌های بعدی قرار گرفتند.

واژه‌های کلیدی: زاگرس، تونل‌سازی، تصمیم‌گیری چندمعیاره، روش سلسله‌مراتبی، روش شباهت به گزینه ایده‌آل

### مقدمه

یکی از پارامترهای مهم و تأثیرگذار در موفقیت پروژه تونل‌سازی انتخاب روش صحیح بررسی زیرسطحی ساختگاه، متناسب با شرایط ژئومکانیکی، توپوگرافی و همچنین ملاحظات

\*نویسنده مسئول d.mohammadi@basu.ac.ir

اقتصادی و ایمنی است. ارتباط بین این معیارها پیچیده است و معمولاً هر معیار بر دیگر معیارها تأثیر می‌گذارد. بنابراین ساختن مدل و یافتن گزینه مناسب با استفاده از معیارهای مستقل آسان نیست. در ارزیابی هر موضوعی نیاز به معیار اندازه‌گیری یا شاخص است. انتخاب شاخص‌های مناسب امکان مقایسه درست بین گزینه‌ها را فراهم می‌کند. زمانی که چند شاخص برای ارزیابی در نظر گرفته می‌شود، فرایند ارزیابی پیچیده می‌شود و پیچیدگی زمانی افزایش می‌یابد که معیارهای چندگانه با هم در تضاد و از جنس‌های مختلف باشند. در این هنگام فرایند ارزیابی و مقایسه از حالت ساده تحلیلی که ذهن قادر به انجام آن است خارج می‌شود و به ابزار تحلیلی عملی نیاز خواهد بود [۱]، [۲].

انتخاب و اولویت بندی بهترین روش بررسی زیرسطحی که هدف این پژوهش است می‌تواند هزینه‌های مادی، معنوی و اجتماعی زیادی را کاهش دهد که بی‌اعتنایی به آن نیز صدمات جبران‌ناپذیری را به بار می‌آورد. انتخاب و اولویت‌بندی بهترین روش بررسی زیرسطحی تونل به معیارهای زیادی وابسته است که در این تحقیق سعی شده است معیارهایی در نظر گرفته شود که تأثیر عمده‌ای بر انتخاب روش دارند. در این راستا، بعد از انتخاب معیارهای مناسب، وزن‌دهی به آن‌ها به وسیله ده نفر از اساتید و صاحب‌نظران صنعت تونل‌سازی انجام داده‌اند. یکی از روش‌های استفاده شده در این پژوهش، فرایند تحلیل سلسله مراتبی (AHP) است که برای اولین بار ساعتی در سال ۱۹۸۰ و سپس در ۲۰۰۰ ارائه کرده است [۱]، [۳]. پس از آن به‌طور بسیار گسترده علاوه بر سایر کاربردهای وسیع، در علوم زمین استفاده شده است [۴]–[۱۷]. فرایند تحلیل سلسله مراتبی روشی است منعطف، قوی و ساده که برای تصمیم‌گیری در شرایطی که معیارهای تصمیم‌گیری متضاد، انتخاب بین گزینه‌ها را با مشکل مواجه می‌سازند، استفاده می‌شود. روش استفاده شده دیگر در این پژوهش، روش شباهت به گزینه ایده‌آل (TOPSIS) است. بر خلاف روش تحلیل سلسله مراتبی، می‌توان از این روش، به‌عنوان روشی که با آن برای تعیین بهترین گزینه، تعداد چشم‌گیری معیار را بررسی می‌کند، استفاده شده است که این روش نیز از ابتدای معرفی آن تا کنون همواره به‌طور

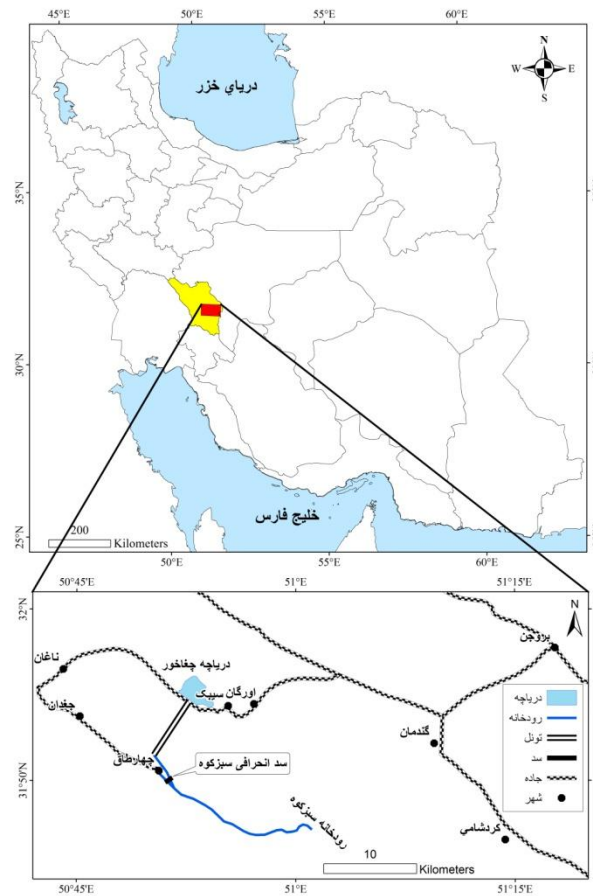
گسترده‌ای مورد توجه بوده است و از آن علاوه بر سایر علوم در مسائل مختلف علوم زمین استفاده شده است [۱۷]-[۲۵].

### معرفی منطقه بررسی شده

منطقه بررسی شده در استان چهارمحال و بختیاری در حدود ۱۰۹ کیلومتری جنوب شهرکرد و در ناحیه‌ای بین عرض جغرافیایی  $31^{\circ}21'$  تا  $32^{\circ}37'$  شمالی و طول جغرافیایی  $49^{\circ}59'$  تا  $51^{\circ}47'$  شرقی واقع شده است. سمت ورودی تونل در حدود ۲۷ کیلومتری جنوب شرقی شهرستان ناغان قرار گرفته است (شکل ۱).

از ارتفاعات مهم منطقه می‌توان از کوه کلار (۳۸۳۲ متر)، کوه هزاردره (۳۹۰۰ متر) و سبزکوه (۳۴۵۳ متر) نام برد. اختلاف ارتفاع بلندترین و پست‌ترین نقطه در محدوده منطقه بررسی شده حدود ۱۹۰۰ متر است [۲۶].

تونل سبزکوه با راستای شمال شرق- جنوب غرب از ارتفاعات کلار که جزئی از رشته-کوه‌های زاگرس مرتفع است و از میان یال شمالی ناودیس سبزکوه عبور می‌کند. از دیدگاه زمین‌شناسی، منطقه سبزکوه در حاشیه شمالی رشته‌کوه‌های زاگرس و در بخش‌های میانی زون ساختاری زاگرس مرتفع قرار گرفته است. زمین‌شناسی منطقه شامل سنگ‌های رسوبی است که به صورت چین خوردگی‌ها، گسل‌ها، زون‌های برشی و سطوح درز و شکاف‌دار و هوازده در سطح رخنمون یافته‌اند. به‌طور کلی تنوع توده‌سنگ‌های تشکیل‌دهنده مسیر تونل زیاد است و شامل سنگ‌های نرم، سخت و خرد شده هستند. از لحاظ سنگ‌شناسی، تغییرات سنگ‌شناسی به صورت منظم بوده است و به ترتیب شامل مارن و مارن آهکی سازند گورپی، آهک، آهک مارنی و آهنگ مارنی-شیلی سازند سروک-ایلام، آهک و آهک مارنی سازند کژدمی، دولومیت و آهک دولومیتی سازندهای داریان-فهلپان، آهک، شیل و شیل آهکی سازند سورمه، دولومیت و دولومیت مارنی سازند سورمه-نیریز، دولومیت سازند دالان و دولومیت سازند خانه کت است [۲۷].

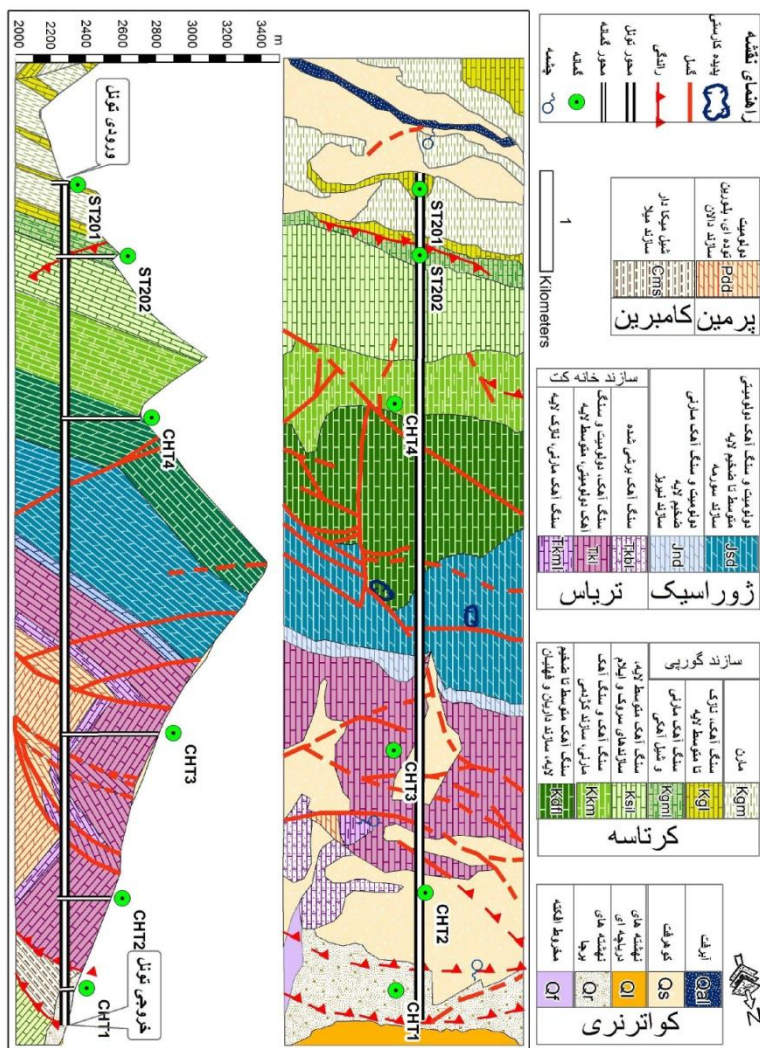


شکل ۱. موقعیت جغرافیایی منطقه بررسی شده (اقتباس از ۲۶ با اصلاحات و ترسیم مجدد)

### زمین‌شناسی مهندسی منطقه

زمین‌شناسی مهندسی در منطقه بررسی شده، به منظور تعیین خصوصیات و ویژگی‌های مهندسی واحدهای مختلف و ارزیابی رفتار مکانیکی توده‌سنگ‌های مسیر تونل انجام شده است. این پژوهش‌ها شامل بررسی مشخصات فیزیکی سنگ‌های مسیر تونل، مشخصات مکانیکی سنگ‌های مسیر تونل، خصوصیات ژئومکانیکی نمونه سنگ در واحدهای مختلف مسیر تونل و رده‌بندی مهندسی توده‌سنگ‌های مسیر تونل است. هدف اصلی این پژوهش‌ها

دستیابی به اطلاعاتی است که بتوان با استفاده از آن‌ها شرایط ژئومکانیکی و وضعیت پایداری سنگ را در ترانشه‌ها و در مسیر تونل پیش‌بینی کرد. بدیهی است که این اطلاعات در طراحی بخش‌های مختلف پروژه (به‌ویژه در تحلیل‌های پایداری، انتخاب نوع نگهداری) قابل استفاده خواهند بود. در شکل ۲ مقطع زمین‌شناسی مسیر تونل ارائه شده است.

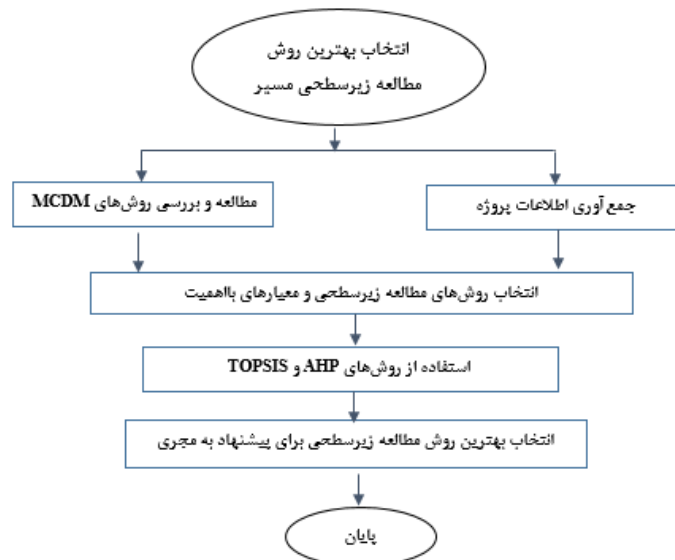


شکل ۲. مقطع زمین‌شناسی مسیر تونل سبزکوه [۲۸]

### مواد و روش‌ها

در پژوهش حاضر برای انتخاب بهترین روش بررسی زیرسطحی از دو تکنیک AHP و TOPSIS استفاده شده است. روش کار مطابق با نمودار جریان‌ی شکل ۳ است که در ادامه روند آن توصیف شده است.

ابتدا به منظور شناسایی و اولویت‌بندی انتخاب و اولویت‌بندی بهترین روش بررسی زیرسطحی، اطلاعات مختلف مربوط به منطقه از جمله: نقشه‌های توپوگرافی با مقیاس ۱:۵۰۰۰۰، نقشه‌های زمین‌شناسی با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ و عکس‌های هوایی با مقیاس تقریبی ۱:۵۰۰۰۰ تهیه شده است. سپس با استفاده از این اطلاعات روش‌ها و معیارهای مؤثر بر انتخاب روش بررسی زیرسطحی انتخاب شد. نهایتاً با استفاده از روش AHP و TOPSIS بهترین روش بررسی زیرسطحی در مسیر تونل سبزه‌کوه انتخاب و اولویت‌بندی شد.

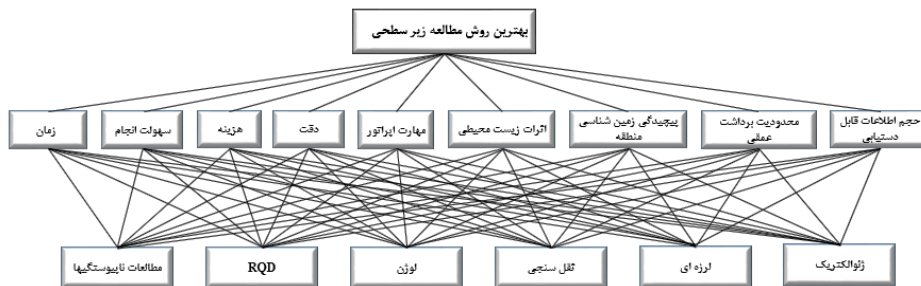


شکل ۳. نمودار مراحل انجام پژوهش

## نتایج و بحث

### ۱. فرآیند تحلیل سلسله مراتبی

ساختن نمودار سلسله مراتبی: اولین قدم در فرآیند تحلیل سلسله مراتبی ساختن نمودار سلسله مراتبی مسئله است، که معمولاً به‌ترتیب در آن هدف، معیارها (و در صورت وجود زیر معیارها) و گزینه‌ها نشان داده می‌شوند. نمودار سلسله مراتبی تصمیم، عوامل مقایسه شده و گزینه‌های رقیب ارزیابی شده در تصمیم را نشان می‌دهد. برای این منظور ایجاد یک نمایش گرافیکی از مسئله که در آن هدف، معیارها و گزینه‌ها نشان داده می‌شوند ضروری است. در شکل ۴ نمودار سلسله مراتبی طرح نشان داده شده است. سطح یک در یک سلسله مراتب همواره هدف را نشان می‌دهد و پایین‌ترین سطح، گزینه‌های تصمیم‌گیری را بیان می‌کند. تبدیل موضوع، یا مسئله بررسی شده به ساختاری سلسله مراتبی، مهم‌ترین قسمت فرآیند تحلیل سلسله مراتبی محسوب می‌شود [۲۹]. در این قسمت با تجزیه مسائل مشکل و پیچیده، فرآیند تحلیل سلسله مراتبی آن‌ها را به‌صورتی ساده که با ذهن و طبیعت انسان مطابقت داشته باشد، تبدیل می‌کند. به‌عبارتی دیگر، فرآیند تحلیل سلسله مراتبی مسائل پیچیده را از طریق تجزیه آن به عناصر جزئی که به‌صورت سلسله مراتبی م مرتبط است را حل کرده و ارتباط هدف اصلی مسئله با پایین‌ترین سطح سلسله را به‌صورت ساده‌تری در می‌آورد. در مسئله انتخاب بهترین روش بررسی زیرسطحی، هدف، بهترین روش بررسی زیرسطحی از بین چند گزینه است. معیارها شامل عواملی هستند که باعث ایجاد تفاوت در گزینه‌ها می‌شوند. گزینه‌ها نیز روش بررسی احتمالی هستند.



شکل ۴. نمودار سلسله مراتبی انتخاب بهترین روش بررسی زیرسطحی

## ۲. تعیین ضریب اهمیت معیارها

برای تعیین ضریب اهمیت (وزن) معیارها چند روش وجود دارد که معمول‌ترین آن‌ها، مقایسه زوجی است. در این روش، معیارها دو به دو با یکدیگر مقایسه می‌شوند و درجه اهمیت هر معیار نسبت به معیار دیگری مشخص می‌شود (جدول ۴). برای این کار می‌توان از یک روش استاندارد (ارائه شده به وسیله ساعتی) استفاده کرد. روش کار به این ترتیب است که به هر مقایسه زوجی یک عدد ۱ تا ۹ نسبت داده می‌شود. معنی هر عدد در جدول ۱ مشخص شده است. پس از وزن‌دهی باید وزن‌ها را نرمال کرد. به منظور نرمالیزه کردن، می‌توان از روش‌های مختلفی استفاده کرد. در این مدل از تقسیم هر وزن بر مجموع وزن‌های همان ستون استفاده شده است [۲۹]. برای سهولت، طبق جداول ۲ و ۳ معیارها و گزینه‌ها به شکل حروف اختصاری تعریف شده‌اند.

### جدول ۱. مقایسه ۹ کمیته ساعتی برای مقایسه زوجی معیارها

امتیاز عددی	مقایسه نسبی شاخص‌ها
۹	اهمیت مطلق
۷	اهمیت خیلی قوی
۵	اهمیت قوی
۳	اهمیت ضعیف
۱	اهمیت یکسان
۲ و ۴ و ۶ و ..	ترجیحات بین فاصله‌های بالا

### جدول ۲. تعریف حروف اختصاری برای گزینه‌ها

تعریف	علامت
مطالعات ناپیوستگی	A
لوژن	B
RQD	C
ژئوالکتریک	D
ثقل سنجی	E
لرزه‌ای	F



جدول ۳. تعریف حروف اختصاری برای معیارها

علاست	تعریف
C1	حجم اطلاعات قابل دست‌یابی
C2	محدودیت برداشت عمقی
C3	پیچیدگی‌های زمین‌شناختی منطقه
C4	اثرات زیست محیطی
C5	مهارت اپراتور
C6	دقت
C7	هزینه
C8	سهولت انجام
C9	زمان

جدول ۴. ماتریس مقایسه زوجی بین معیارها

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	وزن
C1	۱	۳/۲	۲	۴	۱/۲	۱/۳	۳/۲	۵	۹/۲	۰/۱۲۳۷
C2	۲/۳	۱	۱	۳	۱/۴	۱/۷	۱	۳	۳	۰/۰۷۹۴
C3	۱/۲	۱	۱	۲	۱/۴	۱/۷	۱	۳	۳	۰/۰۷۸۳
C4	۱/۴	۱/۳	۱/۲	۱	۱/۷	۱/۹	۱/۳	۱	۱	۰/۰۲۸۴
C5	۲	۴	۴	۷	۱	۱/۳	۳	۷	۶	۰/۲۰۸۹
C6	۳	۷	۷	۹	۳	۱	۹	۹	۹	۰/۳۴۶۹
C7	۲/۳	۱	۱	۳	۱/۳	۱/۹	۱	۳	۳	۰/۰۷۹۷
C8	۱/۵	۱/۳	۱/۳	۱	۱/۷	۱/۹	۱/۳	۱	۱	۰/۰۲۷۵
C9	۲/۹	۱/۳	۱/۳	۱	۱/۶	۱/۹	۱/۳	۱	۱	۰/۰۲۷۳

۳. تعیین ضریب اهمیت گزینه‌ها

بعد از تعیین ضرایب اهمیت معیارها، ضرایب اهمیت گزینه‌ها را باید تعیین کرد (جدول ۵ تا ۱۳). در این مرحله ارجحیت هر یک از گزینه‌ها در ارتباط با هر یک از معیارها ارزیابی و داوری می‌شود. فرآیند به‌دست آوردن وزن (ضریب اهمیت) گزینه‌ها نسبت به هر یک از معیارها شبیه تعیین ضریب اهمیت معیارها نسبت به هدف است. در هر دو حالت، قضاوت‌ها بر مبنای مقایسه زوجی معیارها یا گزینه‌ها و براساس مقیاس ۹ کمیتی ساعتی انجام می‌شود و

در نتیجه ماتریس مقایسه زوجی معیارها یا گزینه‌ها ثبت می‌شود و از طریق نرم‌الیزه کردن ردیف‌های این ماتریس‌ها، ضرایب اهمیت مورد نظر به دست می‌آید. با این حال باید به تفاوتی عمده میان این دو مقایسه اشاره شود [۱]. مقایسه گزینه‌های مختلف، نسبت به معیارها (اگر زیر معیاری وجود نداشته باشد) انجام می‌شود، در صورتی که مقایسه معیارها با یکدیگر، نسبت به هدف پژوهش انجام می‌شود.

جدول ۵. ماتریس مقایسه زوجی از نظر سرعت انجام

	A	B	C	D	E	F	وزن
A	۱	۶	۵	۴	۵	۵	۰/۴۶۸۳
B	۱/۶	۱	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۰/۰۵۶۹
C	۱/۵	۲	۱	۱/۲	۱	۱	۰/۱۰۲۶
D	۱/۴	۲	۲	۱	۲	۲	۰/۱۶۶۶
E	۱/۵	۲	۱	۱/۲	۱	۱	۰/۱۰۲۶
F	۱/۵	۲	۱	۱/۲	۱	۱	۰/۱۰۲۶

جدول ۶. ماتریس مقایسه زوجی از نظر سهولت انجام

	A	B	C	D	E	F	وزن
A	۱	۷	۶	۵	۵	۴	۰/۴۳۷۲
B	۱/۷	۱	۱/۲	۱/۳	۱/۳	۱/۴	۰/۰۳۹۸
C	۱/۶	۲	۱	۱/۲	۱/۲	۱/۳	۰/۰۷۰۲
D	۱/۵	۳	۲	۱	۱/۲	۱/۳	۰/۱۰۹۷
E	۱/۵	۳	۲	۲	۱	۱/۲	۰/۱۳۵۸
E	۱/۴	۴	۳	۳	۲	۱	۰/۲۰۶۹

جدول ۷. ماتریس مقایسه زوجی از نظر کم هزینه بودن

	A	B	C	D	E	F	وزن
A	۱	۷	۶	۵	۵	۶	۰/۴۸
B	۱/۷	۱	۱/۲	۱/۳	۱/۳	۱/۲	۰/۰۶۰۳
C	۱/۶	۲	۱	۱/۲	۱/۲	۱	۰/۰۸۲۵
D	۱/۵	۳	۲	۱	۱	۲	۰/۱۴۷۲
E	۱/۵	۳	۲	۱	۱	۲	۰/۱۴۷۲
F	۱/۶	۲	۱	۱/۲	۱/۲	۱	۰/۰۸۲۵

جدول ۸. ماتریس مقایسه زوجی از نظر دقت

	A	B	C	D	E	F	وزن
A	۱	۱/۳	۱/۳	۱/۴	۱/۳	۱/۶	۰/۰۴۲۳
B	۳	۱	۱	۱/۳	۱	۱/۴	۰/۱۱۶۰
C	۳	۱	۱	۱/۳	۱	۱/۴	۰/۱۱۶۰
D	۴	۳	۳	۱	۲	۱/۲	۰/۲۳۳۰
E	۳	۱	۱	۱/۲	۱	۱/۴	۰/۱۱۸۷
F	۶	۴	۴	۲	۴	۱	۰/۳۶۹۳

جدول ۹. ماتریس مقایسه زوجی از نظر مهارت اپراتور

	A	B	C	D	E	F	وزن
A	۱	۳	۲	۴	۴	۵	۰/۳۵۰۱
B	۱/۳	۱	۱/۲	۲	۲	۳	۰/۱۶۲۷
C	۱/۲	۲	۱	۳	۳	۴	۰/۲۴۸۷
D	۱/۴	۱/۲	۱/۳	۱	۱	۲	۰/۰۹۳۶
E	۱/۴	۱/۲	۱/۳	۱	۱	۲	۰/۰۹۳۶
F	۱/۵	۱/۳	۱/۴	۱/۲	۱/۲	۱	۰/۰۵۱۲

جدول ۱۰. ماتریس مقایسه زوجی از نظر عدم اثرات زیست‌محیطی

	A	B	C	D	E	F	وزن
A	۱	۶	۶	۱	۱	۳	۰/۲۷۲۷
B	۱/۶	۱	۱	۱/۶	۱/۶	۱/۲	۰/۰۴۵۴
C	۱/۶	۱	۱	۱/۶	۱/۶	۱/۲	۰/۰۴۵۴
D	۱	۶	۶	۱	۱	۳	۰/۲۷۲۷
E	۱	۶	۶	۱	۱	۳	۰/۲۷۲۷
F	۱/۳	۲	۲	۱/۳	۱/۳	۱	۰/۰۹۰۹

جدول ۱۱. ماتریس مقایسه زوجی پیچیدگی زمین‌شناختی منطقه

	A	B	C	D	E	F	وزن
A	۱	۳	۲	۱/۲	۳	۱/۳	۰/۱۴۷۷
B	۱/۳	۱	۱/۲	۱/۵	۱	۱/۷	۰/۰۴۷۶
C	۱/۲	۲	۱	۱/۴	۲	۱/۶	۰/۰۸۸۸
D	۲	۵	۴	۱	۶	۱/۲	۰/۲۷۷۹
E	۱/۳	۱	۱/۲	۱/۶	۱	۱/۷	۰/۰۴۷۱
F	۳	۷	۶	۲	۷	۱	۰/۳۹۰۶

جدول ۱۲. ماتریس مقایسه زوجی از نظر عدم محدودیت برداشت

	A	B	C	D	E	F	وزن
A	۱	۱/۳	۱/۳	۱/۴	۱/۴	۱/۴	۰/۰۴۹۷
B	۳	۱	۱	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۰/۱۳۴۲
C	۳	۱	۱	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۰/۱۳۴۲
D	۴	۲	۲	۱	۱	۱	۰/۲۲۷۲
E	۴	۲	۲	۱	۱	۱	۰/۲۲۷۲
F	۴	۲	۲	۱	۱	۱	۰/۲۲۷۲

جدول ۱۳. ماتریس مقایسه زوجی از نظر حجم اطلاعات قابل دست‌یابی

	A	B	C	D	E	F	وزن
A	۱	۳	۳	۱/۳	۱	۱/۳	۰/۱۲۸۸
B	۱/۳	۱	۱	۱/۷	۱/۳	۱/۷	۰/۰۴۳۸
C	۱/۳	۱	۱	۱/۷	۱/۳	۱/۷	۰/۰۴۳۸
D	۳	۷	۷	۱	۳	۱	۰/۳۲۷۲
E	۱	۳	۳	۱/۳	۱	۱/۳	۰/۱۲۸۸
F	۳	۷	۷	۱	۳	۱	۰/۳۲۷۲

۴. تعیین امتیاز نهایی (اولویت) گزینه‌ها

در این مرحله، از تلفیق ضرایب اهمیت مزبور، امتیاز نهایی هر یک از گزینه‌ها تعیین می‌شود (جدول ۱۴).

با توجه به این محاسبات اولویت‌بندی روش‌های بررسی زیرسطحی مسیر تونل سبزکوه بدین شرح است:

$F > D > A > C > E > B$  به عبارت دیگر:

لرزه‌ای < ژئوالکتریک < مطالعات ناپیوستگی < RQD < ثقل سنجی < لوژن  
جدول ۱۴. محاسبه امتیاز مربوط به هر گزینه

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	جمع امتیاز
وزن	۰/۱۲	۰/۰۷	۰/۰۷	۰/۰۲	۰/۲	۰/۳۴	۰/۰۷	۰/۰۲	۰/۰۲	
A	۰/۱۲	۰/۰۴	۰/۱۴	۰/۲۷	۰/۳۵	۰/۰۴	۰/۴۸	۰/۴۳	۰/۴۶	۰/۱۶۷۴
B	۰/۰۴	۰/۱۳	۰/۰۴	۰/۰۴	۰/۱۶	۰/۱۱	۰/۰۶	۰/۰۳	۰/۰۵	۰/۰۹۲۷
C	۰/۰۴	۰/۱۳	۰/۰۸	۰/۰۴	۰/۲۴	۰/۱۱	۰/۰۸	۰/۰۷	۰/۱	۰/۱۱۴۷
D	۰/۳۲	۰/۲۲	۰/۲۷	۰/۲۷	۰/۰۹	۰/۲۳	۰/۱۴	۰/۱	۰/۱۶	۰/۱۸۹۳
E	۰/۱۲	۰/۲۲	۰/۰۴	۰/۲۷	۰/۰۹	۰/۱۲	۰/۱۴	۰/۱۳	۰/۱	۰/۱۱۱۲
F	۰/۳۲	۰/۲۲	۰/۳۹	۰/۰۹	۰/۰۵	۰/۳۶	۰/۰۸	۰/۲	۰/۱	۰/۲۲۶۹

## ۵. بررسی سازگاری در قضاوت

یکی از مزیت‌های فرآیند تحلیل سلسله مراتبی، امکانی برای سازگاری در ارزیابی‌های انجام شده برای تعیین ضریب اهمیت معیارهاست. سازوکاری که ساعتی برای بررسی سازگاری در ارزیابی‌ها در نظر گرفته است، محاسبه ضریبی به نام ضریب ناسازگاری (IR) است. این معیار باید کم‌تر از ۰/۱ باشد.

در جدول ۱۵ مقادیر  $\lambda_{max}$ ، شاخص ناسازگاری، شاخص ناسازگاری تصادفی و نرخ ناسازگاری ماتریس‌های مورد نظر آمده است. ملاحظه می‌شود که شاخص ناسازگاری و نرخ ناسازگاری برای همه ماتریس‌ها کم‌تر از ۰/۱ است که این دلالت بر ارزیابی منطقی ارائه شده در خصوص مقایسه زوجی پارامترها و گزینه‌ها دارد (جدول ۱۵).

جدول ۱۵. محاسبه مقادیر  $\lambda_{max}$ ، شاخص ناسازگاری، شاخص ناسازگاری تصادفی و نرخ ناسازگاری

نرخ ناسازگاری	شاخص ناسازگاری تصادفی	شاخص ناسازگاری	$\lambda_{max}$	وزن	هدف
۰/۰۲	۱/۴۵	۰/۰۳	۹/۲۸	۱	هدف
۰/۰۰۸	۱/۲۴	۰/۰۱	۶/۰۹	۰/۰۲	سرعت انجام
۰/۰۰۴	۱/۲۴	۰/۰۵	۶/۳۲	۰/۰۲	سهولت انجام
۰/۰۰۸	۱/۲۴	۰/۰۱	۶/۱۱	۰/۰۷	کم هزینه بودن
۰/۰۰۸	۱/۲۴	۰/۰۱	۶/۱۱	۰/۳۴	دقت
۰/۰۰۸	۱/۲۴	۰/۰۱	۶/۰۶	۰/۲	مهارت اپراتور
۰/۰۱	۱/۲۴	۰/۰۲	۶/۱۳	۰/۰۲	عدم اثرات زیست محیطی
۰/۰۰۸	۱/۲۴	۰/۰۱	۶/۱۱	۰/۰۷	پیچیدگی های زمین شناسی
۰/۰۰۸	۱/۲۴	۰/۰۱	۶/۰۷	۰/۰۷	عدم محدودیت برداشت عمقی
۰/۰۰۳	۱/۲۴	۰/۰۰۴	۶/۰۲	۰/۱۲	حجم اطلاعات قابل دستیابی

نرخ ناسازگاری سلسله مراتبی نیز برابر است با:

$$I.R. = \frac{I.I}{R.I.I} = \frac{0.03 \times 1 + 0.01 \times 0.02 + 0.05 \times 0.02 + 0.01 \times 0.07 + 0.01 \times 0.34 + 0.01 \times 0.2 + 0.02 \times 0.02 -}{1.45 \times 1 + 1.24 \times 0.02 + 1.24 \times 0.02 + 1.24 \times 0.07 + 1.24 \times 0.34 + 1.24 \times 0.2 + 1.24 \times 0.02} \\ + \frac{0.02 \times 0.02 + 0.01 \times 0.07 + 0.01 \times 0.07 + 0.004 \times 0.12}{+ 1.24 \times 0.02 + 1.24 \times 0.07 + 1.24 \times 0.07 + 1.24 \times 0.12} = 0.015 < 0.1$$

نرخ ناسازگاری سلسله مراتبی (۰/۰۱۵) نیز کم‌تر از ۰/۱ است از این رو، ارزیابی‌ها منطقی بوده‌اند [۱].

### اولویت‌بندی گزینه‌ها با استفاده از روش شباهت به گزینه ایده‌آل

#### ۱. حل مسئله به روش شباهت به گزینه ایده‌آل (TOPSIS)

با توجه به معیارهای مذکور و روش‌های احتمالی بررسی زیرسطحی مسیر تونل سبزکوه و ارزیابی روش‌ها برای معیارهای مختلف، ماتریس تصمیم به صورت جدول ۱۶ تشکیل می‌شود. جدول ۱۶. ماتریس تصمیم گزینه‌ها نسبت به معیارها

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9
A	۸/۶۶	۲/۴۱	۹/۸۳	۱۸	۱۹	۲/۴۱	۳۰	۲۸	۲۶
B	۲/۹۵	۶/۵	۳/۱۷	۳	۸/۸۳	۶/۶	۳/۷۷	۲/۵۵	۳/۱۶
C	۲/۹۵	۶/۵	۵/۹۱	۳	۱۳/۵	۶/۶	۵/۱۶	۴/۵	۵/۷
D	۲۲	۱۱	۱۸/۵	۱۸	۵/۰۸	۱۳/۵	۹/۲	۷/۰۳	۹/۲۵
E	۸/۶۶	۱۱	۳/۱۴	۱۸	۵/۰۸	۶/۷۵	۹/۲	۸/۷	۵/۷
F	۲۲	۱۱	۲۶	۶	۲/۷۸	۲۱	۵/۱۶	۱۳/۲۵	۵/۷

معیارهای در نظر گرفته شده باید بی‌مقیاس شوند. روش‌های مختلفی برای بی‌مقیاس کردن وجود دارد، اما در روش شباهت به گزینه ایده‌آل معمولاً از رابطه (۱) (روش نرم) استفاده می‌شود (جدول ۱۷):

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m x_{ij}^2}} \quad (1)$$

با توجه به ضرایب اهمیت معیارها ماتریس تصمیم بی‌مقیاس شده وزن‌دار به صورت جدول ۱۸ است.

ماتریس تصمیم‌بی‌مقیاس شده وزن دار از ضرب ماتریس تصمیم‌بی‌مقیاس شده در بردار وزن معیارها به دست می‌آید (رابطه ۲):

$$v_{ij} = w_j r_{ij} \quad j = 1, \dots, n; i = 1, \dots, m \quad (2)$$

## ۲. محاسبه فاصله از حل ایده‌آل و ضدایده‌آل

اگر حل ایده‌آل با  $A^*$  و ضد ایده‌آل با  $A^-$  نشان داده شود (رابطه ۳ و ۴) در این صورت:  
جدول ۱۷. ماتریس تصمیم‌بی‌مقیاس شده با استفاده از نورم

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9
A	۰/۲۵۷	۰/۱۱۳	۰/۲۸۷	۰/۴۹۶	۰/۷۲۸	۰/۰۸۷	۰/۸۸۹	۰/۸۳۹	۰/۸۸۱
B	۰/۰۸۷	۰/۲۷۲	۰/۰۹۲	۰/۰۹۳	۰/۳۳۸	۰/۲۳۹	۰/۱۱۱	۰/۰۷۶	۰/۱۰۷
C	۰/۰۸۷	۰/۲۷۲	۰/۱۷۲	۰/۰۹۳	۰/۵۱۷	۰/۲۳۹	۰/۱۵۳	۰/۱۳۴	۰/۱۹۳
D	۰/۶۵۲	۰/۴۶۱	۰/۵۴۰	۰/۵۶۱	۰/۱۹۴	۰/۴۸۹	۰/۲۷۲	۰/۲۱	۰/۳۱۳
E	۰/۲۵۷	۰/۴۶۱	۰/۰۹۱	۰/۵۶۱	۰/۱۹۴	۰/۲۴۴	۰/۲۷۲	۰/۲۶	۰/۱۹۳
F	۰/۶۵۲	۰/۴۶۱	۰/۷۶	۰/۱۸۷	۰/۱۰۶	۰/۷۶	۰/۱۵۳	۰/۳۹۷	۰/۱۹۳

جدول ۱۸. ماتریس تصمیم‌بی‌مقیاس شده وزن دار

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9
وزن	۰/۱۲	۰/۰۷	۰/۰۷	۰/۰۲	۰/۲	۰/۳۴	۰/۰۷	۰/۰۲	۰/۰۲
A	۰/۰۳	۰/۰۰۷	۰/۰۲	۰/۰۰۹	۰/۱۴۵	۰/۰۲۹	۰/۰۶۲	۰/۰۱۶	۰/۰۱۷
B	۰/۰۱	۰/۰۱۹	۰/۰۰۶	۰/۰۰۱	۰/۰۶۷	۰/۰۸۱	۰/۰۰۷	۰/۰۰۱	۰/۰۰۲
C	۰/۰۱	۰/۰۱۹	۰/۰۱۲	۰/۰۰۱	۰/۱۰۳	۰/۰۸۱	۰/۰۱	۰/۰۰۲	۰/۰۰۳
D	۰/۰۷۸	۰/۰۳۲	۰/۰۳۷	۰/۰۱۱	۰/۰۳۸	۰/۱۶۶	۰/۰۱۹	۰/۰۰۴	۰/۰۰۶
E	۰/۰۳	۰/۰۳۲	۰/۰۰۶	۰/۰۱۱	۰/۰۳۸	۰/۰۸۲	۰/۰۱۹	۰/۰۰۵	۰/۰۰۳
F	۰/۰۷۸	۰/۰۳۲	۰/۰۵۳	۰/۰۰۳	۰/۰۲۱	۰/۲۵۸	۰/۰۱	۰/۰۰۷	۰/۰۰۳

$$A^* = \{v_1^*, v_2^*, \dots, v_j^*, \dots, v_n^*\} \quad (3)$$

$$A^- = \{v_1^-, v_2^-, \dots, v_j^-, \dots, v_n^-\} \quad (4)$$

که  $v_j^*$  بهترین مقدار معیار  $j$  از بین تمام گزینه‌ها و  $v_j^-$  بدترین مقدار معیار  $j$  از بین تمام گزینه‌ها است. گزینه‌هایی که در  $A^*$  و  $A^-$  قرار می‌گیرند، به ترتیب نشان‌دهنده گزینه‌های کاملاً بهتر و کاملاً بدتر هستند.



در این مرحله برای هر گزینه فاصله از حل ایده‌آل و فاصله از حل ضد ایده‌آل به ترتیب از روابط (۵) و (۶) محاسبه می‌شوند:

$$S_i^* = \sqrt{\sum_{j=1}^n (V_{ij} - V_j^*)^2} \quad (5)$$

$$S_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (V_{ij} - V_j^-)^2} \quad (6)$$

### ۳. محاسبه شاخص شباهت

در آخرین مرحله شاخص شباهت از رابطه (۷) محاسبه می‌شود:

$$C_i^* = \frac{S_i^-}{S_i^* + S_i^-} \quad (7)$$

مقدار شاخص شباهت بین صفر و یک تغییر می‌کند. هر چه گزینه مورد نظر به ایده‌آل مشابه‌تر باشد، مقدار شاخص شباهت آن، به یک نزدیک‌تر است. کاملاً روشن است که اگر گزینه‌ای بر گزینه ایده‌آل منطبق باشد، آن‌گاه فاصله آن تا حل ایده‌آل مساوی صفر و شاخص شباهت آن مساوی یک خواهد بود و در صورتی که گزینه‌ای بر گزینه ضدایده‌آل منطبق باشد، آن‌گاه فاصله آن تا حل ضدایده‌آل مساوی صفر و شاخص شباهت آن مساوی صفر است از این رو، برای رتبه‌بندی گزینه‌ها بر اساس مقدار شاخص شباهت، گزینه‌ای که دارای بیش‌ترین شاخص شباهت است، در رتبه اول و گزینه‌ای که دارای کم‌ترین شاخص شباهت است، در رتبه آخر قرار می‌گیرد.

حل ایده‌آل ( $A^*$ ) و ضد ایده‌آل ( $A^-$ ) برابر است با:  
حل ایده‌آل ( $A^*$ ):

$$A^* = \{0/078, 0/032, 0/053, 0/011, 0/145, 0/258, 0/062, 0/016, 0/017\}$$

حل ضد ایده‌آل ( $A^-$ ):

$$A^- = \{0/01, 0/007, 0/006, 0/001, 0/021, 0/02, 0/007, 0/001, 0/002\}$$

برای هر یک از روش‌های انتخابی، فاصله از حل ایده‌آل و فاصله از حل ضد ایده‌آل و شاخص شباهت محاسبه و در جدول ۱۹ درج شده است

جدول ۱۹. محاسبه فاصله از حل ایده‌آل و فاصله از حل ضد ایده‌آل و شاخص شباهت برای روش‌های انتخابی

	فاصله از حل ضد ایده‌آل	فاصله از حل ایده‌آل	شاخص شباهت
A	۰/۱۳	۰/۲۳	۰/۳۶۱
B	۰/۷۷	۰/۲۱	۰/۲۶۸
C	۰/۰۹	۰/۳۳	۰/۲۱۴
D	۰/۱۶	۰/۱۵	۰/۵۱۶
E	۰/۰۷۳	۰/۲۲	۰/۲۴۹
F	۰/۲۵	۰/۱۳	۰/۶۵۷

ملاحظه می‌شود ترتیب اولویت روش‌های بررسی زیرسطحی مسیر تونل به صورت  $F > D > A > B > E > C$  و به عبارتی به صورت لزه‌ای <ژئوالکتریک> بررسی‌های ناپیوستگی <لوژن <ثقل سنجی> RQD است.

### نتیجه‌گیری

اولویت‌بندی و انتخاب بهترین روش بررسی زیرسطحی در پروژه‌های بزرگ مسئله مهمی است که در آن ارتباط بین معیارها پیچیده است و معمولاً هر معیار بر دیگر معیارها تأثیر می‌گذارد. بنابراین ساختن مدل و یافتن گزینه مناسب با استفاده از معیارهای مستقل آسان نیست. در این پژوهش به اولویت‌بندی روش‌های بررسی و پیشنهاد بهترین روش برای مناطق صعب‌العبور مسیر تونل سبزکوه با استفاده از تلفیق دو روش قدرتمند از مجموعه روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره پرداخته شد. بر اساس نتایج به دست آمده از تحلیل سلسله مراتبی، در سیستم AHP و TOPSIS، روش لزه‌ای بهترین گزینه برای بررسی زیرسطحی مسیر تونل سبزکوه انتخاب شدند. بر اساس نتایج حاصل از این پژوهش، در سیستم TOPSIS روش RQD و در سیستم AHP روش لوژن به‌عنوان بدترین گزینه برای بررسی زیرسطحی مسیر تونل سبزکوه معرفی شدند.

### تشکر و قدردانی

بدین وسیله از سازمان آب منطقه‌ای شهرکرد به دلیل حمایت‌های مالی و در اختیار قرار دادن بخشی از داده‌های این پژوهش تشکر و قدردانی می‌شود.

### منابع

1. Saaty T. L., "Fundamentals of decision making and priority theory", 2nd Ed., PA: RWS Pub., Pittsburgh (2000).
2. Omkarprasad V., Sushil K., "Analytic hierarchy process: An overview of applications", *European Journal of Operational Research* 169 (2004) 1-29.
3. Saaty T. L., "The Analytic Hierarchy Process. McGraw-Hill, New York (1980).
4. Chen C., Liu Y., "A methodology for evaluation and classification of rock mass quality on tunnel engineering", *Tunnelling and Underground Space Technology* 22 (4) (2007) 377-387.
5. Liu Y., Chen C., "A new approach for application of rock mass classification on rock slope stability assessment", *Engineering Geology* 89(1-2) (2007) 129-143.
6. Zare Naghadehi M., Mikaeil R., Ataei M., "The application of Fuzzy Analytic Hierarchy Process (FAHP) approach to selection of optimum underground mining method for Jajarm Bauxite Mine, Iran", *Expert Systems with Application* 36 (2009) 8218-8226.
7. Mikaeil R., Zare Naghadehi M., Sereshki F., "Multifactorial Fuzzy Approach to the Penetrability Classification of TBM in Hard Rock Conditions", *Tunnelling and Underground Space Technology* 24 (2009) 500-505.

8. Mikaeil R., Zare Naghadehi M., Ataei M., KhaloKakaie R., "A Decision Support System Using Fuzzy Analytical Hierarchy Process (AHP) and TOPSIS Approaches for Selection of the Optimum Underground Mining Method", Archives of Mining Sciences 54 (2) (2009) 341-368.
9. Azadeh A., Osanloo M., Ataei M., "A new approach to mining method selection based on modifying the Nicholas technique", Applied Soft Computing 10 (2010) 1040-1061.
10. Mikaeil R., Ataei M., Yousefi R., "Application of a fuzzy analytical hierarchy process to the prediction of vibrat ion during rock sawing", Mining Science and Technology (China) 21 (2011.) 611-619.
11. Azadeh A., Nazari-Shirkouhi S., Hatami-Shirkouhi L., Ansarinejad A., "A unique fuzzy multi-criteria decision making: computer simulation approach for productive operators' assignment in cellular manufacturing systems with uncertainty and vagueness", The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 56 (2011.) 329-343.
12. Badri A., Nadeau S., Gbodossou A., "A new practical approach to risk management for underground mining project in Quebec", J. Loss Prev. Process Ind. 26 (2013) 1145-1158.
13. Meng Y., Tang D., Xu H., Li C., Li L., Meng S., "Geological controls and coalbed methane production potential evaluation: A case study in Liulin area, eastern Ordos Basin, China", Journal of Natural Gas Science and Engineering 21 (2014) 95-111.
14. Kursunoglu N., Onder M., "Selection of an appropriate fan for an underground coal mine using the Analytic Hierarchy Process", Tunnelling and Underground Space Technology 48 (2015) 101-109.

15. Ebrahimi M., Abdolshah M., Abdolshah S., "Developing a computer vision method based on AHP and feature ranking for ores type detection", *Applied Soft Computing* 49 (2016) 179-188.
16. Wang Q., Wang H., Qi Z., "An application of nonlinear fuzzy analytic hierarchy process in safety evaluation of coal mine", *Safety Science* 86 (2016) 78-87.
17. Kant R., Sen P., Paul P. S., Kher A. A., "A Review of Approaches used for the Selection of Optimum Stopping Method in Hard Rock Underground Mine", *International Journal of Applied Engineering Research* 11 (11) (2016) 7483-7490.
18. Gligoric Z., Beljic C., Simeunovic V., "Shaft location selection at deep multiple orebody deposit by using fuzzy TOPSIS method and network optimization", *Expert Systems with Applications* 37 (2) (2010) 1408-1418.
19. Golestanifar M., Goshtasbi K., Jafarian M., Adnani S., "A multi-dimensional approach to the assessment of tunnel excavation methods", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 48 (7) (2011) 1077-1085.
20. Pazand K., Hezarkhani A., Ataei M., "Using TOPSIS approaches for predictive porphyry Cu potential mapping: A case study in Ahar-Arasbaran area (NW, Iran)", *Computers & Geosciences* 49 (2012) 62-71.
21. Yazdani-Chamzini A., Haji Yakhchali S., "Tunnel Boring Machine (TBM) selection using fuzzy multicriteria decision making methods", *Tunnelling and Underground Space Technology* 30 (2012) 194-204.
22. Mikaeil M., Ozcelik Y., Yousefi R., Ataei M., Hosseini S. M., "Ranking the sawability of ornamental stone using Fuzzy Delphi and multi-criteria

- decision-making techniques", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 58 (2013) 118-126.
23. Mahdevari S., Shahriar K., Esfahanipour A., "Human health and safety risks management in underground coal mines using fuzzy TOPSIS", *Science of the Total Environment* 488-489 (2014) 85-99.
24. Kusi-Sarpong S., Bai C., Sarkis J., Wang X., "Green supply chain practices evaluation in the mining industry using a joint rough sets and fuzzy TOPSIS methodology", *Resources Policy* 46(1) (2015) 86-100.
25. Abedi M., Norouzi G. H., "A general framework of TOPSIS method for integration of airborne geophysics, satellite imagery, geochemical and geological data", *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 46 (2016) 31-44.
۲۶. شرکت مهندسی مشاور ایمن سازان، "گزارش مطالعات زمین‌شناسی عمومی پروژه سامانه انتقال آب سبزکوه به چغاخور" (۱۳۸۸).
27. Hashemi M., Moghaddas Sh., Ajalloeian R., "Application of Rock Mass Characterization for Determining the Mechanical Properties of Rock Mass: a Comparative Study", *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 43 (2010) 305-320.
28. Stocklin J., "Structural history and tectonics of Iran: A review", *AAPG Bulletin* 52 (1968) 1229-1258.
29. Çimren E. B., Çatay E., Budak N., "Development of a machine tool selection system using AHP", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 35 (2007) 363-376.