



IMAM KHOMEINI  
INTERNATIONAL UNIVERSITY

دوره اول، شماره ۱، پاییز ۱۳۹۵، صفحه ۴۱ تا ۵۱

Vol. 1, No. 1, autumn 2016, pp. 41-51



نشریه مهندسی منابع معدنی

Journal of Mineral Resources Engineering  
(JMRE)

## محاسبه شعاع بهینه تزریق در تونل کوهین به منظور بهبود خصوصیات ژئومکانیکی زمین با استفاده از روش تصمیم‌گیری چندمعیاره

صالح قادرنژاد<sup>۱\*</sup>، علی صفدریان<sup>۲</sup>، رضا میکائیل<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد گروه مهندسی معدن، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه تهران

۲- کارشناس مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی ارومیه

۳- استادیار گروه مهندسی معدن، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه صنعتی ارومیه

(دریافت ۱۳۹۴/۰۲/۰۱، پذیرش ۱۳۹۴/۰۵/۲۱)

### چکیده

عمل تزریق دوغاب به‌عنوان یکی از روش‌های اصلی بهسازی زمین نقش اساسی در کیفیت تونلسازی دارد. تزریق دوغاب از طریق بهبود ویژگی‌های مقاومتی توده سنگ و خاک باعث کاهش میزان نشست در سطح زمین، کاهش همگرایی محیط تونل و همچنین کاهش بارهای وارده بر سیستم نگهداری می‌شود. از طرف دیگر تزریق دوغاب باعث افزایش هزینه‌ها، افزایش زمان و همچنین کاهش میزان پیوستگی عملیات تونلسازی خواهد شد. با توجه به اثرات مثبت و منفی تزریق دوغاب بر روند تونلسازی، انتخاب شعاع بهینه تزریق در پروژه‌های تونلسازی اهمیت ویژه‌ای دارد. جابه‌جایی قائم در سقف و کف تونل، جابه‌جایی افقی دیواره تونل، نشست در سطح زمین، بار محوری، نیروی برشی و لنگر خمشی وارد بر سیستم نگهداری، هزینه و مدت زمان حفر تونل به‌عنوان پارامترهای اصلی برای تعیین شعاع بهینه تزریق به‌منظور بهبود خصوصیات ژئومکانیکی محیط و بهبود طراحی تونل انتخاب شدند. در این مقاله ابتدا بر اساس روش عددی تفاضل محدود و با استفاده از نرم افزار  $FLAC^{2D}$  پارامترهای اصلی تونل راه‌آهن محور قزوین - رشت محاسبه شد. پس از تعیین مقادیر هر یک از پارامترهای یاد شده در شعاع‌های مختلف تزریق (۴۰۰، ۵۰۰، ۱۰۰، ۵۰، ۰ سانتی‌متر)، درجه اهمیت هر یک از پارامترها با توجه به نظر نویسندگان با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP) تعیین و در نهایت با به‌کارگیری روش تصمیم‌گیری چند معیاره VIKOR شعاع بهینه تزریق از میان گزینه‌های مختلف انتخاب شد. در این تحقیق شعاع ۱۰۰ سانتی‌متر به‌عنوان شعاع بهینه تزریق به‌منظور بهبود خصوصیات ژئومکانیکی محیط و بهبود طراحی تونل کوهین به دست آمد.

### کلمات کلیدی

تزریق دوغاب، شعاع بهینه، تحلیل سلسله مراتبی، VIKOR، روش تفاضل محدود.

\*نویسنده مسئول و عهده دار مکاتبات Email: saleh.ghadernejad@gmail.com

## ۱- مقدمه

به طور کلی حفر تونل و فضاهای زیرزمینی باعث حذف توده‌ای از خاک و یا سنگ می‌شود. حذف این توده از دیدگاه مکانیک سنگ باعث بروز دو پدیده کلی در شرایط تعادل زمین می‌شود. یکی از بین رفتن تعادل اولیه زمین دربرگیرنده تونل و دیگری تمایل زمین برای ایجاد تعادل ثانویه است. تلاش زمین برای ایجاد تعادل ثانویه همراه با پدیده‌هایی مانند نشست در سطح زمین، تغییر در سطح ایستایی و ناپایداری در فضاهای حفر شده است [۱]. حفر تونل با مقطع بزرگ در محیط‌های خاکی و سنگی سست و به خصوص حفر تونل‌های کم عمق منجر به تشدید عوامل یاد شده می‌شود. عمده تلاش مهندسان و طراحان فضاهای زیرزمینی، کنترل و کاهش اثرات نامطلوب اجرای این سازه‌ها است. با نصب سیستم نگهداری مطمئن (در زمان مناسب) یا با استفاده از روش‌های بهسازی زمین قبل و بعد از حفر تونل یا ترکیبی از این موارد می‌توان موجب کنترل و کاهش موارد نامطلوب شد. یکی از متداول‌ترین روش‌های بهسازی زمین، تزریق دوغاب با فشار است. تزریق دوغاب عبارت از فرآیند تزریق مواد جریان‌پذیر به داخل زمین (معمولاً همراه با فشار به منظور بهبود خصوصیات مهندسی و بهبود رفتار زمین است) [۲]. سابقه بهسازی زمین از طریق پر کردن خلل و فرج (که در اصطلاح تزریق دوغاب خوانده می‌شود) به پیش از دو قرن قبل برمی‌گردد [۳]. هدف اصلی از تزریق دوغاب در محیط، بهبود خصوصیات مقاومتی و پایداری، کنترل و یا کاهش نفوذپذیری در محیط مورد نظر است. اصلاحات و بهبودهای حاصل در نتیجه تزریق دوغاب شامل افزایش ظرفیت تحمل بار و سختی محیط، کاهش نفوذپذیری و یا کاهش جریان آب‌های زیرزمینی، تقویت پی، پایداری تونل و حتی افزایش وزن مخصوص (چگالش) برای کاهش روانگرایی خاک است [۲].

تزریق دوغاب با فشار در بازه وسیعی از سنگ‌ها، شامل سنگ‌های رسوبی ضعیف تا سنگ‌های گرانیتی، در فشارهای بالای آب زیرزمینی و همچنین در تونل‌های سطحی و شهری مورد استفاده قرار گرفته است [۴، ۱۰]. تزریق دوغاب از طریق بهبود ویژگی‌های مقاومتی، نفوذپذیری افزایش وزن مخصوص و همچنین بهبود چسبندگی توده خاک و یا سنگ موجب پایداری فضای زیرزمینی حفر شده می‌شود [۱۱]. تزریق دوغاب در پروژه‌های تونلسازی و معدنی زیادی برای بهبود شرایط معدنکاری و تونلسازی و کاهش آسیب‌های زیست-

محیطی به‌کارگرفته شده است. در پروژه تونل لورن<sup>۱</sup> تزریق دوغاب برای تمام طول سنگی تونل در نظر گرفته شد. این اقدام باعث کاهش میزان نشست آب زیرزمینی به داخل تونل شد [۱۲]. در کشورهای تولیدکننده زغال، تزریق دوغاب به داخل شکستگی‌های افقی ایجاد شده در مرز جدایش روباره به‌عنوان یک راهکار به‌منظور کاهش میزان نشست سطح زمین انجام می‌گیرد [۱۳، ۱۴].

پارامترهای مختلفی بر کیفیت عملیات تونلسازی و پایداری تونل تاثیرگذار هستند. پارامترهایی مانند جابه‌جایی قائم در سقف و کف تونل، جابه‌جایی افقی در دیواره تونل، حداکثر نیروی برشی، حداکثر نیروی محوری و حداکثر لنگر خمشی وارد بر سیستم نگهداری، نشست در سطح زمین، هزینه و زمان انجام پروژه، پارامترهای تاثیرگذار بر کیفیت عملیات تونلسازی‌اند. تزریق دوغاب با بهبود پارامترهای مقاومتی محیط باعث کاهش نشست در سطح زمین، جابه‌جایی قائم در سقف و کف و جابه‌جایی افقی دیواره تونل می‌شود. همچنین با کاهش حداکثر نیروهای برشی، محوری و لنگرخمشی وارد بر سیستم نگهداری منجر به کاهش هزینه‌های مربوط به نگهدارنده‌ها می‌شود. از طرف دیگر افزایش شعاع تزریق منجر به افزایش زمان انجام عملیات تونلسازی، کاهش میزان پیوستگی عملیات و همچنین افزایش هزینه‌ها می‌شود. از دیدگاه فنی و اقتصادی، پروژه‌ای موفق خواهد بود که در کم‌ترین زمان و هزینه، بیشترین میزان پایداری را ایجاد کند. از این‌رو در مقاله حاضر شعاع بهینه تزریق به منظور بهبود خصوصیات ژئومکانیکی و طراحی در تونل کوهین به‌عنوان هدف اصلی تحقیق، تعیین شد. برای نیل به این هدف در گام نخست، بعد از ساخت مدل تونل در نرم افزار  $FLAC^{2D}$ ، پارامترهای موثر بر حفاری و طراحی سیستم نگهداری در شعاع‌های مختلف تزریق (۰، ۵۰، ۱۰۰، ...، ۴۰۰ سانتی‌متر) محاسبه و در نهایت با استفاده از تلفیق دو روش تحلیل سلسله مراتبی و روش VIKOR شعاع بهینه تزریق تعیین شد.

## ۲- مطالعه میدانی

تونل کوهین به طول معادل ۱۶۳۵ متر و سطح مقطع ۱۲۱ مترمربع در قطعه اول راه آهن قزوین- رشت حفر شده است. قطعه اول راه‌آهن مذکور از ایستگاه سیاه چشمه در ۱۵ کیلومتر ۱۵ راه‌آهن قزوین- زنجان با ارتفاع ۱۲۵۰ متر نسبت به سطح دریا شروع می‌شود و با راستای تقریباً شمالی

های ژئومکانیکی ساختگاه تونل عملیات تزریق پس از حفر تونل پیشاهنگ انجام می‌شود. بدین منظور با دستگاه حفاری چال‌هایی به قطر ۵ تا ۱۰ سانتی‌متر و به عمق لازم حفر و از این چال‌ها ماده تزریقی با فشار لازم به داخل محیط هدایت شد. مشخصات ژئومکانیکی تونل قبل و بعد از تزریق دوغاب در جدول ۱ آورده شده است [۱۵].

جدول ۱: مشخصات ژئومکانیکی تونل کوهین قبل و بعد از تزریق

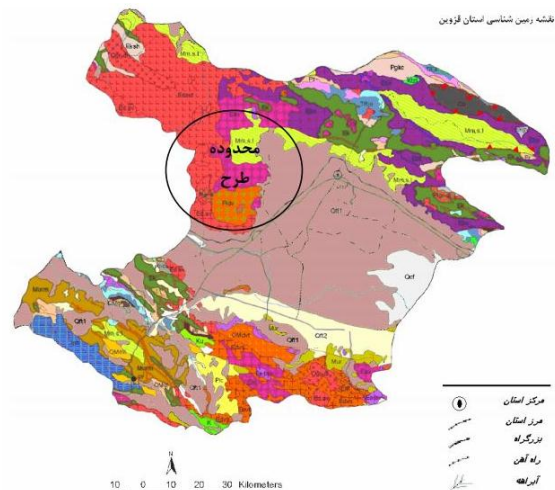
پارامترهای ژئومکانیکی	قبل از تزریق	بعد از تزریق
نسبت پواسون	۰٫۳۵	۰٫۲۵
مدول الاستیسیته	$۳٫۵ \times ۱۰^۸$ (Pa)	$۷ \times ۱۰^۸$ (Pa)
زاویه اصطکاک داخلی	۳۱ (Degree)	۳۱
جرم مخصوص	۲۰۰۰ (Kg/m <sup>3</sup> )	۲۲۰۰
مدول بالک	$۳٫۸۹ \times ۱۰^۸$ (Pa)	$۴٫۶۶ \times ۱۰^۸$ (Pa)
مدول برشی	$۱٫۲۹ \times ۱۰^۸$ (Pa)	$۲٫۸ \times ۱۰^۸$ (Pa)
چسبندگی	$۲٫۷ \times ۱۰^۵$ (Pa)	$۵٫۷ \times ۱۰^۵$ (Pa)

### ۳- مدلسازی عددی با استفاده از نرم‌افزار *FLAC<sup>2D</sup>*

در مقاله حاضر به منظور شبیه‌سازی رفتار تونل و محیط دربرگیرنده آن از نرم‌افزار *FLAC<sup>2D</sup>* استفاده شده است. نرم‌افزار *FLAC<sup>2D</sup>* یک نرم‌افزار تحلیل عددی بر اساس روش تفاضل محدود است که برای محاسبات مهندسی مورد استفاده قرار می‌گیرد. این نرم‌افزار رفتار سازه‌هایی را که در آن خاک یا سنگ و سایر مصالحی که بعد از حد تسلیم به حالت پلاستیک می‌رسند، به خوبی مدلسازی می‌کند. مدل‌های رفتاری متنوعی که در این برنامه تعریف شده است به طراحان فضاهای زیرزمینی این اجازه را می‌دهد تا مسایل مختلف را تحت رفتارهای غیر خطی مدلسازی و تحلیل کنند [۱۶]. در مدلسازی انجام شده برای پروژه تونل راه‌آهن کوهین، ابعاد مدل به اندازه‌ای در نظر گرفته شده است که محدوده تونل تحت تاثیر مرزها قرار نگیرد. برای تحلیل رفتار پلاستیک از مدل موهر - کلمب و برای مدل کردن رفتار پوشش از المان تیر با رفتار ارتجاعی استفاده شده است.

تخمین سیستم نگهداری اولیه مورد نیاز برای پایدارسازی تونل یکی از مسایل مهم در طراحی تونل به شمار می‌رود. در پروژه تونل کوهین برای تعیین پوشش اولیه مناسب و همچنین به منظور حفظ پایداری فضای حفر شده و کمک به

جنوبی و طول ۱۷۲+۴۴ کیلومتر از کنار روستاهای دولت-آباد، دستجرد، کندر، مشکین و یل‌آباد عبور می‌کند و در انتهای مسیر خود به نقطه‌ای که دارای ارتفاع معادل ۱۳۰۰ متر از سطح آب‌های آزاد است می‌رسد. موقعیت جغرافیایی و زمین‌شناسی قطعه اول راه‌آهن محور قزوین- رشت در شکل ۱ نشان داده شده است.



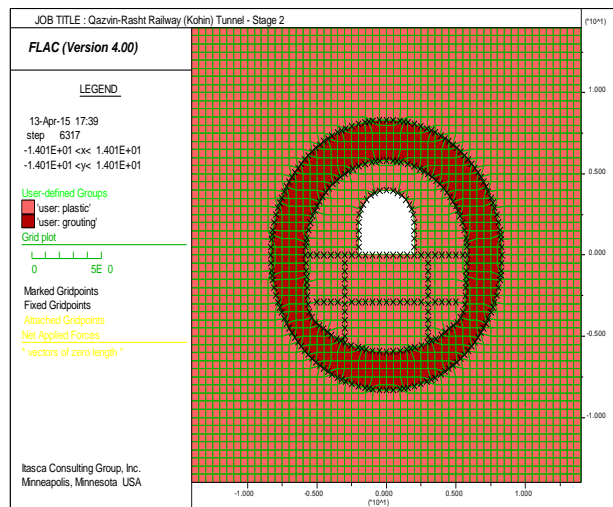
شکل ۱: موقعیت جغرافیایی و زمین‌شناسی قطعه اول راه‌آهن محور قزوین - رشت

مطالعات زمین‌شناسی انجام شده در مورد ساختگاه تونل نشان‌دهنده این موضوع است که تونل در رسوبات سازند هزار دره قرار دارد و جنس زمین پوشاننده آن از تناوب لایه‌های مختلف رسی، ماسه‌ای و کنگلومرای هوازده است. سست بودن ساختگاه تونل، قرارگیری بخش اعظم تونل در زیر سطح ایستابی و بزرگی مقطع تونل از مهمترین ویژگی‌های این تونل است. ۴ گمانه اکتشافی برای شناسایی وضعیت ژئومکانیکی ساختگاه تونل حفر شده‌اند. با استفاده از نمونه‌های گرفته شده از این گمانه‌ها، مشخصات ژئومکانیکی توده سنگ در برگیرنده تونل تعیین شد. نتایج حاصل از آزمایش‌های انجام شده، نشان دهنده پایین بودن ویژگی‌های ژئومکانیکی توده سنگی دربرگیرنده تونل است. به دلیل پایین بودن ویژگی‌های ژئومکانیکی منطقه، بهسازی زمین با استفاده از تزریق دوغاب به‌عنوان یکی از طرح‌های اولیه حفر تونل در نظر گرفته شد. در الگوی پیشنهادی اولیه، عملیات حفر تونل به همراه تزریق دوغاب در ۴ مرحله به ترتیب شامل حفر تونل پیشاهنگ، حفاری طاق تونل، حفر بخش مرکزی و پا طاق‌ها و در نهایت حفر قسمت کف تونل است. در مرحله نخست از عملیات حفاری به منظور بهبود ویژگی-

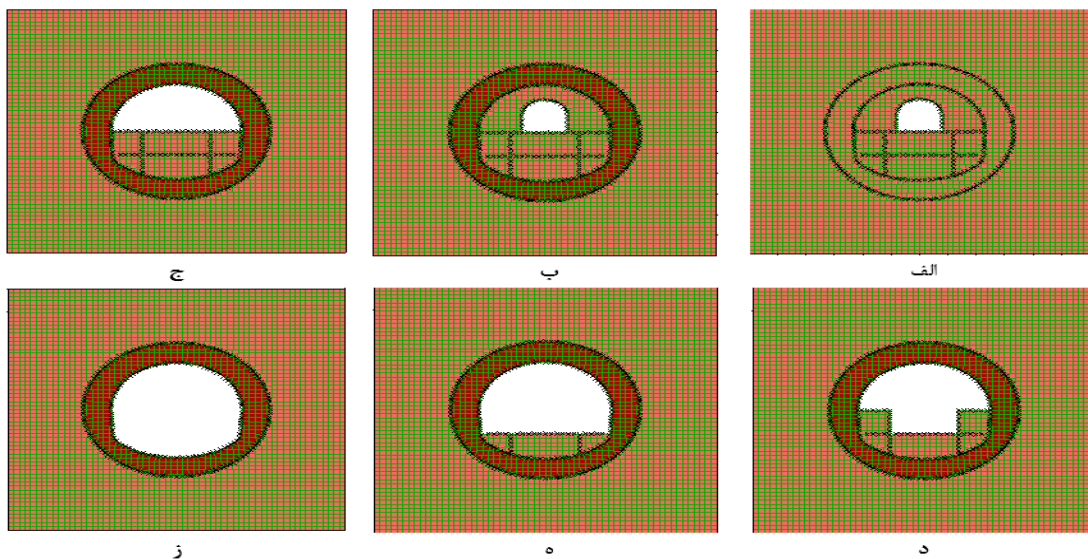
- مراحل مدلسازی حفر تونل کوهین به ترتیب شامل مراحل ۶ گام زیر می‌شود.
- ۱- حفر تونل پیشاهنگ به دهانه ۴ متر و نصب سیستم نگهداری موقت
  - ۲- تزریق دوغاب با شعاع معین
  - ۳- حذف سیستم نگهداری موقت، حفر قسمت طاق و نصب سیستم نگهداری سقف
  - ۴- حفر بخش مرکزی تونل
  - ۵- حفر پاتاق‌ها
  - ۶- حذف سیستم نگهداری موقت، حفر قسمت کف

تونل و در نهایت نصب سیستم نگهداری نهایی کف تونل در شکل‌های ۳- الف تا ۳- و، مراحل مختلف مدلسازی حفر تونل در نرم‌افزار  $FLAC^{2D}$  برای شعاع تزریق دوغاب ۱/۵ متر نشان داده شده است. در این تحقیق سعی شد با استفاده از نرم‌افزار  $FLAC^{2D}$  تاثیر افزایش شعاع تزریق دوغاب از ۵۰ سانتی‌متر تا ۴۰۰ سانتی‌متر با گام‌های ۵۰ سانتی‌متری بر پارامترهای جابه‌جایی قائم در کف و سقف تونل، جابه‌جایی افقی دیواره تونل، میزان نشست در سطح زمین و همچنین حداکثر نیروی برشی، محوری و لنگر خمشی وارد بر سیستم نگهداری مورد بررسی قرار گیرد. نتایج به دست آمده از مدلسازی عددی در شکل‌های ۴ تا ۷ نشان داده شده‌اند.

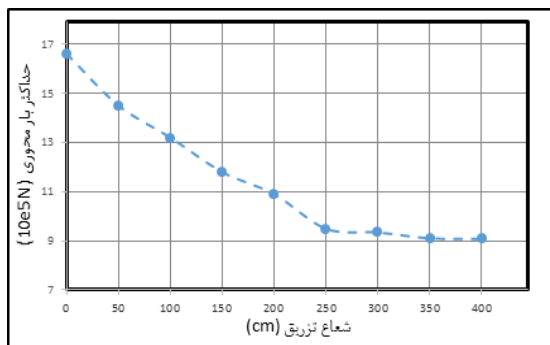
ایجاد تعادل جدید از روش همگرایی - همجواری و رسم منحنی مشخصه زمین استفاده شده است. با توجه به تحلیل-های انجام شده، پوشش اولیه مناسب شامل ۳۵ سانتی‌متر شاتکریت به همراه تیر آهن IPE200 در فواصل ۰/۵ متری است همچنین گام پیشروی مجاز، ۱ متر در نظر گرفته شد [۱۷]. نمای کلی از شبیه‌سازی عددی انجام شده برای پروژه تونل کوهین در شکل ۲ نشان داده شده است.



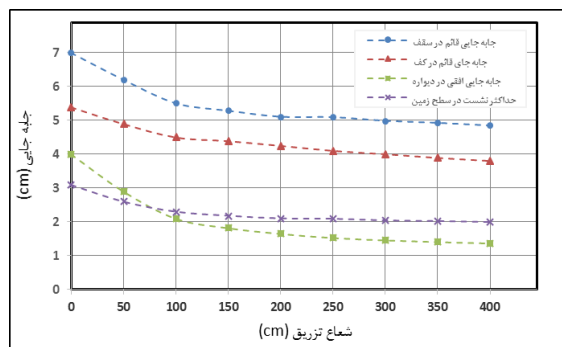
شکل ۲: مدلسازی عملیات تزریق به شعاع ۱/۵ متر بعد از حفر تونل پیشاهنگ در نرم‌افزار  $FLAC^{2D}$



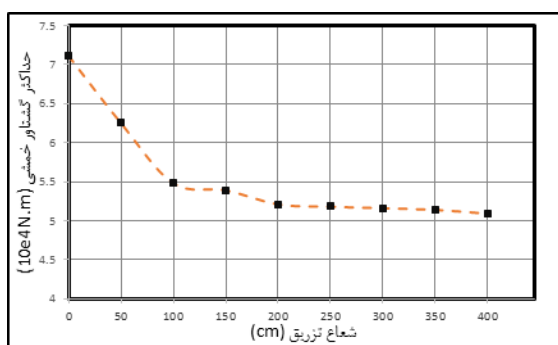
شکل ۳: الف-گام اول، حفر تونل پیشاهنگ، ب-گام دوم، تزریق به شعاع ۱/۵ متر، ج-گام سوم، حفر قسمت طاق تونل، د-گام چهارم، حفر قسمت میانی، ه-گام پنجم، حفر پاتاق‌ها، و-گام آخر، حفر کف تونل



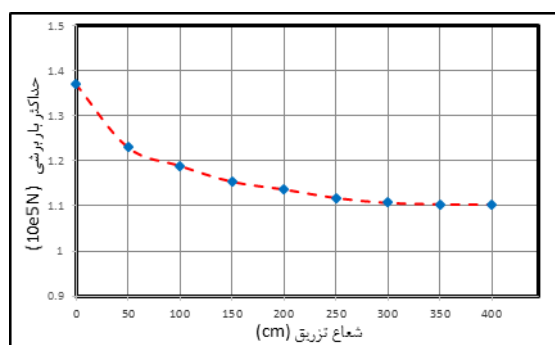
شکل ۵: تاثیر افزایش شعاع تزریق بر حداکثر بار محوری وارد بر سیستم نگهداری



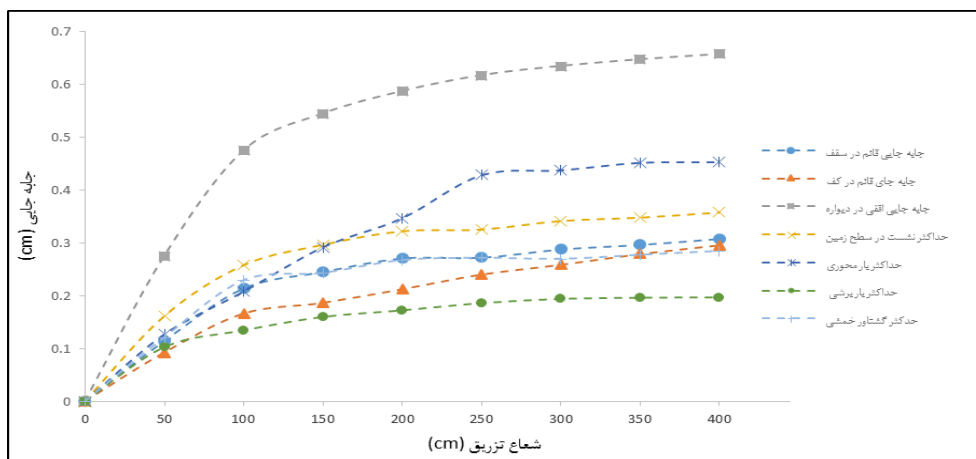
شکل ۴: تاثیر افزایش شعاع تزریق بر جابه‌جایی قائم در کف و سقف، جابه‌جایی افقی در دیواره تونل و نشست سطح زمین



شکل ۷: تاثیر افزایش شعاع تزریق بر حداکثر لنگر خمشی وارد بر سیستم نگهداری



شکل ۶: تاثیر افزایش شعاع تزریق بر حداکثر بار برشی وارد بر سیستم نگهداری



شکل ۸: درصد تغییرات پارامترهای یاد شده به‌ازای افزایش شعاع تزریق

چنین استنباط کرد که با افزایش شعاع تزریق، میزان حداکثر نیروی محوری، برشی و لنگر خمشی ابتدا به سرعت کاهش می‌یابد و سپس از سرعت کاهش آن‌ها کاسته می‌شود. با توجه به نتایج حاصل از تحلیل‌های عددی، افزایش شعاع تزریق موجب بهبود پارامترهای یاد شده می‌شود. بیشینه

با توجه به شکل ۴، مقدار نشست در سطح زمین، مقادیر جابه‌جایی قائم در کف و سقف تونل و جابه‌جایی افقی دیواره تونل با افزایش میزان شعاع تزریق در ابتدا به سرعت کاهش می‌یابد و پس از شعاع ۱۵۰ سانتی‌متر تقریباً به مقدار ثابتی می‌رسد. همچنین با توجه به شکل‌های ۵ تا ۷ نیز می‌توان



استفاده از این روش، مراحل انجام کار را می‌توان به ۵ بخش اصلی به شرح زیر تقسیم کرد:

#### ۵-۱- تشکیل ماتریس تصمیم و بی‌بعد کردن آن

با توجه به تعداد معیارها، تعداد گزینه‌ها و ارزیابی همه گزینه‌ها برای معیارهای مختلف، ماتریس تصمیم به صورت زیر تشکیل می‌شود:

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & \dots & x_{1n} \\ \vdots & \dots & \vdots \\ x_{m1} & \dots & x_{mn} \end{bmatrix}$$

که در آن  $x_{ij}$  عملکرد گزینه  $i$  ( $i=1,2,\dots,m$ ) در ارتباط با معیار  $j$  ( $j=1,2,\dots,n$ ) است. در این مرحله معیارها با ابعاد مختلف به معیارهایی بی‌بعد تبدیل و ماتریس  $F$  به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$F = \begin{bmatrix} f_{11} & \dots & f_{1n} \\ \vdots & \dots & \vdots \\ f_{m1} & \dots & f_{mn} \end{bmatrix}$$

در این ماتریس  $f_j^*$  به صورت رابطه ۴ تعریف می‌شود:

$$f_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m x_{ij}^2}} \quad (4)$$

به همین منظور در ابتدا با استفاده از مقیاس خطی ساعتی که در جدول ۴ درج شده است داده‌های کیفی به داده‌های کمی تبدیل می‌شوند. سپس با توجه به رابطه ۴ ماتریس بی‌بعد داده‌ها محاسبه می‌شود.

می‌توان نام برد. در این تحقیق ابتدا با استفاده از فرآیند تحلیل سلسله مراتبی، وزن (درجه اهمیت) هر یک از پارامترها با استناد به نظر نویسندگان محاسبه شود سپس با به‌کارگیری روش VIKOR شعاع بهینه تزریق محاسبه شد. با توجه به مساله مورد نظر، معیارها و گزینه‌های تعیین شده در جدول ۲ ذکر شده‌اند.

جدول ۲: معیارها و گزینه‌ها برای تعیین شعاع بهینه تزریق در پروژه‌های تونلسازی

گزینه‌ها (شعاع تزریق)		معیارها	
بدون تزریق	A <sub>1</sub>	جابه‌جایی قائم در سقف	C <sub>1</sub>
۵۰ سانتی‌متر	A <sub>2</sub>	جابه‌جایی قائم در کف	C <sub>2</sub>
۱۰۰ سانتی‌متر	A <sub>3</sub>	جابه‌جایی افقی دیواره	C <sub>3</sub>
۱۵۰ سانتی‌متر	A <sub>4</sub>	نشست در سطح زمین	C <sub>4</sub>
۲۰۰ سانتی‌متر	A <sub>5</sub>	حداکثر بار محوری	C <sub>5</sub>
۲۵۰ سانتی‌متر	A <sub>6</sub>	حداکثر نیروی برشی	C <sub>6</sub>
۳۰۰ سانتی‌متر	A <sub>7</sub>	حداکثر لنگر خمشی	C <sub>7</sub>
۳۵۰ سانتی‌متر	A <sub>8</sub>	هزینه عملیات	C <sub>8</sub>
۴۰۰ سانتی‌متر	A <sub>9</sub>	زمان اجرا	C <sub>9</sub>

در میان معیارهای ذکر شده، دو معیار زمان و هزینه دارای ارزش مثبت و بقیه معیارها دارای ارزش منفی هستند. همچنین نتایج حاصل از نرم افزار FLAC2D برای هر یک از پارامترها در شعاع‌های مختلف تزریق در جدول ۳ درج شده است.

اگر در یک مساله تصمیم‌گیری چند معیاره،  $n$  معیار و  $m$  گزینه وجود داشته باشد، به منظور انتخاب بهترین گزینه با

جدول ۳: نتایج حاصل از مدلسازی عددی در نرم‌افزار FLAC<sup>2D</sup>

شعاع تزریق (cm)	جابه‌جایی قائم در سقف (cm)	جابه‌جایی قائم در کف (cm)	جابه‌جایی افقی دیواره (cm)	نشست زمین (cm)	حداکثر بار محوری (KN)	حداکثر نیروی برشی (KN)	حداکثر لنگر خمشی (KN.m)
۰	۷	۵/۴	۴	۳/۱	۱۶۶۳/۶	۱۳۷/۴	۷۱۱/۴
۵۰	۶/۲	۴/۹	۲/۹	۲/۶	۱۴۵۳	۱۲۳/۳	۶۲۵/۳
۱۰۰	۵/۵	۴/۵	۲/۱	۲/۳	۱۳۱۸	۱۱۸/۹	۵۴۸/۴
۱۵۰	۵/۲۸	۴/۳۹	۱/۸۲	۲/۱۸	۱۱۷۸	۱۱۵/۴	۵۳۸/۵
۲۰۰	۵/۱	۴/۲۵	۱/۶۵	۲/۱	۱۰۸۶	۱۱۳/۷	۵۲۱/۱
۲۵۰	۵/۰۹	۴/۱	۱/۵۳	۲/۰۹	۹۵۰/۴	۱۱۱/۸	۵۱۸/۲
۳۰۰	۴/۹۸	۴	۱/۴۶	۲/۰۴	۹۳۵	۱۱۰/۷	۵۱۶/۶
۳۵۰	۴/۹۲	۳/۸۹	۱/۴۱	۲/۰۲	۹۱۱/۱	۱۱۰/۴	۵۱۴/۱
۴۰۰	۴/۸۴	۳/۸	۱/۳۷	۱/۹۹	۹۰۹/۵	۱۱۰/۳	۵۰۸/۹

جدول ۴: تبدیل معیار کیفی به کمی (Saaty 1980)

مشخصه کیفی	خیلی بد	بد	متوسط	خوب	خیلی خوب
معادل کمی	۱	۳	۵	۷	۹
همچنین برای ترجیحات بین فواصلی از مقادیر ۲،۴،۶ و ۸ استفاده می شود					

۲-۵- تعیین بردار وزن

بردار وزن به دست آمده از روش بردار ویژه برای هر معیارها به صورت زیر است.

$$W = [0.127 \ 0.056 \ 0.087 \ 0.031 \ 0.087 \ 0.127 \ 0.056 \ 0.249 \ 0.181]$$

۳-۵- تعیین بهترین و بدترین مقدار از میان مقادیر موجود برای هر معیار

پس از تعیین بردار وزن، بهترین ( $f_j^*$ ) مقدار برای معیارهای مثبت و منفی به ترتیب از روابط ۵ و ۶ محاسبه می شوند:

$$f_j^* = \text{Max}_i f_{ij} \tag{5}$$

$$f_j^* = \text{Min}_i f_{ij} \tag{6}$$

بدترین ( $f_j^-$ ) مقدار برای معیارهای مثبت و منفی به ترتیب از روابط ۷ و ۸ محاسبه می شوند:

$$f_j^- = \text{Min}_i f_{ij} \tag{7}$$

$$f_j^- = \text{Max}_i f_{ij} \tag{8}$$

در این روابط  $f_j^*$  بهترین مقدار معیار  $j$  از بین تمام گزینهها و  $f_j^-$  بدترین مقدار معیار  $j$  از بین تمام گزینهها است.

۴-۵- محاسبه مقدار سودمندی ( $S$ ) و مقدار تاسف ( $R$ ) و شاخص VIKOR ( $Q$ )

مقادیر  $S$  و  $R$  با توجه به روابط ۹ و ۱۰ محاسبه می شوند:

$$S_i = \sum_{j=1}^n w_j \frac{f_j^* - f_{ij}}{f_j^* - f_j^-} \tag{9}$$

$$R_i = \text{Max} \left\{ w_j \frac{f_j^* - f_{ij}}{f_j^* - f_j^-} \right\} \tag{10}$$

که در آن  $w_j$  مقدار وزن مورد نظر برای معیار  $j$  است. در روش برنامه ریزی توافقی اگر پارامتر  $P$  مساوی یک باشد، همان مقدار  $S_i$  به دست می آید:

$$L(A_i) = \sum_{j=1}^n w_j \cdot \frac{f_j^* - f_{ij}}{f_j^* - f_j^-} = S_i \tag{11}$$

در روش برنامه ریزی توافقی اگر پارامتر  $P$  مساوی  $\infty$  باشد، همان مقدار  $R_i$  به دست می آید:

$$L_{\infty}(A_i) = \text{Max} \left[ w_j \cdot \left( \frac{f_j^* - f_{ij}}{f_j^* - f_j^-} \right) \right] = R_i \tag{12}$$

مقدار  $Q$  با توجه به رابطه زیر محاسبه می شود:

$$Q_i = v \left[ \frac{S_i - S^-}{S^* - S^-} \right] + (1-v) \left[ \frac{R_i - R^-}{R^* - R^-} \right] \tag{13}$$

در رابطه ۱۳ مقادیر  $R^*$ ،  $R^-$ ،  $S^*$  و  $S^-$  به صورت زیر تعریف می شوند:

$$S^- = \text{Min } S_i \quad S^* = \text{Max } S_i \quad R^- = \text{Min } R_i \quad R^* = \text{Max } R_i$$

در این روابط:

$$\frac{R^* - R^-}{R_i - R^-} \text{ بیان کننده فاصله از حل ایده آل و } \frac{S^* - S^-}{S_i - S^-}$$

بیان کننده فاصله از حل ضد ایده آل است و پارامتر  $v$  با توجه به میزان توافق گروه تصمیم گیرنده انتخاب می شود. در صورت توافق بالا، مقدار آن بیش از ۰،۵، در صورت توافق با اکثریت آرا مقدار آن مساوی ۰،۵ و در صورت توافق پایین، مقدار آن کمتر از ۰،۵ خواهد بود. مقدار  $Q$  تابعی از  $S_i$  و  $R_i$  بوده که خود این مقادیر به ترتیب مقادیر فاصله از حل ایده آل به ازای  $P=1$  و  $P=\infty$  در برنامه ریزی توافقی است.

۵-۵- مرتب کردن گزینهها بر اساس مقادیر  $R$ ،  $S$  و  $Q$

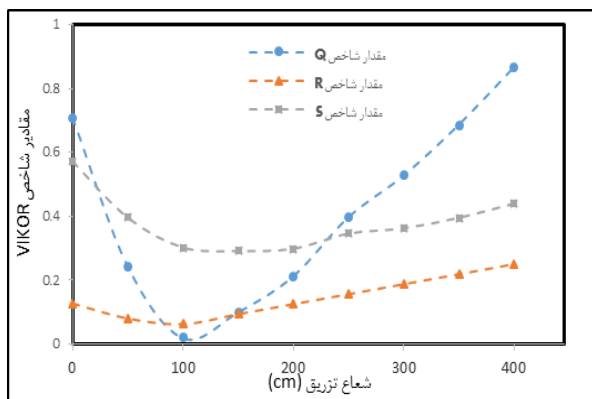
در این مرحله با توجه به مقادیر  $R$ ،  $S$  و  $Q$  گزینهها در سه گروه، از کوچکتر به بزرگتر مرتب می شوند. در نهایت گزینه ای به عنوان گزینه برتر انتخاب می شود که در هر سه گروه به عنوان گزینه برتر شناخته شود. در گروه  $Q$  گزینه ای به عنوان گزینه برتر انتخاب می شود که بتواند دو شرط زیر را داشته باشد:

شرط ۱: اگر گزینه های  $A_1$  و  $A_2$  به ترتیب اولین و دومین گزینه برتر در گروه و  $n$  بیانگر تعداد گزینهها باشد، رابطه ۱۴ صدق کند:



جدول ۵: مقادیر مرتب شده برای سه پارامتر به دست آمده Q و R و S تعیین شده با روش VIKOR

S		R		Q	
A <sub>4</sub>	۰/۲۹۱	A <sub>3</sub>	۰/۰۶۲	A <sub>3</sub>	۰/۰۱۹
A <sub>5</sub>	۰/۲۹۷	A <sub>2</sub>	۰/۰۷۹	A <sub>4</sub>	۰/۱۰۰
A <sub>3</sub>	۰/۳۰۲	A <sub>4</sub>	۰/۰۹۳	A <sub>5</sub>	۰/۲۱۲
A <sub>6</sub>	۰/۳۴۵	A <sub>5</sub>	۰/۱۲۴	A <sub>2</sub>	۰/۲۴۳
A <sub>7</sub>	۰/۳۶۰	A <sub>1</sub>	۰/۱۲۷	A <sub>6</sub>	۰/۳۹۶
A <sub>8</sub>	۰/۳۹۴	A <sub>6</sub>	۰/۱۵۵	A <sub>7</sub>	۰/۵۲۷
A <sub>2</sub>	۰/۳۹۵	A <sub>7</sub>	۰/۱۸۶	A <sub>8</sub>	۰/۶۸۵
A <sub>9</sub>	۰/۴۳۹	A <sub>8</sub>	۰/۲۱۷	A <sub>1</sub>	۰/۷۰۸
A <sub>1</sub>	۰/۵۷۱	A <sub>9</sub>	۰/۲۴۹	A <sub>9</sub>	۰/۸۶۴
S*	۰/۵۷۱	S <sup>-</sup>	۰/۲۹۱	V	۰/۵
R*	۰/۲۱۷۸	R <sup>-</sup>	۰/۰۶۲۲		



شکل ۹: ارتباط شعاع تزریق با شاخص‌های Q و S, R

مدلسازی تونل و محیط در برگزیده آن شد. پارامترهای جابه‌جایی قائم در سقف و کف تونل، جابه‌جایی افقی دیواره تونل، نشست در سطح زمین، حداکثر بار محوری، حداکثر نیروی برشی و حداکثر لنگر خمشی وارد بر سیستم نگهداری، از دیدگاه فنی به‌عنوان تاثیرگذارترین پارامترها بر کیفیت تونلسازی انتخاب شدند. در مدلسازی عددی انجام شده تاثیر افزایش شعاع تزریق بر روی پارامتر تاثیرگذار بر کیفیت تونلسازی مورد بررسی قرار گرفت. به همین منظور مقدار شعاع تزریق دوغاب در مدل عددی از مقدار صفر سانتی‌متر (عدم انجام تزریق) با گام‌های ۵۰ سانتی‌متری تا مقدار ۴۰۰ سانتی‌متر افزایش یافت. نتایج به دست آمده از مدل‌های عددی نشان‌دهنده این موضوع است که افزایش شعاع تزریق در ابتدا به سرعت باعث بهبود پارامترهای مورد نظر شده و سپس از سرعت تاثیرگذاری آن کاسته می‌شود. از سوی دیگر، از دیدگاه اقتصادی افزایش شعاع تزریق باعث کاهش

$$Q(A_2) - Q(A_1) \geq \frac{1}{n-1} \quad (14)$$

شرط ۲: گزینه A<sub>1</sub> باید حداقل در یکی از گروه‌های S و R به عنوان رتبه برتر شناخته شود. زمانی که شرط اول برقرار نباشد، مجموعه‌ای از گزینه‌ها به صورت زیر به عنوان گزینه‌های برتر انتخاب می‌شوند:

$$A_1, A_2, \dots, A_m = \text{گزینه‌های برتر}$$

بیشترین مقدار m با توجه به رابطه ۱۵ محاسبه می‌شود:

$$Q(A_m) - Q(A_1) < \frac{1}{n-1} \quad (15)$$

زمانی که شرط دوم برقرار نباشد دو گزینه A<sub>1</sub> و A<sub>2</sub> به عنوان گزینه‌های برتر انتخاب می‌شوند.

مقادیر مرتب شده برای سه پارامتر Q و R و S (نزولی) در جدول ۵ ارائه شده است. با توجه به بررسی‌های به عمل آمده،

گزینه ای به عنوان گزینه برتر انتخاب می‌شود که در هر سه گروه به عنوان گزینه برتر شناخته شود مشاهده می‌شود گزینه A<sub>3</sub> در دو گروه R و Q به عنوان گزینه برتر معرفی شده است ولی از نظر شاخص S، این گزینه در رتبه سوم قرار دارد. برای انتخاب این گزینه به عنوان گزینه برتر باید دو شرط لازم مورد بررسی قرار گیرد. با بررسی شرط اول مشخص می‌شود که اختلاف گزینه‌های اول و دوم بیشتر از مقدار ۰/۱۲۵ است در نتیجه شرایط مساله شرط اول را تامین می‌کند و بنابراین گزینه A<sub>3</sub> به عنوان شعاع بهینه برای عملیات تزریق پیشنهاد می‌شود. در شکل ۱۳ ارتباط بین مقادیر به دست آمده برای شاخص Q, R و S با شعاع تزریق نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۹ نشان داده شده، مقدار کمترین Q و R در شعاع ۱۰۰ سانتی‌متر و کمینه مقدار شاخص S در شعاع ۱۵۰ سانتی‌متر حاصل می‌شود.

## ۶- نتیجه‌گیری

در این تحقیق با استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره و مدلسازی عددی، شعاع بهینه تزریق دوغاب در پروژه تونل کوهین به منظور بهبود خواص ژئومکانیکی محیط و بهبود طراحی تونل تعیین شد. برای این منظور با در دست داشتن ویژگی‌های ژئومکانیکی منطقه قبل و بعد از تزریق دوغاب و با استفاده از نرم افزار عددی FLAC<sup>2D</sup> اقدام به

- Trenchless Technology (NASTT), March 11-15, Nashville, Tennessee, 1-9.
- [11] Xanthakos, P., Abranson, L., and Bruce, D. (1994). "Ground control and Improvement". Wiley-Interscience, New York, pp. 936.
- [12] Hoiem, A. H., and Nelson, B. (2015). "Rock Mass Grouting in the Løren Tunnel: Case Study with the Main Focus on the Groutability and Feasibility of Drill Parameter Interpretation". Rock Mechanics and Rock Engineering, 47(3): 967-983.
- [13] Xuan, D., and Xu, J. (2014). "Grout injection into bed separation to control surface subsidence during longwall mining under villages: case study of Liudian coal mine". Natural Hazards, 73(2): 883 – 906.
- [14] Xuan, D., Xu, J., Wang, B., and Teng, H. (2015). "Borehole Investigation of the Effectiveness of Grout Injection Technology on Coal Mine Subsidence Control". Rock Mechanics and Rock Engineering, 48(6): 2435-2445.
- [15] مهندسیین مشاور هرارزاه؛ ۱۳۸۳؛ "دومین گزارش تونل راه آهن کوهین محور قزوین - رشت - بندرانزلی".
- [16] Itasca Consulting Group Inc., (1999). FLAC2D version 4.10 User's manual, Itasca Consulting Group Inc, Minneapolis.
- [17] میکائیل، رضا؛ ۱۳۸۵؛ "تحلیل پایداری و طراحی سیستم نگهداری تونل راه آهن کوهین محور قزوین - رشت"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی معدن و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود
- [18] Saaty, T. (1980). "The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource, Allocation". McGraw-Hill, New York, pp. 287.
- [19] عطایی، محمد؛ ۱۳۹۳؛ "تصمیم‌گیری چند معیاره"، دانشگاه صنعتی شاهرود، ویرایش اول، چاپ دوم، ص ۳۳۳.
- [20] Opricovic, S., and Tzeng, G. H. (2002). "multicriteria planning of post-earthquake sustainable reconstruction". Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 17(3): 211–220.
- [21] Opricovic, S., and Tzeng, G. (2003). "Fuzzy Multicriteria Model for Postearthquake Land-Use Planning". Natural Hazards Review, 4(2): 59–64.
- [22] Opricovic, S., and Tzeng, G. H. (2004). "Compromise solution by MCDM methods: a comparative analysis of VIKOR and TOPSIS". European Journal of Operational Research, 156(2): 445–455.
- [23] Opricovic, S., and Tzeng, G. H. (2007). "Extended VIKOR method in comparison with outranking methods". European Journal of Operational Research,
- پیوستگی عملیات، افزایش هزینه‌های عملیاتی و افزایش زمان انجام پروژه می‌شود از این رو پارامترهای زمان و هزینه‌های پروژه نیز به مجموعه پارامترهای تأثیرگذار بر تونلسازی اضافه شدند. در ادامه ابتدا با استفاده از فرآیند تحلیل سلسله مراتبی و با استناد به نظر نویسندگان، بردار وزن پارامترها تعیین شد سپس با به‌کارگیری روش تصمیم‌گیری چندمعیاره VIKOR شعاع بهینه تزریق برابر ۱۰۰ سانتی‌متر به‌عنوان گزینه برتر تعیین شد.
- ۷- مراجع**
- [۱] اورعی، سید کاظم؛ ۱۳۸۷؛ "نگهداری در معادن"، انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ص ۳۳۸.
- [2] Nicholson, P. G. (2015). "Soil Improvement and Ground Modification Methods". 1st edition, Butterworth – Heinemann, Elsevier Inc, Amsterdam, chapter. 12: 289-317.
- [3] ASCE Standard ASCE/G-I53-10, (2010). "Compaction Grouting Consensus Guide". American Society of Civil Engineers, New York, pp. 79.
- [4] Delmalm, T. (2004). "choice of grouting method for jointed hard rock based on sealing time prediction". PHD thesis, Royal University of Technology, Stockholm, Sweden, pp. 250.
- [5] Bernarder, S. (2004). "Grouting in sedimentary and igneous rock with special reference to pressure induced deformation". Technical reports, Lulea University of technology, Lulea, Sweden, pp. 118.
- [6] Lombardi, T. (2003). "grouting of rock mass". Proceeding of 3rd International Conference on Grouting Novel Grout Treatment, February 10-12, New Orleans, Louisiana, United States, 1-42.
- [7] Garshol, K. (2003). "Pre- Excavation Grouting in Rock tunneling". MBT International Underground Construction Group, Division of MBT (Switzerland) Ltd, pp. 138.
- [8] Zhang, D. M., Huang, H. W., and Wang, J. M. (2007). "Numerical study on the effect of grouting on long-term settlement of tunnel in clay". International Conference on Computational Science, May 27 – 30, Beijing, China, 1114-1121.
- [9] Panthi, K. K., and Nilsen, B. (2005). "Significance of grouting for controlling leakage in water tunnel. A case from Nepal". World Tunnel Congress, May, Istanbul, Turkey, 931-938.
- [10] Dickes, G. (2012). "Support of tunneling with chemical grouting in New Jersey". North American Society for

- [26] San Cristóbal, J. R. (2011). "Multi-criteria decision-making in the selection of a renewable energy project in Spain: The VIKOR method". *Renewable Energy*, 36(2): 498-502.
- [27] Opricovic, S. (2011). "Fuzzy VIKOR with an application to water resources planning". *Expert Systems with Applications*, 38(10): 12983-12990.
- [24] Hu-Chen, L., Long, Li., Nan, L., Ling-Xiang, M. (2012). "Risk evaluation in failure mode and effects analysis with extended VIKOR method under fuzzy environment". *Expert Systems with Applications*, 39(17): 12926-12934.
- [25] Tavakkoli-Moghaddam, R., and Mousavi, S. M. (2011). "An integrated AHP-VIKOR methodology for plant location selection". *International Journal of Engineering*, 24(2): 127-137.

<sup>1</sup> Loren

<sup>2</sup> Utility measure

<sup>3</sup> Regret measure