نشریه‌ی مهندسی تونل و فضاهای زیرزمینی
Tunneling & Underground Space Engineering (TUSE)
tuse.shahroodut.ac.ir
دوره‌ی ۹- شماره‌ی۱/بهار ۱۳۹۹

تعیین سیستم حمل‌ونقل بهینه جهت حفاری تونل‌های مکانیزه مترو

پژوهشی

محمد جوادی[۱]؛ محمد صادق عباسی[۲*]؛ محمد تمنائی[۳]

۱- کارشناس شرکت مهندسین مشاور ساحل امید ایرانیان؛ دانش‌آموخته‌ی دکتری مهندسی معدن، *mohamadjavadi61@gmail.com*

۲- کارشناس موسسه فاطر قرارگاه سازندگی خاتم‌الانبیاء؛ دانش‌آموخته‌ی کارشناسی ارشد راه و ترابری، *abbasi92.195@gmail.com*

۳- دانشیار، دانشکده حمل‌ونقل، دانشگاه صنعتی اصفهان، *m.tamannaei@cc.iut.ac.ir*

دریافت دست‌نوشته: ۱۳۹۶/۰۱/۰۷؛ پذیرش دست‌نوشته: ۱۳۹۷/۰۷/۱۶

شماره صفحات: ۱ تا ۱۵

شناسه دیجیتال (*DOI*): *10.22044/tuse.2020.5547.1308*

واژگان کلیدی

حمل‌ونقل

حفاری

تونل

تصمیم‌گیری چند معیاره

منطق فازی

چکیده

هدف از پژوهش حاضر، انتخاب سیستم بهینه حمل‌ونقل در پروژه‌های حفاری مکانیزه متروی شهری است. بدین منظور، سه گزینه مورد بررسی قرارگرفته‌اند: سیستم ریلی کامل، سیستم ترکیبی نوارنقاله-ریل و سیستم ترکیبی نوارنقاله-خودروهای چرخ‌لاستیکی. معیارهای مختلف موردبررسی جهت مقایسه گزینه‌های مذکور عبارت‌اند از: معیارهای اقتصادی، ایمنی-زیست‌محیطی، فنی و مدیریت عملیاتی. برای هریک از این معیارها، یک یا چند زیرمعیار در نظر گرفته شدند. به‌منظور بررسی زیرمعیارهای اقتصادی، هزینه‌ها و منافع هریک از گزینه‌ها مورد تحلیل قرار گرفتند. وزن‌دهی به سایر معیارها و زیرمعیارها، با استفاده از روش مصاحبه با تیم کارشناسان خبره انجام شد. نظرات کارشناسان با استفاده از تکنیک تصمیم‌گیری چندمعیاره موسوم به «روش شباهت به گزینه ایده‌آل» مبتنی بر منطق فازی تحلیل گردیده‌اند. نتایج تحلیلی نشان می‌دهند که سیستم ترکیبی نوارنقاله-خودروهای چرخ‌لاستیکی، بالاترین امتیاز را نسبت به دو سیستم دیگر دارد. با استفاده از نتایج پژوهش حاضر، می‌توان هزینه‌های مختلف مالی و غیرمالی جهت حمل‌ونقل حفاری تونل‌های مترو را به حداقل رساند.

۱- پیش‌گفتار

امروزه استفاده از تونل‌سازی به‌منظور گسترش شبکه‌های حمل‌ونقل همچون شبکه‌های بزرگراهی و ریلی بیش از پیش موردتوجه قرار گرفته است. در صورت حفاری تونل با استفاده از دستگاه حفاری تونل (*TBM*) گزینه‌های مختلفی جهت سیستم حمل‌ونقل حین اجرای تونل‌های مکانیزه وجود دارند. سه مورد از مهم‌ترین این گزینه‌ها عبارت‌اند از:

گزینه اول: سیستم ریلی کامل

گزینه دوم: سیستم ترکیبی نوارنقاله و ریل

گزینه سوم: سیستم ترکیبی نوارنقاله و خودروهای چرخ‌لاستیکی.

هریک از گزینه‌های مذکور، بایستی دو وظیفه را تحت پوشش قرار دهند: وظیفه اول، تخلیه نخاله‌های حاصل از حفاری و وظیفه دوم، انتقال قطعات پیش‌ساخته به داخل تونل. در گزینه ریلیِ کامل، هر دو وظیفه توسط یک سیستم ریلی شامل لوکوموتیو و واگن‌های ریلی انجام می‌شود. در گزینه ترکیبی نوارنقاله-ریل، وظیفه اول توسط نوار نقاله صورت می‌پذیرد؛ در حالیکه وظیفه دوم با استفاده از حمل‌ونقل ریلی انجام می‌شود. در گزینه سوم، وظایف مذکور

* اصفهان؛ نجف‌آباد؛ خیابان شریعتی؛ کوچه شهید پورمحمدی؛ کوچه ابوذر؛ پلاک ۱۳؛ شماره تلفن: ۰۹۱۳۹۳۲۸۱۴۵؛ کد پستی: ۸۵۱۴۸۳۶۵۳۱

به ترتیب توسط نوارنقاله و خودروی چرخ‌لاستیکی (*MSV*) انجام می‌شوند. در **شکل ۱**، شمایی از گزینه‌های سه‌گانه مذکور نشان داده‌شده است.

الف) گزینه اول: ریلی کامل(نگارنده)

ب) گزینه دوم: ترکیبی نوارنقاله-ریل(نگارنده)

پ) گزینه سوم: ترکیبی نوارنقاله-خودرو چرخ‌لاستیکی(سایت سازنده)

شکل ۱- شمایی از سه گزینه حمل‌ونقل در حفاری تونل‌های مکانیزه

در گزینه ریلی کامل (گزینه اول)، قابلیت جابجایی افراد، حمل مصالح حفاری شده، مواد مصرفی و تدارکات در هر دو جهت وجود دارد. برخی از مزایای این گزینه عبارت‌اند از: قابلیت حمل مصالح با اندازه‌های مختلف، هزینه سرمایه‌گذاری نسبی پائین. ازجمله معایب این گزینه هزینه عملیاتی نسبی بالا، محدودیت استفاده درشیب‌های زیاد، آلودگی صوتی بالا و نیاز به سیستم تهویه مناسب است.

در صورت استفاده از نوارنقاله برای خارج نمودن مصالح حفاری‌شده (گزینه دوم و گزینه سوم)، استفاده از سیستم حمل‌ونقلی مجزا جهت ورود قطعات پیش‌ساخته اجتناب‌ناپذیر است. برخی از مزایای نوارنقاله عبارت‌اند از: ظرفیت بالای حمل، کاهش هزینه پرسنلی، افزایش ایمنی و باربری پیوسته. بااین‌حال، استفاده از نوار نقاله دارای معایبی ازجمله هزینه سرمایه‌گذاری بالا و نیاز به سیستم حمل‌ونقل مجزا است.

در ادامه به برخی مطالعات قبلی مرتبط اشاره می‌شود.

باپلر حمل‌ونقل مصالح حفاری توسط سه دستگاه تمام مقطع (*EPB* و *TBM*) و دوغابی (*Slurry*) را مورد مقایسه قرار داده است. نتایج نشان می‌دهد که حفاری توسط دستگاه *TBM* و *EPB* قابلیت حمل نخاله‌های حاصل از حفاری به‌وسیله نوارنقاله را دارند *(Bäppler, 2016)*.

ریتر و همکاران در پژوهش خود اقدام به بررسی روش‌های تخلیه مصالح معدنی به‌وسیله سه گزینه ریلی، نوارنقاله و کامیون کردند. تنها معیار مقایسه گزینه‌ها، عدم اختلاط نخاله‌های حاصل از حفاری برای استفاده مجدد است *(Ritter et al., 2012)*.

آواشتی و همکاران در رویکرد ترکیبی مبتنی بر منطق فازی به بررسی کیفیت ترابری شهری توسط روش‌های تصمیم‌گیری و تنظیم پرسش‌نامه اقدام کردند. معیارهای انتخابی عبارت‌اند از: میزان پاسخ‌دهی، قابلیت اطمینان، سودآوری، پشتوانه و همکاری استفاده‌کنندگان است. این تحلیل توسط چهارده زیرمعیار انجام می‌گیرد *(Awasthi et al., 2011a)*.

در پژوهشی دیگر کلیک و همکاران با در نظر گرفتن هشت معیار دسترسی آسان، نزدیکی، اطلاعات، زمان، پرسنل، محیط، آسودگی، و امنیت و سی‌وچهار زیرمعیار مربوطه میزان رضایت مشتریان از حمل‌ونقل را موردبررسی قراردادند *(Celik et al., 2013)*.

ویلیام در تحقیق خود به بررسی سیستم انتقال مواد در داخل تونل پرداخته‌اند. در این پژوهش یکی از مزایای نوارنقاله در مقایسه با دیگر روش‌های مطرح در پژوهش خود

را عدم توقف انتقال مصالح در صورت ضعف کف تونل می‌دانند *(William, 1998)*.

آواشتی و همکاران در پژوهشی دیگر به ارزیابی سیستم‌های حمل‌ونقل پایدار پرداختند. روش‌های ارزیابی عبارت‌اند از: درآمد و هزینه (*CBA*)، تحلیل چرخه عمر (*LCA*)، ارزیابی زیست‌محیطی (*EIA*)، ... و شباهت به گزینه ایده‌آل. مناسب‌ترین روش مقایسه تصمیم‌گیری شباهت به گزینه ایده‌آل و تئوری شناخته شد. برخی از معیارهای ارزیابی عبارت‌اند از: هزینه عملکرد، آلودگی هوا، آلودگی صوتی، مصرف انرژی، محدودیت کاربرد و... است. زیرمعیارهای اصلی عبارت‌اند از امنیت، ایمنی، صرفه‌جویی اقتصادی، ظرفیت و ... *(Awasthi et al., 2011b)*.

بررسی مطالعات قبلی نشان می‌دهد که اکثر مطالعات انجام‌شده در حوزه حفاری مکانیزه تونل‌ها، مربوط به مطالعات مکانیک خاک، مکانیک سنگ، انتخاب دستگاه حفاری، شرایط ایمنی و ... بوده‌اند و تعداد بسیار معدودی از مطالعات پیرامون حمل‌ونقل در حفاری تونل‌ها انجام‌شده‌اند. علیرغم بررسی وسیع مطالعات قبلی انجام‌شده در حوزه حفاری مکانیزه، هیچ مطالعه‌ای که به پرسش اصلی پژوهش حاضر پرداخته باشد، یافت نشد.

عوامل زیادی در تعیین روش حمل‌ونقل مؤثر است که می‌توان به مشخصات فنی و زمین‌شناسی تونل، طول، قطر، شرایط اقتصادی پروژه و ... اشاره کرد. این پژوهش یک تونل با شرایط مشخص را مدنظر قرار داده است و در صورت تغییر شرایط این مطالعات باید بازنگری شود. در این پژوهش، سه گزینه جهت حمل‌ونقل در حفاری تونل‌های مکانیزه شهری موردبررسی قرارگرفته‌اند. بدین منظور، معیار و زیرمعیارهای مختلف تعریف‌شده است و اهمیت نسبی آن‌ها در هریک از گزینه‌ها تعیین‌شده‌اند. درنهایت، گزینه برتر مشخص‌شده است.

۲- معیارهای مؤثر در انتخاب سیستم حمل‌ونقل

در این بخش، معیارهای مورداستفاده برای تعیین سیستم حمل‌ونقل بهینه حفاری تونل ارایه می‌شوند. این معیارها بایستی به نحوی انتخاب شوند که کلیه ملاحظات مربوط به سیستم حمل‌ونقل را پوشش دهند. در پژوهش حاضر، جهت تعیین سیستم بهینه حمل‌ونقل در حفاری مکانیزه تونل‌های مترو شهری، چهار معیار اصلی در نظر گرفته شدند. این معیارها عبارت‌اند از معیار اقتصادی، معیار ایمنی و زیست‌محیطی، معیار فنی و معیار مدیریت عملیاتی. برای هر یک از این معیارها، زیرمعیارهایی تعریف شدند که در ادامه معرفی شوند:

۲-۱- معیار اقتصادی

یکی از مهم‌ترین معیارها برای ارزیابی و مقایسه گزینه‌های مختلف در حمل‌ونقل تونل، معیار اقتصادی است. زیرمعیارهای درنظرگرفته‌شده برای این معیار عبارت‌اند از: سرمایه اولیه، هزینه تعمیرونگهداری و سودآوری. برای همه زیرمعیارهای مذکور، قابلیت محاسبه کمّی به‌تفکیک گزینه‌های مختلف وجود دارد.

۲-۲- معیار ایمنی-زیست‌محیطی

ایمنی در حمل‌ونقل تونل‌های مکانیزه از اهمیت بالایی برخوردار است. پروژه‌های زیرزمینی عموماً پروژه‌های پیچیده با عوامل تأثیرگذار زیادی هستند. در مراحل انتخاب سیستم در نظر گرفتن عوامل تأثیرگذار بر ایمنی پرسنل حفاری از اهمیت بالایی برخوردار است. همچنین میزان تولید آلاینده‌های هوا و آلاینده‌های صوتی، مطلوبیت گزینه‌های مختلف حمل‌ونقل را می‌تواند دستخوش تغییر قرار دهد. ریسک عملیاتی، آلودگی هوا و آلودگی صوتی، زیرمعیارهای درنظرگرفته‌شده برای این معیار ایمنی-زیست‌محیطی هستند.

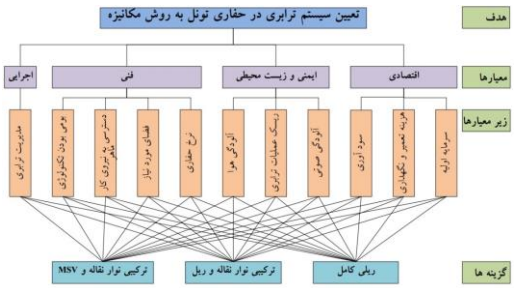
۲-۳- معیار فنی

توجه به مباحث فنی باعث پیشرفت سریع و باکیفیت حفاری تونل می‌شود. زیرمعیارهای مربوط به معیار فنی عبارت‌اند از: نرخ حفاری، فضای مورد نیاز، دسترسی به نیروی کار و بومی بودن تکنولوژی.

۲-۴- معیار مدیریت عملیاتی

منظور از مدیریت عملیاتی، هماهنگی اجزای مختلف سیستم، زمان‌های ورود و خروج وسایل نقلیه، کنترل حمل‌ونقل در طول مسیر و... است. هریک از زیرمعیارهای مذکور، می‌تواند به‌عنوان یک پارامتر مثبت یا منفی در نظر گرفته شود. در این مقاله، زیرمعیار مثبت، آن زیرمعیاری است که افزایش مقدار آن، مطلوبیت بالاتری دارد. زیرمعیارهای مثبت در پژوهش حاضر عبارت‌اند از:

«سودآوری»، «نرخ حفاری»، «دسترسی به نیروی کار ماهر»، «بومی بودن تکنولوژی» و «مدیریت عملیاتی». سایر زیرمعیارها به‌عنوان زیرمعیارهای منفی محسوب می‌شوند. ساختار سلسله مراتبی فرآیند تصمیم‌گیری پیرامون انتخاب سیستم بهینه حمل‌ونقل در حفاری مترو در **شکل ۲**، نشان داده است.



شکل ۲- ساختار سلسله مراتبی فرآیند تصمیم‌گیری

۳- متدولوژی پژوهش

در یک فرآیند تصمیم‌گیری چندمعیاره، وزن‌های مربوط به معیارها، منعکس‌کننده اهمیت آنها در رسیدن به هدف‌اند. از بین معیارهای موردنظر در پژوهش حاضر، امکان محاسبه کمّی معیار اقتصادی برای هریک از گزینه‌های سه‌گانه موردبررسی (سیستم ریلی کامل، سیستم ترکیبی نوارنقاله-ریل و سیستم ترکیبی نوارنقاله-خودروهای چرخ‌لاستیکی) وجود دارد. ازاین‌رو، کلیه زیرمعیارهای اقتصادی به تفکیک هریک از گزینه‌ها تحلیل‌شده‌اند و وزن نسبی آنها محاسبه شده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود پارامترهای زیادی در انتخاب روش حمل‌ونقل مؤثر است.

از جمله مهم‌ترین این پارامترها می‌توان به مواردی مانند طول و قطر تونل اشاره کرد. قطر طول عامل تعیین‌کننده در خصوص میزان فضای در دسترس جهت انجام فعالیت‌های تونل‌سازی است. به عنوان مثال در تونل-های با سطح مقطع کوچک امکان به کارگیری همزمان سیستم ریلی و نوار نقاله وجود ندارد. همچنین سیستم ریلی دوخطه نیازمند حداقل فضا جهت اجرایی شدن دارد. از طرفی دیگر طول تونل نیز از عوامل کلیدی در تعیین سیستم حمل‌ونقل است.

با افزایش طول تونل تعداد سوئیچ‌های مورد نیاز در مسیر افزایش می‌یابند. همچنین افزایش طول تونل باعث افزایش زمان تخلیه مصالح، نیاز به تعداد لوکوموتیو بیشتر و موارد مشابه دیگری می‌شود. به‌عبارتی‌دیگر این دو عامل از جمله فاکتورهای کلیدی در انتخاب سیستم ترابری تونل‌های مکانیزه هستند. علی‌رغم این موضوع، با توجه به اینکه در این پژوهش یک تونل با شرایط خاص مشخص مدنظر قرار گرفته است، از معیار طول و قطر تونل صرف‌نظر شده است. محاسبات اقتصادی بر اساس مطالعه موردی یک پروژه حفاری تونل مکانیزه در شهر اصفهان، ایران انجام شد.

تونل مکانیزه مورد بررسی در این پژوهش دارای مقطع دایره‌ای به قطر ۶/۸ متر و با طول ۲۰ کیلومتر است. برای محاسبه سایر معیارها، امکان محاسبات به تفکیک گزینه‌های مختلف -به دلیل نبود اطلاعات کمّی- وجود نداشت. ازاین‌رو، با هدف بررسی و وزن‌دهی سایر معیارها و زیرمعیارهای مربوط به آن‌ها، از روش مصاحبه با تیم کارشناسان خبره استفاده شد.

بدین منظور، پرسش‌نامه‌ای تهیه شد و در اختیار افراد خبره قرار گرفت. در مجموع، ۳۰ نفر از کارشناسان خبره در موضوع حفاری مکانیزه تونل در ۷ کارگاه مختلف واقع در شهرهای بزرگ ایران مورد پرسش قرار گرفتند. پرسشنامه بر اساس یکی از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره موسوم به «روش تاپسیس فازی» طراحی شد.

اساس این روش بر این نکته استوار است که گزینه انتخابی، باید کم‌ترین فاصله را با ایده‌آل مثبت (بهترین حالت ممکن) و بیشترین فاصله را با ایده‌آل منفی (بدترین حالت ممکن) داشته باشد *(Hwang and Yoon, 1981; Ataei, 2010)*.

در پرسشنامه، از نماد کیفی «وزن‌های کلامی» جهت تعیین میزان اهمیت معیارهای تصمیم‌گیری استفاده‌شده است. این وزن‌ها در **جدول ۱**، نشان داده شده است.

جدول ۱- وزن‌های کلامی مورداستفاده در فرآیند تصمیم‌گیری

وزن کلامی	خیلی کم	کم	متوسط	زیاد	خیلی زیاد
نماد	*VP*	*P*	*M*	*G*	*VG*

هریک از وزن‌های کلامی موردنظر دارای یک مجموعه معادل فازی است. یک عدد فازی ممکن است به‌صورت

مثلثی یا ذوزنقه‌ای بیان شود. در حالت مثلثی (حالت مورد نظر در محاسبات پژوهش حاضر) عدد مربوطه به‌صورت $\tilde{M}=(l,m,u)$ نمایش داده می‌شود که پارامترهای l، m و u به ترتیب بیانگر کمترین مقدار ممکن، محتمل‌ترین مقدار و بیشترین مقدار ممکن برای عدد موردنظرند. در مجموعه‌های **جدول ۲**، معادل فازی وزن‌های کلامی ارایه شده‌اند.

جدول ۲- عدد معادل فازی هریک از وزن‌های کلامی مورداستفاده

وزن کلامی	خیلی کم	کم	متوسط	زیاد	خیلی زیاد
عدد معادل فازی	(۰/۰,۰/۱ ,۰/۳)	(۰/۱,۰/۳ ,۰/۵)	(۰/۳,۰/۵ ,۰/۷)	(۰/۵,۰/۷ ,۰/۹)	(۰/۷,۰/۹ ,۱)

به‌منظور تصمیم‌گیری چند شاخصه با استفاده از روش شباهت به گزینه ایده‌آل بایستی گام‌های زیر به‌صورت مرحله‌به‌مرحله انجام گیرند: در ابتدا با توجه به تعداد معیارها، گزینه‌ها و ارزیابی همه گزینه‌ها برای معیارهای مختلف، ماتریس تصمیم تشکیل می‌شود. در گزاره **(۱)** نمونه‌ای از ماتریس تصمیم نشان داده‌شده است.

$$X=\begin{bmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1n} \\ \vdots & \cdots & \cdots \\ x_{m1} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix} \quad (۱)$$

که در آن x_{ij} عدد فازی مثلثی مربوط به زیرمعیار i ام و گزینه jام است. هریک از زیرمعیارها دارای مقیاس ویژه خود است. به‌منظور فراهم کردن امکان مقایسه زیرمعیارها، بایستی عمل بی مقیاس سازی زیرمعیارها انجام شود. نحوه بی‌مقیاس کردن اعداد ماتریس تصمیم، بسته به «مثبت» یا «منفی» بودن زیرمعیار مربوطه متفاوت است. برای بی مقیاس نمودن یک زیرمعیار مثبت، هریک از اعداد ماتریس تصمیم بر ماکزیمم اعداد فازی مربوط به همان زیرمعیار تقسیم شود (گزاره **(۲)**):

$$r_{ij}=\frac{x_{ij}}{Max\{x_{ij}\ \forall j\in J\}} \quad (۲)$$

که در آن J مجموعه گزینه‌ها و r_{ij} عدد فازی مثلثی بی‌مقیاس‌شده مربوط به زیرمعیار مثبت i ام و گزینه j ام است. برای بی‌مقیاس کردن یک زیرمعیار منفی، هریک از اعداد ماتریس تصمیم بر مینیمم اعداد فازی مربوط به همان زیرمعیار تقسیم می‌شود (گزاره **(۳)**):

$$r_{ij}=\frac{x_{ij}}{Min\{x_{ij}\ \forall j\in J\}} \quad (۳)$$

ماتریس تصمیمِ بی‌مقیاس‌شده وزن‌دار از ضربِ ماتریس تصمیمِ بی‌مقیاس‌شده در بردار وزن معیارها به‌دست می‌آید:

$$\begin{matrix} v_{ij}=w_j r_{ij} & j \\ =1,2,\dots,2 & i \\ =1,2,\dots,m & \end{matrix} \quad (۴)$$

که در آن v_{ij} عدد فازی مثلثی بی‌مقیاس‌شده وزن‌دار مربوط به زیرمعیار i ام و گزینه j ام است. با استفاده از مقادیر v_{ij}، دو مجموعه ایده‌آل مثبت (A^+) و ایده‌آل منفی (A^-) تعیین می‌شوند. متناظر با زیرمعیار i ام، عضو v_i^+ در مجموعه ایده‌آل مثبت و عضو v_i^- در مجموعه ایده‌آل منفی وجود دارد. v_i^+ عبارت است از بزرگ‌ترین مقدار v_{ij} برای زیرمعیار مثبت i ام و کوچک‌ترین مقدار v_{ij} برای زیرمعیار منفی i ام $(\forall j\in J)$. درحالی‌که v_i^- عبارت است از کوچک‌ترین مقدار v_{ij} برای زیرمعیار مثبت i ام و بزرگ‌ترین مقدار v_{ij} برای زیرمعیار منفی i ام $(\forall j\in J)$

$$A^+=\{(\max v_{ij}|j\in J),(\min v_{ij}|j\in J')|i=1,2,..,m\}$$
$$A^+=\{v_1^+,v_2^+,\cdots,v_j^+,\cdots,v_n^+\} \quad (۵)$$

$$A^-=\{(\min v_{ij}|j\in J),(\max v_{ij}|j\in J')|i=1,2,..,m\}$$
$$A^-=\{v_1^-,v_2^-,\cdots,v_j^-,\cdots,v_n^-\} \quad (۶)$$

Where

$$J=\{i=1,2,..,n|j\ \text{associated with Positive criteria}\}$$
$$J'=\{i=1,2,..,n|j\ \text{associated with Negative criteria}\}$$

برای هر گزینه، فاصله اقلیدسی از ایده‌آل مثبت (S_j^+) و فاصله اقلیدسی از ایده‌آل منفی (S_j^-) بر اساس گزاره **(۷)** و گزاره **(۸)** محاسبه می‌شود:

$$S_j^+ = \sqrt{\sum_{i=1}^{n}(v_{ij} - v_i^+)^2} \quad (۷)$$

$$S_j^- = \sqrt{\sum_{i=1}^{n}(v_{ij} - v_i^-)^2} \quad (۸)$$

شاخص شباهت برای هریک از گزینه‌ها از گزاره **(۹)** محاسبه می‌شود. هرچه مقدار این شاخص برای یک گزینه بیشتر باشد، آن گزینه از مطلوبیت و اولویت بالاتری برخوردار است.

$$C_j^+ = \frac{S_j^-}{S_j^+ + S_j^-} \quad (۹)$$

۴- ارزیابی متدولوژی پیشنهادی

در این بخش، نتایج ارزیابی متدولوژی پیشنهادی جهت تعیین سیستم بهینه حمل‌ونقل در حفاری تونل‌های شهری ارایه می‌گردد. بدین منظور، معیارهای چهارگانه همراه با زیرمعیارهای آن‌ها موردبررسی و تحلیل قرار گرفتند. با استفاده از نظرات متخصصین و صاحب‌نظران، وزن تأثیر معیارها و زیرمعیارها مشخص‌شده است. این وزن‌ها در **جدول ۳**، ارایه شده‌اند.

مطابق با **جدول ۳**، مشاهده شود معیارهای «اقتصادی» و «فنی» به ترتیب با ۲۷ و ۲۶ درصد دارای بیشترین اهمیت هستند. همچنین معیار «مدیریت عملیاتی» با ۲۴ درصد و معیار «ایمنی-زیست‌محیطی» با ۲۳ درصد در رتبه‌های بعدی قرار دارند. نتایج تحلیل نظرات خبرگان نشان می‌دهد از بین تمام زیرمعیارهای تعریف‌شده، «سرمایه اولیه» و «بومی بودن تکنولوژی» به ترتیب دارای بیشترین و کمترین وزن در فرآیند تصمیم‌گیری هستند.

همان‌گونه که در بخش ۳ ذکر شد، محاسبات موردنیاز جهت وزن‌دهی به زیرمعیارهای اقتصادی، به تفکیک هریک از گزینه‌ها قابل انجام هستند. این محاسبات با آنالیز اقتصادی کلیه زیر آیتم‌های مربوطه، بر اساس فهرست‌بهای راه سال ۲۰۱۵ ایران انجام‌شده‌اند.

جدول ۳- وزن‌های نهایی تعیین‌شده از جانب افراد خبره

	شرح	وزن معیارهای مختلف
معیارها	اقتصادی	۰/۲۷
	ایمنی و زیست‌محیطی	۰/۲۳
	فنی	۰/۲۶
	اجرایی	۰/۲۴
زیرمعیارهای اقتصادی	سرمایه اولیه	۰/۰۹
	هزینه تعمیر ونگهداری	۰/۰۹
	سودآوری	۰/۰۸
زیرمعیارهای ایمنی و زیست‌محیطی	آلودگی صوتی	۰/۰۶
	ریسک عملیات ترابری	۰/۰۹
	آلودگی هوا	۰/۰۸
زیرمعیارهای فنی	نرخ حفاری	۰/۰۸
	فضای موردنیاز	۰/۰۷
	دسترسی به نیروی کار ماهر	۰/۰۶
	بومی بودن تکنولوژی	۰/۰۵
زیر معیار اجرایی	مدیریت ترابری	۰/۲۴

در **جدول ۴**، محاسبات مربوط به زیرمعیار «سرمایه اولیه» به تفکیک گزینه‌های حمل‌ونقل ارایه‌شده‌اند. در **جدول ۵** و **جدول ۶** محاسبات مربوط به زیرمعیارهای «هزینه تعمیرونگهداری» و «سودآوری» به ترتیب ارایه شده‌اند.

جدول ۴-میزان سرمایه اولیه موردنیاز در گزینه‌های حمل‌ونقل

شماره گزینه‌ها	شرح گزینه‌ها	واحد	مقدار
۱	ریلی کامل	دلار	۲۶۸۷۳۰۰۰
۲	ترکیبی نوارنقاله و ریل	دلار	۲۹۷۴۶۰۰۰
۳	ترکیبی نوارنقاله و خودروهای چرخ لاستیکی	دلار	۸۱۶۹۰۰۰

جدول ۵- هزینه تعمیرونگهداری در گزینه‌های حمل‌ونقل

شماره گزینه‌ها	شرح گزینه‌ها	واحد	مقدار
۱	ریلی کامل	دلار	۵۳۵۰۰۰
۲	ترکیبی نوارنقاله و ریل	دلار	۱۱۲۷۰۰۰
۳	ترکیبی نوارنقاله و خودروهای چرخ‌لاستیکی	دلار	۱۱۲۷۰۰۰

محاسبات انجام‌شده در جدول‌های ۴ تا ۶، با استفاده از نمادهای ارایه‌شده در **جدول ۱**، به وزن‌های کلامی تبدیل شدند. این وزن‌ها در **جدول ۷**، به تفکیک هریک از گزینه‌های حمل‌ونقل نشان داده شده است. برای تعیین نمادهای کلامی مربوط به سایر زیرمعیارها (غیر از زیرمعیارهای اقتصادی) از نظرات خبرگان استفاده گردید. کلیه نمادهای کلامی با استفاده از **جدول ۲**، به عدد معادل فازی تبدیل شدند. با استفاده از این اعداد معادل، ماتریس تصمیم فازی تشکیل داده شد. این ماتریس در **جدول ۸**، ارایه شده است.

جدول ۶- میزان سودآوری در گزینه‌های حمل‌ونقل

شماره گزینه‌ها	شرح گزینه‌ها	واحد	مقدار
۱	ریلی کامل	دلار	۶۲۶۰۳۰۰۰
۲	ترکیبی نوارنقاله و ریل	دلار	۶۸۲۱۷۰۰۰
۳	ترکیبی نوارنقاله و خودروهای چرخ‌لاستیکی	دلار	۶۸۲۱۷۰۰۰

جدول ۷- وزن‌های کلامی مربوط به زیرمعیارهای اقتصادی

شماره گزینه‌ها	شرح گزینه‌ها	سرمایه اولیه	هزینه تعمیر و نگهداری	سودآوری
۱	ریلی کامل	*M*	*P*	*M*
۲	ترکیبی نوارنقاله و ریل	*P*	*M*	*G*
۳	ترکیبی نوارنقاله و خودروهای چرخ‌لاستیکی	*G*	*M*	*G*

جدول ۸-ماتریس تصمیم فازی

شماره گزینه‌ها	شرح گزینه‌ها	سرمایه اولیه	هزینه تعمیر و نگهداری	سودآوری	آلودگی صوتی	ریسک عملیات ترابری	آلودگی هوا	نرخ حفاری	فضای موردنیاز	دسترسی به نیروی کار ماهر	بومی بودن تکنولوژی	اجرایی
۱	ریلی کامل	۰/۳	۰/۱	۰/۳	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۳	۰/۳	۰/۴	۰/۳	۰/۲
		۰/۵	۰/۳	۰/۵	۰/۳	۰/۳	۰,۲	۰/۵	۰/۵	۰/۶	۰/۵	۰/۴
		۰/۷	۰/۵	۰/۷	۰/۵	۰/۵	۰/۴	۰/۷	۰/۷	۰/۸	۰/۶	۰/۶
۲	ترکیبی نوارنقاله و ریل	۰/۱	۰/۳	۰/۵	۰/۳	۰/۳	۰/۲	۰/۶	۰/۳	۰/۴	۰/۲	۰/۴
		۰/۳	۰/۵	۰/۷	۰/۵	۰/۵	۰/۴	۰/۸	۰/۵	۰/۶	۰/۴	۰/۶
		۰/۵	۰/۷	۰/۹	۰/۷	۰/۷	۰/۶	۰/۹	۰/۷	۰/۸	۰/۶	۰/۸
۳	ترکیبی نوارنقاله و خودروهای چرخ‌لاستیکی	۰/۵	۰/۳	۰/۵	۰/۴	۰/۴	۰/۴	۰/۶	۰/۳	۰/۴	۰/۲	۰/۳
		۰/۷	۰/۵	۰/۷	۰/۶	۰/۶	۰/۵	۰/۸	۰/۵	۰/۶	۰/۴	۰/۵
		۰/۹	۰/۷	۰/۹	۰/۸	۰/۸	۰/۷	۱	۰/۷	۰/۸	۰/۶	۰/۷

در **جدول ۸**، اعداد مربوط به زیرمعیارهای مختلف دارای مقیاس‌های متفاوتی هستند. با بی‌مقیاس کردن اعداد ماتریس تصمیم برای هریک از زیرمعیارهای «مثبت» و «منفی»، ماتریس تصمیم فازی بی‌مقیاس حاصل شود. در مرحله بعد، درایه‌های متناظر با هر زیرمعیار مربوط به ماتریس بی‌مقیاس، در وزن تأثیر آن زیرمعیار – ارایه‌شده در **جدول ۳**- ضرب و ماتریس تصمیم بی‌مقیاس وزن‌دار تشکیل می‌شود. این ماتریس در **جدول ۹** ارایه شده است.

جدول ۹- ماتریس تصمیم فازی بی مقیاس وزن‌دار

شماره گزینه‌ها	شرح گزینه‌ها	سرمایه اولیه	هزینه تعمیر و نگهداری	سودآوری	آلودگی صوتی	ریسک عملیات ترابری	آلودگی هوا	نرخ حفاری	فضای موردنیاز	دسترسی به نیروی کار ماهر	بومی بودن تکنولوژی	اجرایی
		۰/۰۱	۰/۰۲	۰/۰۳	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۱	۰/۰۲	۰/۰۳	۰/۰۳	۰/۰۲	۰/۰۸
۱	ریلی کامل	۰/۰۲	۰/۰۳	۰/۰۵	۰/۰۳	۰/۰۴	۰/۰۳	۰/۰۴	۰/۰۴	۰/۰۵	۰/۰۴	۰/۱۲
		۰/۰۳	۰/۰۹	۰/۰۷	۰/۰۶	۰/۰۹	۰/۰۸	۰/۰۶	۰/۰۶	۰/۰۶	۰/۰۵	۰/۲۴
		۰/۰۲	۰/۰۱	۰/۰۵	۰/۰۱	۰/۰۲	۰/۰۱	۰/۰۵	۰/۰۳	۰/۰۳	۰/۰۲	۰/۰۶
۲	ترکیبی نوارنقاله و ریل	۰/۰۳	۰/۰۲	۰/۰۷	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۱	۰/۰۶	۰/۰۴	۰/۰۴	۰/۰۴	۰/۰۸
		۰/۰۹	۰/۰۳	۰/۰۸	۰/۰۳	۰/۰۴	۰/۰۲	۰/۰۸	۰/۰۳	۰/۰۶	۰/۰۵	۰/۱۲
		۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۵	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۵	۰/۰۳	۰/۰۳	۰/۰۲	۰/۰۶
۳	ترکیبی نوارنقاله و خودروهای چرخ‌لاستیکی	۰/۰۱	۰/۰۲	۰/۰۷	۰/۰۱	۰/۰۲	۰/۰۱	۰/۰۷	۰/۰۴	۰/۰۵	۰/۰۴	۰/۰۸
		۰/۰۲	۰/۰۳	۰/۰۸	۰/۰۲	۰/۰۳	۰/۰۲	۰/۰۸	۰/۰۷	۰/۰۶	۰/۰۵	۰/۱۳

پس از مشخص شدن ماتریس بی‌مقیاس وزن‌دار، ایده‌آل مثبت (A^+) و ایده‌آل منفی (A^-) برای هریک از زیرمعیارها مشخص می‌شوند. **جدول ۱۰**، مقادیر مربوطه را نشان می‌دهد. فاصله از حل ایده‌آل (S^+) و ضد ایده‌آل (S^-) برای هریک از گزینه‌ها در **جدول ۱۱**، ذکرشده است.

در گام آخر به‌منظور انتخاب گزینه بهینه، شاخص شباهت محاسبه شد و رتبه‌بندی گزینه‌ها بر اساس این شاخص صورت پذیرفت. بر این اساس، گزینه‌ای که دارای بیشترین شاخص شباهت است در رتبه اول قرار گرفته است و گزینه‌ای که دارای کمترین شاخص شباهت است در رتبه آخر قرار گرفته است. همان‌گونه که از **جدول ۱۲**، مشخص‌شده است، گزینه شماره ۳ (سیستم ترکیبی نوارنقاله و خودروهای چرخ‌لاستیکی) دارای بیشترین شاخص شباهت است و به‌عنوان سیستم بهینه در نظر گرفته می‌شود. در **شکل ۳**، اولویت‌بندی گزینه‌ها با توجه به شاخص شباهت گزینه‌های تصمیم مشخص شده است.

جدول ۱۰- حل ایده‌آل و ضد ایده‌آل برای هرکدام از معیارها

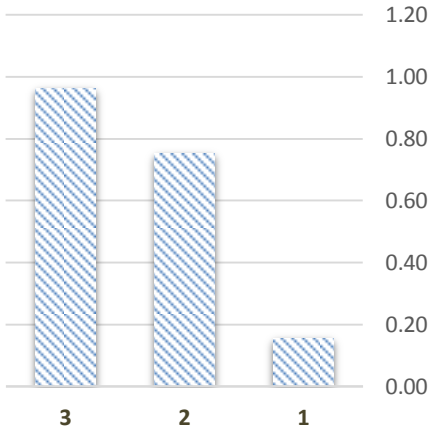
راه‌حل‌ایده‌آل / زیر معیار	A^+	A^-
سرمایه اولیه	(۰/۰۱,۰/۰۱ ,۰/۰۲)	(۰/۰۲,۰/۰۳,۰/۱)
هزینه تعمیر و نگهداری	(۰/۰۱,۰/۰۱ ,۰/۰۳)	(۰/۰۲,۰/۰۳,۰/۱)
سودآوری	(۰/۰۵,۰/۰۷ ,۰/۰۸)	(۰/۰۲,۰/۰۵ ,۰/۰۷)
آلودگی صوتی	(۰/۰۱,۰/۰۱ ,۰/۰۲)	(۰/۰۲,۰/۰۳ ,۰/۰۶)
ریسک عملیات ترابری	(۰/۰۱,۰/۰۱ ,۰/۰۳)	(۰/۰۲,۰/۰۴ ,۰/۰۹)
آلودگی هوا	(۰/۰۱,۰/۰۱ ,۰/۰۲)	(۰/۰۱,۰/۰۳ ,۰/۰۸)
نرخ حفاری	(۰/۰۵,۰/۰۷ ,۰/۰۸)	(۰/۰۲,۰/۰۴ ,۰/۰۶)
فضای موردنیاز	(۰/۰۳,۰/۰۴ ,۰/۰۶)	(۰/۰۳,۰/۰۴ ,۰/۰۷)
دسترسی به نیروی کار ماهر	(۰/۰۳,۰/۰۵ ,۰/۰۶)	(۰/۰۳,۰/۰۴ ,۰/۰۶)
بومی بودن تکنولوژی	(۰/۰۲,۰/۰۴ ,۰/۰۵)	(۰/۰۲,۰/۰۴ ,۰/۰۵)
اجرایی	(۰/۰۶,۰/۰۸ ,۰/۱۲)	(۰/۰۸,۰/۱۲ ,۰/۲۴)

جدول ۱۱- فاصله از حل ایده‌آل و ضد ایده‌آل گزینه‌ها

شماره گزینه	شرح گزینه‌ها	S^+	S^-
۱	ریلی کامل	۰/۲۶	۰/۰۵
۲	ترکیبی نوارنقاله و ریل	۰/۰۸	۰/۲۳
۳	ترکیبی نوارنقاله و خودروهای چرخ لاستیکی	۰/۰۱	۰/۳

جدول ۱۲- شاخص شباهت گزینه‌ها

شماره گزینه	شرح گزینه‌ها	Ci^+	رتبه‌بندی گزینه‌ها
۱	ریلی کامل	۰/۱۵	*III*
۲	ترکیبی نوارنقاله و ریل	۰/۷۵	*II*
۳	ترکیبی نوارنقاله و خودروهای چرخ‌لاستیکی	۰/۹۶	*I*



شکل ۳-اولویت گزینه‌های مختلف جهت حمل‌ونقل در حفاری تونل‌های شهری

۵- اعتبارسنجی

نظرات ارایه‌شده توسط کارشناسان خبره، نیازمند اعتبارسنجی و کنترل صحت است. از طرف دیگر، از بین معیارهای موردبررسی در پژوهش حاضر، فقط معیار

اقتصادی قابلیت محاسبه و کمی کردن را داراست. ازاین‌رو، جهت اعتبارسنجی، نتایج محاسبات دقیق و کمّی مربوط به میزان هریک از زیرمعیارهای اقتصادی، با نظرات کارشناسان در مورد این زیرمعیارها مقایسه شوند. برای انجام این کار، متدولوژی پیشنهادی برای دو ماتریس تصمیم مختلف پیاده‌سازی می‌شود:

الف) ماتریس تصمیم اولیه: در این ماتریس، مقادیر متناظر با زیرمعیارهای اقتصادی، از نتایج محاسبات دقیق و واقعی با احتساب ریزمتره مربوط به گزینه‌های مختلف حاصل‌شده است.

ب) ماتریس تصمیم ثانویه: در این ماتریس، مقادیر متناظر با زیرمعیارهای اقتصادی، از نظرات افراد خبره حاصل‌شده است.

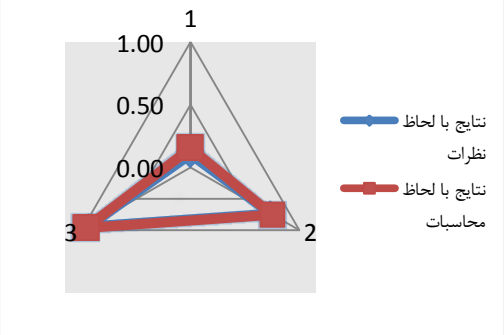
نتایج شاخص شباهت گزینه‌ها برای هر دو ماتریس مذکور در **جدول ۱۳**، ارایه‌شده‌اند.

جدول ۱۳-شاخص شباهت گزینه‌ها با نظر افراد خبره

شماره گزینه‌ها	شرح گزینه‌ها	ماتریس اولیه		ماتریس ثانویه	
		Ci^+	رتبه‌بندی گزینه‌ها	Ci^+	رتبه‌بندی گزینه‌ها
۱	ریلی کامل	۰/۱۵	*III*	۰/۱	*III*
۲	ترکیبی نوارنقاله و ریل	۰/۷۵	*II*	۰/۷۴	*II*
۳	ترکیبی نوارنقاله و خودروهای چرخ‌لاستیکی	۰/۹۶	*I*	۰/۹۴	*I*

نتایج حاصله از **جدول ۱۱**، بیانگر آن است که نظرات افراد خبره مطابقت زیادی با واقعیت دارد. در **شکل ۴**، میزان بالای نزدیکی نظرات کارشناسان با واقعیت نشان داده‌شده است.

روش‌های دیگری نیز برای اعتبارسنجی وجود دارد. به عنوان مثال می‌تواند تمام سطوح نظرات کارشناسان را یک پله افزایش و یا کاهش داده شود. پس از تکرار فرآیند کامل و مقایسه نتایج با نتایج اولیه در صورت همگرا بودن نشان از صحت محاسبات دارد.



شکل ۴- مقایسه بین نتایج تصمیم‌گیری با لحاظ محاسبات و نظرات

۶- نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، سعی شد سیستم بهینه جهت حمل‌ونقل در پروژه‌های حفاری مکانیزه متروی شهری انتخاب شود. بدین منظور، سه گزینه موردبررسی قرارگرفته‌اند: سیستم ریلی کامل، سیستم ترکیبی نوارنقاله-ریل و سیستم ترکیبی نوارنقاله-خودروهای چرخ‌لاستیکی. معیارهای مختلف موردبررسی جهت مقایسه گزینه‌های مذکور عبارت‌اند از معیارهای اقتصادی، ایمنی-زیست‌محیطی، فنی و مدیریت عملیاتی. برای هریک از این معیارها، یک یا چند زیرمعیار در نظر گرفته شدند. به‌منظور بررسی زیرمعیارهای اقتصادی، هزینه‌ها و منافع هریک از گزینه‌ها مورد تحلیل قرار گرفتند. وزن‌دهی به سایر معیارها و زیرمعیارها، با استفاده از روش مصاحبه با تیم کارشناسان خبره انجام شد. در نظرسنجی صورت گرفته از افراد خبره از میان معیارها، معیار اقتصادی و فنی به ترتیب با ۲۷ و ۲۶ درصد بالاترین جایگاه و از میان زیر معیارها، زیر معیارهای سرمایه اولیه، هزینه تعمیر و نگهداری و ریسک عملیات ترابری بالاترین درصد اهمیت را دارا بوده است. نظرات کارشناسان با استفاده از تکنیک تصمیم‌گیری چندمعیاره موسوم به «روش شباهت به گزینه ایده‌آل» مبتنی بر منطق فازی تحلیل شدند. نتایج تحلیلی نشان می‌دهند که سیستم ترکیبی نوارنقاله-خودروهای چرخ‌لاستیکی، بالاترین امتیاز (شاخص شباهت ۹۶) را نسبت به دو سیستم دیگر دارد. اعتبارسنجی این آنالیز با جایگزینی نظرات افراد خبره در مورد معیار اقتصادی و پردازش مجدد

فرآیند موردبررسی قرار گرفته است. مقایسه نتایج حاصله بیانگر آن است که نظرات افراد خبره مطابقت زیادی با واقعیت دارد.

۶- مراجع

Taheri moghadar M. (2001). Assesment of the Semi-continuous transportation system in marl mine of Kerman sement co. First Iranian open pit mining, Kerman.

Taheri moghadar M. (2004). Econemical Decision between Truck transportation and mobile crusher in open pit mining. Iranian Sement samposium. Open pit mining, Kerman.

Taheri moghadar M. (2012). Conveyer Belt (Structure, Design and calculations). Kerman University Publication.

Ataei M. (2010). Fuzzy Multi Criteria Decision making, First Edition. Shahrood University Publication.

Ataei M. (2010). Multi Criteria Decision making, First Edition. Shahrood University Publication.

Mirmohamadsadeghi S J. (2008). Principles and foundations of analysis and design of railway lines. Iran University of Science and Technology Publication.

Ambrasaite I, Barfod MB, Salling KB. (2011). MCDA and Risk Analysis in Transport Infrastructure Appraisals: the Rail Baltica Case. Procedia Social and Behavioral Sciences 20. pp. 944–953

Amund B. (1998). Hard Rock Tunnel Boring. Design and Construction. NTNU Trondheim.

Awasthi A, Chauhan S, Omrani H, Panahi A. (2011). A Hybrid Approach based on Servqual and Fuzzy TOPSIS for Evaluating Transportation Service Quality. Computers & Industrial Engineering 61. PP 637-646.

Awasthi A, Satyaveer S, Chauhan b, Hichem Omrani. (2011). Application of Fuzzy TOPSIS in Evaluating Sustainable Transportation Systems. Expert Systems with Applications 38. pp. 12270–12280

Azadeh A, Osanloo M, Ataei M. (2010). A new approach to mining method selection based on modifying the Nicholas technique. Journal of Applied Soft Computing, volume 10, PP.1040-1061

Bäppler K. (2016). New developments in TBM tunnelling for changing grounds. Tunnel. Underground. Space Technology .

Bitarafan MR, Ataei M. (2004). Mining method selection by multiple criteria decision making tools. The South African Institute of Mining and Metallurgy. PP. 493-498

Boshkov SH, Wright F. (1973). Basic parametric criteria in the selection. Design and development of underground mining systems. In: A.B. Cummins. I.A. Given (Eds), SME Mining Engineering Handbook. Volume 1. SME-AIME. New York. PP. 12.2-12.13

Celik E, Bilisik ON, Erdogan M, Gumus AT, Baracli H. (2013). An Integrated Novel Iinterval Type-2 Fuzzy MCDM Method to Improve Customer Satisfaction in Public Transportation for Istanbul. Transportation Research Part E 58. PP 28-51.

Forman E, Peniwati K. (1998). Aggregating Individual Judgments and Priorities with the Anaytic Hierarchy Process. European Journal of Operational Research 108. PP 165-169

Hwang CL, Yoon K. (1981). Multiplie Atributes Decision Making Methods and Applications. Springer. Berlin .

Hinsley F. Subsurface ventilation and environmental Engineering.

Hustrulid W, Bullock Rl. (2001). Planning the Underground Mine on the Basis of Mining Method. Society of Mining. Metallurgy and Exploration Inc

Liang GS, Wang MJ. (1994). Personnel Selection Using Fuzzy MCDM Algorithm. European Journal of Operational Research. 78

Miller TL, Pakalnis R, Poulin R. (1995). UBC Mining method selection. Mine planing and equipment selection Symposium (MPES). Singal ed. Balkma. Roterdam

Opricovice S, Tzeng GH. (2004). The Compromize Solution by MCDM Methods: A Compromize Analyze of VIKOR and TOPSIS. European Journal of Operational Research 156.

OSHA 19100. Standard of occupational noise exposure.

Orr SA. (1992). Hard-rock mining: method selection criteria. SME Mining Engineering Handbook. Chapter 21. pp. 2090-2106.

Ritter S, Einstein HH, Galler R. (2012). Planning the handling of tunnel excavation material – A process of decision making under uncertaint.

WALKER SC. (1988). Advances in Mining Science and Technology. Mine Winding and Transport. ELSEVIER

Wang TCh, Chang TH. (2007). Application of TOPSIS in evaluating initial training aircraft under a fuzzy environment. Expert Systems with Applications. Volume 33. PP. 870–880

William M, Roberts. (1998). MATERIALS HANDLING SYSTEM. US. Patent .

Yang T, Hung CC. (2007). Multiple-Attribute Decision Making Methods for Plant Layout Design Problem. Robot Compute-Integr Manuf 23. PP 126-137.

Zare S, Bruland A, Rostami J. (2016). Evaluating D&B and TBM tunnelling using NTNU prediction models. Tunnelling and Underground Space Technology 59. 55–64

tuse.shahroodut.ac.ir

Tunneling & Underground Space Engineering (TUSE)

Volume 9-Issue 1\Spring 2020

نشریه‌ی مهندسی تونل و فضاهای زیرزمینی

Determination of Optimal Transportation System in Excavation of Metro Tunnels

M. Javadi[1]; M. S. Abbasi[2*]; M.Tamannaei[3]

1- Expert of Sahel Omid Iranian Consulting Engineering Company; PhD. Graduated, Department of Tunnel Engineering, mohamadjavadi61@gmail.com

2- Expert of Fater Engineering Institute; M.Sc. Graduated, Department of Tunnel Engineering, abbasi92.195@gmail.com

3- Associate Professor; Department of Transportation Engineering; Isfahan University of Technology; Isfahan, m.tamannaei@cc.iut.ac.ir

Received:27 Mar 2017; Accepted: 8 Oct 2018

DOI:10.22044/tuse.2020.5547.1308

Keywords

Transportation

Mechanized excavation

Tunnel

Multi criteria decision making tools

Fuzzy logic

Extended Abstract

Summary

In this research, a new method is presented to determine the optimal transportation system in mechanized tunneling in urban projects. For this purpose, three common transportation systems in similar projects including fully railway system, conveyor belt- railway system and conveyor belt -rubber wheel vehicles have been considered. Afterward, the most important criteria including financial criteria, safety, environmental, and technical aspects have been studied to decide the alternatives. Each of these criteria has been divided into one or several more specific sub-criteria. In order to evaluate the financial sub-criteria, the costs and benefits of each alternative have been investigated comprehensively. Furthermore, the expert knowledge has been used to evaluate the other criteria. Thus, the impact weights of the criteria and sub-criteria, and also, the expert opinions have been analyzed based on the fuzzy logic method. The results show that conveyor belt-rubber wheel vehicles system is more suitable than the other two systems in this study.

Introduction

Nowadays, excavation of tunnels in order to expand the transport networks such as highway and railway networks is increasingly important. In a general categorization, the tunnel excavation methods is divided into three different methods: traditional, semi-mechanized and mechanized tunneling. In the traditional method, the excavation is done by using explosives. This method is efficiency economic for low length and small size tunnels. The excavation machines such as road header is used in the semi-mechanized method. The tunnel boring machines (TBM) like hard rock and earth pressure balance (EPB) machines are used in mechanized tunneling. Drilling tunnels with large diameters and lengths with high excavation speed is the most outstanding specification of the recent method. Different transportation systems can be used during TBM tunneling. The most important systems include the complete railway system (only railway), the railway- conveyor system (conveyor & railway) and the conveyor-multi vehicles system (MSV) (conveyor & MSV).

Each of these alternatives should transport two different materials including excavated materials and needed equipment or instruments. In alternative 1 (only railway), both tasks are done by a railway system. In conveyor & railway system, the first task is done by conveyor while the second task is done using rail transportation. In the third alternative (conveyor & MSV), the tasks are done by conveyor and MSV, respectively.

Methodology and Approaches

In a multi-criteria decision-making process, the weights of the criteria reflect their importance in achieving the goal. Among the criteria considered in the present study, the quantitative calculation of economic criteria for each of the three alternatives (complete railway system, conveyor-railway system, and conveyor-MSV system) is possible. Hence,

all the economic sub-criteria have been analyzed for each of the alternatives separately, and their relative weights have also been calculated. Economic calculations are done based on the case study of a mechanized tunnel excavation project in Isfahan, Iran. The studied tunnel has a circular cross section with diameter of 6.8 m and with a length of 20 km. Due to the lack of quantitative information, it is impossible to analyze the other criteria quantitatively. Thus, relevant professional experts were asked for evaluation and weighting the criteria and their respective sub-criteria. For this aim, a questionnaire was prepared and delivered to the experts. In total, 30 professional experts in 7 different major TBM projects in Iran were questioned. The questionnaire was designed based on the fuzzy multi-criteria decision-making tools, known as the "Fuzzy Topsis". The method is based on the fact that the selected alternative should has the least distance to the best possible condition and the maximum distance to the worst possible condition (Momeni 2013, Hwang and Yoon 1981, Ataee 2010).

Results and Conclusions

The aim of the present study was to select the optimal transportation system in the urban mechanized tunneling projects. For this purpose, three alternatives including complete railway system, conveyor-railway system and conveyor-MSV system were analyzed. For ranking the mentioned alternatives, the economic, safety-environmental, technical and operational management criteria were used. One or more sub-criteria were considered for each of the used criteria. In order to evaluate the economic sub-criteria, costs and benefits of each alternative were analyzed. The weights of the other criteria and sub-criteria were determined by the experts' knowledge. In this way, technical and economic criteria with 27 and 26 percent, respectively, had the highest weights. Initial capital investment, maintenance costs and transportation operation risk, respectively, had the highest percentage of importance. Experts' opinions were analyzed using multi-criteria decision making tools called "similarity to ideal method" based on fuzzy logic technique. The results of this research showed that the conveyor-MSV system by the similarity index of 96% was the best transportation system under the considered conditions. Finally, a sensitivity analyzes was carried out to validate the obtained results. It was deduced that the experts' opinions were in accordance with the actual conditions.