مهندسی عمران شریف (بهار ۱۳۹۶)
دوره‌ی ۲-۳۳، شماره‌ی ۱/۱، ص. ۸۱-۸۸، (یادداشت فنی)

Research Note

ارزیابی و تحلیل ریسک مخاطرات پروژه‌ی حفاری مکانیزه‌ی تونل‌خط ۷ متروی تهران با استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره

سعید سلطانی محمدی * **(استادیار)**
محمدصابر زمزم (دانشجوی دکتری)
گروه مهندسی معدن، دانشگاه کاشان
حسن بخشنده امنیه (دانشیار)
دانشکده‌ی مهندسی معدن، دانشگاه تهران
سید احسان موسوی (دانشجوی دکتری)
گروه مهندسی معدن، دانشگاه کاشان
هادی مختاری (استادیار)
گروه مهندسی صنایع، دانشگاه کاشان

مدیریت ریسک به‌عنوان یکی از ۱۲ سطح اصلی مدیریت پروژه شناخته می‌شود، که از فازهای شناسایی، ثبت، رتبه‌بندی، شناخت اقدام‌های کاهنده، و تخصیص اقدام‌های کاهنده‌ی ریسک تشکیل می‌شود و مدیران پروژه را در اتخاذ شرایط ایمن برای طراحی و اجرا یاری می‌کند. تعدد عوامل مخاطره‌آمیز در پروژه‌های حفاری مکانیزه‌ی تونل‌های درون‌شهری، رتبه‌بندی ریسک را پیچیده و استفاده از این شیوه را دشوار می‌سازند. در این نوشتار، جهت تحلیل ریسک‌های پروژه از روش نزدیکی به گزینه‌ی ایده‌آل استفاده شده است. نتایج حاصل نشان داده است که ریسک عوامل و عوامل مالی و انسانی در رتبه‌ی اول قرار دارند. همچنین ریسک برخورد با شبکه‌ی قنات‌ها از مهم‌ترین مشکلات در پروژه شناخته شده است. بررسی‌های میدانی صورت‌گرفته از مسیر پروژه و با توجه به ریزش‌های اتفاق‌افتاده در محدوده‌ی خیابان مولوی، که در اثر برخورد به قنات‌ها و حفره‌های ناشناس موجود در مسیر پروژه بوده است، صحت آنالیزهای انجام‌گرفته تأیید شده است.

saeedsoltani@kashanu.ac.ir
m.s.zamzam@grad.kashanu.ac.ir
hbakhshandeh@ut.ac.ir
mousavi.miningeng@yahoo.com
mokhtari_ie@kashanu.ac.ir

واژگان کلیدی: حفاری مکانیزه، مدیریت ریسک، رتبه‌بندی، تصمیم‌گیری چندشاخصه‌یی، شباهت به گزینه‌ی ایده‌آل، پروژه‌ی خط ۷ متروی تهران.

۱. مقدمه

پیشینه‌ی صنعت تونل‌سازی و حفر قنات (به‌عنوان یکی از ابتکارهای شگفت‌انگیز ایرانیان) و استخراج معادن به‌صورت زیرزمینی با وسایل بسیار ابتدایی در ایران به ۳۰۰۰ سال پیش بر می‌گردد، ولی تونل‌های مرتبط با حمل و نقل از ابتدای قرن دوازدهم هجری شمسی در ایران متداول شده است.[۱] برنامه‌ریزی‌های صورت‌گرفته در راستای افق ۱۴۰۴ و نیاز به توسعه‌ی ساختارهای زیربنایی کشور، توسعه‌ی هر چه بیشتر صنعت تونل در سال‌های گذشته را در پی داشته است، به نحوی که هم‌اکنون در شهرهای بزرگی مانند: تهران، اصفهان، مشهد، تبریز، و شیراز پروژه‌های امکان‌سنجی و یا ساخت تونل‌های مترو در حال اجرا هستند.[۲] به دلیل تعدد فعالیت‌های پروژه‌ی ساخت تونل در محیط‌های شهری و همچنین پیچیدگی‌های فنی مطرح در پروژه، استفاده از دانش مدیریت پروژه (زمان، هزینه، کیفیت، منابع انسانی، ارتباطات، ریسک و کالا، و مواد پروژه) در اجرای آن‌ها لازم و ضروری است. براساس نظرسنجی‌های صورت‌گرفته از کارفرمایان این پروژه‌ها، مدیریت ناقص و اشتباه به میزان ۳۰ تا ۵۰ درصد زمان و هزینه را افزایش خواهد داد.[۲و۳]

ریسک‌های پروژه به‌عنوان عدم قطعیت‌های موجود در پروژه شناخته می‌شوند که در صورت وقوع، آثار مثبت یا منفی در زمان، هزینه، و کیفیت خواهند داشت. پروژه‌های تونل‌سازی، به دلیل مواجهه با مسائلی همچون شرایط پیش‌بینی‌نشده‌ی زمین و آب و هوا، تفاوت‌های فرهنگی میان نیروی انسانی، بی‌ثباتی‌های سیاسی، و امکان تغییر سیاست‌های دولتی، مسائل مالی و اقتصادی و غیره همواره با ریسک‌های فراوانی روبه‌رو هستند. تعدد و اهمیت هر یک از ریسک‌های مذکور به بزرگی پروژه و پیچیدگی آن وابسته است. به منظور ممانعت از وقوع و مدیریت پاسخگویی به ریسک‌ها در پروژه، استفاده از یک سیستم جامع مدیریت ریسک، جهت مدیریت

* نویسنده مسئول
تاریخ: دریافت ۱۳۹۲/۱۲/۷، اصلاحیه ۱۳۹۴/۴/۱۵، پذیرش ۱۳۹۴/۵/۱۰.

انواع ریسک ضروری است. منظور از مدیریت ریسک، فرایند سیستماتیک شناسایی، تجزیه و تحلیل و واکنش به ریسک پروژه به‌منظور بیشینه‌ساختن نتایج وقایع مثبت و کمینه‌ساختن احتمال وقوع یا اثر پیامدهای ناگوار در اهداف پروژه است. فرایند استفاده از این شیوه شامل: شناسایی، ثبت، رتبه‌بندی، شناخت، و تخصیص اقدامات کاهنده‌ی ریسک است.[۴و۵] از آنجا که مدیریت تمامی منابع ریسک در تونل‌سازی زمان‌بر و دشوار است و فرایند مدیریت ریسک را با شکست مواجه می‌سازد، عموماً فقط بر روی شناسایی ریسک‌های پرخطر در تونل‌سازی تمرکز شده و بخش عمده‌یی از مطالعات صورت‌گرفته در زمینه‌ی مدیریت ریسک تونل‌سازی به این مبحث اختصاص یافته است.[۶-۸]

با توجه به محدودیت‌های متفاوتی که پروژه‌ها در دسترسی به منابع گوناگون (مالی، نیروی انسانی و زمان) و مواجهه با عوامل ریسک دارند، مدیران پروژه توان واکنش و پاسخ‌دهی به همه‌ی ریسک‌ها را به‌طور هم‌زمان نخواهند داشت. از این رو باید پیش از آغاز و ضمن اجرای پروژه نسبت به اولویت‌بندی ریسک‌ها و توجه بیشتر به ریسک‌های با اولویت بالاتر اقدام کرد. رتبه‌بندی ریسک گامی مهم در برآورده‌کردن هر چه بهتر این نیاز است. ثبت و رتبه‌بندی ریسک یک پروژه، چنانچه به‌طور مناسب مورد استفاده قرار گیرد، راهنمایی مفید برای پیشرفت پروژه خواهد بود؛ زیرا استفاده‌ی مفید از آن منجر به اتخاذ تدابیر راهبردی و یافتن مسیری کوتاه و واضح برای اعمال نقشه‌ی پیشنهادی از نظر سازمان‌دهی، پژوهشی، و طراحی و یا برآورده‌کردن نیازها برای شناسایی، رتبه‌بندی، و کاهش ریسک‌های موردنظر خواهد شد.[۹]

در این نوشتار به بررسی و رتبه‌بندی ریسک‌های موجود در پروژه‌ی خط ۷ متروی تهران پرداخته و برای تعیین ریسک‌های موجود از پرسشنامه و توزیع آن در میان گروه‌های ذی‌نفع در پروژه استفاده شده است. درنهایت با جمع‌آوری و بررسی پرسشنامه‌ها، جدول اولویت‌بندی ریسک‌های تأثیرگذار در پروژه با استفاده از روش تصمیم‌گیری شباهت به گزینه‌ی ایده‌آل[1] و با بررسی ماشین متعادل‌کننده‌ی فشار زمین[2] و تأثیر حفاری مکانیزه در تونل‌سازی در محیط‌های شهری و همچنین بررسی مطالعات ژئوتکنیک سعی شده است تا ریسک‌های محتمل در حفاری توسط این دستگاه و پیش‌روی پروژه مطرح و با استفاده از روش تصمیم‌گیری شباهت به گزینه‌ی ایده‌آل رتبه‌بندی شود تا با توجه به آن بتوان شرایطی ایمن برای طراحی و اجرا اتخاذ کرد. در بیشتر مطالعات پیشین به منظور ارزیابی ریسک، فقط از دو معیار میزان تأثیر و احتمال وقوع ریسک استفاده شده است، که در رتبه‌بندی ریسک قرار گرفته‌اند. در حالی که می‌توان معیارهای دیگری از جمله عدم اطمینان تخمین و توانایی سازمان در واکنش به ریسک نیز مطرح شوند.[۸و۱۰] در این نوشتار، معیارهای احتمال وقوع، میزان تأثیر، توانایی مقابله، و عدم اطمینان بررسی و برای رتبه‌بندی عوامل ریسک از روش شباهت به گزینه‌ی ایده‌آل استفاده شده است.

۲. مطالعات پیشین

مدیریت ریسک به‌عنوان یکی از شاخه‌های نوپای مدیریت، برای نخستین بار در دهه‌ی ۱۹۶۰ در صنعت بیمه به‌کار گرفته شده است،[۳] و امروزه استفاده از آن در تمام سازمان‌های متوسط تا بزرگ از جمله شرکت‌های عمرانی دخیل در پروژه‌های تونل‌سازی امری ضروری و متداول است. پروژه‌های تونل‌سازی شهری، مانند هر پروژه‌ی دیگری ریسک‌آور هستند. این پروژه‌ها علاوه بر مشکلات فنی و مهندسی، به دلیل تعدد پرسنل درگیر در پروژه مانند پیمانکار، کارفرما، مشاور و غیره با ریسک‌های متنوعی رو به رو هستند.[۱۰] اگرچه رخداد سوانحی همچون فروریختن تونل متروی مونیخ (۱۹۹۴) و تونل یورک شایر در انگلیس به ترتیب ۴ و ۵۵ میلیون دلار خسارت به همراه داشته است،[۲] ولی توجه مدیران به لزوم استفاده از مدیریت ریسک را افزایش داده است. ریسک پروژه‌های تونل‌سازی همواره قابل توجه است و از طریق مدیریت مناسب می‌توان احتمال وقوع یا تأثیر پیامدهای نامطلوب آن‌ها را کمینه ساخت. از جمله علل اصلی طولانی‌ترشدن و افزایش هزینه‌ی پروژه‌های تونل‌سازی، مدیریت ناقص و ضعیف، به‌ویژه مدیریت ریسک گزارش شده است.[۱۰و۱۱] مدیریت ریسک مستلزم شناسایی، ارزیابی، و رتبه‌بندی ریسک‌های مختلف است. رتبه‌بندی ریسک، مهم‌ترین قسمت این فرایند به‌شمار می‌رود. زیرا با انجام رتبه‌بندی، برتری هر ریسک در مقابل دیگر ریسک مشخص و در نتیجه تصمیم‌گیرنده می‌تواند در مورد میزان تخصیص منابع موجود برای مقابله با هر ریسک برنامه‌ریزی کند.[۵] در مطالعات متعددی به ارزیابی ریسک به‌طور عام و در پروژه‌های تونل‌سازی به‌طور خاص پرداخته شده است، که می‌توان آن‌ها را به چند دسته تقسیم کرد:

مطالعاتی که در آن‌ها ریسک به‌عنوان حاصل‌ضرب احتمال در اثر یک رخداد محسوب شده و دو شاخص «میزان تأثیر» و «احتمال وقوع» ریسک در قالب ماتریس احتمال ـ اثر ریسک استفاده شده‌اند.[۱۲] اثر رخداد معمولاً در زمان یا هزینه‌ی پروژه بررسی شده و در برخی از موارد تحلیل به‌صورت احتمالاتی صورت گرفته است.[۱۳] چگونگی پاسخ به بعضی از ریسک‌ها نیز مورد توجه قرار گرفته است.[۱۴و۱۵]

در پژوهش‌های دیگری به برخی از ضعف‌ها در خصوص روش اندازه‌گیری ریسک در مطالعات مذکور اشاره شده است، از جمله بر غیرقابل اطمینان‌بودن این روند تأکید شده است.[۱۶] یکی دیگر از مشکلات ذکرشده، امکان نادیده‌گرفتن اهمیت ریسک‌های با احتمال کم و اثر مهم است. زیرا طی این شیوه، ریسک‌هایی که احتمال زیاد و اثر غیرمهم دارند، با ریسک‌هایی که احتمال کم و اثر مهم دارند، معادل فرض می‌شوند که این لزوماً نظر تصمیم‌گیرنده نیست.[۱۷]

با وجود این، در برخی دیگر از پژوهش‌های انجام‌شده، شاخص‌های دیگری نظیر «توانایی سازمان در واکنش به ریسک»،[۱۸] «درجه‌ی عدم قطعیت تخمین»،[۱۹] و «سرعت مقابله با ریسک» نیز مطرح شده‌اند.[۲۰] احتمال و میزان تأثیر در هزینه و کیفیت پروژه نیز در رتبه‌بندی به‌کار برده شده‌اند.[۲۱] اثر رخداد دیگر اهداف پروژه مانند کارآمدی و کیفیت پیشنهادی،[۲۲] و شاخص‌های تکمیلی دیگری نظیر مدیریت‌پذیری و نزدیکی وقوع ریسک پروژه در برخی از پژوهش‌های دیگر مورد توجه واقع شده است.[۲۳و۲۴] در برخی دیگر از منابع در زمینه‌ی ارزیابی ریسک زیست‌محیطی از شاخص‌های آثار اجتماعی ـ اقتصادی و آثار زیست‌محیطی استفاده شده است.[۲۵]

همان‌طور که اشاره شده است، دو نگرش متفاوت در تقسیم‌بندی ریسک‌های مرتبط با تونل‌سازی مطرح است: ۱. درنظرگرفتن تمامی ریسک‌های پروژه، ۲. توجه به میزان تأثیرگذاری آن‌ها در هزینه، زمان، و اهداف پروژه.[۶و۲] ریلی و براوون (۲۰۰۴) انواع ریسک‌های مرتبط با طرح‌های تونل‌سازی را این چنین برشمرده‌اند:

- ریسک آسیب یا نقصان‌ها با پتانسیلی برای مرگ و جراحت پرسنل، خطرات اقتصادی و تجهیزاتی زیاد، و از دست‌دادن اعتبار برای افراد درگیر؛
- ریسک عدم دست‌یابی به استانداردها و معیارهای تعیین‌شده در طراحی، عملیات، پشتیبانی و کیفیت؛
- ریسک‌های یک تأخیر مهم در اتمام پروژه و آغاز عملیات درآمدزایی آن؛
- ریسک‌های افزایش جدی در هزینه‌های پروژه و پشتیبانی آن.[۲و۱۲]

براساس یک طبقه‌بندی عمومی، عوامل مخاطره‌زا به ۴ دسته‌ی: طبیعی (سیل، زلزله و...)، خارجی (اقتصادی، سیاسی و...)، داخلی (راهبردی، طرح‌ریزی ضعیف و...)، و نیروی انسانی (تصادفات منجر به آسیب و...) تقسیم شده‌اند.[۲۶] در تقسیم‌بندی

دیگری نیز ۴ نوع ریسک ساخت و طراحی، درآمد و تقاضا، عملیات و نگه‌داری و سایر (مانند: تغییرات در قانون، مالیات و...) برای پروژه‌های تونل‌سازی شناسایی شده است.[۱۱] همچنین تقسیم‌بندی دیگری برای ریسک پروژه‌های فضاهای زیرزمینی ارائه شده است، که عبارت است از: سازه‌یی،قراردادی، و عملکردی. این تقسیم‌بندی تا حدود زیادی براساس زمان و دوره‌ی عمر یک سازه‌ی زیرزمینی است.[۲۷]

۳. مواد و روش‌ها

۱.۳. شناسایی منابع ریسک

در بحث مدیریت ریسک، نکته‌ی حائز اهمیت تعریف عوامل مخاطره‌زا و رتبه‌بندی آن‌هاست. ریسک‌های یک پروژه در نگرشی کلان و در ارتباط با مسائلی همچون زمان و هزینه‌ی پروژه تعریف می‌شوند.[۱۲] نخستین گام در ارزیابی یک عامل ریسک، تعریف و شناسایی دقیق آن است. براساس استاندارد جهانی دانش مدیریت پروژه،[۲۸] از شیوه‌های بازنگری مستندات، چک لیست‌ها، تجزیه و تحلیل فرضیات و رخداد وقایع می‌توان برای شناسایی ریسک‌های پروژه استفاده کرد.

۲.۳. تحلیل کیفی ریسک

تجزیه و تحلیل کیفی ریسک، فرایند تشخیص، و ارزیابی احتمال تأثیر ریسک‌های تبیین‌شده است. در این فرایند، رویدادهای بالقوه‌ی مخاطره‌آمیز بنابر میزان آثار بالقوه‌ی هر یک از آن‌ها در اهداف پروژه اولویت‌بندی و نحوه‌ی پاسخ به آن‌ها تعیین می‌شود. این تذکر لازم است که انتخاب چگونگی پاسخ به ریسک‌های مختلف و کیفیت و کمیت اطلاعات در دسترس، در تجزیه و تحلیل ریسک نقش تعیین‌کننده‌یی ایفا می‌کنند. احتمال وقوع و تبعاتی که از تحقق هر یک از ریسک‌ها پیش‌بینی می‌شود، اثر به‌سزایی در انتخاب روش‌ها و شیوه‌های تجزیه و تحلیل کیفی ریسک دارد. نتایج حاصل حتی می‌تواند در تجزیه و تحلیل‌های کمّی و همچنین برنامه‌ریزی واکنش به ریسک مؤثرواقع شود. اهمیت تجزیه و تحلیل کیفی ریسک‌ها به‌منظور رده‌بندی آن‌ها و خروجی آن به‌عنوان ورودی مرحله‌ی واکنش به ریسک‌هاست. عدم قطعیت‌هایی که در فاز شناسایی ریسک‌ها مورد توجه قرار می‌گیرند، درجه‌ی اهمیت متفاوتی دارند و با توجه به محدودبودن منابع سازمان باید به ریسک‌های پر اهمیت پرداخته شوند.[۲۹-۳۰] ابزار و شیوه‌های تجزیه و تحلیل کیفی ریسک عبارت‌اند از:[۱۹و۳۲]

۱. **احتمال و تأثیر ریسک:** توصیف احتمال رخداد ریسک و عواقب حاصل از آن ممکن است با استفاده از واژگان کیفی (نظیر: خیلی کم، کم، زیاد و...) صورت پذیرد. احتمال ریسک به شانس رخداد یک ریسک اطلاق می‌شود. عواقب ریسک به میزان تأثیر ریسک در اهداف پروژه در صورت وقوع گفته می‌شود.

۲. **ماتریس درجه‌بندی احتمال تأثیر ریسک:** ممکن است ماتریسی تشکیل شود که در آن درجات ریسک بر مبنای ترکیب مقادیر احتمال و میزان تأثیر آن به موقعیت‌های مختلف و یا ریسک‌های پروژه تخصیص داده شود. فرایند رتبه‌بندی ریسک با استفاده از یک ماتریس و انتصاب مقادیری به هر یک از ریسک‌ها تکمیل می‌شود. میزان تأثیر یک ریسک، منعکس‌کننده‌ی شدت اثر آن در اهداف پروژه است.

۳. **آزمون فرضیات پروژه:** فرضیات شناسایی‌شده همواره باید از دو جنبه (ثبات فرضیات و عواقب این فرضیات برای پروژه در صورت نادرستی آن‌ها) مورد ارزیابی و آزمون قرارگیرند.

۴. **رتبه‌بندی دقت داده‌ها:** در صورتی که تجزیه و تحلیل کیفی ریسک برای مدیریت پروژه مفید و اثربخش باشد، اجرای این فرایند نیازمند داده‌هایی دقیق و نا اُریب است. رتبه‌بندی دقت داده‌ها، شیوه‌یی به‌منظور ارزیابی میزان درجه‌ی سودمندی و اهمیت داده‌ها برای اجرای فرایند مدیریت ریسک است.

۳.۳. رتبه‌بندی ریسک‌های پروژه با استفاده از روش شباهت به گزینه‌ی ایده‌آل (Topsis)

از آنجا که اولویت‌بندی منابع ریسک براساس هر یک از معیارهای احتمال وقوع، میزان تأثیر، توانایی مقابله، و عدم اطمینان نتایج کاملاً متفاوتی را ارائه خواهد داد، که مدیریت را با چالش روبه رو می‌سازد، ضروری است تا از مدل‌های تصمیم‌گیری چندشاخصه[۳] برای این منظور استفاده کرد. در این پژوهش جهت نیل به اهداف از مدل چندشاخصه‌ی شباهت به گزینه‌ی ایده‌آل استفاده شده است. این مدل برای اولین بار در سال ۱۹۸۱ توسط هوآنگ و یون[۴] برای اولویت‌بندی گزینه‌ها از طریق مقایسه‌ی آن‌ها به جواب ایده‌آل است، که به شیوه‌ی وزن‌دهی، حساسیت بسیارکمی دارد. مراحل حل مسئله توسط الگوریتم شباهت به گزینه‌ی ایده‌آل ۸ مورد است، که این مراحل جهت بهره‌گیری باید طی شود.

۱.۳.۳. تشکیل ماتریس داده‌ها براساس n گزینه و k شاخص

به‌طورکلی در مدل شباهت به گزینه‌ی ایده‌آل، ماتریس $n \times m$ که m گزینه و n معیار دارد، مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در این الگوریتم فرض می‌شود که هر شاخص و معیار در ماتریس تصمیم‌گیری، مطلوبیت افزایشی یا کاهشی یکنواخت دارد.

$$A_{ij} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \dots & a_{mn} \end{bmatrix}$$

۲.۳.۳. استانداردکردن داده‌ها و تهیه‌ی ماتریس نرمالیزه (R)

به دلیل آنکه احتمال قوی دارد که مقادیر کمّی تعلق‌گرفته به معیارها و شاخص‌ها، یک واحد نداشته نباشند، باید ابعاد و واحد آن‌ها را از بین برد و این مقادیرکمّی را به ارقام بی‌بُعد تبدیل کرد (رابطه‌ی ۱)، که نتیجه‌ی آن ماتریس نرمالیزه‌ی (R) است:

$$R_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^{m} (a_{ij})^2}}$$

$$R_{ij} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \dots & r_{mn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

۳.۳.۳. تعیین و تعدیل وزن هریک از شاخص‌ها (W_j)

در این مرحله، وزن هر یک از شاخص‌ها براساس رویکردها و نظریه‌های کارشناسانه مانند: روش لینمپ[۵]، مدل تحلیل سلسله مراتبی[۶]، مدل آنتروپی[۷] و نیز براساس اهمیت هر معیار محاسبه می‌شود. باید در نظر داشت که مجموع وزن معیارها باید برابر ۱ باشد. برای تعدیل وزن هر یک از شاخص‌های W_j از رابطه‌ی ۲ استفاده می‌شود:

$$W_J' = \frac{\lambda_j . W_j}{\sum_{j=1}^{n} \lambda_j . W_l} \quad (2)$$

۴.۳.۳. ایجاد ماتریس نرمالیزه‌ی وزین (V)

جهت هم ارزش‌ساختن مقادیر درایه‌های ماتریس نرمالیزه، تک‌تک اوزان پارامترها باید به‌صورت نظیر به نظیر در ستون‌های این ماتریس ضرب شود. ماتریس به دست‌آمده از این فرایند، ماتریس نرمالیزه و وزن‌دهی شده است، که آن را با V نشان می‌دهند:

$$V_{ij} = R_{ij}.W_{n\times n} = \begin{bmatrix} v_{11,\dots} & v_{1j,\dots} & v_{1n} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ v_{m1,\dots} & v_{mj,\dots} & v_{mn} \end{bmatrix}$$

۵.۳.۳. مشخص‌کردن ایده‌آل مثبت (A^+) و ایده‌آل منفی (A^-)

ایده‌آل‌های مثبت و منفی به ترتیب براساس رابطه‌های ۳ و ۴ محاسبه می‌شوند:

$$A^+ = \{(\max V_{ij} \,|j \in J\,), (\min V_{ij} \,|j \in J'\,)\,|i = 1, 2, \dots, m\,\} = \{v_1^+, v_2^+, \dots, v_j^+, \dots, v_n^+\} \quad (3)$$

$$A^- = \{(\min V_{ij} \,|j \in J\,), (\max V_{ij} \,|j \in J'\,)\,|i = 1, 2, \dots, m\,\} = \{v_1^-, v_2^-, \dots, v_j^-, \dots, v_n^-\} \quad (4)$$

۶.۳.۳. محاسبه‌ی اندازه‌ی جدایی گزینه‌ی iاُم با ایده‌آل‌ها

با استفاده از روش اقلیدسی و از طریق روابط ۵ و ۶، می‌توان اندازه‌ی جدایی گزینه‌ی iاُم با ایده‌آل مثبت d_i^+ و منفی d_i^- را محاسبه کرد:

$$d_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^{n} (V_{ij} - V_j^+)^2}; \qquad i = 1, 2, \dots, m \quad (5)$$

$$d_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^{n} (V_{ij} - V_j^-)^2}; \qquad i = 1, 2, \dots, m \quad (6)$$

۷.۳.۳. محاسبه‌ی نزدیکی نسبی گزینه‌ی i (A_i) با راه‌حل ایده‌آل

میزان نزدیکی نسبی گزینه‌ی i به راه‌حل ایده‌آل cl_i^+ با استفاده از رابطه‌ی ۷ قابل محاسبه است:

$$cl_i^+ = \frac{d_i^+}{d_i^+ + d_i^-}; \qquad 0 \le cl_i^+ \le 1; \qquad i = 1, 2, \dots, m \quad (7)$$

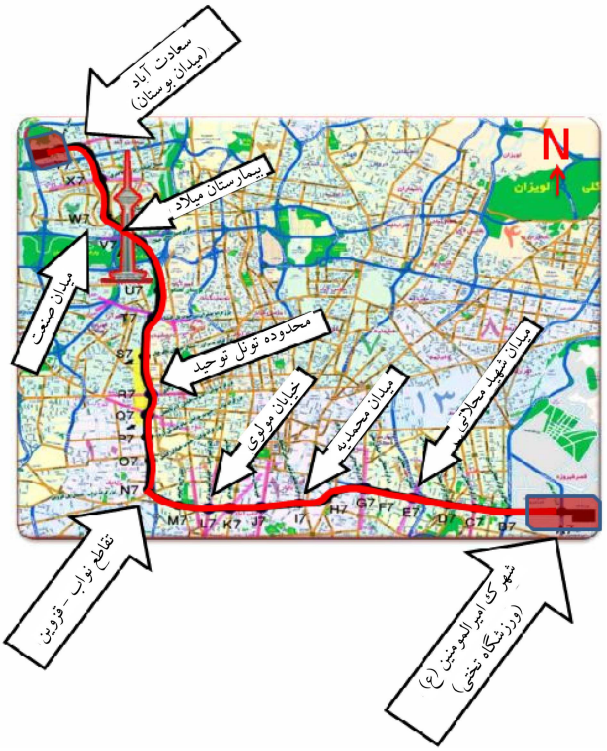
۸.۳.۳. رتبه‌بندی گزینه‌ها براساس ترتیب نزولی cl_i^+

این میزان بین صفر و ۱ در نوسان است. در این راستا، $cl_i^+ = 1$ نشان‌دهنده‌ی بالاترین رتبه و $cl_i^+ = 0$ نیز نشان‌دهنده‌ی کمترین رتبه است.

۴. مطالعه‌ی موردی (تونل خط ۷ متروی تهران)

خط ۷ متروی تهران از شهرک امیرالمؤمنین (ع) واقع در منطقه‌ی جنوب شرق تهران در امتداد شرقی ـ غربی شروع و ضمن گذر از کنار تونل توحید و عبور از کنار برج میلاد و میدان صنعت، در منطقه‌ی سعادت‌آباد (میدان بوستان) واقع در شمال غرب تهران پایان می‌یابد. در شکل ۱، موقعیت پروژه‌ی خط ۷ مترو روی نقشه‌ی تهران نشان داده شده است.[۳۳و۳۴]

تجزیه و تحلیل کیفی ریسک در هر لحظه از زمان برای پروژه‌های در حال پیش‌روی لازم و ضروری است و این اهم زمانی اجرایی است که بتوان داده‌هایی قابل قبول از پروژه دریافت کرد. این فرایند با شناسایی اولیه‌ی ریسک‌های موجود در پروژه به منظور ارزیابی کلی ریسک‌ها آغاز می‌شود.



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی خط ۷ مترو در نقشه‌ی تهران.[۳۳]

از آنجایی که در پروژه‌های تونل‌سازی در محیط‌های شهری، ریسک‌های مربوط به مسائل زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی از اهمیت به‌سزایی برخوردارند، لذا براساس گزارش‌های مطالعات تکمیلی موجود، ریسک‌های مرتبط با مسائل زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی در پروژه‌ی خط ۷ مترو تهران شامل ریسک مسائل ژئوتکنیکی و ژئومکانیکی در فاز طراحی، طراحی و ملزومات دستگاه حفاری EPB، مسائل ساخت (حفاری مکانیزه، راهبری EPB، و نصب پوشش بتنی)، عوامل انسانی (قراردادی، مسئولیت‌ها، و کیفیت کار پرسنل) در نظر گرفته می‌شوند، که در پروژه‌ی خط ۷ متروی تهران، هر بخش از ریسک‌های ذکرشده می‌تواند به زیرشاخه‌هایی از ریسک‌ها تقسیم‌بندی شود (جدول ۱ الی ۵).[۳۵و۳۶]

در این مرحله با توجه به ریسک‌های نام‌برده در پروژه‌ی خط ۷، اقدام به بررسی و ثبت مهم‌ترین ریسک‌های پروژه شده است، که با نظر افراد خبره، ۵ عامل عمده‌ی ریسک و زیرشاخه‌های آن‌ها، که می‌توانستند بیشترین تأثیر را در اهداف پروژه داشته باشند (جدول ۱ الی ۵)، شناسایی و به‌عنوان ریسک‌های پتانسیل خرابی یا آسیب در پروژه معرفی شده‌اند.

در روند محاسبات رتبه‌بندی، دو شاخص احتمال و عدم اطمینان به‌صورت کمّی و دو شاخص تأثیر و توانایی مقابله با ریسک به‌صورت کیفی اندازه‌گیری شده‌اند، که با استفاده از مقیاس دو قطبی فاصله‌یی،[۳۰و۹] مقادیر کیفی نیز به مقادیر کمّی تبدیل شده‌اند. برای تبدیل شاخص منفی عدم اطمینان، به‌جای مقدار عدم اطمینان از مقدار اطمینان استفاده شده است.[۱۹]

پس از به دست‌آوردن ماتریس کمّی‌شده، روش شباهت به گزینه‌ی ایده‌آل براساس گام‌های شرح داده‌شده در بخش ۳.۳. صورت گرفته است.[۳۲] براین اساس پس از تشکیل ماتریس تصمیم‌گیری براساس نظر افراد خبره، وزن شاخص‌های احتمال، تأثیر، عدم اطمینان و توانایی به ترتیب برابر ۷، ۶، ۴ و ۱۰ به دست آمده است. در جدول ۶، سمت افراد خبره و تعدادشان در نظرسنجی ارائه شده است. در

جدول ۱. دسته‌بندی ریسک‌های اصلی پروژه‌ی تونل خط ۷ متروی تهران (ریسک مسائل ژئومکانیکی و ژئوتکنیکی).

شماره‌ی ریسک	ریسک
۱	گیرکردن شیلد EPB
۲	گیرکردن کاترهد دستگاه حفاری
۳	بلوکه‌شدن دستگاه در اثر ناپایداری جبهه‌ی کار
۴	برخورد با شبکه‌ی قنات‌ها
۵	حضور تخته‌سنگ‌ها در طول مسیر حفاری
۶	برخورد با خاک‌های ریزشی
۷	برخورد با شرایط چاه‌های آرتزین
۸	لایه‌های خاک با پتانسیل روانگرایی
۹	برخورد با سنگ‌های ساینده
۱۰	برخورد با آب‌ها و خاک‌ها با خاصیت خورندگی
۱۱	حضور گازهای سمی و خطرناک
۱۲	ناپایداری جبهه‌ی کار تونل
۱۳	شرایط ژئوتکنیکی پیش‌بینی‌نشده
۱۴	اضافه حفاری

جدول ۲. دسته‌بندی ریسک‌های اصلی پروژه‌ی تونل خط ۷ متروی تهران (ریسک طراحی و ملزومات دستگاه حفاری EPB).

شماره‌ی ریسک	ریسک
۱۵	سیستم آب‌بندی ناقص
۱۶	نیروی پیش‌ران ناکافی ماشین
۱۷	کونیک‌نبودن شیلد
۱۸	سیستم آب‌کشی ناکافی
۱۹	طراحی نادرست فشار جبهه‌ی کار
۲۰	تجهیزات ناکافی الکترومکانیکال
۲۱	بروز مشکلات مکانیکی در دستگاه حفاری

جدول ۳. دسته‌بندی ریسک‌های اصلی پروژه‌ی تونل خط ۷ متروی تهران ریسک مسائل ساخت (حفاری مکانیزه، راهبری EPB و نصب پوشش بتنی).

شماره‌ی ریسک	ریسک
۲۲	کمبود فشار در جبهه‌ی کار
۲۳	انجام نادرست عملیات تزریق
۲۴	نصب نادرست سگمنت‌ها
۲۵	راهبری نادرست دستگاه
۲۶	ساخت نادرست سگمنت‌ها
۲۷	انحراف دستگاه از مسیر طراحی‌شده
۲۸	اقدامات ناکافی ایمنی
۲۹	عدم تهویه‌ی کافی
۳۰	از دست‌رفتن مواد (دوغاب یا فوم) در طی حفاری
۳۱	اعوجاج رینگ سگمنت
۳۲	ایجاد ترک و شکست در سگمنت

جدول ۴. دسته‌بندی ریسک‌های اصلی پروژه‌ی تونل خط ۷ متروی تهران (ریسک عوامل و فاکتورهای مالی و انسانی).

شماره‌ی ریسک	ریسک
۳۳	فقدان تجربه پرسنل
۳۴	فقدان تجربه پیمانکار
۳۵	کمبود تجهیزات
۳۶	مشکلات قراردادی
۳۷	مشکلات مالی
۳۸	تصادفات و تصادمات نیروی انسانی
۳۹	آتش‌سوزی یا رخداد انفجار
۴۰	تأخیر در تجهیز و پشتیبانی دستگاه حفاری

جدول ۵. دسته‌بندی ریسک‌های اصلی پروژه‌ی تونل خط ۷ متروی تهران (ریسک پژوهش‌ها و فاز طراحی پروژه).

شماره‌ی ریسک	ریسک
۴۱	ارزیابی ناکافی سازه‌های زیرزمینی موجود
۴۲	وجود سازه‌های زیرزمینی که نقشه‌برداری‌نشده
۴۳	عمق ناکافی مسیر تونل
۴۴	شرایط زمین‌شناسی پیش‌بینی‌نشده
۴۵	ایجاد صدمه یا خرابی به تأسیسات شهری
۴۶	خرابی یا واردشدن صدمه بر ساختمان‌های مجاور
۴۷	ایجاد ترافیک
۴۸	آلودگی هوا
۴۹	آلودگی آب

جدول ۶. سمت و تعداد افراد خبره‌ی شرکت‌کننده در نظرسنجی.

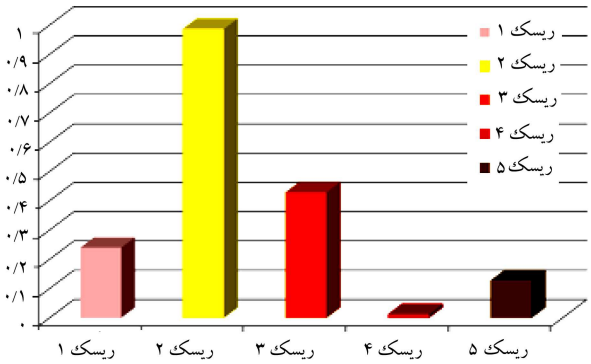
سمت افراد خبره	تعداد
کارشناس تونل	۷
کارشناس فنی	۲
کارشناس الکترومکانیکال	۳
کارشناس کنترل پروژه	۲
کارشناس امور قراردادها	۲

جدول ۷. اوزان نهایی شاخص‌ها با استفاده از روش آنتروپی شنون.

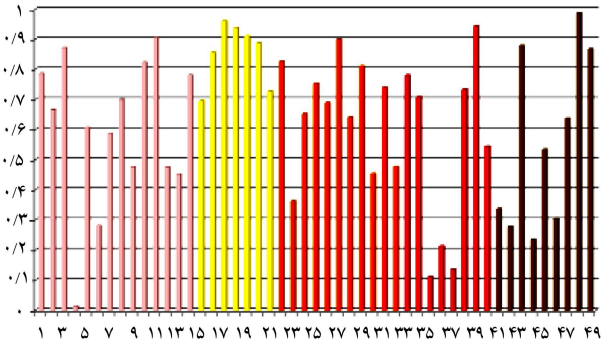
شاخص	احتمال	تأثیر	عدم اطمینان	توانایی
وزن	۰/۸۸۲	۰/۰۳۳	۰/۰۰۸	۰/۰۷۷

مرحله‌ی بعد به اعداد بدون‌مقیاس ۰/۲۶، ۰/۲۲، ۰/۱۵ و ۰/۳۷ تبدیل شده‌اند. در عین حال، با استفاده از روش آنتروپی شنون نیز وزن شاخص‌ها محاسبه و سپس اوزان به‌دست‌آمده با استفاده از اوزان قبلی اصلاح شده‌اند. بدین ترتیب اوزان نهایی شاخص‌ها به‌صورت جدول ۷ به‌دست آمده‌اند.

نتایج حاصل از رتبه‌بندی براساس شاخص cl_i^+ (شکل‌های ۲ و ۳) نشان داده است که عامل ریسک تجهیزات و مالی و انسانی را می‌توان مهم‌ترین ریسک‌هایی دانست که پروژه با آن روبه‌رو است و عامل ریسک مطالعات و فاز طراحی پروژه،



شکل ۲. رتبه‌بندی ۵ عامل اصلی ریسک ابتدایی به ترتیب اهمیت در پروژه‌ی خط ۷ مترو تهران.



شکل ۳. رتبه‌بندی ۴۹ ریسک موجود در پروژه‌ی خط ۷ مترو تهران به روش شباهت به گزینه‌ی ایده‌آل.

جدول ۸. رتبه‌بندی ۵ ریسک ابتدایی به ترتیب اهمیت در پروژه‌ی خط ۷ مترو تهران.

شماره‌ی ریسک	ریسک
۱	برخورد با شبکه‌ی قنات‌ها
۲	کمبود تجهیزات
۳	مشکلات مالی
۴	مشکلات قراردادی
۵	شرایط زمین‌شناسی پیش‌بینی‌نشده

به‌عنوان دومین ریسک مهم برای پروژه است. در شکل ۲ و جدول ۸، ۵ عامل ریسک اصلی موجود و میزان اهمیت هر یک ارائه شده است. همچنین در شکل ۳، تمامی ریسک‌های موجود در پروژه به همراه میزان اهمیت هر یک ارائه شده است.

۵. نتیجه‌گیری

علم تصمیم‌گیری با مسائلی از قبیل شناسایی، دسته‌بندی، و انتخاب سر و کار دارد و هر جا با شرایطی نامطمئن مواجه هستیم، باید اقدام به تصمیم‌گیری کنیم. یکی از حوزه‌هایی که در آن نیاز به تصمیم‌گیری وجود دارد، مدیریت پروژه است. مدیریت ریسک، یکی از فازهای مدیریت پروژه و همچنین ارزیابی ریسک‌ها نیز یکی از قدم‌های اصلی فرایند مدیریت ریسک است. ارزیابی ریسک به معنی اندازه‌گیری ریسک‌ها براساس شاخص‌های معین است، که بر این اساس امکان ارائه‌ی راهکارهای مقابله با ریسک‌ها در مراحل بعدی مدیریت ریسک فراهم می‌شود. فقدان یا مدیریت ناقص ریسک در پروژه‌های تونل‌سازی منجر به پیامدهای منفی از جمله طولانی‌شدن پروژه و افزایش هزینه‌ها می‌شود. رتبه‌بندی ریسک‌ها از ارکان اصلی مدیریت ریسک پروژه و ارائه‌ی پاسخ مناسب به ریسک‌های مرتبط است. مدیریت ریسک به ویژه در پروژه‌های با حجم سرمایه‌گذاری بالا از قبیل پروژه‌های تونل‌سازی، اهمیت و جایگاه خاصی دارد. یکی از گام‌های اصلی در مدیریت ریسک، ارزیابی ریسک و رتبه‌بندی ریسک‌ها نیز یکی از مهم‌ترین بخش‌های ارزیابی ریسک است که به‌دلیل محدودیت‌های زمانی و مالی در پاسخ‌دهی به موقع و درست به آن‌ها در جهت ارائه‌ی راهکارهای سودمند، کمک شایانی به انجام هر چه موفق‌تر فرایند مدیریت ریسک می‌کند.

با توجه به اینکه روش‌های تصمیم‌گیری چندشاخصه، ابزارهایی شناخته‌شده و مفیدی در اولویت‌دهی به گزینه‌های متعدد هستند، در این نوشتار، کاربرد روش شباهت به گزینه‌ی ایده‌آل در رتبه‌بندی ریسک پروژه‌های تونل‌سازی بررسی و جهت رتبه‌بندی ریسک‌های پروژه‌تونل خط ۷ مترو تهران به کار گرفته شده است.

با توجه به نتایج به دست‌آمده از تحلیل انجام‌گرفته، ریسک برخورد با شبکه‌ی قنات‌ها از مهم‌ترین مشکلات شناخته‌شده در پروژه خط مترو تهران شناخته شده است. از آنجا که پروژه‌ی خط ۷ مترو تهران در مسیر چاه‌های آب رباط کریم قرار گرفته است، این نکته تطابق کامل با شرایط عملیاتی و اجرایی پروژه دارد، تا جایی که عامل مذکور حتی در پاره‌یی از مواقع، پروژه را با توقف‌های کوتاه‌مدت رو به رو کرده است. با بررسی‌های میدانی صورت‌گرفته از پروژه و با بازدیدهای مکرر از سایت کارگاه و مشاهدات مسیر تونل از سطح زمین و با توجه به ریزش‌های اتفاق‌افتاده در محدوده‌ی خیابان مولوی، که در اثر برخورد به قنات‌ها و حفره‌های ناشناس موجود در مسیر بوده است، درستی آنالیزهای انجام‌گرفته تأیید شده است. لذا ریاست کارگاه نیز با توجه به آنالیزهای صورت‌گرفته و اتفاقات رخ‌داده بر آن شده است تا با مشورت چند شرکت مشاور ژئوفیزیکی اقدام به حفاری‌های اکتشافی در طول مسیر و منطبق بر محور تونل کند و با نصب دستگاه ژئورادار یا با استفاده از حفر سوندار و ارسال امواج به درون زمین، این حفره‌ها را کشف کند و نسبت به انجام عملیات تزریق به منظور پُرکردن حفره‌ها، اقدامات لازم را انجام دهد و از خطرهای احتمالی جلوگیری کند. همچنین ریسک آلودگی هوا، به‌عنوان آخرین ریسک موجود در پروژه شناخته شده است، که هیچ‌گونه مشکلی را برای پروژه به وجود نیاورده است.

پانوشت‌ها

1. technique for order preference by similarity to ideal solution (TOPSIS)
2. earth pressure balance (EPB)
3. multiple criteria decision making (MCDM)
4. Hwang and Yoon
5. Linmap
6. analytical hierarchy process (AHP)
7. Antropy

منابع (References)

1. Iranian Tunnelling Association (http://www.irta.ir).
2. International Tunnelling and Underground Space Association (http://www.ita-aites.org).
3. USA- UCA of SME- Underground Construction Association of SME (www.uca.smenet.org).
4. Lambert, J.H., Haimes, Y.Y., Li, D., Schooff, R.M. and Tulsiani, V. "Identification, ranking, and management of risks in a major system acquisition", *Reliability Engineering and System Safety*, **72**(3), pp. 315-325 (2001).
5. Ghosh, S. and Jintanapakanont, J. "Identifying and assessing the critical risk factors in an underground rail project in Thailand: A factor analysis approach", *International Journal of Project Management*, **22**(8), pp. 633-643 (2004).
6. Chapman, C. "Key points of contention in framing assumptions for risk and uncertainty management", *Int. J. Project Manage.*, **24**(4), pp. 303-313 (2006).
7. Degn Eskesen, S., Tengborg, P., Kampmann, J. and Holst Veicherts, T. "ITA/AITES accredited material guidelines for tunnelling risk management: International tunnelling association, working group No. 2", *Tunnelling and Underground Space Technology*, **19**(3), pp. 217-237 (2004).
8. BTS/ABI, *The Joint Code of Practice for Risk Management of Tunnel Works in the UK*, London: BTS (2003). (www.britishtunnelling.org)
9. Asgharpour, M.J., *Multiple Attribute Decision Making*, 2ed Edn., University of Tehran Press (2003).
10. Raz, T. and Michael, E. "Use and benefits of tools for project risk management", *International Journal of Project Management*, **19**(1), pp. 9-17 (2001).
11. Wagner, H. "Risk evaluation and control in underground construction", International Symposium on Underground Excavation and Tunneling, Bangkok, Thailand (2-4 February 2006).
12. Degn Eskesen, S., Tengborg, P., Kampmann, J. and Holst Veicherts, T. "ITA/AITES accredited material guidelines for tunnelling risk management: International tunnelling association, working group No. 2", *Tunnelling and Underground Space Technology*, **19**(3), pp. 217-237 (2004).
13. Reilly, J.J. and Brown, J. "Management and control of cost and risk for tunneling and infrastructure projects", *Tunneling and Underground Space Technology*, **19**(B18), pp. 1-8 (2004).
14. Isaksson, T. and Stille, H. "Model for estimation of time and cost for tunnel projects based on risk evaluation", *Rock Mechanic and Rock Engineering*, **38**(5), pp. 373-398 (2005).
15. "*A Code of Practice for Risk Management of Tunnel Works*, The International Tunneling Insurance Group (ITIG) (2006). Available on: http://www.munichre.com/publications/tunnel_code_of_practice_en.pdf.
16. Beard, A.N. "Tunnel safety, risk assessment and decision-making", *Tunnelling and Underground Space Technology*, **25**(1), pp. 91-94 (2010).
17. Chapman, C.B. and Ward, S.C., *Project Risk Management: Processes, Techniques and Insights*, Second edition, John Wiley, UK: Chichester (2003).
18. Pipattanapiwong, J., *Development of Multiparty Risk and Uncertainty Management Process for an Infrastructure Project*, Doctoral dissertation, Kochi University of Technology, 261 p. (2004).
19. McDermott, R.E., Mikulak, R.J. and Beauregard, M.R., *The Basics of FMEA*, Quality Resources, New York (1996).
20. Klein, J.H. and Cork, R.B. "An approach to technical risk assessment", *International Journal of Project Management*, **16**(6), PP. 345-351 (1998).
21. Waterland, L. R., Venkatesh, S. and Unnasch, S., *Safety and Performance Assessment of Ethanol/Diesel Blends (E-Diesel)*, Cupertino, California, 48 p. (2003).
22. Baccarini, D. and Archer, R. "The risk ranking of projects: A methodology", *International Journal of Project Management*, **19**(3), pp. 139-145 (2001).
23. Lambert, J.H., Haimes, Y.Y., Li, D., Schooff, R.M. and Tulsiani, V. "Identification, ranking, and management of risks in a major system acquisition", *Reliability Engineering and System Safety*, **72**(3), pp. 315-325 (2001).
24. Haimes, Y.Y., *Risk Modeling, Assessment, and Management*, 3rd Edition, John Wiley & Sons, New York (2008).
25. *Pertmaster Project Risk v7.5: Tutorial, Manual and Help*, Pertmaster Software, (2002). Available on: http://www.pertmaster.com/.
26. Xu, L. and Liu, G. "The study of a method of regional environmental risk assessment", *Journal of Environmental Assessment*, **90**(11), pp. 3290-3296 (2009).
27. Yogaranpan, Y.M. "Risk management, the key to success in management of construction projects in general and underground projects in particular", Project Manager, Australian Water Technologies Pty. Ltd., pp. 499-508 (1996). Available on: http://www.ats.org.au/.
28. Duddeck, H. "Risk assessment and risk sharing in tunnelling", *Tunnelling and Underground Space Technology*, **2**(3), pp. 315-317 (1987).
29. Project Management Institute (PMI), *A Guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK Guide)*, Pennsylvania, Newtown Square (2004).
30. North, D.W. "Limitations, definitions, principles and methods of risk analysis", *OIE Rev. Sci. Tech. of Int. Epiz.*, **14**(4), pp. 913-923 (1995).
31. Tavakoli, A. and Ahmadi, A. "Model selection and ranking of technology transferring methods", Science & Technology Univerity (2006).
32. Hwang, C. and Yoon, K., *Multiple Attribute Decision Making Methods and Aplications: A State of the Art Survey*, Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems, Verlag, New York, 259 p. (1981).
33. Wang, T. and Lee, H. "Developing a fuzzy TOPSIS approach based on subjective weights and objective weights", Expert Systems with Applications (2008).
34. *Execution Method, Machine Choice and TBM Technical Specifications of Tehran Subway Line 7*, Sepasad Engineering Company, Tehran, Iran (2008).

35. Sahel Consulting Engineers, *Engineering Report of the Eastern-Western Part of Tehran Subway Line 7*, Sepasad Engineering Company, Tehran, Iran (2011).

36. Herrenknecht, M. and Bappler, K. "Mastering risks during mechanized excavation in urban centers with highly complex ground conditions", *Tunnelling and Underground Space Technology*, **21**(3-4), pp. 118-121 (2006).

37. Shannon, C.E. "A mathematical theory of communication", *Bell System Technical Journal*, **27**(3), pp. 106-111 (1984).