



## تجزیه و تحلیل ریسک عملیات حفاری مکانیزه با استفاده از روش ردیابی انرژی و آنالیز مانع

جواد ملکوتی<sup>۱</sup>، وحید غریبی<sup>۲</sup>

تاریخ پذیرش: ۹۱/۱۰/۲۶

تاریخ ویرایش: ۹۱/۱۰/۱۹

تاریخ دریافت: ۹۱/۰۳/۲۱

### چکیده

**زمینه و هدف:** امروزه استفاده از دستگاه تی‌بی‌ام در عملیات حفاری مکانیزه، به ویژه حفاری تونل‌های عظیم و با سرعت عملیاتی بالا، رایج شده است. در سال‌های اخیر در پروژه‌های تونل‌سازی خصوصاً در عملیات حفاری با ماشین‌های تی‌بی‌ام حوادث زیادی به وقوع پیوسته است. کنترل مخاطرات می‌بایست از طریق فرایند مدیریت ریسک صورت پذیرد. این مطالعه با هدف بررسی ریسک عملیات حفاری مکانیزه با استفاده از دستگاه تی‌بی‌ام، در یکی از پروژه‌های تونل‌سازی مکانیزه کشور انجام پذیرفت.

**روش بررسی:** در این مطالعه موردی توصیفی، به منظور تجزیه و تحلیل ریسک، از تکنیک ردیابی انرژی و آنالیز مانع استفاده شد. در فرایند جمع‌آوری اطلاعات از روش‌های مشاهده، تجربه و قضاوت کارکنان، چک‌لیست، آئین‌نامه‌ها و استانداردهای مرتبط و همچنین سوابق حوادث و شبه‌حوادث ثبت شده در واحد ایمنی استفاده گردید؛ شناسایی منابع انرژی، اهداف، احتمال و پیامدهای مخاطرات در کارگروه‌های متعدد و با حضور کارشناسان باتجربه انجام شد. ریسک‌های شناسایی شده الویت‌بندی شده و اقدامات کنترلی توصیه شد.

**یافته‌ها:** در این مطالعه ۵۱ منبع انرژی خطرناک در گروه‌های شش گانه‌ی انرژی شناسایی شد. ۲۹/۴٪ از این منابع انرژی شناسایی شده مربوط به انرژی‌های فیزیکی، ۱۹/۶٪ مربوط به انرژی‌های شیمیایی، ۴۱٪ مربوط به انرژی‌های مکانیکی، ۸٪ مربوط به انرژی الکتریکی و تنها ۲٪ مربوط به عوامل طبیعی بود. قسمت کرین با ۱۹/۵٪ و هریک از قسمتهای کارترهد و شیلد با اختصاص ۱۰٪ از مجموع منابع انرژی خطرناک به ترتیب خطرناک‌ترین و کم‌خطرترین نقاط در فرایند حفاری تونل با دستگاه تی‌بی‌ام بودند.

**نتیجه‌گیری:** براساس نتایج مطالعه، عملیات دستگاه تی‌بی‌ام دربردارنده‌ی منابع خطر متنوع و متعددی است. می‌توان از روش ردیابی انرژی و آنالیز مانع به عنوان یک روش مؤثر در تجزیه و تحلیل ریسک عملیات دستگاه تی‌بی‌ام استفاده نمود.

**کلید واژه‌ها:** آنالیز ریسک، حفاری، تی‌بی‌ام، روش ETBA.

### مقدمه

و آتش‌سوزی همگی از جمله ع واملی هستند که باعث می‌شوند تا کارگران شاغل در چنین محیط‌هایی در معرض مخاطرات متعددی قرار گیرند [۳]. چنانچه مخاطرات در تونل‌ها به درستی شناسایی و کنترل نگردند می‌توانند به فجایع جبران ناپذیری مبدل گردند. در سال ۲۰۰۶ در حفاری تونلی در غرب ایران ۴ نفر به دلیل نقص در سیستم تهویه و انتشار گاز سولفید هیدروژن جان خود را از دست دادند [۲]. وقوع حوادث متعدد و گاهی منجر به مرگ در سال‌های گذشته در پروژه‌های تونل‌سازی سطح کشور دلیلی بر مخاطره‌آمیز بودن بسیاری از این پروژه‌ها است [۲]. به منظور کنترل

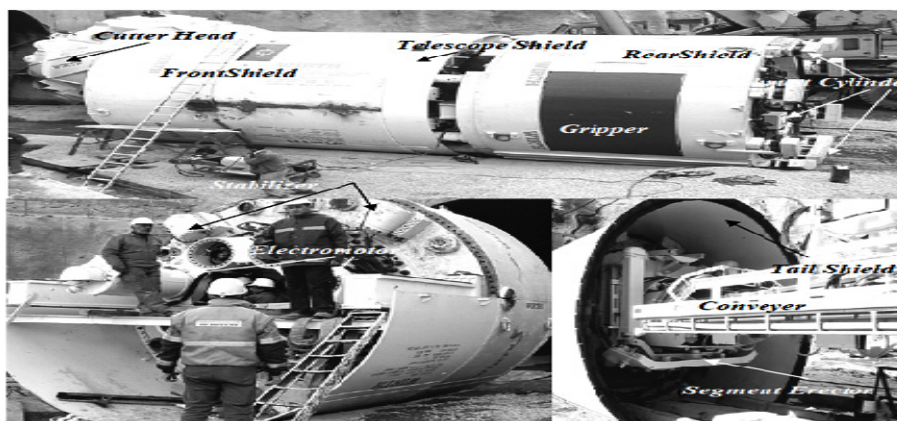
عملیات تونل‌سازی در سراسر دنیا در حال افزایش یافتن است. در سال‌های اخیر در عملیات تونل‌سازی، به ویژه حفاری تونل‌های عظیم و با سرعت عملیاتی بالا، ماشین‌های حفار تمام مقطع تونل (Tunnel boring machine (TBM) مورد استفاده قرار گرفته است [۱]. به دلیل پیچیدگی عملیات حفاری با ماشین‌های حفار تی‌بی‌ام احتمال وقوع حوادث در هنگام حفاری این تونل‌ها بالاست [۲]. کارکردن در محیط‌های فاقد روشنایی طبیعی، با احتمال ریزش دیواره‌های تونل، مواجهه با انواع آلاینده‌های هوا، خطرات ناشی از انفجار

۱- مربی، دانشگاه علوم پزشکی قم، قم، ایران.

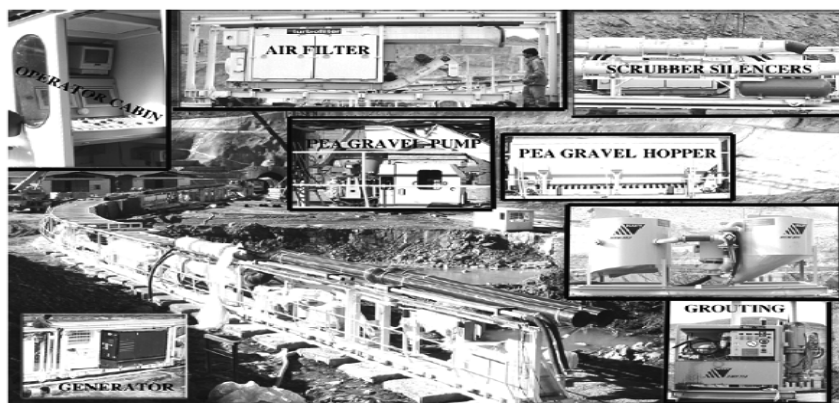
۲- نویسنده مسئول، دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران. gharibi\_88@yahoo.com

انتقال آب و راه سازی در سطح کشور از سویی دیگر ضرورت انجام این مطالعه را تبیین نمود تا از این طریق بتوان مخاطرات ایمنی و بهداشت شغلی این عملیات را به درستی شناسایی و کنترل کرد. این بررسی در یکی از پروژه‌های عظیم تونل‌سازی مکانیزه کشور صورت گرفت. تکنیک ردیابی انرژی و

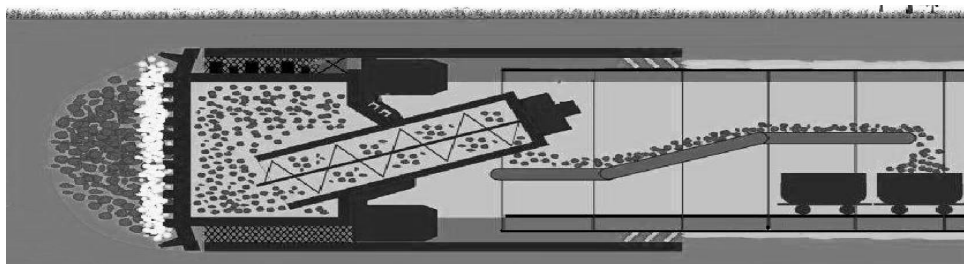
مخاطرات بایستی در مراحل مختلف پروژه ارزیابی ریسک سیستماتیکی از تمامی فعالیت‌ها انجام پذیرد [۴-۵]. فقدان مطالعات جامع و مدون در ارتباط با تجزیه و تحلیل ریسک‌های ایمنی و بهداشت شغلی در عملیات حفاری مکانیزه از یک سو و گسترش عملیات تونل‌سازی مکانیزه در پروژه‌هایی نظیر مترو، تونل‌های



تصویر ۱- قسمت‌های مختلف بدنه‌ی اصلی دستگاه تی بی ام



تصویر ۲- قسمت‌های پشتیبانی دستگاه تی بی ام



تصویر ۳- عملیات حفاری مکانیزه توسط دستگاه تی بی ام

با پیشروی عملیات حفاری، برروی ریل مخصوصی توسط دستگاه تی‌بی‌ام کشیده می‌شود. تصویر ۲ قسمت‌های مختلف سیستم‌های پشتیبانی دستگاه تی‌بی‌ام را نشان می‌دهد.

### روشن بررسی

مطالعه حاضر یک مطالعه موردی توصیفی است که در طی سال‌های ۸۹-۹۰ در پروژه‌ی حفاری تونل انتقال آب کرج با طول بیش از ۲۰ کیلومتر انجام شد. حفاری این تونل با استفاده از دستگاه ماشین حفار سپری تمام مقطع مکانیزه (Double Shield TBM) از نوع سنگ سخت (Hard Rock) و با قطر حفاری ۴/۶۶ متر انجام پذیرفت. از آنجاییکه در فرایند حفاری مکانیزه، مهم‌ترین و اصلی‌ترین فعالیت، عملیات دستگاه تی‌بی‌ام می‌باشد، در این بررسی مخاطرات این عملیات مورد آنالیز قرار گرفت.

در این مطالعه به منظور آنالیز مخاطرات از روش ردیابی انرژی و آنالیز مانع استفاده شد. از ویژگی‌های این روش این است که می‌توان از آن در آنالیز مخاطرات همه‌ی انواع سیستم‌های انرژی استفاده کرد [۱۳].

به منظور مطالعه دقیق‌تر فرایند حفاری مکانیزه توسط دستگاه تی‌بی‌ام، عملیات این دستگاه در ۷ بخش کاترهد، شیلد، ارکتور، کرین (Crane)، پی‌گراول (مخازن و تزریق)، تزریق دوغاب و مورتار و کارموور مورد مطالعه قرار گرفت. در این بررسی به منظور جمع‌آوری اطلاعات از روش‌های مشاهده، مصاحبه و تجربه و قضاوت کارکنان استفاده گردید؛ از طریق طراحی فرم‌هایی به نام فرم تجارب و قضاوت کارکنان از آنها خواسته شد تا ضمن درج نام و نوع فعالیت و سابقه‌ی کاری، سوابق حوادث و شبه‌حوادث خود و سایر همکارانشان را مستند نمایند. این فرم شامل بخش دیگری به نام شناسایی مخاطرات و ارائه‌ی پیشنهادات و راهکارهای کنترلی بود که در این قسمت از کارگر خواسته شد تا مخاطرات کار خود را نوشته و پیشنهادات خود را جهت کنترل مخاطره ذکر نماید. علاوه بر این،

آنالیز مانع (Energy Trace & Barrier Analysis (ETBA)) که در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفت، تاکنون در مطالعات متعددی استفاده شده است [۶-۱۲]. ساختار پی در پی این تکنیک باعث می‌شود تا در مقایسه با بسیاری از روش‌های آنالیز دیگر از رویکرد منطقی در خصوص شناسایی خطرات و کنترل‌ها برخوردار باشد [۱۳]. روش ETBA، روشی فرآیندی در شناسایی مخاطرات حاصله از تمامی منابع انرژی خطرناک است. این تکنیک با ارزیابی اقدامات کنترلی، ابزاری را برای ارزیابی جریان‌ها ناخواسته انرژی به سمت اهداف (افراد، تجهیزات و یا محیط زیست) فراهم می‌آورد. در واقع این تکنیک با هدف شناسایی و ارزیابی مخاطرات، تمامی منابع انرژی که پتانسیل ایجاد آسیب دارند را مورد بررسی قرار می‌دهد [۱۳].

- اجزای اصلی ماشین حفار تمام مقطع ماشین حفار تی‌بی‌ام از دو قسمت بدنه اصلی و تجهیزات پشتیبانی تشکیل شده است. بدنه‌ی اصلی دستگاه تی‌بی‌ام متشکل از قسمت‌های است که از جمله اجزای اصلی آن می‌توان به پیشانی حفاری (head Cutter) و دیسک‌های حفاری (Disk Cutter) اشاره نمود. کاترهد شامل یکسری دیسک کاتر می‌باشد که بر روی آن نصب شده است. این دیسک‌ها شامل تیغه‌هایی هستند که براساس نوع سنگ و قابلیت حفاری به صورت چرخشی در فشار زیاد، طراحی و ساخته شده‌اند. نخاله‌های حاصل از عملیات کاترهد توسط نوار نقاله‌ها به واگن‌ها جهت خروج از تونل منتقل می‌شود. تصویر ۱ قسمت‌های مختلف بدنه‌ی اصلی دستگاه تی‌بی‌ام را نشان می‌دهد.

قسمت‌های پشتیبانی (Back up)، تدارکات فعالیت‌های بدنه‌ی اصلی دستگاه را برعهده دارند؛ تخلیه و حمل نخاله حاصل از حفاری و نشتاب جداره تونل، پایدارسازی جداره‌ی تونل (با استفاده از تجهیزات حمل سگمنت، تزریق شن نخودی (PeaGravel) و تزریق دوغاب سیمان (Grouting) از فعالیت‌های بخش‌های مختلف قسمت پشتیبانی می‌باشند. این قسمت‌ها برروی واگن‌های متوالی نصب شده و همگام



جدول ۱- چک لیست مخاطرات شناسایی شده در هر یک از بخشهای مورد مطالعه در دستگاه تی بی ام

گروه	زیر گروه	کارموور	پی گراول/مخازن و تزریق	کرین	ارکتور	کاترهد	شیلد	تزریق دوغاب و مورتار
۱- فیزیکی	۱-۱- سروصدا	*	*	*	*			*
	۱-۲- ارتعاش		*	*	*			*
	۱-۳- میدان های الکتریکی و مغناطیسی	*	*	*				*
	۱-۴- پرتوهای یونساز							
	۱-۵- پرتوهای غیر یونساز							
	۱-۶- روشنایی							
	۱-۷- شرایط جوی			*	*			
۲- شیمیایی	۲-۱- گازهای تحت فشار							
	۲-۲- مواد قابل اشتعال و احتراق	*		*		*	*	
	۲-۳- مواد اکسید کننده							
	۲-۴- مواد مضر	*		*	*	*	*	*
	۲-۵- مواد خورنده							
	۲-۶- مواد واکنش دهنده خطرناک							
۳- مکانیکی	۳-۱- پرتاب		*					*
	۳-۲- ظروف تحت فشار				*		*	*
	۳-۳- سطوح داغ و سرد						*	*
	۳-۴- سقوط	*		*	*	*	*	*
	۳-۵- له شدگی							
	۳-۶- برش							
	۳-۷- لبه های تیز و برنده			*				
۴- الکتریکی	۳-۸- گیرایش (گرفتن های ناگهانی)	*		*	*			*
	۳-۹- به داخل کشیدن	*		*	*			*
	۳-۱۰- برخورد (تصادف)	*		*	*			*
	۴-۱- جریان الکتریسیه	*	*	*				*
۵- بیولوژیکی	۵-۱- عوامل بیولوژیک							
۶- طبیعی	۶-۱- عوامل مربوط به زمین					*		
	۶-۲- عوامل مربوط به آب و هوا							

مراکز دانشگاهی در محل مورد مطالعه، استفاده گردید؛ برخی از این داده‌ها مربوط به اندازه‌گیری عوامل زیان آور فیزیکی نظیر سروصدا، شرایط جوی، میدان‌های الکترو مغناطیسی، روشنایی و برخی مربوط به عوامل زیان آور شیمیایی در تونل بود. مراحل اجرا شده در این مطالعه و در فرایند بکارگیری روش ETBA، عبارت است از:

۱- شناسایی منابع انرژی؛ این مرحله شامل بررسی

به منظور اطمینان از شناسایی تمامی مخاطرات محتمل، مشاهدات و مصاحبه‌های متعددی در شیفتهای کاری مختلف و در طی ۶ ماه انجام پذیرفت. در طراحی چک‌لیست‌ها از آئین‌نامه‌ها و استانداردهای کاری [۱۴] استفاده شد. در مواردی که جهت شناسایی عوامل زیان آور نیاز به داده‌های اندازه‌گیری برای مقایسه با حدود مجاز تماس شغلی [۱۵] بود از نتایج بررسی‌های انجام شده توسط

وقوع خطر بترتیب با توجه به جداول ۲ و ۳ که برگرفته از استاندارد MIL-STD-882B [۱۸] می‌باشند، توسط جلسات متعدد تیم کارشناسی تعیین گردید. این جلسات با حضور مهندسین، سرپرستان کارگاه‌ها، نماینده کارگران و کارشناسان واحد ایمنی برگزار گردیده و رتبه‌های شدت و احتمال وقوع خطر با توجه به پیامدهای احتمالی مخاطرات و سوابق حوادث و شبه حوادث ثبت شده در پروژه و سایر پروژه‌های مشابه در نظر گرفته شد. با توجه به اینکه سوابق و تجربیات تیم کارشناسی نقش مؤثری در برآورد ریسک دارد در این مطالعه از افراد با تجربه‌ی کاری مرتبط و بالای پنج سال استفاده گردید. تعداد جلسات کارشناسی برگزار شده در مراحل مختلف این مطالعه بالغ بر ۱۷ جلسه بود.

در ستون تحلیل ریسک اولیه، یک مقیاس کیفی از ریسک وقوع رویداد برای مخاطرات شناسایی شده با وضعیت فعلی و بدون اجرای اقدامات کنترلی پیشنهادی تعیین شد. در این ستون با توجه به شاخص ریسک به دست آمده از تلفیق شدت و احتمال خطر در ماتریس ارزیابی و قضاوت ریسک (جدول ۴) [۹، ۱۳] یک کد دو بخشی به دست می‌آید؛ با مقایسه کد به دست آمده با معیارهای قضاوت ریسک، تحلیل اولیه‌ی ریسک به منظور تعیین ضرورت اجرای اقدامات کنترلی صورت پذیرفت. در ستون ۹ برگه‌ی کار ETBA، اقدامات کنترلی با مشورت کارکنان و مهندسین براساس یک روند نظام‌مند حذف، جانشینی، کنترل‌های فنی مهندسی، علائم، اخطارها و یا کنترل‌های مدیریتی و لوازم حفاظت فردی تعیین شد [۱۰، ۱۹]. در ستون دهم مشابه ستون هفتم با فرض اجرای راهکارهای کنترلی توصیه شده، مجدداً ریسک ارزیابی شده و در ستون یازدهم تحلیل ریسک ثانویه و میزان کفایت اقدامات کنترلی پیشنهادی، تعیین گردید.

### یافته‌ها

از مجموع ۷ قسمت دستگاه تی‌بی‌ام، ۵۱ منبع انرژی خطرناک در گروه‌های شش گانه‌ی انرژی شناسایی شد.

اجزای سیستم و شناسائی تمامی منابع انرژی بالقوه خطرناک می‌باشد. با تکمیل چک‌لیست‌ها، بررسی سوابق حوادث و شبه‌حوادث ثبت شده در واحد ایمنی، برگزاری جلسات کارشناسی با حضور مهندسین کارگاه، نماینده‌ی کارگران و کارشناسان واحد ایمنی، شناسایی منابع انرژی صورت پذیرفت [۳-۴، ۱۳-۱۴، ۱۶]. در جدول ۱ چک لیست مورد استفاده و تکمیل شده‌ی این مطالعه ارائه گردیده است.

۲- ردیابی انرژی؛ بعد از شناسایی منابع انرژی، بایستی مسیر هر انرژی در سیستم از ابتدا تا انتها ردیابی شود. این مرحله شامل شناسایی تمامی اهدافی است که ممکن است توسط منابع انرژی خطرناک، آسیب ببینند. بدین منظور از نمودارهای جریان انرژی استفاده گردید به نحوی که در یک طرف نمودار منبع انرژی و در طرف دیگر هدف انرژی ترسیم شده و در بین این دو، مسیر عبور انرژی و موانع (کنترل‌ها) مشخص شد [۹، ۱۳]. این بخش نیز با مشارکت مهندسین تی‌بی‌ام تکمیل و اجرا شد.

۳- شناسایی اقدامات کنترلی و ارزیابی سیستم؛ این مرحله با شناسایی تمامی کنترل‌های موجود در مسیر جریان انرژی و تعیین ریسک اولیه و همچنین توصیه‌ی کنترل‌های پیشنهادی جهت مهار جریان انرژی و تعیین ریسک ثانویه ناشی از انرژی‌های کنترل شده با مشارکت کارشناسان صورت پذیرفت [۹، ۱۳، ۱۷].

بمنظور پیاده سازی تکنیک ETBA از کاربرگ ویژه‌ای استفاده شد (جدول شماره ۶). در این کاربرگ ستون‌های مربوط به نوع و منبع انرژی، خطر، اهداف و کنترل‌های موجود با توجه به داده‌های جمع‌آوری شده تکمیل گردید. ستون نوع انرژی با استفاده از چک‌لیست جدول ۱ کامل شد.

در ستون مربوط به اهداف، اهدافی که در صورت عدم وجود و یا عدم کفایت موانع کنترلی ممکن است تحت تأثیر انرژی رها شده قرار گرفته و آسیب ببینند درج شد. ستون هفتم این کاربرگ مربوط به ارزیابی ریسک است. این ستون از دو قسمت شدت خطر و احتمال وقوع خطر تشکیل شده است. شدت و احتمال

جدول ۲- شدت خطر

ردیف	توصیف	طبقه	تعریف
۱	فاجعه بار	۱	مرگ یا از کار افتادن سیستم
۲	بحرانی	۲	جراحی، بیماری شغلی یا صدمه ی شدید به سیستم
۳	مرزی	۳	جراحی، بیماری شغلی یا صدمه ی خفیف به سیستم
۴	جزئی	۴	جراحی، بیماری شغلی یا صدمه-ی کمتر از حد خفیف به سیستم

جدول ۳- احتمال وقوع خطر

ردیف	توصیف	طبقه	تعریف حادثه
۱	مکرر	A	وقوع مکرر آن محتمل است.
۲	محتمل	B	در طول عمر سیستم چندین بار رخ خواهد داد.
۳	گاه به گاه	C	گاهی اوقات وقوع آن در طول عمر سیستم محتمل است.
۴	بعید	D	وقوع آن غیر محتمل است ولی ممکن است در طول عمر سیستم رخ می دهد.
۵	غیر محتمل	E	بسیار غیر محتمل است، می توان فرض کرد که خطر رخ نخواهد داد.

جدول ۴ - ماتریس ارزیابی و قضاوت ریسک

شدت خطر احتمال وقوع	فاجعه بار (۱)	بحرانی (۲)	مرزی (۳)	جزئی (۴)
مکرر (A)	1A <sup>a</sup>	2A <sup>a</sup>	3A <sup>a</sup>	4A <sup>c</sup>
محتمل (B)	1B <sup>a</sup>	2B <sup>a</sup>	3B <sup>b</sup>	4B <sup>c</sup>
گاه به گاه (C)	1C <sup>a</sup>	2C <sup>b</sup>	3C <sup>b</sup>	4C <sup>d</sup>
خیلی کم (D)	1D <sup>b</sup>	2D <sup>b</sup>	3D <sup>c</sup>	4D <sup>d</sup>
غیر محتمل (E)	1E <sup>c</sup>	2E <sup>c</sup>	3E <sup>c</sup>	4E <sup>d</sup>

<sup>a</sup> غیر قابل قبول، <sup>b</sup> نامطلوب، <sup>c</sup> قابل قبول با تجدیدنظر، <sup>d</sup> قابل قبول بدون تجدیدنظر

شیمیایی ۴۰٪ انرژی‌ها در زیرگروه مواد قابل اشتعال و ۶۰٪ در زیرگروه مواد مضر شناسایی شدند. در زیرگروه مکانیکی با بیشترین فراوانی منابع انرژی خطرناک، مخاطرات در قالب ۵ زیرگروه انرژی شناسایی شدند؛ زیرگروه سقوط با ۲۷٪، پرتاب با ۱۸٪، گیرایش و برخورد هرکدام با ۱۴٪، ظروف تحت فشار و بداخل کشیدن هرکدام با ۹٪ و لبه‌های تیزوبرنده و سطوح داغ و سرد هرکدام با ۴/۵٪ به ترتیب بیشترین و کمترین میزان فراوانی منابع انرژی را در بر گرفتند.

در این مطالعه در زیرگروه انرژی‌های مرتبط با عوامل فیزیکی عوامل سروصدا و ارتعاش در قسمت‌های ارتکوز، کرین، پیگراول، تزریق دوغاب و عامل سروصدا در قسمت کارموور در ارزیابی اولیه‌ی ریسک بالاترین رتبه‌ی ریسک را دارا بودند. ارزیابی ریسک ثانویه با فرض اجرای اقدامات کنترلی توصیه شده در هریک از

۲۹/۴٪ از این منابع انرژی شناسایی شده مربوط به انرژی‌های فیزیکی، ۱۹/۶٪ مربوط به انرژی‌های شیمیایی، ۴۱٪ مربوط به انرژی‌های مکانیکی، ۸٪ مربوط به انرژی الکتریکی و تنها ۲٪ مربوط به عوامل طبیعی بود.

کاربرگ‌های تکمیل شده در این مطالعه بالغ بر ۲۸ برگ شد که به دلیل حجم بالا و عدم امکان ارائه، در جدول ۵ بالاترین رتبه‌های ریسک ارزیابی شده در هریک از گروه‌های انرژی نشان داده شده است؛ ضمناً یک نمونه کاربرگ تکمیل شده مربوط به قسمت کارموور در این مقاله ارائه گردیده است (جدول ۶).

از دیگر یافته‌های این پژوهش این بود که ۶۰٪ از انرژی‌های فیزیکی مربوط به عوامل سروصدا و ارتعاش، ۱۳٪ مربوط به شرایط جوی و ۲۷٪ درصد مربوط به میدان‌های الکترومغناطیسی بودند؛ در گروه انرژی‌های



جدول ۶- نمونه برگه کار تکمیل شده (قسمت کارموور)

ردیف	نوع انرژی	منبع انرژی	خطر	اهداف		کنترل های موجود	تکمیل ریسک اولیه		پیشنهادات	ریسک ثانویه		تکمیل ریسک ثانویه	
				تجزیه و تحلیل	محدود زیست		شدت	احتمال		شدت	احتمال		
۱	مکانیکی	لوکوموتیو	گیر کردن اعضای بدن	✓	✓	ارتباط مداوم با اپراتور لوکو با استفاده از بیسیم، نظارت، آموزش اپراتور، اطلاع رسانی به سایرین از طریق بیج، اطلاع اپراتور کارموور به اپراتور کلین و بالعکس، استفاده از P.P.E مناسب و لباسکار شبرنگدار	B	۲	غیر قابل قبول	استفاده از روشهایی مناسب در هنگام چک کردن مالبندها، اطمینان از سلامت بلندگوهای Back Up و بازرسی آنها، آموزش پرسنل از جمله اپراتورهای لوکو و کارموور	D	۳	قابل قبول با تجدیدنظر
۲	مکانیکی	تجهیزات انتقال نیرو در جکهای کارموور	گیرایش و به داخل کشیدن اعضای بدن	✓	✓	خاموش کردن جک های کارموور در هنگام نگهداری و تعمیرات، سیستم مانیتور کارموور	B	۳	قابل تامل	بازرسی و اطمینان از سلامت جک ها قبل از شروع حفاری، آموزش اپراتور	D	۳	قابل تجدیدنظر
۳	مکانیکی	لوکوموتیو	تصادف	✓	✓	استفاده از چراغ های قرمز هشدار دهنده و اعلام وضعیت خطر در هنگام حرکت لوکو، ارتباط مداوم با اپراتور لوکو با استفاده از بیسیم، اطلاع بعموم از طریق پیجر، نظارت و آموزش اپراتور، اطلاع اپراتور کارموور به اپراتور کلین و بالعکس - استفاده از P.P.E	B	۱	غیر قابل قبول	استفاده از روشهایی مناسب، بازرسی بلندگوهای Back Up، تدوین دستورالعمل های ایمنی و نحوه ی انجام کار - آموزش پرسنل	D	۲	نامطلوب
۴	فیزیکی و جریان الکتریسیه	جریان های الکتریکی متناوب - کابل های برق ۲۰ کیلوولت	برق گرفتگی - اختلالات عصبی	✓	✓	استفاده از کابل های با پوشش مناسب	C	۱	غیر قابل قبول	ایجاد فاصله، آموزش پرسنل در مورد مخاطرات محتمل، معاینات ادواری پرسنل، چرخش شغلی	D	۴	قابل قبول بدون تجدیدنظر
۵	شیمیایی	جک های کارموور و گیربکس هیدروموتور	ناراحتی های پوستی و تنفسی - آلودگی زیست محیطی	✓	✓	آموزش به اپراتور کارموور، چک کردن مداوم جکها، نگهداری و تعمیر مداوم سیستم هیدرولیک دستگاه	B	۳	نامطلوب	پاکسازی مناسب محل ریزش روغن و جدا کردن آن در ظروف مخصوص - استفاده از دستکش های حفاظتی مناسب	D	۳	قابل قبول با تجدیدنظر

که بهرامپور و همکارانش به منظور بررسی اپیدمیولوژی پنج ساله و برآورد حوادث در کارگران ساختمانی یزد انجام داد نیز به این نتیجه رسید که بیشترین حادثه (۴۸/۵۸٪) از نوع سقوط بوده است [۲۲]. مسئله ی سقوط نه تنها این صنعت و عملیات بلکه در بسیاری از صنایع به عنوان یک ریسک فاکتور عمده تعیین گردیده است. در مطالعه یی که گوران و همکارانش در کشور ترکیه انجام دادند نیز به این نتیجه رسیدند بیشترین فراوانی آسیبها در این کشور به دلیل سقوط می باشد [۲۳]. در مطالعه ی دیگری که حلوانی و همکارانش در یزد انجام دادند نیز دریافتند که بیشترین علت حوادث شغلی سقوط (۲۰/۸٪) بوده است [۲۴].

خطر مکانیکی پرتاب نیز به عنوان دومین زیرگروه شایع از مخاطرات مکانیکی شایع تشخیص داده شد. در این مطالعه مشخص شد که فعالیت هایی نظیر تزریق پیگراول و دوغاب و همچنین عملیات حفاری در بردارنده ی این مخاطرات می باشند. پرتاب ذرات شن

در این مطالعه مشخص گردید قسمت کرین با ۱۹/۵٪ و قسمت های کاترهد و شیلد هرکدام با اختصاص ۱۰٪ از مجموع منابع انرژی خطرناک به ترتیب خطرناک ترین و کم خطرترین نقاط در فرایند حفاری با دستگاه تی بی ام می باشند. قسمت های کارموور و ارکتور هرکدام ۱۷/۵٪، پیگراول/مخازن و تزریق ۱۳/۵٪ و قسمت تزریق دوغاب و مورتار ۱۲٪ از منابع انرژی خطرناک را به خود اختصاص دادند.

### بحث و نتیجه گیری

همان طور که ذکر شد بیشترین منابع انرژی شناسایی شده مربوط به انرژی های مکانیکی بود. در زیرگروه انرژی مکانیکی بیشترین خطر مربوط به سقوط با ۲۷٪ فراوانی شناسایی شد زیرا در عملیات حفاری تونل فعالیت های مربوط به جابجایی و حمل بار بسیار زیاد می باشد. حوادث سقوط از ارتفاع جزء شایع ترین حوادث در پروژه های ساختمانی هستند [۲۰-۲۱]. در مطالعه ای

کارگران در پروژه‌های ساختمانی علاوه بر حوادث ناشی از کار با عوامل بیماری‌زایی نظیر دود و فیوم‌ها، صدا و ارتعاش مواجهه دارند [۲۲]. نتایج این مطالعه نیز مؤید این مطلب بود. در این مطالعه عوامل زیان‌آور سروصدا و ارتعاش، ۶۰٪ از منابع انرژی فیزیکی شناسایی شده را به خود اختصاص دادند؛ وجود تجهیزاتی نظیر کمپرسورها و پمپ‌ها در عملیات حفاری و سروصدای بسیار زیاد این تجهیزات و همچنین محصور بودن محیط کار در تونل، از جمله دلایل وجود این عوامل زیان‌آور است. این مسئله نیز با ارائه راهکارهایی کنترلی در منبع تولید سروصدا و ارتعاش و همچنین بر روی کارگر نظیر تعبیه سیستم صداگیر بر روی فن‌ها و کمپرسور پی‌گراول، ایزوله کردن مناسب کابین کارمور میزان ریسک ثانویه کاهش یافت. از دیگر انرژی‌های فیزیکی شناسایی شده شرایط نامساعد جوی و همچنین مواجهه با میدان‌های الکترومغناطیسی بود. کار کردن در اعماق تونل، بالا بودن رطوبت و دمای هوا و همچنین کار کردن در مجاورت خطوط برق پرفشار از مهمترین منابع بوجود آورنده‌ی این انرژی‌های خطرناک بودند.

جریان الکتریسیته و خطر برق گرفتگی در ۵۷٪ از قسمتهای مورد مطالعه دستگاه تی‌بی‌ام شناسایی شد. فراوانی تجهیزاتی که با جریان برق کار می‌کنند و مرطوب بودن محیط کار از عواملی است که اهمیت خطر برق گرفتگی را دو چندان می‌نماید.

۶۰٪ از منابع انرژی خطرناک شناسایی شده در گروه شیمیایی مربوط به زیرگروه مواد مضر بودند. بالا بودن عدد این گروه به این دلیل است که حجم وسیعی از مواد شیمیایی در این زیرگروه قرار دارند. گازهای خروجی از آگروز لوکوموتیو، آئروسول و گردوغبار ناشی از عملیات حفاری و گازهای زیرزمینی نظیر هیدروژن سولفور و متان همگی از موارد دربردارنده‌ی این عوامل خطرناک هستند. در مطالعه‌ی که بیک و همکارانش در ارتباط با مواجهه با گازها و گردوغبارها در مشاغل تونل‌سازی انجام دادند به این نتیجه رسیدند که میانگین هندسی گردوغبار کل و گردوغبار قابل تنفس

و خاک می‌تواند سبب آسیب رساندن به چشم‌ها گردد. در مطالعه‌ی که استادی مقدم در بررسی شیوع و علل حوادث چشمی ناشی از کار در مشهد انجام داد دریافت که مجموع ۶/۰۵٪ از حوادث شغلی مربوط به چشم بوده که ۲۵/۷٪ از این موارد در ارتباط با ورود اجسام خارجی به چشم بوده است [۲۵].

از دیگر یافته‌های این مطالعه این بود که هر کدام از زیرگروه‌های برخورد و گیرایش ۱۴٪ از منابع انرژی خطرناک را به خود اختصاص داده‌اند. خارج شدن واگن خاک از ریل در طول مسیر تونل، گیر کردن اعضای بدن در سگمنت فیدر (ارکتور)، گیر کردن اعضای بدن در هنگام حرکت لوکوموتیو و واگن‌های خاک از جمله فعالیت‌هایی است که در آنها مخاطرات برخورد و گیرایش شناسایی شد. به منظور کنترل ریسک‌های مذکور اقداماتی نظیر بازرسی مداوم تجهیزات، اطمینان از سلامت بلندگوها، آموزش مداوم به پرسنل و تدوین دستورالعمل‌های کاری توصیه گردید.

بهرامپور نیز در بررسی اپیدمیولوژیک خود دریافت که ۲۷/۵۳٪ از حوادث در کارگران ساختمانی، به دلیل برخورد اشیا بوده است [۲۲]. همچنین حلوانی و همکارانش نیز در مطالعه‌ی بررسی علل حوادث در کارگاه‌های تحت پوشش تامین اجتماعی یزد دریافتند که برخورد با موانع ۳/۴٪ و برخورد با اشیا متحرک ۵/۱٪ از موارد حوادث را در سال ۸۴ به خود اختصاص داده بودند [۲۴]. همچنین وزیری‌نژاد و همکاران در مطالعه‌ی خود در صنعت تولید مس دریافتند که شایع‌ترین حادثه‌ی شغلی در سال‌های مطالعه برخورد با اشیا با فراوانی ۵۱/۴٪ بوده است [۲۶]. همچنین محمدفام در مطالعه‌ی خود در صنعت تولید آلومینیوم دریافت که شایع‌ترین حادثه‌ی شغلی به دلیل برخورد با اشیا و به میزان ۳۸/۳٪ بوده و گیرایش نیز ۱۰٪ از موارد حوادث را به خود اختصاص داده است [۲۷]. اختلاف بین اعداد در صنایع مختلف به دلیل تفاوت در نوع و ماهیت کار و همچنین میزان به کارگیری و رعایت اقدامات کنترلی در هر یک از صنایع مورد مطالعه می‌باشد.

مورد استفاده قرار گیرد.

### منابع

1. Shahriar K, Rostami J, KhademiHamidi J, editors. TBM tunneling and analysis of high gas emission accident in Zagros long tunnel 2009.
2. Jafari MJ, Gharari N, Sheikhi HR. The Reliability of a Tunnel Boring Machine. International Journal of Occupational Hygiene. 2009;1(1).
3. OSHA OSHA. Underground Construction (Tunneling)-OSHA3115. 2003 ed: OSHA; 2003.
4. Aneziris O, Papazoglou I, Kallianiotis D. Occupational risk of tunneling construction. Safety Science. 2010;48(8):964-72.
5. Einstein HH, Veneziano D. Risk analysis for tunneling projects: Massachusetts Institute of Technology; 2010.
6. Booya Mostafa AS, Asilian Hossein MSB. Safety analysis of a corn processing industry by energy trace and barrier analysis method: a case study Iran Occupational Health Journal. 2007.
7. Nejadali H, Mortazavi SB, Khavanin A. LPG Storage Spheres Risk Assessment with FMEA and ETBA Methods. Journal of Kermanshah University of Medical Sciences. 2008;12(2).
8. Zaroushani V, Safari Varriani A, Ayati S, Nikpey A. Risk assessment in a foundry unit by energy trace and barrier analysis method (ETBA). Iran Occupational Health. 2010;6(4):7-14.
9. Shirali GHA, Adl J. How to perform Energy Trace & Barrier Analysis (ETBA) in industries? A case study in Isomax Unit of Tehran refinery. Iran Occupational Health Journal. 2006.
10. Doshman FYFAS, Farshad A, Arghami shirazeh HMH. Use of ETBA method (Energy Trace and Barrier Analysis) for hazard identification in a paint shop of an automobile production factory. Iran Occupational Health Journal. 2006.
11. Rahimi M. Systems safety for robots: an energy barrier analysis. Journal of Occupational Accidents. 1986;8(1):127-38.
12. Hollnagel E. Accident analysis and barrier functions. Project TRAIN, IFE. 1999.
13. Ericson CA. Hazard analysis techniques for system safety: Wiley-Interscience; 2005.
14. ISO B. 17776, (2000). Petroleum and natural gas industries—offshore production installations—guidelines on tools and techniques for hazard

در کارگران تی بی ام بیشترین مقدار را در مقایسه با سایر فعالیت‌های تونل‌سازی به خود اختصاص داده است [۲۸].

در ارتباط با عوامل طبیعی تنها منبع انرژی شناسایی شده عوامل مربوط به زمین بودند. با توجه به اینکه عملیات حفاری تونل توسط دستگاه تی بی ام همراه با قرار دادن سگمنت در دیواره‌ی تونل انجام می‌شود ریسک ریزش دیواره‌ها به حداقل مقدار ممکن کاهش یافته و تنها ممکن است هد دستگاه در هنگام حفاری در خاک گیر کند که این مسئله ریسک انسانی را به دنبال نخواهد داشت. جعفری و همکارانش نیز در آنالیز ریسک تی بی ام به روش تجزیه و تحلیل حالات شکست و اثرات آن به این نتیجه رسیدند که توقف کارترهد از بالاترین ریسک برخوردار است و این حالت منجر به توقف دستگاه تی بی ام می‌گردد [۲].

در توصیه‌های کنترلی بر آموزش ایمنی، بازرسی و نگهداری و تعمیرات تجهیزات به عنوان عناصر مؤثر در کاهش میزان مخاطرات توصیه شده است. تاکنون در مطالعات متعددی به تاثیر آموزش بر ارتقاء فرهنگ ایمنی و همچنین تدوین و اجرای برنامه‌های بازرسی و نگهداری و تعمیرات در کاهش مخاطرات اشاره شده است [۲۹، ۸].

از نقاط قوت این مطالعه می‌توان به استفاده از خرد جمعی در تمامی مراحل اجرای پروژه اشاره کرد که این موضوع باعث شد تا داده‌ها با خطای کمتری جمع‌آوری و آنالیز گردد و امکان استفاده از نتایج در سایر پروژه‌های مشابه مهیا گردد. در استفاده از روش ETBA ممکن است خطاهای انسانی و نقص تجهیزاتی که مستقیماً با منابع انرژی همراه نیستند در نظر گرفته نشود که این موضوع را می‌توان از معایب این تکنیک ذکر کرد؛ در این بررسی عدم وجود مطالعات مشابه قابلیت مقایسه را بین نتایج مطالعات محدود می‌ساخت. با توجه به نتایج به دست آمده می‌توان گفت که تکنیک ردیابی انرژی و آنالیز مانع با داشتن رویکردی منطقی می‌تواند به عنوان یک روش مؤثر آنالیز ریسک در عملیات حفاری مکانیزه تونل



27. Mohamadfam I. Evaluation of Occupational Accidents and Their Related Factors in Iranian Aluminum Company in 1999. Scientific Journal of Kurdistan University of Medical Sciences. 2001;19(3):18-26.
28. Bakke B, Stewart P, Ulvestad B, Eduard W. Dust and gas exposure in tunnel construction work. AIHAJ-American Industrial Hygiene Association. 2001;62(4):457-65.
29. Sanaenasab H, Ghofranipour F, Kazemnejad A, Khavanin A, Tavakoli R. The Effect of Composed Precede-Proceed Model, Social Cognitive and Adult Learning Theories to Promote Safety Behaviors in Employees. Journal of Kermanshah University of Medical Sciences. 2008;12(1).
- identification and risk assessment.1-45.
15. ACGIH TLV, editor. Threshold Limit Values for chemical substances and physical agents and Biological Exposure Indices. American Conference of Governmental Industrial Hygienists; 2009.
16. Safety IPoC, Organization WH. The International Programme on Chemical Safety (IPCS). WHO/IPCS; 1983.
17. Vincoli JW. Basic guide to system safety: Wiley-Interscience; 2006.
18. Standard M. System safety program requirements: MIL-STD-882B, Department of Defense, Washington DC 20301, USA, 30 March 1984.
19. OHSAS B. 18001 (2007) Occupational Health and Safety Management Systems. Requirements. British Standards. 2007.
20. Hu K, Rahmandad H, Smith-Jackson T, Winchester W. Factors influencing the risk of falls in the construction industry: a review of the evidence. Construction Management and Economics. 2011;29(4):397-416.
21. Latief Y, Suraji A, Nugroho YS, Arifuddin R. The Nature of Fall Accidents in Construction Projects: A Case of Indonesia. International Journal of Civil & Environmental Engineering. 2011;11(05):92-9.
22. Bahrapour A, Jafari Nodoushan R, Vatani Shoa J. Five-Year Epidemiological Study and Estimation of Accidents Distribution in Construction Industry Workers in Yazd City by the Year 2011 by Applying Time Series Model. Journal of Kerman University of Medical Sciences. 2009;16:156-65.
23. Unal H, Gök A, Gök K. Occupational Accident Characteristics in Türkiye between 1997-2005. Kastamonu Eğitim Dergisi. 2008;16(2):637-50.
24. Halvani GH, Fallah H, Barkhordari A, Khoshk Daman R, Behjati M, Koochi F. A Survey of causes of occupational accidents at working place under protection of Yazd Social Security Organization in 2005. Iran Occupational Health. 2010;7(3):22-9.
25. Ostadi moghadam H, Yekta A, Heravian J, Fahoul M, AFSHARNIA M. Prevalence and etiology of occupational eye accidents in Mashad industrial's workshop. Journal of Rehabilitation. 2004.
26. Vazirinejad R, Esmaeili A, Kazemi M. Occupational Accidents in Construction Industry Among People Referring to Labor and Social Affairs Office Rafsanjan, During 2000-2002. Journal of Rafsanjan University of Medical Sciences. [Research]. 2005;4(4):326-31.





## Risk Analysis of Automated Excavation Operations By Energy Trace & Barrier Analysis Method

J. Malakouti<sup>1</sup>, V. Gharibi<sup>2</sup>

Received: 2012/06/10

Revised: 2013/01/08

Accepted: 2013/01/15

### Abstract

**Background and aims:** In automated excavation operations especially excavating big tunnels with high operation speed the application of Tunnel Boring Machine (TBM) has been prevalent. Tunneling construction projects especially TBM excavating operations have experienced some accidents in recent years. Hazard control must be done through the process of risk management. This study was done with goal of risk analysis of automated excavation operations in one of the water transfer tunnel projects.

**Methods:** In this study for risk analysis, energy trace and barrier analysis technique was used. In data gathering process were used observation method, worker experience and judgments, checklist, standards & regulations and incident records. Recognition of energy sources, targets, probability and severity of hazards were done by competence experts in various team works. The identified risks were prioritized and control measures were recommended.

**Results:** In this study 51 hazardous energy sources in 6 energy categories were recognized. These identified energy sources included physical energy 29.4%, chemical energy 19.6%, mechanical energy 41%, electrical energy 8% and natural energy 2%. The crane section by 19.5%, shield by 10% and cutter head by 10% were the most and the least dangerous part of tunnel boring machine in excavation process.

**Conclusion:** Based on the findings of the study, TBM operations include various energy sources. Energy trace and barrier analysis technique can be used effectively in risk analysis of TBM operations.

**Keywords:** Risk Analysis, excavation, TBM, ETBA method

1. Instructor, Qom University of Medical Sciences, Qom, Iran.

2. (**Corresponding author**), Student of MSc, Tarbiat modares university, Tehran, Iran.  
gharibi\_88@yahoo.com