

مطالعه خرابی‌ها و ارزیابی قابلیت اطمینان ماشین حفار تمام مقطع تونل با روش تحلیل درخت خطا

مقاله پژوهشی

حاصل امینی خوشالان*

استادیار؛ گروه مهندسی معدن، دانشکده مهندسی، دانشگاه کردستان، h.amini@uok.ac.ir

دریافت دست‌نوشته: ۱۴۰۳/۱۱/۰۴؛ پذیرش دست‌نوشته: ۱۴۰۳/۱۲/۰۸

شماره صفحات: ۴۹ تا ۶۸

شناسه دیجیتال (DOI): 10.22044/tuse.2025.15655.1497

واژگان کلیدی	چکیده
خرابی‌های دستگاه TBM زیرسیستم تحلیل درخت خطا قابلیت اطمینان رابطه فاسل - وسلی	امروزه کاربرد ماشین‌های حفاری تمام مقطع تونل در پروژه‌های عمرانی از قبیل تونل‌های حمل و نقل جاده‌ای و مترو و همچنین عملیات معدنی از قبیل باز کردن تونل‌های اصلی و دسترسی معادن گسترش زیادی یافته است. با توجه به هزینه‌های نسبتاً زیاد عملیاتی این ماشین‌ها، نیاز است عملکرد این ماشین‌ها بیشتر مورد مطالعه قرار گیرد تا میزان در دسترس بودن آن‌ها افزایش یابد. یکی از راه‌کارها در این زمینه، مطالعه قابلیت اطمینان و شناسایی نقاط ضعف و خرابی‌های این ماشین‌ها می‌باشد. برای این منظور در تحقیق حاضر، با استفاده از روش تحلیل درخت خطا، خرابی‌های ماشین حفار خط یک مترو تبریز مورد مطالعه قرار گرفته و با در نظر گرفتن پنج زیرسیستم برای این ماشین، احتمال خرابی هر کدام از زیرسیستم‌ها و سپس احتمال خرابی ماشین مورد مطالعه تعیین گردید. نتایج تحلیل درخت خطا نشان داد احتمال خرابی ماشین ۶۲/۱۵ درصد و بنابراین قابلیت اطمینان آن برابر با ۳۷/۸۵ درصد می‌باشد در نهایت با استفاده از رابطه سنجش اهمیت فاسل - وسلی، سهم رخدادهای و همین‌طور برش‌های حداقل در احتمال وقوع خرابی ماشین حفار مشخص گردید. بر اساس نتایج به‌دست آمده، ابزارهای برشی ماشین و نوار نقاله از بحرانی‌ترین مجموعه‌های برشی حداقل در خرابی ماشین مورد مطالعه می‌باشند که تأثیر قابل توجهی در قابلیت اطمینان آن را به خود اختصاص داده‌اند.

۱- مقدمه

پرسنل می‌باشد. این ماشین‌ها قابلیت حفاری در شرایط مختلف زمین‌شناسی اعم از سنگ سخت تا زمین‌های سست شهری را دارند و از این‌رو دارای کاربرد گسترده‌ای در مهندسی عمران و مهندسی معدن می‌باشند (Koothongsumrit & Chankham, 2024). حفاری تونل‌های حمل و نقل جاده‌ای، انتقال آب و به ویژه تونل‌های مترو که به دلیل افزایش تراکم جمعیت شهرها و ضرورت استفاده از فضاهای زیرزمینی ناگزیر می‌باشد، با استفاده از TBM گسترش زیادی یافته است. با توجه به قابلیت‌ها و عملکرد بسیار مناسب این

اخیراً استفاده از ماشین‌های حفاری مکانیزه تمام مقطع تونل (Tunnel Boring Machine (TBM)) که به عنوان یک کارخانه بزرگ تونل‌سازی شناخته می‌شوند به سرعت در حال افزایش می‌باشد. دلایل استقبال از این ماشین‌ها شامل سرعت و کیفیت بالای حفاری و در نتیجه کاهش زمان اجرا و هزینه عملیات، کمترین تأثیر ممکن بر محیط زیست و سازه‌های سطح زمین و همچنین فراهم کردن محیطی ایمن برای

اطمینان برای افزایش توان انواع موشک‌ها به ویژه از نوع بالستیک، بهبود ایمنی و موفقیت اولین فضایی روسیه، استفاده در نیروگاه‌های هسته‌ای آمریکا، صنایع نفت و گاز در نروژ به‌طور گسترده‌ای رواج یافت و بدین ترتیب کاربرد آن در صنایع مختلف با استقبال زیادی مواجه شده است (Amini, Khoshalan, 2016).

۱-۱- کاربرد قابلیت اطمینان در مهندسی معدن و

حفر تونل

کاربرد مباحث قابلیت اطمینان در حوزه مهندسی معدن، به اواخر دهه ۱۹۶۰ بر می‌گردد. در این راستا روش‌های مختلف کیفی و کمی برای تحلیل، مدل‌سازی و شبیه‌سازی قابلیت اطمینان ماشین‌آلات و دستگاه‌های معدنی ارائه شده‌اند. در گزارش‌های ارائه شده، روش‌های آماری بیشترین کاربرد را در مطالعه قابلیت اطمینان ماشین‌آلات و سیستم‌های معدنی داشته‌اند. همچنین سایر روش‌ها شامل روش تحلیل درخت خطا، روش تحلیل انواع خرابی‌ها و تأثیرات آن‌ها، روش مارکوف، شبیه‌سازی مونت کارلو، شبکه بیزین و روش‌های مبتنی بر یادگیری ماشین از قبیل الگوریتم ژنتیک، ماشین بردار پشتیبان، شبکه عصبی مصنوعی و الگوریتم K-نزدیک‌ترین همسایه را می‌توان اشاره نمود (Hosseini, 2011; Odeyar, et al., 2022; Kumar, et al., 2023; Jakkula, et al., 2024).

قابلیت اطمینان ماشین LHD توسط کومار و گرانهولم (۱۹۸۸) صورت گرفت و تعمیر و نگهداری مبتنی بر قابلیت اطمینان برای این ماشین پیشنهاد گردید. یکی از تحقیقات جامع در مورد قابلیت اطمینان LHD توسط کومار (۱۹۹۰) انجام شد. در این تحقیق، برای ماشین‌های مورد مطالعه چهار زیرسیستم شامل زیرسیستم موتور، زیرسیستم حرکت، زیرسیستم هیدرولیک و زیرسیستم ترمز در یک شبکه سری در نظر گرفته شدند. سپس با استفاده از روش آماری و تحلیل داده‌های خرابی‌های اتفاق افتاده در هر زیرسیستم، قابلیت اطمینان آن‌ها و در نهایت مدل قابلیت اطمینان کل ماشین LHD ارائه شده است. از سایر مطالعات انجام شده در مورد قابلیت اطمینان ماشین‌های LHD می‌توان به تحلیل قابلیت اطمینان این ماشین با روش آماری و در نظر گرفتن ۱۰ زیرسیستم برای آن (Vagenas, et al., 1997)، ارزیابی قابلیت اطمینان LHD با استفاده از روش مارکوف و در نظر

ماشین‌ها به‌ویژه نوع تعادل فشار زمین در زمین‌های آبرفتی و سست شهری، در کشور ایران نیز تونل‌های مترو زیادی با این ماشین‌ها حفر شده یا در حال احداث می‌باشند. کاربرد TBM‌ها در مهندسی معدن نیز از سال ۱۹۵۰ به منظور توسعه معدن، بازکردن تونل‌های دسترسی جدید، تونل‌های اکتشافی، انتقال ماده معدنی و باطله، زهکشی و انتقال آب و تهویه مورد توجه قرار گرفته است (Brox, 2013; Hongtao, et al., 2023).

با توجه به هزینه‌های سرمایه‌گذاری اولیه و همین‌طور هزینه‌های نسبتاً زیاد عملیاتی TBM‌ها، جهت جلوگیری از توقف‌های ناشی از خرابی این ماشین‌ها ضروری است که شناخت کاملی از بخش‌های مختلف آن‌ها صورت گیرد تا با شناسایی دقیق نوع خرابی‌ها و مطالعه زمان خرابی‌هایی که در این ماشین‌ها اتفاق می‌افتد قابلیت اطمینان آن‌ها تعیین گردد و با ارائه برنامه مناسب برای تعمیر و نگهداری پیشگیرانه و اصلاحی بتوان توقف‌های ناخواسته TBM‌ها را تا حدود زیادی کاهش داد و هزینه‌های اجرای پروژه را کاهش داد (Amini, Khoshalan, 2015). بیشتر مطالعات صورت گرفته پیرامون عملکرد TBM‌ها در مورد نرخ نفوذ و نرخ پیش‌روی بوده است (Frough, et al., 2013; Ameri, et al., 2021; Dardashti, et al., 2022; She, et al., 2023) و اخیراً بحث تحلیل و بررسی خرابی‌های این ماشین‌ها به منظور بهبود قابلیت اطمینان و دسترسی آن‌ها مورد توجه واقع شده است.

مفهوم قابلیت اطمینان برای اولین بار بعد از جنگ جهانی اول به منظور مقایسه ایمنی عملیات هواپیماها مطرح گردید. سپس مباحث تئوری و کاربرد روش‌ها و تحلیل‌های آماری در بررسی کیفیت محصولات در اوایل دهه ۱۹۳۰ مطرح شد و با شروع جنگ جهانی دوم، آلمانی‌ها از این مباحث برای افزایش کیفیت موشک‌ها استفاده کردند که زیاد موفقیت‌آمیز نبود. پس از جنگ جهانی دوم، با کمک ریاضی‌دان‌ها و تجزیه و تحلیل‌های آماری و تعیین زیرسیستم‌ها برای دستگاه‌های پیچیده، مفاهیم و تئوری‌های قابلیت اطمینان به شکل جدی‌تری مطرح شدند و علاوه بر بحث هواپیماها و موشک‌ها در زمینه‌های گوناگون از جمله تجهیزات الکترونیکی، کامپیوترها و غیره به‌کار گرفته شدند. در دهه ۱۹۶۰ و ۱۹۷۰، با چاپ چندین مجله و کتاب در این زمینه، کاربرد قابلیت

زیرزمینی شامل اسکپ و قفسه با استفاده از الگوریتم ژنتیک (Vayenas & Peng, 2014)، قابلیت اطمینان سیستم اصلی حمل زغال شامل ۶ نوارنقاله در یک معدن در نروژ با روش آماری (Simon, et al., 2014)، قابلیت اطمینان و هزینه چرخه عمر دستگاه‌های چال‌زن (جامبو) با تحلیل‌های آماری (Al-Chalabi, 2014)، قابلیت اطمینان و تعمیر و نگهداری مبتنی بر آن به‌منظور بهبود بهره‌وری کامیون‌ها در معدن مس سونگون با استفاده از شبیه‌سازی مونت کارلو (Moniri, et al., 2014)، قابلیت اطمینان ناو زنجیری زرهی در معدن زغال‌سنگ طبس با روش آماری (Morshedloo & Dehghani, 2015)، قابلیت اطمینان نوار نقاله اصلی معدن زیرزمینی زغال‌سنگ چورچا در هند با روش آماری (Gorai, et al., 2017)، تأثیر شرایط محیطی بر قابلیت اطمینان تجهیزات معدن سونگون (Nouri Qarahasanlou, et al., 2019)، قابلیت اطمینان ماشین اکسکواتور با روش آماری (Suryo & Bayuseno, 2018; Clement, et al., 2019; Liu, et al., 2022)، تحلیل قابلیت اطمینان و تعمیرپذیری لودر و کامیون در معدن مس سونگون با روش آماری (Razzaghzadeh, et al., 2019)، قابلیت اطمینان ۱۰ دامپ تراک معدنی با روش آماری در یک معدن زغال‌سنگ ترکیه (Toraman, 2023)، قابلیت اطمینان کامیون‌های باربری معدن مس سونگون با تحلیل آماری و روش‌های پارامتری و غیرپارامتری (Moniri & Sattarvand, 2023)، تحلیل قابلیت اطمینان یک کامیون معدنی با روش مدل خطرات متناسب ((Proportional Hazard Model (PHM) نیمه پارامتری و پارامتری (Allahkarami, et al., 2022)، ارزیابی قابلیت اطمینان یک ناوگان کامیون‌های معدنی شامل ۷ کامیون در معدن مس سونگون (Rahmani, et al., 2023)، بررسی شاخص‌های قابلیت اطمینان ماشین‌آلات حمل و نقل در معادن زیرزمینی (Chibukhchyan, 2024)، مدل‌سازی شاخص‌های قابلیت اطمینان سیستم بالابری یک معدن با استفاده از نظریه گراف و تئوری مجموعه (Malozymov, 2024)، تحلیل قابلیت اطمینان کامیون‌های باربری معدن گل‌گهر با روش تحلیل درخت خطا و شبکه بیزین (Rahimdel, 2024) می‌توان اشاره نمود.

در زمینه قابلیت اطمینان TBM ها نیز پژوهش‌هایی انجام شده است. جعفری و همکاران (۲۰۰۹) با استفاده از

گرفتن ۶ زیرسیستم هیدرولیک، حرکت، انتقال نیرو، جام بارگیری، ترمز و لاستیک (Samanta, et al., 2004)، قابلیت اطمینان LHD های معمولی، نیمه خودکار و خودکار (Gustafson, 2013)، تحلیل قابلیت اطمینان LHD با استفاده از روش تخمین کاپلر - میر (KME) برای تحلیل روند در داده‌ها (Mouli, et al., 2014) و پیش‌بینی نرخ خرابی و تخمین قابلیت اطمینان LHD با روش ماشین بردار پشتیبان (Chatterjee, et al., 2015) و تحلیل قابلیت اطمینان، قابلیت دسترسی و قابلیت تعمیر و نگهداری یا تحلیل RAM (Reliability, Availability and Maintainability) ماشین LHD با روش آماری (Jakkula, et al., 2022)، اشاره نمود.

از دیگر تحقیقات گزارش شده در مورد قابلیت اطمینان ماشین‌آلات معدنی، تحلیل قابلیت اطمینان لاستیک کامیون‌های معدنی (Dey, et al., 1994)، مدل‌سازی قابلیت اطمینان شاول با روش تحلیل درخت خطا و در نظر گرفتن ۶ زیرسیستم شامل زیرسیستم‌های هیدرولیک، موتور، حرکت، کابل‌ها، جام بارگیری، بدنه و کابین اپراتور (Samanta, et al., 2001)، ارائه مدل قابلیت اطمینان دراگلاین با روش آماری (Townson, 2002; Pandey, et al., 20018)، تحلیل قابلیت اطمینان شاول هیدرولیکی با روش آماری (Hall & Daneshmand, 2003)، تأثیر شرایط و پارامترهای محیطی و عملیاتی بر قابلیت اطمینان ماشین‌آلات معدنی (Ghodrati, 2005)، تحلیل قابلیت اطمینان ناو زنجیری با روش تحلیل درخت خطا (Gupta & Bhattacharya, 2007)، مدل‌سازی قابلیت اطمینان کارخانه خردایش در معدن بوکسیت جاجرم (Barabady & Kumar, 2007)، قابلیت اطمینان ماشین لودر در معدن سنگ آهن با روش آماری (Esmaeili, et al., 2011)، مدل‌سازی و شبیه‌سازی قابلیت اطمینان درام شیرر در معادن جبهه‌کار طولانی با روش آماری (Hoseinie, et al., 2012)، بهبود قابلیت اطمینان ماشین لق‌گیر در معادن زیرزمینی سوئد با روش آماری (Wijaya, 2012) قابلیت اطمینان ماشین‌آلات حفار چرخشی در معدن مس سرچشمه با استفاده از روش آماری (Rahimdel, et al., 2013)، قابلیت اطمینان ماشین دراگلاین در معادن روباز زغال در هند (Mohammadi, et al., 2013)، قابلیت اطمینان سیستم بالابر در معادن

ایمنی، قابلیت اطمینان و قابلیت دسترسی دستگاه‌ها و سیستم‌ها در صنایع مختلف مورد استقبال گسترده‌ای واقع شده است (Lewis, 1966; Bedford & Cooke, 2001). در زمینه مهندسی معدن نیز این روش مورد توجه محققین قرار گرفته است. استفاده از روش تحلیل درخت خطا برای افزایش ایمنی در معادن (Iverson, 2001)، تحلیل خرابی‌ها و قابلیت اطمینان ماشین شاول با استفاده از تحلیل درخت خطا (Samanta, et al., 2001)، تحلیل پایداری و ارزیابی ریسک در معادن زغال استرالیا (Allanson, 2002)، ارزیابی و تحلیل قابلیت اطمینان سیستم معدن‌کاری جبهه‌کار طولانی (Gupta, 2003)، تحلیل تعمیر و نگهداری و قابلیت اطمینان دستگاه شیر در معادن جبهه‌کار طولانی (Gupta, et al., 2006)، بررسی و کنترل انفجارهای ناشی از گاز متان حین عملیات تونل‌سازی (Kissell, 2006)، تحلیل پارامترهای مؤثر در جریان غیرقابل کنترل آب در شیب‌های سنگی (Dokas, 2009)، بررسی احتراق خودبخودی زغال در معادن زیرزمینی (Beamish, 2010)، استفاده از روش تحلیل درخت خطا در تحلیل حوادث ناشی از آتش سوزی در معادن زغال (Shao-Jie, 2013)، بررسی دلایل حوادث ناشی از کامیون‌های باربری در معادن روباز ایالات متحده آمریکا در فاصله زمانی از سال ۱۹۹۵ تا سال ۲۰۱۱ (Zhang, et al., 2014)، تحلیل خرابی‌ها در کارخانه سیمان خوی با روش تحلیل درخت خطا (Nouri Gharahasanlou, et al., 2014)، تحلیل درخت خطا و استراتژی‌های کاهش ریسک برای بالابرهای معدنی (Giraud & Galy, 2018)، استفاده از روش تحلیل درخت خطا در ارزیابی و مدیریت ریسک در پروژه‌های حفاری تونل از دیدگاه مخاطرات ژئوتکنیکی (Mikaeil, et al., 2020)، آنالیز ریسک‌ها در حفاری تونل با روش تحلیل درخت خطا (Hyun, et al., 2015; Yang & Deng, 2021)، بررسی و آنالیز ریسک‌های بهداشت و ایمنی در معادن سطحی با روش تحلیل درخت خطای فازی (Jiskani, et al., 2022)، مطالعه حوادث ساخت تونل‌های مترو در چین (Qie & Yan, 2022) و تحلیل حوادث سیستم حمل و نقل زغال‌سنگ با روش تحلیل درخت خطا (He, et al., 2024)، نمونه‌هایی از کاربردهای روش تحلیل درخت خطا در حوزه مهندسی معدن و تونل‌سازی می‌باشد. نتایج تحقیقات پیشین نشان داد که قابلیت اطمینان در

روش تحلیل انواع خرابی و تأثیر آن‌ها (FMEA) و در نظر گرفتن چهار زیرسیستم برق، هیدرولیک، پنوماتیک و مکانیک، قابلیت اطمینان TBM در یکی از تونل‌های بزرگراه تهران - شمال را به صورت کیفی بررسی نمودند. در جامع‌ترین مطالعه‌ای که در این زمینه صورت گرفته است امینی (۱۳۹۵) با در نظر گرفتن ۵ زیرسیستم برای TBM و روش تحلیل آماری خرابی‌ها و تعمیرات صورت گرفته، به مدل‌سازی قابلیت اطمینان، قابلیت دسترسی و قابلیت تعمیر و نگهداری (RAM) دستگاه TBM از نوع تعادل فشار زمین پرداخته است. نتایج این تحقیق نشان داد که اگر تعمیر و نگهداری پیش‌گیرانه‌ای صورت نپذیرد قابلیت اطمینان ماشین حفار بعد از گذشت ۶۰ ساعت عملیات پیوسته حفاری به صفر نزدیک می‌شود و عملیات حفاری در اثر خرابی ماشین متوقف خواهد شد. در تحقیق دیگری، تحلیل RAM ماشین حفار در یک تونل در کشور هندوستان با استفاده از مدل مارکوف و با در نظر گرفتن ۴ زیرسیستم شامل کاترهد، هیدرولیک، نوار نقاله و بدنه صورت گرفته است (Agrawal, et al., 2019). میکائیل و همکاران (۲۰۲۲) به شبیه‌سازی قابلیت اطمینان TBM با روش مونت کارلو با در نظر گرفتن ۵ زیرسیستم شامل زیرسیستم مکانیک، برق، هیدرولیک، هوای فشرده و آب پرداختند. در آخرین مطالعه‌ای که در این زمینه گزارش شده است کوهساری و همکاران (۲۰۲۲)، تحلیل قابلیت RAM ماشین حفار خطوط یک و دو مترو اصفهان را با در نظر گرفتن سه زیرسیستم مکانیک، برق و کاترهد با استفاده از تحلیل‌های آماری و روش مارکوف ارائه نمودند.

۱-۲- کاربرد روش تحلیل درخت خطا در ارزیابی خرابی‌ها و قابلیت اطمینان در مهندسی معدن و حفر تونل

یکی از روش‌هایی که کاربرد زیادی در تحلیل و ارزیابی خرابی‌ها و تعیین قابلیت اطمینان ماشین‌آلات دارد روش تحلیل درخت خطا می‌باشد. این روش نخستین بار به منظور بررسی قابلیت اطمینان سیستم کنترل پرتاب موشک در اوایل دهه ۱۹۶۰ در آزمایشگاه بل (Bell) مورد استفاده قرار گرفت. این روش در سال‌های بعد توسط شرکت هواپیمایی بوئینگ توسعه یافت و به صورت گسترده به کار گرفته شد (Recht, 1966). از سال ۱۹۶۵ استفاده از این روش برای ارزیابی

زیرسیستم در دسترس باشد می‌توان از رابطه زیر برای تعیین قابلیت اطمینان استفاده کرد. از آنجایی که در تحقیق حاضر، فراوانی همه خرابی‌های حادث شده در ماشین حفار مورد مطالعه از گزارش‌های ثبت شده توسط تیم‌های تعمیر و نگهداری *TBM* و نیز سرپرست شیفت حفاری جمع‌آوری گردید از این رابطه برای تحلیل درخت خطای ماشین حفار استفاده شده است.

$$R(s) = 1 - F(s) \quad (3)$$

در این رابطه، $F(s)$ احتمال خرابی سیستم یا ماشین حفار و $R(s)$ قابلیت اطمینان کلی آن در بازه مورد مطالعه (یک سال عملیاتی) می‌باشد.

۳- روش تحلیل درخت خطا

این روش یک نمودار به شکل درختی است که از بالا به پایین بر اساس رخدادهایی که در وقوع خرابی اصلی مورد نظر سهیم هستند ترسیم می‌گردد. در این شبکه خرابی مورد نظر (در این تحقیق خرابی *TBM*) به عنوان رخداد بالایی یا اصلی در نظر گرفته شده و مسیر خرابی‌ها یا خطاها از بالا به پایین با شناسایی خرابی‌ها یا عوامل میانی (در این تحقیق خرابی زیرسیستم‌های *TBM*) و در انتها عوامل سببی یا رخدادهای پایه (خرابی‌های اتفاق افتاده در هر زیرسیستم) دنبال می‌گردد. روش تحلیل درخت خطا به صورت کیفی و در صورت مشخص بودن احتمال وقوع رویدادها به صورت کمی نیز می‌تواند انجام شود. با توجه به نقش رخدادهای میانی و پایانی در وقوع رخداد اصلی، ترکیب‌هایی از این رخدادهای برای وقوع رخداد اصلی لازم و کافی هستند به عنوان برش‌های حداقل (*MCS: Minimal Cut Sets*) در نظر گرفته می‌شوند و با محاسبه احتمال وقوع رخدادهای پایانی احتمال وقوع رخدادهای میانی و در نهایت، احتمال وقوع رخداد اصلی یا رخداد بالایی تعیین می‌گردد (*Sharma & Singh, 2015*). در واقع در روش تحلیل درخت خطا، شناسایی خرابی‌ها برای هر سیستم یا دستگاه از کل به جزء انجام می‌شود و عواملی که بیشترین تأثیر را بر روی رخداد نهایی دارند شناسایی می‌شوند. سپس اطلاعات به دست آمده جهت ارزیابی احتمال وقوع رخداد نامطلوب و روش‌های کاهش این احتمال وقوع به کار می‌رود و هرچقدر احتمال خرابی یک سیستم بیشتر باشد قابلیت اطمینان آن کمتر خواهد بود.

زمینه‌های گوناگون و از جمله مهندسی معدن به شدت مورد توجه واقع شده است. ماشین حفاری تمام مقطع تونل نیز به عنوان یکی از دستگاه‌های پرکاربرد در زمینه تونل‌سازی مکانیزه و همچنین مهندسی معدن از این موضوع بی‌بهره نبوده است و روش‌های مختلفی برای تحلیل قابلیت اطمینان این ماشین‌ها استفاده شده است. به منظور توسعه این موضوع، در این مطالعه از روش تحلیل درخت خطا برای تحلیل قابلیت اطمینان *TBM* از نوع تعادل فشار زمین استفاده شده است که در مطالعات گذشته، استفاده از این روش برای تحلیل قابلیت اطمینان ماشین حفار تمام مقطع تونل گزارش نشده است. برای این منظور از داده‌های عملیاتی ماشین حفار تمام مقطع تونل از نوع تعادل فشار زمین ساخت شرکت *NFM* چین در خط یک مترو تبریز استفاده شده است. برای تحلیل صحیح خرابی‌ها و محاسبه قابلیت اطمینان، با توجه به ساختار پیچیده و زیاد بودن اجزای این ماشین، ۵ زیرسیستم شامل زیرسیستم‌های مکانیک، برق، هیدرولیک، آب و هوای فشرده برای *TBM* مورد مطالعه در نظر گرفته شده است و خرابی‌های اتفاق افتاده در هر زیرسیستم جداگانه مورد تحلیل قرار گرفته است.

۲- قابلیت اطمینان

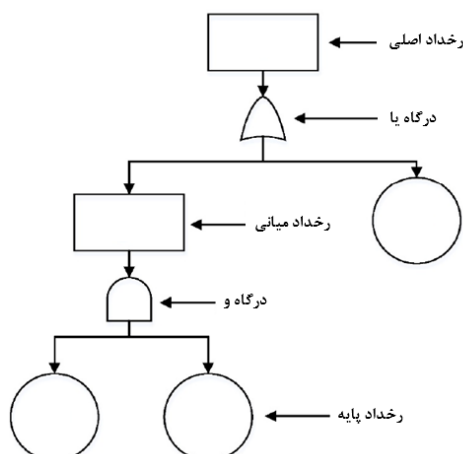
قابلیت اطمینان احتمال این‌که یک سیستم یا یک زیرسیستم در شرایط معین و در دوره زمانی مشخص، بتواند مأموریت خود را به درستی و بدون خرابی انجام دهد تعریف می‌شود و به صورت تابعی از زمان تحت عنوان مدل قابلیت اطمینان سیستم ارائه می‌شود (*Amini Khoshalan, 2016*):

$$R(t) = 1 - F(t) = 1 - \int_0^t f(t) dt \quad (1)$$

$$F(t) = \int_0^t f(t) dt = \text{احتمال وقوع خرابی تا زمان } t \quad (2)$$

در این روابط، $f(t)$ تابع چگالی احتمال توزیع خرابی، $F(t)$ تابع توزیع تجمعی خرابی و $R(t)$ تابع قابلیت اطمینان می‌باشد که به صورت تابعی از زمان بیان می‌شود. متغیر این روابط، زمان بین خرابی‌ها (*TBF: Time between failure*) برای خرابی‌های اتفاق افتاده در هر زیرسیستم می‌باشد. چنانچه به جای زمان بین خرابی‌ها، فراوانی کلیه خرابی‌های اتفاق افتاده در یک سیستم یا

رخداد اصلی با دقت و جزئیات بیشتر بررسی گردد تحلیل‌ها ارزشمندتر و دقیق‌تر خواهند بود. همان‌طور که قبلاً اشاره گردید چنان‌چه احتمال وقوع تمامی رخدادهای پایه در دسترس باشد با تحلیل کمی درخت خطا می‌توان با توجه به نوع درگاه‌های استفاده شده، احتمال هر یک از رخداد‌های میانی و سپس رخداد اصلی را به‌دست آورد.



شکل ۱- نمودار درخت خطا با اجزای اصلی آن (Odeyar, et al., 2022)

درگاه "یا" برای حالتی که رخداد خروجی (رخداد میانی یا اصلی) به وقوع حداقل یک رخداد ورودی این درگاه وابسته باشد کاربرد دارد. مفهوم ریاضی این درگاه به صورت زیر می‌باشد (Dhillon, 2008):

$$F(s) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - F(s_i)) \quad (4)$$

که در آن، n تعداد رخداد‌های خرابی ورودی درگاه، $F(s)$ احتمال وقوع رخداد خروجی درگاه و $F(s_i)$ احتمال وقوع هر کدام از رخداد‌های خرابی ورودی به درگاه می‌باشد.

درگاه "و" موقعی استفاده می‌شود که خروجی درگاه (رخداد میانی یا اصلی) به وقوع همه‌ی رخداد‌های ورودی وابسته باشد. مفهوم ریاضی این درگاه نیز به صورت زیر می‌باشد:

$$F(s) = \prod_{i=1}^n F(s_i) \quad (5)$$

که در آن، $F(s)$ احتمال وقوع رخداد خروجی درگاه "و" می‌باشد.

بنابراین با ترسیم بلوک دیاگرام متناسب با درخت خطا برای ماشین حفار تمام مقطع تونل به عنوان یک سیستم پیچیده، می‌توان قابلیت اطمینان این ماشین را محاسبه نمود. این دیاگرام در واقع مدلی از چیدمان فیزیکی سیستم می‌باشد و نشان می‌دهد که برای عملکرد صحیح سیستم، چگونه هر کدام از اجزای آن سیستم باید عمل نمایند.

روش تجزیه و تحلیل درخت خطا شامل دو مرحله زیر می‌باشد (Odeyar, et al., 2022):

الف- ساخت درخت خطا:

بعد از تعریف سیستمی که قرار است آنالیز شود و مشخص شدن میزان فعالیت‌ها و نیز مطالعه ماهیت رخداد‌های نامطلوب یا نقص‌ها، گام بعدی انتخاب رخداد اصلی است که معمولاً مهم‌ترین، شدیدترین یا نامطلوب‌ترین رخداد است. در ضمن می‌بایست چرخه عمر سیستم نیز مشخص شود سپس فرد شروع به ترسیم درخت خطا می‌کند. رخداد‌های سطوح اول، علت‌های لازم و کافی برای رخداد اصلی هستند. سایر سطوح نیز با کمک روابط منطقی اضافه می‌شود. بهتر است علت‌های بلاواسطه را در سطوح بالای درخت خطا قرار داد زیرا در این حالت دخالت دادن خطاها و نقص‌های ریز و جزئی در ساختمان درخت راحت‌تر می‌شود. درخت‌های خطا با رخداد‌ها و درگاه‌های نمادین متعددی ساخته می‌شوند. اگر چه رخداد‌ها و درگاه‌های زیادی وجود دارند، با این حال اکثر درخت‌های خطا می‌توانند با چهار رخداد و نماد اصلی زیر ساخته شوند:

رخداد اصلی (Top event) یا میانی (Intermediate Event)

درگاه "یا" (OR)

درگاه "و" (AND)

رخداد پایه (Basic Event)

این رخداد‌ها مطابق شکل ۱، نمودار درخت خطا را تشکیل می‌دهند که با توجه به پیچیدگی سیستم مورد مطالعه و تعداد زیرسیستم‌ها و رخداد‌ها این درخت توسعه پیدا می‌کند.

ب- تحلیل کیفی و کمی درخت خطا

درخت خطا ذاتاً یک ارزیابی کیفی از رخداد‌هایی است که باعث اتفاق افتادن رخداد اصلی می‌شوند. هرچقدر علل وقوع

پیشران یا جلوبرنده، هیدروموتورها یا واحد محرکه تأمین گشتاور جهت چرخش کله حفار، مخزن تخلیه مواد حفاری شده، مسیر دسترسی به این مخزن و سینه‌کار در آن تعبیه شده است که پشت سر کله حفار دستگاه قرار گرفته است. شکل ۲، نمایی از TBM خط یک مترو تبریز را نشان می‌دهد.

جدول ۱- مشخصات اصلی ماشین مورد مطالعه

مشخصه ماشین	کمیت
قطر حفاری	۶/۸۸ متر
نیروی محرکه موتورهای کله حفار	۹۴۵ کیلووات
حداکثر گشتاور	۱۱۹۳۰ کیلونیوتن متر
حداکثر نرخ نفوذ	۸۰ میلیمتر در دقیقه
تیغه‌های برش	۱۴۴ عدد در سه نوع
کل نیروی محرکه مورد نیاز	۲۶۰۰ کیلو ولت آمپر
عرض و ضخامت سگمنت	۱۴۰ و ۳۰ سانتی‌متر
طول دستگاه و سیستم پشتیبانی	۱۰۲/۱ متر
وزن کل	۶۲۰ تن



شکل ۲- ماشین حفار خط یک مترو تبریز (NFM Technologies, 2007)

۶- تحلیل خرابی و ارزیابی قابلیت اطمینان ماشین حفار خط یک مترو تبریز

در این بخش با توجه به پایگاه تهیه شده بر اساس داده‌های خرابی مربوط به ۱۲ ماه کاری عملیات حفاری دستگاه TBM خط یک مترو تبریز، از تحلیل کمی روش تحلیل درخت خطا برای ارزیابی عوامل مؤثر بر خرابی این ماشین استفاده شده

۴- تعیین میزان اهمیت رخدادهای پایه و مجموعه‌های برشی حداقل

با محاسبه‌ی احتمال رخدادهای پایه و همچنین رخداد اصلی یا رخداد بالایی، می‌توان با استفاده از رابطه‌ی سنجش اهمیت فاسل - وسلی (Fussell - Vesely Importance (FVI)، سهم رخدادها و همین‌طور برش‌های حداقل (MCS) را در احتمال وقوع رخداد بالایی مشخص کرد. این رابطه به صورت زیر بیان می‌شود (Dhillon, 2008):

$$FVI(i) = \frac{F(E_i)}{F(E_T)} \quad (6)$$

در این رابطه، $FVI(i)$ اهمیت رخداد پایانی یا مجموعه برشی حداقل i در وقوع رخداد اصلی، $F(E_i)$ احتمال وقوع رخداد یا مجموعه برشی حداقل i و $F(E_T)$ احتمال وقوع رخداد اصلی می‌باشد.

۵- مطالعه موردی: ماشین حفار خط یک مترو

تبریز

مشخصات اصلی ماشین حفاری مورد مطالعه در جدول ۱، آورده شده است. این TBM با بیش از ۱۰۰ متر طول دارای بخش پشتیبان (Back up) (شامل ۹ تریلر یا گنتری) و همچنین دارای دو بخش یا کابین اتصال بوده که بین دو بخش پشتیبانی و بخش جلویی ماشین (شامل بخش سپر و کله‌حفار) واقع شده است.

قسمت پشتیبان این TBM دربرگیرنده سیستم‌های پشتیبانی از عملیات حفاری سینه‌کار و پیشروی ماشین می‌باشد. سیستم‌های مختلف برق از قبیل ترانسفورماتور و منبع برق، سیستم‌های هیدرولیک، کمپرسور هوای فشرده و هوای تنفسی، مخازن پلیمر، تهیه فوم و بنتونیت، سیستم‌های کنترلی و ایمنی، مخازن آب و پمپ‌های آبکشی، نوار نقاله برای انتقال مواد کنده شده از سینه‌کار و ... در این بخش واقع شده‌اند. در بخش اتصال ماشین، تجهیزاتی از قبیل نصاب قطعات بتونی (Erector) و ملزومات آن، نقاله حلزونی، واحد تنظیم فوم، مخازن گریس، کانال تهویه، سیستم روشنایی، کابین کنترل TBM، و ... قرار دارند. بخش جلویی این ماشین که بخش سپر (Shield) و کله حفار (Cutterhead) می‌باشد شامل سه سپر بوده که تکیه‌گاه نصاب قطعات، جک‌های

مرتبط با رخداد اصلی و رخداد های میانی، احتمال وقوع آن‌ها محاسبه گردید که مطابق جدول ۴، می‌باشد.

جدول ۲- برخی از خرابی‌های زیرسیستم هیدرولیک

شماره	علت خرابی و توقف ماشین
۱	بالا رفتن دمای روغن
۲	تعویض شیر هیدرولیک یکی از جک‌های بالابر ارکتور
۳	پایین آمدن سطح روغن مخزن اصلی و تزریق روغن
۴	افزایش ناگهانی فشار پمپ‌های هیدرولیک
۵	ترکیدن شیلنگ هیدرولیک نقاله سگمنت
۶	نقص فنی هیدرولیکی نقاله سگمنت و رفع آن
۷	نقص فنی فیلتر روغن
۸	نقص فنی شیلنگ هیدرولیک جک‌های پیش‌ران
۹	افت فشار جک‌های پیش‌ران
۱۰	نقص فنی فیلتر پمپ هیدرولیکی JZ1200

با توجه به نمودار درخت خطا بر اساس احتمال خرابی‌های رخداد های پایه از پایین به بالا احتمال خرابی رخداد های میانی و در نهایت احتمال خرابی رخداد اصلی که همان احتمال خرابی TBM می‌باشد محاسبه شده است. به عنوان مثال احتمال خرابی زیرسیستم هوای فشرده (درگاه OR_{10}) با در نظر گرفتن رخداد های پایه $E59$ تا $E67$ به صورت زیر به دست آمده است:

$$E(OR_{10}) = 1 - \prod_{i=1}^9 (1 - F(s_i)) = 1 - [(1 - 0.0034)(1 - 0.0137)(1 - 0.0034)(1 - 0.021)(1 - 0.038)(1 - 0.0034)(1 - 0.0103)(1 - 0.0034)(1 - 0.0034)] = 9.62\%$$

محاسبه شده است:

است. در این بررسی، خرابی و توقف ماشین حفار به عنوان رخداد اصلی (رخداد بالا) و هر کدام از پنج زیرسیستم تعریف شده برای ماشین مورد مطالعه به عنوان رخداد های میانی در نظر گرفته شده است همچنین خرابی‌های هر کدام از این زیرسیستم‌ها به عنوان رخداد پایه در درخت خطا ترسیم شده است. با توجه به فراوانی خرابی‌ها و همچنین محل وقوع خرابی‌های زیرسیستم‌های مکانیک، برق و هیدرولیک، دو بخش جداگانه شامل بخش سپر و کله حفار و بخش اتصال و پشتیبان برای تحلیل خرابی‌های این سه زیرسیستم در نظر گرفته شده است تا بتوان دید بهتری از میزان خرابی‌ها و اهمیت هر کدام از این بخش‌ها بر روی عملکرد ماشین حفار را مورد بررسی قرار داد. برخی از خرابی‌های زیرسیستم هیدرولیک به عنوان نمونه در جدول ۲، آورده شده است.

شکل ۳، درخت خطای مربوط به خرابی و توقف ماشین حفار خط یک مترو تبریز را نشان می‌دهد.

با توجه به پایگاه داده تهیه شده، احتمال وقوع تمامی خرابی‌های اتفاق افتاده در بازه زمانی مورد مطالعه، محاسبه گردید که نتایج آن مطابق جدول ۳، می‌باشد. لازم به ذکر می‌باشد نماد مثلث در نمودار درخت خطا، معرف انتقال زیر شاخه‌های درخت می‌باشد.

مطابق شکل درخت خطای ارائه شده برای ماشین مورد مطالعه، تمامی درگاه‌ها از نوع درگاه "یا" می‌باشند. بنابراین با توجه به رابطه مربوط به این درگاه، برای تمامی درگاه‌های

همچنین با تعیین شدن احتمال خرابی هر ۵ زیرسیستم

اصلی، احتمال خراب شدن دستگاه TBM از رابطه زیر

$$E(TBM) = 1 - \prod_{i=1}^5 (1 - F(s_i)) = 1 - [(1 - 0.4145)(1 - 0.1142)(1 - 0.1526)(1 - 0.0962)(1 - 0.047)] = 62.15\%$$

جدول ۳- خرابی‌های ماشین حفار خط یک مترو تبریز و احتمال وقوع آن‌ها

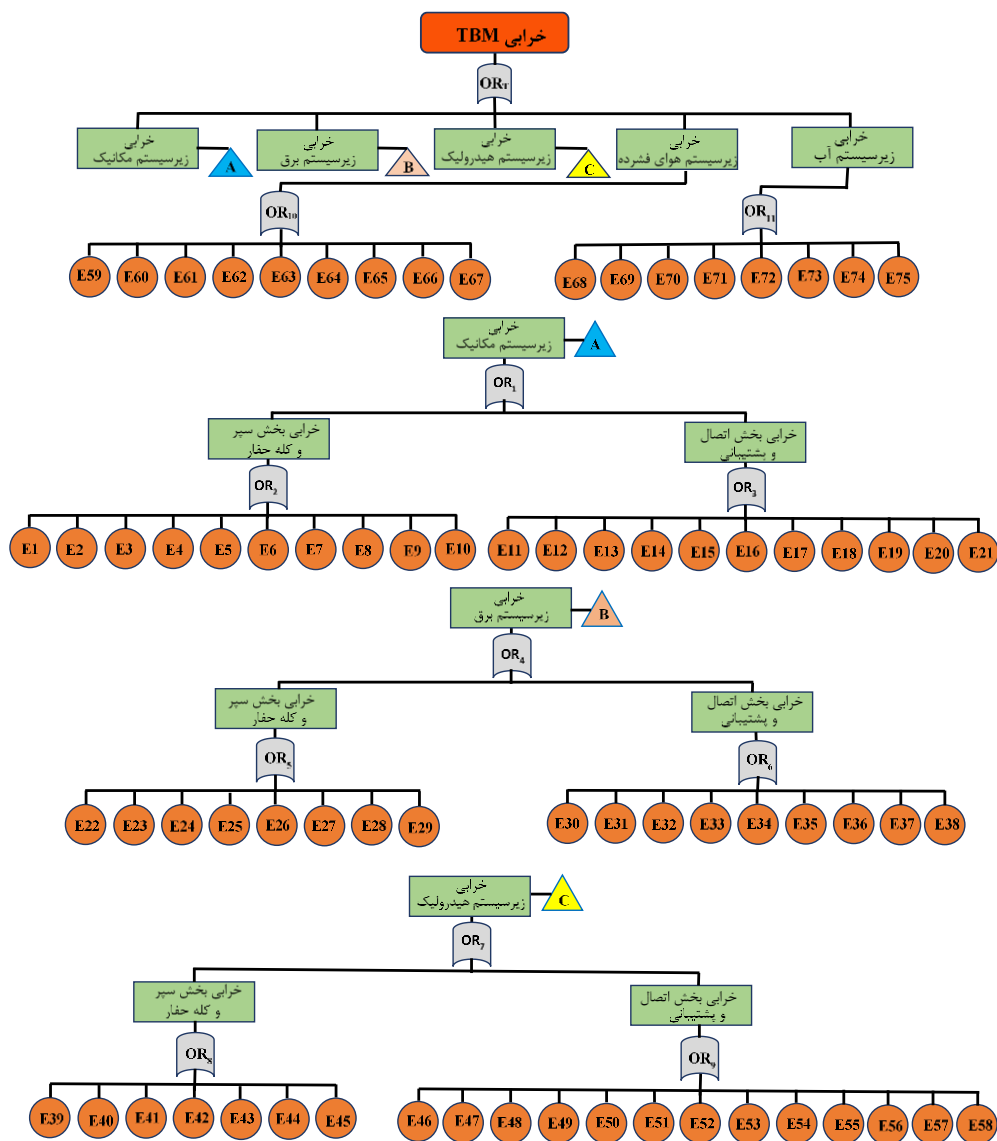
نماد رخداد	نام رخداد پایه	احتمال رخداد (درصد)	نماد رخداد	نام رخداد پایه	احتمال رخداد (درصد)
E1	خرابی ابزارهای برشی	۱۲/۷	E32	خرابی ریموت کنترل بالابر سگمنت	۰/۳۴
E2	خرابی بازوی نصاب سگمنت	۳/۱	E33	مشکل برقی اینورتر پمپ آب	۰/۳۴
E3	مشکل در اتاقک حفاری	۱/۳۷	E34	خرابی سنسورهای گریس	۰/۶۹

ادامه جدول ۳- خرابی‌های ماشین حفار خط یک مترو تبریز و احتمال وقوع آن‌ها

نماد رخداد	نام رخداد پایه	احتمال رخداد(درصد)	نماد رخداد	نام رخداد پایه	احتمال رخداد(درصد)
E4	نقص در سیستم تزریق فوم	۴/۸	E35	خرابی سنسور نوار نقاله	۰/۳۴
E5	مشکل جک‌های پیشران	۰/۳۴	E36	کابل کشی برق دستگاه	۱/۷۲
E6	مشکل نقاله حلزونی	۰/۶۹	E37	خرابی سنسورهای نقاله سگمنت	۰/۳۴
E7	مشکل حس گرهای سنسورها	۰/۶۹	E38	نقص فنی برقی کمپرسور صنعتی	۰/۳۴
E8	تمیزکاری سپر انتهایی	۳/۴	E39	خرابی شیر هیدرولیک جک ارکتور	۰/۳۴
E9	مشکل سیلندرهای مفصلی	۰/۳۴	E40	شیلنگ هیدرولیک جک‌های پیشران	۰/۳۴
E10	نقص سیستم تزریق بنتونیت	۰/۶۹	E41	تعویض شیر پمپ هیدرولیکی ارکتور	۰/۳۴
E11	مشکل نقاله سگمنت	۳/۱	E42	افت فشار جک‌های پیشران	۳/۴
E12	خرابی نوار نقاله	۱۲	E43	اورینگ هیدرولیک جک‌های پیشران	۰/۳۴
E13	گرفتگی خط گریس	۱/۳۷	E44	ترکیدن شیلنگ هیدرولیک ارکتور	۰/۶۹
E14	تمیزکاری و گریس‌کاری	۳/۱	E45	نشتی روغن هیدرولیک	۰/۳۴
E15	خرابی بالابر سگمنت	۲/۴	E46	خرابی شیر سه راهی هیدرولیک	۰/۶۹
E16	ترکیدگی لوله گروت	۰/۳۴	E47	مشکل پمپ خنک کننده هیدرولیک	۰/۳۴
E17	شکستگی ماش روم	۰/۳۴	E48	شیلنگ هیدرولیک جک سگمنت	۰/۶۹
E18	مشکل همزن و پمپ بنتونیت	۰/۶۹	E49	افزایش فشار پمپ‌های هیدرولیک	۰/۳۴
E19	مشکل شیلنگ و پمپ فوم د	۰/۶۹	E50	خرابی شیلنگ هیدرولیک نقاله سگمنت	۰/۶۹
E20	مشکل مخزن گروت دستگاه	۰/۳۴	E51	نقص فنی هیدرولیکی نقاله سگمنت	۰/۳۴
E21	خرابی فن تهویه دستگاه	۰/۳۴	E52	خرابی فیلتر روغن	۰/۳۴
E22	مشکل برقی جک‌های پیشران	۲/۱	E53	تزریق روغن به مخزن هیدرولیک	۲/۷
E23	نقص برق سیستم تزریق فوم	۱/۷۲	E54	بالا رفتن دمای روغن هیدرولیک	۱/۰۳
E24	نقص برقی مانیتورینگ ماشین	۱/۷۲	E55	خرابی جک هیدرولیکی نوار نقاله	۰/۳۴
E25	نقص سنسور نقاله حلزونی	۰/۳۴	E56	خرابی فیلتر پمپ هیدرولیکی	۱/۰۳
E26	نقص فنی برقی ارکتور	۰/۳۴	E57	مشکل شیلنگ روغن هیدرولیک	۱/۷۲
E27	مشکل سیستم UPS دستگاه	۰/۳۴	E58	مشکل هیدرولیکی مخزن گروت	۰/۳۴
E28	مشکل ریموت ارکتور	۰/۳۴	E59	نشتی هوا از سیستم پنوماتیک	۰/۳۴
E29	نقص برقی و عدم پیش روی	۰/۳۴	E60	خرابی پمپ پنوماتیک گریس	۱/۳۷
E30	مشکل تابلو برق جک‌های پیشران	۰/۳۴	E61	نقص فنی سیستم هوای فشرده	۰/۳۴
E31	نقص در ترموستات مخزن آب	۰/۳۴	E62	مشکل فنرهای شیرهای پنوماتیک	۲/۱
E63	خرابی پمپ گریس ماستیک	۳/۸	E70	مشکل آب اتاقک حفاری	۰/۳۴
E64	مشکل کمپرسورهای هوا	۰/۳۴	E71	خرابی شیر فلکه آب دستگاه	۰/۳۴

ادامه جدول ۳- خرابی‌های ماشین حفار خط یک مترو تبریز و احتمال وقوع آن‌ها

نماد رخداد	نام رخداد پایه	احتمال رخداد(درصد)	نماد رخداد	نام رخداد پایه	احتمال رخداد(درصد)
E65	خرابی پمپ HBW	۱/۰۳	E72	اصلاح مسیر آب سیستم خنک کننده کمپرسورها	۰/۳۴
E66	مشکل هوای تنفسی اتاقک کابین	۰/۳۴	E73	مشکل پمپ خنک کننده مبدل حرارتی	۰/۳۴
E67	خرابی سیستم هوای فشرده	۰/۳۴	E74	ترکیدن شیلنگ آب فوم	۰/۳۴
E68	مشکل لوله‌های آب دستگاه	۳/۴	E75	مشکل پمپ آبکشی	۱/۰۳
E69	تخلیه و تمیزکاری مخزن آبکشی	۱/۷۲			



شکل ۳- درخت خطای ماشین حفار تمام مقطع تونل

جدول ۴- رخدادهای اصلی و میانی و احتمال وقوع آن‌ها

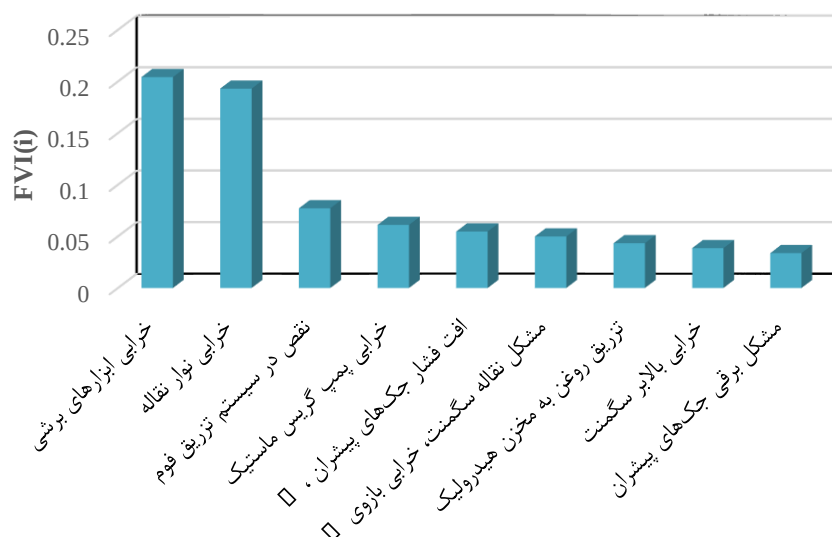
نام رخداد	درگاه مربوطه	نوع رخداد	احتمال وقوع رخداد (درصد)
خرابی TBM	OR_T	اصلی	۶۲/۱۵
خرابی زیرسیستم مکانیک	OR_1	میانی	۴۱/۴۵
خرابی بخش سپر و کله حفار زیرسیستم مکانیک	OR_2	میانی	۲۴/۳۵
خرابی بخش اتصال و بخش پشتیبان زیرسیستم مکانیک	OR_3	میانی	۲۲/۶۱
خرابی زیرسیستم برق	OR_4	میانی	۱۱/۴۲
خرابی بخش سپر و کله حفار زیرسیستم برق	OR_5	میانی	۷/۰۴
خرابی بخش اتصال و بخش پشتیبان زیرسیستم برق	OR_6	میانی	۴/۷۱
خرابی زیرسیستم هیدرولیک	OR_7	میانی	۱۵/۲۶
خرابی بخش سپر و کله حفار زیرسیستم هیدرولیک	OR_8	میانی	۵/۷۳
خرابی بخش اتصال و بخش پشتیبان زیرسیستم هیدرولیک	OR_9	میانی	۱۰/۱۱
خرابی زیرسیستم هوای فشرده	OR_{10}	میانی	۹/۶۲
خرابی زیرسیستم آب	OR_{11}	میانی	۴/۷۰

خط یک مترو تبریز می‌باشند که تأثیر قابل توجهی در قابلیت اطمینان این ماشین دارند. بدیهی است با برنامه‌ریزی صحیح تعمیر و نگهداری پیشگیرانه در مورد اجزای جدول فوق که بیشترین تأثیر را در بهبود عملکرد ماشین مورد مطالعه دارند می‌توان خرابی‌ها و توقف‌های ماشین را به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش داد و با کاهش زمان تعمیر و نگهداری و افزایش قابلیت اطمینان ماشین، قابلیت دسترسی آن را تا حدود زیادی بالا برد. در نهایت به دلیل هزینه‌های قابل توجه این ماشین‌های مکانیزه حفاری تونل، و همچنین با توجه به این‌که این ماشین‌ها از شرکت‌های سازنده مختلف در کشور ایران مشغول به کار می‌باشند ولی تقسیم‌بندی زیرسیستم‌ها و مباحث قابلیت اطمینان آن‌ها مطابق فرایند انجام شده در این تحقیق می‌تواند انجام گیرد لذا پیشنهاد می‌گردد این موضوع به صورت جدی و در مراحل اولیه پروژه‌ها مورد توجه قرار گیرد تا با برنامه مناسب تعمیر و نگهداری پیشگیرانه مبتنی بر قابلیت اطمینان، میزان در دسترس بودن این ماشین‌ها افزایش یابد و زمان و هزینه‌های نهایی اجرای پروژه‌ها کاهش یابد.

با توجه به جدول فوق، زیر سیستم‌های مکانیک و هیدرولیک دارای بیشترین تأثیر در خرابی ماشین حفار مورد مطالعه می‌باشند. به عبارت دیگر از قابلیت اطمینان کمتری نسبت به سایر زیرسیستم‌ها برخوردار می‌باشند. همچنین احتمال خرابی ماشین ۶۲/۱۵ درصد محاسبه گردید. بنابراین در بازه زمانی در نظر گرفته شده، قابلیت اطمینان ماشین حفار خط یک مترو تبریز برابر با ۳۷/۸۵ درصد می‌باشد. برای نشان دادن میزان اهمیت مجموعه‌های برشی حداقل در به وقوع پیوستن خرابی ماشین، از رابطه فاسل - ولسلی استفاده گردید. به دلیل این‌که تمامی درگاه‌ها از نوع "یا" می‌باشند هر کدام از ۷۵ مورد رخداد ثبت شده در واقع نمایانگر یک مجموعه برشی حداقل (MCS) می‌باشند. در جدول ۵، چند مورد از خرابی‌هایی که میزان اهمیت بیشتری در وقوع رخداد اصلی دارند به ترتیب آورده شده است. نمودار میزان اهمیت مجموعه‌های برشی حداقل با استفاده از شاخص FVI در شکل ۴، نشان داده شده است. مطابق جدول ۵، ابزارهای برشی کله حفار و نوار نقاله از بحرانی‌ترین مجموعه‌های برشی حداقل در خرابی ماشین حفار

جدول ۵- مقادیر FVI برای رخدادهای دارای اهمیت بالا در خرابی ماشین حفار خط یک مترو تبریز

FVI	نام رخداد
۰/۲۰۴۳	خرابی ابزارهای برشی
۰/۱۹۳۱	خرابی نوار نقاله
۰/۰۷۷۲	نقص در سیستم تزریق فوم
۰/۰۶۱۱	خرابی پمپ گریس ماستیک
۰/۰۵۴۷	افت فشار جک‌های پیشران، تمیزکاری سپر انتهایی، مشکل لوله‌های آب دستگاه
۰/۰۴۹۹	مشکل نقاله سگمنت، خرابی بازوی نصاب سگمنت، تمیزکاری و گریس‌کاری دستگاه
۰/۰۴۳۴	تزریق روغن به مخزن هیدرولیک
۰/۰۳۸۶	خرابی بالابر سگمنت
۰/۰۳۳۸	مشکل برقی جک‌های پیشران



شکل ۴- نمودار میزان اهمیت مجموعه‌های برشی حداقل با استفاده از شاخص FVI

۷- نتیجه‌گیری

پرداخته شده است. در این تحقیق، دستگاه TBM خط یک مترو تبریز به عنوان مطالعه موردی انتخاب شد و با استفاده از روش تحلیل درخت خطا و در نظر گرفتن ۵ زیرسیستم شامل زیرسیستم‌های مکانیک، هیدرولیک، برق، آب و هوای فشرده برای این ماشین، کلیه‌ی خرابی‌های اتفاق افتاده در بازه زمانی ۱۲ ماه کاری عملکرد این ماشین استخراج گردید و با محاسبه احتمال وقوع هر کدام از خرابی‌ها، احتمال خرابی زیرسیستم‌ها و در نهایت احتمال خرابی TBM محاسبه گردید. نتایج نشان داد احتمال خرابی ماشین حدود ۶۲ درصد

ماشین‌های حفاری تمام مقطع تونل علیرغم توانایی حفاری با سرعت بالا و ایمنی مناسب در شرایط مختلف زمین‌شناسی، به دلیل اجزای بسیار زیاد آن‌ها و خرابی‌هایی که اتفاق می‌افتد دارای هزینه‌های عملیاتی نسبتاً بالایی می‌باشند. مطالعات انجام گرفته در مورد عملکرد این ماشین‌ها بیشتر پیرامون پیش‌بینی و ارزیابی نرخ نفوذ و میزان پیشروی با توجه به شرایط زمین‌شناسی و پارامترهای عملیاتی ماشین بوده است و کمتر به مطالعه توقف‌های ناشی از خرابی در این ماشین‌ها

ترتیب می‌توان با برنامه‌ریزی مناسب تعمیر و نگهداری پیشگیرانه و اصلاحی در مورد اجرای جدول فوق که بیشترین تأثیر را بر قابلیت اطمینان دارند خرابی‌ها و توقف‌های ماشین را به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش داد و قابلیت دسترسی آن را تا حدود زیادی بالا برد.

و بنابراین قابلیت اطمینان ماشین حفار خط یک مترو تبریز حدود ۳۸ درصد می‌باشد. در نهایت با استفاده از رابطه‌ی سنجش اهمیت فاسل - وسلی (FVI) مشخص گردید ابزارهای برشی ماشین و نوار نقاله از بحرانی‌ترین مجموعه‌های برشی در خرابی ماشین می‌باشند که تأثیر قابل توجهی در قابلیت اطمینان این ماشین را به خود اختصاص داده‌اند. بدین

۸- منابع

- Agrawal, A. K., Murthy, V. M. S. R., & Chattopadhyaya, S. (2019). Investigations into reliability, maintainability and availability of tunnel boring machine operating in mixed ground condition using Markov chains. *Engineering Failure Analysis*, 105, 477-489.
- Allahkarami, Z., Sayadi, A. R. & Ghodrati, B. (2022). Reliability Analysis of Mining Transportation System: A Comparative Study of Semi-Parametric and Parametric Proportional Hazard Models. *Quarterly Journal of Transportation Engineering*, 14(2), 2365-2379. doi: 10.22119/jte.2021.286469.2538
- Al-Chalabi, H. (2014). Reliability and Life Cycle Cost Modeling of Mining Drilling Rigs, Ph.D. Thesis, *Luleå University of Technology*, Luleå, Sweden.
- Allanson C. (2002). Strata Control in Underground Coal Mines: A Risk Management Perspective. *Coal Operators' Conference*, University of Wollongong & the Australasian Institute of Mining and Metallurgy, 135-153.
- Ameri, M., Farrokh, E., & Molladavoodi, H. (2021). TBM penetration rate prediction using neural networks and neuro-fuzzy systems. *Tunneling & Underground Space Engineering*. 10(1): 35-56. doi:10.22044/tuse.2022.10987.1424. (In Persian).
- Amini Khoshalan H., Torabi S. R., Hoseinie S. H., & Ghodrati B. (2015). RAM Analysis of Earth Pressure Balance Tunnel Boring Machines: A Case Study. *International Journal of Mining & Geo-Engineering*, 49(2), 173-185.
- Amini Khoshalan, H. (2016). Modelling Reliability, Availability and Maintainability of tunnel boring machine. Ph.D. Thesis, *Shahrood University of Technology*, Shahrood, Iran. (In Persian).
- Barabady, J., & Kumar, U. (2007). Reliability characteristics-based maintenance scheduling: a case study of a crushing plant. *International Journal of Performability Engineering*, 3(3), 319 – 328.
- Beamish B., et al. (2010). Application of fault tree analysis to coal spontaneous combustion. *10th Underground Coal Operators' Conference*, University of Wollongong & the Australasian Institute of Mining and Metallurgy, 269-273.
- Bedford, T., & Cooke, R. M. (2001). Probabilistic risk analysis: foundations and methods. *Cambridge University press*, Cambridge.
- Brox, D. (2013). Technical considerations for TBM tunneling for mining projects. *Transactions of the society for Mining, Metallurgy and Exploration*, 334, 498-505.
- Chatterjee, S., Dash, A., & Bandopadhyay, S. (2015). Ensemble support vector machine algorithm for

- reliability estimation of a mining machine. *Quality and Reliability Engineering International*, 31(8), 1503-1516.
- Chibukhchyan, S. S. (2024). Assessment of the Operational Reliability of Underground Transport and Technological Machines. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*, 53(7), 733-737.
- Clement, E. N., Nkoi, B., & Isaac, O. E. (2019). Improving the reliability of an excavator using maintenance management and 2-parameter Weibull distribution model. *American Journal of Engineering Research (AJER)*, 8(2), 84-89.
- Dardashti, A., Ajalloeian, R., Rostami, J., Hassanpour, J., & Salimi, A. (2022). Prediction of TBM performance in different rock types using input parameters of RMR by applying ML-based regression analysis. *Tunneling & Underground Space Engineering*, 11(3), 233-257. (In Persian).
- Dey, A., Bhattacharya, J., & Banerjee, S. (1994). Prediction of field reliability for dumper tyres. *International Journal of Surface Mining and Reclamation*, 8(1), 23-25.
- Dhillon, B.S. (2008). *Mining Equipment Reliability, Maintainability and Safety*. Springer, London.
- Dokas, I. M., Karras, D. A., & Panagiotakopoulos, D. C. (2009). Fault tree analysis and fuzzy expert systems: Early warning and emergency response of landfill operations. *Environmental Modelling & Software*, 24(1), 8-25.
- Esmaeili, M., Bazzazi, A. A., & Borna, S. (2011). Reliability analysis of a fleet of loaders in Sangan iron mine. *Archives of mining sciences*, 56(4), 629-640.
- Frough, O., Torabi, S. R., Sereshki, F., & Jalali, S. E. (2013). Prediction of TBM Advance Rate Using Rock Engineering Systems. *Tunneling & Underground Space Engineering*, 2(1), 13-25.
- Ghodrati, B. (2005). Reliability and operating environment based spare parts planning. Ph.D. Thesis, *Division of Operation and Maintenance Engineering, Lulea University of Technology*, Lulea, Sweden.
- Giraud, L., & Galy, B. (2018). Fault tree analysis and risk mitigation strategies for mine hoists. *Safety science*, 110, 222-234.
- Gorai, A. K., Kumar, P., & Patel, A. K. (2017). Reliability analysis of the main conveyor system in underground coal mine to determine the maintenance schedules. *International Journal of Mining and Mineral Engineering*, 8(3), 207-233.
- Gupta, S. (2003). Development and evaluation of fault tree of a longwall mining system with hybrid data. Ph.D. Thesis, *Indian Institute of Technology*, Kharagpur, India.
- Gupta, S., Ramkrishna, N., & Bhattacharya, J. (2006). Replacement and maintenance analysis of longwall shearer using fault tree technique. *Mining Technology*, 115(2), 49-58.
- Gupta, S., & Bhattacharya, J. (2007). Reliability analysis of a conveyor system using hybrid data. *Quality and Reliability Engineering International*, 23(7), 867-882.
- Gustafson, A. (2013). Automation of Load Haul Dump Machines: Comparative Performance Analysis and Maintenance Modeling. Ph.D. thesis, *Luleå University of Technology*, Luleå, Sweden.

- Hall, R. A., & Daneshmend, L. K. (2003). Reliability modelling of surface mining equipment: data gathering and analysis methodologies. *International journal of surface mining, reclamation and environment*, 17(3), 139-155.
- He, L., Pan, R., Wang, Y., Gao, J., Xu, T., Zhang, N., Wu, Y., & Zhang, X. (2024). A Case Study of Accident Analysis and Prevention for Coal Mining Transportation System Based on FTA-BN-PHA in the Context of Smart Mining Process. *Mathematics*, 12(7), 1109.
- Hoseinie, S. H., Ataei, M., Khalokakaie, R., Ghodrati, B., & Kumar, U. (2012). Reliability analysis of drum shearer machine at mechanized longwall mines. *Journal of quality in maintenance engineering*, 18(1), 98-119.
- Hosseinie, S.H. (2011). Modelling and simulation the reliability of drum shearer in longwall mining, case study: Tabas coal mine. Ph.D. thesis, *Shahrood University of Technology*. (In Persian).
- Hyun, K. C., Min, S., Choi, H., Park, J., & Lee, I. M. (2015). Risk analysis using fault-tree analysis (FTA) and analytic hierarchy process (AHP) applicable to shield TBM tunnels. *Tunnelling and underground space technology*, 49, 121-129.
- Iverson, S., Kerkerling, J.C., & Coleman, P. (2001). Using fault tree analysis to focus mine safety research. In: *Proc. of the 108th Annual Meeting of the Society for Mining, Metallurgy, and Exploration*, p. 1-10.
- Jafari, M. J., Gharari, N. A., & Sheikhi, H. R. (2009). The Reliability of a Tunnel Boring Machine. *International journal of occupational hygiene*, 1, 21-26.
- Jakkula, B., Mandela, G. R., & Chivukula, S. M. (2022). Reliability, availability and maintainability (RAM) investigation of Load Haul Dumpers (LHDs): a case study. *International Journal of System Assurance Engineering and Management*, 13(1), 504-515.
- Jakkula, B., Mandela, G. R., & Tripathi, A. K. (2024). Reliability analysis of complex repairable systems using artificial neural networks: A case study on underground mining machinery. *Precis. Mech. Digit. Fabr*, 1(4), 189-200.
- Jiskani, I. M., Yasli, F., Hosseini, S., Rehman, A. U., & Uddin, S. (2022). Improved Z-number based fuzzy fault tree approach to analyze health and safety risks in surface mines. *Resources Policy*, 76, 102591.
- Kissell, F. N. (2006). *Handbook for Methane Control in Mining*. National Institute for Occupational Safety and Health, DHHS (NIOSH) Publication No. 127.
- Koohathongsumrit, N., & Chankham, W. (2024). Risk analysis of underground tunnel construction with tunnel boring machine by using fault tree analysis and fuzzy analytic hierarchy process. *Safety*, 10(3), 68.
- Koohsari, A., Kalatehjari, R., Moosazadeh, S., Hajihassani, M., & Van, B. (2022). A Critical Investigation on the Reliability, Availability, and Maintainability of EPB Machines: A Case Study. *Applied Sciences*, 12(21), 11245.
- Kumar, U. (1990). Reliability Analysis of Load-Haul-Dump Machines. Ph.D thesis, *Lulea University of Technology*, Lulea, Sweden.

- Kumar, D., Jana, D., Gupta, S., & Yadav, P. K. (2023). Bayesian network approach for dragline reliability analysis: A case study. *Mining, Metallurgy & Exploration*, 40(1), 347-365.
- Kumar, U., & Granholm, S. (1988). Reliability technique: A powerful tool for mine operators. *Mineral resources engineering*, 1(1), 13-28.
- Lewis, E. E. (1996). Introduction to Reliability Engineering. New York, John Wiley & Sons.
- Liu, W., Zeng, Q., Wan, L., Liu, J., & Dai, H. (2022). Reliability importance measures considering performance and costs of mechanical hydraulic system for hydraulic excavators. *Journal of Sensors*, 1, 5748288.
- Malozyomov, B. V., Martyushev, N. V., Babyr, N. V., et al. (2024). Modelling of Reliability Indicators of a Mining Plant. *Mathematics* (2227-7390), 12(18).
- Mikaeil, R., Khoshalan, H. A., Nasrollahi, M. H., & Esmaeilzadeh, A. (2022). Reliability analysis of full-face tunnel boring machines by Monte Carlo simulation technique. *Rudarsko-geološko-naftni zbornik*, 37(3), 149-160.
- Mikaeil, R., Jalili, Y., , Shahriar, K., & Jafarpour, A. (2020). Risk in Tunneling Projects Using Fault Tree Analysis. *Civil Infrastructure Researches*. 6(1), 41-53.
- Mohammadi, M., Rai, P., Oraee, K., & Kumar, M. (2013). Analysis of availability and utilization of dragline for enhancement of productivity in surface mines-a case study. In *Proceedings of the 23rd World Mining Congress, Montreal*, 55-78.
- Moniri-Morad, A., Pourgol-Mohammad, M., & Sattarvand, J. (2014). Application of reliability-centered maintenance for productivity improvement of open pit mining equipment: Case study of Sungun Copper Mine. *Journal of Central South University*, 21, 2372-2382.
- Moniri-Morad, A., & Sattarvand, J. (2023). A comparative study between the system reliability evaluation methods: case study of mining dump trucks. *Journal of Engineering and Applied Science*, 70(1), 103.
- Morshedloo, E., Dehghani, H. (2015). Reliability Analysis of Armored Face Conveyor (AFC) in Tabas Mechanized Coal Mine. *Journal of Mining Engineering*, 10(26), 1-9. (In Persian).
- Mouli, C., Chamarthi, S., Gà, R. C., & Vã, A. K. (2014). Reliability modeling and performance analysis of dumper systems in mining by KME method. *International Journal of Current Engineering and Technology*, 2, 255-258.
- NFM Technologies, (2007). *Operating and maintenance manual for EPB TBM for Tabriz*, Not published.
- Nouri Gharahasanlou, A., Mokhtarei, A., Khodayarei, A., & Ataei, M. (2014). Fault tree analysis of failure cause of crushing plant and mixing bed hall at Khoy cement factory in Iran. *Case studies in engineering failure analysis*, 2(1), 33-38.
- Nouri Qarahasanlou, A., Ataei, M., Khalokakaie, R., Fatoorachi, S., & Barabady, R. (2019). Operating Environment Based Reliability Analysis of Mining Equipment. *Journal of Analytical and Numerical Methods in Mining Engineering*. 9(18), 129-141.
- Odeyar, P., Apel, D. B., Hall, R., Zon, B., & Skrzypkowski, K. (2022). A Review of Reliability and Fault

- Analysis Methods for Heavy Equipment and Their Components Used in Mining. *Energies*, 15(17), 6263.
- Pandey, P., Mukhopadhyay, A. K., & Chattopadhyaya, S. (2018). Reliability analysis and failure rate evaluation for critical subsystems of the dragline. *Journal of the brazilian society of mechanical sciences and engineering*, 40, 1-11.
- Qie, Z., & Yan, H. (2022). A causation analysis of Chinese subway construction accidents based on fault tree analysis-Bayesian network. *Frontiers in psychology*, 13, 887073.
- Rahimdel, M. J., Hosienie, S. H., Ataei, M., & Khalokakaei, R. (2013). The reliability and maintainability analysis of pneumatic system of rotary drilling machines. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series D*, 94, 105-111.
- Rahimdel, M. J. (2024). Bayesian network approach for reliability analysis of mining trucks. *Scientific reports*, 14(1), 3415.
- Rahmani, Z., Rahimdel, M. J., & Noferesti, H. (2023). Reliability analysis of a fleet of mining trucks (A case study in Iran). *Journal of Geomine*, 1(2), 68-74.
- Razzaghzadeh, R., Shakoor Shahabi, R., & Nouri Qarahasanlou, A. (2019). Analysis of reliability and maintainability for multiple repairable units (Case study: Sungun copper mine). *Journal of Mining and Environment*, 10(4), 1045-1059.
- Recht, J. L. (1966). *System Safety Analysis: The Fault Tree*. National Safety News, 93, 37- 40.
- Samanta, B., Sarkar, B., & Mukherjee, S. K. (2001). Reliability centred maintenance (RCM) for heavy earth-moving machinery in an open cast coal mine. *CIM Bulletin*, 104-107.
- Samanta, B., Sakar, B., & Mukherjee, S. (2004). Reliability modelling and performance analyses of an LHD system in mining. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 104(1), 1-8.
- Shaojie, Z. H. O. U. (2013). Application of fault tree analysis in coal mine fire accidents. *Journal of Convergence Information Technology*, 8(7), 674-681.
- Sharma, P., & Singh, A. (2015). Overview of fault tree analysis. *International Journal of Engineering Research & Technology*, 4(3), 337-340.
- She, L., Hu, C. C., Li, Y. L., Zhang, S. R., et al., (2024). An empirical method for estimating TBM penetration rate using tunnelling specific energy. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 144, 105525.
- Simon, F., Javad, B., & Abbas, B. (2014). Availability analysis of the main conveyor in the Svea Coal Mine in Norway. *International Journal of Mining Science and Technology*, 24(5), 587-591.
- Suryo, S. H., Bayuseno, A.P. (2018) Study on reliability analysis of hydraulic components and excavator engine in maintenance of mine heavy equipment. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*. 9(8), 1244-1254.
- Toraman, S. (2023). System reliability analysis of large capacity electric mining trucks used in coal mining. *Journal of Reliability and Statistical Studies*, 81-98.

- Townson, P. G. A. L. (2002). Load–Maintenance Interaction: Modeling and Optimization, Ph.D. thesis, *University of Queensland*, Queensland, Australia.
- Vagenas, N., Runciman, N., & Clément, S. R. (1997). A methodology for maintenance analysis of mining equipment. *International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment*, 11(1), 33-40.
- Vayenas, N., & Peng, S. (2014). Reliability analysis of underground mining equipment using genetic algorithms: A case study of two mine hoists. *Journal of Quality in maintenance Engineering*, 20(1), 32-50.
- Wang, H., Zhou, C., Bi, Q., Zhu, H., Ding, Z., & Zhang, C. (2023). Adaptive modification of TBM tunneling in coal mine roadway and disaster control technology for complex geological conditions. *Processes*, 11(5), 1389.
- Wijaya, A. R. (2012). Methods for availability improvements of a scaling machine system, Ph.D. thesis, *Division of Operation and Maintenance Engineering, Lulea University of Technology*, Lulea, Sweden.
- Yang, R., & Deng, Y. (2021). Analysis on security risks in tunnel construction based on the fault tree analysis. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 638(1), 012089. IOP Publishing.
- Zhang, M., Kecojevic, V., & Komljenovic, D. (2014). Investigation of haul truck-related fatal accidents in surface mining using fault tree analysis. *Safety science*, 65, 106-117.

Failures study and reliability assessment of tunnel boring machines using fault tree analysis method

H. A. Khoshalan

Assistant Professor; Department of Mining, Faculty of Engineering, University of Kurdistan,
h.amini@uok.ac.ir

Received: 23 Jan 2025; Accepted: 26 Feb 2025
DOI: 10.22044/tuse.2025.15655.1497

Keywords	Extended Abstract
TBM failures Subsystem Fault tree analysis Reliability Fussell – Vesely equation	Summary Nowadays, the use of tunnel boring machines (TBMs) in construction projects such as road and metro tunnels, as well as in mining operations like the excavation of main tunnels and access to mines, has significantly increased. Given the relatively high operational costs of these machines, it is essential to study their performance further to enhance their availability. One approach in this regard is to investigate the reliability and identify the weaknesses and failures of these machines. For this purpose, the present study employs fault tree analysis method to examine the failures of the TBM used in Line 1 of Tabriz Metro. Considering five subsystems for this machine, the probability of failure for each subsystem, and subsequently, the overall probability of failure for the machine have been determined. The results indicate that the probability of failure for the machine is 62.15%, and therefore, its reliability is 37.85%. Finally, using the Fussell – Vesely importance (FVI) measure, the contribution of events and the minimal cut sets (MCS) to the probability of TBM failure have been identified. According to the achieved results, the cutting tools of the machine and the conveyor belt are among the most critical minimal cut sets in the failure of the studied machine, significantly impacting its reliability.

Introduction

Many studies have been conducted by researchers to estimate the performance of TBMs with respect to penetration and advance rates. However, there has been comparatively less focus on investigating the failures of these machines, which significantly impact their performance and availability. Reliability analysis serves as a valuable approach for examining failures in systems or subsystems and identifying their shortcomings. Considering the initial investment costs and the relatively high operational costs of TBMs, it is essential to have a comprehensive understanding of their various components to prevent downtime caused by failures. By accurately identifying the types of failures and studying the failure times that occur in these machines, their reliability can be determined. Furthermore, by providing an appropriate program for preventing and modifying maintenance, it is possible to significantly reduce unwanted TBM downtimes and to lower project execution costs. To achieve this aim, in present study, the fault tree analysis method is used to analyze the reliability of an earth pressure balance tunnel boring machine (EPB-TBM). This method has not been reported in previous studies for analyzing the reliability of a full-face tunnel boring machine.

Methodology and Approaches

One of the methods that has significant applications in the analysis and evaluation of failures and assessment of the reliability of machinery is the fault tree analysis method. This method is widely used in the field of risk assessment, studying failures, and analyzing the reliability in various areas, as well as in mining engineering. For this purpose, operational data from the earth pressure balance type tunnel boring machine manufactured by NFM China, used in Line 1 of Tabriz Metro, has been utilized. Five subsystems including mechanical, electrical, hydraulic, pneumatic and water subsystem have been considered and the failure of the TBM is

considered the main event (top event), while each of the defined subsystems of the machine is regarded as intermediate events. Additionally, the failures of each of these subsystems are depicted as basic events in the fault tree.

Results and Conclusions

The analysis in this study reveals that the mechanical and hydraulic subsystems significantly influence the failure rates of the studied machine, exhibiting lower reliability than other subsystems. Furthermore, the calculated probability of machine failure stands at 62.15 percent. Consequently, the reliability of the drilling machine operating in Line 1 of Tabriz Metro is determined to be 37.85 percent within the designated timeframe. Lastly, based on the Fussell – Vesely importance (FVI) measure, it reveals that the machine cutting tools and conveyor belt represent some of the most critical minimal cut sets contributing to the machine failure, thereby greatly affecting its overall reliability.
