هفتمین کنفرانس بین‌المللی
مهندسی قابلیت اطمینان و ایمنی

مدل‌سازی قابلیت اطمینان سیستم تونل‌سازی سپر EPB با درنظرگرفتن عوامل غیرمستقیم

وحید امینی[۱]، جعفر خادمی حمیدی[۲]، مسعود منجزی[۳]، اسماعیل فصیحی[۴]

[۱]**دانش‌آموخته مهندسی معدن، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران؛** vih.amini@gmail.com

[۲]**دانشیار مهندسی معدن، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران؛** jafarkhademi@modares.ac.ir

[۳]**استاد مهندسی معدن، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران؛** monjezi@modares.ac.ir

[۴]**دستیار تحقیق، مهندسین مشاور رهساز طرح؛** fasihi@gmail.com

چکیده

در سال‌های اخیر استفاده از ماشین حفاری مکانیزه EPB-TBM، در محیط‌های شهری به دلیل کمبود فضا، حساسیت‌هایی مثل کنترل نشست سطح زمین، ایمنی و کیفیت فضای حفاری به‌عنوان روشی مناسب مورد استقبال جامعه مهندسین قرار گرفته و در حال گسترش است. ازاین‌رو، بهبود عملکرد حفاری، برنامه زمانی و کنترل هزینه این ماشین‌ها امری بسیار ضروری است. در تحقیق حاضر، قابلیت اطمینان ماشین حفار خط ۶ (فاز یک) مترو تهران مورد تحلیل قرار گرفته است. برای اولین‌بار عوامل غیرمستقیم (عوامل غیرمرتبط با ماشین همچون بازدیدهای دوره‌ای مربوط به هر زیرسیستم، تمیزکاری و نبود سگمنت در کارخانه) که مانع پیشروی ماشین می‌شوند، شناسایی و در تحلیل‌ها تأثیر آن‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. در این پژوهش ۶ زیرسیستم اصلی و ۱۶ زیرسیستم فرعی برای محاسبه زمان کارآمد ماشین حفار شناسایی شدند، شایان‌ذکر است تمامی زمان‌های خرابی مربوط به زیرسیستم‌های ماشین EPB خط ۶ در پیوسته‌ترین بازه زمانی کارکرد ماشین که حدود ۱۲ ماه بود استخراج و مورد بررسی قرار گرفت. پس از تشکیل پایگاه داده، خروجی حاصل از تحلیل پارتو نشان می‌دهد که بحرانی‌ترین زیرسیستم‌ها در هر دو رویکرد به ترتیب مربوط به قسمت تخلیه مصالح حفاری و قسمت حفاری است. نتایج تکمیلی نشان می‌دهد که زیرسیستم‌های تخلیه مصالح حفاری و نصب قطعات پیش‌ساخته به‌صورت مشترک با ۸۰۰۰ دقیقه زمان تا لحظه شکست، زیرسیستم بحرانی با کمترین قابلیت اطمینان معرفی شدند. نمودارهای قابلیت اطمینان در دو رویکرد با عوامل غیرمستقیم و بدون عوامل غیرمستقیم به‌خوبی نشان می‌دهد که بیش از ۴۰ درصد توقف‌های ماشین مربوط به عوامل غیرمستقیم است.

کلیدواژه: عملکرد ماشین، حفاری مکانیزه، زیرسیستم‌های EPB-TBM، خرابی ماشین، تحلیل پارتو

مقدمه

بررسی عملکرد یک سیستم فرایندی مفید و کاربردی است که در سه مرحله طراحی، ساخت و بهره‌برداری مورداستفاده قرار می‌گیرد. ازکارافتادن سیستم‌ها موجب وقوع اختلال در سطوح مختلفی می‌شود و ممکن است به‌عنوان تهدیدی برای جامعه و محیط‌زیست نیز تلقی شود [۱]؛ بنابراین به‌عنوان یک پرسش اساسی چنین مطرح است که عملکرد یک سیستم در طول عمر کاری آینده‌اش به چه شکل و چه میزانی است؟ [۲]. امروزه کاربرد ماشین‌های حفاری تمام مقطع تونل از نوع EPB-TBM در پروژه‌های تونل‌سازی مکانیزه شهری با استقبال زیادی روبرو شده است. در این راستا مطالعات زیادی در زمینه بررسی عملکرد و قابلیت اطمینان ماشین‌های حفاری مکانیزه انجام

شده است. به عنوان مثال، امینی خوشالان و همکاران [۳] تحلیل و مدل‌سازی قابلیت اطمینان، قابلیت دسترسی و قابلیت تعمیر و نگهداری سیستم برق ماشین EPB مترو تبریز را موردمطالعه قرار دادند. برای این منظور داده‌های خرابی و تعمیر مربوط به ۲۶ ماه را مورد بررسی قرار دادند و در نهایت قابلیت اطمینان سیستم برق ماشین حفار را با ۸۰ درصد قابلیت اطمینان، ۱۵ ساعت معرفی کردند. فاضل-نیا و همکاران [۴] عملکرد مترو خط ۷ تهران را موردمطالعه قرار دادند، آن‌ها ماشین خط ۷ را به ۱۱ زیرسیستم تقسیم و در نهایت زیرسیستم نگهداری اولیه را به‌عنوان بحرانی‌ترین قسمت ماشین معرفی کردند. فروغ و همکاران ضریب بهره‌وری ماشین تونل‌زنی سنگ سخت را با استفاده از سیستم رده‌بندی توده سنگ و یک پایگاه داده متشکل از ۶۸۲ روز عملیات تونل‌سازی تخمین زدند و رابطه بین ضریب بهره‌وری با تأخیرهای مرتبط با توده سنگ و شرایط زمین‌شناسی را بررسی کردند. آن‌ها نشان دادند که این تأخیرها حدود ۲۰ درصد زمان عملیات حفاری بوده است درحالی‌که تأخیرهای مرتبط با ماشین حفاری ۶۰ درصد زمان عملیات حفاری را شامل می‌شود [۵]. بررسی متون نشان می‌دهد که یک مطالعه جامع بر روی خرابی‌ها و تأخیرهای سیستم TBM با تأکید بر عوامل غیرمستقیم در پیشروی ماشین به‌منظور ارزیابی دقیق عملکرد آن ضروری است. درنهایت با مطالعه اکثر تحقیق‌های مرتبط و درک درست از تمامی روش‌ها، کمبود و یا نبود چنین رویکردی جهت به‌دست‌آوردن نتایج قابلیت اطمینان با درنظرگرفتن عوامل غیرمستقیم احساس می‌شود که درنهایت موجب شکل‌گرفتن چارچوب این تحقیق شد. با این رویکرد، مطالعه عملکرد و قابلیت اطمینان ماشین حفاری در عملیات تونل‌سازی مترو خط ۶ تهران (فاز یک) انتخاب شد. در جدول ۱ تصویر و اطلاعات ماشین EPB به کار گرفته شده در خط ۶ مترو تهران آورده شده است و همچنین برای درک بیشتر در مورد چگونگی کارکرد هر زیرسیستم و نحوه ارتباط آن با دیگر زیرسیستم‌ها تصویر شماتیکی از ماشین EPB در شکل ۱ ارائه شده است. باتوجه‌به کمبود فضا فقط خروجی‌های مربوط به رویکرد عوامل غیرمستقیم آورده شده است، اما در آخر نمودارهای قابلیت اطمینان مربوط به هر دو رویکرد با یکدیگر مقایسه شده‌اند. با جمع‌آوری داده‌های خرابی مرتبط به هر زیرسیستم، به تحلیل خرابی هر بخش به‌صورت جداگانه و درنهایت مطالعه جامعی در مورد کل این کارخانه تونل‌سازی پرداخته می‌شود تا ضمن تعیین تابع فراوانی خرابی مربوط به هر زیرسیستم بتوان بحرانی‌ترین زیرسیستم را بعد از تحلیل پارتو و قابلیت اطمینان به دست آورد.

روش‌ها و وسایل

به‌طورکلی دو رویکرد تحلیلی و شبیه‌سازی برای روش‌های ارزیابی قابلیت اطمینان مطرح است [۱]. در این تحقیق با استفاده از روش تحلیلی، قابلیت اطمینان زیرسیستم‌های ماشین مورد بررسی قرار گرفته است. در ادبیات فنی موضوع، چهار روش اصلی و متداول در زمینه تحلیل ماشین‌آلات شامل روش تحلیل انواع خرابی‌ها و تأثیرات آن‌ها[1] FMEA، روش مارکوف[2]، روش تحلیل درخت خطا[3] FTA و روش تحلیل آماری ذکر می‌شود.

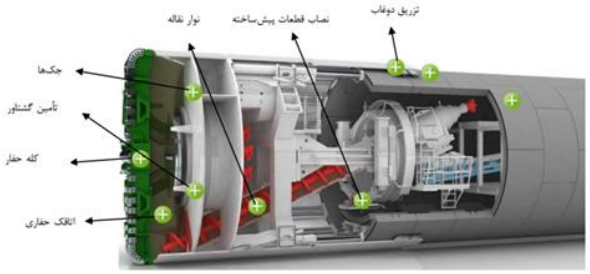
جدول ۱: تصویر و اطلاعات فنی ماشین EPB مترو خط ۶ تهران

ویژگی‌های ماشین	
قطر حفار (متر)	۹,۱۵
حداکثر گشتاور (کیلونیوتن متر)	۱۷۱۹۷
نیروی پیشران (کیلونیوتن)	۷۶۱۹۹
تعداد جک	۳۳
بیشترین فشار زمین (بار)	۳
ولتاژ ورودی (کیلوولت)	۲۰
شیب کمینه و بیشینه کاری (٪)	۵
بیشترین ارتفاع روباره (متر)	۳۵
تعداد موتور	۱۶
نوع موتور	هیدرولیک

در بین این روش‌ها، تنها توضیح روش تحلیل آماری به دلیل استفاده در این تحقیق آورده شده است. روش آماری پایه‌ای‌ترین روش تحلیل و مدل‌سازی قابلیت اطمینان و نگهداری است [۶]. بنابراین روش مدل‌سازی مورداستفاده در این تحقیق جهت به‌دست‌آوردن قابلیت

[1]- Failure Modes and Effects Analysis
[2]- Markov
[3]- Fault Tree Analysis

اطمینان، روش تحلیل آماری است. برای شروع کار تابع توزیع احتمال زمان بین خرابی‌ها به‌عنوان اصلی‌ترین بخش محاسبات قابلیت اطمینان مطرح است؛ لذا یافتن بهترین تابع توزیع چگالی احتمال سازگار با داده‌ها، اولین گام در محاسبه قابلیت اطمینان به شمار می‌آید.



شکل ۱: تصویر شماتیک از اجزاء ماشین EPB

باتوجه‌به طبیعت آماری محاسبات، مهم‌ترین و حیاتی‌ترین عامل در دستیابی به مدل قابلیت اطمینان مناسب، داشتن جامعه آماری کامل و دقیق است. معمولاً برای مدل‌سازی قابلیت اطمینان یک دستگاه از سه روش عمده استفاده می‌شود [۱۰-۷].

الف) فرایند تجدیدشونده (RP)[1]

ب) فرایند پواسون همگن (HPP)[2]

ج) فرایند پواسون ناهمگن (NHPP)[3]

انتخاب هر یک از روش‌های مدل‌سازی فوق، بستگی به نوع داده‌های جمع‌آوری‌شده دارد. الگوریتم کلی برای انتخاب روش مدل‌سازی و تحلیل قابلیت اطمینان بدین قرار است که ابتدا، دو مرحله آزمون روی داده‌ها انجام می‌گیرد. در مرحله اول داده‌ها برای وجود یا عدم وجود روند مورد ارزیابی قرار گرفته، در صورت وجود روند، از فرایند پواسون ناهمگن مانند روش فرایند قانون توان[4] برای تحلیل قابلیت اطمینان و نگهداری استفاده می‌شود.

در صورت عدم وجود روند، داده‌ها برای وجود یا عدم وجود همبستگی سری[5] مورد آزمایش قرار می‌گیرند. لازم به ذکر است که منظور از همبستگی، همبستگی رتبه یک است؛ یعنی همبستگی هر داده با یک داده ماقبل آن، مورد بررسی قرار می‌گیرد. با مشاهده وجود همبستگی در داده‌ها، روش‌های زیرمجموعه فرایند پواسون همگن مثل فرایند پواسون شاخه‌ای[6] برای مدل‌سازی انتخاب می‌شود. در شرایطی که هر دو مورد روند و همبستگی برای داده‌ها وجود نداشته باشد، داده‌ها ازنظر آماری "مستقل و مانا[7] iid" نامیده می‌شوند [۶ و ۹]. برای مدل‌سازی این نوع داده‌ها از فرایند تجدیدشونده و آمار کلاسیک استفاده می‌شود [۴ و ۱۰]. برای انجام محاسبات و آزمون‌های موردنظر از دو نرم‌افزار رایج EasyFit5.6 و Minitab18 استفاده شد. این نرم‌افزارها با محاسبه پارامترهای آماری، به کاربر در انتخاب بهترین تابع توزیع برازش شده بر روی داده‌های موجود کمک می‌کند. درمجموع ۵۷ توزیع آماری در این نرم‌افزارها مورد بررسی قرار می گیرند، اما فقط ۱۵ تابع شناخته‌شده و پرکاربرد (شامل نرمال، لاگ نرمال، وایبول، لاگ نرمال ۳ پارامتری، وایبول ۳ پارامتری، گاما، نمایی و غیره) در مهندسی قابلیت اطمینان در این تحقیق استفاده شده است. در ادامه تمامی خروجی‌های به‌دست‌آمده از زیرسیستم‌ها، به طور مفصل ارائه می‌شود.

جمع‌آوری و تحلیل داده‌ها

زیرسیستم‌های ماشین و نحوه جمع‌آوری اطلاعات

ماشین‌های EPB دارای دو بخش اصلی سپر و پشتیبانی است که هرکدام از اجزاء مختلفی تشکیل شده است. تمامی این اجزاء به‌صورت بسیار منظم و با طراحی دقیق به‌گونه‌ای باهم در تعامل هستند که درنهایت باعث عملکرد نهایی ماشین می‌شوند. مهم‌ترین پارامتر در تعیین زیرسیستم‌ها، عملکرد ملموس و قابل‌تعریف هر زیرسیستم است به‌طوری‌که خراب‌شدن آن زیرسیستم در عملکرد ماشین و اجرای پروژه وقفه ایجاد کند. درنتیجه برای تعیین زیرسیستم‌های ماشین EPB مترو خط ۶ تهران نیاز به مطالعات بسیار بر روی کاتالوگ ارائه شده از سوی شرکت سازنده و همچنین حضور در محل پروژه جهت ارزیابی مکانیسم ماشین از نزدیک بود. پس از مطالعات بسیار در این زمینه و مشورت از مهندسین و مسئولین فنی دستگاه، درنهایت باوجود پیچیدگی بالا، زیرسیستم‌های عملیاتی ماشین EPB مترو خط ۶ تهران به ۶ زیرسیستم که در جدول ۲ آورده شده است، تعریف شد. اما سؤال اصلی بعد از تعیین زیرسیستم‌ها آماده‌کردن فرم مربوط به داده‌های خرابی هر زیرسیستم و چگونه پر کردن آن و صحت داده‌ها مربوط می‌شود، چرا که تمامی تحلیل‌ها و نتیجه‌گیری‌های بعدی به‌درستی همین داده‌ها وابسته است. ازاین‌رو تصمیم بر آن شد از داده‌های خامی که مسئولین شیفت به‌صورت روزانه به مشاور پروژه

[1] Renewl Process
[2] Homogenous Poison Process
[3] Non Homogenous Poison Process
[4] Power Low Process
[5] Serial Correlation
[6] Branching Poison Process
[7] Independent & Identically Distributed

تحویل می‌دهند استفاده شود که در این حالت اطلاعات به‌دست‌آمده با تقریب بسیار خوبی مورد تأیید است. در جدول ۳ نمونه‌ای از فرم‌های گزارش روزانه آورده شده است.

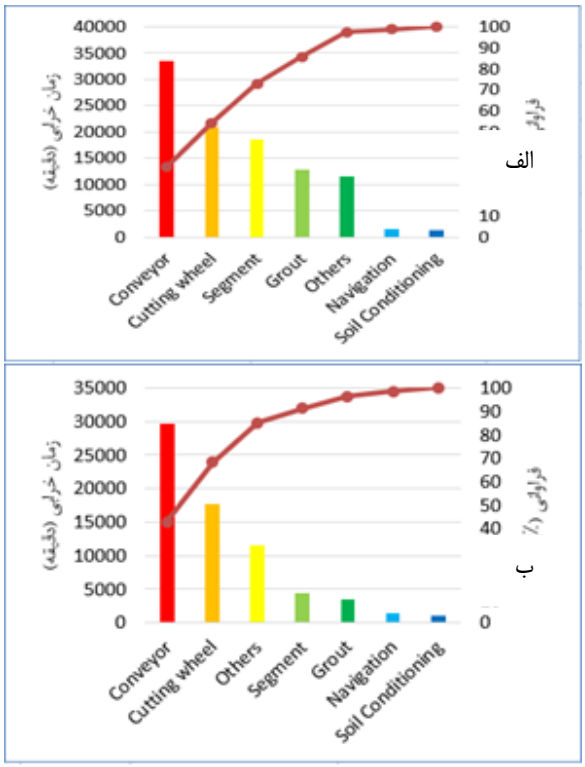
پس از بررسی‌های زیاد و مطالعه مدارک موجود، مشخص شد که هرگونه خرابی در زیرسیستم‌های ماشین باعث قطع عملیات حفاری و توقف ماشین می‌شود، لذا رابطه زیرسیستم‌ها با همدیگر به‌صورت سری بوده و برای محاسبه قابلیت اطمینان احتیاج به مدل‌سازی سری بوده که بتواند رابطه بین اجزاء را به‌درستی نشان دهد.

تحلیل پارتو

در این روش می‌توان با استفاده از داده‌های خرابی هر زیرسیستم و دردست‌داشتن کل خرابی ماشین به تفکیک درصد خرابی هر زیرسیستم به‌کل ماشین را محاسبه کرد و به بحرانی‌ترین زیرسیستم دست پیدا کرد. نتایج تحلیل پارتو در شکل ۳ ارائه شده است. همان‌طور که در شکل ۳ (الف) دیده می‌شود، تخلیه مصالح حفاری و حفاری به ترتیب با ۳۳۴۴۰ و ۲۱۰۱۰ دقیقه خرابی به‌عنوان بحرانی‌ترین زیرسیستم‌های ماشین EPB خط ۶ مترو تهران با درنظرگرفتن عوامل غیرمستقیم (عواملی که به طور غیرمستقیم باعث توقف ماشین شده‌اند، همچون بازدیدهای دوره‌ای، نبود سگمنت، نبود دوغاب و غیره) معرفی شده‌اند این در حالی است که همین زیرسیستم‌ها بدون درنظرگرفتن عوامل غیرمستقیم بیش از ۳۵۰۰ دقیقه بهبود عملکرد داشته‌اند و همچنین زیرسیستم عمل‌آوری خاک با کمترین درصد خرابی، ایمن‌ترین زیرسیستم در هر دو رویکرد شناسایی شد. در ادامه، قابلیت اطمینان تمامی زیرسیستم‌ها با دو رویکرد عوامل غیرمستقیم و بدون عوامل غیرمستقیم مورد ارزیابی قرار گرفته است که نتایج به‌دست‌آمده در شکل ۴ و ۵ قابل‌مشاهده است. یادآور می‌گردد جهت آشنایی بیشتر خواننده و همچنین به دلیل کمبود فضا فقط داده‌های مربوط به سناریو عوامل غیرمستقیم آورده شده است.

جدول ۲: زیرسیستم‌های عملیاتی ماشین EPB مترو خط ۶ تهران

شماره زیرسیستم	نام زیرسیستم	اجزاء زیرسیستم
۱	حفاری[1]	ابزار برش، تأمین گشتاور، نیروی پیشران، کله حفار و اتاقک حفاری
۲	تخلیه مصالح حفاری[2]	نوار نقاله مارپیچ، نوار نقاله TBM و نوار نقاله تونل
۳	نصب قطعات پیش‌ساخته[3]	نصاب قطعات پیش‌ساخته، جرثقیل متحرک و جلوبرنده قطعات پیش‌ساخته
۴	تزریق دوغاب[4]	خطوط تزریق دوغاب و مخزن تزریق دوغاب
۵	عمل‌آوری خاک[5]	نازل فوم
۶	راهبری[6]	دوربین نقشه‌برداری و کابین PLC



شکل ۳: فراوانی خرابی زیرسیستم‌های ماشین EPB مترو خط ۶ تهران الف) با در نظر گرفتن عوامل غیرمستقیم ب) بدون در نظر گرفتن عوامل غیرمستقیم

[1]. Cutting Wheel
[2]. Conveyor
[3]. Segment
[4]. Grout
[5]. Soil Condition
[6]. Navigation

جدول ۳: نمونه‌ای از فرم‌های جمع‌آوری اطلاعات زیرسیستم‌ها

ردیف تأخیر	پیشروی روزانه (متر)	تاریخ تأخیر	ساعت تأخیر	مدت تأخیر (دقیقه)	علت تأخیر	زیرسیستم فرعی	زیرسیستم اصلی
۱	۱۲	۱۳۹۵/۱/۲۴	۱۱:۱۵	۳۰	خرابی نصاب قطعات پیش‌ساخته	حمل قطعات پیش‌ساخته	نصب قطعات پیش‌ساخته
۲	۱۲	۱۳۹۵/۱/۲۴	۱۱:۳۵	۴۵	خرابی تخلیه قطعات	سگمنت فیدر	نصب قطعات پیش‌ساخته
۳	۱۲	۱۳۹۵/۱/۲۴	۱۳:۰۰	۱۵	خرابی نوار نقاله	نوار نقاله تونل	تخلیه مصالح حفاری
۴	۱۲	۱۳۹۵/۱/۲۴	۱۷:۰۰	۱۱۰	تأخیر تزریق دوغاب	تأمین دوغاب	تزریق دوغاب
۵	۱۲	۱۳۹۵/۱/۲۴	۲۲:۵۰	۴۰	تأخیر تزریق دوغاب	تأمین دوغاب	تزریق دوغاب
۶	۱۲	۱۳۹۵/۱/۲۴	۰۱:۴۵	۴۸۰	بازدید دوره‌ای کله حفار	*	سایر
۷	۱,۵	۱۳۹۵/۱/۲۴	۱۹:۰۰	۵۱۰	تعویض ابزار برشی کله حفار	ابزار برش	حفاری
۸	۱,۵	۱۳۹۵/۱/۲۵	۰۳:۴۵	۹۵	توقف نوار نقاله تونل	نوار نقاله تونل	تخلیه مصالح حفاری

مدل‌سازی قابلیت اطمینان

در این قسمت برای به‌دست‌آوردن مدل‌سازی قابلیت اطمینان ابتدا باید روند و همبستگی در داده‌ها بررسی شود.

آزمون روند: به الگوی خرابی‌های یک دستگاه روند گفته می‌شود که می‌تواند یکنواخت یا غیریکنواخت باشد. در حالت یکنواخت، اگر فاصله زمانی بین خرابی‌ها روبه‌افزایش باشد، شرایط دستگاه "روبه‌بهبود[1]" (روند کاهشی) خوانده می‌شود. اگر فاصله زمانی بین خرابی‌ها با افزایش عمر دستگاه کاهش یابد، شرایط دستگاه "روبه‌زوال[2]" (روند افزایشی) خوانده می‌شود. درصورتی‌که تغییرات چندانی در زمان‌های بین خرابی (TBF[3]) دستگاه رخ ندهد، دستگاه را "پایدار[4]" می‌نامند. برای کنترل وجود یا عدم وجود روند در داده‌ها، آزمون‌های مختلفی پیشنهاد شده‌اند که به‌طورکلی به دو گروه آزمون‌های تحلیلی و گرافیکی تقسیم می‌شوند. ازجمله روش‌های تحلیلی می‌توان به آزمون‌های لاپلاس[5]، هندبوک نظامی[6]، چیدمان معکوس[7]، نسبت همسایگی[8] و آزمون مساحت[9] اشاره کرد [۶ و ۱۰]. در میان این روش‌ها، روش هندبوک نظامی از کاربرد بیشتری نسبت به سایر آزمون‌ها برخوردار است. در آزمون نظامی، ارزیابی وجود روند در داده‌ها با استفاده از یک شاخص آماری انجام می‌شود که به‌قرار رابطه ۱ است [۱۰].

$$U = 2\sum_{i=1}^{2n-1} \ln(\frac{T_n}{T_i}) \qquad (۱)$$

u: شاخص آماری نشان‌دهنده کای–دو محاسبه شده

n: تعداد خرابی

T_n: زمان آخرین خرابی

T_i: زمان خرابی iام

آزمون همبستگی سری: هدف از این آزمون ارزیابی استقلال یا همبستگی داده‌ها است. برای بررسی همبستگی داده‌های خرابی یک دستگاه از روش آماری و گرافیکی استفاده می‌شود. در روش گرافیکی n امین داده خرابی به‌صورت تابعی از (n-1) امین داده خرابی رسم می‌شوند. اگر نقاط موجود دارای نظم و ترتیب خاصی نباشد، نشان‌دهنده آن است که داده‌های متوالی دارای همبستگی نیستند. در غیر این صورت داده‌ها غیرمستقل خوانده می‌شود [۶].

در جدول ۴ نتایج آماری آزمون روند و همبستگی آورده شده است.

[1] Improving System
[2] Deteriorating System
[3] Time Between Failure
[4] Stable
[5] Laplace
[6] Military Handbook Test
[7] Reverse Arrangement
[8] Likelihood-ratio
[9] Area Test

جدول ۴: نتایج آزمون روند و همبستگی اجزاء ماشین EPB خط ۶ مترو تهران با درنظرگرفتن عوامل غیرمستقیم

زیرسیستم	نوع داده	روند	همبستگی	آزمون U	رد آزمون U	روش مدل‌سازی
حفاری	TBF	No	-0.008	158.516	Not rejected (>79.1)	RP
تخلیه مصالح حفاری	TBF	No	0.011	356.87	Not rejected (>230.3)	RP
قطعات پیش‌ساخته	TBF	No	0.012	626.77	Not rejected (>279.4)	RP
عمل‌آوری خاک	TBF	No	0.377	24.082	Not rejected (>18.3)	RP
تزریق دوغاب	TBF	No	0.196	130.032	Not rejected (>126.7)	RP
راهبری	TBF	No	-0.312	32.89	Not rejected (>16.9)	RP

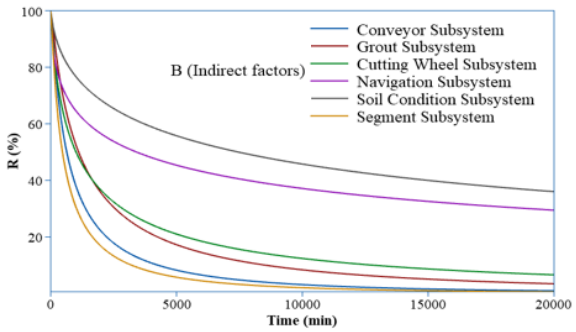
محاسبات جدول ۴ نشان می‌دهد که باتوجه‌به کوچک بودن عدد میزان همبستگی و باتوجه‌به بزرگ‌تر بودن شاخص U از مقدار بحرانی، فرض صفر رد نمی‌شود و عدم وجود روند و همبستگی در داده‌ها مورد تأیید قرار می‌گیرد؛ بنابراین تمامی زیرسیستم‌ها و رفتار کل ماشین مستقل و مانا بوده و بهترین روش برای مدل‌سازی فرایند تجدیدشونده است. پس از مشخص شدن روش مدل‌سازی نوبت به تعیین تابع توزیع هر یک از زیرسیستم‌ها است که برای این کار نرم‌افزار Easyfit5.6 برای تحلیل داده‌ها و برازش بهترین تابع توزیع استفاده شد. همچنین آزمون کلموگروف–اسمیرنوف (K-S) برای تطابق برازش و یافتن بهترین تابع توزیع انتخاب شده است. نتایج تطابق برازش برای یافتن بهترین تابع توزیع احتمال بر روی TBF تمامی زیرسیستم‌ها و کل ماشین در جدول ۵ ارائه شده است.

جدول ۵: نتایج برازش بهترین توابع توزیع برای زیرسیستم‌های ماشین EPB با درنظرگرفتن عوامل غیرمستقیم

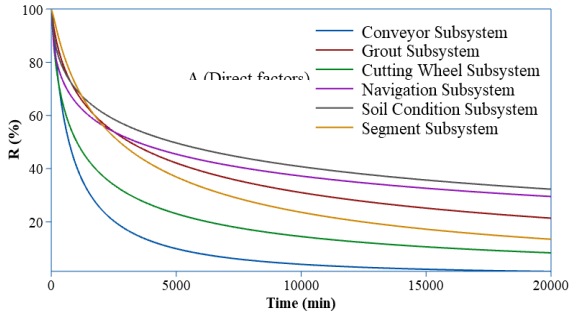
زیرسیستم	K-S test (best fit)	Parameters (TBF)
حفاری	Pareto	$\alpha = 0.703$
		$\beta = 529.87$
تخلیه مصالح حفاری	Pareto	$\alpha = 1.341$
		$\beta = 928.20$
قطعات پیش‌ساخته	Log-Logistic	$\alpha = 1.176$
		$\beta = 416.428$
عمل‌آوری خاک	Gama	$\alpha = 0.603$
		$\beta = 62751324$
تزریق دوغاب	Pareto	$\alpha = 1.069$
		$\beta = 1152.567$
راهبری	Lognormal	$\sigma = 2.943$
		$\mu = 8.716$

با استفاده از تابع قابلیت اطمینان در رابطه ۲ و همچنین جدول ۵، منحنی‌های مدل قابلیت اطمینان زیرسیستم‌های ماشین حفاری خط ۶ مترو تهران با و بدون درنظرگرفتن عوامل غیرمستقیم در شکل ۴ و ۵ آورده شده است.

$$R_t = 1 - \int_0^t f(t)dt \qquad (۲)$$



شکل ۴: منحنی قابلیت اطمینان زیرسیستم‌های ماشین EPB مترو خط ۶ تهران با درنظرگرفتن عوامل غیرمستقیم



شکل ۵: منحنی قابلیت اطمینان زیرسیستم‌های ماشین EPB مترو خط ۶ تهران بدون درنظرگرفتن عوامل غیرمستقیم

باتوجه به شکل ۴، قابلیت اطمینان تمامی زیرسیستم‌ها به‌غیراز زیرسیستم عمل‌آوری خاک در ۵۰۰۰ دقیقه اول با شیب بسیار تند به‌صورت کاهشی بوده و قابلیت اطمینان به ۲۵ درصد کاهش پیدا می‌کند. این کاهش اولیه بدین معناست که هماهنگی اولیه بین اجزای زیرسیستم‌ها به‌خوبی صورت نگرفته و احتمال شکست و خرابی در همان دقایق اولیه بسیار زیاد است که با بازرسی و بازدیدهای دوره‌ای از زیرسیستم‌ها می‌توان تا حد قابل‌قبولی از توقف ماشین کاست. همان‌طور که از شکل مشخص است، زیرسیستم راهبری و عمل‌آوری خاک دوره رفع ایرادات را بسیار زود سپری کرده و به دوره عمر مفید خود رسیده‌اند، طول این بازه برای این دو زیرسیستم بسیار بالاست به‌طوری‌که در دقایق بالای ۲۰۰۰۰ دچار شکست و خرابی می‌شوند. روند کاهشی نمودار قابلیت اطمینان زیرسیستم‌های تخلیه مصالح حفاری و نصب قطعات پیش‌ساخته در ۲۵ درصد متوقف نشده است و به شیب تند خود تا مرز ۵ درصد ادامه داده تا اینکه در دقیقه ۹۰۰۰ قطعاً دچار شکست می‌شوند و عملکرد ماشین را متوقف خواهند کرد، درنتیجه به‌عنوان بحرانی‌ترین زیرسیستم معرفی شدند. این در حالی است که زیرسیستم عمل‌آوری خاک با ۲۰۰۰۰ دقیقه مطمئن‌ترین زیرسیستم این قسمت شناخته شد.

اما در شکل ۵ به‌وضوح مشخص است که اگر عوامل غیرمستقیم در تحلیل‌ها وارد نشوند، قابلیت اطمینان زیرسیستم‌ها به طور چشمگیری افزایش پیدا می‌کنند. مقایسه نتایج شکل ۴ و ۵ به‌خوبی نشان می‌دهد که زیرسیستم قطعات پیش‌ساخته و تزریق دوغاب دارای بیشترین عوامل غیرمستقیم بوده، به‌طوری که قابلیت اطمینان قطعات پیش-ساخته از ۱۰ درصد در ۵۰۰۰ دقیقه به ۴۰ درصد در همان دقیقه مشابه رسیده است و از طرفی دیگر زیرسیستم‌های عمل‌آوری خاک و راهبری دارای کمترین عوامل غیرمستقیم بوده به همین علت قابلیت اطمینان آن‌ها تغییرات زیادی نداشته‌اند که این موضوع بیش‌ازپیش اهمیت عوامل غیرمستقیم را می‌رساند.

نتیجه‌گیری

اهمیت موضوع عوامل غیرمستقیم باعث شد که در این تحقیق برای اولین‌بار ماشین تونل‌زنی EPB مترو خط ۶ تهران به ۶ زیرسیستم کلی و به ۱۶ زیرسیستم فرعی تقسیم شود، به‌طوری‌که تمامی خرابی‌های زیرسیستم‌ها با درنظرگرفتن عوامل غیرمستقیم جمع‌آوری و تجزیه‌وتحلیل شد. باتوجه‌به سری بودن زیرسیستم‌های ماشین EPB، خرابی در هرکدام از زیرسیستم‌ها باعث توقف عملیات کلی ماشین می‌شود. در نتیجه برای بهبود عملکرد ماشین بایستی همواره برنامه‌ریزی‌های تعمیر و نگهداری دقیق بر روی زیرسیستم قسمت نصب قطعات پیش‌ساخته و قسمت تخلیه مصالح حفاری، به‌عنوان بحرانی‌ترین زیرسیستم از لحاظ قابلیت اطمینان انجام شود. یکی از فعالیت‌هایی که می‌تواند عملکرد این زیرسیستم‌ها را بالا ببرد، پیش-بینی نوع خرابی و زمان تعمیر موردنیاز آن است که باعث می‌شود خرابی در کمترین زمان ممکن تعمیر و به حالت اولیه کاری خود بازگردد. ازآنجایی‌که با درنظرگرفتن عوامل غیرمستقیم قابلیت اطمینان زیرسیستم‌ها تا ۵۰۰۰ دقیقه، با شیبی تند به‌صورت کاهشی بوده؛ بنابراین انجام عملیات اصلاحی منطقی‌ترین و کاربردی‌ترین نوع برنامه‌ریزی برای آن به شمار می‌رود. در این نوع زیرسیستم‌ها که روند کاهشی به‌صورت تند بوده، تعویض قطعات بدترین نوع برنامه-ریزی است. کاهش مقطعی قابلیت اطمینان در یک‌زمان محدود بیانگر این نکته است که اجزاء زیرسیستم با همدیگر هماهنگ نبوده‌اند.

عملکرد ۱۲ماهه ماشین EPB مترو خط ۶ تهران (فاز یک) نشان داد که عوامل غیرمستقیم همچون تأمین سگمنت، تأمین دوغاب، پر بودن چاه تخلیه مصالح حفاری و غیره می‌توانند نقش بسزایی را در توقف عملیات داشته باشند، به‌طوری‌که حدود ۴۵ درصد توقف‌های ماشین مربوط به عوامل غیرمستقیم بوده است. شناسایی این عوامل و عدم اجازه تکرار آن‌ها می‌تواند زمان توقف حفاری را به نصف برساند.

منابع

[1] Billinton, R., & Allan, R. N. (1992). Reliability evaluation of engineering systems (Vol. 792). New York: Plenum press.

[2] Dhillon, B. S. (2008). Mining equipment reliability (pp. 57-70). Springer London.

[۳] ح. امینی خوشالان، مدل‌سازی قابلیت اطمینان، دسترسی، تعمیر و نگهداری سیستم برق ماشین حفاری تمام مقطع تونل، نشریه مهندسی منابع معدنی، دوره دوم، شماره ۲، تابستان ۱۳۹۶، صفحه ۱۰-۱.

[۴] پ. فاضل‌نیا، تحلیل عملکرد ماشین تونل‌زنی تمام مقطع (TBM) در زمین نرم- مطالعه موردی، پایان‌نامه ارشد، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران، ۱۳۹۴.

[5] Frough, O., & Torabi, S. R. (2013). An application of rock engineering systems for estimating TBM downtimes. Engineering Geology, 157, 112-123.

[6] Rigdon, S. E., & Basu, A. P. (2000). "Statistical methods for the reliability of repairable systems ", Wiley New York.

[7] Klefsjo, B., & Kumar, U. (1992). Goodness-of-fit tests for the power-law process based on the TTT-plot. IEEE transactions on reliability, 41(4), 593-598.

[8] Modarres, M. (2006). Risk analysis in engineering: techniques, tools, and trends. CRC press.

[9] Kumar, U. (1990). Reliability analysis of load-haul-dump machines (Doctoral dissertation, Luleå tekniska universitet).

[10] Ebeling, C. E. (2019). An introduction to reliability and maintainability engineering. Waveland Press.