رویه‌ی جامع تجزیه و تحلیل و پیش‌بینی قابلیت اطمینان صنعت ریلی

مقاله علمی – پژوهشی

اکبر عالم تبریز*، استاد، دانشکده مدیریت، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران
فرزانه نظری زاده، دانش آموخته دکترا، دانشکده مدیریت، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران
مصطفی زندیه، استاد، دانشکده مدیریت، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران
عباس راد، استادیار، دانشکده مدیریت، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران
*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: a-tabriz@sbu.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۱/۰۸/۲۸– پذیرش: ۱۴۰۲/۰۱/۲۶
صفحه ۳۰۶-۲۸۱

چکیده

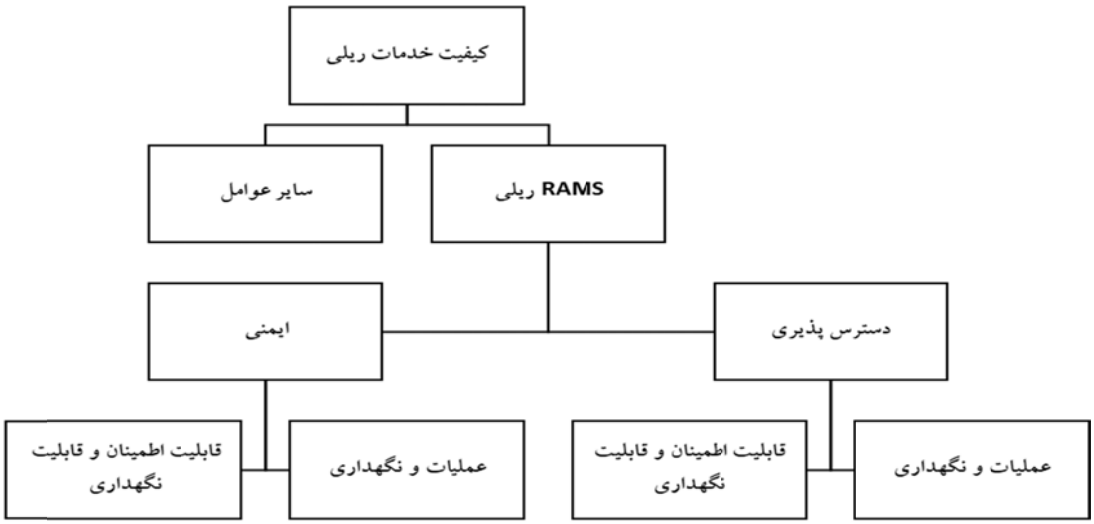
در این مقاله یک رویه‌ی جامع برای پیش بینی قابلیت اطمینان در صنعت ریلی ارایه می‌گردد تا بتوان عوامل موثر بر قابلیت اطمینان را شناسایی و برآورد دقیق‌تری از آن به دست آورد. این مطالعه همچنین به مدیران صنعت ریلی کمک خواهد کرد تا به اهمیت قابلیت اطمینان و بهینه سازی شاخص‌های عملکردی مهم در صنعت ریلی پی برده و پیشرفت‌هایی را که می‌توان برای بهبود قابلیت اطمینان در صنعت ریلی ایجاد کرد، درک نمایند. همچنین در این مطالعه یک چارچوب تخصیص جامع با توجه به ویژگی‌های یک سیستم ریلی مسافری و آلترناتیوهای احتمالی ارایه می‌شود؛ چارچوب پیشنهادی می‌تواند علاوه بر قابلیت اطمینان سیستم، هزینه چرخه عمر و قابلیت اطمینان خدمات را به منظور تعیین بهینه‌ی برنامه‌ی سرمایه‌گذاری برای طراحی یا به روزرسانی سیستم ریلی اختصاص داده و به صنعت ریلی در پیش بینی قابلیت اطمینان سیستم‌ها و زیرسیستم‌ها و شناسایی توازن ایده آل بین هزینه، قابلیت اطمینان و وقت شناسی قطارهای مسافری به منظور دستیابی به طراحی بهینه‌ی سیستم ریلی کمک نماید.

واژه‌های کلیدی: قابلیت اطمینان، صنعت ریلی، وقت شناسی، هزینه چرخه عمر، قطارهای مسافری

۱-مقدمه

زوال یک فرآیند مستمر در سیستم‌ها، تجهیزات و اجزا، تحت فشارهای مختلف و شرایط نامطلوب کار است. عوامل موثر بر زوال بر عملکرد سیستم یا اجزا تاثیر منفی دارند. مطالعه ی این عوامل زمینه ای را برای تصمیم گیری صحیح در مورد اقدامات اصلاحی و پیشگیرانه فراهم می‌سازد. در اکثر موارد به دلیل پیچیدگی‌ها و ملاحظات هزینه‌ای، امکان اجرای تغییرات طراحی وجود ندارد مانند زیرساخت‌های راه آهن و غیره. در چنین شرایطی قابلیت اطمینان عملیاتی از طریق اقدامات موثر نگهداری تضمین می‌شود (کومار، ۲۰۰۸). در سال‌های اخیر، مدیریت دارایی‌های فیزیکی به ویژه در سازمان‌های دارایی محور اهمیت فزاینده‌ای یافته است. کارآمدی یک سیستم ریلی به یکپارچگی تعداد زیادی از سیستم‌های پیچیده بستگی دارد. اگر یک سیستم خراب شود می‌تواند به شدت کل خدمات را تحت تاثیر قرار دهد. قابلیت اطمینان، در دسترس بودن، قابلیت نگهداری و ایمنی به عنوان عوامل اصلی کیفیت خدمات راه آهن در نظر گرفته می‌شوند و در استاندارد EN50126(1999) اروپا به خوبی پوشش داده شده‌اند. این استاندارد تصدیق می کند که ایمنی و در دسترس بودن راه آهن به هم پیوسته اند و تنها در صورت دستیابی به کلیه ی الزامات، قابلیت اطمینان و قابلیت نگهداری بدست می‌آیند. کیفیت خدمات راه آهن نه تنها تحت تاثیر چهار عنصر RAMS بلکه تحت تاثیر عملیات، نگهداری و سایر عوامل نیز قرار دارد که

در شکل ۱ نشان داده شده است. در حالی که تمام عناصر RAMS در مدیریت دارایی‌های فیزیکی راه آهن مهم هستند، تمرکز این مقاله پیشنهاد یک رویه‌ی جامع برای پیش بینی قابلیت اطمینان در صنعت ریلی و شناسایی عوامل موثر بر آن و معرفی چارچوب بهینه سازی و تخصیص آن در راه‌آهن ج.ا.ا است.



شکل ۱. عوامل موثر بر کیفیت خدمات صنعت ریلی

قابلیت اطمینان در صنعت ریلی

کلمه‌ی " قابلیت اطمینان" از کلمه‌ی " اعتماد کردن " ایجاد شده است. این واژه اولین بار در اوایل سال ۱۸۱٦ توسط شاعر ساموئل تی. کولریج در مورد دوست خود که از اطمینان مطلق اطرافیانش برخوردار بود، مورد استفاده واقع شد. از آن زمان مفهوم قابلیت اطمینان نسبتاً رایج شد و توسط عموم مردم و همچنین جامعه‌ی فنی به طور گسترده مورد استفاده قرار گرفت. تعاریف مختلفی از "قابلیت اطمینان" وجود دارد؛ اما یکی از تعاریف مناسب‌تر در زمینه‌ی قابلیت اطمینان دارایی، "احتمال اینکه یک آیتم در شرایط مشخص برای یک بازه‌ی مشخص عملکرد مورد نظر خود را انجام دهد" می‌باشد. قابلیت اطمینان از مشخصه‌های ذاتی هر محصول است و لذا یکی از پارامترهای طراحی محسوب می‌شود. پیش‌بینی قابلیت اطمینان معمولا بر اساس الگوریتم‌های ریاضی مشخص صورت می‌پذیرد. تجزیه و تحلیل قابلیت اطمینان یک رویکرد سیستماتیک برای تحلیل قابلیت اطمینان سیستم‌ها، شناسایی و دستیابی به تعداد و علل خرابی‌ها و کنترل عواقب خرابی‌هاست. دلایل زیادی برای مهم بودن قابلیت اطمینان وجود دارد. مانند شهرت، رضایت مشتری، هزینه‌ی بهره برداری و نگهداری، تکرار تجارت و مزیت رقابتی. اما از نظر نگهداری و تعمیرات، قابلیت اطمینان به دسترسی بیشتر کمک می‌کند که از اهمیت ویژه ای در زمینه ی RAMS برخوردار است. یک سیستم حمل و نقل باید حرکت اشیاء مادی را در زمان و مکان تضمین کند. وظیفه اصلی هر فرآیند حمل و نقل انتقال افراد و کالاها از یک نقطه به نقطه‌ی دیگر با وقت شناسی، راحتی و با حداقل تأثیر منفی بر محیط است. روش-های مختلف فرآیندهای حمل و نقل دارای خصوصیات عملکردی، خدماتی و عملیاتی متمایز هستند که هسته اصلی یک سیستم پویا را ایجاد می‌کنند [لندمارک و همکاران، ۲۰۱۷؛ نوواکوزکی،۲۰۰٤]. زیرساخت‌های ناسالم حمل و نقل مانعی برای دستیابی به اهداف اساسی فرآیند حمل و نقل است. چالش‌های زیادی برای مدیریت زیرساخت‌های حمل و نقل وجود دارد، در درجه اول به این دلیل که وقتی طراحی و نصب به پایان رسید، اصلاح طرح اولیه دارایی‌های زیرساخت دشوار می‌شود. تأمین زیرساخت‌های حمل و نقل که به اندازه کافی قابل انعطاف باشند تا بتوانند با نیازهای حرکتی و محدودیت‌های منابع رو به افزایش همراه شوند، به تصمیمات مربوط به نگهداری و بازسازی بستگی دارد. در این شرایط، فرایندهای نگهداری و مدیریت زیرساخت‌ها باید کارآمد و موثر باشند تا عملکرد قابل اطمینان سیستم‌های حمل و نقل شهری را تضمین کنند. راه آهن نقش مهمی در توسعه اقتصاد

یک کشور ایفا می‌کند که این امر مهم بودن اجرای عملیات راه آهن به روشی کارآمد، ایمن و قابل اعتماد را تعیین می‌نماید. راه آهن یک سازمان پیچیده است و از طریق هماهنگی با بخش‌های مختلف مانند برنامه‌ریزی پروژه، زیرساخت‌ها، تجهیزات حمل و نقل، سیگنالینگ و ارتباطات فعالیت می‌کند. مطالعات نشان داده است که یک رویکرد جامع برای بهبود قابلیت اطمینان سیستم‌های زیرساخت راه آهن به طور همزمان عملکرد هزینه چرخه عمر دارایی‌های زیرساختی را بهبود می‌بخشد [راما و همکاران، ۲۰۱۶]. مدل‌های قابلیت اطمینان که در صنعت ریلی مسافری توسعه و به کار گرفته شده‌اند، بر مدلسازی زیرسیستم‌های منفرد سیستم ریلی مانند زیرسیستم‌های ناوگان و زیر سیستم‌های زیرساخت متمرکز هستند [مک نات،۲۰۱۵؛ جیدایی، ۲۰۱۵؛ کنرادی،۲۰۱۵]. بهبود قابلیت اطمینان یک جزء از یک سیستم ریلی به بهبود کل سیستم کمک چندانی نمی‌کند. در عوض، به دلیل ویژگی‌های مختلف عملکردی و عملیاتی، رفتارهای مختلفی در رابطه‌ی گروه‌های مختلف دارایی زیرساخت راه آهن پدیدار می‌شود. بهبود فرآیند تصمیم‌گیری سیستم‌های پیچیده زیرساختی که در مناطق وسیع جغرافیایی گسترش یافته‌اند، به روش‌هایی برای ارزیابی چگونگی تأثیر یک مداخله روی یک گروه دارایی بر سایر قسمت‌های سیستم راه آهن نیاز دارد [Network Rail, 2014]. علاوه بر این، شناسایی اجزای دارای اولویت بالا که بر عملکرد کلی سیستم تأثیر می گذارند، رهنمودهایی برای بهبود موثرتر سیستم فراهم می‌سازد که به سازمان راه آهن اجازه می‌دهد اهداف استراتژیک گروه‌های مختلف دارایی را در جهت حفظ شبکه ریلی در سطح عملیاتی مورد انتظار تراز کنند. مدل قابلیت اطمینان صنعت ریلی از سه قسمت اصلی ساخته شده است [الدوری، ۲۰۱۶]: ۱- قابلیت اطمینان اجزای فنی تشکیل دهنده سیستم (فرض، استقلال وقایع رخ داده در زیر سیستم‌ها است) ۲-فعل و انفعالات بین زیر سیستم ناوگان و سایر زیر سیستم‌ها ۳-شدت ترافیک پس از وقفه به دلیل یک رویداد نامطلوب. احتمال وقوع خرابی‌ها و همچنین عواقب موجود در ترافیک به شدت استفاده از سیستم بستگی دارد و می‌تواند به عنوان کارکرد یا عملیات حمل و نقل بیان شود [ژواکی، ۲۰۱۷]. کار عملیاتی انجام شده تأثیر مستقیم بر شدت ترافیک قطار دارد. از این رو، در صورت ایجاد اختلال در یک قطار، همه قطارهای وابسته به ترافیک دچار تأخیر می‌شوند. بنابراین، می‌توان دریافت که این دو پارامتر مستقیماً به هم مرتبطند [رستل و همکاران، ۲۰۱۵]. اهمیت قابلیت اطمینان در صنعت ریلی به بهترین وجه توسط میلوتینوویچ (۲۰۰۵) توصیف شده است و تاثیر قابلیت اطمینان را بر دسترس پذیری کمّی می‌نماید. طبق ادبیات سه شاخه اصلی قابلیت اطمینان وجود دارد: سخت افزار، نرم افزار و قابلیت اطمینان انسان. بدون چشم پوشی از اهمیت قابلیت اطمینان انسانی، این مقاله روش‌ها و تکنیک‌های قابلیت اطمینان سخت افزاری را بررسی می‌کند و اساساً تمرکز آن بر قابلیت اطمینان سخت افزار و تجهیزات بدون در نظر گرفتن علت خرابی می‌باشد. قابلیت اطمینان راه آهن را می‌توان به روش های مختلف مانند وقت شناسی خدمات، لغو و تاخیرات و تعداد سفرهای تحقق یافته اندازه‌گیری نمود. از منظر مسافری، وقت شناسی خدمات اغلب به عنوان معیار قابلیت اطمینان استفاده می‌شود و به عنوان احتمال اینکه قطار با یک حاشیه‌ی زمانی مشخص از زمان ورود برنامه ریزی شده به مقصد نهایی برسد، تعریف می‌شود. وقت شناسی برخی از اپراتورهای بزرگ راه آهن اروپا در حدود ۹۵٪ است. مطالعات به وضوح نشان می‌دهد که قابلیت اطمینان برای شرکت های ریلی مهم است و نمی‌توان پیامدهای عدم قابلیت اطمینان را نادیده گرفت. کیفیت اصلی سیستم ریلی بستگی به حفظ ایمنی و قابلیت اطمینان از مرحله طراحی سیستم تا مرحله بهره‌برداری و به عبارت دیگر کل چرخه عمر سیستم دارد. راه‌آهن به طور کلی به عنوان یک شبکه پیچیده با عملکرد پویا در نظر گرفته می شود زیرا به جنبه های مختلفی از جمله زیرساخت‌ها، طراحی، جغرافیا، مسافران و غیره بستگی دارد.

در روزهای اخیر، با افزایش جمعیت و استفاده گسترده از راه آهن، وقت شناسی راه آهن تحت تأثیر قرار می‌گیرد و با سایر روش‌های حمل و نقل در رقابت می‌باشد؛ بنابراین، تمایل مداوم به توسعه‌ی عملیاتی به منظور حفظ دسترسی و وقت شناسی قطارها پیوسته افزایش می‌یابد. برای دستیابی به این مهم، ارزیابی عملکرد سیستم‌های زیرساختی و عملیاتی مهم است. بخش چالش برانگیز توسعه مدلی است که بتواند این خصوصیات دینامیکی را در نظر گرفته و ارزیابی کند و قابلیت اطمینان کلی، در دسترس بودن و بحرانی بودن سیستم‌های زیرساختی را ارائه نماید تا قابلیت عملیاتی و وقت شناسی در بخش‌های مختلف حاصل شود.

تکنیک‌ها و روش‌های مدلسازی قابلیت اطمینان

برای شناسایی مدل‌ها و روش‌های مدلسازی قابلیت اطمینان، بررسی ادبیات برای دستیابی به رویکردهای کلی مورد استفاده توسط نویسندگان مختلف، انجام شده است. روش‌های بی‌شماری برای مدل سازی سیستم وجود دارد و روش‌های بسیار محدودی قابلیت اطمینان را مدل می‌کنند. در حال حاضر، تکنیک‌های رایجی که در مدلسازی پیش بینی قابلیت اطمینان سیستم‌های تعمیر پذیر استفاده می شوند بر پایه‌ی تحلیل‌های آماری و احتمالی شامل فرآیند مارکوف، فرآیند نقطه‌ای پوآسون، روش بیزین، مدل‌های براساس شرایط، شبیه سازی مونت کارلو و ترکیبی از آنها هستند. پس از یک مرور ادبیات گسترده، برخی محدودیت‌ها از مدل‌های موجود استنتاج شده‌اند، بیشتر ادبیات موجود در این زمینه بر پایه‌ی تحلیل میانگین زمان تا رسیدن به شکست یا تعداد مورد انتظار از زمان‌های شکست سیستم‌های تعمیر پذیر است. مدل‌های مرسوم پیشنهادی توسط جامعه علمی، تجزیه و تحلیل درخت خطا (FTA) و بلوک دیاگرام قابلیت اطمینان (RBD) است، هر دوی این روش‌ها در قدرت بیان محدود هستند اما استفاده از آنها آسان و کارآمد است. به عنوان یک سیستم فنی پیچیده، زنجیره‌های مارکوف پیوسته (CTMC) و سایر شبکه‌های پتری تصادفی (SPN) می توانند چنین شبکه‌های پیچیده‌ای را مدل سازی کنند اما مدل سازی سیستم های بسیار بزرگ عملی نیست. مدل FTA توسط بسیاری از نویسندگان پذیرفته شده است و می توان مستقیماً یک FT را در یک شبکه بیزی (BN) ترسیم کرد [بوبی،۲۰۰۱]. شبکه‌های بیزی (BN) قدرت بیان و کارایی حل را برای مدل سازی جنبه های قابلیت اطمینان دارند. فلمینی و همکاران (۲۰۱٤)، تجزیه و تحلیل و مدل سازی زیر سیستم‌های مختلف را با استفاده از مدل‌های مختلف و ترکیبی توصیه می‌کنند. وی در یکی از مقاله‌های خود فقط از FTA برای زیر سیستم ها و شبکه‌های بیزی برای سیستم کلی استفاده کرد. بررسی متون نشان می دهد که مدل های تحلیلی برای قابلیت اطمینان عمدتاً بر اساس فرآیند تصادفی و نظریه احتمال ساخته شده‌اند. با این حال، مدل‌های قابلیت اطمینان تحلیلی نیز بر اساس تجربه یا آزمایشات، یا از مکانیزم شکست حاصل شده‌اند [ابلینگ، ۱۹۹۷]. در مدل‌های موجود، روند نوسازی و تعمیرات حداقلی هنوز دو فرض اساسی هستند [کیم، ۲۰۰۰] اگرچه در سال‌های اخیر بیشتر و بیشتر به تعمیرات ناکامل توجه شده است [لاو، ۲۰۰۰]. فام (۲۰۰۳) چندین مدل بهینه ی نگهداری و تعمیرات ناکامل را مرور کرده و دستورالعمل‌های تحقیقاتی آینده را در مورد نگهداری ناکامل نشان داد. با این حال، مطالعه‌ی وی بیش از پیش بینی قابلیت اطمینان بر فعالیت‌های نگهداری متمرکز بود. بررسی ادبیات نشان داد که مدل‌های موجود دارای محدودیت‌های زیر است:

۱- در تجزیه و تحلیل قابلیت اطمینان یک سیستم تعمیرپذیر، مدل های موجود غالباً کل سیستم را در نظر می‌گیرند و سهم مجزای زیرسیستم‌های مختلف را لحاظ نمی کنند [مارکوز و همکاران،۲۰۰۲؛ هویلند و همکاران، ۱۹۹٤؛ ژاردین و همکاران، آرمسترانگ، ۲۰۰۲].

۲- فعل و انفعالات بین خرابی اجزای موجود در یک سیستم یا زیرسیستم‌ها به اندازه کافی مدلسازی نشده است. مدل‌های موجود برای خرابی‌های وابسته اثرات یک جهته خرابی‌ها یا برخی سیستم‌های خاص مانند سیستم تقسیم بار را در نظر می‌گیرند. یک مدل موثر برای تجزیه و تحلیل شکست های ناشی از تعامل پیوسته‌ی بین اجزای سازنده هنوز توسعه داده نشده است.

۳- عدم کفایت برای پیش‌بینی قابلیت اطمینان با توجه به داده‌های خرابی پراکنده یا صفر وجود دارد. برخی از مدل‌های موجود که با داده‌های شکست پراکنده سروکار دارند، بر اساس روش بیزی [پرسی، ۲۰۰۲؛ ویلیامز و همکاران، ۱۹۹۷، سیلور و همکاران، ۱۹۹۵] ساخته شده‌اند. این مدل‌ها برای به روزرسانی تابع توزیع پسین بدون استفاده از داده‌های شرطی به داده‌های خرابی نیاز دارند [پرسی، ۱۹۹۷]. با این وجود مدل‌های دیگری از سازوکار شکست دارایی‌های خاص ساخته شده‌اند. اما ماهیت آنها خاص است [ابلینگ،۱۹۹۷؛ هانگ، ۱۹۹۹].

٤- در نظرگرفتن سیستماتیک قابلیت اطمینان سیستم‌های تعمیرپذیر با تمام جنبه‌های فوق مانند تعمیرات متعدد ناقص، خرابی‌های تعاملی و داده‌های شکست تاریخی پراکنده وجود ندارد.

۵- برخی از مدل‌ها به سادگی فرمول بندی‌های نظری هستند و هیچ تمرکز واقعی در برنامه ندارند [اکنور، ۲۰۰۲].

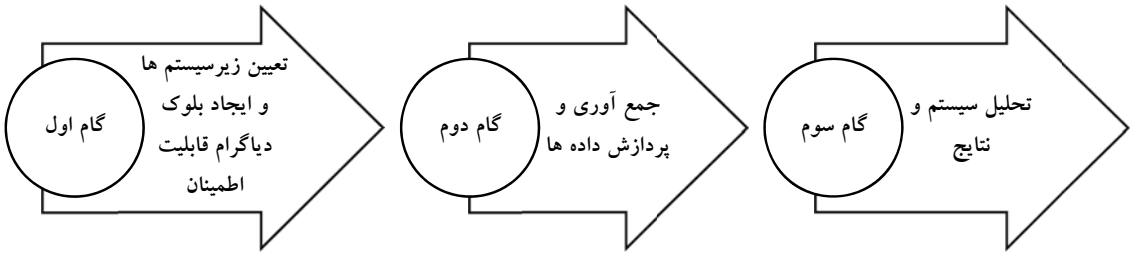
تکنیک‌های مدل سازی باید بتوانند به طور موثر پارامترهای مهم سیستم واقعی را حفظ کنند و تکنیک تجزیه و تحلیل باید قادر به ارائه‌ی بینش در مورد رفتار سیستم بدون اجرای سیستم

واقعی باشد. تکنیک‌های بی‌شماری وجود دارد که می‌تواند تجزیه و تحلیل را در مرحله اولیه، هنگامی که فقط جزئیات اولیه از طرح در دسترس است، فراهم سازد و تکنیک‌های دیگری وجود دارد که تجزیه و تحلیل مراحل بعدی طراحی را ارائه می‌کند. اخیراً، جامعه‌ی شبکه‌های رایانه‌ای علاقه زیادی به استفاده از روش‌های رسمی به عنوان یک روش تجزیه و تحلیل قابلیت اطمینان برای شبکه‌های ارتباطی نشان داده است. روش‌های رسمی از منطق ریاضی به طور دقیق رفتار مورد نظر سیستم را مدل می‌کنند و استدلال ریاضی را برای اثبات غیرقابل انکار اینکه سیستم داده شده الزامات را تأمین می‌کند، به کار می‌گیرند؛ این نوع مدل‌سازی و تجزیه و تحلیل ریاضی، روش‌های رسمی را به عنوان یک روش تجزیه و تحلیل دقیق در مقایسه با تجزیه و تحلیل سنتی و مبتنی بر شبیه سازی تبدیل می کنند. این به این دلیل است که ساده‌سازی دستی در روش‌های تحلیلی مبتنی بر کاغذ و مداد، تجزیه و تحلیل را مستعد خطا می‌کند، به ویژه هنگام تجزیه و تحلیل سیستم‌های بزرگ. علاوه بر این، ممکن است مفروضات اصلی برای اثبات تحلیلی در ذهن ریاضیدان ضمنی باشد و مستند نباشد که می‌تواند هنگام طراحی و اجرای سیستم مشکلاتی را ایجاد کنند. از آنجا که راه‌آهن در عملیات خود پویاست، توسعه یک مدل قابلیت اطمینان با استفاده از شبیه‌سازی RBD و سایر ابزارهای شبیه سازی را می‌توان واقع بینانه‌تر دانست؛ اما هنوز یک مدل اثر بخش برای پیش بینی قابلیت اطمینان دقیق سیستم های پیچیده در دسترس نیست.

رویه‌های تجزیه و تحلیل قابلیت اطمینان

مراحل اصلی قابل تفکیک در هر تجزیه و تحلیل قابلیت اطمینان هنگام تهیه یک مدل، در شکل ۲ به عنوان معیارهای عملکردی، کیفی، کمّی و اعتبارسنجی خلاصه می‌شود. تجزیه و تحلیل عملکردی و فنی شامل جمع آوری داده‌ها، تعریف مشخصات فنی و عملکردهای اصلی یک سیستم همراه با محدودیت‌های خارجی است. یک تجزیه و تحلیل کیفی اهداف تجزیه و تحلیل قابلیت اطمینان را تعریف می‌کند و دامنه ی مطالعه را در مورد ویژگی‌های قابلیت اطمینان موردنیاز از تجزیه و تحلیل مانند در دسترس بودن، نگهداری یا ایمنی ایجاد می‌کند. سطح تفکیک پذیری که سطح اجزا و درجه اطلاعات مورد نیاز را توصیف می کند باید در مرحله کیفی برای سیستم مورد تجزیه و تحلیل مشخص و برجسته شود. هدف اصلی یک تجزیه و تحلیل کیفی ایجاد تمام مکانیسم‌های شکست و ترکیبات خرابی است که بر قابلیت اطمینان یک سیستم تأثیر می‌گذارد.

حوادثی که احتمالاً در سیستم و محیط آن رخ می‌دهد مانند خرابی و نقص در اجزای سیستم به عناصر مدل قابلیت اطمینان تبدیل می‌شوند. در نتیجه اطلاعات مربوط به حالت‌های خرابی، دلایل آنها و داده‌های مربوط به قابلیت اطمینان باید در دسترس قرار گیرد تا امکان ارائه خرابی‌ها و نواقص (همراه با ترکیبات آنها) از اجزای سیستم که به یکی از ویژگی‌های قابلیت اطمینان آسیب می‌زند، وجود داشته باشد. تجزیه و تحلیل کمّی مربوط به توصیف قابلیت اطمینان سیستم با مقیاسی مانند احتمال است. احتمالات را می‌توان از مدلسازی آماری ریاضی بدست آورد که از توزیع شکست احتمالات حاصل از اطلاعات جمع‌آوری شده در طی وقایع ابتدایی در سیستم استفاده می‌کند. یک تجزیه و تحلیل کمّی نقاط قوت و ضعیف سیستم، اجزای حیاتی و سطح قابلیت اطمینان سیستم را شناسایی می‌کند. اطلاعات با ماهیت کمّی از داده‌های قابلیت اطمینان شامل زمان کارکرد، ویژگی‌های نگهداری پیشگیرانه و اصلاحی و داده‌های آماری در مورد شرایط شدید محیطی جدا می شوند. درجاتی از عدم اطمینان با جمع آوری داده‌های خرابی یک سیستم وجود دارد. اعتبارسنجی مدل توسعه یافته نتایج تجزیه و تحلیل کمّی و کیفی را ادغام نموده و خرابی‌ها و ترکیباتی را که بر قابلیت اطمینان سیستم تأثیر می‌گذارد و همچنین مهمترین اجزا و مهمترین عملکردهای سیستم را شناسایی می‌کند.



شکل ۲. رویه‌های تجزیه و تحلیل قابلیت اطمینان

شکل ۳. متدولوژی محاسبه ی قابلیت اطمینان [فلمینگ و همکاران، ۱۹۸۶]

همچنین می‌توان گفت که روش مورد استفاده برای محاسبه ی قابلیت اطمینان یک سیستم شامل ۳ مرحله‌ی کلی زیر است.

مرحله ۱: شناسایی زیر سیستم‌ها و ایجاد بلوک دیاگرام قابلیت اطمینان

تجزیه و تحلیل سیستم، فرآیندی است که جهت کسب و بررسی و پردازش منظم اطلاعات خاص سیستم و مربوط به یک تصمیم یا یک هدف معین انجام می‌شود. محصول نهایی فرآیند، یک مدل مربوط به ویژگی‌های قابلیت اطمینان سیستم است. انتخاب روش تجزیه و تحلیل مناسب بر اساس داده‌های موجود، ارزیابی قابلیت اطمینان و الزامات مهندسی سیستم است [فامورا، ۲۰۱۴]. تجزیه و تحلیل سیستم به طور معمول شامل تعیین اهداف و محدودیت‌ها و مسیرهای جایگزین اقدام است. تجزیه و تحلیل با بررسی احتمال تأثیرات از نظر هدف تجزیه و تحلیل انجام می‌شود. اولین گام تجزیه و تحلیل سیستم، ساده‌سازی سیستم و شناسایی زیرسیستم‌های مهم است. بسیار حائر اهمیت است که سهم هر زیرسیستم در قابلیت اطمینان، تعامل آنها با سایر زیرسیستم‌ها و افزونگی آنها قابل درک باشد. تخصیص بهینه‌ی مولفه‌ها یا اجزا برای هر زیرسیستم نیز مهم است و زیر سیستم‌ها باید متوازن باشند.

مرحله ۲: جمع آوری و پردازش داده‌ها

پس از شناسایی زیرسیستم‌ها و مولفه‌ها یا اجزا، باید بهترین منبع داده‌های خرابی شناسایی و سپس داده‌ها استخراج گردیده و از روش‌های تجزیه و تحلیل برای تعیین روابط درون مجموعه داده‌ها (داده کاوی) استفاده شود. برای جستجوی روندها در مجموعه داده‌ها از تکنیک‌هایی مانند آزمون روند لاپلاس استفاده می شود و سپس توزیع‌های خرابی متناسب با داده‌ها برازش می‌گردند. بسته‌های نرم افزاری مختلفی در دسترس است که می‌توانند داده‌ها را به راحتی پردازش نمایند.

مرحله ۳: تجزیه و تحلیل سیستم و نتایج

هنگامی که فعل و انفعالات زیرسیستم‌ها مشخص گردید، بلوک دیاگرام قابلیت اطمینان ایجاد می‌شود و توزیع خرابی برای اجزا تعیین می‌شود. سپس سیستم قابل تجزیه و تحلیل است. می‌توان از نرم افزار Matlab برای شبیه سازی عملکرد سیستم در طی دوره‌ی زمانی استفاده کرد تا سهم اجزای سازنده و زیرسیستم‌ها را در قابلیت اطمینان سیستم شناسایی نماید. تجزیه و تحلیل سیستم‌های قابلیت اطمینان از یک رویکرد تصادفی پیروی می‌کند که در آن هدف بدست آوردن اطلاعات خرابی برای کل سیستم بر اساس اطلاعات خرابی اجزای سیستم است. سپس از ارزیابی‌های کمّی برای استفاده در تصمیمات مدیریت دارایی انجام می‌شود [جوهانسون، ۲۰۱۳]. جدول ۱ دستورالعمل‌های معمول را برای انجام ارزیابی‌های قابلیت اطمینان نشان می‌دهد.

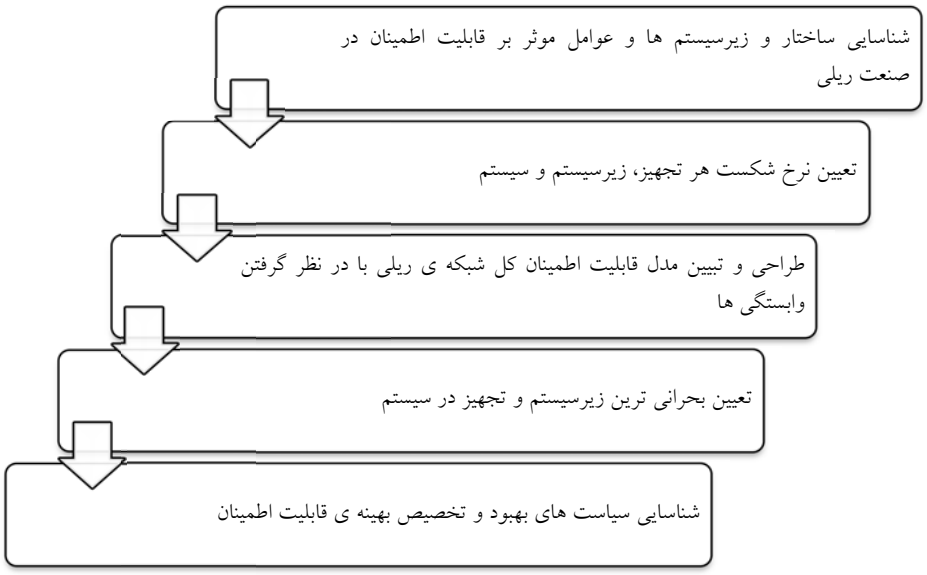
جدول۱. گام‌های ارزیابی قابلیت اطمینان [مارکوز و همکاران، ۲۰۰۵]

نام گام	توضیح	نتیجه
۱. تعریف پیکربندی سیستم	تعیین بلوک‌های اساسی سیستم و وابستگی بین زیرسیستم‌ها	لیست بلوک‌های عملکردی، ورودی، خروجی، انواع وابستگی‌ها و ...
۲.جمع آوری داده	جمع آوری داده های لازم برای قابلیت اطمینان و نگهداری	داده‌های قابلیت اطمینان و نگهداری
۳.ساخت مدل	مدل شبیه سازی تصادفی زمان پیوسته	استفاده از تکنیک های مدل سازی قابلیت اطمینان
٤.شبیه سازی	سناریوهای شبیه سازی و طراحی آزمایش	لیست سناریو و کاربرد مدل
۵. نتایج و تجزیه و تحلیل	محاسبه نتایج شبیه سازی	نتایج پارامترها و توابع قابلیت اطمینان

رویه‌ی جامع پیش بینی و بهینه سازی قابلیت اطمینان صنعت ریلی

به منظور پیش بینی قابلیت اطمینان با در نظر گرفتن انواع خرابی‌ها در صنعت ریلی، تهیه روشی کاملاً مشخص ضروری است. همانطور که پیشتر ذکر شد، مرحله اولیه باید شناسایی عوامل مختلف موثر بر خرابی زیرسیستم‌های ریلی و تعیین نرخ شکست آنها باشد. پس از شناسایی این عوامل، بسته به شرایطی که خرابی رخ داده است و عواملی که نقش غالب در ایجاد آن خرابی دارند، باید داده‌های خرابی زیرسیستم‌ها جمع آوری و دسته بندی شوند. اگر کمبود داده‌های میدانی وجود داشته باشد، می‌توان برای تولید داده‌ها، از شرایط واقعی و به دنبال آن شبیه سازی استفاده نمود. هنگامی که حجم نمونه‌ی قابل توجهی از داده‌ها در یک گروه خاص در دسترس باشد، باید آزمون روند و به دنبال آن پیش بینی خرابی با استفاده از مناسب‌ترین توزیع شکست انجام شود. پس از آن، بر اساس تجزیه و تحلیل و تفسیر نتایج، بودجه تعویض یا خرید تجهیزات برای زیرسیستم‌های مهم در طی فرایند تصمیم گیری تخصیص می‌یابد، هدف از این کار بهبود قابلیت اطمینان در صنعت ریلی است. در شکل٤ رویه‌ی کلی پیشنهادی پیش بینی و تخصیص قابلیت اطمینان در صنعت ریلی نشان داده شده است. آنچه مهم است، شناسایی و درک عملکرد کلی سیستم و زیرسیستم‌ها و روابط بین زیرسیستم‌ها و شناسایی خرابی‌های مختلف در بین آنها و اجزای هر کدام از زیرسیستم‌ها می‌باشد تا بتوان بر آن اساس به کمک بلوک دیاگرام قابلیت اطمینان و تعیین ساختار کلی سیستم در آن نسبت به کاربرد مدل مناسب قابلیت اطمینان اقدام نمود. تعدادی مدل با توجه به ساختارهای رایج به منظور تعیین قابلیت اطمینان سیستم‌ها با توجه به تعمیرپذیری و یا غیرقابل تعمیر بودن آنها وجود دارد اما با توجه به اینکه در صنعت ریلی وابستگی بین زیرسیستم‌ها بسیار زیاد است و تاکنون نیز برای شناسایی جامع این وابستگی‌ها و تاثیرات آن بر قابلیت اطمینان سیستم مطالعات زیادی صورت نگرفته است، لذا در نظر گرفتن وابستگی‌ها می‌تواند در پیشرفت مدلسازی قابلیت اطمینان و تعیین روابط و وابستگی‌های موجود بین زیرسیستم‌های شبکه ی ریلی بسیار

ضروری باشد. بررسی کلیه‌ی زیرسیستم‌ها و مدلسازی قابلیت اطمینان کلی سیستم ریلی می‌تواند برای تخصیص قابلیت اطمینان سیستم، قابلیت اطمینان خدمات صنعت ریلی (شامل وقت شناسی یا تاخیر) و هزینه‌ی چرخه‌ی عمر و توازن بین این شاخص‌های عملکردی در صنعت ریلی بسیار اثربخش باشد. شکل ٤ رویه‌ی کلی پیش‌بینی قابلیت اطمینان را در صنعت ریلی نشان می‌دهد. هر گام این رویه در تعیین قابلیت اطمینان زیرسیستم و کل شبکه‌ی ریلی و توجه به نقاط بحرانی در شبکه حائز اهمیت است. پس از طراحی و تبیین مدل قابلیت اطمینان که بایستی با توجه به روابط بین زیرسیستم‌ها و میزان وابستگی بین آنها انجام شود؛ بحرانی‌ترین زیرسیستم و اجزای زیرسیستم نیز حاصل می‌گردد و می‌توان با تخصیص مقدارمناسب قابلیت اطمینان به هر کدام از زیرسیستم‌ها به بهبود کلی قابلیت اطمینان و توازن این شاخص با سایر شاخص های عملکردی کمک نمود.

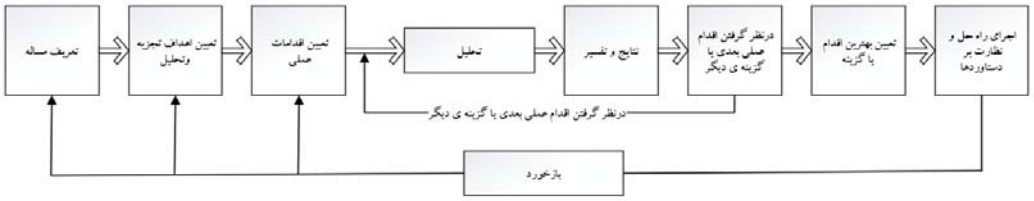


شکل٤. رویه‌ی کلی پیش بینی و تخصیص قابلیت اطمینان در صنعت ریلی

شناسایی ساختار و زیرسیستم ها و عوامل موثر بر قابلیت اطمینان در صنعت ریلی

سیستم ریلی باید انتظارات از سطح تعریف شده خدمات را که همیشه به عناصر و عملکردهای مختلف سیستم راه آهن بستگی دارد، برآورده نماید. برای ارزیابی اینکه آیا سیستم ریلی این انتظارات را برآورده می کند، عملکرد زیرساخت باید اندازه گیری گردد و به عنوان تابعی از اثربخشی، قابلیت اطمینان و هزینه بیان شود [کانسیل، ١٩٩٦]. زیرساختی که قابلیت اطمینان آن کیفیت انتظارات خدمات را با هزینه کم برآورده یا از آن فراتر می‌رود، عملکرد خوبی دارد. از نظر ظاهری، اندازه‌گیری عملکرد در زیرساخت ممکن است ساده به نظر برسد، اما در واقعیت، تحت تأثیر عوامل مختلفی است. سیستم اندازه‌گیری عملکرد (PM) به خوبی طراحی شده ابزاری برای مدیریت و بهبود است که می تواند به عنوان مبنایی برای تصمیم گیری توسط سطوح استراتژیک، عملیاتی و تاکتیکی مدیریت مورد استفاده قرار گیرد [کمیته اروپایی استانداردسازی، ٢٠٠٧]. معیارهای عملکرد و اندازه‌گیری قابلیت اطمینان ابزاری مدیریتی است که تصمیم گیری موثر را تسهیل و پشتیبانی می‌کند. اصطلاح اندازه‌گیری متضمن رویکردی دقیق، منظم و کمّی است. برای سنجش عملکرد دو روش مشخص وجود دارد. کمّی و کیفی. یک رویکرد کمّی داده‌هایی را تولید می‌کند که بینشی در مورد حقایق و ارقام را

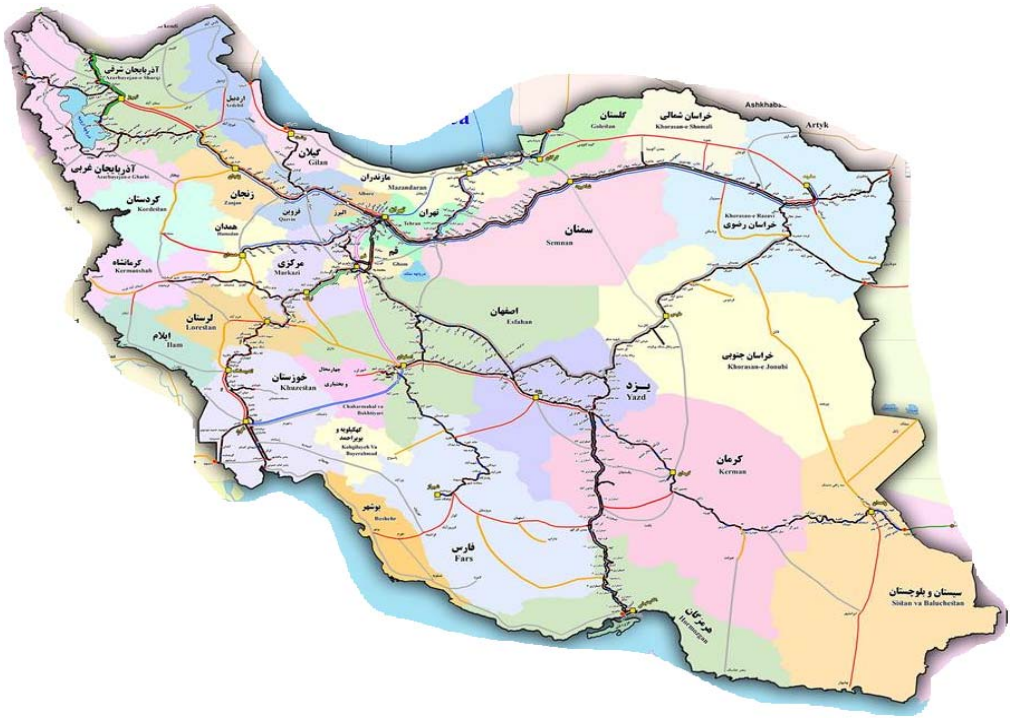
فراهم می سازد و از تجزیه و تحلیل داده‌های آماری استفاده می کند، در حالی که روش‌های کیفی به دنبال توضیح، درک و ارزیابی علل یک نتیجه هستند. [استنستروم، ۲۰۱۲] تأکید کرد که اندازه گیری همه چیز فقط با روش‌های کمّی و کیفی امکان پذیر نیست. برای ایجاد یک سیستم اندازه‌گیری که تا حد ممکن کامل باشد، تکنیک‌های کمّی و کیفی مورد نیاز است. از روش‌های اندازه گیری کیفی می‌توان برای بررسی انطباق با تکنیک‌های کمّی استفاده کرد. عملکرد یک دارایی نتیجه اجرای برنامه‌های مختلف است که هدف نهایی آنها بهبود عملکرد آن است. این برنامه‌ها شامل مداخلات مدیریت دارایی، مدل‌های نگهداری و اندازه‌گیری عملکرد است که می‌توانند برای ارزیابی تأثیر فرآیندهای مداخله استفاده شوند. زیرساخت مدیریت دارایی یک فرایند مبتنی بر اطلاعات است. به همین ترتیب، متداول ترین روش در توسعه این برنامه‌ها از شواهد تجربی (داده‌های کمّی) جمع‌آوری شده در هنگام بررسی خطاها استفاده می‌کند. بدیهی است، می‌توان دریافت که عملکرد یک دارایی می‌تواند از طریق یک برنامه بهبود قابلیت اطمینان مداوم بهبود یابد و می‌تواند چرخه عمر طراحی دارایی‌های زیرساخت را بیشتر کند. برای هماهنگی و تضمین اثربخشی عملکرد سیستم ریلی، بایستی تصمیمات استراتژیک اتخاذ شوند تا این اطمینان حاصل گردد که زیرسیستم‌های مورد نیاز عملکرد مورد انتظار را برآورده می‌سازند و برای دستیابی به این امر، لازم است تحلیل سیستماتیک از عواملی که بر عملکرد زیرسیستم‌ها اثر می‌گذارند، صورت پذیرد [کنرادی و همکاران،۲۰۱۵]. شکل ۵ گام‌های تحلیل سیستم را نمایش می دهد. تجزیه و تحلیل سیستم به طور معمول شامل تعیین اهداف و محدودیت‌ها و مسیرهای جایگزین اقدام است. تجزیه و تحلیل با بررسی احتمال تأثیرات از نظر هدف تجزیه و تحلیل انجام می‌شود.



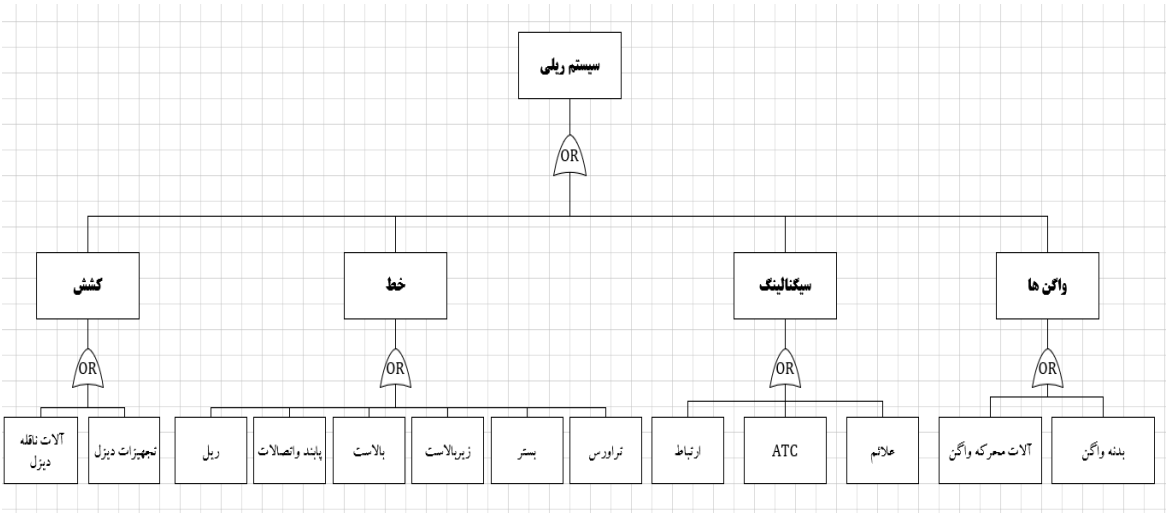
شکل۵. گام‌های تحلیل سیستم (فلمینگ و همکاران، ۱۹۸۶)

یکی از ویژگی‌های اساسی مدیریت عملکرد برای زیرسیستم‌های راه آهن، توسعه تجزیه و تحلیل سیستماتیک در سطوح مختلف شبکه راه آهن است. [پاترا، ۲۰۰۷] این موضوع را با پیشنهاد یک رویکرد یکپارچه برای مدیریت دارایی زیرساخت‌های راه‌آهن که شامل مدیریت RAMS و هزینه‌های چرخه عمر (LCC) است، ارائه داد. تجزیه و تحلیل سیستماتیک هسته اصلی برنامه بهبود مستمر در عملیات راه آهن است [فامورا، ۲۰۱۴]. تجزیه و تحلیل RAMS یک تحلیل سیستماتیک است که می‌تواند برای کمیّت و طبقه‌بندی محدودیت‌های ظرفیت و همچنین بهبود تأثیر استراتژی‌های مداخله زیرساختی که قابلیت اطمینان را افزایش می‌دهد، استفاده شود. علاوه بر این، تکنیک‌های RAMS مهندسان قابلیت اطمینان را قادر می‌سازند تا خرابی داده‌های میدانی جمع آوری شده را پیش بینی کنند. RAMS در راه آهن به عنوان یک رشته مهندسی توصیف می‌شود که شامل مجموعه ای از فعالیت‌ها است که قابلیت اطمینان، در دسترس بودن، قابلیت نگهداری و ویژگی‌های ایمنی را با هم ادغام می کند. این مجموعه از فعالیت‌ها که شامل زمینه های مختلف تخصصی است، با مطالعه خرابی، نگهداری و در دسترس بودن سیستم‌ها مرتبط است.

با توجه به ماهیت سیستم راه آهن و پیکربندی پیچیده و دارای اجزای متعدد، یکی از اهداف این مطالعه، شناسایی زیرسیستم‌هایی است که اساس چارچوب مدل سازی را تشکیل می‌دهند. برای ایجاد دامنه‌ی زیرسیستم های مهم در راه آهن، عناصری که عملکرد و ساختار سیستم را مشخص می‌کنند، باید مشخص شوند. استراتژی مدیریت دارایی زیرساخت شبکه راه آهن [شبکه ریلی لندن، ۲۰۱۴] دارایی‌ها را در ده دسته طبقه بندی کرده است که از جمله آنها می‌توان به سیگنالینگ، خط، الکتریسیته، تقاطع سطوح و مخابرات اشاره نمود. [پاترا، ۲۰۰۷] هنگام ارایه مدل پشتیبانی تصمیم گیری نگهداری و تعمیرات زیرساخت‌های راه‌آهن، سه زیرسیستم متمایز را ذکر کرد.



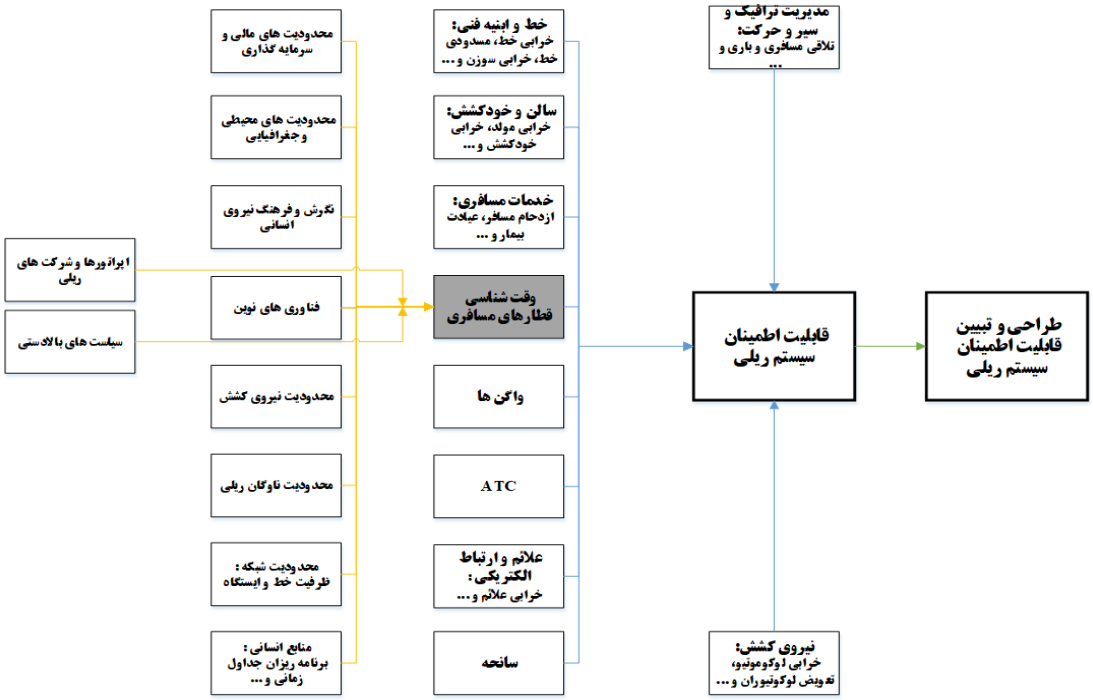
شکل٦. نقشه شبکه‌ی ریلی کشور ایران



شکل ۷. ساختار سیستم ریلی در صنعت راه آهن ایران

زیرسیستم‌های مهم در راه آهن ایران که در شکل۷ ارایه شده‌اند شامل واگن‌ها، سیگنالینگ، خط و نیروی کشش هستند که هرکدام دارای زیرسیستم‌های دیگری می‌باشند. با استفاده از رویکرد سیستم‌ها، سیستم ریلی را می‌توان به عنوان یک سیستم باز متشکل از اجزای متقابل که در یک ساختار سلسله مراتبی و تجزیه شده‌اند، مشاهده کرد. این بدان معنی است که با مطالعه‌ی زیرسیستم‌های راه آهن، عوامل داخلی و خارجی تأثیرگذار بر این سیستم می‌توانند مشخص شوند. تئوری قابلیت اطمینان از داده های خرابی در مدل‌سازی و کمّی سازی قابلیت اطمینان سیستم استفاده می‌کند، از این رو می‌توان

با یافته‌های رستل (۲۰۱۵) و استنستروم (۲۰۱۲)، عوامل تأثیرگذار بر در دسترس بودن زیرساخت‌ها، وقوع خرابی‌ها و پیامدهای آنها را برای اندازه گیری قابلیت اطمینان سیستم ترسیم نمود. برای دستیابی به یک سیستم قابل اعتماد، عوامل خارجی تأثیرگذار بر پارامترهای RAMS باید شناسایی شوند. در سیستم‌های راه آهن، RAMS تحت تأثیر سه شرط است: ۱) سیستم؛ ۲) شرایط نگهداری و ۳) شرایط عملیاتی. شرایط سیستم، منابع خرابی است که در طول چرخه عمر سیستم از داخل به سیستم وارد می‌شود، در حالی که شرایط کار و نگهداری، منابع خرابی است که در حین انجام عملیات و نگهداری بر سیستم وارد می‌شود. این سه منبع عدم موفقیت می‌توانند از طریق عوامل داخلی و خارجی سیستم با یکدیگر تعامل داشته و علل آنها در طول چرخه عمر سیستم مورد ارزیابی و مدیریت قرار گیرد. شکل ۸ عوامل عوامل مستقیم و غیرمستقیم تاثیرگذار بر قابلیت اطمینان صنعت ریلی را نشان می‌دهد.

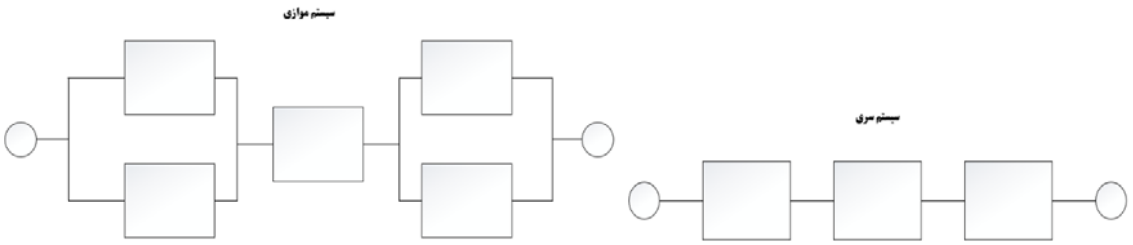


شکل۸ عوامل موثر بر قابلیت اطمینان صنعت ریلی

مدل‌های قابلیت اطمینان که در صنعت ریلی توسعه یافته و به کار گرفته شده‌اند، بر مدلسازی زیر سیستم های مستقل صنعت ریلی مانند سیستم های ناوگان و زیرساخت متمرکز هستند. بررسی و بهبود قابلیت اطمینان یک زیرسیستم از کل شبکه‌ی ریلی به بهبود کل سیستم کمک چندانی نمی‌کند.

در مقابل، به دلیل ویژگی‌های مختلف عملکردی و عملیاتی زیرسیستم های ریلی، بررسی عملکرد کلیه‌ی زیرسیستم‌های مهم و تعاملات میان آنها بسیار ضروری است. همچنین، شناسایی اجزای دارای اولویت بالا که بر عملکرد کلی سیستم تأثیر می‌گذارند، رهنمودهایی برای بهبود موثرتر سیستم فراهم می سازد که به سازمان راه آهن اجازه می‌دهد اهداف استراتژیک گروه‌های مختلف دارایی ها را در جهت حفظ شبکه ریلی در سطح عملیاتی مورد انتظار دنبال نماید. دارایی-های زیرساخت راه آهن سرمایه بر هستند و طول عمر بالایی دارند، از این رو بهره برداری و نگهداری آنها به استراتژی های بلند مدت پایدار احتیاج دارد. ذینفعان متعددی در راه آهن وجود دارند که دارای الزامات متناقضی هستند. این مسائل می‌تواند ارزیابی و نظارت بر عملکرد زیرسیستم‌های راه‌آهن را پیچیده نماید. برای نظارت بر عملکرد زیرسیستم‌های ریلی از شاخص‌های عملکرد مختلفی مانند قابلیت اطمینان، در دسترس

بودن، قابلیت نگهداری و ایمنی استفاده می‌شود. مفهوم اصلی در سیستم‌ها، قابلیت اطمینان است. این یک اصطلاح کلی است که برای توصیف در دسترس بودن و عوامل موثر بر آن مانند قابلیت اطمینان، قابلیت نگهداری و ایمنی استفاده می‌شود. استنستروم (۲۰۱۲) پیشنهاد کرد که قابلیت اطمینان، قابلیت نگهداری، پشتیبانی و مداخلات نگهداری را می‌توان ورودی‌هایی با فرکانس خرابی، تاخیر قطار، زمان و میانگین زمان تعمیر به عنوان خروجی در نظر گرفت. محققان چندین شاخص مربوط به RAMS و هزینه‌های چرخه عمر زیرساخت‌های راه‌آهن را شناسایی کردند. از جمله این شاخص‌ها می‌توان به فرکانس خرابی؛ تأخیر قطار به دلیل خرابی زیرساخت‌ها؛ میانگین زمان بازگشت (MTTR)؛ میانگین زمان شکست (MTTF)؛ میانگین زمان بین شکست‌ها (MTBF) اشاره نمود.



شکل۹. بلوک دیاگرام دو پیکربندی اصلی سیستم

شکست‌ها را می‌توان بر اساس علل آنها طبقه بندی کرد که می‌تواند به علل اولیه یا ثانویه باشد. خرابی‌های اولیه به طور مستقیم یا غیرمستقیم به دلیل خرابی مولفه‌ی دیگری در سیستم ایجاد نمی‌شوند. از طرف دیگر، خرابی‌های ثانویه به طور مستقیم و غیرمستقیم ناشی از خرابی مولفه‌ی دیگری در یک سیستم است. شکست در سیستم ریلی به دلیل خرابی‌های منفرد زیرسیستم‌ها رخ می‌دهد. زیرسیستم‌های راه آهن سطح بالایی از وابستگی متقابل را نشان می‌دهند. این بدان معناست که خرابی‌های مستقل در زیرسیستم‌ها نه تنها منجر به خرابی کل سیستم (خرابی‌های اولیه) می‌شود بلکه باعث شکست سایر زیرسیستم‌ها نیز می گردد (خرابی‌های ثانویه). برای ایجاد یک مدل قابلیت اطمینان که همه سناریوهای ممکن را به تصویر بکشد، زیر سیستم‌ها، ساختارها و فعالیت‌هایی که در شروع و انتشار خرابی‌ها نقش دارند، باید شناسایی و درک شوند. این امر با استفاده از سطوح مختلف انتزاعی به دست می‌آید؛ نمایش رابطه عملکردی بین زیرسیستم‌های مستقل یک سیستم امکان استفاده از تکنیک‌های مختلف را در چارچوب تجزیه و تحلیل RAMS فراهم می‌سازد و می‌تواند برای مطالعه اثر خرابی و اهمیت در سیستم‌های راه آهن مورد استفاده قرار گیرد [پاترا، ۲۰۰۷]. همانطور که پیشتر عنوان شد، بلوک دیاگرام قابلیت اطمینان از ساده ترین تکنیک‌ها برای نمایش پیکربندی منطقی یک سیستم هستند. ویژگی اساسی همه سیستم‌های عملکردی، وابستگی است. اگر همه زیرسیستم‌ها و اجزای سازنده ی آنها با هم در ارتباط باشند، می‌توان یک سیستم را وابسته توصیف کرد [والنزولا، ۲۰۱٤]. دو طبقه بندی اصلی ساختار سری و ساختار موازی وجود دارند و می‌توانند اجزای سیستم را به صورت یک ساختار ترکیب نمایند. سیستم‌های پیچیده از ترکیبی از ساختارهای سری و موازی استفاده می‌کنند. یک ساختار سری فقط و فقط در صورت عملکرد همه n جزء در آن پیکربندی عمل می‌کند، در حالی که برای یک ساختار موازی، اگر یکی از n جزء کار کند، سیستم می‌تواند کار کند [نیلسن، ۲۰۱٤]. پیکربندی یک سری و یک سیستم موازی در شکل۹ نشان داده شده است.

در قلب هرگونه پیش بینی، مسئله انتخاب ساختار مدل مناسب است. هنگام انتخاب ساختار مدل، باید از دانش قبلی و بینش فیزیکی در مورد سیستم استفاده کرد.

تعیین نرخ شکست اجزا و زیرسیستم های صنعت ریلی

هنگام تجزیه و تحلیل قابلیت اطمینان سیستم، به ویژه زیرسیستم‌های راه آهن که دارای پیکربندی پیچیده‌ای هستند، لازم است علت اصلی خرابی زیرسیستم‌ها و تأثیرات آنها در کل شبکه به منظور درک ماهیت خرابی‌های سیستم مورد بررسی و مطالعه قرار گیرند. مطالعه حالت‌های خرابی زیرسیستم‌های راه آهن بر عملکرد شبکه تاثیر می گذارد؛ برای این منظور همه ی بازرسان و اپراتورها باید هنگام گزارش اطلاعات خرابی‌ها به پایگاه داده، بسیار مراقب باشند. غالباً اظهارات در پایگاه‌های اطلاعاتی منجر به تفسیرهای غلط می شود. به منظور دستیابی به تصویری جامع از محل خرابی‌ها و عوامل موثر در بروز خرابی‌ها، ارائه‌ی اطلاعات کامل به پایگاه داده های جامع نیاز دارد. برای این منظور، مدیران ریلی باید پارامترهای لازم برای اندازه گیری را بدانند که غالباً اینطور نیست. پایگاه داده‌های مختلف باید با یکدیگر پیوند داده شوند تا اطلاعات دقیق‌تر در زمان کمتر در دسترس باشد. هنگام گزارش یک نقص، نوع نقص به همراه شرایطی که نقص در آن رخ داده است نیز باید گزارش شود. برای مثال غالباً، تجزیه و تحلیل داده‌های خرابی خط برای ارتباط بین عوامل مسئول خرابی، به ورقه‌های گسترده نیاز دارد. در راه‌آهن، داده‌های مربوط به نگهداری اصلاحی در یک برگه کاغذ گزارش می‌شود. اما اغلب به طور کامل در پایگاه داده ثبت و ضبط نمی‌شوند که این امر ردیابی در هنگام انجام تجزیه و تحلیل را دشوار می سازد. به عنوان مثال، شکست ریل در سیستم خرابی گزارش شده و اقدامات لازم نیز انجام شده است، اما محل دقیق شکست ریل در پایگاه داده گزارش نشده است. بنابراین مشخص نیست که آیا ریل چپ/ راست تعویض شده است. پارامترهایی مانند نوع ترافیک، سرعت، تناژ، وضعیت چرخ و غیره نیز باید گزارش شوند. باید داده‌های شکست زیرسیستم های ریلی را با توجه به تمام فاکتورهای مشخص شده طبقه بندی نمود. این امر نشان می‌دهد که برای مثال چارچوب طبقه بندی خط سنگ آهن ایران با خطوط حمل سنگین استرالیا یا آمریکا متفاوت خواهد بود. در دسترس بودن داده‌ها در ایجاد چارچوب طبقه‌بندی نقشی اساسی دارد. داشتن یک رکورد خوب از داده‌ها برای اندازه‌گیری تأثیر عوامل مختلف موثر در تخریب زیرسیستم‌ها مهم است. کارل (۲۰۱۷)، جیدایی (۲۰۱۵)، مک نات (۲۰۱۵) و برینکمن (۲۰۰۹) حالت‌های مهم خرابی‌های زیرسیستم خط راه آهن را شناسایی و دسته بندی کردند. حالت‌های خرابی شناسایی شده که تأثیرات ثانویه بر روی سیستم زیرساخت دارند شامل شکستگی ریل، اتصالات بلوک معیوب و اتصال قلاب پانتوگرافی است. حسنکیده (۲۰۱۱) تجزیه و تحلیل خرابی سوئیچ‌ها را انجام داد و حالت‌های خرابی حیاتی را در زیرساخت‌های سیگنالینگ راه آهن بر اساس داده‌های تاریخی و فرکانس خرابی شناسایی کرد. صبا (۲۰۱۳) لیست ورود به سیستم خطر را نشان می‌دهد که رابطهای مختلف خرابی بین زیرسیستم‌های راه آهن برقی، سیگنالینگ و خط را نشان می‌دهد. پاترا و کومار(۲۰۱۰) همچنین تجزیه و تحلیل در دسترس بودن را در مدار خط راه آهن انجام دادند و وقفه‌های ریلی و خرابی اتصال ریل را به عنوان یکی از مهمترین حالت‌های خرابی برجسته کردند. مطالعه فرآیندهای خرابی سیستم‌های پیچیده را می‌توان به عنوان یک رویکرد قابلیت اطمینان مبتنی بر شکست یا به عنوان رویکرد مبتنی بر تخریب تعریف کرد. متغیر تصادفی در یک رویکرد مبتنی بر قابلیت اطمینان، زمان خرابی اجزا است در حالی که مدل های مبتنی بر تخریب، عمر مفید باقی مانده را به عنوان متغیر تصادفی در نظر می‌گیرند [والنزولا، ۲۰۱٤]. شکل ۱۰ یک فرآیند مطالعه قابلیت اطمینان مبتنی بر شکست را نشان می دهد.

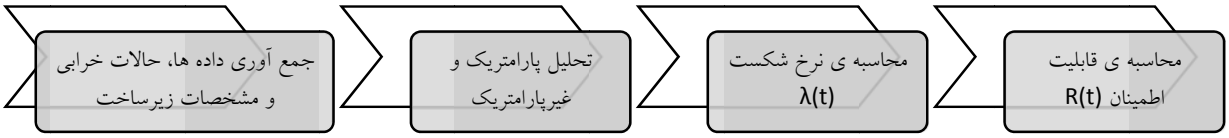
ملاحظه می‌شود که اولین قدم برای ارزیابی قابلیت اطمینان موفقیت آمیز، ایجاد ویژگی‌های سیستم و حالت‌های خرابی مربوطه است. پس از جمع آوری و طبقه بندی داده‌ها با توجه به عوامل مختلف موثر بر روند تخریب زیرسیستم‌ها، داده‌ها باید برای پیش بینی نرخ شکست و قابلیت اطمینان زیرسیستم-های ریلی تجزیه و تحلیل شوند. اما قبل از تجزیه و تحلیل مجموعه داده‌ها یا انتخاب مدل مناسب

برای هر یک از آنها، باید نسبت به آزمون همبستگی سریالی و روند اقدام نمود. اگر داده‌های خرابی مستقل و توزیع یکسان باشند، آنها هیچ همبستگی و روندی را نشان نمی دهند. آزمون استقلال را می توان با ترسیم هر زمان تا عدم موفقیت در برابر (t_{i-1}) زمان شکست که در آن، $i = 1, 2, 3, \ldots, n$ و بررسی اینکه آیا رابطه ای بین طرح‌ها وجود دارد، انجام داد. آزمون توزیع یکسان را می‌توان با رسم تعداد تجمعی شکست در برابر زمان تجمعی تا شکست انجام داد. اگر نقاط رسم شده

روی یک خط مستقیم قرار بگیرند، در داده های خرابی هیچ روندی وجود ندارد و بالعکس. اگر شواهدی از روند در داده‌های خرابی یافت نشد، مدل‌های ثابت مانند فرآیند همگن پواسون (HPP) یا توزیع‌های کلاسیک می‌توانند برای تجزیه و تحلیل داده‌ها (به عنوان مثال، توزیع نمایی، وایبول، نرمال و لگنورمال) استفاده شوند. پس از آن برای تعیین توزیع مناسب از آزمون برازش استفاده می شود. اگر شواهدی از روند به نتیجه برسد، یک مدل غیر ثابت مانند فرآیند پواسون غیر همگن (NHPP) باید برازش شود [فلینس، ۲۰۰۶]. بهترین آزمون با استفاده از نرم افزار ReliaSoft's Weibull ++ 6 انجام می‌شود. فرآیند پواسون غیر همگن برای مدل‌سازی سیستم‌های قابل تعمیر که تحت یک استراتژی تعمیر حداقل با زمان تعمیر ناچیز قرار دارند، استفاده می‌گردد. هنگامی که از یک مدل فرآیند پواسون غیر همگن برای مدل‌سازی یک سیستم قابل تعمیر استفاده می‌شود، سیستم به عنوان یک جعبه سیاه در نظر گرفته می‌شود زیرا هیچ نگرانی در مورد سیستم داخلی اجزا وجود ندارد.

آزمایش روند

برای شناسایی اینکه کدام مدل فرآیند نقطه‌ای برای داده‌های خرابی موجود اعمال شود، از تست روند استفاده شده است. ارزیابی گرافیکی داده‌های خرابی مشاهده شده کافی نیست، بنابراین برای تأیید نتایج ارزیابی گرافیکی و تعیین اینکه داده‌های مشاهده شده از نظر آماری قابل توجه هستند یا فقط تصادفی هستند، یک اعتبارسنجی عددی لازم است. هدف اصلی یک آزمون روند این است که تشخیص دهد آیا الگوهای شکست با گذشت زمان به طور قابل توجهی تغییر می‌کنند. در الگویی از شکست‌ها، روند می‌تواند یکنواخت یا غیر یکنواخت باشد. یک روند یکنواخت شکلی مقعر یا محدب دارد در حالی که روندهای غیر یکنواخت زمانی اتفاق می‌افتد که روندها با زمان تغییر می کنند یا روندها خود را در چرخه تکرار می‌کنند [گرماباکی، ۲۰۱۶]. مثالی از یک روند غیر یکنواخت که بحث شد منحنی وان است. یک آزمون روند با آزمایش یک فرضیه صفر مبنی بر اینکه الگوی خرابی سیستم یک فرآیند نقطه ای است، انجام می‌شود. اگر زمان های همزمانی مستقل و توزیع یکسان باشند، این به معنای یک فرآیند همگن پواسون است، در غیر این صورت، فرضیه جایگزین با فرآیند پواسون غیر همگن اتخاذ می‌شود. روش‌های مختلفی برای انجام تست روند مانند آزمایش لاپلاس، آزمایش کتابچه راهنمای نظامی (MLK-HDBK-189) و تست روند لوئیس رابینسون وجود دارد.



شکل۱۰. روش پیش بینی قابلیت اطمینان مبتنی بر شکست (پریرا، ۲۰۰۸)

طراحی و تبیین مدل قابلیت اطمینان کل شبکه‌ی ریلی

برخی از اجزا و تجهیزات در زیرسیستم‌های ریلی تعمیرپذیر و برخی غیرقابل تعمیرهستند. سیستم تعمیرپذیر مجموعه ای از اقلام و تجهیزات است که پس از عدم انجام حداقل یکی از کارکردهای مورد نیاز خود با انجام هر روش دیگری غیر از جایگزینی کل سیستم، می‌تواند کلیه عملکردهای مورد نیاز خود را انجام دهد [باسیل و همکاران، ۲۰۰۴]. اما سیستم‌های غیر قابل تعمیر اولین بار که متوقف می‌شوند و عملکرد رضایت بخش را متوقف می‌سازند، کنار گذاشته شده و در صورت خرابی، قابل تعمیر نیستند و به طور کلی تعویض می‌شوند. هنگام کار با سیستم‌های تعمیرپذیر، اغلب شمارش وقایعی که بر عملکرد سیستم تأثیر دارند ترجیح داده می‌شود. این رویکرد مدل سازی رویداد محور است. در اینجا وقایع یا خرابی سیستم هستند یا تعمیرات سیستم. فرایند تجدید (RP)، فرآیند پواسون همگن (HPP) و فرآیند پواسون غیر همگن (NHPP) فرآیندهای تصادفی عمومی هستند که در تجزیه و تحلیل قابلیت اطمینان سیستم‌های قابل تعمیر استفاده می‌شوند. رویکردهای مدل‌سازی قابلیت اطمینان ثابت می‌کنند که چندین روش تحلیلی و تلفیقی می‌توانند برای ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم ریلی استفاده شوند. در حین طراحی سیستم، الزامات قابلیت اطمینان معمولاً توسط مهندسان طراح و مهندسان قابلیت اطمینان به زیر سیستم ها اختصاص می‌یابد. طراحی قابلیت اطمینان با توسعه یک مدل آغاز می‌شود. قابلیت اطمینان از مدل‌ها (مانند نمودارهای بلوکی و درختان خطا) برای تهیه

ی یک ابزار گرافیکی برای ارزیابی روابط بین قسمت‌های مختلف سیستم استفاده می‌کند. این مدل‌ها شامل پیش‌بینی‌های مبتنی بر نرخ شکست تعداد قطعات با استفاده از داده‌های تاریخی هستند. در حالی که پیش‌بینی‌ها اغلب به معنای مطلق دقیق نیستند، اما برای ارزیابی تفاوت‌های نسبی در گزینه‌های طراحی بسیار ارزشمند می‌باشند. در بررسی ادبیات، اهمیت سنجش و مدیریت قابلیت اطمینان مورد بحث قرار گرفته و روش‌های مختلفی برای محاسبه‌ی قابلیت اطمینان عنوان شده است. در شکل ۱۱ رویه‌ی کلی تجزیه و تحلیل و پیش بینی قابلیت اطمینان ارایه شده است.

شکل ۱۱. رویه ی کلی تجزیه و تحلیل و پیش بینی قابلیت اطمینان

این مدل بر اساس یک رویکرد از بالا به پایین برای کمّی سازی قابلیت اطمینان زیر سیستم‌های راه آهن ساخته شده است. مرحله اولیه توصیف سیستم بر اساس داده‌های خرابی جمع آوری شده برای خرابی‌های زیرسیستم‌های راه‌آهن است. یک عملکرد سیستم برای مدل سازی پیکربندی و رفتار سیستم با استفاده از تئوری قابلیت اطمینان ایجاد خواهد شد. حالت‌های خرابی جمع آوری و برای ساخت یک مدل عملکردی مورد استفاده قرار می‌گیرند. هر زیر سیستم راه آهن به عملکرد کلی شبکه کمک می کند، بنابراین هر زیر سیستم، یک نوع عملکرد و رفتار را نشان می‌دهد در نهایت با استفاده از تئوری قابلیت اطمینان و استفاده از رویکردهای موجود یا پیشنهادی به یک عملکرد سیستم واحد مدل می‌شود. پس از تکمیل مدل‌سازی، قابلیت اطمینان سیستم ریلی قابل محاسبه و بهینه سازی است.

به طور کلی در صنعت ریلی، مدل کلی قابلیت اطمینان سیستم ریلی می تواند به صورت زیر بیان شود:

$$\mathrm{R}_T = f(R_{Rolling\ stock}, R_{Station}, R_{Track}, R_{Signalling})$$

R_T= قابلیت اطمینان برای کل سیستم ریلی

$R_{Rolling\ stock}$= قابلیت اطمینان ناوگان

$R_{Station}$= قابلیت اطمینان عملیات ایستگاه‌ها

R_{Track}= قابلیت اطمینان خط

$R_{Signalling}$= قابلیت اطمینان سیگنالینگ و ارتباطات

معادله‌ی فوق بیانگر این است که کل قابلیت اطمینان سیستم ریلی تابعی از قابلیت اطمینان زیرسیستم‌هایش می‌باشد. این زیرسیستم‌ها می‌توانند شامل موارد دیگری نیز باشند که در اینجا به چهار زیرسیستم مهم اشاره شد. هنگامی که از نظر آماری فرض مستقل بودن شکست بین زیرسیستم‌ها در نظر گرفته می‌شود، این معادله می‌تواند به صورت زیر ساده سازی شود:

$$R_T = R_{Rolling\ stock} . R_{Station} . R_{Track} . R_{Signalling} + a(w)$$

اصطلاح $a(w)$ برای عدم قطعیت‌های ناشی از تعاملات موجود بین زیرسیستم‌ها به کار می رود و لازم است. در ارزیابی کمّی قابلیت اطمینان این تعاملات و وابستگی‌ها درنظر گرفته شوند.

شناسایی سیاست های بهبود و تخصیص بهینه‌ی قابلیت اطمینان

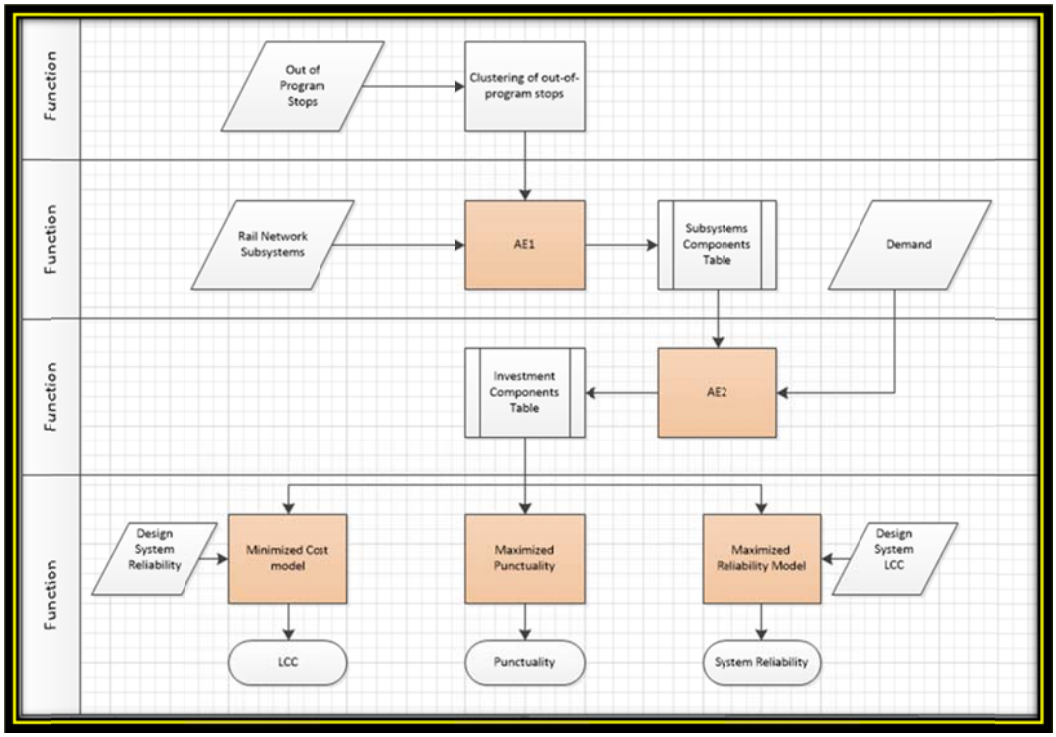
بسیاری از ما در زندگی روزمره خود با خدمات غیرقابل اعتماد مسافرتی روبرو هستیم. چه برای رویدادهای اجتماعی و تجاری و چه برای تحویل کالا، قابلیت اطمینان کلید اصلی کیفیت حرکت است. با این حال، پیش بینی سیاست‌ها در کشورها نشان می دهد که تعداد کمی از کشورها صریحاً قابلیت اطمینان را در سیاست گذاری حمل و نقل در نظر می‌گیرند. در این بحث، هدف ارائه چارچوبی برای سیاست گذاران برای درک مسائل قابلیت اطمینان و درج قابلیت اطمینان در ارزیابی و طراحی سیاست های مدیریت قابلیت اطمینان است. اقتصادی بودن قابلیت اطمینان، یک ویژگی مطلوب شبکه حمل و نقل می باشد. مانند تمام ویژگی‌های مطلوب یک شبکه حمل و نقل، قابلیت اطمینان هزینه دارد. تابع قوانین استاندارد عرضه و تقاضا است؛ یعنی هرچه قیمت بالاتر باشد، مقدار مورد تقاضا کمتر است و برعکس، هرچه قیمت پایین‌تر باشد، مصرف کنندگان بیشتری آن را تقاضا می‌کنند. دقیق بودن قابلیت اطمینان مهم است. اهداف قابلیت اطمینان باید به دقت با سایر شاخص های اصلی عملکرد در حوزه ی حمل و نقل ریلی (وقت شناسی، هزینه چرخه عمر و ...) هماهنگ باشد. برای مثال ممکن است مدیران شبکه تمایل داشته باشند که قطارهای مسافری اولویت بیشتری نسبت به قطارهای باری داشته باشند. بنابراین اهداف باید منعکس کننده چشم انداز شبکه و کاربر باشند.

برای مدیران زیرساخت، تمرکز بر روی آسیب پذیری سیستم است؛ برای یک کاربر شبکه، تمرکز بر تغییر زمان سفر است. عدم قابلیت اطمینان، موجب بی انگیزگی و استرس می‌شود. مسافرت بدون احساس کنترل زمان سفر یک تجربه نامناسب است و مسافران تجربه‌های بد آن را به یاد می‌آورند. کاربران درک عمیقاً منفی از تأخیرهای غیرمنتظره دارند. از آنجا که وظیفه حمل و نقل بخشی از یک زنجیره است، وقفه در هر قسمت از آن سبب شکست در کل زنجیره می‌شود. تکنیک‌ها و ابزارهای زیادی در دسترس است که می‌تواند برای بهبود قابلیت اطمینان شبکه حمل و نقل – چه به صورت جداگانه و چه در ترکیب با یکدیگر – مورد استفاده قرار گیرند [رانگ و همکاران، ۲۰۱۹]. گزینه‌هایی مانند گسترش فیزیکی ظرفیت (ارتقاء و افزودن ظرفیت خطوط، احداث خطوط ریلی و ترمینال‌های جدید و ...)، مدیریت بهتر ظرفیت شبکه (شامل نظارت فعالانه و مدیریت قسمت‌های آسیب پذیر شبکه و بهبود مدیریت حوادث مانند استفاده از جداول زمانی بهینه، برنامه ریزی مجدد پویای شبکه های ریلی در صورت بروز حادثه و سیستم های پیشرفته مدیریت قطار در شبکه راه آهن)، فرآیند تصمیم گیری تعویض یا خرید تجهیزات و مکانیسم های قیمت گذاری برای مدیریت قابلیت اطمینان وجود دارد. محدودیت سرمایه گذاری به در دسترس بودن شبکه و سطح ریسک قابل قبول تحت شرایط عملیاتی معین بستگی دارد. یک روش دقیق پیش بینی قابلیت اطمینان باید بتواند تعادل بهینه ای بین هزینه های مرتبط با ریسک و چرخه‌ی عمر سیستم ریلی مورد نیاز ایجاد کند. طراحی یک سیستم ریلی شامل فرآیند شناسایی، دستیابی، انتخاب و خرید محصولات مناسب برای تشکیل یک سیستم ریلی است. برای دستیابی به سیستم جدید، محصولات متنوعی با هزینه و قابلیت اطمینان خاص برای هر زیرسیستم و مولفه‌های مربوطه از تامین کنندگان تجهیزات انتخاب می‌شوند. برنامه ریزان باید مبادلات موجود بین هزینه‌ی چرخه عمر (LCC)، قابلیت اطمینان سیستم و قابلیت اطمینان خدمات (مانند وقت شناسی یا تاخیر) را به دقت به صورت بهینه به منابع تخصیص دهند. در این مطالعه چارچوب و مدل بهینه سازی برای طراحی سیستم ریلی مسافری ارائه شده است:

۳-چارچوب بهینه‌سازی

پس از تعیین قابلیت اطمینان سیستم، در گام اول این چارچوب، توقفات خارج از برنامه‌ی قطار های مسافری در کل شبکه‌ی ریلی در بازه ی زمانی مشخص، بررسی و بیشترین عوامل از طریق داده کاوی و خوشه بندی به همراه حوزه‌های مربوطه تعیین می گردند، بدین منظور از ماژول ارزیابی‌کننده ی اول استفاده می‌شود؛ و ابتدا همه ی عوامل ممکن را ارزیابی می‌نماید و یک جدول مولفه‌های زیرسیستم‌های مربوطه (شامل تجهیزات و اقلام مناسب هر زیر سیستم) را تولید می‌کند؛ سپس ارزیابی کننده‌ی دوم (AE2) با استفاده از نتایج حاصل از گام اول و تقاضا، جدول مولفه‌های سرمایه گذاری مهمترین حوزه‌های دارای بیشترین عوامل توقفات خارج از برنامه را برای انتخاب سرمایه‌گذاری بهینه با توجه به LCC و قابلیت اطمینان (MTBF) و وقت‌شناسی مرتبط با آنها تولید

می‌نماید. با اطلاعات کامل جمع آوری شده در مورد همه‌ی مولفه‌ها، AE2 مجموعه‌ی بهینه‌ای از گزینه‌های سرمایه گذاری را با توجه به مولفه‌های مذکور تعیین می کند. تجهیزات و اقلام برای هر زیرسیستم می‌توانند از چندین تامین کننده‌ی تجهیزات برای طراحی یک سیستم جدید ریلی یا به روزرسانی سیستم موجود انتخاب شوند. هر محصول دارای LCC و قابلیت اطمینان از نظر MTBF است و این اطلاعات از تامین کنندگان بدست می‌آید.



شکل۱۲. چارچوب بهینه‌سازی

٤-مدلسازی سناریوهای بهبود

برای طراحی یک سیستم ریلی جدید یا به روزرسانی سیستم موجود، محصولات برای هر زیر سیستم می‌توانند از چندین تامین کننده تجهیزات انتخاب شوند. شکل ۷ سیستم ریلی در راه‌آهن ایران را نشان می دهد که از چهار زیرسیستم و سیزده جزء مربوطه تشکیل شده است. این رابطه مبتنی بر ساختار فرآیند طراحی و تدارکات است. محصولی که پس از حل مساله انتخاب می‌شود می‌تواند خود یک زیرسیستم باشد (به عنوان مثال نیروی کشش و واگن) یا اجزای درون زیرسیستم‌ها از قبیل تجهیزات دیزل و آلات ناقله ی دیزل در زیرسیستم نیروی کشش. تصویر مفهومی در شکل ۷ می‌تواند برای یک سیستم با لایه‌های بیشتری از سیستم‌های فرعی (به عنوان مثال، زیرسیستم)، اجزا و مولفه های بیشتر تعمیم یابد. هر محصول دارای قابلیت اطمینان سیستم، قابلیت اطمینان خدمات (وقت شناسی) و هزینه‌ی چرخه عمر است که از داده‌های ارائه شده توسط تامین کنندگان و شرکت‌های ریلی محاسبه شده یا بدست می‌آید. قابلیت اطمینان سیستم از هر محصول را می‌توان از تهیه کنندگان بدست آورد. اما، هزینه‌ی چرخه ی عمر و قابلیت اطمینان خدمات (مانند وقت شناسی) باید از مشخصات محصول و یک برنامه‌ی عملیاتی حاصل شود. موارد زیر سه عنصر مهم برای تصمیم‌گیری را در انتخاب تجهیز، زیرسیستم تعریف می نماید:

قابلیت اطمینان سیستم: احتمال این است که سیستم ریلی در وضعیت نرمال باشد و در مدت زمان تعیین شده و در محیط تعیین شده عملکرد رضایت بخشی داشته باشد. این احتمال می‌تواند با نرخ شکست که معمولا توسط λ علامت گذاری می‌شود و معکوس نرخ شکست است، تعیین گردد. نرخ شکست کمتر، منتج به بهبود قابلیت اطمینان سیستم می‌شود.

هزینه‌ی چرخه‌ی عمر: هزینه‌ی کل محصول در طی عمر محصول می‌باشد که شامل سرمایه گذاری ثابت (برنامه‌ریزی و طراحی)، هزینه عملیاتی و هزینه نگهداری است. برخی

محصولات دارای هزینه‌ی اولیه‌ی کمی می‌باشند. اما هزینه‌های نگهداری و عملیاتی بالایی دارند؛ برخی دیگر که هزینه‌های اولیه ی بالایی دارند ممکن است هزینه‌های عملیاتی و نگهداری کمی داشته باشند. بنابراین هزینه‌ی چرخه‌ی عمر به جای ارزیابی صرفاً سرمایه گذاری دارایی ثابت، یک شاخص مناسب برای تصمیم‌گیری نیز می‌باشد. قابلیت اطمینان خدمات (وقت شناسی یا تاخیر قطارهای مسافری): اثر گذاری بر مسافران است. تاثیر روی مسافران معمولاً می‌تواند به عنوان وقت شناسی یا تاخیر لحاظ شود. تاخیر قطار برای نشان دادن تاثیر خرابی‌ها استفاده می‌شود. تاخیر طولانی مدت تاثیر بیشتری بر مسافران می‌گذارد و نشان از قابلیت اطمینان پایین خدمات دارد. قابلیت اطمینان خدمات درصد ورود به موقع (رسیدن به موقع بدون هیچ گونه بافر) است. درصد به موقع بودن سنتی، به وسیله ی تعداد قطارهایی که در یک ایستگاه پایانی با یک زمان بافر (برای مثال ۵ دقیقه) وارد می‌شوند، محاسبه می‌گردد. تمام تاخیرات در طی فرآیند تصمیم‌گیری بدون هیچ گونه بافر در نظر گرفته می‌شوند تا قابلیت اطمینان واقعی خدمات را نشان دهند. این سه عنصر در مدل‌های بهینه سازی به منظور تعیین تخصیص بهینه‌ی قابلیت اطمینان و LCC گنجانده می‌شوند. علاوه بر این، باید به رابطه ی بین سیستم، زیرسیستم‌ها و اجزای زیرسیستم‌ها بیشتر توجه شود. همانطور که در شکل ۷ نشان داده شده است، سیستم راه آهن از چهار زیرسیستم مهم با یک رابطه به اصطلاح OR تشکیل شده است. این رابطه نشان می‌دهد که سیستم شکست خواهد خورد اگر یکی از این چهار زیرسیستم دچار شکست گردد. رابطه‌ی بین سیستم، زیرسیستم‌ها و اجزای زیرسیستم‌ها باید در فرآیند تصمیم گیری به دقت مورد توجه قرار گیرد؛ اثر متغیرهای تصمیم مدل:

δ_{in} یک متغیر باینری است و بیانگر انتخاب آلترناتیو است که

$$\delta_{in} = \begin{cases} 1 & if\ alternative\ n\ of\ element\ i\ is\ selected \\ 0 & otherwise \end{cases}$$

y_{ik} یک متغیر باینری است و بیانگر انتخاب ترکیب است که

$$y_{ik} = \begin{cases} 1 & if\ combination\ k\ of\ subsystem\ j\ is\ selected \\ 0 & otherwise \end{cases}$$

f_{jk}^{C} یک متغیر پیوسته است و بیانگر نرخ شکست هر ترکیب k در زیرسیستم j است.

f_{j}^{B} یک متغیر پیوسته بیانگر نرخ شکست زیرسیستم j است.

شکست‌های احتمالی باید به ویژه در محاسبات نرخ خرابی به منظور تعیین تخصیص بهینه ی منابع در نظر گرفته شود. مدل‌های بهینه سازی از نماد زیر استفاده می‌نمایند: i نماد اجزا است (شکل ۱)؛ j نماد زیر سیستم است؛ n نماد آلترناتیوهای اجزا است؛ I, J و N به ترتیب مجموعه های i , j, n می باشند. k نماد ترکیبات احتمالی آلترناتیوهای درون زیر سیستم j است و K_j بیانگر مجموعه‌ی k درون زیرسیستم j است. J^T و J^r هر دو زیر مجموعه‌های J هستند؛ که اولی سیستم ریلی و دومی همه‌ی زیرسیستم‌ها را نشان می‌دهد. J^s زیرمجموعه J است و نمایانگر زیر سیستم با رابطه ی OR با مولفه‌های بعدی (مثلا سیستم ریلی و زیر سیستم مسیر شکل ۱) است. J^p زیرمجموعه J است و نمایانگر زیر سیستم با رابطه‌ی AND با مولفه‌های بعدی است. V_k مجموعه‌ی آلترناتیوهای متناظر در ترکیب k هستند که ϵV_k (i , n). N_i مجموعه آلترناتیوهای اجزای i است؛ C_{in} مقدار LCC آلترناتیو n از جزء i است؛ D_j میانگین تاخیر زیرسیستم j است؛ F_{in}^{C} نرخ شکست آلترناتیو n از جزء i است؛ ؛ U_j مقدار عناصر در زیرسیستم j است؛ P زمان کل عملیاتی در هر سال است؛R قابلیت اطمینان طراحی خدمات است؛ B مقدار LCC طراحی است؛ E قابلیت اطمینان طراحی کل سیستم از نظر نرخ خرابی است؛ ؛ G_j قابلیت اطمینان طراحی سیستم از نظر نرخ خرابی هر زیرسیستم j است؛ T ارزش زمانی یک قطار است؛ H افق برنامه‌ریزی پروژه است که ارزش فعلی خالص را در نظر می‌گیرد. M بیانگر اعداد کوچک دلخواه برای مثال 10^{8} *1- است.

f یک متغیر پیوسته بیانگر نرخ شکست سیستم است.

$$\text{Max } ((1-f)+\left(\frac{T-\sum_{i\in I} d_i}{T}\right)*100\%) \quad (1)$$

Subject to

$$\sum_{k\in K} f_{jk}^{m}\, \mathrm{y_{ik}} \le G_j \quad \forall\ j \in J_r \quad (2)$$

$$\sum_{n\in N_i} \delta_{\mathrm{in}} = 1 \quad \forall\ i \in I, n \in N_i \quad (3)$$

$$\sum_{k\in K} \mathrm{y_{ik}} = 1 \quad \forall j \in J_r \quad (4)$$

$$\sum_{i\in I}\sum_{n\in N} C_{in}\delta_{\mathrm{in}} \le B \quad (5)$$

$$\sum_{(i,n)\in V_k} \delta_{\mathrm{in}} \le \mathrm{y_{ik}} + \left(U_j - 1\right) \quad \forall\ k \in K_j, j \in J_r \quad (6)$$

$$\mathrm{f}_{jk}^{C} \ge F_{in}^{C} + m\left(1-\mathrm{y_{jk}}\right) \qquad \forall \quad (i,n) \in V_k, k \in K_j, j \in J_s \quad (7)$$

$$\mathrm{f}_{jk}^{C} \ge \prod_{(i,n)\in V_k} F_{in}^{C} + m\left(1-\mathrm{y_{jk}}\right) \qquad \forall \quad k \in K_j, j \in J_p \quad (8)$$

$$\mathrm{f}_{j}^{B} \ge \mathrm{f}_{jk}^{C} \qquad \forall \quad k \in K_j, j \in J_r \quad (9)$$

$$\mathrm{f} \ge \mathrm{f}_{j}^{B} \quad \forall \quad j \in J_r \quad (10)$$

$$\mathrm{f} \le \mathrm{E} \quad (11)$$

and

$$\delta_{\mathrm{in}} \in \{0,1\} \quad \forall\ i \in I, n \in N_i \quad (12)$$

$$\mathrm{y_{jk}} \in \{0,1\} \quad (13)$$

$$\forall \quad k \in K_j, j \in J \quad (14)$$

$$\mathrm{f}_{jk}^{C} \ge 0 \quad \forall \quad k \in K_j, j \in J \quad (15)$$

$$\mathrm{f}_{j}^{B} \ge 0 \quad \forall \quad j \in J \quad (16)$$

$$\mathrm{f} \ge 0 \quad (17)$$

معادله ۱ تابع هدف قابلیت اطمینان سیستم (f-۱) و وقت شناسی (d_i تاخیر در هر زیر سیستم و T کل زمان عملیاتی دوره‌ی زمانی مشخص) را به حداکثر می‌رساند که (۱-) نرخ شکست سیستم ریلی است. معادله ۲ تضمین می‌نماید که قابلیت اطمینان سیستم (در نرخ شکست) هر زیرسیستم باید کمتر قابلیت اطمینان طراحی سیستم (در نرخ شکست) باشد. معادله‌ی ۳ تضمین می‌کند که فقط یک آلترناتیو برای یک مولفه انتخاب می‌شود. معادله ٤ تضمین می‌کند که فقط یک ترکیب (k) می‌تواند برای یک زیرسیستم انتخاب شود. معادله ۵ محدودیت بودجه است. معادله ی ٦ رابطه ی بین انتخاب یک ترکیب برای زیرسیستم (مانند $\mathrm{y_{jk}} = 1$) و انتخاب مولفه‌های مربوطه (برای مثال $\delta_{\mathrm{in}} = 1$) را برقرار می‌کند. معادله ۷ نرخ شکست ترکیب k از زیرسیستم j (برای مثال f_{jk}^{C}) متشکل از مولفه‌هایی با رابطه‌ی OR دارای بیشترین نرخ شکست

در بین تمام مولفه‌های i در زیرسیستم می‌باشد. معادله ۸ نرخ شکست ترکیب k از زیرسیستم j (برای مثال f_{jk}^{C}) متشکل از مولفه‌هایی با رابطه ی AND است که نرخ شکست همه‌ی مولفه‌های i در زیرسیستم را تعیین می‌کند. معادله ۹ مقدار نرخ شکست زیرسیستم j را از f_{jk}^{C} نشان می‌دهد (برای مثال f_{j}^{B}). به همین ترتیب معادله ۱۰ مقدار نرخ شکست سیستم (یعنی f) را از f_{j}^{B} را تعیین می کند. سایر معادلات ویژگی‌های متغیرها را نشان می دهند. از مدل بهینه سازی ارائه شده با استفاده از داده‌های تجربی بدست آمده از سیستم ریلی راه آهن ج.ا.ا برای طراحی سیستم جدید یا به روز رسانی سیستم ریلی فعلی استفاده می‌شود. سیستم باید با دقت منطبق با سطح مطلوب قابلیت اطمینان سرویس طراحی شود.

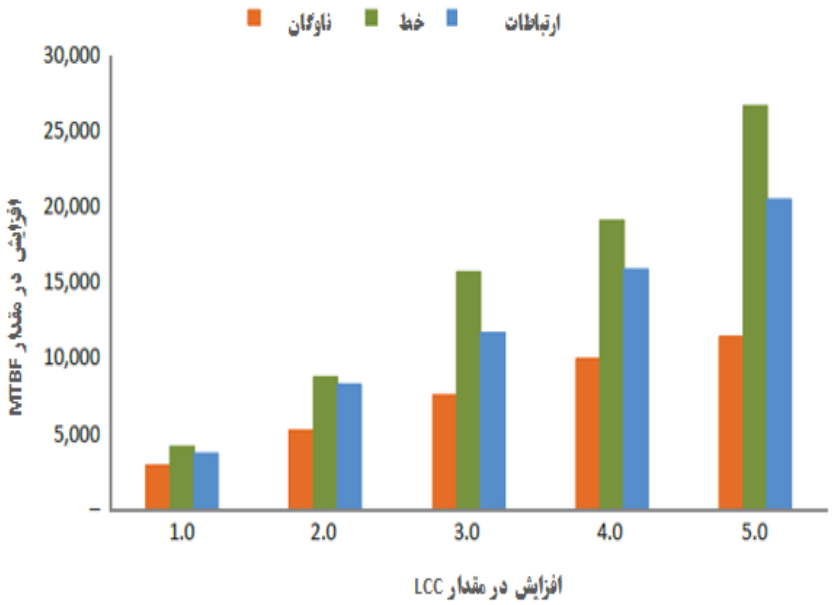
مطالعه موردی

فرآیند بهینه سازی می‌تواند در مطالعه موردی با استفاده از داده‌های تجربی بدست آمده از شرکت راه آهن ج.ا.ا برای نشان دادن کاربرد بالقوه‌ی خود در طراحی سیستم و یا به روز رسانی سیستم ریلی انجام شود. هدف بهبود قابلیت اطمینان سیستم ریلی موجود و افزایش وقت شناسی (کاهش تاخیر قطارهای مسافری) با توجه به محدودیت در مورد افزایش موجود در LCC (یعنی محدودیت بودجه) می‌باشد. این تابع هدف به منظور تعیین یک برنامه‌ی سرمایه‌گذاری بهینه با حداکثر افزایش در قابلیت اطمینان و وقت شناسی به کار گرفته شده است. معمولا هزینه استفاده شده برای بهبود ثابت بوده و قابلیت اطمینان سیستم مطابق با محدودیت هزینه به حداکثر می‌رسد. قابلیت اطمینان ۹۷٪ است. برای بررسی سناریوهای احتمالی، یک فرض افزایش از ۱۰۰۰ میلیارد تا ۵۰۰۰ میلیارد تومان با افزایش ۱۰۰۰ میلیارد در نظر گرفته می‌شود. جدول ٦ گزینه‌های بهبود احتمالی سیستم موجود را نشان می‌دهد و هر گزینه با افزایش LCC و قابلیت اطمینان سیستم (در MTBF) در ارتباط است. همه‌ی زیرسیستم‌ها برای سیستم موجود قابل تغییر نیستند. بنابراین، آلترناتیوهای ارتباطات، ناوگان و خط در این مورد در نظر گرفته شده‌اند. این فرآیند در یک سیستم مدلسازی جبری عمومی کدگذاری شده است و به طور موثر توسط CPLEX در مدت چند ثانیه حل شده است. شکل‌های ۱۳ و ١٤ افزایش در MTBF و LCC را برای هر سناریو نشان می‌دهند. طراحی LCC بالا معمولا منتج به MTBF بالا (قابلیت اطمینان سیستم) می‌شود. گزینه‌ی خط دارای بیشترین افزایش در MTBF و پس از آن ارتباطات و ناوگان هستند. تمایز در افزایش MTBF در بین سه زیرسیستم با طراحی LCC افزایش می‌یابد. مطابق با شکل١٤، هرچه بودجه بالاتر رود، LCC افزایش می یابد. LCC بیشتر برای کلیه‌ی سناریوها به ناوگان و ارتباطات اختصاص داده شده است. زیرا تاثیر در تاخیر از خرابی‌های ارتباطات و ناوگان شدیدتر از خرابی‌های ناشی از خط است. شکل ١٤ افزایش قابلیت اطمینان را از سناریوهای احتمالی بهبود سیستم نشان می‌دهد و با افزایش قابلیت اطمینان از ۹۷٫۱٪ به ۹۷٫۵٪، طراحی LCC از ۱۰۰۰ میلیارد تومان به ۵۰۰۰ میلیارد تومان افزایش می‌یابد.

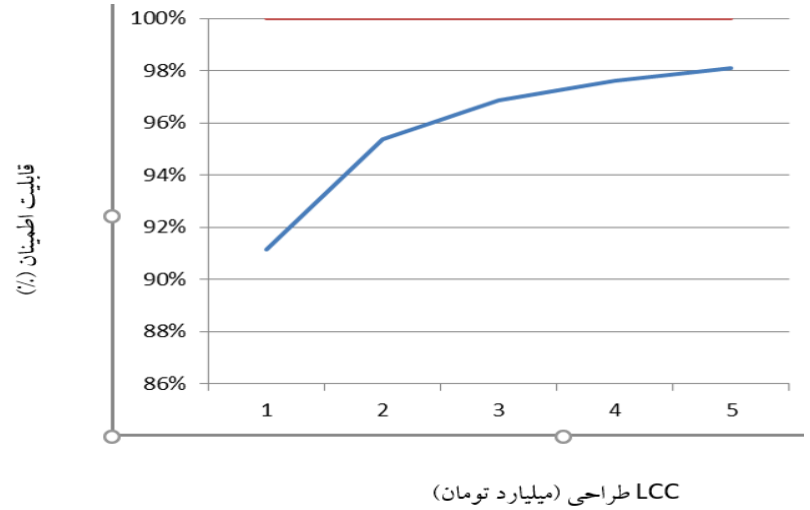
افزایش قابلیت اطمینان سیستم در این مرحله دشوارتر از افزایش آن در مرحله‌ی طراحی است زیرا گزینه‌های بهبود در دسترس محدود هستند و معمولا هزینه ی بیشتری برای سیستم موجود دارند.

جدول ۲. آلترناتیوهای سرمایه‌گذاری

زیرسیستم (i)	آلترناتیو (k)	MTBF (Mik)	LCC (Cik)(billion toman)	Delay (Dik)(train hours)
ناوگان	1	18000	15.6	350
	2	15600	19.7	240
	3	12150	16.03	168
	…	…	…	…
خط	1	14800	14.81	1200
	2	15000	15.5	950
	3	17800	18.06	890
	…	…	…	…
ارتباطات	1	15200	9.05	4103
	2	16480	10.69	2114
	3	19000	12.35	1682
	…	…	…	…
ایستگاه	1	18000	4.9	210
	2	17520	2.01	156
	3	19780	3.05	245
	…	…	…	…



شکل۱۳. افزایش در MTBF و LCC را برای هر آلترناتیو



شکل ۱٤. افزایش قابلیت اطمینان برای هر آلترناتیو احتمالی

بحث در مورد نتایج

اقلام و آیتم‌های هر زیر سیستم می‌توانند از طریق تامین‌کنندگان تجهیزات مختلف برای طراحی سیستم ریلی جدید یا به روز رسانی یک سیستم موجود انتخاب شوند.

تصمیم‌گیرندگان برای تخصیص بهینه‌ی منابع باید تبادلات متوازنی میان قابلیت اطمینان سیستم، قابلیت وقت شناسی و LCC انجام دهند.

مطالعات موردی نشان می‌دهند که قابلیت اطمینان می‌تواند برای سیستم‌های جدید در مرحله‌ی طراحی نسبت به مرحله‌ی بهبود (برای سیستم‌های موجود) با همان میزان پول به طور موثرتری افزایش یابد. بنابراین، سیستم‌هایی که با دقت بسیار طراحی شده‌اند، می‌توانند با تخصیص منابع مناسب از دوباره کاری‌ها و پردازش‌ها و بهسازی‌های پر هزینه جلوگیری نمایند. صحت داده‌های قابلیت اطمینان بدست آمده از تامین کنندگان،

یک عامل مهم برای تعیین موفقیت آمیز برنامه‌ی سرمایه گذاری بهینه از طریق این فرآیند است. داده‌های عملکرد واقعی یک زیر سیستم خاص در یک سیستم ریلی نشان دهنده‌ی قابلیت اطمینان عملیات دنیای واقعی است. تست دقیق داده‌ها به طور کلی برای یک محصول خاص موردنیاز است و اعتبار آنها را می‌توان با داده‌های عملکرد واقعی بهبود داد. مطالعات موردی نشان می‌دهد که فرآیند بهینه سازی می‌تواند به طور موثر و موفقیت آمیز همه‌ی گزینه‌های ممکن را ارزیابی نماید و مجموعه‌های سرمایه‌گذاری بهینه را با توجه به قابلیت اطمینان سرویس طراحی یا LCC تعیین کند. این ابزار می‌تواند به آژانس‌ها و شرکت‌های ریلی کمک کند تا بازده سرمایه‌گذاری خود را به حداکثر رسانده و خدمات قابل اعتماد را به مسافران ارائه نمایند.

۵-نتیجه‌گیری

در این مقاله یک رویه ی تجزیه و تحلیل سیستماتیک و جامع برای پیش بینی قابلیت اطمینان صنعت ریلی ارائه گردید تا به برآورد دقیق تر قابلیت اطمینان منتج شود؛ این رویه به مدیران صنعت ریلی کمک خواهد کرد تا بیشتر به اهمیت قابلیت اطمینان در صنعت ریلی پی برده و پیشرفت‌هایی را که می‌توان در روش موجود برای به روزرسانی سیستم فعلی یا طراحی سیستم جدید ایجاد کرد، درک نمایند. هنگامی که عملکرد و منطق زیرسیستم‌ها درک و بلوک دیاگرام آنها ساخته شد، می توان ویژگی‌های شکست اجزای مختلف را محاسبه نمود. برای تعیین توزیع عمر از داده‌های تاریخی شکست موجود در پایگاه های داده‌های شرکت راه آهن و یا شرکت های تامین کننده استفاده می‌شود. پس از تعیین قابلیت اطمینان با استفاده از مدل مورد نظربایستی نسبت به تخصیص آن با توجه به سایر شاخص‌های عملکردی صنعت ریلی اقدام نمود [چنگ و همکاران، ۲۰۱۷].

براساس رویکرد پیشنهادی در این مقاله، می‌توان استنتاج نمود که قابلیت اطمینان زیرسیستم‌ها در محیط ریلی می‌تواند با موفقیت کمّی گردد. این سنجش قابلیت اطمینان یک شاخص اصلی است و از این طریق منبع عدم اطمینان را می‌توان شناسایی نمود. براساس داده‌های طول عمر و وابستگی متقابل سیستم های مختلف، قابلیت اطمینان کلی و سهم هریک از اجزا در کل سیستم قابل محاسبه است. سیستم‌های با دقت طراحی شده با تخصیص مناسب منابع می‌توانند از هزینه‌های گزاف و دوباره کاری‌ها جلوگیری نمایند. همچنین در این مطالعه یک فرآیند تخصیص جامع با توجه به ویژگی های یک سیستم ریلی مسافری و آلترناتیوهای احتمالی ارائه گردید، فرآیند پیشنهادی می‌تواند ***LCC*** و قابلیت اطمینان خدمات (وقت شناسی) را به منظور تعیین بهینه‌ی برنامه‌ی سرمایه گذاری برای طراحی یا به روزرسانی سیستم ریلی اختصاص دهد. نتایج مطالعات موردی برای استفاده از مدل‌های پیش بینی قابلیت اطمینان و فرآیند بهینه‌سازی به منظور ارزیابی همه‌ی گزینه‌های ممکن و تخصیص بهینه در بین کلیه‌ی زیرسیستم‌ها و اجزای مربوطه ارائه گردید.

این رویکرد جامع می‌تواند به صنعت ریلی در پیش بینی قابلیت اطمینان سیستم‌ها و زیرسیستم‌ها و شناسایی توازن ایده آل بین هزینه، قابلیت اطمینان و وقت‌شناسی قطارهای مسافری به منظور دستیابی به طراحی بهینه‌ی سیستم ریلی کمک نماید.

٦- مراجع

-A. H. S. Garmabaki, A. Ahmadi, J. Block, H. Pham, and U. Kumar, (2016), "A reliability decision framework for multiple repairable units", Reliab. Eng. Syst. Saf., Vol. 150, pp. 78–88.

-A. P. Patra and U. Kumar, (2010), "Availability analysis of railway track circuit", in Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, pp. 169–177.

-A. P. Patra., (2007), "RAMS and LCC in rail track maintenance", Luleå University of Technology.

-Armstrong, M.J., (2002), "Age repair policies for the machine repair problem" .European Journal of Operational Research. 138(1), pp. 127-141.

bobbio, A., et al. 2001. "Improving the analysis of dependable systems by mapping fault trees into Bayesian networks". Reliability Engineering & System Safety, 71(3), pp.249-260.

approach", Reliability Engineering & System Safety. 68(2), pp. 159-168.
-K. N. Fleming, A. Mosleh, and R. Kenneth Deremer, (1986), "A systematic procedure for the incorporation of common cause events into risk and reliability models", Nucl. Eng. Des., Vol. 93, No. 2–3, pp. 245–273.
-Kumar Sharma, D. K., (2005), "Systematic failure mode effect analysis (FMEA) using fuzzy linguistic modeling", International Journal of Quality & Reliability Management, 22(9), pp.986-1004.
-T. Nowakowski, "Problems of Transportation Process Reliability Modelling." Wrocław University of Technology, p. 20.
-Landmark. A.D, Seim. A.A, Nils. O., (2017), "Visualisation of Train Punctuality – Illustrations and Cases", Transportation Research Procedia pp.1227–1234.
-Love, C.E., et al., (2000), "A discrete semi-Markov decision model to determine the optimal repair/replacement policy under general repairs", European Journal of Operational Research, 125(3), pp. 398-409.
-Marquez, A.C., and Heguedas, A.S., (2002), "Models for maintenance optimization: a study for repairable systems and finite time periods". Reliability Engineering & System Safety, 75(3), pp. 367-377.
-M. D. McNaught. 2015. "A Risk-Reliability Comparison of Track Sections in the Passenger Railway Industry", University of Stellenbosch.
-Milutinović, D. & Lučanin, V., (2005), "Relation between reliability and availability of railway vehicles", FME Transactions, 33(3), pp. 135-13.
-Network Rail, (2014), "Asset Management Strategy." Network Rail, London, pp. 48.
-N. R. Council, (1996), "Measuring and Improving Infrastructure Performance", National Academy of Sciences.
-O. Basile, P. Dehombreux, and F. Riane, (2004), "Identification of reliability models for non repairable and repairable systems with small samples", Proc. IMS2004 Conf. Adv. Maint. Model. Simul. Intell. Monit. Degrad. Arles, pp. 1–8.
-O'connor, P.D.T., Practical Reliability Engineering. 4th ed., (2002), "Chichester": John Wiley & Sons Ltd.
-P. Brinkman., (2009), "Valuing rail infrastructure performance in a multi actor context MSc-Thesis", TU Delft.
Carl-William. P, Nils. O, Lena. H. 2017. "Some Influencing Factors For Passenger Train Punctuality In Sweden", International Journal of Prognostics and Health Management.
Cheng. Y, Tsung LU. C, Lin Lu. C. 2017. "comprehensive approach to allocate reliability and cost in passenger rail system design", Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 2608, pp. 86-95.
-C. Stenström, (2012), "Performance Measurement of Railway Infrastructure with Focus on the Swedish Network".
-D. Rama and J. D. Andrews, (2014), "A Holistic Approach to Railway Infrastructure Asset Management", Vol. 11, pp. 3–16.
-Ebeling, C.E., (1997), "An Introduction to Reliability and Maintainability engineering'", New York: The McGraw-Hill Company, Inc., pp.124-128.
-Flammini, F.et al., (2014), "A Multiformalism Modular Approach To ERTMS/ETCS Failure Modeling", International Journal of Reliability, Quality and Safety Engineering.
-Jardine, A.K.S., and Banjevic, D., (2001), "Optimizing a mine haul truck wheel motors' condition monitoring program", J. of Quality in Maintenance Engineering, 7(4), pp. 1355-2511.
-J. Johansson, H. Hassel, and E. Zio., (2013), "Reliability and vulnerability analyses of critical infrastructures: Comparing two approaches in the context of power systems", Reliab. Eng. Syst. Saf., Vol. 120, pp. 27–38.
-Hong, Y.J., Xing, J., and Wang, J.B., (1999), "A second-order third-moment method for calculating the reliability of fatigue", International Journal of Pressure Vessels and Piping. 76(4), pp. 567-570.
-Hoyland, A. and Rausand, M., (1994), "System reliability Theory: Models and Statistical Methods," New York: John Wiley & Sons, Inc.
-H. S. Bø and B. F. Nielsen, (2014), "Estimation of Reliability by Monte Carlo Simulations Combined with Optimized Parametric Models", Norwegian University of Science and Technology.
-Ineco., (2013), "General Rams Plan For The Railway Lines Akko-Carmiel, Haifa - Bet Shean And Herzelya-Kefar Saba", pp. 50.
-Kim, H., (2000), "Reliability modelling of a hard real-time system using the path-space

Repairable Systems", Georgia Institute of Technology.
-Silver, E.A. and Fiechter, C. N., (1995), "Preventive maintenance with limited historical data", European J. of Operational Research. 82(1): pp. 125-144.
-S. J. Hassankiadeh, (2011), "Failure Analysis of Railway Switches and Crossings for the purpose of Preventive Maintenance", Royal Institute of Technology.
-S. M. Famurewa, (2015), "Maintenance Analysis and Modelling for Enhanced Railway Infrastructure Capacity," Lulea University of Technology.
-Williams, M.M.R. and Thome, M.C., (1997), "The estimation of failure rates for low probability events", Progress in Nuclear Energy. 31(4), pp. 373-476.
-Y. K. Al-Douri, P. Tretten, and R. Karim, (2016), "Improvement of railway performance: a study of Swedish railway infrastructure", J. Mod. Transp., Vol. 24, No. 1, pp. 22–37.
Y. M. Jidayi., (2015), "Reliability Improvement of Railway Infrastructure," Stellenbosch University.
-Zhuwaki. N.T., (2017), "Application of reliability analysis for performance assessments in railway infrastructure asset management", Master thesis in Engineering Management in the Faculty of Engineering at Stellenbosch University.
-P. Daniel, Conradie, C. Fourie, P. Vlok, and N. Treurnicht., (2015), "Quantifying System Reliability in Rail Transportation in an Aging Fleet Environment," South African J. Ind. Eng., Vol. 26, No. March, pp.128.
-Percy, D.F., (2002), "Bayesian enhanced strategic decision making for reliability". European Journal of Operational Research. 139(1), pp. 133-145.
-Percy, D.F., Kobbacy, K.A.H., and Fawzi, B.B. (1997), "Setting preventive maintenance schedules when data are sparse". International Journal of Production Economics. 51(3), pp. 223-234.
-Pham, H., (2003), "Handbook of reliability engineering", London, Springer.
-P. Prof, J. Jorge, P. Pereira, O. Prof, and P. Manuel, (2008) "RAMS analysis of railway track infrastructure (Reliability, Availability, Maintainability, Safety)", Instituto Superior Tecnico.
-Restel. F. J, Zajac. M., (2015), "Reliability Model of the Railway Transportation System With Respect to Hazard States", Proceedings of the IEEE IEEM.
-Rong Zhang. R, Lu Li., Jian. W., (2019), "Reliability analysis on railway transport chain", International Journal of Transportation Science and Technology 8, pp.192–201.
-R. Valenzuela, (2014), "Compact Reliability and Maintenance Modeling of Complex

Comprehensive Procedure for Analyzing and Predicting the Reliability of the Railway Industry

Akbar Alemtabriz, Professor, Department of Industrial Management and Information Technology, Management and Accounting Faculty, Shahid Beheshti University, G.C., Tehran, Iran.

Farzaneh nazarizadeh, Ph.D.,Draduate., Department of Industrial Management and Information Technology, Management and Accounting Faculty, Shahid Beheshti University, G.C., Tehran, Iran

Mostafa Zandieh, Professor, Department of Industrial Management and Information Technology, Management and Accounting Faculty, Shahid Beheshti University, G.C., Tehran, Iran.

Abbas Raad, Assistant Professor, Department of Industrial Management and Information Technology, Management and Accounting Faculty, Shahid Beheshti University, G.C., Tehran, Iran.

E-mail: a-tabriz@sbu.ac.ir

Received: January 2023- Accepted: June 2023

ABSTRACT

This paper presents a systematic and comprehensive analysis procedure for predicting the reliability of the railway industry in order to identify the factors affecting the reliability and obtain a more accurate estimate. This study will also help railway industry managers to better understand the importance of reliability and optimize important performance indicators in the railway industry and to understand the advances that can be made to improve reliability in the railway industry. This study also presents a comprehensive allocation framework with regard to the features of a passenger railway system and possible alternatives; In addition to system reliability, the proposed process can allocate life cycle costs and service reliability to determine the optimal investment plan for designing or updating the rail system. This comprehensive approach can help the rail industry in predicting the reliability of systems and subsystems and identifying the ideal balance between cost, reliability and punctuality of passenger trains in order to achieve optimal rail system design.

Keywords: Reliability, Railways Industry, Punctuality, Life Cycle Cost, Passenger Trains