

تأثیر خرابی علت مشترک در پیش‌بینی قابلیت اطمینان صنعت ریلی

فرزانه نظری‌زاده

دانشجوی دکتری، دانشکده مدیریت، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران. farzaneh.nazarizadeh@yahoo.com

اکبر عالم تبریز

(نویسنده‌ی مسؤل) استاد تمام، دانشکده مدیریت، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران. a-tabriz@sbu.ac.ir

مصطفی زندیه

استاد تمام، دانشکده مدیریت، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران. m-zandieh@sbu.ac.ir

عباس راد

استاد تمام، دانشکده مدیریت، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران. a_raad@sbu.ac.ir

چکیده: وجود وابستگی در سیستم‌ها یکی از مشکلات پیش‌بینی و ارزیابی قابلیت اطمینان است. وابستگی احتمال خرابی را افزایش می‌دهد و می‌تواند بر عملکرد یک سیستم تأثیر بگذارد. بدون در نظر گرفتن وابستگی، قابلیت اطمینان به صورت خوش‌بینانه برآورد و سیستم زودتر از پیش‌بینی‌های مقرر با شکست مواجه می‌شود. در صنعت ریلی به دلیل پویایی و پیچیدگی‌های زیاد، زیرسیستم‌ها سطح بالایی از وابستگی را نشان می‌دهند. شناسایی وابستگی‌ها و خرابی‌های وابسته بر اساس بلوک دیاگرام قابلیت اطمینان و ساختار سیستم ریلی می‌تواند بر پیش‌بینی دقیق‌تر قابلیت اطمینان اثر بگذارد و از تبعات گاه‌جبران‌ناپذیر جلوگیری نماید. این مقاله یک مدل جدید ریاضی برای پیش‌بینی قابلیت اطمینان صنعت ریلی با در نظر گرفتن خرابی علت مشترک در محور خراسان ارائه نموده است. مدل پیشنهادی بر اساس دو سناریو در قالب مطالعه موردی توجیه شده است. نتایج، افزایش دقت در پیش‌بینی قابلیت اطمینان را نشان داده‌اند.

واژگان کلیدی: قابلیت اطمینان، خرابی وابسته، خرابی علت مشترک، نرخ مخاطره، صنعت ریلی

تحلیلی و روش‌های مبتنی بر شبیه‌سازی و سایر تکنیک‌ها طبقه‌بندی می‌شوند [۲]. روش‌های مرسوم تجزیه و تحلیل قابلیت اطمینان سیستم، عمدتاً با فرض استقلال معمولاً به دلیل کمبود اطلاعات در نظر گرفته می‌شود و سبب تخمین خوش‌بینانه قابلیت اطمینان در سیستم‌ها می‌گردد. زیرا تجارب صنعتی بیانگر این است که فرض استقلال خرابی‌ها در سناریوهای مختلف، غیر واقعی است و منتج به افزایش ریسک و خطاهای غیر قابل پذیرش می‌گردد؛ بنابراین به منظور تحلیل وابستگی‌ها، ایده‌ی خرابی‌های وابسته معرفی شد. همانطور که در مقاله‌ی مصلح [۳]، هویلند و راسند [۴]،

۱. مقدمه

قابلیت اطمینان از مهمترین خصوصیات کیفی اجزاء، محصولات و سیستم‌های بزرگ و پیچیده، به ویژه صنعت ریلی است. بهترین نتایج از عملکرد قابل اعتماد می‌تواند به واسطه‌ی سیستم‌هایی که بسیار خوب طراحی شده‌اند، بدست آیند [۱]. مدل‌ها و رویکردهای مختلفی به منظور تجزیه و تحلیل قابلیت اطمینان یا توصیف، پیش‌بینی رفتار عملیاتی و جلوگیری از خرابی‌ها گسترش یافته‌اند. عموماً روش‌های ارزیابی قابلیت استقلال خرابی‌ها همراه هستند. فرض اطمینان به دو دسته

Corresponding author: a-tabriz@sbu.ac.ir

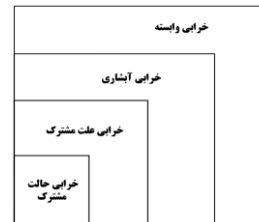
تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۹/۲۴ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۱/۲۷

دوره ۱۲/ شماره ۲

صفحات ۱۲۵-۱۵۱

استفاده می‌گردد [۷، ۱۴]. شکست‌های وابسته‌ی منفی می‌توانند از شکست‌های بیشتر دیگر اجزا در یک سیستم جلوگیری کنند و اغلب با استفاده از رویکردهای شکست‌های مستقل از قبیل تحلیل درخت خطا، بلوک دیاگرام قابلیت اطمینان و مدل مارکوف تحلیل می‌شوند [۵]. هرچند روش‌های مختلفی برای مدل‌سازی سیستم توسعه یافته است اما روش‌های محدودی برای مدلسازی قابلیت اطمینان در صنعت ریلی استفاده شده‌اند. این روش‌ها و مدل‌ها نیز عموماً بدون در نظر گرفتن فرض وابستگی توسعه یافته‌اند. صنعت ریلی به طور کلی به‌عنوان یک شبکه پیچیده با فعالیت‌های پویا در نظر گرفته می‌شود و از طریق هماهنگی با زیرسیستم‌های مختلف خود مانند زیرساخت، ناوگان، سیگنالینگ و ارتباطات در حمل و نقل بار و مسافر فعالیت می‌کند [۱۵]. برای اجرای یک پروژه ریلی وجود سه استاندارد اروپایی EN 50126، EN 50128 و EN 50129 ضروری است و سیستم‌های الکترونیکی ایمنی، سیستم سیگنالینگ و سایر تجهیزات راه آهن با توجه به چرخه عمر سیستم در این استانداردها تشریح شده‌اند [۱۶]. اساس مدل‌سازی قابلیت اطمینان، مبتنی بر استاندارد EN 50126 است [۱۷]. مطابق با این استاندارد، ایمنی و در دسترس بودن شبکه‌ی ریلی به‌عنوان مهمترین عناصر در این صنعت به هم پیوسته‌اند و صنعت ریلی تنها در صورت پایبندی به تمام الزامات قابلیت اطمینان و قابلیت نگهداری، می‌تواند به آنها دست یابد [۱۸، ۱۹]. تداوم فعالیت به طور پیوسته در سیستم ریلی سبب افزایش ریسک خرابی زیرسیستم‌ها می‌گردد. برای آنالیز ریسک زیرسیستم‌های ریلی، عموماً از تکنیک‌های سنتی مانند درخت خطا [۹]، بلوک دیاگرام قابلیت اطمینان [۲۰]، تجزیه و تحلیل حالات و اثرات خرابی (FMEA^۲) [۲۱]، تکنیک آنالیز بحرانیات حالات شکست و اثرات آن (FMECA^۳) [۲۲] و ... استفاده می‌گردد. بمنت و همکاران [۲۳] بلوک دیاگرام قابلیت اطمینان را با رویکرد شبیه‌سازی برای مدلسازی در دسترس بودن سوئیچ‌های سنتی خطوط ریلی به کار بردند. دین‌محمدی و همکاران [۲۲]، خطرات احتمالی خرابی‌های غیر منتظره رخ داده در ناوگان ریلی را با استفاده از روش FMECA در شبکه ریلی اسکاتلند تحلیل و ارزیابی نمودند. سو و همکاران [۲۴] از تجزیه و تحلیل آماری برای چند دسته از اختلالات و منابع و تأثیر آنها بر قابلیت اطمینان در شبکه‌های راه آهن پر سرعت چین استفاده

سان [۵]، راسند و لانتجین [۶]، ژو و همکاران [۷] و ... تشریح گردید، موضوع شکست‌های وابسته، طی ده‌های اخیر مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. چندین طبقه‌بندی از انواع وابستگی توسط پژوهشگران در سیستم‌ها ارائه شده است. مشهورترین آن طبقه‌بندی هامفری و جانسون [۸] است که توسط آنها در یک سند رسمی در سازمان انرژی اتمی انگلستان در سال ۱۹۸۷ منتشر شد و انواع خرابی‌های رخ داده به دلیل وابستگی در یک سیستم را تعریف می‌کنند. این طبقه‌بندی در شکل ۱ ارائه شده است.



شکل ۱. طبقه‌بندی انواع خرابی‌های وابسته [۹]

انواع خرابی‌های وابسته شامل شکست آبخاری، شکست علت مشترک، شکست حالت مشترک، شکست وابسته‌ی منفی می‌باشند [۴]. شکست آبخاری از شکست یک جزء ناشی شده، سپس منجر به شکست‌های زنجیره‌ای دیگر اجزا می‌گردند. شکست آبخاری علاوه بر مدل‌هایی مانند مدل منچستر، مدل شکست مخفی، مدل کاسکاد در سیستم‌های توزیع برق، با استفاده از رویکردهای شکست‌های مستقل از قبیل تحلیل درخت خطا، بلوک دیاگرام قابلیت اطمینان (RBD^۱) و مدل مارکوف نیز تحلیل می‌شود [۹، ۱۰]. خرابی علت مشترک، نوعی از خرابی وابسته است که در آن دو یا چند جزء به طور همزمان یا در یک بازه‌ی زمانی کوتاه و در نتیجه‌ی مستقیم یک علت مشترک دچار حالت‌های خرابی می‌شوند. این نوع شکست، افزونگی یا تنوع استفاده شده به منظور بهبود قابلیت اطمینان را در سیستم از بین می‌برد [۷، ۱۱، ۱۲]. خرابی‌های حالت مشترک، مختص خرابی‌های مشترکی است که در آن چندین سیستم و تجهیزات در یک حالت و به یک دلیل خراب می‌شوند. یعنی شکست‌هایی با رویدادها یا اثرات یکسان [۱۳]. معمولاً از روش‌هایی از قبیل مدل پارامتر اساسی، مدل‌های مجذور ریشه، مدل‌های فاکتور بتا و مدل‌های توزیع نمایی چند متغیری، مدل حرف یونانی متعدد، مدل فاکتور آلفا، روش نمودار حالت و مدل شوک کشنده (نرخ شکست دو جمله‌ای)، برای تحلیل شکست‌های علت مشترک و حالت مشترک

³ Failure Mode, Effects, and Criticality Analysis

¹ Reliability Block Diagram

² Failure Modes and Effects Analysis

غربالی و آنالیز تفصیلی است. آنالیز غربالی شامل غربالگری کیفی و کمی است و تجزیه و تحلیل تفصیلی، تخمین احتمالات رویداد اصلی علت مشترک با توسعه ی یک مدل احتمالی است. این رویکرد در نیروگاه هسته‌ای بکار رفته است. نتایج تحقیق اثبات می‌کند که ریسک به احتمال رخداد خرابی علت مشترک بسیار حساس و از آن تأثیرپذیر است [۳۶]. با توجه به روابط و پیچیدگی‌های میان زیرسیستم‌های ریلی، وجود انواع مختلف خرابی‌های وابسته خصوصاً خرابی علت مشترک محتمل است. ادبیات در موضوع مدل‌سازی قابلیت اطمینان صنعت ریلی غنی نیست و فرض وابستگی و تعیین نوع خرابی در مطالعات صورت‌گرفته، لحاظ نشده است. در این مقاله از رویکرد بسط تیلور به منظور محاسبه‌ی نرخ مخاطره با در نظر گرفتن خرابی علت مشترک استفاده شده است. هر چند در تخمین خرابی علت مشترک از مدل فاکتور آلفا که در سیستم‌های بزرگ کاربرد دارد، استفاده می‌شود. اما برآورد ضرایب آلفا در سیستم‌های پیچیده مشکل است و کات‌ستها و مجموعه انقطاع‌های پیچیده‌ای دارد [۴،۳۴]. لذا در این پژوهش یک مدل تحلیلی برای ارزیابی قابلیت اطمینان در صنعت ریلی با در نظر گرفتن خرابی علت مشترک با الهام از مدل چن و در نظر گرفتن فرض وابستگی خرابی‌ها (از نوع خرابی علت مشترک) با استفاده از رویکرد بسط تیلور توسعه داده شده است. به منظور برآورد ضریب خرابی علت مشترک (بتا) از چک لیست IEC61062 که در صنایع پرتقاضا به‌کار می‌رود، با اخذ نظرات ۸ نفر از خبرگان صنعت ریلی استفاده شده است. ساختار این مقاله به شرح زیر تنظیم شده است. در بخش ۲، شناسایی سیستم ریلی ارائه گردیده است. در بخش ۳، مدل تحلیلی ارزیابی قابلیت اطمینان در صنعت ریلی پیشنهاد شده است. توجیه مدل در بخش ۴ تشریح شده است. در بخش ۵ روش‌های تعیین ضریب علت مشترک ارائه شده است. برآورد مدل در بخش ۶، مقایسه با سایر مدل‌ها و تحلیل حساسیت در بخش ۷ و نتیجه‌گیری در بخش ۸ بیان شده است.

کردند. کنراد و همکاران برای کمی‌سازی قابلیت اطمینان دارایی‌های ناوگان ریلی روشی را با استفاده از آمارهای خرابی ارائه دادند [۲۵]. پاترا، کاربرد تحلیل $RAMS^4$ را در برنامه‌ریزی نگهداری تعمیرات زیرساخت‌های ریلی بررسی نمود [۲۶]. ژانگ و همکاران به ارائه‌ی یک مدل ریاضی برای تعیین و ارزیابی قابلیت اطمینان زنجیره‌ی حمل و نقل کانتینر راه آهن با استفاده از یک الگوریتم ابتکاری از نوع الگوریتم‌های تکرار ریاضی هاسفر و لیند-کویتز-فسلر (HL-RF)^۵ پرداختند [۲۷]. الدور و همکاران، به دنبال بهبود عملکرد خطوط ریلی با هدف اطمینان از دسترسی‌پذیری، قابلیت اطمینان، ایمنی و کاهش هزینه‌های نگهداری بودند [۲۸]. نواس و همکاران، تأثیر شکست‌های مکرر در زمان‌های بین خرابی را برای رد مدل‌های HPP^۶ و NHPP^۷ در مترو مادرید نشان دادند [۲۹]. یک مدل ارزیابی قابلیت اطمینان از نوع شبکه‌ای به نام دیاگرام تأثیر حالت نوعی (TSID^۸) توسط فوکوکا پیشنهاد گردید که از توانایی ویژه‌ای در توصیف روابط و وابستگی‌های کلی برخوردار است [۲۰]. چن، دو مدل ریاضی را برای سنجش قابلیت اطمینان سیستم ریلی و وقت شناسی قطار بر اساس نظریه اساسی احتمال ارائه نمود. مدل کلی قابلیت اطمینان سیستم ریلی در پژوهش او تابعی از قابلیت اطمینان زیرسیستم‌های صنعت ریلی شامل زیرساخت و ناوگان با فرض استقلال شکست بین زیرسیستم‌ها است [۳۰]. سیستم‌های فنی از قبیل راه آهن، فرآیندهای شیمیایی، صنایع هسته‌ای و ... به طور فزاینده‌ای پیچیده می‌شوند؛ این سیستم‌ها دارای زیرسیستم‌ها و اجزای فیزیکی زیاد با تعاملات و وابستگی‌های متقابل هستند. سوانح و اتفاقات گذشته نشان داده‌اند که خرابی‌های وابسته‌ی یکی از تهدیدات اصلی برای سیستم‌های پیچیده هستند و از مهمترین آنها که عامل اصلی خرابی در سیستم‌های ایمنی است، خرابی علت مشترک می‌باشد [۶، ۷، ۳۵]. در سال‌های اخیر نیز محققان توجه زیادی به خرابی علت مشترک به دلیل نقش مهمی که در تعیین قابلیت اطمینان سیستم دارند، نموده‌اند. اخیراً یک روش برای اندازه‌گیری سیستماتیک خرابی علت مشترک پیشنهاد شده است که شامل دو مرحله آنالیز

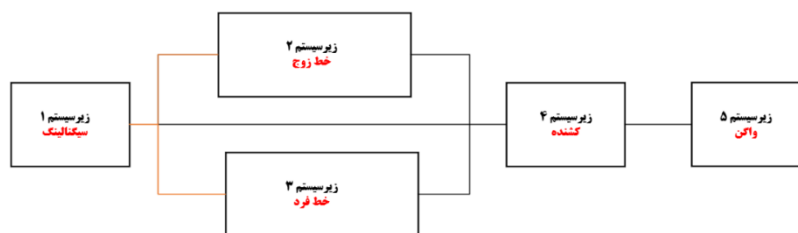
⁷ Non-Homogeneous Poisson Process

⁸ Typed State Influence Diagram

⁴ Reliability, availability, maintainability and safety

⁵ Hasofer Lind-Rackwitz Fiessler

⁶ The Homogeneous Poisson Process

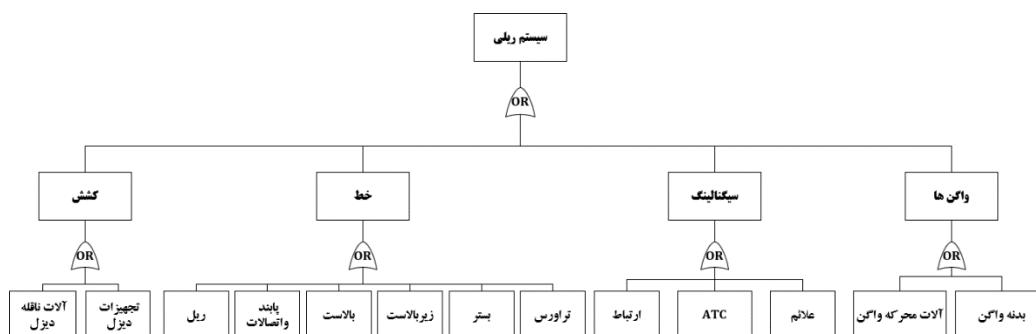


شکل ۲. بلوک دیاگرام زیرسیستم‌های محور خراسان

۲. شناسایی سیستم ریلی

ارزیابی وابستگی و شناسایی نوع خرابی وابسته در میان زیرسیستم‌های صنعت ریلی ایران با تمرکز بر محور خراسان پرداخته شد. در شکل ۲ عملکرد سیستم ریلی در محور خراسان با استفاده از بلوک دیاگرام قابلیت اطمینان نمایش داده شده است. ساختار سیستم ریلی راه آهن ایران شامل زیرسیستم‌هایی از قبیل خط، سیگنالینگ، کشنده و واگن می‌باشد که در شکل ۳ ارائه شده است. هر کدام از این زیرسیستم‌ها خود دارای مولفه‌ها و عناصر دیگری هستند.

برای ایجاد یک مدل قابلیت اطمینان در صنعت ریلی با در نظرگرفتن انواع خرابی‌های وابسته بین زیرسیستم‌ها، باید تمامی ساختارها، زیرسیستم‌ها و فعالیت‌هایی که در به وجود آمدن خرابی‌ها نقش دارند، شناسایی نمود [۳۱]. با توجه به ماهیت سیستم ریلی و پیچیدگی پیچیده‌ی آن از زیرسیستم‌ها و اجزای متعدد، شناسایی زیرسیستم‌های اساسی و مهم به منظور تدوین چارچوب مدل‌سازی بسیار حائز اهمیت می‌باشد. در این پژوهش با استفاده از نمودار تفکیک ساختار سیستم و بلوک دیاگرام قابلیت اطمینان (RBD) به تحلیل روابط و



شکل ۳. ساختار سیستم ریلی راه آهن ایران

سیگنالینگ است و برای تشخیص وجود قطار و کنترل سیستم‌های ایمنی از قبیل سیستم‌های سیگنال، سیستم‌های تعویض سوزن و غیره از طریق تشکیل مدار الکتریکی با ریل و اتصال کوتاه آن به وسیله‌ی محورهای وسایل نقلیه‌ی ریلی به کار می‌رود. سیگنال با تشخیص وجود وسایل نقلیه ریلی به وسیله مدار خط کنترل می‌شود. همه‌ی تجهیزات علائم بر مبنای کار مدار خط عمل می‌کنند. خرابی در مدار خط سبب شکست در عملکرد موفقیت آمیز خط و اجزای آن مانند سوزن‌ها و دو راهی‌ها می‌گردد؛ این مثال نمونه‌ای از خرابی علت مشترک در این سیستم می‌باشد. پس از شناسایی

پس از شناسایی سیستم و زیرسیستم‌های ریلی، نحوه‌ی عملکرد و توالی آنها بررسی گردید و به کمک این تحلیل‌ها، وابستگی‌ها و نوع خرابی‌های محتمل که بر اساس این وابستگی‌ها به وجود می‌آیند، در میان زیرسیستم‌ها شناسایی شد. خرابی وابسته بین زیرسیستم‌های ریلی از نوع علت مشترک (اثر خرابی زیرسیستم سیگنالینگ که علت مشترک خرابی در خطوط زوج و فرد است) مشخص گردید. اجزای زیرسیستم سیگنالینگ می‌توانند همزمان به‌عنوان عامل مشترک سبب شکست در عملکرد زیرسیستم خط (خط زوج و خط فرد) شوند؛ برای مثال مدار خط یکی از اجزای زیرسیستم

$$R_T = f(R_{Rollingstock}, R_{Track}, R_{Signalling}, R_{Wagons}) \quad (1)$$

R_T = قابلیت اطمینان کل سیستم ریلی، $R_{Rollingstock}$ = قابلیت اطمینان زیرسیستم ناوگان، R_{Track} = قابلیت اطمینان زیرسیستم خط، $R_{Signalling}$ = قابلیت اطمینان زیرسیستم سیگنالینگ، R_{Wagons} = قابلیت اطمینان زیرسیستم واگن‌ها.

معادله‌ی فوق بیانگر این است که کل قابلیت اطمینان سیستم ریلی تابعی از قابلیت اطمینان زیرسیستم‌هایش می‌باشد. هنگامی که از نظر آماری فرض مستقل بودن خرابی بین زیرسیستم‌ها در نظر گرفته شود، این معادله به صورت زیر ساده‌سازی می‌شود:

$$R_T = R_{Rollingstock} \times R_{Track} \times R_{Signalling} \times R_{Wagons} + a(w) \quad (2)$$

منظور از اصطلاح $a(w)$ عدم قطعیت ناشی از تعاملات موجود بین زیرسیستم‌ها است و فرض استقلال در بین زیرسیستم‌ها در واقع سبب خطای غیر قابل پذیرش می‌شود. بنابراین در این بخش به تحلیل خرابی وابسته از نوع علت مشترک در مدل پیش‌بینی قابلیت اطمینان صنعت ریلی پرداخته شده است. تأثیر خرابی یک زیرسیستم یا یک جزء بر سایر زیرسیستم‌ها یا اجزا دارای دو پیامد است [۵]:

- ۱- خرابی یک زیرسیستم یا یک جزء باعث می‌شود سایر زیرسیستم‌ها یا اجزا (تأثیرپذیر) فوراً خراب شوند.
- ۲- خرابی یک زیرسیستم یا یک جزء (تأثیرگذار) سبب تسریع در خراب شدن سایر زیرسیستم‌ها یا اجزای آسیب دیده می‌شود. در نتیجه‌ی این دو پیامد، احتمال خرابی سایر زیرسیستم‌ها یا اجزای آسیب دیده افزایش یافته و سرعت خرابی آنها شدت می‌یابد. یک زیرسیستم یا یک جزء می‌تواند تأثیرگذار یا تأثیر پذیر یا هر دو باشد.

خرابی یک زیرسیستم یا جزء بدون تأثیرپذیری از دیگر خرابی‌ها به‌عنوان خرابی مستقل یک زیرسیستم یا یک جزء نامیده می‌شود. به همین ترتیب احتمال خرابی این زیرسیستم یا جزء به‌عنوان احتمال خرابی مستقل آن نامیده می‌شود. اگر زیرسیستم یا جزء تحت تأثیر خرابی سایر زیرسیستم‌ها یا اجزا باشد، احتمال خرابی یک زیرسیستم یا یک جزء با احتمال خرابی مستقل آن متفاوت خواهد بود. احتمال خرابی زیرسیستم یا جزء با تأثیرات سایر خرابی‌ها افزایش می‌یابد. نرخ خرابی در نظریه‌ی قابلیت اطمینان اغلب به‌عنوان تابع نرخ خطر

پیکربندی سیستم، داده‌های لازم جمع‌آوری می‌گردد. از جمله موثرترین عواملی که به طور مستقیم بر روی قابلیت اطمینان سیستم تأثیر می‌گذارد، نرخ خرابی زیرسیستم‌ها و اجزای آن سیستم است. نرخ خرابی تصادفی زیرسیستم‌ها از داده‌های تاریخی یعنی میانگین زمان بین خرابی‌ها ($MTBF^9$) در هر زیرسیستم موجود در سامانه‌های شرکت راه آهن تخمین زده شده است.

به منظور پیاده‌سازی و اجرای مدل پیشنهادی، داده‌ها و اطلاعات کمی موجود از روش کتابخانه‌ای، مستندات موجود و بانک اطلاعاتی شامل سامانه‌های هوش تجاری و گراف نفیس شرکت راه آهن ج.ا.ا جمع‌آوری شد و برای تخمین مقدار ضریب علت مشترک) با استفاده از چک لیست استاندارد از مصاحبه با هشت نفر خبره و متخصصین صنعت ریلی استفاده شد. لذا در این تحقیق با مراجعه به داده‌های تاریخی گذشته شرکت راه آهن ج.ا.ا و انجام مصاحبه با خبرگان شرکت، داده‌های مورد نیاز گردآوری شد. در بخش بعدی به ارائه مدل تحلیلی قابلیت اطمینان کل سیستم با در نظر گرفتن خرابی وابسته از نوع علت مشترک پرداخته شده است.

۳. مدل تحلیلی شکست وابسته در صنعت ریلی

در این بخش ابتدا فرضیات مدل به شرح ذیل عنوان و سپس به ارائه مدل پرداخته شده است. فرضیات مدل به شرح ذیل است:

- ۱- تابع قابلیت اطمینان یک سیستم ریلی با زیرسیستم‌های مفروض شناخته شده و از نوع تابع نمایی است. ۲- توپولوژی و پیکربندی یک سیستم ریلی بر اساس بلوک دیاگرام قابلیت اطمینان و ساختار سیستم شناخته شده است. ۳- راه آهن دو خطه است (خط زوج و خط فرد). ۴- خرابی زیرسیستم‌ها یک روند تدریجی با افزایش مثبت است. ۵- خرابی علت مشترک در سیستم وجود دارد. ۶- اقدامات نگهداری تعمیرات در مدل لحاظ نمی‌شود. ۷- وابستگی مثبت بین خرابی زیرسیستم‌ها در نظر گرفته شده است.

قابلیت اطمینان سیستم ریلی، تابعی از قابلیت اطمینان زیرسیستم‌ها و اجزای آن سیستم است. طبق بلوک دیاگرام قابلیت اطمینان، زیرسیستم‌های ریلی شامل خط، سیگنالینگ، ناوگان و واگن‌ها هستند. لذا مدل کلی قابلیت اطمینان سیستم ریلی به صورت زیر بیان می‌شود [۳۰]:

⁹ Mean Time Between Failures

$$h_{Ind_i} = \begin{cases} \lambda_{Ind_i} & \text{خرابی های تصادفی} \\ \varphi_i(t) & \text{سایر خرابی ها} \end{cases} \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (4)$$

n تعداد زیرسیستم‌ها یا اجزای زیرسیستم‌ها است. از معادلات ۳ و ۴ می‌توان دریافت که تابع مخاطره‌ی یک زیرسیستم، تابعی از مخاطرات مستقل و وابسته‌ی آن زیرسیستم (یعنی زیرسیستم‌هایی که بر یکدیگر اثر می‌گذارند) است. اگر در یک سیستم ریلی که در بین زیرسیستم‌های آن، شکست وابسته از نوع شکست علت مشترک وجود داشته باشد و شامل i ($i=1, 2, \dots, n$) زیر سیستم باشد، توابع مخاطره‌ی زیرسیستم‌ها می‌توانند به صورت زیر بیان شوند:

$$\begin{aligned} h_1(t) &= \varphi_1 [h_{Ind_1}(t), h_{CC_{jC_1}}(t), t] \\ h_2(t) &= \varphi_2 [h_{Ind_2}(t), h_{CC_{jC_2}}(t), t] \\ h_i(t) &= \varphi_i [h_{Ind_i}(t), h_{CC_{jC_i}}(t), t] \\ h_n(t) &= \varphi_n [h_{Ind_n}(t), h_{CC_{jC_n}}(t), t] \end{aligned} \quad (5)$$

نمادهای $h_{CC_{jC_n}}(t)$ ، $h_{Ind_n}(t)$ به ترتیب بیانگر مخاطرات مستقل و علت مشترک زیر سیستم $\{i = 1, 2, 3, \dots, n\}$ هستند. jC_i بیانگر زیرسیستم‌های اثرگذار و از نوع خرابی وابسته علت مشترک زیر سیستم i است. برای مثال با توجه به شکل ۲ فرض می‌کنیم خرابی در زیرسیستم خط زوج تحت تأثیر خرابی‌های زیرسیستم‌های سیگنالینگ (از نوع علت مشترک) باشد. یعنی داریم:

$$h_{Even Track}(t) = h_2(t) = \varphi_2 [h_{Ind_2}(t), h_{CC_{jC_2}}(t), t] \quad (6)$$

در اینجا jC_2 بیانگر زیرسیستم‌های اثرگذار از نوع خرابی وابسته علت مشترک زیر سیستم خط زوج است؛ یعنی $\{jC_2 = 1\}$. در این مقاله نرخ شکست زیر سیستم i با در نظر گرفتن شکست علت مشترک در معادله‌ی ۵ ($h_n(t)$) با استفاده از بسط تیلور به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\begin{aligned} h_i(t) &= \varphi_i \Big|_{h_{CC_{jC_i}}(t)=0} + \sum \frac{\partial \varphi_i}{\partial h_{CC_{jC_i}}} \Big|_{h_{CC_{jC_i}}(t)=0} + \\ & \sum \frac{\partial^2 \varphi_i}{2 \partial h_{CC_{jC_i}} \partial h_{CC_{jC_k}}} \Big|_{h_{CC_{jC_i}}(t)=0} + \\ & \sum \frac{\partial^2 \varphi_i}{2 \partial h_{CC_{jC_i}} \partial h_{CC_{jC_k}}} \Big|_{h_{CC_{jC_i}}(t)=0} + \\ & \sum \frac{\partial^2 \varphi_i}{\partial h_{CC_{jC_i}}^2} \Big|_{h_{Ind_{jC_i}}(t)=0, h_{CC_{jC_i}}(t)=0} \end{aligned} \quad (7)$$

زیرنویس J_{II} بیانگر زیرسیستم‌های اثرگذار زیرسیستم i دارای خرابی تعاملی و زیرنویس J_{CI} بیانگر زیرسیستم‌های اثرگذار زیرسیستم i دارای شکست علت مشترک می‌باشند. برای تأکید اثر نرخ خرابی علت مشترک بر نرخ خرابی زیرسیستم i ، معادله‌ی ۷ به صورت زیر بازنویسی می‌شود:

یا مخاطره نامیده می‌شود. به منظور سادگی محاسباتی و ریاضی در تحلیل خرابی وابسته‌ی یک سیستم ریلی با زیرسیستم‌های مفروض، تغییرات مخاطرات برآورد و سپس توابع توزیع خرابی سیستم و قابلیت اطمینان آن محاسبه می‌شود.

از جمله موثرترین عواملی که به صورت مستقیم بر روی قابلیت اطمینان سیستم تأثیر می‌گذارد، نرخ خرابی زیرسیستم‌ها و اجزای آن سیستم است. برای در نظر گرفتن وابستگی در زیرسیستم‌های ریلی، یک مدل ریاضی با استفاده از رویکرد بسط تیلور برای محاسبه نرخ مخاطره وابسته از نوع خرابی علت مشترک برای هر زیرسیستم ایجاد می‌شود و پس از بدست آوردن نرخ مخاطره، توابع توزیع شکست و قابلیت اطمینان هر زیر سیستم ریلی با در نظر گرفتن وابستگی محاسبه می‌گردد. احتمال شکست با استفاده از تابع توزیع شکست نشان داده می‌شود. رابطه‌ی بین تابع توزیع شکست و تابع مخاطره به صورت زیر است [۲]:

$$F(t) = 1 - \exp \left[- \int_0^t h(t) dt \right] \quad (3)$$

$F(t)$ تابع توزیع شکست و $h(t)$ تابع مخاطره یا نرخ خطر است.

بنابراین تابع توزیع شکست یک زیرسیستم یا یک جزء را می‌توان با استفاده از معادله ۳ (تابع توزیع شکست) در صورت برآورد مخاطره‌ی آن محاسبه نمود. تابع توزیع خرابی و مخاطره در صورت مستقل بودن خرابی‌ها به‌عنوان تابع توزیع خرابی مستقل و مخاطره‌ی مستقل نامیده می‌شوند. احتمال خرابی و مخاطره‌ی یک زیرسیستم یا یک جزء با وابستگی شکست با استفاده از تابع توزیع خرابی علت مشترک و تابع مخاطره‌ی علت مشترک توصیف می‌شوند. F_{Ind_i} و h_{Ind_i} به ترتیب بیانگر تابع توزیع شکست مستقل و تابع مخاطره‌ی مستقل یک زیرسیستم یا یک جزء i می‌باشند. F_{CC_i} و h_{CC_i} به ترتیب بیانگر تابع توزیع خرابی علت مشترک و تابع مخاطره‌ی علت مشترک یک زیرسیستم یا یک جزء i می‌باشند. به طور کلی نرخ خرابی به دو صورت در نظر گرفته می‌شود. ۱- نرخ خرابی ثابت وقتی است که نرخ خرابی اجزا یا زیرسیستم ثابت و مستقل از یکدیگر هستند و از تابع توزیع نمایی پیروی می‌کنند؛ ۲- نرخ خرابی وابسته به زمان که با افزایش زمان نرخ خرابی اجزا به دو صورت افزایشی و کاهشی تغییر می‌کند؛ مانند توزیع گاما، ویبول و ... مخاطره‌ی مستقل با یک مقدار ثابت یا تابعی از زمان است؛ یعنی:

اگر زیرسیستم E دومین شکست علت مشترک را با سایر زیرسیستم‌ها داشته باشد داریم:

$$h_{jC_E}(t) \geq h_{jC_E}(t)_B \geq h_{IE}(t). \quad (14)$$

$h_{IE}(t)$ نرخ خرابی مستقل زیرسیستم E، $h_{jC_E}(t)$ نرخ خرابی علت مشترک زیرسیستم E و $h_{jC_E}(t)_B$ نرخ خرابی علت مشترک زیرسیستم E پیش از خرابی می‌باشد. اگر $\beta_{jC_E}(t) = 0$ خرابی‌های علت مشترک زیرسیستم E هیچ تأثیری بر خرابی زیرسیستم E ندارد؛ پس می‌توان زیرنویس‌های i را از معادله ۱۱ حذف نمود و به فرم ماتریسی زیر نوشت:

$$\{h(t)\} = \{h_I(t)\} + \{\beta(t)h_{C_E}(t)_B\} \quad (15)$$

$h(t)$ یک بردار $N \times 1$ بیانگر مخاطره‌ی یک سیستم و $h_{C_E}(t)_B$ یک بردار $N \times 1$ نرخ خرابی علت مشترک زیرسیستم E پیش از خرابی و $h_I(t)$ یک بردار $N \times 1$ نرخ خرابی مستقل زیرسیستم و $\beta(t)$ ماتریس ضریب علت مشترک است. ویژگی ماتریس ضریب علت مشترک به صورت زیر است:

■ $\beta_{jC_i}(t) \geq 0 (i, j = 1, 2, 3, \dots, N)$ اگر $\beta_{jC_i}(t) = 0$ یعنی خرابی زیرسیستم j هیچ اثری بر خرابی زیرسیستم i ندارد. اگر $\beta_{jC_i}(t) = 1$ یعنی در صورت خرابی زیرسیستم j زیرسیستم i فوراً با شکست مواجه می‌شود.

■ $tr([\beta_{jC_i}(t)]) = 0$ بدین معنی است که یک زیرسیستم با خودش هیچ شکست علت مشترکی ندارد.

■ در سیستم‌های بزرگ و پیچیده، ماتریس ضرایب علت مشترک از نوع ماتریس خلوت یا ماتریس اسپارس می‌باشند؛ یعنی ماتریسی است که اکثر عناصر آن صفر باشد این امر هنگامی است که ابعاد ماتریس به حدی بزرگ شود که در حافظه ننگند و نیز تعداد زیادی از درایه‌های موجود در آن صفر باشد.

معادله‌ی ۱۱ نشان می‌دهد که مخاطره‌ی یک زیرسیستم با مخاطره‌ی مستقل و علت مشترک آن زیرسیستم برابر است. این مدل با مطالعاتی موردی در خصوص زیرسیستم‌های ریلی تصدیق می‌شود. می‌توان از معادلات ۱۱ و ۳، نتیجه‌ی زیر را به سادگی بدست آورد:

$$h_i(t) = \varphi_i [h_{Ind_i}(t), h_{CC_{jC_i}}(t), t] \quad (8)$$

$$= \varphi_i |_{h_{CC_{jC_i}}(t)=0} + \left[\sum \frac{\partial \varphi_i}{\partial h_{CC_{jC_i}}} |_{h_{CC_{jC_i}}(t)=0} + \sum \frac{\partial^2 \varphi_i}{4 \partial h_{CC_{jC_i}} \partial h_{CC_{jC_i}}} |_{h_{CC_{jC_i}}(t)=0} + \sum \frac{\partial^2 \varphi_i}{\partial h^2_{CC_{jC_i}}} |_{h_{Int_{jI_i}}(t)=0, h_{CC_{jC_i}}(t)=0+\dots} \right] \times h_{CC_{jC_i}}(t)$$

وقتی $h_{CC_{jC_i}}(t) = 0$ باشند، در این حالت، نرخ شکست زیرسیستم i برابر با نرخ شکست مستقل خود می‌باشد؛ عبارت اول در سمت راست معادله‌ی ۷، بیانگر نرخ شکست مستقل زیرسیستم i می‌باشد؛ یعنی:

$$\varphi_i |_{h_{Int_{jI_i}}(t)=0, h_{CC_{jC_i}}(t)=0} = h_{Ind_i}(t) \quad (9)$$

$\varphi_i |_{h_{CC_{jC_i}}(t)=0} \geq 0$ منطبق با ویژگی‌های نرخ مخاطره است. بنابراین، عبارات باقی مانده در معادله ۸ بیانگر اثر خرابی‌های زیرسیستم‌های تأثیرگذار بر خرابی زیرسیستم i می‌باشند؛ پس داریم:

$$\beta_{jC_i}(t) = \sum \frac{\partial \varphi_i}{\partial h_{CC_{jC_i}}} |_{h_{CC_{jC_i}}(t)=0} + \sum \frac{\partial^2 \varphi_i}{4 \partial h_{CC_{jC_i}} \partial h_{CC_{jC_i}}} |_{h_{CC_{jC_i}}(t)=0} + \sum \frac{\partial^2 \varphi_i}{\partial h^2_{CC_{jC_i}}} |_{h_{Int_{jI_i}}(t)=0, h_{CC_{jC_i}}(t)=0+\dots} \times h_{CC_{jC_i}}(t) \quad (10)$$

با جایگذاری معادلات ۸، ۹ و ۱۰ در معادله ۷ نرخ شکست زیرسیستم i که تحت تأثیر خرابی وابسته از نوع علت مشترک قرار دارد به صورت زیر بدست می‌آید:

$$h_{Depi}(t) = h_{Ind_i}(t) + \sum_{jC_i} \beta_{jC_i}(t) h_{CC_{jC_i}}(t) \quad (11)$$

برای t های کوچک (یعنی $t \rightarrow 0$)، فقط سه جمله‌ی اول بسط تیلور را برای تقریب $h_i(t)$ در نظر می‌گیریم. زیرنویس jC_i بیانگر زیرسیستم‌های اثرگذار زیرسیستم i دارای شکست علت مشترک می‌باشند. $\beta_{jC_i}(t)$ ضریب علت مشترک می‌باشد و بیانگر میزان تأثیر خرابی زیرسیستم‌های jC_i دارای شکست علت مشترک بر زیرسیستم i است.

اگر زیرسیستم E اولین شکست علت مشترک را با سایر زیرسیستم‌ها داشته باشد داریم:

$$h_{jC_E}(t) \geq h_{jC_E}(t)_B, \quad (12)$$

$$h_{jC_E}(t)_B = h_{IE}(t). \quad (13)$$

$$\beta_{jC_i}(t) = 0 \quad i=1,2,\dots,M \quad (19)$$

با جایگذاری معادله‌ی فوق در معادله نرخ شکست وابسته، خواهیم داشت:

$$\{h(t)\} = \{h_i(t)\} \quad i = 1,2,\dots,M \quad (20)$$

معادله ۲۰ نشان می‌دهد که نرخ شکست وابسته زیرسیستم i با نرخ شکست مستقل خود همانطور که مورد انتظار است، برآورد می‌شود.

مورد ویژه ۲:

هنگامی که شکست‌ها در بین زیرسیستم‌های یک سیستم یا اجزای یک زیرسیستم با وجود یک یا چند زیرسیستم مشترک و زیرسیستم‌های موازی فقط از نوع علت مشترک باشد و شکست‌ها در بین سایر زیرسیستم‌های یک سیستم یا اجزای یک زیرسیستم، مستقل از یکدیگر باشند ضرایب شکست علت مشترک به صورت زیر است:

جزء K دارای نرخ شکست مستقل h_{IK} است و شکست آن مستقل از وضعیت سایر اجزا است. فرض می‌شود هنگامی که جزء K با شکست مواجه می‌شود، جزء ۱، جزء ۲ و ... جزء N در یک سیستم در یک زمان با شکست مواجه می‌شوند. این حالت به‌عنوان حالت ویژه‌ای از شکست علت مشترک که توسط فلمینگ [۴۶] با توسعه مدل فاکتور بتا مورد مطالعه قرار گرفت، تعریف می‌شود. در این مورد، جزء K تنها جزء تأثیرگذار جزء ۱، جزء ۲ و ... جزء N است.

$$\beta_{jC_i}(t) = \begin{cases} 1 & i = 1,2,\dots,N \quad j = K \\ 0 & \text{others} \end{cases} \quad (21)$$

با جایگذاری معادله ۱۳ و ۲۱ در معادله ۱۱ داریم:

$$h_{Dep}(t) = \begin{cases} h_{Ind_i}(t) + h_{C_{IK}}(t) & i = 1,2,\dots,N \\ h_{C_{IK}}(t) & i = K \end{cases} \quad (22)$$

اگر $h_{Ind_i}(t) = \lambda_{Ii}$ و $h_{C_{IK}}(t) = \beta\lambda$ جایی که β ضریب علت مشترک است. معادله ۲۲ دقیقاً همان نتیجه‌ای را نشان می‌دهد که مدل فاکتور بتای عمومی ارائه می‌کند [۳۲]؛ به ویژه هنگامی که $h_{Ind_i}(t) = \lambda_{Ii}$ و $(i = 1,2,\dots,N)$.

۵. برآورد ضریب علت مشترک

روش‌ها و تکنیک‌های محاسبه‌ی ضرایب شکست‌های وابسته بسیار اندک است و ادبیات در این زمینه غنی نیست. ضریب

$$\left\{ F_{Depi}(t) = \left\{ 1 - \exp \left(- \int_0^t [h_{Ind_i}(t) + \sum_{jC_i} \beta_{jC_i}(t) h_{C_{jC_i}}(t)] dt \right) \right\} \right\} \quad (16)$$

F_{Depi} تابع توزیع شکست زیرسیستم i در سیستمی با خرابی وابسته از نوع علت مشترک می‌باشد؛ با توجه به معادله‌ی ۱۱ و بر اساس ساختار سیستم، تابع توزیع شکست کل سیستم ریلی F_{DepT} و قابلیت اطمینان آن R_{DepT} به صورت زیر قابل محاسبه است؛ بنابراین خواهیم داشت:

$$F_{DepT}(t) = F_{DepRollingstock}(t) \times (1 - (1 - F_{DepEvenTrack}(t)) \times (1 - F_{DepOddTrack}(t))) \times F_{DepSignalling}(t) \times F_{DepWagons}(t) \quad (17)$$

F_{DepT} = تابع توزیع شکست وابسته کل سیستم ریلی، $F_{DepRollingstock}$ = تابع توزیع شکست وابسته زیرسیستم کشنده (ناوگان)، $F_{DepEvenTrack}$ = تابع توزیع شکست وابسته زیرسیستم خط زوج، $F_{DepOddTrack}$ = تابع توزیع شکست وابسته زیرسیستم خط فرد، $F_{DepSignalling}$ = تابع توزیع شکست وابسته زیرسیستم سیگنالینگ، $F_{DepWagons}$ = تابع توزیع شکست وابسته زیرسیستم واگن‌ها.

$$R_{DepT}(t) = 1 - F_{DepT}(t) = R_{DepRollingstock} \times (1 - ((1 - R_{DepEvenTrack}(t)) \times (1 - R_{DepOddTrack}(t))) \times R_{DepSignalling} \times R_{DepWagons} \quad (18)$$

$R_{DepRollingstock}$ = تابع توزیع قابلیت اطمینان زیرسیستم کشنده (ناوگان) با در نظر گرفتن وابستگی، $R_{DepEvenTrack}$ = تابع توزیع قابلیت اطمینان خط زوج با در نظر گرفتن وابستگی، $R_{DepOddTrack}$ = تابع توزیع قابلیت اطمینان خط فرد با در نظر گرفتن وابستگی، $R_{DepSignalling}$ = تابع توزیع قابلیت اطمینان سیگنالینگ با در نظر گرفتن وابستگی، $R_{DepWagons}$ = تابع توزیع قابلیت اطمینان واگن‌ها با در نظر گرفتن وابستگی.

۴- توجیه مدل

در این بخش، معادله ۱۱ یعنی نرخ شکست وابسته از نوع علت مشترک، از طریق دو مورد ویژه زیر توجیه شده است.

مورد ۱:

هنگامی که شکست‌ها در بین زیرسیستم‌های یک سیستم یا اجزای یک زیرسیستم، مستقل از یکدیگر باشند، ضریب علت مشترک برابر صفر می‌شود.

نشریه مهندسی و مدیریت کیفیت

روش IEC 61508 برای برآورد کمی اثر چک لیست اقدامات به منظور کاهش خرابی‌های علت مشترک می‌باشد [۱۳]. در این مقاله به منظور برآورد ضریب شکست علت مشترک از روش چک لیست IEC62061 که یک روش کیفی بسیار ساده برای تخمین فاکتور β برای سیستم‌های عملیاتی با تقاضای بالا استفاده شده است و در مقایسه با چک لیست IEC 61508-6، ساده تر است و فقط ۱۴ سوال را بررسی می‌کند [۳۴]. مقدار میانگین هندسی نظرات ۸ خبره و مهندس حرفه‌ای برای تأثیر خرابی زیرسیستم سیگنالینگ روی خطوط زوج و فرد ریلی برابر عدد ۸۷.۳۳ شده است که با توجه به روش چک لیست IEC62061 مقدار بتای آن برابر ۰.۱ می‌گردد.

خرابی علت مشترک، ممکن است با استفاده از قضاوت‌های تخصصی، چک لیست‌ها، مدل‌های تخمینی (مدل جزئی یکپارچه) و استفاده از داده‌های تاریخی برآورد شود. منابع مختلف، دامنه‌ی β را تخمین می‌زنند. بررسی تجهیزات الکتریکی نشان می‌دهد که بهترین مقدار ممکن برابر ۰.۰۱ است در حالی که بدترین مقدار آن ۰.۳ می‌باشد. داده‌های نیروگاه هسته‌ای در مورد سیزده نوع از اجزا نشان داد که β از ۰.۰۳ تا ۰.۲۲ متغیر است و به طور متوسط ۰.۱ می‌باشد [۱۱،۳۳]. اگر داده‌ای در دسترس نباشد، می‌توان β را با استفاده از روش‌های مختلف ذکر شده برای مثال چک لیست هم‌فریز و چک لیست‌های IEC دو چک لیست IEC61508-6 و IEC62061 برای ارزیابی عملکرد مهندسی و پیشگیری از خرابی علت مشترک تخمین زد [۳۴].

جدول ۱. چک لیست IEC62061 [۳۴]	
امتیاز	مورد
تفکیک / افتراق	
۷	آیا کابل‌های سیگنال SRECS برای کانال‌های مجزا جدا از کانال‌های دیگر در همه‌ی موقعیت‌ها یا به اندازه‌ی کافی محافظت می‌شوند؟
۶	آیا در جایی که از رمزگذاری / رمزگشایی اطلاعات استفاده می‌شود، برای تشخیص خطاهای انتقال سیگنال کافی است؟
۷	آیا کابل‌های سیگنال SRECS و انرژی الکتریکی در همه‌ی موقعیت‌ها مجزا هستند یا به اندازه‌ی کافی محافظت می‌شوند؟
۴	اگر عناصر زیرسیستم بتوانند در شکست علت مشترک سهیم باشند، آیا آنها به‌عنوان دستگاه‌های جداگانه‌ی فیزیکی در محفظه‌های خود تهیه می‌شوند؟
تنوع / افزونگی	
۶	آیا زیرسیستم از فناوری‌های الکتریکی مختلفی استفاده می‌کند، به‌عنوان مثال، یک فناوری الکترونیکی یا فناوری الکترونیکی قابل برنامه‌ریزی و دیگری رله الکترومکانیکی؟
۵	آیا در زیرسیستم عناصری به کار رفته است که از اصول فیزیکی مختلفی استفاده می‌کنند (به‌عنوان مثال عناصر حسگر در درب محافظ که از تکنیک‌های مکانیکی و حسگر مغناطیسی استفاده می‌کنند)؟
۶	آیا زیرسیستم از عناصری با اختلاف زمانی در عملیات وظیفه‌ای و یا حالت‌های خرابی استفاده می‌کند؟
۶	آیا عناصر زیرسیستم بازه آزمایش تشخیصی کمتر از ۱ دقیقه دارند؟
پیشگیری / طراحی / کاربرد	
۳	آیا از ارتباط متقابل بین کانال‌های زیرسیستم به غیر از مواردی که برای اهداف آزمایش تشخیصی استفاده می‌گردد، جلوگیری می‌شود؟
ارزیابی / تحلیل	
۸	آیا نتایج حالت‌های خرابی و تجزیه و تحلیل اثرات آن برای ایجاد منابع شکست علت مشترک مورد بررسی قرار گرفته‌اند و آیا منابع از پیش تعیین شده شکست علت مشترک با طراحی حذف شده‌اند؟
۹	آیا خرابی‌های میدانی با بازخورد در طراحی تحلیل می‌شوند؟
صلاحیت / آموزش	
۴	آیا طراحان زیرسیستم علل و عواقب خرابی علت مشترک را درک می‌کنند؟
کنترل محیطی	
۷	آیا عناصر زیرسیستم بدون استفاده از کنترل محیط خارجی، همیشه در محدوده دما، رطوبت، خوردگی، گرد و غبار، لرزش و غیره که آزمایش شده‌اند، ممکن است کار کنند؟
۸	آیا زیرسیستم در برابر تأثیرات سوء ناشی از تداخل الکترومغناطیسی تا محدودیت‌های مشخص شده مصون است؟

برای مثال اگر بر اساس چک لیست، امتیاز کل ۷۰ باشد، بر اساس جدول فوق ضریب $\beta=2$ است. بنابراین مطابق با این چک لیست، مقدار میانگین هندسی نظرات ۸ خبره و مهندس حرفه ای برای تأثیر خرابی زیرسیستم سیگنالینگ روی خطوط زوج و فرد ریلی برابر ۸۷.۳۳ است که با توجه به روش چک لیست IEC62061 مقدار بتای آن برابر ۱٪ می‌گردد.

۶. برآورد قابلیت اطمینان

قابلیت اطمینان سیستم ریلی با ۵ زیرسیستم در مدل پیشنهادی با استفاده از نرم افزار متلب برآورد گردید. با توجه به بلوک دیاگرام قابلیت اطمینان سیستم ریلی که در شکل ۲ تشریح شده است، ساختار این سیستم سری- موازی است و قابلیت اطمینان آن از طریق معادله ۱۸ محاسبه می‌شود. جدول ۳ مقادیر هر پارامتر را در هر زیرسیستم در زمان $t=10000$ ساعت نشان می‌دهد.

چک لیست IEC62061 در مقایسه با چک لیست IEC 61508، به جای هشت دفاع، شش دفاع را مورد ارزیابی قرار می‌دهد: تفکیک / افتراق، تنوع / افزونگی، پیچیدگی / طراحی / کاربرد، ارزیابی / تجزیه و تحلیل، صلاحیت / آموزش، کنترل محیطی. همچنین در این چک لیست از سیستم امتیازدهی استفاده می‌شود. اگر پاسخ سوال "بله" باشد، امتیاز مربوطه بدست می‌آید. پس از پاسخ دادن به تمام سوالات، جمع‌بندی امتیازات آسان است. در آخر، از امتیاز کلی برای یافتن مقدار مربوط به عامل β در جدول ۲ استفاده می‌شود.

امتیاز کلی	فاکتور شکست علت مشترک (β)
< ۳۵	۱۰٪ (۰.۱)
۳۵-۶۶	۵٪ (۰.۰۵)
۶۵-۸۵	۳٪ (۰.۰۳)
۸۵-۱۰۰	۱٪ (۰.۰۱)
میانگین هندسی نظر ۸ خبره	۸۸.۳۳
مقدار بتا (خط فرد= خط زوج)	1%

جدول ۳. برآورد قابلیت اطمینان هر زیرسیستم با پارامترهای مفروض در مدل پیشنهادی ($T=10000$ hours)

زیرسیستم	$h_{Ind_i}(t)$	$\beta_{JC_i}(t)$	$h_{Depi}(t)$	$F_{Depi}(t)$	$R_{Depi}(t)$
سیگنالینگ = 1	0.00076923	0	0.000995	0.08571	0.93312
خط زوج = 2	0.001	0.01	0.001373	0.11627	0.90762
خط فرد = 3	0.001	0.01	0.001503	0.12653	0.90762
کشنده (لکوموتیو) = 4	0.00266	0	0.0031415	0.24629	0.78710
واگن‌ها = 5	0.003	0	0.0035007	0.27026	0.76338

سیستم در مدل چن بدون در نظر گرفتن خرابی وابسته بهینه است؛ لذا به‌عنوان قابلیت اطمینان هدف یا (R_{Target}) در نظر گرفته شده است. جدول ۴ نتایج پیش‌بینی قابلیت اطمینان زیرسیستم‌های مفروض در صنعت ریلی و درصد بهبود تخمین آن را در مدل پیشنهادی در مقایسه با مدل چن [۳۰] در زمان $t=10000$ ساعت نشان می‌دهد.

۷. مقایسه با سایر مدل‌ها و تحلیل حساسیت

در این بخش، نتایج مدل پیشنهادی با مدل چن (به‌عنوان مدل پایه و هدف زیرا فرض مدل چن استقلال خرابی‌ها است) که هیچ نوع وابستگی را در سیستم در نظر نمی‌گیرد، مقایسه شده و تحلیل حساسیت نسبت به تغییر ضریب خرابی علت مشترک ارائه شده است. قابلیت اطمینان هر یک از زیرسیستم‌ها و کل

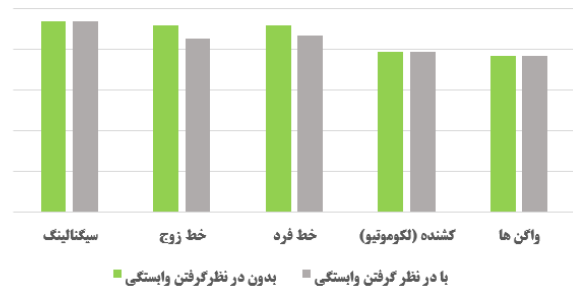
جدول ۴. مقایسه نتایج پیش‌بینی قابلیت اطمینان با مدل چن ($T=10000$ hours)

زیرسیستم	Chen. H. (2003) (R_{Target})	مدل پیشنهادی	$\Delta R_i = R_{Target} - R_i$	درصد بهبود
سیگنالینگ = 1	0.93312	0.93312	0	0
خط زوج = 2	0.91394	0.90762	0/00632	0/632
خط فرد = 3	0.91394	0.90762	0/00632	0/632
کشنده (لکوموتیو) = 4	0.78710	0.78710	0	0
واگن‌ها = 5	0.76338	0.76338	0	0
قابلیت اطمینان کل سیستم	0.55651	0.55588	0/00063	0/063

خرابی وابسته‌ی مدلی (چن) تأثیر می‌گذارند، تجزیه و تحلیل حساسیت را روی ضریب خرابی علت مشترک $\beta_{jC_i}(t)$ در زمان $T=10000$ Hours در چهار حالت انجام شده است. نتایج تخصیص تحت تأثیر مقادیر مختلف $\beta_{jC_i}(t)$ مطابق جدول ۵ بدست آمده است. حالت اول، مقادیر $\beta_{jC_i}(t)$ تا ۰.۳ افزایش یافته است؛ نتیجه حاکی از کاهش مقدار قابلیت اطمینان زیرسیستم‌های متأثر خط زوج و خط فرد سیستم ریلی است. در حالت دوم، $\beta_{jC_i}(t)$ تا ۰.۹ افزایش یافته است که مقادیر کاهش قابلیت اطمینان زیرسیستم‌های متأثر بسیار بیشتر از حالت اول می‌باشد و به مقدار ۰.۱۸ کاهش یافته است. حالت سوم $\beta_{jC_i}(t)$ را به مقدار ۰.۰۰۱ تقلیل دادیم، در این حالت مقدار قابلیت اطمینان زیرسیستم‌های متأثر از خرابی علت مشترک یعنی زیرسیستم‌های خط زوج و فرد که از زیرسیستم سیگنالینگ به‌عنوان عامل مشترک خرابی تأثیر می‌پذیرند، افزایش یافته و به مقدار قابلیت اطمینان هدف نزدیک شده است (به مقدار ۰.۵۴ رسیده است). در حالت چهارم مقدار $\beta_{jC_i}(t)$ به مقدار ۱ افزایش دادیم؛ نتیجه بیانگر تأثیر بسیار شدید خرابی علت مشترک بر قابلیت اطمینان زیرسیستم‌ها و قابلیت اطمینان کل سیستم است. نرخ شکست وابسته زیرسیستم‌هایی که دارای افزایش در مقادیر ضریب علت مشترک می‌باشند به طور کلی افزایش و قابلیت اطمینان کاهش یافته است. مقدار بزرگتر ضریب $\beta_{jC_i}(t)$ می‌تواند سیستم را با مشکل جدی مواجه نماید. در صورتی که R_{System} افزایش یابد، قابلیت اطمینان هر زیرسیستم افزایش و ضریب علت مشترک کاهش می‌یابد. به منظور افزایش قابلیت اطمینان می‌توان با در نظر گرفتن تأثیرات زیرسیستم‌ها بر یکدیگر در مرحله طراحی، تا جای ممکن تأثیرات متقابل را کاهش داده و در نهایت از بروز وابستگی‌های پیچیده در سیستم کاست تا سطحی که بتوان به قابلیت اطمینان هدف (یعنی تقریباً اثرات شکست‌های وابسته صفر) دست یافت.

بر اساس مدل‌های مختلف موجود در ادبیات که شکست‌های وابسته در سیستم‌های مکانیکی، الکترونیکی و ... را در نظر می‌گیرند، تخمین قابلیت اطمینان دقیق‌تر می‌گردد. در زیرسیستم‌های ریلی با در نظر گرفتن اثرات شکست علت مشترک، مقدار قابلیت اطمینان نسبت به مدل چن که در آن فرض وابستگی شکست‌ها لحاظ نمی‌گردد، کمتر می‌شود و برآورد دقیق‌تر است. شکل ۴ تابع توزیع قابلیت اطمینان را با در نظر گرفتن خرابی علت مشترک و بدون در نظر گرفتن خرابی علت مشترک بین زیرسیستم‌ها نشان می‌دهد. با در نظر گرفتن خرابی علت مشترک، قابلیت اطمینان زیرسیستم‌های متأثر شامل زیرسیستم خط زوج و زیرسیستم خط فرد دستخوش تغییراتی می‌گردد که قابل چشم‌پوشی نمی‌باشد؛ زیرا با توجه به تسریع روند تخریب به دلیل تعاملات شکست، ممکن است سیستم زودتر با شکست مواجه شود. سایر زیرسیستم‌هایی که از خرابی علت مشترک متأثر نیستند، مقادیر قابلیت اطمینان آنها دستخوش تغییر نشده است.

قابلیت اطمینان سیستم ریلی در دو مدل



شکل ۴. مقایسه قابلیت اطمینان زیرسیستم‌های ریلی با در نظر گرفتن خرابی علت مشترک و بدون در نظر گرفتن خرابی علت مشترک

تحلیل حساسیت

برای تجزیه و تحلیل اینکه چگونه پارامترهای درگیر در مدل بر قابلیت اطمینان هدف زیرسیستم‌ها (بدون در نظر گرفتن

جدول ۵. مقادیر قابلیت اطمینان زیرسیستم‌ها با مقادیر متفاوت ضریب علت مشترک $\beta_{jC_i}(t)$						
$R_{Target} = 0.55651$	$R_{System} = 0.4939$			$R_{System} = 0.1858$		
زیرسیستم	$\beta_{jC_i}(t)$	$h_{Dep_i}(t)$	$R_{Dep_i}(t)$	$\beta_{jC_i}(t)$	$h_{Dep_i}(t)$	$R_{Dep_i}(t)$
سیگنالینگ 1=	۰	۰.۰۰۰۹۹	۰.۹۱۴۳	۰	۰.۰۰۳۶	۰.۷۲۳۳
خط زوج 2=	۰.۳	۰.۰۰۱۵	۰.۸۷۱۶	۰.۹	۰.۰۰۵۰	۰.۶۳۶۳
خط فرد 3=	۰.۳	۰.۰۰۱۷	۰.۸۶۱۵	۰.۹	۰.۰۰۵۰	۰.۶۳۶۳
کشنده (لکوموتیو) 4=	۰	۰.۰۰۳۱	۰.۷۵۳۷	۰	۰.۰۰۶۷	۰.۵۴۵۰
واگن‌ها 5=	۰	۰.۰۰۳۵	۰.۷۳۹۷	۰	۰.۰۰۶۱	۰.۵۴۳۳

$R_{Target} = 0.55651$	$R_{System} = 0.54501$			$R_{System} = 0.06018$		
زیرسیستم	$\beta_{jC_i}(t)$	$h_{Dep_i}(t)$	$R_{Dep_i}(t)$	$\beta_{jC_i}(t)$	$h_{Dep_i}(t)$	$R_{Dep_i}(t)$
سیگنالینگ $I=$	۰	۰.۰۰۰۹۹	۰.۹۱۴۳	۰	۰.۰۰۳۶	۰.۷۲۳۳
خط زوج $2=$	۰.۰۰۱	۰.۰۰۱۵	۰.۹۰۲۳	۱	۰.۰۰۵۰	۰.۵۳۶۳
خط فرد $3=$	۰.۰۰۱	۰.۰۰۱۷	۰.۹۰۱۹	۱	۰.۰۰۵۰	۰.۵۳۶۳
کشنده (لکوموتیو) $4=$	۰	۰.۰۰۳۱	۰.۷۵۳۷	۰	۰.۰۰۶۷	۰.۵۴۵۰
واگن‌ها $5=$	۰	۰.۰۰۳۵	۰.۷۲۹۷	۰	۰.۰۰۶۸	۰.۵۴۳۳

۸. نتیجه‌گیری

دارای ترافیک بالایی در ساعات مختلف شبانه روز است سبب بروز تاخیرات انتشاری یا گلوله برفی می‌گردد و در صورت پیش‌بینی دقیق‌تر و اقدامات مدیریتی پیشگیرانه از قبیل مدیریت اثربخش دارایی‌های ریلی (انجام نت یا تعویض قطعات زیرسیستم‌ها در زمان مناسب)، می‌توان قابلیت اطمینان شبکه ریلی را ارتقا داد و عملکرد آن را بهبود بخشید. عدم توجه به اثرات خرابی‌های وابسته به تنزل سریع‌تر کل سیستم کمک می‌کند و می‌تواند تبعات جبران‌ناپذیری داشته باشد.

۹. منابع

- [1] Genser, R., & Grassl, A. (1974). State of reliability effort of the European railways. IEEE Transactions on reliability, 23(3), 156-161.
- [2] Billinton, R., & Allan, R. N. (1992). Reliability evaluation of engineering systems (Vol. 792). New York: Plenum press.
- [3] Mosleh, A., (1991). Dependent failure analysis. Reliability Engineering and System Safety. pp. 243-250
- [4] Hoyland, A., & Rausand, M. (2009). System reliability theory: models and statistical methods. John Wiley & Sons.
- [5] Sun, Y., Ma, L., Mathew, J., & Zhang, S. (2006). An analytical model for interactive failures. Reliability Engineering & System Safety, 91(5), 495-504.
- [6] Rausand, M., & Lundteigen, M. A. (2014). Reliability of safety-critical systems: theory and applications: John Wiley & Sons.
- [7] Zhou, T., Droguett, E. L., & Modarres, M. (2020). A common cause failure model

کاهش قابلیت اطمینان و انتشار تاخیر در سطح شبکه‌ی ریلی، سبب کاهش ایمنی، نارضایتی مسافران، خسارتی شدن قطارها و کاهش درآمد شرکت‌های حمل و نقل ریلی می‌گردد. عدم در نظر گرفتن وابستگی در ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم‌های پیچیده با وابستگی‌های زیاد مانند سیستم ریلی می‌تواند به برآورد خوش‌بینانه‌ی قابلیت اطمینان منتج شود و تبعات کاهش قابلیت اطمینان در سیستم نادیده گرفته شود. شکست‌های وابسته بین زیرسیستم‌های ریلی می‌تواند سبب تسریع در شکست سیستم گردد زیرا سیستم‌های ریلی سطح بالایی از وابستگی‌ها اعم از یک جهت و متقابل را نشان می‌دهند؛ یعنی خرابی برخی زیرسیستم‌ها، خرابی دیگر زیرسیستم‌ها را نیز تحت تأثیر قرار خواهد داد و بالعکس. این مقاله یک مدل ریاضی را با استفاده از رویکرد بسط تیلور برای تحلیل کمی شکست وابسته از نوع علت مشترک در صنعت ریلی توسعه می‌دهد؛ در مقایسه با مدل چن، مقداری بهبود در دقت پیش‌بینی قابلیت اطمینان با احتساب خرابی علت مشترک قابل مشاهده است. در این پژوهش کوشش شده تا با در نظر گرفتن وابستگی، صحت برآورد قابلیت اطمینان سیستم ریلی با مطالعه موردی سیستم ریلی محور خراسان بهبود یابد. نتایج کاربردی حاصل از مدل ارائه شده برای محور خراسان با توجه به قضاوت خبرگان در برآورد ضریب تأثیر خرابی علت مشترک با استفاده از استاندارد IEC62061 منتج به بهبود دقت پیش‌بینی به مقدار جزئی ۰.۰۶ درصد شده است. این تأثیر هرچند جزئی است؛ اما بیانگر تأثیر احتساب خرابی‌های وابسته (در این تحقیق از نوع علت مشترک) در عملکرد سیستم ریلی و مدیریت شبکه می‌باشد. در برخی موارد تأثیرات خرابی‌های وابسته از نوع علت مشترک که ناشی از زیرسیستم سیگنالینگ است در برآورد قابلیت اطمینان شبکه ریلی محور خراسان که

- in Computer Aided Verification: 24th International Conference, CAV 2012. Berkeley, CA, USA
- [17] EN50126. (1999). Railway Applications: The specification and demonstration of Reliability, Availability, Maintainability and Safety. CENELEC, International Electrotechnical Commission, IEC
- [18] Diab, E. Badami, M. El-Geneidy. A, 2015, Bus Transit Service Reliability and Improvement Strategies: Integrating the Perspectives of Passengers and Transit Agencies In North America, International Journal of Transport Reviews, Pages 292-328
- [19] Cheng. Y, Tsung LU. C, Lin Lu. C, comprehensive approach to allocate reliability and cost in passenger rail system design, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, no. 2608, 2017, pp. 86-95
- [20] Čepin M. (2011) Reliability Block Diagram. In: Assessment of Power System Reliability. Springer, London. https://doi.org/10.1007/978-0-85729-688-7_9
- [21] Gilchrist, W. (1993). Modelling failure modes and effects analysis. International Journal of Quality & Reliability Management. 10(5):16–23.
- [22] Dinmohammadi, F., Alkali, B., Shafiee, M., Bérenguer, C., & Labib, A. (2016). Risk evaluation of railway rolling stock failures using FMECA technique: a case study of passenger door system. Urban Rail Transit, 2, 128-145.
- [23] Bemment, S. D., Goodall, R. M., Dixon, R., & Ward, C. P. (2017). Improving the reliability and availability of railway track switching by analysing historical failure data and introducing functionally redundant subsystems, Journal of Rail and Rapid Transit, 2017, 0(0) pp. 1–18
- [24] Du, X., Yang, Z., Chen, C., Li, X., & Pecht, M. G. (2018). Reliability analysis of repairable systems based on a two-segment bathtub-shaped failure intensity function. IEEE Access, 6, 52374-52384.
- [25] Conradie, P. D. F., Fourie, C. J., Vlok, P. J., & Treurnicht, N. F. (2015). for components under age-related degradation. Reliability Engineering & System Safety, 195, 106699.
- [8] Humphreyes, P., & Johnston, B. D. (1987). Dependent Failure Procedure Guide SRD-R-418. United Kingdom Atomic Energy Authority, Safety and Reliability Directorate.
- [9] Greig, G. L. (1993). Second moment reliability analysis of redundant systems with dependent failures. Reliability Engineering & System Safety, 41(1), 57-70.
- [10] Fitzmaurice, R. and Fitzpatrick, D. (2010). Cascading Failure in a Complex System Model for Power Systems: Operating and Planning Policy, Doctor of Philosophy thesis, University College Dublin.
- [11] NUREG-75/014., Reactor safety: An assessment of accident risk in us commercial nuclear power plants, technical report. U.S. Nuclear Regulatory Commission, WASH-1400, Washington DC, (1975).
- [12] Pourali, M. (2013). Incorporating common cause failures in mission-critical facilities reliability analysis. IEEE Transactions on Industry Applications, 50(4), 2883-2890.
- [13] Pozsgai, P., Neher, W., & Bertsche, B. (2002, June). Models to consider dependence in reliability calculation for systems consisting of mechanical components. In 3rd International Conference on Mathematical Methods in Reliability, Trondheim, Norway (pp. 539-542).
- [14] Fukuoka, H. (2002). Reliability evaluation method for the railway system: A model for complicated dependency. Quarterly Report of RTRI, 43(4), 192-196.
- [15] Pistolas, C. V. (2016). Decision making for railway operations using RAM analysis. Risk, Reliability and Safety: Innovating Theory and Practice, 2712-2718.
- [16] Cimatti, A., et al., (2012). Formal Verification and Validation of ERTMS Industrial Railway Train Spacing System,

- for Railway Asset Management. PhD Thesis, University of Technology of Troyes (UTT).
- [32] Fleming, K. N. (1974). Reliability model for common mode failures in redundant safety systems (No. GA-A-13284). General Atomics, San Diego, CA (United States).
- [33] Borcsok, J., Schaefer, S., & Ugljesa, E. (2007, April). Estimation and evaluation of common cause failures. In Second International Conference on Systems (ICONS'07) (pp. 41-41). IEEE.
- [34] Sun, W. (2013). Determination of beta-factors for safety instrumented systems (Master's thesis, Institutt for produksjons- og kvalitetsteknikk).
- [35] Xie, L., Lundteigen, M. and Liu, Y. (2018). Common cause failures and cascading failures in technical systems: Similarities, differences and barriers. European safety and reliability Conference. Trondheim, Norway. DOI: 10.1201/9781351174664-302
- [36] Singh, P., & Singh, L. K. (2021). "Modeling and Measuring Common Cause Failures in Measurement of Reliability of Nuclear Power Plant Systems," in *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 70, pp. 1-8, 2021, Art no. 3001608, doi: 10.1109/TIM.2021.3105265.
- Quantifying system reliability in rail transportation in an ageing fleet environment. *South African Journal of Industrial Engineering*, 26(2), 128-142.
- [26] Patra, A. P., Dersin, P. and Kumar, U. (2009). Cost effective maintenance policy: a case study. Accepted for publication in the *International Journal of Performability Engineering*
- [27] Rong Zhang, R, Lu Li, Jian. W. (2019). Reliability analysis on railway transport chain, *International Journal of Transportation Science and Technology* 8, 192–201, <https://doi.org/10.1016/j.ijtst.2018.11.004>
- [28] Al-Douri, Y. K., Tretten, P. and Karim, R. (2016). Improvement of railway performance: a study of Swedish railway infrastructure, *J. Mod. Transport*. 24(1):22–37
- [29] Navas, M. A., Sancho, C., & Carpio, J. (2017). Reliability analysis in railway repairable systems. *International Journal of Quality & Reliability Management*.
- [30] Chen, H., (2003). New models for measuring the reliability performance of train service, *European Safety and Reliability Conference*, 15-18 June 2003, Maastricht, The Netherlands, pp. 397-402
- [31] Hui, S. (2015). Maintenance Modelling, Simulation and Performance Assessment

The Effect of Common Cause Failure in Predicting the Reliability of the Railway Industry

Farzaneh Nazarizadeh

PhD Student, Faculty of Management, Shahid Beheshti University, Tehran. Iran.
farzaneh.nazarizadeh@yahoo.com

Akbar Alem Tabriz*

(Corresponding author), Full Professor, Faculty of Management, Shahid Beheshti University, Tehran. Iran. a-tabriz@sbu.ac.ir

Mustafa Zandieh

Full Professor, Faculty of Management, Shahid Beheshti University, Tehran. Iran. m-zandieh@sbu.ac.ir

Abbas Rad

Assistant Professor, Faculty of Management, Shahid Beheshti University, Tehran. Iran. a_raad@sbu.ac.ir

Abstract

Dependency in systems is one of the problems that reliability faces. Dependence increases the probability of failure and can affect the performance of a system. Regardless of the dependency, reliability is optimistically estimated and the system fails sooner than expected. In the rail industry, subsystems show a high level of dependence due to their high dynamics and complexity. Identifying dependencies and dependent failures based on the block diagram of reliability and structure of the rail system can affect the more accurate prediction of reliability and prevent irreparable consequences. This paper presents a new mathematical model for predicting reliability in the rail industry by considering common cause failure. The results show an increase in accuracy in predicting reliability.

Keywords: Reliability, Dependent failure, Failure rate, Railway industry

Introduction

Reliability is one of the most important quality characteristics of large and complex components, products and systems, especially the railway industry. The best results from reliable performance can be achieved with well-designed systems [1]. Various models and approaches have been developed to analyze or describe reliability, predict operational behavior, and prevent failures. Reliability assessment methods are generally classified into two categories: analytical and methods based on simulation and other techniques [2]. Conventional methods of system reliability analysis are mainly associated with the assumption of failure independence. The assumption of independence is usually considered due to lack of information and leads to optimistic estimates of reliability in systems. Because industry experience suggests that the assumption of failure independence in different scenarios is unrealistic and leads to increased risk and unacceptable errors; Therefore, in order to analyze the

dependencies, the idea of dependent failures was introduced. As described in the article by Mosleh [3], Hoyland and Rasand [4], Sun [5], Rasand and Lantjin [6], Zhou et al. [7], etc., the issue of dependent failures over decades has been considered by researchers. Several classifications of dependency types have been proposed by researchers in systems. The most famous is the Humphrey and Johnson classification, published by them in an official document in the Atomic Energy Organization of the United Kingdom in 1987, which defines the types of failures that occur in a system due to dependency. This classification is presented in Figure 1.

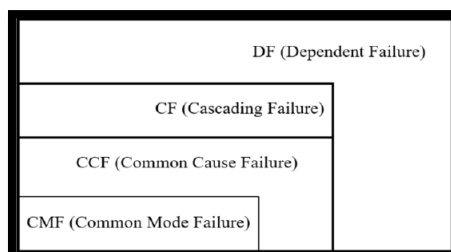


Figure 1. Classification of types of dependent failures [9]

Types of dependent failures include cascade failure, common cause failure, common state failure, negative dependent failure [4]. Cascade failure results from the failure of one component, then leads to a series of failures of other components. In addition to models such as Manchester model, hidden failure model, cascade model in power distribution systems, cascade failure is also analyzed using independent failure approaches such as fault tree analysis, reliability block diagram and Markov model [9, 10]. Common cause failure is a type of dependent failure in which two or more components simultaneously or over a short period of time and as a direct result of a common cause fail. This type of failure eliminates the redundancy or diversity used to improve reliability in the system [7,11,12]. Common-state failures are specific to common failures in which multiple systems and equipment fail in one state and for one reason. That is, failures with the same events or effects [13]. Usually methods such as basic parameter model, root square models, beta factor models and multivariate exponential distribution models, multiple Greek letter model, alpha factor model, state diagram method and lethal shock model (binomial failure rate), Used to analyze common cause and common state failures [7,14]. Negative dependent failures can prevent further failures of other components in a system and are often analyzed using independent failure approaches such as error tree analysis, reliability block diagram, and Markov model [5]. Although different methods have been developed for system modeling, limited methods have been used to model reliability in the rail industry. These methods and models are also generally developed without considering the dependency assumption. The railway industry is generally considered as a complex network with dynamic activities and operates through coordination with its various subsystems such as infrastructure, fleet, signaling and communications in freight and passenger transport [15]. Three European standards EN 50126, EN 50128 and EN 50129 are required to run a railway project, and electronic safety systems, signaling systems and other railway equipment are described in these standards according to the system life cycle [16]. The basis of reliability modeling is based on EN 50126 [17]. According to this standard, safety and availability of the railway network are the most important elements in this industry and the railway industry can achieve them only if it adheres to all the requirements of reliability and maintenance. There are mainly two common views in reliability research in the rail industry: the view of the network user and the provider of the network or rail transport companies and reliability modeling are divided into two categories: system reliability modeling and service reliability modeling. [18,19]. Continuous activity in the rail system increases the risk of subsystem failure. For risk analysis of railway subsystems,

generally using traditional techniques such as fault tree [9], block diagram of reliability [20], analysis of failures and effects (FMEA) [21], critical analysis of failure situations and its effects (FMECA) [22] and ... are used. Bement et al. [23] used the reliability block diagram with a simulation approach to model the availability of traditional rail line switches. Din Mohammadi et al. [22] analyzed the potential risks of unexpected breakdowns in the rail fleet using the FMECA method in the Scottish rail network. Su et al. [24] used statistical analysis for several categories of disturbances and sources and their impact on reliability in China's high-speed rail networks. Conrady et al. [25] proposed a method for quantifying the reliability of rail fleet assets using breakdown statistics. Patra [26] investigated the application of RAMS analysis in the maintenance planning of rail infrastructure repairs. Zhang et al. [27] proposed a model for determining and evaluating the reliability of the railway container transport chain using an innovative algorithm such as mathematical iteration algorithms such as Hasfar and Lind-Reckitz-Fessler (HL-RF). Al-Douri et al. [28] sought to improve the performance of railways with the aim of ensuring accessibility, reliability, safety and reducing maintenance costs. Novas et al. [29] showed the effect of repeated failures in the interval of failure (TBF) for the rejection of HPP and NHPP models in the Madrid Metro. A network-type reliability assessment model called the typical state effect diagram (TSID) was proposed by Foucault [20], which has a special ability to describe general relationships. Chen [30] proposed two mathematical models for measuring the reliability of the rail system and train timing based on the basic theory of probability. The general model of rail system reliability in his research is a function of the reliability of rail industry subsystems, including infrastructure and fleet, assuming failure independence between subsystems. Due to the relationships and complexities between rail subsystems, different types of dependent failures are possible. The literature on modeling the reliability of the railway industry is not rich and the assumption of dependence and determining the type of failure in studies has not been considered. This paper develops an analytical model for assessing the reliability of the rail industry by considering common cause failure. The structure of this article is as follows. In Section 2, the identification of the rail system is presented. In Section 3, an analytical model of reliability assessment in the rail industry is proposed. The model justification is described in Section 4. Section 5 presents methods for determining the common cause coefficient. Model estimation in Section 6, comparison with other models and sensitivity analysis in Section 7 and conclusions are described in Section 8.

Identification the rail system

To create a reliability model in the railway industry by considering the types of interdependent failures between subsystems, it is necessary to identify all the structures, subsystems and activities that are involved in causing the failures [31]. Given the nature of the rail system and its complex configuration of multiple subsystems and components, it is very important to identify the basic and important subsystems in order to develop a modeling framework. In this study, using the system structure separation diagram and reliability block diagram, relationships were analyzed and dependency was assessed and dependent failure was identified among the assumed subsystems of a rail system. Figure 2 shows the performance of a rail system using a block diagram of reliability. The structure of a rail system is assumed to include subsystems such as line (two parallel and odd parallel lines), signaling,

tractor, and wagon, as shown in Figure 3. Each of these subsystems has its own elements.

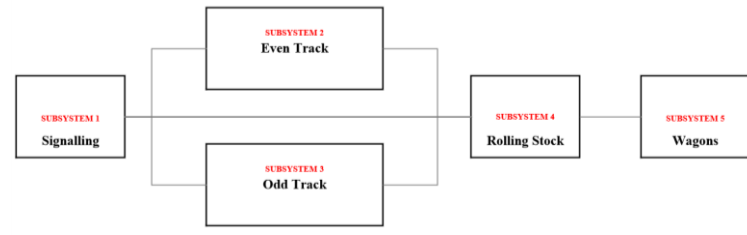


Figure 2. Subsystem reliability block diagram

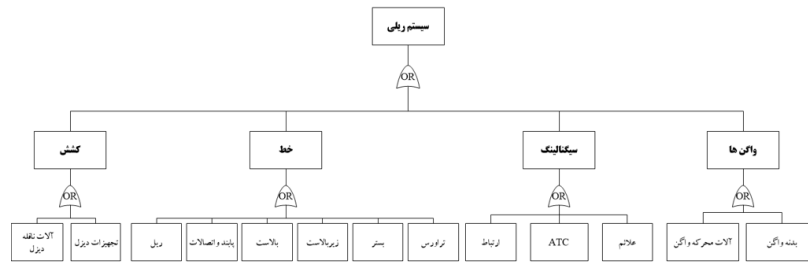


Figure 3. The structure of a hypothetical rail system

After identifying the systems and subsystems, their performance and sequence were examined, and with the help of these analyzes, the dependencies and the type of possible failures that occur based on these dependencies were identified among the subsystems. Dependent failure between rail subsystems was identified as a common cause (effect of signal subsystem failure, which is a common cause of failure in even and odd lines). Signaling subsystem components can simultaneously act as a common cause of failure of line subsystem performance (even line and odd line); For example, the circuit board is one of the components of the signaling subsystem and to detect the presence of trains and control safety systems such as signal systems, needle exchange systems, etc. by forming an electrical circuit with rails and shorting it by vehicle axles. Riley is used. The signal is controlled by the line circuit by detecting the presence of rail vehicles. All signal equipment is based on line circuit work. Failure in the line circuit causes failure in the successful operation of the line and its components such as needles and junctions; This example is an example of common cause failure in this system. In the next section, an analytical model of the reliability of the whole system is presented, considering the dependent failure of the common cause typ.

3. Analytical model of dependent failure in the railway industry

In this section, first the model hypotheses are as follows and then the model is presented. The model assumptions are as follows:

- 1- The reliability function of a rail system with assumed subsystems is known.
- 2- Topology and configuration of a rail system based on block diagram of reliability and system structure is known.
- 3- The railway is two lanes (even line and odd line).
- 4- Subsystem failure is a gradual process with a positive increase.
- 5- There is a common cause of failure in the system.
- 6- Repair maintenance measures are not included in the model.
- 7- Positive correlation between subsystem failure is considered.

Rail system reliability is a function of the reliability of subsystems and components of that system. According to the reliability diagram block, assuming that the railway subsystems include line, signaling, fleet and wagons, the general reliability model of the assumed railway system is expressed as follows [30]:

To calculate the reliability using the reliability block diagram, the following relation can be expressed:

$$R_T = f(R_{Rollingstock}, R_{Track}, R_{Signalling}, R_{Wagons}) \quad (1)$$

Where, R_T is Reliability of the whole railway system and $R_{Rollingstock}$ is Reliability of rolling stock subsystem and R_{Track} is Reliability of track subsystem and $R_{Signalling}$ is Reliability of Signaling subsystem and R_{Wagons} is Reliability of wagons. Equation 1 states that based on the system structure, the reliability of the railway system is a function of the reliability of its subsystems [21]. Assumed railway subsystems include track (even track and odd track), signaling, rolling stock and power supply; when the assumption of statistical independent of failure between each subsystem is applied, this equation can be simplified as follows:

$$R_T = R_{Rollingstock} \cdot R_{Track} \cdot R_{Signalling} \cdot R_{Wagons} + a(w) \quad (2)$$

The above equation states that the total reliability of the rail system is a function of the reliability of its subsystems. When the assumption of failure between subsystems is statistically assumed, the term $a(w)$ refers to the uncertainty resulting from interactions between subsystems, and the assumption of independence between subsystems actually causes an unacceptable error. Therefore, in this section, the dependent failure analysis of the common cause type in the reliability prediction model of the railway industry is discussed. The effect of a subsystem or component failure on other subsystems or components has two consequences [5]: A failure of a subsystem or component causes other (affected) subsystems or components to fail immediately. Failure of a subsystem or an (effective) component accelerates the failure of other damaged subsystems or components. As a result of these two consequences, the probability of failure of other damaged subsystems or components increases and their failure rate increases. A subsystem or component can be effective or influential, or both. A failure of a subsystem or component without being affected by other failures is called independent failure of a subsystem or component. Similarly, the probability of failure of this subsystem or component is referred to as the probability of its independent failure. If a subsystem or component is affected by the failure of other subsystems or components, the probability of failure of a subsystem or component will be different from the probability of its independent failure. The probability of subsystem or component failure increases with the effects of other failures. The failure rate in reliability theory is often referred to as the risk or risk rate function. For the sake of computational and mathematical simplicity in the dependent failure analysis of a rail system with the assumed subsystems, the hazard changes are estimated and then the system failure distribution functions and its reliability are calculated.

One of the most effective factors that directly affect the reliability of the system is the failure rate of subsystems and components of that system. To consider the dependence on rail subsystems, a mathematical model is developed using Taylor's expansion approach to calculate the dependent risk rate despite the common cause failure for each subsystem, and after obtaining the common cause dependent failure rate, the

functions The failure distribution and reliability of each rail subsystem are calculated by considering the dependencies.

The probability of failure is shown using the failure distribution function. The relationship between the failure distribution function and the risk function is as follows [2]:

$$F(t) = 1 - \exp\left[-\int_0^t h(t)dt\right] \quad (3)$$

Where, $F(t)$ is the failure distribution function and $h(t)$ is the failure rate function.

Therefore, the failure distribution function of a subsystem or component can be calculated using Equation 3 (failure distribution function) if its failure rate is estimated. If the failures are independent, failure distribution function and failure rate called as independent failure distribution function and independent failure rate. The probability of failure and failure rate of a subsystem or component with dependent failures is described using the interactive failure distribution function and the interactive failure rate and the common cause failure distribution function and common cause failure rate.

Where F_{Ind_i} and h_{Ind_i} represent the independent failure distribution function and the independent hazard function of a subsystem or component i , respectively. F_{Int_i} and h_{Int_i} represent the interactive failure distribution function and the interactive failure rate of a subsystem or component i , respectively. F_{CC_i} and h_{CC_i} represent the common cause failure distribution function and the common cause failure rate of a subsystem or component i , respectively. In general, the failure rate is considered in two ways. 1- Fixed failure rate is when the failure rate of components or subsystems are fixed and independent of each other and follow the exponential distribution function; 2- Time dependent failure rate, which changes with increasing and decreasing component rate with increasing time; Such as gamma distribution, Weibull, etc.

Independent failure rate is either a fixed amount or a function of time, i.e.

$$h_{Ind_i} = \begin{cases} \lambda_{Ind_i} & \text{random failures} \\ \varphi_i(t) & \text{other failures} \end{cases} \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (4)$$

n is the number of subsystems or subsystem components. From Equations 3 and 4, it can be seen that the failure rate of a subsystem is a function of the independent and dependent risks of that subsystem (i.e., the subsystems that affect each other). If in a railway system whose subsystems have two type of dependent failures such as the common cause failure and interactive failure and include i ($i = 1, 2, 3, \dots, n$) subsystems, the failure rate of the subsystems can express as follows:

$$\begin{aligned} h_1(t) &= \varphi_1 \left[h_{Ind_1}(t), h_{Int_{j1}}(t), h_{CC_{jC_1}}(t), t \right] \\ h_2(t) &= \varphi_2 \left[h_{Ind_2}(t), h_{Int_{j12}}(t), h_{CC_{jC_2}}(t), t \right] \\ \dots h_i(t) &= \varphi_i \left[h_{Ind_i}(t), h_{Int_{jii}}(t), h_{CC_{jC_i}}(t), t \right] \\ \dots h_n(t) &= \varphi_n \left[h_{Ind_n}(t), h_{Int_{jIn}}(t), h_{CC_{jC_n}}(t), t \right] \end{aligned} \quad (5)$$

Where $h_{Ind_n}(t)$, $h_{Int_{jIn}}(t)$ and $h_{CC_{jC_n}}(t)$ represent the independent failure rate, interactive failure rate, and common cause failure rate of the i ($i = 1, 2, 3, \dots, n$)

subsystem, respectively. jI_i represent influencing subsystems of the interactive dependent failure type of subsystem $i \{i = 1, 2, 3, \dots, n\}$ and jC_i Represents influencing subsystems of common cause dependent failure type of subsystem $i \{i = 1, 2, 3, \dots, n\}$.

Now, according to Figure 5, we assume that the failure in the even track subsystem is affected by the failures of the signaling subsystems (common cause type), power supply (interactive type), rolling stock (interactive type) and odd track (interactive type). i.e.

$$h_{Even\ Track}(t) = h_2(t) = \varphi_2 \left[h_{Ind_2}(t), h_{Int_{jI_{Even}}}(t), h_{CC_{jC_2}}(t), t \right] \quad (6)$$

Where, jI_{Even} Represents influencing subsystems of interactive dependent failure type of even track subsystem, i.e. $\{jI_{Even} = 1, 3, 4, 5\}$ and jC_2 Indicates influencing subsystems of common cause dependent failure type of even track subsystem, i.e. $\{jC_2 = 1\}$.

In this paper, the failure rate of subsystem i is considered as follows by considering the interactive dependent failure and the common cause dependent failure in Equation 5 ($h_n(t)$) using Taylor expansion:

$$h_i(t) = \varphi_i \Big|_{h_{CC_{jC_i}}(t)=0} + \sum \frac{\partial \varphi_i}{\partial h_{CC_{jC_i}}} \Big|_{h_{CC_{jC_i}}(t)=0} + \sum \frac{\partial^2 \varphi_i}{2 \partial h_{CC_{jC_i}} \partial h_{CC_{jK_i}}} \Big|_{h_{CC_{jC_i}}(t)=0} + \sum \frac{\partial^2 \varphi_i}{2 \partial h_{CC_{jC_i}} \partial h_{CC_{jK_i}}} \Big|_{h_{CC_{jC_i}}(t)=0} + \sum \frac{\partial^2 \varphi_i}{\partial h^2_{CC_{jC_i}}} \Big|_{h_{Int_{jI_i}}(t)=0, h_{CC_{jC_i}}(t)=0} \quad (7)...$$

Estimation of common cause coefficient

There are very few methods and techniques for calculating dependent failure coefficients and the literature is not rich in this field. Common cause failure coefficients may be estimated using specialized judgments, checklists, estimated models (integrated partial model), and historical data. Various sources estimate the β amplitude. Examination of electrical equipment shows that the best possible value is 0.01 while the worst value is 0.3. Nuclear power plant data on thirteen types of components showed that β varies from 0.03 to 0.22 and averages 0.1 [11,33]. If data are not available, β can be estimated using the various methods mentioned, for example the Humphreys checklist and the IEC checklists IEC61508-6 and IEC62062 to evaluate engineering performance and prevent common failure [34]. The IEC 61508 method is for quantitative estimation of the effect of a checklist of measures to reduce common cause failures [13]. In this paper, the IEC62062 checklist method, which is a very simple qualitative method for estimating the β factor for high-demand operating systems, is used to estimate the common cause failure coefficient, and is simpler than the IEC 61508-6 checklist. It examines only 14 questions [34]. The value of the geometric mean of the opinions of 8 experts and professional engineers for the effect of failure of the signaling subsystem on even and odd rail lines is equal to 88.33, which according to the IEC62062 checklist method, its beta value is equal to 0.1.

Table 1. IEC 62062 checklist [۳۴]	
IEC 62062 Checklist	
Item	Score
Separation	
Are SRECS signal cables for separate channels separate from other channels in all situations or sufficiently protected?	۷
Is it sufficient to detect signal transmission errors where data encryption / decryption is used?	۶
Are SRECS and electrical power cables separate in all situations or are they adequately shielded?	۷
If subsystem elements can contribute to common cause failure, are they provided as separate physical devices in their enclosures?	۴
Diversity / redundancy	
Does the subsystem use different electrical technologies, for example, one electronic technology or programmable electronic?	۶
Are there elements in the subsystem that use different physical principles (for example, sensor elements in the protective door that use mechanical techniques and magnetic sensors)?	۵
Does the subsystem use elements with time differences in task operations or failure modes?	۶
Do the subsystem elements have a diagnostic test interval of less than 1 minute?	۶
Complexity / design / application	
Is interconnection between subsystem channels prevented, except when used for diagnostic testing purposes?	۳
Evaluation / analysis	
Have the results of failure modes and their effect analysis been examined to establish the sources of common cause failure, and have the predetermined sources of common cause failure been removed by design?	۸
Are field failures analyzed with design feedback?	۹
Competence / Training	
Do subsystem designers understand the common causes and consequences of failures?	۴
Environmental control	
Can subsystem elements always operate in the range of temperature, humidity, corrosion, dust, vibration, etc. that have been tested without using external environment control?	۷
Is the subsystem immune to the adverse effects of electromagnetic interference up to specified limits?	۸
Geometric average comment 8 experts	۸۸.۳۳
Beta value (odd line = even line)	۰.۱

Reliability estimation

The reliability of the railway system with 5 subsystems in the proposed model was estimated using MATLAB software. According to the block diagram of the rail system reliability described in Figure 2, the structure of this system is series-parallel and its reliability is calculated through Equation 18. Table 2 shows the values of each parameter in each subsystem at time $t = 10000$ hours .

Table 2. Estimation of reliability of each subsystem with the assumed parameters in the proposed model (T = 10000 hours)

Subsystem	$h_{Indi}(t)$	$\beta_{jC_i}(t)$	$h_{Depi}(t)$	$F_{Depi}(t)$	$R_{Depi}(t)$
1 = Signalling	0.00076923	0	0.000995	0.08571	0.93312
2=EvenTrack	0.001	0.1	0.001373	0.11627	0.90762
3=OddTrack	0.001	0.1	0.001503	0.12653	0.90762
4=Rollingstock	0.00266	0	0.0031415	0.24629	0.78710
5=PowerSupply	0.003	0	0.0035007	0.27026	0.76338

Comparison with other models and sensitivity analysis

In this section, the results of the proposed model are compared with the Chen model and the sensitivity analysis to change the coefficient of failure of the common cause is presented. Table 3 shows the prediction results of the reliability of the assumed subsystems in the railway industry compared to the Chen model [30] at $t = 10,000$ hours. The reliability value of the target at time $t = 10000$ is regardless of the dependencies, ie based on the Chen model. Table 4 shows the percentage improvement in the estimation results based on the proposed model.

Table 3. Comparison of reliability prediction results with Chen model (T = 10000 hours)

Subsystem	Chen. H. (2003) (R_{Target})	Proposed Model
1 = Signalling	0.93312	0.93312
2=EvenTrack	0.91394	0.90762
3=OddTrack	0.91394	0.90762
4=Rollingstock	0.78710	0.78710
5=PowerSupply	0.76338	0.76338
System Reliability	0.55651	0.55588

Table 4. Percentage improvement of results estimation in the proposed model

Subsystem	β Factor Model			Proposed Model		
	Reliability	ΔR_i $= R_{Target}$ $- R_i$	Improvement Percent	Reliability	ΔR_i $= R_{Target}$ $- R_i$	Improvement Percent
1 = Signalling	0.93312	0	0	0.93312	0	0
2=EvenTrack	0.90762	0/00632	0/632	0.90762	0/00632	0/632
3=OddTrack	0.90762	0/00632	0/632	0.90762	0/00632	0/632
4=Rollingstock	0.78710	0	0	0.78710	0	0
5=PowerSupply	0.76338	0	0	0.76338	0	0
Total System	0.55588	0/00063	0/063	0.55588	0/00063	0/063

Based on various models in the literature that consider dependent failures in mechanical, electronic, etc. systems, reliability estimation becomes more accurate. In railway subsystems, considering the effects of interactive dependent failures (Sun model) and common cause failure (beta factor), the amount of reliability is reduced and more accurate compared to the Chen model in which the assumption of dependence of failures is not taken into account. In the proposed model, considering both the interactive failure and the common cause failure that can be observed based on the structure and performance of the railway system, the amount of reliability of the two models Sun and Chen, which consider only one type of dependent failure in the system, is less ($0.0008 < \Delta R < 0.06048$). Subsystems that have the same amount of reliability as each of the Sun and beta factor models are affected only by interactive failures and common cause failure, respectively. The even track and odd track subsystems in the proposed model are affected by both interactive and common cause dependent failures, and therefore their reliability is less than other models (about 0.0008 less than the Sun model, about 0.06048 less than Beta factor model and about 0.0611 less than Chen model). Figure 6 shows the reliability comparison of railway subsystems with and without dependent failures. Given the dependent failures, the reliability of the subsystems undergoes significant changes that cannot be ignored; Because due to the acceleration of the destruction process due to failure interactions, the system may face failure and crisis sooner.

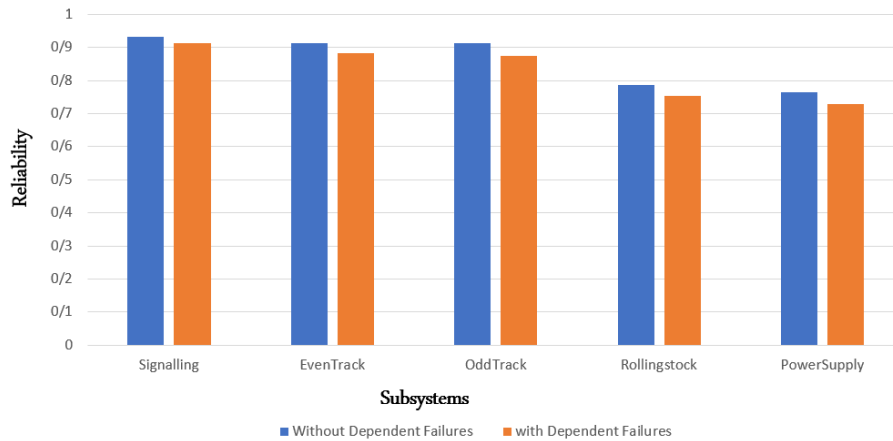


Figure 6. Reliability comparison of railway subsystems with and without dependent failures

Sensitivity analysis

To analyze how the parameters involved in the model affect the target reliability of the subsystems (excluding dependent failures, i. e. the Chen model), sensitivity analysis is performed on the dependent failure coefficients $\beta_{jC_i}(t)$ at time $T = 10,000$ Hours is done in Two modes. In the first case, with values of $\beta_{jC_i}(t)$ has finally increased to 0.3; In the second case, the values of $\beta_{jC_i}(t)$ is finally increased to 0.9. The allocation results are obtained under the influence of different values of $\beta_{jC_i}(t)$ according to Table 8. Dependent failure rates of subsystems that have an increase in the values of interactive failure coefficients and common cause coefficient have generally increased and reliability has decreased significantly. Larger values of $\beta_{jC_i}(t)$ coefficients can cause serious problems for the system. If R_{System} increases, the reliability of each subsystem increases and the dependent coefficients decrease. In order to increase reliability, by considering the effects of subsystems on each other in the design phase, the interactions can be reduced as much as possible and finally the complex dependencies in the system can be reduced to a level that can achieve the target reliability (i. e. approximately the effects of dependent failures (zero) were achieved).

Table 5. Reliability values of subsystems with different values of common cause $\beta_{jC_i}(t)$ coefficient

$R_{Target} = 0.55651$ Subsystem	$R_{System} = 0.4939$			$R_{System} = 0.1858$		
	$\beta_{jC_i}(t)$	$h_{Dep_i}(t)$	$R_{Dep_i}(t)$	$\beta_{jC_i}(t)$	$h_{Dep_i}(t)$	$R_{Dep_i}(t)$
1 = Signalling	0	0.00099	0.9143	0	0.0036	0.7233
2 = EvenTrack	0.3	0.0015	0.8716	0.9	0.0050	0.6363
3 = OddTrack	0.3	0.0017	0.8615	0.9	0.0050	0.6363
4 = Rollingstock	0	0.0031	0.7537	0	0.0067	0.5450
5 = PowerSupply	0	0.0035	0.7297	0	0.0068	0.5433

Conclusions

Reducing the reliability and propagation of delays at the rail network level reduces safety, passenger dissatisfaction, damaged trains and reduced the revenue of rail transport companies. Failure to consider dependency in assessing the reliability of

complex systems with high dependencies such as the rail system can lead to optimistic estimates of reliability and ignore the consequences of reduced reliability in the system. Dependent failures between rail subsystems can accelerate system failure because rail systems show a high level of dependencies, both one-way and reciprocal; That is, the failure of some subsystems will affect the failure of other subsystems, and vice versa. In this research, an attempt has been made to improve the reliability of the rail system reliability estimation by considering the dependence. This paper develops a mathematical model using the Taylor expansion approach for the quantitative analysis of dependent failure in the rail industry; Compared to the Chen model, some improvement in reliability estimation is observed including the common cause failure. Ignoring the effects of breakdown-related failures helps the entire system degrade faster and can have irreparable consequences.

References

- [1] Genser, R., & Grassl, A. (1974). State of reliability effort of the European railways. *IEEE Transactions on reliability*, 23(3), 156-161.
- [2] Billinton, R., & Allan, R. N. (1992). *Reliability evaluation of engineering systems* (Vol. 792). New York: Plenum press.
- [3] Mosleh, A., (1991). Dependent failure analysis. *Reliability Engineering and System Safety*. pp. 243–250
- [4] Hoyland, A., & Rausand, M. (2009). *System reliability theory: models and statistical methods*. John Wiley & Sons.
- [5] Sun, Y., Ma, L., Mathew, J., & Zhang, S. (2006). An analytical model for interactive failures. *Reliability Engineering & System Safety*, 91(5), 495-504.
- [6] Rausand, M., & Lundteigen, M. A. (2014). *Reliability of safety-critical systems: theory and applications*: John Wiley & Sons.
- [7] Zhou, T., Droguett, E. L., & Modarres, M. (2020). A common cause failure model for components under age-related degradation. *Reliability Engineering & System Safety*, 195, 106699.
- [8] Humphreyes, P., & Johnston, B. D. (1987). *Dependent Failure Procedure Guide SRD-R-418*. United Kingdom Atomic Energy Authority, Safety and Reliability Directorate.
- [9] Greig, G. L. (1993). Second moment reliability analysis of redundant systems with dependent failures. *Reliability Engineering & System Safety*, 41(1), 57-70.
- [10] Fitzmaurice, R. and Fitzpatrick, D. (2010). *Cascading Failure in a Complex System Model for Power Systems: Operating and Planning Policy*, Doctor of Philosophy thesis, University College Dublin.
- [11] NUREG-75/014., *Reactor safety: An assessment of accident risk in us commercial nuclear power plants*, technical report. U.S. Nuclear Regulatory Commission, WASH-1400, Washington DC, (1975).
- [12] Pourali, M. (2013). Incorporating common cause failures in mission-critical facilities reliability analysis. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 50(4), 2883-2890.

- [13] Pozsgai, P., Neher, W., & Bertsche, B. (2002, June). Models to consider dependence in reliability calculation for systems consisting of mechanical components. In 3rd International Conference on Mathematical Methods in Reliability, Trondheim, Norway (pp. 539-542).
- [14] Fukuoka, H. (2002). Reliability evaluation method for the railway system: A model for complicated dependency. Quarterly Report of RTRI, 43(4), 192-196.
- [15] Pistolas, C. V. (2016). Decision making for railway operations using RAM analysis. Risk, Reliability and Safety: Innovating Theory and Practice, 2712-2718.
- [16] Cimatti, A., et al., (2012). Formal Verification and Validation of ERTMS Industrial Railway Train Spacing System, in Computer Aided Verification: 24th International Conference, CAV 2012. Berkeley, CA, USA
- [17] EN50126. (1999). Railway Applications: The specification and demonstration of Reliability, Availability, Maintainability and Safety. CENELEC, International Electrotechnical Commission, IEC
- [18] Diab, E. Badami, M. El-Geneidy. A, 2015, Bus Transit Service Reliability and Improvement Strategies: Integrating the Perspectives of Passengers and Transit Agencies In North America, International Journal of Transport Reviews, Pages 292-328
- [19] Cheng. Y, Tsung LU. C, Lin Lu. C, comprehensive approach to allocate reliability and cost in passenger rail system design, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, no. 2608, 2017, pp. 86-95
- [20] Čepin M. (2011) Reliability Block Diagram. In: Assessment of Power System Reliability. Springer, London. https://doi.org/10.1007/978-0-85729-688-7_9
- [21] Gilchrist, W. (1993). Modelling failure modes and effects analysis. International Journal of Quality & Reliability Management. 10(5):16–23.
- [22] Dinmohammadi, F., Alkali, B., Shafiee, M., Bérenguer, C., & Labib, A. (2016). Risk evaluation of railway rolling stock failures using FMECA technique: a case study of passenger door system. Urban Rail Transit, 2, 128-145.
- [23] Bemment, S. D., Goodall, R. M., Dixon, R., & Ward, C. P. (2017). Improving the reliability and availability of railway track switching by analysing historical failure data and introducing functionally redundant subsystems, Journal of Rail and Rapid Transit, 2017, 0(0) pp. 1–18
- [24] Du, X., Yang, Z., Chen, C., Li, X., & Pecht, M. G. (2018). Reliability analysis of repairable systems based on a two-segment bathtub-shaped failure intensity function. IEEE Access, 6, 52374-52384.
- [25] Conradie, P. D. F., Fourie, C. J., Vlok, P. J., & Treurnicht, N. F. (2015). Quantifying system reliability in rail transportation in an ageing fleet environment. South African Journal of Industrial Engineering, 26(2), 128-142.
- [26] Patra, A. P., Dersin, P. and Kumar, U. (2009). Cost effective maintenance policy: a case study. Accepted for publication in the International Journal of Performability Engineering

- [27] Rong Zhang, R, Lu Li, Jian. W. (2019). Reliability analysis on railway transport chain, *International Journal of Transportation Science and Technology* 8, 192–201, <https://doi.org/10.1016/j.ijtst.2018.11.004>
- [28] Al-Douri, Y. K., Tretten, P. and Karim. R. (2016). Improvement of railway performance: a study of Swedish railway infrastructure, *J. Mod. Transport.* 24(1):22–37
- [29] Navas, M. A., Sancho, C., & Carpio, J. (2017). Reliability analysis in railway repairable systems. *International Journal of Quality & Reliability Management.*
- [30] Chen. H., (2003). New models for measuring the reliability performance of train service, *European Safety and Reliability Conference*, 15-18 June 2003, Maastricht, The Netherlands, pp. 397-402
- [31] Hui. S. (2015). *Maintenance Modelling, Simulation and Performance Assessment for Railway Asset Management*. PhD Thesis, University of Technology of Troyes (UTT).
- [32] Fleming, K. N. (1974). Reliability model for common mode failures in redundant safety systems (No. GA-A-13284). General Atomics, San Diego, CA (United States).
- [33] Borcsok, J., Schaefer, S., & Ugljesa, E. (2007, April). Estimation and evaluation of common cause failures. In *Second International Conference on Systems (ICONS'07)* (pp. 41-41). IEEE.
- [34] Sun, W. (2013). *Determination of beta-factors for safety instrumented systems* (Master's thesis, Institutt for produksjons-og kvalitetsteknikk).