

توسعه یک مدل تحلیلی از علل و پیامدهای ناشی از خروج از خط قطار مسافری در راه‌آهن جمهوری اسلامی ایران

محمدعلی رضوانی، استادیار، دانشکده مهندسی راه‌آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
احسان جعفریان (مسئول مکاتبات)، کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی راه‌آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

E-mail: rezvani_ma@iust.ac.ir

تاریخ دریافت: ۹۰/۱۱/۰۵ تاریخ پذیرش: ۹۱/۰۲/۱۰

چکیده

در این پژوهش پیشامد نامطلوب خروج از خط قطار با هدف ارایه مدل و تحلیلی پرجزئیات از علل پدیدآورنده و سناریوهای بالقوه ناشی از وقوع آن مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. برای دستیابی به این هدف از تکنیک تجزیه و تحلیل درخت خطا و درخت وقایع یکپارچه استفاده می‌شود. به دلیل ماهیت غیردقیق و غیرقطعی داده‌های موجود، امکان استفاده از رویکرد سنتی تکنیک تجزیه و تحلیل درخت خطا و درخت وقایع یکپارچه برای این کاربرد وجود ندارد. بنابراین، این پژوهش رویکرد فازی تکنیک تجزیه و تحلیل درخت خطا و درخت وقایع یکپارچه را مورد استفاده قرار می‌دهد. برای این منظور، ابتدا با استفاده از داده‌های جمع‌آوری شده از منابع گوناگون، مدلی پرجزئیات از علل و سناریوهای ممکن ایجاد می‌گردد. سپس ضمن کمی‌سازی مدل ایجاد شده، احتمال و عدد ریسک متناظر با پیشامد نامطلوب خروج از خط قطار تعیین شده و مدل با هدف تعیین سهم علل، مسیرهای علی و سناریوهای گوناگون در ریسک و عدم قطعیت متناظر با خروج از خط قطار مورد ارزیابی و تحلیل قرار می‌گیرد. برای مورد بررسی شده در این مقاله، پیشامدهای "تنظیم اشتباه سوزن" و "عدم تشخیص معیوب بودن بخشی از قطعه خط" به ترتیب به عنوان بحرانی‌ترین علل ریشه‌ای برای ریسک کل و عدم قطعیت خروجی شناسایی شدند.

واژه‌های کلیدی: خروج از خط قطار، ارزیابی احتمالی ریسک، تجزیه و تحلیل درخت خطا و درخت وقایع یکپارچه، منطق فازی

۱. مقدمه

معین به صورت همزمان مورد ارزیابی و تجزیه و تحلیل قرار گیرد [Doménech et.al, 2010] و [Stapelberg, 2009]. از آنجاکه داده‌های موجود در زمینه این مطالعه، داده‌هایی غیردقیق و غیرقطعی هستند، این پژوهش، رویکرد فازی تکنیک تجزیه و تحلیل درخت خطا و درخت وقایع را برای ارزیابی این پیشامد نامطلوب مورد استفاده قرار می‌دهد.

در این پژوهش ابتدا ضمن ارایه مقدمه‌ای بر نظریه مجموعه‌های فازی، تکنیک تجزیه و تحلیل درخت خطا و وقایع یکپارچه به صورت کلی مورد بررسی قرار می‌گیرد. سپس با استفاده از اطلاعات کسب شده از منابع مدلی پرجزئیات از علل ریشه‌ای و سناریوهای بالقوه ناشی از وقوع خروج از خط قطار مسافری ارایه می‌شود و این مدل با هدف فراهم آوردن دیدی پرجزئیات از پیشامد نامطلوب خروج از خط قطار مسافری، کمی‌سازی شده و مورد ارزیابی و تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد. مدلسازی و تحلیل ارایه شده در این پژوهش، از طریق فراهم آوردن دیدی پرجزئیات از علل و سناریوهای بالقوه ناشی از وقوع پیشامد نامطلوب خروج از خط، تصمیم‌گیرنده را در طراحی و اتخاذ اقدامات اصلاحی و راهکارهایی کارآ در راستای کاهش ریسک مرتبط یاری رساند.

۲. مقدمه‌ای بر نظریه مجموعه‌های فازی

به منظور درک بهتر مفاهیم مطرح شده در مقاله، در این بخش مقدمه‌ای بر نظریه مجموعه‌های فازی ارایه می‌شود.

۲-۱ اعداد فازی

یک عدد فازی ابزاری مفید است که می‌تواند به صورتی کارآ به منظور مدل کردن سیستم در شرایط عدم قطعیت و غیردقیق بودن داده‌ها مورد استفاده قرار گیرد. این مقاله از نوع خاصی از اعداد فازی تحت عنوان اعداد فازی مثلثی استفاده می‌کند. تابع عضویت یک عدد فازی مثلثی با استفاده از سه پارامتر $\{a, b, c\}$ و به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\mu_A(x) = \begin{cases} (x-a)/(b-a), & a \leq x \leq b, \\ (c-x)/(c-b), & b \leq x \leq c, \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (1)$$

از آغازین روزهای بهره‌برداری از صنعت حمل و نقل ریلی، خروج از خط، به عنوان یکی از مهم ترین نگرانیها، ذهن شرکت‌های بهره‌بردار را به خود مشغول کرده است. ویژگی حرکت چرخ بر روی ریل که مسیری مشخص و انعطاف ناپذیر است، این صنعت را با چالش منحصر به فرد حفظ چرخها بر روی ریل روبرو می‌کند. صنعت حمل و نقل ریلی، در سالهای اخیر پیشرفت قابل توجهی را تجربه کرده است و سطح ایمنی آن در مقایسه با سالهای آغازین بهره‌برداری از این صنعت بهبود قابل توجهی یافته است. ولی با وجود این پیشرفتها، هنوز هم سوانح و حوادثی نظیر خروج از خط به کرات رخ می‌دهد و هزینه‌های هنگفتی را به شرکت‌های بهره‌بردار و جامعه تحمیل می‌کند [Iwnicki, 2006]. براساس آمار منتشر شده، از مجموع ۴۷۸ مورد حادثه به وقوع پیوسته در سال ۱۳۸۷ در راه‌آهن جمهوری اسلامی ایران، در ۱۹۰ مورد، یعنی در حدود ۴۵ درصد مواقع، حادثه رخ داده، حادثه خروج از خط قطار بوده است [I.R.I Railway. Dept., Protection & Safety of Rail Movements, 2009]. تا امروز مطالعات متعددی به منظور پیش‌بینی و پیشگیری از وقوع پیشامد نامطلوب خروج از خط قطار انجام شده‌اند [Wagner, 2004, Iwnicki, 2006, Iwnicki et. al, 1999, Zhao et.al, 2012, Xio et.al, 2011, Koo, et.al, 2006]. با این وجود، تلاشهای چندانی در راستای توسعه مدل و تحلیلی پرجزئیات از علل و پیامدهای ناشی از وقوع این پیشامد نامطلوب انجام نشده‌اند. فراوانی وقوع و وسعت پیامدهای احتمالی ناشی از وقوع چنین پیشامدی علت اصلی آغاز مطالعه حاضر، با هدف ارایه مدل و تحلیلی جامع از علل و سناریوهای بالقوه ناشی از وقوع پیشامد نامطلوب خروج از خط قطار مسافری است. برای این منظور، با توجه به ویژگیها و اهداف مطالعه، تکنیک تجزیه و تحلیل درخت خطا و درخت وقایع یکپارچه انتخاب شد. تکنیک تجزیه و تحلیل درخت خطا و درخت وقایع یکپارچه، ابزاری ساخت یافته، منطقی و قدرتمند است که با ترکیب کردن رویکردهایی استتاجی و استقرایی این امکان را فراهم می‌آورد که علل و پیامدهای پیشامدی

مورد استفاده قرار گیرند. در این مقاله روش رتبه‌بندی اعداد فازی بر مبنای ارزش گذاری وزنی سطوح گوناگون α مورد استفاده قرار می‌گیرد [Detyniecki, et.al, 2006]. در روش نامبرده، ابتدا هریک از اعداد فازی بر روی عددی حقیقی تصویر می‌شود، سپس از طریق مقایسه این مقادیر حقیقی رتبه عدد فازی تعیین می‌گردد. بر اساس این روش، تابع غیر فازی سازی برای عدد

$$Val(A) = \frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{A_{\alpha_i}^L + A_{\alpha_i}^U}{2} \right) \cdot f(\alpha_i) \cdot \Delta\alpha_i}{\sum_{i=1}^n f(\alpha_i) \cdot \Delta\alpha_i} \quad (8)$$

فازی A به صورت زیر تعریف می‌گردد:
 $\Delta\alpha_i = \alpha_i - \alpha_{i-1}, \alpha_n = 1$ که در رابطه بالا، $A_{\alpha_i}^L, A_{\alpha_i}^U, f(\alpha_i)$ و n به ترتیب حد پایین برش α_i ، حد بالای برش α_i ، تابع ارزش گذاری و تعداد سطوح برش هستند. این پژوهش به منظور ارزش گذاری سطوح گوناگون α از تابع ارزش گذاری pro-support استفاده می‌کند. تابع ارزش گذاری مذکور برای برش سطح α_i به صورت زیر تعریف می‌شود [Detyniecki, 2001]:

$$f(\alpha_i) = C + (S + C) \cdot \alpha_i^q \quad (9)$$

در رابطه بالا C و S به ترتیب وزن تخصیص داده شده به هسته مجموعه فازی A و وزن تخصیص داده شده به پشتیبان مجموعه فازی A هستند. در این مقاله مقادیر پارامترهای ارزش گذاری به صورت زیر انتخاب شده‌اند:

$$C=1.0, S=0.0, q=2$$

۳. تجزیه و تحلیل درخت خطا و درخت وقایع یکپارچه

تجزیه و تحلیل درخت خطا و درخت وقایع یکپارچه ابزاری ساخت یافته، منطقی و قدرتمند است که تحلیل گر را در شناسایی و ارزیابی علل و سناریوهای بالقوه ناشی از وقوع پیشامدی معین یاری می‌رساند. این ابزار از طریق ترکیب کردن رویکردی استنتاجی با نام "درخت خطا" با رویکردی استقرایی با نام "درخت وقایع" این امکان را فراهم می‌آورد که علل و پیامدهای بالقوه ناشی از وقوع پیشامدی به صورت همزمان شناسایی شده و مورد ارزیابی و تجزیه و تحلیل قرارگیرند. در رویکرد سنتی

که $a \leq b \leq c$. عدد فازی مثلثی با استفاده از $\tilde{A} = (a, b, c)$ نشان داده می‌شود.

۲-۲ محاسبات جبری بر روی اعداد فازی

در این مقاله برای انجام محاسبات بر روی اعداد فازی از روش برش α استفاده می‌شود. بر اساس اصل تجزیه اعداد فازی ارایه شده توسط زاده [Zadeh, 1971] مجموعه فازی A می‌تواند به صورت زیر به بینهایت مجموعه غیرفازی تبدیل شود:

$$A = \bigcup_{\alpha \in [0,1]} \alpha A_{\alpha} \quad (2)$$

در این رابطه αA_{α} ، ضرب مقدار α در درجه عضویت مجموعه غیرفازی ($\mu_{A\alpha} = 1$) است و A_{α} اجتماع مجموعه‌های فازی A_{α} به ازای مقادیر گوناگون α است. هریک از این مجموعه‌های غیرفازی در سطح معینی از برش α و به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$A_{\alpha} = \{x | \mu_{\tilde{A}}(x) \geq \alpha\} \quad (3)$$

با استفاده از روش برش α ، به جای انجام محاسبات بر روی اعدادی فازی، محاسبات در سطوح گوناگون برش α و بر روی مجموعه‌هایی غیرفازی انجام می‌گیرد. در این حالت عملیات محاسباتی در هریک از سطوح برش α به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$A_{\alpha} + B_{\alpha} = [A_{\alpha}^L + B_{\alpha}^L, A_{\alpha}^U + B_{\alpha}^U] \quad (4)$$

$$A_{\alpha} - B_{\alpha} = [A_{\alpha}^L - B_{\alpha}^U, A_{\alpha}^U - B_{\alpha}^L] \quad (5)$$

$$A_{\alpha} \cdot B_{\alpha} = [A_{\alpha}^L \cdot B_{\alpha}^L, A_{\alpha}^U \cdot B_{\alpha}^U], \quad A_{\alpha}^L \geq 0, B_{\alpha}^L \geq 0 \quad (6)$$

$$A_{\alpha} \div B_{\alpha} = [A_{\alpha}^L \div B_{\alpha}^U, A_{\alpha}^U \div B_{\alpha}^L] \quad A_{\alpha}^L \geq 0, B_{\alpha}^L > 0 \quad (7)$$

در روابط بالا، $A_{\alpha}^L, A_{\alpha}^U, B_{\alpha}^L, B_{\alpha}^U$ به ترتیب بیانگر حد پایین مجموعه فازی A در سطح برش α ، حد بالای مجموعه فازی A در سطح برش α ، حد پایین مجموعه فازی B در سطح برش α و حد بالای مجموعه فازی B در سطح برش α هستند.

۲-۳ رتبه‌بندی اعداد فازی

تاکنون روشهای متعددی ارایه شده‌اند که با توجه به شرایط مسأله و خواسته‌های تحلیل گر می‌توانند به منظور رتبه‌بندی اعداد فازی

توسط راه آهن جمهوری اسلامی ایران، گزارشهای سالانه منتشر شده توسط اداره‌های ایمنی ریلی سایر راه‌آهن‌ها و اطلاعات کسب شده از سایر منابع استفاده می‌کند.

۴-۱-۱ ایجاد نمودار درخت خطا

درخت خطا مدلی ترسیمی و منطقی است که ترکیبهای گوناگون پیشامدهای پایانی‌یی را که به صورت بالقوه می‌توانند به وقوع پیشامدی معین منجر شوند، نشان می‌دهد. فرآیند ایجاد چنین نموداری، فرآیندی استنتاجی و تکرار شونده است که از پیشامدی معین در بالای درخت آغاز می‌شود، از طریق شاخه‌ها ادامه پیدا می‌کند، در هر دروازه سؤالها و منطق یکسانی بکار گرفته می‌شود و به ریشه درخت (پیشامدهای پایه‌ای) ختم می‌شود [Ericson, 2005]. فرآیند ایجاد درخت خطا تا جایی ادامه پیدا می‌کند که تمامی پیشامدها برحسب خرابیهای سخت‌افزاری، خرابیهای نرم‌افزاری، خطاهای انسانی و رویدادهای طبیعی پایه‌ای قابل شناسایی تعیین شده باشند. جدول ۱ فرآیند ایجاد درخت خطای پیشامد نامطلوب "خروج از خط قطار مسافری" را در ۲۹ گام خلاصه می‌کند. با استفاده از این اطلاعات، نمودار درخت خطای این پیشامد نامطلوب مشابه شکل ۱ ترسیم می‌شود.

۴-۱-۲ ایجاد نمودار درخت وقایع

نمودار درخت وقایع، ابزاری ترسیمی و منطقی است که به منظور شناسایی و نمایش کلیه سناریوهای ممکن ناشی از وقوع پیشامدی مشخص بکار گرفته می‌شود. فرآیند ایجاد این نمودار فرآیندی استقرایی است که از پیشامدی اولیه در ابتدای درخت وقایع آغاز می‌شود، با شناسایی پیشامدهای محوری ادامه پیدا می‌کند و به شناسایی وضعیتهای پایانی (پیامدها) ختم می‌شود. شکل ۲ نمودار درخت وقایع پیشامد نامطلوب "خروج از خط قطار مسافری" را نشان می‌دهد. چنان که در این شکل مشاهده می‌شود، نمودار درخت وقایع خروج از خط قطار مسافری، نموداری متشکل از ۱۲ پیشامد محوری است که از طریق ترکیب کردن این پیشامدها، ۸۴ سناریو بالقوه شناسایی می‌شود. جدول ۲ پیشامدهای محوری این درخت وقایع را معرفی می‌کند.

تجزیه و تحلیل درخت خطا و درخت وقایع یکپارچه، احتمال وقوع پیشامدهای پایانی درختهای خطا و پیشامدهای میانی درخت وقایع به صورت مقداری نقطه‌ای و ثابت یا به صورت متغیری تصادفی و وابسته به زمان در نظر گرفته می‌شود. ولی در واقعیت، به دلیل ماهیت غیردقیق و غیرقطعی داده‌ها، امکان دستیابی به چنین تخمین دقیقی از نرخ وقوع یا پارامترهای تابع توزیع احتمالی وجود ندارد [Cho, 2002 and Ferdousa, et.al, 2009]. در چنین شرایطی استفاده از رویکرد فازی یکی از بهترین و شاید تنها راه حل ممکن است. در رویکرد فازی، تکنیک تجزیه و تحلیل درخت خطا و درخت وقایع یکپارچه به منظور مدل کردن سیستم در شرایط نبود اطلاعات دقیق و جامعی از سیستم مورد بررسی در محیط فازی توسعه داده می‌شود.

۴. ارزیابی ریسک خروج از خط قطار

در این بخش از پژوهش علل ریشه‌ای و سناریوهای بالقوه ناشی از وقوع پیشامد نامطلوب خروج از خط قطار مسافری مورد ارزیابی قرار می‌گیرند. برای این منظور، ابتدا با استفاده از اطلاعات جمع‌آوری شده از منابع گوناگون، مدل‌های ترسیمی درخت خطا و درخت وقایع این پیشامد نامطلوب ایجاد می‌شوند، سپس مدل‌های ایجاد شده با هدف فراهم آوردن تحلیلی پر جزئیات از علل و پیامدهای ناشی از وقوع پیشامد خروج از خط قطار مسافری مورد ارزیابی قرار می‌گیرند.

۴-۱-۳ ایجاد مدل‌های ترسیمی

مرحله "ایجاد مدل‌های ترسیمی" یکی از مهم‌ترین مراحل تکنیک تجزیه و تحلیل درخت خطا و درخت وقایع یکپارچه است. در این مرحله، با استفاده از داده‌ها و اطلاعات جمع‌آوری شده از منابع گوناگون، مدل‌های ترسیمی علل و توالیهای ناشی از وقوع پیشامدی معین ایجاد می‌شوند. این پژوهش برای ایجاد نمودارهای درخت خطا و درخت وقایع پیشامد نامطلوب خروج از خط قطار عمدتاً از چهار دسته کلی اطلاعات شامل اطلاعات کسب شده از کارشناسان فعال در زمینه حمل و نقل ریلی، اطلاعات ارایه شده

جدول ۱. فرآیند ایجاد درخت خطای خروج از خط قطار مسافری

گام	نام	گره	ورودی‌ها		نوع دروازه
			نام	متن	
۱	G01	خروج از خط قطار مسافری	G02	خروج از خط در هنگام عبور از روی سوزن	میانی
			G03	خروج از خط به سبب برخورد یا عبور از روی شیء خارجی	میانی
			G04	خروجی از خط به سبب مشکلات فنی خط	یا میانی
			G05	خروج از خط به سبب مشکلات فنی وسیله نقلیه	میانی
			G06	خروج از خط به سبب بهره‌برداری نامناسب	میانی
			G07	خروج از خط در هنگام عبور از روی سوزن	یا میانی
۲	G02	خروج از خط در هنگام عبور از روی سوزن	E01	خروج از خط به سبب تغییر سوزن در هنگام عبور قطار	یا ثانویه
			E08	تنظیم اشتباه سوزن	ثانویه
۳	G07	خروج از خط به سبب تنظیم اشتباه سوزن	G16	عبور قطار از روی سوزن اشتباه تنظیم شده	یا میانی
			E23	صدور جواز عبور اشتباه توسط سیستم سیگنال	پایه‌ای
۴	G16	عبور قطار از روی سوزن اشتباه تنظیم شده	G20	عبور بدون جواز از سیگنال	یا ثانویه
			G08	عبور یا برخورد قطار با شیء روی خط	میانی
۵	G3	خروج از خط به سبب برخورد یا عبور از روی شیء خارجی	E02	برخورد قطار با بخش‌های معیوب زیرساختار	یا ثانویه
			G09	برخورد قطار با شیء‌ای که روی خط نیست	میانی
			G17	عبور یا برخورد قطار با شیء باقی‌مانده بر روی خط	میانی
۶	G08	عبور یا برخورد قطار با شیء روی خط	G18	برخورد قطار با شیء‌ای که پس از ورود قطار بر روی خط قرار می‌گیرد	یا میانی
			G26	ورود قطار به قطعه خط با وجود باقی‌ماندن شیء روی خط	یا میانی
۷	G17	عبور یا برخورد قطار با شیء باقی‌مانده بر روی خط	G27	باقی‌ماندن شیء خارجی بر روی خط	یا میانی
			G29	ورود قطار به قطعه خط با وجود باقی‌ماندن شیء روی خط	یا میانی
۸	G26	ورود قطار به قطعه خط با وجود باقی‌ماندن شیء روی خط	G20	ورود بدون جواز به قطعه خط	یا پایه‌ای
			E23	صدور جواز عبور اشتباه توسط سیستم سیگنال	پایه‌ای
۹	G29	ورود به قطعه خط به علت جواز ورود اشتباه	E46	عدم تشخیص وجود شیء خارجی بر روی خط	یا پایه‌ای
			E40	باقی‌ماندن شیء توسط پرسنل خط	پایه‌ای
۱۰	G27	باقی‌ماندن شیء خارجی بر روی خط	E41	باقی‌ماندن شیء افتاده از وسیله نقلیه‌ای پیشین	یا پایه‌ای
			E42	باقی‌ماندن شیء با منشأ حوادث طبیعی	پایه‌ای
			E43	باقی‌ماندن شیء با منشأ خطاها و سوءعملکردهای انسانی	پایه‌ای
۱۱	G18	برخورد قطار با شیء‌ای که پس از ورود قطار بر روی خط قرار می‌گیرد	E24	افتادن بخشی از وسیله نقلیه بر روی خط	پایه‌ای
			E25	قرار گرفتن شیء‌ای با منشأ حوادث طبیعی پس از ورود به قطعه خط	یا پایه‌ای
			E26	قرار گرفتن شیء‌ای با منشأ خطای انسانی پس از ورود به قطعه خط	پایه‌ای
۱۲	G09	برخورد قطار با شیء‌ای که روی خط نیست	E09	برخورد قطار با بخش‌های متحرک زیرساختار	یا ثانویه
			G19	برخورد بخشی خارج از گاباری با تجهیزات کناره خط	یا میانی
۱۳	G19	کناره خط	E10	برخورد با تسهیلات موقتی کناره خط	یا ثانویه
			G28	پی‌نبردن به وضعیت بخش قبل از حرکت قطار	یا میانی
۱۴	G28	پی‌نبردن به وضعیت بخش قبل از حرکت قطار	E27	بیرون آمدن بخش در حین حرکت قطار	یا ثانویه
			E44	خارج از گاباری بودن بخشی از قطار یا محموله آن	یا پایه‌ای
۱۵	G04	خروج از خط به سبب مشکلات فنی خط	E45	صدور جواز حرکت با وجود خارج از گاباری بودن بخشی از قطار	یا پایه‌ای
			G10	معیوب بودن بخشی از خط	یا میانی
			G11	ورود قطار به قطعه خط با وجود معیوب بودن بخشی از خط	یا میانی

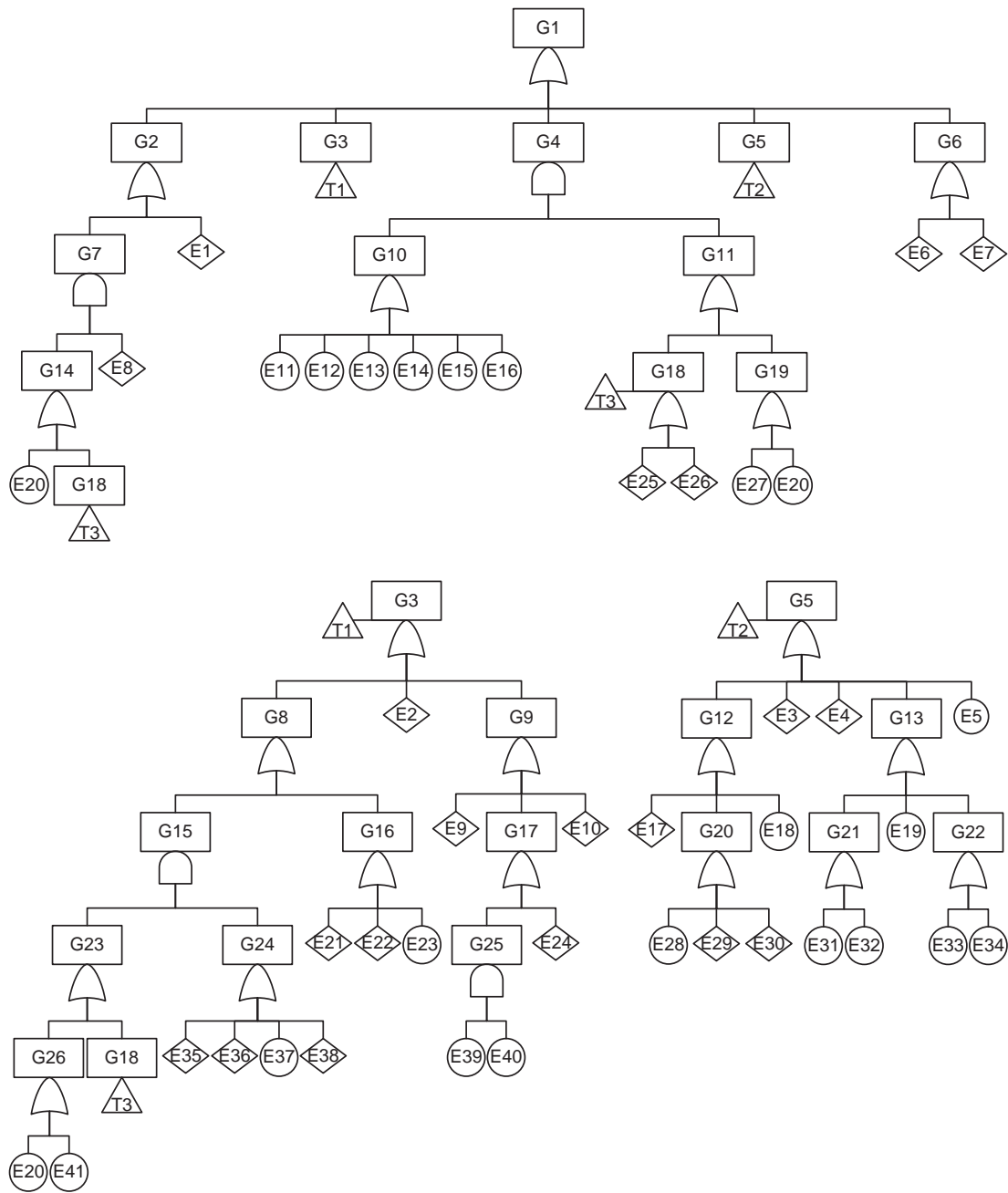
ادامه جدول ۱. فرآیند ایجاد درخت خطای خروج از خط قطار مسافری

گام	نام	گروه	ورودی‌ها		نوع دروازه
			نام	متن	
۱۶	G10	معیوب بودن خط	E11	کماتش خط	پایه‌ای
			E12	شکستگی ریل	پایه‌ای
			E13	پیچش خط	پایه‌ای
			E14	افتادگی خط	پایه‌ای
			E15	نامناسب بودن دور	پایه‌ای
			E16	عرض خط نامناسب	پایه‌ای
۱۷	G11	ورود قطار به قطعه خط با وجود معیوب بودن بخشی از خط	G20	ورود بدون جواز به قطعه خط	میانی
			G21	ورود به علت جواز ورود ناصحیح	میانی
۱۸	G20	ورود بدون جواز به قطعه خط اشغال	E28	عبور از سیگنال به علت خطای لکوموتور در درک و تفسیر سیگنال	ثانویه
			E29	عبور از سیگنال به علت خرابی سیستم ترمز	ثانویه
۱۹	G21	ورود به علت جواز ورود ناصحیح	E30	عدم تشخیص معیوب بودن بخشی از قطعه خط	پایه‌ای
			E23	صدور جواز عبور اشتباه توسط سیستم سیگنال	پایه‌ای
۲۰	G05	خروج از خط به سبب مشکلات فنی وسیله نقلیه	G12	خروج از خط به سبب مشکلات فنی بوژی	میانی
			G13	خروج از خط به سبب مشکلات فنی چرخ - محور	میانی
			E03	خروج از خط به سبب افتادن اجزاء و قطعات وسیله نقلیه	ثانویه
			E04	خروج از خط به سبب معیوب بودن تامپون و اتصالات	ثانویه
			E05	خروج از خط به سبب شکستگی یا معیوب بودن شاسی واگن	پایه‌ای
۲۱	G12	خروج از خط به سبب مشکلات فنی بوژی	E17	معیوب بودن یاتاقان‌ها	پایه‌ای
			G22	گردش ناپذیری بوژی	میانی
			E18	معیوب بودن قاب بوژی	پایه‌ای
۲۲	G22	گردش ناپذیری بوژی	E31	معیوب بودن کاسه بوژی	پایه‌ای
			E32	بیش از حد مجاز بودن وزن محموله	پایه‌ای
			E33	معیوب بودن سیستم تعلیق	پایه‌ای
۲۳	G13	خروج از خط به سبب مشکلات فنی چرخ - محور	G23	بریدن محور	میانی
			E19	خارج از حدود مجاز بودن معیارهای سایشی چرخ	ثانویه
			G24	جدا شدن بانداژ چرخ	میانی
۲۴	G23	بریدن محور	E34	بریدن محور به سبب ترک	پایه‌ای
			E35	بریدن محور به سبب گریپاژ	پایه‌ای
۲۵	G24	جدا شدن بانداژ چرخ	E36	جدا شدن بانداژ به علت لقی آن	پایه‌ای
			E37	جدا شدن بانداژ به علت شکستن آن	پایه‌ای
۲۶	G06	خروج از خط به علت بهره‌برداری نامناسب	E06	خروج از خط به سبب ترمزگیری ناگهانی	پایه‌ای
			E07	خروج از خط به سبب سرعت غیرمجاز	پایه‌ای

۴-۲ ارزیابی مدل‌های ترسیمی

بسته به اهداف مطالعه به صورت کیفی، کمی یا هر دو مورد ارزیابی و تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرند. فرآیند ارزیابی کمی تکنیک تجزیه و تحلیل درخت خطا و درخت وقایع یکپارچه در محیط فازی را به صورت کلی می‌توان در گام‌های زیر خلاصه کرد:

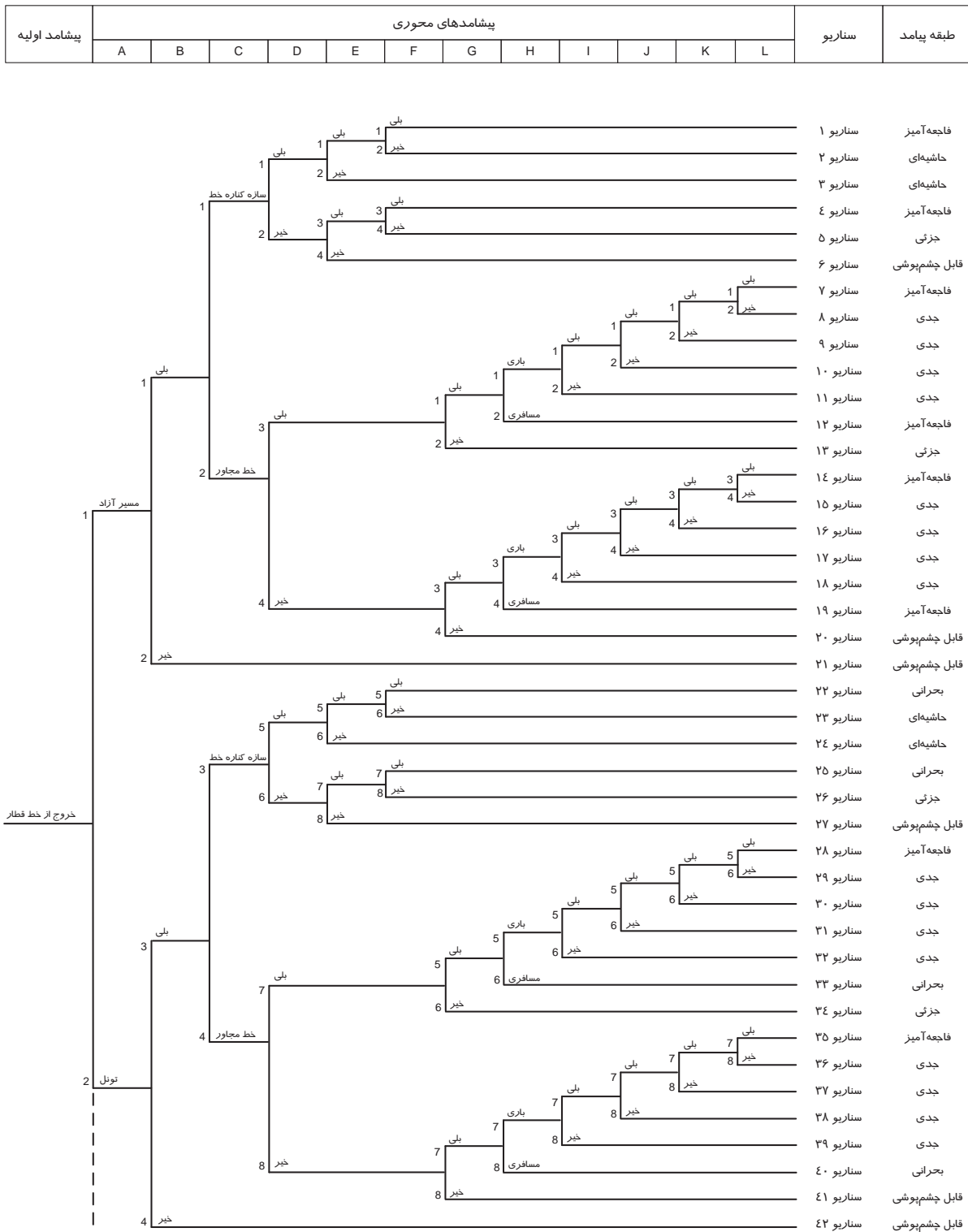
مرحله "ارزیابی مدل" یکی از مهم‌ترین و اساسی‌ترین مراحل تکنیک تجزیه و تحلیل درخت خطا و درخت وقایع یکپارچه است. در این مرحله مدل‌های ترسیمی ایجاد شده در مرحله "ایجاد مدل"



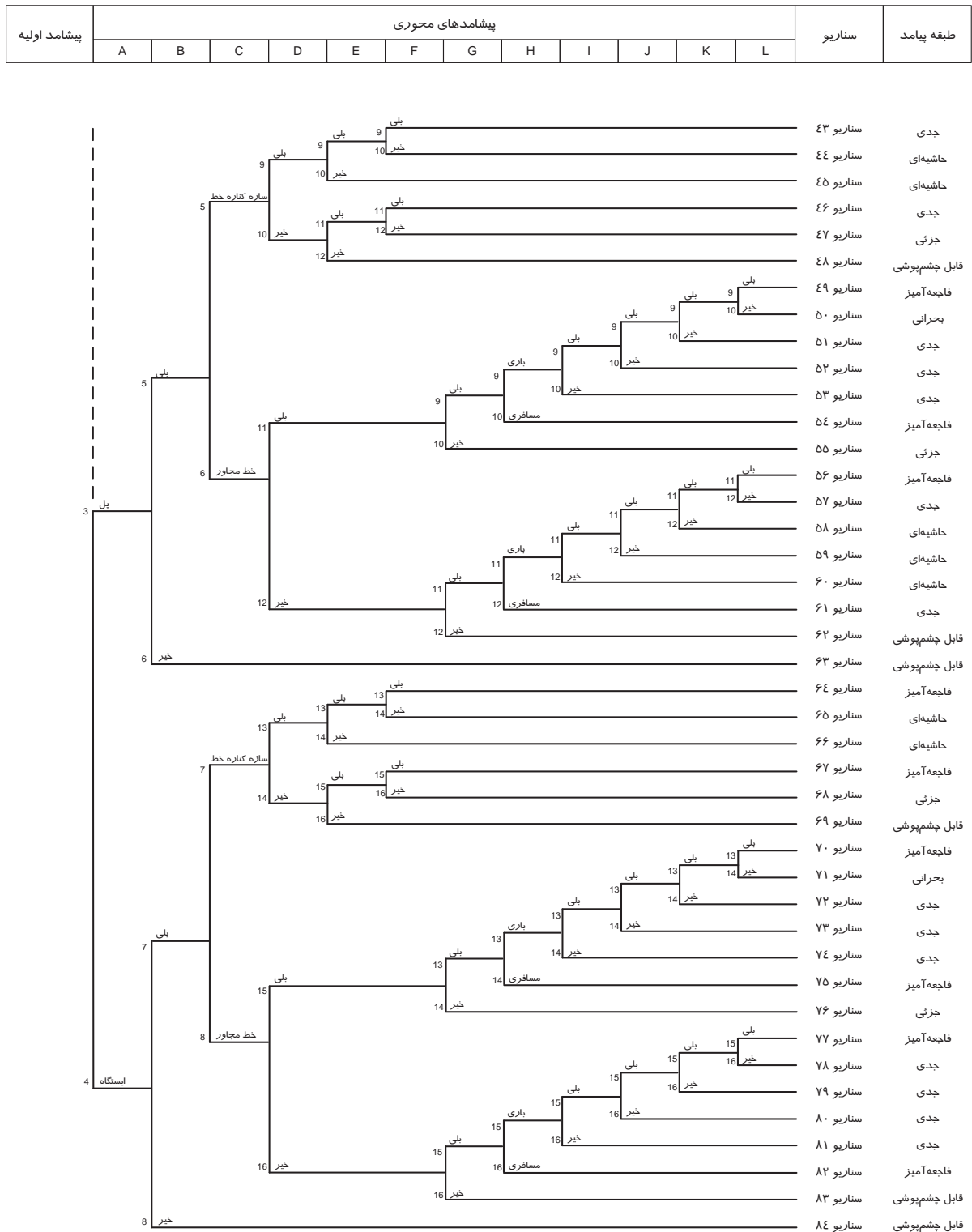
شکل ۱. درخت خطای خروج از خط قطار مسافری

جدول ۲. پیشامدهای محوری نمودار درخت وقایع خروج از خط قطار مسافری

نام گره	متن گره	نام گره	متن گره
A	قطار در چه بخشی از خط خارج می‌شود؟	G	آیا برخورد ثانویه‌ای رخ می‌دهد؟
B	آیا قطار پس از خروج از خط از حدود جانبی مجاز تجاوز می‌کند؟	H	قطار دوم چه نوع قطاری است؟
C	قطار پس از خروج از خط به کدام سمت منحرف می‌شود؟	I	آیا قطار باری ماده مخاطره‌آمیزی را حمل می‌کند؟
D	آیا واگنی از قطار به پهلو می‌افتد؟	J	آیا آتش‌سوزی‌ای حادث می‌شود؟
E	آیا قطار با تجهیزات یا سازه کناره خط برخورد می‌کند؟	K	آیا حجم قابل توجهی از مواد مخاطره‌آمیز رها می‌شود؟



شکل ۲. درخت وقایع خروج از خط قطار مسافری



ادامه شکل ۲. درخت وقایع خروج از خط قطار مسافری

اهمیت فازی تعیین می‌شوند. در این پژوهش عدد فازی متناظر با احتمال پیشامد اولیه درخت وقایع با استفاده از اعداد فازی متناظر با احتمال پیشامدهای پایانی درخت خطای متناظر تعیین می‌شود و اعداد فازی متناظر با پیشامدهای محوری نیز با استفاده از داده‌ها و سوابق موجود، با از طریق ارزیابی زبانی انجام شده توسط کارشناسان تعیین می‌گردد. جداول ۴ و ۵ به ترتیب فواصل برش α عدد فازی متناظر با احتمال پیشامد اولیه و اعداد فازی متناظر با احتمال پیشامدهای محوری درخت وقایع را نشان می‌دهند.

۴-۲-۳ کمی‌سازی سناریوهای درخت وقایع

کمی‌سازی سناریوهای درخت وقایع به صورت کلی در دو گام انجام می‌گیرد: نخست احتمال هر سناریو با استفاده از احتمال پیشامدهای تشکیل دهنده آن سناریو تعیین می‌شود. سپس عدد ریسک متناظر با هر سناریو از طریق ترکیب کردن دو بعد احتمال و شدت پیامدهای سناریو تعیین می‌شود. در این پژوهش پیامدهای هر سناریو برحسب پیامدهای جانی و در شش طبقه مطابق جدول ۶ طبقه‌بندی می‌شود. با استفاده از این تعاریف اعداد فازی متناظر با شدت پیامدهای سناریوهای درخت وقایع مطابق جدول ۷ تعیین می‌شوند. لازم به یادآوری است که در این مطالعه جهت تعیین تلفات جانی معادل هر طبقه از تعریف پیشنهاد شده توسط انجمن ایمنی و استانداردهای ریلی بریتانیا [Rail Safety and

- کمی‌سازی پیشامدهای پایانی درختهای خطا

- کمی‌سازی پیشامد اولیه و پیشامدهای محوری درخت وقایع

- کمی‌سازی سناریوهای درخت وقایع و تعیین عدد ریسک کل

- تفسیر اهمیت و عدم قطعیت

۴-۲-۱ کمی‌سازی پیشامدهای پایانی درخت خطا

در نخستین گام از فرآیند ارزیابی کمی، اعداد فازی متناظر با احتمال پیشامدهای پایانی درخت‌های خطا تعیین می‌شوند. این اعداد در ادامه فرآیند ارزیابی کمی با هدف محاسبه اعداد فازی متناظر با احتمال پیشامد اولیه، ریسک سناریوهای درخت وقایع، ریسک کل و همچنین معیارهای اهمیت فازی مورد استفاده قرار خواهند گرفت. جدول ۳ اعداد فازی متناظر با احتمال پیشامدهای پایانی درخت خطا را ارائه می‌کند. این اعداد یا با استفاده از داده‌ها و سوابق موجود یا با استفاده از ارزیابیهای زبانی انجام شده توسط کارشناسان تعیین می‌شوند.

۴-۲-۲ کمی‌سازی پیشامد اولیه و پیشامدهای محوری درخت وقایع

در دومین گام از فرآیند ارزیابی کمی، اعداد فازی متناظر با احتمال پیشامد اولیه و پیشامدهای محوری درخت وقایع با هدف محاسبه احتمال سناریوها، ریسک سناریوها، ریسک کل و معیارهای

جدول ۳. اعداد فازی متناظر با احتمال پیشامدهای پایانی درخت خطای خروج از خط قطار مسافری

پیشامد			پارامترها			پیشامد			پارامترها		
پایانی	حد پایین	مقدارمیانی	حد بالا	پایانی	حد پایین	مقدارمیانی	حد بالا	پایانی	حد پایین	مقدارمیانی	حد بالا
E01	1.2E-08	6.1E-08	3.0E-07	E15	4.4E-08	1.3E-07	4.0E-07	E29	2.5E-09	7.6E-09	2.3E-08
E02	2.0E-09	6.1E-09	1.8E-08	E16	4.4E-08	1.3E-07	4.0E-07	E30	7.6E-09	3.0E-08	1.2E-07
E03	1.0E-09	3.0E-09	9.1E-09	E17	3.0E-09	6.1E-09	1.2E-08	E31	2.0E-09	6.1E-09	1.8E-08
E04	1.0E-09	3.0E-09	9.1E-09	E18	2.0E-09	6.1E-09	1.8E-08	E32	3.0E-09	9.1E-09	2.7E-08
E05	1.5E-08	3.0E-08	6.1E-08	E19	1.2E-09	6.1E-09	3.0E-08	E33	5.1E-09	1.5E-08	4.6E-08
E06	5.1E-09	1.5E-08	4.6E-08	E20	3.1E-04	9.3E-04	2.8E-03	E34	2.0E-09	6.1E-09	1.8E-08
E07	3.0E-08	9.1E-08	2.7E-07	E21	1.7E-09	5.1E-09	1.5E-08	E35	2.7E-06	1.3E-05	6.7E-05
E08	4.2E-05	8.3E-05	1.7E-04	E22	1.3E-09	5.1E-09	2.0E-08	E36	6.7E-07	3.3E-06	1.7E-05
E09	1.0E-09	3.0E-09	9.1E-09	E23	1.3E-09	5.1E-09	2.0E-08	E37	1.3E-06	6.7E-06	3.3E-05
E10	1.0E-09	3.0E-09	9.1E-09	E24	3.0E-10	1.5E-09	7.6E-09	E38	6.7E-07	3.3E-06	1.7E-05
E11	8.9E-08	2.7E-07	8.0E-07	E25	1.9E-04	8.9E-04	2.5E-03	E39	2.5E-05	5.0E-05	1.0E-04
E12	5.3E-07	1.6E-06	4.8E-06	E26	2.9E-06	8.7E-06	2.6E-05	E40	2.3E-07	6.1E-05	4.2E-04
E13	8.9E-08	2.7E-07	8.0E-07	E27	2.7E-02	5.5E-02	1.6E-01	E41	7.9E-04	2.7E-03	7.0E-03
E14	4.4E-08	1.3E-07	4.0E-07	E28	2.5E-09	7.6E-09	2.3E-08				

جدول ۴. حدود پایین و بالای فواصل برش α عدد فازی متناظر با احتمال پیشامد اولیه درخت وقایع

α			حد بالا			α			حد پایین		
1.02E-06	6.79E-07	0.9	2.04E-06	4.73E-07	0.6	3.35E-06	2.98E-07	0.3	4.97E-06	1.5E-07	0.0
7.55E-07	7.55E-07	1.0	1.67E-06	5.38E-07	0.7	2.88E-06	3.53E-07	0.4	4.40E-06	2.00E-07	0.1
			1.33E-06	6.07E-07	0.8	2.44E-06	4.11E-07	0.5	3.86E-06	2.47E-07	0.2

جدول ۵. اعداد فازی متناظر با احتمال پیشامدهای محوری درخت وقایع خروج از خط قطار مسافری

پیشامد			پارامترها			پیشامد			پارامترها			پیشامد		
محوری	حد پایین	مقدار میانی	حد بالا	مقدار میانی	حد پایین	محوری	حد بالا	مقدار میانی	حد پایین	مقدار میانی	محوری	حد بالا	مقدار میانی	حد پایین
A1	2.4E-01	2.8E-01	3.3E-01	F4	9.0E-01	F4	9.0E-01	9.0E-01	9.0E-01	9.0E-01	F4	9.0E-01	9.0E-01	9.0E-01
A2	4.0E-03	4.6E-03	5.4E-03	F5	4.3E-02	F5	4.1E-02	3.9E-02	4.1E-02	3.9E-02	F5	4.3E-02	4.1E-02	3.9E-02
A3	2.6E-03	3.0E-03	3.5E-03	F6	9.6E-01	F6	9.6E-01	9.6E-01	9.6E-01	9.6E-01	F6	9.6E-01	9.6E-01	9.6E-01
A4	6.6E-01	7.1E-01	7.5E-01	F7	3.2E-02	F7	3.0E-02	2.9E-02	3.2E-02	2.9E-02	F7	3.2E-02	3.0E-02	2.9E-02
B1	5.4E-01	5.9E-01	6.5E-01	F8	9.7E-01	F8	9.7E-01	9.7E-01	9.7E-01	9.7E-01	F8	9.7E-01	9.7E-01	9.7E-01
B2	3.5E-01	4.1E-01	4.6E-01	F9	2.1E-02	F9	2.0E-02	1.9E-02	2.1E-02	1.9E-02	F9	2.1E-02	2.0E-02	1.9E-02
B3	5.4E-01	5.9E-01	6.5E-01	F10	9.8E-01	F10	9.8E-01	9.8E-01	9.8E-01	9.8E-01	F10	9.8E-01	9.8E-01	9.8E-01
B4	3.5E-01	4.1E-01	4.6E-01	F11	8.3E-02	F11	7.5E-02	6.8E-02	8.3E-02	7.5E-02	F11	8.3E-02	7.5E-02	6.8E-02
B5	2.6E-01	2.9E-01	3.2E-01	F12	9.3E-01	F12	9.3E-01	9.2E-01	9.3E-01	9.3E-01	F12	9.3E-01	9.3E-01	9.2E-01
B6	6.8E-01	7.1E-01	7.4E-01	F13	5.8E-02	F13	5.0E-02	4.3E-02	5.8E-02	5.0E-02	F13	5.8E-02	5.0E-02	4.3E-02
B7	7.7E-02	8.5E-02	9.4E-02	F14	9.6E-01	F14	9.5E-01	9.4E-01	9.6E-01	9.5E-01	F14	9.6E-01	9.5E-01	9.4E-01
B8	9.1E-01	9.2E-01	9.2E-01	F15	5.8E-02	F15	5.0E-02	4.3E-02	5.8E-02	5.0E-02	F15	5.8E-02	5.0E-02	4.3E-02
C1	9.0E-01	9.2E-01	9.3E-01	F16	9.6E-01	F16	9.5E-01	9.4E-01	9.6E-01	9.5E-01	F16	9.6E-01	9.5E-01	9.4E-01
C2	6.6E-02	8.5E-02	1.0E-01	G1	1.5E-01	G1	1.0E-01	6.7E-02	1.5E-01	1.0E-01	G1	1.5E-01	1.0E-01	6.7E-02
C3	9.2E-01	9.4E-01	9.6E-01	G2	9.3E-01	G2	9.0E-01	8.5E-01	9.3E-01	9.0E-01	G2	9.3E-01	9.0E-01	8.5E-01
C4	3.9E-02	5.8E-02	7.6E-02	G3	1.5E-01	G3	1.0E-01	6.7E-02	1.5E-01	1.0E-01	G3	1.5E-01	1.0E-01	6.7E-02
C5	9.3E-01	9.5E-01	9.7E-01	G4	9.3E-01	G4	9.0E-01	8.5E-01	9.3E-01	9.0E-01	G4	9.3E-01	9.0E-01	8.5E-01
C6	3.4E-02	5.3E-02	7.2E-02	G5	1.5E-01	G5	1.0E-01	6.7E-02	1.5E-01	1.0E-01	G5	1.5E-01	1.0E-01	6.7E-02
C7	4.8E-01	5.1E-01	5.5E-01	G6	9.3E-01	G6	9.0E-01	8.5E-01	9.3E-01	9.0E-01	G6	9.3E-01	9.0E-01	8.5E-01
C8	4.5E-01	4.9E-01	5.2E-01	G7	1.5E-01	G7	1.0E-01	6.7E-02	1.5E-01	1.0E-01	G7	1.5E-01	1.0E-01	6.7E-02
D1	4.8E-02	5.0E-02	5.2E-02	G8	9.3E-01	G8	9.0E-01	8.5E-01	9.3E-01	9.0E-01	G8	9.3E-01	9.0E-01	8.5E-01
D2	9.5E-01	9.5E-01	9.5E-01	G9	1.5E-01	G9	1.0E-01	6.7E-02	1.5E-01	1.0E-01	G9	1.5E-01	1.0E-01	6.7E-02
D3	4.8E-02	5.0E-02	5.2E-02	G10	9.3E-01	G10	9.0E-01	8.5E-01	9.3E-01	9.0E-01	G10	9.3E-01	9.0E-01	8.5E-01
D4	9.5E-01	9.5E-01	9.5E-01	G11	1.5E-01	G11	1.0E-01	6.7E-02	1.5E-01	1.0E-01	G11	1.5E-01	1.0E-01	6.7E-02
D5	4.8E-02	5.0E-02	5.2E-02	G12	9.3E-01	G12	9.0E-01	8.5E-01	9.3E-01	9.0E-01	G12	9.3E-01	9.0E-01	8.5E-01
D6	9.5E-01	9.5E-01	9.5E-01	G13	7.5E-02	G13	5.0E-02	3.3E-02	7.5E-02	5.0E-02	G13	7.5E-02	5.0E-02	3.3E-02
D7	4.8E-02	5.0E-02	5.2E-02	G14	9.7E-01	G14	9.5E-01	9.3E-01	9.7E-01	9.5E-01	G14	9.7E-01	9.5E-01	9.3E-01
D8	9.5E-01	9.5E-01	9.5E-01	G15	7.5E-02	G15	5.0E-02	3.3E-02	7.5E-02	5.0E-02	G15	7.5E-02	5.0E-02	3.3E-02
D9	4.8E-02	5.0E-02	5.2E-02	G16	9.7E-01	G16	9.5E-01	9.3E-01	9.7E-01	9.5E-01	G16	9.7E-01	9.5E-01	9.3E-01
D10	9.5E-01	9.5E-01	9.5E-01	H1	5.5E-01	H1	5.3E-01	5.0E-01	5.5E-01	5.3E-01	H1	5.5E-01	5.3E-01	5.0E-01
D11	4.8E-02	5.0E-02	5.2E-02	H2	5.0E-01	H2	4.7E-01	4.5E-01	5.0E-01	4.7E-01	H2	5.0E-01	4.7E-01	4.5E-01
D12	9.5E-01	9.5E-01	9.5E-01	H3	5.5E-01	H3	5.3E-01	5.0E-01	5.5E-01	5.3E-01	H3	5.5E-01	5.3E-01	5.0E-01
D13	4.8E-02	5.0E-02	5.2E-02	H4	5.0E-01	H4	4.7E-01	4.5E-01	5.0E-01	4.7E-01	H4	5.0E-01	4.7E-01	4.5E-01
D14	9.5E-01	9.5E-01	9.5E-01	H5	5.5E-01	H5	5.3E-01	5.0E-01	5.5E-01	5.3E-01	H5	5.5E-01	5.3E-01	5.0E-01
D15	4.8E-02	5.0E-02	5.2E-02	H6	5.0E-01	H6	4.7E-01	4.5E-01	5.0E-01	4.7E-01	H6	5.0E-01	4.7E-01	4.5E-01
D16	9.5E-01	9.5E-01	9.5E-01	H7	5.5E-01	H7	5.3E-01	5.0E-01	5.5E-01	5.3E-01	H7	5.5E-01	5.3E-01	5.0E-01
E1	1.9E-01	2.0E-01	2.1E-01	H8	3.0E-03	H8	1.5E-03	1.3E-03	3.0E-03	1.5E-03	H8	3.0E-03	1.5E-03	1.3E-03
E2	7.9E-01	8.0E-01	8.1E-01	H9	1.0E+00	H9	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00	H9	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00
E3	1.4E-01	1.5E-01	1.6E-01	H10	5.0E-01	H10	4.7E-01	4.5E-01	5.0E-01	4.7E-01	H10	5.0E-01	4.7E-01	4.5E-01
E4	8.4E-01	8.5E-01	8.6E-01	H11	5.5E-01	H11	5.3E-01	5.0E-01	5.5E-01	5.3E-01	H11	5.5E-01	5.3E-01	5.0E-01
E5	6.8E-01	7.0E-01	7.2E-01	H12	5.0E-01	H12	4.7E-01	4.5E-01	5.0E-01	4.7E-01	H12	5.0E-01	4.7E-01	4.5E-01
E6	2.8E-01	3.0E-01	3.2E-01	H13	5.8E-01	H13	5.3E-01	4.8E-01	5.8E-01	5.3E-01	H13	5.8E-01	5.3E-01	4.8E-01
E7	4.3E-01	4.5E-01	4.7E-01	H14	5.2E-01	H14	4.7E-01	4.2E-01	5.2E-01	4.7E-01	H14	5.2E-01	4.7E-01	4.2E-01
E8	5.3E-01	5.5E-01	5.7E-01	H15	5.8E-01	H15	5.3E-01	4.8E-01	5.8E-01	5.3E-01	H15	5.8E-01	5.3E-01	4.8E-01
E9	6.8E-01	7.0E-01	7.2E-01	H16	5.2E-01	H16	4.7E-01	4.2E-01	5.2E-01	4.7E-01	H16	5.2E-01	4.7E-01	4.2E-01
E10	2.8E-01	3.0E-01	3.2E-01	I1	1.9E-01	I1	1.9E-01	9.5E-02	1.9E-01	9.5E-02	I1	1.9E-01	1.9E-01	9.5E-02
E11	4.3E-01	4.5E-01	4.7E-01	I2	9.5E-01	I2	9.1E-01	8.1E-01	9.5E-01	9.1E-01	I2	9.5E-01	9.1E-01	8.1E-01
E12	5.3E-01	5.5E-01	5.7E-01	I3	1.9E-01	I3	1.9E-01	9.5E-02	1.9E-01	9.5E-02	I3	1.9E-01	1.9E-01	9.5E-02
E13	4.3E-01	4.5E-01	4.7E-01	I4	9.5E-01	I4	9.1E-01	8.1E-01	9.5E-01	9.1E-01	I4	9.5E-01	9.1E-01	8.1E-01
E14	5.3E-01	5.5E-01	5.7E-01	I5	1.9E-01	I5	1.9E-01	9.5E-02	1.9E-01	9.5E-02	I5	1.9E-01	1.9E-01	9.5E-02
E15	2.4E-01	2.5E-01	2.6E-01	I6	9.5E-01	I6	9.1E-01	8.1E-01	9.5E-01	9.1E-01	I6	9.5E-01	9.1E-01	8.1E-01
E16	7.4E-01	7.5E-01	7.6E-01	I7	1.9E-01	I7	1.9E-01	9.5E-02	1.9E-01	9.5E-02	I7	1.9E-01	1.9E-01	9.5E-02
F1	1.4E-01	1.5E-01	1.6E-01	I8	9.5E-01	I8	9.1E-01	8.1E-01	9.5E-01	9.1E-01	I8	9.5E-01	9.1E-01	8.1E-01
F2	8.4E-01	8.5E-01	8.6E-01	I9	1.9E-01	I9	1.9E-01	9.5E-02	1.9E-01	9.5E-02	I9	1.9E-01	1.9E-01	9.5E-02
F3	9.5E-02	1.0E-01	1.1E-01	I10	9.5E-01	I10	9.1E-01	8.1E-01	9.5E-01	9.1E-01	I10	9.5E-01	9.1E-01	8.1E-01

α این عدد فازی را ارزیابی می‌کند. با استفاده از این فواصل، تابع عضویت عدد فازی متناظر با ریسک خروج از خط قطار مسافری برحسب تلفات جانی معادل در هر قطار کیلومتر سفر به صورت شکل ۳ ترسیم می‌شود.

[Standards Board, UK, 2008] استفاده می‌شود.

با کمی‌سازی سناریوهای درخت وقایع، عدد فازی متناظر با ریسک خروج از خط قطار مسافری برحسب تلفات جانی معادل در هر قطار کیلومتر سفر تعیین می‌شود. جدول ۸ فواصل برش

جدول ۶. تعریف طبقه‌های گوناگون پیامد در نمودار درخت وقایع خروج از خط قطار مسافری

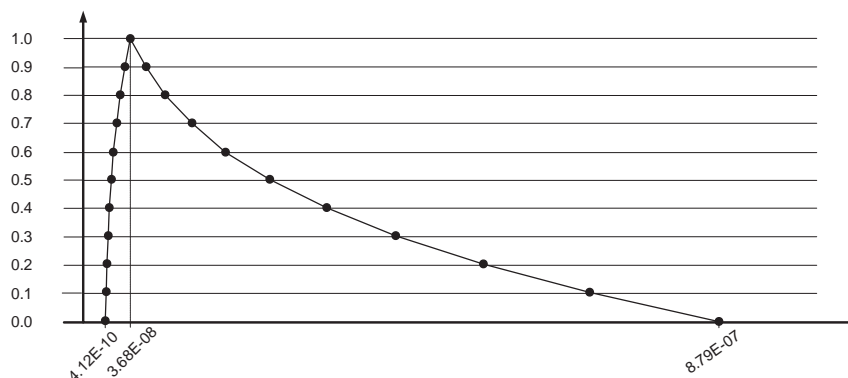
ردیف	شدت	تعداد		
		مرگ و میر	صدمات جدی	صدمات جزئی قابل گزارش
۱	فاجعه‌آمیز	بیش از ۵	بیش از ۱۵	بیش از ۲۵۰
۲	بحرانی	۲ تا ۵	۶ تا ۱۵	از ۵۱ تا ۲۵۰
۳	جدی	۱ یا کمتر	۲ تا ۵	از ۱۶ تا ۵۰
۴	حاشیه‌ای	۰	۱ یا کمتر	از ۶ تا ۱۶
۵	جزئی	۰	۰	از ۲ تا ۵
۶	قابل چشم‌پوشی	۰	۰	۱ یا کمتر

جدول ۷. اعداد فازی متناظر با طبقه‌های گوناگون پیامد در نمودار درخت وقایع خروج از خط قطار مسافری

طبقه	پارامترها			طبقه	پارامترها		
	حد پایین	مقدار میانی	حد بالا		حد پایین	مقدار میانی	حد بالا
فاجعه‌آمیز	7.00E+00	3.63E+02	7.19E+02	حاشیه‌ای	1.60E-02	7.80E-02	1.40E-01
بحرانی	2.73E+00	4.87E+00	7.00E+00	جزئی	2.00E-03	6.00E-03	1.00E-02
جدی	2.46E-01	9.36E-01	1.63E+00	قابل چشم‌پوشی	0.00E+00	5.00E-04	1.00E-03

جدول ۸: حدود پایین و بالای فواصل برش α عدد فازی متناظر با احتمال پیشامد اولیه درخت وقایع

α	حد بالا		α	حد پایین		α	حد بالا		α	حد پایین	
	حد بالا	حد پایین		حد بالا	حد پایین		حد بالا	حد پایین			
0.0	4.97E-06	1.5E-07	0.3	3.35E-06	2.98E-07	0.6	2.04E-06	4.73E-07	0.9	6.79E-07	1.02E-06
0.1	4.40E-06	2.00E-07	0.4	2.88E-06	3.53E-07	0.7	1.67E-06	5.38E-07	1.0	7.55E-07	7.55E-07
0.2	3.86E-06	2.47E-07	0.5	2.44E-06	4.11E-07	0.8	1.33E-06	6.07E-07			



شکل ۳. عدد فازی متناظر با ریسک خروج از خط قطار مسافری

۴-۲-۴ تفسیر اهمیت و عدم قطعیت

اعداد فازی متناظر با احتمال آن‌ها رتبه‌بندی می‌شوند. جدول ۱۰ رتبه‌بندی به دست آمده با استفاده از روش رتبه‌بندی اعداد فازی ارزش‌گذاری وزنی سطوح گوناگون α را ارائه می‌کند. چنان که در این جدول مشاهده می‌شود، از مجموع ۶۷ برش حداقل شناسایی شده در این پژوهش، برشهای حداقل شماره ۲۰ متشکل از پیشامدهای "شکستگی ریل" و "تشخیص ندادن عیب بخشی از قطعه خط"، شماره ۷ متشکل از پیشامدهای "خروج از خط قطار به سبب سرعت بیش از حد قطار" و شماره ۸ متشکل از پیشامدهای "تنظیم اشتباه سوزن" و "صدور جواز عبور اشتباه توسط سیستم علامت‌دهی" بیشترین اندازه غیرفازی سازی شده را داراست و به عنوان بحرانی‌ترین برش حداقل شناسایی می‌شود.

۴-۲-۴-۳ تفسیر اهمیت ریسک پیشامدهای پایانی درخت خط

در این پژوهش برای رتبه‌بندی اهمیت ریسک پیشامدهای پایانی درخت خط از شاخص اهمیت فازی ارائه شده توسط لیانگ و سایرین استفاده می‌شود. براین اساس، اهمیت فازی پیشامد پایانی درخت خط به صورت زیر تعیین می‌شود [Liang, et.al., 1993]:

$$FII_{BEi} = D(R_{IE}, R_{IE}(P_{E_i} = \bar{0})) \quad (10)$$

۴-۲-۴-۱ رتبه‌بندی اهمیت ریسک سناریوهای درخت وقایع

رتبه‌بندی اهمیت سناریوهای درخت وقایع، چیزی نیست جز رتبه‌بندی اعداد فازی متناظر با ریسک این سناریوها. در این پژوهش جهت رتبه‌بندی اعداد فازی نامبرده از روش رتبه‌بندی اعداد فازی بر مبنای ارزش‌گذاری وزنی سطوح گوناگون α استفاده می‌شود. جدول ۹ رتبه‌بندی به دست آمده با استفاده از این روش را نشان می‌دهد. چنان که در این جدول مشاهده می‌شود، از مجموع ۸۴ سناریو شناسایی شده در این پژوهش سناریو شماره ۱۲ متشکل از پیشامدهای "خروج از خط قطار مسافری" ← موقعیت خروج از خط مسیر آزاد باشد ← قطار از حدود جانبی مجاز خارج شود ← قطار به سمت خط مجاور منحرف شود ← حداقل یکی از واگن‌های قطار به پهلو بیافتد ← برخورد ثانویه‌ای رخ دهد ← قطار دوم قطاری مسافری باشد" بیشترین اندازه غیرفازی شده را داراست و به عنوان بحرانی‌ترین سناریو شناسایی می‌شود.

۴-۲-۴-۲ رتبه‌بندی اهمیت ریسک برش‌های حداقل درخت خط

اهمیت ریسک برشهای حداقل درخت خط از طریق رتبه‌بندی

جدول ۹. رتبه‌بندی اهمیت ریسک سناریوهای درخت وقایع خروج از خط قطار مسافری

رتبه‌بندی اهمیت ریسک سناریو			رتبه‌بندی اهمیت ریسک سناریو			رتبه‌بندی اهمیت ریسک سناریو			رتبه‌بندی اهمیت ریسک سناریو		
رتبه	مقدار	سناریو	رتبه	مقدار	سناریو	رتبه	مقدار	سناریو	رتبه	مقدار	سناریو
17	2.1E-10	SC64	13	2.8E-10	SC43	8	1.8E-09	SC22	14	2.8E-10	SC01
28	6.5E-11	SC65	46	2.8E-12	SC44	37	8.6E-12	SC23	19	1.3E-10	SC02
21	8.3E-11	SC66	50	1.2E-12	SC45	43	3.9E-12	SC24	11	6.1E-10	SC03
7	2.2E-09	SC67	3	1.3E-08	SC46	2	1.6E-08	SC25	6	2.6E-09	SC04
29	5.1E-11	SC68	47	2.4E-12	SC47	39	7.9E-12	SC26	18	1.5E-10	SC05
33	1.4E-11	SC69	58	2.8E-13	SC48	52	8.8E-13	SC27	22	8.0E-11	SC06
70	3.0E-14	SC70	75	1.4E-14	SC49	69	4.6E-14	SC28	42	3.9E-12	SC07
84	7.4E-17	SC71	83	1.5E-16	SC50	82	5.1E-16	SC29	77	9.5E-15	SC08
67	5.2E-14	SC72	80	7.8E-16	SC51	78	2.6E-15	SC30	60	2.3E-13	SC09
45	3.0E-12	SC73	72	2.3E-14	SC52	65	7.6E-14	SC31	40	6.6E-12	SC10
30	5.0E-11	SC74	62	1.7E-13	SC53	55	5.6E-13	SC32	31	4.9E-11	SC11
15	2.3E-10	SC75	27	6.7E-11	SC54	16	2.2E-10	SC33	1	2.0E-08	SC12
36	1.0E-11	SC76	73	1.7E-14	SC55	66	5.7E-14	SC34	20	9.4E-11	SC13
54	5.7E-13	SC77	59	2.5E-13	SC56	53	8.6E-13	SC35	26	7.3E-11	SC14
79	1.4E-15	SC78	81	6.1E-16	SC57	76	9.6E-15	SC36	61	1.8E-13	SC15
64	8.2E-14	SC79	74	1.5E-14	SC58	68	4.9E-14	SC37	57	3.6E-13	SC16
41	4.7E-12	SC80	56	4.2E-13	SC59	48	1.4E-12	SC38	35	1.0E-11	SC17
23	7.9E-11	SC81	44	3.1E-12	SC60	34	1.0E-11	SC39	24	7.7E-11	SC18
4	4.3E-09	SC82	9	1.2E-09	SC61	5	4.2E-09	SC40	10	9.0E-10	SC19
32	1.7E-11	SC83	71	2.8E-14	SC62	63	9.5E-14	SC41	38	8.3E-12	SC20
12	4.0E-10	SC84	49	1.3E-12	SC63	51	1.2E-12	SC42	25	7.5E-11	SC21

از مجموع ۴۱ پیشامد پایانی، پیشامدهای پایانی "تنظیم اشتباه سوزن"، "تشخیص ندادن عیب بخشی از قطعه خط" و "صدور جواز عبور اشتباه توسط سیستم سیگنالر" به ترتیب با مقادیر اهمیت غیرفازی سازی شده $5/84 \times 10^{-7}$ ، $4/53 \times 10^{-7}$ و $3/95 \times 10^{-7}$ بیشترین سهم را در ریسک کل دارند و به عنوان بحرانی‌ترین پیشامدهای پایانی برای ریسک کل شناسایی می‌شوند.

۴-۲-۴ تفسیر اهمیت عدم قطعیت پیشامدهای پایانی درخت خطا در این پژوهش برای رتبه‌بندی اهمیت عدم قطعیت پیشامدهای پایانی درخت خطا از معیار اهمیت عدم قطعیت فازی استفاده شد. معیار اهمیت عدم قطعیت فازی پیشامدهای پایانی‌یی را که بیشترین سهم را در عدم قطعیت خروجی فازی دارند، شناسایی می‌کند. رتبه‌بندی به دست آمده با استفاده از این معیار اهمیت می‌تواند در طراحی استراتژی‌های جمع‌آوری اطلاعات بکارگرفته شود. معیار اهمیت عدم قطعیت فازی برای پیشامد پایانی نام درخت خطا به صورت زیر تعریف می‌شود [Suresh, et. al., 1996]:

$$FUI_{BEi} = D(R_{IE}, R_{IEi}) \quad (13)$$

در این رابطه R_{IE} و $R_{IE}(P_{Ei} = \tilde{0})$ به ترتیب عدد فازی متناظر با ریسک کل و عدد فازی متناظر با ریسک کل با صفر فرض کردن احتمال پیشامد پایانی نام است و $D(R_{IE}, R_{IE}(P_{Ei} = \tilde{0}))$ اختلاف بین اعداد فازی R_{IE} و $R_{IE}(P_{Ei} = \tilde{0})$ را ارزیابی می‌کند.

با استفاده از مفهوم فاصله اقلیدسی دو مجموعه فازی، اندازه شاخص اهمیت فازی برای پیشامد پایانی نام درخت خطا به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$FII_{BEi} = ED[R_{IE}, R_{IE}(P_{BEi} = \tilde{0})] \quad (11)$$

در رابطه بالا $ED[R_{IE}, R_{IE}(P_{BEi} = \tilde{0})]$ فاصله اقلیدسی دو مجموعه فازی R_{IE} و $R_{IE}(P_{BEi} = \tilde{0})$ را نشان می‌دهد. با استفاده از مفهوم برش α ، فاصله اقلیدسی دو مجموعه فازی A و B به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$ED[A, B] = \sum_{i=1}^n \left((A_{\alpha_i}^U - B_{\alpha_i}^U)^2 + (A_{\alpha_i}^L - B_{\alpha_i}^L)^2 \right)^{0.5} \cdot \Delta \alpha_i \quad (12)$$

که:
 $\Delta \alpha_i = \alpha_i - \alpha_{i-1}$
 $\alpha_n = 1$

جدول ۱۱ رتبه‌بندی به دست آمده با استفاده از شاخص اهمیت فازی را ارائه می‌کند. چنان که در این جدول مشاهده می‌شود،

جدول ۱۰. رتبه‌بندی اهمیت ریسک برش‌های حداقل درخت خطای خروج از خط قطار مسافری

رتبه‌بندی اهمیت			رتبه‌بندی اهمیت			رتبه‌بندی اهمیت					
مجموعه	اعضاء مجموعه	مجموعه	مجموعه	اعضاء مجموعه	مجموعه	مجموعه	اعضاء مجموعه	مجموعه			
رتبه	مقدار	رتبه	مقدار	رتبه	مقدار	رتبه	مقدار	رتبه			
45	2.0E-09	E24	CS47	11	2.2E-08	E13,E27	CS24	5	8.2E-08	E01	CS01
35	5.8E-09	E20,E36	CS48	53	1.8E-10	E14,E20	CS25	27	7.0E-09	E02	CS02
38	5.3E-09	E25,E36	CS49	56	1.7E-10	E14,E25	CS26	40	3.5E-09	E03	CS03
60	5.4E-11	E26,E36	CS50	65	1.7E-12	E14,E26	CS27	40	3.5E-09	E04	CS04
16	1.6E-08	E41,E36	CS51	19	1.1E-08	E14,E27	CS28	8	3.2E-08	E05	CS05
18	1.2E-08	E20,E37	CS52	53	1.8E-10	E15,E20	CS29	14	1.7E-08	E06	CS06
22	1.1E-08	E25,E37	CS53	56	1.7E-10	E15,E25	CS30	2	1.0E-07	E07	CS07
59	1.1E-10	E26,E37	CS54	65	1.7E-12	E15,E26	CS31	3	1.0E-07	E08,E20	CS08
9	3.2E-08	E41,E37	CS55	19	1.1E-08	E15,E27	CS32	4	9.3E-08	E08,E25	CS09
24	8.7E-09	E28	CS56	53	1.8E-10	E16,E20	CS33	47	9.4E-10	E08,E26	CS10
24	8.7E-09	E29	CS57	56	1.7E-10	E16,E25	CS34	40	3.5E-09	E09	CS11
7	3.8E-08	E30	CS58	65	1.7E-12	E16,E26	CS35	40	3.5E-09	E10	CS12
27	7.0E-09	E31	CS59	19	1.1E-08	E16,E27	CS36	48	3.7E-10	E11,E20	CS13
23	1.0E-08	E32	CS60	31	6.4E-09	E17	CS37	50	3.4E-10	E11,E25	CS14
14	1.7E-08	E33	CS61	27	7.0E-09	E18	CS38	63	3.4E-12	E11,E26	CS15
27	7.0E-09	E34	CS62	26	8.2E-09	E19	CS39	11	2.2E-08	E11,E27	CS16
37	5.6E-09	E39,E40	CS63	10	2.3E-08	E20,E35	CS40	44	2.2E-09	E12,E20	CS17
35	5.8E-09	E20,E38	CS64	13	2.1E-08	E25,E35	CS41	46	2.0E-09	E12,E25	CS18
38	5.3E-09	E25,E38	CS65	52	2.1E-10	E26,E35	CS42	62	2.0E-11	E12,E26	CS19
60	5.4E-11	E26,E38	CS66	6	6.3E-08	E41,E35	CS43	1	1.3E-07	E12,E27	CS20
16	1.6E-08	E41,E38	CS67	34	5.8E-09	E21	CS44	48	3.7E-10	E13,E20	CS21
				32	6.3E-09	E22	CS45	50	3.4E-10	E13,E25	CS22
				32	6.3E-09	E23	CS46	63	3.4E-12	E13,E26	CS23

۵. جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

خروج از خط قطار، پیشامد نامطلوب و ناخواسته‌ای است که در نتیجه ترکیبهای گوناگونی از خرابیهای سخت‌افزاری، خرابیهای نرم‌افزاری، خطاهای انسانی و رویدادهای طبیعی رخ می‌دهد و به صورت می‌تواند هزینه‌های هنگفتی را به سازمان و جامعه تحمل کند.

این پژوهش پیشامد نامطلوب "خروج از خط قطار" را با استفاده از تکنیک تجزیه و تحلیل درخت خطا و درخت وقایع یکپارچه فازی مورد ارزیابی قرار داد. برای این منظور، ابتدا با استفاده از اطلاعات جمع‌آوری شده از منابع گوناگون مدلی پرجزئیات از علل ریشه‌ای خروج از خط قطار و سناریوهای بالقوه ناشی از وقوع این پیشامد ایجاد شد. سپس مدل نامبرده با استفاده از ترکیبی از داده‌های موجود و ارزیابی زبانی انجام گرفته توسط کارشناسان کمی‌سازی شد و احتمال و عدد ریسک متناظر با خروج از خط قطار مسافری تعیین شد. در ادامه پژوهش و با هدف فراهم آوردن دیدی پرجزئیات، مدل مذکور از جهات گوناگون مورد ارزیابی و تحلیل قرار گرفت و سهم اجزای گوناگون مدل در ریسک و عدم قطعیت خروجی تعیین شد.

در رابطه بالا، R_{IE} و R_{IEi} به ترتیب عدد فازی متناظر با ریسک کل و عدد فازی متناظر با ریسک کل با فرض نقطه‌ای بودن احتمال پیشامد پایانی \bar{a} هستند و $D(R_{IE}, R_{IEi})$ اختلاف بین اعداد فازی R_{IE} و R_{IEi} را ارزیابی می‌کند. با استفاده از مفهوم فاصله اقلیدسی دو مجموعه فازی، اندازه اهمیت عدم قطعیت برای پیشامد پایانی \bar{a} درخت خطا به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$E\Omega^{BE\bar{a}} = ED[B^{IE}, B^{IEi}] \quad (14)$$

در رابطه بالا، $ED[B^{IE}, B^{IEi}]$ فاصله اقلیدسی دو مجموعه فازی R_{IE} و R_{IEi} را نشان می‌دهد.

جدول ۱۱ رتبه‌بندی به دست آمده با استفاده از معیار اهمیت عدم قطعیت فازی را نشان می‌دهد. چنان که در این جدول مشاهده می‌شود، از مجموع ۴۱ پیشامد پایانی شناسایی شده، پیشامدهای پایانی "تشخیص ندادن عیب بخشی از قطعه خط"، "باقی ماندن شیء توسط کارکنان خط" و "صدور جواز عبور اشتباه توسط سیستم سیگنالر" به ترتیب با مقادیر اهمیت $2/26 \times 10^{-7}$ ، $2/29 \times 10^{-7}$ و $1/99 \times 10^{-7}$ بیشترین سهم را در عدم قطعیت خروجی فازی دارند و به عنوان بحرانی‌ترین پیشامدهای پایانی برای عدم قطعیت خروجی فازی شناسایی می‌شوند.

جدول ۱۱. رتبه‌بندی اهمیت پیشامدهای پایانی درخت خطای خروج از خط قطار مسافری

FUI		FII		پیشامد پایانی	FUI		FII		پیشامد پایانی
رتبه	مقدار	رتبه	مقدار		رتبه	مقدار	رتبه	مقدار	
28	7.06E-09	28	1.26E-08	E22	9	1.12E-07	9	1.78E-07	E01
27	7.06E-09	28	1.26E-08	E23	30	5.78E-09	30	1.26E-08	E02
40	2.79E-09	40	4.45E-09	E24	36	2.89E-09	36	6.28E-09	E03
6	1.76E-07	5	3.61E-07	E25	36	2.89E-09	36	6.28E-09	E04
41	1.86E-09	41	3.68E-09	E26	16	1.53E-08	16	5.07E-08	E05
1	2.69E-07	1	5.48E-07	E27	20	1.44E-08	17	3.14E-08	E06
25	7.22E-09	26	1.57E-08	E28	10	8.66E-08	8	1.88E-07	E07
25	7.22E-09	26	1.57E-08	E29	7	1.53E-07	2	4.53E-07	E08
13	4.24E-08	13	7.58E-08	E30	38	2.89E-09	38	6.28E-09	E09
31	5.78E-09	31	1.26E-08	E31	38	2.89E-09	38	6.28E-09	E10
24	8.66E-09	22	1.88E-08	E32	14	3.02E-08	15	5.96E-08	E11
21	1.44E-08	18	3.14E-08	E33	5	1.81E-07	6	3.58E-07	E12
32	5.78E-09	32	1.26E-08	E34	15	3.02E-08	14	5.96E-08	E13
2	2.29E-07	7	3.41E-07	E35	17	1.51E-08	19	2.98E-08	E14
11	5.72E-08	11	8.53E-08	E36	17	1.51E-08	19	2.98E-08	E15
8	1.14E-07	10	1.71E-07	E37	17	1.51E-08	19	2.98E-08	E16
12	5.72E-08	12	8.53E-08	E38	35	3.06E-09	35	1.01E-08	E17
29	6.45E-09	24	1.77E-08	E39	33	5.78E-09	33	1.26E-08	E18
22	1.31E-08	24	1.77E-08	E40	23	1.12E-08	23	1.78E-08	E19
4	1.83E-07	4	3.93E-07	E41	3	1.99E-07	3	3.95E-07	E20
					34	4.81E-09	34	1.05E-08	E21

- Anderson, R.T. and Barkan, C.P.L. (2004) "Analysis of railroad accident rates for use in transportation risk analysis", Transport Research Record: 1863, pp. 88-98

- Barkan, C. P. L., Dick, C. T., and Anderson, R. (2003) "Railroad derailment factors affecting hazardous materials transportation risk", Transport Research Record: 1825, pp. 64-74

- Bishop, M.I., and Mech, E.M. (1928) "Derailments and their causes", New Zealand Railways Magazine, Vol 3, No. 6, pp. 36-38.

- Cho, H. N., Choi, H. H. and Kim, Y. B. (2002) "A risk assessment methodology for incorporating uncertainties using fuzzy concepts", Reliability Engineering and System Safety, Vol. 78, pp. 173-83

- Detyniecki, M. and Yager, R. R. (2001) "Ranking fuzzy numbers using alpha-weighted valuations", International Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-Based Systems, Vol. 8, pp. 573-592

- Doménech, E., Escriche, I. and Martorel, S. (2010) "Exposure assessment based on a combination of event and fault tree analyses and predictive modeling", Journal of Food Control, Vol. 21, No. 10, pp. 1338-48.

- Ericson, Clifton A. (2005) "Hazard analysis techniques for system safety", John Wiley and Sons, Hoboken, New Jersey, United States

- Ferdousa, R., Khana, F., Sadiq, R., Amyotte, P. and Veitcha, B. (2009) "Handling data uncertainties in event tree analysis", Process Safety and Environmental Protection, Vol. 87, pp. 283-292

- Gupta, B. L. (1997) "Textbook of railway engineering", Second edition, Standards Publishing, Delhi, India

- Iwnicki, S. D. (2006) "Handbook of Railway Vehicle Dynamics", Taylor & Francis Group, LLC, United States

- Iwnicki, S. D., Parkinson, H. and Stow, J. M. (1999) "Assessing railway vehicle derailment potential using neural networks", Proceedings of the International

براساس نتایج تحلیل به عمل آمده، از مجموع ۴۱ پیشامد پایانی شناسایی شده، پیشامدهای "تنظیم اشتباه سوزن" و "تشخیص ندادن عیب بخشی از قطعه خط" به ترتیب به عنوان بحرانی‌ترین علل ریشه‌ای برای ریسک کل و عدم قطعیت خروجی فازی شناسایی شدند. همچنین، از میان ۶۷ برش حداقل شناسایی شده، برش حداقل متشکل از پیشامدهای "شکستگی ریل" و "تشخیص ندادن بخشی از قطعه خط" به عنوان بحرانی‌ترین مسیر علی و از میان ۸۴ سناریو شناسایی شده، سناریو متشکل از پیشامدهای "خروج از خط قطار مسافری" ← "موقعیت خروج از خط مسیر آزاد باشد" ← قطار از حدود جانبی مجاز خارج شود ← قطار به سمت خط مجاور منحرف شود ← حداقل یکی از واگن‌های قطار به پهلو بیافتند ← برخورد ثانویه رخ دهد ← قطار دوم قطاری مسافری باشد" به عنوان بحرانی‌ترین سناریو برای ریسک کل شناسایی شدند. مدلسازی و تحلیل ارایه شده در این پژوهش از طریق فراهم آوردن دیدی پرجزئیات از علل و سناریوهای بالقوه ناشی از وقوع پیشامد نامطلوب خروج از خط، تصمیم‌گیرنده را در طراحی و اتخاذ اقدامات اصلاحی و راه‌کارهایی کارآ در راستای کاهش ریسک مرتبط یاری رساند.

۶. سپاسگزاری

نویسندگان مقاله لازم می‌دانند از مرکز پژوهش‌های راه‌آهن جمهوری اسلامی ایران، به سبب حمایت مالی و علمی در انجام این پژوهش تشکر و قدردانی کنند.

۷. مراجع

- راه‌آهن جمهوری اسلامی ایران. اداره کل حفاظت و ایمنی سیر و حرکت (۱۳۸۸) "بولتن آماری حوادث سال ۱۳۸۷"، تهران: راه‌آهن جمهوری اسلامی ایران.

- Anderson, R.T. (2005) "Quantitative analysis of factors affecting railroad accident probability and severity", MSc Dissertation, University of Illinois at Urbana-Champaign, Illinois, United States.

- Suresh, P. V., Babar, A. K. and Raj, V. (1996) "Uncertainty in fault tree analysis: A fuzzy approach", *Fuzzy Sets and Systems*, Vol. 83, pp. 135-141
- Wagner, S. (2004) "Derailment risk assessment", MSc thesis, James Goldston Faculty of Engineering and Physical Systems, Central Queensland University, Australia
- Xiao, X., Jin, X., Wen, Z., Zhu, M. and Zhang, W. (2011) "Effect of tangent track buckle on vehicle derailment", *Multibody System Dynamics*, Vol. 25, pp. 1-41
- Zadeh, L. A. (1971) "Similarity relations and fuzzy orderings", *Information Sciences*, Vol. 3, pp. 177-200
- Zhao, J., Chan, A. H. C. and Stirling, A. B. (2006) "Risk analysis of derailment induced by rail breaks, a probabilistic approach", *Proceedings of the Reliability and Maintainability Symposium, RAMS '06*, Birmingham, UK, pp. 486-491
- IMECHE Conference 'Fault Free Infrastructure', Derby, UK, pp. 1-11
- Koo, J. S., and Cho, H. J. (2012) "A method to predict the derailment of rolling stock due to collision using a theoretical wheelset derailment model", *Multibody System Dynamics*, Vol. 27, pp. 403-422
- Liang, G. S. and Wang, M. J. J. (1993) "Fuzzy fault tree analysis using failure possibility", *Microelectronics and Reliability*, Vol. 33, pp. 583-597
- Mundrey, J. S. (2000) "Railway track engineering, Third edition", Tata McGraw-Hill Education, New Delhi, India
- Rail Safety and Standards Board, United Kingdom (2008) "Proposals for the weighting of major and minor injuries"
- Stapelberg, Rudolph Frederick (2009) "Handbook of reliability, availability, maintainability and safety in engineering design", Springer, London, United Kingdom