

# ارزیابی ریسک آتش‌سوزی قطارهای مسافری ایران با استفاده از رویکرد FMEA فازی - تئوری گری

نجمه بلبل امیری (نویسنده مسئول)، دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی راه آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران  
علی اسدی لاری، استادیار، دانشکده مهندسی راه آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

Email: n\_bolbolamiri@rail.iust.ac.ir

## چکیده

این مقاله مربوط به کاربرد رویکردی مبتنی بر ریسک، به منظور ارزیابی عملکرد ایمنی صنعت ریلی ایران، در برخی سطوح شناخته شده ریسک<sup>۱</sup> حریق در قطار مسافری است. اهمیت بررسی حریق از آنان جهت است که عوامل تأثیرگذار بر آن عموماً در اختیار راه آهن بوده و با برنامه ریزی مناسب، آموزش و ارائه نکات دقیق می‌توان از وقوع چنین حوادثی پیشگیری کرد، یا دست کم خسارات وارده به مسافر و پیامدهای مالی آن را کاهش داد. با توجه به افزایش تعداد حوادث آتش‌سوزی در سالهای اخیر، رشد ۲۵ درصد نرخ وقوع حریق بین سالهای ۸۷-۸۶ و نیز با توجه به کاهش ۱۱ درصد نرخ وقوع کل حوادث ریلی، اهمیت بررسی موضوع افزایش می‌یابد.

به منظور ارزیابی ریسک مهم‌ترین مخاطرات آتش‌سوزی، در سه زیرمجموعه برق و تهویه و اگنهای مسافری، مولدهای برق و مولدهای بخار، از رویکرد آنالیز FMEA فازی مبتنی بر تئوری گری استفاده شده است. هدف، شناسایی و تجزیه و تحلیل خطرات تا سطح بررسی کلی علل آنها، تعیین تناوب وقوع و شدت اثر پیامدها به صورت کیفی، محاسبه ریسک هر خرابی در هر زیرمجموعه و نیز تعیین شکافهای موجود در سیستم ریلی کشور در زمینه حریق است. امید است که در آینده با فراهم آوردن پایگاه داده‌ای جامعی از گزارشهای سوانح، آنالیز دقیق‌تر مخاطرات فوق با استفاده از رویکردهای کمی ارزیابی ریسک، میسر شود تا اهداف ایمنی نظیر پیشگیری از خسارات، آسیبهای اجتماعی و پیامدهای آن و نیز ایمنی افراد محقق شود.

واژه‌های کلیدی: آتش‌سوزی، مخاطره، ریسک، تئوری گری، ایمنی قطارهای مسافری

## ۱. مقدمه

تمایل به ارتقاء سطح ایمنی در قطارهای مسافری سابقه قدیمی دارد. به عنوان نمونه، با توجه به اینکه اجزای تشکیل دهنده، قابلیت افزایش میزان بار آتش<sup>۲</sup> در وسیله نقلیه را دارند، جایگزینی تزئینات چوبی واگن با یک ساختار ایمن، به منظور پیشگیری از حریق در واگنهای مسافری، می تواند از جمله اقدامات باشد [Peacock, 1999].

به طور کلی، ایمنی حریق در هر زمینه، مانند حمل و نقل نیازمند یک رویکرد چندگانه است. اهمیت در نظر گرفتن تمامی مخاطرات محتمل و سناریوی حریق آنها، رویکرد سیستمی ایمنی حریق است. توصیه و بکار بستن برنامه‌های ایمنی، باید از جنبه‌های کارایی و اثربخشی، اقتصادی و اثرات محیطی مورد بررسی قرار گیرد [Wiggins, 1976].

برقراری فرهنگ ایمنی در صنعت ریلی، متمرکز بر حالات متعدد خرابی زیر سیستم‌هاست. این حالات خرابی به دو زیر مجموعه خطرناک (WSF)<sup>۳</sup> و نسبتاً ایمن (RSF)<sup>۴</sup> تقسیم بندی می‌شود. به عبارتی ساز و کار تشخیص خرابی و حفاظت در برابر پیامدهای ناشی از آن، جزء برنامه‌های ایمنی است.

بر اساس آمار موجود، شاخص متوسط تعداد حوادث حریق به متوسط قطار- کیلومتر در سالهای ۱۳۸۶ و ۸۷، به ترتیب ۰/۳۶ و ۰/۳۸ است که معادل ۳ درصد و ۵ درصد از کل حوادث ریلی بوده است. بر اساس این رشد ۲۵ درصد، با توجه به پیشرفتهای اخیر در صنعت حمل و نقل ریلی، توسعه تکنیکهای آنالیز مخاطرات و روشهای آزمون حریق، الزام آزمون مجدد "نیازمندیهای ایمنی حریق" و توسعه‌های تکنولوژیکی در زمینه مواد و اجزای تشکیل دهنده واگن ضروری به نظر می‌رسد [Peacock, 2001]. انتخاب روش مناسب، نیازمند تعادل بین زمان (هزینه) تکمیل ارزیابیها و سودآوری است تا با حداقل هزینه، حداکثر سود حاصل شود. در ادامه عوامل تأثیر گذار بر آتش‌سوزی قطارهای مسافری و عمده مشکلات مؤثر بر حریق در حالت کلی مورد بحث قرار می‌گیرد.

## ۲. پارامترهای مؤثر بر آتش‌سوزی

به منظور بررسی ریسک حریق، پارامترهای مؤثر بر حریق، به دو زیر مجموعه مجزا تقسیم می‌شوند. این تقسیم‌بندی به شرح زیر است:

- مشخصه‌های قابلیت اعتماد، دسترسی‌پذیری و پاسخ مناسب زیر شامل سامانه‌هایی نظیر:

(ا) عملکرد سامانه تشخیص حریق

(ب) عملکرد سامانه‌های حفاظتی حریق

(پ) تجهیزات ارتباطی بین قطارها جهت پوشش عملکرد سرویس دهی حریق

(ت) تجهیزات اضطراری (سیستم روشنایی، تخلیه)

(ث) تجهیزات اطفای حریق (دستی و اتوماتیک)

(ج) تمهیدات ایمنی در برابر حریق برای سایر موارد مخاطره آفرین (تابلو برق، کابل)

(چ) مشخصه هندسی واگن و چیدمان داخلی اجزاء قابل اشتعال

- مشخصه‌های مواد و اجزای تشکیل دهنده واگن در آتش‌سوزی:

(الف) قابلیت اشتعال و میزان انرژی فعال سازی

(ب) نرخ آزاد سازی گرما<sup>۵</sup>، دود و گاز سمی

(پ) مقاومت در برابر انتشار حریق و سرعت انتشار

همچنین مواد اشتعال پذیر به دو دسته تقسیم می‌شوند:

(الف) مواد ساختاری و روشهای استفاده از آنها که قابل کنترل اند.

(ب) موادی که توسط مسافر به قطار حمل می‌شوند که غیر قابل کنترل اند. مواد فوق حدود ۱۵۰۰ مگاژول به میزان بار آتش و حدود ۸۰۰ کیلوگرم به مجموع مواد اشتعال پذیر می‌افزاید.

بنابراین با توجه به این تقسیم بندی، دو دسته ارزیابی ریسک حریق می‌توان انجام داد. به منظور ارزیابی ریسک حریق با توجه به مواد و اجزای تشکیل دهنده، رویکرد ارزیابی مخاطرات حریق<sup>۶</sup> بر حسب شاخص نرخ آزادسازی گرما بکار می‌رود. بر اساس این رویکرد ساختار حریق<sup>۷</sup> از مرحله آغاز تا توسعه، مدل منطقه ای حریق<sup>۸</sup> و نمودار زمان تخلیه ایمن<sup>۹</sup> در دسترس<sup>۹</sup> محل بر حسب

حالات بالقوه خرابی و آثار آنها به منظور افزایش قابلیت اعتماد و ایمنی سیستمهای پیچیده و نیز گردآوری داده‌های لازم، برای تصمیم‌گیری در مورد نحوه مدیریت ریسکهاست. در حقیقت هدف از بکارگیری این تکنیک، شناسایی حالات خرابی و تأثیرات آن، اقدام اصلاحی برای حذف یا کاهش احتمال شکست (طراحی مجدد سیستم) و نهایتاً توسعه سیستم نگهداری و تعمیرات کارآ، برای کاهش وقوع حالات بالقوه خرابی است.

در رویکرد سنتی FMEA، رتبه بندی حالات بالقوه خرابی با توجه به سه فاکتور احتمال وقوع (P)، شدت اثر خرابی (S) و پتانسیل عدم تشخیص آنها (D) صورت می‌پذیرد. در این تکنیک به هر یک از عوامل فوق مقادیر بین ۱ تا ۱۰ تخصیص داده می‌شود، به طوری که مقدار بیشتر، بیانگر تأثیر نامطلوبتر پارامترهاست. در نهایت حاصل ضرب ۳ پارامتر نامبرده، درجه ریسک (RPN) را مشخص می‌کند که رتبه بندی ریسکها با استفاده از آن صورت می‌پذیرد.

به دلیل ناکارآمدی رویکرد متعارف، تحقیقات بسیاری برای توسعه و بهبود عملکرد FMEA صورت گرفته است. در نهایت برای رفع موانع چنین رویکردی، تئوری منطق فازی مطرح شده است. سیستم منطق فازی (لطفعلی زاده، ۱۹۸۷)، سیستمی در ارتباط با مفاهیم فازی (مثل مجموعه فازی، متغیرهای زبانی) و منطق فازی است.

در این تحقیق، با توجه به مشکلات رویکرد سنتی FMEA، این رویکرد با منطق فازی ترکیب می‌شود. ترکیب FMEA با منطق فازی به شکل استفاده از تئوری گری صورت می‌پذیرد. برای این منظور، ارزیابی کیفی کارشناسان در مورد وابستگی حالات مختلف بالقوه خرابی و تأثیرات آنها با استفاده از عبارات زبانی انجام خواهد شد.

#### ۴-۱ سیستم فازی

این سیستم از مجموعه ای از روابط استنتاجی از نوع شرطی «اگر ... آنگاه» جهت ایجاد نگاشت از مجموعه ورودی  $U \subset R^h$  به مجموعه خروجی  $V \subset R$  ساخته شده است. اگر  $U$  مجموعه

نرخ رشد آتش<sup>۱</sup>، در یک واگن با مشخصه هندسی و مواد متشکله معلوم به دست می‌آید و گویای آن است که مواد نقش قابل توجهی در کنترل آتش و افزایش ایمنی دارد [Peacock, 2001]، خصوصاً که قسمت عمده‌ای از اجزای واگنهای کشور، از خانواده اشتعال پذیر پلاستیک است. در این مقاله به این بخش از ارزیابیها پرداخته نمی‌شود.

#### ۳. عمده مشکلات سیستم کشور در بحث آتش‌سوزی قطارهای مسافری

(ا) قابلیت اشتعال پذیری بالای تمامی مواد و اجزای تشکیل دهنده واگنهای مسافری که عمدتاً از خانواده پلاستیک اند؛

(ب) مشکل در سیستم حفاظتی، تشخیص و اطفای حریق؛

(پ) مشکلات سازمانی در تدوین دستورالعملهای نظارت بر عملکرد و ایمنی و فرهنگ ایمنی، مبتنی بر ناچیز شمردن اهمیت بررسی مخاطرات حریق به دلیل نقص دانش سازمانی در مسئله تعدیل هزینه - سود؛

(ت) ناکارایی سیستم تحلیل سوانح به منظور ارائه راهکار آتی بر اساس حادثه فعلی، جهت جلوگیری یا تقلیل اثر حوادث مشابه در آینده؛

(ث) ضعف و ناکارآمدی سیستم نگهداری و تعمیرات بخشهای مختلف مبنی بر عدم توجه به رعایت اصول الزامی در استاندارد ریلی (موسوم به فیشهای UIC)، نظیر قرار دادن پشم شیشه در مجاورت تابلو برق یا آغشتگی به روغن که عنصر ماده سوختنی از مثلث آتش را فراهم می‌کند؛

(ج) فرسودگی واگنها خصوصاً واگنهای اسپانیایی که بیشترین آمار حریق متعلق به آنهاست و موارد دیگر.

با توجه به مشکلات فوق الذکر که نقش مهمی بر وقوع حریق و پیامد ناشی از آن دارند، پیاده سازی سیستم مدیریت ریسک و بررسی مخاطرات ضروری به نظر می‌رسد [داده های اداره برق]

#### ۴. تکنیک ارزیابی ریسک

تکنیک ارزیابی [بلبل امیری و فرناد، ۱۳۸۸] حالات بالقوه خرابی و آثار آن (FMEA)، ابزاری کارآمد برای شناخت

ریسک علت خرابی است، معرفی می‌شود. با ترکیب ضریب وزنی هر پارامتر و  $\gamma_i^j$  متناظرش، درجه ارتباط نسبی علت خرابی  $i$  ام، تعیین می‌شود که بیانگر نرخ ریسک هر علت خرابی است که با استفاده از نرخ ریسک، رتبه ریسک تعیین می‌شود.

#### ۴-۲-۱ روش کلین و چن

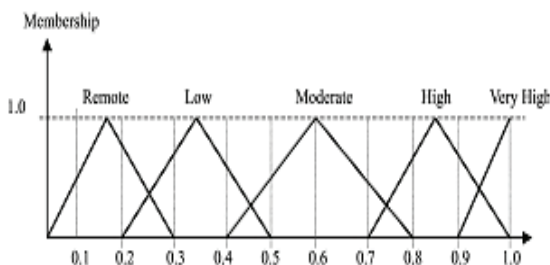
برای غیر فازی کردن عدد فازی و تبدیل آن به یک مقدار دقیق، روشهای مختلفی وجود دارد. در اینجا روش کلین و چن<sup>۱۷</sup> ارائه می‌شود.

در این روش برای تخصیص یک کریسپ به یک مقدار فازی، با توجه به تابع عضویت، رابطه ۱ برقرار است:

$$k(x) = \frac{\sum_{i=0}^n (b_i - c)}{\sum_{i=0}^n (b_i - c) - \sum_{i=0}^n (a_i - d)} \quad (1)$$

به طوری که مقادیر ثابت  $c$  و  $d$  به ترتیب کران پایین و بالای تابع عضویت یعنی ۰ و ۱،  $a_0$  و  $b_0$  حدود پایینی و بالایی طول نمودار مثلثی توصیف کننده هر یک از ۵ متغیرهای زبانی، که مقادیر تابع عضویت به ازای آنها صفر است و همچنین  $a_1$  و  $b_1$  مقادیر میانی مثلث که تابع عضویت به ازای آنها ۱ است.

به منظور محاسبه مقادیر کریسپ متناظر هر متغیر زبانی، براساس نظرات مختلف کارشناسان، تابع عضویت فازی مثلثی برای پنج متغیر زبانی "بسیار کم، کم، متوسط، زیاد و بسیار زیاد" طبق شکل ۱ به دست آمده که با استفاده از آن، مقادیر غیر فازی برای متغیرهای زبانی پنج گانه به دست می‌آید.



شکل ۱. توابع عضویت فازی مثلثی

به عنوان مثال، مقدار غیر فازی شده، برای متغیر زبانی "متوسط"

مرجعی باشد که هر عضو آن با  $X$  نمایش داده می‌شود، مجموعه فازی  $A$  در  $U$  به وسیله زوج مرتب  $A = \{(x, \mu_A(x)) | x \in U\}$  بیان می‌شود که در آن  $X$  متغیر زبانی و  $\mu_A(x)$  تابع عضویت<sup>۱۱</sup> است، که میزان تعلق  $X$  به مجموعه  $A$  را نشان می‌دهد [بلبل امیری، ۱۳۸۸].

#### ۴-۲ تئوری گری

تئوری گری<sup>۱۲</sup> به منظور اولویت بندی ریسکها بکار می‌رود [بلبل امیری و فرناد، ۱۳۸۸ و Chang, 1999]. اساس این روش مبتنی بر روش مقایسه با حل بهینه<sup>۱۳</sup> است. در این روش، ابتدا یک راه حل مطلوب از پارامترها تعیین می‌شود و پس از تعیین مقادیر واقعی هر سه پارامتر  $S, P$  و  $D$  متعلق به هر علت خرابی، و مقایسه با مقادیر مطلوب متناظرشان، راه حلی که فاصله بیشتری با مقادیر مطلوب داشته باشد در اولویت قرار می‌گیرد.

گام اول غیر فازی کردن مقادیر فازی هر سه متغیر زبانی شدت  $(S)$ ، احتمال وقوع  $(P)$  و عدم کشف  $(D)$  است. مقادیر غیر فازی، تحت عنوان کریسپ<sup>۱۴</sup>، مقادیر عددی متناظر متغیرهای زبانی مدل هستند که پس از تعریف تابع عضویت فازی برای هر یک از متغیرها، با استفاده از روشهای غیرفازی کردن<sup>۱۵</sup>، برآورد شده و پس از آن مساله مطابق تئوری "گری" حل می‌شوند. پس از شناخت تمامی حالات خرابی و علل بالقوه شان از طریق طوفان فکری کارشناسان، متغیر زبانی مناسب برای پارامتر  $i$  متعلق به علت خرابی  $j$  ام،  $F_i^j$  تعیین می‌شود. تمامی  $F_i^j$  ها، تشکیل ماتریس علل و متغیر زبانی می‌دهند که سطر ماتریس علت خرابی  $j$  ام و ستون آن پارامترهای  $S, P$  و  $D$  ( $i=3$ ) است.

از آنجا که هدف دستیابی به کمترین مقدار برای هر یک از پارامترهاست، ماتریس دیگری تحت عنوان ماتریس مطلوبیت که نشان دهنده مطلوبترین وضعیت برای هر یک از  $F_i^j$  ها است، حاصل می‌شود. پس از تفاضل دو ماتریس فوق الذکر، ماتریس دیگری به منظور تعیین  $\gamma_i^j$ ، ضریب نسبی ارتباط گری<sup>۱۶</sup> برای هر یک از عناصر ماتریس به دست می‌آید. پس از محاسبه  $\gamma_i^j$ ، ضریب وزنی پارامترها که بیانگر اهمیت نسبی هر پارامتر در تعیین نرخ

با استفاده از روش فوق، به صورت رابطه ۲ است:

$$D_0 = \begin{bmatrix} \Delta_1^1 & \Delta_1^2 & \Delta_1^3 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \Delta_n^1 & \Delta_n^2 & \Delta_n^3 \end{bmatrix}; \Delta_j(i) = x_o(i) - x_j(i) \quad (4)$$

۴-۲-۵ محاسبه ضریب نسبی ارتباط گری

اگر  $\Delta \min$  و  $\Delta \max$  به ترتیب کمترین و بیشترین عنصر ماتریس

$D_0$  و  $\Delta(i)$  عنصر سطر  $i$ ام و ستون  $i$ ام ماتریس  $D_0$  باشد، ضریب

نسبی ارتباط گری  $\{\gamma_o(i), \gamma_j(i)\}$  برای هر  $F_i^j$ ، به صورت رابطه

۵ تعیین می‌شود:

$$\gamma_j^i = \frac{\Delta \min + 0.5 \Delta \max}{\Delta_j(i) + 0.5 \Delta \max} \quad (5)$$

$\gamma$ ، ماتریس حاصل از  $\gamma_j^i$ ها مطابق رابطه ۶ خواهد بود:

$$\gamma = \begin{bmatrix} \gamma_1^1 & \gamma_1^2 & \gamma_1^3 \\ \vdots & \dots & \vdots \\ \gamma_n^1 & \gamma_n^2 & \gamma_n^3 \end{bmatrix} \quad (6)$$

۴-۲-۶ درجه ارتباط گری

ابتدا  $\beta_i$  ضریب وزنی پارامتر  $i$ ام تعیین می‌گردد، که بیانگر اهمیت

نسبی هر پارامتر در تعیین نرخ ریسک علت خرابی  $i$ ام است.

درجه ارتباط یا همان PFA، برای هر علت خرابی  $i$ ، از ترکیب

مناسب  $\gamma_j^i$ ها و  $\beta_i$  متناظرش، به صورت زیر به دست می‌آید. مطابق

رابطه ۷، با استفاده از، رتبه ریسک هر خرابی تعیین می‌شود.

$$\Gamma_j = \sum_{i=1}^n \beta_i \times \gamma_j^i \quad (7)$$

## ۵. شرح مطالعه موردی - حوزه کار

به طور کلی علت آتش‌سوزی به دو زیر مجموعه طبقه بندی می‌شود:

(ا) علت بی واسطه<sup>۲۰</sup>: شرایطی که به‌طور ناگهانی منجر به رویداد

مخاطره آمیز می‌شود که عملکرد اشخاص یا شرایط فیزیکی را در

بر می‌گیرد، مثل زیاد گرم شدن سیمها.

(ب) علت اساسی<sup>۲۱</sup>: که شامل عوامل انسانی، تکنولوژیکی و

محیطی است، مانند اتصالاتی که در اثر وجود روغن در محل منجر

به حریق می‌شود.

مطالعه موردی فوق به دلیل محدودیت حجم مقاله به بخشی از

عوامل متداول و مهم خرابی زیر سامانه‌های برق و تهویه واگنهای

مسافری، مولدهای برق و مولدهای بخار در مجموعه واگنهای

$$k(x) = \frac{[b_o - c] + [b_1 - c]}{\{[b_o - c] + [b_1 - c]\} - \{[a_o - d] + [a_1 - d]\}} \\ = \frac{[8 - 0] + [6 - 0]}{\{[8 - 0] + [6 - 0]\} - \{[4 - 10] + [6 - 10]\}} = 0.583 \quad (2)$$

به این ترتیب مقادیر فازی برای هر متغیر زبانی به صورت جدول

۱ به دست می‌آید:

جدول ۱. مقادیر فازی متغیرهای زبانی

خیلی کم	کم	متوسط	زیاد	خیلی زیاد
۰/۱۹۶	۰/۳۷۰	۰/۵۸۳	۰/۸۰۴	۰/۹۵۶

۴-۲-۲ ماتریس علل و متغیر زبانی<sup>۱۸</sup>

اگر  $[x_1, x_2, \dots, x_n]^T$  ماتریس علل خرابی و  $[x_1^1, x_1^2, x_1^3]$  مقادیر

زبانی سه پارامتر S, P و D علت خرابی  $i$ ام یا همان  $F_i^j$  و  $x_i^{(j)}$

مقادیر کریسپ  $F_i^j$  باشند ( $i=1, 2, 3$ )، آنگاه ماتریس علل و متغیر

زبانی مطابق رابطه ۳ خواهد بود:

$$x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1^{(1)} & x_1^{(2)} & x_1^{(3)} \\ x_n^{(1)} & x_n^{(2)} & x_n^{(3)} \end{bmatrix} \quad (3)$$

۴-۲-۳ ماتریس مطلوبیت<sup>۱۹</sup>

هرچه مقادیر پارامترهای S, P و D کمتر باشند، نرخ ریسک کمتر

است. بنابراین، کمترین مقدار  $F_i^j$ ، "خیلی کم" تعیین می‌شود، که

مقدار بهینه محسوب می‌شود. مقادیر بهینه متناظر  $F_i^j$ ، عناصر

ماتریس مطلوبیت  $x_0 = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{Remote} \dots \text{Remote} \\ \text{Remote} \dots \text{Remote} \end{bmatrix}$  را تشکیل

می‌دهند که با توجه به مقادیر کریسپ  $F_i^j$ ،  $x_0 = \begin{bmatrix} 0.196 \dots 0.196 \\ 0.196 \dots 0.196 \end{bmatrix}$

به دست می‌آید.

۴-۲-۴ محاسبه تفاوت بین ماتریس علل و متغیر زبانی و استاندارد

ماتریس  $D_0$  که عناصر آن،  $\Delta(i)$ ، اختلاف کریسپ  $F_i^j$  متناظر

دو ماتریس علل و متغیر زبانی و استاندارد است، به منظور مقایسه

مقادیر واقعی هر پارامتر با مقدار مطلوب آن، تعیین و به صورت

رابطه ۴ نشان داده می‌شود:

بستگی به زمان تشخیص حریق از لحظه پس از وقوع و نیز چگونگی مهار کردن آن دارد. به عبارتی اگر حسگرهای تشخیص حریق (حساس به گرما، شعله و دود) فعال باشند و نیز اپراتور مربوطه بموقع متوجه حریق شود، در صورت وجود تجهیزات دستی و اتوماتیک اطفاء حریق و فعال بودن آنها، مانع از انتشار حریق به اجزاء مجاور نقطه آغازین حریق می‌شود. از آنجا که در واکنش‌های مسافری تمامی تجهیزات داخل واگن اشتعال زا هستند و نیز به علت عملکرد نادرست بخش نگهداری و تعمیرات (نشتی روغن و سوخت)، بر شدت حریق می‌افزاید. به‌طور خلاصه از جمله فاکتورهای مؤثر بر S:

- (ا) قابلیت اشتعال مواد<sup>۲۳</sup>
- (ب) سرعت انتشار حریق به مواد مجاور<sup>۲۴</sup>
- (پ) قابلیت اشتعال مواد مجاور
- (ت) قابلیت تولید دود و مواد سمی<sup>۲۵</sup>
- (ث) وجود روغن، سوخت و غیره در محل به دلیل عدم نظافت و فقدان عملیات نگهداری و تعمیرات دوره ای و منظم
- (ج) عامل اکسیژن (جریان باد در محل حادثه)
- (چ) وجود ردیاب‌ها و فعال بودنشان
- (ح) وجود تجهیزات اطفای حریق و آماده به کار بودنشان<sup>۲۶</sup>
- (خ) حضور اپراتور در محل
- (د) نقطه آغازین شروع حریق (واگن مسافری، واگن استیم، واگن مولد، رستوران، لکوموتیو)
- (ذ) اندازه حریق و تراکم دود
- (ر) تراکم مسافران و میزان اشغال بودن خط

- (ا) سرعت انتشار حریق
- (ب) توقف در سیستم (توقف در خط و خارج از سرویس شدن وسیله نقلیه جهت تعمیرات)
- (پ) خسارات مالی و جانی (هزینه)

با توجه به تمامی پارامترهای فوق، برای حوادث مشابه می‌توان شدت اثر مختلفی را تعیین کرد. روش دقیق آن است که تأثیر

تحت تملک زیر سامانه‌های مزبور، که منجر به حریق در قطارهای مسافری می‌شود، پرداخته است و با تغییراتی، در راستای تکمیل و اصلاح FMEA در این بخش از مقاله بکار گرفته شده است [Chang, 1999]. اطلاعات مربوط به P و S از گزارشهای تحلیلی سوانح طی سالهای ۸۸-۸۵، نظرات افراد خیره و روش ساده آماری جهت تعیین مقادیر فازی متغیرهای زبانی مورد نظر استخراج شده است. یادآوری می‌شود که نکات زیر به منظور انجام محاسبات در نظر گرفته شده است.

### ۱-۵ قابلیت تشخیص D

قابلیت تشخیص هر یک از عوامل حریق، وابسته به حضور و فعال بودن ردیابهای اتوماتیک (حساس به پارامترهای دود، شعله و حرارت) و اپراتور مربوطه در محل سانحه است که حریق را تشخیص داده و اعلام خطر کند. از آنجا که شاخص مزبور در تمامی زیرمجموعه‌ها یکسان نیست و میزان اهمیت آن نسبی است (در برخی زیرمجموعه‌ها نصب شده، اما غیر فعال است و در برخی دیگر ردیاب نصب نشده، و با وجود اپراتور، نظارتی بر عملکرد و حضور منظم اپراتورها صورت نمی‌گیرد)، با توجه به اینکه حوزه ارزیابی، محدود به واگن خاصی نیست و به صورت کلی بحث شده است، به‌طور کلی، پارامتر D در ارزیابی ریسک، در نظر گرفته نشده است. البته مطابق نظر کارشناسان بخش مولدهای برق، مبنی بر حضور ردیابهای اتوماتیک و کنترل منظم اپراتور از مجموعه مولد، هر نیم تا یک ساعت به جهت کنترل فشار آب، بو، شعله و دود، پارامتر D از وضعیت خوبی برخوردار است. منتها از آنجا که در مورد صحت حضور تجهیزات فوق در واکنشهای قدیمی (خصوصاً اسپانیایی که آمار حوادث از همه بیشتر است) نمی‌توان مطمئن بود، D در برآوردها در نظر گرفته نمی‌شود تا تأثیر دو پارامتر شدت اثر و احتمال وقوع بر مقدار RPN در اولویت قرار گیرد.

### ۲-۵ شدت اثر S

نکته قابل توجه در زمینه شدت اثر (S) خرابیهایی که منجر به حریق در قطارهای مسافری می‌شود این است که شدت اثر

X است (با توجه به اینکه ماتریس مطلوبیت [0] فرض شده است). با در نظر گرفتن ماتریس  $D_0$  ضریب نسبی ارتباط، با استفاده از رابطه ۱ یا رابطه "کلین و چن" محاسبه و نتایج در قالب ماتریس  $\gamma$  ارائه می‌شود (ماتریس در شکل ۲). در خاتمه به منظور تعیین درجه ارتباط نسبی هر علت، ابتدا ضریب وزنی ( $\beta_i$ ) هر پارامتر تعیین می‌گردد و با توجه به رابطه ۷،  $\Gamma_j$  به دست می‌آید.

0.952	0.952	0.473	0.473
0.583	0.583	0.64	0.64
0.370	0.370	0.794	0.794
0.804	0.804	0.525	0.525
0.370	0.196	0.794	1
0.370	0.196	0.794	1
0.196	0.196	1	1
0.952	0.952	$\gamma = 0.473$	0.473
0.370	0.370	0.794	0.794
0.370	0.952	0.794	0.473
0.196	0.952	1	0.473
0.196	0.370	1	0.794
0.952	0.583	0.473	0.64
0.952	0.196	0.473	1
0.583	0.583	0.64	0.64

شکل ۲. ماتریسهای X و  $\gamma$

درجه ارتباط بزرگ تر، بیانگر نزدیکی مقادیر  $F_i^j$  به مقدار بهینه آن است که نشان دهنده اولویت پایین تر ریسک خطاهای بالقوه سیستم و بهبود عملکرد آن است. با توجه به ماتریس  $\gamma$  داریم:

$$\begin{cases} \Delta \text{min} = 0.196 \\ \Delta \text{max} = 0.952 \end{cases}$$

از طرفی با توجه به میزات اهمیت پارامترهای S و  $\beta_p$  و  $\beta_s$ ، ترتیب معادل ۰/۳ و ۰/۲ تعیین می‌شود.

مثال زیر به منظور درک بهتر روش فوق در ادامه آورده شده است. حریق کف بویلر، یکی از علل آتش‌سوزی قطارهای مسافری است که با توجه به جدول ۱، شدت اثر "خیلی زیاد" و احتمال وقوع "کم" برآورد شده است. با توجه به مقادیر غیرفازی سه پارامتر که به ترتیب ۰/۹۵۲ و ۰/۱۹۶ است، ضریب نسبی ارتباط  $\gamma_j^i$ ، برای هر یک از دو پارامتر S,P و مربوط به علت خرابی فوق، عبارتند از:

$$\gamma_{01}(j) = \frac{0.196 + [(0.5) \times (0.952)]}{0.952 + [(0.5) \times (0.952)]} = 0.473$$

$$\gamma_{03}(j) = \frac{0.196 + [(0.5) \times (0.952)]}{0.196 + [(0.5) \times (0.952)]} = 1$$

تمامی پارامترها بر S، با توجه به ضریب وزنی یا اهمیت هر پارامتر بر تابع هدف، در نظر گرفته شود. متداول‌ترین گزینه برای تعیین شدت اثر، برآورد متوسط هزینه‌ها برای هر خرابی طی دوره مورد مطالعه است که شامل هزینه مواد مصرفی، تعمیرات داخلی و نیروی انسانی و نیز یک هزینه متفرقه معادل با ۳۰۰۰۰۰۰ ریال (هزینه مربوط به مصرف آب، گاز، تلفن و هزینه‌های خدماتی کارخانه با توجه به فضای موجود، هزینه مدیریتی، سرپرستی و کنترل مجموعه، هزینه مانور واگن با توجه به کارکرد یک دستگاه لکوموتیو در یک روز، هزینه‌های کارشناسی) است. اما به دلیل جریان نیافتن گردش داده‌ها، دسترسی به جزئیات هر حادثه امکان پذیر نیست. از طرفی دقت برآورد نیز سوال برانگیز است. بنابراین تعیین شدت اثر، از نظر کارشناسان خبره در هر زیرمجموعه استفاده شده که به صورت نسبی شدت‌ها با هم مقایسه شده اند. یعنی رتبه شدت اثر هر خرابی در هر زیرمجموعه تعیین شده است. به عنوان مثال، در مجموعه مولدهای برق موتور و سامانه‌های مکانیکی، رتبه شدت اثر خرابیهای زیرسیستم ( $F_i$ ) فوق به صورت  $F_1 > F_4 > F_2 > F_3 > F_5 & F_6 & F_7$  است، که به منظور تعیین مقادیر زبانی برای S متناظر هر خرابی، بر اساس رتبه، مقادیر کیفی اختصاص می‌یابد، یعنی برای رتبه ۱، مقدار متناظر VH، و برای رتبه ۲، مقدار H و به این ترتیب برای هر رتبه، مقدار زبانی تعریف می‌گردد. نتایج در جدول ۲ آورده شده است.

## ۶. کاربرد تئوری گری

همانطور که قبلاً اشاره شد، گام اول تعیین ماتریس علل و متغیر زبانی و تعیین ماتریس کریسپ  $F_i^j$  (ماتریس X در شکل ۲) است. سپس ماتریس مطلوبیت پارامترها تعیین می‌شود که در واقع عناصر آن مقادیر غیر فازی شده متغیر زبانی "خیلی کم" است. به منظور سهولت در حل مسئله، مقادیر کریسپ ماتریس مطلوبیت به جای ۰/۱۹۶، صفر فرض شده است.

در ادامه با محاسبه تفاوت ماتریس علل و متغیر زبانی و ماتریس مطلوبیت، ماتریس  $D_0$  حاصل می‌شود که در واقع همان ماتریس

## نجمه بلبل امیری، علی اسدی لاری

به این ترتیب مقادیر  $\Gamma$  برای تمامی علل خرابی محاسبه می شود. نتایج حاصل از تئوری گری در جدول ۲ آورده شده است.

**جدول ۲. نمایش FMEA فازی**

رتبه ریسک حاصل از تئوری در هر زیرمجموعه	$\Gamma$	$F\gamma$	$\gamma_s$	P	S	علت	حالت خرابی	SubSystem	ردیف	مورد
۱	0.236	0.473	0.473	VH	VH	دمای بالای دود خروجی ناشی از احتراق که به عنوان یکی از سه عنصر مورد مثلث آتش عمل می کند. لوله ها (تزییق سوخت تحت فشار برای سوزن انژکتور، از طریق پمپ انژکتور) به دلایل ترکیب لوله، نشی، سوراخ مویی و پارگی شیلنگهای سوخت به پمپ و فیلترها، باعث پاشش سوخت به دو مجموعه توربوشاژرهای موتور مولد و مینفولد اگزوز و طبعاً حریق می گردد (به عنوان عنصر ماده سوختی از مثلث آتش)	حرارت بالای: ۱. توربوشاژرهای موتور مولد (دیزل) و ۲. حریق در مینفولد اگزوز موتور	مجموعه موتور	۱	مولدهای برق (۷۶۶۰) / (۷۳۰۰۰، ۷۳۸۰) موتور و سیستمهای مکانیکی
۳	0.32	0.64	0.64	M	M	به علت وجود مواد روغنی و سوختی در محل مولد که در اثر تمیزکاریها یا تعویض، روغن نشت کرده است، ایجاد چرجه و افزایش دما، عامل سوختی را فراهم می کند.	ایجاد چرجه توسط سیستم ترمز (عنصر حرارت از مثلث آتش) به عنوان عامل خارجی ایجاد حریق عمل می کند	سیستم ترمز روی واگن	۲	
۴	0.397	0.794	0.794	L	L	به دلیل استعداد حریق مولد، مثل نشی سوخت و با آغوشگی مولد به سوخت، و نیز دمای بالای لوله های بخار، حریق رخ می دهد	نشت سوخت روی لوله های بخار خشک (Steam) که از زیر مولد عبور می کنند	مولد	۳	
۲	0.263	0.525	0.525	H	H	به دلیل وجود سوخت، مواد روغنی و مواد آلاینده سوختی در محوطه بین موتور و ژنراتور، انضالی مستعد حریق است	اتصال در مجموعه دیزل و ژنراتور	مجموعه ژنراتور	۴	
۵	0.459	0.794	1	L	VL	از آنجا که مجموعه مولد استعداد چرجه دارد، هر گونه انضالی در مجموعه کابلها و مجاورت با مواد آلاینده و روغنی موجب حریق می گردد	اتصال در کابلهای فشار قوی داخل مجموعه مولد شامل کابلهای ژنراتور به تابلوی اصلی تا کابلهای مجموعه بین و سوکت (حفظ و انتقال قدرت)	سیستمهای برقی مولد	۵	
۵	0.459	0.794	1	L	VL	۱. اتصال سیم و کلیدهای فشار قوی داخل تابلوی برق، با بدنه تابلو و ایجاد گرما ۲. جنس پلاستیکی روکش کابل سیم، جلد کنداکتور و سایر قطعات لاستیکی و پلاستیکی داخل تابلو برق بالا بودن دمای محیط و نداشتن سیستم تهویه و جابه جایی هوا (حرارت) فقدان فیوز مناسب و تغییر آمپراژ جریان زیاد (مصرف بالای برق بدون لحاظ ظرفیت شبکه)	سیم و کلیدهای فشار قوی داخل تابلوی برق	تابلوهای برق	۶	ژنراتور و سیستم های برقی مخابرات
۶	0.5	1	1	VL	VL	جنس نامرغوب سیمها به دلیل نادیده گرفتن ضوابط انتخاب سیم فرسودگی سیمها جویدگی سیم توسط چوندگان موذی نصب نامناسب (کشیدگی بیش از حد سیمها، لحیم کاری نامناسب، عبور سیم از مسیر نادرست..)	گرم شدن بیش از اندازه سیمها (حرارت) به دلیل وجود مواد اشتعال پذیر بالای مجموعه تابلو برق، وجود گرد و غبار، کاغذ و تخته در تابلو برق و تجهیزات (ماده سوختی) حریق رخ می دهد	گرم شدن بیش از اندازه سیمها (حرارت)	۷	



## ارزیابی ریسک آتش‌سوزی قطارهای مسافری ایران با استفاده از ...

ادامه جدول ۲. نمایش FMEA فازی

رتبه ریسک حاصل از توری در هر زیرمجموعه	$\Gamma$	$F_y$	$\gamma_s$	P	S	علت	حالت خرابی	SubSystem	ردیف	مورد
۱	۰.۲۳۶	۰.۴۷۳	۰.۴۷۳	VH	VH	۱. نوسان برق دیزل عامل اتصال بی برق؛ با افزایش نوسان، دور الکتروموتور و سایر پارامترهای مرتبط با آن، مثل پمپ آب و پمپ سوخت، و افزایش توان مصرفی سیستم منجر به سوختن الکتروموتور و سپس از کار افتادن بویلر (سیستم تولیدی بخار) و حریق می‌گردد. ۲. ساییدگی عایق به دلیل ضربات نهفته و خارج از کنترل وارده بر واگن، منجر به کاهش ضخامت عایق و اتصالی می‌گردد	اتصالی برق در سیستم	عوامل برقی	۸	
۴	۰.۳۹۷	۰.۷۹۴	۰.۷۹۴	L	L	کف زیر واگن از جنس چوب باشد که در مسافت زیاد بتانسیل ایجاد حریق (گرمایه و ماده سوختی) فراهم می‌شود	ایجاد جرقه در اثر اتصال کفش ترمز حین ترمزگیری، و انتقال آن به زیر واگن	عوامل مکانیکی	۹	
۲	۰.۳۰۱	۰.۷۹۴	۰.۴۷۳	L	VH	به دلیل ضربات وارده یا علل دیگر سیمان کف بویلر شکسته باشد، منجر به انتقال حرارت به کف چوبی واگن و ایجاد دود و حریق (بدلیل وجود اکسیژن) می‌گردد	حریق کف بویلر	عوامل مکانیکی	۱۰	مولدهای بخار (Steam)
۳	۰.۳۴۲	۱	۰.۴۷۳	VL	VH	در صورت عملکرد نادرست، تنظیم servo fuel به هم میخورد که منجر به ورود سوخت بیش از حد به سیستم نسبت به آب، و طبعاً تولید بخار آب می‌گردد. که بخار باعث آربین بردن فضای داخل محفظه می‌شود	کنترلر استاک سوچ	عوامل مکانیکی	۱۱	
۵	۰.۴۳۸	۱	۰.۷۹۴	VL	L	بهم خوردن تنظیم دستگاه (نسبت آب و سوخت) سبب خشک شدن عایق حرارتی و ایجاد دود می‌گردد	کنترلر لمیت کنترلر	عوامل مکانیکی	۱۲	
1	۰.۲۸۷	۰.۴۷۳	۰.۶۴	VH	M	اتصالی در محل مولد و نشی گازوییل و یا عدم نظافت (ماده سوختی) اتصالی در واگن و بدنه چوبی واگن و وجود مواد سوختی اتصالی در تابلو برق و ایراد در کاور فلزی محافظ تابلو برق	اتصالی در اثر وجود مواد اشتعال زا در اطراف محل، مثل بنزین، گازوییل، چوب و پارچه	برق و تهویه واگنهای مسافری	۱۳	برق و تهویه واگنهای مسافری
۳	۰.۳۹۷	۰.۴۷۳	۱	VH	VL	اتصال کوتاه و وجود اکسیژن	عمل نکردن سیستم حفاظتی؛ فیوز، فشارو ترموستات		۱۴	
2	0.32	۰.۶۴	0.64	M	M	عواملی مثل وجود پشم شیشه در بدنه قطار (به منظور ایزولاسیون) و با نوع چوب مصرفی	عوامل مشترک با سایر حوزه‌ها مانند تعمیرات داخلی واگن یا مسافر		۱۵	

### ۶-۱ بیان توصیفی جدول ۲

با توجه به رتبه ریسک هر خرابی در هر زیرمجموعه، رتبه‌های بالاتر ریسک نیازمند توجه بیشتر به منظور کاهش پیامد و وقوع چنین خرابیهایی است. اگرچه دقت عملکرد FMEA در تعیین خروجی هر زیرمجموعه ۱۰۰ درصد نیست، اما قرار گرفتن نرخ

ریسک در محدوده بالا گویای اشکالاتی در زیرمجموعه است. بنابراین با استناد به خروجیها، به عنوان نمونه، با توجه به رتبه بالای ریسک برای مجموعه موتور و اتصالی برق، و با توجه به آمار نسبتاً بالای خرابیهای مزبور، اقداماتی می‌بایست در جهت کاهش رتبه ریسک صورت گیرد. به عبارت دیگر، شناسایی تمامی

با در نظر گرفتن رتبه ریسک، اقدامات اصلاحی لازم به منظور حذف، کاهش، کنترل یا انتقال ریسک صورت گیرد. به عنوان نمونه، از پارامترهای کنترل مثلث آتش در مجموعه موتور و تابلو برق، میتوان به "نصب کاور فلزی روی مجموعه منیفولد و توربوشارژر، استفاده از کفپوشهای فلزی بر روی کف چوبی مولدها و حذف المانهای چوبی داخل مولد که هم خود عامل اشتعال اند و هم آغشتگی شان به مواد روغنی" برای مجموعه موتور، و "کنترل آمپر مصرفی روی اینورتر و سیمهای رابط به منظور آسیب نرساندن به اجزای مدار (افزایش احتمال حریق) و کنترل قطعات با کیفیت مناسب" برای تابلو برق اشاره کرد. تعیین اقدامات اصلاحی مؤثر و ضرورت بهکار بستن آن در کاهش و کنترل ریسک آتشسوزی نقش اساسی دارد، چرا که شدت اثر سوختگی ناشی از حریق و از دست دادن ارگان حیاتی پوست، قابل قیاس با حوادث دیگر نیست و با پرداخت دیه یا خسارت از طرف سازمان یا بیمه جبران پذیر نخواهد بود.

## ۸. سپاسگزاری

از شرکت قطارهای مسافری رجا برای فراهم نمودن اطلاعات فنی و آمارهای موجود برای انجام این مطالعه صمیمانه قدردانی می‌شود.

## ۹. پی نوشتها

- 1- Risk Area
- 2- Fire load
- 3- Wrong side failure
- 4- Right side failure
- 5- Heat release rate
- 6- Fire hazard analysis
- 7- Fire structure
- 8- Zone model
- 9- Availability safe regress time
- 10- Fire growth rate
- 11- Fuzzy Membership Function
- 12- Grey Theory
- 13- Topsis
- 14- Crisp number
- 15- Deffuzification
- 16- Grey Relation Coefficient
- 17- Kelien & Chen

پارامترهای مؤثر بر خرابیهای مجموعه موتور و کابل برق و تعیین روابط بین آنها و تعیین اقداماتی که بر تقلیل پیامدها مؤثر است و ارزیابی مجدد ریسک پس از بکار بستن اصلاحات، به منظور دستیابی به نرخ قابل قبول ریسک خرابیهای مزبور از جمله اقدامات پیشنهادی است. اگرچه تحلیل بیشتر و ارزیابیهای دقیق‌تر ریسک، حمایت‌های همه جانبه سازمانی را می‌طلبد.

## ۷. نتیجه‌گیری

مطالعه حاضر با هدف شناسایی مخاطراتی صورت گرفته که منجر به آتشسوزی در قطارهای مسافری شده و علل هر یک از آنها طبق یافته‌ها، در سه سامانه مولدهای برق، برق و تهویه واگنهای مسافری و مولدهای بخار باید جستجو شود. همچنین تعیین ریسک هر مخاطره جزو اهداف بوده است. ابتدا پارامترهای مؤثر بر آتشسوزی، از دو جنبه قابلیت کارکردی تجهیزات ایمنی مثل فعال بودن ردیابهاو نیز مشخصه مواد اجزای تشکیل دهنده واگنها، و قابلیت اشتعال اجزاء مورد بحث قرار گرفت و از سوی دیگر، به برخی کم توجهی‌های سازمانی در این زمینه اشاره شد. به عنوان نمونه عدم کنترل مؤثر مشخصه اشتعال زایی اکثر اجزای واگنهای مسافری که خود از مولفه‌های مؤثر بر شدت اثر آتشسوزی است. به منظور ارزیابی ریسک، از رویکرد آنالیز FMEA فازی-تئوری "گری" استفاده شد، که اگرچه رویکرد کیفی فوق‌الذکر به دقت رویکرد آنالیز کمی ریسک نیست، اما به شناسایی مخاطرات پریسک‌تر به منظور ارزیابیهای دقیق‌تر کمی کمک می‌کند. به عنوان نمونه، با توجه به خروجی ارزیابی ریسک، خرابی مجموعه موتور و اتصالیها، جزو پر ریسک‌ترین مخاطرات در سه سامانه مذکور معرفی شدند. بنابراین علاوه بر ضرورت توجه بیشتر به این سامانه‌ها، می‌توان از این دستاورد به منظور بهره‌برداری در رویکردهای کمی ریسک، (مثل رویکرد ETA-FTA)، به منظور برآورد مقدار دقیق احتمال وقوع و شدت اثر پیامد مخاطرات فوق‌الذکر در مطالعه تکمیلی بهره‌برد.

از طرفی تعیین رتبه ریسک هر خرابی در هر سامانه، بیانگر میزان توجه و تمرکز روی هر یک از مخاطرات شناخته شده است، تا

- 18- Comparative Series
- 19- Standard Series
- 20- Immediate causes
- 21- Underlying causes
- 22- Expert judgment
- 23- Flammability
- 24- Fire Propagation Rate
- 25- Toxic emission
- 26- Active fire extinguisher

#### ۱۰. مراجع

- بلبل امیری، نجمه و نصیرزاده، فرناد(۱۳۸۸) “ کاربرد رویکرد FMEA فازی برای ارزیابی ریسک خرابیهای مربوط به سیستم سیگنالینگ، علائم، کنترل و مخابرات مترو “، دومین کنفرانس بین‌المللی پیشرفتهای اخیر در مهندسی راه آهن“، تهران، دانشگاه علم و صنعت.

- شرکت قطارهای مسافری رجا ( بی.تا) “داده‌های اداره برق و تهویه واگنهای مسافری، اداره مولدهای برق و اداره مولدهای بخار“، آرشیو قطارهای مسافری رجا.

- Chang, C. L., Wei, C. C and Lee, Y. H. F. (1999) “Failure mode and effects analysis using fuzzy method and Grey Theory” *Kybernetes*, 28(9), pp.1072–80.

- Peacock, Richard D., Reneke, Paul A., Jones, Walter W. and Bukowski, Richard, W. (1999) “Concept for fire protection of passenger rail transportation vehicles: past, present and future”, *International Journal of Fire and Materials*, Vol. 19, pp. 71-87.

- Peacock, Richard D., Reneke, Walter, Paul A. Jones, W. and Bukowski, Richard W. (2001) “Development of a fire hazard assessment method to evaluate the fire safety of passenger trains”, *Journal of Fire and Materials*, Vol. 25.

- Wiggins, John H. (1976) “A national program for fire safety in transportation”, *Fire Research*, pp. 209-221.

