ارزیابی ریسک آتش و بررسی مدل‌های کمی و کیفی آن

نجمه بلبل امیری[۱]، علی اسدی لاری[۲]

[۱] دانشجوی کارشناسی ارشد رشته مهندسی ایمنی در راه آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران، Najmeh.amiri@gmail.com
[۲] استادیار دانشکده مهندسی راه آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران ۱۶۸۴۶، asadi_l@iust.ac.ir

چکیده

مقاله فوق یک چارچوب کلی جهت ارزیابی کمی و کیفی ریسک حریق واگن، بر اساس شاخص‌های مناسب ایمنی و اقدامات مدیریتی، به منظور کاهش و کنترل ریسک فراهم کرده است. تکنیک های ارزیابی ریسک، شاخص‌های ایمنی و اقدامات مدیریتی بر اساس شرایط مختلف متغیرند. هدف تمامی این اقدامات کاهش مخاطرات جانی و مالی به یک سطح قابل قبول می باشد.

کاربرد این تکنیک‌های مدیریتی و روش‌های ارزیابی، به میزان داده های آماری موجود وابسته است و نتایج شان قابل تعمیم به واحدهای مختلف مثل یک واگن می باشد.

در ادامه یک گزارش جهت محاسبه ریسک آتش ناشی از ترکیدن[۱] مخزن سوخت بر اساس داده‌های آماری بررسی می شود. در این مطالعه ی موردی، با محاسبه مقدار مورد انتظار EFS سالیانه، ناشی از آتش سوزی مخزن سوخت، ریسک تعیین می گردد. همچنین در ادامه پارامترهای ایمنی جهت کاهش ریسک و نیز رویکرد انتخاب گزینه بهتر با استفاده از شاخص امکان پذیری مطرح می شوند.

کلمات کلیدی: مخاطرات آتش، ریسک آتش، مدیریت ریسک، رویکردهای کمی و کیفی ارزیابی ریسک، شاخص‌های کاهش ریسک.

مقدمه

ایمنی در تقابل با ریسک بوده و در واقع فقدان پتانسیل وقوع یک پیامد منفی ناخواسته ناشی از یک رویداد، فرآیند یا فعالیت می باشد. به عبارتی یک قطار یا واگن در برابر حریق "بسیار ایمن" فرض می شود، اگر ریسک ناچیزی حاصل از حریق آنرا تهدید کند. از آن جا که برخی از جنبه‌های ریسک حریق اجتناب ناپذیر است، لذا برقراری ایمنی ۱۰۰٪ ناممکن می‌نماید [۱] [2].

طراحی سیستم ایمنی در برابر حریق[۲] برای واحدی که در معرض خطر آتش می باشد، به موارد زیر وابسته است:

۱- براورد میزان مخاطرات ناشی از حریق، که به موارد فوق وابسته است: الف) احتمال وقوع حریق ناخواسته، (ب) روش های انتشار حریق، (ج) تعیین علل آتش و میزان خسارات جانی، مالی و فرآیندی
۲- تمهیدات در نظر گرفته شده برای سنجش کارایی ایمنی در برابر حریق، در محدوده قابل قبول و ایمن باشد.
۳- در صورت اینکه تمهیدات پیش بینی شده ی ایمنی در محدوده غیرقابل قبول باشد، اقدامات پیش گیرانه وسیع تری با در نظر گرفتن هزینه نهایی طرح (شاخص ایمنی) و میزان آسیب طرح روی عملکرد سیستم، لحاظ شود.

از طرفی به منظور طراحی و مدلسازی چنین سیستمی، پیگیری سه مورد بالا و سپس پیاده سازی و ارزیابی سیستم فوق برای یک منطقه خطر خاص لازم است.

رابطه زیر یک شاخص ایمنی در برابر حریق می باشد که بیانگر سود کل حاصل از بکارگیری تکنیک ارزیابی ریسک، با در نظر گرفتن خسارات ناشی از مخاطرات حریق و هزینه طرح های اعضای تیم ایمنی می باشد. هدف بیشینه کردن رابطه فوق است.

ماکزیمم سود کل = {A-(fd+fc)-(hd+hc)}

fd: خسارات ناشی از خرابی ها و صدمات ناشی از وقوع حریق
hd : خسارات ناشی از مخاطرات
fc : هزینه برنامه های ایمنی در برابر حریق
hc : هزینه برنامه های ایمنی در برابر مخاطرات
A : سود ناشی از ارزیابی ریسک

ریسک آتش، خسارات جانی و مالی محتمل ناشی از مخاطرات وقوع حریق طی یک دوره مشخص می باشد و به صورت تابعی از حاصل ضرب احتمال وقوع هریک از سناریوهای آتش سوزی p_i و شدت اثر مرتبط با هر سناریو H_{a_i} بیان می شود.

$$Fire\ \ Risk = F(P_1 Ha_1 \dots P_i H_{a_i} \dots P_n H_{a_n})$$

[1] Rupture
[2] fire safety

Archive of SID
www.SID.ir

هدف مدیریت ریسک حریق[3] کاهش تناوب وقوع و شدت اثر خسارات حریق به یک سطح بسیار پایین و قابل قبول می باشد. چنین هدفی، از طریق اقدامات مدیریتی نظیر نصب سیستم پیش گیرانه فعال و منفعل، میسر می شود. از طرفی مدل سازی حریق به عنوان یک ابزار پیش گیرانه قبل از وقوع محسوب می گردد، که جهت طراحی سیستم ایمنی و بررسی مخاطرات ناشی از سوختن یک ماده یا یک سناریو ی مشخص به‌کار می رود.

به طور کلی مدیریت ریسک حریق سه فعالیت عمده را در بر می گیرد: ۱- شناسایی ریسک ۲- ارزیابی کیفی ریسک ۳- کاهش ریسک. در ادامه هر یک به اختصار، شرح داده شده است.

طبقه بندی انواع قطارها و اجزای آن

۱. لوکوموتیو با توان متمرکز
۲. واگن های خودکششی برقی با سیستم کششی گسترده (توان توزیع یافته در طول قطار)

بنابراین می توان دو حالت برای چنین مطالعه موردی درنظر گرفت: (۱) مخزن سوخت لکوموتیو که در اثر یک سانحه می تواند برای واگن اول متصل به آن در قطار خطرآفرین باشد، (۲) مخزن سوخت واگن خودکشند (موتوردار) که در اثر یک سانحه خطر آتش سوزی را برای مسافران آن واگن به وجود آورد[۳].

شناسایی ریسک[4] و ارزیابی کیفی آن

شناسایی ریسک، شامل شناسایی عوامل احتمالی فزاینده ریسک حریق می باشد. این فاکتورها عبارتند از :

۱- منبع بالقوه احتراق به عنوان آغازگر حریق و نیز مواد جهت تسریع سرعت انتشار آتش، دود و گازهای سمی .
۲- فعال یا غیرفعال بودن سیستم‌های کنترلی به منظور کاهش ریسک، نظیر سیستم تشخیص حریق، اسپرینکلر، سیستم تهویه ی دود و اتفاء آتش.
۳- عوامل خاص مثل: مایعات و جامدات قابل اشتعال، تعداد مسافران در معرض خطر، تعداد افراد پیر، ناتوان و خردسال.
۴- اقدامات حین آتش سوزی که لازمه ی آن، آموزش خدمه و تنظیم برنامه مقابله اضطراری، به منظور بکارگیری اقدامات کارا برای رساندن مسافران به "منطقه ایمن" می باشد.

جهت تسهیل شناسایی ریسک، فرم‌هایی طراحی می شود که در برگیرنده تمامی عناصر تأثیرگذار بر ریسکِ حریقِ مربوط به یک مشخصه خاص، می باشد. این فرم‌ها برای هر جزء یک مشخصه، توسط بازرس یا کارشناس تکمیل می گردد.

اطلاعات فرم‌های مذکور، قادر به ارزیابی کیفی ریسکِ هر جزء از یک مشخصه می باشد. هدف فرم های مذکور، ارزیابی احتمال یا تناوب وقوع حریق در یک دوره زمانی مشخص و خسارات جانی و مالی مورد انتظار در هر آتش سوزی می باشد.

در صورت لزوم، فرم‌ها به برگه‌های کاری[5] شکسته می شوند که هر یک در برگیرنده یک جنبه خاص از ریسک، مثل منابع حرارتی، اجسام قابل اشتعال، ساختار واحد، میانگین فاصله فرار و سیستم حفاظت حریق می باشد. هر برگه کاری شامل یک سری سؤالات بلی– خیر است که بر اساس چگونگی پاسخ دهی به سوالات، امتیاز حاصل از پاسخ‌های هر برگه، محاسبه شده و نهایتاً با حاصل جمع امتیازات تمامی برگه‌ها پس از وزن دهی، امتیاز کل بدست می آید.

تخصیص امتیاز به صورت مقدار عددیِ فزاینده با شدت سطح ریسک، به پاسخ‌های برگه کاری است. مثلاً تخصیص یک امتیاز عددی کم به پارامتر "حضور اسپرینکلر" در برگه کاریِ ارزیابی سیستم حفاظت حریق، که پارامتر فوق یک شاخص کاهنده ریسک آتش می باشد. محدوده امتیازات بسته به دقت سیستم بین ۰-۱۰ و ۰-۲۰ می باشد[۴].

در ادامه با مجموع امتیاز پاسخ های یک برگه کاری، امتیاز کل یک برگه کاری در ارتباط با یک جنبه خاص بدست می آید و برآیند امتیاز نهایی برگه‌های کاری مختلف، امتیاز کل یک جزء از یک مشخصه را می دهد[6].

بدین ترتیب نتایج حاصل از ارزیابی کیفی ریسکِ مربوط به هر جزءِ یک مشخصه، بصورت "ریسک پایین، متوسط و بالا" تعیین می شود. اینگونه ارزیابی ها در قالب آستانه تهدید[7] مطرح می شود.

شیوه‌های مختلفی جهت ارزیابی کیفی ریسک ناشی از حریق در مورد یک واحد خاص مثل یک واگن موجود است، که در ادامه به شرح هر یک پرداخته خواهد شد.

برنامه ارزیابی ریسک آتش[8] (FRRS)

FRRS از جمله مدل‌های ابداعی، به منظور سنجش ایمنی در برابر حریق می باشد و در واقع نوعی آستانه تهدید تلقی می شوند. از جمله ویژگی های FRRS می توان به موارد زیر اشاره کرد:

۱- شامل فرآیندهای مختلف مدل کردن مخاطرات آتش و امتیاز دهی به آنها جهت تخمین ریسک مربوطه.

[3] Fire risk management
[4] Risk identification
[5] Worksheet
[6] overall score of fire property
[7] Point scheme
[8] General method

Archive of SID
www.SID.ir

۲- ارزیابی ریسک و مخاطرات به منظور کاهش هزینه‌های ایمنی
۳- برقراری ارتباط بین اصول پیچیده علمی و مدل‌های تجربی و نظری

اهمیت سیستم فوق به عنوان یک ابزار بررسی ریسک مطرح است. همچنین توجه به این نکته ضروری است که اعتبار سیستم با تمرکز روی فرموله کردن و ارزیابی کمی رویکردهای سیستم بهبود خواهد یافت.

دو مدل جهت تشریح ماهیت و تنوع مدل های FRRS در ادامه بیان می‌شود.

۱. ارزیابی ریسک حریق یک مشخصه [9]

مطابق نظریه گراس، پنج مرحله ارزیابی ریسک آتش عبارتند از:

۱- تعیین مشخصه های بعد از حریق
۲- تعیین شاخص مشخصه ها
۳- نرمالایز کردن شاخص‌ها
۴- وزن دهی جهت تعیین اهمیت نسبی شاخص‌ها نسبت به یکدیگر
۵- ترکیب موارد بالا جهت ارزیابی ریسک حریق

مثلاً "نرخ انتشار حریق" به عنوان یک مشخصه، دارای شاخص عملکردی ۲۵۰ میلی متر است که پس از نرمالیزه کردن شاخص و تعیین وزن نسبی این مشخصه که در اینجا به‌دلیل اهمیت نسبی بالای آن، ضریب وزنی ۰,۵ فرض می شود، ریسک تعیین می شود. لازم به ذکر است که به منظور نرمالیزه کردن، یعنی تبدیل این مقدار به مقادیر بین ۰ تا ۱۰۰، ۰,۴ به عنوان ضریب نرمالیزه تعیین می شود (۲۵۰×۰,۴ =۱۰۰) .

۲. مدل تعادل [10]

مدل تعادل، حاصل از رویکرد دلفی و به منظور ارزیابی بین شاخص‌های مختلف ایمنی می باشد. برای این منظور رابطه زیر به عنوان یک شاخص ریسک با واحد دلار بر مترمربع فضای مورد نظر بر سال، جهت برآورد خسارت متوسط ناشی از حریق توسعه یافته است.

$$L = NP_P L_P + N(1-P_P)\left[P_{FSC} I_{FSC} + P_{FSD} I_{FSD} + I_{FN} P_{FN}\right]$$

L : خسارات جانی و مالی (دلار بر مترمربع بر سال)

N : میانگین سانحه بر $1\ m^2$ از سطح بر سال

I_P : متوسط خسارت جانی و مالی ناشی از حریق با فرض نرسیدن به حالت اشباع (درگیری تمامی اشیا باحریق یا فِلش آوِر[11]) (دلار بر هر سانحه)

P_P : احتمال نرسیدن حریق به فلش اُور

P_{FN} : احتمال نرسیدن حریق به اجزاء دیگر پس از فلش اُور

I_{FN} : متوسط خسارات جانی و مالی با فرض نرسیدن حریق به اجزاء دیگر پس از فلش اُور

P_{FSD} : احتمال رسیدن حریق به اجزاء دیگر با تخریب مرز ساختاری و با فرض وقوع فلش اُور

I_{FSD} : متوسط خسارات جانی و مالی با فرض رسیدن حریق به اجزاء دیگر با تخریب مرز ساختاری پس از فلش اُور.

با اینکه "آستانه تهدید" ها ابزار ارزیابی ساده ای هستند اما بنا به دلایلی یک رویکرد جامع جهت ارزیابی ریسک محسوب نمی شوند. برخی از این عوامل عبارتند از:

۱- اختیاری بودن تخصیص امتیاز به پاسخ سؤالات
۲- امتیاز کلی یک مشخصه برآیند امتیاز برگه‌های کاری است که بیانگر وزن معادل (اهمیت یکسان) برای امتیاز نسبی هر برگه کاری است. در حالیکه برخی جنبه‌های ریسک دارای وزن بالاتری هستند.

بدین منظور مدل‌های ریاضی تخمین کمی دقیق تری از ریسک را نتیجه می دهند.

کاهش ریسک [12]

اگر نتایج حاصل از برگه کاری، بیانگر سطح غیر قابل قبول برای ریسک باشد، اقدامات اصلاحی به منظور کاهش نرخ به زیر سطح می بایست اتخاذ گردد. بنابراین یک چک لیست، که دربرگیرنده نتایج بازرسی مودهای خرابی، جزئیات آموزش‌های لازم و اقدامات اصلاحی می باشد، طراحی می شود. پس از به‌کارگیری اقدامات اصلاحی ارزیابی مجدد ریسک، به منظور اطمینان از تنزل سطح ریسک به یک سطح قابل قبول یا تعیین ضرورت ارزیابی مجدد، انجام می گیرد.

مدل‌های ریاضی [13]

مدل‌های ریاضی برخلاف شیوه آستانه تهدید، یک ارزیابی کمی از میزان انتشار آتش و دود در یک واحد مشخص (مثل واگن) انجام می دهد و به دو نوع اصلی مدل‌های قطعی[14] و غیرقطعی[15] تقسیم می‌شوند [۵].

۱. مدل قطعی

انواع مدل‌های قطعی، به جنبه‌های مختلف آتش و همچنین رویکردهای بهبود جنبه‌ها می پردازند. دو نوع عمده ی مدل قطعی

[9] Assessing fire risk of product
[10] Trade-off model
[11] flashover
[12] Risk reductional
[13] Mathematical model
[14] Deterministic
[15] Non-deterministic

Archive of SID

www.SID.ir

عبارتند از : ۱- مدل فیلد[16] ، ۲- مدل منطقه حریق[17].

۱. ۱. مدل فیلد

مدل فیلد به جنبه پیش بینی جریان هوا و دود در یک حصار می پردازد که متأثر از گرما و جاذبه است. مدل فوق بر تئوری دینامیک سیالات استوار است و نمایانگر دبی جرمی دقیق و جریان انرژی می باشد. همچنین به حل معادلات کلاسیکی حرکت فازگازی در نقاط مجزای مختلف، در فضا و زمان می پردازد. نرم افزار جاسمین[18]، به منظور پیش بینی انتشار حریق در یک حصار مجرد و حتی چند بخشی، به توسعه مدل فوق کمک کرده است.

۱،۲. مدل منطقه حریق

مدل فوق بر هندسه فضای وقوع حریق و جزئیات اجزاء مثل سایز، موقعیت و مواد تشکیل دهنده وابسته است. فضای داخل اتاقک به ناحیه‌هایی تقسیم و از لحاظ دما و تمرکز جرم همگن فرض می شود. با انتشار آتش از یک جزء به جزء دیگر، دما و چگالی دود در هر ناحیه قابل محاسبه است. نرم افزار فَست[19] بر اساس مدل فوق طراحی شده است.

۲. مدل غیر قطعی

مدل مزبور به منظور پیش بینی و تخمین حرکت آتش، دود و اشغال کنندگان در محدوده اطمینان بکار می رود که بصورت احتمالی بیان می شود و بر دو نوع ۱ – احتمالی و ۲- اتفاقی می باشد.

مدل‌های احتمالی به خروجی نهایی مثل میزان خسارات مالی، آسیب سطوح و تلفات وابسته اند، که همین برای سیستم حفاظتی حریق کفایت می کند و نیازی به شناخت جزئی فرآیند نیست. اما در مدل‌های اتفاقی، رویدادهای بحرانی که حین انتشار حریق، با عبور (انتقال) از یک رویداد به رویداد دیگر اتفاق می افتند و منجر به خسارات نهایی می شود، مد نظرند. پارامترهای فیزیکی مثل گرمای آزاد شده و کاهش جرم سوخت نیز در مدل‌های اتفاقی دخیل اند.

۱،۲. مدل‌های احتمالی عبارتند از:

۲،۱،۱. آنالیز آماری و احتمالی ساده[20]

۲،۱،۲. مدل نمایی رشد آتش

۲،۱،۳. مدل توزیع‌های احتمالی

۲،۱،۳،۱. مدل شکست در خروج از سانحه Q

۲،۲. مدل‌های اتفاقی انتشار حریق عبارتند از :

۲،۲،۱. مدل و زنجیره مارکف

۲،۲،۲. مدل گذار حالات

[16] Field model
[17] Zone model
[18] JASMINE
[19] FAST
[20] Simple probabilistic & statistic analysis

در ادامه هریک از مدل‌های احتمالی تشریح می گردد.

۲،۱،۱. مدل ساده آماری- احتمالی

با توجه به مدل فوق داریم:

F_A احتمال آغاز حریق در یک پریود زمانی معلوم، رابطه نمایی با سایز یک واگن (ساختمان) (A) دارد و به تعداد منابع حرارتی و ویژگی آنها وابسته است (K,α) .

D_A خسارت احتمالی سطح در حریق، رابطه نمایی با A دارد و نیز به β (شاخص حضور یا غیاب سیستم حفاظت حریق) وابسته است.

حاصلضرب F_A و D_A، شاخص ریسک F_R را نتیجه می دهد که این روابط توسط راماچاندران توسعه یافت.

کاربرد رابطه نمایی برای تخمین خسارت احتمالی سطح در یک جزء، مثل واگن وابسته قطار، به صورت زیر است:

$$F_{(A)} = KA^{\alpha}$$
$$D_{(A)} = CA^{B}$$
$$F_{(R)} = K.CA^{\alpha+\beta}$$

۲،۱،۲. مدل نمایی رشد آتش[21]

با فرض اینکه اگر θ (پارامتر رشد آتش)، احتمال انتشار حریق از یک جزء به جزء دیگر و $A_{(0)}$ ، سطح اولیه که دچار حریق شده است و مقدار تخمینی آن $1M^2$ است، باشد آنگاه $A_{(T)}$ ، خسارت سطح در زمان T، بصورت $A_{(T)} = A_{(O)} * \exp(\theta)$ براورد می شود. با توجه به رابطه، $A_{(T)}$ ، با افزایش زمان به صورت نمایی افزایش می یابد.

$E_{(\theta)}$ (مقدار مورد انتظار θ) ، $\delta_{(\theta)}$ (انحراف معیار استاندارد θ) و حد اطمینان پارامتر θ، توسط راماچاندران در یک دوره زمانی مقرر سوختن، برآورد شده است. از طرفی زمان دو برابر شدن میزان خسارات سطح، مطابق رابطه، یک مقدار ثابت $\frac{\log e^2}{\theta} = \frac{0.6931}{\theta}$ می باشد.

۲،۱،۳،۱. مدل شکست در خروج از سانحه (Q)[22]

از جمله مدل های توابع توزیع احتمالی می باشد. متغیرهای تصادفی F تابع زمان لازم برای سیرِ دود یا گازهای سمی، از مبدأ و ایجاد شرایط ضعیف در مسیر فرار و متغیر H تابع زمان لازم برای رسیدن به یک مکان امن می باشد که برآیند زمان لازم برای پی بردن به حریق (D)، زمان لازم از کشف تا اقدام به تخلیه (B) و زمان لازم از اقدام به تخلیه تا رسیدن به یک سطح ایمن (E) می باشد. توزیع توأم دو متغیر F و H، رابطه زیر را نتیجه می دهد که مقدار Q به آن وابسته است:

Z= F-H

[21] Exponential Model of Fire Growth
[22] Egress Failure

Archive of SID

www.SID.ir

با توجه به رابطه Z، شاخص ایمنی بصورت زیر بدست می آید:

$$\beta = (\mu f - \mu_h)/(\delta_f^2 + \delta_h^2)^{1/2}$$

بطوریکه μ_h و μ_F بترتیب میانگین متغیر تصادفی F و H و δ_h و δ_F انحراف معیار استاندارد F و H هستند. با توجه به جدول نرمان داریم:

اگر $\mu_f = \mu_h$ آنگاه Q= ۰,۵ (β =0)

اگر $\mu_f > \mu_h$ آنگاه Q > ۰,۵ (β >0)

اگر $\mu_f < \mu_h$ آنگاه Q < ۰,۵ (β<0)

مقدار Q به ازای هر β از جدول توزیع توأم نرمال محاسبه می شود.

۲,۲. مدل‌های تصادفی[۲۳]

زنجیره رویدادهای بحرانی که در فضا و زمان اتفاق می افتد و احتمال ارتباط این رویدادها با یکدیگر، در غالب مدل‌های تصادفی می گنجد. از جمله مدل‌های تصادفی می توان به مدل مارکو (مدل انتشار حریق در یک فضا یا یک جزء) و مدل‌های شبکه (مدل انتشار به فضای خارج از یک فضای محصور) اشاره کرد [۶].

مدل های کلی تصادفی[۲۴]

در یک مدل ساده تصادفی، فرآیند تصادفی سوختن یک شیء، تنها در یکی از ۲ حالت انتشار یا خاموش می تواند باشد. البته حالت سوم، حالتی که آتش بدون اینکه خاموش شود یا انتشار یابد، در همان حالت می سوزد، نیز می تواند برقرار باشد.

قابلیت انتشار حریق از یک شی اولیه (منبع آغاز حریق) به یک شیء ثانویه، به فاصله بین دو شیء وابسته است. همچنین انتشار حریق در حالتیکه شیء ثانویه در فاصله‌ای بیش تر از یک "فاصله بحرانی" از شی اولیه ی در حال ِسوختن واقع باشد، صورت نمی گیرد.

به زبان مدل‌های تصادفی، $\lambda_1(t)$ احتمال انتشار حریق فراتر از شیء اولیه و یا به عبارتی احتمال گذار در زمان t ام، و $\lambda ij(t)$، احتمال گذار از حالت i ام به حالت j ام در زمان t ام می باشد.

بر اساس میزان مقاومت مرزهای ساختاری یک واحد (در اینجا واگن)، حریق می تواند فراتر از یک جزء انتشار یابد. زنجیره حریق[۲۵] متشکل از تعدادی شیء می باشد، که حریق می تواند بر اساس روابط احتمالی وابسته به زمان و مکان، بینشان انتشار یابد. زنجیره در برخی مراحل بر اساس نوع چیدمان اشیاء، فاکتورهای محیطی، قدرت و شدت تخریب حریق، می تواند شکسته شود. در این حالت زنجیره حریق به مرحله خاموش شدن[۲۶] رسیده است.

معادلات برگرفته از مدل‌های تصادفی فوق الذکر، جهت ارزیابی احتمال λij برای هر قطار معلوم با مشخصه‌های طراحی معین، توزیع معین مواد قابل احتراق و چگونگی نصب سیستم حفاظت در برابر حریق بکار می روند.

۲,۲,۱. مدل مارکف[۲۷]

احتمال گذار آتش از یک حالت به حالت دیگر، بصورت تابعی از زمان می باشد که شامل نمونه، فاز و منطقه می باشد. مدت زمان ماندن حریق در یک حالت، قبل از گذار به حالت دیگر، از یک توزیع احتمالی موقتی[۲۸] برخوردار است.

مطابق مدل، اگر حریق در دقیقه n ام در حالت i ام و در دقیقه (n+1) ام در حالت j ام باشد با فرض اینکه $\lambda ij(n)$ احتمال گذار از حالت i به j باشد و نیز وجود m حالت گذار، داریم :

$$p\begin{vmatrix} \lambda_{11} & \cdots & \lambda 1m \\ & & \\ \lambda_{m1} & \cdots & \lambda_{mm} \end{vmatrix} \qquad \sum \lambda ij = 1 \qquad i, j = 1,2,...m$$

اگر qi احتمال سوختن حریق در حالت iام باشد، آنگاه $\sum_{i=1}^{m} qi = 1$، و نمایش این احتمال در زمان t ام بصورت $P_t(q_1, q_2, ,, q_m)$ است. به عبارتی آتش در هر لحظه، تنها در یک حالت i می باشد.

به عنوان مثال اگر فرض کنیم m=۴، گذار از یک حالت بالاتر به حالت پایین تر ممکن نیست و فرآیند سوختن پس از وقوع فلش اُور خاتمه می یابد، P ماتریس گذار و P_n سوختن در زمان n ام برای تمامی حالات، به صورت فوق تعریف می شوند:

$$P\begin{bmatrix} 0.4 & 0.3 & 0.2 & 0.1 \\ 0 & 0.5 & 0.3 & 0.2 \\ 0 & 0 & 0.6 & 0.4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad P_n = (0.1, 0.2, 0.3, 0.4)$$

هدف یافتن P_{n+1} با توجه به P_n و ماتریس گذار است. برای محاسبه زمان پایان آتش سوزی، محاسبات $P_t ; t \geq n+1$ را تا جایی ادامه می دهیم، که کلیه عناصر P_t در زمان t=T تقریبا صفر گردد، که حاکی از آن است که در زمان T هیچ عنصری در هیچ حالتی در حال سوختن نمی باشد و حریق مهار گشته و T زمان مدنظر می باشد. روند محاسبه P_{n+1} در ادامه آورده شده است.

q_1 احتمال سوختن در حالت ۱ در زمان n+1 ام، لازمه آن گذار از حالت ۱ به خودش در فاصله زمانی n و n+1ام می باشد. یعنی q_1 =۰,۴×۰,۱=۰,۰۴. به طور مشابه q_2، تحت گذار از حالت ۱ به ۲ در فاصله زمانی n و n+1 یا گذار از حالت ۲ در زمان n ام به خودش در زمان n+1 ام رخ می دهد.

(۰,۵×۰,۲) + (۰,۳×۰,۱)=۰,۱۳

بنابراین $q_3 = 0.26$ $q_4 = 0.57$ ، می باشد و ماتریس $p_{n+1} = (0.04, 0.13, 0.26, 0.57)$ بدست می آید.

[23] Stochastic fire risk model
[24] General model
[25] Fire chain
[26] Absorbing state
[27] Markov model
[28] Temporal

Archive of SID

www.SID.ir

نقاط ضعف مدل مارکف

۱- ثابت ماندن احتمال گذار، صرف نظر از وابسته بودن گذارها به زمان

۲- لحاظ نکردن پارامترهایی نظیر مدت زمان سوختن در یک حالت معلوم، که بر چگونگی انتشار آتی حریق تاثیرگذار است. مثلاً احتمال سوختن کامل یک بدنه با افزایش شدت آتش (وابسته به زمان) افزایش می یابد.

۳- عدم تعیین چگونگی رسیدن حریق به یک حالت خاص مثلاً بودن حریق در حال رشد (سریع یا آهسته) یا در حال فروکش کردن، که بر زمان ماندن حریق در یک حالت خاص موثر است.

۲،۲،۲. مدل گذار حالت STM - انتشار در یک اتاق (واگن) [۲۹]

با توجه به نقاط ضعف مدل مارکف نظیر مدل STM توسعه یافت. که شامل فرضیات زیر است:

- درصورت انتشار حریق از یک شیء به شیء دیگر، حریق نمی‌تواند انتشار بازگشتی به همان شیء که از آن انتشار یافته است، داشته باشد. حریقی که یک شیء را در بر گرفته، محدود به همان شیء می ماند یا خاموش می شود.

- در مورد گسترش حریق در یک اتاق (واگن) ۳ حالت تعریف می شود:

S_1 : آتش محدود به همان شئ می ماند که از آن انتشار یافته است.

S_2: آتش فراتر از شیء اولیه انتشار می یابد، اما همچنان محدود به اجزای اتاق است.

S_3: آتش فراتر از اتاق انتشار می یابد، اما همچنان محدود به ساختمان (قطار) می ماند.

همچنین حالت چهارم (S_4) تحت عنوان حالت جذب، که حریق نمی تواند حالت فوق را پس از ورود به آن، ترک کند، در مدل STM تعریف می شود. حالت فوق گویای "خود خاتمه یافتن" حریق می باشد.

لازم به ذکر است که S_3 هم می تواند یک حالت جذب یا خود خاتمه یافتن باشد. سه حالت فوق مدل STM را تشکیل می دهند که حالت خاصی از مدل مارکف است.

با توجه به مدل، اگر فرض کنیم $\mu_i(t)$، احتمال خاموش شدن در حالت iام یا گذار به حالت چهارم در زمان tام باشد، آنگاه $W_i(t)$ احتمال سوختن در یک حالت خاص و بدون انتشار بصورت $w_i(t) = 1 - \lambda_i(t) - \mu_i(t)$ برآورد می شود.

مجموع تعداد حریقی که در آغاز یک پریود و در یک حالت خاص، در حال رخ دادن است و نیز مجموع حریق خاموش شده به منظور برآورد $w_i(t)$ ، $\lambda_i(t)$ و همچنین توزیع احتمالی مدت زمان سوختن در یک حالت خاص، بکار می‌رود. روابط مدل مارکف به صورت فوق است:

$$E_1 = \mu_1 \qquad \lambda_1 = 1 - \mu_1$$
$$E_2 = \lambda_1 \mu_2 \qquad \lambda_2 = 1 - \mu_2$$
$$E_3 = \lambda_1 \lambda_2 \mu_3 \qquad \lambda_3 = 1 - \mu_3$$
$$E_4 = \lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 \mu_4$$
$$\sum_{J=1}^{4} Ej = 1$$

از آن جا که انتشار حریق نمی تواند فراتر از ساختمان رود، $M_4 = 1$ و بنابراین $\lambda_4 = 0$.

حالت تکامل یافته مدل فوق ، با تخصیص حالت دیگری بین S_2 و S_3 تحت عنوان "حالت میانی" توسعه یافت. این حالت، به عنوان رویدادِ فراگیری مرزهای ساختاری یک اتاق توسط حریق است که پس از انتشار حریق از حالت S_1 و S_2 رخ می دهد، در حالیکه همچنان حریق محدود به فضای اتاق می باشد. به عبارت دیگر در این حالت، احتمال انتشار حریق و تخریب مرزهای ساختاری برابر حاصل ضرب احتمال درگیری ساختار مرزی با حریق و احتمال خرابی آن(که برای هر جزء با مشخصه متفاوت ، در برابر شدت آتش معین، قابل تخمین است) می باشد.

مطالعه موردی

تعداد حریق به عنوان یکی از سوانح ریلی ایران، طی سال ۱۳۸۳- ۱۳۷۸ مجموعاً معادل ۸۶ مورد می باشد که ۳٪ از مجموعه حوادث ریلی را به خود اختصاص داده است. میزان خسارات وارده که EFs[۳۰] نامیده می شود بصورت دقیق ذکر نشده است. در واقع هر ده آسیب جدی، معادل دویست آسیب جزئی، معادل یک مرگ و میر می باشد، که با EF تخمین زده می شود. یکی از علل سانحه آتش گرفتن قطار، ناشی از گسیختگی فولاد مخزن سوخت و شعله ور شدن محتوای آن می باشد که همانگونه که اشاره شد با توجه به نوع لوکوموتیوهای کششی و خودکشند ۲ علت متفاوت برای این سانحه وجود دارد.

در این مقاله به بررسی و محاسبه ریسک حریق ناشی از این سانحه خاص، پرداخته شده است. مراحل فوق در ادامه تشریح شده اند. هدف آشنایی با نحوه ارزیابی ریسک می باشد و به دلیل نقصان داده ها در مورد حادثه فوق، نتایج عددی حاصله چندان دقیق نیستند و تنها به منظور توضیح رویکرد ارزیابی فوق آورده شده اند. البته لازم به ذکر است که مطالعه فوق ادامه دارد و نتایج روی داده های واقعی در مقالات بعدی ارائه می گردد [۷] [۸].

گام۱: تعیین مراحل تخمین ریسک حریق به شرح زیر:

۱.احتمال بودن مسافر در نزدیکی مخزن سوخت

۲.متوسط سالانه تعداد گسیختگی حاد مخزن

۳.متوسط EFs سالانه ناشی از مخزن سوخت

[29] State transition model

[30] Equivalent Fatalities

Archive of SID

www.SID.ir

مرحله۱. احتمال بودن مسافر در نزدیکی مخزن سوخت به سایز گوی آتش ایجاد شده و طول واگن مسافری(حدود ۲۰متر) وابسته است. با توجه به جدول ۱ احتمال فوق، برای هر نوع قطار مسافریِ مشخص، محاسبه می شود.

جدول ۱:احتمال همنشینی در مجاورت مخزن

احتمال همنشینی در مجاورت مخزن	احتمال حضور مسافر در این قطار خاص	مجموع مسافت سالانه طی شده با قطار (بیلیون کیلومتر)	احتمال مجاورت با مخزن سوخت	نوع قطار
=۰,۲۵×۰,۱۵ ۰,۰۳۷۵	=۵,۸/۳۹,۱ ۰,۱۵	۵,۸	۰,۲۵	Loco-hauled Diesel

فرض: مسافت کلی سالانه یک مسافر ۳۹,۱ بیلیون کیلومتر است.

مرحله۲. تخمین تناوب خرابی (گسیختگی مخزن)، که وابسته به تعیین کلاس آسیب (بین A تا F بر حسب داده های آماری) و نیز تخمین خرابی های وسیله نقلیه طی ۶ سال بر حسب آمار موجود می باشد. نتایج در جدول ۲ آمده است:

جدول ۲:تعداد سالانه گسیختگی جدی مخزن سوخت نزدیک مسافر

تعداد سالانه گسیختگی جدی مخزن سوخت نزدیکِ مسافر	تعداد سالانه گسیختگی جدی مخزن سوخت	احتمال گسیختگی جدی مخزن برای یک حادثه مشخص بر حسب کلاس آسیب D	تعداد وسیله نقلیه سالانه آسیب دیده	تعداد وسیله نقلیه آسیب دیده (طی ۶ سال)
=۰,۲۵×۰,۰۲۲۵ ۰,۰۰۵۶۲۵	=۰,۰۰۱۵×۱۵ ۰,۰۲۲۵	۰,۰۰۱۵	۱۵=۸۶/۶	۸۶

کلاس D : آسیب خارجی قابل ملاحظه، آسیب به ساختار به صورت جزئی، تابیدگی بوژی و آسیب به بدنه.

پس از انجام اقدام اصلاحی، مقدار مورد انتظار بهبود برای هر کلاس آسیب تعیین گردید که بر تعداد خرابی ناشی از گسیختگی سالیانه مخزن مؤثر است. نتایج در جدول ۳ آمده است:

جدول ۳:مقدار مورد انتظار سالانه گسیختگی

مقدار مورد انتظار سالانه گسیختگی	EFs حاصل از یک گلوله آتش	احتمال اینکه یک گلوله آتش منجر به گسیختگی مخزن سوخت شود	تعداد سالیانه گسیختگی مخزن سوخت	
۰,۰۰۲۸۱۲۵.x=۰,۰۰۵۶۲۵×۰,۵X	*x	۰,۵	۰,۰۰۵۶۲۵	میانگین

*آمار مرگ و میر ناشی از حریق طی ۶ سال مشخص نیست. بنابراین EFs حاصل از یک گلوله آتش معلوم نیست و رقم معادل آن در محاسبات مقدار مورد انتظار سالانه گسیختگی منظور نمی گردد۰
بدین ترتیب مقدار متوسط EFs سالیانه ناشی از گسیختگی مخزن سوخت، بصورت ضریبی از X برآورد می شود.

گام۲. تعیین شاخص های ایمنی

اقدامات لازم جهت افزایش حفاظت در برابر حریق، شاخص‌های ایمنی نامیده می شود، که عبارتند از:
۱.کاهش میزان موجودی سوخت ۲. تعیین موقعیت مخزن سوخت ۳. استفاده از مواد فزاینده جهت کاهش تمایل به تجزیه شدن سوخت ۴.استفاده از آستر انعطاف پذیر ۵.مخزن دو جداره ۶.چگونگی نصب مخزن سوخت و نحوه اتصال خطوط سوخت به یکدیگر ۷.سردسازی.

جهت براورد کارایی هریک از پیشنهادهای فوق به منظور انتخاب گزینه برتر، هزینه هر شاخص ایمنی باید تخمین زده و ارزیابی شود. این هزینه ها عبارتند از:
۱.هزینه مواد و نصب تجهیزات، ۲.هزینه عملکردی و ۳.هزینه تحقیق و توسعه (R&D) هر شاخص ایمنی.

به عنوان نمونه تخمین هزینه کاهش میزان موجودی سوخت، به عنوان یک راهکار در ادامه آورده شده است. هدف، کاهش موجودی سوخت حمل شده توسط قطار و در نتیجه کاهش شدت اثر حریق می باشد. این هزینه ها عبارتند از:

۱.هزینه مواد و نصب تجهیزات

هزینه خاصی را شامل نمی شود. درحالیکه افزودن یک تکنولوژی جدید جهت بهبود مخزن با توجه به ذخیره موجودی فعلی لازم بنظر نمی رسد، مخزن سوخت بایستی کوچکتر و ارزانتر ساخته شود.

۲.هزینه عملکردی

هزینه ناشی از سوخت گیری مجدد می باشد که سلسله مرتب آن عبارتند از:
۱. هر وسیله نقلیه سالیانه حدودا ۳۶۵/۲ = ۲۰۰ عمل سوخت گیری مجدد انجام می دهد.
۲. هر سوخت گیری مجدد،۰,۵ - ۱ $\frac{\text{ساعت} - \text{نفر}}{\text{قطار}}$ تحمیل می کند. (توجه: زمان سوخت گیری به طور کل افزایش نمی یابد).
۳. هزینه هر سوخت گیری مجدد بین ۱۵$ تا ۳۰$ براورد می شود (هزینه متوسط هر کارگر ۳۰$/ساعت می باشد).
۴. سه مخزن سوخت به ازای هر قطار به طور متوسط
۵. هزینه عملکردی $\frac{200\times 15}{3}$ *to* $\frac{200\times 30}{3}\frac{\$ / \tan k}{year}$ می باشد.

بنابراین طی بیست سال هزینه عملیات بین ۲۰۰۰ تا ۴۰۰۰ $/tank خواهد شد.

۳. هزینه R&D

هزینه خاصی به این واحد تخصیص نمی یابد، چرا که تغییراتی در وسیله نقلیه صورت نگرفته است.
بدین ترتیب هزینه هر گزینه براورد می شود.

Archive of SID

www.SID.ir

گام ۳. روش ارزیابی

جهت تعیین شاخص ایمنی کاراتر، شاخص‌های زیر پیشنهاد شده اند:

۳,۱. عملکرد ایمنی

کارایی محتمل هر شاخص ایمنی، در غالب مقدار متوسط کاهش در تصادفات ناشی از حریق، ارزیابی می شود. کارایی در قالب شاخص ذخیره بالقوه ماکزیمم مطرح می شود. تخمین مقدار متوسط CFS برای هر شاخص ایمنی در این مرحله بدست می آید.

۳,۲. هزینه مواد

شامل هزینه نیروی انسانی در بخش تولید، امکان سنجی بکارگیری طراحی های آتی در ارتباط با طراحی فعلی وسیله نقلیه، هزینه طراحی مجدد، شامل هزینه فراهم آوردن تجهیزات، به منظور پشتیبانی مشخصه فعلی جهت تطابق با نیازمندیهای فضای زیرزمین، می باشد.

۳,۳.هزینه عملکردی

شامل هزینه پرسنل ایستگاه راه آهن، تغییر برنامه زمان بندی قطار، هزینه نگهداری اضافی و لوازم یدکی می باشد.

۳,۴. هزینه توسعه

شامل هزینه تحقیق، طراحی، آزمایش جهت اثبات کارایی، آزمایش سرویس جهت اثبات قابلیت اعتماد عملکرد و بکارگیریِ شاخص ایمنی می باشد.

گام ۴. تعیین شاخص امکان پذیری

امکان پذیریِ یک شاخص ایمنی، با شاخص‌های امکان پذیری سنجیده می شود.

شاخص امکانپذیری =
/ (ماکزیمم مخارج توجیه پذیر برای یک مخزن ×CFS)
(هزینه مواد+هزینه عملکردی+هزینه توسعه)

Viability>1: سود بیش ازهزینه است. شاخص ایمنی امکان پذیر است.

Viablity=1 : میزان مخارج ماکزیمم است. شاخص ایمنی نا ممکن است.

Viability>1 : میزان مخارج ماکزیمم است. شاخص ایمنی مرزی است.

با توجه به موارد بالا، هزینه هر شاخص ایمنی برآورد شده، سپس با تخمین مقادیر CFS و تعیین شاخص امکان پذیری، در نهایت شاخص ایمنی کاراتر تعیین می شود. نتایج فوق الذکر در جدول ۴ آمده است. با توجه به نتایج جدول ۴، هیچ کدام از شاخص‌ها جز جا دادن فوم امکان پذیر نیستند و از آنجا که با سقف مخارج صورت گرفته، امکانپذیری مرزی محسوب می شود.

نتیجه گیری

در این مقاله، روش‌های منطقی کمی و کیفی، به عنوان راه حل برای سوانح ناشی از حریق، در غالب مدل‌های ریاضیِ غیر قطعی و مدل‌های قطعی مطرح گردید. توجه به این نکته ضروری است که وقوع و انتشار حریق غیر عمدی، پدیده ای تصادفی و متأثر از عوامل مختلف می باشد. شناسایی این پارامترها، با توجه به داده های موجود و تکنیک‌های مدیریت ریسک و ارزیابی نتایج امکان پذیر است.

مدل‌های ارائه شده، قابل تعمیم به صنعت ریلی می باشد. به عبارتی، اگر قطار را به عنوان یک مشخصه و واگن و سایر اجزاء آن را یک جزء بنامیم، مدل سازی انتشار حریق بین اجزاء و حتی خارج از قطار و وقوع پدیده فلش اُور قابل بررسی می باشد. بدین ترتیب با ارزیابی ریسک ناشی از حریق، اقدامات کنترلی کارا و مناسب جهت کاهش وقوع و شدت اثر پیامد آنها تعیین می گردد.

همانگونه که اشاره شد، بدلیل در دسترس نبودن اطلاعات کافی در مورد آمار سوانح ریلی ناشی از حریق در ایران، ریسک به صورت تخمینی براورد گردید و نتایج واقعی پس از اتمام ارزیابی ها در آینده اعلام می گردد. این رویکرد یکی از رویکردهای ارزیابی ریسک حریق ناشی از گسیختگی مخزن سوخت می باشد که با توجه به نوع سانحه حریق، ممکن است تغییر یابد.

Archive of SID

www.SID.ir

جدول ۴: ارزیابی نهایی ریسک

شاخص	CSF %	مواد	هزینه عملکردی	هزینه توسعه	هزینه کل	بودجه متوسط $۲۶۰۰ شاخص امکان پذیری	سقف بودجه $۵۲۰۰ شاخص امکان پذیری
کاهش موجودی	۴۰	۰	۳۰۰۰۰	۰	۳۰۰۰۰	۰,۰	۰,۱
موقعیت مخزن	۴۰	۱۰۰	۰	۰	۱۰۰	**۱۰,۴**	**۲۰,۸**
مخازن دوجداره	۴۰	۵۰۰۰	۰	۱۲۵	۵۱۲۵	۰,۲	۰,۴
مواد فزاینده جهت کاهش تجزیه	۸۰	۴۸۰۰	۳۰۰۰	۱۰۰۰	۵۲۰۰	۰	۰,۱
جا دادن فوم	۶۰	۰	۱۰۰۰	۱۲۵	۰	۰,۷	۱,۵
سردسازی سوخت	۴۰	۱۰۰۰	۲۰۰۰۰	۱۰۰۰	۲۱۲۵	۰	۰,۱

مراجع

[1]- D. Rasbash, G. Ramachandran, B. Kandola, J. Watts and M. Law, *Larger Image Evaluation of Fire safety,* John Wiley & Sons, 2004.

[2]- Ramachandran, G., "Fire safety management and risk assessment," Volume 17, Number 9/, pp. 363±376, 1999.

[3]- علی اسدی لاری، "نیروی محرکه قطار: لکوموتیو یا واگن‌های خودکششی"، صنعت حمل و نقل، شماره ۲۲۷، خرداد ۱۳۸۲، صص ۶۶-۶۹

[4]- Watts, J.M., "Fire Risk Rating Schedules," Fire Hazard and Fire Risk Assessment, ASTM STP 1150, Mareelo M. Hirschler, Ed., American Society for Testing and Material, Philadelphia, 1992, pp. 24-34.

[5]- Ramachandran, G, "A review of mathematical models for assessing fire risk", Fire Prevention, pp.28-32, 1982.

[6]- Ramachandran, G, "Stochastic models of fire growth", SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 2nd ed., National Fire Protection Association, pp.296-311, 1995.

[7]- R. D. A. Windle, W. G. Rasaiah, "Fire Protection – Carriage of Diesel Fuel", Rail Safety & Standards Board, LD..\44186..\AEATR- 2003-808.doc, May 2003.

[۸]- برادران, زوریخواه, شعبانی, "بررسی وضعیت سوانح ریلی در چند کشور توسعه یافته و مقایسه آن با وضعیت ایران", پژوهشکده حمل و نقل ایران۰

Archive of SID

www.SID.ir