ارزیابی علل و پیامدهای وقوع ریسک "ورود قطار به قطعه خط اشغال" با استفاده از رویکرد تجزیه و تحلیل علت و پیامد

احسان جعفریان[1]

[1]دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی ایمنی در راه‌آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران؛ ehsanjafarian@rail.iust.ac.ir

چکیده

حمل و نقل ریلی از دیرباز نقشی بسیار مهم و اساسی را در حمل و کالا و مسافر ایفا می‌کند. از همان روزهای آغازین بهره‌برداری کلان از این صنعت، با توجه به هزینه‌های هنگفت بروز حوادث، همواره این سؤال مطرح بوده است که "چه اقداماتی را می‌توان در راستای افزایش سطح ایمنی در بهره‌برداری از تجهیزات ریلی انجام داد؟"

بکارگیری یک سیستم جامع مدیریت ریسک به ما کمک می‌کند که با شناسایی پیشامدهای بالقوه نامطلوب، آن‌ها را مورد ارزیابی قرار داده و با بکارگیری راه‌کارهای مناسب، احتمال وقوع و پیامدهای نامطلوب ناشی از وقوع آن‌ها را به حداقل مقدار ممکن رساند و یا حذف کرد.

در این تحقیق پیشامد نامطلوب "ورود قطار به قطعه خط اشغال" با استفاده از تکنیک‌های تجزیه و تحلیل علت و پیامد مورد بررسی قرار می‌گیرد و ضمن تعیین علل وقوع پیشامد مذکور و علل کلیه پیشامدهای محوری، سناریوها و پیامدهای محتمل ناشی از وقوع چنین پیشامدی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد و درصد مواقعی که ریسک "ورود قطار به قطعه خط اشغال" به پیامدی خاص می‌انجامد، تعیین می‌گردد.

نتایج این مدلسازی می‌تواند به بهره‌بردار کمک کند تا از یک‌سو با شناسایی علل بوجود آورنده پیشامدی نامطلوب و از سوی دیگر با شناسایی کلیه سناریوها و پیامدهای نامطلوب، راه‌کارهایی مناسب و کارآمد را جهت تقلیل یا حذف ریسک مورد نظر اتخاذ نماید.

کلمات کلیدی: ارزیابی ریسک، ورود قطار به قطعه خط اشغال، تجزیه و تحلیل علت و پیامد، درخت خطا.

۱- مقدمه

حمل و نقل ریلی از دیرباز نقشی بسیار مهم و اساسی را در حمل و کالا و مسافر ایفا می‌کند. از همان روزهای آغازین بهره‌برداری کلان از این صنعت، با توجه به هزینه‌های هنگفت بروز حوادث، همواره این سؤال مطرح بوده است که "چه اقداماتی را می‌توان در راستای افزایش سطح ایمنی در بهره‌برداری از تجهیزات ریلی انجام داد؟"

بکارگیری یک سیستم جامع مدیریت ریسک به ما کمک می‌کند که با شناسایی پیشامدهای بالقوه نامطلوب، آن‌ها را مورد ارزیابی قرار داده و با بکارگیری راه‌کارهای مناسب، احتمال وقوع و پیامدهای نامطلوب ناشی از وقوع آن‌ها را به حداقل مقدار ممکن رساند و یا حذف کرد.

تکنیک تجزیه و تحلیل علت و پیامد، بعنوان روشی ساخت‌یافته، و دقیق و چندسونگر می‌تواند در مراحل شناسایی و تحلیل از سلسله مراحل مدیریت ریسک مورد استفاده قرار گیرد. این تکنیک برمبنای نمودار علت و پیامد می‌باشد. نمودار مذکور نخستین بار در دهه ۱۹۷۰ در آزمایشگاه ملی RISO در دانشگاه صنعتی دانمارک[1] ارائه شد و بمنظور تحلیل قابلیت اطمینان کارخانه‌های انرژی هسته‌ای در کشورهای حوزه اسکاندیناوی استفاده گردید [۱].

این تکنیک ترکیبی از رویکردهای استنتاجی و استقرایی می‌باشد. بدین‌معنا که با استفاده از یک رویکرد استنتاجی (رسیدن از کل به جزء)، کلیه علل ممکن بوجود آورنده پیشامدی مشخص را مورد ارزیابی قرار می‌دهد و با استفاده از رویکردی استقرایی (رسیدن از جزء به کل)، تمامی پیامدهای ناشی از وقوع ریسکی مشخص را بررسی می‌کند[۲].

در این تکنیک، برای شناسایی علل خرابی‌های سیستم و اجزاء بطور معمول از درخت‌های خطای متناظر با آن پیشامدها استفاده می‌شود. درخت خطا، مدلی است که بصورت منطقی و ترسیمی، ترکیب‌های متفاوتی را می‌تواند منجر به وقوع پیشامدی مشخص گردد را نمایش می‌دهد[۳].

در این تحقیق پیشامد نامطلوب "ورود قطار به قطعه خط اشغال" با استفاده از تکنیک‌های تجزیه و تحلیل علت و پیامد مورد بررسی قرار می‌گیرد و ضمن تعیین علل وقوع پیشامد مذکور و علل کلیه پیشامدهای محوری، سناریوها و پیامدهای محتمل ناشی از وقوع چنین پیشامدی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد و درصد مواقعی که ریسک "ورود قطار به قطعه خط اشغال" به پیامدی خاص می‌انجامد، تعیین می‌گردد.

نتایج این مدلسازی می‌تواند به بهره‌بردار کمک کند تا با شناسایی علل و پیامدهای ناشی از وقوع پیشامدی مشخص، راه‌کارهای مناسب را برای کاهش و یا حذف ریسک مورد نظر اتخاذ نماید.

[1] Risø DTU National Laboratory

Archive of SID
www.SID.ir

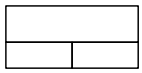
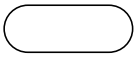
۲- تجزیه و تحلیل علّت و پیامد

تکنیک تجزیه و تحلیل علت و پیامد، ابزاری منطقی و ترسیمی برای تجزیه و تحلیل ریسک و ایمنی سیستم می‌باشد. این تکنیک بهمراه تکنیک تجزیه و تحلیل درخت خطا، بمنظور مستندسازی پیشامدهای بالقوه مورد استفاده قرار می‌گیرند.

این تکنیک، با استفاده از ترکیبی از رویکردهای استنتاجی و استقرایی بطور همزمان تجزیه و تحلیل علل بوجودآورنده و پیامدهای ناشی از وقوع پیشامد مورد بررسی را انجام می‌دهد و مدلی ترسیمی را برای شرح کلیه پیامدهای محتمل سیستم و عناصر تأثیرگذار بر روی آن‌ها فراهم می‌کند[۴].

برای ایجاد نمودار علت و پیامد، بطور معمول از هفت نوع نماد استفاده می‌شود. این نمادها در جدول ۱ مشاهده می‌شوند[۵].

جدول ۱: نمادهای کاربردی

نماد	عنوان	شرح
	پیشامد اولیه	پیشامدی می‌باشد که آغازگر مجموعه‌ای از سناریوهای منجر به وقایع مطلوب و نامطلوب می‌باشد.
	پیشامد میانی (جعبه تصمیم)	از این نماد جهت نمایش پیشامدهای میانی استفاده می‌شود.
	پیامد	این نماد، پیامد ناشی از وقوع مجموعه‌ای چندین پیشامد را نشان می‌دهد.
	نشان‌گر درخت خطا	درخت خطای پیشامد اصلی و پیشامدهای میانی را نشان می‌دهد.
	تأخیر زمانی	تأخیر زمانی‌ای را که باید درنظرگرفته شود نشان می‌دهد.
	دروازه "یا"	پیشامد خروجی زمانی رخ می‌دهد که حداقل یکی از پیشامدهای ورودی رخ داده باشد.
	دروازه "و"	پیشامد خروجی تنها زمانی رخ می‌دهد که تمامی پیشامدهای ورودی رخ داده باشند.

۲-۱- تعاریف

پیشامد اولیه(IE[2]): پیشامدی است که آغازگر یک یا مجموعه‌ای از سناریوها می‌باشد. وقوع این پیشامد، ممکن است به پیامدی نامطلوب یا مطلوب بیانجامد.

پیشامد میانی (پیشامد محوری): پیشامدهای میانی، پیشامدهایی می‌باشند که در طول یک سناریو، بین پیشامد اولیه و پیامد قرار می‌گیرند و معمولاً دو خروجی دارند، پیروزی و شکست. بسته به موفقیت یا عدم موفقیت پیشامدهای میانی، پیامدهای مختلفی ممکن می‌شود.

پیامد: پیامد، نتیجه یا برونداد حاصل از وقوع یک سلسله پیشامد می‌باشد و می‌تواند واقعه‌ای نامطلوب یا مطلوب باشد.

سناریو: مجموعه‌ای از پیشامدهای می‌باشد که به پیامدی مطلوب یا نامطلوب می‌انجامند. این مجموعه با یک پیشامد اولیه آغاز می‌شود، با یک یا چندین پیشامد میانی ادامه می‌یابد و به یک پیامد مشخص می‌انجامد.

مرتبه سناریو: به تعداد پیشامدهای محوری تشکیل دهنده یک سناریو، مرتبه سناریو می‌گویند. یک سناریو از مرتبه یک، سناریویی است تنها یک پیشامد محوری را شامل می‌شود.

پیشامد تکراری (MOE[3]): پیشامدی می‌باشد که در بیش از یک نقطه در ترکیب درخت‌های خطای نمودار علت و پیامد مشاهده می‌شود.

شاخه تکراری (MOB[4]): شاخه‌ای می‌باشد که بیش از یک‌بار در ترکیب درخت‌های خطای نمودار علت و پیامد استفاده می‌شود.

۲-۲- ایجاد نمودار علت و پیامد

ایجاد درخت علت و پیامد، از پیشامدی اولیه در بالای نمودار شروع می‌شود، با شناسایی کلیه پیشامدهای محوری ممکن ادامه می‌یابد و به کلیه پیامدهای ممکن ختم می‌شود.

پیشامدهای محوری معمولاً بصورت موانع ابزاری، موانع دستورالعملی و موانع احتمالی ظاهر می‌شوند و احتمال عدم موفقیت آن‌ها با استفاده از درخت‌های خطا متناظر با آن‌ها محاسبه می‌گردد.

مراحل ایجاد نمودار علت و پیامد عبارتند از:

۱. شناسایی پیشامد اولیه
۲. توسعه نمودار علت و پیامد
۳. کاهش
۴. اعتبارسنجی نمودار ترسیم شده

ارزیابی نمودار علت و پیامد

یکی از مهمترین مراحل تکنیک تجزیه و تحلیل علت و پیامد، مرحله ارزیابی نمودار می‌باشد. در این مرحله بسته به محدودیت‌ها و اهداف پروژه، ارزیابی ممکن به یکی یا هر دوصورت زیر انجام گیرد:

- ارزیابی کیفی
- ارزیابی کمی

[2] **I**nitiating **E**vent (**IE**)

[3] **M**ultiple **O**ccurring **E**vent (**MOE**)

[4] **M**ultiple **O**ccurring **B**ranch (**MOB**)

Archive of SID

www.SID.ir

در ارزیابی کیفی درخت علت و پیامد، ارزیابی بصورت غیر عددی و براساس خصوصیات سناریوها انجام می‌گیرد. این ارزیابی عمدتاً به جهت محدودیت‌های موجود در تعیین احتمال پیشامدهای پایانی انجام می‌گیرد و دید کلی‌ای را از علل و پیامدهای پیشامد مورد بررسی ارائه می‌دهد.

ارزیابی کیفی عمدتاً به دو صورت زیر انجام می‌گیرد:

- رتبه‌بندی کیفی سناریوهای مختلف: رتبه‌بندی کیفی سناریوها، برمبنای مرتبه سناریو تعیین می‌گردد. سناریوها از مرتبه پایین‌تر محتمل‌تر فرض می‌شوند.
- رتبه‌بندی کیفی پیامدها: رتبه بندی کیفی پیامدها در وهله اوّل برمبنای تعداد سناریوهایی که به پیامد مذکور ختم می‌شوند انجام می‌گیرد، و درصورت برابری تعداد سناریوهای منتهی به پیامد مورد نظر، برمبنای مرتبه سناریوهای منتهی انجام می‌گیرد.

ارزیابی کمی نمودار علت و پیامد، همانطورکه از عنوان آن مشخص است، بصورت عددی و با درنظرگفتن احتمال وقوع پیشامدهای پایانی درخت‌های خطا و منطق مابین آن‌ها انجام می‌گیرد.

ارزیابی کمی نمودار علت و پیامد عمدتاً در سه گام زیر انجام می‌شود:

- گام اول: تعیین احتمال پیشامدها
- گام اول: ارزیابی کلیه سناریوهای ممکن
- گام دوم: ارزیابی پیامدهای محتمل

گام اوّل – تعیین احتمال پیشامدها

نخستین گام از مرحله ارزیابی کمی نمودار علت و پیامد، تعیین احتمال وقوع کلیه پیشامدهای پایانی موجود در ساختار درخت‌های خطا می‌باشد. احتمال وقوع پیشامدهای پایانی یا بصورت عددی ثابت و یا بصورت متغیری تصادفی و وابسته به زمان می‌باشد و با استفاده از مستندات و سوابق موجود محاسبه می‌گردد.

از آنجاییکه نمودار علت و پیامد، بیشتر در رابطه با سیستم‌های ایستا کاربرد دارد، لذا، احتمال وقوع پیشامدهای خرابی نیز معمولاً بصورت عددی ثابت و مستقل از زمان فرض می‌شود.

در مواردیکه پیشامدهای محوری مستقل از یکدیگر هستند، در این مرحله علاوه بر تعیین احتمال پیشامدهای پایانی درخت‌های خطا، با درنظرگرفتن منطق مابین پیشامدهای پایانی، احتمال وقوع کلیه پیشامدهای محوری تعیین می‌گردد. این‌کار انجام محاسبات گام بعد یعنی ارزیابی سناریوهای ممکن را تسهیل می‌کند.

گام دوم – ارزیابی سناریوها

دومین گام از مرحله ارزیابی کمی نمودار علت و پیامد، ارزیابی و تحلیل کلیه سناریوهای ممکن می‌باشد. در این گام، کلیه سناریوهای محتمل تعیین می‌گردد و با درنظرگرفتن منطق و رابطه مابین پیشامدها، احتمال وقوع سناریو تعیین می‌گردد.

درصورتیکه پیشامدهای محوری تشکیل‌دهنده یک سناریو مشخص از یکدیگر مستقل باشند، احتمال وقوع سناریو مذکور از ضرب احتمال تک‌تک آن سناریوها بدست می‌آید. ولی چنانچه در ترکیب درخت‌های خطای متناظر با پیشامدهای محوری تشکیل دهنده سناریویی خاص، پیشامدی یا شاخه‌ای تکراری وجود داشته باشد، فرض استقلال برآورده نشده است و در این‌گونه موارد نمی‌توانیم از رابطه مذکور استفاده نماییم.

در چنین حالتی برای محاسبه صحیح احتمال، پیشامد تکراری بایددبصورت ریاضی کاهش یابد. در تجزیه و تحلیل علت و پیامد، این کاهش می‌تواند با استفاده از قوانین جبر بولی و یا با بازبینی درخت خطا انجام گیرد.

گام سوم – ارزیابی پیامدهای محتمل

آخرین گام مرحله ارزیابی کمی، تحلیل کلیه پیامدهای ممکن ناشی از وقوع پیشامد اولیه می‌باشد. در این مرحله، احتمال وقوع تک تک پیامدهای ممکن از طریق جمع جبری احتمال وقوع سناریوهایی که به پیامد مذکور می‌انجامند بدست می‌آید.

با دردست داشتن اطلاعات متناظر با پیامدهای مختلف، تحلیل‌گر می‌تواند راه‌کار مناسب را برای کاهش احتمال وقوع پیامدهای نامطلوب از طریق اعمال موانع جدید و یا کاهش احتمال وقوع پیشامدهای محوری از طریق کاهش احتمال وقوع پیشامدهای پایانی ارائه دهد.

۳. ارزیابی ریسک "ورود قطار به قطعه خط اشغال"

۳-۱. تعاریف

لکومتیوران[5]: فردی می‌باشد که هدایت لکومتیوران با درنظرگرفتن کلیه قوانین و شرایط برعهده دارد.

سیستم علامت‌دهی[6]: مجموعه‌ای از زیرسیستم‌ها و تجهیزات می‌باشد که بمنظور سیر ایمن وسیله نقلیه ریلی درنظرگرفته شده‌اند.

واحد متوقف‌کننده[7]: واحد متوقف‌کننده قطار، بخشی از سیستم علامت‌دهی می‌باشد. این واحد، تجهیزی است برای حفاظت از قطار. هنگامیکه قطار از سیگنال اشغال عبور می‌کند، این واحد قطار را بصورت خودکار متوقف می‌کند و بدین‌ترتیب از ورود قطار به آن قطعه خط جلوگیری می‌کند.

قطعه خط[8]: بخشی از خط می‌باشد که به سیگنال‌دهنده‌ها محدود می‌شود.

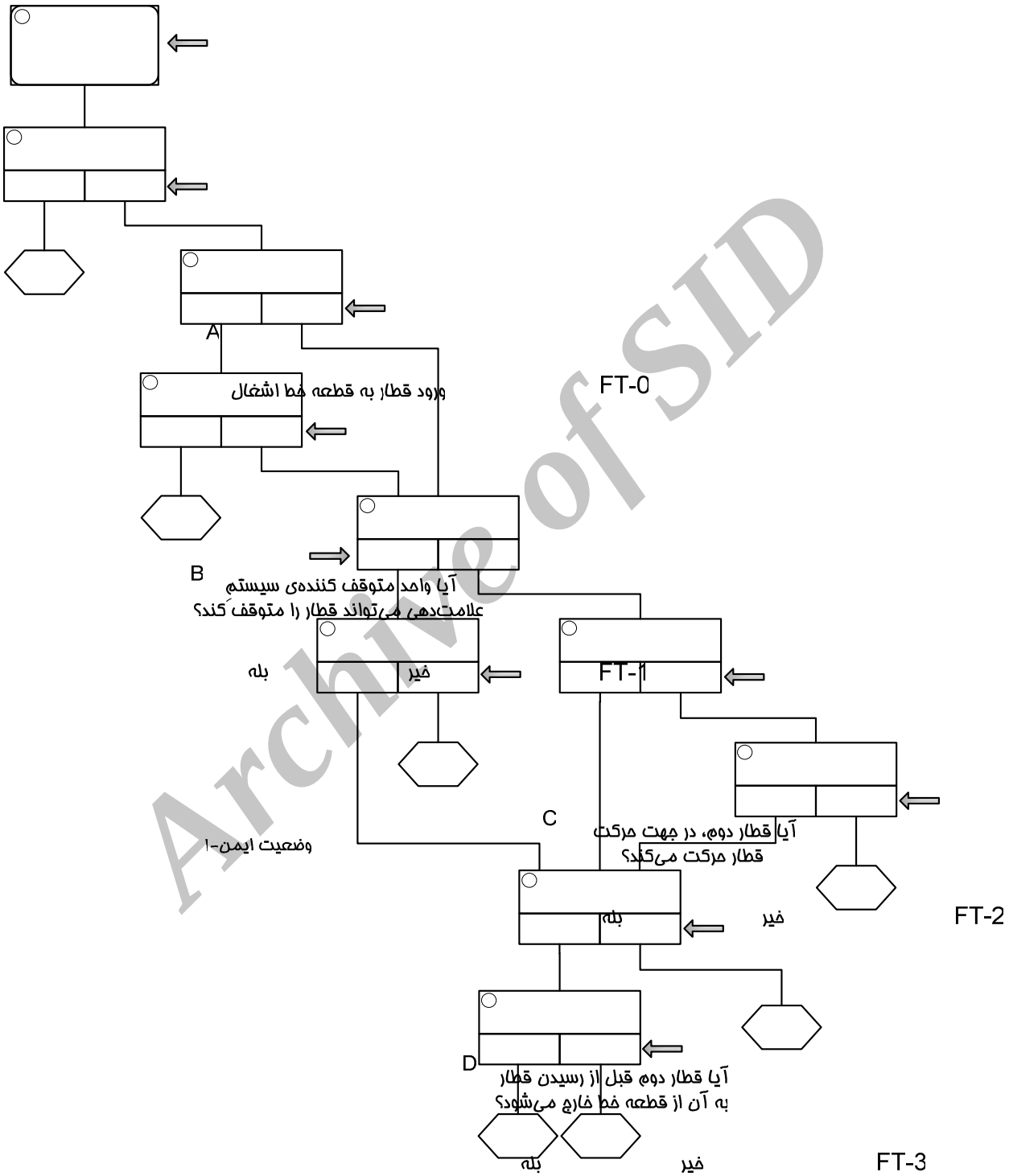
[5] Train Driver
[6] Signaling System
[7] Train Stop
[8] Track Segment

Archive of SID

www.SID.ir

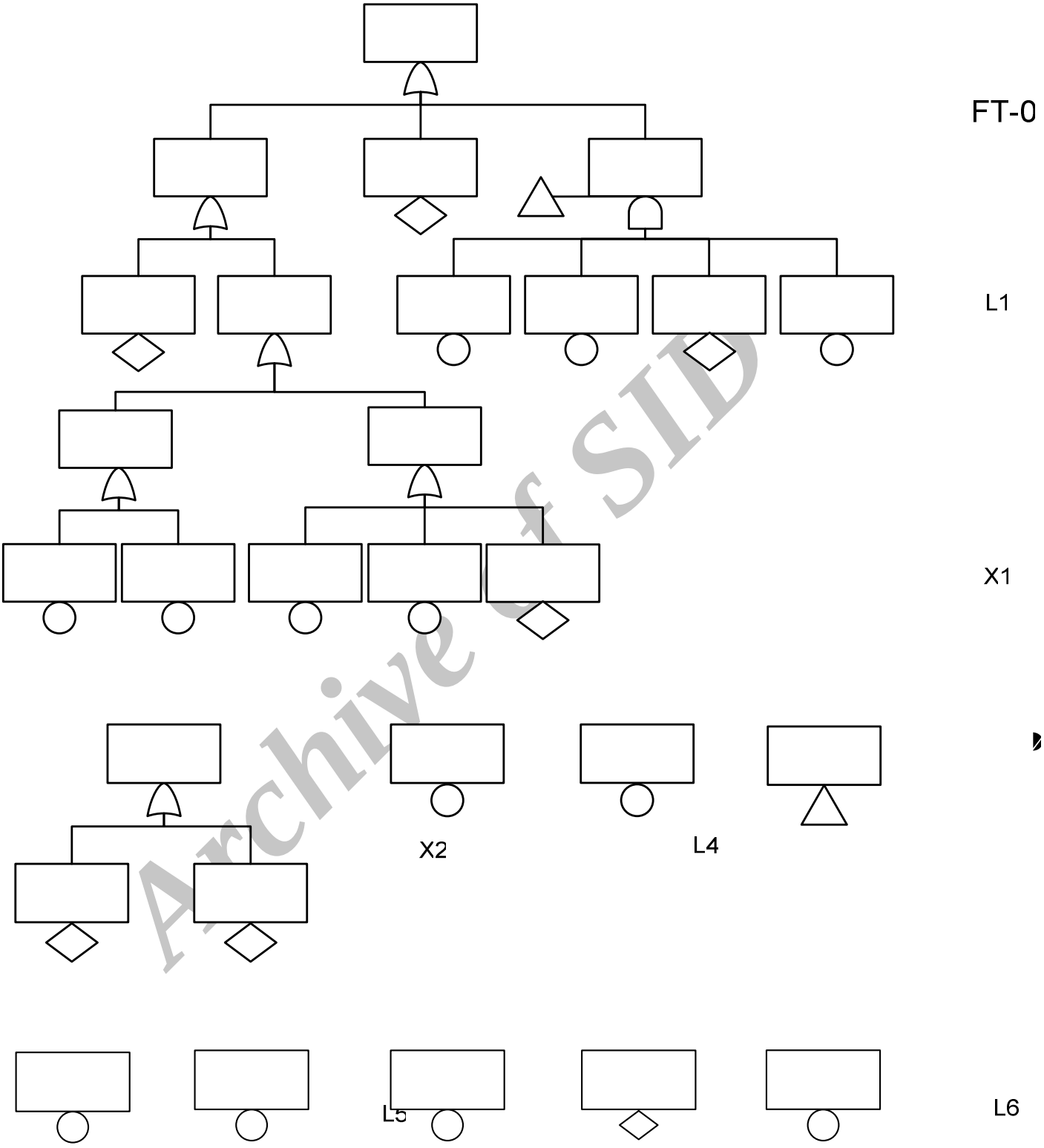
۳-۲. ایجاد نمودار علت و پیامد

همانطورکه پیش از این نیزگفته شد، فرآیند ایجاد نمودار علت و پیامد، فرآیندی است نظام‌مند که از یک پیشامد اولیه در بالای آغاز می‌گردد و تا شناسایی تک‌تک سناریوهای ممکن ادامه می‌یابد. در شکل‌های ۱ و ۲ نمودار علت و پیامد ریسک "ورود قطار به قطعه‌خط اشغال" و درخت‌های خطای نمودار علت و پیامد ریسک مذکور را ملاحظه می‌نمایید.



شکل ۱: نمودار علت و پیامد ریسک "ورود قطار به قطعه خط اشغال"

Archive of SID
www.SID.ir



شکل ۲: درخت‌های خطای نمودار علت و پیامد ریسک "ورود قطار به قطعه خط اشغال"

Archive of SID

www.SID.ir

جدول ۲: پیشامدهای پایانی

نام پیشامد	عنوان پیشامد	نوع پیشامد	احتمال وقوع
X1	اعلام به اشتباه وضعیت آزاد توسط سیستم علامت‌دهی	ثانویه (بسط نیافته)	0.010
X2	عبور از سیگنال به دلیل معیوب بودن علامت دهنده	ثانویه (بسط نیافته)	0.001
X3	استفاده نکردن (استفاده ناکافی) از ترمز دستی	پایه‌ای	0.008
X4	استفاده ناکافی از کفش ترمز	پایه‌ای	0.002
X5	نیرویی خارجی	ثانویه (بسط نیافته)	0.050
X6	ناتوانی خدمه در متوقف نمودن قطار	پایه‌ای	0.020
X7	خستگی لکومتیوران	پایه‌ای	0.005
X8	حواس‌پرتی لکومتیوران	پایه‌ای	0.005
X9	قانون شکن بودن لکومتیوران	پایه‌ای	0.001
X10	تفسیر نادرست سیگنال	پایه‌ای	0.001
X11	خرابی سیستم ترمز	ثانویه (بسط نیافته)	0.001
X12	خرابی واحد متوقف‌کننده سیستم علامت‌دهی	ثانویه (بسط نیافته)	0.010
X13	حرکت قطار در جهت مخالف	پایه‌ای	0.500
X14	رسیدن قطار به قطار دوم قبل از خروج آن از قطعه خط	پایه‌ای	0.030
X15	حضور نداشتن هیچ فردی در قطار فرار کرده	پایه‌ای	0.300
X16	لکومتیوران قطار دوم را نبیند	پایه‌ای	0.003
X17	سایرین متوجه حضور قطار دوم نشوند	پایه‌ای	0.025
X18	نبودن فاصله لازم برای ترمزگیری	پایه‌ای	0.500

۳-۳. ارزیابی نمودار علت و پیامد ریسک "ورود قطار به قطعه خط اشغال"

همانطورکه پیش از این نیز گفته شد، در اولیه گام از مرحله ارزیابی، احتمال وقوع تمامی پیشامدهای پایانی تعیین می‌گردد. در رابطه با این مثال، این احتمال در جدول ۲ ارائه گردیده است.

نکته مهم: از آنجاییکه در ساختار درخت‌های خطای نمودار علت و پیامد ریسک مذکور، پیشامدهای تکراری‌ای مشاهده می‌شوند، لذا در محاسبه احتمال سناریوهایی که یک پیشامد در طول آن در بیش از یک مورد مشاهده می‌شود، همانطور که گفته شد، فرض استقلال برآورده نشده است و در محاسبه احتمال این سناریوها نمی‌توان از ضرب تک‌تک پیشامدهای محوری برای محاسبه سناریو بهره‌برد. برای این حالات روابط احتمالی متناظر استخراج گردیده و در محاسبه احتمال استفاده شده‌اند. این روابط در جدول ۳ ارائه گردیده‌اند.

۳-۳-۱- ارزیابی سناریوها

همانطورکه پیش از این نیز ذکر شد، در مرحله ارزیابی سناریوها، کلیه سناریوهای اعم از سناریوهایی که به پیامدی نامطلوب یا مطلوب می‌انجامند مورد بررسی قرار می‌گیرند. و احتمال وقوع آن‌ها، بادرنظرگرفتن احتمال وقوع پیشامدهای پایانی و منطق مابین پیشامدها محاسبه می‌گردد.

در رابطه با این تحقیق، درنتیجه وقوع پیشامد "ورود قطار به قطعه خط اشغال" در مجموع ۲۴ سناریوی مختلف ممکن می‌باشد که در ادامه این سناریوها بهمراه نحوه محاسبه احتمال وقوع آن‌ها ارائه گردیده‌اند.

جدول ۳: روابط کاربردی در محاسبه احتمال سناریوها

ردیف	فرضیات	رابطه
۱	–	$FE0:\ P\left(\bigcup_i E_i\right)=(\sum 1st\ \ Terms)-(\sum 2nd\ \ Terms)+(\sum 3rd\ \ Terms)-(\sum 4th\ \ Terms)+\ldots$
۲	$A=D\cup E$ $B=E\cup F$	$FE1:\ A\cap B\cap C\Rightarrow FE1=E\cap(D\cup F)\cap C$ $FE2:\ A\cap B^c\cap C\Rightarrow FE2=D\cap(E^c\cap F^c)\cap C$
۳	$A=D\cup E\cup F$ $B=F\cup G$	$FE3:\ A\cap B\cap C\cap D\Rightarrow FE3=(F\cup G)\cap C\cap D$ $FE4:\ A\cap B\cap C\cap D^c\Rightarrow FE4=\left(E\cap(F\cup G)\cap C\cap D^c\right)\cup\left(F\cap C\cap D^c\right)$
۴	$A=E\cap(F\cup G)\cap C\cap D^c$ $B=F\cap C\cap D^c$	$FE5:\ A\cap B\Rightarrow FE5=E\cap F\cap C\cap D^c$
۵	$A=D\cup E\cup F\cup G$ $B=G\cup H$	$FE6:\ A\cap B\cap C\cap D\cap E\Rightarrow FE6=D\cap(G\cup H)\cap C\cap E$ $FE7:\ A\cap B\cap C\cap D^c\cap E\Rightarrow FE7=E\cap(G\cup H)\cap C\cap D^c$ $FE8:\ A\cap B\cap C\cap D^c\cap E^c\Rightarrow FE7=\left(F\cap(G\cup H)\cap C\cap D^c\cap E^c\right)\cup\left(G\cap C\cap D^c\cap E^c\right)$
۶	$A=F\cap(G\cup H)\cap C\cap D^c\cap E^c$ $B=G\cap C\cap D^c\cap E^c$	$FE9:\ A\cap B\Rightarrow FE5=F\cap G\cap C\cap D^c\cap E^c$

Archive of SID

www.SID.ir

سناریو ۱: قطار وارد قطعه خط اشغال شود ← واحد متوقف‌کننده‌ی سیستم علامت‌دهی قطار را متوقف کند ← وضعیت ایمن - ۱.

$$\Pr(S1)=\Pr(A\cap B1)=\Pr[(X1\cup X2\cup(X3\cap X4\cap X5\cap X6)\cup X7\cup X8\cup X9\cup X10\cup X11)\cap(X1\cup X12)^c]\overset{(FE2)}{=}\Pr[(X2\cup(X3\cap X4\cap X5\cap X6)\cup X7\cup X8\cup X9\cup X10\cup X11)\cap(X1^c\cap X12^c)]=1.01e-2$$

سناریو ۲: قطار وارد قطعه خط اشغال شود ← واحد متوقف‌کننده‌ی سیستم علامت‌دهی قطار را متوقف نکند ← قطار دوم هم‌جهت با قطار حرکت کند ← قطار دوم قبل از رسیدن قطار به آن از قطعه خط خارج شود ← وضعیت ایمن - ۲.

$$\Pr(S2)=\Pr(A\cap B2\cap C1\cap D1)=\Pr[(X1\cup X2\cup(X3\cap X4\cap X5\cap X6)\cup X7\cup X8\cup X9\cup X10\cup X11)\cap(X1\cup X12)\cap X13^c\cap X14^c]\overset{(FE1)}{=}\Pr[X1\cup((X2\cup(X3\cap X4\cap X5\cap X6)\cup X7\cup X8\cup X9\cup X10\cup X11)\cap X12)\cap X13^c\cap X14^c]=4.92e-3$$

سناریو ۳: قطار وارد قطعه خط اشغال شود ← واحد متوقف‌کننده‌ی سیستم علامت‌دهی قطار را متوقف نکند ← قطار دوم هم‌جهت با قطار حرکت کند ← قطار دوم قبل از رسیدن قطار به آن از قطعه خط خارج نشود ← قطار فرار کرده باشد ← فردی در قطار حضور داشته باشد ← سیستم ترمز کار کند ← فاصله لازم برای ترمزگیری وجود داشته باشد ← وضعیت ایمن - ۳.

$$\Pr(S3)=\Pr(A\cap B2\cap C1\cap D2\cap E1\cap F1\cap I1\cap J1)=\Pr[(X1\cup X2\cup(X3\cap X4\cap X5\cap X6)\cup X7\cup X8\cup X9\cup X10\cup X11)\cap(X1\cup X12)\cap X13^c\cap X14\cap(X3\cap X4\cap X5\cap X6)\cap X15^c\cap X10^c\cap X18^c]\overset{(FE7)}{=}\Pr[(X3\cap X4\cap X5\cap X6)\cap(X1\cup X12)\cap X13^c\cap X14\cap X15^c\cap X18^c\cap X10^c]=1.68e-12$$

سناریو ۴: قطار وارد قطعه خط اشغال شود ← واحد متوقف‌کننده‌ی سیستم علامت‌دهی قطار را متوقف نکند ← قطار دوم هم‌جهت با قطار حرکت کند ← قطار دوم قبل از رسیدن قطار به آن از قطعه خط خارج نشود ← قطار فرار کرده باشد ← فردی در قطار حضور داشته باشد ← سیستم ترمز کار کند ← فاصله لازم برای ترمزگیری وجود نداشته باشد ← برخورد - ۴.

$$\Pr(S4)=\Pr(A\cap B2\cap C1\cap D2\cap E1\cap F1\cap I1\cap J2)=\Pr[(X1\cup X2\cup(X3\cap X4\cap X5\cap X6)\cup X7\cup X8\cup X9\cup X10\cup X11)\cap(X1\cup X12)\cap X13^c\cap X14\cap(X3\cap X4\cap X5\cap X6)\cap X15^c\cap X10^c\cap X18]\overset{(FE7)}{=}\Pr[(X3\cap X4\cap X5\cap X6)\cap(X1\cup X12)\cap X13^c\cap X14\cap X15^c\cap X10^c\cap X18]=1.68e-12$$

سناریو ۵: قطار وارد قطعه خط اشغال شود ← واحد متوقف‌کننده‌ی سیستم علامت‌دهی قطار را متوقف نکند ← قطار دوم هم‌جهت با قطار حرکت کند ← قطار دوم قبل از رسیدن قطار به آن از قطعه خط خارج نشود ← قطار فرار کرده باشد ← فردی در قطار حضور داشته باشد ← سیستم ترمز کار نکند ← برخورد - ۳.

$$\Pr(S5)=\Pr(A\cap B2\cap C1\cap D2\cap E1\cap F1\cap I2)=\Pr[(X1\cup X2\cup(X3\cap X4\cap X5\cap X6)\cup X7\cup X8\cup X9\cup X10\cup X11)\cap(X1\cup X12)\cap X13^c\cap X14\cap(X3\cap X4\cap X5\cap X6)\cap X15^c\cap X10]\overset{(FE6)}{=}\Pr[(X3\cap X4\cap X5\cap X6)\cap(X1\cup X12)\cap X13^c\cap X14\cap X15^c\cap X10]=3.36e-15$$

سناریو ۶: قطار وارد قطعه خط اشغال شود ← واحد متوقف‌کننده‌ی سیستم علامت‌دهی قطار را متوقف نکند ← قطار دوم هم‌جهت با قطار حرکت کند ← قطار دوم قبل از رسیدن قطار به آن از قطعه خط خارج نشود ← قطار فرار کرده باشد ← فردی در قطار حضور نداشته باشد ← برخورد - ۳.

$$\Pr(S6)=\Pr(A\cap B2\cap C1\cap D2\cap E1\cap F2)=\Pr[(X1\cup X2\cup(X3\cap X4\cap X5\cap X6)\cup X7\cup X8\cup X9\cup X10\cup X11)\cap(X1\cup X12)\cap X13^c\cap X14\cap(X3\cap X4\cap X5\cap X6)\cap X15]\overset{(FE3)}{=}\Pr[(X1\cup X12)\cap X13^c\cap X14\cap X15\cap(X3\cap X4\cap X5\cap X6)]=1.44e-12$$

سناریو ۷: قطار وارد قطعه خط اشغال شود ← واحد متوقف‌کننده‌ی سیستم علامت‌دهی قطار را متوقف نکند ← قطار دوم هم‌جهت با قطار حرکت کند ← قطار دوم قبل از رسیدن قطار به آن از قطعه خط خارج نشود ← قطار فرار نکرده باشد ← لکومتیوران قطار دوم را ببیند ← سیستم ترمز کار کند ← فاصله لازم برای ترمزگیری وجود داشته باشد ← وضعیت ایمن - ۳.

$$\Pr(S7)=\Pr(A\cap B2\cap C1\cap D2\cap E2\cap G1\cap I1\cap J1)=\Pr[(X1\cup X2\cup(X3\cap X4\cap X5\cap X6)\cup X7\cup X8\cup X9\cup X10\cup X11)\cap(X1\cup X12)\cap X13^c\cap X14\cap(X3\cap X4\cap X5\cap X6)^c\cap X16^c\cap X10^c\cap X18^c]\overset{(FE8)}{=}\Pr[((X2\cup X7\cup X8\cup X9\cup X11)\cap(X1\cup X12)\cap X13^c\cap X14\cap X16^c\cap X18^c\cap(X3^c\cup X4^c\cup X5^c\cup X6^c)\cap X10^c)\cup(X1\cap X14\cap X16^c\cap X18^c\cap(X3^c\cup X4^c\cup X5^c\cup X6^c)\cap X10^c)]\overset{(FE0,FE9)}{=}7.57e-5$$

Archive of SID

www.SID.ir

سناریو ۸: قطار وارد قطعه خط اشغال شود ← واحد متوقف‌کننده‌ی سیستم علامت‌دهی قطار را متوقف نکند ← قطار دوم هم‌جهت با قطار حرکت کند ← قطار دوم قبل از رسیدن قطار به آن از قطعه خط خارج نشود ← قطار فرار نکرده باشد ← لکومتیوران قطار دوم را ببینند ← سیستم ترمز کار کند ← فاصله لازم برای ترمزگیری وجود داشته باشد ← برخورد - ۴.

$$\Pr(S8) = \Pr(A \cap B2 \cap C1 \cap D2 \cap E2 \cap G1 \cap I1 \cap J1) = \Pr[(X1 \cup X2 \cup (X3 \cap X4 \cap X5 \cap X6) \cup X7 \cup X8 \cup X9 \cup X10 \cup X11) \cap (X1 \cup X12) \cap X13^c \cap X14 \cap (X3 \cap X4 \cap X5 \cap X6)^c \cap X16^c \cap X10^c \cap X18] \overset{(FE8)}{=} \Pr[((X2 \cup X7 \cup X8 \cup X9 \cup X11) \cap (X1 \cup X12) \cap X13^c \cap X14 \cap X16^c \cap X18 \cap (X3^c \cup X4^c \cup X5^c \cup X6^c) \cap X10^c) \cup (X1 \cap X13^c \cap X14 \cap X16^c \cap X18 \cap (X3^c \cup X4^c \cup X5^c \cup X6^c) \cap X10^c)] \overset{(FE0,FE9)}{=} 7.57e-5$$

سناریو ۹: قطار وارد قطعه خط اشغال شود ← واحد متوقف‌کننده‌ی سیستم علامت‌دهی قطار را متوقف نکند ← قطار دوم هم‌جهت با قطار حرکت کند ← قطار دوم قبل از رسیدن قطار به آن از قطعه خط خارج نشود ← قطار فرار نکرده باشد ← لکومتیوران قطار دوم را ببینند ← سیستم ترمز کار نکند ← برخورد - ۳.

$$\Pr(S9) = \Pr(A \cap B2 \cap C1 \cap D2 \cap E2 \cap G1 \cap I2) = \Pr[(X1 \cup X2 \cup (X3 \cap X4 \cap X5 \cap X6) \cup X7 \cup X8 \cup X9 \cup X10 \cup X11) \cap (X1 \cup X12) \cap X13^c \cap X14 \cap (X3 \cap X4 \cap X5 \cap X6)^c \cap X16^c \cap X10] \overset{(FE7)}{=} \Pr[X10 \cap (X1 \cup X12) \cap X13^c \cap X14 \cap X16^c \cap (X3^c \cup X4^c \cup X5^c \cup X6^c) = 2.98e-7$$

سناریو ۱۰: قطار وارد قطعه خط اشغال شود ← واحد متوقف‌کننده‌ی سیستم علامت‌دهی قطار را متوقف نکند ← قطار دوم هم‌جهت با قطار حرکت کند ← قطار دوم قبل از رسیدن قطار به آن از قطعه خط خارج نشود ← قطار فرار نکرده باشد ← لکومتیوران قطار دوم را نبینند ← سایرین متوجه حضور قطار دوم شوند ← سیستم ترمز کار کند ← فاصله مورد نیاز برای ترمزگیری وجود داشته باشد ← وضعیت ایمن - ۳.

$$\Pr(S10) = \Pr(A \cap B2 \cap C1 \cap D2 \cap E2 \cap G2 \cap H1 \cap I1 \cap J1) = \Pr[(X1 \cup X2 \cup (X3 \cap X4 \cap X5 \cap X6) \cup X7 \cup X8 \cup X9 \cup X10 \cup X11) \cap (X1 \cup X12) \cap X13^c \cap X14 \cap (X3 \cap X4 \cap X5 \cap X6)^c \cap X16 \cap X17^c \cap X10^c \cap X18^c] \overset{(FE8)}{=} \Pr[((X2 \cup X7 \cup X8 \cup X9 \cup X11) \cap (X1 \cup X12) \cap X13^c \cap X14 \cap X16 \cap X17^c \cap X18^c \cap (X3^c \cup X4^c \cup X5^c \cup X6^c) \cap X10^c) \cup (X1 \cap X13^c \cap X14 \cap X16 \cap X17^c \cap X18^c \cap (X3^c \cup X4^c \cup X5^c \cup X6^c) \cap X10^c] \overset{(FE0,FE9)}{=} 2.22e-7$$

سناریو ۱۱: قطار وارد قطعه خط اشغال شود ← واحد متوقف‌کننده‌ی سیستم علامت‌دهی قطار را متوقف نکند ← قطار دوم هم‌جهت با قطار حرکت کند ← قطار دوم قبل از رسیدن قطار به آن از قطعه خط خارج نشود ← قطار فرار نکرده باشد ← لکومتیوران قطار دوم را نبینند ← سایرین متوجه حضور قطار دوم شوند ← سیستم ترمز کار کند ← فاصله مورد نیاز برای ترمزگیری وجود نداشته باشد ← برخورد - ۴.

$$\Pr(S11) = \Pr(A \cap B2 \cap C1 \cap D2 \cap E2 \cap G2 \cap H1 \cap I1 \cap J1) = \Pr[(X1 \cup X2 \cup (X3 \cap X4 \cap X5 \cap X6) \cup X7 \cup X8 \cup X9 \cup X10 \cup X11) \cap (X1 \cup X12) \cap X13^c \cap X14 \cap (X3 \cap X4 \cap X5 \cap X6)^c \cap X16 \cap X17^c \cap X10^c \cap X18] \overset{(FE8)}{=} \Pr[((X2 \cup X7 \cup X8 \cup X9 \cup X11) \cap (X1 \cup X12) \cap X13^c \cap X14 \cap X16 \cap X17^c \cap X18 \cap (X3^c \cup X4^c \cup X5^c \cup X6^c) \cap X10^c) \cup (X1 \cap X13^c \cap X14 \cap X16 \cap X17^c \cap X18 \cap (X3^c \cup X4^c \cup X5^c \cup X6^c) \cap X10^c] \overset{(FE0,FE9)}{=} 2.22e-7$$

سناریو ۱۲: قطار وارد قطعه خط اشغال شود ← واحد متوقف‌کننده‌ی سیستم علامت‌دهی قطار را متوقف نکند ← قطار دوم هم‌جهت با قطار حرکت کند ← قطار دوم قبل از رسیدن قطار به آن از قطعه خط خارج نشود ← قطار فرار نکرده باشد ← لکومتیوران قطار دوم را نبینند ← سایرین متوجه حضور قطار دوم شوند ← سیستم ترمز کار نکند ← برخورد - ۳.

$$\Pr(S12) = \Pr(A \cap B2 \cap C1 \cap D2 \cap E2 \cap G2 \cap H1 \cap I2) = \Pr[(X1 \cup X2 \cup (X3 \cap X4 \cap X5 \cap X6) \cup X7 \cup X8 \cup X9 \cup X10 \cup X11) \cap (X1 \cup X12) \cap X13^c \cap X14 \cap (X3 \cap X4 \cap X5 \cap X6)^c \cap X16 \cap X17^c \cap X10] \overset{(FE7)}{=} \Pr[X10 \cap (X1 \cup X12) \cap X13^c \cap X14 \cap X16 \cap X17^c \cap (X3^c \cup X4^c \cup X5^c \cup X6^c)] = 8.78e-10$$

سناریو ۱۳: قطار وارد قطعه خط اشغال شود ← واحد متوقف‌کننده سیستم علامت‌دهی قطار را متوقف نکند ← قطار دوم هم‌جهت با قطار حرکت کند ← قطار دوم قبل از رسیدن قطار به آن از قطعه خارج نشود ← قطار فرار نکرده باشد ← لکومتیوران قطار دوم را نبینند← سایرین متوجه حضور قطار دوم نشوند ← برخورد - ۲.

$$\Pr(S13) = \Pr(A \cap B2 \cap C1 \cap D2 \cap E2 \cap G2 \cap H2) = \Pr[(X1 \cup X2 \cup (X3 \cap X4 \cap X5 \cap X6) \cup X7 \cup X8 \cup X9 \cup X10 \cup X11) \cap (X1 \cup X12) \cap X13^c \cap X14 \cap (X3 \cap X4 \cap X5 \cap X6)^c \cap X16 \cap X17] \overset{(FE4)}{=} \Pr[((X2 \cup X7 \cup X8 \cup X9 \cup X10 \cup X11) \cap (X1 \cup X12) \cap X13^c \cap X14 \cap X16 \cap X17 \cap (X3^c \cup X4^c \cup X5^c \cup X6^c)) \cup (X1 \cap X13^c \cap X14 \cap X16 \cap X17 \cap (X3^c \cup X4^c \cup X5^c \cup X6^c))] \overset{(FE0,FE5)}{=} 1.14e-8$$

Archive of SID

www.SID.ir

سناریو ۱۴: قطار وارد قطعه خط اشغال شود ← واحد متوقف‌کننده‌ی سیستم علامت‌دهی قطار را متوقف نکند ← قطار دوم در جهت مخالف حرکت کند ← قطار فرار کرده باشد ← فردی در قطار حضور داشته باشد ← سیستم ترمز کار کند ← فاصله مورد نیاز برای ترمزگیری وجود داشته باشد ← وضعیت ایمن - ۳.

$$\Pr(S14)=\Pr(A\cap B2\cap C2\cap E1\cap F1\cap I1\cap J1)=\Pr[(X1\cup X2\cup (X3\cap X4\cap X5\cap X6)\cup X7\cup X8\cup X9\cup X10\cup X11)\cap (X1\cup X12)\cap X13\cap (X3\cap X4\cap X5\cap X6)\cap X15^c\cap X10^c\cap X18^c]\overset{(FE7)}{=}\Pr[(X3\cap X4\cap X5\cap X6)\cap(X1\cup X12)\cap X13\cap X15^c\cap X18^c\cap X10^c]=5.59e-11$$

سناریو ۱۵: قطار وارد قطعه خط اشغال شود ← واحد متوقف‌کننده‌ی سیستم علامت‌دهی قطار را متوقف نکند ← قطار دوم در جهت مخالف حرکت کند ← قطار فرار کرده باشد ← فردی در قطار حضور داشته باشد ← سیستم ترمز کار کند ← فاصله مورد نیاز برای ترمزگیری وجود نداشته باشد ← برخورد - ۴.

$$\Pr(S15)=\Pr(A\cap B2\cap C2\cap E1\cap F1\cap I1\cap J2)=\Pr[(X1\cup X2\cup (X3\cap X4\cap X5\cap X6)\cup X7\cup X8\cup X9\cup X10\cup X11)\cap (X1\cup X12)\cap X13\cap (X3\cap X4\cap X5\cap X6)\cap X15^c\cap X10^c\cap X18]\overset{(FE7)}{=}\Pr[(X3\cap X4\cap X5\cap X6)\cap(X1\cup X12)\cap X13\cap X15^c\cap X18\cap X10^c]=5.59e-11$$

سناریو ۱۶: قطار وارد قطعه خط اشغال شود ← واحد متوقف‌کننده‌ی سیستم علامت‌دهی قطار را متوقف نکند ← قطار دوم در جهت مخالف حرکت کند ← قطار فرار کرده باشد ← فردی در قطار حضور داشته باشد ← سیستم ترمز کار نکند ← برخورد - ۳.

$$\Pr(S16)=\Pr(A\cap B2\cap C2\cap E1\cap F1\cap I2)=\Pr[(X1\cup X2\cup (X3\cap X4\cap X5\cap X6)\cup X7\cup X8\cup X9\cup X10\cup X11)\cap (X1\cup X12)\cap X13\cap (X3\cap X4\cap X5\cap X6)\cap X15^c\cap X10]\overset{(FE6)}{=}\Pr[(X3\cap X4\cap X5\cap X6)\cap(X1\cup X12)\cap X13\cap X15^c\cap X10]=1.12e-13$$

سناریو ۱۷: قطار وارد قطعه خط اشغال شود ← واحد متوقف‌کننده‌ی سیستم علامت‌دهی قطار را متوقف نکند ← قطار دوم در جهت مخالف حرکت کند ← قطار فرار کرده باشد ← فردی در قطار حضور نداشته باشد ← برخورد - ۱.

$$\Pr(S17)=\Pr(A\cap B2\cap C2\cap E1\cap F2)=\Pr[(X1\cup X2\cup (X3\cap X4\cap X5\cap X6)\cup X7\cup X8\cup X9\cup X10\cup X11)\cap (X1\cup X12)\cap X13\cap (X3\cap X4\cap X5\cap X6)\cap X15]\overset{(FE3)}{=}\Pr[(X1\cup X12)\cap X13\cap X15\cap (X3\cap X4\cap X5\cap X6)]=4.80e-11$$

سناریو ۱۸: قطار وارد قطعه خط اشغال شود ← واحد متوقف‌کننده‌ی سیستم علامت‌دهی قطار را متوقف نکند ← قطار دوم در جهت مخالف حرکت کند ← قطار فرار نکرده باشد ← لکومتیوران قطار دوم را ببینند ← سیستم ترمز کار کند ← فاصله مورد نیاز برای ترمزگیری وجود داشته باشد ← وضعیت ایمن - ۴.

$$\Pr(S18)=\Pr(A\cap B2\cap C2\cap E2\cap G1\cap I1\cap J2)=\Pr[(X1\cup X2\cup (X3\cap X4\cap X5\cap X6)\cup X7\cup X8\cup X9\cup X10\cup X11)\cap (X1\cup X12)\cap X13\cap (X3\cap X4\cap X5\cap X6)^c\cap X16^c\cap X10^c\cap X18^c]\overset{(FE8)}{=}\Pr[((X2\cup X7\cup X8\cup X9\cup X11)\cap (X1\cup X12)\cap X13\cap X16^c\cap X18^c\cap (X3^c\cup X4^c\cup X5^c\cup X6^c)\cap X10^c)\cup(X1\cap X13\cap X16^c\cap X18^c\cap (X3^c\cup X4^c\cup X5^c\cup X6^c)\cap X10^c]\overset{(FE0,FE9)}{=}2.52e-3$$

سناریو ۱۹: قطار وارد قطعه خط اشغال شود ← واحد متوقف‌کننده‌ی سیستم علامت‌دهی قطار را متوقف نکند ← قطار دوم در جهت مخالف حرکت کند ← قطار فرار نکرده باشد ← لکومتیوران قطار دوم را ببینند ← سیستم ترمز کار کند ← فاصله مورد نیاز برای ترمزگیری وجود نداشته باشد ← برخورد - ۴.

$$\Pr(S18)=\Pr(A\cap B2\cap C2\cap E2\cap G1\cap I1\cap J2)=\Pr[(X1\cup X2\cup (X3\cap X4\cap X5\cap X6)\cup X7\cup X8\cup X9\cup X10\cup X11)\cap (X1\cup X12)\cap X13\cap (X3\cap X4\cap X5\cap X6)^c\cap X16^c\cap X10^c\cap X18]\overset{(FE8)}{=}\Pr[((X2\cup X7\cup X8\cup X9\cup X11)\cap (X1\cup X12)\cap X13\cap X16^c\cap X18\cap (X3^c\cup X4^c\cup X5^c\cup X6^c)\cap X10^c)\cup(X1\cap X13\cap X16^c\cap X18\cap (X3^c\cup X4^c\cup X5^c\cup X6^c)\cap X10^c)]\overset{(FE0,FE9)}{=}2.52e-3$$

سناریو ۲۰: قطار وارد قطعه خط اشغال شود ← واحد متوقف‌کننده‌ی سیستم علامت‌دهی قطار را متوقف نکند ← قطار دوم در جهت مخالف حرکت کند ← قطار فرار نکرده باشد ← لکومتیوران قطار دوم را ببینند ← سیستم ترمز کار نکند ← برخورد - ۳.

$$\Pr(S20)=\Pr(A\cap B2\cap C2\cap E2\cap G1\cap I2)=\Pr[(X1\cup X2\cup (X3\cap X4\cap X5\cap X6)\cup X7\cup X8\cup X9\cup X10\cup X11)\cap (X1\cup X12)\cap X13\cap (X3\cap X4\cap X5\cap X6)^c\cap X16^c\cap X10]\overset{(FE7)}{=}\Pr[X10\cap(X1\cup X12)\cap X13\cap X16^c\cap (X3^c\cup X4^c\cup X5^c\cup X6^c)]=9.97e-6$$

Archive of SID

www.SID.ir

سناریو ۲۱: قطار وارد قطعه خط اشغال شود ← واحد متوقف‌کننده‌ی سیستم علامت‌دهی قطار را متوقف نکند ← قطار دوم در جهت مخالف حرکت کند ← قطار فرار نکرده باشد ← لکومتیوران قطار دوم را نبیند ← سایرین متوجه حضور قطار دوم شوند ← سیستم ترمز کار کند ← فاصله مورد نیاز برای ترمزگیری وجود داشته باشد ← وضعیت ایمن – ۳.

$$\Pr(S21)=\Pr(A\cap B2\cap C2\cap E2\cap G2\cap H1\cap I1\cap J1)=\Pr[(X1\cup X2\cup (X3\cap X4\cap X5\cap X6)\cup X7\cup X8\cup X9\cup X10\cup X11)\cap (X1\cup X12)\cap X13\cap (X3\cap X4\cap X5\cap X6)^c\cap X16\cap X17^c\cap X10^c\cap X18^c]\overset{(FE8)}{=}\Pr[((X2\cup X7\cup X8\cup X9\cup X11))\cap(X1\cup X12)\cap X13\cap X16\cap X17^c\cap X18^c\cap (X3^c\cup X4^c\cup X5^c\cup X6^c)\cap X10^c)\cup(X1\cap X13\cap X16\cap X17^c\cap X18^c\cap(X3^c\cup X4^c\cup X5^c\cup X6^c)\cap X10^c)]\overset{(FE0,FE9)}{=}7.40e-6$$

سناریو ۲۲: قطار وارد قطعه خط اشغال شود ← واحد متوقف‌کننده‌ی سیستم علامت‌دهی قطار را متوقف نکند ← قطار دوم در جهت مخالف حرکت کند ← قطار فرار نکرده باشد ← لکومتیوران قطار دوم را نبیند ← سایرین متوجه حضور قطار دوم شوند ← سیستم ترمز کار کند ← فاصله مورد نیاز برای ترمزگیری وجود نداشته باشد ← برخورد - ۴.

$$\Pr(S22)=\Pr(A\cap B2\cap C2\cap E2\cap G2\cap H1\cap I1\cap J2)=\Pr[(X1\cup X2\cup (X3\cap X4\cap X5\cap X6)\cup X7\cup X8\cup X9\cup X10\cup X11)\cap (X1\cup X12)\cap X13\cap(X3\cap X4\cap X5\cap X6)^c\cap X16\cap X17^c\cap X10^c\cap X18]\overset{(FE8)}{=}\Pr[((X2\cup X7\cup X8\cup X9\cup X11)\cap(X1\cup X12)\cap X13\cap X16\cap X17^c\cap X18\cap (X3^c\cup X4^c\cup X5^c\cup X6^c)\cap X10^c)\cup(X1\cap X13\cap X16\cap X17^c\cap X18\cap(X3^c\cup X4^c\cup X5^c\cup X6^c)\cap X10^c)]\overset{(FE0,FE9)}{=}7.40e-6$$

سناریو ۲۳: قطار وارد قطعه خط اشغال شود ← واحد متوقف‌کننده‌ی سیستم علامت‌دهی قطار را متوقف نکند ← قطار دوم در جهت مخالف حرکت کند ← قطار فرار نکرده باشد ← لکومتیوران قطار دوم را نبیند ← سایرین متوجه حضور قطار دوم شوند ← سیستم ترمز کار نکند ← برخورد – ۳.

$$\Pr(S23)=\Pr(A\cap B2\cap C2\cap E2\cap G2\cap H1\cap I2)=\Pr[(X1\cup X2\cup (X3\cap X4\cap X5\cap X6)\cup X7\cup X8\cup X9\cup X10\cup X11)\cap (X1\cup X12)\cap X13\cap(X3\cap X4\cap X5\cap X6)^c\cap X16\cap X17^c\cap X10]\overset{(FE7)}{=}\Pr[X10\cap(X1\cup X12)\cap X13\cap X16\cap X17^c\cap(X3^c\cup X4^c\cup X5^c\cup X6^c)]=2.91e-8$$

سناریو ۲۴: قطار وارد قطعه خط اشغال شود ← واحد متوقف‌کننده‌ی سیستم علامت‌دهی قطار را متوقف نکند ← قطار دوم در جهت مخالف حرکت کند ← قطار فرار نکرده باشد ← لکومتیوران قطار دوم را نبیند ← سایرین متوجه حضور قطار دوم نشوند ← برخورد – ۲.

$$\Pr(S24)=\Pr(A\cap B2\cap C2\cap E2\cap G2\cap H2)=\Pr[(X1\cup X2\cup (X3\cap X4\cap X5\cap X6)\cup X7\cup X8\cup X9\cup X10\cup X11)\cap(X1\cup X12)\cap X13\cap(X3\cap X4\cap X5\cap X6)^c\cap X16\cap X17]\overset{(FE4)}{=}\Pr[((X2\cup X7\cup X8\cup X9\cup X10\cup X11)\cap(X1\cup X12)\cap X13\cap X16\cap X17\cap(X3^c\cup X4^c\cup X5^c\cup X6^c))\cup(X1\cap X13\cap X16\cap X17\cap(X3^c\cup X4^c\cup X5^c\cup X6^c))]\overset{(FE0,FE5)}{=}3.80e-6$$

خلاصه نتایج این گام را در جدول ۴ ملاحظه می‌نمایید. همانطورکه مشاهده می‌شود، سناریو شماره ۱، محتمل‌ترین سناریو می‌باشد و غیرمحتمل‌ترین سناریو نیز، سناریو شماره ۵ می‌باشد.

۳-۳-۲- ارزیابی پیامدها

همانطورکه گفته شد، آخرین گام از مرحله ارزیابی نمودار علت و پیامد، ارزیابی پیامدها می‌باشد. در این مرحله احتمال وقوع پیامد با جمع جبری احتمال وقوع سناریوهای منتهی به آن پیامد محاسبه می‌شود.

در رابطه با نمودار علت و پیامد مورد بررسی در این تحقیق نتایج حاصل از مرحله ارزیابی پیامد در جدول ۵ ارائه گردیده است.

همانطورکه در این جدول مشاهده می‌شود، محتمل‌ترین پیامد وقوع ریسک "ورود قطار به قطعه خط اشغال"، وضعیت ایمن ۱ با احتمال وقوع $۱/۰۱\times۱۰^{-۲}$ است و غیرمحتمل‌ترین پیامد نیز، برخود -۴ می‌باشد.

در مجموع، با توجه به این نتایج در ۱۲/۳۵ موارد، پیشامد "ورود قطار به قطعه خط اشغال" به برخورد قطارها می‌انجامد، و در ۸۷/۶۵ درصد موارد، پدیده برخورد رخ نمی‌دهد.

Archive of SID

www.SID.ir

جدول ۴: سناریوهای ممکن

ردیف	سناریو	پیامد	احتمال	رتبه (از نظر احتمال وقوع)
۱	A→B1	وضعیت ایمن - ۱	$۱/۰۱\times۱۰^{-۲}$	۱
۲	A→B2→C1→D1	وضعیت ایمن - ۲	$۴/۹۲\times۱۰^{-۳}$	۲
۳	A→B2→C1→D2→E1→F1→I1→J1	وضعیت ایمن - ۳	$۱/۶۸\times۱۰^{-۱۲}$	۲۰
۴	A→B2→C1→D2→E1→F1→I1→J2	برخورد - ۴	$۱/۶۸\times۱۰^{-۱۲}$	۲۰
۵	A→B2→C1→D2→E1→F1→I2	برخورد - ۳	$۳/۳۶\times۱۰^{-۱۵}$	۲۴
۶	A→B2→C1→D2→E1→F2	برخورد - ۱	$۱/۴۴\times۱۰^{-۱۲}$	۲۲
۷	A→B2→C1→D2→E2→G1→I1→J1	وضعیت ایمن - ۳	$۷/۵۷\times۱۰^{-۵}$	۵
۸	A→B2→C1→D2→E2→G1→I1→J2	برخورد - ۴	$۷/۵۷\times۱۰^{-۵}$	۵
۹	A→B2→C1→D2→E2→G1→I2	برخورد - ۳	$۲/۹۸\times۱۰^{-۷}$	۱۱
۱۰	A→B2→C1→D2→E2→G2→ H1→I1→J1	وضعیت ایمن - ۳	$۲/۲۲\times۱۰^{-۷}$	۱۲
۱۱	A→B2→C1→D2→E2→G2→ H1→I1→J2	برخورد - ۴	$۲/۲۲\times۱۰^{-۷}$	۱۲
۱۲	A→B2→C1→D2→E2→G2→ H1→I2	برخورد - ۳	$۸/۷۸\times۱۰^{-۱۰}$	۱۶
۱۳	A→B2→C1→D2→E2→G2→ H2	برخورد - ۲	$۱/۱۴\times۱۰^{-۸}$	۱۵
۱۴	A→B2→C2→ E1→F1→ I1→J1	وضعیت ایمن - ۳	$۵/۵۹\times۱۰^{-۱۱}$	۱۷
۱۵	A→B2→C2→ E1→F1→ I1→J2	برخورد - ۴	$۵/۵۹\times۱۰^{-۱۱}$	۱۷
۱۶	A→B2→C2→ E1→F1→ I2	برخورد - ۳	$۱/۱۲\times۱۰^{-۱۳}$	۲۳
۱۷	A→B2→C2→ E1→F2	برخورد - ۱	$۴/۸۰\times۱۰^{-۱۱}$	۱۹
۱۸	A→B2→C2→ E2→G1→ I1→J1	وضعیت ایمن - ۳	$۲/۵۲\times۱۰^{-۳}$	۳
۱۹	A→B2→C2→ E2→G1→ I1→J2	برخورد - ۴	$۲/۵۲\times۱۰^{-۳}$	۳
۲۰	A→B2→C2→ E2→G1→ I2	برخورد - ۳	$۹/۹۷\times۱۰^{-۶}$	۶
۲۱	A→B2→C2→ E2→G2→ H1→ I1→J1	وضعیت ایمن - ۳	$۷/۴۰\times۱۰^{-۶}$	۷
۲۲	A→B2→C2→ E2→G2→ H1→ I1→J2	برخورد - ۴	$۷/۴۰\times۱۰^{-۶}$	۷
۲۳	A→B2→C2→ E2→G2→ H1→I2	برخورد - ۳	$۲/۹۱\times۱۰^{-۸}$	۱۴
۲۴	A→B2→C2→ E2→G2→ H2	برخورد - ۲	$۳/۸۰\times۱۰^{-۶}$	۹

جدول ۵: پیامدهای محتمل

ردیف	پیامد	سناریوهای منتهی به پیامد مذکور	احتمال وقوع	درصد مواقعی که پیشامد اولیه به پیامد مذکور می‌انجامد
۱	برخورد - ۱	S6, S17	$۴/۹۴\times۱۰^{-۱۱}$	۰/۰۰۰۰۰۰۲۵
۲	برخورد - ۲	S13, S24	$۳/۸۱\times۱۰^{-۶}$	۰/۰۱۸۹۵۷۱۴
۳	برخورد - ۳	S5, S9, S12, S16, S20, S23	$۱/۰۳\times۱۰^{-۵}$	۰/۰۵۱۲۲۰۰۸
۴	برخورد - ۴	S4, S8, S11, S15, S19, S22	$۲/۴۷\times۱۰^{-۳}$	۱۲/۲۷۴۹۴۵۴۵
۵	وضعیت ایمن - ۱	S1	$۱/۰۱\times۱۰^{-۲}$	۵۰/۲۳۵۳۷۸۷۶
۶	وضعیت ایمن - ۲	S2	$۴/۹۲\times۱۰^{-۳}$	۲۴/۴۷۱۰۹۵۳۹
۷	وضعیت ایمن - ۳	S3, S7, S10, S14, S19, S22	$۲/۶۰\times۱۰^{-۳}$	۱۲/۹۴۸۴۰۲۹۳

Archive of SID

www.SID.ir

۴- نتیجه‌گیری

تکنیک تجزیه و تحلیل علت و پیامد، تکنیکی است ترسیمی که با استفاده از ترکیبی از رویکردهای استنتاجی و استقرایی، بطور همزمان امکان تحلیل علت‌ها و پیامدهای ناشی از وقوع پیشامدی مشخص را مهیا نموده است. از این تکنیک می‌توان در مراحل شناسایی و تحلیل از سلسله مراحل مدیریت ریسک کلیه سیستم‌ها، ازجمله سیستم ریلی بهره برد.

در این مقاله ریسک "ورود قطار به قطعه خط اشغال" با استفاده از تکنیک تجزیه و تحلیل علت و پیامد مورد ارزیابی قرار گرفت و ضمن شناسایی علل وقوع پیشامد اولیه و کلیه پیشامدهای محوری، سناریوها و پیامدهای ممکن مورد ارزیابی قرا گرفت و متوسط درصد مواردی‌که ریسک مورد بررسی به پیامدی نامطلوب منتهی می‌شود، تعیین گردید.

براساس نتایج بدست آمده از تحلیل، در نتیجه وقوع ریسک "ورود قطار به قطعه خط اشغال"، درمجموع ۲۴ سناریو متفاوت محتمل می‌باشند که از این میان، ۸ سناریو به وضعیت ایمن و ۱۶ سناریو به برخورد منتهی می‌شوند. از میان این ۲۴ سناریو، سناریو شماره ۱، یعنی "قطار وارد قطعه خط اشغال شود ← واحد متوقف‌کننده‌ی سیستم علامت‌دهی، قطار را متوقف نکند ← وضعیت ایمن ۱" با احتمال وقوع $۱/۰۱\times۱۰^{-۲}$ محتمل‌ترین سناریو می‌باشد.

ارزیابی کیفی سناریوهای ممکن نیز به نتایج تقریباً مشابهی می‌رسد. همانطورکه گفته شد، رتبه‌بندی کیفی سناریوها براساس مرتبه سناریو انجام می‌گیرد. بر این اساس سناریو شماره ۱، با توجه به اینکه سناریویی از مرتبه ۱ می‌باشد، بعنوان محتمل‌ترین سناریو از نظر کیفی شناخته می‌شود.

در انتها، با درنظرگرفتن احتمال وقوع سناریوهای مختلف، احتمال وقوع پیامدهای متفاوت تعیین گردید، که بر این اساس در مجموع احتمال وقوع برخورد ناشی از ورود قطار به قطعه خط اشغال $۲/۴۸\times۱۰^{-۳}$ می‌باشد. بعبارت بهتر، بطور متوسط در ۱۲/۳۵ درصد از مواردیکه پیشامد ورود قطار به قطعه خط اشغال روی می‌دهد، این امر به وقوع برخورد قطارها می انجامد و در ۸۷/۶۲ درصد از موارد، برخورد روی نمی‌دهد.

لذا با توجه به نتایج تجزیه و تحلیل انجام شده، پیشنهاد می‌شود تا برای کاهش حداکثری در احتمال وقوع پیامد نامطلوب برخورد قطارها، با درنظرگرفتن محتملترین سناریوهای منتهی به پیامد برخورد، از یک‌سو از احتمال وقوع پیشامدهای محوری تشکیل دهنده این سناریوها از طریق کاهش احتمال پیشامدهای پایانی درخت‌های خطای متناظر با آن‌ها کاست و از سوی دیگر با اعمال موانع جدید نظیر استفاده از تجهیزات یا قوانین جدید، احتمال متناظر با سناریو را به میزان قابل توجهی کاهش داد.

مراجع

[1]- Andrews J.D., Ridley L.M., ‘‘Application of Cause-Consequence Diagram Method to Static Systems,’’ Reliability Engineering and System Safety, Vol 75, pp. 47-58, 2002.

[2]- Stapelberg R.F., *Handbook of Reliability, Availability, Maintainability and Safety in Engineering Design*, Springer, 2009

[3]- Hoyland A., and Rausand M., *System Reliability Theory Models and Statistical Methods (2nd Edition)*, John Wiley and Sons, 2004

[4]- *Engineering Safety Management (The Yellow Book) Volume 1 and 2 – Fundamentals and Guidance, Issue 4*, RSSB, 2007

[5]- Ericson C., *Hazard Analysis Techniques for System Safety*, John Wiley and Sons, 2005

Archive of SID

www.SID.ir