ارزیابی ریسک حریق در ایستگاه‌های خط ۱ مترو شهر تهران (پست یکسوساز) با روش تجزیه و تحلیل درخت خطا

سید باقر مرتضوی[۱]، سمیه دانشور[۲]، صدیقه عطرکار روشن[۳]

تاریخ دریافت: ۹۱/۱۲/۰۲ تاریخ ویرایش: ۹۲/۰۳/۳۱ تاریخ پذیرش: ۹۲/۰۵/۲۹

چکیده

زمینه و هدف: سیستم مترو از جمله سیستم‌های زیربنایی در صنعت حمل و نقل می‌باشد که ممکن است در معرض حریق، سیل، زلزله و حوادثی مشابه قرار گرفته و سبب ایجاد خسارات و تلفات فاجعه‌بار به جامعه گردد. بنابراین مطالعه‌ای با هدف ارزیابی ریسک حریق در ایستگاه‌های خط ۱ مترو شهر تهران انجام شد.

روش بررسی: در اجرای این تحقیق پس از شناسایی انواع منابع ایجاد حریق در ایستگاه‌های مترو از طریق مشاهده، مصاحبه با کارشناسان مترو و بررسی مستندات با استفاده از تکنیک آنالیز درخت خطا مهم‌ترین علل بروز خطرحریق الکتریکی در پست‌های (RS(Rectifier Substation) خط ۱ مترو شهر تهران تعیین شد. همچنین با آنالیز کمی درخت خطا میزان احتمال وقوع خطر حریق برای یک سال محاسبه گردید.

یافته‌ها: یافته‌های تحقیق نشان می‌دهد که مهم‌ترین علل وقوع خطرحریق الکتریکی در تابلوها و دستگاه‌های این پست، تعمیرات نامناسب، اجرای نادرست حین نصب تجهیزات، جریان بیش از حد، طول عمر و جنس تجهیزات است. بر اساس محاسبات انجام شده، احتمال وقوع حادثه هر ۱۱ سال یک بار است.

نتیجه‌گیری: با برگزاری دوره‌های آموزشی مناسب برای پرسنل درگیر، نظارت دقیق در حین انجام تعمیرات، و نصب تجهیزات با کیفیت بهتر، احتمال وقوع حادثه به مراتب کاهش می‌یابد.

کلیدواژه‌ها: ایمنی، تجزیه و تحلیل درخت خطا، حریق، مترو تهران، پست یکسوساز

مقدمه

سیستم حمل و نقل عمومی زیرزمینی (مترو) یکی از مهم‌ترین اماکن عمومی است که در صورت بروز حریق می‌تواند خسارات جانی- مالی سنگینی را ایجاد نماید. طبق مطالعات انجام شده خسارات جبران‌ناپذیری از وقوع حریق در ایستگاه‌ها و تونل‌های مترو ایجاد شده است [۱-۴]. از جمله علل بروز حریق در متروهای جهان می‌توان به این موارد اشاره کرد: حریق‌های الکتریکی، حریق‌های عمدی و تروریستی، حریق ناشی از برخورد دو قطار در نتیجه دیریل شدن قطار، حریق ناشی از حوادثی چون سیل، زلزله، انفجار [۵-۸]. طی مطالعه‌ای در سال ۲۰۰۹ علل بروز حریق در سیستم مترو پکن، به ترتیب اتصال کوتاه و از کار افتادگی تجهیزات (۴۱٪)، حریق‌های عمدی (۱۴٪)، سیگار روشن (۱۰٪)، صندلی و جایگاه نشستن (۷٪) و سایر عوامل (۲۸٪) تعیین گردید [۹]. به منظور کنترل آسیب‌ها و صدمات ناشی از عوامل مخاطره‌آمیز باید به شناختی صحیح از خطر دست یافت. پس از شناسایی خطرات، برنامه کنترل خطرات اجراء می‌شود تا خطرات شناسایی شده به کلی از بین برده یا به نوعی تحت کنترل درآیند. این‌که برنامه کنترل خطر را باید از کدام خطر یا خطرات آغاز نمود نیاز به تعیین اولویت‌های خطرات دارد. برای تعیین اولویت خطرات، اولین کار محاسبه ریسک آن‌ها می‌باشد. در تجزیه و تحلیل خطرات، اگر چه تمام خطرات بایستی بیان شود، معمولا محدودیت منابع مانع از انجام این کار می‌شود، به همین علت از ارزیابی ریسک استفاده می‌کنیم. برای ارزیابی ریسک از تکنیک‌های خاصی استفاده می‌شود، به طوری که تکنیک‌های مناسب متعددی برای هر شرایطی وجود دارد؛ بنابراین انتخاب روشی مناسب، اهمیت پیدا می‌کند [۱۰, ۱۱]. طبق بیان واتس روش‌های ارزیابی ریسک حریق را می‌توان به ۳ گروه کیفی، نیمه‌کمّی و کمّی

۱- (نویسنده مسئول) دانشیار گروه مهندسی بهداشت حرفه‌ای، دانشکده علوم پزشکی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران. mortazav@modares.ac.ir
۲- کارشناس ارشد مهندسی بهداشت حرفه‌ای، دانشکده علوم پزشکی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.
۳- استادیار گروه اقتصاد، دانشگاه الزهرا، تهران، ایران.

طبقه‌بندی کرد؛ انواع چک‌لیست‌ها از روش‌های کیفی مورد استفاده در ارزیابی ریسک حریق می‌باشند. از روش‌های نیمه‌کمّی ارزیابی ریسک حریق می‌توان به روش شاخص‌گذاری اشاره کرد که شامل رتبه‌بندی عددی[1]، روش‌های مقیاس نقطه‌ای[2]، نمره‌دهی ریسک[3] می‌باشد [۱۲]. اصولا روش‌های کمّی گسترده‌ترین و کاربردی‌ترین روش‌های ارزیابی ریسک حریق می‌باشند. روش FTA از جمله روش‌های کمّی است که به مقدار وسیعی برای آنالیز کمّی یا کیفی خطر حریق استفاده می‌شود [۱۳]. این روش برای انتخاب سناریوهای حریق و محاسبه قابلیت اطمینان از تجهیزات حفاظت در برابر حریق نیز کاربرد دارد [۱۴]. از آن جایی که سیستم حمل و نقل عمومی زیرزمینی، بخشی از زیرساخت‌های حساس و بحرانی جامعه است، حفاظت از آن جزئی از فرهنگ ایمنی در جامعه مدنی محسوب می‌شود و با توجه به توسعه این نوع از سیستم حمل و نقل در کشور و احتمال ایجاد یک روند تقاضای افزایشی در جامعه در زمینه مقابله با حریق در این سیستم‌ها در آینده، و نیز نقش مهم پست‌های تامین کننده روشنایی[4] و یکسوساز[5] در سیستم مترو به عنوان منابع تغذیه ایستگاه و قطار این مطالعه با هدف بررسی وضعیت ایمنی حریق سیستم مترو شهر تهران در پست‌های یکسوساز انجام گرفته است. پست یکسوساز وظیفه تامین برق ریل سوم و برق قطار را برعهده دارد. در این واحد برق نیروگاه ۲۰ کیلو ولت توسط ترانسفورماتور به جریان ۵۹۳ ولت سه فاز و سپس به ۷۵۰ ولت DC تبدیل شده و برای تغذیه ریل سوم و قطار بکار می‌رود. بنابراین این مطالعه با هدف ارزیابی ریسک حریق در پست‌های یکسوساز ایستگاه‌های مترو شهر تهران (خط ۱) انجام شد.

روش بررسی

این مطالعه با استفاده از تکنیک آنالیز درخت خطا در ایستگاه‌های خط ۱ مترو شهر تهران انجام شد و مهم‌ترین عوامل مؤثر در بروز حوادث یاد شده شناسایی گردیدند. این تکنیک یک مدل نمادین به شکل درختی است که از بالا به پایین تولید شده و رویدادهای خطرناک را نشان می‌دهد. مدل مزبور مسیر خطرها را از یک رویداد یا شرایط نامطلوب و از پیش شناسایی شده به نام رویداد اصلی تا رسیدن به خطرها یا عیوبی که می‌توانند به عنوان عامل سببی عمل کنند (رویدادهای پایانی) دنبال می‌کند. شناخت رویدادهای پایانی و دسترسی به احتمال وقوع آن‌ها این امکان را فراهم می‌سازد که تکنیک مزبور هم به صورت کیفی و هم به صورت کمّی انجام شود. از روش FTA در زمینه پیدا کردن علل ریشه‌ای یک مخاطره و یا رویداد نامطلوب در طول گسترش به منظور کاهش و یا حذف آن، تعیین مسیرهای خرابی دارای ریسک بالا و مکانیزم آن‌ها، شناسایی اندازه ریسک‌های مهم برای اجزاء و رویدادهای خطا، تایید سیستم طراحی شده به وسیله ارزیابی ریسک احتمالات می‌توان بهره برد. این تحقیق در چهار مرحله انجام شد: در مرحله اول جمع‌آوری داده‌های لازم با روش Walking – Talking – Through، به صورت مشاهده، مصاحبه و بررسی مستندات صورت گرفته است. در مرحله دوم رویدادهای اصلی نامطلوب شناسایی شدند. سپس مرحله سوم با ساخت درخت خطا دنبال گردید و در آخرین مرحله با مشخص کردن احتمال وقوع رویدادهای پایانی، امکان تجزیه و تحلیل کمّی درخت فراهم گردید. سپس با رده‌بندی رویدادهای پایانی بر حسب نقش آن‌ها در بروز رویداد اصلی، کوچکترین و در عین حال مهم‌ترین ترکیب‌هایی از رویدادهای پایانی که برای وقوع رویداد اصلی لازم و کافی می‌باشند (برش‌های حداقل) مشخص شد. در نهایت با محاسبه احتمال وقوع رویدادهای میانی، احتمال وقوع رویداد اصلی در یک‌سال محاسبه گردید. در این مطالعه نرخ نقایص از طریق تجزیه و تحلیل اطلاعات ثبت شده از سال ۱۳۷۹ تا ۱۳۹۱ که در شرکت مترو موجود بود با استفاده از فرمول زیر تعین شد.

---

1. Numerical Grading
2. Point Scheme Methods
3. Risk Ranking
4. Lighting Power Substation
5. Rectifier Substation

$$\lambda = \frac{1}{MTBF}$$

که λ برابر با نرخ شکست و MTBF[۶] طبق فرمول زیر می‌باشد.

$$MTBF[۷] = \frac{\text{تعداد دستگاه} \times \text{ساعت کارکرد}}{\text{تعداد نقص}}$$

همچنین برای تعیین احتمال وقوع پیشامدهای خطا برای برون‌داد ورودی AND و OR از روابط زیر استفاده شده است [۱۵, ۱۶] :

$$P_A(E) = \prod_{i=1}^{K} P(Ei)$$

$$P_O(E) = 1 - \prod_{i=1}^{K} (1 - P(Ei))$$

K : تعداد کل پیشامدهای خطای درون‌داد

$P_A(E)$: احتمال وقوع برون‌داد ورودی AND

$P_O(E)$: احتمال وقوع برون‌داد ورودی OR

$P(E_i)$: احتمال وقوع پیشامد خطای برون‌داد E_i و برای $i=1,2,\ldots,K$

یافته‌ها

درخت خطای بسط یافته نهایی دارای ۷۵ رویداد (نهایی، میانی و اولیه) بود که با ۳۱ دروازه منطقی به یکدیگر متصل شدند. تعداد رویدادهای اولیه این درخت ۴۷ مورد بود. با توجه به ماهیت این رویدادها ۳دسته خطاهای انسانی، خطاهای مدیریتی و نقایص سخت‌افزاری برای دسته‌بندی آن‌ها درنظر گرفته شد. همچنین ۷۵ برش حداقل از درخت بدست آمد. مهم‌ترین علل وقوع خطر حریق الکتریکی در تابلوها و دستگاه‌های این پست، تعمیرات نامناسب، اجرای نادرست حین نصب تجهیزات، جریان بیش از حد، طول عمر و جنس تجهیزات تعیین گردید.

با توجه به وسعت درخت خطای ترسیم شده و عدم امکان ارائه کامل آن در مقاله، تنها بخشی از درخت در قالب رویداد میانی ایجاد گرما در ترانسفورماتورهای خشک رزینی ارائه می‌گردد. قابل ذکر است که این رویداد در کنار رویدادهای میانی اکسیژن کافی و وجود

جدول ۱- منابع تولید گرما در پست RS

ردیف	رویداد میانی	احتمال وقوع
۱	افزایش گرما در تابلوهای ۲۰ کیلو ولت	۰/۵۵۹۸
۲	ایجاد گرما در ترانسفورماتورهای خشک رزینی	۰/۸۰۶۲
۳	ایجاد گرما در رکتیفایر قدرت	۰/۷۸۵۲
۴	ایجاد گرما در تابلوهای ۷۵۰ ولت DC	۰/۶۴۱۴
۵	افزایش دما در تایبو حفاظت ولتاژ ریل حرکت	۰/۵۳۶۵
۶	افزایش دما در تابلوهای AC/DC	۰/۶۵۹۳
۷	افزایش دما در تابلوهای RTU	۰/۵۱۲۲

منابع سوختنی، بخشی از درخت حریق را تشکیل خواهد داد.

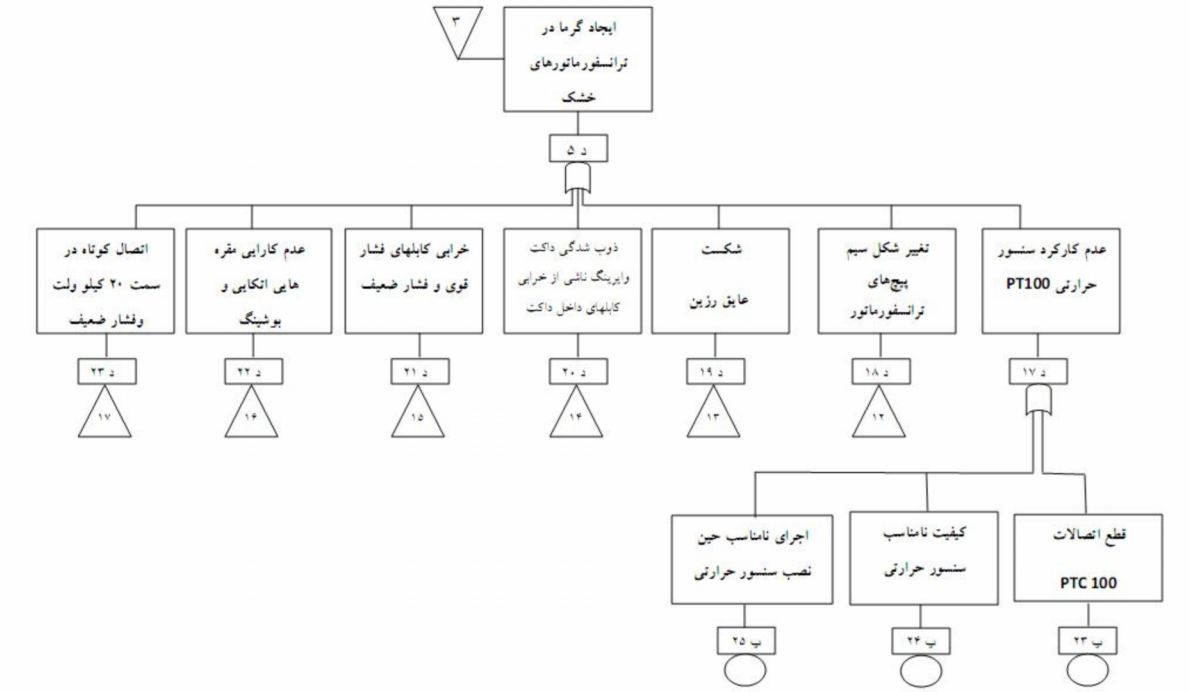
پس از یافتن احتمال وقوع رویدادهای پایانی، با استفاده از منطق‌های ارتباطی (جبر بولین) در درخت خطا احتمال وقوع رویدادهای میانی محاسبه گردید و نهایتا احتمال وقوع ریسک حریق در پست RS به میزان هر ۱۱ سال یک‌بار بدست آمد.

بحث و نتیجه‌گیری

بررسی درخت خطای اجرا شده نشان می‌دهد که ایجاد گرما در ترانسفورماتورهای خشک رزینی و رکتیفایر قدرت به ترتیب با احتمالات **۰/۸۰۶۲ و** ۰/۷۸۵۲ بیشترین تاثیر را در احتمال وقوع حریق الکتریکی در پست RS خواهند داشت. در هر پست RS دو ترانسفورماتور خشک رزینی و دو رکتیفایر قدرت وجود دارد که بر میزان احتمال حادثه خواهند افزود. همچنین نقش تابلوهای ۷۵۰ ولت DC را با توجه به تعداد این تابلوها در هر پست (حداقل ۵ – حداکثر ۸ تابلو) نبایستی نادیده گرفت. تعداد تابلوهای ۲۰ کیلو ولت نیز در هر پست از ۸ تا ۱۰ تابلو متغیر است که این مورد نیز بر احتمال وقوع ۰/۵۵۹۸تاثیر بسزایی خواهد گذاشت. از علل موثر در ایجاد گرما در ترانسفورماتور خشک رزینی می‌توان به تغییر شکل سیم پیچ ترانسفورماتور، شکست عایق رزین، ضعیف شدن مقره‌های اتکایی و بوشینگ، اتصالی در کابل‌های فشار قوی و نیز عدم کارکرد سنسور حرارتی PTC/PT 100

[۶]. Mean Time Between Failure
[۷]. Mean Time Between Failure

شکل ۱- بخشی از درخت خطای حریق در پست RS



اشاره کرد [۱۷]. همچنین از علل ایجاد گرما در رکتیفایر قدرت می‌توان ترکیب این عوامل را ذکر کرد: تهویه نامناسب، عدم کارکرد رله دمایی، ذوب شدن خازن‌ها و فیوزها، زخمی‌شدن و خرابی کابل‌های متصل به تابلوها، اتصال کوتاه در تجهیزات نیمه هادی. برای دیگر رویدادهای میانی مطرح شده در جدول شماره ۱ نیز مجموعه عللی مستقل قابل بحث می‌باشد.

در بررسی مطالعه‌های گذشته، طی گزارشی که توسط پروفسور چن فالین در سال ۱۹۹۳ از انجمن علمی تایوان ارائه شده است در سال ۱۹۷۹ حریق ناشی از ترانسفورماتور در مترو نیویورک باعث آسیب ۱۷۹ نفر گردید. همچنین تخلیه ۷۰۰ نفر به تونل و مرگ ۱ آتش‌نشان در حریق ترانسفورماتور مترو ناگویا ژاپن در سال ۱۹۸۳ و آسیب دیدن ۱۰ نفر آتش‌نشان در حریق ترانسفورماتور تاییپی تایوان در سال ۱۹۹۴ به اهمیت موضوع اشاره دارد [۱۸]. با توجه به فضای سرپوشیده مترو و عدم امکان دسترسی سریع افراد به راه‌های خروجی در زمان حریق و نیز با درنظر گرفتن تراکم جمعیتی که از مترو برای جابجایی استفاده می‌کنند، اهمیت توجه به وضعیت ایمنی حریق ایستگاه‌های مترو بسیار نمایان‌تر می‌شود. طبق نتایج حاصل از درخت تجزیه و تحلیل خطا در پست‌های RS مهم‌ترین علل وقوع خطر حریق الکتریکی در تابلوها و دستگاه‌های این پست‌ها، تعمیرات نامناسب، اجرای نادرست حین نصب تجهیزات، جریان بیش از حد، طول عمر و جنس تجهیز تعیین گردید. نتایج بدست آمده تاکیدی بر بالاتر بودن درصد خطاهای انسانی به علت عدم آگاهی و دانش کافی افراد درگیر (پیمانکاران) و یا بی‌توجهی و بی‌دقتی در زمان انجام فعالیت‌ها، عدم وجود نظارت کامل و جامع بر روی فعالیت پرسنل می‌باشد. همچنین می‌توان عدم وجود برنامه‌ریزی دقیق در زمان طراحی خطوط، درنظر نگرفتن تمهیدات لازم با توجه به شرایط خط و عدم توجه کافی در زمان تهیه تجهیزات را به علت فقدان یک سیستم اجرایی- نظارتی، از دیگر علل بالاتر بودن درصد خطاهای انسانی دانست. بر اساس یافته‌های این تحقیق با برگزاری دوره‌های آموزشی

تخصصی منظم و مستمر برای پرسنل درگیر و نیز متناسب با قطعات و دستگاه‌های تعویض شده و نظارت دقیق در حین انجام تعمیرات و نصب تجهیزات، حفظ و نگهداری درست و کنترل‌ها و بررسی‌های دوره‌ای و اطمینان از سلامت تجهیزات می‌توان احتمال وقوع حادثه را کاهش داد.

منابع

1. Ji J, Zhong W, Li K, Shen X, Zhang Y, Huo R. A simplified calculation method on maximum smoke temperature under the ceiling in subway station fires. Tunnelling and Underground Space Technology. 2011;26(3):490-6.
2. Beard AN. Fire safety in tunnels. Fire Safety Journal. 2009;44(2):276-8.
3. Fridolf K, Nilsson D, Frantzich H. Fire evacuation in underground transportation systems: A review of accidents and empirical research. Fire Technology. 2011.
4. Moodie K. The King's Cross fire: damage assessment and overview of the technical investigation. Fire Safety Journal. 1992;18(1):13-33.
5. Kyriakidis M, Hirsch R, Majumdar A. Metro railway safety: An analysis of accident precursors. Safety Science. 2012;50(7):1535-48.
6. Jing H, editor. Fire Risk Evaluation of Subway2009: IEEE.
7. Wang LC. Hazards Identification Model for Rail Rapid Transit Accidents. Journal of Marine Science and Technology. 2004;12(2):78-85.
8. Zarboutis N, Marmaras N. Searching efficient plans for emergency rescue through simulation: the case of a metro fire. Cognition, Technology & Work. 2004;6(2):117-26.
9. Jialei T, Tong W, Ya C, Guang B, editors. Safety Evacuation Measures in Urban Subway Fire2009: IEEE.
10. Radu LD. Qualitative, Semi-Quantitative And, Quantitative Methods For Risk Assessment: Case Of The Financial Audit. Analele Stiintifice ale Universitatii. 2009;56:643-57.
11. Marhavilas PK, Koulouriotis D. A risk-estimation methodological framework using quantitative assessment techniques and real accidents' data: Application in an aluminum extrusion industry. Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2008;21(6):596-603.
12. Watts J, Hall J. Introduction to Fire Risk Analysis, Section 5, Chapter 1. SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. 2008:1-8.
13. Berlin NG. SFPE Handbook of Fire Protection Engineering: National Fire Protection Association; 1988.
14. Hadjisophocleous GV. Literature Review Of Fire Risk Assessment Methodologies. International Journal on Engineering Performance-Based Fire Codes. 2004;6(1):28-45.
15. Rausand M, Høyland A. System reliability theory: models, statistical methods, and applications: John Wiley & Sons; 2004.
16. Vesely W. Fault tree handbook with aerospace application version 1.1: Washington DC, NASA Office of Safety and Mission Assurance; 2002.
17. Abdelmoumene A. Reliability enhancement of power transformer protection system. Journal of basic and applied scientific research. 2012; 2(10): 10534-9.
18. Chen F, Guo S-C, Chuay H-Y, Chien S-W. Smoke control of fires in subway stations. Theoretical and computational fluid dynamics. 2003; 16(5):349-68.

Fire risk assessment in Tehran metro line 1 (rectifier substation) with fault tree analysis

S.B. Mortazavi[1], S. Daneshvar[2], S. AtrKar Roshan[3]

Received: 2013/02/20 Revised: 2013/06/21 Accepted: 2013/08/20

Abstract

Background and aims: Subway system including infrastructure systems in the transportation industry can potentially exposed to fire, flood, earthquake and similar events and could create catastrophic losses to society. Therefore, this study aims to assess the risk of fire in Tehran subway stations (line 1).

Methods: In performing this research, after the identifying the fire hazard resources in subway stations through observing, interviewing techniques and reviewing the documents, using fault tree analysis the causes of electrical fires in rectifier substations in line 1 of Tehran metro, was determined. Furthermore, with quantitative fault tree analysis, the probability of the fire risk was calculated per year.

Results: Our findings indicate that, main causes of electrical fires in this post are including signs and devices, improper maintenance, improper implementation during equipment installation, inappropriate quality of equipment and their aging. The probability of accidents was calculated as one accident per every 11 years.

Conclusion: By holding training courses for personnel involved and careful monitoring during maintenance and installation of equipment, much lower probability risk would occur.

Keywords: Safety, Fault Tree Analysis, Fire, Tehran Subway, Rectifier Substation.

1. (**Corresponding author**) PhD, Department of Occupational Engineering, Faculty of Medical Sciences, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran. mortazaz@modares.ac.ir
2. Msc. of Occupational Engineering, Faculty of Medical Sciences, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.
3. PhD, Department of Economics, Alzahra University, Tehran, Iran.