



ارزیابی ریسک و تحلیل مهمترین روند حادثه شکست خط بخار در داخل محفظه ایمنی

برای یک نیروگاه نوعی PWR

شاهسوند، آتنا^(۱) - کریمی، کاوه*^(۲) - یوسف‌پور، فرامرز^(۳) - قریب، مرتضی^(۱)

۱. دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی‌تکنیک)، دانشکده مهندسی انرژی و فیزیک، تهران، ایران

۲. باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، واحد تهران شرق، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۳. پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، تهران، ایران

چکیده:

در این تحقیق، هدف ارزیابی حالات مختلف گسترش حادثه شکست خط بخار در داخل محفظه ایمنی برای یک نیروگاه نوعی PWR با روش شناسی PSA و محاسبه ریسک وقوع رویداد SLBI می‌باشد. روش تحقیق به این شکل بوده که در ابتدا تحلیل درخت رویداد انجام شده و سپس برای تحلیل رویدادهای عملکرد ظاهر شده در درخت رویداد، روش تحلیل درخت خطا به کار گرفته شده است. تحلیل‌ها توسط نرم افزار SAPHIRE انجام شده‌اند و بانرم افزار Risk-Spectrum مقایسه شده است. فرکانس آسیب به قلب با روش تخمین نقطه‌ای $1.38E-07/ry$ به دست آمد.

کلمات کلیدی: تحلیل احتمالاتی ایمنی، قابلیت اطمینان، شکست خط بخار، درخت رویداد، درخت خطا.

Risk Assessment and analysis of the most important sequence of Steam Line Break Accident Inside Containment for a typical Westinghouse PWR

Shahsavand, Atena¹; Karimi, Kaveh*²; Yousef Poor, Faramarz³; Gharib, Morteza¹

¹ Amirkabir University (Tehran Polytechnic), Energy Engineering And Physics Department

² Islamic Azad University, East Tehran Branch, Young Researchers Ana Elite Club

³ Nuclear Science and Technology Research Institute of Iran

Abstract:

The objective of this study is to assess the different sequences of steam line break inside containment for a typical Westinghouse PWR using PSA methodology and calculating the core damage risk due to SLBI accident. In this methodology, at first the Event Tree analysis is implemented and then Fault Tree analysis is used to assess the function events of the Event Tree. The SAPHIRE software is used in this risk assessment and it is compared with Risk-Spectrum results. The core damage frequency calculated as $1.38E-07/ry$ using point estimate method.

* آدرس ایمیل نویسنده عهده‌دار مکاتبات: kkarimi@gmail.com



Key Words: Probability Safety Analysis, Reliability, Steam Line Break, Event Tree, Fault Tree.

مقدمه :

در این مقاله روندهای حادثه شکست خط بخار در داخل محفظه ایمنی^۱ بررسی شده است. همچنین در همین راستا کارهایی انجام شده است، از جمله در سال ۲۰۱۴، J. Lim به همراه همکاران عملکرد سیستم ایمنی Passive تحت حادثه SLB را تحلیل کرده‌اند [1]. در سال ۲۰۱۵، M. Pavlova به همراه دیگران حادثه SLB با محاسبات ترموهیدرولیکی توسط کد ریلپ در شرایط Full Power برای VVER1000-V320 Unit تحلیل کرده‌اند [2]. در سال ۲۰۱۷، Francesco Di Maio و همکاران با استفاده از تحلیل حساسیت حاشیه ایمنی، در انتخاب مدل PSA به تحلیلگر کمک می‌کنند تا نشان دهد در چه شرایطی باید مدل دینامیک جانشین مدل استاتیک شود [3]. در همین سال Lee, Hansul و همکاران علاوه بر معرفی یک استاندارد فنی برای Accident Sequence Precursor، با استفاده از PSA به صورت دینامیک حادثه شکست U-Tube های مولد بخار را بعنوان Case Study بررسی نمودند [4]. در این مقاله تحلیل‌ها با روش‌های درخت رویداد و درخت خطا انجام شده است و سپس با استفاده از نرم افزار SAPHIRE کوپل و یکپارچه شدند و درخت رویداد پیوند یافته بدست آمده است. نتایج شامل بررسی مهمترین روند حادثه، فرکانس آسیب به قلب و قابلیت اطمینان رویدادهای عملکردی در طول حادثه می‌باشد.

روش کار:

در حادثه SLBI فرض می‌شود که یکی از خطوط بخار مدار ثانویه شکسته شده و بخار وارد محفظه ایمنی می‌شود. در این صورت کاهش فشار در مولد بخار باعث کاهش دما در مدار اول می‌شود [5]. در نتیجه ی کاهش فشار مدار ثانویه سیگنال ESFAS^۲ صادر می‌شود که منجر به تریپ راکتور می‌گردد. سپس با بستن شیر ایزوله^۳ در خط بخار، مولد بخار آسیب دیده از مولد بخار سالم دیگری ایزوله می‌شود و آب تغذیه اصلی^۴ بسته می‌شود و به جای آن آب تغذیه اضطراری^۵ بر روی مولد بخار سالم باز و آسیب دیده ایزوله می‌شود. به

¹ Steam Line Break Inside Containment (SLBI)

² Engineered Safety Features Actuation Systems

³ Isolation Valve

⁴ Main Feed Water

⁵ Emergency Feed Water (EFW)



منظور خنک‌سازی راکتور، سیستم تزریق ایمنی^۱ به کار می‌افتد و همچنین برای برداشت حرارت در ابتدا از مدار ثانویه و سپس از سیستم برداشت حرارت پسمان^۲ استفاده می‌شود. علاوه بر این، سیستم برداشت حرارت از محفظه ایمنی^۳ در ادامه روی خط خواهد آمد. تمرکز تحلیل حادثه در این مقاله بر روی سطح یک PSA می‌باشد [6]. در ابتدا برای رسم و تحلیل درخت رویداد حادثه SLBI، رویدادهای عملکردی^۴ به منظور جلوگیری از پیشروی حادثه که براساس عملکردهای ایمنی^۵ تعریف شده‌است به کار گرفته می‌شوند. عملکردهای ایمنی تهدید شده در این حادثه شامل کنترل راکتیویه، برداشت حرارت پسمان و کنترل موجودی قلب است. تحلیل درخت رویداد با رویداد آغازگر با فرکانس وقوع 1.0E-03/ry آغاز می‌شود که ترکیب عملکرد و عدم عملکرد رویدادهای عملکردی منجر به ۱۸ روند حادثه شده‌است که از این میان، ۵ روند منجر به خاموشی ایمنی^۶ در راکتور و ۱۳ روند منجر به آسیب به قلب^۷ شده‌است. به منظور تحلیل کمی درخت رویداد، احتمال خرابی و نقص هر کدام از رویدادهای عملکردی مورد استفاده در حادثه با رسم درخت خطا بدست آمده‌است که ناشی از احتمال خرابی تعداد زیادی رویداد پایه می‌باشد. خرابی رویدادهای پایه به دو صورت مستقل و مشترک مدل‌سازی شده‌اند. به منظور کمی‌سازی رویداد پایه، غالباً از مدل‌های ۳ و ۴ قابلیت اطمینان (جدول ۱) و در مدل‌سازی CCF از روش آلفا (معادلات ۱ و ۲) استفاده شده‌است.

$$\alpha_k^m = \frac{\binom{m}{k} Q_k^m}{\sum_{k=1}^m \binom{m}{k} Q_k^m} = \frac{\text{frequency of } k \text{ component failures}}{\text{total component failure frequency}} \quad (1) ; \alpha_t = \sum_{k=1}^m k \alpha_k \quad (2)$$

جدول (۱): مدل‌های قابلیت اطمینان

Reliability Model	No	Reliability Model	No
$Q(t) = 1 - (1 - q)e^{-\lambda T^m}$ (= constant)	4	$Q(t) = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} \cdot [1 - e^{-(\lambda + \mu)t}]$	1
$Q(t) = 0$	5	$Q(t) = 1 - e^{\lambda(\mu - T_i)}$ $T_i = 0, T1, 2T1, \dots$	2
$Q(t) = q + 1 - e^{-\lambda t}$	6	$Q(t) = q$	3

¹ Safety Injection System(SIS)

² Residual Heat Removal System(RHRS)

³Containment Spray System(CSS)

⁴ Function Event

⁵ Safety Function

⁶ Safe Shutdown

⁷ Core Damage



Event Tree Headings



شکل (۱): رویدادهای عملکردی به کار رفته در درخت رویداد حادثه SLBI

در ادامه روند حادثه SLBI، وقوع حادثه شکست لوله‌های مولد بخار^۱ در یک یا هر دوی مولدهای بخار محتمل است و روندهای جدیدی در درخت رویداد ایجاد می‌کند که در این مدل سازی نیز لحاظ شده‌است.

نتایج :

نتایج به دست آمده از تحلیل، شامل احتمال خرابی رویدادهای عملکردی است که در جدول شماره (۲) آمده‌است.

جدول شماره (۲): نتایج احتمال خرابی رویدادهای عملکردی در درخت رویداد حادثه SLBI برای کد

RiskSpectrum و SAPHIRE

NO	Function Events	Probability (SAPHIRE)	Probability (RiskSpec)	NO	Function Events	Probability (SAPHIRE)	Probability (RiskSpec)
1	Reactor Trip System-Cond1	2.57E-07	2.57E-07	6	Bleed-con5	1.01E-02	1.01E-02
2	Main Steam Line Isolation-Cond3	2.24E-08	2.24E-08	7	Containment Spray Heat Removal-Cond2	1.09E-04	1.26E-04
3	Emergency FeedWater System-Cond3	7.11E-03	6.94E-03	8	Containment Spray Heat Removal-Cond1	2.07E-03	2.24E-03
4	Emergency FeedWater System-Cond5	3.93E-03	3.91E-03	9	Operator Pressure Depressurization	4.07E-03	4.10E-03
5	Safety Injection System-Cond1	7.28E-05	9.13E-05	10	Residual Heat Removal System	5.21E-03	5.27E-03

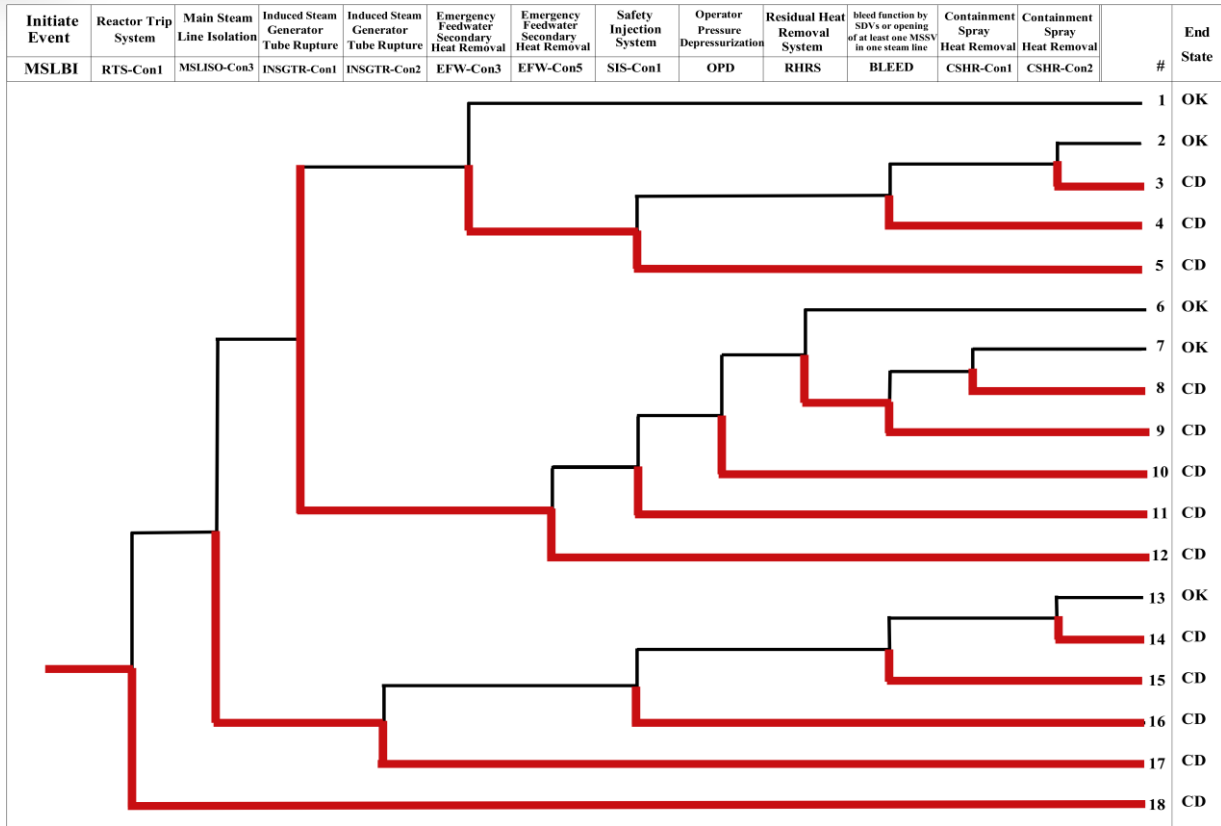
¹Induced Steam Generator Tube Rupture(IND-SGTR)



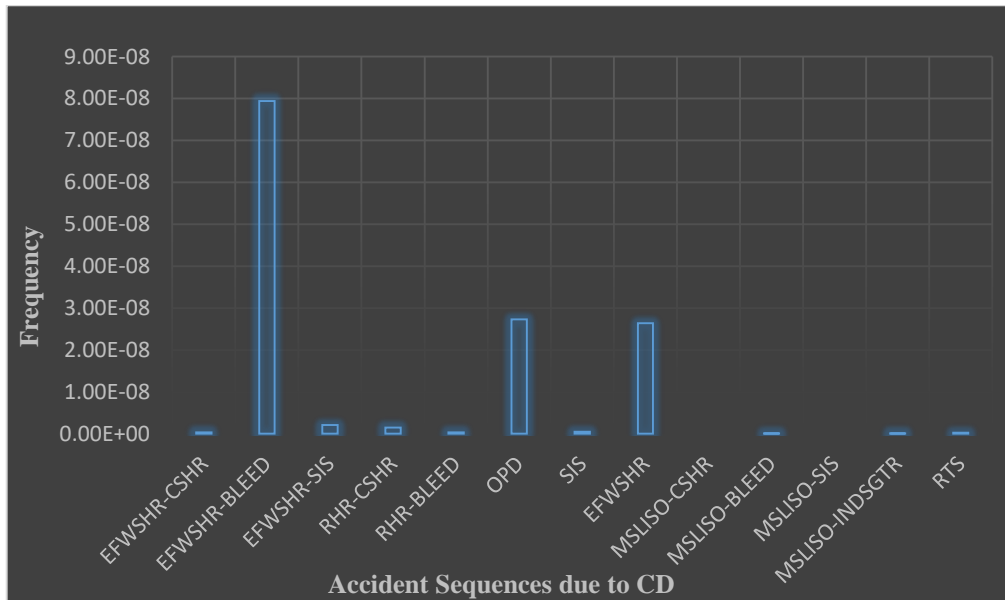
همچنین شکل شماره (۲) نشانگر درخت رویداد حادثه است. هر روند حادثه در انتها به دو حالت نهایی خاموشی ایمن یا آسیب به قلب ختم می‌شود. از ۱۸ روند حادثه، ۱۳ روند منجر به آسیب قلب شده‌است که این روندها با خطوط قرمز مشخص و در ادامه توضیح داده شده‌است. فرکانس و حالت‌های نهایی هر یک از روندها در جدول شماره (۳) آمده‌است.

جدول (۳): نتایج روندهای حادثه در درخت رویداد برای کد SAPHIRE و RiskSpectrum

NO	Accident Sequence	End state	Freq (SAPHIRE)	Freq (RiskSpec)	NO	Accident Sequence	End state	Freq (SAPHIRE)	Freq (RiskSpec)
1	Initiate Event(SLBI)	OK	1.00E-03	1.00E-03	10	OPD	CD	2.73E-08	2.74E-08
2	EFWSHR	OK	7.10E-06	6.92E-06	11	SIS	CD	4.67E-10	5.19E-10
3	EFWSHR-CSHR	CD	3.42E-10	3.67E-10	12	EFWSHR	CD	2.64E-08	3.07E-08
4	EFWSHR-BLEED	CD	7.94E-08	8.52E-08	13	MSLISO	OK	2.24E-11	2.24E-11
5	EFWSHR-SIS	CD	2.13E-09	2.32E-09	14	MSLISO-CSHR	CD	1.02E-15	1.09E-15
6	INDSGTR1	OK	6.70E-06	6.70E-06	15	MSLISO-BLEED	CD	2.25E-13	2.25E-13
7	RHR	OK	3.30E-08	3.33E-08	16	MSLISO-SIS	CD	1.51E-15	2.04E-15
8	RHR-CSHR	CD	1.50E-09	1.81E-09	17	MSLISO-INDSGTR	CD	2.24E-13	2.24E-13
9	RHR-BLEED	CD	3.36E-10	3.39E-10	18	RTS	CD	2.57E-10	2.57E-10



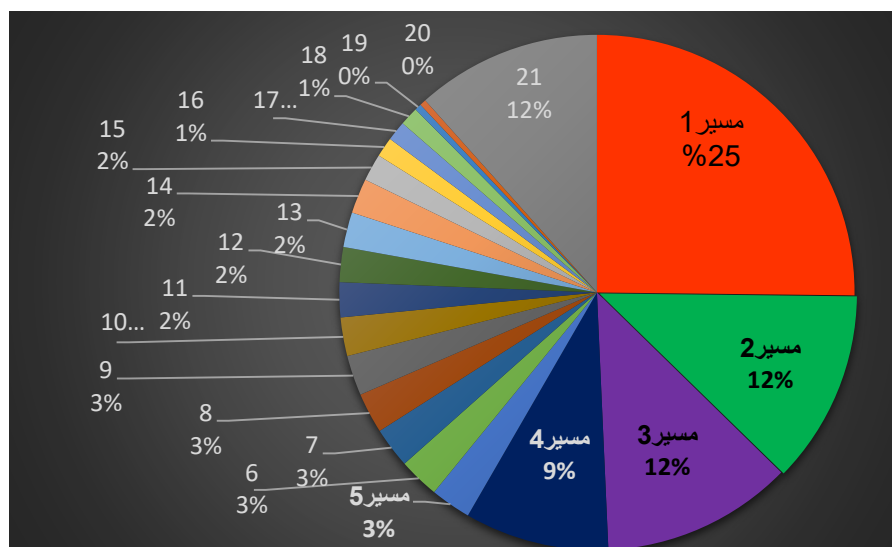
شکل (۲): درخت رویداد حادثه SLBI



شکل (۳): روندهای حادثه منجر به CD

جدول (۴): نتایج پنج ردیف اول MCS برای مهمترین روند حادثه (روند چهارم) در کد SAPHIRE و RiskSpectrum

Cut Set No	Event	Probability	%Total	Description
1	HE_BLEED, HE_EFW_TIE	2.00E-08	25.18	Operator failure to perform bleed function by SDV, Operator failure to open tie line valves between EFWS pools
2	1LAR02_AA701_OO, HE_BLEED	9.63E-09	12.13	Fail to close of MOV, Operator failure to perform bleed function by SDV
3	HE_BLEED, LBA20_AA710_OO	9.51E-09	11.98	Operator failure to perform bleed function by SDV, Fail to close of pneumatic/hydraulic (P/H) valve
4	LBA_AAS_8_CC_001	7.20E-09	9.06	CCF of 8 main steam safety valves (fail to open)
5	HE_BLEED, LBA21_AA901_RC	2.02E-09	2.54	Operator failure to perform bleed function by SDV, Stuck open of Safety valve



شکل (۴): نشان دهنده سهم هر یک از مسیرهای ممکن در نتایج MCS روند چهارم

بحث و نتیجه گیری:

- پس از تحلیل روندهای حادثه، فرکانس آسیب به قلب نهایی با روش تخمین نقطه ای برای حادثه SLBI، $1.38E-07/ry$ به دست آمد. تحلیل عدم قطعیت با روش مونت کارلو با استفاده از ۹۹۹۹۹ نمونه گیری انجام شد و توزیع عدم قطعیت فرکانس آسیب به قلب به دست آمد که در نتیجه متوسط آن $1.57E-$



07/ry، صدک پنجم فرکانس آسیب به قلب-2.57E-08/ry و صدک نود و پنجم 4.44E-07/ry محاسبه شدند که نشان‌دهنده حد پایین و بالا برای فرکانس آسیب به قلب می‌باشند. همچنین فرکانس آسیب به قلب توسط کد Risk-Spectrum با اختلاف ۳.۶۲٪ با نتیجه‌ی SAPHIRE، 1.43E-07/ry به دست آمده است.

- باید متذکر شد که بعضی اختلافاتی که بین نتایج SAPHIRE و RiskSpectrum دیده می‌شود که در جداول شماره (۳) و (۴) آورده شده است به دلیل اختلاف مدل‌سازی CCF در این دو کد می‌باشد. علاوه بر این، اختلاف دو نرم‌افزار در Cutoff Error بی‌تاثیر نبود و همچنین محدودیت نرم‌افزار SAPHIRE در تعداد نمونه‌گیری (حداکثر ۹۹۹۹۹) اما برای RiskSpectrum تا یک میلیون می‌باشد.
- همانطور که در شکل شماره (۳) مشخص است، روند چهارم بیشترین فرکانس آسیب به قلب را دارد و به همین منظور بیشترین سهم را در CD نهایی داراست. این روند در نتیجه‌ی عدم عملکرد سیستم برداشت حرارت از مدار ثانویه و عدم عملکرد Bleed منجر به CD شده است.
- همچنین طبق نتایج MCS برای روند چهارم که برای کد SAPHIRE و RiskSpectrum یکسان به دست آمده است، در جدول شماره (۴) و همچنین به صورت کیفی در شکل شماره (۴) آمده است، طبق آن؛ خطای اپراتور به هنگام عملیات Bleed بیشترین سهم را در نتیجه‌ی روند چهارم دارد. این مسئله نشان‌دهنده‌ی اهمیت بسیار زیاد قابلیت اطمینان انسانی در این بخش است. آموزش اپراتور با سیمولاتورهای آموزشی و همچنین تحلیل قابلیت اطمینان انسانی می‌تواند تا حدودی در عملکرد اپراتور به هنگام حادثه تاثیر گذار باشد.
- یکی از موارد مهم دیگر که به تنهایی نقش بسزایی در نتایج داشته است، مسئله CCF است. همانطور که در جدول شماره (۴) آمده است، مسیر چهارم شامل نقص در باز شدن شیرهای ایمنی بخار اصلی است که شامل هشت شیر است و به علت مشترکی دچار خرابی می‌شوند. این خرابی حدوداً ۹٪ در نتیجه‌ی نهایی تاثیر گذار است. بهترین راه برای کم کردن تاثیر آن، ایجاد تنوع^۱ در سیستم‌های به کار رفته می‌باشد.

مراجع:

¹ Diversity



- [۱] J. Lim ،S. Choi ،J. Yang ،D. Lee ،S. Rassame ،T. Hibiki و M. Ishii" ،Assessment of passive safety system performance under main steam line break accident "،*Annals of Nuclear Energy* ، المجلد ۶۴ ، pp. 287-294 . ۲۰۱۴ ،
- [۲] M. Pavlova ،M. Andreeva و P. Groudev" ،Steam Line Break investigation at full power reactor for VVER-1000/V320 "،*Nuclear Engineering and Design* ، المجلد ۲۸۵ ، pp. 65-74 . ۲۰۱۴
- [۳] F. D. Maio ،C. Picoco ،E. Zio و V. Rychkov" ،Safety margin sensitivity analysis for model selection in nuclear power plant probabilistic safety assessment "،*Reliability Engineering & System Safety* ، المجلد ۱۶۲ ، pp. 122-138 . ۲۰۱۷
- [۴] "Application of Dynamic Probabilistic Safety Assessment Approach for Accident Sequence Precursor Analysis: Case Study for Steam Generator Tube Rupture "،*Nuclear Engineering And Technology* ، المجلد ۴۹ ، pp. 306-312 . ۲۰۱۷
- [۵] IAEA " ،Accident Analysis for Nuclear Power Plants with Pressurized Water Reactors(safety reports series30 "،(International Atomic Energy Agency ،Vienna. ۲۰۰۳
- [۶] IAEA " ،Probabilistic Safety Assessment "،IAEA ،Vienna. ۱۹۹۲