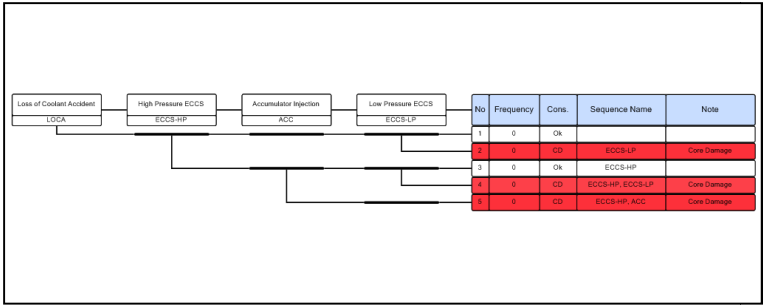
کد محاسباتی تحلیل درخت رویداد



گزارش فنی کد ReLab

بسته پنجم– ویرایش ۰- خرداد ۱۳۹۲

ANC-TEC-SAP-PS-200

فهرست مطالب

۱- چکیده ۶

۲- کلیدواژه ۷

۳- اختصارات ۸

۴- مقدمه ۱۰

۵- دامنه گزارش ۱۲

۶- تحلیل درخت رویداد ۱۳

۷- پیاده‌سازی روابط و الگوریتم‌ها ۴۲

۸- راستی‌آزمایی روابط و الگوریتم ۴۵

۹- نتیجه‌گیری ۴۶

۱۰- مراجع ۴۷

لیست شکل‌ها

شکل ۱: نمونه درخت رویداد رسم‌شده توسط کد SAPHIRE ۱۷
شکل ۲: درخت رویداد حادثه شکست بسیار کوچک مدار اول (Very Small LOCA) ۲۳
شکل ۳: درخت رویداد حادثه شکست بزرگ مدار اول یک راکتور BWR ۳۰
شکل ۴: درخت خطای معادل یک توالی درخت رویداد ۳۲
شکل ۵: درخت خطای معادل پیامد درخت رویداد ۳۴
شکل ۶: فلوچارت تحلیل درخت رویداد در کد ReLab ۴۴

لیست جدول‌ها

جدول ۱: ماتریس وابستگی بین رویدادهای عملکردی درخت رویداد..... ۳۱

۱- چکیده

تحلیل درخت رویداد[1] (ETA) یکی از ابزارهای اصلی مورد استفاده در ارزیابی احتمالاتی ایمنی[2] (PSA) نیروگاه‌های هسته‌ای می‌باشد، و فرکانس ذوب قلب راکتور[3] با استفاده از ترکیب درخت رویداد و درخت خطا محاسبه می‌شود. در راستای توسعه و تکمیل کد محاسباتی جامع تحلیل احتمالاتی ایمنی (PSA) با عنوان ReLab، ماژول تحلیل درخت رویداد طی این پروژه توسعه داده شده است. در توسعه این ماژول، کد SAPHIRE® به عنوان مرجع در نظر گرفته شده است، و در نهایت ماژول تحلیل ETA با قابلیت‌های مشابه این کد، به کد ReLab افزوده شده است. بدین منظور از دو روش Split Fraction و Delete Terms برای محاسبه فرکانس توالی‌های درخت رویداد استفاده شده است. این ماژول

[1] Event Tree Analysis
[2] Probabilistic Safety Assessment
[3] Core Damage Frequency

در کنار استفاده از روش‌های مذکور، از هسته[1] محاسباتی تحلیل مجموعه‌های برشی کمینه که پیشتر توسعه داده شده است نیز بهره می‌برد. نتایج حاصل از کد ReLab به منظور اعتباربخشی با نتایج کد SAPHIRE® مقایسه شده است، و این مقایسه حاکی از تطابق کامل در هر دو روش می‌باشد.

۲- کلیدواژه

تحلیل درخت رویداد (ETA)، توالی رویداد، روش Split Fraction، روش Delete Terms

[1] Kernel

۳- اختصارات

عبارت	عبارت اختصاری	توضیح
Core Damage Frequency	CDF	فرکانس ذوب قلب راکتور
Failure Criteria	FC	معیار خرابی
Fault Tree Analysis	FTA	تحلیل درخت خطا
Fault Tree Linking	FTL	لینک کردن درخت خطا
Event Tree Analysis	ETA	تحلیل درخت رویداد

Event Tree Linking	ETL	لینک کردن درخت رویداد
Loss of Coolant Accident	LOCA	حادثه شکست مدار اول راکتور
Minimal Cut Set	MCS	مجموعه برشی کمینه
Probabilistic Safety Assessment	PSA	ارزیابی احتمالاتی ایمنی
Rare Event Approximation	REA	تقریب رویداد نادر
Reliability Laboratory	ReLab	کد محاسباتی تحلیل احتمالاتی ایمنی

۴- مقدمه

تحلیل درخت رویداد و تحلیل درخت خطا دو ابزار اصلی در انجام PSA نیروگاه‌های هسته‌ای می‌باشند، که از تحلیل درخت رویداد به منظور مدلسازی روند پیشروی حوادث و از تحلیل درخت خطا برای مدلسازی خرابی سیستم‌ها و عملکردهای ایمنی استفاده می‌شود. با توجه به اینکه تحلیل درخت خطا یک روش deductive است برای مدلسازی خرابی سیستم‌ها مناسب می‌باشد، اما تحلیل درخت رویداد یک روش inductive بوده و در نتیجه برای تحلیل روند پیشروی حوادث مناسب می‌باشد [۱]. استفاده از ترکیب این دو روش در تحلیل PSA نیروگاه‌های هسته‌ای به این دلیل است که خواص و ویژگی‌های دو روش، آنها را مکمل یکدیگر می‌سازد. ترکیب درخت خطا و درخت رویداد در تحلیل PSA، غالباً به یکی از دو روش لینک کردن درخت خطا[1] (FTL) یا لینک کردن درخت رویداد[2] (ETL) انجام می‌شود،

[1] Fault Tree Linking
[2] Event Tree Linking

که هر کدام از این دو روش دارای مزایا و محدودیت‌هایی می‌باشند [۲]. اغلب کدهای شناخته‌شده تحلیل PSA نیروگاه‌های هسته‌ای مانند SAPHIRE و Risk Spectrum، از روش اول استفاده می‌کنند. از جمله کدهایی که بر مبنای روش دوم توسعه داده شده‌اند، می‌توان به کد RISKMAN اشاره نمود [۲].

با توجه به مطالب ذکر شده، یک کد جامع PSA بایستی دارای هر دو ابزار تحلیل درخت خطا و تحلیل درخت رویداد و امکان استفاده از ترکیب آنها باشد. از این رو در راستای توسعه و تکمیل کد جامع تحلیل احتمالای ایمنی (ReLab)، علاوه بر ماژول تحلیل درخت خطا که پیشتر توسعه داده شده است، یک ماژول محاسباتی جهت تحلیل درخت رویداد نیز طی این پروژه بصورت جداگانه توسعه داده شده است. در توسعه بسته محاسباتی تحلیل درخت رویداد نیز مشابه ماژول تحلیل درخت خطا، کد SAPHIRE به عنوان مرجع اصلی در نظر گرفته شده است. در نتیجه کد ReLab با داشتن قابلیت‌های مشابه کد SAPHIRE امکان استفاده در تحلیل PSA نیروگاه‌های هسته‌ای را خواهد داشت.

۵- دامنه گزارش

این گزارش به تشریح فرآیند طراحی ماژول تحلیل درخت رویداد در کد محاسباتی ReLab، شامل استخراج فرمولبندی و الگوریتم‌های مربوطه و نحوه پیاده‌سازی آن در کد مذکور می‌پردازد. فصل ششم گزارش حاضر به تشریح مفاهیم و تعاریف اولیه درخت رویداد و بررسی روش‌های مختلف تحلیل آن اختصاص یافته است. روش‌های تحلیل درخت رویداد استفاده شده در کد محاسباتی ReLab دو روش Split Fraction و Delete Terms می‌باشند، که بررسی مفصل آنها در فصل ششم آورده شده است. فصل هفتم گزارش به نحوه پیاده‌سازی روابط و الگوریتم‌ها در کد محاسباتی ReLab می‌پردازد و فصل هشتم گزارش نیز نتایج حاصل از اعتبارسنجی کد محاسباتی را در بر می‌گیرد.

۶- تحلیل درخت رویداد

همانطور که در مقدمه گزارش نیز اشاره شد، تحلیل درخت رویداد یک روش Inductive در تحلیل حوادث می‌باشد، بدین معنی که این روش در زنجیره عِلّی[1] حادثه رو به جلو حرکت می‌کند. به بیان دیگر، در تحلیل درخت رویداد آنچه پس از وقوع یک رویداد نامطلوب بخصوص رخ می‌دهد مدنظر تحلیل‌گر می‌باشد، در حالی که در تحلیل درخت خطا هدف پیدا کردن عواملی است که منجر به یک رویداد نامطلوب می‌شوند [۱]. مدلسازی ترتیب و توالی یک حادثه[2] در PSA نیروگاه‌های هسته‌ای مانند قطع تغذیه الکتریکی خارجی نیروگاه[3] (LOOP)، معمولاً با استفاده از تحلیل درخت رویداد انجام می‌شود. اما مدلسازی خرابی سیستم‌های ایمنی مانند دیزل ژنراتورهای اضطراری که برای مقابله با چنین

[1] Causal Chain
[2] Accident Sequence
[3] Loss of Offsite Power

حادثه‌ای در نظر گرفته شده، به وسیله درخت خطا صورت می‌گیرد. در نهایت ترکیب این دو روش مدل کامل PSA یک نیروگاه هسته‌ای را شکل می‌دهند.

همانطور که در مقدمه گزارش نیز اشاره شده، ترکیب تحلیل درخت خطا و درخت رویداد در مدلسازی PSA نیروگاه‌های هسته‌ای به یکی از دو روش FTL یا ETL صورت می‌گیرد. در روش اول که در تحلیل PSA نیروگاه‌های هسته‌ای مرسوم‌تر می‌باشد، پیامد رویدادهای آغازگر به وسیله درخت رویداد مدل می‌شود و از درخت خطا نیز برای مدلسازی سیستم‌های ایمنی استفاده می‌شود. با توجه به اینکه در این روش کلیه اجزای سیستم‌های ایمنی در درخت خطای آن در نظر گرفته می‌شود این روش نهایتاً منجر به تولید درخت‌های خطای بزرگی خواهد شد و از این رو به این راهبرد، روش درخت خطای بزرگ[1] نیز گفته می‌شود. اما در روش دوم بخش‌های مشترک در بین سیستم‌های ایمنی مختلف، به

[1] Large Fault Tree

عنوان مثال سیستم‌های پشتیبان مانند تغذیه الکتریکی، خود در درخت‌های خطای جداگانه مدلسازی شده و در درخت رویداد نیز بصورت مستقل وارد می‌شود. از آنجا که این روش در نهایت منجر به ایجاد درخت رویدادهای بزرگ خواهد شد به آن روش درخت رویداد بزرگ[1] نیز اطلاق می‌شود.

پیش از ورود به مبانی ریاضی تحلیل درخت رویداد، تعدادی از مفاهیم پایه‌ای تحلیل درخت رویداد در بخش آتی شرح داده خواهند شد.

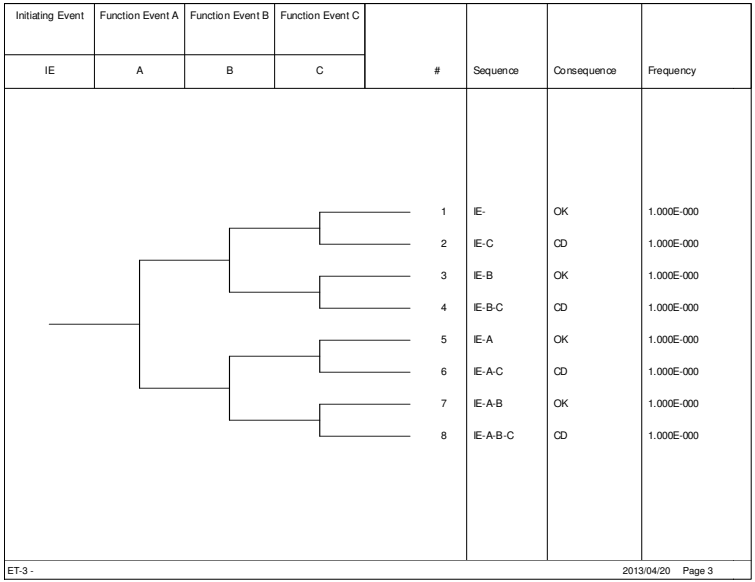
۶-۱- مفاهیم پایه‌ای تحلیل درخت رویداد

این بخش حاوی مروری کلی بر مفاهیم و تعاریف اصلی در تحلیل درخت رویداد می‌باشد، که در کد محاسباتی ReLab نیز از آنها استفاده شده است. هر درخت رویداد دارای یک رویداد آغازگر[1] و تعدادی رویداد عملکرد[2] می‌باشد که رویداد

[1] Large Event Tree

آغازگر نشان دهنده وقوع یک رویداد نامطلوب و رویدادهای عملکرد نماینده سیستم یا عملکردهای ایمنی جهت جلوگیری از عواقب وخیم رویداد نامطلوب می‌باشند. وقوع یا عدم وقوع هر کدام از رویدادهای عملکرد نیز خرابی یا موفقیت آن عملکرد ایمنی را نشان می‌دهد.

[1] Initiating Event
[2] Function Event



Initiating Event	Function Event A	Function Event B	Function Event C				
IE	A	B	C	#	Sequence	Consequence	Frequency
				1	IE-	OK	1.000E-000
				2	IE-C	CD	1.000E-000
				3	IE-B	OK	1.000E-000
				4	IE-B-C	CD	1.000E-000
				5	IE-A	OK	1.000E-000
				6	IE-A-C	CD	1.000E-000
				7	IE-A-B	OK	1.000E-000
				8	IE-A-B-C	CD	1.000E-000

ET-3 - 2013/04/20 Page 3

شکل ۱: نمونه درخت رویداد رسم‌شده توسط کد SAPHIRE

رسم یک درخت رویداد با تعیین رویداد آغازگر آن آغاز می‌شود، سپس در مرحله بعد عواملی که جهت جلوگیری از پیامدهای وخیم آن در نظر گرفته شده‌اند، تعیین می‌شوند. این فرآیند تا زمانی ادامه می‌یابد که کلیه رویدادهای عملکرد تعیین شده باشند. پس از تعیین رویداد آغازگر و رویدادهای عملکرد بایستی با توجه به خرابی یا موفقیت رویدادهای عملکرد، توالی‌های مختلف ممکن پس از وقوع رویداد آغازگر و پیامد آنها را تعیین نمود. در این حالت محاسبه احتمال وقوع توالی‌های مختلف درخت رویداد با توجه به رویدادهای عملکرد قابل انجام می‌باشد. شکل ۱ نمونه درخت رویداد رسم شده توسط کد SAPHIRE را نشان می‌دهد.

هر کدام از مفاهیم رویداد آغازگر، رویداد عملکرد، توالی و پیامد درخت رویداد در بخش‌های آتی شرح داده خواهند شد.

۶-۱-۱- رویداد آغازگر

در تحلیل درخت رویداد، به اولین متغیر ورودی به درخت رویداد "رویداد آغازگر" می‌گویند. رویداد آغازگر در درخت رویداد نشان دهنده وقوع یک رویداد نامطلوب می‌باشد که با ترکیب با خرابی تجهیزات، سیستم‌ها یا عملکردهای ایمنی منجر به یک پیامد نامطلوب شود. از آنجا که رویدادهای آغازگر نشان دهنده فرکانس وقوع یک رویداد می‌باشند، بنابراین برخلاف احتمال رویدادهای پایه، مقدار عددی آن محدودیتی ندارد و می‌تواند بزرگ‌تر از یک نیز باشد. رویداد آغازگر در شکل ۱، در قسمت بالا سمت چپ شکل با حروف اختصاری IE نشان داده شده است.

۶-۱-۲- رویداد عملکرد

رویداد عملکرد نشان دهنده تجهیزات، سیستم‌ها یا عملکردهای ایمنی می‌باشد که برای پیشگیری از وقوع پیامدهای نامطلوب یک رویداد آغازگر در نظر گرفته شده است. در رسم درخت رویداد معمولاً رویدادهای عملکرد را به ترتیب وارد عمل شدن آنها پس از وقوع رویداد آغازگر، وارد می‌کنند. در صورتی که وقوع یا عدم وقوع رویداد عملکرد تأثیر محسوسی در جلوگیری از پیامد نامطلوب رویداد آغازگر داشته باشد، درخت رویداد در این نقطه به دو شاخه تقسیم می‌شود که شاخه بالا موفقیت و شاخه پایین خرابی سیستم را نشان می‌دهد. رویدادهای عملکرد در شکل ۱، در قسمت بالای شکل با حروف A، B و C نشان داده شده‌اند. ورودی یک رویداد عملکرد می‌تواند فقط یک رویداد پایه یا اینکه یک درخت خطا باشد.

۶-۱-۳- توالی درخت رویداد

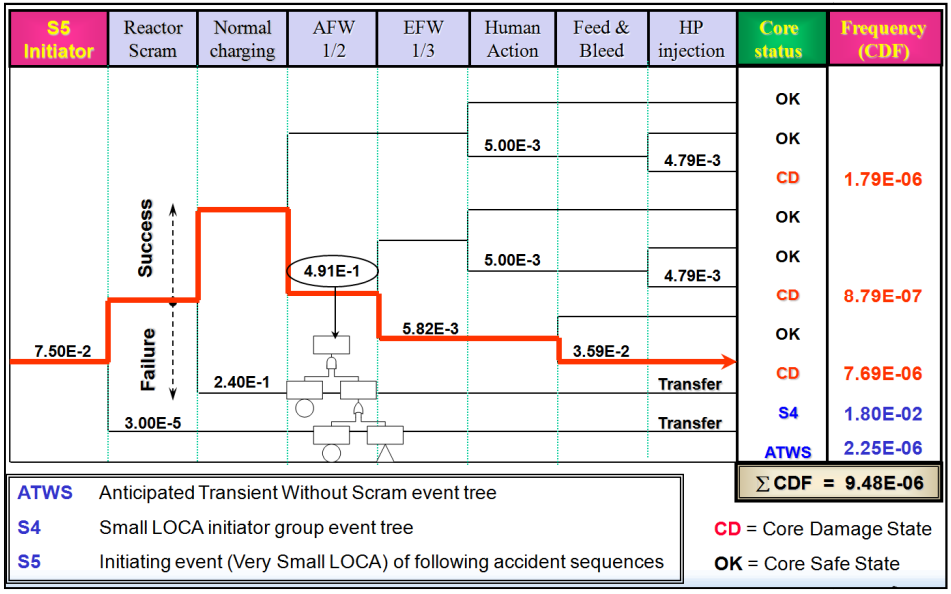
با توجه به آنچه در بخش پیش ذکر شد، هر کدام از مسیرهای درخت رویداد نشان دهنده عدم‌موفقیت تعدادی از سیستم‌ها یا عملکردهای ایمنی و موفقیت سایر سیستم‌ها پس از وقوع رویداد آغازگر می‌باشند. به هر کدام از این مسیرهای درخت رویداد یک توالی حادثه[1] گفته می‌شود. توالی‌های مختلف درخت رویداد در شکل ۱، به ترتیب با اعداد ۱ تا ۸ مشخص شده‌اند. به عنوان مثال توالی شماره ۷ نشان دهنده خرابی سیستم‌های A و B و همچنین موفقیت سیستم C پس از وقوع رویداد آغازگر می‌باشد.

[1] Accident Sequence

۶-۱-۴- پیامد درخت رویداد

هر کدام از مسیرهای درخت رویداد در نهایت منتهی به یک وضعیت پایدار مشخص برای سیستم خواهند شد. به عنوان مثال در مورد راکتورهای هسته‌ای وضعیت نهایی[1] می‌تواند یکی از دو حالت خاموشی راکتور یا ذوب قلب راکتور در نظر گرفته شود. به هر کدام از این وضعیت‌های نهایی یک پیامد درخت رویداد گفته می‌شود و در یک تحلیل PSA هدف اصلی پیدا کردن فرکانس یک پیامد خاص مانند ذوب قلب راکتور است که ممکن است از رویدادهای آغازگر مختلف ناشی شده باشد. این مسئله در شکل ۲ نشان داده شده است.

[1] End State



شکل ۲: درخت رویداد حادثه شکست بسیار کوچک مدار اول (Very Small LOCA)

همانطور که مشاهده می‌شود، رویداد آغازگر این درخت رویداد، شکست بسیار کوچک مدار اول راکتور[1] می‌باشد که با حروف اختصاری S5 نمایش داده شده است. سیستم‌های ایمنی جهت مقابله با این رویداد آغازگر نیز در قسمت بالای شکل با رنگ متمایز و پس از رویداد آغازگر قرار گرفته‌اند. در قسمت پایین سمت راست شکل نیز نشان داده شده است که هدف پیدا کردن مجموع فرکانس ذوب قلب راکتور[2] است که با حروف اختصاری CD مشخص شده است. اما در ستون پیامد مربوط به این درخت رویداد دو حالت S4 و ATWS نیز دیده می‌شود که بر روی توالی مربوط به آنها نیز کلمه Transfer درج شده است. این عبارت بدین معنی است که رویداد آغازگر اولیه با ترکیب با خرابی عملکردهای ایمنی منجر به رویداد آغازگر دیگری شده است که باید در یک درخت رویداد دیگر مدلسازی شود. انتقال در درخت

[1] Very Small LOCA
[2] Core Damage

رویداد نیز مشابه انتقال در درخت خطا می‌باشد و برای هر کدام از توالی‌های انتقال یافته، یک درخت رویداد جداگانه رسم می‌شود.

۶-۲- روش‌های تحلیل درخت رویداد

همانگونه که پیشتر اشاره شد، هدف اصلی در تحلیل درخت رویداد، محاسبه فرکانس پیامد نامطلوب ناشی از یک رویداد آغازگر می‌باشد. از آنجا که در یک درخت رویداد توالی‌های متعددی ممکن است منجر به پیامد نامطلوب شوند، بایستی ابتدا فرکانس هر کدام از این توالی‌ها محاسبه شود. بنابراین محاسبات تحلیل درخت رویداد در نهایت به محاسبه فرکانس توالی‌های مختلف آن کاهش می‌یابد. احتمال وقوع هر کدام از توالی‌های درخت رویداد نیز، احتمال اشتراک رویداد آغازگر و رویدادهای عملکرد در آن توالی می‌باشد. برای محاسبه احتمال/فرکانس هر کدام از توالی‌های درخت رویداد و یا پیامدهای آن روش‌های مختلفی وجود دارد که سه مورد از این روش‌ها در بخش‌های آتی شرح داده می‌شود.

۶-۲-۱- روش Split Fraction

ساده‌ترین روش برای محاسبه فرکانس توالی‌های مختلف درخت رویداد استفاده از حاصلضرب احتمال رویدادهای عملکردی و فرکانس رویداد آغازگر می‌باشد. در این حالت فرض بر این است که رویدادهای عملکردی از همدیگر مستقل می‌باشند، بنابراین احتمال اشتراک آنها برابر حاصلضرب احتمال آنها می‌باشد. در این روش اگر ورودی رویداد عملکردی خود یک گیت یا درخت خطا نیز باشد، فقط احتمال رویداد رأس آن در محاسبه فرکانس توالی مربوطه استفاده خواهد شد. بدیهی است که در مورد رویدادهای عملکرد موفق احتمال متمم آنها در نظر گرفته می‌شود.

به عنوان نمونه‌ای از این روش، احتمال توالی‌ها در شکل ۲ به همین طریق محاسبه شده است. البته در این شکل رویدادهای عملکرد موفق در محاسبه احتمال در نظر گرفته نشده است. استفاده از این تقریب نیز در اغلب موارد خطای چندانی در محاسبات ایجاد نمی‌کند، چون معمولاً احتمال خرابی سیستم‌های ایمنی عددی کوچک می‌باشد و در نتیجه

احتمال موفقیت آنها عددی نزدیک به یک خواهد بود. احتمال توالی مشخص‌شده در شکل ۲ بدون در نظر گرفتن و با در نظر گرفتن رویدادهای عملکرد موفق به ترتیب زیر خواهد بود.

$$F_1 = (7.5E-2)\times(4.91E-1)\times(5.82E-3)\times(3.95E-2) = 7.69E-6$$

$$F_2 = (7.5E-2)\times(1-3.00E-5)\times(1-2.40E-1)\times(4.91E-1)\times(5.82E-3)\times(3.95E-2) = 5.81E-6$$

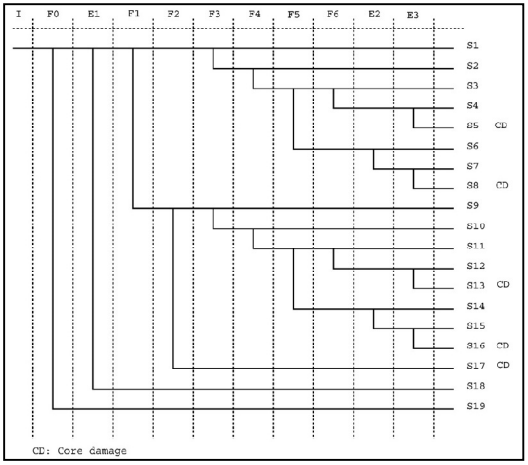
ملاحظه می‌شود که مقدار فرکانس F_2 که در آن رویدادهای موفق نیز در نظر گرفته شده‌اند، کوچک‌تر از مقدار فرکانس F_1 می‌باشد. تفاوت قابل ملاحظه دو عدد از اینجا ناشی می‌شود که یکی از رویدادهای موفق (Normal Charging) دارای احتمال خرابی بزرگی می‌باشد، بنابراین متمم آن نزدیک به یک نبوده و از این رو در نظر گرفتن یا نگرفتن آن تفاوت قابل ملاحظه‌ای در فرکانس توالی ایجاد می‌کند.

با توجه به توضیحات ارائه شده در مورد روش Split Fraction، این روش برای استفاده در راهبرد درخت رویداد بزرگ (ETL) در تحلیل PSA مناسب می‌باشد. چون در این روش وابستگی بین رویدادهای عملکردی مانند سیستم پشتیبان مشترک، از درخت خطاهای مختلف حذف شده و به صورت رویداد عملکرد مستقل در درخت رویداد وارد می‌شود. با وجود اینکه پیش‌فرض انجام محاسبات در کد مرجع یعنی SAPHIRE استفاده از روش Delete Terms می‌باشد، امکان استفاده از روش Split Fraction نیز در نظر گرفته شده است. از این رو در کد ReLab نیز روش پیش‌فرض انجام محاسبات، Delete Terms می‌باشد که در بخش آتی معرفی خواهد شد.

۶-۲-۲- روش Delete Terms

همانطور که در بخش پیش ذکر شد، روش Split Fraction وابستگی بین رویدادهای عملکردی را در نظر نگرفته و فرض می‌کند که این رویدادها از همدیگر مستقل می‌باشند. بنابراین نتایج حاصل از این روش تنها در صورتی معتبر است که

رویدادهای عملکردی از همدیگر مستقل باشند. اما در تحلیل‌های مرسوم PSA معمولاً وابستگی‌های متعددی بین رویدادهای عملکردی وجود دارد، در نتیجه استفاده از روش Split Fraction به نتایج دقیقی منجر نخواهد شد. به عنوان نمونه در این زمینه، درخت رویداد حادثه شکست بزرگ مدار اول در یک نیروگاه BWR [۶] در شکل ۳ داده شده است.



شکل ۳: درخت رویداد حادثه شکست بزرگ مدار اول یک راکتور BWR

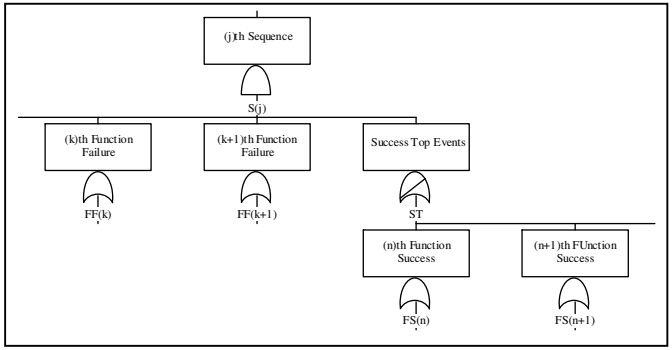
ماتریس وابستگی‌های بین رویدادهای عملکردی این درخت رویداد نیز در جدول ۱ داده شده است، که اعداد درون جدول نشان دهنده تعداد رویدادهای پایه مشترک بین رویدادهای عملکردی می‌باشد.

جدول ۱: ماتریس وابستگی بین رویدادهای عملکردی درخت رویداد

No.	F1	F2	F3	F4	F5	F6
F1	275	5	5	5	0	5
F2	5	797	706	646	17	543
F3	5	706	767	673	17	551
F4	5	646	673	731	17	543
F5	0	17	17	17	79	17
F6	5	543	551	543	17	657

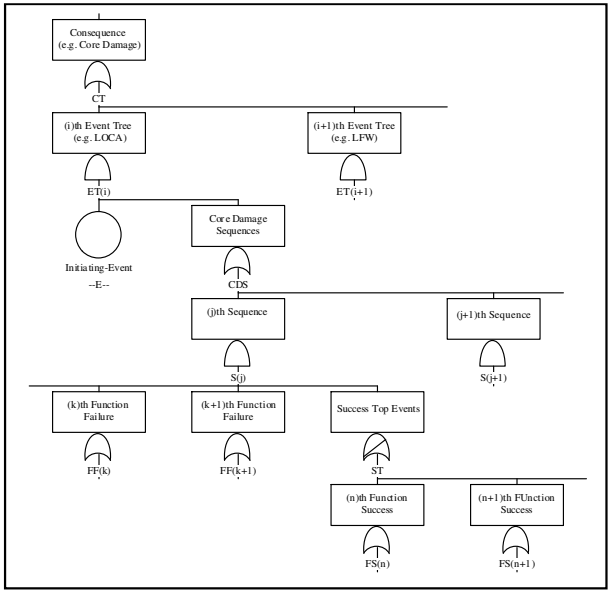
با توجه به جدول مشاهده می‌شود که مجموعه رویدادهای عملکردی F2، F3، F4 و F6 دارای بیشترین رویدادهای مشترک هستند. با توجه به ماتریس وابستگی بین رویدادهای عملکردی، فرض استقلال آنها در این مورد درست نبوده و

منجر به نتایج دقیق نخواهد شد. برای حل دقیق‌تر این مسئله، می‌توان هر کدام از توالی‌های یک درخت رویداد را مانند شکل ۴ به درخت خطای معادل آن تبدیل کرده، سپس با استفاده از مجموعه‌های برشی کمینه، فرکانس آن توالی را محاسبه نمود.



شکل ۴: درخت خطای معادل یک توالی درخت رویداد

همانگونه که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، هر توالی به صورت یک گیت AND در نظر گرفته می‌شود که ورودی‌های آن وقوع یا عدم وقوع رویدادهای عملکردی می‌باشند. رویدادهای عملکرد ناموفق بطور مستقیم به گیت AND وارد می‌شوند، و رویدادهای عملکرد موفق به یک گیت NOR وارد می‌شوند، که خود به گیت AND اصلی وارد شده است. با استفاده از همین روش می‌توان یک پیامد خاص مانند ذوب قلب راکتور در PSA نیروگاه‌های هسته‌ای را نیز همانند شکل ۵ به درخت خطای معادل آن تبدیل نمود.



شکل ۵: درخت خطای معادل پیامد درخت رویداد

اما علاوه بر مسئله وابستگی بین رویدادهای عملکردی یک توالی، نحوه در نظر گرفتن شاخه‌های موفقیت در تحلیل درخت رویداد نیز یکی دیگر از مسائل مهم در محاسبه فرکانس توالی‌ها می‌باشد. این مسئله از اینجا ناشی می‌شود که برای در نظر گرفتن رویداد عملکرد موفق در درخت خطای توالی، باید متمم آن رویداد وارد محاسبات شود و از آنجا که معمولاً ورودی رویدادهای عملکردی، گیت رأس درخت خطای یک سیستم یا عملکرد ایمنی می‌باشند، تبدیل آن به AND و OR مستلزم صرف حافظه کامپیوتری و زمان زیادی می‌باشد. اهمیت این مسئله به حدی است که نحوه در نظر گرفتن شاخه‌های موفقیت درخت رویداد، در کنار تسطیح مجموعه‌های برشی کمینه[1] و استفاده از تقریب رویداد نادر[2] یکی از سه عیب اصلی در روش کلاسیک تحلیل PSA شمرده شده است [۸-۶]. برای غلبه بر این مشکل روش‌های مختلفی توسعه داده شده است که یکی از آنها روش تقریبی delete terms می‌باشد و در این بخش شرح داده می‌شود.

[1] MCS Truncation
[2] Rare Event Approximation

در این روش ابتدا مجموعه‌های برشی کمینه توالی بدون در نظر گرفتن رویدادهای عملکرد موفق محاسبه می‌شود. در نتیجه با توجه به اینکه رویدادهای عملکرد موفق در نظر گرفته نشده‌اند، مقدار عددی فرکانس توالی بزرگ‌تر از مقدار واقعی آن و خوش‌بینانه[1] خواهد بود [۳]. در مرحله بعد لیست اولیه مجموعه‌های برشی که در واقع مجموعه‌های برشی کمینه رویدادهای عملکرد ناموفق می‌باشند، با توجه به رویدادهای عملکرد موفق اصلاح خواهد شد. این کار با حذف مجموعه‌های برشی بی‌معنی از لیست اولیه مجموعه‌های برشی کمینه صورت می‌گیرد. مجموعه برشی بی‌معنی به مجموعه‌ای گفته می‌شود که وقوع آن از لحاظ منطقی امکان‌پذیر نباشد. به عنوان مثال هنگامی که یک رویداد پایه و متمم آن هر دو عضو یک مجموعه برشی باشند، این مجموعه بی‌معنی خواهد بود. در نهایت محاسبه فرکانس توالی با استفاده از لیست نهایی مجموعه‌های برشی که کوچک‌تر از لیست اولیه می‌باشد، صورت می‌گیرد.

[1] Optimistic

برای توضیح روش delete terms مجموعه‌های برشی کمینه یک توالی فرضی درخت رویداد با استفاده از این روش محاسبه خواهد شد. ابتدا فرض کنید از تحلیل رویدادهای عملکرد ناموفق مجموعه‌های برشی کمینه زیر بدست آمده باشند:

E1 * E2 * E3
E2 * E5 * E7
E1 * E2 * E5

همچنین فرض کنید درخت خطای زیر نیز نشان دهنده رویدادهای عملکرد موفق باشد:

TOP	OR	SYS1	SYS2	SYS3
SYS1	AND	E1	E6	
SYS2	AND	E1	E5	
SYS3	AND	E3	E4	

حال باید دید با توجه به مجموعه‌های برشی که از درخت خطای عملکردهای موفق حاصل خواهد شد، کدام یک از مجموعه‌های برشی عملکردهای ناموفق غیرممکن و بی‌معنی هستند. اما قبل از این کار، مقادیر رویدادهایی که در درخت خطای عملکردهای ناموفق وجود ندارند، در درخت خطای عملکرد موفق برابر مقدار FALSE قرار داده شود. دلیل انجام این کار این است که برای اینکه رویدادی از درخت خطای عملکردهای موفق، مجموعه برشی کمینه‌ای از درخت خطای عملکردهای ناموفق را حذف کند، قبل از هر چیز باید در درخت خطای عملکرد ناموفق وجود داشته باشد. با توجه به اینکه رویدادهای E_4 و E_6 در درخت خطای عملکردهای ناموفق وجود ندارند، مقدار آنها در درخت خطای عملکردهای موفق برابر FALSE قرار داده می‌شود.

TOP	OR	~~SYS1~~	SYS2	~~SYS3~~
~~SYS1~~	~~AND~~	~~E1~~	~~FALSE~~	
SYS2	AND	E1	E5	
~~SYS3~~	~~AND~~	~~E3~~	~~FALSE~~	

با اعمال اثر این رویدادها، درخت خطای عملکردهای موفق به شکل زیر تبدیل می شود.

```
TOP    AND   E1     E5
```

این درخت خطا به وضوح تنها یک مجموعه برشی کمینه دارد، که آن هم مجموعه $E_1 * E_5$ می‌باشد. چون این مجموعه برشی کمینه متعلق به عملکردهای موفق می‌باشد، بنابراین نشان دهنده این است که دو رویداد مذکور با هم روی نداده‌اند. در مقابل، یکی از مجموعه برشی کمینه درخت خطای رویدادهای عملکرد ناموفق، یعنی $E_1 * E_2 * E_5$، نشان دهنده وقوع همزمان آنها می‌باشد. بنابراین مجموعه برشی مذکور از لیست مجموعه‌های برشی رویدادهای عملکرد ناموفق حذف خواهد شد.

E1 * E2 * E3
E2 * E5 * E7
~~E1 * E2 * E5~~

در نهایت لازم است اشاره شود، در روش delete terms مقدار فرکانس توالی فقط تا حدودی به مقدار واقعی خود نزدیک‌تر می‌شود اما همچنان مقدار دقیق آن نیست، اما با توجه به سادگی سریع بودن، این روش بیشترین کاربرد را در کدهای PSA داشته است. برای محاسبه مقدار دقیق فرکانس توالی بایستی از قوانین دمورگان در تبدیل گیت‌های متمم استفاده نمود که در بخش آتی شرح داده می‌شود.

۶-۲-۳- روش دِمورگان

روش دقیق در نظر گرفتن شاخه‌های موفقیت درخت رویداد، استفاده از قوانین دمورگان می‌باشد. در این روش اثر گیت‌های متمم در یک توالی با استفاده از قوانین دمورگان در درخت خطای معادل آن اعمال می‌شود. قوانین دمورگان در تبدیل گیت‌های متمم شامل دو قانون زیر می‌شود:

$$\overline{(A+B)}=\overline{A}.\overline{B} \quad or \quad (A.NOR.B)=\overline{A}.AND.\overline{B} \qquad (۱-۶)$$

$$\overline{(A.B)}=\overline{A}+\overline{B} \quad or \quad (A.NAND.B)=\overline{A}.OR.\overline{B} \qquad (۲-۶)$$

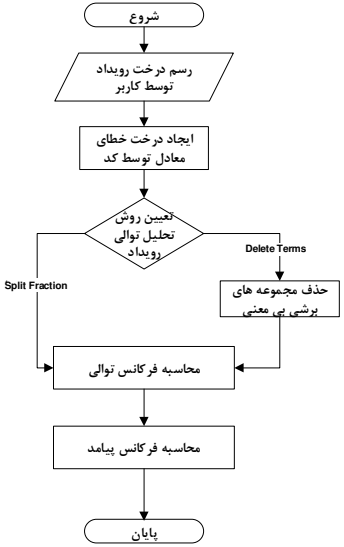
بطور کلی در تبدیل دمورگان، گیت NAND و NOR به ترتیب به گیت OR و AND تبدیل شده و ورودی‌های آنها نیز متمم می‌شوند. در صورتی که ورودی گیت متمم خود یک گیت باشد، نوع آن منفی شده و فرآیند تبدیل تا آخرین

زیرشاخه‌های آن گیت ادامه پیدا می‌کند. با وجود اینکه روش دقیق مدلسازی شاخه‌های موفقیت درخت رویداد تبدیل دمورگان می‌باشد، به دلیل صرف زمان و حافظه زیاد کامپیوتر در تبدیل گیت‌های متمم، این کار در اکثر کدهای PSA انجام نمی‌شود. از آنجا که در کد SAPHIRE نیز که به عنوان مرجع در توسعه ReLab در نظر گرفته شده است از روش دمورگان استفاده نشده است، در کد ReLab نیز در حال حاضر این کار انجام نمی‌شود.

۷- پیاده‌سازی روابط و الگوریتم‌ها

به منظور تحلیل درخت رویداد و محاسبه فرکانس توالی‌های مختلف آن، کد محاسباتی ReLab ابتدا این درخت رویداد را همانطور که در بخش‌های پیش اشاره شد به درخت خطای معادل تبدیل می‌کند. سپس محاسبات مربوط به توالی‌ها به کمک هسته محاسباتی تحلیل درخت خطا که پیشتر توسعه داده شده است انجام می‌شود. برای محاسبه مقادیر فرکانس توالی‌ها، روش‌های Split Fraction یا Delete Terms قابل استفاده می‌باشد که روابط آنها در فصل ۶ این

گزارش شرح داده شده است. پس از تعیین فرکانس توالی‌های مختلف، با توجه به پیامدهای تعیین‌شده برای هر توالی درخت رویداد محاسبات پیامد درخت رویداد نیز قابل انجام است. مبنای اصلی این محاسبات همانطور که اشاره شده درخت خطای معادل درخت رویداد می‌باشد که شمای آن در شکل ۵ ارائه شده است. فرآیند تحلیل درخت رویداد در شکل ۶ نمایش داده شده است.



شکل ۶: فلوچارت تحلیل درخت رویداد در کد ReLab

۸- راستی‌آزمایی روابط و الگوریتم

به منظور اعتباربخشی نتایج حاصل از کد محاسباتی ReLab، مجموعه‌های برشی کمینه و فرکانس توالی‌های مختلف یک درخت رویداد با استفاده از کد ReLab محاسبه و با نتایج کد SAPHIRE® مقایسه شده است. مقایسه صورت گرفته حاکی از تطابق کامل نتایج مجموعه‌های برشی کمینه و فرکانس توالی‌ها در دو کد می‌باشد. لازم به ذکر است که به دلیل حجم بالای نتایج حاصل از تحلیل این درخت، از ارائه نتایج راستی‌آزمایی در اینجا خودداری خواهد شد. ورودی‌ها و نتایج مربوط به این درخت رویداد در هر دو کد SAPHIRE® و ReLab، به همراه بسته نرم‌افزاری قابل دسترسی است و کاربر می‌تواند نتایج این دو کد را با هم مقایسه نماید.

۹- نتیجه‌گیری

در راستای کد جامع تحلیل احتمالاتی ایمنی تحت عنوان کد ReLab، ماژول تحلیل درخت رویداد به صورت جداگانه طی این پروژه توسعه داده شده است. در این پروژه روش مدلسازی درخت رویداد در کد SAPHIRE به عنوان مرجع اصلی در توسعه کد ReLab در نظر گرفته شده است. بدین منظور از دو روش Split Fraction و Delete Terms برای محاسبه فرکانس توالی‌های درخت رویداد استفاده شده است. این ماژول در کنار استفاده از روش‌های مذکور، از هسته محاسباتی تحلیل مجموعه‌های برشی کمینه که پیشتر توسعه داده شده است نیز بهره می‌برد. نتایج حاصل از کد ReLab جهت راستی‌آزمایی با کد SAPHIRE مقایسه شده است، که مقایسه نشان از تطابق کامل نتایج مربوط دارد.

۱۰- مراجع

1. Vesely, W. E., N. Roberts, “Fault tree handbook”, Nuclear Regulatory Commission, 1987.
2. Epstein, S., A. Rauzy, "Can we trust PRA?" Reliability Engineering & System Safety 88(3): 195-205, 2005.
3. Smith, C., “System Analysis Program for Hands-on Integrated Reliability Evaluations – Technical Reference”, 2008, Idaho National Laboratory (INL).
4. Relcon AB., “Risk Spectrum Professional - Theory Manual”, 2005.
5. Modarres, M., “Risk Analysis in Engineering, Techniques, Tools, and Trends”, 2006, Taylor and Francis Group.
6. Ibáñez-Llano, C., et al. "Hybrid approach for the assessment of PSA models by means of binary decision diagrams", Reliability Engineering & System Safety 95(10): 1076-1092, 2010.
7. Ibáñez-Llano, C., et al., "A reduction approach to improve the quantification of linked fault trees through binary decision diagrams", Reliability Engineering & System Safety 95(12): 1314-1323, 2010.

8. Nusbaumer, O. P. M., “Analytical solutions of linked fault tree probabilistic risk assessments using binary decision diagrams with emphasis on nuclear safety applications”, SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY ZURICH, (2007).