آنالیزاحتمالاتی ایمنی برنامه استرس تست نیروگاه بوشهر جهت مقابله با حادثه Station Blackout

جباری ، مسعود[(۱)]*- حداد،کمال[(۲)] – حاتمی ، احسان[(۱)] – تبادار،زهرا[(۱)]– محسن دخت ، مسعود[(۱)] -

۱- سازمان انرژی اتمی ، شرکت مهندسین مشاور افق هسته ای

۲- دانشگاه شیراز ، دانشکده مکانیک ، بخش مهندسی هسته ای

چکیده:

در ماه مارس سال ۲۰۱۱ به دنبال حادثه فوکوشیما مقرر گردید کلیه نیروگاه‌های هسته‌ای اتحادیه اروپادر برابر حوادث طبیعی شدید از لحاظ ایمنی و کفایت سیستم های ایمنی تحت عنوان برنامه استرس تست مورد بررسی قرارگیرند.براساس مدرک NEI-2014 یکی از حوادث مهم به دنبال حوادث طبیعی شدید ، حادثه SBO می باشد. در نیروگاه بوشهر نیز براساس توصیه های WANO مقرر گردید برنامه استرس تست اجرا گرددکه درحال بررسی می باشد.جهت تحقق این برنامه برای نیروگاه بوشهر تعدادی تجهیز portable شامل دو عدد دیزل ژنراتور و٤ عدد دیزل پمپ سیارنیز تهیه گردید.در این مقاله ابتدا fault tree مربوط به هریک از این تجهیزات تهیه و سپس event tree حادثه SBO با توجه به تجهیزات سیار تهیه شده بررسی می گردد. در ادامه آنالیز PSA شامل محاسبات CDF[۱] به وسیله کد SAPHIRE انجام می شود.درانتها نتایج نشان می دهد CDF مربوط به حادثه SBO با توجه به تجهیزات portable به میزان قابل ملاحظه ای کاهش می یابد.

کلمات کلیدی: *(استرس تست، آنالیز احتمالاتی ،SBO ،Portable equipment و CDF)*

مقدمه:

درحادثه فوکوشیما با توجه به قرار گرفتن در گروه حوادث شدید از طرف سایر کشورها و IAEA[۲] مورد آنالیز و بررسی قرار گرفته و مدارکی تحت عنوان درس‌های گرفته شده از حادثه فوکوشیما توسط NRC در این زمینه منتشر شده است. برنامه استرس تست نیروگاه‌های هسته‌ای در مقابل تاثیرات ناشی از حوادث زیر مورد ارزیابی می‌گیرند:

[۱] Core Damage Frequency

[۲] International Atomic Energy Agency

- حوادث طبیعی مانند: زمین لرزه، سیل، هوای خیلی سرد و خیلی گرم، برف، طوفان، تورنادو و باران های شدید که مهمترین آنها زمین لرزه و سیل می‌باشد.
- آنالیز حوادث ناشی از خطای انسانی که البته زیاد مورد توجه قرار نمی‌گیرد. به عنوان مثال می‌توان به برخورد هواپیما با خطوط توزیع برق اشاره نمود. [1]

هدف از استرس تست، آنالیز و بررسی میزان مقاومت نیروگاه در مقابله با حوادثی همچون از دست رفتن توان الکتریکی ناشی از SBO، از دست رفتن منبع برداشت حرارت نهایی (LUHS[۳]) و یا ترکیبی از هر دو می‌باشد. در این رابطه کشورهای اروپایی مشتمل بر ۱۳ کشور برنامه استرس تست را اجرا نموده و گزارشات خود را در این زمینه ارائه و نقاط ضعف و قوت نیروگاه های خود را ارزیابی نموده اند. گزارشات مذکور نشان می دهند که برای اجرای برنامه استرس تست باید بر اساس درس های گرفته شده از حادثه فوکوشیما تعدادی تجهیز portable جهت مقابله با حادثه SBO در نظر گرفته شود. برای نیروگاه بوشهر نیز تعدادی تجهیز سیار شامل دیزل پمپ و دیزل ژنراتور در نظر گرفته شده است.در این مقاله حادثه SBO بررسی و بر اساس آنالیز PSA نحوه بهره برداری از تجهیزات مذکور تعیین و event tree مربوطه تهیه می گردد. در انتها نیز مقدار CDF مربوط به حادثه SBO با توجه به event tree تهیه شده با حالت بدون در نظر گرفتن تجهیزات مذکور مقایسه می گردد.[2]

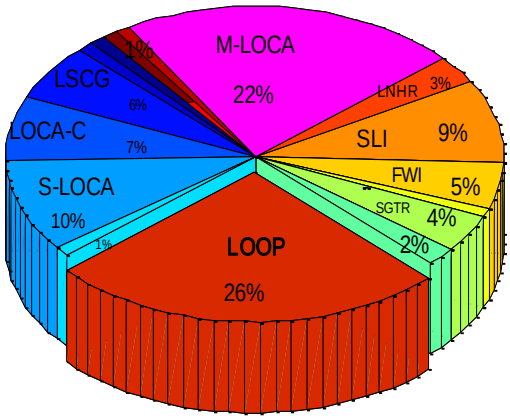
روش کار:

در نیروگاه بوشهر در فصل ۱۵ مربوط به FSAR در قسمت حوادث BDBA حادثه SBO مورد بررسی قرار گرفته است. در این حادثه فرض می شود خطوط تغذیه 400kv ، 230kv و دیزل ژنراتورها نمی توانند سیستم های نرمال و ایمنی را تغذیه نمایند.درواقع فرض می گردد تنها منبع تغذیه باتری خانه می باشد که نهایتا تا ۲ ساعت می تواند برخی از تجهیزات نظیر I&C را تغذیه نماید.نتایج آنالیز نشان می دهد اگر به دنبال حادثه SBO تمهیداتی در نظر گرفته نشود پس از گذشت زمان ۲۸۰۰ ثانیه آب مولد های بخار کامل بخار شده و از شیرهای BRU-A خارج می شود و پس از گذشت زمان ۱۳۰ دقیقه دمای غلاف سوخت به ۱۲۰۰ درجه سانتیگراد خواهد رسید که دراین دما نرخ اکسیداسیون سوخت افزایش خواهد یافت.میزان مشارکت حادثه LOOP در شکل ۱ نشان داده شده است. به دنبال این حادثه برای نیروگاه بوشهر تجهیزات ذکر شده در جدول شماره ۱ جهت مقابله با حادثه SBO تهیه گردیده است تا پس از وقوع این حادثه نیروگاه بلافاصله وارد مرحلهsevere accident نگردد.برای نمونه تصویری از دیزل ژنراتور 2MW در شکل ۲ نشان داده شده است.[4] [3]

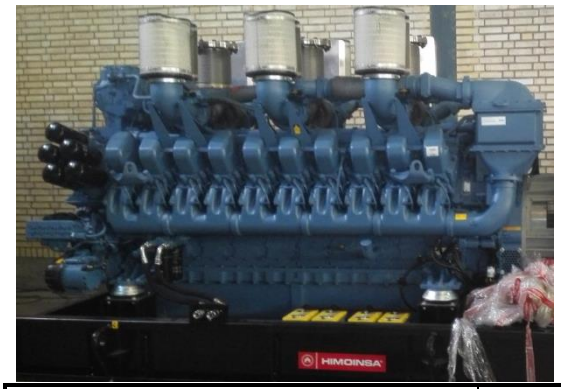
[۳] Loss of Ultimate Heat Sink

جدول شماره۱- لیست تجهیزات اضافه شده برای نیروگاه بوشهر جهت برنامه استرس تست

ردیف	شرح تجهیز	کارکرد در زمان حادثه
۱	دیزل ژنراتور سیار با توان 2 مگاوات به همراه سوئیچ گیر و تجهیزات موردنیاز جهت اتصال به سیستم برق اضطراری نیروگاه	برق رسانی به سیستم های ایمنی موردنیاز در زمان حادثهSBO
۲	دیزل ژنراتور سیار با توان200 کیلووات به همراه سوئیچ گیر وتجهیزات موردنیاز جهت اتصال به سیستم برق اضطراری نیروگاه	برق رسانی به سیستم ها و تجهیزات I&C ،روشنایی اضطراری، سیستم های مخابراتی و شارژ باتری ها
۳	پمپ سیار جهت تأمین آب بوردار برای مدار اول	برداشت حرارت قلب از طریق مدار اول
۴	دیزل پمپ سیار جهت آب رسانی به مولد بخار	برداشت حرارت قلب از طریق تأمین آب تغذیه اضطراری مولد بخار
۵	پمپ سیار جهت تأمین آب مخازن سیستمRS	تأمین آب تغذیه مولد بخار در بلندمدت



شکل ۱- درصد سهم حوادث مختلف در ذوب قلب راکتور هسته ای بوشهر



شکل ۲- دیزل ژنراتور 2MW (نمونه ای از تجهیزات سیار)

۶	پمپ سیار جهت برداشت حرارت از استخر سوخت	برداشت حرارت از استخر سوخت و جلوگیری ازذوب شدن مجتمع های سوخت مصرف شده

پروسه استرس تست پس از رویداد حادثه SBO با توجه به تجهیزات استرس تست:

در مدار دوم با برق‌رسانی به یک کانال از سیستم[۴]RS، آب تغذیه داخل تانک‌های RS در داخل ساختمان ZX1 جهت برداشت گرما از مدار اول به درون یک مولد بخار پمپ می‌گردد. بخار تولیدی نیز از طریق شیر BRU-A به اتمسفر تخلیه می‌گردد.بنابراین با تزریق آب تانک‌های سیستم RS به داخل مولد بخار می‌توان فشار و دمای مدار اول را به ترتیب به 2MPa و 150ºC کاهش داد. در صورتی که نیاز باشد نیروگاه به حالت cold state انتقال داده شود،مدار اول از طریق سیستم TH[۵] خنک می گردد.بنابراین در درجه اول باید اقدامات زیر به ترتیب انجام شود[6]:

۱- برق‌رسانی به یک کانال سیستم RS به وسیله دیزل ژنراتور سیار 2MWجهت برداشت حرارت از طریق مدار دوم و کاهش دما و فشار مدار اول به مقدار 2MPa و $150\ ^0C$
۲- پر کردن مخازن سیستم RS به وسیله دیزل پمپ سیار تهیه شده جهت ادامه برداشت حرارت از مدار دوم و ثابت نگهداشتن دمای مدار اول در حدود 150ºC.[7]

جهت کاهش دما تا ۷۰ درجه و رسیدن به حالت cold state باید تغذیه پمپهای RS را قطع نمود و یکی از کانالهای TH10(20, 30, 40)D001۶ را جهت خنک‌سازی مدار اول به وسیله دیزل ژنراتور 2MW تغذیه نموده و مورد استفاده قرار داد.حالات دیگر نظیر خرابی سیستم RS ومتعاقب آن، عدم امکان برداشت حرارت در مدار دوم نیز در event tree حادثه SBO لحاظ گردیده است. [5] در ادامه برای هریک از تجهیزات سیار مذکور در جدول شماره ۱ مقدار احتمال خرابی محاسبه گردید. در واقع میزان خرابی یا به عبارت دیگر، تابع عدم دسترسی کل سیستم از جمع عدم‌دسترسی تک‌تک مجموعه انقطاع (Minimal Cut-set)به‌دست می‌آید که به طور کلی فرمول ۱ نمایانگر این تابع است:

$$U(x)=\sum_{j}\prod_{k}u_{jk}(x) \qquad (1)$$

در رابطه بالا u_{jk} عدم دسترسی تجهیز kام در مجموعه انقطاع jام است که از مجموع عدم دسترسی به علت نرخ خطا ، تعمیرات و تست تشکیل و در روابط زیر آورده شده است:

$$u_r=\rho+\frac{1}{2}\lambda^* T \quad (2) \qquad u_t=\frac{t}{T} \quad (3) \qquad u_c=\frac{1}{T}(\rho+\lambda^* T)(1-e^{\frac{-D}{\mu}})\mu \quad (4)$$

در روابط مذکور :

u_r =خطای تصادفی ، u_t =عدم دسترسی به علت بازبینی ، u_c = عدم دسترسی به علت تعمیرات ،T=دوره بازبینی ، t= مدت زمان بازبینی ، ρ=خطای پسماند ،D=بیشینه زمان مجاز خرابی ، μ=مدت زمان تعمیرات

[۴] Emergency feed water
[۵] Active ECCS
[۶] Emergency core cooling system

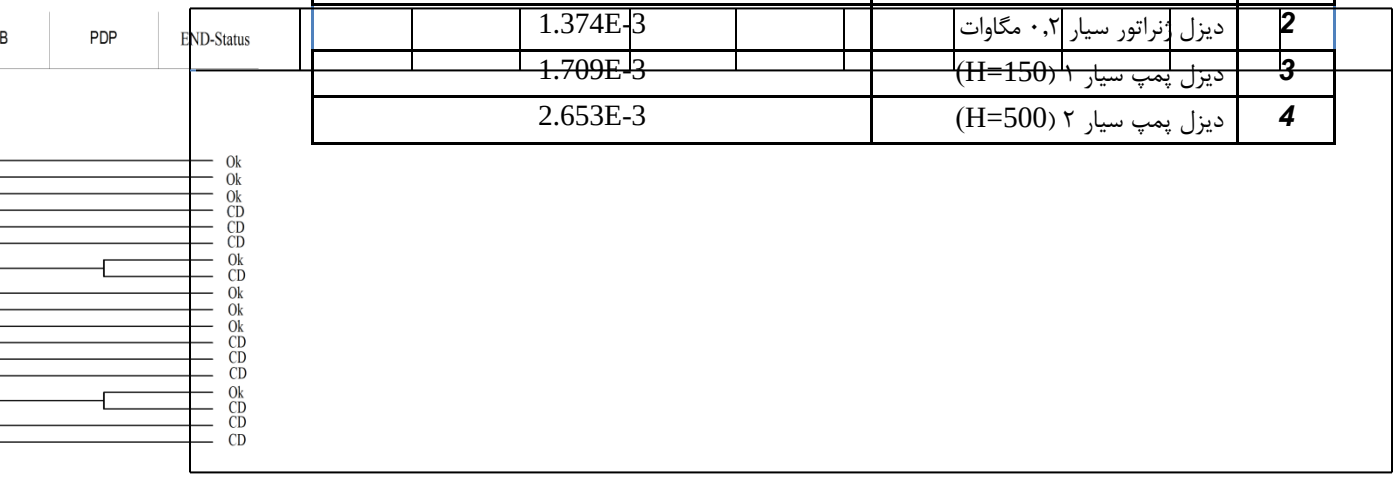
نتایج :

نتایج مربوط به محاسبات احتمال خرابی هر یک از تجهیزات سیار در جدول ۲ آورده شده است .

در ادامه درخت خطا به دنبال حادثه SBO در شکل ۳ نشان داده شده که به وسیله نرم افزار SAPHIRE ترسیم و تحلیل گردیده است . تعریف علائم اختصاری در جدول ۳ نشان داده شده است .

جدول ۲- احتمال خطای مربوط به تجهیزات سیار

ردیف	تجیزات استرس تست	میزان عدم دسترسی یا احتمال خرابی
1	دیزل ژنراتور سیار ۲ مگاوات	1.481E-3
2	دیزل ژنراتور سیار ۰,۲ مگاوات	1.374E-3
3	دیزل پمپ سیار ۱ (H=150)	1.709E-3
4	دیزل پمپ سیار ۲ (H=500)	2.653E-3



شکل ۳- درخت رویداد مربوط به برنامه استرس تست نیروگاه بوشهر با در نظر گرفتن تجهیزات سیار جهت مقابله باحادثه SBO

جدول ۳- فهرست علائم اختصاری مربوط به درخت خطای SBO

اختصارات	معادل اختصارات	توضیحات
SBO	Station blackout	حادثه از دست رفتن دیزل ژنراتورهای اضطراری نیروگاه
RPS	Reactor Protection System	عدم عملکرد یا گیر کردن میله های کنترل سیستم حفاظت اضطراری
TSV	Turbine Stop Valve	شیرهای ورود بخار به توربین

MSIV	Main Steam Isolation Valve	شیرهای ایزوله کننده کلکتورهای اصلی بخار
SBODG	SBO Diesel Generator	دیزل ژنراتورهای اضطراری سیار
SRD	Safety Relief Device	باز شدن شیرهای ایمنی کاهش فشار مولدهای بخار
C4	4 Cut-off Valves	بسته ماندن شیرهای ایمنی مولدهای بخار پس از افت کافی فشار
CDSS	Cold Shut-down Mode	انتقال راکتور به حالت سرد خاموش
HRS	Heat Removal through SGs	برداشت حرارت از قلب راکتور توسط مدار دوم و بصورت مدار باز
F&B	Feed and Bleed	خنک سازی راکتور توسط تزریق خنک کننده به قلب و خارج سازی بخار
PDP	Portable Diesel Pump	پمپ های دیزلی سیار

در انتها نیز CDF مربوط به دو حالت بدون در نظر گرفتن تجهیزات استرس تست و با در نظر گرفتن تجهیزات بایکدیگر مقایسه می شوند. در نیروگاه بوشهر CDF مربوط به حادثه SBO به صورت مجزا وجود ندارد بنابراین با توجه به حادثه LOOP این مقدار محاسبه گردید.همچنین مقدار CDF در حالت جدید به وسیله درخت رویداد شکل ۳ به وسیله نرم افزار SAPHIRE تعیین شد. نتایج حاصل از این محاسبات در جدول ٤آورده شده است.

جدول ۴- مقایسه CDF نیروگاه بوشهر برای حادثه SBO در دوحالت مرجع و با در نظر گرفتن تجهیزات سیار

حالات بررسی	CDF (SBO) [1/y]	CDF (SBO) [%]	CDF total [1/y]	ΔCDF total [%]
حالت فعلی نیروگاه	3.84E-6	26.48	1.45E-5	26.89
مجهز به تجهیزات استرس تست	7.44E-9	0.07	1.06E-5	

بحث و نتیجه گیری

همان طور که قبلا ذکر گردید پس از حادثه Fukushima بر اساس درس های گرفته شده از آن و توصیه های IAEA ، WANO و NRC توصیه گردید که برنامه استرس تست برای نیروگاه های هسته ای در جهت مقابله با حوادث طبیعی شدید انجام شود.یکی از حوادث مهم در نظر گرفته شده حادثه SBO می باشد.در این مقاله ابتدا FSAR نیروگاه بوشهر برای حادثه SBO بررسی گردید و مشخص شد که پس از زمان ۱۳۰ دقیقه دمای غلاف سوخت به ۱۲۰۰ درجه و پس از زمان حدود ۲۸۰۰ ثانیه مولدهای بخار کاملا خشک می شوند.سپس تجهیزات سیار جهت جلوگیری از ذوب شدن قلب بر اساس جدول ۱تعیین گردید . برای هریک از تجهیزات معرفی شده در جدول ۱، fault tree با توجه به نقشه P&ID تجهیزات به وسیله نرم افزار SAPHIRE رسم و مقدار خطا تعیین گردید. سپس در ادامه روش های مقابله با حادثه بررسی و درخت رویداد بر اساس تجهیزات در نظر گرفته شده و

fault tree هر یک از تجهیزات به وسیله نرم افزار SAPHIRE ترسیم و مقدار CDF مربوط به حادثه SBO محاسبه گردید. در نهایت مقدار CDF مربوط به حادثه SBO در دوحالت مرجع و با در نظر گرفتن تجهیزات سیار با یکدیگر مقایسه گردید. نتایج نشان می دهد که CDF به میزان ۲۶٫۸۹ درصد کاهش می یابد.

مراجع

[1] NRC, NUREG/BR-0523.(2014).Lessons learned from Fukushima.

[2] BNPP1. (2015).Final safety analysis report, chapter 9 , Auxiliary system ,revision 2, book1,

[3] Parliamentary Group of the Greens/EFA in the European Parliament.(2011).The European “Stress test” for Nuclear Power Plant.

[4] NEI. (2014).Critical Review of the EU Stress Test performed on Nuclear Power Plants.

[5] Nuclear energy committee. (2012). Diverse and Flexible Coping Strategies (FLEX) Implementation Guide.Washington DC.

[6] BNPP1. (2015).Final safety analysis report, chapter 7, Inspection and control systems (I&C) , revision 2, book1

[7] BNPP1. (2015) .Final safety analysis report, chapter 15, accident analysis, revision 2, book1.