شبیه سازی مد خنک کاری نیروگاه اتمی بوشهر با استفاده از کد RELAP5 و بررسی عملکرد سیستم های برداشت حرارت پسماند

تبادار،زهرا* [۱]– آقاجان پور،سپیده[۱] –جباری ، مسعود[۱]– بنی فضل،امین[۱]–حاجی زاده، سارا[۱]

سازمان انرژی اتمی-شرکت مهندسین مشاور افق هسته ای(OCE)[۱]

چکیده:

از آنجاییکه در لحظات اولیه پس از خاموشی راکتور ، حرارتی معادل ۹٪ ناشی از واپاشی پاره های شکافت تولید می شود، راکتور نیازمند سیستم‌های برداشت حرارت پسماند می‌باشد. بررسی میزان برداشت حرارت و پاسخگویی سیستم های خنک کننده در شرایط خاموشی یکی از موارد پراهمیت در نیروگاه‌های هسته‌ای می‌باشد.لذا در این مقاله عملکرد سیستم های برداشت حرارت پسماند از قلب نیروگاه اتمی بوشهر با استفاده از مدل جامع ترموهیدرولیکی نیروگاه اتمی بوشهر مورد بررسی قرار گرفته است. شبیه سازی بر اساس دستورالعمل های بهره برداری صورت گرفته است که با استفاده از مقایسه نتایج حاصل از شبیه سازی و داده های تست های راه اندازی مدل تهیه شده صحت سنجی شده است.

کلمات کلیدی: *RHR، کد RELAP5، آنالیز ترموهیدرولیکی*

مقدمه :

آنالیز ترموهیدرولیکی سیستم برداشت حرارت باقیمانده جهت تعیین پارامترهای سیستم برداشت حرارت و ارزیابی عملکرد سیستم در شرایط مختلف کاری است. در این مقاله با استفاده از کد محاسباتی RELAP5 و بکارگیری مدل جامع ترموهیدرولیکی نیروگاه اتمی‌بوشهر، شرایط برداشت حرارت از قلب راکتور مورد بررسی قرار گرفته است. بر اساس مدارک تحلیل ایمنی نیروگاه اتمی‌بوشهر[1] سناریوی خنک سازی در دو حالت مورد محاسبه قرار گرفته شده است. این شرایط شامل خنک سازی راکتور در حالت انجام تعمیرات و حالت خاموشی می‌باشند. شرایط مد نظر در این گزارش بررسی پاسخ سیستم‌های خنک کننده در حالت خنک سازی راکتور هنگام خاموشی می‌باشد. سیستم های خنک سازی و همچنین سناریوی آن در دو روش برداشت حرارت ذکر شده متفاوت می‌باشد که به تفصیل در ادامه آورده خواهد شد.

روش کار :

برداشت حرارت باقیمانده از قلب راکتور نیروگاه اتمی‌بوشهر تحت شرایط خاموشی راکتور در حالت های زیر انجام می‌شود:

- خنک سازی راکتور در هنگام خاموشی (هنگامی‌که قسمت بالای راکتور (Cap) بسته است). در این حالت مدار اول بوسیله دو پمپ اصلی خنک شده و بخار تولیدی در مدار دوم بوسیله شیرهای BRU-K به کندانسور تخلیه می‌گردند. شرایط اولیه برنامه خنک سازی در این حالت طبق جدول شماره ۱ می‌باشد.

Table No. 1-Initial state and parameters of the primary coolant prior to planned cooldown [1]

Parameter	Value
Reactor pressure, MPa	15,7
Coolant temperature at the reactor inlet, °C	276,5
Coolant temperature at the reactor outlet, °C	277,0
PRZ water level, mm	11000
SG water level, mm	3500
SG steam pressure, MPa	6,08
Coolant flow rate in the loop with operable RCP set, m^3/h	25600
Time delay since reactor trip, h	3,0

- خنک سازی راکتور در زمان تعویض سوخت و تعمیرات. در این حالت سر راکتور باز است و خنک سازی راکتور بوسیله سیستم TH صورت می‌گیرد که جدول شماره ۲ شرایط اولیه در این حالت کاری را نشان می‌دهد.

Table No.2-Initial state and parameters of the primary coolant prior to repair cooldown [1]

Parameter	Value
Pressure	atmospheric
Coolant temperature at the reactor inlet, °C	40
Coolant temperature at the reactor outlet, °C	70
Time since the reactor trip, days	3

جداول ۱ و ۲ برخی از شرایط اولیه هر یک از حالت های خنک سازی را بیان کردند و برخی از شرایط مشترک در دو حالت در ادامه آورده شده است.

جدول۳ میزان حرارت آزاد شده ناشی از پاره‌های شکافت (سریعاً پس از خاموشی) راکتور را نشان می‌دهد که در آن $N_{dec}+3\sigma$ حرارت آزاد شده با احتساب خطا می‌باشد. در شبیه‌سازی انجام شده مقدار حرارت در زمان ۱۰۰۰۰ ثانیه استفاده شده که طبق جدول شماره ۳ معادل ۱/۱۰۹ درصد توان نامی‌راکتور می‌باشد.

Table No. 3-Decay Heat [1]

Time, s	N_{dec}, rel.units	$N_{dec}+3\sigma$
0,01	0,069111	0,093535
0,10	0,068519	0,08926
1,00	0,064504	0,072109
10,00	0,050059	0,053813
100,00	0,033083	0,035167
1000,00	0,020639	0,021871
10000,00	0,010496	0,011094

Time, s	N_{dec}, rel.units	$N_{dec}+3\sigma$
50000,00	0,0067063	0,0071107
100000,00	0,0055055	0,005854
500000,00	0,003269	0,003408

در این قسمت با استفاده از مدل جامع ترموهیدرولیکی نیروگاه اتمی‌بوشهر که بوسیله کد RELAP5 تهیه شده است، شرایط برداشت حرارت از راکتور شبیه سازی می‌شود. طبق روش ذکر شده در برداشت حرارت پسماند از قلب راکتور نیروگاه اتمی‌بوشهر در شرایط نرمال کاری، خنک سازی بوسیله دو لوپ صورت می پذیرد.

به منظور شبیه سازی شرایط برداشت حرارت از قلب راکتور در زمان خاموشی ابتدا میزان حرارت تولیدی ناشی از پاره‌های شکافت تجمع یافته درون سوخت مطابق جدول ۳ بصورت جدول زمانی توان حرارتی به کد معرفی می‌شود. از آنجایی که شرایط اولیه ارائه شده مطابق مدرک FSAR[1]، ۳ ساعت پس از خاموشی راکتور می‌باشد، به منظور امکان انطباق دادن نتایج محاسبات، میزان حرارت تولید شده پس از ۳ ساعت از خاموشی راکتور (بعد از ۱۰۰۰۰ ثانیه) به عنوان حرارت ناشی از سوخت از جدول ۳ انتخاب گردیده است.

با تعریف این جدول به ساختار ورودی کد در واقع محاسبات نوترونیک ، واکنش های شکافت و توان آزاد شده از میله های حرارتی درون قلب محدود به همان حرارتی خواهد شد که در جدول آورده شده است. برداشت حرارت در شرایط حاضر با استفاده از دو لوپ صورت می‌پذیرد. بدین منظور پمپ های خنک کننده اصلی مدار اول دو لوپ ۱ و ۳ خاموش در نظر گرفته می‌شود و برداشت حرارت بوسیله دو لوپ دیگر ۲ و ٤ انجام می‌پذیرد. در این شرایط فشار مدار اول طبق برنامه کاری ۱۵/۷ مگاپاسکال بوسیله‌ی کنترلر های تثبیت فشار درون فشارنده تعیین می‌گردد.

با اعمال شرایط اولیه به ورودی مدل جامع نیروگاه اتمی بوشهر مراحل خنک سازی راکتور در مد خاموشی در سه مرحله اصلی انجام می پذیرد:

- خنک سازی راکتور بوسیله ۲ عدد از پمپ های اصلی مدار اول ، عملکرد پمپ های تغذیه کمکی آب مدار دوم و باز نمودن شیر BRU-K برای کاهش فشار مدار دوم برای رسیدن از دمای ۲۸۰ به دمای ۱۳۰ درجه سانتیگراد در مدار اول انجام می شود.
- کاهش دمای مدار اول از ۱۳۰ تا ۷۰ درجه سانتیگراد، با رسیدن به فشار ۱/٤۷ مگاپاسکال پمپ های TH فعال شده و پروسه خنک کاری ادامه می یابد و این در حالی است که ۲ پمپ اصلی مدار اول کماکان روشن بوده و فشار اضافی از طریق شیرهای BRU-K خارج گردیده است. در این شرایط پمپ سیستم TH روشن شده و با دبی ۷۰۰ متر مکعب بر ساعت برداشت حرارت انجام می دهد.
- مرحله سوم از پروسه خنک سازی راکتور در مد خاموشی شامل برداشتن سر راکتور در دمای حداکثر ۷۰ درجه سانتیگراد و فشار containment می باشد.

- از آنجاییکه در این شرایط کاری، توربین ها از مدار خارج هستند و شیر توربین تعبیه شده بر روی خط بخار بسته در نظر گرفته می‌شود، به منظور تخلیه بخار ایجاد شده در مدار دوم شیرهای BRU-K که بخار را به سمت کندانسور هدایت می‌کند باز می‌باشند(شکل ۱ محل شیر های TSV و BRU-K را نمایش می‌دهد) در نتیجه همراه با خروج بخار از شیرهای BRU-K دمای مولد بخار کنترل خواهد شد و پمپ های کمکی تغذیه مولد بخار مربوط به لوپ هایی که وظیفه برداشت حرارت را به عهده دارند روشن می‌باشند.

به منظور کنترل سطح آب مولد بخار در ارتفاع ۳/۵ متر از کنترلر سطح استفاده می‌گردد و با ثابت ماندن میزان آب تغذیه ورودی و بخار آب خروجی ارتفاع سطح ثابت باقی خواهد ماند.

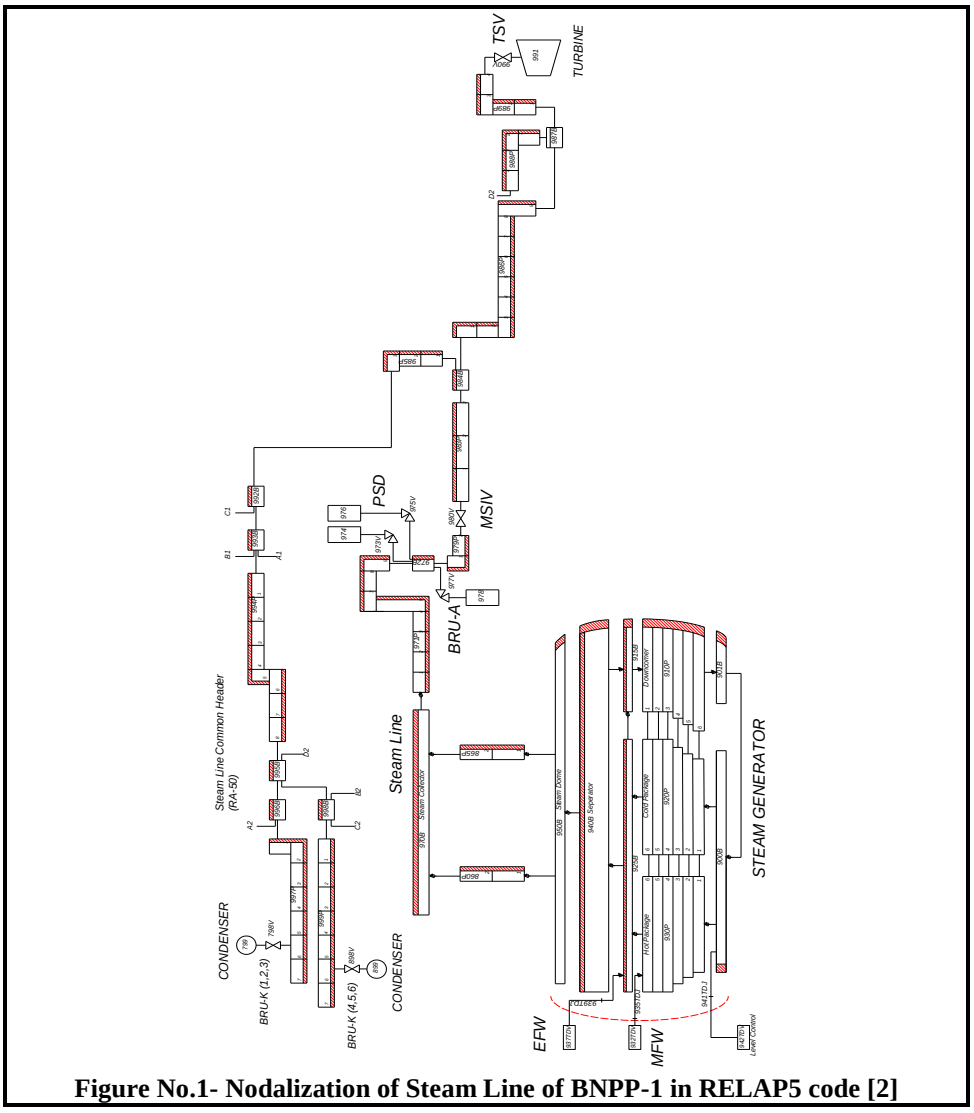

Figure No.1- Nodalization of Steam Line of BNPP-1 in RELAP5 code [2]

با اعمال شرایط فوق بر مدل مد نظر و اجرای برنامه به مدت ۱۰۰۰ ثانیه می‌توان با توجه به دمای سوخت و خنک کننده، شرایط اولیه در مد خاموش سازی را به شرایط پایدار رساند و از آن پس مراحل خنک سازی

راکتور از دمای ۲۸۰ تا ۷۰ درجه سانتیگراد را ادامه داد. در شبیه سازی انجام شده در این مقاله خنک سازی تا مرحله ی قبل از برداشتن سر راکتور انجام می گردد.

نتایج :

نتایج آنالیز پس از خاموشی راکتور در مد خنک سازی در شکل های ۲ تا ٦ نشان داده شده است. همانطور که در شکل۲ مشاهده می شود سطح فشارنده تا ۵ متر کاهش می یابد. سطح فشارنده از محدوده ۵ متر برای جلوگیری از خشک شدن نباید کاهش یابد که این مورد با ابزار کنترلی در نرم افزار محدود شده است. همچنین با کاهش سطح فشارنده، فشار مدار اول نیز از مقدار ۱۵/۷ تا ۱/۳ مگاپاسکال کاهش یافته که در شکل شماره ۳ نمایش داده شده است.

پمپ های سیستم TH با کاهش فشار مدار اول به مقدار ۱/٤۷ مگاپاسکال فعال شده و زمان فعال شدن این پمپ ها در ثانیه ۱۲۵۸۵ می باشد.

شکل شماره ٤ دمای خط گرم لوپ ٤ را نشان می دهد که در زمان خاموش شدن راکتور ۲۸۰ درجه سانتیگراد بوده و پس از فعال شدن پمپ های TH در زمان ۱۲۸۵۸ ثانیه دمای مدار اول از مقدار ۱۳٦ به دمای ۷۰ درجه سانتیگراد می رسد. زمان محاسبه شده بوسیله کد در لحظه رسیدن به دمای ۷۰ درجه سانتیگراد ۳۲۰۰۰ ثانیه می باشد. در پروسه خنک سازی راکتور فشار مولد بخار (مدار دوم) به ۰/۰۵ مگاپاسکال تقلیل می یابد و این در حالی است که سطح آب مولد بخار بر روی ۳/۵ متر ثابت نگه داشته شده است. شکل شماره ٦ سطح آب مولد بخار در لوپ دوم و چهارم نمایش داده شده است. اختلاف دمای میان ورودی و خروجی ۰/۵ درجه سانتیگراد می‌باشد و دبی خروجی از شیرهای BRU-K که نقش خنک کنندگی مدار دوم را به عهده دارد ۲٦/۵ Kg/s می‌باشد.

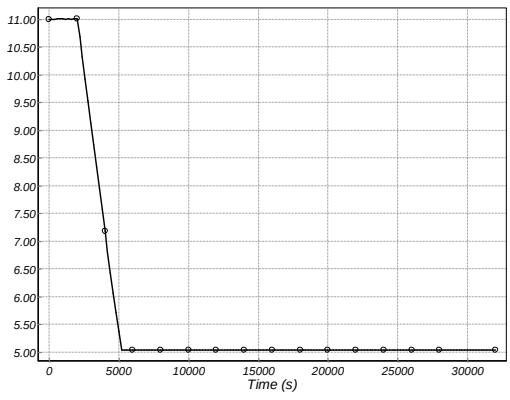

Figure No2- PRZ level during cooldown

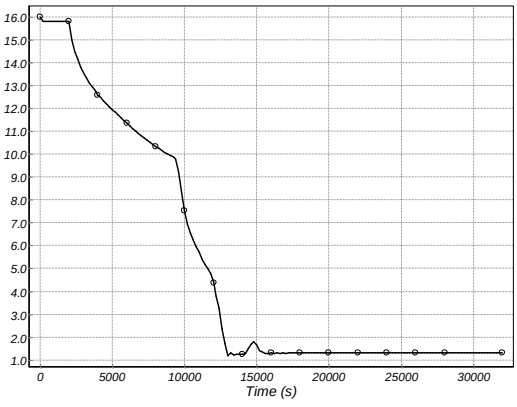

Figure No3- BNPP-1 Primary Pressure during cooldown

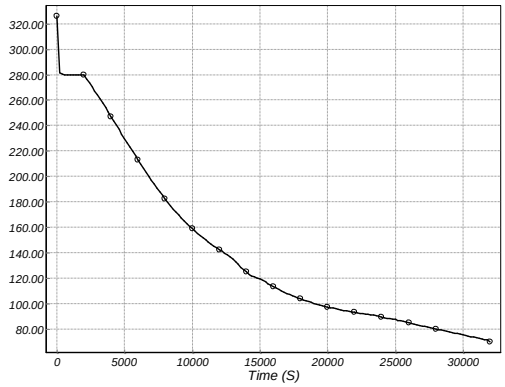

Figure No. 4- BNPP-1 Coolant Temperature during cooldown

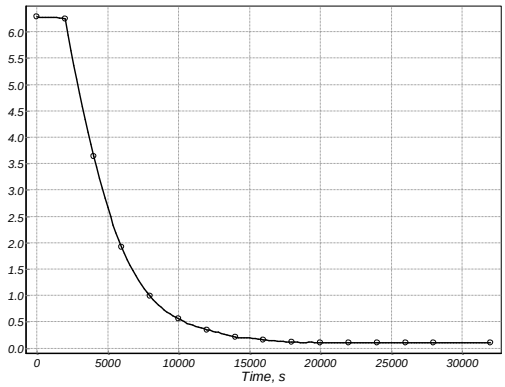

Figure No. 5- BNPP-1 Secondary side Pressure

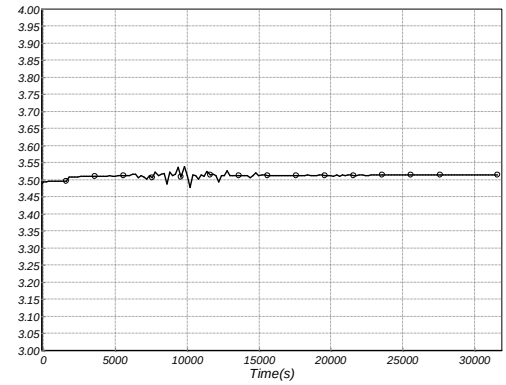

Figure No. 6- Steam Generator water level during Cooldown

بحث ونتیجه گیری :

در این مقاله شرایط اولیه مربوط به زمان خاموشی راکتور بر روی مدل جامع ترموهیدرولیکی اعمال شده و نتایج حاصل از محاسبات کد ارائه گردید. نتایج حاصل از خروجی کد نشان می‌دهد که با توجه به حرارت آزاد شده بر اثر واپاشی پاره های شکافت، طراحی سیستم خنک کاری در این شرایط کاری می‌تواند برداشت حرارت از قلب راکتور را به خوبی انجام داده و از انباشت حرارت در قلب جلوگیری نماید. پارامترهای محاسبه شده بوسیله کد در مقایسه با مقادیر موجود در مدارک طراحی نیروگاه اتمی‌بوشهر در جدول های شماره ٤ و ٥ ارائه شده است.

Table No. 4-Comparison of Relap5 code results with FSAR's values in the 'Hot Condition'

Parameter	FSAR's Value [1]	Relap5 Code Calculation	Error%
reactor pressure, MPa	15.7	15.7001	~ 0
PRZ water level, mm	11.0	11.0014	0.013
SG water level, mm	3.5	3.495	0.14

Parameter	FSAR's Value [1]	Relap5 Code Calculation	Error%
SG steam pressure, MPa	6.08	6.24	2.63
coolant flow rate in the loop with operable RCP set, m^3/h	25600	26550	3.71
PRZ water temperature corresponds to saturation temperature	345.82	345.82	0
coolant temperature at the reactor inlet, ^oC	276.5	279.36	1.03
coolant temperature at the reactor outlet, ^oC	277.0	279.81	1.01

Table No. 5- Comparison of Relap5 code results with reference values in the 'cooldown condition'

Parameter	Reference Value [1]	Relap5 code result	Error%
Pressure setpoint of actuating the TH system, MPa	1.47	1.47	0
coolant temperature when the TH system is actuating, ^oC	130.0	136.0	4.61
Coolant temperature at the end of cooldown condition, ^oC	70.0	70.105	0.15
reactor pressure, MPa	1.47	1.3	11.5
SG pressure when the TH system is actuating, MPa	0.3	0.29	3.33
SG pressure at the end of cooldown condition, MPa	0.1	0.103	3

مراجع :

[1]Final Safety Analysis Report, chapter 15, 49.BU.1 0.0.00.FSAR.RDR001, 2008;
[2] OCE, Engineering Handbook for Accident Analysis of Bushehr NPP Unit-1 (IC-19), 2011