



بررسی حادثه نشت از مدار اول به مدار دوم در مولد بخار نیروگاه هسته‌ای بوشهر و

صحت سنجی مدل به روش تبدیل فوریه سریع

محمد، شاهمیرزالی؛ امیر سعید، شیرانی*؛ امید، صفرزاده

دانشگاه شهیدبهشتی، دانشکده مهندسی هسته‌ای، گروه راکتور

چکیده

ایمنی نیروگاه‌های هسته‌ای یکی از مهمترین مواردی است که در ساخت، راه‌اندازی و بهره‌برداری نیروگاه‌های هسته‌ای مورد توجه قرار می‌گیرد. در این مقاله، حادثه نشت مدار اول به مدار دوم درون مولد بخار هسته‌ای نیروگاه بوشهر بررسی گردیده است. مولد بخار با کد RELAP5 مدل گردیده و توسط روشی مبتنی بر تبدیل فوریه سریع صحت سنجی شده است. نتایج حاصله در حالت ماندگار و گذرا با گزارش نهایی ایمنی مقایسه و تطابق بسیار بالایی را نشان می‌دهد. کلید واژه: مولدبخار، حادثه، تبدیل فوریه سریع، نیروگاه هسته‌ای بوشهر

۱- مقدمه

امروزه بحث ایمنی در نیروگاه‌های هسته‌ای یکی از مهمترین مواردی است که در ساخت، راه‌اندازی و بهره‌برداری نیروگاه‌های هسته‌ای مورد توجه قرار می‌گیرد. به همین دلیل مدل‌سازی حوادث احتمالی در این نیروگاه‌ها در فهم شرایط موجود در هنگام وقوع حادثه می‌تواند بسیار مفید واقع شود. در همین راستا، مولد بخار نیروگاه هسته‌ای بوشهر با استفاده از RELAP5/MOD3,3 مدل‌سازی و سپس حادثه نشت از مدار اول به مدار دوم درون مولد بخار بررسی گردیده است. صحت سنجی مدل با استفاده از روش مبتنی بر تبدیل فوریه سریع (FFTBM^۱) صورت پذیرفته است. در این روش میزان سازگاری مقادیر تجربی و مقادیر محاسباتی تعیین می‌شود. این روش، از روش‌های بسیار مرسوم برای بررسی صحت و اعتبار شبیه‌سازی است [۱]. پروسیک و همکاران از این روش برای بررسی صحت مدل‌سازی حادثه تریپ پمپ خنک‌کننده در نیروگاه VVER-1000 استفاده کردند [۲]. شاهدی و همکاران از این روش در بررسی صحت مدل در حادثه ازدست رفتن سیال خنک‌کننده در نیروگاه VVER-1000 استفاده کرده‌اند [۳]. در هر دو این بررسی‌ها نتایج رضایت‌بخش گزارش شده است.

نتایج حاصله از این بررسی با گزارش نهایی بررسی ایمنی نیروگاه [۴]، در ابتدا به صورت کیفی و بصری بررسی و سپس با استفاده از روش تبدیل فوریه سریع صحت سنجی شده است. نتایج حاصل از این مطالعه

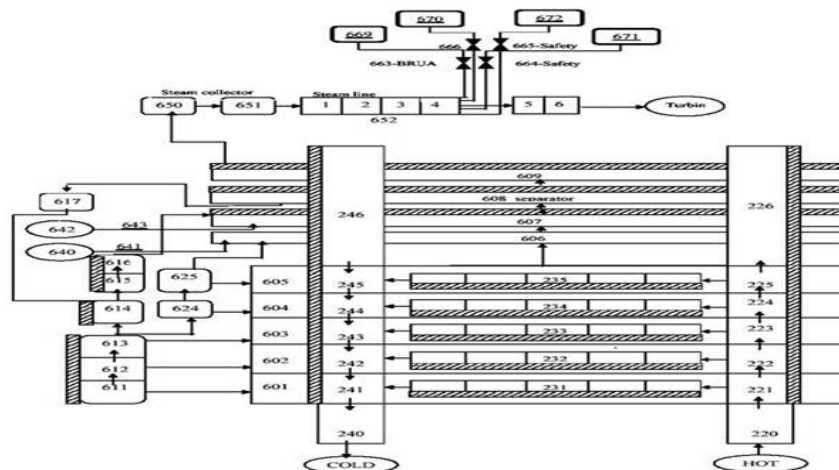
^۱ Fast Fourier transform based method



حاکی از آن است که حادثه به خوبی مدل گردیده و تمامی پارامترهای موجود در شبیه سازی با شرایط واقعی و تجربی تطابق مطلوب را دارند.

۲- مدل سازی مولدبخار

مولد بخار نیروگاه هسته‌ای بوشهر به صورت افقی بوده و دارای تیوب‌های غوطه‌ور و جداساز بخار داخلی می‌باشد. مولد بخار از دو بخش تشکیل شده‌است که عبارتند از اجزای هیدرولیکی مدار اول که خنک کننده درون آن جریان دارد و اجزای هیدرولیکی مدار دوم که آب تغذیه درون آن قرار می‌گیرد. طراحی این مولد بخار به گونه‌ای است که خنک کننده مدار اول درون تیوب‌ها جریان پیدا می‌کند و آب مدار دوم این تیوب‌ها را در برمی‌گیرد. خنک کننده‌ی مدار اول از ناحیه‌ی تحتانی مولد بخار و از قسمت مخصوص ورود خنک کننده وارد مولد بخار می‌شود. شکل ۱ حجم بندی استفاده شده برای مدل سازی مولد بخار را نشان می‌دهد.



شکل ۱: حجم بندی مولدبخار [۵]

۳- نتایج حالت ماندگار و گذرا

در جدول ۱ نتایج مدل سازی مولد بخار در حالت ماندگار در مقایسه با گزارش ایمنی راکتور بوشهر (FSAR) آورده شده است. مدل سازی در حالت پایا تطابق مطلوبی با داده‌های گزارش دارد.

جدول ۱: مقادیر تجربی و محاسباتی پارامترهای مولد بخار در حالت پایا

پارامتر	نتایج	FSAR	درصد خطا
دبی خنک کننده در ورودی مولد بخار (kg/s)	۴۵۱۱	۴۵۰۰	٪۰/۲۴۴۴
دبی خنک کننده در خروجی مولد بخار (kg/s)	۴۵۱۱	۴۵۰۰	٪۰/۲۴۴۴
دبی آب تغذیه ورودی (kg/s)	۴۳۷	۴۳۷	٪۰,۰

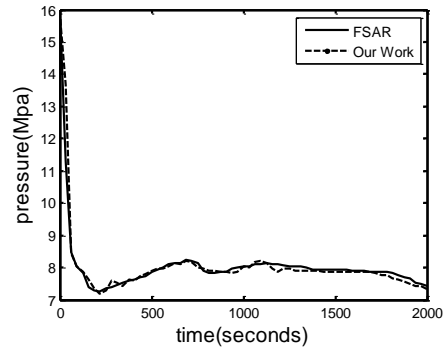
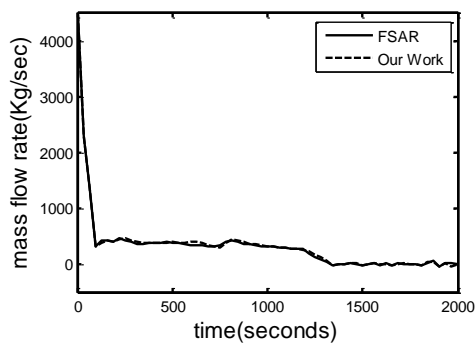


۰/۰۸۵۵٪	۴۳۷	۴۳۶/۶۲۷	دبی بخار خروجی (kg/s)
۰/۰۲۵۴۸٪	۱۵/۷	۱۵/۷۴	فشار ورودی خنک کننده (Mpa)
۰/۰۰۷۷۱٪	۱۵/۵۶۷	۱۵/۵۵۵	فشار خروجی خنک کننده (Mpa)
۰/۰٪	۶/۵	۶/۵	فشار بخار خروجی (Mpa)
۰/۰۰۰۰۴٪	۵۹۳/۱۵	۵۹۳/۱۵۳	دما خنک کننده ورودی (k)
۰/۰۸۷۲۸٪	۵۶۱/۱۵	۵۶۶/۰۴۸	دما خنک کننده خروجی (k)
۰/۰٪	۴۹۳/۰	۴۹۳/۰	دما آب تغذیه (k)
۰/۰۲۲۰۶٪	۵۵۱/۶۵	۵۵۲/۸۶۷	دما بخار خروجی از مولد بخار (k)
۰/۱۰۰۷۵٪	۱/۸۶	۱/۸۳۹۴	ارتفاع سطح آب تغذیه درون مولد بخار (m)
۰/۰/۲>	۹۹/۸<	۱۰۰	کیفیت بخار (%)

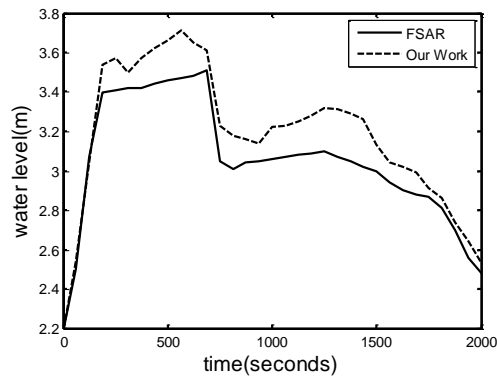
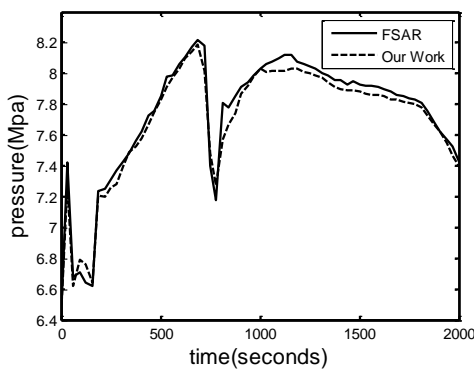
در گام بعد، حادثه نشت از مدار اول به مدار دوم درون مولد بخار مدل شده است. در این حادثه قسمت کلکتور سرد مولد بخار، دچار شکستگی شده و خنک کننده‌ی مدار اول از ناحیه‌ی این شکستگی که قطر معادل آن ۱۰۰ mm است وارد مدار دوم شده و با آب تغذیه‌ی موجود در این مدار مخلوط می‌شود. این حادثه منجر به: افزایش سطح رادیواکتیویته در خط لوله‌ی بخار خروجی از مولد بخار آسیب دیده، کاهش فشار خنک کننده مدار اول، افزایش سطح ارتفاع آب تغذیه درون مولد بخار مذکور و کاهش سطح ارتفاع خنک کننده در فشارنده می‌شود. پس از مدل‌سازی این حادثه، پارامترهای اصلی حاصل به صورت کیفی و بصری با نتایج تجربی مورد مقایسه شده است. دبی خنک کننده و فشار ورودی به مولد بخار در شکل ۲ آورده شده است. فشار و دمای بخار خروجی از مولد بخار در شکل ۳ به تصویر در آمده است. بررسی‌های اولیه معرف مدل‌سازی مناسب حادثه است.

۴- تبدیل فوریه سریع

برای صحت سنجی کمی از روش مبتنی بر تبدیل فوریه سریع استفاده می‌شود. در این روش، میزان سازگاری بین مقادیر تجربی و مقادیر محاسباتی تعیین می‌شود. یک فرآیند فیزیکی می‌تواند در حوزه زمان با $F(t)$ به عنوان تابعی از زمان و یا در حوزه فرکانس با $F(f)$ به عنوان تابعی از فرکانس معرفی گردد. تبدیل فوریه سیگنال $F(t)$ به صورت زیر نوشته می‌شود:



شکل ۲: مقایسه دبی خنک کننده (سمت چپ) و فشار (سمت راست) ورودی به مولد بخار



شکل ۳: مقایسه سطح آب (سمت راست) و فشار بخار خروجی (سمت چپ) مولد بخار

$$\tilde{F}(f_n) = \int_{-\infty}^{\infty} F(t) e^{2\pi i f_n t} dt \approx \sum_{k=0}^{N-1} \tau F(t_k) e^{2\pi i f_n t_k} \quad (1)$$

که τ فاصله زمانی بین دو نمونه برداری متوالی است.

$$f_n = n / N \quad (2)$$

در این رابطه N تعداد کل نقاط گسسته است. این تبدیل گسسته را می توان به صورت زیر نوشت:

$$\tilde{F}_n = \sum_{k=0}^{N-1} F(t_k) e^{2\pi i k n / N} \quad (3)$$

این تبدیل فوریه را می توان با الگوریتم های تبدیل فوریه سریع محاسبه کرد. روش FFTBM یکی از روش های

تبدیل فوریه سریع است که نقاط m از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$N = 2^{m+1} \quad (4)$$

در این روش تفاضل بین مقادیر محاسباتی ($F_{cal}(t)$) و تجربی ($F_{exp}(t)$) را مورد بررسی قرار می گیرد:

$$\Delta F(t) = F_{cal}(t) - F_{exp}(t) \quad (5)$$

در این روش می بایست تبدیل فوریه n نقطه ای گرفت. بنابراین تعداد نقاط از رابطه زیر بدست می آید:



$$n = 2^m, m = 8, 9, 10, 11 \quad (6)$$

دامنه متوسط (AA) و فرکانس وزن شده (WF) که مشخصه‌های اصلی صحت شبیه‌سازی هستند استفاده می‌شود، از روابط زیر محاسبه می‌شود:

$$AA = \frac{\sum_{n=0}^{2^m} |\Delta \tilde{F}(f_n)|}{\sum_{n=0}^{2^m} |\tilde{F}_{\text{exp}}(f_n)|} \quad WF = \frac{\sum_{n=0}^{2^m} |\Delta \tilde{F}(f_n)| f_n}{\sum_{n=0}^{2^m} |\tilde{F}_{\text{exp}}(f_n)|} \quad (7)$$

مقدار دامنه متوسط نمایانگر بزرگی اختلاف بین مقادیر محاسباتی و مقادیر تجربی می‌باشد. اگر این دو مقدار با هم مساوی باشند یعنی خطا نداریم و تابع خطا صفر می‌شود و در نتیجه $AA=0$ به دست می‌آید و در حالت کلی هر چه مقدار دامنه متوسط کوچکتر باشد بیانگر این امر است که شبیه‌سازی به خوبی صورت پذیرفته است. فرکانس وزن شده، محدوده‌ی خطا را مشخص می‌کند برای مثال یک فرکانس وزن شده کوچک یعنی اینکه اختلاف بین مقادیر تجربی و محاسباتی در فرکانس‌های پایین دارای اهمیت بیشتری است. در کل تاثیر و اهمیت دامنه متوسط قابل مقایسه با فرکانس وزن شده نیست و AA پارامتر اصلی ما محسوب می‌شود. مقادیر فاکتور وزنی هر پارامتر در مرجع [۲] پیشنهاد داده شده است. این مقادیر محاسبه و در جدول ۲ ارائه شده است. برای اینکه کلیت صحت مدل‌سازی بررسی شود نیاز به ترکیب مقادیر مختلف دامنه متوسط و فرکانس وزن شده و بدست آوردن یک دامنه متوسط کلی (AA_{total}) و فرکانس وزن شده کلی (WF_{total}) داریم، این امر به کمک روابط زیر محقق می‌شود:

$$AA_{\text{total}} = \sum_{i=1}^k AA_i w_{fi} \quad WF_{\text{total}} = \sum_{i=1}^k WF_i w_{fi} \quad (8)$$

مقدار AA_{total} برابر 0.06282 و WF_{total} برابر 0.23342 است. محدوده‌ی AA_{total} که مورد قبول تمامی منابع معتبر است وجود دارد که در زیر آورده شده است [۲]: $0.3 \leq AA_{\text{total}} \leq 0.5$ پیش بینی بسیار خوب، $0.3 < AA_{\text{total}} < 0.5$ پیش بینی خوب، $0.5 < AA_{\text{total}} < 0.7$ پیش بینی ضعیف و $AA_{\text{total}} > 0.7$ پیش بینی بسیار ضعیف است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که شبیه‌سازی و نتایج آن در رده‌ی بسیار خوب قرار دارد.



جدول ۲: AA و WF برای پارامترهای مختلف مولد بخار

AA×WF	AA	WF×WF	WF	فاکتور وزنی (WF)	پارامتر
۰,۰۰۳۴۵	۰,۰۲۸۳	۰,۰۲۴۲۳	۰,۱۹۸۶	۰,۱۲۲	دبی خنک کننده در ورودی
۰,۰۱۹۱۵	۰,۰۷۸۵	۰,۰۶۲۶۳	۰,۲۵۶۷	۰,۲۴۴	فشار خنک کننده در ورودی
۰,۰۲۰۴۵	۰,۰۸۳۸	۰,۰۵۰۱۲	۰,۲۴۵۹	۰,۲۴۴	فشار خنک کننده در خروجی
۰,۰۰۴۸۶	۰,۰۱۹۹	۰,۰۴۷۹۲	۰,۱۹۶۴	۰,۲۴۴	فشار بخار خروجی
۰,۰۰۲۸۷	۰,۰۱۴۷	۰,۰۲۸۰۸	۰,۱۴۴	۰,۱۹۵	دما بخار
۰,۰۱۱۹۵	۰,۰۶۱۳	۰,۰۲۰۴۴	۰,۱۰۴۸	۰,۱۹۵	ارتفاع سطح آب تغذیه

۵- بحث و نتیجه گیری

ایمینی در نیروگاه های هسته ای از جایگاه مهمی در ساخت، راه اندازی و بهره برداری نیروگاه های هسته ای برخوردار است. مدل سازی دقیق حوادث احتمالی در این نیروگاه ها باعث فهم دقیق رفتار سیستم و پی بردن به نقاط ضعف سیستم می شود. در این مقاله حادثه نشت مدار اول به مدار دوم مولد بخار در نیروگاه بوشهر بررسی شده است. ارزیابی نتایج حاصل با استفاده از روشی مبتنی بر تبدیل فوریه سریع انجام شده است. مقدار دامنه متوسط به دست آمده به گونه ای است که مدل سازی را در محدوده بسیار خوب قرار می دهد.

۶- مراجع

- [۱] A. Prosek , B. Kvizda , B. Mavko , T. Kliment, Quantitative assessment of MCP trip transient in VVER, Nucl. Eng. Des., ۲۰۰۴.
- [۲] Andrej Prosek , Francesco D'Auria , Borut Mavko , 'Review of quantitative accuracy assessments with fast Fourier transform based method (FFTBM)' , Nucl. Eng. Des., ۲۰۰۲.
- [۳] S.Shahedi , J.Jafari , M.Boroushaki , F.D'Auria, Development of a qualified nodalization for small-break LOCA transient analysis in PSB-VVER integral test facility by Relap5 system code, Nucl. Eng. Des., ۲۰۱۰.
- [۴] Atomic Energy Organization of IRAN, Final Safety Analysis Report, Chapter ۱۵, ۲۰۰۸.
- [۵] S. Abbasi, K. Hadad, Analysis of the loss of heat sink transients in the secondary circuit of a VVER-۱۰۰۰ using RELAP5/MOD3,2, Ann. Nucl. Energy ۴۷, ۲۸-۳۷, ۲۰۱۲.