بررسی روش های اندازه گیری و نحوه توزیع شار نوترونی در قلب نیروگاه بوشهر با استفاده از نتایج تست های راه اندازی و مقایسه با نتایج شبیه سازی کد MCNPX

جباری، مسعود[(۱)]* - محسن دخت، مسعود[(۱)] - جانی پور، اصغر[(۲)] - تبادار،زهرا[(۱)]-وحدانی فر ،سیف اله[(۳)]

(۱) سازمان انرژی اتمی ، شرکت مهندسین مشاور افق هسته ای

(۲) شرکت بهره برداری نیروگاه اتمی بوشهر

(۳) مجری طرح نیروگاه بوشهر

چکیده:

یکی از پارامترهای مهم درنیروگاه های هسته ای چگونگی توزیع شار نوترون در نقاط مختلف قلب راکتور می باشد. در نیروگاه بوشهر نحوه توزیع شار نوترون به صورت پیوسته به وسیله پارامترهای متفاوت نظیر orbit، K_q، K_V ، axial offset و... در داخل قلب راکتور مانیتور می گردد. چنانچه توزیع شار نوترونی از محدوده تعریف شده خارج گردد سیگنال تریپ ارسال می گردد. با توجه به اهمیت توزیع شار نوترونی، در این مقاله ابتدا روش های اندازه گیری شار نوترونی در داخل قلب راکتور نیروگاه بوشهر که به وسیله SPND ها و ION CHAMBER ها اندازه گیری می گردند، نحوه قرار گیری سنسورها در داخل و خارج قلب، جنس مواد به کار رفته در سنسورها، نحوه پاسخ دهی(تاخیری و آنی) و شناسایی عدم تقارن شار نوترونی بررسی می گردند. همچنین در این مقاله قلب راکتور نیروگاه بوشهر با کد MCNPX شبیه سازی می گردد و مقدار پارامترهای نشان دهنده توزیع شار نوترونی در درون قلب با مقادیر به دست آمده در تست های راه اندازی نیروگاه بوشهر در توان ۱۰۰ درصد مقایسه می گردد که تطابق بالایی بین داده های تجربی و نتایج کد MCNPX مشاهده می گردد. در انتها نیز مزایا و معایب روش های اندازه گیری شار نوترونی با یکدیگر مقایسه می گردند.

کلمات کلیدی: *نیروگاه بوشهر ، SPND ، اندازه گیری شار نوترون ، تست های راه اندازی و MCNPX*

Exploring the measuring methods and distribution of neutron flux in the reactor core of Bushehr nuclear power plant using the results of start-up tests and comparison with results of MCNPX code simulation

Jabbari,Massoud[1]- Mohsendokht,Massoud[1]-Tabadar, Zahra[1]

1-Ofogh consultant engineering company

Abstract

The distribution of neutron flux in the reactor core is one of the most important parameters in nuclear power plants which is monitored continuously based on different parameters such as axial offset, KV, Kq, orbit and etc. The trip signal is generated if the distribution of neutron flux exceeds the set-points. Regarding to distribution of neutron flux, methods of neutron flux measures in the reactor core by SPNDs and ION CHAMBER , the sensors distribution in and out of the core , the material of the sensors , response times (prompt and delay) and detection of neutron flux distribution asymmetry are explored in this article. The reactor core is simulated by MCNPX code. The parameters that indicate the distribution of neutron flux in the reactor core are compared with the results of Bushehr nuclear power plant start-up tests in nominal power. The results show a good agreement with the plant data. At the end, the advantages and disadvantages of neutron flux measuring methods are analyzed.

Key words: Bushehr nuclear power plant, SPND, Neutron flux measuring, start-up tests and MCNPX

مقدمه

در نیروگاه هسته ای بوشهر شار نوترونی به دو روش اندازه گیری می شود . در روش اول در اطراف قلب راکتور اتاقک های یونش قرار داده شده اند که شار نوترون ها را اندازه گیری می نمایند.این سیستم تحت عنوان NFME[1] می باشد که می تواند تا دمای 150^0Cو فشار 0.49MPa در داخل containment شار نوترون را اندازه گیری نماید. نحوه چیدمان سنسورهای مربوط به سیستم NFME در اطراف قلب راکتور در شکل ۱ نشان داده شده است.کارکرد هریک از این سنسورها در جدول ۱ توضیح داده شده است.در روش دوم از SPND[2] های داخل قلب راکتور جهت اندازه گیری

جدول ۱- عملکرد سنسورهای NFME اطراف قلب

شماره کانال	عملکرد کانال اندازه گیری
1, 6, 12	1-st set of equipment, start-up and working ranges
4, 9, 15	2-nd set of equipment, start-up and working ranges
3, 7, 11	1-st set of equipment, source range
5, 10, 14	2-nd set of equipment, source range
9	1-st set of equipment of physical start-up
2, 13	2-nd set of equipment of physical start-up
13	redundant channel for equipment of the 1-st set

[1] Neutron Flux Monitoring Equipment
[2] Self-Powered Neutron Detector

8	redundant channel for equipment of the 2-nd set

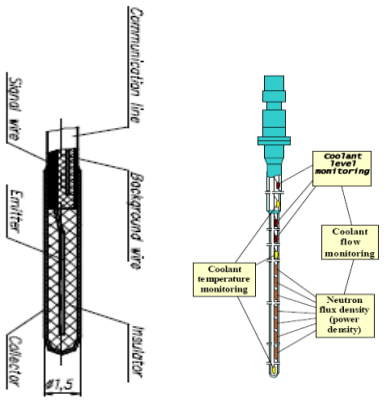
شکل ۱- چیدمان سنسورهای NFME اطراف قلب

شار نوترون مورد استفاده قرار می گیرد. این SPND ها در برخی از مجتمع های سوخت راکتورهای VVER-1000 در کانال های NTMC[۳] قرار داده می شوند . هر NTMC شامل هفت SPND و سه عددترموکوپل می گردد به گونه ای که یک عدد در ورودی و دو عدد در خروجی کانال NTMC قرار داده می شود.۴۶ نوع از این NTMC ها در داخل قلب راکتور V-446 قرار داده شده است. علاوه بر این نوع از NTMC ها دو نوع دیگرنیز وجود دارد . در نوع دیگر تعداد SPND ها برابر با ۷ عدد ، یک ترموکوپل در ورودی مجتمع سوخت ، دو عدد در خروجی و یکی دیگر در بالای سر قلب راکتور قرار دارد که تعداد این نوع از NTMC ها برابر با ۴ می باشد. در نوع آخر تعداد SPND ها برابر با ۷ ، و ۵ عدد ترموکوپل را شامل می گردد که در سه نقطه متفاوت در مسیر جریان خنک کننده به منظور اندازه گیری سطح خنک کننده در شرایط حادثه در قلب قرار گرفته و یک ترموکوپل که در راستای کنترل دما تا دمای ۱۲۰۰ درجه سانتی گراد در نظر گرفته شده است. چیدمان SPND ها در داخل قلب راکتور در شکل ۲ نشان داده شده است.اعداد ۱ ،۲و۳ نشان دهنده اتصال این SPND ها به کانال ۱ تریپ راکتور و اعداد ۴ ،۵ و۶ نشان دهنده اتصال این SPND ها به کانال ۲ تریپ راکتور متصل می گردند.این دتکتورها بدون ولتاژ کار می‌کنند[1].

روش کار

[3] Neutron Temperature Monitoring Channel

در این مقاله ابتدا نحوه عملکرد SPND های داخل قلب راکتور بررسی می گردد و سپس با استفاده از شبیه سازی قلب راکتور بوشهر به وسیله کد MCNPX مقادیر اندازه گیری شده به وسیله SPND ها که از نتایج تست های راه اندازی حاصل شده است با نتایج حاصل از کد MCNPX مقایسه می گردد.

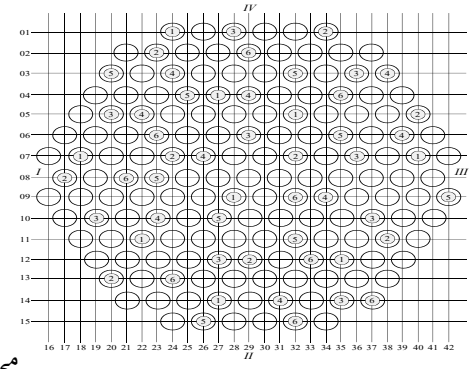


شکل ۲- چیدمان دتکتورهای SPND در درون قلب

شکل ۳- ساختار SPND ها

بررسی عملکرد SPND ها

در SPND ها تابش برخوردی شامل نوترون و گاما متناسب با تعداد برخورد جریان تولید می‌نمایند یک نمونه از این SPNDها در شکل ۳ نشان داده شده است. رسانای مرکزی Emitter می‌باشد و رسانای خارجی Collector نامیده می‌شود. بین Emitter و Collector نیز عایق قرار دارد. در اثر برخورد نوترون و گاما با Emitter الکترون جدا شده و از طریق Resistor جریان برقرار و اندازه‌گیری می‌گردد. پارامتر مهمی که برای SPNDها تعریف می‌شود حساسیت می‌باشد که براساس رابطه زیر تعریف می‌شود[2]:



$$s(t)=\frac{\Delta I(t)}{\Delta\phi} \quad (1)$$

$\Delta I(t)=$ جریان دتکتور $\Delta\varphi=$ شار برخورد کننده

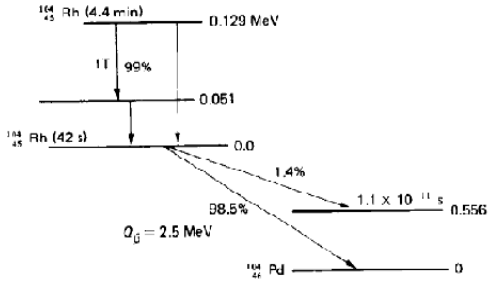
یک Emitter مناسب باید خواص زیر را داشته باشد:

۱- حساسیت بالا ۲- نرخ Burn up کمتر۳- پاسخ آنی ۴- حساسیت نوترون‌ها

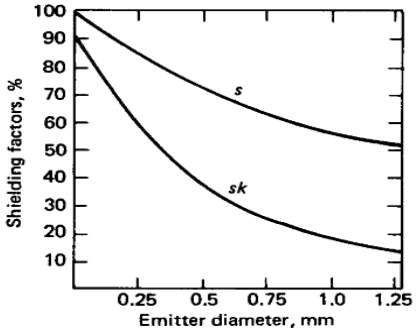
مقاومت‌های عایق باید بین 1012 تا 109 اهم در دمای کاری راکتور باشد. SPND ها براساس پاسخشان به دو نوع پاسخی آنی و تاخیری تقسیم می‌گردند.

SPNDهای با پاسخ تاخیری

در نیروگاه بوشهر از عنصر Rhodium به عنوان Emitter در داخل SPNDهای داخل قلب استفاده می‌گردد که Decay آن براساس شکل۴ خواهد بود. همانطور که در شکل مشخص است ß آزاد شده با انرژی 2.5Mev می‌تواند تبدیل به جریان گردد.در این صورت تعداد اتم های رادیواکتیو درلحظه t برابر خواهد بود[3]:



شکل ۴- زنجیره decay heat عنصر Rh



شکل ۵- نمودار self-shielding

$$N(t)=\frac{s\sigma_e\phi N_0}{\lambda-\sigma_a\phi}(e^{-s\sigma_a\phi t}-e^{-\lambda t}) \qquad (2)$$ N_0= تعداد اتم های اولیه

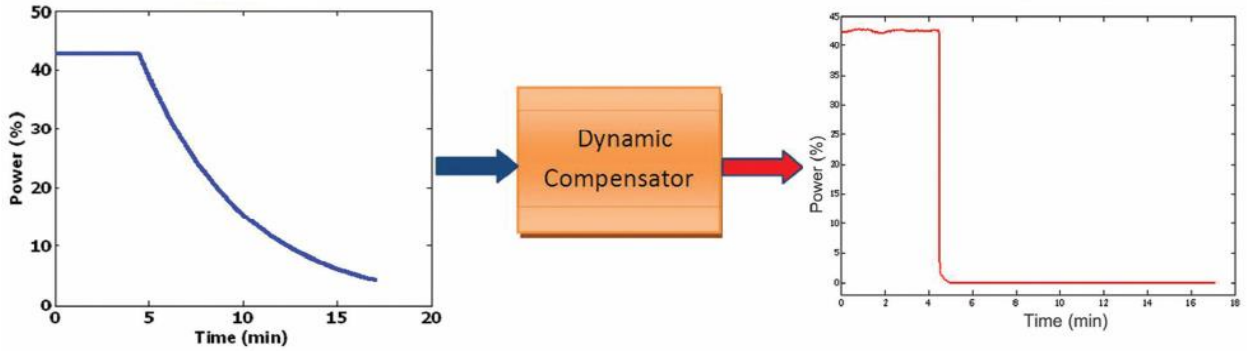
6e= cross section منجر به شرکت در سیگنال می‌گردد و6a= absorption cross section of emitter

S= self-shielding factor (S<1)

پارامتر S در واقع نشان دهنده این می‌باشد که اتم‌های داخلی نسبت سطح مشارکت کمتری در اکتیو شدن دارند که این مقدار کوچکتر از ۱ می‌باشد. نمودار Self-Shielding در شکل ۵ نشان داده شده است. اگر به ازای هر decay یک بار q آزاد گردد براساس رابطه زیر مقدار جریان برابر خواهد بود با:

$$I(t) = kqN(t)\lambda = kq\frac{s\sigma_e\phi N_0}{1-\sigma_a\phi/\lambda}(e^{-\sigma_a\phi t} - e^{-\lambda t}) \quad (3)$$

که مقدار k میزان تعداد الکترون هایی می‌باشد که در عایق از دست می‌رود. پاسخ دتکتور برابر است با فاکتور exp(-λt) می‌باشد. در این صورت به ازای افزایش با کاهش شار نوترون در داخل قلب پاسخ SPND ها بر اساس شکل۶ خواهد بود. $\exp(-S6a\phi t)$ برابر با میزان Burn-up مربوط به Emitter می‌باشد. در نیروگاه بوشهر وسایر نیروگاه‌های هسته‌ای از Rh به عنوان Emitter در SPNDها استفاده می‌گردد در جدول برخی از مشخصات عناصر مورد استفاده در Emitter مربوط به SPNDها آورده شده است[4].



شکل ۶- نحوه پاسخ دهی SPND های قلب نیروگاه بوشهر با استفاده از سیستم کنترلی به کاهش توان

جدول ۲- مشخصات Emitter های به کار رفته در SPND های قلب راکتور

نوع پاسخ دهی	نرخ burn up بر سال به ازای شار برابر با 2×10^{17} نوترون بر ثانیه متر مربع	حساسیت	Emitter
تاخیری	5	2.4×10^{-6}	Rh
تاخیری	0.3	1.5×10^{-7}	V
آنی	2.3	3.4×10^{-8}	Co
آنی	0.9	1.7×10^{-8}	Mo
آنی	0.2	2.6×10^{-7}	Pt

SPND با پاسخ آنی

در این حالت Emitter نوترون را جذب نموده و سپس γ ساطع می‌نماید در این نوع از SPNDها از ^{59}Co و ^{95}Mo استفاده می‌گردد. گاما خارج شده از طریق پدیده فوتوالکتریک یا کامپتون الکترون تولید می‌نماید و الکترون ایجاد شده جریان ایجاد می‌نماید. این نوع SPNDها در مقایسه با SPNDهای تاخیری حساسیت کمتری دارند[5].

توزیع شار نوترون در داخل قلب راکتور نیروگاه بوشهر به وسیله پارامترهای توزیع

توزیع شار نوترونی در نیروگاه بوشهر بر اساس پارامترهای زیر تعریف می گردد:

q_l:متوسط نرخ حرارت خطی میله سوخت 166.7W/cm ، q_r:متوسط توان حرارتی میله سوخت 59.2Kw

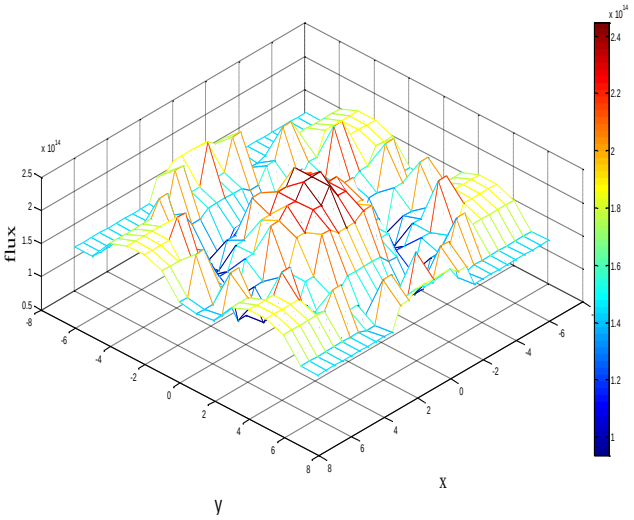
K_0:نسبت مقدار حرارت خطی در میله سوخت به مقدار متوسط در قلب ، k_q: power peaking factor for Fas در قلب ،k_r :نسبت ماکزیمم توان میله سوخت به مقدار متوسط در قلب ، k_{eng}: engineering safety factor برای حرارت خطی درمیله سوخت ، k_n : مقدار ضریب عدم قطعیت در تعیین توان حرارتی ، در این صورت مقدرا ماکزیمم نرخ حرارت خطی تولید شده برابر خواهد بود با :

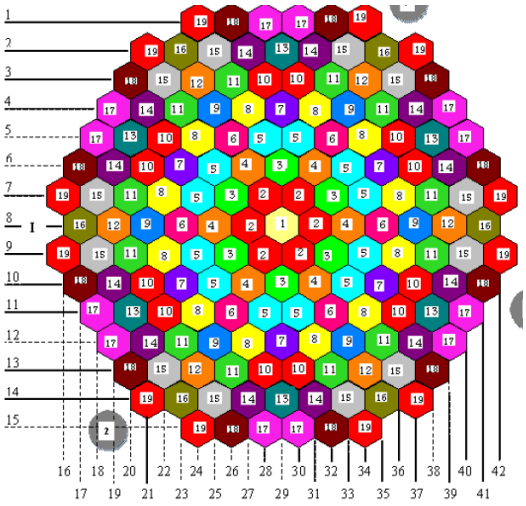
$$Q_l=q_l k_q k_k k_z k_{eng} k_n \quad (4)$$

نتایج

با توجه به اینکه حساسیت SPND های تاخیری بیشتر از آنی می باشد در قلب راکتور بوشهر از SPND های تاخیری از جنس Rh استفاده می گردد. مشکل این نوع از SPND ها پاسخ به تغییرات توان می باشد که با مقداری تاخیر خواهد بود که در نیروگاه بوشهر با به کارگیری dynamic compensator پاسخ آنها به افزایش و یا کاهش توان متناسب تر خواهد شد.در ادامه قلب راکتور بوشهر به وسیله کد MCNPX شبیه سازی می گردد و با نتایج حاصل از توزیع توان از تست های راه اندازی مقایسه می گردد.در این مرحله کل قلب راکتور به ۱۹ اربیت بر اساس در نظر گرفتن ورود میله های کنترل گروه ۱۰ تقسیم می گردد. در شکل۷ نحوه قرار گرفتن اربیت ها نشان داده شده است. نحوه شبیه سازی قلب راکتور به وسیله کد MCNPX در شکل ۸ نشان داده شده است. در این مرحله ضرایب K_q به دست آمده از نتایج تجربی (محاسبه شده به وسیله دتکتورهای SPND) با نتایج حاصل از کد MCNPX مقایسه گردیده است.در واقع با توجه به شکل۷ شار نوترون در هریک از مجتمع های سوخت محاسبه و بر متوسط شار نوترون تقسیم گردیده است. همچنین یکی از پارامترهای مهم که به صورت پیوسته در اتاق کنترل مانیتور می گردد تقارن شار نوترونی در داخل قلب راکتور می باشد . در این حالت که فقط میله های کنترل گروه ۱۰ در نظر گرفته شده اند باید مقادیر شار نوترون در هریک از گروه های اوربیت (شامل ۱۹ اوربیت)یکسان باشد. براساس شکل و محاسبات به دست آمده از خروجی کد MCNPX مقادیر شار نوترون در هریک از اوربیت ها یکسان و توزیع شار متقارن می باشد. پارامترهای دیگر که به صورت پیوسته بررسی می گردند شامل میزانDNBR ، K_V و شار حرارتی خطی می باشد. مجتمع سوخت به ۱۶ لایه تقسیم می گردد و نسبت توان حرارتی در هر لایه از مجتمع سوخت نسبت به متوسط شار

حرارتی در همان لایه مقایسه می گردد[6]. همچنین در مجتمع های سوخت داخل قلب که SPND ها قرار داده شده اند مانند سیستم مانیتورینگ نیروگاه بوشهر ۱۶ قسمت در نظر گرفته شد و مقدار شار در هریک از این قسمت ها محاسبه و با مقادیر نتایج تست های راه اندازی مقایسه گردید .





شکل ۷ –نحوه قرار گیری اوربیت های داخل قلب با توجه به ورود میله های کنترل ، شکل ۸– توزیع شار نوترون به وسیله شبیه سازی قلب راکتور بوشهر به وسیله کد MCNPX

بحث و نتیجه گیری

در این مقاله ابتدا روش های اندازه گیری شار نوترونی در داخل قلب راکتور نیروگاه بوشهر که به وسیله SPND ها و ION CHAMBER ها اندازه گیری می گردند بررسی گردید. در واقع نحوه قرار گیری سنسورهای SPND در داخل قلب،جنس مواد به کار رفته در سنسورها، نحوه پاسخ دهی(تاخیری و آنی) و شناسایی عدم تقارن شار نوترونی در نیروگاه بوشهر بررسی گردیدند. در واقع توجیه به کارگیری SPND های تاخیری در قلب راکتور بوشهر و چگونگی تصحیح پاسخ این نوع از دتکتورها به تغییرات توان در قلب راکتور تعیین گردید.در ادامه قلب راکتور بوشهر به وسیله کد MCNPX شبیه سازی گردید و مقدار پارامترهای نشان دهنده توزیع شار نوترونی در درون قلب با مقادیر به دست آمده در تست های راه اندازی نیروگاه بوشهر در توان ۱۰۰ درصد مقایسه گردید که نتایج نشان می دهد تطابق بالایی بین خروجی کد MCNPX و نتایج تست وجود دارد.

مراجع :

[1]- ADVANCED IN-CORE MONITORING SYSTEM FOR HIGH-POWER REACTORS, Mitin V.I., Alekseev A.N., Golovanov M.N., Zorin A.V. Kalinushkin A.E. Kovel A.I., Milto N.V., Musikhin A.M., Tikhonova N.V. Filatov V.P., RRC "Kurchatov Institute", Moscow, Russia-2015
[2] SPND DETECTORS RESPONSE AT THE CONTROL ROD DROP IN VVER-1000. MEASUREMENT AND MODELLING RESULTS, V. Mitin, N. Milto, M. Kuzmichev*), L. Shishkov, S. Tsyganov RRC "Kurchatov Institute" *) – SNIIP-ASKUR-2014
[3] Comparison Study On In-Core Neutron Detector for Online Neutron Flux Mapping Of Research Reactor and Power Reactor,
[4] Delayed Time Response Self-Powered Neutron Detectors for Reactor Control, A.K. Mishra and A.P. Tiwari Reactor Control Division,2015
[5] MEASUREMENT AND DETECTION OF RADIATION, Second Edition, Nicholas Tsoulfanidis University of Missouri-Rolla TaylPo,,hlr,1995
[6] BNPP1. (2015).Final safety analysis report, chapter 7, Inspection and control systems (I&C), revision 2, book1