



# بیست و یکمین کنفرانس هشتای ایران

۷ و ۸ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

## اندازه گیری تجربی و محاسبه کسر موثر نوترون های تاخیری ( $\beta_{eff}$ ) در راکتور MNSR اصفهان با استفاده از اختلال در راکتیویته

محمد، نامی نظری؛ مسعود، احمدی؛ اسماعیل، قهرمانی؛ جمشید، خورسندی؛ مهدی، رضوانی فرد؛ جواد، عبادتی؛ بهرام، سلیمانی؛

فرهاد، یزدان ستاد

سازمان انرژی اتمی ایران، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای،

### چکیده:

در این مقاله مقدار کسر موثر نوترون های تاخیری ( $\beta_{eff}$ ) برای راکتور MNSR اصفهان اندازه گیری و محاسبه شد. اندازه گیری این پارامتر با استفاده از ایجاد اختلال در راکتیویته راکتور به وسیله یک کپسول کادمیمی با راکتیویته مشخص انجام گرفت. میانگین مقدار اندازه گیری شده برای  $\beta_{eff}$ ،  $0.00802 \pm 0.00010$  به دست آمد. همچنین مقدار  $\beta_{eff}$  با استفاده از کد مونت کارلوی MCNPX محاسبه شد. مقدار این پارامتر با محاسبات شبیه سازی کد MCNPX،  $0.00798 \pm 0.00007$  محاسبه گردید. در هر دو مورد، نتایج توافق بسیار خوبی با مقدار ذکر شده در SAR راکتور که برابر  $0.00808$  است دارند.

**کلیدواژه:** راکتور MNSR، کسر موثر نوترون های تاخیری، کد MCNPX.

### مقدمه

یکی از پارامترهای سینتیکی راکتور، کسر موثر نوترون های تاخیری ( $\beta_{eff}$ ) است که به صورت نسبت تعداد نوترون های حرارتی تاخیری به تعداد کل نوترون های حرارتی تعریف می شود [۱]. این پارامتر که یکی از مهمترین پارامترها در کنترل راکتور به شمار می رود، معمولاً برای تجزیه و تحلیل گذارهای راکتور تحقیقاتی مورد استفاده قرار می گیرد [۲]. اندازه گیری  $\beta_{eff}$  به طور قابل ملاحظه ای دشوار است ولی می توان با استفاده از تقریب سینتیک نقطه ای راکتور و همچنین تقریب پرش آنی، این پارامتر را در راکتور MNSR با ایجاد اختلال در راکتیویته محاسبه کرد. در حالتی که راکتیویته صفر است، پریود تغییر توان راکتور بینهایت بوده و راکتور در حالت پایدار به کار خود ادامه می دهد. با اعمال یک راکتیویته مشخص به قلب راکتور شرایط پایدار بر هم خورده و شرایط گذار جایگزین می شود. در حالت گذار، نحوه تغییرات توان را می توان با تقریب خوبی به دو قسمت پرش آنی و قسمتی که داری شیب ثابتی است یعنی پریود پایدار تقسیم بندی کرد. پرش اولیه متاثر از نوترون های آنی و عمر متوسط آن بوده در حالی که تحول بعدی راکتور، که بلافاصله در امتداد پرش اولیه حاصل



# بیست و یکمین کنفرانس هسته‌ای ایران

۶ و ۷ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

می‌گردد، متاثر از حضور نوترون‌های تاخیری و به میدان آمدن آن‌هاست. در میان نوترون‌های تاخیری، اثر غالب با اولین گروه نوترون‌های تاخیری که دارای بیشترین نیمه عمر است تعیین می‌گردد. پریود پایدار راکتور نیز با استفاده از همین گروه تعریف می‌شود.

هدف این مقاله عرضه روشی تجربی برای اندازه‌گیری کسر موثر نوترون‌های تاخیری ( $\beta_{\text{eff}}$ ) در راکتور MNSR اصفهان است. آزمایش از طریق اعمال یک راکتیویته پله با استفاده از جاسازی یک رشته کادمیمی در کپسول پلی‌اتیلنی و سیستم ربیت پانوماتیک موجود در راکتور انجام گرفت.

## روش کار

جهت تعیین کسر موثر نوترون‌های تاخیری می‌توان از تئوری پرش آنی در سینتیک راکتور سود جست. در این روش با اعمال ناگهانی یک راکتیویته از طریق کپسول کادمیمی به داخل قلب راکتور، توان راکتور تغییر می‌یابد. اما همان طور که ذکر شد، تغییر توان شامل دو مرحله قابل تمیز از یکدیگر است بدین معنی که ابتدا یک کاهش (یا افزایش در صورت اعمال راکتیویته مثبت) سریع و آنی در قدرت مشاهده خواهد شد که عمدتاً متاثر از اثر نوترون‌های آنی بوده و سپس تغییرات با شیب کمتر که ناشی از عملکرد نوترون‌های تاخیری می‌باشد، ظاهر می‌شود. با توجه به اینکه رفتار تابع زمان توان راکتور، درون قلب بسیار پیچیده است لذا برای ساده‌سازی مطلب فرض‌هایی چون مستقل از مکان بودن توزیع نوترون‌های درون قلب راکتور و اینکه هر نیا هسته نوترون تاخیری فقط با یک نوترون واپاشی می‌کند، را در نظر می‌گیریم. با توجه به این ساده‌سازی‌ها و با استفاده از تقریب سینتیک نقطه‌ای راکتور، رفتار وابستگی زمانی توان راکتور و جمعیت هسته‌های مولد نوترون‌ها (آن‌ی و تاخیری) را می‌توان با مجموعه معادلات دیفرانسیلی زیر توصیف کرد [۱]:

$$\frac{dP(t)}{dt} = \frac{\rho - \beta}{\Lambda} P(t) + \sum_{i=1}^6 \lambda_i C_i \quad (1)$$

$$\frac{dC_i(t)}{dt} = \frac{\beta_i}{\Lambda} P(t) - \lambda_i C_i \quad , \quad i = 1, 2, \dots, 6 \quad (2)$$

که در آن  $P(t)$  توان راکتور در لحظه  $t$ ،  $\rho$  راکتیویته،  $\beta$  کسر موثر نوترون‌های تاخیری،  $\Lambda$  زمان میانگین تولید نوترون،  $\lambda_i$  ثابت واپاشی نیا هسته گروه  $i$ ام و  $C_i(t)$  چگالی نیا هسته‌های گروه  $i$ ام در هر لحظه است. معادلات (۱) و (۲) تشکیل یک دستگاه معادلات دیفرانسیل مرتبه اول را می‌دهند. با



# بیست و یکمین کنفرانس هسته‌ای ایران

۶ و ۷ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

فرض راکتیویته پله و حل این دستگاه با توجه به این واقعیت که در لحظات اولیه پس از گذار، تغییرات توان تقریباً برابر صفر است، داریم:

$$0 \approx [\rho - \beta]P(t) + \Lambda \sum_{i=1}^6 \lambda_i C_i \quad (3)$$

لذا،

$$\begin{cases} 0 \approx [\rho_0 - \beta]P_0 + \Lambda \sum_{i=1}^6 \lambda_i C_i \\ 0 \approx [\rho_1 - \beta]P_1 + \Lambda \sum_{i=1}^6 \lambda_i C_i \end{cases} \quad (4)$$

با در نظر گرفتن  $P_0$  به عنوان توان راکتور قبل از اعمال راکتیویته (مثبت یا منفی) از طرق کپسول کادمیمی با استفاده از سیستم ریت و  $P_1$  قدرت شبه پایدار<sup>۱</sup> راکتور بلافاصله پس از اعمال راکتیویته و نیز با توجه به اینکه  $\rho_0 = 0$  و  $\rho_1 = \pm \delta\rho$  است در این صورت خواهیم داشت:

$$\frac{P_1}{P_0} \cong \frac{\beta - 0}{\beta - (\pm \delta\rho)} \Rightarrow \beta = \frac{P_1}{P_1 - P_0} (\pm \delta\rho) \quad (5)$$

که در آن علامت منفی مربوط به اعمال راکتیویته منفی با فرستادن کپسول کادمیمی به درون قلب است و علامت مثبت مربوط به اعمال راکتیویته مثبت با خارج کردن کپسول از قلب می‌باشد. بنابراین در اثر اعمال یک راکتیویته پله و با داشتن توان راکتور قبل و بعد از اعمال راکتیویته، کسر موثر نوترون‌های تاخیری ( $\beta_{\text{eff}}$ ) قابل محاسبه است.

اندازه‌گیری‌ها با استفاده از کپسول‌های کادمیمی کالیبره شده با ارزش راکتیویته‌ی  $1/0.4$  mk و  $1/0.4$  mk در توان‌های متفاوت راکتور انجام شد. سطح توان اولیه راکتور حدود  $0.05\%$  توان اسمی ( $1012 \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$ ) در نظر گرفته شد. در ابتدا راکتور با استفاده از مد خودکار شروع به کار کرد و سپس به مد دستی تغییر داده شد. سپس اطلاعات پیوسته توان راکتور پس از اعمال راکتیویته از طرق جاذب کادمیمی به داخل راکتور، ثبت گردید. در هر آزمایش توان راکتور در دو مرحله، یک بار بلافاصله با فرستادن جاذب کادمیمی به وسیله سیستم ریت پانوماتیک به درون سایت پرتودهی داخلی و بار دیگر بلافاصله با خارج کردن جاذب کادمیمی ثبت شد.

<sup>۱</sup>Quasi-Stable



# بیست و یکمین کنفرانس هشتای ایران

۷ و ۶ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

همچنین مقدار کسر موثر نوترون‌های تاخیری با استفاده از یک مدل سه بعدی نوترونیک طراحی شده با کد مونت کارلوی MCNPX محاسبه گردید. این کار با دو بار اجرای MCNPX یک بار با تعریف کارت فیزیک TOTNU در حالت روشن و با دیگر بدون این کارت و استفاده از رابطه زیر تعیین شد [۳].

$$\beta_{eff} = \frac{K_{yes} - K_{no}}{K_{yes} K_{no}} (۶)$$

که در آن،  $K_{yes}$  ضریب تکثیر موثر ( $K_{eff}$ ) در حالتی است که کارت فیزیک TOTNU روشن است. در این حالت در محاسبه  $K_{eff}$  هم نوترون‌های آنی و نوترون‌های تاخیری در نظر گرفته می‌شوند.  $K_{no}$  ضریب تکثیر موثر در حالت خاموش بودن این کارت در فایل ورودی MCNPX است که در این حالت فقط نوترون‌های آنی در محاسبه  $K_{eff}$  دخیل هستند.

## نتایج

مقدار کسر موثر نوترون‌های تاخیری ( $\beta_{eff}$ ) به ازای اعمال راکتیویته‌های مختلف در جدول (۱) آمده است. همچنین مقدار محاسبه شده برای  $\beta_{eff}$  با استفاده از رابطه (۶)  $0.00007 \pm 0.00798$  به دست آمد که در مقایسه با مقدار ذکر شده در SAR راکتور که برابر  $0.00808$  است [۴]، توافق خوبی دارد. میانگین مقادیر محاسبه شده برای کسر موثر نوترون‌های تاخیری به ازای اعمال راکتیویته‌های مختلف در قلب راکتور حدود  $4/7 \pm 0.00802$  است که توافق بسیار خوبی با مقدار ذکر شده در SAR راکتور دارد.

## بحث و نتیجه گیری

کسر موثر نوترون‌های تاخیری به عنوان یکی از پارامترهای کنترلی در راکتور محسوب می‌شود. در این مقاله روشی برای اندازه‌گیری تجربی این پارامتر عرضه شد. در این روش از تقریب سینتیک نقطه‌ای راکتور و تقریب پرش آنی استفاده گردید. اندازه‌گیری پارامتر  $\beta_{eff}$  از طریق ایجاد اختلال در راکتیویته قلب با استفاده از یک کپسول پلی اتیلن حاوی کادمیم انجام شد. مقدار میانگین محاسبه شده برای کسر موثر نوترون‌های تاخیری  $10\% \pm 0.00802$  به دست آمد. همچنین مقدار این پارامتر با شبیه سازی مونت کارلوی MCNPX و استفاده از یک مدل نوترونیک سه بعدی برای راکتور MNSR،  $0.00007 \pm 0.00798$  محاسبه شد. مقادیر اندازه‌گیری شده از طریق آزمایش و محاسبه شده با کد MCNPX، توافق بسیار خوبی با مقدار ذکر شده در SAR راکتور که برابر  $0.00808$  است، دارند.



# بیست و یکمین کنفرانس هسته‌ای ایران

۶ و ۷ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

جدول (۱): مقادیر اندازه گیری شده  $\beta_{eff}$  به ازای اعمال راکتیویته های مختلف.

$\beta_{eff}$	توان ثانویه [ $\times 10^8 \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$ ] ( $P_1$ )	توان اولیه [ $\times 10^8 \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$ ] ( $P_0$ )	راکتیویته ( $\delta\rho$ ) [mk]
۰/۰۰۷۷۱	۴/۵۲	۵/۱۳	-۱/۰۴
۰/۰۰۷۵۳	۴/۴۲	۵/۰۳	-۱/۰۴
۰/۰۰۷۹۹	۶/۵۹	۷/۰۶	-۰/۵۷
۰/۰۰۸۲۶	۵/۷۲	۵/۰۰	+۱/۰۴
۰/۰۰۷۷۸	۵/۷۶	۴/۹۹	+۱/۰۴
۰/۰۰۸۹۰	۷/۵۰	۷/۰۲	+۰/۵۷

## مراجع

- [1] Lamarsh, John R. "Introduction to Nuclear Reactor Theory". Wesley Publishing Company, New York University, (1972)
- [2] Khattab, K. Sulieman. "Monte Carlo simulation of core physics parameters of the Syrian MNSR reactor". Annals of Nuclear Energy. 38, 1211-1213, (2011).
- [3] Hainoun, A. Khamis, I. "Determination of neutron generation time in miniature neutron source reactor by measurement of neutronics transfer function". Nuclear Engineering and Design, 195, 299-305, (2000).
- [4] "Esfahan MNSR Safety Analysis Report". Reactors Research and Development School & Esfahan Health Physics Department. (2014).