

## اندازه گیری کسر نوترونهاي تاخيري در رآكتورهاي آب سنگين

## منوچهر بهفرنيا

سازمان انرژی اتمی، پژوهشگاه علوم و فنون هسته ای، پژوهشکده تحقیقات و توسعه راکتورها و شتاب دهنده ها

## چکیده:

برای انجام این آزمایش رآکتور را در چند حالت زیر بحرانی که هر یک متناظر با یک ارتفاع خاص است قرار دادیم. سپس متناظر با هر حالت چشمه پالسی نوترون را به داخل رآکتور تزریق کردیم. با آنالیز منحنی های بدست آمده ثابت تلاشی نوترونهاي آني را برای هر حالت بدست آوردیم. نهایتا با برون یابی مقادیر اندازه گیری شده ثابت تلاشی نوترونهاي آني در حالت بحرانی بدست می آید. از آنجایی که  $\beta_{eff} = \lambda \times a_{cr}$ ، لذا مقدار آن بقرار زیر محاسبه می شود:

آشکار ساز	$\beta_{eff}$
$^3\text{He}$	$7/5288 \times 10^{-3}$
$\text{BF}_3$	$7/4577 \times 10^{-3}$

واژه های کلیدی: کسر نوترونهاي تاخيري، زمان تولید نسل نوترون، ثابت تلاشی نوترونهاي آني، ارتفاع بحرانی

## مقدمه:

اینکه کیفیت داده های هسته ای در چه حدی است، بایستی گفت هنوز زمینه کاری مورد توجه متخصصین است. به هر منظوری که از داده های هسته ای استفاده شود، نظیر ایمنی در بحرانیات، طراحی حفاظ، محاسبات مربوط به حالت های گذرا، این داده ها بایستی دارای اعتبار باشند. این مسئله تنها با مقایسه نتایج بدست آمده از محاسبات مبتنی بر این داده های هسته ای با نتایج تجربی تحقق می یابد. به عنوان مثال برای ایمنی در بحرانیات بسیاری از این نتایج آزمایشگاهی مورد ارزیابی قرار گرفته که نتیجتا منجر به تولید هزاران مشخصه محک خورده، شده است [۱]. همینطور برای محاسبات طراحی حفاظ میتوان به مراجع [۲] و [۳] رجوع کرد. در مورد داده های نوترونهاي تاخيري سیستم های محک شده به مراتب کمتر است.

اخیرا آزمایشهایی در سیستمهای سریع جهت اندازه گیری کسر موثر نوترونهاي تاخيري  $\beta_{eff}$  انجام شده است [۴]. در مورد سیستمهای حرارتی نیز یک باز نگری در مورد آزمایشات قدیمی  $\beta_{eff}$  گزارش شده است [۵]. از این میان باز هم گزارشات  $\beta_{eff}$  در مورد رآکتورهای آب سنگین کمتر است. در ادامه کارهای قبلی در این مقاله روش اندازه گیری  $\beta_{eff}$  با استفاده از چشمه پالسی نوترون در مورد رآکتور آب سنگین اصفهان با سوخت اورانیوم طبیعی ارائه شده است.

## روش کار:

تجهیزات به کار برده شده در این آزمایش عبارتند از:

نوترون ژنراتور ، آشکار ساز نوترون از نوع  $BF_3$  و  $^3He$  ، مدار تقویت کننده و تفکیک کننده ، سیستم تحلیلگر چند کاناله MCS .

دستورالعمل آزمایش به قرار زیر می باشد:

۱. رآکتور HWZPR را در اولین ارتفاع زیر بحرانی یعنی ۱۶۴۱ میلی متر متناظر با  $k_{eff} = 0.9936$

جهت اندازه گیری تنظیم می کنیم. رآکتور اکنون در ۵۰ میلی متر زیر ارتفاع بحرانی قرار دارد.

۲. با استفاده از نوترون ژنراتور، بیم نوترونی را به داخل رآکتور تزریق می کنیم.

۳. در مرحله بعد، ۷ میلی متر آب اضافه کرده و در ارتفاع زیر بحرانی جدید یعنی ۱۶۴۸ میلی متر

مرحله ۲ را تکرار می کنیم

۴. مراحل ۳ و ۲ را برای چهار ارتفاع دیگر یعنی ۱۶۵۵ ، ۱۶۶۲ ، ۱۶۶۹ و ۱۶۷۶ تکرار می کنیم.

در روش چشمه پالسی نوترون ، بیم نوترونی به صورت پالس به داخل رآکتور تزریق می شود. سپس پاسخ زمانی نوترونهاي حرارتی در رآکتور از طریق MCS به دست می آید. جهت ساده سازی محاسبات، نوترونهاي تاخیری عموماً تک گروهی در نظر گرفته می شوند به طوری که می توان پاسخ زمانی را با رابطه کلی زیر نشان داد:

$$n(t) = A_0 \exp(\omega_0 t) + A_1 \exp(\omega_1 t) \quad (1)$$

در رابطه بالا  $A_0$  و  $A_1$  به ترتیب دامنه های نوترونهاي آنی و تاخیری و  $\omega_0$  و  $\omega_1$  ریشه های معادله این آور (Inhour) بوده ، که به ترتیب متناظر با نوترونهاي آنی و تاخیری هستند. در شکل (۱) پاسخ زمانی مرحله آخر به طور نمونه نشان داده شده است. اگر از قسمت جلوی منحنی صرف نظر کرده و تنها قسمت میرای منحنی را در نظر بگیریم ، آنگاه می توان با استفاده از روش برازش حداقل مربعات، داده حاصل را به رابطه (۱) برازش نموده و  $\omega_0$  و  $\omega_1$  را به دست آورد. معادله Inhour به فرم زیر را در نظر می گیریم:

$$P \left( P - \frac{\rho - \beta}{\Lambda} - \frac{1}{\Lambda} \sum_{i=1}^{15} \frac{\lambda_i \beta_i}{P + \lambda_i} \right) = 0 \quad (2)$$

معادله فوق دارای ۱۶ ریشه غیر صفر و یک ریشه صفر می باشد. با جایگزین کردن  $\omega_j$  در معادله (۲) ، رابطه بالا به صورت زیر در می آید:

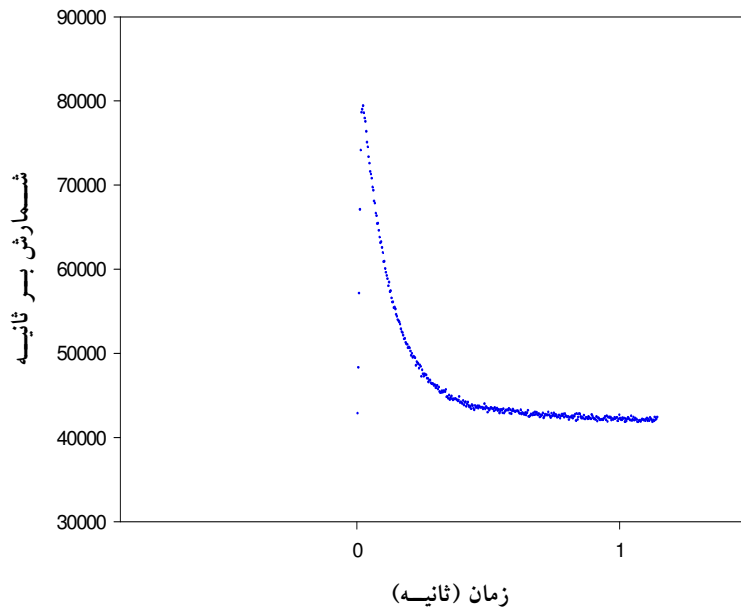
$$\omega_j = \frac{\rho - \beta}{\Lambda} + \frac{1}{\Lambda} \sum_{i=1}^{15} \frac{\lambda_i \beta_i}{\omega_j + \lambda_i} \quad (3)$$

برای  $j=0$  خواهیم داشت  $\omega_j = \omega_0$  که متناظر با نوترونهاي آنی است. اگر ثابت تلاشی نوترونهاي آنی را

به صورت  $\alpha = \frac{\rho - \beta}{\Lambda}$  تعریف کنیم آنگاه برای ریشه  $\omega_0$  از نوترونهاي آنی معادله (۳) به صورت زیر در

می آید:

$$\omega_0 = \alpha + \frac{1}{\Lambda} \sum_{i=1}^{15} \frac{\lambda_i \beta_i}{\omega_0 + \lambda_i} \quad (4)$$



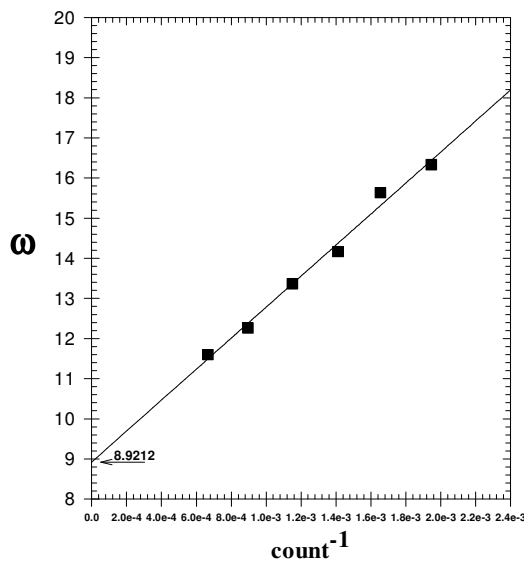
شکل (۱): پاسخ گذرای جمعیت نوترونی بعد از اعمال پالس نوترونی

آزمایش چشمه پالس نوترونی برای شش ارتفاع زیربحرانی نام برده شده در فوق انجام شد و برای هر ارتفاع،  $\omega_0$  متناظر با نوترونهای آنی اندازه گیری شد. نتایج در رابطه با آشکارساز  $^3\text{He}$  در جدول (۱)، گردآوری شده است.

با برازش خطی مقادیر  $\omega_0$  مقدار  $\omega_{0-cr}$  برابر  $۸/۹۲۱۲$  بدست می آید. این مقدار در شکل (۲)، نشان داده شده است. با جایگزینی مقدار  $\omega_{0-cr}$  در رابطه (۴)، مقدار  $\alpha_{cr}$  برابر با  $۸/۵۱۶۷$  بدست می آید.

جدول ۱: مقادیر  $\omega_0$  اندازه گیری شده با آشکار ساز  $^3\text{He}$  در رابطه با ارتفاع های مختلف زیر بحرانی

ارتفاع(میلی متر)	شمارش متوسط در ثانیه	$\omega_0$
۱۶۴۱	۵۱۴	۱۶/۳۳
۱۶۴۸	۶۰۴/۳	۱۵/۶۳
۱۶۵۵	۷۰۸/۶	۱۴/۱۶
۱۶۶۲	۸۶۸/۹	۱۳/۳۶
۱۶۶۹	۱۱۱۷/۵	۱۲/۲۶
۱۶۷۶	۱۵۰۲/۳	۱۱/۶



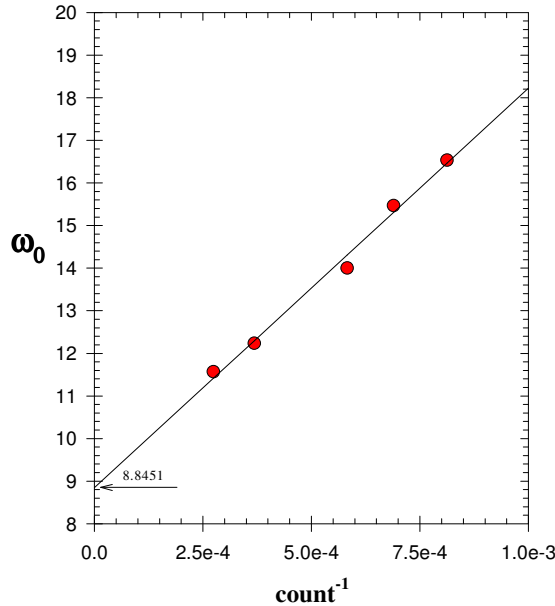
شکل ۲: تغییرات مشخصه نوترونیهای آبی بر حسب معکوس شمارش متوسط نوترونها

نتایج در رابطه با آشکار ساز  $BF_3$  در جدول ۲، نشان داده شده است:

جدول ۲: مقادیر  $\omega_0$  اندازه گیری شده با آشکار ساز  $BF_3$  در رابطه با ارتفاع های مختلف زیر بحرانی

ارتفاع(میلی متر)	شمارش متوسط در ثانیه	$\omega_0$
۱۶۴۱	۱۲۳۰/۲	۱۶/۵۳۳۳
۱۶۴۸	۱۴۵۰/۵۰	۱۵/۴۶۶۷
۱۶۵۵	۱۷۱۶/۴	۱۴
۱۶۶۹	۲۷۱۵/۲	۱۲/۲۳۳۳
۱۶۷۶	۳۶۴۵/۲	۱۱/۵۶۶۷

با برآزش خطی مقادیر  $\omega_0$  مقدار  $\omega_{0-cr}$  در رابطه با آشکار ساز  $BF_3$  برابر  $۸/۸۴۵۱$  بدست می آید. این مقدار در شکل ۳، نشان داده شده است.



شکل ۳: تغییرات مشخصه نوترونهاي آني بر حسب معکوس شمارش متوسط جمعیت نوترونی

با جایگزینی مقدار  $\omega_{0-cr}$  در رابطه ۴، مقدار  $\alpha_{cr}$  در رابطه با آشکار ساز  $BF_3$  برابر  $۸/۴۳۶۳$  بدست می آید.

برای مقایسه بهتر، چهار مقدار اخیر در رابطه با دو آشکار ساز، در جدول ۳ نشان داده شده اند:

جدول ۳: مقادیر اندازه گیری شده  $\beta_{eff}$  توسط دو آشکار ساز  $BF_3$  و  $^3He$

	$\omega_{0-cr}$	$\alpha_{cr}$	$\beta_{eff}$
$^3He$	۸/۹۲۱۲	۸/۵۱۶۷	$۷/۵۲۸۸ \times 10^{-3}$
$BF_3$	۸/۸۴۵۱	۸/۴۳۶۳	$۷/۴۵۷۷ \times 10^{-3}$

از آنجاییکه  $\alpha_{cr} = \frac{\beta_{eff}}{\Lambda}$  پس با فرض  $\Lambda = 0.884 * 10^{-3}$  که از داده های هسته ای است و با استفاده از رابطه  $\beta_{eff} = \alpha_{cr} * \Lambda$  مقدار  $\beta_{eff}$  طبق جدول فوق بدست می آید.

### بحث و نتیجه گیری :

در طراحی تفصیلی راکتور صفر قدرت آب سنگین پارامترهای سینتیکی به قرار زیر انتخاب شده اند:

زمان تولید نسل نوترون  $\Lambda = 0.884 * 10^{-3}$ ، ضریب مؤثر نوترونهاي تاخیری  $\eta_D = 0.9772$ ،

ضریب مؤثر فوتونوترونهاي تاخیری  $\eta_\gamma = 0.2922$ ، کسر حقیقی نوترونهاي تاخیری  $\beta_D = 0.0065$ ،

کسر موثر نوترونهای تاخیری  $\beta_{\text{Def}} = 0.0063521$  ، کسر کلی حقیقی با احتساب گاما  $\beta = 0.0075218$  ، کسر کلی موثر با احتساب گاما  $\beta_{\text{eff}} = 0.0066507$  .

همانطور که دیده می شود بین مقدار تئوری و آنچه از طریق آزمایش بدست آمده است تقریباً، ۱۲٪ اختلاف است. از طرفی برای رآکتور مشابه از کشور چین مقدار  $\alpha_{cr} = 11.05$  بر اساس طبیعت آماری زنجیره نوترون به دست آمده است و مقدار  $\beta_{\text{eff}} = 7.366e-3$  گزارش شده است. که با مقدار بدست آمده از آزمایش ما ۱/۷٪ اختلاف دارد. البته آزمایش عاری از خطا نمی باشد ولی بطور کلی منابع خطا عبارتند از:

- خطای سیستماتیک دستگاههای اندازه گیری
  - اندازه گیری دقیق مقدار زمینه که در مورد رآکتورهای آب سنگین کار بسیار دشواری است
  - محل قرار گرفتن آشکارسازها
  - انتخاب پارامترهای آزمایش از قبیل فرکانس و پهنای پالس نوترونی، تعداد کانالها و پهنای کانال در سیستم تحلیل گر چند کاناله
- در پایان بایستی گفت هنوز تحقیق در معیار کردن داده های هسته ای و پیدا کردن روشهای آزمایشگاهی در کاهش اختلاف بین مقادیر تئوری و آزمایش از زمینه های مورد علاقه محققین است.

#### مراجع:

1. J. Blair Briggs (Ed.), *International Handbook of Evaluated Criticality Safety Benchmark Experiments*, NEA/NSC/DOC(95)03/I, Nuclear Energy Agency, Paris (September 2003 Edition)
2. [www.nea.fr/html/science/shielding](http://www.nea.fr/html/science/shielding)
3. [www-nds.iaea.or.at/fendl/fen-bench.htm](http://www-nds.iaea.or.at/fendl/fen-bench.htm)
4. S. Okajima, T. Sakurai, J.F. Lebrat, V.Z. Averlant, and M. Martini, *Summary on International Benchmark Experiments for Effective Delayed Neutron Fraction*, Progress in Nuclear Energy, **41** (2002) 285–301
5. K. Nakajima, *Re-evaluation of the Effective Delayed Neutron Fraction Measured by the Substitution Technique for a Light Water Moderated Low-Enriched Uranium Core*, J. Nucl. Sci. Technol. **38** (2001) 1120–1125
- 6 -“REACTOR PHYSICS CONSTANTS (ANL-5800)”, Prepared by Argonne National Laboratory. Operated by The University of Chicago