

محاسبه ضریب تنظیم<sup>۱</sup> رآکتور WWER-1000 برای محاسبه جابه جایی محفظه قلب

ناصر وثوقی\* - وحید فرهنگ فلاح

دانشگاه صنعتی شریف، دانشکده مهندسی انرژی

## چکیده:

در این پژوهش ضریب تنظیم رآکتور WWER-1000 به روش تحلیلی محاسبه شده است. برای محاسبه ضریب تنظیم، پاسخ آشکار ساز خارج قلب در حالت مرجع و اختلال، با استفاده از شکل جهت های گسسته معادله ترابرد و با استفاده از روش های مستقیم و الحاقی محاسبه شده است. در روش مستقیم توزیع مکانی چشمه ثابت، توزیع مکانی قدرت در قلب رآکتور و توزیع انرژی آن طیف شکافت در نظر گرفته شده است. در روش الحاقی، مکان چشمه ثابت (چشمه الحاقی) در محل آشکار ساز خارج قلب و توزیع وابسته به انرژی آن سطح مقطع ماکروسکوپی آشکار ساز در نظر گرفته شده است. مقایسه نتایج بدست آمده با نتایج مرجع [۱]، توافق خوبی را نشان می دهد. واژه های کلیدی: قلب رآکتور، ضریب تنظیم، محفظه قلب، آشکار سازهای خارج قلب، روش الحاقی، روش مستقیم

## مقدمه:

روشی که برای محاسبه میزان تکانش محفظه قلب در رآکتورهای آبی استفاده می شود بر اساس آنالیز نوین سیگنال های آشکار سازهای قدرت خارج قلب است [۱]. در این روش با استفاده از دو آشکار ساز مقابل هم در دو سوی قلب و آنالیز داده های طیف توان بدست آمده از سیگنال آنها، می توان مولفه های مشترک (ناشی از تکانش محفظه قلب) را از مولفه های غیر مشترک سیگنال نوین بیرون کشید. سپس میزان تکانش محفظه قلب را می توان با اعمال یک ضریب تنظیم مناسب که پاسخ آشکار ساز را به میزان تکانش تبدیل می کند، تعیین کرد. برای مثال اگر  $(\Delta D/D)$  نشان دهنده کسر نسبی پاسخ آشکار ساز ناشی از تکانش نسبی محفظه قلب باشد و SF (ضریب تنظیم) در واحد کسر نسبی پاسخ آشکار ساز به ازای جابه جایی  $10^{-3} \times$  ۲/۵۴ سانتیمتر باشد، تکانش  $(\Delta x)$  برابر خواهد بود با:

$$(\Delta x) = (1/SF)(\Delta D/D) \quad (1)$$

بعلاوه، برای تکانش های کوچک (کمتر از ۱/۲۷ سانتیمتر)، چنانچه نشان خواهیم داد، SF را می توان ثابت و مستقل از تکانش واقعی فرض کرد. تا کنون داده های متعددی با استفاده از روش های مختلف برای محاسبه ضریب تنظیم رآکتورهای آبی تحت فشار (PWR) منتشر شده است. [۱]

<sup>1</sup> Scaling Factor (SF)

## روش کار:

در روش مستقیم توزیع مکانی چشمه ثابت از توزیع مکانی قدرت در قلب رآکتور WWER-1000 که از شبیه سازی قلب رآکتور توسط کد MCNP در شرایط گرم قدرت نامی، با استفاده از سطح مقاطع تولید شده توسط کد NJOY-97، بدست می آید، محاسبه می شود. توزیع وابسته به انرژی چشمه ثابت نیز طیف شکافت در نظر گرفته می شود. در روش الحاقی، مکان چشمه ثابت در محل آشکارساز خارج قلب (در مرز حفاظ بیولوژیکی) و توزیع وابسته به انرژی آن سطح مقطع ماکروسکوپی اندرکنش  $^3\text{He}(n,p)^3\text{H}$  در نظر گرفته می شود. برای محاسبه پاسخ آشکارساز برای چشمه توزیع شده در درون قلب و آشکارساز قرارگرفته در مرز حفاظ بیولوژیکی (و یا بالعکس) نیاز به محاسبه شار بر روی آشکارساز مستقیم (KNK-14) و شار الحاقی بر روی آشکارساز الحاقی (قلب) داریم. به علت وجود نواحی با چگالی کم در بین قلب رآکتور و مرز حفاظ بیولوژیکی و همچنین غیر همسانگرد بودن پراکندگی ها در بین این دو ناحیه معادله پخش معتبر نیست لذا باید از محاسبات الحاقی برای محاسبه شار و شار الحاقی استفاده کرد. در محاسبات انجام شده برای یافتن شار و شار الحاقی از کدهای ترابرد یک بعدی ANISN و دوبعدی DOT که معادله ترابرد را به روش جهت های مجزا حل می کنند استفاده شده است.

## محاسبه توزیع چگالی قدرت در قلب رآکتور WWER-1000 با استفاده از کد MCNP

در کد MCNP قدرت تولید شده در مجتمع های سوخت (از طریق محاسبه مجموع قدرت تولید شده در هر میله سوخت در هر مجتمع) را می توان با کارت چند منظوره بدست آورد و با تقسیم نتیجه بر حجم آن مجتمع سوخت (در کارت SDn) چگالی قدرت تولید شده توسط آن مجتمع را محاسبه کرد. برای این کار قلب رآکتور مطابق شکل (۱) در جهت شعاعی به ۸ ناحیه تقسیم شده است و چگالی قدرت در هر یک از نواحی بدست آورده شده است. در نهایت با چگالی قدرت محاسبه شده برای هر یک از ۸ ناحیه شکل (۱) و جایگذاری آن در رابطه (۲) جمله چشمه برای حل معادله ترابرد مستقیم توسط کدهای ANISN, DOT محاسبه می شود.

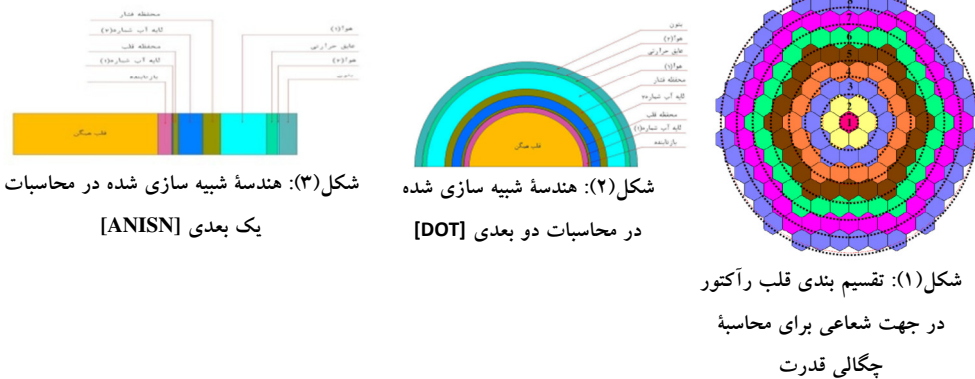
$$S_N^g \left( \frac{\text{neutrons}}{\text{cm}^3 \cdot \text{sec}} \right) = 3.1 \times 10^{10} \bar{v} \chi_g \bar{P} \left( \frac{\text{wat}}{\text{cm}^3} \right) \quad (2)$$

در رابطه (۲)،  $\bar{P}$  چگالی قدرت متوسط در هر یک از نواحی شکل (۱)،  $\bar{v}$  متوسط تعداد نوترون های حاصل از شکافت و  $\chi_g$  از انتگرال بر روی طیف وات<sup>۲</sup> بر روی بازه های انرژی نوترون در کتابخانه ۱۳ گروهی IRAN4.LIB (۷ گروه نوترون، ۶ گروه گاما) بدست می آید.

<sup>2</sup> Watt spectrum

### روش های مستقیم و الحاقی برای یافتن پاسخ آشکارساز

پاسخ آشکارساز به صورت رابطه (۳) تعریف می شود:



$$D = \int_{V_d} \vec{dr} \int_{\text{all } E} dE \int_{\text{all } \vec{\Omega}} d\vec{\Omega} \sigma_d(\vec{r}, E) \phi(\vec{r}, E, \vec{\Omega}) \quad (3)$$

و شکل عملگری معادله ترابرد مستقیم به صورت رابطه (۴) است.

$$H \phi_g = q_g \quad (4)$$

همچنین معادله الحاقی غیر همگن با در نظر گرفتن سطح مقطع وابسته به انرژی پاسخ آشکارساز  $\sigma_{d,g}$  به عنوان چشمه الحاقی به صورت رابطه (۵) است.

$$H^+ \phi_g^+ = \sigma_{d,g} \quad (5)$$

با ضرب طرفین روابط (۴) و (۵) به ترتیب در  $\phi_g^+$  و  $\phi_g$  و تفریق دو رابطه بدست آمده و انتگرال گیری از معادله حاصل بر روی تمامی متغیرهای مستقل و با توجه به تعریف عملگر الحاقی به صورت زیر:

$$\langle \phi_g^+, H \phi_g \rangle = \langle \phi_g, H^+ \phi_g^+ \rangle \quad (6)$$

به رابطه (۷) خواهیم رسید.

$$D = \langle \phi_g \sigma_{d,g} \rangle = \langle \phi_g^+ q_g \rangle \quad (7)$$

رابطه (۷) شکل عملگری پاسخ آشکارساز است.  $\langle \rangle$  به معنی انتگرال گیری بر روی تمامی متغیرهای مستقل است.

### محاسبه کسر نسبی پاسخ آشکارساز با روش مستقیم

در روش مستقیم معادله ترابرد مستقیم در هندسه استوانه ای یک بعدی (ANISN) و هندسه  $(R, \theta)$  دو بعدی (DOT) با همگن کردن قلب رآکتور و با استفاده از چشمه ثابت وابسته به مکان و انرژی حاصل از

معادله (۲) حل شده است. پاسخ آشکارساز خارج قلب وابسته به اندرکنش نوترون های حرارتی است و نقش پرتوهای گاما در پاسخ آشکارساز خارج قلب کمتر از ۱٪ است [۳] لذا از سهم پرتوهای گاما در پاسخ آشکارساز صرف نظر شده است. در نهایت با استفاده از شار مستقیم به دست آمده و با استفاده از سطح مقطع ماکروسکوپی وابسته به انرژی اندرکنش  ${}^3\text{He}(n,p){}^3\text{H}$  (۷ گروهی) در مکان آشکارساز خارج قلب، با استفاده از رابطه (۸) پاسخ آشکارساز برای حالت مرجع و اختلال محاسبه شده است.

$$D = \int_{V_d, \forall E} \phi(x, y, z, E) \sigma_d(x, y, z, E) dx dy dz dE \approx \sum_{\substack{\Delta V_i \in V_d \\ g=1,G}} \phi_{g,i} \sigma_{d, g,i} \Delta V_i \quad (8)$$

$V_d$  حجم آشکارساز (سانتیمتر مکعب)  
 $\phi(x, y, z, E)$  شار وابسته به مکان و انرژی در محل آشکارساز (در مرز حفاظ بیولوژیکی)  
 $\sigma_d(x, y, z, E)$  سطح مقطع ماکروسکوپی وابسته به مکان و انرژی آشکارساز He-3 (بر سانتیمتر)  
 $\Delta V_i$  حجم سلول i ام آشکارساز (سانتیمتر مکعب)  
 سپس با استفاده از رابطه زیر ضریب تنظیم برای جابه جایی های کوچک محفظه قلب از روش مستقیم محاسبه می شود.

$$SF = \left| \frac{\langle \sigma_d \phi' \rangle - \langle \sigma_d \phi_R \rangle}{(\Delta x) \langle \sigma_d \phi_R \rangle} \right| \quad (9)$$

در رابطه (۹) علامت پریم به معنای اختلال (ناشی از تکانش محفظه قلب) است.

### محاسبه کسر نسبی پاسخ آشکارساز با روش الحاقی

در روش الحاقی معادله ترابرد الحاقی با استفاده از چشمه الحاقی (از انتگرال گیری سطح مقطع ماکروسکوپی وابسته به انرژی اندرکنش  ${}^3\text{He}(n,p){}^3\text{H}$  آشکارساز خارج قلب بر روی بازه های انرژی کتابخانه IRAN4.LIB حل می شود. از حل این معادله تابع اهمیت در سراسر فضای فاز (که بیانگر اهمیت نقاط مختلف در پاسخ آشکارساز He-3 است) بدست می آید. در نهایت پاسخ آشکارساز با استفاده از تابع اهمیت بدست آمده و چشمه مستقیم از رابطه (۱۰) محاسبه می شود.

$$D = \int_{V_q, \forall E} \phi_d^+(x', y', z', E) q(x', y', z', E) dx' dy' dz' dE \approx \sum_{\substack{\Delta V_i \in V_q \\ g=1,G}} \phi_{d, g,i}^+ q_{g,i} \Delta V_i \quad (10)$$

$V_q$  حجم چشمه (سانتیمتر مکعب)  
 $\phi_d^+(x', y', z', E)$  شار الحاقی وابسته به مکان و انرژی (بر روی ناحیه قلب رآکتور)

$$q(x', y', z', E)$$

چشمه مستقیم وابسته به مکان و انرژی (سانتیمتر مکعب X ثانیه)

حجم سلول  $i$  ام درون قلب راکتور (سانتیمتر مکعب) [قلب راکتور به ۵۳ مش شعاعی تقسیم شده است]

در نهایت با استفاده از رابطه (۱۱) ضریب تنظیم برای جابه جایی های کوچک محفظه قلب از روش الحاقی محاسبه می شود.

$$SF = \left| \frac{\langle \phi^* S \rangle - \langle \phi_R^* S \rangle}{(\Delta x) \langle \phi_R^* S \rangle} \right| \quad (11)$$

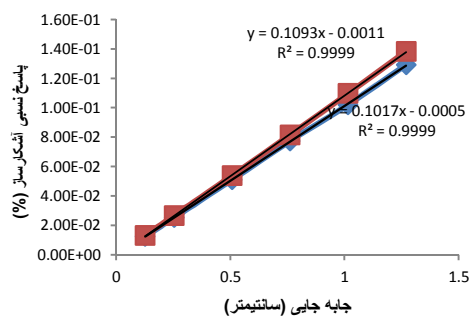
در هر مرحله از محاسبات یک برنامه برای محاسبه انتگرال روابط (۸) و (۱۰) نوشته شده است. هندسه شبیه سازی شده برای محاسبات یک بعدی و دو بعدی در شکل های (۲) و (۳) آورده شده است.

### نتایج:

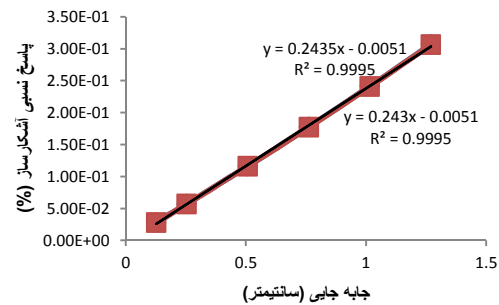
نتایج بدست آمده از محاسبه تحلیلی ضریب تنظیم راکتور WWER-1000 با استفاده از روش های مستقیم و الحاقی، در هندسه یک بعدی و دو بعدی در جدول (۱) آورده شده است.

### بحث و نتیجه گیری:

نحوه تغییر پاسخ نسبی آشکارساز به ازای جابه جایی محفظه قلب در هندسه یک بعدی (استوانه ای) در شکل (۴) آورده شده است. همانطور که از این شکل مشخص است، فرض خطی بودن پاسخ نسبی آشکارساز نسبت به جابه جایی محفظه قلب برای جابه جایی های کوچک (۰/۱۲۷ تا ۱/۲۷ سانتیمتر) برقرار است (به عبارتی ضریب تنظیم مستقل از تکانش واقعی است).



شکل (۵): کسر نسبی پاسخ آشکارساز به ازای جابه جایی محفظه قلب از روش های مستقیم (نقاط قرمز) و الحاقی (نقاط آبی) (دو بعدی)



شکل (۴): کسر نسبی پاسخ آشکارساز به ازای جابه جایی محفظه قلب از روش های مستقیم و الحاقی (یک بعدی) [نتایج محاسبات الحاقی و مستقیم در حالت یک بعدی بر هم منطبق شده اند]

در محاسبات دو بعدی، ضریب تنظیم به زاویه ای که آشکارساز در آن قرار گرفته وابسته است و بیشینه مقدار آن به ازای  $\theta = 0$  به دست می آید. نتایج محاسبه کسر نسبی پاسخ آشکارساز نسبت به جابه جایی محفظه قلب (در راستای X) در شکل (۵) آورده شده است. نتایج حاصل از محاسبات دوبعدی نشان می دهد که فرض خطی بودن در تحلیل دو بعدی نسبت به تحلیل یک بعدی اعتبار کمتری دارد اما برای جابه جایی های کوچک این فرض با تقریب خوبی برقرار است. در محاسبات دو بعدی نتایج محاسبات مستقیم و

الحاقی در جابه جایی های کوچک (کمتر از ۰/۱۲۷ سانتیمتر) با یکدیگر برابرند ولی با افزایش جابه جایی، اختلاف نتایج این دو روش بیشتر می شود.

همانطور که انتظار می رود بیشینه ضریب تنظیم در حالت دوبعدی (برای آشکارساز قرار گرفته در زاویه صفر درجه) [۲/۰۲۹٪ (بر میلیمتر)] کمتر از حالت یک بعدی [۲/۴۳٪ (بر میلیمتر)] است چون اختلال هندسی به وجود آمده در حالت دو بعدی مشابه حالت یک بعدی نیست. در تحلیل یک بعدی اجازه می دهیم که محفظه قلب به صورت یک استوانه منبسط شود (در همه جهات به اندازه  $\Delta X$ ) در حالی که در تحلیل دو بعدی شبیه سازی جابه جایی محفظه قلب واقعی تر است. به طور خاص اگر ضخامت سیال بین قلب رآکتور و آشکارساز خارج قلب در یک طرف قلب کاهش یابد این امر معادل با افزایش ضخامت سیال بین قلب و آشکارساز خارج قلب در سمت دیگر قلب خواهد بود که تنها تحلیل دو بعدی توانایی مدل کردن چنین حالتی را دارد.

جدول (۱): نتایج بدست آمده از محاسبه ضریب تنظیم رآکتور WWER-1000 در هندسه یک بعدی و دوبعدی و مقایسه نتایج آن با ضریب تنظیم داده شده برای رآکتورهای PWR در مرجع [۱]

| نتایج محاسبات برای رآکتور WWER-1000 |            |              |            | نتایج داده شده در مرجع [۱] برای رآکتورهای PWR                                |                           |
|-------------------------------------|------------|--------------|------------|--|---------------------------|
| یک بعدی                             |            | دو بعدی      |            | روش  | ضریب تنظیم (% بر میلیمتر) |
| (بر میلیمتر)                        |            | (بر میلیمتر) |            | از طریق بررسی حساسیت اتاقک یونیزان بر اثر تراکم سیال                         | ۱/۵                       |
| روش مستقیم                          | روش الحاقی | روش مستقیم   | روش الحاقی | از طریق ارتباط بین شتاب سنج های درون محفظه قلب رآکتور و آشکارسازهای خارج قلب | ۱/۷                       |
| ۲/۴۳                                | ۲/۴۳       | ۱/۰۱         | ۱/۰۹       | محاسبات ترابرد دو بعدی   | ۰/۶                       |

### مراجع:

- [1] JOSEPH A. THIE, 'Core Motion Monitoring', nuclear technology vol.45 mid-August.1978.
- [2] J. C. ROBINSON, F. SHAHROKHI, R. C. KRYTER, 'Calculation of the Scale Factor for Inference of Pressurized Water Reactor Core Barrel Motion from Neutron Noise Spectral Density', nuclear technology vol.40 August, 1978.
- [3] MARK W. CRUMP, JOHN C.LEE, 'Calculation of spatial weighting functions for ex-core neutron detectors', nuclear technology vol.41 nov.1978.
- [5] G.E. Sjoden, 'Deterministic adjoint transport applications for HE-3 neutron detector design', Annals of nuclear energy 29 (2002) 1055-1071.
- [6] J. P. THOMPSON, G. R. McCoy B. T. LUBIN, 'Experimental Value of Percent Variation In Root-Mean-Square Ex-Core Detector Signal To The Core Barrel Amplitude Scale Factor', nuclear technology vol.48 April, 1980.
- [7] W. W. Engle, jr., 'A User's Manual for ANISN: A one-dimensional Discrete Ordinates Transport Code with Anisotropic scattering', K-1693, Oak Ridge Gaseous Diffusion plant, 1967.
- [8] W. A. Rhoades, F.R Mynatt, 'The DOT III Two-Dimensional Discrete Ordinates Transport Code' ORNL-TM-4280 (1973)
- [9] Briesmeister, J. F., 'MCNP - A General Monte Carlo N-Particle Transport Code', Version 4C, Los Alamos National Laboratory, LA-13709-M, 2000.