بازسازی چشمه نویز نوترونی با استفاده از روش پویشی در راکتور VVER-۱۰۰۰

سید ابوالفضل حسینی – ناصر وثوقی*

دانشگاه صنعتی شریف، دانشکده مهندسی انرژی

چکیده:

در این پژوهش، شبیه‌ساز نویز نوترونی دو گروهی- دو بعدی با استفاده از روش عناصر محدود گلرکین توسعه داده شده است. در ابتدا، معادله پخش نوترونی دو گروهی برای قلب راکتور VVER- ۱۰۰۰ حل شده و سپس، محاسبات نویز نوترونی به روش تابع گرین انجام شده است. برای حل دستگاه معادلات حالت استاتیکی که از نوع مقادیر ویژه بوده، از روش تکرار قدرت استفاده شده است. بعد از انجام محاسبات مستقیم (حل معادلات پخش نوترونی و نویز نوترونی)، باز سازی چشمه نویز نوترونی از نوع جاذب با قدرت متغییر با استفاده از روش پویشی انجام شده است. با معلوم بودن مقدار نویز نوترونی بدست آمده از محاسبات مستقیم در مکان آشکارسازها و استفاده از دو آشکارساز، مکان و شدت چشمه نویز نوترونی محاسبه شده است. با توجه به نتایج بدست آمده می‌توان نتیجه گرفت که روش پویشی به عنوان یک روش قابل اطمینان برای بازسازی چشمه‌های از نوع جاذب با قدرت متغییر قابل استفاده است

کلید واژه‌ها: روش عناصر محدود گلرکین، پخش نوترونی، نویز نوترونی، بازسازی چشمه نویز، روش پویشی.

۱– مقدمه

در قلب راکتورهای هسته ای در حال کار، عواملی از قبیل نوسانات میله‌های کنترل، تغییر موضعی دمای خنک کننده و کندکننده، تغییر دمای خنک کننده ورودی قلب و... باعث ایجاد اختلالاتی می‌شوند که خود را به صورت نویزی در شار نوترونی آشکارسازهای اتاق کنترل نشان می دهند. تحلیل نویز نوترونی می‌تواند جهت اهداف تشخیصی همانند شناسایی مکان میله‌های کنترل نوسان کننده و یا جهت تخمین برخی از پارامترهای دینامیکی به کار رود [۱]. هدف از این پژوهش، بازسازی چشمه نویز نوترونی از نوع جاذب با قدرت متغییر با استفاده از روش عناصر محدود گلرکین در قلب راکتور VVER-۱۰۰۰ می‌باشد. از جمله کارهای انجام شده در این زمینه، می توان به شناسایی و مکان‌یابی چشمه نویز از نوع جاذب با قدرت متغییر در راکتورهای PWR با استفاده از سه روش مختلف معکوس، منطقه‌ای و پویشی[۲] و بازسازی چشمه نویز نوترونی با استفاده از روش معکوس در قلب راکتور VVER-۱۰۰۰۰ [۳] اشاره کرد.

۲– محاسبات استاتیکی

شکل ماتریسی معادلات پخش نوترونی دو گروهی بحرانی با در نظر گرفتن طیف نوترونی دو گروهی به صورت $\chi_1 = 1$ و $\chi_2 = 0$ و ثابت در نظر گرفتن ضرایب پخش به صورت رابطه (۱) نمایش داده می‌شود:

$$\begin{bmatrix} -D_1\nabla^2 + \Sigma_{rem,1} & 0 \\ -\Sigma_{s,1\to 2} & -D_2\nabla^2 + \Sigma_{rem,2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_1(x,y) \\ \phi_2(x,y) \end{bmatrix} = \frac{1}{k_{eff}} \begin{bmatrix} \nu_1\Sigma_{f,1} & \nu_2\Sigma_{f,2} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_1(x,y) \\ \phi_2(x,y) \end{bmatrix}$$
(۱)

که، $\Sigma_{rem,1} = \Sigma_{a,1} + \Sigma_{s,1\to 2}$ و $\Sigma_{rem,2} = \Sigma_{a,2}$ به ترتیب سطح مقطع برداشت گروه ۱و ۲ می‌باشند.

برای حل دستگاه معادلات (۱) به روش عناصر محدود گلرکین، تابع وزنی به شکل $W(r) = N(r)$ را در این معادلات ضرب کرده و سپس روی دامنه مورد نظر انتگرال می‌گیریم. $N(r)$، تابع پایه سراسری است که از سر هم گرد آوری توابع پایه محلی که در هر عنصر به صورت روابط (۲) الی (٦) تعریف می‌شوند، بدست می‌آید:

$$N_n^{(e)}(x,y) = \frac{a_n + b_n x + c_n y}{2\Delta^{(e)}} \quad ; \quad n = i, j, k \, , \qquad (۲)$$

$$a_i = x_j y_k - y_j x_k ; b_i = y_j - y_k ; c_i = x_k - x_j \, , \qquad (۳)$$

$$a_j = x_k y_i - y_k x_i ; b_j = y_k - y_i ; c_i = x_i - x_k \, , \qquad (٤)$$

$$a_k = x_i y_j - y_i x_j ; b_k = y_i - y_j ; c_k = x_j - x_i \, , \qquad (٥)$$

$$2\Delta^{(e)} = \begin{vmatrix} 1 & x_i & y_i \\ 1 & x_j & y_j \\ 1 & x_k & y_k \end{vmatrix} . \qquad (٦)$$

با حل هر یک از انتگرال‌های محلی و سر هم بندی آن‌ها، دستگاه معادلات کل که از نوع مقادیر ویژه بوده، بدست می‌آید. این دستگاه با استفاده از روش تکرار قدرت[۱] حل می‌شود [٤].

۳- محاسبات دینامیکی

[۱] - Power iteration method

۳-۱-معادلات نویز نوترونی مرتبه اول دو گروهی:

شکل کلی معادلات نویز نوترونی مرتبه اول دو گروهی که در آن چشمه نویز نوترونی از تغییرات سطوح مقطع جذب، شکافت و پراکندگی ناشی شده، به صورت رابطه (۷) می‌باشد[۵]:

$$\left[\nabla.\overline{\overline{D}}(r)\nabla+\overline{\overline{\Sigma}}_{dyn}(r,\omega)\right]\times\begin{bmatrix}\delta\phi_1(r,\omega)\\ \delta\phi_2(r,\omega)\end{bmatrix}=\overline{\phi}_{s,1\to2}(r)\,\delta\Sigma_{s,1\to2}(r,\omega)+\overline{\overline{\phi}}_a(r)\begin{bmatrix}\delta\Sigma_{a,1}(r,\omega)\\ \delta\Sigma_{a,2}(r,\omega)\end{bmatrix}+ \quad (۷)$$
$$\overline{\overline{\phi}}_f(r,\omega)\begin{bmatrix}\delta\nu_1\Sigma_{f,1}(r,\omega)\\ \delta\nu_2\Sigma_{f,2}(r,\omega)\end{bmatrix},$$

مهمترین مزیت محاسبات نویز نوترونی، انجام محاسبات در حوزه فرکانس به جای زمان می‌باشد که باعث شده نیاز به گسسته‌سازی زمانی نباشد. دستگاه معادلات حاصل برای نویز نوترونی از نوع چشمه ثابت بوده و نیازی به استفاده از روش‌های تکرار نیست. برای حل معادلات نویز نوترونی دو گروهی از روش تابع گرین [۵] استفاده می‌شود. با توجه به گروه انرژیی که چشمه نویز نوترونی قرار دارد، تابع گرین را می‌توان از حل معادله (۸) بدست آورد:

$$\left[\nabla.\overline{\overline{D}}(r)\nabla+\overline{\overline{\Sigma}}_{dyn}(r,\omega)\right]\times\begin{bmatrix}G_{g\to1}(r,r',\omega)\\ G_{g\to2}(r,r',\omega)\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\delta(r-r')\\ 0\end{bmatrix}_{g=1}\ or\ \begin{bmatrix}0\\ \delta(r-r')\end{bmatrix}_{g=2} \quad (۸)$$

که در آن، $G_{g\to1}(r,r',\omega)$ و $G_{g\to2}(r,r',\omega)$ به ترتیب توابع گرین گروه اول و دوم ناشی از چشمه نقطه‌ای نویز نوترونی واقع در گروه g و مکان r' است. با در نظر گرفتن چشمه نویز نوترونی در گروه دوم انرژی و استفاده از روش گسسته سازی مکانی گلرکین، معادله (۸) بصورت روابط (۹) و (۱۰) تبدیل می‌شود:

$$\sum_{e=1}^{E}\Big[\iint_{\Omega^{(e)}}d\Omega\,D_1\,\nabla N^{(e)}(r)\nabla N^{(e)T}(r)G^{(e)}_{2\to1}-\Sigma_1^{(e)}\iint_{\Omega^{(e)}}d\Omega\,N^{(e)}(r)N^{(e)T}(r)G^{(e)}_{2\to1}+$$
$$\frac{\nu_2\Sigma^{(e)}_{f,2}}{k_{eff}}\Big(1-\frac{i\omega\beta_{eff}}{i\omega+\lambda}\Big)\iint_{\Omega^{(e)}}d\Omega\,N^{(e)}(r)N^{(e)T}(r)G^{(e)}_{2\to2}+\int_{\partial\Omega^{(e)V}}ds\,N^{(e)}(r)N^{(e)T}(r)\frac{G^{(e)}_{2\to1}}{2}\Big]=0,$$

(۹)

$$\sum_{e=1}^{E}[\iint_{\Omega^{(e)}} d\Omega\, D_2\, \nabla N^{(e)}(\bar{r})\nabla N^{(e)T}(\bar{r})G_{2\to 2}^{(e)} + \Sigma_{s,1\to 2}^{(e)}\iint_{\Omega^{(e)}} d\Omega\, N^{(e)}(\bar{r})N^{(e)T}(\bar{r})G_{2\to 1}^{(e)} -$$

$$(\Sigma_{a,2}^{(e)} + \frac{i\omega}{v_2})\iint_{\Omega^{(e)}} d\Omega\, N^{(e)}(\bar{r})N^{(e)T}(\bar{r})G_{2\to 1}^{(e)} + \int_{\partial\Omega^{(e)V}} ds\, N^{(e)}(\bar{r})N^{(e)T}(\bar{r})\frac{G_{2\to 2}^{(e)}}{2}] = \begin{bmatrix} N_i^{(e)}(\bar{r}) \\ N_j^{(e)}(\bar{r}) \\ N_k^{(e)}(\bar{r}) \end{bmatrix}, \qquad (۱۰)$$

با محاسبه تابع گرین ناشی از تمام نقاط و سپس محاسبه انتگرال (۱۱)، نویز نوترونی دو گروهی انرژی محاسبه می‌شود:

$$\begin{bmatrix} \delta\phi_1(r,\omega) \\ \delta\phi_2(r,\omega) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \int [G_{2\to 1}(r,r',\omega)\, S_2(r',\omega)]dr' \\ \int [G_{2\to 2}(r,r',\omega)\, S_2(r',\omega)]dr' \end{bmatrix} \qquad (۱۱)$$

۳-۲- بازسازی چشمه نویز نوترونی

هدف از این مرحله، تعیین مکان و شدت چشمه نویز نوترونی با استفاده از اطلاعات موجود در مکان آشکارسازها و روش پویشی می‌باشد. این روش، برای مکان‌یابی جاذب‌های از نوع شدت متغییر از طریق مقایسه پاسخ آشکار ساز و مقدار محاسبه شده برای همه مکان‌های ممکن چشمه نویز در راکتور استفاده می‌شود. زمانی که یک توافق بین نویز نوترونی محاسبه و اندازه‌گیری شده وجود داشته باشد، مکان دقیق چشمه نویز تعیین می‌شود. نویز شار حرارتی در مش (I,J) ناشی از یک چشمه نویز در مکان (I۰,J۰) را می‌توان به شکل رابطه (۱۲) نوشت:

$$\delta\phi_2(I,J,\omega) = G_{XS,2\to 2}(I_0,J_0 \to I,J,\omega)\times \delta XS_2(I_0,J_0,\omega) \qquad (۱۲)$$

استفاده از این عبارت برای تطابق دادن خروجی آشکار سازها به علت اینکه هر دوی چشمه نویز و شدت آن مجهول است، مشکل است. اگر دو آشکار ساز A و B وجود داشته باشد، نسبت نویز نوترونی در مکان آشکارساز ها به شکل رابطه (۱۳) خواهد بود:

$$\frac{\delta\phi_2(I_A,J_A,\omega)}{\delta\phi_2(I_B,J_B,\omega)} = \frac{G_{XS,2\to 2}(I_0,J_0 \to I_A,J_A,\omega)}{G_{XS,2\to 2}(I_0,J_0 \to I_B,J_B,\omega)} \qquad (۱۳)$$

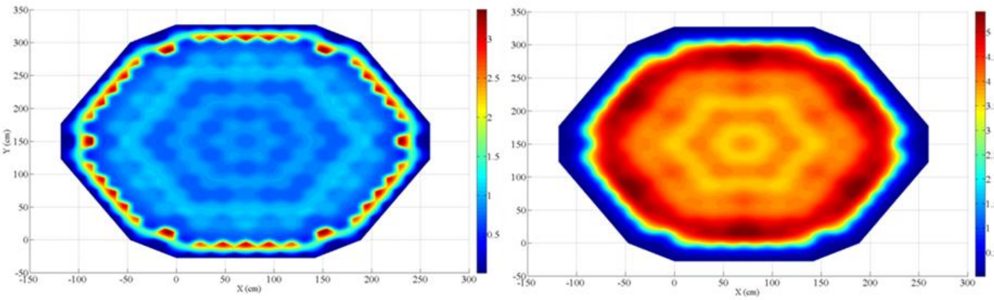
در روش پویشی، هدف کمینه کردن تابع تعریف شده در رابطه (۱٤) است:

$$\Delta_{A,B}(I,J)=\left|\frac{\delta\phi_2^{meas}(I_A,J_A,\omega)}{\delta\phi_2^{meas}(I_B,J_B,\omega)}-\frac{G_{XS,2\to2}(I,J\to I_A,J_A,\omega)}{G_{XS,2\to2}(I,J\to I_B,J_B,\omega)}\right| \qquad (۱٤)$$

اولین عبارت در رابطه (۱٤)، نسبت نویز نوترونی اندازه‌گیری شده در مکان آشکار سازها و عبارت دوم، نسبت نویز نوترونی محاسبه شده در مکان آشکار سازها ناشی از چشمه نویز واقع در مکان (I,J) است. رابطه (۱٤) باید برای تمام مکان‌های چشمه نویز تکرار شود و در نهایت مقدار کمینه آن مکان چشمه نویز را مشخص خواهد کرد. تعیین اندازه آن به سادگی از طریق مقایسه نویز نوترونی محاسبه شده و اندازه گیری شده امکان پذیر می‌شود.

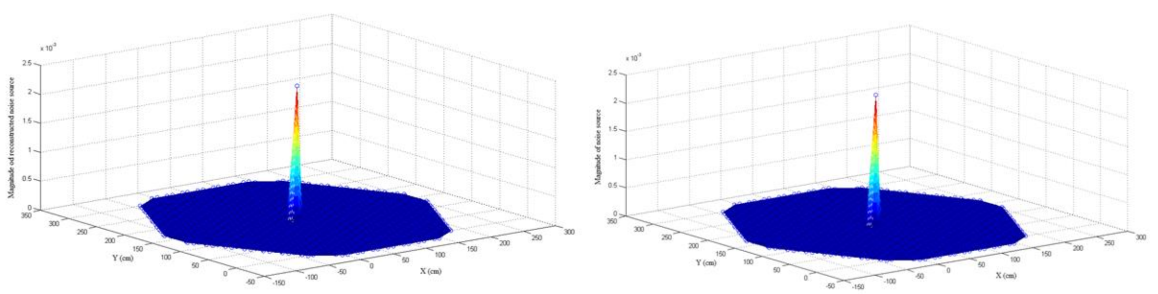
٤- نتایج

ضریب تکثیر محاسبه شده از روش گلرکین ۱/۱۰۸۳٤می‌باشد. در شکل ۱، شار نوترونی سریع و حرارتی بدست آمده از روش گلرکین نمایش داده شده است. درستی محاسبات انجام شده در مرجع ٤ تایید شده است.



شکل ۱- شار نوترونی سریع (شکل سمت راست) –شار نوترونی حرارتی(شکل سمت چپ) محاسبه شده

در شکل ٤، چشمه نویز نوترونی واقعی و بازسازی شده نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود چشمه نویز به طور دقیق با استفاده از دو آشکارساز بازسازی شده است.



شکل ۲- چشمه نویز واقعی (شکل سمت راست)- چشمه نویز بازسازی شده (شکل سمت چپ)

٦- بحث و نتیجه‌گیری

محاسبات استاتیک برای راکتورهای BIBLIS-۲D) PWR و IAEA-PWR) و راکتور IAEA-۲D) VVER) با توجه به سطح مقطع‌های ماکروسکوپی موجود مورد راستی آزمایی قرار گرفته و صحت محاسبات تایید شده است[٤].

صحت محاسبات نویز نوترونی نیز از طریق مقایسه با نتایج محاسبات استاتیکی در فرکانس صفر و استفاده از نتایج محاسبات الحاقی مورد تایید قرار گرفته است[٥]. اگر هیچ گونه نویز زمینه وجود نداشته باشد، روش پویشی می‌تواند به طور دقیق برای تعیین مکان چشمه نویز در قلب راکتور استفاده شود. بنابراین این روش خیلی قابل اعتماد تر از روش معکوس (و تا حدی قابل اعتماد تر از روش منطقه‌ای) است[٢]. علت این موضوع این است که در این روش بر خلاف روش معکوس و روش منطقه‌ای، معکوس گیری وجود ندارد. بنابراین، از روش پویشی استفاده شده در این پژوهش می‌توان به عنوان یک روش قابل اعتماد برای بازسازی چشمه نویز از نوع جاذب با قدرت متغییر نام برد.

مراجع:

١. Demazière, C and Pázsit, I., Numerical tools applied to power reactor noise analysis. Progress of nuclear energy, Vol. ٥١ ١, pp. ٦٧–٨١, ٢٠٠٩.

٢. Demazière, C and Andhill, G., Identification and localization of absorber of variable strength in nuclear reactors. Annals of nuclear energy, Vol. ٣٢, pp. ٨١٢-٨٤٢, ٢٠٠٥.

۳. احمد نصیری، ناصر وثوقی و حسام مالمیر، بازسازی چشمه نویزدر قلب راکتور VVER-۱۰۰۰ بوشهر به روش مستقیم، کنفرانس هسته ای ایران، شماره ۲٤۷، یزد، اسفند ۹۱.

٤. Hosseini, S.A., Vosoughi., Development of two-dimensional, multigroup neutron diffusion computer code based on GFEM with unstructured triangle elements. Annals of nuclear energy, Vol. ٥١, pp. ٢١٣-٢٢٦, ٢٠١٢.

٥. Hosseini, S.A., Vosoughi., Neutron noise simulation by GFEM and unstructured triangle elements. Nuclear engineering and design, Vol. ٢٥٣, pp. ٢٣٨-٢٥٨.