



بازسازی توان بصورت میله به میله در راکتورهای آبی تحت فشار

محمد علی، ترابی*^۱؛ رضا، سیاره^۲؛ علی، نگارستانی^۱؛ محمد، حسینی^۲

۱. دانشگاه تحصیلات تکمیلی و فناوری پیشرفته کرمان، دانشکده مهندسی برق، گروه مهندسی هسته‌ای

۲. سازمان انرژی اتمی، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای

چکیده:

در طراحی و محاسبات نوترونی قلب راکتور اغلب نیاز به هزاران بار انجام محاسبات کل قلب راکتور برای یافتن توان هر میله سوخت می‌باشد. به منظور اجتناب از اینگونه محاسبات پرهزینه روش‌های جدیدی با عنوان "بازسازی شار(قدرت)" معرفی شده است. در این مقاله دو روش محاسبات تک-اسمبلی و چند-اسمبلی بر اساس روش تابع فرم برای این منظور به کار گرفته شده است. با اعمال این روش‌ها به دو مسئله راستی‌آزمایی خطای ذاتی روش بررسی شده است. بهترین نتیجه در روش چند-اسمبلی و با حداکثر ۱,۵ درصد خطا برای توان میله‌های سوخت واقع در مرز مجتمع سوخت مشاهده شده است که قابل قبول می‌باشد.

کلمات کلیدی: بازسازی قدرت، روش تابع فرم، روش تک-اسمبلی، روش چند-اسمبلی، خطای ذاتی

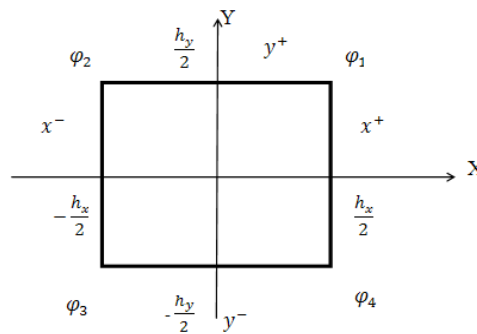
۱. مقدمه:

در طراحی راکتورها یکی از کلیدی‌ترین پارامترها، توزیع شار و به تبع آن توزیع قدرت راکتور می‌باشد. بدین منظور کدهای هسته‌ای با روش‌های محاسباتی مختلفی جهت محاسبه توزیع شار(توان) تهیه شده‌اند. یکی از روش‌های متداول در این زمینه، روش اختلاف محدود می‌باشد. در طراحی و آنالیز پارامترهای ایمنی راکتور و همچنین پیش‌بینی رفتار وابسته به زمان اغلب نیاز است هزاران بار محاسبات کل قلب برای یافتن شار(قدرت) هر میله سوخت انجام شود [۱]. با توجه به تعداد زیاد میله‌های سوخت و به دنبال آن تعداد مش‌ها و ابعاد ماتریس‌های ایجاد شده اینچنین محاسباتی بسیار پرهزینه خواهد بود. از اینرو روش نودال با هدف کاهش هزینه محاسباتی ناشی از بکارگیری روش اختلاف محدود معرفی شده است. در این روش راکتور به نواحی همگن نسبتاً بزرگی در حد مجتمع سوخت تقسیم شده و معادله تراز نوترون در این نواحی حل شده و شار متوسط بدست می‌آید. با وجود مزایای زیاد روش نودال متأسفانه اطلاعات با ارزش ناهمگن از دست می‌رود. از سال ۱۹۷۵ تلاش‌های زیادی برای یافتن روش‌های مکمل نودال به نام "بازسازی میله به میله توان" صورت گرفته است. امروزه این روش در قالب کدهایی مانند [۲] SIMULATE توسعه داده شده است [۲ و ۳].

۲. بازسازی شار(قدرت) به روش تابع فرم:

۱,۲. روش تک-اسمبلی:

یکی از روش‌هایی که برای بازسازی شار(قدرت) می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد روش تابع فرم است که در ادامه به معرفی این روش پرداخته خواهد شد. در روش بازسازی شار(قدرت) به روش تابع فرم چندجمله‌ای، یک چندجمله‌ای به صورت ضریب، تابع شکل شار را اصلاح و شار بازسازی شده را در مجتمع سوخت تولید می‌کند. تابع شکل شار از محاسبات کم‌هزینه بحرانیت مجتمع سوخت بدست می‌آید [۴ و ۵].
با فرض اینکه مبدأ مختصات دکارتی در وسط مجتمع سوخت قرار گرفته باشد:



شکل ۱: نمایشی از یک مجتمع سوخت در مختصات دکارتی

شار بازسازی شده در یک مجتمع سوخت، به صورت رابطه ۱ می‌باشد:

$$\varphi^R(x, y) = A(x, y) * F^R(x, y) \quad (1)$$

که در آن $A(x, y)$ تابع شکل شار نام دارد و از محاسبات ناهمگن بحرانیت مجتمع سوخت بدست می‌آید. به این ترتیب که مجتمع‌های سوخت یکتا با شرایط مرزی بازتابنده کامل بطور مستقل مدل شده و محاسبات کم‌هزینه بحرانیت با مش‌بندی روی "سلول واحد" انجام می‌پذیرد و توزیع شار روی مجتمع سوخت و در واقع $A(x, y)$ بدست می‌آید.

تابع فرم چندجمله‌ای درجه دوم عبارت است از:

$$F^R(x, y) = a_1 + a_2 \left(\frac{x}{h_x} \right) + a_3 \left(\frac{x^2}{h_x^2} \right) + a_4 \left(\frac{y}{h_y} \right) + a_5 \left(\frac{y^2}{h_y^2} \right) + a_6 \left(\frac{x*y}{h_x*h_y} \right) + a_7 \left(\frac{x^2*y}{h_x^2*h_y} \right) + a_8 \left(\frac{x*y^2}{h_x*h_y^2} \right) + a_9 \left(\frac{x^2*y^2}{h_x^2*h_y^2} \right) \quad (2)$$

که به صورت تجربی برای نسبت شار به تابع شکل مجتمع سوخت بدست آمده است [۴]. ضرایب مجهول a_1 تا a_9 به واسطه واداشتن $A(x, y) * F^R(x, y)$ به تطابق دقیق با مقادیر چهار شار گوشه‌ای، چهار شار سطحی و شار حجمی مجتمع سوخت بدست می‌آید.

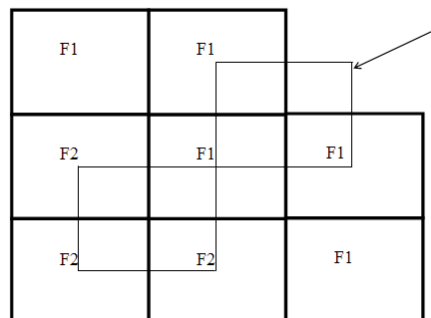
با بررسی نتایج بازسازی شار گروه حرارتی مشاهده می‌شود روش محاسبات تک-اسمبلی خطاهای نسبتاً زیادی دارد (البته نتایج رضایت‌بخشی برای گروه سریع ارائه می‌دهد). برای پیدا کردن منبع خطای ذاتی به بررسی تابع فرم مرجع گروه حرارتی پرداخته می‌شود. منظور از خطای ذاتی خطایی است که فقط ناشی از ذات چندجمله‌ای

بودن تابع فرم باشد و ناشی از خطا در پیدا کردن شار در نقاط گوشه‌ای و شار سطحی نباشد. مشاهده می‌شود که تابع فرم مرجع در قسمت‌های دور از مرز به صورت تخت و در نقاط نزدیک مرز دارای یک گذار نمایی است.

نسبت شار ناهمگن مرجع به تابع شکل اسمبلی که همان تابع فرم مرجع می‌باشد، باید دارای رفتار گذار نمایی نباشد، چرا که اثرات ناهمگنی هم در شار ناهمگن و هم در تابع شکل موجود است [۵]. این نتیجه مهم حاصل می‌شود که تابع شکل مجتمع سوخت که با محاسبه بحرانیات مجتمع‌های سوخت یکتا با شرایط مرزی بازتابنده کامل (جریان خالص روی مرز برابر صفر) بدست آمده، داخل قلب رفتار دیگری در اطراف مرز مجتمع سوخت دارد. در واقع فرض شرط مرزی بازتابنده کامل، در مرز مجتمع‌های سوخت که غناهای متفاوتی دارند صحیح نیست. در واقع بهتر است شرط مرزی بازتابنده کامل فقط برای مجتمع سوخت داخل قلب اعمال شود. بر این اساس روش دیگری به نام روش چند-اسمبلی معرفی می‌شود.

۲.۲. روش چند-اسمبلی:

در روش چند-اسمبلی، ناحیه‌ای متشکل از چهار ربع از چهار مجتمع سوخت همسایه در نظر گرفته می‌شود. شرط مرزی بازتابنده کامل در داخل مجتمع سوخت نسبت به اعمال در مرزهای مجتمع سوخت با غنا و ترکیب‌های متفاوت (مرز تابع شکل مجتمع سوخت) تقریب بهتری است [۶و۵]. محاسبات محلی چند-اسمبلی برای یافتن تابع شکل شار در ربع‌های مجتمع‌های سوخت و همچنین سطح مقطع‌های همگن در آنها و ضرایب ناپیوستگی استفاده می‌شود. در این روش هر مجتمع سوخت به عنوان چهار نود (گره) در نظر گرفته می‌شود که بازسازی شار توسط تابع فرم چند جمله‌ای درجه دوم به طور مستقل در هر یک از نودها انجام می‌پذیرد. مسلماً، این روش محاسباتی برای یافتن پارامترهایی از جمله سطح مقطع‌های همگن در مرزهای قلب که شامل آب و استیل می‌باشد بسیار ضروری است. نمونه‌ای از ساختار چند-اسمبلی در شکل ۲ آمده است:



شکل ۲: نمایشی از انتخاب مدل‌سازی به روش چند-اسمبلی

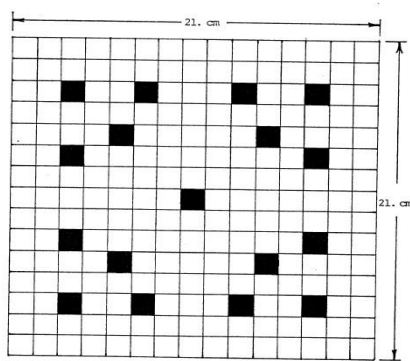


۳. درونیایی شار گوشه‌ای:

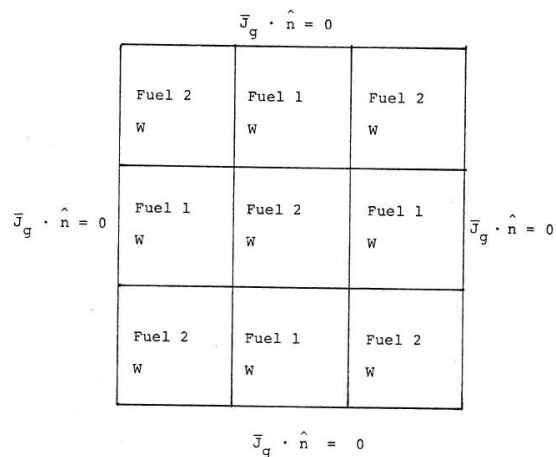
اطلاعات ورودی لازم برای طرح بازسازی قدرت برای هر نود عبارت است از شار حجمی، شار سطحی و شار گوشه‌ای. شار گوشه‌ای از روی مقادیر شار سطحی با استفاده از روشی به نام کامپانا [۴] بدست می‌آید. این روش بر اساس دو فرض اساسی است. فرض اول اینکه تابع فرم روی سطوح به خوبی می‌تواند با یک چندجمله‌ای درجه دوم بیان شود. فرض دوم اینکه چشمه نوترون در نقاط گوشه‌ای وجود ندارد. به این ترتیب یک معادله تفاضل محدود پنج‌نقطه‌ای بر حسب شارهای گوشه‌ای همسایه و شارهای سطحی آن حاصل می‌شود که به یکباره می‌تواند همه شارهای گوشه‌ای قلب را درونیایی کند.

۴. اعمال روش بازسازی قدرت به مسایل راستی آزمایی:

دو مسئله آزمون به منظور راستی آزمایی در نظر گرفته شده است [۴ و ۵]. در مسئله اول از روش تک-اسمبلی و در مسئله دوم از روش چند-اسمبلی استفاده می‌شود.



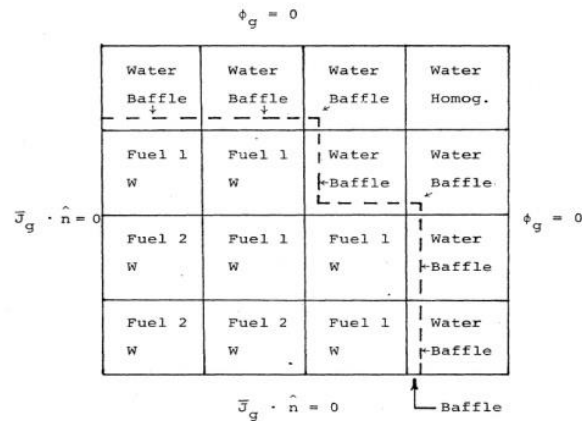
شکل ۴: نمایی از یک مجتمع سوخت [۵]



شکل ۳: قلب راکتور مسئله ۱ [۵]

جدول ۱: سطح مقاطع دوگروهی سلول‌های سوخت، آب و بافل

پارامتر	سوخت ۱	سوخت ۲	آب	بافل
$D_1 (cm)$	۱/۵	۱/۵	۱/۷	۱/۰۲
$D_2 (cm)$	۰/۰۴	۰/۰۴	۰/۳۵	۰/۳۳۵
$\Sigma_{a,1} (cm^{-1})$	۰/۰۱۳	۰/۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۰۳۲۲
$\Sigma_{a,2} (cm^{-1})$	۰/۱۸	۰/۱۵	۰/۰۵	۰/۱۴۶
$v \Sigma_{f,1} (cm^{-1})$	۰/۰۰۶۵	۰/۰۰۵	۰/۰۰	۰/۰۰
$v \Sigma_{f,2} (cm^{-1})$	۰/۲۴	۰/۱۸	۰/۰۰	۰/۰۰
$\Sigma_{s,1 \rightarrow 2} (cm^{-1})$	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۳۵	۰/۰۰
$\Sigma_{s,2 \rightarrow 1} (cm^{-1})$	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰



شکل ۵: قلب راکتور مسئله ۲ [۴]

۵. نتایج:

مقادیر حاصل برای مسئله آزمون اول در جدول زیر آمده است:

جدول ۲: بیشترین خطای مشاهده شده در مسئله اول

نام روش	بیشترین خطای نسبی شار سریع	بیشترین خطای نسبی شار حرارتی	بیشترین خطای نسبی توان
تک-اسمبلی	۰,۰۹	۱,۹۵	۱
چند-اسمبلی	۰,۰۳	۰,۰۵	۰,۰۱

بیشترین خطا در نود مرکزی مشاهده شد. مقادیر حاصل برای مسئله دوم در جدول ۳ ارائه شده است:

جدول ۳: بیشترین خطای مشاهده شده در مسئله دوم

نام روش	بیشترین خطای نسبی شار سریع	بیشترین خطای نسبی شار حرارتی	بیشترین خطای نسبی توان
تک-اسمبلی	۳,۰	۱۵,۰	۱۴
چند-اسمبلی	۱,۵	۲,۰	۱,۵

بیشترین خطای مشاهده شده در بالا مربوط به مجمعی می‌باشد که دو مرز مشترک با بافل دارد. این خطا در میله سوخت واقع در گوشه مجاور آب و بافل رخ داده است. بدیهی است که علت این امر ناشی از وجود شیب شار زیاد می‌باشد.

۶. بحث و نتیجه گیری:

در این پژوهش، سعی شده است، تا با استفاده از روش بازسازی شار(قدرت) و حل معادله پخش نوترون، قدرت تولیدی در هر یک از میله‌های سوخت موجود در یک قلب راکتور نوعی، محاسبه شود. مزیت اصلی



استفاده از روش بازسازی قدرت، کاهش هزینه محاسبات قلب می‌باشد که در طراحی نوترونی قلب راکتور نقش بسزایی خواهد داشت. دو روش بازسازی قدرت به نام‌های "تک-اسمبلی" و "چند-اسمبلی" در این پژوهش مورد بررسی قرار گرفتند. روش تک-اسمبلی در هر دو گروه انرژی از تابع فرم چند جمله‌ای درجه دوم استفاده می‌شود. روش چند-اسمبلی مشابه روش تک-اسمبلی می‌باشد با این تفاوت که در همگن‌سازی و محاسبه تابع شکل، اثر مجتمع‌های سوخت مستقر در همسایه مجتمع سوخت مورد نظر اعمال می‌شود و لذا نتایج بهتری بدست می‌دهد.

۷. مراجع:

۱. Tatsuya IWAMOTO & Munenari YAMAMOTO, "Pin Power Reconstruction Methods of the Few-Group BWR Core Simulator NEREUS," Journal of Nuclear Science and Technology December ۱۹۹۲.
۲. K. R. Rempe, K. S. Smith, and A. F. Henry, "SIMULATE-۳ Pin Power reconstruction Methodology and benchmarking," Nucl. Sci. Eng., ۱۰۳, ۳۳۴, ۱۹۸۹.
۳. Joo-il Yoon, Han GyuJoo, Seung Hoon Ahn, "Implementation of Advanced Multigroup Nodal and Pin Power Reconstruction Methods into PARCS ۳,۱." international agreement report, May ۲۰۱۲.
۴. CHRISTOPHER L. HOXIE, "Applications of Nodal Equivalence Theory to the Neutronic Analysis of PWR's," Ph.D. Thesis, Department of Nuclear Engineering, M.I.T., Cambridge, MA, June ۱۹۸۲.
۵. K.S. Khalil, "The Application of Nodal Equivalence Theory to the Neutronic Analysis of PWR," PhD Thesis Department of Nuclear Engineering, M.I.T., Cambridge, MA, January ۱۹۸۳.
۶. Jose Mndez, "RECONSTRUCTION OF THREE-DIMENSIONAL FLUX SHAPES FROM NODAL SOLUTION" Ph.D. Thesis, Department of Nuclear Engineering, M.I.T., Cambridge, MA, June ۱۹۸۱.