

**محاسبه ضریب دنکوف در هندسه های استوانه ای با روش مونت کارلو****احسان زاهدی نژاد^{*} ، ناصر وثوقی، مصطفی سهراب پور**

دانشگاه صنعتی شریف، دانشکده مهندسی مکانیک

Email:

ehsanzahedinejad@gmail.comzahedinejad_nem@mech.sharif.edu

Tel: 09358370178

چکیده

دقت محاسبه ثوابت گروهی به منظور محاسبات بحرانی سنجی به چندین پارامتر ویژه وابسته است. یکی از این پارامترها ضریب تصحیح دنکوف است که برای محاسبه انتگرال رزونانس و شار کاهش یافته در ناحیه رزونانس در سیستم های غیرهمگن مورد استفاده قرار می گیرد. در این مقاله نرم افزاری به منظور محاسبه ضریب تصحیح دنکوف بر مبنای روش مونت کارلو و احتمال فرار طراحی شده است. نرم افزار طراحی شده قادر به محاسبه ضریب دنکوف برای هر چپش دلخواه از سوخت های استوانه ای است. در ادامه به عنوان نمونه به محاسبه ضریب دنکوف برای سوخت های میله ای بسته سوخت (CANFLEX) که شامل ۴۳ میله سوخت است، پرداخته و در پایان ضرایب دنکوف بدست آمده برای بسته سوخت (CANFLEX) را به عنوان ورودی در کد WIMSD وارد کرده و به بررسی محاسبات بحرانی سنجی می پردازیم. تمامی نتایج بدست آمده در هندسه های بحث شده همگرایی مناسبی با سایر روشهای تحلیلی و نرم افزارهای کاربردی دیگر داشته اند.

کلمات کلیدی: ۱- ضریب تصحیح دنکوف ۲- مونت کارلو ۳- بسته سوخت (CANFLEX) ۴- انتگرال

رزونانس

۱- مقدمه

در محاسبه انتگرال رزونانس، فضای غیر همگن را به صورت یک رابطه هم ارزی که ترکیبی خطی از یک فضای هموزن است در نظر می گیرند که در آن دقت محاسبه انتگرال رزونانس به چگونگی تعیین احتمال برخورد نوترون ها در سوخت بستگی دارد. در مواقعی که سوخت ها در یک آرایش شبکه ای در کنار هم قرار می گیرند، به منظور محاسبه احتمال فرار و برخورد نوترون ها می توان از روش دنکوف -گینسبرگ [1] استفاده کرد که در آن احتمال برخورد یا فرار از سوخت بر حسب یک فاکتور تصحیحی به نام دنکوف، تعریف می شود. ما در این مقاله به طراحی یک نرم افزار (MCDAN-PRO) به منظور محاسبه ضریب دنکوف بر مبنای روش مونت کارلو و احتمال فرار نوترون ها، پرداخته ایم. نرم افزار طراحی شده قادر به محاسبه ضریب تصحیح دنکوف در هر آرایش دلخواه از سوخت های استوانه ای می باشد. به منظور نمایش محاسبات برای سوخت های استوانه ای یک بسته سوخت موسوم به (CANFLEX) که در راکتورهای CANDU به کار می رود و شامل ۴۳ میله سوخت است را مورد بررسی قرار داده ایم. در ادامه نتایج بدست آمده بر مبنای نرم افزار طراحی شده با نرم افزار DANCOFF-MC



مقایسه شده و ضرایب دنکوف بدست آمده به منظور انجام محاسبات بحرانی سنجی به عنوان ورودی در کد WIMS وارد شده و به بررسی تغییرات ضریب تکثیر موثر بر حسب تغییرات ضریب دنکوف خواهیم پرداخت.

۲- جذب رزونانس در سیستم های غیر همگن

در یک سیستم دو ناحیه ای (شامل سوخت و کندکننده) غیرهمگن، به منظور تعیین جذب رزونانس می توان از روش احتمالات برخورد استفاده کرد و معادله توازن اصلی برای محاسبه جذب رزونانس را به صورت زیر نوشت:

$$\Sigma_{tF}\phi_F = (1 - P_F) \int_E^{E/\alpha_{aF}} \frac{\Sigma_{sF}\phi_F}{(1 - \alpha_{aF})E'} dE' + [\Sigma_{mF} + P_F(\Sigma_{aF} + \Sigma_{sF})] \frac{1}{E} \quad (1)$$

که در آن

$\Sigma_{tF}, \Sigma_{mF}, \Sigma_{aF}, \Sigma_{sF}$ = به ترتیب از چپ به راست، سطح مقطع ماکروسکوپی کل در ناحیه سوخت، سطح مقطع پراکندگی عناصر کندکننده در ناحیه سوخت، سطح مقطع ماکروسکوپی جذب عناصر سوخت و سطح مقطع ماکروسکوپی پراکندگی عناصر سوخت هستند.

$\phi_F(E), P_F, \alpha_{aF}$ = به ترتیب از چپ به راست، شار در ناحیه سوخت، احتمال برخورد نوترون تولید شده در سوخت با عناصر کندکننده در ناحیه کندکننده و مینیمم کسر انرژی یک نوترون بعد از یک برخورد الاستیک با عناصر سوخت هستند.

در شرایطی که هندسه مورد نظر به صورت آرایش تناوبی میله های سوخت نزدیک به هم باشد می توان بنابر روش دنکوف-گینسبرگ، P_F را به صورت زیر تعریف کرد [ii]:

$$P_F \approx P_{esc} \frac{1 - C}{1 - C(1 - \Sigma_F \bar{R}_F P_{esc})} \quad (2)$$

که در آن C ضریب دنکوف نامیده می شود. ضریب دنکوف نیز به صورت احتمال رسیدن یک نوترون که به صورت یکنواخت بر روی سطح یک سوخت تولید شده را به سوخت بعدی، با این شرط که هیچ برخوردی با کندکننده و غلاف نداشته باشد، تعریف می شود و \bar{R}_F میانگین طول کرد در ناحیه سوخت است. بنابر رابطه شماره (۲) دقت محاسبه انتگرال و شار رزونانس به روش دنکوف، وابسته به چگونگی تعیین ضریب تصحیح دنکوف است، که در ادامه به آن می پردازیم.

۳- الگوریتم MCDAN-PRO برای سوخت های استوانه ای

رابطه ریاضی که به بیان ضریب تصحیح دنکوف می پردازد را می توان به صورت زیر بیان کرد:

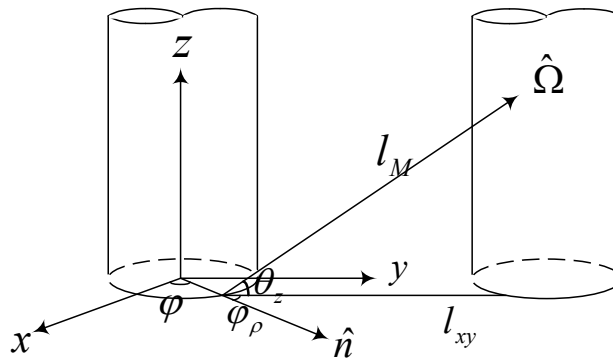
$$C = \frac{\int ds \int_{\hat{n} \cdot \hat{\Omega} > 0} d\Omega(\hat{n}, \hat{\Omega}) \exp[-(\Sigma_{tM} I_M(s, \Omega) - \Sigma_{tC} I_C(s, \Omega) - \Sigma_{tCO} I_{CO}(s, \Omega))]}{\int ds \int d\Omega(\hat{n}, \hat{\Omega})} \quad (3)$$

که در آن $\hat{n}, I_C, I_{CO}, \Sigma_{tM}, \Sigma_{tC}, \Sigma_{tCO}$ ، به ترتیب بردار عمود بر سطح سوخت در نقطه s ، مسافت طی شده توسط نوترون ها در فضای کندکننده و غلاف و خنک کننده در راستای مسیر حرکت نوترون، سطح مقطع



ماکروسکوپیک کل کندکننده، غلاف و خنک کننده بوده و $\hat{\Omega}$ برداری یکه در راستای حرکت نوترون است. شکل شماره (۱) را در نظر بگیرید. با توجه به این شکل می توان روابط زیر را استخراج کرد:

$$\hat{n} \cdot \hat{\Omega} = \cos \theta_z \cos \varphi_\rho \quad d\Omega = \cos \theta_z d\theta_z d\varphi_\rho \quad ds = l d\varphi \quad (4)$$



شکل شماره (۱) - سیستم مختصات استوانه ای برای محاسبه ضریب دنکوف در حالت دو بعدی

که در آن θ_z به صورت زاویه بین صفحه افقی $(x-y)$ و راستای سیر نوترون $(\hat{\Omega})$ ، φ_ρ بر حسب زاویه بین $\hat{\Omega}$ و تصویر بردار سیر نوترون بر روی صفحه افقی $(x-y)$ ، θ_z زاویه افقی که نوترون بر روی سطح صفحه افقی سوخت $(x-y)$ پدیدار می شود، ρ شعاع میله سوخت و l به صورت طول معینی از میله سوخت در راستای محور z تعریف می شوند. حال متغیرهای r_1 ، r_2 ، r_3 را که به صورت تصادفی در بازه $[0,1]$ انتخاب می شوند را در نظر بگیرید. می توان متغیرهای حرکت نوترون را بر حسب این متغیرهای تصادفی به صورت زیر تعریف کرد:

$$\varphi = 2\pi r_1, \sin \varphi_\rho = 2r_2 - 1, \sin \theta_z = r_3 \quad (5)$$

که با جایگذاری روابط (۴) و (۵) در رابطه (۳) می توانیم انتگرال را در مختصات دو بعدی استوانه ای به صورت زیر بنویسیم:

$$C_b = \int_0^1 dr_1 \int_0^1 dr_2 \int_0^1 dr_3 \frac{4}{\pi} \sqrt{1-u_3^2} \exp \left(\frac{(-\Sigma_{im} l_M - \Sigma_{ic} l_C - \Sigma_{ico} l_{co})}{\sqrt{1-u_3^2}} \right) \quad (6)$$

نرم افزار با هر بار تولید متغیرهای تصادفی r_1 ، r_2 ، r_3 راستای حرکت نوترون در فضای مورد نظر را تعیین می کند. مرحله بعدی تعیین مسافت های طی شده در نواحی مختلف است. در اینجا برنامه مختصات متحرکی را بر روی نوترون تولید شده قرار می دهد و با مقایسه نزدیکترین نقطه خط سیر نوترون در فضای مورد نظر با شعاع اجزاء، امکان برخورد با آنها را بررسی می کند.

۴- مقایسه نتایج با استفاده از کد MC-DANCOFF

شکل شماره (۲) را در نظر بگیرید. در اینجا به محاسبه ضریب دنکوف برای میله های سوخت سیاه رنگ پرداخته ایم. فاصله و قطر میله های سوخت به ترتیب برابر با $1/2$ و $0/8$ (cm) در نظر گرفته شده است. سطح مقاطع کل غلاف و کندکننده نیز به ترتیب برابر با $0/3$ و $0/25$ (cm⁻¹) است. در تمامی موارد ما از تاریخچه 100000



نوترون برای همگرایی بهتر محاسبات استفاده کرده ایم. همچنین محاسبات در دو آرایش مربعی و مثلثی انجام شده اند. در جدول شماره (۱) ما به مقایسه مقادیر بدست آمده برای ضریب دنکوف، بر اساس نرم افزار طراحی شده (MCDAN-PRO) و کد DANCOFF-MC پرداخته ایم. در تمامی موارد مقادیر بدست آمده، با مقداری کمتر از ۳/۰ درصد با مقادیر بدست آمده توسط کد DANCOFF-MC همگرا هستند.

F1		F2	
F3		F4	
F5		F6	

شکل شماره (۲) - محاسبه و مقایسه ضریب دنکوف برای چند آرایش نمونه از میله های سوخت در یک محیط با کندکننده بینهایت

جدول شماره (۱) - مقایسه ضریب دنکوف سیاه* توسط کد [iii] DANCOFF-MC

Code (Geometry)	ضریب دنکوف	
	آرایش مربعی	آرایش مثلثی
DANCOFF-MC(F1/F2)	۰/۷۰۱۹	۰/۷۵۷۵
DANCOFF-MC(F3/F4)	۰/۷۱۳۲	۰/۷۵۷۰
DANCOFF-MC(F5/F6)	۰/۷۱۷۵	۰/۷۵۸۶
MCDAN-PRO(F1/F2)	۰/۶۹۸±۰/۰۰۰۸	۰/۷۵۱۸±۰/۰۰۰۶
MCDAN-PRO(F3/F4)	۰/۷۱۱۱±۰/۰۰۰۶	۰/۷۵۳۰±۰/۰۰۰۶
MCDAN-PRO(F5/F6)	۰/۷۱۴۰±۰/۰۰۰۶	۰/۷۵۵۸±۰/۰۰۰۶

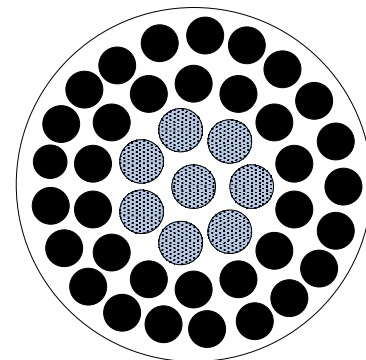
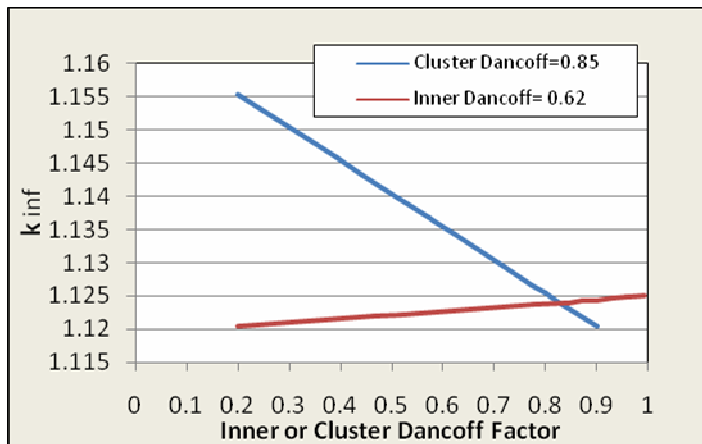
*Lattice Pitch=1.2 cm, Pin Diameter=0.8 cm, Cladding Thickness=0.05 cm, $\Sigma_t^{\text{mod}} = 0.25$

cm^{-1} , $\Sigma_t^{\text{clad}} = 0.3 \text{ cm}^{-1}$

در این بخش با استفاده از کد WIMS [۱۱] به بررسی اثر تغییرات ضریب تکثیر بینهایت (K_{inf}) بر حسب تغییرات ضریب دنکوف، برای بسته سوخت CANFLEX (شکل شماره ۳) که در راکتورهای CANDU مورد استفاده قرار می گیرد، می پردازیم. در این کد می توانیم ضریب دنکوف بدست آمده از روش مونت کارلو را به عنوان ورودی وارد کرده و شاهد تغییرات K_{inf} نسبت به این ورودی باشیم. نحوه وارد کردن ضرایب دنکوف در این



کد برای یک بسته سوخت (برای مثال بسته سوخت CANFLEX) به این ترتیب است که باید میانگین ضریب دنکوف سوخت های داخلی (یعنی تمامی سوخت ها به جز سوخت های چیده شده در حلقه آخر) را به همراه ضریب دنکوف بسته سوخت (میانگین ضریب دنکوف تمامی سوخت ها)، را به عنوان ورودی وارد می کنیم. در شکل شماره (۴) به بررسی تغییرات K_{inf} نسبت به تغییرات ضریب دنکوف داخلی و ضریب دنکوف بسته سوخت پرداخته ایم. همانطور که شکل نشان می دهد به ازای هر ۰/۱ تغییر در ضریب دنکوف بسته سوخت، شاهد ۰/۵ درصد تغییر در K_{inf} بسته سوخت خواهیم بود.



شکل شماره (۴) - تغییرات ضریب تکثیر بینهایت نسبت به تغییر ضریب دنکوف بسته سوخت، در شرایط نرمال چگالی خنک

شکل شماره (۳) - نمایی از سطح مقطع بسته سوخت CANFLEX

در جدول شماره (۲) نیز مقادیر K_{inf} را برای مقادیر گوناگون ضریب دنکوف که با استفاده از روش مونت کارلو بدست آمده و به عنوان ورودی در کد WIMS استفاده شده است، را نشان داده ایم. K_{inf} در این جدول به ازای دو حالت کاری، در شرایطی که چگالی خنک کننده نرمال و خلا کامل است، نشان داده شده است.

جدول شماره (۲) - بررسی تغییرات ضریب تکثیر بینهایت برای مقادیر گوناگون ضریب دنکوف بسته سوخت

	Mode	Kinf NoVoid†	kinf Full Void††
1	Monte Carlo	۱/۱۳۲۰	۱/۱۲۴۰
2	Wims Code	۱/۱۲۹۱	۱/۱۱۸۲



۵- بحث و نتیجه گیری

تمامی مقادیری که برای ضریب دنکوف در یک هندسه استوانه ای توسط MCDAN-PRO بدست آمد با مقداری کمتر از ۰/۳ درصد با مقادیر بدست آمده توسط نرم افزار DANCOFF-MC همگرا بود. در تمامی موارد افزایش سطح مقطع ماکروسکوپیک کل کندکننده، غلاف، و خنک کننده باعث کاهش مقدار ضریب دنکوف شد و همچنین در مورد بسته سوخت CANFLEX، تاثیر غلاف در محاسبات به میزان ۲ درصد، ضریب دنکوف را کاهش داد. به ازای هر ۰/۱ تغییر در ضریب دنکوف بسته سوخت، ۰/۵ درصد تغییر در K_{inf} بسته سوخت مشاهده شد که این امر نشان دهنده اهمیت محاسبه دقیق ضریب دنکوف در هندسه های نامتقارن است. تمامی محاسبات انجام شده ضریب دنکوف را در یک هندسه دو بعدی، برای نوترون های با یک گروه انرژی محاسبه می کنند که به منظور بهبود دقت در محاسبات می توان این محاسبات را در چندین گروه انرژی و در یک هندسه سه بعدی انجام داد که این مطالعات تحت بررسی قرار دارند.

۶- مراجع

- [] - John R. Lamarsh, "Introduction to Nuclear Reactor Theory", Wesley Publishing Compony, December 12, 1965.
- [] - C.E. LEE, M.P. DIAS, "Analytical PN and AN transport solution: Slab and Sphiere Criticality", Transactions of the American Nuclear Society, 43(1982) 374-377.
- []- S. Feher, J. E. Hoogenboom, P. F. A. de Leege, and J.Valko, "Monte Carlo Calculation of Dancoff Factors in Irregular Geometries", Nuclear Science And Engineering: 117,227-238(1994).
- [] - Kowalska, K., S-WIMS Manual. NEA Data Bank, 1972.