

توسعهی کد هستهای نوترونیک 3DNFD در هندسههای مربعی، مثلثی و استوانهای

علی پذیرنده*، محمدحسن جلیلی بهابادی، پیوند ابدی، میثم محمدنیا گروه مهندسی هستهای، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران، صندوق پستی: ۲۷۵-۱٤۵۱۵، تهران _ایران

چکیدد: برای به دست آوردن توزیع شار نوترونهای تند و گرمایی، توزیع چگالی قدرت نسبی در راستای افقی و محوری، ضریب تکثیر مؤثر و هم چنین ضریب قلهسازی در هندسهی مثلثی، کد محاسبات هستهای نوترونیک 3DNFD توسعه داده شد و با معیارهای معتبر مقایسه گردید. در این کد با استفاده از روش تفاضل محدود، معادلهی پخش نوترون در دستگاه مختصات دکارتی در دو هندسهی مربعی و مثلثی و هم چنین مختصات استوانهای در حالت ایستا حل و در آن از روش های عددی تکرار برای حل دستگاه معادلههای خطی استفاده شد. در اجرای کد دو نکتهی اساسی حایز اهمیت است: ۱) دقت محاسبات ۲) سرعت محاسبات. چون این دو همواره در جهت عکس یکدیگر عمل می کنند، توجه به هر دو نکته به طور همزمان حایز اهمیت است.

كليدواژه ها: معادله پخش، هندسه چندبعدی، روش تفاضل محدود، ضريب بهينه سازی تفاضل محدود، گاوس- سايدل

Developing a Nuclear Neutronic Code in Rectangular, Triangular and Cylindrical Geometry

A. Pazirandeh*, M.H. Jalili Behabadi, P. Abadi, M. Mohammadnia Science and Research Branch, Department of Nuclear Engineering, Islamic Azad University, P.O.Box: 14515-775, Tehran- Iran

Abstract: A three-dimensional reactor static code for calculation of flux, power, multiplication factor and also power peaking factor in rectangular, triangular and cylindrical geometry core has been developed and benchmarked. For solution of the time independent neuron diffusion equation a finite difference method was used. To solve the equation with finite difference method, the speed of the applied numerical calculation is a major subject of interest, especially when the number of nodes increases. For this reason using an appropriate method to make the calculation faster is considered as the main priority. The aim of this paper is to present this three-dimensional nuclear reactor code with an emphasis made on the comparison between the advanced iterative algorithms in this code.

Keywords: Diffusion Equation, Multi-Dimension Geometry, Finite Difference Method, Optimization Factor Finite Difference, Gauss-Seidel

*email: paziran@ut.ac.ir



۱. مقدمه

توزیع انرژیتیکی شار نوترون در هر سیستم نوترونی از پارامترهای مهم آن سیستم است. در حقیقت آنچه مورد نظر مهندسین و طراحان رآکتور است تعیین توزیع انرژی (قدرت) در نقاط مختلف سیستم و نحوهی انتقال آن به خارج از سیستم است.

آهنگ هر واکنش مهم در قلب بستگی به مقدار چگالی نوترون در هر نقطه، انرژی نوترون، سطح مقطع مؤثر واکنش مربوطه، فراوانی ایزوتوپی عنصر و عناصر مجاور دارد. چون ساختار قلب علیرغم ظاهر متقارن آن از نظر واکنش به ویژه پراکندگی به شدت ناهمگون است این ویژگی ساختاری باعث میشود که آهنگ انواع مختلف واکنش از نقطهای به نقطهی دیگر کاملاً متفاوت باشد. این خاصیت بر حرکت دسته جمعی نوترونها، سرعت آنها و راستای حرکت آنها تأثیر می گذارد. بستگی دارد اصطلاحاً شار و یا چگالی زاویهای نامیده می شود، و مینای نظریهی ترابرد نوترون را پایه گذاری می کند. یاد آوری این نکته حایز اهمیت است که ساختار قلب به نحوی است که در راستای محوری و شعاعی کاملاً متفاوت است و حرکت دسته جمعی نوترونها در راستای محوری به ویژه در مواد با سطح مقطع

در دهههای اخیر از مدل ترابرد بولتزمن در توجیه حرکات نوترون به صورت یک گاز رقیق استفاده شده است، که اصطلاحاً نظریهی ترابرد نوترون نام گرفته است. در توجیه پخش مولکولهای گاز با استفاده از قانون بولتزمن نتایج خوبی به دست آمده است میکن در مورد نوترون به علت برهم کنش نوترون با ذرات محیط مسئله پیچیده تر است. بدین علت است که مسئلهی ترابرد نوترون بستگی شدیدی به زاویهی پراکنش دارد که آن را متفاوت از مدل پخش گازی مینماید. مشکل اصلی در این است که حل معادلهی ترابرد نوترون اگر ناممکن نباشد بسیار دشوار است و به معین علت در حل آن اقدام به اعمال تقریبهایی میشود. یکی معادلهی پخش نوترون است. اما حل تحلیلی معادلهی پخش در از این تقریبها، مدل پخش گازی، مدل پخش گاز آزاد یا معادلهی پخش نوترون است. اما حل تحلیلی معادلهی پخش در از این تقریبهای مدل پخش گازی، مدل پخش گاز آزاد یا معادلهی پخش نوترون است. اما حل تحلیلی معادلهی پخش در از این تقریبهای مدل پخش گازی، مدل پخش گاز آزاد یا معادلهی پخش نوترون است. اما حل تحلیلی معادلهی پخش در ناممکن است. لذا برای حل آن از روشهای عددی استفاده

۲. استخراج معادلهی تفاضل محدود پخش

با اعمال تقریبهایی در معادلهی ترابرد بولتزمن معادلهی پخش زیر به دست میآید

$$\nabla J_{g}(\mathbf{r}) + \sum_{g}(\mathbf{r})\phi_{g}(\mathbf{r}) = \frac{1}{k}\sum_{g'=1}^{G} x_{g}\upsilon \sum_{fg}(\mathbf{r})\phi_{g'}(\mathbf{r}) +$$
(1)

با تقسیم محیط موردنظر به تعدادی ناحیه، که به هر یک از این ناحیهها یک نود گفته میشود، و با انتگرالگیری از معادلهی پخش بر روی سطح یک نود دلخواه [داریم

$$\begin{split} &\frac{S}{A}\sum_{p=1}^{P}J'_{gp}^{l}+\sum_{g}'_{g}\phi''_{g}^{l}=\frac{1}{k}\sum_{g'=1}^{G}x_{g}\upsilon\sum_{fg}^{l}\phi''_{g'}^{l}+\\ &\sum_{\substack{g'=1\\g'=\ell=g}}^{G}\sum_{gg'}^{l}\phi''_{g'}^{l}; \qquad g=1,1,...,G \end{split} \tag{1}$$

که در آن S طول وجه نود، A سطح نود، l شمارهی نود، P شمارهی وجه هر نود است.

مساحت همهی نودها یکسان و فاصلهی بین نودها ثابت است. نودها دارای هندسه منظمی هستند (شکل ۱). J'_{gp} جریان متوسط گیری شدهی وجهی است که نود 1 را از میان وجه P ترک می کند و دارای جهت رو به خارج و بردار یکهی np است، T'_{gp} شار متوسط گیری شدهی حجمی است و k ویژه مقدار سیستم و یا ضریب تکثیر مؤثر است.



شکل ۱. نمونهای از یک نود در هندسهی استوانهای.

در رابطهی (۲) ما به یک ارتباط میان شار متوسط گیری شدهی حجمی و جریان متوسط گیری شده نیاز داریم، به همین منظور از قانون فیک بهره می گیریم

$$\mathbf{J}(\mathbf{r}, \mathbf{E}) = -\mathbf{D}(\mathbf{r}, \mathbf{E}) \nabla \phi(\mathbf{r}, \mathbf{E}) \tag{(7)}$$

اگر واگرایی شار را با دقتی از مرتبهی (O(h در نظر بگیریم جریان متوسط گیری شدهی وجهی برای نود I می تواند به صورت زیر نوشته شود

$$J'_{gp}^{l} = -D'_{g}^{l} \frac{\phi'_{gp}^{l} - \phi''_{g}^{l}}{h/r}$$
(F)

$$\phi'_{gp}^{1} \equiv \frac{1}{s} \int_{Sp} \phi(\mathbf{r}) ds \tag{\Delta}$$

$$\mathbf{j}_{gp}^{m} = -\frac{\mathbf{\phi}_{gp}^{m} - \mathbf{\phi}_{g}^{m}}{\mathbf{h}}$$
(9)

میدانیم که چگالیهای جریان و شار در مرز میان l و m پیوسته است

$$\mathbf{J'}_{\mathrm{gp}}^{\mathrm{l}} = -\mathbf{J'}_{\mathrm{gp}}^{\mathrm{m}}$$
 (الفن.)

$$\phi'_{\rm gp}^{\prime l} = \phi'_{\rm gp}^{\prime m} \qquad (\downarrow, V)$$

جر) هندسهی شش گوشهای (در دو بعد)، هر نود دارای شش (p=۶) وجه به طول Δx و مساحت Δy / ۳/۳ است [۳]

$$\begin{split} & \frac{{}^{\mathsf{Y}}\!S}{Ah} \sum_{p=\iota}^{p} [\frac{\imath}{D'_{g}^{l}} + \frac{\imath}{D'_{g}^{m}}]^{-\iota} [\varphi''_{g'}^{l} - \varphi''_{g'}^{m}] + \sum_{g}'^{l} \varphi''_{g}^{l} = \frac{\imath}{k} \sum_{g'=\iota}^{G} x_{g} \upsilon \sum_{fg}^{l} \varphi''_{g'}^{l} + \\ & \sum_{\substack{g'=\iota\\g'=\ell=g}}^{G} \sum_{gg'}^{l} \varphi''_{g'}^{n} \qquad g = \imath, \varUpsilon, \dots, G \end{split}$$

برای استخراج رابطهی تفاضل محدود معادلهی پخش در سه بعد، باید رابطهی نشت در راستای محور z را به دست آورد. رابطهی تفاضل محدود گرادیان شار در راستای محور z برای جملهی نشت محوری چنین به دست میآید

$$\mathbf{J}_{g}^{k} = \mathbf{Y} \Big[\frac{\mathbf{h}_{1}}{\mathbf{D}_{g}^{l}} + \frac{\mathbf{h}_{k}}{\mathbf{D}_{g}^{k}} \Big]^{-1} \big[\boldsymbol{\varphi}_{g}^{l} - \boldsymbol{\varphi}_{g}^{k} \big] \tag{9}$$

با اضافه کردن رابطهی مربوط به نشت در راستای محوری رابطهی (۹) به رابطهی (۸)، رابطهی تفاضل محدود معادلهی پخش در سه بعد به صورت زیر به دست میآید

$$\begin{split} & \frac{{}^{\mathsf{Y}}\!S}{A}\sum_{m=1}^{\mathsf{r}}[\frac{1}{D_g^l} + \frac{1}{D_g^m}]^{-1}[\phi_g^l - \phi_g^m] + \\ & \sum_{k=1}^{\mathsf{r}}{}^{\mathsf{Y}}\![\frac{h_l}{D_g^l} + \frac{h_k}{D_g^k}]^{-1}[\phi_g^l - \phi_g^k] + \sum_{\alpha}^g \phi_g^l = \\ & \frac{1}{k}\sum_{g'=1}^G x_g \upsilon \sum_{fg}^l \phi_{g'}^l + \sum_{\substack{g'=1\\g'\neq g}}^G \sum_{gg'}^l \phi_{g'}'^l, g, \mathfrak{l}, \mathfrak{l},$$

که در آن h_k dول مش در راستای محوری برای نود h_k d طول مش در راستای محوری برای نود بالایی یا پایینی نود l و D_g^k ضریب پخش نود k است که در بالا و پایین نود l قرار گرفته است. به طریق مشابه، رابطههای زیر برای هندسههای، به ترتیب، مربعی و استوانهای به دست میآید

$$\begin{split} &\sum_{k=1}^{s} \mathbf{Y} \Big[\frac{h_{1}}{D_{g}^{l}} + \frac{h_{k}}{D_{g}^{k}} \Big]^{-1} \big[\boldsymbol{\varphi}_{g}^{l} - \boldsymbol{\varphi}_{g}^{k} \big] + \sum_{\alpha}^{g} \boldsymbol{\varphi}_{g}^{l} = \\ &\frac{1}{k} \sum_{g'=1}^{G} x_{g} \upsilon \sum_{fg}^{l} \boldsymbol{\varphi}_{g'}^{l} + \sum_{\substack{g'=1\\g'\neq g}}^{G} \sum_{gg'}^{l} \boldsymbol{\varphi}_{g'}^{\prime l}, \quad g, \mathbf{1}, \mathbf{7}, \dots, G; \quad (\mathbf{11}) \\ &\sum_{i=1}^{r} \frac{\mathbf{Y} \Delta \mathbf{r}_{i}}{A_{1}(\mathbf{r}_{i} - \frac{\Delta \mathbf{r}_{i}}{\mathbf{Y}})} \Big[\frac{\Delta \boldsymbol{\varphi}_{i}}{D_{g}^{l}} + \frac{\Delta \boldsymbol{\varphi}_{i}}{D_{g}^{l}} \Big]^{-1} \big[\boldsymbol{\varphi}_{g}^{l} - \boldsymbol{\varphi}_{g}^{i} \big] + \end{split}$$





3. روش توانی برای یافتن ضریب تکثیر مؤثر ابتدا مسئلهی ویژه مقدارهای حالت بحرانی را به شکل عملگری بازنویسی مینماییم

$$\mathbf{M}\boldsymbol{\phi} = \frac{\mathbf{i}}{k} \mathbf{F} \boldsymbol{\phi} \tag{19}$$

که در آن M عملگر تخریب (نشت و جذب) و سمت راست معادله جملهی مربوط به منبع است. ابتدا سمت راست معادله و k را حدس زده و فرض می کنیم که محیط غیرقابل تکثیر است. سپس با روش SOR شار در هر نقطه را به دست می آوریم و با توجه به این شار تکرار اول، جملهی منبع را به دست می آوریم. در حالت کلی داریم

$$\mathbf{M}\boldsymbol{\phi}^{(n+1)} = \frac{1}{k} \mathbf{S}^{(n)} \tag{10}$$

با توجه به رابطهی (۱۶) ضریب تکثیر مؤثر را در هر مرحله محاسبه میکنیم. این عمل تا آن جا ادامه مییابد که تابع خطا (رابطهی ۱۷) را پوشش دهد [۱، ۳].

$$K^{(n+1)} = \frac{\int S^{(n+1)}(r) d^{r}r}{\frac{1}{k^{(n)}} \int S^{(n)}(r) dr}$$
(19)

$$\left| \boldsymbol{\phi}^{(t+1)} - \boldsymbol{\phi}^{(t)} \right| \langle \boldsymbol{\epsilon}_{\lambda}, \mathbf{Max} \left| \frac{\boldsymbol{\phi}_{i}^{(t+1)} - \boldsymbol{\phi}_{i}^{(t)}}{\boldsymbol{\phi}_{i}^{(t)}} \right| \langle \boldsymbol{\epsilon}_{\phi}$$
 (1V)

$$\sum_{i=1}^{r} \frac{{}^{r}S_{j}}{A_{1}} \left[\frac{\Delta r_{1}}{D_{g}^{1}} + \frac{\Delta r_{j}}{D_{g}^{j}} \right]^{-1} \left[\phi_{g}^{1} - \phi_{g}^{j} \right] + \sum_{k=1}^{r} {}^{r}\left[\frac{h_{1}}{D_{g}^{1}} + \frac{h_{k}}{D_{g}^{k}} \right]^{-1} \left[\phi_{g}^{1} - \phi_{g}^{k} \right] +$$
(17)

$$\boldsymbol{\Sigma}_{\alpha}^{g} \boldsymbol{\phi}_{g}^{l} = \frac{1}{k} \sum_{g'=\imath}^{G} \boldsymbol{x}_{g} \boldsymbol{\upsilon} \boldsymbol{\Sigma}_{fg}^{l} \boldsymbol{\phi}_{g'}^{l} + \sum_{\substack{g'=\imath\\g'\neq g}}^{G} \boldsymbol{\Sigma}_{gg'}^{l} \boldsymbol{\phi}'_{g'}^{l}, \quad g, \imath, \textbf{Y}, ..., G$$

که در آنها،

$$\mathbf{A}_{l} = \pi (\mathbf{r}_{l}^{\mathsf{r}} - (\mathbf{r}_{l} - \Delta \mathbf{r}_{l})^{\mathsf{r}}) \frac{\Delta \boldsymbol{\varphi}_{l}}{\mathsf{r}\pi}$$

و

$$S_{v} = \Delta \phi_{1}(r_{j} - \Delta \phi_{j})$$
$$S_{v} = \Delta \phi_{1}(r_{j}).$$

۳. روش SOR در حل دستگاه معادلههای خطی

روش های عددی متعددی برای حل دستگاه معادله های خطی از جمله: حذفی و تکرار، ژاکوبی و گاوس – سایدل، SOR و ... وجود دارد. در حالت چند بعدی به دلیل وجود صفرهای زیاد در ماتریس ضرایب، روش های حذفی مناسب نیستند و از بین روش های تکرار، روش SOR دارای سرعت قابل قبولی است. در این روش از پارامتر ۵ که بین ۱ و ۲ است می توان به صورت زیر استفاده نمود [۱]

$$\phi_i^{(m+1)} = \frac{\omega}{\alpha_{ii}} \left[\mathbf{S}_i - \sum_{j=1}^{i-1} \alpha_{ij} \phi_j^{(m+1)} - \sum_{j=i+1}^N \alpha_{ij} \phi_j^{(m)} \right] + (1-\omega) \phi_i^{(m)} \quad (1\texttt{Y})$$

در این رابطه اگر ۵ را برابر یک قرار دهیم به رابطهی گاوس-سایدل خواهیم رسید.

در این پژوهش به ازای ۵ های مختلف، سرعت محاسبات در رایانهای با پردازندهی مرکزی ۳٫۲ گیگاهرتز و ۵۱۲ مگابایت حافظهی اصلی (RAM) و برای ۱۰۰۰۰ مش بررسی شد که نتایج مربوط به آن در شکل ۲ داده شده است. ملاحظه می شود که بهینه مقدار ۵ برابر ۱٫۸۷ است.

٥. روش ویلانت شیفت^(۱) برای یافتن ضریب تکثیر مؤثر معادلهی تفاضل محدود پخش را به شکل ماتریسی زیر در نظر می گیریم

$$\mathbf{M}\boldsymbol{\phi} = \lambda \mathbf{F}\boldsymbol{\phi} \equiv \frac{\mathbf{i}}{\mathbf{k}_{\rm eff}} \mathbf{F}\boldsymbol{\phi} \tag{1A}$$

$$(\mathbf{M} - \frac{\mathbf{i}}{\mathbf{k}_{s}}\mathbf{F})\phi = \left(\frac{\mathbf{i}}{\mathbf{k}_{eff}} - \frac{\mathbf{i}}{\mathbf{k}_{s}}\right)\mathbf{F}\phi \qquad (19)$$

$$(\mathbf{M} - \frac{\mathbf{i}}{\mathbf{k}_{s}^{n}}\mathbf{F})\boldsymbol{\phi}^{n+\mathbf{i}} = \mathbf{\widetilde{S}}^{n} = \left(\frac{\mathbf{i}}{\mathbf{k}_{eff}^{n}} - \frac{\mathbf{i}}{\mathbf{k}_{s}^{n}}\right)\mathbf{F}\boldsymbol{\phi}^{n}$$

که دارای رابطهی k_{eff}^n + \deltak است. معادلهی (۲۰) را می توان چنین نوشت

$$k_{A}^{n}\psi^{n+\prime} = FA^{-\prime}\psi^{n} \tag{(1)}$$

که در آن،

$$A \equiv M - \frac{1}{k_s^n} F, \quad \psi^n \equiv F \phi^n \tag{11}$$

و

$$\frac{1}{k_{A}^{n}} \equiv \frac{1}{k_{eff}^{n}} - \frac{1}{k_{s}^{n}}$$
(YY)

توجه داریم که k_A ویژه مقدار F['] A برای یک مقدار تثبیت شدهی k_sⁿ است.

$$k_{A}^{n+\prime} = k_{A}^{n} \frac{\langle \psi^{n+\prime}, \psi^{n+\prime} \rangle}{\langle \psi^{n+\prime}, \psi^{n} \rangle}$$
(14)

این رابطه میتواند برای استخراج رابطهای برای (n+۱) امین تکرار ویژه مقدار (ضریب تکثیر مؤثر) استفاده شود. ابتدا

$$\frac{1}{k_{\rm A}^{n+1}} \equiv \frac{1}{k_{\rm eff}^{n+1}} - \frac{1}{k_{\rm s}^{n}} = \frac{\gamma}{k_{\rm A}^{n}}$$
(Ya)

که در آن،

$$\gamma = \frac{\left< \psi^{n+1}, \psi^{n} \right>}{\left< \psi^{n+1}, \psi^{n+1} \right>} \tag{19}$$

$$k_{eff}^{n+1} = \left[\frac{\gamma}{k_A^n} + \frac{\gamma}{k_s^n}\right]^{-1} = \left[\frac{\gamma}{k_{eff}^n} + \frac{\gamma - \gamma}{k_s^n}\right]^{-1}$$
(YV)

کار آیی روش ویلانت شیفت بستگی به انتخاب مناسب ویژه مقدار جابه جایی δk دارد که با افزایش δk تکرار خارجی کاهش می یابد اما باید توجه داشت که افزایش kk باعث افزایش تکرار داخلی می شود. در این کار پژوهشی از روش سعی و خطا بهترین مقدار δk برابر ۲۶، به دست آمد [۴].

$$-\frac{D}{\phi}\frac{d\phi}{dx} = C \tag{(YA)}$$

$$\mathbf{C} = \frac{\mathbf{D}}{\delta} \tag{Y9}$$

در خلاء مقدار فاصلهی برون یابی شده برابر ۰٫۷۱۰۴ $\lambda_{
m tr}$ است و با توجه به این که $D = \lambda_{
m tr}/r$ است.



برای یک شرط مرزی برونیابی شده در داخل یا خارج جاذب سیاه، شیب شار با یک عنصر تفاضل محدود بسط داده میشود. شرط مرزی در سطح یک عنصر به صورت زیر است

$$-\left\langle \frac{\mathbf{D}}{\phi_{s}} \frac{\mathrm{d}\phi}{\mathrm{d}x} \right|_{s} \right\rangle = \mathbf{C}_{s} \tag{(7.)}$$

که در آن، $\mathrm{C_s}$ یک مقدار ثابت است.

$$-\frac{d\phi}{dx} = \frac{\phi_i - \phi_s}{\Delta}$$
(٣1)

که در آن ${\Phi_{\mathrm{i}}}$ شار داخلی، ${\Phi_{\mathrm{s}}}$ شار مرزی و Δ فاصلهی مرز از نقطهی داخلی است.

با جای گذاری رابطهی (۳۱) در رابطهی (۳۰) داریم

$$-\left\langle \frac{\mathbf{D}}{\phi_{s}} \frac{\mathrm{d}\phi}{\mathrm{d}x} \middle|_{s} \right\rangle = \frac{\mathbf{D}_{i}(\phi_{i} - \phi_{s})}{\Delta\phi_{s}} \tag{(YY)}$$

$$\mathbf{J}_{s} = -\mathbf{D}_{i}\mathbf{A}_{n}\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{\phi}}{\mathrm{d}x} = \frac{\mathbf{A}_{n}\boldsymbol{\phi}_{i}}{(\frac{1}{\mathbf{C}_{s}} + \frac{\Delta}{\mathbf{D}_{i}})} \tag{97}$$

این رابطه را با توجه به موقعیت مکانی شرط مرزی در رابطهی (۲) قرار میدهیم [۵].

۲. روندنمای محاسبهی شار و ضریب تکثیر مؤثر

روندنمای محاسبهی شار نوترونی حاصل از حل عددی معادلهی پخش در شکل ۳ داده شده است. چنانچه دیده می شود محاسبات با یک حدس اولیه برای شار آغاز شده و با ایجاد یک شمارنده برای تکرار داخلی ادامه می یابد. محاسبات تا هنگامی ادامه می یابد که شار و ویژه مقدار همگرا شده باشند.



شکل ۳. روندنمای محاسبهی شار و ضریب تکثیر مؤثر.

، توزیع نسبی چگالی قدرت در قلب رآکتور

توزیع نسبی قدرت با فرض چگالی قدرت متوسط واحد، در کل قلب به دست میآید. چگالی قدرت متوسط قلب از رابطه زیر به دست میآید

$$\overline{P} = \frac{\epsilon}{V_{\text{core}}} \int_{V_{\text{core}}} (\sum f_{\nu} \phi_{\nu} + \sum f_{\nu} \phi_{\nu}) dV \qquad (\mbox{wf})$$

$$P = \frac{\varepsilon}{\overline{P}V_{k}} \int_{V_{k}} (\sum f_{y} \phi_{y} + \sum f_{y} \phi_{y}) dV$$
(٣٥)

$$\sum V_{k} (\nabla f_{y} \phi_{y}) dV$$

۹. مشخصات کلی و مزایای کد 3DNFD در هندسههای مربعی، مثلثی و استوانهای

این کد شامل دو برنامهی کنسول و برنامهی پنجره است. برنامهی پنجره دارای یک پنجرهی والد و سه زیرپنجرهی شامل هندسههای مربعی، مثلثی و استوانهای است. این کد قادر است علاوه بر دریافت پارامترهای دو گروهی معادلهی پخش به صورت دستی، این ثابتها را از یک خروجی ذخیره شدهی ویمز استخراج نماید. از دیگر قابلیتهای بارز این کد عدم محدودیت در تعداد مشها و چیدمان سوخت است به طوری که امکان مدلسازی کل قلب رآکتور فراهم می شود. هم چنین امکان ارتباط با دیگر کدهای هسته ی و ذخیره سازی کد برای هر پروژه وجود دارد. کد مذکور دارای ورودی های زیر است:

- تعداد مشها در دو راستای شعاعی و محوری،
 - شرایط مرزی (برونیابی و بازتابیده شده)،
 - دقت محاسبات شار و ضریب تکثیر مؤثر،
- چگالی قدرت متوسط قلب به منظور بهنجارسازی
 توزیع چگالی قدرت و شار قلب،
 - پارامترهای معادله ی پخش در دو گروه انرژی،
 - چيدمان ترکيبات مواد.

خروجیهای کد به صورت زیر هستند

- توزیع شار نوترون تند و گرمایی در نقاط مختلف قلب
 و در دو گروه انرژی،
- ضریب تکثیر مؤثر با توجه به ورودیها و شکل هندسی قلب،
- توزیع قدرت در قلب رآکتور در لایه های مختلف و ضریب قله سازی در راستاهای شعاعی و محوری.

۱۰. مقایسهی نتایج حاصل از کد با معیارهای معتبر

برای بررسی صحت و دقت کد مورد نظر آن را با معیارهای معتبر در هندسههای مربعی و شش گوشهای محک زده و از درستی نتایج به دست آمده از اجرای کد اطمینان حاصل شد. از میان معیارهای ارزیابی شده، معیار شولتز به عنوان نمونه انتخاب شد.

11. معيار شولتز

معیار سه بعدی شولتز، قلب یک VVER1000 را در حالت ایستا مدل میکند. مجتمعهای سوخت، همگن هستند و پارامترهای نظریهی پخش در دو گروه انرژی داده شده است.

ترکیب مواد شامل چهار نوع غنا، جاذب سوختنی، میلههای کنترل و بازتاباننده است. نصف یک مجموعه میلههای کنترل وارد قلب شده است. بخشی از مجتمع مرکزی که در مرکز راستای محوری قرار دارد حاوی ۳۵٫EU است [۷].

۱۲. هندسهی قلب

شکل ۴ طرحواره ی عمودی قلب معیار و شکل ۵ بخش ۳۰ درجهای قلب رآکتور VVER1000 همراه با دو قسمت بازتاباننده را نشان می دهد. در شکل ۵ گام شبکه ی مجتمع سوخت نمونه ی آزمایشی VVER1000، ۲۴/۱ سانتی متر است که اختلاف اندکی با گام شبکه ی یک ۲۴/۱ سانتی متر است واقعی، که ۲۳/۶ سانتی متر است، دارد. این اختلاف برای یک معیار ریاضی قابل قبول است. ارتفاع قلب ۳۵۵ سانتی متر است که بازتاباننده های محوری و شعاعی آن را احاطه کرده اند. بنابراین در مجموع ارتفاع، ۲۲۶ سانتی متر است که شامل ۳۵/۵ سانتی متر،



شکل ٥. چیدمان سوخت در راستای شعاعی [۷].

ضریب تکثیر مؤثر و توزیع شار متوسط قلب و چگالی قدرت

در هر ناحیهی محوری و شعاعی، به دست آمد. نتایج مربوط به ضریب تکثیر در جدول ۲، و توزیع چگالی قدرت در هر بسته

همچنین با تعداد مشهای مختلف در حجم قلب رآکتور ضرایب

در شکل ۷ و توزیع شار نوترونهای تند و در شکل ۸ توزیع

شار نوترونهای گرمایی در مرکز قلب داده شده است. در شکل ۹ نیز اختلاف چگالی قدرت نسبی محوری به دست آمده از

نتایج به دست آمده از اجرای کد و همچنین مقایسهی آن با معیارهای معتبر مانند معیار شولتز صحت و دقت محاسبات و همچنین قدرت کد 3DNFD از لحاظ سرعت محاسبات تأیید

شد. به عنوان مثال اختلاف ضریب تکثیر به دست آمده از اجرای

کد با نتایج معیار در حدود (۷(pcm به دست آمد که مسلماً با

افزايش تعداد مشرها كاهش خواهد يافت. همچنين اختلاف

قدرت بیشینه در حد ۰٬۰۶۴۶ بود که این نتایج دلالت بر صحت و

تكثير مؤثر محاسبه و در جدول ۳ آورده شده است.

سوخت در شکل ۶ آورده شده است.

اجزاي كد و معيار شولتز مشاهده مي شود.

13. نتيجه گيري

دقت محاسبات کد دارد.



۱۳. ترکیب مواد

در شکل ۵، شمارهی نوشته شده در قسمت بالایی یک مجتمع سوخت، نوع مجتمع را نمایش میدهد. در جدول ۱ سطح مقطعها و ضرایب پخش در دو گروه انرژی آورده شده است. مواد ۱، ۳، ۵، ۷ سوخت و مادهی ۴ سوخت دارای EU₇O₇ است. مادهی ۲ سوخت و میلههای کنترل است و مادهی R بازتاباننده است. مادهی بازتابانندهی یکسانی برای راستاهای محوری و شعاعی در نظر گرفته شده است [۷].

18. شرایط مرزی در مرز خارجی قلب، شرط مرزی به صورت •=-Jg (جریان نوترون ورودی برابر صفر است) به عبارت دیگر بازتابش (نوترون) برابر صفر است [۷].

۱۵. نتایج محاسبات و مقایسه با نتایج موجود در معیار شولتز برای محاسبهی توزیع شار، چگالی قدرت و ضریب تکثیر مؤثر، ارتفاع قلب به صورت ۱۲ ناحیهی ۳۵٫۵ سانتیمتری از پایین به بالا شماره گذاری شد. در هر ناحیه ۵ مش و در نتیجه در راستای محوری جمعاً ۶۰ مش زده شد. همچنین هر شش ضلعی به ۹۶ مثلث تقسیم شد.

دقت محاسبات برای محاسبهی شار در حدود ۰٬۰۰۰ و برای محاسبه ضریب تکثیر مؤثر ۰٬۰۰۰۱ در نظر گرفته شد.

(cm^{-1})	$MVs[1+\frac{\sum_{g}}{n \cdot r^{g}}(n.cm)^{-1}]$	(cm^{-1})	(cm^{-1})	Dg (cm)	گروہ	نوع مادہ
•,••۴٧۶	۶/۰۱۳۰×۱۰ ^{-۷}		•,•14140	1,80041	١	
• ,• ٨٣٩٨ •	1,113×1.	• /• 10949	•,•\$\$••\$	•_*****	۲	,
•,••۴٧•۲	0,98.0×1.		•,• ۲۴۷۶۹	1,4.90.	١	U
·/·AFITA	1,180°×1.	• /• 18869	·,·VF9AA	• / ٣٨٧۵۶	۲	٢
•,••0144	V,4479×1.		•,• ٢ ٣٨••	1/57.97	١	٣
•,11491	۱,۵۳۳۶×۱۰ ^{-۵}	•/•1017	·,·A·FFY	۰,۳۸۰۲۸	۲	
•,••\$18٣	٧ _/ ٨٧٣١×١٠ ^{-٧}		•,•14•99	1/29447	١	ĸ
•,17091	۱ _/ ۶۸۴۸×۱۰ ^{-۵}	• /• 139.5	•,•9477	• / 3069	۲	۴
•,••\$٣٣٩	۸,۱۰۱۴×۱۰ ^{-۷}		•,• ۲۳۶۹ ۷	1/36932	١	
•/17998	۱/ ۲۳ ۸۱×۱۰ ^{-۵}	• /• 14100	·/·AV9A1	• /***	۲	2
•,••\$778	۷,۹۵۳۶×۱۰ ^{-۷}		•,• ٣٣٧٢ ١	1,88988	١	
•,17917	۱ <i>,</i> ۶۸۶۶×۱۰ ^{-۵}	• /• 14977	•,• ٨۵٨۵	• , 37411	۲	v
•	•		•,• • • • • • •	۱,۰	١	بازتابنده
•	•	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	· .· ۵۲۷۸۵	· /*****	۲	

جدول ۱. پارامترهای گروهی معادلهی پخش در مواد موجود در قلب [۷]

جدول ۲. مقایسه ی ضریب تکثیر مؤثر حاصل از کد 3DNFD با نتیجه ی

موجود در معيار شولتز





شکل ٦. توزیع چگالی قدرت نسبی محوری به دست آمده از اجرای کد و معیار.

جدول ۳. نتایج کد 3DNFD با تعداد مشرهای متفاوت در راستای محوری و شعاعی

قلەي قدرت	خطای نسبی (PCM)	K _{eff}	تعداد مشها در ماستای محمد ی	تعداد مشها در راستای شعای
	(FCIVI) 49	۱,.۵.۰۱۸	راستای معوری ۳۶	راستای شعاطی ۲۴
	١٢	1,.49991	۴۸	54
۲٬۵۳۹	٧	1,.49449	۶.	٩۶





شکل ۷. توزیع شار نوترونهای تند در مرکز قلب.







1. Wielandt Shift



- 1. J. J. Duderstadt, Louis J. Hamilton, Nuclear Reactor Analysis, Jone Wiley & Sons (1976).
- 2. K. Almenas, Introduction to Nuclear Reactor Physics, Springer publishing Co (1992).
- 3. Y. A. Shatilla, A sample quadratic nodal model for hexagonal geometry, Massachusetts institute of technology, September (1992).
- T. Downar, D. Lee, Y. Xu, T. Kozlowski, PARCS v2.6 U.S. NRC Core Neutronics Simulator THEORY MANUAL, School of Nuclear Engineering Purdue University (2004).

- 5. RSICC computer code collection, CITATION-LDI2, OAK RIDGE national laboratory (1971).
- 6. Computational Benchmark Problems Committee of the Mathematics and Computation Division of The American Nuclear Society, ANL-7416 Supplement 2, Argonne Code Center (1977).
- 7. http://aerbench.kfki.hu/aerbench/FCM101.doc.