



تعیین دو ضریب ایمنی قلب راکتور VVER-1000 با مجتمع سوخت های حلقوی

عرفانی نیا، علی - فقیهی، فرشاد* - حداد، کمال

دانشگاه شیراز، دانشکده مهندسی مکانیک، بخش مهندسی هسته ای

چکیده:

هدف از انجام این تحقیق بدست آوردن ضرایب نوترونیکی ایمنی قلب راکتور VVER-1000 حاوی مجموعه های پیشنهادی جدیدی از سوخت حلقوی است که در شرایط ابتدای سیکل کاری راکتور (BOC) مورد بررسی قرار گرفته است. این ضرائب ایمنی عبارتند از: ۱- ضریب راکتیویته آنی (prompt reactivity coefficient) که فاکتوری مهم در مطالعه جهش های توان راکتور در بحث دینامیک راکتور است. ۲- ضریب توان راکتیویته (power reactivity coefficient) که فاکتوری مهم در مانورهای توان راکتور است. برای این منظور قلب راکتور VVER-1000 با مجتمع سوخت های حلقوی توسط کد محاسباتی MCNP5 با توجه به اطلاعات راکتور مرجع (راکتور VVER-1000 بوشهر) شبیه سازی و سپس در شرایط BOC دو ضریب ایمنی به صورت عددی محاسبه شده است.

کلمات کلیدی: VVER-1000، MCNP5، ضریب راکتیویته آنی، ضریب توان راکتیویته

۱. مقدمه

یکی از اقداماتی که برای بهبود توان راکتورهای PWR پیشنهاد و مورد آزمایش قرار گرفته است، تغییر هندسه سوخت بصورت حلقوی در این نوع از راکتور می باشد. این تغییر هندسه به نحوی است که هیچ تغییری در ابعاد قلب و تعداد مجتمع سوختها حاصل نمی شود و تنها موردی که تغییری کند تعداد و ابعاد میله های سوخت می باشد. برای این منظور و همچنین به منظور پایین تر آوردن ماکزیمم دمای سوخت در راکتورهای تحت فشار (که از نظر ایمنی Minimum Departure from Nucleate Boiling ratio را پایین می آورد) ساخت سوختهای حلقوی مورد توجه قرار گرفته است [1].

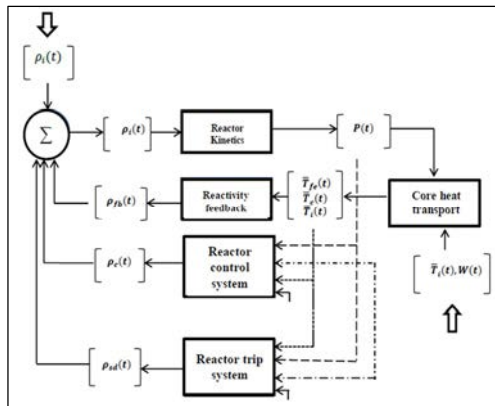
اینگونه سوختها در راکتورهای PWR غریبی مورد تحقیق قرار گرفته است ولی تحقیقات چندانی در راکتورهای VVER-1000 صورت نپذیرفته، و لذا ما آن را مد نظر قرار داده ایم. پیشرو تحقیقات در این زمینه Mujid.S.Kazimi و همکارانش از سال ۲۰۰۱ تاکنون بوده اند که در زمینه تحلیل رفتار نوترونیکی و همچنین ترمو هیدرولیک این نوع راکتورها و همچنین امکان سنجی ساخت این نوع سوختها انجام گرفته است [2]. این مسئله که ابعاد مجتمع سوخت حلقوی همانند مجتمع سوخت راکتورهای در حال کار می باشد و همچنین نسبت خنک کننده به سوخت به همان اندازه راکتورهای PWR امروزی می باشد برای ما می تواند بسیار مطلوب باشد [3]. از کارهای انجام شده میتوان به تحقیق F.Faghihi و M.Saidi nezhad در سال ۲۰۱۰ در تعیین دو ضریب ایمنی برای راکتور آبی تحت فشار Westinghouse با مجموعه سوخت های حلقوی با آرایش ۱۳×۱۳ اشاره کرد [4].

۲. روش کار

هدف از انجام این تحقیق بدست آوردن ضرایب ایمنی برای قلب راکتور VVER-1000 که شامل مجموعه های سوخت حلقوی است می باشد. این ضرائب ایمنی عبارتند از: ۱- ضریب راکتیویته آنی (prompt reactivity coefficient) که فاکتوری مهم در مطالعه جهش های توان راکتور در بحث دینامیک

راکتور است. ۲- ضریب توان راکتیویته (power reactivity coefficient) که فاکتوری مهم در مانورهای توان راکتور است. مشخص شدن مفهوم و اهمیت این دو ضریب را به صورت زیر توضیح می دهیم:

رفتار دینامیکی راکتور یعنی اثر متقابل و پیچیده بین واکنش زنجیره ای نوترون، فیدبک راکتیویته ترموهیدرولیکی سیستم کنترل راکتور و سیستم خاموش سازی.



شرایط محیطی است). در شکل ۱ مدل ساده دینامیکی آورده شده است [5]:

شکل ۱: مدل ساده دینامیک راکتور [5]

که با توجه به مدل بالا که در شکل ۱ آمده است [5]:

$$\rho(t) = \rho_i(t) + \rho_{fb}(t) + \rho_c(t) + \rho_{sd}(t)$$

$\rho_i(t)$ راکتیویته ای که باعث شروع حالت اولیه می شود، $\rho_{fb}(t)$ راکتیویته فیدبک گرمائی، $\rho_{sd}(t)$ راکتیویته در حالت خاموشی یا حالت trip است و $\rho_c(t)$ راکتیویته ناشی از سیستم کنترلی راکتور می باشند. راکتیویته ای که باعث شروع حالت اولیه می شود معمولاً تابع صریح و روشنی از زمان است $\rho_{fb}(t)$ (راکتیویته فیدبک) بستگی به دمای سوخت، دمای اولیه خنک کننده در بدو ورود و نیز دمای خنک کننده و ضریب تکثیر قلب راکتور مورد بحث دارد یعنی در حالت کلی داریم [5]:

$$d\rho_{fb} = \frac{1}{k} \frac{\circ k}{\circ \bar{T}_{fe}} d\bar{T}_{fe} + \frac{1}{k} \frac{\circ k}{\circ \bar{T}_c} d\bar{T}_c + \frac{1}{k} \frac{\circ k}{\circ \bar{T}_i} d\bar{T}_i$$

که در آن دمای متوسط سوخت، دمای متوسط خنک کننده و دمای متوسط سیال ورودی به ترتیب با زیر نویس های fe ، c ، و i مشخص شده اند. ضریب راکتیویته آنی (prompt reactivity coefficient) برای مطالعه جهش های فوق بحرانی آنی توان (super prompt critical nuclear excursion) مورد استفاده قرار می گیرد. در مواقعی که مقدار زیادی راکتیویته به قلب اعمال می شود ($\rho \gg \beta$)، توان راکتور بسیار سریع افزایش می یابد به طوری که این بازه زمانی افزایش توان در مقایسه با زمانی که گرما از سوخت به خنک کننده منتقل می شود بسیار کوچک است لذا در این بازه زمانی دمای سیال خنک کننده تغییر محسوسی نمی کند، بنابراین میتوان گفت که راکتیویته فیدبک فقط ناشی از افزایش دمای سوخت است، و می توان نوشت [5]:



$$d\bar{T}_c \approx d\bar{T}_i \approx 0 \rightarrow d\rho_{fb} = \frac{1}{k} \frac{\partial k}{\partial \bar{T}_{fe}} d\bar{T}_{fe}$$

برای این مدت زمان کوتاه که گرما نمیتواند از سوخت وارد خنک کننده شود همان سوختی به صورت آدیاباتیکی عمل می کند پس می توان نوشت [5]:

$$M_{fe} c_{fe} d\bar{T}_{fe} = P(t) dt \rightarrow d\rho_{fb} = \mu P(t) dt, \quad \mu = \left(\frac{1}{M_{fe} c_{fe}} \right) \left(\frac{1}{k} \frac{\partial k}{\partial \bar{T}_{fe}} \right)$$

که $P(t)$ توان راکتور است، و μ ضریب راکتیویته آنی (prompt reactivity coefficient) نامیده می شود [5]. قلب راکتور با ید به گونه ای طراحی شود که ضریب راکتیویته آنی منفی باشد. زیرا به ازای مثبت بودن آن سیستم غیر پایداری خواهیم داشت.

زمانی که راکتور در توانی کمی بیشتر از توان نامی اش کار می کند نمی توان انتظار داشت دمای سوخت و خنک کننده یکسان است بلکه به منظور انتقال گرما باید دمای سوخت از دمای خنک کننده بیشتر باشد تغییرات راکتیویته نسبت به توان در یک بازه ضریب توان نامیده می شود [3]. ضریب توان به صورت زیر تعریف می شود [5]:

$$\frac{d\rho_{fb}}{dP} = \frac{1}{k} \frac{\partial k}{\partial \bar{T}_{fe}} \frac{d\bar{T}_{fe}}{dP} + \frac{1}{k} \frac{\partial k}{\partial \bar{T}_c} \frac{d\bar{T}_c}{dP} + \frac{1}{k} \frac{\partial k}{\partial \bar{T}_i} \frac{d\bar{T}_i}{dP}$$

با در نظر گرفتن اینکه تغییرات توان به صورت شبه استاتیکی انجام می شود و با در نظر گرفتن دمای ورودی سیال خنک کننده به صورت ثابت (بعد از یک سری محاسبات) خواهیم داشت [5]:

$$\frac{d\rho_{fb}}{dP} = \left(R + \frac{1}{2Wc_p} \right) \frac{1}{k} \frac{\partial k}{\partial \bar{T}_{fe}} + \frac{1}{2Wc_p} \frac{1}{k} \frac{\partial k}{\partial \bar{T}_c}$$

که در این معادله w نرخ جریان سیال خنک کننده در کل قلب با واحد $\left(\frac{kg}{s} \right)$ ، R ، مقاومت گرمایی سوخت با واحد $\left(\frac{^\circ C}{w} \right)$ ، C_p گرمای ویژه در واحد جرم در فشار ثابت سیال خنک کننده با واحد $\left(\frac{j}{kg^\circ C} \right)$ می باشند.

۳. نتایج

۱.۳ شبیه سازی قلب

جدول شماره ۱: مشخصات راکتور VVER-1000 با سوخت حلقوی و سوخت معمولی

| پارامتر | مقدار |
|--------------------------|-----------|
| سوخت حلقوی (annular pin) | |
| شعاع داخلی غلاف داخلی | 0.4091 cm |
| شعاع خارجی غلاف داخلی | 0.4662 cm |
| شعاع داخلی سوخت، Rfi | 0.4741 cm |
| شعاع خارجی سوخت، Rfo | 0.7190 cm |
| شعاع داخلی غلاف خارجی | 0.7269 cm |

18th Iranian's Nuclear Conference

| | |
|------------------------------|--------------------------------------|
| 0.7840 cm | شعاع خارجی غلاف خارجی Rco. |
| 1.7851 cm | گام میله های سوخت |
| 156 | تعداد میله های سوخت در یک مجتمع سوخت |
| 12 | تعداد کانال های هدایت کننده |
| $0.030 \frac{w}{cm^2C}$ | رسانایی گرمایی k_{fe}, UO_2 |
| $410 \frac{j}{kg^{\circ}C}$ | گرمای ویژه c_{fe}, UO_2 |
| $0.1731 \frac{w}{cm^2C}$ | رسانایی گرمایی غلاف، k_c |
| $1870 \frac{j}{kg^{\circ}C}$ | گرمای ویژه خنک کننده، c_p |
| 309.5 °C | دمای متوسط سیال خنک کننده |
| | سوخت معمولی (solid pin) |
| 0.075 cm | شعاع حفره داخلی سوخت |
| 0.385 cm | شعاع سوخت |
| 0.3865 cm | شعاع داخلی غلاف سوخت |
| 0.455 cm | شعاع خارجی غلاف سوخت |
| $107.789 \frac{kw}{lit}$ | نرخ گرمای تولیدی در حجم قلب، q''' |
| 311 | تعداد میله های سوخت در یک مجتمع سوخت |
| 12.75 cm | گام بین میله ها |
| 163 | تعداد مجتمع های سوخت موجود در قلب |
| 316 cm | قطر معادل قلب |
| $84800 \frac{m^3}{hr}$ | نرخ جریان سیال در قلب |

در این تحقیق یک ششم قلب راکتور VVER-1000 با مشخصات روبرو شبیه سازی شده است.

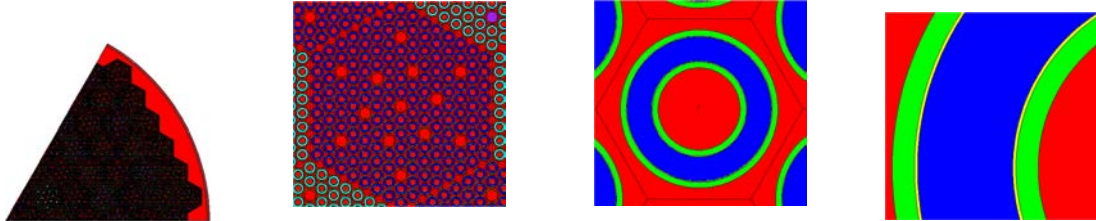
لازم به ذکر است با توجه به توضیحات داده شده در مقدمه، ابعاد راکتور و تعداد مجتمع های سوخت نسبت به راکتور مرجع هیچ تغییری نکرده و اطلاعات مربوط به ابعاد و مواد تشکیل دهنده مطابق با اطلاعات موجود در مدارک FSAR نیروگاه VVER بوشهر میباشد، و فقط تعداد و آرایش میله های سوخت، کانالهای هدایت کننده، ابعاد و هندسه میله های سوخت تغییر یافته است به گونه ای که راکتور دارای نسبت خنک کننده به سوخت مناسب باشد یا به عبارت دیگر

راکتور under moderated باشد. مشخصات راکتور مرجع و راکتور با مجتمع سوخت های حلقوی در جدول شماره ۱ آورده شده است.

در شکل ۲ یک ششم قلب که توسط کد محاسباتی MCNP5 شبیه سازی شده، نمایش داده شده است. آرایش غناهای سوخت در قلب با مجتمع های سوخت حلقوی همانند قلب معمولی است که لازمه مسطح شدن توان در راستای شعایی است.

۲.۳ ضریب راکتیویته آنی (prompt reactivity coefficient)

برای این ضریب محاسبه آن نیازمند محاسبه $\left(\frac{1}{k}\right)\left(\frac{\partial k}{\partial T_{fe}}\right)$ است. این عبارت خود نیز ضریب دمایی راکتیویته (ضریب داپلر)، قلب نیز نامیده می شود. $\alpha_{fe} = \left(\frac{1}{k}\right)\left(\frac{\partial k}{\partial T_{fe}}\right)$ ، شکل ۳ تغییرات لگاریتم ضریب تکثیر بر حسب دمای متوسط سوخت را نشان می دهد، که خط $Y = (-4.388 \times 10^{-6})x + 0.01187$ با $R=0.7609$ بر آن منطبق شده است. شیب نمودار معرف کمیت $\left(\frac{1}{k}\right)\left(\frac{\partial k}{\partial T_{fe}}\right)$ است، که عبارتند از $\alpha_{fe} = -4.388 \times 10^{-6} \left(\frac{1}{^{\circ}C}\right)$



(ت)

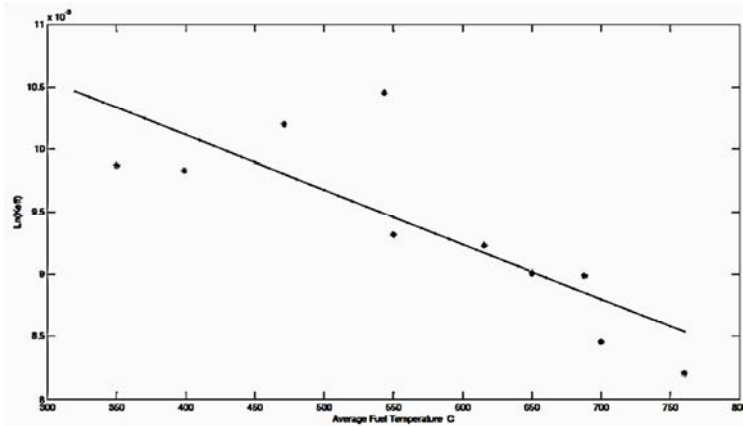
(ب)

(ج)

(الف)

شکل ۲: الف) المان سوخت حلقوی شامل غلاف‌های داخلی و خارجی، گوشت سوخت، فاصله سوخت و غلاف که با گاز هلیوم پر شده است. ب) یک میله سوخت حلقوی. پ) یک مجتمع سوخت هگزگونال شامل ۱۵۶ میله سوخت حلقوی و ۱۳ کانال هدایت کننده. ت) یک ششم قلب همراه با baffle و barrel

بعد از شبیه‌سازی قلب جهت محاسبه دو ضریب ایمنی قلب به شرح زیر محاسبات انجام شده است:



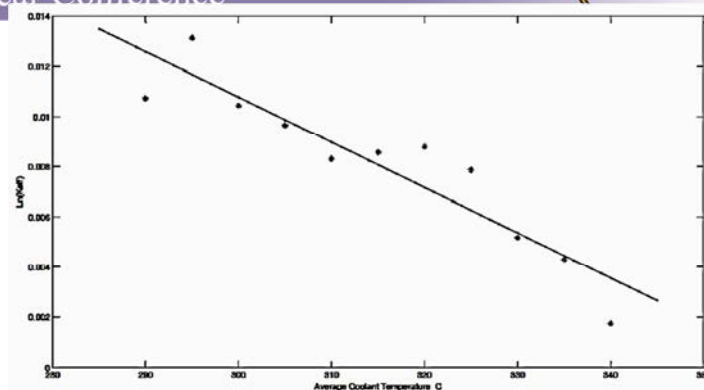
شکل ۳: تغییرات لگاریتم ضریب تکثیر بر حسب دمای متوسط سوخت

ضریب راکتیویته آنی (prompt reactivity coefficient) عبارتند از:

$$\mu = \left(\frac{1}{M_{fe} C_{fe}} \right) \left(\frac{1}{k} \right) \left(\frac{\partial k}{\partial T_{fe}} \right) = \left(\frac{1}{87037.9278 \text{ kg} \times 410 \left(\frac{j}{\text{kg}^\circ\text{C}} \right)} \right) (-4.388 \times 10^{-6} (1/^\circ\text{C})) = -1.22 \times 10^{-13} \left(\frac{1}{j} \right)$$

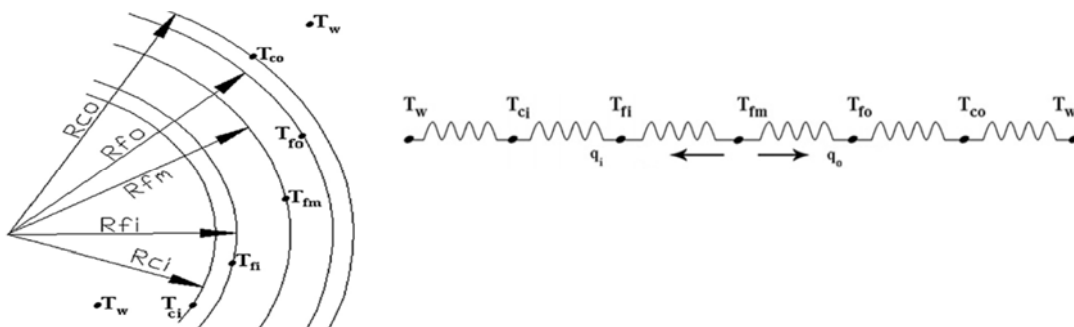
۳.۳ ضریب توان راکتیویته (power reactivity coefficient)

برای این ضریب محاسبه آن نیازمند محاسبه $\left(\frac{1}{k} \right) \left(\frac{\partial k}{\partial T_c} \right)$ است. این عبارت خود نیز ضریب دمای کند کننده راکتیویته قلب نیز نامیده می‌شود. $\alpha_c = \left(\frac{1}{k} \right) \left(\frac{\partial k}{\partial T_c} \right)$ ، شکل ۴ تغییرات لگاریتم ضریب تکثیر بر حسب دمای متوسط خنک کننده را نشان می‌دهد، که خط $Y = (-1.804 \times 10^{-4})x + 0.0649$ با $R=0.8569$ ، آن منطبق شده است. شیب نمودار معرف کمیت $\left(\frac{1}{k} \right) \left(\frac{\partial k}{\partial T_c} \right)$ است، که عبارتند از $\alpha_c = -1.804 \times 10^{-4} \left(\frac{1}{^\circ\text{C}} \right)$.



شکل ۴: تغییرات لگاریتم ضریب تکثیر بر حسب دمای متوسط سیال خنک کننده

برای محاسبه ضریب توان نیاز به تعیین مقاومت گرمایی قلب (R) است که با ارائه مدلی، به صورت عددی محاسبه می شود. با توجه به شکل ۵ و با صرف نظر از فاصله بین سوخت و غلاف و استفاده از روابط انتقال حرارت مقاومت حرارتی یک میله سوخت و به دنبال آن مقاومت گرمایی قلب به دست می آید.



شکل ۵: شماتیک میله سوخت حلقوی با نشان دادن شعاع ها

و دماهای قسمت های مختلف جهت بیان مدل مقاومت گرمایی و مدل مقاومت گرمایی از گوشت سوخت تا سیال خنک کننده پیرامونی [4]

مقاومت های گرمای میله سوخت در جهت مجرای داخلی و در جهت مجرای خارجی که به ترتیب با اندیس های i و o مشخص شده اند به قرار زیر می باشند [4].

$$R_i \left(\frac{^\circ\text{C}}{\text{W}} \right) = \frac{T_{fm} - T_w}{q_i} = \frac{1}{2\pi l} \left(\frac{1}{2k_f} + \frac{\ln\left(\frac{R_{fi}}{R_{ci}}\right)}{k_c} + \frac{1}{hR_{ci}} \right) \quad , \quad R_o \left(\frac{^\circ\text{C}}{\text{W}} \right) = \frac{T_{fm} - T_w}{q_o} = \frac{1}{2\pi l} \left(\frac{1}{2k_f} + \frac{\ln\left(\frac{R_{co}}{R_{fo}}\right)}{k_c} + \frac{1}{hR_{co}} \right)$$

با توجه به اینکه این دو مقاومت به صورت موازی مطرح می شوند مقاومت کل یک میله سوخت قابل محاسبه است. از طرفی مقاومت گرمایی قلب عبارتند از R/N می باشد که N تعداد میله های سوخت در قلب می باشد.

با انجام تمامی محاسبات مقاومت گرمایی قلب مقدار $R=1.85 \times 10^{-7} (^\circ\text{C} / \text{W})$ به دست آمده است.

حال با توجه به اطلاعات و محاسبات بالا می توان ضریب توان راکتیویته را محاسبه نمود.

$$\begin{aligned} \frac{d\rho_{fb}}{dP} \left(\frac{1}{w}\right) &= \left(R + \frac{1}{2Wc_p}\right) \frac{1}{k} \frac{\partial k}{\partial T_{fe}} + \frac{1}{2Wc_p} \frac{1}{k} \frac{\partial k}{\partial T_c} \\ &= \left((1.85e-7) + \frac{1}{2 \times 23555.55 \times 1870}\right) (-4.388 \times 10^{-6}) + \left(\frac{1}{2 \times 23555.55 \times 1870}\right) (1.804 \times 10^{-4}) \\ &= 8.60048 \times 10^{-13} + 1.9844 \times 10^{-12} = 2.844 \times 10^{-12} \left(\frac{1}{w}\right) \end{aligned}$$

نتیجه گیری:

در این تحقیق قلب راکتور VVER-1000 با مجتمع های سوخت حلقوی توسط کد محاسباتی MCNP5 شبیه سازی شد و دو ضریب ایمنی این راکتور به صورت عددی در ابتدای سیکل کارکردی راکتور محاسبه شد.

شرایط ابتدای سیکل کارکردی راکتور با توجه به شرایط کارکردی BOC راکتور مرجع که در مدارک FSAR موجود می باشد لحاظ شده است. در روند محاسبه این دو ضریب ایمنی، ضریب دمایی راکتیویته (ضریب داپلر) و ضریب راکتیویته کند کننده نیز محاسبه شده است. در مقایسه این دو ضریب با موارد ذکر شده در FSAR نیروگاه بوشهر در شرایط BOC خواهیم داشت:

| قلب با سوخت حلقوی $\left(\frac{1}{\%}\right)$ $\times 10^{-5}$ | قلب با سوخت معمولی $\left(\frac{1}{\%}\right)$ $\times 10^{-5}$ | |
|---|--|-----------------------------------|
| -0.4388 | -2.11 | ضریب دمایی راکتیویته (ضریب داپلر) |
| -18.04 | -13.0 | ضریب راکتیویته کند کننده |

منابع و مراجع:

- 1- M. S. Kazimi and N. E. Todreas, "Nuclear Power Economic Performance: Challenges and Opportunities", Ann. Rev. Energy Environ., 24, 139, 1999.
- 2- M. S. Kazimi, D. Feng, Y. Yuan, P. Hejzlar, H. Feinroth, B. Hao, E. J. Lahoda, and H. Hamilton. (2004), The Design and Manufacturing of Annular Fuel for High Power Density and Improved Safety in PWRs, International Meeting on LWR Fuel Performance, Orlando, Florida, September 19-22.
- 3- M. S. Kazimi. (2002), High Performance Fuel Design for Next Generation PWRs Annul Report, MIT-NFC-PR-048, MIT Nucl. Eng. Dept.
- 4- F. Faghihi, M. Saidi nezhad. (2010), Two Safety Coefficients for a Typical 13*13 Annular Fuel Assembly. Prog. Nucl. Energy.
- 5- E. E. Lewis, 1977. Nuclear Power Reactors Safety. John Wiley & Son, Inc.
- 6- MCNP Team, MCNP 5.1.40 RSICC Release Notes, Radiation Safety Information Computational Center (RSICC), http://mcnp-green.lanl.gov/about_mcnp5.html.