



## محاسبه توزیع شعاعی توان در میله سوخت استوانه‌ای بر حسب میزان فرسایش به کمک حل عددی معادلات مصرف سوخت

امیر حسین صفاری\*<sup>(۱)</sup> - سعید جعفری کیا<sup>(۱)</sup> - مجید باهنر<sup>(۱)</sup> - مهدی یارمحمدی<sup>(۲)</sup>

۱- شرکت سورنا، مرکز محاسبات پیشرفته هسته ای

۲- شرکت سورنا، مدیریت مهندسی هسته ای

### چکیده

توزیع شعاعی توان و توزیع ایزوتوپی عناصر شکافت پذیر در سوخت از پدیده های مهم و اثرگذار در رفتار میله سوخت در حین کار راکتور بوده و همواره مورد توجه محققین حوزه تحلیل رفتار سوخت قرار گرفته است. در این مقاله، برنامه‌ای کاربردی برای حل عددی معادلات مصرف سوخت و محاسبه توزیع شعاعی توان در میله‌های سوخت استوانه‌ای بر اساس مدل <sup>1</sup>TUBRNP توسعه داده شده است. نتایج محاسبات در مقایسه با داده‌های مرجع تطابق خوبی دارد به نحوی که مقدار خطای نسبی در محاسبه توزیع شعاعی توان در همه نقاط به غیر از لبه خارجی سوخت کمتر از ۲ درصد است و حداکثر خطای نسبی مربوط به گره واقع بر لبه خارجی سوخت و برابر ۷/۷۴ درصد می‌باشد.

**کلمات کلیدی:** توزیع شعاعی توان، توزیع عناصر شکافت پذیر، فرسایش سوخت، مدل <sup>1</sup>TUBRNP

### مقدمه

در ابتدای سیکل کاری راکتور به دلیل یکسان بودن غلظت مواد شکافت پذیر، توزیع توان در میله سوخت استوانه‌ای در جهت شعاعی تقریباً یکنواخت است. در فرسایش بالاتر با گیراندازی نوترون‌های ناحیه فوق‌حرارتی در رزونانس‌های <sup>238</sup>U، عنصر پلوتونیوم تولید می‌شود و به دلیل پدیده خود حفاظی فضایی، تولید آن در لبه خارجی سوخت بیشتر از مرکز است لذا مقدار چگالی توان نیز به دلیل وابستگی به شار نوترون و غلظت عناصر شکافت پذیر در لبه‌های خارجی سطح قرص سوخت بیشتر می‌شود [۱ و ۲]. جهت شبیه‌سازی این پدیده مدل‌های مختلفی از سوی محققین ارائه گردیده است. به طور مثال Wordsworth برای محاسبه توزیع توان در یک میله سوخت، توزیع شار را با یک معادله چند جمله‌ای با ضرایب ثابت تقریب زده است. این روش در توسعه کدهای محاسباتی رفتار سوخت IAMBUS [۳] و KIANA-1 [۴] به کار رفته است. Palmer و همکارانش نیز مدل RADAR<sup>۲</sup> را که مدلی ساده و سریع جهت محاسبه توزیع توان در میله سوخت است، ارائه داده‌اند [۵]. از آنجا که در این مدل از ایزوتوپ‌های سنگین‌تر Pu صرف نظر شده است، در فرسایش بالای سوخت دقت خوبی ندارد. این مدل مبنای مدل TUBRNP است که Lassmann و همکارانش ارائه نموده‌اند و در آن تعداد ایزوتوپ‌ها در محاسبات مصرف سوخت شامل ایزوتوپ‌های سنگین‌تر پلوتونیوم نیز

<sup>۱</sup> TRANSURANUS burnup model

<sup>۲</sup> RAting Depression Analysis Routine

می‌باشد [۲]. دقت و کارایی بالای مدل TUBRNP باعث شده است که کد محاسباتی تحلیل رفتار ترمومکانیکی سوخت ۳-FRAPCON نیز از این مدل جهت محاسبه توزیع شعاعی توان و غلظت ایزوتوپی عناصر شکافت‌پذیر استفاده نماید [۱]. لذا در این مقاله برنامه‌ای بر اساس این مدل تولید شده که معادلات مصرف سوخت را با روش عددی رانگ کوتاه مرتبه ۴ حل نموده و توزیع شار و توان در میله سوخت را برحسب میزان فرسایش سوخت محاسبه می‌کند.

## روش کار

### معادلات مصرف سوخت

معادلات مربوط به غلظت متوسط ایزوتوپها در میله سوخت بر مبنای معادلات به کار رفته در کدهای محاسباتی مصرف سوخت برای سه ایزوتوپ  $^{235}\text{U}$ ،  $^{238}\text{U}$  و  $^{239}\text{Pu}$  به صورت زیر می‌باشند.

$$\frac{d\bar{N}_{235}}{dt} = -\sigma_{a,235}\bar{N}_{235}\phi, \quad (1)$$

$$\frac{d\bar{N}_{238}}{dt} = -\sigma_{a,238}\bar{N}_{238}\phi, \quad (2)$$

$$\frac{d\bar{N}_{239}}{dt} = -\sigma_{a,239}\bar{N}_{239}\phi + \sigma_{c,238}\bar{N}_{238}\phi, \quad (3)$$

که در معادلات فوق  $\sigma_a$  و  $\sigma_c$  به ترتیب سطح مقطع های موثر جذب و گیراندازی بر اساس طیف  $\phi$  شار نوترون و  $\bar{N}$  برابر چگالی اتمی ایزوتوپ است که اندیس آن نشان دهنده عدد جرمی آن ایزوتوپ است. با توجه به مفهوم فرسایش سوخت می‌توان آن را بر حسب تولید توان و چگالی سوخت نوشت. تولید توان نیز متناسب با سطح مقطعهای شکافت، انرژی آزاد شده از هر شکافت، غلظت ایزوتوپهای شکافت پذیر، شار نوترونی و زمان پرتودهی سوخت می‌باشد.

$$\Delta bu = \frac{q''' \Delta t}{\rho_{fuel}} = \frac{\alpha}{\rho_{fuel}} \sum_k \sigma_{f,k} \bar{N}_k \phi \Delta t, \quad (4)$$

که در معادله فوق  $q'''$ ، چگالی توان تولیدی،  $\rho_{fuel}$  چگالی سوخت،  $\alpha$  ضریب تبدیل،  $\sigma_{f,k}$  سطح مقطع شکافت ایزوتوپ  $k$  ام می‌باشند.

جهت ساده‌سازی معادلات، بهتر است حاصلضرب شار نوترون در بازه زمان یعنی  $\phi \Delta t$  به صورت گام فرسایش سوخت  $\Delta bu$  نوشته شود. با توجه به رابطه اخیر معادلات مصرف سوخت برای غلظت ایزوتوپی شش ایزوتوپ به صورت نقطه‌ای و به صورت تابعی از فاصله از مرکز سوخت بازنویسی شده است. این معادلات دیفرانسیل کوپل به کمک روش رانگ کوتاه مرتبه چهار به صورت عددی حل می‌شوند [۶].

$$\frac{dN_{235}(r)}{dbu} = -\sigma_{a,235}N_{235}(r)A \quad (5)$$

$$\frac{dN_{238}(r)}{dbu} = -\sigma_{a,238}\bar{N}_{238}f(r)A \quad (6)$$

$$\frac{dN_{239}(r)}{dbu} = -\sigma_{a,239}N_{239}(r)A + \sigma_{c,238}\bar{N}_{238}f(r)A \quad (7)$$

$$\frac{dN_{240}(r)}{dbu} = -\sigma_{a,240}N_{240}(r)A + \sigma_{c,239}N_{239}(r)A \quad (8)$$

$$\frac{dN_{241}(r)}{dbu} = -\sigma_{a,241}N_{241}(r)A + \sigma_{c,240}N_{240}(r)A \quad (9)$$

$$\frac{dN_{242}(r)}{dbu} = -\sigma_{a,242}N_{242}(r)A + \sigma_{c,241}N_{241}(r)A \quad (10)$$

$$A = 0.8815 \times \frac{\rho_{fuel}}{\alpha \sum_k \sigma_{f,k} \bar{N}_k} \quad (11)$$

در معادلات فوق  $f(r)$  یک تابع شعاعی شکل<sup>۱</sup> نرمالیزه شده است و جذب نوترون در رزونانس‌های  $^{238}\text{U}$  را که منجر به تولید  $^{239}\text{Pu}$  می‌شود، به نوعی در معادلات تصحیح می‌نماید. تابع توزیع مصرف  $^{238}\text{U}$  و تولید  $^{239}\text{Pu}$  ترکیبی از میزان تولید ثابت  $^{239}\text{Pu}$  ناشی از جذب نوترون‌های حرارتی به علاوه جمله‌ای به شدت غیر خطی برای تولید ناشی از جذب رزونانس‌ها می‌باشد.

$$f(r) = 1 + p_1 \exp(-p_2^2(r_{out} - r)^{p_3}) \quad (12)$$

که در معادله فوق  $r_{out}$  شعاع قرص سوخت است و ضرایب  $p_1$ ،  $p_2$  و  $p_3$  به ترتیب ۳/۴۵، ۳ و ۰/۴۵ می‌باشند.

### توزیع شار و توان

توزیع شعاعی شار نوترونی در قرص سوخت با حل معادله پخش یک بعدی و یک گروهی در سوخت استوانه‌ای به صورت معادله (۱۳) توصیف می‌شود. تولید توان در هر نقطه از سوخت نیز متناسب با شار نوترون و سطح مقطع ماکروسکوپی شکافت می‌باشد که به صورت معادله (۱۴) قابل بیان می‌باشد.

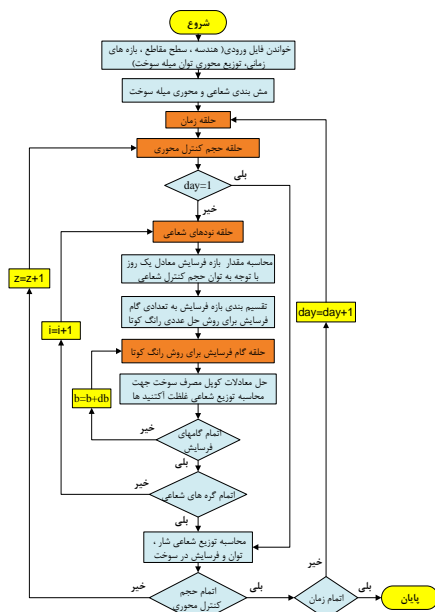
$$\phi(r) = C_1 \times I_0(\kappa r), \quad \kappa = \sqrt{\Sigma_a / D} \quad (13)$$

$$q'''(r) = C_2 \times \sum_j \sigma_{f,j} N_j(r) \times I_0(\kappa r) \quad (14)$$

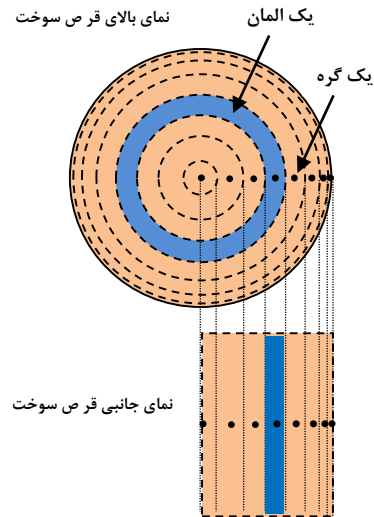
که در معادلات فوق  $I$  تابع شبه بسل،  $\Sigma_a$  سطح مقطع ماکروسکوپی جذب،  $D$  ضریب پخش نوترون، چگالی نقطه‌ای توان است. ثابت  $C_2$  نیز با توجه به مقدار توان میله سوخت به دست می‌آید.

با توجه به تغییرات شدید غلظت Pu و چگالی توان در لبه خارجی سوخت لازم است که مطابق شکل ۱ تعداد المان‌ها در لبه خارجی سوخت نیز بیشتر باشد. در شکل ۲ فلوچارت برنامه محاسباتی ارائه شده است.

<sup>۱</sup> Radial shape function



شکل ۲: فلوچارت برنامه محاسباتی



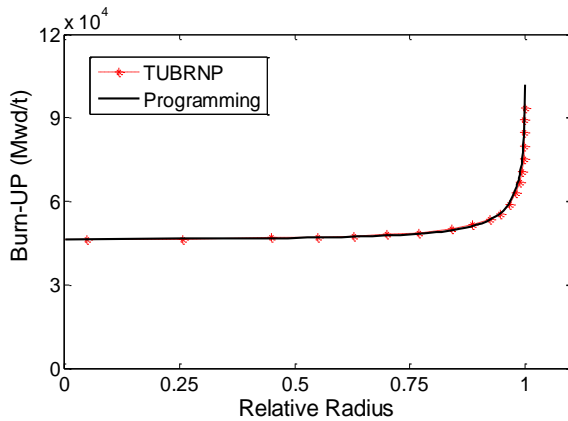
شکل ۱: نحوه مش بندی میله سوخت استوانه‌ای در جهت شعاعی

## نتایج

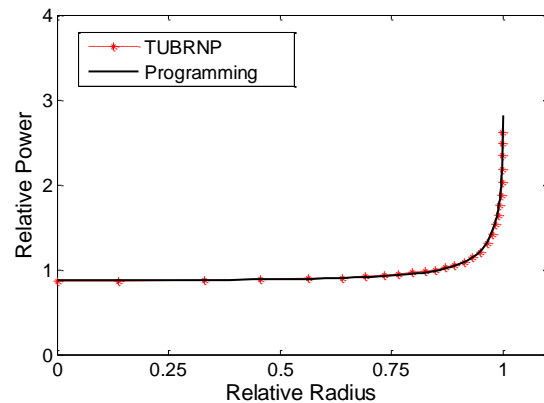
جهت اعتبار سنجی برنامه محاسباتی، از داده‌های تجربی و نتایج مدل TUBRNP استفاده شده است که مربوط به دو نوع سوخت با غنای متفاوت و میزان فرسایش مختلف است که مشخصات آن‌ها در جدول ۱ آمده است. برنامه محاسباتی قادر است که چگالی تولید توان در هر المان شعاعی از سوخت را محاسبه نماید. توزیع شعاعی توان و توزیع شعاعی میزان فرسایش برای میله سوخت در انتهای سیکل با میزان فرسایش متوسط  $50000 \text{ MWd/t}$  به ترتیب در شکل ۳ و ۴ نمایش داده شده است. نتایج بدست آمده در مقایسه با مدل TUBRNP از انطباق خوبی برخوردار می‌باشد به طوری که مقدار حداکثر خطای نسبی در توزیع توان و توزیع فرسایش سوخت مربوط به لبه خارجی سوخت و به ترتیب برابر  $7/74$  و  $9/15$  درصد و در مرکز سوخت برابر  $1/85$  و  $0/51$  درصد است. توزیع شعاعی فرسایش برای سوخت نوع GE برای میزان فرسایش  $29571 \text{ MWd/t}$  در شکل ۵ با نتایج مدل TUBRNP و داده‌های تجربی مقایسه شده است. محاسبات انجام شده انطباق خوبی با مدل مرجع دارد و مقدار خطای نسبی در لبه خارجی سوخت برابر  $0/47$  درصد و در مرکز سوخت برابر  $2/34$  درصد است. در شکل ۶ نیز تغییر نسبت غلظت ایزوتوپ‌ها بر حسب فرسایش در لبه خارجی سوخت EPRI (غنای  $5/75\%$ ) نمایش داده شده است. در پایان مقایسه‌ای بین توزیع شعاعی مجموع غلظت ایزوتوپ‌های Pu در سوخت نوع EPRI با میزان فرسایش  $55000 \text{ MWd/t}$  و سوخت نوع GE با میزان فرسایش  $29000 \text{ MWd/t}$  با نتایج مدل TUBRNP و داده‌های تجربی به ترتیب در شکل‌های ۷ و ۸ نمایش داده شده است.

جدول ۱: انواع سوخت مورد بررسی با میزان فرسایش متفاوت [۲]

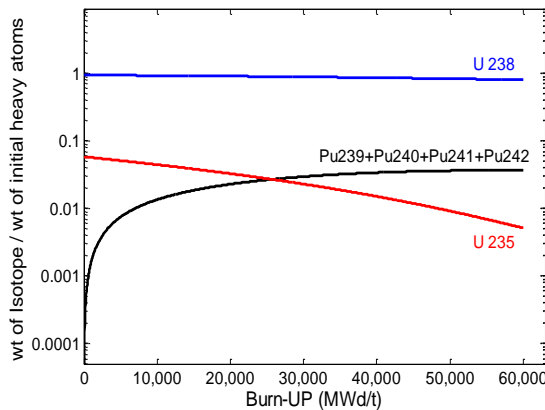
جنس غلاف	ضخامت گپ (mm)	غنا (% <sup>235</sup> U)	چگالی سوخت (%TD) <sup>۱</sup>	قطر قرص سوخت (mm)	میزان فرسایش (MWd/MT)	نوع میله سوخت
Zr-۲	۰/۱۱۵	۲/۹	۹۵/۷	۱۰/۹	۲۹۵۷۱ و ۲۹۰۰۰	GE
Zr-۴	۰/۱۰	۵	۹۵/۵	۸/۰۴	۵۰۰۰۰	EPRI
Zr-۴	۰/۱۰	۵/۷۵	۹۵/۵	۸/۰۴	۵۵۰۰۰	EPRI



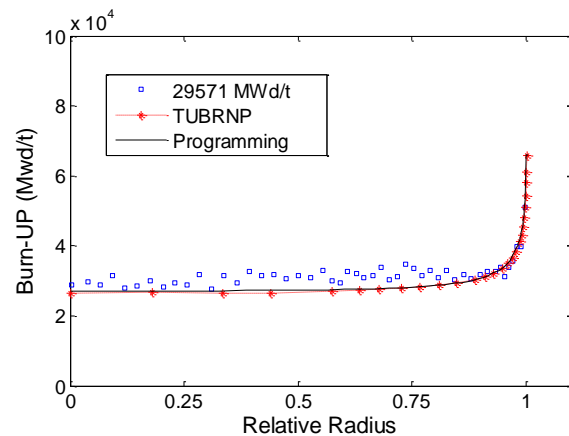
شکل ۴: توزیع شعاعی میزان فرسایش در سوخت (غنا ۵٪) با متوسط فرسایش ۵۰۰۰۰ MWd/t



شکل ۳: توزیع شعاعی نسبی تولید توان در سوخت (غنا ۵٪) با متوسط فرسایش ۵۰۰۰۰ MWd/t

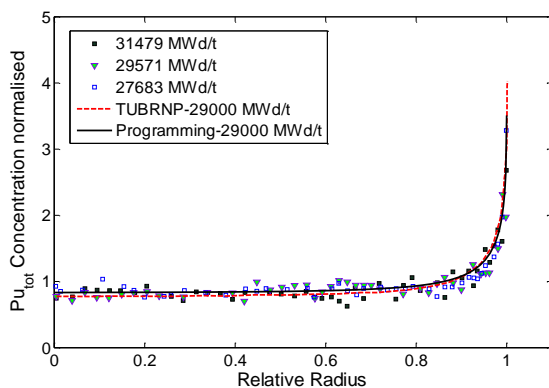


شکل ۶: تغییر نسبت غلظت ایزوتوپها به غلظت عناصر سنگین اولیه در لبه خارجی سوخت EPRI (غنا ۵/۷۵٪) بر حسب فرسایش سوخت

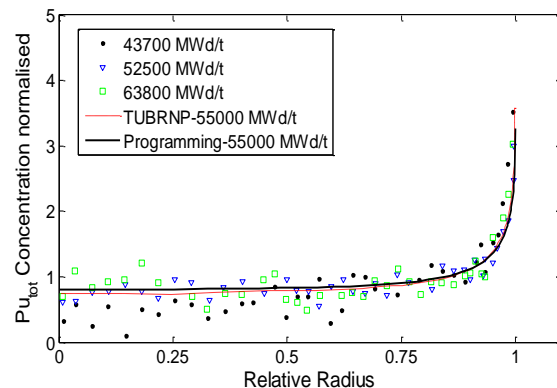


شکل ۵: توزیع شعاعی میزان فرسایش سوخت نوع GE (غنا ۲/۹٪) با متوسط فرسایش ۲۹۵۷۱ MWd/t و مقایسه با مدل TUBRNP و داده‌های تجربی

<sup>۱</sup> Theoretical Density of UO<sub>2</sub> (TD=۱۰,۹۶ g/cm<sup>3</sup>)



شکل ۸: توزیع شعاعی مجموع غلظت ایزوتوپ‌های Pu در سوخت نوع GE (غنا ۲/۹٪)



شکل ۷: توزیع شعاعی مجموع غلظت ایزوتوپ‌های Pu در سوخت نوع EPRI (غنا ۵/۷۵٪)

## بحث و نتیجه گیری

در این مقاله به منظور محاسبه توزیع توان و توزیع ایزوتوپ‌های شکافت‌پذیر در سوخت استوانه‌ای بر حسب فرسایش، یک برنامه محاسباتی توسعه داده شد. این برنامه قادر است با حل عددی معادلات مصرف سوخت، غلظت ایزوتوپ‌های شکافت‌پذیر را در هر گام زمانی محاسبه نموده و با توجه به توزیع شار، توزیع شعاعی توان در میله سوخت را در هر گام زمانی محاسبه نماید. برای اعتبارسنجی برنامه محاسباتی، از نتایج مدل TUBRNP و داده‌های تجربی برای نوع سوخت استفاده شد. در مقایسه با مدل TUBRNP مقدار خطای نسبی در محاسبه توزیع شعاعی توان در همه نقاط به غیر از لبه خارجی سوخت کمتر از ۲ درصد بوده و در لبه خارجی سوخت میزان خطای نسبی برابر ۷/۷۴ درصد است. لذا نتایج به دست آمده نشان می‌دهد برنامه توسعه داده شده از دقت قابل قبولی برای استفاده در یک کد محاسباتی تحلیل رفتار سوخت برخوردار است.

## مراجع

- [۱]- Geelhood, K.J., Luscher, W.G., Beyer, C.E., FRAPCON-۳,۴: A Computer Code for the Calculation of Steady-State Thermal-Mechanical Behavior of Oxide Fuel Rods for High Burnup, Pacific Northwest National Laboratory, ۲-۱۵, ۲۰۱۱
- [۲]- Lassmann, K., O'Carroll, C., van de Laar, J., Walker, CT., The radial distribution of plutonium in high burnup UO<sub>2</sub> fuels, Journal of Nuclear Materials ۲۰۸, ۲۲۳-۲۳۱, ۱۹۹۴
- [۳]- IAMBUS-۱ - A digital computer code for the design, in-pile performance prediction and post-irradiation analysis of arbitrary fuel rods, NUCLEAR ENGINEERING AND DESIGN, ۳۱, ۳۰۹-۳۳۶, ۱۹۷۴
- [۴]- Roshan Zamir, M., General description of KIANA-۱ structure and its application for fuel rod behavior, Annals of Nuclear Energy ۲۸, ۳۶۵-۳۷۴, ۲۰۰۱
- [۵]- Palmer, I.D., Hesketh, K.W., Jackson, P.A., A model for Prediction the radial power profile in a fuel pin, ۱۹۸۳
- [۶]- W. Hornbeck, R., Numerical Methods, Quantum Publishers, INC., ۱۹۴-۱۹۶, ۱۹۷۵