

## بررسی اثر تغییر ضریب هدایت حرارتی سوخت با مصرف سوخت در محاسبه توزیع دما در داخل سوخت حلقوی

حسن اسمعیلی<sup>۱\*</sup>، حسین کاظمی نژاد<sup>۲</sup>، احسان بوستانی<sup>۱</sup>

۱. پژوهشکده راکتور و ایمنی هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، صندوق پستی: ۱۱۳۶۵-۳۴۸۶، تهران، ایران

۲. پژوهشکده کاربرد پرتوها، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، صندوق پستی: ۱۱۳۶۵-۳۴۸۶، تهران، ایران

### چکیده

از نظر مباحث ایمنی یکی از پارامترهای مهم میله سوخت تعیین مقدار بیشترین دمای داخل سوخت در طی کار راکتور است. بدین منظور لازم است که توزیع شعاعی دما در داخل میله سوخت محاسبه شود. عموماً در بسیاری از کدهای محاسباتی در بخش انتقال حرارت در داخل سوخت، ضریب هدایت حرارتی سوخت تنها بصورت تابعی از دما آمده و محاسبه توزیع شعاعی دما بر مبنای آن انجام می‌شود. اما در حقیقت ضریب هدایت حرارتی سوخت در طی کار راکتور تغییر می‌کند. بنابراین در این مقاله به مطالعه اثر تغییر ضریب هدایت حرارتی سوخت با مصرف سوخت (Burnup) در محاسبه توزیع شعاعی دما در داخل یک میله سوخت حلقوی پرداخته و کسر انتقال حرارت به کانال داخلی و خارجی آن بررسی شده است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهند که افزایش مصرف سوخت باعث تغییر قابل ملاحظه‌ای در بیشترین دمای سوخت می‌شود. با این حال، تغییرات مصرف سوخت اثر زیادی روی تقسیم شار حرارتی ندارد.

کلیدواژه‌ها: ضریب هدایت حرارتی، سوخت حلقوی، مصرف سوخت.

## Investigation of the effect of changing the thermal conductivity of the fuel with burnup in calculating the temperature distribution inside an annular fuel

H. Esmaili<sup>1</sup>, H. Kazeminejad<sup>2</sup>, E. Boustani<sup>1</sup>

1. Nuclear Science and Technology Research Institute (NSTRI), P.O. Box 11365-3486, Tehran, Iran

2. Nuclear Science and Technology Research Institute (NSTRI), Research School of Radiation Applications, Iran

### Abstract

In safety issues, one of the most important parameters is the maximum temperature of the fuel during the reactor operation. Therefore, it is necessary to calculate the radial temperature distribution inside the fuel rod. Generally, in many computational codes, the thermal conductivity of the fuel is only a function of temperature and the calculation of the radial temperature distribution is based on it. But, during Reactor operation, the thermal conductivity of the fuel varies. Therefore, in this paper, the effect of changing the thermal conductivity of fuel with burnup in calculating the radial temperature distribution inside an annular fuel rod and the heat transfer fraction to its internal and external channel is investigated. The results show that Burnup increasing causes a significant change in maximum fuel temperature. However, changes in burnup do not have much effect on the heat flux distribution.

**Keywords:** Thermal conductivity, Annular fuel, Burnup.

<sup>1</sup> Email: hesmaeili@aeoi.org.ir

## ۱. مقدمه

بسیاری از پدیده‌های به وقوع پیوسته در سوخت نظیر نرخ رها شدن گازهای حاصل از شکافت، نرخ تورم و تراکم سوخت، نرخ خزش در سوخت و غلاف و نیز برخی از مشخصات کیفی مواد نظیر هدایت حرارتی و مدل کشسانی، متأثر از دمای موضعی سوخت و غلاف می‌باشند. بنابراین در تحلیل ساختاری عملکرد یک میله سوخت، تحلیل حرارتی و تعیین توزیع شعاعی دمای سوخت و غلاف مقدم بر تحلیل مکانیکی می‌باشد.

برای محاسبه توزیع شعاعی دما در داخل یک میله سوخت از روش‌های مختلفی مانند حجم محدود<sup>۲</sup> (FVM) و پهلوهم گذاری متعامد<sup>۳</sup> (OCM) [۱] و یا روش اختلاف محدود<sup>۴</sup> (FDM) [۲] استفاده می‌شود. اسمعیلی و همکاران [۱] از روش‌های FVM و OCM برای محاسبه توزیع شعاعی دما در داخل یک میله سوخت حلقوی استفاده کرده‌اند. در روش OCM معادلات انتقال حرارت یک بعدی با استفاده از روش باقیمانده‌های وزن دار در جهت شعاعی و جداسازی پیشرو برای زمان، جداسازی می‌شوند. در روش باقیمانده‌های وزن دار از خصوصیات توابع متعامد استفاده شده و توزیع دما در میله سوخت با استفاده از یک چند جمله‌ای مرتبه  $n$  محاسبه گردیده است. در این مطالعه هدایت حرارتی بصورت تابعی از فقط دما در نظر گرفته شده است.

در مطالعه‌ای دیگر، دیوارته و همکاران [۲] از روش اختلاف محدود برای محاسبه توزیع شعاعی دما در داخل سوخت و از مدل توده‌ای برای مدل سازی تغییر دمای خنک کننده استفاده نموده‌اند. مدل توده‌ای برای خنک کننده منجر به یک معادله دیفرانسیل معمولی یا ODE<sup>۵</sup> برای تغییر دمای خنک کننده می‌شود. در این مطالعه هدایت حرارتی ثابت در نظر گرفته شده است. این مدل سازی در محل داغ‌ترین نقطه<sup>۶</sup> انجام شده است.

برای اجرا و پیاده‌سازی درست هر یک از این روش‌های فوق نیاز به یک مجموعه از پارامترهای مربوط به سوخت است که بسته به جنس هر بخش از سوخت این مقادیر تعیین می‌شوند. از جمله این پارامترهای مهم ضریب هدایت حرارتی سوخت است. در حالت کلی، هدایت حرارتی در سوخت دی اکسید اورانیوم متأثر از پدیده زیر می‌باشد: هدایت حرارتی در اثر ارتعاش شبکه مولکولی، هدایت حرارتی در اثر الکترون‌های آزاد، اثرات استوکیومتری، میزان تخلخل سوخت، نسبت O/U، میزان مصرف سوخت و تغییر ترکیب سوخت. همچنین، با تشکیل ترک در سوخت هدایت حرارتی نیز تغییر می‌کند [۳].

در یک مطالعه ویلیامز [۴] با استفاده از نرم افزار ABAQUS اقدام به تجزیه و تحلیل چند بعدی عملکرد سوخت راکتورهای آب سبک در حالت پایدار و گذرا نمود. در این مطالعه اثر گازهای حاصل از شکافت، تورم و تراکم سوخت، انتقال حرارت گپ و ... بررسی شد. یکی از اهداف این مطالعه استفاده از اطلاعات به دست آمده جهت توسعه کد عملکرد سوخت BISON است. در بسیاری از کدهای محاسباتی برای یافتن توزیع دما در داخل سوخت از ضریب هدایت حرارتی سوخت ( $k_f$ ) که تنها تابع دما است، استفاده نموده و از تاثیر تغییر ترکیب سوخت بر رسانایی سوخت و دیگر تغییرات این پارامتر در طی کار راکتور در اثر سایر عوامل صرف نظر می‌شود. در واقع کدهای تحلیل زیر کانال موجود تغییرات ضریب هدایت حرارتی سوخت با پارامترهای دیگری نظیر مصرف سوخت را در نظر نمی‌گیرند. اما در کدهای عملکرد سوخت<sup>۷</sup> نظیر FRAPCON و FRAPTRAN [۳] برای محاسبه ضریب هدایت حرارتی سوخت از مدلی استفاده می‌شود که علاوه بر اثر دما، اثر مصرف سوخت نیز در نظر گرفته می‌شود. برای سوخت‌های توپر بسیاری از این روابط به طور گسترده‌ای بکار رفته و مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. با این حال هنوز بسیاری از این روابط برای سوخت با هندسه حلقوی مورد مطالعه قرار نگرفته‌اند. در این مقاله به مطالعه اثر تغییر ضریب هدایت حرارتی سوخت با مصرف سوخت در محاسبه

<sup>۲</sup> Finite Volume Method (FVM)

<sup>۳</sup> Orthogonal Collocation Method (OCM)

<sup>۴</sup> Finite Different Method (FDM)

<sup>۵</sup> Ordinary Differential Equation (ODE)

<sup>۶</sup> hot spot

<sup>۷</sup> The fuel performance codes

توزیع دما در داخل یک میله سوخت حلقوی پرداخته و کسر انتقال حرارت به کانال داخلی و خارجی آن بررسی شده است.

## ۲. روش کار

محاسبات مربوط به عملکرد سوخت نشان می‌دهند که با افزایش مصرف سوخت ضریب هدایت حرارتی سوخت کاهش می‌یابد. کاهش ضریب هدایت حرارتی سوخت در برن‌آپ‌های بالا از اهمیت بسیاری برخوردار است. چرا که چنین تغییری بر توزیع شعاعی دمای سوخت و همچنین تخمین بیشترین دمای مرکز سوخت و در نتیجه حاشیه ایمنی عملکرد حالت پایدار و گذرای راکتور اثر گذار است. بنابراین در این مقاله، در روش OCM [۱] که برای محاسبه توزیع دما در داخل یک میله سوخت حلقوی توسعه داده شده ضریب هدایت حرارتی سوخت بعنوان تابعی از دما و مصرف سوخت در محاسبات اعمال می‌شود. در ادامه به توصیف این روش پرداخته می‌شود.

در شکل ۱ پارامترهای هندسی یک میله سوخت حلقوی تعریف شده‌اند. جهت محاسبه دقیق توزیع درجه حرارت در میله سوخت بایستی ابتدا معادله انتقال حرارت به کمک روش مناسب جداسازی شده و سپس این معادلات جداسازی شده را حل نمود. در حالت یک بعدی و گذرا معادلات وابسته به زمان انتقال حرارت در داخل نواحی مختلف میله سوخت بصورت زیر تعریف می‌شوند [۱،۲]:

برای غلاف داخلی

$$\rho_c C_c \frac{\partial T_i(r,t)}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r k_c \frac{dT_i(r,t)}{dr} \right) \quad ; r_i < r < r_o \quad \& \quad t \geq 0 \quad (1)$$

برای داخل سوخت

$$\rho_f C_f \frac{\partial T_f(r,t)}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r k_f \frac{dT_f(r,t)}{dr} \right) + q''' \quad ; r_{fi} < r < r_{fo} \quad \& \quad t \geq 0 \quad (2)$$

برای غلاف خارجی

$$\rho_c C_c \frac{\partial T_c(r,t)}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r k_c \frac{dT_c(r,t)}{dr} \right) \quad ; r_{ci} < r < r_{co} \quad \& \quad t \geq 0 \quad (3)$$

همچنین برای نواحی مرزی مختلف، روابط زیر بعنوان شرط مرزی برقرار هستند:

$$k_c \frac{\partial T_i(r,t)}{\partial r} \Big|_{r=r_i} = h_m (T_i(r_i,t) - T_m) \quad (4)$$

$$k_c r_o \frac{\partial T_i(r,t)}{\partial r} \Big|_{r=r_o} = h_g r_{fi} (T_f(r_{fi},t) - T_i(r_o,t)) \quad (5)$$

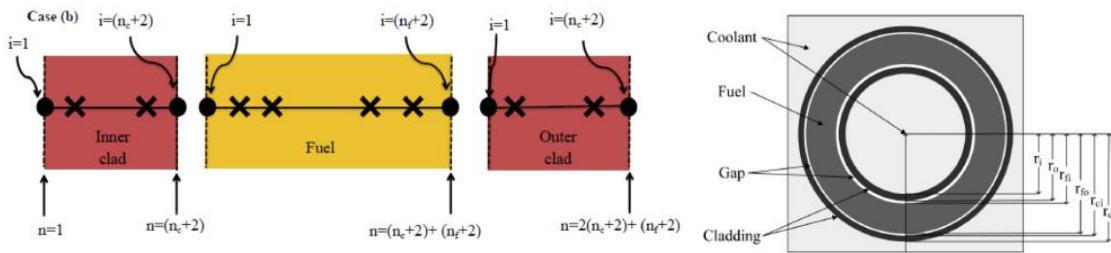
$$k_f \frac{\partial T_f(r,t)}{\partial r} \Big|_{r=r_{fi}} = h_g (T_f(r_{fi},t) - T_i(r_o,t)) \quad (6)$$

$$-k_f \frac{\partial T_f(r,t)}{\partial r} \Big|_{r=r_{fo}} = h_g (T_f(r_{fo},t) - T_c(r_{ci},t)) \quad (7)$$

$$-k_c r_{ci} \frac{\partial T_i(r,t)}{\partial r} \Big|_{r=r_{ci}} = h_g r_{fo} (T_f(r_{fo},t) - T_c(r_{ci},t)) \quad (8)$$

$$-k_c \frac{\partial T_o(r,t)}{\partial r} \Big|_{r=r_{co}} = h_m (T_c(r_{co},t) - T_m) \quad (9)$$

در رابطه فوق چگالی توان تولیدی  $q''$ ، در داخل قرص سوخت یکنواخت فرض شده و از تغییرات  $pc$  با دما صرف نظر شده است.



شکل ۱: پارامترهای هندسی میله سوخت حلقوی شکل ۲: شیوه گره بندی نواحی مختلف در یک سوخت حلقوی با روش OCM

با این حال ضریب هدایت حرارتی برای سوخت‌های  $UO_2$  و  $UO_2-Gd_2O_3$  وابسته به دما و مصرف سوخت با رابطه زیر بیان می‌شود [۵]:

$$k_{UO_2} = \frac{1}{A + a \cdot gad + BT + f(Bu) + (1 - 0.9e^{-0.04Bu})g(Bu)h(T)} + \frac{E}{T^2} e^{-F/T} \quad (10)$$

$$f(Bu) = 0.00187Bu \quad \text{که}$$

$$g(Bu) = 0.038Bu^{0.28}$$

$$h(T) = 1 / (1 + 396e^{-Q/T})$$

در رابطه فوق  $T$  دما برحسب  $K$ ،  $Bu$  مصرف سوخت برحسب  $GWd / MTU$  است. همچنین،  $gad$  کسر وزنی گادولینیوم است. در این رابطه اثر محصولات شکافت با  $f(Bu)$  و اثر تابش با  $g(Bu)$  اعمال شده است. همچنین

$$a = 1.1599 \quad \text{و} \quad A = 0.0452 \frac{m-K}{W} \quad , \quad F = 16361 K \quad , \quad B = 2.46 \times 10^{-4} \frac{m-K}{W/K} \quad , \quad Q = 6380 K \quad \text{و}$$

$$E = 3.9 \times 10^{-9} \frac{W-K}{m} \quad [\Delta] \quad \text{است. در شکل ۳ تغییرات ضریب هدایت حرارتی سوخت با دما و مصرف سوخت نشان$$

داده شده است. در این شکل دیده می‌شود که با افزایش مصرف، ضریب هدایت حرارتی سوخت کاهش می‌یابد.

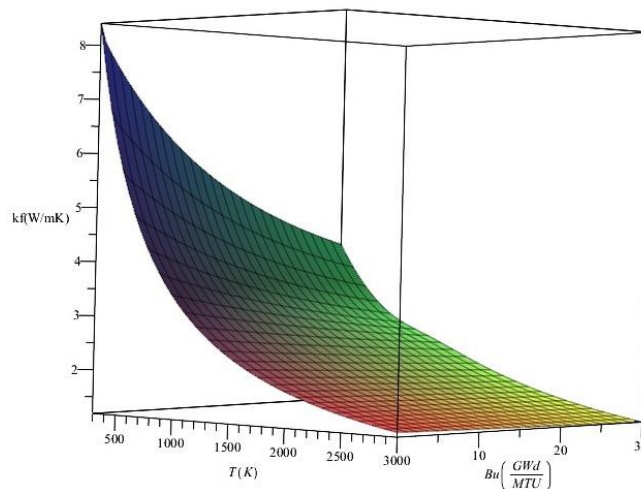
در این مطالعه برای یافتن توزیع دما در داخل میله سوخت، با استفاده از روش OCM معادله انتقال حرارت در داغ‌ترین نقطه یک میله داغ راکتور وستینگهاوس با آرایه  $13 \times 13$  از سوخت حلقوی [۶] حل می‌شوند. در هر بخش از محاسبات که نیاز به پارامتر ضریب هدایت حرارتی سوخت باشد از رابطه (۱) استفاده می‌شود. سپس نتایج حاصل از روش فوق با نتایج حاصل از مطالعه ژیا و همکاران [۷] مقایسه می‌شوند. اکسید گادولینیوم مشهور به گادولینیا ( $Gd_2O_3$ ) در حال حاضر به عنوان سم قابل سوختن برای سوخت PWR استفاده می‌شود. سموم قابل سوختن حاوی گادولینیوم اثر نامطلوبی در کاهش هدایت حرارتی سوخت  $UO_2-Gd_2O_3$  دارند و در نتیجه منجر به پروفیل‌های دمای بالاتر در سوخت می‌شوند. در این مطالعه، تنها سوخت  $UO_2$  بررسی شده و کسر وزنی گادولینیوم صفر در نظر گرفته می‌شود. پارامترهای سوخت حلقوی و همچنین سوخت توپر مرجع و شرایط کاری مورد نیاز برای انجام محاسبات فوق، در مراجع [۱، ۶ و ۸] داده شده است.

برای حل معادلات (۱) تا (۳) و (۴) تا (۹) با در نظر گرفتن شرایط مرزی از روش عددی OCM [۱] استفاده شده است. در روش OCM معادلات انتقال حرارت یک بعدی با استفاده از روش باقیمانده‌های وزن دار در جهت شعاعی و جداسازی پیشرو برای زمان، جداسازی می‌شوند. در روش باقیمانده‌های وزن دار از خصوصیات توابع متعامد استفاده شده و توزیع دما در میله سوخت با استفاده از یک چند جمله‌ای مرتبه  $n$  محاسبه گردیده است. در روش باقیمانده‌های وزن دار گره‌های انتخاب شده در جهت شعاعی منطبق بر ریشه‌های چند جمله‌ای می‌باشند. این امر سبب می‌گردد تا این روش از دقت محاسباتی بالایی برخوردار باشد. از دیگر محسنات این روش کاهش ۵۰ درصدی ذخیره کامپیوتر در مقایسه با

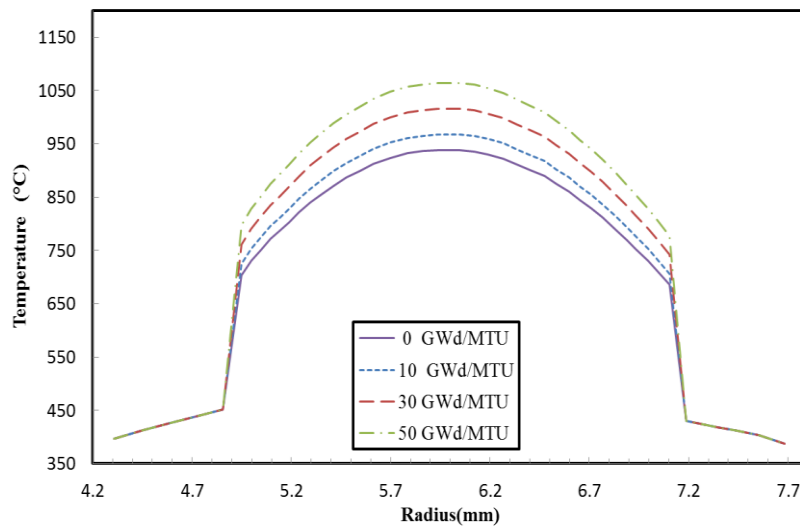
روش‌های متداول تفاضل محدود می‌باشد [۱]. همچنین برای رسیدن به دقت مطلوب، به تعداد کمی گره نیاز است. شکل ۲ شیوه گره بندی نواحی مختلف در یک سوخت حلقوی با استفاده از روش OCM را نشان می‌دهد. همچنین، برای محاسبه کسر انتقال حرارت به کانال داخلی و خارجی از روش توسعه داده شده در مرجع [۹] استفاده شده است.

### ۳. نتایج

در شکل ۴ توزیع شعاعی دما برای مقادیر مختلف مصرف سوخت نشان داده شده است. در این شکل دیده می‌شود که با افزایش مصرف سوخت و کاهش ضریب هدایت حرارتی سوخت، دمای قرص سوخت بالا می‌رود. در واقع برای افزایش مصرف سوخت از صفر به ۱۰، ۳۰ و ۵۰  $\text{GWd/MTU}$  دمای قرص سوخت به ترتیب حدود ۳/۳، ۸/۵ و ۱۳/۶ درصد افزایش می‌یابد. همچنین در جدول ۱ کسر حرارت منتقل شده به کانال داخلی و خارجی در مقادیر مختلف مصرف سوخت با هم مقایسه شده است. با بررسی نتایج فوق، دیده می‌شود که با افزایش مصرف سوخت کسر حرارت منتقل شده به کانال خارجی نیز افزایش می‌یابد. می‌توان دید که نتایج حاصل شده در توافق خوبی با نتایج حاصل از مطالعه ژبا و همکاران [۷] است. بررسی شکل ۴ و همچنین جدول ۱ نشان می‌دهد که اگرچه افزایش مصرف سوخت باعث تغییر قابل ملاحظه‌ای در بیشترین دمای سوخت می‌شود با این حال هنوز هم این مقدار بسیار کمتر از دمای مرکز سوخت توپر (حدود  $2038^\circ\text{C}$ ) [۶] بوده و حاشیه ایمنی قابل ملاحظه‌ای دارد. علاوه بر این تغییرات مصرف سوخت اثر زیادی روی تقسیم شار حرارتی ندارد.



شکل ۳. تغییرات ضریب هدایت حرارتی سوخت با دما و مصرف سوخت (با  $\text{gad}=0.0$ )



شکل ۴. مقایسه توزیع دما در مقادیر مختلف مصرف سوخت

جدول ۱. مقایسه کسر انتقال حرارت در مقادیر مختلف مصرف سوخت

کانال داخلی		کانال خارجی		مصرف سوخت (GWd/MTU)
نتایج ژیا و همکاران [۷]	نتایج روش حاضر	نتایج ژیا و همکاران [۷]	نتایج روش حاضر	
۰/۴۴۱۸	۰/۴۴۶۴	۰/۵۵۸۲	۰/۵۵۳۶	۰/۰
۰/۴۴۱۰	۰/۴۴۲۸	۰/۵۵۹۰	۰/۵۵۷۲	۱۰
۰/۴۴۰۶	۰/۴۴۲۱	۰/۵۵۹۴	۰/۵۵۷۹	۳۰
۰/۴۴۰۲	۰/۴۴۱۵	۰/۵۵۹۸	۰/۵۵۸۵	۵۰

#### ۴. نتیجه گیری

در این مطالعه به بررسی اثر تغییر ضریب هدایت حرارتی سوخت با مصرف سوخت در محاسبه توزیع شعاعی دما در داخل یک میله سوخت حلقوی پرداخته و کسر انتقال حرارت به کانال داخلی و خارجی آن مورد بررسی قرار گرفت. بررسی نتایج پیش‌بینی شده نشان می‌دهد که افزایش مصرف سوخت باعث تغییر قابل ملاحظه‌ای در بیشترین دمای سوخت می‌شود با این حال هنوز هم این مقدار بسیار کمتر از دمای مرکز سوخت توپر است. همچنین می‌توان دید که تغییرات مصرف سوخت اثر زیادی روی تقسیم شار حرارتی نداشته و اثر سایر پارامترهای دیگر مانند تغییر ضریب انتقال حرارت گپ نیز بایستی مورد بررسی قرار گیرد، که در آینده انجام خواهد شد.

#### ۵. مراجع

- [1] Esmaili, H., Kazeminejad, H., and Khalafi, H., Prediction of temperature distribution in annular fuels using orthogonal collocation method. *Annals of Nuclear Energy*, 2019. 134: p. 77-87.
- [2] Basile, D., et al., COBRA-EN: an upgraded version of the COBRA-3C/MIT code for thermal hydraulic transient analysis of light water reactor fuel assemblies and cores. Radiation Safety Information Computational Center, Oak Ridge National Lab, 1999.
- [3] Luscher, W.G. and K.J. Geelhood, Material property correlations: comparisons between FRAPCON-3.4, FRAPTRAN 1.4, and MATPRO. 2010, Pacific Northwest National Lab.(PNNL), Richland, WA (United States).



- [4] Williamson, R.L., Enhancing the ABAQUS thermomechanics code to simulate multipellet steady and transient LWR fuel rod behavior. *Journal of Nuclear Materials*, 2011, 415(1), p.74-83.
- [5] Yilmaz, M.O., M.N. Avramova, and J.G. Andersen, Development, verification, and validation of a fuel thermal conductivity degradation model in CTF. *Annals of Nuclear Energy*, 2016. 97: p. 246-261.
- [6] Feng, D., P. Hejzlar, and M.S. Kazimi, Thermal-hydraulic design of high-power-density annular fuel in PWRs. *Nuclear Technology*, 2007. 160(1): p. 16-44.
- [7] Xia, H., et al., Development of a subchannel analysis code and its application to annular fuel assemblies. *Annals of Nuclear Energy*, 2019. 129: p. 428-436.
- [8] Duarte, J.P., Rivero, J.J., Melo, P.F.E., Alvim, A.C.M., Coupling of a lumped parameter and a finite difference model for estimation of a reactivity-induced transient in a PWR with annular fuel rods. *Nuclear Technology*, 2014. 185 (2): p. 109–126.
- [9] Esmaili, H., Kazeminejad, H., Khalafi, H. and Mirvakili, S.M., Subchannel analysis of annular fuel assembly using the preconditioned Jacobian-free Newton Krylov methods. *Annals of Nuclear Energy*, 2020. 146, p.107616.