



## محاسبه توزیع دما در داخل میله سوخت حلقوی با استفاده از روش OCM

حسن اسمعیلی\*<sup>(۱)</sup>، حسین کاظمی نژاد<sup>(۲)</sup>، حسین خلفی<sup>(۱)</sup>، سید محمد میروکیلی<sup>(۱)</sup>، عارف رحیمیان<sup>(۱)</sup>

۱- پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشکده راکتور و ایمنی هسته‌ای

۲- پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشکده کاربرد پرتوها

چکیده: در این مقاله توزیع شعاعی دما در داخل یک میله سوخت حلقوی با استفاده از روش‌های حجم محدود و OCM محاسبه شده است. در روش OCM از طریق بی بعد سازی معادله بنیادی انتقال حرارت و با تعریف شعاع نسبی گره‌ها در داخل هر قسمت از میله سوخت حلقوی، هر بخش از میله سوخت به یک ناحیه در بازه [۰،۱] تبدیل می‌شود. با این کار می‌توان از ریشه‌های چندجمله‌ای منتقل شده لژاندر در بازه [۰،۱] بعنوان نقاط collocation استفاده کرد. نتایج حاصل از روش‌های اعمال شده در این مقاله با نتایج گزارش شده در مراجع مختلف تحت شرایط کاری متنوع و همچنین نتایج حاصل از حل تحلیلی مقایسه شده‌اند. مقایسه نتایج نشان می‌دهد که، روش OCM با تعداد گره‌های بسیار کمتر به نتایج قابل قبولی می‌رسد.

کلید واژه‌ها: توزیع شعاعی دما، روش OCM، سوخت حلقوی

### مقدمه

سوخت‌های حلقوی با قابلیت خنک شونده‌گی از داخل و خارج توسط فنگ و همکاران در دانشگاه MIT [۱] بمنظور افزایش چگالی توان در حالی که حاشیه‌های ایمنی حفظ کرده و یا بهبود ببخشند، پیشنهاد شده‌اند. سوخت‌های حلقوی دارای دو سطح خنک‌کنندگی هستند. در توسعه و یا طراحی یک سوخت جدید شار حرارتی سطحی میله سوخت پارامتر بسیار مهمی است، چرا که برای تحلیل DNB بمنظور جلوگیری از پدیده CHF بایستی آنرا در نظر گرفت. در مورد یک سوخت استوانه‌ای توپر همه حرارت تولید شده در قرص سوخت از طریق تنها یک سطح خارجی به سیال منتقل می‌شود. بنابراین می‌توان به سادگی شار حرارتی را محاسبه کرد. با این حال پیشبینی شار حرارتی سطحی سوخت‌های حلقوی پیچیده‌تر از سوخت توپر است چرا که حرارت تولید شده در قرص سوخت می‌تواند به سطح داخلی و یا خارجی منتقل شود. مسیر جریان حرارت با اختلاف مقاومت حرارتی بین ناحیه داخلی و خارجی تعیین می‌شود. مقاومت حرارتی سوخت از خنک‌کننده و غلاف و گپ و قرص تشکیل شده است. برای تعیین دقیق شار حرارتی، بایستی ابتدا به روشی توزیع دما در داخل سوخت را با دقت مناسب محاسبه کرد.



در هر روش مدل سازی دو فاکتور مهم برای ارزیابی کارایی آن سرعت محاسبات و دقت آنها است. یک مدل مانند روش توده‌ای همراه با فرضیات و ساده سازی‌های است که اگرچه سرعت محاسبات زیاد می‌کند اما تا حدی از دقت مدل می‌کاهد [۲] از سوی دیگر روش‌هایی مانند اختلاف محدود [۳] اگر چه دارای دقت بسیار خوبی است اما برای حصول نتایج نیازمند حل معادلات زیادی بوده و حل این معادلات پر هزینه است. بنابراین نیاز به روش‌های که هم از نظر دقت و هم از نظر سرعت محاسبات کم هزینه‌تر باشند همواره مورد بحث بوده است.

یکی از روش‌های که انتظار می‌رود هم از نظر دقت محاسبات و هم از نظر سرعت و زمان محاسبات بسیار مفید باشد، روش OCM است. مدل انتقال حرارت هدایت برای یک میله سوخت توپر در نرم‌افزار COBRA-IV روش OCM با استفاده از چند جمله‌ای متقارن، می‌باشد [۴]. در روش اعمال شده در COBRA-IV معادلات انتقال حرارت دوبعدی بصورت ترکیبی از روش باقیمانده‌های وزن دار در جهت شعاعی و روش تفاضل محدود در جهت محوری و جداسازی زمانی ضمنی هستند. لازم به یادآوری است که در نرم‌افزار COBRA-IV از روش OCM تنها برای محاسبه دما در داخل قرص سوخت استفاده شده و دمای غلاف از شرایط مرزی محاسبه می‌شود.

در این مطالعه برای یافتن توزیع دما در داخل میله سوخت، با استفاده از دو روش حجم محدود و روش OCM معادله انتقال حرارت در داخل سوخت توپر و حلقوی حل می‌شوند. سپس نتایج حاصل از روش‌های عددی با نتایج حاصل از حل تحلیلی مقایسه می‌شوند. همچنین کارایی این دو روش از نظر سرعت و دقت انجام محاسبات مورد بررسی قرار می‌گیرد.

## مدل ریاضی

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:

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:

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

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

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

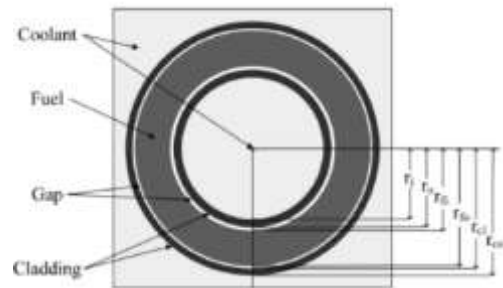
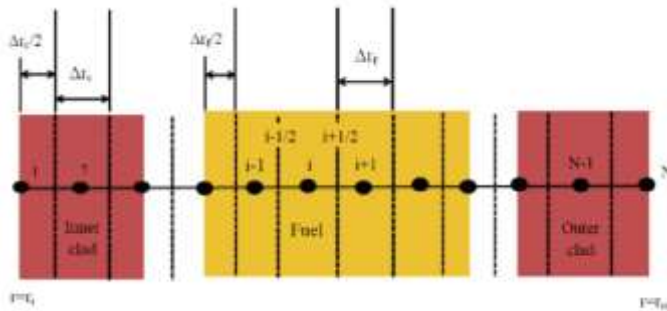
$$-k_f \frac{\partial T_f(r,t)}{\partial r} \Big|_{r=r_{fo}} = h_g (T_f(r_{fo},t) - T_c(r_{ci},t)) \quad (7)$$

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

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

در رابطه فوق چگالی توان تولیدی  $q'''$ ، در داخل قرص سوخت یکنواخت فرض شده و از تغییرات  $\rho C$  با دما صرف نظر شده است. با این حال هدایت حرارتی وابسته به دما در نظر گرفته شده است. برای حل معادلات (۱) تا (۳) و (۴) تا (۹) با در نظر گرفتن شرایط مرزی از دو روش عددی شامل روش OCM و حجم محدود 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 [۴]. 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.



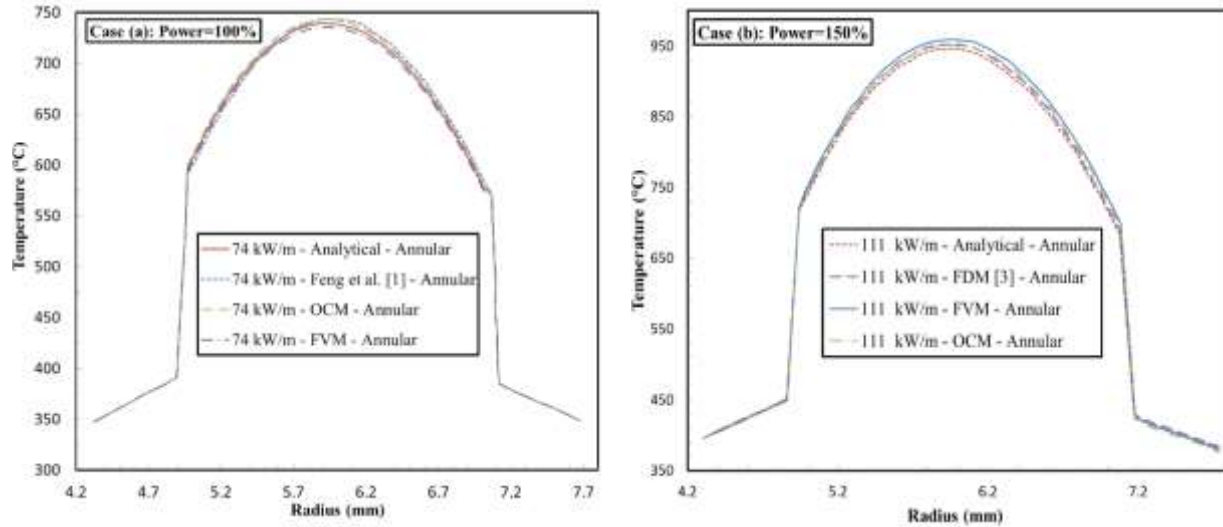
شکل ۲: شیوه گره بندی نواحی مختلف در یک سوخت حلقوی با روش

شکل ۱: پارامترهای هندسی میله سوخت حلقوی

### OCM

### نتایج

نتایج حاصل از مدل‌سازی توزیع دما برای داغ‌ترین نقطه یک میله داغ راکتور وستینگهاوس با آرایه  $13 \times 13$  از سوخت حلقوی [۱] برای دو حالت با توان ۱۰۰ و ۱۵۰ درصد با نتایج حاصل از سایر روش‌ها [۳] مقایسه و در شکل ۳ نشان داده شده است. مشخصات مواد و برخی پارامترهای راکتور PWR وستینگهاوس مرجع با آرایه‌ای از سوخت حلقوی  $13 \times 13$  که محاسبات فوق برای آن انجام شده، در جدول ۳ آمده است.



شکل ۳: توزیع شعاعی دما در داخل سوخت حلقوی با (a) ۱۰۰ و (b) ۱۵۰ درصد توان مرجع

در شکل ۳ مشاهده می‌شود که نتایج حاصل از روش‌های مختلف در توافق خوبی با هم هستند. خطای  $RMSE$  بدست آمده برای روش اختلاف محدود، حجم محدود و روش  $OCM$  به ترتیب  $۳/۲۵$ ،  $۴/۶۱$  و  $۰/۵۲$  است. در جدول ۲ برای سوخت حلقوی با ۱۵۰٪ توان بیشترین دمای سوخت و غلاف که با روش‌های مختلف محاسبه و با هم مقایسه شده‌اند. دقت شود که عبارت  $(n_c, n_f, n_e)$  برای نشان دادن تعداد گره شعاعی به ترتیب در داخل غلاف داخلی، سوخت و غلاف خارجی استفاده می‌شود.



جدول ۱: مشخصات مواد و برخی پارامترهای راکتور PWR وستینگهاوس بعنوان راکتور مرجع

مشخصات مواد	برخی پارامترهای راکتور
غلاف (زیر کونیوم)	فشار سیستم (MPa)
۴۳۰	۱۵/۵۱
دمای مرجع (°C)	توان حرارتی راکتور [MWth]
۳۰۲	۵۱۱۶ (۱۵۰٪)
$C_c$ [J/(kg.°C)] گرمای ویژه،	آرایه سوخت حلقوی
۱۷/۷	۱۳×۱۳
$k_c$ [W/(m.°C)] هدایت حرارتی،	حجم قلب ( $m^3$ )
۶۵۵۱	۳۲/۶
$\rho_c$ ( $kg/m^3$ ) چگالی،	کل ضریب قله مجاز قلب
سوخت ( $UO_2$ )	۲/۵
۱۹۳	تعداد مجتمع‌ها
دمای مرجع (°C)	تعداد کل میله‌های سوخت، $N_{fuel\_rods}$
۸۹۲	۳۰۸۸۰
$C_f$ [J/(kg.°C)] گرمای ویژه،	شعاع داخلی غلاف داخلی، $r_i$ (mm)
۳۲۰	۴/۳۰۵
$k_f$ [W/(m.°C)] هدایت حرارتی،	شعاع خارجی غلاف داخلی، $r_o$ (mm)
۳/۱۹	۴/۸۷۶۵
$\rho_f$ ( $kg/m^3$ ) چگالی،	شعاع داخلی سوخت، $r_{fi}$ (mm)
۱۰۹۸۰	۴/۹۲۸۵
خنک‌کننده (آب)	شعاع خارجی سوخت، $r_{fo}$ (mm)
۷/۱۱۲۵	۷/۱۱۲۵
دمای مرجع (°C)	شعاع داخلی غلاف خارجی، $r_{ci}$ (mm)
۳۳۰/۳۴۱	۷/۱۷۴۵
گرمای ویژه خنک‌کننده در فشار ثابت،	شعاع خارجی غلاف خارجی، $r_{co}$ (mm)
۶۸۲۴	۷/۷۴۶
$C_p$ [J/(kg.°C)]	طول فعال، $H_{core}$ (m)
۵۹۲۹۰/۴۶۰۹۰	۳/۶۶
ضریب انتقال حرارت بین غلاف و خنک‌کننده،	
$h_m$ [W/(m <sup>2</sup> .°C)]	
گپ	
۶۰۰۰/۶۰۰۰	
$h_g$ [W/(m <sup>2</sup> .K)]، ضریب هدایت گپ،	

نتایج جدول ۲ نشان می‌دهد که با افزایش نقاط گره‌ای داخل سوخت از سه نقطه به شش نقطه، به طور قابل ملاحظه‌ای دقت محاسبات افزایش می‌یابد. می‌توان دید که روش OCM با تعداد گره‌های کمتر دقت و کارایی بسیار خوبی نسبت به سایر روش‌ها دارد. دمای مرکز سوخت پیشبینی شده توسط روش FVM (5,20,5) دارای بیشترین مقدار و در روش OCM (2,6,2) کمترین مقدار و دمای محاسبه شده با روش FDM (50,100,50) بین دو روش دیگر می‌باشد که نتیجه روش OCM به حل تحلیلی نزدیکتر است. همچنین، در روش OCM هرچه تعداد گره‌های شعاعی بیشتر باشد، نتایج دقیق‌تری بدست می‌آید اما زمان محاسبات افزایش می‌یابد. با این حال هنوز هم نسبت به روش FVM مقدار CPU(s) بسیار کمتر است. همچنین، در جدول ۵-۹ اختلاف نسبی زمان محاسبات برای روش OCM با تعداد گره‌های مختلف و روش حجم محدود محاسبه شده است. این پارامتر نشان دهنده بهبود سرعت محاسبات است و می



توان دید که استفاده از روش OCM با OCM(2,6,2) گره داخلی می‌تواند تا ۷۳٪ سرعت را نسبت به روش حجم محدود افزایش دهد.

جدول ۲: مقایسه خطای نسبی ( $\Delta$ ) و زمان CPU(s) نتایج تحلیلی و عددی دمای سوخت حلقوی با ۱۵۰٪ توان حرارتی برای روش های مختلف

اختلاف نسبی CPU (%)	CPU(s)	$\Delta$ (%)	$T_{fuel,max}$ (°C)	$\Delta$ (%)	$T_{clad,max}$ (°C)	روش
-	-	۰/۰	۹۴۳/۷۶	۰/۰	۴۵۱/۲۳	Analytical
-	-	۰/۳۱۳	۹۴۶/۷۲	۰/۳۶	۴۵۲/۸۶	FDM (50,100,50) [20]
۷۸	۰/۱۵۶۷	۰/۷۵۱	۹۳۶/۶۷	۱/۹۷	۴۶۱/۱۵	OCM (1,3,1)
۷۷	۰/۱۶۱۴	۰/۴۶۹	۹۳۹/۳۳	۱/۱۶	۴۵۶/۴۷	OCM (2,4,2)
۷۳	۰/۱۸۹۳	۰/۱۰۸	۹۴۲/۷۳	۰/۲۴	۴۵۲/۳۱	OCM (2,6,2)
-	۰/۷۱۷۶	۰/۳۸۰	۹۴۷/۳۵	۰/۴۱	۴۵۳/۱۰	FVM (5,20,5)

### نتیجه گیری

نتایج حاصل از مدل‌سازی توزیع دما در داخل میله سوخت حلقوی با روش‌های OCM و FVM با نتایج گزارش شده در مراجع مختلف تحت شرایط کاری متنوع و همچنین نتایج حاصل از حل تحلیلی مقایسه شده‌اند. با مقایسه نتایج می‌توان دید که روش OCM سریع و دقیق است. مزیت این روش سرعت قابل ملاحظه این روش است. این روش نسبت به روش حجم محدود حدود ۷۳٪ سریع‌تر است. در روش OCM با افزایش تعداد گره‌ها خطای محاسبات کاهش و زمان محاسبات افزایش می‌یابد اما هنوز تعداد گره‌ها در این روش خیلی کمتر از سایر روش‌های دیگر است.

### مراجع

- [۱] 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.
- [۲] Duarte, J.P., J. Su, and A.C.M. Alvim, *Improved lumped parameter for annular fuel element thermohydraulic analysis*.



بیست و ششمین کنفرانس هسته‌ای ایران

۸۰۷ اسفندماه ۱۳۹۸ - دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی - تهران



- [۳] Duarte, J., et al., *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.
- [۴] Stewart, C., et al., *COBRA-IV: The model and the method*. 1977, Pacific Northwest Lab., Richland, WA (USA).