

تحلیل ترموهیدرولیک سوخت‌های حلقوی به روش زیرکانال بر پایه مدل شار رانشی

حسن اسمعیلی^{۱*}، حسین کاظمی نژاد^۲، احسان بوستانی^۱

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

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

چکیده

در این مقاله، یک روش عددی بمنظور تحلیل ترموهیدرولیک مجتمع سوخت حلقوی با استفاده از مدل شار رانشی ارائه شده است. در این راستا، معادلات حاکم در یک شبکه حجم محدود جابه‌جا شده بصورت کاملاً ضمنی جداسازی شده‌اند. سیستم معادلات غیر خطی با روش کاملاً ضمنی و با استفاده از روش نیوتن-کریلف مستقل از ژاکوبین (JFNK) حل شده‌اند. بمنظور بهبود کارایی روش JFNK و پایداری عددی آن، پیش شرط ساز نیمه-ضمنی بر پایه فیزیک مسئله اعمال شده است. بدلیل اهمیت چگونگی توزیع جریان و همچنین تقسیم حرارت بین کانال‌های داخلی و خارجی مدل‌های مناسب اعمال شده است. به منظور اعتبارسنجی مدل حاضر، بعلاوه تقارن و تسهیل در محاسبات، این روش را برای مدل‌سازی ۱/۸ مجتمع سوخت حلقوی در شرایط کاری ارائه شده اعمال نموده و نتایج پیش‌بینی شده با نتایج کدهای COBRA-EN و VIPRE-01 مقایسه و توافق خوبی بین نمونه‌های بررسی شده بدست آمد. بررسی نتایج نشان داد که در پیش‌بینی بیشترین دمای داخل سوخت کد COBRA-EN دارای حدود ۴ درصد خطا نسبت به سایر روش‌ها است.

کلیدواژه‌ها: تحلیل زیرکانال، مدل شار رانشی، روش نیوتن-کریلف، پیش شرط سازی، سوخت حلقوی

Thermal hydraulic modeling of annular fuel assembly using subchannel analysis based on drift flux model

H. Esmaili¹, H. Kazeminejad², E. Boustani¹

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 this paper, a numerical procedure for thermal-hydraulic sub-channel analysis of the annular fuel assembly in a PWR using the drift-flux model (DFM) is presented. The field equations discretized in a finite volume staggered grid. The system of nonlinear equations was solved with a fully-implicit solution scheme using the Jacobian-free Newton-Krylov (JFNK) method. To improve the computational efficiency and numerical stability of the JFNK method, a semi-implicit physics-based preconditioner (PBP) was implemented. To validate the present method, the results were compared with the results of the COBRA-EN and VIPRE-01 code. The key thermal-hydraulic parameters were in good agreement. Also, it was found that the annular fuels have significant safety margins compared to solid fuels.

Keywords: Sub-channel analysis; Drift Flux Model; JFNK method; Preconditioning; Annular fuel

¹ hesmaeili@aeoi.org.ir

۱. مقدمه

به منظور افزایش چگالی توان با حفظ حاشیه‌های ایمنی و یا بهبود آنها، هزلر و همکاران در دانشگاه MIT سوخت‌های حلقوی را به عنوان جایگزینی برای سوخت‌های توپر معمول پیشنهاد داده‌اند. تاکنون تحقیقات زیادی در زمینه ترموهیدرولیک این نوع سوخت‌ها انجام شده است. فنگ و همکاران [۱] با اصلاح کد VIPRE-01 به بررسی عملکرد ترموهیدرولیک سوخت‌های حلقوی برای راکتور وستینگهاوس با توان ۳۴۱۱ MWt پرداخته‌اند. هان و همکاران [۲] به منظور تحلیل ترموهیدرولیک سوخت‌های حلقوی، نرم‌افزار THAF2 را که با کد MATRA جفت شده و اجرا می‌شود، توسعه دادند. در جدیدترین مطالعه، در سال ۲۰۱۹ ژیا و همکاران [۳] کد تحلیل زیرکانال SACAF3 را توسعه داده‌اند که قادر به مدل‌سازی ترموهیدرولیک سوخت‌های حلقوی است. آنها برای مدل‌سازی جریان دوفازی مدل همگن اعمال کرده و همچنین برای تعریف کانال‌های داخلی از مدل کانال بسته ۴ و برای تعریف کانال‌های خارجی از مدل کانال باز ۵ استفاده نموده‌اند.

در سال‌های اخیر تلاش‌های زیادی برای مدل‌سازی جریان دوفازی در یک کانال عمودی با روش‌های محاسباتی پیشرفته مانند روش نیوتن کریلف مستقل از ژاکوبین^۶ (JFNK) انجام شده است. اما تاکنون این روش‌ها برای مدل‌سازی ترموهیدرولیک قلب یک راکتور با سوخت حلقوی با استفاده از مدل زیرکانال اعمال نشده است. همچنین، نرم‌افزارهای تحلیل زیرکانال مانند COBRA-EN و MATRA و VIPRE-01 بدون اصلاح و توسعه توانایی مدل‌سازی یک مجتمع سوخت حلقوی را ندارند. در این راستا و به منظور محاسبه پارامترهای خنک‌کننده در کانال‌های داخلی و خارجی بر پایه روش تکرار و جایگذاری و با لحاظ کردن جریان‌های عرضی بین کانال‌های بیرونی، صفاری و همکاران [۴] برنامه‌ای توسعه دادند که با کد COBRA-EN جفت شده و اجرا می‌شود. در این برنامه کانال داخلی بعنوان کانال مجزا در ورودی تعریف شده و بعد از آماده شدن ورودی نرم‌افزار، COBRA-EN اجرا می‌شود. وقتی محاسبات COBRA-EN پایان یافت پارامترهای هرکانال شامل دمای خنک‌کننده، شار گرمی، چگالی، کیفیت و کسریخار هرکانال جمع‌آوری می‌شود. از داده‌های جمع‌آوری شده ضرایب انتقال حرارت و دمای سطح داخلی و خارجی هر میله محاسبه می‌شود. در مرحله بعد از این نتایج افت فشار در هر کانال محاسبه می‌گردد. اگر مقادیر پارامترهای محاسبه شده در محدوده مورد نظر باشد محاسبات متوقف می‌شود در غیر این صورت با مقادیر جدید شار گرمی و کسر انتقال حرارت، نرم‌افزار COBRA-EN دوباره اجرا می‌شود. این فرایند تا زمانی که خطای محاسبه توزیع شار گرمی و کسر انتقال حرارت در محدوده مشخصی قرار گیرد تکرار می‌شود. آنها توانستند با این روش مقادیر افت فشار، کسر انتقال حرارت به کانال‌های داخلی و خارجی و DNBR را با دقت خوبی پیش‌بینی نمایند. در مطالعه حاضر، با توجه به عدم توانایی نرم‌افزارهای تحلیل زیرکانال موجود برای مدل‌سازی مستقل میله سوخت حلقوی، یک روش محاسباتی بر پایه مدل شار رانشی برای مدل‌سازی و تحلیل ترموهیدرولیک یک مجتمع سوخت حلقوی به روش زیرکانال توسعه داده می‌شود.

۲. توسعه مدل زیرکانال

در یک مجتمع سوخت حلقوی با دو دسته کانال مواجه هستیم. دسته اول کانال‌های داخلی هستند که سیال عبوری از آنها ارتباطی با سایر کانال‌ها ندارند. بنابراین برای این کانال‌ها عبارات‌های مربوط به جریان عرضی در نظر گرفته نمی‌شود. دسته دوم کانال‌های خارجی هستند که با سایر کانال‌های مجاور در ارتباط بوده و در طول کانال تبادل جرم، انرژی و ممنتوم رخ می‌دهد. معادلات یک بعدی حالت گذرا مدل شار رانشی برای کانال خارجی بصورت زیر نوشته می‌شوند [۵]:

² Thermal-Hydraulic analysis code for Annular Fuel (THAF)

³ Subchannel Analysis Code for Annular Fuel (SACAF)

⁴ Closed channel model

⁵ Open channel model

⁶ Jacobian-free Newton-Krylov (JFNK) method

معادله بقای جرم مخلوط

$$\frac{\partial \rho_m}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_m u_m)}{\partial z} + \frac{1}{A_i} \sum_k w_{ik} + \frac{1}{A_i} \sum_k (w'_{ik} - w'_{ki}) = 0 \quad (1)$$

معادله بقای جرم فاز بخار

$$\frac{\partial(\alpha \rho_g)}{\partial t} + \frac{\partial(\alpha \rho_g u_m)}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\alpha \rho_g \rho_l}{\rho_m} \overline{V_{gi}} \right) + \frac{1}{A_i} \frac{(\alpha \rho_g)_i}{\rho_{mi}} \left(\sum_k w_{ik} + \sum_k (w'_{ik} - w'_{ki}) \right) = \Gamma_g \quad (2)$$

معادله انرژی مخلوط

$$\frac{\partial(\rho_m h_m)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_m h_m u_m)}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{\alpha \rho_g \rho_l}{\rho_m} \Delta h_{gl} \overline{V_{gi}} \right] + \frac{1}{A_i} \sum_k w_{ik} h^* + \frac{1}{A_i} \sum_k (w'_{ik} h'_i - w'_{ki} h'_k) = \sum_j \frac{q_{jz}^*}{A_j} + \frac{\partial P}{\partial t} + \left[u_m + \frac{\alpha(\rho_l - \rho_g)}{\rho_m} \overline{V_{gi}} \right] \frac{\partial P}{\partial z} \quad (3)$$

معادله ممنتوم محوری

$$\rho_m \frac{\partial u_m}{\partial t} + \rho_m u_m \frac{\partial u_m}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{\alpha \rho_g \rho_l}{(1-\alpha)\rho_m} \overline{V_{gi}^2} \right] + \frac{1}{A_i} \sum_k w_{ik} u^* + \frac{1}{A_i} \sum_k (w'_{ik} u'_i - w'_{ki} u'_k) = -\frac{\partial P}{\partial z} - \rho_m g - \left[\frac{f_m}{D_h} + \frac{K}{\Delta z} \right] \frac{\rho_m u_m |u_m|}{2} \quad (4)$$

و معادله ممنتوم عرضی

$$\frac{\partial w_{ik}}{\partial t} + \frac{\partial w_{ik} \bar{u}_i}{\partial z} = \frac{s_{ik}}{L_c} (p_{ij} - p_{kj}) - K_{ik} \frac{w_{ik} |w_{ik}|}{2 \rho^* s_{ik} L_c} \quad (5)$$

به منظور ساده سازی در مدل سازی زیرکانال یک مجتمع سوخت توپر، برخی محققین [۵] از معادله ممنتوم عرضی صرفه نظر می‌کنند اما در مدل‌سازی سوخت‌های حلقوی لازم است که این پارامتر در نظر گرفته شود. در معادلات فوق u^* و h^* به ترتیب آنتالپی و ممنتوم محوری هستند که با جریان عرضی انحرافی منتقل می‌شوند.

۳. روش حل عددی

در این مطالعه روش حجم محدود با شبکه جابه‌جا شده برای جداسازی فضایی، و روش اولیبر پسر و کاملاً ضمنی برای جداسازی زمانی معادلات حاکم اعمال شده است. همچنین برای محاسبه عبارت‌های مربوط به جابجایی، روش مرتبه اول بلا دست بکار رفته است. برای حل معادلات غیر خطی بدست آمده از روش JFNK استفاده شده است.

روش نیوتن-کریلف مستقل از ژاکوبین

جداسازی کاملاً ضمنی معادلات فوق، یک سیستم از معادلات غیر خطی را تشکیل می‌دهد. برای حل معادلات غیر خطی جداسازی شده فوق از روش JFNK استفاده شده است. برای حل سیستم معادلات غیر خطی معمولاً از روش نیوتن استفاده می‌شود:

$$F(\mathbf{x}) = 0. \quad (17)$$

در این معادله، F باقیمانده غیر خطی و \mathbf{x} بردار مقادیر نامعلوم است. برای حل این معادله به روش نیوتن لازم است در هر گام مجموعه‌ای از معادلات خطی تصحیحی به فرم زیر حل شوند:

$$J^k \delta \mathbf{x}^k = -F(\mathbf{x}^k) \quad (18)$$

که J ماتریس ژاکوبین و k اندیکس تکرار نیوتن و $\delta \mathbf{x}^k$ بردار تصحیح است. معادله خطی فوق بطور تقریب با استفاده از روش تکرار GMRES [۶] حل می‌شود. انتظار می‌رود که با استفاده از یک پیش شرط ساز، همگرایی الگوریتم GMRES سریع‌تر بوده و برای رسیدن به جواب، به تعداد کمتری تکرار کریلف نیاز است. این امر تاثیر زیادی در بهبود اقتصاد محاسبات دارد. در این راستا با اعمال پیش شرط ساز راست معادله فوق بصورت زیر نوشته می‌شود:

$$J^k P^{-1} P \delta \mathbf{x}^k = -F(\mathbf{x}^k) \quad (20)$$

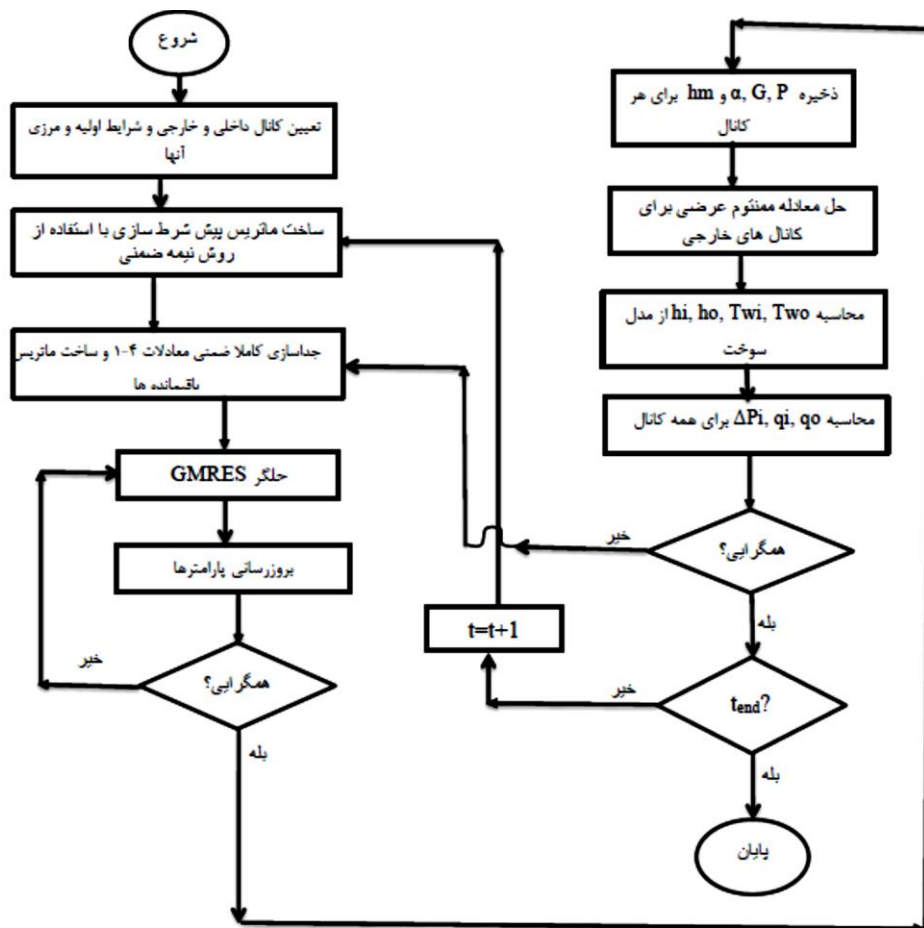
که P ماتریس پیش شرط ساز است. در واقع P^{-1} تقریب ماتریس J^{-1} می‌باشد. در این مقاله، P ماتریس پیش شرط سازی است. ماتریس جدید بصورت زیر خواهد بود:

$$J' = JP^{-1} \quad \& \quad \delta x' = P \delta x \Rightarrow J' \delta x'^k = -F(x^k) \quad (21)$$

سرانجام، بردار δx^k در یک فرایند تکرار از روش GMRES بصورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\delta x^k = P^{-1} \delta x'^k \quad (24)$$

در این مقاله از روش پیش شرط ساز نیمه ضمنی برپایه فیزیک مسئله^۷ برای پیش شرط سازی حلگر با روش کرلیف یعنی GMRES استفاده شده است. در این مطالعه دمای ورودی، کسر بخار ورودی (معمولا در ورودی $\alpha_g = 0$ است)، فشار خروجی و دبی ورودی بعنوان شرایط مرزی اعمال می‌شوند. مقادیر اولیه و شرایط مرزی برای مجتمع سوخت 13×13 در جدول ۱ داده شده‌اند. برای سوخت‌های حلقوی چگونگی توزیع جریان و همچنین تقسیم حرارت بین کانال-های داخلی و خارجی از اهمیت زیادی برخوردار بوده و بایستی تعیین شود. در حقیقت، توزیع جریان خنک‌کننده طوری است که منجر به افت فشار برابر برای همه زیرکانال‌ها شود. مدل توزیع جریان اعمال شده در این مقاله همانند مدل هان و همکاران [۲] است. همچنین، برای یافتن تقسیم حرارت از روش OCM [۷] استفاده شده است.



شکل ۱. الگوریتم محاسبات

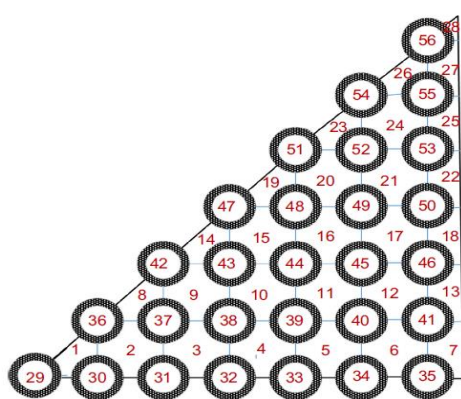
الگوریتم حل در شکل ۱ نشان داده شده است. روند اصلی حل بدین صورت است که ابتدا با حل نیمه ضمنی معادلات ۱-۴، پیش شرط ساز نیمه ضمنی محاسبه می‌شود. سپس، با استفاده از مقادیر اولیه و شرایط مرزی معادلات ۱-۴ بصورت کامل از معادلات حل می‌شوند. در این مرحله معادلات فوق بصورت کانال-به-کانال حل می‌شوند. یعنی برای هر

⁷ physics-based preconditioner (PBP)

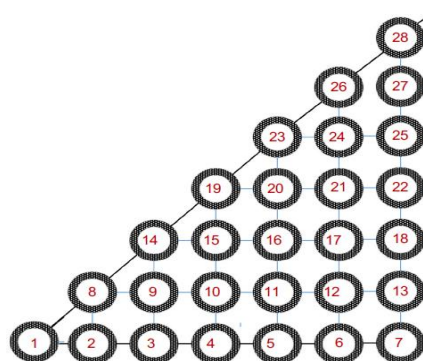
زیرکانال دسته معادلات فوق در طول کانال برای همه سطوح محوری بصورت همزمان حل می‌گردند. در این مطالعه برای هر کانال تنها معادلات ۴-۱ بصورت کاملاً ضمنی حل می‌شوند بنابراین برای ساخت PBP سازگار با این معادلات، در مرحله ساخت PBP از معادله ممنوم عرضی صرف‌نظر کرده و ترم‌های مربوط به جریان عرضی در گام زمانی قبلی محاسبه می‌شوند. در مرحله بعد برای کانال‌های خارجی با مقادیر جدید بدست آمده برای فشار، آنتالپی، کسر بخار و دبی محوری برای هر حجم کنترل، معادله ممنوم عرضی بصورت صفحه به صفحه^۸ حل می‌شود. در روش صفحه به صفحه که روش سطح-به-سطح^۹ نیز خوانده می‌شود، در تضاد با روش کانال-به-کانال، معادله ممنوم عرضی در یک سطح محوری معین و مشخص برای همه زیرکانال‌های خارجی بصورت همزمان حل می‌شود. عبارت‌های مربوط به سرعت محوری در سطح محوری بالاتر در گام تکرار قبلی و عبارت‌های در سطح پایین‌تر با استفاده از مقادیر جدید حل در سطح^{۱۰} قبلی محاسبه می‌شوند. چون در جهت عرضی جفت‌شدگی مستقیمی بین گپ‌ها وجود ندارد، بنابراین در هر سطح برای هر گپ معادلات ممنوم عرضی مستقل از هم بوده حل آنها نسبتاً ساده است. در مرحله بعد با استفاده از مدل توسعه داده شده برای سوخت [۷] توزیع دما در داخل سوخت و همچنین دمای سطح غلاف در تماس با خنک‌کننده کانال داخلی و خارجی و همچنین ضرایب انتقال حرارت بین سطوح محاسبه می‌شود. در گام بعدی بعد از محاسبه شار حرارتی ورودی به هر کانال و افت فشار بین کانال‌های داخلی و خارجی، همگرایی آنها بررسی می‌شود. اگر همگرایی حاصل نشود آنگاه محاسبات به مرحله حل معادلات ۴-۱ بصورت کاملاً ضمنی برگشته و روند فوق تا حصول به همگرایی تکرار می‌شود تا همگرایی لازم بدست آید. اگر این نتایج رضایتمند بودند محاسبات فوق برای گام زمانی بعدی تا حصول به t_{final} تکرار می‌شوند. توجه شود که در روش فوق برای سرعت بخشیدن به محاسبات در هر گام زمانی برای هر کانال تنها یک بار از پیش شرط ساز PBP استفاده می‌شود.

۴. اعتبار سنجی مدل

به منظور اعتبارسنجی مدل حاضر، بعلت تقارن و تسهیل در محاسبات، این روش را برای مدل‌سازی ۱/۸ مجتمع سوخت حلقوی ۱۳×۱۳ در شرایط کاری ارائه شده در جدول ۱ با کانال‌های داخلی و خارجی بکار برده و نتایج بدست آمده با نتایج حاصل از کد COBRA-EN و کد VIPRE-01 [۱] مقایسه می‌شوند. در شکل‌های ۲ و ۳، به ترتیب، شیوه شماره‌گذاری میله‌ها و کانال‌ها در یک هشتم مجتمع سوخت داغ نشان داده شده است.



شکل ۳. شماره گذاری کانال‌های داخلی و خارجی



شکل ۲. شماره گذاری میله‌های سوخت حلقوی در ۱/۸ مجتمع

توزیع محوری افت فشار به دست آمده از روش‌های مختلف برای کانال داغ مجتمع سوخت حلقوی در شکل ۴ با هم مقایسه شده‌اند. در طول کانال داخلی افت فشار تقریباً بصورت یکنواخت تغییر می‌کند. اما، برای کانال خارجی به دلیل

⁸ Plane by plane

⁹ Level-by-level

¹⁰ Level

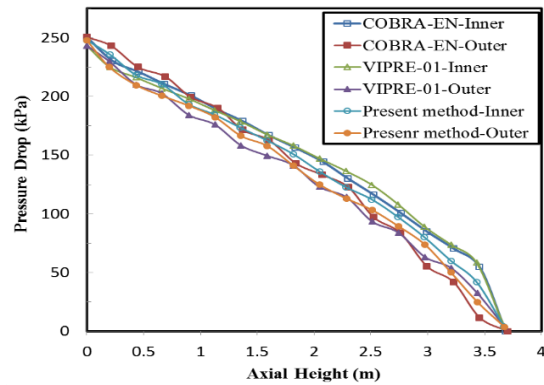
وجود شبکه نگه دارنده در طول کانال همواره شیب نمودار افت فشار کم و زیاد می‌شود. این روند در نتایج حاصل از کد COBRA-EN نیز دیده می‌شود. شکل ۴ نشان می‌دهد که نمودار افت فشار حاصل از روش حاضر در طول کانال بیشتر از مقادیر محاسبه شده با استفاده از کد COBRA-EN است. این اختلاف اساساً ناشی از اعمال روابط تجربی مختلف برای محاسبه پارامترهای مختلفی مانند ضرایب افت فشار است. در شکل ۵ توزیع شعاعی دمای سوخت حلقوی با توان 111 kw/m با روش‌های مختلف با هم مقایسه شده است. در این شکل دیده می‌شود که دمای محاسبه شده با روش‌های مختلف برای سطوح غلاف داخلی و خارجی در تماس با خنک‌کننده در توافق خوبی با هم هستند. اما پیش‌بینی کد COBRA-EN برای بیشترین دما در داخل قرص سوخت دارای حدود ۰.۴٪ خطا است که این تفاوت احتمالاً مربوط به روابط مختلف برای محاسبه پارامترهای فیزیکی و انتقال حرارت در کدهای مختلف است.

در شکل ۶ مقایسه دما خنک‌کننده در کانال‌های داخلی و خارجی با روش‌های مختلف ارائه شده است. همچنین در شکل ۷ توزیع محوری شار حرارتی برای سطوح داخلی و خارجی داغ‌ترین میله نشان داده شده است. در شکل دیده می‌شود که اگر چه سطح داخلی دارای شار حرارتی بیشتری نسبت به سطح خارجی است، اما با این حال، دمای خنک‌کننده در کانال خارجی بیشتر از کانال داخلی است. چرا که در کانال خارجی به دلیل وجود شبکه نگه‌دارنده افت فشار بیشتر است، اما باید افت فشار کانال داخلی و خارجی در نهایت یکسان باشد، بنابراین برای کانال خارجی دبی کمتر است. بنابراین، چون دبی کانال داخلی بیشتر از کانال خارجی است، پس برداشت حرارت از کانال داخلی بیشتر شده و در نتیجه برای کانال خارجی نسبت به کانال داخلی دمای خنک‌کننده بیشتر بوده و سریع‌تر به دمای اشباع می‌رسد. پس، دمای خنک‌کننده در کانال خارجی بیشتر از کانال داخلی بدست می‌آید. از سوی دیگر مقدار دبی بیشتر در کانال‌های داخلی نسبت به کانال خارجی منجر به برداشت حرارت بیشتری از کانال داخلی می‌شود، در نتیجه افزایش دما برای کانال خارجی بیشتر است. همانطور که در جدول ۲ آورده شده است این امر منجر به مقدار MDNBR کمتری در کانال داخلی می‌شود. از شکل ۷ می‌توان نتیجه گرفت که شار حرارتی کانال داخلی $1/41$ برابر کانال خارجی است. البته این نتیجه در شرایطی حاصل شده که ضریب انتقال حرارت در گپ داخلی و خارجی با هم برابر $(h_{gi}=h_{go}=6000 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K})$ است.

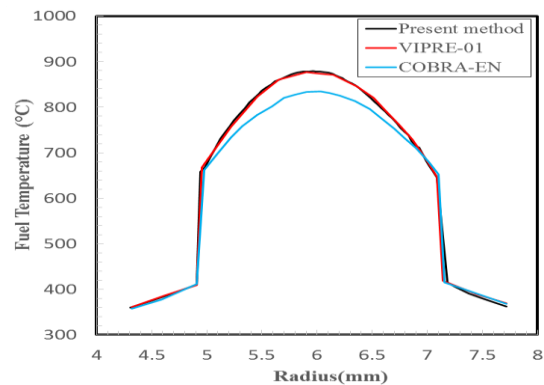
در جدول ۲ مقادیر افت فشار کل و MDNBR حاصل از روش‌های مختلف برای مجتمع سوخت داغ با هم مقایسه شده‌اند. نتایج در توافق خوبی با هم بوده و اختلاف مقادیر افت فشار کل حاصل از روش‌های مختلف کمتر از ۰.۳٪ است. اختلافات اندک مشاهده شده برای پارامترهای مختلف ناشی از اعمال روابط تجربی مختلف برای محاسبه افت فشار و انتقال حرارت، مدل‌های جریان دوفازی متفاوت و همچنین اعمال جداول ترمودینامیکی مختلف در هر کد است.

جدول ۱. مشخصات مهم برای محاسبات مجتمع سوخت حلقوی

نوع آرایه	میله سوخت ۱۳×۱۳
توان	۱۱۱ kW/m
آهنگ جریان خنک‌کننده برای تک میله	۰/۷۸۳۵۷ kg/s
فشار کاری	۱۵/۵ MPa
دمای ورودی خنک‌کننده	۵۶۷/۸۷ K
ضریب انتقال حرارت گپ	W/(m ² .K) ۶۰۰۰
پروفایل توان محوری	توزیع کوسینوسی (۱/۵۵ = میانگین / قله)
شعاع داخلی غلاف داخلی، r_i (mm)	۴/۳۰۵
شعاع خارجی غلاف داخلی، r_o (mm)	۴/۸۷۶۵
شعاع داخلی سوخت، r_{fi} (mm)	۴/۹۳۸۵
شعاع خارجی سوخت، r_{fo} (mm)	۷/۱۱۲۵
شعاع داخلی غلاف خارجی، r_{ci} (mm)	۷/۱۷۴۵
شعاع خارجی غلاف خارجی، r_{co} (mm)	۷/۷۴۶
طول فعال، H_{core} (m)	۳/۶۶
تعداد میله‌ها در هر مجتمع	۱۶۰
ضریب افت فشار صفحه مشبک	۰/۶
ضریب افت فشار شکلی در ورود و خروج	۱/۰ و ۰/۴



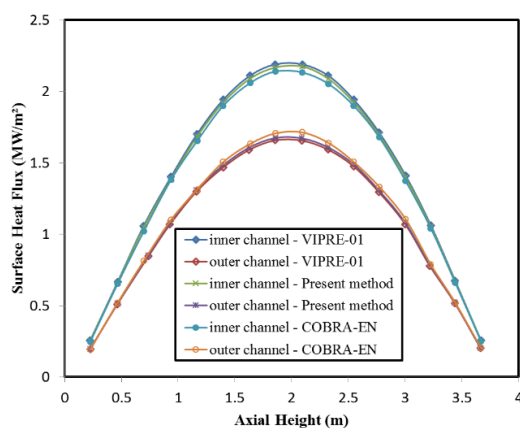
شکل ۳. اختلاف فشار در یک مجتمع سوخت حلقوی



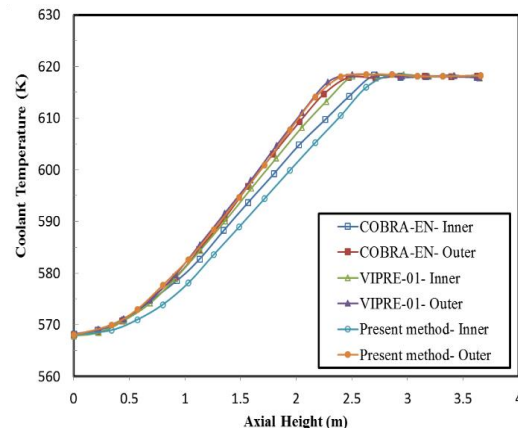
شکل ۴. توزیع شعاعی دمای میله سوخت حلقوی

جدول ۲. مقایسه مقادیر افت فشار و MDNBR برای مجتمع سوخت داغ

روش حاضر		COBRA-EN		VIPRE-01		MDNBR
کانال خارجی	کانال داخلی	کانال خارجی	کانال داخلی	کانال خارجی	کانال داخلی	
۲/۱۸	۱/۷	۱/۸۱	۱/۶۷	۱/۹۳	۱/۳۷	
۲۴۸		۲۵۰		۲۴۳		افت فشار کل (kPa)



شکل ۶. توزیع محوری شار حرارتی



شکل ۵. دمای خنک‌کننده در مجتمع سوخت حلقوی

۵. نتیجه‌گیری

در این مقاله یک کد ترموهیدرولیکی بر اساس روش تحلیل زیرکانال با بکارگیری مدل شار رانشی و در شرایط گذرا برای یک مجتمع سوخت حلقوی توسعه داده شد است. بررسی نتایج نشان داد که در سوخت‌های حلقوی، شار حرارتی کانال داخلی نسبت به کانال خارجی بیشتر است با این حال به دلیل بزرگ‌تر بودن محیط داغ شده کانال خارجی، حرارت ورودی به کانال خارجی بیشتر از کانال داخلی است. در میله سوخت حلقوی به علت افت ناشی از شبکه نگه دارنده در کانال خارجی، شار گرمی کانال داخلی بیشتر از کانال خارجی است. در نتیجه برداشت حرارت از کانال داخلی بیشتر است. بنابراین افزایش دمای خنک‌کننده در کانال خارجی بیشتر از کانال داخلی است. در کانال داخلی به دلیل شار حرارتی بیشتر نسبت به کانال خارجی، DNBR کمتر است.

۶. مراجع

- [1] 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.
- [2] Han, K.H. and S.H. Chang, Development of a thermal-hydraulic analysis code for annular fuel assemblies. Nuclear Engineering and Design, 2003. 226(3): p. 267-275.
- [3] 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.
- [4] صفاری، ا.ح.، توسعه برنامه محاسباتی برای بکارگیری کد COBRA-EN جهت تحلیل زیرکانال قلب راکتورهای PWR با سوخت حلقوی. بیست و یکمین کنفرانس هسته‌ای ایران-۶ و ۷ اسفند ۹۳، ۱۳۹۳.
- [5] Hajizadeh, A., H. Kazeminejad, and S. Talebi, An advanced new fully implicit numerical method for two-phase flow subchannel analysis based on the Drift Flux Model. Annals of Nuclear Energy, 2017. 108: p. 351-365.
- [6] Saad, Y. and M.H. Schultz, GMRES: A generalized minimal residual algorithm for solving nonsymmetric linear systems. SIAM Journal on scientific and statistical computing, 1986. 7(3): p. 856-869.
- [7] Esmaili, H., H. Kazeminejad, and H. Khalafi, Prediction of temperature distribution in annular fuels using orthogonal collocation method. Annals of Nuclear Energy, 2019. 134: p. 77-87.