



بیست و یکمین کنفرانس هسته‌ای ایران

۷ و ۸ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

توسعه برنامه محاسباتی برای بکارگیری کد COBRA-EN جهت تحلیل زیرکانال قلب راکتورهای PWR با سوخت حلقوی

امیر حسین، صفاری؛ امیر سعید، شیرانی؛ عبدالحمید، مینوچهر

۱- دانشگاه شهید بهشتی، دانشکده مهندسی هسته‌ای، گروه راکتور

چکیده:

استفاده از میله سوخت حلقوی به دلیل ویژگی برداشت حرارت از داخل و بیرون موجب کاهش دمای سوخت و افزایش ایمنی راکتور می‌گردد. اکثر کدهای ترموهیدرولیکی مانند COBRA-EN توانایی مدل سازی این نوع سوخت را ندارند. از نظر محاسباتی نحوه تقسیم حرارت و دبی سیال بین کانال داخلی و بیرونی مجهول است. در این مقاله با بکارگیری کد COBRA-EN برای محاسبات سیال در کانالهای داخلی و بیرونی، برنامه‌ای برای یافتن مجهولات یادشده و توزیع دما با روش اختلاف محدود برای سوخت حلقوی توسعه داده شده است. جهت اعتبارسنجی، محاسبات زیرکانال مجتمع سوخت راکتور وستینگهاس با سوخت حلقوی انجام و با مقادیر مرجع مقایسه شده است.

کلمات کلیدی: سوخت حلقوی، ترموهیدرولیک، کد COBRA-EN، توسعه برنامه محاسباتی

مقدمه

طرح میله سوخت حلقوی برای راکتورهای هسته‌ای پیشرفته توسط Kazimi و همکارانش در دانشگاه MIT توسعه داده شده است. در این طرح امکان عبور سیال از درون و بیرون میله سوخت و برداشت حرارت همزمان از درون و بیرون امکان پذیر شده است. استفاده از این نوع میله در راکتورهای PWR فعلی، امکان افزایش ۵۰ درصدی توان با حاشیه ایمنی مناسب را می‌دهند [۱]. با توجه به مزایای این نوع میله سوخت اخیراً محققین زیادی به بررسی و امکان سنجی استفاده از آن از منظر ترموهیدرولیک و نوترونیک در راکتورهای PWR موجود پرداخته‌اند. به طور مثال Mozafari و Faghihi به طراحی میله سوخت حلقوی برای راکتور VVER-1000 از منظر نوترونیک، بهینه سازی گام شبکه و DNBR پرداخته‌اند [۲]. اکثر کدهای تحلیل زیرکانال^۱ موجود مثل COBRA^۲ توانایی محاسبات این نوع

^۱Subchannel Analysis

^۲Coolant Boiling in Rod Array



بیست و یکمین کنفرانس هشتای ایران

۶ و ۷ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

سوخت را ندارند. حتی کد VIPRE^۳ نیز که توسط KAZIMI و همکارانش جهت بررسی ترموهیدرولیکی سوخت حلقوی استفاده شده است به صورت عادی برای سوخت توپر بوده و از گزینه لوله میان تهی لکه در این کد در دسترس است برای تحلیل سوخت حلقوی استفاده نموده اند [۱]. اکثر محققین برای بررسی ترموهیدرولیکی میله سوخت حلقوی سعی نموده‌اند با توسعه برنامه‌هایی محاسباتی و ترفندهایی از کدهای معمول و در دسترس بهره گیرند و نیاز خود به کدهای تحلیل زیرکانال را مرتفع سازند. Shin و همکارانش از کد ترموهیدرولیک MATRA استفاده کرده‌اند و با توسعه برنامه‌ای محاسباتی به تحلیل حرارتی سوخت حلقوی به منظور استفاده در راکتور OPR-1000 پرداخته‌اند [۲]. Deokule و همکارانش برای طراحی میله سوخت حلقوی در نوعی از راکتور آب جوشانکدی توسعه داده‌اند و از کد COBRA-IV برای محاسبات کانال بهره برده‌اند [۴]. از نظر محاسباتی نحوه تقسیم حرارت و دبی سیال بین کانال داخلی و بیرونی مجهول است. در این مقاله کد [COBRA-EN ۵] برای محاسبات سیال در کانال‌های داخلی و بیرونی با لحاظ جریان‌های عرضی بین کانال‌های بیرونی‌کار رفته است و محاسبات حرارتی در سوخت با روش اختلاف محدود انجام شده است. با توجه به مجهول بودن نحوه تقسیم حرارت و دبی برنامه‌ای توسعه داده شده است که با روش تکرار و جایگذاری مقادیر مجهول محاسبه می‌کند. جهت اعتبارسنجی برنامه توسعه داده شده، محاسبات ترموهیدرولیکی مجتمع سوخت راکتور وستینگ‌هاوس با سوخت حلقوی انجام و نتایج با مقادیر موجود در گزارش مرجع مقایسه شده است.

تحلیل انتقال حرارت در سوخت حلقوی

در شکل ۱ مقطع میله سوخت حلقوی نمایش داده شده است. این نوع میله سوخت دارای دو غلاف یکی در داخل و دیگری در بیرون سوخت است. شرط مرزی در این نوع میله انتقال حرارت جابجایی سیال هم از سطح غلاف داخلی و هم از سطح غلاف خارجی است. جهت محاسبه دقیق توزیع درجه حرارت در میله سوخت بایستی معادله انتقال حرارت (معادله ۱) کمک روش اختلاف محدود گسسته سازی شود. راه حل ساده تر استفاده از روش بالانس انرژی برای انواع حجم کنترل متناظر با هر گره است که منجر به همان شکل گسسته معادله با روش اختلاف محدود می‌گردد. به عنوان مثال رابطه ۲ برای یک گره داخلی سوخت می‌باشد.

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(Kr \frac{dT}{dr} \right) + \dot{q}''' = 0 \quad (1)$$

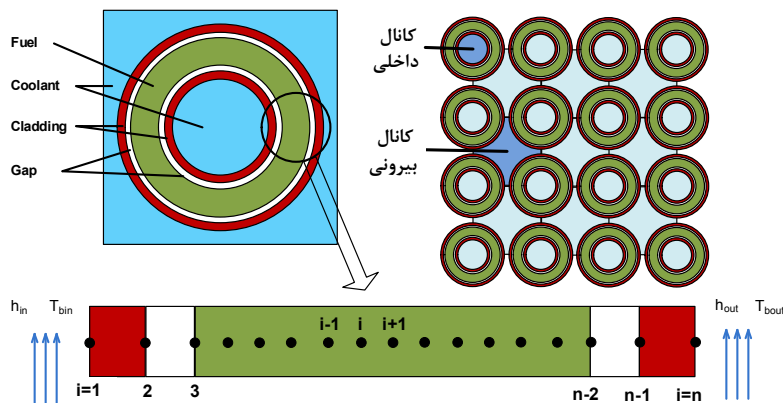
^۳Versatile Internals and Component Program for Reactors; EPRI

^۴Hollow Tubes

^۵Westinghouse

$$\dot{E}_{in} + \dot{E}_g = 0 \Rightarrow K_{i-1} A_{i-1} \frac{T_{i-1} - T_i}{\Delta r} + K_i A_i \frac{T_{i+1} - T_i}{\Delta r} + \dot{q}''' \times V_i = 0 \quad (2)$$

که در معادلات فوق: r مختصات شعاعی، T دما، K ضریب هدایت حرارتی بین دو گره، \dot{q}''' نرخ چگالی تولید توان، V_i حجم هر حجم کنترل و \dot{E}_{in} و \dot{E}_g به ترتیب نرخ انرژی ورودی و نرخ انرژی تولیدی در گره است. مقادیر ضریب انتقال حرارت جابجایی از نتایج کد COBRA-EN برای کانال‌های داخلی و بیرونی در دسترس است. همچنین مقدار ضریب انتقال حرارت گپ برای گپ داخلی و خارجی مطابق مرجع [۱] برابر $6000 \text{ W/m}^2\text{K}$ در نظر گرفته شده است.



شکل ۱: میله سوخت حلقوی و نحوه گره‌بندی شعاعی برای روش اختلاف محدود

روند محاسبات برای تحلیل زیرکانال

در مجتمع سوخت با میله سوخت حلقوی مطابق شکل ۱ دو نوع زیرکانال یا به اختصار کانال وجود دارد، یک نوع کانالهای داخلی میله‌ها و دیگری کانالهای واقع شده در میان میله‌ها یا کانالهای بیرونی است. واضح است که بین کانالهای بیرونی جریانهای عرضی وجود دارند [۶]. که به این منظور از توانمندی کد COBRA-EN استفاده می‌شود. از نظر محاسباتی نحوه تقسیم حرارت و دبی سیال بین کانال داخلی و بیرونی مجهول است. میزان حرارت منتقل شده از میله سوخت به داخل و بیرون بستگی به شرایط هندسی و حرارتی میله سوخت و شرایط سیال در دو طرف دارد. همچنین با توجه به موازی بودن کانالهای داخلی و بیرونی در همه کانال‌ها افت فشار یکسان بوده و بدیهی است با توجه به تفاوت کانال‌ها دبی سیال در کانالهای داخلی و بیرونی متفاوت می‌باشد. افت فشار بیشتر منجر به دبی کمتر می‌شود. میزان این تفاوت با منظور کردن اثر افت فشار صفحه مشبک بیشتر می‌شود. چرا که وجود صفحه مشبک در کانالهای بیرونی اثر گذار است و در افت فشار کانالهای داخلی هیچ اثری ندارد. در برنامه کامپیوتری توسعه داده شده طبق فلوجارت شکل ۲ ابتدا مقادیری فرضی برای دبی و حرارت کانالهای داخلی و بیرونی به عنوان ورودی به کد COBRA-EN داده می‌شود که با اجرای کد برای کانالهای داخلی و بیرونی مقادیر افت فشار و شرایط سیال در کانال‌ها به دست می‌آید. با توجه به نتایج دمای سیال، توزیع دما در تمامی میله‌های سوخت با روش



بیست و یکمین کنفرانس هشتای ایران

۱۷ و ۱۸ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

اختلاف محدود محاسبه می شود و مقادیر جدید حرارت ورودی به کانالها با توجه محاسبات حرارتی سوخت مشخص می گردد. همچنین مقادیر دبی ورودی به کانالها نیز با توجه به یکسان شدن افت فشار در همه کانالها تصحیح می شود و در مرحله تکرار بعدی محاسبات استفاده می شود. این حلقه محاسباتی آنقدر تکرار می شود تا مقادیر حرارت و دبی همه کانالها همگرا شود.

محاسبات زیرکانال مجتمع سوخت راکتور وستینگهاوس با سوخت حلقوی

جهت صحت سنجی عملکرد برنامه توسعه داده شده در این مقاله محاسبات زیرکانال برای یک میله و سپس مجتمع داغ راکتور وستینگهاوس با سوخت حلقوی انجام شده است. مشخصات مهم قلب راکتور در جدول ۱ آمده است. همچنین شمای یک هشتم مجتمع سوخت داغ و نحوه در نظر گرفتن کانالهای داخلی و بیرونی مقدار توان هر میله به ترتیب در شکل های ۳ و ۴ ارائه شده است.

جدول ۱: مشخصات مهم قلب راکتور

وستینگهاوس با سوخت حلقوی [۱]

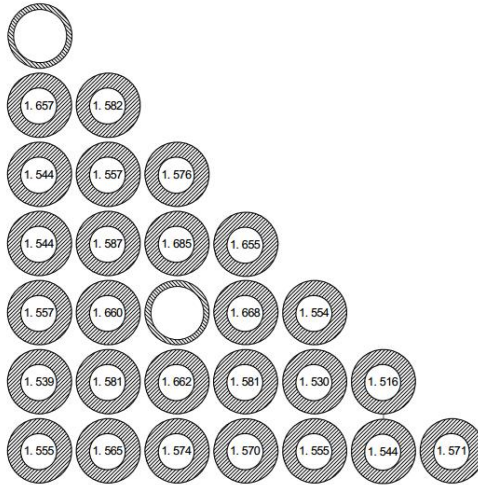
مشخصات	
۱۵/۵۱	فشار سیستم (MPa)
۲۹۴/۷	دمای ورودی ($^{\circ}\text{C}$)
۶۰۳۷	توان قلب راکتور (MW)
۰/۷۸۳۶	دبی جرمی سیال برای مدل سازی تک میله (kg/s)
۲۶۵۵۰	دبی جرمی سیال قلب (kg/s)
۱۶۰	تعداد میله در مجتمع (۱۳×۱۳)
۱/۵۳۶۷	قطر خارجی غلاف بیرونی (cm)
۰/۸۶۳۳	قطر داخلی غلاف داخلی (cm)
۱/۴۱۰	قطر خارجی قرص سوخت (cm)
۰/۹۹	قطر داخلی قرص سوخت (cm)
۳/۶۶	ارتفاع فعال میله سوخت (m)
۰/۶	ضریب افت فشار صفحه مشبک
۱/۰ و ۰/۴	ضریب افت فشار شکلی در ورود و خروج

شکل ۲: فلوچارت برنامه محاسباتی



بیست و یکمین کنفرانس هشتاد و یکم ایران

۶ و ۷ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان



شکل ۴: توزیع نسبی توان در میله‌های

سوخت حلقوی در یک هشتم مجتمع سوخت

وستینگهاوس

شکل ۳: نحوه شماره گذاری کانال‌ها و میله‌ها

در یک هشتم مجتمع سوخت وستینگهاوس

نتایج

در این مقاله جهت اعتبارسنجی دو نوع محاسبات انجام شده است مدل سازی تک میله داغ و مجتمع سوخت داغ. شکل ۵ و ۶ و جدول ۲ مربوط به محاسبات تک میله حلقوی است. در شکل ۵ توزیع شعاعی دما در سوخت حلقوی ارائه شده است و با مقادیر محاسبه شده با کد VIPRE مقایسه شده است. حداکثر خطا در محاسبه دما برابر ۴٪ است که این تفاوت احتمالا مربوط به روابط مختلف برای ضریب هدایت حرارتی سوخت است. ملاحظه می‌شود که علی‌رغم توان خطی بالا در میله سوخت حلقوی (1110 W/cm) حداکثر دما کمتر از ۹۰۰ درجه سانتیگراد است. میزانات فشار و تقسیم دبی در کانال داخلی و بیرونی حاصل از مدل سازی تک میله نیز در جدول ۲ ارائه شده است که انطباق خوبی با نتایج کد VIPRE دارد. در شکل ۶ توزیع محوری DNBR آمده است که مقدار حداقل DNBR بیشتر از ۲/۴ است که نشان‌دهنده حاشیه ایمنی خیلی خوب این نوع سوخت نسبت به سوخت توپر است. همچنین به نظر می‌رسد اختلاف موجود، ناشی از روابط تجربی متفاوت برای شار حرارت بحرانی و تفاوت اندک در شار حرارت سطحی باشد. محاسبات مجتمع داغ نیز انجام شده است و با بررسی نتایج کل مجتمع، کانال داغ داخلی و بیرونی مشخص و نتایج مربوطه در شکل‌های ۷، ۸ و ۹ ارائه شده است در شکل ۷ توزیع شار حرارتی با مقادیر مرجع [۱] مقایسه شده است که نشان از عملکرد خوب کد توسعه داده شده در تعیین نحوه تقسیم حرارت بین کانال داخلی و بیرونی دارد. توزیع دمای سیال در کانال داغ داخلی و بیرونی در شکل ۸ ارائه شده است که انطباق نسبتا خوبی دارد. همچنین توزیع محوری افت فشار در شکل ۹ ارائه شده است. ملاحظه می‌شود که فشار



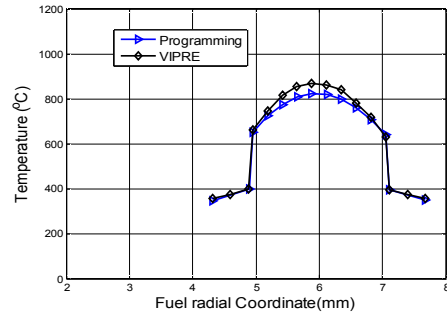
بیست و یکمین کنفرانس هشتای ایران

۶ و ۷ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

سیال در ابتدا و انتهای کانال داخلی تغییرات ناگهانی داشته و در طول کانال به صورت خطی تغییر می کند ولی شیب افت فشار در کانال خارجی به دلیل وجود ۷ صفحه مشبک در طول کانال مرتبا کم و زیاد می شود.

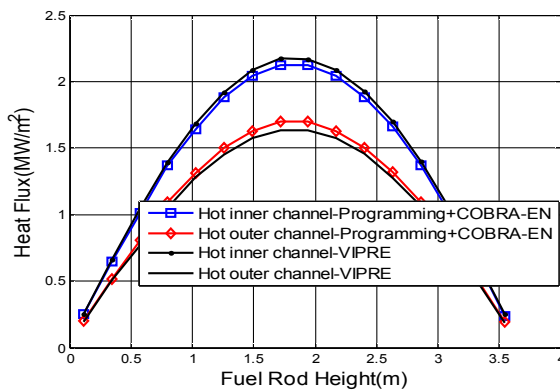
جدول ۲: مقایسه افت فشار و تقسیم دبی در کانال داخلی و بیرونی حاصل از مدل سازی تک میله

VIPRE		Programming + COBRA-EN		
کانال بیرونی	کانال داخلی	کانال بیرونی	کانال داخلی	
209.4	209.4	208.5	208.5	افت فشار (kPa)
0.370	0.415	0.368	0.414	دبی جرمی (kg/s)

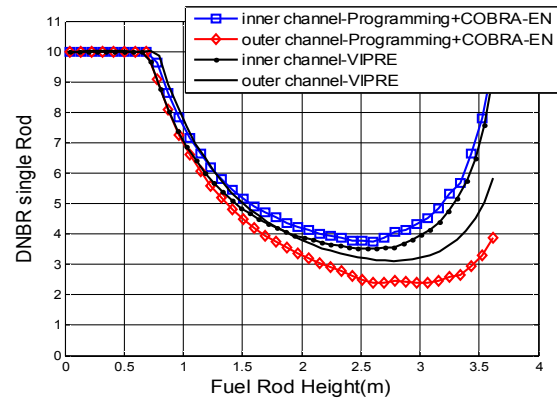


شکل ۵: توزیع شعاعی دمای میله سوخت

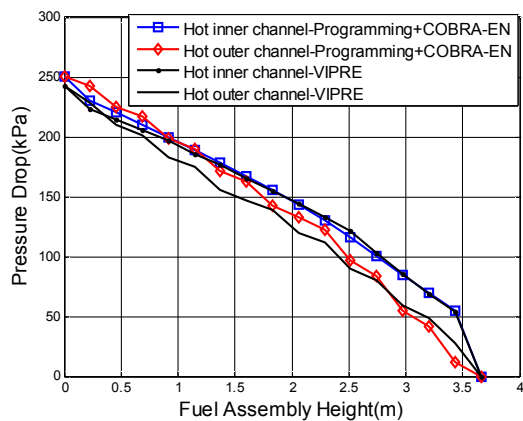
حلقوی



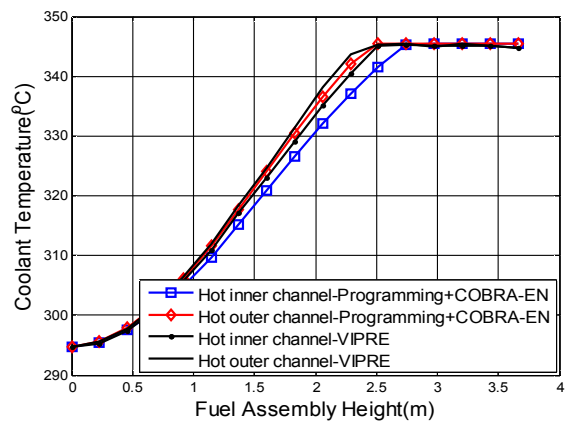
شکل ۷: توزیع محوری شار حرارتی



شکل ۶: توزیع محوری DNBR



شکل ۹: توزیع محوری افت فشار



شکل ۸: توزیع محوری دمای سیال



بیست و یکمین کنفرانس هسته ای ایران

۷ و ۸ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

بحث و نتیجه گیری

در این مقاله برنامه ای محاسباتی برای محاسبات زیرکانال راکتورهای PWR با سوخت حلقوی توسعه داده شد. در این برنامه محاسبه توزیع دما در سوخت حلقوی با روش اختلاف محدود و محاسبات حرارتی سیال با بکارگیری کد COBRA-EN برای کانال های داخلی و بیرونی صورت می گیرد. در این برنامه با توجه به مقادیر فرضی اولیه برای دبی و حرارت ورودی به کانال های داخلی و بیرونی، کد COBRA-EN اجرا می شود سپس با انجام محاسبات حرارتی سوخت، مقدار تقسیم حرارت بین داخل و بیرونهمه میله ها معین می گردد و با توجه به افت فشار، دبی جدید تخمین زده می شود. حلقه تکرار تا همگرایی ادامه می یابد. جهت اعتبارسنجی برنامه توسعه داده شده، محاسبات ترموهیدرولیکی مجتمع سوخت راکتور وستینگهاوس با سوخت حلقوی انجام و نتایج به دست آمده با مقادیر مرجع مقایسه گردید که از انطباق خوبی برخوردار است. لذا این برنامه ابزار مناسبی برای تحلیل زیرکانال راکتورهای PWR با میله سوخت حلقوی می باشد.

مراجع

- [1]-Kazimi, M.S., Hejzlar, P., High Performance Fuel Design for next generation PWRs: final report, 2006
- [2]-Mozafari, M.A., Faghihi, F., Design of annular fuels for a typical VVER-1000 core: Neutronic investigation, pitch optimization and MDNBR calculation, Annals of Nuclear Energy 60, 226-234, 2013
- [3]-Shin, C.H., Chun, T., Thermal hydraulic performance assessment of dual-cooled annular nuclear fuel for OPR-1000, Nuclear Engineering and Design 243, 291-300, 2012
- [4]-Deokule, A.P., Vishnoi A.K., Design and analysis of 19 pin annular fuel rod cluster for pressure tube type boiling water reactor, Nuclear Engineering and Design 276, 64-73, 2014
- [5]-Basile, D., Beghi, M., Chierici, R., Salina, E., and Brega, E., COBRA-EN Manual, 1999
- [6]-امیرحسین صفاری، جلیل جعفری، محاسبات ترموهیدرولیک قلب راکتور هسته ای بوشهر در وضعیت انحراف از شرایط نامی، هجدهمین کنفرانس هسته ای ایران، یزد، ۱۳۹۰