

تحلیل نوترونی و ترموهیدرولیکی استفاده از سوخت حلقوی در راکتور نیروگاه اتمی بوشهر در کد MCNPX و انسیس فلونت

زینب طیاری صادق* و فرهاد ذوالفقارپور

گروه فیزیک هسته‌ای دانشکده علوم، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل

*پست الکترونیکی: z.tayari@uma.ac.ir

(دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۳/۱۴؛ دریافت نسخه نهایی: ۱۴۰۳/۶/۱۷)

چکیده

در این مقاله، استفاده از سوخت حلقوی به جای سوخت توپر در قلب راکتور بوشهر بررسی شده است. در هندسه حلقوی، سوخت دو کانال داخلی و خارجی و دوسطح تبادل دمای سوخت با خنک‌کننده دارد. پنج نوع هندسه حلقوی با شعاع‌های داخلی و خارجی متفاوت به انضمام سوخت توپر فعلی مورد استفاده در راکتور بوشهر، در کد هسته‌ای MCNPX.2.6.0 شبیه‌سازی شده است. پس از صحت‌سنجی شبیه‌سازی، برخی پارامترهای نوترونی برای سوخت‌های با هندسه حلقوی توسط کد محاسبه شده است. با تحلیل نتایج، هندسه حلقوی بهینه معرفی و پیشنهاد شده است. پس از تحلیل نوترونی، هندسه حلقوی انتخاب شده از دیدگاه ترموهیدرولیکی در کد کبرا و نرم افزار فلونت مورد بررسی قرار گرفته است. طبق نتایج به دست آمده، استفاده از سوخت حلقوی سبب می‌شود مقدار سوختن در حدود ۴/۰۱ واحد نسبت به سوخت توپر افزایش یافته و از مقدار ۱۲/۳۳ در سوخت توپر، به ۱۶/۳۴ در واحدهای GWd/MTU برسد. همچنین خنک شونده‌گی بهتر، سبب می‌شود که بیشینه دمای مرکز سوخت ۳۰۰ کلوین کاهش یابد. علاوه بر آن، سبب می‌شود که حاشیه ایمنی MDNBR از مقدار ۱/۷ در سوخت توپر، به مقدار ۲/۵ در غلاف بیرونی، و به مقدار ۳/۷ در غلاف داخلی، افزایش یابد.

واژه‌های کلیدی: سوخت حلقوی، سوخت توپر، نیروگاه اتمی بوشهر BNPP، مصرف سوخت، سوختن، MCNPX، انسیس فلونت

۱. مقدمه

مصرف سوخت می‌شود. برای افزایش نسبت سطح-به-حجم سوخت، می‌توان اندازه سوخت را کاهش داد و در عوض تعداد آنها را افزایش داد. اما این کار به دلیل کاهش مقاومت میله‌ها در برابر لرزش‌ها و افزایش احتمال خوردگی غلاف نازک‌تر، توصیه نمی‌شود [۲-۳].

راه دیگر افزایش نسبت سطح-به-حجم، تغییر هندسه سوخت از توپر به حلقوی با قابلیت خنک شونده‌گی دو کاناله است که توسط MIT پیشنهاد شد و با سرمایه گذاری مؤسسه تحقیقاتی انرژی هسته‌ای U.S. DOE، در سال ۲۰۰۶ اجرا شد [۴].

با افزایش تقاضای استفاده از برق، در سال‌های اخیر تلاش‌هایی در جهت افزایش توان نیروگاه‌های هسته‌ای صورت گرفته است. از راه‌های افزایش توان راکتور، افزایش درصد غنای سوخت یا افزایش تعداد سوخت‌های تازه است. علاوه بر آن، افزایش عمق مصرف سوخت است که با افزایش چرخه کاری راکتور صرفه اقتصادی نیز دارد [۱].

افزایش نسبت سطح-به-حجم میله سوخت، سبب افزایش عمق

است که حجم سوخت حلقوی در بین هندسه‌های مختلف به حجم سوخت توپر فعلی نزدیک‌تر باشد؛ در عین حالی که نسبت سطح-به-حجم بالایی نیز داشته باشد تا بدون این که توان کارکردی و ابعاد قلب تغییر یابد، پارامترهای نوترونی نزدیک به حالت فعلی بماند اما عمق مصرف سوخت افزایش یابد.

مشابه همین کار توسط آقای سهلملی و همکاران در مرجع شماره [۱۰] آمده است. آنها با استفاده از کد MCNP6 طراحی نوترونی و پارامترها و ضرایب ایمنی سوخت حلقوی را بررسی کرده‌اند و مقایسه‌ای بین استفاده از سوخت‌های توپر و حلقوی در قلب راکتورهای PWR انجام داده‌اند. همچنین آقای مظفری و همکاران با استفاده از کد MCNP5 پارامترهای نوترونی سوخت‌های حلقوی را برای استفاده در راکتورهای نوع VVER-1000 بررسی کرده‌اند [۱۱].

در کار حاضر، علاوه بر تحلیل نوترونی، تحلیل ترموهیدرولیکی از کاربرد سوخت حلقوی ارائه شده است. به همین منظور، یکی از میله‌های سوخت حلقوی (لوله سوخت) در فلونت^۲ آنسیس^۳ شبیه‌سازی شده است و نتایج حاصل از آن با نتایج مربوط به سوخت توپر مقایسه شده است. در شبیه‌سازی ترموهیدرولیکی، دمای کاری ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد، و فشار در حدود ۱۵ مگاپاسکال در نظر گرفته شده است. برای اعتبارسنجی شبیه‌سازی ترموهیدرولیکی، از نتایج شبیه‌سازی سوخت توپر در قلب راکتور BNPP توسط کد کبرا^۴ استفاده شده است. مقایسه نتایج نشان دادند که دمای بیشینه در مرکز سوخت حلقوی نسبت به سوخت توپر کاهش یافته است. این نتایج توافق خوبی با نتایج تحلیلی کار آقای جوزف و همکاران دارد که توزیع دمایی سوخت حلقوی را به دست آورده و توسط کد ANSYS APDL اعتبارسنجی کرده‌اند [۱۲].

۲. ویژگی‌های کلی قلب BNPP

قلب راکتور نیروگاه اتمی بوشهر (BNPP) با توان حرارتی ۳۰۰۰

همچنین، سوخت‌های حلقوی توسط آقای بلینکوف و همکاران به منظور دستیابی به چگالی توان بالا بدون افزایش ابعاد ظرف (vessel) راکتور، برای راکتورهای آب سبک (LWR) پیشنهاد شد [۵].

تحقیقات نشان دادند که سوخت حلقوی با قابلیت خنک‌شوندگی دوکاناله، سبب توزیع دمایی بهتر و دستیابی به آهنگ تولید خطی گرمایی بالا می‌شود [۶]. همچنین دیده شده است که قرص‌های حلقوی سوخت، گازهای شکافت رها شده کمتر و MDNBR بالایی دارند [۲].

در کار دیگری، آقای کیم و همکاران در مورد تأثیر هندسه حلقوی سوخت بر کاهش دمای بیشینه سوخت به ویژه در حادثه LOCA تحقیقات انجام داده‌اند [۷].

آقای انصاری فر و همکاران در دانشگاه اصفهان برای یک میله سوخت حلقوی در مجتمع سوخت VVER-1000 تحلیل ترموهیدرولیکی ارائه داده‌اند [۸] و در کار دیگری اثر نانو سیال آب/آلومینا را بر روی راکتور VVER-1000 با سوخت‌های حلقوی بررسی کرده‌اند [۹].

در کار حاضر، قلب راکتور بوشهر (BNPP) در کد MCNPX.2.6.0 چندین بار شبیه‌سازی شده است. در هر بار شبیه‌سازی از سوخت-های حلقوی با شعاع‌های متفاوت و طول گام‌های متفاوت سوخت استفاده شده و برخی پارامترهای نوترونی استخراج شده است. راکتور در اولین چرخه کاری در نظر گرفته شده و میله‌های کنترل در خارج و بالای قلب شبیه‌سازی شده است. نتایج سوخت^۱ سوخت جامد در طول ۳۰۰ روز کار راکتور، با داده‌های FSAR مقایسه شده‌اند و بدین وسیله شبیه‌سازی نوترونی صحت‌سنجی شده است. پس از صحت‌سنجی، برخی پارامترهای نوترونی مانند: ضریب تکثیر مؤثر، توزیع محوری و شعاعی شار نوترون حرارتی، تولید سموم نوترونی و راکتیویته منفی ناشی از آنها و عمق مصرف سوخت در طول ۳۰۰ روز کار راکتور، محاسبه شده‌اند. با بررسی نتایج، از بین هندسه‌های حلقوی پیشنهاد شده، هندسه بهینه انتخاب شده است. معیار انتخاب هندسه بهینه سوخت حلقوی، بر این مبنا بوده

۱. Burnup
۲. FLUENT
۳. ANSYS
۴. COBRA

جدول ۱. ویژگی‌های انواع شش مجتمع سوخت در BNPP.

نوع مجتمع	تعداد میله‌های سوخت	غناي U235 (Wt %)	تعداد میله‌های BARs	محتوای بورن (طبیعی) در ماده جاذب (g/cm ³)	تعداد CPS ARs	تعداد GCs
FA16	۳۱۱	۱/۶	-	-	۱۸	۲
FA24	۳۱۱	۲/۴	-	-	۱۸	۲
FA36	۳۱۱	۳/۶	-	-	۱۸	۲
24B20	۳۱۱	۲/۴	۱۸	۰/۰۲۰	-	۲
24B36	۳۱۱	۲/۴	۱۸	۰/۰۳۶	-	۲
36B36	۳۱۱	۳/۶	۱۸	۰/۰۳۶	-	۲

جدول ۲. ویژگی‌های قلب BNPP [۱۶].

مقدار	ویژگی‌های عمده قلب
شش ضلعی	شکل هندسی قلب و مجتمع‌ها
۱۶۳	تعداد مجتمع‌های سوخت
۲۳/۶	طول گام مجتمع‌ها در قلب (cm)
۱۲/۷۵	طول گام میله‌ها در مجتمع (mm)
۳۱۶	قطر قلب (cm)
۲۹۱	دمای آب ورودی (°C)
۳۵۳	ارتفاع فعال میله سوخت (cm)
UO ₂	ماده قرص سوخت
آلیاژ Zr+1%Nb	ماده غلاف سوخت
۷/۷۳	قطر خارجی غلاف (mm)
۷/۵۷	قطر خارجی قرص سوخت (mm)
۱/۵	قطر سوراخ مرکزی سوخت (mm)
۱۰/۴...۱۰/۷	چگالی قرص سوخت (g/cm ³)
B ₄ C+(Dy ₂ O ₃ TiO ₂)	ماده جاذب در CPS AR
۳۰	ارتفاع Dy ₂ O ₃ TiO ₂ در میله کنترل (cm) جاذب
۳۲۰	ارتفاع جاذب B ₄ C در میله کنترل (cm)
CrB ₂ +Al	ماده جاذب در BAR

۳. شبیه‌سازی در کد MCNPX

کد هسته‌ای MCNPX بر مبنای روش مونت کارلو برای شبیه‌سازی و محاسبات هسته‌ای پایه‌گذاری شده است. این کد قادر به ردیابی انواع مختلف ذرات مانند فوتون‌ها، مزون‌ها، لپتون‌ها

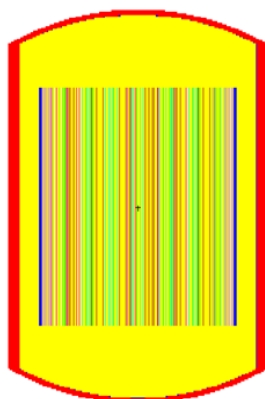
مگاوات، از نوع راکتور آب سبک (LWR) است که تأمین کننده برق هسته‌ای است. این راکتور از نوع راکتورهای آب تحت فشار است که در سال ۱۹۶۰ در روسیه توسعه یافت [۱۳].

نام راکتور برگرفته از اختصار Water-Water Energy Reactor است (WWER) که در زبان روسیه از اختصار Voda-Voda Energo Reactor گرفته شده است (VVER). توسعه راکتور VVER یکی از پررونق‌ترین و تأثیرگذارترین شاخه‌های نیروگاه‌های هسته‌ای است که فناوری ساخت و طراحی آن گسترده و جهان‌شمول است [۱۴].

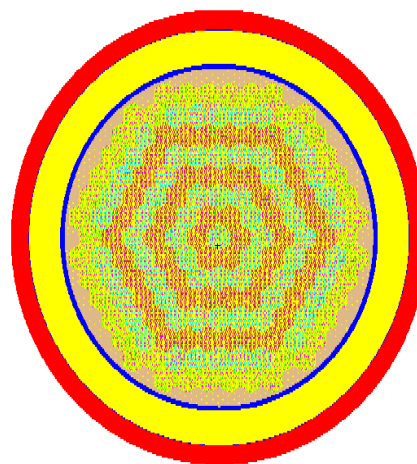
قلب BNPP از ۱۶۳ مجتمع سوخت تشکیل شده است. هندسه قلب و نیز مجتمع‌های سوخت شش ضلعی هستند. هر مجتمع سوخت از ۳۳۱ کانال تشکیل یافته است که در ۳۱۱ کانال آن میله‌های سوخت قرار دارند. یکی از کانال‌ها، کانال مرکزی است و یکی هم برای تعبیه حسگرهای اندازه‌گیری در نظر گرفته شده است. ۱۸ کانال دیگر کانال‌های راهنما هستند که میله‌های کنترل و سامانه حفاظت و میله‌های جاذب در داخل آنها قابلیت حرکت دارند [۱۵]. بالاترین درصد غناي U²³⁵ در میله سوخت، ۳/۶٪ است. جزئیات بیشتر درباره ایزوتوپ‌ها و سایر مواد به کار رفته در مجتمع‌های سوخت، مطابق داده‌های FSAR است [۱۶].

جزئیات انواع مجتمع‌های سوخت مورد استفاده در قلب BNPP در جدول ۱ آمده است.

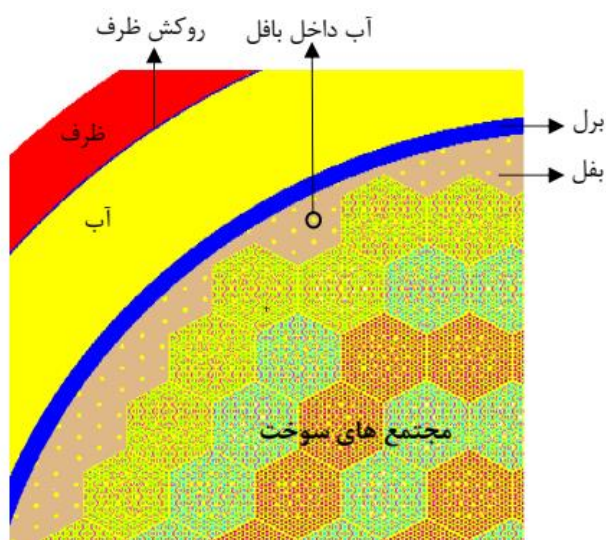
در جدول ۲، ویژگی‌های کلی قلب BNPP آمده است.



شکل ۲. برش عمودی قلب BNPP که در کد MCNP شبیه‌سازی شده است.



شکل ۱. برش افقی از قلب BNPP که در کد MCNPX شبیه‌سازی شده است.



شکل ۳. برش افقی قلب، که در کد MCNPX شبیه‌سازی شده

انجام شده اعتبارسنجی می‌شود. جزئیات صحت‌سنجی در شکل ۴ به نمایش درآمده است.

در اینجا، پنج نوع سوخت حلقوی پیشنهاد شده است. هندسه‌های پیشنهادی، شعاع‌های داخلی و خارجی متفاوت دارند و در داخل مجتمع‌های سوخت طول گام‌های سوخت متفاوت دارند.

پس از اطمینان از صحت شبیه‌سازی در کد MCNPX، قلب راکتور با استفاده از سوخت‌های حلقوی طراحی شده و سپس

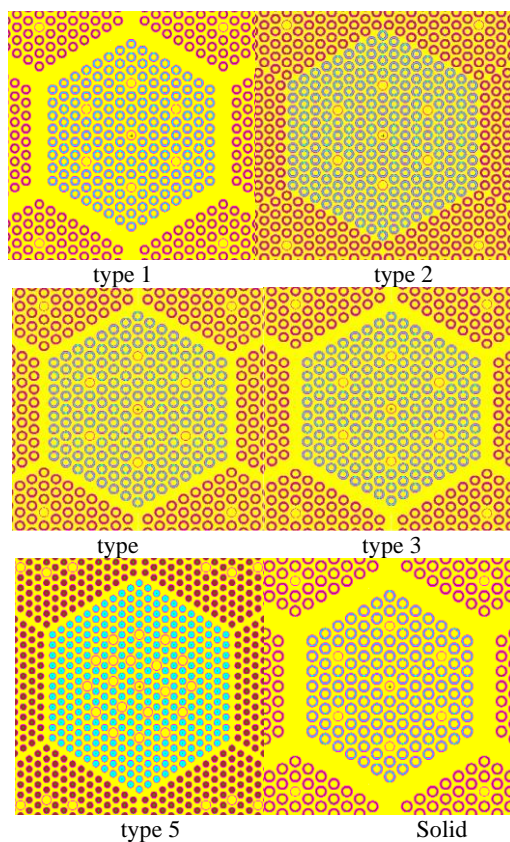
(شامل الکترون‌ها) و هادرون‌ها (شامل نوترون‌ها) است و در طراحی، حفاظ‌گذاری و ایمنی هسته‌ای و سایر اهداف کاربرد دارد. این کد از داده‌های کتابخانه‌ای سطح مقطع‌های محاسبه شده در ENDF بهره می‌گیرد. در کار حاضر، از داده‌های نوترونی محاسبه شده بر پایه ENDF/B-VII.1 به عنوان منبع داده استفاده شده است. ابتدا هندسه شبیه‌سازی شده در فضای ویژوال ادیتور^۱ رصد شده است تا از صحت هندسه طراحی شده اطمینان حاصل شود. دقت شده است که تمامی خطوط سلول‌ها Red Line نباشند تا ذرات هنگام ردیابی گم نشوند. بدین منظور از دستور Fill به صورت تو در تو استفاده شده است. با این کار، تعداد سلول‌های با تعریف جداگانه کاهش می‌یابند و زمان ترسیم هندسی در ویژوال ادیتور به طور چشمگیری کاهش می‌یابد. نمای افقی و عمودی هندسه قلب شبیه‌سازی شده در کد MCNPX در شکل‌های ۱ و ۲ آمده است، و یک دید افقی از یک چهارم ساختار قلب با جزئیات بیشتر در شکل ۳ نشان داده شده است.

سپس با استفاده از کارت BURN، مصرف سوخت در طی ۳۰۰ روز کارکرد راکتور محاسبه شده است. نتایج حاصل از داده‌های فایل خروجی به صورت نمودار ترسیم شده و با داده‌های FSAR مقایسه شده است. با این مقایسه، شبیه‌سازی

^۱. Visual Editor

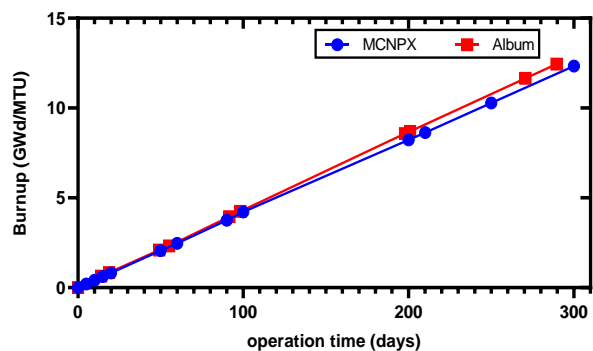
جدول ۳. ویژگی های سوخت های حلقوی و توپر.

نوع سوخت	شعاع داخلی (mm)	شعاع خارجی (mm)	ضخامت سوخت (mm)	حجم سوخت (cm ³)	تعداد سوخت ها در مجتمع	جرم کل سوخت در مجتمع (kg)	جرم کل سوخت در قلب (t)
type 1	۴/۲۵	۵/۶۲	۱/۳۷	۱۴۹/۹۵۵	۲۱۰	۳۳۰/۶۵	۵۳/۸۹۵
type 2	۴/۲۵	۵/۶۲	۱/۳۷	۱۴۹/۹۵۵	۱۶۲	۲۵۵/۰۷	۴۱/۵۷۶
type 3	۴/۵۵	۵/۸۵	۱/۳	۱۴۹/۹۳	۱۶۲	۲۵۵/۰۳	۴۱/۵۷
type 4	۴/۷۵	۶	۱/۲۵	۱۴۹/۰۱	۱۶۲	۲۵۳/۴۶۶	۴۱/۳۱۴
type 5	۵/۳۵	۶/۵	۱/۱۵	۱۵۱/۱۲۶	۱۲۰	۱۹۰/۴۱۸	۴۱/۰۳۸
Solid	شعاع سوراخ مرکزی ۰/۷۵	۳/۷۸۵	۳/۰۳۵	۱۵۲/۶۳۷	۳۱۱	۴۹۸/۴۳۶	۸۱/۲۴۵



شکل ۵. مجتمع های شبیه سازی شده با انواع سوخت های حلقوی و توپر.

طول گام های میله ها در داخل مجتمع ها متفاوت هستند. مشخصات با جزئیات بیشتر سوخت ها در جدول ۴ داده شده است.



شکل ۴. مقادیر مصرف سوخت محاسبه شده توسط کد MCNPX و داده های FSAR در راکتور بوشهر.

شبیه سازی شده است. مجتمع های شبیه سازی شده با سوخت های حلقوی، به صورت بزرگ نمایی شده در شکل ۵ نشان داده شده اند. همچنین ویژگی های کلی سوخت های حلقوی و سوخت توپر در جدول ۳ آمده اند.

معیار انتخاب این هندسه ها بر مبنای انتخاب حجم سوخت نزدیک به سوخت توپر فعلی است، در حالی که نسبت سطح به حجم افزایش می یابد. در این حالت حجم آب موجود در کانال های داخلی و خارجی نیز متفاوت خواهد بود.

البته تأکید می شود که در این شبیه سازی، اندازه قلب و مجتمع ها و طول گام مجتمع ها (۲۳ cm) دست نخورده باقی می ماند و نوع مواد به کار رفته نیز بدون تغییر هستند. فقط هندسه سوخت ها متفاوت در نظر گرفته شده است و بنابراین تعداد میله های

جدول ۴. جزئیات بیشتر هندسه میله‌های سوخت در مجتمع.

	type1	type2	type3	type4	type5	solid
طول گام سوخت (mm)	۱۵/۹۴	۱۶/۶۴	۱۷/۱	۱۷/۴	۱۸/۶	۱۲/۷۵
اعداد سوخت‌ها در مجتمع	۲۱۰	۱۶۲	۱۶۲	۱۶۲	۱۲۰	۳۱۱
قطر کانال داخلی (mm)	۷	۷	۷/۶	۸	۹/۰۲	کانال داخلی ندارد
کمترین فاصله بین غلاف‌های همسایه (mm)	۳	۳/۷	۳/۷	۳/۷	۳/۷	۳/۶۵
ضخامت سوخت (mm)	۱/۳۷	۱/۳۷	۱/۳	۱/۲۵	۱/۱۵	۳/۰۳۵
ضخامت غلاف بیرونی (mm)	۰/۸	۰/۸	۰/۸	۰/۸	۰/۹	۰/۶۸۵
ضخامت غلاف داخلی (mm)	۰/۷	۰/۷	۰/۷	۰/۷	۰/۸	بدون غلاف داخلی
ضخامت فضای بیرونی هلیوم (mm)	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۸
ضخامت فضای داخلی هلیوم (mm)	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۴	شعاع هلیوم = ۰/۷۵

نگه داشته می‌شود.

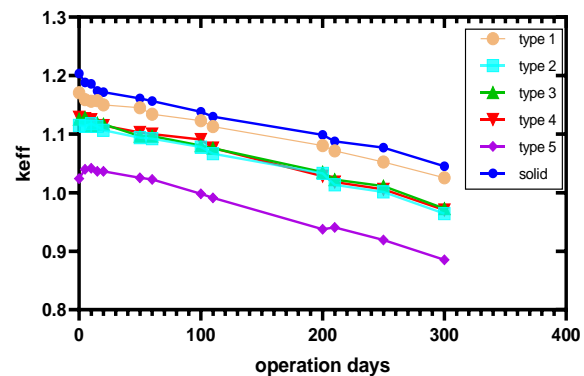
۲.۴. تهی شدگی ایزوتوپ های اورانیوم

با در دست داشتن داده‌های خروجی کد، جرم ایزوتوپ‌های اورانیوم با استفاده از محاسبه چگالی اتمی آنها به‌طور دستی محاسبه شده است. تغییرات جرم ایزوتوپ‌های U^{238} و U^{235} در طول ۳۰۰ روز کار راکتور، و سوختن در انواع سوخت‌های حلقوی محاسبه شده‌اند و در شکل های ۷ و ۸ نشان داده شده‌اند.

شکل‌های ۶ و ۷ و ۸ به وضوح نشان می‌دهند که سوخت حلقوی type1 نزدیک‌ترین مقادیر پارامترهای نوترونی به سوخت حلقوی را دارد.

۳.۴. تولید Pu^{239}

مطابق شکل ۹، با طی زمان کارکرد راکتور و با افزایش سوختن در تمام موارد، در مقدار Pu^{239} روند افزایشی مشاهده می‌شود. این مطلب درست است چون که تولید Pu^{239} حاصل جذب نوترون توسط U^{238} است که این تبدیل با کارکرد راکتور ادامه دار است. در تمام موارد، در ابتدا شیب تولید Pu^{239} بالا است، اما به مرور زمان شیب تولید روند کاهشی نشان می‌دهد. این نتیجه در توافق با نتایج تئوری و تجربی بوده و صحیح است چون‌که طی کارکرد راکتور، ایزوتوپ Pu^{239} با نوترون‌های حرارتی شکافته و در واقع



شکل ۶. تغییرات زمانی ضریب تکثیر ناشی از مصرف سوخت.

۴. تحلیل نوترونی

۱.۴. تغییرات زمانی ضریب تکثیر

اگر تنها عامل مصرف سوخت در نظر گرفته شود، ضریب تکثیر با گذشت زمان روند کاهشی خواهد داشت. ترسیم داده‌های خروجی کد در شکل ۶ مؤید همین مطلب است. از بین پنج نوع سوخت حلقوی، موردی که نزدیک‌ترین مقادیر ضریب تکثیر به مورد سوخت توپر را دارد، در شکل ۶ دیده می‌شود. در این شکل سوخت حلقوی type1 نزدیک‌ترین داده‌ها را به سوخت توپر دارد. البته کاهش ضریب تکثیر با روش کنترلی معروف به شیم شیمیایی^۱ و با کاهش غلظت بورن جبران می‌شود و راکتور در حالت بحرانی

۱. chemical shim

برای سوخت‌های حلقوی محاسبه شده است و با مورد سوخت توپر مقایسه شده است.

کمیت "راکتیویته" نشان دهنده میزان انحراف ضریب تکثیر k قلب از حالت بحرانی است و با نماد ρ نشان داده می‌شود:

$$\rho = \frac{k-1}{k}, \quad (1)$$

Xe^{135} علاوه بر تولید مستقیم در راکتور، از واپاشی I^{135} نیز حاصل می‌شود. مقدار راکتیویته منفی ناشی از سم زنون، طبق رابطه زیر محاسبه می‌شود [۱۷]:

$$\rho \cong -\frac{(\gamma_I + \gamma_X)\phi_0}{v\left(\frac{\lambda_X}{\lambda_a} + \phi_0\right)}, \quad (2)$$

که در آن $\gamma_I(\%) = 6/386$ و $\gamma_X(\%) = 0/228$ به ترتیب سهم تولید I^{135} و Xe^{135} ناشی از شکافت هستند.

$2/4 \sim v$ تعداد متوسط نوترون‌های آزاد شده از یک شکافت است. $\lambda_X = 0/0753 hr^{-1}$ و $\lambda_a = 2/7 \times 10^6 b$ به ترتیب ثابت واپاشی و سطح مقطع جذب Xe^{135} هستند. شار نوترون حرارتی است.

Sm^{149} نیز به طور مستقیم از شکافت و همچنین از واپاشی Pm^{149} تولید می‌شود. مقدار راکتیویته منفی ناشی از سم ساماریوم، از رابطه زیر به دست می‌آید [۱۷]:

$$\rho = -\frac{\gamma_P}{v} \left[1 + \frac{\phi_0 \sigma_a^S}{\lambda_P} [1 - \exp(-\lambda_P t)] \right], \quad (3)$$

که در آن $\gamma_P(\%) = 1/13$ سهم تولید ناشی از شکافت U^{235} و $\lambda_P = 0/0128 hr^{-1}$ ثابت واپاشی Pm^{149} است. $\sigma_a^S = 58500 b$ سطح مقطع جذب Sm^{149} است.

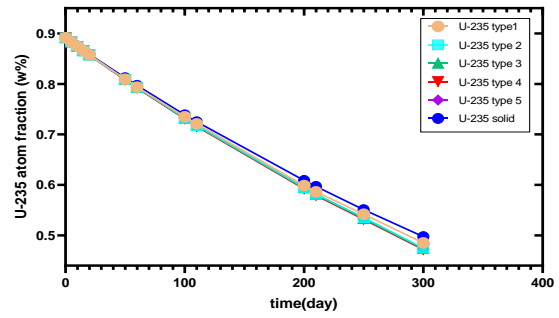
برای محاسبه دستی راکتیویته منفی سموم زنون و ساماریوم، از روابط زیر استفاده شده است [۱۸]:

$$\rho_{Xe} = -\frac{\sum_a Xe}{\sum_a U235} f, \quad (4)$$

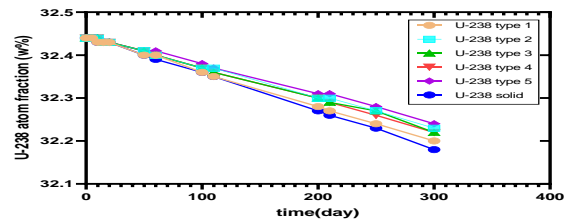
$$\rho_{Sm} = -\frac{\sum_a Sm}{\sum_a U235} f, \quad (5)$$

که در آنها:

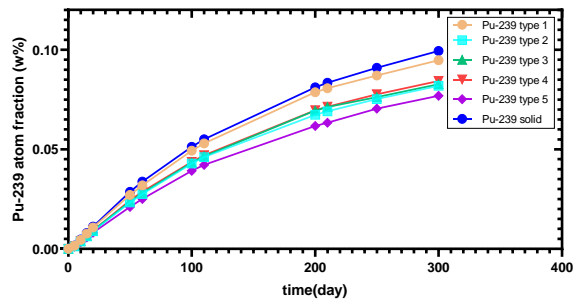
f : ضریب استفاده حرارتی



شکل ۷. تهی شدگی U^{235} بر حسب زمان کار راکتور.



شکل ۸. تهی شدگی U^{238} بر حسب زمان کار راکتور.

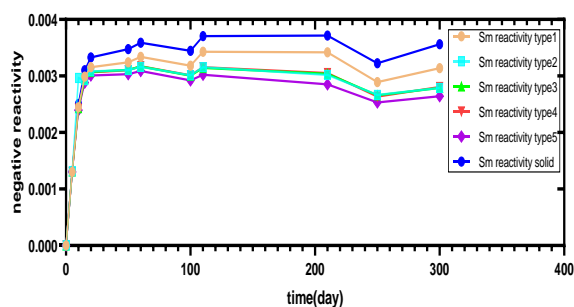


شکل ۹. تولید Pu^{239} بر حسب زمان.

مصرف نیز می‌شود. از شکل ۹، مشاهده می‌شود که میزان تولید پلوتونیوم در مورد سوخت حلقوی type 1 نزدیک‌ترین مقادیر را به مورد سوخت توپر دارد.

۴.۴. سموم نوترونی و راکتیویته منفی

بعضی از محصولات شکافت به دلیل دارا بودن سطح مقطع بزرگ جذب نوترون حرارتی، بر روی ضریب استفاده حرارتی و به طور محسوسی بر روی ضریب تکثیر قلب نیز اثر می‌گذارند. به عبارتی دیگر، با تزریق راکتیویته منفی، بر روی بهره‌برداری راکتور تأثیر می‌گذارند. چنین محصولاتی سموم راکتور هستند. در این بخش، راکتیویته منفی ناشی از سموم زنون (Xe^{135}) و ساماریوم (Sm^{149})



شکل ۱۱. راکتیویته منفی ناشی از تولید Sm^{149} .

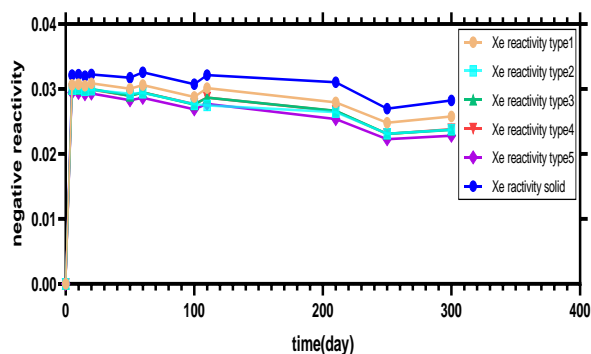
تزریق راکتیویته منفی توسط سموم نوترونی در شکل‌های ۱۰-۱۱ نشان داده شده‌اند. این نمودارها حاصل محاسبات دستی بالا هستند. در این محاسبات، از داده‌های خروجی کد استفاده شده است. راکتیویته منفی حالت اشباع در مورد سوخت توپر، برای سم زنون در حدود ۰/۰۳۱ و برای سم ساماریوم در حدود ۰/۰۳۹ محاسبه شده است. بیشترین اختلاف این مقادیر، مربوط به راکتیویته منفی در مورد سوخت حلقوی type5 است (با اختلاف حدود ۰/۰۰۶ و ۰/۰۰۱) و کمترین اختلاف مربوط به سوخت حلقوی type1 (با اختلاف حدود ۰/۰۱ و ۰/۰۰۰۵) است.

مقایسه شکل‌های ۱۰ و ۱۱ نشان می‌دهد که در تمام موارد، ایزوتوپ Xe^{135} زودتر از Sm^{149} به پایداری می‌رسد اما Sm^{149} راکتیویته منفی بزرگتری را به راکتور تزریق می‌کند. این نتایج در توافق با داده‌های تئوری و تجربی هستند [۱۸].

۴.۵. شار نوترون حرارتی

توزیع شار نوترون حرارتی در قلب، با استفاده از مش تالی استوانه‌ای و در وسط ارتفاع قلب ($z=0$)، در راستای محوری و شعاعی تعیین شده است و در شکل‌های ۱۲-۱۳ نشان داده شده است.

توان کاری راکتور توسط سطح شار نوترونی تعیین می‌شود [۱۸]. بنابراین توان موضعی به سطح شار موضعی نوترون بستگی دارد. پس می‌توان گفت که برای دستیابی به توزیع مسطح توان، لازم است توزیع شار نوترونی مسطح باشد. شکل‌های ۱۲ و ۱۳ صراحتاً نشان می‌دهند که توزیع محوری و شعاعی شار نوترون در مورد سوخت type1 نسبت به سایر سوخت‌ها هموارتر است.



شکل ۱۰. راکتیویته منفی ناشی از تولید Xe^{135} .

سطح مقطع جذب ماکروسکوپی زنون 135 : $\Sigma_{a,Xe}$
 سطح مقطع جذب ماکروسکوپی ساماریوم 149 : $\Sigma_{a,Sm}$
 سطح مقطع جذب ماکروسکوپی اورانیوم 235 : $\Sigma_{a,U235}$
 از آنجا که ضریب استفاده حرارتی عددی کوچک‌تر و نزدیک به ۱ است، در محاسبه دستی، مقدار آن به طور تقریبی برابر با ۱ در نظر گرفته شده است، و چون در فایل خروجی کد، کسر اتمی ایزوتوپ‌ها ارائه شده است، روابط (۴) و (۵) به شکل زیر نیز نوشته شده‌اند تا در آنها کسر اتمی به‌عنوان داده خروجی کد به‌طور صریح لحاظ شود:

$$\frac{\Sigma_{a,Po}}{\Sigma_{a,U235}} = \frac{N_{Po}}{N_{U235}} \times \frac{\sigma_{a,Po}}{\sigma_{a,U235}}, \quad (6)$$

$$\frac{N_{Po}}{N_{U235}} = \frac{N_{Po}}{N_{UO2}} \times \frac{N_{UO2}}{N_{U235}}, \quad (7)$$

که در آنها:

$\Sigma_{a,Po}$: سطح مقطع جذب ماکروسکوپی سم

N_{Po} : چگالی اتمی سم

N_{U235} : چگالی اتمی اورانیوم 235

N_{UO2} : چگالی اتمی سوخت

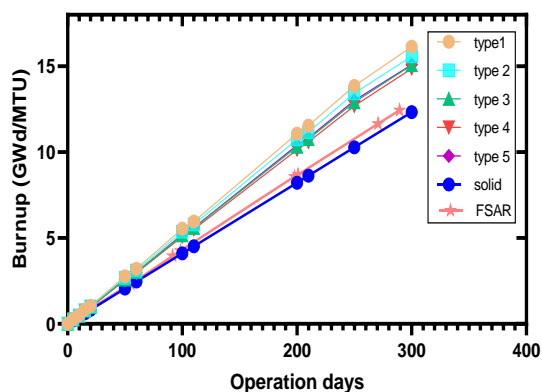
و طبق محاسبات دستی:

$$N_{U235} = 0.0244 N_{UO2}, \quad (8)$$

بنابراین با خواندن مقادیر کسر اتمی $\frac{N_{Po}}{N_{UO2}} = atomfraction$

از روی داده‌های خروجی کد، مقادیر راکتیویته منفی از رابطه زیر محاسبه شده است:

$$\left| \rho_{Po} \right| = \frac{atomfraction}{0.0244} \times \frac{\sigma_{a,Po}}{\sigma_{a,U235}}, \quad (9)$$



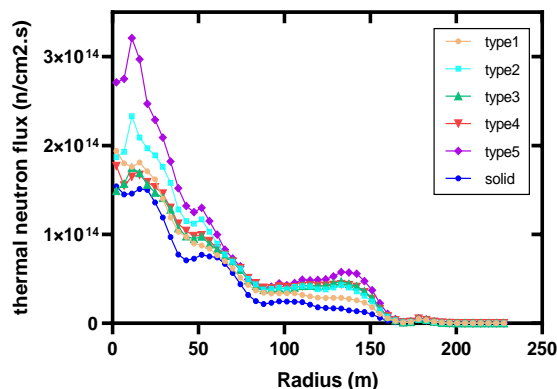
شکل ۱۴. مقایسه مقادیر سوختن بین انواع سوخت‌های حلقوی و توپر.

بنابراین تا اینجا نتیجه می‌شود که هندسه حلقوی type1 نزدیک‌ترین مقادیر پارامترهای نوترونی را به سوخت توپر دارد، در حالی که مصرف سوخت بالاتری را نسبت به سوخت توپر نشان می‌دهد. بنابراین هندسه حلقوی type1 برای استفاده در راکتور پیشنهاد می‌شود. در بخش‌های بعدی، به تحلیل ترموهیدرولیکی و مطالعه توزیع دمایی سوخت حلقوی type1 پرداخته شده است.

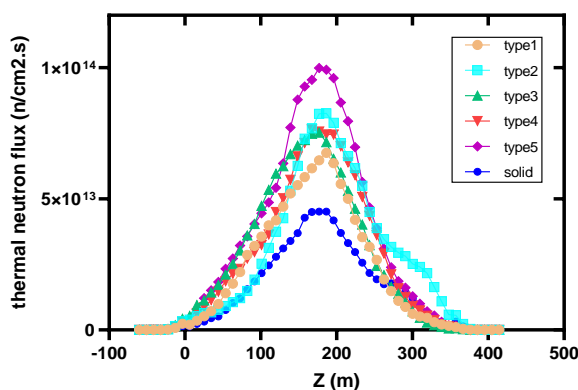
۵. تحلیل ترموهیدرولیکی

پس از نتیجه‌گیری حاصل از مطالعه برخی رفتارهای نوترونی انواع سوخت‌ها، سوخت حلقوی type1 با شعاع داخلی ۴/۲۵ mm و شعاع خارجی ۵/۶۲ mm و سایر جزئیاتی که در جدول‌های ۳ و ۴ آمده است، برای استفاده در راکتور انتخاب و معرفی می‌شود. اما لازم است که رفتار همین سوخت از دیدگاه ترموهیدرولیکی نیز مورد مطالعه قرار گیرد.

برای مطالعه توزیع دمایی سوخت‌ها، ابتدا سوخت توپر در کد کبرا شبیه‌سازی شده است. اما سوخت حلقوی در کد کبرا قابل شبیه‌سازی نیست؛ چون که این کد برای سوخت‌های توپر طراحی شده است. به همین دلیل سوخت حلقوی در نرم افزار انسیس فلونت شبیه‌سازی شده است. برای اطمینان از صحت شبیه‌سازی، سوخت توپر، علاوه بر کد کبرا، در انسیسی فلونت نیز شبیه‌سازی شده است و نتایج حاصل در کبرا و فلونت با هم مقایسه شده‌اند.



شکل ۱۲. توزیع شعاعی شار نوترون حرارتی (RFD) با استفاده از مش تالی.



شکل ۱۳. توزیع محوری شار نوترون حرارتی (HFD) با استفاده از مش تالی.

۴.۶. محاسبات سوختن

برای انواع سوخت‌های پیشنهادی، محاسبات مصرف سوخت برای ۳۰۰ روز کارکرد راکتور انجام شده است. محاسبات توسط کد در واحدهای GWd/MTU انجام شده است و نتایج در شکل ۱۴ نشان داده شده است. در شکل ۱۴ مقادیر سوختن برای سوخت‌های حلقوی مختلف و توپر مقایسه شده است. همچنین داده‌ها با FSAR نیز مقایسه شده‌اند.

همانطور که می‌توان از شکل ۱۴ دید، مقدار سوختن در سوخت حلقوی type1 در حدود ۴/۰۱ واحد نسبت به سوخت توپر افزایش پیدا کرده است و از مقدار ۱۲/۳۳ در سوخت توپر، به ۱۶/۳۴ در واحدهای GWd/MTU رسیده است.

$$\frac{S_k}{I_k} g \Delta x_j P_{kj-1} - \frac{1}{2} \left(k G \frac{\Delta x V_c^*}{sl} \right)_{kj} |w_{kj}| w_{kj}, \quad (12)$$

در طرف راست معادله فوق، جمله اول نیروی ناشی از اختلاف فشار جانبی است و جمله دوم ناشی از افت فشار در جریان عرضی عبوری از شکاف است. در طرف چپ معادله فوق، جمله اول مربوط به انباشتگی تکانه در حجم کنترل و جمله‌های دوم و سوم تکانه ورودی و خروجی در جهت عرضی هستند [۱۹].

برای راکتور بوشهر، روش سه معادله‌ای همگن که معادلات جرم، انرژی و تکانه را برای مدل همگن جریان دوفازی به صورت همزمان حل می‌کند، انتخاب شده است.

پارامترهای مهم ورودی کد کبرا عبارتند از: توزیع توان تولیدی ناشی از شکافت هسته‌ای، دما و دبی سیال ورودی، خواص فیزیکی حرارتی میله سوخت، و مشخصات هندسی سوخت.

کد کبرا برای راکتورهای آب تحت فشار غربی طراحی شده است که سوخت توپر دارد در حالی که سوخت در راکتور بوشهر حفره مرکزی پر شده با گاز هلیوم به شعاع ۷۵ mm / ۰ دارد. در این شبیه‌سازی، با چشم‌پوشی از حفره کوچک مرکزی، سوخت، توپر در نظر گرفته شده است. برای سایر مشخصات هندسی سوخت از داده‌های جدول ۲ استفاده شده است. دمای سیال ورودی ۲۹۱C و دبی جرمی سیال ۳۸۵۰ kg/m³s در نظر گرفته شده است.

در این شبیه‌سازی، روش تحلیل قلب به کار برده شده است که در آن یک میله به طور متوسط نماینده همه میله‌های درون یک مجتمع سوخت در نظر گرفته می‌شود. توزیع توان محوری در قلب مطابق جدول ۵ در نظر گرفته شده است.

در مدل حرارتی استفاده شده در این کد، در هر بازه محوری، معادلات هدایت حرارتی با روش تفاضل محدود فقط در جهت شعاعی حل می‌شود. در این شبیه‌سازی ارتفاع میله به ۲۰ بازه محوری تقسیم شده است و برای ناحیه سوخت در راستای شعاعی، ۴ گره در نظر گرفته شده است. کد به طور خودکار ۲ گره برای غلاف در نظر می‌گیرد. پس از تنظیم فایل ورودی و اجرای آن، محاسبات توسط کد انجام گرفته و داده‌های خروجی برای هر گره در فایل خروجی ارائه می‌شود. طبق داده‌های

۵. ۱. محاسبات دمایی سوخت توپر در کد کبرا-ای ان کد کبرا-ای ان مبتنی بر روش کانال جریان است که معادلات بقای جرم، انرژی، تکانه را همراه با معادلات کمکی (معادلات تولید بخار، لغزش، و غیره) با سه روش حل می‌کند. شکل ساده شده معادلات وابسته به زمان بقای جرم و انرژی و تکانه برای یک حجم کنترل به شکل‌های زیر است:

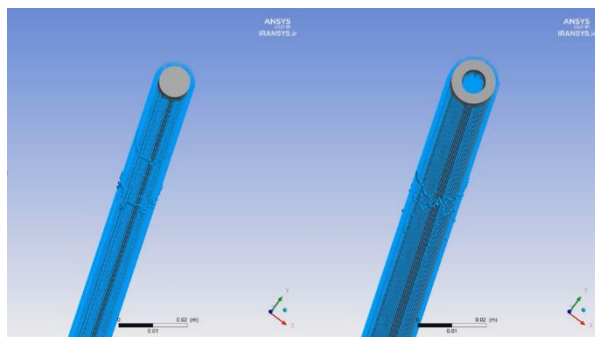
$$A_i \frac{\Delta x_j}{\Delta t} (\rho_{ij} - \rho'_{ij}) + m_{ij} - m_{ij-1} + \Delta x_j \sum_{k \in i} e_{ik} w_{kj} = 0, \quad (10)$$

در معادله (۱۰)، اولین جمله مربوط به انباشتگی جرم در حجم کنترل است، و دومین جمله مربوط به جریان جرم ورودی و خروجی در جهت محوری است. جمله سوم نیز مجموع جریان‌های عرضی ورودی و خروجی در جهت عرضی را نشان می‌دهد [۱۹].

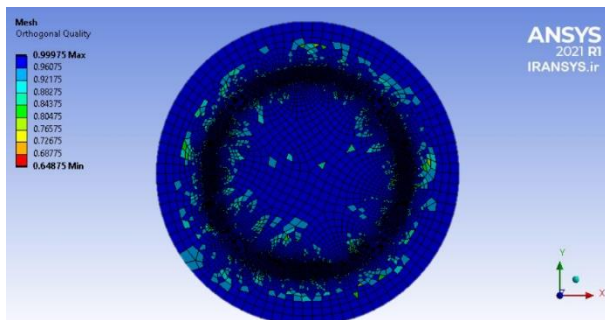
$$\begin{aligned} & \frac{A_i}{\Delta t} \left[\rho''_{ij} (h_{ij} - h''_{ij}) + h_{ij} (\rho_{ij} - \rho''_{ij}) \right] + \\ & + \frac{1}{\Delta x_j} (m_{ij} h_{ij}^* - m_{ij-1} h_{ij-1}^*) + \sum_{k \in i} e_{ik} w_{kj} h_{ij}^* \\ & = \sum_{r \in i} P_r \Phi_{ir} q''_{ij} - \sum_{k \in i} w'_{kj} (h_{ij} - h_{nj}) \\ & - \sum_{k \in i} C_k S_k (T_{ij} - T_{nj}) + \sum_{r \in i} r Q_r \Phi_{ir} q'_{ij}, \quad (11) \end{aligned}$$

در سمت چپ معادله فوق، جمله اول مربوط به انباشتگی انرژی در حجم کنترل است. جمله دوم مربوط به آنتالپی ورودی به حجم کنترل و خروجی از آن در جهت محوری است. و جمله سوم برابر مجموع آنتالپی ورودی و خروجی جریان‌های عرضی است. در سمت راست معادله فوق، جمله اول برابر مجموع شار حرارتی ناشی از میله‌های سوخت کانال i است. جمله‌های دوم و سوم برابر تبادل انرژی عرضی بین کانال i و کانال‌های همسایه n است که به ترتیب ناشی از تبادل جرمی متلاطم و هدایت حرارت سیال است. جمله آخر کسر توان ناشی از شکافت است که مستقیماً در سیال موجود در کانال i ظاهر می‌شود [۱۹].

$$\frac{\Delta x_j}{\Delta t} (w_{kj} - w_{kj}^n) + \bar{U} C_{kj} w_{kj} - \bar{U} C_{kj} w_{kj-1}^* =$$



شکل ۱۵. (سمت راست) سوخت حلقوی (سمت چپ) سوخت توپر.



شکل ۱۶. برش افقی از مش بندی سوخت توپر.

طراحی شده است، در فلونت نیز بدون حفره مرکزی در نظر گرفته شده است. شکل ۱۵ نمایی از هندسه شبیه سازی شده سوخت ها را در فضای پست-پروسسینگ^۳ CFD نشان می دهد. در این شکل، خطوط جریان سیال نیز نشان داده شده اند و حرکت سیال، به شکل کره های کوچک در خطوط جریان دیده می شوند. در شکل های ۱۶ و ۱۷ برشی افقی از شبکه بندی سوخت ها با $Orthogonal\ Quality \approx 0.65$ در فضای انسیس مشینگ^۴ نشان داده شده اند.

نمودار کمیت y -plus برای دیواره سوخت توپر و نیز برای هر دو دیواره سوخت حلقوی از فلونت استخراج شده و در شکل های ۱۸ و ۱۹ نشان داده شده اند. بیشترین مقدار این کمیت در دیواره سوخت توپر در حدود $1/75$ ، در دیواره داخلی سوخت حلقوی $3/1$ و در دیواره خارجی آن $6/55$ است. تندی ورودی سیال 5m/s در نظر گرفته شده است. حرکت آب در خلاف جهت گرانش با شتاب $9/8\text{m/s}^2$ در نظر گرفته شده است. برای روش حل، مدل $SST\ k\text{-}\omega\ (2\text{-eqn})$ تعیین

جدول ۵. توزیع توان محوری در قلب راکتور [۱۹].

مختصات از پایین قلب راکتور (%)	ضریب قله توان
۵	۰/۳۶
۱۵	۰/۸۲
۲۵	۱/۱۲
۳۵	۱/۳۱
۴۵	۱/۳۹
۵۵	۱/۳۹
۶۵	۱/۳۱
۷۵	۱/۱۲
۸۵	۰/۸۲
۹۵	۰/۳۶

خروجی برای گره ها، بیشینه دما در مرکز سوخت در حدود 1506 کلوین و بیشینه دمای سطح سوخت 1040 کلوین و بیشینه دمای غلاف 610 کلوین و بیشینه دمای آب 602 کلوین به دست آمده است. جزئیات بیشتر نتایج محاسبات دمایی در بخش ها و شکل های بعد به صورت نمودار ارائه شده است.

۵.۲. شبیه سازی در فلونت

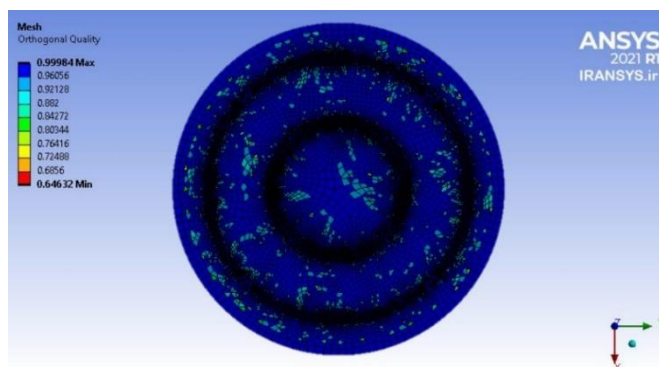
سوخت حلقوی در شکل فعلی کد کبرا قابل شبیه سازی نیست، اما اخیراً آقایان صفاری و اسماعیلی با طراحی کد صدف^۱ قابلیت سوخت حلقوی را بر روی کد کبرا توسعه داده اند [۲۰]. در مقاله حاضر، برای شبیه سازی سوخت حلقوی از نرم افزار مهندسی انسیس فلونت استفاده شده است که یکی از قدرتمندترین کدهای دینامیک سیالاتی CFD است و برای حل معادلات نویراستوکس^۲، روش حجم محدود FVM را به کار می گیرد [۲۱]. در این کار یکی از میله های سوخت حلقوی $type1$ و سوخت توپر در انسیس فلونت مدل سازی شده اند. علاوه بر هندسه حلقوی، هندسه توپر نیز که یک بار در کبرا شبیه سازی شده است، در فلونت نیز شبیه سازی می شود. برای این که مقایسه نتایج مربوط به سوخت توپر در فلونت و کبرا عملی و امکان پذیر باشد، هندسه آن که در کبرا بدون حفره مرکزی

۱. SADAF

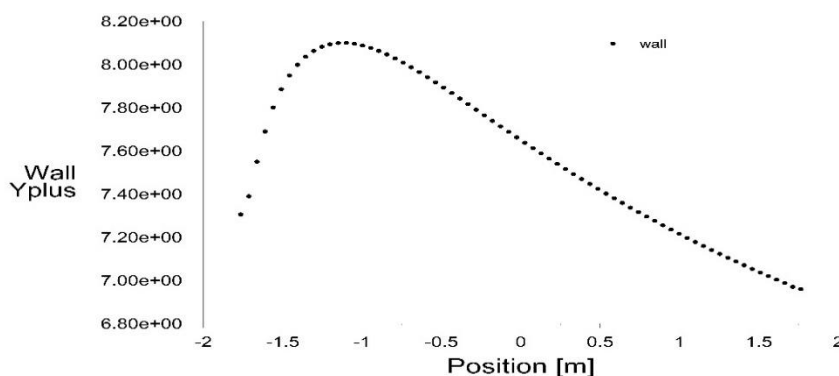
۲. Navier-Stokes

۳. Post-Processing

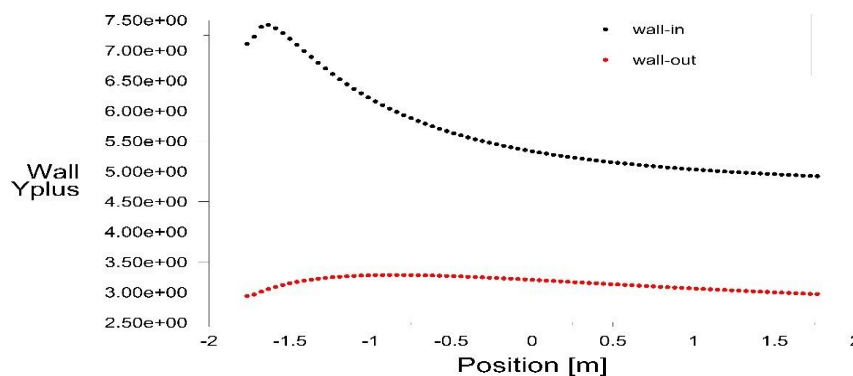
۴. ANSYS MESHING



شکل ۱۷. برش افقی از مش بندی سوخت حلقوی.



شکل ۱۸. کمیت y-plus در دیواره سوخت توپر.



شکل ۱۹. کمیت y-plus در دیواره‌های سوخت حلقوی.

جدول ۶. شرایط کاری در نظر گرفته شده در فلونت.

شرایط کاری	دما	فشار	فشار پیمانه‌ای
مقدار	۵۶۴ K	۲۲۰۰ psia=۱۵۱۶۹۰۰۰ Pa	۱۵۰۶۷۷۶۸ Pa

سوخت و برخی مشخصات آنها به زبان C در کد UDF تعریف شده است. سپس شرایط کاری راکتور تعریف شده است که برخی از آنها در جدول ۶ آمده است. مواد به کار رفته در

سوخت و برخی مشخصات آنها به زبان C در کد UDF تعریف شده است. سپس شرایط کاری راکتور تعریف شده است که برخی از آنها در جدول ۶ آمده است. مواد به کار رفته در

جدول ۷. ویژگی‌های مواد به کار رفته در فلونت [۲۲].

ماده	چگالی (kg/m^3)	گرمای ویژه (J/kg.K)	رسانش گرمایی (W/m.K)	وشکسانی (kg/m.s)
آب (در دمای 300°C)	۷۱۴	۵۶۵۰	۰/۵۴۵	$8/59e-5$
غلاف (Zircalloy-IV)	۶۴۵۰	۱۸۳	۱۰/۷	-
He	۰/۱۷	۵۱۹۳	۰/۲	-
UO ₂	۱۰۵۰۰	۲۲۱	۲/۴	-

جدول ۸. تعریف معیارهای همگرایی.

معیارهای مطلق	باقی مانده
10^{-7}	پیوستگی
10^{-5}	سرعت - مولفه x
10^{-5}	سرعت - مولفه y
10^{-5}	سرعت - مولفه z
10^{-6}	انرژی
۰/۰۰۱	کا
۰/۰۰۱	امگا

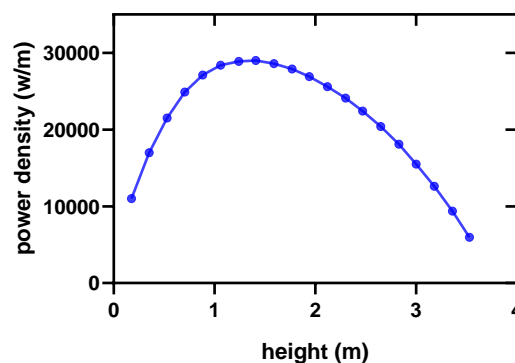
محاسبات در فضای فلونت اجرا شده و در نهایت همگرایی حل حاصل شده است. در جدول ۸ معیارهای همگرایی آمده است. نمودارهای همگرایی در شکل‌های ۲۱-۲۲ نشان داده شده‌اند.

۵.۳. محاسبات توزیع دمایی در فلونت

مهم‌ترین انگیزه طراحی سوخت حلقوی، کاهش دمای بیشینه مرکز سوخت است. این مسئله در حادثه LOCA برای جلوگیری از ذوب شدن سوخت، اهمیت بسیار بالایی دارد. بنابراین پس از حل مسئله در فلونت، داده‌های دمایی در CFD پست-پروسسینگ تجزیه و تحلیل شده است.

جهت بررسی استقلال از مش نتایج، مسئله با انتخاب اندازه‌های مختلف مش حل شده است. در هر بار تغییر اندازه مش‌ها نتایج به دست آمده بررسی شده‌اند و همانطور که از جدول ۹ دیده می‌شود، در نهایت در اندازه مش ۲۰۰ میکرومتر جواب‌ها تغییرات چندانی پیدا نکرده‌اند. نتایج تغییرات اندازه مش و تغییرات جواب‌ها در جدول ۹ ارائه شده است.

در این بخش، توزیع شعاعی دما در وسط ارتفاع میله سوخت ($z=0$) ارائه شده است. همچنین توزیع محوری دما در نواحی: خط مرکزی



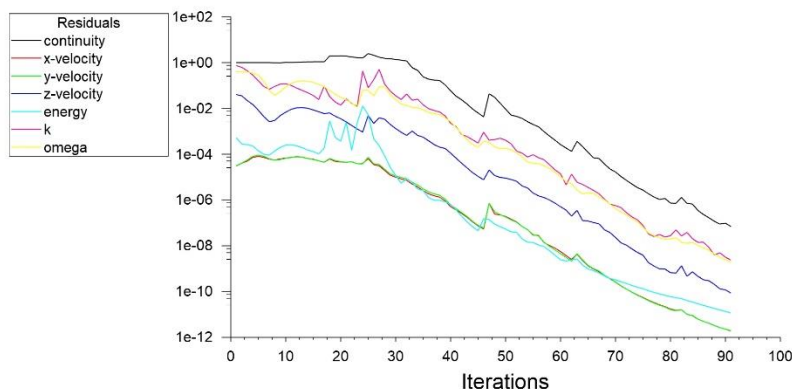
شکل ۲۰. متوسط توزیع توان میله سوخت در BNPP.

آنجایی که در این مقاله توان کاری راکتور بدون تغییر نگه داشته شده است، توزیع توان محوری در قلب راکتور که در جدول ۵ آمده است، بعنوان متوسط توزیع توان محوری در طول میله‌های سوخت توپر و حلقوی type1 در نظر گرفته شده است و به عنوان سورس ترم^۱ در کد UDF تعریف شده است. متوسط توزیع توان محوری در طول میله‌ها در شکل ۲۰ نشان داده شده است. در مرحله بعد، مقداردهی اولیه به روش هیبریدی انجام شده و

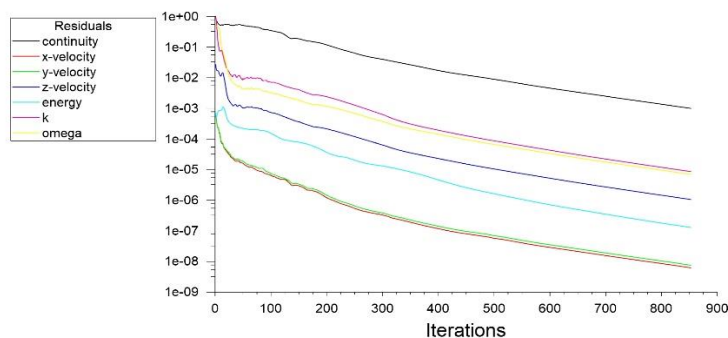
۱. Source term

جدول ۹. استقلال از مش نتایج.

۲۰۰	۲۲۰	۴۰۰	۶۰۰	۹۰۰	۱۲۰۰	اندازه مش (μm)
۲/۵	۲/۲	۱/۸	۱/۴	۱/۱	۰/۷	تعداد مش ($1 \times$ میلیون)
۹۲۶/۹	۹۲۶/۸	۹۲۶/۴	۹۲۵/۹	۹۲۴/۸	۹۲۰/۸	بیشینه دمای مرکز سوخت حلقوی (C)
۱۲۲۶/۸	۱۲۲۶/۶	۱۲۲۵/۱	۱۲۲۳/۷	۱۲۲۱/۵	۱۲۱۷	بیشینه دمای مرکز سوخت توپر (C)
۳۲۵/۸	۳۲۵/۷	۳۲۵/۴	۳۲۵/۱	۳۲۴/۸	۳۲۰/۲	بیشینه دمای غلاف بیرونی سوخت حلقوی (C)
۳۴۱/۱	۳۴۱	۳۴۰/۷	۳۴۰/۳	۳۳۹/۶	۳۳۵/۸	بیشینه دمای غلاف داخلی سوخت حلقوی (C)
۳۳۶/۸	۳۳۶/۷	۳۳۶/۳	۳۳۵/۸	۳۳۴/۳	۳۳۱/۴	بیشینه دمای غلاف سوخت توپر (C)



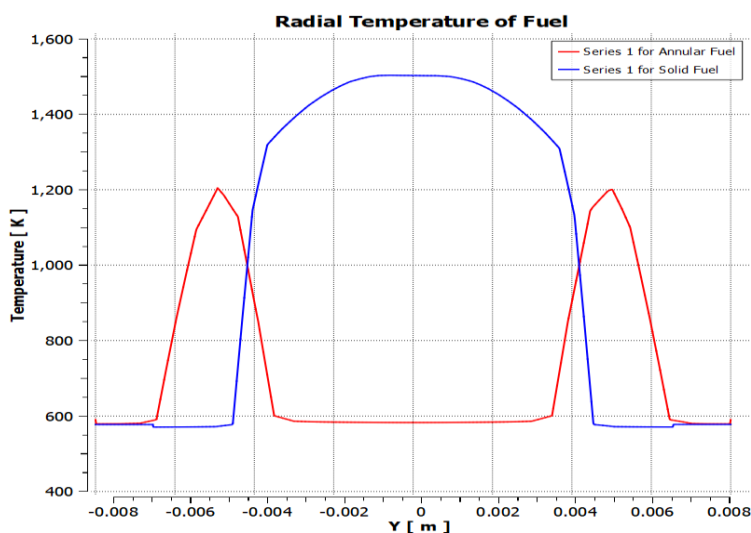
شکل ۲۱. نمودار همگرایی برای مورد سوخت توپر.



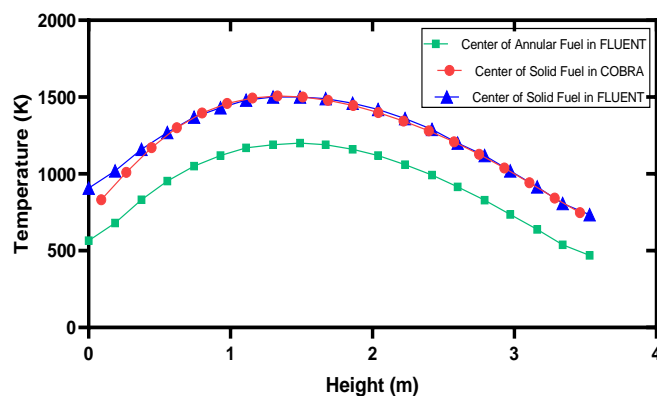
شکل ۲۲. نمودار همگرایی برای مورد سوخت حلقوی.

بیشینه دمای سوخت در مرکز قرص سوخت توپر ۱۵۰۰ کلوین به دست آمده است و در وسط ضخامت حلقه سوخت، بیشینه دما ۱۲۰۰ کلوین محاسبه شده است که ۳۰۰ درجه کاهش دما را نشان می‌دهد. با انتخاب خط مرکزی سوخت در راستای محوری، توزیع دمای محوری در سوخت بررسی شده است.

سوخت، سطح سوخت، سطح بیرونی غلاف‌ها و در راستای محوری آب داخل کانال استخراج و ارائه شده است. این داده‌ها در شکل‌های ۲۳-۲۷ به صورت نموداری نشان داده شده‌اند. نمودار شکل ۲۳، مقایسه بین توزیع شعاعی دما در وسط ارتفاع میله سوخت توپر و حلقوی type1 (در $z=0$) را نشان می‌دهد.



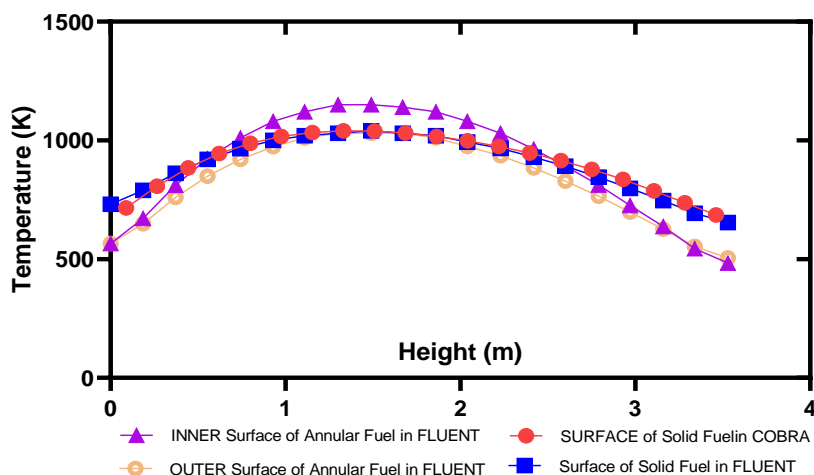
شکل ۲۳. توزیع شعاعی دما در وسط ارتفاع میله سوخت.



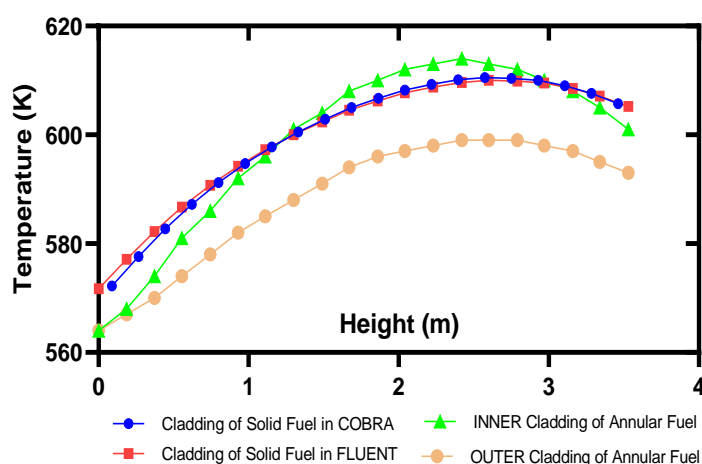
شکل ۲۴. توزیع محوری دما در مرکز سوخت‌ها.

داخلی، در مساحت کوچکتری نسبت به سطح خارجی پخش می‌شود، بنابراین منطقی است که دمای سطح داخلی سوخت بالاتر از سطح بیرونی آن باشد. دمای سطح سوخت توپر در فلونت و کد کبرا در حدود 1040°C کلین به دست آمده است. اختلاف دمای بین مرکز و سطح سوخت توپر، 460°C کلین به دست آمده است. اختلاف دمای بین مرکز و سطوح داخلی و خارجی سوخت حلقوی به ترتیب 50°C و 170°C کلین به دست آمده است. اختلاف دمای بین مرکز و سطوح سوخت حلقوی به طور محسوسی کمتر از سوخت توپر است و این به علت ضخامت کم سوخت حلقوی ($1/37\text{mm}$) و فاصله کمتر بین مرکز و سطوح سوخت حلقوی ($0/685\text{mm}$) در مقابل ضخامت و فاصله بین مرکز و سطح سوخت توپر ($3/035\text{mm}$) است.

که نتیجه در شکل ۲۴ نمایش داده شده است. همانطور که از شکل‌های ۲۳ و ۲۴ مشخص است، دمای بیشینه مرکز سوخت در سوخت حلقوی type1 به طور چشمگیری پایین‌تر از سوخت توپر است. بیشینه دمای مرکز سوخت توپر در فلونت و در راستای محوری 1500°C کلین محاسبه شده است، در حالی که بیشینه دمای مرکز سوخت حلقوی در راستای محوری در حدود 1200°C کلین به دست آمده است. همچنین نمودار توزیع محوری دما در سطح سوخت توپر و سطوح بیرونی و داخلی سوخت حلقوی در شکل ۲۵ رسم شده است. بیشینه دمای سطح خارجی سوخت حلقوی 1030°C کلین، و بیشینه دمای سطح داخلی آن 1150°C کلین به دست آمده است. این اختلاف دما به دلیل این است که گرمای تولید شده در سطح



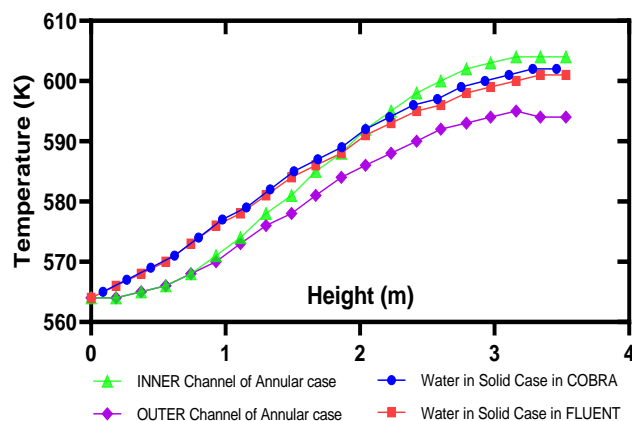
شکل ۲۵. توزیع محوری دما در سطوح داخلی و بیرونی سوخت‌ها.



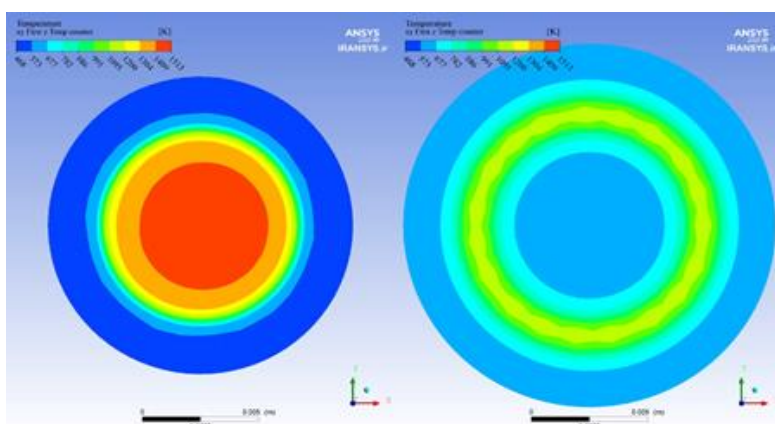
شکل ۲۶. توزیع محوری دمای غلاف.

نسبت به غلاف سوخت توپر نشان می‌دهد. این در حالی است که بیشینه دمای غلاف داخلی سوخت حلقوی ۴ درجه بالاتر از سوخت توپر به دست آمده است. بالا بودن دمای بیشینه غلاف داخلی نسبت به غلاف توپر مشکلی از نظر ایمنی راکتور به وجود نمی‌آورد؛ چرا که دماهای به دست آمده غلاف‌ها همچنان پایین‌تر از دمای ذوب غلاف هستند. آنچه که در ایمنی راکتور و بهینه بودن سوخت مورد بررسی اهمیت دارد، پایین‌تر بودن دمای مرکز سوخت حلقوی نسبت به سوخت توپر است، که البته نتایج به دست آمده در این مورد به طور چشمگیری کاهش دما را نشان می‌دهند.

تبادل گرما بین آب و میله سوخت از طریق غلاف سوخت انجام می‌گیرد. بنابراین دمای سطح غلاف یکی از کمیات مهم است و نقش مهمی در تحلیل شارش گرما از سطح غلاف را دارد. توزیع محوری دمای سطح غلاف در شکل ۲۶ به شکل نموداری رسم شده است. طبق محاسبات، بیشینه دمای غلاف داخلی سوخت حلقوی ۶۱۴ کلوین و بیشینه دمای غلاف خارجی ۵۹۹ کلوین به دست آمده است. بیشینه دمای غلاف سوخت توپر حدود ۶۱۰ کلوین به دست آمده است. بنابراین غلاف خارجی ۱۱ کلوین کاهش دما را



شکل ۲۷. توزیع محوری دما در آب.



شکل ۲۸. کانتور دمای سوخت. حلقوی (سمت راست) و توپر (سمت چپ).

آب در کانال داخلی ۶۰۴ کلوین و در کانال بیرونی ۵۹۴ کلوین و در کانال مربوط به سوخت توپر ۶۰۱ کلوین به دست آمده است. بالا بودن دمای بیشینه آب در کانال داخلی به دلیل بالا بودن دمای بیشینه غلاف داخلی است که البته به دلیل این که همچنان پایین تر از دمای جوش آب در فشار راکتور (۶۲۳ کلوین) است، مشکلی از نظر ایمنی به وجود نمی‌آید. کانتور دمای سوخت در برش افقی و در وسط ارتفاع سوخت حلقوی و توپر ($z=0$) در شکل ۲۸ نشان داده شده است.

این شکل حاصل داده‌های استخراج شده از CFD پست-پروسسینگ است.

جدول ۱۰. نقطه ذوب و جوش برخی مواد در شرایط کاری راکتور.

۶۲۳ K	نقطه جوش آب در فشار حدود ۱۵/۵ MPa
۳۰۷۳ K	دمای ذوب UO_2
۱۴۰۵ K	دمای ذوب اورانیوم فلزی
۲۱۲۳ K	دمای ذوب غلاف (آلیاژ زیرکونیوم)

جدول ۱۰ نقطه جوش آب در فشار ۱۵/۵ MPa و نیز نقاط ذوب برخی مواد را نشان می‌دهد.

در قدم بعدی، توزیع محوری دما در داخل آب بررسی شده است. نتیجه بررسی در نمودار شکل ۲۷ نشان داده شده است. مطابق این شکل، توزیع دمایی در راستای محوری آب در سوخت حلقوی تقریباً با سوخت توپر یکسان است اما دمای بیشینه در کانال داخلی کمی بالاتر است. دمای بیشینه

CHF، به شار حرارتی واقعی q''_{act} سطح میله سوخت تعریف می‌شود [۲۳].

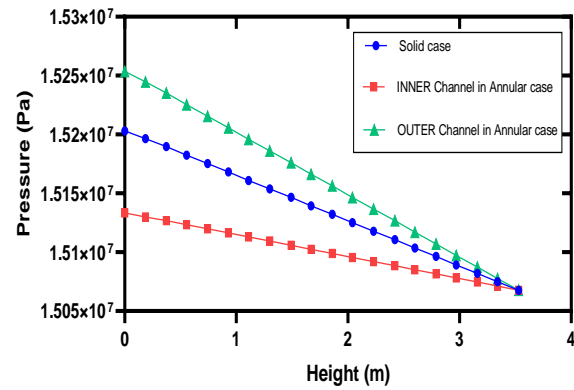
$$DNBR = \frac{CHF}{q''_{act}} \quad (۱۳)$$

برای محاسبه شار حرارتی بحرانی از رابطه جنز و لوتز استفاده می‌شود [۲۳]:

$$CHF = C \times 10^6 \left(\frac{G}{10^6} \right)^m \Delta T_{sub}^{-0.77} \quad (۱۴)$$

که در آن C و m پارامترهای تابع فشار با مقادیر به ترتیب ۰/۴۴۱ و ۰/۵۶۷۱ هستند. G دبی جرمی سیال و ΔT_{sub} اختلاف بین دمای کل حجم سیال و دمای موضعی آن است. کد کبرا مقادیر DNBR را مستقیماً در فایل خروجی ارائه می‌کند. اما در صورت استفاده از نرم افزار فلونت، مقادیر DNBR به طور دستی با استفاده از رابطه (۱۳) محاسبه می‌شود. در این رابطه، مقدار شار حرارتی واقعی q''_{act} توسط فلونت محاسبه و استخراج می‌شود و مقدار شار حرارتی بحرانی از رابطه (۱۴) محاسبه می‌شود.

اگر شار حرارتی واقعی به CHF نزدیک شود، جوشش فیلمی اتفاق می‌افتد. در پدیده جوشش فیلمی، تجمع بخار آب در اطراف میله سوخت عایق حرارتی ایجاد می‌کند و این اتفاق سبب افزایش دمای میله سوخت می‌شود و تداوم آن ممکن است منجر به ذوب میله سوخت شود. برای تضمین این که جوشش فیلمی اتفاق نیفتد، کسر انحراف از جوشش هسته‌ای DNBR باید بزرگتر از عدد ۱ باشد. کمترین مقدار کسر انحراف از جوشش هسته‌ای MDNBR در طول میله سوخت راکتور بوشهر، طبق FSAR برابر ۱/۷۵ است [۱۶]. آقای انصاری فر و همکاران با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی، این مقدار را در حدود ۱/۹ به دست آورده‌اند [۹] و آقای صفایی و همکاران با استفاده از کد کبرا این مقدار را در حدود ۲/۱۶ محاسبه کرده‌اند [۲۴]. در مقاله حاضر، این مقدار با استفاده از کد کبرا برای سوخت توپر ۱/۷ به دست آمده است. برای سوخت حلقوی، این کمیت با استفاده از فلونت محاسبه شده است که برای غلاف داخلی



شکل ۲۹. افت فشار در کانال‌های مختلف عبور سیال.

۴.۵. افت فشار

در مرحله بعد، با صدور داده‌های مربوط به فشار، از CFD پست-پروسسینگ به فضای پرسم، نمودار افت فشار در کانال‌های داخلی و خارجی رسم شده و با نمودار مربوط به داده‌های فشار در سوخت توپر مقایسه شده‌اند. این نتایج در شکل ۲۹ نشان داده شده‌اند.

از آنجا که برای حل مسئله در فلونت در قسمت شرط مرزی (باندی کاندیشن)، شرط پرشر آوتلت^۲ انتخاب شده است، برای همین در هر سه مورد، فشار در خروجی کانال‌ها یکسان در نظر گرفته شده است و افت فشار در کانال‌ها بر همین مبنا توسط کد محاسبه شده است. مطابق شکل ۲۹، متوسط افت فشار در کانال داخلی سوخت حلقوی در حدود ۰/۶۵bar و کمتر از سوخت توپر است. متوسط افت فشار در کانال خارجی سوخت حلقوی در حدود ۱/۸bar و از سوخت توپر بیشتر است. برای جبران این تغییرات افت فشار در سوخت حلقوی باید توان پمپاژ آب به طور مناسب تنظیم شود.

۵.۵. انحراف از جوشش هسته‌ای DNB

در این بخش، کسر انحراف از جوشش هسته‌ای محاسبه شده است. حاشیه ایمنی DNBR یکی از پارامترهای مهم ایمنی راکتور است. این کمیت به صورت نسبت شار حرارتی بحرانی

¹ Prism

² Pressure Outlet

جدول ۱۴. میانگین افت فشار.

افت فشار (bar)	نوع سوخت
۱/۲	توپر در کبرا
۱/۳	توپر در فلوننت
۰/۶۵	کانال داخلی در سوخت حلقوی
۱/۸	کانال بیرونی در سوخت حلقوی

جدول ۱۵. کمینه کسر انحراف از جوشش هسته‌ای.

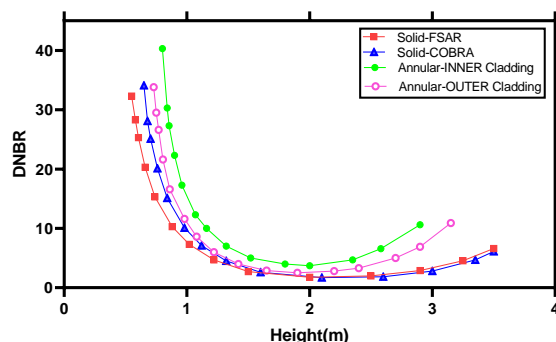
MDNBR	نوع سوخت
۱/۷۵	FSAR توپر در کبرا
۱/۷	توپر در کبرا
۳/۷	غلاف داخلی در سوخت حلقوی
۲/۵	غلاف بیرونی در سوخت حلقوی

۵. ۶. خلاصه‌ای از تحلیل ترموهیدرولیکی

در اینجا، خلاصه‌ای از میانگین کمیات بررسی شده در بالا در جدول‌های ۱۱-۱۵ آمده است.

۶. نتیجه‌گیری

در این مقاله، استفاده از سوخت حلقوی با شعاع داخلی ۴/۲ mm و شعاع خارجی ۵/۶۲ mm به جای سوخت توپر در راکتور بوشهر بررسی شد. تحلیل نوترونی و ترموهیدرولیکی در MCNPX و انسیس فلوننت نشان دادند که با استفاده از سوخت حلقوی، سوختن در حدود ۴/۰۱ واحد نسبت به سوخت توپر افزایش پیدا می‌کند. همچنین استفاده از سوخت‌های حلقوی سبب کاهش ۳۰۰ درجه‌ای در بیشینه دمای مرکز سوخت می‌شود که این مطلب از نقطه نظر حادثه از دست رفتن خنک کننده (LOCA) بسیار حائز اهمیت است. علاوه بر اینها با استفاده از سوخت‌های حلقوی، حاشیه ایمنی MDNBR راکتور در غلاف داخلی ۲ واحد و در غلاف خارجی ۰/۸ واحد افزایش می‌یابد. اما میزان افت فشار در کانال‌های داخلی و خارجی سوخت حلقوی نسبت به سوخت توپر تغییر می‌کند که در این مورد باید قدرت پمپ‌ها به طور مناسبی تنظیم شود.



شکل ۳۰. مقادیر DNBR در طول میله‌های سوخت توپر و حلقوی.

جدول ۱۱. میانگین دما در مرکز سوخت.

نوع سوخت	میانگین دما (°C)
توپر در کبرا	۹۵۳
توپر در فلوننت	۹۴۹
حلقوی type1	۶۴۷

جدول ۱۲. میانگین دمای غلاف.

نوع سوخت	میانگین دما (°C)
توپر در کبرا	۳۲۷
توپر در فلوننت	۳۲۶
غلاف داخلی حلقوی	۳۲۵
غلاف بیرونی حلقوی	۳۱۶

جدول ۱۳. میانگین دما در آب.

نوع سوخت	میانگین دما (°C)
توپر در کبرا	۳۱۳
توپر در فلوننت	۳۱۲
کانال داخلی در سوخت حلقوی	۳۱۳
کانال بیرونی در سوخت حلقوی	۳۰۸

مقدار ۳/۷ به دست آمده است که نسبت به سوخت توپر مقدار ۲ واحد ر افزایش را نشان می‌دهد، و برای غلاف خارجی مقدار ۲/۵ به دست آمده است که افزایش به مقدار ۰/۸ واحد را نشان می‌دهد. جزئیات مقادیر DNBR محاسبه شده در شکل ۳۰ به نمایش درآمده است.

مراجع

1. B Feng and M S Kazimi, "Final Technical Report for the MIT Annular Fuel Research Project" Massachusetts Institute of Technology, Cambridge (2008).
2. M S Kazimi, et al., "MIT-NFC-PR-082", Center for Advanced Nuclear Energy Systems, MIT (2006).
3. P Hejzlar and M S Kazimi, *Nucl. Technology*, **160**, 1 (2007) 2.
4. D Feng, et al., *Nucl. Technol.* **160** (2007) 16.
5. V Blinkov, et al., *Therm. Eng.* **57** (2010) 213.
6. N Todreas and M Kazimi, "Nuclear System", Massachusetts Institute of Technology, (2011).
7. H T Kim et al., *International Congress on Advanced Nuclear Power Plants*, Hollywood, Florida, USA, (2002).
8. G R Ansarifard et al., *21 st Iran Nuclear Conference*, Isfahan University, 2015. (persian)
9. G R Ansarifard et al., *J. Nucl. Sci. Technol.* **82** (2017). (persian)
10. N El-Sahlamy, M Hassan, and A Khedr, *Kerntechnik* **23** (2021).
11. M Amin Mozafari and F Faghihi, *Ann. Nucl. Energy* **60** (2013) 226.
12. O C Joseph, A E Bonah, A B Kwame, *Key Eng. Mater.* **769** (2018) 296.
13. T J Katona, "Nuclear Power – Deployment. Operation and Sustainability", (2011).
14. K Obaidurrahman and J B Doshi, *Ann. Nucl. Energy* **38** (2011) 286.
15. H K Louis and E Amin, *Ann. Nucl. Energy* **164** (2021) 108586.
16. Atomic Energy Organization of Iran (AEOI). "Final Safety Analysis Report (FSAR) for Bushehr VVER-1000 Reactor". (2003).
17. J J Duderstadt and L J Hamilton, "Nuclear Reactor Analysis", Wiley; 1st edition. ASIN: 0471, (1976).
18. J R Lamarsh, "Introduction to Nuclear Reactor Theory", New York University Addison-Wesley Publishing Company Reading.
19. R Gharari, N M Kojouri, and A H Saffari, "COBRA-EN (Modeling, Expansion and Code Upgrading)", Nuclear Science and Technology Research Institute, ISBN: 978-600-7414-52-1, (2020). (persian)
20. A H Saffari and H Esmaili, *Prog. Nucl. Energy* **150**, 1(2022) 104298.
21. S Botond, et al., *Comput. Aided Chem. Eng.* **33** (2014) 187.
22. "The Engineering Mindset .com", <https://theengineeringmindset.com>.
23. W Jens and P Lottes, Argonne National Lab. (1951).
24. S Arshi, S Mirvakili, F Faghihi, *Prog. Nucl. Energy* **52** (2010) 589.