



تأثیر استفاده از سوخت حلقوی با قابلیت خنک شونده از داخل و خارج در راکتور هسته‌ای ماژولار کوچک بر جرم بحرانی سوخت

مجید زیدآبادی نژاد*^(۱) - حسین زایر محمدی ریشهری^(۱)

۱- دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته کرمان، دانشکده علوم و فناوری‌های نوین، گروه مهندسی هسته‌ای

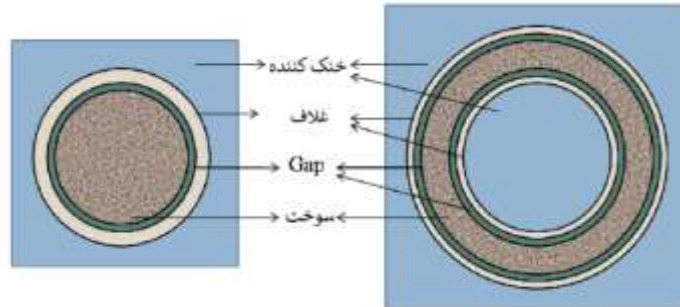
چکیده:

در راکتورهای متداول ماژولار کوچک (SMRs) میله‌های سوخت به صورت توپُر بوده، که این خاصیت باعث شده خنک‌کنندگی و کندکنندگی فقط در سطح خارجی سوخت اتفاق افتد. اما تکنیک استفاده از سوخت حلقوی با خنک‌کنندگی از داخل و خارج که به منظور افزایش ایمنی طراحی می‌شود، علاوه بر اینکه امکان برداشت حرارت از سطح داخلی و خارجی سوخت را فراهم می‌کند، موجب افزایش کندکنندگی نیز می‌شود. در این پژوهش ابتدا قلب یک راکتور ماژولار کوچک شبیه‌سازی و راکتیوتیته اضافی قلب به دست آورده شده، سپس همین راکتور با سوخت حلقوی با قابلیت خنک‌سازی از داخل و خارج شبیه‌سازی شده است. نتایج نشان داد که با جرم سوخت حلقوی کمتری می‌توان به راکتیوتیته اضافی مورد نیاز قلب دست پیدا کرد.

کلمات کلیدی: سوخت حلقوی خنک‌شونده از داخل و خارج، راکتور ماژولار کوچک، ضریب تکثیر، جرم بحرانی

مقدمه:

در سال‌های اخیر انستیتو MIT، تحقیقاتی بر روی سوخت حلقوی با قابلیت خنک‌شوندگی از داخل و خارج انجام داده که در این راستا سازمان‌ها و افراد مختلف، با استفاده از تحقیقات انجام شده توسط MIT، سعی در گسترش این فناوری و عملی کردن آن دارند. در تازه‌ترین این مقالات که در سال‌های ۲۰۱۶ و ۲۰۱۷ توسط انصاری فر و همکاران انجام شده [۱ و ۲] دیده شد که با استفاده از این نوع سوخت دمای مرکز سوخت کاهش پیدا می‌کند و می‌توان به کمک آن توان راکتور را افزایش داد. در مقاله‌ای دیگر که در سال ۲۰۰۳ توسط هان و همکارانش انجام شده بود [۳]، مشاهده شد که در استفاده از این نوع سوخت حداکثر دمای قرص‌های سوخت کمی بالاتر از ۵۰۰ درجه سلسیوس و MDNBR نیز در استفاده از این نوع مجتمع سوخت بالاتر می‌باشد. همچنین در مقاله‌ای دیگر که در سال ۲۰۱۲ توسط شین و همکارانش انجام شده بود [۴]، این نتیجه حاصل شد که در استفاده از این نوع سوخت توان راکتور را می‌توان تا ۲ برابر و افزایش داد.



شکل شماره (۱) - شماتیک میله سوخت توپُر و سوخت حلقوی با قابلیت خنک‌شوندگی از داخل و خارج همچنین در سال‌های اخیر حاضر گرایش به سمت واحدهای کوچک‌تر تولید توان، ایجاد شده است تا قادر باشد برق را برای مکان‌های دورافتاده تامین و سیستم‌های انرژی با توزیع بیشتر ایجاد کند [۵]. لذا تحقیقات زیادی با تاکید بر طراحی و ساخت راکتورهای هسته‌ای کوچک انجام شده است. راکتورهای ماژولار کوچک (SMRs) راکتورهایی هستند که خروجی توان آن‌ها کمتر از 300MWe است [۶]. از مزیت‌های راکتورهای ماژولار کوچک به نسبت راکتورهای بزرگ، تولید انرژی قابل انعطاف برای طیف وسیع‌تری از کاربردها، طراحی کوچک‌تر و فشرده‌تر آن‌ها که امکان حمل و نقل آن‌ها به وسیله قطار یا کامیون را به سمت سایت نیروگاه هسته‌ای ممکن می‌سازد و دارا بودن عملکرد بالا ایمنی ذاتی و غیرفعال آن‌ها است [۷]. که از شاخص‌ترین این نوع راکتورها، راکتور NuScale است

جدول شماره (۱) - مشخصات قلب راکتور NuScale

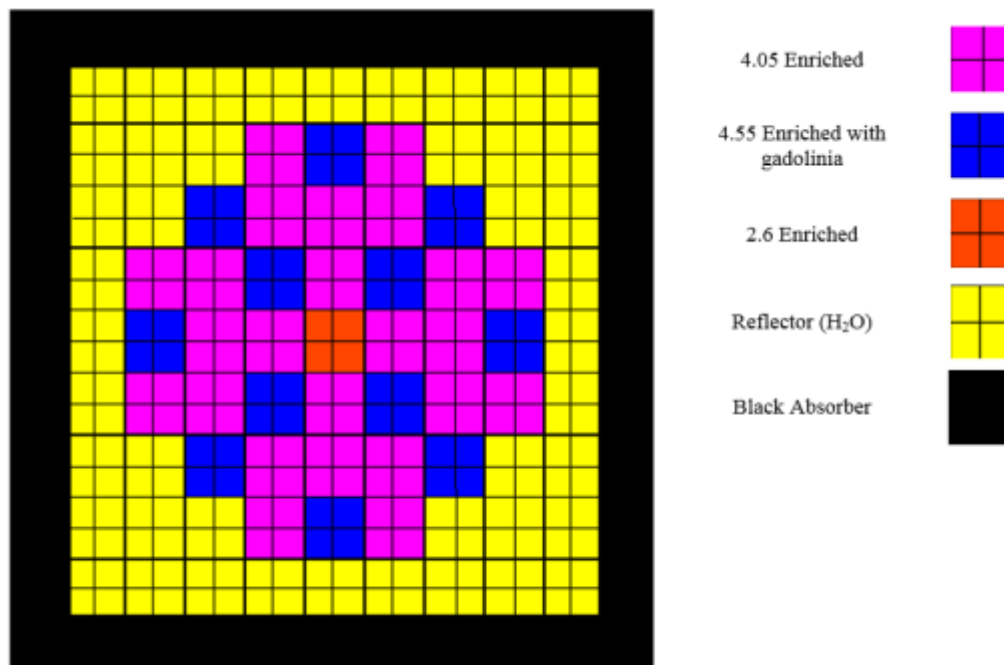
پارامتر	مقدار
توان حرارتی تولیدی قلب	۱۶۰ مگا وات
فشار سیستم	۱۲٫۸ مگا پاسکال
دمای ورودی قلب	۲۵۸٫۳۳ درجه سانتی‌گراد
طول گام	۱۲٫۵۹ میلی‌متر
دبی سیال عبوری	$۶۴۵٫۵۷ \frac{kg}{m^2s}$
طول فعال میله سوخت	۲ متر

در این پژوهش به تاثیر سوخت‌های حلقوی با قابلیت خنک شوندگی از داخل و خارج بر جرم بحرانی در راکتور NuScale پرداخته شده است و به منظور شبیه سازی از کدهای محاسبات نوترونیک WIMS و CITATION استفاده شده است. این تحقیق در راستای فعالیتهای تحقیقاتی سازمان انرژی اتمی ایران می‌باشد.

روش کار :

قلب راکتور NuScale از سه نوع مجتمع سوخت با غناهای ۰.۴، ۰.۵۵٪ و ۰.۶، ۲٪ تشکیل شده است که در ابتدا هر کدام از آن‌ها در داخل کد محاسبات سلولی WIMS شبیه سازی شده اند. در این شبیه سازی به منظور محاسبه راکتیوته اضافه قلب (ρ_{excess}) راکتور، از مدل هندسه سوزنی استفاده شده و راکتور در حالت پاک و سرد (Cold and Clean) در نظر گرفته شده است.

این راکتور شامل ۳۷ مجتمع سوخت با آرایش مربعی است که همگی آن‌ها در کد محاسبات قلب CITATION برای محاسبات بحرانیته استفاده شده است. در شکل شماره ۲ شماتیکی از قلب شبیه سازی شده راکتور NuScale نشان داده شده است.



شکل شماره (۲) - شماتیک قلب راکتور NuScale



پس از شبیه سازی راکتور با هندسه سوخت توپُر و محاسبه راکتیویته اضافه قلب به بررسی سوخت های حلقوی با قابلیت خنک شوندگی از داخل و خارج با شعاع های داخلی متفاوت اما با طول گام ثابت $1/6789$ سانتی متر و شعاع خارجی یکسان به منظور بررسی تاثیر جرم سوخت بر راکتیویته اضافی قلب پرداخته شده است که در جدول شماره ۲ مشخصات هندسی این سوخت ها نشان داده شده است.

جدول شماره (۲) - مشخصات هندسه سوخت های حلقوی مدل شده

نوع میله سوخت	پارامترها	مقدار (cm)	نوع میله سوخت	پارامترها	مقدار (cm)
۱	شعاع داخلی غلاف داخل	۰,۱۵	۲	شعاع داخلی غلاف داخل	۰,۳۵
۱	شعاع خارجی غلاف داخلی	۰,۲۱۱	۲	شعاع خارجی غلاف داخلی	۰,۴۱۱
۱	شعاع داخلی قرص سوخت	۰,۲۱۹	۲	شعاع داخلی قرص سوخت	۰,۴۱۹
۱	شعاع خارجی قرص سوخت	۰,۶۲۰۳	۲	شعاع خارجی قرص سوخت	۰,۶۲۰۳
۱	شعاع داخلی غلاف خارجی	۰,۶۲۸۳	۲	شعاع داخلی غلاف خارجی	۰,۶۲۸۳
۱	شعاع خارجی غلاف خارجی	۰,۶۸۹۳	۲	شعاع خارجی غلاف خارجی	۰,۶۸۹۳
۳	شعاع داخلی غلاف داخل	۰,۴	۴	شعاع داخلی غلاف داخل	۰,۴۵
۳	شعاع خارجی غلاف داخلی	۰,۴۶۱	۴	شعاع خارجی غلاف داخلی	۰,۵۱۱
۳	شعاع داخلی قرص سوخت	۰,۴۶۹	۴	شعاع داخلی قرص سوخت	۰,۵۱۹
۳	شعاع خارجی قرص سوخت	۰,۶۲۰۳	۴	شعاع خارجی قرص سوخت	۰,۶۲۰۳
۳	شعاع داخلی غلاف خارجی	۰,۶۲۸۳	۴	شعاع داخلی غلاف خارجی	۰,۶۲۸۳
۳	شعاع خارجی غلاف خارجی	۰,۶۸۹۳	۴	شعاع خارجی غلاف خارجی	۰,۶۸۹۳
۵	شعاع داخلی غلاف داخل	۰,۵	۶	شعاع داخلی غلاف داخل	۰,۵۲۵
۵	شعاع خارجی غلاف داخلی	۰,۵۶۱	۶	شعاع خارجی غلاف داخلی	۰,۵۸۶
۵	شعاع داخلی قرص سوخت	۰,۵۶۹	۶	شعاع داخلی قرص سوخت	۰,۵۹۴
۵	شعاع خارجی قرص سوخت	۰,۶۲۰۳	۶	شعاع خارجی قرص سوخت	۰,۶۲۰۳
۵	شعاع داخلی غلاف خارجی	۰,۶۲۸۳	۶	شعاع داخلی غلاف خارجی	۰,۶۲۸۳



نوع میله سوخت	پارامترها	مقدار (cm)	نوع میله سوخت	پارامترها	مقدار (cm)
۵	شعاع خارجی غلاف خارجی	۰,۶۸۹۳	۶	شعاع خارجی غلاف خارجی	۰,۶۸۹۳
۷	شعاع داخلی غلاف داخلی	۰,۵۱۲۵	۸	شعاع داخلی غلاف داخلی	۰,۵۱۳۰
۷	شعاع خارجی غلاف داخلی	۰,۵۷۳۵	۸	شعاع خارجی غلاف داخلی	۰,۵۷۴۰
۷	شعاع داخلی قرص سوخت	۰,۵۸۱۵	۸	شعاع داخلی قرص سوخت	۰,۵۸۲۰
۷	شعاع خارجی قرص سوخت	۰,۶۲۰۳	۸	شعاع خارجی قرص سوخت	۰,۶۲۰۳
۷	شعاع داخلی غلاف خارجی	۰,۶۲۸۳	۸	شعاع داخلی غلاف خارجی	۰,۶۲۸۳
۷	شعاع خارجی غلاف خارجی	۰,۶۸۹۳	۸	شعاع خارجی غلاف خارجی	۰,۶۸۹۳

نتایج :

ضریب تکثیر موثر یکی از کلیدی ترین فاکتورها برای کارکرد و کنترل راکتور می‌باشد. هر تغییری در خواص مواد به کاررفته در قلب راکتور و هندسه موجب تغییر بحرانیت قلب و از این رو تغییر در ضریب تکثیر موثر می‌شود. با استفاده از شبیه سازی راکتور NuScale در شرایط قلب پاک و سرد ضریب تکثیر قلب راکتور به دست آورده شد. سپس یک میله سوخت حلقوی با قابلیت خنک شوندگی از داخل و خارج برای این راکتور طراحی شد و قلب راکتور مورد نظر مجدداً با این میله سوخت جدید شبیه سازی شد و ضریب تکثیر بار دیگر به دست آورده شد. همچنین به منظور بررسی تاثیر سوخت حلقوی بر جرم بحرانی میله های سوخت حلقوی دیگری با شعاع های خارجی یکسان و طول گام ثابت اما شعاع های داخلی مختلف (جرم سوخت های مختلف) نیز شبیه سازی شدند. نتایج همگی شبیه سازی ها در جدول زیر آورده شده است.

جدول شماره (۳) - ضریب تکثیرهای موثر برای هر یک از میله‌های سوخت

نوع میله سوخت	ضریب تکثیر موثر (k_{eff}) در حالت (Cold and Clean)	شعاع داخلی (cm)
NuScale اصلی	۱,۲۰۸۵۹۵	توپر
۱	۱,۳۰۶۶۲۳	۰,۱۵
۲	۱,۳۸۹۳۱۵	۰,۳۵
۳	۱,۴۰۶۲۳۷	۰,۴
۴	۱,۳۹۹۲۷۸	۰,۴۵



نوع میله سوخت	ضریب تکثیر موثر (k_{eff}) در حالت (Cold and Clean)	شعاع داخلی (cm)
۵	۱,۲۹۸۸۵۴	۰,۵
۶	۱,۲۹۱۲۰	۰,۵۲۵
۷	۱,۲۲۶۲۶۱	۰,۵۱۲۵
۸	۱,۲۲۴۷۵	۰,۵۱۳۰

بحث و نتیجه گیری :

نتایج شبیه سازی نشان می دهد که استفاده از سوخت حلقوی با قابلیت خنک شونده از داخل و خارج به دلیل افزایش کند کنندگی موجب افزایش راکتیویته اضافی قلب با همان میزان سوخت می شود که این موضع از نظر نوترونیک یک مزیت حساب شده و به شدت حائز اهمیت می باشد. اما هدف اصلی ما در این پژوهش بررسی اثر استفاده از سوخت حلقوی بر جرم بحرانی است. به همین دلیل سوخت های حلقوی با جرم های مختلفی شبیه سازی شده است. جرم سوخت شماره ۱ و سوخت توپر یکسان است اما در بقیه سوخت های حلقوی جرم سوخت رفته رفته کم می شود در حالی که ابعاد قلب ثابت می ماند (شعاع خارجی سوخت ها و طول گام ثابت فرض شده) ولی با این حال دیده می شود با کم شدن جرم سوخت باز هم ضریب تکثیر از ضریب تکثیر سوخت توپر بیشتر می باشد. شبیه سازی ها تا جایی انجام شده که تقریباً ضریب تکثیر سوخت حلقوی با سوخت توپر یکسان شود این درحالی است که جرم سوخت مورد نیاز در سوخت حلقوی برای رسیدن به این ضریب تکثیر $\frac{1}{3}$ جرم سوخت توپر مورد نیاز برای دست یابی به این ضریب تکثیر می باشد.

مراجع :

- [1] M. Zaidabadi, G.R. Ansarifar , M.H. Esteki, Thermal hydraulic analysis of VVER-1000 nuclear reactor with dual-cooled annular fuel using K-w SST Turbulence model, Annals of Nuclear Energy 101 (2017) 118-127.
- [2] G. R. Ansarifar, M. H. Esteki, M. Zaidabadi, Investigation of the Dual-Cooled Annular Fuel Effect on the Thermal Power Uprate in a VVER-1000 Nuclear Reactor, nuclear technology · volume 195 · july (2016).
- [3] Kyu Hyun Han, Soon Heung Chang “Development of a thermal-hydraulic analysis code for annular fuel assemblies”, Nuclear Engineering and Design, 226, 267-275, (2003).



بیست و ششمین کنفرانس هسته‌ای ایران

۸۰۷ اسفندماه ۱۳۹۸ - دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی - تهران



- [4] Chang-Hwan Shin, Tae-Hyun Chun, Dong-Seok Oh, Wang-Kee In, "Thermal hydraulic performance assessment of dual-cooled annular nuclear fuel for OPR-1000". Nuclear Engineering and Design, 243, 291– 300, (2012).
- [5] T. J. W. Marcin Karol Rowinski, Jiyun Zhao, "Small and Medium sized Reactors (SMR): A review of technology," Renewable and Sustainable Energy Reviews 44(2015)643–656, 2015.
- [6] IAEA, 2007. Status of Small Reactor Designs without On-Site Refueling. International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria.
- [7] Carelli, M.D., et al., 2010. Economic features of integral, modular, small-to-medium size reactors. Prog. Nucl. Energy 52, 403–414.