



تحلیل عملکرد ترمو مکانیکی میله سوخت راکتور NuScale در مدت زمان ۱۰۰ روز و بررسی تاثیر استفاده از حفره در مرکز میله 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:

امروزه پیشرفت فناوری هسته‌ای به سمت واحدهای ماژولار با توان کم می‌باشد که یکی از شاخص‌ترین این راکتورها، راکتور NuScale است. از جمله بارزترین ویژگی این راکتورها ایمنی آن‌ها می‌باشد. در مبحث ایمنی اولین سد مقابله با حادثه، میله سوخت است. به همین دلیل در این پژوهش عملکرد ترمو مکانیکی ۱۰۰ روزه سوخت راکتور NuScale مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین یک میله سوخت با حفره مرکزی برای این راکتور طراحی و نتایج حاصل از شبیه سازی این دو نوع سوخت با یکدیگر مقایسه شده است. نتایج نشان دهنده عملکرد ایمن سوخت موجود در راکتور NuScale در طول مدت زمان کارکرد می‌باشد و همچنین نشان می‌دهد وجود حفره باعث بهبود شرایط سوخت در طی کارکرد طولانی می‌شود.

کلمات کلیدی: NuScale، راکتور ماژولار کوچک، ترمو مکانیک، حفره مرکز سوخت

مقدمه:

در حال 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 [۱]. 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 [۲]. 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 [۳].

راکتور NuScale یکی از شاخص‌ترین راکتورهای ماژولار کوچک است که مراحل طراحی پایه و تفصیلی آن به پایان رسیده است. بهره‌گیری از یک پوشش ایمنی غوطه‌ور در استخر آب، خنک سازی قلب راکتور با استفاده از جریان طبیعی خنک کننده و تامین ایمنی راکتور تا ۷۲ ساعت پس از حوادث شدید بدون نیاز به دخالت خارجی از مهمترین ویژگی‌های این راکتور به شمار می‌رود. قلب این راکتور شامل ۳۷ مجتمع سوخت ۱۷*۱۷ است [۴].

جدول شماره (۱) - مشخصات قلب راکتور NuScale



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

به دلیل اهمیت میله سوخت در قلب راکتور هسته‌ای در این پژوهش برای نخستین بار یک میله سوخت راکتور NuScale در حالت پایا در مدت زمان ۱۰۰ روز شبیه‌سازی شده و نتایجی همانند تغییرات شعاعی سوخت و غلاف، دمای مرکز سوخت و اکسیداسیون بدست آورده شده است. سپس یک میله سوخت حلقوی با حفره‌ای به قطر ۱٫۵ میلی‌متر در مرکز سوخت با شرط یکسان بودن جرم سوخت و ضریب تکثیر، برای این راکتور طراحی شده و نتایج حاصل از ۱۰۰ روز کارکرد این دو سوخت با یکدیگر مقایسه شده است. در این پژوهش به منظور بررسی عملکرد ترمودینامیک میله‌های سوخت از کد محاسباتی PARS2 که به منظور تحلیل عملکرد میله سوخت در شرایط پایا توسط مرکز محاسبات پیشرفته هسته‌ای توسعه داده شده است استفاده شده است. این کد قابلیت شبیه‌سازی میله‌های سوخت دی‌اکسید اورانیوم از نوع توپر و یا دارای حفره مرکزی را دارا می‌باشد. لازم به ذکر است که برای اعتبارسنجی کد PARS2 از کد FRAPCON 3.1 استفاده شده است [۵]. این تحقیق در راستای فعالیت‌های تحقیقاتی سازمان انرژی اتمی ایران می‌باشد.

روش کار :

قلب راکتور NuScale از میله‌های سوخت با غنا‌های مختلفی تشکیل شده اما در این پژوهش از یک میله سوخت با غنا ۲٫۶ درصد استفاده شده است. در ابتدا با استفاده از اطلاعات موجود از میله سوخت راکتور NuScale، میله سوخت مورد نظر در کد PARS2 شبیه‌سازی شده است. سپس یک سوخت حلقوی با حفره‌ای به قطر ۱٫۵ میلی‌متر با شرط یکسان بودن جرم سوخت و ضریب تکثیر برای این راکتور طراحی گردیده و این سوخت نیز با کد PARS2 شبیه‌سازی شده و در پایان عملکرد این دو نوع سوخت با یکدیگر مقایسه شده است. اطلاعات مربوط به هر دو نوع سوخت در جدول شماره (۲) آورده شده است.

جدول شماره (۲) - مشخصات میله سوخت راکتور NuScale و میله سوخت حلقوی

پارامتر	مقدار (سوخت NuScale)	مقدار (سوخت حلقوی)
طول میله سوخت	۲٫۱۹۵ متر	۲٫۱۹۵ متر
طول فعال میله سوخت	۲ متر	۲ متر
قطر خارجی غلاف	۹٫۴۹۹ میلی‌متر	۹٫۶۳۷ میلی‌متر
قطر داخلی غلاف	۸٫۲۸۰ میلی‌متر	۸٫۴۱۷۹ میلی‌متر

جنس سوخت	دی‌اکسید اورانیوم (UO_2)	دی‌اکسید اورانیوم (UO_2)
قطر خارجی قرص سوخت	۸,۱۱۵۳ میلی‌متر	۸,۲۵۲۸۳ میلی‌متر
قطر حفره مرکزی سوخت	فاقد حفره	۱,۵ میلی‌متر

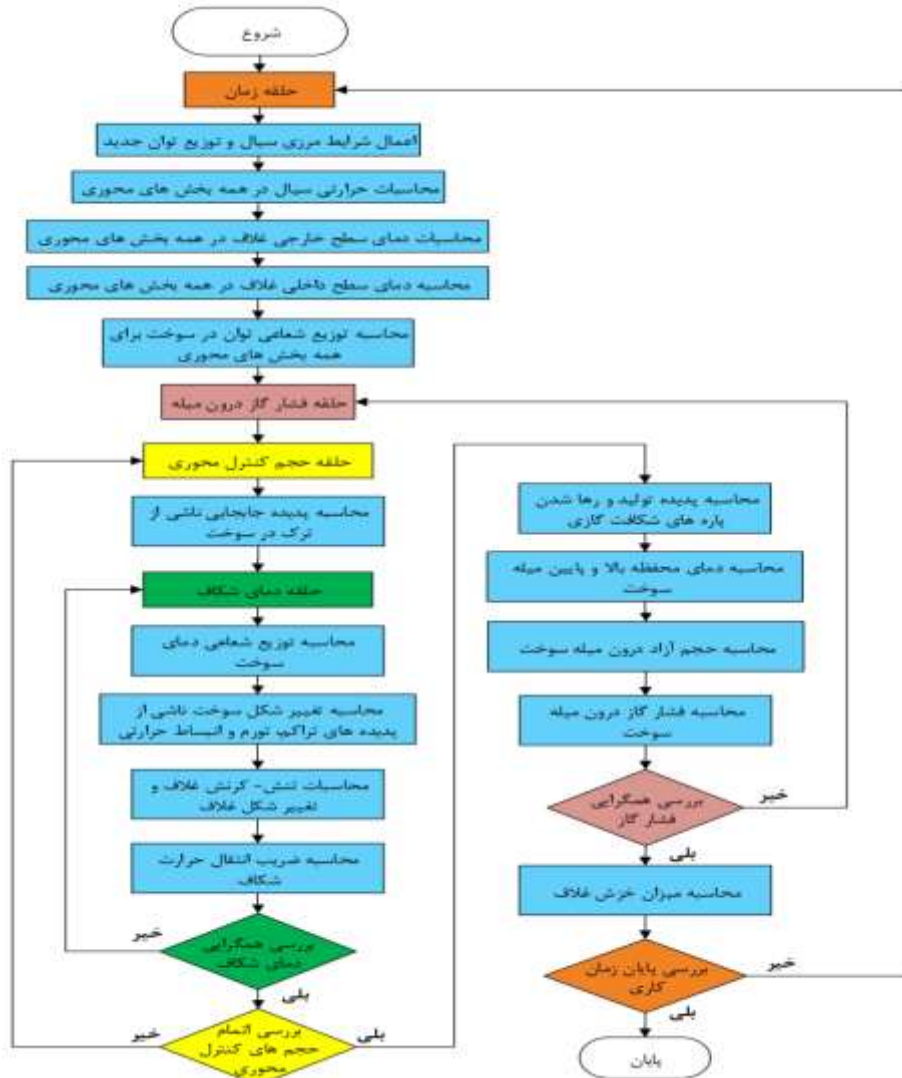


(a)

(b)

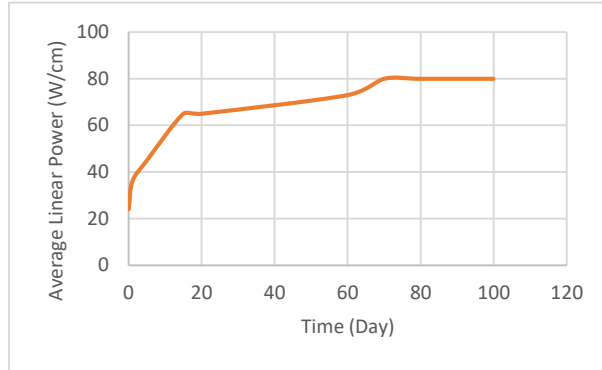
شکل شماره (۱) - (a) سوخت حلقوی (b) سوخت توپُر راکتور NuScale

روند کلی تحلیل عملکرد میله سوخت با استفاده از کد PARS2 در شکل شماره (۲) آورده شده است.



شکل شماره (۲) - روندنمای کلی کد تحلیل عملکرد میله سوخت در شرایط پایا

به منظور شبیه سازی میله سوخت مورد نظر در دوره کاری ۱۰۰ روزه، متوسط توان خطی برحسب زمان (روز) همانند شکل ۳ در نظر گرفته شده است.

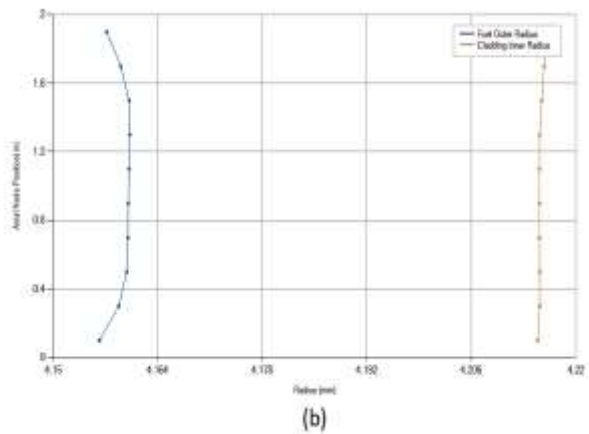
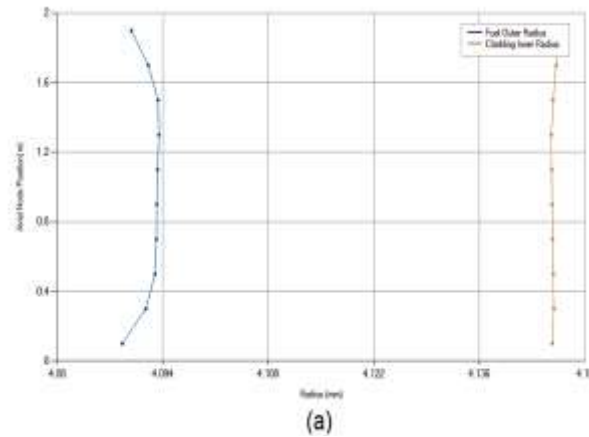


توان خطی

شکل شماره (۳) - متوسط

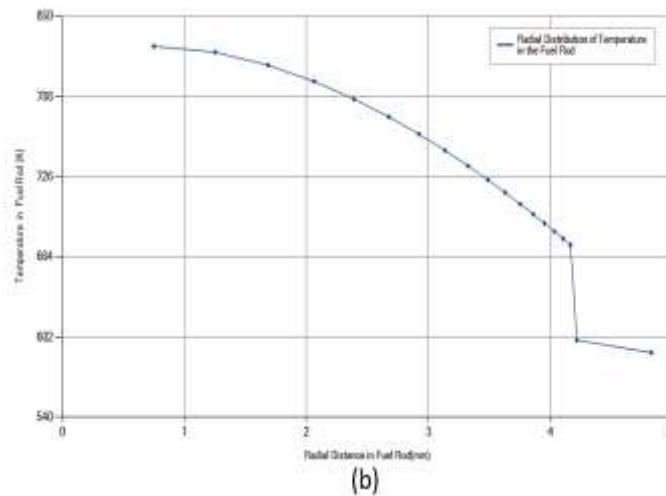
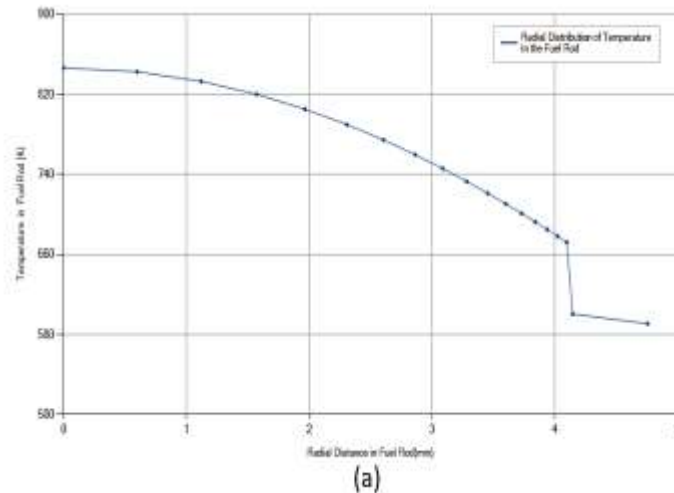
نتایج :

پس از انجام شبیه سازی سوخت راکتور NuScale و سوخت حلقوی طراحی شده، در بازه زمانی صد روزه نتایج زیر حاصل گردید.



شکل شماره (۴) - تغییرات شعاعی سوخت و غلاف (a) سوخت NuScale (b) سوخت حلقوی

از شکل شماره ۴ دیده می‌شود در طی کار کرد راکتور قطر سوخت و غلاف به دلیل تنش‌های حرارتی تغییر می‌کند اما همانطور که از شکل دیده می‌شود پس از ۱۰۰ روز کاری همچنان فاصله بین سوخت و غلاف حفظ شده و به یکدیگر نچسبیده‌اند که نشان‌دهنده شرایط ترمومکانیکی مناسب برای هر دو نوع سوخت می‌باشد.

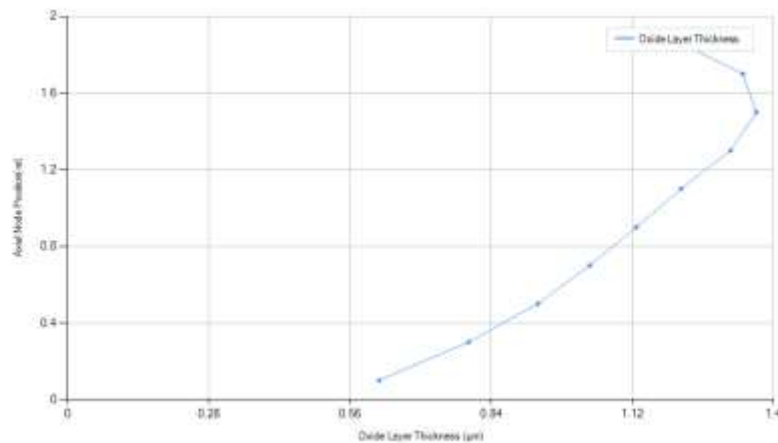


شکل شماره (۵) - دمای مرکز سوخت (a) سوخت NuScale (b) سوخت حلقوی

شکل ۵ نشان‌دهنده توزیع دمای شعاعی سوخت پس از ۱۰۰ روز در ارتفاعی از قلب که بیشینه دما را دارد، می‌باشد. از شکل ۵ دیده می‌شود که بیشینه دمای هر دو نوع سوخت در ناحیه بسیار مناسبی می‌باشد زیرا که از نقطه ذوب سوخت فاصله زیادی دارد.



شکل شماره ۶ نشان دهنده لایه اکسید ایجاد شده روی سطح غلاف در طی ۱۰۰ روز کارکرد می باشد. از این شکل دیده می شود که در طی این کارکرد ضخامت بسیار ناچیزی از اکسید روی سطح غلاف تشکیل می گردد. و هم موضوع موجب می شود سوخت همچنان پس از ۱۰۰ روز از استحکام کافی برخوردار باشد. همچنین دیده شد که اکسیداسیون برای هر دو نوع سوخت به یک اندازه است.



شکل شماره (۶) - اکسیداسیون روی سطح غلاف هر دو نوع سوخت

بحث و نتیجه گیری :

همانطور که از نتایج دیده می شود پس از ۱۰۰ روز کاری همچنان سوخت راکتور NuScale از نظر ترمومکانیکی در شرایط مطلوبی واقع است. در واقع دیده می شود پس از این مدت کارکرد و تغییر اندازه قرص سوخت و غلاف نه تنهای برخوردی بین این دو صورت نگرفته بلکه هنوز فاصله قابل قبولی از یکدیگر دارند. همچنین در طول این مدت لایه اکسید تشکیل شده روی غلاف ضخامت ناچیزی دارد که این موضوع موجب می شود میله سوخت از استحکام کافی برخوردار باشد. همچنین اضافه کردن حفره به این میله سوخت موجب بهتر شدن این ویژگی ها شده است. در نهایت می توان نتیجه گرفت که سوخت راکتور NuScale پس از طی دوران کاری خود همچنان دارای خواص ترمومکانیکی مناسبی می باشد که این موضوع از نقطه نظر ایمنی اهمیت زیادی دارد. پس می تون با طراحی راکتورهای ماژولار کوچک ایمنی نیروگاه ها را در طی کارکرد طولانی مدت افزایش داد.

مراجع :

- [۱] 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.
- [۲] IAEA, 2007. Status of Small Reactor Designs without On-Site Refueling. International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria.



بیست و ششمین کنفرانس هسته‌ای ایران

۸ و ۷ اسفندماه ۱۳۹۸ - دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی - تهران



[۳] Carelli, M.D., et al., 2010. Economic features of integral, modular, small-to-medium size reactors. *Prog. Nucl. Energy* 52, 403–414.

[۴] Reyes Jr, J.N., 2008, July. Introduction to NuScale Design. In *US Nuclear Regulatory Commission Pre-Application Meeting. Rockville, MD* (Vol. 24).

[۵] وبسایت رسمی مرکز محاسبات پیشرفته هسته‌ای، www.ancc.ir/products/item/51-pars2-0