



بررسی خواص ترمومکانیکی غلاف‌های Zircaloy-4، SiC و SS304L در یک راکتور کوچک

مدولار نوعی و انتخاب غلاف مناسب با ضخامت بهینه

محمدزاده، محمد؛ ایوبیان، نوید*؛ میری‌یان، سید فرشاد

دانشگاه اصفهان، دانشکده‌ی علوم و فناوری‌های نوین، گروه مهندسی هسته‌ای

چکیده:

یکی از مهمترین اجزای راکتورهای هسته‌ای، غلاف سوخت است. انتخاب غلاف باید هوشمندانه و براساس شبیه‌سازی‌ها و محاسبات بسیار دقیق صورت پذیرد. اطمینان از کار آن داخل قلب راکتور به عنوان یک محافظ اصلی در برابر انتشار مواد پرتوزا به بیرون و حفاظت از سوخت بسیار ضروری است. با توجه به توسعه نسل جدید راکتورهای SMR انتخاب غلاف مناسب و ضخامت بهینه آن یکی از موارد مهم در طراحی این نوع راکتورها به شمار می‌آید. در این پژوهش، اثرات تغییر ضخامت، فشار داخلی و متوسط دمای غلاف بر روی پارامترهای ترمومکانیکی از قبیل بیشینه تنش محوری، بیشینه تنش محیطی و کرنش برای ۳ نوع غلاف SS304L، Zircaloy-4 و SiC در یک راکتور کوچک مدولار (SMR) نوعی بررسی شد. شبیه‌سازی‌ها به کمک کدهای هسته‌ای MCNPX و FRAPCON و نرم‌افزار ABAQUS انجام گرفت. بهینه‌سازی نیز بر اساس تابع هزینه مناسب انجام پذیرفت. در نهایت غلاف SiC با ضخامت $N\text{ mm}$ به عنوان غلاف مناسب و بهینه انتخاب شد.

کلید واژه: غلاف سوخت، SiC، پارامترهای ترمومکانیکی، ABAQUS، بهینه‌سازی

مقدمه:

امروزه انتشار کربن و ارتباط آن با گرم شدن کره‌ی زمین به آسانی قابل درک است. موضوع ایمنی و سلامتی محیط زیست نیاز به تولید انرژی از راکتورهای هسته‌ای را افزایش داده و استفاده‌ی از سوخت‌های فسیلی را کمتر کرده است [۱ و ۲]. با این حال، راکتورهای فعلی دارای قابلیت تولید حجم زیادی از زباله‌ها و پسماندهای هسته‌ای هستند. راکتورهای هسته‌ای پیشرفته که هم‌اکنون در حال بررسی هستند، امکان استفاده ایمن‌تر و مفیدتر از انرژی هسته‌ای را فراهم می‌آورند. در همه راکتورهای هسته‌ای، غلاف سوخت مهمترین محافظ ایمنی بوده و بیشترین محصولات شکافت پرتوزا را در حجم خود نگه می‌دارد [۲]. انتخاب مواد و فرایند ساخت مربوط به غلاف اهمیت قابل توجهی دارد [۳ و ۴]. ماده‌ی غلاف باید دارای ویژگی‌هایی از قبیل سطح مقطع جذب نوترون پایین، مقاومت مطلوب در برابر خوردگی در محیط‌های آبی با دمای بالا، ضریب انتقال حرارت هدایتی بالا، نقطه‌ی ذوب بالا، مقاومت تابشی مناسب و ضریب انبساط حرارتی پایین باشد [۵ و ۶]. به طور معمول، غلاف‌های آلومینیوم و آلیاژهای آن در دماهای پایین (راکتورهای تحقیقاتی) کاربرد دارند؛ اما غلاف‌های شامل فولاد ضدزنگ، زیرکونیوم و آلیاژهای آن در دماهای بالا (راکتورهای توان) مطلوب هستند [۷]. غلاف‌های امروزی برای سوخت‌های راکتورهای آب سبک (LWRs) از آلیاژهای زیرکونیوم ساخته می‌شوند. بر اساس مطالعات



انجام شده، تمام غلاف‌های سوخت‌های LWRs امروزی، ۹۷ تا ۹۹ درصد زیرکونیوم را شامل می‌شوند. مقادیر جزئی از عناصر دیگر مانند Ni ، Sn ، Fe ، Cr ، Nb و برای بهینه‌سازی خواص مورد نظر و مطلوب اضافه می‌گردند [۸ و ۹]. تحقیق بر روی غلاف‌های جدید و یافتن جایگزین برای آلیاژهای زیرکونیوم بعد از حادثه فوکوشیما در سال ۲۰۱۲ بیشتر گسترش یافت. غلاف مناسب دیگر برای راکتورهای LWR، غلاف سرامیکی کامپوزیتی سیلیکون کاربید (SiC) است. غلاف SiC می‌تواند جایگزین مناسبی برای غلاف‌های پایه زیرکونیومی باشد. غلاف‌های کامپوزیتی بر پایه SiC به صورت عمده مواردی از قبیل مقاومت در برابر تخریب تابشی، جذب پارازیتی نوترون و خوردگی در حین دمای کاری (دماهای بالا) را بهبود می‌بخشند. در مقایسه با زیرکونیوم، SiC دارای نقطه ذوب و استحکام بالاتر بوده و وقتی که در معرض تابش قرار گیرد، پایداری ابعادی بهتری دارد.

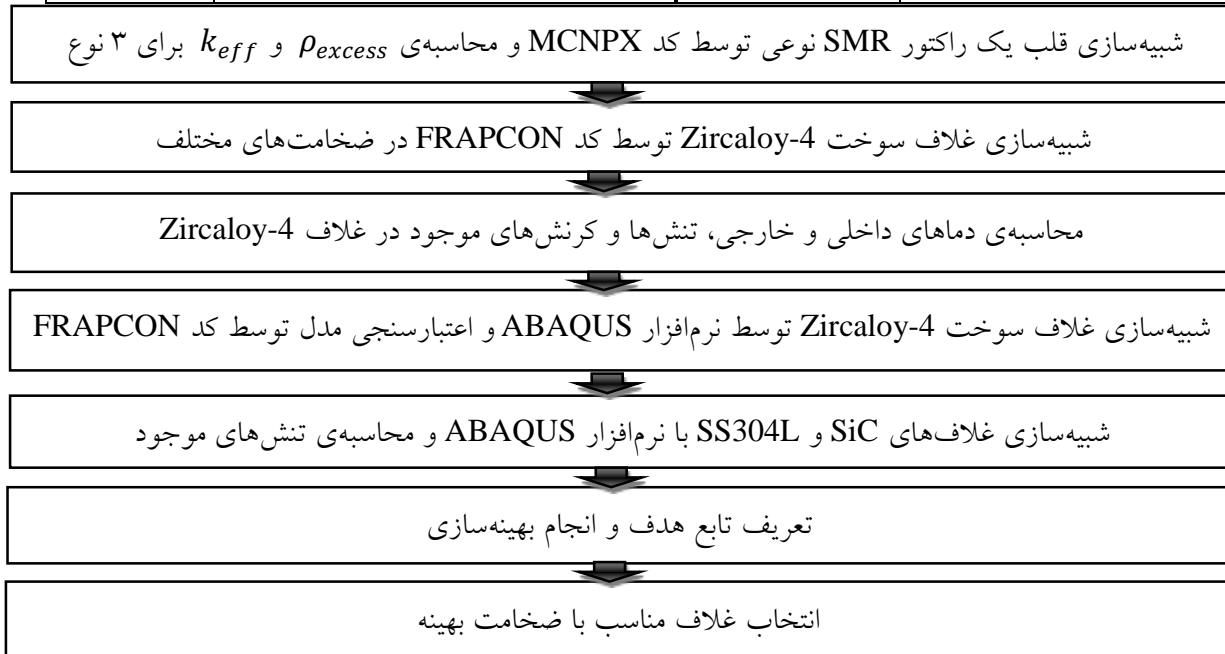
یک پارامتر مهم در انتخاب غلاف، ضخامت آن است. به طور معمول تغییر در ضخامت غلاف، به دلیل محدودیت طراحی قطر بیرونی غلاف، فقط حجم داخل غلاف (حجم سوخت) را تحت تاثیر قرار می‌دهد. غلاف ضخیم‌تر، حجم سوخت را کاهش داده و کاهش حجم سوخت، غنای سوخت را افزایش می‌دهد [۱۰]. در سال‌های اخیر، تحقیقات زیادی در مورد انتخاب ماده غلاف مناسب و مقایسه‌ی غلاف‌های مختلف انجام شده است. در این تحقیق، اثر تغییر ضخامت‌های مختلف ۳ نوع غلاف Zircaloy-4، SiC و SS304L بر روی خواص نوترونیکی و مکانیکی در یک راکتور نوعی SMR مورد ارزیابی و بررسی قرار گرفته است. در این تحقیق از کدهای MCNPX و FRAPCON و نرم افزار ABAQUS برای شبیه‌سازی استفاده شده است. همچنین در آخر، به منظور تعیین غلاف مناسب با ضخامت بهینه، بهینه‌سازی چندهدفه با تعریف تابع هزینه مناسب توسط نرم‌افزار MATLAB انجام خواهد شد.

روش کار:

ویژگی‌های سوخت و قلب یک راکتور SMR نوعی در جدول (۱) آورده شده است [۱۱]. روند انجام تحقیق نیز به صورت خلاصه در شکل (۱) نشان داده شده است. شکل (۲)، نمای از بالای قلب راکتور شبیه‌سازی شده توسط کد MCNP را نشان می‌دهد.

جدول (۱): مشخصات سوخت و قلب یک راکتور SMR نوعی [۱۱]

پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
نوع راکتور	PWR	فشار سیستم (MPa)	۱۵۰
توان حرارتی (MWth)	۱۵۰	قطر قلب راکتور (cm)	۱۹۲
نوع و جنس سوخت	UO ₂ ، میله‌ای	ارتفاع قلب راکتور (cm)	۱۷۵
غناي سوخت (%)	۷	قطر قرص سوخت (mm)	۶/۴
سیکل سوخت (ماه)	۳۰	دمای ورودی خنک‌کننده به قلب راکتور (°C)	۲۹۰
نوع خنک‌کننده‌کننده	آب سبک	دمای خروجی از قلب راکتور (°C)	۳۲۰



شکل (۱): روند انجام تحقیق



شکل (۲): نمای بالای قلب شبیه‌سازی شده به کمک کد MCNPX

به دلیل اینکه کد FRAPCON توانایی مدل‌سازی غلاف‌های SiC و SS304L را ندارد، ابتدا غلاف Zircaloy-4 توسط این کد شبیه‌سازی شد. در ادامه پس از راستی‌آزمایی مدل ABAQUS برای غلاف Zircaloy-4، غلاف‌های SiC و SS304L نیز در این نرم‌افزار مدل‌سازی شدند.

به منظور انتخاب غلاف مناسب با ضخامت بهینه از تابع هزینه زیر استفاده گردید:

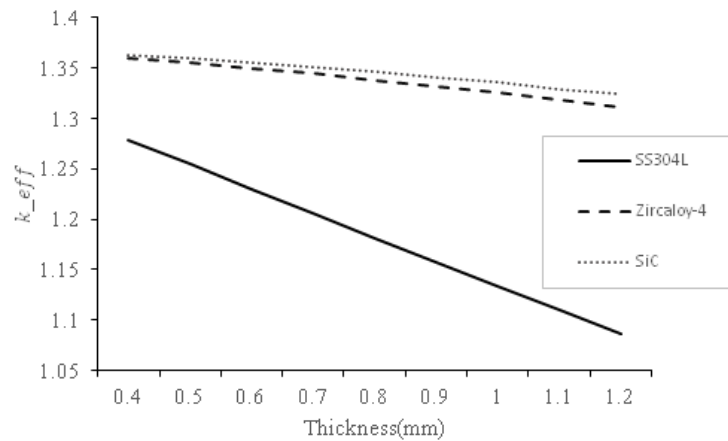
$$(۱) C.F. = \frac{c_1}{\rho_{excess}} + c_2 \cdot \sigma_{\square} + c_3 \cdot \sigma_z + c_4 \cdot \varepsilon + c_5 \cdot W$$

در این رابطه پارامترهای ρ_{excess} ، σ_{θ} ، σ_z ، ε و W به ترتیب راکتیویته‌ی اضافی قلب راکتور، تنش محیطی غلاف، تنش محوری غلاف، درصد کرنش غلاف و وزن غلاف می‌باشند. تنش‌ها و کرنش غلاف توسط نرم‌افزار ABAQUS در EOL محاسبه شده‌اند. همچنین c_1 ، c_2 ، c_3 ، c_4 و c_5 ضرایب وزنی به منظور یکسان‌سازی اثرات پارامترهای مختلف بر روی تابع هزینه هستند و به ترتیب برابر با عکس میانگین راکتیویته‌ی اضافی، عکس میانگین تنش محیطی غلاف، عکس میانگین تنش محوری غلاف، عکس میانگین درصد کرنش غلاف و عکس میانگین وزن غلاف هستند.

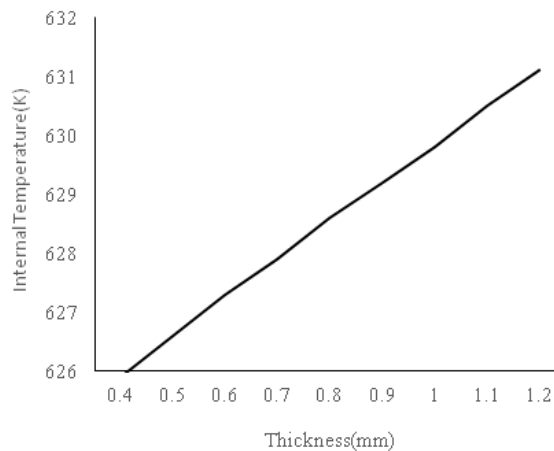
نتایج و بحث:

شکل (۳) تغییرات k_{eff} را بر حسب ضخامت برای غلاف‌های Zircaloy-4، SiC و SS304L محاسبه شده توسط کد MCNPX نشان می‌دهد. همانگونه که مشاهده می‌شود، با افزایش ضخامت غلاف‌ها، مقدار k_{eff} کاهش می‌یابد. همچنین، تغییرات k_{eff} برای دو غلاف Zircaloy-4 و SiC تقریباً یکسان است. شکل (۴) و (۵) نیز به ترتیب تغییرات دمای داخلی و کرنش غلاف Zircaloy-4 را بر حسب ضخامت‌های مختلف در EOL توسط کد FRAPCON نشان می‌دهند. همانگونه که مشاهده می‌شود، افزایش ضخامت باعث افزایش دما و کاهش مقدار کرنش می‌شود. شکل (۶) تغییرات تنش محیطی بیشینه بر حسب فشار داخلی توسط کد FRAPCON و نرم‌افزار ABAQUS را برای غلاف

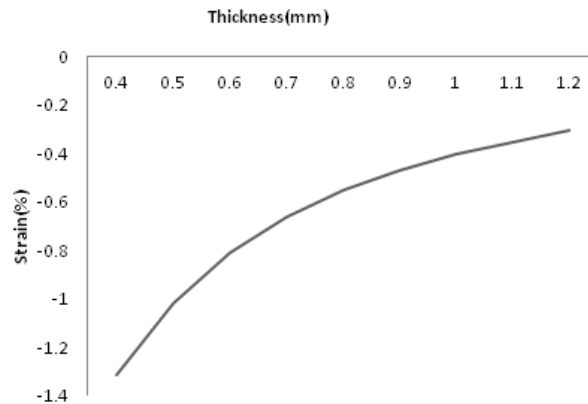
Zircaloy-4 در ضخامت $0/8$ mm نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که رفتار مدل‌های FRAPCON و ABAQUS تقریباً یکسان بوده و حداکثر خطا کمتر از ۱۰٪ است.



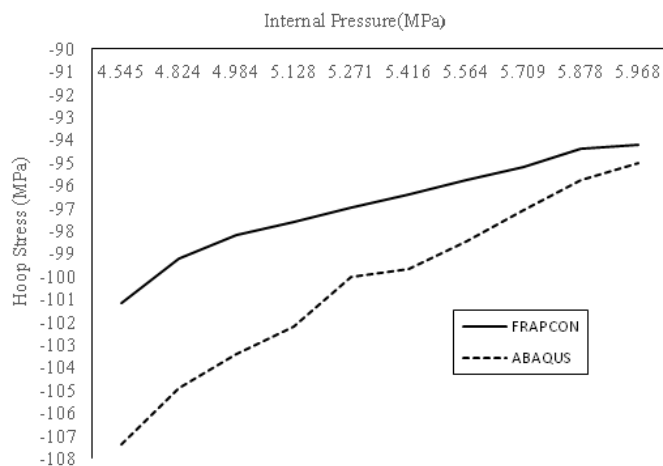
شکل (۳): تغییرات k_{eff} بر حسب ضخامت برای غلاف‌های Zircaloy-4، SS304L و SiC



شکل (۴): دمای متوسط غلاف Zircaloy-4 بر حسب ضخامت در EOL

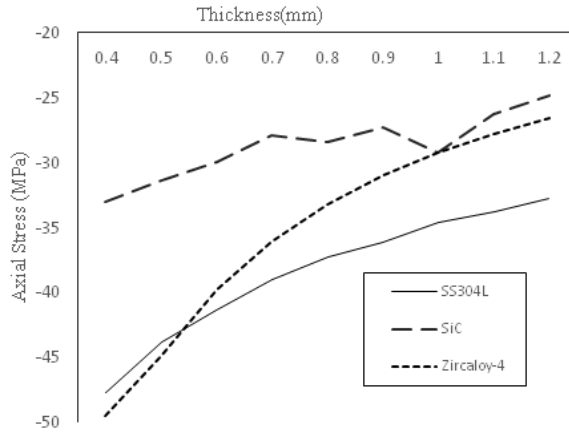


شکل (۵): کرنش غلاف Zircaloy-4 بر حسب ضخامت در EOL

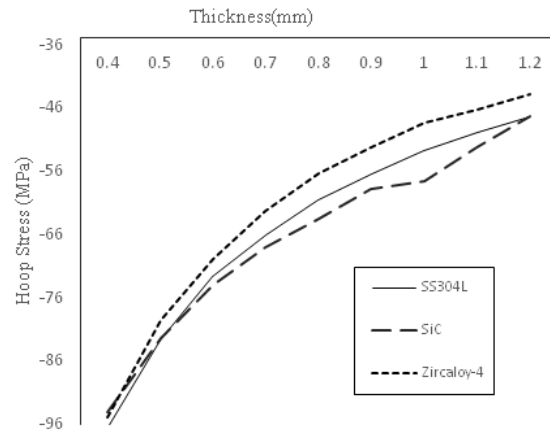


شکل (۶): تنش محیطی بیشینه بر حسب فشار داخلی غلاف زیرکالوی ۴ در ضخامت 0.4 mm توسط FRAPCON و ABAQUS

در ادامه دو غلاف دیگر توسط نرم‌افزار ABAQUS شبیه‌سازی شدند. تغییرات تنش محیطی و محوری بیشینه بر حسب ضخامت‌های مختلف غلاف‌ها در EOL در شکل (۷) نشان داده شده است. از لحاظ مکانیکی هر چه تنش کمتری به غلاف وارد شود، طول عمر آن افزایش می‌یابد. تغییرات تنش محوری بر حسب فشار نیز به همین صورت خواهد بود. افزایش ضخامت غلاف منجر به کاهش تنش‌ها و کرنش‌ها می‌گردد. مشاهده می‌شود که با افزایش ضخامت، مقدار تنش محیطی و محوری بیشینه غلاف کاهش یافته است.



ب



الف

شکل (۷): تغییرات (الف) تنش محیطی بیشینه و (ب) تنش محوری بیشینه بر حسب ضخامت‌های مختلف غلاف‌های

SiC, Zircaloy-4 و SS304L در EOL

انتخاب غلاف بهینه بر اساس نوع و ضخامت، مطابق رابطه (۱) انجام شد. در جدول (۲) نتایج تابع هزینه (C.F.) برای غلاف‌های SiC, Zircaloy-4 و SS304L در ضخامت‌های مختلف آورده شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود، غلاف SiC مقدار کمینه را دارد.

جدول (۲): نتایج تابع هزینه برای غلاف‌های SiC, Zircaloy-4 و SS304L در ضخامت‌های مختلف

ضخامت غلاف (mm)		۰/۴	۰/۵	۰/۶	۰/۷	۰/۸	۰/۹	۱	۱/۱	۱/۲
Cost Function	Zircaloy-4	۶/۴۵۷	۵/۸۴۳	۵/۱۵۸	۵/۳۴۷	۵/۲۵۸	۵/۳۵۱	۵/۴۳۵	۵/۸۵۳	۵/۸۲۸
	SS304L	۵/۵۱۳	۵/۲۴۰	۵/۱۸۶	۵/۳۰۰	۵/۵۰۲	۵/۸۴۰	۶/۳۱۴	۶/۹۷۷	۷/۹۱۱
	SiC	۴/۰۷۱	۳/۸۱۰	۳/۶۷۱	۳/۵۸۳	۳/۶۱۶	۳/۶۲۰	۳/۷۷۶	۳/۷۵۲	۳/۷۸۵

نتیجه‌گیری:

در این تحقیق، تغییرات ضخامت برای ۳ غلاف مختلف در یک راکتور نوعی SMR بررسی شدند. مشاهده شد افزایش ضخامت غلاف منجر به کاهش تنش‌ها و کرنش‌ها در آن می‌شود. غلاف ضخیم‌تر، حجم سوخت را کاهش می‌دهد؛ و این امر نیاز به غنای سوخت بالاتر را افزایش می‌دهد تا مقدار کل ماده شکاف در حجم کاهش یافته حفظ شود. بنابراین، برای تعیین غلاف مناسب باید اثر آن بر روی حجم سوخت و غلاف نیز در نظر گرفته شود. در نهایت پس از بهینه‌سازی به کمک تابع هزینه مناسب، غلاف SiC با ضخامت ۰/۷ mm به عنوان غلاف مناسب و بهینه انتخاب شد.



منابع:

- [1] Jacoby, M. Coming back to nuclear energy. *Chemical & engineering news*, 87(34), 14-18, 2009.
- [2] Azevedo, C. R. D. F. Selection of fuel cladding material for nuclear fission reactors. *Engineering Failure Analysis*, 18(8), 1943-1962, 2011.
- [3] Duan, Z., Yang, H., Satoh, Y., Murakami, K., Kano, S., Zhao, Z., Abe, H. Current status of materials development of nuclear fuel cladding tubes for light water reactors. *Nuclear Engineering and Design*, 316, 131-150, 2017.
- [4] Rebak, R. B., Terrani, K. A., Gassmann, W. P., Williams, J. B., Ledford, K. L. Improving nuclear power plant safety with FeCrAl alloy fuel cladding. *MRS Advances*, 2(21-22), 1217-1224, 2017.
- [5] Frost, B. T., Nuclear Fuel Elements, Argonne National Laboratory, Pergamon Press, N.Y. 1982.
- [6] Alat, E., Motta, A. T., Comstock, R. J., Partezana, J. M., Wolfe, D. E. Multilayer (TiN, TiAlN) ceramic coatings for nuclear fuel cladding. *Journal of Nuclear Materials*, 478, 236-244, 2016.
- [7] El-Wakil, M. M. Nuclear energy conversion. 1971.
- [8] Hallstadius, L., Johnson, S., Lahoda, E. Cladding for high performance fuel. *Progress in Nuclear Energy*, 57, 71-76, 2012.
- [9] Pan, G., C. J. Long, A. M. Garde, A. R. Atwood, J. P. Foster, R. J. Comstock, L. Hallstadius, D. L. Nuhfer, R. Baranwal. Advanced material for PWR application: AXIOM cladding. In *Proceedings of International Conference on Light Water Reactor Fuel Performance (Top Fuel 2010)*. La Grange Park, IL: ANS, 2010.
- [10] Sukjai, Y. Silicon carbide performance as cladding for advanced uranium and thorium fuels for light water reactors. PhD diss., Massachusetts Institute of Technology, 2014.
- [11] Mirian, S.F., Ayoobian, N. Investigations on a typical small modular PWR using coupled neutronic-thermal-mechanical evaluation to achieve long-life cycle-length. *Progress in Nuclear Energy*, 2019.