اثر هموژن سازی هندسه در محاسبات بحرانیت راکتور ماژولار کم قدرت نوعی با سوخت FCM

کمال پور، سارا[۱]–صالحی، علی اکبر[۲]– خلفی، حسین[۲]–متاجی کجوری، نعیم الدین[۲]–جهانفرنیا، غلامرضا[۱]

(۱) دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران، گروه مهندسی هسته ای، تهران، ایران.

(۲) نام سازمان انرژی اتمی ایران

چکیده:

سوخت FCM به عنوان یکی از سوخت های مقاوم در برابر حادثه برای استفاده در راکتورهای آب سبک پیشنهاد شده است. این سوخت از ذرات TRISO تشکیل شده که به صورت تصادفی در ماتریس SiC پراکنده شدند. ساختار هتروژن سوخت FCM، مدلسازی و انجام محاسبات نوترونیک را پیچیده و زمان بر کرده است. در این مطالعه، اثر مدلسازی هموژن سوخت FCM با استفاده از کدهای MCNPX، WIMS و CITATION بر روی پارامترهای ضریب تکثیر موثر و فاکتور پیک قدرت شعاعی بررسی شده و با نتایج مدلسازی هتروژن با استفاده از کد MCNPX مقایسه شده است. مدلسازی هموژن سوخت FCM علاوه بر کاهش زمان محاسبات، نتایج قابل قبولی ارائه می دهد.

کلمات کلیدی: *سوخت FCM، مدلسازی هتروژن، مدلسازی هموژن، کد MCNPX، ضریب تکثیر موثر.*

Effect of geometry homogenization of FCM fuel in a typical small modular reactor criticality calculation

Sarah Kamalpour[(1)], Ali Akbar Salehi[(2)], Hossein Khalafi[(2)], Naimeddin Mataji-Kojouri[(2)], Gholamreaza Jahanfarnia[(1)]

(1) Department of Nuclear Engineering, Science and Research branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.
(2) Atomic Energy Organization of Iran (AEOI), Islamic Republic of Iran.

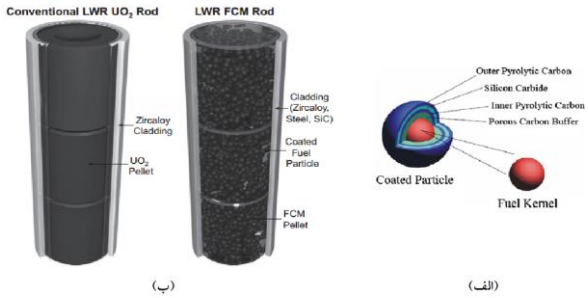
Abstract:

Fully ceramic microencapsulated (FCM) fuel is an enhanced accident tolerant fuel, proposed to use in light water reactors. FCM fuel structure consists of TRSIO particles, dispersed randomly in SiC matrix. Heterogeneous structure of FCM fuel makes neutronic analysis complex and time consuming. In the present paper, geometry homogenization effect on criticality calculations were investigated. Effective multiplication factor and radial power peaking factor were calculated using MCNPX, WIMS and CITATION codes. FCM fuel geometry homogenization presents acceptable preliminary results and reduces calculation time.

Keywords: FCM fuel, homogeneous model, heterogeneous model, MCNPX code and effective multiplication factor.

مقدمه :

سوخت FCM[۱]، یکی از انواع سوخت مقاوم در برابر حادثه می باشد که توسط آزمایشگاه ملی Oak Ridge پیشنهاد شده است. همان طور که در شکل ۱ نشان داده شده، سوخت هسته ای توسط چند لایه مختلف احاطه شده و ذره TRISO را شکل می دهد. سوخت FCM حاوی ذرات TRISO می باشد که به صورت تصادفی در ماتریس SiC پراکنده شده اند [۱].



شکل شماره (۱) الف) سوخت ذره ای و ب) مقایسه ساختار سوخت UO_2 مرسوم و سوخت FCM

در این مطالعه، اثر مدلسازی هموژن سوخت FCM بر روی دو پارامتر کلیدی ضریب تکثیر موثر و فاکتور پیک قدرت شعاعی مورد بررسی قرار گرفته است. پیچیدگی ساختار سوخت FCM، بررسی عملکرد نوترونیک آن را با استفاده از کدهای موجود دشوار ساخته و مطالعه بر روی اثر هموژن سازی هندسه به منظور تسهیل برای مطالعات بیشتر در این زمینه ضروری به نظر می رسد.

روش کار :

۱. انتخاب سوخت FCM

در طی توسعه سوخت های مقاوم در برابر حوادث ماورای طرح در LWR[۲] ها، ارزیابی ترکیب های سوخت دیگر به غیر از اورانیوم اکسید نیز مطرح شده است. ذرات TRISO و ماتریس SiC در برابر اکسیداسیون و انتشار محصولات شکافت طی حوادث مبنای طرح بسیار مقاوم عمل می کنند. دانه های سوخت UN در ذرات TRISO با چگالی بالا، امکان بارگذاری بالاتر مواد شکافان را نسبت به UO_2 فراهم می کنند که در سوخت FCM پیشنهادی مورد نیاز است [۲]. ابعاد دانه و لایه های پوششی ذره TRISO با سوخت UN برای به کارگیری در راکتورهای LWR در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول شماره (۱): طراحی سوخت FCM پیشنهادی در این مطالعه

ویژگی ها	سوخت ۱	سوخت ۲
قطر دانه سوخت (µm)	۶۵۰	۸۰۰
سوخت	UN	
لایه های پوششی	PyC، PyC، SiC و PyC	

[۱] Fully Ceramic Microencapsulated
[۲] Light Water Reactor

ضخامت لایه ها (μm)	۷۵، ۱۰، ۳۵ و ۱۰
نسبت بسته بندی	٪۴۸

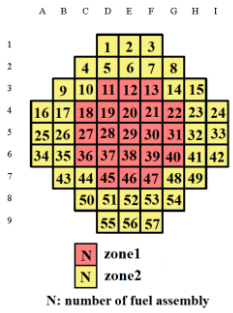
۲. بازطراحی قلب راکتور SMART با سوخت FCM

SMART[۱]، یک راکتور آب تحت فشار یکپارچه با قدرت حرارتی ۳۳۰ MWth و اولین راکتور ماژولار کم قدرت زمینی با طراحی LWR می باشد که موفق به اخذ گواهینامه شده است و به همین دلیل به عنوان راکتور مرجع انتخاب شده است[۳]. قلب راکتور SMART از ۵۷ بسته سوخت تشکیل شده است که طراحی و عملکرد آن بر پایه چیدمان ۱۷×۱۷ میله های سوخت می باشد. هر کدام از بسته های سوخت حاوی ۲۶۴ میله سوخت با ارتفاع فعال ۲ m، ۲۴ لوله راهنما برای میله های کنترل و یک لوله ابزار دقیق می باشد که به صورت مکانیکی با چیدمان مربعی کنار هم قرار گرفته اند[۴]. آرایش قلب راکتور در شکل ۲ نشان داده شده است. بازطراحی قلب راکتور SMART با استفاده از سوخت FCM با حفظ هندسه و چیدمان قلب مرجع صورت گرفته به طوری که میزان بارگذاری مواد شکافان، یکسان باشد. با توجه به این که بخشی از فضای سوخت FCM توسط ماتریس SiC پر می شود، دستیابی به مقدار یکسانی از مواد شکافان (U^{235}) در مقایسه با سوخت UO_2 مرسوم نیازمند افزایش غنا می باشد. غنای متوسط قلب برای راکتور SMART با دو نوع سوخت FCM پیشنهادی ۱ و ۲ به ترتیب برابر با ۷/۰۲ و ۵/۹۵۸ می باشد.

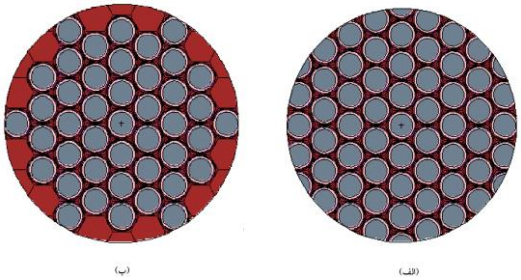
۲-۱ مدلسازی هتروژن راکتور با سوخت FCM

قلب طراحی شده با سوخت FCM با استفاده از کد MCNPX به صورت هتروژن مدلسازی شده است. اولین قدم در طراحی سوخت FCM، مدلسازی یک ذره TRISO می باشد. سپس شبکه ای سه بعدی با سطح مقطع شش وجهی از این ذرات شکل گرفته که در استوانه ای با قطر قرص سوخت محدود شده است. حجمی از استوانه که توسط ذرات TRISO اشغال نشده، توسط SiC پر شده است[۵]. شکل ۳ سطح مقطعی از میله سوخت FCM شبیه سازی شده در MCNPX را نشان می دهد. روشن است که شکل۳ (الف) که در آن بخشی از دانه ها در مرز استوانه قطع شده، نمایانگر واقعیت سوخت FCM نمی باشد. شکل ۳ (ب) که تنها حاوی ذرات کامل می باشد، مدلسازی بهتری از سوخت FCM است. با توجه به این که دانه های کمتری در شکل ۳ (ب) به شکل ۳ (الف) وجود دارد، فاصله ذرات TRISO در راستای محوری باید کاهش پیدا کند تا مقدار صحیح نسبت بسته بندی بدست آید.

[۱] System-integrated Modular Advanced ReacTor



شکل شماره (۲) چیدمان قلب راکتور SMART

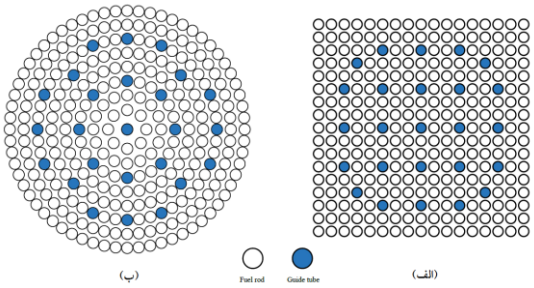


شکل شماره (۳) مدلسازی میله سوخت FCM. الف) با در نظر گرفتن ذرات ناقص ، ب) حذف ذرات ناقص

اثر مدلسازی ذرات TRISO کامل و حذف ذرات TRISO که بخشی از آن با توجه به ساختار شبکه در هندسه سوخت حذف شده در مقالات مختلفی بررسی شده است[۶]. مدلسازی مشابه با شکل ۳ (ب)، نتایج نزدیک تری به واقعیت را نشان می دهد که در این تحقیق نیز از این مدلسازی بهره گرفته شده است. لازم به ذکر است که ذرات TRISO به صورت تصادفی در میله سوخت پراکنده شده اند اما با توجه به اثر جزئی پراکندگی ذرات به صورت تصادفی یا منظم که در مقالات مختلف گزارش شده، چیدمان منظم ذرات TRISO انتخاب شده تا زمان محاسبات MCNPX کاهش یابد[۶].

۲-۲ مدلسازی هموژن راکتور با سوخت FCM

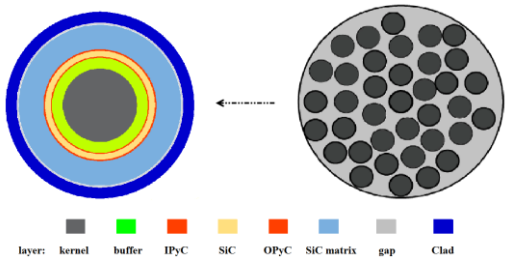
قلب طراحی شده با استفاده از کدهای WIMS-D/4 و CITATION به صورت هموژن مدلسازی شده است. ثابت های گروهی هموژن شده سلولی با استفاده از مدل خوشه ای در کد WIMS-D/4 تولید شده و سپس نتایج آن در اختیار کد CITATION قرار گرفته تا با استفاده از معادله پخش، پارامترهای نوترونیک مورد نظر محاسبه شود. در مدل خوشه ای کل بسته سوخت با آرایش ۱۷ × ۱۷ میله های سوخت در کد WIMS-D/4 مدلسازی شده است. میله های سوخت در حلقه هایی در آرایش خوشه ای قرار گرفته و هتروژن بودن آرایش میله ها حفظ شده است. شعاع معادل حلقه ها از مرکز با نسبت مقایسه ای سطح مربع و سطح دایره محاسبه شده است[۷]. شکل ۴ آرایش خوشه ای معادل با بسته سوخت مربعی را نشان می دهد.



شکل شماره (۴) آرایش معادل در کد WIMS. الف) بسته سوخت،ب) مدل خوشه ای بسته سوخت

کد WIMS-D/d قادر به مدلسازی ساختار هتروژن ذرات سوخت TRISO در ماتریس SiC در هر میله سوخت نمی باشد. مدلسازی میله های سوخت FCM مطابق با شکل ۵ و با در نظر گرفتن شعاع معادل برای هر جزء تشکیل دهنده به صورت هموژن انجام شده است که عبارتند از: دانه سوخت، لایه بافر، لایه IPyC، لایه SiC، لایه OPyC، ماتریس SiC، گپ و غلاف[۷].

مدلسازی قلب با استفاده از هندسه هموژن میله سوخت FCM در شکل ۵ و مجتمع های سوخت با آرایش مربعی در شکل ۴ (الف) با بهره گیری از کد MCNPX و کتابخانه ENDF/B-VII صورت گرفته است. سپس، نتایج با مدلسازی انجام شده توسط کد MCNPX با چیدمان هتروژن ذارت TRISO مقایسه شده است.



شکل شماره (۵) سطح مقطع میله سوخت FCM مدلسازی شده در کد WIMS

نتایج :

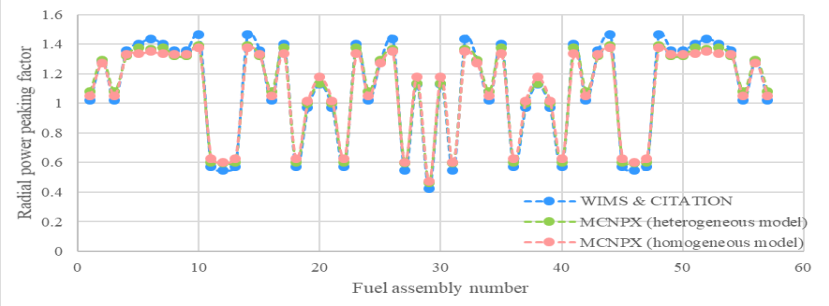
ضریب تکثیر موثر بدست آمده توسط کد MCNPX و کدهای WIMS-D/4 و CITATION برای راکتور با دو سوخت FCM پیشنهادی جدول ۱ در جدول ۲ گزارش شده است.

جدول شماره (۲) ضریب تکثیر موثر محاسبه شده توسط کد MCNPX و کدهای WIMS-d/4 و CITATION

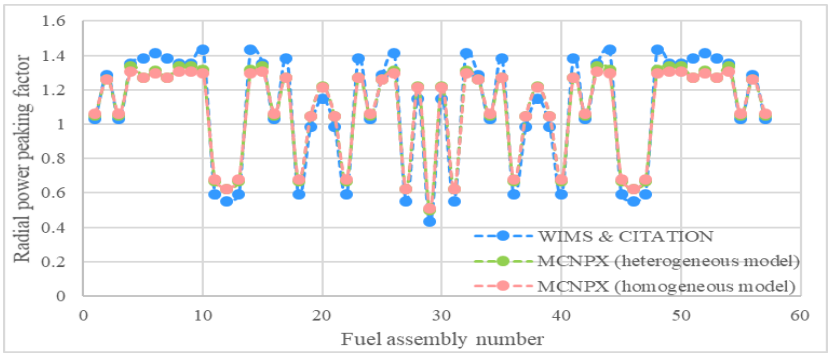
سوخت / ضریب تکثیر موثر	MCNPX (مدل هتروژن)	MCNPX (مدل هموژن)	WIMS-D/4 و CITATION
سوخت ۱	۱/۵۵۰۰۳ ± ۰/۰۰۰۱۹	۱/۵۱۹۹۱ ± ۰/۰۰۰۱۸	۱/۵۲۶۷۷
سوخت ۲	۱/۵۲۷۸۳ ± ۰/۰۰۰۱۸	۱/۵۰۶۹۱ ± ۰/۰۰۰۱۸	۱/۵۱۰۹۲

اختلاف مقدار k_{eff} بدست آمده برای مدل هموژن با استفاده از کد MCNPX و کدهای WIMS-D/4 و CITATION، برای سوخت ۱ و۲ به ترتیب برابر با ۶۸۶ pcm و ۳۹۹ pcm می باشد که تفاوت موجود ناشی از تفاوت روش حل در دو کد انتخاب شده است. مقدار k_{eff} بدست آمده برای مدل هتروژن نسبت به مدل هموژن، مقدار بیشتری را نشان می دهد. اختلاف موجود ناشی از دو دلیل عمده می باشد: (۱) در آرایش هموژن انتخاب شده، اثر خودحفاظی مکانی افزایش پیدا می کند. افزایش اثر خودحفاظی مکانی، میزان k_{eff} را کاهش می دهد. علاوه براین، (۲) هندسه هتروژن موجود در ساختار واقعی سوخت FCM، میزان کندکنندگی را افزایش داده و منجر به دستیابی k_{eff} بالاتری می شود. به این ترتیب می توان گفت که پایین تر بودن میزان ضریب تکثیر محاسبه شده در مدل هموژن، ناشی از اثر غالب خودحفاظی مکانی بیشتر و کندکنندگی کمتر می باشد. اختلاف مقدار k_{eff} بیشتر بین دو مدل هموژن و هتروژن برای سوخت ۱ نسبت به سوخت ۲ مشاهده می شود که ناشی از اثر خودحفاظی مکانی کمتر سوخت ۱ به دلیل قطر دانه TRISO کوچکتر می باشد.

شکل ۶ و ۷ به ترتیب فاکتور پیک قدرت شعاعی برای بسته های سوخت ۱ و ۲ را با استفاده از دو مدل هموژن و هتروژن نشان می دهد. شماره بسته های سوخت برای قلب راکتور SMART در شکل ۲ نشان داده شده است. فاکتور پیک قدرت شعاعی بدست آمده با استفاده از دو مدل، روند یکسانی را نشان می دهد که بیانگر قابلیت مدل هموژن در محاسبه این پارامتر می باشد.



شکل شماره (۶) فاکتور پیک قدرت شعاعی در قلب راکتور SMART برای سوخت ۱



شکل شماره (۷) فاکتور پیک قدرت شعاعی در قلب راکتور SMART برای سوخت ۲

بحث ونتیجه گیری :

سوخت FCM یکی از سوخت های مقاوم در برابر حادثه می باشد که به منظور بهبود عملکرد حرارتی راکتورهای آب سبک پیشنهاد شده است. ساختار هتروژن و پیچیده سوخت FCM یکی از چالش های موجود به منظور بررسی عملکرد نوترونیک آن می باشد. در این مطالعه، محاسبات بحرانیت برای قلب راکتور SMART با جایگزین ساختن دو سوخت FCM با ابعاد مختلف با بهره گیری از دو مدل هموژن و هتروژن صورت گرفته است. نتایج نشان می دهند که هرچند، بین مقدار ضریب تکثیر با استفاده از دو مدل هموژن و هتروژن برای سوخت FCM اختلاف وجود دارد اما می تواند تخمین مناسبی را برای محاسبات اولیه فراهم کند. علاوه بر این، مقدار و روند تغییرات فاکتور پیک قدرت شعاعی در قلب با استفاده از دو مدل هموژن و هتروژن مطابقت خوبی را نشان می دهد. ساده سازی ساختار هتروژن سوخت FCM و حذف ذرات TRISO پراکنده شده در ماتریس SiC در میله سوخت، زمان محاسبات انجام شده در کد MCNPX با استفاده از مدل هموژن را تقریباً به یک چهارم زمان لازم برای انجام محاسبات با استفاده از مدل هتروژن کاهش می دهد.

مراجع :

[1] Yoonhee Lee, Nam Zin Cho., Steady- and transient-state analyses of fully ceramic microencapsulated fuel loaded reactor core via two-temperature homogenized thermal-conductivity model. Annals of Nuclear Energy 76 (2015) 283-296.
[2] T.M. Besmann, M.K. Ferber, H.-T. Lin, B.P. Collin., Fission product release and survivability of UN-kernel LWR TRISO fuel. Journal of Nuclear Materials 448 (2014)412–419.
[3] M.V. Ramana, Laura Berzak Hopkins, Alexander Glaser, Licensing small modular reactors, 2013, Energy 61 (2013) 555e564.
[4] Mario D. Carelli and Daniel T. Ingersoll, Handbook of Small Modular Nuclear Reactors, 2015, Woodhead Publishing.
[5] Volkan ¸Seker, Üner Çolak., HTR-10 full core first criticality analysis with MCNP. Nuclear Engineering and Design 222 (2003) 263–270.
[6] Forrest B. Brown, William R. Martin, Wei Ji, Jeremy L. Conlin, John C. Lee., STOCHASTIC GEOMETRY AND HTGR MODELING WITH MCNP5. Chattanooga, Tennessee, April 17–21, 2005, on CD-ROM, American Nuclear Society, LaGrange Park, IL (2005).
[7] Ammar Khan, Anwar Hussain, Haseebur Rehman, Masroor Ahmad., Neutronics analysis of a small PWR utilizing carbon coated fuel with diffusion theory code PRIDE. Progress in Nuclear Energy 75 (2014) 10-14.