



## آنالیز حرارتی سوخت FCM در راکتور ماژولار کم قدرت نوعی

کمال پور، سارا<sup>(۱)</sup> - صالحی، علی اکبر<sup>(۲)</sup> - خلفی، حسین<sup>(۲)</sup> - متاجی کجوری، نعیم الدین<sup>(۲)</sup> - جهانفاریا، غلامرضا<sup>(۱)</sup>

(۱) دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران، گروه مهندسی هسته‌ای، 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 که بر پایه تکنولوژی اثبات شده سوخت ذره ای TRISO در راکتورهای گازی با دمای بالا می باشد. در این مطالعه عملکرد حرارتی سوخت FCM در یک راکتور ماژولار کم قدرت نوعی طی شرایط پایا و گذرا بررسی شده است. توزیع دما با استفاده از کدهای RELAP و COMSOL برای سوخت FCM محاسبه و نتایج با توزیع دما در سوخت UO<sub>2</sub> مرسوم مقایسه شده است. برای بررسی توزیع دما در ساختار پیچیده سوخت FCM از روش آنالیز چند مقیاسی بهره گرفته شده است. نتایج، بهبود دمایی قابل توجهی را برای سوخت FCM نشان می دهند.

کلمات کلیدی: راکتور ماژولار کم قدرت، سوخت FCM، حادثه تزریق راکتیویته، RELAP و COMSOL

## Thermal analysis of FCM fuel in a typical small modular reactor

Sarah Kamalpour<sup>(1)</sup>, Ali Akbar Salehi<sup>(2)</sup>, Hossein Khalafi<sup>(2)</sup>, Naimeddin Mataji-Kojouri<sup>(2)</sup>, Gholamreza Jahanfarnia<sup>(1)</sup>

(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.

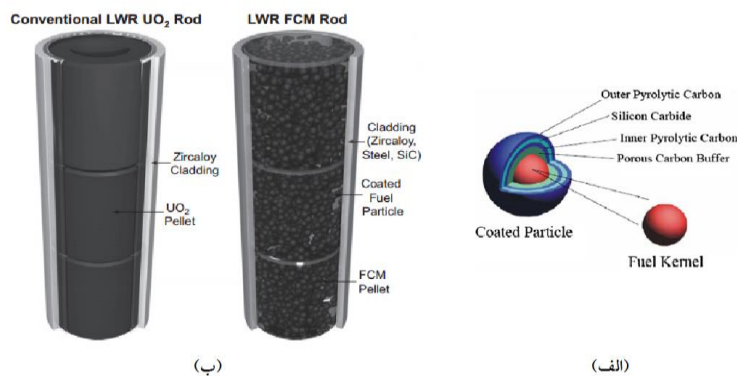
Deployment of fully ceramic microencapsulated (FCM) fuel in light water small modular reactors (SMRs) provides potential of an extremely safe reactor design. Current paper focuses on thermal modelling of FCM fuel under steady state and transient conditions. Then, comparative analysis of FCM fuel pin temperature distribution versus conventional UO<sub>2</sub> fuel is performed in typical SMR. Multi-scale approach is selected to model complicated heterogeneous FCM fuel structure. Results show significant fuel center temperature decrease due to thermos-physical properties improvement.

Keywords: small modular reactor, FCM fuel, reactivity insertion accident, RELAP and COMSOL.

### مقدمه:

حادثه اخیر در سه راکتور هسته ای فوکوشیما در ژاپن، لزوم افزایش ایمنی در راکتورهای هسته ای آب سبک را روشن ساخت. بر این اساس، افزایش ارتقای ایمنی با بهره گیری از سوخت های مقاوم در برابر حادثه

مورد توجه قرار گرفت. سوخت <sup>۱</sup>FCM، یکی از انواع سوخت های 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 با 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. ساختار غیر همگن سوخت پیشنهادی نسبت به سوخت اکسیدی مرسوم مزایای مختلفی دارد که مهم ترین آنها بهبود قابل توجه هدایت حرارتی می باشد [۱]. بررسی عملکرد سوخت و بویژه آنالیز حرارتی آن، در ایمنی راکتور ضروری است. با توجه به آنالیز حرارتی پیچیده سوخت FCM به دلیل ساختار غیر همگن آن، مطالعات مختلفی در زمینه آنالیز حرارتی با استفاده از مدل همگن انجام شده است. در این زمینه می توان به مدل همگن بدست آمده ناشی از اعمال کسر حجمی مواد در میله سوخت اشاره کرد که این روش برای حوادث گذرا مطلوب نمی باشد [۲]. روش دیگر به کار گرفته شده، استفاده از مدل همگن با در نظر گرفتن دو هدایت حرارتی معادل می باشد. یک هدایت حرارتی به سوخت در دمای سوخت اختصاص داده شده و یک هدایت حرارتی برای سایر مواد تشکیل دهنده میله سوخت در یک دمای متوسط در نظر گرفته شده است [۱]. اگرچه در این روش، پروفایل دمایی بدست آمده تخمین بهتری از دمای سوخت را ارائه می کند اما نمی تواند یک پروفایل دمایی واقعی از سوخت FCM را نشان دهد.



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

مدلسازی کل قلب با سوخت FCM به صورت غیر همگن عملاً امکان پذیر نمی باشد و استفاده از مدل همگن، منجر به پیش بینی پایین تر دمای سوخت نسبت به مقدار واقعی می شود. راهکار پیشنهاد شده در این مطالعه، استفاده از چند مقیاس<sup>۲</sup> برای آنالیز حرارتی راکتور می باشد. در این مدل، محاسبات در مقیاس قلب به صورت همگن انجام می شود. اما با کاهش مقیاس به یک میله سوخت، محاسبات به صورت غیر همگن و با در نظر گرفتن ساختار واقعی سوخت FCM انجام می گیرد. به این ترتیب می توان توزیع دقیق دما در میله سوخت و همین طور لایه های مختلف ذرات TRISO را محاسبه کرد. محاسبات دما برای قلب راکتور با

<sup>۱</sup> Fully Ceramic Microencapsulated  
<sup>۲</sup> Multi-scale



سوخت  $UO_2$  مرسوم و سوخت FCM ارائه شده تا امکان مقایسه تغییرات دما ناشی از بهبود خواص ترموفیزیکی سوخت FCM فراهم شود.

### روش کار:

#### ۱. انتخاب سوخت FCM

عملکرد سوخت به شدت وابسته به پارامترهای مربوط به سوخت مثل فرسایش سوخت، دما، فلوئنس نوترون سریع و چگالی قدرت می باشد که به لحاظ فضایی در قلب متفاوت است. ضخامت لایه ها و ترکیب سوخت به شدت بر روی احتمال شکست سوخت TRISO و قابلیت حفظ محصولات شکافت در طی شرایط فعالیت عادی و حادثه اثرگذار است [۳]. ابعاد و ویژگی های سوخت FCM پیشنهادی در جدول ۱ نشان داده شده است. ابعاد سوخت TRISO انتخاب شده از مرجع ۴ انتخاب شده که نتایج حاصل از ارزیابی های ترمومکانیکی برای به کارگیری این سوخت در راکتورهای آب سبک نشان می دهد که می تواند تا دمای  $1600^{\circ}C$  در فرسایش سوخت معادل با  $FIMA^1$  ۱۹٪ بدون هیچ گونه شکستی در ساختار سوخت فعالیت کند [۴]. ابعاد میله سوخت انتخاب شده مشابه با ابعاد میله سوخت به کارگرفته شده در راکتور SMART<sup>۲</sup> در نظر گرفته شده است.

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

۸۰۰	قطر دانه سوخت ( $\mu m$ )
UN	سوخت
PyC, PyC, SiC, PyC	لایه های پوششی
۱۰ و ۳۵، ۱۰، ۷۵	ضخامت لایه ها ( $\mu m$ )
٪۴۸	کسر بسته بندی
۰/۴۰۹۵۷۵	شعاع قرص سوخت (cm)
۰/۴۱۷۸۳	شعاع میله سوخت (cm)
۰/۰۵۷۱۵	ضخامت غلاف (cm)
۲۰۰	ارتفاع فعال سوخت (cm)

۲. بازطراحی قلب راکتور با سوخت FCM و محاسبه توزیع قدرت برای استفاده در آنالیز حرارتی SMART، یک راکتور آب تحت فشار یکپارچه با قدرت حرارتی  $330\text{ MWth}$  و اولین راکتور ماژولار کم قدرت زمینی<sup>۳</sup> با طراحی LWR<sup>۴</sup> می باشد که موفق به اخذ گواهینامه شده است و به همین دلیل به عنوان راکتور مرجع انتخاب شده است [۵]. بازطراحی قلب راکتور SMART با استفاده از سوخت FCM با حفظ

<sup>۱</sup> Fission per Initial Heavy Metal Atoms  
<sup>۲</sup> System-integrated Modular Advanced Reactor  
<sup>۳</sup> Land based Small Modular Reactor  
<sup>۴</sup> Light Water Reactor



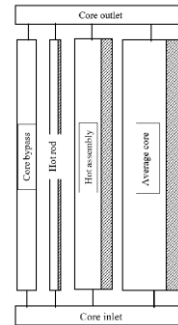
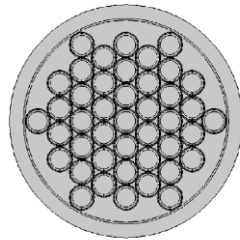
هندسه و چیدمان قلب مرجع صورت گرفته، به طوری که میزان بارگذاری مواد شکافان یکسان باشد. مدل‌سازی قلب راکتور SMART با استفاده از کد MCNPX 2.6 انجام شده است تا امکان مدل‌سازی غیر همگن سوخت FCM فراهم شود. از مدل‌سازی نوترونیک برای محاسبه توزیع قدرت در آنالیز حرارتی بهره گرفته شده است. فاکتور پیک قدرت ( $PPF^1$ ) برای داغ‌ترین میله سوخت برای قلب راکتور SMART با سوخت  $UO_2$  مرسوم و سوخت FCM به ترتیب برابر با  $2/14$  و  $2/06$  می باشد.

۳. شیوه مدل‌سازی برای انجام آنالیز حرارتی

برای مدل‌سازی ترموهیدرولیکی قلب با استفاده از سوخت  $UO_2$  مرسوم و مدل‌سازی همگن سوخت FCM از کد RELAP استفاده شده است. مدل ساده شده قلب راکتور در شکل ۲ نشان داده شده است که در آن چهار کانال در نظر گرفته شده که نمایانگر میله داغ، مجتمع داغ، متوسط قلب و core-bypass می باشد که به ۹ نود محوری تقسیم بندی شده اند. در کد RELAP از خواص ترموفیزیکی موثر سوخت بهره گرفته شده که از مدل Chiew و Glandt استفاده شده که بهبود یافته معادله ماکسول می باشد [۶]. این مدل تابعی از پارامترهای کسر بسته بندی و دما می باشد [۶]. به این صورت با استفاده از مدل همگن، اطلاعات کلی و ارزشمندی از توزیع دما در قلب ایجاد می شود.

به منظور بررسی مدل غیر همگن توزیع دما در سوخت FCM از کد COMSOL استفاده شده است. ساختار غیر همگن سوخت FCM به صورت دو بعدی با استفاده از کد المان محدود COMSOL مدل شده و توزیع دما برای بخش مرکزی داغ‌ترین میله سوخت محاسبه شده است. شکل ۳ مدل‌سازی غیر همگن سوخت FCM را نشان می دهد. لازم به ذکر است که در این مطالعه ذرات TRISO به صورت منظم و با آرایش هگزاگونال در کنار هم قرار گرفته اند اما در عمل ذرات TRISO به صورت تصادفی در میله سوخت پراکنده شده اند. در آرایش در نظر گرفته شده، دما با حاشیه ایمنی بالاتری تخمین زده می شود. این حاشیه ایمنی ناشی از پارامتری به اسم کسر بسته بندی محلی می باشد. هرچه کسر بسته بندی در میله سوخت FCM بالاتر باشد، ماتریس SiC که به صورت سینک حرارتی عمل می کند کاهش می یابد و افزایش دمای بیشتری در سوخت TRISO مشاهده می شود. کسر بسته بندی در نظر گرفته شده برای سوخت FCM، ۴۸٪ انتخاب شده که ماکزیمم مقدار کسر بسته بندی مجاز برای فعالیت ایمن سوخت گزارش شده است [۷]. هر چند با توجه به توزیع تصادفی ذرات TRISO، احتمال کسر بسته بندی بالاتر به صورت محلی وجود دارد. در مدل‌سازی انجام شده که در شکل ۳ نشان داده شده، کسر بسته بندی در مرکز سوخت FCM به صورت محلی بالاتر از کسر بسته بندی متوسط می باشد. علاوه بر این، کسر بسته بندی در لبه های میله، کمتر از کسر بسته بندی متوسط است. بنابراین دمای سوخت در ذره TRISO مرکزی، بالاترین دمای ممکن را نشان می دهد. آنالیز حرارتی سوخت در شرایط پایا و گذرای تزریق راکتیویته انجام شده است.

<sup>1</sup> Power Peaking Factor

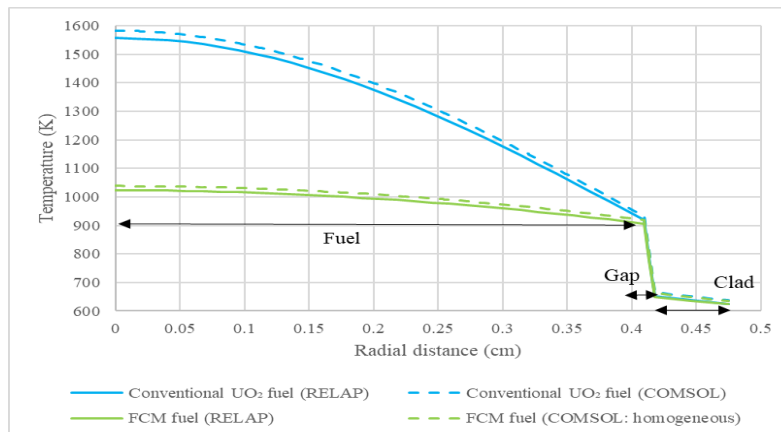


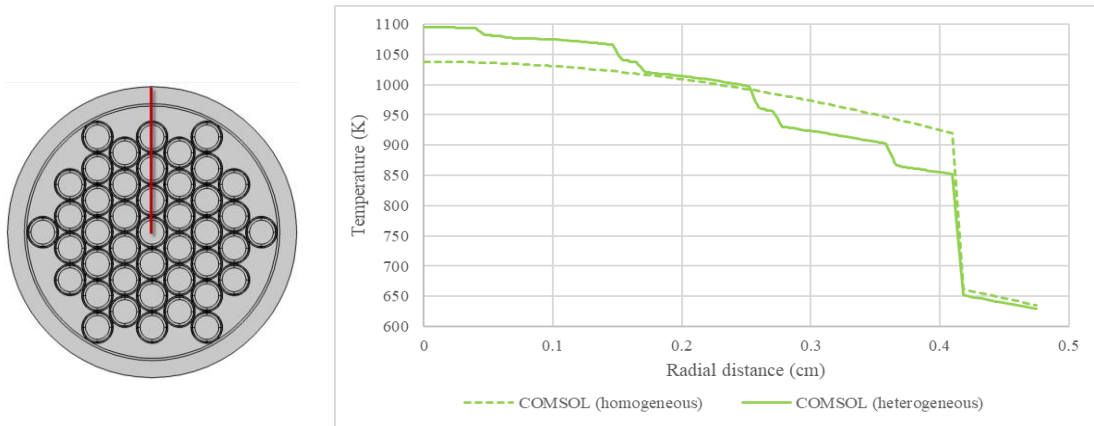
شکل شماره (۳) سطح مقطع میله سوخت FCM به صورت همگن و غیر همگن با استفاده از COMSOL

شکل شماره (۲) مدل‌سازی قلب با استفاده از RELAP

### نتایج :

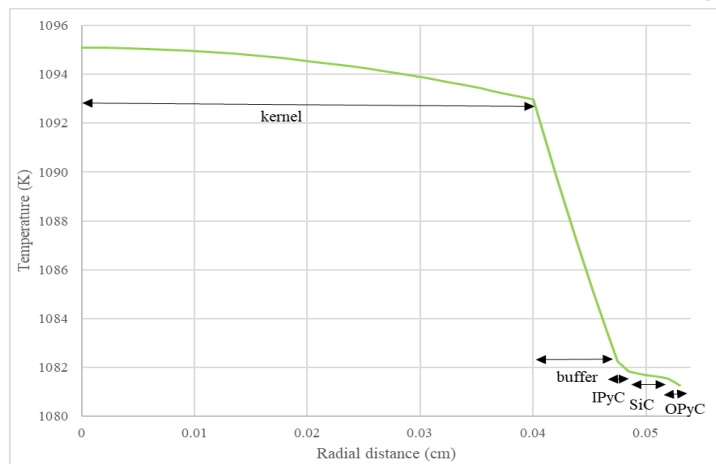
۱. مقایسه توزیع دما برای سوخت  $UO_2$  مرسوم و سوخت FCM در شرایط پایا توزیع دمایی سوخت در راستای شعاعی در ارتفاع مرکزی داغ ترین میله برای سوخت  $UO_2$  مرسوم و سوخت FCM، در شکل ۴ نشان داده شده است. تطابق نتایج بدست آمده از دو کد RELAP و COMSOL، صحت محاسبات انجام شده را نشان می دهد. افزایش دما در قرص سوخت FCM برابر با  $116\text{ K}$  می باشد که در مقایسه با  $638\text{ K}$  در سوخت  $UO_2$  مرسوم، کاهش قابل توجهی داشته است. شکل ۵ مقایسه توزیع دمای سوخت در حالت همگن و غیر همگن را نشان می دهد. توزیع دمای سوخت در حالت غیر همگن در راستای خط قرمز مشخص شده در شکل ۵ نشان داده شده که حاوی نصف ذره TRISO مرکزی و سه ذره TRISO می باشد. قله های دمایی ایجاد شده ناشی از انرژی تولید شده در دانه های ذره TRISO می باشد که در لایه های کربنی احاطه شده و ماتریس SiC کاهش می یابد. توزیع دما در لایه های ذره TRISO برای TRISO مرکزی در شکل ۶ نشان داده شده است که توزیع دما در سوخت به دلیل تولید قدرت، غیر خطی بوده و در سایر لایه های ذره TRISO، توزیع دما به صورت خطی می باشد. بیشترین گرادینان دمایی در لایه کربن متخلخل (بافر) مشاهده می شود که دارای کمترین هدایت حرارتی می باشد.





شکل شماره (۴) توزیع دمای سوخت  $UO_2$  مرسوم و سوخت FCM در حالت پایا

شکل شماره (۵) توزیع دمای سوخت FCM در راستای خط قرمز مشخص شده با مدل همگن و غیرهمگن

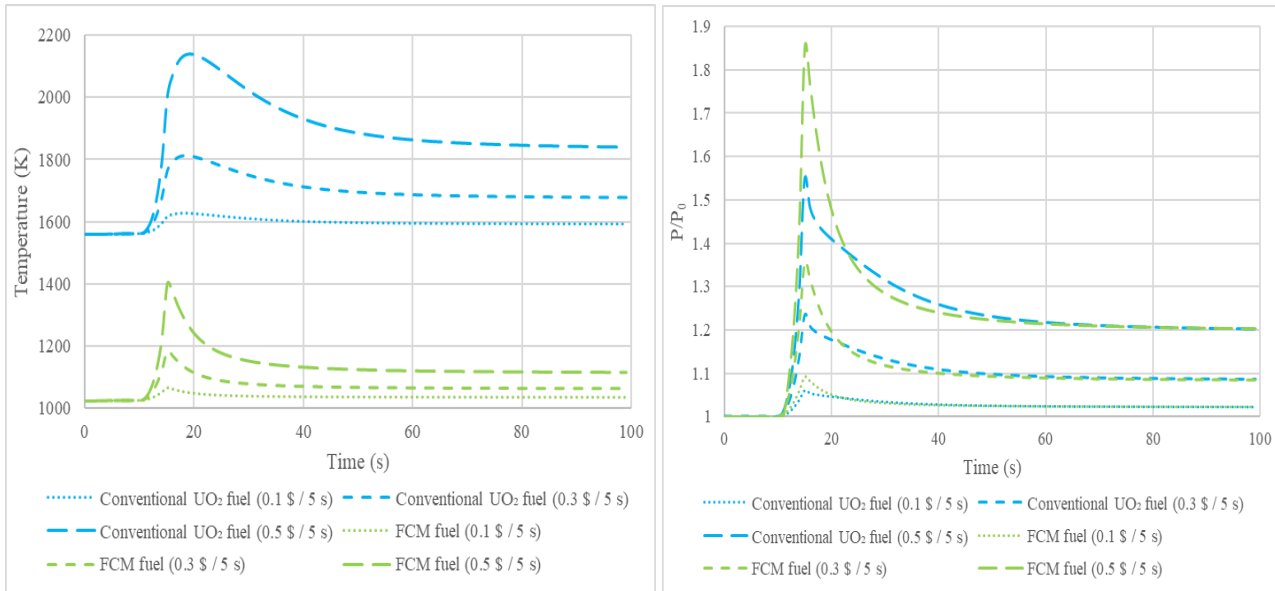


شکل شماره (۶) توزیع دما در لایه های سوخت TRISO

۲. مقایسه توزیع دما برای سوخت  $UO_2$  مرسوم و سوخت FCM در شرایط گذرا فرض شده که راکتیویته های مختلف ۰/۱، ۰/۳ و ۰/۵ دلار در طی ۵ ثانیه به راکتور وارد شود. آغاز شروع حادثه، ثانیه ۱۰ ام فعالیت راکتور در شرایط پایا در نظر گرفته شده است. تغییرات قدرت و دمای مرکز دو سوخت  $UO_2$  مرسوم و سوخت FCM برای داغ ترین میله در شکل ۷ نشان داده شده است. بهبود خصوصیات ترموفیزیکی سوخت FCM در مقایسه با سوخت  $UO_2$  مرسوم، منجر به کاهش قابل توجه دمای مرکز سوخت طی تزریق راکتیویته یکسان می شود. پیک بالاتر قدرت برای راکتور با سوخت FCM به دلیل مقدار کمتر فیدبک این نوع از سوخت می باشد. کاهش قدرت با توجه به افزایش دمای سوخت و روی کار آمدن فیدبک ها صورت گرفته و راکتور با استفاده از هر دو نوع سوخت در طی حادثه، ذاتاً ایمن عمل می کند. ماکزیمم دمای بدست آمده در سوخت  $UO_2$  مرسوم و سوخت FCM ناشی از مقادیر مختلف تزریق راکتیویته مورد بررسی با استفاده از دو مدل همگن و غیر همگن در جدول ۲ آورده شده است. تفاوت دمایی



پیش بینی شده توسط مدل همگن و مدل غیر همگن، با افزایش تزریق راکتیویته محسوس تر شده و در



بدترین حالت ۸۰٪ می باشد.

شکل شماره (۷) (الف) تغییرات قدرت و (ب) دمای مرکز سوخت  $UO_2$  مرسوم و FCM طی شرایط گذرا

شماره (۲) ماکزیمم دمای بدست آمده در مرکز سوخت ب مرسوم و FCM در حالت گذرا

۰/۵ \$ / ۵ s	۰/۳ \$ / ۵ s	۰/۱ \$ / ۵ s	حالت های مورد بررسی/تزریق راکتیویته
۲۱۳۸/۵۵	۱۸۱۱/۵۷	۱۶۲۸/۰۸	ماکزیمم دمای $UO_2$ مرسوم (K)
۱۲۹۹/۰۷	۱۱۴۴/۶۷	۱۰۶۱/۸۲	ماکزیمم دمای FCM (همگن) (K)
۱۴۱۳/۴۲	۱۲۲۲/۵۱	۱۱۲۲/۵۰	ماکزیمم دمای FCM (غیر همگن) (K)
۸۰٪	۶۳٪	۵۴٪	اختلاف ناشی از نتایج دو مدل همگن و غیر همگن سوخت FCM

بحث و نتیجه گیری :

با توجه به ساختار پیچیده سوخت FCM از روش چند مقیاسی برای آنالیز حرارتی بهره گرفته شده است. در این روش محاسبات در مقیاس قلب با استفاده از خواص ترموفیزیکی موثر انجام شده و سپس با استفاده از شرایط مرزی بدست آمده، محاسبات در مقیاس کوچکتر یعنی یک بخش از میله سوخت FCM و ذرات TRISO انجام شده است. نتایج نشان می دهند که بیشینه اختلاف دمایی بدست آمده با استفاده از دو مدل همگن و غیر همگن برابر با ۸۰٪ می باشد و گرادیان دمایی در سوخت FCM کاهش قابل توجهی داشته است.

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] Nicholas R. Brown, Hans Ludewig, Arnold Aronson, Gilad Raitses, Michael Todosow., Neutronic evaluation of a PWR with fully ceramic microencapsulated fuel. Part II: Nodal core calculations and preliminary study of thermal hydraulic feedback. *Annals of Nuclear Energy* 62 (2013) 548–557.
- [3] X.W. Zhou, C.H. Tang., Current status and future development of coated fuel particles for high temperature gas-cooled reactors. *Progress in Nuclear Energy* 53 (2011) 182e188.
- [4] 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.
- [5] M.V. Ramana, Laura Berzak Hopkins, Alexander Glaser, Licensing small modular reactors, 2013, *Energy* 61 (2013) 555e564.
- [6] Folsom, Charles P., Effective Thermal Conductivity of Tri-Isotropic (TRISO) Fuel Compacts. 2012. Utah State University.
- [7] R.N. Morris, P.J. Pappano., Estimation of maximum coated particle fuel compact packing fraction. *Journal of Nuclear Materials* 361 (2007) 18–29.