



تحلیل ترمونوترونی قلب رآکتور ماژولار سایز کوچک پیشرفته SMART با استفاده از کدهای COBRA-EN و CITATION-LDI2، WIMS-D5

ظریفی، احسان*؛ سپانلو، کامران

سازمان انرژی اتمی، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشکده رآکتور و ایمنی هسته‌ای

چکیده

هدف از این مقاله، تحلیل پارامترهای نوترونی و ترموهیدرولیکی قلب رآکتور ماژولار SMART می‌باشد. SMART یک رآکتور با ابعاد کوچک ماژولار بوده بطوریکه تمامی تجهیزات مدار اول آن در داخل محفظه تحت فشار رآکتور قرار داده شده است. در تحلیل انجام شده با بکارگیری کدهای WIMS و CITATION پارامترهای نوترونی این رآکتور نظیر ضریب تکثیر مؤثر، توزیع شار نوترونی و با بکارگیری کد COBRA پارامترهای ترموهیدرولیکی نظیر دمای سوخت و دما، سرعت و چگالی خنک‌کننده مورد بررسی قرار گرفته است. جهت اعتبار سنجی نتایج، حاصل با گزارشات و مقالات مربوط مقایسه شد. مقایسه نتایج نشان دادند که همخوانی خوبی با یکدیگر دارند و از درصد خطای کمی برخوردار می‌باشند.

کلمات کلیدی: رآکتور ماژولار SMART، تحلیل نوترونی، کد WIMS، کد CITATION، کد COBRA

مقدمه

تحقیق و توسعه در زمینه رآکتورهای ماژولار با ابعاد کوچک (SMR) و ایمنی بالا یکی از مهمترین مباحث تحقیقات علمی در دهه اخیر بوده است بطوریکه در برخی از کشورهای توسعه یافته و در حال توسعه طرح های عملیاتی مفهومی جالبی از این نوع رآکتورها ارائه شده است. هر یک از طرح های رآکتور ماژولار با توجه به نیاز پیش بینی شده از جمله توان، نوع کاربری و تعداد ماژولها، دارای تکنولوژی و طرح منحصر به فردی می‌باشند. طراحی مفهومی رآکتور SMART در کره جنوبی از سال ۱۹۹۷ شروع و تا سال ۲۰۰۵ ادامه داشت. طراحی پایه این رآکتور نیز از سال ۲۰۰۲ آغاز و تا سال ۲۰۱۵ ادامه داشت. این رآکتور هم اکنون در فاز اجرایی قرار دارد و نمونه اولیه آن در حال ساخت می‌باشد. Chang از انستیتو تحقیقات انرژی کره جنوبی، در کنفرانس بین‌المللی آینده سیستم‌های هسته‌ای در ایالات متحده آمریکا رآکتور SMART را به عنوان یک رآکتور پیشرفته سایز کوچک یکپارچه برای تولید همزمان برق و آب شیرین معرفی نمود [۱]. Kang و همکارانش طی مقاله‌ای، طرح مطالعاتی رآکتور تحت فشار یکپارچه SMART را

^۱ SMART: System Integrated Modular Advanced Reactor

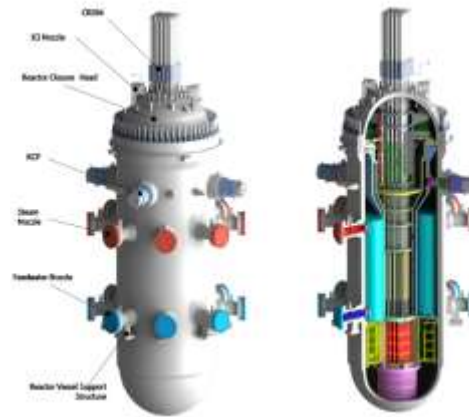
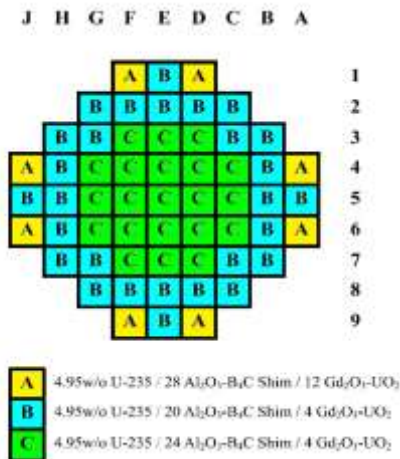
^۲ SMR: Small Modular Reactor



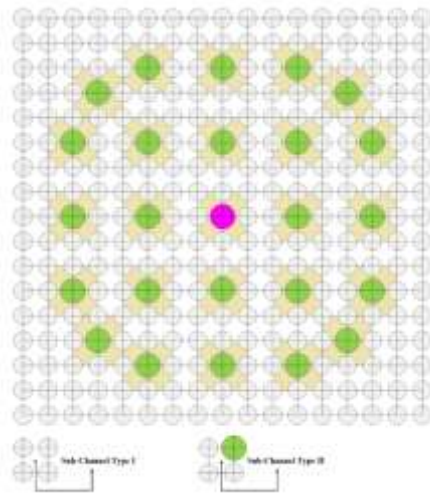
بررسی نمودند [۲]. Kim و همکارانش با ارائه مقاله‌ای در چهارمین کنفرانس بین‌المللی راکتورهای سایز کوچک و متوسط به عنوان گزینه‌های جدید نیروگاه‌های هسته‌ای در کشورها، به بررسی توسعه طراحی و بازبینی راکتورهای آب تحت فشار مازولار یکپارچه از جمله SMART پرداختند [۳]. همچنین Kim و همکارانش طی مقاله‌ای در کنفرانس راکتورهای نسل چهارم در ژاپن، برنامه‌های تایید و بازبینی راکتور SMART را ارائه نمودند [۴]. Zee در سال ۲۰۰۷ طی گزارشی به بررسی توسعه طراحی سیستم‌های راکتور SMART پرداخت [۵]. Song و Hong طی مقاله‌ای در مجله Annals of Nuclear Energy با استفاده از کدهای MASTER و DORT به بررسی و تعیین ارزش میله‌های کنترل در راکتور SMART پرداختند [۶]. Kim و همکارانش در مجله مهندسی انرژی و قدرت، SMART را به عنوان نخستین راکتور پیشرفته مجتمع دارای مجوز بررسی نمودند [۷]. در این تحقیق، شبیه‌سازی قلب راکتور مازولار SMART که یکی از اصلی‌ترین اجزای نیروگاه‌های هسته‌ای است مورد پژوهش و بررسی قرار گرفته است.

روش کار

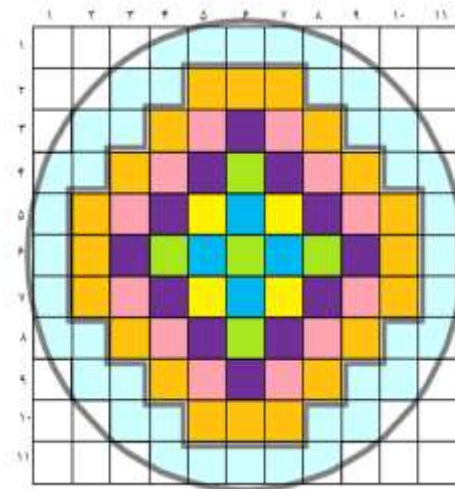
راکتور پیشرفته مازولار SMART یک راکتور یکپارچه آب تحت فشار با قدرت حرارتی ۳۳۰ مگاوات و قدرت الکتریکی ۱۰۰ مگاوات می‌باشد که در کشور کره جنوبی توسعه یافته است. خنک‌کننده و کندکننده این راکتور آب سبک، دمای ورودی و خروجی قلب به ترتیب ۲۹۶ و ۳۲۳ درجه سانتیگراد و فشار مدار اولیه آن ۱۵,۵ مگا پاسکال می‌باشد. در شکل (۱) نمایی از محفظه تحت فشار این راکتور نشان داده شده است. قلب راکتور SMART شامل ۵۷ بسته سوخت مربعی با طول فعال ۲۰۰۰ mm می‌باشد. نمایی از قلب این راکتور در شکل (۲) نشان داده شده است. هر بسته سوخت این راکتور شامل ۲۶۴ میله سوخت، ۲۴ کانال راهنمای میله کنترل و ۱ کانال اندازه‌گیری می‌باشد. بسته‌های سوخت این راکتور مشابه راکتورهای آب تحت فشار می‌باشد. راکتیویته قلب راکتور با استفاده از میله‌های جاذب سوختنی Gd_2O_3 با ترکیب اورانیوم با ۱/۸ درصد وزنی کنترل می‌گردد. در مرحله اول با بهره‌گیری از کد WIMS-D5، ضرایب گروهی مورد نیاز کد CITATION-LDI2 محاسبه شد. بدین منظور با توجه به ساختار و چیدمان میله‌های سوخت در یک بسته سوخت، به شبیه‌سازی انواع سلولهای محاسباتی در کد WIMS و داده‌های بدست آمده از این طریق جهت محاسبات شار نوترونی و توان به کد CITATION لینک گردید. نحوه مش‌بندی قلب راکتور SMART در کد CITATION در شکل (۳) نشان داده شده است. سپس جهت بررسی رفتار ترموهیدرولیکی یک مجتمع سوخت راکتور SMART، از توزیع توان حرارتی بدست آمده در حالت بدون ورود میله‌های کنترل استفاده شد. در شکل (۴) نحوه مش‌بندی یک مجتمع سوخت در کد COBRA ارائه شده است.



شکل (۱) نمایی از محفظه تحت فشار رآکتور SMART [۶] شکل (۲) نمایی از قلب رآکتور SMART [۶]



شکل (۴) مش‌بندی یک مجتمع سوخت



شکل (۳) نحوه مش‌بندی کل قلب در کد CITATION



نتایج

در جدول (۱) مقادیر ضریب تکثیر موثر با مراجع [۸] مقایسه شده است.

جدول (۱) مقایسه ضریب تکثیر موثر

مدل	K_{eff} محاسبه شده با کد CITATION	K_{eff} با استفاده از کد [۸] COREDAX	درصد خطا نسبت به مرجع
بدون وارد شدن میله‌های کنترل در قلب رآکتور	1.072887	1.088338	1.4196 %
با وارد شدن تمامی میله‌های کنترل در قلب رآکتور	0.796723	0.808174	1.4168 %

مقایسه ضریب تکثیر موثر نشان می‌دهد بر اساس محاسبات کد CITATION قلب رآکتور SMART حدوداً دارای mk ۷۲ رآکتیویته مازاد می‌باشد این درحالیست که براساس نتایج کد [۸] COREDAX رآکتیویته مازاد قلب در حدود mk ۸۸ است. اختلاف حاصل را می‌توان به متفاوت بودن روش محاسباتی و استفاده از کتابخانه‌های متفاوت در دو کد دانست با این نتایج به یکدیگر نزدیک می‌باشند. زیرا کد COREDAX از روش بسط نودال معادله پخش استفاده می‌کند در حالیکه کد CITATION از روش اختلاف محدود برای حل معادله پخش استفاده شده است. در شکل (۵) توزیع فاکتور پیک توان (PPF) شعاعی در قلب رآکتور SMART در حالت بدون وارد شدن میله‌های کنترل نشان داده شده و با مرجع [۸] مقایسه شده است. در شکل (۶) نیز توزیع فاکتور پیک توان شعاعی در قلب رآکتور SMART در حالت ورود میله‌های کنترل ارائه شده است. مقایسه نتایج نشان می‌دهد که همخوانی خوبی بین نتایج ۲ کد وجود دارد و اختلاف‌ها مربوط به متفاوت بودن روش حل دو کد می‌باشد. در حالیکه مطابق نتایج کد COREDAX ماکزیمم توان مربوط به بسته سوخت مرکزی با $PPF=1.24597$ می‌باشد براساس نتایج کد CITATION ماکزیمم توان به یک لایه پس از مرکز منتقل شده و در این حالت $PPF=1.18014$ می‌باشد. در شکل (۷) توزیع شار نوترون‌های حرارتی در حالت بدون وارد شدن میله کنترل نشان داده شده است.

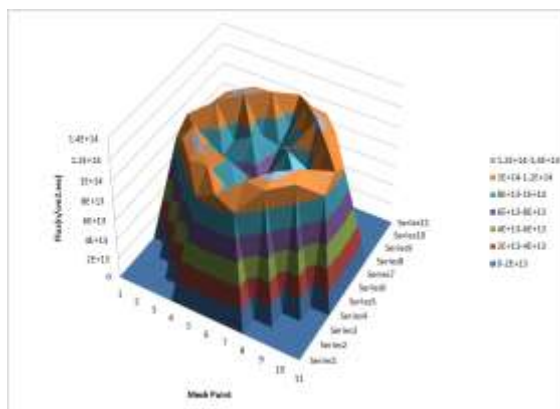
مطابق شکل (۷) ملاحظه می‌گردد توزیع شار نوترون‌های حرارتی دارای شکل تقریباً گاوسی بوده و همچنین در قله شار فرورفتگی‌های وجود دارد که علت آن، به دلیل وجود میله‌های جاذب سوختنی اکسیدگادولونیم می‌باشد. همچنین در شکل (۸) توزیع شار نوترون‌های حرارتی در حالت ورود میله‌های کنترل به قلب رآکتور نشان داده شده است.

CITATION COREDAX [8] Error			0.82159 0.77044 14.50 %	0.95831 0.91345 4.91 %
		0.96813 0.796 21.62 %	1.07621 1.05127 2.37 %	0.96342 1.10517 12.85 %
	0.98067 0.796 23.19 %	1.13102 1.0745 5.26 %	0.98425 1.05004 6.26 %	1.05976 1.13649 6.59 %
0.81967 0.77044 6.38 %	1.06987 1.05127 1.72 %	0.98643 1.05004 6.05 %	1.18014 1.1901 0.83 %	0.95847 1.18329 18.99 %
0.95108 0.91345 4.11 %	0.96298 1.10517 12.86 %	1.05784 1.13649 6.92 %	0.95862 1.18329 18.98 %	1.03474 1.24597 16.94 %

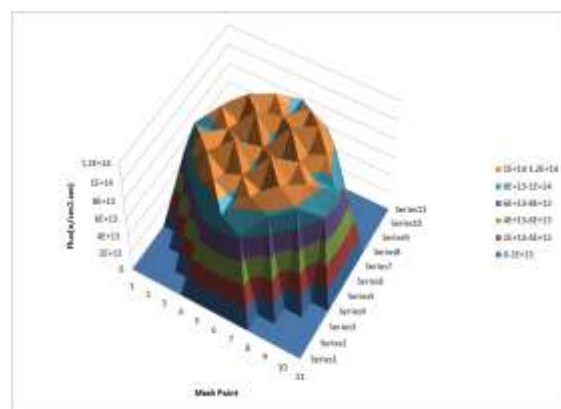
شکل (۵) توزیع فاکتور بیک توان شعاعی در حالت بدون ورود میله‌های کنترل

CITATION			1.01092 1.18749	1.11031 0.91407
		1.17105	0.87261	0.82279
	1.17201	1.22374	0.97693	0.71496
1.01142	1.18814	0.87350	0.70982	0.68153
1.11528	0.92241	0.82198		

شکل (۶) توزیع فاکتور بیک توان شعاعی در حالت ورود میله‌های کنترل

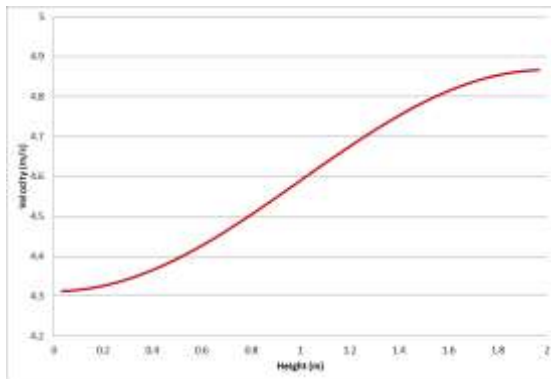


شکل (۸) توزیع شار نوترونی‌های در حالت ورود میله‌های کنترل

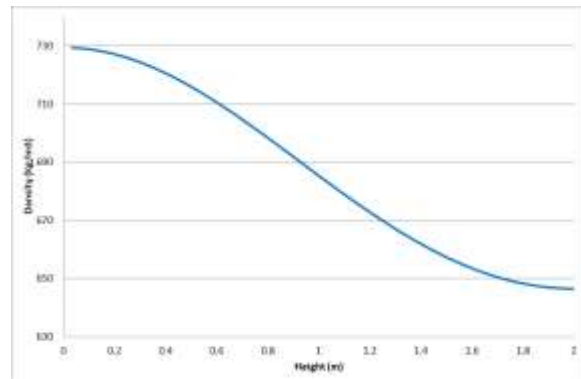


شکل (۷) توزیع شار نوترونی‌های حرارتی در حالت بدون ورود میله‌های کنترل

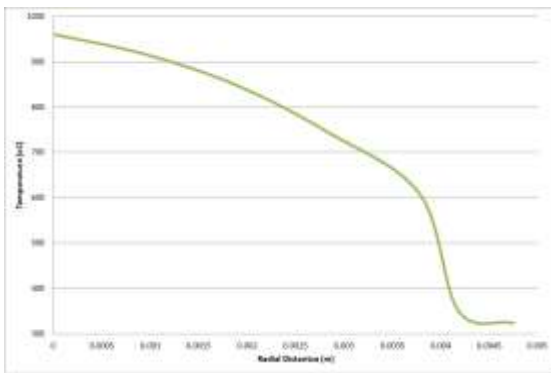
نتایج نشان می‌دهد در حالت ورود تمامی میله کنترل به قلب رآکتور به علت افزایش جاذب‌های نوتونی، شار در مرکز قلب رآکتور مطابق شکل (۸) کاهش و شار اطراف افزایش می‌یابد و در این حالت ماکزیمم توان حرارتی مربوط به بسته های سوخت اطراف قلب با $PPF=1.17201$ می‌باشد. در نهایت با استفاده توزیع توان حرارتی بدست آمده در حالت بدون ورود میله کنترل، تحلیل زیرکانال گرمترین مجتمع سوخت با $PPF=1.18014$ ابا استفاده از کد COBRA انجام شده است. همانطور که در شکل (۴) ملاحظه می‌گردد در تحلیل زیرکانال یک مجتمع سوخت، دو نوع کانال وجود دارد، یک مدل کانال مربعی که در گوشه‌های آن ۴ میله سوخت وجود دارد و نوع دیگر، کانال‌هایی می‌باشند که در یک گوشه آن یک کانال راهنما با قطر بزرگتر وجود دارد. همچنین با توجه به چیدمان 17×17 یک مجتمع سوخت رآکتور SMART منجر به ۲۵۶ زیرکانال همراه با ۲۸۹ میله شده است که از میان آنها ۲۶۴ میله دارای توان حرارتی و ۲۵ میله فاقد هرگونه تولید حرارت می‌باشند. در شکل‌های (۹) الی (۱۲) به ترتیب توزیع محوری چگالی، سرعت و دما در گرمترین کانال ارائه شده‌اند.



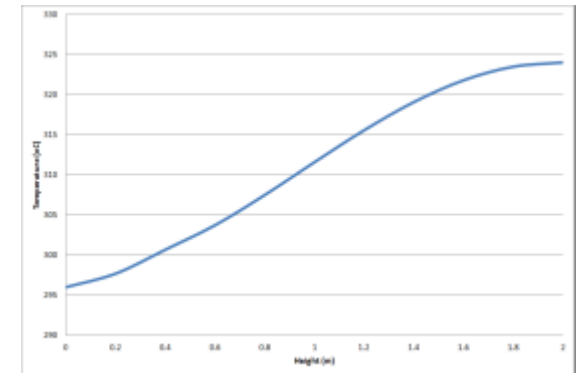
شکل (۱۰) توزیع محوری سرعت سیال



شکل (۹) توزیع محوری چگالی سیال



شکل (۱۲) توزیع شعاعی دمای سوخت



شکل (۱۱) توزیع محوری دمای خنک‌کننده



نتایج نشان می‌دهند به دلیل انتقال حرارت از میله‌های سوخت به خنک‌کننده دمای سیال مطابق شکل (۱۱) افزایش می‌یابد. دمای ورودی در حدود ۲۹۶ درجه سانتیگراد می‌باشد و دمای خروجی به حدود ۳۲۴ درجه سانتیگراد می‌رسد. افزایش دما در طول کانال باعث کاهش چگالی سیال شده بطوریکه چگالی سیال از 730 kg/m^3 به حدود 650 kg/m^3 می‌رسد. همچنین بنابر قانون پیوستگی $\rho_1 A_1 v_1 = \rho_2 A_2 v_2$ و با توجه به اینکه سطح مقطع کانال ثابت است، هر چقدر چگالی سیال کاهش یابد به تبع آن سرعت سیال در قلب افزایش می‌یابد. حداکثر دمای مرکز سوخت در حدود ۹۸۰ درجه سانتیگراد است که این میزان بسیار کمتر از حد ایمنی دمای ذوب سوخت رآکتور (در حدود 2700°C) می‌باشد.

نتیجه گیری

مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی نوترونی قلب رآکتور نشان می‌دهد در حالیکه بر اساس محاسبات کد CITATION رآکتیویته مازاد قلب رآکتور در حدود ۷۲ mk می‌باشد براساس نتایج کد COREDAX این رآکتیویته مازاد قلب به حدود ۸۸ mk می‌رسد. همچنین براساس نتایج کد CITATION ماکزیمم توان مربوط به یک لایه پس از مرکز قلب با $PPF=1.18014$ می‌باشد در کد COREDAX ماکزیمم توان مربوط به بسته سوخت مرکزی با $PPF=1.24597$ می‌باشد. همچنین مقایسه نتایج حاصل نشان می‌دهد که همخوانی خوبی بین نتایج نوترونی بدست آمده از کد CITATION و مرجع موجود [۸] وجود دارد و اختلاف‌ها مربوط به متفاوت بودن روش محاسباتی و استفاده از کتابخانه‌های متفاوت می‌باشد. در کد CITATION از روش اختلاف محدود در حل معادله پخش استفاده شده است در حالیکه در کد COREDAX از روش بسط نودال معادله پخش استفاده می‌شود. همچنین در تحقیق حاضر از کد محاسبات سلولی WIMS براساس کتابخانه ENDF-B.VI برای استخراج سطح مقاطع استفاده شده است، این درحالیست که در مرجع مذکور از کد HELIOS جهت تولید سطح مقاطع و ثوابت گروهی استفاده شده است که مجموع این عوامل باعث به وجود آمدن نتایج متفاوت شده است. بررسی توزیع دما در یک سوخت نشان می‌دهد که حداکثر دمای مرکز سوخت در حدود ۹۸۰ درجه سانتیگراد می‌گردد که این میزان بسیار کمتر از حد ایمنی دمای ذوب سوخت رآکتور می‌باشد که عوامل نشان از حاشیه ایمنی بالای این رآکتور می‌باشد.

مراجع

- 1- M.H. Chang, et al., "SMART – AN Advanced Small Integral PWR for Nuclear Desalination and Power Generation," Proc. of Global 99, International Conference on Future Nuclear Systems, Jackson Hole, USA, Aug. 29 - Sept. 3 (1999).
- 2- C.S. Kang, et. al., "A Planning Study Project of Developing an Integral Reactor (SMART)", KAERI/CM-469/2001, KAERI, Korea (2001).



- 3- Si-Hwan Kim, et al., “Design Development and Verification of a System Integrated Modular PWR”, Proceedings of the fourth International Conference on Nuclear Option in Countries with Small and Medium Electricity Grids, Croatia (2002).
- 4- Si-Hwan Kim, et al., “Design Verification Program of SMART”, GENES4/ANP2003, Sep. 15-19, Kyoto, JAPAN (2003).
- 5- S.K. Zee, “Design Report for SMART Reactor System Development”, KAERI/TR-2846/2007, KAERI, Korea (2007).
- 6- Ser Gi Hong, et al., “A preliminary simulation study of dynamic rod worth for the SMART (System-integrated Modular Advanced Reactor) reactor”, Annals of Nuclear Energy 60, 350–356, 2013.
- 7- Keung Koo Kim, et al., “SMART: The First Licensed Advanced Integral Reactor”, Journal of Energy and Power Eng. 8 (2014) 94-102.
- 8- Jaejun Lee, et al., “A Preliminary Analysis of SMART Reactor Core Using the COREDAX Code”, Transactions of the Korean Nuclear Society, Korea, October 21-22, (2010).