

HTR- MCNP

hosseiniabhari@ut.ac.ir :

(دریافت مقاله: ۱۳۹۰/۹/۲۹؛ دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۲/۲/۶)

MCNP- C HTR- MCNP

HTR- PBM :

کشورهایی چون چین، فرانسه، ترکیه، آمریکا، ژاپن، سوئیس، اندونزی، هلند و روسیه، با طرح و پاسخگویی یک مسئله کوشیدند تا استانداردی جهت انجام این نوع شبیه سازی‌ها را مطرح کنند. اصولاً در شبیه سازی این نوع رآکتورها، مدل هندسی میله‌های کنترل و توزیع ذرات درون توپک‌ها و توزیع توپک‌ها درون قلب از جمله مسائل اصلی می‌باشند. در طی این مقاله به بررسی و ارائه مدلی مناسب جهت شبیه سازی این رآکتور با کد MCNP-۴C خواهیم پرداخت.

HTR-۱۰

رآکتور HTR-۱۰ یک رآکتور تحقیقاتی با قدرت ۱۰MW می‌باشد [۱]. در این نوع رآکتور از توپک‌هایی با شعاع ۳cm

رآکتورهای دما بالا (HTR)، به واسطه کیفیت بالای استانداردهای رعایت شده در آنها در دسته رآکتورهای نسل چهارم قرار گرفته‌اند. امروزه دو نوع طراحی برای این نوع رآکتورها مطرح می‌باشد. نوع اول، رآکتورهای با سوخت میله‌ای می‌باشند (prismatic) که از جمله نمونه‌های در حال کار آن می‌توان به رآکتور HTR تحقیقاتی ژاپن اشاره کرد. نوع دیگر، رآکتورهای با سوخت توپکی می‌باشند. در اوایل قرن بیست و یکم ساخت یک رآکتور تحقیقاتی از این نوع در چین آغاز شد. پس از ساخت و راه اندازی این رآکتور مسئله شبیه سازی آن با استفاده از کدهای موجود مطرح گردید. به دنبال اولین بحرانیت این رآکتور در سال ۲۰۰۳ آژانس انرژی اتمی به کمک

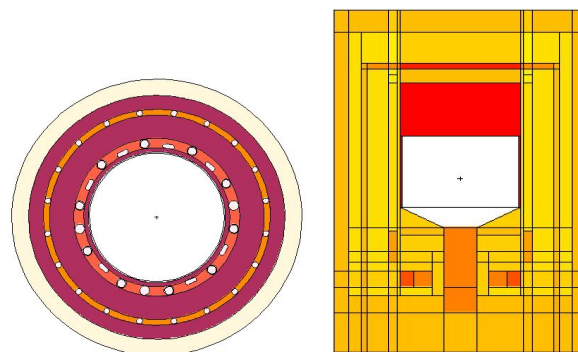
فولاد ضدزنگ قرار گرفته‌اند. اینها در نهایت به وسیله اتصال‌های فلزی به یکدیگر متصل می‌شوند [۲ و ۳].

در تمامی محاسبات انجام شده از کد محاسباتی MCNP-۴C استفاده شده است. نرم‌افزار MCNP-۴C از سطوح مقطع با فرمت ENDF استفاده می‌کند. در طی این محاسبات از کتابخانه استاندارد MCNP، بر پایه ENDF۶ استفاده شده است [۴].

جهت مدلسازی این رآکتور از مدل ارائه شده در گزارش CRP-۵ آژانس استفاده شده است. در مدل مورد استفاده میله‌های کنترل و لوله‌های هلیوم و ناحیه‌های تابش دهی کاملاً شبیه سازی شده و در نظر گرفته شده‌اند [۲]. شکل قلب تعریف شده در کد در شکل ۱ قابل مشاهده می‌باشد.

همان طور که در ابتدا بدان اشاره شد، یکی از مسایل بسیار مهم در شبیه سازی این نوع رآکتور، نحوه توزیع توپک‌ها در قلب می‌باشد. در همان ابتدای امر دو راه حل مطرح می‌شوند: راه اول شبیه سازی و تعریف تک به تک توپک‌ها و راه دوم بهره جستن از توانایی MCNP در تولید ساختارهای تکراری می‌باشد [۴]. کاملاً روشن است که در حالت اول با فرآیندی بسیار پیچیده، هم به لحاظ انجام محاسبات جایگذاری دقیق هر توپک و هم به لحاظ زمان و سخت‌افزار لازم برای اجرای برنامه مواجه هستیم.

در حالت دوم به تعریف یک تک سلول حاوی تعداد محدودی توپک پرداخته و داخل قلب را با این تک سلول پر می‌کنیم. در پر کردن قلب باید به دو نکته توجه داشت: اول اینکه بنا به محاسبات انجام شده ضریب تراکم باید ۰/۶۱ باشد و دوم اینکه نسبت میان توپک‌های سوخت و کند کننده باید حفظ شود. در این راستا به بررسی ساختارهای موجود می‌پردازیم. در جایگذاری تعدادی توپک در یک سلول عموماً این ساختارها مطرح می‌شوند: SC، FCC، BCC، SH، HCP. در مرحله اول به بررسی فاکتور ضریب تراکم در هر یک از این ساختارها می‌پردازیم. در این راستا به محاسبه اندازه اضلاع در متراکم‌ترین



شکل ۱. نمایی از مدل هندسی رآکتور HTR-۱۰ در شبیه سازی انجام شده.

استفاده می‌شود. توپک‌های مذکور به دو نوع تقسیم می‌شوند: توپک‌های گرافیتی و توپک‌های سوخت. هر توپک سوخت متشکل از ماتریسی از جنس گرافیت می‌باشد که به دو ناحیه تقسیم می‌شود: از مرکز کره تا شعاع ۲/۵cm شاهد حضور ذرات سوخت در لابلای ماتریس گرافیتی می‌باشیم، در حالی که از این شعاع به بعد فقط شاهد حضور گرافیت هستیم. ذرات سوخت کره‌هایی با شعاع ۹/۹mm می‌باشند. در مرکز کره سوخت  $UO_2$  با چگالی  $10 \text{ g/cm}^3$  و غنای ۱۷ درصد قرار دارد. این ناحیه به وسیله دو لایه پیاپی گرافیت پیرولیتی و به دنبال آنها یک لایه سیلیکن کاربید و نهایتاً یک لایه بیرونی گرافیت پیرولیتی پوشیده شده است. ساختار لایه‌ای مذکور عموماً با نام TRISO شناخته می‌شود.

قلب رآکتور در انتها الیه پایین متشکل از یک لوله تخلیه توپک و به دنبال آن یک ناحیه به صورت قیف می‌باشد. ناحیه قیفی در نهایت به یک استوانه ختم می‌شود. قسمت تحتانی قلب تا مرز میان ناحیه قیفی و استوانه‌ای به وسیله توپک‌های گرافیت پر می‌شود. ناحیه استوانه‌ای نیز تا حد مقتضی به وسیله مخلوطی از توپک‌های سوخت و گرافیت با نسبت ۵۷ به ۴۳ پر می‌شود. مجموعه قلب حاوی توپک‌ها به وسیله لایه‌ای از گرافیت و آجرهای گرافیت بورات دار شده احاطه شده است [۱].

این رآکتور دارای ۱۰ میله کنترل می‌باشد که در اطراف قلب در بازتابنده گرافیتی تعبیه شده‌اند. از  $(B_7C)$  به عنوان جاذب نوترونی استفاده می‌شود. هر میله کنترل شامل پنج حلقه جاذب نوترونی می‌شود که در ناحیه بین یک پوشش داخلی و خارجی

۱. SC: Simple Cube, FCC: Face Centered Cube, BCC: Body Centered Cube, SH: Simple Hexagon, HCP: Hexagonal close-packed

جدول ۱. مقایسه ضرایب تراکم ساختارهای سلولی مختلف.

نوع ساختار	SC	BCC	FCC	SH	HCP
ضریب تراکم	۰/۵۲	۰/۶۸	۰/۷۴	۰/۶۰	۰/۷۴

حالت برای هر سلول پرداخته و حجم را به دست می‌آوریم.

همان طور که از نتایج جدول ۱ بر می‌آید ساختارهای SC و SH به واسطه ضریب تراکم پایین باید حذف شوند. ساختارهای HCP و FCC نیز اگرچه دارای حد نساب ضریب تراکم می‌باشند ولی به دلیل ضریب تراکم بسیار بالا باید حذف شوند. ضریب تراکم بالای این دو ساختار، ما را بر آن می‌دارد تا جهت رسیدن به ضریب تراکم مورد نظر، فاصله زیادی را میان توپک‌ها ایجاد کنیم که به واسطه کمک به نشت نوترونی، اثر نامناسبی را روی ضریب تکثیر خواهد گذاشت. بدین ترتیب سلول BCC مناسب‌ترین گزینه جهت انجام این شبیه‌سازی می‌باشد.

از سوی دیگر به مسئله نسبت میان توپک‌های سوخت و کند کننده بر می‌خوریم. جهت حل این مسئله سه راه داریم: با توجه به اینکه این نسبت‌ها خیلی از ۵۰ درصد دور نیستند، می‌توانیم اندازه و یا چگالی توپک‌های گرافیت را جهت رسیدن به این نسبت تغییر دهیم [۱] یا اینکه ابرسلول‌هایی با صد توپک تعریف کنیم. در این شبیه‌سازی از راه اول یعنی تغییر در اندازه توپک‌های گرافیت بهره‌جسته‌ایم. آخرین مسئله‌ای که در این باب مطرح می‌شود بحث نیمه توپک‌های ایجاد شده در لبه‌های قلب می‌باشد [۱]. این توپک‌ها از این جهت باعث تغییر در نتیجه می‌شوند که به افزایش در ضریب تراکم می‌انجامند. در راستای تصحیح این مسئله راه حل‌های مختلفی مطرح شده است. اولین راه حل که در کد MCNP-BALL مورد استفاده قرار می‌گیرد آن است که قلب با ضریب تراکمی کمی بیشتر از ۰/۶۱ پر شده و تمامی توپک‌هایی که با دیواره تداخل دارند حذف شوند. در این شبیه‌سازی از راه حل دیگری مبنی بر تزریق یک ناحیه خالی از توپک جهت بازگشت به ضریب تراکم مورد نظر استفاده شده است [۱].

ذرات سوخت، به واسطه تراکم پایین‌تر در فضا، می‌توانند به وسیله سلول‌های SC و SH مدل شوند. محاسبات انجام شده،

نشان می‌دهند که به طور متوسط در هر توپک ۸۵۵۳ ذره سوخت حضور دارند. در راستای مقایسه و بررسی تأثیرات توزیع ذرات سوخت در توپک به انجام محاسبات هم برای ساختار SC و هم SH پرداخته‌ایم.

اولین بحرانیات این رآکتور در عمل در ارتفاع ۱۲۳/۰۶cm توپک رخ داده است. لازم به ذکر است که این میزان را بر واحد توپک نیز از طریق معادله (۱) می‌توان بیان کرد:

$$N = \frac{(\pi * R^2 * h) * f}{\frac{4}{3} \pi r^3} \quad (1)$$

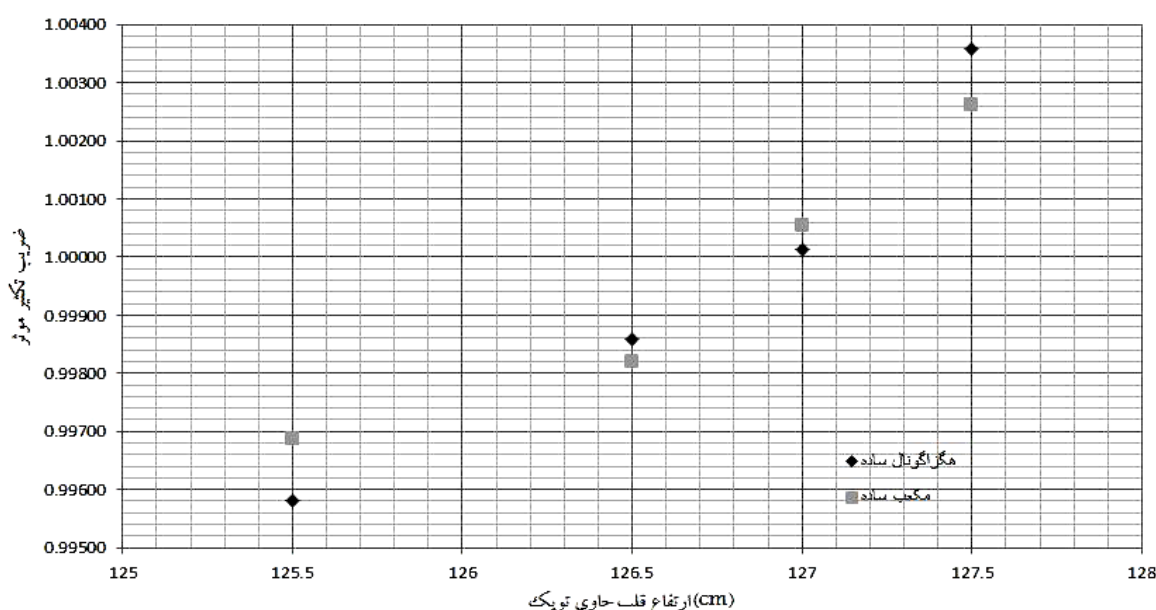
که در آن  $r$  شعاع توپک سوخت و  $R$  شعاع استوانه حاوی توپک‌ها و  $f$  ضریب تراکم توپک‌ها می‌باشد. با انجام این محاسبه به عدد ۱۶۸۹۰ توپک می‌رسیم. نتایج به دست آمده در این کار در جدول ۲ با نتایج حاصل از محاسبات INEEL مقایسه شده‌اند [۲].

همان طور که ملاحظه می‌شود در محاسبه ارتفاع لازم در بحرانیات حدود ۳ درصد خطا داریم. البته لازم به ذکر است که همان‌طور که پیشتر اشاره شد، سطوح مقطع مورد استفاده از کتابخانه MCNP-۴C در دمای ۲۷ درجه بودند در حالی که دمای مسئله ۱۵ درجه بوده است. همچنین باید به خطای نشت حاصل از فاصله میان توپک‌ها و تقریب تغییر اندازه توپک‌ها جهت حصول نسبت مورد نظر توپک سوخت به کند کننده توجه داشت.

همان طور که از شکل ۲ که مبین تغییرات ضریب تکثیر برحسب ارتفاع می‌باشد برمی‌آید شاهد تفاضل بسیار اندکی (حدود ۰/۱ درصد به طور متوسط) میان مقادیر به دست آمده برای دو ساختار SC و SH می‌باشیم. نتایج حاصل از این شبیه‌سازی را حتی می‌توان به توزیع کاتوره‌ای ذرات سوخت داخل ماتریس کند کننده تعمیم داد. در طی سری مقالات خود در باب تأثیرات توزیع کاتوره‌ای نواحی حاوی سوخت درون کند کننده، آقای ویلیامز ضریب تکثیر را بارها برای سیستم‌های کاتوره‌ای محاسبه کرد. نتیجه حاصل توزیع شبه گاوسی برای ضریب تکثیر بود. قله نمودار

جدول ۲. نمودار مقایسه نتایج حاصل برای مسئله ۵-CRP [۲].

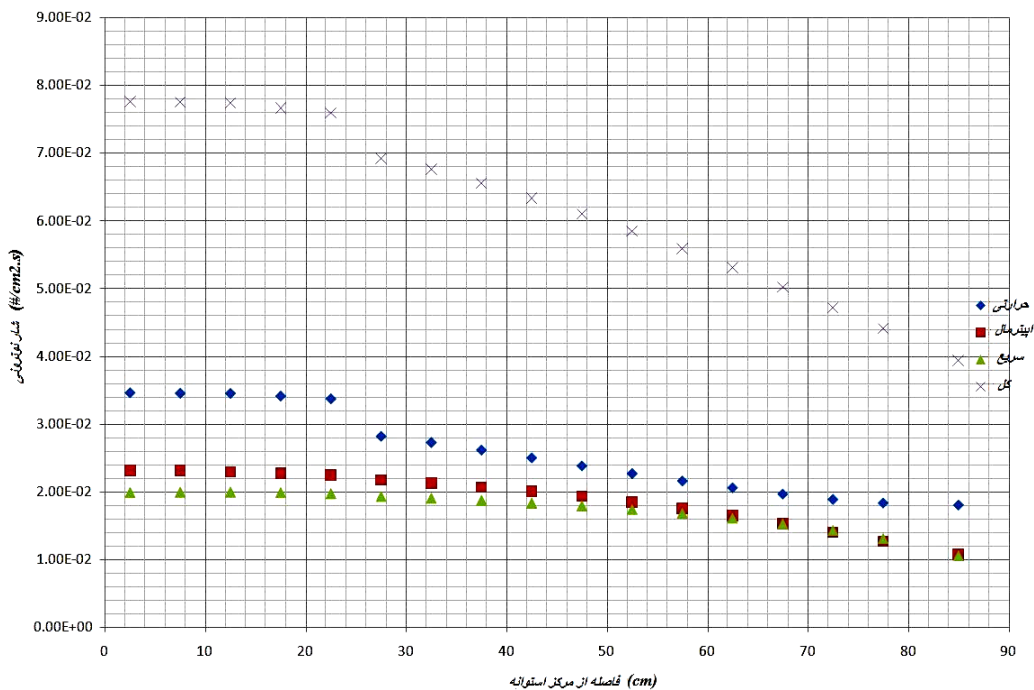
شماره مسئله	نتایج حاصل در چین		نتایج کار حاضر (MCNP-4C)	
	VSOP	MCNP4A	ذرات SC	ذرات SH
(Blheight[cm])	۱۲۵,۸۰۴	۱۲۶,۱۱۶	۱۲۶,۸۸۳	
B۲	B۲۱(k)	۱,۱۱۹۷۴۷	۱,۱۲۵۸۳	۱,۱۲۶۸۶
	B۲۲(k)	۱,۱۱۰۴۳۵		
	B۲۳(k)	۱,۰۹۵۹۶۱		
B۳	B۳۱( $\Delta k/k$ )	٪۱۵,۲۴	٪۱۶,۵۶	٪۱۵,۴۳
	B۳۲( $\Delta k/k$ )		٪۱,۴۱	
B۴	B۴۱( $\Delta k/k$ )	٪۱۸,۲۷	٪۱۹,۳۶	٪۱۸,۵۲
	B۴۲( $\Delta k/k$ )	٪۱,۶۲	٪۱,۷۹	



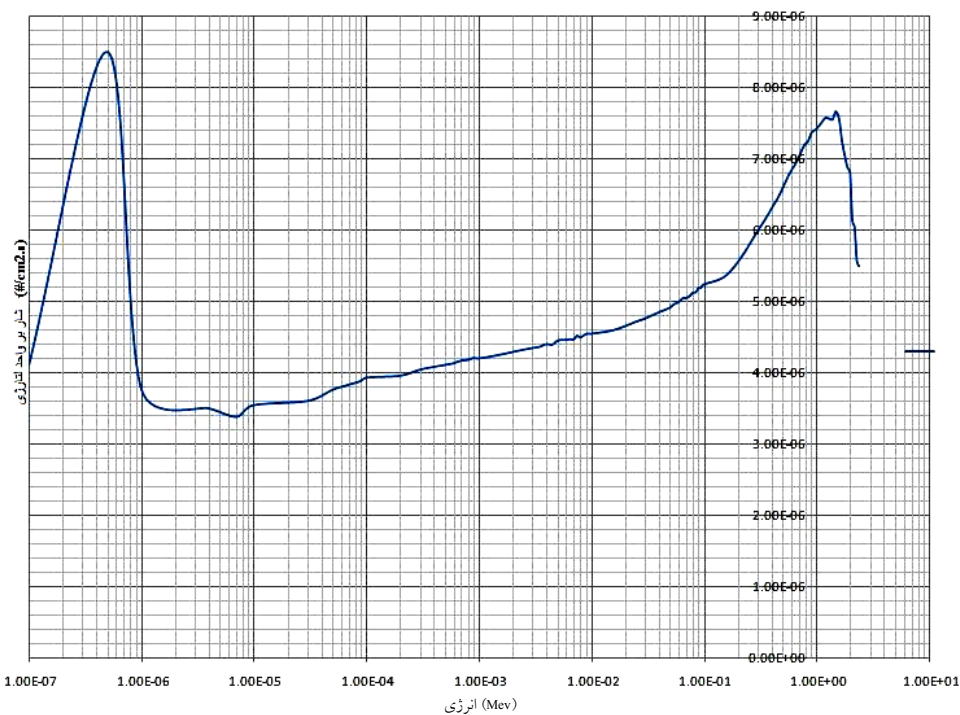
شکل ۲. تغییرات ضریب تکثیر برحسب ارتفاع توپک برای توزیع ذرات SC و SH سوخت.

شاید یکی دیگر از مسایل و پارامترهای مطرح در بررسی قلب رآکتورهای هسته‌ای دینامیک آنها باشد. از جمله ضرایب و پارامترهای مطرح در این زمینه می‌توان به ضریب بتا و ضریب رآکتیویته حرارتی (کل، سوخت و کند کننده) اشاره نمود. مورد آخر شاید جزء مهم‌ترین این پارامترها باشد. این ضریب مبین رفتار قلب در برابر افزایش ضریب تکثیر و قدرت بوده و نقش اساسی در ایمنی ایفا می‌کند. انجام محاسبات مربوط به این ضریب، با توجه به عدم وجود سطوح مقطع در دماهای بالاتر از دمای اتاق در کتابخانه MCNP-۴c در این پژوهش امکان‌پذیر نبوده است. البته این ضریب قبلاً با استفاده از این مدل

توزیع ضریب تکثیر مقداری بسیار نزدیک به میزان به دست آمده از سیستم توزیع منظم بود. با توجه به ماهیت کاتوره‌ای و توزیع نرمال نتایج حاصل و تعدد توپک‌ها- سیستم‌های کاتوره‌ای- در قلب رآکتور به راحتی می‌توان نتیجه گرفت که ضریب تکثیر در کل قلب به میزان متوسط توزیع گاوسی، یعنی همان مقدار حاصل از توزیع منظم ذره‌های سوخت، میل خواهد کرد [۵]. لازم به ذکر است که مطالعات انجام شده بر روی تأثیرات توزیع کاتوره‌ای توپک‌های سوخت و کند کننده در قلب این رآکتور خاص با استفاده از کد MCNP و کتابخانه سطح مقطع ENDFv مؤید این رفتار بوده است [۶].



شکل ۳. توزیع شعاعی سه گروهی شار نوترونی.



شکل ۴. توزیع انرژی شار نوترونی بر واحد لتارژی.

لتارژی نیز پرداخته شد. نتایج به دست آمده در شکل‌های ۳ و ۴ قابل مشاهده می‌باشند. همان‌طور که پیش‌بینی می‌شد قسمت اعظم شار نوترونی داخل قلب از نوترون‌های حرارتی تشکیل شده که در مقایسه با دیگر رآکتورها توزیع شعاعی نسبتاً مسطحی دارند.

هندسی و کتابخانه ENDFV محاسبه و با مقادیر واقعی مقایسه شده است. [۷] همچنین در کنار محاسبه ضریب تکثیر قلب به محاسبه توزیع شعاعی سه گروهی نوترونی و توزیع انرژی نوترون‌ها بر واحد

کشور ژاپن نیز شاید زنگ خطری برای جامعه هسته‌ای جهت توسعه رآکتورهای ایمن‌تر مانند PBMR ها باشد.

در شبیه سازی‌های انجام شده از نرم‌افزار کمکی MCNP visual editor بسیار بهره جستیم که دسترسی بدان بدون کمک جناب آقای دکتر وثوقی امکان‌پذیر نمی‌بود. در قسمتی دیگر از تحقیقات به تولید کتابخانه سطوح مقطع نوترونی به وسیله کد NJOY پرداخته شد که از طریق جناب آقای دکتر پذیرنده فراهم آمد. از این رو از کمک‌های این اساتید محترم کمال سپاس و تشکر را داریم.

مقایسه نتایج حاصل از این شبیه سازی با محاسبات مرجع انجام شده در چین نشان می‌دهد که مدل پیشنهاد شده می‌تواند در عین حال مدلی دقیق و کارا به لحاظ امکانات و زمان لازم باشد. همچنین مشاهده شد که تغییر در توزیع ذرات سوخت از SC به SH تغییر چندانی را در ضریب تکثیر موجب نمی‌شود. این موضوع و تئوری‌های مطرح شده در مراجع نشان‌دهنده آن است که نحوه توزیع ذرات سوخت در توپک تأثیر چندانی بر ضریب تکثیر نمی‌گذارد. اما نهایتاً امید است تا گرایش به بررسی و ساخت این دست رآکتورها در ایران نیز بمانند دیگر کشورهای جهان افزایش یابد، چرا که طراحی آنها در مواجهه با حوادث مبتنی بر سیستم‌های غیرفعال (Passive) است. حوادث اخیر در

4. J F Briesmeister (Ed.), "MCNP-A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 4B", Los Alamos National Laboratory, Report LA-12625-M, March (1997).

5. M M R Williams, *Annals of Nuclear Energy* **27** (2000) 1695.

6. S A Hosseini, *Annals of Nuclear Energy* **50** (2012) 215.

۷. سید علی حسینی، میترا اطهری علاف، کنفرانس فیزیک ایران، یزد (۱۳۹۱).

1. J L Lebenhaft, "MCNP4B modeling of Pebble-Bed Reactors"; MIT (2001).

2. IAEA CRP-5 TECDOC1382 "Evaluation of high temperature gas cooled reactor performance: Benchmark analysis related to initial testing of the HTR and HTR-10", Vienna (2003).

3. H CHANG, X RAEPSAET, F DAMIAN, Y-K LEE, O KOBERL, X JING, and Y YANG, "Analysis of HTR-10 First Criticality with Monte-Carlo Code Tripoli-4.3", Beijing (2003).