

کشورهایی چون چین، فرانسه، ترکیه، آمریکا، ژاپن، سویس، 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 ارائهٔ مدلی مناسب جهت شبیه سازی این رآکتور با کد ۲۲–MCNP خواهیم پرداخت.

HTR-1•

راکتور ۱۰- HTR یک راکتور تحقیقاتی با قدرت ۱۰MW میباشد [۱]. در این نوع راکتور از توپکهایی با شعاع ۳cm رآکتورهای دما بالا (HTR)، به واسطهٔ کیفیت بالای استانداردهای رعایت شده در آنها در دستهٔ 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 مسئلهٔ شبیه سازی آن بحرانیت این رآکتور در سال ۲۰۰۳ آژانس انرژی اتمی به کمک



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

استفاده می شود. تو پکهای مذکور به دو نوع تقسیم می شوند: تو پکهای گرافیتی و تو پکهای سوخت. هر تو پک سوخت متشکل از ماتریسی از جنس گرافیت می باشد که به دو ناحیه تقسیم می شود: از مرکز کره تا شعاع ۲/۵cm شاهد حضور ذرات سوخت در لابلای ماتریس گرافیتی می باشیم، در حالی که از این شعاع به بعد فقط شاهد حضور گرافیت هستیم. ذرات سوخت کره هایی با شعاع ۹/۹mm می باشند. در مرکز کره سوخت بره ایی با شعاع ۵/۹mm می باشند. در مرکز کره دارد. این ناحیه به وسیلهٔ دو لایهٔ پیاپی گرافیت پیرولیتی و به دنبال آنها یک لایهٔ سیلیکن کاربید و نهایتاً یک لایهٔ بیرونی گرافیت پیرولیتی پوشیده شده است. ساختار لایهای مذکور عموماً با نام TRISO شناخته می شود.

قلب رآکتور در منتها الیه پایین مت شکل از یک لولهٔ تخلیهٔ توپک و به دنبال آن یک ناحیه به صورت قیف می باشد. ناحیهٔ قیفی در نهایت به یک استوانه ختم می شود. قسمت تحتانی قلب تا مرز میان ناحیهٔ قیفی و استوانهای به وسیلهٔ توپک های گرافیت پر می شود. ناحیهٔ استوانهای نیز تا حد مقتضی به وسیلهٔ مخلوطی از توپکهای سوخت و گرافیت با نسبت ۵۷ به ۴۳ پر می شود. مجموعهٔ قلب حاوی توپک ها به وسیلهٔ لایه ای از گرافیت و آجرهای گرافیت بورات دار شده احاطه شده است [1].

این رآکتور دارای ۱۰ میلهٔ کنترل میباشد که در اطراف قلب در بازتابندهٔ گرافیتی تعبیه شدهاند. از (B_FC) به عنوان جاذب نوترونی استفاده میشود. هر میلهٔ کنترل شامل پنج حلقهٔ جاذب نوترونی میشود که در ناحیهٔ بین یک پوشش داخلی و خارجی

فولاد ضدزنگ قرار گرفتهاند. اینها در نهایت به وسیلهٔ اتصالهای فلزی به یکدیگر متصل می شوند [۲ و ۳].

در تمامی محاسبات انجام شده از کد محاسباتی MCNP-۴C از MCNP از MCNP-۴C از MCNP-۴C استفاده می کند. در اطی این سطوح مقطع با فرمت ENDF استفاده می کند. در اطی این محاسبات از کتابخانه استاندارد MCNP، بر پایهٔ ENDF۶ استفاده شده است [۴].

جهت مدلسازی این رآکتور از مدل ارائـه شـده در گـزارش - CRP آژانس استفاده شـده اسـت. در مـدل مـورد اسـتفاده میلههای کنترل و لولههای هلیوم و ناحیههای تابش دهی کـاملاً شبیه سازی شـده و در نظر گرفتـه شـدهانـد [۲]. شـکل قلـب تعریف شده در کد در شکل ۱ قابل مشاهده می.باشد.

همان طور که در ابتدا بدان اشاره شد، یکی از مسایل بسیار مهم در شبیه سازی این نوع رآکتور، نحوهٔ توزیع توپکها در قلب میباشد. در همان ابتدای امر دو راه حل مطرح می شوند: 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 می کنیم. در پر کردن قلب باید به دو نکته توجه داشت: اول اینکه بنا به محاسبات انجام شده ضریب تراکم باید ۱۹/۰ باشد و دوم اینکه نسبت میان توپکهای سوخت و کند کننده باید حفظ شود. در این راستا به بررسی ساختارهای موجود می پردازیم. در جایگذاری تعدادی توپک در یک سلول عموماً این ساختارها مطرح می شوند: SC ،FCC ،SC ، SH ، PCP . در مرحلهٔ اول به بررسی فاکتور ضریب تراکم در هر یک از این ساختارها

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

179

جدول ۱. مقايسهٔ ضرايب تراكم ساختارهاي سلولي مختلف.

НСР	SH	FCC	BCC	SC	نوع ساختار
•/٧۴	۰٫۶۰	°,V¥	•/64	۰٫۵۲	ضريب تراكم

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

همان طور که از نتایج جدول ۱ بر می آید ساختارهای SC و SH به واسطهٔ ضریب تراکم پایین باید حذف شوند. ساختارهای HCP و FCC نیز اگرچه دارای حد نساب ضریب تراکم می باشند ولی به دلیل ضریب تراکم بسیار بالا باید حذف شوند. ضریب تراکم بالای این دو ساختار، ما را بر آن می دارد تا جهت رسیدن به ضریب تراکم مورد نظر، فاصلهٔ زیادی را میان توپکها ایجاد کنیم که به واسطهٔ کمک به نشت نوترونی، اثر نامناسبی را روی ضریب تکثیر خواهد گذاشت. بدین ترتیب سلول BCC مناسب ترین گزینه جهت انجام این شبیه سازی می باشد.

از سوی دیگر به مسئلهٔ نسبت میان توپیک های سوخت و كند كننده بر مىخوريم. جهت حل اين مسئله سه راه داريم: بــا توجه به اینکه این نسبت ها خیلی از ۵۰ درصد دور نیستند، می توانیم اندازه و یا چگالی توپکهای گرافیت را جهت رسیدن به این نسبت تغییر دهیم [۱] یا اینکه ابرسلول هایی با صد توپک تعریف کنیم. در این شبیه سازی از راه اول یعنی تغییر در اندازهٔ توپکهای گرافیت بهره جستهایم. آخرین مسئلهای کـه در ایـن باب مطرح می شود بحث نیمه توپکهای ایجاد شده در لبه های قلب میباشد [۱]. این توپکها از ایـن جهـت باعـث تغییـر در نتیجه میشوند که به افزایش در ضریب تـراکم مـیانجامنـد. در راستای تصحیح این مسئله راه حل های مختلفی مطرح شده است. اولین راه حل که در کـد MCNP-BALL مـورد اسـتفاده قرار می گیرد آن است که قلب با ضریب تراکمی کمی بیـشتر از ۶۱، پر شده و تمامی توپکهایی که با دیـواره تـداخل دارنـد حذف شوند. در این شبیه سازی از راه حـل دیگـری مبنـی بـر تزریق یک ناحیهٔ خالی از توپیک جهت بازگشت به ضریب تراكم مورد نظر استفاده شده است [۱].

ذرات سوخت، به واسطه تراکم پایین تر در فضا، می توانند به وسیلهٔ 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 بحرانیت 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 معادلهٔ (۱) می توان بیان کرد:

$$N = \frac{(\pi * R^{\mathsf{Y}} * h) * f}{\frac{\mathfrak{r}}{\mathfrak{r}} \pi r^{\mathsf{r}}},\tag{1}$$

که در آن ۲ شعاع توپ ک سوخت و R شعاع استوانهٔ حاوی توپ کها و f ضریب تراکم توپ کها می باشد. با انجام این محاسبه به عدد ۱۶۸۹۰ توپ کمی رسیم. نتایج به دست آمده در این کار در جدول ۲ با نتایج حاصل از محاسبات INEEL مقایسه شدهاند [۲].

همان طور که ملاحظه می شود در محاسبهٔ ارتفاع لازم در بحرانیت حدود ۳ درصد خطا داریم. البته لازم به ذکر است که همان طور که پیشتر اشاره شد، سطوح مقطع مورد استفاده از کتابخانهٔ ۲۲– MCNP در دمای ۲۷ درجه بودند در حالی که دمای مسئله ۱۵ درجه بوده است. همچنین باید به خطای نشت حاصل از فاصلهٔ میان توپکها و تقریب تغییر اندازهٔ 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 ۱٫۰ درصد به طور متوسط) میان مقادیر به دست آمده برای دو ساختار SC و HS میباشیم. نتایج حاصل از این شبیه سازی 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. نتیجهٔ حاصل توزیع شبه گاوسی برای ضریب تکثیر بود. قلهٔ نمودار

					· · ·
شمارة مسئله		نتایج حاصل در چین		نتايج كار حاضر(MCNP-4C)	
		VSOP	MCNP4A	ذرات SC	ذرات SH
(B1heigh[cm])		۱۲۵/۸۰۴	178/118	۱۲۶/۸۸۳	
В۲	B71(k)	1/119742		1/170/7	1,17989
	BYY(k)	1,110480			
	BYT(k)	1,090981			
В٣	$B^{r}(\Delta k/k)$	/10/24	<u>//18/08</u>	/10/48	
	BTT($\Delta k/k$)		7.1/41		

1.19,79

1/.1/V9

1/.11/01

جدول ۲. نمودار مقایسهٔ نتایج حاصل برای مسئلهٔ CRP - ۵ [۲].



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 PMCNP در این پژوهش امکانپذیر نبوده است. البته این ضریب قبلاً با استفاده از این مدل

 $B^{\epsilon}(\Delta k/k)$

Bf7($\Delta k/k$)

B۴

1/.11/17

7.1,98

توزیع ضریب تکثیر مقداری بسیار نزدیک به میزان به دست آمده از سیستم توزیع منتظم 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 منتظم 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 ENDF۷ مؤید این رفتار بوده است [۶].



شکل ۴. توزیع انرژی شار نوترونی بر واحد لتارژی.

هندسی و کتابخانه ENDFv محاسبه و با مقادیر واقعی مقایـسه شده است. [۷]

همچنین در کنار محاسبهٔ ضریب تکثیر قلب به محاسبهٔ توزیـع شعاعی سه گروهی نوترونی و توزیع انرژی نوترونهـا بـر واحـد

لتارژی نیز پرداخته شد. نتایج به دست آمده در شکلهای ۳ و ۴ قابل مشاهده می باشند. همان طور که پیش بینی می شد قسمت اعظم شار نوترونی داخل قلب از نوترون های حرارتی تشکیل شده که در مقایسهٔ با دیگر راکتورها توزیع شعاعی نسبتاً مسطحی دارند.

www.SID.ir

۱۸۲

کشور ژاپن نیز شاید زنگ خطری برای جامعهٔ هـستهای جهـت توسعهٔ رآکتورهای ایمن تر مانند PBMR ها باشد.

در شبیه سازی های انجام شده از نرمافزار کمکی MCNP visual editor بسیار بهره جستیم که دسترسی بدان بدون کمک جناب آقای دکتر وثوقی امکان پذیر نمی بود. در قسمتی دیگر از تحقیقات به تولید کتابخانهٔ سطوح مقطع نوترونی به وسیلهٔ کد NJOY پرداخته شد که از طریق جناب آقای دکتر پذیرنده فراهم آمد. از این رو از کمک های این اساتید محترم کمال سپاس و تشکر را داریم.

- 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). مقایسهٔ نتایج حاصل از این شبیه سازی با محاسبات مرجع انجام شده در چین نشان می دهد که مدل پیشنهاد شده می تواند 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 نمی شود. این موضوع و تئوریهای مطرح شده در مراجع نشاندهنده آن است که نحوهٔ توزیع ذرات سوخت در توپک تأثیر چندانی بر ضریب تکثیر نمی گذارد. 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

- 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 HTTR 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).