



## محاسبه تغییرات ضریب تکثیر موثر با تغییرات چیدمان ذرات سوخت داخل گلوله ها در راکتور HTR-10 به کمک کد MCNP-4C

خلیل مشکبار بخشایش<sup>\*</sup>، ناصر وثوقی، مهرداد بروشکی

دانشگاه صنعتی شریف، دانشکده مهندسی مکانیک

Email:

[khalilmoshkbar@gmail.com](mailto:khalilmoshkbar@gmail.com)

[khalilm\\_nem@mech.sharif.edu](mailto:khalilm_nem@mech.sharif.edu)

Tel: 09144174228

### چکیده:

راکتورهای بستر گلوله ای (Pebble bed) به عنوان راکتورهای نسل چهارم به علت مزایای بسیار ویژه از حیث ایمنی، قیمت تمام شده بسیار پایین نسبت به سایر نیروگاههای هسته ای (حتی در مقایسه با نیروگاههای فسیلی)، بازدهی نسبتا بالا، توانایی تولید هیدروژن، نبود غلاف سوخت در این راکتورها و رعایت مسایل زیست محیطی در کانون توجه قرار دارند. [1, 2] البته به علت نبود مجتمع سوخت در چنین راکتورهایی و به علت ماهیت کروی این راکتورها و توجه به این نکته که کد MCNP ذاتا ماهیت دکارتی دارد، شبیه سازی آن با مشکلاتی همراه بود. از آنجایی که با توجه به هندسه خاص قلب راکتور بستر گلوله ای، انجام محاسبات با کد MCNP بسیار زمان بر است و طولانی شدن زمان انجام محاسبات باعث انباشت خطا خواهد شد، سعی شد که با کاهش حجم ورودی به نحوی که آسیبی به کلیت مساله وارد نکند، زمان انجام محاسبات را تا حد زیادی کاهش دهیم، به طوری که بتوان با یک کامپیوتر شخصی به نتایج مطلوب دست یافت. محاسبه ضریب تکثیر مؤثر قلب و ارتفاع بحرانی قلب راکتور در حالت پایا با استفاده از کد کامپیوتری MCNP-4C از اهداف نهایی این مقاله است. [3] همچنین در این شبیه سازیها نوع چیدمان ذرات سوخت در گلوله های سوخت برای حالت های مختلف مورد بررسی قرار گرفت و نتایج قابل توجهی داشت، شبیه سازی ها بر روی راکتور 10 مگا وات چینی صورت گرفت و توافق خوبی را با نتایج تجربی نشان داد.

**کلمات کلیدی:** ۱- راکتور Pebble bed ۲- ضریب تکثیر مؤثر ۳- چیدمان ذرات سوخت ۴- کد MCNP ۵- ماهیت دکارتی

### ۱- مقدمه

راکتور HTR-10 یک راکتور بستر گلوله ای دما بالا، با خنک کننده گازی است که توسط دانشگاه Tsinghua ساخته شده است. قلب این راکتور از گلوله های سوخت و کند کننده (هر کدام با قطر ۶ cm) تشکیل شده است، بطوریکه مجموع این گلوله های داخل قلب به حدود ۲۷۰۰۰ عدد می رسد. گلوله های سوخت و کند کننده به طور غیر

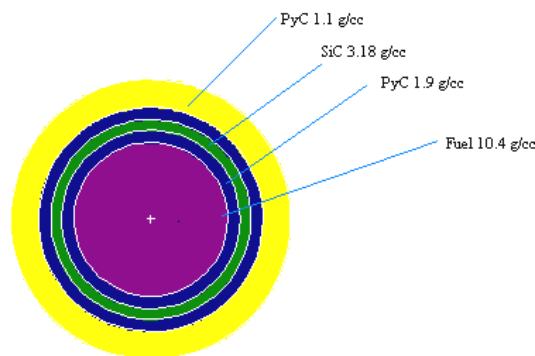


یکنواخت داخل قلب راکتور قرار داده شده اند و نسبت گلوله های سوخت به کند کننده داخل قلب ۵۷/۴۳ است. هر گلوله سوخت شامل ۸۰۰۰ تا ۹۰۰۰ ذره سوخت است. هر کدام از ذرات سوخت از ۴ لایه بیرونی و یک هسته مرکزی سوخت تشکیل می شوند، این ذرات سوخت را تحت عنوان دانه های سوخت پوشش داده شده (CFP) یا TRISO می شناسند. میزان اورانیم داخل گلوله ها حدود ۵ gr با غنای ۱۷٪ است. قطر ذرات سوخت در کل حدود ۰/۱ cm است و هسته آن سوختی به قطر ۰/۴۵ cm است. تعداد میله های کنترل در این راکتورها ۱۰ عدد و تعداد کانال های گاز هلیوم ۲۲ عدد و تعداد کانال های توپ جاذب و تابش دهی به ترتیب ۷ و ۳ می باشد که همگی این کانال ها در بازتابنده جانبی قرار می گیرند. شبیه سازی قلب راکتور با کد MCNP-4C به علت ماهیت دکارتی این کد و ماهیت کروی راکتور با مشکلاتی روبرو بود. از طرفی به علت ماهیت کند روش مونت-کارلو در محاسبات و انحراف معیار بالا در آن، بایستی به نحوی زمان انجام محاسبات را کاهش می دادیم. شبیه سازی با دقت بالایی صورت گرفت و ضریب تکثیر موثر بدست آمده توافق خوبی را با نتایج تجربی نشان داد، از طرفی چیدمان مختلف ذرات سوخت داخل گلوله ها مورد بررسی قرار گرفت و نتایج ارزشمندی حاصل شد. [4,5,6]

## ۲- روش کار

### ۲-۱ شبیه سازی ذره سوخت

برای شبیه سازیها ابتدا لازم می نمود تا ذرات سوخت شبیه سازی شوند، کربن پیرولیتیک به کار رفته در ذرات سوخت همان کربن معمولی است با این تفاوت که برای تهیه آن هیدرو کربن را تا دمای تجزیه خود گرم می کنند و اجازه می دهند تا حالت کریستالی به خود گیرند که این امر موجب ایجاد پیوندهای کووالانسی بین لایه های مختلف ساختار کربن می شود و از این طریق موجب استحکام کربن می شوند. یک ذره سوخت شبیه سازی شده در شکل شماره ۱ قابل مشاهده است.



شکل ۱. برش افقی یک ذره سوخت شبیه سازی شده

### ۲-۲ شبیه سازی گلوله های سوخت

( مدل همگن - مدل کامل - مدل مکعبی - مدل منشوری )

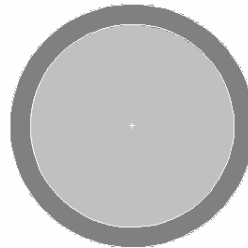
با توجه به هندسه منحصر به فرد گلوله های راکتورهای مذکور، لازم می نمود که گلوله های سوخت این



راکتورها را با دقت شبیه سازی کرد. گلوله های این راکتور که از لحاظ ابعاد به اندازه یک توپ تنیس است که خود از تعداد بسیار زیادی ذرات سوخت که پیشتر توضیح داده شده است تشکیل می شود، بطوریکه این ذرات خود شامل چندین لایه بوده و هسته مرکزی آنها را سوختی به قطر تقریبی  $0.05 \text{ cm}$  تشکیل می دهد.

### ۱-۲-۲ مدل همگن

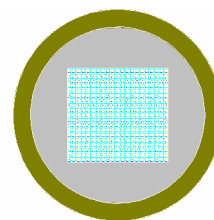
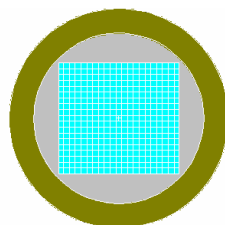
برای پی بردن به اهمیت ذرات سوخت در بحرانیات راکتور ابتدا داخل گلوله های سوخت را همگن کردیم و این گلوله ها را در داخل قلب چیدیم تا بتوانیم اختلاف ضریب تکثیر موثر بین این حالت و حالت واقعی را مشاهده نماییم این امر اهمیت ذرات سوخت داخل گلوله های سوخت را برای ما روشن می سازد.



شکل ۲. برش افقی یک گلوله سوخت همگن شده

### ۲-۲-۲ مدل مکعبی

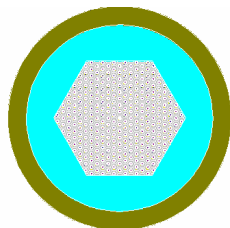
در مرحله بعد یک مکعب را داخل گلوله محاط کردیم بطوریکه بیشترین حجم ممکن را داشته باشد. این امر به این دلیل صورت گرفت تا اثرات اشکال مختلف را علاوه بر حجم های متفاوت مشاهده نماییم. علاوه بر آن در جستجوی شکل و حجم بهینه برای دستیابی به حداکثر ضریب تکثیر موثر بودیم.



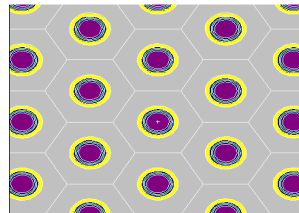
شکل ۳. الف برش افقی از ذرات سوخت در یک مکعب محاط شده بوسیله گلوله  
شکل ۳. ب نمایش محاط بودن مکعب داخل گلوله

### ۳-۲-۲ مدل منشوری

عمل پر کردن گلوله ها با ذرات سوخت را با یک شش ضلعی محاط شده در داخل گلوله به طوری که حداکثر حجم ممکن را داشته باشد، نیز انجام دادیم. البته لازم به ذکر است که در حالت مکعبی تعداد ذره ها ۸۳۳۸ و در حالت منشوری تعداد ذره ها ۸۳۴۱ بود.



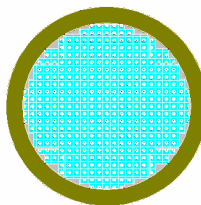
شکل ۴.ب. برش افقی از ذرات سوخت در منشور  
محاط شده بوسیله گلوله سوخت



شکل ۴.الف برش افقی شبکه ذرات  
در گلوله سوخت ( حالت شش ضلعی)

## ۲-۲-۴ مدل کامل

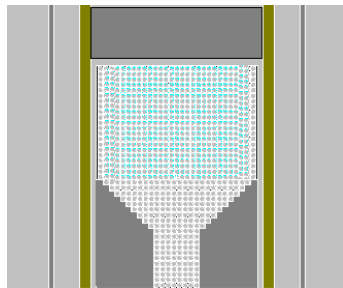
با توجه به ویژگی‌های فیزیکی گلوله‌های مذکور لازم بود که شبیه‌سازی به گونه‌ای صورت گیرد که میزان اورانیم موجود در گلوله‌ها با میزان واقعی آن یکی باشد که باین حساب و با توجه به میزان اورانیم موجود در هر کدام از ذرات سوخت تعداد گلوله‌های موجود به حدود تقریبی ۸۳۳۵ تا ۸۳۴۵ می‌رسید. برای پر کردن گلوله با ذرات سوخت چون با تغییر ارتفاع گلوله سطح مقطع گلوله فرق می‌کرد، بایستی به گونه‌ای مدل می‌کردیم که ذرات سوخت با دیواره کره تقاطعی نداشته باشند، و این امر شبیه‌سازی گلوله سوخت را مشکل می‌کرد. این امر موجب تفاوت زیادی در نحوه پر کردن، در مقایسه با یک استوانه که سطح مقاطع ثابتی دارد را موجب می‌شود، لذا برای رسیدن بدین منظور حجم کره را با مکعبهایی پوشانده، به نحوی که خود این مکعب‌ها مشبندی شده و با ذرات سوخت پر می‌شدند و البته بایستی تعداد آنها در محدوده ذکر شده می‌بود. این موارد ایجاب می‌کرد تعداد آزمایش و خطاهای زیادی صورت گیرد و در حقیقت تنها با استفاده از فرایند سعی و خطا امکان حصول به مطلوب بود. در نهایت مطالب گفته شده را می‌توان در شکل شماره ۵ دید.



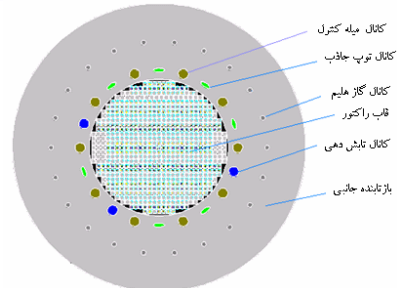
شکل ۵. گلوله سوخت مدل شده به تعداد ۸۳۴۳ ذره سوخت (حالت کامل)

## ۲-۲-۳ شبیه‌سازی قلب راکتور

قلب راکتورهای بستر گلوله‌ای به علت عدم داشتن مجتمع سوخت از لحاظ شبیه‌سازی پیچیدگی‌های خاص خود را دارد. به عبارتی حالت کاملاً تصادفی در چینش گلوله‌های سوخت و کند کننده موجب می‌شود که شبیه‌سازی آن کاملاً ابتکاری باشد و عامل تعیین کننده در این شبیه‌سازی نسبت گلوله‌های سوخت به کند کننده و تعداد گلوله‌های سوخت است، که باید رعایت شود. شکل شماره ۶ نمایی از قلب راکتور شبیه‌سازی شده را نمایش می‌دهد. جدول شماره ۱ تغییر ضریب تکثیر موثر را بر حسب تغییر ارتفاع قلب در حالتی که گلوله سوخت در حالت کامل مدل شده باشد، نشان می‌دهد.



شکل ۶. ب. برش عمودی از راکتور شبیه سازی شده



شکل ۶. الف. برش سطح مقطع افقی راکتور شبیه سازی شده

## ۳- نتایج

جدول ۱. محاسبه تغییر ضریب تکثیر موثر با تغییر ارتفاع قلب (مدل کامل)

ارتفاع قلب (cm)	ضریب تکثیر موثر	نتایج مرجع [6]	
		ارتفاع قلب (cm)	ضریب تکثیر موثر
۱۱۴	۰/۹۷۶۵۷	۱۱۳/۷۷۸	۰/۹۶۹۷۳
۱۲۰	۱/۰۰۴۳۵	۱۲۳/۵۷۶	۱/۰۰۴۷۹
۱۲۶	۱/۰۱۸۴۹	—	—
۱۵۰	۱/۰۷۹۴۳	۱۵۲/۹۷۰	۱/۰۸۲۷۰
۱۵۶	۱/۰۸۹۹۴	—	—
۱۸۶	۱/۱۳۸۱۵	۱۸۲/۳۶۴	۱/۱۳۷۳۸
۱۹۲	۱/۱۵۵۴۱	۱۹۲/۱۶۲	۱/۱۵۶۸۳

نتایج بدست آمده از جدول شماره ۱ توافق خوبی را با نتایج تایید شده قبلی نشان داد، از طرفی  $0.0435 < \text{انحراف معیار} < 0.0136$  بود که انحراف معیار قابل قبولی است. گزارش اولین بحرانیت راکتور [7] در ارتفاع ۱۲۳ cm بود. جدول شماره ۲ نتایج تغییرات ضریب تکثیر موثر را با تغییر چیدمان ذرات سوخت داخل گلوله ها را نشان می دهد.

جدول ۲. مقایسه ضریب تکثیر حاصل از روش های متفاوت چیدمان ذرات داخل گلوله های سوخت

ارتفاع (cm)	نوع	مدل کامل	مدل منشوری	مدل مکعبی	مدل همگن
۱۱۴	—	۰/۹۷۶۵۷	—	—	—
۱۲۰	—	۱/۰۰۴۳۵	۱/۰۰۰۸۱	۰/۹۹۶۷۸	۰/۸۵۴۶۲
۱۲۶	—	۱/۰۱۸۴۹	۱/۰۱۴۴۹	۱/۰۱۰۳۹۲	۰/۸۶۷۹۶
۱۵۰	—	۱/۰۷۹۴۳	۱/۰۵۲۵۹	۱/۰۵۸۱۲	۰/۹۰۹۷۱
۱۵۶	—	۱/۰۸۹۹۴	۱/۰۶۸۷	۱/۰۶۳۹۰۸	۰/۹۱۲۲۳
۱۸۶	—	۱/۱۳۸۱۵	۱/۰۹۹۵۶	۱/۰۹۴۲۷	۰/۹۳۹۸۵
۱۹۲	—	۱/۱۵۵۴۱	۱/۱۰۹۴۷	۱/۱۰۳۹۲	۰/۹۵۱۴۸



همانطور که در جدول شماره ۲ نشان داده شده است، به هیچ وجه مدل همگن، مدل مناسبی برای شبیه سازی گلوله های سوخت نمی باشد. اگرچه مدل های مکعبی و منشوری نیز به مراتب جواب های بهتری نسبت به مدل همگن تولید کرده اند، ولی به هر حال استفاده از مدل کامل در انجام محاسبات توصیه می گردد.

#### ۴- بحث و نتیجه گیری

با وجود آنکه کد MCNP برای محاسبات ضریب تکثیر موثر، توزیع شار و غیره از طریق شبیه سازی دقیق قلب راکتور ارزشمند است، ولی برای محاسبات بحرانیات در دماهای متفاوت، بایستی سطح مقطع مواد مختلف را در دمای مورد نیاز از طریق کدهای مربوطه یا نرم افزار مناسب دیگری تولید کرد. از طرفی کد MCNP معمولاً به عنوان یک کد کمکی برای محاسبات بحرانیات راکتورها ارزشمند است خصوصاً در مواردی که با محدودیت عملکرد کدهای محاسباتی دیگر روبرو هستیم. برای راکتورهایی که از طریق سیستم مختصارت دکارتی یا استوانه ای قابل تحلیل هستند این کد ابزار کاملی را در اختیار دارد ولی در دستگاه کروی با مشکلاتی در شبیه سازی روبرو خواهیم شد. شبیه سازی به کار گرفته شده موجب افزایش زمان در رسم قلب راکتور و کاهش زمان در محاسبه ضریب تکثیر موثر شد و در کل موجب کاهش چشمگیری در ورودی شد. محاسبات ضریب تکثیر موثر با دقت خوبی صورت گرفت و نتایج بدست آمده توافق خوبی را با نتایج تجربی گزارش شده در مراجع نشان داد.

#### ۵- مراجع

- [1] Considerations in the development of safety requirements for innovative reactors, application to modular high temperature gas cooled reactors, IAEA-TECDOC-1366
- [2] Shusaku Shiozawa, Present status of the high temperature engineering test reactor (HTTR), Department of HTTR project, JAERI, Japan
- [3] Robert D. Busch, Judith F. Briesmeister, R.A. Forster, Charles D. Harmon II, Criticality Calculations with MCNP, LA-12827-M, Manual
- [4] Jing, X., Xu, X., Yang, Y., Qu, R., Prediction calculations and experiments for the first criticality of the 10 MW High Temperature Gas-cooled Reactors-Test Module. Nucl. Eng. Des. 218, 43-49., 2002
- [5]. Evaluation of High Temperature Gas Cooled Reactor International, Atomic Energy Agency, Performance. Interim draft of First CRP-5 TECDOC., 2001
- [6] V. Seker, U.Colak, htr-10 full core first criticality analysis with MCNP, Nuclear Engineering and Design, (222) 263-270, 2003
- [7] Design and development of gas cooled reactors, Proceedings of a Technical Committee meeting held in Bei/ing, China, IAEA-TECDOC-899, 30 October - 2 November 1999