



## حل عددی معادله‌های ترموهیدرولیکی حاکم بر قلب رآکتور سوخت-کروی (PBMR) با استفاده از مدل ناحیه‌های متخلخل

محمدحسین استکی، علی فارسون پیلهور\*، آرش دریابک، امیر صفوی  
گروه مهندسی هسته‌ای، دانشکده علوم و فن‌آوری‌های نوین، دانشگاه اصفهان، صندوق پستی: ۷۳۴۴۱-۸۱۷۴۶، اصفهان - ایران

**چکیده:** حل عددی معادله‌های ترموهیدرولیکی حاکم بر قلب رآکتور PBMR با استفاده از مدل ناحیه‌های متخلخل بررسی شد. در این بررسی ابتدا با توجه به وجود دماهای بسیار بالا در قلب، از کد NJOY برای تولید سطح مقطع در این دماها استفاده شد. سپس توسط کد MCNP4C قدرت حرارتی در راستای عمودی و شعاعی به دست آمد که این دو به عنوان منابع قدرت حرارتی در قلب رآکتور وارد نرم‌افزار CFX.12 شد و با توجه به وجود حدود ۴۵۰۰۰۰ مجتمع سوخت در قلب رآکتور و بالا بودن میزان محاسبه‌ها، ناحیه‌ای از قلب که مجتمع‌های سوخت در آن قرار دارند به عنوان یک ناحیه‌ی همگن متخلخل در نظر گرفته، و پارامترهای ترموهیدرولیکی قلب رآکتور محاسبه شد. نتایج حاصل از هر دو کد MCNP4C و CFX.12، در مقایسه با نتایج دیگر کدها بر اعتبار این دو برای استفاده شدن در این نوع رآکتور صحت گذاشت. از جمله نتایج دیگری که به دست آمد، شرط تراکم‌پذیر بودن گاز هلیوم است؛ این مطالعه نشان داد که نتایج در صورتی قابل مقایسه با نتایج دیگر کدها است که تراکم‌پذیر بودن گاز لحاظ شود و این خود منجر به اصلاح فرمول دارسی-ویسباخ در این نوع رآکتور شد.

**کلیدواژه‌ها:** حل عددی، معادله‌های ترموهیدرولیکی، رآکتور PBMR، ناحیه‌های متخلخل، MCNP، CFX

## Numerical Solution of Governing Thermal-Hydraulic Equations in the Core of PBMR Using the Porous Media Model

M.H. Esteki, A.F. Pilevar\*, A. Daryabak, A. Safavi

Department of Nuclear Engineering, Faculty of Advanced Sciences & Technologies, University of Isfahan, P.O.Box: 81746-73441, Isfahan - Iran

**Abstract:** Numerical solution of governing thermal-hydraulic equations in the core of a pebble bed modular reactor (PBMR) is investigated using the porous media approach. By considering that there is a high temperature helium gas in the core, the NJOY code is used to generate cross sections at these temperatures. Then, the heat flux in the core is obtained in the axial and radial directions by the MCNP code and is consequently used in the computational fluid dynamics (CFD) simulation as a semi-sine and an algebraic function. The major characteristics of the flow field have been identified, whereby the thermal-hydraulic parameters such as temperature and pressure profiles have been specified and compared with the other available data. The results of the MCNP4C and CFX.12 in comparison with the other codes confirmed the present calculation to be used in this type of reactor. Other results that obtained with the use of other codes and softwares prove that the inclusion of the compressibility is quite reasonable, where it leads to a slight difference between the measured temperature, pressure and velocity and the actual ones, where it enables us to improve the Darcy-Weisbach equation in this type of reactor.

**Keywords:** Numerical Solution, Thermal-Hydraulic Equations, PBMR, Porous Media, MCNP, CFX



## ۱. مقدمه

اشاره‌ای نشده است. لذا در این مقاله، شبیه‌سازی ترموهیدرولیکی این نوع رآکتور با استفاده از مدل ناحیه‌های متخلخل و با به کارگیری کد MCNP4C و نرم‌افزار CFX.12 انجام و به طور خاص شرط تراکم‌پذیر بودن جریان هلیوم مطالعه شده است.

## ۲. هندسه‌ی رآکتور

رآکتور با سوخت کروی نوعی رآکتور گازی دما-بالا است که از گاز هلیوم به عنوان خنک‌کننده و از گرافیت به عنوان کندکننده و بازتاباننده استفاده می‌کند. سوخت این رآکتور، شامل چندین هزار گلوله‌ی حاوی ذرات سوخت است که به صورت تصادفی روی هم قرار می‌گیرند. این نوع رآکتور در قدرت‌های متفاوتی طراحی شده است. در این مقاله رآکتور با سوخت کروی آفریقای جنوبی، که دارای قدرت حرارتی ۴۰۰ مگاوات است، بررسی شده است [۶]. در مقایسه با دیگر رآکتورهای از این نوع، به دلیل وجود یک بازتاباننده‌ی گرافیتی ثابت در مرکز قلب، قله‌ی حرارتی در فاصله‌ی دورتر از مرکز قلب مشاهده خواهد شد. طول قلب ۱۱ متر است و گلوله‌های سوخت در فضای حلقوی بین دیواره‌ی قلب و بازتاباننده‌ی میانی قرار می‌گیرند. گاز از پایین رآکتور وارد قلب شده و با حرکت به سمت بالا، از بالا به روی گلوله‌های سوخت می‌ریزد و سپس از پایین قلب خارج می‌شود. دور تا دور قلب و بالا و پایین آن توسط صفحه‌های گرافیتی پوشیده شده است. از ۲۴ میله‌ی کنترل در این رآکتور استفاده شده که به صورت متقارن در بازتاباننده‌ی خارجی قرار گرفته‌اند. هر مجتمع سوخت این نوع رآکتور از میلیاردها ذره‌ی ریز ساخته شده است. ذرات سوخت با نام TRISO از یک هسته‌ی مرکزی سوخت تشکیل شده‌اند که معمولاً اورانیم اکسید است و قطر آن به ۰٫۵ میلی‌متر می‌رسد و لایه‌های متفاوتی از سیلیکون کاربید و گرافیت بر روی آن قرار می‌گیرد. بر روی کره‌ی سوخت معمولاً توسط یک فرایند شیمیایی یک لایه‌ی تف‌کافتی<sup>(۳)</sup> کشیده شده و قطر ذره‌ی سوخت تا یک میلی‌متر افزایش می‌یابد تا هم به عنوان محافظ سوخت عمل کند و هم محلی برای جمع‌آوری گازها و شکافت-پاره‌ها باشد [۷]. در شکل‌های ۱ و ۲ مشخصه‌های هندسی رآکتور و نمونه‌ای از مجتمع سوخت نشان داده شده است.

حل عددی معادله‌های ترموهیدرولیکی حاکم بر رآکتورهای قدرت همیشه به عنوان یکی از مبحث‌های مهم هسته‌ای مطرح بوده است. رآکتور با سوخت کروی<sup>(۱)</sup> (PBMR) که یکی از رآکتورهای نسل ۴ محسوب می‌شود هم‌اکنون در چندین کشور در حال ساخت و یا طراحی است. آزمایشگاه ملی آیداهو در امریکا با داشتن یک رآکتور دما-بالای پژوهشی، آزمایش‌های نوترونی و ترموهیدرولیکی وسیعی بر روی این نوع رآکتور انجام داده و هر ساله چندین گزارش منتشر می‌کند. دانشمندان چین نیز مطالعه‌های زیادی بر روی رآکتور دما-بالای HTR-10<sup>(۲)</sup> انجام داده‌اند و با توجه به این‌که آفریقای جنوبی در حال ساخت یک رآکتور PBMR است، دانشمندان این کشور نیز مقاله‌ها و کتاب‌های زیادی در این زمینه تألیف کرده‌اند. از جمله‌ی دیگر کشورهای پیشرو در این زمینه، می‌توان به ژاپن، هلند و آلمان اشاره کرد که با توجه به برنامه‌ی خود مبنی بر ساخت رآکتورهای دما-بالا در چند سال آینده در حال طراحی نوترونی و ترموهیدرولیکی آن هستند.

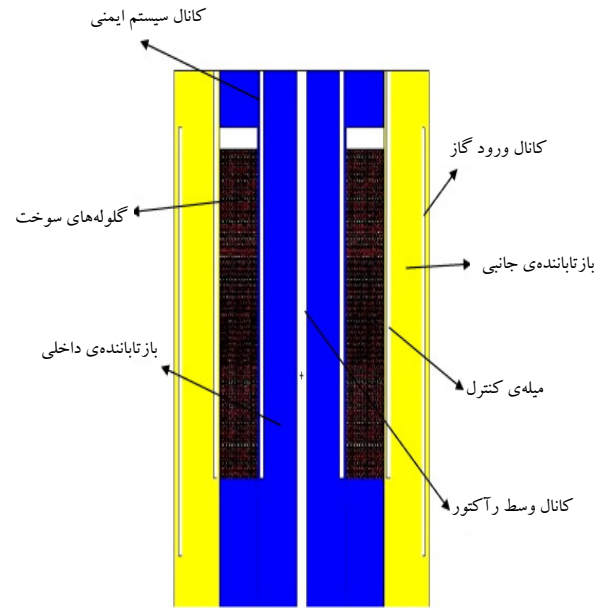
مطالعه‌های بسیاری در چندین سال اخیر بر روی این نوع رآکتورها انجام شده است که بعضی از آن‌ها کل قلب رآکتور را با استفاده از کدهای مخصوص و اغلب با همگن گرفتن قلب شبیه‌سازی کرده‌اند. از جمله‌ی کارهای شاخص انجام شده می‌توان به پژوهش‌های رتسما و همکاران (۲۰۰۶) با استفاده از کدهای مختلف نوترونی و ترموهیدرولیکی شبیه‌سازی رآکتور سوخت-کروی با قدرت ۲۶۸ مگاوات اشاره کرد [۱]. دادلی و همکاران (۲۰۰۸) شبیه‌سازی ترموهیدرولیکی را با استفاده از کدهای TINTe، VSOP و FLOWNEX انجام دادند که از نتایج آن‌ها برای مقایسه‌ی نتایج مطالعه‌ی حاضر استفاده شده است [۲]. در سال‌های اخیر مقاله‌هایی چاپ شده است که رفتار تعداد معدودی از مجتمع‌های سوخت را بررسی کرده‌اند؛ از جمله‌ی آن‌ها می‌توان به مقاله‌های حسن و همکاران (۲۰۰۲) و (۲۰۰۸) و لی و همکاران (۲۰۰۷) اشاره کرد [۳، ۴، ۵].

در هیچ کدام از مطالعه‌های انجام شده، از دو کد MCNP4C و نرم‌افزار CFX.12 برای شبیه‌سازی و از معادله‌های ناحیه‌های متخلخل استفاده نشده است، خصوصاً این‌که به طور خاص به تراکم‌پذیر بودن یا نبودن گاز هلیوم در قلب رآکتور

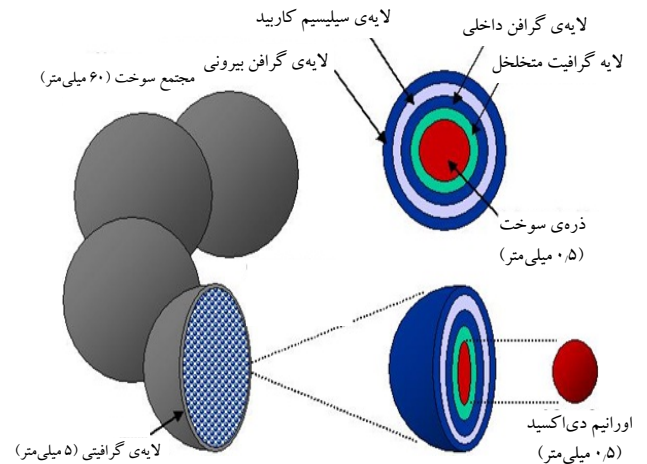
### ۲.۳ قدرت حرارتی در قلب رآکتور

با توجه به این که در هر مجتمع سوخت حدود ۱۵۰۰۰ ذره‌ی ریز سوخت قرار دارد و تعداد گلوله‌های سوخت در این نوع رآکتور نزدیک به ۴۵۰۰۰۰ است، شبیه‌سازی این گلوله‌ها کاری سخت و دشوار است. البته باید دقت داشت که وجود ذرات سوخت در محاسبه‌ها به دقت محاسبه کمک می‌کند ولی چنین محاسبه‌ای نیاز به محاسبه‌گرهای پیشرفته دارد. شبیه‌سازی ۱۵۰۰۰ ذره‌ی ریز در درون ۴۵۰۰۰۰ گلوله‌ی سوخت در کد MCNP نیاز به تعریف سطح‌ها و سلول‌های بسیار زیادی دارد که عملاً کاری ناممکن و در ضمن غیرضروری است چون با تعریف این گلوله‌ها به صورت همگن می‌توان به ساده‌سازی مسئله پرداخت به طوری که به کلیات مسئله خدشه وارد نشود [۸، ۹].

در این مطالعه ابتدا مجتمع‌های همگنی از سوخت اورانیم دی‌اکسید با غنای ۹/۶ درصد، کربن، سیلیکون و چند عنصر دیگر، که در درون این مجتمع‌های سوخت هستند، به صورت درصد نسبی هر کدام در حالت واقعی همراه با لایه‌های کربنی دور این مجتمع‌ها تعریف شد. سپس درون قلب با این مجتمع‌های سوخت به صورت شبکه‌ی مکعبی مش زده و با تعریف بازتاباننده‌های داخلی و خارجی قلب و میله‌های کنترل و خاموش‌کننده در دور تا دور قلب و هم‌چنین پوشش دور قلب هندسه‌ی رآکتور کامل شد. آن‌گاه، با قرار دادن تالی‌های مختلف در طول و شعاع رآکتور، شار و قدرت حرارتی به دست آورده شد که نتایج حاصل هم‌خوانی بسیار خوبی با نتایج دیگر کدها داشت. در شکل‌های ۳ و ۴ تغییرات شعاعی و محوری چگالی قدرت حرارتی در مقایسه با نتایج دیگر کدها نشان داده شده است. در راستای شعاعی دو قله‌ی شار حرارتی در لبه‌ی دو بازتاباننده‌ی درونی و بیرونی قرار دارد و در راستای محوری شار بیشینه در حدود ارتفاع ۴۰۰ سانتی‌متر از بالای رآکتور مشاهده می‌شود.



شکل ۱. مشخصات هندسی رآکتور ۴۰۰-PBMR.



شکل ۲. نمونه‌ای از مجتمع سوخت و ذرات TRISO.

### ۳. شار محوری و شعاعی در قلب رآکتور

#### ۱.۳ تولید سطح مقطع در دماهای بالا

کد NJOY دارای واحدهای<sup>(۴)</sup> مختلفی است که مرحله به مرحله اثرهای پارامترهای مختلف بر داده‌ی موردنظر را اعمال می‌کند. ابتدا سطح مقطع‌های ایزوتوپ‌های تشکیل‌دهنده‌ی سوخت رآکتور از کتابخانه‌های ENDF/B-6 و دماهای کاری رآکتور که در حدود ۵۰۰ تا ۱۰۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد است به عنوان ورودی، وارد کد NJOY شد و این کد با اعمال اثرهای دما، در نهایت سطح مقطع‌های عناصر در دماهای جدید را در قالبی که قابل استفاده در کد MCNP4C است، تولید کرد.



#### ۱.۴ ناحیه‌ی متخلخل

در علوم مهندسی ناحیه‌ی متخلخل به ناحیه‌ای از جسم جامد اطلاق می‌شود که در آن حفره‌های خلاء وجود دارد و یا به نواحی‌ای گفته می‌شود که به علت تعداد بسیار زیاد و سلسله‌وار جسم می‌توان آن را به عنوان یک ناحیه‌ی متخلخل در نظر گرفت. همچنین، تعداد زیادی جسم کروی را که به طرق مختلف در کنار هم قرار گرفته‌اند نیز می‌توان به عنوان یک ناحیه‌ی متخلخل در نظر گرفت. پارامتر مهم در محاسبه‌ی هر ناحیه‌ی متخلخلی، میزان تخلخل و نفوذپذیری آن است.

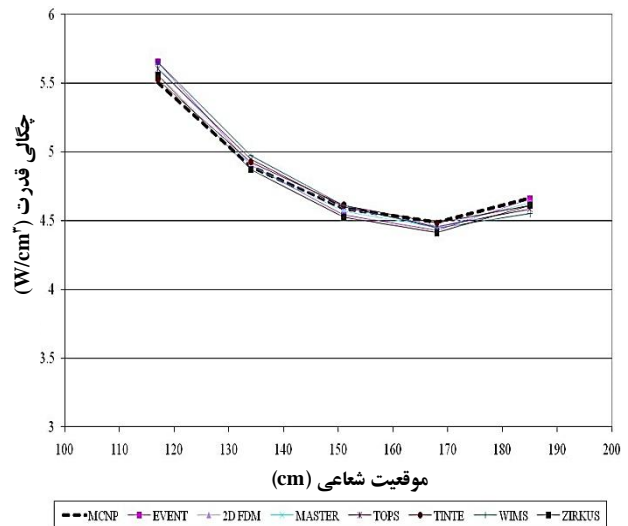
#### ۱.۱.۴ تخلخل

در یک ناحیه‌ی متخلخل نسبت حجم خلأ به حجم کل را تخلخل گویند. مجتمع‌های سوخت در ناحیه‌ی قلب رآکتور به صورت تصادفی روی هم قرار گرفته‌اند که با توجه به نتایج تجربی میزان تخلخل آن‌ها بین ۰.۳۸ تا ۰.۴۲ پیش‌بینی شده است. در این هندسه اگر حجم مجتمع‌های سوخت را به حجم کل قلب تقسیم کنیم عدد ۰.۶۹ به دست می‌آید، که اگر این عدد را از یک کم کنیم، میزان تخلخل ۰.۳۹ به دست می‌آید. در بحث قرارگیری چند جسم کروی در کنار هم، می‌توان این کره‌ها را به طرق مختلف در کنار هم قرار داد که از جمله‌ی آن‌ها می‌توان به مکعبی ساده، با ضریب پرشدگی ۰.۵۲، مکعبی مرکز پر با ضریب پرشدگی ۰.۶۸ و مکعبی مرکز وجوه پر با ضریب پرشدگی ۰.۷۴ اشاره نمود. برای شبیه‌سازی تعدادی گلوله‌ی سوخت، این گلوله‌ها به صورت مکعبی مرکز پر با ضریب پرشدگی ۰.۶۸ در کنار هم قرار گرفته‌اند چرا که این نوع چینش نزدیک‌ترین حالت به حالت تصادفی است [۱۱].

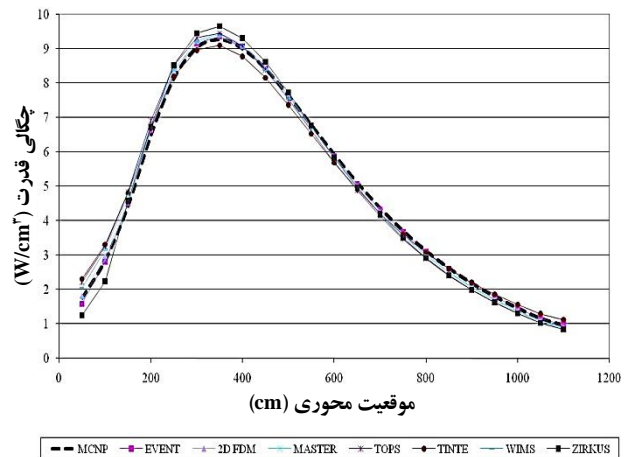
#### ۲.۱.۴ نفوذپذیری

برای محاسبه‌ی نفوذپذیری جریان در هندسه‌های مختلف نظریه‌های بسیار زیادی مطرح شده است. طبق قانون دارسی، گرادیان فشار در طول یک مسیر متخلخل با سرعت جریان سیال، میزان نفوذپذیری و گرانروی جریان رابطه دارد [۱۱]:

$$-\frac{dP}{dx} = \frac{\mu}{K} u_D \quad (1)$$



شکل ۳. تغییرات شعاعی چگالی قدرت حرارتی به دست آمده از کد MCNP4C و مقایسه‌ی آن با نتایج دیگر کدها.



شکل ۴. تغییرات محوری چگالی قدرت حرارتی به دست آمده از کد MCNP4C و مقایسه‌ی آن با نتایج دیگر کدها.

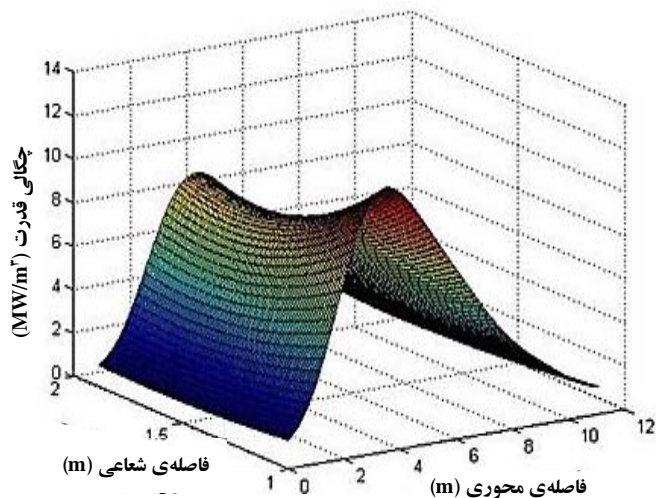
#### ۴. شبیه‌سازی ترموهیدرولیکی

در نرم‌افزارهای موجود که برای شبیه‌سازی ترموهیدرولیکی این نوع رآکتور استفاده شده‌اند، ناحیه‌ی قلب به صورت یک ناحیه‌ی همگن در نظر گرفته شده و با انجام تمهیدات خاص و با معادله‌های خاص نمودارهای دما، فشار و دیگر پارامترهای ترموهیدرولیکی به دست آمده است. در این مقاله با توجه به این که نرم‌افزار CFX.12 قابلیت حل معادله‌های ناحیه‌ی متخلخل را دارد ناحیه‌ی قلب این نوع رآکتور همانند یک ناحیه‌ی متخلخل در نظر گرفته شد و با محاسبه‌ی پارامترهای یک ناحیه‌ی متخلخل برای این هندسه (نفوذپذیری، تخلخل و ...) شبیه‌سازی این نوع رآکتور انجام شد [۱۰].

### ۱.۲.۴ مدل‌سازی جریان

برای مدل‌سازی جریان در درون قلب رآکتور همان‌طور که پیش از این گفته شد از ناحیه‌ی متخلخل استفاده شد. ناحیه‌ی سوخت به عنوان ناحیه‌ی متخلخل با میزان تخلخل ۰/۳۹ و نفوذپذیری  $6 \times 10^{-7}$  در نظر گرفته شد. در این رآکتور سیال گازی هلیوم با نرخ جریان ۱۹۵ کیلوگرم بر ثانیه و در دمای ۵۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد و فشار ۹ مگاپاسکال وارد قلب رآکتور می‌شود و در خروجی‌های رآکتور به ۹۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد و فشاری در حدود ۸/۷ مگاپاسکال می‌رسد. برای تعیین شرایط مرزی، در ورودی مسأله دما و فشار داده می‌شود و در خروجی قلب نرخ جریان ۱۹۵ کیلوگرم بر ثانیه تعیین می‌شود و همچنین در سطح‌های تماس قلب با بازتاباننده‌های درونی و بیرونی انتقال حرارت جابه‌جایی در نظر گرفته شده است. شرایط اولیه‌ی مسئله نزدیک شرایط واقعی مسئله در نظر گرفته شده است که البته در حل حالت گذرا پس از گذشت چند دوره‌ی زمانی، تغییرات شرایط اولیه اثر چندانی بر حل مسئله و جواب آن ندارد.

برای وارد کردن قدرت حرارتی ناشی از شکافت گرمایی، در نرم‌افزار CFX.12، در ناحیه‌ی متخلخل از دو تابع جبری و سینوسی، به ترتیب، در راستای شعاعی و محوری استفاده شد. دو تابع قدرت گرفته شده از کد MCNP4C به عدد یک بهنجار و سپس همراه با یک مقدار ثابت در هم‌دیگر ضرب و به عنوان منبع حرارتی در ناحیه‌ی متخلخل استفاده شد. در شکل ۵ نمودار سه بعدی قدرت ناشی از شکافت هسته‌ای استفاده شده در نرم‌افزار CFX.12 نشان داده شده است.



شکل ۵. نمودار سه بعدی قدرت حاصل از شکافت هسته‌ای.

که در آن،  $\mu$  گرانروی،  $K$  نفوذپذیری و  $u_D$  سرعت جریان سیال است. سرعت جریان سیال را می‌توان از سرعت جریان سیال در نبود ناحیه‌ی متخلخل محاسبه کرد. انحراف از مقدار واقعی در قانون دارسی برای گازها و سیال با جریان‌های با سرعت بالا زیاد است. برای به دست آوردن مقدار دقیق نفوذپذیری از نظریه‌ی ارگان استفاده شد که با بسط نظریه‌ی کارمان-کوزی رابطه‌ی بین سرعت و افت فشار، نفوذپذیری، تخلخل و دیگر پارامترهای هندسی و سیال به دست آمده است

$$-\frac{dP/dx}{\rho u_D^2} d = \frac{d^2}{K} \frac{1}{Re_d} + \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon^3} \quad (2)$$

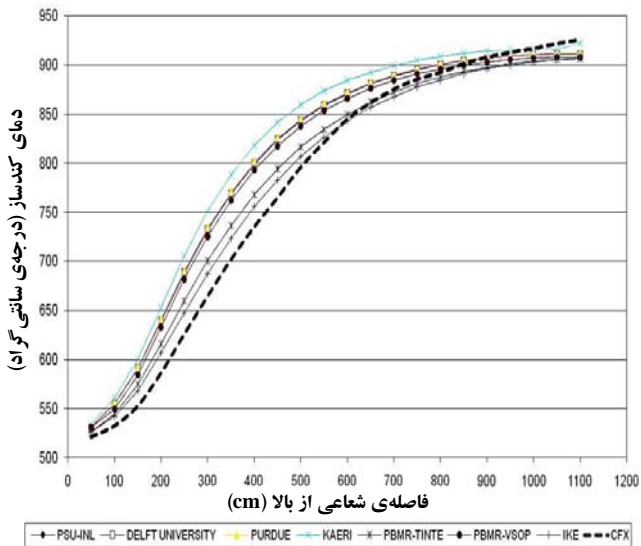
که در آن  $d$  قطر هیدرولیکی،  $Re$  ضریب رینولدز، و  $\varepsilon$  تخلخل است. اگر این رابطه را براساس میزان نفوذپذیری مرتب کنیم چنین به دست می‌آید [۱۱]

$$-\frac{dP/dx}{\rho u_D^2} d - \frac{\varepsilon^2}{1-\varepsilon} = \frac{18 \cdot (1-\varepsilon)}{Re_d} + 1 \quad (3)$$

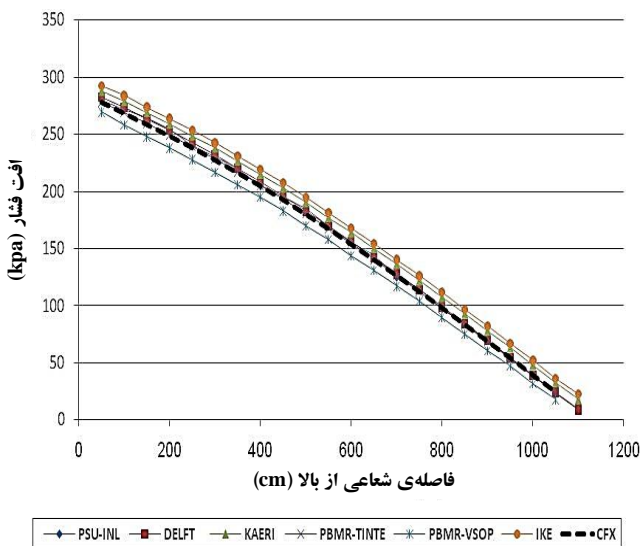
### ۲.۴ شبیه‌سازی رآکتور با نرم‌افزار CFX.12

از جمله مزایای این نرم‌افزار این است که بر خلاف دیگر نرم‌افزارهای ترموهیدرولیکی که در آن‌ها باید هندسه در نرم‌افزار دیگری هم چون Gambit مشخص و سپس به عنوان ورودی مسئله به نرم‌افزار شبیه‌سازی داده شود، نرم‌افزار CFX.12 دارای این قابلیت است که هندسه در درون خودش مشخص می‌شود. این هندسه شامل بازتاباننده‌ی استوانه‌ای درونی است که قلب رآکتور، که یک ناحیه‌ی متخلخل فرض شده است، دور آن قرار دارد. سپس بازتاباننده‌ی بیرونی، پوشش دور رآکتور و بازتاباننده‌های بالایی و پایینی با حفظ اندازه‌های واقعی رآکتور رسم شده است.

هندسه پس از مشخص شدن باید مش‌بندی شود، منظور از مش‌بندی این است که هندسه به ناحیه‌های کوچک‌تری تقسیم شود و نرم‌افزار با تلفیق معادله‌های حاکم برای هر ناحیه پارامترهای ترموهیدرولیکی را محاسبه کند. در این هندسه مش استفاده شده دارای یک میلیون عنصر است و در دو ناحیه‌ی سطح بازتاباننده‌ی درونی و بیرونی از لایه‌ی مرزی استفاده شده است. تراکم مش‌بندی در درون قلب و ناحیه‌ی متخلخل بیش‌تر از بقیه‌ی نواحی است زیرا حل معادله‌ها در آن منطقه بیش‌تر مورد نظر بوده و باید جواب دقیق‌تری از حل آن‌ها به دست آید.



شکل ۷. تغییرات محوری دما در رآکتور، به دست آمده از نرم‌افزار CFX.۱۲ و مقایسه‌ی آن با نتایج دیگر کدها.



شکل ۸. تغییرات شعاعی افت فشار در رآکتور، به دست آمده از نرم‌افزار CFX.۱۲ و مقایسه‌ی آن با نتایج دیگر کدها.

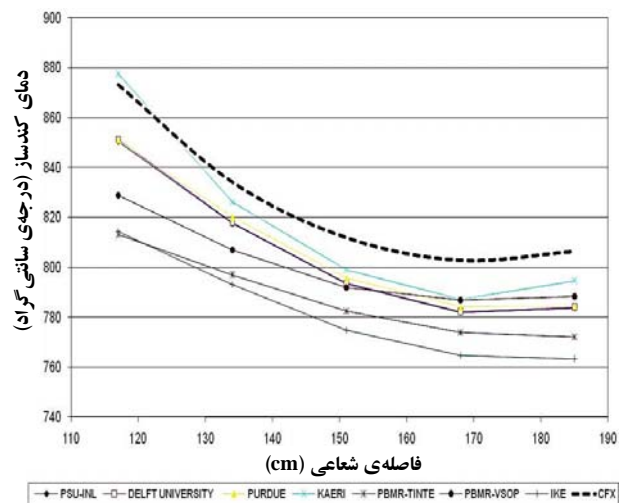
#### ۴.۴ شبیه‌سازی جریان بر روی مجتمع‌های سوخت

در هر شبیه‌سازی ترموهیدرولیکی علاوه بر نمودارهای دما، فشار و سرعت، باید جهت حرکت جریان سیال و محل‌های تشکیل گردابه‌های ناشی از جریان گردابه‌ای و نحوه‌ی حرکت سیال بر روی جسم مشخص شود [۱۲]. در این جا به علت این که ناحیه‌ی قلب رآکتور متخلخل در نظر گرفته شده بود برای به دست آوردن پارامترهای اشاره شده، از تعدادی مجتمع سوخت در کنار هم استفاده شد. نحوه‌ی چینش این مجتمع‌های سوخت،

#### ۳.۴ نمودار دما و فشار در قلب رآکتور

گاز هلیوم با دمای ۵۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد وارد قلب شده و پس از گرفتن گرما از سطح گلوله‌های سوخت، دمای آن در خروجی رآکتور به حدود ۹۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد خواهد رسید [۷]. در شکل‌های ۶ و ۷ تغییرات شعاعی و محوری دما در رآکتور با نتایج دیگر کدها مقایسه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود میزان اختلاف با اغلب آن‌ها بسیار ناچیز است. اختلاف کم‌تر از ۵٪ است (در علوم مهندسی این میزان اختلاف معقولی است). در نمودار تغییرات محوری دما چون اوج قدرت حرارتی در ناحیه‌ی ۲۰۰ تا ۶۰۰ سانتی‌متر اتفاق می‌افتد منحنی تغییرات دما بیش‌ترین شیب را دارا است. این موضوع برای نمودار تغییرات شعاعی دما در سطح تماس با بازتاباننده اتفاق می‌افتد.

افت فشار در رآکتورهای با سوخت کروی عمدتاً ناشی از اصطکاک سیال با سطح کروی مجتمع‌های سوخت است. با توجه به تعریف این ناحیه به عنوان یک ناحیه‌ی متخلخل، از یک منبع همگن همانند منبع حرارتی در قلب استفاده شد و با تعریف میزان نفوذپذیری به عنوان اصلی‌ترین پارامتر آن افت ناشی از اصطکاک بین سیال و سطح مجتمع سوخت محاسبه شد. در شکل ۸ افت فشار سیال و هم‌چنین میزان اختلاف آن با نتایج چند کد دیگر نشان داده شده است. در این نوع رآکتور سیال با فشار ۹ مگاپاسگال وارد و با فشار حدود ۸٫۷ مگاپاسگال خارج می‌شود.



شکل ۹. تغییرات شعاعی دما در رآکتور، به دست آمده از نرم‌افزار CFX.۱۲ و مقایسه‌ی آن با نتایج دیگر کدها.



نکته‌ی قابل توجه دیگر در این شبیه‌سازی این است که تنها اثر گرمایی مجتمع‌های سوخت بر روی سیال دیده شده است؛ زیرا به علت پیچیده بودن مجتمع‌های سوخت که حاوی حدود ۱۵۰۰۰ ذره‌ی سوخت با لایه‌های متفاوتی از کربن و سیلیکات بوده و به صورت فشرده در کنار هم قرار گرفته‌اند، از اثر انتقال حرارت از طریق هدایت در درون مجتمع‌های سوخت صرف‌نظر شده است و تنها از حرارت ناشی از مجتمع‌های سوخت به عنوان شرط مرزی بر روی سطح مجتمع‌ها استفاده شده است.

همان‌طور که در شکل ۱۰ دیده می‌شود گردابه‌های سیال در پشت مجتمع‌های سوخت و در فاصله‌ی بین آن‌ها به وجود می‌آید که این مسأله ناشی از افت موضعی سیال در پشت مجتمع‌های سوخت است. سیال هر چه به سمت پایین هندسه حرکت می‌کند گردابه‌های بزرگ‌تری را در سر راه خود می‌بیند. این گردابه‌ها در زاویه‌ی ۱۴۰ درجه نسبت به جلوی مجتمع‌های سوخت به وجود می‌آید که ناشی از صفر شدن گرادیان سرعت در آن نقطه است [۱۲]. هم‌چنین می‌توان میزان افت فشار در این هندسه را تعیین کرد که با توسعه‌ی آن برای کل رآکتور به مقدار ۲۹۰ کیلوپاسگال می‌رسیم که نتایج پیش از این به دست آمده با استفاده از ناحیه‌ی متخلخل را به نوعی تأیید می‌کند.

#### ۵.۴ تراکم‌پذیری گاز هلیوم و اصلاح فرمول داریسی-ویسباخ

در این مطالعه تراکم‌پذیری گاز هلیوم به عنوان یک پارامتر مؤثر در معادله‌های ترموهیدرولیکی مورد توجه قرار گرفت. چگالی گاز هلیوم در دما و فشار محیط، ۰/۱۸ کیلوگرم بر مترمکعب، و در دما و فشار کاری رآکتور در حدود ۶/۵ کیلوگرم بر مترمکعب است. این مقادیر از قانون گاز کامل به دست می‌آید

$$\rho(z) = \frac{P(z)}{RT(z)} \quad (5)$$

$$R = \frac{\bar{R}}{M} \quad (6)$$

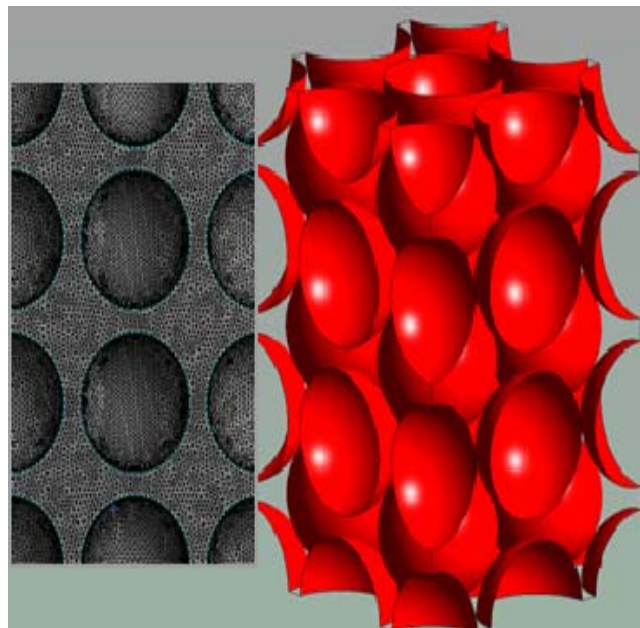
$$\bar{R} = 8,314 \text{ (j/mol.K)}$$

لذا با توجه به این نکته، در محاسبه‌ی ترموهیدرولیکی انجام شده نمی‌توان چگالی سیال را ثابت فرض کرد. شکل ۱۱ تغییرات چگالی در طول قلب رآکتور را نشان می‌دهد. همان‌طور که دیده می‌شود چگالی سیال در طول قلب رآکتور در حال تغییر است. این نکته منجر به اصلاح معادله تجربی داریسی-ویسباخ برای افت فشار سیال در قلب رآکتور شد.

همان‌گونه که پیش از این توضیح داده شد، به صورت مکعبی مرکز پر است زیرا که نزدیک‌ترین ضریب پرشدگی به حالت تصادفی را دارد. در مش‌بندی این هندسه باید چند نکته مهم مورد نظر قرار گیرد. اولین موضوع در ارتباط با اندازه‌ی مش مورد استفاده است که در هر شبیه‌سازی گردابه‌ای اندازه‌ی مش ارتباط مستقیم با ایجاد گردابه‌ها در سیال دارد. بزرگ‌ترین طول مش باید ۰/۰۱ بزرگ‌ترین طول هندسه باشد [۳]. در این‌جا، این اندازه ۲/۱۳ سانتی‌متر است. هم‌چنین اندازه‌ی کوچک‌ترین طول مش باید در حدود یک ششم اندازه‌ی بزرگ‌ترین طول مش باشد [۳]. در شکل ۹ نحوه‌ی چینش مجتمع‌های سوخت و مش استفاده شده نشان داده شده است.

یکی از محاسن نرم‌افزار CFX.12 وجود شرط مرزی تقارن<sup>(۵)</sup> است که این امکان را فراهم می‌کند که بتوان دیواره‌های کناری را متقارن فرض کرد. این کار سبب می‌شود که نرم‌افزار از ناحیه‌هایی که متقارن فرض شده‌اند جسم را گسترش داده و به نوعی به چینش تعداد بسیار زیادی از مجتمع‌های سوخت دست یابد. در این هندسه فرض شده است که سیال با نرخ جریان و دمای مشخص وارد می‌شود و فشار خروجی آن ثابت است. هم‌چنین فرض شده است که این مجتمع‌های سوخت در پایین قلب قرار دارند. نرخ جریان سیال ورودی چنین محاسبه شد

$$\dot{m}_{\text{model}} = \dot{m}_{\text{PBMR}} \left( \frac{A_{\text{model}}}{A_{\text{PBMR}}} \right) \quad (4)$$



شکل ۹. نحوه‌ی چینش مجتمع‌های سوخت و مش استفاده شده.



که در آن،  $\dot{m}$  نرخ جریان سیال،  $\varepsilon$  میزان تخلخل،  $\psi$  ضریب کوگلر و اسچولتن،  $A$  سطح مقطع عبور سیال،  $d$  قطر لوله،  $H$  طول لوله و  $\rho$  چگالی سیال است.

از این رابطه در چندین مقاله برای تعیین افت فشار، بدون در نظر گرفتن اثرات تراکم‌پذیری گاز هلیم استفاده شده است که با توجه با تغییرات چگالی سیال در طول رآکتور، شکل اصلاح شده‌ی آن به صورت زیر است

$$\Delta P = \int_0^z \psi \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon^3} \frac{H}{d} \frac{1}{\rho(z)} \left( \frac{\dot{m}}{A} \right)^2 dz \quad (9)$$

از رابطه‌های (۵) و (۹) نتیجه می‌شود که به دست آوردن میزان افت فشار در طول رآکتور مستلزم حل یک معادله‌ی دیفرانسیلی است.

### ۵. نتیجه‌گیری

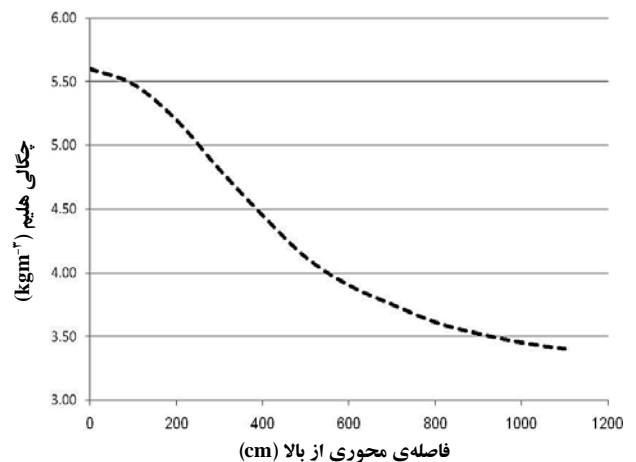
استفاده از کد NJOY و تولید سطح مقطع در دماهای بالا و همچنین استفاده از روش‌های کاهش خطا در شبیه‌سازی با کد MCNP4C نتایج قابل قبولی را به دست داد. اگر چه همگن گرفتن ذرات سوخت این نوع رآکتور به نوعی ساده‌سازی مسئله را به دنبال داشت، ولی حاکی از تأثیرات کم بر روی نتایج نهایی است. همچنین از نتایج به دست آمده استنباط شد که نرم‌افزار CFX.12 با اختلاف بسیار کمی نسبت به کدهای تخصصی موجود، توانایی مدل کردن ناحیه‌های متخلخل، و شبیه‌سازی ترموهیدرولیکی این نوع رآکتور را دارد.

### پی‌نوشت‌ها

۱. Pebble Bed Modular Reactor
۲. High Temperature Reactor
۳. Pyrolytic
۴. Module
۵. Symmetry



شکل ۱۰. محل ایجاد گردابه‌های سرعت در نمای عمودی.



شکل ۱۱. تغییرات محوری چگالی سیال در رآکتور.

برای تعیین افت فشار سیال در درون یک مجرا، از معادله‌ی تجربی دارسی-ویسباخ استفاده شد

$$\Delta P = f \frac{l}{d} \rho \frac{v^2}{2} \quad (7)$$

که در آن،  $d$  و  $l$ ، به ترتیب، قطر و طول لوله،  $v$  و  $\rho$ ، به ترتیب، سرعت و چگالی سیال، و  $f$  ضریب دارسی-ویسباخ است.

کوگلر و اسچولتن [۱۳] با در نظر گرفتن شرایط هندسی و مشخصات سیال یک ناحیه‌ی متخلخل این رابطه را به شکل زیر ارائه نمودند

$$\Delta P = \psi \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon^3} \frac{H}{d} \frac{1}{\rho} \left( \frac{\dot{m}}{A} \right)^2 \quad (8)$$





1. F. Reitsma, G. Strydom, J. De Haas, K. Ivanov, B. Tyobeka, R. Mphahlele, T. Downar, S. Seker, H. Gougar, D. Da Cru, The PBMR steady-state and coupled kinetics core thermal-hydraulics benchmark test problems, Nucl. Eng. Des. 236 (2006) 657–668.
2. B. Dudley, T. Dudley, W. Bouwer, P. De Villiers, Z. Wang, The thermal-hydraulic model for the pebble bed modular reactor (PBMR) plant operator training simulator system, Nucl. Eng. Des. 238 (2008) 3102–3113.
3. Y.A. Hassan, G. Yesilyurt, Flow distribution of pebble bed high temperature of gas cooled reactors using large eddy simulation, J. World Energy Base, ETDEWEB ID: 20265944 (2002).
4. Y.A. Hassan, Large eddy simulation in pebble bed gas cooled core reactors, Nuclear Engineering and Design, 238(3) (2008) 530-537.
5. J. Lee, G. Park, K. Kim, W. Lee, Numerical treatment of pebble contact in the flow and heat transfer analysis of a pebble bed reactor core, Nuclear Engineering and Design, 237 (2007) 2183-2196.
6. A. Acir, H. Coskun, Criticality and burn up analyses of a PBMR-400 full core using Monte Carlo calculation method, Ann. Nucl. Energy 38 (2–3) (2011) 298–301.
7. B. Boer, Optimized Core Design and Fuel Management of a Pebble-Bed Type Nuclear Reactor, IOS Press Under the Imprint Delft University Press (2008).
8. J.F. Briesmeister, MCNP-A General Monte Carlo N-particle Transport Code, Version 4C2 (1997)
9. Y.A. Hassan, G. Yesilyurt, LES simulation in pebble bed modular reactor core through randomly distributed fuel elements, Trans. Nucl. Sci., (2003) 346–348.
10. ANSYS CFX-11.0, ANSYS Inc., Canonsburg, USA, November (2006).
11. M. Kaviany, Principles of Heat Transfer in Porous Media, Springer-Verlag, New York (1995).
12. F.P. Incropera, Introduction to Heat Transfer, John Wiley and Sons Inc, United States (2005).
13. K. Kugeler, R. Schulten, Hochtemperatur-reaktortechnik, Springer-Verlag (1989).