





دانشگاه اصفهان
دانشکده علوم و فن آوریهای نوین
گروه مهندسی هسته‌ای

پایان نامه کارشناسی ارشد رشته مهندسی هسته‌ای

بررسی ترموهیدرولیکی حادثه ورود هوا به رآکتور PBMR

استاد راهنما:

دکتر محمدحسین استکی

استاد مشاور:

دکتر نوید ایوبیان

پژوهشگر:

احمدعلی ایرانپور

بهمن ماه ۱۳۹۱

کلیه حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات، ابتکارات و نوآوری‌های ناشی از تحقیق موضوع این پایان‌نامه متعلق به دانشگاه اصفهان است.



دانشگاه اصفهان

دانشکده علوم و فن آوریهای نوین

گروه مهندسی هسته‌ای

پایان نامه کارشناسی ارشد رشته مهندسی هسته‌ای

آقای احمدعلی ایرانپور

تحت عنوان

بررسی حادثه ترموهیدرولیکی ورود هوا به رآکتور PBMR

در تاریخ ۹۱/۱۲/۱۰ توسط هیأت داوران زیر بررسی و با درجه به تصویب نهایی رسید.

۱- استاد راهنمای پایان نامه دکتر محمدحسین استکی با مرتبه‌ی علمی استادیار امضاء

۲- استاد مشاور پایان نامه دکتر نوید ایوبیان با مرتبه‌ی علمی استادیار امضاء

۳- استاد داور داخل گروه دکتر غلامرضا انصاری فر با مرتبه‌ی علمی استادیار امضاء

۴- استاد داور خارج از گروه دکتر بهزاد تیموری با مرتبه‌ی علمی استادیار امضاء

امضای مدیرگروه

چکیده

هدف از انجام این پروژه بررسی رخدادهای ورود هوا به رآکتور PBMR از دیدگاه ترموهیدرولیکی و طراحی یک سامانه خنک کننده برای رآکتور مورد نظر است. بعد از جمع‌آوری اطلاعات مربوط به ساختار رآکتور، همچنین اطلاعات مربوط به حادثه‌ای اشاره شده در بالا و چگونگی کمی و کیفی رخداد آن، کار شبیه‌سازی رآکتور توسط نرم‌افزار CFX که زیر مجموعه‌ای از نرم‌افزارهای ANSYS است انجام شد. با شروع حادثه توان تولیدی رآکتور صفر می‌شود ولی گرمای واپاشی با یک نرخ نزولی شروع به تولید می‌کند. این گرما توسط سامانه خنک کننده می‌بایست دفع شود با انجام شبیه‌سازی‌های مربوطه و با توجه به معیار در نظر گرفته شده برای دمای مربوط به محفظه فشار رآکتور و دماهای بدست آمده از خروجی نرم‌افزار به این نتیجه می‌رسیم که طراحی انجام شده جوابگوی برداشت بار گرمایی تولید شده توسط واپاشی جهت حفظ مرز دمایی تعیین شده می‌باشد و امکان ساخت چنین سامانه‌ای در عمل وجود خواهد داشت.

کلید واژه‌ها: PBMR - ترموهیدرولیک - CFX - گرمای واپاشی - سامانه خنک‌کننده

فهرست مطالب

صفحه

عنوان

فصل اول: رآکتورهای با دمای بسیار بالا

- 1-1 رآکتورهای با دمای بسیار بالا 1
- 2-1 تاریخچه HTGR 2
- 3-1 طراحی HTGR 3
- 4-1 رآکتورهای PBMR 3
- 5-1 حادثه ی ورود هوا به رآکتور 5

فصل دوم: بررسی پدیده فیزیکی حادثه

- 1-2 بررسی پدیده فیزیکی حادثه 6
- 2-2 تولید گرمای واپاشی 6
- 3-2 گلوله های سوخت 7
- 4-2 شرح مدل 8
- 5-2 نتایج ناشی از خروج سیال از رآکتور 9
- 6-2 ناحیه ی متخلخل 9
- 7-2 شرایط شروع و شرایط مرزی 9
- 8-2 روابط انتقال حرارتی و سیالاتی 10
- 1-8-2 انتقال حرارت جابه جایی طبیعی 13
- 9-2 افت فشار در گلوله های سوخت 15
- 10-2 محاسبات RCCS 16
- 1-10-2 بار گرمایی در هنگام خاموش اضطراری سامانه 18
- 2-10-2 حادثه ی PLOFC 18
- 3-10-2 حادثه ی DLOFC 18
- 11-2 هندسه 19
- 12-2 ضریب انتقال حرارت رسانشی موثر گلوله های سوخت 21
- 13-2 انتقال حرارت از مخزن فشار رآکتور به پره ها 22
- 14-2 انتقال حرارت از پره به سیال 24
- 15-2 مدل محاسباتی انتقال حرارت و جرم در چرخه ی سامانه ی RCCS 25

25	1-15-2 معادله ی پیوستگی (بقای جرم)
25	2-15-2 قانون دوم نیوتن
25	3-15-2 قانون اول ترمودینامیک
29	16-2 مدل محاسباتی انتقال حرارت از RCCS از پره به سازه ی بتنی
30	17-2 توزیع دما در سازه ی بتنی
34	18-2 انتقال حرارت از آب به چاه حرارتی نهایی
35	19-2 انتقال حرارت از چاه گرمایی به محیط
37	20-2 کارهای تجربی انجام شده در این زمینه
37	1-20-2 هدف از انجام کارهای تجربی
38	2-20-2 طراحی دستگاه تجربی (انجام شده در کارهای قبلی)
39	3-20-2 پروسه ی آزمایش
41	4-20-2 نتایج آزمایشگاهی
43	21-2 کنترل رآکتور
فصل سوم: شبیه سازی و نتایج	
44	1-3 کارکرد رآکتور PBMR-400
45	2-3 هلیوم به عنوان سیال
45	3-3 مدل کردن افت فشار
47	4-3 ملاحظات مهندسی PBMR
47	5-3 فرض های و معیارها برای طراحی سامانه خنک کننده
49	6-3 خواص گرافیت
49	7-3 شرایط مرزی اولیه
50	1-7-3 توزیع دمای اولیه قلب
51	8-3 شرح مدل در CF X
51	1-8-3 ضریب رسانش حرارتی قلب
51	2-8-3 ظرفیت گرمایی قلب
54	3-8-3 شبیه سازی حادثه
57	9-3 سامانه پیشنهادی
59	10-3 راه کارهای پیشنهادی

صفحه	عنوان
60	11-3 استفاده از قابلیت نرم افزار CFX در تعیین قطر
61	12-3 نتایج بدست آمده
65	13-3 روش حل نرم افزار
66	14-3 کارهای آینده

فهرست شکل‌ها

عنوان	صفحه
شکل 1-1: اجزای سوخت رآکتور PBMR [1]	3
شکل 1-2: نمای بالای رآکتور PBMR-400 [1]	4
شکل 2-2: پوسته ولوله	10
شکل 2-4: گرمای برداشتی و گرمای هدر رفته رآکتور [5]	17
شکل 2-5: بار گرمایی پس از خاموشی	18
شکل 2-9: یک طرح برای سامانه خنک کننده	20
شکل 2-13: انتقال حرارت از پره به سیال	24
شکل 2-15: جریان گرمایی خنک کننده	27
شکل 2-16: مقاومت گرمایی بین پره و بتن	29
شکل 2-17: حجم کنترل دیواره بتنی	30
شکل 2-18: نمای بالایی سامانه خنک کننده	30
شکل 2-20: حجم کنترل سازه بتنی	32
شکل 2-21: چندحجم کنترل متوالی	33
شکل 2-22: انتقال حرارت سازه بتنی رآکتور	33
شکل 2-23: انتقال حرارت از آب به چاه گرمایی	34
شکل 2-24: انتقال حرارت به محیط	35
شکل 2-25: شبیه سازی انتقال حرارت	38
شکل 2-26: سامانه طراحی شده برای آزمایش [4]	39
شکل 2-27: دما بر حسب زمان	40
شکل 2-29: دمای لوله گرمایی در دو حالت مختلف	42
شکل 2-30: دمای بتن در دو حالت مختلف	42
شکل 2-1 نمودار افت دبی رآکتور	46
شکل 3-1-1: نمای برش خورده رآکتور	55
شکل 3-1-2: نمای برش خورده رآکتور	55
شکل 3-2: سامانه خنک کننده رآکتور	61
شکل 3-3: توزیع دمای قلب	62
شکل 3-4: توزیع دمای محفظه فشار رآکتور	62

فهرست جدول‌ها

صفحه	عنوان
7.....	جدول 2-1: ثوابت رابطه توان واپاشی
43.....	جدول 2-2: دماهای شرایط گوناگون
44.....	جدول 3-1: خصوصیات رآکتور PBMR-400
49.....	جدول 3-2: خواص گرافیت
49.....	جدول 3-3: شرایط مرزی اولیه
63.....	جدول 3-5: مقایسه مقادیر دمایی

فصل اول

رآکتورهای با دمای بسیار بالا¹ (VHTR)

1-1 رآکتورهای با دمای بسیار بالا

رآکتورهای با دمای بسیار بالا یکی از رآکتورهای نسل چهارم هستند. رآکتورهای² PBMR در این رده بندی قرار می گیرند. چرخه سوختی تطبیق پذیر این رآکتورها قابلیت رقابت با هر رآکتوری در هر اندازه ای را دارد. دمای بالا در این رآکتور مزایای زیر را داراست:

- راندمان بالای حرارتی
- امکان تولید هیدروژن و گرمایش
- نوآوری و طراحی باعث می شود تا از ذرات ریز سوختی بتوان استفاده کرد. همچنین امکان ساخت رآکتور با سیال هلیوم و کند کننده ی گرافیت بوجود می آید.
- رآکتور 400-PBMR رآکتوری با اندازه ی متوسط است.
- دستاوردهای این رآکتور:
- مصرف اورانیوم تازه برای بارگذاری به مقدار کمینه خود می رسد.

1 . Very height temperature reactor
2 . Pebble bed modular reactor

- کم کردن نوکلیدهای دارای عدد اتمی بالاتر از اورانیوم¹ (TRUs) در سوخت مصرف شده
 - بارگذاری مجدد (refueling) پیوسته به منظور کاهش دفعات خاموشی رآکتور [1]
- این رآکتورها دمای خروجی بین 900 تا 1000 درجه سلسیوس دارند. این خروجی دمایی بالا راندمان حرارتی را افزایش خواهد داد. راندمان حرارتی این رآکتورها تا حدود 50 درصد می‌رسد.

1-2 تاریخچه HTGR²

اقتصادی کردن رآکتورهای خنک شونده با گاز در سال 1956 در نیروگاه Calder Hall در انگلیس شروع شد. انگلیس برای این کار 26 عدد از رآکتور Magnox و 14 عدد از رآکتور خنک شونده با گاز را ساخت که از این رآکتورها دو تا از رآکتورهای Magnox و همهی رآکتورهای خنک شونده با گاز تا سال 2008 کار می‌کردند. علاوه بر این 11 تا از رآکتورهای خنک شونده با گاز در فرانسه، ایتالیا، ژاپن و اسپانیا کار می‌کردند. رآکتورهای با دمای بسیار بالا در سال 1950 برای افزایش راندمان رآکتورهای³ GCR³ بوجود آمد، این پیشرفت با استفاده از ذرات سوخت پوشیده شده با سرامیک و سیال هلیوم همراه شد و قابلیت این را پیدا کرد که رآکتور بتواند در دمای بسیار بالا کار کند. به زودی رآکتور آزمایشی Dragon با قدرت 20 مگا وات در انگلیس ساخته شد که دمای خروجی آن 750 درجه سلسیوس بود و رآکتور⁴ AVR 15 مگا واتی در آلمان دارای خروجی دمای 950 درجه سلسیوس بود. رآکتور 60 مگا واتی Peach Bottom unit یک رآکتور HTGR با سوخت حلقه‌ای و شکل گرافیت میله‌ای جامد بود که در نزدیکی فیلادلفیا در آمریکا کار می‌کرد. در این رآکتورها از فولاد زنگ نزن برای لوله‌های جریان سیال آنها استفاده شده است. هر سه تا از رآکتورها خاموش شده‌اند.

رآکتورهای HTGR بعدی قدرت بالاتری داشتند و در آنها از بتن پیش تنیده برای ساخت حفاظ آنها استفاده شد. رآکتور FSV یک رآکتور 330 مگاواتی بود که دارای بلوک‌های 6 قطعی سوخت متشکل از اورانیوم 235 و توریوم بود که در کولرودای آمریکا کار می‌کرد.

این رآکتور قابلیت دسترسی (availability) پایین داشت. دیگر رآکتورهای طراحی شده در این زمینه در کشورهای آمریکا، روسیه، آلمان به دلایل متعدد ساخته نشد. بسیاری از خصیصه‌های رآکتورهای HTR-

1 . transuranic

2 . high temperature gas reactor

3 . Gas cooled reactor

4 . Arbeitsgemeinschaft versus reactor

modul در شرکت‌های زیمنس و اینتراتورم در سال 1980 گسترش یافت. بسیاری از خصیصه‌های این رآکتورها (محدودیت دمایی 1600 درجه سانتی‌گراد، سیستم خنک‌کننده‌ی غیرفعال (passive) در طول حادثه و لوله‌های فلزی فولادی) با رآکتورهای بعدی HTGR مطابق شد که شامل رآکتورهای¹ PBMR و² GT-HMR است.

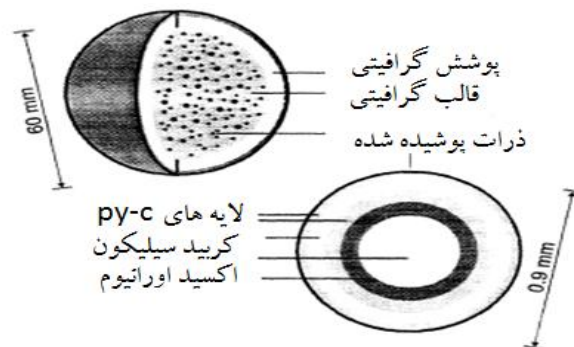
3-1 طراحی HTGR

HTGR ها توسط ذرات سوختی پوشیده شده با گرافیت بار گذاری می شود.

4-1 رآکتورهای PBMR

در رآکتور 400 PBMR از سوخت با ذرات دی‌اکسید اورانیوم استفاده شده است. که در پوشش گرافیتی قرار داده شده است و به شکل کروی هستند.

قطر گلوله‌های سوخت حدود 6 سانتی متر است. سوخت‌ها در یک محفظه حلقوی هستند که در مرکز، دور، بالا و پایین آن توسط بازتابنده‌ی گرافیتی احاطه شده است.



شکل ۱-۱: اجزای سوخت رآکتور PBMR [۱]

محفظه فشار رآکتور (PRV) از جنس فولاد طراحی شده است تا هم سازه‌ی رآکتور را تقویت کند و هم انتقال حرارت خوبی برای رساندن گرما به سامانه خنک‌کننده‌ی رآکتور باشد. این رآکتورها برای استفاده در سیکل برایتون طراحی شده است. دمای کار رآکتور به ترتیب 900 و 540 درجه سلسیوس در ورودی و خروجی است.

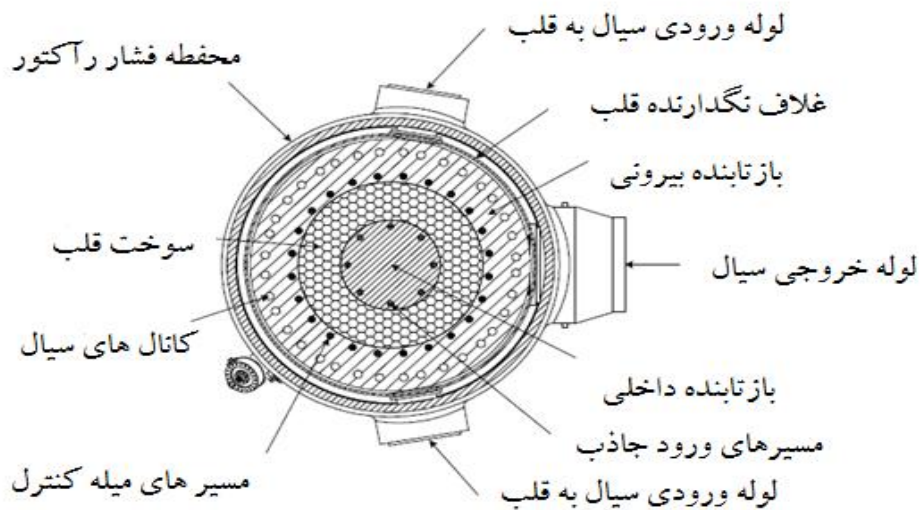
1 . Arbeitsgemeinschaft versus reactor

2 . Gas turbine- modular Helium reactor

فشار کار کرد 9 مگا پاسکال است. سیال هلیوم از مسیرهای تعبیه شده از پایین رآکتور به بالای رآکتور به جریان می‌افتد. این مسیرها در بازتابنده‌ی بیرونی تعبیه می‌شود. هلیوم در گذر از قلب گرم می‌شود و سپس به سمت توربین می‌رود.

کنترل رآکتیویته در این رآکتور ها توسط میله‌های تعبیه شده در بازتابنده‌ی بیرونی انجام می‌شود که به دو شکل عمل می‌کند. میله‌های کنترل می‌تواند از بالا به سمت پایین حرکت کند و یا از پایین به سمت بالا برود و سامانه رزرو خاموشی با آزاد شدن گلوله‌های جاذب نوترن به داخل بازتابنده‌ی داخلی عمل می‌کند.

ضریب دمایی منفی بزرگ این رآکتورها باعث می‌شود یک بازخورد خوب برای حوادثی که منجر به افزایش دما می‌شود داشته باشیم [3].



شکل ۱-۲: نمای بالای رآکتور PBMR-400 [۱]

گلوله سوخت در حدود 15000 ذره را داراست و وزن اورانیوم آن حدود 9 گرم است. گلوله سوخت در یک پوشش به ضخامت 0/9 میلی‌متر قرار داده شده است. در این رآکتور حدود 452000 گلوله سوخت وجود دارد. گلوله‌های سوخت از بالای رآکتور وارد می‌شود و با نرخ تقریبی 2833 گلوله در روز از پایین رآکتور خارج می‌شود. گلوله‌های استفاده شده‌ی سوخت با گلوله‌های تازه (fresh) جایگزین می‌شود. به طور متوسط یک گلوله‌ی سوخت 6 بار از قلب رآکتور عبور می‌کند.

1- 5 حادثه‌ی ورود هوا به رآکتور

یکی از محدود خطرانی که رآکتور PBMR دارد شکستن لوله‌ی انتقال هلیوم است. طی این حادثه هلیوم به سرعت از قلب خارج می‌شود. بعد از این هوا از پایین قلب وارد رآکتور می‌شود. حادثه‌ی ورود هوا غالباً به صورت آرام از پایین رآکتور اتفاق می‌افتد. به این صورت که هوا در پایین رآکتور موجود است. گرمای منتقل شده به سیال باعث می‌شود سیال گرم شده و چگالی آن کم شود و کم کم به سمت بالای رآکتور برود. ورود هوا می‌تواند توسط مقاومت هیدرولیکی که ناشی از عبور جریان سیال از یک هندسه‌ی پیچیده است قطع شود.

چالش برای این حادثه دفع توان واپاشی با یک سامانه غیرفعال (passive) است به صورتی که به رآکتور آسیبی وارد نشود. برای همین نیاز است تا بتوانیم محدوده‌ی مجاز دمایی در این حادثه را رعایت کنیم و هدف اصلی از انجام این کار همین موضوع است. در این بررسی فرض می‌کنیم که ورودی و خروجی باهم دچار نقص شود زیرا این شدیدترین حادثه‌ی ورود هوا در این نوع رآکتور است [2]. زای ایمنی رآکتورها PBMR را در شرایط حادثه بررسی کرد. نکته قابل توجه در کار وی این بود که نشان داد بدون استفاده از یک سامانه فعال قلب رآکتور ایمن می‌ماند. وی با استفاده از نرم افزار HEATING-7 نشان داد دمای محفظه فشار رآکتور از حد مجاز طراحی طی حادثه فراتر می‌رود. کار مشابهی که توسط پروفیسور هی چون با نرم افزار PEB-SIM انجام شد نشان داد که فرض عدم جابه جایی هوا در رآکتور پس از حادثه فرضی منطقی است [4]. وی همچنین بررسی کرد که برای خنک کردن رآکتور توسط جریان هوا حداقل سرعت هوا باید به 6 متر بر ثانیه برسد. قابل توجه است که سرعت هوا پس از حادثه در رآکتور محدود است و این مسئله نه تنها اشکال طراحی رآکتور نیست بلکه برعکس طراحی جالب این رآکتور را می‌رساند زیرا ورود هوا به رآکتور باعث واکنش اکسیژن با گرافیت می‌شود. با این وجود هوا تا اندازه‌ای وارد رآکتور می‌شود که باید مورد بررسی قرار گیرد. نیروهای شناوری از لحاظ مقدار ورود هوا برای واکنش شیمیایی مهم است و زای با ارایه یک مدل بسیار ساده که یک لوله U شکل وارونه که مدل ساده شده یک رآکتور بود مدل سازی را انجام داد. کورسن در بررسی رآکتور PBMR-400 برای خنک کاری قلب پس از خاموشی از یک مدل انتقال حرارتی تشعشعی محض استفاده کرد [4]. وستینگهاوس یک سامانه فعال برای خنک کردن در حالت خاموشی رآکتور طراحی کرد. شرکت آروا نیز یک سامانه فعال طراحی کرد تا خنک کاری رآکتور را انجام دهد. دمای بالای محفظه فشار رآکتور منجر به شکست لوله‌ها و نشت رادیواکتیو سامانه اولیه می‌شود [2].

کورسون از فرض دما ثابت در سامانه خنک کننده رآکتور استفاده کرد. وی تاکید کرد که نیروی شناوری در حادثه‌ی شکستگی لوله هلیوم مفداری بی اثر از لحاظ ترموهیدرولیکی است [2].

فصل دوم

بررسی پدیده‌ی فیزیکی حادثه ورود هوا به رآکتور

۱-۲ بررسی پدیده فیزیکی حادثه

برسی حادثه با فرض شکستن لوله ورودی و خروجی رآکتور و افت فشار آنی برای عملکرد رآکتور در شرایط قدرت کامل در شرایط پایا است. پس از گذشت چندین ثانیه از حادثه تعادل فشار بوجود می‌آید چون پس از شکستن لوله‌های هلیوم، هلیوم به سرعت از آن خارج می‌شود. گرمای واپاشی در قلب رآکتور توسط لوله‌های آن منتقل می‌شود.

۲-۲ تولید گرمای واپاشی

بعد از خاموشی رآکتور، قدرت ناشی از وجود نوترن‌های تأخیری باعث گرم شدن اجزای رآکتور می‌شود. قدرت بوجود آمده تابع پیشینه‌ی کار رآکتور است. که شامل توان قبل از خاموشی رآکتور و دوره خاموشی است. رابطه‌ی توانی KFA برای تخمین توان واپاشی بکار می‌رود [4].

$$Q_{dh}(t_s, t_0) = Q_T A (t_s^{-a} - (t_s + t_0)^{-a}) \quad (1-2)$$

Q_T قدرت رآکتور قبل از خاموشی

t_s زمان خاموشی رآکتور

t_0 زمان عملکرد رآکتور

A و a ثوابت هستند که در جدول زیر داده شده است.

جدول 2-1: ثوابت رابطه توان واپاشی

بازدهی زمانی (s)	A	a
	0.0603	0.639
	0.0766	0.181
$150 < ts < 4 \times 10^6$	0.13	0.283
$4 \times 10^6 < ts < 8 \times 10^8$	0.266	0.335

3-2 گلوله‌های سوخت

انتقال حرارت در قلب رآکتور ناشی از هدایت گرمایی از طریق سوخت و تشعشع از بین فضای بین گلوله‌های سوخت است. چگالی منطقه‌ی حاوی گلوله‌ها $729/5 \text{ kg/m}^3$ است. شرکت جنرال الکتریک رابطه‌ی زیر را برای هدایت گرمایی گلوله‌های سوخت ارائه کرده است.

$$K(T) = 1/1563 \times 10^{-4} (T - 173/16) \quad (2-2)$$

واحد K(T) بر حسب (w/m.K) است.

چگالی ظرفیت گرمایی (ρC_p) توسط رابطه‌ی زیر داده می‌شود:

$$\rho C_p = 1/75 (1 - \epsilon) \left[0/645 + 3/14 \times \frac{(T - T_0)}{1000} - 2/809 \times \frac{(T - T_0)^2}{(1000)^2} + 0/959 \times \frac{(T - T_0)^3}{(1000)^3} \right] \quad (3-2)$$

به طوری که

ϵ ضریب تخلخل گلوله‌های سوخت
 $T(k)$ دمای گره‌ها
 T_0 دمای محیط
 ρC_p (J/kg-m³) چگالی ظرفیت گرمایی گره‌ای
 ضریب تخلخل گلوله‌های سوخت توسط فرمول زیر محاسبه می‌شود:

$$\epsilon = \frac{0/78}{(D/d)^2} + 0/379 \quad (4-2)$$

D قطر مجرا

d قطر گلوله سوخت

چگالی باز تابنده 2250 kg/m^3 است. رسانش حرارتی گرافیت به دما وابسته است.

2-4 شرح مدل

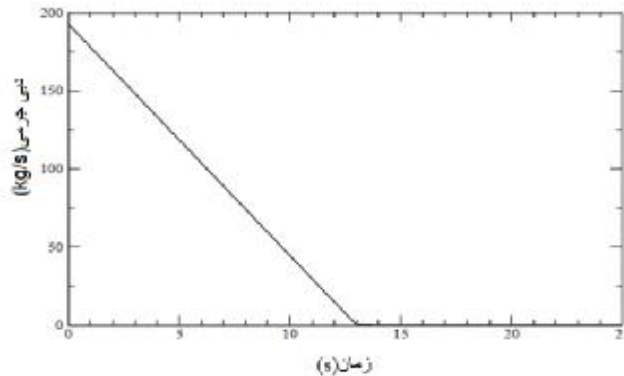
مدل ارائه شده توسط نرم افزار انسیس در محیط workbench رسم شده است. در مقایسه با مدل‌های قبلی ارائه شده بسیاری از نقص‌های مدل کردن که ناشی از ضعف نرم افزار است برطرف شده. از جمله سه بعدی بودن مدل، در نظر گرفتن جریان طبیعی برای سامانه خنک کننده، و به طور کل خواص سیال که به صورت واقعی و مطابق واقعیت سیال ارائه شده است.

به دلیل کارآرایی و قدرت بالای شبیه سازی توسط نرم افزار CFX در این جا نیاز به فرض‌های ساده شونده که در مدل‌های دیگر استفاده شده است نداریم مدل‌های قبلی به دلیل محدودیت در قابلیت نرم افزار دارای فرضیات زیادی بود که غالباً دقت مسئله را تحت تأثیر قرار می‌داد. از جمله شرایط مربوط به شرایط مرزی، دو بعدی بودن در نظر گرفتن قلب به شکل معجزا از جنبه‌ی سیالاتی، سادگی بیش از حد رژیم‌های جریان، در نظر نگرفتن جابه جایی‌های طبیعی سیال و چند پارامتر دیگر. تنها مدلی که در این مسئله با فیزیک آن مطابق نیست ساختار قلب رآکتور است مدل کردن یک فضای بزرگ که مشکل از 452000 گلوله سوخت و سیال عبور کننده از آن است مشکل اساسی نیست بلکه مشکل در پردازش چنین مسئله‌ای است. برای داشتن دقت لازم در محاسبات باید گلوله‌های مش بندی شود. یک حساب سرانگشتی ما را به این نتیجه می‌رساند. که برای مش زدن این فضا، حجم مش به میلیاردها مش می‌رسد. حل این مسئله با امکانات موجود و رایانه در دسترس غیر ممکن است. جالب این جاست که در این نرم افزار تدبیری برای حل این مشکل اندیشیده شده است. ما به جای تعریف یک فضا متشکل از گلوله‌های سوخت و سیال می‌توانیم از یک محیط متخلخل استفاده کنیم که در ادامه شرح آن آمده است. پس تنها پارامتری که با واقعیت مسئله مطابق نیست قلب رآکتور است. میله‌های کنترل و مسیرهای جاذب اضافی نیز در این مدل ارایه نشده علت آن ناچیز بودن اثر این دو در انتقال حرارت است که در کارها مشابه نیز دیده می‌شود و صرفاً جهت تسهیل در اجرای برنامه و کم کردن حجم محاسبات لحاظ نشده زیرا مدل کردن این قسمت‌ها بسیار ساده است.

در مدل کردن در کارهای مشابه از مدل‌های 15 درجه، 30 درجه، 60 درجه، 180 درجه استفاده شده که مسلماً با توجه به هندسه رآکتور و فرض‌های مسئله مدل 15 درجه دارای دقت خوبی است و نتایج بهتری می‌دهد لذا در حل مسئله ما از تقارن 15 درجه‌ای استفاده کردیم.

5-2 نتایج ناشی از خروج سیال از رآکتور

طبق مدل ارایه شده سیال پس از گذشت 13 ثانیه از رآکتور خارج می‌شود. دبی جرمی جریان مطابق مدل به صورت خطی افت می‌کند. همچنین فشار پس از گذشت این زمان به فشار بیرون که 100 کلیو پاسکال است، می‌رسد [4].



شکل ۲-۱: نمودار افت دبی رآکتور [۴]

6-2 ناحیه‌ی متخلخل

ناحیه‌ی متخلخل متشکل از جسم جامد و حفره‌های درون آن است. و منظور از آن نواحی است که به علت تعداد زیاد و سری وار جسم می‌توان آن را به عنوان یک محیط متخلخل در نظر گرفت [3]. به عنوان مثال لوله‌های موازی در مبدل‌های بخار و آب را می‌توان جسم متخلخل در نظر گرفت. همچنین تعداد زیادی جسم کروی که به طرق مختلف در کنار هم قرار گرفته باشند نیز یک محیط متخلخل است. پارامتر مهم در محاسبه هر ناحیه متخلخل میزان تخلخل و نفوذپذیری آن است.

در یک ناحیه‌ی متخلخل نسبت حجم ناحیه‌ی خلا به حجم کل را تخلخل گویند. مجتمع‌های سوخت در ناحیه‌ی قلب رآکتور به صورت تصادفی روی هم قرار گرفته که با توجه به نتایج تجربی برای آنها بین 0/38 تا 0/42 پیش بینی شده است. در این هندسه اگر حجم مجتمع‌های سوخت را به حجم کل قلب تقسیم کنیم میزان 69% بدست می‌آید که اگر این عدد را از یک کم کنید میزان تخلخل 39% بدست می‌آید.

7-2 شرایط شروع و شرایط مرزی

سیکل تعادل شروع در هنگام افت فشار داخل قلب و خاموشی توسط leben haft انجام شده است. مدل بررسی شده رآکتور PBMR-400 آفریقای جنوبی است [4].

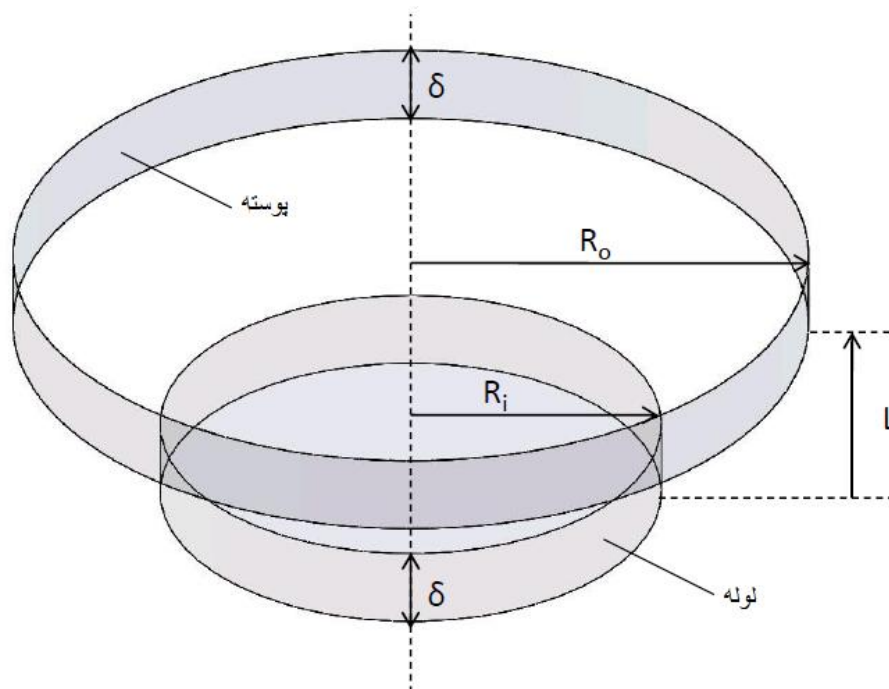
8-2 روابط انتقال حرارتی و سیالاتی

برای بررسی انتقال حرارت نیاز به تعریف ضریب انتقال حرارت داریم. ضریب انتقال حرارت مؤثر طبق فرمول زیر حساب می‌شود. [4]

$$h_{eff} = h_c + h_r [T_s^2 + T_b^2] [T_s + T_b] + h_n [T_s - T_b]^{he} \quad (5-2)$$

$T_s(^{\circ}\text{C})$	دمای سطح
$T_b(^{\circ}\text{C})$	دمای مرز
$h_c(\text{W}/\text{m}^2\text{ }^{\circ}\text{C})$	ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری
$h_r(\text{W}/\text{m}^2\text{ }^{\circ}\text{C}^3)$	ضریب تشعشع
h_n	ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی طبیعی
h_e	توان رسانش طبیعی

برای محاسبه‌ی ضریب انتقال حرارت تشعشعی نیاز به تعریف ضریب شکل داریم. ضریب شکل نسبت توان تشعشعی است که از یک سطح خارج می‌شود و به سطح دیگر می‌رسد. برای این مسئله که دارای هندسی استوانه‌ای است ضریب شکل برای دو استوانه که در شکل نشان داده شده است بدین صورت تعریف می‌شود.



شکل 2-2: پوسته و لوله