



## بررسی برخی جنبه‌های مهم ایمنی ذاتی رآکتور برست-۳۰۰، رآکتور سریع نسل چهارم خنک شده با سرب

محمد زارعی بیناباج<sup>۱</sup>، نعیم‌الدین متاجی کجوری\*<sup>۲</sup>، عبدالحمید مینوچهر<sup>۱</sup>

۱. دانشکده‌ی مهندسی هسته‌ای، دانشگاه شهید بهشتی، صندوق پستی: ۱۹۸۳۸۹۶۳۱۱۳، تهران - ایران

۲. گروه پژوهشی ایمنی هسته‌ای و حفاظت پرتوی، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۸۳۶-۱۴۳۹۵، تهران - ایران

**چکیده:** در این مطالعه، یک طراحی روسی از رآکتورهای سریع خنک شده با سرب مذاب، با سوخت ترکیبی اورانیم-پلوتونیم نیتريد انتخاب شد. برای نشان دادن این مهم که طراحی مذکور از ایمنی ذاتی به عنوان یکی از معیارهای پیشنهادی نسل چهارم رآکتورهای هسته‌ای برخوردار است، شبیه‌سازی دقیقی از قلب با کمک کد محاسباتی MCNP انجام شد. سطح مقطع‌های مواد موجود در قلب با استفاده از نرم‌افزارهای MAKXF و NJOY در دماهای مختلف تهیه و برخی پارامترهای پویا و ناپویا نظیر ضریب تکثیر مؤثر قلب، کسر مؤثر و شش گروهی نوترون‌های تأخیری محاسبه شدند. بازخورهای واکنش‌پذیری حرارتی با تغییر مشخصه‌ها و اندازه‌های مؤلفه‌های قلب در کد MCNP و مشاهده‌ی اثر آن بر روی  $k_{eff}$  محاسبه شدند. یک مدل سیستمی کامل، با لحاظ نمودن زیرسیستم‌های نوترونی و ترموهیدرولیکی و بازخورهای حرارتی تهیه و بر مبنای آن ضریب توانی واکنش‌پذیری و حاشیه‌ی واکنش‌پذیری (معیاری از واکنش‌پذیری پیشینه‌ی قابل تزریق به قلب) محاسبه شد. بر این اساس با توجه به این که مقدار این حاشیه‌ی واکنش‌پذیری کم‌تر از کسر مؤثر نوترون‌های تأخیری قلب است، این طراحی مجهز به ایمنی ذاتی دانسته شده است چرا که امکان بحرانی‌شدگی آبی در اثر تزریق واکنش‌پذیری در دسترس وجود ندارد. هم‌زمان برخی حالت‌های گذرا نیز به منظور اثبات ایمنی ذاتی قلب در نظر گرفته شدند. تحلیل پایداری پویا بر مبنای تشکیل ماتریس گذر حالت برای معادله‌های معرف سیستم و محاسبه‌ی ویژه مقادیرهای این ماتریس که همان قلب‌های سیستم‌اند، نیز انجام شد. مجموعه‌ای از قطب‌ها که همگی دارای بخش حقیقی منفی‌اند، خود معرف یک سیستم پایدار پویا بوده و معیار دیگری از ایمنی ذاتی است.

**کلیدواژه‌ها:** ایمنی ذاتی، رآکتور سریع خنک شده با سرب، حاشیه‌ی واکنش‌پذیری، بازخور واکنش‌پذیری حرارتی

## Study of some important aspects of inherent safety of BREST-300, generation IV lead-cooled fast reactor

M. Zarei Binabaj<sup>1</sup>, N. Mataji Kojouri\*<sup>2</sup>, A.H. Minuchehr<sup>1</sup>

1. Nuclear Engineering Department, Shahid Beheshti University, P.O.Box: 19838963113, Tehran - Iran

2. Nuclear Safety and Radiation Protection Research Group, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOL, P.O.Box: 14395-836, Tehran - Iran

**Abstract:** A Russian design of Lead-cooled Fast Reactor (LFR) with a mixed uranium-plutonium nitride fuel is chosen as a case study. In order to demonstrate the inherent safety considered in this proposed design in the framework of Generation IV of nuclear reactors, a precise simulation of core has been attempted using MCNP lattice features. The material cross sections have been developed by NJOY & MAKXSf at different temperature levels. Meanwhile, certain static and dynamic parameters such as core effective multiplication factor ( $k_{eff}$ ), group-wise and effective delayed neutron fractions are derived. Thermal reactivity feedbacks are calculated by changing the core composition and layout in the MCNP and inspecting its effect on  $k_{eff}$ . A complete systemic model comprising neutronic, thermal hydraulic (for hot channel) and feedbacks sub-systems has been developed. The power reactivity coefficient and reactivity margin (indicative of the maximum reactivity available to insert into the reactor core) are derived afterwards and it is demonstrated that the BREST reactor is equipped with inherent safety, and its reactivity margin stands well below the value of  $\beta_{eff}$ . The reactor, therefore, does not undergo prompt-criticality phenomena in available reactivity insertion accidents. Meanwhile, certain transient analyses are taken into account to verify the reactor intrinsic safety. Besides, a stability analysis through the formation of state transition matrix for the system describing equations and calculation of its eigenvalues which represent the system poles has been conducted. A set of poles with negative real parts stands for a dynamically stable system which is also a measure of the inherent safety.

**Keywords:** Inherent safety, Lead-cooled fast reactor, Reactivity margin, Thermal reactivity feedback

\*email: nkojouri@aeoi.org.ir

تاریخ دریافت مقاله: ۹۲/۹/۱۹ تاریخ پذیرش مقاله: ۹۳/۱۰/۱۰





## ۱. مقدمه

امروزه نیروگاه‌های هسته‌ای نزدیک به ۱۶ درصد برق جهان را تولید می‌کنند [۱]. تاکنون به کارگیری انرژی هسته‌ای برای تولید برق، دو نسل را پشت سر گذاشته و این روند تکاملی هم‌چنان ادامه دارد، به نحوی که در نسل سوم، معیارهای فنی، اقتصادی و ایمنی در چارچوبی هم‌آهنگ و متعادل مورد توجه قرار گرفته‌اند. تمرکز بر معیارهای ایمنی ذاتی<sup>(۱)</sup> و غیرفعال<sup>(۲)</sup> در خودکنترلی<sup>(۳)</sup> و ایمن‌سازی رآکتورها نیز از جمله راهبردهای اساسی نسل چهارم رآکتورهای هسته‌ای است [۲]. برخی نقاط عطف نظیر حادثه‌های TMI، چرنوبیل و فوکوشیما که اتکای بیش از حد به سامانه‌های ایمنی مهندسی شده<sup>(۴)</sup> و نبود سازوکارهای ایمنی ذاتی و غیرفعال در آن‌ها مشهود بود، نیاز به راهبردهای تکاملی (نسل سوم) و نیز طراحی‌های جدید (نسل چهارم) را آشکار می‌سازند تا از این طریق مخاطره‌های حادثه‌های تأثیرگذار بر ایمنی کاهش یابد [۳، ۴]. بر این اساس در چهارچوب برنامه‌ی نسل چهارم رآکتورهای هسته‌ای و بر پایه‌ی تجربه‌های به دست آمده در جریان کار و حادثه‌های مهمی که این صنعت با آن روبه‌رو شده است، الزام‌های جدیدی در طراحی، ساخت و بهره‌برداری از نیروگاه‌های هسته‌ای در نظر گرفته می‌شوند. در این الزام‌های جدید هم‌آهنگی بین عامل‌های مختلف تأثیرگذار در توسعه‌ی نیروگاه‌های هسته‌ای و به اصطلاح سازگار بودن عامل‌های مزبور، مدنظر طراحان قرار گرفته است. تعیین راه کارهای توسعه‌ی پایدار هسته‌ای و بررسی ارضای عدم ارضای آن‌ها در طراحی‌های مختلف پیشنهادی، یکی از محورهای اصلی پژوهش‌هایی است که در زمینه‌ی طراحی‌های جدید انجام می‌شوند.

ایمنی ذاتی به معنای لحاظ کردن پاره‌ای ویژگی‌های فنی در طراحی اولیه‌ی رآکتور است به نحوی که در شرایط انحراف از عملکرد معمولی، کل سیستم با تکیه بر این ویژگی‌ها و بدون نیاز به دخالت عنصرهای فعال کنترلی به شرایط کار عادی بازگردانده شود. بازخورهای مناسب واکنش‌پذیری<sup>(۵)</sup> از جمله مهم‌ترین عامل‌های تعیین‌کننده‌ی ایمنی ذاتی هستند. سرب مذاب با داشتن برخی خواص ویژه نظیر نقطه‌ی جوش بالا و فشار بخار پایین و نیز عدم انجام واکنش شیمیایی در تماس با آب یا بخار آب، به عنوان یک راهبردهای اساسی برای خنک‌سازی و برداشت حرارت

در آینده مطرح می‌شود [۵]. در همین راستا طرح پیشنهادی اتحادیه‌ی اروپا به شکل فعالانه‌ای پی‌گیری می‌شود [۶]. رآکتور روسی برست (BREST) نیز که در همین چهارچوب و منطبق با بسیاری از موازین نسل چهارم طراحی شده است، دارای ویژگی ایمنی ذاتی است [۷].

این مقاله ضمن معرفی رآکتور برست، اجزای قلب آن و روند محاسباتی و چگونگی تهیه‌ی مدل پویای قلب شامل زیرسیستم‌های نوترونی، ترموهیدرولیک و بازخورها با کمک مدل ایجاد شده، ویژگی ایمنی ذاتی برای رآکتور برست را نشان داده و برخی حالت‌های گذرای ناشی از تزریق واکنش‌پذیری را مورد بررسی قرار می‌دهد.

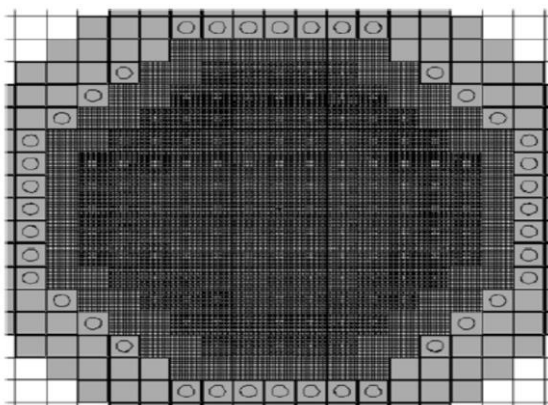
## ۲. رآکتور برست-۳۰۰

رآکتور برست-۳۰۰ که در دهه‌ی ۹۰ میلادی از سوی دانشمندان روسی معرفی شد، یک رآکتور سریع با قدرت ۳۰۰ مگاوات الکتریکی (۷۰۰ مگاوات حرارتی) و از نوع استخری، خنک شده با سرب مذاب، و با سوخت ترکیبی اورانیم-پلوتونیم منوتیرید است [۸، ۹]. سوخت شامل ۱۴٪ پلوتونیم و سایر آکتینیدها بوده و مابقی آن اورانیم طبیعی یا تهی شده است. ترکیب ایزوتوپی و غنای سوخت در جدول ۱ آورده شده است. قلب این رآکتور دارای یک شبکه‌ی ۱۸۵ تایی از مجتمع‌های مربعی سوخت ۱۱×۱۱ است که از این میان ۱۱۴ میله‌ی سوخت فعال و ۷ مکان نیز به لوله‌های راهنما<sup>(۶)</sup> اختصاص دارد. طول فعال هر میله‌ی سوخت ۱۱۰ سانتی‌متر بوده و در انتهای بالایی مجهز به یک محفظه‌ی نگه‌دارنده‌ی شکافت-پاره‌ها به اندازه‌ی ۹۰ cm است. گام میله‌های سوخت ۱۳/۶ mm بوده و در مجموعه‌ای از مجتمع‌های سوخت با گام ۱۶۹/۹ mm قرار دارند. غنای سوخت بر خلاف طراحی‌های متعارف در همه جای قلب یکسان است، اما قطر میله‌های سوخت در سه ناحیه‌ی قلب متفاوت است ناحیه‌ی داخلی ۹/۱ mm، ناحیه‌ی میانی ۹/۶ mm و ناحیه‌ی خارجی ۱۰/۴ mm). ناحیه‌ی داخلی شامل ۵۷ میله‌ی سوخت، میانی ۷۲ و خارجی ۵۶ میله‌ی سوخت است. ضخامت غلاف ۰/۵ mm بوده و از آلیاژ EP-۸۲۳ با ۱۲٪ کرم که مقاومت بالایی در برابر خوردگی سرب مذاب دارد، ساخته شده است. شکاف ناحیه‌ی



### ۳. مدل سیستمی قلب

طراحی قلب این رآکتور با لحاظ نمودن ویژگی ایمنی ذاتی انجام شد. در این مقاله این مهم به ویژه در جریان راه‌اندازی بررسی شده است. تزریق حداکثر واکنش‌پذیری در دسترس یکی از مسایلی است که در ایمنی ذاتی مطرح می‌شود. این مهم باید به نحوی انجام شود که از شکل‌گیری حادثه‌ی کنترل‌ناپذیر اجتناب شود. این شرط، در یک طراحی ذاتاً ایمن لازم می‌دارد که واکنش‌پذیری بیشینه‌ای که تحت هر شرایطی به قلب تزریق می‌شود کم‌تر از کسر مؤثر نوترون‌های تأخیری باشد یعنی،  $\beta_{\text{eff}} < \max(\rho_{\text{in}}) \leq 0.3, 10$ . بر این اساس، قلب تحت هیچ شرایطی نمی‌تواند یک حادثه‌ی بحرانی‌شدن آنی<sup>(۸)</sup> را تجربه کند. این مساله به ویژه در قیاس با رآکتورهای متعارف PWR که فرایند راه‌اندازی آن‌ها شامل تزریق واکنش‌پذیری‌های بزرگ بوده و تمهیدات کنترلی ویژه‌ای نظیر تزریق بوریک اسید در خنک‌کننده و کندساز برای جلوگیری از بحرانی‌شدن آنی را طلب می‌کند، حایز اهمیت است. به منظور اثبات ویژگی مذکور، نخست شبیه‌سازی نوترونی با کدهای MCNPX (V.۲.۶) [۱۱]، (۹۷.۶۲) NJOY [۱۲] و (۲۰۰۶) MAKXS [۱۳] انجام شد و در ادامه با تهیه‌ی یک برنامه‌ی کامپیوتری، یک مدل پویا که معادله‌های زیرسیستم‌های ترموهیدرولیکی کانال داغ قلب، بازخورها و سینتیک نقطه‌ای را هم‌زمان لحاظ می‌کند، تهیه شد. مجموعه معادله‌های دیفرانسیلی که معرف هر زیرسیستم هستند با استفاده از روش رانژکوتای<sup>(۹)</sup> مرتبه‌ی چهارم حل شدند. نمایی از قلب شبیه‌سازی شده با MCNP و مدل پویای معرف قلب در شکل‌های ۱ و ۲ و الگوریتم محاسبه‌ها نیز در شکل ۳ ارائه شده است.



**شکل ۱.** طرح‌واره‌ی قلب رآکتور برست-۳۰۰ مدل‌سازی شده با کد MCNP، میله‌های کنترل و ستون‌های بازتاباننده‌ی سرب در ناحیه‌ی پیرامونی قلب قرار دارند. (تغییر رنگ تدریجی در ناحیه‌ی سوخت، ناشی از تفاوت قطر میله‌های سوخت است)

میان سوخت و غلاف به ضخامت ۰.۲ mm از سرب پر شده است تا هم انتقال حرارت بهتری انجام شود و هم از تنش‌های حرارتی-مکانیکی میان فولاد غلاف و سوخت جلوگیری شود. ستون‌هایی از بازتاباننده‌ی سربی بدون مواد بارور<sup>(۷)</sup> در بالا و پیرامون قلب قرار دارند که امکان تولید ایزوتوپ‌های مورد استفاده در تسلیحات جمعی را منتفی می‌سازند. میله‌های کنترل از جنس ترکیب‌های بُر نیز در پیرامون قلب قرار گرفته و فعالیت‌های مربوط به مدیریت سوخت و تزریق واکنش‌پذیری به هنگام سوخت‌گذاری را ایمن می‌سازند. دمای سیال ورودی به قلب ۶۹۰ K و در خروجی ۸۱۰ K بوده، آهنگ شارش سیال در قلب  $41600 \text{ kg s}^{-1}$  و سرعت بیشینه‌ی سیال  $1.8 \text{ m s}^{-1}$  است. چگالی سوخت در دمای محیط  $13.5 \text{ g cm}^{-3}$  است. خلاصه‌ای از این مشخصه‌ها در جدول ۲ آمده است.

**جدول ۱.** ترکیب سوخت رآکتور برست-۳۰۰ [۹، ۸]

| مؤلفه‌ی سوختی                   | ایزوتوپ           | درصد اتمی |
|---------------------------------|-------------------|-----------|
| اورانیوم طبیعی (۸۶٪)            | $^{235}\text{U}$  | ۰.۳       |
|                                 | $^{238}\text{U}$  | ۹۹.۷      |
|                                 | $^{238}\text{Pu}$ | ۰.۵       |
|                                 | $^{239}\text{Pu}$ | ۶۴        |
| پلوتونیم و سایر آکتینیدها (۱۴٪) | $^{240}\text{Pu}$ | ۲۸        |
|                                 | $^{241}\text{Pu}$ | ۳.۱       |
|                                 | $^{242}\text{Pu}$ | ۱.۷       |
|                                 | $^{241}\text{Am}$ | ۲.۱       |
|                                 | $^{242}\text{Am}$ | ۰.۱       |
|                                 | $^{243}\text{Am}$ | ۰.۵       |

**جدول ۲.** برخی مشخصه‌های طراحی رآکتور برست-۳۰۰ [۹، ۸]

| کمیت   | مقدار                     |
|--|---------------------------|
| توان نامی در بار کامل (الکتریکی)                             | ۳۰۰ مگاوات                |
| توان نامی در بار کامل (حرارتی)                               | ۷۰۰ مگاوات                |
| خنک‌کننده  | سرب                       |
| نوع سوخت   | PuN-UN-MA                 |
| چگالی قرص سوخت   | $13.5 \text{ g cm}^{-3}$  |
| درصد اتمی غنا (Pu+MA) در کل قلب                              | ~۱۴٪                      |
| درصد اتمی غنای اورانیوم                                      | نزدیک به طبیعی یا تهی شده |
| تعداد نواحی سوختی قلب  | ۳                         |
| تعداد مجتمع‌های سوخت در سه ناحیه‌ی قلب (داخلی، میانی، خارجی) | مجموع: ۱۸۹ (۵۶، ۷۲، ۵۶)   |
| تعداد میله‌های سوخت در هر مجتمع                              | ۱۲۱                       |
| قطر (mm) میله‌های سوخت در سه ناحیه                           | ۱۰.۴، ۴.۹، ۹.۱            |
| گام میله‌های سوخت در هر مجتمع                                | ۱.۳۶ cm                   |
| گام مجتمع سوخت در دمای ۲۰°C                                  | ۱۴.۹۶ cm                  |
| ضخامت غلاف (mm)  | ۰.۵                       |
| ماده‌ی غلاف  | EP-۸۲۳                    |
| طول فعال میله‌ی سوخت (cm)                                    | ۱۱۰                       |
| نوع مدار اول   | استخری                    |
| دمای سیال سرب ورودی به قلب                                   | ۶۹۰ K                     |
| دمای سوخت در شرایط کاری                                      | ۹۳۰ K                     |

### ۱.۳ تهیه‌ی سطح مقطع‌ها

سطح مقطع‌های مؤلفه‌های ساختاری قلب (سوخت، غلاف و خنک کننده) در دماهای مختلف با استفاده از ویژگی پهن کنندگی اثر دوپلر در نرم‌افزار NJOY که کتابخانه‌های استاندارد ENDF را به کار می‌گیرد و نیز نرم‌افزار MAKXSف که از کتابخانه‌های داخلی MCNP بهره می‌برد، تهیه شدند. سطح مقطع‌های وابسته به دما برای محاسبه‌ی پارامترهای کاری سیستم، شامل بازخورهای دمایی واکنش پذیری ضروری هستند. با توجه به استفاده از مدل فشرده‌ی ترموهیدرولیکی برای توصیف رفتار دمایی کانال داغ<sup>(۱۰)</sup> قلب، برای هر ماده‌ی موجود در این کانال (شامل سوخت، غلاف و خنک کننده) دمای متوسطی در نظر گرفته شد. در توان اسمی، این مقادارها برای سوخت، غلاف و خنک کننده به ترتیب، ۸۰۰، ۷۵۰ و ۹۳۰ درجه‌ی کلونین هستند. تحلیل حالت پایدار معادله‌های دیفرانسیل به کار رفته در این مقاله برای توصیف کانال داغ قلب، چنین انتخاب دماهایی را توجیه می‌کند که با مقدارهای اعلام شده در مرجع‌های [۸، ۹] مطابقت دارند. دلیل‌های به کارگیری و اعتبار این مدل در بخش ۴.۳ بیان شده است.

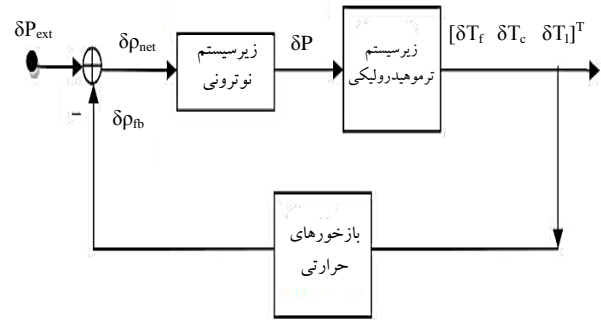
### ۲.۳ مدل‌سازی قلب با کد MCNP

با استفاده از ویژگی‌های کد MCNP نظیر ساختارهای تکرارپذیر و تالی‌های محاسبه‌ی شار، هندسه‌ی قلب پیاده‌سازی و برخی پارامترهای ایستا نظیر سطح مقطع‌های متوسط مواد ساختاری قلب ( $\bar{\sigma}_f$ ,  $\bar{\sigma}_a$ ) و تعداد مؤثر نوترون‌های ناشی از شکافت ( $\bar{\nu}$ ) محاسبه شد. این پارامترها برای محاسبه‌ی کسر مؤثر نوترون‌های تأخیری در هر یک از گروه‌های شش گانه و نیز کسر مؤثر نوترون‌های تأخیری در خود قلب مورد استفاده قرار گرفتند [۱۴]

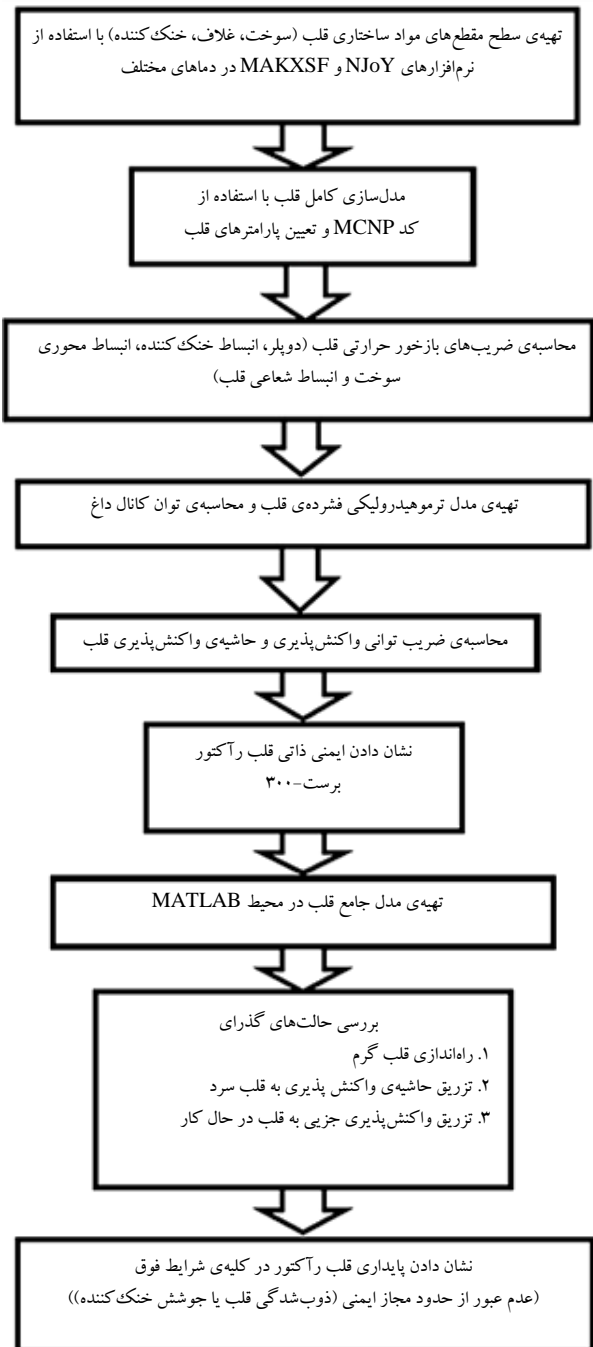
$$\bar{\beta}_i = \frac{\sum_j \bar{\nu}_j N^j \bar{\sigma}_f^j \beta_i^j}{\sum_j \bar{\nu}_j N^j \bar{\sigma}_f^j} \quad (1)$$

$$\bar{\beta}_{eff} = \sum_{i=1}^6 \bar{\beta}_i \quad (2)$$

کلیه‌ی پارامترهای معادله‌ها، در قسمت نمادگذاری معرفی شده‌اند. به کارگیری معادله‌های سینتیک نقطه‌ای با توجه به



شکل ۲. مدل به کار گرفته شده.



شکل ۳. روندنمای محاسبه‌ها.



### ۳.۳ بازخورهای واکنش‌پذیری

چهار بازخور اساسی واکنش‌پذیری مورد بررسی قرار گرفتند: (۱) بازخور واکنش‌پذیری ناشی از پهن‌شدگی سطح مقطع جذب در ناحیه‌ی تشدید در مواد بارور در اثر افزایش دما، (۲) بازخور واکنش‌پذیری ناشی از انبساط میله‌ی سوخت، (۳) بازخور واکنش‌پذیری ناشی از انبساط حجمی خنک‌کننده و (۴) بازخور واکنش‌پذیری ناشی از انبساط شبکه‌ی نگه‌دارنده‌ی مجتمع‌های سوخت و دورشدگی آن‌ها از یک‌دیگر در اثر بالا رفتن دمای سیال ورودی به قلب. لازم به ذکر است که اثرهای انبساطی مربوط به غلاف در این مدل لحاظ نشده است.

از آنجایی که هر تغییر دمایی در اجزای قلب، تغییرهای واکنش‌پذیری را بر کل قلب اعمال خواهد نمود، پدیده‌ی فیزیکی ناشی از این تغییر دما (اعم از پهن‌شدگی دوپلر، انبساط ابعادی یا سخت‌شدگی طیف) را که به تغییرهای واکنش‌پذیری می‌انجامد، می‌توان بر مبنای معادله‌های ۷ و ۸ با یک مدل خطی واکنش‌پذیری به تغییرهای دما منتسب نمود [۱۰]. در محاسبه‌ی هر یک از این ضریب‌ها واکنش‌پذیری دمایی، دمای سایر اجزای قلب ثابت در نظر گرفته شد

$$\rho = \frac{k-1}{k}, \Delta\rho = \frac{k_r - k_1}{k_1 k_r} \quad (7)$$

$$\alpha_i = \frac{\Delta\rho_i}{\Delta T_j} \quad (8)$$

که در آن شاخص  $i$  معرف پدیده‌ی فیزیکی و شاخص  $j$  معرف آن جزء از قلب است که تغییر دمای آن، تغییر واکنش‌پذیری را سبب شده، و  $\alpha_i$  ضریب دمایی واکنش‌پذیری آن پدیده است. بر این اساس و با لحاظ نمودن کلیه‌ی مقدارهای محاسبه شده برای ضریب‌های دمایی واکنش‌پذیری، معادله‌ی ۸ معرف کل بازخورهای واکنش‌پذیری قلب خواهد بود که در آن  $\alpha_D$  ضریب بازخور حرارتی ناشی از پهن‌شدگی دوپلر و  $\Delta T_f$  تغییر دمای سوخت،  $\alpha_{ax}$  ضریب بازخور حرارتی ناشی از انبساط محوری میله‌ی سوخت،  $\alpha_1$  ضریب بازخور حرارتی ناشی از افزایش دمای سیال خنک‌کننده‌ی موجود در کانال و  $\Delta T_1$  مقدار تغییر دمای خنک‌کننده و  $\alpha_{red}$  ضریب بازخور حرارتی ناشی از افزایش دمای سیال ورودی به قلب،  $\Delta T_{in}$  مقدار تغییر دمای سیال ورودی به قلب است.

اندازه‌های کوچک قلب و نیز بزرگ بودن پویش آزاد متوسط<sup>(۱۱)</sup> نوترون در درون قلب (در مقایسه با گام سوخت ۱/۳۶ سانتی‌متر) امکان‌پذیر است [۱]. چنین مدلی در عمل، قلب را به صورت همگن دیده و انتشار اغتشاش‌های واکنش‌پذیری را به صورت آنی فرض می‌کند. در محاسبه‌های این مقاله، مقدار پویش آزاد متوسط نوترون در کل قلب با استفاده از کد MCNP حدود ۳ سانتی‌متر به دست آمد.

با توجه به داده‌های طراحی (جدول‌های ۱ و ۲) برخی پارامترهای نوترونی قلب در حال کار از جمله ضریب تکثیر مؤثر قلب ( $k_{eff}$ ) در شرایط اسمی به ازای ۲۵۰ بار اجرای کد MCNP و ۱۰۰۰۰ نوترون در هر واقعه،  $1/00074 \pm 1/00024$  محاسبه شد. هم‌چنین معادله‌ی ۲ کسر مؤثر نوترون‌های تأخیری را ۳۴۰ pcm پیش‌بینی کرد. این مقدار در محاسبه‌های طراحان ۳۶۰ pcm ذکر شده است [۸، ۹]. به علاوه با دانستن این که نیم-عمر هر ایزوتوپ عددی ثابت است، ثابت‌های واپاشی برای گروه‌های شش‌گانه‌ی گسیلنده‌های نوترون‌های تأخیری محاسبه شدند [۱۴]

$$t_{\gamma,r} = \frac{\ln(\gamma)}{\lambda} \Rightarrow \bar{T}_{\gamma,r,i} = \frac{\sum_j N_j^i \beta_j^i T_j^i}{\sum_j N_j^i \beta_j^i} \quad (3)$$

برای محاسبه‌ی زمان متوسط «تولید» نوترون در درون قلب از معادله‌ی زیر استفاده شد [۱۴]. این معادله سرعت متوسط نوترون را از روی انرژی متوسط نوترون در قلب به دست داد

$$\Lambda = \frac{1}{\bar{v} \sum_j (\bar{v}^j \sum_f^j)} = 7.02 \times 10^{-7} \quad (4)$$

این مقدار در محاسبه‌های مرجع،  $8.20 \times 10^{-7}$  ذکر شده است. پارامترهای فوق همگی برای حل مجموعه معادله‌های سینتیک نقطه‌ای ۵ و ۶ که جمعیت نوترون را به صورت تابعی از زمان به دست می‌دهند ضروری بود. معادله‌های سینتیک نقطه‌ای در واقع معرف زیرسیستم نوترونی قلب هستند

$$\frac{dn}{dt} = \frac{\rho_{net}(t) - \bar{\beta}_{eff}}{\Lambda} n(t) + \sum_{i=1}^6 \lambda_i C_i(t) \quad (5)$$

$$\frac{dC_i}{dt} = \frac{\bar{\beta}_{if}}{\Lambda} n(t) - \lambda_i C_i(t) \quad (6)$$



مدل خطی تغییر واکنش‌پذیری (معادله‌ی ۸) مقدار  $\alpha_{\alpha x}$  (ضریب واکنش‌پذیری ناشی از انبساط طولی) را  $K^{-1} \times 10^{-6} \times 1.59$  - به دست داد که با مقدار گزارش شده در مرجع [۹] برای این کمیت،  $K^{-1} \times 10^{-6} \times 1.1$  - هم‌سویی خوبی دارد.

**۳.۳.۳ بازخور واکنش‌پذیری ناشی از انبساط شعاعی قلب**  
با افزایش دمای سیال ورودی به قلب، ضمن انبساط شبکه‌ی نگه‌دارنده‌ی مجتمع‌های سوخت، این مجتمع‌ها از یک‌دیگر دور شده و تراکم ماده‌ی سوختی از ناحیه‌های مرکزی قلب با اهمیت نوترونی بیش‌تر دور می‌شود که سبب تزریق یک واکنش‌پذیری منفی به قلب می‌شود. شبکه‌ی نگه‌دارنده‌ی مجتمع‌های سوخت از ماده‌ای مشابه فولاد غلاف (آلیاژ EP-۸۲۳) در نظر گرفته شده و انبساط آن نیز به صورت یک‌نواخت میان مجتمع‌ها لحاظ شد. این، هر بار در هندسه‌ی ورودی کد MCNP لحاظ و کلیه‌ی پارامترهای دیگر ثابت در نظر گرفته شد. بر مبنای مدل خطی وابستگی واکنش‌پذیری با دما (معادله‌ی ۸) ضریب بازخور ( $\alpha_{\text{rad}}$ ) ناشی از این پدیده  $K^{-1} \times 10^{-6} \times 6.41$  - محاسبه شد. این مقدار در مرجع [۹]،  $K^{-1} \times 10^{-6} \times 6.70$  - ذکر شده است.

**۴.۳.۳ بازخور ناشی از انبساط حجمی خنک‌کننده**  
انبساط حجمی خنک‌کننده سبب کاهش چگالی و در نتیجه کاهش جذب و قدرت کندکنندگی نوترون خنک‌کننده و هم‌زمان سخت‌شدگی<sup>(۱۲)</sup> بیش‌تر طیف نوترون و افزایش شکافت می‌شود. لذا اثر کلی انبساط حجمی خنک‌کننده، تزریق یک بازخور مثبت واکنش‌پذیری است [۱۰]. تغییر چگالی سرب با دما در ورودی کد MCNP لحاظ شده و همانند بخش پیشین با در نظر گرفتن یک مدل خطی برای واکنش‌پذیری، ضریب مربوط  $(\alpha_1)$  برابر  $K^{-1} \times 10^{-6} \times 2.26$  محاسبه شد. مقدار ذکر شده در مرجع [۹] برای این کمیت  $K^{-1} \times 10^{-6} \times 1.9$  است.

**۴.۳ زیرسیستم ترموهیدرولیکی**  
اندازه‌های کوچک قلب رآکتور امکان به کارگیری مدل فشرده برای کانال داغ قلب را فراهم می‌آورد. با به کارگیری معادله‌های پایستگی انرژی برای کانال داغ و محاسبه‌ی پارامترهای مؤثر برای این کانال، مجموعه‌ی دیگری از معادله‌های دیفرانسیلی به دست می‌آید که هم‌بسته با معادله‌های سینتیک نقطه‌ای و مدل

$$\Delta\rho_{\text{fb}}(t) = (\alpha_{\text{D}} + \alpha_{\alpha x})\Delta T_{\text{f}} + \alpha_{\text{v}}\Delta T_{\text{v}} + \alpha_{\text{red}}\Delta T_{\text{in}} \quad (9)$$

مجموعه معادله‌های زیرسیستم ترموهیدرولیکی (بخش ۴.۳) با معرفی ثابت‌های انتقال حرارت از سوخت به غلاف و نیز از غلاف به خنک‌کننده، چگونگی اثرگذاری این بازخور حرارتی را نشان می‌دهند.

**۱.۳.۳ بازخور واکنش‌پذیری دوپلری**  
پهن‌شدگی دوپلر سبب افزایش جذب نوترون در نواحی انرژی تشدیدی به ویژه در ایزوتوپ‌های بارور (نظیر  $^{238}\text{U}$  و  $^{240}\text{Pu}$ ) شده و با کاهش میزان شکافت به مثابه یک بازخور منفی واکنش‌پذیری عمل می‌کند. با تهیه‌ی سطح مقطع‌های وابسته به دما در NJOY و MAKXSف و به کارگیری آن‌ها در کد MCNP و با محاسبه‌ی ضریب تکثیر مؤثر قلب در هر بار، تغییر واکنش‌پذیری ناشی از تغییر دما محاسبه و از روی آن ضریب بازخور دوپلر با استفاده از معادله‌ی ۷ محاسبه شد. افزایش دمای سوخت دارای اثر انبساطی در میله‌ی سوخت نیز خواهد بود، اما در محاسبه‌های مربوط به پدیده‌ی دوپلر این مساله لحاظ نشد. مقدار محاسبه شده‌ی  $\alpha_{\text{D}}$  (ضریب بازخور دوپلر) با استفاده از معادله‌ی ۷ برابر  $10^{-7} \times 4.25$  - به دست آمد. این مقدار در مرجع [۹]،  $10^{-6} \times 4.3$  - حساب شده است.

**۲.۳.۳ بازخور ناشی از انبساط محوری میله‌ی سوخت**  
با افزایش دمای سوخت، انبساط محوری در میله‌ی سوخت سبب کاهش چگالی سوخت و به تبع آن کاهش تراکم و دورشدگی ماده‌ی سوختی از نواحی مرکزی قلب با درجه‌ی اهمیت بیش‌تر نوترون به سمت حاشیه‌های قلب می‌شود. بر این اساس با کاهش احتمال شکافت به ازای یک نوترون، بازخور واکنش‌پذیری منفی تزریق می‌شود [۱۰] (در واقع هر چه نوترون به مرزهای قلب نزدیک‌تر باشد احتمال فرار بیش‌تری دارد). تغییر طولی میله‌های سوخت همراه با تغییر در چگالی سوخت در هندسه‌ی ورودی کد MCNP لحاظ شده و تغییر واکنش‌پذیری ناشی از آن محاسبه شد. کلیه‌ی پارامترهای دیگر (از جمله سطح مقطع سوخت) در طول محاسبه ثابت نگه داشته شدند و تنها اثر انبساطی بر روی هندسه لحاظ شد.



که در آن  $\tau$  ثابت‌های زمانی معادله‌های انتقال حرارت است

$$\tau_f = \frac{M_f c_{p,f}}{h_{fc}} \tau_{c1} = \frac{M_c c_{p,c}}{h_{fc}} \tau_{c2} = \frac{M_c c_{p,c}}{h_{cl}} \tau_1 = \frac{M_l c_{p,l}}{h_{cl}} \tau_o = \frac{M_l}{2\dot{m}_{in}} \quad (18)$$

ثابت‌های زمانی  $\tau$  در معادله‌های فوق به نوعی از لحاظ فیزیکی بیان‌گر زمان لازم برای اثرگذاری حرارت تولید شده در سوخت روی دمای مؤلفه‌های مختلف قلب هستند. مقادیر این کمیت‌ها برای این رآکتور به ترتیب،  $\tau_{c1} = 0.3844$  S،  $\tau_f = 0.677$  S،  $\tau_{c2} = 0.128$  S و  $\tau_o = 0.362$  S هستند.

### ۵.۳ محاسبه‌ی حاشیه‌ی واکنش‌پذیری قلب در فرایند راه‌اندازی

حاشیه‌ی واکنش‌پذیری راه‌اندازی معرف واکنش‌پذیری بیشینه‌ای است که می‌توان در طی فرایند راه‌اندازی به قلب تزریق نمود. فرایند راه‌اندازی معرف یک تحول تدریجی از شرایط سرد توان صفر<sup>(۱۴)</sup> (که در آن دماها پایین‌تر از دمای اسمی‌اند) به شرایط کار اسمی است. تغییر واکنش‌پذیری در طول فرایند راه‌اندازی را می‌توانیم چنین نشان بدهیم [۸، ۹، ۱۰]

$$\Delta\rho_{margin} = \left| \Delta\rho_{isothermal} + \Delta\rho_{power} + \Delta\rho_{burnup} \right| \quad (19)$$

جمله‌ی نخست در سمت راست معادله‌ی ۱۹،  $\Delta\rho_{isothermal}$ ، بیان‌گر فرایند هم‌دمایی است که طی آن دمای کل قلب با کمک پمپ از شرایط سرد با توان صفر به شرایط گرم با توان صفر افزایش می‌یابد. افزایش دمای قلب در طی این فرایند یک واکنش‌پذیری منفی به قلب تزریق می‌کند، لذا میله‌های کنترل برای مقابله با آن بیرون کشیده می‌شوند. جمله‌ی دوم،  $\Delta\rho_{power}$ ، بیان‌گر واکنش‌پذیری تزریق شده در شرایط گرم توان صفر از طریق بیرون کشیدن سریع میله‌های کنترل است که در طی آن توان قلب به حد شرایط کار اسمی می‌رسد. جمله‌ی سوم،  $\Delta\rho_{burnup}$ ، نیز بیان‌گر تغییر واکنش‌پذیری در اثر مصرف تدریجی سوخت طی یک چرخه‌ی کاری قلب است. جمله‌ی

$\Delta\rho_{isothermal}$  را می‌توان چنین نوشت [۱۰]

$$\begin{aligned} \Delta\rho_{isothermal} &= \frac{\partial\rho}{\partial\bar{T}_f} \Delta\bar{T}_f + \frac{\partial\rho}{\partial\bar{T}_1} \Delta\bar{T}_1 + \frac{\partial\rho}{\partial T_{in}} \Delta T_{in} \\ &= \alpha_f \Delta\bar{T}_f + \alpha_1 \Delta\bar{T}_1 + \alpha_{rad} \Delta T_{in} \cong -\lambda\rho_{pcm} \quad (20) \end{aligned}$$

بازخورها، رفتار کلی قلب را به نمایش می‌گذارند. در معادله‌های زیر  $d, c, f$  و  $in, o$  به ترتیب، معرف سوخت، غلاف، خنک‌کننده و نیز ورود و خروج سیال خنک‌کننده‌ی قلب هستند.

$$m_f c_{p,f} \frac{d\bar{T}_f}{dt} = q - h_{fc}(\bar{T}_f - \bar{T}_c) \quad (10)$$

$$m_c c_{p,c} \frac{d\bar{T}_c}{dt} = h_{fc}(\bar{T}_f - \bar{T}_c) - h_{cl}(\bar{T}_c - \bar{T}_1) \quad (11)$$

$$\begin{aligned} m_l c_{p,l} \frac{d\bar{T}_l}{dt} &= h_{cl}(\bar{T}_c - \bar{T}_l) - \dot{m}_{in} c_{p,l} (\bar{T}_o - \bar{T}_{in}) \xrightarrow{\bar{T}_1 = \frac{T_{in} + T_o}{2}} \\ m_l c_{p,l} \frac{d\bar{T}_l}{dt} &= h_{cl}(\bar{T}_c - \bar{T}_l) - 2\dot{m}_{in} c_{p,l} (\bar{T}_l - \bar{T}_{in}) \quad (12) \end{aligned}$$

کمیت  $q$  در معادله‌ی ۱۰ معرف توان آزاد شده در اثر شکافت در کانال داغ قلب است (منظور از کانال داغ در این محاسبه‌ها، در واقع همان کانال مربوط به مرکزی‌ترین میله‌ی سوخت قلب است). این کمیت با استفاده از توزیع فضایی شار و نیز ضریب بیشینگی<sup>(۱۳)</sup> (که توسط کد MCNP محاسبه می‌شوند) با توان کل قلب که در معادله‌های سینتیک نقطه‌ای مربوط به زیرسیستم نوترونی (معادله‌های ۵ و ۶) به کار می‌رود، مرتبط شده است (معادله‌ی ۲۴). مقادیر ضریب‌های انتقال حرارت میان اجزای مختلف قلب (انتقال حرارت از سوخت به غلاف و از غلاف به خنک‌کننده) نیز چنین‌اند [۱۵]

$$h_{fc} = \frac{1}{R_f + R_c} = \frac{1}{\frac{1}{4\pi H k_f} + \frac{\ln(\frac{r_{c,int}}{R_f})}{2\pi H k_c}} \quad (13)$$

$$h_{cl} = \frac{1}{R_c + R_l} = \frac{1}{\frac{\ln(\frac{r_{c,out}}{R_{c,i}})}{2\pi H k_c} + \frac{1}{h_l A}} \quad (14)$$

با لحاظ نمودن ثابت‌های زمانی در مجموعه معادله‌های فوق به دست می‌آوریم

$$\frac{dT_f}{dT} = \frac{q}{\tau_f h_{fc}} - \frac{T_f}{\tau_f} + \frac{T_c}{\tau_f} \quad (15)$$

$$\frac{dT_c}{dt} = \frac{(T_f - T_c)}{\tau_{cl}} - \frac{(T_c - T_l)}{\tau_{cr}} \quad (16)$$

$$\frac{dT_l}{dt} = \frac{(T_c - T_l)}{\tau_l} - \frac{(T_o - T_{in})}{\tau_o} \quad (17)$$





با در نظر گرفتن این مهم که در طی بیرون کشیدن سریع میله‌های کنترل، دمای سیال ورودی به قلب فرصت چندانی برای تغییر نداشته ( $\Delta T_{in} \cong 0$ ) و دمای اجزای قلب نیز تقریباً به صورت آنی تغییر می‌کند (انتقال حرارت تقریباً به صورت بی‌دررو بین اجزای قلب صورت می‌گیرد)، تغییر دمای اجزای قلب با توان را با توجه به معادله‌های ۹ تا ۱۱ می‌توان چنین نوشت [۱۰]

$$q = h_{fc}(\bar{T}_f - \bar{T}_c) \quad (26)$$

$$q = h_{cl}(\bar{T}_c - \bar{T}_1) \quad (27)$$

$$q = \dot{m}_{in} c_{p,l}(\bar{T}_1 - T_{in}) \quad (28)$$

و با توجه به ثابت ماندن دمای سیال ورودی طی این فرایند ( $\Delta T_{in} \cong 0$ ) داریم

$$\frac{\partial \bar{T}_f}{\partial q} = \frac{1}{h_{fc}} + \frac{1}{h_{cl}} + \frac{1}{\dot{m}_{in} c_{p,l}} \quad (29)$$

$$\frac{\partial \bar{T}_c}{\partial q} = \frac{1}{h_{cl}} + \frac{1}{\dot{m}_{in} c_{p,l}} \quad (30)$$

$$\frac{\partial \bar{T}_1}{\partial q} = \frac{1}{\dot{m}_{in} c_{p,l}} \quad (31)$$

و از آنجایی که از اثرهای بازخورهای دمایی واکنش‌پذیری مربوط به غلاف صرف نظر کرده‌ایم ( $\frac{\partial \rho}{\partial T_c} = 0$ )، تغییر واکنش‌پذیری ناشی از تغییر ناگهانی توان را می‌توانیم چنین بنویسیم

$$\Delta \rho_{power} = \frac{\partial \rho}{\partial P} \Delta P = \gamma \frac{\partial \rho}{\partial q} \Delta P = \gamma \left[ \alpha_f \left( \frac{1}{h_{fc}} + \frac{1}{h_{cl}} + \frac{1}{\dot{m}_{in} c_{p,l}} \right) + \alpha_1 \left( \frac{1}{\dot{m}_{in} c_{p,l}} \right) \right] \Delta P \cong -20.8 \text{ pcm} \quad (32)$$

محاسبه‌های مربوط به تغییرهای واکنش‌پذیری ناشی از مصرف سوخت  $\Delta \rho_{burnup}$  در این مقاله مورد بررسی قرار نگرفته است اما مقدار آن در مرجع‌های [۸، ۹]، ۵۰ pcm ذکر شده است یعنی، این که این رآکتور سریع زاینده‌گی بسیار ناچیزی داشته و در عمل، مصرف‌کننده‌ی سوخت است.

که به خوبی نشان‌دهنده‌ی بستگی این کمیت به بازخورهای حرارتی واکنش‌پذیری قلب، و کمیت  $\alpha_f$  مجموع  $\alpha_{ox}$  و  $\alpha_D$  است.

در طی فرایند راه‌اندازی سرد که دمای سیال ورودی به آرامی از ۶۷۰ (دمای راه‌اندازی سرد) به ۶۹۰ درجه‌ی کلون (دمای راه‌اندازی گرم) افزایش می‌یابد، دمای سایر مؤلفه‌های قلب نیز افزایش مشابهی را تجربه می‌کنند، در نتیجه می‌توان چنین نوشت

$$\Delta \rho_{isothermal} = (\alpha_f + \alpha_1 + \alpha_{rad}) \Delta T_{in} \quad (21)$$

کمیت  $\Delta \rho_{power}$  را نیز می‌توان چنین نوشت [۱۰]

$$\Delta \rho_{power} = \frac{\partial \rho}{\partial P} \Delta P = \left[ \frac{\partial \rho}{\partial \bar{T}_f} \frac{\partial \bar{T}_f}{\partial P} + \frac{\partial \rho}{\partial \bar{T}_1} \frac{\partial \bar{T}_1}{\partial P} + \frac{\partial \rho}{\partial T_{in}} \frac{\partial T_{in}}{\partial P} \right] \Delta P \quad (22)$$

و برحسب توان کانال داغ قلب (کانال مربوط به میله‌ی سوخت مرکزی قلب) می‌توان چنین نوشت

$$\frac{\partial \rho}{\partial P} = \frac{\partial \rho}{\partial q} \frac{\partial q}{\partial P} \quad (23)$$

که در آن  $q$  توان تولیدی در کانال داغ و  $P$  توان کل قلب است. نسبت  $q$  به  $P$  را می‌توان چنین نوشت

$$\frac{q}{P} = \frac{\phi_{channel}}{\phi_{core}} = \gamma \quad (24)$$

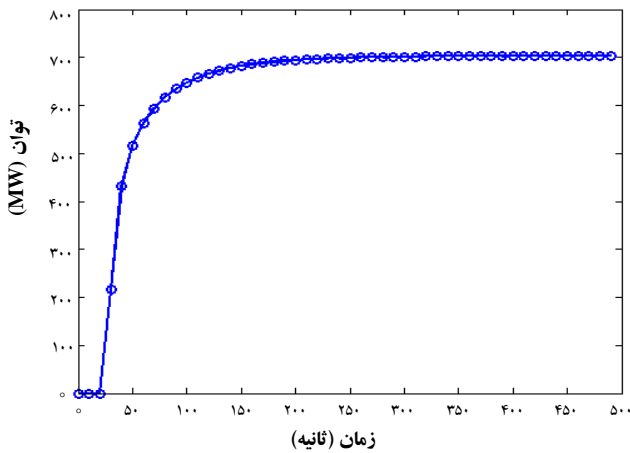
که در آن  $\phi_{channel}$  شار کانال داغ قلب و  $\phi_{core}$  شار کل قلب بوده و از نتایج محاسبه‌های تالی‌های کد MCNP قابل استخراج‌اند. این نسبت ( $\gamma$ ) در محاسبه‌های مطالعه‌ی حاضر تقریباً  $6 \times 10^{-5}$  به دست آمد.

به این ترتیب، معادله‌ی ۲۲ را می‌توان چنین نوشت

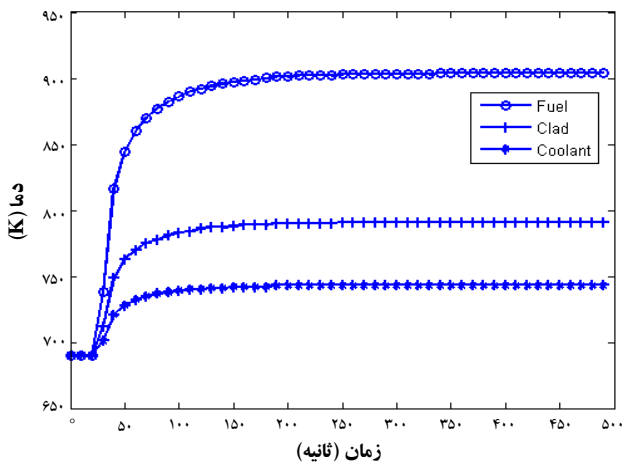
$$\Delta \rho_{power} = \frac{\partial \rho}{\partial P} \Delta P = \gamma \frac{\partial \rho}{\partial q} \Delta P = \gamma \left[ \frac{\partial \rho}{\partial \bar{T}_f} \frac{\partial \bar{T}_f}{\partial q} + \frac{\partial \rho}{\partial \bar{T}_1} \frac{\partial \bar{T}_1}{\partial q} + \frac{\partial \rho}{\partial T_{in}} \frac{\partial T_{in}}{\partial q} \right] \Delta P \quad (25)$$



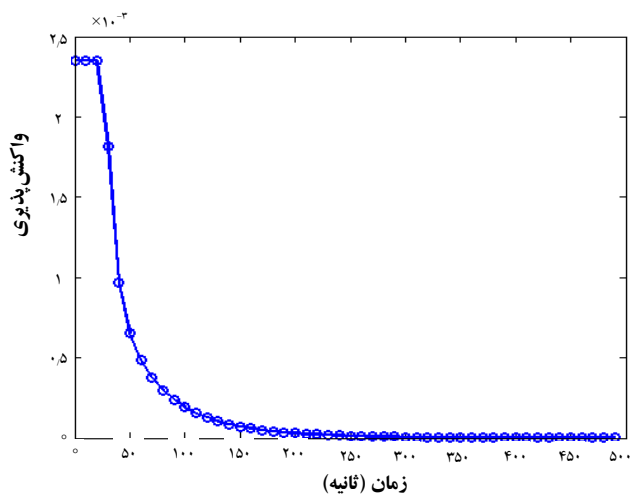
نیز در نهایت به صفر می‌رسد (شکل ۶). این نتایج اعتبار مدل به کار گرفته شده برای شبیه‌سازی قلب و مقدار واکنش‌پذیری راه‌اندازی به دست آمده بر مبنای این مدل را تأیید می‌کند.



شکل ۴. تغییر توان قلب در جریان تزریق واکنش‌پذیری راه‌اندازی.



شکل ۵. تغییر دمای اجزای قلب در جریان تزریق واکنش‌پذیری در خلال راه‌اندازی.



شکل ۶. تغییر واکنش‌پذیری قلب در جریان تزریق واکنش‌پذیری راه‌اندازی.

با لحاظ نمودن محاسبه‌های فوق، مقدار  $\Delta\rho_{margin}$  در نهایت می‌تواند چنین نوشته شود

$$\Delta\rho_{margin} = |\Delta\rho_{isothermal} + \Delta\rho_{power} + \Delta\rho_{power}| = |-276 pcm| = 276 pcm \quad (33)$$

#### ۴. بررسی ایمنی ذاتی در جریان اعمال واکنش‌پذیری راه‌اندازی

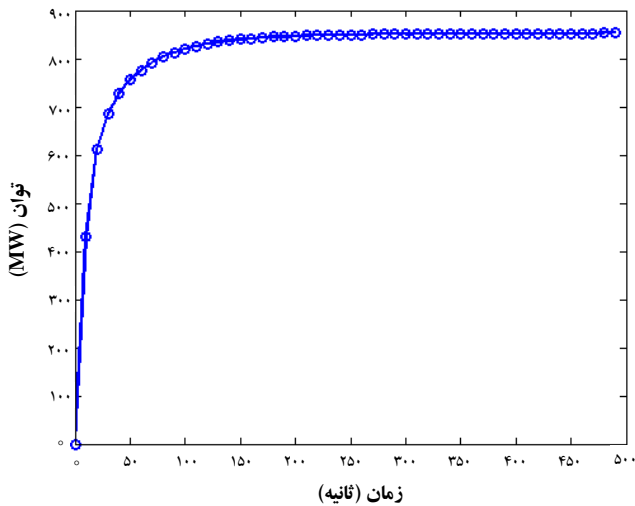
محاسبه‌های بخش ۲.۳ مقدار کسر مؤثر نوترون‌های تأخیری قلب را  $340 pcm$  به دست داد. از معادله‌ی ۲۹ نیز حاشیه‌ی واکنش‌پذیری راه‌اندازی قلب  $276 pcm$  محاسبه شد. کم‌تر بودن این مقدار واکنش‌پذیری اعمال شده در طی راه‌اندازی قلب از کسر مؤثر نوترون‌های تأخیری  $(\beta_{eff} \leq \max(\rho_{in}))$  خود بیان‌گر ایمنی ذاتی و بحرانی نشدن آنی قلب در طی این فرایند است.

#### ۱.۴ تزریق واکنش‌پذیری راه‌اندازی

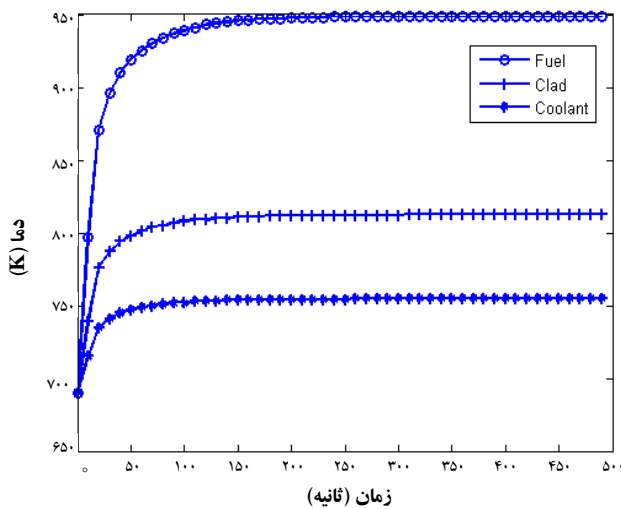
این روند شامل تزریق واکنش‌پذیری لازم برای شروع به کار قلبی است که از حالت سرد با توان صفر به آرامی به حالت گرم با توان صفر منتقل شده است. در چنین روندی، نخست دمای کلیه‌ی اجزای خنک‌کننده به کمک پمپ‌ها از  $670 K$  به  $690 K$  افزایش می‌یابد و دمای اجزای قلب نیز به آرامی به همین سطح از دما می‌رسد. در ادامه با بیرون کشیدن سریع میله‌های کنترل، قلب می‌باید در طی کار قلب هم‌زمان با مصرف تدریجی سوخت تأمین شود. لذا، داریم

$$\Delta\rho_{startup} = \Delta\rho_{isothermal} + \Delta\rho_{power} = 226 pcm \quad (34)$$

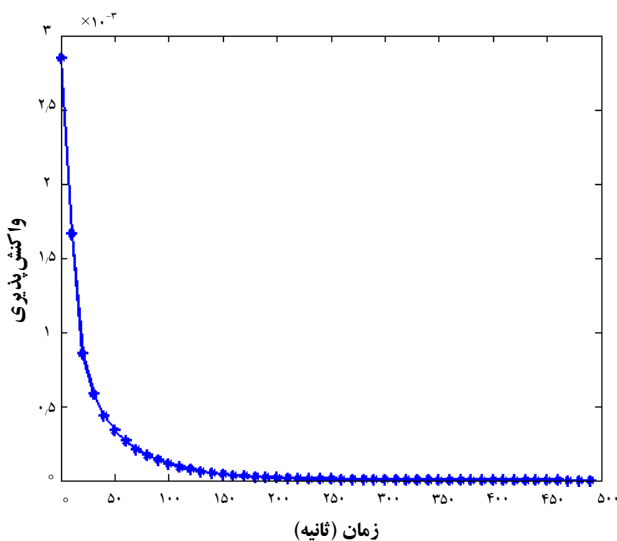
در مدل مورد بحث چنان‌چه این میزان از واکنش‌پذیری را به صورت یک تابع پله‌ای<sup>(۱۵)</sup> به قلب سرد اعمال کنیم می‌بینیم که قلب در توان اسمی، دماهای متوسط اسمی و واکنش‌پذیری صفر پایدار می‌شود که این، اعتبار مدل به کار گرفته شده را نشان می‌دهد. به عبارت دیگر، در حضور بازخورهای ذاتی حرارتی، تزریق این میزان از واکنش‌پذیری محاسبه شده به قلب، رفتار گذرایی را ایجاد می‌کند که در نهایت سبب پایدار شدن قلب در مقدارهای اسمی  $700$  مگاوات توان (شکل ۴)، دمای اسمی  $930 K$  سوخت، دمای اسمی  $800 K$  غلاف و دمای اسمی  $750 K$  خنک‌کننده می‌شود (شکل ۵). مقدار واکنش‌پذیری خالص قلب



شکل ۷. تغییر توان در جریان تزریق حاشیه‌ی واکنش‌پذیری به قلب سرد.



شکل ۸. تغییر دمای مؤلفه‌های قلب در جریان تزریق واکنش‌پذیری به قلب سرد.



شکل ۹. تغییر واکنش‌پذیری در جریان تزریق حاشیه‌ی واکنش‌پذیری به قلب سرد.

## ۲.۴ اعمال واکنش‌پذیری بیشینه به قلب سرد

چنان‌چه با بیرون کشیدن ناگهانی تمامی میله‌های کنترل، واکنش‌پذیری بیشینه‌ی قابل دسترسی (حاشیه‌ی واکنش‌پذیری) به یک قلب سرد اعمال شود، محاسبه‌ی مدل مورد استفاده نشان می‌دهد که تزریق این میزان از واکنش‌پذیری نیز شرایط بحرانی شدن آنی را به همراه نداشته  $(\Delta\rho_{\text{margin}}(\bar{\beta}_{\text{eff}}))$  و دمای نهایی مؤلفه‌های قلب (سوخت، غلاف و خنک‌کننده) نیز در محدوده‌ی ایمن قرار خواهد گرفت. به عبارت دیگر، حوادثی چون ذوب سوخت و غلاف یا جوشش خنک‌کننده را شاهد نخواهیم بود. دمای بحرانی ذوب سوخت  $2923\text{K}$ ، ذوب غلاف  $1750\text{K}$  و جوشش خنک‌کننده  $2016\text{K}$  است [۸، ۹]. در اثر اعمال این میزان از واکنش‌پذیری، قلب در حضور بازخورهای حرارتی در شرایط پایای جدیدی بالاتر از شرایط قبلی پایدار می‌شود. توان  $800$  مگاوات (شکل ۷)، دمای سوخت  $950\text{K}$ ، دمای غلاف  $860\text{K}$  و دمای خنک‌کننده  $760\text{K}$  می‌شود (شکل ۸). واکنش‌پذیری خالص قلب نیز به صفر می‌رسد (شکل ۹).

## ۵. پایداری مدل پیشنهادی

در بخش‌های پیشین از دیدگاه بازخورهای حرارتی، رآکتور را به زیرسیستم‌های نوترونی (معادله‌های سینتیک نقطه‌ای)، ترموهیدرولیک (معادله‌های پارامتری یکپارچه<sup>(۱۶)</sup>) تقسیم نمودیم. با تعیین معادله‌های دیفرانسیلی توصیف‌کننده‌ی هر یک از این زیرسیستم‌ها، مجموعه‌ای از معادله‌های هم‌بسته به دست آمد که در واقع معادله‌های حالت سیستم قلب رآکتور بودند. در حالت کلی این مجموعه از معادله‌ها غیرخطی است، اما می‌توان آن را حول نقطه‌ی کار خطی نموده و با تعیین ماتریس گذار حالت<sup>(۱۷)</sup> در نقطه‌ی کار و تعیین قطب‌های سیستم (که در واقع همان ویژه-مقدارهای ماتریس گذار حالت هستند) پایداری را مشخص نمود. در این بخش این مهم مورد توجه قرار گرفته و پایداری سیستمی رآکتور نیز به عنوان نتیجه‌ای از ایمنی ذاتی قلب نشان داده شده است.

## ۱.۵ تشکیل ماتریس گذار حالت در نقطه‌ی کار

در این مرحله به منظور سهولت در انجام محاسبه، ابتدا متغیرهای بی‌بعد زیر را تعریف می‌کنیم

$$\psi(t) = \frac{n(t)}{n_0}$$

$$\eta_i = \frac{C_i(t)}{C_{i0}} \quad (35)$$



جدول ۳. مختصه‌های قطب‌های سیستم

| مکان                                | قطب      |
|-------------------------------------|----------|
| $-۳,۸۷۷۰ \times ۱۰^{-۳}$            | $P_1$    |
| $-۲,۸۴۲۴ \times ۱۰^{-۱}$            | $P_2$    |
| $-۷,۲۲۶۰$                           | $P_3$    |
| $-۳,۸۴۸۳$                           | $P_4$    |
| $-۱,۱۲۵۲ + j ۱,۴۶۰۶ \times ۱۰^{-۱}$ | $P_5$    |
| $-۱,۱۲۵۲ - j ۱,۴۶۰۶ \times ۱۰^{-۱}$ | $P_6$    |
| $-۲,۶۳۰۴ \times ۱۰^{-۱}$            | $P_7$    |
| $-۹,۸۹۰۳ \times ۱۰^{-۲}$            | $P_8$    |
| $-۱,۷۵۱۵ \times ۱۰^{-۲}$            | $P_9$    |
| $-۹,۸۰۰۳ \times ۱۰^{-۳}$            | $P_{10}$ |

### ۶. بحث و نتیجه‌گیری

در چهارچوب معیارهای معرفی شده در طراحی نسل چهارم رآکتورهای اتمی، تکیه بر مشخصه‌های طراحی اولیه در خودکنترلی و ایمنی قلب از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است تا از این طریق میزان وابستگی به سازوکارهای فعال کنترلی به حداقل برسد. همان‌گونه که نتایج شبیه‌سازی‌های انجام شده در این مطالعه نشان داد، طرح رآکتور برست-۳۰۰ پیشنهاد شده از سوی طراحان روسی، در جریان فرایند راه‌اندازی از ویژگی ایمنی ذاتی برخوردار است، به این معنی که واکنش‌پذیری پیشینه‌ی قابل دسترسی برای تزریق به قلب این رآکتور در طول فرایند راه‌اندازی مقداری کم‌تر از کسر مؤثر نوترون‌های تأخیری است. این مهم هرگونه بحرانی شدن آنی و حادثه‌های احتمالی پی‌آیند آن نظیر ذوب سوخت و غلاف یا جوشش خنک‌کننده را ناممکن می‌سازد. به علاوه سازوکارهای کنترل قوی واکنش‌پذیری (نظیر تزریق بوریک اسید که در رآکتورهای PWR متداول است) غیرضروری می‌نماید. تزریق حاشیه‌ی واکنش‌پذیری به قلب سرد نیز مخاطره‌های فوق را به همراه ندارد. این مهم با توجه به مشخصه‌های طراحی و محتوای سوخت و خنک‌کننده‌ی قلب که بازخورهای حرارتی و حاشیه‌ی واکنش‌پذیری مناسبی را فراهم می‌کنند، امکان‌پذیر شده است.

نهایتاً ضمن تحلیل معادله‌های فضای حالت قلب رآکتور، قطب‌های سیستم (ویژه- مقدارهای ماتریس گذار حالت برای سیستم خطی‌سازی شده حول نقطه‌ی کار) محاسبه و با توجه به منفی بودن بخش حقیقی همه‌ی این مقادارها، پایداری پویای قلب (در ازای افزایش جزئی واکنش‌پذیری حول نقطه‌ی کار) که معرف ایمنی ذاتی قلب نیز است، نشان داده شد.

اکنون چنانچه در معادله‌های ۵ تا ۶ و ۱۵ تا ۱۷ یک اغتشاش جزئی حول نقطه‌ی کار در نظر بگیریم، پس از انجام پاره‌ای ساده‌سازی‌های ریاضی و با صرف‌نظر از جمله‌های مرتبه‌ی دوم اغتشاش، به مجموعه معادله‌های خط‌سازی شده‌ی زیر در شکل کلی فضای حالت می‌رسیم [۱۶]

$$\dot{X} = AX + Bu \quad (۳۶)$$

که در آن X معرف بردار حالت و بیان‌گر تغییرهای جزئی هر یک از متغیرها حول نقطه‌ی کار، و بردار u نیز معرف ورودی است،

$$X = [\delta T_f \quad \delta T_c \quad \delta T_1 \quad \delta \psi \quad \delta \eta_1 \quad \delta \eta_2 \quad \delta \eta_3 \quad \delta \eta_4 \quad \delta \eta_5 \quad \delta \eta_6] \quad (۳۷)$$

$$u = [\delta T_{in} \quad \delta p] \quad (۳۸)$$

ماتریس‌های A و B نیز چنین معرفی می‌شوند

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{1}{\tau_f} & \frac{1}{\tau_f} & 0 & \frac{\dot{q}}{M_1 C_f} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{\tau_{c1}} & -(\frac{1}{\tau_{c1}} + \frac{1}{\tau_{c2}}) & \frac{1}{\tau_{c2}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{\tau_1} & -(\frac{1}{\tau_1} + \frac{\gamma}{\tau_1}) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\alpha_f}{\Lambda} & 0 & \frac{\alpha_1}{\Lambda} & \frac{-\beta}{\Lambda} & \frac{-\beta_1}{\Lambda} & \frac{-\beta_2}{\Lambda} & \frac{-\beta_3}{\Lambda} & \frac{-\beta_4}{\Lambda} & \frac{-\beta_5}{\Lambda} & \frac{-\beta_6}{\Lambda} \\ 0 & 0 & 0 & \lambda_1 & -\lambda_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \lambda_2 & 0 & -\lambda_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \lambda_3 & 0 & 0 & -\lambda_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \lambda_4 & 0 & 0 & 0 & -\lambda_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \lambda_5 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\lambda_5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \lambda_6 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\lambda_6 \end{bmatrix} \quad (۳۹)$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ \frac{\gamma}{\tau_0} & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (۴۰)$$

ویژه- مقدارهای ماتریس A که معرف قطب‌های سیستم معرفی شده با معادله‌های هم‌بسته‌ی ۵ تا ۶ و ۱۵ تا ۱۷ هستند در جدول ۳ نشان داده شده‌اند که همگی دارای بخش حقیقی منفی هستند. بر این اساس سیستم خطی‌سازی شده حول نقطه‌ی کار (شرایط پایای رآکتور) در ازای تزریق واکنش‌پذیری‌های کوچک (اعوجاج‌های کوچک) پایدار است.



## پی‌نوشت‌ها

1. Inherent safety
2. Passive
3. Self control
4. Engineered
5. Reactivity feedbacks
6. Guide tube
7. Fertile
8. Prompt criticality
9. Runge-Kutta
10. Hot channel
11. Mean free path
12. Hardening
13. Peaking factor
14. Zero power
15. Step function
16. Lumped parameter
17. State transition matrix

## نمادگذاری

- $n(t)$ : چگالی جمعیت نوترون‌ها [ $\text{cm}^{-3}$ ]
- $p(t)$ : واکنش‌پذیری [ $\Delta k/k$ ]
- $\beta$ : کسر نوترون‌های تأخیری
- $\Lambda$ : متوسط زمان تولید نوترون [s]
- $\lambda$ : ثابت زمانی واپاشی نوترون تأخیری [ $\text{s}^{-1}$ ]
- $\nu$ : متوسط تعداد نوترون‌های تولید شده در اثر شکافت
- $v$ : سرعت متوسط نوترون [ $\text{m s}^{-1}$ ]
- $N$ : چگالی اتمی [ $\text{cm}^{-3}$ ]
- $C(t)$ : غلظت نیا هسته [ $\text{cm}^{-3}$ ]
- $m$ : جرم [kg]
- $c_p$ : ظرفیت گرمایی ویژه در فشار ثابت [ $\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$ ]
- $T$ : دما [K]
- $P$ : توان تولیدی در کل قلب (W)
- $q$ : توان تولیدی در کانال داغ قلب [W]
- $h$ : ضریب انتقال حرارت میان دو محیط مجاور [ $\text{W K}^{-1}$ ]
- $\dot{m}$ : دبی جرمی [ $\text{kg s}^{-1}$ ]
- $R$ : مقاومت حرارتی میان دو محیط مجاور [ $\text{K W}^{-1}$ ]
- $H$ : ارتفاع کانال [m]
- $k$ : رسانش حرارتی [ $\text{W K}^{-1}$ ]
- $\tau$ : شعاع مؤثر محیط [m]
- $h_1$ : ضریب هم‌رفتی حرارتی سیال خنک‌کننده [ $\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$ ]
- $A$ : سطح انتقال حرارت [ $\text{m}^2$ ]
- $\tau$ : ثابت زمانی انتقال حرارت [s]
- $\alpha$ : ضریب بازخور حرارتی [ $\text{K}^{-1}$ ]

## زیر نویس‌ها

- $i$ : گروه  $i$ ام نوترون تأخیری
- $z$ : ایزوتوپ  $z$ ام
- $f$ : سوخت
- $c$ : سوخت
- $l$ : خنک‌کننده
- $fb$ : بازخور
- $fc$ : سوخت به غلاف
- $cl$ : غلاف به خنک‌کننده
- $in$ : ورودی
- $o$ : خروجی
- $int$ : داخلی
- $out$ : خارجی
- $net$ : خالص
- $ext$ : خارجی
- $eff$ : مؤثر
- $rad$ : شعاعی



- [1] A. Waltar, D. Todd, P. Tsvetkov, Fast spectrum reactors, Springer (2011).
- [2] S.M. Goldberg, R. Rosner, Nuclear reactors: generation to generation, American Academy of Arts & Sciences (2011).
- [3] J. Lamarsh, A.J. Baratta, Introduction to nuclear engineering, Prentice Hall (2001).
- [4] M. Hashim, Y. Ming, A.S. Ahmed, Review of severe accident phenomena in LWR and related severe accident analysis codes, Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology, 5, 12 (2013).
- [5] P. Hejzlar, N.E. Todreas, E. Schwageraus, A. Nikiforova, R. Petroski, M.J. Driscoll, Cross comparisons of fast reactor concepts with various coolants, Nuclear Engineering and Design, 239 (2009).
- [6] A. Alemberti, J. Carlsson, E. Malambu, A. Orden, D. Struwe, P. Agostini, S. Monti, European lead cooled fast reactor: ELSY, Nuclear Engineering and Design, doi: 10.1016/j.nucengdes, 2011.03.029, (2011).
- [7] T.R. Allen, D.C. Crawford, Lead-cooled fast reactor systems and the fuels and materials challenges, Science and Technology of Nuclear Installations, doi:10.1155/2007/97486, (2007).
- [8] E.O. Adamov, White book of nuclear power, RDIPE, Moscow (1998).
- [9] E.O. Adamov, V.V. Orlov, Naturally safe lead cooled fast reactors for large scale nuclear power, RDIPE, Moscow (2001).
- [10] E.E. Lewis, Nuclear power reactor safety, John Wiley & Sons (1978).
- [11] Los Alamos National Laboratory, MCNP 5 manual, I, II, III (2008).
- [12] R.E. Mc Farlane, D.W. Muir, The NJOY nuclear data processing system version 91, (1994).
- [13] Forrest. B. Brown, The MAKXSF code with doppler broadening, Los Alamos National Laboratory (2006).
- [14] Matthew Johnson, Scott Lucas, P. Tsvetkov, Modeling of reactor kinetics and dynamics, Idaho National Laboratory, INL/EXT-19953-10 (2010).
- [15] N.E. Todreas, M.M. Kazimi, Nuclear Systems, Taylor & Francis (1991).
- [16] L.E. Weaver, Nuclear reactor dynamics and control, American Elsevier Publishing Company, INC (1968).