

## طراحی مفهومی نوترونی رآکتور تحقیقاتی تهران با استفاده از سوخت حلقوی

مصطفی حسن‌زاده، فرخ خوش‌احوال<sup>\*</sup>، مسعود امین مظفری، محمدامین امیرخانی، احمد لشکری، محمد رجایی  
پژوهشکده‌ی رآکتور و ایمنی هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، صندوق پستی: ۱۳۳۹-۱۴۱۵۵، تهران - ایران

\*Email: fkhoshahval@aeoi.org.ir

### مقاله‌ی پژوهشی

تاریخ دریافت مقاله: ۹۹/۵/۷ تاریخ پذیرش مقاله: ۹۹/۹/۳

### چکیده

هدف از این مقاله، بررسی امکان استفاده از سوختی با هندسه حلقوی به منظور بهینه‌سازی آن در رآکتور تحقیقاتی تهران از دیدگاه نوترونی است. در استفاده از سوخت‌های حلقوی، به دلیل تولید شار بالاتر و راکتیویته بیشتر، نیاز به بارگذاری سوخت کم‌تری است. بنابراین در این پژوهش، در رآکتور تحقیقاتی تهران از سوختی جدید با هندسه حلقوی جهت جایگزینی با سوخت فعلی که دارای هندسه صفحه‌ای است، استفاده شده است. این سوخت از لحاظ موادی مشابه با سوخت رآکتور تهران می‌باشد. برای این منظور، پارامترهای نوترونی قلب شامل ضریب تکثیر مؤثر، راکتیویته، توزیع شار نوترون سه‌گروهی، ضریب بیشینه توان، ضریب ایمنی راکتیویته، ارزش میله‌های کنترل، با استفاده از کدهای MCNPX2.7 و WIMS-CITATION محاسبه شده است. سپس نتایج حاصله این کدها با نتایج گزارش آنالیز ایمنی (SAR) رآکتور تحقیقاتی تهران (TRR) مقایسه گردید. نتایج نشان می‌دهد که مقدار درصد اختلاف نسبی برای پارامترهای راکتیویته و ضریب بیشینه توان برای رآکتور تیوبلار حاصل از کد MCNPX در مقایسه با نتایج TRR-SAR به ترتیب در حدود ۰/۲ و ۲۲- درصد می‌باشد. هم‌چنین نتایج به دست آمده در این مقاله نشان می‌دهد که برای رسیدن به راکتیویته معادل قلب اول رآکتور تحقیقاتی تهران یعنی حدود ۶۹۱۶ pcm، میزان جرم سوخت قلب تیوبلار تا حدود ۱۷٪ کاهش می‌یابد. از سوی دیگر، با استفاده از سوخت حلقوی شار نوترونی در کانال‌های پرتوهدی تا حدود ۱۴٪ افزایش می‌یابد. هم‌چنین با توجه به نتایج این تحقیق، قلب پیشنهادی تیوبلار، قلبی با چیدمان ۱۶ تایی و حداقل ۷ بسته ۶ تایی میله کنترل جهت رسیدن به معیارهای ایمنی لازم است.

**کلیدواژه‌ها:** سوخت حلقوی، رآکتور تحقیقاتی تهران، پارامترهای نوترونی، کدهای MCNPX2.7 و WIMS-CITATION

## Neutronic conceptual design of Tehran Research Reactor using tubular fuel

M. Hasanzadeh, F. Khoshahval\*, M. Amin Mozafari, M.A. Amirkhani, A. Lashkari, M. Rajaei  
Reactor and Nuclear Safety Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, P.O.Box: 14155-1339, Tehran - Iran

### Research Article

Received 28.7.2020, Accepted 23.11.2020

### Abstract

The purpose of this paper is to investigate the possibility of using fuel with annular geometry (Tubular) in Tehran research reactor (TRR) from a neutronic perspective. The use of annular fuels requires less fuel load due to higher flux generation and higher reactivity. It is noteworthy that one of the most important advantages of this type of fuel is the creation of an area in the center of the fuel complex for irradiation of materials and production of radiopharmaceuticals. Therefore, in the TRR, a new fuel with annular geometry has been adopted to replace the current fuel with cubic geometry. This fuel is similar to TRR fuel in terms of materials. For this purpose, the neutron conditions of the core are simulated using MCNPX2.7 and WIMS-CITATION codes. Then the obtained results from these codes were compared with the SAR results of the TRR. The obtained results in this paper show that to achieve the reactivity equivalent to the first core of the TRR, the critical mass of the tubular core fuel is up to 17% less than the critical mass of the first core fuel. On the other hand, using annular fuel, the neutron flux in the radiation channels increases up to about 14%. Also, according to the results of this study, the proposed tubular core, a core with an arrangement of 16 and at least 8 packages of 6 control rods are needed to achieve safety standards.

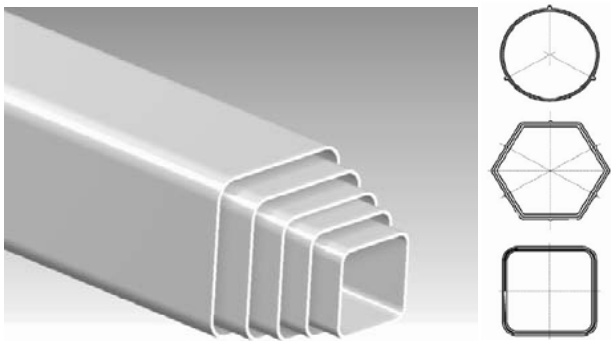
**Keywords:** Tubular Fuel, Tehran Research Reactor, Neutronic parameters, MCNPX2.7, WIMS-CITATION



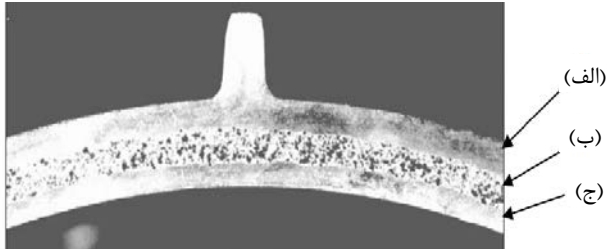
## ۱. مقدمه

گسترده‌ای از نیازهای رآکتورهای تحقیقاتی مختلف را پوشش دهد.

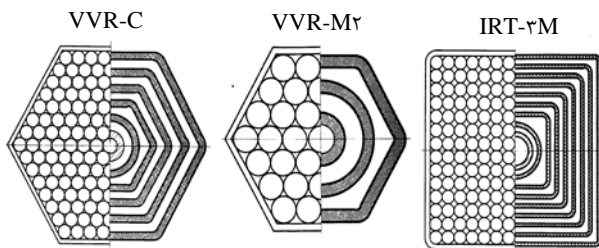
در جدول ۱ اطلاعات چند نوع متداول از این نوع سوخت ارائه شده است. یکی از مهم‌ترین کاربردهای سوخت حلقوی قرار گرفتن نمونه‌های پرتوهی در حفره مرکزی به قطر ۲/۱۳ سانتی‌متر [۲] این نوع از سوخت‌ها است که به ویژه در تولید رادیوایزوتوپ‌های مختلف حایز اهمیت است. لازم به توضیح است که این نوع سوخت‌ها اغلب در رآکتورهای با توان بین ۱ تا ۲۰ مگاوات مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۲].



شکل ۱. انواع سوخت حلقوی (راست) و یک مجتمع سوخت حلقوی از نوع IRT<sup>۴</sup> (چپ) [۱].



شکل ۲. ساختار سوخت حلقوی از نوع MR<sup>۵</sup> (رآکتور MARIA، لهستان)، (الف) غلاف بیرونی، (ب) سوخت و (ج) غلاف داخلی [۱].



شکل ۳. طرح واره مقطع عرضی سطح مقطع مجتمع‌های سوخت‌های روسی و میله‌ای آمریکایی از نوع MTR<sup>۲</sup> به همراه معادل آن‌ها [۱].

تأسیسات هسته‌ای (رآکتورهای تحقیقاتی، مجموعه‌های بحرانی و زیربحرانی) نقشی کلیدی در به‌دست آوردن دانش در فیزیک هسته‌ای را بازی می‌کنند. یکی از اجزای اصلی هر رآکتور هسته‌ای، سوخت مورد استفاده در آن می‌باشد. تنوع سوخت‌های هسته‌ای بسیار زیاد است و بسته به نوع رآکتور، انواع مختلفی از المان‌های سوخت و مجتمع‌های سوخت تولید می‌شود. یکی از این نوع مجتمع‌های سوخت، سوخت‌های حلقوی (تیوبلار) هستند که در شوروی سابق طراحی شده‌اند و امروزه در رآکتورهای تحقیقاتی روسیه و رآکتورهایی که این کشور در طراحی آن‌ها دخالت داشته است از جمله لهستان، چکسلواکی، هلند و غیره، مورد استفاده قرار می‌گیرد. گسترده‌ترین طیف مجتمع‌های سوخت طراحی شده با المان‌های سوخت حلقوی (IRT-۲M, IRT-۳M, MR, MIR, WWR-TS, IVV-۲M) مورد استفاده قرار گرفته‌اند. این نوع سوخت از چندین صفحه سوخت خمیده با مقطع عرضی مربعی، شش‌ضلعی یا دایره‌ای تشکیل شده است که به‌صورت هم‌محور در داخل یک‌دیگر قرار گرفته‌اند (شکل ۱). در هر یک از این صفحات سوخت قسمت گوشت سوخت با دو لایه غلاف از جنس آلومینیم احاطه شده است (شکل ۲) [۱].

کارخانه تولید سوخت NCCP<sup>۱</sup> کشور روسیه از سال ۱۹۷۳ تاکنون بیش از ۳۰۰۰۰ مجتمع سوخت در ۵۶ نوع مختلف برای رآکتورهای تحقیقاتی کشور روسیه و شوروی سابق و همچنین کشورهای دیگری در اروپا، آسیا و خاورمیانه ساخته است. این کارخانه یکی از تولیدکنندگان اصلی سوخت حلقوی با انواع مختلف است که محصولات آن در رآکتورهای تحقیقاتی کشورهای متعدد از جمله روسیه (از همه انواع سوخت)، جمهوری چک (LWR-۱۵)، مجارستان (VVR-SM)، قزاقستان (VVR-K)، لهستان (MARIA)، لیبی (IRT-۱)، اوکراین (VVR-M) و ازبکستان (VVR-SM) استفاده می‌شود. در شکل ۳ سطح مقطع مجتمع‌های سوخت میله‌ای روسی و سوخت میله‌ای آمریکایی از نوع MTR<sup>۲</sup> به همراه معادل سوخت حلقوی هر کدام که با سوخت LEU<sup>۳</sup> جایگزین شده‌اند، نشان داده شده است [۱]. با تغییر شکل مقطع سوخت حلقوی و همچنین تعداد صفحات هم‌محور، جرم اورانیوم موجود در هر مجتمع نیز تغییر می‌کند که این موضوع می‌تواند بازه

4. In-Reactor Thimble

5. Module Redial

1. Novosibirsk Chemical Concentrate Plant

2. Material Test Reactor

3. Low Enriched Uranium



مختلف دنیا و با الهام از الگوی استفاده شده در آن‌ها، روند مناسبی جهت جایگزینی سوخت فعلی با هندسه مکعبی با سوختی جدید با هندسه حلقوی در رآکتور تهران اتخاذ گردد. قابل ذکر است که این سوخت از لحاظ موادی مشابه با سوخت رآکتور تهران می‌باشد. برای این منظور، پارامترهای نوترونی قلب شامل ضریب تکثیر مؤثر، راکتیویته، توزیع شار نوترون سه گروهی، ضریب بیشینه توان، ضریب ایمنی راکتیویته و ارزش میله‌های کنترل با استفاده از کدهای MCNPX<sub>۲/۷</sub> و WIMS-CITATION محاسبه شده است [۳، ۴]. سپس نتایج حاصله این کدها با نتایج گزارش آنالیز ایمنی (SAR) رآکتور تحقیقاتی تهران (TRR) برای پارامترهای راکتیویته، ضریب ایمنی راکتیویته و ضریب بیشینه توان مقایسه گردید.

## ۲. مواد و روش‌ها

### ۱۰۲ معیارهای ایمنی قلب رآکتور تهران از دیدگاه نوترونی





به طور کلی برای تغییر یا طراحی سوخت یا کندکننده باید کمیت‌هایی از جمله ضرایب بازخورد، راکتیویته، طول کارکرد (چرخه)، میزان مصرف سوخت، شار نوترون و ارزش میله‌های کنترل را مقایسه و بررسی کرد. ضرایب بازخورد شامل ضریب بازخورد دمایی سوخت، کندکننده و خنک‌کننده و ضریب بازخورد خلأ است که وابسته به مصرف سوخت هم هستند. تحلیل شار نوترون شامل بررسی یکنواخت بودن توزیع شار نوترون، امکان داشتن سطح شار مورد نظر یا تولید شار بالاتر و وابستگی شار به میزان مصرف سوخت از نکات مهم در طراحی نوترونی است. بررسی ارزش راکتیویته برای در نظر گرفتن ایمنی رآکتور و اقتصاد سوخت انجام می‌شود. مصرف سوخت سالانه، حاشیه خاموشی، مناسب بودن برای آزمایش و سطوح بیشینه توان از جمله کمیت‌هایی است که برای مقایسه طرح‌های مختلف استفاده می‌شود [۵]. ارزیابی برقرار بودن این معیارها برای هر قلبی با انجام محاسبات امکان پذیر است [۶]. بنابراین در این مقاله نیز برخی از معیارهای ایمنی قلب رآکتور تهران از دیدگاه نوترونی با سوخت فعلی بررسی شده و از آن‌جای که این معیارها در رآکتوری با سوخت حلقوی که چیدمان، ابعاد قلب و سوخت، نوع کندکننده، میله‌های کنترل و سایر تجهیزات آن مشابه رآکتور تهران می‌باشد، استفاده شده است. معیارهای طراحی رآکتور تهران در جدول ۲ آمده است [۷].

### جدول ۲. معیارهای طراحی نوترونی رآکتور تهران

مقدار	کمیت
۶۹۱۶	راکتیویته اضافی <sup>۱</sup> قلب اول
بیش‌تر از ۳۰۰۰	حاشیه خاموشی <sup>۲</sup> (pcm)
کم‌تر از کسر مؤثر نوترون‌های تأخیری	ارزش میله کنترل تنظیمی
بیش‌تر از ۱۵	ضریب ایمنی راکتیویته (SRF <sup>۳</sup> )
کم‌تر از ۳	ضریب قله توان کل (TPPF <sup>۱</sup> )

1. Excess Reactivity
2. Shut Down Margin
3. Safety Reactivity Factor (SRF)

## جدول ۱. مشخصات برخی انواع متداول سوخت حلقوی [۲]

نوع سوخت	انواع	شکل هندسی	انواع رآکتور
IRT	IRT-۲M IRT-۳M IRT-۴M IRT-۶M		IR-۸, LWR-۱۵, IWW-۷, WWR-SM
IVV-۲M	IVV-۲M IVV-۱۰		reactors only Russian research
VVR	VVR-Z		VVR-K reactor
MR	WWS-M		MARIA reactor

با توجه به مطالعات انجام شده در این راستا، به طور خلاصه مهم‌ترین مزیت‌ها و ویژگی‌های سوخت‌های حلقوی یا تیوبلار می‌تواند موارد زیر باشد [۱، ۲].

- نرخ انتقال حرارت از سوخت حلقوی به خنک‌کننده پیش‌تر است. دلیل این امر زیاد بودن سطح انتقال حرارت در سوخت حلقوی است.
  - بیشینه دمای سوخت در سوخت حلقوی کم است. لذا حاشیه ایمنی و اطمینان در طی حوادث نیز برای سوخت حلقوی زیاد است.
  - انحراف از جوشش هسته‌ای در سوخت حلقوی پیش‌تر است. چون برداشت حرارت از سطح سوخت حلقوی زیادتر است.
  - بیشینه استرس سوخت حلقوی کم‌تر است. به همین دلیل، احتمال شکست سوخت در سوخت‌های حلقوی پایین‌تر است.
  - استحکام مکانیکی و مقاومت مناسب در برابر جریان بالای خنک‌کننده از خصوصیات مناسب این نوع رآکتورها است [۲].
  - به دلیل استفاده از سوخت‌های سرامیکی در مجتمع‌های سوخت حلقوی، امکان ساخت ترکیبات مختلف سوخت با چگالی‌های مختلف از  $۱/۲۵ \text{ g/cm}^3$  تا  $۳ \text{ g/cm}^3$  بسته به نظر مشتری وجود دارد.
  - در این نوع رآکتورها، به دلیل تولید شار بالاتر و چرخه کاری طولانی‌تر نیاز به بارگذاری سوخت کم‌تر است.
  - ایجاد مراکز پرتودهی در مرکز مجتمع‌های سوخت و در اطراف قلب بیش‌تر است. به خصوص برای تولید رادیوایزوتوپ و سیلیکون داپینگ (Silicon doping) مناسب است.
- اما مهم‌ترین عیب این نوع از مجتمع‌ها محدودیت در بارگذاری اورانیم است که این امر به دلیل ابعاد بسیار نازک سوخت است و برای رفع این مشکل از نوعی سوخت میله‌ای با طراحی جدید (استفاده از سوخت‌های آمریکایی از نوع MTR) استفاده شده است. بنابراین هدف از انجام این پژوهش، بررسی امکان استفاده از این نوع سوخت در رآکتور تحقیقاتی تهران از دیدگاه نوترونی می‌باشد. در این راستا سعی شده است تا پس از بررسی چندین نوع سوخت حلقوی در رآکتورهای تحقیقاتی



با توجه به بررسی‌ها و مطالعات انجام شده در این زمینه، بیش‌تر سوخت‌های به‌کار رفته در این نوع راکتورها از نوع ۶تایی (بسته کنترلی) و ۸تایی (بسته سوخت) هستند. همچنین از المان‌های ۴تایی به عنوان باکس‌های پرتودهی به تعداد کم‌تری در اطراف قلب استفاده می‌شود که در ادامه این نوع سوخت به اطراف قلب‌های بعدی اضافه شده است. میله‌های کنترل در سوخت‌های حلقوی از جنس B۴C استوانه‌ای با شعاع ۱٫۰۵ سانتی‌متر می‌باشد که در مرکز مجتمع‌های سوخت با ۶ حلقه وارد می‌شود.

پارامترهای نوترونی قلب شامل ضریب تکثیر مؤثر، راکتیویته، توزیع شار نوترون سه گروهی، ضریب بیشینه توان، ضریب ایمنی راکتیویته و ارزش میله‌های کنترل با استفاده از کدهای MCNPX<sub>۲٫۷</sub> و WIMS-CITATION محاسبه شده است که در ادامه نحوه محاسبه برخی از این پارامترها شرح داده شده است.

برای محاسبه راکتیویته از رابطه (۱) استفاده می‌شود.

$$\rho = \frac{k_{eff} - 1}{k_{eff}} \quad (1)$$

با در نظر گرفتن Ag-In-Cd و B۴C با چگالی به ترتیب ۱۰٫۱۷ gr/cm<sup>۳</sup> و ۲٫۵۳ gr/cm<sup>۳</sup> به عنوان ماده جاذب برای میله‌های کنترل، ارزش میله‌های کنترل و حاشیه خاموشی راکتور محاسبه شده است (قابل ذکر است که در قلب تیوبلار معمولاً از میله کنترل B۴C استفاده می‌شود ولیکن میله کنترل راکتور تهران Ag-In-Cd می‌باشد). ارزش میله‌های کنترل و حاشیه خاموشی راکتور به ترتیب با استفاده از رابطه (۲) و (۳) به دست آمده است [۸].

$$\rho_w = \frac{k_o - k_i}{k_o \times k_i} \quad (2)$$

که در آن  $k_o$  ضریب تکثیر مؤثر راکتور به ازای بیرون بودن تمام میله‌های کنترل از قلب راکتور و  $k_i$  ضریب تکثیر مؤثر راکتور به ازای داخل بودن تمامی میله‌های کنترل در داخل قلب می‌باشد.

$$\rho_s = \rho - \rho_w \quad (3)$$

که در این رابطه،  $\rho_w$  و  $\rho_s$  به ترتیب ارزش میله کنترل و حاشیه خاموشی می‌باشند.

۲.۲ شبیه‌سازی قلب اول راکتور تحقیقاتی تهران با سوخت جدید به کمک کدهای WIMS و CITATION

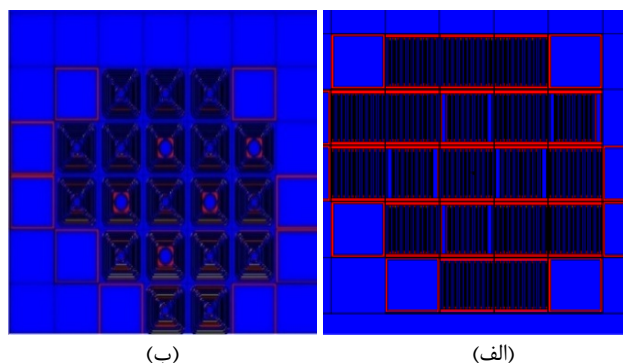
برای انجام محاسبات سلولی سوخت حلقوی از نوع IRT-۴M جهت استفاده از آن در راکتور TRR، کد محاسبات سلولی WIMS-D۵ مورد استفاده قرار می‌گیرد. از آن‌جاکه کد

۲.۲ شبیه‌سازی قلب اول راکتور تحقیقاتی تهران با سوخت جدید با کد MCNPX

در این قسمت فایل‌های ورودی جهت شبیه‌سازی قلب اول راکتور تهران و تیوبلار از طریق کد مذکور تهیه شده و سپس پارامترهای نوترونی از جمله ضریب تکثیر مؤثر و راکتیویته محاسبه شده و نتایج به دست آمده برای قلب اول مقایسه شده است. شکل ۴ الف و ب قلب اول راکتور تهران و تیوبلار شبیه‌سازی شده توسط کد MCNPX با ۱۴ مجتمع سوخت و ۵ مجتمع کنترلی را نشان می‌دهد.

ابتدا با توجه به قلب اول راکتور تهران [۱] که دارای ۱۹ مجتمع سوخت (۱۴ SFE<sup>۲</sup> و ۵ CFE<sup>۳</sup>) بوده است قلب شبیه‌سازی شده از سوخت‌های حلقوی نیز با تعداد برابر مجتمع سوخت (۸<sup>۲</sup> Tub-۱۴ و ۵<sup>۵</sup> Tub-۶) و با آرایش قلب اول راکتور تهران در نظر گرفته شده است (شکل ۴). قابل ذکر است که هندسه سوخت تیوبلار از نوع IRT-۴M و مشابه با سوخت راکتور تهران U<sub>۳</sub>O<sub>۸</sub>-Al در نظر گرفته شده است. مزیت این نوع سوخت می‌تواند موارد زیر باشد.

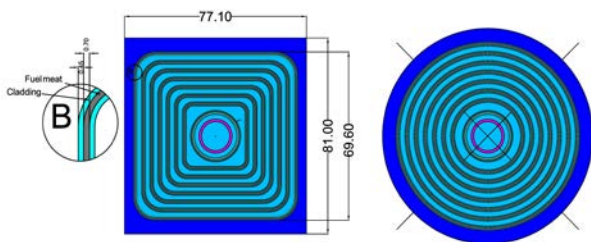
- قطر هیدرولیکی سوخت IRT-۴M بیش‌تر از سایر سوخت‌های حلقوی روسی مانند VVR-C، VVR-M۲، IRT-۲M، IRT-۳M و MR است.
- در فرایند ساخت مجتمع سوخت IRT-۴M در مقایسه با سایر سوخت‌های روسی از نوع IRT-۲M، IRT-۳M اجازه ایجاد فاصله بین عناصر سوخت IRT-۴M داده شده است. یعنی ضخامت صفحات سوخت افزایش یافته است.
- مساحت سطح مقطع IRT-۴M بیش‌تر از سایر سوخت‌های حلقوی روسی مانند VVR-C، IRT-VVR-M۲، IRT-۲M است.



شکل ۴. شبیه‌سازی توسط کد MCNPX با ۱۴ مجتمع سوخت و ۵ مجتمع کنترلی الف) قلب اول راکتور تهران، ب) تیوبلار.

1. Total Power Peaking Factor (TPPF)
2. Standard Fuel Element
3. Control Fuel Element
4. المان ۸ تایی
5. المان ۶ تایی





شکل ۵. تبدیل مجموعه سوخت IRT-4M دایره‌ای متحداً مرکز (ابعاد: mm).

## جدول ۳. مشخصات گروه‌های انرژی ورودی فایل‌های WIMS-D5

مرز بالایی	مرز پایینی	گروه
۱۰ MeV	۰.۸۲۱ MeV	۱
۰.۸۲۱ MeV	۵۵۳۰ keV	۲
۵۵۳۰ keV	۳۳ eV	۳
۳۳ eV	۰.۶۲۵ eV	۴
۰.۶۲۵ eV	۰.۱۰۰ eV	۵
۰.۱۰۰ eV	۰ eV	۶

## جدول ۴. اطلاعات مربوط به چیدمان اولین قلب رآکتور تهران برای دو

ماده	جرم در اولین قلب عملیاتی رآکتور تهران <sup>۱</sup> (kg)	جرم در اولین قلب رآکتور با سوخت تیوبلار (kg)
U-238	۲۰.۵۶	۲۴.۶۲
U-235	۵.۱۴	۶.۱۵
O	۴.۶۲	۵.۵۳
Al	۱۰.۹۸	۱۳.۱۵
Total	۴۱.۳۰	۴۹.۴۵

## جدول ۵. نتایج مربوط به پارامتر ضریب تکثیر مؤثر برای قلب اول رآکتور تهران و تیوبلار

پارامتر	ضریب تکثیر مؤثر	رآکتیویته (pcm)
TRR	$1.07268 \pm 0.00012$	۶۷۷۶
TRR-SAR	$1.07429$	۶۹۱۶
TRR-Tubular	$1.13148 \pm 0.00012$	۱۱۶۲۰

لذا با توجه به ضریب تکثیر مؤثر قلب رآکتور تحقیقاتی تهران (جدول ۵)، می‌توان با کاهش جرم سوخت قلب تیوبلار به همان مقدار رسید. در نتیجه در این مقاله سعی شده است با استفاده از ترکیبات مختلف از سه نوع مجتمع سوخت حلقوی (المان‌های ۴، ۶ و ۸ تایی) منتخب براساس ضریب تکثیر مؤثر قلب، گام بهینه و چیدمان‌های مختلف در نظر گرفته شده و نحوه قرارگیری میله‌های کنترل (۶-Tub)، پارامترهای مختلف نوترونی در قلب رآکتور تیوبلار بررسی و محاسبه شده است. ترکیبات مختلف براساس معیارهای نوترونی و ایمنی رآکتور تهران بیان شده در SAR (جدول ۲)، مطالعات انجام شده در این زمینه (۱-۴) و میزان جرم سوخت رآکتور تهران (جدول ۴) و ضریب تکثیر مؤثر و رآکتیویته مازاد قلب رآکتور تهران انتخاب شده‌اند:

۱. جرم اورانیم موجود در قلب رآکتور بین ۳۷ تا ۴۱ کیلوگرم باشد (قلب اول رآکتور تهران با ۱۵ SFE و ۴ CFE دارای جرم ۴۱/۳ Kg است)،

WIMS-D5 یک‌بعدی است، برای به‌دست آوردن ثوابت گروهی موردنیاز مجموعه سوخت هشت‌تایی، شش‌تایی به همراه میله‌های کنترلی و یا بدون آن و همچنین مجموعه سوخت چهارتایی، حلقه‌های مجموعه سوخت IRT-4M که دارای مقطع مربع شکل با گوشه‌های گرد هستند، به یک سری از دایره‌ای متحداً مرکز شامل خنک‌کننده، غلاف سوخت و مواد سوخت تبدیل می‌شوند (شکل ۵).

برای به‌دست آوردن ثوابت گروهی شامل آب و بازتابنده‌های گرافیتی و یا بریلیوم، کانال‌های تابش‌دهی، از هندسه صفحه‌ای (SLAB) کد WIMS-D5 استفاده شده است [۴]. با استفاده از فایل‌های فوق، ثوابت گروهی مورد استفاده در کد CITATION در شش گروه انرژی که مرزهای گروه‌های آن در جدول ۳ مشخص شده، تهیه شده است.

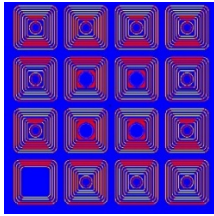
## ۳. بحث و تحلیل نتایج

۱.۳ محاسبه پارامترهای نوترونی برای چیدمان با سوخت حلقوی با کدهای WIMS-CITATION و MCNPX

## ۱.۰.۳ محاسبه پارامترهای نوترونی با کد MCNPX

برای محاسبه پارامترهای نوترونی قلب تیوبلار و تهران ابتدا نیاز است که میزان جرم سوخت اورانیم در دو قلب مورد بررسی قرار گیرد. جدول ۴ اطلاعات مربوط به چیدمان اولین قلب رآکتور تهران برای دو حالت سوخت‌های صفحه‌ای و حلقوی را نشان می‌دهد. نتایج مربوط به پارامتر ضریب تکثیر مؤثر و رآکتیویته برای قلب اول رآکتور تهران (TRR) با ۱۴ بسته سوخت و ۵ بسته کنترلی و قلب تیوبلار (Tubular) مشابه با آن، بدون میله‌های کنترل با کد MCNPX برای تعداد ۵۰ میلیون تاریخچه (تعداد ۵۰۰ سیکل و تعداد کل ذرات ۱۰۰۰۰۰) در جدول ۵ نشان داده شده است. همان‌طور که این جدول نشان می‌دهد مقدار ضریب تکثیر مؤثر ( $K_{eff}$ ) و رآکتیویته ( $\rho$ ) در قلب اول تیوبلار در مقایسه با قلب اول تهران به دلیل جرم سوخت بالاتر (جرم کل سوخت رآکتور تهران برای قلب اول حدود ۴۱/۳۰ کیلوگرم و برای قلب تیوبلار در حدود ۴۹/۴۵ کیلوگرم است، مطابق با جدول ۴)، بیش‌تر است. بنابراین با توجه به افزایش ۱۷٪ درصدی میزان جرم سوخت قلب تیوبلار در شرایط مشابه با قلب اول رآکتور تحقیقاتی تهران، موجب افزایش ضریب تکثیر مؤثر قلب تیوبلار شده است. قابل ذکر است که در این تحقیق، مقدار انحراف معیار محاسبات برای پارامتر ضریب تکثیر مؤثر در حدود ۱۲ pcm است. همچنین نتایج حاصل از کد با نتایج ذکر شده در SAR مقایسه شده است که مقدار اختلاف نتایج در حدود ۱۵۰ pcm یا ۰/۲ درصد است.





شکل ۶. چیدمان قلب رآکتور تهران با سوخت حلقوی با یک المان ۴ تایی، ۴ المان ۶ تایی و ۱۱ المان ۸ تایی.

در شکل ۷ چیدمان قلب اول رآکتور تهران با ۱۹ المان سوخت (شامل ۱۴ المان SFE و ۵ المان CFE) و نیز قلب منتخب حاوی ۱۶ المان سوخت حلقوی (شامل ۵ المان ۸ تایی، ۷ المان ۶ تایی و ۴ المان ۴ تایی) نشان داده شده است. این قلب که از نظر راکتیویته بسیار نزدیک به قلب اول رآکتور تهران است،  $16.67\%$  جرم سوخت کم‌تری دارد. جهت مقایسه میزان تغییر شار در قلب تیوبلار نسبت به قلب اول، شار محوری نوترون برای سه گروه انرژی نوترون‌های حرارتی، فوق حرارتی و سریع در کانال IR-box واقع در موقعیت D9 با استفاده از کد MCNPX با فرض توان یکسان محاسبه شده است که نتیجه آن در شکل ۸ ارایه گردیده است. نتیجه محاسبات نشان می‌دهد که شار نوترون در راستای محوری کانال D9 در قلب تیوبلار برای نوترون‌های حرارتی، فوق حرارتی و سریع به طور متوسط به ترتیب  $16.1\%$ ،  $10.2\%$  و  $12.3\%$  درصد بیش‌تر از قلب اول رآکتور تهران می‌باشد. به عبارت دیگر در قلب تیوبلار با  $16.67\%$  جرم سوخت کم‌تر، افزایش شاری در حدود  $14.3\%$  درصد نسبت به قلب اول رآکتور تهران به‌دست آمده است که این دستاورد برای کاربردهای نوترونی به خصوص برای پرتودهی مواد و تولید رادیوایزوتوپ قابل ملاحظه است.

۲.۱.۳ محاسبه پارامترهای نوترونی با کدهای WIMS و CITATION  
 آرایش قلب ۱۶ تایی با فرض نزدیکی مقدار جرم  $^{235}\text{U}$  همانند رآکتور TRR در نظر گرفته شده است. سیستم حفاظت کنترلی (CPS)، میله‌ایی از جنس فولاد زنگ نزن (AISI-۳۱۶L SS) برای تنظیم دقیق توان، میله‌هایی از جنس  $(\text{B}_4\text{C})$  با چگالی  $2.53$  گرم بر سانتی‌متر مکعب و میله‌هایی از جنس  $(\text{Ag-In-Cd})$  برای جبران راکتیویته اضافه قلب، هستند. غلافی از جنس فولاد زنگ نزن (AISI-۳۱۶L SS) برای میله‌های سیستم حفاظتی در مجموعه سوخت IRT-۴M به‌طور دایم در نظر گرفته شده است. چیدمانی که این‌جا در نظر گرفته شده است شامل: ۱ سوخت حلقوی ۴ تایی، ۸ سوخت حلقوی ۶ تایی و ۷ سوخت حلقوی ۸ تایی. سوخت‌ها در یک ناحیه ۶ در ۹ می‌توانند قرار گیرند و علاوه بر فضای خالی ناحیه صفحه نگه‌دارنده دولایه از طرفین صفحه نگه‌دارنده به‌عنوان بازتابنده‌های جانبی در نظر گرفته می‌شود. سوخت در نظر گرفته شده در این چیدمان  $\text{U}_2\text{O}_8\text{-Al}$  می‌باشد. در ادامه ضریب

۲. حداقل ۴ مجتمع سوخت Tub-۶ در قلب موجود باشد (حداقل تعداد ابزار کنترلی).

۳. حداقل ۴ مجتمع سوخت Tub-۸ در قلب موجود باشد (حداقل جرم سوخت جهت بحرانی شدن).

لذا ترکیب بهینه مجتمع‌های سوخت براساس تعداد مجتمع‌های سوخت با ۴، ۶ و ۸ المان، به چندین دسته تقسیم می‌شوند. در این تحقیق، بر اساس محاسبات مختلف انجام شده برای نزدیک ۱۰۰ آرایش قلب در نظر گرفته شده، تعداد ۹ آرایش قلب بر اساس شروط بالا انتخاب شده که برای مثال، یک نمونه از آرایش قلب (۱۱ ۴ ۴) یک المان ۴ تایی، ۴ المان ۶ تایی و ۱۱ المان ۸ تایی) در شکل ۶ نشان داده شده است. نتایج به‌دست آمده برای ضریب تکثیر مؤثر، ارزش میله‌های کنترل  $(\text{B}_{\text{eff}})$ ، مقدار جرم مجتمع‌های سوخت، ضریب بیشینه توان<sup>۲</sup> و ضریب ایمنی راکتیویته<sup>۳</sup> در مجتمع‌ها محاسبه شده که در جدول ۶ نشان داده شده است. با فرض این‌که در هنگام ورود کامل میله‌های کنترل در قلب، ضریب تکثیر حداقل بایستی کم‌تر از ۰/۹ شود، تا با استناد به SAR رآکتور تهران مقدار SRF (برابر است با نسبت مجموع ارزش میله‌های کنترل به راکتیویته اضافی) بیش‌تر از ۱/۵ گردد. هم‌چنین با توجه به این جدول، مقدار ضریب بیشینه توان برای قلب رآکتور تهران SAR حدود ۲/۱ می‌باشد که حدود ۲۲ درصد بیش‌تر از مقدار آن در قلب رآکتور تیوبلار (۱/۷۱) است. البته قابل ذکر است که هر چه مقدار این پارامتر کم‌تر باشد از نظر ایمنی بهتر است. علاوه بر این، از نتایج جدول ۶ مشاهده می‌شود که برای کنترل رآکتور بهتر است تعداد میله‌های کنترل (Tub-۶) افزایش یابد. دلیل آن است که ارزش تمام میله‌های کنترل در هنگام ورود کامل آن‌ها در قلب رآکتور تهران بیش از  $12541$  pcm است، بنابراین مشاهده می‌شود برای قلب تیوبلار با میله کنترل  $\text{B}_{\text{eff}}$  در این جدول بیش‌تر آرایش‌ها را می‌توان انتخاب نمود. هم‌چنین در این جدول مشاهده می‌شود که اختلاف بین حالت‌های مختلف بررسی شده در مقدار ضرایب بیشینه توان بسیار کم می‌باشد در حالی که برای پارامترهای ارزش میله‌های کنترل و ضریب ایمنی راکتیویته به دلیل تغییر تعداد مجتمع‌های Tub-۶ متفاوت است. بنابراین با توجه به جدول ۶، بیش‌تر آرایش‌ها شرایط حاشیه خاموشی و ضریب ایمنی راکتیویته را پاس می‌کنند. ولی به طور کلی می‌توان گفت که تقریباً بیش‌تر مقادیر پارامترهای نوترونی محاسبه شده در این جدول نزدیک هم می‌باشند، انتخاب قلب مناسب جهت ادامه کار بسیار سخت خواهد بود.

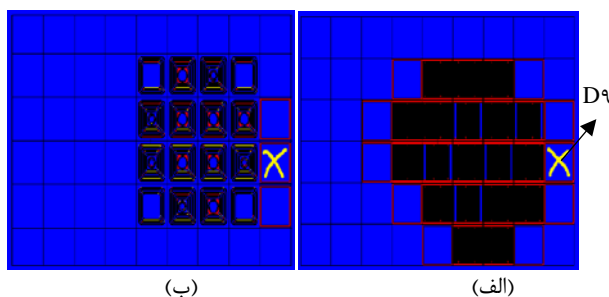
1. Density = 2.53 g/cm<sup>3</sup>
2. Power Peaking Factor
3. Safety Reactivity Factor



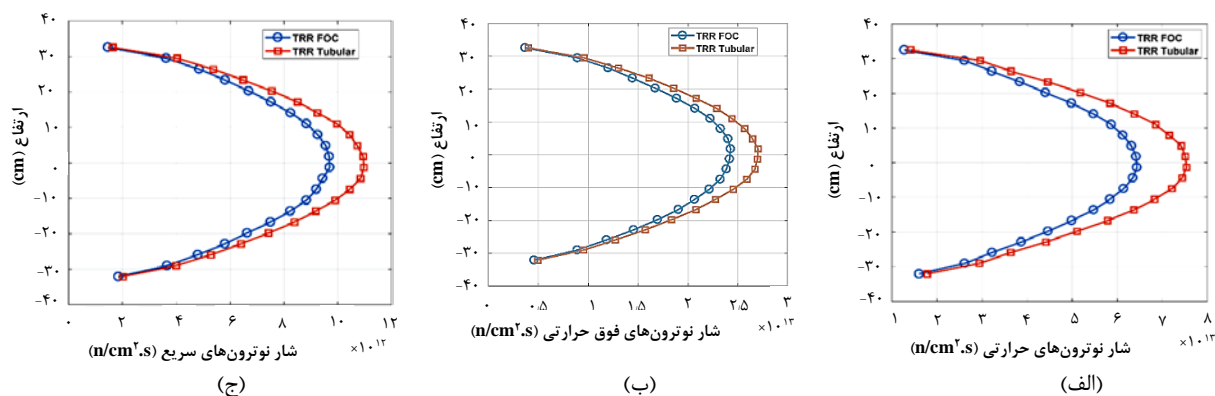
شده است. برای یافتن راکتیویته اضافی می‌بایست تمامی میله‌های کنترلی بیرون باشند. ضریب تکثیر مؤثر قلب، راکتیویته اضافی و ضریب پیک‌های توان با کدهای WIMS و CITATION محاسبه شده که در جدول ۷ آمده است.

جدول ۶. پارامترهای نوترونی قلب رآکتور تیوبلار برای آرایش‌های مختلف مجتمع‌های سوخت با میله کنترل B<sub>4</sub>C

PPF	SRF	Control Rod Worth (pcm)	$K_{eff}$	Mass U-235 (kg)	Total Fuel Mass (kg)	[Tub-۴ Tub-۶ Tub-۸]	No.
۱.۷۰	۲.۹۵	۱۹۲۶۴.۹۵	۱.۰۶۹۶	۴.۶۹	۳۷.۶۷۸	[۳ ۸ ۵]	۱
۱.۷۲	۳.۱۰	۱۹۸۹۳.۴۵	۱.۰۶۸۶	۴.۶۵	۳۷.۳۴۶	[۳ ۹ ۴]	۲
۱.۷۰	۳.۰۶	۲۰۳۰۳.۶۳	۱.۰۷۱۱	۴.۸۰	۳۸.۵۸۱	[۲ ۸ ۶]	۳
۱.۷۱	۳.۳۰	۲۱۵۱۲.۹۹	۱.۰۶۹۷	۴.۷۶	۳۸.۲۴۹	[۲ ۹ ۵]	۴
۱.۷۰	۳.۵۶	۲۲۸۱۷.۴۱	۱.۰۶۸۴	۴.۷۲	۳۷.۹۱۷	[۲ ۱۰ ۴]	۵
۱.۷۰	۳	۲۰۲۴۷.۷۴	۱.۰۷۲۳	۴.۹۱	۳۹.۴۸۴	[۱ ۸ ۷]	۶
۱.۷۰	۳.۲۳	۲۱۴۳۹.۴۳	۱.۰۷۱۰	۴.۸۷	۳۹.۱۵۲	[۱ ۹ ۶]	۷
۱.۷۱	۳.۴۷	۲۲۷۶۴.۶۸	۱.۰۷۰۱	۴.۸۳	۳۸.۸۲۰	[۱ ۱۰ ۵]	۸
۱.۷۱	۳.۷۸	۲۴۱۹۲.۴۸	۱.۰۶۸۳	۴.۷۹	۳۸.۴۸۸	[۱ ۴ ۱۱]	۹



شکل ۷. الف) چیدمان قلب اول رآکتور تهران، ب) قلب منتخب تیوبلار



شکل ۸. مقایسه شار نوترون‌های حرارتی (الف)، فوق حرارتی (ب)، سریع (ج)، در کانال IR-box واقع در D<sub>9</sub> در قلب اول رآکتور تهران و قلب تیوبلار.

از مجموع اثر دمای سوخت و کندکننده و اثر زینان برای قلب تیوبلار با چیدمان ۱۶ تایی (ترتیب لایه‌ها (۴-۶-۸)) با سوخت U<sub>2</sub>O<sub>8</sub>-Al از طریق کدهای WIMS-CITATION محاسبه شده و در جدول ۸ آورده شده است. نکته قابل ذکر این است که کد WIMS-D5 قادر به محاسبه مقدار <sup>135</sup>Xe در طول زمان نیست (این کد برای محاسبات برناپ، ایزوتوپ‌های با نیمه‌عمر کم‌تر از ۱۹ ساعت را اشباع در نظر می‌گیرد). بنابراین در یک زمان یا مقدار زینان صفر است و یا مقدار آن برابر زینان تعادلی در هر سطحی از توان است (در این‌جا مقدار تعادلی زینان متناسب با سطح توان ۵ مگاوات محاسبه شده است). با توجه به این‌که در کتابخانه کد WIMS-D5 ثوابت گروهی برای هر

جدول ۷. پارامترهای نوترونی چیدمان ۱۶ تایی سوخت U<sub>2</sub>O<sub>8</sub>-Al بدون میله‌های کنترلی

مقدار	پارامترهای نوترونی
۱.۰۸۰۷۹۶	ضریب تکثیر مؤثر
۱.۲۲۴	ضریب قله شعاعی توان
۱.۵۹۹	ضریب قله کل توان
۱.۳۰۶	ضریب قله محوری توان

۳.۱.۳ محاسبه ضرایب فیدبک‌های دمایی سوخت و کندکننده مهم‌ترین فیدبک راکتیویته در یک رآکتور بحرانی فیدبک داپلری است که با افزایش دما یا توان، رزنانس‌های مربوط به شکافت پهن‌تر شده در نتیجه جذب نوترون‌های فوق حرارتی بیش‌تر می‌گردد. لذا در این مقاله، فیدبک دمایی راکتیویته ناشی



شکل‌های فرض شده، کتابخانه داده‌های موجود در آن‌ها، برای مثال، نحوه و تعداد گروه‌بندی انرژی و یا خطاهای محاسباتی نتایج باشد. همچنین برای پارامتر SRF دلیل این اختلاف ناشی از خطای محاسبه ارزش میله‌های کنترل است که عامل اصلی تفاوت کد مونت کارلو MCNPX با کدهای یقینی WIMS-CITATION در محاسبه این پارامتر است.

**جدول ۸.** مقایسه نتایج فیدبک دمایی راکتیویته ناشی از مجموع اثر دمایی سوخت و کندکننده و اثر زینان برای قلب تیوبلار با چیدمان ۱۶ تایی سوخت  $U_2O_8$ -AL با SAR

Relative difference%	SAR [γ]	۳-۹-۴	۱-۸-۷	Parameter
۲۵	-۸	۹٫۹	-۱۰٫۳	Fuel and Coolant temperature coefficient (CZP <sup>۱</sup> to HZP <sup>۲</sup> ), pcm/k
۱۳	-۷۲	-۸۱	-۸۲	Power Effects (HZP to HFP <sup>۳</sup> ), pcm/MW
۵	-۳۱۵۰	-۳۳۵۳	-۳۳۰۸	Xe Effects (HZP to HFX <sup>۴</sup> ), pcm

**جدول ۹.** خلاصه نتایج پارامترهای نوترونی برای قلب تیوبلار با چیدمان ۱۶ تایی سوخت  $U_2O_8$ -AL با استفاده از کدهای WIMS-CITATION

SRF	PPF	<sup>۲۳۵</sup> U Mass (kg)	$K_{eff}$	Tub (۴-۶-۸)
۳٫۹۹۹	۱٫۵۹۷	۴٫۹۱۵	۱٫۰۸۱۵۷۰۵	۱-۸-۷
۴٫۲۹۳	۱٫۵۸۶	۴٫۸۷۴	۱٫۰۷۹۸۳۹۰	۱-۹-۶
۴٫۹۵۷	۱٫۵۵۴	۴٫۷۲۰	۱٫۰۷۵۵۰۹۹	۲-۱۰-۴
۳٫۹۰۳	۱٫۵۴۹	۴٫۶۹۱	۱٫۰۷۶۴۲۳۰	۳-۸-۵
۴٫۱۱۰	۱٫۵۴۶	۴٫۶۴۹	۱٫۰۷۴۷۴۶۰	۳-۹-۴

**جدول ۱۰.** خلاصه نتایج پارامترهای نوترونی برای قلب تیوبلار با چیدمان ۱۶ تایی سوخت  $U_2O_8$ -AL با استفاده از کدهای MCNPX

SRF	PPF	<sup>۲۳۵</sup> U Mass (kg)	$K_{eff} \pm 0.00012$	Tub (۴-۶-۸)
۳٫۰۰۳	۱٫۶۹۶	۴٫۹۱۴	۱٫۰۷۲۲۹	۱-۸-۷
۳٫۲۳۴	۱٫۶۹۹	۴٫۸۷۳	۱٫۰۷۱۰۱	۱-۹-۶
۳٫۵۶۴	۱٫۷۰۴	۴٫۷۱۹	۱٫۰۶۸۴۱	۲-۱۰-۴
۲٫۹۶۰	۱٫۷۰۳	۴٫۶۸۹	۱٫۰۶۹۶۲	۳-۸-۵
۳٫۱۰۰	۱٫۷۲۲	۴٫۶۴۸	۱٫۰۶۸۵۷	۳-۹-۴

**جدول ۱۱.** اختلاف نتایج پارامترهای نوترونی برای قلب تیوبلار با چیدمان ۱۶ تایی سوخت  $U_2O_8$ -AL از طریق کدهای WIMS-CITATION و MCNPX

SRF	PPF (%)	<sup>۲۳۵</sup> U Mass (%)	$K_{eff}$ (%)	Tub (۴-۶-۸)
۳۳٫۱۷	-۵٫۸۴	۰٫۰۲	۰٫۸۷	۱-۸-۷
۳۲٫۷۵	-۶٫۶۵	۰٫۰۲	۰٫۸۲	۱-۹-۶
۳۹٫۰۹	-۸٫۸۰	۰٫۰۲	۰٫۶۶	۲-۱۰-۴
۳۱٫۸۶	-۹٫۰۴	۰٫۰۴	۰٫۶۴	۳-۸-۵
۳۲٫۵۸	-۱۰٫۲۲	۰٫۰۲	۰٫۵۸	۳-۹-۴

1. Cold Zero Power
2. Hot Zero Power
3. Hot Full Power
4. محاسبات در حالت تعادل زینان

ایزوتوپ در دماهای مختلف داده شده است، لذا این کد با روش‌هایی که در درون سورس اصلی خود دارد، قادر است ثوابت گروهی مواد را در هر دمای مورد احتیاج محاسبه نماید. برای انجام محاسبات نوترونی و با در نظر گرفتن تغییرات دمایی سه حالت زیر در نظر گرفته شده است.

- Cold Zero Power (CZP): در این حالت، برای تمام مواد قلب رآکتور دمای  $293.15\text{ K}$  در نظر گرفته شده است.
- Hot Zero Power (HZP): در این حالت، برای تمام مواد قلب رآکتور دمای  $310.95\text{ K}$  در نظر گرفته شده است.
- Hot Full Power (HFP): در این حالت، دما برای خنک‌کننده یا کندکننده  $316.15\text{ K}$  و برای سوخت و غلاف آن  $338.15\text{ K}$  و برای سایر مواد تشکیل‌دهنده رآکتور  $316.15\text{ K}$  در نظر گرفته شده است.

**۴.۱.۳ مقایسه نتایج پارامترهای نوترونی حاصل از کدها با نتایج SAR رآکتور تحقیقاتی تهران**

در جدول ۹ و ۱۰ نتایج پارامترهای مختلف نوترونی شامل ضریب تکثیر مؤثر ( $K_{eff}$ )، مقدار جرم سوخت ( $^{235}\text{U}$  Mass)، فاکتور بیشینه توان کل (PPF) و ضریب ایمنی راکتیویته (SRF) برای ۵ آرایش مختلف قلب تیوبلار با چیدمان ۱۶ تایی شامل المان‌های ۴، ۶ و ۸ تایی با سوخت  $U_2O_8$ -AL که با کدهای WIMS-CITATION و MCNPX محاسبه شده است. همان‌طوری که این جدول نشان می‌دهد آرایش قلبی که دارای جرم سوخت  $^{235}\text{U}$  بالاتری است، مقدار ضریب تکثیر مؤثری بیش‌تری دارد. هم‌چنین مقادیر فاکتور بیشینه توان کل و ضریب ایمنی راکتیویته کم‌تر از معیارهای نوترونی و ایمنی بیان شده در جدول ۲ است.

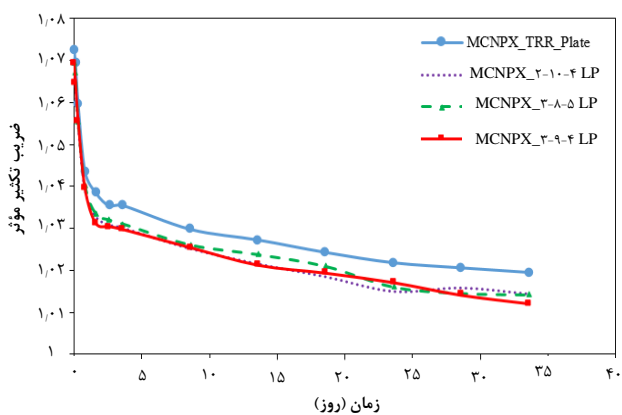
جدول ۱۱ اختلاف نتایج پارامترهای نوترونی محاسبه شده برای قلب تیوبلار با چیدمان ۱۶ تایی سوخت  $U_2O_8$ -AL از طریق کدهای WIMS-CITATION و MCNPX را نشان می‌دهد. در این جدول، بیش‌ترین اختلاف بین نتایج دو کد برای پارامترهای ضریب تکثیر مؤثر و میزان جرم سوخت به ترتیب  $0.87\%$  و  $0.04\%$  درصد می‌باشد که این خطا می‌تواند ناشی از خطای آماری کد مونت کارلو MCNPX و فرضیات ساده شده برای مثال هندسه، گروه‌بندی انرژی و یا شرای مرزی برای کد یقینی WIMS-CITATION باشد. اما برای پارامتر بیشینه توان، اختلاف دو کد در حدود  $10\%$  درصد است و برای پارامتر SRF، به طور میانگین حدود  $33\%$  درصد است که می‌تواند ناشی از نحوه محاسبه این پارامتر در این دو کد، ابعاد هندسه





**جدول ۱۳.** مقایسه نتایج پارامترهای نوترونی برای قلب تیوبلار با چیدمان ۱۶ تایی سوخت  $U_2O_8-AL$  با کدهای MCNPX و WIMS-CITATION با در نظر گرفتن میله کنترل Ag-In-Cd

ارزش میله کنترل (pcm)	ضریب تکثیر مؤثر	$U_2O_8-AL$
۲۷۸۲	$1.03752 \pm 0.00012$	MCNPX
۳۶۲۳	۱.۰۳۵۱۷۸	WIMS-CITATION
۸۴۱	٪۰.۲۳	Error



**شکل ۹.** محاسبات فرسایش سوخت و طول سیکل برای چیدمان‌های مختلف قلب تیوبلار حاصل از کد MCNPX در مقایسه با فرسایش سوخت رآکتور تهران.

#### ۴. جمع‌بندی

در این مقاله، ابتدا به بررسی برخی از مهم‌ترین انواع مجتمع‌های سوخت حلقوی پرداخته شده و مشخصات کلی آن‌ها بیان شده است. از مهم‌ترین مزایا این نوع سوخت‌ها می‌توان به ایجاد حفره‌های در مرکز مجتمع سوخت برای تولید رادیوآروهای مختلف اشاره کرد. لذا یکی از گزینه‌های مفید در آینده برای رآکتورهای تحقیقاتی با توجه به کاهش غنای سوخت، استفاده از این نوع سوخت‌ها است. در این مقاله، ابتدا شرایط نوترونی قلب اول رآکتور تحقیقاتی تهران و سپس قلب تیوبلار با چیدمان مشابه آن با استفاده از کدهای MCNPX<sub>۲,۷</sub> و WIMS-CITATION شبیه‌سازی شده است. سپس نتایج حاصله این کدها با نتایج SAR قلب اول رآکتور تحقیقاتی تهران مقایسه گردید. نتایج به دست آمده از این مقاله نشان می‌دهد که حداقل چیدمان مورد نیاز با راکتیویته یکسان قلب اول تهران، چیدمان ۱۶ تایی با سوخت  $U_2O_8-Al$  می‌باشد. همچنین در این تحقیق، با توجه به نتایج می‌توان نتیجه گرفت که مقدار شار نوترون‌ها در قلب تیوبلار بیش از ۱۴/۳ درصد نسبت به قلب فعلی رآکتور تهران است و این مقدار افزایش شار، برای کاربردهای نوترونی به خصوص برای پرتودهی مواد و تولید رادیوایزوتوپ بسیار حایز اهمیت می‌باشد. علاوه بر این،

همچنین نتایج پارامترهای نوترونی برای قلب تیوبلار با چیدمان ۱۶ تایی برای سوخت  $U_2O_8-AL$  از طریق کدهای MCNPX و WIMS-CITATION برای حالت بحرانی تکرار شده و در جدول ۱۲ نشان داده شده و مقایسه شده است. اختلاف نتایج دو کد در این جدول برای پارامترهای ضریب تکثیر مؤثر ( $K_{eff}$ ) و شار نوترون ( $\phi_T$ ) به ترتیب برابر با ۰/۱۸۷ و ۲/۰ درصد می‌باشد که این اختلاف با توجه به روش‌های محاسباتی و کتابخانه‌های مورد استفاده در هر یک از این کدها، قابل قبول است.

در نهایت نتایج پارامترهای نوترونی شامل ضریب تکثیر مؤثر و راکتیویته برای قلب تیوبلار با چیدمان ۱۶ تایی سوخت  $U_2O_8-AL$  با کدهای MCNPX و WIMS-CITATION با در نظر گرفتن میله کنترل Ag-In-Cd به دست آمده در جدول ۱۳ نشان داده شده است. برای درک اختلاف زیاد ارزش میله‌های کنترل بین دو کد ناشی از چند میله کنترل، یک میله کنترل در داخل قلب قرار داده شده و مقدار تفاوت ارزش آن با دو کد محاسبه شده که نتایج آن در جدول ۱۲ آورده شده است. اختلاف نتایج دو کد در این جدول، برای پارامترهای  $K_{eff}$  و ارزش یک میله کنترل برابر با مقادیر به ترتیب ۰/۲۳ درصد و ۸۴۱ pcm می‌باشد. لذا این اختلاف قابل قبول است و می‌تواند ناشی از خطای آماری و کتابخانه مربوط به توزیع دمایی کدها باشد.

شکل ۹ محاسبات مصرف سوخت و طول سیکل برای چیدمان‌های مختلف قلب تیوبلار، حاصل از کد MCNPX در مقایسه با مصرف سوخت رآکتور تهران با سوخت‌های صفحه‌ای را نشان می‌دهد. همان‌طور که دیده می‌شود، طول سیکل ناشی از سوخت‌های تیوبلار نسبت به سوخت‌های صفحه‌ای کمی کاهش داشته است که با توجه کاهش میزان موجودی اولیه در قلب رآکتور، این پدیده توجیه‌پذیر است. ضمناً ملاحظه می‌شود که رفتار، یا به عبارتی تغییرات ضریب تکثیر مؤثر برای چند چیدمان مختلف با سوخت یکسان و هندسه حلقوی بسیار نزدیک به هم است. به عبارتی دیگر، تغییر چیدمان تأثیر قابل توجهی بر روی منحنی تغییرات ضریب تکثیر مؤثر در سوخت‌های حلقوی نداشته است.

**جدول ۱۲.** مقایسه نتایج پارامترهای نوترونی برای قلب تیوبلار با چیدمان ۱۶ تایی سوخت  $U_2O_8-AL$  با کدهای MCNPX و WIMS-CITATION برای حالت بحرانی

$\phi_T$ (n/cm <sup>2</sup> s)	$K_{eff}$	$U_2O_8-AL$
$1.47E \pm 14$	$0.99785 \pm 0.00012$	MCNPX
$1.44E \pm 14$	۰.۹۹۹۷۱	WIMS-CITATION
۲	۰/۱۸۷	Error %



## مراجع

1. V. Rozhikov, et al., *Design and Manufacture of Fuel Assemblies for Russian Research Reactors*, In *Safety Related Issues of Spent Nuclear Fuel Storage*, Springer, 95-105 (2007).
2. K.A. Konoplev, et al., *LEU WWR-M2 fuel qualification*, In *Proceedings of this Conference*, (2002).
3. D.B. Pelowitz, *MCNPX 2.7.0 manual*, LANL, LA-CP-07-1473. *Los Alamos National Laboratory*, (2008).
4. CITATION-LDI, *Nuclear Reactor Core Analysis Code System Contributed by: Oak Ridge National Laboratory Oak Ridge, Tennessee "CCC-643 CITATION-LDI 2"*.
5. N.A. Hanan, et al., *Feasibility studies for LEU conversion of the WWR-SM reactor in Uzbekistan using pin-type and tubular fuels*, No. INIS-XA-C--007. (2003).
6. P.L. Garner, N.A. Hanan, *Neutronics, steady-state, and transient analyses for the Poland MARIA reactor for irradiation testing of LEU lead test fuel assemblies from CERCA: ANL independent verification results*, No. ANL/08/27. *Argonne National Lab (ANL), Argonne, IL (United States)*, (2011).
7. AEOL, *Safety Analysis Report for Tehran Research Reactor*, (Atomic Energy Organization of Iran, Tehran, Iran, 2009).
8. H. Khaleghi, M. Hasanzadeh, *Analysis of the thermal feedback and burn up effects on kinetic parameters in TRR by the Monte Carlo method*, *Journal of Physics Communications*, **3**, (2018).

پارامترهای مختلف نوترونی مانند  $\phi_T$ ,  $\rho$ ,  $K_{eff}$  و PPF و SRF برای آرایش‌های مختلف با چیدمان ۱۶ تایی برای قلب تیوبلار با سوخت  $U_3O_8$ -AL از طریق کدهای WIMS-CITATION و MCNPX محاسبه شده است و اختلاف نتایج به دست آمده حاصل از این کدها برای این پارامترها قابل قبول است. همچنین نتایج این تحقیق نشان داد که در قلب تیوبلار با ۱۶٫۶۷٪ جرم سوخت کم‌تر، شار نوترونی به میزان ۱۴٫۳ درصد نسبت به قلب اول رآکتور تهران افزایش یافت.

## COPYRIGHTS

©2021 The author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, as long as the original authors and source are cited. No permission is required from the authors or the publishers.



## استناد به این مقاله

مصطفی حسن‌زاده، فرخ خوش‌احوال، مسعود امین مظفری، محمدامین امیرخانی، احمد لشکری، محمد رجایی (۱۴۰۱)، طراحی مفهومی نوترونی رآکتور تحقیقاتی تهران با استفاده از سوخت حلقوی، ۹۹، ۱۴۶-۱۵۵

**DOR:** 20.1001.1.17351871.1401.43.1.16.9

**Url:** [https://jonsat.nstri.ir/article\\_1359.html](https://jonsat.nstri.ir/article_1359.html)

