



شبیه‌سازی و ارزیابی نوترونیکی و حفاظ استخر دوم یک رآکتور تحقیقاتی نوعی به‌عنوان استخر سوخت مصرفی

احسان بوستانی^{ID}، مصطفی حسن‌زاده^{ID*}

پژوهشکده رآکتور و ایمنی هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۱۴۱۵۵-۱۳۳۹، تهران - ایران

*Email: mhasanzadeh@aeoi.org.ir

مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۱۰/۰۳ تاریخ بازنگری مقاله: ۱۴۰۲/۱۲/۱۵ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۱/۲۸

چکیده

محاسبات طراحی استخر سوخت مصرفی مستلزم در نظر گرفتن جنبه‌های مختلف از جمله نوترونیکی، ترموهیدرولیک، ایمنی، حفاظ، اقتصادی و بهره‌برداری است. با توجه به هزینه بالای طراحی و ساخت یک استخر سوخت مصرفی جدید و همچنین وجود فضاهای خالی در استخر برخی از رآکتورهای تحقیقاتی، محاسبات نوترونیکی و حفاظ برای امکان‌سنجی استفاده از استخر دوم یک رآکتور تحقیقاتی نوعی به‌عنوان استخر سوخت مصرفی با استفاده از کدهای ORIGEN2.1 و MCNP6 انجام شده است. اولین گام در محاسبات، تعیین فاصله بین سوخت‌ها (گام شبکه) به‌گونه‌ای است که ضریب تکثیر مؤثر برای بدترین حالت ممکن کمتر از ۰/۹۵ باشد که گام شبکه ۱۳ سانتی‌متر این شرایط را برآورده می‌کند. محاسبه جملات چشمه برای سوخت مصرفی با بیشترین میزان مصرف (۶۰٪) برای لحاظ کردن بدبینانه‌ترین حالت انجام شده است. کارکرد پیوسته رآکتور و ۲۴ ساعت خنک‌شوندگی، به‌عنوان کمترین زمان ممکن برای انتقال سوخت مصرفی به قفسه نگهداری جهت داشتن بدبینانه‌ترین شرایط، در طراحی قفسه نگهداری سوخت مصرفی در نظر گرفته شده است. برای یک قفسه با ۱۰۰ بسته سوخت مصرفی که از هر طرف ۸۷ سانتی‌متر با دیوار استخر فاصله دارد، لایه آبی به ضخامت ۳۰۰ سانتی‌متر در بالای سوخت‌ها و ضخامت ۸۵ سانتی‌متر دیوار بتونی برای امکان استفاده از استخر شماره ۲ به‌عنوان استخر مصرفی کفایت می‌کند که معیار آهنگ دز کمتر از ۱ و ۱۰ میکروسیورت بر ساعت برای پشت دیوار و بالای سطح آب استخر را نیز برآورده می‌کند.

کلیدواژه‌ها: نوترونیکی، حفاظ، رآکتور تحقیقاتی، سوخت مصرفی، کد MCNP6

Neutronics and shielding simulation and evaluation of a second pool of a typical research reactor as spent fuel pool

E. Boustani, M. Hasanzadeh*

Reactor and Nuclear Safety Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOI, P.O.Box: 14155-1339, Tehran - Iran

Research Article

Received: 24.12.2023,

Revised: 05.03.2024,

Accepted: 16.04.2024

Abstract

The design calculations for the spent fuel pool require consideration of various parameters, including 0neutronic, thermal-hydraulic, safety, shielding, economic, and operational factors. Due to the high cost of designing and building a new spent fuel pool, as well as the presence of empty spaces in the pool of some research reactors, calculations for the feasibility of using a second pool of a typical research reactor as a spent fuel pool are conducted using ORIGEN2.1 and MCNP6 codes. The first step is to determine the distance between fuels (grid pitch) in a way that ensures the effective multiplication factor for the worst-case scenario is less than 0.95. It is found that a 13 cm grid pitch meets this condition. Source term calculations are then performed for fuel with the highest burnup (60%) to establish the most pessimistic condition. Continuous operation and 24-hour cooling are considered the shortest possible time to transfer spent fuels to the storage rack, in order to create the most pessimistic conditions for the design of the spent fuel rack. For a rack containing 100 spent fuels, located 87 cm away from the pool wall on each side, a 300 cm layer of water above the fuels and an 85 cm thick concrete wall are determined to be sufficient for the possibility of using the second pool as a spent fuel pool. It has been determined that these measures meet the dose rate criteria of less than 1 and 10 $\mu\text{Sv/h}$ behind the wall and above the pool water level.

Keywords: Neutronic, Shielding, Research reactor, Spent fuel, MCNP6 code



۱. مقدمه

یک نقشه مدیریت سوخت مصرفی مؤثر در رآکتورهای تحقیقاتی شامل مدیریت سوخت مصرفی از زمان خروج از قلب تا دورریزی^۱ نهایی است. از آنجاکه سوخت مصرفی برای سال‌ها به تولید گرما و تابش ادامه خواهد داد، باید ذخیره‌سازی ایمن، پایدار و مطمئن آن تا قبل از بازفرآوری یا انتقال به محل نگهداری دائمی فراهم گردد [۱]. برای دریافت، ذخیره و بازیابی ایمن سوخت، طراحی باید دارای ویژگی‌هایی باشد که در تمام طول عمر تأسیسات در شرایط عملیاتی عادی، رویدادهای عملیاتی پیش‌بینی شده^۲ و حادثه مفید باشد. این ویژگی‌ها عبارتند از [۱-۳]:

- حفظ زیربحرانیت،
- برداشت گرمای واپاشی سوخت مصرفی،
- ایجاد حفاظت پرتوی،
- جداسازی مواد پرتوزا از محیط^۳.

به‌عنوان مبنایی برای طراحی استخر سوخت مصرفی، سه معیار پذیرش وجود دارد که وابسته به خصوصیات سوخت مصرفی است و شامل تولید گرما، نرخ‌های دز گاما و نوترون است. در جایی که نرخ دز گاما با افزایش مصرف افزایش می‌یابد، دما با گرادیان بالاتر افزایش می‌یابد و در نتیجه نرخ دز نوترون نیز به شدت افزایش خواهد یافت. این بدان معنی است که نرخ دز گاما عامل حاکم برای ذخیره سوخت در مقادیر مصرف کمتر است، درحالی که برای سوخت با مصرف بیشتر، حذف گرما به معیار طراحی اصلی تبدیل می‌شود. با افزایش بیشتر مصرف، نرخ دز نوترون عاملی است که تعیین‌کننده زمان ماندگاری سوخت در استخر سوخت مصرفی است [۴-۵].

استخر سوخت مصرفی به‌طور معمول دارای آستر فولادی ضدزنگ دولایه، سیستم تصفیه آب و یک دوربین زیر آب برای بازرسی چشمی سوخت‌ها است. ظرفیت استخر سوخت مصرفی برای چندین سال در نظر گرفته می‌شود که پس از آن سوخت‌ها برای نگهداری خشک یا بازفرآوری ارسال می‌شوند [۶]. داشتن استخر مناسب و یک برنامه بسیار قوی نگهداری کیفیت آب حیاتی است که وابسته به تجهیزات پشتیبان سازگار با مواد بسته‌های سوخت، چرخش آب برای جلوگیری از رسوب مواد جامد و سیستم خنک‌سازی و تصفیه آب مستقل است. رسانش الکتریکی، دما و PH آب به‌همراه نرخ دز محیط اطراف استخر

از جمله کمیت‌هایی است که بایستی به‌صورت پیوسته و منظم پایش شود [۷].

طراحی‌های متفاوتی برای استخر سوخت مصرفی در دیگر رآکتورها در نظر گرفته شده است. در آرژانتین، تعداد ۶۰۸ بسته سوخت مصرف شده در ۲ ردیف که هر ردیف شامل ۱۹ شبکه با ظرفیت نگهداری ۳۲ بسته است، در یک استخر به عمق ۱۶ متر نگهداری می‌شود و شبکه‌ها به‌گونه‌ای طراحی شده‌اند که هرکدام روی دیگری قرار می‌گیرد [۶]. همان‌گونه که در شکل ۱ نشان داده شده، استخر شماره ۲ در رآکتور OPAL^۴ استرالیا به‌عنوان استخر سوخت مصرفی برای نگهداری ۳۳۰ بسته سوخت طراحی شده است. این میزان مصرف سوخت برای نگهداری سوخت مصرفی ۱۰ سال رآکتور طراحی شده است [۷].

به‌عنوان مثالی دیگر، در رآکتور IRT-۴M^۵ با توان ۱۰ مگاوات، استخری با ظرفیت ۶۰ سوخت به‌منظور استخر دائمی و استخر دیگری با ظرفیت حدود ۳۰ سوخت برای جابه‌جایی سوخت‌ها در شرایط اضطراری در نظر گرفته شده است. همچنین، ظرفیت نگهداری سوخت مصرفی در رآکتور IEA-R^{۱۶} برزیل حدود ۱۵۶ بسته و در رآکتور RECH-۱^۷ شیلی حدود ۹۰ بسته است [۸-۹]. فضاهای خالی در برخی از دیگر رآکتورهای تحقیقاتی مثل استخر دوم رآکتور تحقیقاتی شماره ۱ پاکستان نیز وجود دارد که می‌توان از آن برای نگهداری سوخت مصرفی استفاده کرد [۱۰، ۱۱].



شکل ۱. استخر شماره ۲ به‌عنوان استخر سوخت مصرفی در رآکتور OPAL.

4. Open Pool Australian Light-Water

5. In-Reactor Thimble

6. Atomic Energy Institute-Reactor 1

7. Chilean Research Reactor-1

Journal of Nuclear Science, Engineering and Technology

Vol. 46 (2), Serial Number 112, 2025, P 59-67

1. Disposal

2. Anticipated Operational Occurrences

3. Confinement

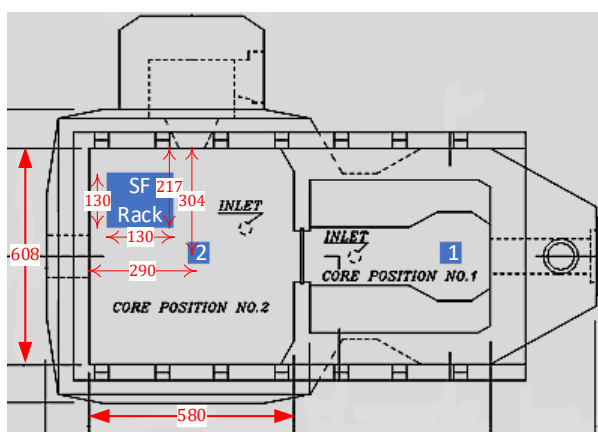


سوخت مصرفی است. عمق استخر یک حاشیه ایمنی برای محافظت از پرسنل ایجاد می‌کند و اجازه می‌دهد تا سوخت مصرفی بدون تمهید خاصی نگهداری شود [۹].

از جمله مزایای استخر نگهداری سوخت مصرفی، نگهداری تجهیزات و نمونه‌های پرتوزا، سوخت‌های معیوب، بازتابنده‌های گرافیت، تیغه‌های جاذب نوترون و دیگر وسایل مورد استفاده در بهره‌برداری از جمله تجهیزات و اسباب موجود در استخر دوم رآکتور تحقیقاتی می‌باشد.

شکل ۲ محل پیشنهادی قفسه نگهداری سوخت مصرفی و موقعیت آن نسبت به محل بهره‌برداری از قلب در استخر شماره ۱ و شماره ۲ (محل‌های مشخص شده در شکل با شماره ۱ و ۲ در مربع‌های آبی‌رنگ) را نشان می‌دهد. یادآوری می‌شود که همه اندازه‌های داده شده به سانتی‌متر بوده و با استفاده از نرم‌افزار Visio نوشته شده است.

از آنجاکه در صورت کارکرد پیوسته رآکتور در محافظه کارانه‌ترین حالت، هر ماه ۱ عدد سوخت مصرفی از قلب خارج می‌شود، قفسه طراحی شده با چیدمان 10×10 دارای ظرفیت نگهداری ۱۰۰ سوخت مصرفی برای بهره‌برداری پیوسته از رآکتور به مدت ۸ سال است. باتوجه به ضرورت در نظر گرفتن فاصله کافی بین محل قلب در استخر شماره ۲ و قفسه نگهداری سوخت مصرفی جهت بهره‌برداری ایمن از رآکتور در صورت انتقال قلب به استخر شماره ۲، جانمایی قفسه به گونه‌ای انجام گرفته که فاصله آن از قلب حدود ۷۵ سانتی‌متر باشد. موقعیت قفسه پیشنهادی نسبت به قلب رآکتور برای این وضعیت در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۲. موقعیت قلب در استخر شماره ۱ و ۲ و محل پیشنهادی برای قفسه سوخت مصرفی.

پژوهش‌های انجام شده در ارتباط با نگهداری و ایمنی سوخت مصرفی و نگهداری آن‌ها در خارج از کشور، باتوجه به مقدار سوخت مصرفی قابل توجه و همچنین الزامات ایمنی بسیار سخت‌گیرانه‌تر در نیروگاه‌های قدرت در مقایسه با رآکتورهای تحقیقاتی، متمرکز بر نیروگاه‌های قدرت بوده و پژوهش‌چندانی در زمینه رآکتورهای تحقیقاتی منتشر نشده است [۱۱-۱۳]. در داخل نیز پژوهش‌های انجام شده در ارتباط با استخر سوخت مصرفی متمرکز بر حوادث احتمالی و پیامدهای آن است و در زمینه طراحی مقاله‌ای منتشر نشده است [۱۴].

طراحی و ساخت استخر سوخت مصرفی کاری بسیار پرهزینه است، لذا بهینه‌سازی استخرهای موجود و استفاده از آن‌ها می‌تواند یکی از راهکارهای مناسب باشد. از این‌رو، امکان‌سنجی استفاده از استخر دوم یک رآکتور تحقیقاتی نوعی به عنوان محل نگهداری سوخت‌های مصرفی بررسی شده است. علی‌رغم وجود معیارهایی مثل نوترونیک، ترموهیدرولیک، ایمنی و اقتصادی برای طراحی یک استخر سوخت مصرفی، در این پژوهش معیارهای مربوط به نوترونیک و حفاظ بررسی شده است. از دیدگاه نوترونیک، ترتیب و ظرفیت قفسه‌ها و فضای بین سوخت‌ها و قفسه‌ها باید طوری طراحی شوند که ضریب تکثیر مؤثر (K_{eff}) کمتر از ۰/۹۵ باشد [۱۵-۱۶]. معیار دز استفاده شده در طراحی شامل دز کمتر از $1 \mu\text{Sv/h}$ و $10 \mu\text{Sv/h}$ در پشت دیوار استخر و بالای سطح آب است [۱۰].

در مرحله اول، مشخصات سوخت مصرفی با استفاده از گزارش آنالیز ایمنی^۱ و برخی اسناد موجود دیگر رآکتورها استخراج شده است [۱۷-۱۸]. در مرحله دوم، محاسبات بحرانیته برای چیدمان سوخت‌های مصرفی با استفاده از کد MCNP۶ [۱۹] و در مرحله سوم، محاسبه جملات چشمه با استفاده از کد ORIGEN۲.۱ انجام شده است [۲۰]. در مرحله چهارم، محاسبات دز بیرون استخر برای تعیین آهنگ دز با استفاده از کد MCNP۶ انجام شده است.

۲. مواد و روش

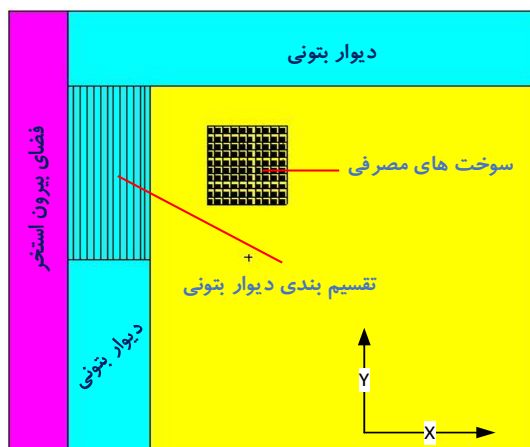
سوخت مصرفی دارای پرتوزایی بالایی است. استخر سوخت مصرفی برای ذخیره‌سازی طولانی‌مدت سوخت مصرفی به مدت ۱۰ تا ۲۰ سال قبل از ارسال برای بازفرآوری یا ذخیره‌سازی به صورت خشک یا تر استفاده می‌شود. براساس طراحی، استخر سوخت مصرفی مجهز به قفسه‌های ذخیره‌سازی^۲ برای نگهداری

1. Safety Analysis Report (SAR)
2. Racks



جدول ۱. مشخصات رآکتور تحقیقاتی تهران به عنوان یک رآکتور نوعی

مقدار	کمیت
U_2O_8 -AL	جنس سوخت
۱۹٫۷۵	غناي سوخت تازه (%)
۵	بیشینه توان (مگاوات)
۲۴	کمترین زمان خنک‌شوندگی (ساعت)
۶۰	بیشینه مصرف سوخت (%)
آب سبک	خنک‌کننده
۱۰۰ عدد (۱۰×۱۰)	ظرفیت قفسه
AL-۶۰۶۱	جنس قفسه
آب سبک و بتون باریتی	جنس حفاظ
۱۳	گام شبکه (سانتی‌متر)



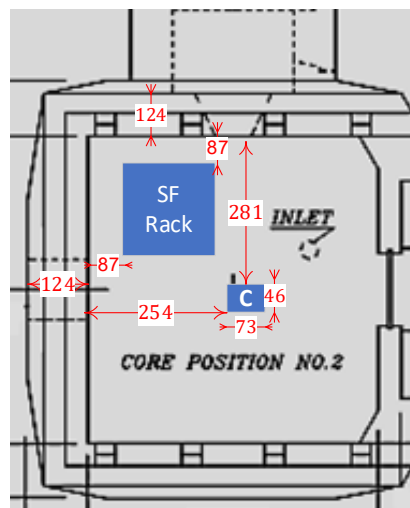
شکل ۴. استخر شماره ۲ و قفسه سوخت مصرفی شبیه‌سازی شده با کد MCNP.

۳. نتایج و تحلیل

۱.۳ رآستی آزمایی^۱

رآستی آزمایی این کدها برای اطمینان از درستی شبیه‌سازی انجام شده در این پژوهش مورد نیاز است. اندازه‌گیری دز گامای ناشی از سوخت مصرفی رآکتور تحقیقاتی تهران در استخر شماره ۲ و زیر آب به صورت دوره‌ای توسط آژانس بین‌المللی انرژی اتمی انجام می‌شود. از این‌رو، مقایسه نتایج تجربی مربوط به اندازه‌گیری‌های انجام شده توسط آژانس بین‌المللی انرژی اتمی و نتایج شبیه‌سازی توسط این دو کد برای رآستی آزمایی انجام شده است.

نتایج حاصل از شبیه‌سازی و اندازه‌گیری در فاصله ۳۰ سانتی‌متری از دو سوخت مصرفی به ترتیب با مصرف ۰٫۷٪ و ۴۳٪ و خنک‌کنندگی ۰° و ۷۳ روز، در جدول ۲ آمده است. خطای محاسبات MCNP و اندازه‌گیری به ترتیب کمتر از ۲٪ و ۱۰٪ است.



شکل ۳. موقعیت و ابعاد قفسه سوخت پیشنهادی نسبت به قلب در موقعیت شماره ۲.

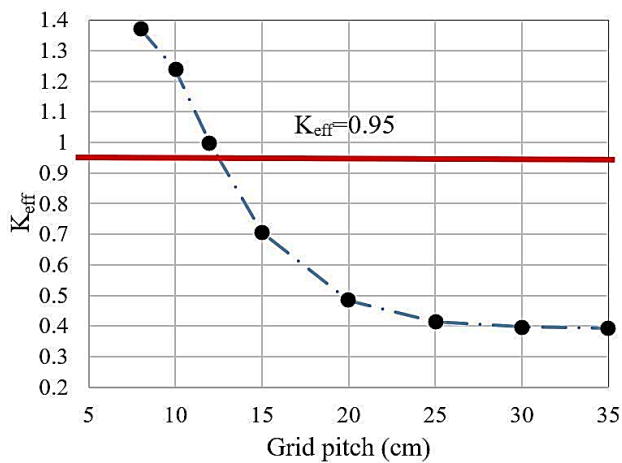
موقعیت و ابعاد قفسه سوخت پیشنهادی نسبت به قلب در موقعیت شماره ۲ همان‌گونه که از اندازه‌های داده شده در شکل ۳ مشاهده می‌شود، باتوجه به بیشترین برد نوترون در آب، فاصله تقریبی ۷۴ سانتی‌متری در نظر گرفته شده به لحاظ معیارهای ایمنی برای جلوگیری از تأثیر قفسه نگه‌داری سوخت مصرفی بر قلب کفایت می‌کند [۲۱]. مشخصات سوخت مصرفی به همراه ابعاد قفسه طراحی شده در جدول ۱ آورده شده است [۱۷].

شکل ۴ موقعیت قفسه، چیدمان سوخت‌های مصرفی و دیواره‌های بتونی شبیه‌سازی شده با کد MCNP۶ در استخر شماره ۲ را نشان می‌دهد. فرضیات در نظر گرفته شده در این مقاله برای استخر شماره ۲ شامل یک دیواره بتونی به ضخامت ۱۲۴ سانتی‌متر و ارتفاع آب حدود ۷ متر در بالای قفسه نگه‌داری سوخت مصرفی می‌باشد.

کدهای محاسباتی ORIGIN۲.۱ و MCNP۶ در این پژوهش برای محاسبه جملات چشمه و مقادیر آهنگ دز استفاده شده‌اند. کد ORIGIN۲.۱ یک کد یقینی است که برای محاسبه غلظت رادیونوکلیدها با توجه به تاریخچه و نوع سوخت با استفاده از رابطه بتمن به کار برده می‌شود. این کد حاوی کتابخانه گسترده‌ای از سطح مقطع‌های نوترون و گاما برای تعداد زیادی از عناصر است و از روش ماتریسی برای حل معادلات دیفرانسل یک‌بعدی استفاده می‌کند. کد MCNP۶ یک کد مونت‌کارلو است که با داشتن کتابخانه‌ای پیوسته از سطح مقطع‌ها و توانایی شبیه‌سازی دقیق هندسه، ذرات گوناگون را تا خروج از ناحیه موردنظر ترابرد کرده و از کتابخانه ENDF/B-VI برای سطح مقطع‌ها استفاده می‌کند. دقت جواب در این کد را می‌توان در بسیاری از مسایل با استفاده از روش‌های گوناگون کاهش خطا تا حد دلخواه کاهش داد.

1. Validation





شکل ۵. تغییرات ضریب تکثیر مؤثر برای فواصل مختلف سوخت‌های مصرف شده.

جدول ۳. شدت فوتون تولیدی ناشی از میزان مختلف مصرف سوخت

Diff. (%)	%۶۰ BU	%۳۰ BU	بازه انرژی (MeV)
۴۶٫۱۵	۶٫۸۶E+۱۵	۴٫۷۰E+۱۵	۱٫۰۰E-۰۲
۲۵٫۸۳	۱٫۹۳E+۱۵	۱٫۳۵E+۱۵	۲٫۵۰E-۰۲
۲۷٫۶۲	۲٫۵۶E+۱۵	۲٫۰۱E+۱۵	۳٫۷۵E-۰۲
۴۰٫۵۹	۱٫۱۱E+۱۵	۷٫۹۰E+۱۴	۵٫۷۵E-۰۲
۵۳٫۱۶	۲٫۵۴E+۱۵	۱٫۶۶E+۱۵	۸٫۵۰E-۰۲
۴۱٫۲۸	۳٫۶۱E+۱۵	۲٫۵۵E+۱۵	۱٫۲۵E-۰۱
۲۵٫۴۵	۷٫۷۰E+۱۵	۶٫۱۴E+۱۵	۲٫۲۵E-۰۱
۲۵٫۱۸	۵٫۱۶E+۱۵	۴٫۱۲E+۱۵	۳٫۷۵E-۰۱
۲۴٫۱۱	۱٫۰۴E+۱۶	۸٫۴۰E+۱۵	۵٫۷۵E-۰۱
۲۵٫۱۰	۱٫۲۴E+۱۶	۹٫۹۱E+۱۵	۸٫۵۰E-۰۱
۲۱٫۲۲	۷٫۳۰E+۱۵	۶٫۰۲E+۱۵	۱٫۲۵E+۰۰
۲۷٫۵۴	۲٫۹۲E+۱۵	۲٫۲۹E+۱۵	۱٫۷۵E+۰۰
۲۰٫۰۳	۱٫۴۶E+۱۵	۱٫۲۱E+۱۵	۲٫۲۵E+۰۰
۲۰٫۲۲	۶٫۲۵E+۱۴	۵٫۲۰E+۱۴	۲٫۷۵E+۰۰
۱۷٫۷۸	۳٫۵۶E+۱۴	۳٫۰۲E+۱۴	۳٫۵۰E+۰۰
۱۵٫۹۵	۱٫۹۵E+۱۴	۱٫۶۸E+۱۴	۵٫۰۰E+۰۰
۱۷٫۵۶	۱٫۵۷E+۱۲	۱٫۳۳E+۱۲	۷٫۰۰E+۰۰
۲۵٫۰۴	۱٫۷۶E+۰۸	۱٫۴۰E+۰۸	۹٫۵۰E+۰۰
۲۸٫۳۲	۶٫۷۱E+۱۶	۵٫۲۳E+۱۶	TOTAL

برای مشاهده بهتر تأثیر مصرف سوخت، شدت کل فوتون‌های تولیدی و طیف گاما برای پایان پرتودهی محاسبه و در شکل ۶ آمده است.

همان‌گونه که از شکل ۶ مشاهده می‌شود، شدت فوتون برای سوخت با مصرف ۶۰٪ به‌طور قابل‌توجهی بیشتر از سوخت با مصرف ۳۰٪ است که در بقیه زمان‌ها هم از این روند پیروی می‌کند.

جدول ۲. جمع‌بندی نتایج اندازه‌گیری و محاسبه دز گاما برای دو سوخت مصرفی

شماره سوخت	نرخ دز (mSv/h)		اختلاف نسبی (%)
	اندازه‌گیری	محاسبه	
سوخت ۱	$۶٫۱۰ \times ۱۰^{-۶}$	$۵٫۴۱ \times ۱۰^{-۶}$	-۱۱
سوخت ۲	$۱٫۶۴ \times ۱۰^{-۴}$	$۲٫۰۲ \times ۱۰^{-۴}$	+۲۳

با توجه به نتایج جدول ۲، با درنظر گرفتن تأثیر قابل‌ملاحظه برخی عوامل ازجمله فاصله آشکارساز از سوخت، که به‌صورت تقریبی بوده و امکان‌پذیر نبودن تعیین دقیق آن، اختلاف نسبی تا ۲۰٪، که در جدول ۲ گزارش شده، قابل‌قبول بوده و نشان‌دهنده تأیید درستی شبیه‌سازی انجام شده است.

به‌منظور محاسبات مقادیر نرخ دز نوترون و گاما، میزان ضخامت حفاظ مورد نیاز و بررسی بحرانی قفسه سوخت مصرفی، لازم است که چندین عامل مؤثر دیگر نیز در نظر گرفته شود.

۲.۳ بحرانیّت

برای به‌دست آوردن طرح اولیه و به‌منظور پیش‌بینی ظرفیت نگهداری سوخت‌های مصرفی، تغییرات ضریب تکثیر مؤثر با فاصله بین سوخت‌ها برای ۱۰۰ عدد سوخت تازه، که در آرایه‌ای مربعی‌شکل به‌صورت ۱۰×۱۰ قرار گرفته‌اند، با استفاده از کارت Kcode موجود در کد MCNP۶ محاسبه و در شکل ۵ آورده شده است. تعداد ۱۰۶ تاریخچه در نظر گرفته شده و خطای نسبی نتایج کمتر از $۱۰^{-۳}$ است.

باتوجه به نتایج آرایه شده در شکل ۵، کمینه فاصله بین سوخت‌ها برای داشتن شرط مربوط به زیربحرانی بودن استخر ۱۳ سانتی‌متر است.

۳.۳ میزان پرتودهی

میزان پرتودهی روی طیف و شدت فوتون‌های گسیلی تأثیرگذار است. میزان متوسط مصرف سوخت قلب‌های تعادلی حدود ۳۰٪ و محافظه‌کارانه‌ترین حالت برای یک سوخت درنظر گرفتن میزان مصرف ۶۰٪ است. برای درک میزان تأثیر این عامل، طیف شار و شدت فوتون‌های مربوط به سوخت‌های با مصرف ۳۰٪ و ۶۰٪ برای زمان پایان پرتودهی با استفاده از ORIGEN۲.۱ محاسبه و در جدول ۳ آمده است. واحد شدت برحسب تعداد فوتون تولیدی در ثانیه است.

1. Fresh Fuel
2. Burn-Up (BU)



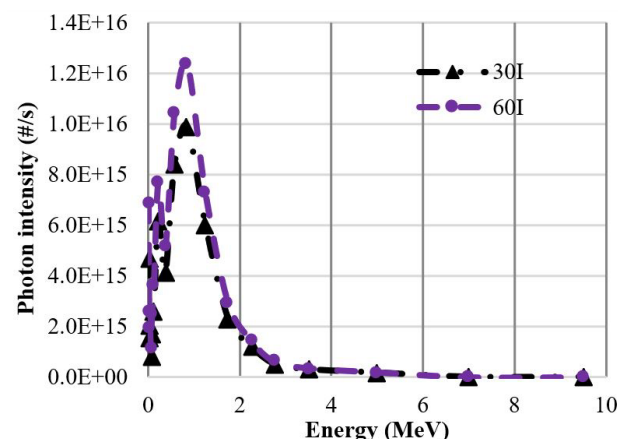
یک حالت پیوسته و دو حالت گسسته در نظر گرفته شده است. برای حالت گسسته ۱، فرض بر کارکرد رآکتور به صورت ۲۹ روز در توان نامی و یک روز خاموشی برای تعویض سوخت و تعمیرات است. برای حالت گسسته ۲، فرض بر کارکرد به صورت ۲۵ روز در توان نامی و ۵ روز خاموشی است.

همان‌گونه که از نتایج داده شده در جدول ۴ برای ۳ الگوی در نظر گرفته شده مشاهده می‌شود، بزرگی چشمه‌های فوتون گسیلی وابستگی چندانی به برنامه کارکرد رآکتور ندارند.

۵.۳ زمان خنک‌شوندگی

زمان خنک‌شوندگی، مدت زمان خروج سوخت از قلب، در شدت گامای تولیدی از سوخت اثرگذار است. برای نشان دادن تأثیر این عامل، شدت چشمه فوتون ناشی از سوختی با مصرف ۶۰٪ برای بلافاصله پس از پایان پرتودهی و ۲۴ ساعت پس از خنک‌شوندگی در جدول ۵ آمده است.

برای مشاهده بهتر تفاوت نمودارها، شدت واپاشی فوتون‌ها، برای سوختی با مصرف ۶۰٪ که بلافاصله از قلب خارج شده و سوختی با زمان خنک‌شوندگی ۶۰ روز، در شکل ۷ آمده است.



شکل ۶. طیف فوتون‌های ناشی از میزان مختلف مصرف سوخت.

۴.۳ برنامه کارکرد رآکتور

معمولاً برای راحتی محاسبات، الگوی پرتودهی به صورت پیوسته در نظر گرفته می‌شود. این در حالی است که در اغلب رآکتورهای تحقیقاتی به علت تنوع وظایف و فعالیت‌های این‌گونه از رآکتورها، چنین الگویی وجود ندارد. برای بررسی میزان تأثیر این الگو روی شدت چشمه فوتون، شدت چشمه برای پرتودهی پیوسته و گسسته یک بسته سوخت محاسبه و در جدول ۴ ارائه شده است. در این جدول، برای مقایسه برنامه کارکرد رآکتور،

جدول ۴. شدت فوتون تولیدی برای سه برنامه کارکرد متفاوت رآکتور

بازه انرژی (MeV)	کارکرد پیوسته	کارکرد گسسته ۱	Diff. (%)	کارکرد گسسته ۲	Diff. (%)
۱,۰۰E-۰۲	۶,۸۶E+۱۵	۷,۰۴E+۱۵	۲,۶۳	۶,۸۸E+۱۵	۰,۱۹
۲,۵۰E-۰۲	۱,۹۳E+۱۵	۱,۹۷E+۱۵	۲,۱۵	۱,۹۲E+۱۵	-۰,۴۲
۳,۷۵E-۰۲	۲,۵۶E+۱۵	۲,۶۱E+۱۵	۱,۶۹	۲,۵۴E+۱۵	-۰,۹۵
۵,۷۵E-۰۲	۱,۱۱E+۱۵	۱,۱۴E+۱۵	۲,۴۰	۱,۱۱E+۱۵	۰,۰۲
۸,۵۰E-۰۲	۲,۵۴E+۱۵	۲,۶۰E+۱۵	۲,۱۳	۲,۵۴E+۱۵	-۰,۰۸
۱,۲۵E-۰۱	۳,۶۱E+۱۵	۳,۶۸E+۱۵	۲,۰۳	۳,۵۷E+۱۵	-۰,۹۱
۲,۲۵E-۰۱	۷,۷۰E+۱۵	۷,۹۳E+۱۵	۳,۰۵	۷,۷۴E+۱۵	۰,۵۱
۳,۷۵E-۰۱	۵,۱۶E+۱۵	۵,۲۹E+۱۵	۲,۷۱	۵,۱۶E+۱۵	۰,۰۳
۵,۷۵E-۰۱	۱,۰۴E+۱۶	۱,۰۷E+۱۶	۲,۶۰	۱,۰۴E+۱۶	-۰,۲۹
۸,۵۰E-۰۱	۱,۲۴E+۱۶	۱,۲۷E+۱۶	۲,۲۷	۱,۲۲E+۱۶	-۱,۲۱
۱,۲۵E+۰۰	۷,۳۰E+۱۵	۷,۵۵E+۱۵	۳,۳۹	۷,۳۵E+۱۵	۰,۶۳
۱,۷۵E+۰۰	۲,۹۲E+۱۵	۲,۹۵E+۱۵	۱,۰۵	۲,۸۸E+۱۵	-۱,۲۹
۲,۲۵E+۰۰	۱,۴۶E+۱۵	۱,۵۱E+۱۵	۳,۳۷	۱,۴۶E+۱۵	۰,۵۵
۲,۷۵E+۰۰	۶,۲۵E+۱۴	۶,۴۴E+۱۴	۳,۰۳	۶,۲۷E+۱۴	۰,۳۲
۳,۵۰E+۰۰	۳,۵۶E+۱۴	۳,۶۸E+۱۴	۳,۴۳	۳,۵۸E+۱۴	۰,۶۵
۵,۰۰E+۰۰	۱,۹۵E+۱۴	۲,۰۲E+۱۴	۳,۴۹	۱,۹۶E+۱۴	۰,۷۲
۷,۰۰E+۰۰	۱,۵۷E+۱۲	۱,۶۲E+۱۲	۳,۴۴	۱,۵۸E+۱۲	۰,۶۵
۹,۵۰E+۰۰	۱,۷۶E+۰۸	۱,۸۲E+۰۸	۳,۴۶	۱,۷۷E+۰۸	۰,۶۶
TOTAL	۶,۷۱E+۱۶	۶,۸۸E+۱۶	۲,۵۵	۶,۷۰E+۱۶	-۰,۲۵



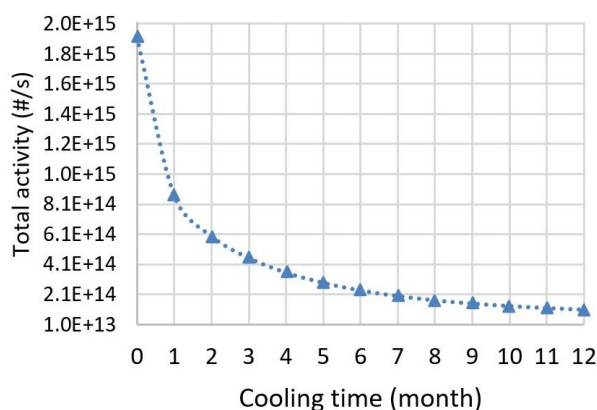
از آنجاکه در صورت کارکرد پیوسته رآکتور، یک عدد سوخت مصرفی در هر ماه خواهیم داشت، کمترین زمان مورد نیاز برای پرشدن کامل ظرفیت ۱۰۰ تایی قفسه سوخت مصرفی با سوخت‌هایی با ۶۰٪ مصرف حدود ۸ سال است. با توجه به محتمل نبودن بهره‌برداری پیوسته از یک رآکتور تحقیقاتی، فرض در نظر گرفته سبب برآورد بسیار محافظه‌کارانه برای چشمه پرتوزایی خواهد شد. محاسبات چشمه پرتوزایی با فرض زمان خنک‌شوندگی ۰ تا ۱۱ ماه برای ۱۲ سوخت مصرفی سال آخر محاسبه و در شکل ۸ آورده شده است.

همان‌طور که از شکل ۸ مشاهده می‌شود، تغییرات پرتوزایی پس از چند ماه اول خنک‌کنندگی کاهش قابل‌ملاحظه‌ای خواهد داشت. خنک‌شوندگی در سال‌های مختلف ۱، ۲، ۳، ۴، ۵، ۶ و ۷ سال برای سوخت‌های مصرفی در نظر گرفته شده است. با توجه به در نظر گرفتن پرتوزایی ابتدای هر سال سوخت مصرفی برای ۱۲ ماه سال، نتایج ارایه شده در این بخش نیز محافظه‌کارانه است. لازم به یادآوری است که میانگین خطای نسبی همه محاسبات کد کمتر از ۱۰٪ است.

۶.۳ نرخ دز

۱.۶.۳ دز نوترون

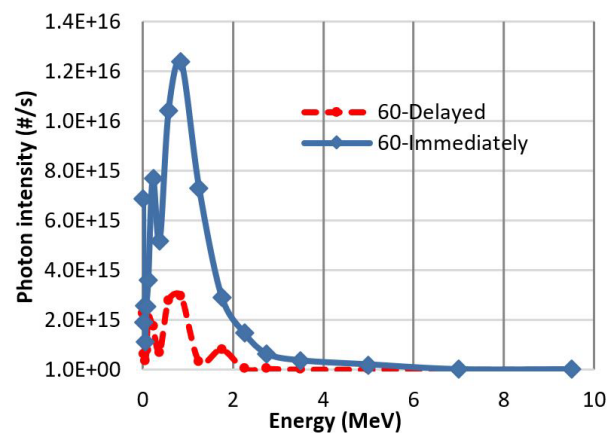
نوترون حاصل از دو چشمه شامل واکنش آلفا-نوترون^۲ و شکافت خودبه‌خودی^۳ مربوط به ۱۰۰ بسته سوخت مصرفی در استخر شماره ۲ با شدت‌های کل 7.15×10^5 و 3.09×10^6 با استفاده از کد ORIGEN۲.۱ محاسبه شده است. سپس، نرخ دز نوترون با استفاده از تالی F5 در کد MCNP۶ محاسبه شده است. تغییرات دز نوترون مربوط به این دو چشمه در دیوار استخر در شکل ۹ آمده است.



شکل ۸. تغییرات پرتوزایی سوخت مصرفی در سال اول.

جدول ۵. شدت فوتون تولیدی برای دو زمان مختلف پس از پرتو دهی

بازه انرژی (MeV)	فوری	پس از ۲۴ ساعت خنک شدن	Diff. (%)
1.0×10^{-2}	6.86×10^{15}	2.27×10^{15}	-۶۶٫۹
2.5×10^{-2}	1.93×10^{15}	6.18×10^{14}	-۶۷٫۹
3.75×10^{-2}	2.56×10^{15}	1.14×10^{15}	-۵۵٫۶
5.75×10^{-2}	1.11×10^{15}	3.6×10^{14}	-۶۷٫۶
8.5×10^{-2}	2.54×10^{15}	7.75×10^{14}	-۶۹٫۵
1.25×10^{-1}	3.61×10^{15}	2.09×10^{15}	-۴۲٫۲
2.25×10^{-1}	7.7×10^{15}	1.72×10^{15}	-۷۷٫۶
3.75×10^{-1}	5.16×10^{15}	7.14×10^{14}	-۸۶٫۱
5.75×10^{-1}	1.04×10^{16}	2.79×10^{15}	-۷۳٫۳
8.5×10^{-1}	1.24×10^{16}	2.95×10^{15}	-۷۶٫۲
1.25×10^0	7.3×10^{15}	3.31×10^{14}	-۹۵٫۵
1.75×10^0	2.92×10^{15}	8.04×10^{14}	-۷۲٫۴
2.25×10^0	1.46×10^{15}	2.84×10^{13}	-۹۸٫۱
2.75×10^0	6.25×10^{14}	3.0×10^{13}	-۹۵٫۲
3.5×10^0	3.56×10^{14}	2.51×10^{11}	-۹۹٫۹
5.0×10^0	1.95×10^{14}	2.21×10^9	-۱۰۰٫۰
7.0×10^0	1.57×10^{12}	3.97×10^2	-۱۰۰٫۰
9.5×10^0	1.76×10^8	5.44×10^1	-۱۰۰٫۰
TOTAL	6.71×10^{16}	1.66×10^{16}	-۷۵٫۳



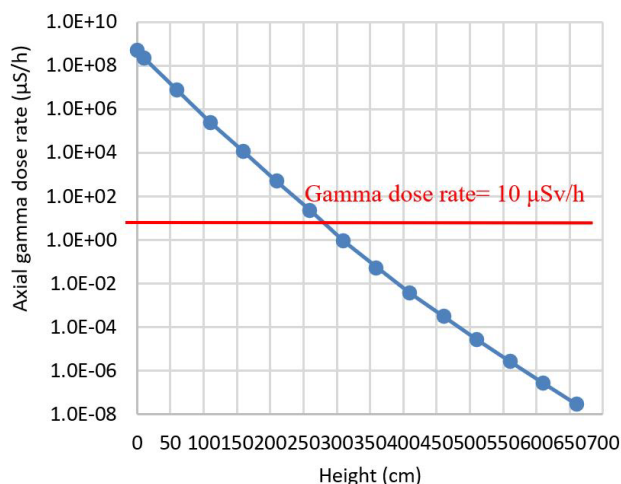
شکل ۷. طیف فوتون‌های منتشر شده برای زمان‌های مختلف خروج از قلب.

همان‌گونه که از نتایج ارایه شده در جدول ۵ و شکل ۷ مشاهده می‌شود، خنک‌شوندگی تأثیر بسزایی در کاهش تعداد فوتون‌های گسیلی از سوخت دارد. مطابق این نتایج، در نظر گرفتن فوتون‌های گسیلی در لحظه پایان پرتو دهی می‌تواند به‌عنوان حالت محافظه‌کارانه (بدبینانه)^۱، در محاسبات حفاظ استفاده شود.

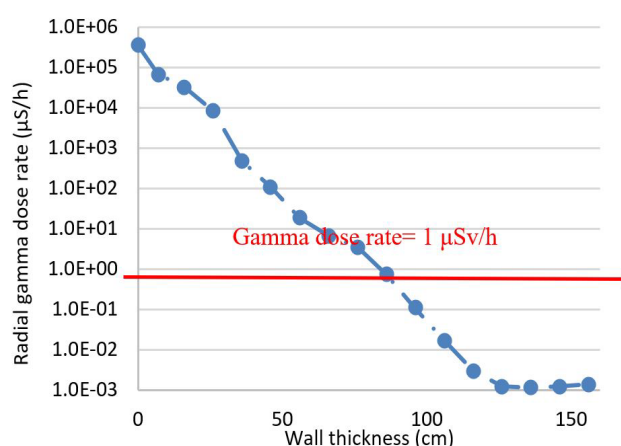
2. Alpha Neutron (AF)

3. Spontaneous Fission (SF)

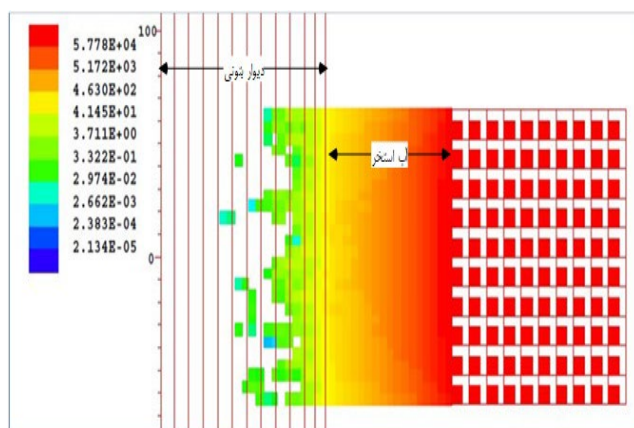




شکل ۱۰. تغییرات محوری دز گاما از بالای سوخت در استخر شماره ۲.



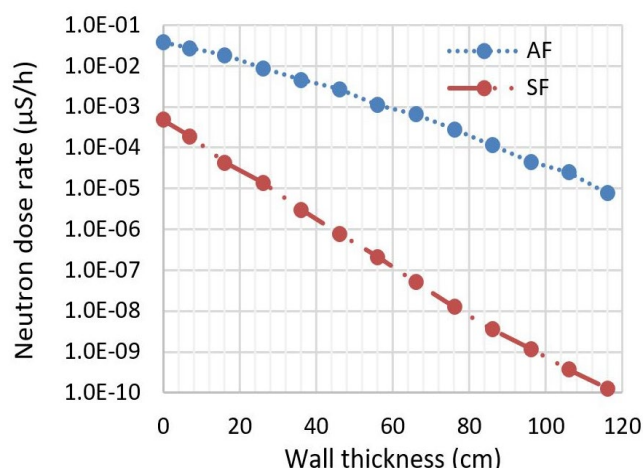
شکل ۱۱. تغییرات شعاعی دز گاما در دیوار بتونی استخر شماره ۲.



شکل ۱۲. نقشه دز گاما در دیوار بتونی استخر شماره ۲.

۴. بحث و نتیجه‌گیری

ساخت و نگهداری استخر سوخت مصرفی کاری بسیار پرهزینه و حساس است که بایستی ملاحظات گوناگونی از جمله ایمنی، امنیتی، نگهداری، استهلاک و اقتصادی آن در نظر گرفته شود. باتوجه به لحاظ شدن بسیاری از این موارد در استخر اصلی و



شکل ۹. تغییرات دز ناشی از چشمه آلفا- نوترون در دیوار استخر شماره ۲.

همان‌گونه که به‌روشنی از شکل ۹ مشاهده می‌شود، آهنگ دز نوترون در ابتدای لبه دیوار (که ۸۷ سانتی‌متر از قفسه سوخت مصرفی فاصله دارد) بسیار کم و از مرتبه ۰/۱ میکروسیورت بر ساعت است.

۳.۶.۳ دز گاما

نرخ دز گاما برای حالت محوری در استخر شماره ۲ محاسبه و در شکل ۱۰ ارایه شده است. ارتفاع داده شده در این شکل، فاصله محوری از بالای قفسه نگهداری سوخت‌های مصرفی است. همان‌گونه که از داده‌های ارایه شده در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود، ارتفاع آب لازم برای کاهش دز گاما به کمتر از معیارهای ایمنی پذیرفته شده حدود ۳۰۰ سانتی‌متر می‌باشد. نرخ دز گاما برای حالت شعاعی در استخر شماره ۲ محاسبه شده و در شکل ۱۱ ارایه شده است. فاصله داده شده در این شکل، ضخامت دیوار بتونی استخر شماره ۲ است.

همان‌گونه که از داده‌های ارایه شده در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود، ضخامت بتون لازم برای کاهش دز گاما به کمتر از معیارهای ایمنی پذیرفته شده حدود ۸۵ سانتی‌متر می‌باشد. برای مشاهده بهتر، نقشه دز گاما در دیواره کناری استخر سوخت‌های مصرفی در شکل ۱۲ نشان داده شده است.

همان‌گونه که از شکل ۱۲ مشاهده می‌شود، نرخ دز گاما از قفسه سوخت‌های مصرفی تا لبه دیواره به اندازه ۳ مرتبه کاهش یافته است. باتوجه به ضخامت و چگالی قابل‌توجه دیواره بتونی و پس از اجرای برنامه تا ۵۰۰ میلیون ذره، آهنگ دز از ابتدا تا اواسط دیوار استخر به میزان ۶ مرتبه کاهش یافته است.

8. IAEA-TECDOC-1508. Spent fuel management options for research reactors in Latin America. VIENNA. 2006.
9. Benz J.M, Smartt H.A. Maintaining Continuity of Knowledge of Spent Fuel Pools Tool Survey. the U.S. Department of Energy. 2016 August.
10. Khan L.A, Ahmad N. Reactivity worth of the thermal column of a MTR type swimming pool research reactor using low enriched uranium fuel. *Annals of Nuclear Energy*. 2002 1 Jul;29(10):1253-9. Doi: 10.1016/S0306-4549(01)00108-6.
11. Mahmood T, Bokhari I.H, Iqbal M, Mahmood T, Ahmed N, Israr M. Performance evaluation/analysis of Pakistan Research Reactor-1 (PARR-1) current core configuration. *Progress in Nuclear Energy*. 2011 1 Aug;53(6):729-35. Doi.org/10.1016/j.anucene.2007.06.006.
12. IAEA-Tecdoc-233. Research Reactor Core Conversion from The Use of Highly Enriched Uranium to The Use of Low Enriched Uranium Fuels Guidebook. 1980.
13. Sallmann D.I, Moersch I.J, Vlaski D.I. Design of spent nuclear fuel storage facilities for the load cases earthquake and aircraft impact-technical specifications, methods and examples for wet and dry storage. *Transactions of the Korean Nuclear Society Autumn Meeting Yeosu, Korea*. 2018 25-26 October.
14. Gol Narges S, Mousavian S.K. Thermal-hydraulic analysis of loss-of-cooling accident in spent fuel pool of Bushehr NPP using the RELAP5 and MELCOR. *Journal of Nuclear Science and Technology*. 2020 21 Nov;41(3):87-96 [In Persian].
15. IAEA Safety Standards Series No. SSG-15. Storage of Spent Nuclear Fuel. *Specific Safety guide*. 2012.
16. Mohammadi A, Hassanzadeh M, Omidvari N. Criticality safety analysis of TK-13 cask in Bushehr nuclear power plant. *Kerntechnik*. 2017;82:637-642. Doi.org/10.3139/124.110831.
17. Safety Analysis Report for Tehran Research Reactor. *Atomic Energy Organization of Iran*. 2009.
18. Safety Analysis Report for Australian *Nuclear Science and Technology Organization*. 2004.
19. Pelowitz D.B. MCNP6TM User's Manual. Version 1.0, Los Alamos National Laboratory report LA-CP-13-00634. 2013.
20. Crofft A.G. A User's Manual for the ORIGEN 2.1 Computer Code. Rep. ORNL/TM-7175 Oak Ridge National Laboratory. 2000.
21. Lamarsh J.R. Introduction to Nuclear Engineering. Addison-Wesley Publishing Company. 1975.

شماره ۲ رآکتورهای تحقیقاتی، در صورت استفاده از استخر دوم یک رآکتور تحقیقاتی به عنوان محل نگهداری سوخت مصرفی، اغلب این چالش‌ها حل خواهد شد.

محاسبات حفاظ برای استخر سوخت مصرفی یک رآکتور استخری نوعی با در نظر گرفتن فشرده‌ترین برنامه کاری، بیشترین میزان مصرف سوخت و کمترین زمان خنک‌کنندگی برای در نظر گرفتن شرایط بدبینانه انجام شده است. محاسبات نشان می‌دهد که ضخامت ۸۵ سانتی‌متر برای دیوار بتونی و ارتفاع ۳۰۰ سانتی‌متر برای ستون آب بالای قفسه طراحی شده با گام شبکه ۱۳ سانتی‌متر و ظرفیت ۱۰۰ سوخت مصرفی در استخر شماره ۲ جهت برآورده کردن معیارهای دز کفایت می‌کند.

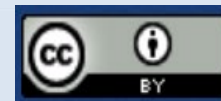
یادآوری می‌شود که نتایج پژوهش حاضر تنها با در نظر گرفتن معیارهای نوترونیک و حفاظ بوده و برای به کارگیری این ایده در یک رآکتور تحقیقاتی، بررسی جامع همه مؤلفه‌ها از جمله ترموهیدرولیک، ایمنی، بهره‌برداری و استهلاک ضروری است.

مراجع

1. IAEA safety standards, Design of Fuel Handling and Storage Systems for Nuclear Power Plants, *Specific Safety Guide No. SSG-63*. 2020.
2. Lebrun A, Bignan G. Nondestructive assay of nuclear low-enriched uranium spent fuels for burnup credit application. 2016.
3. Robert K. Criticality Safety in the Waste Management of Spent Fuel from NPPs. 2011.
4. Arndt B, Klaus R, Wasinger K. Advanced spent fuel storage pools. Storage of spent fuel from power reactors. *Vienna. IAEA*. 2003;130-141.
5. Perschmann W.D, Fuchs H.P, Banck J. Impact of Extended Burnup of Spent Fuel on Backend of Fuel Cycle. German Perspective. *IAEA. Vienna*. 2002;8-11 July.
6. IAEA-Nuclear Energy Series. No. NF-T-3.9. Research Reactor Spent fuel management Options and Support to Decision Making. *VIENNA*. 2021.
7. Management and storage of Research Reactor Spent Nuclear Fuel, Proceedings of a Technical Meeting held in Thurso. *United Kingdom*. 2009;19-22 October.

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

بوستانی، احسان، حسن زاده، مصطفی. (۱۴۰۴)، شبیه‌سازی و ارزیابی نوترونیک و حفاظ استخر دوم یک رآکتور تحقیقاتی نوعی به عنوان استخر سوخت مصرفی. *مجله علوم، مهندسی و فناوری هسته‌ای*، ۱۱۲(۲)، ۵۹-۶۷. DOI: <https://doi.org/10.24200/nst.2024.1641>. Url: https://jonsat.nstri.ir/article_1641.html

