

شبیه‌سازی مونت کارلویی امکان تولید کبالت-۶۰ در رآکتور تحقیقاتی تهران

زهره غلامزاده*، بهروز رک

پژوهشکده رآکتور و ایمنی هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۸۳۶-۱۴۳۹۵، تهران- ایران

*Email: zgholamzadeh@aeoi.org.ir

مقاله‌ی پژوهشی

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۱۱/۹ تاریخ بازنگری مقاله: ۱۴۰۲/۲/۱۵ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۲/۲۳

چکیده

کبالت-۶۰ به عنوان یک چشمه پرتوزا صنعتی مهم در استریلیزاسیون مواد غذایی و تجهیزات پزشکی مورد استفاده قرار می‌گیرد. چشمه‌های kCi عمدتاً می‌توانند برای تحقیقات آزمایشگاهی مورد استفاده قرار گیرند با این حال مراکز صنعتی معدودی وجود دارند که از این چشمه‌ها برای پرتودهی محصولات کشاورزی استفاده می‌کنند. لذا در این مطالعه، پتانسیل تولید چشمه‌های چند ده کیلوکوری میله‌ای کبالت-۶۰ در رآکتور تحقیقاتی تهران با استفاده از کد MCNPX بررسی شده است. مجتمع‌های مختلف شامل میله‌های کبالت-۵۹ توسط کد محاسباتی مدل شد. همچنین بارگذاری مجتمع میله‌ای کبالت-۵۹ در آرایش‌های مختلف قلب رآکتور تحقیقاتی تهران بررسی شد و بهره تولید کبالت-۶۰ در هر یک از موارد مدل شده محاسبه شد. نتایج حاصل از این مطالعه نشان می‌دهد با بهینه‌سازی مجتمع میله‌ای کبالت-۵۹ در یک آرایش ۲۷- تایی قلب سال ۱۴۰۱ رآکتور تحقیقاتی تهران می‌توان پس از ۳ سال پرتودهی به حدود ۴۰ kCi محصول کبالت-۶۰ دست یافت. استفاده از بازتاباننده برلیوم با هندسه بهینه شده می‌تواند راکتیویته منفی ایجاد شده ناشی از بارگذاری مجتمع کبالت-۵۹ را کاهش دهد. همچنین بارگذاری مجتمع کبالت-۵۹ در حاشیه قلب تعادلی رآکتور تحقیقاتی تهران می‌تواند منجر به تولید حدود ۲۳ kCi کبالت-۶۰ گردد.

کلیدواژه‌ها: امکان‌سنجی، کبالت-۶۰، چشمه کیلوکوری، کد MCNPX

Monte Carlo simulation of the possibility of cobalt-60 production in Tehran research reactor

Z. Gholamzadeh*, B. Rok Rok

Reactor and Nuclear Safety Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOL, P.O.BOX: 14395-836, Tehran – Iran

Research Article

Received 29.1.2023, Revised: 5.5.2023, Accepted 13.5.2023

Abstract

^{60}Co is used as a major industrial radioactive source in food and medical equipment sterilization. kCi sources can be used for laboratory research, however, few industrial centers utilize these sources for irradiating agricultural products. Hence, in this study, the potential of producing tens of kCi from ^{60}Co sources in the Tehran research reactor has been investigated through the MCNPX code. Different assemblies including ^{59}Co rods were modeled by a computational code. In addition, the loading of the ^{59}Co rod assembly in different arrangements of the Tehran research reactor core was investigated. The ^{59}Co production yield was calculated in each case. The results of this study show that by optimizing the ^{59}Co rod assembly in a 27-fuel 1401-year core arrangement of the Tehran Research Reactor, it is possible to achieve about 40 kCi of ^{60}Co product after 3 years of irradiation. The use of a beryllium reflector with optimized geometry can reduce the negative reactivity caused by the ^{59}Co assembly loading. Also, loading the cobalt-59 assembly at the periphery of the equilibrium core of the Tehran research reactor can lead to the production of about 23 kCi of cobalt-60.

Keywords: Feasibility study, ^{60}Co , kCi source, MCNPX

Journal of Nuclear Science, Engineering and Technology

Vol. 45 (4), Serial Number 109, 2024, P 36-45



۱. مقدمه

پرتودهی خون و فرآورده‌های خونی و هم‌چنین سترون‌سازی دارو و مواد زیست‌شناختی به‌کار رفته در صنعت پزشکی در کشورهای پیشرفته و برخی از کشورهای در حال توسعه در حال انجام است که در این فرایند از دستگاه‌های پرتودهی درون کار با حفاظ خشک و شامل چشمه‌های سزیم-۱۳۷ یا کبالت-۶۰ با اکتیویته تا ۳ کیلوکوری به نام گاماسل‌های خونی استفاده می‌شود [۲].

قارچ یکی از فاسدشدنی‌ترین محصولات است و بلافاصله پس از برداشت، کیفیت خود را از دست می‌دهد. ماندگاری کوتاه قارچ (۱ تا ۳ روز در دمای محیط) مانعی برای توزیع و بازاریابی محصول تازه است. لذا درمان با پرتودهی به عنوان یک تکنیک حفاظتی احتمالی افزایش ماندگاری قارچ خواهد بود که با موفقیت در چندین محصول غذایی مانند انبه، توت فرنگی و غیره آزمایش شده است. تابش‌دهی قارچ‌ها در یک تجهیزات آزمایشی با چهار چشمه کبالت-۶۰، با اکتیویته کل ۲۳/۸ kCi انجام شده است [۳].

هم‌چنین لازم به ذکر است که تأسیسات کایوپه^۱ در سال ۱۹۶۸-۱۹۶۷ برای انجام تحقیقات در مورد درمان محصولات کشاورزی ساخته شد. که یک مرکز تابش استخری است و مجهز به یک آرایه چشمه رادیوایزوتوپی کبالت-۶۰ در یک سلول حفاظ با حجم بالا ($3 \times 6 \times 7 \text{ m}^3$) است. حداکثر اکتیویته مجاز برای کارخانه کایوپه ۱۰۰ kCi و اکتیویته فعلی (ژانویه ۲۰۱۹) ۶۷ kCi است. در این مرکز، مقادیر نرخ دز متفاوت با قرار دادن نمونه‌ها در موقعیت‌های خاص در سلول تابش در دسترس است. در حال حاضر (ژانویه ۲۰۱۹)، حداکثر دز موجود این چشمه ۱۰/۸ کیلوگری در ساعت است [۴].

خلفی و قریب در سال ۲۰۰۵ تأثیر افزایش قطر میله‌های کبالت بر کاهش شار نوترون (به‌عبارتی اثر خودجذبی میله‌های کبالت-۵۹) را بررسی کرده‌اند. در این مطالعه، هم‌چنین از یک مجتمع ۱۳-میله‌ای با قطر ۰/۷ cm و ارتفاع ۲۰ cm شامل ۸۹۰/۵ g کبالت-۵۹ در محل‌های دام شار نوترون در یک قلب ۲۸-تایی رآکتور تحقیقاتی تهران استفاده شده است. نتایج این کار نشان می‌داد امکان دستیابی به بهره ۵۰ kCi/y محصول کبالت-۶۰ در رآکتور تحقیقاتی تهران در مکان کانال پرتودهی مرکزی وجود دارد. هم‌چنین محاسبات این نویسندگان نشان می‌دهد استفاده از این مجتمع در قلب ۲۸-تایی مدل شده ۲۰۲۰ pcm راکتیویته منفی ایجاد می‌کند [۵].

یکی از رایج‌ترین کاربردهای چشمه‌های رادیواکتیو، استریل‌کردن وسایل پزشکی و محصولات دارویی است. در این روش استریلیزاسیون، پرتو می‌تواند در حالی که محصولات در بسته‌بندی نهایی قرار داده شده‌اند به محصولات نفوذ کند به‌گونه‌ای که فرایند استریلیزاسیون را ساده می‌کند. دستگاه‌های قابل کاشت (ارتوپدی، استنت‌ها و غیره) و هم‌چنین دستگاه‌های مبتنی بر بافت که از اهداکنندگان انسانی می‌آیند نیز معمولاً با کبالت-۶۰ استریل می‌شوند تا ایمنی بیمار دریافت‌کننده افزایش یابد. با توجه به حجم عظیم دستگاه‌هایی که نیاز به استریل شدن دارند، این فرایند معمولاً در تأسیسات بزرگ تجاری تابش گاما توسط پرتودهی چشمه دارای اکتیویته ده‌ها MCi کبالت-۶۰ انجام می‌شود. تخمین زده می‌شود که صدها تأسیسات کبالت-۶۰ (با حداکثر اکتیویته ۱۰۰ kCi) در سراسر جهان در مؤسسات تحقیقاتی، دانشگاه‌ها و آزمایشگاه‌های دولتی وجود داشته باشند [۱].

تابش مواد غذایی به دزهای نسبتاً پایینی نیاز دارد: کم‌تر از ۱ کیلوگری برای مهار رشد جوانه، کند کردن فرایند رسیدن، و کشتن حشرات و لاروهای که پس از برداشت در غلات، میوه‌ها و سبزیجات یافت می‌شوند و تا ۱۰ کیلوگری برای از بین بردن پاتوژن‌ها در گوشت و ماهی، کنترل کپک‌ها و افزایش ماندگاری در محصولات تازه لازم است. بنابراین، برای پرتودهی مواد غذایی معمولاً از چشمه‌های پرتودهی صنعتی کوچک (۱ MCi) استفاده می‌کنند که می‌توانند به سرعت دزهای ۱۰-۱ کیلوگری را فراهم کنند. مراکز پرتودهی‌های صنعتی بزرگ (با اکتیویته بیش‌تر از ۱ MCi) تقریباً به طور انحصاری برای استریل‌کردن دستگاه‌های پزشکی استفاده می‌شوند زیرا می‌توانند دزهای بالای مورد نیاز برای محصولات پزشکی (۲۵ تا ۵۰ کیلوگری) را در مدت زمان کوتاه فراهم کنند [۱].

چشمه‌های در حد کیلوکوری عمدتاً فقط می‌توانند برای تحقیقات آزمایشگاهی و نیز استریل کردن تجهیزات کوچک پزشکی یا محصولات کشاورزی در حجم و ابعاد کوچک که به دز بالایی برای استریلیزاسیون نیاز ندارند (حد ۱ الی ۱۰ کیلوگری) مورد استفاده قرار گیرند. در مورد تجهیزات پزشکی با حجم و ابعاد بزرگ در مقیاس صنعتی، زمان رسیدن به دز مورد نظر طولانی بوده و نیز بارگذاری تعداد محصولات تحت پرتودهی کم خواهد شد. برخی مراکز تحقیقات کشاورزی یا مراکز تحقیقات پزشکی از این چشمه‌ها استفاده می‌کنند که در ادامه به برخی موارد اشاره خواهد شد.



زنگ نزن آستنیتی (L ۳۱۶، ۳۲۱، ۳۰۴) با طراحی ویژه قرار گرفته و جوشکاری می‌شود. به طور کلی چشمه‌های میله‌ای کبالت در محدوده اکتیویته ۰/۱ mCi تا ۵۰ mCi توسط این شرکت قابل ارائه می‌باشد [۱۰].

از آنجایی که یکی از کاربردهای رآکتور تحقیقاتی تهران تولید رادیویزوتوپ‌ها می‌باشد، در این مطالعه امکان به‌کارگیری رآکتور تهران برای تولید چشمه‌های کبالت-۶۰ با اکتیویته چند ده کیلو کوری بررسی خواهد شد.

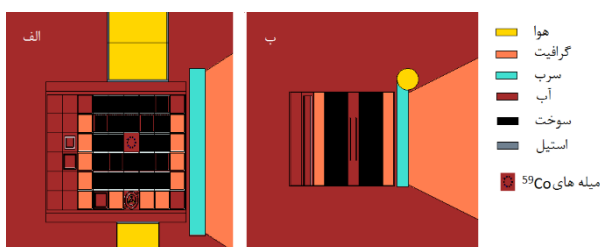
۲. مواد و روش‌ها

امکان تولید چشمه‌های کیلوکوری کبالت-۶۰ در رآکتور تحقیقاتی تهران (TRR)، با استفاده از روش شبیه‌سازی هدف این مطالعه قرار گرفته است. کبالت-۵۹ مطابق معادله زیر با جذب نوترون به کبالت-۶۰ تبدیل می‌گردد.



از آنجایی که برای تولید چنین چشمه‌هایی از مجتمع‌های میله‌ای کبالت-۵۹ استفاده می‌شود ابتدا تعدادی میله با قطر و ارتفاع اولیه انتخاب گردید و محاسبات تولید کبالت-۶۰ در آن‌ها هدف کار قرار گرفت.

در این مطالعه قطر میله‌ها به جهت کاهش خودجذبی بهینه می‌گردد و سپس تأثیر تعداد میله‌ها در یک مجتمع و نیز آرایش قلب بر میزان تولید محصول بررسی خواهد شد. در ابتدا ۱۰ عدد میله با قطر ۰/۹ cm و ارتفاع ۳۰ cm به عنوان یک مجتمع فرض شده اولیه در یک قلب ۲۴ تایی مدل شد (شکل ۱) و به مدت ۳ سال، محاسبه پرتودهی این مجتمع در مرکز قلب رآکتور در توان ۵ MW انجام شد. از آنجایی که پدیده خودجذبی در مورد ماده‌های هدف ضخیم قابل ملاحظه خواهد بود، اثر کاهش قطر میله‌ها بر افزایش بهره محصول کبالت-۶۰ در قلب ۲۴ تایی بررسی گردید و قطرهای ۰/۷ cm و ۰/۵ cm نیز برای این مجتمع ۱۰-میله‌ای بررسی شد.



شکل ۱. بارگذاری ۱۰ عدد میله کبالت با قطر ۰/۹ cm و ارتفاع ۳۰ cm در کانال مرکزی یک قلب ۲۴-تایی رآکتور تحقیقاتی تهران (الف) نمای برش مقطعی قلب، (ب) نمای برش محوری قلب.

جودایی و سلیمان^۱ (۲۰۲۲) امکان تولید کبالت-۶۰ را در رآکتور ۲۲ MW ETER مصر بررسی کرده‌اند. نتایج کار آن‌ها نشان می‌دهد که ETTR-۲ قادر به تولید کبالت-۶۰ با اکتیویته ویژه ۸۳/۸۹ Ci/g در 263 ± 14 روز پس از قرار دادن هشت مداد کبالت-۵۹ با قطر ۰/۷۷ سانتی‌متر، ارتفاع ۳۲ سانتی‌متر و جرم ۷۴/۵۰۶ گرم است. همچنین آن‌ها نشان دادند که با کاهش قطر مدادها و افزایش تعداد آن‌ها در حالی که جرم کبالت-۵۹ ثابت نگه داشته می‌شود، نرخ تولید بالاتری ممکن است حاصل شود [۶].

لازم به ذکر است که ابعاد مختلف میله‌های کبالت-۵۹ برای تولید چشمه‌های کبالت-۶۰ در رآکتورهای مختلف دنیا استفاده شده است. به عنوان مثال آرژانتین از میله‌های کبالت فلزی، پوشیده شده با نیکل با خلوص $99.7\% <$ درصد کبالت-۵۹ به شکل استوانه‌های فلزی (قطر ۶/۴ میلی‌متر و طول ۱۲/۷ میلی‌متر یا ۲۵/۴ میلی‌متر) استفاده می‌کند [۷].

در رآکتور ۱۲۵ MW کشور چین میله‌های کبالت-۵۹ با طول ۱۰ cm و قطر ۱ cm با جرم کل ۱۸۵۰ g پرتودهی شده است [۸].

گئورگ و همکاران در سال ۲۰۰۹ به این مطلب اشاره کرده‌اند که در رآکتور قدرت هند کبالت-۶۰ در استوانه‌های کوچک^۲ با اکتیویته ۱۴۰ Ci/g تولید می‌شود. ابعاد استوانه‌های کوچک ۱mm×۱mm و ابعاد کپسول محتوی این استوانه‌های کوچک ۲۹mm×۲۰mm است [۹].

چشمه‌های میله‌ای کبالت در مقیاس اکتیویته کم به دو روش در شرکت پارس ایزوتوپ تولید می‌گردد. در روش اول سیم کبالت-۵۹ در رآکتور پرتودهی نوترونی شده و به کبالت-۶۰ پرتوزا تبدیل می‌شود. این ماده پرتوزا طبق نقشه ساخت با گام‌های متناسب با توزیع پرتوزایی به دور هسته فلزی پیچیده شده و درون کپسول لوله‌ای از جنس فولاد زنگ نزن آستنیتی (L ۳۱۶، ۳۲۱، ۳۰۴، ۳۱۶) با طراحی ویژه قرار گرفته و جوشکاری می‌شود. در روش دوم از تکنولوژی سرامیکی جهت تولید استفاده می‌گردد. به این ترتیب که هسته سرامیکی به جای هسته فلزی و سیم در طول چشمه به کار گرفته می‌شود که طبق نقشه ساخت، گام‌های متناسب با توزیع پرتوزایی به طول هسته سرامیکی اعمال می‌گردد. سپس سرامیک در درون یک غلاف آلومینیومی قرار گرفته جوشکاری شده و در ادامه این غلاف در درون کپسول لوله‌ای از جنس فولاد

1. Abdulrahim Jodaibi and Abdelfattah Y. Soliman
2. Pellet



كارت BURN مواردی چون اکتیویته محصول (Ci)، جرم محصول (g)، تعداد اتم محصول (atom/cm^۲) و اکتیویته ویژه محصول (Ci/g) خواهد بود. این کارت شامل TIME که زمان پرتودهی را برحسب روز مشخص می‌کند، POWER که توان رآکتور را برحسب MW مشخص می‌کند، MAT که شماره ماده مورد نظر جهت محاسبات معادلات بتمن را مشخص می‌کند، MATVOL که حجم ماده مورد نظر حل معادلات بتمن را مشخص می‌کند، BOPT که نحوه چاپ داده‌های ذکر شده در خروجی را مشخص می‌کند و PFRAC که کسر توان مورد استفاده ضمن پرتودهی را مشخص می‌کند، می‌باشد [۱۱].

در محاسبات تجمع رادیوایزوتوپ‌ها، کد MCNPX از کد CINDER استفاده می‌کند. کد CINDER در ابتدا برای جامعه فیزیک رآکتور توسعه داده شد، در حالی که کد امروزه شامل کاربردهای مختلف از محاسبات مصرف سوخت رآکتور، تبدیلات مبتنی بر شتاب‌دهنده تا فعال‌سازی توسط شتاب‌دهنده و حتی اختر فیزیک در محاسبات تکامل عناصر و ایزوتوپ‌ها از زمان تولد کیهان است [۱۴].

از نظر ریاضی، فرایند تعادل مواد را می‌توان در هر زمان با معادله زیر توصیف کرد:

$$\frac{dN_i}{dt} = \sum_j \gamma_{ij} \sigma_{f,j} N_j \phi + \sum_k \sigma_{c,k \rightarrow i} N_k \phi + \sum_l \lambda_{l \rightarrow i} N_l - (\sigma_{f,i} N_{ji} \phi + \sigma_{a,i} N_{ji} \phi + \lambda_i N_i) \quad (2)$$

که $\frac{dN_i}{dt}$ نرخ زمانی تغییر در غلظت ایزوتوپ i هسته‌های قابل شکافت، $\sum_k \sigma_{c,k \rightarrow i} N_k \phi$ نرخ تولید ایزوتوپ i از شکافت تمام i از تبدیل نوترونی همه ایزوتوپ‌ها شامل (n, γ) ، $(n, 2n)$ ، etc. و غیره، $\sum_l \lambda_{l \rightarrow i} N_l$ نرخ تولید ایزوتوپ i از فروپاشی همه ایزوتوپ‌ها از جمله β^- ، β^+ ، α ، γ و غیره، $\sigma_{f,i} N_{ji} \phi$ نرخ حذف ایزوتوپ i با شکافت، $\sigma_{a,i} N_{ji} \phi$ نرخ حذف ایزوتوپ i با جذب نوترون (به استثنای شکافت)، $\lambda_i N_i$ نرخ حذف ایزوتوپ i با واپاشی است [۱۵].

برای محاسبه شار ذرات در حجم، از تالی F۴ استفاده می‌شود که واحد آن، Cm^۲/تعداد ذره، می‌باشد که به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$F^4 = \int_V \int_t \int_E \phi(r, E, t) dE dt dV / V \quad (3)$$

لازم به ذکر است که انتخاب قطر بهینه به لحاظ کاهش خودجذبی اهمیت بسیاری دارد هم‌چنان‌که در کار محققان دیگر نیز این بهینه‌سازی قطر میله‌های کبالت مورد توجه قرار گرفته است [۵، ۶].

کد محاسباتی MCNPX۲.۷ قادر به ترابرد ۳۴ نوع ذره از جمله ذرات نوترون و فوتون است. این کد محاسباتی قادر است انواع مسائل رآکتور و شتاب‌دهنده‌ها را مدل‌سازی کرده و پارامترهای مختلف مورد نیاز تولید محصولات رادیوایزوتوپ را با استفاده از رآکتور و یا شتاب‌دهنده ذرات محاسبه نماید [۱۱-۱۳].

لذا در این کار از کد MCNPX۲.۷ برای مدل‌سازی قلب رآکتور تحقیقاتی تهران استفاده شده است. از کارت BURN کد محاسباتی برای انجام محاسبات میزان تولید کبالت-۶۰ در مجتمع شامل میله‌های کبالت-۵۹ استفاده شد.

یکی از قابلیت‌های مهم MCNPX، کارت BURN UP می‌باشد که توانایی آن در محاسبه میزان مصرف سوخت است. این کارت، علاوه بر محاسبات مصرف سوخت، مقدار فعالیت‌های ایزوتوپ‌های تولید شده، کسر اتمی و جرمی آن‌ها و غیره را نیز برحسب زمان مصرف سوخت محاسبه می‌کند. کتابخانه این کد برای ۳۴۰۰ ایزوتوپ طراحی شده است که شامل واپاشی ایزوتوپ‌های محصول شکافت، بهره محصولات شکافت، مقادیر واپاشی ایزوتوپ‌های اکتینیدهای کم‌مقدار و غیره می‌باشد. ایزوتوپ‌های تولید شده در این کد به دو دسته آکتینیدها و غیرآکتینیدها تقسیم می‌شوند. کد به اپراتور اجازه می‌دهد که نوع غیرآکتینیدهایی که مایل به ترابرد آن‌ها می‌باشد را کنترل نماید.

فرم نوشتاری کارت BURN UP به صورت زیر می‌باشد.

```
BURN TIME=T۱ T۲
POWER=p
PFREC=f۱ f۲
MAT=m۱ m۲
MATVOL=v۱ v۲
BOPT=b۱ b۲ b۳
```

کارت BURN قادر است پس از پایان سیکل قرار داده شده در کارت KCODE، شار نوترون میانگین در محل میله‌های کبالت-۵۹ را محاسبه کرده و این شار را به عنوان ورودی به کد CINDER وارد کند تا معادلات بتمن را حل کرده و موجودی کبالت-۶۰ را برحسب زمان پرتودهی محاسبه کند. خروجی



در نهایت قلب تعادلی رآکتور تهران طبق FSAR مدل گردید [۱۷]. مجتمع کبالت-۵۹ در کانال پرتودهی حاشیه قلب مطابق شکل ۴ قرار داده شد و محاسبات بهره تولید کبالت-۶۰ در این قلب پس از ۳ سال پرتودهی انجام گردید.

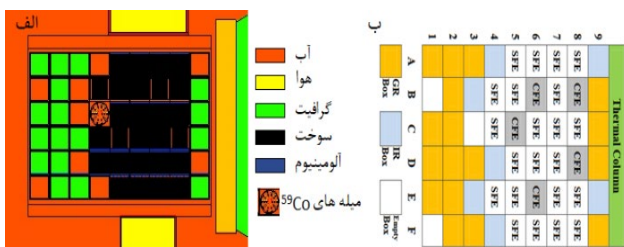
لذا در این مطالعه، تأثیر آرایش‌های مختلف قلب رآکتور تحقیقاتی تهران بر بهره تولید کبالت-۶۰، راکتیویته منفی حاصل از بارگذاری مجتمع میله‌ای کبالت در محل کانال پرتودهی مرکزی و در حاشیه قلب (در مورد قلب تعادلی موجود در FSAR) و نیز تأثیر برلیوم بر کاهش راکتیویته منفی بررسی خواهد شد.

هم‌چنین تأثیر برلیوم بر کاهش شار نوترون حرارتی در محل میله‌های کبالت-۵۹ در قلب تعادلی محاسبه خواهد شد.

۳. بحث و نتایج

محاسبات پرتودهی ۱۰ عدد میله فلزی کبالت-۵۹ با قطر ۰٫۹ cm، ارتفاع ۳۰ cm، و چگالی $۸٫۸ \text{ g/cm}^۳$ که معادل جرم حدود ۱٫۷ kg است در کانال مرکزی قلب ۲۴ تایی رآکتور تهران مطابق شکل ۱ برای توان ۵ MW و زمان ۳ سال انجام گردید.

در شکل ۵، نتایج برن‌آپ این مجتمع ۱۰ میله‌ای با فرض کارکرد ۱۰۰٪ قلب در سال (روشن بودن ۳۶۵ روز) ارائه شده است که نشان می‌دهد پس از پایان پرتودهی حدود ۶۰ kCi کبالت-۶۰ تولید می‌گردد، در صورتی‌که کارکرد قلب سالانه ۷۰٪ باشد حدود ۴۰ kCi کبالت-۶۰ پس از ۳ سال در این مجتمع تولید خواهد شد. اکتیویته ویژه این مجتمع در پایان سال سوم پرتودهی $۳۵٫۱ \text{ Ci/g}$ است.



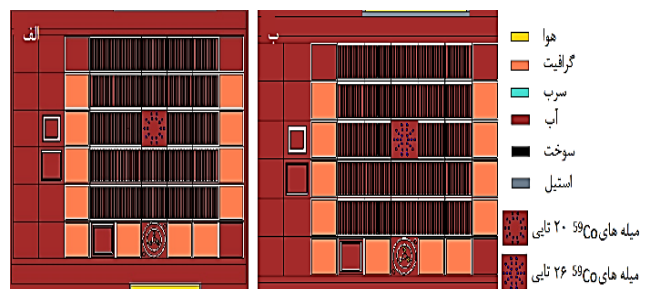
شکل ۴. بارگذاری مجتمع ۲۶ میله‌ای کبالت با قطر بهینه و ارتفاع ۳۰ cm در کانال پرتودهی قلب تعادلی رآکتور تحقیقاتی تهران (الف) قلب ۲۷-تایی مدل شده توسط MCNPX، (ب) قلب تعادلی موجود در FSAR.

با استفاده از کارت En که در آن n شماره وابسته به تالی Fn است، می‌توان تالی را با بازبندی انرژی به دست آورد. فرم نوشتن این کارت به صورت زیر می‌باشد [۱۲].

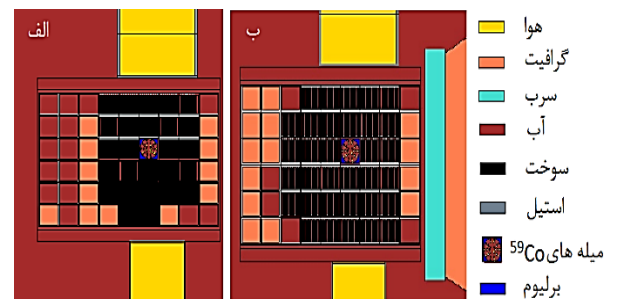
$$En \ E1 \ E2 \ E3 \dots \ En$$

در ادامه بهره محصول با افزایش تعداد میله‌های دارای قطر بهینه (دارای کم‌ترین اثر خودجذبی یا به عبارتی بیش‌ترین اکتیویته حاصل شده بر واحد جرم) بررسی گردید و تعداد میله‌ها در گام بعدی دایره هم‌مرکز با ۱۰ میله قبلی به ترتیب به ۲۰ و ۲۶ عدد افزایش داده شد (شکل ۲).

به منظور حفظ گام ثابت بین میله‌ها تعداد ۲۰ و ۲۶ میله تنها مواردی است که می‌تواند در دایره هم‌مرکز داخلی جا شود. هم‌چنین بهره محصول با پرتودهی در قلب ۲۷ تایی (قلب تعادلی رآکتور تحقیقاتی تهران) و ۳۳ تایی (بزرگ‌ترین قلب چیدمان شده رآکتور تحقیقاتی تهران) بررسی گردید. در ادامه، تأثیر استفاده از برلیوم به‌عنوان کاهش‌دهنده راکتیویته منفی ناشی از بارگذاری مجتمع میله‌ای کبالت-۵۹ بررسی گردید (شکل ۳).

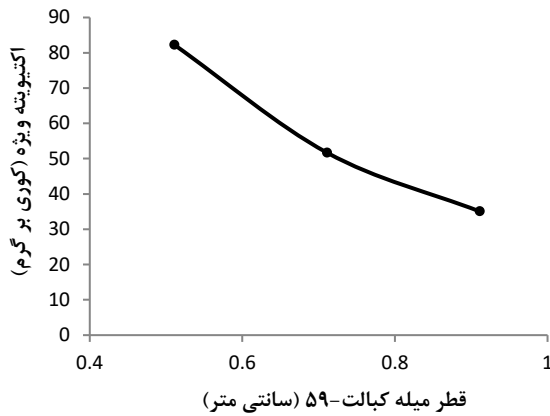


شکل ۲. بارگذاری ۱۰ عدد میله کبالت با قطر بهینه و ارتفاع ۳۰ cm در کانال مرکزی یک قلب ۲۴-تایی رآکتور تحقیقاتی تهران (الف) مجتمع ۲۰-تایی، (ب) مجتمع ۲۶-تایی.

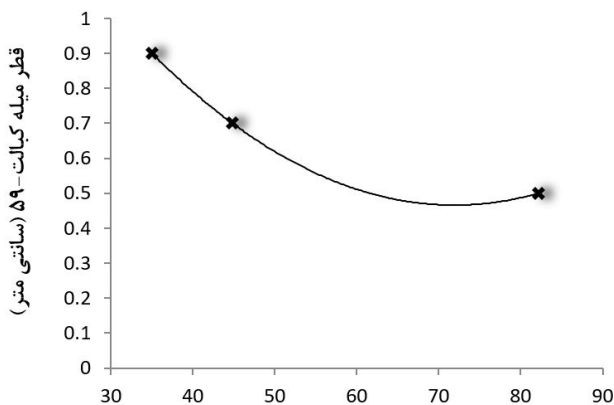


شکل ۳. بارگذاری مجتمع ۲۶ میله‌ای کبالت با قطر بهینه و ارتفاع ۳۰ cm در کانال مرکزی قلب رآکتور تحقیقاتی تهران (الف) قلب ۲۷-تایی، (ب) قلب ۳۳-تایی.





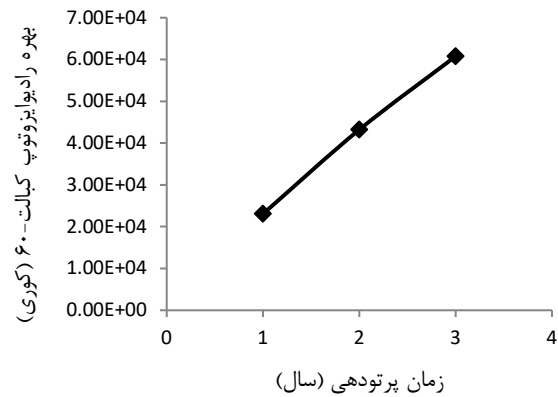
شکل ۶. محاسبات بهره تولید کبالت-۶۰ در ۱۰ عدد میله کبالت-۵۹ با قطر ۰٫۹ cm، ۰٫۷ و ۰٫۵ و ارتفاع ۳۰ cm در کانال مرکزی قلب ۲۴-تایی راکتور تحقیقاتی تهران برحسب زمان پرتودهی ۳ سال پرتودهی در توان ۵ MW.



شکل ۷. محاسبات اکتیویته ویژه تولید کبالت-۶۰ در ۱۰ عدد میله کبالت-۵۹ با قطر ۰٫۹ cm، ۰٫۷ و ۰٫۵ و ارتفاع ۳۰ cm در کانال مرکزی قلب ۲۴-تایی راکتور تحقیقاتی تهران پس از ۳ سال پرتودهی در توان ۵ MW.

لذا قطر ۰٫۵ cm برای میله‌ها انتخاب گردید و تعداد آن‌ها از ۱۰ عدد به ۲۰ و ۲۶ عدد به ترتیب مطابق شکل ۲ تغییر داده شد. محاسبات تولید کبالت-۶۰ در این مجتمع‌ها نشان داد که با استفاده از مجتمع ۲۰-میله‌ای در همان شرایط پرتودهی ذکر شده در قبل، حدود ۶۶٫۳۲ kCi کبالت-۶۰ با اکتیویته ویژه ۶۰٫۸ Ci/g تولید خواهد شد. در مورد مجتمع ۲۶-میله‌ای این مقادیر به ترتیب ۶۹٫۷۱ kCi و ۵۱٫۲ Ci/g می‌باشند. که مجتمع ۲۰-میله‌ای ۲۶۹۹ pcm راکتیویته منفی و مجتمع ۲۶-میله‌ای ۲۷۵۴ pcm راکتیویته منفی ایجاد خواهد کرد.

هرچند افزایش تعداد میله‌ها در قلب ۲۴ تایی، بهره نهایی محصول را پس از ۳ سال به ترتیب نسبت به مجتمع ۱۰ میله‌ای حدود ۴۸٪ و ۵۵٪ افزایش می‌دهد ولی به دلیل کاهش اکتیویته ویژه و افزایش خودجذبی و به‌ویژه تزریق راکتیویته منفی



شکل ۸. محاسبات بهره تولید کبالت-۶۰ در ۱۰ عدد میله کبالت-۵۹ با قطر ۰٫۹ cm و ارتفاع ۳۰ cm در کانال مرکزی قلب ۲۴-تایی راکتور تحقیقاتی تهران برحسب زمان پرتودهی.

لازم به ذکر است که حضور این مجتمع در کانال مرکزی قلب حدود ۲۲۰۰ pcm راکتیویته منفی در قلب ایجاد می‌کند. راکتیویته حاصل اختلاف ضریب تکثیر مؤثر قلب با $(k_{eff(\gamma)})$ و بدون حضور $(k_{eff(\gamma)})$ مجتمع کبالت خواهد بود و از رابطه زیر محاسبه می‌گردد.

$$\rho = \frac{k_{eff(\gamma)} - k_{eff(\gamma)}}{k_{eff(\gamma)}} \quad (۴)$$

در ادامه کاهش قطر هر یک از میله‌ها در آرایش ۱۰ میله‌ای بررسی گردید و قطر میله‌ها به ترتیب به ۰٫۷ cm و ۰٫۵ cm کاهش داده شد و محاسبات تجمع کبالت-۶۰ برای این مجتمع ۱۰-میله‌ای محاسبه گردید. طبق شکل ۶، پس از ۳ سال پرتودهی میله‌ها در توان ۵ MW نتایج محاسبات نشان می‌دهد همان‌طور که انتظار می‌رود به دلیل مسأله خودجذبی برای میله‌های کبالت ضخیم، با کاهش قطر میله، اکتیویته ویژه افزایش می‌یابد و برای کم‌ترین قطر یعنی ۰٫۵ cm پس از ۳ سال ۴۴٫۸ kCi کبالت-۶۰ با کارکرد ۱۰۰٪ قلب در سال در توان ۵ MW تولید می‌گردد. اکتیویته ویژه این مجتمع ۸۲٫۲۳ Ci/g است.

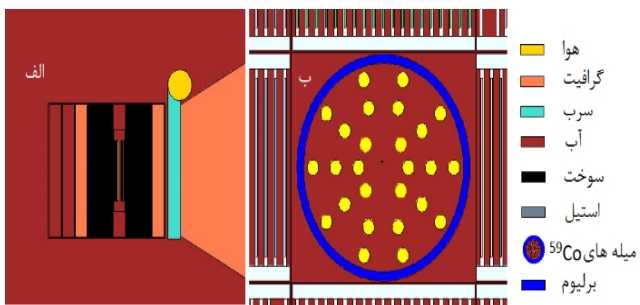
لازم به ذکر است که حضور مجتمع‌های با قطر ۰٫۷ و ۰٫۵ سانتی‌متر در کانال مرکزی قلب به ترتیب حدود ۲۰۴۹ pcm و ۱۶۸۸ pcm راکتیویته منفی در قلب ایجاد می‌کند.

در شکل ۷، تغییرات اکتیویته ویژه برحسب قطر میله‌ها ارائه شده است. هم‌چنان‌که شکل نشان می‌دهد انتخاب قطر ۰٫۵ cm به منظور کاهش پدیده خودجذبی و افزایش اکتیویته ویژه ^{۶۰}Co مناسب به نظر می‌رسد.

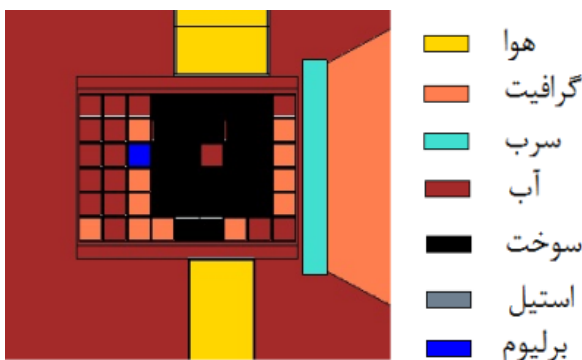


نوترون حرارتی را جذب نمی‌کند. افزایش ضخامت برلیوم از ۱ mm به ۳ mm حدود ۲۰۰ pcm راکتیویته قلب را افزایش می‌دهد. و استفاده از ۳ mm برلیوم در اطراف مجتمع ۲۶-میله‌ای کبالت-۶۰ حدود ۳۱۷ pcm راکتیویته مثبت ایجاد کرده است. بارگذاری این مجتمع ۲۶-میله‌ای در کانال مرکزی قلب ۲۷-تایی حدود ۲۶۵۰ pcm راکتیویته منفی ایجاد کرده است. از آن جایی که راکتیویته منفی حاصل از بارگذاری مجتمع کبالت-۵۹ زیاد هست و هرچه تعداد میله‌ها یا جرم کبالت-۵۹ بارگذاری شده بیش‌تر باشد این راکتیویته بیش‌تر هست، در ادامه استفاده از یک بلوک برلیومی در قسمت بازتاباننده‌های گرافیتی و تأثیر آن بر افزایش راکتیویته قلب بررسی شد (شکل ۹).

محاسبات نشان می‌دهد استفاده از این بلوک برلیومی تنها ۴۰ pcm بر راکتیویته قلب می‌افزاید درحالی که جرم آن حدود ۷ کیلوگرم است.



شکل ۸. بررسی تأثیر هندسه برلیوم بر اکتیویته ویژه تولید کبالت-۶۰ در ۲۶ عدد میله کبالت-۵۹ با قطر ۰/۵ cm و ارتفاع ۳۰ cm در کانال مرکزی قلب ۲۷-تایی رآکتور تحقیقاتی تهران پس از ۳ سال پرتودهی در توان ۵ MW (الف نمای محوری قلب ب) نمای سطح مقطعی قلب.



شکل ۹. بررسی تأثیر بلوک برلیوم بر افزایش راکتیویته قلب ۲۷-تایی رآکتور تحقیقاتی تهران.

قابل ملاحظه به قلب ۲۴ تایی به لحاظ اقتصادی مناسب به نظر نمی‌رسد.

لذا، محاسبات مجتمع ۲۶-میله‌ای در قلب ۳۳ تایی تکرار شد و نتایج محاسبات نشان می‌دهد پس از ۳ سال کارکرد ۱۰۰٪ قلب حدود ۴۶/۷۲ kCi کبالت-۶۰ با اکتیویته ویژه ۳۳ Ci/g تولید خواهد شد. بارگذاری این مجتمع در قلب ۳۳ تایی باعث راکتیویته منفی حدود ۱۹۶۴ pcm می‌گردد که نسبت به قلب ۲۴-تایی حدود ۷۸۰ pcm کم‌تر است.

از آن جایی که راکتیویته منفی، طول سیکل کاری رآکتور را به شدت کاهش می‌دهد لذا امکان استفاده از بازتاباننده به عنوان جبران‌کننده راکتیویته منفی در ادامه بررسی خواهد شد. از آن جایی که برلیوم مؤثرترین بازتاباننده در ایجاد راکتیویته مثبت است، از آن به عنوان جبران‌کننده راکتیویته منفی ناشی از بارگذاری مجتمع کبالت-۵۹ در ادامه استفاده خواهد شد [۱۶].

استفاده از برلیوم (مطابق شکل ۳) به عنوان جبران‌کننده راکتیویته منفی در قلب ۳۳-تایی بررسی شد و نتایج محاسبات نشان داد که پس از ۳ سال کارکرد ۱۰۰٪ قلب حدود ۴۵/۶۱ kCi کبالت-۶۰ تولید خواهد شد. که نسبت به مورد قبلی (بدون برلیوم) ۲/۳٪ کاهش داشته است. ولی بارگذاری حدود ۱/۴۷۹ کیلوگرم برلیوم حدود ۴۰۰ pcm راکتیویته منفی را جبران کرده است.

محاسبات بارگذاری این مجتمع ۲۶-میله‌ای کبالت-۵۹ در قلب ۲۷-تایی (آخرین چیدمان قلب در سال ۱۴۰۱) نیز بررسی گردید که نتایج حاصل نشان داد بهره کبالت-۶۰ پس از ۳ سال کارکرد ۱۰۰٪ ۶۰/۱۹ kCi و اکتیویته ویژه ۴۴/۱۹ Ci/g است. به منظور بهینه‌سازی میزان برلیوم، هندسه آن نسبت به شکل ۳ مطابق شکل ۸ به صورت استوانه‌ای (با ارتفاع ۴۰ cm) تغییر داده شد و ضخامت بازتاباننده به ترتیب ۱، ۲ و ۳ (حداکثر فضای ممکن در اطراف مجتمع) تغییر داده شد. این ضخامت‌ها به ترتیب معادل بارگذاری حدود ۰/۱۶۴، ۰/۳۳۲ و ۰/۵۰۶ برلیوم می‌باشند.

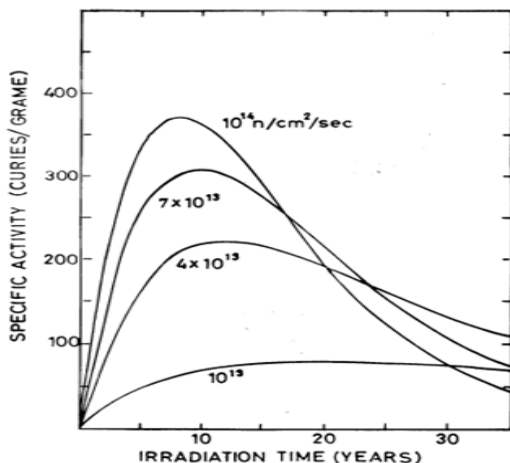
محاسبات نشان می‌دهد با بارگذاری ۱ mm برلیوم با هندسه فوق‌الذکر، بهره کبالت-۶۰ پس از ۳ سال پرتودهی ۶۴ kCi خواهد بود. با افزایش ضخامت به ۲ mm بهره تولید حدود ۶۳ kCi کاهش می‌یابد و در حالت ۳ mm برلیوم نیز بهره تولید حدود ۶۳ kCi خواهد بود. لازم به ذکر است کاهش ۱/۵٪ محصول پس از استفاده از برلیوم می‌تواند در محدود خطای محاسباتی کد باشد زیرا برلیوم به عنوان کندکننده است و



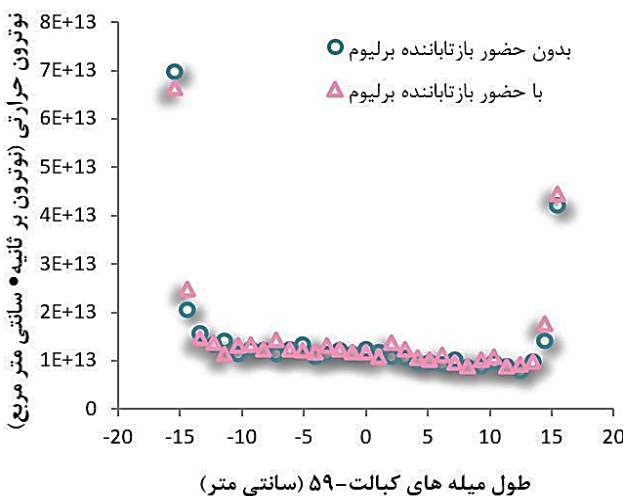
لازم به ذکر است که محاسبات انجام شده در این کار با منحنی ارائه شده در مدرک آژانس انرژی اتمی بین‌المللی (شکل ۱۰) و نیز مقادیر ذکر شده رآکتور ETER مصر کاملاً همخوان است [۶، ۷].

در ادامه توزیع شار نوترون حرارتی محوری در راستای طول میله‌های کبالت-۵۹ بارگذاری شده در قلب ۱۴۰۱ با و بدون حضور بازتاباننده برلیوم ارائه شده است. همان‌طور که شکل نشان می‌دهد با حضور بازتاباننده برلیوم شار نوترون حرارتی اندکی افزایش داشته است (شکل ۱۱).

به دلیل وجود میله‌های کنترل، پیک شار نوترون در قلب به سمت پایین‌تر از مرکز قلب است و این موضوع بر نحوه توزیع شار نوترون حرارتی روی میله‌های کبالت-۵۹ نیز تأثیر می‌گذارد. همچنین به دلیل جذب نوترون حرارتی روی میله‌های کبالت-۵۹، شار نوترون حرارتی بالای میله‌ها از پایین آن‌ها بیش‌تر است (بالای ۱۵ cm و پایین ۱۵ cm-).



شکل ۱۰. بررسی وابستگی اکتیویته ویژه کبالت-۶۰ به شار نوترون حرارتی [۷].



شکل ۱۱. توزیع شار نوترون حرارتی در راستای میله‌های کبالت-۵۹ بارگذاری شده در قلب ۱۴۰۱.

لذا بهینه‌سازی استفاده از برلیوم در اطراف خود مجتمع کبالت-۵۹ و درون خود کانال پرتودهی تأثیر بهتری در جبران راکتیویته منفی خواهد داشت ضمن این‌که جرم برلیوم بسیار کم‌تری برای این منظور مورد نیاز است.

در ادامه قلب تعادلی رآکتور تحقیقاتی تهران مطابق FSAR مدل گردید [۱۷].

محاسبات انجام شده برای قلب تعادلی مدل شده مطابق FSAR رآکتور تحقیقاتی تهران نشان داد در مجتمع ۲۶-میله‌ای پس از ۳ سال پرتودهی در توان ۵ MW حدود ۳۳۷۰۳ kCi کبالت-۶۰ تولید می‌شود. همچنین بارگذاری این مجتمع در حاشیه قلب به همراه برلیوم حدود ۶۳۲ pcm راکتیویته منفی برای قلب ایجاد کرده است. بدون استفاده از برلیوم این راکتیویته منفی ۷۸۳ pcm است و بهره تولید کبالت-۶۰ در این حالت ۳۳۷۰۴ kCi خواهد بود. اکتیویته ویژه محصول در این شرایط ۲۴/۲۵ Ci/g است. با فرض ۷۰٪ کارکرد قلب می‌توان گفت امکان تولید حداقل ۲۳ kCi کبالت-۶۰ در محل حاشیه قلب تعادلی مدل شده رآکتور تحقیقاتی تهران وجود دارد.

محاسبات شار نوترون حرارتی (کم‌تر از ۰/۴ eV) در محل میله‌ها با استفاده از تالی F۴ کد MCNPX در مورد مجتمع کبالت-۵۹ بارگذاری شده در قلب تعادلی انجام گردید. نتایج محاسبات نشان می‌دهد با حضور بازتاباننده برلیوم شار نوترون حرارتی میانگین میله‌ها $۹/۲۲ \times 10^{12}$ n/s.cm^۲ است و بدون حضور بازتاباننده برلیوم این شار $۹/۰۷ \times 10^{12}$ n/s.cm^۲ است که حدود ۱/۶٪ افزایش داشته است.

در کار مطالعاتی انجام شده توسط خلفی و قریب، قلب ۲۸-تایی مدل شده دارای دو عدد دام شار (یکی در مرکز قلب و دیگری در حاشیه قلب) می‌باشد. محاسبات این گروه با استفاده از کدهای WIMS و CITATION نشان می‌دهد در محل دام شار مرکزی، شار نوترون حرارتی میانگین ۲×10^{13} n/s.cm^۲ اکتیویته ویژه ۱۳ میله کبالت با جرم کل ۸۹۰ g پس از ۳۳۰ روز پرتودهی حدود ۳۳۷۰ Ci/g است [۵].

در محل دام شار مرکزی قلب ۲۷ تایی (آخرین قلب چیدمان شده سال ۱۴۰۱) اکتیویته ویژه ۴۴/۱۹ Ci/g است و در محل پرتودهی قلب تعادلی مدل شده توسط کد MCNPX در مطالعه حاضر (دام شار حاشیه قلب)، میانگین شار نوترون حرارتی محل میله‌ها $۹/۲۲ \times 10^{12}$ n/s.cm^۲ است و اکتیویته ویژه کبالت-۶۰ پس از ۳ سال پرتودهی ۱۳۶۲ g کبالت-۵۹ در حاشیه قلب تعادلی طبق FSAR حدود ۲۴/۲۵ Ci/g است.



مقایسه کار انجام شده توسط خلفی و قریب با قلب تعادلی ۲۷-تایی مدل شده در این کار نشان می‌دهد هم‌خوانی خوبی بین محاسبات مطالعه حاضر و کار انجام شده قبلی توسط آن‌ها وجود دارد.

لازم به ذکر است در این محاسبات مجتمع‌های مختلف میله‌ای کبالت-۵۹ در مکان کانال مرکزی یا به عبارتی محل دام شار نوترون^۱ قلب‌های مختلف رآکتور تهران قرار داده شده است و تنها یک امکان‌سنجی به لحاظ بهره تولید برحسب اکتیویته ویژه انجام شده است. لذا تغییر پارامترهای نوترونیک قلب به غیر از راکتیویته منفی مورد بحث و بررسی این مطالعه قرار نگرفته است. بنابراین در کارهای آتی نیاز است ضمن طراحی بهینه مجتمع کبالت برای پرتودهی در قلب تعادلی (۲۷-تایی) رآکتور تحقیقاتی تهران، تأثیر آن بر پارامترهای نوترونیک و ایمنی رآکتور به دقت مطالعه گردد.

اهمیت تولید چشمه‌های صنعتی کبالت در کشور بسیار زیاد است و لذا نیازمند مطالعات گسترده در زمینه امکان‌به‌کارگیری رآکتورهای موجود در کشور برای برآورده کردن این هدف است. مطالعه حاضر می‌تواند مسیر خوبی را برای محققان ایجاد کند تا بتوان در کم‌ترین زمان ممکن به این هدف مهم دست یافت. همچنین این مطالعه در تکمیل محاسبات انجام‌شده توسط خلفی و قریب به‌خوبی پارامترهای مهم در طراحی مجتمع‌های کبالت-۶۰ را بیان می‌کند که از مهم‌ترین آن‌ها طراحی بهینه با کاهش اثرات خودجذبی ناشی از قطر میله‌ها و یا هندسه مجتمع و نیز کاهش راکتیویته منفی ایجادشده در قلب رآکتور با جانمایی مناسب مجتمع یا طراحی یک ماده بازتاباننده جبران‌کننده راکتیویته منفی است.

لازم به ذکر است که میانگین خطای محاسباتی در تمام محاسبات انجام شده در مطالعه حاضر کم‌تر از ۳٪ بوده است. به منظور راستی‌آزمایی برنامه استفاده شده، شار نوترون حرارتی در کانال‌های پرتودهی قلب تعادلی مورد استفاده در این پژوهش محاسبه گردید و با مقدار ذکر شده در FSAR رآکتور تهران مقایسه شد [۱۷]. نتایج محاسبات نشان داد شار نوترون حرارتی محاسبه شده در کانال A۶ قلب تعادلی مدل شده در این پژوهش $0.70 \times 10^{13} \text{ n/s.cm}^2$ است و مقدار ذکر شده در مدرک FSAR در این موقعیت $0.92 \times 10^{13} \text{ n/s.cm}^2$ است. در کانال D۶ مقدار شار نوترون حرارتی محاسبه شده $1.13 \times 10^{13} \text{ n/s.cm}^2$ است و مقدار ذکر شده در مدرک FSAR در این موقعیت $1.77 \times 10^{13} \text{ n/s.cm}^2$ است. ضریب تکثیر مؤثر قلب تعادلی مدل شده در این کار در ابتدای سیکل کاری (BOC) 1.03085 و مقدار گزارش شده در FSAR در ابتدای سیکل کاری (BOC) 1.03131 است. لازم به ذکر است که اختلاف مقادیر محاسباتی این کد و FSAR در مرتبه خطای محاسباتی است.

۴. نتیجه‌گیری

در حال حاضر، تنها هفت رآکتور قدرت در جهان وجود دارد که به صورت تجاری ایزوتوپ رادیواکتیو کبالت-۶۰ را تولید می‌کنند و تولید صنعتی کبالت-۶۰ در رآکتورهای تحقیقاتی تاکنون گزارش نشده است.

از آنجایی‌که چشمه‌های با اکتیویته چند ده کیلوکوری می‌توانند در مراکز تحقیقاتی و نیز مراکز صنعتی پرتودهی برخی از محصولات کشاورزی به‌کار گرفته شوند، در این مطالعه امکان تولید چشمه ^{60}Co با اکتیویته چند ده کیلوکوری در رآکتور تحقیقاتی تهران مورد بررسی قرار گرفت.

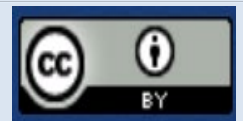
محاسبات انجام شده توسط کد MCNPX نشان داد بهینه‌سازی ابعاد مجتمع در افزایش بهره تولید، کاهش راکتیویته منفی قلب ضمن پرتودهی، کاهش اثر خودجذبی بسیار مهم است. در رآکتور تحقیقاتی تهران تنها در صورت امکان استفاده از کانال مرکزی قلب، و پرتودهی مجتمع ۲۶-میله‌ای در آرایش ۲۷-تایی امکان تولید بیشینه حدود 40 kCi چشمه کبالت-۶۰ پس از ۳ سال پرتودهی وجود خواهد داشت؛ این مقدار با فرض ۲۵۵ روز روشن بودن رآکتور در سال استنباط شده است. استفاده از برلیوم در اطراف مجتمع کبالت می‌تواند راکتیویته منفی تا حدودی را جبران کند.



1. <https://nucleus.iaea.org/sites/diif/Pages/GammaRT.aspx>.
2. Bagheri R, Ranjbar H. Nuclear Designing of a Blood Irradiator Facility for Research and Medical Applications Using Cobalt-60 Line Sources. Scientific Quarterly of Applied Physics of Iran, School of Physics, Al-Zahra University. (12th year, consecutive 13, winter 1401).
3. Fernandes Â, Antonio A.L, Oliveira B, Martins A. Effects of gamma rays on sugars composition of wild mushrooms from the Northeast of Portugal. International Conference of Agricultural Engineering. (Valencia, 2012).
4. Baccaro S, Cemmi A, Sarcina I.Di, Ferrara G. Gamma Irradiation CALLIOPE Facility at ENEA Casaccia Research Centre. 2019.
5. Khalafi H, Gharib M. Optimization of ^{60}Co production using neutron flux trap in the Tehran research reactor. *Annal. of Nucl. Energ.* 2005;32:331.
6. Judaibi A, Soliman A.Y. Simulation of cobalt-60 production in research reactors using OpenMC Monte Carlo code. *Kerntechnik.* 2022;87(2):230.
7. Manual for reactor produced radioisotopes. (IAEA-TECDOC-1340. 2003).
8. Zhijian C, Yunjiang S, Chunchua Z, Maoling Li. Recent status on cobalt-60 gamma ray radiation sources production and its application in China. *Redint. Phys. Chem.* 1993;42(1-3):469.
9. George J.R, Kushwah R, Sastry K.V.S. Teletherapy sources with imported and indigenous ^{60}Co activity. *Journal of Med. Phys.* 2009;34(3):180.
10. <https://parsisotope-industrial.com/product/60-Cobalt>.
11. Pelowitz D.B. Users' manual versión of MCNPX2.6.0. (LANL, LA-CP-07-1473. 2008).
12. Shultis J.K, Faw R.E. An MCNP primer Dept. of Mechanical and Nuclear Engineering. (Kansas State University. Copyright. 2004-2010).
13. Briesmeister J.F. MCNP- A General Monte Carlo N-Particle Transport code Version4C. (Los Alamos National Laboratory Report, USA, LA-13709-M 2000).
14. Gallmeier F.X, Ferguson P.D, Lu W, Iverson E.B, Muhrer G, Holloway S.T, Kelsey Ch, Pitcher E, Wohlmuther M, Micklich B. The CINDER'90 transmutation code package for use in accelerator applications in combination with MCNPX. (19th Meeting on Collaboration of Advanced Neutron Sources. 2010).
15. Fensin M.L. Development of the MCNPX depletion capability: A Monte Carlo linked depletion method that automates the coupling between MCNPX and CINDER90 for high fidelity burnup calculations. (University of Florida. 2008).
16. Gholazadeh Z, Khoshahval F, Mozafari M.A, Joze-Vaziri A. Computational investigation of Tehran research reactor graphite reflector replacement with Be, BeO or D_2O and its impacts on thermal neutron flux enhancement. *International Journal of Nuclear Energy Science and Technology.* 2019;13(4):350.
17. Introduction and general description of research reactor. (TRR- SA- RPT- 052).

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

غلامزاده، زهره، رک رک، بهروز. (۱۴۰۳)، شبیه‌سازی مونت کارلویی امکان تولید کبالت -۶۰ در رآکتور تحقیقاتی تهران. *مجله علوم، مهندسی و فناوری هسته‌ای*، ۱۰۹ (۳)، ۳۶-۴۵.
 Url: https://jonsat.nstri.ir/article_1568.html .DOI: <https://doi.org/10.24200/nst.2024.1568>

