مجله علوم، مهندسی و فناوری هسته‌ای، دوره ۴۵، شماره ۴، جلد ۱۱۰، زمستان ۱۴۰۳

Journal of Nuclear Science, Engineering and Technology
Vol. 45 (1), Serial Number 110, 2025

طراحی هسته‌ای سامانه پرتودهی گامای قابل حمل دو محفظه‌ای با استفاده از چشمه‌های میله‌ای کبالت-۶۰ با ظرفیت ۱۰۰ کیلوکوری

رضا باقری[۲،۱*]، ابوالفضل ثوری[۲،۱]، نادر شیخ مقدسی[۲،۱]، محمدحسین سلامت‌بخش[۲،۱]، ایرج مرادی قراتلو[۲،۱]، میکائیل یگانه[۲،۱]، سیدپژمان شیرمردی[۲،۱]

۱. پژوهشکده کاربرد پرتوها، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۸۴۸۶-۱۱۳۶۵، تهران- ایران
۲. شرکت توسعه کاربرد پرتوهای ایران، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۸۳۶-۱۴۳۹۵، تهران- ایران

*Email: rzbagheri@aeoi.org.ir

مقالهٔ فنی

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۹/۷ تاریخ بازنگری مقاله: ۱۴۰۳/۱/۲۹ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۲/۸

چکیده

در این کار با استفاده از کد MCNPX محاسبات مربوط به طراحی هسته‌ای سامانه پرتودهی گامای قابل حمل دو محفظه‌ای به منظور پرتودهی غلات و حبوبات مطابق استانداردهای بین‌المللی انجام گرفت. بدین منظور با استفاده از چشمه‌های میله‌ای کبالت-۶۰ مدل GIK-A۶m شرکت MAYAK روسیه و با ظرفیت ۱۰۰ کیلوکوری محاسبات در دو بخش نسبت یکنواختی دز و دبی خروجی محصول پرتو دیده و همچنین بخش حفاظ‌گذاری در برابر پرتوهای گاما انجام گرفت. مقدار یکنواختی دز درون محفظه‌های پرتودهی درونی و بیرونی به ترتیب حدود ۱٫۷۷ و ۲٫۱۸ به دست آمد. همچنین مقدار دبی خروجی محصول نوعی پرتودهی شونده با چگالی فله‌ای ۸۰۰ kg/m^3، حدود ۳٫۲ تن در ساعت محاسبه شد. غله نوعی در چنین دستگاهی بین ۳۰۰ تا ۶۵۶ گری دز دریافت خواهد کرد که کمتر از حداکثر میزان دز جذبی توصیه شده غلات و حبوبات (۱ کیلوگری) به منظور انبارمانی و دفع حشرات توسط آژانس بین‌المللی انرژی اتمی می‌باشد. مطابق سند شماره ۴۳٫۷ مؤسسه استانداردهای ملی آمریکا، میزان آهنگ دز نشتی در فاصله ۵ سانتی‌متری از سطح دستگاه و برای نواحی محدود شده و در مد پرتودهی، کمتر از ۲۰۰ µSv/h (بیشترین حد مجاز پیشنهاد شده) محاسبه شد. نتایج نشان دادند که حفاظ سربی سامانه با بیشینه ضخامت ۲۹ سانتی‌متر به راحتی جلوی پرتوهای گامای گسیلی را سد کرده و کار با چنین دستگاهی هیچ خطر پرتوگیری را متوجه کارکنان نخواهد کرد. در نهایت بازده انرژی سامانه نیز با افزایش حدود ۱۰٫۵ درصدی ناشی از افزودن محفظه بیرونی حدود ۲۵ درصد برآورد شد.

کلیدواژه‌ها: پرتودهی غلات، کبالت-۶۰، حفاظ‌گذاری، نسبت یکنواختی دز، MCNPX

Nuclear designing of a portable two-chamber gamma irradiator facility for irradiation of grains containing 100 kCi cobalt-60 line sources

R. Bagheri[*1,2], A. Souri[1,2], N. Sheikh-Moghaddasi[1,2], M.H. Salamatbakhsh[1,2], I. Moradi-Gharatloo[1,2], M. Yeganeh[1,2], S.P. Shirmardi[1,2]

1. Radiation Application Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOI, P.O.Box: 11365-8486, Tehran – Iran
2. Iran Radiation Application Development Company (IRAD Co.), AEOI, P.O.Box: 14395-836, Tehran – Iran

Technical Paper

Received: 28.11.2023, Revised: 17.4.2024, Accepted: 27.4.2024

Abstract

In this research using the MCNPX code, calculations were done for nuclear designing of portable two-chamber gamma irradiator facility for irradiation of grains and legumes according to international standards. Calculations were made in two parts of dose uniformity ratio and mass flow rate of the irradiated product, as well as gamma-ray shielding using 100 kCi Cobalt-60 line sources, model GIK-A6m of Mayak Co., Russia. The dose uniformity ratios of internal and external irradiation chambers were found to be about 1.77 and 2.18, respectively. Also, the mass flow rate of an irradiated typical grain with a bulk density of 800 kg m-3 was calculated to be about 3.2 ton h-1. A typical grain will receive a dose between 300-656 Gy, which is less than the maximum recommended limit of absorbed dose for grains and legumes (1 kGy) in purpose of shelf-life extension and insect disinfestation by the IAEA. According to ANSI/HPS N43.7, the leakage dose rate at a distance of 5 cm far from the surface of the irradiator in the irradiate mode and for restricted areas, was calculated to be less than 200 µSv/h (maximum permissible radiation level). The results showed that the lead shield of irradiator facility with maximum thickness of 29 cm, easily blocks the emitted gamma rays and working with such a facility would not pose any radiation risk to the employees. Finally, the energy efficiency of the facility was estimated to be about 25% with an increase of about 10.5% due to the addition of external chamber.

Keywords: Grain irradiation, Cobalt-60, Shielding, Dose uniformity ratio, MCNPX

۱. مقدمه

پرتودهی مواد غذایی با پرتوهای گاما و ذرات الکترون از سال ۱۹۸۱ به‌طور هم‌زمان توسط سه نهاد مهم بین‌المللی سازمان غذا و کشاورزی ملل متحد[1] (FAO)، سازمان جهانی بهداشت[2] (WHO) و آژانس بین‌المللی انرژی اتمی[3] (IAEA) مورد تأیید می‌باشد [۱].

امروزه پرتودهی مواد غذایی در کشورهای پیشرفته و بعضی کشورهای در حال توسعه در حال انجام است. از جمله مزایای استفاده از پرتودهی در صنایع غذایی می‌توان به ضدعفونی حشرات و دفع آنها، کاهش بار میکروبی، کنترل عفونت ناشی از انواع انگل‌ها و قارچ‌ها در مواد غذایی، کاهش میکروارگانیسم‌های بیماری‌زا، افزایش زمان ماندگاری یا انبارمانی، حفظ بهتر مواد و ارزش تغذیه‌ای و کیفیت حسی مواد غذایی، تثبیت کیفیت مواد غذایی به مدت طولانی، جلوگیری از ضایعات و هدر رفت درصد زیادی از محصولات غذایی و همچنین عدم آلودگی محصول و محیط زیست اشاره کرد [۱-۳].

معمولاً بدین منظور از دستگاه‌های پرتودهی گاما و الکترون قابل حمل و ثابت حاوی چشمه‌های گسیلنده گاما و شتاب‌دهنده‌های خطی الکترونی استفاده می‌شود. سامانه‌های پرتودهی گامای قابل حمل که جزء پرتودهنده‌های درون‌کار خشک طبقه‌بندی می‌شوند، سیستم‌های تابشی پرتو گاما و دربرگیرنده چشمه‌های مهر و موم شده رادیواکتیو سزیم-۱۳۷ یا کبالت-۶۰ با اکتیویته تا چند ده کیلوکوری می‌باشند که با استفاده از تضعیف‌کننده‌های گامای خشک از قبیل سرب حفاظ‌گذاری شده و در اتاق‌های بدون حفاظ اضافی سربی یا بتونی مورد استفاده قرار می‌گیرند [۴].

پرتودهی غلات و حبوبات جایگاه ویژه‌ای در صنعت پرتودهی مواد غذایی در تمام سامانه‌های پرتودهی ثابت و قابل حمل دارند. پرتودهی غلات و حبوبات بیشتر به منظور افزایش زمان ماندگاری و انبارمانی آنها از طریق دفع حشرات و کاهش بار میکروبی آنها انجام می‌گیرد [۲، ۵، ۶]. سامانه‌های پرتودهی گاما و الکترون ثابت متعددی در ایران وجود دارند که به منظور پرتودهی مواد غذایی، صنعتی و بهداشتی به‌کار می‌روند. از جمله آنها می‌توان سامانه‌های پرتودهی مرکز تابش گامای تهران، مرکز پرتوفرآوری یزد، واحد پرتودهی صنعتی بناب، سامانه پرتودهی الکترون قزوین و تأسیسات پرتودهی گامای چند منظوره شهرکرد را نام برد [۷]. اما تنها سامانه پرتودهی گامای قابل حمل ایران مربوط به سامانه پرتودهی موجود در شهرک صنعتی آذرشهر می‌باشد که این سامانه در سال ۱۳۷۲ به منظور پرتودهی پیاز و سیب‌زمینی از کشور مجارستان خریداری گردید. این سامانه با تغییر کاربری در سال ۱۳۹۸ به منظور پرتودهی فله‌ای حبوبات (لپه و عدس) به‌کار گرفته شد. امروزه این دستگاه با اکتیویته نسبتاً پایین چشمه کبالت-۶۰ (در حدود ۲۰ کیلوکوری)، به منظور ضد عفونی حشرات و افزایش ماندگاری این محصولات و با دبی خروجی نسبتاً پایین به‌کار گرفته شده است.

متأسفانه کارهای تحقیقاتی زیادی در زمینه شبیه‌سازی، طراحی و ساخت سامانه‌های پرتودهی گامای قابل حمل با ظرفیت بالا در کشور انجام نگرفته است. در این کار پژوهشی سعی می‌شود تا با بهره‌گیری از کد MCNPX[4] محاسبات مربوط به طراحی هسته‌ای دستگاه پرتودهی گامای قابل حمل دو محفظه‌ای به منظور پرتودهی غلات و حبوبات در دو بخش نسبت یکنواختی دز و دبی خروجی محصول پرتو دیده و همچنین حفاظ‌گذاری آن طوری محاسبه شود که کار با این دستگاه بتواند استانداردهای پذیرفته شده بین‌المللی برای کار با چنین سیستم پرتودهی گاما را برآورده کند. به منظور افزایش دبی خروجی دستگاه و بالا بردن ظرفیت پرتودهی آن، دستگاه مورد نظر با حداکثر اکتیویته ۱۰۰ کیلوکوری و با دو محفظه پرتودهی درونی و بیرونی طراحی و شبیه‌سازی می‌گردد.

سامانه طراحی شده می‌تواند با پرتودهی محصولات فله‌ای غلات و حبوبات در دزهای پایین و متوسط (تا نهایتاً مقدار توصیه شده ۱۰ کیلوگری برای مواد غذایی)، نسبت به گندزدایی، کنترل جوانه‌زنی و کاهش آفات انباری به منظور افزایش انبارمانی از طریق کاهش بار میکروبی و نابودی میکروارگانیسم‌های آلوده و فسادزای مواد غذایی مورد استفاده قرار گیرد. محصولات قابل پرتودهی از سوی این سامانه شامل غلات و حبوباتی نظیر گندم، جو، چاودار، برنج، نخود، لپه، عدس، لوبیا خواهد بود. همچنین می‌توان از این سامانه به منظور پرتودهی خشکبارهایی نظیر گردو، بادام، پسته، فندق و غیره ... استفاده کرد. در نهایت مشخصات هسته‌ای و فیزیکی دستگاه طراحی شده با سایر دستگاه‌های پرتودهی گامای قابل حمل موجود مقایسه می‌شود.

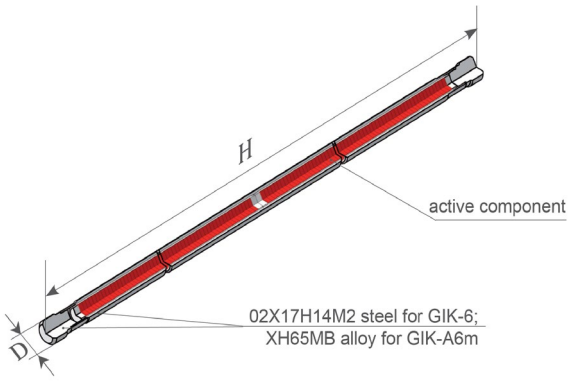
1. Food and Agriculture Organization (FAO)
2. World Health Organization (WHO)
3. International Atomic Energy Organization (IAEA)
4. Monte Carlo N-Particle Transport Code (MCNP)

۲. مواد و روش‌ها

۱.۲ محفظه‌ها و قفسه نگه‌دارنده چشمه‌های میله‌ای کبالت-۶۰ دستگاه

به منظور حداکثر استفاده از ظرفیت پرتودهی دستگاه و جلوگیری از هدر رفت انرژی پرتوهای گامای ساطع شده از آن و افزایش بازده پرتودهی، دستگاه مورد نظر شامل دو محفظه پرتودهی در داخل چشمه‌های پرتودهی (محفظه درونی) و اطراف آنها (محفظه بیرونی) طراحی گردید. همچنین به منظور حصول هرچه بیشتر میزان یکنواختی دز تحویلی به محصول و جذب یکنواخت‌تر پرتوهای یونیزان در تمام بخش‌های هر دو محفظه پرتودهی، دستگاه مورد نظر در قطر بهینه محاسبه شده با تعداد ۱۸ چشمه میله‌ای کبالت-۶۰ طراحی گردید که به‌صورت استوانه‌ای بین دو محفظه پرتودهی درونی و بیرونی چیده شده‌اند.

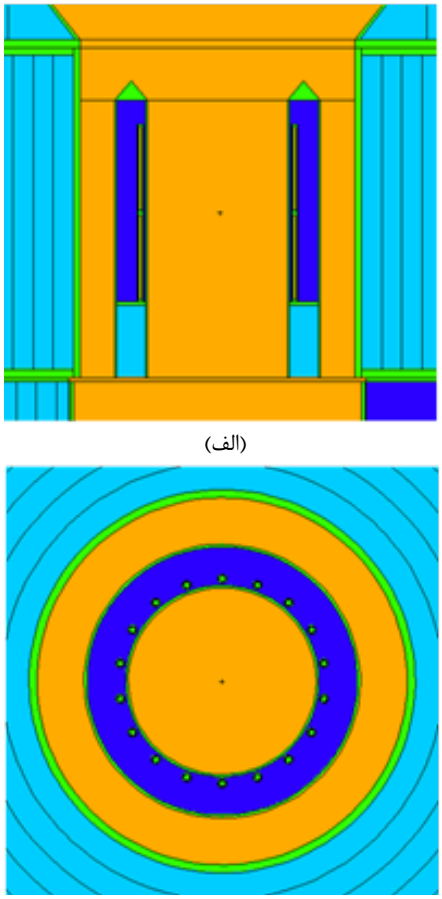
محفظه داخلی در احاطه ۱۸ میله کبالت-۶۰ و محفظه خارجی محیط بر این ۱۸ چشمه میله‌ای کبالت-۶۰ می‌باشد. به علت فراوانی و در دسترس بودن چشمه‌های میله‌ای کبالت-۶۰ نسبت به چشمه‌های میله‌ای سزیم-۱۳۷ و از همه مهم‌تر قیمت پایین‌تر چشمه‌های کبالت-۶۰ و همچنین تعداد و انرژی بالای پرتوهای گامای ساطع شده از چشمه کبالت-۶۰ در مقایسه با چشمه سزیم-۱۳۷ در هر واپاشی (دو پرتو گامای ۱٫۱۷ و ۱٫۳۳ مگاالکترون‌ولت چشمه کبالت-۶۰ در مقابل تک پرتوی گامای ۰٫۶۶۲ مگاالکترون‌ولت چشمه سزیم-۱۳۷) و به طبع آن قدرت نفوذ بالا و آهنگ تحویل دز بالای پرتوهای گامای چشمه کبالت-۶۰، چشمه‌های میله‌ای کبالت-۶۰ در این طراحی به‌کار گرفته شدند [۸]. بدین‌منظور از چشمه‌های میله‌ای کبالت-۶۰ مدل GIK-A۶m شرکت مایاک[5] روسیه و با ظرفیت ۱۰۰ کیلوکوری استفاده شد. این چشمه‌ها به ارتفاع ۴۵٫۱۶ سانتی‌متر (H) و قطر ۱٫۱۱ سانتی‌متر (D) به‌صورت تجاری توسط شرکت نامبرده به بازار ارائه می‌شوند [۹]. همان‌طور که در شکل ۱ نشان داده شده است، مواد رادیواکتیو کبالت-۶۰ (بخش به رنگ قرمز) در فضایی استوانه‌ای‌شکل به ارتفاع حدود ۴۳٫۹۶ سانتی‌متر و قطر ۷٫۳ میلی‌متر در درون میله‌های فولادی نگه‌دارنده مواد رادیواکتیو جاگذاری شده‌اند.



شکل ۱. نمایش هندسی چشمه میله‌ای کبالت-۶۰ مدل GIK-A۶m ساخت شرکت مایاک روسیه [۹].

در هماهنگی با قطرهای بهینه محاسبه شده برای محفظه‌های درونی و بیرونی برای حصول حدود دز معین، محفظه‌های پرتودهی مطابق با لوله‌های فولادی ضدزنگ موجود در بازار شامل سه لوله داخلی، وسطی و خارجی به ترتیب به قطرهای خارجی برابر با ۳۵٫۵۶ سانتی‌متر (ضخامت ۴٫۷۸ میلی‌متر)، ۵۰٫۸۰ سانتی‌متر (ضخامت ۵٫۵۴ میلی‌متر) و ۷۱٫۱۰ سانتی‌متر (ضخامت ۱٫۵ میلی‌متر) طراحی گردید. فضاهای داخل لوله داخلی، مابین لولهٔ داخلی و وسطی و همچنین مابین لوله وسطی و لوله خارجی به ترتیب به عنوان محفظه درونی، محفظه چشمه‌ها و محفظه بیرونی در نظر گرفته شدند. قطر داخلی محفظه درونی ۳۴٫۶ سانتی‌متر (شعاع ۱۷٫۳ سانتی‌متر) و ضخامت محفظه بیرونی (حدفاصل لوله‌های وسطی و خارجی) ۸٫۶۵ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. فضای خالی به ضخامت یک میلی‌متر نیز بین میله‌های کبالت-۶۰ و جایگاه‌های فولادی نگه‌دارنده آنها جهت سهولت در جابه‌جایی و تعویض چشمه‌های میله‌ای کبالت-۶۰ در نظر گرفته شد. در شکل ۲ هر دو محفظه درونی و بیرونی در بخش روبه‌روی چشمه‌ها همراه با چشمه‌های میله‌ای کبالت-۶۰ نشان داده شده است. نواحی نارنجی‌رنگ نشان‌دهنده محفظه‌های درونی و بیرونی عبور محصول است. همچنین چشمه‌های میله‌ای کبالت-۶۰ با رنگ زرد و نزدیک محفظه درونی نشان داده شده‌اند. ورقه‌های فولادی به رنگ سبز و سرب به عنوان حفاظ و به رنگ آبی روشن نشان داده شده است. هوای داخل قفسه چشمه نیز به رنگ آبی تیره نشان داده شده است.

5. MAYAK



(الف)

(ب)

شکل ۲. موقعیت محفظه‌های پرتودهی نسبت به میله‌های چشمه‌ای کبالت-۶۰. دو برش مقطعی X-Z (الف) و X-Y (ب).

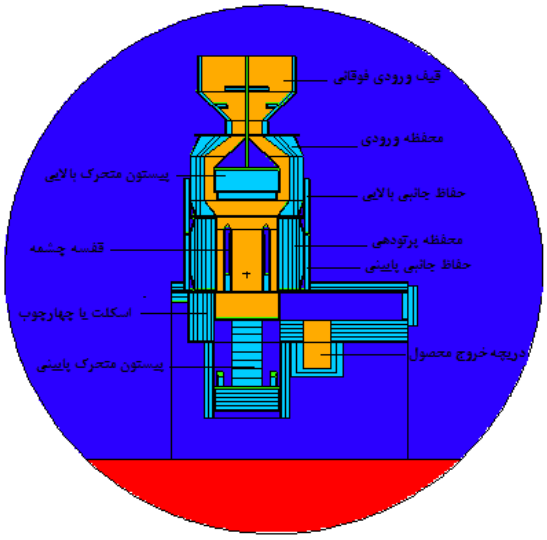
۲.۲ حفاظ سربی دستگاه پرتودهی گامای قابل حمل دو محفظه‌ای با ظرفیت ۱۰۰ کیلوکوری

به منظور حفاظت اپراتورهای دستگاه در برابر پرتوهای گامای گسیل شده از آن، ضروری است تا قفسه چشمه حامل میله‌های کبالت-۶۰ به‌صورت کامل حفاظ‌گذاری شود. به‌طور معمول برای این‌کار از فلز سرب با عدد اتمی ۸۲ و چگالی بالا به منظور ساخت حفاظ استفاده می‌شود [۱۰]. در این شبیه‌سازی از ورق‌هایی از جنس فولاد زنگ نزن شماره ۳۰۴ و ضخامت ۱ سانتی‌متر و چگالی ۷٫۹۲ گرم بر سانتی‌متر مکعب به منظور استحکام مکانیکی دستگاه و برای نگه‌داری قطعات سربی استفاده شد.

برای حفاظ‌گذاری دستگاه از بدنه اصلی سربی (شامل قفسه چشمه‌های میله‌ای کبالت-۶۰ و محفظه‌های پرتودهی)، پیستون‌های سربی بالایی و پایینی متحرک، محفظه ورودی استوانه‌ای بالای بدنه اصلی، قیف ورودی فوقانی، اسکلت یا چهارچوب پایینی حامل کانوایرهای بیرون کشنده غله و حفاظ‌های جانبی (تنوره‌ها) متشکل از فولاد و سرب استفاده شد. همچنین به منظور حرکت آزاد و بدون زحمت پیستون‌های سربی بالایی و پایینی، حدود ۲ میلی‌متر فاصله بین درپوش‌ها با بدنه اصلی حفاظ سربی و قفسه حامل چشمه‌ها در نظر گرفته شد.

در شکل ۳ شمای کلی از سامانه طراحی و شبیه‌سازی شده نشان داده می‌شود. رنگ‌های قرمز، نارنجی، سبز، آبی روشن و آبی تیره به ترتیب نشان‌دهندهٔ بتن زیر دستگاه، محصول پرتودهی شونده، فولاد ضدزنگ، سرب و هوا می‌باشند. سعی گردید به منظور محاسبه و ملاحظه پرتوهای گامای برگشتی و پراکنده شده از زیر دستگاه، بتن زیر دستگاه نیز در شبیه‌سازی‌ها مدنظر قرار گیرد. همچنین به منظور صرفه‌جویی در مصرف سرب و کاهش هزینه‌ها و همچنین کاهش وزن دستگاه، بخش‌های مربوط به بدنه اصلی سربی و حفاظ استوانه‌ای بالای بدنه اصلی به‌صورت مخروطهایی ناقص در نظر گرفته شدند.

پرتودهی محصول (حبوبات و غلات) در این سامانه به این طریق است که محصول ابتدا به وسیله یک کانوایر به قیف ورودی فوقانی (با ظرفیت تقریبی حدود ۶۰۰ لیتر) که در دهانه دستگاه تعبیه شده انتقال می‌یابند. محصول پس از خروج از قیف ورودی، در اثر گرانش از محفظه ورودی عبور کرده و در داخل محفظه پرتودهی، با عبور از اطراف قفسه چشمه (محفظه‌های پرتودهی درونی و بیرونی) تحت پرتودهی قرار می‌گیرد. در نهایت محصول توسط دو کانوایر مارپیچی جداگانه، از قسمت زیرین محفظه پرتودهی و از طریق دو مسیر جداگانه از سامانه خارج می‌شود.



شکل ۳. شمای کلی از سامانه پرتودهی گامای قابل حمل دو محفظه‌ای با ظرفیت ۱۰۰ کیلوکوری.

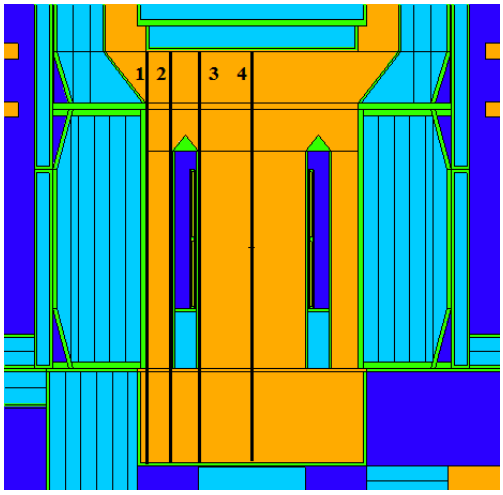
۳.۲ شبیه‌سازی با کد MCNPX، محاسبات و استانداردهای مربوطه

در این مطالعه برای ترابرد پرتوهای گامای گسیل شده از چشمه و به منظور محاسبه نسبت یکنواختی دز در داخل محفظه درونی و بیرونی دستگاه پرتودهی گامای قابل حمل و همچنین حفاظ‌گذاری دستگاه از کد مونت‌کارلوی شبیه‌سازی MCNPX استفاده می‌شود. این کد محاسباتی چند منظوره از کتابخانه‌های تجربی و نظری دقیق مربوط به سطح‌مقطع هسته‌ای و مدل‌های فیزیکی برای برهم‌کنش‌های ذرات بهره می‌برد. این کد با استفاده از روش مونت‌کارلو برای شبیه‌سازی برهم‌کنش انواع تابش‌ها با ماده و ترابرد آن‌ها در تمام انرژی‌ها به‌کار رفته و مقدار تالی مورد نظر را با خطای معین فراهم می‌کند [۱۱].

از کمیتی به نام نسبت یکنواختی دز[6] (DUR) به منظور بررسی میزان یکنواختی دز تحویل داده شده به محصول در داخل دستگاه پرتودهی استفاده خواهد شد. این کمیت نسبت بیشترین مقدار دز دریافتی محصول به کمترین دز دریافتی همان محصول را بعد از پرتودهی و در خروجی سامانه پرتودهی به‌دست می‌دهد. هرچقدر این کمیت به عدد ۱ نزدیک باشد میزان یکنواختی دز تحویلی به تمام بخش‌های محصول پرتودهی‌شونده در داخل دستگاه پرتودهی یکسان و ایده‌ال است [۱۲].

ازآنجایی‌که نسبت یکنواختی دز به‌صورت نسبت بیشینه دز دریافتی محصول به کمینه دز دریافتی همان محصول در بعد از پرتودهی و در خروجی سامانه پرتودهی تعریف می‌شود، لذا برای محاسبه آن، محافظه‌کارانه‌ترین مسیرهای ممکن عبور محصول از داخل سیستم پرتودهی به منظور محاسبه بیشترین مقدار ممکن در نظر گرفته شدند. در این سامانه محصول نوعی پرتودهی شونده در حال حرکت بوده و در زمان‌های مختلف در داخل این میدان تابش با آهنگ دزهای مختلف قرار خواهد داشت. در شکل ۴ مسیرهای عبوری به‌صورت زیر شماره‌گذاری شده‌اند:

- مسیر شماره ۱: دورترین فاصله از چشمه در محفظه بیرونی می‌باشد که کمترین دز پرتوگیری ممکن را در این محفظه خواهد داشت.
- مسیر شماره ۲: نزدیک‌ترین فاصله به چشمه در محفظه بیرونی می‌باشد که بیشترین دز پرتوگیری ممکن را در این محفظه خواهد داشت.
- مسیر شماره ۳: نزدیک‌ترین فاصله به چشمه در محفظه درونی می‌باشد که بیشترین دز پرتوگیری ممکن را در این محفظه خواهد داشت.
- مسیر شماره ۴: دورترین فاصله از چشمه در محفظه درونی است که منطبق بر محور محفظه درونی نیز می‌باشد و کمترین دز پرتوگیری ممکن را در این محفظه خواهد داشت.



شکل ۴. موقعیت مسیرهای عبوری ممکن برای محاسبه بیشترین مقدار کمیت نسبت یکنواختی دز (DUR).

مش‌تالی مکعب مستطیلی نوع ۳ (RMESH۳ total) جهت محاسبه میزان دز دریافتی محصول در نقاط مختلف محفظه‌های پرتودهی و به تبع آن محاسبه نسبت یکنواختی دز و دبی خروجی محصول در خروجی سامانه مورد استفاده قرار گرفت. این نوع مش‌تالی انرژی انباشته شده از تمام ذرات را در حجم هر پیکسل محاسبه می‌کند و خروجی را برحسب واحد MeV/cm^3 ارائه می‌دهد [۱۱]. برای تبدیل خروجی کد به میزان دز جذب شده در هر پیکسل برحسب گری در این نوع تالی، خروجی کد را باید به چگالی محصول مورد پرتودهی تقسیم کرد و از ضرایب مشخص برای تبدیل MeV به ژول استفاده کرد. همچنین پیکسل‌ها با ابعاد mm^3 ۳×۳×۳ معادل ابعاد یک لپه (محصول فرضی مورد نظر) جهت پرتودهی در نظر گرفته شدند.

با توجه به سند مؤسسه استانداردهای ملی آمریکا به شماره ۴۳/۷ (ANSI/HPS N۴۳/۷) و تحت عنوان طراحی و به‌کارگیری ایمن پرتودهنده‌های درون کار خشک (دسته شماره ۱)، میزان دز مجاز نشتی در فاصله ۵ سانتی‌متری از سطح دستگاه پرتودهنده برای نواحی محدود (محصور) نشده و محدود شده و در مد پرتودهی (حالت روشن و کارکرد دستگاه) به ترتیب باید کمتر از ۲۰ و ۲۰۰ میکروسیورت بر ساعت باشد [۱۳]. به منظور محاسبه میزان دز نشتی در این فاصله از سطح دستگاه و محاسبه حفاظ لازم، از دزیمترهایی از جنس آب و همچنین تالی F۸* استفاده گردید. این تالی نیز میزان انرژی به‌جا گذاشته شده از هر نوع تابش را در حجم سلول مورد نظر محاسبه کرده و برحسب مگا الکترون ولت ارائه می‌دهد [۱۱]. برای به‌دست آوردن میزان دز جذب شده در هر سلول دزیمتری

6. Dose Uniformity Ratio (DUR)

برحسب گری، باید انرژی جذب شده در آن سلول دزیمتری برحسب ژول را به جرم آن سلول برحسب کیلوگرم تقسیم کرد. در ادامه با رسم نمودارهای آهنگ دز برحسب ضخامت ماده حفاظ (سرب) و همچنین ملاحظه حداکثر میزان مجاز آهنگ دز نشتی طبق استاندارد مربوطه، ضخامت مناسب حفاظ برای بخش‌های مختلف دستگاه محاسبه گردید.

همچنین به منظور محاسبه بازده انرژی سامانه طراحی شده برای پرتودهی محصول عبوری از آن (از لحظه ورود محصول به قیف فرودی فوقانی تا لحظه خروج از سامانه)، از تالی F8* استفاده گردید. بدین منظور انرژی به‌جا گذاشته شده در هر دو محفظه درونی و بیرونی (محل اصلی پرتودهی محصول) و همچنین بقیه بخش‌های سامانه به کل انرژی خارج شده از چشمه‌های میله‌ای کبالت-۶۰ تقسیم شده و بازده انرژی سامانه پرتودهی محاسبه می‌گردد.

از کارت‌های POS، ERG، RAD و EXT به ترتیب برای توصیف موقعیت مکانی، انرژی ذرات، شعاع و ضخامت چشمه‌های میله‌ای کبالت-۶۰ در بلوک داده و کارت SDEF استفاده شد. چشمه کبالت-۶۰ به‌صورت چشمه فوتونی همگن و همسانگردی در نظر گرفته شد که به طور هم‌زمان در هر واپاشی دو پرتو گامای ۱٫۱۷ و ۱٫۳۳ مگاالکترون‌ولت گسیل می‌کند [۸]. همچنین فرض گردید که تمام ۱۸ چشمه میله‌ای کبالت-۶۰ دارای قدرت یکسان (جمعاً ۱۰۰ کیلوکوری) می‌باشند که به‌صورت همگن و همسانگرد پرتوهای گاما را در تمام جهت‌ها گسیل می‌کنند.

شبیه‌سازی برای حصول نتایج از هر دو تالی نام برده در بالا، با استفاده از حدود ۲ میلیارد تاریخچه دنبال شد و نتایج با خطای کمتر از ۵ درصد گزارش گردید. برای کاهش خطای آماری از روش تقسیم هندسه استفاده شد که این روش سعی می‌کند تا از طریق بالا بردن اهمیت ترابرد ذرات در سلول‌های نزدیک به ناحیه تالی خطای آماری را کاهش دهد [۱۱].

همچنین لازم به ذکر است که طبق توصیه‌های مراجع معتبر بین‌المللی در رابطه با کاربرد پرتوها در صنایع غذایی (آژانس بین‌المللی انرژی اتمی (IAEA) و سازمان غذا و داروی ایالات متحده آمریکا[۱] (FDA)، دز پرتو گامای مورد استفاده جهت افزایش زمان ماندگاری و افزایش انبارمانی غلات از طریق دفع حشرات و از بین بردن تخم و لاور آنها کمتر از ۱ کیلوگری توصیه می‌شود [۵، ۶]. همچنین حداقل دز مورد نیاز برای افزایش زمان انبارمانی محصول مورد نظر (لپه)، حدود ۳۰۰ گری در نظر گرفته می‌شود. بنابراین محاسبات دبی خروجی در این مطالعه با این فرض انجام می‌گیرد که محصول نوعی مورد نظر (لپه) بین ۳۰۰ تا ۱۰۰۰ گری دز دریافت کند.

۳. نتایج

۱.۳ محاسبات دبی خروجی و نسبت یکنواختی دز (DUR) سامانه پرتودهی گامای قابل حمل دو محفظه‌ای

سامانه پرتودهی مورد نظر با ۱۸ میله کبالت-۶۰ به طول تقریبی ۴۶ سانتی‌متر و مجموعاً به ظرفیت ۱۰۰ کیلوکوری اکتیویته چشمه کبالت-۶۰ و به‌صورت دو محفظه پرتودهی استوانه‌ای درونی و بیرونی طراحی گردید. متوسط آهنگ دز دریافتی در چهار مسیر شماره ۱، ۲، ۳ و ۴ به ترتیب حدود ۰٫۶۷، ۱٫۴۶، ۲٫۶۵ و ۱٫۵ گری بر ثانیه به‌دست آمدند. متوسط آهنگ دز دریافتی در مسیر ۲ نسبت به مسیر ۱ مقدار ۲٫۱۸ و متوسط آهنگ دز دریافتی در مسیر ۳ نسبت به مسیر ۴ مقدار ۱٫۷۷ به دست می‌آید که به ترتیب نشان‌دهنده نسبت یکنواختی دز برای محفظه خارجی برابر ۲٫۱۸ و محفظه داخلی ۱٫۷۷ می‌باشند. شایان ذکر هست که با در نظر گرفتن هر دو محفظه درونی و بیرونی (کل دستگاه پرتودهی‌کننده)، نسبت یکنواختی دز کل سامانه پرتودهی برابر ۲٫۱۸ محاسبه می‌گردد. فرض گردید که قبل از ورود محصول به این چهار مسیر با بیشترین و کمترین میزان پرتوگیری ممکن، محصول مورد پرتودهی مسیرهای مشابهی از لحظه بارگیری (قیف ورودی فوقانی) در سامانه پرتودهی تا رسیدن به این چهار مسیر طی کرده و دز یکسانی دریافت کرده باشد. البته این فرض، فرض معقولی می‌باشد، زیرا محاسبات حاصل از شبیه‌سازی نشان داد که دز میانگین در این مسیر مشترک (از لحظه وارد شدن لپه به مخزن قیف فوقانی تا ابتدای مسیرهای چهارگانه) بسیار کم و در حدود ۰٫۰۱ گری بر ثانیه می‌باشد که در مقایسه با دز ناشی از مسیرهای نام برده بسیار کوچک و قابل اغماض می‌باشد.

به منظور محاسبه دبی خروجی، محصول مورد پرتودهی به‌طور فرضی لپه و با چگالی فله‌ای حدود ۸۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب در نظر گرفته شد. در محاسبات دبی و سرعت عبور محصول پرتودهی شونده فرض گردید که طبق مقادیر مجاز توصیه شده توسط مراجع معتبر بین‌المللی به منظور انبارمانی و آلودگی‌زدایی حشرات از محصول لپه، همه جای محصول حداقل ۳۰۰ گری دز از پرتوهای گاما دریافت کرده باشد. همچنین طبق توصیه‌های آژانس بین‌المللی انرژی اتمی (IAEA) و سازمان غذا و داروی ایالات متحده آمریکا (FDA)، میزان دز

7. Food and Drug Administration (FDA)

تحویلی به غلات به منظور افزایش زمان انبارمانی و دفع حشرات نباید بیشتر از ۱ کیلوگری باشد [۲].

بنابراین با در نظر گرفتن حداقل دز جذبی ۳۰۰ گری برای پرتودهی محصول نوعی لپه، بیشترین دز جذبی لپه در این سامانه نوعی حدود ۶۵۶ گری (۳۰۰×۲٫۱۸) خواهد بود که کاملاً زیر حدود توصیه شده (کمتر از ۱ کیلوگری) توسط مراجع معتبر بین‌المللی برای پرتودهی غلات و حبوبات به منظور افزایش زمان انبارمانی و دفع حشرات می‌باشد.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، بیشترین دز دریافتی در داخل محفظه درونی و مسیر عبوری نزدیک چشمه و مماس بر آن (مسیر شماره ۳) و کمترین دز دریافتی در داخل محفظه بیرونی و دور از چشمه‌ها (مسیر شماره ۱) اتفاق می‌افتد. همچنین مشاهده می‌شود که دز دریافتی در محفظه درونی بیشتر از محفظه بیرونی می‌باشد. لذا به منظور یکنواخت‌تر شدن نسبت دز دریافتی، باید از دو کانوایر جداگانه برای بیرون کشیدن محصول از محفظه‌های درونی و بیرونی استفاده شود تا محصول عبوری از محفظه درونی بتواند با سرعت بیشتری حرکت کند. حجم مؤثر محفظه‌های درونی و بیرونی به ترتیب در حدود ۱۲۷ و ۲۱۶ لیتر می‌باشد. با فرض حداقل دز جذبی ۳۰۰ گری برای پرتودهی غله نوعی (لپه)، سرعت حرکت محصول در دو محفظه درونی و بیرونی به ترتیب برابر ۰٫۶۷ و ۰٫۳۰ سانتی‌متر بر ثانیه محاسبه شد. در نهایت دز دریافتی لپه در حین حرکت از مسیرهای شماره ۱، ۲، ۳ و ۴ با سرعت پیش‌بینی شده در بالا به ترتیب حدود ۳۰۰ و ۶۵۶ گری برای محفظه بیرونی و ۳۰۰ و ۵۳۱ گری برای محفظه درونی خواهد بود. در نهایت میزان دبی خروجی لپه با سرعت‌های محاسبه شده در دو محفظه درونی و بیرونی، در محافظه‌کارانه‌ترین حالت ممکن به ترتیب حدود ۱۸۱۹ و ۱۳۹۶ کیلوگرم بر ساعت از طریق شبیه‌سازی با کد MCNPX به‌دست می‌آید. دبی کل دو محفظه نیز حدود ۳۲۱۵ کیلوگرم در هر ساعت (حدود ۳٫۲ تن در ساعت)، ۷۷ تن در روز، ۲۳۱۵ تن در ماه و ۲۸ هزار تن در سال می‌باشد. لازم به ذکر است که میزان افزایش دبی چنین سامانه دو محفظه‌ای با اکتیویته چشمه کبالت-۶۰ حدود ۱۰۰ کیلوکوری، نسبت به حالت تک‌محفظه‌ای با همان مقدار اکتیویته (با در نظر گرفتن فقط محفظه درونی)، حدود ۱۷۶ درصد (نزدیک دو برابر) می‌باشد.

شایان ذکر است که طبق اندازه‌گیری‌های تجربی انجام گرفته در مجتمع پرتوفرایند شمال‌غرب کشور (بناب) روی سیستم‌های قبلی سامانه‌های پرتودهی پرتابل با محفظه‌های استوانه‌ای‌شکل، حدود ۲۵ درصد اختلاف بین نسبت یکنواختی دز محاسبه شده از طریق شبیه‌سازی و اندازه‌گیری تجربی وجود دارد. این اختلاف عمدتاً ناشی از در نظر گرفتن محافظه‌کارانه‌ترین مسیرهای عبوری ممکن لپه به منظور به‌دست آوردن کمترین و بیشترین حد دز دریافت شده (برای محاسبه بیشترین مقدار کمیت نسبت یکنواختی دز) در حالت شبیه‌سازی می‌باشد. این در حالی است که مطمئناً لپه قرار گرفته در ابتدای مسیرهای چهارگانه نشان داده شده در شکل ۴، ترجیحاً تا آخرین لحظه خروج از سامانه پرتودهی روی مسیرهای مستقیم ترسیم شده حرکت نکرده و به‌صورت کاتوره‌ای نزدیک و یا دور از چشمه‌ها جابه‌جا خواهد شد. با احتساب این مقدار اختلاف بین نتایج تجربی و شبیه‌سازی حاصل از اندازه‌گیری‌های قبلی، میزان دبی خروجی تجربی و واقعی دستگاه حدود ۴ تن در ساعت و نزدیک ۱۰۰ تن در روز پیش‌بینی می‌شود.

از طرفی با توجه به این‌که چگالی فله‌ای غله گندم نزدیک چگالی فله‌ای لپه و در حدود ۷۷۰ کیلوگرم بر مترمکعب می‌باشد [۱۴] و همچنین با توجه به این‌که متوسط مصرف سرانه گندم در کشور حدود ۳۲۰ گرم در روز می‌باشد [۱۵]، لذا با چنین دستگاه طراحی شده‌ای (با دبی خروجی حدود ۱۰۰ تن در روز)، می‌توان گندم جمعیت ساکن یک شهر حدود ۳۰۰ هزار نفری را پرتودهی نمود.

۲.۳ بازده انرژی سامانه و پروفایل دز در داخل محفظه‌ها

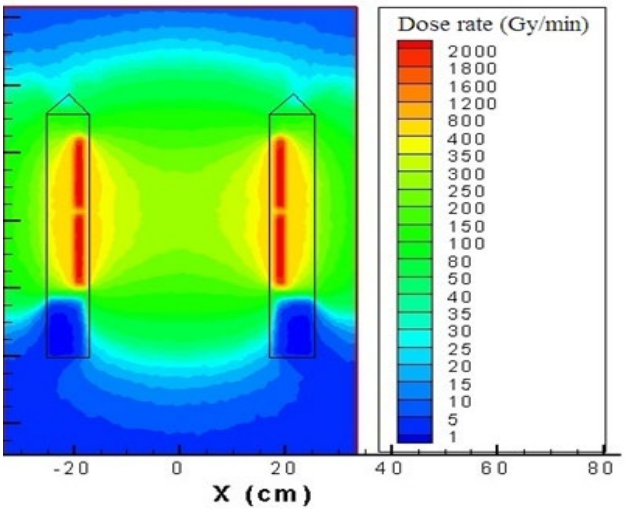
نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان می‌دهند که سامانه پرتودهی گامای قابل حمل دو محفظه‌ای طراحی شده دارای بازده انرژی کل حدود ۲۵ درصد می‌باشد. به عبارتی محصول پرتودهی شونده از لحظه ورود محصول به قیف فرودی فوقانی تا لحظه خروج از سامانه حدود ۲۵ درصد از انرژی پرتوهای گامای گسیلی از چشمه‌های میله‌ای کبالت-۶۰ را جهت افزایش زمان انبارمانی و ضدعفونی حشرات جذب می‌کند و ۷۵ درصد باقی‌مانده انرژی گسیلی چشمه‌ها در بخش‌های مختلف سربی و فولادی دستگاه جذب شده و به حرارت تبدیل می‌شود. بخش بسیار ناچیزی (۲×۱۰^{-۵} درصد) از این انرژی نیز از سامانه نشت کرده و در هوا و اتاق شامل سامانه جذب خواهد شد.

لازم به ذکر است که حدود ۱۱٫۹ و ۱۰٫۴ درصد انرژی گسیلی چشمه‌ها به ترتیب در دو محفظه درونی و بیرونی (محل اصلی پرتودهی محصول) به جا گذاشته خواهند شد (مجموعاً ۲۲٫۳ درصد در دو محفظه از ۲۵ درصد بازده کل سامانه).

همچنین در شکل ۵ پروفایل دز بر روی یک مقطع مستطیلی‌شکل عبوری از محور محفظه‌های درونی و بیرونی نشان داده شده است. سطح محاط شده در کادر سیاه رنگ، نشان‌دهنده قفسه چشمه‌ها می‌باشد که قسمت قرمزرنگ نشان‌دهنده چشمه‌ها می‌باشد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در فضای مربوط به محفظه‌ها بیشترین میزان دز جذبی در نزدیکی چشمه‌های میله‌ای کبالت-۶۰ و چسبیده به دیواره محفظه‌ها اتفاق می‌افتد (حدود ۸۰۰ تا ۱۰۰۰ گری بر دقیقه). در محور محفظه پرتودهی درونی و همچنین دیواره خارجی محفظه بیرونی و دور از چشمه‌ها میزان دز دریافتی محصول افت می‌کند (حدود ۱۰۰ گری بر دقیقه). محصول پرتودهی شونده با عبور از داخل این میدان تابشی گاما با سرعت‌های محاسبه شده در بالا و دریافت دزهای مختلف، نهایتاً در خروجی دستگاه بین ۳۰۰ تا ۶۵۶ گری دز دریافت خواهد کرد که در این‌صورت نسبت یکنواختی دز در حدود ۲٫۱۸ محاسبه می‌گردد.

۳.۳ حفاظ‌گذاری دستگاه پرتودهی گامای قابل حمل دو محفظه‌ای

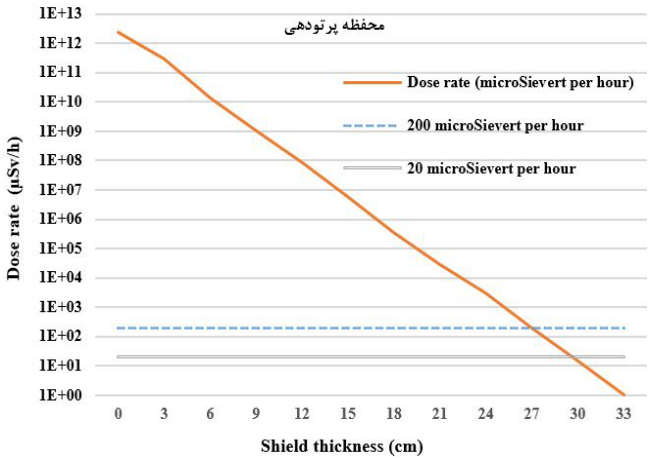
سامانه پرتودهی گامای قابل حمل مورد نظر طوری طراحی گردید تا در مواقع جاگذاری چشمه‌ها و جابه‌جایی آن، بتوان محفظه پرتودهی سامانه پرتودهی قابل حمل (قلب دستگاه پرتودهنده) را به‌راحتی باز و بسته کرد طوری‌که این بخش از دستگاه بتواند مستقل عمل کند و در عین حال خطری را از لحاظ پرتوگیری متوجه کارکنان و پرسنل ننماید. در این نوع طراحی محفظه پرتودهی و پیستون‌های متحرک بالایی و پایینی آن به منظور جابه‌جایی ایمن چشمه، به‌صورت یکپارچه طراحی گردید.



شکل ۵. پروفایل در داخل هر دو محفظه پرتودهی درونی و بیرونی سامانه پرتودهی پرتابل با ظرفیت ۱۰۰ کیلوکوری.

در شکل ۶ نمودار آهنگ دز برحسب ضخامت حفاظ سربی برای بخش محفظه پرتودهی سامانه آورده شده است. همچنین بیشینه حدود دز مجاز ۲۰۰ و ۲۰ میکروسیورت بر ساعت به ترتیب برای نواحی محدود شده و محدود نشده به‌صورت خط راست در این نمودار نشان داده شده اند. همان‌طورکه در شکل ۶ نشان داده شده است، برای حفاظ‌گذاری محفظه پرتودهی، طبق محاسبات کد MCNPX حدود ۲۷ سانتی‌متر سرب مورد نیاز است که بین دو استوانه‌ای فولادی به ضخامت‌های ۱٫۵ سانتی‌متر (دیواره بیرونی) و ۱٫۲۷ سانتی‌متر (دیواره درونی) قرار بگیرد، تا در نواحی محدود شده آهنگ دز معادل در بیرون محفظه پرتودهی در مد پرتودهی (به اصطلاح حالت ON و کارکرد دستگاه) و در فاصله حدود ۵ سانتی‌متری از آن (چسبیده به محفظه پرتودهی و بدون در نظر گرفتن تنوره) به کمتر از ۲۰۰ میکروسیورت بر ساعت (حدود ۱۹۷٫۵ میکروسیورت بر ساعت بدون در نظر گرفتن فولادهای نگه‌دارنده حفاظ سربی) برسد.

همچنین استفاده از حفاظ جانبی (تنورهٔ استوانه‌ای) اضافی با ضخامت ۶ سانتی‌متر متشکل از فولادهای زنگ نزن داخلی و خارجی نگه‌دارنده سرب هر کدام به ضخامت ۱ سانتی‌متر و ۴ سانتی‌متر سرب مابین آنها در دور محفظه اصلی، کافی خواهد بود تا دز جذبی را در فاصله ۵ سانتی‌متری از حفاظ جانبی پایینی به زیر ۲۰ میکروسیورت بر ساعت (حدود ۱۵ میکروسیورت بر ساعت) یعنی حداکثر سطح مجاز دز خروجی از دستگاه برای نواحی محدود نشده و در مد کاری پرتودهی تقلیل دهد. لازم به ذکر است که به‌طور محافظه‌کارانه مد پرتودهی دستگاه را بدون در نظر گرفتن محصول لپه در داخل آن در نظر گرفتیم. مطمئناً وجود محصول پرتودهی شونده در داخل دستگاه تأثیر بسزایی در کاهش آهنگ دز نشتی و مقدار محاسبه شده در حالت بدون محصول خواهد داشت.



شکل ۶. نمودار آهنگ دز برحسب ضخامت سربی برای محفظه پرتودهی.

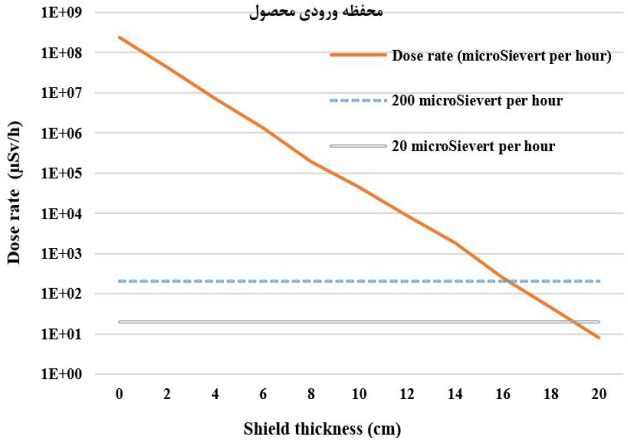
همچنین به منظور حفاظ‌گذاری در بخش بالایی و پایینی محفظه پرتودهی، علاوه بر پیستون‌های سربی بالایی و پایینی، لازم است که در بخش بالای محفظه پرتودهی، حفاظی در اطراف محفظه ورودی محصول و همچنین در بخش پایین محفظه پرتودهی (چهارچوب سامانه) حفاظ‌های سربی مناسب طراحی گردند.

در شکل ۷ نمودار آهنگ دز برحسب ضخامت حفاظ سربی برای بخش محفظه ورودی محصول سامانه آورده شده است. همان‌طورکه در شکل ۷ نشان داده شده است، برای حفاظ‌گذاری محفظه ورودی محصول، طبق محاسبات کد MCNPX حدود ۱۷ سانتی‌متر حفاظ سربی لازم است تا آهنگ دز خروجی در سطح بیرونی محفظه پرتودهی محصول به کمتر از ۲۰۰ میکروسیورت بر ساعت کاهش یابد. شایان ذکر است که علاوه بر ۱۷ سانتی‌متر سرب، ۲ سانتی‌متر فولادهای زنگ نزن داخلی و خارجی نگه‌دارنده سرب نیز آهنگ دز خروجی را به حدود ۳۲ میکروسیورت بر ساعت کاهش خواهند داد. در این مورد نیز به‌طور محافظه‌کارانه، مد پرتودهی دستگاه را بدون در نظر گرفتن محصول لپه در داخل آن در نظر گرفتیم.

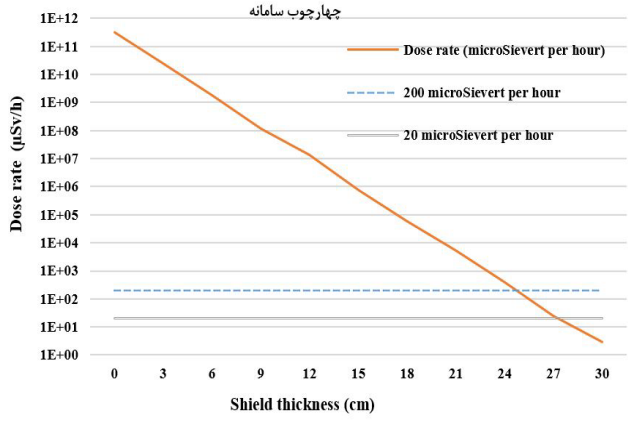
به منظور سد پرتوهای گامای نشتی از محل اتصال محفظه ورودی محصول و محفظه پرتودهی، تنوره بالایی (حفاظ جانبی استوانه‌ای) مشابه با تنوره پایینی و با ضخامت حدود ۶ سانتی‌متر در اطراف محل وصل شدن این دو محفظه تعبیه گردید. این حفاظ میزان آهنگ دز نشتی در محل اتصال دو محفظه را به کمتر از ۶۰ میکروسیورت بر ساعت کاهش داد. در ادامهٔ طراحی حفاظ بخش بالایی محفظه پرتودهی سامانه، به منظور جلوگیری از نشت و خروج اشعه و به حداقل رساندن ریسک پرتوگیری پرتوکاران، قطر گردن قیف ورودی نیز در باریک‌ترین بخش آن حدود ۳۳ سانتی‌متر محاسبه شده و حفاظ بخش محفظه ورودی در زیر بخش گردن قیف با زاویه حدود ۵۴ درجه به سمت داخل خم شده و حفاظ‌گذاری گردید. این نوع طراحی حفاظ باعث گردید تا آهنگ دز خروجی در اطراف گردن قیف به کمتر از ۲۰ میکروسیورت بر ساعت برسد.

در بخش پایین محفظه پرتودهی (چهارچوب دستگاه) نیز، حفاظ‌های سربی از ضخامت ۱۰ تا ۲۹ سانتی‌متر بسته به فاصله و موقعیت از چشمه‌ها طوری طراحی گردیدند که آهنگ دز خروجی از تمام سطوح بیرونی بخش پایین سامانه پرتودهی در موقعیت تقریباً چسبیده به آن و در حالت روشن دستگاه (مد پرتودهی) و حتی خالی بودن دستگاه از محصول پرتودهی شونده، کمتر از ۲۰۰ میکرو سیورت بر ساعت باشد. در شکل ۸ نمودار آهنگ دز برحسب ضخامت حفاظ سربی برای بخش پایین محفظه پرتودهی (چهارچوب دستگاه) و برای ضخیم‌ترین بخش آن نشان داده شده است. همان‌طورکه شکل ۸ نشان می‌دهد، با ضخامت حدود ۲۹ سانتی‌متری حفاظ سربی در بخش چهارچوب سامانه، آهنگ دز نشتی در فاصله چسبیده به آن حدود ۵ میکروسیورت بر ساعت (کمتر از ۲۰ میکروسیورت بر ساعت) خواهد بود.

محاسبات حاصل از شبیه‌سازی نشان دادند که میزان آهنگ دز نشتی در فاصله ۵ سانتی‌متری از سطح دستگاه و برای نواحی محدود شده و در مد پرتودهی، کمتر از میزان مجاز آهنگ دز معادل نشتی (۲۰۰ میکروسیورت بر ساعت) می‌باشد، لذا حفاظ سربی طراحی شده سامانه پرتودهی با حداکثر ضخامت حدود ۲۹ سانتی‌متر به راحتی جلوی پرتوهای گامای ساطع شده از سامانه طراحی شده را مسدود کرده و کار کردن با چنین دستگاهی با مشخصات ذکر شده در بالا از لحاظ فیزیک بهداشت هیچ خطر پرتوگیری را متوجه کارکنان نخواهد کرد. لازم به ذکر است که درصورت وجود محصول در داخل دستگاه و در مد کاری پرتودهی، میزان دز خروجی از همه جای دستگاه طبق محاسبات کد MCNPX کمتر از ۲۰ میکروسیورت بر ساعت پیش‌بینی می‌شود.



شکل ۷. نمودار آهنگ دز برحسب ضخامت سربی برای بخش محفظه ورودی محصول سامانه.



شکل ۸. نمودار آهنگ دز برحسب ضخامت سربی برای بخش چهارچوب سامانه.

۴.۳ مقاومت پرتوی اجزاء به‌کار رفته در ساختمان سامانه پرتودهی گامای قابل حمل دو محفظه‌ای

سامانه پرتودهی گامای طراحی شده بیشتر از جنس استیل و سرب می‌باشد و از مواد پلاستیکی و حس‌گرها درون سیستم استفاده نشده است و تنها موارد استفاده از کابل‌ها و تجهیزات الکترونیکی و اپتیکی در خارج از سیستم پرتودهی می‌باشد. مقاومت تابشی اکثر تجهیزات الکترونیکی پایه سیلیسیمی نوعی در حدود ۱ میلیون راد (۱۰ کیلوگری) می‌باشد [۱۶]. همچنین کابل‌های تجاری مقاوم در برابر تابش‌های یونیزان تا مقاومت تابشی حدود ۱۰۰ گیگا راد (۱۰ میلیون گری) به راحتی در دسترس می‌باشند [۱۷]. با توجه به این‌که میزان آهنگ دز در خارج از سامانه پرتودهی طراحی شده کمتر از ۲۰۰ میکروسیورت بر ساعت (۲۰ میلی‌راد بر ساعت) می‌باشد، تاب‌آوری تابشی کابل‌ها و تجهیزات الکترونیکی نوعی به‌کار رفته در اتاق حاوی سامانه پرتودهی بیشتر از ۵ هزار سال طول خواهد کشید. لذا آسیب پرتوی ناشی از پرتوهای گامای سامانه مورد نظر روی این قطعات قابل اغماض و چشم‌پوشی می‌باشد.

همچنین با توجه به این‌که پرتودهی توسط اشعه گامای حاصل از رادیوایزوتوپ کبالت -۶۰ با انرژی ۱٫۱۷ و ۱٫۳۳ مگا الکترون ولت صورت می‌گیرد و هیچ ذره نوترونی در واپاشی چشمه کبالت-۶۰ گسیل نمی‌شود، هیچ‌گونه رادیوایزوتوپی در این سامانه تولید نخواهد شد. از طرفی انرژی پرتوهای گامای رادیوایزوتوپ کبالت-۶۰ برای نفوذ به داخل هسته اتم‌ها و تولید هسته‌های رادیواکتیو از طریق واکنش‌هایی نظیر واکنش فوتونوترون[8] به اندازه کافی بزرگ نیست. انرژی بستگی هسته عناصر با عد اتمی بزرگتر از ۲۰ به‌طور متوسط حدود ۸ مگاالکترون‌ولت است [۱۸]. تنها هسته دو رادیوایزوتوپ بریلیم-۹ و دوتریم از لحاظ عملی به عنوان منابع فوتونوترون مطرح می‌باشند. انرژی فوتون مورد نیاز برای گسیل نوترون در واکنش فوتونوترون برای این دو رادیوایزوتوپ به ترتیب ۱٫۶۷ و ۲٫۲۳ مگاالکترون‌ولت می‌باشد که بزرگتر از هر دو پرتو گامای کبالت-۶۰ می‌باشد [۱۹]. بنابراین هیچ‌کدام از قسمت‌ها و قطعات سیستم و همچنین محصول پرتودهی شده در اثر این پرتوها رادیواکتیو نخواهند شد.

۵.۳ مقایسه مشخصات سامانه پرتودهی گامای قابل حمل دو محفظه‌ای با حالت تک محفظه‌ای و سامانه موجود در آذرشهر

به منظور اعتبارسنجی نتایج حاصل از شبیه‌سازی سامانه طراحی شدهٔ گامای قابل حمل دو محفظه‌ای (با ظرفیت ۱۰۰ کیلو کوری) با نتایج تجربی موجود و مقایسه مشخصات فیزیکی و هسته‌ای دستگاه طراحی شده با سایر سامانه‌های موجود در ایران، نتایج حاصل از شبیه‌سازی با مشخصات سامانه تک‌محفظه‌ای (با همان قدرت چشمه ۱۰۰ کیلو کوری) و همچنین تنها سامانه پرتودهی گامای قابل حمل ایران (موجود در شهرک صنعتی آذرشهر) در جدول ۱ مقایسه گردید.

همان‌طورکه جدول ۱ نشان می‌دهد، مشخصات فیزیکی و هسته‌ای سامانه پرتودهی گامای دو محفظه‌ای مزیت‌های بالایی نسبت به دو سامانه دیگر دارد. چشم‌گیرترین مزیت طراحی سامانه دو محفظه‌ای، دبی خروجی نسبتاً بالای آن می‌باشد که تقریبا دو برابر دبی خروجی حالت تک‌محفظه‌ای و سیزده برابر دبی خروجی سامانه آذرشهر می‌باشد. این موضوع ناشی از هم اکتیویته اسمی بالای سامانه دو محفظه‌ای و همچنین نسبت بالای بازده انرژی آن می‌باشد. نسبت بالای دبی خروجی به واحد اکتیویته سامانه پرتودهی دو محفظه‌ای نسبت به دو مورد دیگر (۴۰ کیلوگرم بر کیلوکوری در مقابل ۲۳ و ۱۶ کیلوگرم بر کیلوکوری) به‌خوبی مؤید طراحی بهینه این سیستم پرتودهی می‌باشد. همچنین به خاطر نسبت بالای آهنگ دز تحویلی در طراحی‌های تک و دو محفظه‌ای نسبت به سامانه آذرشهر، سرعت عبور محصول در این دو طراحی به مراتب بالاتر از سامانه فعال آذرشهر می‌باشد که این موضوع به نوبه خود باعث کاهش مدت زمان حضور محصول پرتودهی شونده در داخل دستگاه به منظور جذب حد دز معینی می‌شود.

همچنین مزیت دیگر سامانه‌های تک و دو محفظه‌ای، به نسبت یکنواختی دز بهتر آنها (فقط محفظه داخلی) نسبت به سامانه آذرشهر مربوط می‌شود. این موضوع به تعداد بالای چشمه‌های میله‌ای کبالت-۶۰ استفاده شده در طراحی سامانه‌های پرتودهی گامای قابل حمل تک و دو محفظه‌ای نسبت به سامانه آذرشهر مرتبط می‌باشد (۱۸ چشمه میله‌ای کبالت-۶۰ در مقابل ۱۲ چشمه میله‌ای). مزیت عمده دیگر سامانه دو محفظه‌ای طراحی شده نسبت به دو سامانه دیگر در جدول ۱، بازده بالای انرژی آن می‌باشد (۲۵ درصد در مقابل ۱۵ و ۱۳ درصد). این موضوع نشان می‌دهد که استفاده از بیرون چشمه‌ها برای پرتودهی محصول در قالب محفظه بیرونی، حدود ۱۰٫۵ درصد بازده انرژی را افزایش می‌دهد.

8. Photoneutron

جدول ۱. مقایسه مشخصات فیزیکی و هسته‌ای سامانه گامای قابل حمل دو محفظه‌ای با سایر سامانه‌های مشابه موجود (اعداد تقریبی است)

خصوصیات	سامانه دو محفظه‌ای	سامانه تک‌محفظه‌ای	سامانه شهرک صنعتی آذرشهر
چشمه تابشی و نوع چیدمان چشمه	کبالت-۶۰، استوانه‌ای	کبالت-۶۰، استوانه‌ای	کبالت-۶۰، استوانه‌ای
تعداد چشمه‌ها	۱۸	۱۸	۱۲
وزن تقریبی (تن)	۴۳	۳۷	۱۵٫۳
ابعاد فیزیکی (ارتفاع×عرض×عمق) (سانتی‌متر مکعب)	۲۷۴×۱۷۳×۴۵۷	۲۳۰×۱۱۴×۴۵۷	۲۳۰×۲۴۰×۵۰۰
قطر داخلی محفظه	۳۴٫۶ (داخلی)، ۸٫۶۵ (ضخامت محفظه خارجی)	۳۴٫۶	۲۹٫۶
حجم مؤثر محفظه‌ها (لیتر)	۱۲۷ (داخلی)، ۲۱۶ (خارجی)	۱۲۷	۵۵
اکتیویته اسمی (کیلوکوری)	۱۰۰	۱۰۰	۲۰
آهنگ متوسط دز در مسیر محور محفظه (گری بر دقیقه)	۹۰ (محفظه داخلی)	۹۴	۳۵٫۵
سرعت عبور لپه (سانتی‌متر بر ثانیه)	۰٫۶۷ (داخلی)، ۰٫۳۰(خارجی)	۰٫۶۵	۰٫۱۶
مدت زمان لازم برای تحویل ۳۰۰ گری دز به محصول (دقیقه)	۳٫۳۳ (داخلی)، ۷٫۴۶ (خارجی)	۳٫۲۱	۸٫۴۷
نسبت یکنواختی دز (DUR)	۱٫۷۷ (داخلی)، ۲٫۱۸ (خارجی)	۱٫۷۲	۲
آهنگ دز چسبیده به دستگاه (میکروسیورت بر ساعت)	≤۲۰	≤۲۰	≤۱۰
ماده حفاظ	سرب و ورقه‌های فولادی	سرب و ورقه‌های فولادی	سرب و ورقه‌های فولادی
دبی خروجی (کیلوگرم بر ساعت)	۴۰۰۰ (مجموع دو محفظه)	۲۳۰۰	۳۲۰
نسبت دبی خروجی به واحد اکتیویته (کیلوگرم بر کیلوکوری بر ساعت)	۴۰	۲۳	۱۶
بازده انرژی (٪)	۲۵ (۱۱٫۹ محفظه درونی، ۱۰٫۴ محفظه بیرونی)	۱۵	۱۳

۴. نتیجه‌گیری

دستگاه پرتودهی گامای قابل حمل دو محفظه‌ای با استفاده از چشمه‌های میله‌ای کبالت-۶۰ به منظور پرتودهی غلات و حبوبات مطابق استانداردهای پذیرفته‌شده بین‌المللی انجام گرفت. مقدار یکنواختی دز درون محفظه‌های پرتودهی درونی و بیرونی حدود ۲ و دبی خروجی کمینه حاصل از شبیه‌سازی حدود ۳٫۲ تن در ساعت محاسبه شد. میزان آهنگ دز نشتی چسبیده به سطح دستگاه و با ضخامت حفاظ سربی بیشینه ۲۹ سانتی‌متر در اطراف قفسه چشمه پایین‌تر از حد مجاز (۲۰۰ میکروسیورت بر ساعت) محاسبه شد. نتایج نشان دادند که کمترین و بیشترین میزان دز جذبی به ترتیب در محفظه درونی (نزدیکی چشمه‌های میله‌ای کبالت-۶۰) و محفظه بیرونی (دور از چشمه‌های میله‌ای کبالت-۶۰) اتفاق می‌افتد. بازده انرژی کل نیز با افزایش حدود ۱۰٫۵ درصدی ناشی از محفظه بیرونی حدود ۲۵ درصد برآورد شد که در مقایسه با سامانه تک‌محفظه‌ای و سامانه آذرشهر اشاره شده در جدول ۱ مزیت عمده‌ای به شمار می‌رود. این افزایش بازده انرژی سبب افزایش حدود ۸۰ درصدی دبی خروجی نسبت به سامانه تک‌محفظه‌ای گردید. همچنین افزایش تعداد جایگاه‌های قرارگیری چشمه‌های میله‌ای در سامانه‌های تک و دو محفظه‌ای (۱۸ جایگاه) نسبت به سامانه آذرشهر (۱۲ جایگاه) سبب بهبود نسبت یکنواختی دز شد.

شاید بتوان گفت تنها عیب عمده سامانه پرتودهی قابل حمل دو محفظه‌ای و تک‌محفظه‌ای نسبت به سامانه پرتودهی آذرشهر به حجم زیاد سرب استفاده شده به منظور حفاظ‌گذاری آنها مربوط می‌شود که عمدتاً ناشی از دو عامل محفظه بیرونی اضافه شده و اکتیویته اسمی بالای آنها می‌باشد. عامل اول باعث افزایش وزن سامانه دو محفظه‌ای نسبت به سامانه تک‌محفظه‌ای (با همان مقدار اکتیویته اسمی) شده و هر دو عامل ذکر شده باعث افزایش وزن آنها نسبت به سامانه آذرشهر می‌شوند. ناگفته پیداست که با افزایش اکتیویته چشمه کبالت-۶۰ به‌کار رفته در سامانهٔ پرتودهی، حجم زیادی از سرب به منظور حفاظ‌گذاری آن مورد نیاز است. در نهایت می‌توان نتیجه گرفت که سامانه پرتودهی طراحی شده می‌تواند بدون این‌که خطر خاصی را از لحاظ پرتوگیری خارجی متوجه پرتوکاران نماید به منظور پرتودهی گستره وسیعی از غلات و حبوبات به کار رود.

مراجع

1. Huq T, Dang Vu K, Riedl B, Bouchard J, Lacroix M. Synergistic effect of gamma (γ)-irradiation and microencapsulated antimicrobials against Listeria monocytogenes on ready-to-eat (RTE) meat. Food Microbiol. 2015;46:507-514.
2. International Atomic Energy Agency (IAEA). Dosimetry for Food Irradiation. IAEA- Technical Reports Series No. 409, 2002.
3. Palumbo R, Crisci A, Venâncio A, Abrahantes J.C, Dorne J.L, Battilani P, Toscano P. Occurrence and co-occurrence of mycotoxins in cereal-based feed and food. Microorganisms. 2020;8:1-17.
4. International Atomic Energy Agency (IAEA). Manual on self-contained gamma irradiators (Categories I and III). IAEA-PRSM-7 (Rev.1), 1996.
5. Joint FAO/WHO Codex Alimentarius Commission, Rome (Italy). Codex general standard for irradiated foods and recommended international code of practice for the operation of radiation facilities used for the treatment of foods, Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO): FAO. Codex Alimentarius, Vol. 15, FAO/WHO, 1984.
6. Calado T, Abrunhosa L, Cabo Verde S, Alté L, Venâncio A. Effect of gamma-radiation on Zearalenone - Degradation, cytotoxicity and estrogenicity. Foods. 2020;9:1-16.
7. Rafiee S.R, Eftekhari-Zadeh E, Gholami Y. A review on the status and future trends of radiation processing in Iran. J. Radiat. Res. Appl. Sci. 2017;10:331-337.
8. Bagheri R, Adeli R. Gamma-ray shielding properties of phosphate glasses containing Bi_2O_3, PbO, and BaO in different rates. Radiat. Phys. Chem. 2020;174:108918.
9. Production association, MAYAK. Ionizing sources and bulk isotopes, State atomic energy corporation, 31 Lenin St., Ozyorsk, Chelyabinsk Region, Russia. 2020.
10. Bagheri R, Moghaddam A.K, Yousefi A. Gamma-ray shielding study of light to heavy weight concretes using MCNP-4C code. Nucl. Sci. Tech. 2017;28:1–8.
11. Pelowitz D.B. MCNPXTM User's Manual. Version 2.6.0, Report LA-CP-07-1473. Los Alamos, NM: Los Alamos National Laboratory. 2008.
12. https:/ /www.nordin.com/wp-content/uploads/2014/10/GT_ Presentation_Risk _mitigation.pdf.
13. American National Standards Institute Inc. (ANSI). Safe design and use of self-contained, dry source storage irradiators (Category I). Health Physics Society, ANSI/HPS N43.7,2018.
14. https://www.engineeringtoolbox.com/foods-materials-bulk-density-d_1819.html.
15. Kalantari N, Ghaffarpur M. National Report of: The Comprehensive study on household food consumption patterns and nutritional status of I.R.Iran, 2001–2003. National Nutrition and Food Technology Research Institute, Shaheed Beheshti University of Medical Sciences; Tehran, Iran: 2005.
16. Zhu M, Xiao H, Sun P, Jiang J, Cui Z, Zhao J, Zhang Z, Peng L.M. Radiation-hardened and repairable integrated circuits based on carbon nanotube transistors with ion gel gates. Nat. Electron. 2020;3:622-629.
17. https://www.allectra.com/news/radiation-resistant-kapton-wires-from-allectra-2/.
18. Meyerhof W.E. Elements of nuclear physics. McGrraw-Hill, New York. 1989.
19. Knoll G.F. Radiation detectibn and measurement. 3rd Ed. John Wiley & Sons, Inc. New York. 2000.

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
باقری، رضا، ثوری، ابوالفضل، شیخ مقدسی، نادر، سلامت‌بخش، محمدحسین، مرادی قراتلو، ایرج، یگانه، میکائیل، شیرمردی، سیدپژمان. (۱۴۰۳)، طراحی هسته‌ای سامانه پرتودهی گامای قابل حمل دو محفظه‌ای با استفاده از چشمه‌های میله‌ای کبالت-۶۰ با ظرفیت ۱۰۰ کیلوکوری. مجله علوم، مهندسی و فناوری هسته‌ای، ۱۱۰(۴)، ۱۹۰-۲۰۱. **Url:** https://jonsat.nstri.ir/article_1645.html .**DOI:** https://doi.org/10.24200/nst.2024.1645