

## Research Paper

# Nuclear Designing of a Blood Irradiator Facility for Research and Medical Applications Using Cobalt-60 Line Sources<sup>1</sup>

Reza Bagheri<sup>2\*</sup> and Hassan Ranjbar<sup>3</sup>

Received: 2022.05.21

Revised: 2022.08.17

Accepted: 2022.10.28

## Abstract

Nowadays, the irradiation of blood and blood products, as well as sterilization of pharmaceuticals and biological materials used in the medical industry, are being carried out in developed countries and some developing countries. Usually for this purpose, self-contained dry source storage irradiators containing cesium-137 or cobalt-60 gamma ray sources with activity up to 3 kCi are used as blood irradiator facilities. In this research, an attempt was made to use the MCNPX code to perform the calculations related to the nuclear design of a blood irradiator facility using cobalt-60 line sources in two parts of iso-dose curves and shielding according to internationally accepted standards. The dose uniformity ratio inside the irradiation chamber was about 2 and the external dose rate at a distance of 5 cm from the surface of the gamma cell device was about 36  $\mu$ Sv/h and below the allowable limit. The results showed that the iso-dose curves were completely symmetric and the delivered dose increased near the cobalt-60 line sources while decreasing as the distance away from the line sources and closer to the cylindrical axis of the irradiation chamber. In addition, the results showed that the designed lead shield with an average thickness of 30 cm easily blocks the gamma rays and in terms of health physics, working with such a blood irradiator will not pose any risk of radiation to employees.

**Keywords:** *Blood Irradiator, Cobalt-60, Shielding, Dose Uniformity Ratio, MCNPX.*

<sup>1</sup> DOI: 10.22051/ijap.2022.40461.1281

<sup>2</sup> Assistant Professor, Northwest Research Complex (Bonab), Radiation Applications Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, Atomic Energy Organization of Iran, North Karegar Ave., Tehran, Iran. (Corresponding Author). E-mail: rzbagheri@aeoi.org.ir, reza\_bagheri@aut.ac.ir

<sup>3</sup> Associate Professor, Nuclear Fuel Cycle Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, Atomic Energy Organization of Iran, Tehran, Iran. Email: hranjbar@aeoi.org.ir



## طراحی هسته‌ای دستگاه گاماسل خونی با چشمه‌های میله‌ای کبالت-۶۰ برای کاربردهای تحقیقاتی و پزشکی<sup>۱</sup> رضا باقری<sup>۲\*</sup> و حسن رنجبر<sup>۳</sup>

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۲/۳۱

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۰۵/۲۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۸/۰۶

فصلنامه علمی فیزیک کاربردی ایران

دانشکده فیزیک، دانشگاه الزهرا

سال دوازدهم، پیاپی ۳۱، زمستان ۱۴۰۱

صص ۷- ۲۲

### چکیده:

امروزه پرتودهی خون و فرآورده‌های خونی و همچنین سترون‌سازی دارو و مواد زیست‌شناختی بکار رفته در صنعت پزشکی در کشورهای پیشرفته و برخی از کشورهای در حال توسعه در حال انجام است. بدین منظور بیشتر 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. در این پژوهش تلاش شد تا با بهره‌گیری از کد MCNPX محاسبات مربوط به طراحی هسته‌ای دستگاه گاماسل خونی با استفاده از چشمه‌های میله‌ای کبالت-۶۰ در دو بخش منحنی‌های ایزو دز و حفاظ‌گذاری آن برابر استانداردهای پذیرفته‌شده بین‌المللی انجام گیرد. مقدار یکنواختی دز درون محفظه پرتودهی حدود ۲ و میزان آهنگ پرتوگیری در فاصله ۵ سانتی‌متری از سطح دستگاه گاماسل حدود ۳۶ میکروسیورت بر ساعت و پایین‌تر از حد مجاز محاسبه شد. نتایج نشان دادند که منحنی‌های ایزو دز به درستی متقارن بوده و میزان دز دریافتی در نزدیک چشمه‌های میله‌ای کبالت-۶۰ افزایش یافته است. همچنین با دور شدن از میله‌ها و نزدیک شدن به محور استوانه محفظه پرتودهی، میزان دز کاهش یافته است. افزون بر این، نتایج نشان دادند که حفاظ سربی طراحی شده با ضخامت متوسط ۳۰ سانتی‌متر به راحتی در برابر پرتوهای گاما سدی ایجاد کرده است. از دیدگاه فیزیک بهداشت، استفاده از دستگاه گاماسل خون با چنین ویژگی‌هایی هیچگونه خطر پرتوگیری را متوجه کارکنان نخواهد کرد.

**واژگان کلیدی:** گاماسل خونی، کبالت-۶۰، حفاظ‌گذاری، نسبت یکنواختی دز، MCNPX.

<sup>۱</sup> DOI: 10.22051/ijap.2022.40461.1281

<sup>۲</sup> استادیار، مجتمع پژوهشی شمال غرب کشور (بناب)، پژوهشکده کاربرد پرتوها، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، تهران، ایران. (نویسنده مسئول) rzbagheri@aeoi.org.ir, reza\_bagheri@aut.ac.ir

<sup>۳</sup> دانشیار، پژوهشکده چرخه سوخت هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، تهران، ایران. Email: hranjbar@aeoi.org.ir



## ۱. مقدمه

امروزه استفاده از پرتوهای یونیزان در صنعت پزشکی و با استفاده از فناوری گاماسل‌های خونی و پژوهش‌هایی چون پرتودهی خون و فرآورده‌های آن به منظور پیشگیری از بیماری پیوند در برابر میزبان مربوط به انتقال خون<sup>۱</sup> و استریل کردن خود خون و فرآورده‌های آن، استریل کردن غشاء فیبرینی، سترون‌سازی دارو و مواد زیست‌شناختی، پژوهش‌های پزشکی مربوط به دریافت میزان دز و اثرات آن و غیره به صورت چشمگیری در حال افزایش است [۲ و ۱].

گاماسل‌های خونی، که جزء پرتودهنده‌های درون‌کار خشک<sup>۲</sup> طبقه‌بندی می‌شوند، دستگاه‌های تابشی پرتو گاما و دربرگیرنده چشمه‌های مهر و موم شده رادیواکتیو سزیم-۱۳۷ یا کبالت-۶۰ می‌باشند که با استفاده از تضعیف‌کننده‌های گامای خشک همچون سرب حفاظ‌گذاری شده و در اتاق‌های بدون حفاظ اضافی سربی یا بتونی مورد استفاده قرار می‌گیرند [۳].

کاربرد اصلی پرتودهی خون به سه گروه مهم بیماران آپلازی (پیوندهای آلوزنیک مربوط به پیوند مغز قرمز استخوان)، بیماران شیمی‌درمانی و کودکان با نقص مادرزادی سیستم ایمنی مربوط می‌شود [۴ و ۵]. دز پرتو گامای مورد استفاده بدین منظور برابر با استاندارد بین‌المللی ISO/ASTM 51939 در محدوده ۱۵ تا ۵۰ گری می‌باشد [۶]. کمینه دز تابش در مرکز محفظه تابش دستگاه گاماسل باید حدود ۲۵ گری باشد، به صورتی که میزان پرتودهی در هیچ محلی از محفظه تابش بیش از ۵۰ گری نباشد و در محفظه پرتودهی به صورت کامل پر نیز کمینه دز پرتودهی هر قسمت از فرآورده‌های خونی از ۱۵ گری کمتر نباشد [۷].

گاماسل‌های خونی بر اساس رادیونوکلئید گسیلنده پرتو گاما به دو دسته اساسی دستگاه‌های پرتودهی با چشمه سزیم-۱۳۷ و کبالت-۶۰ تقسیم بندی می‌شوند. دستگاه‌های پرتودهی با چشمه سزیم-۱۳۷ بیشتر به کمک شرکت "بست تراترونیکس"<sup>۳</sup> کانادا ساخته شده و دارای انواع Gammacell 3000 Elan و Gammacell 1000 Elite، Gammacell 40 Exactor می‌باشند [۸ و ۹]. همچنین شرکت هندی "بی آر آی تی"<sup>۴</sup>، دستگاه‌های پرتودهی ظرفیت بالا با استفاده از چشمه‌های رادیونوکلئیدی کبالت-۶۰ را گسترش داده است. از انواع این دستگاه‌ها

<sup>1</sup> Transfusion Associated Graft-Versus-Host Disease (TA-GVHD)

<sup>2</sup> Self-contained, Dry Source Storage Irradiators

<sup>3</sup> Best Theratronics

<sup>4</sup> BRIT



می‌توان به Gamma Chamber 5000، Gamma Chamber 1200 و Blood Irradiator (BI-2000) اشاره نمود [۱۰].

متاسفانه کارهای پژوهشی بسیار در زمینه شبیه‌سازی، طراحی و ساخت گاماسل‌های خونی در کشور انجام نشده است. فتح‌اللهی و همکاران با استفاده از طراحی و ساخت تضعیف‌کننده‌هایی از جنس سرب، دامنه کاربرد گاماسل را برای پرتودهی در محدوده دزهای پایین گسترش دادند [۱۱]. بالکانیان و همکاران، طراحی هسته‌ای یک دستگاه گاماسل صنعتی با اکتیویته ۲۴ کیلوکوری و با استفاده از کد MCNP4C را انجام داده‌اند که نتایج شبیه‌سازی با داده‌های تجربی موجود مقایسه شده است [۱۲]. همچنین، این تیم توان گرمایی تولیدی در هر بخش از دستگاه گاماسل صنعتی را با استفاده از نرم افزار مربوطه (ANSYS) مورد مطالعه قرار دادند [۱۳].

در پژوهش پیش رو تلاش می‌شود تا با بهره‌گیری از کد MCNPX محاسبات مربوط به طراحی هسته‌ای دستگاه گاماسل خونی در دو بخش منحنی‌های ایزو دز و حفاظ‌گذاری آن به صورتی محاسبه شود که کار با این دستگاه بتواند استانداردهای پذیرفته شده بین‌المللی برای کار با چنین دستگاه‌های پرتودهی گاما را برآورده کند. در نهایت مشخصات هسته‌ای و فیزیکی دستگاه طراحی شده با دستگاه‌های گاماسل خونی و صنعتی موجود مقایسه می‌شود.

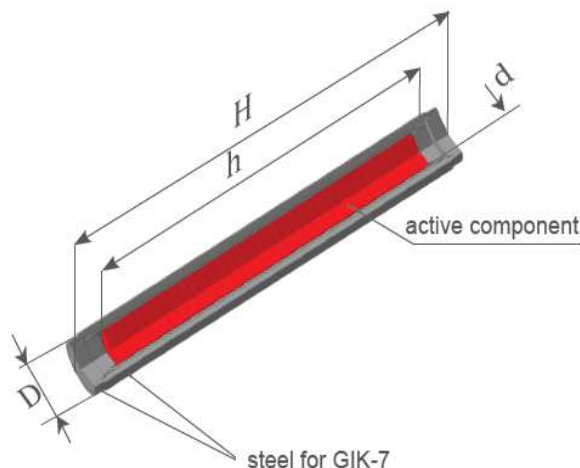
## ۲. مواد و روش‌ها

### ۱.۲ محفظه و قفسه نگهدارنده چشمه‌های میله‌ای کبالت-۶۰ دستگاه گاماسل خونی

به منظور دستیابی به یکنواختی دز بیشتر و جذب یکنواخت‌تر پرتو یونیزان در تمام بخش‌های محفظه پرتودهی، گاماسل مورد نظر با تعداد ۱۸ جایگاه فولادی برای نگهداری چشمه‌های میله‌ای کبالت-۶۰ در نظر گرفته شد که به صورت استوانه‌ای اطراف محفظه پرتودهی آلومینیومی قرار می‌گیرند. همچنین محفظه پرتودهی برابر با نمونه گاماسل‌های خونی خارجی به ضخامت ۲ میلی‌متر از جنس آلومینیوم (دستیابی به کمترین حد خودجذبی در بدنه محفظه پرتودهی) و ارتفاع ۲۰ سانتی‌متر و قطر ۱۶ سانتی‌متر جهت پرتودهی خون و فرآورده‌های خونی و موارد پژوهشی در نظر گرفته شد. محفظه در مرکز قفسه فولادی نگهدارنده چشمه‌های میله‌ای کبالت-۶۰ قرار گرفت. حدود نیم سانتی‌متر فاصله بین قفسه و محفظه به دلیل امکان جابجایی آسان محفظه آلومینیومی در نظر گرفته شد. همچنین جایگاه‌های فولادی نگهدارنده چشمه‌های میله‌ای کبالت-۶۰ به ضخامت ۲ میلی‌متر از جنس فولاد زنگ‌نزن شماره ۳۰۴ و قطر داخلی ۱/۳ سانتی‌متر شبیه‌سازی شد.



به دلیل 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 در مقابل تک پرتوی گامای ۰/۶۶۲ مگاالکترون‌ولت) و به دنبال آن قدرت نفوذ بالا و آهنگ تحویل دز بالای پرتوهای گامای چشمه کبالت-۶۰، چشمه‌های میله‌ای کبالت-۶۰ در این پژوهش به کار گرفته شد [۱۴]. بدین منظور چشمه‌ها برابر با چشمه‌های میله‌ای کبالت-۶۰ موجود در بازار (چشمه‌های میله‌ای کبالت-۶۰ مدل GIK-7-1 ساخت شرکت MAYAK روسیه به ارتفاع ۸/۱۵ سانتی‌متر [H] و قطر ۱/۱ سانتی‌متر [D]) مورد شبیه‌سازی قرار گرفت [۱۵]. همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده است، مواد رادیواکتیو کبالت-۶۰ در فضایی استوانه‌ای شکل به ارتفاع ۶/۹۵ سانتی‌متر [h] و قطر ۷/۳ میلی‌متر [d] در درون میله‌های فولادی نگهدارنده مواد رادیواکتیو جاگذاری شده است.



شکل ۱ شماتیک هندسی چشمه میله‌ای کبالت-۶۰ مدل GIK-7-1 ساخت شرکت MAYAK روسیه [۱۵].

یک میلی‌متر فضای خالی نیز بین میله‌های کبالت-۶۰ و جایگاه‌های فولادی نگهدارنده آن‌ها به دلیل آسانی در جابجایی و جایگزینی چشمه‌های میله‌ای کبالت-۶۰ در نظر گرفته شد. همچنین به منظور دستیابی هر چه بیشتر یکنواختی دز تحویلی با استفاده از دستگاه در هر کدام از ۱۸ جایگاه فولادی نگهداری چشمه، دو عدد از چشمه‌های میله‌ای کبالت-۶۰ با ویژگی‌های بیان شده در بالا جاگذاری گردید. بین هر دو چشمه میله‌ای کبالت-۶۰ نیز یک عدد دامی از جنس فولاد زنگ‌نزن شماره ۳۰۴ و ارتفاع ۳/۷ سانتی‌متر و قطر ۱/۱ سانتی‌متر در نظر گرفته شده است. از دو ورق استوانه‌ای داخلی و



خارجی به ضخامت ۲ میلی‌متر و از جنس فولاد زنگ‌نزن شماره ۳۰۴ به منظور نگهداری عمودی جایگاه‌های فولادی نگهدارنده چشمه استفاده شد.

## ۲.۲ حفاظ سربی دستگاه گاماسل

به منظور نگهداری از اپراتورهای دستگاه گاماسل در برابر پرتوهای گامای گسیل شده از آن، ناگزیر باید قفسه چشمه شامل میله‌های کبالت-۶۰ به صورت کامل حفاظ‌گذاری شود. به صورت معمول برای این کار از فلز سرب با عدد اتمی ۸۲ و چگالی بالا به منظور ساخت حفاظ استفاده می‌شود [۱۶]. در این شبیه‌سازی نیز برابر با شرایط حقیقی موجود از ورق‌هایی از جنس فولاد زنگ‌نزن شماره ۳۰۴ و ضخامت ۱ سانتی‌متر به منظور استحکام مکانیکی دستگاه و برای نگهداری قطعات سربی استفاده شد. برابر با دستگاه‌های گاماسل استاندارد و موجود در بازار، ضخامت حفاظ سربی بطور متوسط حدود ۳۰ سانتی‌متر در اطراف قفسه چشمه به منظور تضعیف پرتوهای گاما در نظر گرفته شد.

برابر با طرح‌های موجود خارجی، حفاظ شامل درپوش‌های سربی بالایی و پایینی متحرک، بست حلقوی دور درپوش بالایی (به منظور جابجایی و تعویض چشمه‌های میله‌ای کبالت-۶۰) و بدنه ثابت حفاظ سربی می‌باشد. همچنین به منظور حرکت آزاد و بدون زحمت محفظه پرتودهی همراه با درپوش‌های سربی بالایی و پایینی، حدود ۰/۲ میلی‌متر فاصله بین درپوش‌ها با بدنه ثابت حفاظ سربی و بست حلقوی در نظر گرفته شد. افزون بر این، بین قفسه چشمه و بست حلقوی با بدنه ثابت محافظ سربی حدود ۰/۲ میلی‌متر فاصله به دلیل تعویض و جابجایی آسان چشمه‌ها در نظر گرفته شد.

## ۳.۲ شبیه‌سازی با کد MCNPX، محاسبات و استانداردهای مربوطه

در این پژوهش برای ترابرد پرتوهای گامای گسیل شده از چشمه و به منظور رسم منحنی‌های ایزو دز در داخل محفظه پرتودهی دستگاه گاماسل خون و همچنین حفاظ‌گذاری اطراف قفسه چشمه‌ها از کد مونت کارلوی شبیه‌سازی MCNPX استفاده می‌شود. این کد محاسباتی چند منظوره که بر پایه روش مونت کارلو استوار است، برای شبیه‌سازی برهمکنش انواع تابش‌ها با ماده و ترابرد آن‌ها در تمام انرژی‌ها به کار می‌رود. این کد از کتابخانه‌های مربوط به سطح مقطع هسته‌ای و مدل‌های فیزیکی برای برهمکنش‌های ذرات بهره می‌برد و کمیت‌های مورد نظر را با خطای مشخص فراهم می‌کند [۱۷].

برای به دست آوردن منحنی‌های ایزو دز در داخل محفظه پرتودهی آلومینیومی، از یک دزیمتر مکعبی پرسپیکس، از جنس PMMA و چگالی ۱/۱۹ گرم بر سانتی‌متر مکعب و ابعاد  $16 \times 20 \times 3 \text{ cm}^3$  استفاده شد. این دزیمتر یکبار منطبق بر محور ایکس‌ها و یکبار



عمود بر آن و منطبق بر محور ایگرگ‌ها در نظر گرفته شد. اینکار برای بررسی منحنی‌های ایزو دز در حالت‌هایی در نظر گرفته شد که دزیمتر پرسپکس یکبار روبروی چشمه‌های میله‌ای کبالت-۶۰ و یکبار بین دو میله قرار می‌گیرد.

مش تالی نوع ۳ جهت رسم منحنی‌های ایزو دز و محاسبه میزان دز در نقاط مختلف محفظه پرتو دهی مورد استفاده قرار گرفت. این نوع تالی انرژی انباشته شده از تمام ذرات را در حجم هر پیکسل محاسبه می‌کند و خروجی را بر حسب واحد  $\text{MeV/cm}^3$  نشان می‌دهد [۱۷]. برای تبدیل خروجی کد به میزان دز جذب شده در هر پیکسل بر حسب گری در این نوع تالی، خروجی کد را باید به چگالی PMMA تقسیم کرده و از ضرایب مشخص برای تبدیل MeV به ژول استفاده کرد. همچنین پیکسل‌ها با ابعاد  $0.25 \times 0.25 \times 0.3 \text{ mm}^3$  مد نظر قرار گرفتند.

از کارت‌های POS, ERG, RAD و EXT به ترتیب برای بیان جایگاه مکانی، انرژی ذرات، شعاع و ضخامت چشمه‌ها در بلوک داده و کارت SDEF استفاده شد. چشمه کبالت-۶۰ بصورت چشمه فوتونی همگن و ایزوتروپیک در نظر گرفته شد که به صورت همزمان در هر واپاشی دو پرتو گامای ۱/۱۷ و ۱/۳۳ مگاالکترون‌ولت گسیل می‌کند [۱۴]. هر یک از کارت‌های بیان شده در بالا به صورت پخش جداگانه در نظر گرفته شدند. همچنین فرض گردید که تمام ۳۶ چشمه میله‌ای کبالت-۶۰ دارای قدرت یکسان ۸۳/۳۳ کوری (جمعا ۳ کیلوکوری) می‌باشند که بصورت همگن و ایزوتروپیک پرتو گاما را در تمام جهات گسیل می‌کنند. برای کاهش خطای آماری از روش Geometry splitting استفاده شد که این روش سعی می‌کند تا از راه بالا بردن اهمیت ترابرد ذرات در سلول‌های نزدیک به ناحیه تالی خطای آماری را کاهش دهد [۱۷].

همچنین از کمیتی به نام نسبت یکنواختی دز<sup>۱</sup> به دلیل بررسی میزان یکنواختی دز تحویل داده شده در داخل محفظه پرتو دهی استفاده خواهد شد. این کمیت بیشترین مقدار دز بدست آمده در نقطه‌ای داخل محفظه را به کمترین مقدار دز دریافتی در نقطه‌ای دیگر از محفظه پرتو دهی محاسبه می‌کند. هرچه قدر این کمیت به عدد ۱ نزدیک باشد میزان یکنواختی دز تحویلی در داخل محفظه پرتو دهی مناسب و ایده‌آل است [۱۸].

با توجه به سند موسسه استانداردهای ملی آمریکا به شماره ANSI/HPS N۴۳.۷-۲۰۰۷ به نام "طراحی و بکارگیری ایمن پرتودهنده‌های درون کار خشک (دسته شماره ۱)"، میزان دز مجاز در فاصله ۵ سانتی‌متری از سطح دستگاه گاماسل در نواحی محصور شده باید کمتر از میزان ۲۰۰

<sup>۱</sup> Dose Uniformity Ratio (DUR)

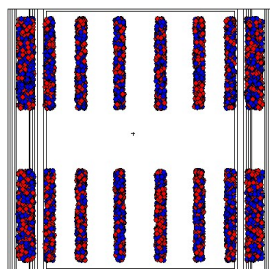


میکروسیورت بر ساعت باشد [۱۹]. به منظور محاسبه میزان دز دریافتی در این فاصله از سطح دستگاه گاماسل، پوسته استوانه‌ای به ضخامت و ارتفاع  $3/5$  سانتی‌متر پر شده با آب و همچنین تالی  $F8^*$  استفاده گردید. این تالی میزان انرژی جذب شده در سلول را بر حسب مگا الکترون ولت محاسبه می‌کند [۱۷]. برای بدست آوردن میزان دز جذب شده در هر سلول دزیمتر بر حسب گری باید انرژی جذب شده در آن سلول دزیمتری بر حسب ژول را به جرم آن سلول بر حسب کیلوگرم تقسیم کرد. با توجه به سر و کار داشتن با پرتوهای گاما و الکترون در این مساله دز جذب شده بر حسب گری برابر با دز معادل بر حسب سیورت می‌باشد. شبیه‌سازی با استفاده از حدود ۲ میلیارد تاریخچه دنبال شد و نتایج با خطای کمتر از ۵ درصد گزارش گردید. یک سلول دزیمتری به شکل پوسته استوانه‌ای در بالای دستگاه گاماسل و در فاصله ۵ سانتی‌متری از سطح آن و در مقابل شکاف‌ها و درزهای موجود در نظر گرفته شد.

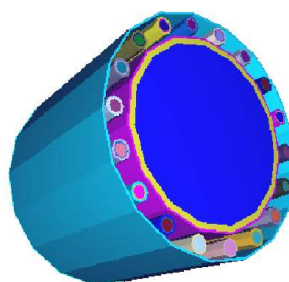
### ۳. نتایج

#### ۱.۳ منحنی‌های ایزو دز و مقدار DUR در داخل محفظه پرتودهی گاماسل

شکل ۲ تصویر سه‌بعدی هندسه استوانه‌ای شبیه‌سازی شده، شامل چشمه‌های میله‌ای کبالت-۶۰، قفسه نگهدارنده چشمه و محفظه آلومینیومی را نشان می‌دهد. همچنین در این شکل جایگاه چشمه‌های میله‌ای کبالت-۶۰ همراه با ذرات گامای ساطع شده از آنها از مقطع محور استوانه نشان داده شده است.



(ب)

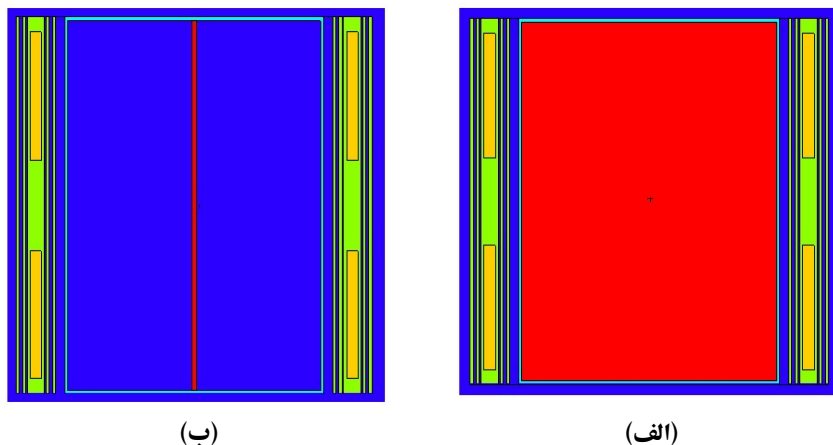


(الف)

شکل ۲ (الف) تصویر سه‌بعدی هندسه شبیه‌سازی شده قفسه چشمه‌ها، (ب) همراه با جایگاه چشمه‌های میله‌ای کبالت-۶۰ و ذرات ساطع شده از آنها.



افزون بر این، در شکل ۳ نیز از دزیتر پرسپکس استفاده شده و هندسه شبیه‌سازی شده را از مقطع برشی صفحه  $X-Z$  در دو حالت دزیتر پرسپکس روبروی چشمه‌های میله‌ای کبالت-۶۰ و بین دو چشمه میله‌ای نشان می‌دهد. بخش‌های نارنجی رنگ دربرگیرنده مواد رادیواکتیو کبالت-۶۰ بوده و رنگ سبز دلالت بر فولاد دربرگیرنده این مواد می‌باشد. همچنین هوا و دزیتر پرسپکس به ترتیب با رنگ‌های آبی و قرمز نشان داده شده‌اند. تمامی شکل‌های نشان داده شده بر درستی هندسه شبیه‌سازی شده از قفسه چشمه‌های یک دستگاه گاماسل خونی اشاره دارند.

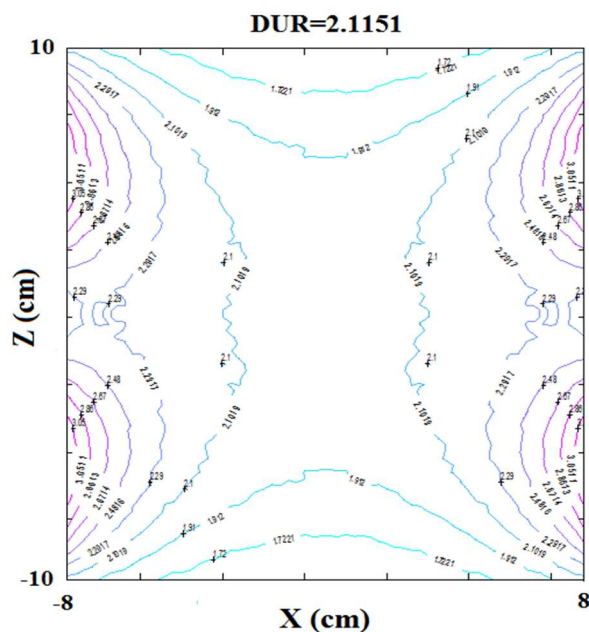


شکل ۳ هندسه شبیه‌سازی شده در راستای صفحه  $X-Z$  همراه با دزیتر پرسپکس مورد مطالعه (الف) در جهت محور  $X$ ها و (ب) در جهت محور  $Y$ ها.

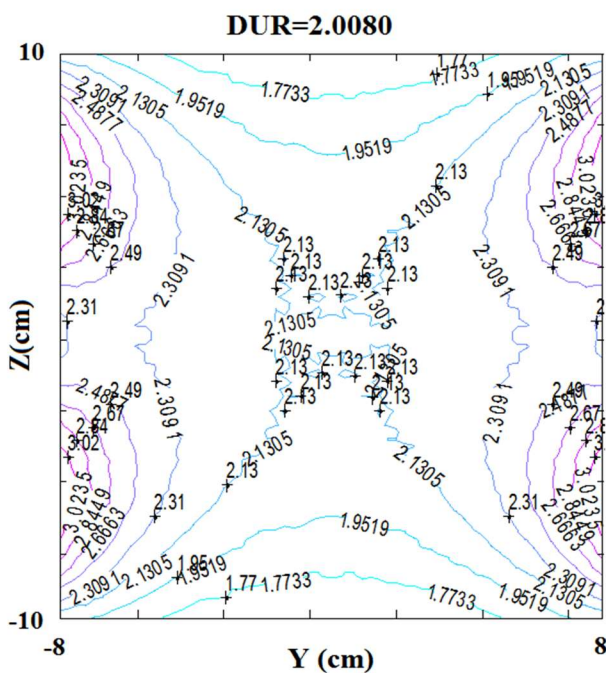
شکل‌های شماره ۴ و ۵ منحنی‌های ایزو دز و مقادیر نسبت یکنواختی دز (DUR) را برای هر دو حالت قرارگیری دزیتر پرسپکس در داخل محفظه پرتودهی نشان می‌دهند. همانطور که در شکل دیده می‌شود، منحنی‌های ایزو دز به درستی متقارن بوده و نسبت یکنواختی دز در حالت  $X$  (دزیتر پرسپکس روبروی چشمه‌های میله‌ای کبالت-۶۰) بیشتر از حالت  $Y$  (دزیتر پرسپکس بین دو چشمه میله‌ای کبالت-۶۰) بدست می‌آید. به بیانی دیگر، پرتوگیری نمونه دزیتر PMMA در داخل محفظه پرتودهی در حالت  $Y$  یکنواخت‌تر از حالت  $X$  می‌باشد. میزان دز دریافتی در نزدیک چشمه‌های میله‌ای کبالت-۶۰ افزایش یافته و با دور شدن از میله‌ها و نزدیک شدن به محور استوانه محفظه پرتودهی، میزان دز کاهش می‌یابد. در نقاط (پیکسل‌های دزیتری مورد مطالعه در داخل



محفظه پرتودهی) چسبیده و نزدیک به وسط هر کدام از دو چشمه‌ی میله‌ای کبالت-۶۰، بیشترین مقدار دز دریافتی را خواهیم داشت. مقادیر دز جذبی بدست آمده از شبیه‌سازی در این نقاط و در دو حالت X (دزیومتر روبروی چشمه‌های میله‌ای) و Y (مابین دو چشمه میله‌ای) به ترتیب برابر با حدود ۴/۳۶ و ۴/۳۰ فمتو گری بر تاریخچه بدست می‌آیند. کمترین میزان دز جذبی نیز در روی محور محفظه استوانه‌ای اتفاق افتاده و دقیقاً در نقطه مرکز محور محفظه استوانه‌ای کمترین میزان دز دریافتی برابر با حدود ۲/۰۶ و ۲/۱۴ فمتو گری بر تاریخچه به ترتیب برای دو حالت X و بدست خواهد آمد. مقدار متوسط نسبت یکنواختی دز (DUR) در درون محفظه پرتودهی با چیدمان چشمه شناسانده شده در این پژوهش، حدود ۲/۰۶۱ بدست می‌آید.



شکل ۴ منحنی ایزو دز برای حالت دزیومتر منطبق بر محور Xها و روبروی چشمه‌های میله‌ای کبالت-۶۰.

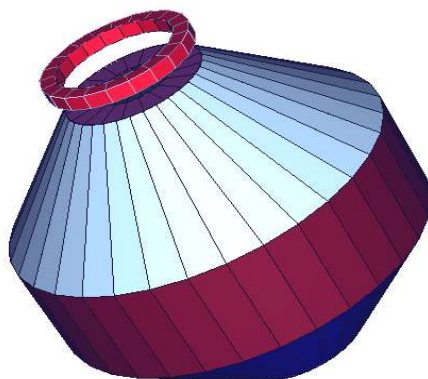


شکل ۵ منحنی ایزو دز برای حالت دزیتر منطبق بر محور  $Y$ ها و روبروی چشمه های میله ای کبالت-۶۰.

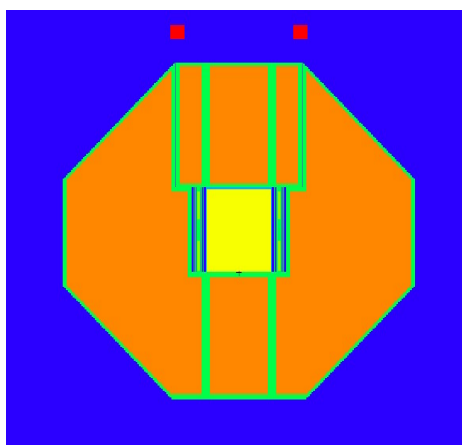
### ۲.۳ طراحی حفاظ سربی دستگاه گاماسل

شکل ۶ نمایی سه بعدی از کل دستگاه گاماسل را همراه با سلول دزیتری به کار رفته در فاصله ۵ سانتی متری از بالای آن نشان می دهد. به منظور کاهش واریانس و افزایش احتمال برخورد ذرات از حجم سلول دزیتری، سلول دزیتری مورد نظر به دلیل تقارن استوانه ای دستگاه گاماسل، به صورت پوسته استوانه ای در نظر گرفته شد. همچنین شکل ۷، هندسه شبیه سازی شده را از برش مقطعی  $X-Z$  همراه با سلول دزیتری موجود در بالای آن، قفسه چشمه، میله های کبالت-۶۰، درپوش های سربی بالایی و پایینی و بست حلقوی نشان می دهد. به دلیل صرفه جویی در مصرف سرب و کاهش هزینه ها و همچنین کاهش وزن دستگاه گاماسل، بالا و پایین دستگاه به صورت مخروط های ناقص در نظر گرفته شده است.





شکل ۶ نمای سه بعدی از دستگاه گاماسل همراه با سلول دزیمتری به شکل پوسته استوانه‌ای.



شکل ۷ هندسه شبیه‌سازی شده از برش مقطعی X-Z همراه با سلول دزیمتری مورد نظر.

با توجه به اینکه این دستگاه برای جاگذاری حدود ۳ کیلوکوری اکتیویته کبالت-۶۰ طراحی شده است، از این رو، آهنگ دز معادل دریافت شده در سلول دزیمتری مورد نظر پس از انجام شبیه‌سازی و خروجی کد MCNP و انجام محاسبات مربوطه حدود ۳۶ میکروسیورت بر ساعت (همراه با دز نظر گرفتن بدنه دستگاه گاماسل از جنس فولاد به ضخامت یک سانتی‌متر) محاسبه خواهد شد. همانطور که نتایج نشان می‌دهند، میزان دز معادل دریافتی در سلول دزیمتری مورد نظر بسیار کمتر از میزان مجاز دز دریافتی (۲۰۰ میکروسیورت بر ساعت) می‌باشد، از این رو حفاظ سربی طراحی شده با ضخامت متوسط ۳۰ سانتی‌متر به راحتی جلوی پرتوهای گاما را سد کرده و کار کردن با دستگاه گاماسل با چنین ویژگی‌هایی از دیدگاه فیزیک بهداشت هیچگونه خطر پرتوگیری را متوجه کارکنان نخواهد کرد. لازم به یادآوری است که بر اساس سند موسسه استانداردهای ملی آمریکا به

شماره ۲۰۰۷-ANSI/HPS N۴۳.۷، میزان بیشینه دز دریافتی کارکنان در فاصله ۵ سانتی متری از سطح دستگاه گاماسل خونی در نواحی محصور شده نباید از میزان ۲۰۰ میکروسیورت بر ساعت تجاوز کند.

### ۳.۳ مقایسه ویژگی‌های گاماسل طراحی شده با گاماسل‌های تجاری موجود

به منظور اعتبارسنجی نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی دستگاه گاماسل خونی مورد نظر، ویژگی‌های فیزیکی و هسته‌ای دستگاه طراحی شده با مشخصات برخی از گاماسل‌های خونی و تجاری موجود در جدول ۱ مقایسه می‌شود. بدین منظور دستگاه‌های پرتودهی تجاری با چشمه سزیم-۱۳۷ شامل Gammacell 1000 Elite و Gammacell 3000 Elan و همچنین دو دستگاه پرتودهی با چشمه کبالت-۶۰ شامل Blood Irradiator (BI-2000) و Gamma Chamber 5000 مورد مقایسه قرار می‌گیرند [۷ و ۹].

همان‌طور که جدول ۱ نشان می‌دهد، ویژگی‌های فیزیکی و هسته‌ای گاماسل خونی طراحی شده برابری خوبی با گاماسل‌های خونی و صنعتی موجود در بازار، به ویژه با گاماسل‌های مبتنی بر چشمه‌های کبالت-۶۰، از خود نشان می‌دهد. آهنگ دز تحویلی به ازای واحد اکتیویته (گری بر دقیقه بر کیلوکوری) برای گاماسل‌های طراحی شده با چشمه‌های میله‌ای سزیم-۱۳۷ حدود نصف مقدار بدست آمده در طراحی‌های مربوط به چشمه میله‌ای کبالت-۶۰ است. از این رو، مدت زمان پرتودهی به ازای واحد اکتیویته در گاماسل‌های با چشمه رادیونوکلیدی کبالت-۶۰ به نصف مدت زمان پرتودهی با گاماسل‌های دربرگیرنده چشمه سزیم-۱۳۷ کاهش می‌یابد. این موضوع به فراوانی و انرژی بالای پرتوهای گامای رادیونوکلید کبالت-۶۰ در مقایسه با رادیونوکلید سزیم-۱۳۷ در هر واپاشی هسته برمی‌گردد. افزون بر این، این موضوع موجب می‌شود که در طراحی گاماسل‌های خونی و صنعتی با چشمه سزیم-۱۳۷ به مقدار وزنی کمتری از سرب به منظور حفاظ‌گذاری دستگاه نیاز باشد. همچنین نتایج نشان می‌دهند که با چشم‌پوشی کردن از برتری انتخاب حجم بزرگ‌تر محفظه پرتودهی نمونه در طراحی گاماسل‌های با چیدمان صفحه‌ای چشمه، میزان آهنگ دز به ازای واحد اکتیویته‌ی گاماسل با محفظه کوچک‌تر حدود ۱/۵ برابر گاماسل با محفظه پرتودهی بزرگ‌تر می‌باشد.



**جدول ۱** مقایسه مشخصات فیزیکی و هسته‌ای گاماسل خونی طراحی شده با گاماسل‌های تجاری موجود.

ویژگی‌ها	Gammacel 1 1000 Elite	Gamma cell 3000 Elan	Blood Irradiator (BI-2000)	Gamma Chamber 5000	گاماسل طراحی شده در این پژوهش
چشمه تابشی و نوع چیدمان چشمه	سزیم-۱۳۷، صفحه‌ای	سزیم-۱۳۷، صفحه‌ای	کبالت-۶۰، استوانه‌ای	کبالت-۶۰، استوانه‌ای	کبالت-۶۰، استوانه‌ای
وزن تقریبی (کیلوگرم)	۱۱۵۰	۱۴۷۹	۲۶۰۰	۵۶۰۰	۳۰۶۴ (فقط حفاظ سربی و قفسه چشمه)
ابعاد فیزیکی (ارتفاع×عرض×عمق) (سانتی‌متر مکعب)	۹۸×۸۰×۱۵۵	۹۸×۸۰×۱۵۵	۱۱۲×۹۵×۱۷۱	۱۲۵×۱۰۶/۵×۱۵۰	۸۸×۸۸×۸۰ (فقط حفاظ سربی و قفسه چشمه)
حجم محفظه نمونه (لیتر)	۰/۸۲۴	۲/۳۴	۳	۵	۴/۰۲
اکتیویته اسمی (کیلو کوری)	۰/۵۷۵ (مدل A)، ۱/۳ (مدل I) و ۲/۶ (مدل II)	۱/۳ (مدل I) و ۲/۶ (مدل II)	۰/۸۱	۱۴	۳
آهنگ دز در آب (گری بر دقیقه)	۳/۵، ۷/۶ و ۱۴/۳ (دز مرکزی)	۴/۵ یا ۸/۷ (دز مرکزی)	۹ (بیشینه دز)	۱۶۰ (بیشینه دز)	۲۹/۲ (دز مرکزی)
آهنگ دز به ازای واحد اکتیویته (گری بر دقیقه بر کیلوکوری)	۵/۸۵، ۶/۰۹ و ۵/۵۰	۳/۳۵ و ۳/۴۶	۱۱/۱۱	۱۱/۴۳	۹/۷۲
مدت زمان مورد نیاز برای تحویل ۲۵ گری دز به محصولات خونی (دقیقه)	۳/۳، ۷/۱ و ۱/۷	۲/۹ یا ۵/۶	۲/۷۷	۰/۱۶	۰/۸۶
نسبت یکنواختی دز (DUR)	۱/۴	۱/۷	---	---	۲/۰۶

ویژگی‌ها	Gammacel 1 1000 Elite	Gamma cell 3000 Elan	Blood Irradiator (BI-2000)	Gamma Chamber 5000	گاماسل طراحی شده در این پژوهش
آهنک دز در فاصله ۵ سانتی متری از سطح (میکرو سیورت بر ساعت)	≤۱۰	≤۵	---	---	۳۶
ماده حفاظ	سرب و ورقه‌های فولادی	سرب و ورقه‌های فولادی	سرب و ورقه‌های فولادی	سرب و ورقه‌های فولادی	سرب و ورقه‌های فولادی
کشور و شرکت سازنده	Best Theratroni، CS، کانادا	Best Theratronics، کانادا	BRIT، هندوستان	BRIT، هندوستان	ایران
سال ساخت	۱۹۹۴	۱۹۹۴	۲۰۰۰	۱۹۹۶	۲۰۲۲ (طراحی هسته‌ای)

#### ۴. نتیجه گیری

نیاز مراکز پرتودهی به یک دستگاه پرتودهی درون کار خشک و قابل جابه‌جایی بدون نیاز به حفاظ اضافی به منظور انجام پژوهش در زمینه پرتودهی، مطالعات دزیمتری، مشخص نمودن حد دز، استریل کردن ابزارهای حساس پزشکی، پرتودهی خون و فرآورده‌های آن، پرتودهی اعضای پیوندی با دز پرتودهی بالا و غیره، یکی از نیازهای انکارناپذیر صنعت هسته‌ای و پزشکی می‌باشد. این کار با استفاده از تابش نمونه‌ها در داخل دستگاه‌های گاماسل خونی و پژوهش‌هایی همراه با انجام مطالعات میکروبیولوژی انجام می‌پذیرد. در این کار، طراحی هسته‌ای دستگاه گاماسل خونی با استفاده از چشمه‌های میله‌ای کبالت-۶۰ در دو بخش منحنی‌های ایزو دز و حفاظ‌گذاری آن برابر استانداردهای پذیرفته‌شده بین‌المللی انجام گرفت و نتایج با نمونه‌های حقیقی موجود مقایسه گردید. برای اینکار کد مونت کارلوی MCNPX برای انجام محاسبات به کار گرفته شد. تلاش شد تا حد امکان شرایط حقیقی در روش شبیه‌سازی با کد MCNPX پیاده‌سازی شود، تا ترابرد ذرات و در نتیجه خروجی کد در شرایط مشابه حالت حقیقی انجام گیرد.

مقدار یکنواختی دز درون محفظه پرتودهی حدود ۲ و میزان آهنک پرتوگیری در فاصله ۵ سانتی متری از سطح دستگاه گاماسل پایین‌تر از حد مجاز محاسبه شد. نتایج نشان دادند که



منحنی‌های ایزو دز به درستی متقارن بوده و میزان دز دریافتی با دور شدن از میله‌ها و نزدیک شدن به محور استوانه محفظه پرتو دهی کاهش می‌یابد. همچنین نتایج نشان دادند که کار کردن با دستگاه گاماسل خون با چنین ویژگی‌هایی از دیدگاه فیزیکی بهداشت هیچگونه خطر پرتوگیری را متوجه کارکنان نخواهد کرد.

## ۵. تقدیر و تشکر

از تمامی همکاران محترم در مجتمع پژوهشی شمال غرب کشور (بناب) که ما را در نگارش این مقاله یاری رساندند، نهایت تشکر و سپاس‌گزاری را به عمل می‌آوریم.

## منابع

- [1] International Atomic Energy Agency (IAEA), Effects of ionizing radiation on blood and blood components: A survey. IAEA-TECDOC, No. 934, 1997.
- [2] Janatpour K., Denning L., Nelson K., Betlach B., Mackenzie M., Holland P., "Comparison of X-ray vs. gamma irradiation of CPDA-1 red cells", Vox Sang. 89, 215-9, 2005.
- [3] Gómez-Simuta Y., Parker A., Cáceres C., Vreysen M.J.B., Yamada H., "Characterization and dose-mapping of an X-ray blood irradiator to assess application potential for the sterile insect technique (SIT)", Appl. Radiat. Isot. 176, 109859, 2021.
- [4] Soliman K., Adili M., Alrushoud A., "Radiation dose verification of an X-ray based blood irradiator using EBT3 radiochromic films calibrated using Gamma Knife machine", Rep. Pract. Oncol. Radiother. 24, 369-374, 2019.
- [5] Aparecido Olivo R., Vinicius da Silva M., Bernadelli Garcia F., et al., "Evaluation of the effectiveness of packed red blood cell irradiation by a linear accelerator", Rev. Bras. Hematol. Hemoter. 37, 153-159, 2015.
- [6] American Society for Testing and Materials standards, ISO/ASTM 51939:2017 Practice for blood irradiation dosimetry, 2017.
- [7] Roback J., Rae Combs M., Grossman B., Hillyer C. "Technical Manual. 16th ed. Bethesda: AABB", p.213, 2008.
- [8] Anderson K.C., Goodnough L.T., Sayers M., et al., "Variation in blood component irradiation practice: implications for prevention of transfusion-associated graft-versus-host disease", Blood 77, 2096-102, 1991.
- [9] Best Theratronics, 413 March Road Ottawa, ON K2K OE4 Canada, All Gammacells now made by: Nordion sold its Research Irradiator, 2008.
- [10] Barnard S.G.R., Ainsbury L., Daniels T., Eakins J.S., "Alternatives to Cesium irradiators for biological sciences research and blood transfusion services", Centre for Radiation, Chemical and Environmental Hazards, Public Health England, Contract Report CRCE-RED-001-2020, 2020.
- [11] Fathollahi H., Ahari Mostafavi H., Majd F., "Investigation for possibility of extension of irradiation domain for Issledovatelj gamma-cell facility to lower doses", J. Nucl. Sci. Tech. 31, 43-46, 2004. (In Persian)
- [12] Balkanian N., Yeganeh M., Karamati Farhood R., "Nuclear design of Gamma-cell irradiation system with total activity of 24kCi using MCNP4C code", Proceeding of 21<sup>th</sup> nuclear conference of Iran, Isfahan university, Isfahan, 25-26 Feb, 2016. (In Persian)





- [13] Balkanian N., Amir Alayi S., Yeganeh M., Karamati Farhood R., "Thermal analysis of Gamma-cell irradiation system using MCNP4C code and ANSYS software", Proceeding of 21<sup>th</sup> nuclear conference of Iran, Isfahan university, Isfahan, 25-26 Feb, 2016. (In Persian)
- [14] Bagheri, R., Adeli, R., "Gamma-ray shielding properties of phosphate glasses containing Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, PbO, and BaO in different rates", Radiat. Phys. Chem. 174, 108918, 2020.
- [15] Production association, MAYAK. "Ionizing sources and bulk isotopes", State atomic energy corporation, 31 Lenin St., Ozyorsk, Chelyabinsk Region, Russia, 2020.
- [16] Bagheri, R., Moghaddam, A.K., Yousefi, A., "Gamma-ray shielding study of light to heavy weight concretes using MCNP-4C code", Nucl. Sci. Tech. 28, 1-8, 2017.
- [17] Pelowitz, D.B., "MCNPXTM User's Manual", Version 2.6.0, Report LA-CP-07-1473, Los Alamos, NM: Los Alamos National Laboratory, 2008.
- [18] [https://www.nordin.com/wp-content/uploads/2014/10/GT\\_Presentation\\_Risk\\_mitigation.pdf](https://www.nordin.com/wp-content/uploads/2014/10/GT_Presentation_Risk_mitigation.pdf).
- [19] ANSI, American National Standards Institute, Inc., Safe Design and Use of Self-Contained, Dry Source Storage Irradiators (Category I). Health Physics Society, ANSI/HPS N43.7, 2007.

© 2022 Alzahra University, Tehran, Iran. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0 license) (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

