



محاسبه‌ی توزیع دز در محفظه‌ی تابش سیستم پرتودهی قابل حمل SVHI-Co-60-T قبل و بعد از بارگذاری، با استفاده از کد MCNP4C و مقایسه‌ی آن با نتایج حاصل از دزیمترهای PMMA برای استفاده از آن در پرتودهی گندم

نوید بالکانیان، میکائیل یگانه*، آیت قانع، مهدی تقوی، عباس مدبر
پژوهشکده‌ی کاربرد پرتوها، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، صندوق پستی: ۱۹۶-۵۵۵۵۱۵، بناب - ایران

چکیده: سیستم پرتودهی قابل حمل SVHI-Co-60-T با چشمه‌ی Co-60 برای پرتودهی پیاز مورد استفاده قرار گرفته است. برای بهینه‌سازی و تغییر کاربری سیستم، شناخت کافی از دز جذبی محصول‌ها ضروری است. در این مقاله دز جذبی در نقاط مختلف محفظه‌ی تابش، قبل از بارگذاری، با استفاده از کد MCNP4C محاسبه و با نتایج حاصل از اندازه‌گیری دز مذکور در امتداد خط مرکزی با دزیمترهای رد، آمبر و کلیر در پژوهشکده‌ی کاربرد پرتوها مقایسه شده است. مقادیر به دست آمده از دزیمترها و نتایج کد مطابقت خوبی با هم دارند. توزیع دز در داخل محفظه‌ی تابش بر روی صفحه‌ای به ابعاد $60\text{cm} \times 30\text{cm}$ با کد MCNP4C محاسبه شده است. آهنگ دز کمینه، بیشینه و آهنگ دز در ناحیه‌ی هم‌دز مرکزی، به ترتیب، 0.3 ، 2.6 و 1.25 kGy/hr به دست آمده است. آهنگ دز اندازه‌گیری شده در ناحیه‌ی هم‌دز مرکزی با دزیمترهای رد، آمبر و کلیر، به ترتیب، برابر با 1.37 ، 1.303 و 1.302 kGy/hr است. اختلاف آهنگ دز مرکزی محاسبه شده با کد و دزیمترها، به ترتیب، برابر 8.7% ، 3.8% و 3.8% است. هم‌چنین بعد از بارگذاری، برای داشتن نسبت یکنواختی دز مناسب برای تغییر کاربری سیستم از پرتودهی پیاز به گندم با استفاده از کد MCNP4C سپرهایی در جلوی چشمه‌های جدید، طراحی شده و نتایج با اندازه‌گیری تجربی مقایسه شده است.

کلیدواژه‌ها: سیستم پرتودهی قابل حمل، SVHI-Co-60-T، دزیمترهای PMMA، کد MCNP4C

Calculation of Dose Distribution in Irradiation Chamber of the SVHI-Co-60-T Portable Irradiation System Before and After Loading, Using MCNP4C Code and Comparison with the Results of the PMMA Dosimeters to Use for Wheat Irradiation

N. Balkanian, M. Yeganeh*, A. Ghaneh, M. Taghavi, A. Modaber

Research School of Radiation Applications, Nuclear Science and Technology Research Institute, P.O.Box: 5555515-196, Bonab - Iran

Abstract: SVHI-Co-60-T irradiation system has been used as a portable one with Co-60 source for onion irradiation. To optimize and for the change of the system application, sufficient knowledge of the absorbed dose of the products is necessary. In this paper, the absorbed dose in the irradiation chamber is calculated for different points using MCNP4C code and then the results are compared with the measurements by the Red, Amber and Clear dosimeters of the Radiation Application Research School, along the central line of the chamber. The values obtained from dosimeters are in good agreement with the code results. The dose distribution in the irradiation chamber has been calculated on a plane with dimensions of $60\text{cm} \times 30\text{cm}$. The minimum and maximum dose rates and the dose rate at the center of the same dose area of the isodose curve are 0.3 kGy/hr, 2.6 kGy/hr and 1.25 kGy/hr, respectively. Also, the dose rate measured in the central area of the chamber using Red, Amber and Clear dosimeters is 1.37 kGy/hr, 1.303 kGy/hr and 1.302 kGy/hr, respectively. Differences between the calculated dose using MCNP4C code and the measured dose employing three types of dosimeters are 8.7% , 3.8% and 3.8% , respectively. After loading, the spacers have been designed in front of new sources with MCNP4C code to have suitable dose with a uniform ratio to change its application from onion to wheat irradiation and also to compare with the measurements.

Keywords: Portable Irradiation System, SVHI-Co-60-T, PMMA Dosimeters, MCNP4C Code

*email: mayeganeh@bnrc.ir

تاریخ دریافت مقاله: ۹۲/۹/۲۰ تاریخ پذیرش مقاله: ۹۳/۵/۱۱



شکل ۱. سیستم پرتوده‌ی SVHI-CO-60-T و لوله‌ی PVC قرار گرفته در داخل آن.

هدف از این کار به دست آوردن آهنگ‌های دز بیشینه، کمینه، آهنگ دز مرکزی و توزیع دز در همه‌ی نقاط محفظه‌ی تابش قبل از بارگذاری سیستم بود. به دلیل محدودیت‌هایی که در اندازه‌گیری تجربی دز وجود دارد، امکان اندازه‌گیری دز فقط در امتداد خط مرکزی محفظه وجود داشت و در سایر نقاط می‌باید از نتایج کد MCNP4C استفاده کرد. ابتدا منحنی هم دز داخل محفظه‌ی تابش با استفاده از کد MCNP4C محاسبه شده و براساس آهنگ‌های دز کمینه و بیشینه‌ی درون محفظه‌ی پرتوده‌ی، زمان پرتوده‌ی دزیمترهای رد 4034، آمبر 3042 و کلیر مشخص شد. سپس دزیمترها در داخل سیستم قرار داده شده و مقادیر دز جذبی با نتایج به دست آمده از کد MCNP4C مقایسه شدند. با توجه به مطابقت خوب نتایج محاسبه و اندازه‌گیری می‌توان از درستی نتایج به دست آمده از کد در سایر نقاط نیز اطمینان حاصل پیدا کرد. هم‌چنین قطر سپر برای داشتن نسبت یکنواختی دز مناسب برای گندم با استفاده از کد MCNP4C بعد از بارگذاری سیستم محاسبه شده و نسبت یکنواختی سیستم و سرعت خروجی گندم به صورت تجربی با نتایج حاصل از کد MCNP4C مقایسه شد.

۲. شبیه‌سازی سیستم پرتوده‌ی

در این پژوهش از کد MCNP4C استفاده شد. ورودی‌های لازم در کد MCNP4C از این قرارند [۳، ۴]. این سیستم دارای ۳۶ کانال چشمه (از جنس فولاد ضد زنگ) به قطر 13mm و ارتفاع 628mm با هندسه‌ی دایره‌ای به شعاع 350mm است.

۱. مقدمه

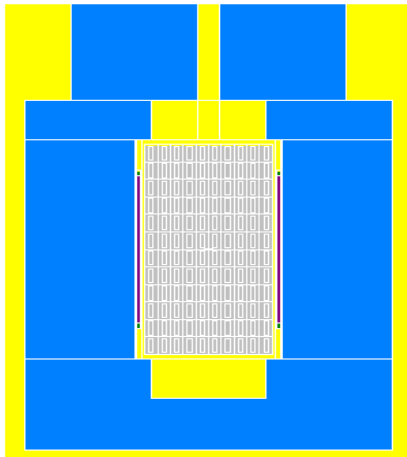
۱.۱ توضیح کلی سیستم پرتوده‌ی

سیستم پرتوده‌ی قابل حمل SVHI-Co-60-T موجود برای پرتوده‌ی پیاز در دزهای پایین 50 ± 20 Gy به منظور جلوگیری از جوانه زدن و افزایش زمان ذخیره‌سازی آن ساخته شده است. این سیستم شامل چشمه‌های تابشی کبالت-60 از نوع محفظه‌ی خود حفاظ است. پیازها از مخزن ورودی به وسیله‌ی یک نقاله به گلوگاه در بالای سیستم حمل می‌شوند و سپس بر اثر نیروی وزن خود از طریق یک حفاظ تابشی ماریجی از جنس سرب به محفظه‌ی استوانه‌ای تابش وارد می‌شوند (شکل ۱). محفظه‌ی تابش با حفاظ سربی به ضخامت ۲۶ سانتی‌متر احاطه شده است. محصولات پرتو دیده از طریق دو مجرای خروجی روی نقاله‌ها و سپس داخل مخزن خروجی ریخته می‌شوند.

این سیستم قبل از بارگذاری دارای فعالیت پرتوزایی 37 kCi بوده است. برای اطمینان از پرتوده‌ی مناسب و هم‌چنین برای بهینه‌سازی و طراحی این نوع از سیستم‌ها، شناخت کافی از دز جذبی محصولات هنگام فرایند پرتوده‌ی ضروری است. از این‌رو، انجام دزیمتری و اندازه‌گیری دقیق توزیع دز در داخل سیستم ضروری است. با توجه به مشکل له‌شدگی پیازها، این سیستم برای پرتوده‌ی گندم تغییر کاربری داده شده است. این سیستم با ۶ میله‌ی کبالت-60 بارگذاری شده و فعالیت کل سیستم به 59 kCi می‌رسد. چون میله‌های بارگذاری شده دارای فعالیت بالا هستند بنابراین برای داشتن نسبت یکنواختی دز مناسب لازم بود، سپرهایی در جلوی میله‌های جدید طراحی شود.

۲.۱ دزیمترهای استفاده شده

دزیمترهای پلی‌متیل متااکریلات^(۱) (PMMA) به طور گسترده در دزیمتری دز-بالا در زمینه‌ی فرآوری پرتوی صنعتی استفاده می‌شوند. مزیت‌های اصلی این دزیمترها، سختی، پایداری، سادگی و قیمت ارزان آن‌ها است. برهم‌کنش پرتو یوننده با پلی‌متیل‌اکریلات، رادیکال‌های آزاد تولید می‌کند که روی جذب نوری آن در نوارهای طول موج مشخص تأثیر می‌گذارد. از دزیمترهای پلی‌متیل‌اکریلات می‌توان به دزیمترهای ردپرسپکس^(۲)، آمبر پرسپکس^(۳) و کلیرپرسپکس^(۴) اشاره کرد. با اندازه‌گیری میزان جذب نوری این دزیمترها و استفاده از منحنی‌های مقیاس‌بندی، می‌توان مقدار دز جذب شده را اندازه‌گیری نمود [۱، ۲].



شکل ۳. هندسه‌ی شبیه‌سازی شده‌ی محفظه‌ی تابش سیستم پرتودهی قابل حمل SVHI-CO-60-T.

شکل ۴ ورودی کد MCNP۴C برای محاسبه‌ی قطر سپرها بعد از بارگذاری سیستم را نشان می‌دهد. جهت تعیین قطر باید نسبت یکنواختی دز در داخل محصول کم‌تر از ۲ باشد [۵، ۶]. در این شکل قسمت زرد رنگ، هوا، خاکستری رنگ، گندم و دزیمترها، بخش‌های بنفش رنگ چشمه‌های سیستم هستند، سپرها در جلوی ۶ میله‌ی جدید قرار گرفته‌اند و قسمت‌های سبز رنگ بخش‌های فولادی سیستم‌اند. هم‌چنین برای محاسبه‌ی سرعت خروجی گندم، دزیمترهایی در ابعاد گندم در نقطه‌ی دز کمینه (دزیمتر شماره ۱ در شکل ۴)، واقع شده‌اند. این دزیمترها در کل ارتفاع سیستم پرتودهی (از ورود تا خروج محصول) چیده شده‌اند. مقدار آهنگ دزی که گندم به هنگام طی مسیر جذب می‌کند، محاسبه شده و سرعت برای دزهای کمینه‌ی جذبی مختلف چنین محاسبه شد

$$D(\text{kGy}) = \dot{D}_1 t_1 + \dot{D}_2 t_2 + \dots + \dot{D}_n t_n \quad (1)$$

$$t_1 = \frac{X_1}{v}, t_2 = \frac{X_2}{v}, \dots, t_n = \frac{X_n}{v} \xrightarrow{v_1=v_2=\dots=v_n=v}$$

$$t_1 = \frac{X_1}{v}, t_2 = \frac{X_2}{v}, \dots, t_n = \frac{X_n}{v} \quad (2)$$

$$D(\text{kGy}) = \frac{1}{v} (\dot{D}_1 X_1 + \dot{D}_2 X_2 + \dots + \dot{D}_n X_n) \quad (3)$$

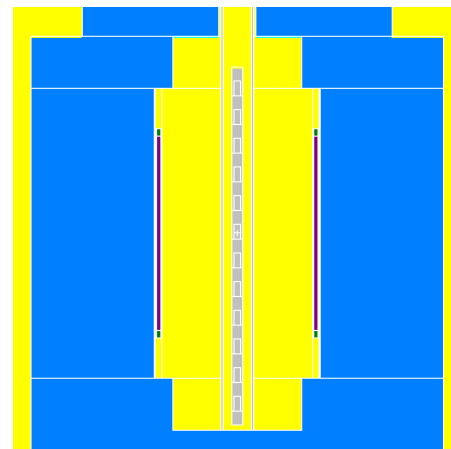
$$v(\text{cm/s}) = \frac{\dot{D}_1 X_1 + \dot{D}_2 X_2 + \dots + \dot{D}_n X_n}{D * 3600} \quad (4)$$

که در آن‌ها، v سرعت، \dot{D}_n آهنگ دز در سلول n ، مدت زمان طی گندم از سلول n و X_n ارتفاع سلول n است.

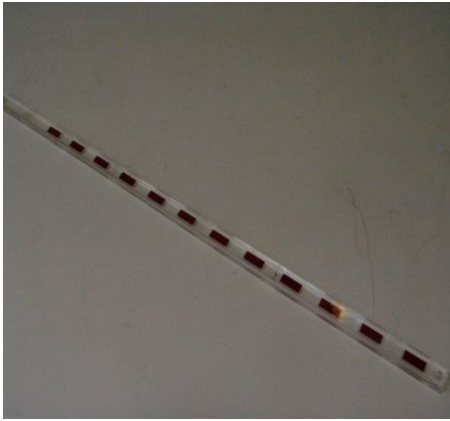
سیستم دارای ۱۹ میله‌ی چشمه‌ای به ابعاد $11,1\text{mm} \times 452\text{mm}$ در وسط کانال‌ها است. هم‌چنین میله‌ها دارای غلاف‌هایی از جنس زیرکونیم و فولاد ضد زنگ هستند. هر میله‌ی چشمه‌ای به ۴ قسمت تقسیم شده که قسمت‌های بالایی و پایینی میله، غیرفعال بوده و ۲ قسمت میانی فعال هستند. میله‌ها به طور یک در میان در کانال‌ها قرار گرفته و کانال ۳۶م دارای میله‌ی چشمه‌ای با قسمت غیرفعال و یک قسمت فعال است. فعالیت پرتوزایی سیستم در زمان اجرای برنامه، قبل از بارگذاری $3,4 \text{ kCi}$ و بعد از بارگذاری 59 kCi به دست آمد.

دستور F۴ کد برای محاسبه‌ی شار در یک حجم استفاده شده است و با استفاده از ضریب‌های $DE(\text{MeV})$ و $DF\left(\frac{\text{rem/hr}}{\text{photon/cm}^2 \cdot \text{sec}}\right)$ که ضریب تبدیل شار به دز هستند، مقدار دز برحسب rem h^{-1} محاسبه شد. ضریب کیفیت (WR) برای فوتون برابر ۱ است و این مقدار معادل با نرخ دز برحسب rad h^{-1} است [۳].

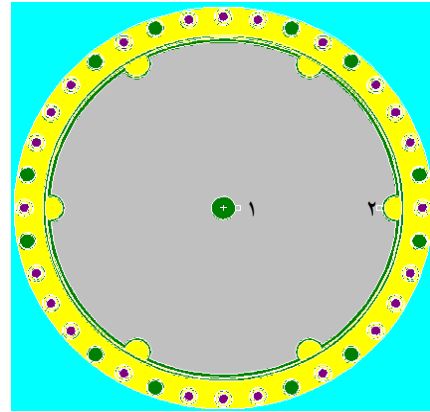
ورودی کد MCNP۴C برای محاسبه‌ی توزیع دز و مقادیر دز در امتداد محفظه‌ی تابش، قبل از بارگذاری در شکل‌های ۲ و ۳ نشان داده شده است. قسمت آبی رنگ شکل‌ها بخش حفاظ زیست‌شناختی سربی و قسمت زرد رنگ هوا، خاکستری رنگ آب (دزیمترها و ورقه‌های پرسپکس)، خطوط خاکستری اطراف ورقه‌های پرسپکس، لوله‌ی PVC و بخش بنفش رنگ، چشمه‌ی سیستم است. ترتیب قرارگیری دزیمترها از پایین به بالا است. برای ترسیم منحنی هم دز تعداد دزیمترهای در نظر گرفته شده در راستای شعاعی ۱۰ و در راستای عمودی ۱۲ عدد بود.



شکل ۴. هندسه‌ی شبیه‌سازی شده برای محاسبه‌ی مقدارهای دز در امتداد خط مرکزی محفظه‌ی تابش سیستم پرتودهی قابل حمل SVHI-CO-60-T.



شکل ۵. چیدمان اندازه‌گیری برای برقراری تعادل الکترونی (دزیمترها در بین دو ورقه از جنس پرسپکس قرار گرفته‌اند).



شکل ۴. ورودی کد NCNP4C برای محاسبه‌ی قطر و نسبت یکنواختی دز گندم بعد از بارگذاری سیستم پرتودهی قابل حمل SVHI-CO-60-T.

۳. روش اندازه‌گیری

۱.۳ اندازه‌گیری قبل از بارگذاری سیستم

سیستم مورد استفاده دارای یک حفره‌ی دسترسی به محفظه‌ی تابش، به قطر ۸ سانتی‌متر است؛ به همین جهت تنها می‌توان دز را در امتداد خط مرکزی محفظه‌ی تابش اندازه‌گیری کرد. دو ورقه‌ی پرسپکس، ۱۰ و ۸ میلی‌متری به ابعاد $91,75\text{cm} \times 2,4\text{cm}$ برای برقراری تعادل الکترونی در نظر گرفته شده است. بر روی ورقه‌ی ۱۰ میلی‌متری برای قرارگیری دزیمترها، با استفاده از دستگاه CNC ۱۲ حفره‌ی مستطیلی به ابعاد $1,2\text{cm} \times 3,2\text{cm} \times 0,4\text{cm}$ ایجاد می‌شود. ورقه‌ی ۸ میلی‌متری بعد از جای‌گذاری دزیمترها در داخل حفره‌ها بر روی ورقه‌ی ۱۰ میلی‌متری گذاشته می‌شود. برای اطمینان از این که دزیمترها دقیقاً در وسط محفظه‌ی تابش قرار می‌گیرند از یک لوله‌ی PVC به طول ۳ متر و قطر خارجی ۶,۳ سانتی‌متر استفاده شده است. ورقه‌های به هم چسبیده شده از یک انتها به وسیله‌ی پیچ و مهره و از طرف دیگر به وسیله‌ی کائوچو در وسط لوله‌ی PVC محکم می‌شوند. شکل ۵ دزیمترهای رد پرسپکس در بین ورقه‌های پرسپکس را نشان می‌دهد. مشخصه‌های دزیمترهای استفاده شده در جدول ۱ آورده شده است.

با توجه به مقادیر دز به دست آمده از شبیه‌سازی، دزیمترهای رد و کلیبر به مدت ۲۴ ساعت و دزیمترهای آمبر به مدت ۶ ساعت در داخل سیستم قرار گرفتند. بعد از خارج شدن دزیمترها، با استفاده از دستگاه طیف‌سنج نوری مدل لامبدا ۴۵ شرکت پرکین المیر مقدار جذب نوری دزیمترها خوانده شده و از روی منحنی‌های مقیاس‌بندی دزیمترها، دز جذبی آن‌ها محاسبه شد.

جدول ۱. مشخصات دزیمترهای استفاده شده

نوع دزیمتر	رد پرسپکس	آمبر پرسپکس	کلیبر پرسپکس
تغییر رنگ	قرمز ← قرمز تیره	کهربایی ← قهوه‌ای	سفید ← زرد کم‌رنگ
طول موج اندازه‌گیری (نانومتر)	۶۴۰	۶۰۳	۳۱۴
محدوده‌ی اندازه‌گیری دز جذبی (کیلوگری)	۵۰-۵	۳۰-۵۰۰	۵۰-۵

۲.۳ اندازه‌گیری دز بعد از بارگذاری سیستم

برای تعیین رابطه‌ی سرعت- دز و هم‌چنین نسبت یکنواختی دز، کل سیستم پرتودهی با گندم پر شد، هر دزیمتر آمبر به ۱۲ قسمت مساوی در حد گندم تقسیم شده و با 40 kg گندم مخلوط شد. مارپیچ خروجی در کم‌ترین سرعت تنظیم شده و گندم حاوی دزیمترها به روی نقاله ریخته و در خروجی غربال شد. مدت زمان خروج دزیمترها از سیستم ۲۲ دقیقه و ۳۶ ثانیه و طول مسیر ۳۰۰ سانتی‌متر بود. این روش نسبت یکنواختی دز دقیق گندم را ارائه داد و برای اطمینان از دقت و صحت کار، اندازه‌گیری سه بار و هر بار با ۱۰۰ دزیمتر تکرار شد.

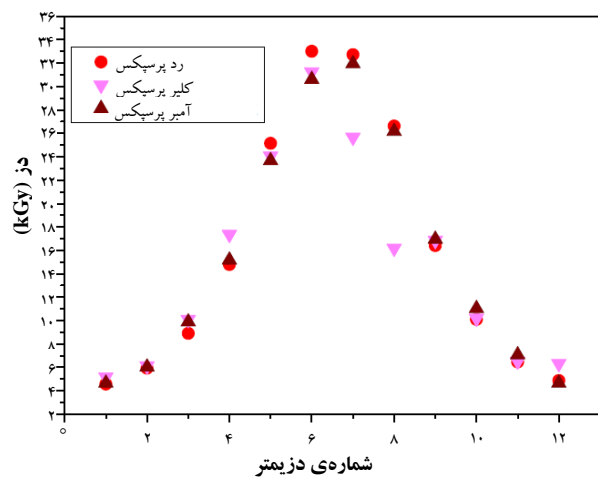
۴. یافته‌ها و بحث

۱.۴ پیش از بارگذاری

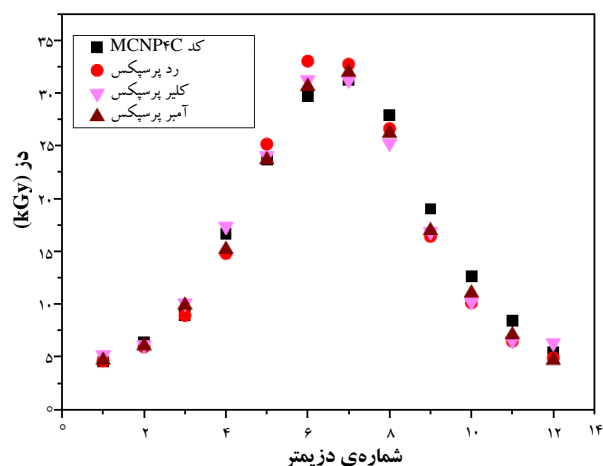
همان‌طور که در شکل ۶ نشان داده شده است آهنگ دز در ناحیه‌ی هم دز مرکزی $1,25\text{ kGy/hr}$ و کمینه‌ی آهنگ دز $0,3\text{ kGy/hr}$ بود. از روی مقادیر آهنگ دز و محدوده‌ی دز عملیاتی دزیمترها، مدت زمان پرتودهی دزیمترهای رد و کلیبر، ۲۴ ساعت و آمبر، ۶ ساعت به دست آمد. از منحنی هم‌دز می‌توان دریافت که استفاده از میله‌های چشمه با دو قسمت غیرفعال در بالا و پایین میله‌ی چشمه باعث می‌شود که آهنگ دز در قسمت‌های بالا و پایین محفظه‌ی تابش تقریباً یکنواخت شود.

اندازه‌گیری تجربی دارند. بیشینه‌ی اختلاف کد نسبت به دزیمتر آمبر در نقطه‌ی ۱۱ برابر ۱۹/۵٪ است. اختلاف در نقاط ۱۲، ۱۰، ۹، به ترتیب، ۱۶، ۱۴ و ۱۲٪ و در بقیه نقطه‌ها اختلاف کد کم‌تر از ۱۰٪ است. منابع ایجاد خطا در محاسبات و اندازه‌گیری‌ها عبارت‌اند از:

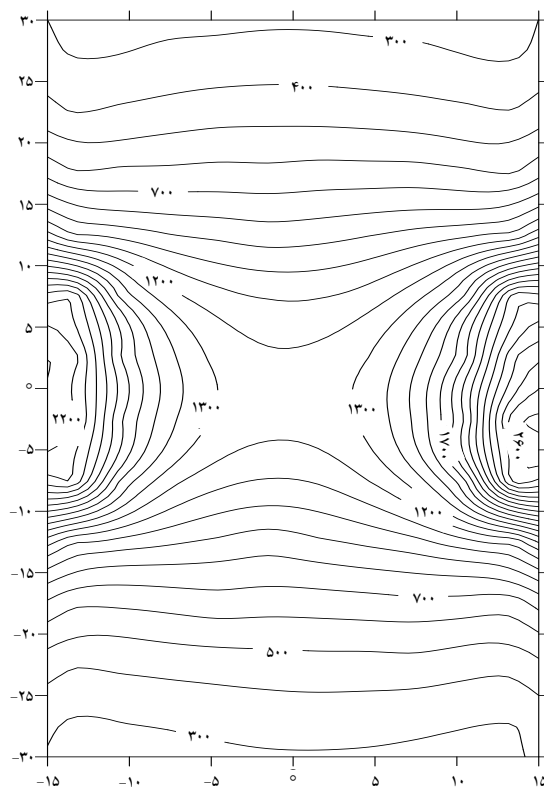
- اختلاف مربوط به دزیمترها در اندازه‌گیری دز؛
- خطای مربوط به دستگاه اندازه‌گیری (طیف‌سنج نوری و کولیس رقمی)؛
- خطا به خاطر نبود نگه‌دارنده‌ی مناسب برای اندازه‌گیری دقیق دز در مکان‌های یکسان از دزیمترها (یکی از مهم‌ترین عامل‌های ایجادکننده خطا است)؛
- خطای شبیه‌سازی با کد که ۴٪ است؛
- خطای مربوط به محاسبه‌ی دز در یک سلول به وسیله‌ی کد؛
- خطای مربوط به ضریب‌های تبدیل شار به دز در کد.



شکل ۷. مقایسه‌ی مقدار دز رد، کلیور و آمبر.



شکل ۸. مقایسه‌ی مقدارهای دز محاسبه شده در امتداد خط مرکزی محفظه‌ی تابش با مقدارهای دز اندازه‌گیری شده با دزیمترهای PMMA.

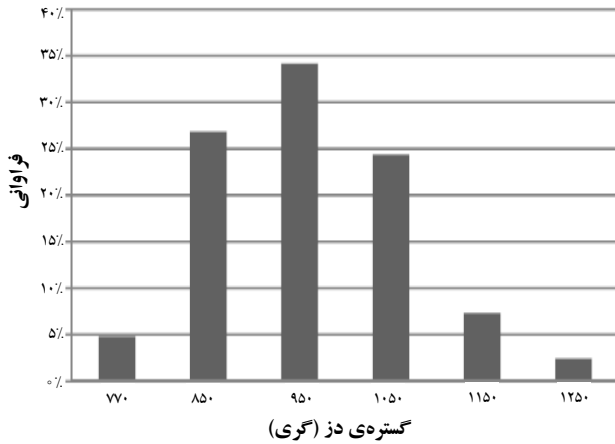


شکل ۶. منحنی هم‌دز به دست آمده از کد MCNP4C (آهنگ دز برحسب گری بر ساعت و طول، ارتفاع برحسب سانتی‌متر است).

آهنگ دز در نزدیکی چشمه در سمت راست ۲/۶ kGy/hr بود که ۴۰۰ Gy بیش‌تر از نقطه‌ی متقابل بود، این امر به خاطر میله‌ی چشمه‌ای ۱۹ بود که تقارن را به هم زده بود. در شکل ۷، مقدار دز جذبی از دزیمتر شماره ۱ شروع به افزایش کرده و در نقطه‌های ۶ و ۷ (تقریباً مرکز محفظه‌ی تابش) به بیشینه مقدار خود رسیده و سپس شروع به کاهش نموده است. از روی این شکل می‌توان فهمید که نقطه‌های ۶ و ۷ در ناحیه‌ی هم‌دز مرکزی قرار گرفته‌اند. در شکل دیده می‌شود که بیشینه‌ی اختلاف اندازه‌گیری آمبر نسبت به رد برای دزیمتر شماره ۳ و برابر ۱۰٪ است، برای سایر نقاط اختلاف بین اندازه‌گیری دزیمترهای رد و آمبر کم‌تر از ۱۰٪ است. در شکل ۷ به جز دو نقطه‌ی ۷ و ۸ نتایج دزیمترهای کلیور مطابقت خوبی با دزیمترهای رد و آمبر دارند. بیشینه‌ی اختلاف کلیور نسبت به آمبر در دزیمتر شماره‌ی ۱۲ (دزیمتر شماره‌ی ۱۲ دقیقاً در آستانه‌ی محدوده‌ی کاری کلیور است) ۲۱٪ و در بقیه نقطه‌ها خطا کم‌تر از ۱۰٪ است. علت اختلاف فاحش در دزیمترهای ۷ و ۸ احتمالاً به دلیل دقت کم دزیمترها است. در شکل ۸ دیده می‌شود که با جای‌گذاری دزیمترهای کلیور جدید در این نقطه‌ها خطای بین آمبر و کلیور کم‌تر از ۱۰٪ می‌شود. در شکل ۸، نتایج کد MCNP4C مطابقت بسیار خوبی با نتایج



۲.۴ بعد از بارگذاری



شکل ۹. نمودار فرآوانی دز اندازه‌گیری شده با دزیترهای آمبر.

پی‌نوشت‌ها

1. Poly Methyl Meth Acrylate
2. Red Perspex
3. Amber Perspex
4. Clear Perspex

مرجع‌ها

1. B. Whittaker, The Influence of Dose Rate, Ambient Temperature and Time on the Radiation Response of Harwell PMMA Dosimeters, Radiation Physics and Chemistry, 60 (2001) 101-110.
2. S. O'Keeffe, C. Fitzpatrick, E. Lewis, A Review of Optical Fibre Radiation Dosimeters, Sensor Review, 28(2) (2008) 136-142.
3. OAK Ridge National Laboratory, Monte Carlo N-Particle Transport Code System, Los Alamos National Laboratory (2000).
4. J.K. Shultis, R.E. Faw, An Mecn Primer, Dept. of Mechanical and Nuclear Engineering Kansas State University (2006).
5. International Atomic Energy Agency (IAEA), Gamma Irradiators for Radiation Processing, Vienna (2002).
6. IAEA, Dosimetry for Food Irradiation, Technical Reports Series No. 409 (2002) 40.

کمینه‌ی آهنگ دز برای سرعت $0,221 \text{ cm/s}$ (حداقل سرعت دستگاه) برابر با 746 Gy و بیشینه‌ی دز برابر با 1307 Gy اندازه‌گیری شد. بنابراین نسبت یکنواختی سیستم پرتودهی برای سپرهایی به شعاع 1 cm ، $1,75$ به دست آمد. در شکل ۹ نمودار فرآوانی دز برحسب دز نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۹ دیده می‌شود بیش از 80% محصول، دزی بین 850 تا 1050 Gy را دریافت کرده است. با کد MCNP برای سرعت $0,221 \text{ cm/s}$ ، نتایج زیر حاصل شد.

- آهنگ دز کمینه‌ای که گندم با سرعت ثابت در مسیر جذب می‌کند (دزیتر ۱ در شکل ۵): $1251,7 \text{ kGy/hr}$ ؛
- آهنگ دز بیشینه‌ای که گندم با سرعت ثابت در مسیر جذب می‌کند (دزیتر ۲ در شکل ۵): $1921,04 \text{ kGy/hr}$ ؛
- آهنگ دز کمینه: 786 Gy ؛
- آهنگ دز بیشینه: 1208 Gy ؛
- نسبت یکنواختی دز: $1,54$.

تطابق خوبی بین محاسبه و اندازه‌گیری تجربی سیستم وجود دارد. دز 400 Gy برای گندم کافی است، پس باید سرعت سیستم روی $0,434$ سانتی‌متر بر ثانیه تنظیم شود.

۵. نتیجه‌گیری

در شکل ۶، آهنگ دز در ناحیه‌ی هم‌دز مرکزی، $1,25 \text{ kGy/hr}$ و هم‌چنین آهنگ دز اندازه‌گیری شده در این ناحیه برای دزیترهای رد، آمبر و کلیر به ترتیب برابر با $1,37$ ، $1,30$ و $1,30 \text{ kGy/hr}$ است. خطا در محاسبه‌ی آهنگ دز مرکزی بین کد و دزیترها، به ترتیب، $8,7$ ، $3,8$ و $3,8\%$ است. بنابراین نتایج کد و اندازه‌گیری تجربی در نقاط اندازه‌گیری مطابقت خیلی خوبی با هم دارند، لذا می‌توان نتایج کد MCNP4C را به سایر نقاط تعمیم داد. با توجه به نتایج کد، آهنگ دز کمینه $0,3 \text{ kGy/hr}$ و آهنگ دز بیشینه $2,6 \text{ kGy/hr}$ است که در تعیین زمان پرتودهی محصولات و بهینه‌سازی این سیستم لازم و ضروری است. هم‌چنین بعد از بارگذاری سیستم نتایج اندازه‌گیری تجربی نشان داد که قرار دادن سپرهایی با قطر 1 cm نسبت یکنواختی دز را به حد معقولی برای پرتودهی گندم می‌رساند. با کد MCNP نسبت یکنواختی دز $1,54$ و از اندازه‌گیری $1,75$ به دست آمد که مطابقت خوبی با هم دارند.