



## شبیه سازی مونت کارلویی دز جذبی در تعیین هندسه بهینه چشمه های سامانه پرتودهی پرتابل گامای کبالت-۶۰

کبیر، مصطفی<sup>(۱)</sup> - اطاعتی، غلامرضا\*<sup>(۱)</sup>

<sup>۱</sup>دانشگاه صنعتی امیر کبیر، دانشکده مهندسی انرژی و فیزیک، گروه کاربرد پرتوها

### چکیده:

پرتودهی مواد غذایی از جمله روش های حفظ و آلودگی زدایی آن ها به حساب می آید. میکروارگانیزم های مضر موجود در مواد غذایی عامل بسیاری از بیماری ها هستند که با پرتوگیری تا حد بسیار قابل قبولی از بین می روند. سامانه های پرتودهی در جای کوچک یا پرتابل امروزه برای استریلیزاسیون در محل تولید مواد غذایی مورد استفاده قرار می گیرند. حدود دز پرتودهی طبق استانداردهای بین المللی از ۰/۲ تا ۱۰ کیلوگری می تواند متغیر باشد. در این مقاله با استفاده از کد مونت کارلویی MCNPX محاسبات دزیمتری برای تعیین بهینه ترین چینش چشمه های میله ای کبالت-۶۰ در یک سامانه پرتودهی کوچک پرتابل مورد بررسی واقع شد. هندسه های موجود شامل اکتیویته های ۲/۵، ۵/۰، ۷/۵، ۱۰/۰، ۱۲/۵، ۱۵/۰ و ۱۷/۵ کیلوکوری بودند. با توجه به محدودیت فضا و هندسه، زمان در معرض قرار گرفتن مواد غذایی مورد محاسبه واقع شد. محاسبات نشان دادند زمانی که از ۶ چشمه مدادی پرتوهای کبالت-۶۰ با اکتیویته ۱۵/۰ کیلوکوری در پیکربندی ۶-ضلعی منتظم دوگانه می تواند ایده آل ترین چینش برای داشتن بیشینه دز جذبی مجاز برای مواد غذایی خشک باشد.

کلمات کلیدی: پرتودهی مواد غذایی، سامانه های پرتابل، دزیمتری، شبیه سازی مونت کارلویی، کبالت-۶۰

## Monte Carlo Simulation of Absorbed Dose for Determining the Optimal Geometry of Cobalt-60 Gamma-ray Portable Irradiation System

Kabir, Mostafa; Etaati, Gholamreza\*

Energy Engineering and Physics Department, Amirkabir University of Technology (Tehran Polytechnic)

### Abstract:

Food Irradiation is one of the methods of preservation and decontamination. The harmful microorganisms in foodstuffs are the cause of many diseases that are annihilated by radiation to an acceptable level. Small or portable irradiation systems are being used today for sterilization at the place of production of food. The radiation dose according to the international standards can vary from 0.2 kGy to 10 kGy. In this paper, using the MCNPX Monte Carlo Code, the dosimetry calculations were carried out to determine the optimal arrangement of cobalt-60 rod springs in a portable small-scale irradiation system. Geometries were included 2.5, 5.0, 7.5, 10.10, 12.5, 15.0, and 17.5 kCi activities. Given the space limitations and geometry, the time of exposure to food was calculated. The calculations showed that when six cobalt-60 pencil source rod with 15.0 kCi activity in a regular hexagonal dual configuration could be the most ideal arrangement for having the maximum allowable dosage for dry food.

**Keywords:** Food irradiation, Portable irradiation facility, Dosimetry, Monte Carlo simulation, Co-60



## مقدمه :

یکی از مهم ترین مسائلی که ذهن مسئولین بخش‌های مختلف نظیر صنعت، کشاورزی و بهداشت را به خود مشغول کرده است، تأمین احتیاجات غذایی برای جمعیت رو به فزاینده جهان است. از طرفی تأمین سلامت مواد غذایی شرط لازم برای تأمین سلامت جامعه و از شاخص های مهم توسعه می‌باشد. بروز موارد متعدد بیماری های منتقله از راه مواد غذایی در جهان لزوم به توجه بکارگیری بهداشت مواد غذایی را بیشتر نمایان می سازد [۱ و ۲]. آمارهای موجود حاکی از آن است که سالانه هزاران تن مواد غذایی به علت غیر بهداشتی بودن غیرقابل مصرف و معدوم می‌شوند، و این مسئله باعث وارد شدن زیان های اقتصادی هنگفتی به کشورها می گردد. از آنجا که طیف وسیعی از آلودگی ها در طی مراحل مختلف تهیه، نگهداری، جابجایی و آماده سازی مواد غذایی توسط مراکز تهیه و عرضه مواد غذایی صورت می‌گیرد، سلامت مواد غذایی به طور مستقیم تحت تأثیر عوامل فردی، فیزیکی و عملکردی در محل های مذکور می باشد [۳].

تعریف کلی واژه کیفیت عبارت است از مجموعه ای از صفات و ویژگی های یک ماده غذایی که بر میزان پذیرش آن در نزد خریدار و مصرف کننده مؤثر بوده و آن را از دیگر ویژگی های مواد غذایی متمایز می‌سازد [۴]. بر اساس استاندارد ISO:22000 خطرات میکروبی، فیزیکی و شیمیایی زیادی می توانند در زنجیره غذایی اتفاق بیافتند. در سطح توزیع و عرضه ماده غذایی نیز این خطرات ممکن است ماده غذایی را تحریک کند [۵]. بنابراین شناخت دقیق روش هایی که بر عرضه مواد غذایی تأثیرات کلیدی دارند و تعیین کننده ایمنی محصول می باشد از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است و عامل اصلی مؤثر بر آن همان کیفیت محصول غذایی است. در بسیاری از این موارد روش ها با تأثیر بر میکروارگانیسم های عامل فساد نقش خود را ایفا می کنند. با توجه به اثری که این روش ها بر نابودی میکروارگانیسم ها دارند از آن ها به عنوان روش هایی برای کنترل رشد میکروبی مواد غذایی و روش هایی برای از بین بردن میکروارگانیسم ها در مواد غذایی به کار گرفت. از جمله روش های پیش گیری از آلودگی مواد غذایی می توان به استفاده از بسته بندی مناسب، تمیزکردن و گندزدایی نمودن ابزار و وسایل کار، روش هایی برای کنترل رشد میکروبی و از بین بردن میکروارگانیسم ها در مواد غذایی تولید شده به روش های غیرمستقیم نظیر پلاسمای سرد یا پرتوهای یونیزان ایکس و گاما اشاره کرد. با از بین رفتن میکروارگانیسم ها میزان ماندگاری مواد غذایی و کشاورزی نیز به شدت افزایش می یابد.



امروزه مجموعه های بسیار وسیعی از پرتودهنده‌ها و سامانه های پرتودهی در کل جهان ساخته می‌شوند. حدود ۸۵ درصد از مراکز پرتودهی با استفاده از رادیوایزوتوپ های پرتوزای گاما کار می‌کنند که به آنها در اصطلاح مراکز تابش گاما می‌گویند. با استفاده از شتابدهنده‌های ذرات از انواع گوناگون نظیر شتابدهنده‌های رادیوفرکانسی خطی، رودترون‌ها و شتابدهنده‌های الکترواستاتیکی بزرگ نیز امروزه برای مقاصد استریلیزاسیون و پرتودهی بهره گرفته می‌شود. پرتودهنده‌های کوچک یا محلی که از نوع سامانه‌های پرتودهی پرتابل هستند نیز می‌توانند به نوبه خود نقش مهمی را در سلامت مواد غذایی ایفا کنند.

این سامانه‌ها با قابلیت نصب و برچیده شدن در کمترین زمان و سهولت فیزیکی ساخته می‌شوند. انواع مختلفی از آن‌ها مورد طراحی و ساخت واقع شده‌اند. اغلب این سامانه‌ها در نزدیکی مراکز تولید مواد غذایی ساخته می‌شوند و بلافاصله پس از تولید، پرتودهی شده و وارد چرخه اقتصادی می‌گردند. غالباً این سامانه‌های پرتابل با استفاده از چشمه‌های کبالت-۶۰ و با توجه به میزان دز مورد نیاز، می‌توانند دز جزئی را به مقدار قابل قبول به مواد غذایی وارد نمایند. در ایران پژوهش‌های در این حوزه عمدتاً منحصر به محاسبات دز و توزیع یکنواختی آن در سامانه بزرگ تابش گامای سازمان انرژی اتمی ایران و یا محاسبات حفاظ پرتویی آنها شده است که از نقطه نظر این مقاله که به بررسی دز جذبی ناشی از سامانه کوچک پرتابل می‌پردازد، خارج از دامنه این مقاله است.

در این فرایند اشعه‌های یونیزه کننده باعث از بین رفتن میکروارگانیزم‌هایی که غذا را آلوده می‌کنند یا باعث فساد و تخریب مواد غذایی می‌شوند، می‌گردند. پرتودهی به عنوان یک فرایند سرد شناخته شده است که دما را بطور قابل توجهی افزایش نمی‌دهد و در اکثر غذاها تغییرات فیزیکی یا مشخصات حسی به جا نمی‌گذارد. به عنوان مثال یک سیب اشعه دیده باز هم ترد و آبدار است [۶].

### حدود دز

حدود دز تفکیکی برای هر گونه از مواد غذایی در جدول شماره ۱ آمده است [۷]:

جدول ۱. حدود دز مورد نیاز برای هر کاربرد در محدوده های پرتودهی گوناگون.

محدوده پرتودهی	کاربرد	دز (kGy)
----------------	--------	----------



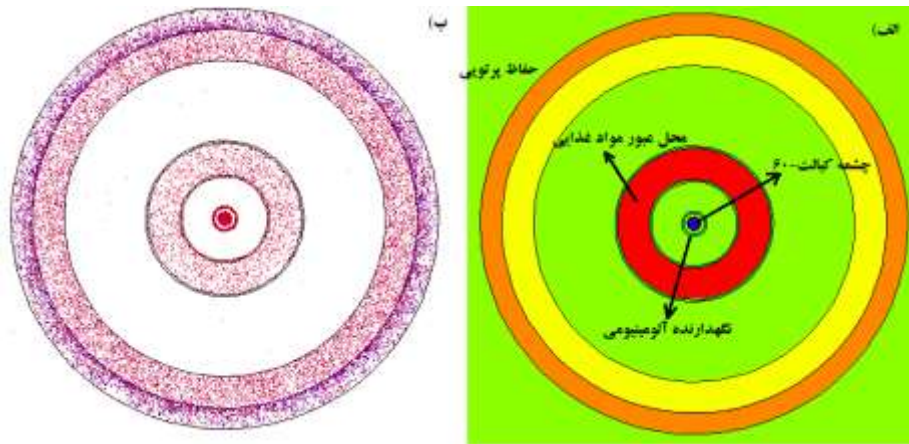
0.06-0.25	جلوگیری از جوانه زدن (سیب‌زمینی، پیاز، سیب‌زمینی شیرین، هویج و سیر)	
0.5-1.0	تاخیر در رسیدن (توت فرنگی، سیب زمینی)	
0.15-1.0	از بین بردن حشرات و آلودگی ناشی از آنها (دانه ها و غلات، گندم، جو، دانه های قهوه، حبوبات، مغز های خشک شده، ادویه جات، میوه های خشک، ماهی خشک و دودی، انبه، پاپایاس)	دز پایین (تا 1 kGy)
0.3-1.0	کنترل انگل ها و غیرفعال سازی آنها	
1.0-7.0	طولانی کردن زمان ماندگاری آبزیان(ماهی تازه و خام، غذاهای دریایی، تولیدات تازه، محصولات گوشتی تازه و یخچالی)	دز متوسط (1kGy تا 10kGy)
1.0-7.0	کاهش ریسک های پاتوژنیک و میکروب های فاسد کننده	
3.0-7.0	افزایش بازده و ماندگاری آب میوه های طبیعی، کاهش زمان پخت و پز سبزیجات خشک شده	
10.0	آنزیم ها (دهیدراته کردن)	
3.0-15.0	استریلیزاسیون ادویه جات و عاری کردن از هرگونه ویروس باکتری و ...، سبزیجات خشک-هر چه دز بیشتر، بو و مزه محصول کمتر می گردد)	دز بالا (بیش از 10kGy)
10.0-25.0	استریلیزاسیون مواد بسته بندی شده	
44.0	استریلیزاسیون غذا(بیمارستان ها و کارکنان NASA)	



طبق استاندارد میزان دز وارد شده به مواد غذایی نباید بیش از ۱۰ کیلوگری شود. این مقدار برای مواد غذایی خشک در نظر گرفته شده است که مورد مطالعه در این پژوهش است [۴]. در این پژوهش با در نظر گرفتن ماکزیمم دز مورد پذیرش از طرف استانداردها در ابتدا میزان اکتیویته چشمه کبالت-۶۰ و سپس بهترین چینش هندسی چشمه‌ها در زمان ثابت معین ۱۹، ۱۴۰ ثانیه که ماده غذایی در معرض پرتودهی در سامانه پیچشی پرتودهی قرار می‌گیرد، با استفاده از کد شبیه ساز مونت-کارلویی ترابرد پرتوهای MCNPX2.7e شبیه سازی سیستم چینش چشمه‌ها به منظور حصول پیکربندی بهینه با متغیر دانستن اکتیویته چشمه و دز در زمان ثابت، انجام شد. هدف از این مقاله صرفاً بررسی بهینه بودن پیکربندی چشمه‌های کبالت-۶۰ در تحمیل دز مورد نیاز برای استریلیزاسیون می باشد و هندسه کلی سامانه مورد بحث در این مقاله نیست.

#### روش کار :

چشمه عمومی در کد با کارت SDEF تعریف می گردد اما در این پروژه چشمه حجمی از کبالت-۶۰ وجود دارد که دارای توزیع انرژی گسسته ۱۳۳۲ و ۱۱۷۳ کیلو الکترون ولت است. با استفاده از کارت pos مکان چشمه‌ها را که وابسته به شعاع و محور استوانه‌ها هستند با استفاده از زیر کارت های si و sp و ds تعیین می کنیم. نمونه برداری آماری رندم باید از دو انرژی و مکان حجمی چشمه صورت بگیرد که این خود بخود زمان اجرای کد را افزایش می دهد. هر کدام از این میله‌های کبالت-۶۰ دارای اکتیویته ۲،۵ کیلوکوری بوده و ارتفاع هریک ۷۰ سانتی متر است. قطر میله چشمه ۱،۱ سانتی متر است و درون یک غلاف از فولاد زنگ نزن به ضخامت ۱ میلی‌متر و قطر ۱۳ میلی‌متر قرار گرفته است. هر چشمه یا مجموعه چشمه نیز در یک غلاف آلومینیومی قرار دارد و در بیرون آن محل عبور مواد پرتودهی شونده قرار می گیرد که با کمک نیروی گرانش از بالا به پایین طی یک مسیر مارپیچی سر خورده و به پایین منتقل می شوند. به علت محدودیت کد در پیاده سازی هندسه مارپیچی، در ارتفاع کل مجموعه ۱۷ چنبره با شعاع داخلی ۱۰ سانتی متر و قطر ۵،۰۸ سانتی متر با کارت Tz تعریف گشت و در آن از آب پر گشت.



شکل ۱. نمای کلی شبیه سازی تک چشمه میله کبالت-۶۰ و محفظه پرتو دهی. الف) کلیات هندسه (نما از بالا)، ب) برخورد مونت-کارلویی فوتون‌ها با دیواره و محفظه.

برای رسیدن به بهترین هندسه ممکن به منظور پرتو دهی مواد غذایی، پیکربندی های گوناگونی در نظر گرفته شد و در کد پیاده سازی شد. هندسه ها شامل تغییر در تعداد چشمه های کبالت-۶۰ و نحوه چینش آنهاست و در انتها محاسبه دز در داخل سلول عبور کننده مواد غذایی. هر چشمه کبالت-۶۰ دارای اکتیویته ۲,۵ کیلوکوری می باشد. بنابراین باید چینش های مختلف بر حسب مضاربی از ۲,۵ کیلوکوری باشد. یکنواختی دز در این سامانه ها حائز اهمیت است اما به دلیل آنکه مواد غذایی از بالاترین نقطه تا پایین بارها در مسیر ماریپیچی قرار می گیرد، بدیهی است که توزیع دز یکنواخت خود بخود برقرار می شود. به همین علت در این پژوهش تنها به محاسبه دز کل جذبی اکتفا شده است.

### نحوه محاسبه دز جذبی

برای محاسبه دز جذبی وارده به محل عبور مواد مورد پرتو دهی با استفاده از کد MCNPX از یکی از روش های مبتنی بر تعریف اساسی دز جذبی با استفاده از تالی  $^*f8$  که انرژی کل جذب شده در یک سلول را به دست می دهد و سپس تقسیم آن بر جرم آن سلول استفاده شده است. جرم سلول را کد در خروجی به صورت حجم سلول می دهد که با ضرب در چگالی، مقدار جرم به دست می آید. اگرچه استفاده از کارت  $^*f8$  نیز به دلیل خاصیت ارتفاع پالسی آن زمان اجرای کد را می افزاید اما به تجربه ثابت شده است که دقیق ترین



جواب را به دست می‌دهد. جواب به دست آمده سپس با استفاده از رابطه زیر به دز جذبی نوع ماده مورد نظر قابل تبدیل است:

$$\dot{D}_m = \frac{\mu_m / \rho_m}{\mu_{water} / \rho_{water}} \dot{D}_{water} \quad (1)$$

که در آن  $\dot{D}_m$  و  $\dot{D}_{water}$  به ترتیب نرخ دز جذبی در ماده مورد نظر و آب می‌باشد.  $\mu_m$  و  $\mu_{water}$  نیز ضرایب تضعیف خطی برای ماده و آب زمانی است که از چشمه کبالت استفاده می‌کنیم. چگالی‌های ماده مورد اندازه‌گیری و آب به ترتیب  $\rho_m$  و  $\rho_{water}$  هستند. از رابطه ۱ برای تبدیل دز محاسبه در این مقاله برای سایر مواد غذایی دیگر می‌توان بهره گرفت.

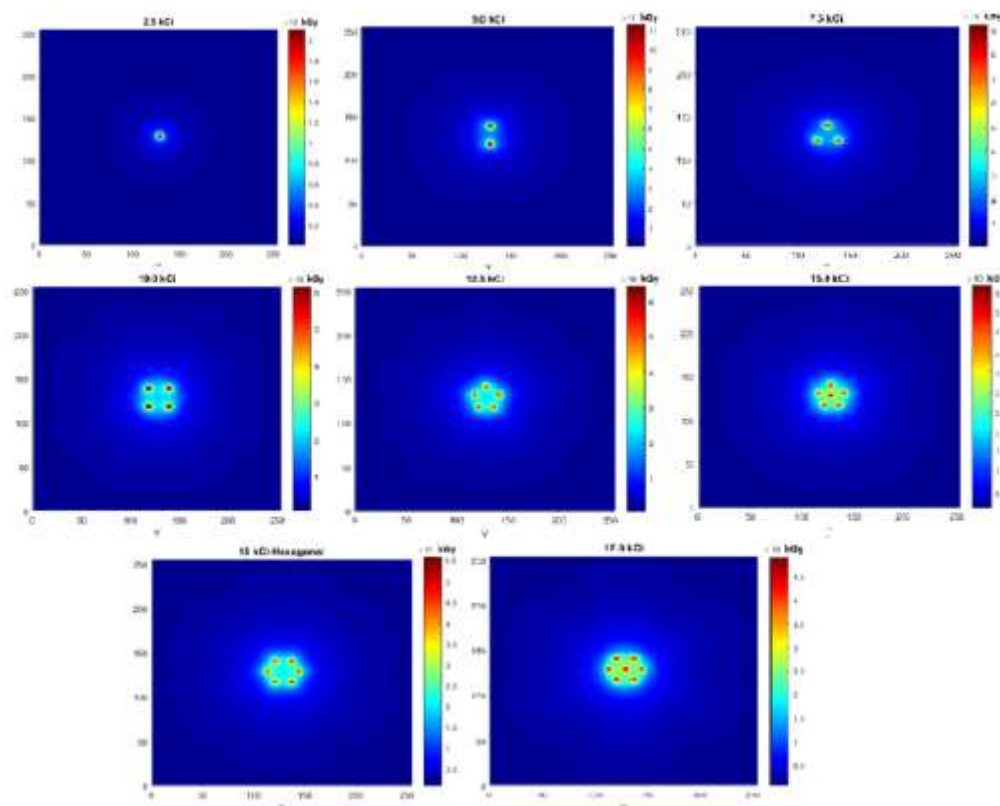
نتایج:

توزیع دز در اطراف محفظه چشمه‌های کبالت-۶۰ در شکل زیر نمایش داده شده است.

جدول ۲. دز محاسبه در سلول پرتودهی.

دز جذبی (Gy) بر اساس پیکربندی چشمه‌های		اکتیویته (kCi)
Co-60		
۶ ضلعی منتظم	۵ ضلعی منتظم	
-	۷۸۴/۳۶	۲/۵
-	۱۶۵۱/۸۰	۵/۰
-	۲۴۹۱/۷۷	۷/۵
-	۳۳۲۲/۱۴	۱۰/۰
-	۳۹۵۱/۸۳	۱۲/۵
۴۹۸۰/۶۹	۴۷۴۲/۲۶	۱۵/۰
۱۰۰۴۲/۷۷	۹۴۰۱/۹۶	۳۰/۰



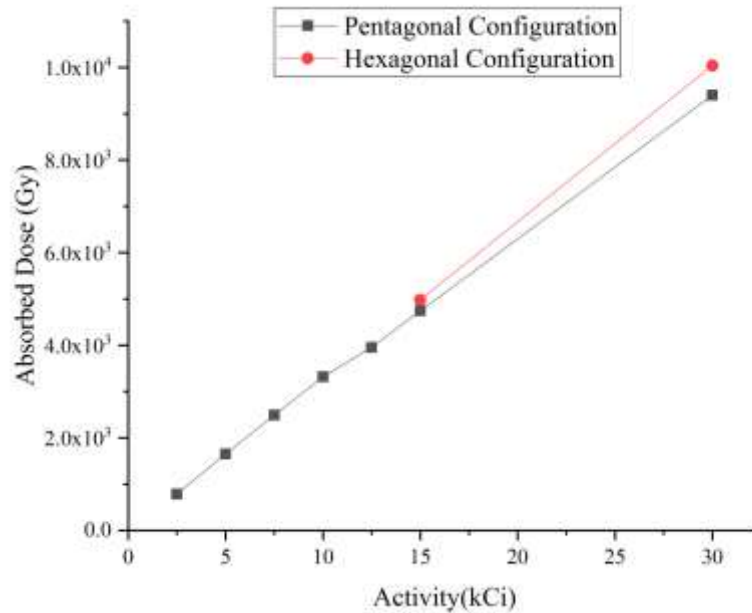


شکل ۲. توزیع دز برای چشمه های با اکتیویته های ۲/۵، ۵/۰، ۷/۵، ۱۰/۰، ۱۲/۵، ۱۵/۰ و ۱۷/۵ کیلوکوری

بدین ترتیب نتایج حاصل از محاسبات دز جذبی در درون محفظه عبور مواد غذایی در جدول ذیل نشان داده شده است.

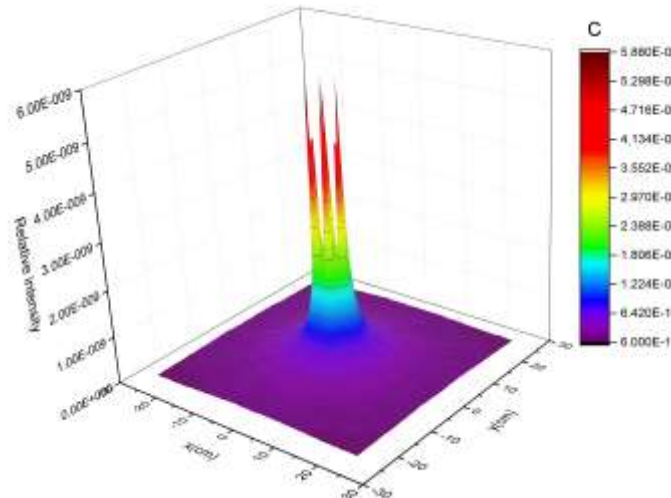
در این سیستم پرتودهی پرتابل به علت قید دز بیشینه ۱۰ کیلوگری و قید زمان پرتودهی گفته شده در بالا هندسه به گونه ای در نظر گرفته شد که بتواند آن مقدار را برآورده نماید. نمودار میزان افزایش دز جذبی بر حسب اکتیویته در شکل ۳ نشان داده شده است.





شکل ۳. توزیع دز پرتو دهی بر حسب میزان اکتیویته مورد استفاده از کبالت-۶۰.

همان گونه که از نتایج بالا مستفاد می گردد بهینه ترین هندسه ای که می تواند مقدار ۱۰ کیلوگری دز را برای یک سامانه پرتو دهی کوچک ایجاد نماید زمانی است که از دو آرایه ۶ تایی از میله های کبالت-۶۰ به صورت ۶- ضلعی منتظم استفاده کنیم است. علت بررسی حالت پنج- ضلعی منتظم با یک چشمه در وسط آن بود که ممکن بود با این پیکربندی، میزان دز جذبی مطلوب به دست آید که مشاهدات و نتایج امری غیر از این را نشان داد و این نتیجه در بدایت امر بدیهی نبود. در شکل ۴ میزان دز نرمالیزه شده ناشی از پرتوهای گامای کبالت-۶۰ در بالای محفظه پرتو دهی نشان داده شده است.



شکل ۴. توزیع دز در بالای محفظه شامل ۶ میله کبالت-۶۰ با پیکربندی ۶-ضلعی منظم.

#### بحث و نتیجه گیری :

در این مقاله در ابتدا هندسه محل عبور مواد غذایی در یک سامانه پرتودهی پرتابل به طور دقیق در کد مونت کارلویی MCNPX2.7e شبیه سازی شد و مقادیر دز جذبی برای حالت های گوناگون پیکربندی های مختلف هندسی چشمه های میله ای کبالت-۶۰ محاسبه گشت. با در نظر گرفتن قید بیشینه دز مجاز اعمالی به مواد غذایی به مقدار ۱۰ کیلوگری و مدت زمان در معرض پرتو قرار گیری آن‌ها، با توجه به نتایج به دست آمده در این پژوهش، با استفاده از هندسه ۶ چشمه ۲/۵ کیلوگری از کبالت-۶۰ در دو طبقه دز جذبی مورد نظر به دست آمد. مقادیر دز هنگامی که از چینش ۵-ضلعی منظم با ۶ چشمه استفاده می شد برابر است با ۹۴۰۱ گری و برای همان تعداد چشمه اما با هندسه ۶-ضلعی منظم ۱۰۰۴۲ گری دز به مواد غذایی خشک مورد نظر اعمال می شود.

#### مراجع :

- [1] WHO. 2000. Foodborne disease: Focus on health education. World Health Organization, Geneva.
- [2] WHO. 2008. Foodborne disease outbreaks: Guidelines for investigation and control. WHO publication, Geneva
- [3] NRA. 2010. Increased restaurant industry sales, employment growth predicted. National Restaurant Association (NRA). National Restaurant Association Economic Forecast. Ohlsson, Th. And Bengtsson, N. (2002). Minimal processing technologies in the food industry. Crc press.
- [4] Ray, B. 2004. Fundamental of Food Microbiology. CRC Press. Washington, DC.
- [5] Roday, S. 1999. Food hygiene and sanitation, Tata McGraw-Hill publishing company limited



بیست و پنجمین کنفرانس هسته‌ای ایران

۲۰۱ اسفندماه ۱۳۹۲ - دانشگاه آزاد اسلامی (واحد پوشش)



- 
- [6] Codex Alimentarius General Standard for Irradiated Foods (CAC/STAN 106-1983, rev.1 2003) at the Wayback Machine (archived 2007-09-26)
- [7] Xuetong, Fan, Food Irradiation Research and Technology, Wiley-Blackwell, 2018.