

طراحی و ساخت سامانه پرتودهی خودحفاظ گاما برای محصولات کشاورزی

مهدی منشی زاده^۱، علی سلیمانی^۱، مهدی خسروانی^۱، مرتضی یاحقی^۱، حسین سیار^۱، رامین روزه دار مقدم^۱، آیدین قلعه اسدی^۱، ابوالفضل صالحی زاده^۱، حامد آل ابراهیم دهکردی^۱، محمد صادق اسلامی^۱، عباس فرخی زاده^۱، امید حقیقی^۱، حمیدرضا سراوانی^۱، علی طاهری^{۲*} و سید پژمان شیرمردی^{۲*}

۱. شرکت توسعه کاربرد پرتوهای ایران، سازمان انرژی اتمی ایران، تهران، ایران

۲. پژوهشگاه کاربرد پرتوها، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، تهران، ایران

* پست الکترونیکی: ceo@iradco.ir

چکیده

افزایش عمر مفید و کاهش ضایعات محصولات کشاورزی با از بین رفتن باکتری، ویروس، حشرات و آفت با پرتودهی بوسیله اشعه گاما با مقدار دز جذبی که توسط آزمایشگاه‌های میکروبیولوژی و مواد غذایی مشخص می‌شود، امکان‌پذیر است. بدین منظور به طراحی و ساخت یک سامانه پرتودهی خودحفاظ گاما برای پرتودهی غلات و حبوبات با چشمه رادیواکتیو کبالت - ۶۰ با اکتیویته ۵۰ کیلوکوری پرداخته شد. عملکرد این سامانه به گونه‌ای است که با استفاده از نوار نقاله، محصولات کشاورزی به صورت فله‌ای به داخل قیف ورودی سامانه ریخته می‌شوند. محصولات از قیف ورودی به ماریپیچی سقوط می‌کنند و پس از عبور از این ماریپیچ وارد کسک (محفظه پرتودهی) می‌شوند تا پرتودهی بشوند. میزان دز جذبی محصولات کشاورزی علاوه بر چگالی، نوع محصول و... بستگی به مدت زمان حضور در کسک پرتودهی دارد که این زمان پرتودهی بوسیله تغییر سرعت گردش ماردون قابل تغییر بوده و میزان دز جذبی گرفته شده توسط محصول با در نظر گرفتن مقدار اکتیویته باقی‌مانده بصورت نرم افزاری محاسبه می‌شود. طراحی و ساخت سامانه پرتودهی نوع ۱ بر اساس استاندارد به شماره **ANSI/HPSN43.7-2018** و با استفاده از نرم‌افزار **Solidworks** و استاندارد حفاظ‌سازی پایه **ISIRI7751** و توسط نرم‌افزار **MCNPX** مدل‌سازی شده است. سایر طراحی و ساخت‌ها اعم از نقشه‌کشی صنعتی و تاسیسات، نقشه‌کشی الکتریکی، تحلیل سازه، جوشکاری و سیستم برق و کنترل نیز بر اساس استاندارد مربوطه‌اش رعایت و انجام شده است. سازه مکانیکی ساخته شده دارای تحمل بار استاتیک سازه ۱۴۰ کیلو نیوتون می‌باشد. طراحی منحصر به فرد ماریپیچ ورودی محصولات بصورت پله‌ای به جای اسپیرال باعث کاهش سرب مورد نیاز برای حفاظ‌سازی به میزان ۲ تن نسبت به نمونه مشابه ساخت کشور مجارستان شد. دبی خروجی محصولات پرتودهی شده در این سامانه در حدود ۱ تن بر ساعت برای گندم با دز ۲۰۰ گری است. میزان یکنواختی دز برابر ۲ بدست آمد که برای کارهای صنعتی پرتودهی قابل قبول است.

واژه‌های کلیدی: پرتودهی، سامانه پرتودهی خودحفاظ گاما، کبالت، میزان یکنواختی دز، حفاظ‌سازی، شبیه‌سازی MCNPX.

۱. مقدمه

این ضایعات می‌تواند تا ۵۰ درصد هم برسد [۱]. در کشور ایران سالانه حدود ۱۲۰ میلیون تن محصولات کشاورزی شامل غلات و میوه و دانه‌های روغنی و ... تولید می‌گردد که در صورت عدم

ضایعات محصولات کشاورزی در سرتاسر جهان از ۵ تا ۱۰ درصد است، در صورتی که در کشورهایی با آب و هوای گرم

استفاده از روش‌های بازدارنده کاهش ضایعات، حدود ۳۰ درصد محصولات کشاورزی از بین می‌رود. بنابراین حفظ کیفیت و ارزش مواد غذایی و همینطور محصولات کشاورزی در برابر آسیب‌های میکروبیولوژی ضروری است [۲].

معمول‌ترین و گسترده‌ترین روش مبارزه با آفات، استفاده از آفت‌کش‌های شیمیایی برای غلات و حبوبات است [۳]. این روش‌ها اثرات نامناسبی بر سلامت محیط زیست و مصرف کنندگان داشته و نیز موجب کاهش ارزش غذایی و ویژگی‌های محصول می‌شود [۴]. به عبارتی علاوه بر اینکه استفاده از آفت‌کش‌ها مقرون به صرفه نیست، چنانچه این سموم بدون رعایت اصول ایمنی و بهداشتی استفاده شوند، باعث مسمومیت و در برخی موارد باعث مرگ می‌شود. همینطور در این روش مبارزه با آفات، با به جا گذاشتن بقایای آفت‌کش‌ها مانند فسفین^۱ در دانه‌ها باعث آلوده شدن محیط زیست می‌شود و بنابراین مستلزم اندازه‌گیری‌های ویژه برای ایمنی و سلامت مصرف‌کننده‌ها است [۵]. بر اساس تأیید آژانس حفاظت محیط زیست سازمان ملل^۲، پرتودهی مواد غذایی می‌تواند جایگزینی مناسب برای سموم باشد [۶] و طبق اعلام سازمان بهداشت جهانی^۳، پرتودهی هیچ خطری برای مصرف‌کننده مواد غذایی و محصولات کشاورزی ندارد [۷]. این شرایط باعث توسعه روش‌های استفاده از پرتو برای دفع آفات غلات گردیده که مستلزم تعیین دزهای پرتو مناسب می‌باشد.

تحقیقات در زمینه دفع آفات محصولات کشاورزی با پرتودهی از دهه‌ی ۱۹۵۰ میلادی انجام یافته است [۸]. این مطالعات در اتحاد جماهیر شوروی از سال ۱۹۵۵ در انستیتوی تحقیقات علمی غلات و فرآورده‌های غلات وزارت کشور اتحاد جماهیر شوروی^۴ با همکاری آکادمی علوم اتحاد جماهیر شوروی^۵ آغاز گردید. بعد از اتحاد جماهیر شوروی، در سال ۱۹۶۳ ایالات متحده‌ی آمریکا پرتودهی گندم و محصولات حاصل از آن را با

دز ۵۰-۲۰ کیلو راد تصویب کرد و به دنبال این دو کشور پیشرو در زمینه پرتودهی غلات، امروزه پرتودهی در بسیاری از کشورها در حال انجام است [۹].

فناوری پرتودهی با استفاده از اشعه گاما یا ایکس یکی از روش‌های افزایش مدت زمان ماندگاری [۱۰ و ۱۱]، مبارزه با آفات و حشرات، کاهش آلودگی‌های میکروبی، عوامل بیماری‌زا، قارچی و انگلی، کاهش ضایعات و هدر رفت انواع محصولات کشاورزی بدون ایجاد آلودگی برای محیط زیست است. به عبارتی پرتودهی موجب می‌شود تا کاهش استفاده از ضد عفونی کننده‌های شیمیایی سمی و سرطان‌زا را داشته باشیم. همینطور پرتودهی محصولات کشاورزی با دزهای نسبتاً پایین سبب کشته یا عقیم شدن تمام مراحل مختلف تکاملی آفات معمولی غلات، حتی تخم‌های واقع در داخل دانه می‌گردد [۱۲] و پرتودهی در دزهای پایین از جوله زنی غده‌های سیب‌زمینی، پیاز، سیر، زنجبیل و شاه بلوط جلوگیری به عمل می‌آورد [۱۳] و [۱۴]. همچنین بعضی از محصولات خصوصاً میوه‌ها نمی‌توانند به غیر از پرتودهی به وسیله روش‌های شیمیایی یا عوامل فیزیکی ضد عفونی گردند و در این موارد، پرتودهی روش جایگزینی ندارد. از مزایای پرتودهی نسبت به سایر روش‌های آفت‌زدایی از قبیل استفاده از سموم، آفت‌کش‌های شیمیایی می‌توان به مواد زیر اشاره کرد [۲ و ۵]:

- قابلیت اطمینان بالا
 - نفوذ پذیری
 - سهولت و سادگی بکارگیری و کنترل آسان
 - انجام سریع و پیوسته فرآیند
 - قابلیت انجام برای تجهیزات بسته‌بندی شده و فله‌ای
 - نداشتن هیچ گونه باقیمانده مضر بعد از فرآیند
 - صرفه‌جویی در مصرف انرژی
- در این راستا سامانه‌های پرتودهی مختلفی از جمله سامانه‌های

۱. Phosphine

۲. United Nation Environment Programme (UNEP)

۳. World Health Organization (WHO)

۴. All-Russian Research Institute of grain and products of its processing (VNIIZ)

۵. Doklady Akademii Nauk SSSR

جدول ۱. مقدار دز لازم با هدف مبارزه با آفات، انگل‌ها و کنترل جوانه‌زنی برای پرتودهی محصولات کشاورزی

محصول	هدف	دز (KGy)	چگالی (g/cm^3)
غلات، حبوبات	مبارزه با آفات و انگل‌ها	۰/۰-۱۵/۵۰	۱/۱-۲/۴
جو	کنترل جوانه زنی	۰/۰-۲۵/۵۰	۱/۱-۳/۴
لوبیا چیتی	کنترل جوانه زنی	۰/۰-۱۵/۲۰	۰/۵۰
گندم	کنترل جوانه زنی و رشد جوانه	۰/۰-۲۰/۴۰	۱/۱-۳/۵
برنج	کنترل جوانه زنی و رشد جوانه	۰/۰-۲۵/۳۵	۰/۰-۵۰/۶۰
ذرت	کنترل جوانه زنی و رشد جوانه	۰/۰-۳۰/۵۰	۱/۳

پرتودهی خودحفاظ گاما نمودیم. بدین منظور طراحی مکانیکی با استفاده از نرم‌افزار Solidworks و استانداردهای مربوط و طراحی حفاظ با استفاده از نرم‌افزار MCNPX و طبق استاندارد و ایمنی که توسط آژانس بین‌المللی انرژی اتمی [۱۸]، استاندارد ملی آمریکا [۱۹] و مرکز نظام ایمنی هسته‌ای کشور تعیین شده است، انجام شد و سپس با در نظر گرفتن سایر استانداردهای مربوطه، نقشه‌های مکانیکی، برقی، هسته‌ای و ... سامانه تهیه شد. بر اساس طراحی Solidworks، آهن و استیل‌ها با برشکاری لیزری به سائزهای مورد نیاز رسید. همینطور جوشکاری‌ها با تست PT^2 مورد بررسی قرار گرفته و تایید شد. همینطور تابلو برق مناسب و PLC با یک سری محاسبات هسته‌ای برای هماهنگی سرعت خروج محصولات با توجه به نوع محصول پرتودهی شده برای سیستم نوشته شد. همزمان با اینکار، سرب ریزی یکپارچه انجام پذیرفت و در نهایت نقشه راه بارگذاری چشمه و طراحی‌هایی در این مورد انجام پذیرفت تا استانداردهای موجود در این زمینه رعایت شود. در حال حاضر سامانه خودحفاظ گاما می‌تواند مورد بهره‌برداری قرار بگیرد.

۲. طراحی و ساخت

طراحی و ساخت سامانه پرتودهی خودحفاظ گاما با حداکثر اکتیویته ۵۰ کیلوکوری منطبق بر استاندارد ANSI/HPSN43.7-2018 مربوط به ساخت سیستم‌های پرتودهی نوع ۱، استاندارد

گاما، ایکس و الکترون در دنیا مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱۴] و [۱۵] که سامانه پرتودهی خودحفاظ گاما با استفاده از پرتوهای گامای ساطع شده از رادیوایزوتوپ صنعتی کبالت-۶۰ روش مناسب و مطلوبی نسبت به سایر روش‌های پرتودهی سالم‌سازی و آفت‌زدایی است.

برای داشتن تاثیر مثبت از پرتودهی، بازه مشخصی از دز جذبی برای هر نوع محصول کشاورزی یا مواد غذایی وجود دارد که توسط آزمایشگاه میکروبیولوژی تعیین می‌شود و مقدار دز جذبی بیشتر از این حد تاثیرات منفی بر روی محصولات کشاورزی دارد. در جدول (۱) محدوده دز مجاز برای محصولاتی از قبیل غلات و حبوبات آورده شده است [۱۶]. با استفاده از جدول (۱) می‌توانیم زمان پرتودهی مورد نیاز انواع محصولات کشاورزی را از رابطه زیر استخراج کنیم [۱۷]:

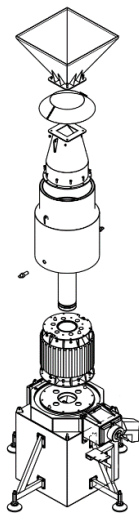
$$t = \frac{D}{\dot{D}} \quad (1)$$

که در آن D دز جذبی محصول و \dot{D} آهنگ دز جذبی محصول است.

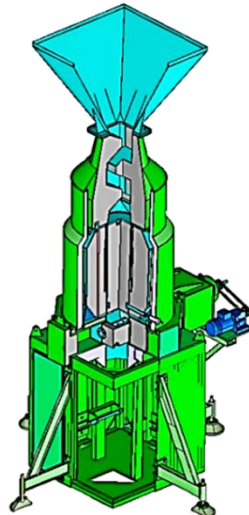
با مشخص شدن زمان پرتودهی به محصولات کشاورزی، نیاز به دستگاهی است که بتواند پرتودهی را طبق استانداردهای موجود و اصل ALARA^۱ جهت سلامت و ایمنی اپراتور همراه با دز جذبی مناسب برای محصولات کشاورزی را فراهم کند. بنابراین ما اقدام به طراحی، ساخت و بومی‌سازی سامانه

۱. As Low as Reasonably Achievable

۲. Penetrant test



ج



ب



الف

شکل ۱. الف) تصویر، ب) نمای برشی و ج) نقشه انفجاری اجزای سامانه خودحفاظ گاما. ارتفاع کل سامانه ۴/۵ متر است.



شکل ۲. اجزای اصلی سامانه پرتودهی خود حفاظ گاما شامل ۱) قیف ورودی، ۲) ماریچ بالای، ۳) کسک پرتودهی، ۴) تنوره، ۵) پایه، ۶) ماردون پیچشی و کالسکه، ۷) استوانه روشن / خاموش سربی، ۸) جک هیدرولیکی، ۹) محفظه حمل کسک و ۱۰) تابلو فرمان.

جنس فولاد بوده و از صفحات آهنی تشکیل شده که از چهار سمت توسط پایه‌ها نگه داشته می‌شود و توانایی تحمل بار ۱۴۰ کیلونیوتون (طبق شبیه‌سازی انجام شده) را دارد. ماردون با متعلقاتش، تجهیزات سنگین شامل حفاظ‌های سربی و بازوی استوانه فولادی جک هیدرولیکی محفظه پرتودهی روی اسکلت نگهدارنده قرار گرفته است.

هنگام جابجایی یا عدم بهره‌برداری از سیستم، برای جلوگیری از

پایه ISIRI7751 حفاظت در برابر پرتوهای یون‌ساز و ایمنی پرتو، استاندارد نقشه‌کشی صنعتی و تاسیسات استاندارد IEC نقشه‌کشی الکتریکی، استاندارد AISC-360-10 تحلیل سازه و استاندارد جوشکاری QWS-D1.1/D1.1M:2020 است. همچنین از نرم‌افزار Solidworks برای طراحی مکانیکی، نرم افزار MCNPX برای طراحی حفاظ زیستی و سیستم برق و کنترل با استفاده از نرم‌افزار Eplan انجام شده و تمامی استانداردهای مذکور در طراحی و ساخت رعایت شده است.

با توجه به اینکه هدف سامانه پرتودهی خودحفاظ گاما، پرتودهی محصولاتی از قبیل حیوانات شامل نخود، لپه، عدس، لوبیا،... و غلات شامل ذرت، گندم، برنج،... و خشکبار شامل گردو، بادام، پسته، فندق،... است، بنابراین مبنای پروژه بصورتی بود که محصولات کشاورزی از قسمت بالای سامانه که کیفی در آنجا قرار دارد وارد ماریچ پلکانی شده و سپس در طی عبور از کسک^۱ (محفظه پرتودهی) با اکتیویته ۵۰ kCi پرتودهی شود. سپس محصولات از قسمت زیرین سامانه خارج می‌شوند.

در شکل (۱) به ترتیب تصویر، نمای برشی و نقشه انفجاری و در شکل (۲) اجزای اصلی سامانه پرتودهی خودحفاظ گاما آورده شده است. پایه و اسکلت نگهدارنده سامانه خودحفاظ از

حفاظ سربی مخصوص می‌باشد و بالای اسکلت نگهدارنده قرار می‌گیرد. در طراحی کسک، یکنواختی دز جذبی از نکات قابل تامل است تا محصولات به صورت یکدست دز دریافت کنند. با توجه به محاسبات انجام شده و با در نظر گرفتن این موضوع که محصول از وسط کسک عبور می‌کند، می‌بایست چینش خاصی به منظور یکنواختی دز با اکتیویته ۵۰ کیلوکوری صورت پذیرد. خوشبختانه به دلیل چیدمان متقارن میله‌های پرتودهی، یک فضای دز با تقارن استوانه‌ای بدست می‌آید. البته عوامل دیگری همچون اکتیویته و چگالی محصول در ایجاد نسبت یکنواختی دز استاندارد موثر می‌باشد. در دستگاه خودحفاظ گاما ۳۶ محل، جهت قراردادن مدادک‌های چشمه قرار دارد که بر اساس اکتیویته‌ی چشمه‌ها و توزیع دز در محفظه‌ی پرتودهی چیدمان می‌شود. مدادک چشمه‌ی کبالت معمولی با غلاف زیرکونیوم در یک غلاف فولاد ضد زنگ مهر و موم شده است و به طور معمول اکتیویته‌ی اولیه هر مدادک در حدود ۸۰۰۰ تا ۱۲۰۰۰ کوری می‌باشد؛ طول هر مدادک ۴۵/۲ سانتی‌متر و قطر آن ۱/۱ سانتی‌متر است. مدادک‌ها در کسک قرار می‌گیرند و کسک مجهز به یک حفاظ سربی مخصوص است. قطر داخلی محفظه فولادی (محل عبور و پرتودهی محصول) ۳۰۰ میلی‌متر و قطر حلقه‌ای که مدادک‌ها روی آن چیده شده‌اند ۳۰۴ میلی‌متر است.

میزان دز دریافتی محصول علاوه بر خصوصیات خود محصول (چگالی، نوع محصول و...)، بستگی به مدت زمان حضور محصول در کسک دارد که این زمان با سرعت عبور محصولات کشاورزی متناسب است. تنظیم سرعت توسط ماردونی که در محل خروج محصول نصب شده، انجام می‌گیرد. به عبارت دیگر سرعت چرخش ماردون، متناسب با دبی خروجی محصول داخل سامانه است و با تغییر دادن آن، می‌توان زمان پرتودهی را بالا برده و دز جذبی محصول را به مقدار مورد نیاز رساند. در واقع کسک یک محفظه استوانه‌ای با حجم داخلی $V_{Cask} = \pi r^2 h$ است که در آن $r = 14/4 \text{ cm}$ شعاع داخلی کسک و $h = 96 \text{ cm}$ ارتفاع کسک است. دبی حجمی ماردون



شکل ۳. موقعیت جک در حالت الف) روشن (جک در پایین‌ترین حالت ممکن است) ب) خاموش (جک تا انتها باز است). استوانه سربی خاموش/روشن توسط میله‌های نگهدارنده مهار شده و بار استوانه سربی از روی جک برداشته شده است.

نشت پرتو، یک استوانه سربی توپر (که استوانه روشن / خاموش نامیده می‌شود) با ابعاد برابر با ابعاد محفظه پرتودهی، داخل آن قرار می‌گیرد. به منظور بهره‌برداری از سیستم لازم است این استوانه توپر به داخل پایه دستگاه پایین آورده شود که اینکار توسط جک هیدرولیکی انجام می‌پذیرد. در ساخت اولیه سامانه خودحفاظ از یک جک تلسکوپی دو مرحله‌ای دستی با ظرفیت ۱۰ تن استفاده شده بود که در زمان باز شدن حداکثر ارتفاع آن ۳۰ سانتی‌متر می‌شد و وقتی دستگاه جهت عملیات پرتودهی روشن می‌شد، بایستی از ۵ عدد اسپیسر^۱ نیز استفاده می‌شد تا بتوان استوانه روشن/خاموش را پایین آورد. با توجه به اینکه این نوع جک دستی بود و مدت زمان انجام عملیات بالا و پایین آوردن سیلندر درب محفظه پرتودهی طولانی (حدود یک ساعت) بود، خطر پرتوگیری مستقیم را بالا می‌برد.

به همین دلیل در طراحی بعدی، جک تلسکوپی پنج مرحله‌ای (شکل ۳) طراحی شد که باعث کاهش زمان روشن/خاموش از یک ساعت به پنج دقیقه و کاهش قابل توجه پرتوگیری احتمالی کاربران شد. این سیستم به صورت برقی و از فاصله دو متری محل استقرار جک قابل کنترل می‌باشد.

کسک، محل پرتودهی به محصولات است و مجهز به یک



شکل ۶. هندسه و محل قرارگیری ماریپچ پلکانی ساخته شده

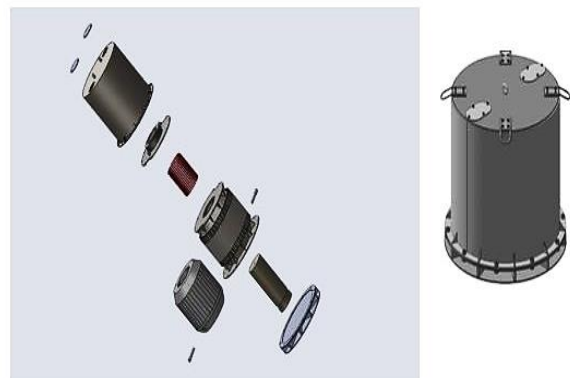
درپوش فولادی ضد زنگ که با سرب پر شده استفاده می شود و کسک داخل این درپوش قرار می گیرد تا حداکثر حفاظت در برابر اشعه حاصل شود و مقاومت بیشتری در برابر نیروهای خارجی ایجاد نماید. ساختار محفظه انتقال در شکل (۵) نشان داده شده است.

ماریپچ پلکانی یکی از مهم ترین قسمت های سامانه پرتودهی خود حفاظ است و در بالای کسک قرار می گیرد. شکل (۶) نمایی از ماریپچ را که به کسک نصب شده و در مرحله بعد تنوره به آن اضافه شده است را نشان می دهد. این ورودی مخروطی شکل از جنس سرب بوده که با ورقه ای از فولاد ضد زنگ مقاوم در برابر سایش پوشانده شده است. درون این مخروط، سرب ریزی شده و سطحی از فولاد ضد زنگ مقاوم در برابر سایش، سرب ها را پوشانیده و پلکان یا ماریپچ پیوسته ای را تشکیل داده است. این ماریپچ علاوه بر حفاظت عمودی در برابر تشعشع، از سقوط آزاد محصول نیز جلوگیری می کند. ارتفاع این ماریپچ پلکانی ۹۵۱/۱۴ میلی متر، و قطر دایره مقطع تحتانی آن ۸۰۰ میلی متر می باشد.

این نحوه طراحی کاهش ارتفاع ماریپچ را در بر داشته و باعث کاهش سرب ریزی به مقدار ۲ تن نسبت به نمونه مشابه سامانه خودحفاظ ساخت کشور مجارستان (شکل ۷) شد.



شکل ۴. ماردون با هر بار چرخش حجم مشخصی از محصولات غذایی پرتو دیده را به خارج کسک هدایت می کند.



شکل ۵. درپوش فولادی برای حمل و نقل کسک به همراه تجهیزاتاتی که شرایط و استاندارد حمل و نقل مواد پرتوزا را ایجاد می کنند.

V_{dM} طبق شکل (۴) برای انواع محصول کشاورزی هم مشخص است، بنابراین با استفاده از نسبت V_{Cask} / V_{dM} ، تعداد دور برای تخلیه کامل کسک بدست می آید. با مشخص بودن زمان پرتودهی، نسبت تعداد دور بر زمان پرتودهی عددی را بدست می دهد که متناسب با دور موتور است و با تنظیم دور موتور بر حسب این عدد، سرعت حرکت ماردون تعیین می شود به عبارتی می توان نوشت:

$$N = \frac{1}{kt} \frac{V_{Cask}}{V_{dM}}, \quad (2)$$

که در آن k نسبت تبدیل گیربکس و N دور موتور بر ثانیه است.

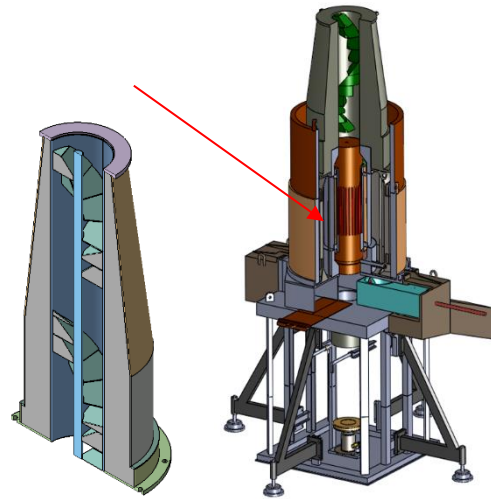
در طی نقل و انتقال کسک از یک محل به محلی دی گر، از

خاموش را داراست. قابل ذکر است پس از ثبت چگالی و دز پرتودهی توسط کاربر، مدت زمان پرتودهی به صورت خودکار توسط نرم افزار سامانه محاسبه می گردد. همچنین در صورتی که مقادیر چگالی محصول خارج از محدوده تعریف شده توسط کاربر ثبت شود، فرآیند پرتودهی آغاز نخواهد شد. دمای قطعات الکترونیکی که در داخل تابلو فرمان قرار دارد حین کارکرد در زمان بهره برداری و نگهداری دستگاه در بازه 60°C - 0°C و میزان رطوبت مجاز، بازه 95% - 10% است و بنابراین دما و رطوبت کارکرد تابلو فرمان و متعلقات الکترونیکی اش نیز همین مقادیر در نظر گرفته می شود. به منظور جلوگیری از آسیب های ناشی از اتصال کوتاه و نوسانات برقی در تابلو فرمان از فیوزهای مینیاتوری^۶ استفاده شده است چون این فیوزها نسبت به تحمل جریان اولیه و اضافه بار سریعاً عکس العمل نشان می دهند و برق مدار را قطع می کنند. با این حال چنانچه به هر دلیلی برق قطع شود یا همینطور محصول کشاورزی و شیء خارجی درون سامانه گیر کند، قابلیت چرخش ماردون به صورت دستی وجود دارد تا محصولات تخلیه شوند. در صورت بروز خطا در هر یک از ایترلاک ها و آلارم های در نظر گرفته شده برای سیستم و خطای محاسباتی، پرتودهی آغاز نخواهد شد. پس از رفع خطا و بازنشانی آن، به صفحه فرآیند پرتودهی منتقل شده و امکان شروع فرآیند پرتودهی میسر می گردد. ذکر این نکته ضروری است که متناسب با محل نصب دستگاه و درخواست بهره بردار سامانه، امکان افزایش ایترلاک های دستگاه وجود دارد.

۳. ملاحظات ایمنی پرتویی

۳.۱. محاسبات حفاظ زیستی

در این بخش، بررسی و محاسبه توزیع آهنگ دز گامای حفاظ زیستی سامانه پرتودهی خودحفاظ گاما بر طبق طراحی با



شکل ۷. مارپیچ اسپیرال ساخت کشور مجارستان

نکته دیگر اینکه محصولات کشاورزی از سمت قیف بالای سامانه وارد می شوند و بنابراین جهت جلوگیری از سقوط اشیای بزرگ درون قیف، در قسمت ورودی قیف، از یک سرند با ابعاد مش متناسب با نوع غلات و حبوبات استفاده می شود که احتمال گیرکردن شیء درون سامانه را تا حد زیادی کاهش می دهد.

کنترل قسمت برقی سامانه پرتودهی خودحفاظ گاما با استفاده از یک تابلو فرمان انجام می شود که شامل رابط گرافیکی^۱، PLC^۲، رله ها^۳ و میکروکنترلرها^۴، اینورتر موتور و مدارات کنترلی است و کاربری سیستم را آسان می کند. تنظیمات اولیه بر روی رابط گرافیک پس از بارگذاری چشمه ها بر روی دستگاه و نصب در محل پرتودهی محصولات صورت می گیرد. همانطور که گفته شد این تابلو فرمان با کنترل میزان گردش ماردون بر حسب میزان اکتیویته باقیمانده و در نتیجه زمان پرتودهی، میزان دریافتی توسط محصول را کنترل می کند. همچنین تابلو فرمان جهت بررسی ایترلاک ها^۵ و خطاهای دستگاه مورد استفاده قرار می گیرد و قابلیت بالا و پایین بردن جک برای حالت روشن یا

۱. Human-Machine Interface (HMI)

۲. Programmable logic controller

۳. Relay

۴. Microcontroller

۵. Interlock

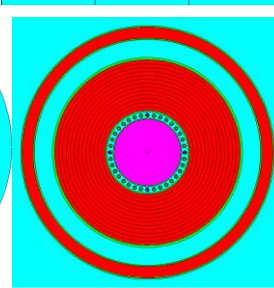
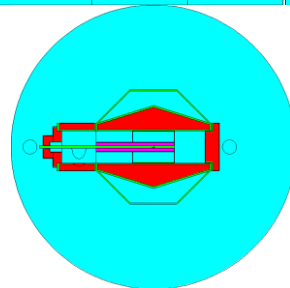
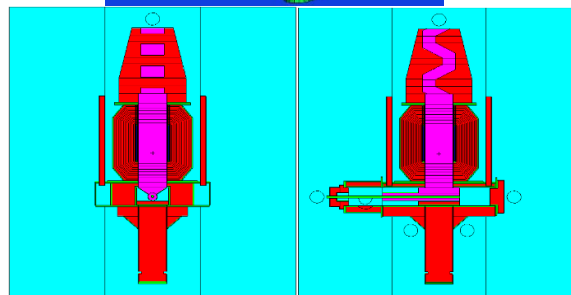
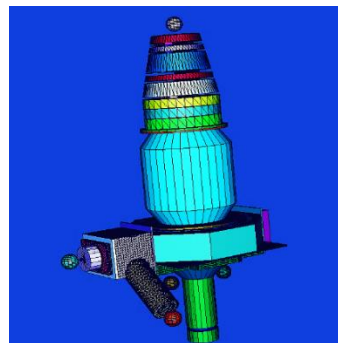
۶. Miniature Circuit Breaker (MCB)

جدول ۲. میزان آهنگ دز در موقعیت‌های مختلف سامانه پرتودهی خودحفاظ گاما در حالت روشن

موقعیت	آهنگ دز فوتون ($\mu\text{Sv/h}$)
بالای سامانه روی دهانه ورودی	۰/۳۳۱
مارپیچ عمودی	۱/۲۴
روبروی انتهای شفت ماردون	۰/۱۰۹
پشت درپوش محل قرارگیری کالسکه و ماردون	۰/۲۵۰
زیر میز و کنار استوانه سربی	۰/۱۲۳
روبروی دهانه خروجی محصول	

در شبیه‌سازی با توجه به بحرانی‌ترین شرایط تجهیز، چشمه پرتویی گاما مد نظر به صورت ۴ مدادک با اکتیویته ۱۲۵۰۰ کوری (کلا معادل ۵۰ کیلوکوری) در چهار سمت کسک (در زوایای صفر، ۹۰، ۱۸۰ و ۲۷۰ بر روی دایره کسک چشمه) در نظر گرفته شده است. شکل (۸) نمایی سه بعدی، جانبی و از بالا از مقاطع سامانه پرتودهی خودحفاظ گاما در حالت روشن در محیط نرم‌افزار کد MCNPX را نشان می‌دهد. محاسبه توزیع آهنگ دز گامای حفاظ زیستی دستگاه پرتودهی خود حفاظ گاما بر اساس ضرایب تبدیل شار به دز استاندارد ICRP-21 (پیوست) [۱۹] محاسبه شده است. تالی F4 در سلول‌های کروی به قطر ۱۵ سانتی‌متر در نقاط حساس شامل بالای مسیر عمودی مارپیچ، دو طرف انتهایی ماردون، دهانه خروجی ماردون و داخل اسکلت یا چارچوب نگهدارنده (زیر تجهیز مورد نظر) محاسبه شده و ابعاد مش‌ها ۳×۳×۳ سانتی‌متر در نظر گرفته شده است.

در حین پرتودهی محفظه پرتودهی، مسیر عمودی مارپیچ، کالسکه و ماردون با غلات و حبوبات پر می‌شود که محدوده چگالی غلات و حبوبات در حدود $1/4 \text{ g/cm}^3$ - [۱۱] می‌باشد و بدین دلیل چگالی مواد در نظر گرفته شده در شبیه‌سازی این مناطق برابر 1 g/cm^3 لحاظ شده است. میزان آهنگ دز فوتون در موقعیت‌های مختلف در جدول (۲) و توزیع

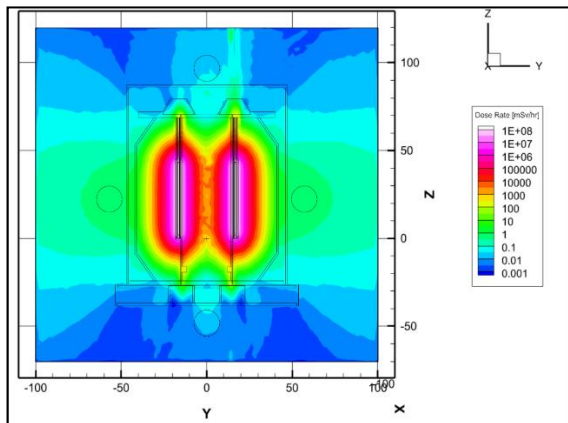


شکل ۸. نمایی سه بعدی، جانبی و از بالا از مقاطع سامانه پرتودهی خودحفاظ گاما در حالت روشن

استفاده از کد محاسبات هسته‌ای مونت کارلو MCNPX v2.6 انجام گرفته است. قسمت‌های مختلف سامانه پرتودهی خود حفاظ گاما شامل مسیر مارپیچ عمودی، حفاظ زیستی اصلی دستگاه، محل پرتودهی محصول، کسک مدادک‌های چشمه، ماردون، استوانه روشن/خاموش دستگاه و سایر قسمت‌های دستگاه با کد مذکور شبیه‌سازی شد. قسمت‌های مختلف دستگاه از مواد مختلف شامل سرب به عنوان حفاظ زیستی، فولاد ضد زنگ SS-316L برای کسک چشمه و فولاد معمولی برای جداره‌های بیرونی حفاظ زیستی و دستگاه، پیچ‌ها، پایه‌ها و ستون‌های اصلی دستگاه و شفت‌ها^۱ مورد استفاده قرار گرفته است. همانطور که گفته شد اکتیویته اولیه مدادک‌های چشمه کبالت-۶۰ استاندارد در محدوده ۸۰۰۰-۱۲۰۰۰ کوری است لذا

جدول ۳. میزان آهنگ دز در موقعیت‌های مختلف کسک و محفظه حمل و نقل موقت

موقعیت	آهنگ دز فوتون ($\mu\text{Sv/h}$)
بالای کسک حمل و نقل	۲۶/۲۰۸
اطراف کسک حمل و نقل	۵۵۸/۴۵۱
	۵۵۹/۶۴۰
	۵۵۱/۹۷۰
	۵۵۷/۰۲۵
زیر کسک حمل و نقل	۱۴/۷۱

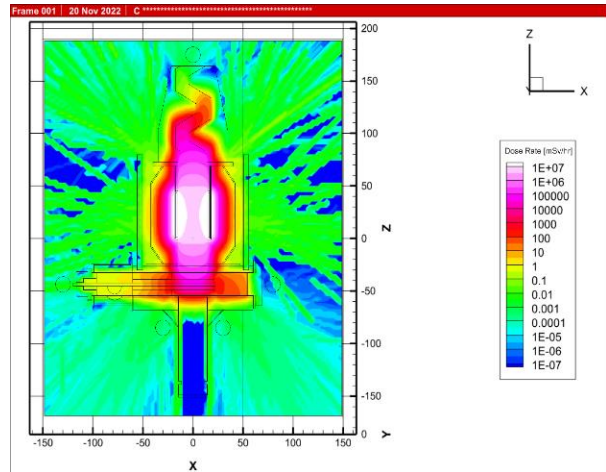


شکل ۱۱. توزیع آهنگ دز گاما برای حالت حمل و نقل به همراه محفظه حمل و نقل سامانه خودحفاظ گاما

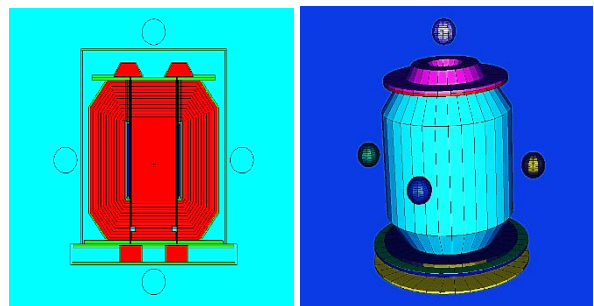


شکل ۱۲. دزیمتری بخش‌های مختلف سامانه خودحفاظ گاما

باشد [۱۹] و نتایج تجربی که با استفاده از دزیمتر از سامانه گرفته شد، نتایج جدول (۲) و (۳) را با حدود ۵ الی ۷ درصد خطا تایید کرد. در شکل (۱۲) نمایی از دزیمتری سامانه خود حفاظ گاما با استفاده از دزیمتر آورده شده است.



شکل ۹. نمایی از توزیع آهنگ دز گاما برای حالت روشن سامانه خودحفاظ گاما



شکل ۱۰. نمای سه بعدی و جانبی از مدل شبیه‌سازی کسک به محفظه حمل و نقل موقت به همراه سایر متعلقات

آهنگ دز در شکل (۹) ارائه شده است.

در مرحله بعد، کسک چشمه به همراه محفظه حمل و نقل و سایر متعلقات که به منظور جابجایی کوتاه برای بارگذاری چشمه به داخل کسک مورد استفاده قرار می‌گیرد، شبیه‌سازی شده است. نمای سه بعدی و نمایی جانبی مدل شبیه‌سازی کسک به محفظه حمل و نقل موقت به همراه سایر متعلقات در شکل (۱۰) نشان داده شده است. همچنین میزان و توزیع آهنگ دز گاما برای حالت عادی و حالت حمل و نقل به همراه محفظه حمل و نقل سامانه خودحفاظ گاما به ترتیب در جدول (۳) و شکل (۱۱) آورده شده است.

طبق استاندارد ملی آمریکا و مرکز نظام ایمنی هسته‌ای کشور، مقدار آهنگ دز استاندارد به ترتیب برای حالت حمل و نقل و حالت بهره‌برداری باید کمتر از $20\mu\text{Sv/h}$ و 2mSv/h باشد.

شماره سریال P08^۱ با اکتیویته ۲۶۶۹/۰۵ کوری (مدادک چشمه کبالت -۶۰ با کمترین میزان اکتیویته که برای بارگذاری جهت آزمون پرتویی محصول در نظر گرفته شده است).

▪ حالت دوم: انجام شبیه‌سازی ناشی از بارگذاری ۳ عدد مدادک به شماره سریال‌های P08، P43 و P45 با اکتیویته‌های به ترتیب ۲۶۶۹/۰۵ کوری، ۲۶۸۷/۴۰ کوری و ۲۷۲۸/۷۱ کوری که در موقعیت‌های متقارن و به ترتیب کانال‌های به شماره #۳، #۱۵ و #۲۷ قرار می‌گیرند.

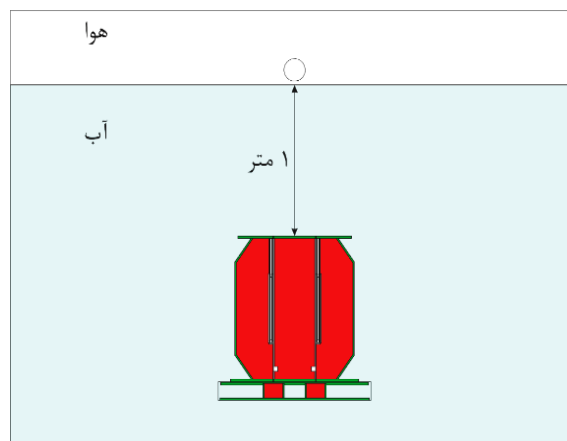
▪ حالت سوم: انجام شبیه‌سازی ناشی از بارگذاری ۱۸ عدد مدادک مطابق با اکتیویته و موقعیت قرارگیری مدادک‌های چشمه کبالت-۶۰ در شماره کانال‌های فرد کسک که موقعیت قرارگیری چشمه‌ها در جدول (۴) ارائه شده است. اکتیویته کل در این حالت معادل ۴۹۶۱۵/۱۲ کوری می‌باشد که در شبیه‌سازی‌ها این مقدار معادل با ۵۰ کیلوکوری در نظر گرفته شده است.

موقعیت قرارگیری چشمه‌ها و آهنگ دز برای این سه حالت در مدل‌های شبیه‌سازی برای ۱ مدادک (حالت اول)، ۳ مدادک (حالت دوم) و ۱۸ مدادک (حالت سوم) در شکل (۱۴) نشان داده شده است.

آهنگ دز فوتون در راستای مرکزی کسک و درون کره‌ای روی سطح آب و توزیع آهنگ دز فوتون با استفاده از مش تالی دوبعدی در مختصات دکارتی روی سطح استخر و با استفاده از ضرایب تبدیل شار به دز ICRP-21 و درون‌یابی لگاریتمی در نهایت، توزیع آهنگ دز پرتو گاما روی سطح آب که توسط مش تالی برای سه حالت مختلف انجام شده در شکل (۱۵) نشان داده شده است.

بر طبق این شبیه‌سازی‌ها و نقشه راهی که بر این اساس طراحی گردید، انتقال چشمه‌ها به درون کسک انجام پذیرفت که در شکل (۱۶) نمایی از انتقال موفقیت آمیز چشمه‌ها به درون کسک مشاهده می‌شود.

جدول (۵) محاسبه شده است. ابعاد مش‌ها ۱×۱×۱ سانتی‌متر در نظر گرفته شده است.



شکل ۱۳. نمایی کلی از مدل شبیه‌سازی شده کسک در استخر

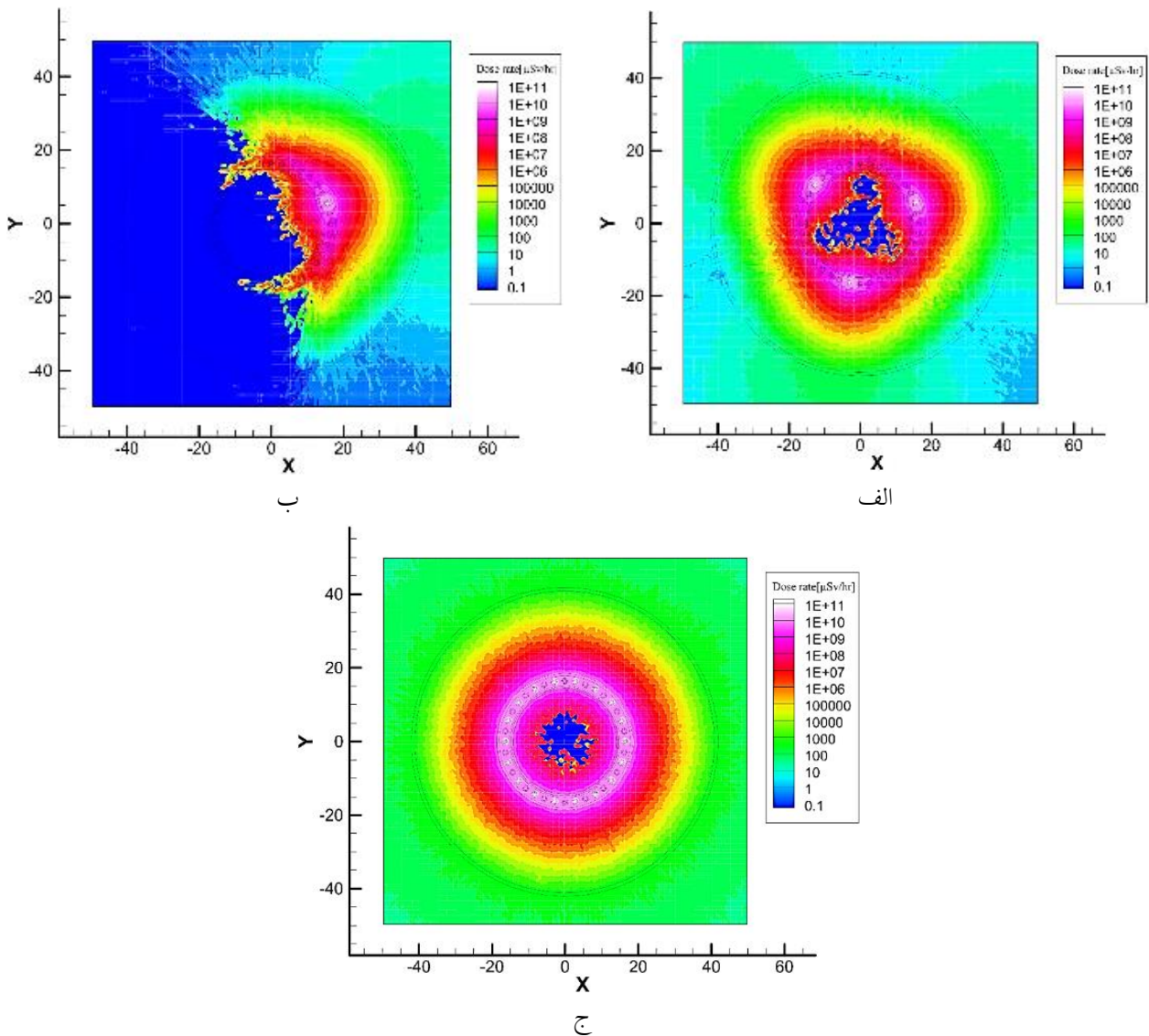
۲.۳. بارگذاری چشمه‌ها

انجام فرآیند بارگذاری مدادک‌های چشمه کبالت-۶۰ در کسک سامانه پرتودهی خودحفاظ گاما توسط جرثقیل سقفی و در داخل استخر انجام می‌شود. پس از برداشتن حفاظ سربی روی کسک در کف استخر، کسک در عمق ۱ الی ۱/۵ متری زیر آب مستقر می‌شود و پیچ کانال‌های محل قرارگیری چشمه‌های کبالت-۶۰ باز و یا بسته می‌شود. ظرفیت چشمه کسک سامانه پرتودهی خودحفاظ گاما ۵۰ کیلو کوری می‌باشد که چشمه‌های رادیوایزوتوپ صنعتی کبالت-۶۰ با اکتیویته‌های مختلف می‌تواند در ۳۶ کلنال تعبیه شده روی کسک قرار گیرند. به منظور رعایت الزامات و ملاحظات ایمنی پرتویی و تعیین حدود دز در زمان عملیات بارگذاری کسک سامانه پرتودهی خودحفاظ گاما، آهنگ دز پرتوی گاما بر روی سطح آب استخر ناشی از کسک حاوی چشمه در عمق ۱ متری شبیه‌سازی و محاسبه شد که در شکل (۱۳) نمایی کلی از مدل شبیه‌سازی آورده شده است. در ابتدا شبیه‌سازی و بارگذاری یک مدادک و سپس بارگذاری سه مدادک انجام گرفت تا از صحت شبیه‌سازی و مطابقت با نتایج تجربی حاصل شود و سپس بارگذاری ۱۸ مدادک با اکتیویته میانگین ۲ کیلو کوری انجام شد بنابراین سه حالت در نظر گرفته می‌شود.

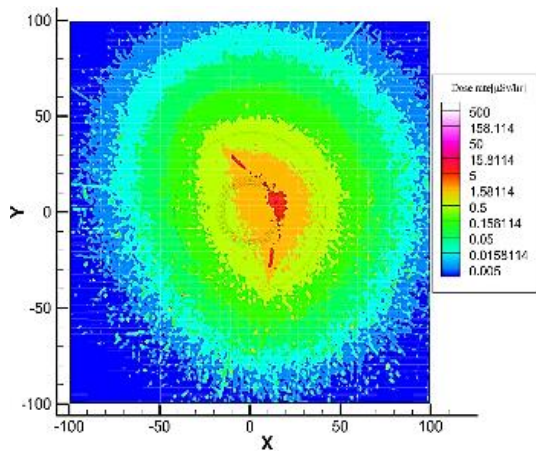
▪ حالت اول: انجام شبیه‌سازی ناشی از بارگذاری مدادک به

جدول ۴. اکتیویته و موقعیت قرارگیری مدادک‌ها در کسک سامانه پرتودهی خود حفاظ گاما

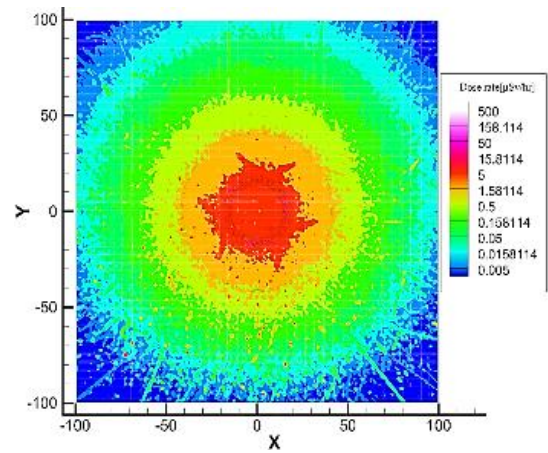
شماره سریال	اکتیویته (کوری)	موقعیت قرار گیری	شماره سریال	اکتیویته (کوری)	موقعیت قرار گیری
C27	۲۹۱۸/۴۰	#۱	P27	۲۶۹۱/۹۹	#۱۹
P08	۲۶۶۹/۰۵	#۳	P34	۲۷۸۶/۰۸	#۲۱
P81	۲۸۳۵/۵۴	#۵	P16	۲۷۱۴/۹۴	#۲۳
P18	۲۶۷۳/۶۳	#۷	P36	۲۷۸۱/۵۰	#۲۵
C34	۲۸۱۲/۵۴	#۹	P45	۲۷۲۸/۷۱	#۲۷
P30	۲۶۸۲/۸۱	#۱۱	P87	۲۷۶۸/۸۰	#۲۹
P78	۲۸۰۷/۹۳	#۱۳	P31	۲۷۳۷/۸۹	#۳۱
P43	۲۶۸۷/۴۰	#۱۵	C33	۲۷۶۱/۸۹	#۳۳
C29	۲۷۹۴/۱۲	#۱۷	P79	۲۷۶۱/۸۹	#۳۵



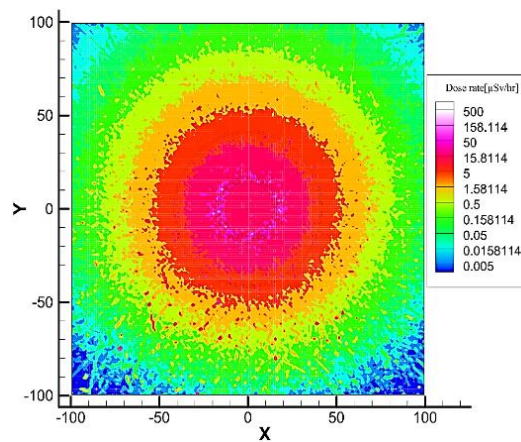
شکل ۱۴. نمایی از موقعیت چشمه شبیه‌سازی شده (برشی از میانه کسک) برای حالت ۱ (الف)، ۳ (ب) و ۱۸ (ج) مدادک چشمه



الف



ب



ج

شکل ۱۵. توزیع آهنگ دز گاما روی سطح آب برای حالت ۱ (الف)، ۳ (ب) و ۱۸ (ج) مدادک چشمه

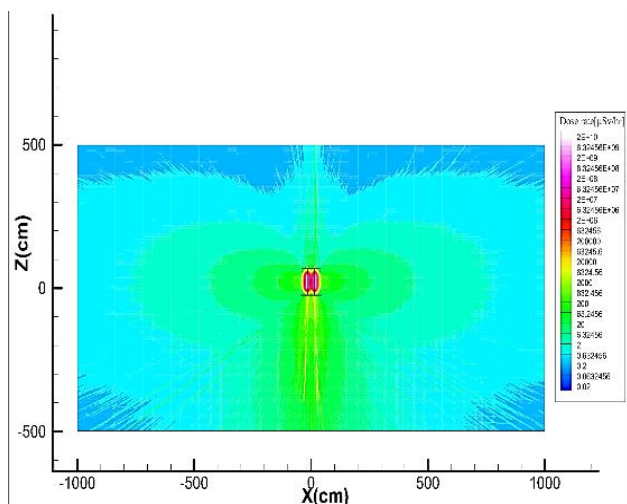


شکل ۱۶. انتقال چشمه ها به درون کسک

جدول ۵. نتایج آهنگ دز گاما روی سطح آب

درصد خطا	نتایج ($\mu\text{Sv/h}$)	میزان اکتیویته کل چشمه ها	تعداد مدادک ها	حالت
٪ ۷/۷۹	۲/۰۰	۲۶۶۹/۰۵ کوری	۱	حالت اول
٪ ۶/۷۲	۵/۴۳	۸۰۸۵/۱۶ کوری	۳	حالت دوم
٪ ۵/۷۵	۳۱/۰۵	۵۰،۰۰۰ کوری	۱۸	حالت سوم

۳.۳. مونتاز و دمونتاز سامانه پرتودهی خودحفاظ



شکل ۱۷. توزیع آهنگ دز گاما در اطراف کسک حاوی چشمه در ارتفاع ۵ متری و ناشی حذف پالت حمل و نقل

که مشاهده می شود نشت دز در زیر کسک ایجاد می شود و بنابراین باید کسک هرچه سریعتر بر روی پایه نگه دارنده سامانه نصب شود تا سرب های پایه نگه دارنده مانع نشت پرتو گردند. محاسبات نشان داد که آهنگ دز نشتی از پایه نگه دارنده سامانه خودحفاظ در حدود $0.25 \mu\text{Sv/h}$ و سامانه خودحفاظ ساخت کشور مجارستان در حدود 0.7 mSv/h است. با توجه به اینکه هر دو این مقادیر از مقدار استاندارد کمتر است بنابراین نتایج مورد تایید است.

۳.۳.۲. جداسازی درپوش سربی بالای کسک

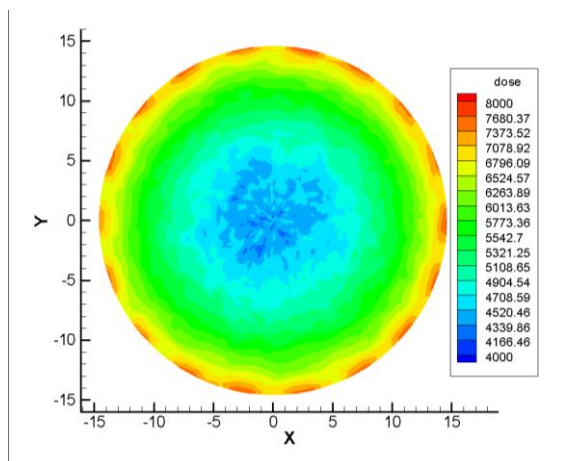
پس از استقرار کسک روی پایه نگه دارنده، در ابتدا باید درپوش سربی روی کسک برداشته شود و سپس ماریچ پلکانی گذاشته شود.

در اثر برداشتن درپوش سربی روی کسک به دلیل حذف بخشی از حفاظ زیستی سربی در بالای کسک انتظار نشت پرتوهای گاما از بالای کسک وجود دارد که در این حالت نیز آهنگ دز گاما به بیش از چند 10^5 میلی سیورت بر ساعت خواهد رسید. نتایج شبیه سازی و توزیع آهنگ دز گاما در اطراف کسک حاوی چشمه مستقر بر روی پایه و ناشی از برداشتن درپوش سربی روی کسک در شکل (۱۸) ارائه شده است.

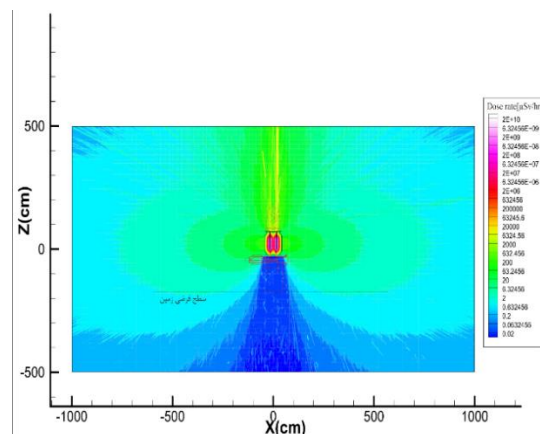
کسک سامانه پرتودهی خودحفاظ گاما توسط ۱۸ عدد مدادک چشمه صنعتی کبالت-۶۰ در استخر سامانه پرتودهی گامای تهران، بارگذاری می شود. پس از قرارگیری مدادک های چشمه و حفاظ دامی سربی در کانال های مخصوص آن ها پیچ های روی کانال های کسک بسته می شود و در نهایت درپوش سربی روی کسک قرار گرفته و کسک به همراه پالت از طریق سقف سامانه به بیرون از سامانه منتقل می شود. پس از بستن محفظه حمل و نقل، کسک به محل استقرار خود منتقل می شود. آهنگ دز پرتوی گاما طبق استاندارد در فاصله ۵ سانتی متری از دیواره محفظه باید کمتر از 2 mSv/h باشد و طبق نتایج شبیه سازی ارائه شده در جدول (۳) این مقدار حدود $60 \mu\text{Sv/h}$ محاسبه شده است. لذا الزامیست طی فرآیند جابجایی و مونتاز سامانه پرتودهی خودحفاظ گاما ملاحظات ایمنی پرتویی و زمان پرتوگیری افراد در نظر گرفته شود. بدین منظور با توجه به باز شدن محفظه و جدا شدن کسک از روی پالت و در نهایت برداشتن درپوش سربی بالایی کسک از روی کسک در حین فرآیند مونتاز، باید آهنگ دز پرتوگاما در فواصل مختلف مشخص شود که در بخش های بعدی مورد بررسی قرار می گیرد.

۳.۳.۱. جداسازی کسک از روی پالت

در این حالت کسک از پالت جدا می شود. با توجه به این که بخشی از حفاظ زیستی سربی که در پالت تعبیه شده، حذف می شود لذا حین بلند کردن کسک و قراردادن آن روی پایه نگه دارنده شاهد نشت دز پرتو گاما در زیر کسک خواهیم بود که در این حالت آهنگ دز گاما در زیر کسک به بیش از چند 10^5 میلی سیورت در ساعت خواهد رسید. بدین منظور با حذف پالت، کسک و درپوش سربی بالای آن در ارتفاع ۵ متری از سطح زمین مدل شد و توزیع آهنگ دز گاما در اطراف کسک محاسبه شده است. نتایج شبیه سازی و توزیع آهنگ دز گاما در اطراف کسک حاوی چشمه در ارتفاع ۵ متری و ناشی از حذف پالت حمل و نقل در شکل (۱۷) نشان داده شده است. همانطور



شکل ۱۹. نمودار توزیع دز در داخل کسک پرتودهی



شکل ۱۸. توزیع آهنگ دز گاما در اطراف کسک حاوی چشمه مستقر بر روی پایه و ناشی از برداشتن درپوش سربی روی کسک

۵. نتایج و بحث

به منظور طراحی و ساخت سامانه خودحفاظ پرتوی گاما، با اصلاح نمونه قبلی ساخته شده در مجارستان، شبیه‌سازی حالات مختلف دخیل در محاسبات مکانیکی، ایمنی و برقی صورت پذیرفت. با توجه به اینکه بالاترین احتمال برای دریافت دز، در شبیه‌سازی حلت اول، مربوط زهانی است که استولنه روشن/خاموش در خارج از کسک قرار گرفته باشد بنابراین شبیه‌سازی برای این حالت صورت پذیرفت. نتایج جدول (۲) و شکل (۹) برای حالت ایستای کسک و داده‌های جدول (۳) و شکل (۱۱) برای حالت حمل و نقل کسک می‌باشد که طراحی انجام شده متناسب با مقیاس‌های استاندارد است. طبق نتایج بدست آمده از جدول (۵) و شکل (۱۵) مشاهده می‌شود که بارگزاری چشمه کبالت-۶۰ در کسک طی فرآیند طراحی شده به طور ایمن صورت می‌پذیرد.

در شکل (۱۷) آهنگ دز گاما در شعاع ۳ متری از کسک، چند میکروسیورت بر ساعت (کمتر از $10 \mu\text{Sv/h}$) می‌باشد و در فواصل بیشتر (۵ تا ۱۰ متری) شاهد افت چندانی نخواهیم بود و آهنگ دز گاما کمتر از $2 \mu\text{Sv/h}$ خواهد بود. پس از استقرار کسک بر روی پایه نگهدارنده حفاظ زیستی سامانه در قسمت زیرین کسک توسط حافظ زیستی سربی مورد استفاده در پایه نگهدارنده تکمیل می‌شود و جلوی نشت پرتوی گاما از زیر کسک گرفته می‌شود.

۴. یکنواختی دز کسک

نسبت یکنواختی دز وابسته به هندسه چشمه‌های مورد استفاده در سیستم و نحوه چینش چشمه‌ها نسبت به هم است. با توجه به اینکه چشمه‌ها استوانه‌ای هستند بنابراین هندسه‌ای با تقارن استوانه‌ای برای کسک در نظر گرفته شد تا یکنواختی دز بهتری وجود داشته باشد. هرچه سیستم دارای یکنواختی دز با عدد پایبندی باشد، مطلوب‌تر است. اما طبق گزارش آژانس بین‌المللی انرژی اتمی [۲۰]، یکنواختی دز جذبی در محدوده $1/5$ الی ۳ برای بسیاری از برنامه‌های پرتودهی محصولات غذایی مناسب است.

برای بدست آوردن یکنواختی دز در داخل کسک از رابطه زیر استفاده می‌کنیم [۲۱]:

$$\eta = \frac{\dot{D}_{\max}}{\dot{D}_{\min}} \quad (3)$$

که در آن \dot{D}_{\max} بیشینه آهنگ دز و \dot{D}_{\min} کمینه آهنگ دز در داخل محفظه کسک است. در شکل (۱۹) برای چگالی محصول 1 g/cm^3 و 18 g چشمه کبالت با اکتیویته 8000 کوری ، نمودار توزیع دز محصول در داخل کسک آورده شده است.

از طریق رابطه (۳) و جایگذاری مقادیر شکل (۱۹)، برای حالت مذکور میزان یکنواختی دز $\eta = 1/95$ بدست آمد. بدیهی است با افزایش تعداد چشمه‌ها بصورت متقارن، این عدد نیز بهبود خواهد یافت.

در شکل (۱۸) آهنگ دز گاما در شعاع ۴ متری از کسک، چند میکروسیورت بر ساعت (کمتر از $10\mu\text{Sv/h}$) می‌باشد. همانطور در شکل (۱۸) مشاهده می‌شود در فاصله ۸ متری آهنگ دز گاما به کمتر از $2\mu\text{Sv/h}$ کاهش خواهد یافت. پس از برداشتن درپوش سربی روی کسک، ماریپیچ پلکانی بر روی کسک قرار می‌گیرد و با تکمیل شدن حفاظ زیستی سربی از نشت پرتوی گاما از بالای کسک جلوگیری می‌شود.

مشاهدات حاکی از این است که حضور پالت باعث اثر حفاظی می‌گردد بنابراین در هنگام حمل با جرثقیل باید حداکثر فاصله ۵ متر با استفاده از جرثقیل تامین گردد تا بتوان از حصول اصول ALARA اطمینان یافت. خاطر نشان می‌گردد پس از قرار گرفتن ماریپیچ پلکانی روی کسک، توزیع آهنگ دز گاما در اطراف کسک تغییری نخواهد کرد و در حین بستن پیچ‌های کسک به پایه نگهدارنده و ماریپیچ پلکانی آهنگ دز گاما در فاصله ۵ سانتی متری از کسک، میزان این آهنگ دز مطابق با استاندارد و مبنای طراحی باید کمتر از 2mSv/h باشد که بر طبق شبیه‌سازی‌های انجام شده در حدود $600\mu\text{Sv/h}$ برآورد شده است. همچنین در خصوص طراحی مکانیکی، با اصلاحات صورت پذیرفته و افزایش سرب کالسکه میزان نشت دز در حد قابل توجهی کاهش یافت و این نتیجه از شکل (۱۸) دریافت شده است. همچنین با تقویت پایه سازه مکانیکی، تحمل سازه به 140 کیلو نیوتون افزایش پیدا کرد و میزان سرب‌ریزی برای ماریپیچ پلکانی با طراحی منحصر به فرد در حد دو تن کاهش پیدا کرد. با اضافه کردن قابلیت نرم‌افزاری در PLC برای کنترل سرعت ماردون و اصلاحات صورت پذیرفته در مسیر پلکانی، میزان پرتو دمی محصول با محاسبه بروز اکتیویته باقی مانده صورت می‌پذیرد و کار با سامانه را برای افراد غیر متخصص نیز هموار کرده است. در نهایت، به دلیل اینکه مواد مورد استفاده در سیستم عمدتاً استیل 304 و سرب می‌باشد و از مواد پلاستیکی درون سیستم استفاده نشده است و تنها موارد استفاده از کابل‌ها در خارج از سیستم پرتو دمی می‌باشد و دز در این مناطق کمتر از $200\mu\text{Sv}$ است، لذا آسیب ناشی از پرتو روی این قطعات قابل اغماض و چشم پوشی می‌باشد.

در نهایت میزان یکنواختی دز از پارامترهای مهم شبیه‌سازی و ساخت محسوب می‌شود بدین دلیل که تمامی محصولات بتوانند دز یکنواختی را دریافت کنند. برای سامانه پرتو دمی خودحفاظ میزان یکنواختی دز طبق شکل (۱۹) حدود عدد ۲ بدست آمد که برای کارهای صنعتی پرتو دمی مورد قبول است.

۶. نتیجه‌گیری

پرتو دمی یک فرآیند فیزیکی است که با استفاده از پرتوهای گاما به نابود کردن باکتری‌های بیماری‌زاها در مواد غذایی و محصولات کشاورزی پرداخته می‌شود. این روش بهبود معیارهای بهداشتی و کیفیتی محصولات کشاورزی و مواد غذایی را فراهم می‌کند و از فساد آن‌ها جلوگیری می‌کند. بدین منظور سامانه پرتو دمی خودحفاظ گامای بهبود یافته‌ای، طراحی و ساخته شد. با اصلاحات صورت گرفته در سامانه پرتو دمی خودحفاظ گاما کاهش دز نشتی، افزایش تحمل وزن محصولات کشاورزی، کاربری آسان که جزو قابلیت‌های منحصر به فردش محسوب می‌شود، طولنایی پرتو دمی انواع غلات و حبوبات فراهم می‌شود. حدود دز مجاز و آهنگ دز معادل برای حالت‌های مختلف بهره‌برداری از سامانه‌های پرتو دمی با محفظه نگهداری در استاندارد ANSI/HPS N43.7-2018 و استاندارد پلایه 7751 ISIRI "حفاظت در برابر پرتوهای یونساز و ایمنی منابع پرتو-استانداردهای پایه" بیان شده است که استاندارد مذکور برای سامانه‌های پرتو دمی خودحفاظ شامل چشمه‌های گاما یا بتازای بسته، به کار می‌رود. با توجه به شبیه‌سازی و اندازه‌گیری دز بصورت تجربی، آهنگ دز و حدود مجاز در طراحی سامانه مذکور با توجه به استاندارد پرتو دمی خودحفاظ گاما، رعایت شده است. همچنین بر طبق مدرک مرکز نظام ایمنی هسته‌ای کشور با عنوان «مقررات ترابری ایمن مواد پرتوزا» با شماره شناسه -1-50/01-200-RE-MA-INRA-1400 Kho حدود مقادیر مجاز آهنگ دز برای انواع بسته‌ها و کانتینر حمل نباید از 2mSv/h تجاوز کند. همانطور که نتایج شبیه‌سازی کسک و محفظه حمل و نقل موقت نشان می‌دهد (جدول ۲) حدود مجاز آهنگ دز رعایت شده است. خوشبختانه

نتایج تجربی هم صحت نتایجی که به صورت تئوری بدست آمده بود را نیز تایید کرد. در حال حاضر سامانه خودحفاظ گاما تولنایی پرتودهی حدود ۱ تن بر ساعت برای گندم با دز ۲۰۰ گری را با یکنواختی دز ۱/۹۵ داراست.

پیوست

- حدود دز مجاز در استاندارد ANSI/HPS N43.7-2018 آهنگ دز معادل برای حالت‌های مختلف بهره‌برداری از سامانه‌های پرتودهی با محفظه نگهداری چشمه خشک بیان و در جدول زیر ارائه شده است [۱۹].

Mode of operation	Location	Maximum permissible radiation level	
		Unrestricted area Shall not exceed	Restricted area Shall not exceed
Irradiate-storage modes	100 cm from the accessible surface	0.002 mSv h ⁻¹ (0.2 mrem h ⁻¹)	0.02 mSv h ⁻¹ (2 mrem h ⁻¹)
	30 cm from the accessible surface	0.005 mSv h ⁻¹ (0.5 mrem h ⁻¹)	0.05 mSv h ⁻¹ (5 mrem h ⁻¹)
	5 cm from the accessible surface	0.02 mSv h ⁻¹ (2 mrem h ⁻¹)	0.2 mSv h ⁻¹ (20 mrem h ⁻¹)
Sample load/unload	100 cm from the accessible surface	0.01 mSv h ⁻¹ (1 mrem h ⁻¹)	0.1 mSv h ⁻¹ (10 mrem h ⁻¹)
	30 cm from the accessible surface	0.025 mSv h ⁻¹ (2.5 mrem h ⁻¹)	0.25 mSv h ⁻¹ (25 mrem h ⁻¹)
	5 cm from the accessible surface	0.2 mSv h ⁻¹ (20 mrem h ⁻¹)	2 mSv h ⁻¹ (200 mrem h ⁻¹)
Transient mode	100 cm from the accessible surface	0.01 mSv h ⁻¹ (1 mrem h ⁻¹)	0.1 mSv h ⁻¹ (10 mrem h ⁻¹)
	30 cm from the accessible surface	0.025 mSv h ⁻¹ (2.5 mrem h ⁻¹)	0.25 mSv h ⁻¹ (25 mrem h ⁻¹)
	5 cm from the accessible surface	0.2 mSv h ⁻¹ (20 mrem h ⁻¹)	2 mSv h ⁻¹ (200 mrem h ⁻¹)

- جدول ضرایب تبدیل شار فوتون به آهنگ دز فوتون استاندارد ICRP-21 و ANSI/ANS6.1.11977 [۱۹].

ANSI/ANS6.1.11977		ICRP-21	
Energy, E) MeV(DF(E) (rem/hr)/(p/cm ² -s)	Energy, E) MeV(DF(E) (rem/hr)/(p/cm ² -s)
0.01	3.96E-06	0.01	2.78E-06
0.03	5.82E-07	0.015	1.11E-06
0.05	2.90E-07	0.02	5.88E-07
0.07	2.58E-07	0.03	2.56E-07
0.1	2.83E-07	0.04	1.56E-07
0.15	3.79E-07	0.05	1.20E-07
0.2	5.01E-07	0.06	1.11E-07
0.25	6.31E-07	0.08	1.20E-07
0.3	7.59E-07	0.1	1.47E-07
0.35	8.78E-07	0.15	2.38E-07
0.4	9.85E-07	0.2	3.45E-07
0.45	1.08E-06	0.3	5.56E-07
0.5	1.17E-06	0.4	7.69E-07
0.55	1.27E-06	0.5	9.09E-07
0.6	1.36E-06	0.6	1.14E-06
0.65	1.44E-06	0.8	1.47E-06
0.7	1.52E-06	1	1.79E-06
0.8	1.68E-06	1.5	2.44E-06
1	1.98E-06	2	3.03E-06
1.4	2.51E-06	3	4.00E-06
1.8	2.99E-06	4	4.76E-06
2.2	3.42E-06	5	5.56E-06
2.6	3.82E-06	6	6.25E-06
2.8	4.01E-06	8	7.69E-06
3.25	4.41E-06	10	9.09E-06

3.75	4.83E-06
4.25	5.23E-06
4.75	5.60E-06
5	5.80E-06

مراجع

1. C S K Lin, et al., *Energy Environ. Sci.* **2** (2013) 426.
2. R Indiarito and M A H Qonit, *Int. J. Sci. Technol. Res* **9, 1** (2020) 4411-4414.
3. D C Lima, et al., *LWT* **116** (2019) 108539.
4. P A Follett and E D Weinert, *Radiat. Phys. Chem.* **81, 8** (2012) 1064-1067.
5. D Hamel, R Vlatka and L Anita, *Insects* **12** (2020) 846.
6. M Sharkey, et al., *Environ. Int.* **144** (2020) 106041.
7. D A E Ehlermann, *Radiat. Phys. Chem.* **129** (2016) 10-12.
8. J F Diehl, "*Irradiation for Food Safety and Quality*" CRC Press, (2020).
9. C H Bloomster, et al., "*Potential value of Cs-137 capsules*" Pacific Northwest National Lab, Richland, WA (United States) (1985).
10. R Ravindran and K J, *Food Chem.* **285** (2019) 363-368.
11. S Ashraf, et al., *Int. J. Chem. Stud.* **7, 2** (2019) 131-136.
12. R Enu and P Enu, *Eur. Sci. J.* **6** (2014).
13. A Matsuyama and K Umeda, "*Preservation of Food by Ionizing Radiation*" CRC Press, (2018).
14. H M Lung, et al., *Trends Food Sci. Technol.* **1** (2015) 66.
15. I Piri, et al., *Afr. J. Microbiol. Res.* **32** (2011) 5806.
16. E N Anikieva, et al., *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, IOP Publishing (2021).
17. F H Attix, "*Topics in Radiation Dosimetry: Radiation Dosimetry*", Elsevier, (2013).
18. S Cruz, R M Gustafsson and K Mrabit, *Radiat. Prot. Dosimetry* **96** (2001) 17.
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.
20. G G Eichholz, "*Dosimetry for food irradiation*" IAEA Report (2003) 665.
21. K Farah et al., *Radiat. Meas.* **41, 2** (2006) 201-208.