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،۱]* و سید پژمان شیرمردی[۲،۱]

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

۲. پژوهشکده 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 مارپیچی سقوط می‌کنند و پس از عبور از این مارپیچ 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 کیلونیوتون می‌باشد. طراحی منحصر به فرد مارپیچ ورودی محصولات بصورت پله‌ای به جای اسپیرال باعث کاهش سرب مورد نیاز برای حفاظ سازی 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، حفاظ سازی، شبیه‌سازی MCNPX.

۱. مقدمه

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

اســـتفاده از روش‌های بازدارنده کاهش ضـــایعات، حدود ۳۰ درصـــد محصـــولات کشـــاورزی از بین می‌رود. بنابراین حفظ کیفیت و ارزش مواد غذایی و همینطور محصـــولات کشـــاورزی در برابر آسیب‌های میکروبیولوژی ضروری است [۲].

معمول‌ترین و گســـترده‌ترین روش مبارزه با آفات، اســـتفاده از آفت‌کش‌های شـــیمیایی برای غلات و حبوبات اســـت [۳]. این روش‌ها اثرات نامناسـبی بر سـلامت محیط زیسـت و مصـرف کنندگان داشـته و نیز موجب کاهش ارزش غذایی و ویژگی‌های محصـــول می‌شـــود [۴]. به عبارتی علاوه بر اینکه اســـتفاده از آفت‌کش‌ها مقرون به صـــرفه نیســـت، چنانچه این ســـموم بدون رعایت اصول ایمنی و بهداشتی استفاده شوند، باعث مسمومیت و در برخی موارد باعث مرگ می‌شـــود. همینطور در این روش مبارزه با آفات، با به جا گذاشـــتن بقایای آفت‌کش‌ها مانند فسـفین[۱] در دانه‌ها باعث آلوده‌شـدن محیط زیسـت می‌شـود و بنابراین مســـتلزم اندازه‌گیری‌های ویژه برای ایمنی و ســـلامت مصرف‌کننده‌ها است [۵]. بر اساس تأیید آژانس حفاظت محیط زیسـت سـازمان ملل[۲]، پرتودهی مواد غذایی می‌تواند جایگزینی مناسـب برای سـموم باشـد [۶] و طبق اعلام سـازمان بهداشـت جهانی[۳]، پرتودهی هیچ خطری برای مصـــرف کننده مواد غذایی و محصـولات کشـاورزی ندارد [۷]. این شـرایط باعث توسـعه روش‌های اســـتفاده از پرتو برای دفع آفات غلات گردیده که مستلزم تعیین دزهای پرتو مناسب می‌باشد.

تحقیقات در زمینه دفع آفات محصـولات کشـاورزی با پرتودهی از دهه‌ی ۱۹۵۰ میلادی انجام یافته اســـت [۸]. این مطالعات در اتحاد جماهیر شـــوروی از ســـال ۱۹۵۵ در انســـتیتوی تحقیقات علمی غلات و فرآورده‌های غلات وزارت کشـور اتحاد جماهیر شـوروی[۴] با همکاری آکادمی علوم اتحاد جماهیر شـوروی[۵] آغاز گردید. بعد از اتحاد جماهیر شـــوروی، در ســـال ۱۹۶۳ ایالات متحده‌ی آمریکا پرتودهی گندم و محصـولات حاصـل از آن را با دز ۵۰-۲۰ کیلوراد تصـویب کرد و به‌دنبال این دو کشـور پیشـرو در زمینـه پرتودهی غلات، امروزه پرتودهی در بســـیـاری از کشورها در حال انجام است [۹].

فناوری پرتودهی با اســـتفاده از اشـــعه گاما یا ایکس یکی از روش‌های افزایش مدت زمان ماندگاری [۱۰و۱۱]، مبارزه با آفات و حشرات، کاهش آلودگی‌های میکروبی، عوامل بیماری‌زا، قارچی و انگلی، کاهش ضـایعات و هدر رفت انواع محصـولات کشـاورزی بدون ایجاد آلودگی برای محیط زیسـت اسـت. به عبارتی پرتودهی موجب می‌شود تا کاهش استفاده از ضد عفونی کننده‌های شیمیایی سمی و سرطان‌زا را داشته باشیم. همینطور پرتودهی محصـولات کشـاورزی با دزهای نسـبتا پایین سـبب کشـته یا عقیم شـدن تمام مراحل مختلف تکاملی آفات معمولی غلات، حتی تخم‌هـای واقع در داخـل دانـه می‌گردد [۱۲] و پرتودهی در دزهای پایین از جولنه زنی غده‌های سـیب‌زمینی، پیاز، سیر، زنجبیل و شاه بلوط جلوگیری به عمل می‌آورد [۱۳ و ۱۴]. همچنین بعضـی از محصـولات خصـوصـا میوه‌ها نمی‌توانند به غیر از پرتودهی به وســـیله روش‌های شـــیمیایی یا عوامل فیزیکی ضـــدعفونی گردنـد و در این موارد، پرتودهی روش جایگزینی ندارد. از مزایای پرتودهی نسـبت به سـایر روش‌های آفت زدایی از قبیل اسـتفاده از سـموم، آفت‌کش‌های شـیمیایی و 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

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 آفت زدایی 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]:

$$t = \frac{D}{\dot{D}} \qquad (۱)$$

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[1] 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 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 بین المللی 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 سایزهای 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 بهره برداری قرار بگیرد.

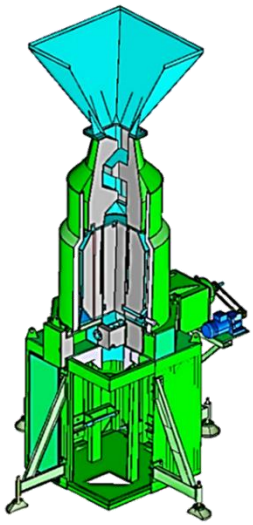
۲. طراحی و ساخت

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

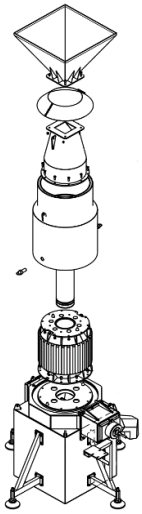
۱. As Low as Reasonably Achievable

۲. Penetrant test

الف



ب



ج

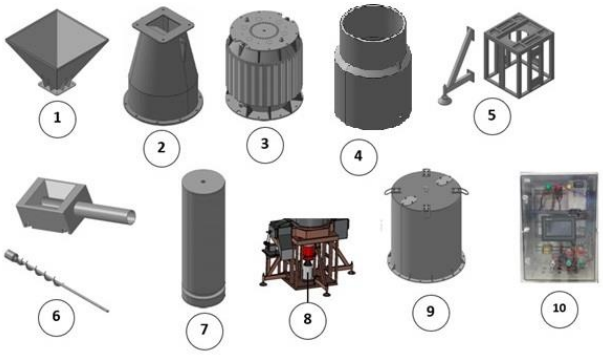
شکل ۱. الف) تصویر، ب) نمای برشی و ج) نقشه انفجاری اجزای سامانه خودحفاظ گاما. ارتفاع کل سامانه ۴/۵ متر است.

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 حبوبات 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 قیفی در آنجا قرار دارد وارد مارپیچ پلکانی شده و سپس در طی عبور از کسک[1] (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 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 انجام‌شده) 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



شکل ۲. اجزای اصلی سامانه پرتودهی خود حفاظ گاما شامل ۱) قیف ورودی، ۲) مارپیچ بالایی، 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.

۱. Cask

(ب) (الف)

شـــکل ۳. موقعیت جک در حالت الف) روشـــن (جک در پایین‌ترین حالت ممکن اســـت) ب) خاموش (جک تا انتها باز اســـت). اســـتوانه ســـربی خاموش/روشـــن توســـط میله‌های نگهدارنده مهار شـــده 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.

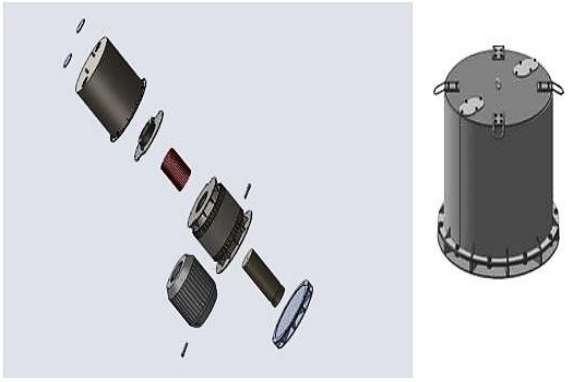
به همین دلیل در طراحی بعدی، جک تلســـکوپی پنج مرحله‌ای (شکل ۳) طراحی شد که باعث کاهش زمان روشـن/خاموش از یک ساعت به پنج دقیقه و کاهش قابل توجه پرتوگیری احتمالی کاربران شد. این سیستم به صورت برقی و از فاصله دو متری محل استقرار جک قابل کنترل می‌باشد.

کســـک، محل پرتودهی به محصـــولات اســـت و مجهز به یک حفاظ سربی مخصوص می‌باشد و بالای اسکلت نگهدارنده قرار می‌گیرد. در طراحی کســـک، 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 محصـــول از وســـط کســـک عبور می‌کند، می‌بایســـت چینش خاصی به منظور یکنواختی دز با اکتیویته ۵۰ کیلوکوری صورت پذیرد. خوشـــبختلنه به دلیل چیدمان متقارن میله‌های پرتودهی، یک فضـــای دز با تقارن اســـتوانه‌ای بدســـت می‌آید. البته عوامل دیگری همچون اکتیویته و چگالی محصـــول در ایجاد نســـبت یکنواختی دز اســـتاندارد موثر می‌باشـــد. در دســـتگاه خودحفاظ گاما ۳۶ محل، جهت قراردادن مدادک‌های چشمه قراردارد که بر اســـاس اکتیویته‌ی چشـــمه‌ها و توزیع دز در محفظه‌ی پرتودهی چیدمان می‌شـــود. مدادک چشـــمه‌ی 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 ســـانتی‌متر اســـت. مدادک‌ها در کســـک قرار می‌گیرند و کسک مجهز به یک حفاظ سربی مخصوص است. قطر داخلی محفظه فولادی (محل عبور و پرتودهی محصـول) 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 محصـــول و...)، بســـتگی به مدت زمان حضـــور محصول در کسک دارد که این زمان با سرعت عبور محصولات کشاورزی متناسب است. تنظیم سرعت توسط ماردونی که در محل خروج محصـــول نصـــب شـــده، 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 محصـــول را به مقدار مورد نیاز رســـاند. در واقع کســـک یـــک محفظـــه اســـتوانـــه‌ای بـــا حجم داخلی $V_{Cask} = \pi r^2 h$ اســـت که در آن $r = ۱۴/۴ cm$ شـــعاع داخلی کســـک و $h = ۹۶ cm$ ارتفاع کســـک اســـت. دبی حجمی ماردون

۱. Spacer

شکل ۴. ماردون با هر بار چرخش حجم مشخصی از محصولات غذایی پرتودیده را به خارج کسک هدایت می‌کند.



شکل ۵. درپوش فولادی برای حمل و نقل کسک به همراه تجهیزاتی که شرایط و استاندارد حمل و نقل مواد پرتوزا را ایجاد می‌کنند.

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 می‌آید. با مشخص بودن زمان پرتودهی، نسبت تعداد دور بر زمان پرتودهی عددی را بدست می‌دهد که متناسب با دور موتور است و با تنظیم دور موتور بر حسب این عدد، سرعت حرکت ماردون تعیین می‌شود به عبارتی می‌توان نوشت:

$$N = \frac{1}{kt}\frac{V_{Cask}}{V_{dM}}, \qquad (۲)$$

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

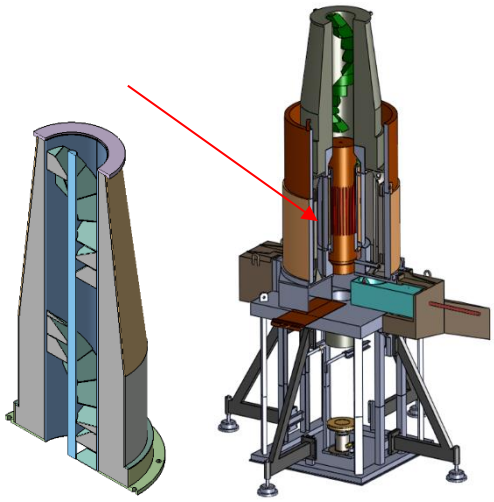
در طی نقل و انتقال کسک از یک محل به محلی دیگر، از

شکل ۶. هندسه و محل قرارگیری مارپیچ پلکانی ساخته شده

درپوش فولادی ضد زنگ که با سرب پر شده استفاده می‌شود و کسک داخل این درپوش قرار می‌گیرد 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.

مارپیچ پلکانی یکی از مهم‌ترین قسمت‌های سامانه پرتودهی خود حفاظ است و در بالای کسک قرار می‌گیرد. شکل (۶) نمایی از مارپیچ را که به کسک نصب شده و در مرحله بعد تنوره به آن اضافه شده است را نشان می‌دهد. این ورودی مخروطی شکل از جنس سرب بوده که با ورقه‌ای از فولاد ضد زنگ مقاوم در برابر سایش پوشانده شده است. درون این مخروط، سرب‌ریزی شده و سطحی از فولاد ضد زنگ مقاوم در برابر سایش، سرب‌ها را پوشانیده و پلکان یا مارپیچ پیوسته‌ای را تشکیل داده است. این مارپیچ علاوه بر حفاظت عمودی در برابر تشعشع، از سقوط آزاد محصول نیز جلوگیری می‌کند. ارتفاع این مارپیچ پلکانی ۹۵۱/۱۴ میلی‌متر، و قطر دایره مقطع تحتانی آن ۸۰۰ میلی‌متر می‌باشد.

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



شکل ۷. مارپیچ اسپیرال ساخت کشور مجارستان

نکته دیگر اینکه محصولات کشاورزی از سمت قیف بالای سامانه وارد می‌شوند 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 می‌شود که احتمال گیرکردن شیء درون سامانه را تا حد زیادی کاهش می‌دهد.

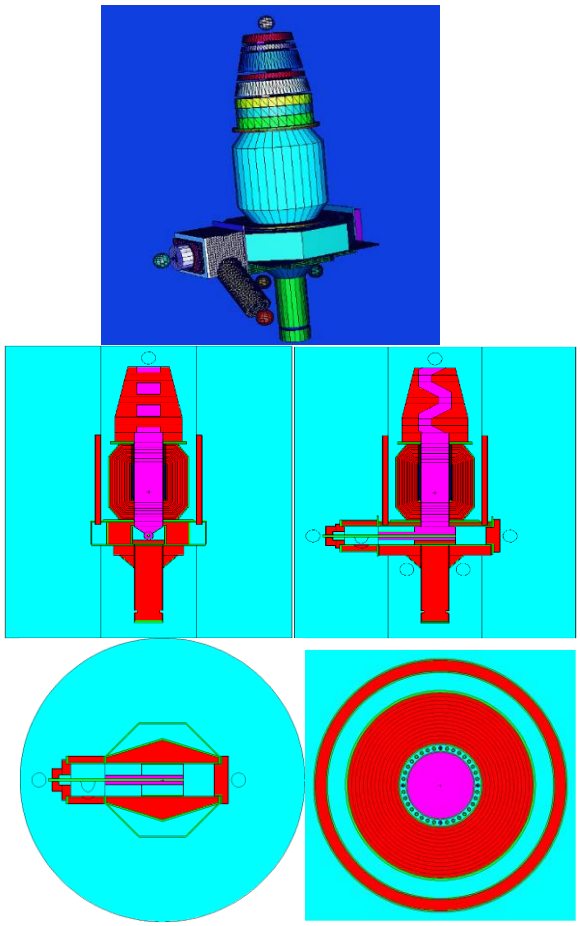
کنترل قسمت برقی سامانه پرتودهی خودحفاظ گاما با استفاده از یک تابلو فرمان انجام می‌شود که شامل رابط گرافیکی[۱]، PLC[۲]، رله‌ها[۳] و میکروکنترلرها[۴]، اینورتر موتور و مدارات کنترلی است و کاربری سیستم را آسان می‌کند. تنظیمات اولیه بر روی رابط گرافیک پس از بارگذاری چشمه‌ها بر روی دستگاه و نصب در محل پرتودهی محصولات صورت می‌گیرد. همانطور که گفته شد این تابلوفرمان با کنترل میزان گردش ماردون بر حسب میزان اکتیویته باقیمانده و در نتیجه زمان پرتودهی، میزان دز دریافتی توسط محصول را کنترل می‌کند. همچنین تابلو فرمان جهت بررسی اینترلاک‌ها[۵] و خطاهای دستگاه مورد استفاده قرار می‌گیرد و قابلیت بالا و پایین بردن جک برای حالت روشن یا خاموش را داراست. قابل ذکر است پس از ثبت چگالی و دز پرتودهی توسط کاربر، مدت زمان پرتودهی به صورت خودکار توسط نرم‌افزار سامانه محاسبه می‌گردد. 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 بهره‌برداری و نگهداری دستگاه در بازه ^{o}C ۶۰-۰ و میزان رطوبت مجاز، بازه ۹۵٪-۱۰٪ است و بنابراین دما و رطوبت کارکرد تابلو فرمان و متعلقات الکتریکی‌اش نیز همین مقادیر در نظر گرفته می‌شود. به منظور جلوگیری از آسیب‌های 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 اضافه‌بار سریعاً عکس‌العمل نشان می‌دهند و برق مدار را قطع می‌کنند. 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 اینترلاک‌ها و آلارم‌های در نظر گرفته شده برای سیستم و خطای محاسباتی، پرتودهی آغاز نخواهد شد. پس از رفع خطا و بازنشانی آن، به صفحه‌ی فرآیند پرتودهی منتقل شده و امکان شروع فرآیند پرتودهی میسر می‌گردد. ذکر این نکته ضروری است که متناسب با محل نصب دستگاه و درخواست بهره‌بردار سامانه، امکان افزایش اینترلاک‌های 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

۱. Human-Machine Interface (HMI)
۲. Programmable logic controller
۳. Relay
۴. Microcontroller
۵. Interlock
۶. Miniature Circuit Breaker (MCB)



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[1] مورد استفاده قرار گرفته است. همانطور که گفته شد اکتیویته اولیه مدادک‌های چشمه کبالت-۶۰ استاندارد در محدوده ۸۰۰۰-۱۲۰۰۰ کوری است لذا

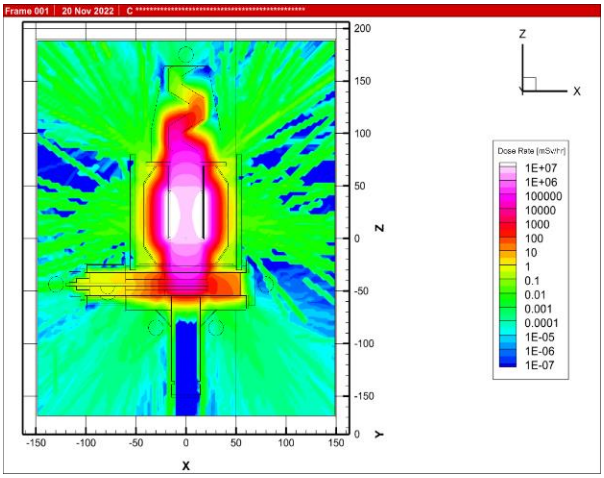
جدول ۲. میزان آهنگ دز در موقعیت‌های مختلف سامانه پرتودهی خودحفاظ گاما در حالت روشن

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

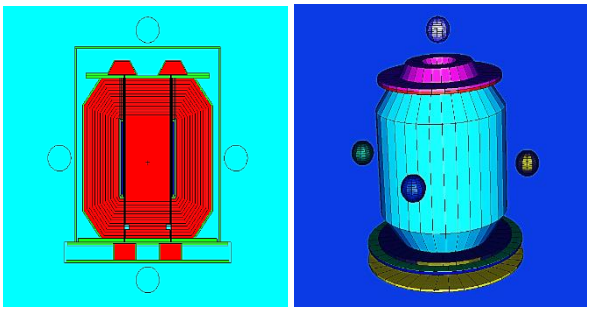
در شبیه‌سازی با توجه به بحرانی‌ترین شرایط تجهیز، چشمه پرتویی گاما مد نظر به صورت ۴ مدادک با اکتیویته ۱۲۵۰۰ کوری (کلا معادل ۵۰ کیلوکوری) در چهار سمت کسک (در زوایای صفر، ۹۰، ۱۸۰ و ۲۷۰ بر روی دایره کسک چشمه) در نظر گرفته شده است. شکل (۸) نمایی سه بعدی، جانبی و از بالا از مقاطع سامانه پرتودهی خودحفاظ گاما 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 g/cm^3 ۱/۴ - ۱ [۱۱] می‌باشد و بدین دلیل چگالی مواد در نظر گرفته شده در شبیه‌سازی این مناطق برابر g/cm^3 ۱ لحاظ شده است. میزان آهنگ دز فوتون در موقعیت‌های مختلف در جدول (۲) و توزیع

۱. Shaft



شـکل ۹. نمایی از توزیع آهنگ دز گاما برای حالت روشـن سـامانه خودحفاظ گاما



شـکل ۱۰. نمای سـه بعدی و جانبی از مدل شـبیه‌سـازی کسـک به محفظه حمل و نقل موقت به همراه سایر متعلقات

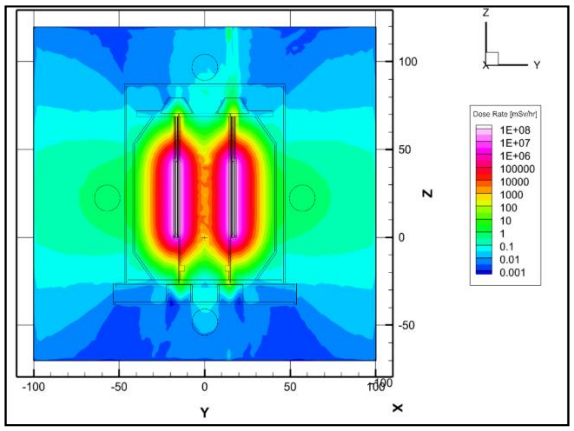
آهنگ دز در شکل (۹) ارائه شده است.

در مرحله بعد، کسـک چشـمه به همراه محفظه حمل و نقل و سـایر متعلقات که به منظور جابجایی کوتاه برای بارگذاری چشـمه به داخل کسـک مورد اسـتفاده قرار می‌گیرد، شـبیه‌سـازی شـده اسـت. نمای سـه بعدی و نمای جانبی مدل شـبیه‌سـازی کسـک به محفظه حمل و نقل موقت به همراه سـایر 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 سـامانه خودحفاظ گاما به ترتیب در جدول (۳) و شکل (۱۱) آورده شده است.

طبق اسـتاندارد ملی آمریکا و مرکز نظام ایمنی هسـته‌ای کشـور، مقدار آهنگ دز اسـتاندارد به ترتیب برای حالت حمل و نقل و حالت بهره‌برداری باید کمتر از $2mSv/h$ و $20\mu Sv/h$

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

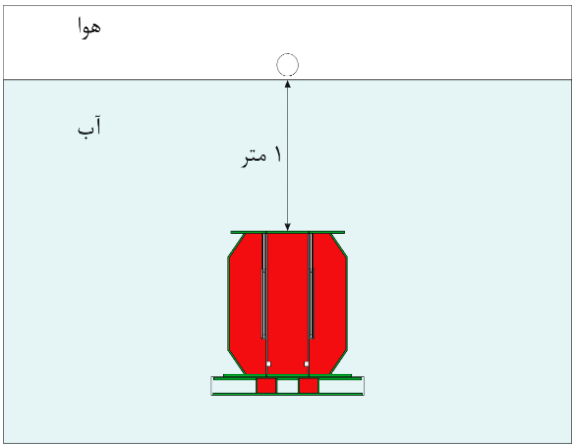
موقعیت	آهنگ دز فوتون (µSv/h)
بالای کسک حمل و نقل	۲۶/۲۰۸
اطراف کسک حمل و نقل	۵۵۸/۴۵۱
	۵۵۹/۶۴۰
	۵۵۱/۹۷۰
	۵۵۷/۰۲۵
زیر کسک حمل و نقل	۱۴/۷۱



شـکل 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

باشـد [۱۹] و نتایج تجربی که با اسـتفاده از دزیمتر از سـامانه گرفته شـد، نتایج جدول (۲) و (۳) را با حدود ۵ الی ۷ درصـد خطا تایید کرد. در شـکل (۱۲) نمایی از دزیمتری سـامانه خود حفاظ گاما با استفاده از دزیمتر آورده شده است.



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

۳. ۲. 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 ۱/۵متری 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 می‌تولند 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 مداد 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 شماره سریال P08[1] 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 مش‌تالی دوبعدی در مختصات دکارتی روی سطح استخر و با استفاده از ضرایب تبدیل شار به دز ICRP-21 و درون‌یابی لگاریتمی در 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.

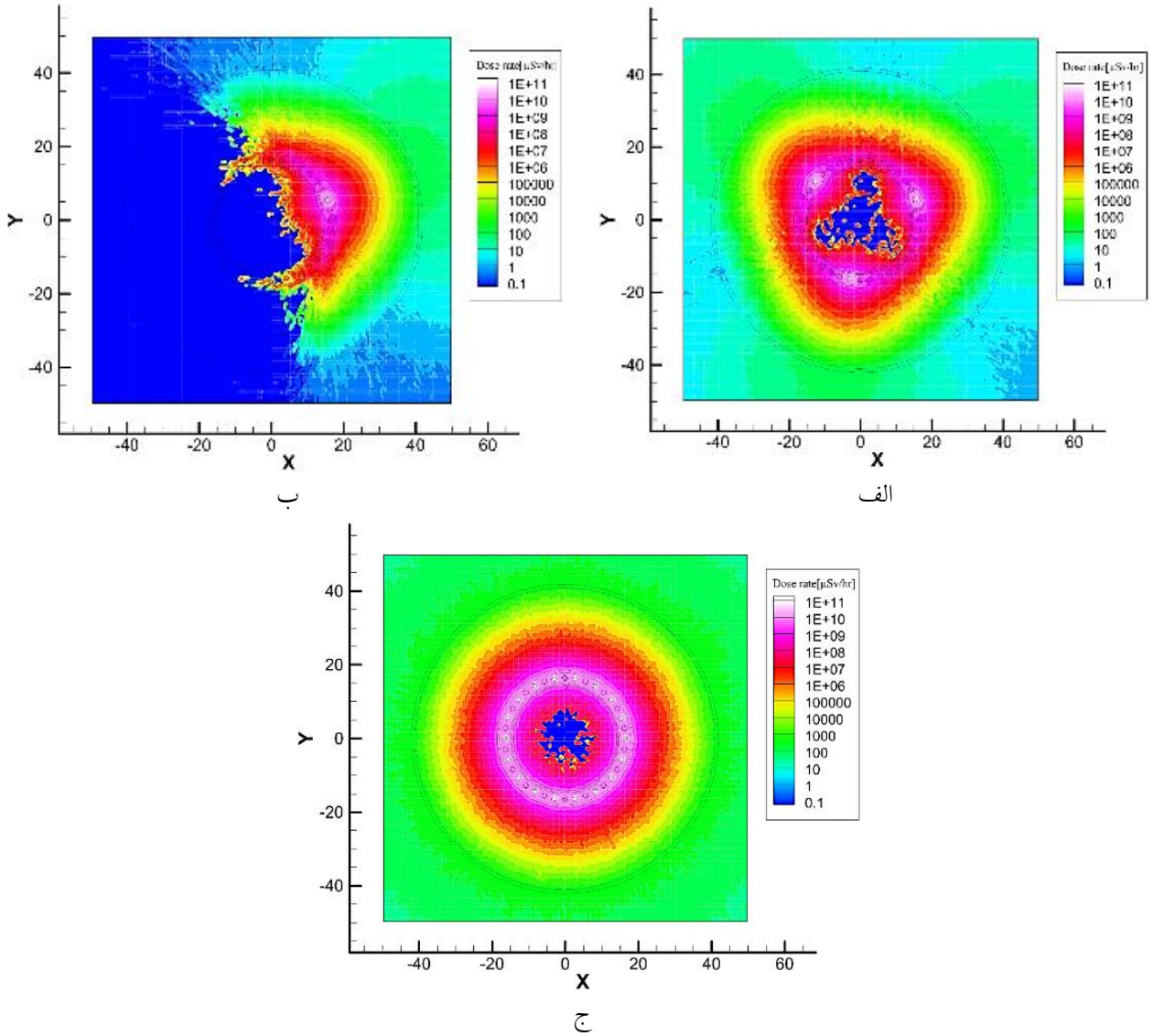
بر طبق این شبیه‌سازی‌ها و نقشه راهی که بر این اساس طراحی گردید، انتقال چشمه‌ها به درون کسک انجام پذیرفت که در شکل (۱۶) نمایی از انتقال موفقیت آمیز چشمه‌ها به درون کسک مشاهده می‌شود.

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

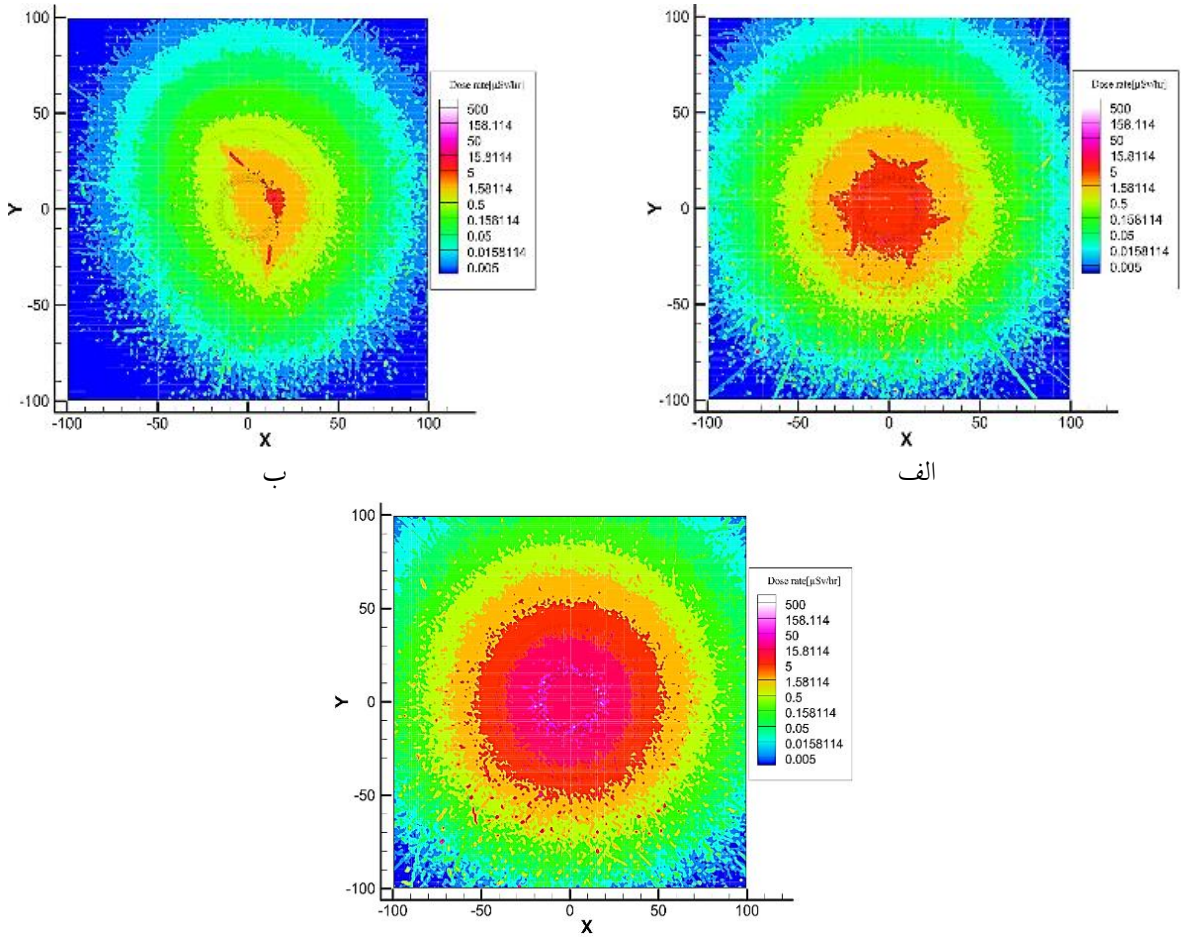
۱. محاسبات پرتوزایی چشمه‌ها مربوط به تاریخ ۱۴۰۱/۱۲/۰۷ یا ۲۰۲۳/۰۲/۲۷ است.

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



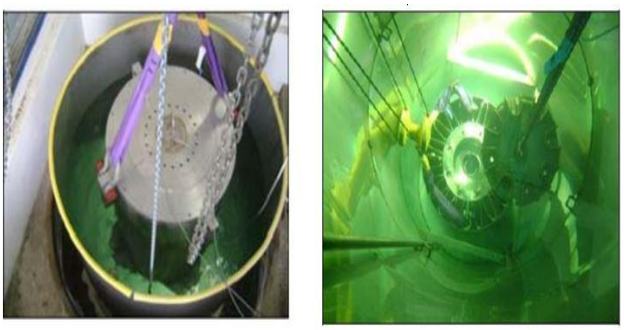
شکل ۱۴. نمایی از موقعیت چشمه شبیه‌سازی شده (برشی از میانه کسک) برای حالت ۱ (الف)، ۳ (ب) و ۱۸(ج) مدادک چشمه



ب الف

ج

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



شکل ۱۶. انتقال چشمه‌ها به درون کسک

جدول ۵. نتایج آهنگ دز گاما روی سطح آب

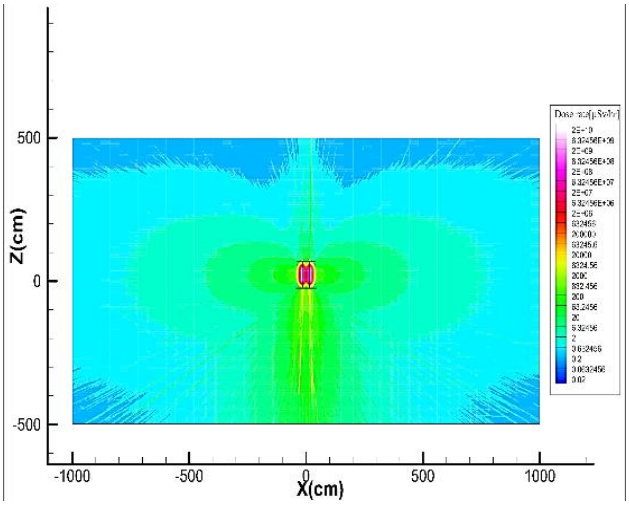
	تعداد مدادک‌ها	میزان اکتیویته کل چشمه‌ها	نتایج(μSv/h)	درصد خطا
حالت اول	۱	۲۶۶۹/۰۵ کوری	۲/۰۰	٪ ۷/۷۹
حالت دوم	۳	۸۰۸۵/۱۶ کوری	۵/۴۳	٪ ۶/۷۲
حالت سوم	۱۸	۵۰،۰۰۰ کوری	۳۱/۰۵	٪ ۵/۷۵

۳. ۳. مونتاژ و دمونتاژ سامانه پرتودهی خودحفاظ

کسک سامانه پرتودهی خودحفاظ گاما توسط ۱۸ عدد مدادک چشمه صنعتی کبالت-۶۰ در استخر سامانه پرتودهی گامای تهران، بارگذاری می‌شود. پس از قرارگیری مدادک‌های چشمه و حفاظ دامی سربی در کانال‌های مخصوص آن‌ها پیچ‌های روی کانال‌های کسک بسته می‌شود و در نهایت درپوش سربی روی کسک قرار گرفته و کسک به همراه پالت از طریق سقف سامانه به بیرون از سامانه منتقل می‌شود. پس از بستن محفظه حمل و نقل، کسک به محل استقرار خود منتقل می‌شود. آهنگ دز پرتوی گاما طبق استاندارد در فاصله ۵ سانتی متری از دیواره محفظه باید کمتر از ۲mSv/h باشد و طبق نتایج شبیه‌سازی ارائه شده در جدول (۳) این مقدار حدود ۶۰۰µSv/h محاسبه شده است. لذا الزامیست طی فرآیند جابجایی و مونتاژ سامانه پرتودهی خودحفاظ گاما ملاحظات ایمنی پرتویی و زمان پرتوگیری افراد در نظر گرفته شود. بدین منظور با توجه به باز شدن محفظه و جداشدن کسک از روی پالت و در نهایت برداشتن درپوش سربی بالایی کسک از روی کسک در حین فرآیند مونتاژ، باید آهنگ دز پرتوگاما در فواصل مختلف مشخص شود که در بخش‌های بعدی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۳. ۳. ۱. جداسازی کسک از روی پالت

در این حالت کسک از پالت جدا می‌شود. با توجه به این که بخشی از حفاظ زیستی سربی که در پالت تعبیه شده، حذف می‌شود لذا حین بلند کردن کسک و قراردادن آن روی پایه نگهدارنده شاهد نشت دز پرتو گاما در زیر کسک خواهیم بود که در این حالت آهنگ دز گاما در زیر کسک به بیش از چند ۱۰ میلی‌سیورت 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 شبیه‌سازی 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



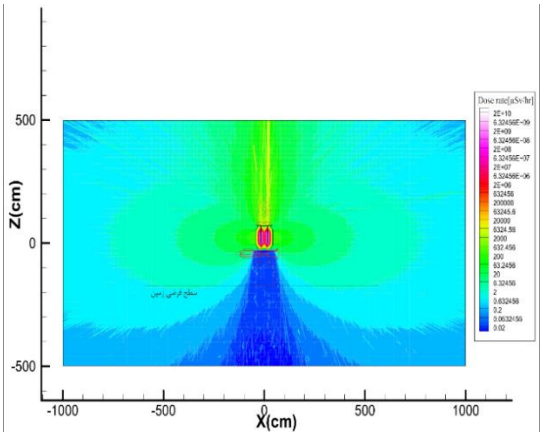
شکل ۱۷. توزیع آهنگ دز گاما در اطراف کسک حاوی چشمه در ارتفاع ۵ متری و ناشی حذف پالت حمل و نقل

که مشاهده می‌شود نشت دز در زیر کسک ایجاد می‌شود و بنابراین باید کسک هرچه سریعتر بر روی پایه نگه‌دارنده سامانه نصب شود تا سرب‌های پایه نگه‌دارنده مانع نشت پرتو گردند. محاسبات نشان داد که آهنگ دز نشتی از پایه نگهدارنده سامانه خودحفاظ در حدود ۰/۲۵ µSv/h و سامانه خودحفاظ ساخت کشور مجارستان در حدود ۰/۷ 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 نگهدارنده، در ابتدا باید درپوش سربی روی کسک برداشته شود و سپس مارپیچ 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 ۱۰ میلی‌سیورت بر ساعت خواهد رسید. نتایج شبیه‌سازی 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.



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

۴. یکنواختی دز کسک

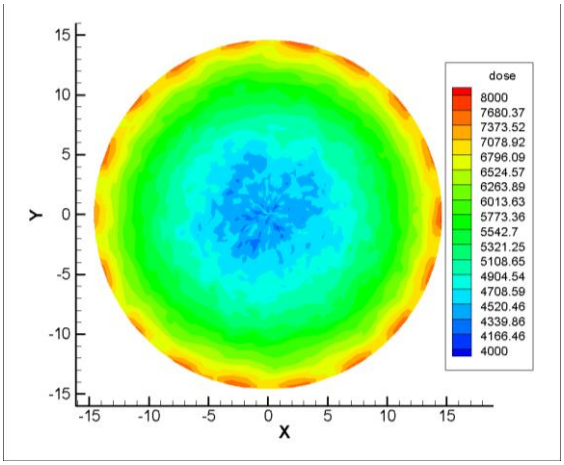
نسبت یکنواختی دز وابسته به هندسه چشمه‌های مورد استفاده در سیستم و نحوه چینش چشمه‌ها نسبت به هم است. با توجه به اینکه چشمه‌ها استوانه‌ای هستند بنابراین هندسه‌ای با تقارن استوانه‌ای برای کسک در نظر گرفته شد تا یکنواختی دز بهتری وجود داشته باشد. هرچه سیستم دارای یکنواختی دز با عدد پایینتری باشد، مطلوب‌تر است. اما طبق گزارش آژانس بین المللی انرژی اتمی [۲۰]، یکنواختی دز جذبی در محدوده ۱/۵ 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]:

$$\eta = \frac{\dot{D}_{\max}}{\dot{D}_{\min}} \ , \qquad (۳)$$

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 ۱۸ چشمه کبالت با اکتیویته ۸۰۰۰ 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.



شکل ۱۹. نمودار توزیع دز در داخل کسک پرتودهی

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 شبیه سازی حلت اول، مربوط زمانی 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 می پذیرد.

در شکل (۱۷) آهنگ دز گاما در شعاع ۳ متری از کسک، چند میکروسیورت بر ساعت (کمتر از ۱۰μSv/h) می‌باشد و در فواصل بیشتر (۵ تا ۱۰ متری) شاهد افت چندانی نخواهیم بود و آهنگ دز گاما کمتر از ۲μSv/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.

در شکل (۱۸) آهنگ دز گاما در شعاع ۴ متری از کسک، چند میکروسیورت بر ساعت (کمتر از ۱۰µSv/h) می‌باشد. همانطور در شکل (۱۸) مشاهده می‌شود در فاصله ۸ متری آهنگ دز گاما به کمتر از ۲µSv/h کاهش خواهد یافت. پس از برداشتن درپوش سربی روی کسک، مارپیچ 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 مارپیچ پلکانی روی کسک، توزیع آهنگ دز گاما در اطراف کسک تغییری نخواهد کرد و در حین بستن پیچ‌های کسک به پایه نگهدارنده و مارپیچ پلکانی آهنگ دز گاما در فاصله ۵ سانتی متری از کسک، میزان این آهنگ دز مطابق با استاندارد و مبنای طراحی باید کمتر از ۲mSv/h باشد که بر طبق شبیه‌سازی‌های انجام شده در حدود ۶۰۰ µSv/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 ۱۴۰ کیلونیوتون افزایش پیدا کرد و میزان سرب‌ریزی برای مارپیچ 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 پرتودهی 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 ۳۰۴ و سرب می باشد و از مواد پلاستیکی درون سیستم استفاده نشده است و تنها موارد استفاده از کابل‌ها در خارج از سیستم پرتودهی می‌باشد و دز در این مناطق کمتر از 200 µSv 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 پرتودهی خودحفاظ میزان یکنواختی دز طبق شکل (۱۹) حدود عدد ۲ بدست آمد که برای کارهای صنعتی پرتودهی مورد قبول است.

۶. نتیجه‌گیری

پرتودهی 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 پرتودهی خودحفاظ گامای بهبود یافته‌ای، طراحی و ساخته شد. با اصلاحات صورت گرفته در سامانه پرتودهی خودحفاظ گاما کاهش دز نشتی، افزایش تحمل وزن محصولات کشاورزی، کاربری آسان که جزو قابلیت‌های منحصر به فردش محسوب می‌شود، تولنایی پرتودهی انواع غلات و حبوبات فراهم می‌شود. حدود دز مجاز و آهنگ دز معادل برای حالت‌های مختلف بهره‌برداری از سامانه‌های پرتودهی با محفظه نگهداری در استاندارد ANSI/HPS N43.7-2018 و استاندارد پایه ISIRI 7751 "حفاظت در برابر پرتوهای یونساز و ایمنی منابع پرتو–استانداردهای پایه" بیان شده است که استاندارد مذکور برای سامانه‌های پرتودهی خودحفاظ شامل چشمه‌های گامازا یا بتازای بسته، به‌کار می‌رود. با توجه به شبیه‌سازی و اندازه‌گیری دز بصورت تجربی، آهنگ دز و حدود مجاز در طراحی سامانه مذکور با توجه به استاندارد پرتودهی خودحفاظ گاما، رعایت شده است. همچنین بر طبق مدرک مرکز نظام ایمنی هسته‌ای کشور با عنوان «مقررات ترابری ایمن مواد پرتوزا» با شماره شناسه INRA-MA-RE-200-50/01-1-Kho.1400 حدود مقادیر مجاز آهنگ دز برای انواع بسته‌ها و کانتینر حمل نباید از mSv/h ۲ 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 تولیدی 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	Maximmum 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 Indiarto 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 SelfContained, 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.