



فصلنامه علمی ((دفاع هوافضایی))
دوره ۲، شماره ۳، آذر ۱۴۰۲

عنوان مقالات

مقاله پژوهشی

بررسی سیستم‌های پرتو دهی گاما به منظور فرآوری و اصلاح مواد

محمد منصوری^۱، سیدتقی محمدی^۲

۱- دکتری فیزیک، گروه فیزیک، مرکز آموزش علوم پایه، دانشگاه پدافند هوایی خاتم‌الانبیاء(ص)، تهران، ایران
۲- استادیار فیزیک، گروه فیزیک، مرکز آموزش علوم پایه، دانشگاه پدافند هوایی خاتم‌الانبیاء(ص)، تهران، ایران

چکیده

اشعه گاما همانند امواج رادیویی، فروسرخ، فرابنفش و پرتو ایکس، نوعی از امواج الکترومغناطیس به شمار می‌آید. شروع کاربرد پرتوها به اواخر قرن ۱۹ میلادی، پس از کشف اشعه ایکس توسط رونتگن برمی‌گردد. کاربرد پرتوها به طور گسترده و موفقیت‌آمیزی در پزشکی، صنعت، کشاورزی و بخش‌های تحقیقاتی دیده می‌شود. به طور مثال در پزشکی برای درمان تومورهای سرطانی از نوترون و اشعه گاما و در رادیولوژی از اشعه ایکس استفاده می‌شود. در صنعت دفاعی و نظامی نیز از پرتو گاما که از رادیم و کبالت رادیواکتیو با قدرت زیاد تابش می‌شوند، برای پیدا کردن حفره‌های ریز و شکستگی‌های قطعات فلزی در صنعت هواپیمایی و موشکی استفاده می‌کنند. همچنین برای تعیین نوع و مقدار ماده پرتوزا در پایش هوایی پرتوی گاما در هنگام عملیات شناسایی نیز مورد استفاده قرار می‌گیرند. یکی دیگر از کاربردهای پرتوها در زمینه پرتو فرآوری است. پرتو فرآوری به منظور فرآوری و اصلاح مواد، کاهش ضایعات مخرب صنعتی و باز فرآوری پساب‌ها و غیره استفاده می‌شود که در ادامه این مقاله با تفصیل بیشتری معرفی شده است. لذا در این مقاله ابتدا در مورد تابش و انواع آن توضیح داده شده و سپس در ادامه آن به معرفی انواع مختلف سیستم‌های پرتو دهی گاما و همچنین بررسی برخی از پرتو دهنده‌های موجود در دنیا پرداخته شده است.

اطلاعات مقاله

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۸/۲۰

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۱/۲۰

کلمات کلیدی:

تابش، گاما، پرتو فرآوری، سیستم پرتو دهی، پرتو دهنده‌ها



نویسنده مسئول:

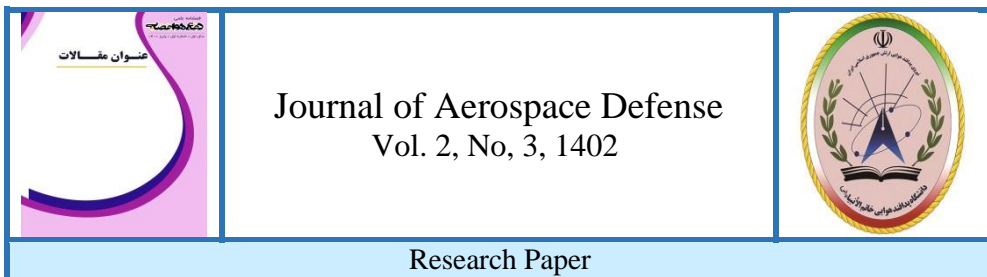
محمد منصوری

ایمیل:

drmansouri.m20@gmail.com

استناد به مقاله: محمد منصوری، سیدتقی محمدی، بررسی سیستم‌های پرتو دهی گاما به منظور فرآوری و اصلاح

مواد، مجله علمی پژوهشی دفاع هوافضایی دوره ۲، شماره ۳، آذر ۱۴۰۲.



Investigating gamma irradiation systems for the purpose of processing and modifying materials

Mohammad Mansouri¹, Seyed Taghi Mohammadi²

¹ Ph.D. in Physics, Department of Physics, Basic Science Education Center, Khatam Al-Anbiah (pbuh) Air Defense University, Tehran, Iran

² Assistant Professor of Physics, Department of Physics, Basic Science Education Center, Khatam Al-Anbiah (pbuh) Air Defense University, Tehran, Iran

Article Information

Accepted: 1402/08/20

Received: 1401/11/20

Keywords:

Irradiation, Gamma, Ray processing, Irradiation system, emitters.



Corresponding author:

Mohammad Mansouri

Email:

drmansouri.m20@gmail.com

Abstract

Gamma rays, like radio waves, infrared waves, ultraviolet rays, and X-rays, are a type of electromagnetic waves. The beginning of the use of radiation dates back to the end of the 19th century, after the discovery of X-rays by Røntgen. The use of radiation is widely and successfully seen in medicine, industry, agriculture and research sectors. For example, neutrons and gamma rays are used in medicine to treat cancerous tumors, and X-rays are used in radiology. In the defense and military industry, gamma rays emitted from radioactive radium and cobalt with high power. They are used to find small holes and fractures of metal parts in the aircraft and missile industry. They are also used to determine the type and amount of radioactive material in aerial monitoring of gamma rays during identification operations. Another application of rays in the field of radiation processing. Ultra-processing is used in order to process and modify materials, reduce harmful industrial waste and reprocess waste water, etc., which is introduced in more detail in the rest of this article. Therefore, in this article, radiation and its types are first explained, and then the different types of gamma radiation systems are introduced, as well as some radiation emitters in the world are discussed.

HOW TO CITE: Mohammad Mansouri, Seyed Taghi Mohammadi, Investigating gamma irradiation systems for the purpose of processing and modifying materials, Journal of Aerospace Defense, Vol. 2, No 3, 1402.

۱. مقدمه

تابش^۱، یک لغت عمومی است که به انتقال انرژی در فضا اطلاق می‌شود و شامل امواج صوتی و طیف امواج الکترومغناطیسی می‌باشد. همه ذرات اتمی و زیر اتمی، به‌ویژه الکترون‌ها و نوترون‌ها نیز در خانواده وسیع انواع مختلف تابش لحاظ شده‌اند. همچنین سامانه سیستم‌های تصویربرداری پرتو گاما، دارای کاربردهای وسیعی در حوزه‌های نظامی و امنیتی، بخصوص در فاشا بوده و برحسب نوع کاربرد، پارامترهای مختلفی در طراحی آن مدنظر قرار می‌گیرد [۱]. تابش به دو دسته یونیزان و غیر یونیزان تقسیم می‌گردد. عبارت تابش یونیزان به اشعه ایکس، اشعه گاما و ذرات اتمی و زیر اتمی مانند الکترون، پوزیترون، پروتون، نوترون آلفا و غیره، اطلاق می‌شود که قادرند الکترون‌ها را از اتم‌ها و مولکول‌های ماده جدا نموده و تولید یون می‌کنند [۲]. تابش غیر یونیزان، تابش الکترومغناطیسی با طول موج حدود ۱۰ نانومتر یا بیشتر است. این بخش از طیف الکترومغناطیسی شامل امواج رادیویی، میکروموج‌ها، نور مرئی و نور فرابنفش می‌باشد [۳]. پرتوهای یونیزان به دو دسته کلی پرتوهای مستقیم مانند ذرات باردار (الکترون و ذره آلفا) و یونیزان غیر مستقیم مانند ذرات بدون بار (فوتون و نوترون)، تقسیم می‌شوند. این پرتوها در برخورد با محیط‌های مادی سبب ایجاد یونیزاسیون یا برانگیختگی اتم‌های محیط می‌شوند. پرتوهای یونیزان غیر مستقیم، سبب آزاد شدن الکترون‌ها و یا هسته‌های پس‌زده شده^۲ و ذرات باردار دیگری می‌شوند که این ذرات به نوبه خود، اتم‌های محیط مادی را یونیزه می‌کنند. عبارت برخورد برای پرتوهای یونیزان غیر مستقیم به فرایندهایی اطلاق می‌شود که در آن انرژی و یا جهت پرتو و یا هر دو تغییر می‌یابند. درحالی‌که در پرتوهای یونیزان مستقیم، هرگونه اثر متقابل بین ذره باردار تابشی با الکترون و یا هسته اتم‌های محیط، به‌عنوان برخورد شناخته می‌شود.

پرتوهای یونیزان هنگام عبور از محیط مادی، با اتم‌ها و مولکول‌های آن محیط اندرکنش می‌کنند. یک ذره باردار به هنگام عبور از ماده، از طریق اندرکنش‌های کولنی به اتم‌های آن ماده، به طور پیوسته انرژی خود را از دست می‌دهد و سرانجام پس از طی فاصله معینی موسوم به برد می‌ایستد و انرژی آن جذب می‌شود. برد ذرات باردار به نوع و انرژی ذره و نیز ماده‌ای که ذره در آن حرکت می‌کند، بستگی دارد. احتمال اینکه ذره بارداری از یک ماده عبور کند و برهم‌کنشی انجام ندهد، عملاً صفر است. ذرات بدون بار مانند فوتون و نوترون نیز با محیط مادی اندرکنش دارند، اما احتمال غیر صفری وجود دارد که یک نوترون یا یک فوتون بدون هیچ‌گونه برهم‌کنشی از هر ضخامت ماده‌ای عبور کند. بنابراین هیچ برد محدودی را نمی‌توان برای نوترون یا فوتون تعریف کرد [۳]. در مورد فوتون‌ها (پرتوهای گاما) با افزایش ضخامت جذب فقط از شدت پرتو کاسته می‌شود و جذب کامل صورت نمی‌گیرد. اگر اندازه‌گیری تضعیف پرتو گاما در شرایط هندسی خوب

^۱ Radiation

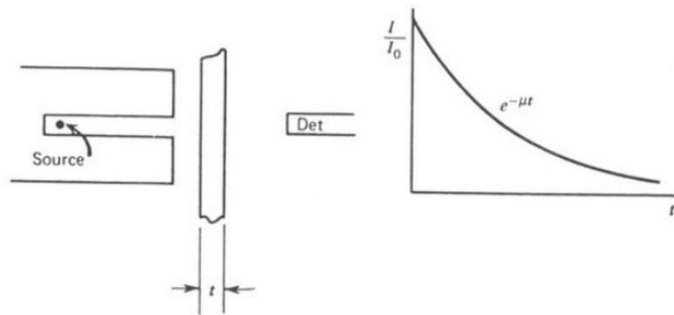
^۲ Recoiled

(شکل ۱) یعنی با استفاده از یک باریکه تابشی باریک و کاملاً موازی انجام شود، در صورتی که پرتو گاما تک انرژی باشد، یک منحنی نمایی حاصل خواهد شد که از قانون مشهور لامبرت-بیر^۱ تبعیت می‌کند:

$$\frac{I}{I_0} = e^{-\mu t} \quad (1)$$

در رابطه (۱) ضخامت ماده جاذب، I_0 شدت اولیه پرتو گاما و I شدت پرتو (بدون برخورد) بعد از عبور از ضخامت t است [۳]. همچنین μ ضریب تضعیف خطی می‌باشد که به صورت احتمال اندرکنش در واحد طول تعریف می‌شود و واحد آن در SI، m^{-1} است. در ادامه به منظور آشنایی با برخی مفاهیم و کمیات مورد استفاده در مقاله به معرفی آن‌ها پرداخته می‌شود.

Gamma ray transmission experiment



شکل ۱: منحنی عبور نمایی پرتوهای گاما تحت شرایط هندسی خوب [۵]

دوز جذبی: پرتوهای یونیزان در حین اندرکنش با اتم‌ها و مولکول‌های محیط مادی، تمام و یا بخشی از انرژی خود را از دست می‌دهند. میزان انرژی جذب‌شده در واحد جرم یک ماده مشخص (در یک حجم بسیار کوچک از آن ماده) به عنوان دز جذبی تعریف می‌شود:

$$D = \frac{d \bar{\varepsilon}}{dm} \quad (2)$$

در رابطه (۲)، $d \bar{\varepsilon}$ متوسط انرژی داده شده به جرم dm می‌باشد. در مورد دوز جذبی ذرات باردار یا بدون باری که انرژی خود را در جرم dm به‌جا می‌گذارد، لزوماً در همان محل تولید نشده‌اند.

^۱ Beer-lambert Law

واحد بین‌المللی دوز جذبی که امروزه به کار می‌رود گری^۱ است که برابر با ۱ J/kg می‌باشد. واحد قدیمی دوز جذبی راد^۲ است که برابر با ۱۰۰ erg/g می‌باشد. یک گری برابر با ۱۰۰ راد است.

آهنگ دوز جذبی: میزان انرژی جذب‌شده در واحد جرم یک ماده مشخص در یک حجم بسیار کوچک از آن ماده در واحد زمان، آهنگ دوز جذبی است. واحد دوز جذبی گری بر ثانیه است و از رابطه (۳) محاسبه می‌شود:

$$\dot{D} = \frac{dD}{dt} \quad (3)$$

شار (φ): تعداد ذراتی که از واحد سطح در واحد زمان عبور می‌کنند شار نامیده می‌شود. واحد شار $m^{-2} s^{-1}$ است.

۲. پرتوآوری

صنعت پرتوآوری در اوایل دهه ۱۹۶۰ میلادی معرفی گردید. در پرتوآوری، یک ماده یا محصول را برای محافظت، اصلاح و بهبود خواص آن مورد پرتودهی قرار می‌دهند به این صورت که محصول در بازه زمانی معینی در مجاورت یک منبع پرتودهی، در معرض پرتوهای گسیل‌شده از چشمه قرار می‌گیرد. کسری از انرژی تابشی که به محصول می‌رسد، به‌وسیله آن جذب می‌شود. این مقدار به جرم ترکیب ماده و همچنین مدت زمان پرتودهی بستگی دارد. پرتوهای یونیزان می‌توانند خواص فیزیکی شیمیایی و بیولوژیکی مواد مورد تابش را اصلاح کنند و یا تغییر دهند. برای هر نوع خاصی از محصول مقدار معینی از انرژی تابشی مورد نیاز است تا تأثیر دلخواه در آن ایجاد شود. در حال حاضر کاربرد مهم صنعت پرتوآوری، شامل سترون‌سازی محصولات یکبار مصرف پزشکی، پرتودهی مواد غذایی و محصولات کشاورزی، میکروبی‌زدایی پساب‌ها و فاضلاب‌ها، بهبود مواد پلیمری و غیره می‌باشد [۶ و ۷].

تمامی پرتوآوری‌ها به‌وسیله پرتوهای یونیزان انجام می‌شود که شامل پرتوهای گاما، الکترون‌های پرانرژی و پرتوهای ایکس تولیدشده از الکترون‌های پرانرژی می‌باشد [۵]. تمایز روشنی بین پرتوهای ایکس و گاما وجود ندارد و تنها از طریق منبع تولیدشان قابل شناسایی می‌باشند. پرتوهای گاما در گذارهای هسته‌ای و واپاشی عناصر رادیواکتیو گسیل می‌شوند، درحالی‌که پرتوهای ایکس در پرتوآوری از فرآیند تابش ترمزی در شتابدهنده‌های الکترونی تولید می‌شوند. اختلاف اصلی پرتوهای گاما و الکترون در قدرت نفوذ آن‌ها می‌باشد. الکترون‌ها برای محصولات با ضخامت کم کاربرد داشته و برای محصولات ضخیم (بیش از ۴ سانتی‌متر معادل آب) مناسب نیستند [۶]. بنابراین در مواردی که نفوذ کم پرتو و سرعت بالای نقاله مورد نیاز است از باریک‌های الکترونی

^۱ Gray

^۲ Rad

استفاده می‌شود، درحالی‌که پرتوهای گاما و ایکس به دلیل قدرت نفوذ بالاتر برای فرآیند پرتودهی محصولات ضخیم و چگال مورد استفاده قرار می‌گیرند. گامافرآوری مزایای بسیاری نسبت به دیگر روش‌های فرآوری دارد. برای مثال به برخی از مزایای استفاده از آن در پرتوفرآوری محصولات پزشکی اشاره می‌شود [۷]:

۱. محصولات بلافاصله بعد از پرتودهی قابل استفاده هستند.
۲. کمترین افزایش دما در محصولات در طول فرآیند صورت می‌گیرد.
۳. به دلیل نفوذپذیری بالای پرتوهای گاما محصولات به طور بسته‌بندی شده می‌توانند تحت عمل پرتودهی قرار بگیرند.
۴. فرایند بسیار دقیق و تجزیه‌پذیر است.
۵. کنترل فرایند پرتودهی آسان است (فقط دوز کنترل می‌شود).

۳. سیستم‌های پرتودهی گاما

پرتوهای گاما در انتهای طیف امواج الکترومغناطیسی قرار گرفته‌اند. نام‌گذاری اشعه گاما ریشه هسته‌ای بودن آن را می‌رساند و گرچه هیچ اختلاف دیگری با سایر پرتوهای الکترومغناطیسی ندارد. این پرتوها تابش‌های الکترومغناطیسی تک انرژی هستند که از هسته‌های برانگیخته حاصل از تبدیل پرتوزا گسیل می‌شوند. گسیل این پرتوها خودساز و کاری است که توسط آن انرژی برانگیختگی هسته‌ها آزاد می‌شود [۴]. انرژی پرتوهای گاما به اندازه کافی بالا هست که بتواند پیوندهای مولکولی را بشکند و اتم‌ها را یونیزه کند ولی نه آنقدر که بر ساختارهای هسته‌ها تأثیر بگذارد. بنابراین تابش گاما می‌تواند خواص فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی مواد را بهبود بخشد، درحالی‌که محصولات مورد پرتودهی رادیو اکتیو نمی‌شوند [۷].

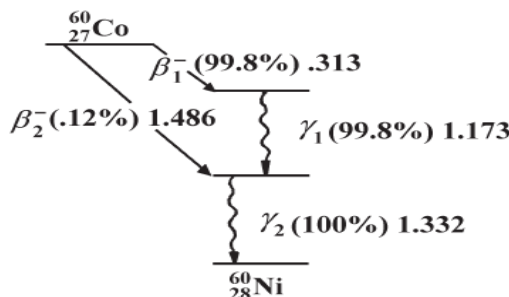
نفوذ خیلی بیشتر اشعه گاما در مقابل الکترون‌ها، سادگی، اعتبار و موفقیت سیستم‌های پرتودهی گاما نسبت به شتاب‌دهنده‌های الکترونی مشخصه جالب توجه این تکنولوژی است. از طرفی تنها عامل مهم در تعیین میزان دز جذب‌شده در محصول تحت تابش زمان پرتودهی است که همین امر، استفاده و کارگردانی این سیستم‌ها را آسان کرده است. اگرچه استفاده از شتاب‌دهنده‌های الکترونی صنعتی نیز افزایش یافته است و امروزه شتاب‌دهنده‌های الکترونی می‌توانند به‌عنوان منابع تابش مؤثر، مشابه سیستم‌های پرتودهی گاما استفاده شوند، با این حال اکثر پرتودهنده‌های موجود در دنیا از نوع پرتودهنده‌های گاما می‌باشند که معمولاً از یک چشمه رادیو اکتیو، محل نگهداری چشمه، سیستم حمل‌ونقل محصولات، حفاظ بیولوژیکی و انبارهای ورود و خروج کالا تشکیل شده‌اند [۲].

۴- منابع تابش گاما

کبالت -۶۰ و سزیم -۱۳۷ که ایزوتوپ‌های رادیواکتیو کبالت و سزیم هستند، منابع اصلی تابش در سیستم‌های پرتودهی گاما می‌باشند. زیرا به طور نسبی انرژی بالاتری از دیگر پرتوهای گاما دارند و

نیمه عمر آن‌ها طولانی است. نیمه عمر کبالت - ۶۰ برابر ۵/۲۷ سال و نیمه عمر سزیم - ۱۳۷، ۳۰/۱۷ سال است [۸]. از میان این دو ایزوتوپ، کبالت - ۶۰ منحصراً به عنوان چشمه پرتو گاما در سیستم‌های پرتوآوری تجاری استفاده می‌شود در حالی که از سزیم - ۱۳۷ خیلی محدودتر و در آزمایشگاه‌های تحقیقاتی استفاده شده است. دلیل اصلی این انتخاب به این حقیقت مربوط می‌شود که پرتوهای گسیل شده از کبالت - ۶۰ با شدت خیلی بیشتری در محصولات نفوذ می‌کنند همچنین کبالت - ۶۰ در آب حل نمی‌شود، روش تولید آن آسان است و با اکتیویته ویژه بالا قابل تولید می‌باشد که امکان ساخت چشمه‌های بسیار فشرده را فراهم می‌آورد [۷].

سزیم - ۱۳۷ یکی از پاره‌های حاصل از شکافت اورانیم - ۲۳۵ است که هنگام کار یک راکتور هسته‌ای مقادیر بسیار زیادی از این ایزوتوپ فعال تولید می‌شود. چشمه سزیم - ۱۳۷ معمولاً به صورت قرصی از پودر کلرید سزیم است. این منبع در سال ۲۸/۲٪ واپاشی می‌کند که حاصل واپاشی آن یک پرتو گاما با انرژی ۶۶۲ keV بوده و محصول نهایی آن ایزوتوپ پایدار باریم - ۱۳۷ است [۲]. ساز و کار واپاشی رادیو ایزوتوپ کبالت - ۶۰ در شکل (۲) نشان داده شده است.



شکل ۲: نمایی از سازو کار رادیو ایزوتوپ کبالت - ۶۰ [۷]

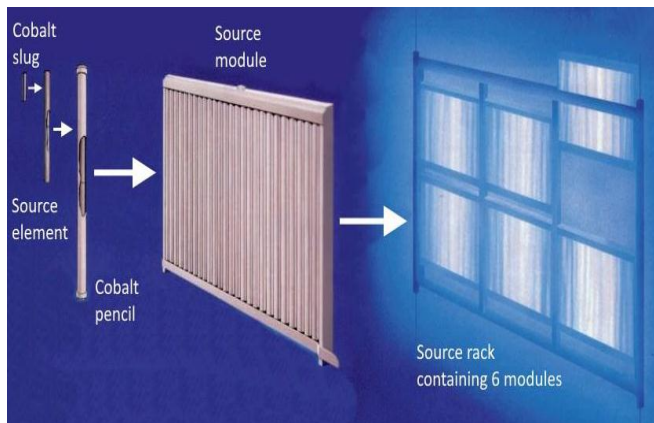
تولید کبالت - ۶۰ رادیواکتیو با کبالت طبیعی (فلز) شروع می‌شود. عنصر کبالت با ۱۰۰٪ فراوانی ایزوتوپ پایدار کبالت - ۵۹ در طبیعت موجود می‌باشد. سنگ معدن کبالت کمیاب است و این فلز تنها در حدود ۰/۰۰۱٪ پوسته زمین را تشکیل می‌دهد. جهت تهیه کبالت رادیواکتیو، فلز کبالت - ۵۹ تصفیه شده به شکل اسلاگ^۱ یا میله‌های استوانه‌ای (یا قرص) ایجاد می‌شوند که عموماً قطری کمتری از ۰/۵ اینچ دارند. میله‌ها با فلزی مانند نیکل روکش شده و سپس در یک لوله زیر کالوی یا فولاد ضد زنگ نگهداری می‌شوند. این ترکیب، هدفی را که در راکتور هسته‌ای مورد پرتو دهی قرار می‌گیرد تشکیل می‌دهد. در راکتور هسته اتم کبالت - ۵۹ یک نوترون جذب می‌کند و به هسته اتم کبالت - ۶۰ تبدیل می‌شود. پس از پرتو دهی (که به شار نوترون در محل بستگی دارد و می‌تواند ۱۸

^۱ Slug

تا ۲۴ ماه طول بکشد) میله‌های رادیواکتیو از راکتور خارج شده و در ظرف‌های مخصوصی به نام کسک^۱ (محفظه حمل مواد رادیواکتیو) به سلول‌های داغی منتقل می‌شوند و در نهایت پوششی از فولاد ضد زنگ روی آن‌ها قرار می‌گیرد. ترکیب نهایی معمولاً به شکل یک میله نازک به طول ۱۱۸ اینچ و قطر ۰/۵ اینچ می‌باشد [۲].

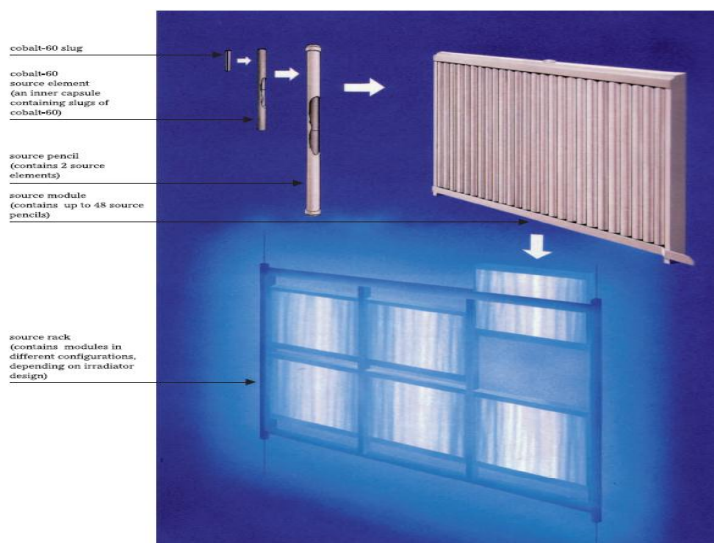
کبالت -۶۰ با گسیل یک ذره بتای منفی به ایزوتوپ پایدار از نیکل -۶۰ واپاشی می‌کند. نیکل تولیدشده در حالت برانگیخته است و بلافاصله دو فوتون با انرژی‌های ۱/۳۳ و ۱/۱۷ مگا الکترون ولت گسیل می‌کند تا به حالت پایدار برسد. با واپاشی هر اتم کبالت -۶۰ شدت چشمه کاهش می‌یابد به طوری که این کاهش در زمانی حدود ۵/۲۷ سال به ۵۰٪ می‌رسد هر سال حدود ۱۲٪ عمر مفید میله چشمه حدود ۲۰ سال می‌باشد این درحالی است که بعد از حدود ۵۰ سال ۹۹/۹٪ از کبالت -۶۰ به نیکل غیر از رادیواکتیو تبدیل می‌شود.

در یک سیستم پرتودهی گاما هندسه چشمه مورد نیاز از طریق بارگذاری چشمه‌های میله‌ای درون موقعیت‌های از پیش تعیین شده در مدول‌ها^۲ و توزیع این مدول‌ها در سینی^۳ پرتودهنده‌های صنعتی می‌شود. فعالیت هر کدام از این چشمه‌ها می‌تواند حدود ۱۰۰۰۰ کوری باشد و بسیاری از این چشمه‌ها در کنار یکدیگر درون یک پرتودهنده قرار می‌گیرند تا چشمه پرتودهی را تشکیل دهند. نمونه‌ای از یک چشمه کبالت -۶۰ به همراه مدول و سینی که عموماً در پرتودهنده‌های تجاری مورد استفاده قرار می‌گیرد، در شکل ۳ و ۴ نشان داده شده است.



شکل ۳: نمایی از چشمه کبالت -۶۰ در سیستم پرتودهی IR-۱۳۶

۱ Cask
۲ Module
۳ Rack



شکل ۴: نمایی از چشمه کبالت - ۶۰ [۶]

هنگامی که سیستم پرتودهی خاموش است برای محافظت از چشمه رادیواکتیو و نیز حفاظت پرسنل در برابر اشعه از سرب و یا ماده مناسب دیگری با عدد اتمی بالا (حفاظ خشک) و یا آب با عمقی حدود ۴ الی ۵ متر (حفاظ تر) استفاده می شود.

طراحی پرتودهنده های گاما با توجه به اینکه کوچک یا بزرگ باشند متفاوت است. پرتودهنده های کوچک برای تحقیقات و پرتودهنده های خیلی بزرگ برای پرتودهی صدها تن محصول در طول روز مناسب هستند. به طور کلی اصول اساسی طراحی برای همه پرتودهنده ها عبارتند از [۷]:

۱. بیشینه کردن بهره انرژی تابشی
۲. بهبود نسبی یکنواختی دز در محصولات
۳. اطمینان از ایمنی و سهولت در بهره برداری.

پیش از بیان طبقه بندی سیستم های پرتودهی گاما به معرفی مشخصه های عملکردی آنها پرداخته می شود.

۵- مشخصه های دزیمتری سیستم های پرتودهی

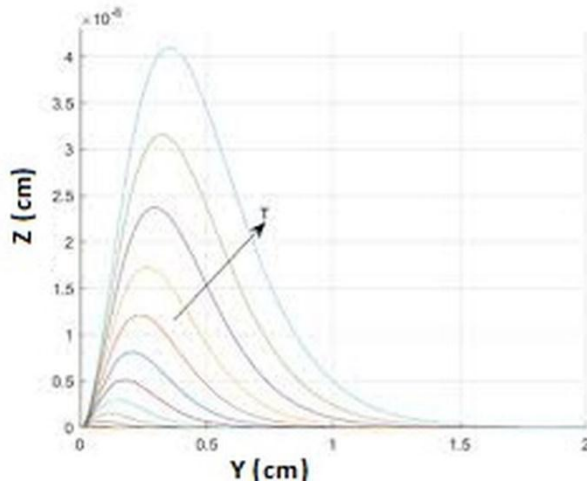
بهره تولید^۱، کارایی^۲ و نسبت یکنواختی دز^۳ از مشخصه های اصلی سیستم های پرتودهی می باشند. نقاط مختلف یک محصول پس از طی چرخه کامل پرتودهی دزهای متفاوتی دریافت می کنند. در یک سیستم پرتودهی که آرایه میله های چشمه یک صفحه را تشکیل می دهند (مشابه شکل ۵) دز

^۱ Throughput

^۲ Efficiency

^۳ Dose Uniformity Ratio

جذبی بیشترین تغییرات را در صفحه عمود بر چشمه نشان می‌دهد. نمونه‌ای از منحنی‌های همدوز در جعبه محصول پرتودیده در یک سیستم پرتو دهی نمونه در شکل ۵ نشان داده شده است.



شکل ۵: منحنی‌های هم دز رسم شده در صفحه‌ای عمود بر صفحه چشمه در یک سیستم پرتو دهی نمونه

اگر دز بیشینه و دز کمینه دریافت شده را به ترتیب با D_{max} و D_{min} نشان دهیم، نسبت یکنواختی دز با رابطه ۴ تعریف می‌شود:

$$U = \frac{D_{max}}{D_{min}} \quad (4)$$

نسبت یکنواختی دز به ابعاد محصول، چگالی، نوع پرتو و جزئیات طراحی سیستم بستگی دارد. در یک پرتو دهی مناسب، این نسبت باید هرچه بیشتر به عدد یک نزدیک باشد ولی عملاً در کاربردهای صنعتی و در حجم بسیار زیاد محصولات، تغییرات دز اجتناب ناپذیر است. بهره تولید و یا میزان آهنگ پرتو دهی محصول، به صورت مقدار محصول پرتو دهی شده با یک دز کیمنه مشخص و در واحد زمان تعریف می‌شود و به شدت چشمه رادیواکتیو، چگالی محصول و دز مورد نیاز بستگی دارد. بهره تولید به دو صورت بهره تولید حجمی و بهره تولید جرمی بیان می‌شود. بهره تولید حجمی بر اساس دز کیمینه ۲۵ kGy و اکتیویته ۱۰۰ KCi از رابطه ۵ و بهره تولید جرمی از رابطه ۶ به دست می‌آید:

$$T_v = \frac{D_{max}}{25} \times \frac{100}{A} \times V \left(\frac{m^3}{100kci.h} \right) \quad (5)$$

$$T_m = T_v \times V \left(\frac{kg}{100kci.h} \right) \quad (6)$$

به طوری که D_{min} دز کمینه کلی بر حسب KGy، A فعالیت چشمه بر حسب KCi، V حجم کارتن‌ها بر حسب مترمکعب، ρ چگالی محصولات بر حسب کیلوگرم بر مترمکعب و جمع زمان سکون^۱ محصول در یک موقعیت از سیستم و حرکت^۲ آن تا موقعیت بعدی یک ساعت در نظر گرفته می‌شود. نرخ تولید سالیانه به بارگذاری چشمه، دز مورد نیاز و چگالی محصولات بستگی دارد [۷]. کسری از کل انرژی تابش شده به چشمه که به صورت مفید در محصول جذب می‌شود کارایی سیستم پرتودهی نامیده می‌شود، که بر اساس دز کمینه جذب شده و اکتیویته چشمه تعریف می‌شود. کارایی سیستم پرتودهی از رابطه^۴ و ۴ و ۵ به دست می‌آید:

$$\varepsilon = \frac{D_{max} \times \rho \times V}{A \times \sum f_i E_i} \quad (7)$$

در این رابطه D_{min} دز کمینه جمعی به ازای واحد زمان سکون و جابجایی، A فعالیت چشمه، V حجم کارتن‌ها، ρ چگالی کلی محصولات، f_i احتمال گسیل فوتون‌های ناشی از چشمه و E_i انرژی مربوطه به هر فوتون است. کارایی سیستم پرتودهی با افزایش مقدار محصول در اطراف چشمه و کاهش فاصله بین محصول تحت تابش و چشمه بیشتر می‌شود. البته به دلیل بالا رفتن هزینه وسایل حمل و نقل محصولات، این افزایش تراکم دارای محدودیت می‌باشد.

۶- طبقه‌بندی سیستم‌های پرتودهی گاما

تفاوت اساسی پرتودهنده‌های گاما در سطح اکتیویته منبع تابش آن‌ها و روش جابجایی محصولات در میدان تابش می‌باشد. براساس طبقه‌بندی آژانس بین‌المللی انرژی اتمی (IAEA) سیستم‌های پرتودهی گاما به ۴ گروه عمده تقسیم می‌شوند:

گروه I سیستم‌های پرتودهی درون کار^۳ با حفاظ خشک^۴

گروه II سیستم‌های پرتودهی پانوراما^۵ با حفاظ خشک

گروه III سیستم‌های پرتودهی درون کار با حفاظ تر^۶

گروه IV سیستم‌های پرتودهی پانوراما با حفاظ تر

این تقسیم‌بندی بر اساس نوع حفاظ چشمه رادیواکتیو (خشک یا تر) و نیز ساختار کلی پرتودهنده می‌باشد. تفاوت اصلی سیستم‌های درون کار و پانوراما در این است که در سیستم‌های پرتودهی

^۱ Dwell

^۲ Shuffle

^۳ Self-contained Irradiators

^۴ Dry Storage

^۵ Panoramic Irradiators

^۶ Wet Storage

درون کار نمونه موردنظر توسط میله‌های چشمه احاطه می‌شود. در صورتی که در نوع پانوراما محصولات حول چشمه حرکت می‌کنند و این چشمه است که در مرکز سیستم پرتودهی قرار می‌گیرد. در ادامه پرتو دهنده‌های درون کار و پانوراما با تفصیل بیشتری توصیف شده‌اند.

۶-۱ پرتو دهنده‌های درون کار

پرتو دهنده‌های درون کار عمدتاً برای تحقیقات و کاربردهایی که دز پایین و نرخ تولید نسبتاً کمی مورد نیاز است، مانند پرتودهی خون طراحی شده‌اند. شمار زیادی از آنها پرتو دهنده‌های حفاظ خشک هستند و معمولاً اکتیویتهٔ منبع به حدود ۲۵ KCi محدود می‌شود. در این سیستم‌ها چشمه پرتودهی (سزیم یا کبالت) درون حفاظی از سرب یا فلز مناسب دیگری قرار دارد. استفاده از سزیم - ۱۳۷ به پرتو دهنده‌های درون کار و حفاظ خشک محدود شده است و سازوکاری برای حرکت نمونه از محل بارگیری به محل پرتودهی وجود دارد. چنین سیستم‌هایی می‌توانند بدون آنکه نیازی به حفاظ اضافی باشد، به‌طور مناسبی در یک آزمایشگاه یا اتاق قرار گیرند. مزیت عمده چنین پرتو دهنده‌های کوچک این است که نصب و کار با آنها آسان است و آهنگ دز بالا و یکنواختی دز خوبی تولید می‌کنند که برای تحقیقات در زمینه تابش ضروری است. این مشخصه‌ها از طریق احاطه‌شدن نمونه با میله‌های چشم حاصل می‌شود به طوری که نمونه، پرتو را از همه جهات دریافت می‌کند. چنین طراحی، محدودیت و قید و شرطی را روی اندازه نمونه‌ها ایجاد می‌کند. حجمی حدود ۱ تا ۵ لیتر، که البته برای تحقیق و پرتودهی در مقیاس کوچک کاملاً مناسب است، در این نوع پرتو دهنده‌ها متداول است [۷]. به طور مثال سیستم پرتودهی گاماسل - ۲۲۰ یک پرتو دهنده تحقیقاتی درون کار خشک با حفاظ سربی است که در پژوهشکده کاربرد پرتوهای تهران در حال بهره‌برداری می‌باشد. شکل ۶ سیستم پرتودهی گاماسل را نشان می‌دهد.



شکل ۶: سیستم پرتودهی درون کار گاماسل - ۲۲۰ در حال بهره‌برداری در پژوهشکده کاربرد پرتوها در سازمان انرژی اتمی ایران

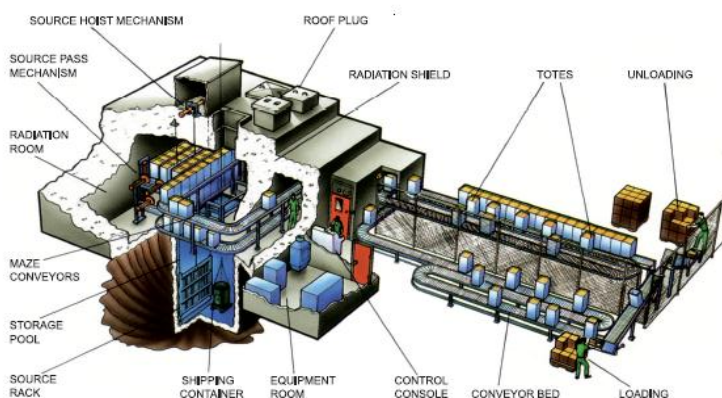
چشمهٔ این پرتودهنده رادیوایزوتوب کبالت - ۶۰ است که به منظور پرتودهی نمونه در محل مشخصی (محل بارگیری) درون اتاقک پرتودهی قرار می‌گیرد و زمان سنج دستگاه جهت تحویل دز از پیش تعیین شده‌ای تنظیم می‌شود.

۶-۲ پرتودهنده‌های پانوراما

برای پرتودهی در مقیاس‌های تجاری و آزمایشی، پرتودهنده‌های پانوراما مناسب هستند. چشمه شامل چندین میله کبالت - ۶۰ است که در یک صفحه منظم شده‌اند و می‌تواند به درون یک اتاق پرتودهی بزرگ منتقل شود. درون اتاق چشمه به وسیلهٔ آب (حفاظ تر)، سرب (حفاظ خشک) و یا هر ماده مناسب دیگری با عدد اتمی بالا محافظت می‌شود. می‌توان سیستم‌های پرتودهی پانوراما را بر اساس محفظهٔ حمل محصول (نوع بسته‌بندی) به ۴ گروه کلی تقسیم کرد [۷]:

۱. پرتودهنده‌های مدل ظرفی^۱
۲. پرتودهنده‌های مدل قفسه‌ای^۲
۳. پرتودهنده‌های نوع قفسه‌ای بزرگ^۳
۴. پرتودهنده‌های نوع نقاله‌ای بزرگ^۴

نمونه‌ای از این پرتودهنده‌ها، پرتودهنده‌های مدل ظرفی‌ر شکل ۷ نشان داده شده است.



شکل (۷): نمونه‌ای از سیستم‌های پرتودهی پانوراما - پرتودهنده‌های مدل ظرفی [۷]

- ۱ Tote Box Irradiator
- ۲ Carrier Type Irradiator
- ۳ Pallet Carrier Irradiator
- ۴ Pallet Conveyor Irradiator

در مفهوم مدل ظرفی، محصولات در جعبه‌هایی از جنس آلومینیوم یا فایبرگلاس به نام Tote قرار داده می‌شوند. به‌طور نوعی یک ظرف، حجمی تقریباً برابر با $0/75$ مترمکعب دارد و می‌تواند تعدادی از جعبه‌های محصول را در خود جای دهد. مهمترین خصوصیت این نوع از پرتودهنده‌ها این است که بسیار تطبیق‌پذیر می‌باشند بطوری که ظرف‌های محصول می‌توانند شکل جعبه استوانه و یا کیف^۱ داشته باشند. ظرف‌ها برای بارگیری و بارگذاری از اتاق پرتو دهی خارج می‌شوند و بسته به طراحی پرتودهنده، می‌توانند چند صد کیلو از محصولات را در خود جای دهند. اغلب سیستم‌های مدل ظرفی با ترکیب‌بندی محصول پوشاننده چشمه^۲ طراحی می‌شوند. این ترکیب‌بندی بهره و کارایی بالاتری از کبالت را نشان می‌دهد و به یکنواختی دز در محصولات کمک می‌کند [۷،۱۰].

در سیستم‌های نوع قفسه‌ای، محفظه حمل محصولات معمولاً حامل‌های آلومینیومی با ارتفاع حدود ۲ تا ۳ متر می‌باشد که جزئی از سیستم پرتو دهی به حساب آمده و هر یک از چندین طبقه تشکیل شده‌اند. معمولاً قفسه‌ها از سقف آویزان هستند و درون اتاقک پرتو دهی در اطراف چشمه بر روی نقاله‌های تک ریلی توسط پیستون‌های هیدرولیکی و یا پنوماتیکی حرکت می‌کنند. سیستم‌های نوع قفسه‌ای اغلب با ترکیب‌بندی چشمه پوشاننده محصول^۳ ساخته می‌شوند [۱۰]. در مورد ترکیب‌بندی چشمه - محصول، در ادامه مقاله توضیح داده خواهد شد.

پرتودهنده‌های نوع قفسه‌ای بزرگ و پرتودهنده‌های نوع نقاله‌ای بزرگ همان سیستم‌های نوع قفسه‌ای و مدل ظرفی در ابعاد بزرگ می‌باشند، به‌طوری که حامل محصولات توسط لیفتراک بارگیری شده و با هم پرتو دهی می‌شوند [۱۰]. تفاوت اساسی سیستم‌های پانوراما علاوه بر محفظه حمل محصول، در نوع حفاظ چشمه (خشک یا تر)، پیکربندی چشمه و محصول، چشمه پوشاننده محصول و نحوه بارگیری می‌باشد.

از آنجایی که یک منبع رادیونوکلئید، پرتوهای گاما را در همه جهات گسیل می‌کند، می‌تواند به وسیله محصولات احاطه شود، تا ضریب کارایی انرژی افزایش یابد. بنابراین چندین (گاهی ۱۰۰ تا ۲۰۰) محصول به طور هم‌زمان پرتو دهی می‌شوند. در چنین حالتی آهنگ دز میانگین به‌طور معنی داری کمتر است و محصول به زمان بیشتری برای پرتو دهی نیاز دارد. البته این زمان با توجه به این حقیقت که چندین ظرف بزرگ با هم پرتو دهی می‌شوند، توجیه می‌شود [۷].

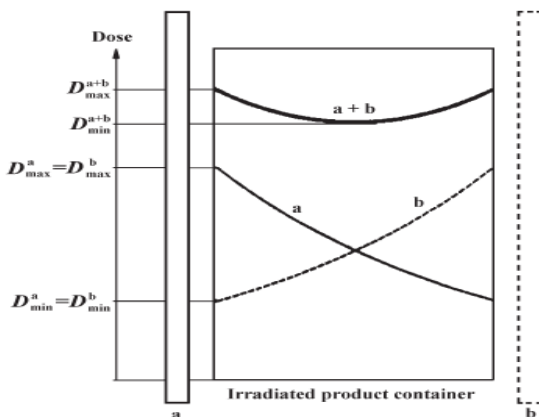
برای یک چشمه تک انرژی با افزایش ضخامت محصول، شدت پرتو اندازه‌گیری شده به‌طور نمایی کاهش می‌یابد به همین دلیل در پرتودهنده‌های گاما غالباً برای یکنواخت شدن دز جذبی در محصولات، پرتو دهی از طریق چرخش محصول مورد نظر و یا از طریق پرتو دهی از دو طرف منبع،

^۱ Bag

^۲ Product overlapping the source

^۳ source overlapping the Product

صورت می‌گیرد. شکل ۸ منحنی‌های عمق دز در یک محصول پرتودیده از دو طرف با یک منبع رادیونوکلئید را نشان می‌دهد [۶].



شکل ۸: منحنی‌های عمق دز در یک محصول که از دو طرف پرتو دهی شده است [۵]

نحوه بارگیری^۱ محصولات در سیستم‌های پانوراما می‌تواند به دو گونه یکجا^۲ یا پیوسته^۳ باشد. در نوع یکجا، یک دسته از محصولات بارگیری و با هم پرتو دهی می‌شوند و سپس همه با هم از اتاقک پرتو دهی خارج شده و پرتو دهنده خاموش می‌شود، چشمه در حفاظ قرار می‌گیرد، سپس گروه بعدی محصولات بارگیری می‌شوند. در حالی که در نوع پیوسته، زمانی که پرتو دهنده روشن است و چشمه بیرون از حفاظ قرار دارد محصولات به طور پیوسته بارگیری می‌شوند. به این صورت که با خروج یک محصول کاملاً پرتو دهی شده از اتاقک، محصول دیگری وارد چرخه پرتو دهی می‌شود. به منظور کاهش تغییر دز در محصول، در طول پرتو دهی محصول حول محورش چرخانده می‌شود (مناسب روش یکجا) و یا به دور چشمه حرکت می‌کند که این روش برای مدل پیوسته، مناسب‌تر است (البته برای برخی از پرتو دهنده‌ها روش یکجا هم استفاده می‌شود) [۷].

زمانی که دز کمی مورد نیاز باشد، محصولات می‌توانند به طور پیوسته حرکت کنند و سرعت نقاله طوری انتخاب می‌شود که دز مورد نیاز تأمین شود. در دزهای بالا به طور کلی سرعت نقاله خیلی کم خواهد شد و لذا روش حرکت - سکون^۴ ارجح می‌باشد. در این روش محصولات در محل پرتو دهی طراحی شده، حول منبع پرتو دهی برای مدت زمان معینی حدود چند دقیقه می‌مانند و سپس همه آن‌ها به مکان بعدی منتقل می‌شوند به طوری که هر محصول قبل از آن که اتاق پرتو دهی

^۱ Loading

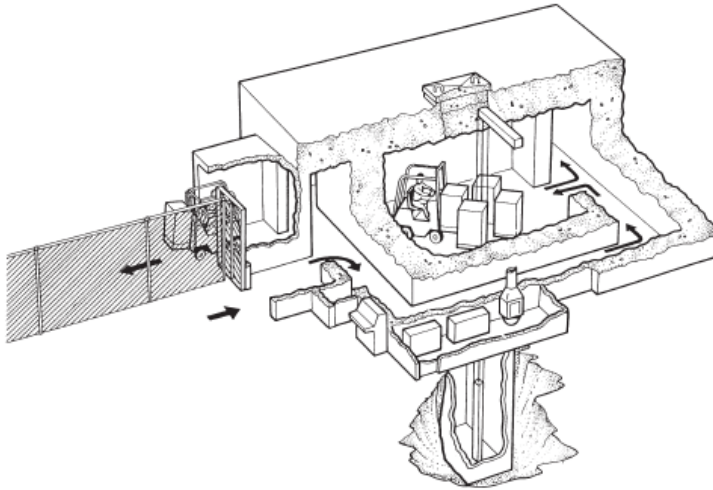
^۲ Batch

^۳ continues

^۴ Shuffle-Dwell

را ترک کند نهایتاً در همهٔ موقعیت‌ها مورد پرتودهی قرار می‌گیرد. در این روش زمان سکون بر اساس میزان دز مورد نیاز انتخاب می‌شود [۷].

برای پرتودهی در نرخ تولید نسبتاً پایین، پرتودهنده‌هایی با قابلیت پرتودهی یکجا بسیار مفید هستند و از آنجایی که در این پرتودهنده‌ها امکان تغییر نرخ دز میسر است و همچنین بکار بردن آن‌ها آسان است، در تحقیقات و مطالعات بهینه‌سازی کاربرد دارند. شکل ۹ یک پرتودهندهٔ نوع نقاله‌ای بزرگ را نشان می‌دهند که محصولات بر روی پالت و به صورت یکجا بارگیری می‌شوند [۷].



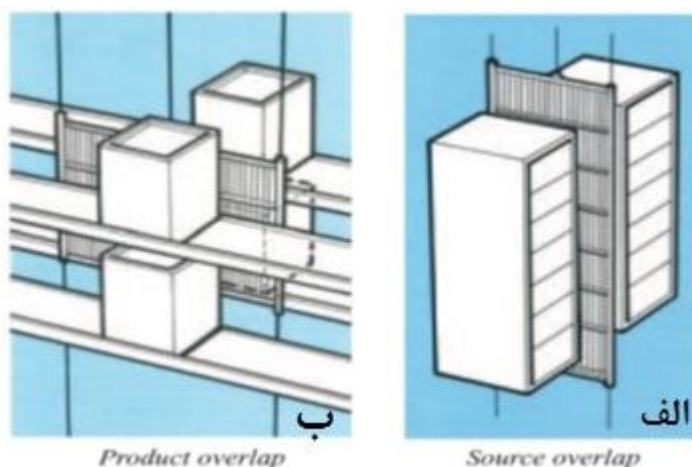
شکل ۹: طراحی از یک سیستم پرتودهی یکجا [۶]

همان‌طور که قبلاً نیز اشاره شد، پرتودهنده‌های پانوراما از لحاظ پیکربندی (هندسه) چشمه و محصولات به دو گروه تقسیم می‌شوند:

۱. پرتودهنده‌های محصول پوشانندهٔ چشمه
۲. پرتودهنده‌های چشمهٔ پوشانندهٔ محصول

تفاوت این پرتودهنده‌ها، در نحوهٔ قرارگیری چشمه نسبت به محصولات می‌باشد. در نوع محصول پوشانندهٔ چشمه (شکل ۱۰ الف) محصولات در ظرف‌هایی قرار دارند و عموماً بر روی نقاله‌هایی حول چشمه می‌چرخند و توسط یک آسانسور در طبقات مختلف جابجا می‌شوند. پرتوگیری محصولات در طبقات مختلف به یکنواختی دز در آن‌ها کمک می‌کند. در این نوع از پرتودهنده‌ها مجموع ارتفاع ظرف‌ها در طبقات، بیشتر از ارتفاع سینی چشمه است و اکثر پرتوهای گسیل‌شده از چشمه به محصول می‌رسند بنابراین علی‌رغم سازوکار پیچیده حرکت محصولات بین طبقات مختلف بهره‌انرژی در این نوع سیستم‌ها نسبتاً بالا می‌باشد. شکل ۱۰ ب، نوع چشمهٔ پوشاننده محصول نمایش داده شده است. در این نوع سازوکار انتقال محصولات ساده‌تر می‌باشد، به‌طوری‌که

محصولات در چهار ردیف یا بیشتر و تنها در یک طبقه حرکت می‌کنند. در طراحی این نوع پرتودهنده‌ها، ارتفاع حامل محصولات از ارتفاع یک ظرف در نوع محصول پوشاننده چشمه بیشتر است، با این وجود ارتفاع چشمه از حامل‌های محصولات بیشتر می‌باشد. در اینجا یکنواختی دز با حالت محصول پوشاننده چشمه قابل مقایسه است ولی بهره انرژی کمتر می‌باشد [۷]. سیستم‌های پرتودهی پانوراما معمولاً توسط حفاظ بیولوژیکی به ضخامت حدود ۲ متر بتون معمولی و یا ضخامت مناسبی از سرب احاطه می‌گردند. ضخامت حفاظ به گونه‌ای انتخاب می‌شود که آهنگ دز در بیرون سیستم تا حد تعیین شده کاهش یابد. به‌علاوه به‌خاطر پس پراکنده شدن پرتوها توسط حفاظ (خصوصاً بتون) کارایی سیستم نیز اندکی افزایش می‌یابد.



شکل (۱۰): سیستم پرتودهی: الف) محصول پوشاننده چشمه، ب) چشمه پوشاننده محصول [۷]

۷- مروری بر سیستم‌های پرتودهی گاما در دنیا

سیستم پرتودهی گاما با طراحی‌های گوناگونی در دنیا موجود و در حال بهره‌برداری می‌باشند. حدود ۲۰۰ سیستم پرتودهی تجاری گاما در فهرست آژانس بین‌المللی انرژی اتمی (IAEA) به ثبت رسیده است. به‌منظور شناخت بیشتر سیستم‌های پرتودهی، ترکیب‌بندی برخی از آن‌ها در این‌جا مورد بررسی قرار گرفته است.

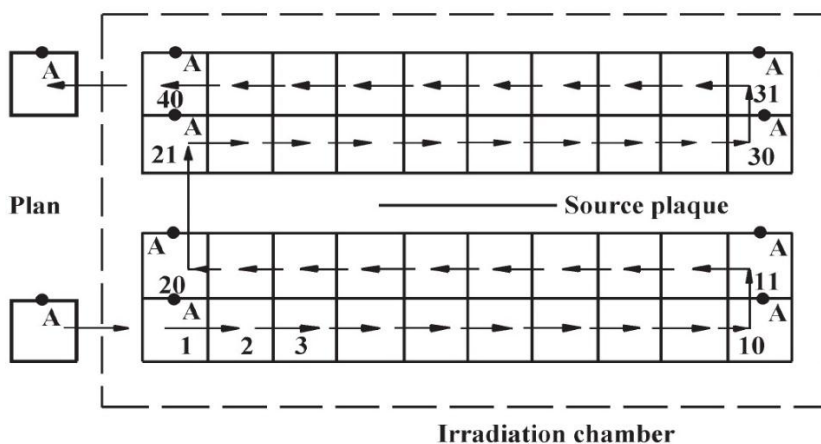
سیستم پرتودهی صنعتی AECL JS-6500 در ININ مکزیک واقع شده است. این سیستم با ترکیب‌بندی محصول پوشاننده چشمه برای سترون‌سازی محصولات یکبار مصرف پزشکی، طراحی شده است. قدرت اصلی چشمه در سال ۱۹۸۰ حدود یک میلیون کوری بوده است، سینی چشمه دارای ۱۰۳ میله کبالت -۶۰ نوع (C-۱۸۸) می‌باشد که در یک قاب مسطح مستطیلی (شامل ۶ مدول در دو طبقه) با توزیع غیر یکنواخت نصب شده است. سیستم حمل‌ونقل محصولات دارای دو طبقه و دو ردیف در هر طرف چشمه می‌باشد، در هر ردیف ۷ موقعیت (جایگاه) وجود دارد و

بنابراین محصولات درون اتاق پرتودهی از ۵۶ موقعیت عبور می‌کنند. محصولات درون ظرف‌های آلومینیومی با ابعاد ۴۸/۲ سانتی‌متر (عرض)، ۴۸/۲ سانتی‌متر (طول) و ۹۱/۲ سانتی‌متر (ارتفاع) قرار گرفته و به درون سیستم می‌روند. حداکثر بارگیری محصولات ۶۵ کیلوگرم است و با توجه به ابعاد ظرف‌ها، حداکثر چگالی محصولات می‌تواند حدود 0.3 g/cm^3 باشد [۷].

سیستم پرتودهی گاما در پرتغال با نام تجاری UTR، یک سیستم پانوراما حفاظ خشک با عملکردی پیوسته است. این سیستم عمدتاً برای سترون‌سازی وسایل پزشکی و دیگر محصولات طراحی شده است. پرتودهی در یک اتاقک با ابعاد $8 \times 3/9$ مترمربع با دیوارهایی از بتون چگال با ضخامتی حدود ۲ متر انجام می‌شود. سینی چشمه مساحتی برابر با $0.9 \times 0.9 \text{ m}^2$ دارد و زمانی که چشمه مورد استفاده نباشد، در یک محفظه خشک نگهداری می‌شود. اکتیویته واقعی چشمه در فوریه ۱۹۹۸ برابر با $3/4 \times 10^{15} \text{ Bq}$ (۹۲ KCi) گزارش شده است. محصولات برای پرتودهی به وسیله ۴۰ حامل آویزان از یک نقاله تک‌ریلی حرکت می‌کنند. درون اتاق پرتودهی، ۲۸ حامل در ۴ ردیف در اطراف چشمه (در هر ردیف دارای ۷ حامل) وجود دارد. هر حامل ظرفیت حمل چهار کارتن محصول با ابعاد $0.4 \times 0.4 \times 0.4 \text{ m}^3$ و حداکثر وزن ۱۲۰ Kg را دارد. در این صورت حداکثر چگالی محصولات می‌تواند حدود 0.47 g/cm^3 باشد. عملیات سیستم پرتودهی محصولات در دو ردیف در هر طرف صفحه چشمه انجام می‌شود [۱۲، ۱۳، ۱۴].

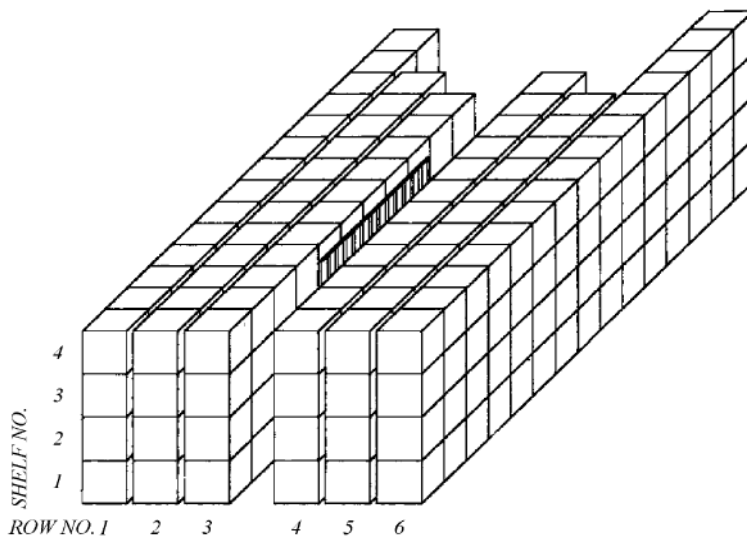
سیستم پرتودهی گاما با نام تجاری VIKIRAN، در سال ۲۰۰۴ در کلکته هند ساخته شد. این سیستم بر اساس طبقه‌بندی در گروه IV قرار می‌گیرد و برای سترون‌سازی محصولات پزشکی استفاده می‌شود. در پیکربندی چشمه این سیستم شش میله با اکتیویته کل $3588/5 \text{ TBq}$ به طور عمودی در دوسینی چشمه قرار گرفته‌اند. طول میله‌ها برابر با 0.403 m و قطر خارجی آن‌ها 0.0272 m می‌باشد. جعبه‌های محصول با ابعاد داخلی $0.425 \times 0.325 \times 0.575 \text{ m}^3$ در حامل‌هایی شامل ۵ قفسه قرار گرفته و در ۳ ردیف در هر طرف چشمه حرکت می‌کنند. فاصله اولین ردیف نقاله‌ها تا چشمه 0.40 متر و فاصله نقاله‌ها از یکدیگر برابر با 0.59 متر می‌باشد [۱۵].

سیستم‌های پرتودهی Mega Gamma I، در مرکز ملی تکنولوژی و تحقیقات پرتو (NCRRT) در قاهره مصر واقع شده است. این سیستم از نوع پرتودهنده‌های مدل ظرفی می‌باشد، طراحی و ساخت آن توسط MDS Nordion انجام گرفته است. در این سیستم محصولات درون ظرف‌های آلومینیومی با ابعاد $50 \times 50 \times 90$ بارگیری می‌شوند. ظرف‌ها در یک چشمه مستطیلی در چهار ردیف موازی حرکت می‌کنند. در هر طرف چشمه دو ردیف در دو طبقه وجود دارد (شکل ۱۱). ظرف‌ها ابتدا در طول چهار ردیف طبقه بالایی حرکت کرده و سپس توسط یک آسانسور به طبقه پایین انتقال داده می‌شوند و در طول چهار ردیف طبقه پایین حرکت می‌کنند.



شکل (۱۱): شمایی از چیدمان سیستم پرتودهی Mega Gamma I [۱۶]

سیستم پرتودهی گاما IR-۱۳۶ در حال حاضر در پژوهشکده کاربرد پرتوهای تهران در حال بهره‌برداری می‌باشد. این سیستم نوع قفسه‌ای، از ۶۹ حامل آلومینیومی که هر کدام ۴ کارتن با ابعاد $0.4 \times 0.4 \times 0.4$ m را می‌کنند، تشکیل شده است. حرکت حامل‌ها بر روی ریل‌هایی که با استفاده از پیستون‌های پنوماتیک کار می‌کنند، انجام می‌شود. به‌طور کلی سیستم دارای ۶ ردیف و ۴ طبقه می‌باشد که در شکل ۱۲ نشان داده شده است.



شکل ۱۲: شمایی از چیدمان سیستم پرتودهی IR-۱۳۶ [۱۷]

هر کارتن محصول نهایتاً در ۲۷۶ موقعیت قرار می‌گیرد و با توجه به میزان دز مورد نیاز، زمان مشخصی را در این مکان‌ها ساکن می‌شود. چشمه شامل ۱۰ سینی است که در دو مجموعه ۵ تایی منظم شده است. این دو مجموعه به صورت عمودی روی هم قرار گرفته‌اند. هر سینی چشمه از ۴۲ موقعیت تشکیل شده است که توسط میله‌ای از نوع C-۱۸۸ و یا میله‌های مجازی^۱ پر می‌شوند. سینی چشمه به طور متقارن درون پرتودهنده بین ردیف‌های ۳ و ۴ قرار گرفته است و در نهایت جهت عمودی دو مجموعه سینی مقابل قفسه‌های طبقه دوم و سوم قرار دارند [۱۸، ۱۹].

۸- نتیجه‌گیری

سیستم‌های پرتودهی گاما یکی از متداول‌ترین روش‌های از بین بردن آلودگی به منظور ضدعفونی یا استریل کردن محصولات مختلف می‌باشند. در صنعت دفاعی و نظامی نیز از پرتو گاما که از رادیم و کبالت رادیواکتیو با قدرت زیاد تابش می‌شوند، سامانه سیستم‌های تصویربرداری پرتو گاما، دارای کاربردهای وسیعی در حوزه‌های نظامی و امنیتی بخصوص در فاشا بوده و برحسب نوع کاربرد، پارامترهای مختلفی در طراحی آن مدنظر قرار می‌گیرد. این سیستم‌های پرتودهی گاما که عموماً از کبالت ۶۰ به عنوان چشمه گاما استفاده می‌کنند، دارای اکتیویته بالایی هستند و لازم است که حفاظ‌های لازم برای تضمین ایمنی پرسنل شاغل در این مراکز تدارک دیده شود، لذا از جمله کمبودهای مهم در آزمایشگاه‌های آنالیز هسته‌ای مرتبط با اندازه‌گیری کیفی و کمی عناصر پرتوزا در نمونه‌های محیطی، صنعتی و بیولوژیکی، عدم دسترسی به چشمه‌های سنجه‌بندی به منظور سنجه‌بندی انرژی و بهره سیستم‌های طیف‌سنجی پرتوهای گاما می‌باشد. به علاوه حتی در صورت دسترسی به این چشمه‌ها، به دلیل واپاشی عناصر پرتوزا پس از مدتی بسیاری از این چشمه‌ها غیرقابل استفاده می‌شوند

۹- تشکر و قدردانی

از دفتر پژوهشکده دانشگاه پدافند هوایی خاتم الانبیاء^(ص) بابت پیگیری‌ها و هماهنگی‌های لازم جهت برگزاری جلسات خبرگی پژوهش حاضر و نیز کلیه اندیشمندان و پژوهشگرانی که در خلال تحقیق خالصانه دیدگاه‌ها و نقطه نظرات علمی و کارشناسی خود را ارائه نمودند، تشکر و قدردانی می‌گردد.

۱۰- تعارض منافع

نویسنده(گان) اعلام می‌دارند که در مورد انتشار این مقاله تضاد منافع وجود ندارد. علاوه بر این، موضوعات اخلاقی شامل سرقت ادبی، رضایت آگاهانه، سوء رفتار، جعل داده‌ها، انتشار و ارسال مجدد و مکرر توسط نویسندگان رعایت شده است.

^۱ Dummy Pencil

۱۱-دسترسی آزاد

این نشریه دارای دسترسی باز است و اجازه اشتراک (تکثیر و بازآرایی محتوا به هر شکل) و انطباق (بازترکیب، تغییر شکل و بازسازی بر اساس محتوا) را می‌دهد.

۱۲- مراجع

[1] Application of quantum technology in radars, Hassan Nanakar, Seysd Ali Hosseini-Moradi, Mehdi Nazirzadeh, Volume 8, Issue 2 (2020).

[2] Fair and, B.P, "Radiation Sterilization For Health Care Products-X ray, Gamma and Electronic Beam", CRC Press,New York, 2002.

[3] Tsouifanidis, N., "Measurement and Detection of Radiation" 2nd ed, Taylor&Francis, Washington, DC 200053521, 1995.

[4] Cember,H. "Introduction to Health Physics", Pergamon, 1983.

[5] International Atomic Energy Agency (IAEA), "Dosimetry for Food Irradiation". Technical Reports Series No,409,Vienna, 2002.

[6] International Atomic Energy Agency (IAEA),"Gamma Irradiators for Radiation Processing", Vienna, July 2005.

[7] Ledorer, C.M., and Shirley, V.S., "Table of Isotopes" 7th ed., Wiley Interseience, NewYork, 1978.

[8] Calvo,W.A.P., Rela, P.R.,Springer. F.E., da Costa, F.E., Omi, N.M., Silva, L.G.A., "A small size Continues Run Industrial Gamma Irradiator", Radiat. Phys. Chem. Vol 71, PP. 561-563, 2004.

[9] Kunstadt, P, "Radiation Disinfestations and Fumigant Replacement, a Technology whose Time Is Now", MDS Nordion.

[10] Pina-Villalpando, G., and Sloan, D.P., "Use of Computer Code for Dose Distribution Studies in a Co-60 Industrial Irradiator", Radiat. Phys.Chem.Vol 46, pp. 1385-1389, 1995.

[11] Oliveria, C., Salgado, J., Ferri de Carvalho,A., "Dose Rate Determinations in the Poruguese Gamma Irradiation Facility: Monte Carlo Simulations and Measurements",Radiant.Phys.Chem. Vol.58, po.279-255, 2000a.

[12] Oliveria, C., Salgado, J., Luisa Botelho, M., Ferreira, L.M. "Dose Determination by Monte Carlo-a Useful Tool in Gamma Radiation Process", Radiant. Phys.Chem.Vol.57, po.667-670, 2000b.

[13] Oliveria, C., Ferreira, L.M, Go cancalves, I.F., Salgado, J., "Monte Carlo Studies of the Irradiator Geometry of the Poruguese Gamma Irradiation Facility", Radiat. Phys.Chem.Vol.65, pp. 293-295, 2002.

- [14] George, J.R., Pradhan, A.S., "Theoretical Evaluation of Dose Distribution in product in Radiation Processing Plants", Radiat, Phys. Chem. Vol.77, pp. 186-191, 2008.
- [15] Atomic Energy of Canada Limited (AECL), "Cobalt-60 Irradiator Model IR-136 for IAEA-iran", Operator's Manual, Document No. IN-IR136-84-04, 1985.
- [16] Sephton, J.P., Sharpe, P.H.G., Chu, R.D.H, O'Hara, K.P.J., Abdel-Rchim, F., Abdel Fattah, A., "Dose Mapping of a Co-60 Industrial Irradiation Plant Using an Electronic Data Recording System, Static Measurements and Mathematical Modeling", Radiat. Phy.
- [17] Sohrabpour, M., Hasanzadeh, M., Shahriari, M., Sharifzadeh, M., Dose Distribution of the IR-136 Gamma Irradiator Using a Monte Carlo Code and Comparison with Dosimetry", Radiat. Phys. Chem. Vol. 63, pp. 769-772, 2002.
- [18] Knoll Glenn, F. "Radiation Detection and Measurement". New York: John Wiley & Sons, Inc., 2000.
- [19] D. Srinivas, V. Ramesh Babu, I. Patra, S. Tripathi, M.S. Ramayya, A.K. Chaturvedi. Assessment of background gamma radiation levels using airborne gamma ray spectrometer data over uranium deposits, Cuddapah Basin, India – A comparative study of dose rates estimated by AGRS and PGRS, Journal of Environmental Radioactivity, 167 (2017) 1–12.