

۱۹۷۹

مکتبہ اسلامیہ
لاہور

بِسْمِ اللّٰهِ الرَّحْمٰنِ الرَّحِیْمِ

دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)

دانشکده فیزیک

پایان نامه دکتری

همانندسازی ترابرد پرتوها با استفاده از کد مانته کارلو EGS4 و محاسبه
توزیع دوز بر اساس روش کرنل نقطه ای در سیستم های پرتو دهی گاما

توسط: غلامرضا رئیس علی

استاد راهنما: دکتر مصطفی سهرابیپور

استاد مشاور: دکتر محمد فقیه حبیبی

۱۳۷۱

۲۹۱۷۹

۰۲۶۹۴/۲

تقدیم به:

همسر عزیزم

که رنج بسیاری را در راه تحصیلاتم متحمل شدند و
اگر بردباری ایشان در تحمل مشکلات نبود این
پایان نامه هرگز به پایان نمی رسید.

و با سپاس از:

پدر و مادر عزیزم که همواره مشوقم بوده اند.

از استاد ارجمنده، جناب آقای دکتر مصطفی سهرابپور
مدیریت محترم مرکز تابش گامای سازمان انرژی اتمی ایران
که هدایت این پایان نامه را پذیرفته و در تهیه و تدوین آن
مرا یاری نموده اند، صمیمانه تشکر و سپاسگزاری می نمایم.

از کلیه همکارانم در مرکز تابش گاما، سرکار خانم
صدیقه دلدار، آقای مهندس حمیدرضا هنرخواه، آقای
علی اکبر کاظمی موحد، آقای علی سرلک، پرسنل محترم
کارگردانی، و خانم معصومه اصغری که هر یک به نحوی در
پیشرفت این پروژه مرا یاری کرده‌اند و همچنین از آقای
مهندس فرشاد قشلاقی کمال تشکر را دارم. از آقای مهندس
فریدون صفائی که نسخه‌ای از کد کامپیوتری EGS4 را تهیه
نمودند و همچنین از پرسنل محترم مرکز محاسبات دانشگاه
صنعتی امیرکبیر، تشکر می‌نمایم. ضمناً از سرکار خانم
پروین پرچگانی که در تایپ این پایان‌نامه زحمات بسیاری
را متحمل شده‌اند، سپاسگزارم.

هماندسازی ترابرد پرتوها با استفاده از کد مانته کارلو EGS4 و محاسبه

توزیع دوز براساس روش کرنل نقطه‌ای در سیستم‌های پرتودهی گاما

چکیده

شناخت صحیح توزیع فضائی دوز در سیستم‌های پرتودهی گاما بدلائل فنی، حقوقی و اقتصادی از اهمیت زیادی برخوردار است. در عمل، اندازه‌گیری دوز معمولاً دچار مشکلاتی نظیر غیرهمگونی مواد تشکیل دهنده دوزسنج با محصول مورد پرتودهی و یا در دسترس نبودن محل دوزسنجی می‌باشد. از طرفی در مرحله طراحی سیستم‌های پرتودهی باید توزیع دوز را از طریق انجام محاسبات بدست آورد و بدین منظور دسترسی به یک مجموعه برنامه‌های کامپیوتری جهت محاسبه توزیع دوز اجتناب‌ناپذیر است.

در این پروژه مجموعه‌ای از برنامه‌های کامپیوتری براساس روشهای کرنل نقطه‌ای و مانته کارلو، بمنظور انجام محاسبات سیستم‌های پرتودهی با هندسه‌های دکارتی، استوانه‌ای و مرکب تدوین گردیده‌اند. در برنامه‌های تدوین شده براساس روش مانته کارلو، کد کامپیوتری EGS4 در ایران برای اولین بار بکار گرفته شده است. ضمناً از روش مانته کارلو بمنظور همانندسازی ترابرد پرتوها در سیستم‌های پرتودهی، برای نخستین بار در دنیا استفاده شده است.

کد کامپیوتری EGS4 همراه با یک کد کاربر بخصوص مورد استفاده قرار می‌گیرد. کدهای کاربری که در این پایان‌نامه بمنظور همانندسازی ترابرد پرتوها در سیستم‌های پرتودهی گاما با تقارن‌های هندسی استوانه‌ای، دکارتی و مرکب تدوین گردیده‌اند بترتیب عبارتند از: GCELL5، DOSMAPM و DOSMAPC2. همچنین برنامه DOSMAP3 براساس روش کرنل نقطه‌ای بمنظور محاسبه توزیع نرخ دوز در سیستم‌های پرتودهی قفسه‌ای تدوین گردیده است. علاوه بر این برنامه کامپیوتری CYLDETM به عنوان کد کاربر بمنظور همانندسازی تغییرات دوز در نزدیکی مرز ناهمگنی‌های موجود در سیستم‌های پرتودهی، تدوین گردیده است. همچنین برای محاسبه دوز جذبی در محصولات با چگالی‌های متفاوت، مجموعه‌ای از برنامه‌های کامپیوتری با عنوان PRODMIX تدوین شده است.

نتایج بدست آمده از محاسبات با دوزسنجی تجربی مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند و توافق بین نتایج محاسبات و اندازه‌گیری رضایتبخش است. اندازه‌گیری‌های تجربی در سیستم‌های پرتودهی IR-136 و GC-220 موجود در مرکز تابش گامای سازمان انرژی اتمی ایران انجام شده است. در اندازه‌گیری‌ها از سیستم‌های دوزسنجی فریک، پرسپکس شفاف و فیلم‌های Gaf-Chromic استفاده شده است. کدهای کامپیوتری تدوین شده را می‌توان در طراحی، ارزشیابی عملکرد و بهینه‌سازی کارگردانی سیستم‌های پرتودهی گاما، کنترل مقطعی دوز و کامپیوتری کردن کنترل سیستم‌های پرتودهی مورد استفاده قرار داد.

Radiation Transport Simulation in Gamma Irradiator Systems Using EGS4 Monte Carlo Code and Dose Mapping Calculations Based on Point Kernel Technique.

ABSTRACT

For technical, legal and economical considerations, dose distribution is one of the most important operational parameters of gamma irradiator systems. In practice, the dose measurements may be met with certain degree of difficulty when dissimilar dosimeter material and product, or nonaccessibility of the desired dosimetry position is encountered. On the other hand for irradiator design purposes, dose distribution may be obtained by mathematical modelling of the radiation transport and dose distribution in the irradiator systems.

In this project a series of computer codes based on point kernel technique and also Monte Carlo method have been developed. These codes perform radiation transport calculations for irradiator systems having cartesian, cylindrical and mixed geometries. In this work in the Monte carlo calculations, the computer code "EGS4" has been applied to a radiation processing type Problem. This code has to be accompanied by a specific user code. The set of codes developed include: GCELL5, DOSMAPM, DOSMAPC2 which simulate the radiation transport in gamma irradiator systems having cylindrical, cartesian, and mixed geometries, respectively. The program "DOSMAP3" based on point kernel technique, has been also developed for dose rate mapping calculations in carrier type gamma irradiators. Another computer program "CYLDETM" as a user code for EGS4 has been also developed to simulate dose variations near the interface of heterogeneous media in gamma irradiator systems. In addition a system of computer codes "PRODMIX" has been developed which calculates the absorbed dose in the products with different densities.

Validation studies of the calculated results versus experimental dosimetry has been performed and good agreement has been obtained. The experimental verification has been carried out at the radiation facilities, IR136 and GC-220, of the Gamma Irradiation Center (GIC) of Atomic Energy Organization of Iran (AEOI). The dosimetry systems utilized included Fricke, clear perspex and Gaf-Chromic films. The developed computer codes may be applied to irradiator design, irradiator performance assessment, irradiator operation optimization, incremental product dose monitoring and irradiator computer control tasks.

فهرست مطالب

صفحه

عنوان

چکیده فارسی

چکیده انگلیسی

فصل اول: مقدمه ۱

۱-۱ - مقدمه: سیستم‌های پر توده‌ی گاما ۱

۲-۱ - مشخصه‌های مهم سیستم‌های پر توده‌ی گاما و پارامترهای طراحی آنها ۴

۳-۱ - انگیزه‌های اجرای پروژه و مطالب مندرج در پایان‌نامه ۷

فصل دوم: ترابرد پرتوها ۱۱

۱-۲ - مقدمه: معادله‌ی ترابرد بلترمن ۱۱

۲-۲ - ضریب تأثیر پراکندگی و بکارگیری آن در کرنل نقطه‌ای دوز جذبی ۱۴

۳-۲ - همانندسازی ترابرد پرتوها با روش مانته کارلو ۲۰

۲-۳-۱ - متغیرهای تصادفی ۲۲

۲-۳-۲ - قضیه‌ی حد مرکزی نظریه‌ی احتمالات و کاربرد آن در روش مانته کارلو ۲۵

۲-۳-۳ - تولید اعداد شبه تصادفی یکنواخت بین صفر و یک و تست‌های آماری

مربوط به آنها ۲۷

۲-۳-۴ - ساختن متغیرهای تصادفی ناپيوسته ۲۸

۲-۳-۵ - ساختن متغیر تصادفی پیوسته با استفاده از روش مستقیم ۲۹

۲-۳-۶ - ساختن متغیر تصادفی پیوسته با استفاده از روش طرد ۳۰

۲-۳-۷ - ساختن متغیر تصادفی پیوسته با استفاده از روش تجزیه ۳۱

۲-۳-۸ - مراحل مختلف در ترابرد پرتوها با روش مانته کارلو ۳۲

۲۳	۲-۳-۸-۱ - تعیین پارامترهای ذرات تابیده شده از چشمه
۳۷	۲-۳-۸-۲ - تعیین فاصله تا محل برخورد و تعیین نوع اندرکنش
۳۹	۲-۳-۸-۳ - پارامترهای ذره پس از برخورد
۴۳	۲-۳-۹ - روش‌های غیر تشبیهی در ترابرد پرتوها با روش مانته کارلو
۴۵	۲-۴-۴ - سیستم کد کامپیوتری EGS4
۴۶	۲-۴-۱ - اندرکنش‌هایی که در EGS4 همانندسازی می‌شوند
۴۸	۲-۴-۲ - مروری کلی بر همانندسازی فیزیکی در کد EGS4
۴۹	۲-۴-۳ - ترابرد ذرات در کد EGS4
۵۱	۲-۴-۴ - نحوه بکارگیری کد EGS4

فصل سوم: همانندسازی ترابرد پرتوها در سیستم‌های پرتودهی

۵۴	با تفرار استوانه‌ای
۵۵	۳-۱ - سیستم پرتودهی آزمایشگاهی Gammacell 220
۶۲	۳-۲ - کالیبراسیون سیستم پرتودهی GC-220 و دوزسنج‌های پرسپکس شفاف و GAF
۷۱	۳-۳ - معرفی کد GCELL5 و استفاده از آن بمنظور همانندسازی سیستم پرتودهی GC-220
۷۴	۳-۴ - نتایج بدست آمده از کد کامپیوتری GCELL5 و مقایسه آنها با نتایج تجربی

فصل چهارم: همانندسازی سیستم‌های پرتودهی با تفرار دکارتی

۹۵	۴-۱ - مقدمه
۹۶	۴-۲ - سیستم پرتودهی IR-136
۱۰۳	۴-۳ - تدوین برنامه کامپیوتری DOSMAP3 و نتایج بدست آمده از آن

۴-۴ - تدوین برنامه کامپیوتری DOSMAPM و نتایج بدست آمده از آن ۱۲۲

۴-۵ - مقایسه نتایج برنامه های DOSMAP3 و DOSMAPM با نتایج دوزسنجی و همچنین

نتایج گزارش شده شرکت سازنده سیستم پرتو دهی IR-136 ۱۴۵

فصل پنجم: همانندسازی سیستم های پرتو دهی سکوئی با تقارن مرکب

دکارتی- استوانه ای ۱۵۶

۱-۵ - مقدمه ۱۵۶

۲-۵ - معرفی سیستم پرتو دهی Shihoro، سیستمی با تقارن مرکب دکارتی- استوانه ای ۱۵۷

۳-۵ - برنامه کامپیوتری DOSMAPC2 ۱۶۰

۴-۵ - نتایج بدست آمده از همانندسازی سیستم پرتو دهی سبزمینی Shihoro

با استفاده از کد DOSMAPC2 ۱۶۳

فصل ششم: تدوین برنامه کامپیوتری CYLDETM و سیستم برنامه های

کامپیوتری PRODMIX ۱۸۴

۱-۶ - تدوین برنامه کامپیوتری CYLDETM ۱۸۵

۲-۶ - تدوین سیستم کدهای کامپیوتری PRODMIX ۱۹۳

فصل هفتم: نتایج و پیشنهادها. ۱۹۷

۱-۷ - نتایج بدست آمده از همانندسازی سیستم های پرتو دهی گاما با تقارن استوانه ای ۱۹۸

۲-۷ - نتایج بدست آمده از همانندسازی سیستم های پرتو دهی گاما با تقارن دکارتی ۱۹۹

۱-۲-۷ - نتایج بدست آمده از برنامه کامپیوتری DOSMAP3 ۱۹۹

۲-۲-۷ - نتایج بدست آمده از برنامه کامپیوتری DOSMAPM ۲۰۰

۲۰۱	۷-۲-۳ - مقایسه نتایج بدست آمده از همانندسازی سیستم‌های پر توده‌ی با تقارن دکارتی
۲۰۲	۷-۳ - نتایج بدست آمده از همانندسازی سیستم‌های پر توده‌ی سکونی با تقارن مرکب دکارتی - استوانه‌ای
۲۰۴	۷-۴ - تأثیر پرتوهای پس‌پراکنده شده از حفاظ در پارامترهای مختلف سیستم‌های پر توده‌ی GC-220 ، IR-136 و Shihoro
۲۰۶	۷-۵ - نتایج بدست آمده از برنامه CYLDETM
۲۰۶	۷-۶ - نتایج بدست آمده از مجموعه برنامه‌های PRODMIX
۲۰۷	۷-۷ - پیشنهادها
۲۰۸	پیوست : لیست برنامه کامپیوتری GCELL5
۲۲۱	مراجع

فصل اول

مقدمه

۱-۱- مقدمه: سیستم‌های پرتودهی گاما

از زمانیکه رونتگن (Roentgen) در سال ۱۸۹۵ پرتوهای ایکس و بکرل (Bequerel) در سال ۱۸۹۶ رادیواکتیویته را کشف کردند، بشر همواره در فکر بهره‌برداری و استفاده از خواص ویژه پرتوهای یونساز بوده است. یکی از کاربردهای این پرتوها، استفاده از آنها در صنعت نسبتاً جوان پرتو فرآیند (Radiation Processing) می‌باشد. این صنعت در اوایل دهه ۱۹۶۰ معرفی گردید. در این روش صنعتی با استفاده از پرتودهی مواد با دوزهای جذبی بالا (High Absorbed Doses) می‌توان به اثرات فیزیکی، شیمیایی یا بیولوژیکی معینی دست یافت. سه کاربرد عمده پرتو فرآیند عبارتند از:

۱- سترون کردن محصولات پزشکی

۲- پرتودهی مواد غذایی

۳- اصلاح مواد پلیمری

سترون کردن محصولات پزشکی توسط پرتوها در دهه ۱۹۷۰ بشدت مورد توجه قرار گرفت و هم‌اکنون این روش از متداول‌ترین روشهای سترون کردن محصولات پزشکی است (۱). در صنعت پرتو فرآیند از سیستم‌های پرتودهی گاما، سیستم‌های پرتودهی الکترونی و سیستم‌های پرتودهی با اشعه ایکس ترمزی (Bremsstrahlung X-ray) استفاده می‌شود. با وجود

اینکه امروزه سیستم‌های پرتودهی با اشعه ایکس ترمزی با نرخ تولید^۱ و میزان غیریکنواختی دوز^۲ مناسب، طراحی و ساخته می‌شوند (۲) ولی این سیستم‌ها هنوز به علت پیچیدگی و کارآئی پایین، سیستم‌های در حال تحقیق و توسعه محسوب می‌شوند. سیستم‌های پرتودهی الکترونی نیز نسبت به سیستم‌های پرتودهی گاما پیچیده‌تر بوده و فقط در مورد پرتودهی کالاهائی با ضخامت کم و در بسته‌بندی‌های کوچک کاربرد دارند (۳). پیچیدگی تکنولوژیک سیستم‌های پرتودهی گاما نسبت به انواع دیگر کمتر بوده و از طرفی تنها عامل مهم در تعیین دوز جذب شده در محصول تحت تابش، زمان پرتودهی می‌باشد که به همین دلیل استفاده و کارگردانی این نوع سیستم‌ها نسبتاً آسان می‌باشد. از اینرو سیستم‌های پرتودهی گاما نسبت به سایر سیستم‌ها، مورد استفاده بیشتری دارند و بیش از نود و پنج درصد سیستم‌های پرتودهی موجود دنیا از این نوع می‌باشند. سیستم‌های پرتودهی رایج بیشتر از نوع جعبه‌ای^۳ می‌باشند. این نوع سیستم‌های پرتودهی از یک چشمه پرتوزا، محل نگهداری چشمه، سازوکار پرتودهی (Source Pass Mechanism)، سیستم نقاله برای انتقال محصول به داخل و خارج فضای پرتودهی، حفاظ پرتو (Radiation Shield) و انبارهای ورود و خروج کالا تشکیل شده‌اند. در سیستم‌های پرتودهی گاما، ترجیحاً از چشمه‌های ^{60}Co و ^{137}Cs استفاده می‌شود (۴). دلایل استفاده از این دو چشمه در سیستم‌های پرتودهی گاما را می‌توان بصورت زیر خلاصه کرد:

- ۱- اطلاع دقیق از میزان فعالیت (Activity) و طولانی بودن نیمه‌عمر آنها
- ۲- بالا بودن نرخ تولید آنها در رآکتورهای هسته‌ای
- ۳- ساده بودن بیناب انرژی
- ۴- پایدار بودن هسته دختر حاصل از واپاشی آنها و امکان تعیین دقیق فعالیت آنها با استفاده از رابطه ساده $A = A_0 e^{-\lambda t}$
- ۵- ثابت ماندن بیناب تابشی آنها با گذشت زمان

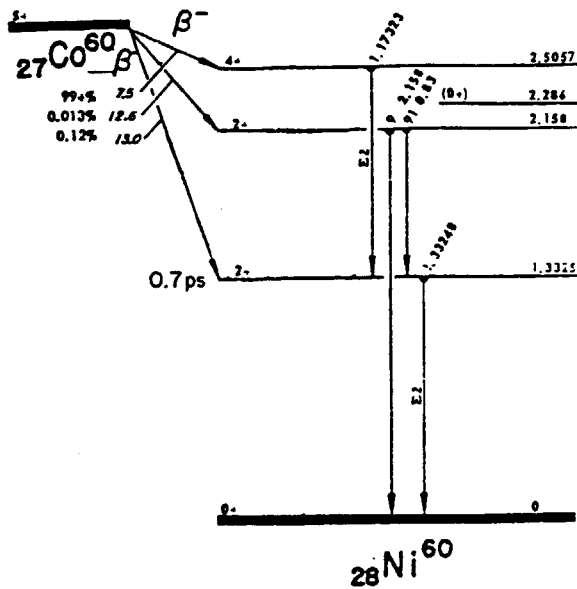
۱) Throughput (بخش ۱-۲)

۲) Dose non-uniformity ratio (بخش ۱-۲)

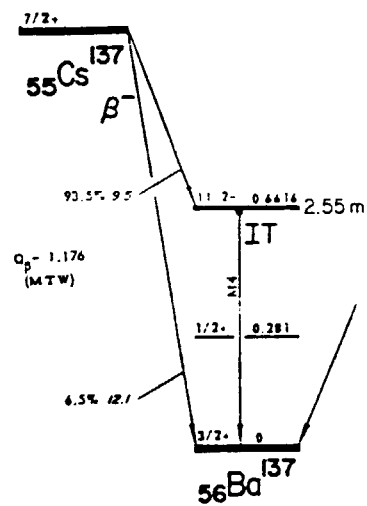
۳) Carrier type gamma irradiator

کبالت شصت از طریق پرتو دمی ^{60}Co که یک ایزوتوپ پایدار می باشد در شار نوترونی $10^{12} \text{ n/cm}^2/\text{s}$ تا $10^{15} \text{ n/cm}^2/\text{s}$ که در رآکتورهای هسته ای وجود دارد، بدست می آید. نیمه عمر کبالت شصت $5/2714$ سال است (۵) و این ایزوتوپ با گسیل یک پرتو β^- به حالت برانگیخته ^{60}Ni واپاشیده شده و بدنبال آن ^{60}Ni با تابش دو پرتوی گامای $1/17 \text{ MeV}$ و $1/33 \text{ MeV}$ (هرکدام با احتمال تقریباً صددرصد) به هسته پایدار ^{60}Ni تبدیل می گردد.

سزیم - ۱۳۷ یکی از پاره های حاصل از شکافت ^{235}U است که هنگام کار یک رآکتور هسته ای مقادیر بسیار زیادی از این ایزوتوپ فعال تولید می شود که پس از جداسازی بصورت کلرید سزیم مورد استفاده قرار می گیرد. نیمه عمر ^{137}Cs ، ۳۰ سال است (۵) که از طریق تابش پرتوی β^- به هسته برانگیخته ^{137}Ba واپاشیده شده، بدنبال آن یک پرتوی گاما با انرژی $0/662 \text{ MeV}$ از هسته ^{137}Ba انتشار می یابد. شمای واپاشی ^{137}Cs در شکل ۱-۱-الف و شمای واپاشی ^{60}Co در شکل ۱-۱-ب نشان داده شده اند.



شکل ۱-۱-ب - شمای واپاشی ^{60}Co (۶)



شکل ۱-۱-الف - شمای واپاشی ^{137}Cs (۶)

در اکثر سیستم‌های پرتودهی گاما از چشمه کبالت شصت استفاده می‌شود. مجموعه میله‌های کبالت شصت با پوشش فولاد ضدزنگ، چشمه پرتوزا را تشکیل می‌دهند. آرایه میله‌های کبالت در چشمه باید بگونه‌ای باشد که بیشترین کارآئی را برای استفاده از پرتوهای گاما جهت پرتودهی داشته باشد. برای داشتن کارآئین آرایه، محصولات باید چشمه را بیوشانند (Product Overlap) اما از آنجائی که در بعضی کاربردها، افزایش هزینه سیستم نقاله از میزان کاهش هزینه چشمه بیشتر است، سیستم را به صورت چشمه بلندتر از محصول (Source Overlap) نیز طراحی می‌کنند (۷).

سیستم‌های پرتودهی معمولاً توسط حفاظی به ضخامت حدود ۲ متر بتون معمولی و یا ضخامت مناسبی از سرب احاطه می‌گردند. حفاظ، میزان تابش در بیرون سیستم را تا حد مجاز کاهش می‌دهد و علاوه بر آن بخاطر پس پراکنده کردن پرتوها (Back-Scattering) کارآئی سیستم نیز مختصراً افزایش می‌یابد.

۱-۲ - مشخصه‌های مهم سیستم‌های پرتودهی گاما و پارامترهای طراحی آنها

از مشخصه‌های مهم سیستم‌های پرتودهی، میزان غیریکنواختی^۱ دوز در محصول پرتودیده، کارآئی و نرخ تولید این سیستم‌ها می‌باشند (۸).

هنگامی که یک محصول در سیستم پرتودهی تحت تابش قرار می‌گیرد، کلیه قسمت‌های آن، دوز یکسانی را دریافت نمی‌کنند. در سیستم‌هایی که آرایه میله‌های چشمه یک صفحه را تشکیل می‌دهند، دوز جذبی بیشترین تغییرات را در صفحه عمود بر صفحه چشمه نشان می‌دهد. منحنی‌های هم‌دوز (Isodose Curves) در صفحه‌ای عمود بر صفحه چشمه این تغییرات را به خوبی بیان می‌کنند. شکل ۱-۲ منحنی‌های هم‌دوز در یک جعبه محصول پرتودیده در یک سیستم نمونه را نشان می‌دهد (۹). نسبت دوز بیشینه به دوز کمینه جذب شده در محصول نسبت غیریکنواختی نامیده می‌شود. به عنوان مثال، نسبت غیریکنواختی دوز در محصولی که توزیع دوز آن در شکل ۱-۲ مشاهده می‌شود، برابر با $\frac{1.17}{0.90} = 1.30$ است.

(۱) این نسبت را نسبت یکنواختی و در مواردی Overdose Ratio نیز می‌نامند.