

تعیین پارامترهای دوزیمتری دومین مدل دانه پالادیم-۱۰۳ ساخته شده در پژوهشکده تحقیقات کشاورزی، پزشکی و صنعتی

غلامرضا رئیس علی^۱، مهدی صادقی^۲، وحیده عطائی نیا^۳، ارژنگ شاهور^۴، مریم قاسمی غنچه نازی^۵

- ۱- دانشیار سازمان انرژی اتمی ایران؛ پژوهشکده کاربرد پرتوها، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، تهران
- ۲- استادیار سازمان انرژی اتمی ایران؛ پژوهشکده تحقیقات کشاورزی، پزشکی و صنعتی، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، کرج
- ۳- دانش آموخته کارشناسی ارشد مهندسی هسته‌ای-پرتو پزشکی؛ گروه مهندسی هسته‌ای، دانشگاه آزاد اسلامی- واحد علوم و تحقیقات، تهران
- ۴- کارشناس فیزیک؛ پژوهشکده تحقیقات کشاورزی، پزشکی و صنعتی، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، کرج
- ۵- دانش آموخته کارشناس ارشد فیزیک پزشکی؛ گروه فیزیک پزشکی، دانشکده پزشکی، دانشگاه علوم پزشکی اصفهان

تاریخ پذیرش مقاله: ۸۷/۴/۱۹

تاریخ دریافت نسخه اصلاح شده: ۸۷/۳/۲۲

چکیده

مقدمه: امروزه، کاربرد ایزوتوپ کم انرژی ^{103}Pd در براکی تراپی، برای درمان بدخیمی‌های پروستات، چشم، سر و گردن، پستان و دهانه رحم افزایش یافته است. در همین راستا، پژوهشکده تحقیقات کشاورزی، پزشکی و صنعتی سازمان انرژی اتمی ایران، اقدام به طراحی و ساخت انواع مختلف دانه پالادیم-۱۰۳ کرده است. هدف از این تحقیق، انتخاب بهترین دانه از نظر دوزیمتری، برای تولید است. قبل از استفاده بالینی از این دانه‌ها، لازم است مشخصات دوزیمتری آنها بطور دقیق اندازه‌گیری و محاسبه شود. در این تحقیق پارامترهای دوزیمتری دومین دانه پالادیم-۱۰۳ ساخته شده در پژوهشکده تحقیقات کشاورزی، پزشکی و صنعتی سازمان انرژی اتمی ایران، تعیین شده‌اند.

مواد و روشها: پارامترهای دوزیمتری این دانه شامل ثابت آهنگ دز، تابع هندسی، تابع دز شعاعی، تابع ناهمسانگردی، فاکتور ناهمسانگردی و ثابت ناهمسانگردی بر اساس پروتکل TG43-U1 با روش محاسباتی مونت کارلو (کد MCNP4C) و اندازه‌گیری با استفاده از دوزیمترهای ترمولومینسانس مدل GR200A در فانتوم پرسپکس تعیین شده‌اند.

نتایج: ثابت آهنگ دز محاسبه شده با کد MCNP4C در آب برابر با $(0.706 \pm 0.01) \text{ (cGy}^{-1}\text{U}^{-1})$ و در فانتوم پرسپکس برابر با $(0.501 \pm 0.01) \text{ (cGy}^{-1}\text{U}^{-1})$ بدست آمد. با استفاده از تابع هندسی محاسبه شده، تابع دز شعاعی و تابع ناهمسانگردی به روشهای محاسباتی و تجربی در فانتوم آب و پرسپکس تعیین شدند. همچنین ثابت ناهمسانگردی محاسبه شده در آب برابر ۰/۸۸ بدست آمد.

بحث و نتیجه‌گیری: اختلاف کمتر از ۱۰٪ بین مقادیر بدست آمده از محاسبات مونت کارلو و اندازه‌گیریهای تجربی نشاندهنده توافق قابل قبول بین برنامه شبیه‌سازی و اندازه‌گیری‌های انجام شده است. همچنین پارامترهای دوزیمتری بدست آمده برای این دانه، با اولین دانه پالادیم-۱۰۳ ساخته شده در پژوهشکده تحقیقات کشاورزی، پزشکی و صنعتی و همچنین با چند مدل جهانی مقایسه شده است. نتایج قابل قبول پارامترهای دوزیمتری دانه‌های ساخته شده، نشان می‌دهند که از نظر دوزیمتری می‌توان از این دانه‌ها به منظور براکی‌تراپی استفاده نمود. (مجله فیزیک پزشکی ایران، دوره ۵، شماره ۱، پیاپی (۱۹، ۱۸)، بهار و تابستان ۸۷: ۲۲-۹)

واژگان کلیدی: براکی تراپی، دانه پالادیم-۱۰۳، پروتکل TG-43U1، محاسبات مونت کارلو، دوزیمتری ترمولومینسانس

* نویسنده مسؤول: غلامرضا رئیس علی

آدرس: تهران، انتهای خیابان کارگر شمالی، سازمان انرژی اتمی ایران،

پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشکده کاربرد پرتوها

graisali@aeoi.org.ir

تلفن: ۸۸۲۲۱۲۲۲-۸۸۲۲۱۲۱۹ (۲۱) +۹۸ دورنگار: ۸۸۲۲۱۲۱۹-۸۸۲۲۱۲۱۹ (۲۱) +۹۸

۱- مقدمه

امروزه کاربرد ایزوتوپ‌های کم انرژی نظیر ^{125}I و پالادیم- ^{103}Pd در براکی تراپی، برای درمان بدخیمی‌های پروستات، چشم، سر و گردن و گاهی برای پستان و دهانه رحم افزایش یافته است [۱-۴]. مزایای براکی تراپی نسبت به جراحی، سهولت درمان، آسیب کمتر به بافت‌های سالم اطراف [۵، ۱] و کاهش اثرات جانبی بعد از عمل برای بیمار است [۵]. مزایای براکی تراپی نسبت به تله-تراپی، قابلیت آن در متمرکز کردن پرتو روی بافت تومور، کمترین پرتودهی به بافت‌های سالم اطراف [۶ و ۷] و افت سریع دوز در بافت سالم اطراف تومور می‌باشد [۸]. به دلیل اینکه ^{125}I و پالادیم- ^{103}Pd پرتوهای ایکس کم انرژی گسیل می‌کنند و نیمه عمر نسبتاً کوتاهی دارند، می‌توانند به مدت طولانی و بدون آسیب به بافت‌های سالم اطراف تومور یا پرتودهی اضافی به سایر افراد، در بافت بدن باقی بمانند [۶]. پالادیم به علت پایین بودن انرژی فوتونی‌اش، افت دوز عمقی سریعتری در مقایسه با دیگر ایزوتوپ‌ها دارد که در نتیجه دوز رسیده به ارگان‌های سالم اطراف تومور کاهش می‌یابد [۱، ۲]. در مقایسه با چشمه ^{125}I ، حفاظت پالادیم با انرژی حدود ۲۱ کیلو الکترون‌ولت ساده‌تر است. نیمه عمر پالادیم ^{103}Pd ۱۶/۹۹ روز است و ۹۵٪ دوز خود را در حدود ۸ هفته به تومور می‌رساند. به دلیل نیمه‌عمر کوتاه‌تر پالادیم- ^{103}Pd نسبت به ^{125}I ، استفاده از آن در کاشتهای دائمی از لحاظ بیولوژیکی مناسب‌تر است، چون دوز با آهنگ بسیار سریعتری می‌تواند به تومور داده شود [۸]. امروزه در آمریکا، استفاده از چشمه پالادیم، یک سوم درمانهای براکی تراپی با کاشت دائمی را تشکیل می‌دهد [۱، ۲]. در همین راستا، پژوهشکده تحقیقات کشاورزی، پزشکی و

صنعتی سازمان انرژی اتمی ایران، اقدام به طراحی و ساخت انواع مختلف دانه پالادیم- ^{103}Pd کرده است. قبل از استفاده بالینی از این دانه‌ها لازم است مشخصات دوزیمتری این دانه‌ها بطور دقیق اندازه‌گیری و محاسبه شود. برای بیان دقیق پارامترهای توزیع دوز چشمه‌های کم انرژی مورد استفاده در براکی تراپی، از پروتکل TG-43U1 که شامل فرمولبندی برای محاسبات دوز و مجموعه داده‌هایی برای پارامترهای دوزیمتری چشمه‌های براکی تراپی است، استفاده می‌شود [۹]. در این تحقیق پارامترهای دوزیمتری دومین دانه پالادیم- ^{103}Pd ساخته شده در پژوهشکده تحقیقات کشاورزی، پزشکی و صنعتی سازمان انرژی اتمی به روش محاسباتی مونت کارلو با استفاده از کد MCNP4C و روش تجربی با استفاده از دوزیمترهای ترمولومینسانس مدل GR200A تعیین و با یکدیگر مقایسه شده‌اند. همچنین پارامترهای دوزیمتری این دانه، با اولین دانه پالادیم- ^{103}Pd ساخته شده، مقایسه شده است.

۲- مواد و روشها

۲-۱- توصیف دانه

دومین نمونه دانه پالادیم- ^{103}Pd ساخته شده در پژوهشکده تحقیقات کشاورزی، پزشکی و صنعتی سازمان انرژی اتمی (NRCAM12) (شکل ۱)، به صورت لوله استوانه‌ای شکلی از جنس تیتانیوم با قطر داخلی ۰/۷ میلی‌متر و قطر خارجی ۰/۸ میلی‌متر و طول ۴/۵ میلی‌متر می‌باشد. کلاهک دانه از جنس تیتانیوم به طول ۰/۶۲۲ میلی‌متر و قطر داخلی ۰/۶۹۵ میلی‌متر و قطر خارجی ۰/۷۸۷ میلی‌متر ساخته شده است که زائده‌ای مخروطی شکل به طول متوسط ۰/۳ میلی‌متر دارد. داخل کپسول، پنج رزین کروی به قطر متوسط 0.3 ± 0.62 میلی‌متر که پالادیم- ^{103}Pd بطور یکنواخت و به صورت حجمی در آنها

اندازه‌گیری تابع ناهمسانگردی چشمه بکار رفت [۱۱]. دوزیمترهای ترمولومینسانس پس از مراحل کالیبراسیون و گرمادهی [۱۰]، به همراه دانه در محل‌های تعبیه شده در فانتوم قرار گرفته و پرتودهی شدند. با تکرار اندازه‌گیری‌ها و بدست آوردن میانگین قرائت دوزیمترها، مقدار دوز جذب شده در هر مکان توسط دوزیمترهای ترمولومینسانس بدست آمد [۱۲، ۱۱، ۶]. فرمول محاسبه دوز بصورت رابطه (۱) می‌باشد [۱۱، ۵، ۲].

$$\dot{D}(r, \theta) = \frac{R}{CF \times EF \times T \times d(t)} \quad (1)$$

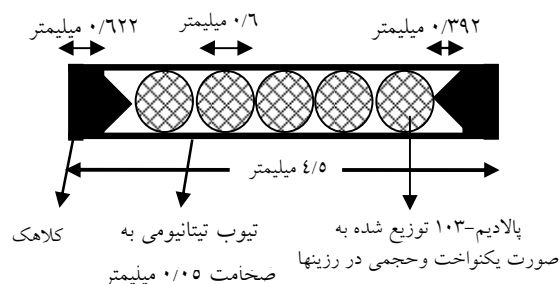
در این فرمول:

$\dot{D}(r, \theta)$ آهنگ دوز در نقطه (r, θ) ، R خوانش هر دوزیمتر با اعمال ضریب تصحیح مربوط به آن (ECC) و کسر دوز زمینه، CF فاکتور کالیبراسیون هر دوزیمتر (میکروگری^۱ / شمارش) برای پرتو کالیبره شده در میدان کبالت ۶۰ در آزمایشگاه دوزیمتری استاندارد ثانویه^۲ پژوهشگاه تحقیقات کشاورزی، پزشکی و صنعتی سازمان انرژی اتمی ایران، EF فاکتور تصحیح انرژی هر دوزیمتر برای چشمه پالادیم با انرژی متوسط ۲۰ کیلو الکترون‌ولت، T مدت زمان پرتودهی دوزیمترهای ترمولومینسانس و $d(t)$ فاکتور تصحیح واپاشی چشمه در مدت زمان پرتودهی دوزیمترها می‌باشد که از رابطه زیر بدست می‌آید [۱۱]:

$$d(t) = \frac{1 - e^{-\lambda t}}{\lambda t} \quad (2)$$

در رابطه بالا λ ثابت واپاشی و t زمان واپاشی چشمه می‌باشد.

توزیع شده است، قرار گرفته‌اند. رزین، یک نوع ماده آلی با چگالی ۱/۱۴ گرم بر سانتیمتر مکعب و ترکیبات اکسیژن ۹/۰۹٪، هیدروژن ۶۳/۶۳٪، کربن ۱۸/۱۸٪ و نیتروژن ۹/۰۹٪ می‌باشد.



شکل ۱- دومین دانه رزینی پالادیم-۱۰۳ ساخته شده در پژوهشگاه تحقیقات کشاورزی، پزشکی و صنعتی سازمان انرژی اتمی ایران

۲-۲- اندازه‌گیری توزیع دوز اطراف دانه با استفاده از دوزیمترهای ترمولومینسانس

توزیع دوز اطراف دانه پالادیم-۱۰۳ مدل NRCAM12 با استفاده از دوزیمترهای ترمولومینسانس مدل GR200A در فانتوم پرسپکس اندازه‌گیری شد. جنس این دوزیمترها از لیتیم فلوراید ترکیب شده با ناخالصی‌های منیزیم، مس و فسفر است. دوزیمترهای ترمولومینسانس نوع GR200A به شکل قرصهایی به قطر ۴/۵ میلی‌متر و ضخامت ۰/۸ میلی‌متر می‌باشند [۱۰]. فانتوم بصورت حجمی مکعبی به ابعاد ۳۰×۳۰×۱۵ سانتی‌متر مکعب شامل ۱۵ صفحه پرسپکس هریک به ضخامت ۱ سانتی‌متر در نظر گرفته شد تا تمام پرتوهای پراکنده را دربرگیرد [۱۱-۱۴]. صفحه میانی صفحه‌ی قرارگیری دانه و دوزیمترهای ترمولومینسانس می‌باشد. دو نوع فانتوم طراحی شده پرسپکس برای صفحه میانی در نظر گرفته شد [۱۵]. اولین فانتوم برای اندازه‌گیری تابع دوز شعاعی و دومین فانتوم برای

1- Count/μGy
2- SSDL

۳-۲- محاسبات مونت کارلو

به منظور مقایسه با نتایج تجربی، توزیع دوز اطراف دانه پالادیم-۱۰۳ مدل NRCAM12 با روش محاسباتی مونت کارلو با بکارگیری کد MCNP4C [۱۷] تعیین شد. این کد جذب فوتوالکتریک و تابش اشعه ایکس مشخصه لایه‌های K و L و پراکندگی کامپتون و ریلی را شبیه سازی می کند [۹،۱۱].

دانه پالادیم-۱۰۳ مدل NRCAM12، در مرکز کره‌ای فرضی از جنس آب به شعاع ۱۵ سانتی متر شبیه سازی شد. فانتوم به سلولهایی محصور بین پوسته‌های کروی و مخروطی تقسیم شد [۱۸]. ضخامت پوسته‌های کروی تا فاصله ۱/۵ سانتیمتر ۰/۰۱ سانتیمتر و برای فواصل بیشتر از ۱/۵ سانتیمتر ۰/۱ سانتیمتر و ضخامت پوسته‌های مخروطی ۱ درجه در نظر گرفته شد. بنابراین آشکارسازهای فرضی، آشکارسازهایی حلقوی محدود به پوسته‌های کروی و مخروطی به ضخامت Δr و ارتفاع $r \Delta \theta$ هستند. اثر میانگین گیری دوز حجم این سلولها که به دوز یک نقطه منسوب می شود، در مقایسه با خطاهای آماری ناشی از محاسبات MCNP ناچیز و قابل چشم پوشی است [۱۸]. بدلیل کم بودن انرژی چشمه و برد کوتاه الکترونهای ثانویه تولید شده توسط فوتونهای گسیل شده از این چشمه، انتقال الکترونهای ثانویه شبیه سازی نشد و با فرض تعادل الکترونی، کرما با دوز برابر در نظر گرفته شد [۱۱،۱۲]. بیناب انرژی فوتونهای پالادیم-۱۰۳ در پروتکل TG43-U1 آورده شده است [۹].

برای محاسبه توزیع دوز در آب، با توجه به تحقیق انجام شده توسط رئیس علی و همکارانش برای محاسبه توزیع دوز ناشی از چشمه ید-۱۲۵ در فواصل مختلف ۰/۲۵ تا ۱۰ سانتیمتر با تالی‌های F4، F6 و F8* و نتیجه تقریباً یکسان به دست آمده و نیز این نتیجه که زمان محاسبه دوز با تالی F6 بسیار سریعتر از تالی F8* (حدود ۲۰ برابر) با دقت‌های یکسان می باشد [۱۹].

همچنین با داشتن فرض تعادل الکترونی در آشکارسازهای انتخاب شده در همه فواصل، در این تحقیق محاسبه توزیع دوز در آب با استفاده از تالی F6 با تعداد تاریخچه های $10^9 \times 1/8$ برای رسیدن به خطای کمتر از ۵ درصد انجام شد. بیشترین مقادیر عدم قطعیت در امتداد محور طولی چشمه مشاهده شد. این خطا در فواصل دورتر بیشتر می شود [۲۰]. زمان اجرای برنامه توسط کامپیوتر Intel(R)-Celeron(R) با سرعت ۲/۴ گیگاهرتز، برای محاسبه توزیع دوز در آب حدود ۲۲۰ ساعت بود. با استفاده از توزیع دوز محاسبه شده، سایر پارامترهای دوزیمتری دانه بر اساس پروتکل TG43-U1 تعیین شد. در این نوشتار از تکرار فرمولهای ارائه شده در پروتکل TG43-U1 اجتناب شده است.

به منظور مقایسه با نتایج تجربی اندازه گیری شده با دوزیمترهای ترمولومینسانس، توزیع دوز در فانتوم پرسپکس با استفاده از تالی F4 به همراه ضرایب تبدیل شار به دوز در آب که با استفاده از ضرایب جذب انرژی جرمی [۲۱] بدست آمدند، محاسبه گردید. فانتوم پرسپکس ($C_5O_2H_8$) با چگالی ۱/۱۹ گرم بر سانتی متر مکعب شبیه سازی گردید.

برای محاسبه S_k به ازای واحد اکتیویته، با استفاده از کد MCNP4C، دانه در مرکز کره‌ای از جنس خلأ به شعاع ۶ متر در نظر گرفته شد و کرمای هوا در سلولی به فاصله یک متر از مرکز دانه و در امتداد عمود بر محور دانه با استفاده از تالی F6 محاسبه شد. در برنامه شبیه سازی نوشته شده فوتونهای با انرژی کمتر از ۵ کیلو الکترون ولت با استفاده از دستور ELPT حذف شدند. فوتونهای با انرژی کمتر از ۵ کیلو الکترون ولت در دیواره دانه و مجاورت آن در فاصله کمتر از ۰/۱ میلیمتر جذب می شوند و تأثیری در میزان دوز جذبی در آب ندارند [۵،۹،۲۲]. با استفاده از قانون عکس مجذور فاصله و رابطه (۳)، کرمای هوا

صورت نمودارهای رسم شده در شکل ۲ نشان داده شده اند. با توجه به اینکه تابع هندسی صرفاً به عنوان یک تابع کمکی برای بدست آوردن سایر توابع و پارامترها مورد استفاده قرار گرفته، نتایج عددی مربوط به این تابع ارائه نشده است.

با استفاده از تابع هندسی و توزیع دوز محاسبه شده در آب، تابع دوز شعاعی بر اساس پروتکل TG43-U1 تعیین شد. تابع دوز شعاعی محاسبه شده در آب، محاسبه شده در پرسپکس و اندازه گیری شده در پرسپکس در جدول ۱ ارائه شده اند. تابع دوز شعاعی محاسبه شده توسط روش مونته کارلو در فانتوم های آب و پرسپکس با مقادیر اندازه گیری شده با دوزیمترهای ترمولومینسانس در فانتوم پرسپکس و تبدیل شده در آب مقایسه گردید و نتایج در شکل ۳ آورده شده است. ضرایب تبدیل اطلاعات تجربی در فانتوم پرسپکس به فانتوم آب از نسبت دوز بدست آمده برای دو فانتوم با شبیه سازی مونته کارلو بدست آمدند. این ضرایب در جدول ۲ ارائه شده اند.

در فاصله ۱۰۰ سانتیمتر از مرکز دانه، به کرمای هوا در فاصله یک سانتیمتر بهنجار شد [۲۵-۲۳].

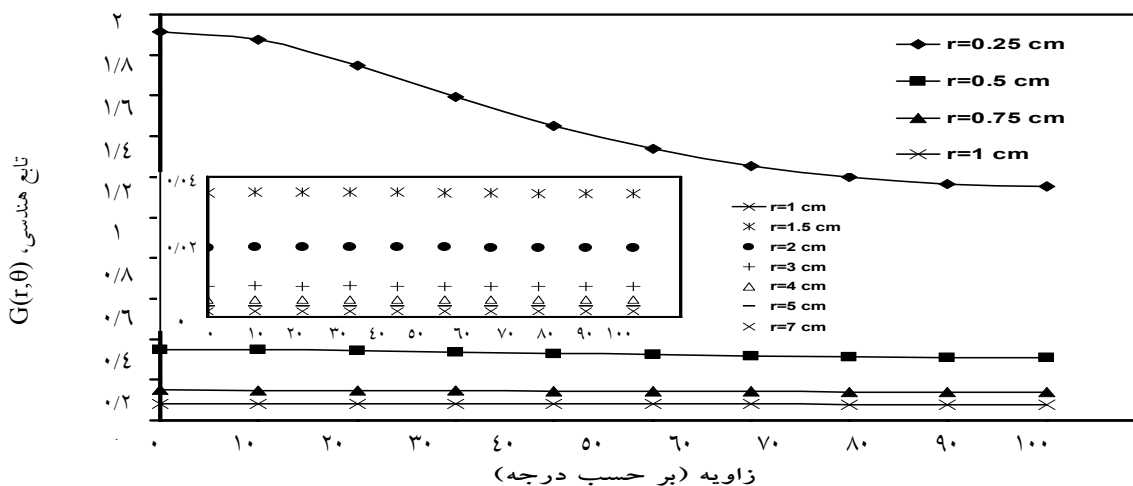
$$S_K = \dot{K}_\delta(d)d^2 \quad (3)$$

در رابطه بالا، $\dot{K}_\delta(d)$ آهنگ کرمای هوا در فاصله d از مرکز دانه با در نظر گرفتن فوتونهای با انرژی بیشتر از δ است که مقدار δ در محاسبات ۵ کیلو الکترون ولت فرض شده است.

۳- نتایج

ثابت آهنگ دوز دانه پالادیم-۱۰۳ تولید شده، در فانتوم آب برابر با $(0.706 \pm 0.001) \text{ cGyh}^{-1}\text{U}^{-1}$ و در فانتوم پرسپکس برابر با $(0.501 \pm 0.001) \text{ cGyh}^{-1}\text{U}^{-1}$ محاسبه شد. در واحد ثابت آهنگ دوز، U واحد شدت کرمای هوای مربوط به چشمه است و به صورت $1\text{U}=1\text{cGycm}^2\text{h}^{-1}$ تعریف شده است.

تابع هندسی با محاسبه شار حجمی توسط تالی F4 در خلأ برای فواصل و زوایای مختلف از چشمه تعیین شد. نتایج به



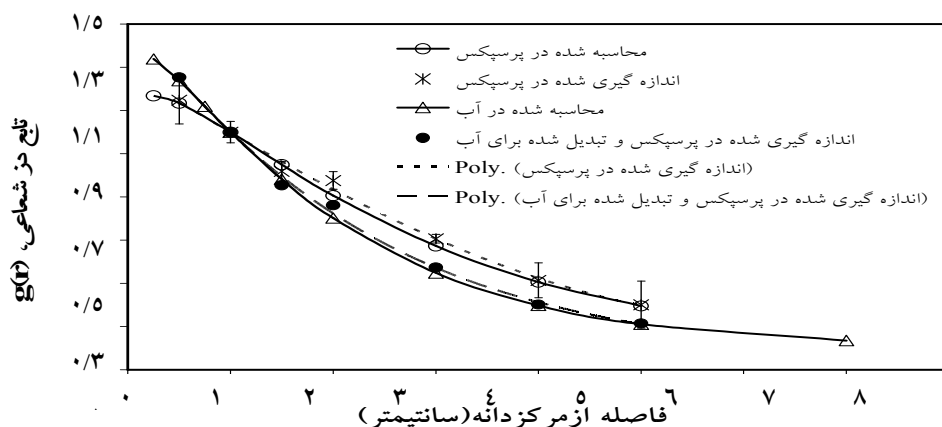
شکل ۲- تغییرات تابع هندسی محاسبه شده دانه ^{103}Pd NRCAM12 برای فاصله های مختلف از مرکز دانه بر حسب زاویه

جدول ۱- تابع دوز شعاعی اندازه‌گیری شده و محاسبه شده در فانتوم پرسپیکس و آب برای دانه ^{103}Pd NRCAM12.

فاصله از مرکز دانه (سانتیمتر)	محاسبه شده با کد MCNP4C در آب	محاسبه شده با کد MCNP4C در پرسپیکس	اندازه‌گیری شده با دوزیمترهای ترمولومینسانس در پرسپیکس
۰/۲۵	$1/339 \pm 0/001$	۱/۱۷	—
۰/۵	$1/239 \pm 0/001$	۱/۱۳	$1/15 \pm 0/13$
۰/۷۵	$1/119 \pm 0/001$	۱/۰۷	—
۱	$1/000 \pm 0/001$	۱	$1/00 \pm 0/11$
۱/۵	$0/783 \pm 0/001$	۰/۸۵۰	$0/82 \pm 0/08$
۲	$0/602 \pm 0/001$	۰/۷۰۶	$0/78 \pm 0/09$
۳	$0/3483 \pm 0/0004$	۰/۴۷۳	$0/51 \pm 0/09$
۴	$0/1976 \pm 0/0002$	۰/۳۰۶	$0/31 \pm 0/09$
۵	$0/1112 \pm 0/0002$	۰/۱۹۵	$0/20 \pm 0/14$
۷	$0/0354 \pm 0/0001$	—	—

جدول ۲- نسبت دوز محاسبه شده در فانتوم آب به دوز محاسبه شده در فانتوم پرسپیکس

زاویه (بر حسب درجه)				فاصله از مرکز دانه
۰	۳۰	۶۰	۹۰	(سانتیمتر)
۱/۴۶۵	۱/۶۳۱	۱/۶۰۵	۱/۶۱۱	۰/۲۵
۱/۲۶۰	۱/۵۳۷	۱/۵۳۷	۱/۵۳۸	۰/۵
۱/۰۷۰	۱/۳۹۱	۱/۴۰۸	۱/۴۰۸	۱
۱/۰۲۲	۱/۲۷۴	۱/۲۹۵	۱/۲۹۷	۱/۵
۰/۹۴۳	۱/۱۷۱	۱/۱۹۸	۱/۲۰۱	۲
۰/۸۵۴	۱/۰۱۰	۱/۰۳۵	۱/۰۳۸	۳
۰/۷۳۷	۰/۸۸۴	۰/۹۰۵	۰/۹۰۸	۴
۰/۶۵۸	۰/۷۷۹	۰/۸۰۰	۰/۸۰۲	۵



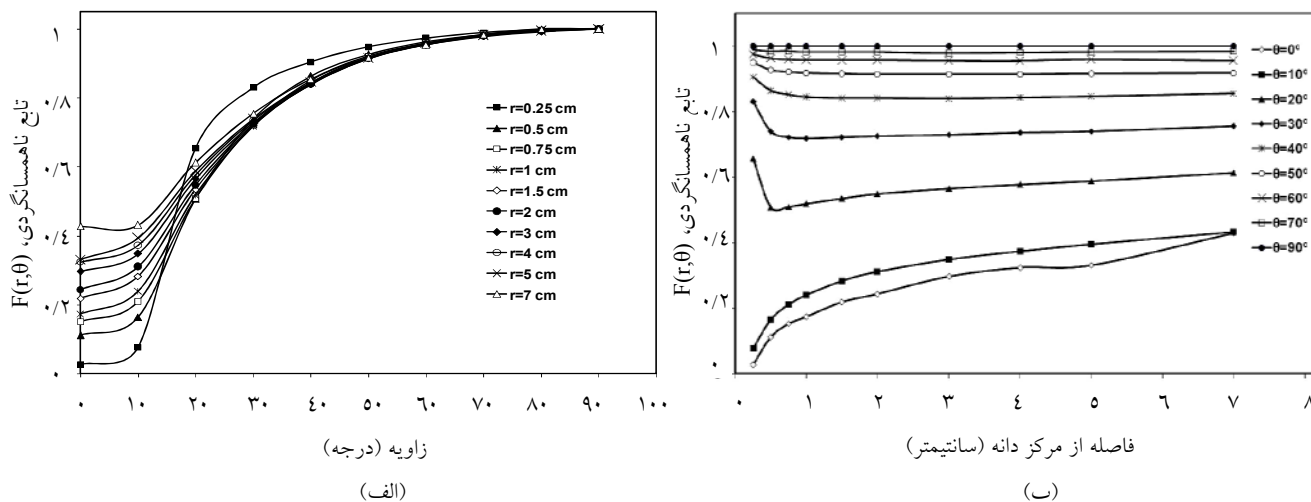
شکل ۳- مقایسه تابع دوز شعاعی محاسبه شده با کد MCNP4C در فانتوم‌های آب و پرسپیکس و اندازه‌گیری شده با دوزیمترهای ترمولومینسانس در فانتوم پرسپیکس و تبدیل شده برای آب در فواصل مختلف از چشمه برای دانه ^{103}Pd NRCAM12. خطاها بر حسب σ (انحراف معیار) رسم شده اند.

مختلف، بر حسب فاصله از مرکز دانه نشان می‌دهد. در نمودارهای رسم شده در شکل ۵ تابع ناهمسانگردی محاسبه شده توسط روش مونت کارلو در فانتوم‌های آب و پرسپکس با مقادیر اندازه‌گیری شده با دوزیمترهای ترمولومینسانس در فانتوم پرسپکس و تبدیل شده برای آب مقایسه شده است. اختلاف مقادیر تابع ناهمسانگردی بدست آمده از اندازه‌گیری و محاسبه ۰/۱٪ تا ۰/۹٪ است.

تابع ناهمسانگردی با استفاده از توزیع دوز و تابع هندسی محاسبه شده در آب، بر اساس پروتکل TG43-U1 تعیین شد. نتایج در جدول ۳ آمده است. نمودارهای نشان داده شده در شکل ۴-الف تغییرات تابع ناهمسانگردی را در آب، در فاصله‌های مختلف از مرکز دانه بر حسب زاویه نشان می‌دهند. نمودارهای نشان داده شده در شکل ۴-ب تغییرات تابع ناهمسانگردی را در آب در زوایای

جدول ۳- تابع ناهمسانگردی و فاکتور ناهمسانگردی محاسبه شده در آب مربوط به دانه ^{103}Pd NRCAM12. خطای توابع ناهمسانگردی محاسبه شده در زاویه صفر درجه کمتر از ۶٪ و در سایر زوایا کمتر از ۱٪ است.

فاصله از مرکز دانه (سانتیمتر)	زاویه (بر حسب درجه)										فاکتور ناهمسانگردی محاسبه شده در آب $\phi_{an}(r)$
	۰	۱۰	۲۰	۳۰	۴۰	۵۰	۶۰	۷۰	۸۰	۹۰	
۰/۲۵	۰/۰۲۷	۰/۰۷۸	۰/۶۵۴	۰/۸۳۱	۰/۹۰۵	۰/۹۴۹	۰/۹۷۴	۰/۹۸۹	۰/۹۹۸	۱/۰۰۰	۱/۰۲
۰/۵	۰/۱۱۱	۰/۱۶۴	۰/۵۰۷	۰/۷۳۹	۰/۸۶۵	۰/۹۲۶	۰/۹۶۲	۰/۹۸۴	۰/۹۹۷	۱/۰۰۰	۰/۹۰۹
۰/۷۵	۰/۱۵۱	۰/۲۱۰	۰/۵۰۹	۰/۷۲۱	۰/۸۵۲	۰/۹۲۱	۰/۹۵۹	۰/۹۸۴	۰/۹۹۶	۱/۰۰۰	۰/۸۹۲
۱	۰/۱۷۳	۰/۲۴۰	۰/۵۱۸	۰/۷۱۸	۰/۸۴۵	۰/۹۱۷	۰/۹۵۷	۰/۹۸۲	۰/۹۹۴	۱/۰۰۰	۰/۸۸۶
۱/۵	۰/۲۱۸	۰/۲۸۳	۰/۵۳۴	۰/۷۲۱	۰/۸۴۱	۰/۹۱۵	۰/۹۵۶	۰/۹۸۲	۰/۹۹۴	۱/۰۰۰	۰/۸۸۵
۲	۰/۲۴۳	۰/۳۱۱	۰/۵۴۷	۰/۷۲۴	۰/۸۴۱	۰/۹۱۴	۰/۹۵۷	۰/۹۸۱	۰/۹۹۴	۱/۰۰۰	۰/۸۸۴
۳	۰/۲۹۶	۰/۳۴۸	۰/۵۶۵	۰/۷۲۸	۰/۸۳۹	۰/۹۱۵	۰/۹۵۵	۰/۹۷۹	۰/۹۹۲	۱/۰۰۰	۰/۸۸۶
۴	۰/۳۲۴	۰/۳۷۳	۰/۵۷۶	۰/۷۳۵	۰/۸۴۲	۰/۹۱۴	۰/۹۵۵	۰/۹۸۰	۰/۹۹۴	۱/۰۰۰	۰/۸۸۸
۵	۰/۳۳۰	۰/۳۹۴	۰/۵۸۸	۰/۷۳۹	۰/۸۴۶	۰/۹۱۶	۰/۹۵۸	۰/۹۸۲	۰/۹۹۵	۱/۰۰۰	۰/۸۹۰
۷	۰/۴۲۸	۰/۴۳۲	۰/۶۱۳	۰/۷۵۵	۰/۸۵۵	۰/۹۱۸	۰/۹۵۵	۰/۹۸۳	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۰/۸۹۷



شکل ۴- تغییرات تابع ناهمسانگردی محاسبه شده در آب برای دانه NRCAM12: (الف) تغییرات تابع ناهمسانگردی محاسبه شده در آب برای فاصله‌های مختلف از مرکز دانه برحسب زاویه، (ب) تغییرات تابع ناهمسانگردی محاسبه شده در آب برای زوایای مختلف از مرکز دانه برحسب فاصله.

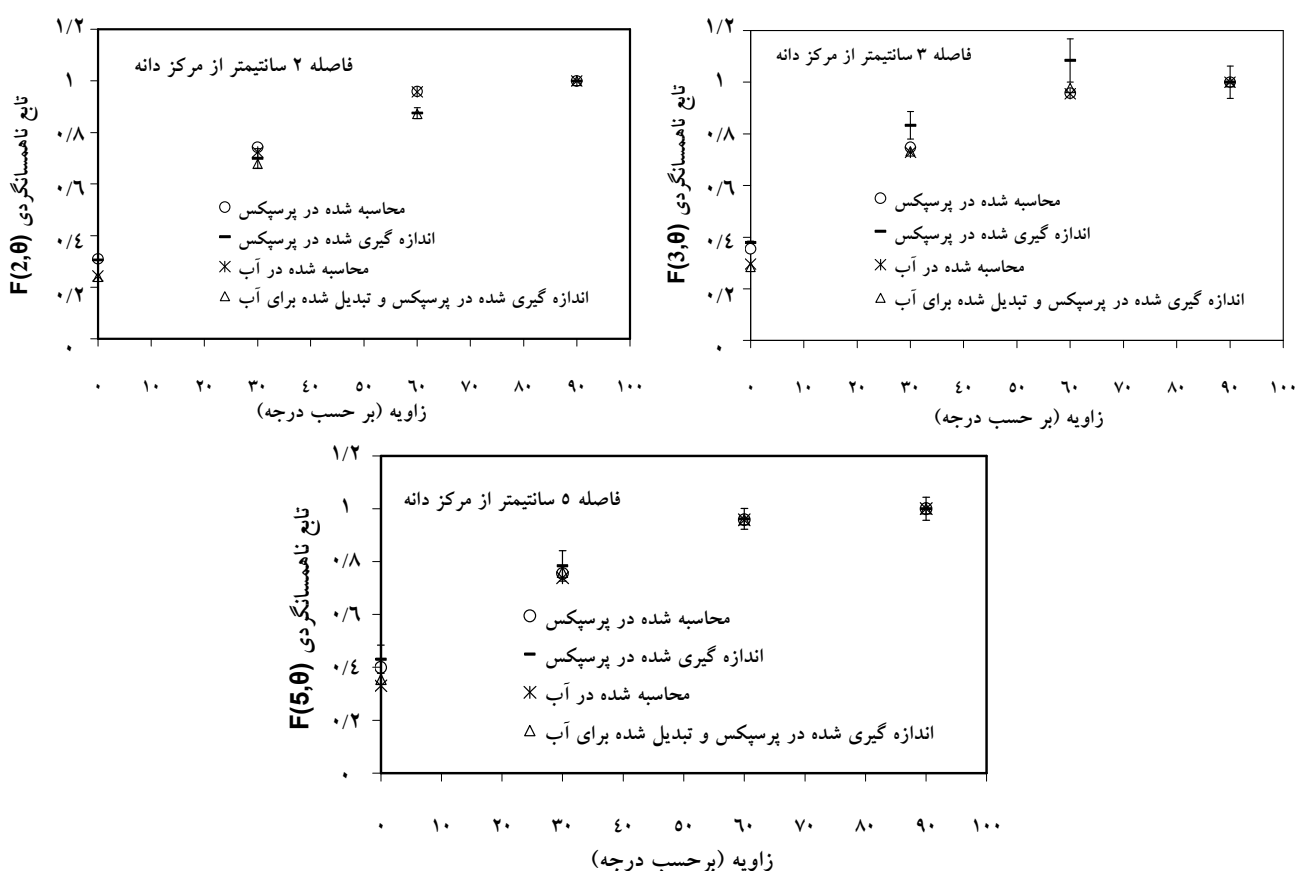
جدول ۴- مقایسه تابع ناهمسانگردی محاسبه شده با کد MCNP4C در فانتوم‌های آب و پرسپکس با مقادیر اندازه‌گیری شده با دوزیمترهای ترمولومینسانس در فانتوم پرسپکس و تبدیل شده برای آب برای دانه ^{103}Pd NRCAM12

فاصله شعاعی (سانتیمتر)	زاویه نسبت به محور طولی دانه (درجه)	محاسبه شده در پرسپکس	اندازه‌گیری شده در پرسپکس	محاسبه شده در آب	پرسپکس و تبدیل شده برای آب
۲	۰	۰/۳۱۰	۰/۳۰۵	۰/۲۴۳	۰/۲۴۰
	۳۰	۰/۷۴۳	۰/۷۰۰	۰/۷۲۴	۰/۶۷۹
	۶۰	۰/۹۵۹	۰/۸۷۶	۰/۹۵۷	۰/۸۷۲
	۹۰	۱	۱	۱	۱
۳	۰	۰/۳۵۵	۰/۳۷۹	۰/۲۹۶	۰/۲۸۵
	۳۰	۰/۷۴۸	۰/۸۳۳	۰/۷۲۸	۰/۷۳۲
	۶۰	۰/۹۵۸	۱/۰۸	۰/۹۵۵	۰/۹۷۷
	۹۰	۱	۱	۱	۱
۵	۰	۰/۴۰۰	۰/۴۳۱	۰/۳۳۰	۰/۳۵۵
	۳۰	۰/۷۵۵	۰/۷۸۴	۰/۷۳۹	۰/۷۶۰
	۶۰	۰/۹۵۹	۰/۹۶۲	۰/۹۵۸	۰/۹۵۹
	۹۰	۱	۱	۱	۱

گردد. فاکتور ناهمسانگردی تعیین شده در آب در جدول ۳ آورده شده است. ثابت ناهمسانگردی محاسبه شده در فانتوم‌های آب و پرسپکس به روش مونت کارلو با مقادیر اندازه‌گیری شده با دوزیمترهای ترمولومینسانس مقایسه گردید و نتایج در جدول ۵ آورده شده است.

همچنین مقایسه نتایج حاصل از محاسبه تابع ناهمسانگردی در فانتوم‌های آب و پرسپکس و نتایج حاصل از اندازه‌گیری در فانتوم پرسپکس و تبدیل شده برای آب در جدول ۴ آورده شده است.

برای دانه ^{103}Pd NRCAM12، فاکتور ناهمسانگردی $\varphi_{an}(r)$ و ثابت ناهمسانگردی $(\bar{\varphi}_{an})$ بر اساس پروتکل TG-43 تعیین



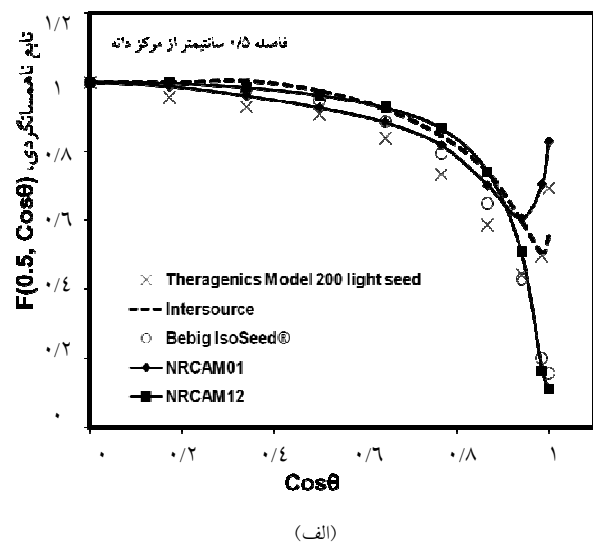
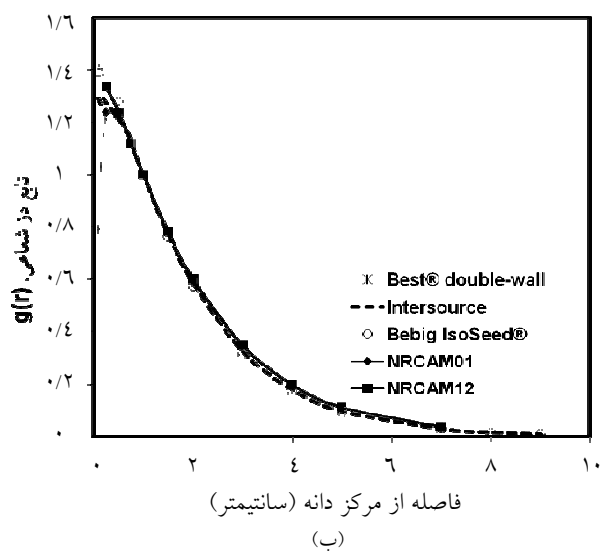
شکل ۵- مقایسه تابع ناهمسانگردی محاسبه شده با کد MCNP4C در فانتوم‌های آب و پرسپکس و اندازه‌گیری شده با دوزیمترهای ترمولومینسانس در فانتوم پرسپکس و تبدیل شده برای آب برای زوایای مختلف در فاصله‌های: (الف) سانتیمتر، (ب) ۳ سانتیمتر و (ج) ۵ سانتیمتر برای دانه NRCAM12. خطاها بر حسب σ (انحراف معیار) رسم شده اند.

پالادیم-۱۰۳ ساخته شده در دنیا که توسط سایر محققین دوزیمتری شده‌اند [۲۷،۲۸،۵،۲۹]، در نمودارهای شکل‌های ۶-الف و ۶-ب آورده شده است. نمودارها حاکی از این است که دانه‌ی ^{103}Pd NRCAM 12 و مخصوصاً دانه‌ی ^{103}Pd NRCAM 01 در مقایسه با سایر دانه‌های جهانی در حد خوبی هستند.

به‌منظور مقایسه این دانه با اولین دانه پالادیم-۱۰۳ ساخته شده در پژوهشکده تحقیقات کشاورزی، پزشکی و صنعتی (NRCAM01) که شامل چهار رزین اکتیو و یک نشانگر از جنس مس داخل یک لوله استوانه‌ای از جنس تیتانیوم با قطر خارجی ۰/۸ میلی‌متر و طول ۴/۵ میلی‌متر با کلاهک‌هایی فنجان‌ی شکل است [۱۵]، تابع دوز شعاعی و تابع ناهمسانگردی این دانه‌ها و چند دانه

جدول ۵- ثابت ناهمسانگردی ($\bar{\phi}_{an}$) محاسباتی و اندازه‌گیری شده مربوط به دانه ^{103}Pd NRCAM12.

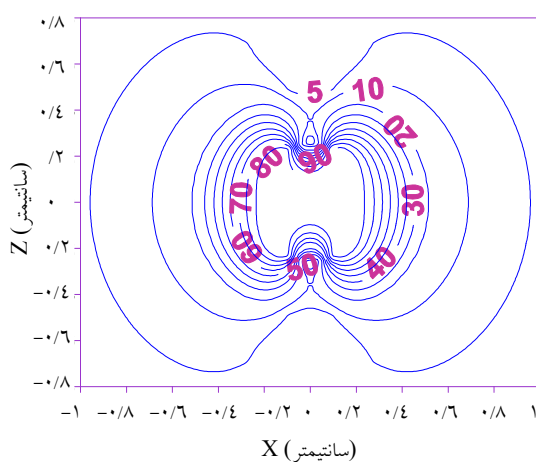
مدل دانه	روش دوزیمتری	فانتوم استفاده شده	ثابت ناهمسانگردی $\bar{\phi}_{an}$
NRCAM12	دوزیمتری ترمولومینسانس	پرسپکس	۰/۸۸۸
NRCAM12	محاسبات مونت کارلو	پرسپکس	۰/۸۹۵
NRCAM12	محاسبات مونت کارلو	آب	۰/۸۸۶



شکل ۶-الف) مقایسه تابع دوز شعاعی محاسبه شده در آب مربوط به دانه NRCAM01 و دانه NRCAM12 با تابع دوز شعاعی محاسبه شده چند دانه پالادیم-۱۰۳ ساخته شده در دنیا [۲۷،۲۸،۵،۲۹] (ب) مقایسه تابع ناهمسانگردی محاسبه شده در آب در فاصله ۰/۵ سانتیمتر از مرکز چشمه مربوط به دانه NRCAM01 و دانه NRCAM12 با تابع ناهمسانگردی محاسبه شده چند دانه پالادیم-۱۰۳ ساخته شده در دنیا [۲۷،۲۸،۵،۲۹].

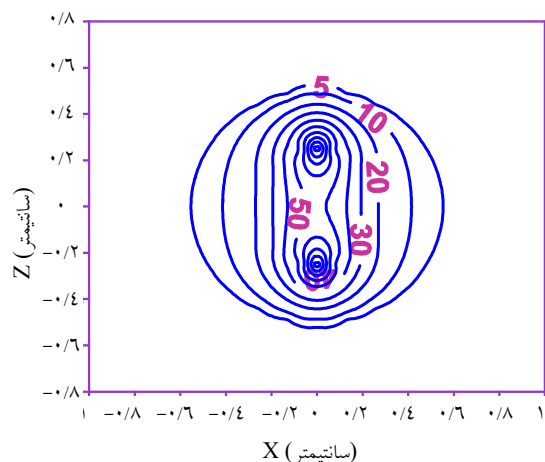
پارامترهای دوزیمتری پالادیم-۱۰۳

شده‌اند. محور Z در راستای محور طولی دانه است. اعداد روی هر منحنی، مقدار دوز مربوط به نقاط واقع روی منحنی است که به مقدار دوز بیشینه بهنجار شده‌اند.



(ب)

با استفاده از توزیع دوز بدست آمده در فانتوم آب با کد MCNP4C و تالی F6، منحنیهای ایزودوز دانه‌های NRCAM01 و NRCAM12 رسم شده و در شکل ۷ آورده



(الف)

شکل ۷- منحنیهای ایزودوز رسم شده با استفاده از محاسبات مونت کارلو برای: (الف) دانه NRCAM01 و (ب) دانه NRCAM12

و محیط در نظر گرفته نمی‌شود، یکنواخت‌تر شدن نمودارها در فواصل شعاعی دورتر ناشی از اثر قانون عکس مجذور فاصله بر روی دوز اطراف دانه می‌باشد. تابع دوز شعاعی در آب و پرسپکس محاسبه و اندازه‌گیری شد. اختلاف بین مقادیر اندازه‌گیری شده و مقادیر محاسبه شده مربوط به تابع دوز شعاعی در فاصله دو سانتیمتری و سه سانتیمتری از مرکز دانه به ترتیب ۹٪ و ۷٪ می‌باشد که این تفاوت می‌تواند ناشی از خطای اندازه‌گیری با دوزیمترهای ترمولومینسانس و یا شبیه‌سازی دانه باشد. در سایر نقاط اختلاف کمتر از ۴٪ مشاهده می‌شود.

۴- بحث و نتیجه‌گیری

پارامترهای دوزیمتری دومین چشمه دانه‌ای پالادیم-۱۰۳ ساخته شده در پژوهشکده تحقیقات کشاورزی، پزشکی و صنعتی، توسط محاسبات مونت کارلو و روش تجربی براساس توصیه‌های پروتکل TG-43U1 تعیین شدند. ثابت آهنگ دوز در فانتوم آب و در فانتوم پرسپکس محاسبه شد. نمودارهای مربوط به تابع هندسی محاسبه شده در شکل ۲ آورده شده‌اند. همانطور که از نمودارها برمی‌آید، در فاصله ۰/۲۵ سانتیمتر، ترکیب هندسی داخل دانه بر تابع هندسی اثر زیادتری دارد. با توجه به اینکه در محاسبه تابع هندسی جذب و پراکندگی فوتون در ساختمان دانه

منحنی‌های هم‌دوز دانه‌های NRCAM 01 و NRCAM 12 در شکل ۷ آورده شده‌اند. در اطراف محور طولی و خصوصاً زاویه صفر درجه، دوز ناشی از دانه ^{103}Pd NRCAM 01 بیشتر از ^{103}Pd NRCAM 12 است و این بدلیل ضخامت کمتر کلاهک‌های دو سر دانه ^{103}Pd NRCAM 01 نسبت به دانه ^{103}Pd NRCAM 12 می‌باشد. می‌توان گفت، هرگاه ضخامت کلاهک‌ها بیشتر از ضخامت غلاف دانه باشد باعث تضعیف بیشتر و توزیع زاویه‌ای ناهمسانگرد دوز اطراف دانه خواهد شد.

اختلاف کمتر از ۱۰٪ بین نتایج بدست آمده از محاسبات و اندازه‌گیری، نشان‌دهنده سازگاری نتایج برنامه‌های شبیه‌سازی و اندازه‌گیری‌های انجام شده در این تحقیق می‌باشد. پارامترهای دوزیمتری این دانه با اولین دانه ساخته شده مدل NRCAM 01 و همچنین با دیگر دانه‌های پالادیم-۱۰۳ ساخته شده در دنیا مقایسه شد. نتایج نشان می‌دهند که دانه‌های NRCAM 01 و NRCAM 12 از نظر خصوصیات دوزیمتری، در حد استانداردهای جهانی می‌باشند.

شکل ۴-الف تغییرات تابع ناهمسانگردی را در آب، در فاصله‌های مختلف از مرکز دانه بر حسب زاویه نشان داده شده است. همانطور که از نمودارها برمی‌آید، برای همه فواصل، در زاویه صفر درجه ناهمسانگردی بیشترین مقدار را دارد و بتدریج با افزایش زاویه کاهش می‌یابد. در فاصله ۰/۲۵ سانتیمتر، ترکیب هندسی داخل دانه بر تابع ناهمسانگردی اثر زیادتری دارد. در فاصله‌های دورتر، سهم پرتوهای پراکنده در آب افزایش می‌یابد که اثر هندسی چشمه را از بین می‌برد. با اینکه پراکندگی در آب تمایل به نرم کردن اثر ساختار هندسی دانه دارد، این اثر کاملاً از بین نمی‌رود و در تابع ناهمسانگردی قابل مشاهده است [۲۶]. نمودارهای نشان داده شده در شکل ۴-ب تغییرات تابع ناهمسانگردی را در آب در زوایای مختلف، بر حسب فاصله از مرکز دانه نشان می‌دهد. در زوایای کوچکتر، ناهمسانگردی زیاد و وابستگی محسوسی به فاصله وجود دارد. این وابستگی به فاصله، در زوایای بزرگتر کاهش می‌یابد.

منابع

1. Bernard S, Vynckier S, Dosimetric study of a new polymer encapsulated palladium-103 seed, Phys Med Biol 2005; 50:1493-1504.
2. Reniers B, Vynckier S, Scalliet P, Dosimetric study of a new palladium seed, Applid Radiation and Isotopes 2002; 57:805-11.
3. Williamson J F, Coursey B M, DeWerd L A, Hanson W F, Nath R, Rivard M J, Recommendations of the American of Physicists in Medicine on Pd-103 interstitial source calibration and dosimetry: Implications for dose specification and prescription, Med Phys 2000; 27(4): 634-42.
4. Meigooni A S, Zhang H., Clark J R, Rachabaththula V, Koona R A, Dosimetric characteristics of the new RadioCoilTM ^{103}Pd Wire line source for use in permanent brachytherapy source, Med Phys 2004; 31(11): 3095-105.
5. Meigooni A S, Bharucha Z, Yoe-Sein M, Sowards K, Dosimetric characteristics of the Best double-wall ^{103}Pd brachytherapy source, Med Phys 2001; 28: 2568-75.

6. Cutrer L M, Hollywood N, Calif, Laser welded brachytherapy source and method of making the source, Patent No: U. S. P 5,997,463, 1999; 1-14.
7. Nath R, Anderson L L, Meli J A, Olch A J, Stitt J A, Williamson J F, Code of practice for brachytherapy physics: Report of the AAPM Radiation Therapy Committee Task Group No. 56, Med Phys 1997; 24(10), 1557-98.
8. Khan F M, The Physics of Radiation Therapy, Ed. William & Wilkins, 1995.
9. Rivard M J, Coursey B M, DeWerd L A, Hanson W F, Huq M S, Ibbott G S, Mitch M G, Nath R, Williamson J F, Update of AAPM Task Group No.43 Report: A revised AAPM protocol for brachytherapy dose calculations, Med Phys 2004; 31(3):633-74.
10. PTW, TL Detectors, D577.131.0/2: 1-9,
11. Anagnostopoulos G, Baltas D, Karaikos P, Sandilos P, Papagiannis P and Sakelliou L, Thermoluminescent dosimetry of the selectseed ^{125}I interstitial brachytherapy seed, Med Phys 2002; 29(5).
12. Patel N S, Chiu-Tsao S, Williamson J F, Fan P, Duckworth T, Shasha D and Harrison L B, Thermoluminescent dosimetry of the Symmetra ^{125}I model I25.S06 interstitial brachytherapy seed, Med Phys 2001; 28(8): 1761-69.
13. Meigooni A S, Yoe-Sein M M, Al-Otoom A Y, Sowards K T, Determination of the dosimetric characteristics of the intersource ^{125}I brachytherapy source, Appl Rad And Isotopes 2002; 56:589-99.
14. Peterson S W and Thomadson B, Measurement of the dosimetric constants for a new ^{103}Pd brachytherapy source, Med Phys 2002; 1: 110-9.
15. Ghonchenazi M G, Determination of dosimetry parameters of Pd-103 source using TLD dosimeters and Monte Carlo simulation method, M. Sc. thesis 1385; Isfahan University of Medical Science.
16. Meigooni A S, Recent developments in brachytherapy source dosimetry, Iran J Radiat Res 2004; 2(3): 97-105.
17. Briesmeister, Editor J F, MCNP-4C, A General Monte Carlo N Particle Transport Code System Version 4C, Los Alamos National Laboratory LA-13709-M, 2000.
18. Rivard M J, A discretized approach to determining TG-43 brachytherapy dosimetry parameters: case study using Monte Carlo calculation for the ^{103}Pd MED3633 source, Applied Radiation and Isotopes 2001; 55: 775-82.
19. Raisali G, Mokhles Gerami F, Khodadadi R, Piroozfar B, Determination of dosimetry parameters for low energy brachytherapy sources based upon TG43-U1 protocol using different MCNP tallies, J Nuclear Science and Technology 2006; 35:29-36.
20. Reniers B, Vynckier S, Scalliet P, Dosimetric study of the new InterSource 125 iodine seed, Med Phys 2001; 28, 2285-88.
21. Hubbell, J H, Seltzer, S M, Tables of X-Ray Attenuation Coefficients from 1 keV to 20 MeV for Elements Z=1 to 92 and 48 Additional Substances of Dosimetric Interest, Report NISTIR 5632, National Institute of standard and Technology, Gaithersburg, MD, 1995.

22. Rivard M J, Monte Carlo calculation of AAPM Task Group Report No.43 dosimetry parameters for the MED3631-A/M ^{125}I source, Med Phys 2001; 28(4):629-37.
23. Li Z, Palta J R, Fan J J, Monte Carlo calculation and experimental measurements of dosimetry parameters of a new ^{103}Pd source, Med Phys 2000; 27, 1108-12.
24. Meigooni A S, Dini Sh A, Awan Sh B, Dou K, Koona R A, Theoretical and experimental determination of dosimetric characterization for ADVANTAGETM Pd-103 brachytherapy source, Applied Radiation and Isotopes 2006; 64: 881-7.
25. Sowards K T, Monte Carlo dosimetric characterization of the IsoAid ADVANTAGETM ^{103}Pd brachytherapy source, Journal of Applied Clinical Medical Physics 2007; 8(2): 18-25.
26. Capote R, Mainegra E, Lopez E, Anisotropy function for low energy interstitial brachytherapy sources: an EGS4 Monte Carlo study, Phys Med Biol 46, 2001; 135-50.
27. Meigooni A S, Sowards K, Soldano M, Dosimetric characteristics of the Intersource $^{103}\text{palladium}$ brachytherapy source, Med Phys 2000; 27, 1091-9.
28. Daskalov G M, Williamson J F, Monte Carlo-aided dosimetry of the new Bebig IsoSeed[®] ^{103}Pd Interstitial Brachytherapy Seed, Med Phys 2001; 28(10): 2154-61.
29. Williamson J F, Coursey B M, DeWerd L A, Hanson W F, Nath R, Dosimetric prerequisites for routine clinical use of new low energy photon interstitial brachytherapy sources, Med Phys 1998; 25, 2269-70.