



محاسبه درصد خطای به وجود آمده در استفاده از فانتوم آب به جای بافت نرم برای توزیع چشمه براکی تراپی ^{103}Pd به روش مونتاژ کارلو

ام لیلا احمدی^۱، حسین توکلی انبران^{۲*}

چکیده

مقدمه: چشمه ^{103}Pd منبع کم انرژی می باشد که در براکی تراپی مورد استفاده قرار می گیرد. طبق توصیه های انجمن فیزیک پزشکی آمریکا تعیین پارامترهای دزیمتری چشمه های براکی تراپی قبل از کاربرد کلینیکی، از اهمیت ویژه ای برخوردار است. در این تحقیق پارامترهای دزیمتری چشمه مورد نظر با استفاده از فانتوم آب و بافت نرم محاسبه شده و نتایج با یکدیگر مقایسه شده اند. روش بررسی: پارامترهای دزیمتری طبق پروتکل TG-43U1 در اطراف چشمه ^{103}Pd در فانتوم آب با چگالی $1.0/998 \text{ gr/cm}^3$ و فانتوم بافت نرم با چگالی $1.0/4 \text{ gr/cm}^3$ در فواصل مختلف بر روی محور طولی و عرضی چشمه با استفاده از کد MCNP4C شبیه سازی و اختلاف نسبی بین این دو حالت با یکدیگر مقایسه شده است. نتایج: نتایج حاصل از شبیه سازی ها نشان می دهند پارامترهای دزیمتری تابع دز شعاعی و تابع ناهمسانگردی در استفاده از فانتوم آب به جای بافت نرم تا فاصله $1/5 \text{ cm}$ از چشمه مطابقت خوبی با یکدیگر دارند و با افزایش فاصله، اختلاف افزایش می یابد به طوری که در فاصله 6 cm از چشمه این اختلاف به 4% درصد می رسد. نتیجه گیری: نتایج حاصل از فانتوم بافت نرم در مقایسه با فانتوم آب حداکثر دارای اختلاف نسبی 4% درصدی در فاصله 6 cm از چشمه است، لذا می توان نتایج مربوط به فانتوم آب را با حداکثر خطای 4% درصدی در کاربردهای عملی به جای بافت نرم به کار بست و یا آن که با توجه به جداول به دست آمده در این پژوهش مقدار اختلاف به دست آمده در هر فاصله را برای استفاده در فانتوم بافت نرم اصلاح نمود.

واژه های کلیدی: براکی تراپی، فانتوم آب، فانتوم بافت نرم، کد MCNP4C، ^{103}Pd

۱- کارشناس ارشد، فیزیک هسته ای، دانشکده فیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود

۲- استادیار، گروه فیزیک، دانشکده فیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود

* (نویسنده مسئول): تلفن: ۰۲۳۳۳۳۹۵۲۷۰، پست الکترونیکی: tavakoli-anbaran@shahroodut.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۸/۲۱

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۳/۱۸

مقدمه

براکی‌تراپی نوع خاصی از پرتو درمانی است که در آن چشمه رادیواکتیو با دقت، درون یا اطراف ناحیه تحت درمان قرار می‌گیرد، که از چشمه‌های گسیلنده گاما(۱) و یا گسیلنده بتا(۲) برای این منظور استفاده می‌گردد. چشمه کم انرژی ^{103}Pd به طور گسترده در درمان تومورهای پروستات، سینه و گردن مورد استفاده قرار می‌گیرد. از مزایای استفاده از این چشمه داشتن نیمه عمر کوتاه (۱۶/۹۹ روز) و سازگار بودن فلز پالادیم با بافت‌های بیولوژیکی بوده، لذا در آب و مایع‌های بیولوژیکی حل نمی‌شود و دارای خطر پیش‌بینی نشده کمتری است. همچنین چون در فاصله کمی از چشمه، دز به سرعت افت می‌کند، بنابراین با آهنگ دز مناسب می‌توان به بازده بالایی برای از بین بردن سلول‌های سرطانی دست یافت(۳،۴).

برای نتیجه‌گیری کلینیکی مطلوب باید دز رسیده به جرم تومور بیشترین مقدار بوده در حالی که کمترین مقدار به حجم اطراف آن برسد. به دلیل گرایان دز بالا نزدیک چشمه و سیگنال‌های پایین در فاصله‌های زیاد دزیمتری تجربی در براکی‌تراپی پیچیده می‌باشد. یکی از تکنیک‌هایی که به طور گسترده برای حل این مشکل مورد استفاده قرار می‌گیرد استفاده از شبیه‌سازی مونت کارلو می‌باشد(۵). محاسبه توزیع دز در فاصله‌های کوچک و همچنین اعتبارسنجی نتایج تجربی می‌تواند به وسیله کد قدرتمند MCNP انجام گیرد.

در سال ۱۹۹۵ انجمن فیزیک پزشکی آمریکا گروه TG-43 پروتکلی برای محاسبه دز در اطراف چشمه‌های براکی‌تراپی منتشر کرده و در سال ۲۰۰۴ تحت عنوان TG-43U1 آن را به روز رسانی کرده است(۶). همچنین در سال ۲۰۰۷ ضمیمه این پروتکل منتشر شده که در آن علاوه بر معرفی چندین چشمه جدید گسیلنده فوتون کم انرژی، اطلاعات اضافی در مورد برخی از سوالات به وجود آمده پس از انتشار گزارش TG-43U1 و روش‌های جدید برای فرمالیسم محاسبه دز

معرفی شده است که با وجود آن فرمول‌بندی محاسبه دز، تا حد زیادی همان است که در گزارش TG-43U1 آورده شده است(۷). این پروتکل شامل کاربرد مونت کارلو در شبیه‌سازی، راهنمایی برای دزیمتری مونت کارلو، توصیه‌هایی برای شبیه‌سازی و اعتبارسنجی محاسبات می‌باشد که در محیط آب اطراف چشمه انجام می‌شود(۶).

از آنجا که بدن انسان از بافت‌های مختلف با چگالی‌های متفاوت تشکیل شده است بنابراین استفاده از آب به جای بافت واقعی می‌تواند یکی از منابع خطا برای تعیین دقیق پارامترهای دزیمتری اطراف چشمه‌های براکی‌تراپی به شمار آید. از این رو در این تحقیق به بررسی فانتوم آب به جای فانتوم بافت نرم پرداخته و با مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی، درصد خطای حاصل را محاسبه کرده‌ایم.

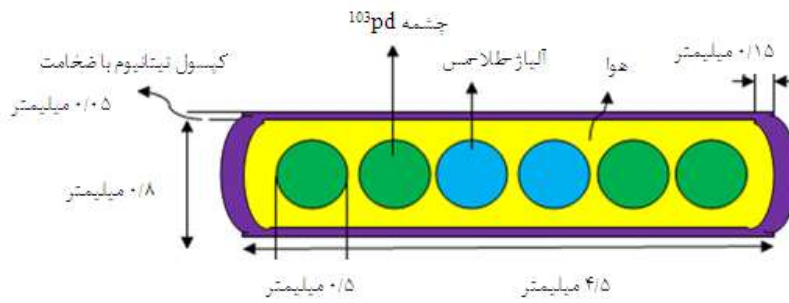
در مراحل انجام شبیه‌سازی، از کد MCNP نسخه 4C استفاده شده است(۸).

روش بررسی

مشخصات چشمه ^{103}Pd مدل MED3633:

با در نظر گرفتن پارامترهای مختلف از جمله، ضخامت کپسول و محل قرار گرفتن کره‌های رادیواکتیو، چشمه ^{103}Pd به مدل‌های مختلفی تقسیم بندی می‌شود. مدل MED3633 یکی از مدل‌هایی است که مورد تأیید انجمن فیزیک پزشکی آمریکا می‌باشد(۹).

همان‌طور که در شکل(۱) مشاهده می‌شود، چشمه از شش‌گویی، از جنس پلی‌استیرن که قطر هر یک ۰/۵ mm می‌باشد تشکیل شده است. دو گوی وسط از ترکیبات آلیاژ طلا و مس به ترتیب دارای درصد وزنی (۰/۸۰٪ و ۰/۲۰٪) می‌باشند. کپسول مشاهده شده، استوانه‌ای از جنس تیتانیوم به طول ۴/۵ mm با قطر خارجی ۰/۸ و قطر داخلی ۰/۷ mm می‌باشد. ضخامت سطح جانبی استوانه ۰/۰۵ mm و انتهای آن ۰/۱۵ mm می‌باشد(۹،۱۰).



شکل ۱: هندسه چشمه ^{103}Pd مدل MED3633 [۹]

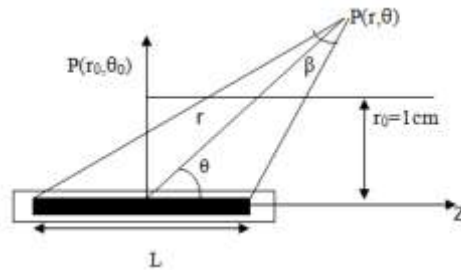
پارامترهای دزیمتری طبق پروتکل TG-43U1:

کاربردهای کلینیکی چشمه باید براساس توصیه‌های محاسبه دز باشد. در سال ۲۰۰۴ انجمن فیزیک پزشکی آمریکا تحت عنوان گروه TG-43U1 پروتکلی برای محاسبه دز در اطراف چشمه‌های براکی‌تراپی منتشر کرده است. در این پروتکل تعدادی از کمیت‌های جدید از قبیل تابع ناهمسانگردی $F(r, \theta)$ ، ثابت نرخ دز Λ ، تابع هندسی $G(r, \theta)$ ، تابع دز شعاعی $g(r)$ و شدت گرمای هوا S_k معرفی شده است. محاسبه نرخ دز در پروتکل TG-43U1 به صورت زیر است.

فرمول (۱)

$$\dot{D}(r, \theta) = S_k \Lambda \left[\frac{G(r, \theta)}{G(r_0, \theta_0)} \right] g(r) F(r, \theta)$$

مطابق آنچه که در شکل (۲) مشاهده می‌شود r ، فاصله نقطه دلخواه تا مرکز تقارن چشمه بر حسب cm ، β زاویه بین ابتدا و انتهای چشمه برحسب رادیان، L طول موثر چشمه بر حسب cm و همچنین زاویه θ ، زاویه نسبت به محور طولی چشمه بر حسب رادیان می‌باشد. $P(r_0, \theta_0)$ نقطه مرجع محاسبات یعنی در زاویه 90° درجه و فاصله 1 cm بر روی محور عرضی چشمه می‌باشد (۶، ۹، ۱۰).



شکل ۲: مختصات چشمه براکی‌تراپی برای محاسبه پارامترهای دزیمتری طبق پروتکل TG-43U1 [۶].

در رابطه دز جذبی در اطراف چشمه، هریک از پارامترها به

صورت زیر محاسبه می‌شوند.

فرمول (۵)

$$S_k = K_s (d)^2$$

واحد شدت گرمای هوا برابر است با $1 \text{ Gy m}^2 \text{ h}^{-1}$ با μ که اصطلاحاً به آن U می‌گویند.

$$G(r, \theta) = \begin{cases} 1/r^2 & \text{چشمه نقطه‌ای} \\ \beta/Lr \sin \theta & \text{چشمه خطی} \end{cases} \quad \text{فرمول (۲)}$$

فرمول (۳)

$$g(r) = \frac{D(r, \theta_0) G(r_0, \theta_0)}{D(r_0, \theta_0) G(r, \theta_0)}$$

فرمول (۴)

$$F(r, \theta) = \frac{D(r, \theta) G(r, \theta_0)}{D(r, \theta_0) G(r, \theta)}$$

فرمول (۶)

$$\Lambda = \frac{D(r_0, \theta_0)}{S_k}$$

واحد ثابت نرخ دز $1 \text{ U} - 1 \text{ cGy h}^{-1}$ می‌باشد (۶).

تابع آرایش هندسی تنها به هسته فعال بستگی داشته و به رادیونوکلئید و کپسول بستگی ندارد، برای محاسبات این تابع چگالی جرمی همه مواد و ترکیبات داخلی چشمه را صفر در نظر گرفته و شار در اطراف چشمه که خلأ می‌باشد با استفاده از تالی F4 کد MCNP4C محاسبه کرده‌ایم.

برای محاسبه شدت گرمای هوا با توجه به پروتکل TG-43U1 ابتدا نرخ گرمای هوا را محاسبه می‌کنیم، برای این منظور کره‌هایی از هوا به شعاع ۰/۵ سانتی‌متر، به طوریکه محیط اطراف آن خلأ باشد، از فاصله ۲۰ تا ۱۰۰ سانتی‌متری بر روی محور عرضی چشمه انتخاب کرده و با استفاده از تالی F6 کد MCNP4C، با ضرب نرخ گرمای هوای به دست آمده در مجذور فاصله، شدت گرمای هوا محاسبه شد. در نهایت با رسم عرض از مبدأ خطی که از نمودار شدت گرمای هوا بر حسب فاصله می‌گذرد، شدت گرمای چشمه تعیین شده است (۵).

جدول ۱: ترکیب اتمی و درصد وزنی عناصر تشکیل‌دهنده بافت نرم با چگالی $111/04 \text{ gr/cm}^3$

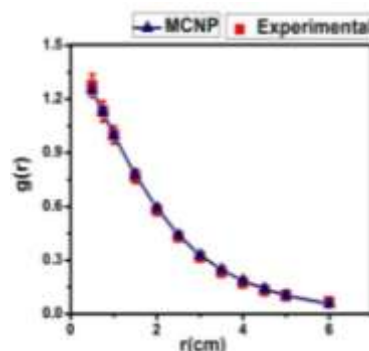
نام عنصر	درصد وزنی بافت	نام عنصر	درصد وزنی بافت
هیدروژن	۱۰/۴۵۴	گوگرد	۰/۲۰۴
کربن	۲۲/۶۳	کلر	۰/۱۳۳
نیتروژن	۲/۴۹	پتاسیم	۰/۲۰۸
اکسیژن	۶۳/۵۲	کلسیم	۰/۰۲۴
سدیم	۰/۱۱۲	آهن	۰/۰۰۵
منیزیم	۰/۰۱۳	روی	۰/۰۰۳
سیلیسیم	۰/۰۳	روبیدیم	۰/۰۰۱
فسفر	۰/۱۳۴	زیرکونیم	۰/۰۰۱

نتایج

نتایج شبیه‌سازی در فانتوم آب:

ناهمسان‌گردی در فواصل ۱، ۲، ۳، ۴ و ۵ سانتی‌متری در زوایای صفر تا ۹۰ درجه با فواصل ۱۰ درجه در نمودارهای زیر رسم شده و با نتایج تجربی اندازه‌گیری شده توسط Wallace and Fan مقایسه شده‌اند (۹).

بعد از انجام شبیه‌سازی‌های لازم نتایج مربوط به تابع دز شعاعی در فواصل ۰/۵، ۰/۷۵، ۱، ۱/۵، ۲، ۲/۵، ۳، ۳/۵، ۴، ۴/۵، ۵ و ۶ سانتی‌متری بر روی محور عرضی چشمه و تابع



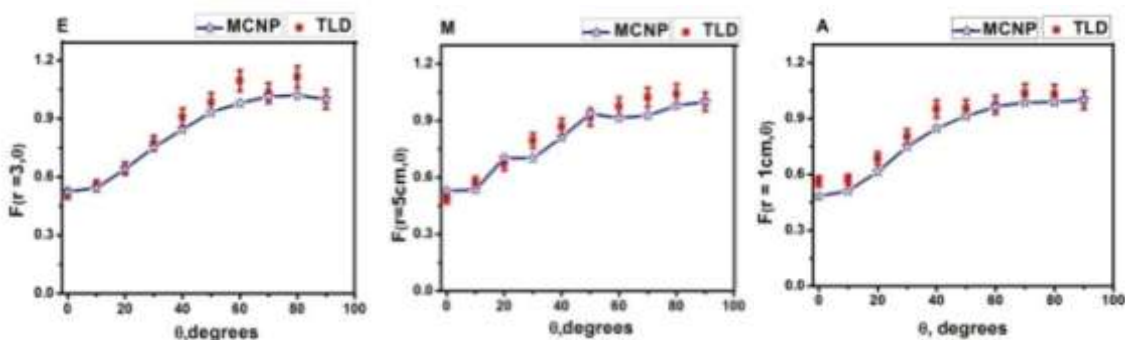
نمودار ۱: نمودار تابع دز شعاعی در فانتوم آب همراه با مقادیر اندازه‌گیری شده در تجربه برای چشمه براکی‌تراپی ^{103}Pd مدل MED3633

جدول ۲: مقادیر تابع دز شعاعی اندازه‌گیری شده و محاسبه شده برای چشمه براکی تراپی ^{103}Pd مدل MED363

r(cm)	MCNP در این کار		Wallace & Fan در
	تجربه با خطای ۵٪ [۹]		
۰/۵	۱/۲۵۰ ±	۰/۰۰۰۹	۱/۲۷۵
۰/۷۵	۱/۱۳۰ ±	۰/۰۰۲۹	۱/۱۳۲
۱/۰	۱/۰۰۰ ±	۰/۰۰۰۶	۱/۰۰۰
۱/۵	۰/۷۷۶ ±	۰/۰۰۱۴	۰/۷۶۹
۲/۰	۰/۵۹۱ ±	۰/۰۰۳۰	۰/۵۸۰
۲/۵	۰/۴۴۰ ±	۰/۰۰۵۹	۰/۴۳۱
۳/۰	۰/۳۲۸ ±	۰/۰۰۱۱	۰/۳۱۸
۳/۵	۰/۲۴۸ ±	۰/۰۰۲۰	۰/۲۳۱
۴/۰	۰/۱۸۵ ±	۰/۰۰۲۴	۰/۱۷۴
۴/۵	۰/۱۳۹ ±	۰/۰۰۵۶	۰/۱۳۲
۵/۰	۰/۱۰۴ ±	۰/۰۰۹۰	۰/۱۰۲

جدول ۳: تابع ناهمسانگردی برای چشمه براکی تراپی پالادیم-۱۰۳ مدل MED3633 با استفاده از کد MCNP در فانتوم آب در این کار

۵ cm	۴ cm	۳ cm	۲ cm	۱ cm	
۰/۵۲۹ ± ۰/۰۱۳۴	۰/۵۳۲ ± ۰/۰۱۳۰	۰/۵۲۴ ± ۰/۰۰۴۰	۰/۴۹۷ ± ۰/۰۰۲۲	۰/۴۸۲ ± ۰/۰۰۰۴	صفر درجه
۰/۵۳۵ ± ۰/۰۱۳۱	۰/۵۳۵ ± ۰/۰۱۲۸	۰/۵۴۳ ± ۰/۰۰۶۶	۰/۵۳۸ ± ۰/۰۰۲۴	۰/۵۱۲ ± ۰/۰۰۰۵	۱۰ درجه
۰/۷۰۳ ± ۰/۰۱۳۰	۰/۶۴۵ ± ۰/۰۱۱۳	۰/۶۴۰ ± ۰/۰۰۶۲	۰/۶۲۸ ± ۰/۰۰۲۸	۰/۶۱۴ ± ۰/۰۰۰۵	۲۰ درجه
۰/۷۰۲ ± ۰/۰۱۲۵	۰/۷۳۵ ± ۰/۰۱۲۴	۰/۷۵۳ ± ۰/۰۰۴۶	۰/۷۳۸ ± ۰/۰۰۳۲	۰/۷۴۹ ± ۰/۰۰۰۵	۳۰ درجه
۰/۸۱۱ ± ۰/۰۱۲۴	۰/۸۵۲ ± ۰/۰۱۰۳	۰/۸۴۴ ± ۰/۰۰۰۵	۰/۸۴۸ ± ۰/۰۰۳۷	۰/۸۴۸ ± ۰/۰۰۰۶	۴۰ درجه
۰/۹۳۶ ± ۰/۰۱۳۷	۰/۹۲۰ ± ۰/۰۱۲۳	۰/۹۳۳ ± ۰/۰۰۵۷	۰/۹۰۹ ± ۰/۰۰۳۹	۰/۹۱۳ ± ۰/۰۰۰۶	۵۰ درجه
۰/۹۱۴ ± ۰/۰۱۳۵	۰/۹۴۰ ± ۰/۰۱۲۷	۰/۹۷۹ ± ۰/۰۰۴۸	۰/۹۶۷ ± ۰/۰۰۴۲	۰/۹۶۴ ± ۰/۰۰۰۶	۶۰ درجه
۰/۹۲۷ ± ۰/۰۱۳۴	۰/۹۸۳ ± ۰/۰۲۵۴	۱/۰۱۵ ± ۰/۰۰۵۸	۰/۹۹۱ ± ۰/۰۰۴۳	۰/۹۸۷ ± ۰/۰۰۰۷	۷۰ درجه
۰/۹۷۹ ± ۰/۰۱۳۷	۱/۰۰۹ ± ۰/۰۱۲۷	۱/۰۲۰ ± ۰/۰۰۵۹	۱/۰۰۱ ± ۰/۰۰۴۳	۰/۹۸۹ ± ۰/۰۰۰۷	۸۰ درجه
۱/۰۰۰ ± ۰/۰۱۴۰	۱/۰۰۰ ± ۰/۰۱۲۸	۱/۰۰۰ ± ۰/۰۰۴۸	۱/۰۰۰ ± ۰/۰۰۴۴	۱/۰۰۰ ± ۰/۰۰۵۹	۹۰ درجه



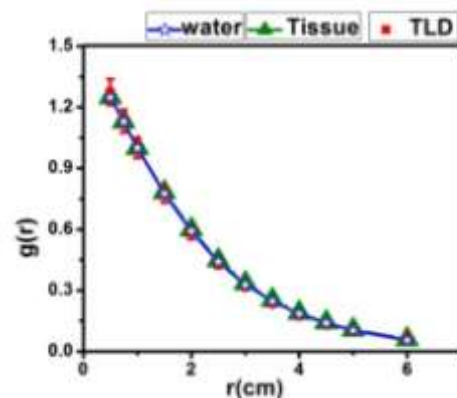
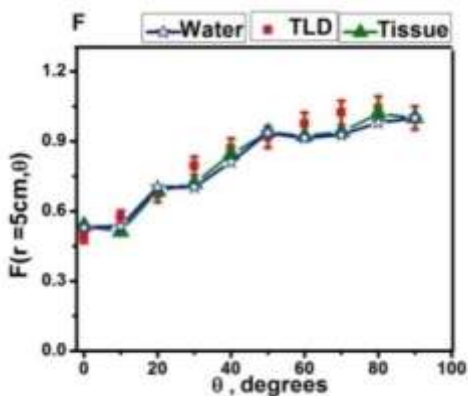
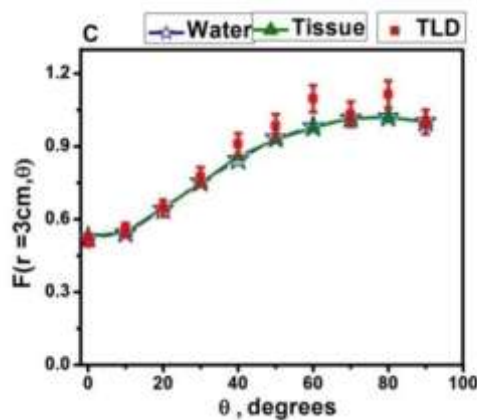
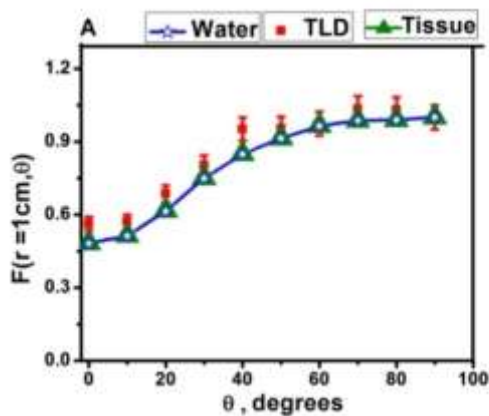
نمودار ۲: نمودار تابع ناهمسانگردی اندازه‌گیری شده در تجربه توسط Wallace&Fan و محاسبه شده با استفاده از کد MCNP برای چشمه براکی تراپی ^{103}Pd مدل MED3633 در فانتوم آب در این کار [۹]

نتایج شبیه‌سازی در فانتوم بافت نرم:

همانند آنچه که برای فانتوم آب انجام داده‌ایم شبیه‌سازی‌های لازم برای فانتوم بافت نرم با عناصر تشکیل دهنده بافت نرم (جدول ۱) انجام داده و نتایج آن در نمودارهای زیر نشان داده شده است (۱۲).

جدول ۴: تابع دز شعاعی محاسبه شده در فانتوم بافت نرم برای چشمه براکی‌تراپی ¹⁰³Pd مدل MED3633

r(cm)	MCNP در فانتوم بافت نرم
۰/۵	۱/۲۵۰ ± ۰/۰۰۰۹
۰/۷۵	۱/۱۳۰ ± ۰/۰۰۲۹
۱/۰	۱/۰۰۰ ± ۰/۰۰۰۷
۱/۵	۰/۷۸۲ ± ۰/۰۰۱۴
۲/۰	۰/۵۹۹ ± ۰/۰۰۳۰
۲/۵	۰/۴۴۷ ± ۰/۰۰۵۸
۳/۰	۰/۳۳۴ ± ۰/۰۰۱۹
۳/۵	۰/۲۵۳ ± ۰/۰۰۱۵
۴/۰	۰/۱۸۹ ± ۰/۰۰۳۳
۴/۵	۰/۱۴۲ ± ۰/۰۰۵۵
۵/۰	۰/۱۰۶ ± ۰/۰۰۸۷
۶/۰	۰/۰۵۸ ± ۰/۰۰۷۲



نمودار ۴: نمودارهای A, C, F تابع ناهمسانگردی اندازه‌گیری شده در تجربه به همراه مقادیر محاسبه شده با استفاده از کد MCNP در فانتوم بافت نرم و آب برای چشمه براکی‌تراپی ¹⁰³Pd مدل MED3633

نمودار ۳: نمودار تابع دز شعاعی در فانتوم بافت نرم همراه با مقادیر اندازه‌گیری شده در تجربه در آب و شبیه‌سازی شده در فانتوم آب برای چشمه براکی‌تراپی ¹⁰³Pd مدل MED3633

جدول ۵: تابع ناهمسانگردی در فانتوم بافت نرم با استفاده از کد MCNP برای چشمه براکی تراپی ^{103}Pd مدل MED3633

۵ cm	۴ cm	۳ cm	۲ cm	۱ cm	
0.1537 ± 0.0130	0.1534 ± 0.0032	0.1518 ± 0.0046	0.1499 ± 0.0022	0.1483 ± 0.0004	صفر درجه
0.1512 ± 0.0124	0.1539 ± 0.0030	0.1546 ± 0.0046	0.1536 ± 0.0023	0.1514 ± 0.0005	۱۰ درجه
0.1686 ± 0.0168	0.1668 ± 0.0029	0.1646 ± 0.0059	0.1632 ± 0.0028	0.1616 ± 0.0005	۲۰ درجه
0.1718 ± 0.0120	0.1746 ± 0.0035	0.1747 ± 0.0043	0.1737 ± 0.0039	0.1750 ± 0.0005	۳۰ درجه
0.1843 ± 0.0120	0.1852 ± 0.0037	0.1851 ± 0.0043	0.1849 ± 0.0037	0.1849 ± 0.0006	۴۰ درجه
0.1938 ± 0.0131	0.1933 ± 0.0033	0.1929 ± 0.0055	0.1906 ± 0.0039	0.1913 ± 0.0006	۵۰ درجه
0.1922 ± 0.0129	0.1948 ± 0.0040	0.1979 ± 0.0046	0.1965 ± 0.0042	0.1965 ± 0.0006	۶۰ درجه
1.017 ± 0.0140	1.017 ± 0.0043	1.012 ± 0.0057	1.004 ± 0.0043	1.007 ± 0.0007	۷۰ درجه
1.018 ± 0.0134	1.021 ± 0.0043	1.019 ± 0.0059	1.001 ± 0.0043	0.989 ± 0.0007	۸۰ درجه
1.000 ± 0.0135	1.000 ± 0.0042	1.000 ± 0.0045	1.000 ± 0.0043	1.000 ± 0.0007	۹۰ درجه

در هریک از نمودارهای ۴ روند تابع ناهمسانگردی حاصل از شبیه‌سازی در فانتوم بافت نرم با نتایج حاصل از شبیه‌سازی در فانتوم آب و تجربه در آب همخوانی دارد. خطای گزارش شده در اندازه‌گیری تجربی توسط Wallace & Fan (۹)، ۵ درصد گزارش شده و میزان آن در شبیه‌سازی‌ها تا فاصله ۳ cm کمتر از ۲ درصد و تا فاصله ۵ cm کمتر از ۴ درصد می‌باشد. برای نشان دادن بهتر تغییرات این تابع در فانتوم آب نسبت به فانتوم بافت نرم کمیات

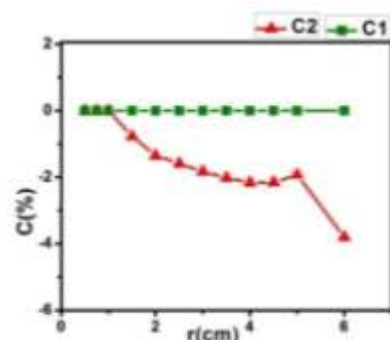
$$D_2 = \frac{F(r,\theta)_W - F(r,\theta)_T}{F(r,\theta)_W} \times 100 \quad D_1 = \frac{F(r,\theta)_W - F(r,\theta)_W}{F(r,\theta)_W} \times 100$$

را معرفی می‌کنیم که در آن D_1 و D_2 اختلاف نسبی مقادیر اندازه‌گیری شده در فانتوم آب و بافت نرم نسبت به آب بر حسب درصد بیان می‌کند. در نمودارهای شکل (۸) اختلاف نسبی مقادیر اندازه‌گیری شده در فانتوم آب و بافت نرم نشان داده شده است.

مقایسه نتایج حاصل از فانتوم بافت نرم و آب: همانطور که در نمودار ۳ مشاهده می‌شود روند تابع دز شعاعی در فانتوم بافت نرم با مقادیر حاصل از تجربه در آب و شبیه‌سازی در فانتوم آب همخوانی دارد. خطای محاسبات در تجربه ۵ درصد گزارش شده است که میزان آن با استفاده از شبیه‌سازی تا فاصله ۱ cm کمتر از ۲ درصد و تا فاصله ۶ cm کمتر از ۴ درصد می‌باشد. برای نشان دادن اختلاف بهتر بین مقادیر تابع دز شعاعی به دست آمده در فانتوم آب نسبت به فانتوم بافت نرم، کمیات

$$C_2 = \frac{g(r)_W - g(r)_T}{g(r)_W} \times 100 \quad \text{و} \quad C_1 = \frac{g(r)_W - g(r)_W}{g(r)_W} \times 100$$

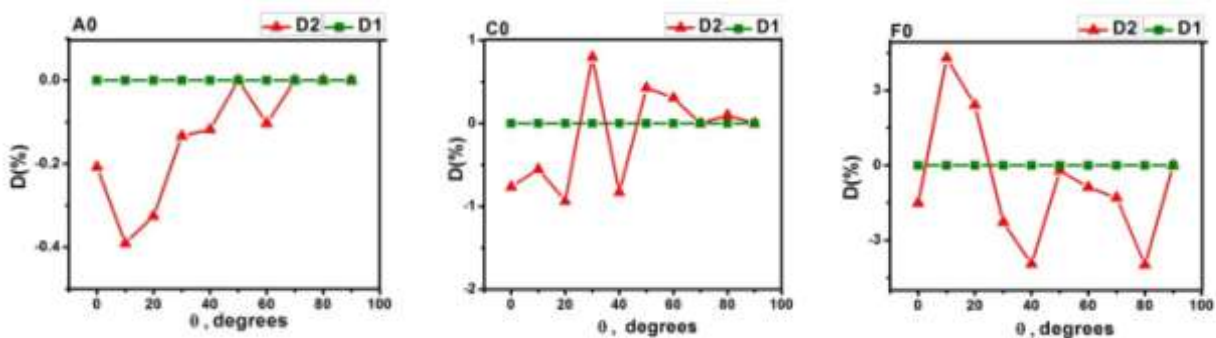
را معرفی کرده که در آن C_1 اختلاف نسبی تابع دز شعاعی در فانتوم آب نسبت به آب بر حسب درصد و C_2 اختلاف نسبی تابع دز شعاعی در فانتوم بافت نرم نسبت به فانتوم آب بر حسب درصد می‌باشد. در نمودار ۳ اختلاف نسبی بین این دو حالت مشاهده می‌شود.



شکل ۷: نمودار اختلاف نسبی تابع دز شعاعی محاسبه شده در فانتوم آب نسبت به فانتوم بافت نرم برای چشمه براکی تراپی ^{103}Pd مدل MED3633

جدول ۶: اختلاف نسبی تابع دز شعاعی بافت نسبت به آب بر حسب درصد

r(cm)	$C_2 = \frac{g(r)_R - g(r)_T}{g(r)_W} \times 100$
۰/۵	٪ ۰/۰۰ ± ۰/۰۰۰۸
۰/۷۵	٪ ۰/۰۰ ± ۰/۰۰۳۲
۱/۰	٪ ۰/۰۰ ± ۰/۰۰۰۹
۱/۵	٪ ۰/۷۷۲ ± ۰/۰۰۳۳
۲/۰	٪ ۱/۳۵ ± ۰/۰۱۲۱
۲/۵	٪ ۱/۵۲ ± ۰/۰۴۲۷
۳/۰	٪ ۱/۸۳ ± ۰/۰۲۰۲
۳/۵	٪ ۲/۰۲ ± ۰/۰۴۰۹
۴/۰	٪ ۲/۱۶ ± ۰/۱۳۸۵
۴/۵	٪ ۲/۱۶ ± ۰/۴۰۶۰
۵/۰	٪ ۱/۹۲ ± ۱/۱۵۸۰
۶/۰	٪ ۳/۵۷ ± ۷/۲۸۱



نمودار ۶: نمودارهای A₀, C₀, F₀ به ترتیب اختلاف نسبی تابع ناهمسانگردی در فانتوم آب نسبت به بافت نرم در فاصله‌های ۱، ۳ و ۵ سانتی‌متری از چشمه براکی‌تراپی ¹⁰³Pd مدل MED3633

جدول ۷: اختلاف نسبی تابع ناهمسانگردی بافت نرم نسبت به آب بر حسب درصد $D_2 = \frac{F(r,\theta)_W - F(r,\theta)_T}{F(r,\theta)_W} \times 100$

Δ cm	۴ cm	۳ cm	۲ cm	۱ cm	
٪ ۱/۵۱ ± ۰/۰۶۶۷	٪ ۰/۳۸ ± ۰/۰۴۷۵	٪ ۰/۷۶ ± ۰/۰۲۲۲	٪ ۰/۰۴ ± ۰/۰۱۲۶	٪ ۰/۲۱ ± ۰/۰۰۲۴	صفر درجه
٪ ۴/۳۰ ± ۰/۰۶۲۹	٪ ۰/۷۵ ± ۰/۰۴۶۲	٪ ۰/۵۵ ± ۰/۰۲۷۳	٪ ۰/۳۷ ± ۰/۰۱۱۵	٪ ۰/۳۹ ± ۰/۰۰۲۷	۱۰ درجه
٪ ۲/۴۲ ± ۰/۰۴۳۳	٪ ۳/۵۷ ± ۰/۰۲۸۹	٪ ۰/۹۴ ± ۰/۰۲۰۹	٪ ۰/۶۴ ± ۰/۰۱۰۰	٪ ۰/۳۳ ± ۰/۰۰۱۹	۲۰ درجه
٪ ۲/۳۰ ± ۰/۰۳۵۲	٪ ۱/۵۰ ± ۰/۰۲۴۱	٪ ۰/۸۰ ± ۰/۰۱۱۷	٪ ۰/۱۴ ± ۰/۰۰۹۳	٪ ۰/۱۳ ± ۰/۰۰۱۳	۳۰ درجه
٪ ۳/۹۵ ± ۰/۰۲۶۳	٪ ۰/۰۰ ± ۰/۰۱۲۲	٪ ۰/۸۳ ± ۰/۰۰۶۰	٪ ۰/۱۲ ± ۰/۰۰۷۳	٪ ۰/۱۲ ± ۰/۰۰۱۲	۴۰ درجه
٪ ۰/۲۱ ± ۰/۰۲۱۶	٪ ۱/۴۱ ± ۰/۰۱۵۲	٪ ۰/۴۳ ± ۰/۰۰۹۰	٪ ۰/۳۳ ± ۰/۰۰۶۶	٪ ۰/۰۰ ± ۰/۰۰۱۰	۵۰ درجه
٪ ۰/۸۷ ± ۰/۰۲۲۴	٪ ۰/۸۵ ± ۰/۰۱۵۲	٪ ۰/۳۱ ± ۰/۰۰۶۹	٪ ۰/۲۰ ± ۰/۰۰۶۴	٪ ۰/۱۰ ± ۰/۰۰۰۹	۶۰ درجه
٪ ۴/۸۵ ± ۰/۰۲۲۷	٪ ۳/۴۶ ± ۰/۰۲۷۵	٪ ۰/۳۰ ± ۰/۰۰۷۹	٪ ۱/۳۱ ± ۰/۰۰۶۲	٪ ۲/۰۳ ± ۰/۰۰۱۰	۷۰ درجه
٪ ۴/۹۶ ± ۰/۰۲۰۰	٪ ۱/۹۰ ± ۰/۰۱۳۲	٪ ۱/۸۶ ± ۰/۰۰۸۰	٪ ۰/۰۲ ± ۰/۰۰۶۱	٪ ۰/۰۰ ± ۰/۰۰۱۰	۸۰ درجه
٪ ۰/۰۰ ± ۰/۰۱۹۴	٪ ۰/۰۰ ± ۰/۰۱۳۶	٪ ۰/۰۰ ± ۰/۰۰۶۴	٪ ۰/۰۰ ± ۰/۰۰۶۲	٪ ۰/۰۰ ± ۰/۰۰۵۹	۹۰ درجه

ثابت نرخ دز: با مقادیر به دست آمده توسط دیگران در جدول (۸) مقایسه بعد از محاسبه دز جذبی در نقطه مرجع و شدت گرمای هوا مقدار این پارامتر با استفاده از فرمول (۶) محاسبه شده و شده است.

جدول ۸: مقادیر ثابت نرخ دز محاسبه شده و اندازه‌گیری شده با استفاده از روش‌های مختلف برای چشمه براکی‌تراپی ^{103}Pd

روش	محیط	Λ (cGyh ⁻¹ IU ⁻¹)
(Wallace and Fan) دزیمتری ترمولومینسانس [۹]	آب	$0.680 \pm 5\%$
(Li et al) دزیمتری دیودی [۱۳]	آب	$0.693 \pm 5/7\%$
(Li et al) شبیه‌سازی مونت کارلو [۱۳]	آب	$0.677 \pm 2\%$
MCNP4C در این کار	آب	$0.682 \pm 2\%$
MCNP4C در این کار	بافت نرم	$0.693 \pm 2\%$

بحث

همچنین نتایج مربوط به این تابع در فانتوم بافت نرم با استفاده از کد MCNP4C همخوانی خوبی با نتایج مربوط به مقادیر تجربی اندازه‌گیری شده توسط Wallace & Fan در تجربه Li و همکاران (۱۳) و Rivard و همکاران (۱۴) با استفاده از کد MCNP و شبیه‌سازی مونت کارلو دارد.

خطاهای اندازه‌گیری در تجربه ۵ درصد گزارش شده است که میزان آن در فواصل نزدیک به چشمه به دلیل پیچیدگی‌های محاسبات نسبت به فواصل دورتر بیشتر است (۹). تفاوت نسبی تابع دز شعاعی به دست آمده در فانتوم بافت نرم نسبت به فانتوم آب تا فاصله ۱ cm کمتر از ۲ درصد و تا فاصله ۶ cm کمتر از ۴ درصد می‌باشد. در نمودارهای مربوط به تابع دز شعاعی در فانتوم آب و بافت نرم همان‌طور که نشان داده شده است به علت تقارن چشمه بر روی محور عرضی، تابع دز شعاعی بیانی از بیشترین مقدار دز رسیده نسبت به نقطه اندازه‌گیری دارد. در واقع در این راستا می‌توان به بهره‌برایی از میزان دز دریافتی دست یافت. همان‌طور که نمودار مربوط به این تابع نشان می‌دهد هر چه فاصله از مرکز تقارن چشمه بیشتر شود، می‌توان افت دز در اثر پدیده‌های تضعیف فوتونی در محیطی که بیشتر در اثر پدیده فوتوالکتریک و پراکندگی کامپتون می‌باشد

برای تعیین روند کلی تابع دز شعاعی طبق آن چه که در پروتکل TG-43U1 بیان شده است بعد از برازش آن، تابع مورد نظر از یک تابع چند جمله‌ای پیروی می‌کند که این تابع برای فانتوم آب برابر با:

$$g(r) = 1.50645 - 0.049356 r - 0.05408 r^2 + 0.05223 r^3 - 0.0093 r^4 + 5.43081e^{-4} r^5 \quad (y)$$

است که R-Square آن بسیار نزدیک به واحد و حدود ۰/۹۹۹۹۶ می‌باشد. تابع دز شعاعی مربوط به فانتوم بافت نرم نیز از تابع زیر پیروی می‌کند.

$$g(r) = 1.50874 - 0.50758 r - 0.03325 r^2 + 0.04316 r^3 - 0.00773 r^4 + 4.4794e^{-4} r^5 \quad (\lambda)$$

R-Square، حاصل از این برازش ۰/۹۹۹۹۵ می‌باشد. مقایسه نتایج به دست آمده مربوط به تابع دز شعاعی در فانتوم آب با استفاده از کد MCNP4C (با خطای کمتر از ۴ درصد) و مقادیر اندازه‌گیری شده این تابع با استفاده از این کد توسط Li و همکاران (۱۳) و محاسبات مونت کارلو توسط Rivard و همکاران (۱۴) تطابق خوبی را با هم نشان می‌دهند که این مقایسه نسبت به مقادیر تجربی اندازه گرفته شده توسط Wallace & Fan (با خطای ۵ درصد) (۹)، می‌باشد.

مقادیر محاسبه شده این تابع با مقادیر اندازه گرفته شده در تجربه با خطای ۵ درصد توسط Wallace & Fan (۹) و همچنین با مقادیر به دست آمده با استفاده از کد MCNP توسط و همکاران Li (۱۳) و محاسبات مونت کارلو توسط Rivard و همکاران (۱۴) که در محاسباتمان نیز زیر ۴ درصد بوده است تطابق خوبی را با هم نشان می‌دهند.

در نمودارهای ۶ بیشینه اختلاف نسبی در استفاده از فانتوم بافت نرم نسبت به فانتوم آب، در زوایای زیر ۲۰ درجه مشاهده می‌گردد که در نتیجه دو عامل می‌باشد: (۱) با نزدیک شدن به چشمه و فاصله از خط تقارن آن، سبب نزدیک شدن به ناحیه‌ای از چشمه می‌شود که درصد یکنواختی پرتوهای گسیلی از آن کاهش یافته است. (۲) تفاوت در چگالی الکترونی بافت نرم و آب، که در نهایت موجب تفاوت در دز جذبی در این دو محیط می‌شود. در محاسبات ثابت نرخ دز در فانتوم آب و بافت نرم از رابطه (۶) استفاده نموده‌ایم. مقدار این پارامتر در فانتوم آب $0.682 \pm 2\%$ می‌باشد که با مقایسه با مقادیر به دست آمده توسط Li و همکاران با استفاده از دزیمتری دیودی $0.57 \pm 0.693 (13)$ ، مقادیر اندازه‌گیری شده با استفاده از کد MCNP توسط Li و همکاران ($0.677 \pm 2\%$) (۱۳) مقادیر محاسبه شده توسط Rivard با استفاده از شبیه‌سازی مونت کارلو ($0.672 \pm 5\%$) (۱۴) و اندازه‌گیری در تجربه توسط Wallace & Fan ($0.680 \pm 5\%$) تطابق خوبی دارد (۹). از طرفی هر یک از پارامترهای شدت گرمای هوا و آهنگ دز نقطه مرجع در اندازه‌گیری ثابت نرخ دز موثر است، بنابراین در محاسبه این پارامتر در فانتوم بافت نرم آهنگ دز جذب شده در نقطه مرجع تغییر کرده و مقدار این پارامتر در فانتوم بافت نرم $0.693 \pm 2\%$ به دست می‌آید که نسبت به مقدار محاسبه شده در فانتوم آب بزرگتر است و علت آن به بیشتر بودن چگالی الکترونی بافت نرم نسبت به آب بستگی دارد که باعث افزایش دز جذبی بافت نرم در نقطه مرجع شده است.

مشاهده کرد. با نفوذ در عمق از شدت فوتون‌ها کم شده که منجر به کم شدن تعداد برخوردها می‌شود از این رو تعداد انتقال‌های انرژی به ماده توسط الکترون‌ها کم شده و دز جذبی کاهش می‌یابد و بدین ترتیب در فاصله‌های دورتر، انرژی کمتری به جا می‌گذارد. از آن جا که چشمه براکی‌تراپی ^{103}Pd ، چشمه‌ای با فوتون‌های کم انرژی می‌باشد، عمق نفوذ آن بالا نیست و انرژی آن در فاصله‌های نزدیکتری نسبت به چشمه افت می‌کند بنابراین با قرار دادن چشمه در نزدیکی تومور می‌توان به بازده بالایی برای کشتن سلول‌های سرطانی بدون این که کمترین آسیب به بافت‌های سالم اطراف آن بزند دست یافت. در نمودار ۵، اختلاف نسبی استفاده از فانتوم بافت نرم نسبت به فانتوم آب به چگالی الکترونی محیط و فاصله از مرکز چشمه بستگی دارد، به طوری که با افزایش فاصله مقدار C از صفر تا ۴ درصد در فاصله ۶ cm تغییر می‌کند. به این ترتیب می‌توان پی به اثرگذاری نوع ماده (آب یا بافت نرم) در فواصل دورتر از چشمه رسید.

تابع ناهمسان‌گردی، بیانی از تغییرات دز به دلیل توزیع ماده رادیو اکتیویته بر روی کره‌های چشمه، اثرات خود جذبی درون چشمه، انحنای کپسول، ضخامت ماده تشکیل دهنده آن و محیط اطراف چشمه می‌باشد. این تابع به صورت کسر نرمالیزه شده دز جذبی به زاویه مرجع نسبت به کسر نرمالیزه شده تابع هندسی در همان نقطه می‌باشد، به عبارتی میزان شار خروجی از چشمه با وجود ماده را نسبت به حالتی که ماده وجود ندارد می‌سنجد. بنابراین زمانی که ماده حضور نداشته باشد انتظار می‌رود این تابع برابر ۱ شود. از نمودارهای رسم شده برای تابع ناهمسان‌گردی در فانتوم آب و فانتوم بافت نرم مشاهده می‌شود با نزدیک شدن به زاویه ۹۰ درجه به علت تقارن چشمه، پرتوهای بیشتری به نقاط مورد نظر می‌رسند و همچنین ضخامت کپسول نسبت به محور طولی کمتر بوده در نتیجه میزان شار رسیده به نقاط مورد نظر بیشتر می‌شود و در نهایت دز جذبی افزایش می‌یابد.

استفاده کرده‌ایم و طبق پرتکل TG-43U1 شبیه‌سازی‌ها در محیط آب انجام شد.

در نهایت می‌توان گفت در این پژوهش با مقایسه فانتوم آب با فانتوم بافت نرم و به دست آوردن اختلاف نسبی نتایج در این دو وضعیت می‌توان از فانتوم آب به جای بافت نرم با خطای زیر ۴ درصد استفاده نمود. این خطا با افزایش فاصله از چشمه افزایش می‌یابد به طوری که در فاصله ۶ cm به ۴ درصد می‌رسد. لذا می‌توان نتایج حاصل از آب را با اصلاح ۴ درصدی به جای بافت نرم مورد استفاده قرار داد. همچنین مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها با نتایج تجربی که در مرجع (۶) آورده شده است نشان دهنده تطابق بسیار خوبی بین نتایج شبیه‌سازی‌های انجام شده با واقعیت دارد، بنابراین می‌توان در کاربردهای عملی از نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها بهره جست تا به بیشترین میزان اثر بخشی درمان برای بیماران مبتلا به تومورهای بدخیم دست یافت.

با توجه به نتایج حاصل از شبیه‌سازی و مطالب ذکر شده به علت نزدیکی چگالی بافت نرم نسبت به آب اختلاف نسبی پارامترهای تابع دز شعاعی و تابع ناهمسان‌گردی بافت نسبت به آب تقریباً ۴ درصد می‌باشد که نشان دهنده تطابق خوب نتایج حاصل از فانتوم آب و فانتوم بافت نرم با خطای ۴ درصدی دارد (۶).

نتیجه‌گیری

با توجه به این‌که اجزای بدن از بافت‌های مختلف با درصد عناصر و ترکیبات متفاوت تشکیل شده است، برای رسیدن به درمان با نتیجه مطلوب آگاهی از تفاوت دز رسیده به اجزای مختلف بدن از اهمیت زیادی برخوردار است. لذا قبل از انجام درمان کلینیکی باید از میزان بیشترین دز رسیده به بافت آسیب دیده به طوری که بافت‌های سالم مجاور کمترین دز را دریافت کنند به علت اهمیت ویژه آن، مطلع شد. برای دستیابی به این هدف در این مطالعه از کد شبیه‌سازی مونت کارلو MCNP4C

References:

- 1- Alallak NA, Sarhan SS. *Factors Affecting Gamma Ray Transmission*. Jordan J Physics 2012; 5(2): 77-88.
- 2- Shahrabi M, Tavakoli-Anbaran H. *Calculating dosimetry parameters in brachytherapy using the continuous beta spectrum of Sm-153 in the Monte Carlo simulation approach*. European Physical J Plus 2015; 130(2): 1-8.
- 3- Williamson JF, Thomadson BR, Nath R. *Brachytherapy physics*. Madison, Wisconsin: Med Physics Publ; 1995.
- 4- Charles J. *Applications of Monte Carlo Methodes in Biolog medicine and other fields of science*. Intech; 2011.
- 5- Briesmesmeister JF. *MCNP-A general Monte Carlo N-particle transport code, Version 4C*. Los Alamos National laboratory. Los Alamos, Nm: 2000.
- 6- Nath R, Anderson LL, Luxton G, Weaver KA, Williamson JF, Meigoni AS. *Dosimetry of interstitial brachytherapy sources: recommendations of the AAPM Radiation Therapy Committee Task Group No.43*. American AssoPhysicists in Med Med Phys 1995; 1(2): 4.

- 7- Rivard MJ, Butler WM, DeWerd LA, Huq MS, Ibbott GS, Meigooni AS, et al. *Supplement to the 2004 update of the AAPM Task Group No. 43 Report*. Med Phys 2007; 34(6): 2187-2205.
- 8- Rivard MJ. *A discretized approach to determining TG-43 brachytherapy dosimetry parameters: case study using Monte Carlo calculations for the MED3633 source*. Appl Radiat Isot 2001; 55(6): 775-82.
- 9- Wallace RE, Fan JJ. *Dosimetric characterization of new design ^{103}Pd brachytherapy source*. Med, Phys 1999; 26(11): 2456-70.
- 10- Li Z, Pallta RJ, Fan JJ. *Monte carlo calculation experimental measurements of dosimetry parameters of a new ^{103}Pd source*. Med, Phys. 2000; 27(5): 1108-13.
- 11- Boone JM. *Glandular breast dose for monoenergetic and highfrequency Xray beams: Monte Carlo assessment*. Radiology 1999; 213(1): 23-37.
- 12- Jarrett JM. *Experimental method development for direct dosimetry of permanent interstitial prostatebrachytherapy implants*. Southeastern Louisiana 2005.
- 13- Zuofeng Li, Jatinder R, Pallta, JJ Fan. *Monte Carlo calculation experimental measurements of dosimetry parameters of a new ^{103}Pd source*. Med. Phys 2000; 27: 1108.
- 14- Rivard MJ. *A discretized approach to determining T-43 brachytherapy dosimetry parameters: case study using Monte Carlo calculations for the MED3633 ^{103}Pd source*. Applide Radiation and Isotopes 2001; 55: 775-82.

Calculating Error Percentage in Using Water Phantom Instead of Soft Tissue Concerning ^{103}Pd Brachytherapy Source Distribution via Monte Carlo Method

Ahmadi OL(MSc)¹, Tavakoli-Anbaran H(PhD)^{*2}

^{1,2} *Department of Physics, Faculty of Physics, Shahrood University of Tecnology, Shahrood, Iran*

Received: 8 May 2014

Accepted: 12 Nov 2015

Abstract

Introduction: ^{103}Pd is a low energy source, which is used in brachytherapy. According to the standards of American Association of Physicists in Medicine, dosimetric parameters determination of brachytherapy sources before the clinical application was considered significantly important. Therefore, the present study aimed to compare the dosimetric parameters of the target source using the water phantom and soft tissue.

Methods: According to the TG-43U1 protocol, the dosimetric parameters were compared around the ^{103}Pd source in regard with water phantom with the density of 0.998 gr/cm^3 and the soft tissue with the density of 1.04 gr/cm^3 on the longitudinal and transverse axes using the MCNP4C code and the relative differences were compared between the both conditions.

Results: The simulation results indicated that the dosimetric parameters depended on the radial dose function and the anisotropy function in the application of the water phantom instead of soft tissue up to a distance of 1.5 cm, between which a good consistency was observed. With increasing the distance, the difference increased, so as within 6 cm from the source, this difference increased to 4%.

Conclusions: The results of the soft tissue phantom compared with those of the water phantom indicated 4% relative difference at a distance of 6 cm from the source. Therefore, the results of the water phantom with a maximum error of 4% can be used in practical applications instead of soft tissue. Moreover, the amount of differences obtained in each distance regarding using the soft tissue phantom could be corrected.

Keywords: Brachytherapy; Water Phantom; Soft Tissue Phantom; MCNP Code; ^{103}Pd

This paper should be cited as:

Ahmadi OL, Tavakoli Anbaran H. *Calculating error percentage in using water phantom instead of soft tissue concerning ^{103}pd brachytherapy source distribution via monte carlo method.* J Shahid Sadoughi Univ Med Sci 2015; 23(9): 806-18.

****Corresponding author: Tel: +982332395270 , Email: tavakoli-anbaran@shahroodut.ac.ir***