



محاسبه‌ی توزیع دز در براکی‌تراپی نوترونی با چشمه‌ی ^{252}Cf از طریق شبیه‌سازی مونت کارلو و مقایسه با داده‌های تجربی

غلامحسین ایزدی وصفی^{۱*}، محمدمهدی فیروزآبادی^۱، ایرج جباری^۲
۱. گروه فیزیک، دانشگاه بیرجند، صندوق پستی: ۹۷۱۷۵-۶۱۵، بیرجند - ایران
۲. گروه مهندسی هسته‌ای، دانشگاه اصفهان، صندوق پستی: ۷۳۴۴۱-۸۱۷۴۶، اصفهان - ایران

چکیده: شناخت دقیق توزیع دز در اطراف چشمه‌های براکی‌تراپی به منظور ایجاد طرح‌های درمانی مناسب برای درمان سرطان ضروری است. در این پژوهش، پارامترهای دزیمتری چشمه‌ی بالینی ^{252}Cf براساس دستور کار TG-۴۳ و بهره‌گیری از تالی‌های مختلف (F4، F6 و *F8) محاسبه‌ی دز در کد MCNPX، مقدار دز در زاویه‌ها و فاصله‌های مختلف از مرکز چشمه محاسبه و با داده‌های تجربی و شبیه‌سازی دیگران مقایسه شد. با مقایسه‌ی نتایج این پژوهش با داده‌های تجربی و مشاهده‌ی انطباق خوب آن‌ها مشخص شد که مقدار دز چشمه‌ی بالینی ^{252}Cf در راستای محور طولی چشمه دارای بیشینه مقدار خود است که با توجه به وابستگی زاویه‌ای مقدار دز به تابع هندسی در دستور کار TG-۴۳، گستردگی بیش‌تر توزیع مواد پرتوزا در این راستا نسبت به راستاهای دیگر و در نتیجه بیش‌تر بودن مقدار شار نوترون در این راستا، دلیل این ازدیاد است. هم‌چنین نتایج تالی‌های F4 و F6 در محاسبات دزیمتری نوترون از نتایج تالی *F8 دقیق‌تر و سرعت محاسبات بیش‌تر است. محاسبات دزیمتری در این پژوهش، مشخصه‌یابی دزیمتری مقدماتی چشمه‌ی بالینی ^{252}Cf به منظور طراحی و کاربرد در طرح‌های درمانی در کشور را فراهم نموده است.

کلیدواژه‌ها: براکی‌تراپی، نوترون، ^{252}Cf ، دزیمتری، مونت کارلو

Calculation of Dose Distribution in Neutron Brachytherapy Using ^{252}Cf Source Through the Monte Carlo Simulation and Comparison with Experimental Data

Gh. Izadi Vasafi^{*1}, M.M. Firoozabadi¹, I. Jabari²

1. Department of Physics, University of Birjand, P.O.Box: 615-97175, Birjand - Iran
2. Department of Nuclear Engineering, Esfahan University, P.O.Box: 81746-73441, Esfahan - Iran

Abstract: Detailed recognition of dose distribution around the brachytherapy sources in order to create appropriate plans for treatment of cancer is very important. In this study, with calculation of the dosimetric parameters of clinical ^{252}Cf source based on TG-43U1 protocol and utilizing different tallies of dose calculation in MCNPX code [F4 (Fluence Tally), F6 (Kerma Tally) and *F8 (Dose Tally)], the dose rate at different directions and distances from the source center has been determined and compared with other experimental and simulation results. By comparing the results of this study with the experimental measurements and observing the good adaptation of the results, it was observed that the dose rate of clinical ^{252}Cf source has its largest value at the direction of longitudinal axis of the source, which is the reason for more expansion of radioactive material distribution in this direction, in comparison with other directions and consequently higher neutron flux in this direction, based on the angular dependence of dose rate to geometric function according to TG-43 protocol. It was also found that the F4 and F6 tally results in neutron dosimetry calculations are more accurate than the *F8 tally results. The dosimetry calculations performed in this study has provided a preliminary dosimetry characterization of ^{252}Cf neutron sources for usage in treatment plans in the country.

Keywords: Brachytherapy, Neutron, ^{252}Cf , Dosimetry, MCNP

*Email: izadi.physics86@yahoo.com



۱. مقدمه

تند امکان‌پذیر است و میزان افزایش اکسیژن کاهش یافته است، که نوترون‌ها را بسیار مؤثرتر از فوتون‌ها برای درمان سلول‌های هیپوکسی و تومورهای مقاوم در برابر تابش می‌سازد [۵، ۶].

در سال‌های اخیر براکی‌تراپی نوترونی با استفاده از چشمه‌ی ^{252}Cf ، به میزان زیادی برای درمان تومورهای بدخیم مورد استفاده قرار گرفته است. انجام براکی‌تراپی با دقت بالا به منظور حصول حداکثر و حداقل مقدار دز به ترتیب در تومور و بافت‌های سالم آن نیاز به تعیین دقیق توزیع دز در اطراف این چشمه‌ها دارد. بنابراین ارایه‌ی روش‌هایی دقیق برای محاسبه‌ی توزیع دقیق دز در اطراف چشمه‌ها از اهمیت ویژه‌ی برخوردار است [۲، ۵، ۷]. انجمن فیزیک پزشکی آمریکا (AAPM) دستورالعملی تحت عنوان TG-۴۳ برای محاسبه‌ی پارامترهای دزیمتری و توزیع دز در اطراف چشمه‌های براکی‌تراپی منتشر کرده است (۱۹۹۵). این دستورالعمل هنگام انجام آزمون‌های براکی‌تراپی به عنوان فایل داده‌ها در اختیار سیستم‌های طراحی درمان قرار می‌گیرد [۸، ۹]. دستورالعمل TG-۴۳ دارای معایب متعددی بود و دستورالعمل اصلاح شده‌ی آن تحت عنوان TG-۴۳U۱ در سال ۲۰۰۴ منتشر شد [۱۰]. براساس این دستورالعمل، توزیع دز در اطراف چشمه‌های براکی‌تراپی با استفاده از پارامترهای دزیمتری و به کمک روش‌های اندازه‌گیری تجربی و شبیه‌سازی در فانتوم یکنواخت آب برآورد می‌شود. مقدار دز نوترون در فاصله‌ی r و در زاویه‌ی قطبی θ از یک چشمه‌ی استوانه‌ای (شکل ۱) براساس این دستورالعمل توسط رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود

$$\dot{D}(r, \theta) = S_K \Lambda g(r) F(r, \theta) \left[\frac{G(r, \theta)}{G(r_0, \theta_0)} \right] \quad (1)$$

که در آن، پارامتر S_K شدت کرمای هوای چشمه، Λ ثابت مقدار دز، $G(r, \theta)$ تابع هندسی، $g(r)$ تابع دز شعاعی و $F(r, \theta)$ تابع ناهمسان‌گردی است. r_0 و θ_0 مختصات نقطه‌ی مرجع در فاصله‌ی ۱ سانتی‌متری ($r_0 = 1\text{cm}$) عمود بر محور طولی چشمه ($\theta_0 = 90^\circ$) نشان داده شده در شکل ۱ است.

براکتی‌تراپی یکی از روش‌های پرتودرمانی برای درمان سرطان است که در آن منابع پرتوزای پوشش‌دار در فاصله‌ی اندکی از تومور به صورت درون-بافتی، درون-حفره‌ای و یا بر روی سطح تومور قرار می‌گیرند. منابع تابش پرتو در براکی‌تراپی به سه دسته تقسیم می‌شوند. ۱) چشمه‌های فوتونی که بر پایه‌ی تابش پرتوهای گاما و ایکس حاصل از گیراندازی الکترون و تبدیلات داخلی استوار است مانند ^{137}Cs ، ^{192}Ir ، ^{198}Au ، ^{125}I و ^{103}Pd ؛ ۲) چشمه‌های الکترونی که بر پایه‌ی تابش الکترونی ناشی از واپاشی بتا استوارند مانند ^{90}Sr ، ^{90}Y ؛ ۳) چشمه‌های نوترونی که مانند ^{252}Cf بر پایه‌ی تابش نوترون حاصل از شکافت خودبه‌خود استوارند [۱، ۲].

کالیفرنیم-۲۵۲ (^{252}Cf) یک رادیونوکلید مصنوعی است که به طور چشمگیری در تحقیقات، صنعت و پزشکی به عنوان یک چشمه‌ی نوترونی مورد استفاده قرار می‌گیرد. واپاشی این رادیونوکلید از راه گسیل ذرات آلفا و شکافت خودبه‌خود است. این رادیونوکلید در اثر شکافت خودبه‌خود به ۸۴۶ پاره‌ی متفاوت شکافته می‌شود که از این پاره‌ها حدود ۶۹۳ مورد نوترون-گسیل و بقیه گاما-گسیل هستند [۳]. تابش نسبتاً زیاد نوترون به همراه نیم-عمر نسبتاً طولانی در مقایسه با دیگر رادیونوکلیدهای شکافت‌پذیر خودبه‌خود، ^{252}Cf را به عنوان مناسب‌ترین گزینه برای انتخاب چشمه در براکی‌تراپی نوترونی قرار داده است. مشخصات واپاشی رادیونوکلید ^{252}Cf در جدول ۱ درج شده است [۴].

از اوایل دهه‌ی ۱۹۷۰، ^{252}Cf به عنوان چشمه‌ی نوترون در براکی‌تراپی مورد استفاده قرار گرفت. براکی‌تراپی نوترونی بسیار مؤثرتر از براکی‌تراپی فوتونی برای درمان تومورهای مقاوم در برابر تابش هم‌چون تومورهای حجیم، ملانوما و گلیوما است [۵]. در دانشگاه کنتاکی نتایج تحسین برانگیزی در درمان تومورهای بدخیم زنانه با استفاده از چشمه‌ی ^{252}Cf به دست آمده است. بدون شک موفقیت‌های کلینیکی استفاده از چشمه‌ی ^{252}Cf ناشی از مزیت‌های درمان تومور با نوترون‌های تند است. این مزیت‌ها عبارت‌اند از: تأثیرگذاری زیست‌شناسی بالاتر که با نوترون‌های

جدول ۱. مشخصات واپاشی رادیونوکلید ^{252}Cf

نیم-عمر (سال)	فعالیت پرتوزایی	درصد گسیل ذرات آلفا	درصد شکافت خودبه‌خود	نوترون‌های گسیل شده	فوتون‌های گسیل شده	انرژی متوسط نوترون‌ها	انرژی متوسط پرتوهای گاما
۲،۶۴۵	5363 Ci g^{-1}	۹۷	۳	$2.32 \times 10^6 \text{ S}^{-1} \mu\text{g}^{-1}$	$1.322 \times 10^7 \text{ S}^{-1} \mu\text{g}^{-1}$	2.13 MeV	0.8 MeV

که در آن، β (برحسب رادیان) زاویه‌ی ایجاد شده از تقاطع دو خط گذرنده از ابتدا و انتهای طول هسته‌ی فعال چشمه و نقطه‌ی مورد نظر است.

تابع هندسی در زوایای $\theta = 0^\circ$ (با استفاده از قاعده‌ی هویپیتال) و $\theta = 90^\circ$ توسط رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود

$$G(r, \theta) = \begin{cases} \frac{\beta}{(r^2 - \frac{L^2}{4})} & \theta = 0 \\ \frac{2 \arctan(\frac{L}{2r})}{[Lr]} & \theta = 90 \end{cases} \quad (5)$$

به طور کلی تابع هندسی $G(r, \theta)$ ، از رابطه‌ی زیر تبعیت می‌کند،

$$G(r, \theta) = \frac{\arctan(\frac{L}{2r \sin \theta} + \cot \theta) + \arctan(\frac{L}{2r \sin \theta} - \cot \theta)}{Lr \sin \theta} \quad (6)$$

تابع دز شعاعی $g(r)$ ، بیان‌گر آفت مقدار دز نوترون در امتداد محور عمود بر چشمه است که به مقدار جذب و پراکندگی در محیط اطراف چشمه (آب) وابسته است و چنین تعریف می‌شود

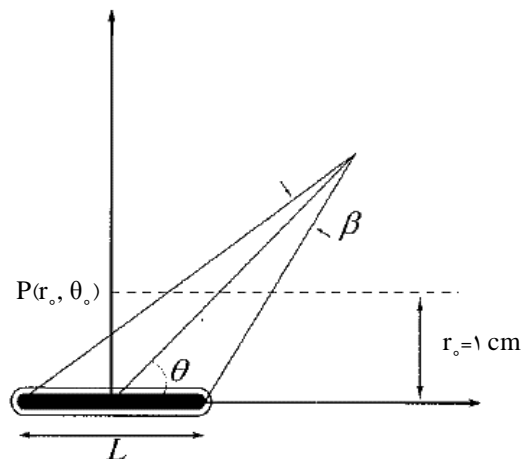
$$g(r) = \frac{\dot{D}(r, \theta_0) G(r_0, \theta_0)}{G(r, \theta_0) \dot{D}(r_0, \theta_0)} \quad (7)$$

به منظور محاسبات عملی و مقایسه، تابع دز شعاعی معمولاً مطابق رابطه‌ی زیر به صورت یک تابع چند جمله‌ای درجه پنجم تعریف می‌شود،

$$g(r) = a_0 + a_1 r + a_2 r^2 + a_3 r^3 + a_4 r^4 + a_5 r^5 \quad (8)$$

تابع ناهمسان‌گردی $F(r, \theta)$ ، تغییرات زاویه‌ای مقدار دز نوترون ناشی از اثرات جذب و پراکندگی در محیط آبی اطراف چشمه را نشان می‌دهد و چنین تعریف می‌شود [۱۰]

$$F(r, \theta) = \frac{\dot{D}(r, \theta) G(r, \theta_0)}{G(r, \theta) \dot{D}(r, \theta_0)} \quad (9)$$



شکل ۱. هندسه‌ی در نظر گرفته شده برای محاسبات دزیمتری در براکی‌تراپی.

پارامتر شدت کرمای هوا، شدت چشمه‌ی به کار رفته در براکی‌تراپی را نشان می‌دهد و برحسب آهنگ کرمای هوا در نقطه‌ای روی محور عمود بر چشمه در فضای آزاد و در فاصله‌ی d از مرکز چشمه توسط رابطه‌ی زیر بیان می‌شود [۱۱]

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

در این رابطه، پارامتر d فاصله‌ی درجه‌بندی (کالیبراسیون) است که معمولاً ۱ متر فرض می‌شود. یکای S_K ، $\mu\text{Gy m}^2\text{h}^{-1}$ یا $\text{cGy cm}^2\text{h}^{-1}$ است که به آن U می‌گویند.

پارامتر ثابت مقدار دز به صورت مقدار دز نوترون در محیط آب در فاصله‌ی ۱ سانتی‌متری از مرکز چشمه روی محور عمود بر چشمه به شدت کرمای هوا تعریف می‌شود.

$$\Lambda = \frac{\dot{D}(r_0, \theta_0)}{S_K} \quad (3)$$

تابع $G(r, \theta)$ ، اثرات هندسه‌ی چشمه در مقدار دز را نشان می‌دهد و وابسته به توزیع مواد پرتوزا در چشمه است. به عبارتی این تابع وابستگی فضایی و زاویه‌ای مقدار شار نوترون در اطراف چشمه را نشان می‌دهد. وابستگی شار نوترون برای چشمه‌های نقطه‌ای به صورت $\frac{1}{r^2}$ و برای چشمه‌های خطی با توزیع یکنواخت و طول فعال L به صورت زیر بیان می‌شود

$$\frac{\beta}{(Lr \sin \theta)} \quad (4)$$

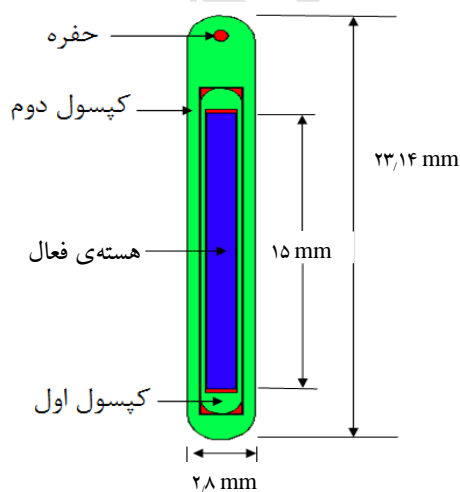


داخلی و خارجی از طریق جوش‌هایی در انتها، به یکدیگر متصل شده‌اند [۱۰]. هندسه‌ی چشمه شبیه‌سازی شده در این پژوهش، در شکل ۲ نشان داده شده است.

۲.۲ شبیه‌سازی مونت کارلو

شبیه‌سازی مونت کارلو پیش‌بینی دقیقی از توزیع دز ارایه می‌نماید. برای محاسبه‌ی توزیع دز در اطراف چشمه‌ی ^{252}Cf در ابتدا پارامترهای دزیمتری چشمه براساس دستورالعمل TG-۴۳ و استفاده از کد محاسباتی MCNPX [۱۳] و بهره‌گیری از تالی‌های F_4 ، F_6 و F_8 محاسبه شد. برای این منظور نخست پارامترهای S_K و مقدار $\dot{D}(r, \theta)$ توسط کد MCNPX، و پارامتر $G(r, \theta)$ توسط روابط تحلیلی ۵ و ۶ محاسبه و سپس پارامترهای Δ ، $g(r)$ و $F(r, \theta)$ به ترتیب با استفاده از این پارامترها منطبق بر رابطه‌های تعریف‌کننده‌ی آنها (رابطه‌های ۳، ۷ و ۹) محاسبه شدند. در نهایت با جای‌گذاری مقادیر این پارامترها در معادله‌ی ۱، مقدار دز در راستاها و فاصله‌های مختلف از مرکز چشمه محاسبه شد.

در شبیه‌سازی انجام شده، چشمه‌ی ^{252}Cf در مرکز یک فانتوم کروی از آب به چگالی 0.998 g cm^{-3} و شعاع ۱۵ سانتی‌متر قرار گرفته است. مقدار دز $\dot{D}(r, \theta)$ با استفاده از تالی‌های F_4 (تالی محاسبه‌ی شار)، F_6 (تالی محاسبه کرما) و F_8 (تالی محاسبه دز) در زاویه‌های 0° ، 30° ، 45° ، 60° و 90° درجه نسبت به محور چشمه در فاصله‌های ۰.۵ تا ۱۰ سانتی‌متری از مرکز چشمه درون حجم‌هایی از آب محصور به مخروط‌هایی با زاویه‌ی رأس ۱ درجه و پوسته‌هایی کروی به ضخامت ۰.۱ سانتی‌متر محاسبه شده است. شکل ۳ نمای جانبی هندسه شبیه‌سازی شده در این پژوهش را نشان می‌دهد.



شکل ۲. هندسه‌ی چشمه‌ی میله‌ای ^{252}Cf شبیه‌سازی شده.

در پژوهشی که در سال ۱۳۸۴ توسط رئیس‌علی و همکارانش در سازمان انرژی اتمی ایران انجام شد به تعیین ویژگی‌های دزیمتری چشمه‌ی براکی‌تراپی کم‌انرژی ^{125}I براساس دستورالعمل TG-۴۳U₁ و بهره‌گیری از شبیه‌سازی به روش مونت کارلو پرداخته شد. در آن پژوهش از روش‌های مختلف محاسبه‌ی دز با کد MCNP (تالی‌های F_4 ، F_6 و F_8) برای محاسبه‌ی پارامترهای دزیمتری منطبق بر دستورالعمل TG-۴۳U₁ استفاده شد. یافته‌های پژوهش مذکور با محاسبات انجام شده در مقاله‌ها و گزارش‌های علمی مقایسه شد. نتایج مقایسه نشان داد که در اکثر موارد نتایج هر سه روش با نتایج مرجع مقایسه در توافق خوبی است. هم‌چنین نتایج به دست آمده از تالی‌های F_4 و F_6 ، حدود ۲۰ برابر سریع‌تر از تالی F_8 است که این نتیجه را می‌توان در محاسبات متعدد لازم در طراحی‌های چشمه‌های براکی‌تراپی فوتونی مورد استفاده قرار داد [۱۲].

در دستورالعمل TG-۴۳U₁ توصیه شده است که قبل از استفاده‌ی بالینی از چشمه‌های براکی‌تراپی جدید پارامترهای دزیمتری آنها محاسبه و با پارامترهای دزیمتری سایر چشمه‌های تجاری مقایسه شود، در صورت هم‌سویی نتایج می‌توان چشمه‌ی براکی‌تراپی جدید را به عنوان چشمه‌ی مناسب معرفی نمود. هدف از انجام این پژوهش محاسبه‌ی مقدار دز در اطراف چشمه‌ی ^{252}Cf در راستاها و فاصله‌های مختلف مطابق با دستورالعمل TG-۴۳U₁ و استفاده از روش شبیه‌سازی مونت کارلو (کد MCNPX) و بهره‌گیری از روش‌های مختلف محاسبه‌ی دز در کد MCNP (تالی‌های F_4 ، F_6 و F_8) و مقایسه‌ی مقدار دز با داده‌های تجربی و نتایج شبیه‌سازی سایر پژوهش‌گران است.

۲. روش کار

۱.۲ مشخصات چشمه

در این پژوهش چشمه‌ی میله‌ای ^{252}Cf موجود در آزمایشگاه ملی اوک ریج شبیه‌سازی شد. هسته‌ی مرکزی این چشمه از یک میکروگرم کالیفرنیم-۲۵۲ حجیم‌سازی شده با فلز پالادیم تشکیل شده است و به شکل استوانه‌ای به قطر ۱/۲۳ و ارتفاع ۱۵ میلی‌متر در آمده است. این هسته درون یک کیپسول استوانه‌ای شکل به قطر ۱/۷۵، ارتفاع داخلی ۱۵/۵ و ارتفاع خارجی ۱۷/۷۸ میلی‌متر، ساخته شده از آلایژی از فلزات پلاتین (۹۰٪) و ایریدیم (۱۰٪) قرار گرفته است. این کیپسول نیز توسط کیپسول استوانه‌ای شکل دیگری به قطر ۲/۸، ارتفاع داخلی ۱۷/۸۲ و ارتفاع خارجی ۲۳/۱۴ میلی‌متر و از همان جنس آلایژ کیپسول اول احاطه شده است. کیپسول‌های

F₈* در هر سلول به مقدار جرم همان سلول محاسبه شد. شدت کرمای هوا با قرار دادن چشمه‌ی ²⁵²Cf در مرکز یک فانتوم کروی از هوا به قطر ۵ متر و ضرب نرخ کرمای هوای محاسبه شده با استفاده از تالی‌های مذکور در فاصله‌ی ۱۰۰ سانتی متری از چشمه، در مجذور این فاصله محاسبه شد. ترکیب و چگالی هوا از جدول XIV پیشنهاد شده توسط دستورالعمل TG-۴۳ انتخاب شده است.

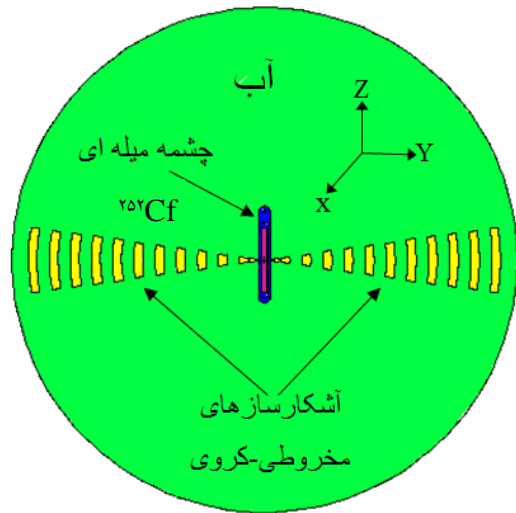
تعداد ذرات ترابرد شده 5×10^7 نوترون در نظر گرفته شد. طیف انرژی نوترونی چشمه‌ی ²⁵²Cf به صورت طیف شکافت وات، در کد MCNP به وسیله‌ی رابطه‌ی زیر تعریف می‌شود

$$N(E) = \exp(-1.025 \sinh \left[\frac{2.92E}{\dots} \right]) \quad (10)$$

خطای محاسبات شبیه‌سازی کم‌تر از ۳٪ است.

۳. نتایج و بحث

مقادیر پارامترهای دزیمتری محاسبه شده در این تحقیق برای چشمه‌ی ²⁵²Cf در جدول‌های ۲، ۳، ۴، ۵ و ۶ درج شده‌اند. در جدول‌های ۲ و ۳ پارامترهای محاسبه شده‌ی شدت کرمای هوا و ثابت مقدار دز با نتایج قسون و پارادس [۵، ۷] مقایسه شده است. از داده‌های این دو جدول مشخص است که نتایج حاصل از تالی‌های F₄ و F₆ در مقایسه با تالی F₈* اختلاف کم‌تری با نتایج دیگران دارند که نشان می‌دهد که تالی‌های F₄ و F₆ تالی‌های مناسب‌تری برای انجام محاسبات دزیمتری نوترونی دقیق‌تر در مقایسه با تالی F₈* هستند. هم‌چنین زمان اجرای تالی‌های F₄ و F₆ کم‌تر از تالی F₈* است که نشان از بیش‌تر بودن سرعت محاسبات با این دو تالی نسبت به تالی F₈* است. تالی F₈ تالی ارتفاع تپ نامیده می‌شود و روند محاسبه‌ی تالی ارتفاع تپ به طور ذاتی به صورت قیاسی است. بنابراین این تالی با نوترون‌ها و روش‌های کاهش واریانس کم‌تر سازگار است. اما در عوض دو تالی F₄ و F₆ (تالی کرما) برای محاسبات دزیمتری نوترونی چشمه‌ی ²⁵²Cf مناسب‌تر هستند که از فرض برابری کرمای نوترون و دز جذب شده برای چشمه‌ی ²⁵²Cf ناشی می‌شود. با محاسبه‌ی تحلیلی مقادیر تابع هندسی در زاویه‌ها و فاصله‌های مختلف (جدول ۴) و هم‌چنین با توجه به رابطه و تعریف تابع هندسی در دستورالعمل TG-۴۳U1 که بستگی فضایی و زاویه‌ای مقدار شار نوترون در اطراف چشمه را نشان می‌دهد می‌توان دریافت که



شکل ۳. نمای جانبی هندسه‌ی شبیه‌سازی شده توسط کد MCNPX.

در محاسبات دزیمتری با دو مفهوم دز جذبی و کرما روبه‌رو هستیم. دز جذبی کمیتی است که انرژی جذب شده از کلیه پرتوها در واحد جرم ماده را اندازه‌گیری می‌کند. مجموع انرژی منتقل شده به ذرات باردار تولید شده از پرتوهای یوننده غیرمستقیم (مانند فوتون و نوترون) در یکای جرم ماده، کرما نامیده می‌شود. در شرایط تعادلی ذرات باردار و حالتی که در آن امکان خروج ذرات باردار از محیط وجود ندارد، کرما تخمین خوبی برای دز جذب شده است، در غیر این صورت مقدار کرما کم‌تر از مقدار دز جذب شده خواهد بود. سازوکار غالب در برهم‌کنش نوترون‌های چشمه‌ی ²⁵²Cf با محیط آب، پراکندگی کشسان است. در این برهم‌کنش بخشی از انرژی نوترون فرودی به هسته‌ی هدف منتقل می‌شود. بیش‌ترین انتقال انرژی زمانی است که نوترون با پروتون (هسته‌ی اتم هیدروژن) به صورت رودرو برخورد کند. در این پژوهش برای نوترون که اغلب برهم‌کنش‌هایش از نوع کشسان با هسته‌های اتم‌های هیدروژن موجود در محیط آب است و به عبارتی نوترون انرژی خود را به پروتون منتقل می‌کند و احتمال خروج پروتون از محیط برهم‌کنش کم است، فرض برابری کرمای نوترون و دز جذب شده برای چشمه‌ی ²⁵²Cf با دقت خوبی صادق است. با فرض برابری کرما و دز جذب شده در فاصله‌های مختلف، (MeV/g) می‌توان از تالی F₆ برای محاسبه‌ی دز نوترون استفاده نمود. مقدار دز برای تالی F₄ (cm⁻²) با استفاده از ضرایب تبدیل شار به کرمای نوترون در محیط آب (در محدوده‌ی انرژی ۱۱eV تا ۱۵۰MeV) [۱۴] و برای تالی F₈* (MeV) با تقسیم مقدار تالی



تطابق بیش‌تری با نمودار داده‌های ریوارد و همکاران برخوردار است. با رسم نمودار برازش داده‌های تابع دز شعاعی به دست آمده از تالی F_4 ، ثابت‌های تابع درجه‌ی پنجم با مقادیر زیر به دست آمد،

$$a_0 = 0,9807 \quad a_1 = 0,0524 \quad a_2 = -0,0403$$

$$a_3 = 0,0061 \quad a_4 = -0,0005 \quad a_5 = 0,00001$$

مشاهده می‌شود که هم‌خوانی نزدیکی نیز بین نمودار برازش شده با نمودار نتایج ریوارد و همکارانش وجود دارد.

مقدار شار نوترون‌ها در راستای محور طولی چشمه ($\theta = 0$) دارای بیشینه مقدار خود است و با افزایش تدریجی زاویه به سمت محور عمود بر چشمه، از مقدار شار نوترون‌ها کاسته می‌شود. هم‌چنین با افزایش فاصله از چشمه مقدار تابع هندسی در هر راستایی کاهش می‌یابد. داده‌های تابع دز شعاعی و تابع ناهمسان‌گردی به ترتیب در فاصله‌ها و زاویه‌های مختلف در جدول‌های ۵ و ۶ درج شده است. نمودار تابع دز شعاعی برحسب فاصله از مرکز چشمه در فاصله‌های ۰/۵ تا ۱۰ سانتی‌متری در شکل ۴ نشان داده شده و با نتایج ریوارد و همکارانش مقایسه شده است [۹]. همان‌گونه که مشاهده می‌شود نمودار حاصل از داده‌های دو تالی F_4 و F_6 نسبت به تالی F_8 از

جدول ۲. پارامتر شدت کرمای هوا «SK» چشمه‌ی ^{252}Cf (به ازای یک میکروگرم کالیفرنیم-۲۵۲) با استفاده از تالی‌های مختلف کد MCNPX و مقایسه با نتایج دیگران

پارامتر	F_4	F_6	* F_8	قسون و همکاران	پارادس و همکاران
$\text{U } \mu\text{g}^{-1}$	۰,۳۴۳	۰,۳۴۲	۰,۳۶۰	۰,۳۳۰	۰,۳۳۵
اختلاف مطالعه‌ی حاضر و نتایج قسون و همکاران	۳,۹	۳,۶	۹,۱	—	۱,۵۱۵
اختلاف مطالعه‌ی حاضر و نتایج پارادس و همکاران	۲,۴	۲,۱	۷,۵	-۱,۴۹۳	—

جدول ۳. پارامتر ثابت مقدار دز «A» چشمه‌ی ^{252}Cf محاسبه شده با استفاده از تالی‌های مختلف کد MCNPX و مقایسه با نتایج دیگران

پارامتر	F_4	F_6	* F_8	قسون و همکاران	پارادس و همکاران
cGy U h^{-1}	۵,۵۰۳	۵,۵۲۱	۵,۳۷۹	۵,۵۷۹	۵,۷۱۹
اختلاف مطالعه‌ی حاضر و نتایج قسون و همکاران	-۱,۴	-۱,۰	-۳,۶	—	۲,۵۰۹
اختلاف مطالعه‌ی حاضر و نتایج پارادس و همکاران	-۳,۸	-۳,۵	-۵,۹	-۲,۴۴۸	—

جدول ۴. پارامتر تابع هندسی « $G(r, \theta)$ » چشمه‌ی ^{252}Cf در زاویه‌ها و فاصله‌های مختلف از مرکز چشمه، محاسبه شده با استفاده از روش تحلیلی

$G(r, \theta)$					$r(\text{cm})$
$\theta = 90$	$\theta = 60$	$\theta = 45$	$\theta = 30$	$\theta = 0$	
۲,۶۲۱	۳,۱۰۹	۳,۹۶۶	۶,۰۴۱	—	۰,۵
۰,۸۵۸	۰,۹۵۹	۱,۱۱۲	۱,۳۹۰	۲,۲۸۶	۱
۰,۴۱۲	۰,۴۴۰	۰,۴۷۵	۰,۵۲۳	۰,۵۹۳	۱,۵
۰,۲۳۹	۰,۲۴۹	۰,۲۶۱	۰,۲۷۴	۰,۲۱۰	۲
۰,۱۵۵	۰,۱۶۰	۰,۱۶۵	۰,۱۷۰	۰,۱۷۶	۲,۵
۰,۱۰۹	۰,۱۱۱	۰,۱۱۳	۰,۱۱۶	۰,۱۱۹	۳
۰,۰۸۰	۰,۰۸۲	۰,۰۸۳	۰,۰۸۴	۰,۰۸۶	۳,۵
۰,۰۶۲	۰,۰۶۳	۰,۰۶۳	۰,۰۶۴	۰,۰۶۵	۴
۰,۰۴۹	۰,۰۴۹	۰,۰۵۰	۰,۰۵۰	۰,۰۵۱	۴,۵
۰,۰۴۰	۰,۰۴۰	۰,۰۴۰	۰,۰۴۱	۰,۰۵۰	۵
۰,۰۲۸	۰,۰۲۸	۰,۰۲۸	۰,۰۲۸	۰,۰۲۸	۶
۰,۰۲۰	۰,۰۲۰	۰,۰۲۱	۰,۰۲۰۶	۰,۰۲۱	۷
۰,۰۱۶	۰,۰۱۶	۰,۰۱۶	۰,۰۱۶	۰,۰۱۶	۸
۰,۰۱۲	۰,۰۱۲	۰,۰۱۲	۰,۰۱۲	۰,۰۱۲	۹
۰,۰۱۰	۰,۰۱۰	۰,۰۱۰	۰,۰۱۰	۰,۰۱۰	۱۰

**جدول ۵.** پارامتر تابع دز شعاعی « $g(r)$ » چشمه‌ی ^{252}Cf در فاصله‌های مختلف از مرکز چشمه، محاسبه شده با استفاده از تالی‌های مختلف کد MCNPX

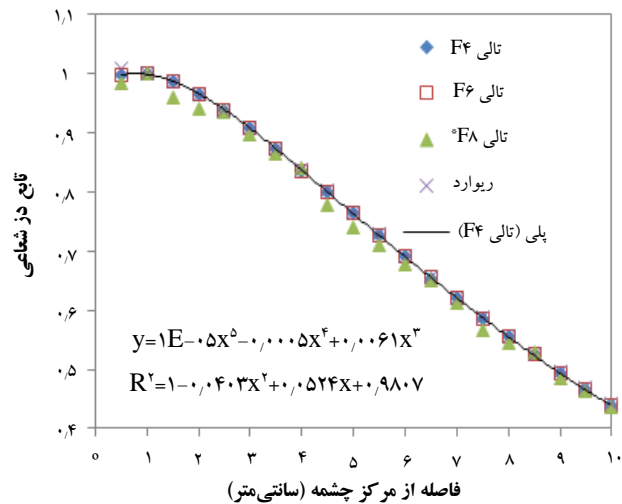
$gn(r)$			$r(\text{cm})$
*F8	F6	F4	
۰٫۹۸۴۳	۰٫۹۹۶۶	۰٫۹۹۶۶	۰٫۵
۱٫۰۰۰۰	۱٫۰۰۰۰	۱٫۰۰۰۰	۱
۰٫۹۶۰۴	۰٫۹۸۷۵	۰٫۹۸۷۵	۱٫۵
۰٫۹۴۰۸	۰٫۹۶۵۸	۰٫۹۶۵۸	۲
۰٫۹۳۴۲	۰٫۹۳۹۲	۰٫۹۳۹۱	۲٫۵
۰٫۸۹۶۶	۰٫۹۰۷۹	۰٫۹۰۷۸	۳
۰٫۸۶۴۵	۰٫۸۷۳۰	۰٫۸۷۲۹	۳٫۵
۰٫۸۳۹۸	۰٫۸۳۵۸	۰٫۸۳۵۷	۴
۰٫۷۷۷۹	۰٫۸۰۰۱	۰٫۷۹۹۹	۴٫۵
۰٫۷۴۱۰	۰٫۷۶۴۴	۰٫۷۶۴۲	۵
۰٫۶۷۷۹	۰٫۶۹۱۶	۰٫۶۹۱۳	۶
۰٫۶۱۱۶	۰٫۶۲۰۸	۰٫۶۲۰۵	۷
۰٫۵۴۵۷	۰٫۵۵۴۹	۰٫۵۵۴۵	۸
۰٫۴۸۶۲	۰٫۴۹۳۹	۰٫۴۹۳۶	۹
۰٫۴۳۷۳	۰٫۴۳۸۷	۰٫۴۳۸۴	۱۰

جدول ۶. پارامتر تابع ناهمسان‌گردی « $F(r, \theta)$ » چشمه‌ی ^{252}Cf در زاویه‌ها و فاصله‌های مختلف از مرکز چشمه، محاسبه شده با استفاده از تالی‌های مختلف کد MCNPX

$F(r, \theta = 60^\circ)$			$F(r, \theta = 30^\circ)$			$F(r, \theta = 0^\circ)$			$r(\text{cm})$
*F8	F6	F4	*F8	F6	F4	*F8	F6	F4	
۱٫۰۰۴۷	۰٫۹۹۸۶	۰٫۹۹۸۶	۱٫۰۰۱۰	۱٫۰۰۷۲	۱٫۰۰۷۱	-	-	-	۰٫۵
۰٫۹۹۵۸	۰٫۹۹۹۷	۰٫۹۹۹۷	۰٫۹۹۰۹	۱٫۰۰۱۸	۱٫۰۰۱۷	-	-	-	۱
۱٫۰۱۰۹	۰٫۹۹۹۳	۰٫۹۹۹۴	۱٫۰۲۳۶	۰٫۹۹۷۴	۰٫۹۹۷۴	۰٫۹۹۷۱	۰٫۹۸۶۴	۰٫۹۸۶۳	۱٫۵
۱٫۰۱۴۴	۰٫۹۹۹۶	۰٫۹۹۹۷	۱٫۰۲۶۹	۰٫۹۹۹۲	۰٫۹۹۹۱	۰٫۹۹۶۷	۰٫۹۸۴۰	۰٫۹۸۴۰	۲
۱٫۰۰۰۹	۰٫۹۹۸۷	۰٫۹۹۸۷	۰٫۹۸۵۴	۱٫۰۰۰۳	۱٫۰۰۰۴	۰٫۹۷۴۳	۰٫۹۸۱۷	۰٫۹۸۱۷	۲٫۵
۰٫۹۹۳۹	۰٫۹۹۷۸	۰٫۹۹۷۹	۰٫۹۸۳۱	۱٫۰۰۰۲	۱٫۰۰۰۲	۰٫۹۸۸۰	۰٫۹۸۱۶	۰٫۹۸۱۶	۳
۰٫۹۸۶۶	۰٫۹۹۸۶	۰٫۹۹۸۶	۰٫۹۹۴۳	۱٫۰۰۲۶	۱٫۰۰۲۶	۰٫۹۹۴۴	۰٫۹۷۸۳	۰٫۹۷۸۳	۳٫۵
۰٫۹۷۵۳	۱٫۰۰۱۸	۱٫۰۰۱۸	۰٫۹۸۶۳	۱٫۰۰۴۱	۱٫۰۰۴۱	۰٫۹۴۵۴	۰٫۹۸۲۲	۰٫۹۸۲۱	۴
۱٫۰۰۵۸	۰٫۹۹۸۶	۰٫۹۹۸۶	۱٫۰۱۸۳	۱٫۰۰۲۵	۱٫۰۰۲۵	۰٫۹۸۸۶	۰٫۹۸۰۹	۰٫۹۸۰۹	۴٫۵
۰٫۹۹۴۴	۰٫۹۹۷۲	۰٫۹۹۷۲	۱٫۰۱۷۳	۱٫۰۰۱۰	۱٫۰۰۰۹	۱٫۰۰۰۲	۰٫۹۷۸۸	۰٫۹۷۸۸	۵
۱٫۰۲۶۶	۰٫۹۹۷۶	۰٫۹۹۷۶	۰٫۹۹۴۴	۰٫۹۹۸۹	۰٫۹۹۸۸	۰٫۹۷۶۳	۰٫۹۷۵۸	۰٫۹۷۵۸	۶
۱٫۰۰۳۳	۰٫۹۹۸۴	۰٫۹۹۸۴	۱٫۰۱۴۵	۱٫۰۰۰۰	۱٫۰۰۰۰	۰٫۹۸۲۷	۰٫۹۷۵۶	۰٫۹۷۵۶	۷
۰٫۹۸۸۹	۰٫۹۹۹۲	۰٫۹۹۹۲	۰٫۹۹۱۴	۱٫۰۰۲۱	۱٫۰۰۲۱	۰٫۹۷۹۴	۰٫۹۷۲۸	۰٫۹۷۲۹	۸
۱٫۰۰۶۳	۰٫۹۹۹۸	۰٫۹۹۹۸	۱٫۰۲۸۲	۱٫۰۰۳۶	۱٫۰۰۳۶	۰٫۹۵۹۵	۰٫۹۷۳۳	۰٫۹۷۳۳	۹
۰٫۹۷۶۵	۰٫۹۹۵۴	۰٫۹۹۵۵	۱٫۰۰۳۵	۱٫۹۹۸۸	۰٫۹۹۸۹	۰٫۹۴۵۳	۰٫۹۷۰۸	۰٫۹۷۰۸	۱۰



۷ نشان می‌دهد که مقدار دز چشمه‌ی ^{252}Cf در راستای محور طولی چشمه دارای بیشینه مقدار خود است. با توجه به رابطه‌ی ۱ در دستورالعمل TG-۴۳، دو پارامتر تابع هندسی و تابع ناهمسان‌گردی نقش تعیین‌کننده در اختلاف دز در زاویه‌های مختلف (در فاصله‌های یکسان از چشمه) دارند، چرا که تنها این دو پارامتر وابستگی زاویه‌ای دارند. با تحلیل داده‌های جدول ۶ مشخص شد که مقادیر پارامتر تابع ناهمسان‌گردی در راستای محور طولی چشمه $\theta = 0$ کم‌تر از مقادیر آن در راستاهای دیگر است (مقادیر پارامتر تابع ناهمسان‌گردی در $\theta = 90$ دقیقاً برابر با ۱ است). بنابراین بیش‌تر بودن مقدار پارامتر تابع هندسی در راستای محور طولی چشمه نسبت به راستاهای دیگر (با توجه به داده‌های جدول ۴)، عامل اصلی بیش‌تر بودن مقدار دز در راستای محور طولی چشمه است. به عبارتی با توجه به مشخص شدن وابستگی زاویه‌ای مقدار دز به پارامتر تابع آرایش هندسی و تعریف این پارامتر در دستور کار TG-۴۳U۱، گستردگی بیش‌تر توزیع مواد پرتوزا در راستای محور طولی چشمه نسبت به راستاهای دیگر و در نتیجه بیش‌تر بودن مقدار شار نوترون دلیل ازدیاد دز در این راستا است.



شکل ۴. نمودار تابع دز شعاعی برحسب فاصله و مقایسه‌ی آن با نتایج نظیر به دست آمده توسط ریوارد [۸].

در نهایت با جای‌گذاری مقادیر هر یک از این پارامترها در رابطه‌ی ۱، مقادیر دز نوترون در زاویه‌ها و فاصله‌های مختلف از چشمه برای داده‌های تالی F۴ (جدول ۷) حاصل شد که با داده‌های تجربی کالوت [۱۵] در راستای محور طولی چشمه و داده‌های شبیه‌سازی پانچ و زامن [۱۶] در زاویه‌ی ۴۵ درجه و عمود بر محور چشمه ($\theta = 90$) مقایسه شده است. نتایج پژوهش حاضر در جدول

جدول ۷. مقدار دز نوترون در زاویه‌ها و فاصله‌های مختلف از چشمه‌ی ^{252}Cf محاسبه شده براساس دستور کار TG-۴۳U۱ و مقایسه با داده‌های تجربی کالوت [۱۴] و شبیه‌سازی پانچ و زامن [۱۵] (مقادیر داخل پرانتز مقدار اختلاف با داده‌های تجربی [$\theta = 0, 90$] و شبیه‌سازی [$\theta = 45$] را نشان می‌دهد)

پانچ و زامن (شبیه‌سازی)		کالوت و همکاران (تجربی)		مطالعه‌ی حاضر			r(cm)
($\theta = 90$)	($\theta = 45$)	($\theta = 90$)	($\theta = 0$)	($\theta = 90$)	($\theta = 45$)	($\theta = 0$)	
۵٫۸	۴٫۸	۶٫۴۹	—	۵٫۷۴۶ (-۰٫۹۳)	۴٫۹۳۳ (۲٫۷۷)	—	۰٫۵
۱٫۹	۱٫۱	۲٫۰۵	—	۱٫۸۸۸ (-۰٫۶۶)	۱٫۱۷۵ (۶٫۷۸)	—	۱
۰٫۹	۰٫۴۸	۰٫۹۴۸	—	۰٫۸۹۵ (-۰٫۵۶)	۰٫۴۸۸ (۱٫۶۸)	۱٫۲۷۰	۱٫۵
۰٫۵	۰٫۲۶	۰٫۵۲۷	۰٫۶۰۵	۰٫۵۰۸ (۱٫۶۲)	۰٫۲۶۰ (۰٫۰۰)	۰٫۶۰۸ (۰٫۶۱)	۲
۰٫۳۱	۰٫۱۵	۰٫۳۲۷	—	۰٫۳۲۱ (۳٫۴۸)	۰٫۱۵۵ (۳٫۱۷)	۰٫۳۵۷	۲٫۵
۰٫۲۱	۰٫۰۹۷	۰٫۲۱۹	۰٫۲۲۹	۰٫۲۱۷ (۳٫۴۳)	۰٫۰۹۹ (۲٫۰۴)	۰٫۲۲۲ (۱٫۴۴)	۳
۰٫۱۵	۰٫۰۶۶	۰٫۱۵۴	—	۰٫۱۵۴ (۲٫۸۷)	۰٫۰۶۷ (۰٫۸۵)	۰٫۱۶۱	۳٫۵
۰٫۱۱	۰٫۰۴۸	۰٫۱۱۴	۰٫۱۱۶	۰٫۱۱۴ (۳٫۱۶)	۰٫۰۵۰ (۳٫۳۲)	۰٫۱۱۷ (۰٫۸۳)	۴
۰٫۰۸۵	۰٫۰۳۵	۰٫۰۸۶	—	۰٫۰۸۶ (۱٫۳۰)	۰٫۰۳۴ (-۲٫۴۹)	۰٫۰۸۸	۴٫۵
۰٫۰۶۶	۰٫۰۲۵	۰٫۰۶۸	۰٫۰۷	۰٫۰۶۷ (۱٫۱۳)	۰٫۰۲۵ (۱٫۷۰)	۰٫۰۶۷ (-۳٫۹۵)	۵
۰٫۰۴۱	۰٫۰۱۵	۰٫۰۴۵۳	—	۰٫۰۴۲ (۲٫۴۵)	۰٫۰۱۶ (۵٫۴۱)	۰٫۰۴۲	۶
۰٫۰۲۶	۰٫۰۰۹۸	—	—	۰٫۰۲۸ (۶٫۳۲)	۰٫۰۱۱ (۱۴٫۱۲)	۰٫۰۲۸	۷
۰٫۰۱۸	۰٫۰۰۶۳	—	—	۰٫۰۱۹ (۵٫۳۰)	۰٫۰۰۶ (-۱۱٫۹۸)	۰٫۰۱۹	۸
۰٫۰۱۴	۰٫۰۰۴۱	—	—	۰٫۰۱۳ (-۴٫۶۶)	۰٫۰۰۴ (-۶٫۴۲)	۰٫۰۱۳	۹
۰٫۰۱	۰٫۰۰۲۹	—	—	۰٫۰۰۹ (-۳٫۸۷)	۰٫۰۰۲ (-۲۱٫۴۸)	۰٫۰۰۹	۱۰



مقاوم در برابر تابش که قابل درمان با روش براکی‌تراپی فوتونی و هیچ روش درمانی دیگر نیستند مورد استفاده قرار می‌گیرد. با محاسبات دزیمتری انجام یافته در این پژوهش، مقدمات مشخصه‌یابی دزیمتری چشمه‌های نوترونی (^{252}Cf) به منظور طراحی و کاربرد برای درمان بیماران سرطانی سخت-درمان‌پذیر در آینده‌ای نه چندان دور در کشور فراهم خواهد شد.

با مقایسه‌ی مقدار دز با داده‌های دیگران در جدول ۷ مشخص شد که اختلاف اندکی بین مقدار دز محاسبه شده در پژوهش حاضر براساس دستورالعمل TG-۴۳U۱ با داده‌های تجربی و نتایج شبیه‌سازی دیگران وجود دارد. این اختلاف دز ناشی از تفاوت در مدل‌سازی طیف انرژی نوترون برای چشمه‌ی ^{252}Cf (طیف شکافت وات یا ماکسول) در محاسبه‌ی پارامترهای دزیمتری در شبیه‌سازی‌ها و هم‌چنین میزان دقت و حساسیت وسایل اندازه‌گیری نسبت به تغییرات سریع دز در کارهای تجربی است. با هم‌خوانی نزدیک مقدار دز محاسبه شده در این پژوهش براساس دستورالعمل TG-۴۳U۱ با داده‌های تجربی و شبیه‌سازی سایر پژوهش‌گران می‌توان به سودمندی و کاربردی بودن دستورالعمل TG-۴۳U۱ در محاسبه‌ی دز نوترون در اطراف چشمه‌ی بالینی ^{252}Cf برای استفاده در سیستم‌های طراحی درمان براکی‌تراپی نوترونی با چشمه‌ی ^{252}Cf پی برد.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش مجموعه‌ی کاملی از داده‌های دزیمتری چشمه‌ی بالینی ^{252}Cf منطبق بر دستورالعمل TG-۴۳U۱ با استفاده از کد MCNPX و بهره‌گیری از تالی‌های F_4 ، F_6 و F_8 * محاسبه و مقدار دز متناظر با این پارامترها، در راستاها و فاصله‌های مختلف از مرکز چشمه محاسبه شد. مشخص شد که مقدار دز در راستای محور طولی چشمه‌ی ^{252}Cf دارای بیشینه مقدار نسبت به راستاهای دیگر است. با توجه به بستگی مقدار دز به پارامتر تابع هندسی و تعریف این پارامتر در دستور کار TG-۴۳U۱، گستردگی بیش‌تر توزیع مواد پرتوزا در راستای محور طولی چشمه نسبت به راستاهای دیگر و در نتیجه بیش‌تر بودن مقدار شار نوترون دلیل این ازدیاد است. هم‌چنین مشخص شد که سرعت محاسبات و دقت نتایج استفاده از تالی‌های F_4 و F_6 در محاسبه‌ی دز نوترون در اطراف چشمه‌ی ^{252}Cf بیش‌تر از تالی F_8 * است که بدین‌گونه می‌توان محاسبات دزیمتری نوترونی دقیق‌تر با درصد خطای کم‌تر و در زمان اجرای کم‌تری را شاهد بود.

پارامترهای دزیمتری محاسبه شده در این پژوهش می‌تواند به عنوان فایل ورودی در سیستم‌های طراحی درمان براکی‌تراپی نوترونی با چشمه‌ی ^{252}Cf مورد استفاده قرار گیرد. به علت پرهزینه بودن روش براکی‌تراپی نوترونی (از جمله ساخت چشمه‌ی بالینی ^{252}Cf)، این روش در برخی از کشورهای پیشرفته جهان از جمله ژاپن، روسیه، چین و ... برای درمان تومورهای بدخیم و تومورهای



- [1] C.S. Shlea, D.H. Stoddard, Californium isotopes proposed for intracavity and interstitial radiation therapy with neutrons, *Nature*, 206 (1965) 1058-1059.
- [2] L.L. Anderson, Status of dosimetry for ^{252}Cf medical neutron sources, *Phys. Med*, 18 (1973) 779-799.
- [3] J.G. Wierzbicki, M.J. Rivard, W. Roberts, Physics and dosimetry of clinical ^{252}Cf sources, *Kluwer Academic*, 29 (1997) 25-53.
- [4] R.C. Martin, R.R. Laxson, J.H. Miller, J.G. Wierzbicki, M.J. Rivard, D.L. Marsh, Development of high-activity ^{252}Cf sources for neutron brachytherapy, *Appl. Radiat. Isot*, 48 (1997) 1567-1570.
- [5] J. Ghassoun, D. Mostacci, V. Molinari, A.J. ehouani, Detailed dose distribution prediction of Cf-252 brachytherapy source with boron loading dose enhancement, *Applied Radiation and Isotopes*, 68 (2010) 265-270.
- [6] M.J. Rivard, Neutron dosimetry for a general ^{252}Cf brachytherapy source, *Medical Physics*, 27 (2000) 2803-2815.
- [7] L. Paredes, J. Azorin, M. Balcazar, J.L. Francois, Neutrons absorbed dose rate calculations for interstitial brachytherapy with ^{252}Cf sources, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 580 (2007) 582-585.
- [8] R. Nath, L.L. Anderson, G. Luxton, K.A. Weaver, J.F. Williamson, A.S. Meigooni, Dosimetry of interstitial brachytherapy sources: Recommendations of the AAPM Radiation Therapy Committee Task Group, No. 43, *Med. Phys*, 22 (1995) 209-234.
- [9] M.J. Rivard, J.G. Wierzbicki, F. Van den Heuvel, R.C. Martin, R.R. McMahon, Clinical brachytherapy with neutron emitting ^{252}Cf sources and adherence to AAPM TG-43 dosimetry protocol, *Med. Phys*, 26 (1999) 87-96.
- [10] M.J. Rivard, B.M. Coursey, L.A. Dewerd, W.F. Hanson, M. Saiful Huq, G.S. Ibbott, Update of AAPM Task Group Report No. 43: A revised AAPM protocol for brachytherapy dose calculations, *Med Phys*, 31 (2004) 633-674.
- [11] M.J. Rivard, J.K. Sganga, F. Errico, J.S. Tsai, K. Ulin, M.J. Engler, Calculated neutron air kerma strength conversion factors for a generically encapsulated Cf-252 brachytherapy source, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 476 (2002) 119-122.
- [12] G. Raisali, F. Mokhles Gerami, R. Khodadadi, B. Piroozfar, Determination of Dosimetry Parameters for Low Energy Brachytherapy Sources Based on TG-43U1 Protocol Using Different MCNP Tallies, *Journal of Nuclear Science and Technology*, 35 (1384) 29-36.
- [13] LS. (Ed.)Walter, LANL(Los Alamos National Laboratory) Monte Carlo N-Particle transport code system for multiparticle and high energy applications. Version 270, LA-CP-02-408, Los Alamos National Laboratory (2002).
- [14] M.B. Chadwick, H.H. Barschall, R.S. Caswell, A consistent set of neutron kerma coefficients from thermal to 150MeV for biologically important materials, *Med. Phys*, 26 (1999) 974-991.
- [15] R.D. Colvett, H.H. Rossi, V. Krishnaswamy, Dose distributions around a californium-252 needle, *Phys. Med. Biol*, 17 (1972) 356-364.
- [16] J.C. Yanch, R.G. Zamenhof, Dosimetry of ^{252}Cf source for neutron radio therapy with and without augmentation of boron neutron capture therapy. *Radiat. Res*, 131 (1992) 249-256.