

تعیین ویژگیهای دزیمتری چشمه‌های براکی‌تراپی کم انرژی بر اساس دستور کار TG-43U1 با روشهای مختلف محاسبه دز در کد MCNP

غلامرضا رئیس علی^{۱*}، فریبا مخلص گرامی^۲، رضا خدادادی^۳، بهناز پیروزفر^۲

۱- مرکز تحقیقات کشاورزی و پزشکی هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۳۱۴۸۵-۴۸۹، کرج - ایران

۲- امور ایمنی هسته‌ای کشور، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۱۴۱۵۵-۱۳۳۹، تهران - ایران

۳- امور حفاظت در برابر اشعه، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۱۴۱۵۵-۴۴۹۴، تهران - ایران

چکیده: مرکز تحقیقات کشاورزی و پزشکی هسته‌ای سازمان انرژی اتمی ایران، با توجه به کاربرد روزافزون چشمه‌های کم انرژی ^{125}I و ^{103}Pd در براکی‌تراپی سرطان پروستات، ساخت اینگونه چشمه‌ها را در دستور کار خود قرار داده است. لذا در این تحقیق بر آن شدیم تا با محاسبات دزیمتری منطبق با دستور کار TG-43U1 به روش مونت کارلو به وسیله کد MCNP برای چشمه‌ای مشابه چشمه در دست تولید و مقایسه آن با محاسبات انجام شده در مقاله‌ها و گزارش‌های علمی، مقدمات مشخصه‌یابی دزیمتری این چشمه‌ها را فراهم کنیم. این محاسبات با بهره‌گیری از روش‌های متفاوت محاسبه دز (تالی‌های F4، F6، *F8) انجام شده است. نتایج به دست آمده با در نظر گرفتن دقت و سرعت محاسبات، مقایسه شده‌اند و در اکثر موارد، نتایج هر سه روش با نتایج مرجع مقایسه در توافق خوبی بوده‌اند. همچنین در این تحقیق مشخص شد که نتایج بدست آمده از تالی F6، حدود ۲۰ برابر سریعتر از تالی *F8 است که این نتیجه را می‌توان در محاسبات متعدد لازم در طراحی چشمه‌های براکی‌تراپی، مورد استفاده قرار داد.

واژه‌های کلیدی: براکی‌تراپی، MCNP، دستور کار TG-43U1، محاسبات دز، ^{125}I ، ^{103}Pd ، پروستات، روش مونت کارلو، کدهای کامپیوتری

Determination of Dosimetry Parameters for Low Energy Brachytherapy Sources Based on TG-43U1 Protocol Using Different MCNP Tallies

G. Raisali^{1*}, F. Mokhles Gerami², R. Khodadadi³, B. Piroozfar³

1- Nuclear Research Center for Agriculture and Medicine, AEOL, P.O. Box: 31485-489, Karaj - Iran

2- National Nuclear Safety Department, AEOL, P.O. Box: 14155-1339, Tehran - Iran

3- National Radiation Protection Department, AEOL, P.O. Box: 14155-4494, Tehran - Iran

Abstract: Application of low energy ^{125}I and ^{103}Pd sources in prostate cancer brachytherapy has been considerably increased, recently. Accordingly, the Nuclear Research Center for Agriculture and Medicine (NRCAM) has selected the production of ^{103}Pd source seeds and their characterization as one of its main objectives. In this investigation, we have calculated TG-43U1 dosimetry parameters for a source similar to the primary NRCAM design, using MCNP Monte Carlo computer code with F4, F6 and *F8 tallies. The results have been compared with the corresponding values reported in the literature and for most of the cases, all the three tallies and the reported values are in good agreement. It has been found that the F6 tally is about 20 times faster than *F8 tally without any considerable loss of accuracy. Therefore, it is concluded that for design analysis purposes, the F6 tally is adequately efficient to perform cumbersome recursive brachytherapy seed design calculations.

Keywords: brachytherapy, MCNP, TG-43U1 protocol, dose calculations, ^{125}I , ^{103}Pd , prostate, Monte Carlo method, computer codes

*email: graisali@nrcam.org

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۸۶/۳/۱۰ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۸۶/۹/۳۰

۱- مقدمه

یکی از روش‌های درمان تومورهای بدخیم استفاده از پرتودهی نزدیک یا براکی تراپی است. در این روش با قراردادن چشمه پرتوزا در مجاورت تومور برای به از بین بردن آن اقدام می‌شود. در مورد تومورهای کوچک مانند سرطان پروستات از کاشت دائم چشمه‌های کم انرژی مانند ^{106}Pd و ^{125}I درون تومور استفاده می‌شود [۱، ۲ و ۳]. با توجه به اینکه این نوع چشمه‌های کم انرژی به صورت دانه‌های استوانه‌ای شکل تولید می‌شوند و معمولاً میدان پرتو در اطراف آنها به میزان قابل توجهی ناهمسانگرد است، شناخت دقیق توزیع دز به منظور طراحی روش درمان، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است [۴، ۵ و ۶]. در این مورد انجمن فیزیک پزشکی آمریکا (AAPM) با تشکیل گروه کار شماره ۴۳ با بررسی دزیمتری این چشمه‌ها دستور کار دزیمتری "TG-43U1" را توصیه کرده است. این دستور کار شامل فرمولبندی برای محاسبات دز و مجموعه داده‌هایی برای پارامترهای دزیمتری چشمه‌های براکی تراپی است [۷].

با توجه به اینکه مرکز تحقیقات کشاورزی و پزشکی هسته‌ای سازمان انرژی اتمی ایران، ساخت چشمه‌های کم انرژی ^{125}Pd را در دستور کار خود دارد و انتظار می‌رود در آینده از این چشمه‌ها برای درمان بیماران در کشور استفاده شود، بر آن شدیم تا با انجام دادن محاسبات دزیمتری در مورد چشمه‌ای مشابه چشمه در دست تولید و مقایسه آن با نتایج موجود در مراجع، مقدمات مشخصه‌یابی دزیمتری این چشمه‌ها را فراهم کنیم. برای این منظور از کد مونت کارلوی MCNP با در نظر گرفتن توصیه‌های دستور کار TG-43U1 استفاده شده است [۸]. از طرفی، در این مورد با توجه به طولانی بودن مدت محاسبات مونت کارلو، به منظور یافتن روشی سریعتر، سعی شده است با بهره‌گیری از روش‌های متفاوت محاسبه دز (تالی‌های مختلف در کد MCNP) نتایج به دست آمده از نظر دقت و سرعت محاسبات با یکدیگر مقایسه و ارزیابی شوند. در ادامه این مقاله، ابتدا بطور خلاصه به معرفی دستور کار TG-43U1 پرداخته شده، سپس فرض‌ها و روش‌های محاسبات در بخش مواد و روش‌ها ارائه و نتایج مورد بحث و ارزیابی قرار گرفته‌اند.

۲- فرمول‌بندی محاسبات دز در دستور کار TG-43U1

دستور کار TG-43U1 بر اساس کمیت‌های اندازه‌گیری شده (یا قابل اندازه‌گیری) و جدا کردن (decouple) تعدادی از کمیت‌های وابسته به هم استوار است. فرمولبندی محاسبه دز در این دستور کار، در تباین با روش قدیمی که با استفاده از ثابت‌های نرخ پرتوگیری و ضرایب تضعیف بافت انجام می‌شد، نیاز به داده‌های ورودی شامل نرخ‌های دز چشمه‌ای واقعی در فانتوم معادل بافت دارد. بطور سنتی نرخ دز $\dot{D}(r)$ در فاصله r از چشمه درون شکاف (interstitial) براکی تراپی با استفاده از تقریب چشمه نقطه‌ای حساب می‌شود [۷]:

$$\dot{D}(r) = A_{app} f_{med} (\Gamma_{\delta})_A \left(\frac{1}{r^2}\right) T(r) \Phi_{an} \quad (1)$$

که در آن A_{app} فعالیت چشمه، f_{med} ضریب تبدیل پرتوگیری به دز، $(\Gamma_{\delta})_A$ ثابت نرخ پرتوگیری برای رادیونوکلئید در چشمه، $T(r)$ ضریب تضعیف بافت و Φ_{an} ثابت ناهمسانگردی است.

در دستور کار TG-43U1 هر یک از کمیت‌های به کار رفته به منظور محاسبه نرخ دز برای نوع خاصی از چشمه، اندازه‌گیری یا حساب می‌شود، بنابراین بستگی به ساختار و آرایش هندسی چشمه، همچنین بیناب فوتون ورودی و محیط دارد. روشهای سنتی بر پایه شارش فوتون حول چشمه در فضای آزاد هستند که یکی از کاستیهای اساسی در این روش است، در حالیکه کاربردهای بالینی (کلینیکی) نیاز به توزیع دز در محیط پراکنده‌گر بدن بیمار دارند. فرمولبندی توصیه شده در این دستور کار، این نقص اساسی را با استفاده مستقیم از توزیع دز اندازه‌گیری شده (یا قابل اندازه‌گیری) که با قرار دادن چشمه‌ای در محیط معادل آب ایجاد می‌شود، حل می‌کند.

در دستور کار TG-43U1 کمیت‌های جدیدی از جمله تابع ناهمسانگرد $F(r, \theta)$ ، ثابت نرخ دز Λ ، تابع آرایش هندسی $G(r, \theta)$ ، تابع دز شعاعی $g(r)$ و شدت کرمای هوا S_k به کار گرفته شده است. این کمیت‌ها به جای کمیت‌های روش سنتی به این صورت جایگزین می‌شوند:

کمیت‌های دستور کار TG-43U1 به شرح زیر توصیف شده‌اند:

۱-۲ شدت کرمای هوا (Air Kerma Strength)

شدت کرمای هوا معیاری از شدت چشمه براکی تراپی است که بر حسب نرخ کرمای هوا در نقطه‌ای در راستای محور عمود بر چشمه در فضای آزاد مشخص می‌شود. این کمیت بصورت حاصلضرب نرخ کرمای هوا در فاصله سنج‌بندی d از چشمه در فضای آزاد $\dot{K}_\delta(d)$ و مجذور فاصله d تعریف می‌شود:

$$S_k = \dot{K}_\delta(d)d^2 \quad (۳)$$

$\dot{K}_\delta(d)$ ناشی از فوتون‌های با انرژی بیشتر از δ (تقریباً ۵ keV) است که در فاصله‌ای بسیار بیشتر از طول چشمه ($d \gg L$) حساب می‌شود. واحد S_k ، $\mu\text{Gy}\cdot\text{m}^2\cdot\text{h}^{-1}$ یا $\text{cGy}\cdot\text{cm}^2\cdot\text{h}^{-1}$ است که به آن U نیز می‌گویند.

۲-۲ ثابت نرخ دز (Dose Rate Constant)

ثابت نرخ دز، Λ ، به عنوان نسبت نرخ دز در محیط آب در فاصله یک سانتی‌متری روی محور عمود بر چشمه‌ای به شدت کرمای هوا، تعریف می‌شود:

$$\Lambda = \frac{\dot{D}(r_0, \theta_0)}{S_k} \quad (۴)$$

r_0 و θ_0 مختصات نقطه مرجع یعنی $r = 1 \text{ cm}$ و $\theta = \frac{\pi}{2}$ و واحد ثابت نرخ دز $\text{cGy}\cdot\text{hr}^{-1}\cdot\text{U}^{-1}$ است.

۳-۲ تابع آرایش هندسی (Geometry Function)

این تابع برای در نظر گرفتن وابستگی شارش فوتون حول چشمه‌ای با فضای آزاد است. هنگامیکه توزیع پرتوزایی با فرض چشمه نقطه‌ای یا چشمه خطی به طول L نوشته شود، $G(r, \theta)$ بصورت زیر خواهد بود:

$$G(r, \theta) = \begin{cases} r^{-2} & \text{برای چشمه نقطه‌ای} \\ \frac{\beta}{Lr \sin \theta} & \text{برای چشمه خطی} \end{cases} \quad (۵)$$

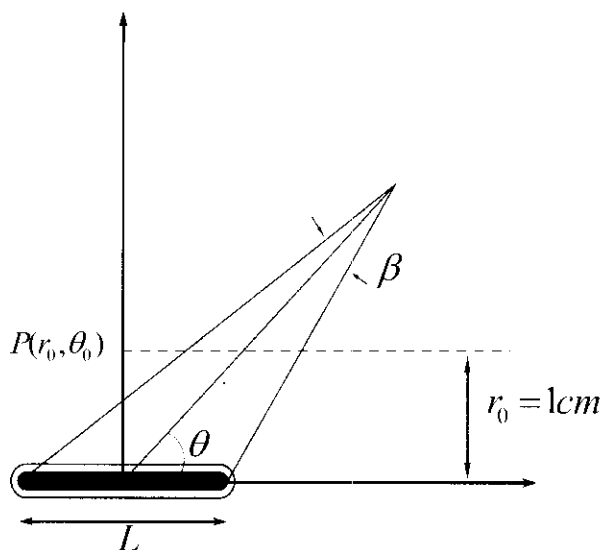
کمیت‌های دستور کار TG-43U1 برای محاسبه نرخ دز

A_{app}	S_k
$(\Gamma_\delta)_x$	Λ
$(\frac{1}{r^2})$	$G(r, \theta)$
$T(r)$	$g(r)$
$\bar{\Phi}_{em}$	$F(r, \theta)$

یکی از مزیت‌های این دستور کار محاسبه دز در دو بعد است، در حالیکه در روش سنتی محاسبه دز فقط در یک بعد برای چشمه‌های نقطه‌ای همسانگرد انجام می‌شد. برای محاسبه دز در دو بعد حول چشمه‌ای استوانه‌ای (شکل ۱) بر اساس دستور کار TG-43U1 داریم:

$$\dot{D}(r, \theta) = S_k \Lambda \frac{G(r, \theta)}{G(r_0, \theta_0)} g(r) F(r, \theta) \quad (۲)$$

که در آن، r فاصله نقطه دلخواه تا مرکز تقارن چشمه بر حسب سانتی‌متر، θ زاویه نسبت به محور طولی چشمه بر حسب رادیان، $r_0 = 1 \text{ cm}$ و $\theta_0 = \frac{\pi}{2}$ مختصات نقطه مرجع، L طول مؤثر چشمه بر حسب سانتی‌متر و β زاویه محصور بین ابتدا و انتهای طول مؤثر چشمه از نقطه دلخواه بر حسب رادیان است.



شکل ۱- هندسه در نظر گرفته شده در محاسبات دز.



تعریف آنها (روابط ۴، ۶ و ۷) حاصل شده‌اند. برای محاسبه S_k و $\dot{D}(r, \theta)$ بوسیله کد MCNP از تالی‌های F4، F6 و F8* و برای $G(r, \theta)$ فقط از تالی F4 استفاده شده است.

$G(r_0, \theta_0)$ تابع آرایش هندسی در نقطه مرجع است.

۴-۲ تابع دز شعاعی (Radial Dose Function)

در تابع دز شعاعی $g(r)$ ، اثرهای جذب و پراکندگی فوتون‌ها را در محیط آب اطراف چشمه، در امتداد محور عمود بر چشمه در نظر می‌گیرند. این تابع بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$g(r) = \frac{\dot{D}(r, \theta_0)G(r_0, \theta_0)}{\dot{D}(r_0, \theta_0)G(r, \theta_0)} \quad (6)$$

۵-۲ تابع ناهمسانگردی (Anisotropy Function)

در تابع ناهمسانگردی، $F(r, \theta)$ ، ناهمسانگردی توزیع دز ناشی از اثرهای جذب و پراکندگی در محیط آب اطراف چشمه در نظر گرفته شده و بصورت زیر تعریف می‌شود:

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

در این تحقیق پارامترهای Λ ، $G(r, \theta)$ ، $g(r)$ و $F(r, \theta)$ با استفاده از روش‌های مختلف محاسبه دز به وسیله کد MCNP/4C برای چشمه $MED3631 - A/M^{125}I$ محاسبه و مقایسه شده‌اند [۸].

۲-۳ روش محاسبات

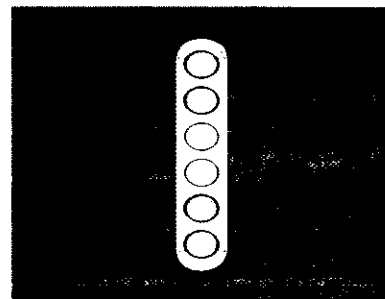
محاسبات دزیمتری با استفاده از کد MCNP/4C انجام شده‌اند. نرخ دز " $\dot{D}(r, \theta)$ " و شدت گرمای هوا، S_k ، با استفاده از تالی‌های F6 و F8* و در مورد تالی F4 به همراه ضرایب تبدیل شارش به دز [۱۰]، حساب شده‌اند. در این کد از فایل‌های کتابخانه‌های mcplib22 و el032 به ترتیب برای سطح مقطع‌های فوتون و الکترون استفاده شده است. نرخ دز در

۳- مواد و روش‌ها

پارامترهای دزیمتری برای چشمه مورد نظر (شکل ۲) بر اساس روش مونت کارلو با استفاده از کد MCNP/4C حساب شده‌اند [۹]. ترتیب انجام محاسبات بدین گونه است که ابتدا پارامترهای اصلی S_k (به ازای یک ذره تابش شده از چشمه)، $\dot{D}(r, \theta)$ و $G(r, \theta)$ به دست آمده سپس پارامترهای Λ ، $g(r)$ و $F(r, \theta)$ از روی نسبت‌های مختلف این پارامترها طبق

جدول ۱- انرژی و درصد فوتون‌ها به ازای هر واپاشی چشمه ^{125}I .

انرژی فوتون (keV)	فوتون به ازای هر واپاشی (%)
۲۷/۲۰۲	۴۰/۵
۲۷/۴۷۲	۷۵/۶
۳۰/۹۸۰	۲۰/۱
۳۱/۸۷۷	۴/۳۸
۳۵/۴۹۱۹	۶/۶۶



شکل ۲- هندسه ایده‌آل در نظر گرفته شده برای محاسبات به وسیله کد MCNP/4C.



آرایش هندسی $G(r, \theta)$ نیز با استفاده از تالی F4 و با در نظر گرفتن محیط خلأ، حساب شده است. همچنین به منظور مقایسه، تابع آرایش هندسی $G(r, \theta)$ ، از رابطه تحلیلی (۵) نیز به دست آمده است.

۴- یافته‌ها و نتایج

نتایج پارامترهای دزیمتری حساب شده در این کار پژوهشی، به همراه نتایج به دست آمده نظیر آنها توسط Rivard [۹] (با خطای نسبی کمتر از ۰/۱ درصد) در جدول‌های ۲، ۳ و ۴ مندرج است. مدت اجرای محاسبات در این تحقیق با کامپیوتر P4 2.2 GHz برای رسیدن به خطای نسبی کمتر از ۰/۱ درصد به وسیله تالی‌های F4 و F6 برابر ۱۰ ساعت (تعداد تاربخچه‌های لازم حدود 2×10^8) و برای تالی F8* برابر با ۲۰۰ ساعت (تعداد تاربخچه‌های لازم حدود 2×10^9) است.

بطوری که در جدول‌های ۲، ۳ و ۴ مشاهده می‌شود، پارامترهای به دست آمده در این تحقیق اختلاف اندکی با مقادیر به دست آمده توسط Rivard دارند. این اختلاف در مورد نتایج مربوط به زاویه صفر درجه بزرگتر است، که علت آن را می‌توان در کاهش آمار شمارش ذرات در آشکارساز فرضی جستجو کرد. دو دلیل اصلی کاهش آمار ذرات، مربوط به اثر خود جذبی بیشتر پرتوها در امتداد محوری و کوچک بودن

فاصله‌های ۰/۲۵، ۰/۵، ۱، ۲، ۵ و ۱۰ سانتی‌متری و در زوایای صفر، ۳۰، ۶۰ و ۹۰ درجه درون حجم‌هایی (Cells) از آب، محصور به مخروط‌هایی با زاویه رأس یک درجه و پوسته‌های کروی به ضخامت ۰/۱ سانتی‌متر به دست آمده‌اند. ابتدا نرخ‌های دز به وسیله تالی F8* برای رسیدن به خطای ۰/۱ درصد اجرا شد. مدت اجرا با کامپیوتر P4 2.2GHz حدود ۲۰۰ ساعت بود. این مدت طولانی به دلیل پیچیدگی شبیه‌سازی ترابرد الکترون‌ها با در نظر گرفتن جزئیات اندرکنش‌ها در محاسبات با تالی F8* است. به منظور کاستن مدت اجرای محاسبات، به نظر رسید که استفاده از تالی‌های F4 و F6 با توجه به ماهیت روش محاسباتی آنها، مناسب باشد. تالی F6 در حالت فوتونی، تخمین گر کرما است. بدیهی است، در شرایط تعادل الکترونی و ناچیز بودن تابش ترمزی، کرما تخمین بسیار خوبی برای دز جذبی خواهد بود.

تالی F4 تخمین گر شارش ذرات با استفاده از طول مسیر آنها در سلول است. اگر این تالی را به همراه کارتهای DE و DF، که به ترتیب انرژی فوتون و ضرائب تبدیل شارش به دز در انرژی نظیر است را به کار ببریم، دز جذبی حساب خواهد شد. در محاسبه S_k فاصله سنج‌بندی، d ، برابر ۱۰۰ سانتی‌متر است و نرخ کرما در این فاصله در سلولی از هوا، محصور به مخروطی با زاویه رأس ۱۰ درجه و پوسته کروی به ضخامت ۱ سانتی‌متر با تالی‌های F8*، F6 و F4 به دست آمد؛ تابع

جدول ۲- تابع آرایش هندسی $G(r, \theta)$ "چشمه MED3631 - A/M¹²⁵" با استفاده از کد MCNP و مقادیر نظیر به دست آمده توسط Rivard و مقایسه آنها با روش تحلیلی (مقادیر داخل پرانتز میزان اختلاف را نسبت به نتایج تحلیلی بر حسب درصد نشان می‌دهد).

$\theta=60^\circ$			$\theta=30^\circ$			$\theta=0^\circ$			r (cm)
Analytic	Rivard	F4	Analytic	Rivard	F4	Analytic	Rivard	F4	
۱/۱۸۴	۱/۱۵۹ (-۰/۲۱)	۱/۱۶۳ (-۱/۸)	۱/۹۲۸	۲/۱۸۴ (+۱۳/۳)	۲/۲۰۵ (+۱۴/۴)	۶/۷۰۱	۵/۳۹۷ (-۱۹/۵)	۵/۶۷۹ (-۱۵/۲)	۰/۲۵
$3/161 \times 10^{-1}$	$3/158 \times 10^{-1}$ (-۰/۱)	$3/154 \times 10^{-1}$ (-۰/۲)	$3/634 \times 10^{-1}$	$3/775 \times 10^{-1}$ (+۳/۹)	$3/779 \times 10^{-1}$ (+۴/۰)	$3/991 \times 10^{-1}$	$4/214 \times 10^{-1}$ (+۵/۶)	$4/319 \times 10^{-1}$ (+۸/۲)	۰/۵۰
$7/954 \times 10^{-2}$	$7/95 \times 10^{-2}$ (-۰/۰۵)	$7/947 \times 10^{-2}$ (-۰/۰۹)	$8/23 \times 10^{-2}$	$8/316 \times 10^{-2}$ (+۱/۰)	$8/301 \times 10^{-2}$ (+۰/۰۹)	$8/382 \times 10^{-2}$	$8/515 \times 10^{-2}$ (+۱/۶)	$8/225 \times 10^{-2}$ (-۰/۷)	۱/۰۰
$1/989 \times 10^{-2}$	$1/989 \times 10^{-2}$ (۰)	$1/987 \times 10^{-2}$ (-۰/۱)	$2/006 \times 10^{-2}$	$2/011 \times 10^{-2}$ (+۰/۲)	$2/014 \times 10^{-2}$ (+۰/۷)	$2/015 \times 10^{-2}$	$2/023 \times 10^{-2}$ (+۰/۴)	$2/075 \times 10^{-2}$ (۱۳/۰)	۲/۰۰
$3/183 \times 10^{-3}$	$3/183 \times 10^{-3}$ (۰)	$3/184 \times 10^{-3}$ (+۰/۰۳)	$3/187 \times 10^{-3}$	$3/189 \times 10^{-3}$ (+۰/۰۶)	$3/187 \times 10^{-3}$ (۰)	$3/190 \times 10^{-3}$	$3/193 \times 10^{-3}$ (+۰/۱)	$3/281 \times 10^{-3}$ (+۲/۸)	۵/۰۰
$7/958 \times 10^{-4}$	$7/958 \times 10^{-4}$ (۰)	$7/939 \times 10^{-4}$ (-۰/۲)	$7/960 \times 10^{-4}$	$7/958 \times 10^{-4}$ (-۰/۰۲)	$7/947 \times 10^{-4}$ (-۰/۱)	$7/962 \times 10^{-4}$	$7/966 \times 10^{-4}$ (+۰/۰۵)	$8/231 \times 10^{-4}$ (۱۳/۴)	۱۰/۰۰



جدول ۳ - تابع دز شعاعی و ثابت نرخ دز، $g(r)$ و Λ ، چشمه ^{125}I A/M - MED3631 با استفاده از تالی‌های مختلف کد MCNP و مقایسه آنها با مقادیر نظیر به دست آمده توسط Rivard [۹] (مقادیر داخل پرانتز میزان اختلاف را نسبت به نتایج Rivard بر حسب درصد نشان می‌دهد).

Rivard	g (r)			r (cm)
	*F8	F6	F4	
۰/۹۹۲	۰/۹۹۵ (+۰/۳)	۰/۹۹۸ (+۰/۶۱)	۱/۰۴۰ (+۴/۸)¹	۰/۲۵
۱/۰۱۵	۱/۰۲۱ (+۰/۶)	۱/۰۲۱ (+۰/۶)	۱/۰۴۶ (+۰/۳/۰)	۰/۵۰
۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۱/۰۰
۰/۸۸۳	۰/۸۸۷ (+۰/۴)	۰/۸۸۴ (+۰/۱)	۰/۸۶۰ (-۲/۶)	۲/۰۰
۰/۴۴۶	۰/۴۶۶ (+۴/۵)	۰/۴۶۶ (+۴/۵)	۰/۴۴۲ (- ۴/۱)	۵/۰۰
۰/۱۲۱	۰/۱۲۰ (-۰/۸)	۰/۱۲۰ (-۰/۸)	۰/۱۱۶ (-۴/۱)	۱۰/۰۰
۱/۰۶۷	۱/۱۱۸ (+۴/۸)	۱/۱۲۱ (+۵/۱)	۱/۰۵۲ (-۱/۴)	Λ (cGy.hr ⁻¹ U ⁻¹)

جدول ۴ - تابع ناهمسانگردی "F(r,θ)" چشمه ^{125}I A/M - MED3631 با استفاده از تالی‌های مختلف کد MCNP و مقایسه آنها با مقادیر نظیر به دست آمده توسط Rivard [۹] (مقادیر داخل پرانتز میزان اختلاف را نسبت به نتایج Rivard بر حسب درصد نشان می‌دهد).

$\theta = ۶۰$				$\theta = ۳۰$				$\theta = ۰$				r (cm)
Rivard	*F8	F6	F4	Rivard	*F8	F6	F4	Rivard	*F8	F6	F4	
۰/۹۹۲	۰/۹۹۴ (۰/۲)	۰/۹۸۹ (۰/۳)	۰/۹۹۰ (۰/۲)	۰/۹۳۴	۰/۹۲۷ (-۰/۷)	۰/۹۲۸ (-۰/۶)	۰/۹۳۷ (+۰/۳)	۰/۸۲۴	۰/۷۷۳ (-۶/۲)	۰/۸۴۱ (+۲/۱)	۰/۸۵۱ (+۳/۳)¹	۰/۲۵
۰/۹۸۲	۰/۹۸۵ (+۰/۳)	۰/۹۸۳ (-۰/۱)	۰/۹۸۵ (-۰/۳)	۰/۸۶۸	۰/۸۶۶ (-۰/۲)	۰/۸۶۶ (-۰/۲)	۰/۸۶۹ (+۰/۱)	۰/۷۴۷	۰/۷۴۲ (-۰/۷)	۰/۷۰۹ (-۵/۱)	۰/۷۰۸ (-۵/۲)	۰/۵۰
۰/۹۸۱	۰/۹۸۷ (+۰/۶)	۰/۹۸۲ (+۰/۱)	۰/۹۸۳ (۰/۲)	۰/۸۷۳	۰/۸۷۰ (-۰/۳)	۰/۸۶۷ (-۰/۷)	۰/۸۶۵ (-۰/۹)	۰/۶۸۲	۰/۷۱۶ (+۵/۰)	۰/۶۹۲ (+۱/۵)	۰/۶۶۲ (-۳/۰)	۱/۰۰
۰/۹۸۴	۰/۹۷۸ (-۰/۶)	۰/۹۸۱ (۰/۳)	۰/۹۸۰ (۰/۴)	۰/۸۸۶	۰/۸۷۲ (- ۱/۶)	۰/۸۷۴ (- ۱/۴)	۰/۸۷۱ (- ۱/۷)	۰/۶۷۲	۰/۷۰۰ (+۴/۲)	۰/۶۷۰ (-۰/۳)	۰/۶۴۶ (-۳/۹)	۲/۰۰
۰/۹۸۴	۰/۹۸۰ (-۰/۴)	۰/۹۸۰ (-۰/۴)	۰/۹۸۲ (-۰/۲)	۰/۸۹۸	۰/۸۹۴ (-۰/۴)	۰/۸۹۰ (-۰/۹)	۰/۸۸۷ (-۱/۲)	۰/۷۲۱	۰/۷۶۶ (+۶/۲)	۰/۷۱۰ (-۱/۵)	۰/۷۰۵ (-۲/۲)	۵/۰۰
۰/۹۷۲	۰/۹۷۵ (+۰/۳)	۰/۹۸۷ (+۱/۵)	۰/۹۹۱ (+۱/۹)	۰/۸۹۴	۰/۸۹۳ (-۰/۱)	۰/۹۰۱ (+۰/۸)	۰/۹۰۰ (+۰/۷)	۰/۷۸۶	۰/۶۷۴ (-۱۴/۲)	۰/۷۴۴ (-۵/۳)	۰/۶۷۰ (-۱۴/۷)	۱۰/۰۰

بطوری که در جدول ۲ مشاهده می‌شود، پارامتر $G(r, \theta)$ حساب شده با کد MCNP و مقادیر نظیر به دست آمده توسط Rivard [۹] توافق خوبی دارند (اختلاف کمتر از ۵ درصد) و هر دوی این مقادیر نسبت به مقادیر نظیر محاسبه شده به روش تحلیلی در زوایای صفر و ۳۰ درجه در فاصله‌های نزدیک، میزان اختلاف بالای ۵ درصد را نشان می‌دهند. این اختلاف در فواصل نزدیک به چشمه ناشی از مبنای محاسبه در روش تحلیلی (براساس دستور کار TG-43U1) می‌باشد؛ زیرا در این روش، محاسبات با فرض یک چشمه خطی با توزیع یکنواخت، صورت می‌گیرد (که با ساختار چشمه واقعی متفاوت است) و به همین دلیل، این مدل فقط در فواصل دور، که جزئیات درونی چشمه چندان در نتایج محاسبات مؤثر نبوده و چشمه به صورت

ابعاد آشکارساز فرضی حول زاویه صفر درجه است. نمونه‌ای از منحنی‌های $g(r)$ ، $G(r, 0)$ و $F(r, 0)$ به ترتیب در شکل‌های ۳، ۴ و ۵ نشان داده شده است. همانطور که در این نمودارها مشاهده می‌شود، نتایج بدست آمده توافق خوبی را نسبت به نتایج Rivard نشان می‌دهند.

۵- بحث و نتیجه‌گیری

با توجه به اینکه تولید چشمه‌های کم‌انرژی برای تراپی در آینده‌ای نه چندان دور برای درمان بیماران در کشور مورد استفاده قرار خواهد گرفت، با محاسبات دزیمتری انجام یافته، مقدمات مشخصه‌یابی دزیمتری اینگونه چشمه‌ها به منظور طراحی و کاربرد فراهم شده است.

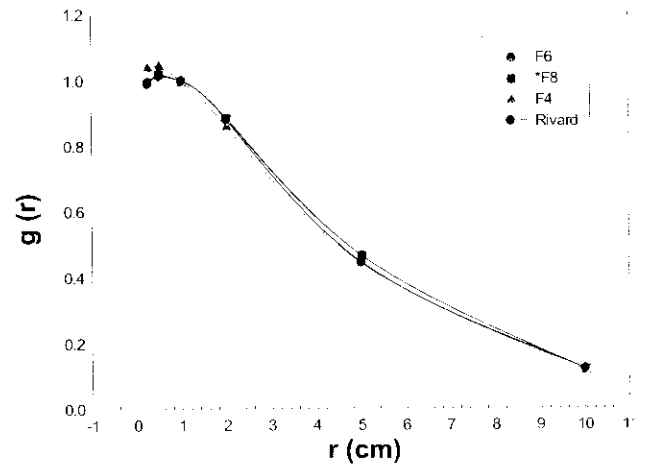


نقطه‌ای رفتار می‌کند، پاسخ‌های قابل قبولی را به دست می‌دهد. با توجه به جدول ۳، پارامترهای $g(r)$ و Λ توافق بسیار خوبی را با نتایج Rivard نشان می‌دهند و میزان اختلاف در تمام مقادیر کمتر از ۵ درصد می‌باشد. در جدول ۴ میزان اختلاف در مورد پارامتر $F(r, \theta)$ به جز در زاویه صفر درجه، نسبت به مقادیر نظیر Rivard، کمتر از ۵ درصد است. علت اختلاف بالای ۵ درصد در راستای زاویه صفر درجه در این مورد، کاهش آمار شمارش ذرات ناشی از دو اثر خود جذبی بیشتر پرتوها و کوچک بودن حجم سلول (آشکارساز فرضی) است.

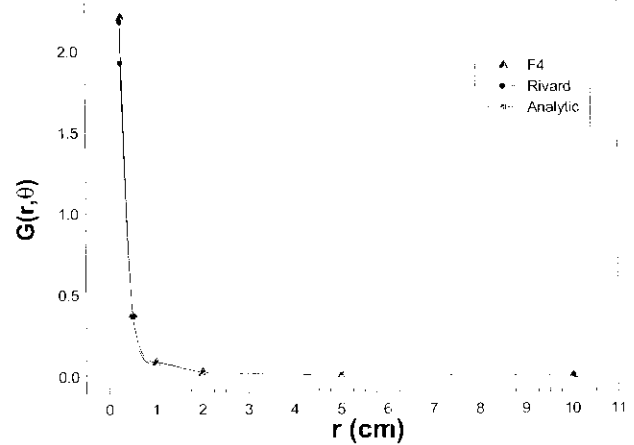
همچنین با توجه به مقایسه نتایج تالی‌های مختلف دز ($F8$ ، $F6$ و $F4$) از نظر دقت و سرعت محاسبات، می‌توان نتیجه گرفت که زمان اجرای تالی‌های $F4$ و $F6$ علاوه بر داشتن دقت قابل قبول، حدود ۲۰ برابر سریعتر از تالی $F8$ است که این نتیجه ممکن است در محاسبات متعدد لازم برای طراحی دقیق‌تر اینگونه چشمه‌ها، مورد استفاده قرار گیرد.

تشکر و قدردانی

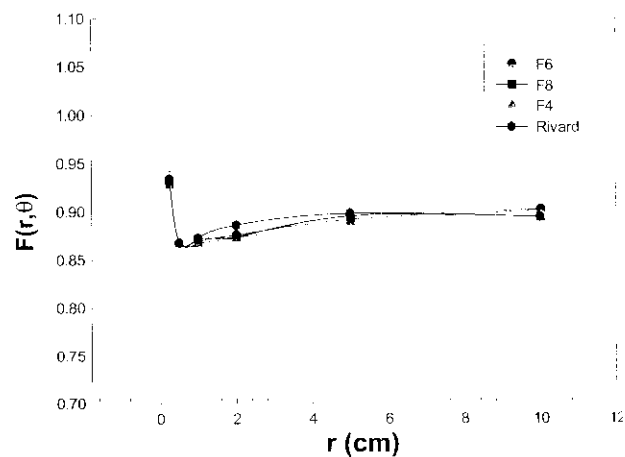
بدین وسیله بر خود لازم می‌دانیم از آقایان امیرحسین نوروزی و احسان حلاج‌فرد، که در این کار ما را یاری کرده‌اند، صمیمانه تشکر کنیم. همچنین از سرکار خانم لیلا محرمی‌نژاد که زحمت تایپ این مقاله را به عهده گرفتند، سپاسگزاریم.



شکل ۳- نمودار تابع دز شعاعی " $g(r)$ " بر حسب فاصله و مقایسه آنها با نتایج نظیر بدست آمده توسط Rivard.



شکل ۴- نمودار تابع آرایش هندسی " $G(R, \theta)$ " در زاویه ۳۰ درجه بر حسب فاصله و مقایسه آنها با نتایج نظیر بدست آمده از روش تحلیلی و Rivard.



شکل ۵- نمودار تابع ناهمسانگردی " $F(r, \theta)$ " در زاویه ۳۰ درجه بر حسب فاصله و مقایسه آنها با نتایج نظیر بدست آمده توسط Rivard.



References:

1. Y. Yu, L.L. Anderson, Z. Li, D.E. Mellenberg, R. Nath, M. Schell, F.M. Waterman, A. Wu, J.C. Blasko, "Permanent prostate seed implant brachytherapy: Report of the American Association of Physicists in Medicine Task Group Report No. 64," *Med. Phys.*, **26**, 2054–2076 (1999).
2. C. J. Mettlin, G. P. Murphy, D.S. Rosenthal, H.R. Menck, "The national cancer data base report on prostate carcinoma after the peak in incidence rates in the U.S.," *Cancer* **83**, 1679–1684 (1998).
3. H. Ragde, A-A.A. Elgamal, P.B. Snow, J. Brandt, A.A. Bartolucci, B.S. Nadir, L.J. Korb, "Ten-year disease free survival after transperineal sonography-guided iodine-125 brachytherapy with or without 45-gray external beam irradiation in the treatment of patients with clinically localized, low to high Gleason grade prostate carcinoma," *Cancer* **83**, 989–1001 (1998).
4. J.F. Williamson, "Dosimetric characteristics of the DraxImage Model LS-1 I-125 interstitial brachytherapy source design: A Monte Carlo investigation," *Med. Phys.*, **29**, 509–521 (2002).
5. C.C. Ling, M.C. Schell, E.D. Yorke, "Two-dimensional dose distribution of 125I seeds," *Med. Phys.*, **12**, 652–655 (1985).
6. R.S. Sloboda and G.V. Menon, "Experimental determination of the anisotropy function and anisotropy factor for model 6711 I-125 seeds," *Med. Phys.*, **27**, 1789–1799 (2000).
7. M.J. Rivard, B.M. Coursey, L.A. DeWerd, W.F. Hanson, M. Saiful Huq, G.S. Ibbott, M.G. Mitch, R. Nath, J.F. Williamson, "Update of AAPM Task Group No. 43 Report: A revised AAPM protocol for brachytherapy dose calculations," *Med. Phys.*, **31(3)**, 633-674 (2004).
8. J.F. Briesmeister, Ed., "MCNP-A General Monte Carlo N-particle Transport Code, Version 4C", LA 13709-M (2000).
9. M. J. Rivard, "Monte Carlo Calculations of AAPM Task Group Report No.43 dosimetry parameters for the MED3631 -A/M ¹²⁵I Source," *Med. Phys.*, **28**, 629-637 (2001).
10. ICRP No. 74, "Conversion coefficient for use in radiological protection against external radiation," ICRP and ICRU (1997).