

بررسی اثر تغییرات ابعاد چشمه‌های براکی‌تراپی با آهنگ دز بالا در کمیت‌های دزیمتری با ابزار مونت کارلوی GEANT^۴

شهناز شفیعی^۱، علی اصغر مولوی^{۲*} و زهرا سادات سجادی^۱

^۱ گروه فیزیک، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران.

^۲ گروه فیزیک، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، خراسان رضوی، ایران.

* ایران، سبزوار، دانشگاه حکیم سبزواری، دانشکده علوم پایه، گروه فیزیک، کد پستی: ۹۶۱۷۹۷۶۴۸۷.

پست الکترونیکی: a.mowlavi@hsu.ac.ir

چکیده

در این تحقیق، چشمه استاندارد BEBIG با ابزار مونت کارلوی GEANT^۴ شبیه‌سازی و توزیع دز دوبعدی و عامل هندسی برای چشمه خطی و چشمه استوانه‌ای محاسبه شد. در چشمه استاندارد BEBIG تغییر ابعادی بدون تغییر حجم با ثابت بودن اکتیویته، اعمال شد و با طراحی جدید، عامل هندسی برای چشمه خطی و چشمه استوانه‌ای محاسبه گردید. برای هر دو چشمه، با داشتن آهنگ دز چشمه و عامل هندسی استوانه‌ای، تابع ناهمسان‌گردی و تابع دز شعاعی محاسبه شده‌اند. مقدار دز برای هر دو چشمه BEBIG استاندارد و BEBIG تغییر ابعاد داده شده در نزدیکی آنها خیلی زیاد است و با دور شدن از چشمه این مقدار کاهش یافته است. عامل هندسی در روش مونت کارلو برای چشمه BEBIG تغییر ابعاد داده شده ضروری به نظر می‌رسد؛ اما برای چشمه BEBIG استاندارد قابل تقریب است. در فواصل نزدیک چشمه تغییر ابعاد داده شده ناهمسان‌گردی خیلی کاهش یافته؛ بنابراین برای تومورهای هدف، توزیع دز یکدست‌تر است.

کلیدواژه‌گان: چشمه BEBIG، کمیت‌های دزیمتری، ابزار مونت کارلوی GEANT^۴، پروتکل TG-۴۳U۱، عامل هندسی.

۱. مقدمه

در همه موارد براکی‌تراپی، چشمه تابش داخل محفظه‌ای قرار داده شده، بدین صورت که مواد پرتوزا در داخل کپسول فلزی احاطه می‌شود. معمولاً رایج‌ترین چشمه پرتوزا در براکی‌تراپی با آهنگ دز بالا کبالت ۶۰ است که در کپسول‌هایی از جنس فولاد ضدزنگ به شکل استوانه‌ای محکم و درزبندی شده قرار می‌گیرد. این چشمه‌های پرتوزا مدت‌هاست که در درمان به روش براکی‌تراپی استفاده می‌شوند؛ بنابراین بهینه‌سازی و تغییر هندسه

برای درمان تومورهای سرطانی متمرکز، از روش براکی‌تراپی استفاده می‌شود. براکی‌تراپی با آهنگ دز بالا^۱ (HDR) یک تکنیک روبه‌رشد است [۱]. در براکی‌تراپی از رادیوایزوتوپ‌های پرتوزایی که تابش گاما دارند، برای از بین بردن سلول‌های سرطانی و کوچک کردن تومور استفاده می‌شود. در پرتودرمانی براکی‌تراپی با آهنگ دز بالا از چشمه‌های رادیوم ۲۲۶، سزیم ۱۳۷، کبالت ۶۰، ایریدیوم ۱۹۲ و طلا ۱۹۸ استفاده می‌شود.

^۱ . High dose rate

آن‌ها مناسب با تومورهای متفاوت امری ضروری است؛ بنابراین انجام این پژوهش لازم و مفید به نظر می‌رسد.

در این پژوهش چشمه استاندارد BEBIG^۱ [۲] به کمک ابزار مونت کارلوی GEANT^۴ [۳] شبیه‌سازی و کمیت‌های دزیمتری آن مطابق توصیه‌های انجمن فیزیک پزشکی آمریکا در پروتکل TG-۴۳U^۳ [۴] محاسبه شده‌اند. در پروتکل TG-۴۳U^۱ عامل هندسی به صورت خطی تخمین زده شده است. همان‌طور که می‌دانیم عامل هندسی به شکل و هندسه چشمه وابسته است؛ بنابراین عامل هندسی را به کمک مونت کارلو با قراردادن شکل واقعی چشمه، به صورت استوانه‌ای محاسبه کردیم و کمیت‌های دزیمتری را در دو حالت مقایسه نمودیم. اخیراً جويا و همکارانش اعتبارسنجی داده‌های دزیمتری چشمه فوق را با استفاده از کد مونت کارلو مبتنی بر GATE GEANT^۴ انجام دادند. نتایج محاسبه شده ناهمسان‌گردی و توابع دز شعاعی که از ۰/۱ سانتی‌متر تا ۱۰ سانتی‌متر در اطراف چشمه شروع می‌شود، مطابقت بسیار خوبی با نتایج مطالعات منتشر شده داشته است. میانگین تغییرات دز شعاعی و مقادیر توابع ناهمسان‌گردی از داده‌های توافق شده به ترتیب ۱٪ و ۰/۹٪ بود [۵].

سقامنش و همکارانش شبیه‌سازی مونت کارلو برای محاسبه پارامترهای دزیمتری و دزهای مؤثر معادل وارد بر قلب و بافت‌های پیرامون آن را در طی IVBT^۴ (براک‌تراپی داخل عروقی) انجام دادند. نتایج مطالعه آن‌ها با داده‌های تجربی منتشر شده و سایر شبیه‌سازی‌هایی که توسط برنامه‌های مختلف اما با همان چشمه پرتودهی انجام شده بودند، توافق بسیار خوبی دارد. همچنین در این مطالعه ارزیابی از خطرات احتمالی برای

قلب و دیگر بافت‌های نرم حساس اطراف رگ تحت درمان در هنگام براکی‌تراپی $^{90}\text{Y} / ^{90}\text{Sr}$ انجام گرفته است [۶].

بهولا و همکارانش یک روش تحلیلی ساده مبتنی بر چشمه نقطه‌ای برای محاسبه توزیع آهنگ دز در آب پیشنهاد کردند و با استفاده از این روش ثابت آهنگ دز، تابع دز شعاعی و تابع ناهمسان‌گردی را محاسبه کردند. همچنین یک جدول آهنگ دز دوبعدی در قالب دکارتی محاسبه کردند. برای نواحی که تعادل الکترونیکی وجود دارد، مقایسه‌ای بین داده‌های محاسبه‌شده تحلیلی و داده‌های منتشر شده مبتنی بر مونت کارلو، توافق خوبی را نشان می‌دهد (برای اکثر نقاط محاسبه، توافق در محدوده ۰/۵٪ بود و حداکثر انحراف حدود ۳٪ بود) [۷].

سلوان و همکارانش آهنگ توزیع دز دوبعدی چشمه BEBIG^{۶۰}Co را محاسبه کردند و توسط کد مونت کارلو EGSnrc دز جذبی و کرما را در آب و هوا محاسبه کردند. آن‌ها از کدهای مونت کارلو MCNP-۴C و MCNPX برای محاسبه ثابت آهنگ دز استفاده کردند؛ سپس توزیع دز دوبعدی، تابع دز شعاعی و تابع ناهمسان‌گردی را برای چشمه‌های Ralstron ^{60}Co و ^{192}Ir microSelectron و GZP^۶ مقایسه کردند. از مقایسه داده‌های آهنگ دز با نتایج منتشر شده مونت کارلو مبتنی بر GEANT^۴ مشخص شده که تفاوت‌هایی تا حدود ۹٪ در نقاط بسیار نزدیک به چشمه‌های BEBIG در فاصله ۰/۲۵ سانتی‌متر از محور طولی مشاهده می‌شود. علاوه بر چشمه جدید، داده‌های آهنگ دز در امتداد محور طولی، در سمتی که کابل چشمه به آن متصل است، ۱۴٪ بیشتر هستند [۸].

مروی و همکاران مطالعه‌ای باهدف ارزیابی دقت محاسبات سیستم طراحی درمان در براکی‌تراپی سرطان رحم، توسط دستگاه BEBIG^{۶۰}Co با انجام دزیمتری سطحی پوست با

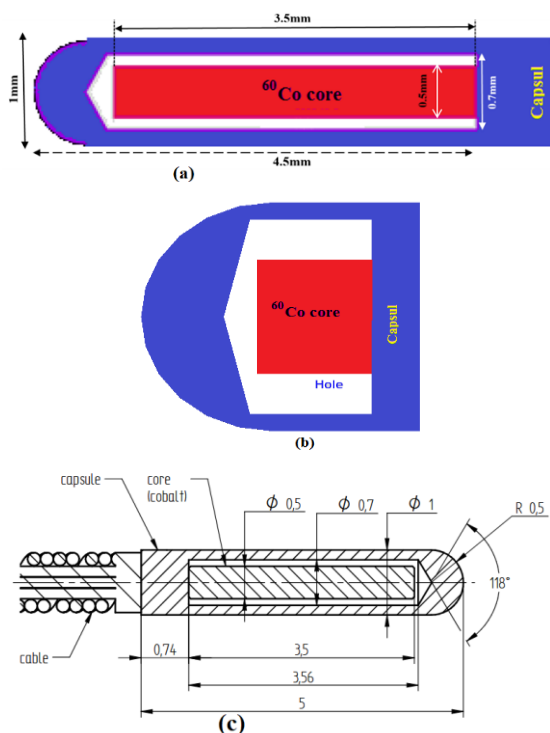
^۱ BEBIG Medical GmbH نام یک شرکت آلمانی است که در زمینه ساخت تجهیزات درمان سرطان از جمله محصولات رادیوتراپی کار می‌کند، به‌ویژه در حوزه براکی‌تراپی فعالیت دارد.

^۲ Geometry And Tracking

^۳ Task Group ۴۳ Update ۱

^۴ IntraVascular BrachyTherapy

تغییر حجم، انجام شده؛ تا تأثیر آن در عامل هندسی و دز بررسی شود. البته دیگر کمیت‌های دزیمتری نیز با تغییر دز و عامل هندسی تغییر خواهند کرد. طول استوانه یک چهارم و شعاع مقطع آن دو برابر شد که ابعاد هسته به صورت $h = 0.875 \text{ mm}$ و $r = 0.5 \text{ mm}$ محاسبه و چشمه طراحی گردید. در شکل (۱b) نمایی از این چشمه شبیه‌سازی شده توسط ابزار GEANT۴ مشاهده می‌شود.



شکل (۱): (a) چشمه BEBIG استاندارد [۲]، و (b) چشمه BEBIG تغییر ابعاد داده شده شبیه‌سازی شده توسط ابزار GEANT۴ و (c) شکل واقعی از چشمه استاندارد.

۲.۳. محاسبه‌ی دز دوبعدی

گزارش TG-۴۳U۱ توسط انجمن فیزیک پزشکی آمریکا^۲ (AAPM) چشمه‌ها را استوانه‌ای و متقارن در نظر گرفته است، بنابراین تقارن استوانه‌ای وجود دارد و توزیع دز، دوبعدی می‌شود. پس می‌توان آن را در سیستم مختصات قطبی توصیف کرد؛ درحالی‌که راهکار قدیمی فقط چشمه‌های همسان‌گرد نقطه‌ای را در یک بعد در نظر گرفته بود. با استفاده از این دستگاه

استفاده از دزیمترهای ترمولومینسانس (TLD^۱) انجام دادند و دقت سیستم طراحی درمان را بهبود بخشیدند [۹].

۲. روش‌های محاسباتی و شبیه‌سازی

در این مطالعه چشمه استاندارد براکی‌تراپی ^{60}Co BEBIG به کمک ابزار مونت‌کارلوی GEANT۴ شبیه‌سازی شد. سپس ابعاد چشمه BEBIG با شرط ثابت ماندن حجم آن تغییر داده و شبیه‌سازی گردید. دز دوبعدی برای هر چشمه به صورت جداگانه به دست آمده و عامل هندسی برای هر چشمه به دو روش، یکی مطابق پروتکل TG-۴۳U۱ به صورت تقریب خطی و دیگری با هندسه واقعی به شکل استوانه‌ای با محاسبات مونت‌کارلوی GEANT۴ محاسبه شد. با داشتن عامل هندسی در حالت استوانه‌ای و دز دوبعدی، کمیت‌های تابع دز شعاعی و تابع ناهمسان‌گردی محاسبه و نتایج مقایسه شده است.

۲.۱. شبیه‌سازی طراحی چشمه‌ی BEBIG

هندسه چشمه استاندارد BEBIG شامل کپسول فولاد ضدزنگ، نیمکره‌ای به شعاع 0.5 mm و یک استوانه به ارتفاع $4/5 \text{ mm}$ و شعاع 0.5 mm است که فاصله‌ی مرکز نیم‌کره تا مرکز استوانه $2/25 \text{ mm}$ است. درون کپسول، حفره‌ای شامل مخروط و استوانه است که فاصله‌ی مرکز مخروط تا مرکز استوانه $1/88 \text{ mm}$ و ارتفاع مخروط $0/2 \text{ mm}$ و شعاع مقطع آن $0/35 \text{ mm}$ است. چشمه BEBIG دارای یک هسته‌ی مرکزی استوانه‌ای شکل از جنس کبالت به ارتفاع $3/5 \text{ mm}$ و شعاع خارجی $0/25 \text{ mm}$ است [۲]. چشمه شبیه‌سازی شده توسط ابزار GEANT۴ در شکل (۱a) نشان داده شده است.

۲.۲. تغییر در هندسه‌ی چشمه BEBIG بدون تغییر در حجم آن

با ثابت ماندن اکتیویته‌ی چشمه، عامل هندسی به شکل چشمه بستگی دارد. بنابراین تغییراتی در ابعاد چشمه BEBIG بدون

^۲American Association of Physicists in Medicine

^۱Thermoluminescent Dosimeter

مختصات، برای محاسبه آهنگ دز دوبعدی چشمه‌های براکی‌تراپی خطی گسیل‌کننده فوتون از معادله (۱) استفاده می‌شود:

$$\dot{D}(r, \theta) = \Lambda S_K \frac{G_L(r, \theta)}{G_L(r, \theta)} F(r, \theta) g_L(r) \quad (1)$$

که در آن، S_K قدرت کرمای هوا، Λ ثابت آهنگ دز، $G_L(r, \theta)$ عامل هندسی، $g_L(r)$ تابع دز شعاعی و $F(r, \theta)$ تابع ناهمسان‌گردی هستند. نقطه‌ی (r, θ) مرجع $r = 1$ سانتی‌متر و $\theta = \frac{\pi}{4}$ انتخاب شده است. لازم به توضیح است که پروتکل TG-۴۳ پارامترهای دزیمتری را بر حسب آهنگ دز ($\dot{D}$) بیان می‌کند، در حالی‌که خروجی حاصل از شبیه‌سازی‌های مونت کارلو، دز جذب شده (D) به ازای هر ذره اولیه است. از آن‌جا که در شبیه‌سازی‌های فیزیکی انتقال فوتون در آب (برخلاف برخی دزیمترهای تجربی)، پدیده‌هایی نظیر اشباع یا وابستگی به آهنگ دز^۱ وجود ندارد و پاسخ محیط کاملاً خطی است، می‌توان توزیع دز جذب شده و توزیع آهنگ دز را در چارچوب

G-۴۳ و با در نظر گرفتن نرمالیزه‌سازی نسبت به قدرت کرمای هوا به یکدیگر مربوط دانست. بنابراین در این پژوهش، مقادیر نرمالیزه‌شده دز محاسبه‌شده توسط مونت کارلو مستقیماً با مقادیر نرمالیزه‌شده آهنگ دز در چارچوب TG-۴۳ مقایسه شده‌اند.

در ابزار مونت کارلوی GEANT۴ برای محاسبه دز، از مش‌بندی در مختصات قطبی کروی، θ با تقسیمات یک درجه‌ای و r با تقسیمات ۰/۵ میلی‌متری استفاده شد. فیزیک مورد استفاده شده در قسمت واپاشی هسته‌ای کبالت، G۴RadioactiveDecay بوده و پس از واپاشی ذرات، فرایند الکترومغناطیسی بر اساس مدل Penelope انتخاب شد. محدوده قطع برد ۰/۰۱ میلی‌متر برای الکترون، پوزیترون و گاما تعریف شده است. در مدل BEBIG توزیع دز در مرکز چشمه متقارن نیست؛ بنابراین محدوده θ از صفر تا ۱۸۰ است. برنامه با یک پردازنده Intel(R) Core(TM) i۳-۱۰۱۰۰ CPU @

۴.۲. محاسبه عامل هندسی

عامل هندسی، تغییر نسبی دز را فقط به دلیل توزیع فضایی ماده پرتوزا در چشمه بدون غلاف، با نادیده گرفتن جذب و پراکندگی فوتون در ساختار چشمه، محاسبه می‌کند.

عامل هندسی، $G_L(r, \theta)$ ، بر حسب cm^{-2} است که بیانگر کاهش شار فوتون‌ها با افزایش فاصله از چشمه بوده و وابستگی آن به توزیع فضایی ماده پرتوزا را نشان می‌دهد. عامل هندسی مطابق رابطه (۲) به صورت انتگرال روی حجم چشمه تعریف می‌شود:

$$G(\vec{r}) = \frac{\int_{V_s} \frac{\rho(\vec{r}') d(v')}{|\vec{r} - \vec{r}'|^2}}{\int_{V_s} \rho(\vec{r}') d(v')} \quad (2)$$

برای چشمه‌های نقطه‌ای عامل هندسی به $G(\vec{r}) = r^{-2}$ تبدیل می‌شود؛ و برای چشمه خطی، به دلیل وجود تقارن سمتی، عامل هندسی مستقل از زاویه ϕ است و به صورت $G(\vec{r}) = G(r, \theta)$ ساده می‌شود. توزیع سه بعدی $\rho(\vec{r}')$ در تعیین $G(\vec{r})$ مؤثر است، ولی این مقدار برای بسیاری از چشمه‌ها دقیقاً مشخص نیست.

عامل هندسی در گزارش TG-۴۳U۱ از تقریب چشمه‌های خطی مطابق رابطه (۳) است [۱۱، ۱۰]:

$$G(\vec{r}) = G_L(r, \theta) \approx \frac{\beta}{Lr \sin(\theta)} \quad (3)$$

که در آن مطابق شکل (۲)، L طول فعال چشمه برحسب سانتی‌متر و $\beta = \theta_p - \theta_r$ زاویه متناظر با نقطه مورد نظر و دو انتهای طول فعال L است.

^۱ . Dose- rate dependence

عامل هندسی محاسبه شده به روش مونت کارلو استفاده شده است.

۶.۲. تابع ناهمسان‌گردی

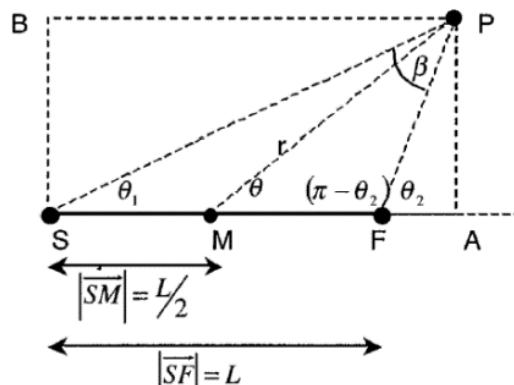
با داشتن آهنگ دز چشمه و عامل هندسی، تابع ناهمسان‌گردی که ناهمسان‌گردی توزیع دز در اطراف چشمه است، از رابطه (۶) محاسبه می‌شود:

$$F(r, \theta) = \frac{D(r, \theta) G_L(r, \theta)}{D(r, \theta) G_L(r, \theta)} \quad (6)$$

این تابع دوبعدی تغییرات آهنگ دز در اطراف چشمه در فواصل و زوایای مختلف به دلیل جذب فوتون توسط غلاف را نشان می‌دهد. مقدار $F(r, \theta)$ در صفحه‌ی عرضی $\theta = \frac{\pi}{4}$ برابر یک است البته این مقدار با تغییر زاویه‌ی قطبی به سمت صفر یا صد و هشتاد درجه به دلیل تضعیف فوتون توسط غلاف و هسته چشمه، کاهش می‌یابد. برای یک زاویه مشخص، مقدار $F(r, \theta)$ با افزایش فاصله، به دلیل افزایش نسبت تابش پراکنده به تابش اولیه، افزایش می‌یابد. در این تحقیق در رابطه (۶) عامل هندسی مونت کارلو جایگزین شده است.

۳. نتایج

برای مقایسه تأثیر عامل هندسی و تأثیر هندسه چشمه بر کمیت‌های دزیمتری، ابتدا دز چشمه کروی و نمودار $r^2 G(r, \theta)$ بر حسب زاویه برای فواصل مختلف در شکل‌های ۳ و ۴ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود توزیع دز در تمام زوایا متقارن است. همان‌طور که انتظار می‌رود نمودار $r^2 G(r, \theta)$ بر حسب زاویه در همه فواصل مقدار ثابت است. در ادامه کار چشمه‌ها شبیه‌سازی شده و پس از محاسبه دز دوبعدی، کمیت‌های دزیمتری با جاگزینی عامل هندسی محاسبه شده به روش مونت کارلو به دست آمدند؛ و نمودارهای کمیت‌های دزیمتری دو چشمه رسم و مقایسه شد.



شکل (۲): هندسه چشمه خطی برای محاسبه فاکتور هندسی در نقطه

P [۱۱].

در نهایت معادله تقریبی عامل هندسی برای یک چشمه خطی به صورت رابطه (۴) است: $(\theta \neq 0, \pi)$

$$G_L(r, \theta) = \frac{1}{Lr \sin(\theta)} \sin^{-1} \left(\frac{L \sin \left[\tan^{-1} \left(\frac{r \sin \theta}{r \cos \theta - L/r} \right) \right]}{\sqrt{(r \sin \theta)^2 + (r \cos \theta + L/r)^2}} \right) \quad (4)$$

عامل هندسی برای چشمه استوانه‌ای به روش تحلیلی قابل حل نیست، بنابراین مقدار آن از روش مونت کارلو محاسبه می‌شود. در این تحقیق علاوه بر این که کپسول چشمه به صورت خطی تقریب زده و به روش تحلیلی تقریبی حل شده است؛ هندسه چشمه به صورت واقعی در نظر گرفته و به روش مونت کارلو، انتگرال آن محاسبه گردید. سپس نمودارهای دو حالت در فواصل یکسان برای تمام زوایا مقایسه شده است.

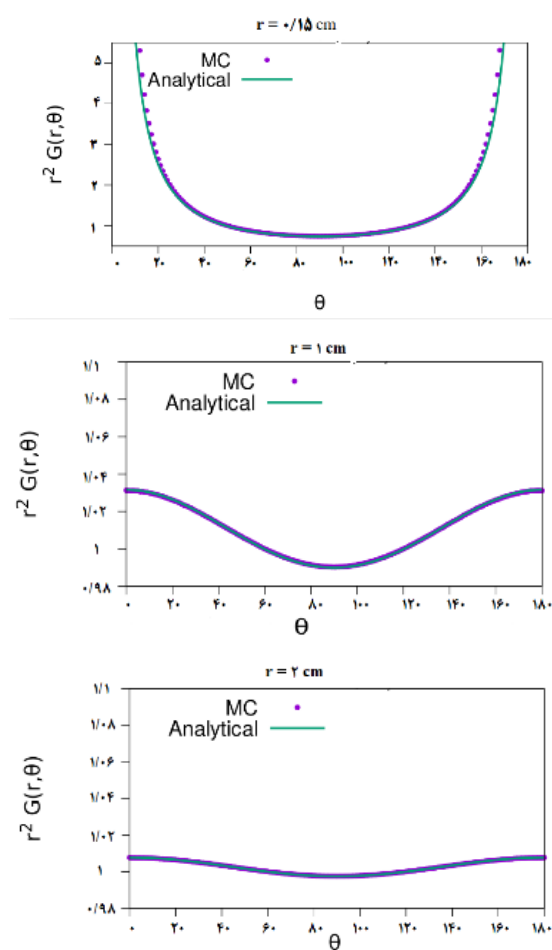
۵.۲. تابع دز شعاعی

با داشتن آهنگ دز چشمه و عامل هندسی، تابع دز شعاعی که بدون بعد است، از رابطه (۵) محاسبه می‌شود:

$$g_x(r) = \frac{D(r, \theta) G_x(r, \theta)}{D(r, \theta) G_x(r, \theta)} \quad (5)$$

تابع دز شعاعی فقط برای محور عرضی $\theta = \frac{\pi}{4}$ به کار می‌رود و به مکان نقطه‌ی محاسبه، در صفحه عرضی، بستگی دارد. مقدار r در نقطه $P(r, \theta)$ (نقطه مرجع) برابر یک سانتی‌متر است. زیرنویس x که در نسخه‌ی بروزرسانی TG-۴۳ اضافه شده است، اشاره به نوع چشمه از نظر هندسی دارد به گونه‌ای که P برای چشمه‌های نقطه‌ای و L برای چشمه‌های خطی به کار می‌رود. برای محاسبه تابع دز شعاعی، از

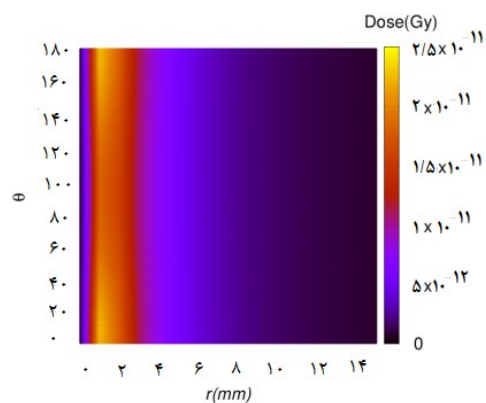
همان‌طور که می‌دانیم عامل هندسی، بر حسب cm^{-2} است؛ پس $r^2 G(r, \theta)$ بعد ندارد و باید مقدار آن در زاویه ۹۰ درجه برابر یک شود. این مقدار برای چشمه خطی (تحلیلی) و چشمه استوانه‌ای (مونت کارلو) تفاوت چندانی ندارند. به‌ویژه در فاصله دور از چشمه این دو مقدار کاملاً همپوشانی دارند. عامل هندسی در روش محاسبه مونت کارلو برای این چشمه قابل تقریب است. در فاصله یک سانتی متری چشمه مقادیر آنالیتیکال و مونت کارلو در تمامی زوایا خیلی نزدیک هستند. یعنی ناهمسان‌گردی به صفر نزدیک شده است.



شکل (۵): نمودار $r^2 G(r, \theta)$ بر حسب زاویه در سه شعاع

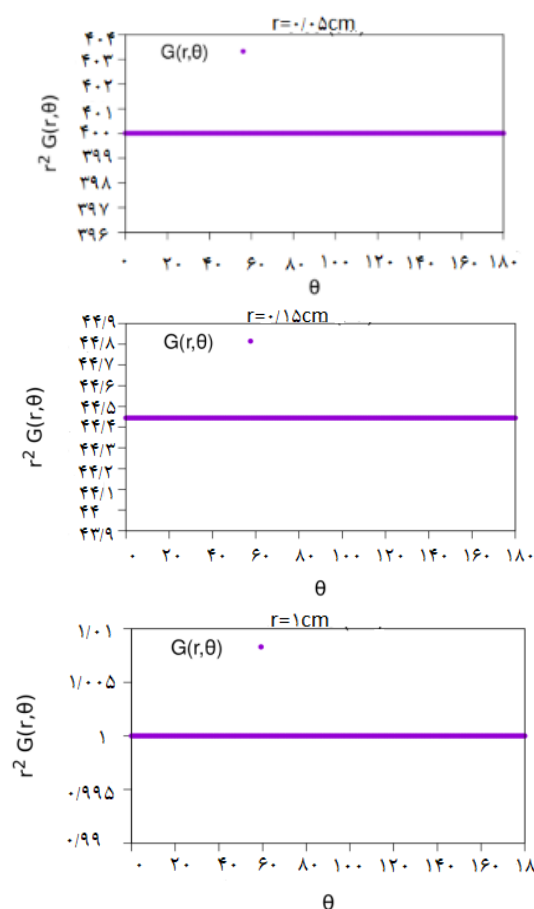
مختلف از چشمه BEBIG.

نمودار تابع دز شعاعی به همراه خطا برای چشمه BEBIG استاندارد در فواصل مختلف از آن، در شکل (۶a) رسم شده است با دور شدن از چشمه مقدار، $g_L(r)$ کاهش یافته است.



شکل (۳): نمودار دز دوبعدی به ازای یک فوتون چشمه تا فاصله ۱/۵

سانتی متری چشمه کروی در زوایای صفر تا ۱۸۰ درجه.

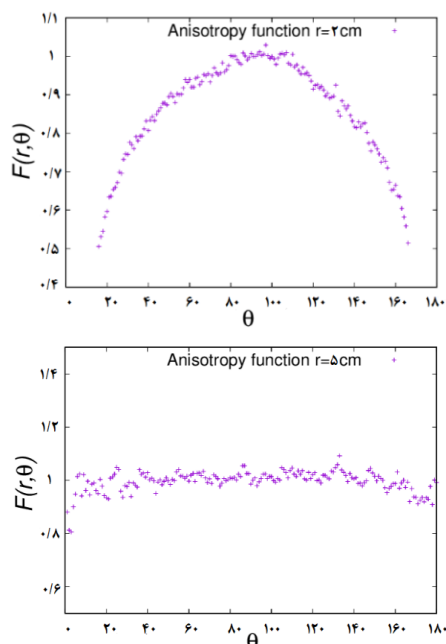


شکل (۴): نمودار $r^2 G(r, \theta)$ بر حسب زاویه در سه شعاع مختلف از

چشمه کروی.

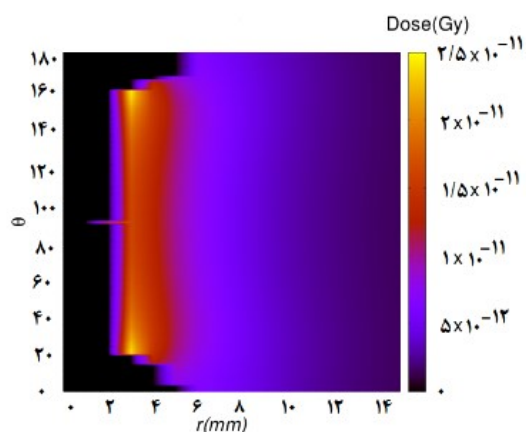
۱.۳ چشمه BEBIG استاندارد

نمودارهای $r^2 G(r, \theta)$ بر حسب زاویه برای فواصل مختلف در دو حالت چشمه خطی (تحلیلی) و چشمه استوانه‌ای (مونت کارلو) در فواصل ۰/۰۵ و ۰/۱۵ و ۱ سانتی متری از چشمه BEBIG استاندارد در شکل ۵ رسم و مقایسه شده‌اند.



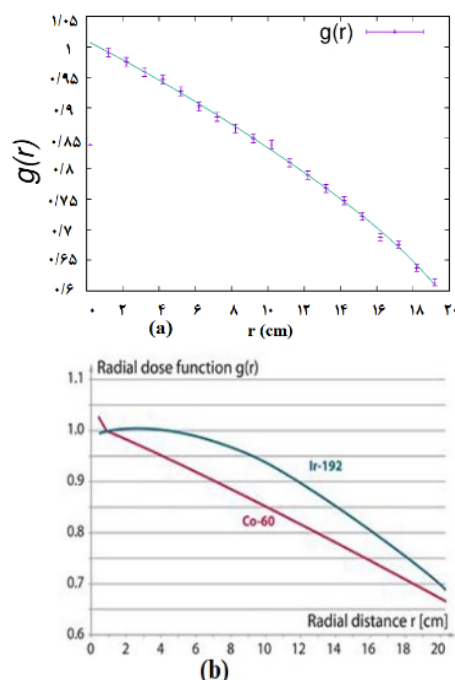
شکل (۷): نمودار تابع ناهمسان‌گردی چشمه BEBIG استاندارد در فواصل ۲ و ۵ سانتی‌متری از چشمه.

نتایج دز دوبعدی پس از اجرای برنامه برای 10^9 ذره به ازای یک فوتون چشمه تا فاصله‌ی ۱/۵ سانتی‌متری چشمه BEBIG استاندارد، در شکل ۸ قابل مشاهده است. همان‌طور که دیده می‌شود؛ مقدار دز در نزدیکی چشمه خیلی زیاد و با دور شدن از آن کاهش یافته است. مقدار دز در زوایای ۲۰ تا ۱۶۰ درجه در چشمه BEBIG استاندارد همسان‌گردتر است؛ زیرا با توجه به ابعاد آن به حالت خطی نزدیک‌تر است.



شکل (۸): نمودار دز دوبعدی به ازای یک فوتون چشمه تا فاصله ۱/۵ سانتی‌متری چشمه BEBIG استاندارد.

خطا در محاسبه تابع دز شعاعی نسبت به نمودار تجربی شکل (۶b) حدود ۴٪ است و تطابق کاملاً مشهود است.



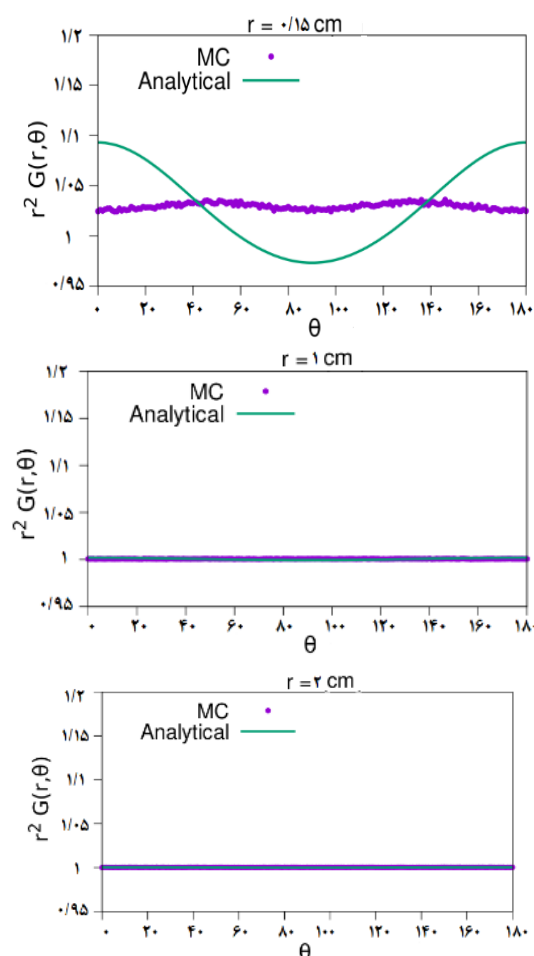
شکل (۹): (a) تابع دز شعاعی و خطای آن بر حسب فاصله از چشمه BEBIG و (b) نمودار تجربی از سایت BEBI [۱۲].

با توجه به تطابق نمودار تابع دز شعاعی اطراف چشمه استاندارد BEBIG شبیه‌سازی‌شده در این پژوهش با نمودار تجربی آن در سایت BEBIG می‌توان انتظار داشت کمیت‌های دزیمتری چشمه طراحی شده نیز قابل راستی‌آزمایی با چشمه استاندارد شبیه‌سازی شده باشد.

نمودار تابع ناهمسان‌گردی بر حسب زاویه به کمک نرم‌افزار GNUPLOT در فواصل ۲ سانتی‌متر و ۵ سانتی‌متری از چشمه استاندارد BEBIG در شکل ۷ رسم شده است. ناهمسان‌گردی در زوایای نزدیک به صفر و ۱۸۰ درجه کمتر از یک و در زاویه ۹۰ درجه برابر یک است. نتیجه این که توزیع دز چشمه در دو انتهایش نامتقارن و در قسمت میانی متقارن است. در فاصله دورتر از چشمه ($r = 5$ cm) مقدار ناهمسان‌گردی در تمام زوایا نزدیک به یک است بنابراین توزیع دز در فواصل دور از چشمه متقارن است.

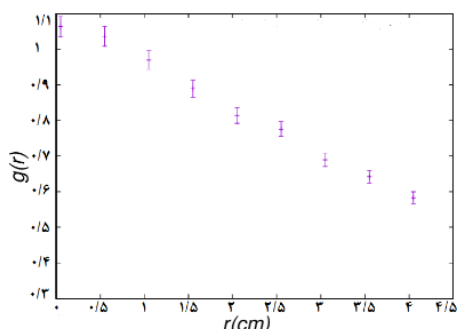
۲.۳. چشمه BEBIG تغییر ابعاد داده شده

نمودارهای $r^2 G(r, \theta)$ بر حسب زاویه برای فواصل مختلف در دو حالت چشمه خطی (تحلیلی) و چشمه استوانه‌ای (مونت کارلو) در فواصل ۰/۰۵ و ۰/۱۵ و ۱ سانتی‌متری از چشمه BEBIG تغییر ابعاد داده شده در شکل ۹ رسم و مقایسه شده‌اند. در چشمه تغییر ابعاد داده شده محاسبات مونت کارلو برای هندسه استوانه‌ای نسبت به حالت خطی متفاوت است. مقادیر مونت کارلو خیلی نزدیک به یک بوده و تفاوت دو هندسه چشمه، کاملاً مشهود است؛ بنابراین عامل هندسی در روش محاسبه مونت کارلو برای این چشمه ضروری است. در فاصله یک سانتی‌متری چشمه، مقادیر آنالیتیکال و مونت کارلو در تمامی زوایا خیلی نزدیک هستند؛ یعنی ناهمسان‌گردی به صفر نزدیک است.



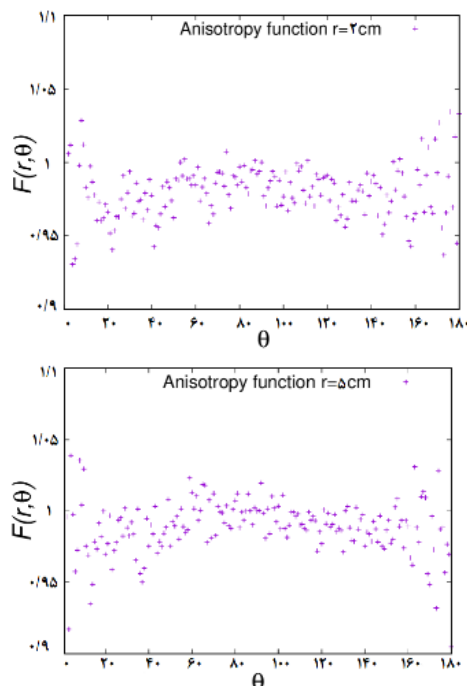
شکل (۹): نمودار $r^2 G(r, \theta)$ بر حسب زاویه در سه شعاع مختلف از چشمه BEBIG تغییر ابعاد داده شده.

نمودار تابع دز شعاعی به همراه خطا برای چشمه BEBIG تغییر ابعاد داده شده در شکل ۱۰ رسم شده است. با دور شدن از چشمه مقدار، $g_L(r)$ کاهش یافته است.



شکل (۱۰): تابع دز شعاعی و خطای آن بر حسب فاصله از چشمه تغییر BEBIG تغییر ابعاد داده شده.

نمودار تابع ناهمسان‌گردی بر حسب زاویه در فواصل ۲ سانتی‌متر و ۵ سانتی‌متری از چشمه BEBIG تغییر ابعاد داده شده، در شکل ۱۱ رسم شده است. مقدار ناهمسان‌گردی در دو سانتی‌متری و پنج سانتی‌متری چشمه در زوایای ۱۶۰ تا ۱۸۰ درجه خیلی زیاد شده است و این به دلیل هندسه چشمه است.



شکل (۱۱): نمودار تابع ناهمسان‌گردی چشمه BEBIG تغییر ابعاد داده شده در فواصل ۲ و ۵ سانتی‌متری از چشمه.

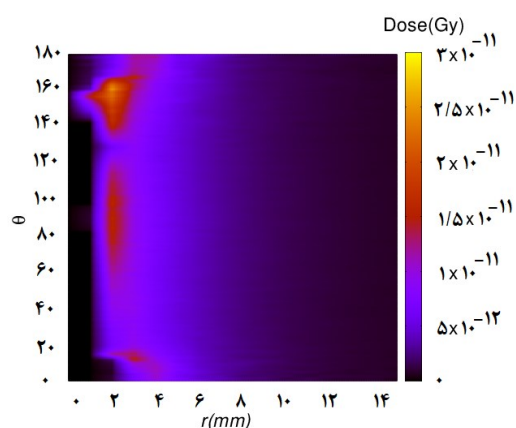
۴. بحث و نتیجه‌گیری

بررسی نتایج و نمودارها نشان می‌دهد که محاسبه‌ی عامل هندسی به روش محاسبه‌ی مونت‌کارلو برای چشمه‌ی BEBIG تغییر ابعاد داده شده، ضروری است؛ و برای چشمه‌ی استاندارد BEBIG در فواصل دور از چشمه قابل تقریب است؛ اما در نزدیک چشمه می‌توان از نتایج این پژوهش در جهت بهبود توزیع دز استفاده کرد. اگر چشمه‌ی BEBIG را تغییر ابعاد دهیم در فواصل نزدیک چشمه ناهمسان‌گردی خیلی کاهش یافته بنابراین برای تومورهای هدف توزیع دز یکدست‌تر است. در این پژوهش عامل هندسی با در نظر گرفتن ابعاد واقعی چشمه و بدون تقریب به روش مونت‌کارلو محاسبه شده است که پیش از این در پژوهش‌های دیگران انجام نشده است. برای هر دو چشمه، عامل هندسی به دو روش مونت‌کارلویی و تحلیلی محاسبه و مقایسه شده‌اند.

۵. قدردانی

بر خود لازم می‌دانم از استاد گران‌قدرم دکتر مهدی ابراهیمی جهت راهنمایی‌های بی‌دریغشان در آموزش کد GANT۴ سپاسگزاری کنم.

نتایج دز دوبعدی پس از اجرای برنامه برای 10^9 ذره به ازای یک فوتون چشمه تا فاصله $1/5$ سانتی‌متری چشمه تغییر ابعاد داده شده مطابق شکل ۱۲، در نرم‌افزار GNUPLOT رسم شده است. همان طور که دیده می‌شود؛ مقدار دز در نزدیکی چشمه خیلی زیاد و با دور شدن از چشمه کاهش یافته است. مقدار ناهمسان‌گردی دز در نزدیک چشمه، و در زوایای 140° تا 160° درجه بیشتر شده؛ که به دلیل وجود استیل نیم‌دایره‌ای است. ناهمسان‌گردی در زوایای صفر تا بیست درجه و 160° تا 180° درجه خیلی کمتر شده است.



شکل (۱۲): نمودار دز دوبعدی به ازای یک فوتون چشمه تا فاصله $1/5$

سانتی‌متری چشمه BEBIG تغییر ابعاد داده شده در زوایای صفر تا

180° درجه.

۶. مراجع

1. S. Elboukhari, S. Elboukhari, K. Yamni, H. Ouabi, T. Bouassa, L. Ait Mlouk. Comparative dosimetric study between 60 Co and 192 Ir BEBIG high dose rate sources, used in Brachytherapy, using Monte Carlo N-particle extended. *Dosimetry*. IntechOpen. (2022).
2. D. Granero, J. Pérez-Calatayud, F. Ballester. Dosimetric study of a new Co-60 source used in brachytherapy. *Med. Phys.* 34. (9) (2007) 3485-3488.
3. S. Agostinelli, J. Allison, K. Amako, J. Apostolakis, H. Araujo, P. Arce, M. Asai, D. Axen, S. Banerjee, G. Barrant, F. Behner, L. Bellagamba, J. Boudreau, L. Broglia, A. Brunengo, H. Burkhardt, S. Chauvie, J. Chuma, R. Chytracsek, G. Cooperman, G. Cosmo, P. Degtyarenko, A. Dell'Acqua, G. Depaola, D. Dietrich, R. Enami, A. Feliciello, C. Ferguson, H. Fesefeldt, G. Folger, F. Foppiano, A. Forti, S. Garelli, S. Giani, R. Giannitrapani, D. Gibin, J.J. Gómez Cadenas, I. González, G. Gracia Abril, G. Greeniaus, W. Greiner, V. Grichine, A. Grossheim, S. Guatelli, P. Gumplinger, R. Hamatsu, K. Hashimoto, H. Hasui, A. Heikkinen, A. Howard, V. Ivanchenko, A. Johnson, F.W. Jones, J. Kallenbach, N. Kanaya, M. Kawabata, Y. Kawabata, M. Kawaguti, S. Kelner, P. Kent, A. Kimura, T. Kodama, R. Kokoulin, M. Kossov, H. Kurashige, E. Lamanna, T. Lampén, V. Lara, V. Lefebure, F. Lei, M. Liendl, W. Lockman, F. Longo, S. Magni, M. Maire, E. Medernach, K. Minamimoto, P. Mora de Freitas, Y. Morita, K. Murakami, M. Nagamatu, R. Nartallo, P. Nieminen, T. Nishimura, K. Ohtsubo, M. Okamura, S. O'Neale, Y. Oohata, K. Paech, J. Perl, A. Pfeiffer, M.G. Pia, F. Ranjard, A. Rybin, S. Sadilov, E. Di Salvo, G. Santin, T. Sasaki, N. Savvas, Y. Sawada, S. Scherer, S. Sei, V. Sirotenko, D. Smith, N. Starkov, H. Stoecker, J. Sulkimo, M. Takahata, S. Tanaka, E. Tcherniaev, E.

- Safai Tehrani, M. Tropeano, P. Truscott, H. Uno, L. Urban, P. Urban, M. Verderi, A. Walkden, W. Wander, H. Weber, J.P. Wellisch, T. Wenaus, D.C. Williams, D. Wright, T. Yamada, H. Yoshida, D. Zschiesche. Geant4—a simulation toolkit. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sec. A: Accelerators* 506 (3) (2003) 250-303.
4. M. J. Rivard, B. M. Coursey, L. A. DeWerd, W. F. Hanson, M. S. 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) (2004) 633-674.
 5. M. Joya, H. A. Nedaie, G. e Geraily, M. Ghorbani, P. Sheikhzadeh, M. Naraq Arani. BEBIG ⁶⁰Co HDR brachytherapy source dosimetric parameters validation using GATE Geant4-based simulation code. *Heliyon* 8 (3) (2022) e09168.
 6. S. Saghmanesh, A. Karimian, M. Abdi. Absorbed dose assessment of cardiac and other tissues around the cardiovascular system in brachytherapy with ⁹⁰Sr/⁹⁰Y source by Monte Carlo simulation. *Radiat. Prot. Dosimetry* 147 (1-2) (2011) 296-299.
 7. S. Bhola, T. P. Selvam, S. Sridhar, R. S. Vishwakarma. An analytic approach to the dosimetry of a new BEBIG ⁶⁰Co high-dose-rate brachytherapy source. *J. Med. Phys.* 37 (3) (2012) 129-137.
 8. T. P. Selvam, S. Bhola. EGSnrc-based dosimetric study of the BEBIG HDR brachytherapy sources. *Med. Phys.* 37 (3) (2010) 1365-1370.
 9. M. Marvi, M. Salehi Barough, S. Gholami. Measurement of entrance skin dose (ESD) by TLD dosimeters and its comparison with treatment design systems in GYN brachytherapy. *J. Radiat. Safety Measurement* 10 (2) (2021) 37-44.
 10. D. Baltas, L. Sakelliou, N. Zamboglou. *The Physics of Modern Brachytherapy for Oncology*. CRC Press, New York, 2006.
 11. R. P. King, R. S. Anderson, M. D. Mills. Geometry function of a linear brachytherapy source. *J. Appl. Clinical Med. Phys.* 2 (2) (2001) 69-72.
 12. BEBIG Medical. Cobalt-60 source for HDR brachytherapy. Available from: <https://www.bebigmedical.com/product/34.html>.