



ارزیابی عدم قطعیت دز جذبی پروستات در اثر تورم بافت و تغییر مکان چشمه‌های پرتوزا در براکی تراپی با روش مونت کارلو

زهرا آقائی^۱، علیرضا کریمیان^۲ و محمدحسن علامت‌ساز^۱

۱. دانشکده فیزیک، دانشگاه صنعتی اصفهان

۲. گروه مهندسی پزشکی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اصفهان

پست الکترونیکی: karimian@eng.ui.ac.ir

(دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۰۱/۲۶؛ دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۹/۰۶/۰۹)

چکیده

براکي تراپی، نوعی درمان سرطان است که منبع پرتوزا در داخل بافت سرطانی بیمار و یا در نزدیکی آن کاشته می‌شود. هدف از این تحقیق، محاسبه عدم قطعیت دز جذبی بافت پروستات در براکی تراپی، ناشی از تورم در پروستات، جابه‌جایی چشمه‌های کاشته شده و نیز بررسی اثر هر دو عامل، پس از کاشت چشمه‌های پرتوزا در آن است. در این تحقیق از کد MCNPX ۲.۶، پروتکل TG-۴۳U۱ و فانتوم بدن ORNL برای شبیه‌سازی براکی تراپی پروستات توسط چشمه‌های یو-۱۲۵ استفاده شد. در مطالعه اول با تعداد ۸۴ چشمه یو-۱۲۵، مقدار دز جذبی پرتو در پروستاتی به حجم $38/01 \text{ cm}^3$ برای دو نوع چشمه دانه‌ای خطی و نقطه‌ای به ترتیب $110/59 \text{ Gy}$ و $110/57 \text{ Gy}$ به دست آمد. با در نظر گرفتن تورم 50% در پروستات پس از کاشت چشمه‌ها، دز جذبی بیش از 17% کاهش یافت. در شبیه‌سازی دوم با تعداد ۷۶ چشمه یو-۱۲۵، تورم 12% و جابه‌جایی چشمه‌ها پس از کاشت در سه جهت (به اندازه $1/8 \text{ mm}$ چپ - راست، $2/1 \text{ mm}$ جلو - عقب و $3/4 \text{ mm}$ بالا - پایین) دز دریافتی بافت سرطانی حدود 21% کاهش یافت. این تحقیق نشان داد، نتایج شبیه‌سازی چشمه‌های دانه‌ای خطی و نقطه‌ای براکی تراپی بسیار به هم نزدیک است. لذا در مطالعات شبیه‌سازی می‌توان از چشمه نقطه‌ای به جای چشمه دانه‌ای خطی استفاده کرد که پیچیدگی محاسبات را کاهش می‌دهد، همچنین مطالعه حاضر نشان داد تأثیر تورم پروستات و جابه‌جایی چشمه‌های براکی تراپی در مقدار دز جذبی بافت تحت درمان قابل توجه است و بر روند درمان تأثیر دارد.

واژه‌های کلیدی: سرطان پروستات، براکی تراپی، عدم قطعیت دز جذبی، روش مونت کارلو

۱. مقدمه

پرتودرمانی رسیدن حداکثر دز پرتو به تومور، بدون ایجاد آسیب به بافت‌های سالم مجاور است. پرتودرمانی به دو شیوه داخلی (براکي تراپی^۱) و خارجی (تله تراپی^۲) انجام می‌شود. براکی تراپی

سرطان پروستات دومین عامل مرگ و میر در مردان سراسر دنیا به شمار می‌آید [۱]. بیماران سرطانی با پرتودرمانی یا پرتودرمانی همراه با سایر روش‌ها درمان می‌شوند. هدف در

۱. BrachyTherapy

۲. TeleTherapy

شامل مزایایی از جمله سهولت در درمان، کاهش دز دریافتی ناحیه سالم بافت پروستات و نیز بافت‌های سالم اطراف، کاهش خطر ابتلا به عفونت‌های پس از عمل، افزایش سرعت بهبودی بیمار و متمرکز کردن پرتو روی بافت تومور است [۲]. از محدودیت‌های این روش، متورم شدن پروستات، ناشی از کاشت دانه‌های پرتوزا [۳] و جابه‌جایی چشمه‌های کاشته شده از مکان خود در اثر تورم در ناحیه بافت سرطانی است که سبب به هم خوردن طرح درمان و دز دریافتی پروستات می‌شود [۴]. تغییر در مقدار دز درمانی طراحی شده، موجب ایجاد عدم قطعیت، بازگشت بیماری و یا دریافت دز پرتو توسط ناحیه سالم بافت خواهد شد. منظور از جابه‌جایی دانه، انحراف از موقعیت و مکان مناسب دانه کاشته شده در طول درمان است.

در سال ۲۰۱۵ تلز و همکاران به تورم اولیه در براکی‌تراپی پروستات اشاره و این تورم را ناشی از کار گذاشتن دانه‌ها (به طور متوسط ۶۰ الی ۱۲۰ دانه متناسب با حجم پروستات) درون پروستات عنوان کردند که تغییرات حجم آن منجر به تغییر در دز دریافتی نهایی در طول درمان می‌شود. در این مقاله دانه براکی‌تراپی ید-۱۲۵ مدل آمرشام^۱ ۶۷۱۱ و برای تایید مراحل شبیه‌سازی و محاسبه پارامترهای دزیمتری چشمه از فرمول‌های پروتکل TG-۴۳ استفاده کردند. شبیه‌سازی با نرم‌افزار مونت-کارلو MCNPX ۲.۷ انجام شده است. کتابخانه مورد استفاده برای شبیه‌سازی برهم‌کنش ذرات فوتون و الکترون ENDF/BVI بوده است. تعداد تاریخچه به گونه‌ای انتخاب شد که خطای شبیه‌سازی کمتر از ۰/۵٪ باقی بماند. در شبیه‌سازی با فانوم گولم و طرح درمانی واقعی، از کاشت ۸۴ دانه براکی‌تراپی استفاده شد. سه حجم 3 cm^3 ، $38/01$ ، $52/01$ و $57/02$ بررسی شد. آنها دریافتند که پس از گذشت دو هفته از کاشت دانه‌ها (چشمه سطحی) در پروستاتی به حجم 3 cm^3 $38/01$ (حجم آن پس از تورم 3 cm^3 $57/02$ است) نتایج درمان واقعی کاهش ۳/۵۱٪ کل دز دریافتی پروستات را نسبت به دز دریافتی آن پیش از تورم، نشان می‌دهد، در حالی که این اختلاف در شبیه‌سازی به اندازه ۲۵/۱۶٪ کمتر از مقدار دز پیش‌بینی

شده و تجویزی است [۳].

وستندرپ و همکاران در سال ۲۰۱۶، تورم و اثرات جابه‌جایی دانه در دزیمتری براکی‌تراپی دائم پروستات با چشمه ید-۱۲۵ را بررسی کردند. هدف در این مقاله، مشخص کردن جابه‌جایی دانه‌ها، بررسی میزان تورم و تغییر دز جذبی در زمان کاشت دانه و پس از ۳۰ روز در براکی‌تراپی پروستات بوده است. در این مقاله دزیمتری دانه‌ها با استفاده از تصویربرداری CBCT^۲ براساس موقعیت دانه‌ها و دزیمتری دانه‌ها با استفاده از روش TRUS^۳ بر اساس مشاهده مقایسه شده است. به این منظور در بازه زمانی اکتبر ۲۰۰۷ تا ژوئن ۲۰۱۲ تعداد ۷۴۰ بیمار مبتلا به سرطان پروستات که روش درمانی براکی‌تراپی با چشمه ید-۱۲۵ برای آنها انتخاب شده بود، بررسی شدند. مقدار دز تجویزی برای بیمارانی که تنها روش براکی‌تراپی بر روی آنها اجرا می‌شد (۸۱٪ از کل بیماران)، ۱۴۵ گری و برای بیمارانی که پس از پرتو درمانی خارجی، روش براکی‌تراپی را انجام می‌دادند (۱۹٪ از کل بیماران)، ۱۱۰ گری در نظر گرفته شد. بیمارانی که قبل از کاشت دانه‌ها اقدام به برداشتن تومور یا غده پروستات با جراحی کردند، حذف و ۶۹۹ بیمار برای انجام مطالعه باقی ماندند. این تعداد از جامعه آماری امکان بررسی جابه‌جایی دانه‌های ید-۱۲۵ در کاشت دانه به روش براکی‌تراپی دائم را فراهم می‌کند. در مرحله اجرای درمان، چهار نشانگر ثابت از جنس طلا با ابعاد $1/0 \times 5/0 \text{ mm}^2$ (مدل Heraeus GmbH ساخت آلمان) در دو سوزن قرار داده شد. اولین سوزن حامل نشانگر از سمت چپ و دومین سوزن از سمت راست وارد پروستات و نشانگرها را جایگذاری کرد. سپس پیش‌طرح درمانی برای اندازه و شکل پروستات طبیعی و سالم قبل از کاشت دانه‌ها، با دستگاه TRUS (مدل Fal Con EX and Flex Focus ۲۱۰۱ ساخت دانمارک) انجام شد. مکان سوزن‌ها توسط تصاویر عرضی و عمودی از پروستات با دستگاه TRUS تعیین شدند. همچنین تصاویر جداگانه‌ای برای تعیین محل دقیق دانه‌ها در پروستات تهیه شد. پس از پایان جایگذاری، فرایند کاشت به پایان رسید. به طور

۲. C-arm Cone Beam Computed Tomography

۳. TransRectal UltraSound

۱. Amersham

سال‌های اخیر مورد توجه بسیاری از مراکز درمانی فعال در این زمینه قرار گرفته است. آگاهی از هندسه چشمه مورد استفاده در درمان و ساختار داخلی آن از موارد مهم در محاسبه پارامترهای دزسنجی چشمه است [۵]. از این رو چشمه ید-۱۲۵ مدل آمرشام هلث^۱ ۶۷۱۱ به دلیل کاربرد متداول آن در کاشت دائم براکی‌تراپی پروستات، شبیه‌سازی شد.

نیمه‌عمر چشمه ید-۱۲۵، ۵۹/۴ روز است که ۹۰٪ از کل دز آن در ۱۹۷ روز اول دریافت می‌شود [۶]. پرتوزایی هر یک از چشمه‌های ید-۱۲۵ مورد استفاده در این تحقیق ۰/۵ mCi و مقدار دز تجویزی در درمان‌های بالینی سرطان پروستات ۱۴۵ Gy است [۳]. در طراحی این چشمه از یک نشانگر استوانه‌ای به طول ۲/۸ mm و شعاع ۰/۲۵۴ mm از جنس نقره با چگالی جرمی ۱۰/۵ g/cm^۳ استفاده شد که با ترکیبی از ماده پرتوزا ید-۱۲۵، برمیید ید (Br_۲I_۲) با چگالی جرمی ۶/۲۴۵ g/cm^۳ به ضخامت ۲ میکرومتر پوشانیده شده است، همچنین این مجموعه درون یک کپسول تیتانیومی، با چگالی جرمی ۴/۵۴ g/cm^۳ با ضخامت ۰/۵ mm است که به هر دو انتهای آن تیوب (لوله) جوش داده شده تا شکل یک کپسول استوانه‌ای با ابعاد ۰/۸ mm × ۴/۵ را پیدا کند و به وسیله گاز آرگون (با چگالی جرمی ۱/۷۸۴ mg/cm^۳) پر شده است [۷].

۱.۲. پارامترهای دزیمتری، طراحی چشمه و تأیید صحت

چشمه شبیه‌سازی شده

جهت استفاده بالینی از این چشمه‌ها لازم است قبل از استفاده پزشکی، مشخصات و پارامترهای دزسنجی این چشمه‌ها به‌طور دقیق محاسبه شود. در این راستا، می‌توان از شبیه‌سازی مونت کارلو در تعیین مشخصات دزسنجی چشمه استفاده کرد. برای چشمه‌های کم انرژی براکی‌تراپی که $E < 150 \text{ keV}$ است پروتکل TG-۴۳U^۱ توصیه شده است. بنابراین محاسبات مورد نیاز برای اعتبارسنجی پارامترهای دزسنجی بر اساس این پروتکل انجام شد [۵]. این پروتکل شامل کاربرد مونت کارلو در شبیه‌سازی، راهنمایی برای دزسنجی مونت کارلو، توصیه‌هایی

میانگین در این بیماران 8 ± 72 دانه ید با میانگین قدرت برای هرچشمه $U = 19/876 - 4/0$ و ابعاد $6/8 \times 4/6 \text{ mm}$ کاشته شد. داده‌های دزیمتری برای ۶۹۹ بیمار در روز صفرم با روش‌های TRUS و CBCT و در روز سی‌ام با تصویربرداری به روش CT محاسبه و ثبت شد. در حین کاشت به‌طور متوسط کاهش $4/7 \pm 10/6 \%$ (انحراف معیار از مقدار دز تجویز شده) در کمیت D_{90} (به معنی حداقل دز رسیده به ۹۰٪ از کل حجم) و کاهش $2/5 \pm 5/1 \%$ در کمیت V_{100} (درصد حداقل حجم دریافتی از مقدار دز تجویز شده) در دزیمتری به روش CBCT نسبت به روش TRUS گزارش شد. در روز سی‌ام کمیت D_{90} به میزان $5/8 \pm 1/8$ کمتر از مقدار آن در حین کاشت به روش TRUS و به میزان $8/0 \pm 8/7$ بیشتر از مقدار آن در حین کاشت به روش CBCT بوده است. دلیل اختلاف در مقدار D_{90} در دو زمان ذکر شده را می‌توان به علت تورم پروستات پس از کاشت دانه‌ها دانست. از آنجایی که کاشت دانه‌ها به صورت رشته‌ای است، تورم‌های متفاوتی در جهت‌های بالا-پایین نسبت به جهت‌های افقی به سبب استحکام بالای رشته‌ها مشاهده شد. از سایر مواردی که مقدار دزیمتری را تغییر می‌دهد، می‌توان به فاصله بین دانه‌ها، عدم قطعیت در ثبت و جابه‌جایی دانه‌ها در کانال‌های کاشته شده، پراکندگی در کاشت سوزن‌ها نام برد [۴].

۲. مواد و روش‌ها

یکی از روش‌هایی که به‌طور گسترده در دزسنجی مورد استفاده قرار می‌گیرد، شبیه‌سازی مونت کارلو است. در این تحقیق از شبیه‌سازی با نرم‌افزار MCNPX ۲.۶ و فانتوم محاسباتی ORNL استفاده شد. MCNPX یک کد چند منظوره برای ترابرد ذرات با انرژی‌های مختلف است و در تعیین پارامترهای دزسنجی و محاسبه مقادیر عدم قطعیت آنها، عدم قطعیت دز جذبی پرتو پروستات متورم پس از کاشت و جابه‌جایی چشمه‌های کاشته شده، کاربرد دارد. برای ترابرد فوتون، الکترون و سطح مقطع پراکندگی، از داده‌های کتابخانه‌ای ENDF/B-VI استفاده شد. براکی‌تراپی پروستات با چشمه‌های پرتوزای تابش کننده گاما در

چشمه، ضخامت چنبره‌ها را 0.5 cm ، در فواصل بین 1 cm – 3 cm و ضخامت را 0.1 cm ، در فواصل بین 1 cm – 10 cm ضخامت 0.5 cm و در فاصله‌های بزرگ‌تر از 10 cm ضخامت چنبره‌ها 1 cm در نظر گرفته شد.

در این تحقیق از آنجا که برای تایید صحت چشمه شبیه‌سازی شده و محاسبه پارامترهای دزیمتری آن نیاز به استفاده از روابط ۱ و ۲ طبق پروتکل TG-۴۳U₁ بوده است، لذا شبیه‌سازی با استفاده از 10^8 ذره (تعداد تاریخچه - NPS) و تالی $(F^4(\text{MeV}/\text{cm}^2) * \text{انجام شده است})$ با استفاده از خروجی این تالی، میزان شار انرژی را در سلولی که دز در آن محاسبه می‌شود به دست آورده، سپس با استفاده از ضرایب مناسب و ICRU^[۸]، توسط کارت FMn انرژی شار به دز تبدیل شد. در این مطالعه برای رسم منحنی‌های هم‌دز از مختصات دکارتی و تالی MESH نوع ۳ که مختص بیان انرژی جذب شده است، استفاده شد. همچنین از نرم‌افزار TECPLOT ۳۶۰ EX ۲۰۱۵ برای رسم منحنی‌های هم‌دز استفاده شد.

۲.۲. فانتوم بدن

به منظور شبیه‌سازی کل بدن بیمار از فانتوم محاسباتی ORNL^۱ که فانتومی با شباهت بسیار نسبت به ساختار و بافت‌های بدن است، استفاده شد. این فانتوم در محاسبات دزسنجی پزشکی هسته‌ای در برنامه‌های مونت‌کارلو به کار می‌رود. این فانتوم فاقد پروتستات است. لذا در شبیه‌سازی طرح درمانی ابتدا پروتستاتی با حجم و مکان مناسبی نسبت به قرارگیری سایر بافت‌های بدن و از جنس بافت نرم ۱۶ ترکیبی شبیه‌سازی و سپس مطابق طراحی درمان، چشمه‌های ید-۱۲۵ در آن جایگذاری شد. بافت نرم ۱۶ ترکیبی، فانتومی شامل تمام بافت‌های بدن به جز اسکلت و ریه است و از ترکیب ۱۶ عنصر H, C, N, O, Na, Mg, Si, P, S, Cl, K, Ca, Fe, Zn, Rb, Zr با نسبت‌های مشخص و چگالی 1.04 g/cm^3 بوده که نزدیک به چگالی آب است. درصد وزنی عنصرها در بافت نرم در مرجع [۹] بیان شده است.

برای شبیه‌سازی و اعتبارسنجی محاسبات است. پارامترهای دزسنجی تعریف شده بر طبق پروتکل TG-۴۳U₁ جهت محاسبه دز شامل پارامترهای قدرت گرمای هوا $S_k[\text{cGy}\cdot\text{cm}^2/\text{h}]$ ، ثابت آهنگ دز $\Lambda[\text{cGy}/\text{h}\cdot\text{U}]$ ، تابع هندسی $G_L(r, \theta)$ ، تابع دز شعاعی در فاصله‌های مختلف عمود بر محور چشمه $g(r)$ و تابع ناهمسانگردی دو بعدی $F(r, \theta)$ است. نقطه $(r_0 = 1 \text{ cm}, \theta_0 = \pi/2)$ نقطه مرجع برای محاسبات دز در نظر گرفته می‌شود. طبق پروتکل دزیمتری براکی‌تراپی TG-۴۳ اندازه‌گیری‌ها باید در آب یا در فانتوم معادل آب انجام گیرد [۵]. به طور مرسوم، مقدار انرژی قطع برای چشمه‌های براکی‌تراپی با فوتون‌های کم انرژی، 5 keV است. چشمه ید-۱۲۵ با پرتوزایی 0.5 mCi در تمامی مراحل شبیه‌سازی در نظر گرفته شد.

الف) ثابت آهنگ دز به عنوان آهنگ دز، در آب در فاصله ۱ سانتی‌متری از مرکز هندسی چشمه‌ای با قدرت یک واحد گرمای هوا و در جهت محور عرضی تعریف شده است.

$$\Lambda = \frac{\dot{D}(r_0, \theta_0)}{S_k}, \quad (1)$$

به منظور محاسبه عددی کمیت آهنگ دز در هوا، کره‌ای به شعاع 15 cm شامل آب مایع، تعریف شد و پس از آن در فاصله 1 cm عمود بر محور چشمه که $\theta_0 = \pi/2$ است، ضریبی از آهنگ پرتودهی در هوا با استفاده از تالی F^4 به دست آمد.

ب) تابع دز شعاعی، وابستگی شعاعی جذب و پراکندگی فوتون را در یک ماده و در طول محور عرضی در نظر می‌گیرد (رابطه ۲).

چشمه نقطه‌ای یا دانه‌ای خطی x:

$$g_x(r) = \frac{\dot{D}(r, \theta_0) G_x(r, \theta_0)}{\dot{D}(r_0, \theta_0) G_x(r_0, \theta_0)}, \quad (2)$$

برای به دست آوردن تابع دز شعاعی چشمه پرتوزا در مرکز یک فانتوم استوانه‌ای به شعاع 15 cm حاوی آب و اطراف آن در فواصل 1 cm – 12 cm ، چنبره‌هایی هم‌مرکز با ضخامت‌های متفاوت که محور طولی آنها در راستای محور عرضی چشمه است، قرار داده شد. در فاصله‌های کمتر از 0.3 cm تا مرکز

۱. Oak Ridge National Laboratory

۳.۲. درمان سرطان پروستات با طرح درمانی اول

در مرحله نخست، تعداد ۸۴ چشمه مانند طرح درمانی ارائه شده توسط تلز و همکاران [۳] که در شکل ۱ الف بازطراحی شده است، شبیه‌سازی و اثر تورم ناشی از کاشت چشمه‌ها بر مقدار دز دریافتی بافت پروستات و عدم قطعیت آن محاسبه شد. به منظور جلوگیری از تداخل چشمه‌ها در طرح، فاصله مرکز تا مرکز چشمه‌ها، ۰/۲۵ cm، به صورت طولی در راستای محور Z در ۲۸ موقعیت y-Z مختلف تعریف شد. پس از کاشت چشمه‌ها، حجم‌های اولیه و پیش از تورم 3 cm^3 ، $30/01$ و $38/01$ در نظر گرفته شد. بنابر گزارش‌های بالینی مدت حداکثر تورم تقریباً 4 ± 14 روز است [۳ و ۱۰]. بر اساس گزارش تلز افزایش حجم پروستات بلافاصله پس از کاشت چشمه‌ها در آن، بین ۷۴٪-۵۰٪ برابر است [۳]. پس از گذشت سی روز از کاشت چشمه‌ها در غده، تورم ۱۲٪ در حجم ذکر شده مشاهده می‌شود [۴]. حجم‌ها پس از تورم با افزایش تقریباً ۹۰٪، ۵۰٪ و ۱۰٪ به حجم 3 cm^3 $57/02$ متورم می‌شوند. در شبیه‌سازی همه مراحل این تحقیق، با کارت‌های درخواست $F4^*$ و $F6^*$ و تعداد تاریخچه 10^8 برخورد ذره‌های فوتون و الکترون پیگیری شد. همچنین به منظور کاهش واریانس از روش تکثیر و رولت روسی برای هندسه و کارت IMP جلوی هر سلول استفاده شده است. سپس مقادیر دز جذبی پرتو بافت و میزان عدم قطعیت آماری پس از شبیه‌سازی گزارش شد. به منظور بررسی تفاوت دز جذبی پرتو در چشمه‌های نقطه‌ای در مقایسه با چشمه‌های دانه‌ای خطی، مرحله بعدی جایگذاری تعداد ۸۴ چشمه نقطه‌ای در مکان‌های مشخص شده طرح درمانی، به جای چشمه‌های دانه‌ای خطی است. همچنین نتایج حاصل با نتایج مقاله تلز و همکاران [۳] مقایسه و اعتبارسنجی شد.

۴.۲. درمان سرطان پروستات با طرح درمانی دوم

در مرحله دوم به منظور بررسی تغییر دز جذبی پرتو ناشی از تغییر در مکان چشمه‌های کاشته شده قبل و بعد از تورم غده، طبق طرح درمانی مورد استفاده در این تحقیق که در شکل ۱ ب آمده است، تعداد ۷۶ چشمه دانه‌ای خطی شکل در حجم

پروستات قرار داده شد. تعداد ۷۶ دانه‌ای خطی در ۱۹ موقعیت مختلف در صفحه y-Z با فاصله مرکز به مرکز ۰/۲۵ cm و طول دانه‌ای خطی در راستای محور Z تعریف شد.

۱.۴.۲. گام نخست، بررسی تغییرات دز در لحظه پس از کاشت:

اولین گام بررسی تغییرات دز جذبی پرتو و میزان عدم قطعیت آن در لحظه پس از کاشت در حجم‌های مختلف است. حجم‌های مورد بررسی 3 cm^3 ، $30/01$ و $52/01$ هستند.

۲.۴.۲. گام دوم، بررسی تغییرات دز در روز صفرم پس از کاشت:

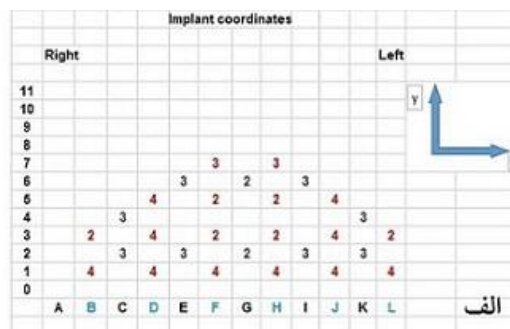
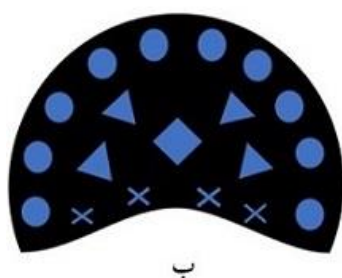
در این گام، تغییرات دز پس از جابه‌جایی چشمه‌های کاشته شده محاسبه شد. در این مرحله، جابه‌جایی چشمه‌ها به اندازه $1/8\text{ mm}$ در جهت چپ-راست (در راستای محور X)، $2/1\text{ mm}$ در جهت برون‌سو-درون‌سو (در راستای محور Y) و $3/4\text{ mm}$ در جهت بالا-پایین (در راستای محور Z) بر طبق گزارش ارائه شده توسط وستندرپ در بررسی‌های بالینی مورد مطالعه قرار گرفت [۴].

۳.۴.۲. گام سوم، بررسی تغییرات دز پس از گذشت سی روز از کاشت:

در این مرحله، تغییر دز در بافت با تورم ناشی از کاشت چشمه‌ها بررسی شد. حجم اولیه 3 cm^3 ، $30/01$ ، پس از تورم ناشی از کاشت با افزایش حجم ۱۲٪ که بر مبنای گزارش وستندرپ است [۴]، به حجم $33/62\text{ cm}^3$ متورم می‌شود. به این ترتیب، حجم‌های $38/01$ و $52/01$ با این مقدار تورم به ترتیب به حجم‌های $42/57\text{ cm}^3$ و $58/25$ افزایش می‌یابند. سپس چشمه‌های دانه‌ای خطی به چشمه‌های نقطه‌ای تبدیل و محاسبات دز و عدم قطعیت تکرار خواهد شد.

۵.۲. دز دریافتی بافت‌های مجاور پروستات

در این مرحله از تحقیق، به منظور بررسی آسیب‌های احتمالی



شکل ۱. طرح درمانی مورد استفاده در این تحقیق برای درمان سرطان پروستات به روش براکی‌تراپی با چشمه‌های ید-۱۲۵ مدل ۶۷۱۱. (الف) طرح اول با ۸۴ چشمه و (ب) طرح دوم با ۷۶ چشمه.

کار برده می‌شود که بیشتر آنها نامعلوم و به طور ذاتی توزیع احتمال دارند. برخی از گزارش‌های آماری عدم قطعیت مدل هندسی را از ۵٪ - ۲٪ بیان کرده‌اند. همچنین آنها مقدار ۲٪ را برای این پارامتر مناسب دانستند. عوامل مؤثر در عدم قطعیت ناشی از مدل هندسی شامل شکل چشمه، انحنای انتهای پیکربندی، ضخامت دیواره‌های کپسول، میزان انحراف ساختار داخلی و لبه‌های تیز نسبت به هندسه آرمانی است [۵].

عدم قطعیت سطح مقطع، مربوط به کدهای داده‌های کتابخانه‌ای است و بنابر گزارش‌های عدم قطعیت سطح مقطع فوتوالکتریک برای انرژی‌های ۱-۴۰ keV در حدود حداکثر ۲٪ تخمین زده می‌شود. برای مثال برای کتابخانه سطح مقطع ۱۴۶ DLC عدم قطعیت ۰/۹۹۱ و برای ۹۹ DLC مقدار ۱/۰۱۰ اعلام و همچنین این پارامتر برای چشمه‌ای با انرژی ۳۰ keV در فانتوم آب ۱/۵٪ گزارش شده است [۱۲].

۳. نتایج

۱.۳. طراحی چشمه و تأیید صحت چشمه شبیه‌سازی شده

تصویری از چشمه براکی‌تراپی شبیه‌سازی شده ید-۱۲۵ آمرشام ۶۷۱۱ به همراه اجزای آن که در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته، در شکل ۲ آمده است. این تصویر از خروجی برنامه شبیه‌سازی گرفته شده است.

به منظور تأیید درستی شبیه‌سازی چشمه، پارامترهای دزسنجی شبیه‌سازی و درستی نتایج آن بررسی شد. ثابت آهنگ

بافت‌های نزدیک به پروستات، مقادیر دز این بافت‌ها محاسبه شد. در این راستا، دز جذبی پرتو بافت‌های مثانه و بیضه‌ها که نزدیک‌ترین فاصله را با پروستات کاشته شده با ۷۶ چشمه دارند، اندازه‌گیری شد. سایر بافت‌های مورد بررسی شامل کبد، کلیه‌ها، لگن و روده بزرگ هستند.

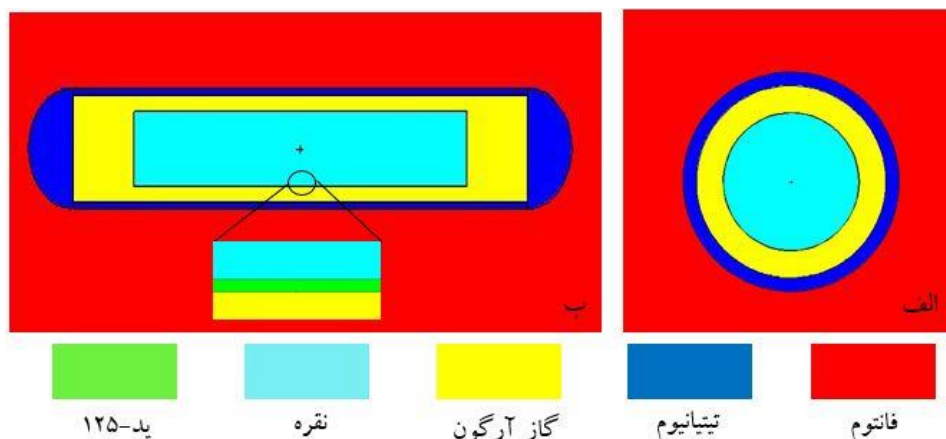
۶.۲. عدم قطعیت ترکیبی

در این تحقیق، عدم قطعیت‌های زیر هنگام استفاده از چشمه ید-۱۲۵ در براکی‌تراپی پروستات مورد بررسی قرار گرفت. عدم قطعیت در نتایج حاصل از رابطه‌های $TG-^{232}U$ ، عدم قطعیت نتایج حاصل از تورم در پروستات در حین و پس از کاشت چشمه در آن، عدم قطعیت دز جذبی پرتو در جابه‌جایی چشمه‌ها. عدم قطعیت ترکیبی که شامل عدم قطعیت در شبیه‌سازی و پارامترهای دزسنجی پروتکل $TG-^{232}U$ در چشمه ید-۱۲۵ است، با استفاده از رابطه (۳) به دست می‌آید.

$$u_c = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} = \sqrt{u_{A-MC}^2 + u_{B-\mu}^2 + u_{B-geo}^2}, \quad (3)$$

u_{A-MC} عدم قطعیت آماری نوع A است که با روش مونت کارلو به دست می‌آید. همچنین $u_{B-\mu}$ و u_{B-geo} به ترتیب عدم قطعیت‌های نوع B ناشی از سطح مقطع و مدل هندسی هستند [۵ و ۱۱].

اعلام مقادیر عدم قطعیت سیستماتیک مربوط به مدل هندسی چشمه معمولاً توسط کمپانی‌های سازنده چشمه اعلام می‌شود. در هر طراحی چشمه، مشخصات تعداد زیادی از پارامترهای هندسی که برخی از آنها منحصر بفرد نیز هستند، به



شکل ۲. چشمه آمرشام ۶۷۱۱ شبیه‌سازی شده توسط کد مونت کارلو. (الف) چشمه در صفحه xy و (ب) چشمه در صفحه zx چارچوب مختصات و توزیع رادیویزوتوپ ۱۲۵-ید بر روی میله نقره.

جدول ۱. مقادیر ثابت آهنگ دز. میزان اختلاف مقدار شبیه‌سازی شده در این تحقیق با مقادیر به دست آمده در مطالعات پیشین به صورت درصد بیان می‌شود.

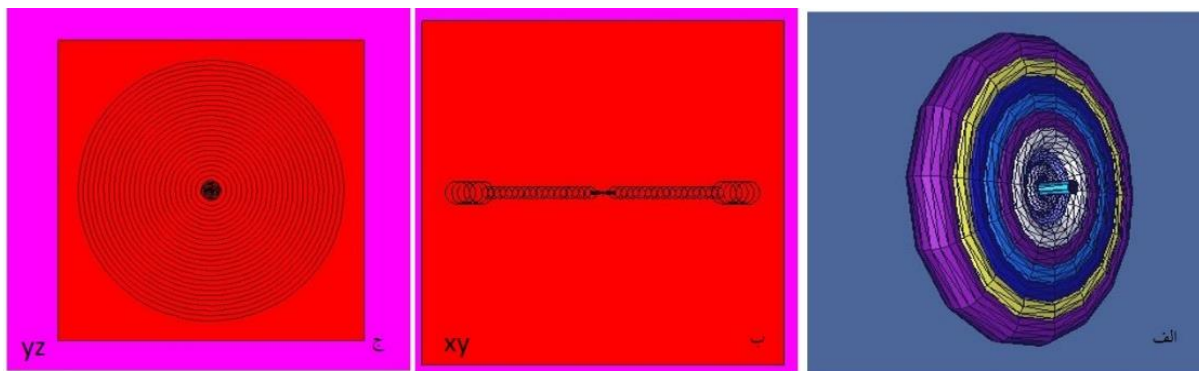
مقدار ثابت آهنگ دز [cGy/h.U]	میزان اختلاف نسبی با نتایج این تحقیق	فانتوم	ریوارد [۵]
۰/۹۵	۱/۲۴٪ -	آب مایع	آب مایع
۰/۹۷	۴/۲۱٪ -	آب جامد	آب جامد
۰/۹۶		آب مایع	این تحقیق
۱/۰۲		آب جامد	آب جامد

توزیع تابع شعاعی دز در فاصله‌های شعاعی مختلف با تقریب خطی به روش مونت کارلو با استفاده از نرم‌افزار رسم TECPLOT در شکل ۴ آمده است. برای $0 < r < L$ (که در آن $L=3 \text{ mm}$ طول هسته چشمه است) ابتدا مقدار تابع به صورت نمایی افزایش می‌یابد و سپس برای مقادیر $r > L$ تابع شعاعی دز به صورت نمایی کاهش می‌یابد. همچنین در این نمودار نتایج با داده‌های شبیه‌سازی ریوارد [۵] مقایسه شد که در این مرحله تطابق خوبی مشاهده شد.

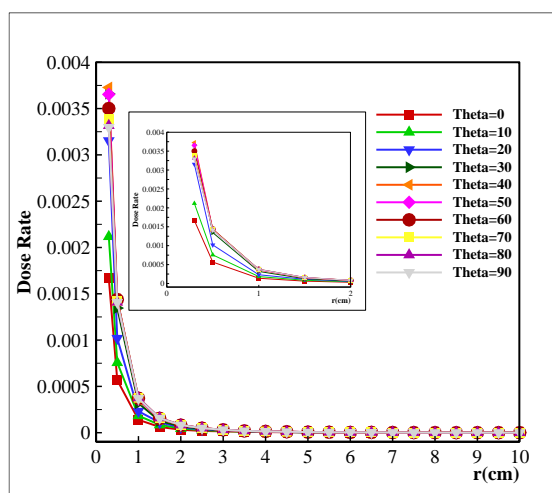
به کمک اطلاعات حاصل از این مطالعه می‌توان آهنگ دز مورد نیاز در برنامه‌نویسی سیستم‌های طراحی درمان را در هر نقطه پیرامون چشمه ۱۲۵-مدل ۶۷۱۱ را با استفاده از کد MCNPX محاسبه کرد (شکل ۵). در فاصله ثابت، با افزایش زاویه تا 90° درجه، نرخ دز افزایش و در زاویه ثابت، با افزایش فاصله از چشمه، آهنگ دز کاهش می‌یابد.

دز، Δ ، با استفاده از نتایج مونت کارلو و به کار بردن رابطه (۱) به دست می‌آید. نتایج این مرحله به همراه میزان اختلاف آن با مقادیر به دست آمده توسط سایر پژوهشگران در جدول ۱ آمده است.

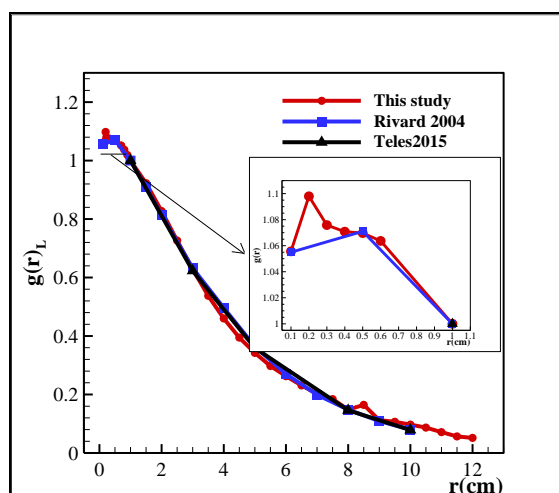
شکل ۳. الف هندسه شبیه‌سازی شده چنبره‌های هم‌مرکز و به مرکز چشمه ۱۲۵-مدل ۶۷۱۱ در سه بعد xyz به منظور محاسبه تابع دز شعاعی است. شکل‌های ۳. ب و ج هندسه فانتوم استوانه‌ای به شعاع 15 cm و حاوی فانتوم آب را نشان می‌دهد. تالی $F4^*$ شار انرژی را محاسبه می‌کند. از آنجایی که دز جذبی از حاصل ضرب شار انرژی در ضریب جذب انرژی (μ_{en}/ρ) به دست می‌آید، انرژی به قسمت‌های مختلفی تقسیم و شار انرژی این قسمت‌ها در μ_{en}/ρ ضرب می‌شود و در نهایت دز جذبی از جمع همه مقادیر به دست آمده حاصل می‌شود.



شکل ۳. هندسه شبیه‌سازی شده به منظور محاسبه تابع دز شعاعی چشمه ید-۱۲۵. (الف) در سه بعد، دانه ای خطی ید-۱۲۵ در مرکز چنبره‌های هم مرکز، (ب) نمایش سطح مقطع در دو بعد، تعداد ۳۲ چنبره هم مرکز به مرکز دانه‌ای خطی ید-۱۲۵ مدل ۶۷۱۱ در صفحه XY و (ج) هندسه دوبعدی در صفحه YZ، استوانه حاوی آب در کره‌ای به شعاع ۱۰ سانتی‌متر و شامل هوای خشک.



شکل ۵. مقایسه آهنگ دز در فانتوم آب در فواصل و زوایای مختلف برای چشمه ید-۱۲۵ مدل ۶۷۱۱.



شکل ۴. مقایسه تابع دز شعاعی محاسبه شده با روش مونت کارلو در فانتوم آب در چشمه ید-۱۲۵ با تقریب خطی در فاصله ۰/۱ تا ۱۲ سانتی‌متر با مقالات ریوارد و تلز.

۲.۳. فانتوم بدن

از آنجایی که فانتوم ORNL فاقد پروستات است، در شبیه‌سازی طرح درمانی ابتدا پروستاتی به حجم $30/02 \text{ cm}^3$ در مکان $(0, -6/0025, 2/505)$ و از جنس بافت نرم ۱۶ ترکیبی شبیه‌سازی (شکل ۶) و سپس بر اساس طراحی درمان، چشمه‌های براکی‌تراپی در آن جایگذاری شد. بخشی از حجم پروستات که مبتلا به سرطان بود تحت کاشت چشمه‌های براکی‌تراپی ید-۱۲۵ قرار گرفت.

۳.۳. درمان سرطان پروستات با طرح درمانی اول

به منظور بررسی تغییرات دز جذبی پرتو با تغییرات حجم پروستات پس از طراحی پروستات در فانتوم و کاشت چشمه‌ها، بر اساس طرح کاشت شکل ۱. الف تعداد ۸۴ چشمه یک بار به شکل دانه‌ای خطی و بار دیگر به شکل نقطه‌ای درون پروستات جایگذاری شد. جدول ۲ مقادیر به دست آمده در این تحقیق را نشان می‌دهد.

با در نظر گرفتن حجم اولیه $38/01 \text{ cm}^3$ و افزایش آن تا ۵۰٪، در حالت استفاده از چشمه دانه‌ای خطی مقدار کاهش دز

در حجمی تقریباً کروی شکل به مرکز (۳/۳۵، ۶/۹، ۰) افت دز تجمعی در $r=1/44$ cm (دومین رنگ از مرکز منحنی که به رنگ صورتی است) نسبت به $r=0/88$ cm (اولین رنگ از مرکز در منحنی که با سفید مشخص است) ۱۳/۵۷٪ است. افت دز تجمعی در مرز پروستات و به شعاع $r=1/93$ cm نسبت به شعاع $r=1/44$ cm به اندازه ۷۲/۸۵٪ است. به این معنا که در این روش درمانی، مقدار دز تجمعی بسیار کمی به مرز پروستات و عضوهای اطراف آن می‌رسد.

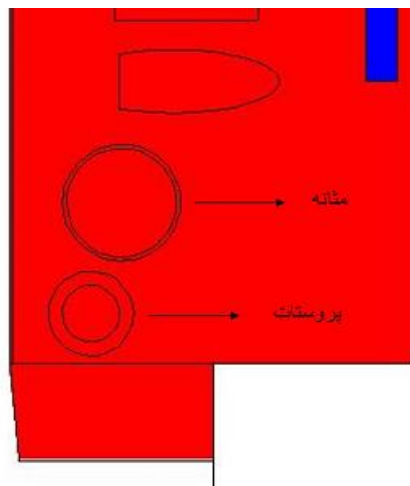
شکل ۸ نمودار دز حجمی پروستات سرطانی کاشته شده با تعداد ۸۴ چشمه رسم شده، همان طور که مشخص است، مقادیر دز جذبی چشمه نقطه‌ای و دانه‌ای خطی با خطای بسیار کمی بر هم منطبق هستند.

۴.۳. درمان سرطان پروستات با طرح درمانی دوم

گام نخست، بررسی تغییرات دز در لحظه پس از کاشت: به منظور محاسبه دز جذبی پرتو بافت پروستات و میزان عدم قطعیت ناشی از جابه‌جایی چشمه‌ها، تعداد ۷۶ چشمه برطبق طرح درمانی شکل ۱. ب جایگذاری و نتایج این مرحله در جدول ۳ درج شده است.

با توجه به شکل ۹ و در گام نخست، زمانی که ۷۶ چشمه دانه‌ای خطی در داخل پروستاتی به حجم $30/02 \text{ cm}^3$ کاشته شود، بیشترین مقدار دز تجمعی $106/42 \text{ Gy}$ در حجمی به اندازه ۵۸٪ از کل حجم پروستات متمرکز است (رنگ سفید در منحنی). پس از آن ۷۳٪ از کل حجم پروستات دز تجمعی به اندازه ۶۷٪ از مقدار کل دز تجمعی را دریافت می‌کند (که با رنگ صورتی دیده می‌شود). افت دز تجمعی در مرز پروستات ($r=1/93 \text{ cm}$) نسبت به شعاع $0/34 \text{ cm}$ در مرحله قبل، ۸۳٪ است. دز تجمعی کل در تومور و بافت سالم پروستات به ترتیب $106/42$ و $30/31$ گری است.

در گام دوم و پس از جابه‌جایی چشمه‌های دانه‌ای خطی کاشته شده در پروستات، عدم قطعیت در دز جذبی بافت سالم و سرطانی پروستاتی به حجم $30/02 \text{ cm}^3$ به ترتیب برابر است با ۲/۷۵٪ و ۱۳/۸۴٪ (جدول ۳).



شکل ۶. شبیه‌سازی پروستات در زیر مثانه و از جنس بافت نرم در فانوم ORNL.

نسبت به مقدار دز پروستات غیر متورم، ۱۷/۱۸٪ است. مقدار اختلاف ۱۷/۱۸٪ به عنوان عدم قطعیت در دز جذبی پرتو بیان می‌شود. همچنین هنگام استفاده از چشمه نقطه‌ای به جای دانه‌ای خطی میزان عدم قطعیت دز ۱۷/۲٪ محاسبه شد. میزان عدم قطعیت در مقاله تلز و همکاران [۳] به ترتیب برابر با ۱۹/۰۹٪ و ۱۸/۱۶٪ است که بیانگر کاهش عدم قطعیت محاسبه شده و افزایش دقت شبیه‌سازی این تحقیق است. همچنین مقدار اختلاف در میزان دز جذبی پرتو بافت پروستات در کاشت دو چشمه با هندسه‌های دانه‌ای خطی و نقطه‌ای ۰/۰۲٪ به دست آمد.

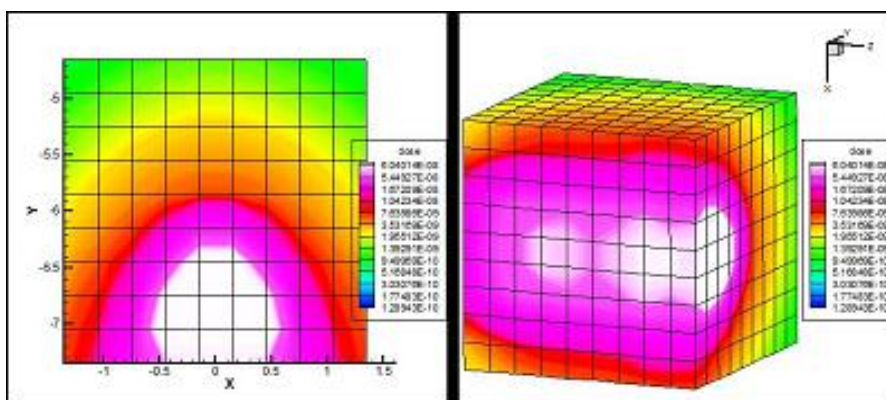
در این پژوهش علاوه بر محاسبه دز جذبی پرتو و عدم قطعیت آن در بافت پروستات ناشی از تورم ایجاد شده پس از کاشت، منحنی‌های هم‌دز دو و سه بعدی برای حجم‌ها و هر دو شکل چشمه رسم و بررسی شد که یکی از جنبه نوآوری این تحقیق در مقایسه با سایر پژوهش‌های انجام شده است.

از منحنی هم‌دز دوبعدی شکل ۷ درمی‌یابیم که در فاصله $0/6 \pm \text{cm}$ از مرکز پروستات در راستای محور x، در فاصله $1/2 \text{ cm}$ پایین تر از مرکز پروستات در جهت y و در فاصله $3/1$ تا $3/6$ در جهت z بیشترین مقدار دز تجمعی در حجم پروستات وجود دارد و با رنگ سفید در منحنی متمایز شده است. با توجه به منحنی سه بعدی، نتایج زیر حاصل می‌شود.

جدول ۲. مقایسه میزان دز جذبی پرتو بافت پروستات در سه حجم قبل از تورم و حجم متورم ۵۷/۰۲ سانتی‌متر مکعب در پژوهش حاضر و مقاله تلز و همکاران.

میزان دز جذبی تجمعی بافت پروستات (Gy)	دز جذب شده بافت پروستات ناشی از هر چشمه (Gy)	شکل چشمه	حجم پروستات (cm ³)	پژوهش حاضر	تلز و همکاران
۱۲۲/۳۳	۱/۴۵	دانه‌ای خطی	۳۰/۰۲	پژوهش حاضر	
۱۲۲/۲۷	۱/۴۵	نقطه			
۱۱۰/۵۹	۱/۳۱	دانه‌ای خطی ^۱	۳۸/۰۱	پژوهش حاضر	
۱۱۰/۵۷	۱/۳۱	نقطه ^۲			
۹۵/۵۸	۱/۱۳	دانه‌ای خطی	۵۲/۰۱	پژوهش حاضر	
۹۵/۵۵	۱/۱۳	نقطه			
۹۱/۵۸	۱/۰۹	دانه‌ای خطی	۵۷/۰۲	پژوهش حاضر	
۹۱/۵۵	۱/۰۸	نقطه			
۱۱۰/۹۶	۱/۳۲	دانه‌ای خطی	۳۸/۰۱	پژوهش حاضر	تلز و همکاران
۱۲۴/۳۳	۱/۴۸	نقطه			
۸۹/۷۷	۱/۰۷	دانه‌ای خطی	۵۷/۰۲	پژوهش حاضر	تلز و همکاران
۱۰۱/۷۵	۱/۲۱	نقطه			

۱ چشمه ید-۱۲۵ مدل آمرشام ۶۷۱۱ به صورت دانه‌ای خطی جایگذاری شده است. ۲ چشمه به صورت نقطه‌ای در پروستات تعریف شده است.

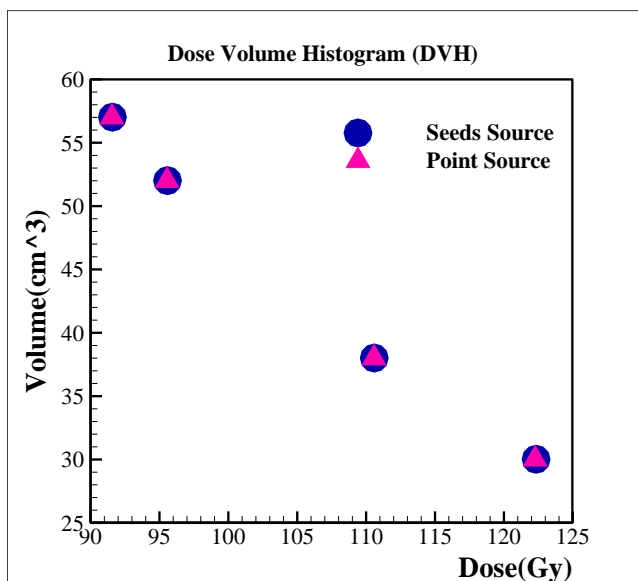


شکل ۷. منحنی هم دز پروستاتی با حجم ۳۰/۰۲ پس از کاشت ۸۴ چشمه دانه‌ای خطی در آن.

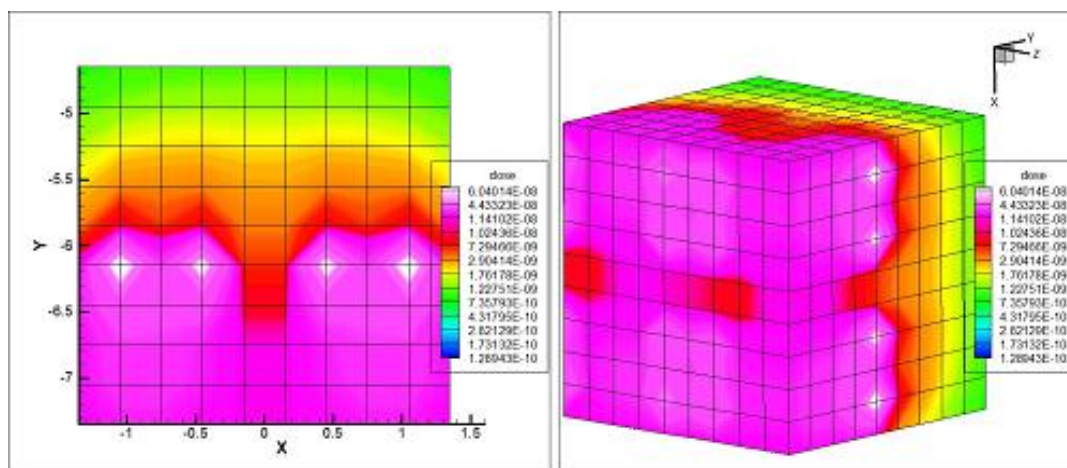
۵.۳. دز دریافتی اعضای مجاور به پروستات

به منظور بررسی آسیب‌های احتمالی بافت‌های نزدیک به پروستات در براکی‌تراپی آنها با چشمه ید-۱۲۵، مقادیر دز جذبی پرتو بافت‌های مثانه و بیضه‌ها که نزدیک‌ترین فاصله را با پروستات دارند، به ترتیب ۶/۲۹ و ۴/۵۲ گری محاسبه شد (جدول ۴).

در گام سوم و با دقت در جدول ۳، عدم قطعیت دز جذبی بافت سرطانی در چشمه‌های دانه‌ای خطی پس از جابه‌جایی چشمه‌ها و ایجاد تورم ۱۲٪ در حجم ۳۰/۰۲ cm³ برابر است با ۴/۶۰٪. این کمیت در چشمه‌های نقطه‌ای کاشته شده در این حجم ۴/۳۶٪ محاسبه شد.



شکل ۸. مقادیر دز جذبی پروتو بافت سرطانی در طرح درمانی اول. همزمان چشمه‌های نقطه‌ای و دانه‌ای خطی در یک نمودار رسم شده‌اند.



شکل ۹. منحنی هم دز تجمعی پروستاتی با حجم ۳۰/۰۲ سانتی مترمکعب با جایگذاری ۷۶ چشمه دانه‌ای خطی طبق طرح درمانی.

۶.۳. مقادیر عدم قطعیت ترکیبی

مقادیر عدم قطعیت نوع A پارامترهای دزسنجی، ثابت آهنگ دز و تابع دز شعاعی به ترتیب ۰/۰۱٪ و ۰/۳۲٪ به دست آمد.

$$= \sqrt{(0/0001)^2 + (0/0110)^2 + (0/0140)^2} = 0/0178$$

$$\%u_{clA} = \%1/78$$

ب- تابع دز شعاعی

با استفاده از مقادیر ارائه شده برای دو پارامتر $u_g(r)/\mu$ و $u_{g(r)/geo}$ ، عدم قطعیت ترکیبی تابع دز شعاعی برای شعاع‌های ۰/۱، ۰/۵ و ۱/۰ cm محاسبه شد (جدول ۵).

الف- ثابت آهنگ دز

مقدار عدم قطعیت سطح مقطع در ثابت آهنگ دز برابر مقادیر اعلام شده توسط هیدجارن برابر با ۱/۱٪ است. همچنین مقدار

عدم قطعیت هندسه یعنی $u_{\Lambda/geo}$ برابر با ۱/۴٪ است [۵].

$$u_{\Lambda} = \sqrt{u_{A/\Lambda}^2 + u_{B/\Lambda}^2} = \sqrt{u_{A-MC}^2 + u_{\Lambda/\mu}^2 + u_{\Lambda/geo}^2} \quad (4)$$

جدول ۳. نتایج شبیه‌سازی مونت‌کارلو برای درمان سرطان پروستات به روش براکی‌تراپی در طرح درمانی دوم با ۷۶ چشمه دانه‌ای خطی، در طی سه گام زمانی بلافاصله پس از کاشت، روز صفرم و روز سی‌ام پس از کاشت چشمه‌ها.

عدم قطعیت خروجی کد (L) MCNPX	عدم قطعیت در یافت سالم در جابه‌جایی چشمه و تورم (L)	عدم قطعیت در یافت سالم در جابه‌جایی چشمه و تورم (L)	عدم قطعیت در یافت سالم در جابه‌جایی چشمه و تورم (L)	عدم قطعیت در یافت سالم در جابه‌جایی چشمه و تورم (L)	میزان دز جنبی (Gy)	تجمعی یافت سرطانی (Gy)	میزان دز جنبی (Gy)	تجمعی یافت سرطانی (Gy)	میزان دز جنبی (Gy)	تجمعی یافت سرطانی (Gy)	ناتی از هر دانه (Gy)	شکل چشمه پروستات (cm ³)	حجم پروستات (cm ³)
۰/۰۱	-۲/۹۰	۲/۶۰	۱۳/۸۴	۲/۷۵	۳۵/۱۸	۱۰۹/۴۳	۱/۴۳	۱۰۹/۴۳	۱/۴۳	۱۰۹/۴۳	۱/۴۰	دانه‌ای خطی	۳۰/۰۲
۰/۰۳	-۱۱/۹۲	۴/۳۶	-۲/۴۵	۱۸/۳۷	۲۹/۰۸	۱۰۱/۳۳	۱/۳۳	۱۰۱/۳۳	۱/۳۳	۱۰۱/۳۳	۱/۰۸	دانه‌ای خطی	۳۸/۰۱
۰/۰۱	-۷/۶۷	۱۵/۱۵	-۰/۶۹	۱۹/۹۳	۲۳/۹۰	۹۰/۳۹	۱/۱۸	۹۰/۳۹	۱/۱۸	۹۰/۳۹	۰/۹۴	دانه‌ای خطی	۵۲/۰۱
۰/۰۱	-۱۳/۳۶	۵/۴۴			۲۹/۴۵	۱۰۱/۷۴	۱/۳۳	۱۰۱/۷۴	۱/۳۳	۱۰۱/۷۴	۱/۳۳	دانه‌ای خطی	۳۳/۶۲
۰/۰۱	-۹/۴۱	۱۷/۷۶			۳۰/۲۴	۱۰۲/۹۲	۱/۳۵	۱۰۲/۹۲	۱/۳۵	۱۰۲/۹۲	۱/۳۵	نقطه‌ای	
۰/۰۱	-۲۱/۰۴	۱۶/۱۸			۲۷/۶۷	۹۷/۴۹	۱/۲۸	۹۷/۴۹	۱/۲۸	۹۷/۴۹	۱/۲۸	دانه‌ای خطی	۴۲/۵۷
۰/۰۱					۲۸/۲۴	۹۸/۶۷	۱/۲۹	۹۸/۶۷	۱/۲۹	۹۸/۶۷	۱/۲۹	نقطه‌ای	
۰/۰۱					۲۲/۰۰	۸۶/۹۲	۱/۱۴	۸۶/۹۲	۱/۱۴	۸۶/۹۲	۱/۱۴	دانه‌ای خطی	۵۸/۳۵
۰/۰۱					۲۲/۳۴	۸۸/۰۷	۱/۱۵	۸۸/۰۷	۱/۱۵	۸۸/۰۷	۱/۱۵	نقطه‌ای	

جدول ۴. مقادیر دز جذبی پرتو بافت‌های مجاور پروستات بعد از تورمی به اندازه ۱۲٪ در پروستاتی به حجم ۵۲/۰۱ سانتی‌متر مکعب پس از کاشت ۷۶ چشمه و جابه‌جایی آنها.

عضو	حجم (cm ^۳)	شکل چشمه	میزان دز جذبی پرتو (Gy)	مقدار اختلاف دز جذبی پرتو قبل از تورم و بعد از آن (%)
مثانه	۴۵/۷۰۰	دانه‌ای خطی	۶/۲۹	۳۱/۳۵
بیضه‌ها	۳۷/۶۰۰	دانه‌ای خطی	۴/۵۲	۳/۸۲
روده بزرگ	۳۷۲/۵۰۰	دانه‌ای خطی	$1/59 \times 10^{-1}$	۰/۸۷
لگن	۶۰/۶۰۰	دانه‌ای خطی	$1/02 \times 10^{-2}$	۱/۴۳
کلیه‌ها	۲۸۸/۰۰۰	دانه‌ای خطی	$5/48 \times 10^{-5}$	۱۲/۵۱
کبد	۱۸۳۰/۰۰۰	دانه‌ای خطی	$3/81 \times 10^{-5}$	۱۴/۳۳

جدول ۵. عدم قطعیت ترکیبی نوع A و B تابع دز شعاعی.

$r(cm)$	$u_{g(r) \mu}$	$u_{g(r) geo}$	u_{A-MC}	$u_{clg(r)}(\%)$
۰/۱	۰/۰۱۸	۰/۰۲۳	۰/۰۰۲	۲/۹۲۰
۰/۵	۰/۰۰۸	۰/۰۰۰۶	۰/۰۰۱	۱/۰۰۰
۱/۰	۰	۰	۰/۰۰۳	۰/۳۲۰

۴. بحث و نتیجه‌گیری

در این تحقیق مقادیر پارامترهای دزسنجی شامل ثابت آهنگ دز و تابع دز شعاعی محاسبه شد. مقادیر تابع دز شعاعی در سه شعاع مختلف و در دو شکل چشمه با مقادیر ارائه شده ریوارد مقایسه و بیشینه اختلاف این پارامتر در شکل دانه‌ای خطی در شعاع ۵/۰ cm برابر با ۶/۶۸٪ به دست آمد. این اختلاف را می‌توان به سبب کاهش شار ناشی از برهم‌کنش‌های فوتونی، با افزایش فاصله‌ی شعاعی از چشمه دانست.

یکی از برتری‌های تحقیق حاضر در مقایسه با مقاله تلز، محاسبه میزان دز و عدم قطعیت آن در چهار حجم مختلف از بافت سالم و سرطانی پروستات تحت درمان با چشمه‌های نقطه‌ای و دانه‌ای خطی است؛ در صورتی که تلز تنها به دو حجم از پروستات سرطانی پرداخته است. مقادیر محاسبه شده نشان‌دهنده کاهش خطای محاسباتی و افزایش دقت شبیه‌سازی است. نتایج محاسبه دز جذبی پرتو بافت پروستات در سه حجم $3/0/02 \text{ cm}^3$ ، $38/0/1$ و $52/0/1$ قبل از تورم و حجم متورم $57/0/2 \text{ cm}^3$ در تحقیق حاضر و مقاله تلز در جدول (۲) آمده

است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش حجم پروستات، مقدار دز دریافتی آن کاهش می‌یابد. میزان اختلاف دز جذبی در بافت در دو شکل چشمه دانه‌ای خطی و نقطه‌ای ۰/۰۱٪ است که اختلافی بسیار کمتر از مقدار گزارش شده مقاله تلز (۱۰/۷۵٪) است. از آنجایی که مقدار اختلاف بسیار ناچیز است، می‌توان به منظور سادگی طراحی درمان در نرم‌افزارهای مربوط و با استفاده از داده‌های این تحقیق، از چشمه‌های نقطه‌ای به جای چشمه‌های دانه‌ای خطی استفاده کرد. همچنین مطالعه حاضر نشان داد که در طرح درمانی نخست، در اثر تورم پروستات و ۱/۵ برابر شدن حجم آن در حین و پس از کاشت چشمه‌های براکی‌تراپی، دز دریافتی بافت تحت درمان حدود ۱۷٪ کاهش می‌یابد.

در مقاله وستندرب صرفاً اثرات جابه‌جایی چشمه‌های کاشته شده به صورت مشاهدات بالینی و با استفاده از تصاویر CBCT و روش TRUS بررسی و دزسنجی دانه‌ها بر اساس تغییر در موقعیت دانه‌ها محاسبه شده است. به عبارت دیگر نتایج آنها بر اساس داده‌های تجربی و بیمارستانی است و با جسم استاندارد

دز توسط سایر چشمه‌ها، نداشتن ساختار پیچیده و عدم وجود مواد با ضریب جذب بالا در ساختار آن، کمتر از عدم قطعیت دز در بافت سرطانی پروستات در کاشت با چشمه‌های دانه‌ای خطی است. علامت منفی در عدم قطعیت به دلیل کاهش دز حالت ثانویه نسبت به حالت اولیه و لحظه‌ی پس از کاشت است.

منحنی‌های هم‌دز رسم شده نشان می‌دهند که حداکثر (بیش از ۵۰٪ از کل دز پرتو) مقدار دز در ناحیه بافت سرطانی تحت کاشت چشمه‌های براکی‌تراپی مشاهده می‌شود. افت دز در مرز بافت پروستات ۸۰٪-۷۰٪ از کل دز جذبی پرتو درمانی است. به عبارت دیگر، مقدار دز بسیار کمی به مرز پروستات و بافت‌های مجاور به آن می‌رسد. مقادیر ذکر شده بیانگر درصد بالای موفقیت و عوارض بسیار کم این شیوه درمانی است. با رسم منحنی‌های هم‌دز می‌توان پی برد که در فواصل نزدیک به چشمه به دلیل میزان شار بیشتر، مقدار دز جذبی تجمعی بافت پروستات بیشتر است. اما در فواصل بسیار دور از چشمه، پرتو‌زایی کمتری مشاهده می‌شود و منحنی‌ها به شکل دایروی متمایل می‌شوند که بیانگر این واقعیت است که در این فواصل، عملکرد چشمه دانه‌ای خطی به صورت یک چشمه نقطه‌ای است، همچنین از مقایسه نحوه قرارگیری چشمه‌های دانه‌ای خطی با منحنی هم‌دز سه بعدی، می‌توان پی برد که مقدار دز جذبی تجمعی بافت در راستای محور طولی چشمه کمتر از راستای محور عرضی آن است.

(فانتوم) اعتبارسنجی نشده است. در حالی که در این تحقیق از فانتوم محاسباتی ORNL که فانتومی با شباهت بسیار نسبت به ساختار و بافت‌های بدن است، استفاده شد. مواد مورد استفاده در فانتوم ORNL همخوانی زیادی با عناصر سازنده بافت‌های بدن دارد. علاوه بر این، وجه تمایز تحقیق حاضر با مقاله وستندرب، بررسی دز دریافتی بافت و عدم قطعیت آن بر اثر جابه‌جایی چشمه‌ها، تورم و تأثیر همزمان هر دو عامل در پروستات سرطانی و سالم است. با استفاده از طرح درمانی دوم تغییرات دز در طی سه گام محاسبه شد (جدول ۳). همچنین حداکثر میزان عدم قطعیت دز ناشی از جابه‌جایی چشمه‌ها و تورم در گام دوم و گام سوم به ترتیب $\pm 20\%$ و $\pm 21\%$ محاسبه شد.

بیشترین مقدار عدم قطعیت ناشی از جابه‌جایی چشمه‌ها است. تورم ایجاد شده در پروستات به سبب کاشت دانه‌های براکی‌تراپی است که موجب به هم خوردگی توزیع چشمه‌ها و توزیع دز در پروستات می‌شود. حداکثر عدم قطعیت ترکیبی در پارامترهای دزسنجی پروتکل و خروجی کد به ترتیب ۳٪ و ۰/۳٪ به دست آمد. از دلایل عدم قطعیت دو مورد اخیر، استفاده از کتابخانه سطح مقطع داده‌های مختلف در شبیه‌سازی، ابعاد، هندسه و پیکربندی چشمه‌ی شبیه‌سازی شده است.

مقادیر دز جذبی پرتو پروستات، زمانی که چشمه‌ها نقطه‌ای در نظر گرفته شوند، به اندازه ۶/۵٪ - ۳٪ نسبت به چشمه‌های دانه‌ای خطی در بافت پروستات کمتر است. مقادیر عدم قطعیت در کاشت چشمه‌های نقطه‌ای به علت همسانگردی، جذب کمتر

مراجع

1. https://www.who.int/health-topics/cancer#tab=tab_1, Available on Date 2020, 25 March.
2. S Bernard and S Vynckier, *Physics in Medicine and Biology* **50**, 7 (2005) 1493.
3. P Teles, S Barros, S Cardoso, A Facure, LAR Da Rosa, M. Santos, P Pereira Jr, P Vaz, and M Zankl, *Radiation protection dosimetry* **165**, 1-4 (2015) 482.
4. H Westendorp, T Nuver, C Hoekstra, M Moerland, and A Minken, *International Journal of Radiation Oncology Biology Physics* **96**, 1 (2016) 197.
5. M Rivard, B Coursey, L DeWerd, W Hanson, M Saiful Huq, G Ibbott, M Mitch, R Nath, and J
6. Y Yu, L Anderson, Z Li, D Mellenberg, R Nath, M C Schell, F Waterman, A Wu, and J Blasko, *Medical Physics* **26**, 10 (1999) 2054.
7. M Rivard, *Medical Physics* **36**, 2 (2009) 486.
8. D R White, R V Griffith, I J Wilson, *Journal of the International Commission on Radiation Units and Measurements* **24**, 1 (1992) 122.
9. J Jarrett, "Experimental method development for direct dosimetry of permanent interstitial prostate brachytherapy implants," Louisiana State University (2005).
10. williamson, *Medical Physics* **31**, 3 (2004) 633.

- Institute of Standards and Technology Gaithersburg (1994).
12. H Hedtjärn, G A Carlsson, and J F Williamson, *Medical Physics* **27**, 5 (2000) 1076.
10. F Waterman, N Yue, B Corn, and A Dicker, *International Journal of Radiation Oncology Biology Physics* **41**, 5 (1998) 1069.
11. B Taylor and C Kuyatt, US Department of Commerce, Technology Administration, National