



## طراحی اپلیکاتور براکی تراپی با استفاده از $HDR-^{75}Se$ برای درمان سرطان غیرملانومای پوست با استفاده از شبیه سازی به روش مونت کارلو

سارا قنواٹی<sup>(\*)</sup>، اصغر حدادی

گروه مهندسی هسته ای، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

### چکیده:

در براکی تراپی تومورهای پوستی اپلیکاتورهای مختلفی طراحی شده‌اند که از چشمه‌های مختلف براکی تراپی از جمله چشمه  $HDR-^{192}Ir$  استفاده می‌کنند. علاوه بر این، چشمه  $^{75}Se$  نیز یک چشمه صنعتی می‌باشد که با توجه به مشخصات فیزیکی می‌تواند به عنوان یک جایگزین مناسب برای چشمه‌های رادیوتراپی سطحی در نظر گرفته شود. هدف از این تحقیق علاوه بر معرفی چشمه  $^{75}Se$  به عنوان جایگزین  $^{192}Ir$  در براکی تراپی های سطحی، طراحی اپلیکاتور و فیلتر مسطح کننده مناسب برای چشمه  $^{75}Se$  به منظور درمان تومورهای پوستی با استفاده از کد مونت کارلو است. در این کار فانتومی جدید از ساعد مرد بالغ با در نظر گرفتن جزئیات لایه‌های مختلف نیز طراحی شده که با در نظر گرفتن این جزئیات اندازه‌گیری دز تومور و استخوان با دقت بیشتری صورت گرفت. پس از انجام محاسبات، نمودارهای توزیع دز در عمق و کانتورها و منحنی‌های هم دز ترسیم شده و به منظور بررسی عملکرد چشمه  $^{75}Se$ ، نتایج حاصل از این تحقیق با عملکرد چشمه  $^{192}Ir$  در تحقیقات گذشته مقایسه شد.

**کلیدواژه‌ها:** براکی تراپی، اپلیکاتور، فیلتر مسطح کننده، فانتوم پوست، سرطان پوست

## Design of Brachytherapy applicator for treatment of non-melanoma skin cancer using $HDR-^{75}Se$ seed by montecarlo simulation

Sara Ghanavati<sup>(\*)</sup>, Asghar hadadi

Department of Medical Radiation Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

### Abstract:

In brachytherapy of skin cancer, various applicators have been designed that use different brachytherapy sources, including  $Ir-192$  HDR. In addition, the  $^{75}Se$  source is an industrial source that can be considered as a suitable alternative to surface radiotherapy sources due to its physical characteristics. The purpose of this study, in addition to introducing  $^{75}Se$  fountain as an alternative to  $^{192}Ir$  in superficial brachytherapy, is to design an applicator and flattening filter for  $^{75}Se$  fountain for the treatment of skin tumors using the Monte Carlo code. In this work, a new phantom of an adult male hand was designed by considering the details of different layers, which by considering these details, the tumor and bone dose were measured more accurately. After performing the calculations, dose distribution diagrams were drawn in depth and contours and isodes curves and in order to evaluate the performance of  $^{75}Se$  spring, the results of this research were compared with the performance of  $^{192}Ir$  spring in previous researches.

**Keywords:** Brachytherapy, Applicator, Flattening filter, Skin phantom, Skin cancer

## ۱. مقدمه

سرطان پوست یکی از سرطان‌های رایج در جهان است که ابتدا به آن در حال افزایش است و بطور کلی به دو دسته‌ی ناشی از سلولهای ملانوسیت (ملانوما) و سلولهای لایه اپیدرم (سرطان پوست غیر ملانوما) تقسیم می‌شود [۱]. برای درمان سرطان پوست از روش‌های درمانی زیادی استفاده می‌شود که یکی از این روشها براکی‌تراپی می‌باشد [۲].

در حال حاضر یکی از رادیونوکلئیدهای پرکاربرد در حوزه براکی‌تراپی  $^{192}\text{Ir}$  است که علاوه بر براکی‌تراپی تومورهای مغزی، دستگاه گوارش، تومورهای مثانه، سرطان مری، سرطان سینه و غیره در براکی‌تراپی سرطان پوست نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد. از سوی دیگر رادیونوکلئید  $^{75}\text{Se}$  که در صنعت و کشاورزی کاربرد دارد [۳] را می‌توان در برای براکی‌تراپی پوست نیز به کار گرفت. این رادیونوکلئید دارای نیمه عمر ۱۱۹.۷۷۹ روز و متوسط انرژی فوتون‌های گامای آن ۲۱۴.۹ keV است.

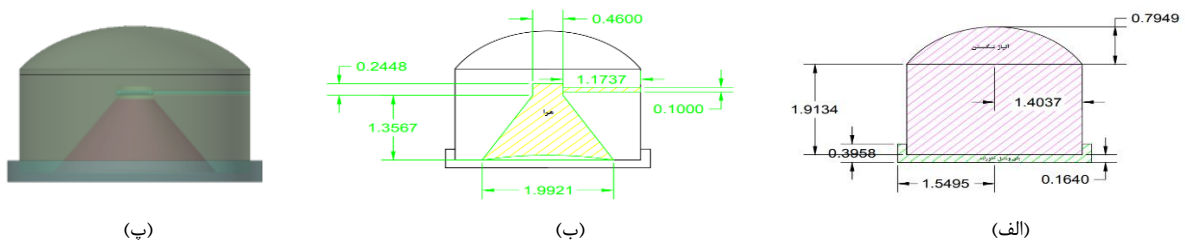
با توجه به ویژگی‌های مثبت  $^{75}\text{Se}$  و امکان تولید آن در کشور، می‌توان آن را به عنوان جایگزینی برای  $^{192}\text{Ir}$  در براکی‌تراپی سطحی در نظر گرفت [۳، ۴، ۵].

هدف از این تحقیق معرفی رادیونوکلئید  $^{75}\text{Se}$  برای براکی‌تراپی سرطان غیر ملانومای پوست، همچنین طراحی اپلیکاتور مناسب، مبتنی بر اپلیکاتور *Bebig Valencia* است. در این تحقیق از شبیه‌سازی به روش مونت کارلو برای اندازه‌گیری دز لایه‌های مختلف فانتوم ساعد مرد بالغ به ازای دز تجویزی ۴۰ Gy برای تومور استفاده شد. همچنین پارامترهای زمان درمان و *Flattn* برای این رادیونوکلئید محاسبه گردید و با مقادیر متناظر  $^{192}\text{Ir}$  مقایسه شده که عملکرد خوبی را از  $^{75}\text{Se}$  نشان داد.

## ۲. روش کار

### ۲.۱. شبیه‌سازی اپلیکاتور

در این کار با استفاده از طرح اپلیکاتور *Bebig Valencia* مطابق شکل ۱، بدنه اصلی اپلیکاتور طراحی گردید. جنس بدنه اصلی اپلیکاتور از آلیاژ تنگستن ( $\text{Ni } 6\% , \text{Cu } 4\% , \text{W } 90\% , \rho = 17 \text{ g/cm}^3$ ) که برای محدود کردن اشعه در ناحیه مورد نظر بکار می‌رود و کلاهدک پلاستیکی از پلی‌وینیل‌فلوراید ( $\text{F } 59.3\% , \text{C } 37.5\% , \text{H } 3.2\% , \rho = 1.78 \text{ g/cm}^3$ ) است [۶].

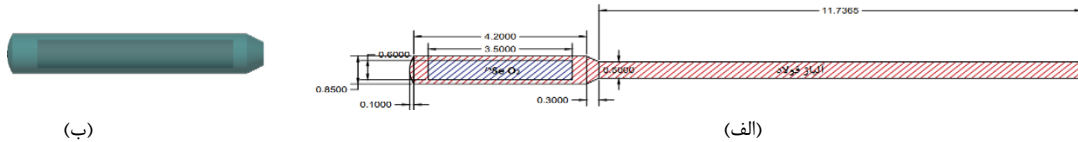


شکل ۱. ابعاد اپلیکاتور (cm) الف) نمای خارجی ب) نمای داخلی پ) اپلیکاتور طراحی شده

## ۲.۲. شبیه سازی چشمه $^{75}\text{Se}$ و فیلتر مسطح کننده

در این کار چشمه  $^{75}\text{Se}$  که توسط بلوسوو<sup>۱</sup> و همکاران معرفی شده مورد استفاده قرار گرفت. چشمه استفاده شده به صورت ترکیب  $^{75}\text{Se O}_2$  که در پوسته ی فولادی با ترکیب (1% Si, 68% Fe, 19% Cr, 10% Ni, 2% Mn,  $\rho = 8 \text{ g/cm}^3$ ) قرار گرفته، شبیه سازی شده است. [۶].

در شکل ۲ (الف) ابعاد چشمه ی بکار گرفته شده و غلاف آن و در شکل ۲ (ب) چشمه ی شبیه سازی شده  $^{75}\text{Se}$  نشان داده شده است.



شکل ۲. (الف) ابعاد چشمه  $^{75}\text{Se}$  (ب) چشمه شبیه سازی شده  $^{75}\text{Se}$  (mm)

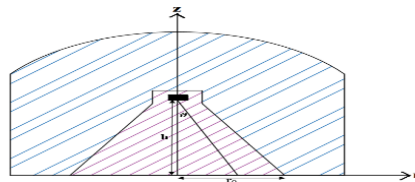
برای طراحی فیلتر مسطح کننده از روش تحلیلی و تکرار که در تحقیق رابرت جرج<sup>۲</sup> و همکاران به کار گرفته شده است، استفاده شد. در این روش با استفاده از رابطه ی:

$$Z(\vartheta) = \frac{1}{\mu} \ln \frac{1 + \tan^2 \vartheta}{1 + \tan^2 \vartheta_0} \cos \vartheta \quad (1)$$

و قرار دادن مقادیر مختلف  $\vartheta$  ( $0 < \vartheta < \vartheta_0$ ) که با استفاده از رابطه ی:

$$r = h \tan \vartheta \quad (2)$$

بدست می آید، نمودار  $Z$  بر حسب  $\vartheta$  ترسیم شده که شکل فیلتر را بدست می دهد. همانطور که در شکل ۳ نشان داده شده است،  $h$  فاصله ی چشمه تا پنجره ی اپلیکاتور و  $r$  فاصله مرکز پنجره تا کناره ها است. با توجه به اینکه شعاع پنجره اپلیکاتور می باشد، حداکثر زاویه ( $\vartheta_0$ ) را می توان محاسبه کرد [۸].



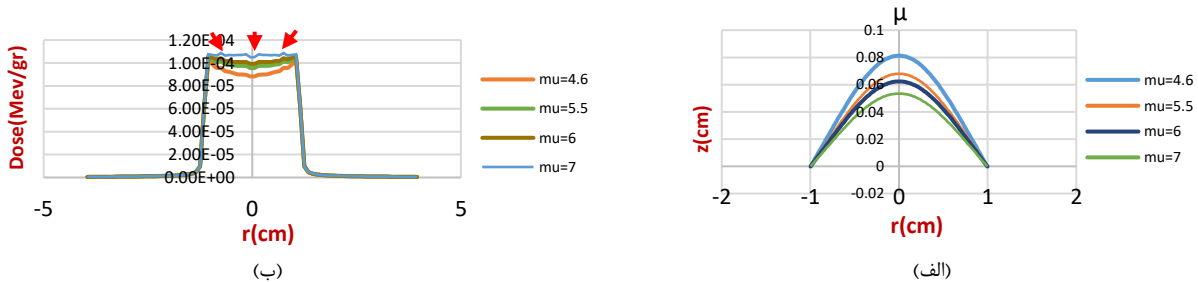
شکل ۳. رسم شماتیک مقادیر مورد استفاده در محاسبه تحلیلی ضخامت فیلتر سرب

برای به دست آوردن  $\mu$  که همان ضریب تضعیف می باشد با استفاده از کد MCNPX2.6 چشمه ی نقطه ای  $^{75}\text{Se}$  که در فاصله ی ۱۵ سانتیمتری از سطح فانوم آب قرار دارد، شبیه سازی شده و با استفاده از تالی  $*F8$  مقدار دز ناشی از این چشمه در عمق های مختلف اندازه گیری شده و نمودار دز بر حسب عمق ترسیم می گردد و از انطباق تابع نمایی می توان مقدار  $\mu$  را در رابطه ی (۳) بدست آورد.

$$D(d) = D_{(0)} e^{-\mu d(a).d} \quad (3)$$

از آنجایی که فاصله چشمه تا پنجره اپلیکاتور  $h = 1.47913 \text{ cm}$  و شعاع پنجره اپلیکاتور  $r_0 = 0.99605 \text{ cm}$  است، حداکثر مقدار  $\vartheta$  برابر با  $34^\circ$  بدست آمد. با ترسیم نمودار دز بر حسب عمق مقدار  $\mu$  برابر با  $4.6$  بدست آمد.

پس با داشتن مقدار  $\mu$  و قرار دادن مقدار  $0 < \theta < 34^\circ$  در رابطه‌ی (۱) شکل فیلتر بدست می‌آید. برای شبیه‌سازی فیلتر مسطح کننده می‌توان شکل زنگوله‌ای آن را با قرار دادن ورقه‌های استوانه‌ای یا مخروطی‌های ناقص روی یکدیگر به دست آورد که در این پروژه شکل فیلتر را از طریق قرار دادن مخروطی‌های ناقص روی یکدیگر ترسیم کردیم. پس از ترسیم فیلتر و قرار دادن آن در اپلیکاتور، با استفاده از نرم افزار MCNPX2.6 فایل ورودی را اجرا نموده و نمودار توزیع دز شعاعی را در عمقی که تومور قرار دارد ترسیم می‌کنیم. در شکل ۴ (الف) روند تغییر شکل فیلتر و در شکل ۵ (ب) روند تغییر نمودار توزیع دز در عمق تومور با تغییر مقادیر  $\mu$  مشاهده می‌شود.



شکل ۴. الف) شکل زنگوله‌ای فیلتر مسطح کننده در چهار ارتفاع مختلف ب) نمودار توزیع دز در عمق تومور متناظر با ارتفاع مختلف

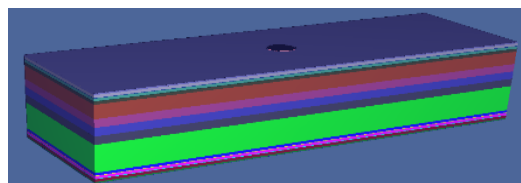
در شکل ۴ نشان داده شده که با افزایش مقدار  $\mu$  فیلتر کوتاه‌تر شده و دز در مرکز تومور افزایش می‌یابد و توزیع مناسب‌تری پیدا می‌کند. در نهایت با توجه به اینکه فیلتر متناظر با  $\mu=7$  نمودار دز در عمق مناسب‌تری بدست می‌دهد برای استفاده در اپلیکاتور طراحی شده مناسب‌تر می‌باشد. به منظور بهبود توزیع دز در قسمت‌هایی که در شکل ۴ (ب) نشان داده شده، دو قطعه مخروطی به بالای فیلتر اضافه شده است (شکل ۵).



شکل ۵. ابعاد مخروطی‌های تشکیل دهنده فیلتر و برایش شده (ابعاد برحسب cm می‌باشد)

### ۳.۲. شبیه‌سازی فانتوم

به منظور انجام محاسبات دقیق دزیمتری در پوست با استفاده از کد محاسباتی MCNPX2.6، طراحی فانتومی از ساعد مرد بالغ به ابعاد  $6.34 \times 8 \times 24$  cm با در نظر گرفتن جزئیات لایه‌های مختلف صورت گرفت به صورت شکل ۶ صورت گرفت. این فانتوم به ترتیب از ۱۹ لایه‌ی اپیدرم ( $0.1$  mm)، درم ( $1$  mm)، هیپودرم ( $2$  mm)، دیواره رگ ( $0.36$  mm)، خون ( $1.88$  mm)، دیواره رگ ( $0.36$  mm)، هیپودرم ( $2$  mm)، ماهیچه ( $1$  mm)، استخوان ( $0.6$  mm)، مغز زرد استخوان ( $0.6$  mm)، استخوان ( $0.6$  mm)، ماهیچه ( $2$  mm)، هیپودرم ( $2$  mm)، دیواره رگ ( $0.36$  mm)، خون ( $1.88$  mm)، دیواره رگ ( $0.36$  mm)، هیپودرم ( $2$  mm)، درم ( $1$  mm)، اپیدرم ( $0.1$  mm) تشکیل شده است.



شکل ۶. تصویر سه بعدی از فانتوم طراحی شده.

#### ۴.۲. محاسبه دز جذبی

در براکی تراپی پوست معمولاً دز ۳۰ Gy و ۴۰ Gy را طی دو هفته در ۶ تا ۸ فرکشن به تومور می‌دهند [۲]. در این پژوهش محاسبات ما بر پایه‌ی دز ۴۰ Gy می‌باشد که طی دو هفته در ۸ فرکشن به تومور داده می‌شود، یعنی دز در هر فرکشن ۵ Gy است. با استفاده از کارت  $F\lambda^*$  و با تاریخچه ۱E۸ مقدار دز جذب شده در لایه‌های مختلف فانتوم که در ناحیه مخروطی در میدان درمان قرار دارد به ازای ۴۰ Gy دز دریافتی حجم هدف بالینی (CTV) محاسبه شد. از آنجایی که CTV حجم بالینی هدف می‌باشد، این ناحیه در لایه‌ی درم و اپیدرم به صورت استوانه‌ای به ضخامت ۱.۱ mm و قطر ۱۵ mm در نظر گرفته شده است حجم هدف برنامه ریزی شده (PTV) نیز با افزودن یک حاشیه به ضخامت تقریباً ۳ mm به CTV ایجاد شده است [۹]. همچنین به منظور رسم پلات‌های دوبعدی، سه بعدی، منحنی‌های هم‌دز و کانتورهای رنگی با استفاده از نرم‌افزار surfer از کارت مش تالی مستطیلی با تاریخچه ۲E۸ در فایل ورودی استفاده گردید که در این مش بندی تمامی بازه‌ها در راستای X و Y و Z یک میلی‌متری در نظر گرفته شدند.

#### ۵.۲. محاسبه $D_{av}$ و flatness و زمان درمان

برای محاسبه‌ی flatness در کمیسیون بین‌المللی الکتروتکنیکال (IEC) پارامتری به اسم Flattn تعریف شده است [۱۰] که به معنی یکنواختی بیشتر از ۸۰٪ در عرض ناحیه هندسی مورد نظر در عمق مرجع می‌باشد. این پارامتر به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$Flattn = \frac{D_{max} - D_{min}}{D_{max} + D_{min}} \times 100 \quad (۴)$$

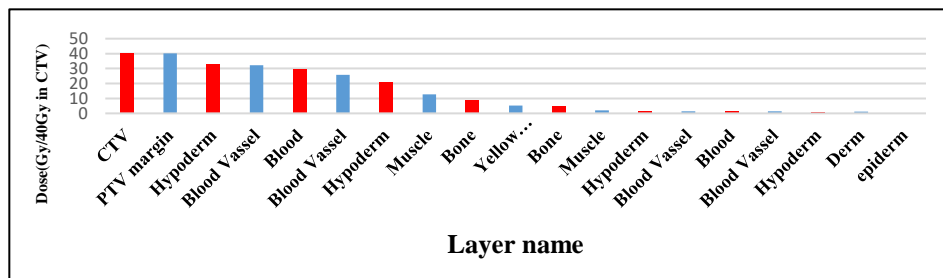
پارامتر  $D_{av}$  نیز دز میانگین می‌باشد که با استفاده از رابطه (۵) محاسبه می‌گردد:

$$D_{av} = \frac{D_{max} + D_{min}}{2} \quad (۵)$$

در این روابط  $D_{min}$  دز مینیمم و  $D_{max}$  دز بیشینه در ناحیه هندسی می‌باشد. به منظور محاسبه Flattn و  $D_{av}$  عمق مرجع را مرکز تومور یعنی فاصله ۰.۰۶ سانتیمتری از سطح فانتوم و عرض ناحیه هندسی را شعاع ۰.۷۵ سانتی‌متری از مرکز تومور در نظر گرفتیم. کمیت زمان درمان با توجه به میزان دز تجویزی برای تومور در هر فرکشن و اکتیویته چشمه قابل اندازه‌گیری است، لذا با توجه به اینکه دز در هر فرکشن ۵ Gy و اکتیویته چشمه ۱۰ Ci در نظر گرفته شده، زمان درمان در هر فرکشن را می‌توان بدست آورد.

#### ۳. تجزیه و تحلیل داده‌ها

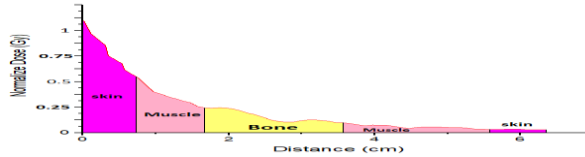
همانطور که در نمودار میله‌ای شکل ۷ نشان داده شده است، با افزایش عمق، دز جذب شده کاهش می‌یابد. همچنین دز رسیده به لایه‌های استخوان و مغز زرد استخوان به ترتیب ۴.۶ Gy و ۵.۱۷ Gy می‌باشد که حدود ۱۱.۵ الی ۲۲.۵ درصد از دز رسیده به ناحیه CTV می‌باشد. علاوه بر این لایه‌های مختلف پوست در طرف دیگر فانتوم حدود ۱/۴۰ دز رسیده به ناحیه CTV را دریافت کرده‌اند.



شکل ۷. نمودار میله‌ای دز لایه‌های مختلف فانتوم به ازای دز تجویزی تومور به میزان ۴۰ Gy

### ۱.۳. رسم منحنی PDD

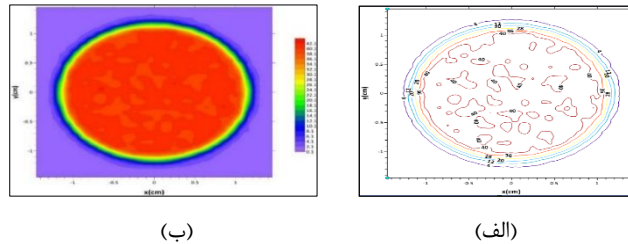
در شکل ۸ منحنی PDD ترسیم شده و همه‌ی داده‌ها به دز تومور نرمالایز شده‌اند، همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود، دز تابشی به لایه‌های مختلف استخوان و مغز زرد استخوان ۲۵٪-۱۱.۵٪ از دوز تجویز شده است. علاوه بر این، دز تابشی به لایه‌های مختلف پوست در طرف دیگر فانتوم حدود ۲.۵ درصد از دوز تجویز شده است. اما در براکی تراپی تومور پوستی به وسیله‌ی چشمه IR-HDRs کاهش دز استخوان نسبت به تومور بسیار اندک بوده و دز استخوان در حدود ۹۵٪ دز تومور است [۲].



شکل ۸. منحنی PDD چشمه  $^{75}\text{Se}$ ، دز در عمق‌های مختلف به دز تومور نرمالایز شده است

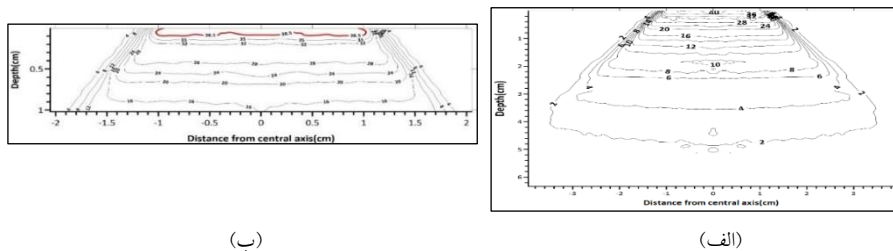
### ۲.۳. منحنی‌های هم دز

شکل ۹ کانتور هم دز در صفحه تومور را نشان می‌دهد. همانطور که در این شکل نشان داده شده، در صفحه تومور، تا شعاع ۱ سانتی متر از مرکز تومور دز تقریباً ۴۰ Gy است و برای شعاع‌های بزرگتر به دلیل اندازه پنجره اپلیکاتور، دز به سرعت کاهش می‌یابد.



شکل ۹. الف) کانتور توزیع دز در صفحه تومور ب) پلات رنگی در صفحه تومور

شکل ۱۰ الف) منحنی هم دز تا عمق ۵ سانتی متری فانتوم را نشان می‌دهد. نمای بزرگ این منحنی تا عمق ۱ سانتی متری نیز در شکل ۱۰ ب) نشان داده شده است. مطابق با شکل ۱۰ ب)، مشاهده می‌شود ناحیه PTV توسط منحنی هم دز ۳۸.۵ Gy بطور کامل احاطه شده است، لذا  $D_{100}$  ناحیه PTV در حدود ۳۸.۵ Gy است که از میزان دز تجویزی (۴۰ Gy) [۹] در حدود ۱.۵ Gy کمتر می‌باشد.



شکل ۱۰. الف) منحنی‌های هم دز در عمق‌های مختلف فانتوم ب) نمای نزدیک منحنی‌های هم دز تا عمق ۱ cm از سطح فانتوم

### ۳.۳. نتایج محاسبات $D_{av}$ و flatness و زمان درمان

با در نظر گرفتن مرکز تومور به عنوان عمق مرجع (فاصله ۰.۰۶ cm از سطح فانتوم) و شعاع ۰.۷۵ cm از مرکز تومور به عنوان عرض ناحیه هندسی مقدار دز ماکسیمم در این قسمت ۴۰.۹۸۶ Gy و دز مینیمم ۳۸.۸۹۵ Gy بدست آمد بنابراین مقدار Flattn با استفاده از رابطه (۴) برابر با ۲.۶٪ و  $D_{av}$  با استفاده از رابطه‌ی (۵) برابر ۳۹.۹۴۱۲۷ Gy محاسبه شد. مقدار Flattn برای چشمه  $^{192}\text{Ir}$  مقدار ۲۰.۹٪ است [۱۱].

مدت زمان درمان تومور در هر جلسه با استفاده از چشمه  $^{75}\text{Se}$  با اکتیویته  $10\text{ Ci}$  تقریباً برابر با  $7\text{ min}$  به دست آمد که این مقدار برای چشمه  $^{192}\text{Ir}$  با همان اکتیویته  $10\text{ Ci}$  برابر با  $2.37\text{ min}$  می باشد [۷، ۱۱]. با این حال، یک محاسبه ساده نشان می دهد که پس از  $220$  روز، برابر با سه نیمه عمر  $^{192}\text{Ir}$ ، زمان درمان برای هر دو رادیونوکلئید برابر با  $24$  دقیقه است.

#### ۴. نتیجه گیری

در این پروژه به طراحی اپلیکاتور براکی تراپی با استفاده از چشمه  $^{75}\text{Se}$  برای درمان سرطان پوست با استفاده از شبیه سازی به روش مونت کارلو و بررسی عملکرد این اپلیکاتور پرداخته شد. همچنین طراحی فانتوم جدید از پوست با در نظر گرفتن جزئیات لایه های مختلف نیز بخش مهمی از این کار را تشکیل داد. این فانتوم یک مدل دقیق از ساعد دست مرد بالغ است که شامل لایه های مختلف پوست، لایه چربی، دیواره رگ، خون، استخوان و مغز استخوان است که با در نظر گرفتن این جزئیات اثراتی مانند پس پراکندگی، جذب، تضعیف و غیره اعمال می شود که منجر به اندازه گیری دقیق دز در تومور و استخوان می شود. اگرچه استفاده از  $^{75}\text{Se}$  باعث افزایش زمان درمان در مقایسه با  $^{192}\text{Ir}$  می شود، اما محاسبه نشان می دهد که این زمان برای هر دو بعد از  $3$  نیمه عمر  $^{192}\text{Ir}$  تقریباً یکسان است.  $^{75}\text{Se}$  در مقایسه با  $^{192}\text{Ir}$  اکتیویته ویژه بیشتری داشته و در نتیجه قابلیت ساخت آن در ابعاد کوچک وجود دارد، همچنین با توجه به انرژی پرتوهای گاما، با استفاده از  $^{75}\text{Se}$  دز رسیده به لایه های مجاور تومور به ویژه استخوان نسبت به  $^{192}\text{Ir}$  بسیار کمتر و دز پرسنل نیز کاهش و ضخامت حفاظ سربی مورد استفاده کمتر است [۷]. بنابراین توزیع دز بهتر و کاهش قابل ملاحظه ی دز استخوان، حفاظ سازی آسان تر [۷]، نیمه عمر بیشتر، زمان درمان مناسب و اکتیویته ویژه بالاتر می تواند این رادیونوکلئید صنعتی را به جایگزین مناسبی برای  $^{192}\text{Ir}$  در براکی تراپی سطحی تبدیل کند.

#### مراجع

1. Craythorne, E., & Al-Niami, F. Skin cancer. *Medicine*, 45(7), 431 (2017).
2. Safigholi, H., Song, W. Y., & Meigooni, A. S. Optimum radiation source for radiation therapy of skin cancer. *Journal of applied clinical medical physics*, 16(5), 219 (2015).
3. Roushan, F. P., Jalilian, A. R., & SABET, M. Simultaneous production and quality control of  $^{73}\text{Se}$  and  $^{75}\text{Se}$  radioisotopes in a 30 MeV cyclotron. (2004).
4. Famulari, G., Pater, P., & Enger, S. A. Microdosimetric evaluation of current and alternative brachytherapy sources—a Geant4-DNA simulation study. *International Journal of Radiation Oncology\* Biology\* Physics*, 100(1), 270 (2018).
5. Weeks, K. J., & Schulz, R. J. Selenium-75: A potential source for use in high-activity brachytherapy irradiators. *Medical physics*, 13(5), 728 (1986).
6. Anagnostopoulos, G., Andrassy, M., & Baltas, D. The Bebig Valencia-type skin applicators: Dosimetric study and implementation of a dosimetric hybrid technique. *Brachytherapy*, 16(5), 1044 (2017).
7. Belousov, A. V., Belianov, A. A., Krusanov, G. A., & Chernyaev, A. P. Simulation of  $^{75}\text{Se}$  Encapsulated Sources for Their Potential Use in Brachytherapy. *Moscow University Physics Bulletin*, 73(3), 339 (2018).
8. Jeraj, R., Sarvary, A., & Kron, T. Optimal flattening filter shape of a surface brachytherapy applicator. *Physics in Medicine & Biology*, 47(5), 723. (2002).
9. Ouhib, Z., Kasper, M., Calatayud, J. P., Rodriguez, S., Bhatnagar, A., Pai, S., & Strasswimmer, J. Aspects of dosimetry and clinical practice of skin brachytherapy: The American Brachytherapy Society working group report. *Brachytherapy*, 14(6), 840 (2015).
10. IEC 60976 Report, International Electrotechnical Commission
11. Safigholi, H., Meigooni, A. S., & Song, W. Y. Comparison of  $^{192}\text{Ir}$ ,  $^{169}\text{Yb}$ , and  $^{60}\text{Co}$  high-dose rate brachytherapy sources for skin cancer treatment. *Medical Physics*, 44(9), 4426 (2017).