

ارزیابی دزیمتری چشمه‌های Se^{75} و Ir^{192} در براکی‌تراپی با آهنگ دز بالا ضایعات سرطانی

بزرگ پوستی با استفاده از شبیه‌سازی به روش مونت کارلو

INC29-1246

زهرا نقی‌زاده قره‌لر، اصغر حدادی*

گروه مهندسی پر تویزشکی، دانشکده فنی و مهندسی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

چکیده:

هدف از این تحقیق، ارزیابی دزیمتری چشمه‌های Se^{75} و Ir^{192} ، در براکی‌تراپی با آهنگ دز بالا برای درمان ضایعات سرطانی بزرگ پوستی با استفاده از اپلیکاتور چند موقعیتی ساکن، والنسیا با میدان بزرگ با کولیماتور 5cm به روش مونت کارلو با استفاده از کد MCNPX2.6 بوده است. به این منظور، تمام پارامترهای دزیمتری در فانتوم آب، برای دو چشمه محاسبه شد. جهت اعتبارسنجی شبیه‌سازی، نتایج Ir^{192} با داده‌های منتشر شده مقایسه شد. که توافق خوبی بین دو خروجی برقرار بود. Se^{75} دارای توزیع دز یک بعدی و دو بعدی، ضریب فاکتور خروجی و تقارن نسبتاً مشابهی با Ir^{192} بود. یکنواختی و نیم‌سایه به ترتیب ۲۶٪ افزایش و ۱۷٪ بهبود یافته است؛ و به دلیل انرژی متوسط کمتر Se^{75} ، نشتی اپلیکاتور تقریباً به ۰٫۵٪ رسید؛ و جهت ایجاد زمان درمان مشابه با Ir^{192} برای Se^{75} اکتیویته‌ی Ci20 پیشنهاد داده شد.

کلیدواژه‌ها: دزیمتری، چشمه Se^{75} ، چشمه Ir^{192} ، سرطان پوست، مونت کارلو

Dosimetric evaluation of ^{75}Se and ^{192}Ir sources in brachytherapy with high dose rate of large skin cancer lesions using Monte Carlo simulation.

Z.Naghizadeh gharehlar, A.Haddadi*

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

Abstract:

The goal of this research was to evaluate the dosimetry of ^{75}Se and ^{192}Ir sources on the brachytherapy with high dose rate for treatment of large skin cancer lesions using large field Valencia multi-dwell position applicator with 5cm collimator by Monte Carlo method using MCNPX2.6 code. To this end, all of the dosimetry parameters in the water phantom were calculated for two source. And to ensure the accuracy of the simulation, ^{192}Ir results were compared with published data, and there was good agreement between two outputs. ^{75}Se had 1D and 2D distributions, output-factor and symmetry, approximately similar to ^{192}Ir . Flatness and penumbra increased by 26% and improved by 17%, respectively. Due to lower average energy of ^{75}Se , the leakage of the applicator reached to approximately 0.5%. and to create treatment times similar to ^{192}Ir , an activity of 20Ci was suggested for ^{75}Se .

Keywords: Dosimetry, ^{75}Se source, ^{192}Ir source, Skin cancer, Monte Carlo

۱. مقدمه

سرطان غیر ملانوما پوستی یکی از سرطان‌های رایج است. براکی‌تراپی با چشمه‌ی ^{192}Ir HDR با اپلیکاتور مخروطی تک موقعیتی ساکن، لایپزیگ و والنسیا، یک روش کارآمد برای ضایعات کوچک و عمق‌های کمتر از ۵mm است [۱]. در این اپلیکاتورها، جهت ایجاد گسترش ناحیه‌ی درمان، از اپلیکاتورهای تک موقعیتی ساکن عمودی استفاده می‌شود، که غیریکنواختی توزیع دز را به دنبال دارد. برای ایجاد توزیع دز یکنواخت از فیلتر یکنواخت‌کننده در قسمت خروجی اپلیکاتور والنسیا استفاده می‌شود، که با گسترش قطر اپلیکاتورهای والنسیا، طول فیلتر یکنواخت‌کننده افزایش می‌یابد و باعث کاهش ۵۰٪-۶۴٪ آهنگ دز می‌شود، که افزایش زمان درمان را به دنبال دارد [۲]. امروزه جهت ایجاد یک توزیع دز همگن با گستردگی بیشتر، اپلیکاتورهای چند موقعیتی ساکن پیشنهاد داده شده‌اند [۲،۳]. برای مثال اپلیکاتور والنسیا با میدان بزرگ (LFVA^۱)، که دارای دو کاتتر محیطی و یک مرکزی به ترتیب با ۳۰ و ۱ موقعیت ساکن چشمه برای چشمه‌های ^{192}Ir و ^{60}Co است [۳]. با توجه به نیمه‌عمر کم ^{192}Ir ، امروزه چشمه‌های مختلفی جهت جایگزینی پیشنهاد شده‌اند [۴،۱] برای مثال بلوسوف و همکارانش با توجه به ویژگی‌های ^{75}Se نسبت به ^{192}Ir که شامل نیم‌عمر بیشتر، انرژی متوسط کمتر، تابع دز شعاعی بیشتر و پوشش یکنواخت‌تر تابع ناهمسانگرد در اطراف چشمه، این ماده‌ی رادیواکتیو را به عنوان چشمه‌ی جایگزین ^{192}Ir در براکی‌تراپی پیشنهاد دادند [۴]. در نهایت، هدف از این تحقیق، ارزیابی و پیشنهاد چشمه‌ی ^{75}Se به عنوان جایگزینی برای چشمه‌ی ^{192}Ir در درمان سرطان پوست با استفاده از اپلیکاتور LFVA با شبیه‌سازی به روش مونت کارلو با استفاده از کد MCNPX2.6 است.

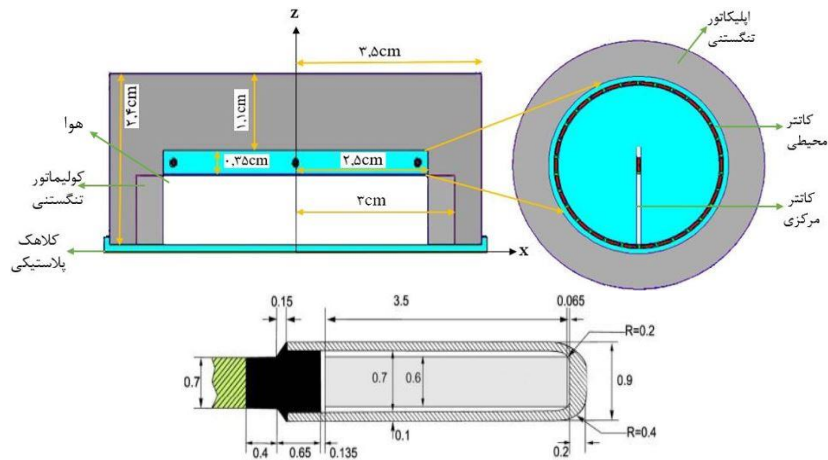
۲. روش کار

۱.۲. شبیه‌سازی اپلیکاتور

اپلیکاتور در این تحقیق، مطابق اپلیکاتور LFVA با کولیماتور ۵cm با بدنه‌ی تنگستنی ($\rho=17 \text{ g/cm}^3$ ، Cu: ۴٪، $\rho=6$ ٪، Ni: ۹۰٪، W: [۱]) به همراه یک کلاهک ۱mm پلاستیکی از جنس پلی متیل متاکریلات (PMMA^۲) ($\rho=1.19 \text{ g/cm}^3$ ، C: ۵۹.۹۵٪، O: ۳۱.۹۶٪، H: ۸.۰۵٪، $\rho=1.19$) در قسمت خروجی اپلیکاتور مانند شکل (۱-الف) در مجاورت فانتوم آب ($\rho=1 \text{ g/cm}^3$ ، O: ۸۸.۸۱٪، H: ۱۱.۱۹٪، $\rho=1$) به ابعاد $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$ شبیه‌سازی شد. همچنین جهت ایجاد یک توزیع همگن از ۳۱ موقعیت ساکن چشمه استفاده شده است [۶،۳]. به دلیل عدم شبیه‌سازی لوله‌های انتقال چشمه، مخالف اپلیکاتور مرجع از یک کاتتر محیطی در شعاع ۲.۳cm و یک کاتتر منفرد در مرکز شبیه‌سازی شده است؛ و به دلیل آنکه چشمه‌های محیطی در موقعیت‌های ثابت و با فاصله‌ی ۱۲ درجه نسبت به یکدیگر در نظر گرفته شده‌اند نسبت تمام چشمه‌ها ۱ در نظر گرفته شد. همچنین چشمه‌های شبیه‌سازی شده مطابق شکل (۱-ب) بر اساس چشمه‌ی mHDR-v2r است. چشمه‌های طراحی شده، حاوی یک ماده‌ی رادیواکتیو (^{192}Ir و ^{75}Se) با طول فعال ۳.۵ mm و قطر ۰.۶ mm است که توسط فولاد ضد زنگ AISI 316L ($\rho=8.02 \text{ g/cm}^3$ ، Mn: ۲٪، Si: ۱٪، $\rho=17$ ٪، Cr: ۱۲٪، Ni: ۶۸٪، Fe: ۶۸٪) احاطه شده‌اند [۷].

^۱ Large Field Valencia Applicator

^۲ polymethyl methacrylate



شکل ۱. سمت راست) اپلیکاتور شبیه‌سازی شده. سمت چپ) چشمه mHDR-v2r [۷].

۲.۲. محاسبه پارامترهای دزیمتری

جهت محاسبه‌ی تمام پارامترهای دزیمتری، به دلیل تقارن چرخشی اپلیکاتور از مش‌تالی استوانه‌ای نوع ۳، به صورت لایه‌های استوانه‌ای ۱mm، در هر دو راستای شعاعی و محوری در فانتوم آب استفاده شد؛ و تنها برای رسم توزیع دز دوبعدی در راستای x، y در عمق مرجع از مش‌تالی دکارتی نوع ۳ استفاده شد که هر وکسل دارای ابعاد $1 \times 1 \times 1 \text{ mm}^3$ است. در نهایت دز جذب شده در تمام نقاط، به دز مرکزی در عمق مرجع ۳mm در آب نرمالیزه شده‌اند. تعداد تاریخچه در این شبیه‌سازی‌ها 10^9 بوده است؛ و انرژی قطع برای هر دو چشمه 10 keV در نظر گرفته شد. البته جهت کاهش درصد خطا در محاسبات پارامترهای دزیمتری از تعداد تاریخچه‌ی 2×10^9 استفاده شد.

تمامی پروفایل‌ها، یکنواختی (F)، تقارن (S)، نیم‌سایه (P) بر اساس معیارهای IEC 60976 است [۳]. یکنواختی و تقارن با روابط زیر محاسبه می‌شود [۸،۲]:

$$\times 100 \quad (1)$$

$$F = \frac{D_{max} - D_{min}}{D_{max} + D_{min}}$$

$$(2)$$

$$S = D(x) - D(-x)$$

در این روابط D_{max} و D_{min} به ترتیب بیانگر حداکثر و حداقل دز در ناحیه مسطح است. ناحیه‌ی مسطح به ۸۰٪ فاصله‌ی دو نقطه که دز در آنجا ۵۰٪ دز مرکزی است، گفته می‌شود. همچنین $D(x)$ و $D(-x)$ دز در نقاط $\pm x$ در ناحیه مسطح است. نیم‌سایه بیانگر فاصله‌ی بین دو نقطه‌ی ۸۰٪ و ۲۰٪ دز مرکزی است [۳].

۳.۲. ضریب فاکتور خروجی

ضریب فاکتور خروجی با واحد (cGy/hU) ، بیانگر نسبت آهنگ دز مرجع به شدت گرمای هوای چشمه مربوطه است [۹]. آهنگ دز جذب شده با استفاده از مش‌تالی استوانه‌ای نوع ۳ در عمق مرجع با شعاع و ارتفاع ۱mm بدست آمد، و خروجی برای چشمه‌ی 10 Ci در مدت زمان ۱ ساعت تعمیم داده شد. همچنین، شدت گرمای هوا با واحد $(\mu\text{Gy m}^2 \text{ h}^{-1})$ که معیاری برای بیان قدرت چشمه است. مطابق فرمول (۳) متناسب با حاصلضرب آهنگ گرمای هوا در نقطه‌ی کالیبراسیون (d)، در امتداد محور عرضی چشمه در فضای خلا، در مربع فاصله (d^2) که معمولاً ۱m لحاظ می‌شود، محاسبه می‌شود [۱۰].

$$\dot{K}_{air}(d) \times d^2 \quad (3)$$

$$S_k =$$

برای محاسبه‌ی شدت کرمای هوا، چشمه در مرکز یک کره‌ی خلاء با شعاع ۱۱۰cm شبیه‌سازی شد؛ و آهنگ کرما در استوانه‌ی متحدالمرکز با ارتفاع ۲mm حاوی هوای خشک در فاصله‌ی ۱m از امتداد محور عرضی چشمه به وسیله‌ی تالی F₆ محاسبه شد. جهت تبدیل کرمای هوای هر فوتون به کرمای هوای یک چشمه‌ی ۱۰Ci از رابطه (۴) استفاده شد.

$$\dot{K}_{air} = K'_{air} \times N_{photon} \quad (۴)$$

در اینجا N_{photon} ، رابطه‌ی بین اکتیویته‌ی چشمه و تعداد فوتون‌های ساطع شده در هر فروپاشی و K'_{air} ، کرمای هوای هر فوتون اولیه است [۱۰]. بهره‌ی گسیل فوتون‌های گسیل شده با انرژی‌های بالاتر از ۱۰keV در هر واپاشی مطابق با گزارش ICRP107 برای ^{192}Ir و ^{75}Se به ترتیب برابر با ۲,۳۱۲۸ و ۱,۷۸۴۷ است [۱۱].

۴.۲. محاسبه‌ی زمان درمان

آهنگ دز جذب شده در نقطه‌ی مرکزی عمق مرجع برای هر دو چشمه‌ی ^{192}Ir و ^{75}Se با اکتیویته‌ی ۱۰Ci در شبیه‌سازی‌های گذشته به دست آمد. با توجه به آنکه دز در هر جلسه‌ی درمان ۵Gy است [۱]. زمان درمان در هر جلسه‌ی درمان از ابتدا تا ۴ ماه محاسبه شد، و اکتیویته مورد نیاز برای ^{75}Se جهت ایجاد مدت زمان درمان، مشابه ^{192}Ir محاسبه شد.

۵.۲. محاسبه‌ی نشستی اپلیکاتور

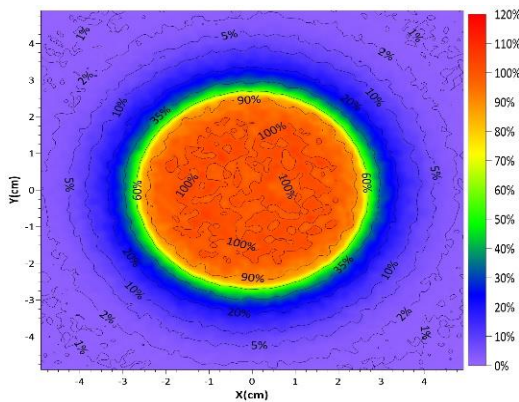
طبق مقاله‌ی آناگنوس توپولوس، برای محاسبه‌ی نشستی اپلیکاتور از نرم‌لیزاسیون کرمای برخوردی هوا به آهنگ دز مرجع استفاده شد [۹]. به همین منظور مش‌تالی دکارتی نوع ۱ با ابعاد ۱mm³، با تاریخچه‌ی ۱۰^۹ پیرامون اپلیکاتور شبیه‌سازی شد؛ و مطابق فرمول (۵) از ضرب شار خروجی (ϕ) به ضرب تبدیل شار به کرمای هوای (k_{ϕ}) موجود در ICRU57 جهت محاسبه‌ی کرمای برخوردی هوا (K_{air}) استفاده شد [۱۲].

$$k_{\phi} = \frac{K_{air}}{\phi} \quad (\text{p.Gy.cm}) \quad (۵)$$

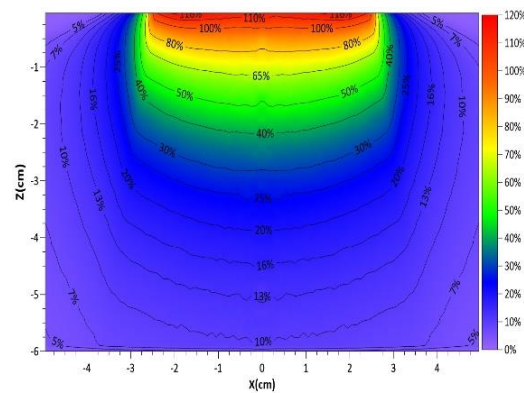
۳. نتایج

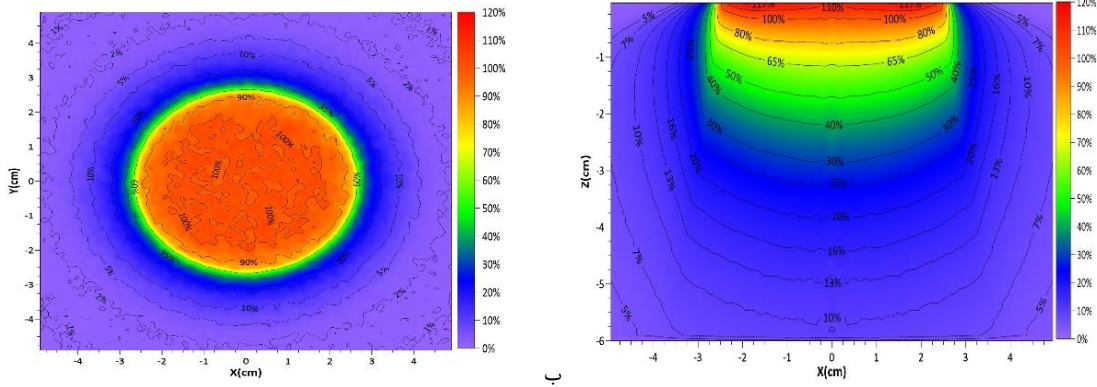
۱.۳. توزیع دز در آب

در شکل (۲) توزیع دز دو بعدی در عمق و صفحه‌ی X و Y در عمق ۳mm نشان داده شده است. که بیانگر هماهنگی توزیع دز دو بعدی دو چشمه است. درصد خطا متناسب با موقعیت هروکسل برای ^{192}Ir و ^{75}Se به ترتیب برابر ۰,۲٪ - ۱,۶٪ و ۰,۲٪ - ۵,۹٪ بوده است.



الف





شکل ۲. تصویر سمت راست توزیع دز دو بعدی در عمق و تصویر سمت چپ توزیع دز دو بعدی در عمق ۳mm است. تصاویر الف: ^{192}Ir و ب: ^{75}Se است.

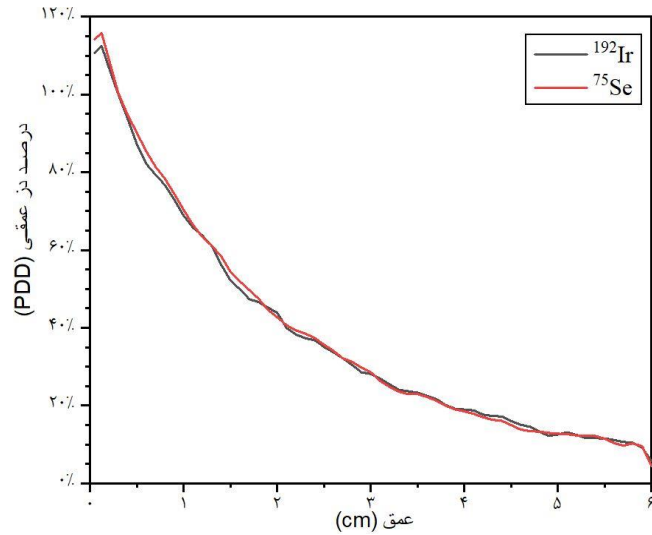
۲.۳. مقایسه‌ی درصد دز عمقی (PDD^۱)

در شکل (۳) منحنی درصد دز عمقی، تا عمق ۶cm برای ^{192}Ir و ^{75}Se نشان داده است که درصد خطا متناسب با عمق برای هر دو چشمه بین ۱٫۷٪ - ۷٪ بوده است. در جدول (۱) درصد دز عمقی هر دو چشمه تا عمق ۱cm با PDD حاصل از شبیه‌سازی مقاله‌ی کاندلا و همکارانش مقایسه شد [۳]. به دلیل عدم تعادل الکترون در لایه‌های سطحی، کرمای برخورداری با دز جذبی برابر نبوده است [۳]؛ در نتیجه PDD برای ^{192}Ir در این تحقیق، با ادبیات پیشین در عمق‌های اولیه مطابقت نداشته است، اما در عمق‌های بعدی به دلیل حضور تعادل الکترونی توافق خوبی برقرار است.

جدول ۱. PDD در عمق ۱cm.

عمق (mm)	PDD(%)	
	^{192}Ir	^{75}Se
۰٫۵	۱۱۵	۱۱۴٫۲۸
۱	۱۱۱٫۶	-
۱٫۲۵	-	۱۱۵٫۶۵
۲	۱۰۵٫۶	۱۰۹٫۲۳
۳	۱۰۰	۱۰۰
۴	۹۵	۹۴٫۰۷
۵	۹۰	۹۱٫۷۵
۶	۸۵	۸۴٫۱۱
۷	۸۰٫۵	۸۱٫۳۷
۸	۷۷	۷۹٫۳۴
۹	۷۳	۷۳٫۴۶
۱۰	-	۷۰٫۷۵

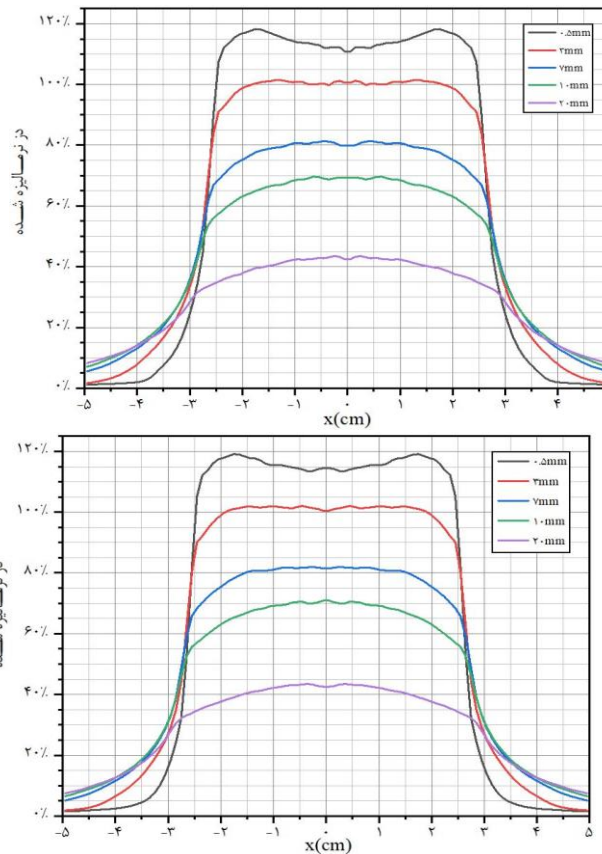
^۱ percentage depth-dose



شکل ۳. منحنی PDD برای دو چشمه ^{192}Ir و ^{75}Se تا عمق ۶cm.

۳.۳. پروفایل‌های توزیع دز

اشکال (۴-الف) و (۴-ب) پروفایل‌های دز نرمالیزه شده به عمق تجویزی ۳ mm را در عمق‌های ۰.۵، ۳، ۷، ۱۰، ۲۰ میلی‌متر به ترتیب برای ^{192}Ir و ^{75}Se نشان می‌دهند. با توجه به شکل، با افزایش عمق آب، مقادیر پروفایل دز کاهش می‌یابد و گستردگی دز به اطراف بیشتر می‌شود [۱]. اما در عمق‌های سطحی به دلیل حضور کاتر محیطی که ۳۰ موقعیت ساکن چشمه دارد، دز در محدوده‌ی شعاعی ۲،۳cm افزایش یافته و مقادیر پروفایل دز در این قسمت هم کاهش یافته است. نتایج یکنواختی، نیم‌سایه و تقارن در عمق ۳mm برای ^{192}Ir و ^{75}Se این تحقیق و مقاله‌ی کاندلا و همکارانش جهت مقایسه در جدول (۲) آورده شده است، و به دلیل آنکه در این تحقیق نسبت چشمه‌ها برابر در نظر گرفته شد است، اختلاف ۹،۵٪ بین یکنواختی دو ^{192}Ir وجود دارد. یکنواختی و نیم‌سایه ^{75}Se نسبت به ^{192}Ir به ترتیب ۲۶٪ افزایش ۱۷٪ کاهش یافته است. به دلیل تقارن چرخشی اپلیکاتور، تقارن در تمام موارد صفر در نظر گرفته شده است [۳]. درصد خطا در این محاسبات، متناسب به موقعیت هروکسل برای ^{192}Ir و ^{75}Se به ترتیب برابر ۰،۲٪- ۰،۸٪ و ۰،۱۹٪- ۰،۷٪ بوده است.



شکل ۴. پروفایل توزیع دز یک بعدی در عمق‌های ۰,۵، ۱، ۲، ۳، ۵، ۷، ۱۰، ۲۰ میلی‌متر است. سمت راست ^{192}Ir و سمت چپ ^{75}Se .

۴.۳. ارزیابی ضریب فاکتور خروجی

در جدول (۲) ضریب فاکتور خروجی برای چشمه‌های ^{192}Ir ، ^{75}Se و ^{192}Ir محاسبه شده با شبیه‌سازی، در مقاله‌ی کاندلا و همکارانش با بیان میزان خطا نشان داده شده است [۳]. با توجه به آنکه اختلاف ضریب فاکتور خروجی چشمه‌های ^{192}Ir در حدود ۱,۲۳٪ است، توافق خوبی بین خروجی این تحقیق و ادبیات پیشین برقرار است. ضریب فاکتور خروجی ^{75}Se در حدود ۰,۶۱٪ بیشتر از ^{192}Ir است.

جدول ۲. یکنواختی، نیم‌سایه، تقارن، ضریب فاکتور خروجی.

چشمه	نیم‌سایه (mm)	تقارن	یکنواختی (%)	ضریب فاکتور خروجی (cGy/h×U)
^{192}Ir [1]	۷,۸	۰	۲,۱	۰,۱۶۲
^{192}Ir	۷,۸	۰	۲,۳	۰,۱۶۴ + ۰,۰۰۵
^{75}Se	۶,۴	۰	۲,۹	۰,۱۶۵ + ۰,۰۰۷

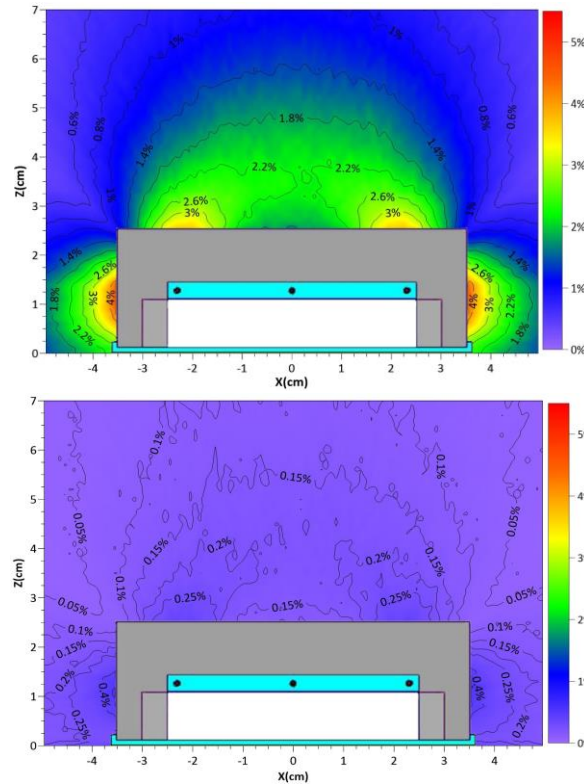
۵.۳. زمان درمان

مدت زمان درمان هر جلسه‌ی درمان، برای دو چشمه ^{192}Ir و ^{75}Se با اکتیویته‌ی 10Ci از ابتدا تا ۴ ماه به ترتیب بین ۵۰,۲ تا ۱۵,۴۹ دقیقه و ۱۰,۳۴ تا ۳۱,۹۱ دقیقه بوده است، که به منظور ایجاد مدت زمان درمان مشابه ^{192}Ir ، اکتیویته 20Ci برای ^{75}Se پیشنهاد می‌شود.

۶.۳. نشتی اپلیکاتور

نشتی اپلیکاتور برای چشمه‌ی ^{192}Ir و ^{75}Se به ترتیب در شکل‌های (۵-الف) و (۵-ب) نشان داده شده‌اند، که میزان نشتی اپلیکاتور برای چشمه ^{192}Ir در قسمت کناری اپلیکاتور ۴,۶٪ و در فاصله‌ی ۱ cm از اپلیکاتور به کمتر از ۲,۵٪ می‌رسد.

در قسمت پشت اپلیکاتور بیشترین نشتی در محدوده‌ی کاتر محیطی در حدود ۴٪ است. با توجه به آنکه در مقاله‌ی کاندلا و همکارانش، بیشترین نشتی اپلیکاتور در حدود ۵٪ و در فاصله‌ی کمتر از ۱cm، کمتر از ۳٪ بوده است [۳]؛ تقریباً خروجی دو ^{192}Ir با یکدیگر مطابقت دارند. مطابق شکل (۶-ب) نشتی اپلیکاتور برای چشمه‌ی ^{75}Se تقریباً ۰.۵٪ است. حداقل و حداکثر درصد خطا در این محاسبات متناسب با موقعیت هر وکسل برای ^{192}Ir و ^{75}Se به ترتیب برابر ۰.۰۳۶٪، ۰.۰۳۹٪ و ۱۷٪- بوده است.



شکل ۵. تصویر دو بعدی از نشتی اپلیکاتور. تصویر سمت راست: ^{192}Ir و تصویر سمت چپ: ^{75}Se .

۴. بحث و نتیجه‌گیری

در این تحقیق، به منظور ارزیابی چشمه ^{75}Se برای درمان‌های سطحی با میدان بزرگ با استفاده از اپلیکاتور LFVA به وسیله‌ی کد MCNPX2.6، تمام پارامترهای دزیمتری مورد ارزیابی قرار گرفت؛ جهت اعتبارسنجی شبیه‌سازی، چشمه ^{192}Ir نیز مورد ارزیابی قرار گرفت و با مقالات مربوطه مقایسه شد. در تمام پارامترهای دزیمتری توافق قابل قبولی بین چشمه‌ی ^{192}Ir دو تحقیق وجود داشت. بنابراین می‌توان از صحت شبیه‌سازی اطمینان حاصل کرد. با وجود آنکه PDD در عمق‌های سطحی برای ^{75}Se بیشتر از ^{192}Ir است، اما همچنان از حداکثر دز مجاز در سطح که در محدوده‌ی ۱۵۰٪- ۱۲۵٪ قرار دارد [۱]، کمتر است. توافق خوبی بین توزیع دز یک بعدی و دو بعدی، تقارن و ضریب فاکتور خروجی بین دو چشمه وجود داشت؛ و تنها میزان یکنواختی، ۲۶٪ افزایش یافت؛ و میزان نیم‌سایه‌اش ۱۷٪ بهبود یافت؛ و میزان نشتی اپلیکاتور به حدود ۰.۵٪ رسید و با در نظر گرفتن نشتی ۵٪، می‌توان ضخامت دیواره‌ی اپلیکاتور را کاهش داد؛ که این امر باعث سبک‌تر شدن اپلیکاتور می‌شود. همچنین به منظور ایجاد زمان درمان مشابه بین دو چشمه باید اکتیویته ^{75}Se را به ۲۰Ci افزایش داد. در نهایت با توجه به توافق خوب پارامترهای دزیمتری دو چشمه، و ویژگی‌های فیزیکی چشمه ^{75}Se از جمله، نیمه عمر بالاتر و انرژی متوسط کمتر نسبت به ^{192}Ir ، می‌توان گفت چشمه‌ی ^{75}Se می‌تواند جایگزین مناسبی برای چشمه‌ی ^{192}Ir در براکی‌تراپی سرطان پوست باشد.

۵. مراجع

- [1] Safigholi, Habib, Ali S. Meigooni, and William Y. Song. "Comparison of ^{192}Ir , ^{169}Yb , and ^{60}Co high-dose rate brachytherapy sources for skin cancer treatment." *Medical physics* 44.9 (2017): 4426-4436.
- [2] Draeger, Emily, et al. "Clinically-implementable template plans for multidwell treatments using Leipzig-style applicators in ^{192}Ir surface brachytherapy." *Brachytherapy* 20.2 (2021): 401-409.
- [3] Candela-Juan, C., et al. "Design and characterization of a new high-dose-rate brachytherapy Valencia applicator for larger skin lesions." *Medical Physics* 43.4 (2016): 1639-1648.
- [4] Belousov, A. V., et al. "Simulation of ^{75}Se encapsulated sources for their potential use in brachytherapy." *Moscow University Physics Bulletin* 73.3 (2018): 339-341.
- [5] McConn, Ronald J., et al. *Compendium of material composition data for radiation transport modeling*. No. PNNL-15870 Rev. 1. Pacific Northwest National Lab.(PNNL), Richland, WA (United States), 2011.
- [6] Gimenez-Alventosa, V., et al. "Correction factors for ionization chamber measurements with the 'Valencia' and 'large field Valencia' brachytherapy applicators." *Physics in Medicine & Biology* 63.12 (2018): 125004.
- [7] Granero, Domingo, et al. "Dosimetry revisited for the HDR brachytherapy source model mHDR-v2." *Medical physics* 38.1 (2011): 487-494.
- [8] Sadrollahi, Alemeh, et al. "Monte-Carlo simulation of the Siemens Artiste linear accelerator flat 6 MV and flattening-filter-free 7 MV beam line." *Plos one* 14.1 (2019): e0210069.
- [9] Anagnostopoulos, Georgios, Michael Andrassy, and Dimos Baltas. "The Bebig Valencia-type skin applicators: Dosimetric study and implementation of a dosimetric hybrid technique." *Brachytherapy* 16.5 (2017): 1044-1056.
- [10] Borg, J., and D. W. O. Rogers. "Monte Carlo calculations of photon spectra in air from ^{192}Ir sources." *National Research Council Report PIRS-629r*, Ontario, Canada (1999): 11-2.
- [11] ICRP. "Nuclear decay data for dosimetric calculations. ICRP Publication 107." *Ann. ICRP* 38.3 (2008).
- [12] Dusciac, Dorian, et al. "High energy photon reference for radiation protection: Technical design of the LINAC beam and ionization chambers; And calculation of monoenergetic conversion coefficients." *EPJ Web of Conferences*. Vol. 124. EDP Sciences, 2016.