

بررسی تأثیر هندسه کولیماتورهای اپلیکاتور میدان بزرگ والنسیا بر توزیع دز چشمه ^{75}Se با استفاده از روش مونت کارلو

زهرا نقی زاده قره لر* و اصغر حدادی

گروه مهندسی پرتویزشکی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

تهران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی هسته‌ای، کد پستی: ۱۴۷۷۸-۹۳۸۵۵.

پست الکترونیکی: haddadi14857@yahoo.com

چکیده

امروزه برای درمان ضایعات بزرگ پوستی که در محدوده $3\text{ cm} - 5\text{ cm}$ قرار دارند، استفاده از اپلیکاتورهای چند مکان استقرار چشمه با چند کولیماتور قابل تعویض پیشنهاد داده شده است. به همین منظور در این تحقیق به ارزیابی پارامترهای دزیمتری اپلیکاتور پوست برای بررسی تأثیر هندسه کولیماتورهای ($3\text{ cm} \times 5\text{ cm}$ ، 4 cm و 5 cm) اپلیکاتور میدان بزرگ والنسیا بر توزیع دز چشمه ^{75}Se با استفاده از روش مونت کارلو پرداخته شد؛ نتایج نشان داد با کوچک تر شدن قطر کولیماتور تأثیر قابل توجهی در میزان درصد دز عمقی در سطح، ضریب فاکتور خروجی و زمان درمان ایجاد نشد، و با افزایش عمق میزان درصد دز عمقی به شدت کاهش یافت. میزان نیم سایه برای کولیماتورهای 4 cm و $3\text{ cm} \times 5\text{ cm}$ (محور x) به ترتیب $17/2\%$ و $42/2\%$ افزایش و برای کولیماتور $3\text{ cm} \times 5\text{ cm}$ (محور y) $5/6\%$ کاهش یافته است. میزان همواری برای کولیماتورهای 4 cm و $3\text{ cm} \times 5\text{ cm}$ (محور x) به ترتیب 57% ، $23/8\%$ بهبود و برای کولیماتور $3\text{ cm} \times 5\text{ cm}$ (محور y) $3/8\%$ افزایش یافته و میزان تقارن برای دیگر کولیماتورها نسبت به کولیماتور 5 cm بهبود یافته است.

کلیدواژگان: چشمه ^{75}Se ، کولیماتور، اپلیکاتور میدان بزرگ والنسیا، دزیمتری، مونت کارلو.

۱. مقدمه

مکان استقرار^۲ چشمه، سطحی، لایپزیگ یا والنسیا با چشمه ^{192}Ir استفاده می شود [۲].
اپلیکاتورهای لایپزیگ (فاقد فیلتر یکنواخت کننده) دارای دو مدل افقی و عمودی هستند؛ در مدل افقی، علاوه بر توزیع دز غیریکنواخت، ناحیه درمان مستقل از اندازه دهانه کولیماتور بوده و بر طبق مطالعات انجام شده، 90% دز مرکزی در محدوده 10 mm محور مرکزی قرار دارد و در مدل عمودی، ناحیه درمان

امروزه سرطان پوست که به دو گروه سرطان ملانوما و غیرملانوما تقسیم بندی می شوند، رو به گسترش است. برای درمان این بیماری ها از فن های مختلفی از جمله جراحی، شیمی - درمانی و پرتودرمانی (الکترون درمانی، اشعه ایکس سطحی و براکی تراپی سطحی و الکترونیکی) استفاده می شود [۱]. در صورتی که ضایعه در عمق $3-4\text{ mm}$ باشد به طور رایج از روش براکی تراپی سطحی با استفاده از اپلیکاتورهای مخروطی^۱ تک

² Single dwell position

¹ Conical applicators

افزایش یافته است، اما دز در اطراف محور مرکزی ۲۰٪ کاهش یافته و بیش‌ترین مقدار دز در محدوده ۱-۰/۸ cm قرار دارد [۳]. در صورت استفاده از اپلیکاتورهای والنسیا (دارای فیلتر یکنواخت‌کننده) برای ایجاد یک توزیع دز یکنواخت در محدوده درمان، به دلیل کاهش ۵۰٪-۶۰٪ شدت پرتو توسط این اپلیکاتورها، مدت زمان درمان با آن‌ها نسبت به اپلیکاتورهای لایپزیگ افزایش می‌یابد [۳]. با توجه به آن‌که، با افزایش قطر کولیماتورهای اپلیکاتور لایپزیگ و دهانه اپلیکاتور والنسیا تک مکان استقرار چشمه در توزیع دز محدودیت بیشتری ایجاد می‌شود. امروزه برای درمان ضایعات بزرگ‌تر از ۳ cm، استفاده از اپلیکاتورهای مخروطی چند مکان استقرار پیشنهاد شده است [۳]. به همین منظور امروزه دو نوع اپلیکاتور مکان استقرار چشمه (اپلیکاتور لایپزیگ با چند مکان استقرار چشمه و اپلیکاتور والنسیا با میدان بزرگ (LFVA¹) برای چشمه رایج Ir¹⁹² با چند کولیماتور متغیر معرفی شده است [۴،۳]. با توجه به نیمه‌عمر کوتاه Ir¹⁹² (۷۳/۸ روز)، امروزه در حوزه براکی-تراپی چشمه‌های متعددی برای جایگزینی معرفی شده است؛ برای براکی‌تراپی پوست چشمه‌های Co⁶⁰، Yb¹⁶⁹ و Se⁷⁵ پیشنهاد داده شده است [۶،۵]، که در این بین، چشمه Se⁷⁵ با نیمه‌عمر ۱۱۹/۷۸ روز دارای نیمه‌عمر بیشتری نسبت به Ir¹⁹² و Yb¹⁶⁹ است، در نتیجه نیاز به تعویض کمتری دارد؛ و با توجه به آن‌که انرژی متوسط Se⁷⁵ (۲۱۵ keV) نسبت به Co⁶⁰ و Ir¹⁹² کمتر است، نیاز به حفاظ‌سازی کمتری دارد [۷].

استقرار چشمه دارای شکل واگرا است؛ در صورتی‌که در اپلیکاتور LFVA با ۳۱ مکان استقرار چشمه، که عمده پرتودهی آن از ۳۰ مکان استقرار چشمه در کاتر محیطی است [۴]، که با کوچک‌تر شدن قطر کولیماتورها، شکل کولیماتورها نسبت به کاتر محیطی همگرا تر می‌شوند. به همین منظور در این تحقیق به بررسی تأثیر هندسه کولیماتور بر توزیع دز اپلیکاتور LFVA با ۳۱ مکان استقرار چشمه حاوی چشمه Se⁷⁵ با سه کولیماتور متغیر (۵ cm، ۴ cm و ۳ cm × ۵ cm) با استفاده کد شبیه‌ساز MCNPX ۲.۶ پرداخته شد و تمام پارامترهای دزیمتری اپلیکاتور پوست برای سه کولیماتور در فانتوم آب محاسبه شد و با یکدیگر مقایسه شدند. همچنین قابل ذکر است به منظور اطمینان از صحت شبیه‌سازی اپلیکاتور و محاسبات پارامترهای دزیمتری اپلیکاتور پوست، پارامترهای دزیمتری برای اپلیکاتور LFVA با کولیماتور ۵ cm برای چشمه Ir¹⁹² محاسبه شد و با مقاله مرجع [۴] مقایسه شد.

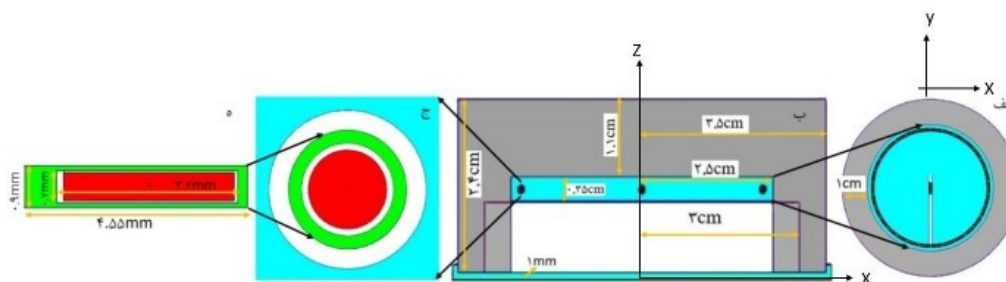
۲. روش کار

۲.۱. شبیه‌سازی چشمه و اپلیکاتور

با استفاده از کد مونت‌کارلو MCNPX ۲.۶، مطابق شکل (۱)، اپلیکاتور LFVA با بدنه و کولیماتور تنگ‌ستنی ($\rho = 17 \text{ g/cm}^3$ ، Cu: ۴٪، Ni: ۶٪، W: ۹۰٪) به همراه یک کلاهک پلاستیکی از جنس پلی متیل متاکریلات (PMM A²) ($\rho = 1/19 \text{ g/cm}^3$ ، C: ۵۹/۹۵٪، O: ۳۱/۹۶٪، H: ۸/۰۵٪) [۹] که در قسمت خروجی اپلیکاتور قرار دارد و ۳۱ مکان استقرار چشمه، که ۳۰ مکان استقرار چشمه آن در یک کاتر محیطی (در فاصله‌ی شعاعی ۲/۳ cm از مرکز) با فاصله زاویه‌ای ۱۲ درجه نسبت به یکدیگر قرار دارند و یک مکان استقرار چشمه در کاتر مرکزی قرار دارد و احتمال حضور چشمه در تمام موقعیت استقرار چشمه‌ها یکسان لحاظ شد، کولیماتورهای

² Polymethyl methacrylate

¹ Large Field Valencia Applicator



شکل (۱): شکل اپلیکاتور LFVA در نماهای مختلف؛ الف: اپلیکاتور LFVA در راستای x و y که موقعیت قرارگیری کاتر مرکزی و محیطی را نشان می‌دهد، ب: اپلیکاتور LFVA در راستای x و z که ابعاد اپلیکاتور و کلاهک را نشان می‌دهد؛ ج: نمای چشمه در راستای x و z درون کاتر؛ ه: ساختار چشمه را نشان می‌دهد.

۳ با تعداد ۶۱ و ۱۰۰ مش به ترتیب در راستای z و r که ابعاد هر مش در راستای شعاعی و محوری ۱ mm بوده است استفاده شد. در صورتی که به دلیل عدم تقارن چرخشی هندسی کولیماتور بیضی شکل (۳ cm × ۵ cm)، برای رسم پروفایل یک بعدی، نقشه دوبعدی کروئال، نیم‌سایه و همواری این کولیماتور در هر دو راستای x (۳ cm) و y (۵ cm) از مش تالی دکارتی نوع ۳ با تعداد ۱۰۰، ۱۰۰ و ۶۱ مش به ترتیب در هر سه راستای x، y و z، که هر مش دارای ابعاد ۱ mm بوده است استفاده شد، اما با توجه به این‌که در این شبیه‌سازی درصد خطا در عمق مرجع (۳ mm) همچنان بیشتر از ۱۰٪ بود، جهت کاهش خطا از روش رولت روسی استفاده شد، و ناحیه تا عمق ۱/۵ mm به ۳ سلول، و از این عمق به بعد به یک سلول تقسیم شد، و اهمیت حضور ذره در هر سلول طوری افزایش پیدا کرد تا اهمیت حضور ذره در عمق ۳ mm، ۱۶ برابر شده باشد تا در عمق مرجع درصد خطا به کمتر از ۱٪ برسد.

رسم نقشه‌های توزیع دو بعدی عرضی و تقارن سه کولیماتور از مش تالی دکارتی نوع ۳ با تعداد ۱۰۰، ۱۰۰ و ۶۱ مش به ترتیب در هر سه راستای x، y و z، که هر مش دارای ابعاد ۱ mm بوده است، استفاده شد.

تنگستنی این اپلیکاتور دارای دو شکل دایره‌ای به قطرهای ۴ cm و ۵ cm و یک شکل بیضی با قطرهای ۳ cm × ۵ cm است؛ همچنین قابل ذکر است فضای موجود در داخل کولیماتور و کاتر از هوا ($\rho = 0.001205 \text{ g/cm}^3$)، $N = 75/53\%$ ، $C: 0/012\%$ ، $Ar: 1/21\%$ ، $O: 23/18\%$ پر شده است.

هندسه‌ی چشمه‌های شبیه‌سازی شده بر پایه مدل چشمه mHDR-v2r است. چشمه‌های ^{75}Se و ^{192}Ir طراحی شده دارای طول فعال ۳/۵ mm، قطر ۰/۶ mm و غلاف از جنس فولاد ضد زنگ AISI ۳۱۶L ($\rho = 8/02 \text{ g/cm}^3$)، $Mn: 2\%$ ، $Fe: 6\%$ ، $Ni: 12\%$ ، $Si: 1\%$ است [۱۰].

۲.۲. محاسبه پارامترهای دزیمتری

برای محاسبه تمام پارامترهای دزیمتری اپلیکاتور پوست، از مش تالی نوع ۳ در فانتوم مکعبی آب ($\rho = 1 \text{ g/cm}^3$)، $88/81\%$ ، $O: 11/19\%$ ، $H: 11/19\%$ [۹] که در مجاورت اپلیکاتور قرار دارد با ابعاد $10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$ شبیه‌سازی شد، و تاریخچه ذرات (nps) 2×10^9 برای کاهش حداکثری درصد خطا انتخاب شد.

با توجه به تقارن چرخشی کولیماتورهای دایره‌ای شکل (۴ cm و ۵ cm)، برای رسم پروفایل توزیع دز یک بعدی، نقشه دو بعدی کروئال، همواری و نیم‌سایه از مش تالی استوانه‌ای نوع

برای محاسبه شدت کرمای هوا با واحد $(\mu\text{Gy m}^2 \text{h}^{-1})$ ، که متناسب با حاصل ضرب آهنگ کرمای هوا در نقطه‌ی کالیبراسیون (d) ، در امتداد محور عرضی چشمه در فضای خلاء، در مربع فاصله (d^2) که معمولاً ۱ m لحاظ می‌شود؛ معیاری برای بیان قدرت چشمه است [۱۲].

برای محاسبه شدت کرمای هوا، چشمه گسیلنده فوتون، در مرکز یک کره‌ی خلاء با شعاع ۱۱۰ cm شبیه‌سازی شد؛ آهنگ کرمای هوا در حلقه استوانه‌ای شکل به شعاع داخلی و خارجی به ترتیب ۹۷/۵ cm و ۱۰۲/۵ cm به ارتفاع ۳/۵ cm حاوی هوای خشک در فاصله ۱۰۰ cm از امتداد محور عرضی چشمه به وسیله تالی F_6 با تاریخچه 1×10^9 (این تاریخچه برای به دست آوردن حداقل درصد خطای ۰/۰۰۶٪ کافی بود). محاسبه شد [۵، ۶]. با توجه به آن که ترابرد انرژی‌های کمتر از ۱۰ keV، نتایج دقیق‌تر برای اکثر کاربردهای دزیمتری ایجاد نمی‌کند، برای کاهش زمان محاسبات و خطای نسبی، انرژی قطع فوتون ۱۰ keV در نظر گرفته شد [۱۴، ۶]. در نهایت برای تبدیل کرمای هوای هر فوتون به کرمای هوای یک چشمه با فعالیت ۱۰ Ci از رابطه (۳) استفاده شد [۱۵].

$$\dot{K}_{air} = K'_{air} \times N_{photon} \quad (3)$$

$$N_{photon} = Y \times A \quad (4)$$

\dot{K}_{air} : آهنگ کرمای هوا، ناشی از یک چشمه با فعالیت A ، (Gy/s) است.

K'_{air} : آهنگ کرمای هوا ناشی از هر فوتون اولیه (Gy/ photon) است.

N_{photon} : رابطه بین فعالیت چشمه و تعداد فوتون‌های ساطع شده در هر فروپاشی است.

Y : بهره‌ی گسیل فوتون‌های گسیل شده با انرژی‌های بالاتر از ۱۰ keV در هر واپاشی مطابق با گزارش ICRP ۱۰۷ برای ^{90}Se و ^{192}Ir به ترتیب برابر با ۲/۳۱۲۸ و ۱/۷۸۴۷ است [۱۶].

برای محاسبه درصد دز عمقی^۱ (PDD) هر سه کولیماتور از مش نوع ۳ با تعداد ۶۱ مش در راستای Z با ابعاد ۱ mm در هر دو راستای شعاعی و عرضی استفاده شد، و سپس مش موجود در تمام عمق‌ها به مش عمق مرجع (۳ mm) نرمالیزه شد.

تمامی پروفایل‌ها، همواری (F)، تقارن (S)، نیم‌سایه (P) بر اساس معیارهای IEC ۶۰۹۷۶ است [۴].

دو پارامتر تقارن و همواری برای ارزیابی میزان یکنواختی توزیع دز، در ناحیه مسطح (۸۰٪ محدوده‌ای که دز به ۵۰٪ دز مرکزی می‌رسد ناحیه مسطح می‌گویند) که در عمق مرجع قرار دارد؛ به ترتیب با روابط (۱) و (۲) محاسبه می‌شوند [۴].

$$F = 100 \times \frac{D_{max} - D_{min}}{D_{max} + D_{min}} \quad (1)$$

$$S = \max \left(\frac{D(x)}{D(-x)} \right) \quad (2)$$

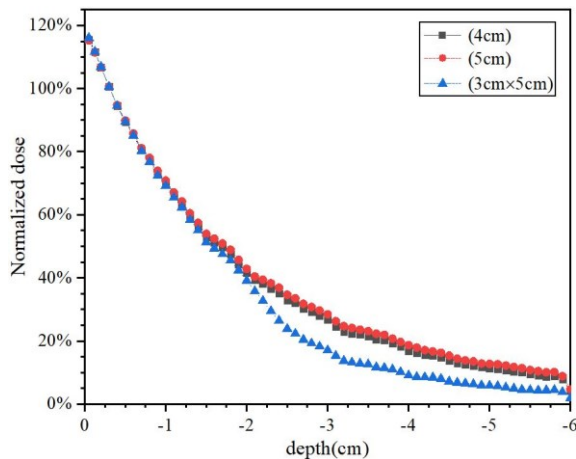
در این روابط D_{max} و D_{min} به ترتیب بیان‌گر حداکثر و حداقل دز و $D(x)$ و $D(-x)$ در نقاط $\pm x$ در ناحیه مسطح هستند. نیم‌سایه بیان‌گر اختلاف فاصله بین دو نقطه که دز از ۸۰٪ به ۲۰٪ دز مرکزی، در عمق مرجع ۳ mm می‌رسد، است [۴].

۳.۲. ضریب فاکتور خروجی

ضریب فاکتور خروجی با واحد (cGy/hU)، بیان‌گر نسبت آهنگ دز مرجع به شدت کرمای هوای چشمه مربوطه است [۱۱].

برای محاسبه‌ی آهنگ دز جذبی، از شبیه‌سازی مش تالی استوانه‌ای نوع ۳ بر روی محور مرکزی فانتوم در عمق ۳ mm استفاده شد، و سپس خروجی ناشی از شبیه‌سازی که بیان‌گر انرژی به جای گذاشته در واحد حجم (MeV/cm^3) به ازای هر فوتون است، با استفاده از ضرایب تبدیل، به آهنگ دز جذبی (cGy/h) ناشی از چشمه ۱۰ Ci در مدت زمان یک ساعت تعمیم داده شد.

¹ percentage depth–dose



شکل (۲): PDD سه کولیماتور اپلیکاتور LFVA حاوی چشمه ^{75}Se .

جدول (۱): PDD سه کولیماتور اپلیکاتور LFVA حاوی چشمه ^{75}Se با کولیماتور ۵ cm اپلیکاتور LFVA حاوی چشمه ^{192}Ir .

PDD(%)				عمق (mm)	^{192}Ir (ع)
تحقیق حاضر					
^{75}Se cm×۳ cm) (۵)	^{75}Se (۴ cm)	^{75}Se (۵ cm)	^{192}Ir		
۱۱۶/۳۱	۱۱۵/۶۵	۱۱۵/۴۸	۱۱۳/۴۸	۱۱۵	۰.۵
-	-	-	-	۱۱۱/۶	۱
۱۱۰/۶	۱۱۰/۵۳	۱۱۰/۵	۱۱۵/۰۵	-	۱.۲۵
۱۰۸.۴۲	۱۰۸.۳۱۳	۱۰۸.۲۱	۱۰۶.۳۲	۱۰۵/۶	۲
۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۳
۹۳/۷	۹۳/۹	۹۴	۹۳/۶۱	۹۵	۴
۹۰/۸۸	۹۰/۸۸	۹۱/۳	۸۷/۴۰	۹۰	۵
۸۳/۷۲	۸۳/۶۷	۸۴/۳۵	۸۲/۶۰	۸۵	۶
۸۱/۲۳	۸۱/۸۹	۸۲/۱۳	۸۱/۵۶	۸۰/۵	۷
۷۶/۱۳	۷۶/۴۹	۷۷/۲۹	۷۶/۴۴	۷۷	۸
۷۲/۷۶	۷۳/۸۴	۷۴/۴۷	۷۴/۵۸	۷۳	۹
۶۸/۷۸	۶۹/۸۰	۷۰/۲۱	۷۰/۹۸	-	۱۰

با توجه به آن که کولیماتورهای اپلیکاتور LFVA برخلاف اپلیکاتورهای تک مکان استقرار چشمه که شکل دهانه اپلیکاتور نسبت به چشمه به صورت واگرا هستند، هر چقدر قطر کولیماتورهای اپلیکاتور LFVA کوچک تر می شود، خروجی آن ها همگرا تر می شود.

۴: فعالیت چشمه مورد نظر با واحد Bq است.

در نهایت برای محاسبه زمان درمان از نسبت آهنگ دز جذبی به دست آمده به دز تجویزی، که ۵ Gy در یک جلسه درمان است، استفاده شد [۵].

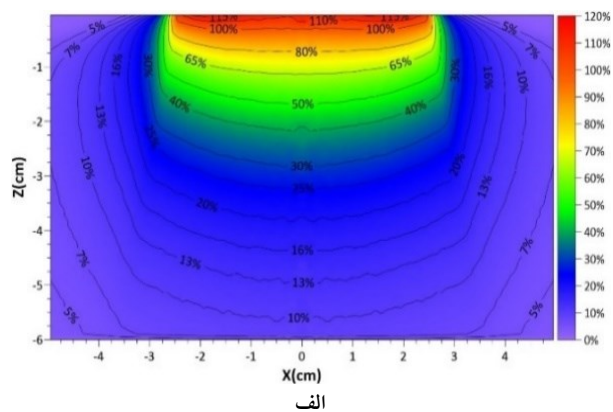
۳. نتایج

۳.۱. درصد دز عمقی

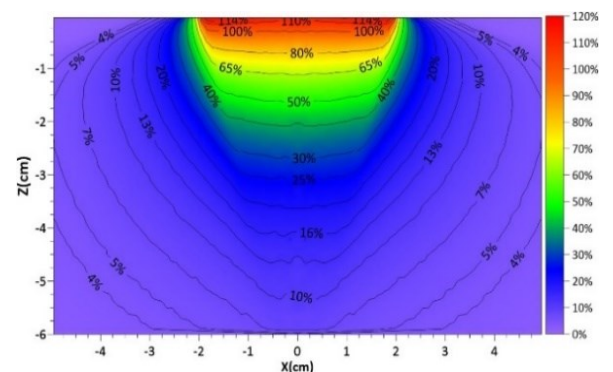
درصد دز عمقی اپلیکاتور LFVA حاوی چشمه ^{75}Se با سه کولیماتور ۵ cm، ۴ cm و ۳ cm × ۵ cm، بسته به موقعیت مش تالی به ترتیب با درصد خطاهای ۱/۳٪ - ۱/۱٪، ۴/۱٪ - ۱/۱٪ و ۴/۵٪ - ۱/۲٪ تا عمق ۶ cm مطابق شکل (۲) رسم شدند و برای بررسی دقیق تر همراه با PDD چشمه ^{192}Ir با کولیماتور ۵ cm به ترتیب با درصد خطاهای ۱/۲۶٪ - ۲/۳٪، ۱/۱۷٪ - ۱/۱٪، ۱/۶٪ - ۱/۱٪ تا عمق ۱ cm محاسبه شدند و در جدول (۱) آورده شده اند.

همان طور که در جدول (۱) مشخص است، به دلیل عدم تعادل الکترونی در محدوده قبل از عمق انباشت^۱ دز (برای چشمه ^{192}Ir در عمق ۱/۲۵ mm قرار دارد)، کرمای برخوردی (محاسبات مقاله مرجع [۴]) با دز جذبی (محاسبات تحقیق حاضر) برابر نبوده، که این امر باعث اختلاف PDD چشمه ^{192}Ir در لایه های سطحی فانتوم بین دو تحقیق شده است، اما بعد از عمق انباشت دز با حضور تعادل الکترونی میزان PDD دو تحقیق با اختلاف کمتر از ۳٪ تطابق قابل قبولی دارند. همچنین میزان PDD چشمه ^{75}Se با کولیماتور ۵ cm در مقایسه با چشمه ^{192}Ir (تحقیق حاضر) در سطح بیشتر است، اما همچنان از حداکثر دز مجاز در سطح که در محدوده ۱۵۰٪-۱۲۵٪ قرار دارد [۵]، کمتر است، و از عمق تجویزی ۳ mm به بعد، توافق قابل قبولی بین PDD دو چشمه وجود داشت.

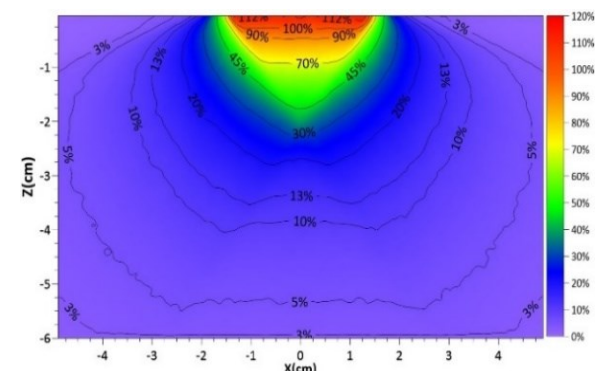
¹ Buildup



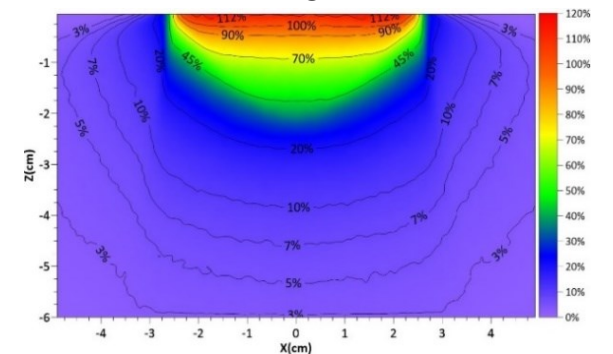
الف



ب



ج



د

شکل (۳): پروفایل دو بعدی توزیع دز کرومال تا عمق ۶ cm برای اپلیکاتور LFVA حاوی چشمه ^{75}Se با سه کولیماتور مختلف.

الف: ۵ cm، ب: ۴ cm، ج: ۵ cm × ۳ cm (محور x)

و د: ۵ cm × ۳ cm (محور y).

همان‌طور که در جدول (۱) مشخص است، مطابق مقالات پیشین به دلیل حضور پرتوهای پراکنده ناشی از کولیماتور [۸]، میزان PDD برای کولیماتورهای کوچک‌تر در حدود کمتر از ۱٪ بیشتر است که این میزان قابل صرف نظر است و همان‌طور که در شکل (۲) مشخص است، مطابق گزارش آن‌ها با افزایش عمق میزان پراکندگی آب کم می‌شود [۸]، که به دلیل شکل همگرایی کولیماتورهای کوچک‌تر کاهش پراکندگی آب با شدت بیشتری کاهش می‌یابد، در نتیجه میزان PDD برای کولیماتورهای کوچک‌تر در اعماق بیشتر، بیشتر کاهش می‌یابد.

۲.۳. پروفایل دو بعدی توزیع دز عرضی و کرومال

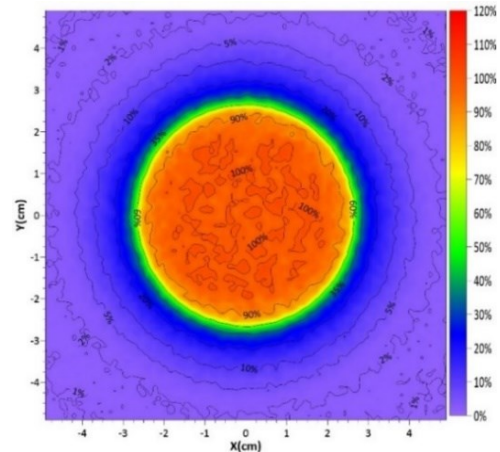
مطابق شکل (۳) پروفایل توزیع دز کرومال برای چشمه ^{75}Se با کولیماتورهای ۵ cm، ۴ cm و ۳ cm × ۵ cm، تا عمق ۶ cm که بسته به موقعیت مش‌تالی به ترتیب با درصد خطاهای ۰/۲٪ - ۵/۸٪، ۰/۲۷٪ - ۶/۴٪ و ۰/۵۹٪ - ۱۳/۵۸٪ رسم شدند و مطابق شکل (۴) پروفایل توزیع دز دو بعدی عرضی در عمق ۳ mm که بسته به موقعیت مش‌تالی به ترتیب با درصد خطاهای ۲/۹٪ - ۳۷٪، ۲/۹٪ - ۵۱٪ و ۳٪ - ۶۴/۴٪ رسم شدند.

همان‌طور که در شکل (۳) مشخص است با کوچک‌تر شدن قطر کولیماتور شکل توزیع دز در عمق شکل همگرایی دارد که این امر خود باعث کاهش بیشتر پرتوهای بافت سالم می‌شود و شکل (۴) هم مشخص است، علاوه بر این که اپلیکاتور LFVA برای درمان دایره‌ی و بیضی مفید است، بعد از محدوده کولیماتور توزیع دز دارای افت شدیدی است.

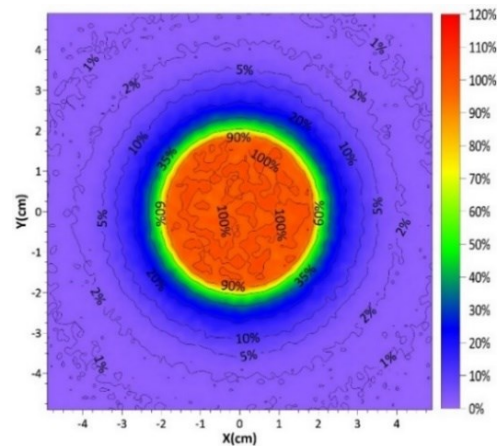
کولیماتور ۵ cm × ۳ cm و ۴ cm، ۵ cm (محور x و محور y) حاوی چشمه ^{75}Se و کولیماتور ۵ cm حاوی ^{192}Ir ، بسته به موقعیت مش تالی به ترتیب با درصد خطاهای ۰/۷۲٪-۰/۱۹٪، ۰/۲٪-۰/۹٪، (۰/۵۹٪-۰/۱٪، ۰/۶٪-۰/۳۱٪) و ۰/۸٪-۰/۲٪. میزان تقارن به ترتیب با درصد خطاهای ۰/۱۲٪-۲/۱٪، ۰/۱۶٪ (۰/۱۸٪-۲/۱۶٪، ۱۷/۸٪-۲/۱٪) و ۰/۸٪-۰/۲٪ مطابق جدول (۲) محاسبه شدند و به منظور اعتبار سنجی از شبیه‌سازی و محاسبات، پارامترهای دزیمتری چشمه ^{192}Ir تحقیق حاضر با مقاله مرجع [۴] مقایسه شد. در مقاله مرجع، با فرض تقارن چرخشی اپلیکاتور پوست، میزان تقارن صفر در نظر گرفته شد. میزان نیم‌سایه اپلیکاتور که به SSD و ابعاد چشمه، عمق درمان و اندازه دهانه کولیماتور بستگی دارد [۱۳] برای هر دو تحقیق ۷/۸ mm بوده است که بیان‌گر صحت شبیه‌سازی اپلیکاتور LFVA است. به دلیل آن‌که برخلاف مقاله مرجع در این تحقیق نسبت زمان حضور چشمه‌ها یکسان در نظر گرفته شد و فاصله زاویه‌ای مکان استقرار چشمه در کاتر محیطی به‌طور مساوی ۱۲ درجه لحاظ شد، بین میزان همواری چشمه ^{192}Ir دو تحقیق اختلاف ۹/۵٪ به‌وجود آمد.

جدول (۲): میزان تقارن، نیم‌سایه و همواری سه کولیماتور اپلیکاتور LFVA حاوی چشمه ^{75}Se و کولیماتور ۵ cm حاوی چشمه ^{192}Ir .

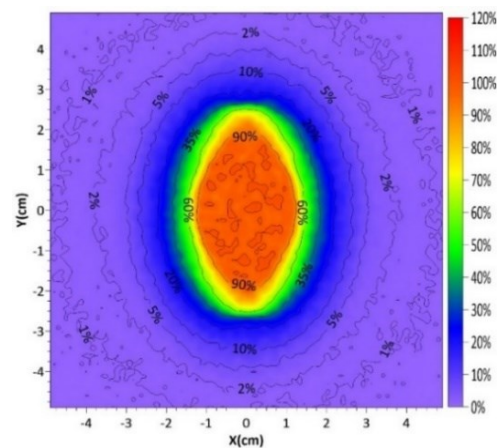
چشمه	کولیماتور	تقارن	همواری (%)	نیم‌سایه (mm)
^{75}Se (تحقیق حاضر)	۴ cm	۱/۰۵	۱/۱	۷/۵
	۵ cm	۱/۰۷	۲/۶	۶/۴
	۵ cm × ۳ cm (محور x)	۱/۰۶	۱/۹۸	۹/۱
^{192}Ir (تحقیق حاضر)	۵ cm × ۳ cm (محور y)	۱/۰۶	۲/۷	۶/۰۴
	۵ cm	۱/۰۹	۲/۳	۷/۸
^{192}Ir	۵ cm	-	۲/۱	۷/۸



الف



ب



ج

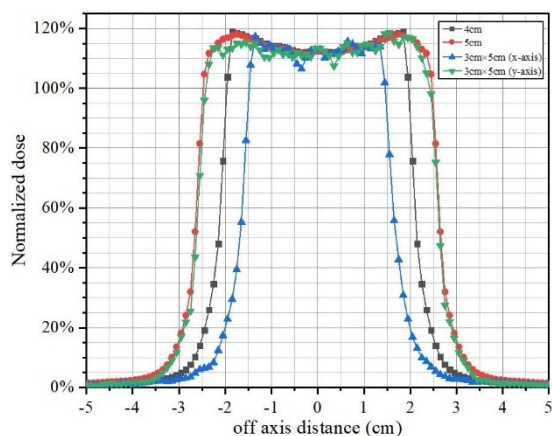
شکل (۴): پروفایل دو بعدی توزیع دز در عمق ۳ mm برای اپلیکاتور

LFVA حاوی چشمه ^{75}Se با سه کولیماتور مختلف.

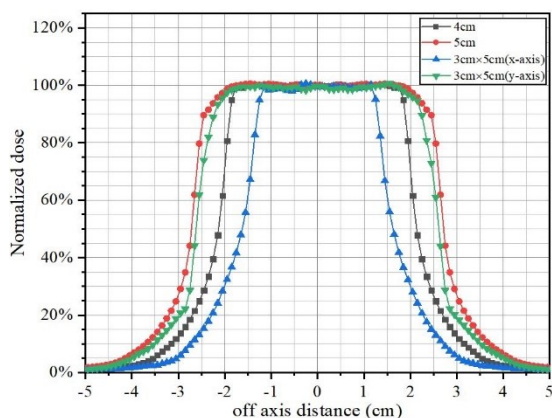
الف) ۵ cm، ب) ۴ cm و ج) ۵ cm × ۳ cm.

۳. ۴. تقارن، نیم‌سایه و همواری

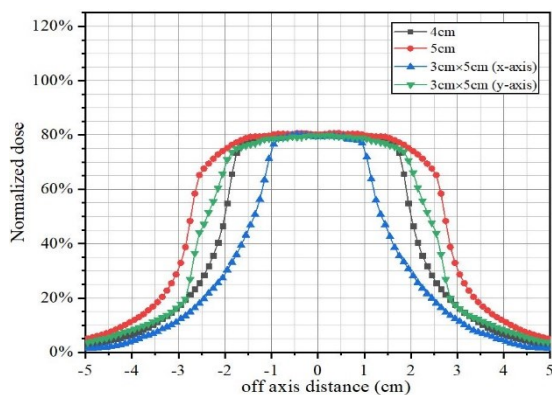
به منظور بررسی تأثیر هندسه کولیماتورهای اپلیکاتور LFVA به روی پارامترهای دزیمتری، میزان همواری و نیم‌سایه سه



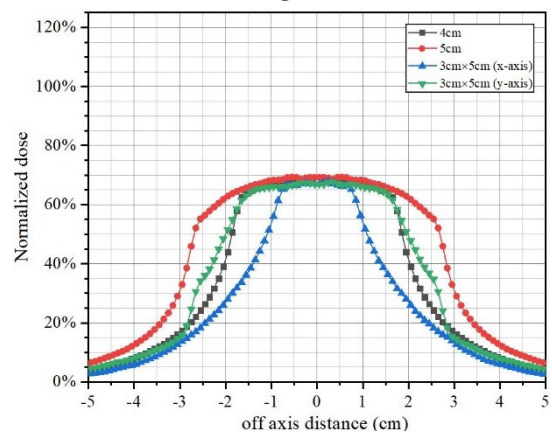
الف



ب



ج



د

میزان نیم‌سایه و تقارن برای چشمه ^{75}Se (کولیماتور ۵ cm) نسبت به ^{192}Ir (کولیماتور ۵ cm)، به ترتیب ۱۷٪ و ۱۹/۱٪ بهبود یافته؛ در صورتی میزان همواری ۱۳/۰۴٪ افزایش یافته است. در کولیماتورهای با قطر کوچک‌تر با وجود کاهش میدان درمان که کاهش نیم‌سایه فیزیکی را در بردارد، نیم‌سایه کولیماتورهای ۵ cm × ۳ cm (محور x) و ۴ cm نسبت به کولیماتور ۵ cm به ترتیب ۴۲/۲٪ و ۱۷/۲٪ افزایش یافته است، که این امر ناشی از شکل همگرایی کولیماتورها است که در راستای پرتو قرار ندارند و باعث افزایش نیم‌سایه عبوری و هندسی می‌شوند و به دلیل کاهش میدان درمان روبه‌روی کولیماتور ۵ cm × ۳ cm (محور y)؛ پرتوهای پراکنده کمتری به محدوده اندازه‌گیری نیم‌سایه می‌رسند؛ در نتیجه تحت تأثیر کاهش نیم‌سایه فیزیکی، ۵٪ نیم‌سایه‌اش بهبود یافته است. با توجه به آن‌که با کاهش دهانه کولیماتور میزان عبور پرتوهای پس‌پراکنده کاهش و با افزایش دهانه کولیماتور افزایش می‌یابند، میزان همواری برای کولیماتورهای ۴ cm و ۵ cm × ۳ cm (محور x) نسبت به کولیماتور ۵ cm، به ترتیب ۵۷٪، ۲۳/۸٪ بهبود یافته و کولیماتور ۵ cm × ۳ cm (محور y) ۳/۸٪ افزایش یافته است؛ میزان تقارن برای کولیماتورهای ۴ cm، ۵ cm × ۳ cm (محور x)، ۵ cm × ۳ cm (محور y) نسبت به کولیماتور ۵ cm، به ترتیب ۱/۹٪، ۰/۹۳٪ و ۰/۹۳٪ بهبود یافته است. همچنین برای بررسی افت شار فوتونها، توزیع دز یک بعدی سه کولیماتور ۵ cm، ۴ cm و ۵ cm × ۳ cm (محور x و محور y) حاوی چشمه ^{75}Se که بسته به موقعیت مشتالی به ترتیب با درصد خطاهای ۰/۱۹٪-۰/۷۲٪، ۰/۲٪-۰/۹٪، ۰/۵۹٪-۰/۵۱٪، ۰/۶٪-۴/۳۱٪ مطابق شکل (۵) رسم شدند، و مشخص شد هرچقدر به سمت عمق پیش می‌رویم، میزان افت شار فوتونها بیشتر می‌شود و مقادیر پروفایل دز کاهش می‌یابد، و این افت شار فوتونها برای کولیماتورهای با قطر کوچک‌تر بیشتر است.

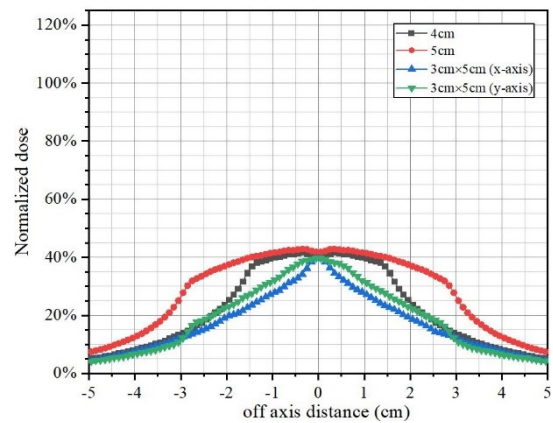
و ۱/۷٪ است؛ همچنین میزان اختلاف مدت زمان درمانشان کمتر از ۳۰ ثانیه است، که می‌توان از این میزان اختلاف صرف نظر کرد.

جدول (۳): میزان ضریب فاکتور خروجی و مدت زمان درمان، ناشی از اپلیکاتور LFVA حاوی چشمه ^{75}Se با سه کولیماتور ۵ cm، ۴ cm و ۳ cm × ۵ cm و چشمه ^{192}Ir با کولیماتور ۵ cm.

چشمه	کولیماتور	ضریب فاکتور خروجی (cGy/h×U)	زمان درمان (دقیقه)
^{75}Se (تحقیق حاضر)	۴ cm	۰/۱۷۲+۰/۰۰۶	۹/۹۳
	۵ cm	۰/۱۷۴+۰/۰۰۶	۹/۸۴
	۵ cm×۳ cm	۰/۱۷۱+۰/۰۰۶	۱۰/۱
^{192}Ir (تحقیق حاضر)	۵ cm	۰/۱۶۴+۰/۰۰۵	۵/۰۲
	۵ cm	۰/۱۶۲	-

۴. بحث و نتیجه‌گیری

در این تحقیق به منظور بررسی تأثیر هندسه کولیماتورهای اپلیکاتور LFVA (که با کوچک‌تر شدن قطر کولیماتور، شکل آن‌ها همگراتر می‌شود) حاوی چشمه ^{75}Se به روی توزیع دز، تمام پارامترهای دزیمتری اپلیکاتور پوست با استفاده از شبیه‌سازی مونت کارلو با کد MCNPx۲.۶ مورد ارزیابی قرار گرفت. در ابتدا جهت اعتبارسنجی شبیه‌سازی، پارامترهای دزیمتری کولیماتور ۵ cm حاوی چشمه ^{192}Ir با محاسبات کولیماتور ۵ cm چشمه ^{192}Ir مقاله مرجع [۴] برپایه شبیه‌سازی مقایسه شد، و مشخص شد به دلیل آن‌که محاسبات تحقیق حاضر برپایه دز جذبی و مقاله مرجع برپایه کرمانی بر خوردی بوده است میزان PDD دو چشمه ناشی از عدم تعادل الکترونی قبل از عمق انباشت دز (عمق ۱/۲ mm) در لایه‌ی سطحی دارای اختلاف کمی هستند، و بعد از عمق انباشت دز، به دلیل وجود تعادل الکترونی، توافق قابل قبولی بین دو PDD وجود دارد؛ همچنین به دلیل تفاوت اهمیت حضور چشمه‌ها در مکان استقرارهای



شکل (۵): پروفایل یک بعدی توزیع دز در پنج عمق مختلف، برای اپلیکاتور LFVA حاوی چشمه ^{75}Se با سه کولیماتور مختلف. الف) ۰.۵ mm، ب) ۳ mm، ج) ۷ mm، د) ۱۰ mm و ه) ۲۰ mm.

۳.۵. ضریب فاکتور خروجی و مدت زمان درمان

ضریب فاکتور خروجی برای اپلیکاتور LFVA با سه کولیماتور ۵ cm، ۴ cm و ۳ cm × ۵ cm، حاوی چشمه ^{75}Se با شدت کرمانی هوای ($36350/27\text{m } \mu\text{Gy}^2 \text{h}^{-1}$) با بیان درصد خطا و ضریب فاکتور خروجی چشمه ^{192}Ir با کولیماتور ۵ cm با شدت کرمانی هوای ($17570/417\text{m } \mu\text{Gy}^2 \text{h}^{-1}$) در جدول (۴) آورده شدند. میزان اختلاف ضریب فاکتور خروجی ^{192}Ir دو تحقیق برابر ۱/۲۳٪ بوده است؛ و میزان اختلاف ضریب فاکتور خروجی دو چشمه ^{75}Se و ^{192}Ir (کولیماتور ۵ cm) در حدود ۶٪ بوده است، و مدت زمان درمان چشمه ^{75}Se حدود ۵ دقیقه بیشتر است.

به دلیل آن‌که بخشی از پرتوهای پرنانرژی چشمه‌های موجود در کاتر محیطی که هم راستا با محور مرکزی هستند و در کولیماتور جذب می‌شوند و به ناحیه درمان نمی‌رسند؛ آهنگ دز در نقطه مرجع کاهش می‌یابد، که این امر کاهش ضریب فاکتور خروجی و افزایش زمان درمان را برای کولیماتورهای با قطر کوچک‌تر در بردارد؛ اما به دلیل آن‌که مطابق جدول (۳) میزان اختلاف ضریب فاکتور خروجی کولیماتورهای ۴ cm و ۳ cm × ۵ cm نسبت به کولیماتور ۵ cm به ترتیب برابر ۱/۱۶٪

کاهش می‌یابد و میزان نیم‌سایه کولیماتورهای ۴ و ۳ cm × ۵ cm (محور x) و ۳ cm × ۵ cm (محور y) به ترتیب تحت تأثیر نیم-سایه عبوری ۱۷/۲٪ و ۴۲/۲٪ افزایش و تحت تأثیر کاهش نیم-سایه فیزیکی ۵/۶٪ کاهش یافته‌اند. میزان همواری برای کولیماتور ۳ cm × ۵ cm (محور y) ۳/۸٪ افزایش یافته است و به دلیل آن‌که در کولیماتورهای کوچک‌تر ناحیه درمان کمتر می‌شود، میزان پراکندگی در فانتوم آب کاهش می‌یابد که میزان همواری برای کولیماتورهای ۴ cm و ۳ cm × ۵ cm (محور x) به ترتیب ۵۷٪، ۲۳/۸٪ بهبود یافته است و میزان تقارن با کوچک-تر شدن قطر کولیماتور بهبود یافته‌اند و بین میزان ضریب فاکتور خروجی و مدت زمان درمان سه کولیماتور اختلاف قابل توجهی وجود نداشت؛ در نهایت با توجه به آن‌که میزان همواری هر سه کولیماتور کمتر از ۳٪ بوده است و میزان PDD اشان، ضریب-فاکتور خروجی اشان و مدت زمان درمانشان با یکدیگر توافق قابل قبولی داشتند، بدون تأثیر در کیفیت درمان می‌توان از سه کولیماتور در طی درمان ضایعات با ابعاد مختلف استفاده کرد، هرچند با استفاده از کولیماتورهای کوچک‌تر بهتر می‌توان از عمق‌های بیشتر که در ناحیه درمان نیستند، محافظت کرد.

۵. مراجع

1. A. Pashazadeh, A. Boese, M. Friebe. Radiation therapy techniques in the treatment of skin cancer: an overview of the current status and outlook. *J. Dermatolog. Treat.* 30 (8) (2019) 831-839.
2. G. Famulari, P. Pater, S. A. Enger. Microdosimetric evaluation of current and alternative brachytherapy sources—a Geant4-DNA simulation study. *Int. J. Radiat. Oncol. Biol. Phys.* 100 (1) (2018) 270-277.
3. C. J. Tien, D. W. Pinkham, Z. J. Chen. Feasibility of using multiple-dwell positions in ¹⁹²Ir Leipzig-style brachytherapy surface applicators to expand target coverage and clinical application. *Brachytherapy.* 19 (4) (2020) 532-543.

چشمه دو تحقیق، اختلاف ۹/۵٪ بین میزان همواری اشان وجود دارد، میزان نیم‌سایه که تحت تأثیر هندسه اپلیکاتور است برای هر دو مقاله ۷/۸ mm بوده است و اختلاف ضریب فاکتور خروجی دو تحقیق در حدود ۱/۲۳٪ بوده است که خود تاییدی بر صحت شبیه‌سازی اپلیکاتور است.

مقایسه پارامترهای دزیمتری چشمه ^{۷۵}Se با چشمه ^{۱۹۲}Ir نشان می‌دهد، با توجه به آن‌که انرژی متوسط چشمه ^{۷۵}Se (۲۱۵ keV) نسبت به انرژی متوسط ^{۱۹۲}Ir (۳۸۰ keV) کمتر است، بیشتر برهمکنش‌های فوتون چشمه ^{۷۵}Se در عمق‌های اولیه بوده در نتیجه میزان PDD این چشمه در لایه اولیه در حدود ۲٪ از میزان PDD چشمه ^{۱۹۲}Ir بیشتر بوده است. همچنین میزان جذب فوتون‌های ^{۷۵}Se در دیواره کولیماتور بیشتر بوده که باعث کاهش نیم‌سایه عبوری این چشمه نسبت به چشمه ^{۱۹۲}Ir شده است که بهبود ۱۷٪ نیم‌سایه برای چشمه ^{۷۵}Se را در برداشته است و با توجه به آن‌که میزان پراکندگی پرتو ناشی از فوتون‌های کم انرژی بیشتر از فوتون‌های پر انرژی است [۱۳]، میزان همواری چشمه ^{۷۵}Se، ۱۳٪ نسبت به ^{۱۹۲}Ir افزایش یافته است. همچنین به دلیل آن‌که میزان دز جذب شده ناشی از چشمه ^{۷۵}Se نسبت به ^{۱۹۲}Ir کمتر بوده است، میزان زمان درمان ^{۷۵}Se افزایش یافته است که برای حل این مشکل می‌توان فعالیت چشمه را بیشتر کرد و میزان تقارن چشمه ^{۷۵}Se نسبت به چشمه ^{۱۹۲}Ir بهبود یافته است و اختلاف بین ضریب فاکتور خروجی دو چشمه تنها ۶٪ بوده است. در نتیجه با توجه به خواص فیزیکی چشمه ^{۷۵}Se، در درمان ضایعات بزرگ پوستی، چشمه ^{۷۵}Se می‌تواند جایگزین مناسبی برای چشمه ^{۱۹۲}Ir باشد.

مقایسه پارامترهای دزیمتری کولیماتورها نشان می‌دهد، هندسه کولیماتور در لایه‌های سطحی تأثیری قابل توجهی در PDD ندارد و با افزایش عمق به طور قابل توجهی با کوچک‌تر شدن قطر کولیماتور میزان PDD و پراکندگی پرتو به اطراف

4. C. Candela-Juan, Y. Niatsetski, R. Van Der Laarse, D. Granero, F. Ballester, J. Perez-Calatayud, J. Vijande. Design and characterization of a new high-dose-rate brachytherapy Valencia applicator for larger skin lesions. *Med. Phys.* 43 (4) (2016) 1639-1648.
5. H. Safigholi, A. S. Meigooni, W. Y. Song. Comparison of ^{192}Ir , ^{169}Yb , and ^{60}Co high-dose rate brachytherapy sources for skin cancer treatment. *Med. Phys.* 44(9) (2017) 4426-4436.
6. A. Hadadi, S. Ghanavati. ^{75}Se -A promising alternative to ^{192}Ir for potential use in the skin cancer brachytherapy: A Monte Carlo simulation study using FLUKA code. *Appl. Radiat. Isot.* 197 (2023) 110786.
7. A. V. Belousov, A. A. Belianov, G. A. Krusanov, A. P. Chernyaev. Simulation of ^{75}Se Encapsulated Sources for Their Potential Use in Brachytherapy. *Moscow University Physics Bulletin.* 73 (2018) 339-341.
8. J. Pérez-Calatayud, D. Granero, F. Ballester, V. Puchades, E. Casal, A. Soriano, V. Crispín . A dosimetric study of Leipzig applicators. *Int. J. Radiat. Oncol. Biol. Phys.* 62 (2) (2005) 579-584.
9. R. J. McConn, C. J. Gesh, R. T. Pagh, R. A. Rucker, R. Williams III. Compendium of material composition data for radiation transport modeling. Pacific Northwest National Lab.(PNNL), Richland, WA (United States), 2011.
10. L. Murphy. The dosimetric effect of variations in source position on treatments using Leipzig-style brachytherapy skin applicators. *Biomed. Phys. Eng. Express.* 6 (1) (2020) 015031.
11. G. Anagnostopoulos, M. Andrassy, D. Baltas. The Bebig Valencia-type skin applicators: dosimetric study and implementation of a dosimetric hybrid technique. *Brachytherapy.* 16 (5) (2017) 1044-1056.
12. J. Borg, D. W. Rogers. Monte Carlo calculations of photon spectra in air from ^{192}Ir sources. National Research Council Report PIRS-629r, Ontario, Canada, 1999.
13. F. M. Khan, J. P. Gibbons. Khan's the physics of radiation therapy. Lippincott Williams & Wilkins, 2014.
14. J. Perez-Calatayud, F. Ballester, R. K. Das, L. A. DeWerd, G. S. Ibbott, A. S. Meigooni, Z. Ouhib, M. J. Rivard, R. S. Sloboda, J. F. Williamson. Dose calculation for photon-emitting brachytherapy sources with average energy higher than 50 keV : Full report of the AAPM and ESTRO. *Med. Phys.* 39 (2012) 2904-2929.
15. J. Borg, D. W. Rogers. Monte Carlo calculations of photon spectra in air from ^{192}Ir sources. Nat. Res. Council Rep. PIRS-629r. Ontario, Canada, 1999.
16. ICRP. Nuclear decay data for dosimetric calculations. ICRP Publication 107. *Ann. ICRP* 38.3, 2008.