

## تعیین پارامترهای دزیمتری یک چشمه طراحی شده جدید $^{125}\text{I}$ با مارکر $\text{Ag} + \text{Al}_2\text{O}_3$

### در فانتوم آب

اکرم اسلامی باباحیدری\* و مجتبی شمسایی ظفرقندی

دانشکده فیزیک و مهندسی هسته‌ای، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران.

\* تهران، پل حافظ، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده مهندسی هسته‌ای و فیزیک، کد پستی: ۱۵۹۱۶-۳۴۳۱۱

پست الکترونیکی: a\_eslamii@yahoo.com

#### چکیده

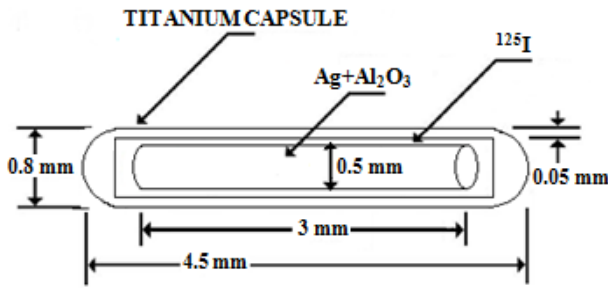
از آنجاکه چشمه‌های رادیواکتیو در براکی تراپی، نقش عمده‌ای در درمان تومورهای بدخیم موضعی ایفا می‌کند، یک چشمه جدید  $^{125}\text{I}$  طراحی شده است. چشمه کپسولی از جنس تیتانیوم و حاوی استوانه‌ای از ترکیب نقره و اکسید آلومینیم است. روی این استوانه ید قرار گرفته است. چشمه در مرکز فانتومی کروی قرار گرفته و با شبیه‌سازی مونت کارلو، کد MCNPX ver. ۲/۶ ویژگی‌های دزیمتری آن، از جمله شدت گرمای هوا، ثابت نرخ دز و تابع دز شعاعی و تابع ناهمسانگردی مطابق با دستورالعمل TG-43 U1 به دست آمد. ثابت نرخ دز  $0.98 \pm 0.12 \text{ cGyh}^{-1}\text{U}^{-1}$  اندازه‌گیری شد و ویژگی‌های دزیمتری آن با چشمه‌های معمول دیگر مقایسه شد. با استفاده از اطلاعات به دست آمده می‌توان نتیجه گرفت که این تحقیق می‌تواند زمینه‌ساز ساخت و استفاده از این چشمه در براکی تراپی شود. به خصوص اینکه طبق آزمایش‌های یک گروه پژوهشی در کره، کل مراحل آماده شدن مارکر، ۶ ساعت طول می‌کشد و این میله به راحتی درون استوانه‌های تیتانیومی قرار می‌گیرد.

کلیدواژه‌گان: براکی تراپی، TG-43 U1، روش مونت کارلو، MCNPX،  $^{125}\text{I}$ ، پارامترهای دزیمتری،  $\text{Ag} + \text{Al}_2\text{O}_3$

#### ۱. مقدمه

ساخت چشمه‌های براکی تراپی تنوع یافته است. در سال ۲۰۰۷، در کره تحقیقی انجام گرفت که در آن، اکسید آلومینیم و نقره به صورت پودر با یکدیگر مخلوط و پس از طی مراحل تحت فشار  $1/2 \text{ ton/cm}^2$ ، به صورت میله‌های استوانه‌ای به طول ۳ cm و قطر ۰/۲۵ cm درآمد و سپس این استوانه‌ها در محلولی حاوی  $5 \text{ mCi } ^{125}\text{I}$  قرار داده شدند، سپس با تغییر شرایطی مثل میزان غلظت محلول یا مدت زمان قرار داده شدن میله‌ها در محلول و... بهینه‌سازی جذب  $^{125}\text{I}$  روی این استوانه‌ها، مورد بررسی قرار گرفت [۷]. بر این اساس، در این تحقیق، چشمه منحصر به فردی طراحی شد که مارکر آن  $\text{Ag} + \text{Al}_2\text{O}_3$  است و سپس ویژگی‌های پارامتری آن از روش مونت کارلو به دست آمد.

براکي تراپی یکی از راه‌های درمان تومورهای بدخیم است. براکی تراپی با استفاده از چشمه‌هایی که فوتون‌هایی با انرژی پایین گسیل می‌کنند، یکی از مهم‌ترین روش‌ها برای درمان سرطان پروستات است. از مزایای آن نسبت به روش‌های دیگر، درمان مثل جراحی یا تله‌تراپی کاهش آسیب به قسمت‌های سالم دیگر بافت و از بین رفتن فرصت ترمیم سلول‌های سرطانی است [۱-۶]. رادیو ایزوتوپ  $^{125}\text{I}$  ایزوتوپی با فوتون‌های کم‌انرژی است که چون دز ناشی از آن، در فاصله‌های زیاد به شدت افت می‌کند، می‌تواند ایزوتوپ مناسبی در چشمه‌های براکی تراپی باشد. با توسعه درمان به شیوه براکی تراپی، طراحی و



شکل ۱: شکل چشمه

طیف انرژی فوتون  $^{125}\text{I}$  طبق دستورالعمل TG-43 U1،

در جدول زیر آمده است [۸]:

جدول ۱: طیف انرژی فوتون  $^{125}\text{I}$

انرژی فوتون (KeV)	فوتون در هر واپاشی
۲۷/۲۰۲	۰/۴۰۶
۲۷/۴۷۲	۰/۷۵۷
۳۰/۹۸	۰/۲۰۲
۳۱/۷۱	۰/۰۴۳۹
۳۵/۴۹۲	۰/۰۶۶۸

## ۲.۲. پارامترهای دزیمتری

طبق پروتکل TG-43 U1 [۸]، ثابت نرخ دز،  $\Lambda$ ، به نسبت نرخ دز در فانتوم در فاصله یک سانتی متری روی محور عمود بر چشمه به شدت کرمای هوا، تعریف می شود:

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

یا شدت کرمای هوا نیز معیاری از شدت چشمهٔ براکی تراپی است و به صورت حاصل ضرب میزان کرمای هوا در فاصله  $d$  تعریف می شود؛ یعنی

$$S_k = \dot{k}_\delta d^2 \quad (2)$$

که  $\dot{k}_\delta$  ناشی از فوتون های با انرژی بیشتر از  $\delta$  (۵ KeV) است و واحد  $S_k$ ،  $\mu\text{Gm y}^2\text{h}^{-1}$  یا  $\text{cGycm}^2\text{h}^{-1}$  (این یکاها چک شوند) است که به آن U نیز می گویند. پارامتر دیگر که باید محاسبه شود، تابع دز شعاعی است که بیانگر آثار جذب و

از آنجا که برای کاهش آسیب های احتمالی به بافت سالم، مقدار دز رسیده به بافت باید کنترل شده باشد، انجمن فیزیک پزشکی آمریکا (AAPM) گروهی تحت عنوان TG-43 U1 را به منظور تعریف و تعیین پارامترهای مورد نیاز چشمه های براکی تراپی تشکیل داد. این انجمن توصیه می کند که قبل از استفاده از هر چشمه ای، باید پارامترهای دزیمتری آن به دو روش مونت کارلو و اندازه گیری عملی تعیین شود [۸]. طبق توصیه انجمن TG-43 U1 در شبیه سازی مونت کارلو مشخصات چشمه، طیف انرژی و مشخصات محیط باید به طور دقیق به کار روند تا بتوان روش ارائه شده آن ها را روشی دقیق برای استفاده از چشمه ها دانست. به همین دلیل در این تحقیق، بعد از تعریف دقیق چشمه و محیط ویژگی های دزیمتری، از جمله شدت کرمای هوا، ثابت نرخ دز، تابع دز شعاعی و تابع ناهمسانگردی به منظور استفاده از آن در درمان، به دست آمد و با چشمه های مشابه دیگر مقایسه شد.

## ۲. مواد و روش ها

### ۱.۲. مشخصات چشمه

این چشمه کپسولی از جنس تیتانیوم با قطرهای داخلی و خارجی  $0/8$  و  $0/7$  میلی متر، یعنی با ضخامت متوسط  $0/05$  میلی متر و ضخامت انتهای دو طرف کپسول  $0/4$  میلی متر است و حاوی استوانه ای از ترکیب نقره و اکسید آلومینیم با چگالی  $8/5 \text{ g.cm}^{-3}$  است. (ترکیب نقره و اکسید آلومینیم به ترتیب با درصد وزنی  $15$  و  $85$  است). طول استوانه (مارکر)  $10/3$  میلی متر و شعاع آن  $0/25$  میلی متر است و روی این استوانه  $^{125}\text{I}$  به صورت  $\text{AgI}$  یکنواخت و به ضخامت  $5 \times 10^{-5}$  میلی متر و با چگالی  $3/640 \text{ g.m}^{-3}$  قرار گرفته است. نیمه عمر این ایزوتوپ  $59/4$  روز است [۷].

پراکندگی در آب در طول محور عمودی چشمه و در  $2/\pi$  می باشد و به صورت زیر تعریف می شود:

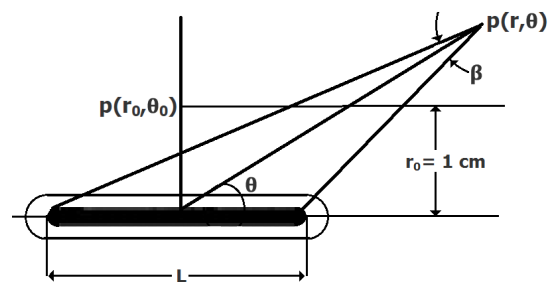
$$g(r) = \frac{\dot{D}(r, \theta_0)G(r_0, \theta_0)}{\dot{D}(r_0, \theta_0)G(r, \theta_0)} \quad (3)$$

در این رابطه،  $G(r_0, \theta_0)$  تابع آرایش هندسی در نقطه مرجع یعنی  $G(1\text{cm}, \pi/2)$  است. این تابع برای در نظر گرفتن وابستگی شارش فوتون حول چشمه ای با فضای آزاد است.  $G(r, \theta)$  را می توان از رابطه های زیر به دست آورد:

$$G_p(r, \theta) = r^{-2} \quad \text{چشمه نقطه ای} \quad (4)$$

$$G_L(r, \theta) = \begin{cases} \frac{\beta}{Lr \sin(\theta)}, & \theta \neq 0^\circ \\ (r^2 - L^2/4)^{-1}, & \theta = 0^\circ \end{cases} \quad \text{چشمه خطی}$$

که میزان  $\beta$  را می توان با توجه به شکل زیر به دست آورد:



شکل ۲: هندسه در نظر گرفته شده در محاسبات دز

تابع دیگر تابع ناهمسانگردی است که توزیع دز را ناشی از اثرهای جذب و پراکندگی در اطراف چشمه بررسی می کند و تابع ناهمسانگردی دو بعدی به این صورت تعریف می شود:

$$F(r, \theta) = \frac{\dot{D}(r, \theta)G(r, \theta_0)}{\dot{D}(r, \theta_0)G(r, \theta)} \quad (5)$$

تابع ناهمسانگردی یک بعدی نیز فقط بر حسب فاصله است و از این رابطه به دست می آید:

$$\phi_{an}(r) = \frac{\int_0^{\theta_0} \dot{D}(r, \theta) \sin(\theta) d(\theta)}{\dot{D}(r, \theta_0)} \quad (6)$$

ثابت ناهمسانگردی را نیز می توان از این رابطه به دست آورد:

$$\bar{\phi}_{an} = \frac{\sum \dot{D}_i(r) \phi_{an}(r)}{\sum \dot{D}_i(r)} \approx \frac{\sum (1/r^2) \phi_{an}(r)}{\sum (1/r^2)} \quad (7)$$

در این تحقیق، شدت کرمای هوا، ثابت نرخ دز و تابع دز شعاعی و تابع ناهمسانگردی یک بعدی و دو بعدی و ثابت ناهمسانگردی برای چشمه محاسبه شده اند.

### ۳.۲. روش شبیه سازی

چشمه در مرکز فانتومی کروی آب به شعاع ۳۰ سانتی متر و با چگالی  $0.998 \text{ g.m}^{-3}$  و متشکل از یک اتم اکسیژن و دو اتم هیدروژن، قرار گرفته است و سپس پارامترهای دزیمتری به دست آمده است.

کد MCNP یکی از کدهای بسیار کارآمد برای شبیه سازی به روش مونت کارلو است [۱۰]. در این تحقیق، محاسبات دزیمتری به وسیله کد MCNPX ver. ۲/۶ انجام شده اند.

دز جذب شده با استفاده از تالی های  $F_6$  در زاویه های ۰، ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۵۰، ۶۰، ۷۰، ۸۰، ۹۰ و در فاصله های ۰/۱، ۰/۱۵، ۰/۲، ۰/۲۵، ۰/۳، ۰/۵، ۰/۶، ۰/۷، ۰/۷۵، ۱، ۲، ۳، ۴، ۵، ۶، ۷، ۸، ۹ و ۱۰ سانتی متری در حجم هایی از آب محصور به لایه های کروی و لایه های مخروطی و با ضخامت ۰/۰۱ سانتی متر است [۸، ۱۱، ۱۲، ۱۳].

شدت کرمای هوا<sup>۱</sup> با استفاده از تالی  $F_6$  [۱۱] در پوسته های کروی پر از هوا در محیط خلأ به دست آمده است [۸، ۱۱، ۱۴، ۱۵].

هر چند  $S_k$  مستقل از فاصله است، برای دقت بیشتر شدت کرمای هوا در فواصل ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ سانتی متری از چشمه به دست می آید.

تالی  $F_4$  نیز برای محاسبه تابع آرایش هندسی،  $G(r, \theta)$ ، به کار می رود [۱۲] که از رابطه تحلیلی ۴، نیز به دست می آید.  $g(r)$  در فاصله های ۰/۱، ۰/۱۵، ۰/۲، ۰/۲۵، ۰/۳، ۰/۵، ۰/۶، ۰/۷، ۰/۷۵، ۱، ۲، ۳، ۴، ۵، ۶، ۷، ۸، ۹ و ۱۰ سانتی متری و  $F(r, \theta)$  در

۱.  $S_k$

فاصله‌های ۰/۵، ۱، ۲، ۳، ۴، ۵ سانتی‌متری و در زوایای ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۵۰، ۶۰، ۷۰ و ۸۰ درجه از طریق روابط آورده شده محاسبه می‌شود. در این تحقیق، برای رسیدن به خطای نسبی هرچه کمتر، تعداد تاریخچه‌ها  $4 \times 10^4$  در نظر گرفته شد.

ثابت نرخ دز،  $\Lambda$  ثابت نرخ دز  $0.980 \pm 0.12 \text{ cGyh}^{-1}\text{U}^{-1}$  آمد. پارامترهای دیگر دزیمتری در جدول‌های ۲ و ۳ به دست آمده است و با نتایج چند چشمه معمول  $^{125}\text{I}$  مقایسه شده است (در محیط آب).

### ۳. یافته‌ها و نتایج

در این تحقیق، تعداد تاریخچه‌ها  $4 \times 10^4$  در نظر گرفته شد.

جدول ۲: ثابت نرخ دز ( $\text{cGyh}^{-1}\text{U}^{-1}$ ) و مقایسه آن با دیگر پژوهش‌ها

چشمه	روش	$\Lambda (\text{cGyh}^{-1}\text{U}^{-1})$
این تحقیق	مونت کارلو	$0.980 \pm 0.12$
IAI-125 [۱۶]	مونت کارلو	$0.98 \pm 0.03$
Amersham 6711 [۱۷]	مونت کارلو	۰/۹۷۳
Amersham 6702 [۱۷]	مونت کارلو	۱/۰۳۰
InterSource 125I [۱۸]	مونت کارلو	۱/۰۳
Best Industries 2301 [۱۹]	اندازه‌گیری	۱/۰۵
MED3631 [۲۰]	اندازه‌گیری	۱/۰۶

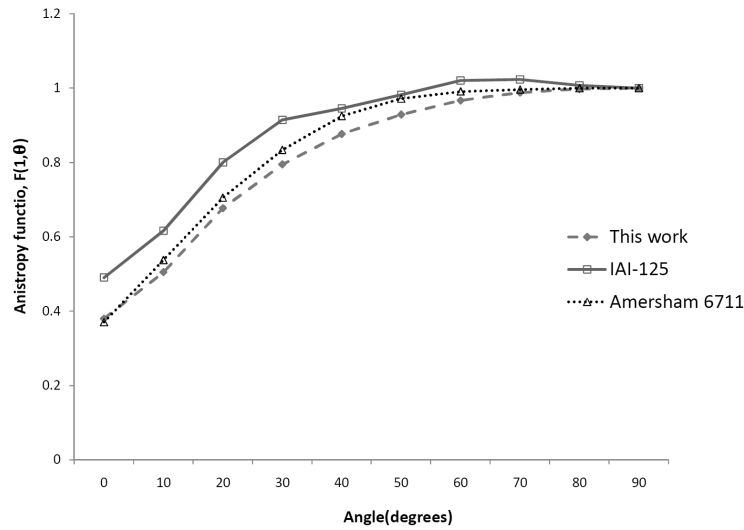
جدول ۳: تابع دز شعاعی  $g(r)$  و مقایسه آن با دیگر پژوهش‌ها

فاصله (cm)	چشمه جدید	IsoAid ADVANTAGE™ $^{125}\text{I}$	Amersham 6711
۰/۱	۱/۰۴۶	۱/۰۴۰	۱/۰۵۵
۰/۱۵	۱/۰۶۵		۱/۰۷۸
۰/۲	۱/۰۷۹	۱/۰۶۶	
۰/۲۵	۱/۰۷۵		۱/۰۸۲
۰/۳	۱/۰۷۲	۱/۰۶۵	
۰/۵	۱/۰۶۱	۱/۰۴۸	۱/۰۷۱
۰/۶	۱/۰۵۰	۱/۰۴۱	
۰/۷	۱/۰۴۱	۱/۰۴۲	
۰/۷۵	۱/۰۳۵		۱/۰۴۲
۱	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰
۲	۰/۸۳۷	۰/۸۳۴	۰/۸۱۴
۳	۰/۶۶۶	۰/۶۶۹	۰/۶۳۲
۴	۰/۵۱۶	۰/۵۲۳	۰/۴۹۶
۵	۰/۳۹۰	۰/۳۹۹	۰/۳۶۴
۶	۰/۲۹۵	۰/۳۰۵	۰/۲۷۰
۷	۰/۲۲۰	۰/۲۲۲	۰/۱۹۹
۸	۰/۱۶۴	۰/۱۶۳	۰/۱۴۸
۹	۰/۱۲۱	۰/۱۲۹	۰/۱۰۹
۱۰	۰/۰۸۹	۰/۰۹	۰/۰۸۰۳

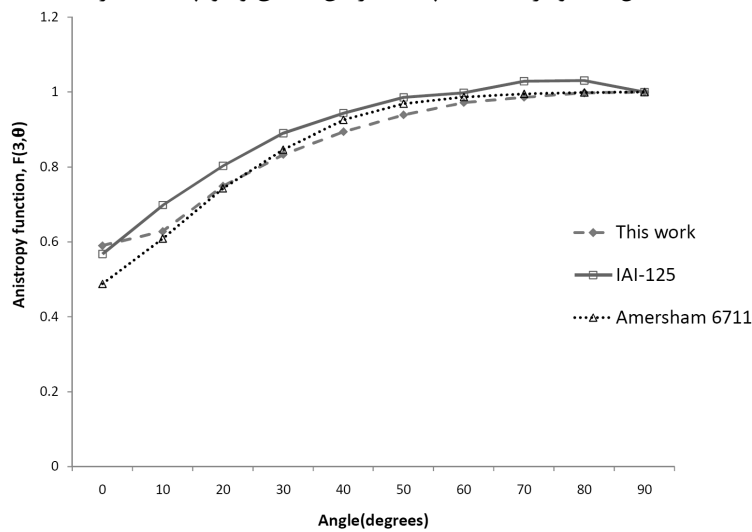


جدول ۶: مقایسه تابع ناهمسانگردی این تحقیق با دیگر پژوهش‌ها (فواصل ۳، ۴ و ۵ سانتی‌متری)

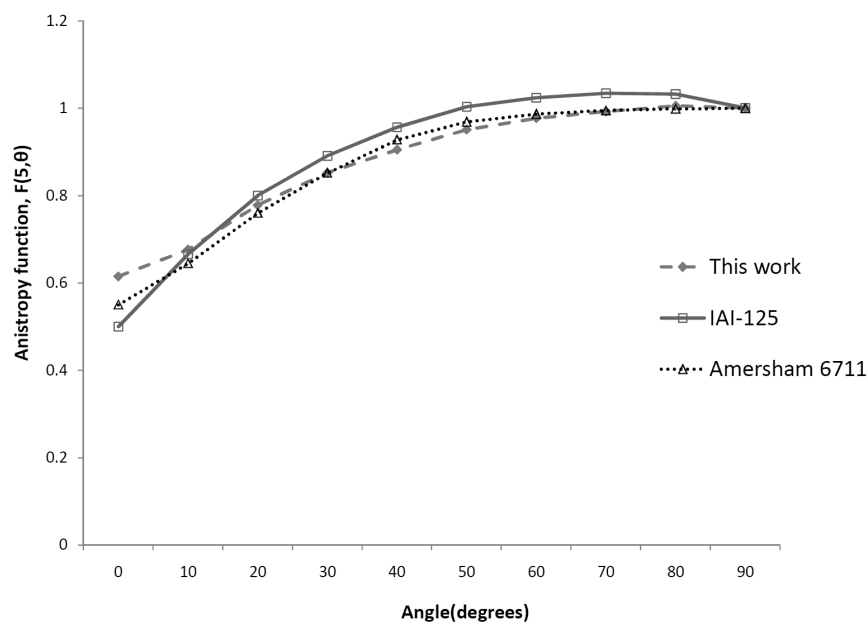
فاصله (cm)									زاویه(درجه)
۵			۴			۳			
IAI-125	Amersham 6711	این تحقیق	IAI-125	Amersham 6711	این تحقیق	IAI-125	Amersham 6711	این تحقیق	
۰/۵۰۰	۰/۵۵۰	۰/۶۱۵	۰/۵۳۵	۰/۵۲۰	۰/۶۱۰	۰/۵۶۷	۰/۴۸۸	۰/۵۹۰	۰
۰/۶۶۶	۰/۶۴۵	۰/۶۷۶	۰/۶۹۰	۰/۶۳۰	۰/۶۵۴	۰/۶۹۸	۰/۶۰۹	۰/۶۲۸	۱۰
۰/۸۰۰	۰/۷۶۰	۰/۷۷۸	۰/۸۰۴	۰/۷۵۲	۰/۷۶۵	۰/۸۰۳	۰/۷۴۳	۰/۷۴۹	۲۰
۰/۸۹۱	۰/۸۵۲	۰/۸۵۲	۰/۸۹۱	۰/۸۴۸	۰/۸۴۳	۰/۸۹۰	۰/۸۴۶	۰/۸۳۳	۳۰
۰/۹۵۶	۰/۹۲۸	۰/۹۰۵	۰/۹۴۹	۰/۹۲۸	۰/۸۹۹	۰/۹۴۴	۰/۹۲۶	۰/۸۹۴	۴۰
۱/۰۰۳	۰/۹۶۹	۰/۹۵۱	۰/۹۹۲	۰/۹۶۹	۰/۹۴۲	۰/۹۸۶	۰/۹۶۹	۰/۹۳۹	۵۰
۱/۰۲۴	۰/۹۸۷	۰/۹۷۷	۱/۰۰۸	۰/۹۸۷	۰/۹۷۰	۰/۹۹۸	۰/۹۸۷	۰/۹۷۲	۶۰
۱/۰۳۴	۰/۹۹۵	۰/۹۹۲	۱/۰۱۸	۰/۹۹۵	۰/۹۸۷	۱/۰۲۹	۰/۹۹۵	۰/۹۸۶	۷۰
۱/۰۳۲	۰/۹۹۹	۱/۰۰۵	۱/۰۳۱	۰/۹۹۹	۱/۰۰۰	۱/۰۳۱	۰/۹۹۹	۰/۹۹۸	۸۰
۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۹۰



شکل ۴: نمودار چشمه در این تحقیق و دو چشمه دیگر  $F(1, \theta)$



شکل ۵: نمودار چشمه در این تحقیق و دو چشمه دیگر  $F(3, \theta)$



شکل ۶: نمودار  $F(\Delta, \theta)$  چشمه در این تحقیق و دو چشمه دیگر

باشد. کل مراحل آماده شدن مارکر، ۶ ساعت طول می کشد و این میله به راحتی درون استوانه های تیتانیومی قرار می گیرد و چون شبیه سازی مونت کارلو، روشی دقیق برای محاسبه پارامترهای دزیمتری چشمه است و حتی در نقاطی مثل نقاط نزدیک به چشمه که دز جذب شده و شیب تغییرات دز زیاد است، روشی دقیق تر و مفیدتر از روش تجربی است. با استفاده از کد MCNPX که کد دقیق و قدرتمندی برای شبیه سازی در زمینه های مختلف است، ویژگی های پارامتری چشمه از روش مونت کارلو به دست آمد و ملاحظه شد که این ویژگی ها با ویژگی های چشمه های معمول دیگر همخوانی دارد و با توجه به اینکه استفاده از چشمه های کم انرژی در درمان بیماری مزایای زیادی دارد، این چشمه جدید می تواند به عنوان یک چشمه جدید براکی تراپی به کار رود.

#### ۴. بحث و نتیجه گیری

جدول ها و شکل ها علاوه بر بیان ویژگی های دزیمتری چشمه، ویژگی های این چشمه و دیگر چشمه ها را با هم مقایسه می کنند. اختلافی که بین نتایج وجود دارد، ناشی از تفاوت در ساختار چشمه هاست. همان طور که از جداول و شکل ها دیده می شود، توافق خوبی بین ویژگی های دزیمتری این چشمه طراحی شده و چشمه های شناخته شده دیگر مثل  $^{125}\text{I}$  ADVANTAGE™ مدل IAI\_125 و Amersham 6711 وجود دارد که بیانگر این است که این چشمه می تواند به عنوان چشمه براکی تراپی مورد استفاده قرار گیرد. از آنجاکه تحقیق بهینه سازی جذب  $^{125}\text{I}$  روی  $\text{Ag} + \text{Al}_2\text{O}_3$  توسط U.J.Park و همکاران [۷] نشان داد که  $^{125}\text{I}$  به راحتی روی  $\text{Ag} + \text{Al}_2\text{O}_3$  می چسبد و توزیع آن نیز یکنواخت است،  $\text{Ag} + \text{Al}_2\text{O}_3$  می تواند حامل خوبی برای  $^{125}\text{I}$

#### ۵. مراجع

- [1] D. Nori, Conformal brachytherapy of prostate cancer: an effective outpatient treatment. *Cancer Watch* 1 (1992), 124–126.
- [2] K.J. Russell and J.C. Blasko, Recent advances in interstitial brachytherapy for localized prostate cancer. *Probl. Urol.* 7 2 (1993), 260–278.
- [3] M.S. Porrizzo, B.S. Hilaris, C.R. Moorthy, A.E. Tchelebi, C.A. Mastoras, L.L. Shih, L. Stabile and N. Salvaras, Permanent interstitial implantation using palladium-103: The New York Medical

- college preliminary experience. *Int. J. Rad. Onc. Biol. Phys.* 23 (1992), 1033–1036.
- [4] J.C. Blasko, K. Wallner, P.D. Grimm and H. Ragde, Prostate specific antigen based control following ultrasound guided  $^{125}\text{I}$  implantation for Stage T1/T2 Prostate carcinoma. *J. Urol.* 154 (1995), 1096–1099.
- [5] Duggan DM, Improved radial dose function estimation using current version MCNP Mont-Carlo simulation: Model 6711 and ISC3500  $^{125}\text{I}$  brachytherapy sources, *Appl Radiat Isot.* 61 (2004), 1443–1450.
- [6] Usqaonker SR, MCNP Modeling of prostate brachytherapy and of organ dosimetry, 2003; MSc thesis, USA.
- [7] U. J. Park, J. S Lee, K. J. Son, H. S. Han, S. S. Nam, The adsorption of  $^{125}\text{I}$  on a  $\text{Ag}+\text{Al}_2\text{O}_3$  rod as a carrier body for a brachytherapy source. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry.* 277 2 (2008), 429–432.
- [8] M.J. Rivard, B.M. Coursey, L.A. DeWerd, W.F. Hanson, M.S. Huq, G.S. Ibbott, M.G. Mitch, R. Nath and J.F. Williamson, Update of AAPM task group no. 43 report: a revised AAPM protocol for brachytherapy dose calculations, *Med. Phys.* 31 (2004), 633–674.
- [9] R. Nath and N. Yue, Dosimetric characterization of a newly designed encapsulated interstitial brachytherapy source of iodine-125—model LS-1 BrachyseedTM, *Appl. Radiat. Isot.* 55 (2001), 813–821.
- [10] J.F. Briesmeister, Editor, *MCNP-4C A General Monte Carlo N-Particle Transport Code System—Version 4C*, Los Alamos National Laboratory, Louisiana (2000).
- [11] M. Sadeghi, G. Raisali, S.H. Hosseini and A. Shavar, Monte Carlo calculations and experimental measurements of dosimetric parameters of the IRA  $^{103}\text{Pd}$  brachytherapy source, *Med. Phys.* 34 (2008), 1288–1294.
- [12] Z. Li, J.R. Palta and J.J. Fan, Monte Carlo calculations and experimental measurements of dosimetry parameters of a new  $^{103}\text{Pd}$  source, *Med. Phys.* 27 (2000), pp. 1108–1112.
- [13] M.J. Rivard, A discredited approach to determining TG-43 brachytherapy dosimetry parameters: case study using Monte Carlo calculation for the  $^{103}\text{Pd}$  MED3633 source, *Appl. Radiat. Isot.* 55 (2001), 775–782.
- [14] Z. Li, J.R. Palta and J.J. Fan, Monte Carlo calculations and experimental measurements of dosimetry parameters of a new  $^{103}\text{Pd}$  source, *Med. Phys.* 27 (2000), 1108–1112.
- [15] A.S. Meigooni, Z. Bharucha, M. Yoe-Sein and K. Sowards, Dosimetric characteristics of the bests double-wall  $^{103}\text{Pd}$  brachytherapy source, *Med. Phys.* 28 (2001), 2568–2575.
- [16] Ali S. Meigooni,<sup>a)</sup> Joshua L. Hayes, Hualin Zhang, and Keith Sowards, Experimental and theoretical determination of dosimetric characteristics of IsoAid ADVANTAGE<sup>TM</sup> $^{125}\text{I}$  brachytherapy source, *Med. Phys.* 29 9 (2002), 2152–2158.
- [17] J. F. Williamson, H. Perera, and Z. Li, Comparison of calculated and measured heterogeneity correction factors for  $^{125}\text{I}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ , and  $^{192}\text{Ir}$  brachytherapy source near localized heterogeneities, *Med. Phys.* 20 (1993), 209–222.
- [18] A. S. Meigooni, M. M. Yoe-Sein, A. Al-Otoom, and K. Sowards, Determination of the dosimetric characteristics of interSource125 iodine brachytherapy source, *Appl. Radiat. Isot.* 56 (2002), 589–599.
- [19] A.S. Meigooni, D.G. Gearheart and K. Sowards, Experimental determination of dosimetric characteristics of Best<sup>®</sup>  $^{125}\text{I}$  brachytherapy source, *Med. Phys.* 27 9 (2000), 2168–2173.
- [20] R.E. Wallace and J.J. Fan, Report on the dosimetry of a new design  $^{125}\text{I}$  brachytherapy source. *Med. Phys.* 26 9 (1999), 1925–1931.