



مجله سنجش و ایمنی پرتو، جلد 7، شمارهٔ 3، تابستان 1398، صفحه 29-34 تاریخ دریافت مقاله: 1398/03/28، تاریخ پذیرش مقاله: 1398/06/13

# مطالعهی آهنگ دز جذبی کل پرتوهای گسیل شده از چشمهی براکی تراپی <sup>252</sup>Cf به روش مونت کارلو

املیلا احمدی \* و حسین توکلیعنبران

دانشکده فیزیک و مهندسی هستهای، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، سمنان، ایران. \*سمنان، شاهرود، دانشگاه صنعتی شاهرود، دانشکده فیزیک و مهندسی هستهای، کدپستی:36169-95161 پست الکترونیکی: Leila\_Ahmadi0123@yahoo.com

#### چکیدہ

چشمه ی برای تراپی Cf<sup>252</sup> یک چشمه ی شکافت خودبه خودی می باشد که از آن به عنوان یک چشمه ی گسیلنده ی نو ترون استفاده می شود. علاوه بر نو ترون های گسیل شده از این چشمه ی پر توهای گاما با متوسط انرژی MeW 1 گسیل می شوند. در این مطالعه با استفاده از کد مونت کارلوی MCNPX ابتدا میزان دز جذبی نو ترون ها، گامای اولیه و گاماهای ثانویه که در نتیجه ی گیراندازی نو ترون حرارتی با هیدروژن آب تولید می شوند در فواصل مختلف از چشمه در فانتوم آب محاسبه شد. سپس میزان دز معادل کل، نو ترون و گاما در فواصل مختلف از چشمه به دست آمد. نتایج نشان می دهند که، پر توهای گامای اولیه و گاماهای ثانویه که در نتیجه ی گیراندازی نو ترون حرارتی با هیدروژن آب تولید می شوند در فواصل مختلف از چشمه به دست آمد. نتایج نشان می دهند که، پر توهای گامای حاصل از این چشمه می توانند انرژی قابل توجهی در فواصل نزدیک به چشمه به جا بگذارند که باید سهم این نشان می دهند که، پر توهای گامای حاصل از این چشمه می توانند انرژی قابل توجهی در فواصل نزدیک به چشمه به جا بگذارند که باید سهم این نشان می دهند که، پر توهای گامای حاصل از این چشمه می توانند انرژی قابل توجهی در فواصل نزدیک به چشمه به جا بگذارند که باید سهم این پر توها در مقادیر دز جذبی کل در استفاده از این چشمه و یا چشمههایی که تنها به عنوان گسیلنده ی نو ترون شناخته شده اند در نظر گرفته شود. آهنگای دز نو ترون و گامای کل با افزایش فاصله از چشمه کاهش پیدا کرده و در فواصل نزدیک به چشمه بیشترین میزان انرژی خود را به جا می گذارند. دز معادل ناشی از نو ترون ها در فواصل نزدیک (کمتر از 20) با اختلاف، نسبت به پر توهای گاما بیشترین میزان انرژی خود را به جا می گذارند. دز معادل ناشی از نو ترون ها در فواصل نزدیک (کمتر از 20) با اختلاف، نسبت به پر توهای گاما بیشترین میزان انرژی خود را به حیا که گذارند. دز معادل ناشی از نورون ها در فواصل نزدیک به چشمه می میزان انرژی خود را به جا می گذارند. در معادل ناشی از نوترون ها در فواصل تای در قالی 20 می می کار به می طری خوره می می می در در معادل کامها در فراصل می در می می در حالی که میزان می طرویکه مقدار گاماها در فواصل مای 20 تا 20 کاره تا 4/300 در می 20/50 تا 20 کاره تا 20/20 واست.

**کلیدواژگان:** <sup>252</sup>Cf، دز معادل، دز نوترون، گامای اولیه، گامای ثانویه.

#### **1**. مقدمه

چشمههای کالیفرنیم علی رغم قیمت بالای آنها از اوایل دههی 1970 جایگزین چشمههای نوترون دیگر از قبیل، <sup>124</sup>Sb-Be، <sup>124</sup>Cm-Be و <sup>242</sup>Cm-Be قـرار گرفتنـد [1]. از جمله مزیتهای این چشمهها میتوان به اکتیویته ویژه بالای آن (اجازه تولید چشمههای نوترون در اندازههای کوچک را فراهم میسازد)، طیف نوترون نرم (در مقایسه با دیگر

چشمههای گسیلندهی نوترون) و اکتیویته ی گامای پایین آن اشاره نمود [2]. چشمه ی <sup>252</sup>Cf با نیمه عمر 2/646 سال، م/96 ٪ مد واپاشی آن ذرات آالفا است. اما به دلیل برد کوتاه آنها و توقف در کپسول یا حفاظ دور چشمه در درمان قابل استفاده نمی باشند. مقدار کوچک اما با اهمیت، 3/1 ٪ واپاشی آن منجر به شکافت خودبه خودی می شود. در هر شکافت به

طور میانگین 3/768 نوترون منتشر میشود. هر 1 گرم 252°Cf × 2/314 نوترون در هر ثانیه گسیل میکند. انرژی نوترونهای حاصل از شکافت با بیشترین احتمال، MeV 70/ و میانگین انرژی نوترونها 2/1 MeV است. علاوه بر نوترونهای ساطع شده، 1 گرم 252°، 10<sup>13</sup> × 1/3 گاما در هر ثانیه با انرژی متوسط 1 MeV گسیل میکند [3. 4].

درمان با استفاده از نوترونها با انتقال انرژی خطی بالا آن را به یکی از تابش های مورد مطلوب نسبت به گاماها اختصاص داده است. از جمله مزایای آن می توان به ذرات کوتاه برد، مزایای بیولوژیکی برای کنترل موضعی تومور براساس غلبه در عود مجدد تومور و اثر زیستشناختی نسبی بالاتر نسبت به تومورهای در حال رشد نام برد. در حالیکه در درمان تومورهای بدخیم به دلیل کمبود اکسیژن در تومور یا به اصطلاح هیپوکسی، استفاده از پرتوهای گاما و الکترون سبب مقاومت بافت در برابر این پرتوها می شود. حالتهای واپاشی لور کلی در واکنشهای هسته ای انرژی بالا تشکیل می شوند که طولانی ترین نیمه عمر آنها به عال 250 می رسد. با این وجود، پروتون نیز نمی تواند مزایای رادیوبیولوژیکی همانند نوترون داشته باشد [5. 6].

نتایج درمان هزاران بیمار در مراکز مختلف جهان با استفاده از چشمه ی براکی تراپی 2<sup>52</sup> Cf نشان می دهد که، ترکیب تابش نوترون و فوتون به خصوص برای تومورهای بزرگ و همچنین برای تومورهایی که به طور معمول در برابر تابش مقاومت نشان می دادند مثل تومورهای ملانوما و تومورهای پیشرفته ی دهانه ی گردن رحم می تواند موثر واقع شود [7]. با توجه به کاربردهای عملی که چشمه ی گسیلنده نو ترون 2<sup>52</sup> بخصوص در حوزه درمان براکی تراپی دارد شناخت پر توهای گسیلی و اندازه گیری میزان انرژی آنها دارای اهمیت است. در درمان سرطان اندامهای مختلف بدن از طریق پر تو درمانی

مانند سرطان دهانهی گردن رحم با روش براکی تراپی، دریافت کمتــرین میـزان دز رسیــده بـه بافـتهـای مختلفـی کـه در مجاورت با اندام آسیب دیده قرار دارند لازم و ضروری میباشد [8، 9]. از این رو در تحقیق قبلی نشان دادهایم که، محاسبات دزیمتری در فانتوم آب به جای بافت نرم دارای اختلاف نسبى حدوداً 4 درصدى است كه با انجام اين تصحيحات مي توان نتايج مربوط به فانتوم آب را به جاي بافت نرم در طراحی برنامهی درمان به کار بست [10]. هدف از انجام این تحقیق، مطالعهی دزیمتری پرتوهای نوترون، گامای اولیه و گامای ثانویهی چشمهی براکی ترایی <sup>252</sup>Cf در فانتوم آب اطراف چشمه با استفاده از کد مونت کارلوی MCNPX می باشد [11]. در این شبیه سازی ها از تابع ماکسول برای تعریف طیف انرژی نوترونها استفاده شده است. از طرفـی در حالت کلی اثر بیولوژیکی در درمان با <sup>252</sup>Cf با اکثریت قاطع به نوترون نسبت داده می شود. زیرا نوترون ها به طور میانگین 6 برابر بیشتر از گاماها در کشتن سلولهای بدخیم تاثیر دارند [12]. بنابراین در نهایت آهنگ دز معادل کل در فواصل مختلف از چشمه، برای نشان دادن بیشترین تاثیر توسط نوترونها در دز کلی محاسبه شده است.

### 2. مواد و روشها

برای انجام شبیهسازی ها چشمه ی <sup>252</sup>Cf که به صورت یک چشمه ی استوانه ای با طول فعال 0/5mm می باشد، در مرکز یک فانتوم آب به چگالی 90/908 gr/cm<sup>3</sup> و شعاع 20cm قرار داده شده است [13]. به دلیل گرادیان بالای تغییرات دز در نزدیکی چشمه، برای دزیمتری دقیق تر ضخامت پوسته های استوانه ای خیلی کوچک انتخاب می شوند. از این رو آهنگ دز جذبی در پوسته های استوانه ای به ابعاد 20/mm × 0/2mm در فواصل 5/0، 5/0، 1، 5/1، 2، 5/2، 3، 5/3، 4، 5/4، 5، 5/5، م. 7، 8، 9 و 2001 از چشمه محاسبه شده است [14]. طیف

انرژی نوترونها به صورت طیف ماکسولی و از رابطـهی زیـر تبعییت میکند [15].

$$N(E) = Ce^{-E/1.42}E^{0.5}$$
(1)

برای محاسبات دز جذبی نوترون، از تالی F6 یا همان تالی گرمایی کد MCNPX که واحد آن بر حسب MeV/gr میباشد استفاده شده است. با توجه به اینکه تعداد نوترونهای گسیل شده از هر 1 گرم 2<sup>52</sup> <sup>252</sup> 10<sup>1</sup> × 2/314 نوترون در ثانیه میباشد آهنگ دز جذبی بر حسب cGy/h.μg بهدست آمد [3، 11]. گاماهای اولیه پرتوهای گامایی هستند که همراه با نوترون و طی واپاشی محصولات شکافت گسیل میشوند. جهت محاسبهی درست دز ناشی از پرتوهای گامای اولیه در اطراف چشمه، نیاز به طیف درستی از پرتوهای گاما است.

از طرفی فوتونها با انرژیهای کمتر از 20 keV انرژیشان را تا فاصلهی 1 cm از چشمه به جا میگذارند که نادیده گرفتن سهم این فوتونها در طی حرکت در آب موجب تخمین کمتری از میزان دز جذبی بخصوص در فواصل نزدیک به چشمه میشود. بنابراین باید طیفی را لحاظ کنیم که منجر به نتیجهی درستی در محاسبات شبیهسازی شود. از این رو در محاسبات از طیف تصحیح شدهای که در برگیرندهی رنج پایین انرژی گاماها است و توسط Dr. Ian C.Gauld at ORNL به محاسبات از طیف تصحیح شدهای که در برگیرندهی رنج پاین انرژی گاماها است و توسط McNPL با تقسیم بر جرم سلول بر حسب واحد f8\* کد MCNPX با تقسیم بر جرم سلول بر گاماهای گسیلی در هر ثانیه آهنگ دز جذبی بر حسب گاماهای گسیلی در هر ثانیه آهنگ دز جذبی بر حسب نوترونهای حرارتی در آب طی واکنـش H(n,γ)<sup>1</sup> که

منجر به گسیل گاماهای MeV میشوند حاصل میشوند. دز جذبی این گاماها نیز با استفاده از تالی f8\* کد MCNPX بدست می آید. در نهایت برای محاسبهی آهنگ دز معادل کل، رابطهی زیر مورد استفاده قرار گرفت [12]:

$$D_{Total} = D_n \times RBE_n + D_\gamma \times RBE_\gamma = 6D_n + D_\gamma$$
(2)

## 3. نتايج و بحث

آهنگ دز جذبی نوترونهای گسیل شده از چشمه کالیفرنیم با خطای کمتر از 5 درصد همراه با نتایج کار دیگران در شکل 1 مشاهده می گردد. مقایسهی نتایج به دست آمده با نتایج تجربی مشاهده می گردد. مقایسهی نتایج کار شبیهسازی توسط (18] و همکارانش و نتایج کار شبیهسازی توسط (19] و همکارانش و نتایج کار شبیهسازی توسط محیط آب با یکدیگر تطابق خوبی دارند. محاسبات مربوط به آهنگ دز نوترون نشان می دهد که، دز جذبی در فواصل نزدیک به چشمه (فواصل زیر 2 cm) دارای شیب تندتری می باشد. به عبارتی نوترونها در این فواصل، بیشترین میزان انرژی را در محیط به جا می گذارند (تعداد نوترونهای اندرکنش کننده با ماده در فواصل نزدیک بیشتر است. همچنین مسیر آزاد میانگین برای انرژی متوسط نوترونها در آب تقریباً 20 است).

با افزایش فاصله از چشمه، تعداد نوترون های اندرکنش کننده با ماده کم شده، در نتیجه باعث کم شدن تعداد انتقالهای انرژی به ماده شده و در نهایت دز جذبی کاهش پیدا می کند به طوری که میزان تغییرات به یک روند یکنواختی می رسد. محاسبات مربوط به آهنگ دز گاماهای اولیه، ثانویه و کل (مجموع دز گامای اولیه و ثانویه) در جدول 1 آورده شده است.

جدول (1): آهنگ دز گاماهای اولیه، ثانویه و کل بر حسب cGy/h.μg.

آهنگ دز گامای کل	آهنگ دز گاما ثانویه	آهنگ دزگامای اولیه	فواصل (cm)
$4/30\times 10^{0}\pm 4/53\times 10^{-2}$	$2/36 \times 10^{-2} \pm 9/07 \times 10^{-4}$	$4/27 \times 10^{0} \pm 4/53 \times 10^{-2}$	0/50
$2/02\times 10^{0}\pm 2/53\times 10^{-2}$	$1/10 \times 10^{^2} \pm 5/24 \times 10^{^4}$	$2/01\times 10^{0}\pm 2/53\times 10^{-2}$	0/75
$1/12\times 10^{0}\pm 1/60\times 10^{-2}$	6/66 $\times$ 10 $^{-3}$ $\pm$ 3/75 $\times$ 10 $^{-4}$	$1/11\times 10^{0}\pm 1/60\times 10^{-2}$	1/00
$4/95 \times 10^{-1} \pm 8/50 \times 10^{-3}$	$3/27 \times 10^{-3} \pm 1/40 \times 10^{-4}$	$4/91 \times 10^{1} \pm 8/50 \times 10^{3}$	1/50
$2/72 \times 10^{-1} \pm 5/75 \times 10^{-3}$	$2/06 \times 10^{-3} \pm 6/97 \times 10^{-5}$	$2/70\times 10^{1}\pm 5/75\times 10^{3}$	2/00
$1/72 \times 10^{-1} \pm 4/02 \times 10^{-3}$	$1/48 \times 10^{^{-3}} \pm 5/49 \times 10^{^{-5}}$	$1/71 \times 10^{\text{1}} \pm 4/02 \times 10^{\text{3}}$	2/50
$1/16 \times 10^{-1} \pm 2/97 \times 10^{-3}$	$1/07 \times 10^{-3} \pm 3/83 \times 10^{-5}$	$1/15 \times 10^{-1} \pm 2/97 \times 10^{-3}$	3/00
$8/88\times 10^{-2}\pm 2/44\times 10^{-3}$	$9/00 \times 10^{-4} \pm 3/21 \times 10^{-5}$	$8/79\times 10^{^{-2}}\pm 2/44\times 10^{^{-3}}$	3/50
$7/00 \times 10^{^-2} \pm 2/04 \times 10^{^-3}$	$7/19 \times 10^{-4} \pm 2/71 \times 10^{-5}$	$6/93 \times 10^{-2} \pm 2/04 \times 10^{-3}$	4/00
$5/18 \times 10^{-2} \pm 1/61 \times 10^{-3}$	$6/81 \times 10^{-4} \pm 3/75 \times 10^{-5}$	$5/11\times 10^{-2}\pm 1/61\times 10^{-3}$	4/50
$4/08 \times 10^{-2} \pm 1/39 \times 10^{-3}$	$5\!/73 \times 10^{-4} \pm 1\!/93 \times 10^{-5}$	$4/02\times 10^{-2}\pm 1/39\times 10^{-3}$	5/00
$3/40 \times 10^{-2} \pm 1/16 \times 10^{-3}$	$4/52\times 10^{-4}\pm 1/62\times 10^{-5}$	$3/36\times 10^{-2}\pm 1/16\times 10^{-3}$	5/50
$2/90 \times 10^{-2} \pm 1/01 \times 10^{-3}$	$4/55 \times 10^{-4} \pm 1/50 \times 10^{-5}$	$2/85 \times 10^{\text{-2}} \pm 1/01 \times 10^{\text{-3}}$	6/00
$2/14 \times 10^{-2} \pm 8/46 \times 10^{-4}$	$3/37\times 10^{-4}\pm 1/17\times 10^{-5}$	$2/11\times 10^{-2}\pm 8/46\times 10^{-4}$	7/00
$1/56 \times 10^{-2} \pm 7/26 \times 10^{-4}$	$2/65\times 10^{-4}\pm 1/03\times 10^{-5}$	$1/54 \times 10^{-2} \pm 7/26 \times 10^{-4}$	8/00
$1/24 \times 10^{-2} \pm 5/26 \times 10^{-4}$	$2/41 \times 10^{-4} \pm 8/69 \times 10^{-6}$	$1/22 \times 10^{-2} \pm 5/26 \times 10^{-4}$	9/00
9/66 $\times$ 10 $^{-3} \pm$ 4/68 $\times$ 10 $^{-4}$	$1/86 \times 10^{-4} \pm 7/00 \times 10^{-6}$	$9{/}48\times10^{^{-3}}\pm4{/}68\times10^{^{-4}}$	10/0

همان طور که در شکل 2 مشاهده می شود مقایسه ی بین آهنگ مربوط به دز گامای کل همراه با نتایج کار شبیه سازی شده Al-Saihati and Naqvi و [13] و Wang and Kelm [12] در محیط آب با یکدیگر تطابق خوبی دارند.



شکل (2): آهنگ دز جذبی گامای کل محاسبه شده در این مطالعه در آب همراه با نتایج کار دیگران در آب **[12، 13]**.





خطای حاصل از محاسبات کد در تمامی فواصل کمتر از 5 درصد میباشد. با توجه به جدول 1، با کم شدن تعداد گاماهای ثانویه که از گیراندازی نوترون حرارتی حاصل می شوند میزان دز گامای ثانویه با افزایش فاصله از چشمه کاهش پیدا میکند.

با افزایش فاصله از چشمه آهنگ دز گامای کال کاهش پیدا میکند. و در فواصل نزدیک به چشمه با شیب تندتری بیشترین میزان انرژی خود را به جا میگذارد.

محاسبات مربوط به آهنگ دز معادل کل، طبق رابطهی 2 از مجموع آهنگهای دز معادل نوترون و گاما به دست آمد. نتایج این محاسبات در جدول 2 مشاهده می گردد. جهت نشان دادن تأثیر هر کدام از پرتوها در میزان دز کلی در شکل 3، مقایسهی بین مقادیر آهنگ دز معادل گاما و نوترون با آهنگ دز معادل کل نشان داده شده است. با توجه به شکل 3، دز ناشی از نوترونها در فواصل نزدیک به چشمه (کمتر از 2 cm) با اختلاف نسبت به پرتوهای گاما بیشترین میزان تأثیر، در دز کلی

دارد که نشاندهندهی اهمیت پرتوهای نوترون نسبت به گاماها در این فواصل است.



شکل (3): مقایسهی آهنگ دز معادل گاما و نوترون با آهنگ دز معادل کل.

.cSv/h.µg	حسب	معادل بر	اهنگ دز	:(2)	جدول
-----------	-----	----------	---------	------	------

آهنگ دز معادل کل	آهنگ دز معادل نوترونها	آهنگ دز معادل گامای کل	فواصل (cm)
$5/06 \times 10^{1} \pm 3/09 \times 10^{-1}$	$4/63 \times 10^{1} \pm 3/05 \times 10^{-1}$	$4/30 \times 10^{0} \pm 4/53 \times 10^{-2}$	0/50
$2/34 \times 10^1 \pm 1/69 \times 10^{-1}$	$2/14\times 10^{1}\pm 1/67\times 10^{-1}$	$2/02\times 10^{0}\pm 2/53\times 10^{-2}$	0/75
$1/32 \times 10^{1} \pm 1/10 \times 10^{-1}$	$1/21 \times 10^1 \pm 1/09 \times 10^{1}$	$1/12 \times 10^0 \pm 1/60 \times 10^{-2}$	1/00
$5/87 \times 10^{0} \pm 5/87 \times 10^{-2}$	$5/37 \times 10^{0} \pm 5/80 \times 10^{-2}$	$4/95\times10^{-1}\pm8/50\times10^{-3}$	1/50
$3/23 \times 10^{0} \pm 3/77 \times 10^{-2}$	$2/95 \times 10^{0} \pm 3/72 \times 10^{-2}$	$2/72\times 10^{-1}\pm 5/75\times 10^{-3}$	2/00
$2/01 \times 10^{0} \pm 2/68 \times 10^{-2}$	$1/84 \times 10^{0} \pm 2/65 \times 10^{-2}$	$1/72\times 10^{-1}\pm 4/02\times 10^{-3}$	2/50
$1/35 \times 10^{0} \pm 2/03 \times 10^{-2}$	$1/24 \times 10^0 \pm 2/01 \times 10^{-2}$	$1/16\times 10^{-1}\pm 2/97\times 10^{-3}$	3/00
$9/64 \times 10^{-1} \pm 1/59 \times 10^{-2}$	$8/75 \times 10^{-1} \pm 1/58 \times 10^{-2}$	$8/88\times 10^{-2}\pm 2/44\times 10^{-3}$	3/50
$7/06 \times 10^{-1} \pm 1/28 \times 10^{-2}$	6/36 $\times 10^{\text{1}} \pm 1/26 \times 10^{\text{2}}$	$7/00\times 10^{-2}\pm 2/04\times 10^{-3}$	4/00
$5/36 \times 10^{-1} \pm 9/43 \times 10^{-3}$	4/84 $\times 10^{\text{1}} \pm$ 9/29 $\times$ $10^{\text{3}}$	$5/18\times 10^{-2}\pm 1/61\times 10^{-3}$	4/50
$4/12 \times 10^{-1} \pm 7/91 \times 10^{-3}$	$3/71 \times 10^{-1} \pm 7/79 \times 10^{-3}$	$4/08\times 10^{-2}\pm 1/39\times 10^{-3}$	5/00
$3/26 \times 10^{-1} \pm 7/27 \times 10^{-3}$	$2/92 \times 10^{-1} \pm 7/18 \times 10^{-3}$	$3/40\times 10^{-2}\pm 1/16\times 10^{-3}$	5/50
$2/62 \times 10^{-1} \pm 6/24 \times 10^{-3}$	$2/33 \times 10^{-1} \pm 6/15 \times 10^{-3}$	$2/90\times 10^{-2}\pm 1/01\times 10^{-3}$	6/00
$1/74 \times 10^{-1} \pm 4/02 \times 10^{-3}$	$1/52 \ \times 10^{-1} \pm \ 3/93 \times 10^{-3}$	$2/14\times 10^{-2}\pm 8/46\times 10^{-4}$	7/00
$1/20 \times 10^{-1} \pm 3/16 \times 10^{-3}$	$1/05 \ \times 10^{-1} \pm \ 3/08 \times 10^{-3}$	$1/56\times 10^{-2}\pm 7/26\times 10^{-4}$	8/00
$8/55 \times 10^{-2} \pm 2/47 \times 10^{-3}$	7/31 ×10^{-2} $\pm$ 2/41 × 10^{-3}	$1/24\times 10^{-2}\pm 5/26\times 10^{-4}$	9/00
$6/25 \times 10^{-2} \pm 2/02 \times 10^{-3}$	5/29 ×10 <sup>-2</sup> ± 1/97 × 10 <sup>-3</sup>	$9/66\times 10^{-3}\pm 4/68\times 10^{-4}$	10/0

4. نتيجەگىرى

گامای ثانویه می باشد. به دلیل نزدیک بودن عناصر تشکیل دهندهی بافت نرم با آب محاسبات دزیمتری در فانتوم آب دز جذبی حاصل از پرتوه ای گسیلی از چشمهی کالیفرنیم شامل: دز ناشی از نوترونها، دز حاصل از گاماهای اولیه و دز ویژگی نوترونها نسبت به گاماها در درمان تومورهای بدخیم حائز اهمیت است اما باید توجه داشت که پرتوهای گامای حاصل می توانند انرژی قابل ملاحظهای در فواصل نزدیک به چشمه ( کمتر از 2 cm) به جا بگذارند که باید در استفاده از این چشمه و یا چشمههایی که تنها به عنوان گسیلندهی نوترون شناخته شدهاند در نظر گرفته شود و میزان دز ناشی از آن را در دز کل سهیم نمود.

- A.K. Yengeni. Californium-252 Neutron Sources. Appl. Radiat. 1sot. 48 10(12) (1997) 1563–1566.
- [2] M.J. Rivard, J.G. Wierzbicki, F. Van den Heuvel. Clinical brachytherapy with neutron emitting <sup>252</sup>Cf sources and adherence to AAPM TG-43 dosimetry protocol. Med. Phys. 26 (1999) 87–96.
- [3] D. Hei et al. Design of a setup for a <sup>252</sup>Cf neutron source for storage and analysis purpose. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B. 386 (2016) 1–3.
- [4] J.W. Poston. Neutron depth dose distribution in heterogeneous phantoms. Georgia Institute of Technology (1971).
- [5] A. Yadollahpour, M. Zahihzadeh and A. Ahmadabad. Calculation of Dose Distribution Around a Clinical <sup>252</sup> Cf Source for Neutron Therapy Based on AAPM, TG-43 Protocol. Biomedical & Pharmacology Journal. 6(2) (2013) 137–143.
- [6] J. Ghassoun, D. Mostacci and V. Molinari. Detailed dose distribution prediction of <sup>252</sup>Cf brachytherapy source with boron loading dose enhancement. Applied Radiation and Isotopes. 68 (2010) 265–270.
- [7] J.I.m. Venselaar, D. Baltas, A.S. meigooni and P.J. Hoskin. A Comprehensive Brachytherapy Physical and Clinical Aspects. CRC Press.ck. (2012).
- [8] V. Samerdokiene, K.P. Valuckas, E. Janulionis, V. Atkocius and M.J. Rivard. Second primary malignancies after radiotherapy including HDR <sup>252</sup>Cf brachytherapy for cervical cancer. Brachytherapy. 14 (2015) 898–904.
- [9] S.F. Brandao and T.P.R. Campos. Intracavitary moderator balloon combined with <sup>252</sup>Cf brachytherapy and boron neutron capture

انجام شده است. نتایج نشان میدهند که، آهنگهای دز نوترون و گامای کل با افزایش فاصله از چشمه کاهش پیدا کرده و در فواصل نزدیک به چشمه بیشترین میزان انرژی را به جا می گذارند. محاسبات مربوط به آهنگ دز معادل کل و مقایسه آن با آهنگ دز معادل گاما و نوترون نشان میدهند که، در استفاده از این چشمه در کاربردهای کلینیکی به دلیل اثر زیست شناختی متوسط 6 برابر نوترون نسبت به پرتوهای گاما، نوترونها بیشترین میزان تأثیر در دز کل دارند هر چند ایس

5. مراجع

therapy, improving dosimetry in a brain tumor and infiltrations. Published by the British Institute of Radiology. (2015).

[10] احمدی، ام لیلا. توکلی عنبران، حسین. محاسبه درصد خطای به وجود آمده در استفاده از فانتوم آب به جای بافت نرم برای توزیع چشمه ی براکی تراپی <sup>103</sup>Pd به روش مونت کارلو. مجله ی علمی پژوهشی دانشگاه علوم پزشکی شهید صدوقی یزد، (9)23. (1394) 818-806.

- [11] I. Al-Saihati and A.A. Naqvi. Neutron and gamma-ray doses from a <sup>252</sup>Cf brachytherapy source in a water phantom. J Radioanal Nucl Chem. 296 (2013) 963–966.
- [12] D. Pelowitz. MCNPX user's manual, LA-CP-07-1473 Version 2.6.0.Los Alamos National Laboratory. 13 (2008).
- [13] C. Wang and R. Kelm. Determination of Neutron and Gamma Dose Rates in Water Surrounding a New Interstitial <sup>252</sup>Cf Brachytherapy Source. Med. Phys. 36 (2009).
- [14] C. Wang and R. Kelm. Determination of Neutron and Gamma Dose Rates in Water Surrounding a New Interstitial <sup>252</sup>Cf Brachytherapy Source. Med. Phys. 36 (2009).
- [15] L.L Anderson. Status of dosimetry for <sup>252</sup>Cf medical neutron sources. Phys. Med. Biol. 18 (1973) 779–799.
- [16] E. Fortune, I. Gauld and C. Wang. Gamma Dose near a New Miniature Cf-252 Brachytherapy Source. Med. Phys. 37 (2010).
- [17] R.D. Colvett, H.H Rossi1 and V. Krishnaswamy. Dose distributions around a californium-252 needle. Phys. Med. Biol. 17(3) (1972) 356.