

شبیه‌سازی کالریمتر آب برای گستره دز پایین باریکه الکترون سطح درمانی با استفاده از کد کامپیوتری MCNP4C

ناهید حاجیلو^{۱*}، گلرخ شفیعی^۲، سید مصطفی محمدی سیدکلایی^۳ و فرهود ضیائی^۱

^۱ پژوهشکده کاربرد پرتوها، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، تهران، ایران.

^۲ گروه فیزیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه آزاد واحد تهران مرکزی، تهران، ایران.

^۳ گروه فیزیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه شاهرود، شاهرود، ایران.

* تهران، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشکده کاربرد پرتوها، صندوق پستی: ۱۱۳۶۵-۳۴۸۶

پست الکترونیکی: nhajiloo@nrcam.org

چکیده

در این کار پژوهشی، یک دستگاه کالریمتر آب که به منظور دزیمتری باریکه الکترون‌های حاصل از شتاب‌دهنده‌های درمانی و در گستره دز جذبی پایین به کار می‌رود، با استفاده از کد کامپیوتری MCNP4C شبیه‌سازی شد. سپس منحنی‌های دز عمق محاسبه و با مقادیر تجربی مقایسه شد. همچنین تأثیر لایه‌های پراکننده در عمق دز بیشینه مورد بررسی قرار گرفته و مشخص شد که حضور لایه‌های پراکننده منجر به جذب دز بیشینه در عمق کمتر می‌شود.

کلیدواژگان: دزیمتری، کالریمتر، شبیه‌سازی، کد MCNP4C.

۱. مقدمه

می‌گیرند: آب و گرافیت. اگر از آب استفاده شود، دز جذبی به دست آمده مستقیماً قابل استفاده است، اما اگر از گرافیت استفاده شود، طی مرحله‌ای اضافی برای تبدیل اندازه دز به دز جذبی در آب ضروری است. این مسئله بزرگ‌ترین مزیت کالریمتر آب نسبت به نوع گرافیت آن است [۴].

هدف از این کار پژوهشی، شبیه‌سازی یک کالریمتر آب برای دزیمتری در گستره دز پایین باریکه الکترون و پرتو گاما با استفاده از کد کامپیوتری MCNP4C است. نتایج حاصل از محاسبات با مقادیر تجربی کار دیگران مقایسه شد [۵].

۲. مواد و روش‌ها

دز جذبی، D ، با استفاده از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$D=C \Delta T \quad (1)$$

کالریمتری اساسی‌ترین روش برآورد میزان دز جذبی در سطح استاندارد اولیه است، زیرا افزایش دما بارزترین پیامد جذب انرژی در یک ماده است. عموماً دز جذبی را می‌توان مستقیماً با مشاهده آثار حرارتی ایجادشده توسط پرتو یونیزان در ماده مورد نظر اندازه‌گیری کرد، ولی در عمل مشکلات زیادی وجود دارد. کالریمتری روشی غیرحساس بوده و معمولاً نیاز به وسایل پیچیده‌ای دارد، به آسانی قابل حمل نبوده و به طور تجاری در دسترس نیست، به کندی عمل کرده و از زمانی که برای اندازه‌گیری تنظیم می‌شود، مدتی طول می‌کشد تا به پایداری حرارتی برسد. در نتیجه کالریمتر معمولاً برای کارهای استاندارد یا کاربردهای تحقیقاتی محدود می‌شود [۱-۳]. دو ماده اصلی در ساخت کالریمتر برای تعیین دز جذبی مورد استفاده قرار

۱.۲. ساختار کالریمتر^۱ ESW

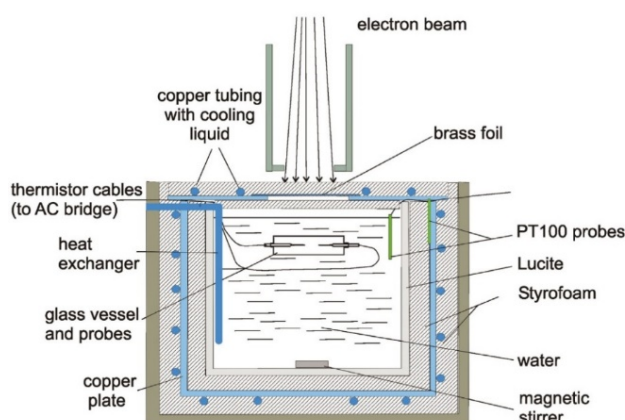
در این تحقیق، کالریمتر ESW که توسط آقای استوارت و همکارانش طراحی و ساخته شده است، به عنوان هدف اصلی کار مورد شبیه سازی قرار گرفت (شکل های ۱ و ۲) [۵]. محفظه اصلی کالریمتر جعبه ای از جنس PMMA^۲ به ضخامت ۱۰ mm و ابعاد $30 \times 30 \times 20 \text{ cm}^3$ در نظر گرفته شده است. اصولاً برای اجتناب از پدیده همرفت، دمای کارکرد یک کالریمتر در 4°C تنظیم می شود. به منظور برقراری و حفظ این دما، از یک لایه عایق از جنس فوم پلی استایرن^۳ با ضخامت ۵ cm در اطراف فانتوم استفاده می شود، سپس یک لایه مسی به ضخامت ۵ mm که در اطراف آن، لوله های آب برای برقراری و حفظ دماست. در مرحله بعد، مجدداً یک لایه فوم پلی استایرن با ضخامت ۵ cm حول لایه مسی قرار داده می شود (شکل ۱). سرانجام این آرایش توسط یک جعبه چوبی با ابعاد خارجی $55 \times 55 \times 40 \text{ cm}^3$ احاطه می شود. در قسمت بالایی نیز صفحات مسی به ضخامت ۵ mm قرار دارد که بالا و پایین این صفحه ورقه های فوم پلی استایرن با ضخامت های ۲/۵ cm و ۱ cm قرار گرفته اند. ورقه مسی طوری برش خورده است که پنجره ای به ابعاد $10 \times 10 \text{ cm}^2$ برای ورود پرتو تشکیل دهد. این پنجره به وسیله یک ورقه برنجی به ضخامت ۰/۱ mm پوشیده شده است.

برای خنک نگه داشتن دمای کالریمتر در حد $0/1^\circ\text{C}$ ، از یک یخچال Neslab RTE-7 استفاده می شود. در کف فانتوم آب یک همزن مغناطیسی قرار دارد که در مراحل خنک سازی، از ایجاد شیب دمایی جلوگیری می کند.

۲.۲. محفظه شیشه ای

محفظه کالریمتر از شیشه پیرکس ساخته شده و استوانه ای شکل است. پنجره جلو و عقب دایره ای شکل بوده و قطری معادل ۷۹ mm دارد. ضخامت پنجره های جلویی و عقبی ۱/۱ mm و ضخامت جانبی استوانه ۲/۱ mm است. دو ورودی در دو سمت بدنه استوانه ای برای ورود دماسنج تعبیه شده است. ورودی سومی نیز برای پر کردن محفظه و خروج حباب های احتمالی وجود دارد.

که در آن، ΔT تغییرات دمایی ناشی از جذب پرتو و C ظرفیت گرمایی ماده در فشار ثابت است. واحد اصلی دز جذبی گری (Gy) است. در معادله مذکور فرض بر این است که همه انرژی های نهفته در ماده به گرما تبدیل می شود. کالریمتری نسبت به سایر روش ها این مزیت را دارد که می توان C را در غیاب تابش اندازه گیری کرد [۶]. شکل های (۱) و (۲) نمایی از یک کالریمتر آب را نمایش می دهند. یادآور می شود در شبیه سازی با استفاده از کد MCNP از تالی $f8^*$ جهت محاسبه دز باریکه الکترون و فوتون در محفظه شیشه ای کالریمتر که به عنوان دزیمتر در نظر گرفته شده، استفاده شده است [۷]. همچنین چشمه به صورت نقطه ای تعریف شده که پرتوهای فوتون و باریکه الکترون است، به صورت عمود بر سطح بالایی کالریمتر تابانیده می شوند (شکل ۱).



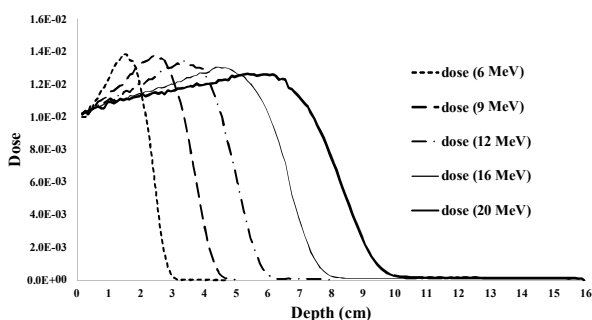
شکل ۱: طراحی کلی از یک کالریمتر آب نوعی [۵]



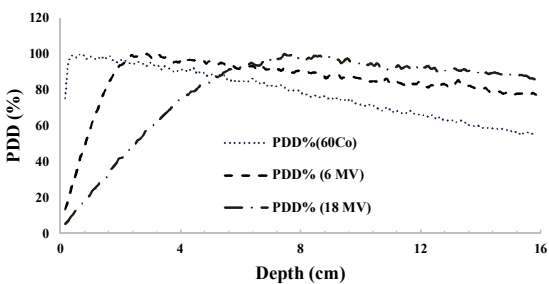
شکل ۲: نمایی از یک کالریمتر آب نوعی بدون لایه بالایی [۵]

1. Electron Sealed Water
2. Polymethyl Methacrylate
3. Styrofoam

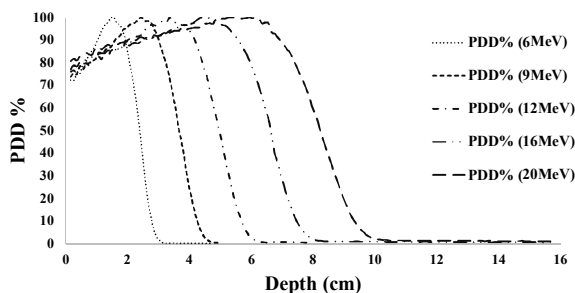
شکل (۳) اجزای مختلف کالریمتر را با جزئیات نشان می‌دهد. درصد دز عمقی برای الکترون‌های با انرژی‌های مختلف (6 MeV ، 9 MeV ، 12 MeV ، 16 MeV و 20 MeV) محاسبه شد. شکل (۴) نمودار تغییرات درصد دز عمقی برای انرژی‌های مختلف الکترون را نشان می‌دهد. مطابق شکل، با افزایش انرژی باریکه‌ی الکترون شیب افت اولیه‌ی پرتوهای الکترونی ورودی کاهش پیدا می‌کند. چنان‌که مشاهده می‌شود در ابتدا دز افزایش یافته و بعد از رسیدن به بیشینه‌ی مقدار خود شروع به افت می‌کند که علت این پدیده اثرات پس‌پراکندگی می‌باشد. همان‌طور که می‌دانیم به این عمق، عمق بیشینه‌ی دز گفته می‌شود.



شکل ۴: نمودار تغییرات دز-عمق برای باریکه‌های الکترون بدون در نظر گرفتن لایه‌های بالایی (نتایج شبیه‌سازی با کد MCNP4c)



(الف)



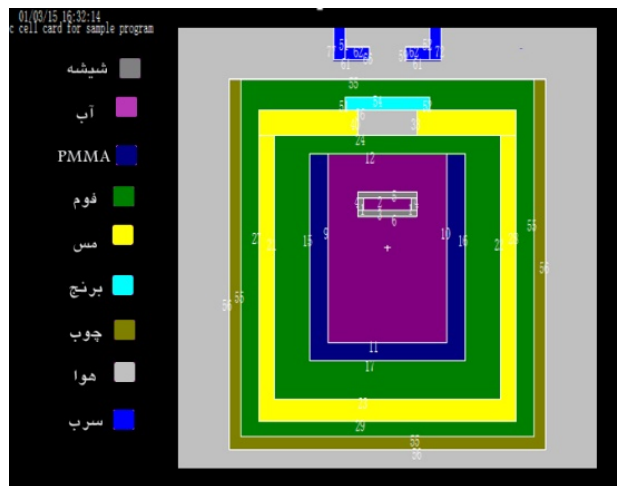
(ب)

شکل ۵: نمودار تغییرات درصدی دز-عمق مربوط به

۲.۳. سیستم کنترل دما

محفظه‌ی دماسنج نیز از پیرکس ساخته شده است که قطری برابر با 8 mm و ضخامت دیواره‌ی 1 mm دارد. در داخل این محفظه، یک دماسنج مقاومتی قرار می‌گیرد. این دماسنج 0.25 mm قطر دارد و مقاومت نرمال آن در دمای $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ برابر $10\text{ k}\Omega$ است. سه دماسنج برای کنترل و نظارت بر دمای آب و صفحات مسی در این گرماسنج وجود دارد. دو عدد از آنها در فانتوم آب قرار دارند و سومی در صفحه‌ی مسی جای گرفته است. این دماسنج‌ها توسط چند رشته سیم به یک مدار AC متصل شده‌اند [۵].

از آنجایی که ماده‌ی اصلی استفاده‌شده در این کالریمتر آب است. در نتیجه ابتدا تضعیف پرتوهای مختلف در آب و رفتار کلی آنها در فانتوم آب (کالریمتر بدون در نظر گرفتن لایه‌های بالایی) شبیه‌سازی شده تا پارامترهایی مانند عمق بیشینه‌ی دز برای پرتوهای فوتون و الکترون به دست آید، سپس کالریمتر به‌طور کامل با در نظر گرفتن لایه‌های بالایی بررسی شده است. همچنین در خصوص تأثیر ضخامت لایه‌ی فوقانی بر مقادیر دز عمقی که از جنس برنج است، محاسباتی انجام گرفته و با جایگزینی موادی چون مس، آلومینیوم و استیل به‌جای برنج محاسبات تکرار و مورد مقایسه قرار گرفته است.

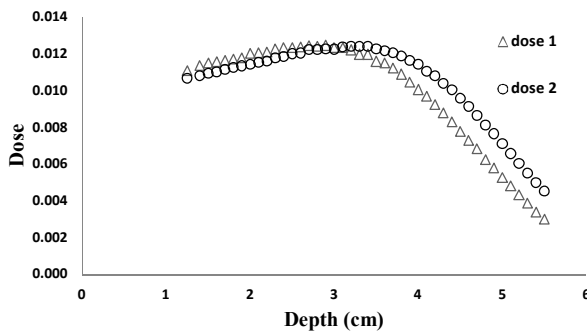


شکل ۳: ساختمان اصلی کالریمتر آب همراه با جزئیات آن

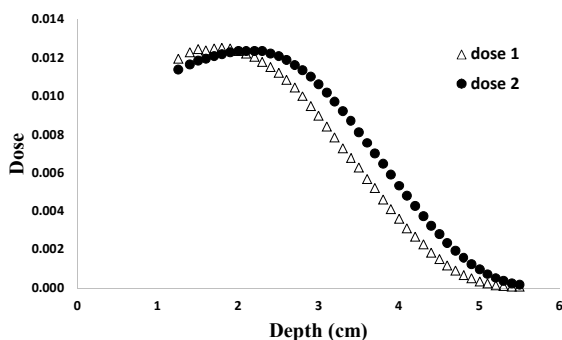
۳. نتایج

ابتدا کالریمتر آب مورد نظر با استفاده از کد کامپیوتری MCNP4C بدون در نظر گرفتن لایه‌های بالایی شبیه‌سازی شد.

گرفته است. همان‌طور که در شکل (۷) مشاهده می‌شود، بیشینه دز مربوط به باریکه الکترون 12 MeV در حالت‌های کالریمتر بدون لایه‌های فوقانی و با لایه‌های فوقانی به ترتیب در عمق‌های حدود $3/4\text{ cm}$ و $2/4\text{ cm}$ است. اما در شکل (۸) که مربوط به باریکه الکترون‌های 9 MeV است، این مقادیر به ترتیب $2/2\text{ cm}$ و $1/7\text{ cm}$ به دست آمده است.



شکل ۷: اثر ناشی از اضافه شدن لایه‌های پراکننده برای الکترون‌هایی با انرژی 12 MeV (داده‌های $dose1$ و $dose2$ به ترتیب مربوط به دز با در نظر گرفتن لایه فوقانی و بدون در نظر گرفتن لایه فوقانی است).



شکل ۸: اثر ناشی از اضافه شدن لایه‌های پراکننده در انرژی الکترون 9 MeV (داده‌های $dose1$ و $dose2$ به ترتیب مربوط به دز با در نظر گرفتن لایه فوقانی و بدون در نظر گرفتن لایه فوقانی است).

در شکل (۹) نتایج آزمایشگاهی تغییرات دز عمقی برای الکترون 9 MeV به دست آمده از اندازه‌گیری ارائه شده است [۵] که با نتایج محاسبات تطابق خوبی را نشان می‌دهد.

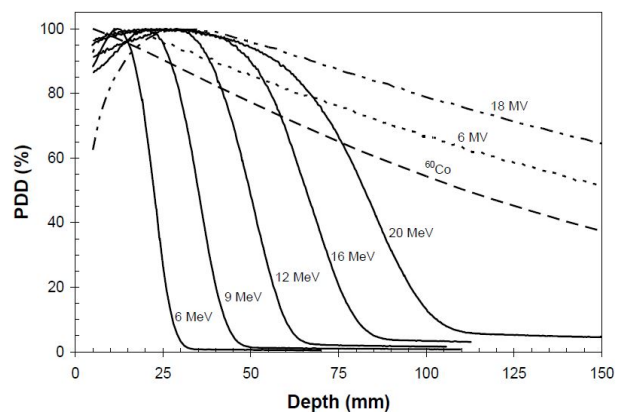
اثر لایه‌های بالایی (پراکننده) کالریمتر بر روی توزیع دز در اثر تغییر ضخامت برنج

در شکل (۱۰) تغییرات دز عمقی بر حسب تغییر ضخامت برنج که با استفاده از کد کامپیوتری MCNP4C محاسبه شده، رسم شده

الف. پرتوهای فوتون بدون در نظر گرفتن لایه‌های بالایی (نتایج شبیه‌سازی با کد MCNP4C؛ ب. الکترون

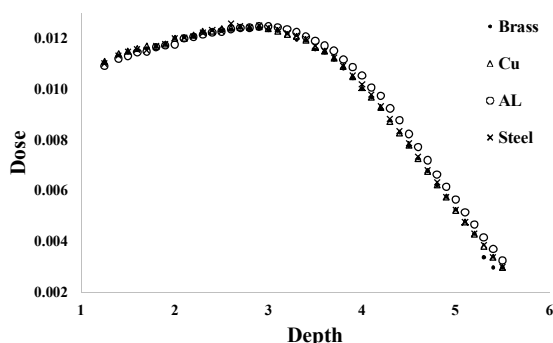
همچنین منحنی‌های دز-عمق پرتو فوتون با انرژی‌های مختلف 6 MV و 12 MV و انرژی مربوط به پرتو گاما ^{60}Co ، با استفاده از کد MCNP4C محاسبه شد. یادآور می‌شود چشمه ^{60}Co دو پرتو گاما با انرژی‌های $1/17\text{ MeV}$ و $1/33\text{ MeV}$ از خود گسیل می‌کند که در اینجا برای سهولت در شبیه‌سازی به صورت یک چشمه تک‌انرژی با انرژی میانگین دو پرتو، یعنی $1/25\text{ MeV}$ در نظر گرفته شده است.

همان‌طور که از شکل‌های (۴) و (۵) و (۶) مشاهده می‌شود، تطابق خوبی بین نتایج حاصل از شبیه‌سازی با نتایج به دست آمده توسط آقای استوارت مشاهده می‌شود. شکل ۵ تغییرات درصدی دز بر حسب عمق در آب را برای پرتوهای فوتون با انرژی‌های مختلف نشان می‌دهد. در شکل (۶) نتایج حاصل از اندازه‌گیری تغییرات درصدی دز-عمق در محیط آب برای باریکه الکترون و پرتو فوتون در شرایط مشابه شبیه‌سازی، در کالریمتر آب بدون در نظر گرفتن لایه‌های بالایی که توسط کریستین استوارت انجام شده، آمده است [۵].



شکل ۶: نتایج حاصل از اندازه‌گیری تغییرات PDD بر حسب عمق برای پرتوهای فوتون و الکترون با انرژی‌های متفاوت [۵]

در شکل‌های (۷) و (۸) اثرات ناشی از اضافه شدن لایه‌های بالایی بر روی تابع پاسخ کالریمتر را که با استفاده از کد MCNP4C محاسبه شده نشان می‌دهد. بررسی‌ها در انرژی‌های میانی 12 MeV و 9 MeV به عنوان نمونه صورت



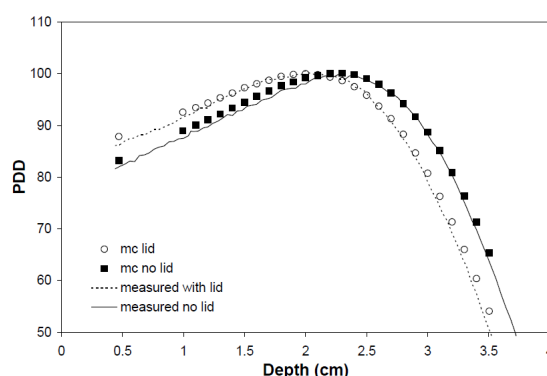
شکل ۱۱: تغییرات دز عمقی برحسب جایگذاری مواد مختلف

۴. نتیجه‌گیری

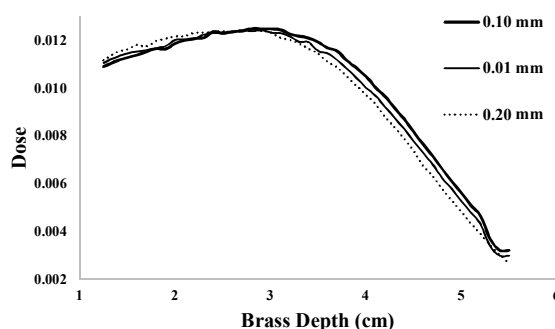
با استفاده از کد MCNP4C یک کالریمتر آب شبیه‌سازی و محاسبات مربوط به دز عمق انجام شد. همچنین اثرات مربوط به وجود لایه‌های پراکننده کالریمتر بررسی شد که با نتایج تجربی ارائه‌شده توسط دیگر پژوهشگران، تطابق خوبی را نشان می‌دهد.

با انجام بررسی‌های مذکور، پیش از ساخت کالریمتر، شناخت بهتری نسبت به عملکرد اجزای آن به دست آمد. از جمله می‌توان نتیجه گرفت که در یک کالریمتر کامل با لایه پراکننده (لایه‌های فوقانی) میزان دز بیشینه در عمق کمتری اتفاق می‌افتد و در نتیجه در عمق بیشتری می‌توان دزیمتری انجام داد. به عبارت دیگر، لایه پراکننده در نمودار حاصل از باریکه الکترون در مرز نقطه دز بیشینه یکنواختی ایجاد کرده است. عمق بهینه برای دزیمتری یعنی عمقی که محفظه شیشه‌ای در آن قرار دارد و آن مکان در عمقی قرار دارد که دز بیشینه در آن عمق رخ می‌دهد.

است. همان‌طور که مشهود است، هنگامی که ضخامت برنج افزایش یا کاهش پیدا می‌کند، تغییر چندانی در میزان دز بیشینه رخ نمی‌دهد. همان‌طور که در شکل (۱۱) مشاهده می‌شود، هنگامی که به جای برنج موادی مانند مس و آلومینیوم و استیل جایگذاری می‌گردد، بازهم تفاوت چندانی بین نمودارهای دز عمقی مشاهده نمی‌شود و دز بیشینه در هر چهار نمودار تقریباً در یک عمق واقع شده است و البته دلیل ترجیح داده شدن برنج به جای مواد دیگر احتمالاً به مواردی همچون اثر هدایت گرمایی یا خواص مکانیکی مربوط است که نیاز به بررسی‌های بیشتر دارد.



شکل ۹: تغییرات دز عمقی برای الکترون ۹ MeV حاصل از اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی و محاسبات (منظور از mc محاسبات انجام شده با استفاده از روش مونت کارلو است.) [۵]



شکل ۱۰: تغییرات دز عمقی برحسب تغییر ضخامت برنج

۵. مراجع

- [۱] قریب، احمد. کتاب پیدایش و کاربردهای علوم و فناوری‌های هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، (۱۳۸۴).
- [۲] ضیائی، فرهود و رحمنی، الناز. شبیه‌سازی کالریمتر گرافیتی با بهره‌گیری از کد EGS4. مجله سنجش و ایمنی پرتو، جلد ۲، شماره ۲، (۱۳۹۳).

- [3] D.T. Burns, M.R. McEwen and A.J. Williams. An NPL absorbed dose calibration service for electron beam radiotherapy Proc. Int. Symp. On Measurement Assurance in Dosimetry, IAEA-SM-330/34, ed S P Flitton, (1994) p 61.
- [4] S.R. Domen, P.J. Lamperti. A heat-loss-compensated calorimeter: Theory, design and

- performance. J. Res. Natl. Bur. Stand. A, 78, (1974) 595–610.
- [5] K. Stewart. The development of new devices for accurate radiation dose measurement: A guarded liquid ionization chamber and an electron sealed water calorimeter. Department of physics McGill university, Montreal August, (2007).
- [6] S. Lovell and H. Shen. A flow calorimetric method of determining electron beam energy. Phys Med Biol 21 (1976) 198-208.
- [7] Los Alamos National Laboratory. Monte Carlo N-Particle Transport Code System, MCNP4C. Los Alamos, New Mexico (2000).