

## محاسبه دز جذبی و وابستگی به انرژی دزیمترهای مقیاس کوچک برای باریکه‌های فوتون‌درمانی

محسن آل‌اسحق‌ی و مجتبی تاجیک\*

گروه فیزیک هسته‌ای، دانشگاه دامغان، دامغان، سمنان، ایران.

\*سمنان، دامغان، دانشگاه دامغان، گروه فیزیک هسته‌ای، کدپستی: ۳۶۷۱۶-۴۱۱۶۷

پست‌الکترونیکی: [tajik@du.ac.ir](mailto:tajik@du.ac.ir)

### چکیده

در این پژوهش میزان وابستگی دز به انرژی برای دزیمترهای اتاقک یونیزاسیون هوا، لیتیوم فلوراید، سیلیکون و سوسوزن پلاستیک، با استفاده از کد شبیه‌سازی مونت کارلو MCNPX بررسی و برای انرژی گاما در محدوده‌ی انرژی رادیوتراپی شبیه‌سازی شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد پاسخ هریک از دزیمترها برای فوتون‌ها در بازه‌ی انرژی ۰/۲ تا ۲۰ مگاالکترون‌ولت متفاوت است. وابستگی دز به انرژی برای دزیمتر اتاقک یونیزاسیون هوا نسبت به سایر دزیمترها بیشتر است. در میان دزیمترهای مورد مطالعه نسبت دز جذبی سوسوزن پلاستیک به دز جذبی آب در محدوده‌ی انرژی مورد نظر، حداقل وابستگی به انرژی را نشان می‌دهد. نتایج نسبت دز جذبی دزیمترها به دز جذبی آب نشان می‌دهند که سوسوزن پلاستیک بیشترین و سیلیکون کمترین هم‌ارزی با آب را دارد. در بررسی‌های تحلیلی نسبت دز جذبی دزیمترها به دز جذبی آب با استفاده از تئوری برلین محاسبه و با نتایج مونت کارلو مقایسه شد. مقایسه‌ها هم‌خوانی خوب نتایج تحلیلی و شبیه‌سازی را نشان می‌دهد.

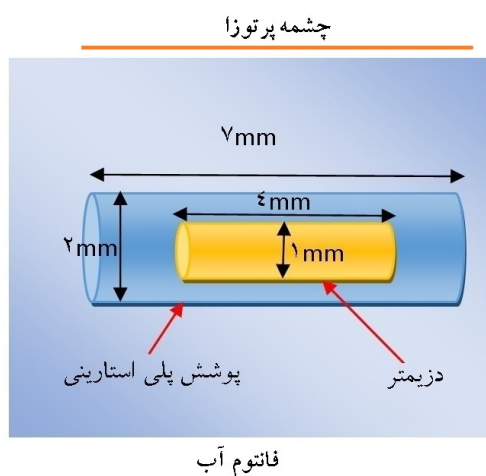
کلیدواژه‌گان: دز جذبی، دزیمتر مقیاس کوچک، تئوری برلین، باریکه فوتون.

### ۱. مقدمه

منحصر به خود دارند. با توجه به اینکه از ویژگی‌های اساسی یک دزیمتر در کاربردهای کلینیکی، عدم وابستگی به انرژی و داشتن رفتاری معادل با آب در برابر پرتوها است [۱-۶]. با استفاده از شبیه‌سازی مونت‌کارلو میزان وابستگی دز این دزیمترها در محدوده‌ی انرژی ۰/۲ تا ۲۰ مگاالکترون‌ولت برای فوتون‌های گاما بررسی خواهد شد. فوتون‌های گاما با

اندازه‌گیری دقیق و سریع توزیع فضایی و زمانی دز جذب شده در دزیمتری بالینی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. دزیمترهای مختلفی برای انجام این کار در بخش‌های کلینیکی مورد استفاده قرار می‌گیرند. از این دزیمترها می‌توان به اتاقک یونیزاسیون هوا، لیتیوم فلوراید، سیلیکون و سوسوزن پلاستیک اشاره کرد. هر کدام از این دزیمترها معایب و مزیت‌های

قطر ۱ mm و طول ۴ mm در شبیه‌سازی‌ها مورد مطالعه قرار گرفته است.



شکل (۱): هندسه مورد استفاده در شبیه‌سازی.

با استفاده از تالی F8\* انرژی ذخیره شده در دزیمترها محاسبه و سپس مقدار دز برای هر انرژی در فانتوم آب و دزیمترهای ذکر شده، محاسبه شد. در سیستم دزیمتری باید مکان پرتوهی و مکان دزیمتر یکسان باشد و فقط فانتوم آب امکان جابه‌جایی دارد. به منظور مقایسه نتایج دزیمترها، باید مکانی در داخل فانتوم آب مشخص شود که نسبت دز در دزیمتر به دز فانتوم آب، یک شود. بدین منظور در شبیه‌سازی، دزیمتری از جنس آب در داخل فانتوم آب در نظر گرفته شد. با جابه‌جایی دزیمتر در داخل آب و محاسبه نسبت دز دزیمتر به دز آب برای موقعیت‌های مختلف دزیمتر، مکانی که این نسبت برابر یک می‌شود برای هر انرژی مورد نظر، به دست آمد. با مشخص شدن این موقعیت دزیمتر برای هر انرژی، دزیمترهایی از جنس سوسوزن پلاستیک، اتافک یونیزاسیون هوا، سیلیکون و لیتیوم فلوراید در این موقعیت قرار داده و نسبت دز دزیمتر به دز آب محاسبه شد.

به منظور کاهش خطا و زمان اجرای محاسبات، ترابرد ذرات برای پانصد میلیون فوتون گاما و با استفاده از یک سیستم محاسباتی با هشت هسته پردازشی با فرکانس ۲/۶ GH و به

محدوده‌ی انرژی مذکور معمولاً در رادیوتراپی مورد استفاده قرار می‌گیرد و نسبت دز دزیمتر به دز در فانتوم آب در انرژی‌های مختلف فوتون‌های گاما تعیین خواهد شد. در مرحله بعدی با استفاده از تئوری حفره برلین<sup>۱</sup> نسبت دز هر یک از دزیمترها به دز فانتوم آب را محاسبه و با نتایج شبیه‌سازی مقایسه شده است. با استفاده از نتایج به دست آمده پاسخ هریک از دزیمترها در بازه‌ی انرژی مورد نظر مشخص شد. به منظور بررسی کارایی دزیمترهای اتافک یونیزاسیون هوا، سیلیکون، لیتیوم فلوراید و سوسوزن پلاستیک، مقدار دز و وابستگی به انرژی در میدان‌های پرتوی گامای مورد استفاده در درمان بیماران محاسبه شده و سپس با هم مقایسه شده است. در این پژوهش نسبت دز جذبی در دزیمتر به دز در آب به دو روش محاسبه شد. روش اول با استفاده از شبیه‌سازی مونت‌کارلو و به کارگیری کد MCNPX و روش دوم با استفاده از تئوری برلین انجام شده است.

## ۲. محاسبه دز با استفاده از کد شبیه‌سازی

### MCNPX

برای محاسبه دز جذبی به روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو از کد MCNPX استفاده شده است. در مرحله اول هندسه یک سیستم دزیمتری مطابق با شکل ۱ طراحی شد. بدین منظور فانتوم آبی به صورت مکعبی به حجم  $20 \times 20 \times 20 \text{ cm}^3$  و دزیمتر به صورت استوانه‌ای به قطر ۱ mm و ارتفاع ۴ mm درون پوشش پلی‌استارینی به صورت استوانه‌ای به قطر ۲ mm و ارتفاع ۷ mm و باریکه تابش گاما با انرژی‌های ۰/۲، ۰/۵، ۱، ۲، ۴، ۶، ۸، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ مگا‌الکترون‌ولت در نظر گرفته شد [۷-۹]. دزیمترهای اتافک یونیزاسیون هوا، سیلیکون، لیتیوم فلوراید و سوسوزن پلاستیک با هندسه استوانه‌ای به ابعادی به

<sup>۱</sup> Burlin cavity theory

به دیواره،  $\overline{(\frac{\mu_{en}}{\rho})^g}$  میانگین نسبت ضرایب جذب جرمی انرژی حفره به دیواره و  $d$  یک پارامتر وابسته به اندازه حفره است که برای حفره کوچک یک و برای حفره بزرگ صفر در نظر گرفته می‌شود. همانطور که قبلاً بیان شد، کوچک و بزرگ بودن حفره بستگی به انرژی فوتون گاما دارد. در این محاسبات برای انرژی‌های ۰/۲ و ۰/۵ مگاالکترون‌ولت،  $d$  برابر صفر و برای انرژی‌های ۱، ۲، ۴، ۶، ۸، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ مگاالکترون-ولت،  $d$  برابر یک در نظر گرفته شد.

#### ۴. بحث و نتایج

نتایج محاسبه نسبت دز در دزیمترهای مورد مطالعه به دز در آب با استفاده از کد شبیه‌سازی مونت‌کارلوی MCNPX و تئوری برلین در بازه‌ی انرژی‌های باریکه فوتون گاما در شکل‌های (۲-الف، ب، ج و د) نشان داده شده است.

در این شکل‌ها میزان هم‌خوانی نتایج تئوری برلین با نتایج شبیه‌سازی کد MCNPX نیز ارائه شده است. نتایج در نمودارهای (۲-الف)، (۲-ب)، (۲-ج) و (۲-د) نشان می‌دهند که میانگین اختلاف نسبی مقادیر شبیه‌سازی و تئوری حفره برلین برای دزیمتر سوسوزن پلاستیک کمترین مقدار و در حدود ۰/۳ درصد است. این مقدار برای دزیمتر لیتیوم فلوراید بیشترین و در حدود ۲/۲ درصد است. بیشترین مقدار اختلاف نسبی بین نتایج شبیه‌سازی و تئوری برلین مربوط به دزیمترهای لیتیوم فلوراید برای انرژی‌های بیشتر از ۱۰ MeV و سیلیکون برای انرژی‌های کمتر از ۱ MeV و در حدود ۴/۵ درصد است. اختلاف نسبی بین نتایج شبیه‌سازی و تئوری برلین برای دزیمتر سوسوزن پلاستیک در حدود ۱/۱ درصد است. این مقادیر نشان می‌دهند برای دزیمتر سوسوزن پلاستیک نتایج شبیه‌سازی و تئوری برلین بیشترین هم‌خوانی و کمترین تغییرات دز را در گستره‌ی انرژی مورد نظر دارد.

روش اجرای موازی انجام شد. حداکثر خطای محاسبه دز یک درصد است.

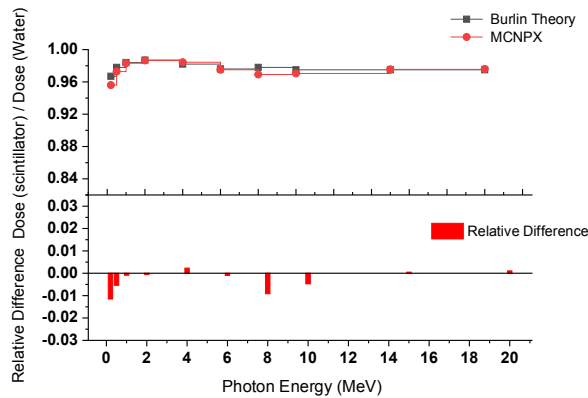
#### ۳. محاسبه دز با استفاده از تئوری حفره برلین

به منظور اندازه‌گیری دز جذب شده در یک محیط لازم است که یک وسیله حساس به پرتوها در آن محیط معرفی شود. به طور معمول این دزیمتر نباید از جنس خود محیط بوده، بلکه لازم است یک جزء اضافی برای آن محیط تلقی شود. این دزیمتر که همان وسیله حساس به پرتو است، دارای یک حفره مملو از گاز است که در اصل به این تئوری، تئوری حفره گفته می‌شود. این تئوری برای هر محیط خارجی اعم از جامد، مایع و یا گاز به کار می‌رود. براگ و گری ملاحظه کردند برای محیطی که در معرض فوتون‌ها قرار گرفته و دارای ابعاد کافی برای ایجاد تعادل الکترونی در داخل خود است، می‌توان به -عنوان یک حفره کوچک مملو از گاز (یا دزیمتر) معرفی کرد. ابعاد حفره بستگی به انرژی پرتو دارد. اگر پرتو پراثری باشد، این حفره کوچک و اگر انرژی پرتو فوتون کم باشد، حفره متوسط یا بزرگ در نظر گرفته می‌شود. نوع تئوری‌ها در اندازه این حفره‌ها خلاصه می‌شود. تئوری برلین برای حفره‌های با ابعاد متوسط در حد برد الکترون‌های ثانویه است. این تئوری برای حفره‌های بزرگ برای پرتوهای غیرمستقیم یون‌ساز نیز در نظر گرفته می‌شود. رابطه‌ای که برلین براساس ابعاد حفره‌ها به -دست آورد، به عنوان تئوری حفره برلین معروف است. تئوری حفره برلین رابطه ۱ را برای محاسبه نسبت دز دزیمتر به دز دیواره پیشنهاد می‌دهد.

$$\frac{\overline{D}_g}{D_w} = d \cdot \overline{S}_w^g + (1-d) \left( \frac{\mu_{en}}{\rho} \right)_w^g \quad (1)$$

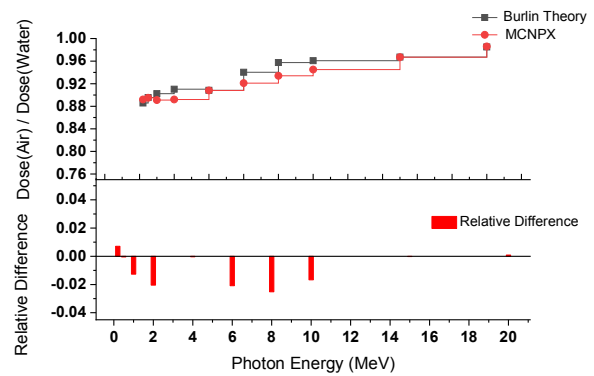
در این رابطه  $\overline{D}_g$  میانگین دز جذب شده در حفره،  $D_w$  دز جذب شده در دیواره،  $\overline{S}_w^g$  میانگین نسبت توان توقف حفره

تراپی  $^{60}\text{Co}$  مدرج شود و سپس بدون هیچ ضرایب تصحیحی به منظور اندازه‌گیری باریکه‌های چند انرژی تولیدی در شتابدهنده‌های انرژی بالا مورد استفاده قرار گیرد. هم‌خوانی خوب بین نتایج تئوری برلین و نتایج شبیه‌سازی مونت کارلوی با کد MCNPX نشان می‌دهد که اندازه متوسط برای دزیمترهای مورد مطالعه مناسب است. همچنین مقایسه نتایج نشان می‌دهند که تئوری برلین می‌تواند برای بررسی توانمندی سایر دزیمترهای جدید، مشابه با اندازه دزیمترهای مورد مطالعه در این پژوهش مورد استفاده قرار گیرد.

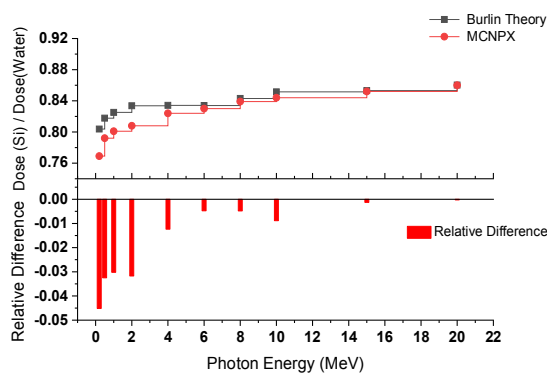


(ب)

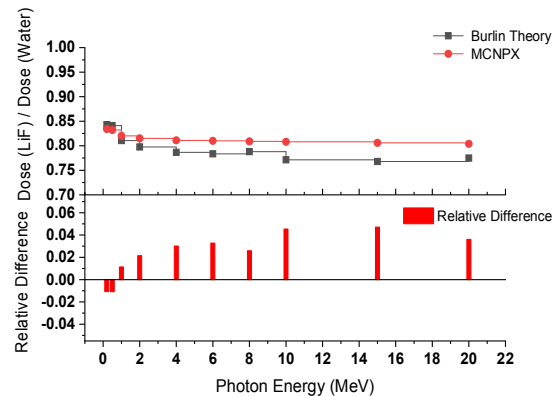
همانطور که در شکل (۲-ب) برای دزیمتر سوسوزن پلاستیک مشاهده می‌شود در انرژی‌های  $0.5\text{ MeV}$  و بیشتر، نسبت دز دزیمتر به دز دیواره تقریباً ثابت و مقدارش نزدیک به  $0.98$  است. در انرژی‌های کمتر از  $0.5\text{ MeV}$  این نسبت با کاهش انرژی، کاهش یافته به عبارتی وابسته به انرژی است، در انرژی  $0.2\text{ MeV}$  این نسبت به حدود  $0.95$  کاهش می‌یابد. نتایج نمودار شکل (۲-ب) به روشنی نشان می‌دهند که سوسوزن پلاستیک دارای پاسخ مستقل از انرژی در بازه انرژی مورد نظر دارد. بنابراین سوسوزن پلاستیک می‌تواند در باریکه تله



(الف)



(د)



(ج)

شکل (۲): مقایسه نتایج شبیه‌سازی کد MCNPX و تئوری حفره برلین (الف): نسبت دز اتاقک هوا به دز آب (ب): نسبت دز سوسوزن پلاستیک به دز آب (ج): نسبت دز لیتیوم فلوراید به دز آب (د): نسبت دز سیلیکون به دز آب برای انرژی‌های فوتون  $0.2$ ،  $0.5$ ،  $1$ ،  $2$ ،  $4$ ،  $6$ ،  $8$ ،  $10$ ،  $15$  و  $20$  مگا الکترون‌ولت.

آب، در شکل ۳ تغییرات نسبت دز در دزیمتر به دز در آب برحسب انرژی باریکه فوتون نشان داده شده است. در این

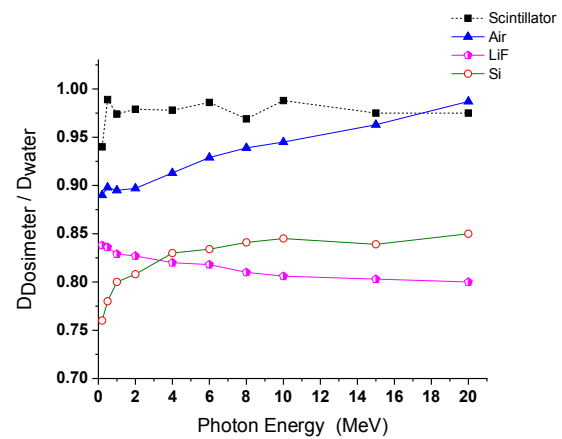
به منظور مقایسه کیفی از میزان هم‌ارزی دزیمترهای سوسوزن پلاستیک، اتاقک یونیزاسیون هوا، لیتیوم فلوراید، سیلیکون با

شکل، نتایج به طور کیفی نشان می‌دهند سوسوزن پلاستیک بیشترین هم‌ارزی و لیتیوم فلوراید و سیلیکون کمترین هم‌ارزی را با آب دارند، به عبارتی دز رسیده به بافت حاوی آب را دزیمترهای لیتیوم فلوراید و سیلیکون با خطای بیشتری ثبت می‌کنند. در شکل ۳ همانطور که قبلاً به صورت کمی بیان شد اتاقک یونیزاسیون هوا بیشترین تغییرات دز را با انرژی از خود نشان می‌دهد و حداقل ثبات و پایداری دز را در گستره‌ی انرژی مورد نظر نشان می‌دهد. در این شکل دزیمتر سوسوزن پلاستیک بیشترین هم‌ارزی و ثبات و پایداری در اندازه‌گیری دز را برای انرژی‌های فوتون نشان می‌دهد.

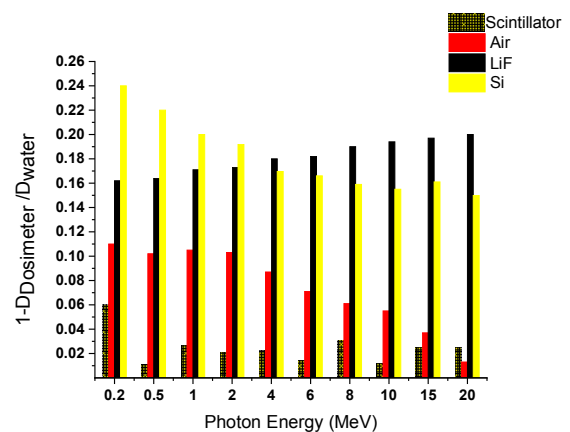
بررسی‌های کمی در شکل‌های ۳ و ۴ نشان می‌دهند در بازه‌ی انرژی مورد نظر پاسخ سوسوزن پلاستیک در انرژی‌های کمتر از ۰/۵ MeV، لیتیوم فلوراید و سیلیکون در انرژی‌های بیشتر از ۲ MeV تقریباً مستقل از انرژی است، در حالی که پاسخ دزیمتر اتاقک یونیزاسیون هوا در تمام بازه‌ی انرژی وابسته به انرژی است. برای سوسوزن پلاستیک حداقل هم‌ارزی با آب در انرژی‌های کمتر از ۰/۵ MeV، به طور متوسط ۹۶ درصد و در سایر بازه‌ی انرژی به طور متوسط در حدود ۹۸ درصد است. برای دزیمترهای مورد مطالعه دزیمتر سیلیکون در انرژی ۰/۲ MeV با مقدار ۷۵ درصد کمترین هم‌ارزی با آب را دارد. در انرژی‌های بیشتر از ۳/۲ MeV دزیمتر لیتیوم فلوراید با مقدار میانگین حدود ۸۰ درصد کمترین هم‌ارزی با آب را دارد.

## ۵. نتیجه‌گیری

با استفاده از کد مونت کارلوی MCNPX و تئوری حفره برلین وابستگی دز به انرژی باریکه‌های فوتون درمانی و هم‌ارزی با آب برای دزیمترهای پرکاربرد بررسی شد. مطالعات نشان می‌دهند که برای اتاقک یونیزاسیون هوا نسبت دز به دز آب به طور خطی با انرژی فوتون تغییر می‌کند و بیشترین تغییرات را در بازه‌ی انرژی ۰/۲ تا ۲۰ مگا الکترون‌ولت، در میان دزیمترها از خود نشان می‌دهد. دزیمتر لیتیوم فلوراید به طور میانگین حداقل هم‌ارزی با آب را در میان دزیمترهای مورد بررسی در بازه‌ی انرژی مورد نظر از خود نشان می‌دهد. این دزیمتر همانند پاسخ دزیمتر سیلیکون به جز در انرژی‌های کمتر از ۲ MeV تقریباً مستقل از انرژی است. پاسخ دزیمتر سوسوزن پلاستیک تقریباً در تمام بازه‌ی انرژی مستقل از انرژی است و بیشترین هم‌ارزی را با آب دارد. بنابراین یک سوسوزن پلاستیک را می‌توان در بازه‌ی انرژی بیشتر از ۰/۵ MeV مدرج کرد و بدون هیچ تصحیح انرژی در یک



شکل (۳): نتایج شبیه‌سازی نسبت دز برای دزیمترهای سوسوزن پلاستیک، اتاقک یونیزاسیون هوا، لیتیوم فلوراید، سیلیکون به دز آب برحسب انرژی فوتون با استفاده از کد MCNPX.



شکل (۴): میزان اختلاف نسبی دز دزیمترهای سوسوزن پلاستیک، اتاقک یونیزاسیون هوا، لیتیوم فلوراید و سیلیکون به دز آب برحسب انرژی فوتون.

و باریکه‌های الکترونی در محدوده‌ی انرژی مگاالکترون‌ولت را اندازه‌گیری کند. هم‌خوانی خوب بین نتایج مونت‌کارلو و تئوری برلین، نشان می‌دهد تئوری برلین می‌تواند به‌طور قابل اعتمادی درحوزه‌ی پژوهش انجام شده، مورد استفاده قرار گیرد.

محدوده‌ی مگاالکترون‌ولت استفاده نمود. سوسوزن پلاستیک علاوه بر پاسخ مستقل از انرژی، ویژگی‌های دزیمتری با ارزشی از قبیل: تکرارپذیری نتایج، پاسخ خطی به دز، پاسخ مستقل از تغییرات دما و مقاوم در برابر آسیب تابش را دارا است. این سوسوزن می‌تواند به‌طور دقیقی دز عمقی برای پرتوهای ایکس

## ۶. مراجع

- [1] J.C. Roeske, B. Aydogan, M. Bardies and J.L. Humm. Small-scale dosimetry: challenges and future directions, *Semin Nucl Med.* 38 (2008) 367–83.
- [2] A. Stenvall, E. Larsson, SE. Strand and BA. Jönsson. A small-scale anatomical dosimetry model of the liver, *Physics in Medicine & Biology.* 59 (2014) 3353–3357.
- [3] A.S. Beddar, K.J. Kinsella, A. Ikhlef and C.H. Sibata. A miniature scintillator-fiber-optic-PMT detector system for the dosimetry of small fields in stereotactic radiosurgery, *IEEE Transactions on Nuclear Science.* 48 (2001) 924–928.
- [4] D. Duggan, and C. Coffey. Small photon field dosimetry for stereotactic radiosurgery, *Medical dosimetry.* 23 (1998) 153–159.
- [5] A.S. Beddar. Plastic scintillation dosimetry and its application to radiotherapy, *Radiation Measurements.* 41 (2006) S124–S133.
- [6] M. Clift, R.A. Sutton, and D.V. Webb. Water equivalence of plastic organic scintillators in megavoltage radiotherapy bremsstrahlung beams, *Physics in Medicine & Biology.* 45 (2000) 1885–1895.
- [7] M. Heydarian, P.W. Hoban and A.H. Beddoe. A comparison of dosimetry techniques in stereotactic radiosurgery, *Physics in Medicine & Biology.* 41 (1996) 93–110.
- [8] A.S. Beddar, T.R. Mackie and F.H. Attix. Water-equivalent plastic scintillation detectors for high-energy beam dosimetry: II. Properties and measurements, *Physics in Medicine & Biology.* 37 (1992) 1901–1913.
- [9] A.S. Beddar, T.M. Briere, F.A. Mourtada, O.N. Vassiliev, H.H. Liu and R. Mohan. Monte Carlo calculations of the absorbed dose and energy dependence of plastic scintillators, *Medical physics.* 32 (2005) 1265–1269.
- [10] F.H. Attix. Introduction to radiological physics and radiation dosimetry, John Wiley & Sons (2008).