شبیه‌سازی سیستم پرتودرمانی حین‌عمل INTRABEAM به همراه اپلیکاتورهای کروی توسط ابزار مونت‌کارلوی GEANT4

شمس‌آبادی، رضا[۱]؛ باغانی، حمیدرضا[۱]*؛ آزادگان، بهنام[۱]؛ مولوی، علی اصغر[۱]

[۱] گروه فیزیک، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ایران

چکیده

اشعه‌ایکس تولیدی از دستگاه INTRABEAM به همراه اپلیکاتورهای کروی با قطرهای مختلف در پرتودرمانی حین‌عمل توسط پرتوهای ایکس کم‌انرژی استفاده می‌شود. دراین کار یک مدل مونت‌کارلو از دستگاه INTRABEAM و اپلیکاتورهای کروی توسط ابزار GEANT4 شبیه‌سازی و خصوصیات دوزیمتریک مربوط به پروب لخت و اپلیکاتورهای کروی مختلف به صورت کمی مورد بررسی قرار گرفت. خصوصیات دوزیمتریک مورد بررسی شامل درصد دوز عمقی (PDD) و ناهمسانگردی بود که پس از محاسبه با داده‌های گزارش‌شده توسط شرکت سازنده (Carl Zeiss, Germany)، مقایسه شد. توافق خوبی میان PDDهای شبیه‌سازی شده و گزارش‌شده توسط شرکت سازنده وجود داشت. به‌علاوه مقادیر ناهمسانگردی‌های بدست‌آمده برای اپلیکاتورهای مختلف نیز در گستره تغییرات مجاز توصیه‌شده توسط شرکت سازنده قرار می‌گرفت. در نهایت سودمندی ابزار GEANT4 در شبیه‌سازی دستگاه INTRABEAM و اپلیکاتورهای کروی مربوطه جهت راه‌اندازی و تعیین خصوصیات دوزیمتریک آنها مورد تایید قرار گرفت.

واژه های کلیدی: *پرتودرمانی حین عمل، سیستم INTRABEAM، اپلیکاتور های کروی، خصوصیات دوزیمتری، شبیه‌سازی مونت‌کارلو*

Simulation of INTRABEAM intraoperative radiotherapy system along with spherical applicators using GEANT4 Monte Carlo toolkit

Reza Shamsabadi[1], Hamid Reza Baghani[1], Behnam Azadegan[1], Ali Asghar Mowlavi[1]

[1] *Physics Department, Hakim Sabzevari University, Shohada-e Hastei Blvd, P.O. 9617976487, Sabzevar, Iran*

Abstract

Soft X-ray emerging from INTRABEAM along with different spherical applicators diameter are employed for low energy X-ray intraoperative radiotherapy. In this work, a Monte Carlo model of INTRAMBEAM and spherical applicators was simulated by GEANT4 toolkit and dosimeteric characteristics of bare prob and deferent spherical applicators were evaluated *quantitatively. After the calculation of dosimeteric features such as percent depth dose (PDD) and anisotropy, they were compared with manufacture's reported data (Carl Zeiss, Germany). There was a good agreement between the simulated and reported PDDs by manufacture. In addition the acquired anisotropies were also within the standard recommended criteria by the manufacture. Eventually, usefulness of GEANT4 toolkit for simulation of INTRABEAM machine and its dedicated spherical applicators for commissioning and evaluation of dosimeteric characteristics, was confirmed in current study.*

***Keywords**: Intraoperative radiotherapy, INTRABEAM system,Spherical applicators, Dosimetric characteristics, Monte Carlo simulation*

PACS No. 87.52.-g, 87.66.Jj, 87.53.-j,02.70.Uu

مقدمه

سرطان پستان از جمله سرطان‌های شایع در میان زنان به شمار می‌رود که با توجه به نیاز بیش از پیش به افزایش دقت و کیفیت درمان، روش‌های درمانی مختلفی توسعه یافته‌اند[۱]. روش‌هایی مانند پرتودرمانی خارجی، براکی‌تراپی و پرتودرمانی حین‌عمل به عنوان تکنیک‌های موثر در درمان سرطان پستان معرفی شده‌اند[۲،۳]. در دو دهه اخیر پرتودرمانی حین‌عمل جراحی (IORT) به عنوان یکی از شیوه‌های جدید و موثر برای درمـان بیمـاران مبتلا به سرطان پستان استفاده می‌شود. این روش درمانی را می‌توان به دو دسته تقسیم‌بندی کرد: ۱- پرتودهی حین‌عمل جراحی با الکترون(IOERT) ۲- پرتودهی با اشعه‌ایکس کم‌انرژی. در صورت استفاده از اشعه ایکس کم‌انرژی که به روش پرتودرمانی حین‌عمل با پرتو ایکس کم‌انرژی

این مقاله درصورت قابل دسترس بودن در وبگاه psi.ir معتبر است

(low kV X-ray) مشهور است، از یک ابزار کوچک برای تولید پرتوایکس و تابش‌دهی استفاده می‌شود. یکی از جدیدترین سیستم-های معرفی‌شده برای این کار، دستگاه INTRABEAM می‌باشد که توسط شرکت Carl Zeiss ساخته شده‌است. با معرفی اپلیکاتورهای کروی‌شکل امکان استفاده از این دستگاه برای درمان سرطان پستان نیز امکان‌پذیر می‌گردد[٤].

تابش‌دهی با پرتوایکس کم‌انرژی بخشی از یک درمان ترکیبی محسوب می‌شود که بعد از جراحی تومور، برای از بین بردن سلول-های سرطانی باقی‌مانده به‌کار می‌رود. برای این منظور، چشمه پرتو-ایکس درون اپلیکاتور قرار گرفته و بستر تومور به صورت همسانگرد تابش‌دهی می‌شود. میزان دوز تجویزی در این روش حدود ۲۰ Gy می‌باشد که در سطح اپلیکاتور تجویز می‌گردد[٥].

به دلیل ماهیت کم‌انرژی پرتوهای ایکس مورد استفاده در این روش، دوزیمتری دستگاه INTRABEAM و اپلیکاتورهای مربوطه از طریق دوزیمتری عملی کاری سخت و زمانبر می‌باشد. جهت غلبه بر این مشکلات می‌توان از شبیه‌سازی مونت‌کارلو که یک روش قدرتمند و قابل‌اعتماد برای شبیه‌سازی سیستم‌های درمانی و تعیین خصوصیات دوزیمتریک آنها می‌باشد، کمک گرفت. در این پژوهش از ابزار شبیه-سازی GEANT4 برای مدل‌سازی دقیق سیستم INTRABEAM و اپلیکاتورهای کروی مربوطه و تعیین خصوصیات دوزیمتریک آنها استفاده شد.

مواد و روش‌ها

سیستم INTRABEAM شامل یک چشمه پرتوایکس(پروب) بوده که از یک استوانه خلا به طول ۱۰ سانتی‌متر و شعاع ۱/٦ سانتی‌متر ساخته شده‌است. در انتهای استوانه الکترون‌ها با لایه نازکی از طلا به ضخامت ۰/۵ میکرومتر برخورد و اشعه‌ایکس توسط دو فرآیند تابش ترمزی و تابش اختصاصی به صورت همسانگرد تولید می‌شود. پروب اشعه‌ایکس قادر به تولید پرتوایکس کم‌انرژی ۳۰، ٤۰ و ۵۰ kV می-باشد. با این وجود تنها از انرژی ۵۰ kV برای درمان استفاده می‌شود. جهت سازگاری پروب با بافت بدن، قسمت خارجی آن توسط لایه نازکی از نیترات کروم اندود شده‌است[٦]. سیستم INTRABEAM شامل تعدادی اپلیکاتور کروی با قطرهای مختلف می‌باشد که برای پرتودهی پستان مورداستفاده قرار می‌گیرند.

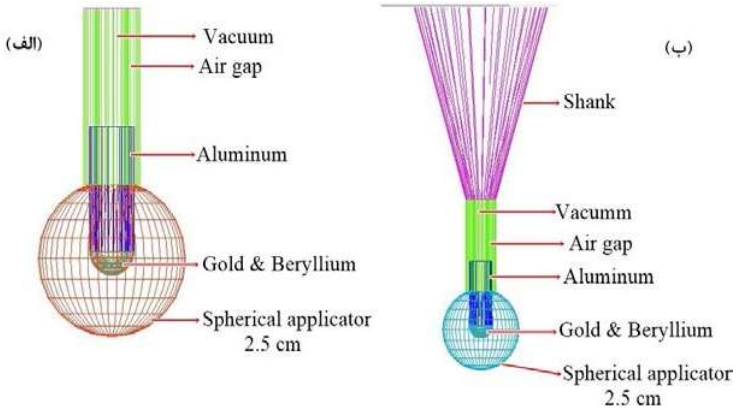
هر اپلیکاتور کروی شامل یک شانک و یک قسمت کروی است . اپلیکاتورهای مورد استفاده از جنس پلی‌اترمید بوده و قطر آنها از ۱/۵ تا ۵ سانتی‌متر با گام‌های ۰/۵ سانتی‌متر قابل‌تغییر است[۷].

الف: شبیه‌سازی مونت‌کارلو:

GEANT4 یک ابزار شبیه‌سازی مونت‌کارلو بوده که قادر به ترابرد ذرات و برهمکنش‌های وابسته به آنها در میان مواد می‌باشد. با توجه به قابلیت ترابرد ذرات در محدوده انرژی پایین، درحدود چند الکترون‌ولت، GEANT4 یکی از ابزارهای مناسب شبیه‌سازی در حوزه مطالعات پزشکی در انرژی‌های پایین محسوب می‌شود[۸]. در این پژوهش از نسخه ٤.۱۰.۱ جهت شبیه‌سازی سیستم INTRABEAM و اپلیکاتورهای کروی مربوطه استفاده شد.

ابتدا پروب اشعه‌ایکس شامل استوانه خلا جهت حرکت الکترون، لایه نازک طلا و پنجره خروجی بریلیمی با توجه به مفهوم هندسه توپر در ابزار GEANT4 شبیه‌سازی شدند. چشمه الکترون به‌صورت نقطه‌ای و با انرژی ۵۰ keV تعریف گردید که فاصله آن تا نوک پروب برابر ۸ سانتی‌متر بود. الکترون‌های ترابرد شده در داخل پروب خلا با برخورد به هدف طلا در انتهای پروب از طریق فرآیند تابش‌ترمزی و ایکس مشخصه باعث تولید پرتوهای ایکس می‌شوند. شبیه‌سازی اپلیکاتورهای مختلف این سیستم نیز طی دو مرحله شامل شبیه‌سازی شانک و شبیه‌سازی قسمت کروی اپلیکاتورهای با قطر مختلف صورت‌گرفت.

برای ارزیابی خصوصیات دوزیمتریک سیستم مدل‌سازی شده از فیزیک G4EmLivermorePhysics استفاده شد که قادر به ترابرد ذرات از انرژی۲۵۰eV تا انرژی۱۰۰MeV می‌باشد. لازم به ذکر است که تعداد ذرات ترابرد شده در هر شبیه‌سازی برابر ۱۰۰ میلیون ذره و خطای آماری وابسته به نتایج حاصل در تمام موارد کمتر از ۲٪ بود. انرژی قطع در ترابرد کلیه ذرات نیز برابر ۱میکرومتر در نظر گرفته شد. شکل(۱) نمایی سه بعدی از پروب اشعه‌ایکس شبیه‌سازی شده در پژوهش حاضر به همراه اپلیکاتور۲/۵ سانتی‌متری را نشان می‌دهد.



شکل(۱) طرحواره‌ای ازپروب اشعه‌ایکس شبیه‌سازی شده به همراه اپلیکاتور۲/۵ سانتی‌متری (الف) بدون شانک (ب) همراه با شانک.

این مقاله درصورت قابل دسترس بودن در وبگاه psi.ir معتبر است

ب: پارامترهای دوزیمتری

در این پژوهش پارامترهای دوزیمتری شامل درصد دوزعمقی در راستای محور مرکزی پروب (PDD) و ناهمسانگردی (A) برای سیستم INTRABEAM و تمامی اپلیکاتورهای کروی استخراج و موردمطالعه قرار گرفت.

PDD را می‌توان توسط رابطه زیر بیان کرد:

$$PDD\,(\%) = \frac{D_d}{D_s} \times 100 \qquad (۱)$$

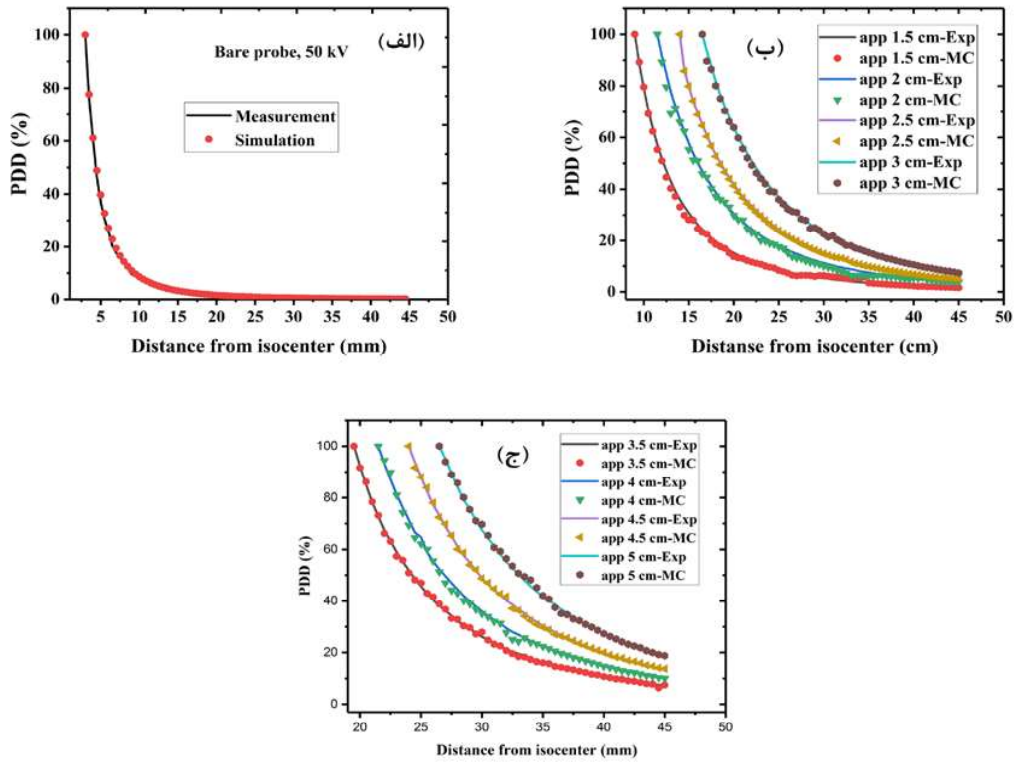
که در این رابطه D_d دوز جذب شده در عمق d و D_s دوز جذب شده در سطح پروب یا اپلیکاتورهای مختلف می‌باشد. جهت محاسبه PDD در راستای محور پروب، از سلول‌هایی با ابعاد ۰/۲۵×۰/۲۵×۰/۲۵ mm^3 استفاده شد. سپس دوز جذب شده در هر سلول محاسبه و بر دوز بدست‌آمده در سطح تقسیم و از طریق معادله ۱، PDD برای پروب لخت و اپلیکاتورهای مختلف بدست آمد. در نهایت داده‌های بدست‌آمده با PDD های گزارش‌شده توسط شرکت سازنده، که از طریق دوزیمتری یونی بدست‌آمده است، مقایسه گردید. ناهمسانگردی را می‌توان به صورت اختلاف دوز بدست‌آمده در هر نقطه در اطراف اپلیکاتور و دوز حاصل در همان نقطه در امتداد محور مرکزی پروپ لخت (عدم حضور اپلیکاتور) تعریف و آن را توسط رابطه زیر بیان نمود[۹]:

$$A\,(\%) = \frac{D(\theta) - D(\theta_0)}{D(\theta_0)} \times 100 \qquad (۲)$$

که در این رابطه $D(\theta)$ و $D(\theta_0)$ به ترتیب دوز جذب شده در نقاط واقع در فاصله یکسان از نوک پروب اشعه ایکس و در زاویای θ و صفر نسبت به محور مرکزی پروب می‌باشند.

نتایج

مقایسه میان PDD حاصل از شبیه‌سازی و اندازه‌گیری عملی برای پروب لخت و اپلیکاتورهای کروی مختلف در شکل(۲) نشان داده شده‌است.

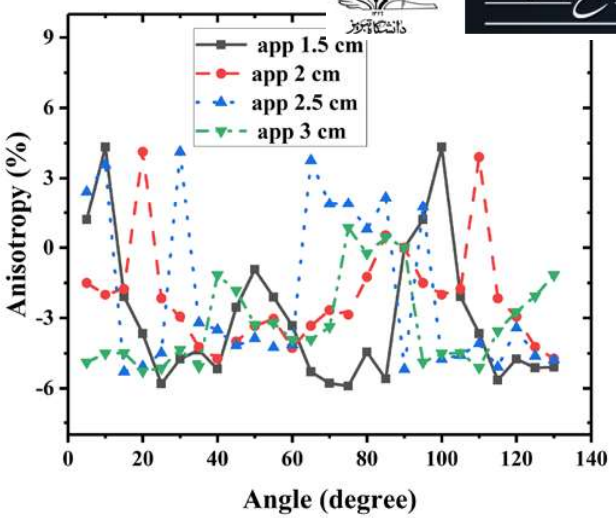


شکل(۲): مقایسه میان PDD تجربی و شبیه‌سازی برای (الف) پروب لخت (ب) اپلیکاتورهای کروی ۱/۵ تا ۳ سانتی‌متری و (ج) اپلیکاتورهای کروی ۳/۵ تا ۵ سانتی‌متری.

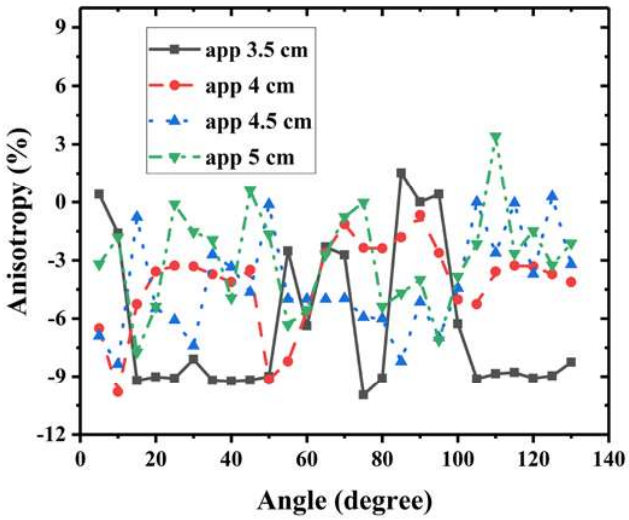
همانطور که از شکل(۲) قابل‌مشاهده است توافق خوبی بین داده های PDD حاصل از شبیه‌سازی مونت‌کارلو و اندازه‌گیری عملی برای پروب لخت و اپلیکاتورهای کروی مختلف وجود دارد، به‌طوریکه بیشترین اختلاف میان نتایج حاصل از شبیه‌سازی مونت کارلو و دوزیمتری عملی برابر ۱/۷٪ بود. با افزایش قطر اپلیکاتور، شیب افت دوز در عمق افزایش پیدا می‌یابد که می‌تواند به پالایش بیشتر اشعه‌ایکس توسط اپلیکاتورهای بزرگتر، که باعث افزایش انرژی موثر طیف اشعه‌ایکس می‌شود، نسبت داد.

نتایج حاصل از ارزیابی ناهمسانگردی در اطراف اپلیکاتورهای کروی با قطر مختلف در شکل‌های (۳) و (٤) آورده شده‌است. قابل‌ذکر است که نتایج حاصل از ناهمسانگردی در فاصله یک سانتی‌متری از سطح اپلیکاتور مربوطه محاسبه شده‌است.

این مقاله درصورت قابل دسترس بودن در وبگاه psi.ir معتبر است



شکل(۳): تغییرات ناهمسانگردی اپلیکاتورهای کروی ۱/۵ تا ۳ سانتی‌متری.



شکل(٤): تغییرات ناهمسانگردی اپلیکاتورهای کروی ۳/۵ تا ۵ سانتی‌متری.

همانطور که در شکل‌های (۳) و (٤) نشان داده‌شده است، حداکثر میزان ناهمسانگردی مشاهده‌شده برای اپلیکاتورهای موردمطالعه حدود ۱۰٪ می‌باشد. با توجه به این واقعیت می‌توان گفت که توزیع دوز در اطراف اپلیکاتورهای کروی کاملا همسانگرد نبوده و می‌تواند باعث ایجاد ناهمگنی دوز در بستر تومور گردد. با این وجود، گستره تغییرات ناهمسانگردی بدست‌آمده در کار حاضر کاملا در توافق با گستره تغییرات مجاز ناهمسانگردی برای اپلیکاتورهای مختلف، که توسط شرکت سازنده گزارش شده، می‌باشد.

علاوه بر پژوهش حاضر، Clausen و همکاران نیز به ارزیابی خصوصیات دوزیمتریک اپلیکاتورهای استوانه‌ای مورداستفاده با سیستم INTRABEAM در درمان تومورهای داخل واژن پرداخته‌اند[۱۰]. مقایسه نتایج حاصل از این کار با خروجی مربوط به اپلیکاتورهای کروی سیستم INTRABEAM که در مقاله حاضر بدست‌آمد، نشان می‌دهد که خصوصیات دوزیمتریک این دو نوع اپلیکاتور با یکدیگر متفاوت هستند که این اختلاف را می‌توان به تفاوت در شکل ساختاری و هندسه این دو نوع اپلیکاتور نسبت داد. ۱۷

نتیجه گیری

در این پژوهش به شبیه‌سازی مونت‌کارلوی سیستم درمانی INTRABEAM و اپلیکاتورهای کروی مربوطه توسط ابزار شبیه سازی GEANT4 پرداخته شد. اعتبار سیستم شبیه‌سازی شده از طریق مقایسه داده‌های دوزیمتری بدست‌آمده با نتایج تجربی گزارش‌شده، موردتایید قرارگرفت. باتوجه به اینکه ماهیت کم‌انرژی پرتوهای ایکس تولیدشده توسط این سیستم می‌تواند باعث ایجاد پیچیدگی در اندازه‌گیری پارامترهای دوزیمتری آن توسط روش‌های تجربی گردد، شبیه‌سازی سیستم INTRABEAM توسط ابزار مونت‌کارلوی GEANT4 و تعیین خصوصیات دوزیمتری حاصل از این دستگاه توسط شبیه‌سازی مونت‌کارلو می‌تواند به عنوان یک روش جایگزین برای دوزیمتری عملی این دستگاه در نظر گرفته‌شود.

مراجع

[۱] F. Bray, J. Ferlay, I. Soerjomataram,L. Siegel, Rebecca A. Torre, A. Jemal, "Global cancer statistics 2018: Globocan estimates of incidence and mortality worldwide for 36 cancers in 185 countries". CA Cancer J Clin, vol. 68, pp. 394-424, 2018.

[۲] F. A. Vicini, L. L. Kestin, G. K. Edmundson,D. A. Jaffray, J. W. Wong, V. R. Kini, P. Y. Chen, A. A. Martinez. "Dose-volume analysis for quality assurance of interstitial brachytherapy for breast cance", Int J Radiat Oncol Biol Phys, vol. 45, pp. 803-810, 1995.

[۳] Veronesi, G. Gatti, A. Luini, M. Intra, R. Orecchia,P. Borgen, M. Zelefsky, B. McCormick, V. Sacchini. "Intraoperative radiation therapy for breast cancer: Technical notes". Breast J, vol. 9, pp. 106-112, 2003.

[٤] W. T. Curry, G. R. Cosgrove, F. H. Hochberg, J. Loeffler, N. T. Zervas. "Stereotactic interstitial radiosurgery for cerebral metastases", J Neurosurg, vol. 103, pp. 630–635, 2005.

[٥] U. Kraus-Tiefenbacher, P. Biggs, J. Vaidya, D. Francescatti. "Electronic Brachytherapy/Low KV-IORT: Physics and Techniques, In: L. L. Gunderson, F.A. Calvo, C. G. Willett, L. B. Harrison (Eds.), "Intraoperative irradiation: Techniques and results". Humana Press, P.P 85-98, 2011.

[٦] F. Moradi, N. M. Ung, M. U. Khandaker, G. A. Mahdiraji, M. Saad, R. Malik, A. Z. Bustam, Z. Zaili, D. A. Bradley. "Monte Carlo skin dose simulation in intraoperative radiotherapy of breast cancer using spherical applicators", Phys Med Biol; vol. 62, pp. 1-17, 2017.

[۷] M. Ebert, B. Carruthers. "Dosimetric characteristics of a low-kV intra-operative x-ray source: Implications for use in a clinical trial for treatment of low-risk breast cancer", Med Phys,vol. 30, pp. 2424-2431, 2003.

[۸] S. Incerti, A. Ivanchenko, M. Karamitros, A. Mantero, P. Moretto, H. N. Tran, B. Mascialino, C. Champion, V. N. Ivanchenko, M. A. Bernal. "Comparison of GEANT4 very low energy cross section models with experimental data in water", Med Phys, vol. 37, pp. 4692-4708, 2010.

[۹] Carl Zeiss. INTRABEAM® Dosimetry. EN_30_010_155II, 2011.

[۱۰] S. Clausen, F. Schneider, L. Jahnke, J. Fleckenstein, J. Hesser, G. Glatting, F. Wenz F. A Monte Carlo based source model for dose calculation of endovaginal TARGIT brachytherapy with INTRABEAM and a cylindrical applicator. Z Med Phys, vol. 22, pp. 197-204, 2012.

این مقاله درصورت قابل دسترس بودن در وبگاه psi.ir معتبر است