ارزیابی صحت عملکرد نرم‌افزار اختصاصی Primo در راه‌اندازی و تعیین خصوصیات دوزیمتریک شتابدهنده‌های پرتودرمانی

باغانی، حمیدرضا (۱) * –مهدوی‌پویا، مهدی (۲)– صداقتی‌زاده، محمود (۲)

۱ دانشگاه حکیم سبزواری ، دانشکده علوم‌پایه ، گروه فیزیک

۲ دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، دانشکده فیزیک، گروه فیزیک هسته‌ای

چکیده:

راه‌اندازی و تعیین خصوصیات دوزیمتریک شتابدهنده‌های مورداستفاده در پرتودرمانی امری ضروری و اجتناب‌ناپذیر می‌باشد. با توجه به زمان‌بر بودن و نیاز به دسترسی به تجهیزات ویژه جهت تعیین خصوصیات دوزیمتری توسط اندازه‌گیری یونی، شبیه‌سازی مونت‌کارلو به عنوان یکی از روش‌های جایگزین پیشنهاد شده‌است. نرم‌افزار Primo یکی از نرم‌افزارهای اختصاصی معرفی‌شده برای این منظور است که موتور محاسباتی آن بر پایه کد مونت‌کارلوی PENELOPE پایه‌گذاری شده است. هدف از این کار ارزیابی صحت عملکرد این نرم‌افزار از طریق مقایسه منحنی‌های PDD و TDP حاصل از آن با نتایج دوزیمتری عملی متناظر برای باریکه الکترون تولید شده توسط شتابدهنده Varian2100C/D در انرژی‌های مختلف می‌باشد. نتایج حاصل نشان داد که نرم‌افزار Primo از صحت مناسبی در تعیین منحنی‌های TDP برخوردار است، درحالی که برای محاسبه دقیق‌تر منحنی‌های PDD، لازم است که در برخی از موارد پارامترهای انرژی باریکه الکترون ابتدا توسط کاربر بهینه‌سازی گردد.

کلمات کلیدی: *راه‌اندازی شتابدهنده‌های پرتودرمانی، نرم‌افزار Primo، اعتبارسنجی، دوزیمتری عملی، الکترون*

مقدمه:

کاربرد شتابدهنده‌های ذرات برای استفاده در مقاصد درمانی امروزه از توجه زیادی برخوردار است. در این راستا، شتابدهنده‌های خاصی تحت عنوان شتابدهنده‌های بالینی (Clinical LINAC) طراحی و به بازار عرضه شده‌اند که می‌توانند به طور مستقیم در بخش‌های پرتودرمانی جهت درمان گستره وسیعی از انواع سرطان‌ها مورداستفاده قرارگیرند. استفاده از هر نوع شتابدهنده بالینی ابتدا مستلزم راه‌اندازی و تعیین خصوصیات دوزیمتریک آن می‌باشد، چرا که پیاده‌سازی یک طرح درمان مناسب برای پرتودهی بیمار نیازمند در اختیار داشتن خصوصیات دوزیمتریک تابش مورداستفاده مانند منحنی‌های توزیع دوز عمقی (PDD) و پروفایل‌های دوز عرضی (TDP) در عمق‌های مختلف در یک محیط مناسب معادل بافت بدن مانند آب است.

بنابراین اولین گام در استفاده از شتابدهنده‌های پرتودرمانی، راه‌اندازی و تعیین خصوصیات دوزیمتریک آنها با استفاده از یک روش استاندارد در داخل فانتوم آب می‌باشد. معمول‌ترین روش برای تعیین خصوصیات دوزیمتریک یک شتابدهنده

تابش استفاده از دوزیمتری یونی می‌باشد. برای این‌منظور، از یک دوزیمتر اتاقک‌یونش جهت اسکن میدان تابش در داخل فانتوم‌آب استفاده می‌شود که این دوزیمتر تحت‌عنوان آشکارساز میدان (Field detector) شناخته می‌شود. برای حذف اثرات ناشی تغییرات خروجی شتابدهنده در حین‌اندازه‌گیری نیز از یک اتاقک‌یونش ثانویه تحت‌عنوان آشکارساز مرجع (Reference detector) استفاده می‌شود [۱]. علاوه‌بر این‌موارد، دسترسی به یک فانتوم‌آب اتوماتیک جهت جابجاکردن آشکارساز میدان در داخل میدان‌تابش و تجهیزاتی جهت قرائت پاسخ دوزیمتر و کنترل حرکات آن در داخل فانتوم نیز ضروری است.

متاسفانه به‌دلیل قیمت بالای تجهیزات ذکرشده، تمام مراکز پرتودرمانی به این امکانات جهت دوزیمتری یونی دسترسی ندارند. بعلاوه استفاده از روش دوزیمتری یونی زمان‌بر و نیازمند داشتن تجربه بالایی در این خصوص می‌باشد. هرچند که روش دوزیمتری‌یونی یک روش دقیق و قابل‌اعتماد در تعیین خصوصیات دوزیمتریک تابش می‌باشد، اما به‌دلیل استفاده از زمان‌های پرتودهی طولانی در حین‌اندازه‌گیری، خطر پرتوگیری از شتابدهنده نیز به طور قابل‌توجهی افزایش می‌یابد. بنابراین، استفاده از روش دوزیمتری‌یونی جهت راه‌اندازی شتابدهنده‌های بالینی نیازمند درنظرگرفتن تمهیدات حفاظتی قابل‌توجهی در حین‌کار با این شتابدهنده‌ها نیز می‌باشد. برای غلبه بر محدودیت‌های ذکرشده، روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو به عنوان یک راهکار جایگزین جهت تعیین خصوصیات دوزیمتریک شتابدهنده‌های پرتودرمانی پیشنهاد شده‌است[۲]. در این روش سر شتابدهنده درمانی و تابش تولیدشده توسط آن با استفاده از شبیه‌سازی مونت‌کارلو مدل‌سازی شده و پس از ترابرد تک‌تک ذرات شبیه‌سازی شده در داخل یک محیط مناسب، مثل فانتوم آب، پارامترهای دوزیمتری موردنظر از قبیل منحنی‌های توزیع دوز عمقی (PDD) و پروفایل‌های دوز عرضی (TDP) تعیین می‌گردد.

یکی از نرم‌افزارهای اختصاصی معرفی‌شده برای راه‌اندازی و تعیین خصوصیات دوزیمتریک شتابدهنده‌های پرتودرمانی بر پایه روش مونت‌کارلو، نرم‌افزار Primo می‌باشد که بر طبق کد مونت‌کارلوی PENELOPE توسعه یافته‌است. مطابق توصیه پروتوکل‌های TG-105 و TG-106، اعتبارسنجی و اطمینان از صحت عملکرد هر مدل مونت‌کارلوی مورداستفاده در دوزیمتری شتابدهنده‌های پرتودرمانی، امری ضروری و اجتناب‌ناپذیر می‌باشد[٤، ۳]. بنابراین هدف از این پژوهش ارزیابی صحت عملکرد نرم‌افزار اختصاصی Primo در تعیین خصوصیات دوزیمتریک باریکه الکترون شتابدهنده‌های پرتودرمانی از طریق مقایسه نتایج PDD و TDP حاصل از این نرم‌افزار با نتایج دوزیمتری یونی متناظر در داخل فانتوم آب می‌باشد.

روش کار:

نرم‌افزار Primo یک نرم‌افزار اختصاصی مبتنی بر کد مونت‌کارلوی PENELOPE جهت دوزیمتری شتابدهنده‌های مورداستفاده در پرتودرمانی می‌باشد[٦، ٥]. دسترسی به این کد رایگان بوده و از طریق مکاتبه با تیم‌سازنده در آلمان

قابل‌دسترسی می‌باشد. بعلاوه این نرم‌افزار دارای یک رابط کاربر گرافیکی (GUI) می‌باشد که کار با این نرم‌افزار را ساده می‌سازد. این نرم‌افزار شامل فایل‌های مونت‌کارلوی کامپایل‌شده مدل‌های گوناگونی از شتابدهنده‌های Varian انرژی پایین و انرژی بالا می‌باشد. بعلاوه دو مدل نسبتا دقیق از شتابدهنده‌های نسل ELEKTA که در حال بروزرسانی می‌باشند، نیز در مجموعه داده‌های این نرم‌افزار وجود دارد. قسمت‌های مختلف ساختار سر شتابدهنده شامل پنجره خلا، هدف، موازی-ساز اولیه، فیلتر مسطح‌کننده (فویل پراکنده‌ساز)، اتاقک‌های یونش، آینه، آرواره‌های متحرک، موازی‌سازهای چندتیغه‌ای در درمان با فوتون و اپلیکاتورهای مورداستفاده در درمان با الکترون در مدل‌های شبیه‌سازی شده به‌طورکامل لحاظ شده‌است. این نرم‌افزار برای استفاده نیاز به نصب نداشته و تنها از طریق اجرای فایل اجرایی primo.exe قابل‌دسترسی می‌باشد. جهت‌استفاده از این نرم‌افزار، ابتدا نوع شتابدهنده موردمطالعه و مد عملکرد آن (فوتون یا الکترون) انتخاب می‌شود. سپس انرژی اسمی باریکه موردنظر انتخاب و نرم‌افزار به صورت خودکار انرژی اولیه، پهنای انرژی اولیه، پهنای-مکانی اولیه و توزیع‌زاویه‌ای اولیه باریکه را به‌طور خودکار و با توجه به مدل شتابدهنده انتخاب شده، تعیین می‌نماید. البته کاربر نیز می‌تواند این مقادیر را به‌منظور بهینه‌سازی شبیه‌سازی انجام شده تغییر دهد. خروجی این نرم‌افزار به صورت سه فایل فضای‌فاز مجزا می‌باشد که در قسمت‌های مختلف سر شتابدهنده و فانتوم دوزیمتری تعریف‌شده در این نرم‌افزار قابل‌حصول است. فایل فضای‌فاز اول در زیر آینه شتابدهنده، فایل فضای‌فاز دوم در انتهای اپلیکاتور الکترون و فایل فضای‌فاز سوم در داخل فانتوم تعبیه‌شده در زیر سر شتابدهنده (فاصله چشمه تا سطح فانتوم (SSD) تعریف‌شده برابر ۱۰۰ سانتی‌متر است) محاسبه می‌شود. قابل‌ذکر است که برای مقاصد دوزیمتری فایل فضای‌فاز سوم باید حتما محاسبه شود، در صورتی‌که برای تعیین خصوصیات فیزیکی باریکه الکترون در داخل یک شتابدهنده می‌توان به محاسبه فایل‌های فضای‌فاز اول و دوم بسنده کرد.

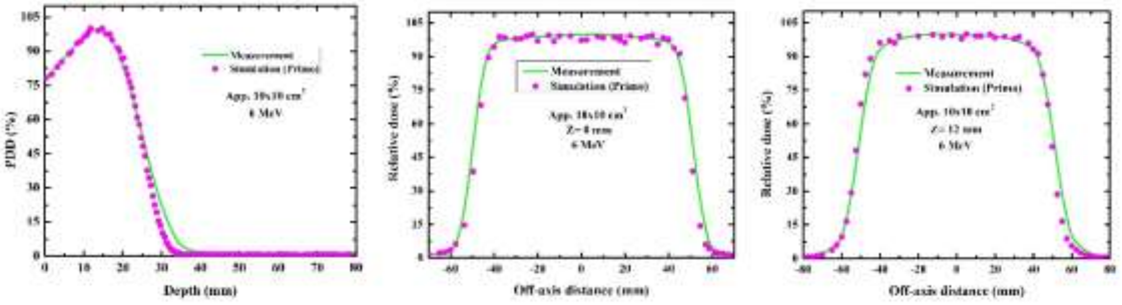
برای ارزیابی صحت عملکرد این نرم‌افزار در تعیین خصوصیات دوزیمتریک باریکه الکترون شتابدهنده‌های پرتودرمانی تجاری، شتابدهنده Varian مدل 2100C/D مدنظر قرار گرفت. سپس پارامترهای دوزیمتریک باریکه الکترون حاصل از این شتابدهنده در انرژی‌های ٦، ٩ و ١٢ MeV و به ازای اپلیکاتور مرجع $10\times10\ cm^2$ در داخل یک فانتوم آب با ابعاد $40\times40\times10\ cm^3$ محاسبه و با نتایج حاصل از دوزیمتری یونی متناظر مقایسه‌شد. پارامترهای دوزیمتری موردنظر شامل PDD و TDP در سطح فانتوم و عمق دوز بیشینه مربوط به انرژی‌های الکترون موردمطالعه بود که در داخل وکسل‌هایی مکعبی به ابعاد $0/25\times0/25\times0/15\ cm^3$ محاسبه شده‌است. برای دوزیمتری عملی از دو اتاقک یونش Semiflex (TM31010)، یکی به عنوان دوزیمتر میدان و دیگری به عنوان دوزیمترمرجع استفاده شد. تمام اندازه‌گیری‌ها در داخل یک فانتوم آب اتوماتیک MP3-M و با گام‌های ۲ میلی‌متر انجام‌پذیرفت. قابل‌ذکر است که SSD در تمام اندازه‌گیری‌های

انجام‌شده برابر ۱۰۰ سانتی‌متر درنظر گرفته‌شد. برای تحلیل و پردازش نتایج حاصل از دوزیمتری عملی از نرم‌افزار Meyphsto navigator (PTW) استفاده‌شد.

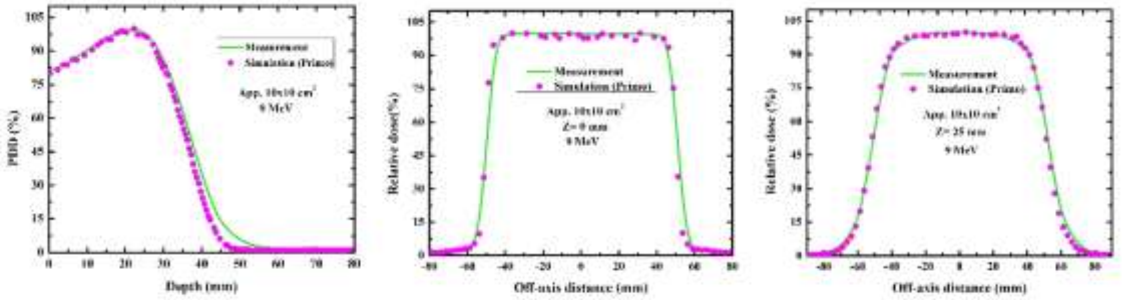
برای مقایسه نتایج حاصل از نرم‌افزار Primo و دوزیمتری عملی از تحلیل گاما با درصد اختلاف دوز(DD%) ۳٪ و فاصله تا توافق (DTA) ۳ میلی‌متر استفاده شد. تحلیل گاما در واقع تلفیقی از پارامترهای DD% و DTA می‌باشد که بر مبنای آن شاخصی به نام شاخص گاما در تمام موقعیت‌های‌مکانی و سطوح دوز موردبررسی تعیین می‌گردد. مقادیر شاخص گامای کوچکتر از یک به عنوان معیاری از توافق میان نتایج درنظر گرفته می‌شود. بعلاوه پارامترهای فیزیکی منحنی‌های PDD بدست آمده در انرژی‌های مختلف شامل درصد دوز سطح (D_s)، عمق دوز بیشینه (R_{100})، عمق دوز ۹۰٪ (R_{90}) و عمق دوز ۵۰٪ (R_{50}) استخراج و با یکدیگر مقایسه‌گردید.

نتایج:

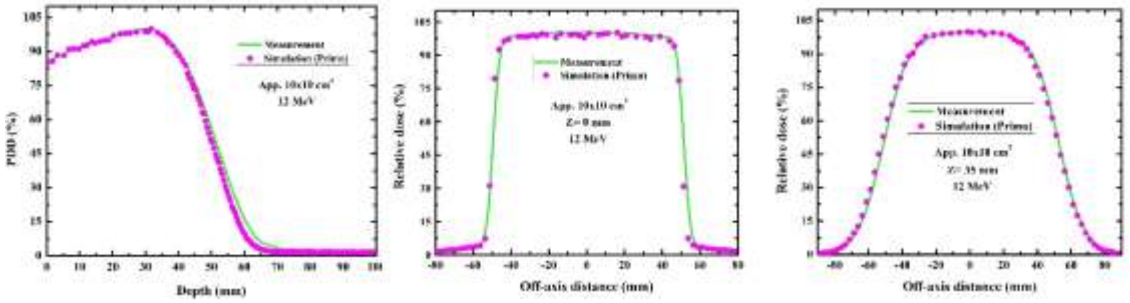
نتایج حاصل از محاسبه و اندازه‌گیری عملی منحنی‌های PDD و TDP در انرژی‌های الکترون ٦، ۹ و ۱۲ MeV، به ازای اپلیکاتور مرجع ۱۰×۱۰ cm^2 به ترتیب در شکل‌های ۱ تا ۳ نمایش داده شده است.



شکل (۱) مقایسه منحنی‌های PDD و TDP حاصل از نرم‌افزار Primo و دوزیمتری عملی در انرژی ٦ MeV.



شکل (۲) مقایسه منحنی‌های PDD و TDP حاصل از نرم‌افزار Primo و دوزیمتری عملی در انرژی ۹ MeV.



شکل (۳) مقایسه منحنی‌های PDD و TDP حاصل از نرم‌افزار Primo و دوزیمتری عملی در انرژی ۱۲ MeV.

نتایج حاصل از تحلیل‌گاما در مقایسه منحنی‌های PDD حاصل از نرم‌افزار Primo و دوزیمتری‌عملی در انرژی‌های ۶، ۹ و ۱۲ MeV نشان‌داد که مقدار شاخص‌گاما به‌ترتیب در ۷۵٪، ۸۰٪ و ۹۰٪ از عمق‌های موردمطالعه کوچکتر از یک است. از طرف دیگر، مقایسه منحنی‌های TDP در انرژی ۶ MeV و به ازای هر دو عمق موردبررسی مشخص‌کرد که مقدار شاخص‌گاما در ۹۵٪ از موارد کوچکتر از یک است. در انرژی ۹ MeV و به ازای عمق‌های موردمطالعه، مقدار شاخص‌گاما در ۹۷٪ از موارد کوچکتر از یک بود. در انرژی ۱۲ MeV و به ازای هر دو عمق موردبررسی نیز در تمام موارد مقدار شاخص‌گاما کوچکتر از یک بود.

نتایج حاصل از استخراج و مقایسه پارامترهای دوزیمتری منحنی‌های PDD مربوط به نرم‌افزار Primo و دوزیمتری عملی در انرژی‌های مختلف الکترون نیز در جدول شماره (۱) گزارش شده‌است.

جدول (۱) مقایسه پارامترهای دوزیمتری استخراج‌شده از منحنی‌های PDD حاصل از نرم افزار Primo و دوزیمتری عملی.

انرژی (MeV)	روش ارزیابی	پارامتر			
		D_s (%)	R_{100} (mm)	R_{90} (mm)	R_{50} (mm)
	اندازه‌گیری عملی	۷۸/۲	۱۵	۱۸/۸	۲۵/۵
۶	نرم‌افزار Primo	۷۸/٤	۱٤/۸	۱۹/۳	۲۵/۰
	اختلاف نسبی (٪)	۰/۳	۱/۳	۲/٦	۱/۹
	اندازه‌گیری عملی	۸۰/۷	۲۱/۰	۲۸/۸	۳۷/۳
۹	نرم‌افزار Primo	۸۰/۱	۲۲/۲	۲۸/۱	۳٦/۳
	اختلاف نسبی (٪)	۰/۷	۵/۷	۲/٤	۲/٦
	اندازه‌گیری عملی	۸۵/۷	۳۰/۰	٤۰/۱	۵۱/٤
۱۲	نرم‌افزار Primo	۸۵/۲	۳۱/۷	۳۹/۱	۵۰/۳
	اختلاف نسبی (٪)	۰/۵	۵/٦	۲/۵	۲/۱

همانطور که از نتایج گزارش شده در جدول شماره (۱) پیداست، اختلاف میان پارامترهای دوزیمتری استخراج شده در غالب موارد کمتر از ۳٪ است. تنها در دو مورد اختلاف نتایج به حدود ۵٪ می‌رسد که می‌توان آن را به تفاوت‌های موجود در منحنی‌های PDD محاسبه شده و تجربی نسبت داد.

بحث و نتیجه گیری:

در این‌کار به ارزیابی صحت عملکرد نرم‌افزار اختصاصی Primo در تعیین خصوصیات دوزیمتریک باریکه الکترون حاصل از شتابدهنده‌های پرتودرمانی پرداخته شد. برای این منظور منحنی‌های PDD و TDP محاسبه شده توسط این نرم‌افزار برای شتابدهنده Varian 2100C/D در انرژی‌های ٦، ۹ و ۱۲ MeV با نتایج عملی متناظر که توسط دوزیمتری یونی در داخل فانتوم آب اندازه‌گیری شده بودند، به طور کمی و از طریق تحلیل گاما مقایسه گردید. نتایج حاصل از مقایسه منحنی‌های PDD نشان داد که توافق نسبتا مناسبی میان نتایج حاصل از این نرم‌افزار و دوزیمتری عملی وجود دارد، هرچند که اختلاف میان نتایج در نواحی انتهایی منحنی‌های موردمطالعه افزایش می‌یابد. اختلاف‌های مشاهده‌شده در بخش انتهایی منحنی‌های PDD را می‌توان عمدتا به تفاوت‌های وجود میان طیف انرژی اولیه درنظر گرفته شده برای الکترون توسط نرم‌افزار Primo و طیف واقعی الکترون نسبت داد. در واقع مهمترین پارامتر تاثیرگذار در تغییر منحنی‌های PDD محاسبه شده در مطالعه حاضر طیف انرژی اولیه الکترون می‌باشد. قابل‌ذکر است که در این کار از مقادیر پیش‌فرض درنظر گرفته شده توسط نرم‌افزار Primo برای محاسبه منحنی‌های PDD استفاده شد. با این وجود، کاربر می‌تواند با تغییر این پارامتر (از طریق تغییر انرژی اولیه الکترون و پهنای انرژی باریکه) میزان اختلاف میان منحنی‌های PDD محاسبه شده توسط این نرم‌افزار و نتایج عملی متناظر را کاهش دهد. مقایسه نتایج حاصل از منحنی‌های TDP محاسبه شده و تجربی در انرژی‌های مختلف و به ازای هر دو عمق موردبررسی در داخل فانتوم آب نشان‌داد که توافق بسیار مطلوبی میان نتایج حاصل از نرم‌افزار Primo و دوزیمتری عملی وجود دارد. به‌طور کلی منحنی‌های TDP وابستگی چندانی به خصوصیات فیزیکی طیف انرژی اولیه درنظر گرفته شده برای باریکه الکترون ندارند. در عوض این پارامتر تابعی از توزیع مکانی و زاویه‌ای اولیه درنظر گرفته شده برای باریکه الکترون می‌باشد. با توجه به توافق مطلوب میان منحنی‌های TDP موردمطالعه می‌توان نتیجه گرفت که توزیع مکانی و زاویه‌ای اولیه پیش‌فرض درنظر گرفته شده توسط نرم‌افزار Primo در شبیه‌سازی باریکه الکترون از صحت قابل‌قبولی برخوردار است. در نهایت با توجه به نتایج بدست آمده در این کار می‌توان نتیجه گرفت که نرم‌افزار اختصاصی Primo از توانایی لازم برای راه‌اندازی و تعیین خصوصیات دوزیمتریک شتابدهنده‌های پرتودرمانی

برخوردار است، هر چند که در برخی موارد کاربر مجبور به تنظیم مجدد پارامترهای اولیه باریکه الکترون جهت بهینه‌سازی نتایج حاصل از این نرم‌افزار و دستیابی به نتایجی قابل اعتماد، مخصوصا در مورد منحنی‌های PDD، می‌باشد.

مراجع:

[1] Baghani HR, Aghamiri SMR, Mahdavi SR, Akbari ME, Mirzaei HR. Comparing the dosimetric characteristics of the electron beam from dedicated intraoperative and conventional radiotherapy accelerators. J. Appl. Clin. Med. Phys. 2015; 16: 1-11.
[2] Pena J, Franco L, Gómez F, Iglesias A, Lobato R, Mosquera J, et al. Commissioning of a medical accelerator photon beam Monte Carlo simulation using wide-field profiles. Phys. Med. Biol. 2004; 49: 4929-42.
[3] Chetty IJ, Curran B, Cygler JE, DeMarco JJ, Ezzell G, Faddegon BA, et al. Report of the AAPM Task Group No. 105: Issues associated with clinical implementation of Monte Carlo-based photon and electron external beam treatment planning. Med. Phys. 2007; 34: 4818-53.
[4] Das IJ, Cheng CW, Watts RJ, Ahnesjö A, Gibbons J, Li XA, et al. Accelerator beam data commissioning equipment and procedures: report of the TG-106 of the Therapy Physics Committee of the AAPM. Med. Phys. 2008; 35: 4186-215.
[5] Rodriguez M, Sempau J, Brualla L. PRIMO: A graphical environment for the Monte Carlo simulation of Varian and Elekta linacs. Strahlenther. Onkol. 2013; 189: 881-6.
[6] Sempau J, Badal A, Brualla L. A PENELOPE-based system for the automated Monte Carlo simulation of clinacs and voxelized geometries—application to far-from-axis fields. Med. Phys. 2011; 38: 5887–5895.