



انجمن حفاظت در برابر اشعه ایران

مقاله کنفرانسی



مجله سنجش و ایمنی پرتو، جلد ۱۱، شماره ۴، زمستان (ویژه نامه) ۱۴۰۱، صفحه ۶۵-۷۲
ششمین کنفرانس سنجش و ایمنی پرتوهای یون ساز و غیر یون ساز (مرداد ماه ۱۴۰۰)
تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۰۷/۱۴، تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۰۵/۰۹

اندازه گیری میزان دز نشت شده از TiGRT Dynamic MLC با دزیمتر دایود EDGE و فیلم رادیوکرمیک EBT^۳ و مقایسه نتایج با محاسبات کد BEAMnrc

میکنائل ملازاده^۱، احد زینالی^۱، مصطفی رباط جزی^۲ و غزاله گرایلی^{۳*}

^۱ گروه فیزیک پزشکی، دانشکده پزشکی، دانشگاه علوم پزشکی ارومیه، ارومیه، ایران.

^۲ گروه فیزیک پزشکی و علوم پرتوی، دانشکده پیراپزشکی سبزوار، سبزوار، ایران.

^۳ گروه فیزیک پزشکی و مهندسی پزشکی، دانشکده پزشکی، دانشگاه علوم پزشکی تهران، تهران، ایران.

* تهران، دانشگاه علوم پزشکی تهران، دانشکده پزشکی، گروه فیزیک پزشکی و مهندسی پزشکی، کد پستی: ۱۳۱۵۱-۱۴۱۷۶.

پست الکترونیکی: ghazalegraily8726@gmail.com

چکیده

یکی از عوامل کلیدی در ارزیابی تضمین کیفیت در درمان های رادیوتراپی پیشرفته همچون IMRT و VMAT به دست آوردن اقسام مختلف نشت های دز مربوط به MLC های مورد استفاده در این تکنیک ها است. در این مطالعه پارامترهای مختلف نشت دز از Dynamic MLC که به صورت اکسترنال زیر کلیماتور دستگاه شتاب دهنده خطی زمینس اضافه شده بود با استفاده از دزیمترهای مختلف (آشکارساز دایود و فیلم رادیوکرومیک) اندازه گیری و با نتایج شبیه سازی مونت کارلو مقایسه شدند. شاخص های اندازه گیری شامل نشت پرتو تابشی از فاصله هوایی مابین لیف ها (inter-leaf leakage)، میزان عبور پرتو ایکس از تک تک لیف ها (intra-leaf transmission)، متوسط نشت و نشت مربوط به محل بسته شدن لیف ها در میدان تابش کاملاً بسته (abutting air gap leakage) در انرژی ۶ MV بودند. در اندازه گیری شاخص های مختلف میزان دز نشت شده از TiGRT Dynamic MLC توافق خوبی ما بین داده های اندازه گیری شده و نتایج شبیه سازی به دست آمد. مطابق پروتکل TG-۵۰ میانگین نشت interleaf و عبور intraleaf بایستی کم تر از ۲٪ باشد؛ و نتایج مطالعه ما نشان داد که پارامترهای نشت به دست آمده از این نوع MLC با پروتکل های جهانی توافق دارند.

کلیدواژگان: نشت MLC، کد EGSnrc، فیلم EBT^۳، دزیمتر دایود EDGE، تضمین کیفیت MLC.

۱. مقدمه

رادیوتراپی هم چون IMRT^۲ یا VMAT^۳ استفاده می شود [۱]. در این تکنیک ها از MLC^۴ برای مدولاسیون شدت

امروزه برای تحویل دز تجویز شده به حجم تومور با کانفرمالیتی بالا و به منظور کمینه کردن آسیب های تشعشع به ارگان های در معرض خطر (OAR^۱) از روش های نوین

^۲ Intensity-Modulated Radiation Therapy

^۳ Volumetric Modulated Arc Therapy

^۴ Multi-leaf collimator

^۱ Organ at Risk

۲. مواد و روش‌ها

۱.۲. مولتی لیف کلیماتور داینامیک TiGRT

مولتی لیف کلیماتور داینامیک TiGRT نوع H دارای ۵۱ جفت لیف (۱۰۲ لیف) است. لیف‌ها با آرایش خاصی با ۳ نوع ضخامت مختلف در دو راستای محور X قرار گرفته‌اند به طوری که کم‌ترین ضخامت لیف در قسمت مرکزی $1/6 \text{ mm}$ می‌باشد. ماکزیمم فیلد سایز ایجاد شده به وسیله این نوع MLCها بسته به نوع شتاب‌دهنده‌ای که سیستم MLC بر روی آن نصب شده است از $30 \times 15 \text{ cm}^2$ تا $30 \times 30 \text{ cm}^2$ (در محل آیزوستتر) متغیر است. این سیستم وزنی حدود 65 kg دارد و ماکزیمم سرعت هر لیف 50 mm/s است. عدم قطعیت در موقعیت مکانی هر لیف کم‌تر از $0/5 \text{ mm}$ بوده و با توجه به بروشور شرکت سازنده میزان نشت inter-leaf کم‌تر از ۲٪ می‌باشد. همچنین قابلیت اجرای انواع مختلفی از تکنیک‌های درمان رادیوتراپی از جمله کانفرمال، IMRT استاتیک و داینامیک، VMAT و استریوتاکتیک رادیوسرجری را داراست.

برای تعیین هر یک از شاخص‌های مختلف نشت MLC از پیکربندی ویژه‌ای از لیف‌ها استفاده شد. به منظور اندازه‌گیری نشتی^۳ و عبور^۴ MLCها که به ترتیب برای پارامترهای inter leaf leakage و intra leaf leakage به کار می‌رود از حالت Blocked MLC استفاده شد (شکل ۱). در این مد میدان استاندارد $10 \times 10 \text{ cm}^2$ به وسیله فک‌های X و Y ایجاد شد و سپس لیف‌های MLC در یک سمت کلیماتورهای ثانویه به حالت بسته شده درآمدند طوری که محل بسته شدن لیف‌ها خارج از میدان استاندارد بود. در این حالت راستای اسکن یا خوانش در راستای محور Yها و عمود بر محور تابش بود. طبق شکل ۱ برای اندازه‌گیری نشت مربوط

پرتوهای درمانی جهت به دست آوردن توزیع دز پیچیده با گرادیان‌های دز بالا استفاده می‌شود. بنابراین در رادیوتراپی، MLCها به عنوان یک ابزار پایه‌ای به شمار می‌روند و نقش به‌سزایی در بالا بردن کیفیت درمان رادیوتراپی بیماران ایفا می‌کنند. در سه دهه اخیر، انواع مختلفی از MLCها توسط شرکت‌های سازنده توسعه داده شده و به صورت روتین در کلینک‌های رادیوتراپی مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۲،۳].

این MLCها از نظر تعداد، طراحی، مواد سازنده و پهنای لیف‌ها متفاوت از هم هستند. از این رو ویژگی‌های دزیمتریک لیف‌ها متأثر از ویژگی‌های فیزیکی آن‌ها خواهد بود. این مشخصه‌ها با استفاده از انواع مختلفی از دزیمترها قابل اندازه‌گیری هستند.

علاوه بر این، تکنیک‌های شبیه‌سازی مونت کارلو (MC^1) نیز برای تعیین مشخصه‌های MLC مورد استفاده قرار می‌گیرند [۴،۵]. روش‌های مختلفی برای ارزیابی سه بعدی تضمین کیفیت (QA^2) در درمان‌های IMRT و VMAT استفاده می‌شود [۶،۷] اما باید در نظر داشت که از مهم‌ترین پارامترها در تضمین کیفیت چنین تکنیک‌هایی تعیین خصوصیات دزیمتریک MLCها است [۸].

در این مطالعه ویژگی‌های دزیمتریک DMLC اکسترنال شرکت LinaTech آمریکا نوع H نصب شده بر هد دستگاه شتاب‌دهنده زیمنس پرایموس 6 MV با استفاده از دزیمتر دایوید EDGE و فیلم رادیوکرومیک EBT3 اندازه‌گیری و با نتایج شبیه‌سازی مونت کارلو مقایسه شدند. این شاخص‌ها شامل نشت MLC (inter-intra leaf leakage) و نشت مربوط به Abutting air gap بودند.

³ Leakage

⁴ Transmission

¹ Monte Carlo

² Quality assurance

شد. مقدار تابش لازم برای تهیه پروفایل‌ها حدود 800 MU^1 بود.

۳.۲. دزیمتری با فیلم EBT3

فیلم‌های گاف کرومیک به دلیل قابلیت‌های ویژه‌ای که دارند ابزاری مناسب برای تضمین کیفیت در IMRT توصیه شده‌اند [۸]. از جمله ویژگی‌های این فیلم‌ها می‌توان به قدرت تفکیک فضایی بالا، امکان استفاده در گستره وسیعی از تابش‌ها و عدم وابستگی به انرژی اشاره کرد.

در این مطالعه برای اکتساب پروفایل‌های inline و crossline در حالت‌های Blocked/Closed MLC جایگذاری فیلم‌های رادیوکرومیک در عمق ۵ cm (100 cm SSD) در داخل فانتوم آب جامد از جنس PMMA استفاده شد. برای تامین شرایط پس‌پراکنی 15 cm^2 ضخامت در زیر فیلم در نظر گرفته شد [۹].

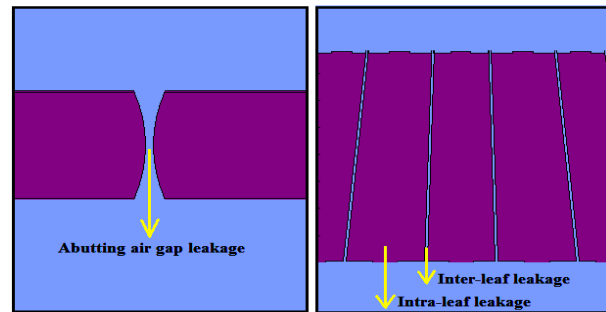
مقادیر 12000 MU و 1000 MU به ترتیب در حالت‌های Blocked MLC و Closed MLC به فیلم‌ها تابش شد (شکل ۲). طبق پروتکل TG-۵۵ [۱۰] فیلم‌ها بعد از گذشت ۴۸ ساعت از پرتودهی در مد RGB در با ۱ اسکنر Microtek با رزولوشن 127 dpi اسکن شدند.

برای به‌دست آوردن دانسیته اپتیکی خالص (netOD) فیلم‌ها از رابطه زیر استفاده شد:

$$\text{netOD} = -\log_{10} \frac{PV_{\text{exp}}}{PV_{\text{blank}}} \quad (1)$$

که در آن PV_{exp} و PV_{blank} به ترتیب مقادیر پیکسل فیلم تابش دیده و تابش ندیده هستند. علاوه بر این، جهت استخراج منحنی کالیبراسیون 20 سطح دز مختلف از صفر تا 2000 cGy با فواصل دز 50 cGy به تکه‌های فیلم $5 \times 5 \text{ cm}^2$

به Abutting air gap از حالت Closed MLC استفاده شد بدین نحو که MLC‌ها در مرکز میدان استاندارد به حالت بسته شده پارک شده بودند ($x=0$). در این حالت راستای اسکن یا خوانش در راستای محور X‌ها بود.



شکل (۱): نشت‌های مختلف MLC.

۲.۲. دزیمتری با دایود EDGE

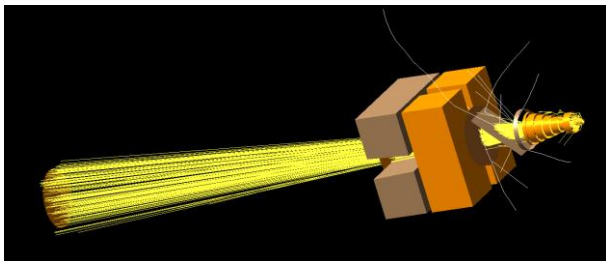
دتکتور EDGE از محصولات شرکت Sun Nuclear آمریکا و یک دایود سیلیکونی با حجم حساس $19 \times 10^{-6} \text{ cm}^3$ است که از قدرت تفکیک فضایی بسیار بالایی برخوردار است و مناسب برای اندازه‌گیری پروفایل‌های دز در نواحی با گرادیان دز شدید است. این آشکارساز برخلاف آشکارسازهای دیگر مانند Farmer و Semiflex به صورت افقی طوری که سطح بالایی آن به سمت پرتو تابشی باشد قرار می‌گیرد.

برای اندازه‌گیری پارامترهای عبور inter leaf و nشت intra leaf دایود در عمق ۵ cm داخل فانتوم آب در فاصله ۱۰۰ cm از تارگت جایگذاری شد. سپس در حالت Blocked MLC پروفایل inline (پروفایل در راستای محور Y‌ها) با رزولوشن فضایی ۱ mm اکتساب شد. همچنین جهت به‌دست آوردن نشتی MLC حاصل از Abutting air gap با همان شرایط اسکن قبلی پروفایل crossline (پروفایل در راستای محور X) برای حالت Closed MLC اندازه‌گیری

¹ Monitor unit

² Back scatter

نظر گرفته شد. اندرکنش اجباری فوتون و پراکندگی رایلی مورد استفاده قرار نگرفت. برای افزایش شمار فوتون‌های تولید شده از تارگت، کاهش زمان شبیه‌سازی و بهبود عدم قطعیت از گزینه DBS^4 استفاده شد. در همه شبیه‌سازی‌ها DBS برابر ۱۰۰۰ تنظیم گردید. شعاع میدان تقسیم برای DBS که برابر با ضلع میدان مربعی مورد نظر (در فاصله مشخصی از تارگت) در نظر گرفته می‌شود، برای ابعاد میدان $10 \times 10 \text{ cm}^2$ برابر ۱۰ انتخاب گردید. پارامتر $ESAVE$ برابر با 2 MeV تنظیم شد. سایر پارامترها بر اساس کتابچه راهنمای کد انتخاب شدند. برای اعتبارسنجی MC ، ابتدا هد شتاب‌دهنده زمینس (در غیاب MLC) اعتبارسنجی شد. در مرحله دوم MLC نیز اضافه شده و بر اساس داده‌های دزیمتری که شامل منحنی‌های PDD^5 و پروفایل‌های دز جانبی در میدان‌ها و عمق‌های مختلف بودند شبیه‌سازی‌ها اعتبارسنجی شدند. شکل ۳ تصویر سه بعدی از شتاب‌دهنده شبیه‌سازی شده را نشان می‌دهد.



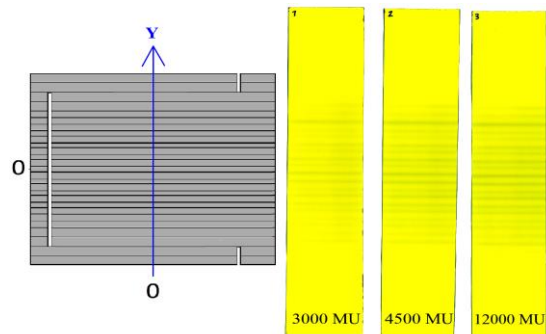
شکل (۳): نمای سه بعدی از هد شتاب‌دهنده شبیه‌سازی شده و ترسیم آن به وسیله نرم‌افزار EGS-Windows.

۵.۲. ارزیابی تضمین کیفیت سیستم طراحی در مان

MC و TiGRT

برای ارزیابی تضمین کیفیت سیستم‌های محاسباتی $TiGRT$ و MC نمونه‌ای از پلان $IMRT$ به نام C -Shape از پروتکل

تابش‌دهی شدند. کلیه اندازه‌گیری‌ها براساس پروتکل ۳۹۸-TRS [۱۱] انجام شدند.



شکل (۲): تصاویر فیلم‌های تابش‌دهی در MU های مختلف در حالت Blocked MLC.

۴.۲. شبیه‌سازی و محاسبات مونت کارلو

برای شبیه‌سازی هد شتاب‌دهنده و سیستم MLC اکسترنال نصب شده بر روی آن از کد $BEAMnrc$ استفاده شد. همچنین برای به دست آوردن توزیع دزها در فانتوم از کد $DOSXYZnrc$ استفاده شد. در مرحله اول هد شتاب‌دهنده خطی بدون سیستم MLC شبیه‌سازی شد. اجزاء تشکیل دهنده سر ماشین درمانی اعم از تارگت (هدف اشعه X)، کلیماتور اولیه و فیلتر یکنواخت کننده با استفاده از ماجول ساختاری $FLATFIL$ و قسمت‌های دیگر از جمله اتافک یونش، آینه و کلیماتور ثانویه (فک‌های X و Y) به ترتیب با ماجول‌های ساختاری^۱ به نام $MIRROR$ ، $CHAMBER$ و $JAWS$ مدل شدند. سپس MLC ها با استفاده از ماجول ساختاری $VARMLC$ شبیه‌سازی شدند. برای کاهش زمان‌های اجرا^۲ در شبیه‌سازی‌ها و افزایش بازدهی، از تکنیک‌های کاهش واریانس استفاده شد. در مورد پارامترهای مربوط به ترانسپورت ذرات، انرژی قطع کلی^۳ برای ذرات فوتونی و الکترونی به ترتیب 0.1 MeV و 0.7 MeV در

¹ Component module

² Run times

³ Global cutoff energy

⁴ Directional Bremsstrahlung Splitting (DBS)

⁵ Percentage depth dose

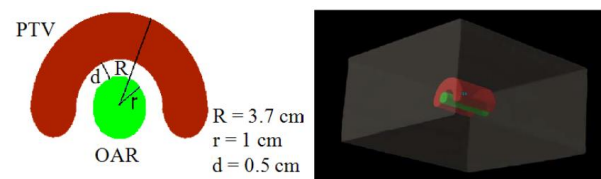
با ۲۰٪ در نظر گرفته شد. فیلم به‌عنوان توزیع دز مرجع در نظر گرفته شد.

۳. نتایج

برای استخراج منحنی کالیبراسیون فیلم از داده‌های کانال قرمز در بازه صفر تا ۱۰۰۰ cGy استفاده شد. منحنی کالیبراسیون از برازش یک چند جمله‌ای درجه سوم بر روی داده‌های تجربی به‌دست آمد. به کمک معادله انتشار خطا کلیه عدم قطعیت‌های مربوط به سیستم فیلم دزیمتری که شامل عدم قطعیت حاصل از اندازه‌گیری ($\sigma_{\text{Experimental}}$)، عدم قطعیت در برازش منحنی کالیبراسیون (σ_{Fit}) و عدم قطعیت کل (σ_{Total}) هستند محاسبه شدند. مطابق نمودار شکل ۵ ملاحظه می‌گردد که ماکزیمم عدم قطعیت کلی وابسته به سیستم فیلم دزیمتری در بازه دزهای کم‌تر از ۵۰ cGy، در حدود ۵/۸۶٪ است و در محدوده دزهای بالاتر از ۵۰ cGy این مقدار ۴/۷۱٪ می‌باشد.

با انتخاب پارامترهای مربوط به پرتو الکترون فرودی بر تارگت برابر با ۶/۲ MeV و ۰/۰۹ mm نتایج حاصل از اعتبارسنجی شبیه‌سازی‌های انجام شده توافقی خوبی با اندازه‌گیری‌های عملی را نشان دادند. بعد از ناحیه انبوهش دز^۲ مابین منحنی‌های PDD حاصل از MC و اندازه‌گیری‌ها ماکزیمم اختلاف دز ۱/۸۴٪ به‌دست آمد. در نواحی هموار پروفایل‌ها، مقدار اختلاف دز^۳ بین نتایج MC و اندازه‌گیری‌های عملی برابر با ۱/۹۵٪ برآورد گردید و برای کلیه ابعاد میدان‌های مورد مطالعه، مقدار فاصله تا توافق^۴ برای نواحی با گرادیان دز بالا کم‌تر از ۱ mm تخمین زده شد.

TG-۱۱۹ [۱۲] انتخاب شد (شکل ۴). پلان مورد نظر مطابق ضوابط و معیارهای تعریف شده در صفحه ۱۳ پروتکل در حالت IMRT استاتیک و در نسخه ساده‌تر^۱ بر روی فانتوم همگن آب جامد در سیستم محاسباتی TiGRT (با الگوریتم point kernel) طرح‌ریزی و شبیه‌سازی شد. مطابق پروتکل تومور بایستی دزی برابر با ۵۰۰۰ cGy دریافت کند اما به دلیل آن‌که دزهای بالا خارج از محدوده مفید فیلم‌های رادیوکرومیک هستند، دزهای تجویزی با فاکتوری برابر با ۱۰ مرتبه کم‌تر در نظر گرفته شدند. بدین ترتیب ۵۰۰ cGy به تومور تجویز شد. در اندازه‌گیری‌های عملی قطعه‌ای از فیلم رادیوکرومیک EBT2 داخل فانتوم و در قسمت مرکزی ناحیه PTV جایگذاری شد. بعد از اتمام طراحی درمان، کلیه سگمنت‌های پلان IMRT به‌همراه وزن پرتوهای تابش شده از هر سگمنت (MUها) با کد مونت کارلو شبیه‌سازی شدند.



شکل (۴): مشخصات ساختارهای PTV و OAR طبق TG-۱۱۹.

تعداد ذرات تابشی بر روی فانتوم به اندازه‌ای بود که عدم قطعیت در MC کم‌تر از ۱٪ (۱ SD) به‌دست آمد. در شبیه‌سازی‌ها، طراحی درمان و فیلم دزیمتری قدرت تفکیک مکانی ۱ mm در نظر گرفته شد. در نهایت توزیع دز دو بعدی حاصل از MC و TiGRT با توزیع دز به‌دست آمده از فیلم EBT2 با شاخص دو بعدی گاما در معیارهای ۳ mm- و ۴ mm- ۳٪ با نرم‌افزار VeriSoft نسخه ۶/۲ آنالیز شد. در تحلیل نتایج آستانه دز بررسی مطابق شرایط کلینیکی برابر

² Build-up

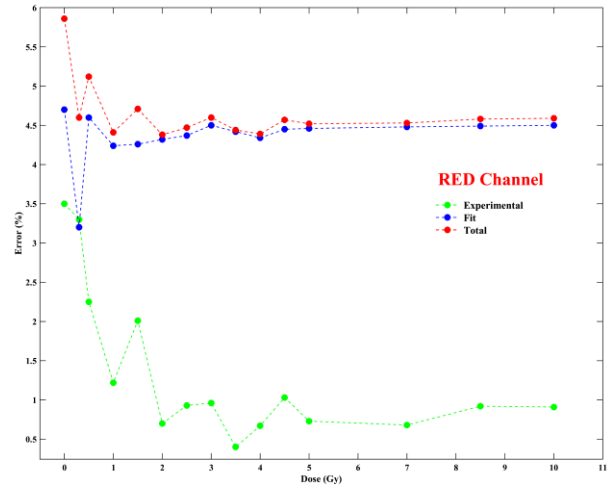
³ Dose Difference (DD)

⁴ Distance to Agreement (DTA)

¹ Easer version

ناشی از فاصله جدایی لیف‌های مجاور هم است لذا در منحنی پروفایل نشت، متوسط نشت در نقاط قله‌های پروفایل نشت به‌عنوان نشت interleaf اندازه‌گیری می‌شود. بر خلاف آن، متوسط عبور در نقاط دره‌های پروفایل نشت، به‌عنوان عبور intraleaf اندازه‌گیری می‌گردد. عبور intraleaf در واقع نشان‌دهنده میزان اشعه عبور یافته از ضخامت لیف‌های MLC در راستای پرتو تابشی (ارتفاع هر لیف) می‌باشد.

نتایج مربوط به پارامترهای مختلف نشت TiGRT MLC به‌وسیله دزیمتری‌های عملی و محاسبات MC در جدول ۱ آورده شده است. مطابق داده‌های این جدول کل متوسط نشت دز از سیستم TiGRT MLC با دایود، فیلم و MC در حدود ۱٪ است.



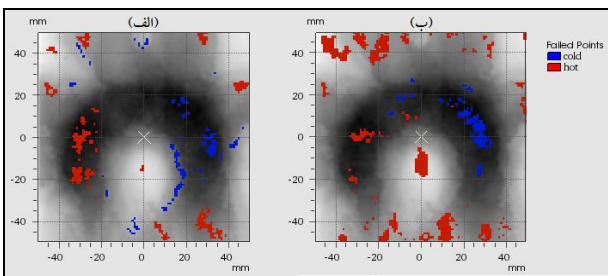
شکل (۵): منحنی‌های مربوط به تخمین عدم قطعیت کل و مؤلفه‌های تشکیل‌دهنده آن در کانال قرمز.

برای اندازه‌گیری نشت interleaf از منحنی پروفایل نشت در راستای محور Yها استفاده می‌شود از آنجایی که این نشت

جدول (۱): مقادیر مختلف دز نشت شده از TiGRT Dynamic MLC

پارامتر	دایود	فیلم	مونت کارلو
نشت inter-leaf	۱/۹±۰/۱ (٪۵)	۱/۹±۰/۱ (٪۵)	۲/۰±۰/۰
نشت intra-leaf	۱/۴±۰/۱ (٪۷/۷)	۱/۴±۰/۱ (٪۷/۷)	۱/۳±۰/۱
نشت abutting air gap	۵/۴±۱/۹ (٪۳)	۵/۳±۲/۱ (٪۰/۶)	۵/۲±۰/۱

(مقادیر داخل پرانتز درصد اختلاف در مقایسه با محاسبات MC هستند.)

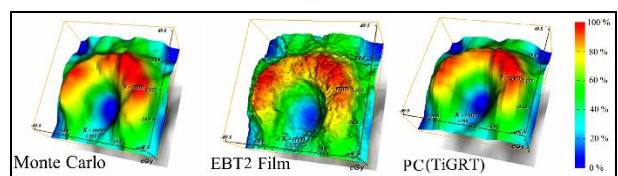


شکل (۷): نواحی عدم پذیرش شده در (الف) MC و (ب) TiGRT.

جدول (۲): درصد نرخ پذیرش گاما برای MC و الگوریتم

point kernel سیستم طراحی درمان TiGRT		پارامتر
۳-۳ mm	۴-۴ mm	
Local-Global	Local-Global	مونت کارلو
۹۱/۸-۹۵/۱	۹۷/۶-۹۹/۱	
۸۳/۸-۹۲/۱	۹۴-۹۸	TiGRT

شکل ۶ توزیع دز دو بعدی حاصل از شبیه‌سازی مونت کارلو، فیلم و سیستم طراحی درمان TiGRT را در پلان C-Shape IMRT نشان می‌دهد. در شکل ۷ نواحی عدم پذیرش که با استفاده از شاخص گاما به‌دست آمده‌اند نشان داده شده است. نتایج آزمون گاما برای معیارهای مختلف در جدول ۲ آورده شده است. در معیار ۳-۳ mm و در حالت Global توافق خوبی مابین MC و TiGRT وجود دارد اما در حالت Local درصد پذیرش نرخ گاما برای TiGRT کم‌تر از حد قابل قبول می‌باشد.



شکل (۶): نقشه‌های توزیع دز حاصل از پلان IMRT

۴. بحث و نتیجه‌گیری

تعیین صحیح و دقیق انواع دزهای نشت شده از سیستم‌های MLC و همچنین مدلینگ صحیح دیگر پارامترهای MLC در سیستم‌های محاسبه‌گر توزیع دز از عوامل بسیار مؤثر در ارتقاء سطح تضمین کیفیت درمان‌های پیشرفته رادیوتراپی به‌شمار می‌آید. اثرات کلینیکی مربوط به تغییرات در پارامترهای نشت دز از انواع مختلفی از سیستم‌های MLC توسط محققین متعددی مطالعه شده است [۱۳، ۱۴]. از این‌رو در تعیین این مشخصات بایستی از ابزارهای دقیق دزیمتری استفاده کرد و شناخت کافی از قابلیت‌ها و عدم مزایای آن‌ها داشت. از مزایای بارز دزیمتر EDGE در تعیین پارامترهای نشت دز MLC می‌توان به دسترسی سریع به جزئیات نتایج اندازه‌گیری‌ها بدون نیاز به پردازش داده‌ها و بدون نیاز به پرتودهی بالا (MU)

پایین)، با رزولوشن و دقت بالا اشاره کرد. اما این دزیمتر قادر به تهیه توزیع دز صفحه دو بعدی نیست. در مقابل، فیلم‌های گاف‌کرومیک علاوه بر برخورداری از قدرت تفکیک فضایی بالا و عدم وابستگی به انرژی، قادر به اندازه‌گیری توزیع دز دو بعدی هستند. ولی در مقابل در این روش پردازش داده‌ها زمان‌بر است.

مطابق توصیه‌های TG-۵۰ [۸] میانگین نشت interleaf و عبور intraleaf بایستی کم‌تر از ۲٪ باشد و نتایج مطالعه ما نشان داد که داده‌های به‌دست آمده با معیارهای پروتکل مذکور مطابقت دارد. علاوه بر این توافق خوبی مابین داده‌های اندازه‌گیری شده و نتایج شبیه‌سازی در تعیین شاخص‌های مختلف میزان دز نشت شده از TiGRT MLC به‌دست آمد.

۵. مراجع

1. K. Otto. Volumetric modulated arc therapy: IMRT in a single gantry arc. *Med. Phys.* 35 (1) (2008) 310-317.
2. T. Y. Lim, I. Dragojević, D. Hoffman, E. Flores-Martinez, G. Y. Kim. Characterization of the Halcyon™ multileaf collimator system. *J. Appl. Clin. Med. Phys.* 20 (4) (2019) 106-114.
3. S. Rohani, S. Mahdavi, A. Mostaar, S. Ueltzhöffer, R. Mohammadi, G. Geraily. Physical and dosimetric aspect of euromechanics add-on multileaf collimator on varian clinac 2100 C/D. *J. Bio. Phys. Eng.* 9 (1) (2019) 29-36.
4. S. Agostinelli, J. Allison, K. Amako, J. Apostolakis, H. Araujo, P. Arce, M. Asai, D. Axen, S. Banerjee, G. Barrand, F. Behner, L. Bellagamba, J. Boudreau, L. Broglia, A. Brunengo, H. Burkhardt, S. Chauvie, J. Chuma, R. Chytracsek, G. Cooperman, G. Cosmo, P. Degtyarenko, A. Dell'Acqua, G. Depaola, D. Dietrich, R. Enami, A. Feliciello, C. Ferguson, H. Fesefeldt, G. Folger, F. Foppiano, A. Forti, S. Garelli, S. Giani, R. Giannitrapani, D. Gibin, J.J. Gómez Cadenas, I. González, G. Gracia Abril, G. Greeniaus, W. Greiner, V. Grichine, A. Grossheim, S. Guatelli, P. Gumplinger, R. Hamatsu, K. Hashimoto, H. Hasui, A. Heikkinen, A. Howard, V. Ivanchenko, A. Johnson, F.W. Jones, J. Kallenbach, N. Kanaya, M. Kawabata, Y. Kawabata, M. Kawaguti, S. Kelner, P. Kent, A. Kimura, T. Kodama, R. Kokoulin, M. Kossov, H. Kurashige, E. Lamanna, T. Lampén, V. Lara, V. Lefebure, F. Lei, M. Liendl, W. Lockman, F. Longo, S. Magni, M. Maire, E. Medernach, K. Minamimoto, P. Mora de Freitas, Y. Morita, K. Murakami, M. Nagamatu, R. Nartallo, P. Nieminen, T. Nishimura, K. Ohtsubo, M. Okamura, S. O'Neale, Y. Oohata, K. Paech, J. Perl, A. Pfeiffer, M.G. Pia, F. Ranjard, A. Rybin, S. Sadilov, E. Di Salvo, G. Santin, T. Sasaki, N. Savvas, Y. Sawada, S. Scherer, S. Sei, V. Sirotenko, D. Smith, N. Starkov, H. Stoecker, J. Sulkimo, M. Takahata, S. Tanaka, E. Tcherniaev, E. Safai Tehrani, M. Tropeano, P. Truscott, H. Uno, L. Urban, P. Urban, M. Verderi, A. Walkden, W. Wander, H. Weber, J.P. Wellisch, T. Wenaus, D.C. Williams, D. Wright, T. Yamada, H. Yoshida, D. Zschesche, GEANT4—a simulation toolkit. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sec. A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 506 (3) (2003) 250-303.
5. I. Kawrakow, E. Mainegra-Hing, D. W. O. Rogers, F. Tessier, B. R. B. Walters. The EGSnrc Code System: Monte Carlo Simulation of Electron and Photon Transport. Report PIRS-701, Techreport PIRS-701, National Research Council Canada (2001–2015 [version 2018]).
6. M. Molazadeh, M. Robotjazi, G. Geraily, H. Rezaeejam, A. Zeinali, A. Shirazi. Three-

- dimensional IMRT QA of Monte Carlo and full scatter convolution algorithms based on 3D film dosimetry. *Radiat. Phys. Chem.* 186 (2021) 109528.
7. C. F. D. Zamo, M. N. Moyo. Validation of a 3D Pretreatment Quality Assurance Tool for Volumetric Modulated Arc Therapy (VMAT). *Open Access Lib. J.* 8 (6) (2021) 1-16.
 8. A. Boyer, P. Biggs, J. Galvin, E. Klein, T. LoSasso, D. Low, K. Mah, C. Yu. *Basic Applications of Multileaf Collimators*. American Association of Physicists in Medicine, Alexandria, VA, 2001.
 9. S. Devic, J. Seuntjens, E. Sham, E. B. Podgorsak, C. R. Schmidlein, A. S. Kirov, C. G. Soares. Precise radiochromic film dosimetry using a flat - bed document scanner. *Med. Phys.* 32 (7Part1) (2005) 2245-2253.
 10. A. Niroomand-Rad, C. R. Blackwell, B. M. Coursey, K. P. Gall, J. M. Galvin, W. L. McLaughlin, A. S. Meigooni, R. Nath, J. E. Rodgers, C. G. Soares. Radiochromic film dosimetry: recommendations of AAPM radiation therapy committee task group 55. *Med. Phys.* 25 (11) (1998) 2093-2115.
 11. International Atomic Energy Agency. Absorbed dose determination in external beam radiotherapy: an international code of practice for dosimetry based on standards of absorbed dose to water. IAEA TRS-398. Vienna: IAEA; 2001.
 12. G. A. Ezzell, J. W. Burmeister, N. Dogan, T. J. LoSasso, J. G. Mechalakos, D. Mihailidis, A. Molineu, J. R. Palta, C. R. Ramsey, B. J. Salter, J. Shi, P. Xia, N. J. Yue, Y. Xiao. IMRT commissioning: multiple institution planning and dosimetry comparisons, a report from AAPM Task Group 119. *Med. Phys.* 36 (11) (2009) 5359-5373.
 13. R. Topolnjak, U. Van Der Heide, G. Meijer, B. Van Asselen, C. Raaijmakers, J. Lagendijk. Influence of the linac design on intensity-modulated radiotherapy of head-and-neck plans. *Phys. Med. Bio.* 52 (1) (2006) 169.
 14. Q. J. Wu, Z. Wang, J. P. Kirkpatrick, Z. Chang, J. J. Meyer, M. Lu, C. Huntzinger, F.-F. Yin. Impact of collimator leaf width and treatment technique on stereotactic radiosurgery and radiotherapy plans for intra-and extracranial lesions. *Radiat. Oncology* 4 (1) (2009) 1-10.