

مقایسه شبیه‌سازی توزیع دز حاصل از دستگاه گامانایف مدل 4C با استفاده از گزینه‌های CT data و non CT data beamnrc کد

معصومه بخشی^۱، غزاله گرایلی^{۱*}، احمد مستعار^۲ و محمود تشکری دادگر^۳

^۱گروه فیزیک و مهندسی پزشکی، دانشکده پزشکی، دانشگاه علوم پزشکی و خدمات درمانی تهران، تهران، ایران.

^۲گروه فیزیک پزشکی و مهندسی پزشکی، دانشکده پزشکی، دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی، تهران، ایران.

^۳دانشکده مهندسی کامپیوتر، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران.

*تهران، دانشگاه علوم پزشکی و خدمات درمانی تهران، دانشکده پزشکی، گروه فیزیک و مهندسی پزشکی، کدپستی: ۱۴۸۳۷۹۴۸۸۳

پست الکترونیکی: gh-geraily@sina.tums.ac.ir

چکیده

امروزه رادیوجراحی استریوتاکتیک مبتنی بر گامانایف، برای درمان ضایعات مغزی با ابعاد کوچک بسیار توسعه یافته است. جهت بررسی دزیمتری و ارزیابی سیستم طراحی درمان گامانایف نیاز به استفاده از شبیه‌سازی مونت کارلو با استفاده از کد اختصاصی beamnrc که دارای گزینه‌های non CT data و CT data است، می‌باشد. اما با توجه به مزایا و عدم مزایای این گزینه‌ها انتخاب گزینه بهتر و صحیح‌تر کد، هدف اصلی این مطالعه می‌باشد. در این مطالعه برای اندازه‌گیری توزیع دز از دستگاه گامانایف مدل 4C، فانتوم استاندارد کروی معادل آب و نیز فیلم‌های EBT3 بهره‌گیری شد. شبیه‌سازی فانتوم کروی با هر دو گزینه کد beamnrc، CT data و non CT data انجام گرفت و نتیجه توزیع دز حاصله مقایسه گردید.

مقایسه نتایج توزیع دز شبیه‌سازی با اندازه‌گیری در هر سه راستا با دارا بودن شاخص گامای کوچک‌تر از یک نشان‌دهنده اعتبار شبیه‌سازی می‌باشد. هم‌چنین مقایسه توزیع دز حاصل از شبیه‌سازی به هر دو روش نشان‌دهنده اختلاف معنی‌داری بین منحنی‌ها نمی‌باشد. براساس نتایج بدست آمده کد beamnrc با استفاده از هر دو گزینه CT data و non CT data می‌تواند دقت یکسانی جهت محاسبه توزیع دز فراهم نماید. لذا روش non CT data با توجه به سهولت استفاده برای فانتوم‌های با شکل منظم ارجح می‌باشد.

کلیدواژگان: شبیه‌سازی، گامانایف، توزیع دز، CT data، کد beamnrc

۱. مقدمه

در محیط نیم‌کره‌ای به نام هلمت، باعث توزیع دز کروی به حجم هدف می‌شود و مهم‌ترین اهداف رادیوتراپی که عبارتند از: تحویل بیشینه دز به بافت تومور و کاهش دز رسیده به نواحی اطراف و بافت‌های سالم را، برآورده می‌سازد. [۲] در

امروزه رادیوجراحی استریوتاکتیک گامانایف به عنوان یکی از روش‌های رادیوتراپی تطبیقی نقش بسزایی در درمان ضایعات درون جمجمه‌ای با حجم کوچک (در حدود کمتر از 25 cm^3) دارد. [۱] در دستگاه گامانایف با قرارگیری ۲۰۱ منبع کبالت ۶۰

۲. مواد و روش‌ها

برای اجرای این مطالعه دو مرحله پیاده‌سازی شد. در مرحله اول تابش‌دهی فانتوم همگن و کروی آب که در کنترل کیفی دستگاه به کار گرفته می‌شود، با استفاده از فیلم EBT3 انجام شد. از آنجایی که فیلم یک دزیمتر ثانویه است و قابلیت اندازه‌گیری دز جذبی مطلق را ندارد، برای مشخص کردن پاسخ آن‌ها به یک دز مشخص باید کالیبراسیون صورت پذیرد. در مرحله دوم هد دستگاه گامانایف مدل C 4 با استفاده از کد BEAMnrc و DOSXYZnrc شبیه‌سازی شد. فانتوم همگن کروی نیز با هر دو روش با و بدون تصاویر سی تی در کد DOSXYZnrc تعریف شد.

۲.۱. کالیبراسیون فیلم EBT3 و تابش‌دهی فانتوم آب

ابتدا به منظور اندازه‌گیری خروجی دستگاه میزان تابش زمینه و نشتی دستگاه با اتاقک یونش اندازه گرفته شد و سپس اتاقک یونش در کاست مخصوص و بین دو نیم‌کره قرار داده شد و فانتوم کروی در داخل دستگاه بسته شد. بر طبق دستورالعمل گامانایف مدل C4 جهت تابش از کولیماتور ۱۸mm استفاده شد. [۶] پس از تابش و با داشتن ضرایب مربوطه مانند ضرایب تصحیح فشار و دما و همچنین کم کردن میزان نشتی دستگاه خروجی آن بدست آمد.

فیلم‌های بریده شده در ابعاد ۵×۵ سانتی‌متری در کاست مخصوص قرار دادن فیلم جایگذاری شد. در شکل ۱ کاست به همراه فیلم EBT3 بریده شده مشاهده می‌شود. پس از قرار دادن کاست داخل فانتوم و گرفتن تصاویر سی تی به منظور انتقال به سیستم طراحی درمان، فانتوم داخل دستگاه قرار گرفت. همانند تابش‌دهی اتاقک یونش و بر طبق دستورالعمل دستگاه، از کولیماتور ۱۸ mm استفاده شد. تابش‌دهی فیلم‌ها در دزهای ۰ تا ۴۰ گری در فواصل منظمی صورت گرفت. با داشتن خروجی دستگاه و میزان دز لازم، زمان تابش

درمان‌های گامانایف از سیستم طراحی درمان Gamma Plan Leksell استفاده می‌شود. این سیستم محیط سر را همگن (فانتوم آب معادل بافت) در نظر می‌گیرد [۳].

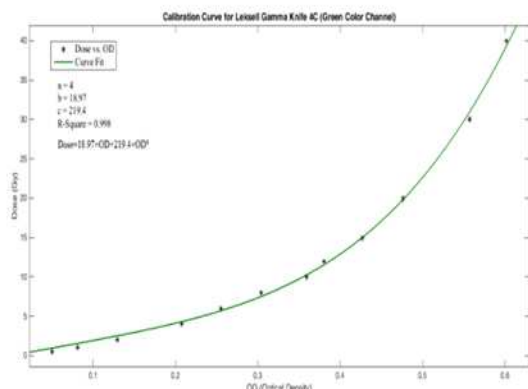
با وجود پیشرفت‌های حاصل از تکنولوژی کامپیوتری، روش‌های محاسبه مونت‌کارلو به سیستم طراحی درمان راه یافته‌اند. شبیه‌سازی مونت‌کارلو دقیق‌ترین روش محاسبه دز در پرتودرمانی است زیرا تمام برهم‌کنش‌های محتمل از ابتدا تا انتهای ناحیه مورد نظر را در محاسبه دز لحاظ کرده و همچنین براساس قوانین مکانیک کوانتومی نوع برهم‌کنش ذرات از قوانین احتمال تبعیت می‌کند. از طرفی وجود محدودیت‌های اندازه‌گیری به روش دزیمتری از قبیل محدود و حساس بودن فضای مورد مطالعه، نیاز به دقت مکانی بالا و همچنین حجیم بودن وسایل اندازه‌گیری و آشکارسازها برای ارزیابی میزان دز رسیده به ناحیه کوچکی همانند تومورها از دیگر دلایل بهره‌گیری از روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو می‌باشد. [۴] یکی از پرکاربردترین کدهایی که در پرتودرمانی استفاده می‌شود کد EGSnrc و زیر مجموعه‌های آن از جمله BEAMnrc، DOSXYZnrc و CTCREATE می‌باشد. [۵]

در این مطالعه سعی شده است، علاوه بر شبیه‌سازی بخش‌های مختلف سیستم گامانایف به روش مونت‌کارلو و بررسی پارامترهای توزیع دز در ناحیه ایزوستتر در فانتوم آب، به ارزیابی توزیع دز به دو روش تعریف از طریق طراحی هندسی (Non_CT data input) و یا با استفاده از تصاویر سی تی فانتوم همگن کروی (Phantom create from CT data) در کد DOSXYZnrc پرداخته شود. لازم به ذکر است تا کنون هیچ مطالعه‌ای در خصوص مقایسه این دو روش و تاثیر آن بر توزیع دز حاصل انجام نشده است و با توجه به مزایا و معایب هر یک از این روش‌ها، مقایسه اثر آن‌ها بر توزیع دز جهت انتخاب بهترین روش شبیه‌سازی امری ضروری به نظر می‌رسد.

اسکن فیلمها با اسکنر Microtek 9800XL، توسط نرم افزار Microtek Scan Wizard Pro و با رزولوشن ۱۵۰dpi انجام شد. از نرم افزار ImageJ برای آنالیز و بدست آوردن مقدار پیکسل هر فیلم استفاده شد. [۷] و مقدار چگالی اپتیکی فیلمها با رابطه ۱ محاسبه گردید که Net OD مقدار چگالی اپتیکی فیلم، I مقدار پیکسل فیلم تابش ندیده و I_i مقدار پیکسل تابش دیده است. [۸-۹]

$$Net\ OD = \log\left(\frac{I}{I_0}\right) \quad (1)$$

پس از بدست آوردن مقادیر مرتبط با هر فیلم، با الگوریتمی به نام Levenberg-Marquardt، بهترین منحنی منطبق شده با دادهها یعنی منحنی کالیبراسیون رسم گردید. شکل ۴ منحنی کالیبراسیون را برای هلمت ۱۸ نشان می دهد. [۹]



شکل (۴): منحنی کالیبراسیون هلمت ۱۸ در دستگاه

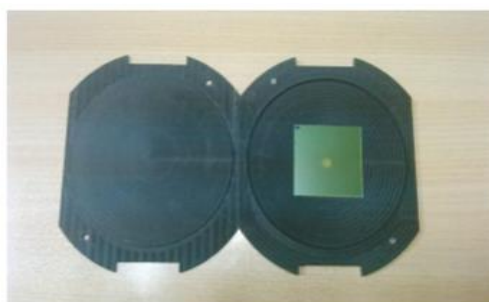
گامانایف. پارامترهای انطباق و درجه جمله غیر خطی و ضریب رگرسیون در نمودار مشخص شده است. ضریب رگرسیون ۰٫۹۹۸ می باشد [۹].

۲٫۲. شبیه سازی مونت کارلو

سیستم گامانایف دارای ۲۰۱ چشمه کبالت ۶۰ با انرژی ۱/۱۷MeV و ۱/۳۳MeV (بطور میانگین ۱/۲۵ MeV) با نیمه عمر تقریبی ۵/۳ سال و اکتیویته ۶۰۰۰ کوری در زمان نصب می باشد. این چشمهها در هندسه‌ای به صورت نیم کره به شعاع

اندازه گیری و پرتودهی انجام شد. شکل ۲ نمایی از فانتوم کروی قرار گرفته در دستگاه گامانایف به همراه کولیماتور ۱۸ را نشان می دهد.

جهت اندازه گیری خطا، تابشها در هر دز با سه قطعه فیلم صورت پذیرفت. فیلمها برای اسکن به مدت ۴۸ ساعت در جعبه‌ای تاریک قرار داده شد تا ثبات پس از تابش برقرار شود. شکل ۳ فیلمهای تابش داده شده با دستگاه گامانایف را نشان می دهد.

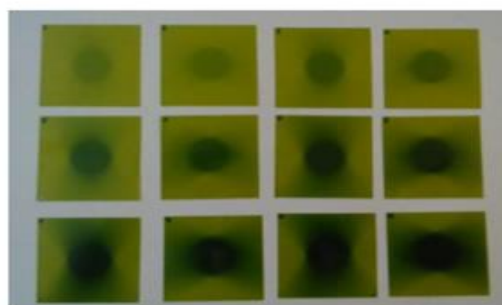


شکل (۱): نمایی از کاست مخصوص قرار دادن فیلم در فانتوم کروی

دستگاه گامانایف مدل 4C به همراه فیلم EBT3

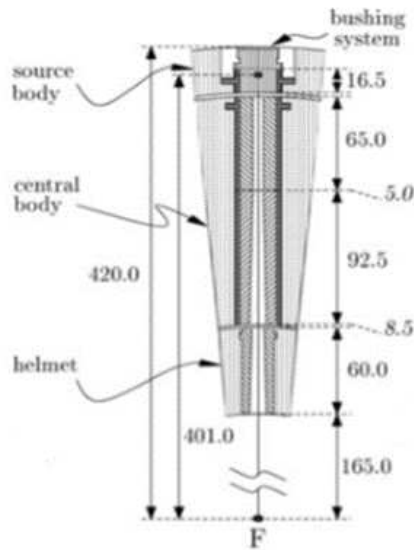


شکل (۲): فانتوم کروی قرار گرفته در دستگاه گامانایف.



شکل (۳): نمایی از فیلم های EBT3 تابش داده شده با دستگاه

گامانایف [۹].



شکل (۶): نمایی از یک تک کانال به همراه مواد تشکیل دهنده ی آن.

جدول (۱): تفاوت اندازه ی روزنه های ورودی و خروجی در

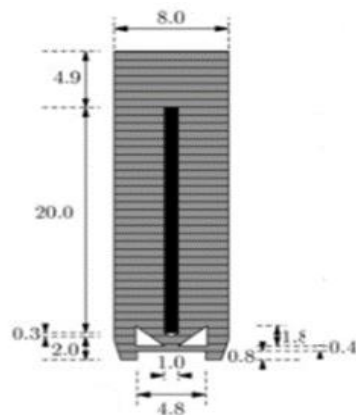
کولیماتور های مختلف [۱۰].

	۱۸	۱۴	۸	۴
روزنه ورودی mm	۸/۳	۶/۳	۳/۸	۲
روزنه خروجی mm	۱۰/۶	۸/۵	۵	۲/۵
زاویه تابش (درجه)	۱/۲۸۷	۱/۰۳۲	۰/۶۰۷	۰/۳۰۳

به طور کلی کد BEAMnrc به عنوان یک سیستم شبیه سازی مونت کارلو برای مدل سازی منابع رادیوترابی و هم چنین کد DOSXYZnrc برای محاسبه توزیع دز در فانتوم تعریف شده با و بدون تصاویر سی تی مورد استفاده است.

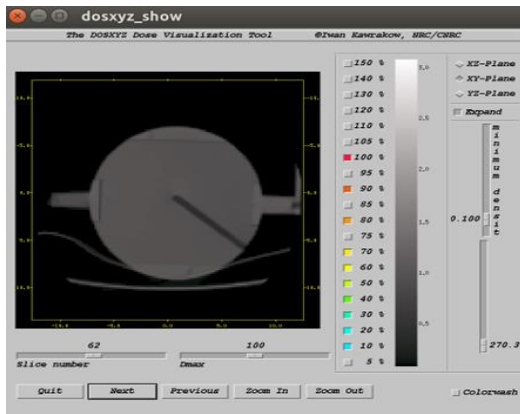
برای پیاده سازی هندسه دستگاه گامانایف از کد BEAMnrc به منظور تعریف یک تک کانال، مدول CONESTAK استفاده شد و در انتها از مدول SLAB تحت عنوان فضای فاز برای ذخیره اطلاعات ذرات شبیه سازی شده استفاده گردید. با توجه به یکسان بودن تمام ۲۰۱ چشمه و جدول ۲ که مختصات کروی تمام چشمه ها را دربردارد [۱۰]، هلمت دستگاه گامانایف در کد DOSXYZnrc شبیه سازی شد.

۴۰/۱ سانتی متر چیده شده اند. در واقع هر چشمه شامل ۲۰ قرص کبالت ۶۰ با ضخامت ۱mm درون کپسولی به ارتفاع ۲۰mm می باشند و این کپسول ها هم درون کپسول دیگری از جنس آهن قرار گرفته اند و فضای بین آنها لایه ی نازکی از هوا قرار دارد. این دستگاه شامل دو کولیماتور اولیه و ثانویه می باشد. همان طور که در شکل ۵ مشاهده می شود کولیماتور اولیه در بدنه ی اصلی دستگاه از دو لایه تشکیل شده است، لایه ی ابتدایی به ضخامت ۶۵ mm که تا ۹۶٪ آن تنگستن است و لایه ی دوم به ضخامت ۹۲ mm از سرب ایجاد شده اند. کولیماتور ثانویه که روی یک کلاه خود در اندازه های مشخص ۱۸ mm، ۱۴ mm، ۸ mm، ۴ mm دارای ضخامت ۶۰ و از جنس تنگستن می باشد. کولیماتورهای ثانویه برای ایجاد اندازه ی میدان مورد نظر در راستای کولیماتور اولیه قرار می گیرند و بین این دو کولیماتور فاصله ای به ضخامت ۸/۵ از هوا ایجاد می شود.



شکل (۵): شماتیکی کپسول حاوی قرص های کبالت.

مطابق شکل ۶ مسیر عبور پرتو، مخروطی شکل است و اندازه ی زاویه ی راس آن به نوع هلمت بستگی دارد و نشان دهنده میزان پهن شدگی پرتوهای گامای تولیدی است. در جدول ۱ تفاوت اندازه ی روزنه های ورودی و خروجی در چهار نوع هلمت آمده است [۹].



شکل (۸): فانتوم همگن تعریف شده DOSXYZnrc به

روش Phantom create from CT data.

در این شبیه سازی تعداد تاریخچه ذرات یک میلیارد و پانصد ذره منظور گردید تا عدم قطعیت آماری برای همه وکسل ها کم تر از ۱٪ باشد. ماکزیمم زمان CPU نیز ۹۹۹۹ ساعت در نظر گرفته شد. هم چنین مقادیر $ECUT=0.1MeV$ و $PCUT=0.01MeV$ همانند کد BEAMnrc لحاظ شدند.

۳. یافته ها

جهت اطمینان از شبیه سازی های انجام شده و به منظور اعتبارسنجی آن ها لازم بود صحت محاسبات حاصل از شبیه سازی مورد ارزیابی قرار گیرد لذا داده های پروفایل دز سیستم طراحی درمان LGP مربوط به فانتوم همگن در هلمت ۱۸ و هم چنین داده های پروفایل دز حاصل از شبیه سازی در فانتوم همگن و هلمت ۱۸ وارد نرم افزار GNU PLOT گردیده و سه پارامتر DD، DTA، و γ -index بدست آمد. شایان ذکر است که در این مطالعه جهت ارزیابی معیار پذیرش یا ملاک سنجش برای پارامتر DD، کم تر از ۲٪ و برای پارامتر DTA، کم تر از ۲ میلی متر در نظر گرفته شده است. [۱۱]

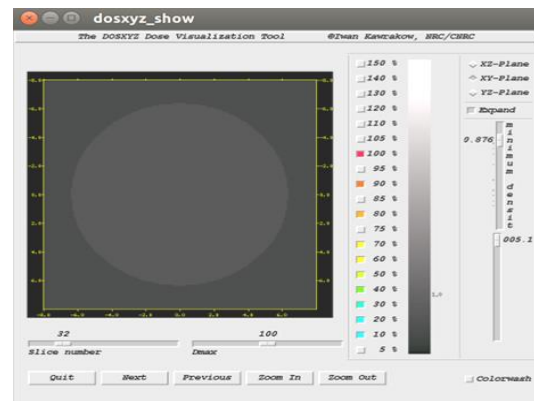
در شکل های ۹، ۱۰ و ۱۱ منحنی پروفایل های دز حاصل از شبیه سازی مونت کارلو با اندازه گیری های فیلم در هر سه راستای X و Y و Z با یکدیگر مقایسه شده است. همان طور که

جدول ۲: نشان دهنده مختصات کروی چشمه ها.

α	A	B	C	D	E
θ° (deg)	۹۶	۱۰۳/۵	۱۱۱	۱۱۸/۵	۱۲۶
ϕ_1° (deg)	۲۶۶/۲۵	۲۶۶	۲۶۱	۲۵۵/۵	۲۶۰
$\Delta\phi^{\circ}$ (deg)	۷/۵	۸	۹	۹	۱۰

در مرحله نهایی شبیه سازی لازمه ی محاسبه توزیع دز در فانتوم، تعریف فانتوم با وارد کردن داده های فانتوم به یکی از دو روش Phantom create from Non_CT data input و CT data است.

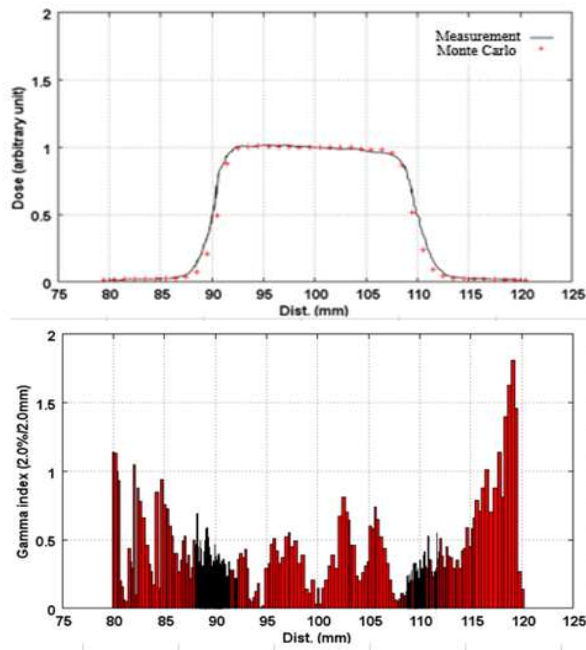
در حالت Non_CT data input با استفاده از برنامه MATLAB، وکسل های با پهنای ۰/۱cm فانتوم همگن و کروی از جنس پلاکسی گلاس (با نام تجاری PMMA) با چگالی ۱/۱۷gr/cm³ و محیط اطراف آن از جنس هوا (AIR700ICRU) شبیه سازی شد (شکل ۷).



شکل (۷): فانتوم همگن تعریف شده DOSXYZnrc به روش

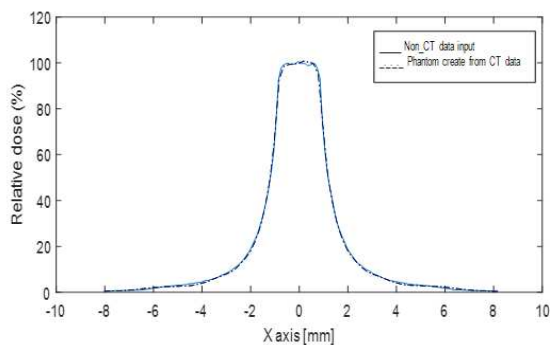
Non_CT data input

در روش Phantom create from CT data فایلی با پسوند *egsphnt. برای تعریف فانتوم مورد نیاز است. بنابراین از طریق CTCREATE، تصاویر سی تی فانتوم همگن و کروی مورد استفاده در کنترل کیفی دستگاه با ساختار DICOM به فایلی شامل اطلاعات تعداد مواد در فانتوم، نام مواد، تعداد وکسل ها در جهات X و Y و Z، مرز وکسل ها در جهات X و Y و Z و ماتریس دو بعدی در هر اسلایس تبدیل شد (شکل ۸).



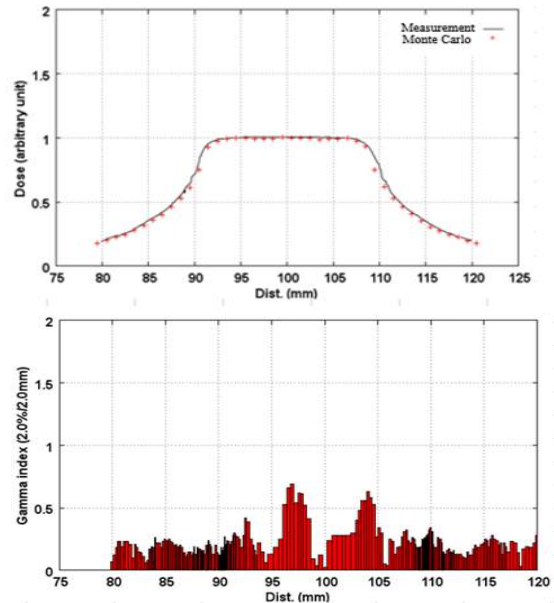
شکل (۱۱): منحنی پروفایل‌های دز اندازه‌گیری و شبیه‌سازی مونت کارلو در راستای Z به همراه نمودار γ -index.

در شکل‌های ۱۲، ۱۳ و ۱۴ هدف اصلی این مطالعه یعنی ارزیابی توزیع دز در هر سه راستای X و Y و Z به دو روش تعریف از طریق طراحی هندسی (Non_CT data input) و یا با استفاده از تصاویر سی تی فانتوم همگن کروی (Phantom create from CT data) در کد DOSXYZnrc نشان داده شده است.

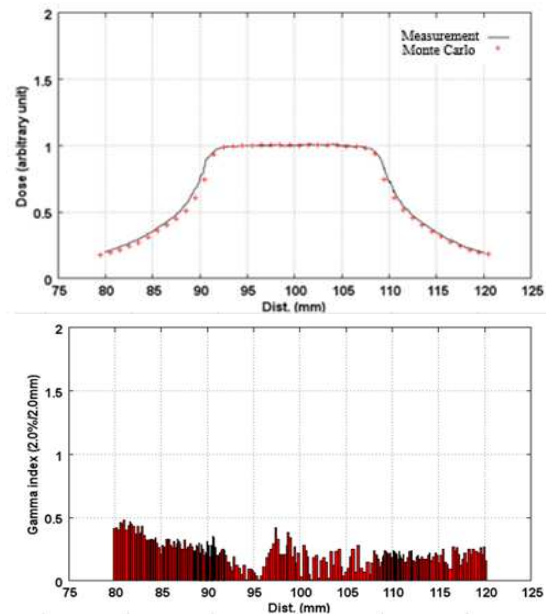


شکل (۱۲): منحنی پروفایل دز در راستای X از طریق طراحی هندسی (Non_CT data input) و یا با استفاده از تصاویر سی تی فانتوم همگن کروی (Phantom create from CT data).

در هر سه جهت ملاحظه می‌شود شاخص گاما کوچک‌تر و یا مساوی یک است و می‌توان نتیجه گرفت که محاسبات در این نقاط قابل قبول است.



شکل (۹): منحنی پروفایل‌های دز اندازه‌گیری و شبیه‌سازی مونت کارلو در راستای X.



شکل (۱۰): منحنی پروفایل‌های دز اندازه‌گیری و شبیه‌سازی مونت کارلو در راستای Y به همراه نمودار γ -index.

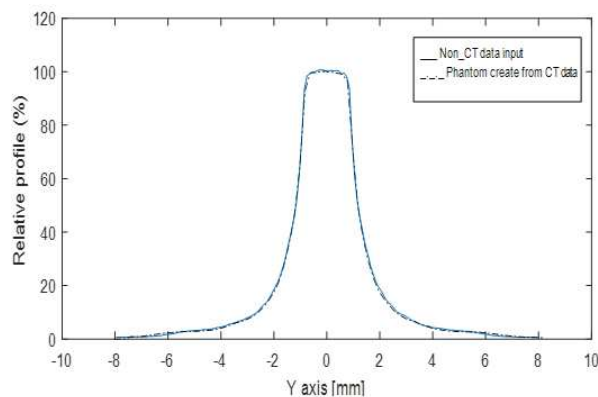
شاخص گامای کوچک تر و یا مساوی یک دارند و دو پارامتر DD و DTA در داخل معیار پذیرش قرار گرفته اند (DD = ۲٪ و DTA = ۲٪).

نتایج شبیه سازی بدست آمده در این مطالعه نشان می دهد پروفایل دز در دو روش تعریف فانتوم از طریق طراحی هندسی (Non_CT data input) و با استفاده از تصاویر سی تی فانتوم همگن کروی (Phantom create from CT data) از نظر شکل و پهنای پروفایل دز بسیار نزدیک به هم هستند و از هر یک از این دو روش می توان استفاده نمود.

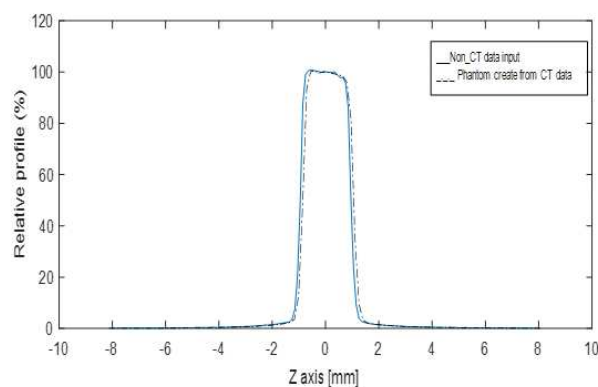
هر کدام از این دو روش مزیت هایی نسبت به دیگری دارد. از روش Non_CT data input می توان در تعریف فانتوم های همگن با هندسه ی ساده مثل مکعب به راحتی استفاده نمود. روش Phantom create from CT data برای فانتوم هایی با هندسه پیچیده مانند فانتوم های کروی و به خصوص فانتوم های ناهمگن مناسب است که البته در صورت وجود تصاویر سی تی فانتوم و اطلاع از تعداد و نام مواد به کار رفته در فانتوم تابع تبدیل دانسیته به اعداد سی تی، می توان از این روش استفاده نمود.

۵. تشکر و قدردانی

بدین وسیله از پرسنل مرکز گامانایف ایران قدردانی و تشکر می شود. این مقاله نتیجه طرح تحقیقاتی مصوب دانشگاه علوم پزشکی و خدمات بهداشتی تهران با کد ۳۱۰۳۰۳۰۰۳-۳۰-۰۳-۹۴ می باشد.



شکل (۱۳): منحنی پروفایل دز در راستای y از طریق طراحی هندسی (Non_CT data input) و یا با استفاده از تصاویر سی تی فانتوم همگن کروی (Phantom create from CT data).



شکل (۱۴): منحنی پروفایل دز در راستای z از طریق طراحی هندسی همگن کروی (Phantom create from CT data) و یا با استفاده از تصاویر سی تی فانتوم

۴. بحث و نتیجه گیری

همان طور که در شکل های (۶) و (۷) و (۸) مشاهده می شود کلیه پروفایل ها (شبیه سازی مونت کارلو و اندازه گیری فیلم) در هر سه جهت اصلی سیستم مختصات دستگاه گامانایف،

۶. مراجع

- [1] Pourfallah TA, Allahverdi M, Alam NR, Ay MR, Zahmatkesh MH. Verifying the accuracy of dose distribution in Gamma Knife unit in presence of inhomogeneities using PAGAT polymer gel dosimeter and MC simulation. *International Journal of Radiation Research*. 2009; 7(1):49-56.
- [2] Khan FM, Gibbons JP. *Khan's the Physics of Radiation Therapy*: Lippincott Williams & Wilkins; 2014.
- [3] Zhang P. Fast verification of Gamma Knife treatment plans. *Journal of Applied Clinical Medical Physics*. 2000; 1(4):158-64.
- [4] Thuc P. Simulation of the transmitted dose in EPID using a Monte Carlo method: M. Sc. Thesis, University of Adelaide; 2009.
- [5] Walters B, Kawrakow I, Rogers D. *DOSXYZnrc user manual*. NRC Report PIRS. 2005; 794.
- [6] Elekta. *Leksell gamma Knife C, Software upgrade, Instruction for use 2004*.
- [7] Raband W. *Imagej*. National Institutes of Health, Bethesda, Maryland, USA. 1997-2012.
- [8] Farah N, Francis Z, Abboud M. Analysis of the EBT3 Gafchromic film irradiated with 6 MV photons and 6 MeV electrons using reflective mode scanners. *Physica Medica*. 2014; 30(6):708-12.
- [9] Najafi M, Geraily GH, Shirazi A, Esfahani M, Teimouri J. Analysis of Gafchromic EBT3 film calibration irradiated with gamma rays from different systems: Gamma Knife and Cobalt-60 unit. *Medical Dosimetry* 2017; 42: 159-168.
- [10] Al-Dweri, FMO, Lallena AM. A simplified model of the source channel of the Leksell Gamma Knife®: testing multisource configurations with PENELOPE. *Physics in Medicine & Biology*. 2004; 49:3441-3453.
- [11] Elekta. A new TMR dose algorithm in Leksell GammaPlan [white paper]. Article No. 1021357.00. Stockholm, Sweden: Elekta Instrument AB; 2012.