



آنالیز عنصری بافت در پروتون تراپی با استفاده از شمارش زیر قله طیف گامای آنی

فرشته ساحلی^۱، ناصر وثوقی^۱، زعفر ریازی^{۲*}، فاطمه سادات رسولی^۳

۱. دانشکده مهندسی انرژی، دانشگاه صنعتی شریف، صندوق پستی: ۸۶۳۹-۱۴۵۱۵، تهران - ایران

۲. پژوهشکده فیزیک و شتابگرها، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۳۴۸۶-۱۱۳۶۵، تهران - ایران

۳. دانشکده فیزیک، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، صندوق پستی: ۴۹۶۱۱-۱۵۴۱۸، تهران - ایران

مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت مقاله: ۹۸/۲/۲۹ تاریخ پذیرش مقاله: ۹۸/۶/۲

چکیده

برای استفاده بهینه از قابلیت‌های پروتون در درمان تومور، لازم است در مرحله طرح درمان محل پیک براگ با دقت بالایی پیش‌بینی شود. آنالیز عنصری بافت یکی از روش‌های مورد تحقیق برای پیش‌بینی دقیق محل پیک براگ، برد پروتون و توزیع توان توقف بافت می‌باشد. هر عنصر در بافت طیف گاماها را منحصراً به فردی دارد، بنابراین با ثبت و تحلیل طیف گاماها آنی گسیل شده از بافت، امکان پیش‌بینی جرم عناصر بافت وجود دارد. در مطالعه حاضر، ابتدا گاماها آنی گسیل شده از عناصر اصلی بافت‌های بدن (^{14}N و ^{12}C ، ^{16}O ، ^{40}Ca) با استفاده از کد Geant4 به دست آمدند. سپس با استفاده از پنج فانتوم با جرم‌های عنصری مشخص، رابطه تناسب بین شمارش‌های زیر قله خطوط گاما ۳/۹۱، ۲/۳۱ و ۷/۱۲ MeV به ترتیب با جرم عناصر کلسیم، نیتروژن و اکسیژن در فانتوم‌ها به صورت خط برازش به دست آمدند. در ادامه برای دو فانتوم آزمون با داشتن شمارش‌های این خطوط گاما و با استفاده از خط برازش، جرم هر عنصر در فانتوم تخمین و با مقدار واقعی مقایسه گردید. نتایج به دست آمده برای سه عنصر ذکر شده در فانتوم‌های آزمون دارای اندازه‌ی درصد خطای نسبی کم‌تر از ۶ هستند، که موجب جابه‌جایی برد پروتون کم‌تر از ۱ میلی‌متر می‌شود.

کلیدواژه‌ها: مونت کارلو، پروتون تراپی، Geant4، گاما آنی، آنالیز عنصری

Elemental analysis of tissue in proton therapy using photopeak count of prompt gamma spectrum

F. Saheli¹, N. Vosoughi¹, Z. Riazi^{2*}, F.S. Rasouli³

1. Department of Energy Engineering, Sharif University of Technology, P.O.Box: 14515-8639, Tehran – Iran

2. Physics and Accelerator Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOL, P.O.Box: 11365-3486, Tehran – Iran

3. Department of Physics, K.N. Toosi University of Technology, P.O.Box: 15418-49611, Tehran – Iran

Research Article

Received 19.5.2019, Accepted 24.8.2019

Abstract

Online elemental analysis of irradiated tissue in proton therapy is a major part of this treatment, since it leads to accurate estimation of the depth of Bragg peak, proton range, and distribution of stopping power of irradiated tissue. Given the fact that each element has unique characteristic prompt gamma (PG) spectrum, recording and analyzing of the emitted gamma-ray spectra is one of the methods used for online elemental analysis of irradiated tissue. In the present study, the PG lines of most abundant elements of human tissues (^{12}C , ^{16}O , ^{20}Ca , and ^{14}N) are obtained using Geant4 toolkit. Moreover, the linear dependency of 7.12, 3.91 and 2.31 MeV PG counts to the mass of ^{16}O , ^{20}Ca , and ^{14}N are investigated in five phantoms. The gamma lines of 2.31, 3.91 and 7.12 MeV are selected to determine the mass of nitrogen, calcium, and oxygen in the irradiated volume. Furthermore, for two test phantoms, the mass of elements is estimated using linear fitting and is compared with predefined mass of these elements in the test phantoms. The results showed that the relative errors of estimated mass of calcium, nitrogen, and oxygen are less than 6%, which leads to the range estimation deviation of about 1 mm.

Keywords: Monte carlo, Proton therapy, Geant4, Prompt gamma, Elemental analysis

*Email: Zafar.riazi@gmail.com

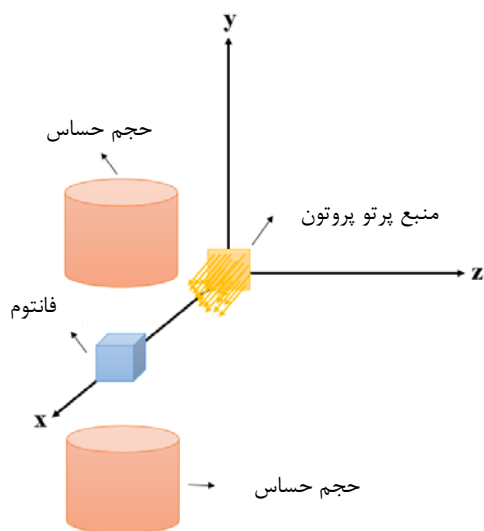
۱. مقدمه

مزیت منحنی توزیع دز باریکه ذرات پروتون با انرژی معین، افت تیز دز در یک برد خاص است که امکان تخریب کامل تومور را با منطبق کردن دقیق این مکان روی محل تومور فراهم می‌کند. از طرفی جابه‌جایی اندک در مکان افت دز نسبت به محل درست آن که طبق طرح درمان مشخص گردیده است، می‌تواند منجر به انباشت انرژی زیادی در ارگان‌های سالم موجود در اطراف بافت تحت درمان شده و امکان سرطان‌های ثانویه و یا تخریب کلی بافت مجاور را شدت بخشد. بنابراین با کنترل محل انباشت دز بیشینه (پیک براگ)، می‌توان کیفیت اجرای پروتون‌تراپی را بهبود بخشید [۱]. با توجه به آن‌که پروتون‌ها در داخل بدن بیمار متوقف می‌گردند، لذا امکان تصویربرداری عبوری پروتون برای رصد توزیع دز آن وجود ندارد. ثبت گاما‌های ثانویه تولید شده در پروتون‌تراپی یکی از بهترین گزینه‌ها برای این هدف می‌باشد [۲]. برهم‌کنش‌های غیرکشسان پروتون فرودی و ماده‌ی هدف تحت تابش در پروتون‌تراپی یکی از دو رخداد زیر را به دنبال دارند. رخداد اول تولید هسته‌هایی با فزونی پروتون است که این هسته‌ها با گسیل پوزیترون به پایداری می‌رسند و اساس تصویربرداری PET^۱ حین پروتون‌تراپی را تشکیل می‌دهند [۳]. رخداد دیگر تولید هسته‌های هدف برانگیخته است که این هسته‌های برانگیخته معمولاً طی چند نانو ثانیه تابش گاما با محدوده‌ی انرژی کم‌تر از ۱۰ MeV تولید می‌کنند که به آن گسیل گامای آنی^۲ گفته می‌شود و برای هر عنصر منحصر به فرد است [۴-۷]. برخلاف روش ثبت گاما‌های نابودی در PET، ثبت گاما‌های آنی، به علت این‌که بلافاصله پس از برهم‌کنش غیرالاستیک پروتون و بافت تولید می‌شوند و بهره نسبی بالاتری دارند، امکان مونیتورینگ برخط در پروتون‌تراپی را فراهم می‌کنند [۶]. استفاده از گسیل گاما‌های آنی در پایش درمان در پروتون‌تراپی به یکی از سه روش تصویربرداری گاما‌های آنی (PGI^۳)، زمان‌گیری گاما‌های آنی (PGT^۴) و طیف‌سنجی گاما‌های آنی (PGS^۵) [۲، ۸] انجام می‌شود. در روش طیف‌سنجی گاما‌های آنی، آنالیز طیف به یکی از دو روش آنالیز

کل طیف (WSA^۶) [۹] و آنالیز با استفاده از شمارش‌های زیر قله [۹] انجام می‌شود. با توجه به منحصر به فرد بودن طیف عناصر مختلف، بافت‌های با عناصر مختلف طیف گسیلی متفاوتی را حین تابش پروتون ایجاد می‌کنند. این طیف می‌تواند جهت آنالیز عنصری بافت تحت درمان مورد استفاده قرار گیرد [۲، ۷]. در سال ۲۰۰۹ در یک مطالعه مقدماتی توسط Polf و همکارانش [۱۰] با استفاده از شبیه‌سازی مونت‌کارلویی، نتایج مربوط به گسیل گامای آنی تولید شده از طریق برهم‌کنش‌های پروتون- هسته با بافت در حین پروتون‌تراپی مطالعه شده و طیف گامای ثبت شده از بافت‌ها با محتویات عنصری مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان داد که طیف تابش گامای آنی برای هر نوع بافت مورد مطالعه متفاوت است و شدت نسبی گامای آنی گسیل شده از یک بافت مشخص، متناسب با غلظت هر عنصر در بافت است. در نهایت بر مبنای نتایج به دست آمده، پتانسیل استفاده از گسیل گامای آنی به‌عنوان یک روش برای راستی‌آزمایی دقت و کارایی دز تحویل شده به بافت در پروتون‌تراپی مطرح شده است. پس از این مطالعه Polf و همکارانش در سال ۲۰۰۹ اولین اندازه‌گیری‌های مربوط به طیف گامای آنی را به طور تجربی انجام دادند [۱۱]. نتایج نشان داد که طیف مونت‌کارلویی محاسبه شده توافق خوبی با طیف اندازه‌گیری شده دارد. وربرگ و گروهش در سال ۲۰۱۲ [۱۲] داده‌های تجربی و شبیه‌سازی برای سطح مقطع دیفرانسیلی برهم‌کنش‌های پروتون و عناصر ^{۱۲}C، ^{۱۴}N و ^{۱۶}O را با یکدیگر مقایسه نمودند و خطوط گسیل مشخصه عناصر را شناسایی کردند. گروه تحقیقاتی Polf در سال ۲۰۱۳ [۷] مطالعات خود را بر روی چگونگی گسیل گامای آنی بافت‌ها به صورت تابعی از تغییرات غلظت اکسیژن و کربن متمرکز کردند و موفق به تعیین غلظت عنصر اکسیژن در بافت‌های تحت تابش با باریکه پروتون شدند. این مطالعه موفق شد یک رابطه‌ی خطی بین بهره خط گسیل گاما ۶/۱۳ MeV (یکی از قله‌های مشخصه اکسیژن) و مقدار جرم اکسیژن در حجم تحت تابش تخمین بزند. این در حالی است که بافت بدن از عناصر دیگری نیز تشکیل شده است و برای انجام آنالیز عنصری کامل بافت، این مطالعات می‌تواند در جهت یافتن غلظت بقیه عناصر ادامه یابد.

1. Positron Emission Tomography
2. Prompt Gamma
3. Prompt Gamma-Ray Imaging
4. Prompt Gamma-Ray Timing
5. Prompt Gamma-Ray Spectroscopy

تا بالاترین بهره از گاما‌های آنی ثبت شوند. در هر شبیه‌سازی فانتوم با ابعاد $2\text{cm} \times 2\text{cm} \times 2\text{cm}$ در فاصله 5 cm محل چشمه قرار گرفته است. با استفاده از چیدمان شکل ۱ در مرحله اول، فانتوم به صورت تک عنصر اکسیژن، کربن، کلسیم و نیتروژن تعریف می‌شود تا خطوط گاما‌های آنی رسیده به حجم حساس مربوط به هر یک از عناصر برحسب انرژی این گاماها ثبت شوند. در مراحل بعدی، فانتوم به صورت ترکیب عناصر مختلف با مشخصات ذکر شده در جدول ۱ تعریف شد.



شکل ۱. طرح‌واره‌ای از هندسه شبیه‌سازی شده در ابزار Geant 4.

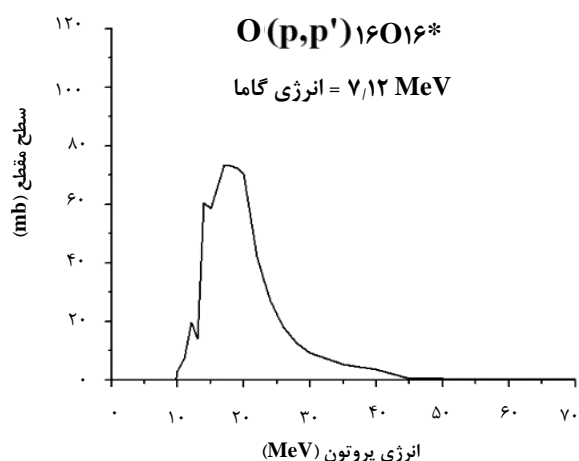
بنابراین در مطالعه حاضر پنج فانتوم با درصدهای جرمی متفاوت از عناصر کربن، اکسیژن، نیتروژن و کلسیم با چگالی‌هایی از مرتبه چگالی بافت‌های بدن مورد بررسی قرار گرفته است. در این مطالعه تناسب بین شمارش‌های زیر قله خطوط $2,31\text{ MeV}$ (مربوط به عنصر نیتروژن) و $3,91\text{ MeV}$ (مربوط به عنصر کلسیم) و $7,12\text{ MeV}$ (مربوط به عنصر اکسیژن) بررسی و روابط خطی برای این تناسب‌ها به دست آمد. به کمک این روابط می‌توان با داشتن شمارش‌های زیر قله خطوط $2,31\text{ MeV}$ و $3,91\text{ MeV}$ و $7,12\text{ MeV}$ در هر فانتوم آزمون جرم عناصر نیتروژن، کلسیم و اکسیژن را در حجم تحت تابش فانتوم تخمین زد.

۲. مواد و روش‌ها

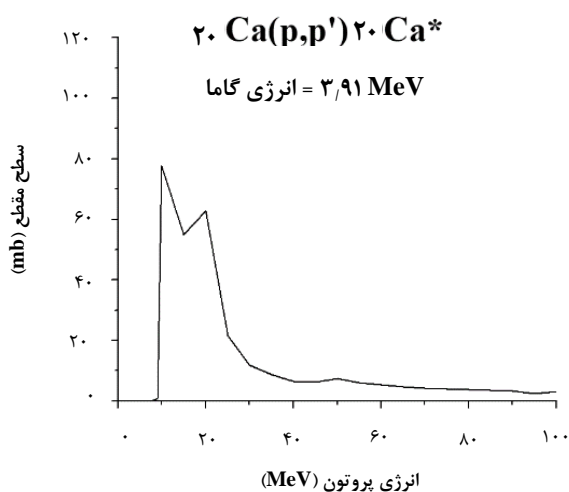
شکل ۱ هندسه شبیه‌سازی شده در ابزار Geant4 را نشان می‌دهد. در این شبیه‌سازی‌ها چشمه پروتون به صورت صفحه مربعی به ابعاد $1\text{ cm} \times 1\text{ cm}$ با انرژی 30 MeV در مبدأ و در راستای محور x تعریف شده است. براساس مطالعه Polf و همکارانش [۱۰] در انرژی 30 MeV بالاترین بهره گسیل گاما‌های آنی برای فراوان‌ترین عناصر موجود در بافت‌های بدن گزارش شده است. گاما‌های آنی گسیل شده از فانتوم‌ها در حجم حساس $3'' \times 3''$ ثبت می‌شوند. محل قرارگیری این حجم‌های حساس نسبت به محل قله براگ طوری تنظیم شده

جدول ۱. چگالی و درصد عنصری مربوط به فانتوم‌های آموزشی a, b, c, d و e دو فانتوم آزمون

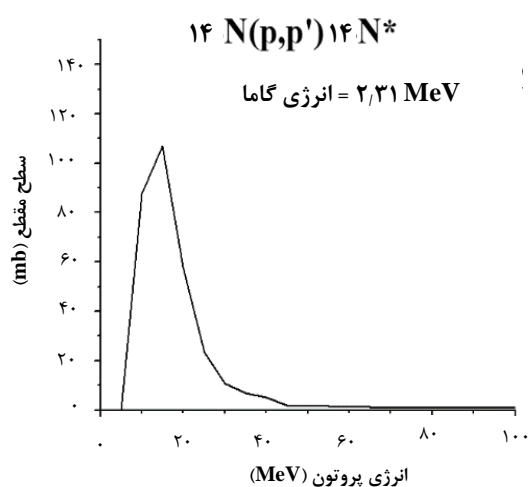
آموزش و آزمون فانتوم از چگالی و وزن (%)					
H (%)	Ca (%)	N (%)	O (%)	C (%)	$\rho\text{ (g cm}^{-3}\text{)}$
۲۰	۰	۱۶٫۸	۴۶٫۴۵	۱۶٫۷۵	۰٫۹۵
۱۳	۲۱٫۷۹	۲۳٫۵۱	۳۰٫۴	۱۱٫۳	۰٫۹۲
۵	۳۲٫۶	۳۴٫۷	۲۰٫۶	۷٫۱	۱٫۵۲
۱۸٫۵	۵٫۵	۴٫۸۴	۶۱٫۰۴	۱۰٫۱۲	۱٫۰۵
۱۲	۸	۱۰	۶۸	۲	۰٫۹۷
۱۵	۱۵	۲۰	۴۲	۸	۱٫۳۵
۸	۱۹	۲۲	۳۷	۱۴	۱٫۱۵



شکل ۲. سطح مقطع گسیل گاماهاى آنی ۷٫۱۲ MeV عنصر اکسیژن.



شکل ۳. سطح مقطع گسیل گاماهاى آنی ۳٫۹۱ MeV عنصر کلسیم.



شکل ۴. سطح مقطع گسیل گاماهاى آنی ۲٫۳۱ MeV عنصر نیتروژن.

در ابزار Geant4 مجموعه فیزیک‌های استاندارد الکترومغناطیس برای شبیه‌سازی اندرکنش‌های الکترومغناطیسی پروتون‌های فرودی و همه ذرات ثانویه تولید شده برای بازه انرژی بالاتر از ۱ keV به کار گرفته شده است. هم‌چنین مدل‌های G4Elastic و G4Decay به ترتیب برای در نظر گرفتن پراکندگی الاستیک تمام هادرون‌ها و فرایندهای واپاشی هسته برانگیخته مورد استفاده قرار گرفته است. مدل pre-compound توسعه داده شده توسط مرجع [۱۳] برای مدل کردن برهم‌کنش‌های غیرالاستیک پروتون که موجب تولید خطوط گاما آنی می‌گردد، مورد استفاده قرار گرفته است. انتخاب این مجموعه از فیزیک در ابزار Geant4، سطح مقطع گسیل گاماهاى آنی ۷٫۱۲ MeV، ۳٫۹۱ MeV و ۲٫۳۱ MeV را به ترتیب به صورت شکل‌های ۲، ۳ و ۴ نتیجه می‌دهد. هم‌چنین تعداد ذرات تاریخچه در هر شبیه‌سازی (5×10^9) در نظر گرفته شده است.

پنج فانتوم a، b، c، d و e با مشخصات ذکر شده در جدول ۱ جهت یافتن تناسب بین شمارش‌های خطوط گامای آنی و جرم هر عنصر به عنوان فانتوم‌های آموزشی تعریف شده‌اند. همان‌طور که در جدول ۱ نشان داده شده است دو فانتوم آزمون جهت ارزیابی ارتباط تخمین زده شده، انتخاب شده است.

در این مطالعه برای تعیین جرم کلسیم در حجم تحت بررسی هر فانتوم از شمارش گاماهاى ۳٫۹۱ MeV برای عنصر نیتروژن از شمارش گاماهاى ۲٫۳۱ MeV و برای اکسیژن از شمارش گاماهاى آنی ۷٫۱۲ MeV هر فانتوم استفاده شده است. علت انتخاب این خطوط گاما عدم اشتراک عناصر در تولید این گاماها می‌باشد. برای مثال سایر عناصر به جز اکسیژن سهمی در شمارش‌های گاما ۷٫۱۲ MeV ندارند. جرم عناصر کلسیم، نیتروژن و اکسیژن در حجم تحت تابش به صورت رابطه‌ی ۱ محاسبه شده است [۷].

$$m_i(g) = \rho \times V \times w_i \quad (1)$$

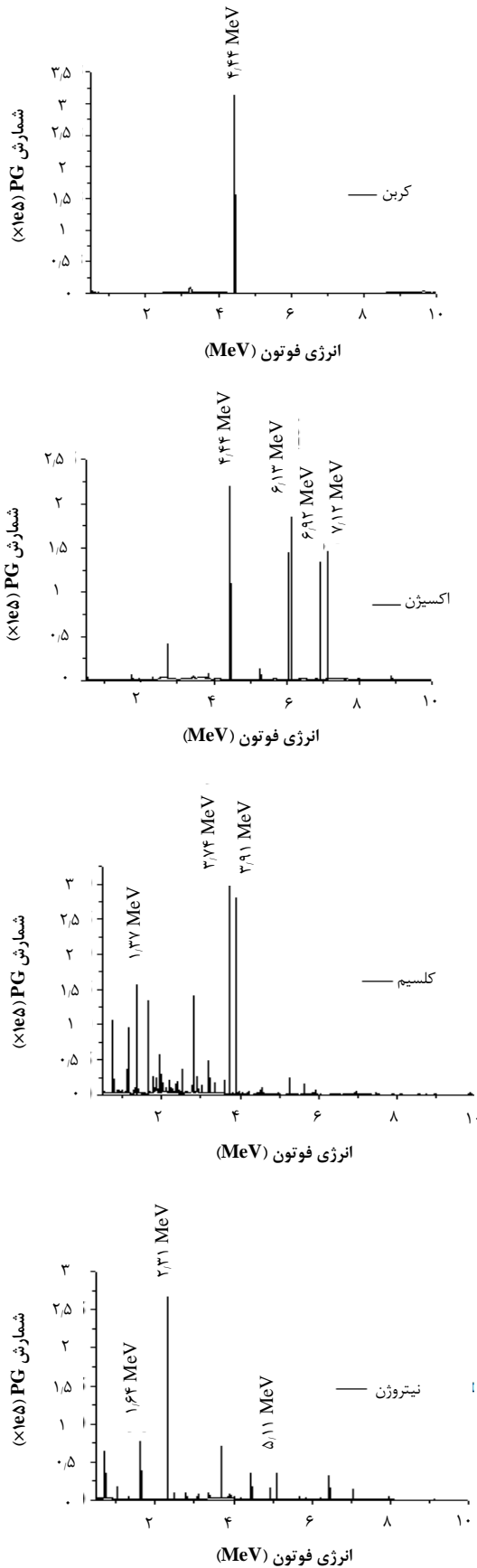
که در آن ρ چگالی فانتوم، w_i درصد جرمی عنصر i ام در فانتوم تحت بررسی و V حجم تحت تابش است که به صورت حاصل ضرب پروفایل چشمه ($1\text{cm} \times 1\text{cm}$) در عمق ۵۰٪ شمارش پیک براگ محاسبه می‌شود.

۳. نتایج

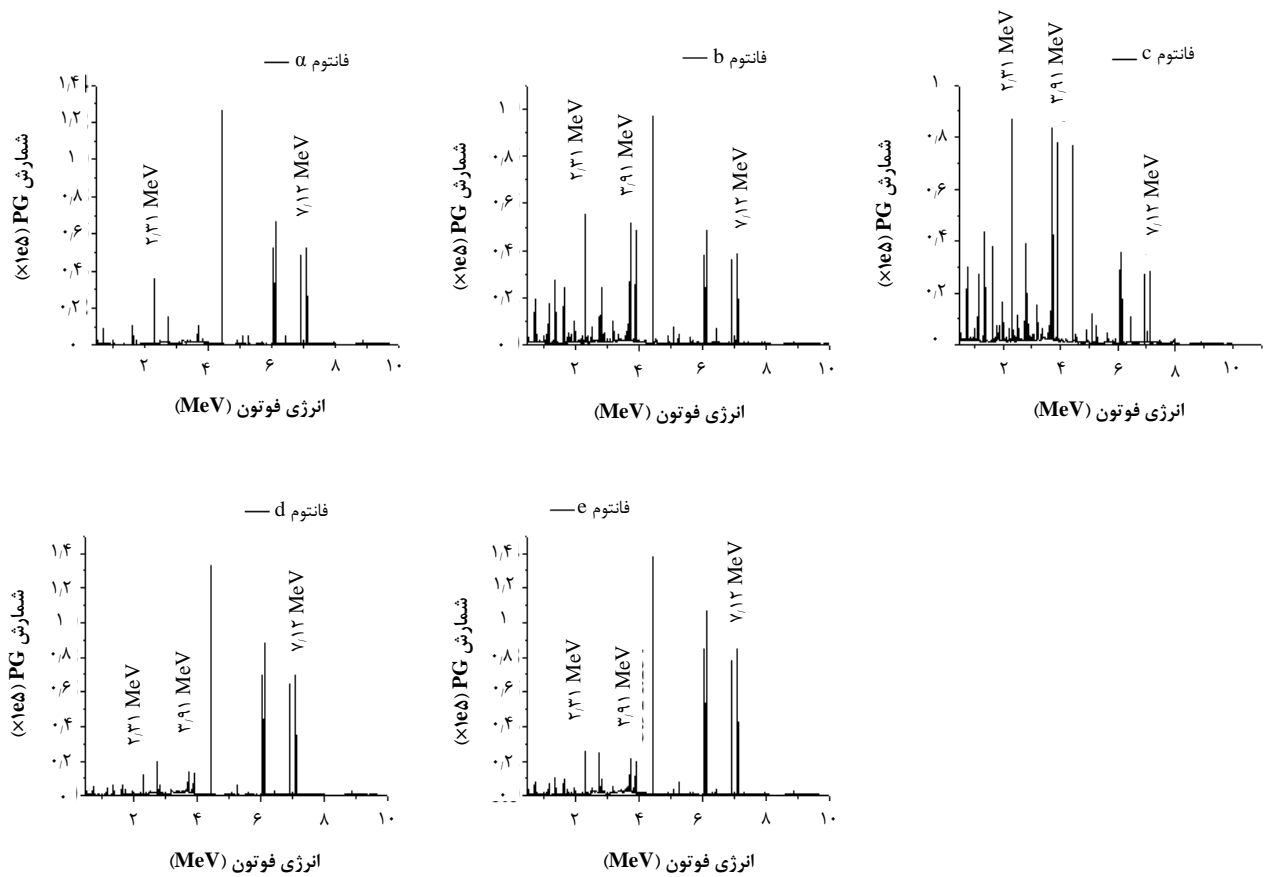
شکل ۵ نتایج مربوط به خطوط گسیل گامای آبی عناصر اکسیژن، کربن، نیتروژن و کلسیم را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، خطوط گامای 4.44 MeV برای کربن، 4.44 MeV ، 6.13 MeV ، 6.92 MeV و 7.12 MeV برای اکسیژن، 3.74 MeV ، 1.37 MeV و 3.91 MeV برای کلسیم و 2.31 MeV ، 1.64 MeV و 5.11 MeV برای نیتروژن به وضوح قابل تشخیص است. براساس شکل ۵ برخی خطوط گاما بین عناصر مشترک است، نظیر خط 4.44 MeV برای عنصر کربن و اکسیژن. در حالی که برخی خطوط مختص عنصری خاص می‌باشد و می‌توان شمارش‌های این گاماها را به مقدار آن عنصر نسبت داد. در این مطالعه خطوط گامای 3.91 MeV ، 2.31 MeV و 7.12 MeV در نظر گرفته شده است. شکل ۶ خطوط گاماها ی آبی گسیل شده از فانتوم‌های a، b، c، d و e را نشان می‌دهد. شکل ۷ نیز خطوط گاماها ی آبی گسیل شده از فانتوم‌های آزمون ۱ و ۲ را نشان می‌دهد. این فانتوم‌ها براساس چگالی‌ها و درصد جرمی عناصر کربن، اکسیژن، نیتروژن، کلسیم و هیدروژن ارایه شده در جدول ۱ تعریف شده‌اند.

تناسب بین شمارش گاماها ی 3.91 MeV با جرم کلسیم، گاماها ی 2.31 MeV با جرم نیتروژن و گاماها ی 7.12 MeV با جرم اکسیژن در حجم تحت تابش به ترتیب در شکل‌های ۸، ۹ و ۱۰ نمایش داده شده است. در سال ۲۰۱۳ یک رابطه ی خطی برای شمارش‌های زیر قله ی 6.13 MeV و مقدار جرم اکسیژن در نمونه‌های مورد بررسی از آب و شکر توسط Polf گزارش شده است [۷]. در مطالعه حاضر این رفتار برای عناصر اکسیژن، نیتروژن و کلسیم براساس شمارش‌های زیر قله 7.12 MeV ، 2.31 MeV و 3.91 MeV به‌دست آمده است. ابزار مورد استفاده برای برازش خطی نرم‌افزار OriginPro8 است. در نهایت جهت اعتبارسنجی رفتار پیش‌بینی شده، دو فانتوم آزمون مورد بررسی قرار گرفته‌اند و با مقایسه جرم تخمین زده شده توسط برازش خطی و جرم واقعی عناصر کلسیم، نیتروژن و اکسیژن در فانتوم‌های آزمون ۱ و ۲، اندازه‌ی درصد خطای نسبی این روش در پیش‌بینی جرم محاسبه گردیده است.

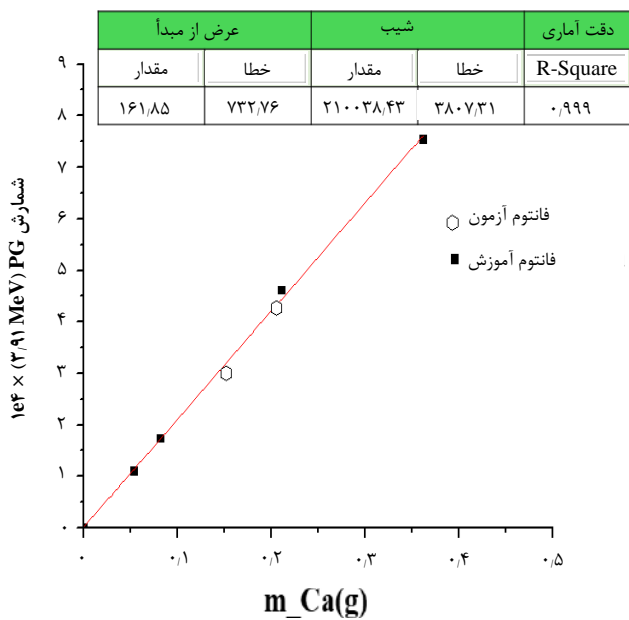
جدول ۲ حجم تحت تابش، جرم عناصر کلسیم، نیتروژن و اکسیژن در حجم تحت تابش و شمارش گاماها ی 3.91 MeV ، گاماها ی 2.31 MeV و گاماها ی 7.12 MeV در پنج فانتوم آموزشی را نشان می‌دهد. در جدول ۳ این اطلاعات برای دو فانتوم آزمون ارایه شده است.



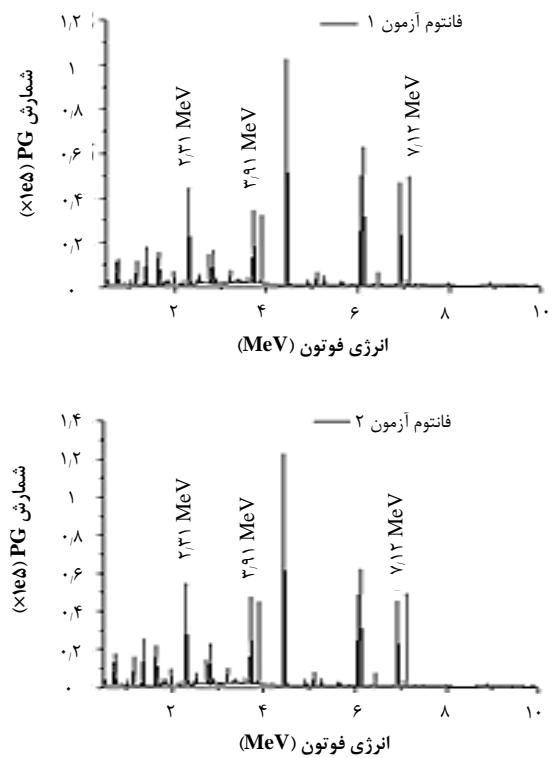
شکل ۵. خطوط گسیل گامای آبی عناصر کربن، اکسیژن، کلسیم و نیتروژن.



شکل ۶. خطوط گسیل گامای آنی فانتوم‌های a, b, c, d و e.

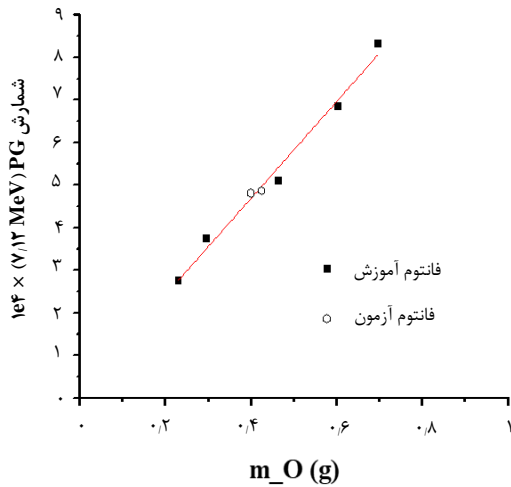


شکل ۸. شمارش‌های گامای آنی قله ۳۹۱ MeV به صورت تابعی از جرم کلسیم در حجم تحت تابش و خط برازش شده به این داده‌ها.



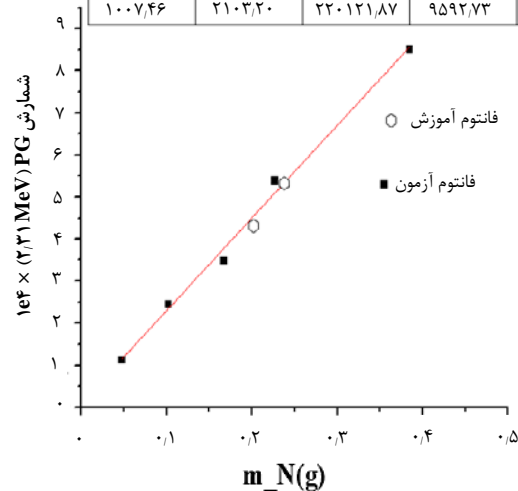
شکل ۷. خطوط گسیل گامای آنی فانتوم‌های آزمون.

عرض از مبدأ		شیب		دقت آماری
مقدار	خطا	مقدار	خطا	R-Square
۱۶۵۸٫۹۵	۳۶۲۲٫۶۵	۱۱۳۶۸٫۴۳	۷۴۰٫۱۶۴	۰٫۹۸۳



شکل ۱۰. شمارش‌های گامای آنی قله ۷۱۲ MeV به صورت تابعی از جرم اکسیژن در حجم تحت تابش و خط برازش شده به این داده‌ها.

عرض از مبدأ		شیب		دقت آماری
مقدار	خطا	مقدار	خطا	R-Square
۱۰۰۷٫۴۶	۲۱۰۳٫۲۰	۲۲۰۱۲۱٫۸۷	۹۵۹۲٫۷۳	۰٫۹۹۲



شکل ۹. شمارش‌های گامای آنی قله ۲۳۱ MeV به صورت تابعی از جرم نیتروژن در حجم تحت تابش و خط برازش شده به این داده‌ها.

جدول ۲. حجم تحت تابش، جرم عناصر کلسیم، نیتروژن و اکسیژن و شمارش‌های مربوط به قله‌های ۳٫۹، ۲٫۳۱ و ۷٫۱۲ MeV برای فانتوم‌های a, b, c, d و e

فانتوم آموزش						
شمارش (۷۱۲ MeV)	m _O (g)	شمارش (۲۳۱ MeV)	m _N (g)	شمارش (۳٫۹ MeV)	m _{Ca} (g)	حجم تابش شده (cm ³)
۵۰۹۸۰	۰٫۴۶۲	۳۴۷۹۱	۰٫۱۶۷	۰	۰	۱٫۰۴۷
۳۷۴۷۱	۰٫۲۹۴	۵۳۸۵۵	۰٫۲۲۷	۴۶۱۰۶	۰٫۲۱۱	۱٫۰۵۲
۲۷۵۷۱	۰٫۲۲۹	۸۵۱۱۱	۰٫۳۸۵	۷۵۳۴۶	۰٫۳۶۲	۰٫۷۳
۶۸۴۰۴	۰٫۶۰۲	۱۱۲۸۸	۰٫۰۴۸	۱۰۹۷۴	۰٫۰۵۴	۰٫۹۴
۸۳۲۸۶	۰٫۶۹۵	۲۴۴۸۴	۰٫۱۰۲	۱۷۳۰۰	۰٫۰۸۲	۱٫۰۵۳

جدول ۳. حجم تحت تابش، جرم عناصر کلسیم، نیتروژن و اکسیژن و شمارش‌های مربوط به پیک‌های ۳٫۹، ۲٫۳۱ و ۷٫۱۲ MeV برای فانتوم‌های آزمون

فانتوم آزمون						
شمارش (۷۱۲ MeV)	m _O (g)	شمارش (۲۳۱ MeV)	m _N (g)	شمارش (۳٫۹ MeV)	m _{Ca} (g)	حجم تابش شده (cm ³)
۴۸۵۹۷	۰٫۴۲۵	۴۳۱۶۸	۰٫۲۰۲	۲۹۹۷۳	۰٫۱۵۲	۰٫۷۵
۴۸۰۸۸	۰٫۴۰	۵۳۲۱۴	۰٫۲۳۸	۴۲۶۸۱	۰٫۲۰۵	۰٫۹۴

از برازش خطی با مقدار واقعی دقیقاً برابر بوده است. جهت بررسی تأثیر خطاهای به دست آمده در تخمین درصد وزنی عناصر روی برد پروتون، از رابطه‌ی ارایه شده در مرجع [۱۴] برای محاسبه برد پروتون در ترکیبات مختلف استفاده شده است. نتایج مربوط به محاسبه برد پروتون برای دو فانتوم آزمون با استفاده از درصد‌های وزنی تخمینی و درصد‌های واقعی از پیش تعریف شده در جدول ۵ ارایه شده است. نتایج این جدول خطای کم‌تر از ۳ درصد را برای برد پروتون، که معادل با جابه‌جایی کم‌تر از یک میلی‌متر در مکان برد است، را نشان می‌دهد.

در ستون‌های سوم و ششم از جدول ۴ جرم تخمین زده شده برای عناصر کلسیم، نیتروژن و اکسیژن به ترتیب برای فانتوم‌های آزمون ۱ و ۲ گزارش شده است. مقایسه این نتایج با جرم واقعی این عناصر در حجم تحت تابش، اندازه‌ی درصد خطاهای نسبی ۵٫۹ و ۱٫۵ را برای پیش‌بینی جرم کلسیم و ۲٫۸ و ۲ درصد را برای اکسیژن به ترتیب برای فانتوم‌های آزمون ۱ و ۲ نشان می‌دهد. هم‌چنین اندازه‌ی درصد خطای نسبی پیش‌بینی جرم نیتروژن ۴٫۴۶ در فانتوم آزمون ۱ بوده است و در فانتوم آزمون ۲ این خطا به صفر رسیده و مقدار تخمین زده شده با استفاده

جدول ۴. جرم تعریف شده و تخمین زده شده عناصر کلسیم، نیتروژن و اکسیژن و اندازه‌ی درصد خطای نسبی برای فانتوم‌های آزمون

عنصر	فانتوم آزمون ۱		فانتوم آزمون ۲	
	جرم از پیش تعریف شده (g)	جرم تخمین زده شده (g)	خطا (%)	خطا (%)
Ca	۰٫۱۵۲	۰٫۱۴۳	۵٫۹	۰٫۲۰۲
N	۰٫۲۰۲	۰٫۱۹۳	۴٫۴۶	۰٫۲۳۸
O	۰٫۴۲۵	۰٫۴۱۳	۲٫۸	۰٫۳۹

جدول ۵. برد دقیق و تخمین زده شده پروتون در دو فانتوم آزمون و اندازه‌ی درصد خطای نسبی

برد دقیق (g/cm ^۲)	فانتوم آزمون ۱		فانتوم آزمون ۲	
	برد تخمین زده شده (g/cm ^۲)	خطا (%)	برد دقیق (g/cm ^۲)	برد تخمین زده شده (g/cm ^۲)
۰٫۸۵۴	۰٫۸۷۵	۲٫۴۶	۰٫۹۳۷	۰٫۹۴۷

۴. بحث و نتیجه‌گیری

در این مطالعه شمارش‌های گامای آنی رسیده به حجم حساس ناشی از تابش پرتوهای پروتون برحسب انرژی برای پنج فانتوم تشکیل شده از هیدروژن، کربن، کلسیم، اکسیژن و نیتروژن شبیه‌سازی شده است. نتایج به‌دست آمده نشان داد که جرم عناصر اکسیژن، نیتروژن و کلسیم در حجم تحت تابش هر فانتوم به ترتیب متناسب با شمارش گاماهاى آنی مربوط به انرژی ۰٫۷۱۲، ۲٫۳۱ MeV و ۳٫۹۱ MeV است. بنابراین روش شمارش‌های زیر قله را می‌توان برای آنالیز عنصری فانتوم تحت تابش مورد استفاده قرار داد. شدت قله‌های مشترک بین عناصر، نظیر شمارش‌های قله ۴٫۴۴ MeV که هم در طیف کربن و هم در طیف اکسیژن ظاهر می‌شود، وابسته به غلظت هر دو عنصر کربن و اکسیژن است و اندازه‌گیری گسیل گاماهاى آنی ۴٫۴۴ MeV به تنهایی برای تعیین مقدار کربن در حجم تحت تابش کافی نیست و لازم است تا غلظت اکسیژن (با استفاده از دیگر قله‌های اکسیژن نظیر ۶٫۱۳ MeV، ۶٫۹۲ MeV و یا ۷٫۱۲) مورد بررسی قرار گیرد. براساس این مطالعه برای یک سیستم ثبت گاماهاى آنی می‌توان جرم هر عنصر در حجم تحت تابش فانتوم را با استفاده از شمارش برخی قله‌های گاما آنی مشخصه آن عنصر پیش‌بینی کرد. در مطالعه حاضر غلظت عناصر کلسیم، اکسیژن و نیتروژن در فانتوم‌های آزمون با اندازه‌ی خطای نسبی کم‌تر از ۶٪ تخمین زده شده است. نتایج نشان داد خطاهای مربوط به اختلاف درصدهای جرمی تخمین

زده شده و درصدهای جرمی واقعی در فانتوم‌های آزمون، منجر به خطا در تعیین برد به اندازه کم‌تر از ۱ میلی‌متر خواهد بود که با توجه به محدوده خطاهای تجربی در تعیین برد، مقداری قابل‌قبول محسوب می‌شود. با توجه به این‌که تعیین عناصر موجود در بافت تحت تابش به منظور افزایش کیفیت درمان همواره یکی از چالش‌های مهم در بحث پرتودرمانی به شمار می‌رود، این روش از آنالیز عنصری برای اندازه‌گیری و دنبال کردن تغییرات غلظت عناصر در حین جلسات درمان پروتون تراپی بسیار کارآمد به نظر می‌رسد.

مراجع

1. W.D. Newhauser, R. Zhang, *The physics of proton therapy*. *Phys. Med. Biol.* **60** (8) 155 (2015).
2. J. Krimmer, et al, *Prompt-gamma monitoring in hadrontherapy: A review*, *Nucl. Instrum. Meth. A*, **878**, 58 (2018).
3. M. Moteabbed, S. España, H. Paganetti, *Monte Carlo patient study on the comparison of prompt gamma and PET imaging for range verification in proton therapy*, *Phys. Med. Biol.*, **56** (4), 1063 (2011).
4. C.H. Min, et al. *Prompt gamma measurements for locating the dose falloff region in the protontherapy*, *Appl. phys. lett.*, **89** (18), 183517 (2006).
5. E. Testa, et al. *Monitoring the Bragg peak location of 73MeV/u carbon ions by means of prompt- γ ray measurements*, *Appl. phys. lett.*, **93** (9), 093506 (2008).
6. M. Usta, et al. *Stopping power and dose calculations with analytical and Monte Carlo methods for protons and prompt gamma range verification*. *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A*, **897**, 106 (2018).
7. J.C. Polf, et al. *Measurement of characteristic prompt gamma rays emitted from oxygen and carbon in tissue-equivalent samples during proton beam irradiation*, *Phys. Med. Biol.* **58** (17), 5821 (2013).
8. T. Werner, et al. *Processing of prompt gamma-ray timing data for proton range measurements at a clinical beam delivery*, *Phys. Med. Biol.* (2019) accepted manuscript.
9. R.P. Gardner, et al., *Single peak versus library least-squares analysis methods for the PGNAA analysis of vitrified waste*. *Appl. Radiat. Isotopes*. **48** (10), 331 (1997).
10. J.C. Polf, et al., *Prompt gamma-ray emission from biological tissues during proton irradiation: a preliminary study*. *Phys. Med. Biol.*, **54**, 731 (2009).
11. J.C. Polf, et al., *Measurement and calculation of characteristic prompt gamma ray spectra emitted during proton irradiation*, *Phys. Med. Biol.* **519**, 27 (2009).
12. J.M. Verburg, H.A. Shih, J. Seco, *Simulation of prompt gamma-ray emission during proton radiotherapy*, *Phys. Med. Biol.* **57**(17), 5459 (2012).
13. J. Jeyasugiththan, S. Peterson, *Evaluation of proton inelastic reaction models in Geant4 for prompt gamma production during proton radiotherapy*. *Phys. Med. Biol.*, **60** (19), 7617 (2015).
14. F.S. Rasouli, S.F. Masoudi, D. Jette, *Technical Note: On the proton range and nuclear interactions in compounds and mixtures*, *Med. Phys.*, **42** (5) 2364 (2015).