



## ارائه و شبیه سازی یک مدل جدید از فنتوم با استفاده از کد MCNPX به منظور تعیین دقیق دز جذبی در عمل NCT و نیز ارائه یک روش تحلیلی برای مقایسه نتایج بدست آمده سید علیرضا، موسوی شیرازی<sup>۱\*</sup>؛ ناصر، منصور شریفلو<sup>۲</sup>؛ داریوش، سرداری<sup>۲</sup>

۱. دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب- دانشکده علوم پایه- گروه فیزیک

۲. دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران- دانشکده فنی و مهندسی- گروه مهندسی هسته ای

### چکیده:

در این مقاله، یک مدل جدید از فنتوم کبد معرفی، تعریف و توسط مونت کارلو شبیه سازی می شود. سپس مقادیر دز جذبی بطور دقیق در آن و در سایر عناصر تشکیل دهنده اش محاسبه می شود. این فنتوم دارای ترکیبات مشابه با ترکیبات موجود در بافت کبد واقعی یک فرد بزرگسال می باشد. در مرحله بعد، یک روش تحلیلی برای تعیین دزهای جذبی در عناصر فنتوم مذکور ارائه می شود و سپس برای تصدیق این مدل، نتایج بدست آمده از هر دو طریق شبیه سازی مونت کارلویی و تحلیلی با یکدیگر برای بازه وسیعی از انرژی نوترونی مقایسه می گردند. این مقایسه در هر یک از اجزای فنتوم کبد بطور کامل اعمال می شود. نتایج بدست آمده نشان می دهد که برای انرژی نوترونی زیر ۱۵MeV، همه نمودارهای دز، همپوشانی خوبی نسبت به یکدیگر دارند.

واژگان کلیدی: دز، فنتوم، کبد، نوترون.

### مقدمه

عمل نوترون تراپی بوسیله گیراندازی نوترون، یک تکنیکی از رادیوتراپی است که برای درمان تومورها با استفاده از پرتوهای بوسیله ذرات باردار دارای LET (Linear Energy Transfer) بالا انجام می شود. درمان بوسیله نوترون، شامل دو نوع BNCT (Boron Neutron Capture Therapy) و NCT (Neutron Capture Therapy) می باشد. در روش BNCT با اندازه گیری اولیه حامل های بور و تزریق آن در بدن بیمار، از اندرکنش بین نوترون و بور موجود در محلول که منجر به تولید پرتوی  $\alpha$  که یک پرتوی یونساز مستقیم می باشد استفاده می نمایند که این پرتو می تواند مستقیماً محیط بافت را که قسمت اعظم آن آب می باشد یونیزه نماید.

ولی روش NCT روشی متفاوت از BNCT می باشد که در آن پرتوها یونسازی محیط را به طور غیر مستقیم انجام می دهند. یعنی ابتدا ذرات ثانویه بارداری مانند الکترونها را در محیط بافت بوجود آورده و سپس آن ذرات باردار، عمل یونیزاسیون را انجام می دهند. در گذشته فنتوم MIRD توسط دو دانشمند به نامهای Fisher و Snyder در ORNL در سال ۱۹۶۰ برای ۲۲ ارگان داخلی و بیش از ۱۰۰ زیر ارگان داخلی بدن طراحی شده است. این طراحی در اصل اولین ساخت فنتوم شبیه به انسان می باشد که برای دو جنس مرد و زن به منظور دزیمتری داخلی صورت گرفته است [۲۸]. انواع کاملتری از فنتوم موسوم به فنتومهای مدل خانواده نیز در سال

۱۹۸۰ طراحی و ساخته شده است که دارای اطلاعات دقیقی از مواد موجود در بافت نمی باشد. در این فنتومها هر یک از ارگانها بدلیل داشتن بسیاری از محدودیتهای ذاتی در تعریف هندسه و نوع ماده ، دارای اطلاعات ضعیفی بوده و لذا این فنتومها صرفاً بر اساس اطلاعاتی سطحی ساخته شده و دارای درجه بالایی از خطا بودند.  
**روش کار**

### ارائه یک فنتوم کبد و شبیه سازی آن با کد MCNPX

در این تحقیق ، فنتوم مورد نظر یک فنتوم کروی و دارای لایه های متعدد بوده که برای بافت کبد ارائه می شود و دارای ترکیبات مشابه در مقایسه با ترکیبات موجود در کبد یک فرد بالغ مذکر است. ویژگی این فنتوم آنست که صرفاً به درون خود بافت محدود نمی شود بلکه تمامی بافت های جلوی کبد از جمله: چربی ، پوست و بافتهای زیر پوستی را نیز در برمی گیرد و لذا در این تحقیق تمامی بافت های جلوی بافت کبد در طراحی و مدلسازی این فنتوم بطور دقیق محاسبه شده اند. فنتوم کبدهی که در این تحقیق قرار است مورد بررسی قرار گیرد دقیقاً دارای معادل جرمی با آناتومی واقعی انسان بوده و درصد مواد تشکیل دهنده اش نیز مطابق با جدول ۱ می باشد.

جدول ۱- اجزاء و درصد مواد تشکیل دهنده بافت کبد انسان (جنس مذکر)

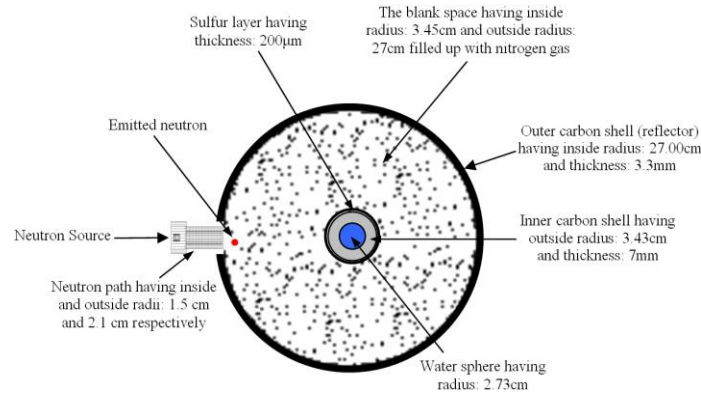
درصد جرمی	ماده
۶۹٫۶۹٪	آب
۰٫۳۵٪	گلیکوژن ( $C_{12}H_{22}O_{11}$ )
۲۹٫۹٪	پروتئین و گلوکز ( $C_{24114}H_{17120}N_{11228}O_{14005}S_{331}$ and $C_6H_{12}O_6$ )

چربی و آب هر دو در مجموع نوعاً بیش از ۹۰ درصد جرم بافتهای بدن را می سازند [۳]. در این تحقیق ، ضخامت بافت چربی که در نظر گرفته شده است ۳۰mm می باشد. درخصوص بافت پوست نیز ، متوسط ضخامت خالص پوست در مردان بطور متوسط ۱٫۵mm می باشد. پوست یک بافت بیولوژیکی است که از کربن ، اکسیژن و نیتروژن تشکیل شده است [۱]. فاصله بین چشمه نوترونی و بافت کبد به عنوان یک مسیر در نظر گرفته می شود. فاصله از سطح بدن (نزدیکترین بخش نسبت به بدن برای قرارگیری کلیماتور چشمه نوترونی در NCT) به بافت کبد بطور متوسط برای یک بدن طبیعی ، ۳cm در نظر گرفته می شود. بنابراین در شبیه سازی فنتوم ، مسیر استوانه ای که پرتوی نوترونی از سرتاسر آن عبور می کند تا به بافت کبد برسد یک استوانه در نظر گرفته و محاسبه می شود که شعاع داخلی آن  $r_1=1,0\text{cm}$  و شعاع خارجی آن  $r_2=2,1\text{cm}$  و طول آن  $l=3\text{cm}$  می باشد. در این فنتوم تعدادی لایه تعریف شده اند بطوریکه هر لایه بیانگر مقدار عنصر تشکیل دهنده موجود است. با استفاده از تجزیه مواد ساختمانی یک بافت کبد و بر مبنای درصد جرمی و چگالی های هر یک از آنها نسبت به عناصر تشکیل دهنده شان شامل: H, O, C, S, N, مقادیر H و O به یک کره آب تجمیع می شود و مقادیر بقیه عناصر شامل: S, C, N نتیجتاً با دقت ممکن محاسبه می شوند. بنابراین جرم ، ضخامت و شعاع کره مربوط به هر یک از عناصر تجزیه شده ، محاسبه گردیده و مطابق جدول ذیل می باشند:

جدول ۲- جرم، ضخامت و شعاع کره متعلق به هر یک از عناصر تجزیه شده

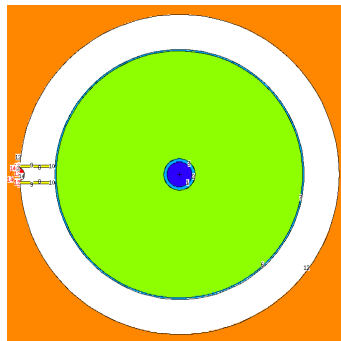
عناصر	جرم (gr)	شعاع خارجی کره مربوطه (cm)	ضخامت (cm)
C	۳۱۶,۹۳۷	۳,۴۳ (پوسته درونی)	۰,۷
		۲۷,۳۴ (پوسته بیرونی)	۰,۳۴
S	۶,۰۸۵	۳,۴۵	۰,۰۲
N	۱۰۲,۹۴۳	۲۷,۰۰	۲۳,۵۴
H	۱۹۸,۸۹۸	تجمع شده به یک کره آب با شعاع ۲,۷۳cm	
O	۱۳۷۳,۹۳۱		

یک نمای ظاهری از فتوم مذکور که ترکیبی از چند لایه می باشد در ذیل به نمایش در آمده است:



شکل ۱- مدل کروی فتوم کبد

در مرحله بعد این فتوم با استفاده از شبیه سازی مونت کارلویی شبیه سازی می شود. شکل زیر هندسه فتوم تعریف شده با این شبیه سازی را نمایش می دهد:



شکل ۲- فتوم شبیه سازی شده توسط شبیه سازی مونت کارلو (کد MCNPX)



## استفاده از روش تحلیلی

در این تحقیق برای فنتوم مورد اشاره ، علاوه بر مدل سازی مونت کارلویی ، از روش تحلیلی نیز میزان دز جذبی در فنتوم مذکور و سایر اجزای تشکیل دهنده آن با در نظر گرفتن اندرکنش های بین فوتون با مواد تشکیل دهنده فنتوم ، برای طیف وسیعی از انرژی نوترونها بدست می آید. علت استفاده از روش تحلیلی در ساده تر بودن آن نسبت به روش ترانسپورت نوترون می باشد که در کد مونت کارلو بکارگیری می شود. انرژی از دست رفته نوترون در هر پراکندگی الاستیک توسط رابطه ۱ توصیف می شود [۴،۵]:

$$\Delta E = E_1 - E_2 (\cos \theta) P(\cos \theta) d(\cos \theta) \quad (1)$$

انرژی منتقل شده به فنتوم یا به عبارتی دیگر دز جذبی برای هر یک از عناصر موجود در فنتوم که دارای وزن اتمی  $A$  می باشند در طول برخورد یک نوترون با انرژی  $E_{th}$  از طریق رابطه ۲ محاسبه می شود:

$$E_R = \frac{2A}{(A+1)^2} E_{th} \cos^2 \psi \quad (2)$$

برای در نظر گرفتن میزان نفوذ نوترون از طریق لایه های فنتوم ، احتیاج به سطح مقطع های پراکندگی نوترون و توزیع زاویه ای آن می باشد. بنابراین با استفاده از زبان برنامه نویسی FORTRAN دز جذب شده در همه عناصر موجود در این فنتوم محاسبه می شود. معادله ۳ میزان انرژی انتقالی نوترون از انرژی بالا به انرژی پایین با توجه به اینکه  $n$  تعداد برخوردهای نوترونی می باشد را نشان می دهد [۷]:

$$E_{th} = E_n e^{-n\xi} \quad (3)$$

معادله ۴ مطابق ذیل شکل می گیرد و میزان انرژی نوترونهاي حرارتی را نشان می دهد:

$$E_{th} = E_n e^{-n\xi} = E_n e^{-\left( \frac{\Sigma_a + \Sigma_s (1 - \frac{2}{3A})}{\Sigma_{st}} \right) \left( \frac{2}{A + \frac{2}{3}} \right) n} \quad (4)$$

معادله ۴ می تواند تعیین کننده انرژی نوترون حرارتی رسیده به سرتاسر ضخامت فنتوم بر اساس انرژی نوترون فرودی می باشد. لذا جهت تعیین دز جذبی در فنتوم ، دامنه عددی  $E_n$  و  $E_{th}$  به تعداد برخوردهای نوترونی ( $n$ ) تقسیم می شود و سپس مقدار حاصله به انرژی اولیه  $E_{th}$  مطابق رابطه ذیل اضافه می شود [۶]:

$$E_{th(new)} = E_{th} + \frac{E_n - E_{th}}{n} \quad (5)$$

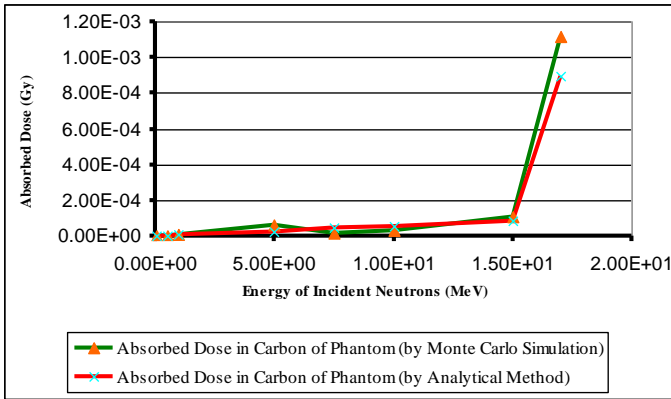
لذا جهت تعیین مقادیر دز جذبی در عناصر فنتوم مذکور ، معادلات ۲ و ۴ با هم الحاق می شوند. در نهایت ، معادله ۶ می تواند دز جذبی را در عناصر این فنتوم تعیین کند:

$$E_R = \frac{2A}{(A+1)^2} E_n e^{-\left( \frac{\Sigma_a + \Sigma_s (1 - \frac{2}{3A})}{\Sigma_{st}} \right) \left( \frac{2}{A + \frac{2}{3}} \right) n} \cos^2 \psi \quad (6)$$

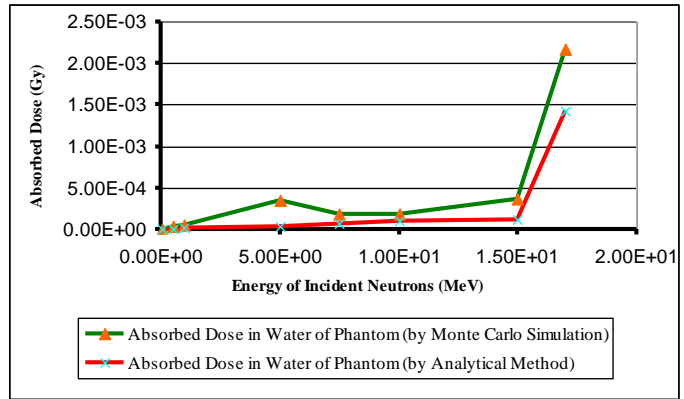


### نتایج

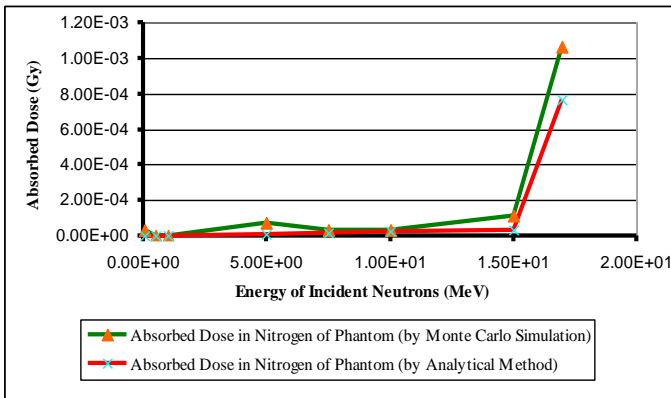
نمودارهای حاصله برای مقادیر دز جذبی در اجزای فنتوم مذکور (به ازای نوترونهاي ساطع شده) بر حسب  $E_R-E_n$  و توسط شبیه سازی مونت کارلویی با  $10^6$  nps و روش تحلیلی مطابق شکلهای ذیل می باشد:



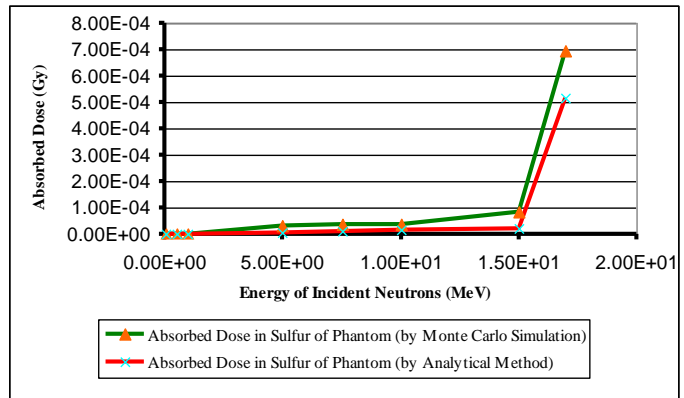
شکل ۴- دز جذبی در عنصر کربن فنتوم



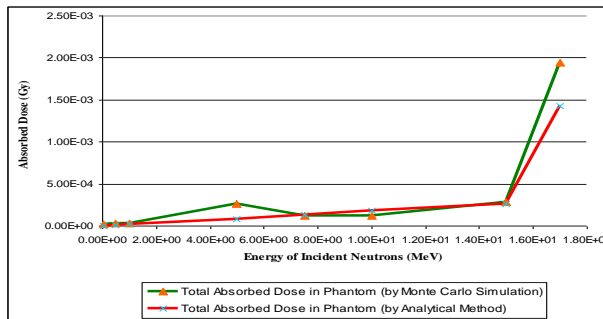
شکل ۳- دز جذبی در آب فنتوم کبد



شکل ۶- دز جذبی در عنصر نیتروژن فنتوم



شکل ۵- دز جذبی در عنصر سولفور فنتوم



شکل ۷- دز جذبی کلی در فنتوم کبد به دو طریق مونت کارلو و تحلیلی



## بحث و نتیجه گیری

مطابق شکل‌های ۳ تا ۷ اینطور مشاهده می شود که در محدوده انرژی نوترونی  $15\text{MeV} - 0.01\text{eV}$ ، مقدار دز جذبی تعیین شده در هر یک از اجزای فتوم چه از روش مونت کارلویی و چه از روش تحلیلی تقریباً مشابه یکدیگرند و نمودارهای بدست آمده از هر دو طریق برای نوترونهای با انرژی کمتر از  $15\text{MeV}$  با یکدیگر به خوبی مطابقت دارند. این همپوشانی به خوبی تصدیق می کند که این فتوم کروی می تواند محاسبه دقیق دز جذبی را برای بافت کبد میسر سازد. برای انرژی نوترونی بالای  $15\text{MeV}$ ، نتایج بدست آمده دارای خطا می باشد که این به علت وقوع واکنش های  $(n,\alpha)$  در انرژی های بالاتر از  $15\text{MeV}$  می باشد. چون کد مونت کارلو تمامی محاسبات دز را بر اساس ترابرد نوترونی و معادله ترانسپورت انجام می دهد و بالعکس روش تحلیلی محاسبه دز را بر اساس معادلات ریاضی (بر اساس  $\psi$  و  $E_n$ ) و نیز بر اساس فیزیک نوترون انجام می دهد، لذا به سبب محدودیت روش تحلیلی و قادر نبودن این روش به دربرگیری ذرات  $\alpha$  و نتیجتاً عدم محاسبه دز جذبی مربوط به این ذرات، لذا یک خطا در این رابطه به وجود می آید. علاوه بر این، نتیجه گرفته می شود که بواسطه افزایش انرژی نوترون فرودی در بازه سریع تا حرارتی، آب بیشترین مقدار دزهای جذبی را دریافت می کند و به ترتیب کربن، نیتروژن و سولفور به همان نسبت مقادیر کمتری از دزهای جذبی را دریافت می نمایند.

## مراجع

- ۱- Broder, V., ۱۹۶۰. Observations on skin thickness and subcutaneous tissue in man. Z. Morph. Anthrop. ۵۰ (۳), ۳۸۶-۳۹۵.
- ۲- Fisher, H. L., Snyder, W. S., ۱۹۶۶. Variation of dose delivered by  $^{137}\text{Cs}$  as a function of body size from infancy to adulthood. ORNL ۴۰۰۷, ۲۲۱-۲۲۸.
- ۳- Martin, A. D., Daniel, M. Z., Drinkwater, D. T., et al. ۱۹۹۴. Adipose tissue density, estimated adipose lipid fraction and whole body adiposity in male cadavers. Int. J. Obes. Relat. Metab. Disord. ۱۸ (۲), ۷۹-۸۳.
- ۴- Mousavi Shirazi, S. A., Pazirandeh, A., ۲۰۱۰. Design of a New System for Neutron Capture Therapy (Nct) Of a Sample Tissue for Determination of Requirement Duration and Determination of Absorbed Dose. J. Sci. Islamic Azad Univ. (Phys Iss) ۲۰, ۵۵-۶۸.
- ۵- Mousavi Shirazi, S. A., Sardari, D., ۲۰۱۲. Design and Simulation of a New Model for Treatment by NCT. Sci. Technol. Nucl. Install, ۱-۷, doi: ۱۰.۱۱۵۵/۲۰۱۲/۲۱۳۶۴۰.
- ۶- Mousavi Shirazi, S. A., Sardari, D., ۲۰۱۳. Analyzing the Interaction of Neutrons for Cancer Treatment Purpose. J. Basic. Appl. Sci. Res. ۳ (۲s), ۵۰۳-۵۰۶.
- ۷- Mousavi Shirazi, S. A., Taheri, A., ۲۰۱۰. A NEW METHOD FOR NEUTRON CAPTURE THERAPY (NCT) AND RELATED SIMULATION BY MCNP۴C CODE. AIP Conf, Kuala Lumpur, Malaysia ۷۷-۸۳.
- ۸- Richmond, C. R., ۱۹۸۵. Icrp Report of the Task Group on Reference Man. Appl. Rad. Isotop. ۱۲ (۳), ۲۵۱.
- ۹- Rochman, D., Haight, R. C., Wender, S. A., et al. ۲۰۰۵. First Measurements with a Lead Slowing-Down Spectrometer at LANSCE. International Conference on Nuclear Data for Science and Technology. AIP Conf. New Mexico, USA ۷۳۶-۷۳۹.