

محاسبه کمیت‌های میکرودوزیمتری الکترون‌های کم انرژی در ساختارهای زیر سلولی به کمک

کد Geant4-DNA

مجتبی مکاری*

گروه فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه صنعتی خاتم الانبیاء (ص) بهبهان، بهبهان

*خوزستان، بهبهان، دانشگاه صنعتی خاتم الانبیاء (ص) بهبهان، گروه فیزیک، کدپستی: ۶۳۶۱۶-۶۳۹۷۳

پست الکترونیکی: mokari@bkatu.ac.ir

چکیده

با کمک تعریف کمیت‌های تصادفی وابسته به ساختارهای میکروسکوپی، میکرودوزیمتری می‌تواند دستیابی به اطلاعاتی دقیق از اثرات تابش را فراهم سازد. با استفاده از روش توزیع تصادفی موسوم به μ -randomness و کد Geant4-DNA، در یک کره از جنس آب برای الکترون‌های کم انرژی در بازه انرژی ۰/۱ تا ۵ keV، مقادیر میکرودوزیمتری متوسط انرژی ویژه فراوانی و دوز و همچنین متوسط انرژی خطی فراوانی و دوز محاسبه شده است. در این پژوهش، حجم‌های هدف شامل استوانه‌هایی به ابعاد (ارتفاع \times قطر) 23×23 معادل حجم DNA، 100×50 معادل حجم نوکلئوزوم و 300×300 آنگستروم معادل حجم فیبر کروماتین انتخاب شده‌اند. با بررسی متوسط انرژی خطی فراوانی و دوز مشاهده شد که روند تغییرات نسبت به انرژی الکترون‌های اولیه با روند تغییرات آسیب همان الکترون‌ها در DNA شباهت دارد. همچنین نتایج پژوهش با نتایج موجود از شبیه‌سازی با کدهای PITS و KURBUC نیز مقایسه شده است. تفاوت‌هایی در نتایج این پژوهش با نتایج کدهای PITS و KURBUC مشاهده شد که به دلیل تفاوت در سطح مقطع مورد استفاده برای الکترون در کدهای مورد بررسی است. به‌عنوان مثال در کد Geant4-DNA برای الکترون‌های کم انرژی سطح مقطع یونیزاسیون و برانگیختگی به نسبت دیگر کدها، کوچکتر است.

کلیدواژگان: الکترون، میکرودوزیمتری، روش μ -randomness، Geant4-DNA، انرژی ویژه z، انرژی خطی y.

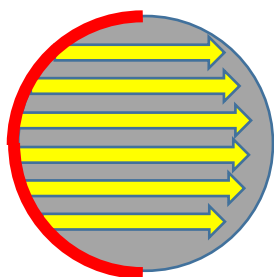
۱. مقدمه

متناسب با اندازه تومور بدون آسیب به بافت‌های سالم اطراف را دارند. البته میزان انرژی انباشت شده و توزیع فضایی نقاط برهمکنشی در ماده، در اثر برهمکنش این ذرات، تصادفی است. به‌طور کلی عوامل تابشی که می‌توانند بر ساختارهای بیولوژیکی

بررسی اثر پرتوهای یون‌ساز با سلول و ماده وراثتی آن، اطلاعات مهمی را برای شناخت بهتر زمینه‌های علمی مثل بیوفیزیک پرتویی، پرتودرمانی و تصویربرداری پزشکی به ما می‌دهد. پرتوهای یون‌ساز در محیط مادی پتانسیل ایجاد دوز جذبی

محاسبه کرده و با مقادیر شبیه‌سازی قبلی مقایسه نموده‌اند، همچنین آسیب دورشته‌ای پروتون‌ها در DNA را با روند تغییرات کمیت‌های میکرودوزیمتری پروتون مورد بررسی قرار داده‌اند [۸].

در این کار، به کمک کد Geant4-DNA، پرتوهای الکترون در بازه انرژی ۰/۱ تا ۴/۵ keV در محیط آب شبیه‌سازی می‌شود و کمیت‌های میکرودوزیمتری انرژی ویژه و انرژی خطی در ساختارهای زیر سلولی مثل DNA، نوکلئوزوم و فیبر کروماتین محاسبه می‌شود. این کمیت‌ها در پرتودرمانی و طراحی درمان با الکترون‌های اولیه یا در مواردی که الکترون‌ها پرتوهای ثانویه هستند، می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. ماهیت این پژوهش، در اثر برهمکنش‌های فیزیکی و مستقیم پرتو در ماده است که انرژی‌های انباشت در اثر یونیزاسیون و برانگیختگی در محیط را مورد بررسی قرار می‌دهد. کمیت‌های ذکر شده تاکنون برای الکترون‌های کم انرژی با کد Geant4-DNA و به روش μ -randomness محاسبه نشده است و فقط نتایج الکترون به روش μ -randomness با کدهای PITS و KURBUC محاسبه شده است [۴] که در این پژوهش مقایسه‌ای با نتایج مذکور صورت گرفته است.



شکل (۱): محیط کار و چشمه پرتوهای الکترون.

۲. مواد و روش‌ها

این پژوهش به کمک کد Geant4-DNA انجام شده است، که بر پایه کد Geant4 (v10.06p2) توسعه یافته و امکان شبیه‌سازی تابش‌ها در محیط‌های کوچک با ابعادی در مقیاس

تأثیر بگذارند، شامل: دوز جذب شده، تعداد، توزیع و همبستگی نقاط برهمکنشی و همچنین میزان انرژی انباشت شده در نقاط برهمکنشی هستند [۱].

مسئله مهم در اینجا این است که در نظر گرفتن کامل ساختارهای زیستی و تمام فعل و انفعالات تابشی، بسیار پیچیده است. روسی و همکاران با در نظر گرفتن مفاهیمی که بتوانند ویژگی‌های اصلی جذب تابش را به ابعاد و نوع بافت مرتبط کنند و با طراحی روش‌های مفهومی و تجربی لازم، مشکلات مربوط به اندازه‌گیری دوزها را در حجم‌های میکروسکوپی تا حدودی بر طرف نمودند [۲]. بدین ترتیب به عنوان شاخه‌ای از بیوفیزیک تابشی، مطالعه توزیع‌های فضایی، زمانی و تصادفی فرایندهای انباشت انرژی در سطوح میکروسکوپی مورد پژوهش قرار گرفت و مفاهیم میکرودوزیمتری برای تعیین کمیت‌های تصادفی مسیرهای تابش با معرفی پارامترهایی مانند انرژی ویژه Z و انرژی خطی Y به جای دوز و انتقال انرژی خطی^۱ به کار گرفته شدند.

بیشتر کارهایی که در زمینه میکرودوزیمتری تاکنون انجام شده به صورت شبیه‌سازی به کمک کدهای موجود است. از آن جمله می‌توان به پژوهش‌های: لیامسون و همکاران به کمک کدهای PITS و KURBUC برای پرتوهای کربن و پروتون [۳] و الکترون [۴] همچنین نیکجو و همکاران [۵] با کد KURBUC، که مقادیر میکرودوزیمتری را در کره‌ها و استوانه‌هایی با اندازه کوچک برای برخی از یون‌های سنگین محاسبه کرده‌اند، اشاره کرد. رولت و همکاران [۶] از FLUKA برای محاسبه توزیع‌های انرژی خطی در یک محیط با دیواره مشخص استفاده کردند تا عملکرد کد FLUKA را برای الکترون‌های کم انرژی بررسی کنند. اخیراً مکاری و همکاران [۷]، به کمک کد Geant4-DNA و روش μ -randomness کمیت‌های میکرودوزیمتری انرژی ویژه و انرژی خطی را برای پروتون‌ها

^۱ Linear Energy Transfer (LET)

نسبت انرژی انباشت در استوانه‌های هدف به حجم آن‌ها مقایسه شد. در آزمون دوم معکوس متوسط انرژی ویژه فراوانی $\frac{1}{\bar{z}_f}$ با فرکانس انرژی‌های انباشت بزرگتر صفر ($f > 0$) مقایسه شد [۷]. در صورتی که آزمون‌های مذکور با اختلاف کمتر از ۱۰٪ برقرار باشند، نمونه‌گیری تایید و وارد مرحله محاسبات می‌شویم. در مرحله نهایی کمیت‌های میکرودوزیمتری متوسط انرژی ویژه فراوانی و دوز (\bar{z}_D و \bar{z}_F) و متوسط انرژی خطی فراوانی و دوز (\bar{y}_D و \bar{y}_F) به کمک روابط زیر محاسبه شده است [10]:

$$\bar{y}_F = \int_0^\infty y f(y) dy \quad (1)$$

$$\bar{y}_D = \int_0^\infty y d(y) dy = \frac{\int_0^\infty y^2 f_1(y) dy}{\int_0^\infty y f(y) dy} = \frac{\bar{z}_F^2}{\bar{z}_F} \quad (2)$$

$$\bar{z}_F = \int_0^\infty z f_1(z) dz \quad (3)$$

$$\bar{z}_D = \int_0^\infty z d_1(z) dz = \frac{\int_0^\infty z^2 f_1(z) dz}{\int_0^\infty z f_1(z) dz} = \frac{\bar{z}_F^2}{\bar{z}_F} \quad (4)$$

انرژی خطی به صورت $y = \frac{\mathcal{E}}{\ell}$ تعریف می‌شود که در آن \mathcal{E} انرژی منتقل شده و برابر با جمع کل انرژی‌های انباشت شده توسط یک رویداد واحد در حجم است. $\bar{\ell}$ برای استوانه‌ای با شعاع R و ارتفاع H ، متوسط طول وتر از رابطه $2RH/(R+H)$ به دست می‌آید. انرژی ویژه نیز به صورت $z = \frac{\mathcal{E}}{m}$ تعریف می‌شود که در آن \mathcal{E} انرژی منتقل شده در جرم m است [۱۰]. همچنین $f(y)$ (یا $f_1(z)$) چگالی احتمال این است که انرژی خطی (یا انرژی ویژه برای یک رویداد واحد) برابر یا کوچکتر از y (یا z) باشد. $d(y)$ (یا $d_1(z)$) چگالی احتمال کسری از دوز جذب شده در هر رویداد، در انرژی خطی (یا انرژی ویژه برای یک رویداد واحد) برابر یا کوچکتر از y (یا z) می‌باشد [۱۰].

DNA، یعنی حجم‌های نانومتری به آن اضافه شده است. مدل استفاده شده در این تحقیق، مدل پیش فرض Geant4-DNA با انرژی برش $7/4 \text{ eV}$ است. برهمکنش‌های الکترونی در مدل اصلی کد شامل: پراکندگی الاستیک ($7/4 \text{ eV}$ تا 1 MeV)، برانگیختگی الکترونی (9 eV تا 1 MeV)، یونیزاسیون (11 eV تا 1 MeV)، فعل و انفعالات پیوست مولکولی (4 eV تا 1 MeV)، و تحریک ارتعاشی (2 eV تا 100 eV) می‌باشد.

به منظور انجام این پژوهش، ابتدا، پرتوهای الکترون در بازه انرژی 0.1 تا $4/5 \text{ keV}$ ، مطابق شکل ۱ به‌طور موازی از نیمی از سطح کره‌ای از جنس آب ترابرد و شبیه‌سازی شده است. قطر کره آب برابر $6 \mu\text{m}$ برابر میانگین شعاع هسته سلول‌های پستانداران در نظر گرفته شده است [۹]. ذرات اولیه الکترونی، بین 1000 تا 20000 پرتو با توجه به انرژی الکترون‌های اولیه، به منظور توزیع کافی رد پرتو در محیط انتخاب شده که در سطح کره موازی با قطر آن ترابرد شده‌اند. تعداد پرتوها در هر انرژی به گونه‌ای انتخاب شده که با تغییر ۵٪ تعداد پرتوها در هر انرژی (تعداد پرتو $\pm 5\%$ آن‌ها)، تغییرات نتایج شبیه‌سازی زیر ۵٪ باشد. برای بررسی توزیع انرژی انباشت در نمونه‌های هدف انتخاب شده، الکترون‌ها تا انرژی برش ردیابی شدند. البته بیشتر فعل و انفعالات فیزیکی، به جز پراکندگی الاستیک منجر به انباشت انرژی می‌شوند. برای بررسی مقادیر میکرودوزیمتری، با استفاده از الگوریتمی با زبان برنامه‌نویسی پایتون، حجم‌های استوانه‌ای هدف با ابعاد (ارتفاع \times قطر)، 23×23 ، 50×100 و 300×300 آنگستروم، معادل ساختارهای DNA، نوکلئوزوم و فیبر کروماتین انتخاب شده‌اند.

برای تضمین نمونه‌گیری مناسب، استوانه‌های نمونه‌برداری شده در حجم هدف با روش μ -randomness توزیع شده‌است. روش μ -randomness در کار قبلی ما به‌طور کامل شرح داده شده است [۷]. نمونه‌گیری با دو آزمون سنجیده شده است. در آزمون اول نسبت انرژی انباشت در کره اصلی به حجم آن و

بزرگتر هستند که این روند نیز در محاسبات آسیب DNA و شکست‌های رشته‌ای در کار مکاری و همکاران برای الکترون‌های در همین بازه انرژی نیز مشاهده شده است [۱۱].

جدول (۱): کمیت‌های میکرودوزیمتری انرژی ویژه میانگین فراوانی و دوز و انرژی خطی ویژه میانگین فراوانی و دوز برای الکترون‌های کم انرژی در بازه ۰/۱ تا ۴/۵ keV به کمک شبیه سازی کد

Geant4-DNA

| انرژی × نظر (keV × Å) | ۰/۱ | ۰/۳ | ۰/۵ | ۱ | ۱/۵ | ۴/۵ | انرژی (keV) |
|--------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----------------|
| \bar{y}_F | ۶/۷۵ | ۲/۵۳ | ۰/۹۲ | ۰/۱۵ | ۰/۱۰ | ۰/۰۹ | ۲۳×۲۳ |
| (keV/μm) | ۱۹/۸۵ | ۱۴/۷۸ | ۶/۱۳ | ۱/۱۵ | ۰/۴۵ | ۰/۴۳ | ۱۰۰×۵۰ |
| | ۲۰/۶۱ | ۳۶/۶۴ | ۱۷/۸۴ | ۵/۹۷ | ۲/۳۸ | ۰/۷۵ | ۳۰۰×۳۰۰ |
| \bar{y}_D | ۵۳/۶۲ | ۳۰/۹۲ | ۱۷/۳۸ | ۰/۶۸ | ۰/۳۶ | ۰/۲۵ | ۲۳×۲۳ |
| (keV/μm) | ۷۲/۷۸ | ۷۳/۵ | ۳۷/۳۳ | ۱۲/۹۲ | ۱۰/۶۵ | ۱۰/۳۱ | ۱۰۰×۵۰ |
| | ۲۹/۸۸ | ۶۷/۵۹ | ۶۴/۵۷ | ۲۸/۴۰ | ۱۲/۳۷ | ۸/۰۶ | ۳۰۰×۳۰۰ |
| $\bar{z}_F^{10^4}$ | ۱۷/۳۳ | ۶/۴۹ | ۲/۳۶ | ۰/۳۸ | ۰/۲۶ | ۰/۲۴ | ۲۳×۲۳ |
| (eGy) | ۴/۰۴ | ۳/۰۱ | ۱/۲۵ | ۰/۲۳ | ۰/۰۹ | ۰/۰۸ | ۱۰۰×۵۰ |
| | ۰/۳۱ | ۰/۵۵ | ۰/۲۷ | ۰/۰۹ | ۰/۰۴ | ۰/۰۱ | ۳۰۰×۳۰۰ |
| $\bar{z}_D^{10^4}$ | ۱۳/۷۰ | ۷۹/۳۷ | ۴۴/۶۱ | ۱۷/۴ | ۹/۳۰ | ۶/۵۰ | ۲۳×۲۳ |
| (eGy) | ۱۴/۷۲ | ۱۴/۸۸ | ۷/۶۱ | ۲/۶۳ | ۲/۱۷ | ۲/۱۱ | ۱۰۰×۵۰ |
| | ۰/۴۵ | ۱/۰۲ | ۰/۹۷ | ۰/۴۳ | ۰/۱۹ | ۰/۱۲ | ۳۰۰×۳۰۰ |

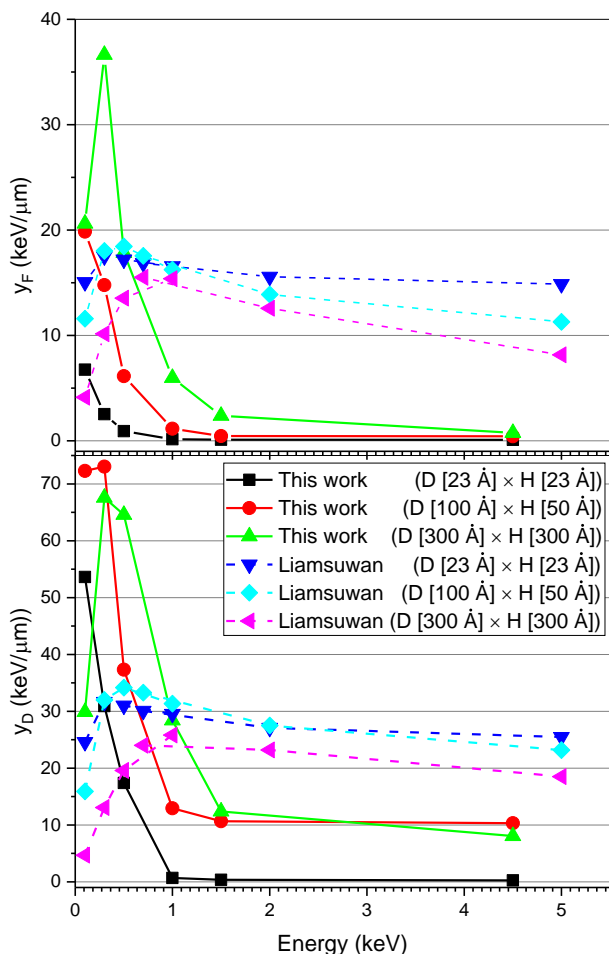
شکل ۲ نمودار متوسط انرژی خطی فراوانی و دوز (y_F و y_D) را در مقایسه با نتایج کدهای PITS و KURBUC توسط لیامسون و همکاران [۴] نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که انرژی‌های مخصوص میانگین فراوانی این دو تحقیق در انرژی‌های پایین تر از ۱ keV برای کد Geant4-DNA بزرگتر و در انرژی‌های بالاتر ۱ keV مقادیر محاسباتی با کدهای PITS و KURBUC بزرگتر است. این روند در محاسبه آسیب پرتوهای الکترون کم انرژی در DNA و سلول، در پژوهش‌های مکاری و همکاران نیز مشاهده شده است [۱۱ و ۱۲]. علت اختلاف نتایج شبیه‌سازی‌ها می‌تواند در تفاوت در سطح مقطع مورد استفاده برای الکترون باشد. به‌عنوان مثال در کد Geant4-DNA برای الکترون‌های کم انرژی سطح مقطع یونیزاسیون و برانگیختگی به نسبت دیگر کدها، کوچکتر است [۱۳] همچنین با محاسبه متوسط طول وتر هر استوانه، مقادیر ۱۵/۳، ۲۵ و ۲۰۰ آنگستروم به‌دست می‌آید که به دلیل سهم انرژی انباشت زیاد در حجم‌های بزرگ و ماهیت تصادفی این کمیت، مقادیر مذکور در استوانه‌های بزرگتر نسبت به کوچکتر، بیشتر است.

در ادامه کار، کمیت‌های میکرودوزیمتری در استوانه‌هایی به ابعاد (ارتفاع×قطر) ۲۳×۲۳ معادل حجم DNA، ۱۰۰×۵۰ معادل حجم نوکلئوزوم و ۳۰۰×۳۰۰ آنگستروم، معادل حجم فیبر کرواتین ارائه شده است.

۳. بحث و بررسی نتایج

پس از انجام شبیه‌سازی پرتوها در کره آب به قطر ۶ μm با کد Geant4-DNA، مختصات نقاط برهمکنش فیزیکی الکترون به همراه انرژی انباشت شده در آن نقاط از خروجی کد Geant4-DNA استخراج شد. به کمک روش μ-randomness استوانه‌های هدف در کره آب پخش شد و فراوانی انرژی انباشت در استوانه‌ها اندازه‌گیری شده و توابع چگالی احتمال مربوطه محاسبه شد. برای این کار، مختصات فضایی نقاط دارای انباشت انرژی، نسبت به فضای استوانه‌های هدف، بررسی شده تا مشخص شود کدام نقاط برهمکنشی در استوانه هدف قرار گرفته است. سپس انرژی انباشت شده (به‌صورت مجموع انرژی‌ها) در هر استوانه محاسبه شده و توزیع چگالی احتمالی با توجه به فراوانی و مقدار انرژی کل انباشت‌شده در استوانه‌های هدف، محاسبه شده است. در پایان به کمک معادلات ۱ تا ۴ کمیت‌های میکرودوزیمتری متوسط انرژی ویژه فراوانی و دوز (\bar{z}_D و \bar{z}_F) و متوسط انرژی خطی فراوانی و دوز (\bar{y}_D و \bar{y}_F) محاسبه شده است. جدول ۱ کمیت‌های میکرودوزیمتری ذکر شده را برای الکترون‌های تک انرژی در بازه ۰/۱ تا ۴/۵ keV ارائه می‌دهد. این کمیت‌ها، در سه حجم مختلف معادل DNA، نوکلئوزوم و فیبر کروماتین که جزء بخش‌های زیر سلولی هستند، به دست آمده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، کمیت‌های متوسط انرژی ویژه و انرژی خطی فراوانی و دوز با افزایش انرژی الکترون‌ها کاهش می‌یابد. البته در انرژی‌های کم به دلیل برهمکنش‌های بیشتر پرتوهای الکترون (اولیه و یا ثانویه)، کمیت‌های محاسبه شده

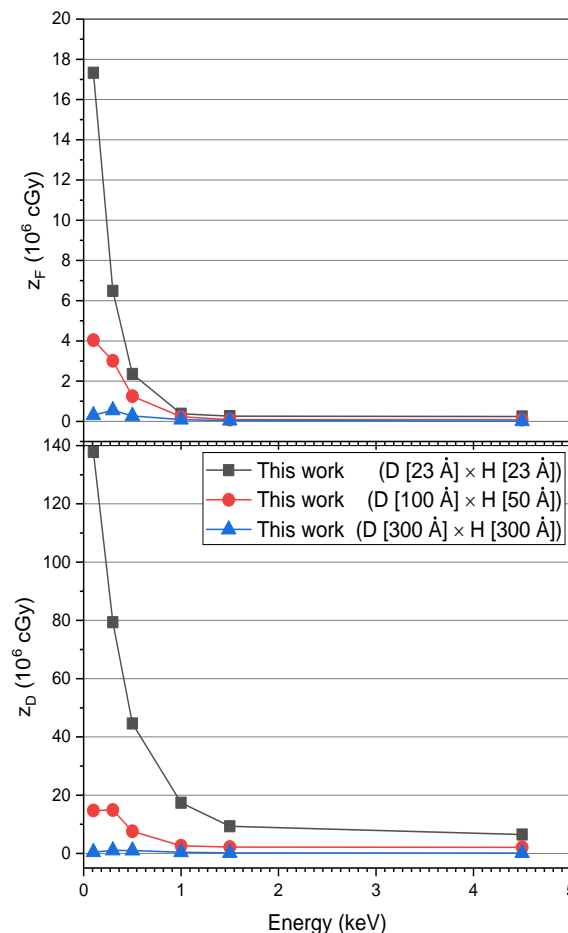
شکل (۳): انرژی ویژه میانگین فراوانی (شکل بالا) و دوز (شکل پایین) برای الکترون‌های کم انرژی در بازه ۰/۱ تا ۴/۵ keV به کمک شبیه سازی کد Geant4-DNA (ابعاد استوانه‌ها به آنگستروم می‌باشد).



۴. نتیجه گیری

به کمک ماهیت تصادفی انباشت انرژی ناشی از برهمکنش‌های فیزیکی بین پرتو و ماده و با استفاده از کد Geant4-DNA، کمیت‌های میکرودوزیمتری مربوط به پرتوهای الکترون کم انرژی را به منظور بررسی کارایی کد Geant4-DNA محاسبه کردیم. برای این کار سه حجم استوانه‌ای شکل در اندازه‌های مختلف شبیه اندازه‌های ارگان‌های زیر سلول مانند DNA، نوکلئوزوم و فیبر کروماتین را در نظر گرفتیم و نتایج کار را با نتایج موجود از شبیه‌سازی با کدهای PITS و KURBUC نیز مقایسه کردیم. مشاهده شد که با مقایسه متوسط انرژی خطی فراوانی و دوز این دو تحقیق در انرژی‌های پایین تر (الکترون‌های

شکل (۲): انرژی خطی ویژه میانگین فراوانی (شکل بالا) و دوز (شکل پایین) برای الکترون‌های کم انرژی در بازه ۰/۱ تا ۴/۵ keV به کمک شبیه سازی کد Geant4-DNA را در مقایسه با نتایج لیامسون و همکاران با کدهای PITS و KURBUC در استوانه‌هایی با ابعاد یکسان نشان می‌دهد (ابعاد استوانه‌ها به آنگستروم می‌باشد).



شکل ۳ نمودار متوسط انرژی ویژه فراوانی و دوز (z_D و z_F) را برای الکترون‌ها در این پژوهش نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که مقادیر میکرودوزیمتری این پژوهش با حجم استوانه‌هایی تغییر می‌کنند که به ترتیب نسبت حجمی ۱، ۴۱ و ۲۲۱۹ برای استوانه‌های کوچک، متوسط و بزرگ دارند. در انرژی‌های کم این وابستگی حجمی بسیار بیشتر است اما در انرژی‌های بالاتر، این وابستگی حجم کمتر شده و مقادیر انرژی ویژه به مقادیری از مرتبه چند در 10^6 سانتی گری همگرا می‌شوند.

- Influence of low energy electrons. *Radiat. Meas.* 45 (2010) 1330-1333.
7. M. Mokari, H. Moeini, M. Soleimani, Calculation of microdosimetric spectra for protons using Geant4-DNA and a μ -randomness sampling algorithm for the nanometric structures, *Int. J. Radiat. Biol.* 97 (2021) 208-218.
 8. M. Mokari, M. H. Alamatsaz, H. Moeini, R. Taleei. A Simulation Approach for Determining the Spectrum of DNA Damage Induced by Protons. *Phys Med Biol.* 63(2018) 175003.
 9. E. Polig, D. B. Kimmel, W. S. S. Jee. Morphometry of bone cell nuclei and their location relative to bone surfaces. *Phys. Med. Biol.* 29 (1984) 939-952.
 10. ICRU. *Microdosimetry*. Bethesda: International Commission on Radiation Units and Measurements, 1983.
 11. M. Mokari, M. H. Alamatsaz, H. Moeini, A. A. Babaei Brojeny, R. Taleei. Track structure simulation of low energy electron damage to DNA using Geant4-DNA. *Biomed. Phys. Eng. Express* 4 (2018) 065009.
 12. M. Mokari, H. Moeini, M. Soleimani, E. Fereidouni. Calculation and comparison of the direct and indirect DNA damage induced by low energy electrons using default and CPA100 cross section models within Geant4-DNA. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B* 480 (2020) 56-66.
 13. G. Famulari, P. Pater, S. Enger. Microdosimetry calculations for monoenergetic electrons using Geant4-DNA combined with a weighted track sampling algorithm. *Phys. Med. Biol.* 62 (2017) 5495-5508.

اولیه) از ۱ keV نتایج کد Geant4-DNA بزرگتر و در انرژی‌های بالاتر از ۱ keV مقادیر محاسباتی با کدهای PITS و KURBUC بزرگتر است که این روند در محاسبه آسیب پرتوهای الکترون کم انرژی در DNA و سلول، در پژوهش‌های مکاری و همکاران نیز مشاهده شده است. همچنین، در خصوص متوسط انرژی ویژه فراوانی و دوز ($\overline{z_D}$ و $\overline{z_F}$) الکترون‌های کم انرژی، نتایج جدیدی بدست آمده است که قبلاً با استفاده از روش μ -randomness با Geant4-DNA حاصل نشده بود. این نتایج می‌تواند در پرتودرمانی و طراحی درمان با الکترون‌های اولیه یا در مواردی که الکترون‌ها پرتوهای ثانویه هستند، مورد استفاده قرار گیرد.

۵. مراجع

1. H. Nikjoo, D. Emfietzoglou, R. Watanabe, S. Uehara. Can Monte Carlo track structure codes reveal reaction mechanism in DNA damage and improve radiation therapy?, *Rad. Phys. Chem.* 77 (2008) 1270-1279.
2. H. H. Rossi, W. A. Rozenzweig. A device for the measurement of dose as a function of specific ionization, *Radiology* 64 (1955) 404.
3. T. Liamsuwan, M. Hultqvist, L. Lindborg, S. Uehara, H. Nikjoo. Microdosimetry of proton and carbon ions, *Med. Phys.* 41 (2014) 8.
4. T. Liamsuwan, D. Emfietzoglou, S. Uehara, H. Nikjoo. Microdosimetry of low-energy electrons, *Int. J. Radiat. Biol.* 12 (2012) 899-907.
5. H. Nikjoo, D. Emfietzoglou, T. Liamsuwan, R. Taleei, D. Liljequist, S. Uehara. Radiation track, DNA damage and response - a review. *Rep. Prog. Phys.* 79 (2016) 116601.
6. S. Rollet, P. Colautti, B. Grosswendt, D. Moro, E. Gargioni, V. Conte, L. DeNardo. Monte Carlo simulation of mini TEPC microdosimetric spectra: