

بررسی و تحلیل آسیب مستقیم ذرات آلفا و پروتون بر روی DNA ناشی از اثرات انفجار بمب کثیف علی روحی مردق^۱

چکیده

با کاربرد گسترده انرژی هسته‌ای در صنعت و زمینه‌های نظامی، تشعشعات یونیزان بیش از پیش بر انسان تاثیر می‌گذارد، از این رو انرژی هسته‌ای توان بالقوه‌ای برای کاربردهای نظامی دارد. در اقدامات تروریستی هسته‌ای، مکان‌های پرجمعیت شهری هدف اصلی محسوب می‌شوند. یکی از مهلک‌ترین نوع حملات تروریسم هسته‌ای، استفاده از بمب کثیف در مکان‌های شلوغ و سر بسته مانند ایستگاه‌های مترو و مراکز خرید می‌باشد. پرتوهای یونیزه کننده از لحاظ مکانیسم عمل یونیزاسیون به پرتوهای یونیزه کننده مستقیم و غیرمستقیم تقسیم می‌شوند. تابش یونیزه کننده با انتقال انرژی خطی بالا (LET) همانند استفاده از ذرات آلفا می‌تواند مستقیماً با اهداف بیولوژیکی برهمکنش داشته باشد تا باعث یونیزاسیون شود و زنجیره‌ای از حوادث را برای ایجاد تغییرات بیولوژیکی آغاز کند. از نرم افزار Geant4-DNA برای محاسبه شکستگی مستقیم DNA ناشی از ذرات آلفا و پروتون استفاده شد. برای ذرات آلفا با انرژی ۱ مگا الکترون ولت، تعداد شکستگی‌های تک رشته‌ای (SSB) و دو رشته‌ای (DSB) افزایش یافته است. فراتر از انرژی ۱ مگا الکترون ولت، SSB و DSB روند نزولی داشتند. مشاهده شد که نسبت $\frac{SSB}{event}$ برای پروتون‌ها و ذرات آلفا در انرژی‌های مختلف تقریباً ثابت است. نتایج بررسی شده، نشان داد که در حالت کلی تفاوتی بین ذرات آلفا و پروتون در مقدار SSB، قابل توجه نیست.

واژگان کلیدی : بمب کثیف، ذرات آلفا، پروتون‌ها، DNA، SSB، DSB

۱- (علی روحی مردق): فارغ التحصیل دانشگاه تبریز، ایران. ایمیل: Alirohie.ar99@gmail.com

مقدمه

تحول و پیشرفت‌های روز افزون علوم و تکنولوژی موجب تحول در ساختار جنگ‌های بشری شده و شکل جنگ‌ها را از فرم کلاسیک به جنگ‌های نوین و نامتعارف تغییر داده است. بمب کثیف نوعی سلاح انفجاری است که در آن از انفجار غیر هسته‌ای برای پراکندن مواد پرتوزا و آلوده کردن محیط استفاده می‌شود از این رو دارای صفت کثیف است. بر خلاف قدرت انفجاری یک بمب اتمی، که از یک واکنش زنجیره‌ای هسته‌ای ناشی می‌شود، انرژی انفجاری بمب کثیف از مواد منفجره معمولی مانند دینامیت یا TNT ناشی می‌شود. هنگامی که بمب کثیف منفجر می‌شود، مواد رادیواکتیو را که در مجاورت مواد منفجره قرار گرفته است، پراکنده می‌کند. ساخت بمب کثیف آسانتر و ارزان‌تر از سلاح هسته‌ای است. ماده رادیواکتیو بکار رفته در این نوع بمب‌ها، نیازی به اورانیوم یا پلوتونیوم بسیار خالص موجود در بمب‌های اتمی ندارد اما می‌تواند از هر یک از منابع رادیواکتیو مورد استفاده در پزشکی و صنعت باشد. بمب کثیف بیشتر از آنکه شبیه به یک بمب هسته‌ای با قدرت تخریب بالا باشد به یک بمب با مواد منفجره متعارف شبیه است و تهدیدی جدی از سوی تروریست‌ها می‌باشد. انفجار یک بمب کثیف نسبت به بمب‌های هسته‌ای تخریب و تلفات کمتری ایجاد می‌کند ولی ساخت آن بسیار ساده‌تر و ارزان‌تر بوده و در ضمن از قابلیت تخریب انفجاری و آسیب‌های تشعشعی برخوردار است. انتشار مواد رادیواکتیو با هدف آسیب رسانی حمله رادیولوژیکی نام می‌گیرد. بمب کثیف، نوعی RDD^۱ است که به منظور پراکنش مواد رادیواکتیو به سطح یک منطقه مشخص و با وسایل انفجاری معمول فعال می‌شود. از کلمات بمب کثیف و RDD اغلب در مقالات تکنیکی به جای یکدیگر استفاده می‌شود. ولی، RDD سایر موارد پراکنش مانند قراردادن یک کانتینر پر از مواد رادیواکتیو در یک محل عمومی یا استفاده از هواپیما برای انتشار شکل‌های پودری یا گازهای استنشاقی مواد رادیواکتیوی، را نیز در برمی‌گیرد (حمله بیولوژیکی^۲، ۲۰۰۶). انفجار یک بمب هسته‌ای هزاران، تا میلیون‌ها برابر بیش از انفجار متعارف که در بمب کثیف رخ می‌دهد، انرژی تولید می‌کند. انفجار کلاهک هسته‌ای منجر به انفجار مهیب شده و در نتیجه موج انفجار، گرما، تشعشع، ریزش مواد رادیواکتیو رخ می‌دهد و همچنین ابر قارچی شکل منحصربه‌فردی را تولید می‌کند. غبارات رادیواکتیو با سیله باد در هوا جابجا شده و در اثر نیروی وزن به سطح زمین می‌ریزد (FAQS^۳؛ ۲۰۰۶).

در حال حاضر یکی از تهدیدهای محتمل استفاده از سلاح‌های هسته‌ای کم قدرت است که در ابعاد و اندازه یک چمدان می‌باشد و محتمل‌ترین تهدید منطقی، استفاده از بمب کثیف است. این بمب حاوی مواد منفجره و مواد رادیواکتیو است. این سلاح‌ها می‌توانند حاوی اورانیوم یا پلوتونیوم باشند ولی به احتمال بیشتر، از مواد رادیواکتیو قابل دسترس در امور پزشکی، تحقیقات و صنایع استفاده می‌شود (شریفی فر، ۱۳۸۷). در انفجار بمب کثیف بیشتر ذرات رادیواکتیو به مناطق اطراف پراکنده می‌شود و به زمین سقوط می‌کند و در محدوده انفجار، اعمال اثر خواهد کرد. میزان تخریب و تلفات بمب کثیف با مقدار مواد منفجره آن تعیین می‌شود. ولی با کمترین مقادیر ماده منفجره، پخش مواد رادیواکتیو می‌تواند چشمگیر باشد و اثرات روانی این رخداد بسیار بیشتر از صدمات فیزیکی آن است (بمب کثیف^۴؛ ۲۰۰۵).

^۱radiological dispersal device

^۲Radiological Attack

^۳Frequently Asked Questions

^۴Dirty Bombs

ذرات باردار با LET^۱ بالا، مانند یون‌های کربن یا هلیوم، می‌توانند یونیزاسیون قوی را در طول مسیر خود القا کنند و باعث آسیب به DNA شوند. آسیب وارده در این فرایند نسبت به آسیب دیگری که از طریق سایر فرآیندهای تابش یونیزان مانند اشعه X ایجاد شده است، قدرتمندتر است. انرژی ذخیره شده (ED)^۲ تابش یونیزان در نقاطی از فضای که مقدار گسسته انرژی به محیط انتقال می‌یابد با ماده ارتباط برقرار می‌کنند. از این به عنوان رسوب انرژی (ED) یاد می‌شود و به طور معمول واحد آن الکترون ولت است (نیکجو^۳، ۲۰۰۸). اگرچه جنبه‌های فیزیکی ذرات باردار به طور منطقی قابل درک است، اما تفاوت بین انواع مختلف تابش از نظر آسیب DNA نیاز به بررسی بیشتری دارد (ریتر و دورانت^۴، ۲۰۱۰ & برنال^۵، ۲۰۱۵ & ویدونا^۶، ۲۰۰۶). تابش یونیزان با انتقال انرژی خطی بالا (LET)، همانند استفاده از ذرات آلفا، می‌تواند مستقیماً با اهداف بیولوژیکی برهم‌کنش داشته باشد تا باعث یونیزاسیون شود و زنجیره‌ای از حوادث را برای ایجاد تغییرات بیولوژیکی آغاز کند. برخی مطالعات گزارش کرده‌اند که آسیب DNA به LET تابش یونیزان بستگی دارد. تابش ذرات با LET بالا آسیب‌های پیچیده‌تری ایجاد می‌کند که ترمیم آن بسیار دشوار است (تامسون^۷، ۲۰۱۲ & هادا^۸، ۲۰۱۱).

در مطالعات بیولوژیکی، DNA به عنوان یک هدف مهم برای اثرات بیولوژیکی انواع مختلف تابش شناخته می‌شود (پالمانس^۹، ۲۰۱۵ & وارد^{۱۰}، ۱۹۹۸). شکست‌های DNA ناشی از تابش برای بررسی ظرفیت تابش برای از بین بردن سلول‌ها اساسی است. انواع مختلف تابش، طیف وسیعی از آسیب‌های DNA را مانند SSB^{۱۱} و DSB^{۱۲} ایجاد می‌کند. SSB در صورت برخورد با یک اتم قند فسفات با ذخیره انرژی بیشتر از ۸/۲۳ eV که اولین سطح تحریک در آب مایع است برخورد می‌کند (فریدلند^{۱۳}، ۱۹۹۹). DSB زمانی اتفاق می‌افتد که دو SSB در رشته‌های مخالف در فاصله جفت ۱۰ پایه (جفت باز) تشکیل شوند (آلیسون^{۱۴}، ۲۰۱۶ & الگازار و کاظم^{۱۵}، ۲۰۱۵ & برنال^{۱۶}، ۲۰۱۳). DSB از خطرناک‌ترین آسیب‌های DNA است (کامپا^{۱۷}، ۲۰۰۵). آسیب مستقیم مربوط به عملکرد مستقیم ذرات (اولیه یا ثانویه) بر روی اهداف بیولوژیکی از طریق یونیزاسیون یا تحریک است. در اثر تأثیرات غیر مستقیم، تابش با آبی که بیشتر حجم سلول را پر می‌کند، برهم‌کنش کرده و منجر به ایجاد رادیکال‌های آزاد می‌شود که اتم‌ها یا مولکول‌های بسیار با واکنش بالا هستند و هرکدام دارای یک الکترون جفت نشده هستند. رادیکال‌های آزاد می‌توانند به اهداف حیاتی متشکل از DNA حمله کرده و رشته‌های آنها را بشکنند (برنال^{۱۸}، ۲۰۱۲).

^۱Linear energy transfer^۲Energy Deposition^۳nikjoo^۴Ritter and Durante^۵Bernal^۶Viduna^۷Thompson^۸Hada^۹Palmans^{۱۰}Ward^{۱۱}double-stranded breaks^{۱۲}double-stranded breaks^{۱۳}Friedland^{۱۴}Alison^{۱۵}Elgazzar and Kazem^{۱۶}Bernal^{۱۷}Campa^{۱۸}Bernal

علائم زودرس ناشی از تشعشع عبارتند از ریزش مو، کاهش تعداد پلاکت‌های خون، اسهال، استفراغ. علائم طولانی مدت نیز عبارتند از، از بین رفتن سلول‌ها و آسیب رسیدن به بافت‌ها، ایجاد جهش در DNA سلول‌های زنده، و در نتیجه ایجاد انواع سرطان‌ها. پزشکان بر این باورند که جهش‌ها در سلول‌های خاص و سلول‌های تکثیر شده ایجاد می‌شود و افزایش سرطان ناشی از تشعشع ممکن است سال‌ها پس از قرار گرفتن در معرض مشاهده شود. در میان اثرات مزمن بر بازماندگان آلودگی ناشی از تشعشع، کشنده‌ترین آنها سرطان خون است، همچنین نگرانی دیگر برای فرزندان این بازماندگان است. برای کسانی که قبل از تولد (در داخل رحم) در معرض تشعشعات قرار گرفته‌اند، تحقیقات نشان می‌دهد که میزان کودکان با اندازه سر کوچک، ناتوانی ذهنی و اختلال در رشد فیزیکی افزایش یافته است (شان و آلیسیا،^{۲۰۲۳}).

مطالعه حاضر با هدف بررسی تأثیرات مستقیم تابش ذرات آلفای تک انرژی در سطح انرژی ۱-۰/۱ MeV با گام ۰/۱ MeV، ۵-۱ MeV با گام ۱ MeV، ۱۰-۳۰ MeV را با گام ۱۰ MeV مرحله انجام شده است. $\frac{DSB}{event}$ و $\frac{SSB}{event}$ انرژی ذخیره شده، مقادیر LET برای انرژی‌های مختلف و بازده SSB و DSB برای ذرات آلفا محاسبه شد. علاوه بر این، نتایج آلفا با نتایج پروتون مقایسه شد (احمدی گنجه، ۲۰۲۰).

پیشینه تحقیق

برهمکنش پرتوهای یونیزان با هسته سلول می‌تواند منجر به آسیب به پایه DNA و همچنین شکستگی رشته‌های تکی و دوگانه (SSBs و DSBs) شود که می‌تواند اثرات بیوفیزیکی اولیه و دیر هنگام از جمله مرگ سلولی، اختلال ژنتیکی و سرطان را آغاز کند. نتایج تجربی از زیست شناسی پرتوهای مولکولی و سلولی نشان می‌دهد که سطوح اولیه و باقیمانده DSBs به اثرات بیولوژیکی تشعشعات مرتبط است. آسیب DNA می‌تواند باعث انسداد ساختاری در سلول شود که می‌تواند منجر به انحراف سلولی یا سرطان شود. اثرات اولیه پرتوهای یونیزان هم از فعل و انفعالات فیزیکی مانند یونیزاسیون و تحریک و هم از واکنش شیمیایی رادیکال‌ها به ویژه رادیکال هیدروکسیل سرچشمه می‌گیرد (اونیل،^{۲۰۲۳}). مدل‌سازی بیوفیزیکی منجر به درک این موضوع شده است که با افزایش پیچیدگی آسیب DNA، آسیب شدیدتر می‌شود و احتمالاً پیامدهای بیولوژیکی خواهد داشت. مطالعه طیف‌های DSB در درجه اول مهم است زیرا آنها می‌توانند منجر به ترمیم نادرست یا عدم درمان شوند و از این رو می‌توانند باعث مرگ سلولی شوند. در تشعشعات آلفا، مانند همه انواع پرتوهای یونیزان، DSB اشتهای ترمیم نشده اصلی‌ترین ضایعه مرتبط بالینی فرض می‌شود. منجر به انحرافات کروموزومی و از دست دادن یکپارچگی تولید مثلی سلول می‌شود. DSB‌های ایجاد شده توسط ذرات آلفا بسیار پیچیده، مقاوم‌تر به ترمیم معمولی هستند، و بنابراین ژنوتوکسیک‌تر از DSB‌های ناشی از روش‌های دیگر هستند (معینی، ۲۰۲۰).

روش تحقیق

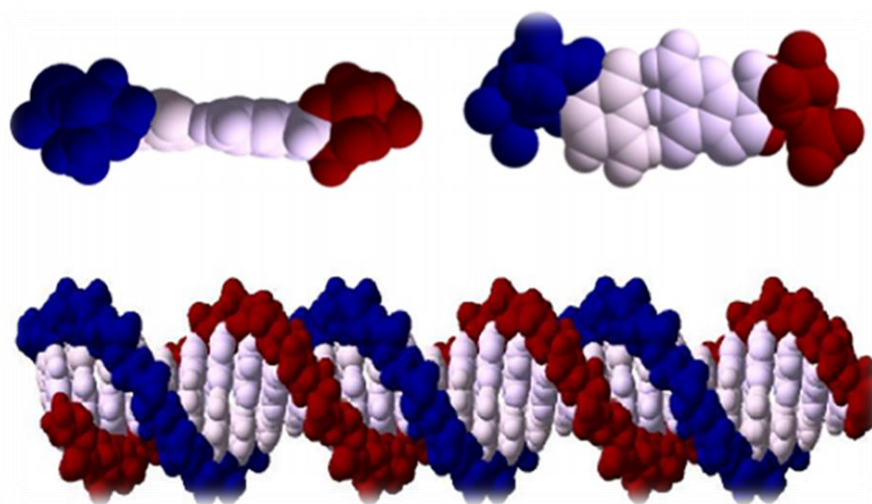
نرم افزار Geant4-DNA

نرم افزار کاربردی Geant4-DNA در این کار انتخاب شده است. نرم افزار Geant4-DNA برای اولین بار در سال ۲۰۰۷، توسعه یافته، این نرم افزار با هدف عمومی برای ترابرد ذرات در انرژی‌های مربوط به میکرو و نانو دوزیمتری تولید شد. این نسخه نتیجه تحقیقات مداوم در چارچوب پروژه Geant4-DNA می‌باشد. نسخه مورد استفاده Geant4.10.2 بود که مجموعه کاملی از مدل‌ها را برای مراحل فیزیکی، فیزیکی شیمیایی و شیمیایی برهم کنش تابش یونیزان با آب مایع فراهم می‌کند.

روش شبیه‌سازی

در این مطالعه برای در نظر گرفتن تمام فرایندهای فیزیکی منجر به ذخیره انرژی الکترون‌ها، می‌توان از پروتون‌ها و ذرات آلفا، فرآیندهای خاص و کلاس‌های مدل موجود در Geant4-DNA بهره برد. در این شبیه‌سازی‌ها از کلاس سازنده G4EmDNAPhysics استفاده شده است که برهم‌کنش‌های الکترومغناطیسی و شبیه‌سازی برخی از فرآیندهای فیزیکی مانند پراکندگی الاستیک، یونیزاسیون، تحریک الکترونیکی، تحریک ارتعاشی و غیره را توصیف می‌کند.

استفاده از مدل هندسی اولین قدم برای مدل‌سازی آسیب‌های DNA است. در این بررسی، هندسه DNA اتمی براساس مدل پیشنهادی برنال و همکاران شبیه‌سازی شد (اتولنگی، ۱۹۹۷). در این مدل سطوح مختلف و نوکلئوتیدها و الیاف کروماتین شبیه‌سازی شده است. در مدل اتمی، مارپیچ دوتایی DNA با جزئیات در نظر گرفته شد. اتم‌ها توسط کره‌هایی با شعاع متناسب با شعاع واندروالس مدل‌سازی شدند. برای ساخت سطوح مختلف هندسه، از روشی که شامل جفت نوکلئوتید یا جفت باز، رشته‌های دوتایی DNA، نوکلئوزوم‌ها و الیاف کروماتین استفاده شد. برای تشکیل مارپیچ DNA، از طریق چرخش زاویه حدود ۳۶+ درجه برای هر جفت باز، جفت بازها در امتداد یک محور چرخشی قرار گرفتند. شکل ۱ نمودار سه بعدی هندسه جفت باز را از دو نمای و مارپیچ دوگانه DNA نشان می‌دهد.

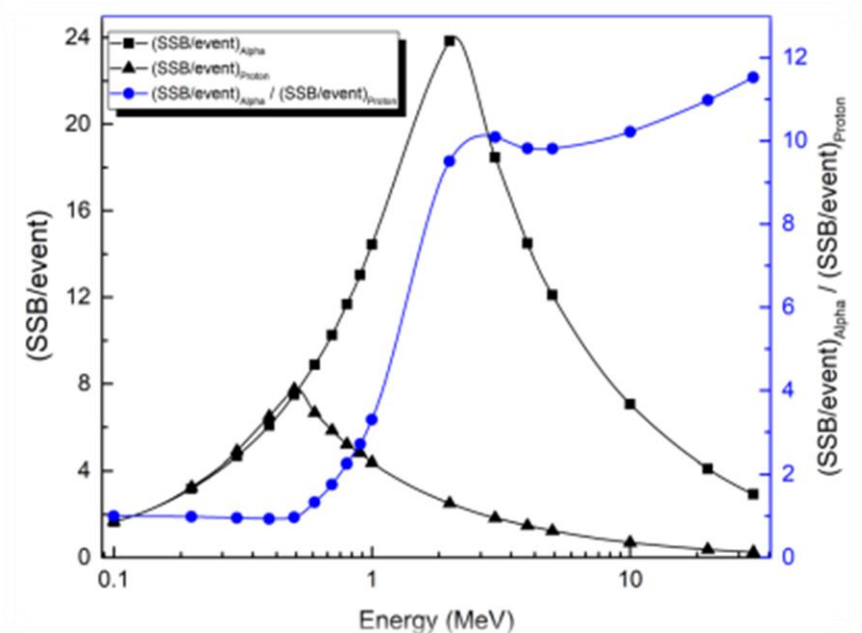


شکل (۱): نمودار سه بعدی یک جفت نوکلئوتید با دو نمای جانبی و مارپیچ دوتایی DNA که در مطالعه حاضر استفاده شده است (احمدی گنجه و همکاران، ۲۰۲۰).

در مرحله بعدی شبیه سازی هندسی، نوکلئوزومها با چرخاندن دو حلقه مارپیچ به دور کره هیستون ساخته شدند. پس از ساخت نوکلئوزوم، الیاف کروماتین توسط شش نوکلئوزوم در هر سطح در یک مارپیچ فوقانی با گام ۷/۱۱ نانومتر و قطر خارجی ۳۸/۳۱ نانومتر تشکیل شد. تکرار این ساختار منجر به فیبر کروماتین شد. بر اساس هندسه شبیه سازی شده، تمام جفت های پایه DNA به طور تصادفی در هسته سلول به طول ۱۰ میکرومتر قرار گرفتند. مقدار LET، توسط Geant4 محاسبه شد. شبیه سازی ها با آلفای تک انرژی و پروتون با سطح انرژی ۰/۱-۱ MeV، ۱-۵ MeV و ۳۰-۳۰۰ MeV انجام شد. پرتوهای در امتداد جهت Z و در ورودی هسته سلول تحت تابش قرار گرفتند.

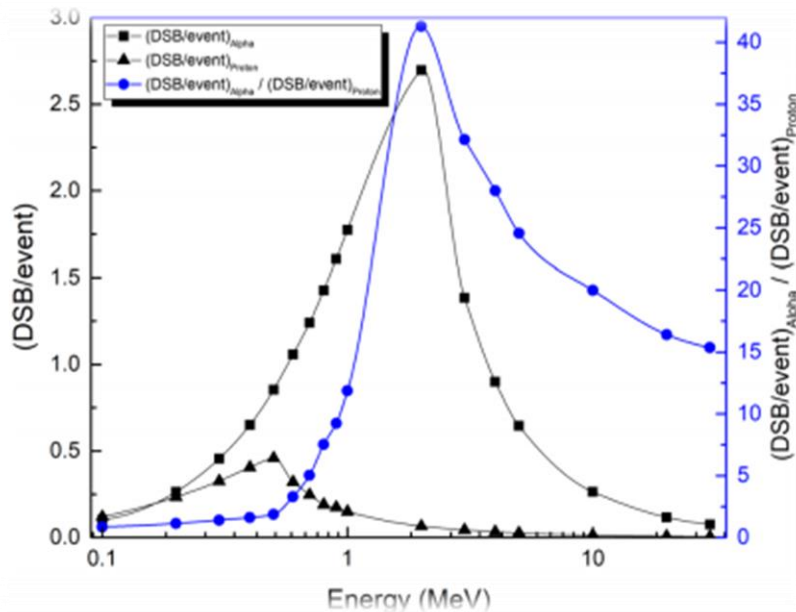
تجزیه و تحلیل

شکل ۲ از نظر انرژی ذرات آلفا در مقایسه با نتایج پروتون $\frac{SSB}{event}$ ، $\frac{DSB}{event}$ را نشان می دهد. روند $\frac{SSB}{event}$ ذرات آلفا در محدوده ۰/۱-۱ MeV افزایش یافت، اما این روند افزایش در محدوده ۰/۵-۰/۱ MeV برای پروتون ها بود. روند بیشتر از ۱ MeV برای ذرات آلفا و فراتر از ۰/۵ MeV برای پروتون ها کاهش یافته است. بر اساس نتایج، $\frac{SSB}{event}$ برای تابش های آلفا و پروتون در محدوده ۰/۱ MeV تا ۰/۵ MeV تقریباً یکسان است، اما فراتر از این محدوده، نسبت ذرات آلفا به پروتون ها در سطح انرژی ۱۲ MeV به ۳۰ MeV افزایش می یابد (احمدی گنجه و همکاران، ۲۰۲۰).



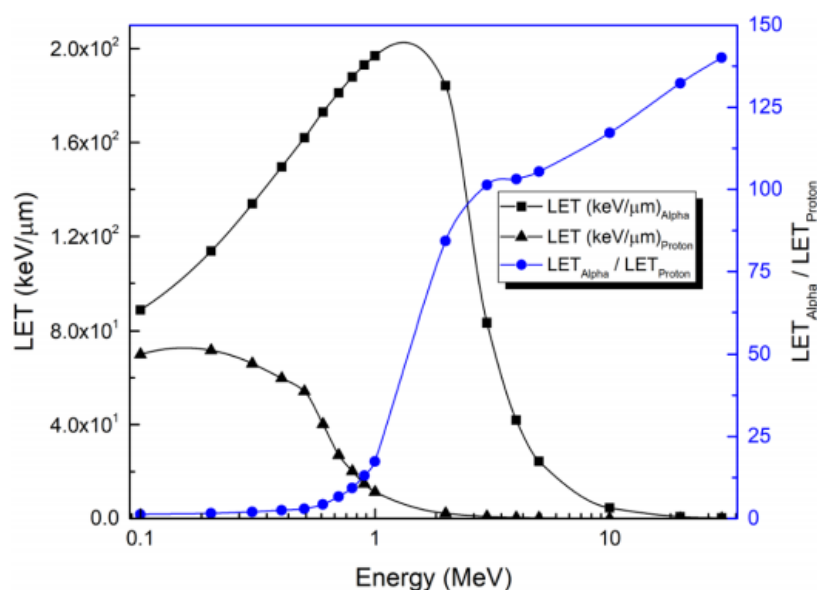
شکل (۲): تعداد $\frac{SSB}{event}$ برای ذرات آلفا و پروتون و نسبت $\frac{SSB}{event}$ برای ذرات آلفا به آن برای پروتون ها (احمدی گنجه و همکاران، ۲۰۲۰).

شکل ۳ میانگین شکستگی DSB برای انرژی‌های مختلف آلفای مختلف و نسبت آنها به شکست پروتون را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل ۳ نشان داده شده است، روند $\frac{SSB}{event}$ آلفا و پروتون مشابه روندهای $\frac{SSB}{event}$ آن ذرات است. اکثر DSB ها مربوط به انرژی کم هستند. در واقع، بیشتر این شکست‌ها برای ذرات آلفا در سطح انرژی کمتر از ۱ MeV رخ می‌دهد. نسبت شکست آلفا به شکست پروتون ۱ برای سطح انرژی کمتر از ۰/۵ MeV است، اما فراتر از این انرژی، این نسبت در انرژی ۲ MeV به ۴۱ افزایش می‌یابد (احمدی گنجه، ۲۰۲۰).



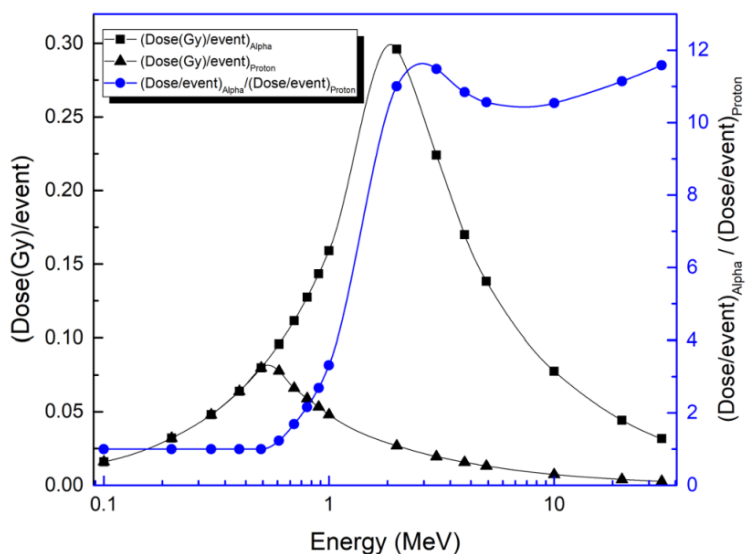
شکل (۳): تعداد $\frac{SSB}{event}$ برای آلفا و ذرات پروتون و میزان $\frac{SSB}{event}$ ذرات آلفا به پروتون‌ها به عنوان تابعی از انرژی (احمدی گنجه و همکاران، ۲۰۲۰).

پیچیدگی آسیب پس از تابش تحت تأثیر کیفیت تابش است، زیرا تابش‌های با انتقال انرژی خطی بالا (LET)، مانند ذرات آلفا یا یون‌های سنگین‌تر، تمایل دارند انرژی ذخیره شده خود را به صورت موضعی در مسیر خود در بافت متمرکز کنند (الخاندرو، ۲۰۲۳). در شکل ۴، LET با توجه به انرژی ذخیره شده محاسبه شد. مقدار LET ذرات آلفا برای بیش از ۱۰۰٪ در محدوده ۰/۱ تا ۸۸/۶۲ keV/μm (۱۹۶/۸۷ keV/μm) افزایش یافت، اما فراتر از این محدوده انرژی به ۰/۲۸ (keV/μm) کاهش یافت. نسبت LET آلفا به LET پروتون ۱/۲۶ در ۰/۱ MeV بود، اما در سطوح انرژی بالاتر، به ۱۴۰ رسید (احمدی گنجه و همکاران، ۲۰۲۰).



شکل (۴): LET برای ذرات آلفا و پروتون و نسبت مقادیر LET برای آن ذرات به عنوان تابعی از انرژی محاسبه شده است (احمدی گنجه و همکاران، ۲۰۲۰).

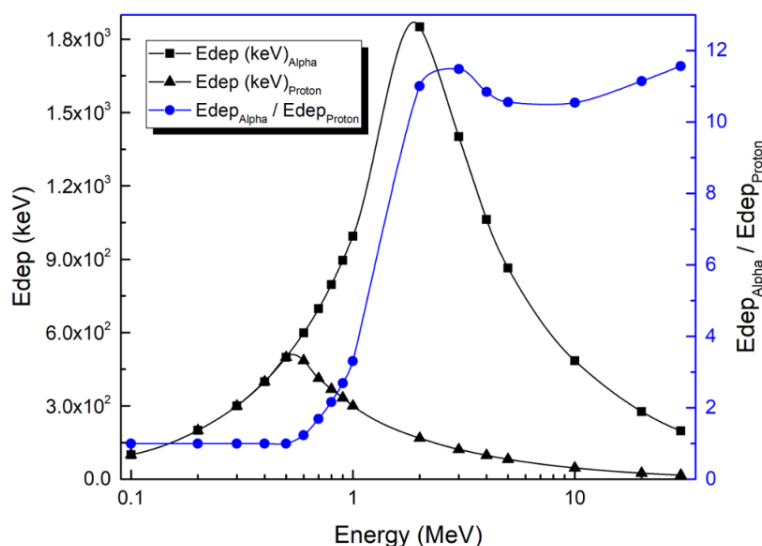
شکل ۵ دوزهای آلفا را برای انرژی‌های مختلف در مقایسه با دوزهای پروتون نشان می‌دهد. همانطور که شکل نشان می‌دهد، روند $\frac{dose}{event}$ مشابه روندهای $\frac{SSB}{event}$ و $\frac{DSB}{event}$ است. نسبت دوز آلفا به دوز پروتون در انرژی ۲ MeV به حداکثر مقدار ۱۱/۵ رسید. فراتر از این انرژی، نسبت به مقدار تقریباً ثابتی رسیده است.



شکل (۵): ذرات آلفا و پروتون و نسبت دوز ذرات آلفا به پروتون ها به عنوان تابعی از انرژی (احمدی گنجه و همکاران، ۲۰۲۰).

انرژی ذخیره شده توسط ذرات آلفا به حداکثر مقدار ۲ MeV افزایش یافته و سپس شروع به کاهش می‌کند. برای انرژی‌های کوچکتر از ۱ MeV، همانطور که در شکل ۶ ارائه شده است، محدوده آلفا کوچکتر از اندازه سلول بود که در

این مطالعه ۱۰ میکرومتر بود، و کل انرژی در داخل سلول‌ها ذخیره شد. برای انرژی‌های بالاتر، محدوده بزرگتر از اندازه سلول بود و مقداری از انرژی در خارج از منطقه سلول ذخیره شد. نسبت مقادیر انرژی ذخیره شده توسط ذرات آلفا و پروتون‌ها در سطوح انرژی کمتر از ۰/۵ MeV بود. فراتر از این حد، نسبت به حدود ۱۲ در ۳۰ MeV افزایش یافت. این به این دلیل است که پروتون‌ها و آلفاها با انرژی کمتر از ۰/۵ MeV می‌توانند تمام انرژی خود را در ناحیه سلولی ذخیره کنند.



شکل (۶) انرژی ذخیره شده توسط ذرات آلفا و پروتون و نسبت انرژی جذب شده برای آن ذرات به عنوان تابعی از انرژی (احمدی گنجه و همکاران، ۲۰۲۰).

نتیجه‌گیری و پیشنهادات

خطرناک‌ترین نوع استفاده از انرژی هسته‌ای کاربردهای نظامی آن است که به دلیل قدرت تخریبی بسیار بالا آسیب‌های غیرقابل‌تصور را به DNA می‌رساند، که از آن جمله می‌توان به انواع سرطان‌ها اشاره کرد. به همین دلیل مطالعه روی آثار ناشی از پرتوهای هسته‌ای و شناسایی آسیب‌های وارده اهمیت فراوانی دارد. در مطالعه حاضر، آسیب مستقیمی که ذرات آلفا و ذرات پروتون در DNA ایجاد کرده‌اند محاسبه و در محدوده ۰/۱-۳۰ MeV مقایسه شده است. وضوح اتمی DNA با استفاده از Geant4-DNA شبیه‌سازی شد و $\frac{SSB}{event}$ مربوطه، $\frac{SSB}{event}$ مربوطه ارزیابی شد. انرژی ذخیره شده توسط Geant4 محاسبه شد. دامنه آلفا کوتاه‌تر از دامنه پروتون بود. کل انرژی ذرات آلفا در کمتر از ۱ MeV و پروتون‌ها کمتر از ۰/۵ MeV ذخیره انرژی داشته است. نسبت مقدار LET ذرات آلفا به پروتون‌ها از ۱/۲۶ در ۰/۱ MeV به ۱۴۰ در ۳۰ MeV افزایش یافته است. نسبت عملکرد SSB برای آلفا به پروتون‌ها از ۰/۸۶ تا ۱/۱ متغیر بود. در این مورد، تفاوت معنی‌داری بین ذرات آلفا و پروتون وجود نداشت.

انرژی ذخیره شده نیز توسط Geant4 محاسبه شد. محدوده آلفا کوتاه‌تر از محدوده پروتون بود. کل انرژی ذرات آلفا در کمتر از ۱ مگا الکترون‌ولت و پروتون‌ها در کمتر از ۰/۵ مگا الکترون‌ولت در ناحیه سلول ذخیره شدند. در سطوح انرژی پایین و زمانی که محدوده ذرات کوچکتر از اندازه سلول بود، انرژی ذرات به طور کامل در ناحیه سلول رسوب می‌کرد. هنگامی که محدوده ذرات بزرگتر از اندازه سلول بود، بیشتر انرژی آنها در خارج از ناحیه سلولی رسوب می‌کرد و روند

شکست و نمودارهای دوز تغییر کرد. در این مورد، تفاوت معنی داری بین ذرات آلفا و پروتون وجود نداشت. بنابراین، بازده SSB را می توان مستقل از نوع ذرات برخوردی و انرژی آنها در نظر گرفت. همانطور که برای بازده DSB، آنها برای ذرات آلفا در محدوده ۰/۱-۱ مگا الکترون ولت افزایش یافت و سپس کاهش یافت. با این حال، برای پروتون ها، روند در محدوده ۰/۱-۳۰ مگا الکترون ولت کاهش یافت.

فهرست منابع

شریفی فر، س. (۱۳۸۷). بمب کثیف. مجله دانشکده پرستاری ارتش جمهوری اسلامی ایران.

Radiological Attack. (۲۰۰۶). "A fact sheet from the national academies and the US department of Homeland" security. www.bt.cdc.gov. last update 10.

Frequently Asked Questions About a Nuclear Blast. (۲۰۰۶). www.cdc.gov. Page last reviewed May ۱۰.

dirty bomb explosion. (۲۰۰۵). www.cdc.gov. 12.

H. Nikjoo, P. O'Neill, W. Wilson, and D. Goodhead. (۲۰۰۸). "Computational approach for determining the spectrum of DNA damage induced by ionizing radiation," *Radiation research*, vol. 156, no. 5, pp. 577-583, 2001. ۶- I. Rosenberg, "Radiation oncology physics: a handbook for teachers and students," *British journal of cancer*, vol. 98, no. 5, PP. 1020.

S. Ritter and M. Durante. (۲۰۱۰). "Heavy-ion induced chromosomal aberrations: a review", *Mutation Research/Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis*, vol. 701, no. 1, PP. 38-۴۶.

M. Bernal *et al.*, (۲۰۱۵). "Track structure modeling in liquid water: A review of the Geant4-DNA very low energy extension of the Geant4 Monte Carlo simulation toolkit," *Physica Medica*, vol. ۳۱, no. ۸, PP. ۸۶۱-۸۷۴.

D. Viduna, K. Hinsen, and G. Kneller. (۲۰۰۰). "Influence of molecular flexibility on DNA radiosensitivity: a simulation study," *Physical Review E*, vol. 62, no. 3, PP. 3986.

L. H. Thompson. (۲۰۱۰). "Recognition, signaling, and repair of DNA double-strand breaks produced by ionizing radiation in mammalian cells: the molecular choreography," *Mutation Research/Reviews in Mutation Research*, vol. 751, no. 2, PP. 158-246.

M. Hada, H. Wu, and F. A. Cucinotta. (۲۰۱۱). "mBAND analysis for high-and low-LET radiation-induced chromosome aberrations: a review," *Mutation Research/Fundamental and Molecular Mechanisms of Mutagenesis*, vol. 711, no. 1-2, PP. 187-192.

- H. Palmans et al. (2015). "Future development of biologically relevant dosimetry," *The British journal of radiology*, vol. 88, no. 1045, PP. 20140392.
- J. Ward. (۱۹۹۸). "Nature of Lesions Formed by Ionizing Radiation, DNA damage and repair," *DNA Repair in Higher Eukaryotes. Totowa: Humana Press*, vol. 2, PP. 65-84.
- W. Friedland, P. Jacob, H. G. Paretzke, M. Merzagora, and A. Ottolenghi. (۱۹۹۹). "Simulation of DNA fragment distributions after irradiation with photons," *Radiation and environmental biophysics*, vol. 38, no. 1, PP. 39-47.
- J. Allison et al. (201۶). "Recent developments in Geant4," *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, vol. 835, PP. 186-225.
- A. H. Elgazzar and N. Kazem. (2015). "Biological effects of ionizing radiation," in *The pathophysiologic basis of nuclear medicine*: Springer, PP. 715-726.
- M. A. Bernal et al. (201۳). "An atomistic geometrical model of the B-DNA configuration for DNA–radiation interaction simulations," *Computer Physics Communications*, vol. 184, no. 12, PP. 2840-2847.
- A. Campa et al. (۲۰۰۵). "DNA DSB induced in human cells by charged particles and gamma rays: experimental results and theoretical approaches," *International journal of radiation biology*, vol. 81, no. 11, PP. 841-854.
- M. A. Bernal, C. Dealmeida, C. Sampaio, S. Incerti, C. Champion, and P. Nieminen. (201۶). "The invariance of the total direct DNA strand break yield," *Medical Physics*, vol. 38, no. 7, PP. 4147-4153.
- Xu. Shan and D. Alicia. (2023). "Nuclear bomb and public health," *Journal of Public Health Policy*, Vol 44, No 1, PP. 348-359.
- Z. Ahmadi Ganjeha et al. (202۰). "Simulation of direct DNA damages caused by alpha particles versus protons," *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, Vol 473, No 1, PP. 10-15.
- P. O'Neill.(2001). " Radiation-induced damage in DNA," *Studies in Physical and Theoretical Chemistry Volume 87*, PP. 585-622.
- H. Moeini et al. (202۰). "Calculation of the initial DNA damage induced by alpha particles in comparison with protons and electrons using Geant4-DNA," *International Journal of Radiation Biology*, Vol. 66, NO. 6, PP. 767–778.
- A. Ottolenghi, M. Merzagora, and H. Paretzke. (۱۹۹۷). "DNA complex lesions induced by protons and α -particles: track structure characteristics determining linear energy transfer and particle type dependence," *Radiation and environmental biophysics*, vol. 36, no. 2, PP. 97-103.
- B. Alejandro et al. (۲۰۲۲). "The relation between microdosimetry and induction of direct damage to DNA by alpha particles," *Physics in Medicine & Biology*, Vol 66, N

Investigating and analyzing the direct damage of alpha and protons particles on DNA caused by the explosion of a dirty bomb

A. Rouhi Mardough^{۱*}

Abstract:

With the widespread use of nuclear energy in industry and military fields, ionizing radiation affects humans more than ever. In nuclear terrorist acts, densely populated urban areas are considered the main target. One of the most deadly types of nuclear terrorism attacks is the use of dirty bombs in crowded and closed places such as subway stations and shopping centers. Ionizing rays are divided into direct and indirect ionizing rays in terms of the mechanism of action of ionization. Ionizing radiation with high linear energy transfer (LET), such as using alpha particles, can directly interact with biological targets to cause ionization and initiate a chain of events to produce biological changes. Geant4-DNA software was used to calculate direct DNA breakage caused by alpha particles and protons. For alpha particles with an energy of 1 megaelectron volts, the number of single strand breaks (SSB) and double strand breaks (DSB) has increased. Beyond the energy of 1 MeV, SSB and DSB had a decreasing trend. It was observed that $\frac{SSB}{event}$ ratio is almost constant for protons and alpha particles at different energies. The analyzed results showed that in general, there is no significant difference between alpha particles and protons in the amount of SSB.

Keywords: Dirty bomb, alpha particles

1. (Ali Rouhi Mardough): Graduated from Tabriz University, Iran. Email: Alirohie.ar99@gmail.com