# ک محاسبهٔ آسیب ناشی از رادیونوکلئید 125I در فواصل مختلف از محور مرکزی DNA بر اساس مدل اتمی و با استفاده از جعبهابزار Geant4-DNA

پروین احمدی'، مجتبی شمسایی زفرقندی\*، علیاصغر شکری'

۱) کروه فیزیک، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران ۷) دانشکدهٔ مهندسی انرژی و فیزیک، دانشگاه امیرکبیر، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۳/۲۶ تاریخ پذیرش:۱۳۹۹/۸/۲۶

چکيده

**مقدمه:** این مطالعه روشی برای بررسی آسیبهای ناشی از تابش رادیونوکلئید گسیلندهٔ اوژه است.

Geant4-DNA مواد و روش ها: در این مطالعه، بهرهٔ شکست ناشی از رادیونوکلئید ید در فواصل مختلف از مرکز DNA، با به کارگیری ابزار Geant4-DNA و با استفاده از مدل اتمی ارزیابی شد.

**یافتههای پژوهشن:** میانگین بهرهٔ شکست در DNA، بهعنوان تابعی از فاصله از مرکز محور DNA تا مکان واپاشی رادیونوکلئید گسیلندهٔ اوژه نشان دادهشده است.

**بحث و نتیجه گیری:** این تحقیق نشان میدهد بیشترین آسیب توسط الکترون کمانرژی زیر ۱ کیلو الکترونولت و بهویژه هنگامی که در نزدیکی DNA قرار می گیرند، دیده می شود.

واژههای کلیدی: Geant4-DNA، الکترون اوژه، هستههای پرتوزا، شکست دوگانه

\* نویسنده مسئول: دانشکدهٔ مهندسی انرژی و فیزیک، دانشگاه امیرکبیر، تهران، ایران

Email: pysham@aut.ac.ir

Copyright © 2019 Journal of Ilam University of Medical Science. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution international 4.0 International License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/) which permits copy and redistribute the material, in any medium or format, provided the original work is properly cited.

#### مقدمه

هدف درمانی با رادیونوکلئیدهای اوژه، به علت برد کوتاه در حد ابعاد سلولی و LET بالا و رساندن سمیت بالا به تومور و سلولهای سرطانی توجه شده است. هنگامی که رادیونو کلئیدهای گسیلندهٔ اوژه در سلول های سرطانی قرار می گیرند، سبب آسیب به DNA می شوند و میتوانند سرعت رشد سلولهای سرطانی را کنترل کنند (۱). این اثر با تأثیر مستقیم تابشهای یونیزان بر روى سلول ايجاد مى شود؛ همچنين به علت اينكه بخش فراوانی از سلول، از آب تشکیل شده است، ممکن است هنگام تعامل تابش با آب، رادیکالهای آزاد تولید شوند كه اين يك اثر غيرمستقيم بهشمار ميآيد . تأثير تابش می تواند سبب شکستهای دو گانه در DNA شود. رادیونوکلئیدهای گسیلندهٔ اوژه، بهویژه در درمان سرطان های از نوع متاستاز و یا تومورهای کوچک کاربرد شناختەشدەترىن عضو خانوادە دارند. 1251 راديونوكلئيدها است كه از آنها بهعنوان گسيلندهٔ اوژه یاد می شود. به علت سمیت بسیار و برد کوتاه و تابش حداقل به بافت سالم، این نوع رادیونوکلئید به نامزد مناسبی برای درمان سرطان تبدیل شده است. واپاشی این رادیونوکلئیدها، با انتشار چندین الکترون کمانرژی در محل وایاشی، بهویژه هنگامی که در نزدیکی DNA قرار می گیرند، سبب نابودی سلول می شوند. در صورتی که رادیونوکلئید استفادهشده در درون سلول قرار گیرد، یک مولکول حامل باید رادیونوکلئید را از غشای سلول عبور دهد. این فرایند به روش نشان دارسازی یا عمل سنتز صورت می گیرد که در آن، هدایت رادیونوکلئید به سوی كروموزومها انجام مى شود. انرژى انباشتى حاصل از وایاشی در مجاورت کروموزومها، سبب ایجاد شکست در

پیوند میان مولکولهای کروموزوم می شود. در این مطالعه، موقعیت ید در چهار سنتز با نامهای m- ،m-Iodo-p-ethoxyHoechst (125IE-H) 4- ،Iodo-p-methoxyHoechst (125IM-H) iodophenyl methanamineHoechst (C8 5-125I iodo-2 و -2-125IC8-H) 5-125I iodo-4 و -2-2000 مد و deoxyuridine شکست دوگانهٔ آنها در فواصل گوناگون از محور کروموزوم بررسی گردید.

آسیبهای ناشی از تابش، با استفاده از روشهای نظری و تجربی بررسی شده (۲–۸)؛ اما بسیاری از جنبههای کمی آسیب ناشی از تابش، هنوز بهطور کامل توسط روشهای تجربی بررسی نشده است. در این زمان، شبیهسازی به درک بعضی از جزئیات آثار تابشهای یونیزان در مقیاسهای سلولی و درون سلولی کمک می کند. کدهای مونت کارلوی متداول در شبیه سازی (۹٬۱۰) ARTRAC، (۱۱)، (14) RITRACKS (17) TRAX (17) PITS KURBUC و Geant4 (۱۵) هستند. Geant4 کدی با دسترسی آزاد است که شامل کلاسهای کتابخانهای به زبان ++C است و امکان شبیه سازی برهم کنش ذرات در مقیاس نانو و زیرسلولی را در محیط آب مایع فراهم می کند. از Geant4-DNA که در سال ۲۰۰۸ از Geant4 استخراج شده، در این پژوهش برای شبیهسازی آسیب تابش یونیزان در مقياس DNA استفاده شده است. اين كد توانسته است فعل و انفعالات ذرات با آب مایع در انرژیهای چند الکترونولت تا چند مگا الکترونولت را شبیهسازی کند (۱۶–۲۲).





شکل شمارهٔ ۱. فاصلهٔ اتم ید (کرهٔ سبز رنگ) به ترتیب در (a) ۰/۵۷ (a) ۰/۹۲(c) ۰/۸۶۱(c) و (l/۳۹ (d) ۱/۳۹ نانومتر از مرکز محور DNA.

### مواد و روشها

Geant4 نرمافزاری مبتنی بر روش مونتکارلو است. این کد، کدی با هدف کلی است و به طور گسترده، در زمینههای گوناگونی ازجمله فیزیک انرژی بالا، مطالعات فضایی، پزشکی و رادیوبیولوژیک به کار میرود. این کد تعداد بسیاری کتابخانه دارد و کاربر به منبع داده، دسترسى باز دارد. Geant4 شامل مجموعه اوليهٔ فرایندهای فیزیکی در آب تا محدودهٔ انرژی پایین است. Geant4-DNA که از Geant4 استخراجشده است، اجازه میدهد تا تعامل ذرات با انرژی پایین در مقیاس نانومتر را توصيف كند. اين كد براى دزيمترى و نانودزیمتری مناسب است و نرمافزاری مبتنی بر زبان برنامهنویسی ++C است که می تواند تعامل ذرات با ماده را در طیف گستردهای از انرژی، هندسه و ابعاد شبیهسازی کند (۲۱، ۱۵). در این کد، از آب مایع برای فعل و انفعالات ذرات استفاده شده است که یک تخمین منطقی از فرایندهای بیولوژیکی است. در این کار، از مدل اتمی B-DNA استفاده شده است. B-DNA

محتمل ترین ساختار DNA در سلول های زنده است (۲۰). بسیاری از پژوهشها توانایی Geant4-DNA را با بستهٔ الکترومغناطیسی کمانرژی برای شبیهسازی تابش در مقیاسهای سلولی و درون سلولی نشان دادهاند (۲۴، ۲۳، ۱۹، ۱۸). در این مطالعه، از طیف 125I استفاده شد که در گزارش AAPM آمده است (جدول شمارهٔ ۱) (۲۵). در مطالعهٔ شبیهسازی، از ۱۰۰۰۰۰ الکترون بهعنوان منبع ذرات باردار اوليه بهره گرفته شد. الكترونها بهطور تصادفي توليد ميشوند . مدل (PDB lib) از بانک دادهٔ پروتئین (bna.pdb1 استخراجشده است. أسيب DNA ناشى از تابش يونيزان مستقیم و غیرمستقیم بررسی گردید. برای اثر مستقیم، انرژی آستانه (حداقل مقدار انرژی لازم برای ایجاد شکست در هر رشته ۱۰/۷۹ (DNA الکترونولت است. که این ۱۰/۷۹ الکترونولت، کمترین انرژی یونیزاسیون آب در کد Geant4-DNA است. برای تخمین اثر غیرمستقیم DNA، روش پامپون کاربرد دارد. در روش یامیون، از یک روش در بررسی اثر مستقیم و غیرمستقیم گروههای قند \_ فس\_فات برابر یا بیشتر از انرژی آستانه باشد، یک شکس\_ت تکرشت\_های اتفاق میافتد. هنگامیکه دو شکست تکرش\_تهای در دو رشتهٔ متضاد و در فاصلهٔ کمتر از ۱۰ جفت باز اتفاق بیفتد، یک شکست دوگانه شکل می گیرد (شکل شمارهٔ ۲) (۲۸، ۴، ۳).



شکل شمارهٔ ۲. شکست تکرشتهای و شکست دوگانه (راست)؛ ساختار مولکولی (DNA bna.pdb1) (چپ)

از آنجا ۷۰ درصد سلولها از آب تشکیل شده است، هنگامی که سلول در معرض تابش یونیزان قرار می گیرد، انرژی تابش بیشتری توسط مولکولهای آب جذب می شود و سبب ایجاد رادیکالهای آزاد می گردد. این تأثیرات به عنوان آثار غیر مستقیم تابش یونیزان شناخته می شوند. در مرحلهٔ شیمیایی، در میان گونههای شیمیایی می شوند. در مرحلهٔ شیمیایی، در میان گونههای شیمیایی می شوند. در مرحلهٔ شیمیایی، در میان گونههای شیمیایی می شوند. در مرحلهٔ شیمیایی، در میان گونههای شیمیایی می شوند. در مرحلهٔ شیمیایی، در میان گونههای شیمیایی می توانایی تعامل با کار دارد. رادیکالهای هیدرو کسیل بسیار بیشتر از سایر گونهها، با قند و گروههای پایه در بسیار بیشتر از سایر گونهها، با قند و گروههای پایه در بسیار بیشتر از سایر گونهها، با قند و گروههای پایه در بسیار بیشتر از سایر گونهها، با قند و گروههای پایه در بسیار بیشتر از سایر گونهها، با قند و گروههای پایه در بسیار بیشتر از سایر گونهها، با قند و گروههای پایه در بسیار بیشتر از سایر گونهها، با قند و گروههای پایه در محمال با قند فسفات، ۲۰ درصد و پایه، ۸۰ درصد است. OH با قند فسفات، ۱۳ درصد است. احتمال آسیب ناشی

استفاده شده است و تفاوت در اثر مستقیم و غیرمستقیم،

تفاوت در انرژی آستانهٔ آنهاست. بــرای تأثیر مستقیم

انرژی آستانه، ۱۰/۷۹ الکترونولت و بــــرای اثر

غيرمستقيم، ١٧ الكترونولت (بهعن\_وان حداقل

انرژی لازم برای تولید یک جفت رادیکال) استفاده شده

است (۲۷–۲۶). هنــــگامی که انرژی برجاگذاشته در

# یافتههای پژوهش

در این کار، برای بررسی واپاشی 125۱، از -Geant4 استفاده شده DNA برای پیش بینی شکست DNA استفاده شده است. نتایج شکست دوگانه در هر واپاشی ناشی از 1251، در فواصل گوناگون از محور مرکزی DNA در شکل شمارهٔ ۳ نشان داده شده است. این تحقیق نشان می دهد که شکست دوگانه در هر واپاشی، به ترتیب ۱/۶، می دهد که شکست دوگانه در هر واپاشی، به ترتیب ۱/۶، می دهد که شکست دوگانه در مر واپاشی، به ترتیب ۱/۶، می دهد که شکست دوگانه در مر واپاشی، به ترتیب ۱/۶، می دهد که شکست دوگانه در مر واپاشی، به ترتیب ۲/۵، می دهد که شکست دوگانه در مر واپاشی، به ترتیب ۲/۵، می دهد که شکست دوگانه در مر واپاشی، به ترتیب ۲/۵ کار مرکز محور شمارهٔ ۲ خلاصه شده است.





بعدون مشاره ۲۰ طیف (معکرون مای روزه ۲۰۱ - ۲۰				
125I				
فرايند	(keV) انرژی	بازده		
CK NNX	٠/٠٢٩٩	۳/۵۱		
Auger NXY	•/•٣٢۴	۱٠/٩		
CK MMX	•/١٢٧	1/44		
CK LLX	٠/٢١٩	•/754		
Auger MXY	٠/۴۶١	٣/٢٨		
Auger LMM	٣/ • ۵	۱/۲۵		
Auger LMX	٣/۶٧	•/٣۴•		
Auger LXY	۴/۳۴	•/•711		
Auger KLL	۲۲/۴	۰/۱۳۸		
Auger KLX	78/4	۰/۰۵۹		
KXY Auger	۳۰/۲	۰/۰۰۶۵		

(۲۵) 125I	اوژه	الكترونهاي	۱. طيف	شمارة	جدول
-----------	------	------------	--------	-------	------

جدول شمارهٔ ۲. میانگین تعداد شکستهای دوگانهٔ الکترونهای اوژه در فواصل گوناگون از محور اصلی DNA با استفاده از مدل اتمی

نام سنتز 125I	فاصلة 125I از مركز	میانگین تعداد شکست دوگانه در هر	میانگین تعداد شکست دوگانه در هر
	(nm)DNA	واپاشی 125I در این مطالعه	واپاشي 125I ديگر كارها (مرجع)
125IMH	٠/٨۶١	۰/۵۶	-
125IEH	٠/٩٢	•/۵۵	(٢) •/۵٢
125IC8H	١/٣٩	٠/٣٨	(۲) ·/۱۸
125IdUr	•/۵Y	1/11	(۲۹) ١/١
			(۳۰) ۰/۹۸
	صفر	١/۶	-

می یابد. در اصل، شکست دوگانه در هر واپاشی رادیونو کلئید گسیلندهٔ الکترون اوژه، با افزایش فاصله میان رادیونو کلئید ید و DNA کاهش می یابد. بیشترین با افزایش فاصلهٔ 125I از محور مرکزی DNA، از ۰/۵۷ نانومتر به ۱/۳۹ نانومتر، شکست دوگانه در هر واپاشی به ترتیب با حدود ۲۶/۸ و ۷۶/۲۵ درصد کاهش

شکست دوگانه در الکترونهای اوژه زیر ۱ کیلو الکترونولت اتفاق میافتد (شکل شمارهٔ ۴). نتایج

نشاندهندهٔ افت سریع در بهرهٔ شکست دوگانه، با افزایش فاصله از محور مرکزی DNA است.



شکل شمارهٔ ۴. میانگین تعداد شکست دوگانه الکترونهای اوژه در انرژیهای گوناگون با استفاده از مدل اتمی

### بحث و نتیجه گیری

مطالعة حاضر نشان دهندة جزئيات بيشتر بررسي الكترون اوژه و آثار بيولوژيكي مستقيم و غيرمستقيم راديونوكلئيد 1251است. در اين يژوهش از -Geant4 DNA (pdb4dna) استفاده گردید و از مدل DNA ساختار B-DNA بهره گرفته شد که شبیهترین ساختار به DNA انسان است. در این ساختار، محل قرار گرفتن اتمها در ساختار DNA کاملاً شبیهسازیشده است. تأثیر اتمهای رادیونوکلئید در فواصل گوناگون از محور، برای تولید آسیبهای مستقیم و غیرمستقیم بررسی شده است. این مطالعه نشان میدهد میان شکست دوگانه در هر واياشي و فاصلة منبع از مركز DNA، رابطة نمايي وجود دارد و کاهش حدود ۸۰ درصد بهرهٔ شکست در فاصلهٔ ۱/۱ نانومتر رخ میدهد. این موضوع نشان میدهد که آسیبDNA در فواصل دور از محور، به علت برد کوتاه الکترون های اوژه، به شدت کاهش می یابد و پس از این فاصله، شمارش کم شکست مربوط به آثار غیرمستقیم تابش است و در خارج از سلول رادیونوکلئید گسیلندهٔ اوژه، در عمل تأثیری در ایجاد شکست ندارد. بیشترین آسیب دربارهٔ الکترونهای اوژه و کاستر کرونینگ با

انرژی زیر ۱ کیلو الکترونولت و مربوط به لایههای M و N و در مجاورت DNA رخ میدهد. 125I با داشتن الکترون های تابشی زیر keV و با بازدهٔ نسبتاً خوب در این محدودهٔ انرژی و ویژگیهای شیمیایی مناسب برای نشاندار کردن، گزینهٔ شایستهای برای هدف درمانی است. با توجه به انرژی برجا گذاشتهٔ این گسیلنده در فواصل چند نانومتر و هدایت هدفمند آن به نزدیکی کروموزوم، زمینهٔ انهدام و کنترل تودههای سرطانی را فراهم خواهد کرد. برای طراحی بهتر استراتژیهای هدف درمانی مبتنی بر الکترون اوژه، یک درک جامع و اساسی نیاز است که مربوط به رابطهٔ دقیق میان بهرهٔ شکست دوگانه و موقعیت ید-۱۲۵ باشد. دسترسی به یافتههای تئوری با مونتکارلو می تواند به ما برای رسیدن به نتایج بهتری در مطالعات تجربی کمک کند؛ بنابراین، روش شبیهسازی در حوزهٔ ابعاد سلولی کمک می کند تا با انتخاب هندسه و رادیونو کلئید مناسب، به شرایط آزمایشگاهی نزدیک شود و درنتیجه سبب می گردد یافتههای بهدستآمده در این حوزه، ما را در انتخاب راديوداروهاى مناسب گسيلندهٔ الکترون اوژه و طراحی درمان هدفمند یاری کند.

### References

1.Nikjoo H, Taleei R, Liamsuwan T, Liljequist D, Emfietzoglou D. Perspectives in radiation biophysics from radiation track structure simulation to mechanistic models of DNA damage and repair. Rad Phys Chem 2016;128:3-10.

doi.10.1016/j.radphyschem.2016.05.005

2.Balagurumoorthy P, Xu X, Wang K, Adelstein SJ, Kassis AI. Effect of distance between decaying 125I and DNA on auger electron induced double strand break yield. Int J Rad Biol 2012;88:998-1008. doi.10.3109/09553002.2012.706360

3.Piroozfar B, Raisali G, Alirezapour B, Mirzaii M. The effect of 111In radionuclide distance and auger electron energy on direct induction of DNA double strand breaks a Monte Carlo study using Geant4 toolkit. Int

J Rad Biol 2018;94:385-93. doi:10.1080/09553002.2018.1440329

4.Mokari M, Alamatsaz MH, Moeini H, Babaeibrojeny AA, Taleei R. Track structure simulation of low energy electron damage to DNA using Geant4 DNA. Biomed Phys Eng Exp 2018;4: 65009.

5.Francis Z, Incerti S, Karamitros M, Tran H, Villagrasa C. Stopping power and ranges of electrons, protons and alpha particles in liquid water using the Geant4 DNA package. Nucl Ins Meth Phys Res Sec Mate At. 2011;269:2307-11.

doi.10.1016/j.nimb.2011.02.031

6.Freudenberg R, Kotzerke J. Cellular dosimetry using the Geant4 Monte Carlo toolkit. J Nucl Med2010;51:1488-9.

7.Leaf nosed bat. Encyclopedia britannica. 5<sup>th</sup> ed. Sunders Publication. 2009.P.231-9.

8.Tajik M, Rozatian AS, Semsarha F. Simulation of ultrasoft X rays induced DNA damage using the Geant4 Monte Carlo toolkit. Nucl Ins Meth Phys Res Sec Mate At.2015;342:258-65.

doi.10.1016/j.nimb.2014.10.023

9.Friedland W, Dingfelder M, Kundrat P, Jacob P. Track structures DNA targets and radiation effects in the biophysical Monte Carlo simulation code PARTRAC. Mut Res Fund Mole Mech Mut 2011;711:28-40. doi.10.1016/j.mrfmmm.2011.01.003

10.Nikjoo H, Uehara S, Emfietzoglou D, Cucinotta F. Track structure codes in radiation research. Rad Meas2006;41:1052-74. doi.10.1016/j.radmeas.2006.02.001 11.Wilson WE, Nikjoo H. A Monte Carlo code for positive ion track simulation. Rad Environ Biophys1999;38:97-104. doi.10.1007/s004110050144

12.Wälzlein C, Scifoni E, Kramer M, Durante M. Simulations of dose enhancement for heavy atom nanoparticles irradiated by protons. Phys Med Biol2014;59:1441.

13.Plante I, Cucinotta FA. Multiple CPU computing the example of the code RITRACKS. Int Meet Comp Int Meth Bioinfo Bios 2012;2:123-8.

14.Uehara S, Nikjoo H, Goodhead D. Cross sections for water vapour for the Monte Carlo electron track structure code from 10 eV to the MeV region. Phys Med Biol1993;38:1841.

15.Agostinelli S, Allison J, Amako K, Apostolakis J, Araujo H, Arce P, et al. Geant4 a simulation toolkit. Nucl Ins Meth Phys Res Sec Equ 2003;50:250-303. doi.10.1016/S0168-9002(03)01368-8

16.Lampe N, Karamitros M, Breton V, Brown JMC, Kyriakou I, Sakata D, et al. Mechanistic DNA damage simulations in Geant4 DNA part 1 a parameter study in a simplified geometry. Phys Med 2018;48:135-45.

doi.10.1016/j.ejmp.2018.02.011

17.Sakata D, Lampe N, Karamitros M, Kyriakou I, Belov O, Bernal MA, et al. Evaluation of early radiation DNA damage in a fractal cell nucleus model using Geant4 DNA. Phys Med 2019;62:152-7. doi.10.1016/j.ejmp.2019.04.010

18.Incerti S, Kyriakou I, Bernal M, Bordage M, Francis Z, Guatelli S, et al. Geant4 DNA example applications for track structure simulations in liquid water a report from the Geant4 DNA Project. Med Phys 2018;45:722-39. doi.10.1002/mp.13048

19.Bernal MA, Bordage MC, Brown JMC, Davidkova M, Delage E, El Bitar Z, et al. Track structure modeling in liquid water: A review of the Geant4 DNA very low energy extension of the Geant4 Monte Carlo simulation toolkit. Phys Med 2015;31:861-74.

20.Semsarha F, Goliaei B, Raisali G, Khalafi H, Mirzakhanian L. An investigation on the radiation sensitivity of DNA conformations to 60Co gamma rays by using Geant4

toolkit. Nucl Ins Meth Phys Res Sec Int Mate At2014;323:75-81.

doi.10.1016/j.nimb.2014.01.002

21.Chauvie S, Francis Z, Guatelli S, Incerti S, Mascialino B, Montarou G, et al. Monte Carlo simulation of interactions of radiation with biological systems at the cellular and DNA levels. Phys Med 2006;3:72-6.

22. Tajik M, Rozatian AS, Semsarha F. Calculation of direct effects of 60Co gamma rays on the different DNA structural levels a simulation study using the Geant4 DNA toolkit. Nucl Ins Meth Phys Res Sec Int Mate At2015;346:53-60.

doi.10.1016/j.nimb.2015.01.042

23.Incerti S, Douglass M, Penfold S, Guatelli S, Bezak E. Review of Geant4 DNA applications for micro and nanoscale simulations. Phys Med 2016;32:1187-200. doi:10.1016/j.ejmp.2016.09.007

24.Kyriakou I, Incerti S, Francis Z. Technical Note improvements in geant4 energy loss model and the effect on lowenergy electron transport in liquid water. Med Phys 2015;42:3870-6. doi.10.1118/1.4921613

25.Howell RW. Radiation spectra for Auger electron emitting radionuclides report No two of AAPM nuclear medicine task group no six. Med Phys 1992;19:1371-83. doi. 10.1118/1.596927

26.Pomplun E. A new DNA target model for track structure calculations and its first application to i-125 Auger electrons. Int J Rad Biol 1991;59:625-42. doi.10.1080/09553009114550561

27.Pomplun E. 123I calculation of the Auger electron spectrum and assessment of the strand breakage efficiency. Biophys Am Phys Med Sym Proce1992; 8:253-8. Doi.10.1080/09553009114550561

28.Nikjoo H, Emfietzoglou D, Liamsuwan T, Taleei R, Liljequist D, Uehara S. Radiation track DNA damage and response a review. Rep Prog Phys Soc 2016;79:116601.

29.Humm JL, Charlton DE. A new calculational method to assess the therapeutic potential of auger electron emission. Int J Rad Oncol Biol Phys 1989;17:351-60. doi.10.1016/0360-3016(89)90450-1

30.Raisali G, Mirzakhanian L, Masoudi SF, Semsarha F. Calculation of DNA strand breaks due to direct and indirect effects of Auger electrons from incorporated 123I and 125I radionuclides using the Geant4 computer code. Int J Rad Biol 2013;89:57-64. doi.10.3109/09553002.2012.715785

## Calculation of the Damage Induced by Radionuclide 125I at Different Intervals from the DNA Central Axis based on an Atomic Model using the Geant4-DNA Toolkit

Ahmadi P<sup>1</sup>, Shamsaizafarghandi M<sup>2\*</sup>, Shokri A<sup>1</sup>

(Received: June 15, 2020 Accepted: November 16, 2020)

#### Abstract

*Introduction:* This study proposed a method to investigate the damage caused by Auger emitter radionuclide radiation.

*Materials & Methods:* This study investigated the detailed rate of breaks induced by iodine radionuclide at different intervals from the DNA center using the Geant4-DNA toolkit and based on the atomic geometric model.

*Findings:* The mean number of breaks in DNA is shown as a function of distance from

the center of the DNA axis to the position of Auger emission radionuclide decay.

*Discussions & Conclusions:* The highest damage occurs by electrons with energies below 1 keV, especially in the proximity of DNA.

*Keywords:* Auger electron, Double strand break, Geant4-DNA, Radionuclide

2. Faculty of Energy Engineering and Physics, Amirkabir University, Tehran, Iran \*Corresponding author Email:pysham@aut.ac.ir

Scientific Journal of Ilam University of Medical Sciences

<sup>1.</sup> Dept of Physics, Payame Noor University, Tehran, Iran