The Effect of Cell Oxygen Concentration on the Relative Biological Effectiveness of Low Energy X-rays

Shamsabadi Reza [1], Baghani Hamid Reza [2]

1. Ph.D, Physics department, Hakim Sabzevari University, Sabzevar, Iran. ORCID ID: 0000-0001-5166-4817.
2. Associated professor, Physics department, Hakim Sabzevari University, Sabzevar, Iran. (Corresponding Author), Tel: 051-44013556, Email:Hamidreza.baghani@gmail.com. ORCID ID: 0000-0003-0392-9192.

ABSTRACT

Background and Aim: Cancer treatment using ionizing radiation is an effective modality for the management and control of various cancers. The presence of oxygen inside the cell causes various damages to the DNA molecule. The purpose of this study is to calculate the relative biological effectiveness (RBE) of low-energy X-rays during cancer treatment using intraoperative radiotherapy at different oxygen concentrations within the cell through a Monte Carlo (MC) simulation approach.

Materials and Methods: To estimate the RBE values in this study, the secondary electron spectrum, which was emitted from 1 cm after the bare probe surface, was calculated with the Geant4-validated MC model of the INTRABEAM system. After the calculation of the secondary electron energy spectrum, the RBE values of the emitted low-energy X-rays from the INTRABEAM system at different cell oxygen concentrations were calculated by the MCDS MC code.

Results: The results showed that the RBE values increase with the oxygen concentration increment in the cell. When the oxygen concentration increments from 0 to 100%, the RBE_{SSB} and RBE_{DSB} values increase by about 1.6 and 2.3 times, respectively. Furthermore, in most of the studied oxygen concentrations, the RBE_{DSB} values were greater than unity, which indicates the high relative biological effectiveness of the considered low-energy X-rays compared to high-energy photons.

Conclusion: Accordingly, it can be concluded that cell oxygen level is one of the influential factors for RBE assessments relevant to the emitted X-rays from the INTRABEAM system, where the cell sensitivity to the ionizing radiation decreases at low-oxygen levels.

Keywords: Oxygen concentration, Relative biological effectiveness, Low energy X-rays, INTRABEAM system, Monte Carlo simulation.

Received: May 23, 2023 **Accepted:** April 16, 2024

How to cite the article: Shamsabadi Reza, Baghani Hamid Reza. The Effect of Cell Oxygen Concentration on the Relative Biological Effectiveness of Low Energy X-rays. SJKU 2025;30(2):46-54.

Copyright © 2018 the Author (s). Published by Kurdistan University of Medical Sciences. This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution-Non Commercial License 4.0 (CCBYNC), where it is permissible to download, share, remix, transform, and buildup the work provided it is properly cited. The work cannot be used commercially without permission from the journal

[Downloaded from sjku.muk.ac.ir on 2026-09-15]

[DOI: 10.22034/30.2.46]

مجله علمی دانشگاه علوم پزشکی کردستان / دوره سی /خرداد وتیر ۱۴۰۴-۵۴/۱۴۰۴-۴۶

اثر غلظت اکسیژن سلولی بر اثربخشی زیست‌شناختی نسبی پرتوهای ایکس کم‌انرژی

رضا شمس‌آبادی[۱]، حمیدرضا باغانی[۲]

۱.گروه فیزیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ایران. کد ارکید: ۴۸۱۷-۵۱۶۶-۰۰۰۱-۰۰۰۰.

۲. دانشیار، گروه فیزیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ایران. (نویسنده مسئول)، تلفن ثابت: ۴۴۰۱۳۵۵۶-۰۵۱، پست الکترونیک:Hamidreza.baghani@gmail.com، کد ارکید: ۹۱۹۲-۰۳۹۲-۰۰۰۳-۰۰۰۰.

چکیده

زمینه و هدف: درمان سرطان با استفاده از پرتوهای یونیزان روشی مؤثر برای مدیریت و کنترل سرطان‌های مختلف است. ازآنجاکه حضور اکسیژن درون سلول موجب ایجاد آسیب‌های مختلف به مولکول DNA می‌شود، هدف از انجام مطالعه حاضر محاسبه میزان اثرات زیست‌شناختی نسبی (RBE) پرتوهای ایکس‌کم انرژی مورداستفاده در پرتودرمانی حین عمل در غلظت‌های مختلف اکسیژن درون سلول، با استفاده از رویکرد شبیه‌سازی مونت‌کارلو است.

مواد و روش‌ها: جهت برآورد میزان RBE در این مطالعه ابتدا طیف الکترون‌های ثانوی ایجادشده در فاصله یک‌سانتی‌متری از پروب لخت دستگاه درمانی INTRABEAM با استفاده از یک مدل مونت‌کارلوی اعتبارسنجی شده توسط ابزار مونت‌کارلوی Geant4 محاسبه شد. پس از محاسبه طیف الکترون‌های ثانوی، مقادیر RBE پرتوهای ایکس کم‌انرژی حاصل از دستگاه درمانی مذکور در غلظت‌های مختلف اکسیژن درون سلول، توسط کد میکرودوزیمتری MCDS محاسبه شد.

یافته‌ها: نتایج حاصل از این بررسی نشان داد که میزان RBE با افزایش غلظت اکسیژن درون سلول افزایش می‌یابد به‌طوری‌که با افزایش غلظت اکسیژن از صفر تا صددرصد، مقادیر RBE_{SSB} و RBE_{DSB} به ترتیب حدود ۱/۶ و ۲/۳ برابر افزایش یافتند. علاوه بر این در بیشتر غلظت‌های اکسیژن موردبررسی مقادیر RBE_{DSB} بزرگتر از یک بوده که نشان‌دهنده میزان بالای اثرات زیست-شناختی نسبی پرتوهای ایکس کم‌انرژی موردمطالعه در مقایسه با فوتون‌های پرانرژی است.

نتیجه‌گیری: باتوجه‌به نتایج به‌دست‌آمده می‌توان چنین استنباط نمود که میزان غلظت اکسیژن درون سلول از جمله عوامل مؤثر در ایجاد اثرات زیست‌شناختی ناشی از پرتوهای ایکس حاصل از دستگاه درمانی INTRABEAM است به‌طوری‌که در غلظت-های پایین اکسیژن، حساسیت سلول‌ها نسبت به تابش‌های یونیزان کاهش می‌یابد.

کلمات کلیدی: غلظت اکسیژن، اثرات زیست‌شناختی نسبی، دستگاه INTRABEAM، پرتوهای ایکس کم‌انرژی، شبیه‌سازی مونت‌کارلو.

وصول مقاله:۱۴۰۲/۳/۲ اصلاحیه نهایی:۱۴۰۲/۱۲/۱۳ پذیرش:۱۴۰۳/۱/۲۸

[Downloaded from sjku.muk.ac.ir on 2026-09-15]

[DOI: 10.22034/30.2.46]

مقدمه

امروزه استفاده از تابش‌های یونیزان به‌عنوان یکی از روش های مؤثر و کارآمد در درمان و کنترل انواع تومورهای سرطانی شناخته شده است (۱). پرتوهای یونیزان با انرژی زیاد هنگام ورود به بافت بدن پس از برهمکنش‌های مختلف موجب تولید تعداد بسیار زیادی الکترون ثانوی می‌شوند. الکترون‌های ثانوی ایجادشده می‌توانند موجب یونش و برانگیزش اتم‌ها و در نتیجه از بین رفتن ترکیبات شیمیایی درون سلول‌ها شوند (۲). بر اساس یافته‌های زیست‌شناختی به‌دست‌آمده مولکول به نسبت بزرگ و یکپارچه DNA مهم‌ترین بخش سلول به‌شمار می‌رود به طوری که تابش‌های یونیزان می‌توانند موجب ایجاد آسیب به مولکول DNA شوند. هنگامی‌که تجمع نقاط آسیب‌دیده در یک بخش از مولکول DNA افزایش یابد و یا به اصطلاح آسیب‌های خوشه‌ای به وجود آید، DNA قادر بازسازی خود نبوده و احتمال زنده ماندن سلول به‌شدت کاهش می‌یابد (۳). ایجاد آسیب‌های ایجادشده ناشی از پرتوهای یونیزان در مولکول DNA عمدتاً به صورت مستقیم و غیرمستقیم بوده که شامل شکست تک‌رشته‌ای(Single strand break, SSB)، شکست دو رشته‌ای(Double strand breaks, DSB) و آسیب بازهای آلی(Based damage, BD) می‌باشند. شکست‌های دو رشته‌ای ایجادشده در مولکول DNA سهم بالایی در جهش‌های واردشده به ماده وراثتی داشته و در نهایت ممکن است مرگ سلولی را به همراه داشته باشند(۶-۴).

میزان اثربخشی زیست‌شناختی نسبی (Relative biological effectiveness, RBE) تابش‌های یونیزان به عوامل مختلف فیزیکی و زیست‌شناختی بسیاری مانند میزان دوز ذخیره‌شده در سلول، حساسیت بافت نسبت به پرتوهای یونیزان، میزان انتقال خطی انرژی (Linear energy transfer, LET)، کیفیت پرتو و میزان غلظت اکسیژن سلولی وابسته است (۹-۷). سلول‌های طبیعی بطورمعمول حاوی غلظت‌های اکسیژن بالاتری نسبت به سلول‌های سرطانی هستند به طوری که غلظت‌های مختلف اکسیژن سلول در ایجاد آسیب‌های پیچیده‌تر مولکول DNA نقش مهمی دارد. پرتوهای یونیزان از طریق برهمکنش مستقیم با بافت و ذخیره انرژی و یا به طور غیرمستقیم با یونیزه‌کردن آب و درنتیجه تولید گونه‌های فعال اکسیژن (Reactive oxygen species, ROS)، از جمله رادیکال‌های هیدروکسیل، سوپراکسید و پراکسید هیدروژن باعث ایجاد آسیب اجزاء سلولی می‌شوند. نشان داده شده است که حدود ۷۰ درصد آسیب‌های ایجادشده ناشی از تابش های یونیزان با LET پایین مربوط به برهمکنش‌های غیرمستقیم DNA و تابش یونیزان می‌باشد (۹). گونه‌های فعال اکسیژن تولیدشده در برهمکنش پرتوهای یونیزان و مولکول آب موجب ایجاد پراکسید (RO_2) شده که می‌تواند بلافاصله با اجزای سلولی برهمکنش کرده و باعث ایجاد آسیب‌های غیر قابل ترمیم در مولکول DNA و در نهایت مرگ سلولی شوند.

علاوه بر این، نوع پرتوهای یونیزان مورداستفاده نیز به‌عنوان عامل تأثیرگذار دیگری در ایجاد آسیب‌های مولکول DNA شناخته‌شده است (۱۰). همچنین نشان داده شده است که پرتوهای‌ایکس کم‌انرژی دارای میزان اثربخشی زیست‌شناختی نسبی یکسانی نسبت به پرتوهای با LET بالا می‌باشند(۱۱). در واقع شدت آسیب ایجادشده در مولکول DNA ناشی از پرتوهای با LET بالا به‌طور قابل ملاحظه‌ای بیشتر از آسیب‌های ایجادشده توسط پرتوهای با LET پایین است؛ بنابراین فوتون‌های کم‌انرژی (LET بالا) در مقایسه با فوتون‌های پرانرژی (LET پایین) موجب ایجاد شکست‌های (شکست‌های تک رشته‌ای، دو رشته‌ای و شکست باز آلی) بیشتری در مولکول DNA می‌شوند؛ لذا فوتون‌های کم-انرژی دارای میزان RBE بیشتری در مقایسه با فوتون‌های پرانرژی دارند. (۱۲).

ازآنجاکه حضور اکسیژن درون سلول می‌تواند موجب تغییر محصولات شیمیایی ایجادشده ناشی از بر همکنش غیرمستقیم پرتوهای یونیزان و مولکول آب شود و همچنین

[Downloaded from sjku.muk.ac.ir on 2026-09-15]

[DOI: 10.22034/30.2.46]

باتوجه‌به میزان بالای RBE پرتوهای ایکس کم‌انرژی در مقایسه با فوتون‌های پرانرژی، هدف از انجام مطالعه حاضر بررسی میزان RBE ناشی از پرتوهای ایکس کم‌انرژی مورداستفاده در پرتودرمانی حین عمل در غلظت‌های مختلف اکسیژن درون سلول با استفاده از رویکرد شبیه‌سازی مونت‌کارلو است.

مواد و روش‌ها

برای برآورد میزان RBE حاصل از پرتوهای ایکس کم انرژی مورداستفاده در پرتودرمانی حین عمل جراحی ابتدا با استفاده از مدل مونت‌کارلوی اعتبارسنجی شده دستگاه INTRABEAM (با مقایسه منحنی‌های درصد دوز عمقی به‌دست‌آمده از روش مونت‌کارلو و مقادیر گزارش‌شده توسط شرکت سازنده) (۱۳)، طیف الکترون‌های ثانوی ایجادشده در فاصله یک سانتی‌متری از پروب لخت در آب، با استفاده از ابزار مونت‌کارلوی Geant4 مورد محاسبه قرار گرفت. برای برآورد طیف‌های الکترون‌های ثانوی متعاقب برهمکنش پرتوهای ایکس با آب از فیزیک G4EmLivermorePhysics استفاده شد که قادر به ترابرد ذرات از انرژی ۲۵۰eV تا انرژی ۱۰۰MeV است (۱۴). لازم به ذکر است طیف الکترون‌های ثانوی ایجادشده با ترابرد تعداد 10^7 ذره اولیه (طیف پرتوهای ایکس) مورد محاسبه قرار گرفته است.

پس از محاسبه طیف الکترون‌های ثانوی برای محاسبه اثرات زیست‌شناختی نسبی پرتوهای ایکس کم‌انرژی به ازاء غلظت‌های مختلف اکسیژن درون سلول از کد مونت‌کالوی MCDS استفاده شد. ازآنجاکه کد MCDS توانایی شبیه سازی و برآورد شکست‌های ایجادشده ناشی از فوتون‌ها و ذرات خنثی را در مولکول DNA ندارد، به همین دلیل ابتدا طیف الکترون‌های ثانوی ناشی از بر همکنش پرتوهای ایکس کم‌انرژی با آب مورد محاسبه قرار گرفت. الگوریتم مورداستفاده در کد MCDS در ابتدا برای تعدادی از ذرات باردار به وجود آمد؛ ولی به‌تدریج با بهینه‌سازی پارامترهای موجود، محدوده وسیع‌تری از ذرات با انرژی‌های مختلف در این کد گنجانده شد. در آخرین نسخه منتشرشده از نرم افزار MCDS 3.10A ، ذرات مجاز قابل‌ردگیری گسترش‌یافته و شامل یون‌های سنگین تا ^{56}Fe می‌شود. لازم به ذکر است اعتبار کد MCDS در برآورد آسیب‌های ایجادشده در مولکول DNA قبلاً توسط Stewart و همکاران موردبررسی قرار گرفته است (۱۵).

الگوریتم مورداستفاده در برآورد آسیب‌های ایجادشده به روش مونت‌کارلو توسط کد MCDS دارای دو مرحله اصلی شامل الف) توزیع تصادفی تعداد موردانتظار شکست‌های اولیه و ب) تقسیم‌بندی آسیب‌های ایجادشده است (۱۵). فرآیند گروه‌بندی آسیب‌های رشته‌ای ایجادشده در DNA بدین صورت است که اگر شکست ایجادشده در یکی از رشته‌های مولکول DNA رخ داده باشد به‌عنوان یک SSB در نظرگرفته می‌شود. علاوه بر این در صورتی که دو شکست تک‌رشته‌ای در رشته‌های مقابل هم در مولکول DNA در فاصله کمتر از ۱۰جفت باز ایجادشوند، به‌عنوان یک DSB تلقی می‌شود. لازم به‌ذکر است در کد MCDS شبیه‌سازی و ردگیری ذرات صورت نگرفته بلکه تنها اثر آن‌ها بر روی DNA توسط پارامتر n_{seg} در طول یک مولکول DNA مورد بررسی قرار می‌گیرد (۱۵). پارامترn_{seg} طول قطعه DNA بر حسب جفت باز است که بر اساس نوع ذره و انرژی جنبشی آن متغیر بوده و توسط رابطه ۱ قابل محاسبه است.

$$n_{seg}(x) = 149200 - \frac{123600(x)}{x + 267} \qquad (۱)$$

در رابطه ۱، x متغیری است که باانرژی ذره به طور معکوس تغییر می‌کند (۱۵).

خروجی برنامه MCDS شامل بهره شکست‌های ایجادشده در مولکول DNA است به‌طوری‌که در نهایت می‌توان مقادیر RBE پرتوهای ایکس کم‌انرژی حاصل از دستگاه INTRABEAM را از طریق رابطه ۲ محاسبه کرد(۱۶):

[Downloaded from sjku.muk.ac.ir on 2026-09-15]

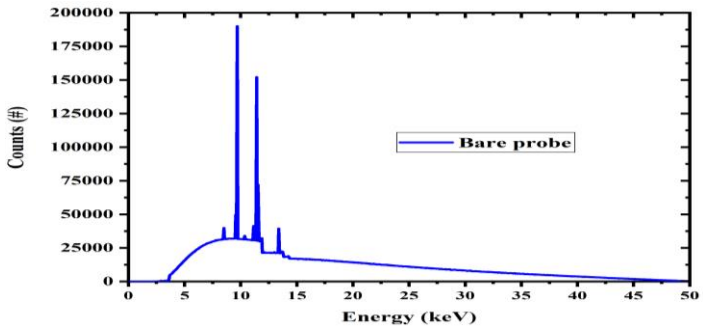
[DOI: 10.22034/30.2.46]

$$RBE=\frac{(Y_{sb})}{(Y_{sb})_{reference}} \quad (۲)$$

در رابطه ۲ مقدار Y_{sb} بهره شکست‌های تک‌رشته‌ای و دو رشته‌ای ایجادشده در طول مولکول DNA مربوط به تابش موردمطالعه و تابش مرجع($Y_{Sb)reference}$) است. از آنجا که اثرگذاری نسبی‌زیست‌شناختی به میزان توانایی یک پرتو در ایجاد اثرگذاری زیست‌شناختی یکسان در مقایسه با یک تابش مرجع (پرتوایکس ۲۰۰keV یا ^{60}Co) در نظر گرفته می‌شود، در مطالعه حاضر از پرتوهای گامای حاصل از ^{60}Co به عنوان تابش مرجع استفاده شد و میزان شکست‌های تک‌رشته‌ای و دو رشته‌ای ایجادشده به‌عنوان مرجع جهت برآورد میزان اثربخشی نسبی تابش مورد مطالعه در نظر گرفته شد. لازم به ذکر است بهره شکست‌های تک‌رشته‌ای و دو رشته‌ای ایجادشده توسط تابش مرجع به ترتیب برابر با ۱۸۸/۸۴ $Gy^{-1}Gbp^{-1}$ و ۸/۲۷ $Gy^{-1}Gbp^{-1}$ در نظر گرفته شدند؛ بنابراین اثر میزان غلظت اکسیژن سلول بر اثربخشی نسبی پرتوهای ایکس موردمطالعه با محاسبه بهره شکست‌های ایجادشده (شکست‌های تک‌رشته‌ای و دو رشته‌ای) در مولکول DNA توسط پرتوهای ایکس و تقسیم بر مقادیر ذکرشده مربوط به تابش مرجع در غلظت‌های مختلف اکسیژن سلولی (از صفر تا صد درصد) بررسی شد.

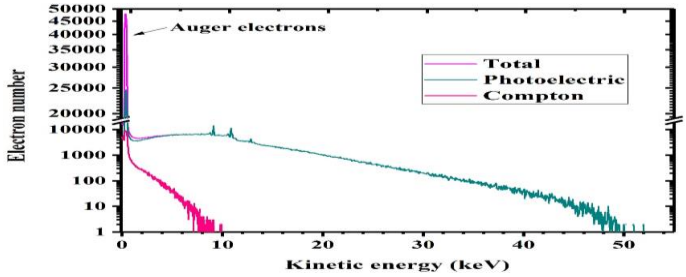
یافته‌ها

طیف پرتوهای ایکس کم‌انرژی ساطع‌شده از دستگاه INTRABEAM در اثر برخورد الکترون‌های باانرژی ۵۰ keV باهدف طلا در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱. طیف پرتوهای ایکس ساطع‌شده. طیف پرتوهای ایکس حاصل از پروب لخت دستگاه درمانی INTRABEAM.

طیف الکترون‌های ثانوی ناشی از برهمکنش پرتوهای ایکس کم‌انرژی دستگاه INTRABEAM و آب در فاصله ۱ سانتی‌متری از چشمه تولید پرتوایکس (شکل ۱) در شکل ۲ نشان داده شده است.

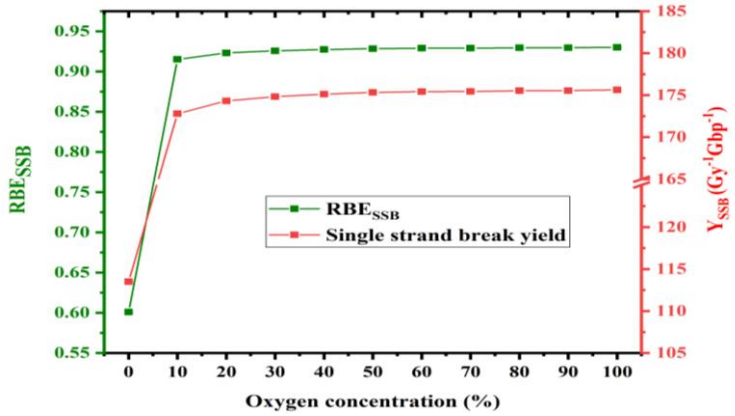


شکل ۲. طیف الکترون‌های ثانوی ایجادشده. طیف الکترون‌های ثانوی ایجادشده در اثر برهمکنش پرتوهای ایکس حاصل از دستگاه درمانی INTRABEAM و آب در فاصله ۱ سانتی‌متری از پروب لخت.

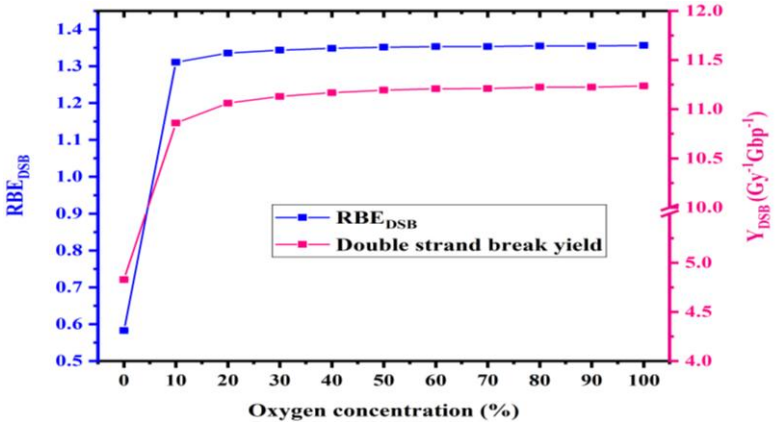
[Downloaded from sjku.muk.ac.ir on 2026-09-15]

[DOI: 10.22034/30.2.46]

نتایج حاصل از برآورد RBE_{SSB} و RBE_{DSB} ناشی از پرتوهای ایکس کم‌انرژی گسیل‌شده در فاصله ۱ سانتی‌متری از پروب پرتوایکس دستگاه INTRABEAM به ازاء غلظت‌های مختلف اکسیژن درون سلول به ترتیب در شکل-های ۳ و ۴ گزارش شده‌است.



شکل ۳: مقادیر بهره شکست‌های تک‌رشته‌ای و RBE_{SSB} پرتوهای ایکس کم‌انرژی. مقادیر RBE_{SSB} و بهره شکست‌های تک‌رشته‌ای ایجادشده توسط پرتوهای ایکس کم‌انرژی مورد استفاده در پرتودرمانی حین عمل جراحی به ازاء غلظت‌های متفاوت اکسیژن درون سلول از صفر تا ۱۰۰٪.



شکل ۴: مقادیر بهره شکست‌های دو رشته‌ای و RBE_{DSB} پرتوهای ایکس کم‌انرژی. مقادیر RBE_{DSB} و بهره شکست‌های دو رشته‌ای ایجادشده توسط پرتوهای ایکس کم‌انرژی مورداستفاده در پرتودرمانی حین عمل جراحی به ازاء غلظت‌های متفاوت اکسیژن درون سلول از صفر تا ۱۰۰٪.

بحث

همان‌طور که در شکل ۱ نشان داده شده است طیف پرتوهای ایکس ساطع‌شده از دستگاه درمانی موردمطالعه شامل پرتوهای ایکس مشخصه هدف طلا (انرژی‌های keV ۹/۷، ۱۱/۴ keV و ۱۳/۴keV) و پیوستاری از طیف انرژی تابش‌های ترمزی است. طیف الکترون‌های ثانوی به دست آمده در شکل ۲ ناشی از برهمکنش پرتوهای ایکس کم-انرژی و آب، شامل فوتوالکترون‌ها، الکترون کامپتون و الکترون‌های اوژه هستند که در قسمت‌های کم انرژی طیف الکترون‌های ثانوی به دست آمده، سهم عمده الکترون‌های ثانوی به‌دست‌آمده مربوط به الکترون‌های اوژه است. با توجه به شکل ۲، شدت فوتوالکترون‌ها بسیار بیشتر از شدت الکترون‌های کامپتون است که این موضوع به ماهیت کم-انرژی پرتوهای ایکس مورداستفاده در پرتودرمانی حین عمل و سطح مقطع بالاتر اثر فوتوالکتریک نسبت به پراکندگی کامپتون در این محدوده انرژی مرتبط است (۱۷). قله‌های تیز مشاهده شده در پیوستار طیف کلی الکترون‌های ثانوی مربوط به برهمکنش پرتوهای ایکس

[Downloaded from sjku.muk.ac.ir on 2026-09-15]

[DOI: 10.22034/30.2.46]

مشخصه با آب است که منجر به تولید الکترون‌های ثانوی می‌شوند. با توجه به دامنه کمتر الکترون‌های اوژه (حدود ۰/۱ میکرومتر) نسبت به اندازه سلول، بیشتر انرژی الکترون-های اوژه درون سلول ذخیره خواهد شد به طوری که از این طریق می‌تواند باعث افزایش مقادیر RBE در پرتودرمانی حین عمل جراحی با استفاده از پرتوهای ایکس کم‌انرژی شوند.

همان‌طور که در شکل‌های ۳ و ۴ نشان داده شده است بهره شکست‌های تک رشته‌ای و دو رشته‌ای و متعاقباً مقادیر RBE (RBE_{SSB} و RBE_{DSB}) با افزایش غلظت اکسیژن درون سلول از صفر تا صد درصد افزایش یافته است. با افزایش غلظت اکسیژن درون سلول مقادیر RBE_{SSB} و RBE_{DSB} به ترتیب حدود ۱/۶ و ۲/۳ برابر افزایش یافته است. دلیل این موضوع را می‌توان به این واقعیت نسبت داد که با افزایش میزان اکسیژن درون سلول، برهمکنش پرتو ورودی و اکسیژن نیز افزایش یافته که این موضوع درنهایت می‌تواند موجب ایجاد گونه‌های فعال اکسیژن بیشتر در بافت شود. با افزایش تعداد گونه‌های فعال اکسیژن تولیدشده تعداد برهمکنش‌ها با اجزای سلولی افزایش یافته و باعث القاء آسیب‌های بیشتر در مولکول DNA می‌شود. هم‌چنین با توجه به نتایج نشان داده شده در شکل‌های ۳ و۴ می‌توان دریافت که بیشترین اثر تغییر غلظت اکسیژن در مقادیر RBE_{DSB} و RBE_{DSB} به دست آمده هنگام افزایش غلظت اکسیژن از صفر درصد تا ۱۰ درصد است. دلیل این موضوع را می‌توان به این امر نسبت داد که در غلظت‌های پایین اکسیژن درون سلول، اثرات مخرب پرتوهای ایکس تا حدود ۳ برابر کاهش می‌یابد که به اصطلاح به آن نسبت افزایش اکسیژن (Oxygen enhancement ratio, OER) گفته می‌شود (۱۸).

باتوجه‌به شکل‌های ۳ و۴، افزایش غلظت اکسیژن درون سلول از ۱۰ تا ۱۰۰ درصد تغییر قابل ملاحظه‌ای (کمتر از ۳ درصد) در برآورد RBE_{DSB} و RBE_{DSB} نداشته است. این یافته در مطالعه انجام شده توسط Chan و همکاران که تغییرات غلظت اکسیژن سلول را در ایجاد آسیب‌های دو رشته‌ای مولکولDNA در فوتون با LET بالا مورد بررسی قرار دادند، نیز نشان داده شده است (۱۹).

میزان غلظت اکسیژن موجود در سلول را می‌توان به‌عنوان یک عامل محیطی بسیار مهم در ایجاد آسیب‌های ایجادشده در مولکول DNA در نظر گرفت. غلظت اکسیژن موجود در سلول در بین انواع تومور، در مناطق مختلف تومور و بین تومور و بافت طبیعی متفاوت است و همین موضوع می‌تواند موجب تغییر نوع آسیب‌های ایجادشده در مولکول DNA شود. بافت‌های طبیعی از سطح اکسیژن کافی برخوردار هستند؛ اما بااین‌وجود تومورها در زمان رشد سریع خود اغلب با شرایط کم اکسیژنی مواجه هستند. نظر به اهمیت میزان اکسیژن برای تولید رادیکال‌های فعال اکسیژن در زمان تابش، مناطق با میزان اکسیژن کم درون تومورها حساسیت کمتری به پرتو داشته و نسبت به آن مقاوم هستند. باتوجه‌به سطح اکسیژن بالای درون بافت‌های سالم، ورود پرتو به این بافت‌ها ممکن است باعث ایجاد گونه‌های بیشتری از رادیکال‌های فعال اکسیژن شود که این موضوع می‌تواند موجب کاهش مزایای استفاده از پرتودرمانی شود. رویکردهای بسیاری برای کاهش مقاومت تومورها و افزایش حساسیت آن‌ها نسبت به پرتو مانند استفاده از روش-های درمانی کمکی (همانند شیمی‌درمانی و هایپرترمی) وجود دارد که استفاده از این روش‌ها به‌شدت وابسته به نوع، موقعیت تومور و همچنین اهداف درمان است (۲۰ و۲۱).

باتوجه‌به نتایج نشان‌داده‌شده در شکل ۴ می‌توان دریافت که میزان RBE_{DSB} برآوردشده برای بیشتر غلظت‌های اکسیژن مورد بررسی بیشتر از واحد است. مقادیر بالای RBE_{DSB} پرتوهای ایکس کم‌انرژی (نسبت به فوتون‌های پرانرژی که برابر واحد در نظر گرفته می‌شود) از نظر زیست شناختی مشابه با مقادیر به دست آمده برای پرتوهای LET بالا است به طوری که این امر ممکن است موجب بهبود نتایج بالینی در درمان سرطان‌ها شود.

[Downloaded from sjku.muk.ac.ir on 2026-09-15]

[DOI: 10.22034/30.2.46]

نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از برآورد اثرات زیست‌شناختی ناشی از پرتوهای ایکس حاصل از دستگاه INTRABEAM به ازاء غلظت‌های مختلف اکسیژن درون سلول نشان داد که میزان غلظت اکسیژن درون سلول از جمله عوامل تأثیرگذار مهم در ایجاد آسیب‌های زیست‌شناختی مختلف به شمار می‌رود. ماهیت پایین غلظت اکسیژن موجود درون سلول می‌تواند موجب کاهش شدید حساسیت سلول به پرتوهای یونیزان شود که در نهایت می‌تواند آسیب به سایر بافت‌های سالم اطراف تومور را به دنبال داشته باشد. همچنین باتوجه‌به مقادیر بالای RBEDSB (مشابه با پرتوهای با LET بالا) محاسبه‌شده در این بررسی، استفاده از پرتوهای ایکس کم-انرژی در پرتودرمانی حین عمل جراحی می‌تواند باعث بهبود کیفیت فرایند درمانی شود؛ بنابراین باتوجه‌به ماهیت کم‌انرژی پرتوهای ایکس حاصل از دستگاه INTRABEAM، استفاده از روش‌های موجود جهت کاهش مقاومت تومورها به پرتوهای یونیزان در غلظت‌های پایین اکسیژن سلولی لازم به نظر می‌رسد به‌طوری‌که پیشنهاد می‌شود این موضوع توسط گروه‌درمانی موردتوجه قرار گیرد.

تشکر و قدردانی

مطالعه حاضر(با شناسه اخلاق IR.HSU.REC.1402.013 مصوب در دانشگاه حکیم سبزواری) به صورت مستقل صورت پذیرفته و کد تصویب طرح و منبع تأمین مالی به مطالعه حاضر تعلق نگرفته است. هم‌چنین نتایج حاصل از این مطالعه با منافع نویسندگان در تعارض نیست.

منابع

1. Derer A, Frey B, Fietkau R, Gaipl US. Immune-modulating properties of ionizing radiation: rationale for the treatment of cancer by combination radiotherapy and immune checkpoint inhibitors. Cancer Immunol Immunother. 2016;65:779-786.
2. Schürmann R, Vogel S, Ebel K, Bald I. The Physico-Chemical Basis of DNA Radiosensitization: Implications for Cancer Radiation Therapy. Chemistry. 2018;24:10271-10279.
3. Henthorn NT, Warmenhoven W, Sotiropoulos M, Mackay RI, Kirkby KJ, Merchant MJ. Nanodosimetric Simulation of Direct Ion-Induced DNA Damage Using Different Chromatin Geometry Models. Radiat Res. 2017;188:690–703.
4. Sage E, Shikazono N. Radiation-induced clustered DNA lesions: Repair and mutagenesis. Free Radic Biol Med. 2017;107:125-135.
5. Ceccaldi R, Rondinelli B, D'Andrea AD. Repair pathway choices and consequences at the double-strand break. Trends Cell Biol. 2016;26:52-64.
6. Matsuya Y, Nakano T, Kai T, Shikazono N, Akamatsu K, Yoshii Y, Sato T. A Simplified Cluster Analysis of Electron Track Structure for Estimating Complex DNA Damage Yields. Int J Mol Sci. 2020;21:1701.
7. Choi J, Kang JO. Basics of particle therapy II: relative biological effectiveness. Radiat Oncol J. 2012;30:1-13.
8. Qi J, Geng C, Tang X, Tian F, Han Y, Liu H, et al. Effect of spatial distribution of boron and oxygen concentration on DNA damage induced from boron neutron capture therapy using Monte Carlo simulations. Int J Radiat Biol. 2021;97:986-996.
9. Nickoloff JA, Taylor L, Sharma N, Kato TA. Exploiting DNA repair pathways for tumor sensitization, mitigation of resistance, and normal tissue protection in radiotherapy. Cancer Drug Resist. 2021;4:244-263.
10. Kyriakou I, Tremi I, Georgakilas AG, Emfietzoglou D. Microdosimetric investigation of the radiation quality of low-medium energy electrons using Geant4-DNA. Appl Radiat Isot. 2021;172: 109654.

[Downloaded from sjku.muk.ac.ir on 2026-09-15]

[DOI: 10.22034/30.2.46]

11.Zhang H, Zhou W. Low-energy X-ray irradiation: A novel non-thermal microbial inactivation technology. Adv Food Nutr Res. 2022:100:287-328.
12.Tsai JY, Chen FH, Hsieh TY, Hsiao YY. Effects of indirect actions and oxygen on relative biological effectiveness: estimate of DSB induction and conversion induced by gamma rays and helium ions. J Radiat Res. 2015;56:691-9.
13.Shamsabadi R, Baghani HR, Azadegan B, Mowlavi AA. Monte Carlo based analysis and evaluation of energy spectrum for low-kV IORT spherical applicators. Z Med Phys. 2020;30:60-69.
14.Beld E, Seevinck PR, Lagendijk JJW, Viergever MA, Moerland MA. Monte Carlo study of the impact of a magnetic field on the dose distribution in MRI-guided HDR brachytherapy using Ir-192. Phys Med Biol. 2016;61:6791–6807.
15.Stewart RD, Yu VK, Georgakilas AG, Koumenis C, Park JH, Carlson DJ. Effects of radiation quality and oxygen on clustered DNA lesions and cell death. Radiat Res. 2011;176:587-602.
16 Shamsabadi R, Baghani HR, Azadegan B, Mowlavi AA. Impact of spherical applicator diameter on relative biologic effectiveness of low energy IORT X-rays: A hybrid Monte Carlo study. Phys Med. 2020;80:297-307.
17 Wang XJ, Miguel B, Seuntjens J, Fernández-Varea JM. On the relativistic impulse approximation for the calculation of Compton scattering cross sections and photon interaction coefficients used in kV dosimetry. Phys Med Biol. 2020;65:125010.
18.Cartwright IM, Su C, Haskins JS, Salinas VA, Sunada S, Yu H, et al. DNA repair deficient Chinese hamster ovary cells exhibiting differential sensitivity to charged particle radiation under aerobic and hypoxic conditions. Int J Mol Sci. 2018;19:2228.
19.Chan CC, Chen FH, Hsueh KL, Hsiao YY. The Effect of Hypoxia on Relative Biological Effectiveness and Oxygen Enhancement Ratio for Cells Irradiated with Grenz Rays. Cancers (Basel). 2022;14:1262.
20.Rao W, Deng ZS. A review of hyperthermia combined with radiotherapy/chemotherapy on malignant tumors. Crit Rev Biomed Eng. 2010;38:101-16.
21. Gong L, Zhang Y, Liu C, Zhang M, Han S. Application of radiosensitizers in cancer radiotherapy. Int J Nanomedicine. 2021;16:8139-8140.

[Downloaded from sjku.muk.ac.ir on 2026-09-15]

[DOI: 10.22034/30.2.46]