



Scan online to view this article

The Xray effect on pancreatic cancer cell line in concomitant therapy with nano sheets of graphene oxide and hyperthermia

Mohammad Hosein Haqiqian¹, Dariush Sardari^{1*}, Mohammad Houshyari², Reza Moghadasali³

1. Department of Medical Radiation Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

2. Department of Radiation Oncology, Shahid Beheshti University of Medical Sciences, Tehran, Iran

3. Department of Stem Cells and Developmental Biology, Cell Sciences Research Center, Royan Institute for Stem Cell Biology and Technology, ACECR, Tehran, Iran

Abstract

Aim and Background: Pancreatic cancer leaves little hope for survival among patients. This is due to its cancerous cell resistance to radiation and chemicals.

Materials & Methods: Synergistic effect between three modalities of pancreatic cancer treatment is investigated. These are radiation therapy, Hyperthermia and graphene oxide nanosheets. The aim is to overcome resistance of pancreatic cancer cell against radiation therapy. Cancerous cell lines were treated by each one of three modalities separately. Other samples were treated with various combinations of these modalities. Hyperthermia accomplished with placing cell lines for 15 min in 42°C. In the course of radiation therapy, the cancerous cells were irradiated by 6 MV Linac for two cases of 2 Gy and 3 Gy. The cell line viability was readout by MTT assay in 24 hours and 48 hours after treatment.

Results: In single modality treatment it was shown that 24h after the treatment, the group treated by RT 3 Gy had the highest cell killing result. Following up the result in 48h readout, hyperthermia and 3 Gy radiotherapy had similar result. In double modality treatment, for both 24h and 48h viability readout, the group graphene-oxide plus 2 Gy radiotherapy showed cell survival amounting to 67.07% and 43.23% respectively being the lowest cell survival among all double combinations.

Conclusion: In triple modality treatment, the cell viability for 24h showed no significant improvement but in 48h the hyperthermia plus Graphene-oxide and 3 Gy radiotherapy had very low cell viability. Significant sensitizing effect for GO when combined by radiation therapy was observed.

Keywords: Graphene oxide nano-sheets; Radiotherapy ; Hyperthermia; pancreatic cancer cell lines; combinational therapy, Iau Science

Corresponding author:

Department of Medical Radiation Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

Email: Dariush.sardari@gmail.com



به صورت
بد

بررسی اثر درمانی تابش اشعه ایکس بر روی سلول سرطانی پانکراس در ترکیب با هایپرترمیا و نانو صفحه اکسید گرافن

محمد حسین حقیقیان^۱، داریوش سرداری^{۱*}، محمد هوشیاری^۲، رضا مقدسعلی^۳

۱. گروه مهندسی هسته‌ای - پرتوپزشکی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران

۲. گروه رادیوتراپی و آنکولوژی، دانشکده پزشکی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

۳. گروه سلول‌های بنیادی و سلول درمانی، مرکز تحقیقات رویان، تهران، ایران

چکیده

سابقه و هدف: سرطان پانکراس امید چندانی برای زنده ماندن در بین بیماران باقی نمی‌گذارد. این به دلیل مقاومت سلول این سرطان در برابر اشعه یون ساز و داروهای شیمی درمانی است. اثر هم افزایی ترکیب سه روش درمانی بروی سلول سرطانی پانکراس بررسی شده است. پرتودرمانی، هایپرترمیا و نانو صفحات اکسید گرافن روش‌های درمانی این مطالعه هستند. هدف از این کار غلبه بر مقاومت سلول سرطانی پانکراسی در برابر تابش یون ساز می‌باشد.

مواد و روش‌ها: رده‌ی سلول سرطانی 1-ASPC، توسط هر یک از سه روش زیر جداگانه با یک عامل درمانی تحت درمان قرار گرفت. همچنین این مطالعه درمان‌های مذکور را نیز به صورت ترکیبی مورد بررسی قرار داد. درمان با اکسید گرافن به مدت ۲ ساعت در دوز انتخابی ۳۰ ppm. هایپرترمیا به مدت ۱۵ دقیقه در ۴۲ درجه‌ی سلسیوس انجام شد. پرتودرمانی، توسط لینک 6 MV برای دو دوز 2 Gy و 3 Gy تابش دهی شد. نرخ بقا رده‌ی سلول با روش MTT در ۲۴ ساعت و ۴۸ ساعت پس از هر درمان قرائت شد.

یافته‌ها: در گروه با یک عامل درمانی نشان داده شد که ۲۴ ساعت پس از درمان، گروه تحت درمان با رادیوتراپی 3 Gy بالاترین نتیجه کشتار سلولی را داشت. در درمان با ترکیب دو روش، برای هر دو بازخوانی زنده ماندن ۲۴ ساعت و ۴۸ ساعت، گروه گرافن اکسید به علاوه رادیوتراپی ۲ Gy بقای سلول را به ترتیب ۶۷/۰۷٪ و ۴۳/۲۳٪ درصد در سطح معنی داری ۰/۰۵ نشان داد که به ترتیب کمترین بقای سلول در میان تمام گروه‌های درمانی دو ترکیبی است. در درمان ترکیب سه روش، زنده ماندن سلول به مدت ۲۴ ساعت هیچ پیشرفت قابل توجهی نشان نداد اما در ۴۸ ساعت هایپرترمیا و گرافن اکسید و رادیوتراپی ۳ Gy دارای بیشترین میزان مرگ سلولی سلولی در تمامی آزمایشات بود.

نتیجه‌گیری: هنگامی که هایپرترمیا با پرتودرمانی همراه بود، اثر هم‌افزایی قابل توجهی با اکسید گرافن مشاهده شد. اکسید گرافن می‌تواند به عنوان یک حساسیت‌زا برای تابش یون‌ساز استفاده شود.

واژگان کلیدی: نانو صفحه‌ی اکسید گرافن، رادیوتراپی، هایپرترمیا، سلول سرطانی پانکراس، درمان ترکیبی، Iau Science

مقدمه

ابتلا به سرطان پانکراس یکی از مهم‌ترین دلایل از دست دادن امید بیمار در سراسر جهان است. متداول‌ترین نوع این سرطان آدنوکارسینومای پانکراس است که بسیار تهاجمی است و میزان بقا کمتر از ۵٪ دارد (۱،۴). این امر ماهیت کشنده این بیماری را برجسته می‌کند (۵). بهترین راهکار برای درمان این نوع سرطان، تشخیص زود هنگام همراه با

نویسنده مسئول:

گروه مهندسی هسته‌ای - پرتوپزشکی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و

تحقیقات، تهران، ایران

پست الکترونیکی: Dariush.sardari@gmail.com

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۲/۳۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۶/۱۶

در ۳ دسته تحت درمان قرار گرفتند. در گروه "تک درمانی"، رده سلولی با هر عامل درمانی مجزا تحت درمان قرار گرفت و با گروه کنترل (سلول بدون عامل درمانی) مقایسه شدند. گروه دو درمانی: ترکیب دو درمان شامل هایپرترمیا + رادیوتراپی 2Gy، هایپرترمیا + رادیوتراپی 3 Gy، اکسید گرافن + رادیوتراپی 3 Gy و هایپرترمیا + اکسید گرافن است. مطالعه نهایی در ترکیب سه عامل درمان است، که شامل هایپرترمیا + رادیوتراپی 2 Gy + اکسید گرافن و هایپرترمیا + رادیوتراپی 3 Gy + اکسید گرافن بود.

سنتز و تعیین خصوصیات

برای تولید اکسید گرافن به روش هامر^۴، ابتدا گرافیت پوسته‌ای-لایه لایه‌ای (۱ گرم، شرکت مرک) به محلول H_2SO_4 (۸۰ میلی لیتر، شرکت مرک) اضافه شد و به مدت ۲ ساعت مخلوط و به هم زده شد. سپس $KMnO_4$ به مخلوط اضافه گردید و به مدت ۲۴ ساعت مخلوط شد. سپس رنگ محلول در نتیجه فرآیند اکسیداسیون گرافیت به تیره تغییر کرد. برای رفع واکنش اکسیداسیون، آب دو بار تقطیر اضافه گردید. به منظور خنثی سازی اثر $KMnO_4$ باقیمانده (بدون واکنش)، محلول آبی H_2O_2 (۱۰ میلی لیتر، مرک) اضافه شد که باعث تغییر رنگ به زرد می‌شود. مخلوط سه بار با H_2O و HCL (۱ میلی متر، مرک) در ۸۰۰۰ دور در دقیقه برای حذف یون‌ها و اسیدهای اضافی سانتریفیوژ شد. پس از فرآیند لایه برداری خود به خود، اکسید گرافین تشکیل می‌شود. در انتها برای بدست آوردن اکسید گرافن بدون ناخالصی عاری از هرگونه ذره اضافی، محلول از طریق فرآیند دیالیز (لوله ۱۲ کیلو دالتون) به مدت ۷۲ ساعت در دمای ۲۵ درجه‌ی سلسیوس خالص سازی گردید (۲۷). به دنبال رسوب محلول اکسیدگرافن بر روی سطح میکا شکافته شده، تصاویر میکروسکوپ نیروی اتمی^۵ (DME، دانمارک) توسط یک دامنه دوگانه ۹۵-۲۰۰ گرفته شد تا درک دقیق اندازه ورق‌های اکسید گرافن را نشان دهد. الگوی پراش اشعه X^6 با استفاده از طیف سنج اشعه ایکس فیلپس (هلند) پس از خشک کردن در یک لیوفیلایزر بدست آمد. طیف ماورا بنفش با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر Nicolet (Evolution

رویکرد جراحی مقطع برداری رادیکالی است (۶). جراحی به-طور برجسته تنها گزینه درمانی این بیماری است اما فقط تعداد محدودی از بیماران که تحت عمل جراحی قرار می-گیرند، بقا می‌یابند. رادیوتراپی برای سرطان پانکراس که گزینه کار ساز نیست، یک موضوع بحث برانگیز است. تاکنون نتایج حاصل از رادیوتراپی به عنوان درمان کمکی هنوز برای این نوع سرطان نامشخص است (۷). بنابراین، اگر اثر هم افزایی هایپرترمیا بتواند پرتودرمانی را بهبود بخشد، گام بزرگی برای پیشبرد این درمان خواهد بود (۸). هایپرترمیا با سابقه طولانی در درمان‌های خاص و به عنوان روش اصلی درمانی شناخته نمی‌شود (۹،۱۱). از آنجا که هایپرترمیا می‌تواند یک عامل در افزایش اثر پرتودرمانی باشد (۱۲،۱۳) در مطالعات سلولی^۱ و حیوانی^۲ نشانه‌هایی مشاهده شده است که بافت سرطانی نسبت به استفاده از هر دو روش درمانی با دمای بالا و تابش اشعه ایکس به صورت ترکیبی، موثرتر است (۸،۱۲،۱۴،۱۵). نانو صفحه اکسید گرافن، با خواص فیزیکی عالی به صورت صفحه‌های نانو با ساختار دو و خاصیت سازگاری با بدن و سطح ویژه زیاد^۳ (۲۶۳۰ متر مربع در گرم)، هدایت الکتریکی استثنایی (حرکت حامل‌های بار، ۲۰۰۰۰۰ سانتی متر مربع $s^{-1} V^{-1}$)، هدایت حرارتی ($W / m / 5000$)، باعث کاربردهای عظیمی در تحقیقات و آزمایشات زیست پزشکی شده است (۱۶،۱۸). کاربرد این نانو صفحه در ترکیب با هایپرترمیا با استفاده از تابش لیزر بستر مطالعات بسیاری در مورد فوتوترمال تراپی بوده است (۱۹). همچنین از این نانو صفحه برای انتقال دارو (انتقال هدفمند) در تصویربرداری سلولی یا درمان به عنوان عامل درمانی به همراه عامل تشخیصی (ترانوستیک)^{۲۰} استفاده شده است. به منظور دستیابی به بخش جدیدی از تحقیقات و درمان سرطان، هدف از این مطالعه بررسی اثر ترکیبی سه روش درمانی برای افزایش اثر هم افزایی عوامل درمان به منظور بالا بردن نرخ مرگ سلولی سرطان پانکراس بود.

مواد و روش‌ها

گروه بندی های درمانی

نانو ذره به عنوان ابزاری مدرن برای تحویل دارو و هدف قرار دادن سلول سرطانی شناخته شده است (۲۴-۲۲). سلول‌ها

⁴ Hummer

⁵ Atomic force microscopy (AFM)

⁶ X-ray Powder Diffraction (XRD)

¹ In vitro

² In vivo

³ Specific surface area

یافته‌ها

رده سلولی و گروه بندی

نمونه سلول‌های آدنوکارسینومای پانکراس انسانی در DMEM/F12 + 2mML-Glutamine + 10FBS + 1mM پیروات سدیم در ۳۷ درجه‌ی سلسیوس رشد داده شد. برای تعیین غلظت مناسب و مدت زمان درمان در هایپرترمیا در دمای ۴۲ درجه‌ی سلسیوس، آزمایش در دوزهای مختلف که در زیر ذکر شده است، انجام شد. هر مطالعه شامل گروه کنترل بدون عامل درمانی بود. برای اهداف درمانی، نمونه‌ها با توجه به غلظت نانو ذرات ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۵۰، ۶۰، ۸۰، ۱۰۰ میکروگرم در میلی لیتر به علاوه یک گروه کنترل به هشت گروه تقسیم شدند. درمان هایپرترمیا همراه با گروه کنترل به مدت ۱۵، ۳۰، ۶۰ و ۹۰ دقیقه در ۴۲ درجه‌ی سلسیوس انجام شد (شکل ۱). سپس قسمت دیگر درمان یعنی اکسید گرافن به طور همزمان با زمان انکوباسیون ۲ ساعته و به دنبال آن رادیوتراپی اعمال شد. هایپرترمیا، توسط دستگاه بن ماری برای مدت زمان ۱۵ دقیقه در دمای ۴۲ درجه سلسیوس تنظیم شد.

روش اندازه گیری بقا سلولی

برای اندازه گیری نرخ بقا، از روش MTT استفاده شد. برای این منظور، سلول‌های سرطانی پانکراس رشد و در پتری دیش‌های شش خانه کاشته شدند. رده سلولی با تراکم ۳۰۰۰۰۰ سلول در هر محفظه قرار داده شد. این سلول‌ها در مرحله درمان تحت غلظت‌هایی که قبلاً ذکر شد با نانو گرافن اکساید درمان شدند (ترتیب اندازه ۱۰ - ۱۰۰ میکروگرم در میلی لیتر). سپس رادیوتراپی انجام گرفت و نرخ بقای سلول‌ها پس از ۲۴ و ۴۸ ساعت با افزودن ۱ میلی لیتر محلول MTT به نمونه‌ها، اندازه گیری شد. همه آزمایش‌ها در هر گروه سه بار تکرار گردید.

توالی درمان‌ها

گروه‌های نمونه ابتدا با افزودن نانو گرافن اکساید با غلظت ۳۰ میکروگرم در میلی لیتر با زمان انکوباسیون ۲ ساعت تحت درمان قرار گرفتند. سپس سلول‌ها به مدت ۱۵ دقیقه بدون وقفه توسط هایپرترمیا مجدداً درمان گردیدند. درمان نهایی رادیوتراپی بود. به همین منظور سلول‌ها به کلینیک پرتودرمانی تحویل داده شدند تا در معرض اشعه ایکس ۶ MV لینک با دو دوز Gy۲ و Gy۳ قرار بگیرند.

Thermo Scientific)، در محدوده طول موج ۲۰۰-۸۰۰ نانومتر بدست آمد. برای ارزیابی ناهمگنی، میکروسکوپ نوری قطبی شده^۱ (Leica DMR) برای بررسی میکروسکوپی استفاده شد. برای توصیف اندازه دانه‌ها و توزیع آن، از روش تصویربرداری الکترون ثانویه^۲ با میکروسکوپ الکترونی پرتو دوگانه (FEI Helios NanoLab 600) بررسی شد. برای ارزیابی نوع شناسی و معماری، نمونه‌ها توسط میکروسکوپ الکترونی انتشار میدانی مشاهده شدند (FEI-SEM، FEI Nova NanoSEM 230، USA). ضخامت نانو گرافن (به شکل پوسته) ۰/۸ نانومتر و عرض آن‌ها در محدوده ۲۰۰ - ۵۰۰ نانومتر اندازه گیری شد (۳۷).

مدت زمان درمان و دوز مصرفی

سلول سرطانی پانکراس در محیط کشت خود به مدت ۴۸ ساعت کشت داده شد و آزمایش بر روی آن‌ها انجام شد. به منظور حصول غلظت کشنده سلولی، غلظت‌های ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۵۰، ۶۰، ۸۰، ۱۰۰ میکروگرم در میلی لیتر اکسید گرافن به سلول‌ها به مدت دو ساعت اضافه شد و سپس ۴۸ ساعت پس از این درمان، نتایج مطالعه گردید. همچنین به منظور بدست آوردن زمان درمان برای هایپرترمیا در دمای ۴۲ درجه سلول‌ها با ۴ مدت زمان مختلف ۱۵، ۳۰، ۶۰، ۹۰ دقیقه تحت درمان هایپرترمیا قرار گرفتند تا مدت زمان مناسب برای درمان ترکیبی بدست آید که پس از ۴۸ ساعت نتایج حاصله ثبت شد. با روش MTT در ۲۴ و ۴۸ ساعت پس از هر روش نتایج میزان مرگ سلولی استخراج شد. برای درک بهتر مکانیسم درمان و تاثیر عوامل درمانی بر روی مرگ سلولی، بازخوانی زنده ماندن سلول‌ها را در دو زمان مطالعاتی در ۲۴ ساعت و ۴۸ ساعت پس از آزمایش صورت گرفت.

تجزیه و تحلیل آماری

تجزیه و تحلیل داده‌ها با SPSS Statistics انجام شد (۳۴). در مطالعه‌ی حاضر، میانگین انحراف معیار (SD) در بیان متغیرهای مداوم لحاظ شده است. به همین منظور از آزمون ANOVA یک طرفه (به دنبال آن آزمون تعقیبی دانکن) و آزمون t مستقل استفاده شد. مقایسه بین گروه‌ها، تمام آزمون‌های آماری دو طرفه بودند و ۰/۰۵ > P از نظر آماری معنادار در نظر گرفته شد.

¹ polarized optical microscope (POM)

² Secondary electron image

هایپرترمیا

هایپرترمیا توسط بن ماری^۱ از جنس فولاد ضد زنگ انجام شد که شامل گزینه تنظیم زمان و دما بود. محفظه بن ماری کاملاً عایق شده بود و از دماسنج و تایمر خارجی جهت کنترل کیفی در این روش استفاده گردید. در داخل بن ماری یک صفحه فولاد ضد زنگ ساخته شده است که از آن به عنوان یک سکوی نگهدارنده برای قرار دادن ظرف حاوی سلولها استفاده شد.

پرتودرمانی

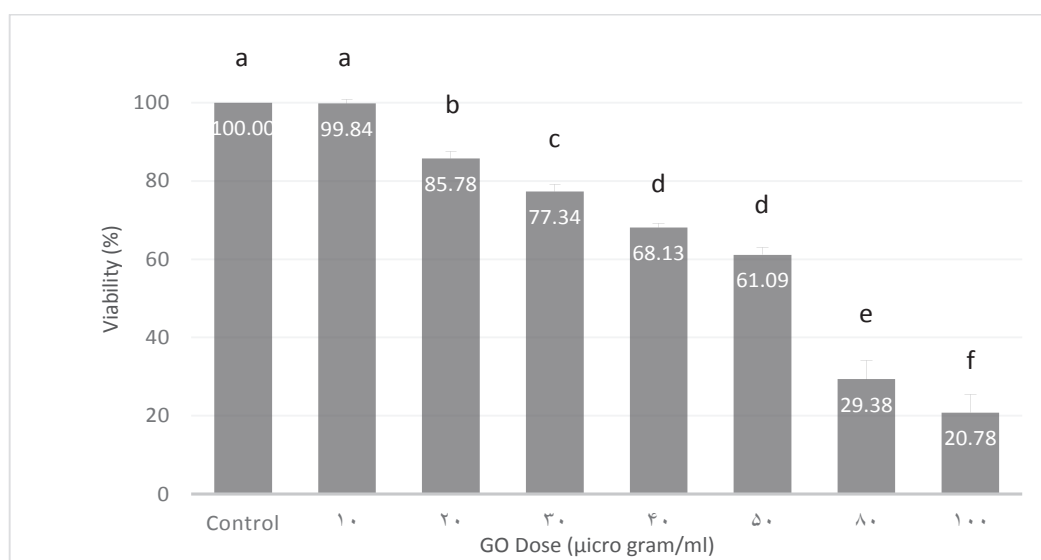
برای انجام پرتودرمانی، نمونه‌ها را با Elekta compact 6 MV تحت تابش قرار داده شد و فاصله منبع تابش تا بر روی سطح پتری دیش^۲ ۱۰۰۰ میلی متر تنظیم گردید.

نتایج

مطالعات در شرایط آزمایشگاهی کاهش جمعیت سلولهای سرطانی پانکراس را با گذشت زمان پس از درمان ترکیبی نشان می‌دهد. نتایج به تفکیک به شرح زیر خواهد بود.

مطالعات دوز

نتایج در شکل های ۱ تا ۵ نشان داده شده است. در شکل (۱) مشاهده شده است که غلظت 100 ppm اکسید گرافن به خودی خود دوز کشنده‌ای است که در آن بقای سلول (۹/۱۳٪ $\pm ۲۹/۷۸$ ٪) بود. با این حال، ماندگاری سلول در 80 ppm بسیار مشابه دوز کشنده (۹٪/۷۴ $\pm ۲۹/۳۸$ ٪) بود. بنابراین غلظت اکسید گرافن بیش از 80 ppm بقا سلولی را پایین‌تر از ۳۰٪ می‌آورد و در نتیجه استفاده از این حدود دوز نمی‌تواند در درمان ترکیبی اثر بخش باشد، چرا که بخش عمده سلولها بر اساس درمان با اکسید گرافن از بین خواهند رفت و عملاً ترکیب با سایر درمان‌ها بی‌معنی خواهد بود. مطابق شکل (۱)، اثر اکسید گرافن به طور قابل توجهی بالاتر از ۳۰ ppm نشان می‌دهد که در آن بقای سلول (۳/۴٪ $\pm ۳۴/۷۷$ ٪) است. این غلظت اکسید گرافن برای درمان‌های ترکیبی دو حالت و سه حالت، در مراحل بعدی آزمایش استفاده شده است.



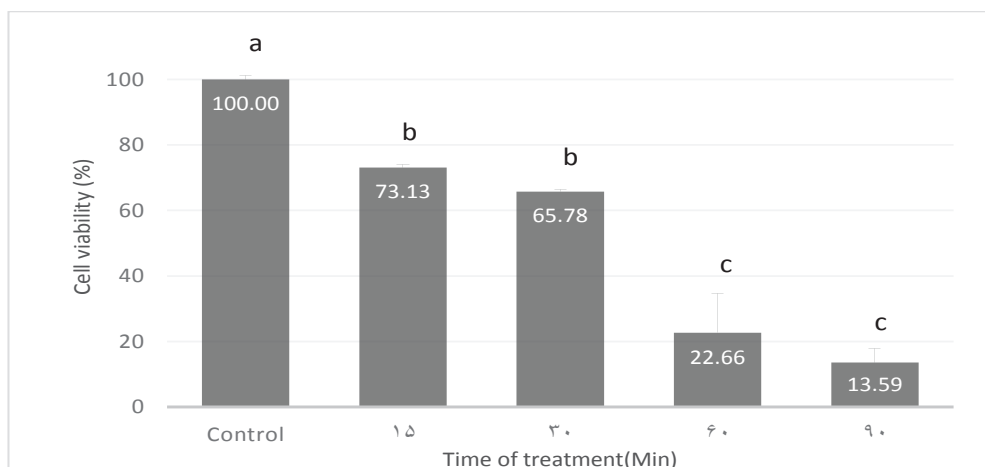
شکل شماره ۱ تاثیر اکسید گرافن بر روی نرخ بقا در دوزهای مختلف اکسید گرافن بر روی سلول سرطانی پانکراس (a-d) زمان ۲۴: گروه هایی که با حرف یکسان تعیین شده اند در ۰/۰۵ تفاوت معنی داری ندارند. (A-E) زمان ۴۸: گروه هایی که با حرف یکسان تعیین شده اند در سطح ۰/۰۵ تفاوت معنی داری ندارند. $P < 0.001$ *** (مقایسه بین ۲۴ و ۴۸ H)

² SSD(Source surface distance)

¹ Bain-marie

بنابراین این زمان درمان را می‌توان برای مطالعات بیشتر در درمان‌های ترکیبی مورد بررسی قرار داد. در حقیقت این میزان نرخ بقا حاشیه‌ای برای مطالعه را فراهم می‌کند که در آن اثر هم‌افزایی سایر عوامل درمانی را می‌توان بهتر مشاهده کرد.

شکل (۲) نتایج زنده ماندن سلول را به عنوان تابعی از زمان فقط به دلیل تاثیر درمان با هایپرترمیا را نشان می‌دهد. در مدت زمان درمان ۹۰ دقیقه هایپرترمیا، بقای سلول ($8/50 \pm$ ۱۳/۵۹٪) بود، با توجه به نتایج، مدت زمان ۱۵ دقیقه می‌تواند به عنوان یک زمان متوسط درمان در نظر گرفته شود، که نشان دهنده زنده ماندن سلول ($1/84 \pm 73/12$ ٪) است.



شکل شماره ۲: نرخ بقا سلولی در بکارگیری هایپرترمیا با دمای ۴۲ درجه در مدت زمان‌های مختلف

(a-d) زمان ۲۴: گروه‌هایی که با حرف یکسان تعیین شده‌اند در سطح ۰/۰۵ تفاوت معنی‌داری ندارند.

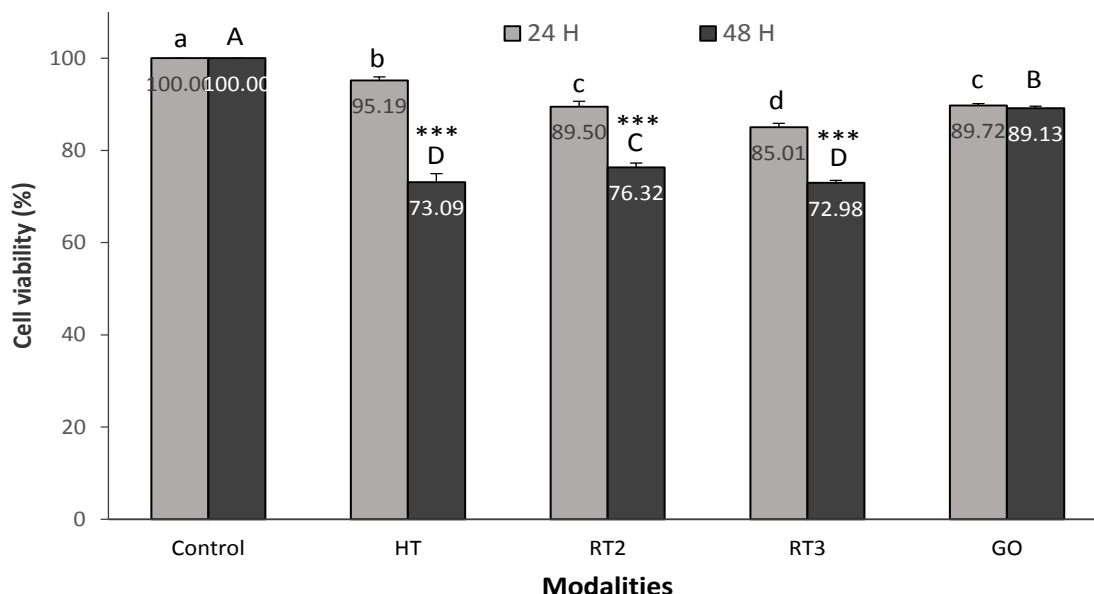
(A-E) زمان ۴۸: گروه‌هایی که با حرف یکسان تعیین شده‌اند در سطح ۰/۰۵ تفاوت معنی‌داری ندارند.

*** $P < 0.001$ (مقایسه بین ۲۴ و ۴۸ H)

بررسی درمان با یک روش

رادیوتراپی با دوز ۲ Gy و رادیوتراپی با دوز ۳ Gy برای مورد ۴۸ ساعت بعد از درمان وجود ندارد.

شکل (۳) نرخ بقا سلول را در ۲۴ ساعت و ۴۸ ساعت پس از درمان یک روش برای اکسید گرافن، هایپرترمیا و دو دوز پرتودرمانی مقایسه می‌کند. مقایسه نتایج نشان می‌دهد که تفاوت قابل توجهی در زنده ماندن سلول برای هایپرترمیا و

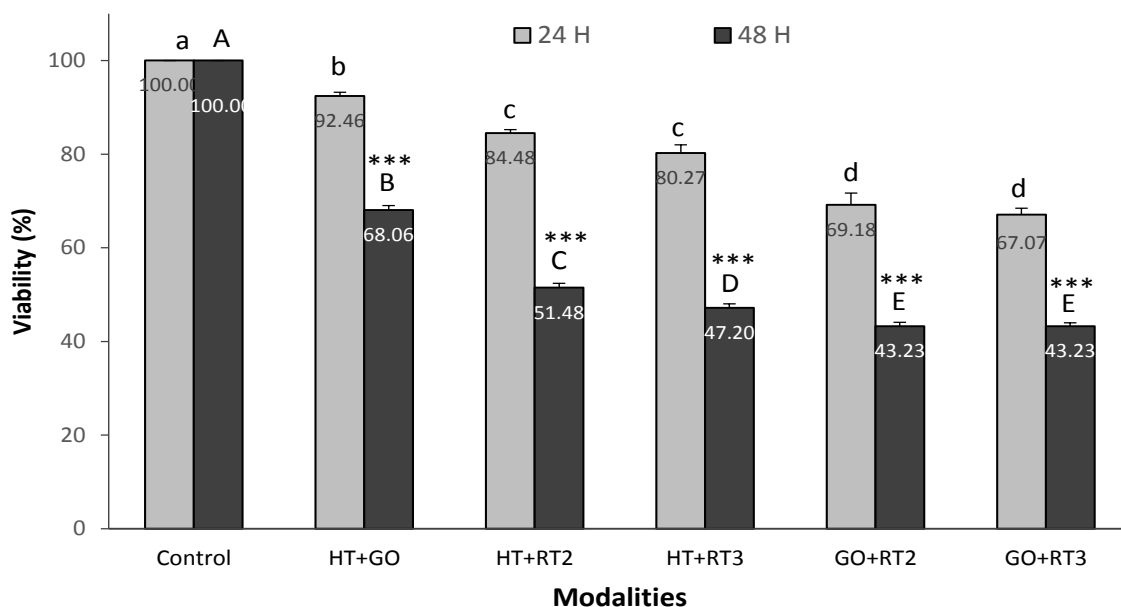


شکل شماره ۳ نرخ بقا سلولی در بکارگیری درمان ترکیبی در بازخوانی ۲۴ و ۴۸ ساعت پس از درمان (a-d): ۲۴: گروه هایی که با حرف یکسان تعیین شده اند در سطح ۰/۰۵ تفاوت معنی داری ندارند. (A-E): ۴۸: گروه هایی که با حرف یکسان تعیین شده اند در سطح ۰/۰۵ تفاوت معنی داری ندارند. *** $P < 0.001$ (مقایسه بین ۲۴ و ۴۸ H)

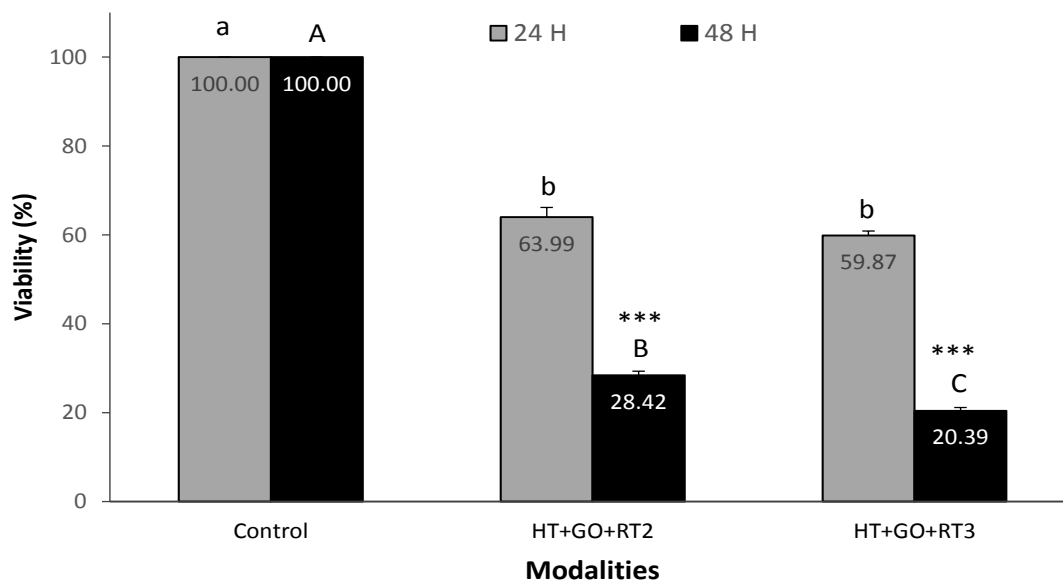
مطالعه روش های درمانی ترکیبی

توجهی نتایج متفاوتی دارند. در درمان ترکیبی سه حالتی نتیجه ۲۴ ساعته هایپرترمیا+اکسید گرافن+رادیوتراپی Gy 2 بسیار شبیه به هایپرترمیا+اکسید گرافن+رادیوتراپی Gy ۳ است. بنابراین این نتایج قابل مقایسه نیستند. در این را ستا، نتایج ۴۸ ساعته برای گروه های ذکر شده نیز تفاوت معنی داری نسبت به یکدیگر ندارند. برای سادگی، مشاهده کمی به نتیجه بقای سلول در شکل ۵ نشان داده شده است. اما نکته حائز اهمیت که در مورد آن بحث خواهد شد گروه درمانی سه ترکیبی است که نتایج نرخ بقا آن بسیار موثر واقع شد.

مطابق شکل ۴، نتایج شمارش نرخ بقا سلول ۲۴ ساعت پس از درمان برای هایپرترمیا+رادیوتراپی با دوز Gy ۲ و هایپرترمیا+رادیوتراپی با دوز Gy ۳ تفاوت معنی داری نسبت به یکدیگر ندارد. شباهت نتایج بین اکسید گرافن+رادیوتراپی دو Gy و اکسید گرافن+رادیوتراپی Gy ۳ مشاهده شده است. با این حال، به نظر می رسد که گروه های دیگر در سطح معناداری ۰/۰۵ بسیار متفاوت هستند. در بازخوانی ۴۸ ساعته، آزمایش MTT نتایج تقریباً یکسانی برای گروه های درمانی اکسید گرافن+رادیوتراپی Gy ۲ و اکسید گرافن+رادیوتراپی Gy ۳ نشان داد. گروه های دیگر به طور قابل



شکل شماره ۴ مقایسه‌ی اثر درمان ترکیبی دو حالت در ۲۴ و ۴۸ ساعت پس از درمان
 (a-d) زمان ۲۴: گروه‌هایی که با حرف یکسان تعیین شده اند در سطح ۰/۰۵ تفاوت معنی داری ندارند.
 (A-E) زمان ۴۸: گروه‌هایی که با حرف یکسان تعیین شده اند در سطح ۰/۰۵ تفاوت معنی داری ندارند.
 *** $P<0.001$ (مقایسه بین ۲۴ و ۴۸ H)



شکل شماره ۵ میزان تاثیر درمان سه حالت در ۲۴ ساعت و ۴۸ ساعت پس از درمان
 (a-d) زمان ۲۴: گروه‌هایی که با حرف یکسان تعیین شده اند در سطح ۰/۰۵ تفاوت معنی داری ندارند.
 (A-E) زمان ۴۸: گروه‌هایی که با حرف یکسان تعیین شده اند در سطح ۰/۰۵ تفاوت معنی داری ندارند.
 *** $P<0.001$ (مقایسه بین ۲۴ و ۴۸ H)

نقطه عطف ترکیب پرتودرمانی با هایپرترمیا در پژوهش حاضر به سال ۲۰۰۰ میلادی برمی گردد (۳۰). در حقیقت هایپرترمیا سلول های سرطانی را که تابش یون ساز نمی تواند از بین ببرد، در شرایط کمبود اکسیژن دچار آسیب جدی می کند و به نوعی در جایی که تابش یونساز نمی تواند اثر کند این درمان اثر کرده و سبب کشته شدن نوع سلول می شود (۱۱). و این مهم منجر به بهبود نتایج پرتودرمانی خواهد شد. مشاهدات تجربی در تحقیق حاضر نشان می دهد که ترکیب هایپرترمیا با اکسید گرافن می تواند انتخاب موفقتری باشد. اکسید گرافن موضوع تحقیقات گسترده ای در زمینه درمان های ترکیبی و تشخیص برای مبارزه با سرطان بوده است (۲۱). برای درمان تک حالت، همان طور که نشان داده شد بر اساس دوزهای انتخابی هر درمان، تاثیر چندان موفقیتی جهت از بین بردن سلول ها نداشتند که این موضوع هم به دلیل انتخاب شدت دوز هم به دلیل مقاومت ذاتی نوع سلول در سرطان پانکراس است. به طور کلی تمایل به ترکیب روش های درمانی به منظور کاهش دوز، ویژگی مداخله گر و در نتیجه کاهش عوارض جانبی هر درمان، همواره وجود دارد. لذا، اولین مرحله از مطالعه حاضر می تواند به ما نشان دهد که هایپرترمیا با افزایش مدت زمان درمان می تواند موثرتر باشد که این موضوع نیز در مطالعات دیگر نیز دیده شده است (۳۱)، اما برعکس، عوارض جانبی به طرز چشمگیری افزایش خواهد یافت، چنانچه با استفاده از این روش درمانی در ۹۰ دقیقه برای ۴۲ درجه سلسیوس از نظر بالینی غیر ممکن خواهد بود. مشاهده شده است که ۱۵ دقیقه زمان درمان در ۴۲ درجه سلسیوس می تواند انتخاب بهینه در آزمایشات فعلی و حتی بالینی باشد. در حقیقت این مدت زمان درمان، به نوعی قابل درک برای شرایط بالینی است. در ابتدا قصد آن داریم تاثیر هر درمان به تنهایی را مورد بحث قرار داده سپس درمان های ترکیبی آن ها را ارزیابی و با سایر مطالعات مقایسه کنیم. به طور طبیعی، هایپرترمیا آپوپتوز سلول و پاسخ سیستم ایمنی بدن را افزایش می دهد و جریان خون را تحریک می کند. مهمترین عامل از بین بردن بافت سرطانی، نکروز مستقیم سلول با دمای بحرانی است که از ۴۱ درجه سلسیوس تا ۴۵ درجه سلسیوس افزایش می یابد (۴۱، ۱۱).

در نتیجه، انتظار می رود که دمای ۴۲ درجه سلسیوس یک درجه حرارت بحرانی باشد و حدود ۳۰٪ مرگ و میر سلول ها در ۴۸ ساعت پس از درمان ترکیبی می تواند یک اثر سلولی مستقیم توسط هایپرترمیا به دلیل نکروز باشد (۱۴).

با این حال این یک نتیجه مشخص نیست، مطالعه نیاز به بررسی بیشتر دارد. در تحقیق حاضر نرخ بقا سلول فقط در ۲۴ ساعت و ۴۸ ساعت اندازه گیری شد. این مدت زمان به عنوان شاخص اثربخشی درمان در مرگ میر سلول ها به حساب می آید (۳۳). هایپرترمیا حتی می تواند بر غشای سلول و نفوذ پذیری آن به مولکول ها و نانوذرات تأثیر بگذارد (۱۱)، که استفاده از نانو ذرات مانند اکسید گرافن در این آزمایش برای ما مطلوب است. علاوه بر این، درمان حرارتی می تواند سلول ها را نسبت به پرتودرمانی حساس کند. اگرچه مرگ سلول از طریق مکانیسم های مختلف در هایپرترمیا و اکسید گرافن انجام می شود، اما درصد زنده ماندن سلول در اکسید گرافن با دوز ppm ۳۰ بسیار نزدیک به هایپرترمیا ۱۵ دقیقه در ۴۲ درجه سلسیوس است. در مطالعه ای دیگر تجزیه و تحلیل در سطح ژن نشان داد که ژن های مربوط به تنظیم رشد سلول و آپوپتوز، پاسخ به سطح اکسیژن و هایپوکسی و فرایندهای متابولیسمی ممکن است به دلیل وجود اکسید گرافن تنظیم شوند (۳۴). علاوه بر این، شکل و اندازه اکسید گرافن می تواند بر زنده ماندن سلول تأثیر بگذارد، مشروط بر نفوذ اکسید گرافن از غشا سلول، اکسید گرافن قادر است به اجزای سلول متصل شود که در پی آن به عملکرد سلول آسیب رسیده تا جایی که باعث مرگ سلول می شود (۳۵). با مشاهده نتایجی که در اینجا گزارش می شود، غلظت بیشتر اکسید گرافن از طریق نفوذ آن به غشای سلولی سمیت سلولی بیشتری ایجاد می کند (۳۶). برای ایجاد تعادل بر اساس اصل کلی در هر درمان فی ما بین آسیب و منفعت در این نوع درمان، اکسید گرافن با دوز ppm ۳۰ تجویز شد. از طرفی این دوز نرخ مرگ سلولی قابل توجهی ندارد و به سهولت امکان بررسی و نرخ مرگ سلولی سایر درمان های ترکیبی در این مطالعه را نیز می تواند نشان دهد. شایان ذکر است که در میان گزینه های درمان تک حالت و پس از ۲۴ ساعت، رادیوتراپی با دوز Gy ۳ بسیار کارآمدتر از دیگر درمان ها است (شکل ۳) اما بعد از ۴۸ ساعت تفاوت آن با هایپرترمیا و رادیوتراپی با دوز Gy ۲ تقریباً ناچیز است. در حالی که در ادامه مطالعه در ۴۸ ساعت پس از درمان نتیجه هایپرترمیا بسیار شبیه رادیوتراپی با دوز Gy ۳ است و تفاوت معنی داری ندارد. اثر تأخیری که در ۲۴ ساعت و ۴۸ ساعت پس از درمان مشاهده شد، ممکن است به زمان دو برابر شدن سلول، مانع در انتقال اکسید گرافن از طریق غشای سلول و صدمه به

میتوکندری، و همچنین زمان مورد نیاز برای ترشح پروتئین - های شوک گرمایی نسبت داده شود (۳۷) در تمام گروه های درمانی اثرات نرخ بقا توسط اکسیدگرافن در ۲۴ ساعت یا ۴۸ ساعت، نرخ بقا سلولی به طور نزدیک مشابه بود. برای درک درمان ترکیبی و اثربخشی آن، در هر دو مورد ۲۴ ساعته و ۴۸ ساعته بهترین نتیجه برای از بین بردن سلول های سرطانی در میان گزینه های دو روش اکسید گرافن + رادیوتراپی با دوز Gy ۲ و اکسید گرافن + رادیوتراپی با دوز Gy ۳ بود. با این وجود، تفاوت معناداری بین دو گروه مشاهده نشد. بنابراین، دوز Gy ۲ برای عملیاتی تر بودن بالینی توصیه می شود. همانند مطالعه روش تک درمانی، مشاهدات تفاوت هایی را در طول زمان نشان می دهد. در ۴۸ ساعت تمام درمان ها از بین بردن سلول های قابل توجهی را نشان داد و این بدان معنی است که تمام درمان های با گذشت زمان اثر بهتری دارند. نتایج حاصل از ترکیب هایپرترمیا + اکسید گرافن و هایپرترمیا + رادیوتراپی با دوز Gy ۲ یا هایپرترمیا + رادیوتراپی با دوز Gy ۳ کاملاً راضی کننده بوده است. در این روش درمانی می توان دریافت که هایپرترمیا نمی تواند گزینه مناسبی برای ترکیب با اکسیدگرافن باشد اما می تواند گزینه مناسبی در ترکیب با رادیوتراپی باشد همان طور که در زمان ۴۸ ساعته در شکل شماره ۴ نشان می دهد. در همان شکل، مشاهده شده است که، نتایج حاصل از گروه های درمانی هایپرترمیا به دوز تابش در رادیوتراپی (۳۸) بستگی دارد و با افزایش دوز تابش از Gy ۲ به Gy ۳ به نسبت متناسب اثر کشندگی نیز افزایش می یابد. با این حال، این اثر اکسیدگرافن و تغییرات در دوز رادیوتراپی و بقای سلول نمی تواند همواره صادق باشد و می توان این موضوع را در شکل (۴) و شکل (۵) دریافت. بر اساس نتایج بدست آمده هایپرترمیا، حداقل تا ۴۲ درجه سلسیوس، برای ترکیب با اکسیدگرافن گزینه موثری نیست. درحالی که آزمایش ها به سمت گزینه های ترکیبی بیشتر انجام شده، مشخص گردید، رادیوتراپی در ترکیب با اکسیدگرافن توانایی کشتن سلول را دو برابر می کند. این موضوع در شکل (۳) و شکل (۴) نشان داده شده است. این بدان معناست که سلول ها به گونه ای آسیب می بینند که گویا نه بلافاصله بلکه با ۴۸ ساعت تأخیر می میرند. در واقع، آسیب سلولی به شکلی است

که سلول نمی تواند به حالت طبیعی برگردد. با بررسی ساختار شیمیایی اکسیدگرافن یک نکته کلیدی را می توان درک کرد که این نانو ذره می تواند رادیکال های آزاد را در محیط سلول تولید کند به شرطی که با اشعه یون ساز در رادیوتراپی برخورد کند. در همین حال، سطح مقطع کوچک آنها سبب آن می - شود که سلول سرطانی آن را جذب کند (۲۱). از این رو اکسیدگرافن به طور قطعی می تواند به عنوان یک حساس کننده اشعه به کار گرفته شود. همچنین در اثر جذب در غشا التهاب سلولی ایجاد کرده و سبب آسیب به سلول می - شود (۴۸).

نکته جالب این است که تغییر دوز اشعه X از Gy ۲ به Gy ۳ نتایج را به طور قابل توجهی تغییر نمی دهد. این بدان معنی است که حتی با دوز کمتری از تابش ایکس نیز می توان سبب آزاد سازی رادیکال آزاد شد (۴۰، ۴۲).

گروه درمانی نهایی، مهم ترین هدف این تحقیق، ترکیب هر سه روش با هم است. مشاهدات در آزمایش ها نشان می دهد که میزان بقای سلول های سرطانی نسبت به سایر ترکیبات بررسی شده با اختلاف $P < 0.001$ به طور کلی کم تر گزارش می شود. طبق نتایج، درمان ترکیبی از هایپرترمیا + رادیوتراپی + اکسیدگرافن بالاترین میزان مرگ و میر را در سلول های سرطانی پانکراس ایجاد می کند اما میزان آسیب به سلول های طبیعی موجود در اندام برای تحقیقات بعدی باقی خواهد ماند. بنابراین تجزیه و تحلیل خطر در مقابل سود همچنان نیازمند آزمایش های بعدی خواهد بود. شکل (۵) ترکیب اکسیدگرافن، رادیوتراپی و هایپرترمیا می تواند درک بهتری از مرگ سلول به ما بدهد.

پیامدهای معنی داری در سطح $P < 0.001$ در همه ی نتایج، به خصوص در ۴۸ ساعت پس از هر درمان وجود دارد. تمام درمان ها تأخیر عملکردی در زنده ماندن سلول های سرطانی را نشان داده اند. نتایج فوق ثابت می کند که میزان بقا در ۴۸ ساعت پس از درمان هم در مطالعه ی رادیوتراپی با دوز Gy ۲ و هم به میزان قابل توجهی کمتر از ۲۴ ساعت است، تفاوت در مورد دوز بالاتر بیشتر است. بهترین و مطلوب ترین نتیجه با ترکیب هر سه روش درمانی هنگام استفاده از رادیوتراپ Gy و مطالعه ۴۸ ساعت پس از درمان به دست آمد.

نتیجه گیری

همچنین به عنوان یک روش کمکی، پرتودرمانی با دوز Gy ۲ تفاوت معنی داری با Gy ۳ نشان نداد.

سپاسگزاری

برخود لازم میدانیم مراتب تشکر و قدردانی از پژوهشگاه رویان و بیمارستان فجر که میزبان فاز عملی این تحقیق بودند را اعلام نمائیم.

اکسید گرافن در ترکیب با پرتودرمانی اثر حساسیت رادیویی را در رده های سلولی سرطان پانکراس، به ویژه در ترکیب با هایپرترمیا نشان می دهد. اگرچه اثر هم افزایی اکسید گرافن با انرژی زیاد ایکس یا فوتون گاما هنوز سوال برانگیز است، اما با توجه به نتایج آزمایشات، تاثیر هم افزایی گزارش می شود.

1. Haller, D.G. New perspectives in the management of pancreas cancer. *Seminars in oncology*, 2003; 30 S. 11: 3-10.
2. Ogawa, K.; Karasawa, K.; Ito, Y.; Ogawa, Y.; Jingu, K.; Onishi, H. Hiroshi Onishi,; et al. Intraoperative radiotherapy for resected pancreatic cancer: a multi-institutional retrospective analysis of 210 patients, *Int. J. of Rad. Oncol. Biol. Phys.*, 2010; 77: 734-742.
3. Vincent, A.; Herman, J.; Schulick, R.; Hruban, R.H.; Goggins, M. Pancreatic cancer, *The Lancet*, 2011;378: 607-620.
4. Goral, V., Pancreatic cancer: Pathogenesis and diagnosis. *Asian Pac J. Cancer Prev.*, 2015, 16, 5619-24.
5. Horst, A.; Versteijne, E.; Besselink, M.; Daams, J.; Bulle, E.; Bijlsma, M.; Wilmink, J.; Delden, O.; Hooft, J.; Franken, N.; Laarhoven, H.; Crezee, H.; Tienhoven, G. The clinical benefit of hyperthermia in pancreaticcancer:asystematicreview.*Int.J.Hyperthermia*,2018;34:969–979.
10.1080/02656736.2017.1401126.
6. Le, N.; Sund, M.; Vinci, A.; Prognostic and predictive markers in pancreatic adenocarcinoma, *Dig. Liver Dis*, 2016; 48: 223-30.
7. Gall, T.M.; Tsakok, M.; Wasan, H.; Jiao, L.R. Pancreatic cancer: current management and treatment strategies. *Postgraduate Medical Journal*, 2015; 91: 594-600. doi: 10.1136/postgradmedj-2014-133161.
8. Hazard, L.J.G. The role of radiation therapy in pancreas cancer. *Gastrointest. Cancer Res*, 2009; 3: 20–28.
9. Petrelli, F.; Comito, T.; Ghidini, A.; Torri, V.; Scorsetti, M.; Barni, S. Stereotactic Body Radiation Therapy for Locally Advanced Pancreatic Cancer: A Systematic Review and Pooled Analysis of 19 Trials. *Int. J. Radiat. Oncol. Biol. Phys.*, 2017; 97: 313–322.
10. Datta, N.R.; Ordonez, S.G.; Gaip, U.S.; Paulides, M.M.; Crezee, H.; Gellermann, J. *et al.* Local hyperthermia combined with radiotherapy and/or chemotherapy: recent advances and promises for the future. *Cancer Treat. Rev*, 2015; 41: 742–53.
11. Rao, W.; Deng, Z.S.; Liu, J.; A review of hyperthermia combined with radiotherapy/chemotherapy on malignant tumors, *Crit. Rev. Biomed. Eng*, 2010; 38: 101-116.
12. Alexander, A.A. *Tripartite treatment by radiation, hyperthermia and anti-OX40 immunotherapy potentiates tumor growth delay and tumor microenvironment immunomodulation in pancreatic Cancer*, M.Sc. Thesis, University of Maryland, Baltimore, 2017.
13. Mahmood, J.; Shukla, H.; Soman, S.; Santanu, S.; Singh, P.; Kamlapurkar, S.; Saeed, A.; Amin, N.; Vujaskovic, Z. , Immunotherapy, radiotherapy and hyperthermia: A combined therapeutic approach in pancreatic cancer treatment. *Cancers*, 2018; 10: 469.
14. Kaur, P.; Hurwitz, M.D.; Krishnan, S.; Asea, A. Combined hyperthermia and radiotherapy for the treatment of cancer. *Cancers*, 2011; 3: 3799-3823.
15. Konings, A.W.T. Interaction of heat and radiation in vitro and in vivo in: *Thermoradiotherapy and thermochemotherapy*; Fessenden P., Vernon C.C., Eds. Springer, 1995; 89-102.

16. De Haas-Kock D.F.M.; Buijsen, J.; Pijles-Johannesma, M.; Lutgens, L.; Lammering, G.; Van Mastrigt, A.P.G.; *et al.*, Concomitant hyperthermia and radiation therapy for treating locally advanced rectal cancer. *Cochrane Database of Systematic Reviews*, 2009; Issue 3. Art. No.: CD006269: DOI: 10.1002/14651858.CD006269.pub2
17. Shibamoto, Y.; Nishimura, U.; Abe M. Intraoperative Radiotherapy and Hyperthermia. *Hepatogastroenterology*, 1996; 43: 326-332.
18. Roesch, M.; Mueller-Huebenthal, B. Review: the role of hyperthermia in treating pancreatic tumors. *Indian J. Surg. Oncol.*, 2015; 6: 75-81.
19. Liu, J.; Cui, L.; Losic, D.; Graphene and graphene oxide as new nanocarriers for drug delivery applications. *Acta Biomaterialia*, 2013; 9(12): 9243-9257. doi.org/10.1016/j.actbio
20. Ma, Y.; Sun, L.; Huang, W.; Zhang, L.; Zhao, J.; Fan, Q.; Huang, W. Three-dimensional nitrogen-doped carbon nanotubes/graphene structure used as a metal-free electrocatalyst for the oxygen reduction reaction. *J. Phys. Chem. C*, 2011; 115: 24592-24597.
21. Viseu, T.; Lopes, C.M.; Fernandes. E.; Oliveira M.E.; Lúcio, M. A systematic review and critical analysis of the role of graphene-based nanomaterials in cancer theranostics. *Pharmaceutics*, 2018; 10: 282, doi:10.3390/pharmaceutics10040282.
22. Gautam, S. Graphene Oxide: A Potential Drug Carrier for Cancer Therapy—Review. *Res. Rev. A J. Pharm. Sci*, 2018; 8(3): 20-31.
23. Stankovich S.; Dikin D.A.; Dommett, G. H.B; Kohlhaas, K.M.; Zimney, E.J.; Stach, E.A., *et al*, Graphene-based composite materials, *Nature*, 2006; 442: 282-286.
24. Tadzyszak, K.; Wychowaniec, J.K.; Litowczenko, J. Biomedical applications of graphene-based structures. *Nanomaterials*, 2018; 8: 11.
25. Tang, L.; Li, X.; Ji, R.; Teng, K.S.; Tai, G.; Ye, J.; Wei, C.; Lau, S.P. Bottoms-up synthesis of large-scale graphene oxide nanosheets. *J. Mater. Chem.*, 2012; 22: 5676-5683.
26. Jalili-Firoozinezhad, S.; Moghadam, M. H. M.; Ghanian, M. H.; Ashtiani, M. K.; Alimadadi, H.; Baharvand, H.; Martin, I.; Scherbericha, A. Polycaprolactone-templated reduced-graphene oxide liquid crystal nanofibers towards biomedical application. *RSC Adv*. 2017; 7:39628-39634.
27. Mohit Chaudhary¹, R.S. Sengar, Vaishali, M.K. Yadav, Mukesh Kumar and Pushpendra Kumar ; SYN THE SIS AND CHAR AC TER IZA TION OF GRAPHENE OX IDE, 2018; Agric. 19 (1) : 158-160.
28. Aliyev, E.; Filiz, V.; Khan, M.M.; Lee, Y.J.; Abetz, C.; Abetz, V. Structural Characterization of Graphene Oxide: Surface Functional Groups and Fractionated Oxidative Debris. *Nanomaterials* 2019; 9: 1180. <https://doi.org/10.3390/nano9081180>
29. Kumar, P.; Nagarajan, A.; Uchil, P.D. Analysis of cell viability by the lactate dehydrogenase assay. *Cold Spring Harb. Protoc*. 2018.
30. van der Zee J.; Gonzalez Gonzalez, D.; van Rhooen G.C.; van Dijk J.D.; van Putten W.L.; Hart, A.A. Comparison of radiotherapy alone with radiotherapy plus hyperthermia in locally advanced pelvic tumors: a prospective, randomised, multicentre trial. Dutch Deep Hyperthermia Group. *Lancet*. 2000; 355(9210): 1119-25.
31. Hildebrandt, B.; Wust, P.; Ahlers, O.; Daeing, A.; Sreenivasa, G.; Kerner, T.*et al.*, The cellular and molecular basis of hyperthermia. *Crit. Rev. Oncol. Hematol.*, 2002;43: 33-56.

32. Cherukuri, P.; Glazer, E.S.; Curley, S.A. Targeted hyperthermia using metal nanoparticles. *Adv. Drug. Deliv. Rev.* 2010; 62: 339-345.
33. Mittal S.; Kumar V.; Dhiman N.; Chauhan L.K.S.; Pasricha R.; Pandey A. K. Physico-chemical properties based differential toxicity of graphene oxide/reduced graphene oxide in human lung cells mediated through oxidative stress, *Sci. Rep.*, 2016; doi: 10.1038/srep39548.
34. Chang, Y.; Yang, S.T.; Liu, J.H.; Dong, E.; Wang, Y.; Cao, A.; Liu, Y.; Wang, H. In vitro toxicity evaluation of graphene oxide on A549 cells. *Toxicol. Lett.*, 2011; 200:201-10.
35. Wang, S.; Zhang, Q.; Luo, X.F.; Li, J.; He, H.; Yang, F.; Di, Y.; Jin, C; et al. Magnetic graphene-based nanotheranostic agent for dual-modality mapping guided photothermal therapy in regional lymph nodal metastasis of pancreatic cancer. *Biomaterials*. 2014; 35: 9473-83, 26.
36. Yang, D.; Feng, L.; Dougherty, C.A.; Luker, K.E.; Chen, D.; Cauble, M.A.; et al. In vivo targeting of metastatic breast cancer via tumor vasculature-specific nano-graphene oxide. *Biomaterials*. 2016;104: 361-371.
37. Ahmed, K.; Zaidi, S.F.; Rehman, M.R.; Rehman, R.; Kondo, T. Hyperthermia and protein homeostasis: cytoprotection and cell death. *J. Therm. Biol.*, 2020; 91: 102615.
38. Maluta, S.; Schaffer M.; Pioli, F.; Dall'Oglio, S.; Passeto, S.; Schaffer, P.M. et al., Regional hyperthermia combined with chemoradiotherapy in primary or recurrent locally advanced pancreatic cancer, *Strahlenther. Onkol.*, 2011; 187: 619.
39. Yue, H.; Wei, W.; Yue, Z.; Wang, B.; Luo, N.; Gao, Y. et al. The role of the lateral dimension of graphene oxide in the regulation of cellular responses. *Biomaterials*. 2012;33:4013-4021. doi:10.1016/j.biomaterials.
40. Liu, Y.; Luo, Y.; Wu, J.; Wang, Y.; Yang, X.; Yang, R. et al. Graphene oxide can induce in vitro and in vivo mutagenesis, *Sci. Rep.*, 2013; 3: 3469.
41. Robinson, J.T.; Tabakman, S.M.; Liang, Y.; Wang, H.; Casalongue H.S.; Vinh, D.; Dai, H. Ultrasmall reduced graphene oxide with high near-infrared absorbance for photothermal therapy. *J. Am. Chem. Soc.*, 2011; 133: 6825-6831.
42. Podolska, M.J.; Barras, A.; Alexiou, C.; Frey, B.; Gaip, U.; Boukherroub, R.; Szunerits, S.; Janko C.; Muñoz, L.E. Graphene oxide nanosheets for localized hyperthermia—physicochemical characterization biocompatibility, and induction of tumor cell death, *cells*, 2020; 9: 776.
43. Ahmad, N.; Kaur, G. A study of population dynamics of normal and immune cells in presence of tumor cells. *Int. J. Sci. Eng. Res*, 2013; 4(4): 770 – 775.
44. Yin, F.; Hu, K.; Chen, Y.; Yu, M.; Wang, D.; Wang, Q. et al. SiRNA Delivery with PEGylated graphene oxide nanosheets for combined photothermal and genetherapy for pancreatic cancer. *Theranostics*, 2017; 7: 1133-48.