

The effect of copper oxide nanoparticle conjugated with lapatinib on breast cancer cell line and evaluating the effect of this nanoparticle on caspase 8 gene expression

Masoumeh Valizadeh Talarposhti ¹ , Ali Salehzadeh ^{1*} , Amir Jalali ² 

¹ Dept of Biology, Rasht Branch, Islamic Azad University, Rasht, Iran

² Dept of Biology, Faculty of Science, Arak University, Arak, Iran

Article Info

Article type:

Research article

Article History:

Received: Aug. 26, 2024

Received in revised form:

Jan. 04, 2025

Accepted: Jan. 18, 2025

Published Online: Apr. 16, 2025

* Correspondence to:

Ali Salehzadeh

Dept of Biology, Rasht Branch,
Islamic Azad University, Rasht,
Iran

Email:

a.salehzadeh@iau.ac.ir

ABSTRACT

Introduction: Breast cancer is a significant global cause of cancer-related mortality, highlighting the urgent need for new drugs to combat this prevalent disease. This study was designed to investigate the anticancer effect of copper oxide nanoparticles conjugated with lapatinib and its effect on the expression of the caspase-8 gene in a breast cancer cell line.

Materials & Methods: Copper oxide nanoparticles were synthesized from a CuCl₂ solution, treated with D-glucose, and then linked to lapatinib. The physicochemical properties of the nanoparticles were analyzed using FT-IR, XRD, EDS, DLS, zeta potential measurement, and electron microscope imaging. The effect of the nanoparticles on the viability of breast cancer (MDA-MB-231) and normal (MRC-5) cells was evaluated using the MTT test, while the expression of the caspase-8 gene was measured via real-time PCR. Statistical differences were analyzed using one-way ANOVA in SPSS V.22, with a p-value less than 0.05 considered statistically significant.

Results: The study found that copper oxide nanoparticles conjugated with lapatinib had a spherical morphology, a surface charge of -14 mV, and a particle size of 426.3 nm in aqueous medium. These nanoparticles had concentration-dependent inhibitory effects on cancer and normal cell lines, with a 50% inhibitory concentration of 75 and 120 µg/ml, respectively, and a 3.24-fold increase in caspase-8 gene expression.

Conclusion: Copper oxide nanoparticles linked with lapatinib were more effective at stopping cancer cells than normal cells, and by boosting the levels of caspase-8, they trigger the external pathway of cell death in cancer cells.

Keywords: Apoptosis, Breast Cancer, Copper Oxide Nanoparticle, Lapatinib

How to cite this paper: Valizadeh Talarposhti M, Salehzadeh A, Jalali A. The effect of copper oxide nanoparticle conjugated with lapatinib on breast cancer cell line and evaluating the effect of this nanoparticle on caspase 8 gene expression. *Journal of Ilam University of Medical Sciences*. 2025;33(1):55-70.

Introduction

Breast cancer is a leading cancer type in women globally, with over 26.2 million new cases annually and nearly 700,000 deaths (1). Its diverse phenotypes complicate treatment, especially for drug-resistant and metastatic forms (1). Surgery is the primary intervention, but anticancer chemotherapy is crucial for eliminating cancer cells and microscopic tumors (2). Research focuses on developing effective drugs and targeted delivery systems to enhance efficacy and reduce side effects (3).

Nanotechnology offers promise in cancer treatment, utilizing nanoparticles smaller than 100 nm for improved drug delivery and stability (3). Copper oxide (CuO) nanoparticles, in particular, show potential due to their antibacterial, antifungal, antioxidant, and anticancer properties (4). Copper, an essential trace element, supports enzyme functions and immune responses, which can inhibit cancer cells by disrupting the cell cycle and inducing apoptosis, partly through increased oxygen free radical production (5). Additionally, they serve as drug carriers, improving drug stability and



© The Author(s)

Publisher: Ilam University of Medical Sciences

Journal of Ilam University of Medical Sciences, Volume 33, Issue 1, 2025

targeted delivery (4, 5). These advancements highlight the growing role of nanodrugs in cancer therapy (5). This study was designed to investigate the anticancer effect of copper oxide nanoparticles conjugated with lapatinib and its effect on the expression of the caspase-8 gene in a breast cancer cell line.

Methods

In this study, copper oxide nanoparticles coated with d-glucose and loaded with the drug lapatinib were synthesized, and their physicochemical and biological properties were investigated. For synthesis, first, a copper chloride solution was prepared, its pH was adjusted, and it was stirred at high temperature to form Copper oxide nanoparticles. Then, these nanoparticles were coated with d-glucose and loaded with lapatinib. Separation and drying were performed in different stages using a centrifuge, oven, and freeze dryer. The properties of the nanoparticles were analyzed using electron microscopes (TEM and SEM), DLS testing for particle size, a zeta sizer for surface charge, EDS spectroscopy for elemental analysis, FT-IR for surface functional group identification, and XRD for crystal structure investigation. The study looked at how nanoparticles affect the growth of breast cancer cells (MDA-MB-231) and normal cells (HDF) using an MTT assay. Cells were incubated in the presence of different concentrations of nanoparticles, and their viability was measured by optical absorption assay at 570 nm. Also, the expression of the caspase-8 gene as one of the apoptosis genes was investigated using real-time PCR. RNA extracted from treated cells was converted to cDNA and compared with the reference gene GAPDH. Statistical differences were analyzed using one-way ANOVA in SPSS V.22, with a p-value less than 0.05 considered statistically significant.

Results

Copper oxide nanoparticles conjugated with lapatinib had a spherical morphology with a size of 17–55 nm and no elemental impurities. The surface charge of the nanoparticle was -14 mV, and the particle size in aqueous medium was 426.3 nm. Copper oxide nanoparticles conjugated with lapatinib had concentration-dependent inhibitory effects on the studied cells, and the 50% inhibitory concentration in cancer and normal cell lines was 75 and 120 µg/ml, respectively. The expression level of the

caspase-8 gene in cancer cells treated with the nanoparticles increased 3.24-fold.

Conclusion

Copper oxide nanoparticles linked with lapatinib were more effective at stopping cancer cells than normal cells, and by boosting the levels of caspase-8, they trigger the external pathway of cell death in cancer cells.

Authors' Contribution

Conceptualization, Methodology: Validation, Formal Analysis, Software, Investigation, Resources, Data

Curation, Writing– Original Draft Preparation, Writing– Review & Editing, Visualization, Supervision,

Project Administration: MV, AS, AJ.

Ethical Statement

An ethical code was unnecessary since no human-animal samples were utilized. The authors adhered to ethical standards by avoiding data fabrication, falsification, plagiarism, and misconduct.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

Funding

This research has no financial support from any institution.

Acknowledgment

The authors thank the staff of the Biology Laboratory of Islamic Azad University, Rasht Branch.

اثر نانوذره اکسید مس کنژوگه با داروی لاپاتینیب روی رده سلولی سرطان پستان و ارزیابی اثر این نانوذره روی بیان ژن کاسپاز-۸

معصومه ولیزاده تالار پشته^۱، علی صالحزاده^{۱*}، امیر جلالی^۲

^۱ گروه زیست‌شناسی، واحد رشت، دانشگاه آزاد اسلامی، رشت، ایران

^۲ گروه زیست‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه اراک، اراک، ایران

اطلاعات مقاله

چکیده

نوع مقاله: پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۶/۰۵

تاریخ ویرایش: ۱۴۰۳/۱۰/۱۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۰/۲۹

تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۱/۲۷

نویسنده مسئول:

علی صالحزاده

گروه زیست‌شناسی، واحد رشت، دانشگاه آزاد اسلامی، رشت، ایران

Email: a.salehzadeh@iau.ac.ir

مقدمه: سرطان پستان مهم‌ترین و فراگیرترین عامل مرگ‌ومیر ناشی از سرطان در جمعیت زنان دنیا به‌شمار می‌آید. میزان بالای مرگ‌ومیر ناشی از این بیماری ضرورت دستیابی به داروهای جدید علیه آن را نمایان می‌کند. در این مطالعه اثر ضدسرطانی نانوذره اکسید مس کنژوگه‌شده با لاپاتینیب روی سلول‌های رده سرطان پستان و اثر آن بر بیان ژن کاسپاز-۸ بررسی شد.

مواد و روش‌ها: نانوذره اکسید مس با استفاده از محلول کلرید مس سنتز گردید و با استفاده از محلول D-گلوکز عامل‌دار شد و سپس با داروی لاپاتینیب کنژوگه گردید. ویژگی‌های فیزیکی-شیمیایی نانوذره با استفاده از آزمایش‌های XRD، FT-IR، DLS، EDS، سنجش پتانسیل زتا و تصویربرداری میکروسکوپ الکترونی بررسی شد. اثر نانوذره بر زیستایی سلول‌های رده سرطان پستان (MDA-MB-231) و سلول‌های طبیعی (HDF) با آزمایش MTT ارزیابی گردید و از آزمایش Real-Time PCR برای سنجش بیان ژن کاسپاز-۸ استفاده شد. برای بررسی تفاوت‌های آماری از آنالیز واریانس یک‌طرفه با استفاده از نرم‌افزار SPSS vol.22 استفاده گردید و مقدار P کمتر از ۰/۰۵ به‌عنوان سطح معنی‌داری در نظر گرفته شد.

یافته‌های پژوهش: نانوذره اکسید مس کنژوگه‌شده با لاپاتینیب با مورفولوژی کروی و اندازه ۵۵-۱۷ نانومتر و بدون ناخالصی عنصری بود. بار سطحی نانوذره ۱۴- میلی‌ولت و اندازه آن در محیط آبی ۴۲۶/۳ نانومتر بود. نانوذره اکسید مس کنژوگه‌شده با لاپاتینیب آثار مهاری وابسته به غلظت بر سلول‌های مطالعه‌شده داشت و غلظت نیمه‌مهاری آن در سلول‌های سرطانی و طبیعی به ترتیب ۷۵ و ۱۲۰ میکروگرم/میلی‌لیتر بود؛ همچنین میزان بیان ژن کاسپاز-۸ در سلول‌های سرطانی تیمار شده با نانوذره به میزان ۳/۲۴ برابر افزایش یافت.

بحث و نتیجه‌گیری: این مطالعه نشان داد که نانوذره اکسید مس کنژوگه‌شده با لاپاتینیب آثار مهاری قوی‌تری در سلول‌های سرطانی نسبت به سلول‌های طبیعی داشتند و با افزایش بیان کاسپاز-۸ باعث فعال‌سازی مسیر بیرونی مرگ سلولی در سلول‌های سرطانی می‌شوند.

واژه‌های کلیدی: آپوپتوز، سرطان پستان، لاپاتینیب، نانوذره اکسید مس

استناد: ولیزاده تالار پشته، معصومه، صالحزاده علی، جلالی امیر. اثر نانوذره اکسید مس کنژوگه با داروی لاپاتینیب روی رده سلولی سرطان پستان و ارزیابی اثر این نانوذره روی بیان ژن کاسپاز-۸. *مجله دانشگاه علوم پزشکی ایلام*، فروردین ۱۴۰۴؛ ۳۳(۱): ۵۵-۷۰.

مقدمه

سرطان پستان مهم‌ترین و فراوان‌ترین نوع سرطان در جمعیت زنان در همه نقاط دنیا به‌شمار می‌آید. آخرین داده‌های اپیدمیولوژی نشان می‌دهد که نرخ ابتلای سالیانه این بیماری بیش از ۲/۲۶ میلیون مورد جدید در دنیا است و هر سال نزدیک به ۷۰۰ هزار نفر جان خود را در اثر این بیماری از دست می‌دهند (۱). این بیماری فنوتیپ‌های مختلف و متنوعی دارد که الگوهای رفتار تهاجمی، متاستاز و پاسخ به دارو در آنان متفاوت است؛ به همین علت، درمان این بیماری با دشواری‌های جدی مواجه است، به‌طوری‌که درمان انواع مقاوم به دارو و متاستاتیک در بسیاری از موارد غیرممکن است.

عمل جراحی با هدف حذف بافت سرطانی به‌عنوان اولین مداخله درمانی در نظر گرفته می‌شود؛ اما شیمی‌درمانی ضدسرطانی کلیدی‌ترین مرحله درمان است، فرایندی که با هدف پاک‌سازی سلول‌های سرطانی و حذف تومورهای میکروسکوپی نقش مهمی در روند درمانی بیماران دارد؛ به همین سبب، دستیابی به داروهای جدید و مؤثر علیه سرطان پستان در زمره اهداف تحقیقاتی محققان فراوانی قرار گرفته است. دستیابی به سامانه‌های دارورسانی هدفمند به‌منظور افزایش اثربخشی دارو و کاهش عوارض سمیتی یکی دیگر از اهداف مطالعاتی در حوزه مبارزه با سرطان پستان است (۲). بسیاری از داروهای شیمیایی علی‌رغم اثرگذاری مناسب، به علت پایداری کم و یا آثار سمیتی ناخواسته، به مرحله کارآزمایی بالینی نمی‌رسند و نمی‌توانند استفاده شوند.

فناوری نانو مبتنی بر طراحی، سنتز و به‌کارگیری محصولات با اندازه کمتر از ۱۰۰ نانومتر است. پزشکی تشخیصی و درمانی دورنمای امیدوارکننده‌ای را از استفاده از نانو محصولات ارائه کرده است. ذرات نانو سطح وسیع و درعین‌حال، اندازه کوچک دارند. این ویژگی امکان نفوذ به بافت‌های هدف و اثربخشی بهتر در مقایسه با ذرات بزرگ‌تر را فراهم می‌کند. درعین‌حال، این ترکیبات می‌توانند به‌عنوان یک حامل برای دارورسانی و یا افزایش پایداری دارو مورد توجه قرار گیرند (۳).

مس عنصری مهم در بدن انسان، گیاهان و حیوانات است. مقدار متوسط این عنصر در بدن انسان تقریباً حدود ۱۰۰ میلی گرم است و مقدار مصرف روزانه این عنصر حدود ۲-۴ میلی گرم تا حداکثر ۱۰ میلی گرم است که از طریق منابع غذایی دریافت می‌شود. این عنصر کارکردهای متعددی را در انسان انجام می‌دهد؛ ازجمله به‌عنوان کوفاکتور برای بسیاری از آنزیم‌ها عمل می‌کند، در سنتز نوروپپتیدها دخالت دارد، تنظیم‌کننده مسیرهای سیگنالینگ سلولی است و همچنین در دفاع آنتی‌اکسیدانی و عملکرد سلول‌های ایمنی انسان نقش دارد (۴).

نانوذرات اکسید مس (CuO) به علت کاربردهای متنوع خود، توجه فراوانی را به خود جلب کرده‌اند. این ذرات خواص گوناگون و کاربردهای متنوعی دارند. کاربردهای کلی اکسید مس در زیست پزشکی به‌عنوان عوامل ضدباکتریایی، ضدقارچی، آنتی‌اکسیدان، دارورسانی و ضدسرطانی است (۵). نانومواد مبتنی بر مس کاندیدای مناسبی برای طراحی دستگاه‌های پزشکی، پمادها و باندازه‌های مقاوم در برابر میکروب‌ها هستند. علاوه بر این، مس یک عنصر کمیاب ضروری است که به‌عنوان یک کوفاکتور برای عملکرد طبیعی آنزیم‌های مسیرهای متابولیک مختلف مورد نیاز است. چنین ویژگی را می‌توان برای فرمولاسیون‌های داروهای ضدتوموری استفاده کرد (۶). به سبب اندازه کوچک، آن‌ها به‌راحتی برای سلول‌هایی انسان قابل دسترسی هستند و می‌توانند به‌راحتی با مولکول‌های زیستی موجود در سطح سلول و درون سلولی تعامل داشته باشند (۳). وجود مس در برخی داروها سبب تقویت آثار ضدتوموری انتخابی است که نشان‌دهنده قابلیت نانوذرات CuO به‌عنوان عوامل ضدتومور بالقوه است. مطالعات پیشین نشان داده‌اند که نانوذرات اکسید مس از طریق مهار چرخه سلولی و القای آپوپتوز می‌توانند سبب مهار انواع مختلف سلول‌های سرطانی شوند. مطالعات پیشین بر نقش افزایش تولید رادیکال‌های آزاد اکسیژن در آثار ضدسرطانی نانوذره اکسید مس تأکید دارند (۵). علاوه بر آثار ضدتوموری مستقیم، نانوذرات فلزی ازجمله اکسید مس می‌توانند به‌عنوان حاملان دارویی استفاده

گردید و به مدت دو ساعت در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد هم زده شد. پس از پایان این مرحله، نانوذره اکسید مس تشکیل گردید که با استفاده از سانتریفیوژ با سرعت ۸۰۰۰ دور/دقیقه و به مدت ۱۰ دقیقه جداسازی شد. نانوذره به دست آمده با استفاده از آب مقطر شستشو داده شد و در آون (۸۰ درجه سانتی‌گراد) خشک گردید.

در مرحله بعد، یک گرم از نانوذره اکسید مس و ۰/۵ گرم از D-گلوکز در ۶۰ میلی‌لیتر آب مقطر ریخته شد و در حمام اولتراسونیک به مدت ۳۰ دقیقه قرار گرفت تا پراکنده شود. مخلوط حاصل در یک اتوکلاو فولادی ضدزنگ با پوشش تفلون ۱۰۰ میلی‌لیتری به مدت ۳ ساعت در دمای ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفت. محصول در ۶۰۰۰ دور بر دقیقه توسط سانتریفیوژ جداسازی شد. رسوب حاصل پس از سه بار شستشو با آب و اتانول دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۵ ساعت خشک گردید؛ سپس یک گرم از نانوذرات اکسید مس پوشش داده شده با دی-گلوکز با ۱ گرم از لاپاتینیب در ۵۰ میلی‌لیتر آب مقطر توسط دستگاه اولتراسونیک دیسپرس و سپس توسط شیکر انکوباتور به مدت ۲۴ ساعت همزده شد. پس از ۲۴ ساعت، محصول در ۶۰۰۰ دور بر دقیقه توسط سانتریفیوژ جداسازی گردید. در نهایت، رسوب حاصل سه بار با آب مقطر شستشو داده شد و به مدت ۲۴ ساعت توسط دستگاه فریز درایر خشک گردید.

تعیین ویژگی‌های نانوذره: اندازه و مورفولوژی نانوذره CuO-Lapatinib با استفاده از تصویربرداری میکروسکوپ الکترونی انجام شد. به منظور تعیین اندازه و ریخت‌شناسی نانوذرات از میکروسکوپ‌های الکترونی گذاره و نگاره استفاده گردید. اندازه ذرات در محیط آبی با استفاده از آزمایش DLS و بار سطحی ذرات با آزمایش تعیین پتانسیل زتا و با استفاده از دستگاه زتا سایزر صورت گرفت. تجزیه و تحلیل عنصری نانوذره با استفاده از آزمایش طیف‌سنجی پراش انرژی پرتو ایکس (EDS) انجام شد.

از آزمایش FT-IR به منظور تعیین گروه‌های عاملی سطحی نانوذره استفاده گردید. این آزمایش در محدوده جذبی ۵۰۰ تا ۴۰۰۰ cm⁻¹ و با استفاده از دستگاه

شوند. مطالعات پیشین در این زمینه با هدف افزایش پایداری مولکول‌های دارویی، بهبود نیمه‌عمر آنان در بدن و همچنین بهینه‌سازی دارورسانی به بافت‌های هدف انجام شده‌اند و نتایج امیدوارکننده‌ای نشان داده‌اند (۷). بر اساس این، نانوذره‌های مبتنی بر نانوذرات فلزی کثرت‌گه شده در مطالعات درمانی روی سرطان با افزایش استقبال روبه‌رو شده‌اند. با توجه به موارد ذکر شده، این مطالعه به منظور سنتز نانوذره اکسید مس کثرت‌گه با داروی لاپاتینیب (CuO-Lapatinib) و ارزیابی آثار ضدسرطانی آن بر سلول‌های رده سرطان پستان صورت گرفت. این مطالعه بر روی دارورسانی با استفاده از نانوذرات CuO عامل‌دارسازی شده با گلوکز برای هدف قرار دادن سلول‌های سرطان سینه و بررسی اثر آن بر فعالیت ژن کاسپاز-۸ تمرکز دارد که از عوامل آغاز آپوپتوز سلولی است. نتایج این پژوهش می‌تواند یک مسیر امیدوارکننده برای پیشرفت‌های بالقوه در درمان سرطان را نشان دهد.

مواد و روش‌ها

مواد و دستگاه‌های استفاده شده: در این مطالعه از کلرید مس دو آبه (CuCl₂·2H₂O) ساخت Merck (آلمان) و داروی لاپاتینیب ساخت شرکت Sigma-Aldrich (آمریکا) استفاده شد. دستگاه‌های استفاده شده در این مطالعه شامل میکروسکوپ‌های الکترونی گذاره Zeiss-EM10C-100 KV (آلمان) و نگاره Tescan Mira3 (جمهوری چک)، زتا سایزر (Malvern Instruments Ltd, 6.32)، اسپکتروفتومتر FT-IR ساخت شرکت Nicolet IR-100، دفراکتومتر Philips X'Pert MPD و دستگاه ترموسایکلر (LightCycler, Roche) ساخت آلمان بود؛ همچنین کیت‌های تجاری استفاده شده شامل کیت استخراج RNA شرکت دنا زیست (ایران) و کیت سنتز cDNA شرکت دنا زیست (ایران) بود.

سنتز نانوذره: ساخت نانوذره اکسید مس بر اساس روش گزارش شده توسط روش رهنما و قراگوزلو (۸) انجام گردید که هم‌رسوبی نامیده می‌شود. در ابتدا محلول ۰/۱ درصد وزنی/حجمی کلرید مس دو آبه (CuCl₂·2H₂O) در آب مقطر تهیه شد. در ادامه، pH محلول بر روی ۱۱ تنظیم

اسپکتروفتومتر FT-IR انجام شد؛ همچنین ساختار کریستالی نانوذرات با استفاده از آزمایش پراش اشعه ایکس (XRD) در طول موج $\lambda = 1.54056 \text{ \AA}$ و با منبع پرتو کبالت انجام پذیرفت. تعیین آثار مهار تکثیر سلولی: به منظور بررسی پتانسیل مهار تکثیر سلول از آزمایش 3-[4,5-dimethylthiazol-2-yl]-2,5 diphenyl tetrazolium bromide (MTT) استفاده گردید. در ابتدا، رده‌های سلولی سرطان پستان (MDA-MB-231) و سلول طبیعی (HDF) که از انستیتو پاستور ایران خریداری شده بودند، در محیط کشت سرم جنین گوساله و پنی سیلین/استرپتومایسین کشت داده شدند. پس از رشد تک‌لایه سلولی، سلول‌ها از فلاسک جداسازی گردیدند و با استفاده از لام نوبار و رنگ آمیزی تریپان بلو شمارش شدند. در مرحله بعد، تعداد 1×10^4 به هر چاهک در پلیت کشت سلولی ۹۶ خانه اضافه گردید. نانوذره CuO-Lapatinib به چاهک‌های حاوی سلول افزوده شد، به طوری که غلظت نهایی نانوذره در چاهک‌ها $7/81$ تا 500 میکروگرم/میلی‌لیتر بود. چاهک‌های بدون نانوذره به عنوان شاهد در نظر گرفته شدند. در ادامه، سلول‌ها به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۳۷ درجه سانتی‌گراد انکوبه گردیدند. پس از پایان انکوباسیون، محیط کشت خارج شد و ۲۰۰ میکرولیتر محلول MTT افزوده گردید و مجدداً به مدت چهار ساعت انکوبه شد؛ سپس محتوی چاهک تخلیه گردید و ۲۰۰ میکرولیتر محلول دی‌متیل سولفو کساید به چاهک‌ها افزوده شد. پس از انکوباسیون به مدت ۳۰ دقیقه، جذب نوری

چاهک‌ها در طول موج ۵۷۰ نانومتر اندازه‌گیری گردید. در پایان، میزان زیستایی سلول‌ها در غلظت‌های مختلف نانوذره CuO-Lapatinib با استفاده از رابطه زیر تعیین شد (۹، ۱۰).

$$\text{جذب نوری تیمار} - \text{جذب نوری شاهد} \\ \text{جذب نوری شاهد} \times 100 = \text{مهار درصد}$$

بررسی بیان ژن کاسپاز-۸: به منظور بررسی بیان ژن کاسپاز-۸ از آزمایش real-Time PCR استفاده گردید. ابتدا سلول‌های رده سرطان پستان با نانوذره CuO-Lapatinib تیمار شدند. غلظت استفاده شده در این تیمارها برابر غلظت نیمه‌مهار (IC50) بود. سلول‌ها به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۳۷ درجه سانتی‌گراد انکوبه گردیدند و سپس سلول‌ها جمع‌آوری و با PBS شستشو شدند. در ادامه، محتوی RNA کل با استفاده از کیت تجاری و بر اساس دستورالعمل سازنده کیت استخراج گردید. کیفیت و غلظت RNA استخراج شده با استفاده از دستگاه نانودراپ تعیین شد. پس از کسب اطمینان از کیفیت RNA، سنتز cDNA با کیت تجاری انجام گردید. برای بررسی بیان ژن کاسپاز-۸، مخلوط واکنش حاوی ۵ میکرولیتر SYBR Green، ۰/۵ میکرولیتر پرایمرهای مستقیم و معکوس، یک میکرولیتر cDNA و ۳ آب مقطر بدون RNase تهیه شد. تکثیر قطعات DNA در دستگاه ترموسایکلر صورت گرفت. از ژن GAPDH به عنوان ژن کنترل داخلی استفاده شد و بیان ژن با استفاده از روش $2^{-\Delta\Delta Ct}$ محاسبه گردید (۱۱). توالی پرایمرهای استفاده شده در جدول شماره ۱ نمایش داده شده است.

جدول شماره ۱. میزان عطرمايه موجود در هر دیسک در مقایسه با میزان رقت عطرمايه گیاه

Primers	Sequences (5'-3')	Size	References
Caspase8-Forward Caspase8-reverse	GACTGGATTTGCTGATTACCTACCTAA CCTCAATTCTGATCTGCTCACTTCT	143 bp	(24)
GAPDH-forward GAPDH-reverse	CCCACTCCTCCACCTTTGAC CATACCAGGAAATGAGCTTGACAA	74 bp	(24)

۰/۰۵ به عنوان سطح معنی‌داری در نظر گرفته شد.

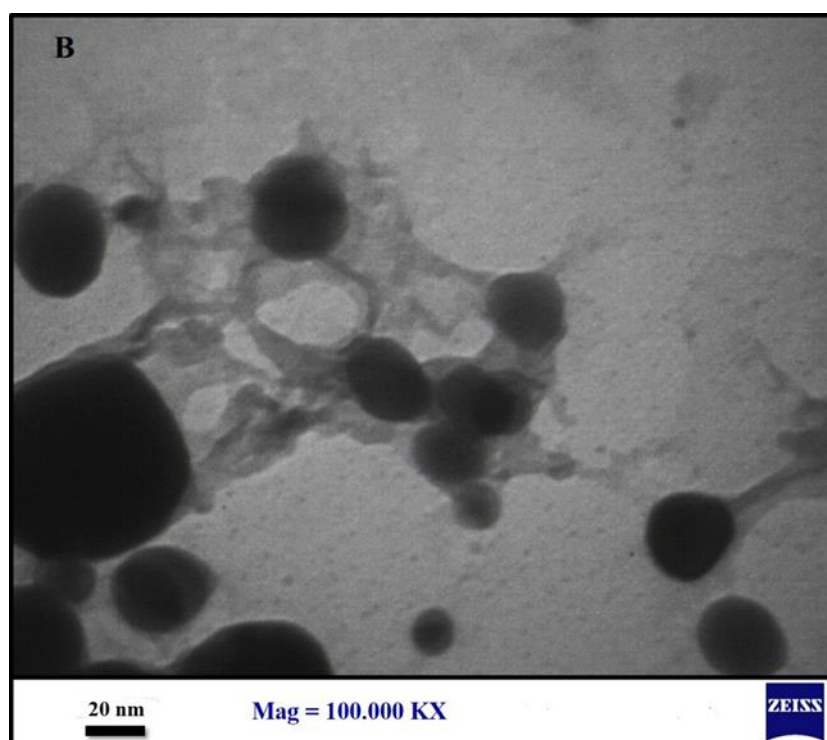
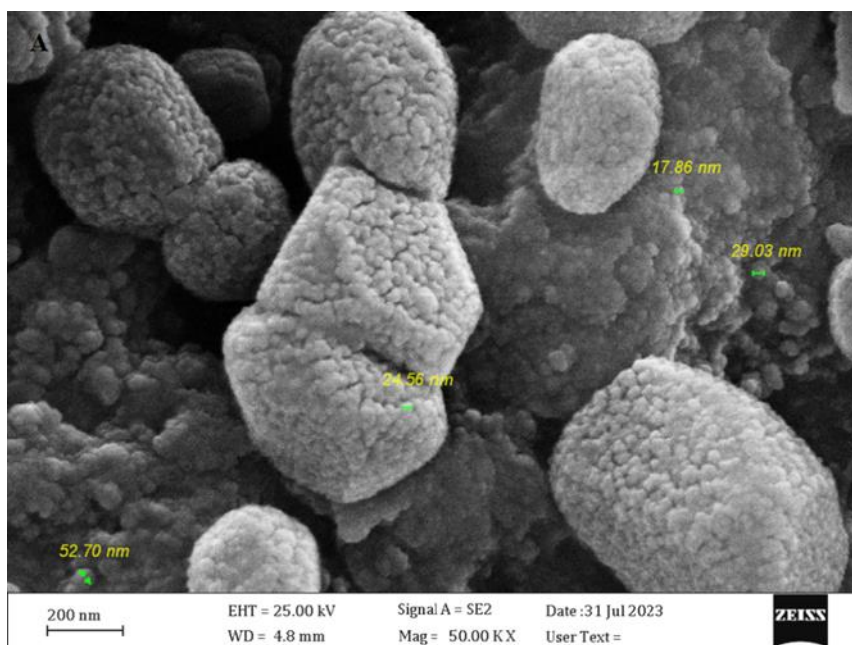
یافته‌های پژوهش

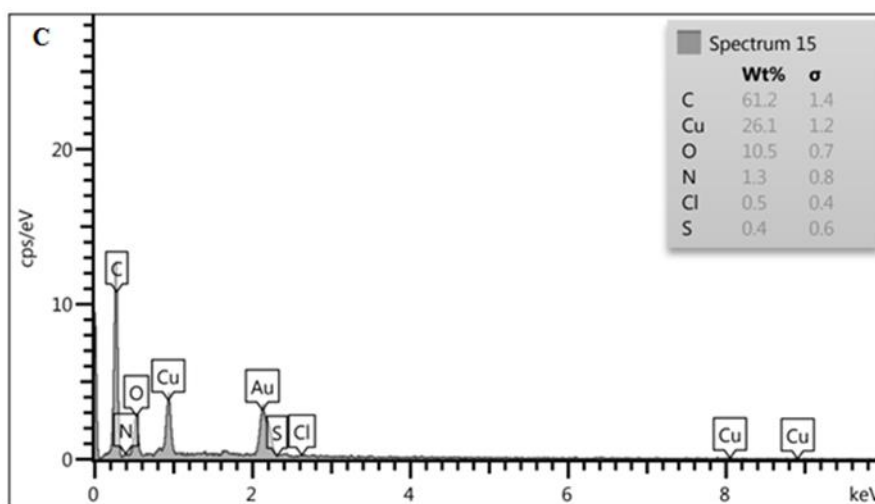
مورفولوژی نانوذرات CuO-Lapatinib با استفاده از

آزمایش‌ها در سه تکرار تجربی انجام گردید و نتایج به صورت میانگین و انحراف معیار بیان شده است. برای بررسی تفاوت‌های آماری از آنالیز واریانس یک‌طرفه با استفاده از نرم‌افزار SPSS vol.22 استفاده گردید و مقدار P کمتر از

تشکیل دهنده نانوذره شامل کربن، مس، اکسیژن، نیتروژن، کلر و گوگرد بود که نشان دهنده خلوص نانوذره سنتز شده است (شکل شماره ۱- C).

تصویربرداری SEM و TEM انجام گردید. نتایج نشان داد که نانوذرات ظاهر کروی دارند و اندازه آنان از ۱۷ تا ۵۵ نانومتر است. شکل شماره ۱- A و B تصاویر میکروسکوپ الکترونی نانوذرات سنتز شده را نمایش می دهد؛ همچنین عناصر

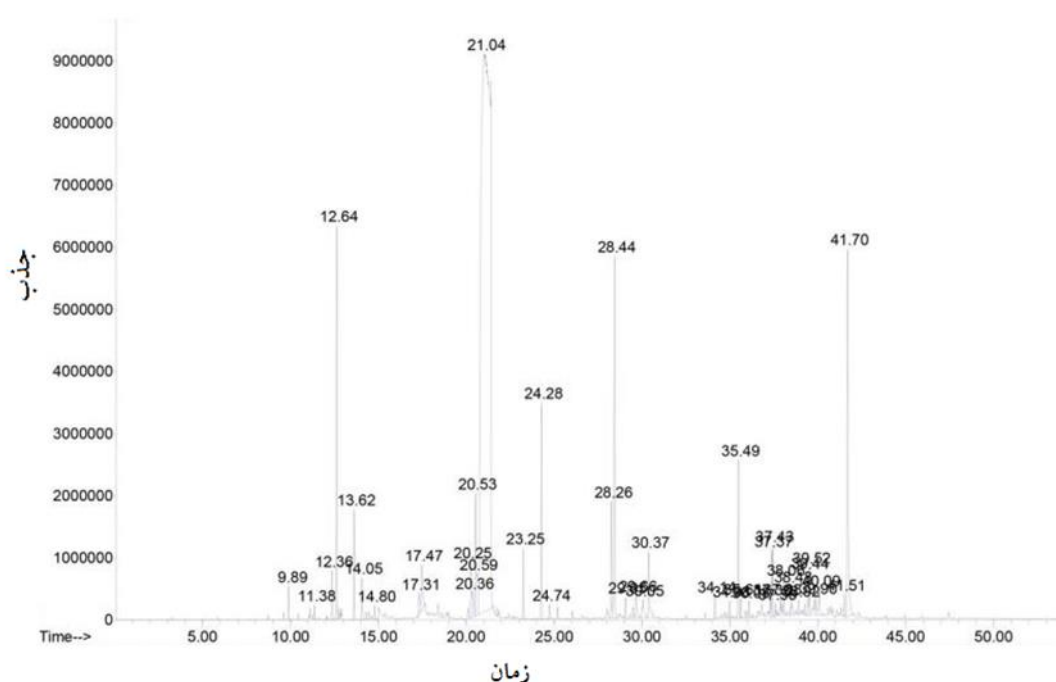




شکل شماره ۱. A و B تصاویر میکروسکوپ الکترونی SEM و TEM نانوذره CuO-Lapatinib و C تجزیه و تحلیل عنصری نانوذره

عطرمایه آویشن مرتعی را تشکیل می‌دهد. این ترکیب ضدالتهاب قوی، ضدآسترس، اکسیداتیو و مهارکننده رشد باکتری و قارچ است و سرعت مرگ سلول‌های سرطانی را افزایش می‌دهد (۱۳).

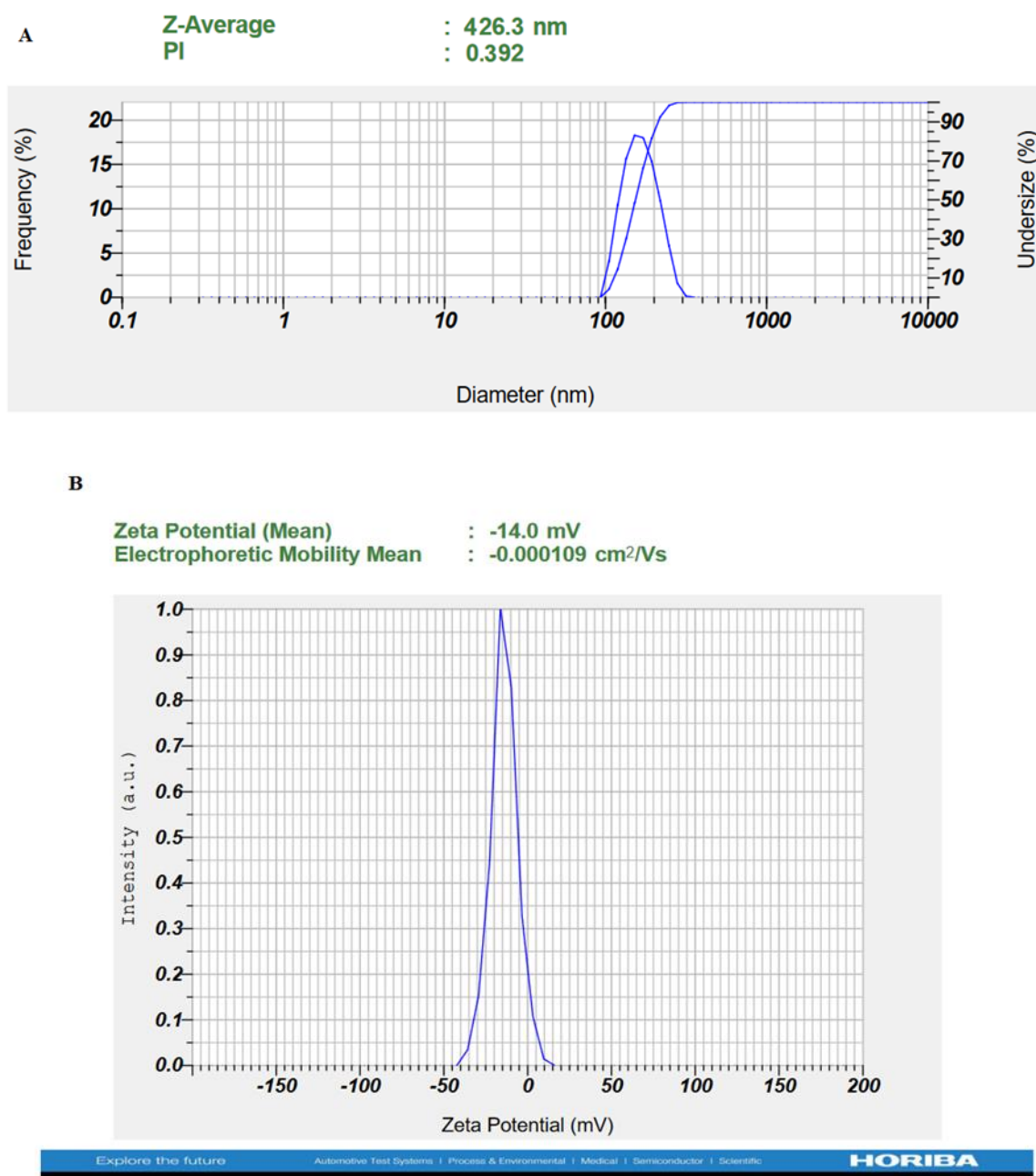
آویشن مرتعی درصد بالایی از مواد فنولی به‌ویژه کارواکرول دارد (شکل شماره ۱). کارواکرول مایع بی‌رنگ مایل به زرد، یک ترکیب فنلی و مشتق مونوترپن طبیعی است که بیشترین مقدار (۶۶/۹۶ درصد) از مواد تشکیل‌دهنده



شکل شماره ۱. کروماتوگرام عطرمایه گیاه آویشن مرتعی به‌دست آمده از دستگاه GC-MS

شاخص پراکندگی اندازه نانوذره ۰/۳۹۲ بود که نشان‌دهنده همگن بودن اندازه نانوذره ساخته شده است؛ همچنین آزمایش اندازه‌گیری پتانسیل زتا نشان داد که نانوذره ساخته شده بار سطحی ۱۴- میلی‌ولت دارد (شکل شماره ۲).

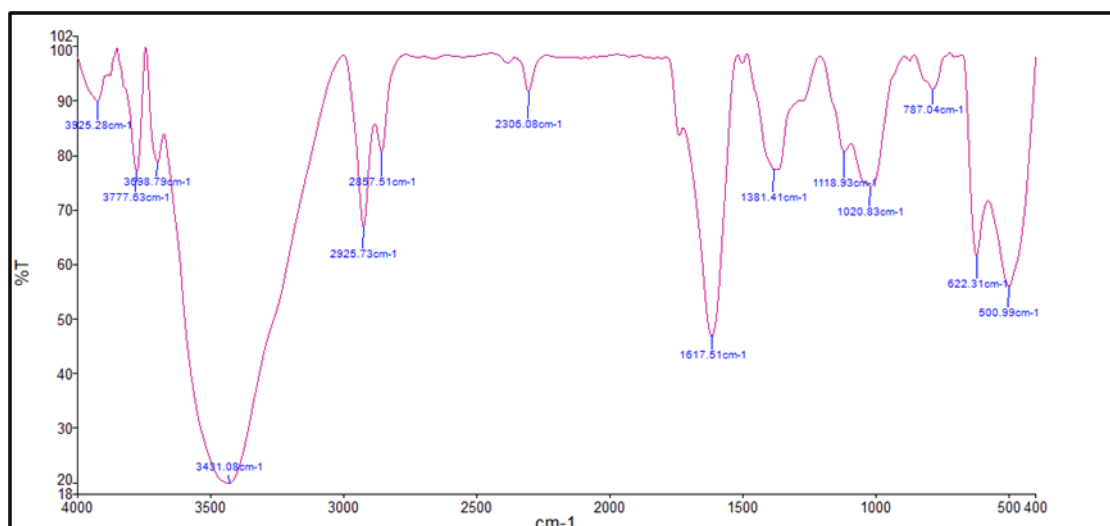
بر اساس نتایج آزمایش DLS، نانوذره CuO-Lapatinib در محیط آبی با اندازه ۴۲۶/۳ نانومتر است. اندازه نانوذرات در محیط آبی معمولاً به علت جذب آب، بزرگ‌تر از شکل خشک آنان است. افزایش اندازه نانوذرات در آزمایش DLS نیز به سبب جذب آب است. علاوه بر این،



شکل شماره ۲. تجزیه و تحلیل های DLS (A) و پتانسیل زتای (B) نانوذره CuO-Lapatinib

۲۹۲۵ و ۳۴۳۱ cm⁻¹ مرتبط با پیوند O-H هستند. با توجه به وجود پیک‌های مربوط به CuO NPs و Lapatinib در باند FT-IR نانوذرات CuO@Lapatinib می‌توان نتیجه گرفت که نانوذرات به درستی سنتز شده‌اند (شکل شماره ۳) (۱۲).

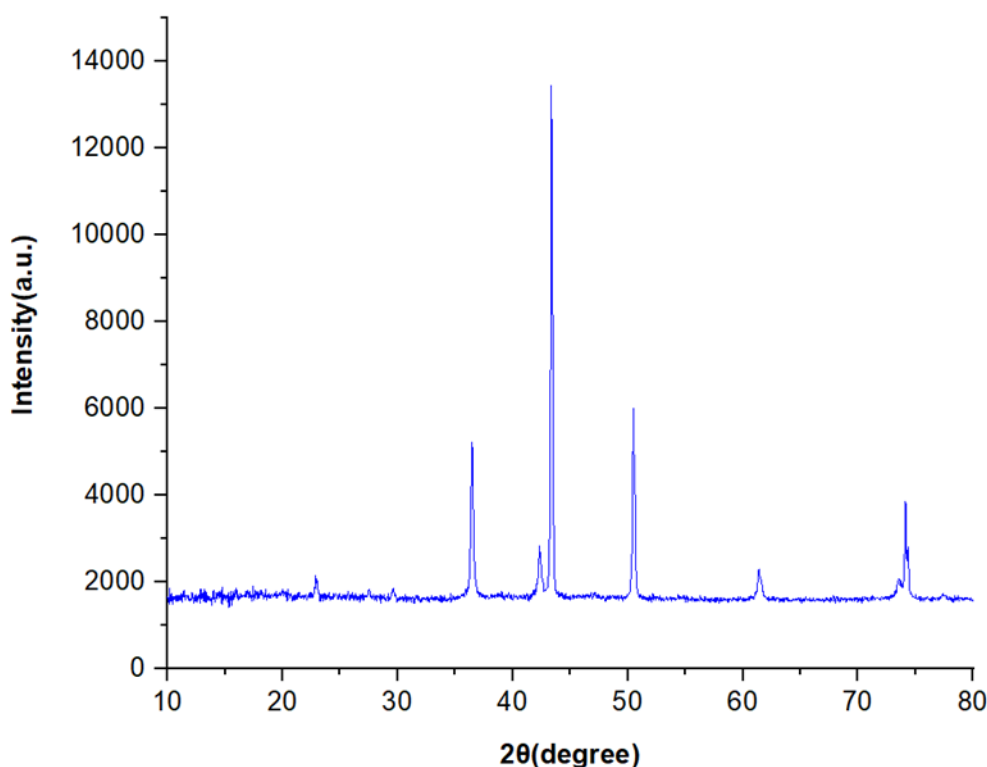
بر اساس نتایج آزمایش FT-IR، پیک‌های جذبی شدیدی در ۵۰۰ و ۶۲۲ cm⁻¹ دیده می‌شود که با پیوند Cu-O مرتبط است. پیک‌های جذبی قابل مشاهده در ۷۸۷، ۱۰۲۰، ۱۱۱۸ و ۲۳۰۶ cm⁻¹ به ترتیب نشان‌دهنده پیوندهای C-Cl، S-O، N-H و C-C است؛ همچنین پیک‌های قابل مشاهده در



شکل شماره ۳. تجزیه و تحلیل FT-IR نانوذره CuO-Lapatinib

دارند. به علت خواص آمورف لاپاتینیب، پیک‌های مرتبط با آن در طیف XRD نانوذره CuO@Lapatinib مشاهده نمی‌شود (۱۴) (شکل شماره ۴).

بر اساس تجزیه و تحلیل XRD، پیک‌های در ۳۶/۴۴، ۴۳/۳۶، ۵۰/۴۸، ۶۱/۳۰ و ۷۴/۱۲ درجه مرتبط با نانوذره CuO هستند که با JCPDS CARD NO 45-0937 (۱۳) مطابقت

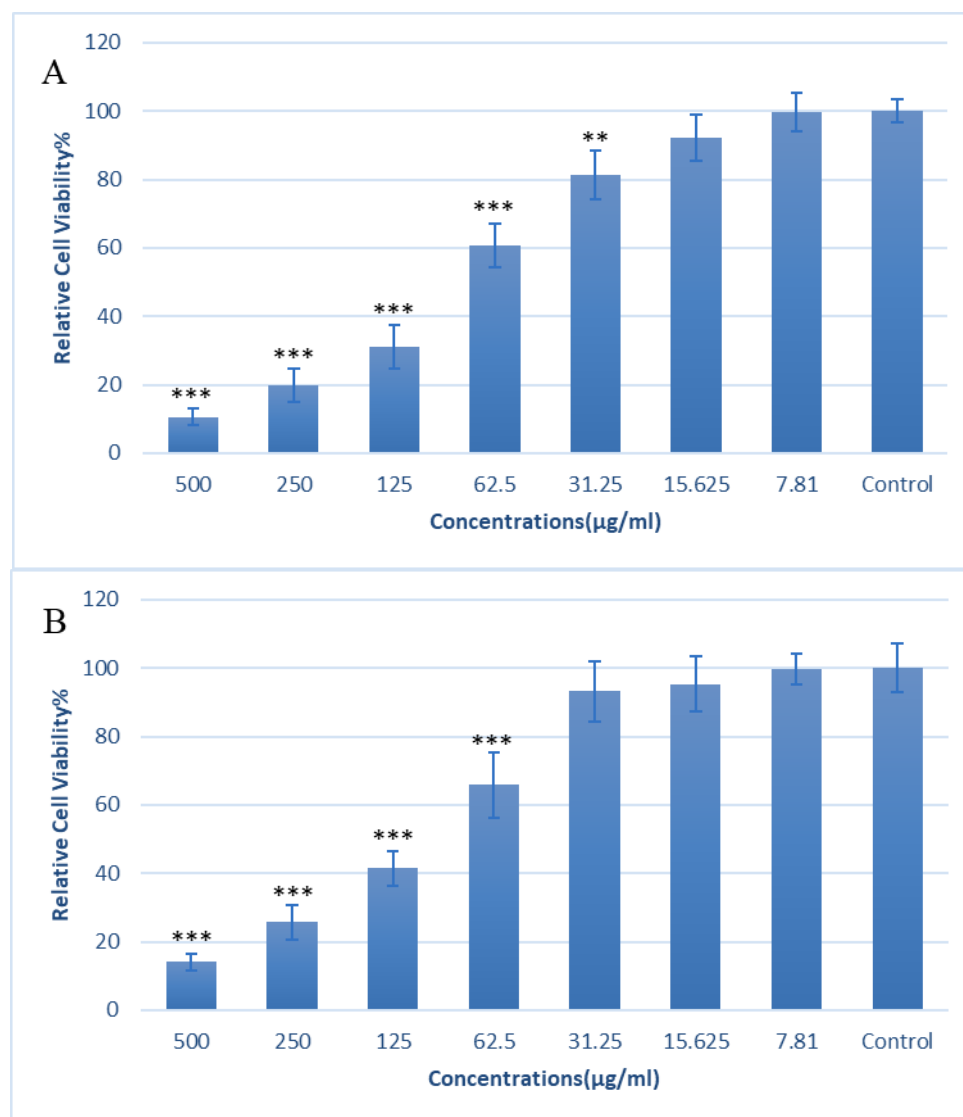


شکل شماره ۴. تجزیه و تحلیل XRD نانوذره CuO-Lapatinib

میکروگرم/میلی‌لیتر و غلظت نیمه‌مهارى نانوذره برای سلول‌های طبیعی ۱۲۰ میکروگرم/میلی‌لیتر بود؛ همچنین بررسی زیستایی سلول‌های سرطان پستان نشان داد که حداقل غلظت مهارکننده معنی‌دار نانوذره CuO-Lapatinib 25/31

آزمایش MTT: بررسی زیستایی سلول‌های طبیعی و سلول‌های رده سرطان پستان با استفاده از آزمایش MTT انجام شد. بر اساس نتایج، حداقل غلظت مهارکننده معنی‌دار نانوذره CuO-Lapatinib برای سلول‌های رده سرطانی ۶۲/۵

میکروگرم/میلی‌لیتر و غلظت نیمه‌مهارى آن ۷۵ داده‌شده است.
میکروگرم/میلی‌لیتر بود. نتایج در شکل شماره ۵ نمایش

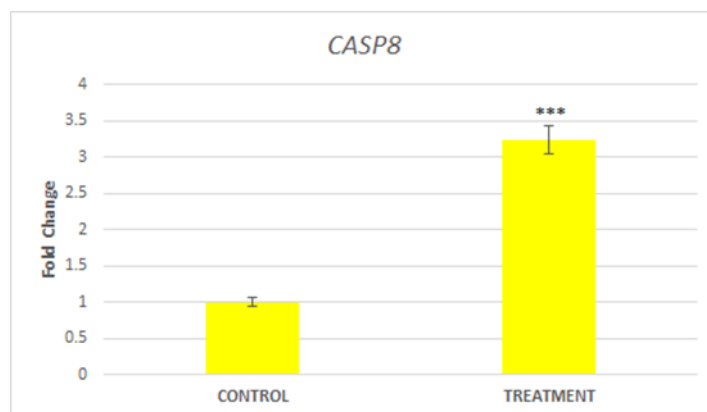


شکل شماره ۵. زیستایی سلول‌های رده سرطان پستان (A) و سلول‌های طبیعی (B) در اثر تیمار با غلظت‌های مختلف نانوذره CuO-Lapatinib.

** نشان‌دهنده مقدار P کمتر از ۰/۰۱ و *** نشان‌دهنده مقدار P کمتر از ۰/۰۰۱ است

به بیان دیگر، میزان بیان ژن کاسپاز-۸ در سلول‌های تیمار شده نسبت به سلول‌های تیمار نشده ۳/۲۴ برابر افزایش داشت. نتایج در شکل شماره ۶ نمایش داده شده است.

بیان ژن کاسپاز-۸: بررسی بیان ژن کاسپاز-۸ نشان داد که تیمار سلول‌های سرطان پستان با نانوذره CuO-Lapatinib سبب افزایش معنی‌دار بیان ژن کاسپاز-۸ می‌شود ($P < 0.05$);



شکل شماره ۶. اثر نانوذره CuO-Lapatinib بر بیان ژن کاسپاز-۸ در سلول‌های رده سرطان پستان. *** نشان‌دهنده مقدار P کمتر از ۰/۰۰۱ است

بحث و نتیجه‌گیری

سرطان پستان فراگیرترین و کشنده‌ترین نوع سرطان در جمعیت زنان دنیا به‌شمار می‌آید. بروز فنوتیپ‌های مختلف از این بیماری، متاستاز و انواع مقاوم به دارو مهم‌ترین علل حداث این بیماری محسوب می‌شوند. دستیابی به داروهای مؤثرتر یکی از نیازهای ضروری برای درمان این بیماری است. برخی از نانوذرات فلزی به علت ویژگی‌های ضدسرطانی ذاتی که دارند، مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته‌اند؛ همچنین این ذرات می‌توانند به‌عنوان حامل داروهای ضدسرطانی مرد استفاده شوند و با بهبود پایداری و دارورسانی هدفمند، سبب افزایش اثربخشی شیمی‌درمانی گردند. در این مطالعه اثر ضدسرطانی نانوذره اکسید مس کنژوگه با داروی لاپاتینیب روی رده سلولی سرطان پستان مطالعه شد و اثر این نانوذره بر بیان ژن کاسپاز ۸ ارزیابی گردید. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که نانوذره اکسید مس کنژوگه با داروی لاپاتینیب از آثار ضدسرطانی قابل توجهی بر سلول‌های سرطان پستان برخوردار است، درحالی‌که آثار مهاری آن بر سلول‌های رده طبیعی به‌مراتب کمتر است. علاوه بر این، تیمار سلول‌های سرطان پستان با نانوذره یادشده سبب افزایش چشمگیر بیان ژن کاسپاز-۸ در آنان می‌گردد.

بررسی اثر تیمار سلول‌های سرطان پستان و سلول طبیعی با نانوذره CuO-Lapatinib نشان داد که این نانوذره آثار سمیتی وابسته به دوز بر هر دو رده سلولی دارد، هرچند نانوذره CuO-Lapatinib آثار مهاری قوی‌تری بر سلول‌های رده سرطان پستان داشت؛ به‌بیان‌دیگر، این نانوذره سبب

کاهش قابل توجه زنده‌مانی سلول‌های رده سرطان پستان در مقایسه با سلول‌های طبیعی شد. ویژگی‌های سیتوتوکسیک نانوذره CuO-Lapatinib را می‌توان به هر دو جزء سازنده آن، یعنی نانوذره اکسید مس و داروی لاپاتینیب مرتبط دانست. هنگامی که نانوذرات اکسید مس وارد سلول یا هسته می‌شوند، به آبخاری از واکنش‌ها منجر می‌گردند که شامل واکنش‌های ژنوتوکسیک مختلف مانند جهش، تغییر بیان ژن، آسیب DNA و آسیب به میتوکندری می‌شود. نانوذرات CuO نشان داده‌اند که به‌طور خاص، میتوکندری‌های داخل سلول را هدف قرار می‌دهند و با ایجاد شرایط استرس اکسیداتیو در سلول، مسیر سیگنال‌دهی آپوپتوز بواسطه میتوکندری را آغاز می‌کنند؛ بنابراین، ایجاد استرس اکسیداتیو که از طریق افزایش رادیکال‌های آزاد به‌ویژه رادیکال‌های آزاد اکسیژن رخ می‌دهد، یک سازوکار سیتوتوکسیک عمده نانوذره اکسید مس است (۱۵). همسو با این مطالعه، ذوغیبی و همکاران نشان دادند که نانوذره اکسید مس به میزان فراوانی می‌تواند سبب مهار سلول‌های رده سرطان پستان MDA-MB-231 شود، هرچند آنان گزارش کردند که میزان IC₅₀ نانوذره ساخته‌شده ۲۰ میکروگرم/میلی‌لیتر بود (۱۶). این تفاوت را می‌توان به تفاوت در روش سنتز نانوذره، اندازه ذرات و شرایط آزمایش مرتبط دانست. در مطالعه‌ای دیگر، شفیع و همکاران گزارش کردند که نانوذره اکسید روی عامل‌دارشده با گلوکز و کنژوگه با تیوسمی کاربازون آثار مهاری بیشتری بر سلول‌های سرطان پستان، در مقایسه با سلول‌های طبیعی دارند که با یافته‌های این پژوهش مطابقت دارد (۱۷). در مطالعه آنان،

مقدار IC₅₀ 97/133 میکروگرم بر میلی لیتر بود که بیشتر از نانوذره سنتز شده در این مطالعه است.

لاپاتینیب یک مهارکننده تیروزین کیناز است که به طور انتخابی گیرنده فاکتور رشد اپیدرمی را مهار می کند و از سال ۲۰۰۷، توسط سازمان غذا و داروی ایالات متحده (FDA) برای درمان سرطان سینه متاستاتیک تأیید شده است. علاوه بر این، در ترکیب با لتروزول که یک مهارکننده آروماتاز است، این دارو به عنوان درمان خط اول برای سرطان سینه متاستاتیک که گیرنده های هورمونی و HER2 را بیان می کنند، پذیرفته شده است. مطالعات آزمایشگاهی نشان داده است که لاپاتینیب از طریق کاهش فسفریلاسیون گیرنده های هدف و پروتئین های Raf، ERK، AKT و PLCγ1، فعال سازی مسیرهای سیگنال دهی EGFR و HER2، MAPK، PI3K-AKT و PLCγ را مهار می کند. علاوه بر این، این دارو بیان p38 را که در آپوپتوز نقش دارد، افزایش می دهد و توقف در مرحله subG1 چرخه سلولی (یک نشانه آپوپتوز) و مهارکننده های کیناز وابسته به سیکلین p21 و p27 را القا می کند (۱۸)؛ بنابراین به نظر می رسد، نانوذره اکسید مس و داروی لاپاتینیب از طریق یک اثرگذاری افزایشی می توانند سبب مهار سلول های رده سرطان پستان شوند.

سلول های طبیعی نیز درجاتی از حساسیت را نسبت به این نانوذره نشان دادند؛ اما آثار سمیتی نانوذره CuO-Lapatinib بر سلول های رده سرطان پستان به مراتب قوی تر بود. این تفاوت می تواند به تفاوت در متابولیسم و سرعت تکثیر سلول های سرطانی با سلول های طبیعی مرتبط باشد. سلول های سرطانی سرعت تکثیر بسیار بالاتری نسبت به سلول های طبیعی دارند و به این منظور، گیرنده های عناصر غذایی و فاکتورهای رشد در این سلول ها با افزایش بیان مواجه هستند. این ویژگی می تواند سبب افزایش حساسیت سلول های طبیعی در برابر داروی لاپاتینیب گردد که یک مهارکننده گیرنده هورمون رشد بر سطح سلول است (۱۹).

یکی دیگر از علل حساسیت بالای سلول های سرطانی در برابر نانوذره CuO-Lapatinib را می توان به ازدیاد استرس اکسیداتیو مرتبط دانست. سلول های سرطانی به سبب سرعت

متابولیک و نرخ تکثیر بالا، همواره با درجاتی از استرس اکسیداتیو روبرو هستند؛ به بیان دیگر، میزان رادیکال های آزاد تولید شده در محیط این سلول ها بالاتر از سلول های طبیعی است؛ به همین علت، این سلول ها آستانه تحمل کمتری در برابر ازدیاد استرس اکسیداتیو ناشی از مواجهه با نانوذره CuO-Lapatinib را دارند و به همین سبب، آثار سیتوتوکسیک نانوذره در سلول های رده سرطان پستان بسیار بیشتر از سلول های طبیعی بود (۲۰).

به منظور ارزیابی اثر مواجهه سلول های رده سرطان پستان با نانوذره CuO-Lapatinib بر بیان ژن کاسپاز-۸ از آزمایش real-time PCR استفاده شد. نتایج این مطالعه نشان دهنده افزایش معنی دار بیان ژن یاد شده در اثر مواجهه سازی با نانوذره بود. کاسپاز-۸ که مانند سایر اعضای خانواده کاسپاز به صورت یک زیموژن غیرفعال تک زنجیره ای (pro-Caspase-8) ساخته می شود، در اثر برش پروتئولیتیک فعال می شود و نقش آغازگر اصلی مسیر آپوپتوز بیرونی را ایفا می کند؛ همچنین تحت شرایط خاص، این آنزیم می تواند مسیر آپوپتوز درونی را نیز تحریک نماید. در مسیر خارجی، اتصال سیگنال های محرک آپوپتوز به گیرنده های خود که به گیرنده های مرگ معروف اند، سبب فراخوانی و فعال سازی کاسپاز-۸ می گردد. این آنزیم نیز به نوبه خود با برش پروتئولیتیک، باعث فعال شدن کاسپازهای عملگر می شود و به این ترتیب، سبب پیشروی آبشار کاسپازی و بروز آپوپتوز می گردد (۲۱). مطالعه محمود و همکاران نشان داد که تیمار کردن سلول های سرطان پستان MCF-7 با نانوذره اکسید مس سبب افزایش تولید رادیکال های آزاد اکسیژن می شود و باعث افزایش فعالیت کاسپازها از جمله کاسپاز ۳ و ۹ می گردد و به آپوپتوز منجر می شود (۲۲)؛ همچنین همسو با نتایج این مطالعه، لی و همکاران دریافتند که لاپاتینیب می تواند سبب افزایش فعال سازی کاسپاز-۸ گردد و باعث افزایش حساسیت سلول های سرطان پستان در برابر داروهای ضدسرطانی می شود (۲۳).

مسیر درونی آپوپتوز معمولاً در پاسخ به استرس های درون و برون سلولی همچون استرس اکسیداتیو و آسیب به

DNA رخ می‌دهد. این مسیر که معمولاً با افزایش نفوذپذیری غشای میتوکندری و آزادسازی سیتوکروم c از غشای آن آغاز می‌گردد، سبب فعال‌سازی کاسپاز-۹ و به دنبال آن، فعال‌سازی آبشار کاسپازی منجر به آپوپتوز می‌شود. از سویی، فهمیده شده است که کاسپاز-۸ در صورت فعال شدن، از طریق برهم‌کنش با پروتئین BID سبب افزایش تخریب غشای میتوکندری و آزادسازی سیتوکروم c از میتوکندری می‌گردد و به‌این ترتیب، مسیر درونی آپوپتوز را فعال می‌کند (۲۱). بر اساس آنچه در این مطالعه مشاهده شد، تیمار سلول‌های رده سرطان پستان با نانوذره CuO-Lapatinib سبب افزایش معنی‌دار بیان کاسپاز-۸ می‌شود. با در نظر گرفتن نقش کاسپاز-۸ در مسیرهای درونی و بیرونی آپوپتوز، افزایش بیان این ژن می‌تواند نشان‌دهنده القای آپوپتوز به‌عنوان سازوکار ضدسرطانی نانوذره CuO-Lapatinib باشد.

در این مطالعه، آثار ضدسرطانی نانوذره CuO-Lapatinib بر سلول‌های رده سرطان پستان بررسی گردید. نتایج نشان داد که نانوذره سنتز شده سمیت وابسته به غلظت بر سلول‌های سرطانی داشت و آثار سمیتی قوی‌تری در سلول‌های سرطانی نسبت به سلول‌های طبیعی نشان داد؛ همچنین تیمار سلول‌های سرطان پستان با نانوذره CuO-Lapatinib سبب افزایش معنی‌دار بیان ژن کاسپاز-۸ شد که می‌تواند نشان‌دهنده فعال‌سازی مسیرهای آپوپتوز درونی و بیرونی در این سلول‌ها باشد. این مطالعه آثار ضدسرطانی امیدوارکننده نانوذره CuO-Lapatinib را در سلول‌های سرطان پستان نشان می‌دهد که می‌تواند گامی روبه‌جلو و آینده‌دار در دارورسانی هدفمند از نانوذرات اکسید فلزی به‌منظور مقابله با سرطان پستان باشد. با این حال، مطالعات گسترده‌تر به‌منظور بررسی میزان سمیت سیستمیک، پایداری نانوذره و اثربخشی این نانوذره در شرایط درون‌تنی (in vivo) که از محدودیت‌های این مطالعه است، در مطالعات بعدی باید مورد توجه قرار گیرند.

سپاس‌گزاری

نویسندگان از کارکنان آزمایشگاه زیست‌شناسی دانشگاه آزاد واحد رشت تشکر می‌کنند.

تعارض منافع

نویسندگان هیچ تعارض منافع ندارند و این پروژه هیچ حمایت مالی دریافت نکرده است. گفتنی است، نویسندگان سهم مساوی در مقاله دارند.

کد اخلاق

با توجه به اینکه این تحقیق روی موجود زنده نبود، نیاز به اخذ کد اخلاق نداشت.

حمایت مالی

این تحقیق هیچ کمک مالی خاصی از سازمان‌های تأمین مالی در بخش‌های عمومی، تجاری یا غیر انتفاعی دریافت نکرد.

مشارکت نویسندگان

نویسندگان دارای سهم مساوی در نگارش مقاله می‌باشند.

References

1. Sung H, Ferlay J, Siegel RL, Laversanne M, Soerjomataram I, Jemal A, et al. Global cancer statistics 2020: GLOBOCAN estimates of incidence and mortality worldwide for 36 cancers in 185 countries. *CA Cancer J Clin*. 2021; 71:209-49 doi: 10.3322/caac.21660.
2. Fang X, Cao J, Shen A. Advances in anti-breast cancer drugs and the application of nano-drug delivery systems in breast cancer therapy. *J Drug Deliv Sci Technol*. 2020;57:101662. doi:10.1016/j.jddst.2020.101662.
3. Kim GJ, Nie S. Targeted cancer nanotherapy. *Mater Today*. 2005; 8:28-33. doi:10.1016/S1369-7021(05)71034-8.
4. Waris A, Din M, Ali A, Ali M, Afridi S, Baset A, et al. A comprehensive review of green synthesis of copper oxide nanoparticles and their diverse biomedical applications. *Inorg Chem Commun*. 2021; 123:108369. doi:10.1016/j.inoche.2020.108369.
5. Verma N, Kumar N. Synthesis and biomedical applications of copper oxide nanoparticles: an expanding horizon. Verma N, Kumar N. Synthesis and biomedical applications of copper oxide nanoparticles: an expanding horizon. *ACS Biomater Sci Eng*. 2019; 5:1170-88. doi:10.1021/acsbiomaterials.8b01092.
6. Szymański P, Frączek T, Markowicz M, Mikiciuk-Olasik E. Development of copper based drugs, radiopharmaceuticals and medical materials. *Biometals*. 2012; 25:1089-112. doi:10.1007/s10534-012-9578-y.
7. Chandrakala V, Aruna V, Angajala G. Review on metal nanoparticles as nanocarriers: Current challenges and perspectives in drug delivery systems. *Emerg Mater*. 2022; 5:1593-615. doi:10.1007/s1001841722004867.
8. Rahnema A, Gharagozlou M. Preparation and properties of semiconductor CuO nanoparticles via a simple precipitation method at different reaction temperatures. *Opt Quantum Electron*. 2012; 44:313-22. doi:10.1007/s11082-011-9540-1.
9. Hosseinkhah M, Ghasemian R, Shokrollahi F, Mojdehi SR, Noveiri MJ, Hedayati M, et al. Cytotoxic potential of nickel oxide nanoparticles functionalized with glutamic acid and conjugated with thiosemicarbazide (NiO@ Glu/TSC) against human gastric cancer cells. *J Clust Sci*. 2022; 33:2045-53. doi:10.1007/s10876-021-02124-2.
10. Kumari R, Saini AK, Kumar A, Saini RV. Apoptosis induction in lung and prostate cancer cells through silver nanoparticles synthesized from *Pinus roxburghii* bioactive fraction. *J Biol Inorg Chem*. 2020; 25:23-37. doi: 10.1007/s00775-019-01729-3.
11. Pfaffl MW. A new mathematical model for relative quantification in real-time RT-PCR. *Nucleic Acids Res*. 2001; 29:e45. doi: 10.1093/nar/29.9. e45.
12. Talarposhti MV, Salehzadeh A, Jalali A. Comparing the toxicity effects of copper oxide nanoparticles conjugated with Lapatinib on breast (MDA-MB-231) and lung (A549) cancer cell lines. *Naunyn Schmiedebergs Arch Pharmacol*. 2024; 397:6855-6866. doi: 10.1007/s00210-024-03071-1.
13. Bouazizi N, Bargougui R, Oueslati A, Benslama R. Effect of synthesis time on structural, optical and electrical properties of CuO nanoparticles synthesized by reflux condensation method. *Adv Mater Lett*. 2015; 6:158-64. doi: 10.5185/amlett.2015.5656.
14. Varlashkin P. X-ray powder diffraction data of lapatinib ditosylate monohydrate. *Powder Diffr*. 2009; 24:250-3. doi:10.1154/1.3187152.
15. Yang Q, Wang YE, Yang Q, Gao Y, Duan X, Fu Q, et al. Cuprous oxide nanoparticles trigger ER stress-induced apoptosis by regulating copper trafficking and overcoming resistance to sunitinib therapy in renal cancer. *Biomaterials*. 2017; 146:72-85. doi:10.1016/j.biomaterials.2017.09.008.
16. Zughaibi TA, Mirza AA, Suhail M, Jabir NR, Zaidi SK, Wasi S, et al. Evaluation of anticancer potential of biogenic copper oxide nanoparticles (CuO NPs) against breast cancer. *J Nanomater*. 2022;2022:5326355. doi:10.1155/2022/5326355.
17. Shafiei I, Tavassoli SP, Rahmatollahi HR, Ghasemian R, Salehzadeh A. A novel copper oxide nanoparticle conjugated by thiosemicarbazone promote apoptosis in human breast cancer Cell line. *J Clust Sci*. 2022;33:2697-706. doi:10.1007/s10876-021-02187-1.
18. Segovia-Mendoza M, González-González ME, Barrera D, Díaz L, García-Becerra R. Efficacy and mechanism of action of the tyrosine kinase inhibitors gefitinib, lapatinib and neratinib in the treatment of HER2-positive breast cancer: preclinical and clinical evidence. *Am J Cancer Res*. 2015;5:2531.
19. Xuhong JC, Qi XW, Zhang Y, Jiang J. Mechanism, safety and efficacy of three tyrosine kinase inhibitors lapatinib, neratinib and pyrotinib in HER2-positive breast cancer. *Am J Cancer Res*. 2019; 9:2103-19.
20. Redza-Dutordoir M, Averill-Bates DA. Activation of apoptosis signalling pathways by reactive oxygen species. *Biochim Biophys Acta*. 2016; 1863:2977-92. doi: 10.1016/j.bbamcr.2016.09.012.

21. Mandal R, Barrón JC, Kostova I, Becker S, Strebhardt K. Caspase-8: The double-edged sword. *Biochim Biophys Acta Rev Cancer*. 2020; 1873:188357. doi: 10.1016/j.bbcan.2020.188357.
22. Mahmood RI, Kadhim AA, Ibraheem S, Albukhaty S, Mohammed-Salih HS, Abbas RH, et al. Biosynthesis of copper oxide nanoparticles mediated *Annona muricata* as cytotoxic and apoptosis inducer factor in breast cancer cell lines. *Sci Rep*. 2022; 12: 16165. doi:10.1038/s41598-022-20360-y.
23. Li YT, Qian XJ, Yu Y, Li ZH, Wu RY, Ji J, et al. EGFR tyrosine kinase inhibitors promote pro-caspase-8 dimerization that sensitizes cancer cells to DNA-damaging therapy. *Oncotarget*. 2015;6:17491. doi: 10.18632/oncotarget.3959.
24. Tajmehri H, Mousavi FS, heydarnezhad M, Golrokh FJ, Nezami PV, Khanpour P, et al. Evaluation of the cytotoxic effect of cobalt oxide nanoparticles functionalized by glucose and conjugated with lapatinib (Co3O4@ Glu-Lapatinib) on a lung cancer cell line and evaluation of the expression of CASP8, mTOR1, and MAPK1 genes. *BioNanoScience*. 2024;14:999-1010. doi:10.1007/s12668-024-01348-6.