

تأثیر ذرات نانو اکسیدروی بر بیان ژن‌های دخیل در تولید بیوفیلم سودوموناس آئروژینوزا جدا شده از بیماران مبتلا به سیستمیک فیبروزیس

مونا کنکوری^۱، یوسف عرفانی^{۲*}، شرمین خرازی^۳، ستاره حقیقت^۴

چکیده

زمینه و هدف: سودوموناس آئروژینوزا (*Pseudomonas aeruginosa*) یک پاتوژن فرصت طلب گرم منفی است که اغلب در بیماران مبتلا به فیبروز کیستیک، زخم‌های سوختگی، نقص ایمنی، اختلال انسداد مزمن ریوی یافت می‌شود. علاوه بر این، سودوموناس آئروژینوزا همچنین یکی از مهمترین پاتوژن‌های مسبب عفونت‌های بیمارستانی اطلاق می‌شود که به‌طور گسترده در دستگاه‌های پزشکی (تهویه) یافت می‌شود؛ زیرا تمایل به رشد روی سطوح مرطوب دارند. با توجه به اهمیت درمان سیستمیک فیبروزیس و توانایی تشکیل بیوفیلم توسط سودوموناس آئروژینوزا، این مطالعه به بررسی اثر نانوذره اکسیدروی بر بیان ژن‌های دخیل در تولید بیوفیلم سودوموناس آئروژینوزا در بیماران مبتلا به سیستمیک فیبروزیس می‌پردازد.

روش بررسی: نمونه‌های خلط و گلو از ۱۵۰ بیمار مبتلا به سیستمیک فیبروزیس تهیه و برای جداسازی سودوموناس آئروژینوزا در محیط کشت مکانیکی آگار کشت داده شد و تست‌های تشخیصی و افتراقی برای شناسایی کلنی‌ها صورت گرفت. تست‌های حساسیت آنتی‌بیوتیکی بر روی جدایه‌های مثبت با استفاده از روش دیسک دیفیوژن (کربی-باثر) انجام شد. نانوذره اکسیدروی با توجه به دستورالعمل ساخت نانوذره ساخته شد و با میکروسکوپ SEM ارزیابی گردید. سویه‌های مقاوم به چند آنتی‌بیوتیک با ۱۶ میکروگرم بر میلی‌لیتر نانوذره اکسیدروی ۲ نانومتری تلقیح شدند و هاله مهارتی سنجیده شد. بررسی اثر نانوذره بر کاهش بیان ژن‌های *gacA*، *retS*، *lasR* و *rhlR* با استفاده از روش Real-Time PCR سنجیده شد.

یافته‌ها: از مجموع ۱۵۰ نمونه دریافتی، ۷۳ (۴۸/۶۶٪) مورد از جدایه‌ها به‌عنوان سودوموناس آئروژینوزا شناخته شدند. نتایج مقاومت آنتی‌بیوتیکی نشان داد که تمام جدایه‌های سودوموناس آئروژینوزا به آنتی‌بیوتیک‌های انتخابی مقاوم بودند. نتایج ارزیابی نانوذره با میکروسکوپ SEM نشان داد که نانوذره سنتز شده میانگین اندازه حدود 44 ± 10 نانومتر دارد. نتایج تست Real-Time PCR نشان‌دهنده کاهش بیان ژن‌های *gacA*، *retS*، *lasR* و *rhlR* در حضور نانوذره اکسیدروی در سویه‌های سودوموناس آئروژینوزا بود. بیشترین اثر کاهشی بر سطح بیان ژن *rhlR* و کمترین بر سطح بیان ژن *retS* مشاهده گردید.

نتیجه‌گیری: استفاده از نانوذره اکسیدروی می‌تواند سبب حذف عفونت سودوموناس آئروژینوزا از طریق کاهش بیان ژن‌های مورد مطالعه و ممانعت از تشکیل بیوفیلم شود و نتیجه‌ی درمانی بهتری را برای بیماران سیستمیک فیبروزیس مبتلا به عفونت ریه ارائه دهد.

واژه‌های کلیدی: سودوموناس آئروژینوزا، بیوفیلم، اکسیدروی، نانوذرات، Real-time PCR، بیان ژن

دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۷/۳۰

پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۱۰/۹

* نویسنده مسئول:

یوسف عرفانی؛

دانشکده پیراپزشکی دانشگاه علوم پزشکی تهران

ستاره حقیقت؛

واحد علوم پزشکی تهران دانشگاه آزاد اسلامی

Emails:

yerfani@tums.ac.ir

haghighat.s@iau.ac.ir

۱ دانشجوی دکتری میکروبیولوژی، واحد علوم پزشکی تهران، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۲ دانشیار گروه علوم آزمایشگاهی، دانشکده پیراپزشکی، دانشگاه علوم پزشکی تهران، تهران، ایران

۳ دانشیار گروه نانوفناوری پزشکی، دانشکده فناوری‌های نوین پزشکی، دانشگاه علوم پزشکی تهران، تهران، ایران

۴ دانشیار گروه میکروبیولوژی، واحد علوم پزشکی تهران، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

مقدمه

سودوموناس آئروژینوزا یک میکروارگانیسم فرصت طلب، گرم منفی، متحرک و هوازی است که عمدتاً در دستگاه تنفسی افراد با نقص ایمنی مانند بیماران مبتلا به سیستمیک فیبروزیس و بستری در بیمارستان کلونیزه می شود (۱). سودوموناس آئروژینوزا عامل بروز اندوکاردیت، باکتری می، عفونت های زخم، عفونت های چشمی، گوش، دستگاه گوارش و دستگاه ادراری و ذات الریه بوده که به عنوان یک پاتوژن تهدیدکننده ی زندگی با نرخ مرگ و میر بالا به دلیل مقاومت ذاتی به عوامل ضدباکتری متداول همیشه مورد اهمیت بوده است (۲ و ۳).

سودوموناس آئروژینوزا به بسیاری از استراتژی های درمانی و همچنین در برابر نمک با غلظت بالا، عوامل ضد عفونی کننده ی رایج، شرایط خشک و اکثر آنتی بیوتیک های مورد استفاده، بسیار مقاوم است که بیان کننده نیاز فوری به درمان باکتری به ویژه در بیماران مبتلا به نقص ایمنی است (۳). خاصیت بیماری زایی و مقاومت به آنتی بیوتیک به دلیل وجود عوامل بیماریزا و همچنین توانایی تشکیل بیوفیلم در سودوموناس آئروژینوزا باعث شده است که در صورت کلونیزه شدن باکتری در سیستم تنفسی، در شرایط نامطلوب شامل محیط بی هوازی، رقابت برای کسب مواد مغذی و کلونیزه شدن باکتری های دیگر، وجود غلظت بالای نمک، مورد حمله ی سلول های ایمنی شامل نوتروفیل، تولید AMP و ROS قرارگیرد. بنابراین باکتری با بروز جهش جهت بیان عوامل بیماریزایی شامل پیلی، تاژک، پروتئازها و بیان ژن های تشکیل دهنده ی بیوفیلم، ویژگی های لازم جهت بقا در محیط نامطلوب را کسب کند (۴).

تشکیل بیوفیلم منجر به شکل گیری ماتریکس خارج سلولی در اطراف جامعه میکروبی می شود که امکان تبادل ژنتیکی بین جوامع باکتریایی را فراهم کرده، از سیستم ایمنی مانند فاگوسیتوز محافظت می کند و سبب بروز مقاومت ۱۰-۱۰۰ برابری باکتری در مقایسه با حالت عادی می شود (۵). در زمان تشکیل بیوفیلم باکتری ها، سیستم کروم سنسینگ منجر به ایجاد ارتباط بین سلول ها و تبادل مواد غذایی، افزایش مکانیسم دفاعی در برابر سیستم ایمنی و بروز مقاومت علیه عوامل ضدباکتری می شود؛ علاوه بر آن در تنظیم بیان ژن باکتری، تشکیل بیوفیلم و اسپورزایی نقش دارد. رایج ترین مولکول های ارتباطی در سیستم کروم سنسینگ، اتواینوسر یا خودالفارگر هموسرین لاکتون (AHL) است. در سودوموناس آئروژینوزا در تشکیل بیوفیلم سیستم کروم سنسینگ *Las/Rhl* دارای نقش اساسی هستند. ژن های *rhIR* و *iqs*، *psq*، *lasR* در سیستم های

کروم سنسینگ عمدتاً در سودوموناس آئروژینوزا وجود دارند (۶).

همان طور که قبلاً ذکر شد، سودوموناس آئروژینوزا عمدتاً در سیستم تنفسی بیماران دچار نقص ایمنی مانند سیستمیک فیبروزیس کلونیزه می شود. سیستمیک فیبروزیس یکی از بیماری های اثری تهدیدکننده ی زندگی است که بیش از ۷۰۰۰۰ نفر در سراسر جهان به آن مبتلا هستند. کیفیت زندگی در بیماران مبتلا به سیستمیک فیبروزیس بسیار ضعیف است و میانگین بقای آن حدود ۴۷ سال است (۷). از آن جایی که در افراد مبتلا به سیستمیک فیبروزیس عملکرد ریه مختل شود، بیماران مستعد ابتلا به عفونت سودوموناس آئروژینوزا هستند، درمان عفونت سودوموناس آئروژینوزا به دلیل مقاومت آنتی بیوتیکی و خواص بیوفیلمی باکتری بسیار سخت است که منجر به پیش آگهی بد بیماری و کاهش امید به درمان بیماران می شود (۸). اخیراً نانوذرات فلزی به عنوان یک ماده ی امیدوارکننده در زمینه پزشکی مورد توجه قرار گرفته است که در این میان، نانوذرات اکسیدروی بیشتر به عنوان یک نانوذره ضدسرطانی و ضدباکتریایی و همچنین دارای خواص ضد التهابی و ضد داباتی کاربرد دارند. نانوذره اکسیدروی می تواند دیواره سلولی باکتری را تحریک کند و یکپارچگی غشا را از طریق تولید پراکسید هیدروژن مختل کند (۹). هدف مطالعه ی حاضر، بررسی اثر نانوذره اکسیدروی بر سطح بیان ژن های دخیل در تولید بیوفیلم سودوموناس آئروژینوزا جدا شده از بیماران سیستمیک فیبروزیس است.

روش بررسی

• جداسازی سویه های باکتریایی از بیماران

سودوموناس آئروژینوزا از نمونه های خلط و گلوئی ۱۵۰ بیمار مبتلا به سیستمیک فیبروزیس که به بیمارستان مرکز طبی کودکان تهران مراجعه کرده بودند، تهیه شد. نمونه ها بلافاصله به محیط تربیتیکی سوی براث (TSB) منتقل شدند و سپس در محیط کشت مکانیکی آگار به مدت ۲۴ ساعت کشت داده شدند. به بیماران قبل از ورود فرم رضایت نامه داده شد.

پس از کشت باکتری بر روی محیط کشت مکانیکی آگار، کلنی های موکوئیدی با رنگ دانه ی سبز جدا شده و شناسایی باکتری بر اساس تست های بیوشیمیایی، رنگ آمیزی گرم، گلوکز و مالتوز اکسیداز، رشد در دمای ۴۲ درجه سانتی گراد صورت گرفت. سویه سودوموناس آئروژینوزا ATCC 27853 یک سویه استاندارد مثبت برای اعتبارسنجی مطالعه در نظر گرفته شد. کلنی های تأیید

• تعیین حداقل غلظت مهارکنندگی و حداقل غلظت کشندگی نانوذره

اکسیدروی بر سودوموناس آئروژینوزا با استفاده از روش میکروداپلوشن براث برای تعیین حداقل غلظت مهاری نانوذره از پلیت ۹۶ خانه استفاده گردید. بدین منظور، رقت‌های سریالی از نانوذره اکسیدروی در محیط مولر هیتون براث تهیه گردیده و داخل هر چاهک ریخته شد. کدورت نیم‌مک‌فارلند از کشت تازه تمامی جدایه‌های سودوموناس آئروژینوزا تهیه و ۱۰۰ میکرولیتر به هر چاهک اضافه گردید. پلیت، ۲۴ ساعت در ۳۷ درجه سانتی‌گراد گرماگذاری گردید. از محیط کشت مولر هیتون براث به‌عنوان کنترل منفی و محیط کشت به‌همراه سوسپانسیون سودوموناس آئروژینوزا ATCC 27853 به‌عنوان کنترل مثبت در نظر گرفته شد. تعیین کدورت چاهک‌ها با استفاده از الیزاید (Biotek) ارزیابی شد. اولین چاهکی که عدم رشد در آن مشاهده گردید و با جذب نوری بسیار نزدیک به صفر و یا برابر صفر، به‌عنوان حداقل غلظت مهاری در نظر گرفته شد. از چاهک‌هایی که در آن‌ها رشد صورت نگرفته بود، بر روی محیط مولر هیتون آگار (مرک، آلمان) کشت صورت گرفت و پس از یک شبانه‌روز گرماگذاری کمترین غلظتی از نانوذره که باکتری در آن رشد نکرد، به‌عنوان حداقل غلظت کشندگی صورت گرفت.

• تعیین حساسیت آنتی‌بیوتیکی به روش انتشار دیسک در حضور

زینک‌اکساید

نانوذرات اکسیدروی در آب مقطر حل شده و میزان ۱۰ ماکرولیتر از آن به دیسک‌های آنتی‌بیوتیکی به‌کار رفته تلقیح و این‌بار قدرت حجم معین از غلظت اولیه از نانوذرات اکسیدروی اضافه شده به دیسک‌های به‌کار برده آنتی‌بیوتیکی جهت بررسی تأثیر نانوذرات اکسیدروی در همراهی آنتی‌بیوتیک در مقایسه با اثر آنتی‌بیوتیک به‌تنهایی، در از بین بردن باکتری بررسی گردید.

• تجزیه و تحلیل کمی ژن‌های مربوط به تشکیل بیوفیلم در حضور

نانوذرات اکسیدروی با استفاده از Real-Time PCR

نمونه‌ی RNA از سویه‌های سودوموناس آئروژینوزا که با ۱۰ میکروگرم بر میلی‌لیتر نانو اکسیدروی در دمای ۳۷ درجه سانتی‌گراد در انکوباتور شیکردار گرماگذاری شده بودند، استخراج شد. سپس بیوفیلم از پلیت‌های ۹۶ خانه‌ای جدا شده و با ۱۰ میلی‌مولار NaCl شسته شد و در نهایت توسط کیت استخراج RNX (سیناژن، تهران، ایران) براساس دستورالعمل ذکر شده استخراج RNA صورت گرفت. cDNA با استفاده از کیت سنتز cDNA استاندارد Revert Aid™

شده به محیط تریپتیک سوی براث حاوی ۲۰٪ گلیسرول منتقل و در دمای ۸۰- درجه سانتی‌گراد ذخیره و نگهداری شدند.

• تعیین حساسیت آنتی‌بیوتیکی با استفاده از دیسک دیفیوژن

تست حساسیت آنتی‌بیوتیکی برای سویه‌های سودوموناس آئروژینوزا جدا شده با استفاده از روش انتشار دیسک بر اساس دستورالعمل‌های موسسه استاندارد بالینی و آزمایشگاهی (CLSI 2023) انجام شد. آنتی‌بیوتیک‌های انتخاب شده برای تعیین حساسیت آنتی‌بیوتیکی به شرح زیر بودند: پپراسیلین ۱۰۰ میکروگرم (PIP)، تیکارسیلین ۷۵ میکروگرم (TC)، تازوباکتام-پپراسیلین ۱۰۰ میکروگرم (TZP)، سفنازیدیم ۳۰ میکروگرم (CAZ)، سفپیم ۳۰ میکروگرم (FEP)، مروپنم ۱۰ میکروگرم (MEM)، آزترونام ۳۰ میکروگرم (ATM)، آمیکاسین ۳۰ میکروگرم (AN)، جنتامایسین ۱۰ میکروگرم (GM) و سیپروفلوکساسین ۵ میکروگرم (CP). دیسک‌های آنتی‌بیوتیک مورد استفاده در این مطالعه از شرکت‌های MAST (انگلستان) و Rosco (دانمارک) خریداری گردیدند. سویه‌ی سودوموناس آئروژینوزا ATCC 27853 به‌عنوان کنترل استفاده شد. (۱۰).

• سنتز نانوذرات اکسیدروی با استفاده از رسوب شیمیایی

نانوذره اکسیدروی براساس غلظت روی (M/۳۵-۰/۵۰)، زمان واکنش (۵-۱ دقیقه) و نسبت مولی (۲-۱۰) OH-/Zn با استفاده از روش رسوب شیمیایی سنتز شد. به‌طور خلاصه، استات روی و هیدروکسید سدیم (مواد شیمیایی Merck، آلمان) در متانول حل شده و به مدت ۱ ساعت به آرامی و با سرعت ۵ میلی‌لیتر در دقیقه مخلوط شدند. مخلوط به‌دست آمده دوباره به مدت ۱ ساعت در ۱۵۰۰ دور در دقیقه در دمای داده شده هم زده شد. در نهایت، صفحه‌ی نانوذرات اکسیدروی با سانتریفیوژ با دور ۱۵۰۰ به‌دست آمد و به مدت ۲۴ ساعت در دمای اتاق خشک شد. جهت بررسی اندازه و پایداری نانوذرات اکسیدروی ابتدا ۱۷ ترکیب مختلف از غلظت استات روی، نسبت هیدروکسید سدیم به استات روی مختلف و با تغییر در زمان به‌هم خوردن ساخته شدند. ۱ نمونه توسط مدلسازی آماری با استفاده از نرم‌افزار Design Expert انجام شده و محاسبه‌ی تفاوت متغیرها بر اساس طراحی Box Behnken انجام شد. نمونه‌ی ساخته شده جهت مراحل آلیس، بررسی میزان سمیت سلولی و تولید رادیکال ارزیابی گردید. بررسی ساختار بلور نانوذرات اکسیدروی و ارزیابی آلیس آن‌ها با عناصر کمیاب خاکی، توسط الگوی پراش پرتو ایکس محاسبه گردید. عکس نانوذره با میکروسکوپ SEM گرفته شد.



(فرمتناز) بر اساس دستورالعمل داده شده سنتز شد.

• تکنیک Real-Time PCR برای تعیین بیان ژن‌های مرتبط با بیوفیلم

در حضور نانو ذرات اکسیدروی

تکثیر ژن‌های *gacA*, *retS*, *lasR* و *rhIR* با استفاده از روش Real Time-PCR سایر گرین انجام شد. دستورالعمل تهیه مخلوط واکنش به صورت زیر است: ۱۰ میکرولیتر از مخلوط Syber Green، ۰/۵ میکرولیتر از پرایمر فوروارد و ریورس، و ۵ میکرولیتر cDNA در حجم نهایی ۲۰ میکرولیتر با استفاده از آب دیونیزه شده. ژن *tufB* به عنوان یک کنترل داخلی استفاده شد و برنامه‌ی Real-Time PCR بدین ترتیب انجام شد: دناتوراسیون اولیه در دمای ۹۵ درجه سانتی گراد به مدت

۱۰ دقیقه، به دنبال آن ۴۰ چرخه دناتوراسیون در دمای ۹۵ درجه سانتی گراد به مدت ۲۰ ثانیه، آنیل کردن در دمای ۲۵ درجه سانتی گراد به مدت ۲۰ ثانیه، و افزایش در دمای ۷۲ درجه سانتی گراد به مدت ۲۰ ثانیه. پرایمرهای اختصاصی برای تکثیر ژن *gacA*, *retS*, *lasR* و *rhIR* به عنوان یک کنترل داخلی در جدول ۱ فهرست شده است. سطح بیان نسبی ژن با استفاده از روش بیان نسبی ژن ($\Delta\Delta Ct-2$) با استفاده از معادله‌ی زیر تعیین شد:

$$Ct \text{ target} - Ct \text{ reference} = \Delta Ct$$

$$\Delta\Delta Ct = \text{نمونه آزمایش } \Delta Ct - \text{نمونه کنترل } \Delta Ct$$

بیان ژن نسبی: $\Delta\Delta Ct-2$

جدول ۱: فهرست پرایمرهای مورد استفاده در تشخیص ژن‌های مؤثر در ایجاد بیوفیلم در سودوموناس آئروژینوزا

اندازه (bp)	5'	توالی پرایمر	3'	ژن
۱۸۱	3'-AGGTGCAGCGTGATTAAG-5'	Forward	3'-GCATCTTCACGTCCATCAG-5'	<i>gacA</i>
۱۴۳	3'-TCCCTATTTCCGCCAGAC-5'	Forward	3'-CCAGCTTGACCACGATTG-5'	<i>retS</i>
۱۳۳	3'-CTGTGGATGCTCAAGGACTAC-5'	Forward	3'-AACTGGTCTTGCCGATGG-5'	<i>lasR</i>
۱۴۰	3'-CTGGAAAAGGAAGTGCGG-5'	Forward	3'-GTAGTTCTGCATCTGGTATCG-5'	<i>rhIR</i>

از ۱۵۰ نمونه‌ی مورد بررسی، ۷۳ مورد (۴۸/۶۶٪) با توجه به تست‌های بیوشیمیایی و افتراقی سودوموناس آئروژینوزا تشخیص داده شدند. تمام ۷۳ سویه‌ی جدا شده از بیماران مبتلا به سیستمیک فیبروزیس به آنتی بیوتیک‌های استفاده شده برای تست‌های حساسیت آنتی بیوتیکی مقاوم بودند که میزان مقاومت برای آنتی بیوتیک‌های تهیه شده از شرکت MAST ۶ میلی متر گزارش شد که شامل آنتی بیوتیک‌های تازوباکتام پیراسیلین، آمیکاسین، جنتامایسین، سفنازیدیم، سیپروفلوکساسین بود و برای آنتی بیوتیک‌های شرکت Rosco که شامل ایمینیم و سفیم بودند ۹ میلی متر گزارش شد.

• نتیجه‌ی سنتز نانو ذره اکسیدروی

نانو ذره با روش رسوب‌دهی شیمیایی ساخته شد که یون‌های ماده شیمیایی روی، با بار مثبت بر سطح نقره ساخته شده و با سترات با بار منفی از طریق واکنش الکترواستاتیک جذب شده و به طور مستقیم برای تشکیل پوسته‌ی اکسیدروی با هیدروکسید سدیم واکنش داده‌اند. ویژگی نانو ذره‌ی اکسیدروی توسط میکروسکوپ SEM ارزیابی گردید که در شکل ۱ نمایش داده شده است.

پرایمرهای مورد نظر با استفاده از نرم افزار الیگو ۷ طراحی و برای صحت طراحی، توالی Blast گردیدند. سپس توالی تأیید شده به شرکت پیشگام برای ساخت فرستاده شدند. پرایمر به صورت لیوفیلیزه دریافت و برای انجام واکنش مولکولی با رقت ۰/۱ مورد استفاده قرار گرفت.

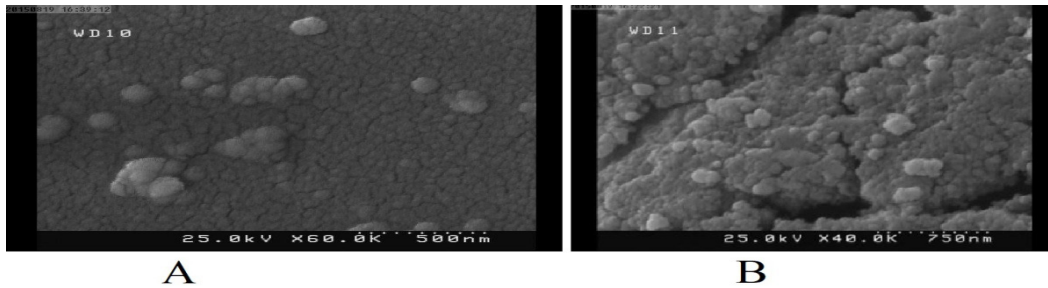
• تجزیه و تحلیل آماری

تجزیه و تحلیل آماری با استفاده از SPSS نسخه ۱۸ و REST 900 انجام شد. نتایج با استفاده از واریانس ANOVA یک طرفه برای شناسایی تفاوت بین نمونه‌های تیمار شده و تیمار نشده و همچنین تنوع بیان ژن در گروه شاهد و تیمار شده با گروه نانو اکسیدروی به دست آمد و مقدار $P < ۰/۰۵$ معنی دار در نظر گرفته شد.

یافته‌ها

• نتایج جداسازی و نتیجه‌ی مقاومت آنتی بیوتیکی سودوموناس آئروژینوزای

جدا شده از نمونه‌های بالینی



شکل ۱: آنالیز میکروسکوپ SEM نانواکسیدروی در بزرگ‌نمایی مختلف. توزیع انکسار در بزرگ‌نمایی ۷۰۰K، شکل A بزرگ‌نمایی ۵۰۰ نانومتر، شکل B بزرگ‌نمایی ۷۰۰ نانومتر

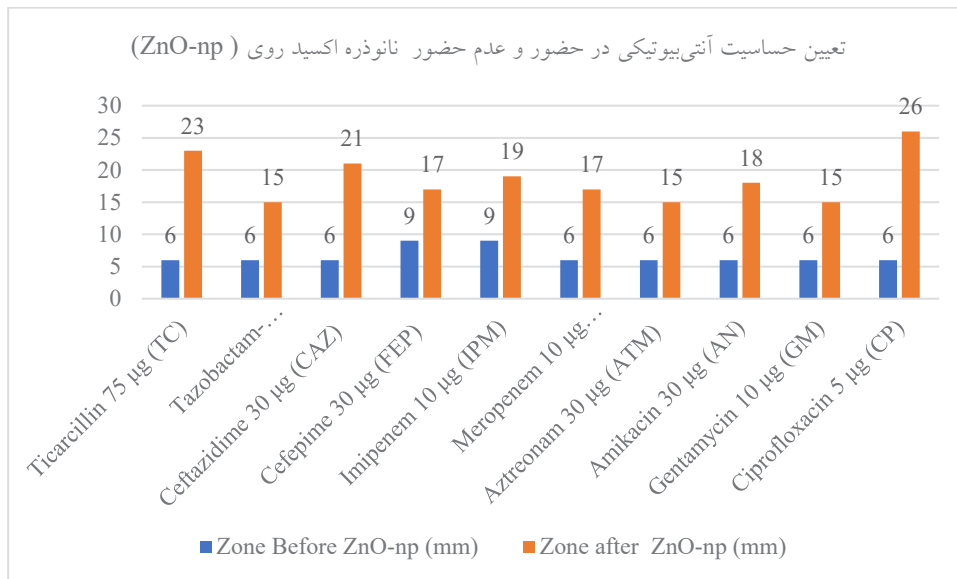
• نتیجه‌ی تعیین حساسیت آنتی‌بیوتیکی به روش انتشار دیسک در حضور نانوذره اکسیدروی

تمامی جدایه‌ها از بیماران مبتلا به سیستمیک فیبروزیس به آنتی‌بیوتیک‌های اعمال شده برای تست حساسیت آنتی‌بیوتیکی و پس از القای ۱۶ میکروگرم در میلی‌لیتر نانوذره اکسیدروی مقاوم بودند. کاربرد ۱۶ میکروگرم بر میلی‌لیتر نانوذره اکسیدروی، الگوی حساسیت آنتی‌بیوتیکی به جز آمیکاسین که روی آن الگوی مقاومت را به الگوی میانی اعطا کرد، طبق نمودار ۱ بر مابقی روند حساسیت آنتی‌بیوتیکی بود که نشان‌دهنده‌ی تأثیر مثبت نانوذره اکسیدروی بر حساس بودن جدایه به‌شمار رفت.

طبق شکل ۱، نانوذره سنتز شده میانگین اندازه حدود 44 ± 4 برآورد شد.

• نتیجه‌ی تعیین میزان مهارکنندگی و باکتری‌کشی نانوذره اکسیدروی

علیه سودوموناس آئروژینوزا
غلظت مختلف نانوذره اکسیدروی بین ۰/۳-۴۰ میکروگرم/میلی‌لیتر انتخاب گردید تا تأثیر مهارکنندگی آن در مهار رشد باکتری و حذف آن بررسی شود. براساس نتایج به‌دست آمده غلظت ۱۶ و ۲۳ میکروگرم/میلی‌لیتر را به‌ترتیب غلظت مهارکننده MIC و غلظت کشندگی MBC باکتری سودوموناس آئروژینوزا انتخاب گردید.



نمودار ۱: نتایج قطر هاله‌ی عدم رشد در اطراف دیسک‌های آنتی‌بیوتیک به روش انتشار دیسک در حضور نانوذره اکسیدروی

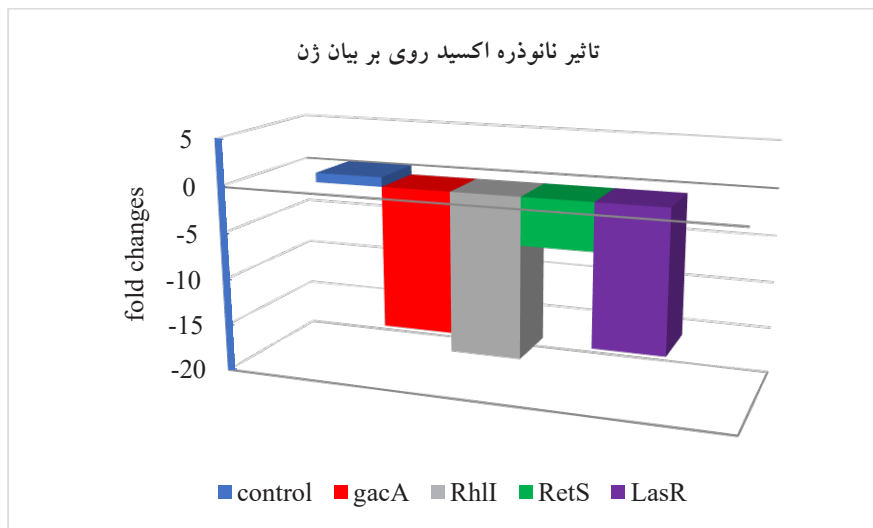
بیان نسبی ژن‌های مربوط به تشکیل بیوفیلم با استفاده از Real-Time PCR کمی ارزیابی شد و با توجه به نتایج به‌دست آمده از Real-Time PCR، میزان بیان ژن‌های تشکیل‌دهنده‌ی بیوفیلم سویه‌های باکتریایی تلقیح‌شده با نانواکسیدروی، نشان داد که نانوذره نانواکسیدروی می‌تواند به‌طور قابل توجهی میزان سطح بیان ژن‌های دخیل در تشکیل بیوفیلم شامل ژن‌های *retS*، *LasR*، *rhlI* و *gacA* را کاهش دهند

با توجه به نمودار ۱ بیشترین میزان قطر هاله‌ی عدم رشد با افزودن نانوذره به آنتی‌بیوتیک‌ها، مربوط به هم‌افزایی با آنتی‌بیوتیک سیپروفلوکساسین بود. برای آنتی‌بیوتیک‌های جنتامایسین، آزترونام و تازوباکتام کمترین میزان قطر هاله‌ی به‌دست آمده مشاهده گردید.

• تأثیر نانوذره اکسیدروی بر بیان ژن‌های مربوط به تشکیل بیوفیلم

بیان ژن های *LasR*، *retS*، *rhII* و *gacA* در نمودار ۲ نشان داده شد و کاهش بیان ژنی در *gacA* و *retS*، *rhII*، *LasR* 15 (P= ۰/۰۰۰۲)، *gacA* و *retS*، *rhII*، *LasR* 17 (P= ۰/۰۰۰۱) و *gacA* 15 (P= ۰/۰۰۱) بود.

نانوذره اکسیدروی می تواند به طور قابل توجهی میزان سطح بیان *gacA*، *rhIR* و *rasI* را کاهش دهند، اگر چه کاهش *retS* بیشتر قابل توجه نبود و نانوذره اکسیدروی اثر مثبت قابل توجهی بر کاهش ژن *retS* نداشت. تغییرات



نمودار ۲: نمودار تأثیر نانوذره اکسیدروی بر بیان ژن های مورد مطالعه

طبق گفته‌ی سازمان غذا و دارو (FDA) به‌عنوان نانوذره‌ی ایمن شناخته شده است (۱۴). در این مطالعه، اثر مثبت نانوذره اکسیدروی بر تشکیل بیوفیلم سویه‌های سودوموناس آئروژینوزا در بیماران سیستمیک فیبروزیس بررسی گردید. مطالعات قبلی نشان داد که نانوذرات فلزی به‌ویژه، نانو اکسیدروی، می تواند به‌عنوان یک عامل ضدباکتری برای عفونت‌های بیمارستانی استفاده شود که در آن اکثر باکتری‌های گرم مثبت و گرم منفی به نانو اکسیدروی حساس بودند (۱۵). نتیجه‌ی مطالعه‌ی حاضر داده‌های جدیدی را در مورد اثر نانو اکسیدروی بر خواص تشکیل بیوفیلم سودوموناس آئروژینوزا در بیماران سیستمیک فیبروزیس ارائه می‌دهد. مطالعات قبلی عمدتاً بر روی وضعیت پلانکتونیک باکتری‌هایی مانند استافیلوکوکوس اورئوس و سودوموناس آئروژینوزا متمرکز بودند و اطلاعات کمتری در مورد رابطه‌ی بین نانو اکسیدروی و تشکیل بیوفیلم وجود داشت (۱۶ و ۱۷). یک مطالعه بر روی تشکیل بیوفیلم سودوموناس آئروژینوزا جدا شده از بیماران سوختگی نشان داد که بیش از ۵۰ درصد جدا شده‌ها به آنتی بیوتیک‌ها مقاوم بودند و اکثریت آن‌ها به آنتی بیوتیک‌های پپراسیلین - تازوباکتام حساس بودند. تنها ۲۵ درصد از سویه‌ها توانایی تشکیل بیوفیلم را داشتند که با الگوی حساسیت آنتی بیوتیکی ارتباطی نداشت (۱۸). ولدبیگی و همکاران توانایی تشکیل بیوفیلم سویه‌های جدا شده از عفونت‌های سوختگی و ریوی را در مطالعه‌ی خود نشان دادند (۱۹). در مطالعه‌ی حاضر، تمام جدا شده‌ها به آنتی بیوتیک‌های

همان‌گونه که در نمودار ۲ مشخص است، تمامی ژن‌ها در حضور نانوذره اکسیدروی دارای تفاوت‌های کاهشی در سطح بیانشان بودند و نشان داد که نانوذره اکسیدروی به میزان زیادی می تواند دارای اثر کاهشی معنادار بر بیان ژن شود.

بحث

سودوموناس آئروژینوزا یک باکتری فرصت طلب است و توانایی کلونیزه شدن در سطوح مختلف و انسان را دارد. سودوموناس آئروژینوزا به‌عنوان یک عفونت بیمارستانی با پیش‌آگهی ضعیف به‌ویژه در بیماران نقص ایمنی در نظر گرفته می‌شود (۱۱). مشخصه‌ی اصلی عفونت باکتریایی ناشی از سودوموناس آئروژینوزا خاصیت مقاومت آنتی بیوتیکی است که می تواند در شرایط محیطی مختلف در شرایط نامناسب با تشکیل بیوفیلم رشد کند (۱۲). علاوه بر این، سودوموناس آئروژینوزا پاتوژن مهم و اصلی در سیستم تنفسی بوده که منجر به عفونت ریه و افزایش میزان مرگ و میر در بیماران با نقص ایمنی می‌شود (۱۳). بنابراین استفاده از عوامل ضد میکروبی جدیدی که بتواند بر خاصیت مقاومت آنتی بیوتیکی باکتری غلبه کند و توانایی ریشه‌کن کردن عفونت را داشته باشد، یکی از موضوعات مهم و داغ در حیطه‌ی پزشکی محسوب می‌شود.

در حال حاضر نانو تکنولوژی به دلیل نقش بالقوه‌ی آن در درمان عفونت‌های انسانی مورد توجه قرار گرفته است. در میان نانوذرات کاربردی، نانو اکسیدروی

retS و *gacA* در حضور نانوذره اکسیدروی می باشد که می تواند به عنوان یک استراتژی امیدوارکننده برای درمان عفونت مزمن سودوموناس آئروژینوزا به ویژه در بیماران دچار نقص ایمنی مانند سیستمیک فیبروزیس معرفی شود.

نتیجه گیری

مطالعه‌ی حاضر با هدف بررسی اثر نانوذره اکسیدروی بر خواص تشکیل بیوفیلم سودوموناس آئروژینوزا در بیماران مبتلا به سیستمیک فیبروزیس انجام شد. نتیجه‌ی مطالعه نشان دهنده‌ی کارایی نانو اکسیدروی بر کاهش ژن‌های کروم سنسینگ از جمله *lasR* و *rhlR*، ژن‌های تشکیل دهنده‌ی بیوفیلم و فاکتورهای بیماری‌زایی باکتریایی است. تجویز نانوذره اکسیدروی در بیماران مبتلا به سیستمیک فیبروزیس که از عفونت ریه ناشی از سودوموناس آئروژینوزا رنج می‌برند، میزان مرگ‌ومیر را در بیماران سیستمیک فیبروزیس کاهش می‌دهد و می‌تواند به عنوان استراتژی‌های درمانی و پیشگیری استفاده شود.

تشکر و قدردانی

پژوهش حاضر بخشی از پایان نامه مقطع دکتری و عنوان «بررسی اثر نانو اکسیدروی بر روی بیوفیلم، بیان ژن‌های ویرولانس و با جایگزین و شونده تایپینگ مولکولی به روش MLVA ایزوله‌های سودوموناس آئروژینوزا مقاوم به چند دارو جدا شده از بیماران سیستمیک فیبروزیس در بیمارستان مرکز طبی کودکان تهران» و مصوب در کمیته اخلاق دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات با کد اخلاق IR.IAU.PS.REC.1401.272 می‌باشد. نویسندگان این مقاله از دکتر علی هاشمی از دانشکده پزشکی شهید بهشتی بابت در اختیار دادن برخی سوش‌های استاندارد و همچنین واحد توسعه تحقیقات بیمارستان مرکز طبی کودکان تهران بابت همکاری در اجرای این پروژه قدردانی و تشکر می‌نمایند.

منتخب از جمله پیراسیلین تازوباکتام مقاوم بودند و توانایی تشکیل بیوفیلم داشتند که نشان دهنده‌ی شدت عفونت در بیماران سیستمیک فیبروزیس نسبت به بیماران سوختگی است.

علاوه بر این، نتایج این مطالعه اثر نانوذره اکسیدروی بر بیان ژن‌های تشکیل دهنده‌ی بیوفیلم مانند ژن‌های کروم سنسینگ شامل *retS* و *rhlI*، *gacA*، را نشان داد. ژن‌ها در تغییر فاز متحرک باکتری‌ها به وضعیت تشکیل بیوفیلم نقش مهمی دارند. ژن‌های فوق در حضور نانوذره اکسیدروی دارای کاهش قابل قبول در بیان سطح ژنی بودند که میزان بیان ژن *gacA* و *lasR* در حضور نانوذره اکسیدروی حدود ۱۷ برابر و برای ژن *rhlI* حدود ۱۵ برابر و برای ژن *retS* ۵ برابر کاهش نشان داد ($P < 0.001$). صالح و همکاران نیز نتایج مشابهی را در مورد کاهش قابل توجه ژن‌های *pqsA*، *athIR*، *rhlI*، *lasR*، *jasI* و *pqsR* را در حضور نانوذره اکسیدروی گزارش کردند (۲۰). ژن *retS* یک حسگر ترکیبی است که در عفونت حاد بیان می‌شود و بیان ژن‌های مسئول تشکیل بیوفیلم و ژن‌های کروم سنسینگ را در عفونت مزمن سودوموناس آئروژینوزا افزایش می‌دهد (۲۱). علاوه بر این، ژن *gacA* یک پروتئین بسیار حفاظت شده برای تولید آگزونزیم‌ها و متابولیت‌های ثانویه در سودوموناس آئروژینوزا تولید می‌کند که به طور مثبت بیان ژن‌های *lasR* و *rhlR* را تنظیم می‌کند (۲۲). باید در نظر گرفته شود که غلظت‌های خاص نانوذرات روی دارای خواص ضدباکتریایی هستند، در نتیجه رشد باکتری‌ها و تشکیل بیوفیلم را مهار می‌کنند. از آن‌جا که سودوموناس آئروژینوزا یک باکتری موجود در همه جا است باید درک برهمکنش این باکتری که زمینه ساز اثر قرار گرفتن این باکتری در معرض نانوذرات فلزی با دوز کم در محیط است نیز توجه شود (۲۳). با بررسی‌های انجام شده، مشخص شد که هیچ مطالعه‌ای در رابطه با اثر نانو اکسیدروی بر بیان ژن *retS* و *gacA* وجود ندارد و این اولین گزارش در مورد کاهش تنظیم ۵ و ۱۵ برابری ژن‌های

References

1. Wu M & Li X. Chapter 87-*Klebsiella pneumoniae* and *Pseudomonas aeruginosa*, in book: Molecular medical microbiology. 2nd ed. Amsterdam: Elsevier; 2015: 1547-64.
2. Moradali MF, Ghods S & Rehm BHA. *Pseudomonas aeruginosa* lifestyle: A paradigm for adaptation, survival, and persistence. *Frontiers in Cellular and Infection Microbiology* 2017; 7(39): 1-29.
3. Weiner LM, Webb AK, Limbago B, Dudeck MA, Patel J, Kallen AJ, et al. Antimicrobial-Resistant pathogens associated with healthcare-associated infections: Summary of data reported to the national healthcare safety network at the centers for disease control and prevention, 2011-2014. *Infection Control and Hospital Epidemiology* 2016; 37(11): 1288-301.



4. Bhagirath AY, Li Y, Somayajula D, Dadashi M, Badr S & Duan K. Cystic fibrosis lung environment and *Pseudomonas aeruginosa* infection. BMC Pulmonary Medicine 2016; 16(174): 1-22.
5. Tuon FF, Dantas LR, Suss PH & Tasca-Ribeiro VS. Pathogenesis of the *Pseudomonas aeruginosa* biofilm: A review. Pathogens 2022; 11(300): 1-19.
6. Venturi V. Regulation of quorum sensing in *Pseudomonas*. FEMS Microbiology Reviews 2006; 30(2): 274-91.
7. Agha-Mohammadi A, Keivanfar M, Navaei S, Shirzadi R, Masiha F, Allameh Z, et al. First cystic fibrosis patient registry annual data report-cystic fibrosis foundation of Iran. Acta Medica Iranica 2019; 57(1): 33-41.
8. Reyne N, Mc-Carron A, Cmielewski P, Parsons D & Donnelley M. To bead or not to bead: A review of *Pseudomonas aeruginosa* lung infection models for cystic fibrosis. Frontiers in Physiology 2023; 2023(1104856): 1-13.
9. Rasha E, Al-Khulaifi MM, Al-Othman M, Khalid I, Doaa E, Alaa K, et al. Effects of zinc oxide nanoparticles synthesized using *Aspergillus niger* on Carbapenem-Resistant *Klebsiella pneumonia* in vitro and in vivo. Frontiers in Cellular and Tissue Microbiology 2021; 11(748739): 1-11.
10. The European Committee on Antimicrobial Susceptibility Testing. Clinical breakpoints and dosing of antibiotics. Available at: https://www.eucast.org/clinical_breakpoints. 2019.
11. Lewenza S, Falsafi RK, Winsor G, Gooderham WJ, Mc-Phee JB, Brinkman FSL, et al. Construction of a mini-Tn5-luxCDABE mutant library in *Pseudomonas aeruginosa* PAO1: A tool for identifying differentially regulated genes. Genome Research 2005; 15(4): 583-9.
12. Hoiby N, Bjarnsholt T, Givskov M, Molin S & Ciofu O. Antibiotic resistance of bacterial biofilms. International Journal of Antimicrobial Agents 2010; 35(4): 322-32.
13. Hassett DJ, Korfhagen TR, Irvin RT, Schurr MJ, Sauer K, Lau GW, et al. *Pseudomonas aeruginosa* biofilm infections in cystic fibrosis: Insights into pathogenic processes and treatment strategies. Expert Opinion on Therapeutic Targets 2010; 14(2): 117-30.
14. Espitia PJP, Soares NFF, Coimbra JSR, De-Andrade NJ, Cruz RS & Medeiros EAA. Zinc oxide nanoparticles: Synthesis, antimicrobial activity and food packaging applications. Food and Bioprocess Technology 2012; 5(1): 1447-64.
15. Premanathan M, Karthikeyan K, Jeyasubramanian K & Manivannan G. Selective toxicity of ZnO nanoparticles toward gram-positive bacteria and cancer cells by apoptosis through lipid peroxidation. Nanomedicine: Nanotechnology, Biology and Medicine 2011; 7(2): 92-184.
16. Banoee M, Seif S, Nazari ZE, Jafari-Fesharaki P, Shahverdi HR, Moballegh A, et al. ZnO nanoparticles enhanced antibacterial activity of ciprofloxacin against *Staphylococcus aureus* and *Escherichia coli*. Journal of Biomedical Materials Research Part B: Applied Biomaterials 2010; 93(2): 557-61.
17. Feris K, Otto C, Tinker J, Wingett D, Punnoose A, Thurber A, et al. Electrostatic interactions affect nanoparticle-mediated toxicity to gram-negative bacterium *Pseudomonas aeruginosa* PAO1. Langmuir Journal - ACS Publications 2010; 26(6): 4429-36.
18. Kunwar A, Shrestha P, Shrestha S, Thapa S, Shrestha S & Amatya NM. Detection of biofilm formation among *Pseudomonas aeruginosa* isolated from burn patients. Burns Open 2021; 5(3): 125-9.
19. Valadbeigi H, Sadeghifard N, Kaviar VH, Haddadi MH, Ghafourian S & Maleki A. Effect of ZnO nanoparticles on biofilm formation and gene expression of the toxin-antitoxin system in clinical isolates of *Pseudomonas aeruginosa*. Annals of Clinical Microbiology and Antimicrobials 2023; 22(89): 1-8.

20. Saleh MM, Sadeq RA, Latif HKA, Abbas HA & Askoura M. Zinc oxide nanoparticles inhibits quorum sensing and virulence in *Pseudomonas aeruginosa*. African Health Sciences 2019; 19(2): 2043-55.
21. Goodman AL, Kulasekara B, Rietsch A, Boyd D, Smith RS & Lory S. A signaling network reciprocally regulates genes associated with acute infection and chronic persistence in *Pseudomonas aeruginosa*. Developmental Cell 2004; 7(5): 745-54.
22. Chieda Y, Iiyama K, Yasunaga-Aoki C, Lee JM, Kusakabe T & Shimizu S. Pathogenicity of gacA mutant of *Pseudomonas aeruginosa* PA01 in the silkworm, Bombyx mori. FEMS Microbiology Letters 2005; 244(1): 181-6.
23. Al-Momani H, Aolymat I, Ibrahim L, Albalawi H, Al Balawi DA, Albiss BA, et al. Low-dose zinc oxide nanoparticles trigger the growth and biofilm formation of *Pseudomonas aeruginosa*: A hormetic response. BMC Microbiology 2024; 24(290): 1-17.

The Effect of Zinc Oxide Nanoparticles on the Expression of Genes Involved in the Production of *Pseudomonas Aeruginosa* Biofilm Isolated from Cystic Fibrosis Patients

Mona Konkuri¹ (M.S.), Yousef Erfani^{2*} (Ph.D.), Sharmin Kharrazi³ (Ph.D.),
Setareh Haghghat^{4*} (Ph.D.)

1 PhD. Candidate in Microbiology, TeMS.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran

2 Associate Professor, Department of Laboratory Sciences, School of Allied Medical Sciences, Tehran University of Medical Sciences, Tehran, Iran

3 Associate Professor, Department of Medical Nanotechnology, School of Advanced Technologies in Medicine, Tehran University of Medical Sciences, Tehran, Iran

4 Associate Professor, Department of Microbiology, TeMS.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran

Abstract

Received: 21 Oct. 2024

Accepted: 29 Dec. 2024

Background and Aim: *Pseudomonas aeruginosa* is a Gram-negative opportunistic pathogen that is often found in patients with cystic fibrosis, burn wounds, immunodeficiency, and chronic obstructive pulmonary disorder. In addition, *P. aeruginosa* is also considered one of the most important pathogens causing hospital infections, widely found in medical devices (ventilation), because they tend to grow on moist surfaces. Considering the importance of cystic fibrosis treatment and the ability of *P. aeruginosa* to form biofilms, this study examines the effect of nano zinc oxide particle on the expression of genes associated in biofilm formation in isolated *P. aeruginosa* from cystic fibrosis patients.

Materials and Methods: Sputum and throat samples from 150 patients with cystic fibrosis were cultured on MacConkey agar culture medium. After an overnight incubation, the grown colonies were determined and confirmed by biochemical tests. An antibiotic sensitivity test by disk diffusion method (Kirby–bauer) were used to determine the antibiotic susceptibility pattern. Zinc nanoparticles were synthesized following established protocols and evaluated using scanning electron microscopy (SEM). The multi-antibiotic-resistant strains were inoculated with 16 µg/ml of 2 nm ZnO nanoparticles and inhibition zone were measured. The impact of these nanoparticles on the expression levels of *gacA*, *retS*, *lasR*, and *rhIR* genes was assessed using Real-Time PCR. The relative gene expression level was determined using the gene expression method: ($\Delta\Delta C_t-2$).

Results: Of the total 150 samples, 73 (48.66%) isolates were identified as *P. aeruginosa*. All *P. aeruginosa* isolates were resistant to selected antibiotics. SEM evaluation indicated that the synthesized nanoparticles had an average size of approximately 4 ± 0.44 nm. The results from the Real-Time PCR tests showed a decrease in the expression of the *gacA*, *retS*, *lasR*, and *rhIR* genes in the presence of the zinc nanoparticles in *P. aeruginosa* strains. The most significant reduction in gene expression was observed for the *rhIR* gene, whereas the least reduction was noted for the *retS* gene.

Conclusion: The use of nano zinc oxide can eliminate *Pseudomonas aeruginosa* infection by preventing biofilm formation and providing better treatment results for cystic fibrosis patients with lung infection.

Keywords: *Pseudomonas Aeruginosa*, Biofilm, Zinc Oxide, Nanoparticles, Real-Time PCR, Gene Expression

* Corresponding Authors:

Erfani Y
Haghghat S

Emails:
y Erfani@tums.ac.ir
haghghat.s@iau.ac.ir