

Antibacterial and Antibiofilm Activities of Imipenem-Loaded Niosomes Against Imipenem-Resistant *Acinetobacter baumannii*

Najmeh Mehrabi Khozani¹

Nafiseh Sadat Naghavi²

Laleh Hoveida³

¹ MSc Student, Department of Microbiology, Fal.C., Islamic Azad University, Isfahan, Iran

² Associate Professor, Department of Microbiology, Fal.C., Islamic Azad University, Isfahan, Iran

³ Assistant Professor, Department of Microbiology, Fal.C., Islamic Azad University, Isfahan, Iran

(Received February 14, 2026; Accepted July 29, 2026)

Abstract

Background and purpose: Niosomes are nonionic surfactant-based vesicular structures that have been investigated for drug delivery due to their biodegradable and non-immunogenic properties. The aim of the present study was to evaluate the antimicrobial and antibiofilm effects of imipenem-loaded niosomes against *Acinetobacter baumannii* isolates obtained from different hospital wards.

Materials and methods: In this experimental study, 15 *Acinetobacter baumannii* isolates were collected from different wards of Al-Zahra Hospital in Isfahan. The isolates were identified using biochemical tests. Imipenem resistance and biofilm-forming ability were determined. The physicochemical properties of the imipenem-loaded niosomes, including particle size, zeta potential, entrapment efficiency, and drug release profile, were also evaluated. Antimicrobial activity against imipenem-resistant bacteria was determined using the microdilution method.

Results: Of the 15 *Acinetobacter baumannii* isolates, 9 were resistant to imipenem. Most isolates formed weak or moderate biofilms. The imipenem-loaded niosomes had a mean particle size of 211.1 nm and a zeta potential of -34.3 mV. Drug release experiments showed that the niosomes provided controlled release and reduced the rapid release of imipenem. The minimum inhibitory concentration (MIC) and minimum bactericidal concentration (MBC) values of the imipenem-loaded niosomes against imipenem-resistant isolates were 2- to 8-fold and 2- to 4-fold lower, respectively, than those of free imipenem. In addition, imipenem-loaded niosomes showed a greater inhibitory effect on biofilm formation than free imipenem, with an improvement of up to threefold.

Conclusion: Imipenem-loaded niosomes may represent a promising approach for addressing imipenem-resistant *Acinetobacter baumannii* and inhibiting biofilm formation. However, further studies, including clinical validation, are required to determine their therapeutic potential and whether they can reduce the burden of nosocomial infections caused by *Acinetobacter baumannii*.

Keywords: *Acinetobacter baumannii*, antibiotic resistance, imipenem, biofilm, niosomes

J Mazandaran Univ Med Sci 2026; 36 (259): 17-29 (Persian).

Corresponding Author: Nafiseh Sadat Naghavi - Department of Microbiology, Fal.C., Islamic Azad University, Isfahan, Iran (E-mail: n.naghavi@iau.ac.ir, nafiseh_naghavi@yahoo.com)

بررسی فعالیت ضد باکتریایی و ضد بیوفیلمی نیوزوم‌های حامل ایمنی پنم بر روی *اسیتوباکتر بومانی* مقاوم به ایمنی پنم

نجمه مهرابی خوزانی^۱

نفیسه سادات نقوی^۲

لاله هویدا^۳

چکیده

سابقه و هدف: نیوزوم‌ها ساختارهای لایه‌ای بر پایه سورفکتانت‌های غیر یونی هستند که به دلیل زیست تخریب پذیر و غیر ایمنی‌زا بودن، برای حمل دارو مورد توجه قرار گرفته‌اند. مطالعه حاضر با هدف ارزیابی تأثیر ضد میکروبی و ضد بیوفیلمی نیوزوم‌های حامل ایمنی پنم بر جدایه‌های *اسیتوباکتر بومانی* به دست آمده از بخش‌های مختلف بیمارستانی، انجام پذیرفت.

مواد و روش‌ها: در این مطالعه آزمایشگاهی، ۱۵ جدایه *اسیتوباکتر بومانی* از بخش‌های مختلف بیمارستان الزهراء در اصفهان جمع‌آوری شد. جدایه‌ها با استفاده از تست‌های بیوشیمیایی شناسایی شدند. مقاومت به ایمنی پنم و توانایی تشکیل بیوفیلم جدایه‌ها تعیین شد. همچنین، ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی نیوزوم‌های حامل ایمنی پنم شامل اندازه، بار سطحی، کارایی محصورسازی و پروفایل آزادسازی دارو مورد ارزیابی قرار گرفت. اثر ضد میکروبی بر باکتری‌های مقاوم به ایمنی پنم، با روش میکرودايلوشن تعیین شد.

یافته‌ها: در این مطالعه، ۹ جدایه از ۱۵ جدایه *اسیتوباکتر بومانی* به ایمنی پنم مقاوم بودند. بیش‌تر جدایه‌ها بیوفیلم‌های ضعیف یا متوسط تشکیل دادند. نیوزوم‌های حامل ایمنی پنم شامل اندازه ۲۱۱/۱ نانومتر و پتانسیل زتای ۳۴/۳- میلی‌ولت بودند. نتایج آزمایش‌های آزادسازی دارو نشان داد که نیوزوم‌ها قادر به کنترل آزادسازی دارو و جلوگیری از آزادسازی سریع ایمنی پنم هستند. مقادیر حداقل غلظت بازدارندگی رشد (MIC) و حداقل غلظت باکتری کشی (MBC) نیوزوم‌های حامل ایمنی پنم در برابر جدایه‌های مقاوم به ایمنی پنم به ترتیب ۲ تا ۸ برابر و ۲ تا ۴ برابر کم‌تر از ایمنی پنم آزاد بودند. همچنین، نیوزوم‌های حامل ایمنی پنم اغلب اثر مهار کننده بهتری (تا ۳ برابر) بر روی تشکیل بیوفیلم نسبت به ایمنی پنم آزاد داشتند.

استنتاج: استفاده از نیوزوم‌های حامل ایمنی پنم تهیه شده در مطالعه حاضر می‌تواند به عنوان یک روش نوین و مؤثر در مقابله با جدایه‌های *اسیتوباکتر بومانی* مقاوم به ایمنی پنم و مهار تشکیل بیوفیلم توسط آن‌ها مطرح شود. این فرمولاسیون جدید پس از طی کردن مراحل تأییدی بالینی، می‌تواند به طور بالقوه به کاهش عوارض عفونت‌های بیمارستانی ناشی از *اسیتوباکتر بومانی* کمک کند.

واژه های کلیدی: *اسیتوباکتر بومانی*، مقاومت آنتی‌بیوتیکی، ایمنی پنم، بیوفیلم، نیوزوم

مؤلف مسئول: نفیسه سادات نقوی - فلاورجان: گروه میکروبیولوژی، واحد فلاورجان، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران Email: nafiseh_naghavy@yahoo.com n.naghavi@iau.ac.ir

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه میکروبیولوژی، واحد فلاورجان، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران

۲. دانشیار، گروه میکروبیولوژی، واحد فلاورجان، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران

۳. استادیار، گروه میکروبیولوژی، واحد فلاورجان، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۱/۲۵ تاریخ ارجاع جهت اصلاحات: ۱۴۰۴/۱۲/۶ تاریخ تصویب: ۱۴۰۵/۵/۷

مقدمه

اسیتوباکتر بومانی باکتری مرتبط با عفونت‌های هشدار دهنده مقاوم به چند داروی اکتسابی بیمارستانی با نرخ مرگ و میر در محدوده ۲۰ تا ۵۰ درصد می‌باشد. بر اساس داده‌های نظارتی ۲۰۲۱ تا ۲۰۲۳، گزارش شده است که تنها ۲۵/۵ درصد از جدایه‌های اسیتوباکتر بومانی به آنتی‌بیوتیک‌های موجود حساس بوده‌اند، در حالی که ۲/۹ درصد به یک کلاس ضد میکروبی، ۴/۹ درصد به دو کلاس و ۶۶/۶ درصد به حداقل سه کلاس ضد میکروبی یا بیش‌تر مقاومت نشان داده‌اند (۱). این باکتری توانایی تشکیل بیوفilm بر روی سطوح زنده (بافت مخاطی میزبان) و سطوح غیر زنده (مانند کاتترها) را دارد که نقش مهمی در ایجاد عفونت‌های بیمارستانی ایفا می‌کند (۲). عفونت اسیتوباکتر بومانی اغلب با مقاومت چند دارویی همراه است و اخیراً به اغلب آنتی‌بیوتیک‌ها از جمله کارباپنم و کولیستین مقاومت نشان می‌دهد (۳). ماتریکس بیوفilm، که باکتری‌ها را احاطه کرده است، آن‌ها را قادر می‌سازد تا شرایط سخت را تحمل کنند و در مقابل درمان‌های آنتی‌بیوتیکی مقاومت کنند. در نتیجه، درمان‌های فعلی برای عفونت‌های ناشی از اسیتوباکتر بومانی بیوفilm‌ساز اغلب ناموفق هستند (۴). بنابراین، نیاز فوری به داروها و یا درمان‌های جایگزین برای جلوگیری از ایجاد بیوفilm و غیر فعال کردن چسبندگی این باکتری به سطوح زنده یا غیر زنده وجود دارد. این درمان‌های نوآورانه شامل مهارکننده‌های سنجش حد نصاب، محصولات طبیعی/روغن‌های ضروری، پپتیدهای ضد میکروبی، مهارکننده‌های افلاکس پمپ، نانوذرات و درمان فتودینامیک استراتژی‌های بالقوه‌ای برای مقابله با مقاومت آنتی‌بیوتیکی ارائه می‌دهند (۵).

نیوزوم‌ها ساختارهایی کروی و میکروسکوپی با یک یا چند لایه هستند که توسط سورفکتانت‌های غیر یونی، با یا بدون کلسترول و یک القاکننده بار تشکیل می‌شوند. استفاده از کلسترول در این ساختارها باعث

استحکام بیش‌تر دو لایه می‌شود و القاکننده‌های بار با اضافه کردن بار الکتریکی به وزیکول‌ها، اندازه آن‌ها را افزایش داده و بازدهی به دام انداختن دارو را افزایش می‌دهند (۶). نیوزوم‌ها با جهت‌گیری خاص سورفکتانت‌ها، یک ساختار دو لایه تشکیل می‌دهند که املاح را در محلول آبی محصور می‌کند و این امر باعث می‌شود این ذرات دارای سطوح داخلی و خارجی آبدوست با یک ناحیه لیوفیل بین آن‌ها باشند (۷). برای تهیه نیوزوم‌ها از چندین روش مختلف استفاده می‌شود که شامل تزریق اتر، تکان دادن دستی، فراصوت و میکروسایال‌سازی است. در این فرآیندها، سورفکتانت و کلسترول در دماهای بالا هیدراته شده و به یک سوسپانسیون کلئیدی تبدیل می‌شوند. در نهایت، داروی به دام افتاده از طریق روش‌هایی مانند ساتریفیوژ یا دیالیز از ترکیب جدا می‌شود. از سوی دیگر، روش‌هایی مانند تبخیر فاز معکوس، روش حباب و تزریق لیپید نیز برای تولید نیوزوم‌ها استفاده می‌شوند (۸). نیوزوم‌ها زیست تخریب پذیر، زیست سازگار و غیر ایمنی‌زا هستند و می‌توانند به عنوان یک سیستم دارو رسانی مؤثر عمل کنند. این ساختارها داروها را به صورت کنترل شده آزاد کرده و بازدهی درمانی را افزایش می‌دهند (۹). نیوزوم‌ها به دلیل انعطاف پذیری در حمل داروهای محلول در آب، چربی دوست و آمفی‌فیل بودن، در درمان‌های مختلف دارویی کاربرد دارند. این ذرات نسبت به لیپوزوم‌ها ماندگاری بیش‌تری دارند و ارزان‌تر هستند. علاوه بر این، اثربخشی دارو رسانی با استفاده از نیوزوم‌ها به دلیل افزایش پایداری و هدف‌گیری دارو بهبود می‌یابد (۸).

نیوزوم‌ها حامل‌های دارویی هستند که می‌توانند انتخابی ایده‌آل باشند زیرا زیست سازگار، بی‌اثر و قادر به حمل دوز زیادی از یک یا چند دارو هستند. با این حال، اطلاعات کمی در مورد فعالیت نیوزوم‌ها به عنوان حامل دارو علیه اسیتوباکتر بومانی و اثر مهار آن‌ها بر تشکیل بیوفilm وجود دارد. بنابراین، هدف از این

مطالعه، ساخت نیوزوم‌های حاوی ایمنی پنم و تعیین خصوصیات فیزیکوشیمیایی آنها و در نهایت، بررسی اثرات ضد میکروبی و ضد بیوفیلمی نیوزوم‌های حاوی ایمنی پنم بر روی جدایه‌های میکروبی/سیتوباکتر بومانی مقاوم به ایمنی پنم در مقایسه با داروی آزاد بود.

مواد و روش‌ها

این مطالعه آزمایشگاهی، بر روی بیماران بستری در بخش‌های مختلف (CCU، ICU، جراحی و نفرولوژی) بیمارستان الزهراء اصفهان انجام شد. طی یک دوره چهار ماهه، ۱۵ نمونه کشت بالینی که تأیید فنوتیپی آنها به عنوان/سیتوباکتر بومانی انجام شد، جمع‌آوری گردید (۱۰). نمونه‌گیری با مجوز اخلاق از کمیته اخلاق دانشگاه آزاد اسلامی واحد فلاورجان با کد IR.IAU.FALA.REC.1404.065 انجام شد.

تعیین الگوی مقاومت به ایمنی پنم با روش دیسک دیفیوژن

حساسیت آنتی‌بیوتیکی با استفاده از روش دیسک دیفیوژن طبق دستورالعمل CLSI ۲۰۲۳ انجام شد. سوسپانسیون باکتریایی با غلظت مطابق نیم مک‌فارلند (1.5×10^8) تهیه و با سوآپ استریل به صورت چمنی روی مولر هینتون آگار کشت داده شد. دیسک‌های آنتی‌بیوتیکی با فواصل مناسب روی محیط قرار گرفتند و پس از انکوباسیون ۱۸ تا ۲۴ ساعته در دمای ۳۷ درجه سانتی‌گراد قطر هاله عدم رشد با خط کش اندازه‌گیری شد. نتایج با جدول استاندارد مقایسه شده و حساسیت باکتری‌ها به صورت حساس، نیمه حساس یا مقاوم گزارش شد.

بررسی توانایی تولید بیوفیلم

برای ارزیابی تشکیل بیوفیلم توسط ایزوله‌ها، از روش میکروتیتربلیت استفاده شد. ابتدا کلنی‌های باکتری روی محیط تریپتیکاز سوی آگار حاوی ۱ درصد گلوکز

کشت داده شد و به مدت ۲۰ ساعت در دمای ۳۷ درجه سانتی‌گراد انکوبه شدند. سپس، کلنی‌ها به محیط تریپتیکاز سوی براث حاوی ۱ درصد گلوکز منتقل شدند تا سوسپانسیونی با غلظت برابر با نیم مک‌فارلند تهیه شود. سپس، ۲۰۰ میکرولیتر از این سوسپانسیون به چاهک‌های پلیت میکروتیتربلیت منتقل و به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۳۷ درجه سانتی‌گراد انکوبه گردید. پس از انکوباسیون، چاهک‌ها با PBS شسته و با متانول ۹۹ درصد فیکس شدند. پس از خشک شدن، چاهک‌ها با کریستال ویوله ۲ درصد رنگ‌آمیزی شده و با آب مقطر شستشو داده شدند. در مرحله بعد، رنگ متصل به بیوفیلم‌ها با استیک اسید ۳۳ درصد استخراج شد و میزان جذب نوری در طول موج ۵۷۰ نانومتر اندازه‌گیری شد. این آزمون برای هر نمونه سه بار تکرار شد. چاهک‌های حاوی محیط کشت بدون باکتری به عنوان کنترل منفی و چاهک‌های حاوی محیط کشت و جدایه استاندارد به عنوان کنترل مثبت در نظر گرفته شدند (۱۱). درجه بیوفیلم تشکیل شده در جدول شماره ۱، گزارش شده است.

جدول شماره ۱: نحوه تفسیر نتایج تشکیل بیوفیلم

مقدار OD	تفسیر
$OD_i \leq OD_c$	عدم تشکیل بیوفیلم
$OD_c \leq OD_i \leq 2OD_c$	بیوفیلم ضعیف
$2OD_c \leq OD_i \leq 4OD_c$	بیوفیلم متوسط
$4OD_c \leq OD_i$	بیوفیلم قوی

OD_i: میانگین جذب نوری سه چاهک مربوط به هر جدایه، OD_c: میانگین جذب نوری سه چاهک مربوط به کنترل مثبت

تهیه نیوزوم‌های حاوی ایمنی پنم

سورفکتانت‌های غیر یونی مورد استفاده در تهیه نیوزوم‌ها شامل Tween 60 و Span 60 بودند که همراه با کلسترول به عنوان عامل تثبیت کننده استفاده شدند. نسبت مولی سورفکتانت‌ها به کلسترول ۲:۲:۱ انتخاب شد که بر اساس مطالعات پیشین برای بهینه‌سازی پایداری و زیکول‌ها و کارایی محصورسازی دارو مناسب بود. مقدار معینی از Tween 60، Span 60 و

کلسترویل در ۲۰ میلی لیتر مخلوطی از کلروفرم-متانول (۲:۱) حل شد تا یک محلول یکنواخت از لیپیدها تهیه شود. این محلول به مدت ۴۵ دقیقه با سرعت ۱۵۰ دور در دقیقه و دمای ۲۵ درجه سانتی گراد تحت هم‌زدن مغناطیسی قرار گرفت تا از حل شدن کامل اجزای لیپیدی و یکنواختی محلول اطمینان حاصل شود. پس از تهیه محلول لیپیدی، حلال آلی (مخلوط کلروفرم-متانول) با استفاده از دستگاه تبخیر تحت فشار (WB Heidolph Instruments, Eco Laborota 4000) در دمای ۶۰ درجه سانتی گراد و به مدت ۴۵ دقیقه از محلول تبخیر شد. این فرآیند با سرعت ۱۲۰ دور در دقیقه انجام شد تا یک فیلم نازک لیپیدی روی دیواره‌های فلاسک چرخشی تشکیل شود. این فیلم نازک پایه‌ای برای خود-مونتاژ نیوزوم‌ها خواهد بود. پس از تبخیر حلال آلی، با استفاده از گاز نیتروژن، حلال‌های باقی مانده از فلاسک خارج شدند. سپس فیلم لیپیدی به مدت ۴۵ دقیقه در ۲۰ میلی لیتر محلول PBS (پتاسیم فسفات با pH ~7.4 و غلظت ۱۰۰ میلی مولار) حاوی ایمو پنم هیدراته شد. فرایند هیدراسیون باعث می‌شود فیلم لیپیدی مجدداً هیدراته شده و به نیوزوم‌های حاوی ایمو پنم خود-مونتاژ شود. این مرحله در دمای اتاق انجام شد تا از تخریب دارو جلوگیری شود. پس از هیدراسیون، سوسپانسیون نیوزومال به مدت ۱۰ دقیقه تحت سونیکیشن با استفاده از دستگاه پروب سونیکاتور (Hielscher UP50H) قرار گرفت. این مرحله برای کاهش اندازه ذرات نیوزوم‌ها و بهبود یکنواختی آن‌ها انجام شد. سونیکیشن همچنین به از بین بردن هرگونه تجمع بزرگ یا وزیکول‌های چند لایه که ممکن است در طول فرایند هیدراسیون تشکیل شده باشند، کمک می‌کند. سوسپانسیون نهایی برای بررسی کدری و هرگونه نشانه‌ای از فلوکولاسیون مورد بازبینی بصری قرار گرفت، چرا که این موضوع نشان دهنده تشکیل موفق نیوزوم‌ها است. اگر فلوکولاسیون مشاهده می‌شد، بهینه‌سازی بیش‌تر فرمولاسیون ضروری بود. سپس

سوسپانسیون نیوزومال در دمای ۴ درجه سانتی گراد برای آزمایشات بعدی ذخیره شد. نیوزوم‌های خالی (بدون ایمو پنم) با استفاده از همان روش ذکر شده بالا تهیه شدند تا به عنوان گروه‌های شاهد استفاده شوند. نسبت مولی لیپید به ایمو پنم در این مطالعه ۲۰:۱ بهینه‌سازی شد تا محصورسازی دارو به‌طور مؤثری انجام شود و از اضافه شدن مقدار اضافی لیپید که می‌تواند بر پایداری و ویژگی‌های آزادسازی دارو تأثیر بگذارد، جلوگیری شود. این نسبت به گونه‌ای انتخاب شد که کارایی بالای محصورسازی دارو را بدون ایجاد مشکلات در خواص فیزیکی نیوزوم‌ها به دست آورد (۱۲، ۱۳).

تعیین ویژگی‌های وزیکول‌ها

در این مطالعه، ویژگی‌های فیزیکی شیمیایی و عملکرد نیوزوم‌های تهیه شده، از جمله مورفولوژی، اندازه هیدرودینامیک، بار سطحی، کارایی محصورسازی، آزادسازی دارو و پایداری به‌طور کامل بررسی شد. برای ارزیابی مورفولوژی و ویژگی‌های سطحی نیوزوم‌ها، از میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی (Field emission-scanning electron microscopy, FE-SEM) استفاده شد. یک قطره از سوسپانسیون نیوزوم (با نسبت رقیق‌سازی ۱:۱۰۰ با آب دیونیزه) روی پایه نمونه قرار داده شد. سپس، نمونه با لایه‌ای از طلا به ضخامت ۲۰۰ نانومتر پوشش داده شد. تصاویر با استفاده از میکروسکوپ FE-SEM (Carl Zeiss) تهیه شدند و با نرم‌افزار ImageJ برای اندازه‌گیری اندازه، شکل و یکنواختی سطح ذرات تجزیه و تحلیل گردیدند (۱۴). همچنین، فرمولاسیون نیوزوم با استفاده از پراش نور دینامیکی (Dynamic light scattering, DLS) در دستگاه Zetasizer Nano (Malvern Instruments، انگلستان) تعیین شد. اندازه‌گیری در دمای ۲۵ درجه سانتی گراد و با غلظت ۰/۱ میلی گرم در میلی لیتر در PBS (pH حدود ۷/۴) در ۳ تکرار انجام شد و بار سطحی و شاخص چند توزیعی

(Polydispersity index, PDI) بر اساس الگوهای پراکندگی نور از سوسپانسیون نیوزوم محاسبه شد (۱۵).

کارایی محصورسازی (Encapsulation efficiency, EE%)

کارایی محصورسازی (EE%) ایمنی پنم در فرمولاسیون نیوزوم با استفاده از آزمایش اولتراسانتریفیوژ تعیین شد. ابتدا ۲ میلی لیتر از سوسپانسیون نیوزوم در دستگاه اولتراسانتریفیوژ به مدت ۲۵ دقیقه در سرعت ۷۵۰۰ g دمای ۲۵ درجه سانتی گراد سانتریفیوژ شد. سپس جذب نوری (OD) مایع فوقانی در طول موج ۲۸۱ نانومتر با استفاده از اسپکتروفتومتر (UV Jasco V-530) اندازه گیری شد. مقدار ایمنی پنم آزاد در مایع فوقانی از معادله منحنی استاندارد تخمین زده شد. سپس، EE% با استفاده از فرمول $EE\% = [(A-B)/A] \times 100$ محاسبه شد که در آن A مقدار کل ایمنی پنم (دارو بارگذاری شده) در سوسپانسیون نیوزوم و B مقدار ایمنی پنم آزاد در مایع فوقانی است (۱۶).

سینتیک آزادسازی در محیط آزمایشگاهی

برای بررسی سینتیک آزادسازی دارو از فرمولاسیون نیوزوم/ایمنی پنم، از روش دیالیز دینامیک استفاده شد. ابتدا ایمنی پنم آزاد با استفاده از اولتراسانتریفیوژ در سرعت ۱۰۰۰/۱۰۰ g به مدت ۴۵ دقیقه در دمای ۴ درجه سانتی گراد از نیوزوم جدا شد. سپس، سوسپانسیون نیوزوم حاوی ۱ میلی لیتر از فرمولاسیون در کیسه دیالیز قرار گرفت و در ۳۰ میلی لیتر محیط گیرنده (PBS) با غلظت ۵ میلی مولار و pH حدود ۷/۴ در دمای ۳۷ درجه سانتی گراد و سرعت ۱۵۰ دور در دقیقه به مدت ۴۸ ساعت به طور مغناطیسی هم زده شد. سپس در فواصل زمانی ۱، ۲، ۴، ۸، ۲۴ و ۴۸ ساعت، ۱ میلی لیتر از مایع گیرنده برداشته شد و مقدار ایمنی پنم آزاد شده با استفاده از معادله منحنی استاندارد اندازه گیری شد. سپس معادل حجم PBS تازه به جای نمونه های برداشته شده، اضافه گردید. داده های

آزادسازی برای تحلیل سینتیک آزادسازی با استفاده از مدل های ریاضی مختلف شامل توزیع ویبول، تابع تانژانت های ابر هذلولی، معادله کورس-مایر-پیاس و چند جمله ای های مرتبه صفر تا پنجم بررسی و تحلیل شد (۱۷).

ارزیابی فعالیت ضد باکتریایی نیوزوم های سنتز شده

برای ارزیابی فعالیت ضد باکتریایی نیوزوم های سنتز شده، از پروتکل استاندارد میکرودايلوشن در محیط مغذی طبق دستورالعمل CLSI ۲۰۲۳ استفاده شد. این پروتکل برای تعیین غلظت های حداقل مهارکنندگی (MIC) و حداقل باکتری کشی (MBC) به ترتیب در محیط های کشت مولر-هیتون براث (MHB) و کشت مولر-هیتون آگار (MHA) مورد استفاده قرار گرفت. برای این منظور، سوسپانسیون جدایه های *اسیتوباکتر بومانی* با استفاده از استاندارد ۰/۵ مک فارلند تهیه شد که معادل $10^8 \times 1/5$ واحد تشکیل کلنی در میلی لیتر باکتری است. سپس، ۱۰ میکرولیتر از هر سوسپانسیون به نیوزوم ها در غلظت های مختلف (۲ تا ۵۱۲ میکروگرم در میلی لیتر) در محیط کشت MHB در چاهک های پلیت میکروتیتر ۹۶ خانه استریل اضافه شد و پلیت به مدت ۱۸ ساعت در دمای ۳۷ درجه سانتی گراد انکوبه شد. پس از انکوباسیون، جذب نوری (OD) با استفاده از دستگاه خوانش میکروپلیت ELISA در طول موج ۶۲۰ نانومتر اندازه گیری شد. حداقل غلظت نیوزوم که در آن رشد باکتری ها مشاهده نشد (بدون کدورت قابل اندازه گیری) به عنوان MIC ثبت شد. برای تعیین MBC، ۱۰ میکرولیتر از محتویات هر چاهک که رشد باکتری ها در آن مشاهده نشد، در سطح محیط کشت MHA کشت داده شد و پلیت ها به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۳۷ درجه سانتی گراد انکوبه شدند. حداقل غلظتی که در آن پس از انکوباسیون هیچ گونه رشدی بر روی محیط آگار مشاهده نشد، به عنوان MBC گزارش شد. تمامی آزمایش ها در سه تکرار مستقل انجام شدند. از

اسیتوباکتر بومانی بدون هیچ تیماری به عنوان کنترل مثبت استفاده شد و برای کنترل منفی، محیط‌های کشت بدون باکتری در نظر گرفته شد (۱۸).

فعالیت ضد بیوفیلم نیوزوم‌های سنتز شده

برای ارزیابی اثر مهارکنندگی بیوفیلم نیوزوم‌های حاوی ایمی پنم، ابتدا ۲۰۰ میکرولیتر از سوسپانسیون‌های باکتریایی انتخاب شده با شمارش 10^6 واحد تشکیل کلنی در میلی لیتر که با محیط TSB رقیق شده بودند، به چاهک‌های یک پلیت ۹۶ چاهکی استریل اضافه شد. سپس، رقیق‌سازی‌های مختلف نیوزوم‌های حاوی ایمی پنم به هر چاهک افزوده شد تا غلظت نهایی مورد نظر نیوزوم نیز به دست آید و پلیت به مدت یک شبانه روز در دمای ۳۷ درجه سانتی گراد انکوبه شد. پس از انکوباسیون، چاهک‌ها شسته شده و بیوفیلم‌های تشکیل شده با متانول مطلق ثابت شدند. در مرحله بعد، بیوفیلم‌ها با کریستال ویولت رنگ آمیزی شدند. در نهایت، OD چاهک‌ها با استفاده از دستگاه خوانش میکروپلیت ELISA در طول موج ۵۷۰ نانومتر اندازه گیری شد (۱۱).

تجزیه و تحلیل داده‌ها

برای مقایسه پارامترهای مورد بررسی، از آزمون تی (t-test) و کای اسکوئر (Chi-squared) استفاده شد. در این تحلیل، سطح معنی داری کم‌تر از ۰/۰۵ در نظر گرفته شد، به این معنا که اگر مقدار p کم‌تر از ۰/۰۵ بود، تفاوت مشاهده شده بین گروه‌ها از نظر آماری معنی دار تلقی می‌شد. تمامی نمودارهای مرتبط با داده‌ها، با استفاده از نرم‌افزار GraphPad Prism نسخه ۰/۹ ترسیم شدند.

یافته‌ها

مشخصات جدایه‌های مورد مطالعه

جدایه‌هایی با ویژگی‌های فنوتیپی کوکوباسیل گرم منفی مورد شناسایی قرار گرفتند. نتایج آزمون‌های

بیوشیمیایی که بر اساس آن‌ها ۱۵ جدایه/اسیتوباکتر بومانی شناسایی شدند، در جدول شماره ۲ مشاهده می‌شود. از میان ۱۵ جدایه/اسیتوباکتر بومانی، ۹ جدایه نسبت به آنتی‌بیوتیک ایمی پنم مقاوم بودند. از میان جدایه‌های مقاوم به ایمی پنم، یک جدایه بیوفیلم تشکیل نداد؛ ۳ جدایه بیوفیلم ضعیف و ۳ جدایه بیوفیلم متوسط تشکیل دادند و تنها ۲ جدایه بیوفیلم قوی ایجاد کردند. از ۱۵ نمونه، ۹ نمونه از مردان و ۶ نمونه از زنان جداسازی شد. اطلاعات دموگرافیک نمونه‌ها در جدول شماره ۳ مشاهده می‌شود.

مورفولوژی و اندازه نیوزوم حامل ایمی پنم

نیوزوم حامل ایمی پنم به شکل کروی در مشاهده با FE-SEM ظاهر شد (تصویر شماره ۱). اندازه متوسط هیدرودینامیک نانوزوم ایمی پنم ۲۱۱/۱ نانومتر بود که با استفاده از روش DLS اندازه گیری شد (تصویر شماره ۲). مقدار PDI نانوزوم ایمی پنم برابر با ۰/۳۱۱ بود که نشان دهنده پراکندگی همگن نسبی نانوذرات است. پتانسیل سطحی نیوزوم حامل ایمی پنم ۳۴/۳- میلی ولت بود که نشان دهنده پایداری خوب پخش نیوزوم است.



تصویر شماره ۱: مورفولوژی کروی نیوزوم حامل ایمی پنم بر اساس میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی (FE-SEM)

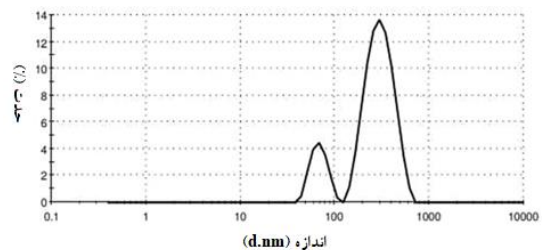
جدول شماره ۲: نتایج آزمون‌های بیوشیمیایی برای شناسایی جدایه‌های *اسیتوباکتر بومانی*

آزمون	اکیداز	کاتالاز	TSI	اکیداسین/تخمیر	حرکت	لوره‌آز	اندول	MR	VP	مصرف سیرت	هیدرولیز زلاتین	مصرف گلوکز	مصرف فروکوز	احیای نیترات
نتیجه	-	+	K/KH ₂ S-	اکیداتیو	-	-	-	-	-	+	=	-	=	-

جدول شماره ۳: اطلاعات دموگرافیک نمونه‌های بالینی مورد

بررسی

توزیع بر اساس		
گروه سنی (تعداد نمونه)	نوع نمونه (تعداد نمونه)	بخش بیمارستان (تعداد نمونه)
۱۸-۴۰ سال (۲)	زخم (۵)	ICU (۴)
۴۰-۶۰ سال (۳)	تنفسی (۴)	CCU (۲)
۶۰-۶۹ سال (۵)	ادراری (۴)	جراحی (۳)
بالای ۶۹ سال (۶)	خونی (۲)	نفرولوژی (۱)



تصویر شماره ۲: منحنی توزیع اندازه نیوزوم حامل ایمی پنم با روش پراش نور دینامیکی (DLS)، با توجه به حدت قله‌ها، اندازه متوسط نیوزوم حامل ایمی پنم، ۲۱۱/۱ نانومتر به دست آمد.

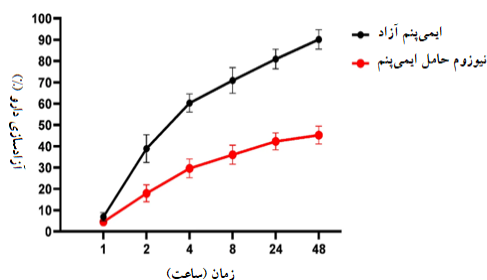
کارایی محصورسازی نیوزوم (EE%)

فرمولاسیون نیوزوم بازه ۵۸/۹ تا ۶۲/۵ درصد کارایی انقباض نشان داد که حاکی از پتانسیل بالای نیوزوم‌ها در محصورسازی دارو است. به عبارت دیگر، نیوزوم‌ها می‌توانند ایمی پنم را به طور مؤثر در خود جای دهند که این امر در پتانسیل استفاده بالینی از آنها اهمیت دارد.

پروفایل آزادسازی درون‌واری

پروفایل آزادسازی درون‌واری برای هر دو فرمول آزاد ایمی پنم و نیوزوم ایمی پنم مطابق با مدل کینتیک اول-مرتبه بود. همان طور که در تصویر شماره ۳ نشان داده شده است، حدود ۶۰ درصد از ایمی پنم از فرمول آزاد در ۴ ساعت اول آزاد سازی شد، در حالی که تنها ۳۰ درصد از دارو از معلق نانوزومی در همان مدت زمان آزاد شد. بعد از ۴۸ ساعت، حدود ۹۰ درصد از ایمی پنم

از فرمول آزاد و ۴۸ درصد از فرمول نانوزومی آزادسازی شد. این نتایج نشان می‌دهند که نیوزوم حامل ایمی پنم قادر به کنترل آزادسازی دارو است و از آزادسازی سریع جلوگیری می‌کند.



تصویر شماره ۳: مقایسه پروفایل‌های آزادسازی آزمایشگاهی ایمی پنم آزاد و نیوزوم حامل ایمی پنم در دمای ۳۷ درجه سانتی گراد

فعالیت ضد باکتریایی

مقادیر MIC و MBC نیوزوم حامل ایمی پنم در برابر ۹ جدایه بالینی *اسیتوباکتر بومانی* اندازه‌گیری و با فرمولاسیون ایمی پنم آزاد مقایسه گردید (جدول شماره ۴).

جدول شماره ۴: مقایسه مقادیر MIC و MBC نانوذرات نیوزوم بارگذاری شده با ایمی پنم و ایمی پنم آزاد در برابر جدایه‌های *اسیتوباکتر بومانی*

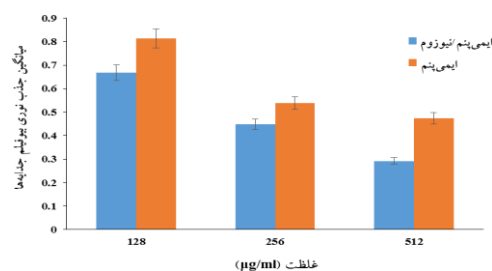
شماره جدایه میکروبی	MIC (μg/ml)		MBC (μg/ml)	
	ایمی پنم آزاد	ایمی پنم نیوزوم	ایمی پنم آزاد	ایمی پنم نیوزوم
۱	۲۵۶/±۱۰/۱۳۰	۱۲۸/±۷/۰۱۰	۵۱۲/±۵۲/۲۳۰	۲۵۶/±۳۳/۰۴۰
۲	۲۵۶/±۹/۱۲۰	۶۴/±۵/۰۴۰	۵۱۲/±۳۴/۲۱۳	۱۲۸/±۱۳/۱۳۰
۳	۱۲۸/±۹/۰۳۰	۶۴/±۸/۷۶۰	۱۲۸/±۷/۹۰۱	۱۲۸/±۱۰/۰۳۴
۴	۶۴/±۴/۳۳۰	۸/±۰/۱۲۰	۱۲۸/±۷/۱۱۱	۳۲/±۵/۰۱۰
۵	۲۵۶/±۱۷/۰۲۶	۳۲/±۲/۳۱۰	۱۲۸/±۶/۲۱۰	۶۴/±۴/۳۴۲
۶	۴/±۰/۰۲۰	۱/±۰/۰۰۲	۱۶/±۰/۳۰۱	۴/±۰/۰۰۳
۷	۱۶/±۰/۵۴۳	۴/±۰/۰۷۶	۱۶/±۰/۲۱۰	۸/±۰/۰۱۰
۸	۱۲۸/±۸/۲۵۴	۶۴/±۹/۱۳۰	۲۵۶/±۲۱/۰۰۰	۱۲۸/±۲۰/۰۳۶
۹	۵۱۲/±۱۳/۳۳۵	۲۵۶/±۱۱/۱۵۰	۵۱۲/±۶۱/۹۱۰	۲۵۶/±۲۵/۰۱۰

نتایج نشان داد که نیوزوم MIC ایمی پنم علیه تمام جدایه‌های *اسیتوباکتر بومانی* را نسبت به ایمی پنم آزاد ۲ تا ۸ برابر کاهش داد و این کاهش معنی‌دار بود

($P < 0/01$). همچنین، نیوزوم/ایمی پنم دارای کارایی بالای باکتری کشی بود که MBC را ۲ تا ۴ برابر علیه ۹ جدایه *اسیتوباکتر بومانی* به طور معنی دار کاهش داد ($P < 0/01$). علاوه بر این، توان ضد باکتریایی نیوزوم تنها مورد بررسی قرار گرفت و هیچ گونه فعالیت ضد باکتریایی در برابر تمامی جدایه ها مشاهده نشد.

فعالیت ضد بیوفیلمی

نتایج مربوط به بررسی تأثیر نیوزوم حامل ایمی پنم و ایمی پنم آزاد بر مهار تشکیل بیوفلم توسط *اسیتوباکتر بومانی* در تصویر شماره ۴ مشاهده می شود، انجام شد. با افزایش غلظت آنتی بیوتیک ایمی پنم آزاد و به صورت نیوزوم بارگذاری شده با ایمی پنم، اثر ضد بیوفیلمی افزایش یافت. علاوه بر آن، زمانی که ایمی پنم به صورت کپسوله در نیوزوم قرار گرفت، اثر ضد بیوفیلمی آن افزایش معنادار نشان داد ($P = 0/017$ برای غلظت ۱۲۸ میکروگرم در میلی لیتر، $P = 0/038$ برای غلظت ۲۵۶ میکروگرم در میلی لیتر و $P = 0/005$ برای غلظت ۵۱۲ میکروگرم در میلی لیتر). بیشترین افزایش به میزان ۳ برابر بر روی جدایه شماره ۷ بود.



تصویر شماره ۴: مقایسه میانگین جذب نوری چاهک های حاوی ایمی پنم آزاد و نیوزوم بارگذاری شده با ایمی پنم در برابر جدایه های *اسیتوباکتر بومانی*

بحث

نتایج آزمایش های MIC و MBC که بر روی نیوزوم های حاوی ایمی پنم انجام شد، به وضوح نشان

دادند که این روش، تأثیر قابل توجهی در کاهش این پارامترها داشته است. به طوری که MIC و MBC به ترتیب ۲ تا ۸ برابر و ۲ تا ۴ برابر کم تر از مقادیر فرم آزاد دارو بودند. به عبارت دیگر، استفاده از فرم نیوزومی ایمی پنم موجب می شود که دارو با دوز کمتری نسبت به فرم آزاد خود قادر به مهار و کشتن باکتری ها باشد، که این امر می تواند به کاهش عوارض جانبی درمان نیز کمک کند. مطالعات مشابهی نیز به نتایج مشابهی در استفاده از نیوزوم ها برای درمان باکتری های مقاوم به دارو دست یافته اند. به عنوان نمونه، پژوهش های هدایتی و همکاران و همتی و همکاران نیز اثربخشی بالای نیوزوم های دارویی را در مقابله با باکتری های مقاوم به چند دارو گزارش کرده اند (۱۸، ۱۹). در این تحقیقات، نشان داده شد که نیوزوم ها به طور قابل توجهی باعث کاهش MIC و MBC دارو های مختلف در مقابل جدایه های مقاوم به دارو شده و اثر بخشی درمان را بهبود بخشیده اند. این مطالعات همچنین بر اهمیت فناوری نیوزوم ها به عنوان یک روش نوین و مؤثر در درمان عفونت های مقاوم تأکید کرده اند و نشان می دهند که این فناوری می تواند جایگزین یا مکمل خوبی برای درمان های سنتی باشد. علاوه بر این، مطالعه همتی و همکاران نشان داد که نیوزوم های حاوی ونکومایسین می توانند به طور مؤثری بر روی *استافیلوکوکوس اورئوس* مقاوم به متی سیلین عمل کرده و MIC و MBC آن را به میزان قابل توجهی کاهش دهند (۱۹). تحقیق حاضر نیز نشان داد که استفاده از نیوزوم ها باعث بهبود دسترسی دارو به باکتری های هدف می شود و اثربخشی آن افزایش می یابد. در پژوهش رحمتی و همکاران، تأثیر نیوزوم های حاوی آمیکاسین بر *کلبسیلا پنومونیه* مقاوم به دارو بررسی شد (۲۰). نتایج این تحقیق نشان داد که این فرمولاسیون ها قادر به کاهش MIC و MBC به میزان قابل توجهی هستند و موجب افزایش کارایی درمان می شوند. Schulte-Werning و همکاران نیز به بررسی اثر نیوزوم های حاوی کلرامفنیکل در درمان عفونت های

ناشی از باکتری‌های مقاوم پرداختند (۲۱). مطالعه حاضر نیز نشان داد که استفاده از نیوزوم‌ها باعث افزایش اثر ضد باکتریایی دارو و کاهش عوارض جانبی آن نسبت به فرم آزاد دارو می‌شود. این مطالعات همگی مؤید این نکته هستند که نیوزوم‌ها به‌عنوان حامل‌های دارویی می‌توانند به‌طور مؤثری اثربخشی داروها را افزایش دهند و در درمان عفونت‌های ناشی از باکتری‌های مقاوم به دارو نقش مهمی ایفا کنند. با توجه به این که استفاده از این فناوری‌ها می‌تواند به کاهش عوارض جانبی و افزایش دستیابی دارو به باکتری‌های هدف کمک کند، امید می‌رود که در آینده به‌عنوان یک روش درمانی مؤثر و قابل اعتماد جایگزین یا مکمل روش‌های درمانی سنتی در مقابله با بیماری‌های عفونی مقاوم به دارو قرار گیرد.

چالش‌های درمانی ناشی از عفونت‌های *اسیتوباکتر بومانی* به‌ویژه به دلیل توانایی این باکتری در تشکیل بیوفیلם بسیار حائز اهمیت هستند. بیوفیلם‌ها ساختارهایی پیچیده و مقاوم از باکتری‌ها هستند که بر روی سطوح مختلف از جمله دستگاه‌های پزشکی، همچون کاتترها و دستگاه‌های تنفسی، ایجاد می‌شوند. این ساختارها به باکتری‌ها این امکان را می‌دهند که در برابر داروهای ضد باکتریایی و سیستم ایمنی میزبان مقاوم شوند، که موجب ایجاد مشکلات درمانی می‌شود. از آن‌جا که بیش‌تر جدایه‌های *اسیتوباکتر بومانی* به داروهای مختلف مقاوم هستند، توانایی این باکتری در تشکیل بیوفیلם، مسئله درمانی را پیچیده‌تر می‌کند (۴).

در این مطالعه، مشاهده شد که اکثر جدایه‌های *اسیتوباکتر بومانی* قادر به تشکیل بیوفیلם بودند، که این یافته با نتایج تحقیقات پیشین نیز هم‌خوانی داشت. به‌عنوان مثال، نتایج Li و همکاران و Khalil و همکاران نیز بر نقش بیوفیلם در مقاومت این باکتری‌ها تأکید کرده‌اند (۲۲، ۲۳). در حالی که این ویژگی می‌تواند در درمان‌های استاندارد مشکلات عمده‌ای ایجاد کند، تلاش‌هایی برای مقابله با این معضل انجام شده است. یکی از راهکارهایی که در این مطالعه بررسی شده،

استفاده از نیوزوم‌ها است. نیوزوم‌ها، که نانوذرات چربی هستند، به‌عنوان حامل‌های دارویی موثر برای انتقال داروهای ضد باکتریایی شناخته شده‌اند. نتایج این تحقیق نشان داد که نیوزوم‌های حاوی ایمنی پنم توانستند در اغلب موارد تشکیل بیوفیلם را مهار کنند و این مهار به ۳ برابر نیز رسید. این یافته نشان می‌دهد که افزایش غلظت ایمنی پنم در داخل نیوزوم‌ها ممکن است باعث کاهش توانایی *اسیتوباکتر بومانی* در تشکیل بیوفیلם شود. این نتایج با دیگر مطالعات مشابه همخوانی دارد. برای نمونه، شامکانی و همکاران گزارش کردند که نیوزوم‌های حاوی مینوسایکلکسن توانستند MBC را در برابر *اسیتوباکتر بومانی* ۲ تا ۴ برابر کاهش دهند، که نشان دهنده اثربخشی بالای این نوع داروها در کاهش بیوفیلם‌ها است (۲۴). Maurizi و همکاران نیز نشان دادند که نیوزوم‌ها می‌توانند به افزایش نفوذپذیری داروها به داخل ماتریکس بیوفیلם کمک کنند (۲۵). این تأثیر به دلیل خاصیت ساختاری نیوزوم‌ها است که به آن‌ها اجازه می‌دهد به راحتی از میان لایه‌های مختلف بیوفیلם عبور کرده و دارو را به باکتری‌ها و نواحی غیر قابل دسترس برسانند. به علاوه، آزادسازی کنترل شده دارو، که در این مطالعه نیز مشاهده شد، می‌تواند مؤثرتر از آزادسازی ناگهانی و سریع دارو باشد. این ویژگی باعث می‌شود دارو به تدریج و به میزان مناسب به باکتری‌ها برسد و در نتیجه اثربخشی آن افزایش یابد. همچنین، آزادسازی کنترل شده دارو به کاهش سمیت دارو و افزایش کارایی درمان کمک می‌کند، زیرا دارو به صورت مداوم و در دوزهای پایین‌تر در دسترس قرار می‌گیرد و از تجمع سریع در بافت‌های سالم جلوگیری می‌شود. در مجموع، ترکیب این دو مکانیسم می‌تواند به عنوان یک استراتژی مؤثر در مقابله با بیوفیلם‌ها و درمان عفونت‌های مقاوم به دارو محسوب شود. این اثرات موجب می‌شود که نیوزوم‌ها نه تنها در افزایش کارایی داروها مؤثر باشند بلکه به عنوان یک ابزار نوین

در درمان عفونت‌های بیوفیلمی مقاوم به آنتی‌بیوتیک‌ها مطرح شوند.

پایداری نیوزوم‌ها به عنوان یک عامل کلیدی در اثربخشی درمانی آن‌ها شناخته می‌شود. در واقع، حفظ ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی این نانوذرات در طی فرآیندهای نگهداری و ذخیره‌سازی برای تضمین کارایی درمانی آن‌ها در طول زمان اهمیت زیادی دارد. در این مطالعه، نشان داده شد که نیوزوم حامل ایمی‌پنم قادر به کنترل آزادسازی دارو است و از آزادسازی سریع جلوگیری می‌کند. به طوری که حدود ۶۰ درصد از ایمی‌پنم از فرمول آزاد و ۳۰ درصد از معلق نانوزومی در ۴ ساعت اول آزادسازی شد. بعد از ۴۸ ساعت، حدود ۹۰ درصد از ایمی‌پنم از فرمول آزاد و ۴۸ درصد از فرمول نانوزومی آزادسازی شد. استفاده از ترکیبات خاص مانند کلسترول و سورفکتانت‌های غیر یونی زنجیره بلند (توین ۶۰ و اسپن ۶۰) به طور خاص در تقویت غشاء نیوزوم‌ها مؤثر است. این ترکیبات نه تنها به تقویت ساختار غشاء کمک می‌کنند بلکه موجب کاهش نشت دارو از داخل این نانوذرات نیز می‌شوند. نشت دارو یکی از مشکلات رایج در سیستم‌های دارو رسانی نانویی است که می‌تواند تأثیرات درمانی را کاهش دهد (۲۶). بنابراین استفاده از این ترکیبات به ویژه در بهبود پایداری و اثربخشی داروهای داخل نیوزوم‌ها بسیار مؤثر است.

یکی از محدودیت‌های تحقیق حاضر حجم نمونه پایین (۱۵ جدایه) است که تعمیم پذیری نتایج را محدود می‌کند. بنابراین پیشنهاد می‌شود مطالعات بعدی

بر رویه جدایه‌های بیش تری تکرار شود. محدودیت دیگر، عدم بررسی تأثیر نیوزوم‌های حامل ایمی‌پنم بر مکانیسم‌های مولکولی مقاومت می‌باشد که مطالعه بر روی آن توصیه می‌شود تا جنبه‌های مختلف تأثیر این ذرات آشکار شود. همچنین، به دلیل عدم ارزیابی سمیت سلولی، استفاده از این ذرات برای کاربرد بالینی محدود می‌شود و انجام این ارزیابی در مطالعات بعدی ضروری است.

نتایج این بررسی نشان داد که نیوزوم‌های حاوی ایمی‌پنم قادر به کاهش MIC و MBC داروی آزاد علیه *اسیتوباکتر بومانی* هستند. همچنین، نیوزوم‌های حاوی ایمی‌پنم توانستند به طور مؤثری تولید بیوفیلم در *اسیتوباکتر بومانی* را مهار کنند که این ویژگی به ویژه در درمان عفونت‌های مزمن و مقاوم به دارو اهمیت دارد. یافته‌های این تحقیق نشان دهنده پتانسیل بالای نیوزوم‌ها به عنوان حامل‌های دارویی در مقابله با مشکلات مربوط به درمان عفونت‌های *اسیتوباکتر بومانی* مقاوم به ایمی‌پنم و کاهش عوارض ناشی از مقاومت علیه این داروی آنتی‌بیوتیکی هستند.

سپاسگزاری

این مقاله برگرفته از نتایج پایان نامه کارشناسی ارشد در گروه میکروبیولوژی دانشگاه آزاد اسلامی واحد فلاورجان با کد ۱۶۲۷۹۷۰۵۷ می‌باشد. نویسندگان مقاله نهایت تشکر و قدردانی خود را از معاونت علمی دانشگاه بابت پشتیبانی فنی برای انجام این تحقیق اعلام می‌دارند.

References

- 1- Goncalves EK, Ramos LA, Seibert A, Ribeiro LM, McDuffie SL, Murray MC, Fiester SE. *Acinetobacter baumannii*: a perspective on challenges presented by a drug-resistant pathogen. *Front Bacteriol* 2026; 4: 1734537.
- 2- Piperaki ET, Tzouveleakis LS, Miriagou V, Daikos GL. Carbapenem-resistant *Acinetobacter baumannii*: in pursuit of an effective treatment. *Clin Microbiol Infect* 2019; 25(8): 951-957. PMID: 30986553
- 3- Yang CH, Su PW, Moi SH, Chuang LY. Biofilm formation in *Acinetobacter*

- baumannii: genotype-phenotype correlation. *Molecules* 2019; 24(10): 1849. PMID: 31096608.
- 4- Roy S, Chowdhury G, Mukhopadhyay AK, Dutta S, Basu S. Convergence of biofilm formation and antibiotic resistance in *Acinetobacter baumannii* infection. *Front Med (Lausanne)* 2022; 9: 793615. PMID: 35155502.
- 5- Murugaiyan J, Kumar PA, Rao GS, Iskandar K, Hawser S, Hays JP, et al. Progress in alternative strategies to combat antimicrobial resistance: focus on antibiotics. *Antibiotics (Basel)* 2022; 11(2): 200. PMID: 35203805.
- 6- Costa R, Costa Lima SA, Gameiro P, Reis S. On the development of a cutaneous flavonoid delivery system: advances and limitations. *Antioxidants (Basel)* 2021; 10(9): 1376. PMID: 34573012.
- 7- Kheilnezhad B, Hadjizadeh A. Factors affecting the penetration of niosome into the skin, their laboratory measurements and dependency to the niosome composition: a review. *Int J Indig Herb Drug* 2021; 18(5): 555-569.
- 8- Maurya K, Singh A, Pandey S, Kumar N, Siddhiqui MA. Niosomes: classification, preparation and application. *Int J Indig Herb Drug* 2021; 6(1): 29-32.
- 9- Suryawanshi S, Patil P, Gaikwad R, Mali S, Pol S. Proniosomes: modern drug delivery system. *Pharm Reson* 2021; 4(1): 41-56.
- 10- Wiranto E, Kiranasari A, Kusumawati L, Tania T. Morphological characteristics and differentiation of *Acinetobacter baumannii* colony on selective medium CHROMagar *Acinetobacter*. *EKSAKTA* 2024; 25(1): 91-98.
- 11- Babapour E, Haddadi A, Mirnejad R, Angaji SA, Amirmozafari N. Biofilm formation in clinical isolates of nosocomial *Acinetobacter baumannii* and its relationship with multidrug resistance. *Asian Pac J Trop Biomed* 2016; 6(6): 528-533. PMID: 27570708.
- 12- Piri-Gharaghie T, Jegargoshe-Shirin N, Saremi-Nouri S, Khademhosseini SH, Hoseinnezhad-Lazarjani E, Mousavi A, et al. Effects of imipenem-containing niosome nanoparticles against high prevalence methicillin-resistant *Staphylococcus epidermidis* biofilm formed. *Sci Rep* 2022; 12(1): 5140. PMID: 35332199.
- 13- Yaghoobian M, Haeri A, Bolourchian N, Shahhosseini S, Dadashzadeh S. The impact of surfactant composition and surface charge of niosomes on the oral absorption of repaglinide as a BCS II model drug. *Int J Nanomedicine* 2020; 15: 8767-8781. PMID: 33173295.
- 14- Haddadian A, Robattorki FF, Dibah H, Soheili A, Ghanbarzadeh E, Sartipnia N, et al. Niosomes-loaded selenium nanoparticles as a new approach for enhanced antibacterial, anti-biofilm, and anticancer activities. *Sci Rep* 2022; 12(1): 21938. PMID: 36535967.
- 15- Calò A, Sanmartí-Espinal M, Iavicoli P, Persuy MA, Pajot-Augy E, Gomila G, et al. Diffusion-controlled deposition of natural nanovesicles containing G-protein coupled receptors for biosensing platforms. *Soft Matter* 2012; 8(46): 11632-11643. PMID: 23413315.
- 16- Lv Y, He H, Qi J, Lu Y, Zhao W, Dong X, Wu W. Visual validation of the measurement of entrapment efficiency of drug nanocarriers. *Int J Pharm* 2018; 547(1-2): 395-403. PMID: 29906547.

- 17- Modi S, Anderson BD. Determination of drug release kinetics from nanoparticles: overcoming pitfalls of the dynamic dialysis method. *Mol Pharm* 2013; 10(8): 3076-3089. PMID: 23777448.
- 18- Hedayati Ch M, Abolhassani Targhi A, Shamsi F, Heidari F, Salehi Moghadam Z, Mirzaie A, et al. Niosome-encapsulated tobramycin reduced antibiotic resistance and enhanced antibacterial activity against multidrug-resistant clinical strains of *Pseudomonas aeruginosa*. *J Biomed Mater Res A* 2021; 109(6): 966-980. PMID: 32864888.
- 19- Hemmati J, Chiani M, Chegini Z, Seifalian A, Arabestani MR. Surface modified niosomal quercetin with cationic lipid: an appropriate drug delivery system against *Pseudomonas aeruginosa* infections. *Sci Rep* 2024; 14(1): 13362. PMID: 38858495
- 20- Rahmati M, Babapoor E, Dezfulian M. Amikacin-loaded niosome nanoparticles improve amikacin activity against antibiotic-resistant *Klebsiella pneumoniae* strains. *World J Microbiol Biotechnol* 2022; 38(12): 230. PMID: 36221068.
- 21- Schulte-Werning LV, Murugaiah A, Singh B, Johannessen M, Engstad RE, Škalko-Basnet N, et al. Multifunctional nanofibrous dressing with antimicrobial and anti-inflammatory properties prepared by needle-free electrospinning. *Pharmaceutics* 2021; 13(9): 1527. PMID: 34575590.
- 22- Li Z, Ding Z, Liu Y, Jin X, Xie J, Li T, et al. Phenotypic and genotypic characteristics of biofilm formation in clinical isolates of *Acinetobacter baumannii*. *Infect Drug Resist* 2021; 14: 2613-2624. PMID: 34262318.
- 23- Khalil MA, Ahmed FA, Elkhateeb AF, Mahmoud EE, Ahmed MI, Ahmed RI, et al. Virulence characteristics of biofilm-forming *Acinetobacter baumannii* in clinical isolates using a *Galleria mellonella* model. *Microorganisms* 2021; 9(11): 2365. PMID: 34835486.
- 24- Shamkani F, Barzi SM, Badmasti F, Chiani M, Zafari M, Shafiei M. Enhanced anti-biofilm activity of the minocycline-and-gallium-nitrate using niosome wrapping against *Acinetobacter baumannii* in C57/BL6 mouse pneumonia model. *Int Immunopharmacol* 2023; 115: 109551. PMID: 36543708.
- 25- Maurizi L, Forte J, Ammendolia MG, Hanieh PN, Conte AL, Relucenti M, et al. Effect of ciprofloxacin-loaded niosomes on *Escherichia coli* and *Staphylococcus aureus* biofilm formation. *Pharmaceutics* 2022; 14(12): 2662. PMID: 36559153.
- 26- Pandey P, Pal R, Khadam VKR, Chawra HS, Singh RP. Advancement and characteristics of non-ionic surfactant vesicles (niosome) and their application for analgesics. *Int J Pharm Investig* 2024; 14(3): 616-632.