شیمی و نانوشیمی (پژوهش های شیمیایی و نانومواد سابق)
Chemistry & Nanochemistry
https://sanad.iau.ir/journal/crn

سنتز سبز نانوذرات نقره: مروری بر روش‌ها و خواص ضدباکتری نانوذرات نقره

میثم ناصری[۱]، مهدی ایران‌نژاد[۱*]، اکبر مهدیلو[۲]، راحله خسروی نیسیانی[۳]

[۱] گروه مهندسی فرآوری مواد معدنی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

[۲] دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

[۳] شرکت پویشگر نانوسبز، اصفهان، ایران

چکیده: در دهه‌های اخیر، نانوذرات نقره به دلیل داشتن خاصیت ضدباکتری، به‌طور گسترده مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته‌اند. نانوذرات نقره با تخریب دیواره سلولی باکتری‌ها و ایجاد اختلال در فرآیندهای زیستی آن‌ها، می‌توانند در مبارزه با عفونت‌های باکتریایی موثر باشند. روش‌های مختلفی برای سنتز نانوذرات نقره وجود دارند که دارای مزایا و معایبی هستند. در سال‌های اخیر، سنتز نانوذرات نقره به روش سبز به دلایل کاهش اثرات زیان‌بار زیست‌محیطی، ایمنی و غیره بیشتر مورد بررسی قرار گرفته است. تحقیق حاضر با هدف معرفی مناسب‌ترین روش سنتز سبز برای تهیه نانوذرات نقره با خاصیت ضدباکتری انجام شده است. نتایج نشان می‌دهند که تاثیر نانوذرات نقره سنتز شده با میکروارگانیسم‌ها نسبت به نانوذرات نقره سنتز شده با عصاره گیاهان بر روی مهار باکتری‌ها بیشتر است. خاصیت ضدباکتری نانوذرات نقره سنتز شده با قارچ نسبت به نانوذرات نقره سنتز شده با جلبک و باکتری بیشتر است. هم‌چنین، بررسی‌ها نشان می‌دهد که خاصیت ضدباکتری نانوذرات نقره به خصوصیات فیزیکی و شیمیایی دیواره سلولی باکتری‌ها بستگی دارد. در این راستا، اثر ضدباکتری نانوذرات نقره بر روی باکتری‌های گرم منفی نسبت به باکتری‌های گرم مثبت بیشتر است.

واژگان کلیدی: نانوذرات نقره، خاصیت ضدباکتری، عصاره گیاهان، میکروارگانیسم، سنتز سبز.

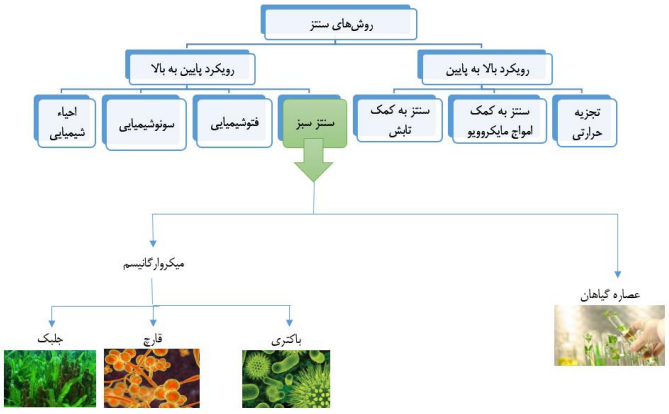
iranajad@aut.ac.ir

۱- مقدمه

روش‌های متعددی برای سنتز نانوذرات نقره به دلیل کاربردهای گسترده آن‌ها وجود دارد. در شکل ۱ انواع روش‌های مهم سنتز نانوذرات نقره ارائه شده است. روش‌های سنتز نانوذرات به دو دسته رویکرد بالا به پایین و پایین به بالا تقسیم می‌شوند. روش رویکرد بالا به پایین به کاهش ابعاد ماده تا رسیدن به مقیاس نانوذرات گفته می‌شود و رویکرد پایین به بالا به افزودن اجزای سازنده در مقیاس اتمی یا مولکولی گفته می‌شود. روش‌های رویکرد پایین به بالای سنتز نانوذرات نقره شامل احیاء شیمیایی، تجزیه حرارتی، الکتروشیمیایی، سونوشیمیایی، فتوشیمیایی، فرآیند سنتز به کمک تابش، سنتز به کمک امواج مایکروویو، سنتز سبز و غیره می‌باشند[۱-۳].

روش کاهش شیمیایی با استفاده از عوامل کاهنده شیمیایی مانند سدیم بورهیدرید، اسید اسکوربیک و غیره صورت می‌گیرد که این فرایند منجر به کاهش یون‌های نقره و تولید نانوذرات نقره می‌گردد. استفاده از مواد شیمیایی مضر در سنتز نانوذرات نقره می‌تواند اثرات نامطلوبی بر محیط زیست داشته باشد[۴].

تاریخ دریافت : ۱۴۰۳/۷/۱۰
تاریخ پذیرش : ۱۴۰۳/۸/۱۷



شکل ۱. انواع روش‌های مهم سنتز نانوذرات نقره.

روش‌های تجزیه حرارتی و الکتروشیمیایی نیاز به تجهیزات ویژه و شرایط کنترل‌شده دارند که این امر باعث افزایش هزینه تولید نانوذرات با استفاده از این روش‌ها می‌شود[۵]. سنتز سونوشیمیایی و فتوشیمیایی از امواج صوتی یا نور برای تحریک واکنش‌های شیمیایی جهت سنتز نانوذرات با اندازه و شکل کنترل شده استفاده می‌کنند[۵-۷]. سنتز به کمک امواج مایکروویو به تسریع فرآیند سنتز کمک می‌کند و در نتیجه زمان تولید نانوذرات را کاهش داده و کیفیت آن‌ها را افزایش می‌دهد. روش سنتز سبز یا به عبارتی زیست زا[1]از مواد طبیعی مانند عصاره‌های گیاهی یا میکروارگانیسم‌ها (باکتری، قارچ و غیره) برای کاهش یون‌های نقره و تولید نانوذرات استفاده می‌کند[۱]. روش سنتز سبز نیاز به دما و فشار بالا ندارد[۸]. در روش سنتز نانوذرات نقره با استفاده از عصاره‌های گیاهی، از مواد زیستی گوناگونی نظیر زیست‌توده، میوه، برگ، گیاه، پروتئین، دانه و نشاسته به‌عنوان عوامل کاهنده و پوشش‌دهنده استفاده می‌شود. این مواد به دلیل پایداری در محیط‌های آبی و سازگاری با محیط‌زیست، توجه زیادی را به خود جلب کرده‌اند[۹-۱۱].

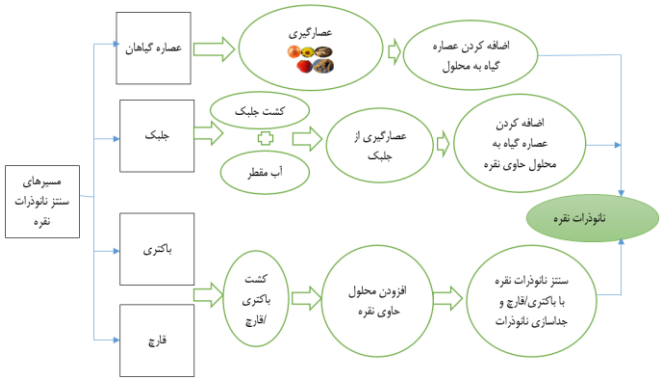
گیاهان و عصاره‌های گیاهی به‌عنوان منابع غنی از ترکیبات فعال زیستی، از جمله پلی‌فنول‌ها، فلاونوئیدها و آلکالوئیدها، نقش مهمی در سنتز نانوذرات نقره ایفا می‌کنند. هم‌چنین، میکروارگانیسم‌هایی مانند باکتری‌ها و قارچ‌ها قادر به تولید نانوذرات نقره از طریق مسیرهای بیوشیمیایی هستند. این موجودات زنده می‌توانند فلزات را از محیط جذب کرده و منجر به تولید نانوذرات پایدار از طریق متابولیسم شوند[۱۰, ۱۱].

روش‌های سنتز سبز نانوذرات نقره به منظور بررسی خاصیت ضدباکتری به صورت شماتیک در شکل ۲ نشان داده شده است.

در سال‌های اخیر، نانوذرات نقره به دلیل اثرات مهارکننده رشد باکتری‌های مضر و خاصیت ضدباکتری، به خوبی شناخته شده‌اند. از خاصیت ضدباکتری نانوذرات نقره در زمینه‌های مختلف پزشکی از جمله کاهش عفونت‌ها، در درمان سوختگی‌ها و بهبود سریع زخم‌ها، پیشگیری از تجمع باکتری‌ها بر روی پوشش سطوح تجهیزات و فرآیند ضدعفونی‌سازی در تصفیه آب استفاده شده است. نانوذرات نقره به طور قابل توجهی خطر عفونت‌های بیمارستانی را کاهش می‌دهند. نانوذرات نقره توانایی قابل‌توجهی در حفاظت از سلول‌ها در برابر عفونت‌های ناشی از ویروس ضدایمنی(HIV) دارند[۱۲-۱۴].

هدف تحقیق حاضر، ارزیابی و مقایسه کارایی و پتانسیل فعالیت ضدباکتری نانوذرات نقره سنتز شده به روش‌های سبز (با استفاده از عصاره گیاهان، جلبک‌ها، قارچ‌ها و باکتری‌ها) می‌باشد. بدین منظور، ابتدا به بررسی خاصیت ضدباکتری نانوذرات نقره، روش‌های ارزیابی خاصیت ضدباکتری و مکانیزم فعالیت آن‌ها پرداخته شده است. سپس، مطالعات انجام شده با استفاده از عصاره‌های گیاهی، باکتری‌ها، قارچ‌ها و جلبک‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد. در ادامه، عملکرد نانوذرات نقره بر روی باکتری‌های گرم مثبت و منفی[2] و هم‌چنین ارتباط بین ابعاد نانوذرات و خاصیت ضدباکتری آن‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۲- خاصیت ضدباکتری نانوذرات نقره



شکل ۲. مسیرهای سنتز نانوذرات نقره به روش سبز.

[1] Biogenic

[2] Gram positive and negative bacteria

۲-۱- کاربرد ضدباکتری نانوذرات نقره

خواص شیمیایی و زیستی نانوذرات نقره به دلیل کاهش ابعاد در مقیاس نانو افزایش یافته و آن‌ها را به مواد مؤثر در زمینه دارا بودن خاصیت ضدباکتری تبدیل می‌کند. کاربرد این نانوذرات در صنایع بسته‌بندی، مواد غذایی، داروسازی و دیگر حوزه‌ها به خاصیت ضدباکتری آن‌ها وابسته است. فعالیت‌های ضدباکتری نانوذرات نقره در تحقیقات متعددی مورد بررسی قرار گرفته است[۱۵-۲۱].

در تحقیقات گالوات و همکاران مشخص شد که نانوذرات نقره با اندازه تقریبی ۱۰ نانومتر به دیواره سلول میکروبی متصل شده و باعث اختلال در نفوذپذیری و مسیرهای متابولیکی سلولی می‌شوند که در نهایت منجر به مرگ سلولی می‌گردد[۲۰]. علاوه بر این، تولید گونه‌های اکسیژن فعال(ROS) به عنوان علت اصلی مرگ باکتری‌ها شناخته شده است، زیرا این فرایند باعث پراکسیداسیون لیپیدها شده و تولید ATP و تکثیر DNA را مختل می‌کند. هم‌چنین، افزایش سطح ROS در سلول‌های باکتریایی می‌تواند منجر به استرس اکسیداتیو در این سلول‌ها شود. به طور کلی، نانوذرات نقره پخش شده در محیط‌های فیزیولوژیکی نسبت به نانوذرات نقره تجمع یافته کارایی ضدباکتری بیشتری نشان داده‌اند[۲۱]. نانوذرات نقره به‌عنوان داروی جایگزین آنتی‌بیوتیک‌ها، تولید کمپلکس‌های مورد استفاده در فیلترهای استریل‌کننده و مواد بسته‌بندی مورد بررسی قرار گرفته‌اند. نانوذرات نقره می‌توانند عملکردهای سلولی مانند نفوذپذیری و تنفس سلولی را مختل کنند. علاوه بر این، هنگامی که به غشاهای سلولی می‌رسند، قادر به اختلال در اجزای سلولی از طریق واکنش با پروتئین‌های حاوی گوگرد و کمپلکس‌های حاوی فسفر مانند DNA هستند[۱۶].

تحقیقاتی درباره سمیت نانوذرات نقره برای سلول‌ها و بافت‌ها، به‌خصوص سلول‌های پستانداران، انجام شده است. با این حال، مطالعات اخیر نشان داده‌اند که ترکیب نانوذرات نقره با عوامل ضدباکتریایی می‌تواند اثرات سمی بر روی سلول‌های پستانداران را کاهش دهد و در عین حال، فعالیت‌های ضدباکتری آن‌ها را به‌طور هم‌افزا بهبود بخشد[۱۷]. تعامل بین یون‌های فلزی و مولکول‌های زیستی مانند پروتئین، پپتید و اسیدهای آمینه تأثیر قابل توجهی بر پتانسیل درمانی نانوذرات فلزی دارند. مولکول‌های زیستی نقش حیاتی در انتقال مؤثر نانوذرات فلزی مزدوج از طریق مسیرهای زیستی مختلف از جمله انتقال الکترون، حمل و ذخیره فلزات ایفا می‌کنند. علاوه بر این، سیستم‌های فلزی مزدوج تأثیر چشمگیری بر آنزیم‌های حیاتی مرتبط با متابولیسم باکتریایی دارند. این فرآیند از طریق واکنش‌های تبادل لیگاند صورت می‌گیرد، به گونه‌ای که لیگاند موجود با داروی بارگذاری‌شده جایگزین شده و با آنزیم خاصی که به عنوان منبع اصلی برای سیستم‌های فلزی مختلف عمل می‌کند، تعامل پیدا می‌کند[۱۸].

کارایی خاصیت ضدباکتری نانوذرات به شدت به بار سطحی نانوذرات بستگی دارد. مطالعات متعددی در این زمینه انجام شده است که به بررسی استفاده از عوامل پوششی و تثبیت‌کننده‌ها برای جلوگیری از تجمع نانوذرات پرداخته‌اند. نانوذرات با بار مثبت فعالیت ضدباکتری خوبی نسبت به نانوذرات با بار منفی از خود نشان داده اند[۱۹, ۲۲]. تحقیقاتی درباره اصلاح سطح نانوذرات نقره از طریق روش های شیمیایی انجام شده است. نانوذرات با سطح مناسب می‌توانند در زمینه‌های مختلفی مانند پزشکی، مهندسی و کاربردهای زیستی مفید باشند. این نوع بهبود سطحی را می‌توان به دو دسته کلی پیوندهای کووالانسی و غیرکووالانسی ربط داد[۱۹]. علاوه بر این، پلی‌ساکاریدهای طبیعی به طور قابل توجهی به بهبود فعالیت سطحی نانوذرات نقره کمک می‌کنند. بیشتر روش‌های بهبود سطحی بر پایه تشکیل پیوندهای کووالانسی استوارند که پیوندهای قوی‌تری دارند. در نتیجه، باعث افزایش پایداری لیگاندهای متصل به سطح نانوذرات می‌شوند و ارتباط بین آن‌ها را تقویت می‌کنند. علاوه بر این، گروه‌های موجود بر روی لیگاندها با نانوذرات واکنش داده و از طریق جذب شیمیایی به سطح نانوذرات متصل می‌شوند و آرایش‌های خود سازمان‌یافته ایجاد می‌کنند[۲۰].

نانوذرات نقره در صنایع غذایی و در فرآیند بسته‌بندی نیز استفاده می‌شوند، زیرا از تخریب مواد غذایی توسط پاتوژن‌ها جلوگیری می‌کنند. یکی از ویژگی‌های مهم نانوذرات نقره یا مواد زیستی، فعالیت ضدباکتری آن‌ها علیه میکروارگانیسم‌های آزاد در آب و میکروب‌ها است[۲۳].

۲-۲-روش‌های بررسی خاصیت ضدباکتری نانوذرات نقره

روش‌های متعددی برای انجام آزمایش‌های تعیین خاصیت ضدباکتری نانوذرات نقره وجود دارند. این روش‌ها شامل انتشار دیسک آگار[1]، رقیق‌سازی در محیط مایع، انتشار در محیط آگار، روش شیب ضدمیکروبی[2] و سایر روش‌ها می‌باشند[۲۴]. تعدادی از سنجش‌های زیستی بررسی خاصیت ضدباکتری نانوذرات نقره از جمله انتشار دیسک آگار، انتشار در محیط آگار و رقیق‌سازی در محیط مایع به خوبی شناخته شده‌اند و به طور معمول مورد استفاده قرار می‌گیرند ولی سایر روش‌ها مثل روش‌های فلوسایتوفلومتری[3] و بیولومینسانس[4] با وجود ارائه نتایج سریع و شناخت بهتر به طور وسیع استفاده نمی‌شوند، زیرا انجام آن‌ها مستلزم به کار گرفتن ابزارها و تجهیزات مخصوص می‌باشد[۲۵].

انتشار دیسک آگار یک روش مرسوم و متداول برای بررسی خاصیت ضدمیکروبی نانوذرات محسوب می‌شود. این روش به دلیل قابلیت اطمینان، هزینه پایین و سادگی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در میان محیط‌های کشت، آگار مولر هینتون[5] به دلیل فراهم آوردن شرایط رشد مطلوب برای بسیاری از باکتری‌ها از جمله استافیلوکوکوس اورئوس[6] سودوموناس آئروژینوزا[7] و اشرشیاکلی[8] انتخاب شده است. انتشار دیسک آگار، به‌عنوان یک روش استاندارد، به پژوهشگران این امکان را می‌دهد تا با استفاده از دیسک‌های آغشته به آنتی‌بیوتیک‌های مختلف، نواحی مهار رشد باکتری‌ها را اندازه‌گیری کرده و سطح حساسیت باکتری را تعیین کنند. این امر در تعیین مقدار مناسب داروهای آنتی‌بیوتیک و مدیریت صحیح عفونت‌ها نقش اساسی دارد. رقیق‌سازی در محیط مایع روشی است که در آن با کاهش تدریجی غلظت آنتی‌بیوتیک در محیط مایع، حداقل غلظت مورد نیاز برای مهار رشد باکتری‌ها تعیین می‌شود. این روش، به دلیل دقت بالا و ارائه اطلاعات با جزئیات بیشتر برای تعیین حداقل غلظت مهار(MIC) بسیار مؤثر است[۲۴, ۲۶].

روش شیب ضدمیکروبی ترکیبی از روش اصلی رقیق‌سازی و روش تغلیظ جهت تعیین اندازه MIC است که با ایجاد یک غلظت گرادیانی از عامل ضدمیکروبی آزمایش شده در محیط آگار همراه می‌باشد. Etest یک فرم تجاری از این روش است. در این روش، یک نوار آغشته با غلظت گرادیانی افزایشی با عامل ضدمیکروبی از یک انتها به قسمت دیگر بر روی سطح آگاری پخش می‌شود که قبلا با باکتری مورد تلقیح قرار گرفته است. این روش عمدتا برای تعیین MIC آنتی بیوتیک‌ها، ضد قارچ‌ها و غیره استفاده می‌شود[۲۵].

۲-۳- مکانیزم عملکرد ضدباکتری نانوذرات نقره و عوامل موثر بر آن

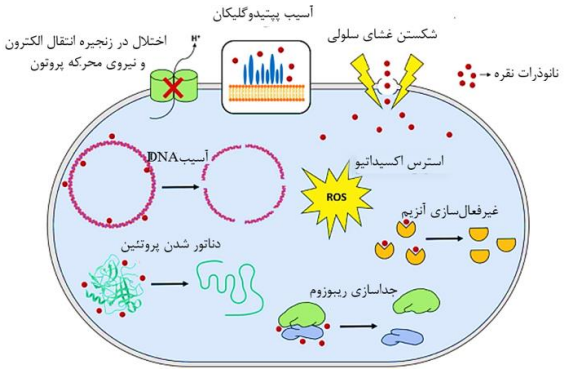
خاصیت ضدباکتری نانوذرات نقره بر روی باکتری‌ها بسیار قابل‌توجه است. ویژگی‌های ضدباکتری نانوذرات نقره به شدت به عواملی مانند اندازه نانوذرات، pH، شکل نانوذرات، بار سطحی نانوذرات، مقدار و حالت انتشار نانوذرات بستگی دارد[۱۱, ۲۷].

با توجه به اینکه نانوذرات نقره قادر به آزادسازی یون‌های نقره (Ag^+) هستند، این آزادسازی به عنوان یکی از مکانیزم‌های اصلی فعالیت ضدمیکروبی آن‌ها در نظر گرفته می‌شود. یون‌های نقره با بار مثبت (Ag^+) نقش حیاتی در فعالیت ضدمیکروبی نانوذرات نقره ایفا می‌کنند که جهت حفظ فعالیت‌های ضدمیکروبی و سمیت خود باید در حالت یونیزه باشند. یون‌های نقره با اسیدهای نوکلئیک کمپلکس تشکیل می‌دهند و نسبت به گروه‌های فسفات، برهم‌کنش قوی‌تری با این اسیدها دارند. یون‌های نقره با توجه به جاذبه‌های الکترواستاتیکی و تمایل به پروتئین‌های حاوی گوگرد، به سیتوپلاسم و دیواره سلولی باکتری‌ها می‌چسبند و به طور قابل توجهی نفوذپذیری آن‌ها را افزایش می‌دهند. این افزایش نفوذپذیری منجر به اختلال در پوشش‌های باکتریایی می‌شود. هنگامی که یون‌های نقره آزاد توسط سلول‌ها جذب می‌شوند، آنزیم‌های تنفسی غیرفعال شده و به دنبال آن تولید گونه‌های فعال اکسیژن افزایش می‌یابد و آزادسازی آدنوزین تری‌فسفات (ATP) مختل می‌شود[۲۹-۲۷].

یکی از مکانیزم‌های اصلی اثر نانوذرات نقره، تأثیر آن‌ها بر DNA باکتری‌ها است. این ذرات با اتصال به DNA و اختلال در ساختار آن، مانع از تکثیر و رونویسی صحیح ژن‌ها می‌شوند. نتیجه این

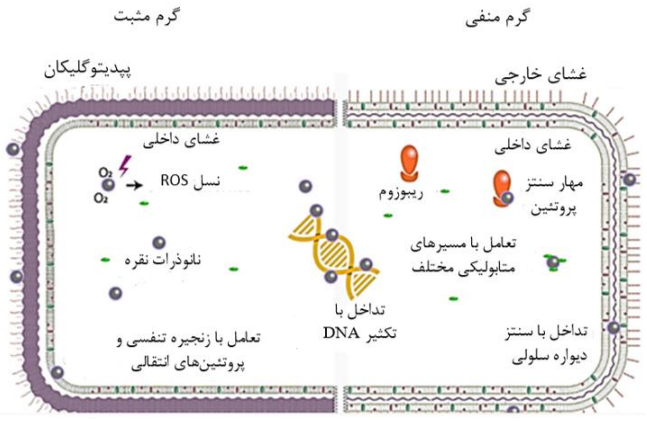
[1] Agar disk-diffusion
[2] Antimicrobial gradient method
[3] Flow cytofluorometric
[4] Bioluminescence
[5] Agar Mueller-Hinton
[6] Staphylococcus aureus
[7] Pseudomonas aeruginosa
[8] Escherichia coli

اختلال، از بین رفتن توانایی باکتری‌ها برای تکثیر و رشد است. نانوذرات نقره باعث تغییراتی در ساختار غشای سلولی باکتری‌ها می‌شوند. این تغییرات می‌توانند منجر به افزایش نفوذپذیری غشا و در نهایت نشت محتویات سلولی شوند. در نتیجه، سلول باکتریایی نمی‌تواند تعادل داخلی خود را حفظ کند و از بین می‌رود. در نهایت، نانوذرات نقره در ترکیب با گوگرد موجود در سلول، تشکیل ذرات کوچک و متراکم الکترونی می‌دهند. این گرانول‌ها می‌توانند به تخریب بیشتر ساختارهای داخلی سلول کمک کنند[۱۱, ۱۴, ۲۵]. گونه‌های فعال اکسیژن تولید شده یک عامل حیاتی در تشدید اختلال در غشای سلولی و تغییر در اسید دئوکسی ریبونوکلئیک (DNA) می‌باشد. یون‌های نقره می‌توانند با دناتور کردن اجزای ریبوزومی سیتوپلاسمی، از سنتز پروتئین جلوگیری کرده و باعث ریشه‌کن شدن باکتری‌ها و میکروب‌ها شوند (شکل ۳)[۲۹-۳۱].



شکل۳. مکانیزم ضدباکتری نانوذارت نقره[۲۹].

اندازه و شکل نانوذرات نقره بر خواص نانوذرات نقره تأثیر می‌گذارد و این پدیده توسط معادله استوالد–فروندلیچ توصیف شده است. نانوذرات نقره با اندازه کوچک و آرایش کروی یا شبه کروی و با سطح ویژه بیشتر، یون‌های نقره بیشتری آزاد می‌کنند. نانوذرات نقره با شکل کروی، خاصیت ضدباکتری بیشتری دارند و می‌توانند از طریق دیواره سلولی باکتری‌ها به داخل آن‌ها نفوذ کنند. از طرفی، اندامک‌ها به دلیل دناتور شدن غشای سلولی پاره می‌شوند و باعث لیز سلولی می‌شوند[۲۹, ۳۲]. نوع باکتری مورد آزمایش یکی دیگر از پارامترهای مهم است. برای درک بهتر اثرات ضدباکتری نانوذرات نقره، باکتری‌های مختلف بررسی می‌شوند. یکی از این موارد، ساختار دیواره سلولی سویه‌های مختلف میکروبی است. سویه‌های میکروبی دارای ساختارهای مختلفی در دیواره سلولی خود هستند که سبب تفکیک باکتری‌ها به دو گروه باکتری‌های گرم منفی (G-Ve) و گرم مثبت (G+Ve) می‌شوند. باکتری‌های گرم منفی دارای لایه نازکی از پپتیدوگلیکان به ضخامت ۱ تا ۵ نانومتر هستند که این لایه بین غشای خارجی و غشای سیتوپلاسمی قرار دارد. در مقابل، باکتری‌های گرم مثبت فاقد غشای خارجی هستند اما دارای لایه ضخیم‌تری از پپتیدوگلیکان به ضخامت حدود ۳۰ نانومتر هستند. باکتری‌های گرم منفی دارای غشای خارجی لیپوپلی‌ساکاریدی (LPS) بیرون لایه پپتیدوگلیکان هستند که سبب مقاومت باکتری‌ها در برابر بسیاری از داروها و مواد ضدباکتری می‌شوند. در حالی که، باکتری‌های گرم مثبت فاقد غشای خارجی لیپوپلی‌ساکاریدی هستند و لایه ضخیم از پپتیدوگلیکان دارند که به‌طور فشرده و متراکم در دیواره سلولی قرار دارد. لایه ضخیم پپتیدوگلیکان باعث می‌شود که باکتری‌های گرم مثبت در برابر تغییرات محیطی و مواد ضدباکتریایی مقاومت بیشتری داشته باشند[۳۳, ۳۴]. تاثیر نانوذرات نقره بر باکتری‌های گرم منفی نسبت به باکتری‌های گرم مثبت بیشتر است. شمایی از مکانیزم خاصیت ضدباکتری نانوذرات نقره در باکتری‌های گرم مثبت و منفی در شکل ۴ نمایش داده شده است. دیواره سلولی باکتری گرم منفی در مقایسه با باکتری گرم مثبت مخروطی‌تر است. دیواره سلولی ضخیم باعث کاهش انتشار نانوذرات نقره به محیط سلولی می‌شود[۳۱, ۳۲, ۳۵] همچنین، بررسی‌ها نشان می‌دهد که نانوذرات نقره کروی شکل نسبت به نانوذرات نقره میله‌ای شکل در برابر گونه باکتریایی کلبسیلا کارایی خاصیت ضدمیکروبی بیشتری دارند[۳۶].



شکل۴. مکانیزم خاصیت ضدمیکروبی نانوذرات نقره در باکتری‌های G+ve و G-ve [۳۵].

۳- واسطه‌های سنتز سبز در تهیه نانوذرات نقره

چنانچه قبلا اشاره شد، سنتز سبز دارای روش‌ها یا مسیرهای مختلفی است که تفاوت این روش‌ها عمدتا در واسطه مورد استفاده است. واسطه‌های سنتز سبز شامل عصاره گیاهان، باکتری‌ها، قارچ‌ها و جلبک‌ها هستند که در ادامه هر کدام به تفکیک مورد بررسی قرار گرفته است.

۳-۱- عصاره گیاه

عصاره گیاهان مختلف حاوی طیف وسیعی از ترکیب متابولیت‌های اولیه و ثانویه از جمله اسیدهای فنولی، فلاونوئیدها، آلکالوئیدها، ترپنوئیدها، اسیدهای آمینه، ترکیبات الکلی، گلوتاتیون‌ها، پلی‌ساکاریدها، آنتی‌اکسیدان‌ها، اسیدهای آلی (اسکوربیک، اگزالیک، مالیک، تارتاریک، پروتوکاتچوئیک اسید) و کینون‌ها هستند. ترکیبات ذکر شده می‌توانند به عنوان عامل احیاء یون‌های فلزی در فرآیند سنتز سبز نقش‌آفرینی کنند[۳۷-۴۰]. علی‌رغم مشخص نبودن مکانیزم دقیق فرآیند سنتز سبز، احیاء یون نقره با گیر انداختن یون‌های نقره بر روی سطح پروتئین‌های موجود در عصاره گیاهی از طریق برهم‌کنش‌های الکترواستاتیک انجام می‌شود که منجر به تغییر ساختار ثانویه آنها و تشکیل هسته‌های نقره می‌شوند. هسته‌های نقره با احیاء بیشتر یون‌های نقره و تجمع آنها در هسته رشد می‌کنند[۳۸-۴۰].

کشاری و همکاران خاصیت ضدمیکروبی نانوذرات نقره حاصل از عصاره برگ سستروم شبانه[۱] در برابر یکسری از باکتری‌ها با استفاده از روش انتشار دیسکی مورد مطالعه قرار دادند. نتایج این پژوهش نشان داد که نانوذرات حاصل دارای ابعاد ۲۰ نانومتر و هاله مهار باکتری (خاصیت ضدمیکروبی) برای باکتری‌های سیتروباکتر[۲] سالمونلا تیفوئیدی[۳] انتروکوک فکالیس[۴] اشریشیاکلی، پروتئوس ولگاریس[۵] ویبریوکلرا[۶] ترتیب برابر ۳۶، ۲۸، ۱۵، ۲۳، ۲۶ و ۴۱ میلی‌متر بوده است. نانوذرات نقره تولیده شده بر روی باکتری گرم منفی عملکرد بهتری نسبت به باکتری گرم مثبت داشته است. در بین باکتری‌های گرم منفی مورد مطالعه، نانوذرات نقره بر روی باکتری ویبریوکلرا بیشترین تاثیر و بر روی باکتری اشریشیاکلی کم‌ترین تاثیر را داشته است و در بین باکتری‌های گرم مثبت تفاوت زیادی در هاله ایجاد شده توسط نانوذرات نقره گزارش نشده است[۴۱]. داز و همکاران خاصیت ضدمیکروبی نانوذرات نقره سنتز شده توسط عصاره سرخس[۷] در برابر باکتری‌های انترکوباس[۸] هیدروفیلا[۹] سالامونا انتریکو[۱۰] لیستریا[۱۱] باسیل سرئوز[۱۲] استافیلوکوکوس اورئوس مورد بررسی قرار دادند. نتایج یافته‌ها بیانگر این بود که اندازه نانوذرات ۱۷ نانومتر و هاله مهار ثبت شده علیه باکتری‌های انترکوباس، هیدروفیلا، سالامونا انتریکو، لیستریا، باسیل سرئوز و استافیلوکوکوس اورئوس به ترتیب برابر ۹/۶۸، ۱۰/۸۰، ۱۱/۶۴، ۱۲/۴۶، ۱۰/۷۵ و ۱۲/۵۳ میلی‌متر بوده است و نانوذرات تولید شده بر روی باکتری گرم مثبت استافیلوکوکوس اورئوس عملکرد بهتری نسبت به باکتری گرم منفی داشته است[۴۲]. گویندپا و همکاران به بررسی خاصیت ضدمیکروبی نانوذرات نقره سنتز شده توسط عصاره برگ کالوفیلوم تومنتوزوم[۱۳] پرداخته‌اند. در این تحقیق، اندازه نانوذرات ۲۴ نانومتر و حداکثر هاله ثبت شده علیه باکتری‌های کلبسیلا اورئوس، استافیلوکوکوس اورئوس، سودموناس ارئوژینزا و اشریشیاکلی به ترتیب برابر ۱۶، ۱۶، ۸ و ۷ میلی‌متر بوده است. نانوذرات نقره تولید شده بر روی باکتری گرم مثبت نسبت به باکتری گرم منفی عملکرد بهتری داشته است[۴۳]. سالاری و همکاران خاصیت ضدمیکروبی نانوذرات نقره سنتز شده توسط عصاره میوه پروسوپیس فارکتا[۱۴] را مورد بررسی قرار داده‌اند. در این تحقیق، اندازه نانوذرات ۱۲/۶۸ نانومتر و هاله مهار ثبت شده برای باکتری‌های اشریشیا کلی، استافیلوکوکوس اورئوس، سالمونلا تیفی و استافیلوکوکوس پنومونیه[۱۵] ترتیب برابر ۲۸، ۳۳/۶۶، ۲۹/۱۴، ۱۸/۶۶ میلی‌متر بوده است و نانوذرات نقره به دست آمده بر روی باکتری گرم

[1] Cestrum nocturnum
[2] Citrobacter
[3] S. typhi
[4] E. faecalis
[5] P. vulgaris
[6] Vibrio cholerae
[7] Cassia alata
[8] Enterobacteriaceae
[9] Hydrophila
[10] Salmonella enterico
[11] Listeria
[12] Bacillus cereus
[13] Calophyllum tomentosum leaves
[14] Prosopis farcta fruit
[15] Staphylococcus pneumoniae

مثبت عملکرد بهتری داشته است[۴۴]. در پژوهشی دیگر سنتز نانوذرات اکسید روی/ نقره (Ag/ZnO-NPs) با استفاده از عصاره فلفل دلمه‌ای مورد بررسی قرار گرفته است. مطالعه خاصیت ضدمیکروبی نانوذرات نقره، نانوذرات اکسید روی و نانوذرات دوپه شده نشان می‌دهد که نانوذرات به دست آمده دارای اثر ضدمیکروبی بر روی پاتوژن‌های باکتریایی بوده است. با این حال، نانوذرات اکسید روی دوپه شده با نقره، فعالیت ضدمیکروبی بالاتری نسبت به نانوذرات نقره و اکسید روی از خود نشان داده اند[۴۵]. در تحقیقی دیگر، ارزیابی سنتز سبز نانوذرات اکسید روی، نقره و نقره – اکسید روی دوپه شده با عصاره گیاه سنا غربی[1] جهت بررسی خاصیت ضدمیکروبی انجام شده است. شکل‌های نانوذرات نقره و اکسید روی به ترتیب کروی و نامنظم بودند. فعالیت ضدمیکروبی نانوذرات نقره و اکسید روی بر روی باکتری‌های استرپتوکوکوس پیوژنز[2]، اشرشیاکلی، استافیلوکوکوس اوروس و سودوموناس آئروژینوزا مثبت بود. نانوذرات روی و نقره دوپ شده در برابر باکتری اشرشیاکلی، استافیلوکوکوس اوروس و سودوموناس آئروژینوزا خاصیت ضدمیکروبی خوبی نداشته‌اند[۴۶]. جدول ۱ مهم‌ترین عصاره‌های گیاهی مورد استفاده در سال‌های اخیر را جهت سنتز نانوذرات نقره نشان می‌دهد. هم‌چنین، اندازه نانوذرات نقره، شکل نانوذرات نقره، نوع باکتری مورد بررسی و هاله مهار باکتری در جدول ۱ آورده شده است. سنتز سبز با عصاره گیاهان شامل عصاره‌گیری از قسمت‌های مختلف گیاه از جمله گل، میوه، برگ، پوست و غیره می‌باشد. تحقیقات انجام شده نشان می‌دهند که عصاره برگ بر روی باکتری گرم منفی عملکرد بهتری داشته است، در حالی که عصاره میوه بر روی باکتری گرم مثبت عملکرد بهتری داشته است. به همین دلیل، می‌توان بیان کرد که علاوه بر اندازه نانوذرات، تهیه عصاره از بخش‌های مختلف گیاهان بر عملکرد ضدمیکروبی نانوذرات نقره تاثیر دارد. به عنوان مثال؛ نانوذرات نقره تهیه شده با صمغ بر روی باکتری گرم منفی تاثیر بالاتری داشته و بر روی باکتری سودوموناس آئروژینوزا عملکرد پایین‌تری داشته است. در یکی از تحقیقات، سنتز سبز با فراصوت باعث افزایش اندازه نانوذرات و افزایش خاصیت ضدمیکروبی بر روی باکتری گرم منفی شده است. با توجه به جدول ۱، استفاده از خاصیت مغناطیسی باعث کاهش اندازه نانوذرات نقره و عملکرد بهتر خاصیت ضدمیکروبی آن‌ها بر روی باکتری گرم مثبت شده است. بررسی خاصیت ضدمیکروبی نانوذرات نقره در بررسی مطالعات موجود در جدول ۱ با استفاده از روش کشت دیسکی صورت پذیرفته است.

۳-۲- باکتری

فرآیند سنتز سبز با باکتری دارای مشکلاتی مانند زمان‌بر بودن فرآیند و عدم کنترل دقیق ابعاد نانوذرات حاصل شده است. باکتری‌ها به دلیل توانایی در کاهش یون‌های فلزات سنگین، به عنوان یکی از گزینه‌های اصلی برای سنتز نانوذرات مورد توجه قرار گرفته‌اند [۷۱, ۷۲]. کلاس و همکاران سنتز نانوذرات نقره با ترکیبات و اشکال مشخص را با استفاده از سویه سودوموناس استوتزری بررسی کردند[۷۳]. همچنین کالیماث و همکاران سنتز نانوذرات نقره با استفاده از توده زیستی باسیلوس لیکنیفورمیس [3] مورد بررسی قرار داده‌اند. مطابق نتایج این تحقیق، اندازه نانوذرات سنتز شده بین ۴۰ تا ۵۰ نانومتر بوده و با استفاده از آنزیم نیترات تثبیت شده‌اند [۷۴].

در تحقیقی، سنتز سبز نانوذرات نقره با استفاده از پاتوژن شیگلا فلکسنری ۲۹۵۰۸ [4] بررسی شده است و کارایی آنها به عنوان عوامل ضدقارچی ارزیابی شده است. سویه خالص این باکتری توانایی کاهش یون‌های نقره را داشت. ابعاد نانوذرات نقره تهیه شده کروی شکل، ۵۰ نانومتر بود. مطابق این تحقیق، آزمایش‌های خواص‌سنجی حاکی از آن است که این نانوذرات از فعالیت ضدقارچی خوبی برخوردار بوده‌اند[۷۵]. در جدول ۲ انواع باکتری مورد استفاده، اندازه نانوذرات، شکل نانوذرات و هاله مهار باکتری توسط نانوذرات نقره حاصل شده در شرایط بهینه تحقیقات ذکر شده است. در بررسی جدول ۲ مشخص شد که سنتز نانوذرات نقره با باکتری لاکتوباسیلوس[5] خاصیت ضدباکتری خوبی در برابر گروه پلانتاروم[6] (باکتری گروم مثبت) داشته است. هم‌چنین، خاصیت ضدمیکروبی نانوذرات نقره سنتز شده با باکتری اگزوپلی ساکارید پروبیوتیک لاکتوباسیلوس برویس MSR104 [7] عملکرد بهتری بر روی باکتری گرم منفی نشان داده است.

[1] Senna occiddentalis
[2] Streptococcus pyogenes
[3] Bacillus licheniformis
[4] Shigella flexneri 29508
[5] Lactobacillus
[6] Plantarum
[7] Lactobacillus brevis isolated from Chinese koumiss

جدول ۱. انواع عصاره گیاه مورد استفاده به عنوان واسطه سنتز برای تهیه نانوذرات نقره دارای خاصیت ضدمیکروبی.

شماره	نوع گیاه	اندازه نانوذرات (nm)	شکل نانوذرات	نوع باکتری	هاله مهار باکتری (mm)	منبع
۱	عصاره آبی بومادران[۱]	۲۰/۷۷	کروی	استافیلوکوکوس اورئوس	۱۰/۳۳	[۴۷]
				باسیلوس سوبتلیس[۲]	۹/۶۷	
				سالمونلا انتریکا	۹/۶۷	
				اشریشیا کلی	۱۰/۶۷	
				سودوموناس آئروژینوزا	۱۰	
	عصاره اتانولی بومادران	۱۸/۵۳	مستطیلی	استافیلوکوکوس اورئوس	۱۳/۱۰	[۴۷]
				باسیلوس سوبتلیس	۱۰	
				سالمونلا انتریکا	۱۳/۱۰	
				اشریشیا کلی	۱۳	
				سودوموناس آئروژینوزا	۱۳	
	عصاره متانولی بومادران	۱۴/۲۷	مکعبی	استافیلوکوکوس اورئوس	۱۴/۶۷	[۴۷]
				باسیلوس سوبتلیس	۱۰/۳۳	
				سالمونلا انتریکا	۱۰/۶۷	
				اشریشیا کلی	۹/۶۷	
				سودوموناس آئروژینوزا	۱۴/۳۳	
۲	صمغ کادام کربوکسی متیله[۳]	۹	کروی	باسیلوس سوبتیلیس	۲۳	[۴۸]
				باسیلوس سرئوس	۲۵	
				اشریشیا کلی	۲۸	
				سودوموناس آئروژینوزا	۱۵	
۳	عصاره برگ گل لادن[۴]	۵۵–۳۵	کروی	استافیلوکوکوس اورئوس	۵۰	[۴۹]
				انتروکوکوس فکالیس[۵]	۲۵	
				اشریشیا کلی	۲۲	
				سالمونلا تیفی	۵۰	
				سودوموناس آئروژینوزا	۵	
۴	عصاره میوه گارسینیا ایندیکا	۳۰–۵	کروی	اشریشیا کلی	۱۴	[۵۰]
				باسیلوس سوبتلیس	۱۲	
				استافیلوکوکوس اورئوس	۱۵	
				سودوموناس آئروژینوزا	۱۲	
				سالمونلا انتریکا	۰	
				پروتئوس ولگاریس	۰	
۵	عصاره گیاه فلفل دلمه‌ای	۸۰–۳۱	کروی	سودوموناس آئروژینوزا	۸	[۵۱]
۶	عصاره بذر کتان	۴۶/۹۸	کروی	اشریشیا کلی	۱۱	[۵۲]
				کلبسیلا پنومونیه	۱۰/۸	
				استافیلوکوکوس اورئوس	۸/۹	
				استرپتوکوک پیوژنز	۸/۷	
۷	عصاره گل جاتروفا اینترگیم ژاک[۶]	۴۵–۱۷	کروی	اشریشیا کلی	۲۳/۳۳	[۵۳]
				باسیلوس سوبتلیس	۱۲/۶۷	
				کلبسیلا پنومونیه	۱۸/۳۳	
				استافیلوکوکوس اورئوس	۱۴/۶۷	

ادامه جدول ۱...

۸	عصاره اسطوخودوس استوکاس[۷]	۲۰–۵۰	کروی	استافیلوکوکوس اورئوس سودوموناس آئروژینوزا	۲۰ ۱۹	[۵۴]
۹	کوروکومین	۳۳۰–۷۳۰	کروی	استافیلوکوکوس اورئوس سودوموناس آئروژینوزا	۲۵ ۲۵	[۵۵]
۱۰	عصاره آبی برگ حرا[۸]	۳۰	کروی	استافیلوکوکوس اورئوس اشریشیا کلی	۷ ۹	[۵۶]
۱۱	سلولز	۲۲—۵۵	کروی	باسیلوس سرئوس باسیلوس سوبتلیس اشریشیا کلی میکروکوکوس لوتئوس سودوموناس آئروژینوزا سالمونلا تیفی سراشیا مارسسنس استافیلوکوکوس اورئوس	۱۳ ۱۳ ۱۳ ۱۵ ۱۳ ۱۴ ۱۴ ۱۴	[۵۷]
۱۲	عصاره دانه شنبلیله	التراسوند ۲۰ مغناطیسی۴۰	کروی	اشریشیا کلی استافیلوکوکوس اورئوس اشریشیا کلی استافیلوکوکوس اورئوس	۶٫۳۲ ۷٫۰۷ ۱۰٫۴۹ ۱۰	[۵۸]
۱۳	عصاره آویشن کوتسیانوس[۹]	۴۰–۵۰	کروی	اشریشیا کلی استافیلوکوکوس اورئوس باسیلوس سوبتلیس استرپتوکوک پیوژنز	۲۵ ۲۴ ۲۴ ۲۷	[۵۹]
۱۴	عصاره آبی برگ‌های کاسیا آلاتا[۱۰]	۲۰–۸۵	کروی	استافیلوکوکوس اورئوس باسیلوس سوبتلیس اشریشیا کلی والگریا	۱۰ ۱۱ ۱۳ ۸	[۶۰]
۱۵	عصاره براسیکا اولراسه (کلم بروکلی ایتالیا)[۱۲]	۲۰	کروی	باکترئوید فارگیل[۱۱] استرپتوکوک پنومونی استافیلوکوکوس اورئوس کلبسیلا پنومونیه اشریشیا کلی اینترکوکوس پروتئوس میرابیلس[۱۳] سودوموناس آئروژینوزا استافیلوکوکوس ایپدمس[۱۴]	۹٫۴۳ ۱۰٫۳۳ ۱۰٫۱ ۱۰ ۱۰ ۱۱٫۱۶ ۱۱٫۳۳ ۱۲ ۱۴٫۳۳	[۶۱]
۱۶	کیتوزان	۱۹۰–۲۰۰	کروی	استافیلوکوکوس اورئوس باسیل سروئوز لوتوس[۱۵] انتریکا	۲۱ ۱۳ ۲۰ ۱۷	[۶۲]

ادامه جدول ۱...

					اشریشیا کلی	۱۵	
					سالمونلا تیفی	۱۰	
					کلبسیلا پنومونیه	۱۷	
۱۷	عصاره برگ استرامونیوم داتورا[۱۶]	۲۰/۴۳	کروی		اشریشیا کلی	۴	[۵۴]
					استافیلوکوکوس اورئوس	۴	
۱۸	عصاره ریشه والریاناجاتامانسی[۱۷]	۲۹/۱	کروی		اشریشیا کلی	۱۸/۳	[۶۳]
					استافیلوکوکوس اورئوس	۱۵/۷	
					استرپتوکوکوس موتانس	۱۹/۴	
۱۹	عصاره برگ شاهدانه ساتیوا[۱۸]	۱۹۵-۱۰۴	کروی		پزدو فلورانس	۶	[۶۶]
					استافیلوکوکوس اورئوس	۷	
					کلبسیلا پنومونیه	۸	
					اشریشیا کلی	۸	
۲۰	عصاره آبی آلیوم آمپلوپراسم[۱۹]	۵۰-۸	کروی		استافیلوکوکوس اورئوس	۸	[۶۴]
					سودموناس ارئوژینزا	۲۷	
					اشریشیا کلی	۲۳	
۲۱	عصاره سرخس	۱۴/۰۱	کروی		اشریشیا کلی	۱۸	[۶۵]
					کاندیدا آلبیکانس	۲	
۲۲	عصاره پالپ موز[۲۰]	۴۳/۵۶	کروی		اشریشیا کلی	۱۷/۳	[۶۶]
					استافیلوکوکوس اپیدمس	۱۳/۵	
۲۳	عصاره پریلا فروتسنس[۲۱]	۸۰-۲۰	کروی		استافیلوکوکوس اورئوس	۱۰/۶۴	[۶۷]
					اشریشیا کلی	۹/۴۳	
					باسیلوس سوبتلیس	۹/۸۴	
					سودموناس آئروژینوزا	۹/۹۷	
۲۴	عصاره دانه کاسیای غربی ال[۲۲]	۲۸/۵ -۶/۴۴	کروی		استافیلوکوکوس اورئوس	۱۱/۸۵	[۶۸]
					اشریشیا کلی	۱۴/۶۱	
					باسیلوس سوبتلیس	۱۵/۵۰	
۲۵	عصاره لیسیوم شاوی[۲۳]	۱۴۲-۱۲	کروی		اشریشیا کلی	۱۰/۳	[۶۹]
					سودموناس فلوروسنس[۲۴]	۸/۱	
					انتریکا	۱۴	
					باسیلوس سوبتلیس	۷/۸	
					استافیلوکوکوس اورئوس	۸/۳	
۲۶	عصاره دانه بیکسا اورلانال[۲۵]	۲۱/۲۸	کروی		اشریشیا کلی	۱۹	[۶۹]
					انتروباکتر کلوآکا[۲۶]	۱۸	
					انتروکوکوس فکالیس	۱۷	
					پروتئوس میرابیلیس	۱۷	
					سودوموناس آئروژینوزا	۱۶	

ادامه جدول ۱...

۲۷	عصاره برگ هیبیسکوس تیلیاسئوس ال[۲۷]	۳۰–۳۵	کروی	باسیلوس سوبتلیس	۱۰٫۹۱	[۷۰]
				استافیلوکوکوس اورئوس	۱۰٫۸۸	
				اشریشیا کلی	۱۲٫۳۱	
				کلبسیلا پنومونیه	۱۰٫۷۰	
				سودوموناس آئروژینوزا	۱۰٫۴۷	
				پروتئوس ولگاریس	۱۱٫۹۴	

[1]Yarrow (Achillea millefolium), [2] Bacillus subtilis, [3] Carboxymethylated Kadam gum, [4] Tropaeolum majus L., [5] Enterococcus faecalis, [6] Jatropha integerrima Jacq. Flower, [7] Lavandula stoechas, [8] mangrove rhizophora stylosa leaf, [9] Thymus kotschyanus, [10] leaves of Cassia alata, [11] Bacteroides fragilis, [12] Brassica oleracea, [13]Proteus mirabilis, [14] Staphylococcus epidermidis, [15] Lotus, [16] Datura stramonium leaf, [17] Valeriana jatamansi, [18] diverse varieties of Cannabis sativa leaf, [19] Allium ampeloprasum, [20] Banana pulp extract, [21] Acid-Rich Perilla frutescens, [22] Cassia occidentalis L. seed, [23] Lycium shawii, [24] Pseudomonas fluorescens, [25] Bixa Orellana Seed, [26] Enterobacter cloacae, [27] Hibiscus tiliaceus L

جدول ۲. انواع باکتری مورد استفاده به عنوان واسطه سنتز برای تهیه نانوذرات نقره دارای خاصیت ضدمیکروبی.

شماره	نوع باکتری	اندازه نانوذرات (nm)	شکل نانوذرات	نوع باکتری	هاله مهار باکتری (mm)	منبع
۱	سنتز با لاکتوباسیلوس پلانتاروم TA4	۱۴	کروی	استافیلوکوکوس اورئوس	۱۸	[۷۶]
				استافیلوکوکوس اپیدیمیس	۱۷٫۶۷	
				اشریشیا کلی	۱۵	
				سالامونا	۱۷٫۳۳	
۲	اگزوپلی ساکارید پروبیوتیک لاکتوباسیلوس برویس MSR104	۴۵	کروی	اشریشیا کلی	۱۳٫۷۲	[۷۷]
				استافیلوکوکوس اورئوس	۹٫۵۳	
۳	لاکتوباسیلوس پلانتاروم	۱۰–۰٫۷	کروی	استافیلوکوکوس اورئوس	۲۲	[۷۸]
				اشریشیا کلی	۲۰	
۴	باسیلوس ROM6	۷۰–۲۰	کروی	استافیلوکوکوس اورئوس	۱۷	[۷۹]
				اشریشیا کلی	۱۲	
				سودوموناس آئروژینوزا	۱۰	
				آسینتو باکتربومانی[۱]	۸	
۵	باسیلوس زانتوکسینلی GBE11[۲]	۴۰–۵	کروی	باسیلوس سوبتیلیس	۱۷٫۲	[۸۰]
				استافیلوکوکوس اورئوس	۱۸	
				اشریشیا کلی	۱۹٫۵	
				سودوموناس آئروژینوزا	۱۸٫۲	
				آلبیکنس[۳]	۱۸٫۹	
۶	باکتری سودوموناس استخراج شده از خاک	۵۰–۵	کروی	اشریشیا کلی	۱۵	[۸۱]
				اگزیگوباکتریوم آرانتیاکوم[۴]	۱۲	
				استافیلوکوکوس اورئوس	۲۱	
۷	سرتی مارکاسکانس اورئوس سکوئنسیس[۵]	۲۰–۱۰	کروی	لیستریا	۲۱	[۸۲]
				اشریشیاکلی	۱۷	
				باسیلوس سرئوز	۱۹٫۵	
				سودوموناس اورژینوزا	۲۳	
۸	اشریشیاکلی	۱۰٫۶	کروی	اشریشیاکلی	–	[۸۳]

[1] Acinetobacter baumannii, [2] Bacillus amyloliquefaciens, [3] Bacillus albicans, [4] Exiguobacterium aurantiacum, [5] Serratia marcescens ssp sakuensis

۳-۳- جلبک

جلبک‌ها موجودات خودپرورده‌ای هستند که می‌توانند به‌راحتی در محیط‌های مختلف رشد کنند. سلول‌های جلبک دارای متابولیت‌های ثانویه مختلف و ترکیبات زیستی فعالی هستند که به عنوان عوامل پوششی در فرآیند سنتز نانوذرات عمل می‌کنند[۸۴]. اجزای شیمیایی اصلی جلبک‌ها شامل پروتئین‌ها، کربوهیدرات‌ها (شامل سلولز و نشاسته)، لیپیدها (شامل روغن‌ها و چربی‌ها)، رنگدانه‌ها (شامل کلروفیل و کاروتنوئیدها)، مواد مغذی، مواد معدنی و ترکیبات فعال زیستی متعدد هستند. به دلیل توانایی جلبک‌ها برای تبدیل مواد مغذی معدنی به مولکول‌های زیستی متنوع شامل رنگدانه‌ها، پلی ساکاریدها، پروتئین‌ها و لیپیدها گزینه مناسب برای واسطه سنتز محسوب می‌شوند. علاوه بر این، جلبک‌ها تعدادی متابولیت ثانویه را به همراه پلی‌فنول‌ها، فلاونوئیدها و ترپنوئیدها تولید می‌کنند که دارای خواص ضدمیکروبی و ضدسرطانی هستند[۹]. در فرآیند سنتز از گونه‌های جلبک، عصاره آن‌ها یا پلیمرهای زیستی برای تسهیل احیاء یا تثبیت یون‌های فلزی، نمک‌های فلزی یا ترکیبات پیش‌ساز مختلف استفاده می‌شود. جلبک‌ها جایگزین مناسبی برای روش‌های مرسوم هستند زیرا قیمت مناسبی دارند، به وفور در دسترس هستند و میل ترکیبی بالایی با یون‌های فلزی دارند. سنتز نانومواد با استفاده از جلبک شامل چندین مرحله است. مرحله اول، زیست‌توده یا عصاره جلبک به دست می‌آید. در مرحله دوم، یون‌های فلزی یا محلول‌های پیش‌ساز به محیط اضافه می‌شوند. در نهایت در مرحله سوم تحت شرایط مناسب، جلبک‌ها یا اجزای آنها به عنوان کاهنده یا تثبیت کننده عمل می‌کنند و تشکیل و افزایش نانوساختارها را تسهیل می‌کنند[۹]. سنتز با استفاده از جلبک طی مکانیزم‌های بیوشیمیایی و بیوفیزیکی انجام می‌شود. جلبک‌ها دارای آنزیم‌ها و پروتئین‌هایی هستند که به عنوان کاتالیزور عمل می‌کنند و فرآیند بیومرینالیزاسیون[1] را تسهیل می‌کنند. این مولکول‌های زیستی می‌توانند به یون‌های فلزی متصل شده و آنها را به نانوذرات کاهش دهند و پراکندگی آنها را تثبیت نمایند[۹]. سنتز زیستی نانوذرات با واسطه جلبک، بسته به نوع جلبک و نانوذرات مورد نظر، طی مکانیزم‌های مختلف شامل تجمع زیستی و کاهش زیستی، سنتز خارج سلولی، سنتز درون سلولی و کاهش آنزیمی صورت می‌گیرد. جلبک‌ها قابلیت جذب یون‌های فلزی از محیط اطراف را دارند. بعضی آنزیم‌های موجود در جلبک‌ها، مانند نیترات ردوکتاز یا آلدئید دهیدروژناز فرایند کاهش یون‌های فلزی را فعال می‌کنند و آن‌ها را به شکل‌های فلزی صفر ظرفیتی تغییر می‌دهند. برخی از گونه‌های مختلف جلبک در سنتز خارج سلولی، مولکول‌های آلی شامل پروتئین‌ها، آنزیم‌ها و پلی‌ساکاریدها را به عنوان عامل کاهنده و تثبیت کننده به محیط اطراف منتشر می‌کنند. در سنتز درون سلولی، جلبک‌ها دارای اندامک‌های درون سلولی از جمله کلروپلاست هستند. اندامک‌های درون سلولی شرایط کاهش و تثبیت مناسبی را برای تشکیل نانوذرات فراهم می‌کنند. در مکانیزم کاهش آنزیمی، جلبک‌ها آنزیم‌های مختلف از جمله ردوکتازها، پراکسیدازها و لاکازها را تولید می‌نمایند که می‌توانند یون‌های فلزی را کاهش دهند. این آنزیم‌ها دارای گروه‌های کاربردی خاصی هستند که می‌توانند به یون‌های فلزی متصل شوند و فرآیند کاهش آن‌ها را تسهیل کنند. دقت مکانیزم کاهش آنزیمی در بین انواع مکانیزم‌ها بالاست و می‌تواند منجر به سنتز کنترل‌شده نانوذرات با اندازه و شکل مطلوب شوند. مکانیزم سنتز سبز با جلبک شامل ترکیبی از روش‌های ذکر شده در بالا هستند[۹].

دهز و همکاران در سال ۲۰۱۴ سنتز زیستی نانوذرات AgCl را با استفاده از جلبک دریایی سارگاسوم پلاژیوفیلوم[2] به‌صورت خارج‌سلولی انجام دادند. نانوذرات کروی با اندازه ۲۱ تا ۴۸ نانومتر به دست آمده است. نانوذرات تهیه شده فعالیت ضدباکتری مناسبی علیه باکتری اشریشیاکلی داشته است[۸۵]. در مطالعه‌ای دیگر، داسیلوافرویرا و همکاران در سال ۲۰۱۷ سنتز زیستی خارج‌سلولی نانوذرات نقره را با استفاده از جلبک سبز تک‌سلولی کلرلا ولگاریس[3] انجام داده‌اند. بررسی آنالیز FTIR نانوذرات نقره نشان می‌دهد که پروتئین‌های جلبک عامل اصلی تثبیت و تشکیل نانوذرات نقره بوده‌اند. نانوذرات نقره فعالیت ضدمیکروبی خوبی در برابر باکتری‌های بیماری‌زای استافیلوکوکوس اورئوس (گرم مثبت) و کلبیداس پنومونیه (گرم منفی) از خود نشان داده است[۸۶]. فاطیما و همکاران سنتز زیستی نانوذرات کروی نقره را

[1] Biomineralization

[2] Sargassum plagiophyllum

[3] Chlorella vulgaris

با استفاده از جلبک قرمز پورتیریا هورنمانی[1] بررسی کردند. نانوذرات نقره، فعالیت ضدمیکروبی خوبی علیه باکتری‌های ویبریو پارهمولیتیکوس،[2] ویبریو آنگویلاروم،[3] ویبریو آلژینولیتیکوس[4] و ویبریو هارویی[5] نشان دادند[۸۷]. در گزارش دیگری، باهورا و همکاران در سال ۲۰۲۰ سنتز زیستی نانوذرات نقره را با استفاده از جلبک میکرو دریایی گونه پادینا[6] بررسی کردند. نانوذرات نقره، اندازه یکنواختی داشتند و فعالیت ضدمیکروبی خوبی در برابر باکتری‌های بیماری‌زای سودموناس آرئوژینروز و استافیلوکوکوس اورئوس از خود نشان دادند[۸۸]. در جدول ۳ خلاصه‌ای از مهم‌ترین جلبک‌های مورد استفاده در سنتز سبز نانوذرات نقره همراه با اندازه، شکل و خاصیت ضدمیکروبی آن‌ها آورده شده است. هاله مهار باکتری توسط نانوذرات نقره تهیه شده با جلبک از قاعده منظمی برخوردار نیست. در اغلب تحقیقات انجام شده با واسطه جلبک، خاصیت ضدمیکروبی نانوذرات نقره تهیه شده بر روی باکتری‌های گرم منفی نسبت به باکتری‌های گرم مثبت بیشتر است. بررسی خاصیت ضدمیکروبی نانوذرات نقره در بررسی مطالعات موجود در جدول ۳ با استفاده از روش کشت دیسکی صورت پذیرفته است.

۳-٤- قارچ

سنتز نانوذرات نقره به‌وسیله قارچ‌ها یکی دیگر از روش‌های زیستی سنتز نانوذرات است. سنتز نانوذرات نقره با استفاده از قارچ‌ها به دلیل امکان تهیه نانوذرات نقره با اندازه و شکل هندسی کنترل شده، توجه بیشتری را به خود جلب کرده است[۹۹]. خاصیت ضدمیکروبی نانوذرات نقره سنتز شده با استفاده از قارچ‌ها به دلایل خواص تجمع فلزی و تحمل غلظت بالای فلز نسبت به دیگر میکروارگانیسم‌ها بیشتر است[۱۰۰, ۱۰۱]. قارچ‌ها، پتانسیل بالایی را برای اتصال دیواره سلولی به یون‌های فلزی دارند. تهیه نانوذرات به وسیله قارچ‌ها کارآمدتر، کم‌هزینه‌تر و ساده‌تر از باکتری‌ها است. به همین دلیل، قارچ‌ها به‌طور گسترده‌ای برای سنتز انواع مختلف نانوذرات از جمله نانوذرات نقره، طلا و به صورت محدود برای اکسید منگنز و تیتانیوم مورد استفاده قرار گرفته‌اند. مکانیزم سنتز نانوذرات با استفاده از قارچ‌ها می‌تواند داخل سلولی یا خارج سلولی باشد. در سنتز داخل سلولی، فلز پیش‌ماده به کشت میسلیومی[7] اضافه می‌شود و در زیست‌توده قارچ جذب می‌گردد. بنابراین، استخراج نانوذرات نیازمند روش‌های شیمیایی، سانتریفیوژ و فیلتراسیون برای تجزیه زیست‌توده و آزادسازی نانوذرات است[۱۰۲]. در روش‌های سنتز خارج سلولی، فلز پیش‌ماده به محلول آبی حاوی مولکول‌های زیستی زیست‌توده قارچ اضافه می‌شود که منجر به تشکیل نانوذرات آزاد می‌شود. این روش نیازی به روش و تجهیزات خاصی برای آزادسازی نانوذرات از سلول‌ها ندارد و بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرد[۱۰۳]. در سال‌های اخیر، بیشتر تحقیقات بر روی تولید خارج‌سلولی نانوذرات به‌وسیله قارچ‌ها انجام شده است[۱۰۴]. متوکا و همکاران در سال ۲۰۱۴ سنتز نانوذرات نقره را با استفاده از قارچ اسکیزوفیلوم رادیاتوم[8] انجام دادند که منجر به تولید نانوذرات نقره با اندازه ۱۰ تا ۴۰ نانومتر از طریق فرآیند بیومینرالیزاسیون خارج‌سلولی شد. خاصیت ضدمیکروبی نانوذرات نقره به دست آمده در برابر باکتری‌های گرم مثبت و منفی قابل قبول بوده است[۱۰۵]. فروز و همکاران در تحقیقی به سنتز نانوذرات نقره با واسطه قارچ و ارزیابی فعالیت ضدمیکروبی نانوذرات به دست آمده در برابر باکتری‌های استافیلوکوکوس اورئوس، استافیلوکوکوس دیسانتریا[9] و سالمونلا تیفی با روش انتشار دیسکی پرداختند. در این تحقیق، هاله مهار ثبت شده علیه استافیلوکوکوس اورئوس، استافیلوکوکوس دیسانتریا و سالمونلا تیفی به ترتیب برابر با ۱۷/۵±۰/۵، ۱۷/۵±۰/۵ و ۱۸/۳±۰/۶ میلی‌متر بوده است[۱۰۶].

عواملی مانند pH محیط، زمان واکنش و غلظت‌های یونی بر بازده و اندازه نانوذرات تهیه شده با قارچ تأثیر می‌گذارند. به همین دلیل، مطالعات زیادی به منظور بررسی اثر این پارامترها بر تهیه نانوذرات نقره با واسطه قارچ انجام شده است. راجپوت و همکاران در سال ۲۰۱۶، اثر pH و دما بر بیوسنتز نانوذرات نقره را با استفاده از قارچ فوزاریوم اکسی اسپوروم[10] بررسی کردند. نتایج حاکی از آن است که pH محیط بر شکل نانوذرات نقره تولید شده توسط فوزاریوم اکسی اسپوروم ۴۰۵ تأثیر می‌گذارد. در

[1] Portieria hornemannii
[2] Vibrio parahaemolyticus
[3] Vibrio anguillarum
[4] Vibrio alginolyticus
[5] Vibrio harveyii
[6] Padina sp.
[7] Mycelium
[8] Schizophyllum radiatum
[9] Staphylococcus dysentery
[10] Fusarium oxysporum

جدول ۳. انواع جلبک مورد استفاده به عنوان واسطه سنتز برای تهیه نانوذرات نقره دارای خاصیت ضدمیکروبی.

شماره	نوع جلبک	اندازه نانوذرات (nm)	شکل نانوذرات	نوع باکتری	هاله مهار باکتری (mm)	منبع
۱	میکرو جلبک کلاسترولا آئرورستریکا استرین BA_Chlo4[۱]	۱۴٫۵	شش ضلعی	استافیلوکوکوس اورئوس	۱۳	[۸۹]
		۱۵٫۶	کروی	اشریشیا کلی	۱۲	
				سودوموناس آئروژینوزا	۱۰٫۱	
				استرپتوکوک پیوژنز	۱۱٫۲	
				باسیلوس سوبتلیس	۱۰٫۰۷	
۲	عصاره جلبک سیانوباکتریوم[۲]	۳۰	کروی	اشریشیا کلی	۱۶٫۹	[۹۰]
				کلبسیلا پنومونیه	۱۶٫۵	
				سودوموناس آئروژینوزا	۱۶٫۴	
				استافیلوکوکوس اورئوس	۱۶٫۹۵	
۳	عصاره مورینگا اولیفرا[۳]	۲۹٫۴۵–۱۵٫۲۲	کروی	اشریشیا کلی	۱۷	[۹۱]
				کلبسیلا پنومونیه	۱۱	
				استافیلوکوکوس اورئوس	۱۹	
				باسیلوس سوبتلیس	۱۵	
۴	جلبک قهوه‌ای سرگاسوم والگرا[۴]	۱۶٫۹۷ –۶٫۹۰	کروی	استافیلوکوکوس کاپره	۲۱	[۹۲]
				استافیلوکوکوس کاپیتیس	۱۸٫۳۳	
				استافیلوکوکوس اپیدرمیدیس	۱۵	
۵	جلبک سبز آبی (سیانوباکتریوم) اسیلاتوریا[۵]	۲۸	کروی	اشریشیا کلی	۱۶	[۹۳]
۶	جلبک رشته ای[۶]	۳۰–۲۰	کروی	استافیلوکوکوس اورئوس	۲۳	[۹۴]
				آسینتو باکتربومانی	۱۵	
۷	جلبک سبز انتروومورفا روده‌ای[۷]	۹٫۱۷	کروی	اشریشیا کلی	۱۵	[۹۵]
				سودوموتاس آپروژینوزا	۱۵	
				کلبسیلا پنومنه	۱۶	
				استافیلوکوکوس اورئوس	۱۴	
				سالمونلا انتریکا	۱۵	
				سارکینا	۱۵	
				کاندیا	۱۵	
۸	دونالیلا سالینا[۸]	۳۵	کروی	اشریشیا کلی	۴	[۹۶]
				باسیلوس سوبتلیس	۷	
				انتروباکتر	۷	
۹	کلرلا مینوتیسیما[۹]	۷۳٫۱۳	کروی	اشریشیا کلی	۲۰	[۹۷]
				سالمونلا	۱۷	
				کلبسیلا	۱۵	
				استافیلوکوکوس اورئوس	۲۰	
				باسیلوس سرئوز	۲۱	
۱۰	جلبک دریایی سارگاسوم پلی کیستوم[۱۰]	کمتر از ۱۰۰	کروی	استافیلوکوکوس اورئوس	۳۶	[۹۸]
				میکروکوکوس لوتئوس	۳۵	
				سودوموناس فلورسنس	۲۵	
				سراتیا مارسسنس	۱۸	
				کلبسیلا پنمونیاکول	۱۸	

ادامه جدول ۳...

استافیلوکوکوس اپیدرمیدیس	۱۷
کاندیدااَلبیکانس	۱۷
باسیلوس سوبتلیس	۱۸
ویبریوکلرا	۱۵

[1] Microalgae coelastrella aeroterrestrica strain BA_Chlo4, [2] Cyanobacterial algae, [3] Marine brown alga Padina pavonia, [4] Brown Algae Sargassum vulgare, [5] Blue-green alga Oscillatoria princeps, [6] Filamentous algae, [7] Green algae Enteromorpha intestinalis, [8] Dunaliella salina, [9] Chlorella minutissima

pH=۳ ، نانوذرات نقره‌ای به اشکال مثلثی، کروی و میله‌ای تولید می‌شوند؛ در حالی که در ۵ و pH=۷ نانوذرات یکنواخت و عمدتاً کروی شکل تولید می‌شوند. هم‌چنین، تأثیر دماهای مختلف را بر میزان نانوذرات نقره تولید شده توسط فوزاریوم اکسی اسپوروم ۴۰۵ بررسی شد که بیشترین مقدار نانوذرات نقره در دمای بین ۵۰ تا ۷۰ درجه سانتی‌گراد تشکیل شده است؛ در حالی که کمترین مقدار نانوذرات نقره در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد مشاهده شده است. دماهای انکوباسیون بر اندازه نانوذرات نقره سنتز شده تأثیر دارند. در دماهای بهینه (۵۰ تا ۷۰ درجه سانتی‌گراد)، نانوذرات کوچک (۱۰ نانومتر) تشکیل شدند در حالی که در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد، قطر نانوذرات نقره بیش از ۵۰ نانومتر بوده است[۱۰۷]. افزایش بیشتر pH تا ۹ منجر به تشکیل ترکیبی از نانوذرات به شکل بیضوی و کروی شده است. تغییر pH محیط باعث ایجاد اندازه‌های مختلف نانوذرات می‌شود، زیرا تغییر pH بر ماهیت اسیدی یا بازی اسیدهای آمینه که در ساخت نانوذرات دخیل هستند، تأثیر می‌گذارد[۱۰۷-۱۰۹]. بیرلا و همکاران در سال ۲۰۱۳ تأثیر دما بر بیوسنتز نانوذرات نقره با استفاده از فوزاریوم اکسی اسپوروم را مطالعه کردند و نتایج نشان داد که دمای بهینه سنتز نانوذرات نقره ۴۰ تا ۶۰ درجه سانتی‌گراد است[۱۰۹]. راموس و همکاران در سال ۲۰۲۰ سنتز زیستی خارج‌سلولی نانوذرات نقره را از قارچ گونه تریکودرما[1] گزارش کردند و نتیجه‌گیری کرده‌اند که نانوذرات نقره، فعالیت ضدباکتری خوبی علیه باکتری‌های گرم منفی داشته است[۱۱۰].

در جدول ۴ خلاصه‌ای از مهم‌ترین قارچ‌های مورد استفاده در سنتز سبز نانوذرات نقره همراه با اندازه، شکل و خاصیت ضدمیکروبی آن‌ها آورده شده است. با توجه به جدول مشاهده می‌شود که نانوذرات نقره تهیه شده با عصاره قارچ، خاصیت ضدمیکروبی بیشتری بر روی باکتری گرم منفی نسبت به باکتری گرم مثبت داشته است. اما مطالعاتی وجود دارد که در آن، مهار باکتری گرم مثبت توسط نانوذرات نقره نسبت به باکتری گرم منفی بیشتر می‌باشد. در تحقیقاتی، خاصیت ضدمیکروبی نانوذرات نقره تهیه شده به کمک قارچ آسپرژیلوس ژاپنیکس[2] پنی سیلیوم[3] و آسپرژیلوس ترئوس[4] بررسی شده است که نتایج حاکی از خاصیت ضعیف ضدمیکروبی نانوذرات نقره بوده است.

٤- تحلیل و بحث

بررسی تحقیقات انجام شده نشان می‌دهد که فعالیت ضدمیکروبی نانوذرات نقره به اندازه نانوذرات، نوع واسطه سنتز، مقدار واسطه سنتز، روش سنتز، شرایط سنتز، نوع باکتری‌های مورد بررسی و غیره بستگی دارند. شکل ۵ اثر نانوذرات نقره سنتز شده با عصاره گیاهان را بر مهار باکتری‌های گرم مثبت و منفی نشان می‌دهد. نتایج شکل ۵ نشان می‌دهند که اندازه نانوذرات تأثیر قابل‌توجهی بر توانایی آن‌ها در مهار باکتری‌ها دارند. این موضوع می‌تواند به دلیل تفاوت در سطح تماس و قابلیت نفوذ نانوذرات به دیواره‌های سلولی باکتری‌ها باشد. وجود ترکیبات زیستی فعال مختلف در عصاره‌های گیاهی می‌تواند باعث تفاوت‌های قابل‌توجه در کارایی ضدمیکروبی نانوذرات نقره تهیه شده با انواع عصاره‌های گیاهی باشد. در حالت کلی، با بررسی هاله مهار ثبت شده برای باکتری‌های گرم مثبت و منفی مشخص است که تاثیر نانوذرات بر مهار باکتری‌های گرم منفی نسبت به باکتری‌های گرم مثبت بیشتر بوده است. از دلایل تاثیر بیشتر نانوذرات نقره بر روی باکتری‌های گرم منفی می‌توان به ساختار دیواره سلولی، تجمع نانوذرات و آزادسازی یون نقره اشاره کرد.

شکل ۶ نشان‌دهنده تاثیر نانوذرات نقره سنتز شده با باکتری‌ها بر مهار باکتری‌های گرم مثبت و منفی است. تحلیل داده‌های شکل

[1] Ttrichoderma

[2] Aspergillus japonicus
[3] Penicillium
[4] Aspergillus terreus

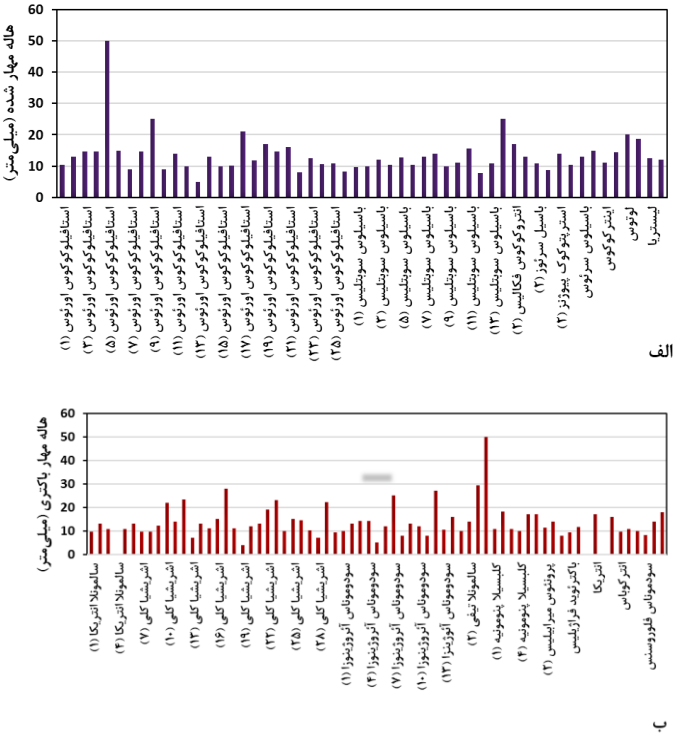
جدول ۴. انواع قارچ مورد استفاده به عنوان واسطه سنتز برای تهیه نانوذرات نقره دارای خاصیت ضدمیکروبی.

شماره	نوع قارچ	اندازه نانوذرات (nm)	شکل نانوذرات	نوع باکتری	هاله مهار باکتری (mm)	منبع
۱	آسپرژیلوس برونویولاسئوس[۱]	۱۵٫۲۱–۰٫۷۲	کروی	استافیلوکوکوس اورئوس	۱۹	[۱۱۱]
				اشریشیا کلی	۱۷	
				سودوموناس آئروژینوزا	۱۹	
				سالمونلا	۱۹	
				باسیلوس سوبتلیس	۲۰	
۲	تریکودرما هارزیانوم	۲۱٫۴۹	کروی	اشریشیا کلی	۱۵٫۵۶	[۱۱۲]
				باسیلوس سوبتلیس	۱۳٫۸۶	
				سالمونلا	۱۷٫۴۳	
				استافیلوکوکوس اورئوس	۱۴٫۶	
۳	تالارومایسس پورپوروژنوس[۲]	۶۰–۳۰	کروی	اشریشیا کلی	۱۷	[۱۱۳]
				شیگلا دیسانتری	۱۸	
				لیستریا مونوسیتوژنز	۱۳	
				سالمونلا تیفی	۱۴	
۴	اندوفیت پنی سیلیوم اگزالیکوم[۳]	۱۶٫۹	کروی	استافیلوکوکوس اورئوس	۸	[۱۱۴]
				اشریشیا کلی	۷٫۴	
۵	بوهینیا تومنتوسا لین[۴]	۳۲	کروی	اشریشیا کلی	۶٫۷۵	[۱۱۵]
				استافیلوکوکوس اورئوس	۹٫۲۵	
۶	پنی سیلیوم اگزالیکوم و فوزاریوم هایناننس[۵]	۲۱–۳	کروی	استافیلوکوکوس اورئوس	۱۵	[۱۱۶]
				باسیلوس سوبتلیس	۱۶	
				باسیلوس مگاتریوم	۱۹	
				اشریشیا کلی	۱۷	
				سودوموناس آئروژینوزا	۱۶	
۷	قارچ اندوفیت – پنی سیلیوم سینامو‌پورپورئوم[۶]	۳۰	کروی	استافیلوکوکوس اورئوس	۱۹	[۱۱۷]
				باسیلوس سوبتلیس	۱۸	
				اشریشیا کلی	۱۹	
				سودوموناس آئروژینوزا	۱۸	
۸	ماکروفنگوس (قارچ)[۷]	۵۰	کروی	استافیلوکوکوس اورئوس	۱۲	[۱۱۸]
				باسیلوس سوبتلیس	۱۶	
				اشریشیا کلی	۱۵	
				سودوموناس آئروژینوزا	۱۷	
۹	آسپرژیلوس ترئوس	۲۳–۳٫۸	کروی	اشریشیا فاسیلوس	۰	[۱۱۹]
				اشریشیا کلی	۰	
				کلبسیلا پنومنه	۰	
				ولگاریس	۱۸	
				استافیلوکوکوس هومینس	۱۴	
				استافیلوکوکوس اپیدرمیس	۰	
				استافیلوکوکوس تیفی	۱۴	
۱۰	پنی سیلیوم	۲۳–۳٫۸	۲۳	اشریشیا فاسیلوس	۱۲	[۱۱۹]
				اشریشیا کلی	۱۳	
				کلبسیلا پنومنه	۰	
				ولگاریس	۲۳	

ادامه جدول ٤...

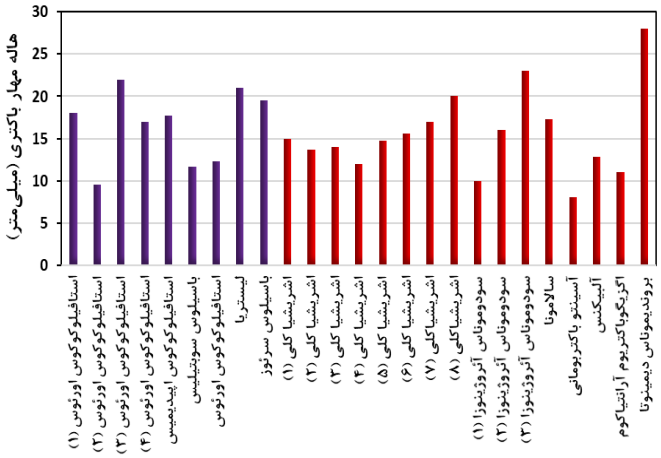
			استافیلوکوکوس هومینس	۲۴		
			استافیلوکوکوس اپیدرمیس	۱۳		
			استافیلوکوکوس تیفی	۲۲		
۱۱	آسپرژیلوس اوریزا[8]	۳٫۸–۲۳	کروی	اشریشیا فاسیلوس	۱۲	[۱۱۹]
				اشریشیا کلی	۱۲	
				کلبسیلا پنومنه	۱۱	
				ولگاریس	۲۱	
				استافیلوکوکوس هومینس	۲۳	
				استافیلوکوکوس اپیدرمیس	۱۴	
				استافیلوکوکوس تیفی	۲۲	
۱۲	آسپرژیلوس ژاپنیکس	۳٫۸–۲۳	کروی	اشریشیا فاسیلوس	۱۴	[۱۱۹]
				اشریشیا کلی	۱۵	
				کلبسیلا پنومنه	۰	
				ولگاریس	۲۳	
				استافیلوکوکوس هومینس	۲۴	
				استافیلوکوکوس اپیدرمیس	۱۳	
				استافیلوکوکوس تیفی	۲۵	

[1] Aspergillus brunneoviolaceus, [2] Talaromyces purpureogenus, [3] Endophyte Penicillium oxalicum, [4] Bauhinia Tomentosa Linn, [5] Penicillium oxalicum and Fusarium hainanense, [6] Fungus—Penicillium cinnamopurpureum, [7] Macrofungal



شکل ۵. خاصیت ضدمیکروبی نانوذرات نقره سنتز شده با عصاره گیاهان بر روی باکتری‌های (الف) گرم مثبت و (ب) گرم منفی.

۶ نشان می‌دهد که مهار باکتری‌های گرم منفی و مثبت با نانوذرات سنتز شده توسط باکتری تقریبا یکسان است. در اکثر تحقیقات تاثیر نانوذرات نقره بر روی باکتری‌های استافیلوکوکوس اورئوس و اشریشیاکلی مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است. باکتری‌های گرم منفی آسینتو باکتربومانی و بروندیموناس دیمینوتا به ترتیب کمترین و بیشترین هاله مهار ثبت شده را به خود اختصاص داده‌اند. کمترین و بیشترین هاله مهار ثبت شده از بین باکتری‌های گرم مثبت مربوط به باکتری استافیلوکوکوس اورئوس است.

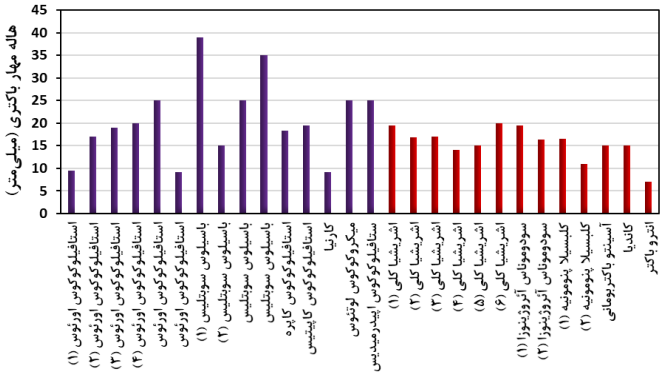


شکل ۶. خاصیت ضدمیکروبی نانوذرات نقره سنتز شده با باکتری‌ها بر روی باکتری‌های گرم مثبت و منفی (گرم منفی: قرمز، گرم مثبت: بنفش).

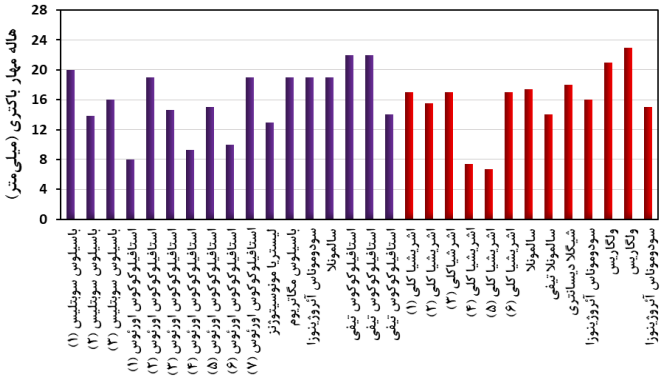
شکل ۷ نشان‌دهنده تاثیر نانوذرات نقره سنتز شده با جلبک‌ها بر مهار باکتری‌های گرم مثبت و منفی است. شکل ۷ نشان می‌دهد که تاثیر خاصیت ضدمیکروبی نانوذرات نقره تهیه شده به وسیله جلبک‌ها در برابر باکتری‌های گرم مثبت و منفی قابل توجه است. اندازه نانوذرات نقره تهیه شده با جلبک تأثیر قابل‌توجهی بر عملکرد ضدباکتری نانوذرات نقره دارد. نانوذرات کوچکتر قادر به نفوذ بهتر به داخل باکتری‌ها هستند و از این طریق می‌توانند فعالیت ضدباکتری بیشتری نشان دهند. در تحقیقات انجام شده، باکتری‌های استافیلوکوکوس اورئوس و باسیلوس سوبتلیس از نوع باکتری‌های گرم مثبت و باکتری‌های اشریشیاکلی، سودوموناس آئروژینوزا و کلبسیلا از نوع باکتری‌های گرم منفی مورد بررسی بیشتری قرار گرفته‌اند. تاثیر نانوذرات نقره بر مهار باکتری‌های استافیلوکوکوس اورئوس، اشریشیاکلی، سودوموناس آئروژینوزا و کلبسیلا از نظم خاصی برخودار می‌باشد در حالی که تاثیر نانوذرات نقره بر مهار باکتری باسیلوس سوبتلیس از نظم خاصی برخودار نیست. بنابراین، می‌توان گفت که شرایط سنتز در بررسی فعالیت ضدمیکروبی نانوذرات نقره بر روی بعضی باکتری‌ها از جمله باسیلوس سوبتلیس بسیار مهم می‌باشد.

شکل ۸ نشان‌دهنده خاصیت ضدباکتری نانوذرات نقره سنتز شده با قارچ نسبت به مهار هر دو باکتری گرم مثبت و منفی است. خاصیت ضدباکتری نانوذرات نقره حاصل شده برای باکتری‌های گرم مثبت و منفی به صورت تقریبی یکسان است. به علاوه، تحقیقات بر روی مهار رشد باکتری‌های استافیلوکوکوس اورئوس، باسیلوس سوبتلیس و اشریشیاکلی با نانوذرات سنتز شده با قارچ بیشترین مطالعه را به خود اختصاص داده‌اند. خاصیت ضدباکتری نانوذرات تهیه شده به کمک قارچ بر روی باکتری‌های استافیلوکوکوس اورئوس و باسیلوس سوبتلیس بر خلاف باکتری اشریشیاکلی در تحقیقات مختلف یکسان نیست.

نانوذرات نقره سنتز شده با جلبک به دلیل دارا بودن ترکیبات شیمیایی مانند پلی‌ساکاریدها، پروتئین‌ها و سایر متابولیت‌های ثانویه خاصیت ضدباکتری خوبی دارند. نانوذرات سنتز شده با گیاهان به دلیل دارا بودن ترکیبات فعال زیستی، دارای اثرات ضدباکتری خوبی هستند و خاصیت ضدباکتری نانوذرات تهیه شده با عصاره گیاهان بر روی طیف وسیعی از باکتری‌های گرم



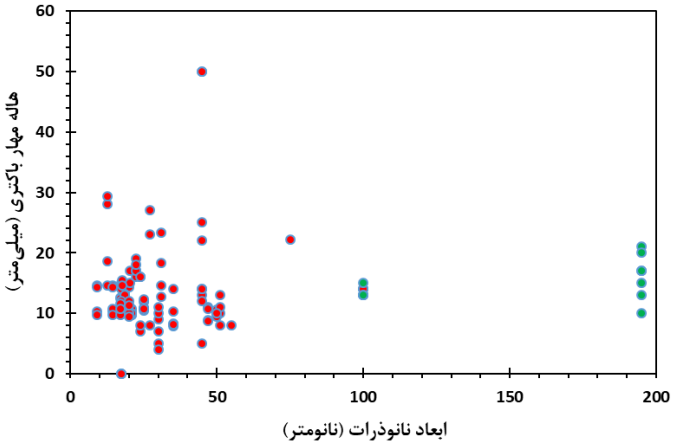
شکل ۷. خاصیت ضدمیکروبی نانوذرات نقره سنتز شده با جلبک‌ها بر روی باکتری‌های گرم مثبت و منفی (گرم منفی: قرمز، گرم مثبت: بنفش).



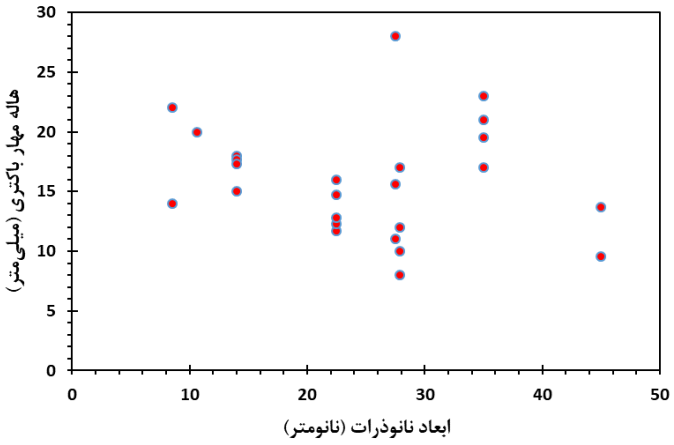
شکل ۸. خاصیت ضدباکتری نانوذرات نقره سنتز شده با قارچ‌ها بر روی باکتری‌های گرم مثبت و منفی (گرم منفی: قرمز، گرم مثبت: بنفش).

مثبت و منفی مورد بررسی قرار گرفته است. قارچ‌ها آنزیم‌ها و متابولیت‌هایی تولید می‌کنند که در فرایند احیای یون‌های فلزی به نانوذرات نقره مؤثر می‌باشند. نانوذرات نقره تولید شده توسط قارچ‌ها، فعالیت‌های ضدباکتری قابل توجهی علیه باکتری‌های گرم مثبت و منفی نشان داده‌اند. به صورت کلی می‌توان گفت که عملکرد ضدباکتری نانوذرات نقره سنتز شده توسط میکروارگانیسم‌ها، به ویژه قارچ، نسبت به نانوذرات نقره سنتز شده توسط عصاره گیاهان بالاتر است.

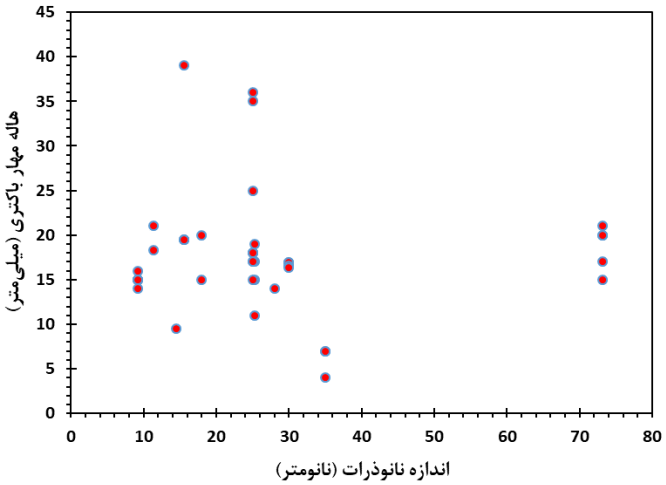
شکل‌های ۹ تا ۱۲ تاثیر ابعاد نانوذرات نقره سنتز شده با روش سبز بر خاصیت ضدباکتری نانوذرات نقره را نشان می‌دهند. ابعاد نانوذرات نقره بر ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی نانوذرات نقره حاصل شده تاثیر می‌گذارد. شکل ۹ رابطه بین نانوذرات نقره سنتز شده با عصاره گیاهان و خاصیت ضدمیکروبی آن‌ها را نشان می‌دهد. شکل ۹ نشان می‌دهد که معمولا محدوده ابعاد نانوذرات نقره سنتز شده با عصاره گیاهان بین ۰ تا ۵۰ نانومتر می‌باشند.



شکل ۹. تاثیر ابعاد نانوذرات نقره سنتز شده با عصاره گیاهان بر خاصیت ضدمیکروبی آن.



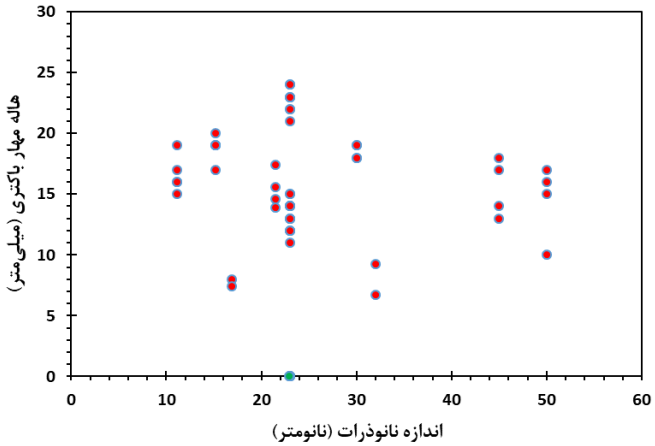
شکل ۱۰. تاثیر ابعاد نانوذرات نقره سنتز شده با باکتری بر خاصیت ضدمیکروبی آن.



شکل ۱۱. تاثیر ابعاد نانوذرات نقره سنتز شده با جلبک بر خاصیت ضدمیکروبی آن.

خاصیت ضدمیکروبی نانوذرات نقره در تحقیقاتی ۱۰۰ و ۲۰۰ نانومتر بوده است که با رنگ سبز در شکل ۹ نشان داده شده است. عدم پراکندگی داده‌های تحقیقات مختلف نشان‌دهنده عدم تاثیرگذاری زیاد نوع عصاره گیاه بر روی ابعاد نانوذرات نقره شکل ۱۰ رابطه بین ابعاد و خاصیت ضدمیکروبی نانوذرات نقره تهیه شده با باکتری را نشان می‌دهد. تعداد تحقیقات انجام شده با واسطه سنتز باکتری برای تهیه نانوذرات نقره نسبت به عصاره گیاهان کم می‌باشد. پراکندگی زیاد ابعاد و خاصیت ضدمیکروبی نانوذرات نقره سنتز شده با باکتری نشان‌دهنده تاثیرگذاری بالای نوع باکتری مورد استفاده جهت سنتز نانوذرات نقره می‌باشد. هم‌چنین شکل ۱۰ نشان می‌دهد که ابعاد نانوذرات نقره تهیه شده با باکتری زیر ۵۰ نانومتر می‌باشد. محدوده ابعاد نانوذرات نقره سنتز شده با باکتری بین ۱۰ تا ۴۵ نانومتر است. هم‌چنین، محدوده هاله مهار باکتری مختلف توسط نانوذرات نقره سنتز شده با باکتری‌ها بین ۷ تا ۲۸ میلی‌متر است.

شکل ۱۱ پراکندگی ابعاد و خاصیت ضدمیکروبی نانوذرات نقره سنتز شده با جلبک را نشان می‌دهد. محدوده ابعاد نانوذرات نقره سنتز شده با جلبک ۱۰ تا ۷۵ نانومتر می‌باشد. محدوده هاله مهار باکتری توسط نانوذرات نقره سنتز شده با جلبک ۵ تا ۴۰ میلی‌متر است. در اغلب تحقیقات هاله مهار باکتری توسط نانوذرات نقره سنتز شده با جلبک ۱۰ تا ۲۰ میلی‌متر است. ارتباط بین ابعاد و خاصیت ضدمیکروبی نانوذرات نقره که از قارچ به عنوان واسطه سنتز استفاده شده است، در شکل ۱۲ نشان داده شده است. محدوده ابعاد نانوذرات نقره سنتز شده با قارچ مشابه باکتری بوده است. محدوده هاله مهار باکتری نانوذرات نقره سنتز شده با قارچ بین ۵ تا ۲۵ میلی‌متر بوده است. با توجه به شکل ۱۲ مشخص است که نانوذرات نقره در محدوده ۱۰ تا ۳۰ نانومتر خاصیت



شکل ۱۲. تاثیر ابعاد نانوذرات سنتز شده با قارچ بر خاصیت ضدمیکروبی آن.

ضدمیکروبی قابل قبولی داشته است؛ اما در تحقیقی، نانوذرات نقره با ابعاد ۲۷ نانومتر، خاصیت ضدمیکروبی نداشته است که در نمودار ۱۲ با رنگ سبز مشخص شده است.

روش سنتز نانوذرات نقره با استفاده از عصاره گیاهان نیازمند زمان کوتاه‌تری است. نانوذرات حاصل از این روش از پایداری متوسط تا بالا برخوداراند. اما سنتز نانوذرات نقره با استفاده از جلبک‌ها نیاز به زمان بیشتری دارد. پایداری نانوذرات تولید شده با جلبک‌ها مطلوب است، چرا که جلبک‌ها حاوی پلی‌ساکاریدها و مواد چسبنده‌ای هستند که به عنوان پوشش‌دهنده و پایدارکننده عمل می‌کنند. در مقابل این دو روش سنتز، سنتز نانوذرات نقره با استفاده از باکتری‌ها و قارچ‌ها زمان بیشتری نسبت به گیاهان و جلبک‌ها نیاز دارد، چرا که باکتری‌ها و قارچ‌ها به زمان بیشتری برای تکثیر و تولید متابولیت‌های مورد نیاز برای کاهش یون‌های نقره نیاز دارند. نانوذرات تولید شده با باکتری‌ها و قارچ‌ها از پایداری خوبی برخوردارند، زیرا پروتئین‌ها و پلیمرهای زیستی تولید شده به عنوان پوشش‌دهنده و پایدارکننده طبیعی عمل می‌کنند. در کل می‌توان بیان کرد، سنتز به کمک عصاره‌های گیاهی و جلبک زمان کمتری نیاز دارند و پایداری نانوذرات سنتز شده با میکروارگانیسم‌ها (جلبک، قارچ و باکتری) بیشتر است.

٤- نتیجه گیری

نانوذرات نقره از طریق سه روش سنتز سبز، فیزیکی و شیمیایی تهیه می‌شوند. نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد که نانوذرات نقره سنتز شده به روش سبز به دلیل سازگاری با محیط زیست، عدم مصرف مواد شیمیایی و غیره مورد توجه بیشتری قرار گرفته است. در روش سنتز سبز از عصاره گیاهان یا میکروارگانیسم‌هایی مانند جلبک، قارچ و باکتری به عنوان عوامل کاهنده و تثبیت‌کننده استفاده می‌شود. یکی از کاربردهای اصلی نانوذرات نقره، خاصیت ضدمیکروبی آن‌ها است که به صورت معمول، در نانوذرات سنتز شده با روش سبز بیشتر است. نانوذرات نقره قادر به تخریب دیواره سلولی باکتری‌ها و اختلال در عملکردهای حیاتی آنهاست. بنابراین، نانوذرات نقره گزینه‌ای مناسب برای مقابله با عفونت‌های باکتریایی می‌باشند. خاصیت ضدمیکروبی نانوذرات نقره سنتز شده با عصاره گیاهان نسبت به جلبک، قارچ و باکتری کمتر گزارش شده است، اما با توجه به سادگی فرآیند و در دسترس بودن عصاره گیاهان، در تحقیقات بیشتری مورد استفاده قرار گرفته است. نانوذرات نقره سنتز شده با قارچ‌ها به دلیل اندازه کوچک‌تر و ترکیبات فعال موجود در قارچ‌ها، بهترین عملکرد ضدمیکروبی را داشته‌اند. به طور کلی، تاثیر نانوذرات نقره سنتز شده با عصاره گیاهان و میکروارگانیسم‌ها بر روی باکتری گرم منفی نسبت به باکتری گرم مثبت بیشتر می‌باشد.

تشکر و قدردانی

نویسندگان این مقاله بر خود لازم می‌دانند از بنیاد ملی علم ایران(INSF) که امکان انجام تحقیق حاضر در قالب طرح پژوهشی فراهم آورده‌اند، سپاسگزاری نمایند.

مراجع

1. M. Khan, M. R. Shaik, S. F. Adil, S. T. Khan, A. Al-Warthan, M. R. H. Siddiqui, M. N. Tahir and W, Tremel, Dalton Trans., 47, 11988 (2018).

2. A. Nene, M. Galluzzi, L. Hongrong, P. Somani, S. Ramakrishna and X. F. Yu, Nanoscale. 13, 13923 (2021).

۳. م. ناصری، م. ایران‌نژاد و ا. مهدیلو، چهل و یکمین گردهمایی (همایش ملی) علوم زمین،تهران. ۱۴۰۱.

4. V. Demchenko. S. Riabov, S. Kobylinskyi, L. Goncharenko, N. Rybalchenko, A. Kruk, O. Moskalenko and M. Shut, Sci. Rep., 10, 7126 (2020).

5. M. Nycz, K. Arkusz and D. G Pijanowska, Nanomaterials. 9, 1072 (2019).

۶. س. فروغی‌راد و م. خطیب‌زاده، نشریه شیمی و مهندسی شیمی ایران. ۳۴ (۱۳۹۴) ۱.

7. V. Scardaci, Nanomaterials. 11, 2226 (2021).

۸. م. ناصری، م. ایران‌نژاد و ا. مهدیلو، سومین کنفرانس ملی معدنکاری و صنایع معدنی سبز ایران، زنجان، ایران. (۱۴۰۲).

۹. م. ناصری، م. ایران‌نژاد و ا. مهدیلو، سومین کنفرانس ملی به کارگیری روش‌های تجربی و عددی در صنایع شیمیایی و معدنی، کرمان، ایران. (۱۴۰۲).

۱۰. ر. خسروی نیسیانی، پایان‌نامه، دانشگاه صنعتی سهند تبریز. ۱۳۹۹.

11. Z. Asadi, M. Saki, R. Khosravi, M. Amin, A. Ghaemi and S. Akrami, Indian J. Microbiol., 1 (2024).

12. A. M. Abdel-Mohsen, J. Jancar, R. M. Abdel-Rahman, L. Vojtek, P. Hyršl, M. Dušková, and H. Nejezchlebová, Int. J. Pharm., 520, 241 (2017).

13. S. S. Salem, E. F. El-Belely, G. Niedbała, M. M. Alnoman, S. E. D. Hassan, A. M. Eid and A. F. ouda, Nanomaterials. 10, 2082 (2020).

۱۴. ع. شریفی و ع. شفقت، نشریه شیمی و مهندسی شیمی ایران. ۳۹ ۱۱ (۱۳۹۹).

15. M. Pant, C. Prashar, K. C. Pandey, S. Roy, V. Pande and A. Dandapat, RSC adv., 14, 1114 (2024).

16. Z. U. R. Mashwani, T. Khan, M. A. Khan and A. Nadhman, Appl. Microbiol. Biotechnol., 99, 9923 (2015).

17. M. Bagirova, S. Dinparvar, A. Allahverdiyev, M., K., E. Unal, S. Abamor and M. Novruzova, Acta Trop., 208, 105498 (2020).

18. M. Abbas, A. Atiq, R. Xing and X. Yan, J. Mater. Chem.. B 9, 4444 (2021).

19. I. A. Arefina, D. A. Kurshanov, A. A. Vedernikova, D. V. Danilov, A. V. Koroleva, E. V. Zhizhin and A. L. Rogach, Nanomaterials. 13, 223 (2023).

20. G. Gahlawat, S. Shikha, B. S. Chaddha, S. R. Chaudhuri, S. Mayilraj and A. R. Choudhury, Microb. Cell Fact., 15, 1 (2016).

21. P. Korshed, L, Li,. Z, Liu and T, Wang, PLoS One. 11, e0160078 (2016).

22. M. J. Silvero C, D. M. Rocca, E. A. de la Villarmois, K. Fournier, A. E. Lanterna, M. F. Perez and J. C., Scaiano, ACS omega. 3, 1220 (2018).

23. M. Wypij, M., Rai, L. F., Zemljič, M., Bračič, S., Hribernik and P. Golińska, Front. bioeng. biotechnol., 11, 1241739 (2023).

24. S. K. Ogata, A. C. Gales and E. Kawakami, Braz. J. Microbiol., 45, 1439 (2014).

۲۵. ر، بهلولی خیاوی، فصلنامه آزمایشگاه و تشخیص. ۳۵ (۱۳۹۶).

26. C. Mollea, F. Bosco and D Fissore, Antibiotics. 11,1809 (2022).

27. L. Bonilla-Gameros, P. Chevallier, X. Delvaux, L. A. Yáñez-Hernández, L. Houssiau, X. Minne and D. Mantovani, Nanomaterials. 14, 609 (2024).

28. Y. Wang, Z. Li, D. Yang, X. Qiu, Y. Xie and X. Zhang, J. Colloid Interface Sci., 583, 80 (2021).

29. A. Roy, O. Bulut, S. Some, A. K. Mandal and M. D. Yilmaz, RSC adv., 9 (2019).

30. U. F. L. Gunputh, K.H. Lawton, A. C. Besinis, Tredwin and R.D. Handy, Nanotoxicology. 14, 97 (2020).

31. D.-K. H. Nguyen, N.Q. Dinh and V.-P, Appl. Nanosci. 13, 3709 (2023).

32. A. H. Abo-Elmagd, R. A., Hamouda, M. H., Shalan and R. A., Abdelrazak, RSC adv., 10, 44232 (2020).

33. B. P. Dyett, H. Yu, S. Sarkar, J. B. Strachan, C. J. Drummond and C. E. Conn, ACS Appl. Mater. Interfaces., 13, 53530 (2021).

34. Z. Ye and C. Aparicio, J. Pept. Sci., 28, e3299 (2022).

35. R. E. Duval, J. Gouyau and E. Lamouroux, Nanomaterials. 9, 1775 (2019).

36. D. Acharya, K. M. Singha, P. Pandey, B. Mohanta, J. Rajkumari and L. P. Singha, Sci. Rep., 8, 201 (2018).

37. S. A. P. Aromal and D, Spectrochim, Acta Part A Mol. Biomol. Spectrosc. 97, 1 (2012).

38. G. S. Marslin, K. Id, Q.M. Selvakesavan, R.K. Kruszka, D. Kachlicki and P.G, Franklin, Materials. 11, 940 (2018).

39. Y. X. S. Shen, A. Yu, X.; Qiu, L. Zhang and L.Q, Zhang, Green Chem., 9, 852 (2007).

40. V. V. Makarov, A.J. love and O.V. Sinitsyna, S.S Makarova, I.V. Yaminsky, M.E. Taliansky and N.O. Kalinina, Acta Nat. 6, 35 (2014).

41. A. K. G. Keshari, R. Srivastava, P. Singh, V. B. Yadav and J. Nath, Ayurveda Integr Med. 11, 37 (2020).

42. G. Das. J. K. Patra and H.-S. Shin, Mater. Sci. Eng. C., .114, 111011 (2020).

43. M. Govindappa. B. Hemashekhar. M.-K. Arthikala. V. R. Rai and Y. Ramachandra, Results Phys., 9, 400, (2018)

44. S. Salari. S. E. Bahabadi. A. Samzadeh-Kermani and F. Yosefzaei, Iran. J. Pharm. Sci., 18, 430 (2019).

45. M. S. Mthana. M. N. Mthiyane. A. C. Ekennia. M. Singh and D. C. Onwudiwe, Sci. Afr., 17, e01365 (2022).

46. O. N. UNUATA, PhD diss. 2021.

47. H. Yousaf. A. Mehmood. K. S. Ahmad and M. Raffi, Mater. Sci. Eng. C., 112, 110901 (2020).

48. K. Seku. B. R. Gangapuram. B. Pejjai. K. K. Kadimpati and N. Golla, J. Nanostructure Chem.,. 8, 179 (2018).

49. S. Valsalam. P. Agastian. M. V. Arasu. N. A. Al-Dhabi. A.-K. M. Ghilan. K. Kaviyarasu. B. Ravindran. S. W. Chang and S. Arokiyaraj, J. Photochem. Photobiol. B, 191, 65 (2019).

50. G. M. Sangaonkar and K. D. Pawar, Colloids Surf. B: Biointerfaces, 164, 210 (2018).

51. A. V. Samrot. N. Shobana and R. Jenna, Bionanoscience, 8, 632 (2018).

52. A. K. Alzubaidi, W. J. Al-Kaabi, A. A. Ali, S. Albukhaty, H. Al-Karagoly, G. M. Sulaiman, M. Asiri and Y. Khane, Appl. Sci., 13, 2182 (2023).

53. G. Suriyakala. S. Sathiyaraj. S. Devanesan. M. S. AlSalhi. A. Rajasekar. M. K. Maruthamuthu and R. Babujanarthanam, Saudi J. Biol. Sci., 29, 680 (2022)

54. M. Mousavi-Khattat. M. Keyhanfar and A. Razmjou, Artif Cells Nanomed Biotechnol., 46, 1022 (2018).

55. L. Loan Khanh, N. Thanh Truc, N. Tan Dat, N. Thi Phuong Nghi, V. van Toi, N. Thi Thu Hoai, T. Ngoc Quyen, T. Thi Thanh Loan and N. Thi Hiep, Sci. Technol. Adv. Mater., 20, 276 (2019).

56. N. Willian, Z. Syukri, A. Labanni and S. Arief, Rasayan J. Chem., 13, 1478 (2020).

57. A. A. Abdellatif, H. N. Alturki and H. M. Tawfeek, Sci. Rep., 11, 84 (2021).

58. A. R. Deshmukh, A. Gupta and B. S. Kim, Biomed Res. Int., 2019, 1714358 (2019).

59. M. Hamelian. M. M. Zangeneh. A. Amisama. K. Varmira and H. Veisi, Appl. Organomet. Chem., 32, e4458 (2018).

60. A. Vijayakumari and A. Sinthiya, Int. J. Pharm. Clin. Res., 10, 138 (2018).

61. S. Ansar, H. Tabassum, N. S. Aladwan, M. Naiman Ali, B. Almaarik, S. AlMahrouqi, M. Abudawood, N. Banu and R. Alsubki, Sci. Rep., 10, 18564 (2020).

62. S. Hajji, S. B. Khedir, I. Hamza-Mnif, M. Hamdi, I. Jedidi, R. Kallel, S. Boufi and M. Nasri, Biochim. Biophys. Acta - Gen. Subj., 1863, 241 (2019).

63. P. Prem, S. Naveenkumar, C. Kamaraj, C. Ragavendran, A. Priyadharsan, K. Manimaran, N. S. Alharbi, N. Rarokar, T. Cherian and V. Sugumar, Green Chem. Lett. Rev., 17, 2305142 (2024).

64. F. Jalilian, A. Chahardoli, K. Sadrjavadi, A. Fattahi and Y. Shokoohinia, Adv. Powder Technol., 31, 1323 (2020).

65. X. Cao, L. Zhu, Y. Bai, F. Li and X. Yu, Green Chem. Lett. Rev., 15, 28 (2022).

66. M. Ohiduzzaman, M. Khan, K. Khan and B. Paul, Heliyon. 10 (2024).

67. V. R. Netala, T. Hou, S. S. Sana, H. Li and Z. Zhang, Molecules. 29, 1250 (2024).

68. A. Arya, P. K. Tyagi, S. Bhatnagar, R. K. Bachheti, A. Bachheti and M. Ghorbanpour, Sci. Rep., 14, 7243 (2024).

69. N. Kaur, R. Kumar, S. Alhan, H. Sharma, N. Singh, R. Yogi, V. Chhokar, V. Beniwal, M. K. Ghosh and S. K. Chandraker, Inorg. Chem. Commun., 159, 111735 (2024).

70. V. V. Konduri, N. K. Kalagatur, L. Gunti, U. K. Mangamuri, V. R. Kalagadda, S. Poda and S. B. N. Krishna, S. Afr. J., 168, 476 (2024).

71. M. Rafique, I. Sadaf, M. S. Rafique, M. B. Tahir, Artif. Cells Nanomed. Biotechnol., 45, 1272 (2017).

72. S. Iravani, Int. Sch. Res. Notices., 2014, 359316 (2014).

73. T. Klaus, R. Joerger, E. Olsson and C.-G. Granqvist, Proc. Natl. Acad. Sci., 96, 13611 (1999).

74. K. Kalimuthu, R. S. Babu, D. Venkataraman, M. Bilal and S. Gurunathan, Colloids Surf. B Biointerfaces, 65, 150 (2008).

75. N. Chatterjee, S. Pal and P. Dhar, Next Nanotechnology. 6, 100089 (2024).

76. H. Mohd Yusof, N. A. Abdul Rahman, R. Mohamad and U. H. Zaidan, Appl. Sci., 10, 6973 (2020).

77. M. S. R. Rajoka, H. M. Mehwish, H. Zhang, M. Ashraf, H. Fang, X. Zeng, Y. Wu, M. Khurshid, L. Zhao and Z. He, Colloids Surf B Biointerfaces, 186, 110734 (2020).

78. G. E. Ogunleye, O. O. Akintade, K. A. Oyinlola, M. O. Kazeem and T. S. Oyewo, International Congresses of Turkish Science and Technology Publishing. 268, (2023)

79. R. Esmail, A. Afshar, M. Morteza, A. Abolfazl and E. Akhondi, BMC Microbiol., 22, 97 (2022).

80. A. M. Eid, S. E.-D. Hassan, M. F. Hamza, S. Selim, M. S. Almuhayawi, M. H. Alruhaili, M. K. Tarabulsi, M. K. Nagshabandi and A. Fouda, Catalysts. 14, 419 (2024).

81. S. Saeed, A. Iqbal and M. A. Ashraf, Environ. Sci. Pollut. Res., 27, 37347, (2020).

82. B. Akl, M. M. Nader and M. El-Saadony, J. Agr. Chem. Biotechnol., 11, 1, (2020)

83. E. Baltazar-Encarnación, C. E. Escárcega-González, X. G. Vasto-Anzaldo, M. E. Cantú-Cárdenas and J. R. Morones-Ramírez, J. Nanomater., 2019, 4637325 (2019).

84. D. Fawcett, J. J. Verduin, M. Shah, S. B. Sharma and G. E. J. Poinern, J. Nanosci., 2017, 8013850 (2017).

85. T. S. Dhas, V. G. Kumar, V. Karthick, K. J. Angel and K. Govindaraju, Spectrochim. Acta A Mol. Biomol. Spectrosc.,120, 416 (2014).

86. V. da Silva Ferreira, M. E. ConzFerreira, L. M. T. Lima, S. Frasés, W. de Souza and C. Sant'Anna, Enzyme Microb. Technol., 97, 114 (2017).

87. R. Fatima, M. Priya, L. Indurthi, V. Radhakrishnan and R. Sudhakaran, Microb. Pathog., 138, 103780 (2020).

88. P. Bhuyar, M. H. A. Rahim, S. Sundararaju, R. Ramaraj, G. P. Maniam and N. Govindan, Beni-Suef Univ. J. Basic Appl. Sci., 9, 1 (2020).

89. R. S. Hamida, M. A. Ali, Z. N. Almohawes, H. Alahdal, M. A. Momenah and M. M. Bin-Meferij, Pharm. , 14, 2002 (2022).

90. S. Husain, S. K. Verma, M. Azam, M. Sardar, Q. Haq and T. Fatma, Mater. Sci. Eng. C., 122, 111888 (2021).

91. N. Abdel-Raouf, N. M. Al-Enazi, I. B. M. Ibraheem, R. M. Alharbi and M. M. Alkhulaifi, Saudi J. Biol. Sci., 26, 1207 (2019).

92. R. A. Hamouda and E. S. Aljohani, Mar. Drugs. 22, 154 (2024).

93. A. K. Bishoyi, C. R. Sahoo, A. P. Sahoo and R. N. Padhy, App. Nanosci., 11, 389 (2021).

94. M. Danaei, M. M. Motaghi, M. Naghmachi. F. Amirmahani and R. Moravej, Biol., 76, 3057 (2021).

95. A. M. Haglan, H. S. Abbas, C. Akköz, S. Karakurt, B. Aşikkutlu and E. Güneş, Int. Nano Lett., 10, 197 (2020).

96. S. Shantkriti, M. Pradeep, K. Unish, V. Das, S. Nidhin, K. Gugan and A. Murugan, App. Surf. Sci. Adv., 13, 100377 (2023).

97. L. Kumar, L. Mohan, R. Anand and N. Bharadvaja, Syst. Microbiol. Biomanufacturing., 4, 230 (2024).

98. R. Thiurunavukkarau, S. Shanmugam, K. Subramanian, P. Pandi, G. Muralitharan, M. Arokiarajan, K. Kasinathan, A. Sivaraj, R. Kalyanasundaram and S. Y. AlOmar, Sci. Rep., 12, 14757 (2022).

99. A. Gade, P. Bonde, A. Ingle, P. Marcato, N. Duran and M. Rai, J. Biobased Mater. Bio., 2, 243 (2008).

100. S. Ahmad, S. Munir, N. Zeb, A. Ullah, B. Khan, J. Ali, M. Bilal, M. Omer, M. Alamzeb and S. M. Salman, Int. J. Nanomedicine 5087 (2019).

101. A. Ahmad, P. Mukherjee, S. Senapati, D. Mandal, M. I. Khan, R. Kumar and M. Sastry, Colloids Surf. B Biointerfaces, 28, 313 (2003).

102. M. A. Rabeea, M. N. Owaid, A. A. Aziz, M. S. Jameel and M. A. Dheyab, J. Environ. Chem. Eng., 8, 103841 (2020).

103. L. P. Costa Silva, J. P. Oliveira, W. J. Keijok, A. R. da Silva, A. R. Aguiar, M. C. C. Guimarães, C. M. Ferraz, J. V. Araújo, F. L. Tobias and F. R. Braga, Int. J. Nanomedicine 6373 (2017).

104. G. Gahlawat and A. R. Choudhury, RSC adv., 9, 12944, (2019).

105. R. P. Metuku, S. Pabba, S. Burra, S. Hima Bindu, N. K. Gudikandula and M. Singara Charya, 3 Biotech. 4, 227 (2014).

106. N. Feroze, B. Arshad, M. Younas, M. I. Afridi, S. Saqib and A. Ayaz, Microsc. Res. Tech., 83, 72 (2020).

107. S. Rajput, R. Werezuk, R. M. Lange and M. T. McDermott, Langmuir. 32, 8688 (2016).

108. M. Gericke and A. Pinches, Gold bull., 39, 22 (2006).

109. S. S. Birla, S. C. Gaikwad, A. K. Gade and M. K. Rai, Sci. World J., 2013, 796018 (2013).

110. M. M. Ramos, E. dos S. Morais, I. da S. Sena, A. L. Lima, F. R. de Oliveira, C. M. de Freitas, C. P. Fernandes, J. C. T. de Carvalho and I. M. Ferreira, Biotechnol. lett., 42, 833 (2020).

111. H. Mistry, R. Thakor, C. Patil, J. Trivedi and H. Bariya, Biotechnolo. Lett., 43, 307 (2021).

112. N. Konappa, A. C. Udayashankar, N. Dhamodaran, S. Krishnamurthy, S. Jagannath, F. Uzma, C. K. Pradeep, S. De Britto, S. Chowdappa and S. Jogaiah, Biomol., 11, 535 (2021).

113. A. Sharma, A. Sagar, J. Rana and R. Rani, Micro. Nano Syst. Lett., 10, 2 (2022).

114. P. Gupta, N. Rai, A. Verma, D. Saikia, S. P. Singh, R. Kumar, S. K. Singh, D. Kumar and V. Gautam, ACS omega. 7, 46653 (2022).

115. S. Renganathan, S. Subramaniyan, N. Karunanithi, P. Vasanthakumar, A. Kutzner, P.-S. Kim and K. Heese, Antioxid., 10, 1959 (2021).

116. R. Thakor, H. Mistry, H. Patel, D. Jhala, N. Parmar and H. Bariya, J. App. Microb., 133, 857 (2022).

117. B. Dinesh, N. Monisha, H. Shalini, G. Prathap, J. Poyya, M. Shantaram, J. S. Hampapura, C. S. Karigar and C. G. Joshi, Spec. Lett., 55, 20 (2022).

118. G. Vijayakumar, H. J. Kim, J. W. Jo and S. K. Rangarajulu, Int. J. Mol. Sci., 25, 861 (2024).

119. M. A. Basheer, K. Abutaleb, N. N. Abed and A. A. Mekawey, J. Genet. Eng. & Biotechnol., 21, 127 (2023).

شیمی و نانوشیمی (پژوهش های شیمیایی و نانومواد سابق)
Chemistry & Nanochemistry
https://sanad.iau.ir/journal/crn

Green synthesis of silver nanoparticles: a review of the methods and antibacterial properties of nanoparticles

Meysam Naseri[1], Mehdi Irannajad[1]*, Akbar Mehdilo[2], Raheleh Khosravi Nisiani[3]

[1]Department of Mineral Processing Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

[2] University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

[3] Pouyeshgar NanoSabz Company, Isfahan, Iran

Abstract: In recent decades, silver nanoparticles have gained significant attention from researchers due to their antibacterial properties. Silver nanoparticles can be effective in combating bacterial infections by disrupting the bacterial cell walls and interfering with their biological processes. There are various methods for synthesis of silver nanoparticles, which have advantages and disadvantages. In recent years, green synthesis of silver nanoparticles has been increasingly studied due to its reduced harmful environmental effect, safety, and other benefits. The current research was carried out with the aim of introducing the most appropriate green synthesis method for the preparation of silver nanoparticles with antibacterial properties. The results show that the antibacterial activity of silver nanoparticles synthesized with microorganisms is greater than silver nanoparticles synthesized with plant extracts. Furthermore, studies show that the antibacterial properties of silver nanoparticles depend on the physical and chemical characteristics of the bacterial cell wall. In this regard, the antibacterial effect of silver nanoparticles on Gram-negative bacteria is grater than on Gram-positive bacteria.

Keywords: Silver nanoparticles, Antibacterial properties, Plant extracts, Microorganism, Green synthesis.

*Correspondent Author Email: *iranajad@aut.ac.ir*