لیزر در پزشکی؛ ۱۳۹۷، دورهٔ ۱۵، شمارهٔ ٤، صفحات: ۳۱-۲۶ .

مقاله پژوهشی

ساخت بسترهای پلاسمونیک به روش آسان چرخشی و به هدف آشکارسازی باکتری سالمونلا

وحید اسکندری [۱]
نفیسه شریفی [۲]

خلاصه

مقدمه: روش پراکندگی رامان ارتقاءیافتهٔ سطحی (SERS) یکی از روش‌های کارآمد برای شناسایی مقادیر اندک و حتی شناسایی تک مولکول است. با قرار گرفتن گونه‌های مختلف در نزدیکی سطح فلز و یا جذب فیزیکی گونه‌ها به نانوساختارهای فلزی، به علت برهم‌کنش گونه‌ها و پلاسمون‌های سطحی فلز، شدت سیگنال رامان افزایش می‌یابد. از طرفی باکتری سالمونلا در بسیاری از مواد غذایی یافت می‌شود و به‌راحتی می‌تواند رشد کند که شناسایی این باکتری در صنایع غذایی و کشاورزی مورد توجه است که برای شناسایی این باکتری می‌توان استفاده از تکنیک SERS را پیشنهاد کرد.

روش بررسی: در این پژوهش، نانوذرات نقره به روش شیمیایی و با استفاده از عامل کاهندهٔ ساکاروز ساخته شدند، سپس با به‌کارگیری روش چرخشی و نشست نانوذرات نقره روی بسترهای شیشه‌ای، بسترهای پلاسمونیکی ساخته شدند. با استفاده از بسترهای پلاسمونیکی و طیف‌سنجی رامان که تکنیکی غیرمخرب است، آشکارسازی باکتری سالمونلا انجام شد.

یافته‌ها: با استفاده از آنالیزهای طیف‌سنجی فرابنفش-مرئی (UV-Vis)، میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی (FESEM) و میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM)، مشخصه‌های بسترهای پلاسمونیکی بررسی شدند و به‌عنوان حسگر زیستی پراکندگی رامان ارتقاءیافتهٔ سطحی (SERS) مورد استفاده قرار گرفتند. استفاده از بستر پلاسمونیکی سبب می‌شود که به دلیل تشدید پلاسمون-های سطحی نانوجزایر نقره و پراکندگی نور از جزایر نقرهٔ میکرومتری، ارتعاش‌های مولکولی باکتری سالمونلا تقویت شوند بنابراین شدت قله‌های ارتعاش‌های مولکولی طیف SERS باکتری سالمونلا نسبت به طیف رامان آن که از حکاکی باکتری روی بستر شیشه‌ای به‌دست می‌آید، قوی‌تر است. بسترهای پلاسمونیکی معرفی‌شده می‌تواند به تشخیص کم‌هزینه و زودهنگام بیماری‌های ناشی از باکتری سالمونلا و پاتوژن‌های موجود در مواد غذایی کمک کند.

نتیجه‌گیری: ازآن‌جایی‌که نقره به‌دلیل تشدید پلاسمون‌های سطحی و پراکندگی نور، سیگنال رامان حاصل از مولکول‌های مختلف را بهبود می‌دهد، بسترهای پلاسمونیکی

۱. *کارشناسی ارشد، پژوهشکدهٔ علوم و فناوری نانو، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران*

۲. *استادیار، گروه لیزر و فوتونیک، دانشکدهٔ فیزیک، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران*

[Downloaded from icml.ir on 2026-10-31]

به‌عنوان بســـتر فعال در طیف‌ســـنجی ارتقاءیافتهٔ ســـطحی (SERS) برای آشکارســـازی غلظت‌های مختلف باکتری سالمونلا به‌کارگرفته شدند. با استفاده از بسترهای پلاسمونیکی که متشکل از نانوجزایر و جزایر میکرومتری نقره هستند می‌توان از اثر تشدید پلاسمون‌های ســـطحی و اثر پراکندگی نور به‌طور هم‌زمان استفاده کرد و سیگنال رامان باکتری سالمونلا را افزایـــش داد. بـــا کاهش غلظـــت باکتری، ســـیگنال‌های SERS نیز کاهـــش می‌یابند. برخلاف رامان باکتری‌هایی که روی بســـتر غیرپلاسمونیکی شیشه قرار دارند در بسترهای پلاســـمونیکی، با کاهش غلظت باکتری، شدت قله‌های ارتعاش‌های مولکولی سالمونلا هنوز هم از شدت قابل ملاحظه‌ای برخوردار است که نتیجهٔ تحریک ارتعاش‌های مولکولی به‌وسیلهٔ پلاســـمون‌های ســـطحی و پراکندگی نور از بســـتر پلاسمونیک اســـت و می‌توان باکتری ســـالمونلا تا غلظت ۱۰۲ $cfu\ mL^{-1}$ را شناســـایی کرد هرچند این بسترهای پلاسمونیکی توانایی شناســـایی تک مولکول را ندارد که برای انجام این کار باید از ســـوزن میکروسکوپ نیروی اتمی اســـتفاده کرد که هزینه‌ها را افزایش می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: بســـترهای پلاســـمونیک، نانوذرات نقره، پراکندگی رامان ارتقاءیافتهٔ سطحی (SERS)، باکتری سالمونلا، ارتعاش‌های مولکولی

نویسندهٔ‌مســـئول: نفیســـه شـــریفی تلفن: ۰۳۱۵۵۹۱۳۰۹۱
پســـت الکترونیـــک: sharifi@kashanu.ac.ir

مقدمه

باکتری سالمونلا در بســـیاری از مواد غذایی یافت می‌شود و در شرایط محیطی نامناســـب نیز نه‌تنها می‌تواند زنده بمانـــد که به‌راحتی می‌تواند رشـــد کند. بنابراین کنترل باکتری ســـالمونلا در صنعت کشاورزی، غذا و صنایع فرآوری همواره مسئله‌ســـاز است و شناسایی و تشخیص مقادیر بســـیار اندک آن مورد توجه قرار دارد. ازطرفی شناسایی و تشخیص مواد میکروبیولوژیکـــی زمان‌بر و نیازمند هزینه‌های گزاف اســـت و تشـــخیص سریع باکتری‌ها در مواد غذایی از اهداف حوزه‌های مرتبط با آن است که دستگاه‌های مختلفی ازجمله طیف‌ســـنجی زیرقرمز و طیف‌سنجی رامان که هر دو طیف‌ســـنجی اثر انگشـــتی محسوب می‌شـــوند و با استفاده از ارتعاش‌های مولکولی ماده را بررســـی می‌کنند برای تشخیص باکتری‌ها به‌کار گرفته می‌شـــوند. اما، ازآن‌جایی‌که گونه‌های میکروبیولوژیکی مانند باکتری‌هـــا در محیط‌های آبی قرار دارند و به‌دلیل فعال بودن ارتعاش‌های مولکولی آب، اندازه‌گیری با طیف‌سنجی زیرقرمز مناسب گونه‌های موجود در محیط آبی نیست، طیف‌ســـنجی رامان گزینهٔ مناسبی برای تشخیص گونه‌های میکروبیولوژیکی است[۱] اما به‌دلیل ضعیف بودن ذاتی سیگنال حاصـــل از پراکندگی رامان، مطالعهٔ مولکول‌هـــا با غلظت‌های اندک عملاً امکان‌پذیر نیست[۲]. یکی از روش‌های کارآمد برای تشخیص و شناسایی مقادیر اندک و حتی شناسایی تک‌مولکول، روش پراکندگی رامان ارتقاءیافتهٔ سطحی (SERS) است[۳و۴]. در این روش هنگامی‌که گونه‌های مختلف مورد مطالعه در نزدیک ســـطح فلز قرار می‌گیرند یا به‌طور فیزیکی جذب نانوذرات فلزی می‌شـــوند، به‌علـــت برهم‌کنش گونه‌ها و پلاســـمون‌های سطحی نقره، شدت سیگنال رامان افزایش می‌یابد و بدین‌ترتیب SERS می‌تواند برای تشخیص سریع و دقیق گونه‌های میکروبیولوژیکی استفاده شـــود[۵ و۶]. در این پژوهش، نانوذرات نقره با اســـتفاده از روش ســـادهٔ چرخشـــی، برروی بسترهای شیشـــه‌ای قرار گرفتند تا به‌عنوان بسترهای فعال در SERS برای تشـــخیص غلظت‌های مختلفی از باکتری سالمونلا بـــه‌کار گرفته شـــوند. بدین‌ترتیب می‌توان با صـــرف هزینه‌های کمتر به تشخیص زودهنگام بیماری‌های ناشـــی از باکتری سالمونلا و پاتوژن‌های موجود در مواد غذایی دست بیابیم.

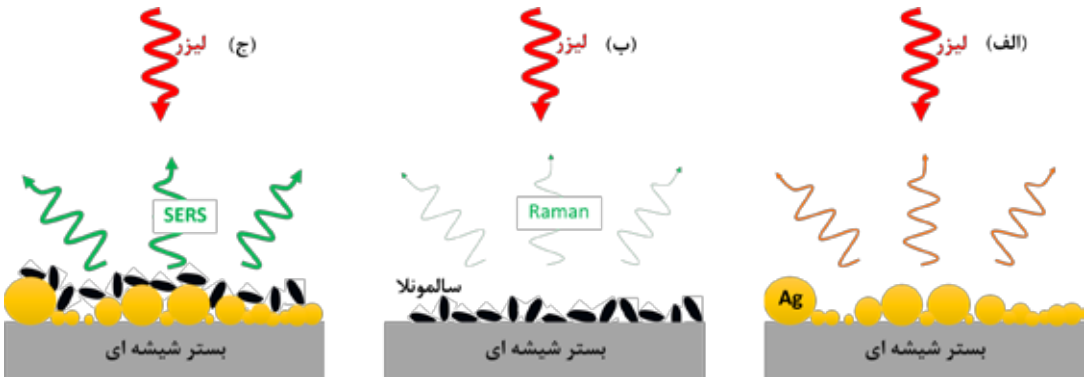
شکل۱ طرحوارهٔ آشکارسازی باکتری سالمونلا را نشان می‌دهد که الف: بستر پلاسمونیکی، ب: بستر شیشه‌ای حکاکی‌شده با باکتری سالمونلا و ج: بستر پلاسمونیکی حکاکی‌شده با باکتری سالمونلا است که با تابش نور لیزر با طول‌موج ۷۸۵ نانومتر سیگنال نور رامان پراکنده‌شده اندازه‌گیری می‌شود.

روش‌های ساخت و شناسایی

روش ساخت بسترهای پلاسمونیکی

لام‌های شیشه‌ای با ابعاد ۲ cm × ۲ cm به‌عنوان بستر برش داده شدند و ابتدا با شـــوینده‌های آنیونی و آب و سپس با استون شستشو داده شدند و حین شستشـــو از امواج فراصوت نیز استفاده شد. سپس بسترها خشک و درنهایت در دمـــای ۴۰۰°C به مدت ۳۰ دقیقـــه در کوره حرارت‌دهی شـــدند تا آلودگی‌های آلی نیز از سطح شیشه حذف شوند و سطح بسترها

[Downloaded from icml.ir on 2026-10-31]



شـــکل۱: طرح‌وارهٔ آشکارسازی الف) سیگنال رامان بستر پلاسمونیکی، ب) سیگنال رامان بستر شیشه‌ای حکاکی‌شده با باکتری سالمونلا و ج) سیگنال SERS بستر پلاسمونیکی حکاکی‌شده با باکتری ســـالمونلا که بهبود سیگنال رامان باکتری سالمونلای حکاکی‌شده روی بستر پلاسمونیکی را نســـبت به حالتی که باکتری سالمونلا در معرض نور پراکنده‌شده از نانوذرات نقره قرار نگرفته است، نمایش می‌دهد.

آب‌دوســـت شوند. به‌منظور ســـاخت نانوذرات نقره با اســـتفاده از هم‌زن مغناطیسی و با افزودن آمونیا به mL ۲۱ محلول ۰/۱ مولار نقره نیترات، کمپلکس آمونیاکی نقره ســـاخته شـــد. ســـپس با اضافه کردن mL ۲۰ محلول پتاس ۰/۰۵ مولار به‌صورت قطره قطره، رســـوب نقره اکســـید که به‌رنگ تیره است، تشکیل می‌شود. اضافه کردن آمونیا به‌صورت قطره قطره باعث حل شدن رسوب حاصل و شفاف شدن محلول می‌شود. بعد از اضافه کردن mL ۰۱ محلول ســـاکاروز ۰/۰۷ مولار و استفاده از حمام گرمایی با دمای $50^{o}C$ به مدت ۴ دقیقه، کمپلکس نقره کاهیده می‌شـــود و نقره در داخل محلول تشـــکیل می‌شود[۷]. سپس برای پوشش‌دهی نقره روی لام‌های شیشـــه‌ای و ساخت بسترهای پلاســـمونیکی، mL ۱۰۰ محلول کلوئیدی نقره روی لام‌های شیشه‌ای قرار داده شد و با استفاده از دستگاه چرخشی به مدت ۶۰ ثانیه با سرعت ۳۶۰۰ دور بر دقیقه لایه‌نشانی انجام شد که مدت‌زمان شتاب‌گیری ۱۲ ثانیه تنظیم شد.

کشت و حکاکی باکتری ســـالمونلا روی بستر شیشه‌ای و بستر پلاسمونیکی

مقداری کلنی باکتری در محیط کشت سوی براث (SOY-BROTH) در دمای $37^{o}C$ به مدت ۱۸ ساعت در اتوکلاو (شرکت ریحان طب مدل RT-۲، ایران) قرار داده شـــد تا باکتری‌ها فعال شوند. پس از سانتریفیوژ به‌مدت ۱۰ دقیقه با ســـرعت ۱۵۰۰۰ دور بردقیقه، مایع زردرنگ جدا شد که از لوله‌های ســـانتریفیوژ خارج شد و ۳ بار، هر بار با mL ۱۰ آب بدون یون این عمل تکرار شـــد و باکتری ســـالمونلا در غلظت‌های 10^{2}، 10^{3}، 10^{4}، 10^{5} و 10^{6} cfu mL^{-1} (colony-forming unit mL^{-1}) تهیه شـــد و از هر کدام mL ۱۰ روی بســـترهای شیشـــه‌ای و بسترهای پلاسمونیکی حکاکی شد و در دمای آزمایشگاه خشک شدند.

مشخصه‌یابی

طیف‌سنجی UV-Vis و تصویر میکروسکوپ الکترونی گسیل میدانی (FE-SEM) بســـتر پلاســـمونیکی به‌ترتیـــب به‌وســـیلهٔ دســـتگاه Perkin-Elmer مدل Lambda 25 و Hitachi مدل S4160 انجام شد. تصویر میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM) این نمونه‌ها نیز با استفاده از دستگاه شرکت نانوسیســـتم پارس ساخت ایران تهیه شد. با تابش نور لیـــزر Nd:YAG با طول‌موج ۷۸۵ نانومتـــر و توان خروجی قابل تنظیم ۷۵ میلی‌وات دســـتگاه طیف‌ســـنجی رامان Metrohm Raman مدل MIRA، طیف رامان و طیف SERS نمونه‌ها اندازه‌گیری شدند.

یافته‌ها و بحث

طیف جذب و تصویر FE-SEM بستر پلاسمونیکی

شـــکل ۲-الف طیف جذب بســـتر پلاســـمونیکی را نشـــان می‌دهد که مشاهدهٔ بیشـــینهٔ جذب در طول‌موج ۴۲۴ نانومتر که قلهٔ پلاسمونی نقره است، تشـــکیل نانوذرات نقره را تأیید می‌کند. وجود تنها یک قلهٔ جذبی در طیف جذب نقره نیز نشـــان می‌دهد که نانوذرات کروی یا شبه کروی هســـتند. درشکل ۲-ب تصویر FE-SEM بســـتر پلاسمونیکی مشاهده می‌شود که نقره به‌صورت جزایری روی سطح بستر شیشه قرار گرفته‌اند. اندازهٔ جزایر کوچک‌تر که به‌صورت نقاطی روشـــن چه برروی سطح تیرهٔ شیشـــه و چه برروی ذرات بزرگ‌تر و کلوخه‌ای در تصویر دیده می‌شـــود، حدود ۱۰ نانومتر اســـت. توزیع اندازهٔ جزایر بزرگ‌تر در منحنی که برروی تصویر قرار داده شـــده مشاهده می‌شـــود که اندازهٔ بین ۲۰ تا ۱۸۰ دارند. درواقع، با کاهش کمپلکس نقره و تشـــکیل نانوذرات نقره، ذرات کروی یا شـــبه‌کروی ساخته می‌شوند که در مورد بســـیاری از آن‌ها پدیدهٔ کلوخه شـــدن اتفاق افتاده است که به‌صورت جزایری بی‌شـــکل دیده می‌شوند. بنابراین با روش ســـاخت به‌کارگرفته‌شده، بســـتر پلاسمونیکی هم شامل ذرات میکرونی و هم شامل نانوذرات است که ذرات بزرگ‌تر نقره منجر به پراکندگی نور (تقویت میدان الکتریکی دور) می‌شـــوند و ذرات کوچک‌تر، میدان‌هـــای الکتریکی نزدیـــک قابل توجهی ایجـــاد می‌کنند که حاصل تشدید پلاسمون‌های سطحی است[۸و۹].

[Downloaded from icml.ir on 2026-10-31]

درواقع، با تابش نور (لیزر) به سطح ناصاف فلز، در اثر تشدید پلاسمون‌های سطحی نانوســـاختارهای فلزی به‌وســـیلهٔ میدان الکترومغناطیسی لیزر، میدان‌های الکتریکی ارتقاءیافته در اطراف فلز ایجاد می‌شـــود[۱۰و۱۱]. گویی میدان الکتریکی حاصل از تابش نور لیزر تقویت شده است. بنابراین مولکولی کـــه در این میدان الکتریکی ارتقاءیافتـــه قرار می‌گیرد، بیش‌تر قطبیده می‌شود و درنتیجه سیگنال رامان بهبود می‌یابد[۱۲].

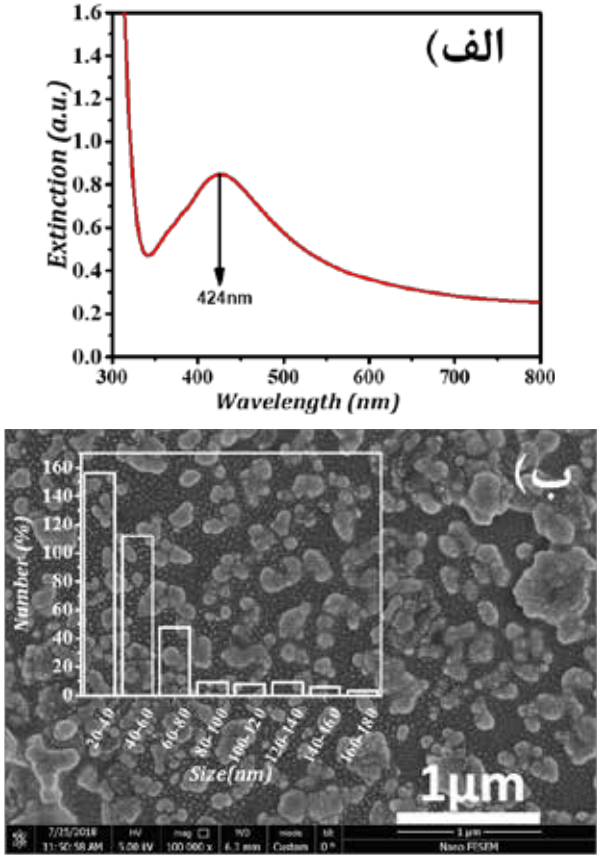
تصویر AFM بستر پلاسمونیکی

شکل۳ تصویر AFM الف: دوبعدی و ب: سه‌بعدی بستر پلاسمونیکی را نشـــان می‌دهد. با استفاده از نرم‌افزار Image Plus میانگین زبری ۱۶/۹ نانومتـــر، میانگین مرتفع‌ترین زبری ۱۳۷/۸ نانومتر و میانگین عمیق‌ترین زبری ۲۴/۳ نانومتر برای بستر پلاسمونیکی به‌دست آمد. همان‌طورکه در تصویر FESEM شکل ۲-ب مشاهده می‌شود ساختارهای نقره در تمام سطح شیشـــه به‌طورکامل به یکدیگر متصل نشده‌اند و ساختار جزیره‌ای دارند. ازطرفی اندازهٔ ذرات یکســـان نیســـت و توزیعی بـــرای اندازهٔ ذرات مشاهده می‌شود که این غیریکنواختی اندازه در ارتفاع نیز وجود دارد و در تصاویر AFM نیز مشـــاهده می‌شود. همان‌طورکه گفته شد، این زبری و ناصافی نقره می‌تواند باعث تقویت سیگنال رامان شود.

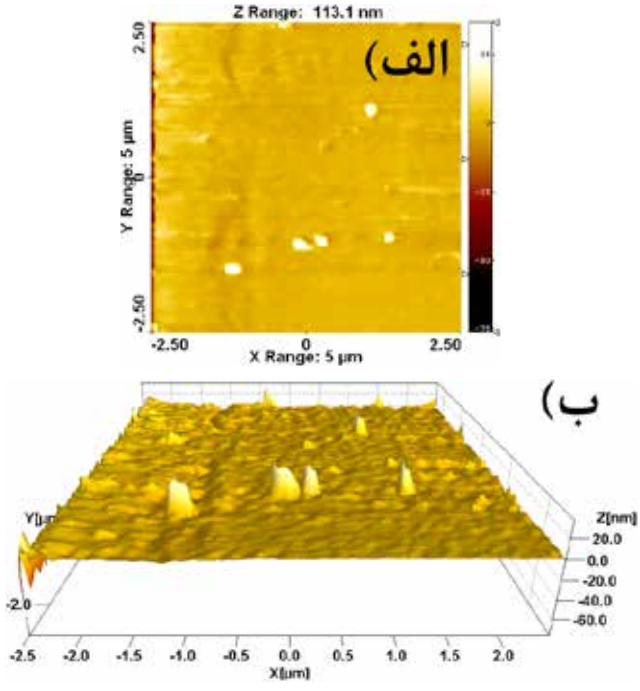
طیف رامان و SERS و آشکارسازی باکتری سالمونلا

شـــکل ۴-الف طیـــف SERS باکتری ســـالمونلا بـــا غلظت‌های 10^{6}، 10^{5}، 10^{4}، 10^{3} و 10^{2} cfu mL^{-1} که روی بســـترهای پلاســـمونیکی حکاکی شـــده‌اند را نشان می‌دهد. قله‌هایی که مشاهده می‌شود مربوط به ارتعاش‌های مولکولی باکتری سالمونلا است که در جدول ۱ مولکول‌های سازندهٔ باکتری سالمونلا و ارتعاش‌های مولکولی و موقعیت آن‌ها مشاهده می‌شود. با کاهش غلظت باکتری، شدت قله‌های ارتعاش‌های مولکولی آن کاهش می‌یابد چون تعداد باکتری‌ها و درنتیجه تعداد سیگنال‌های ارتعاشی آن‌ها کاهش یافته اســـت[۱و۲]. شـــکل ۴-ب تغییرات شدت قوی‌ترین سیگنال SERS مشاهده‌شده، I، که مربوط به فسفولیپیدها در عدد موج ۹۹۸ cm^{-1} است را برحسب تغییرات لگاریتمی غلظت باکتری سالمونلا، C، نشان می‌دهد که با برازش انجام‌شده از رابطهٔ (۱) پیروی می‌کند.

همان‌طورکه در شکل ۴-الف مشـــاهده شد با کاهش غلظت باکتری تا غلظت 10^{2} cfu mL^{-1} حتی شـــدت قوی‌ترین قلهٔ SERS نیز کاهش می‌یابد. در شـــکل۵ طیف رامان بســـتر پلاســـمونیکی طیف رامان بستر شیشه‌ای (غیر پلاسمونیکی) حکاکی‌شده با باکتری و طیف SERS بستر پلاسمونیکی حکاکی‌شده با ســـالمونلا مشاهده می‌شود. با تابش نور لیزر با طول‌موج ۷۸۵ نانومتر ارتعاش‌های مولکولی باکتری ســـالمونلا تحریک می‌شوند. همان‌طورکه دیده می‌شـــود سیگنال SERS باکتری سالمونلا حکاکی‌شـــده روی بستر پلاسمونیکی در مقایسه با سیگنال رامان باکتری حکاکی‌شده روی بستر شیشه‌ای بهبود یافته است که همان‌طورکه در شکل

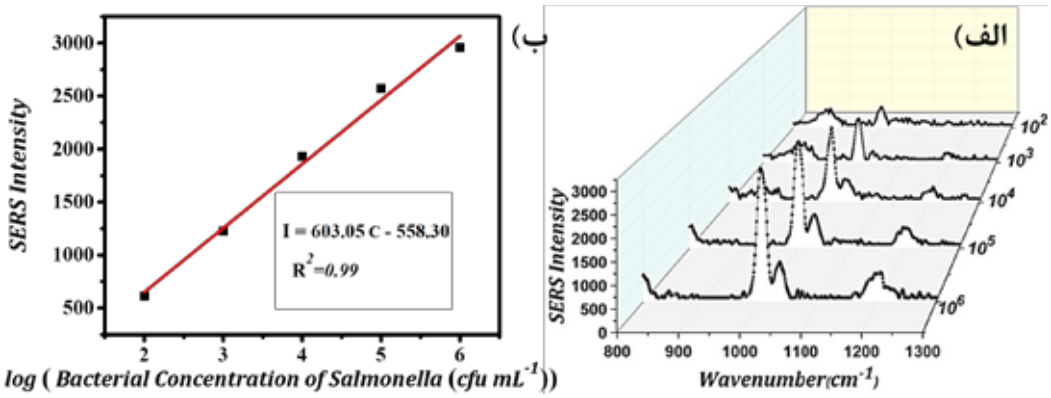


شکل۲: الف) طیف جذب بســـتر پلاسمونیکی با بیشینهٔ جذب در طول‌موج ۴۲۴ نانومتر و ب) تصویر FE-SEM بستر پلاســـمونیکی و (داخل شکل) توزیع اندازهٔ جزایر نقره روی بستر پلاسمونیکی



شکل۳: تصویر AFM الف) دوبعدی و ب) سه‌بعدی بستر پلاسمونیکی

[Downloaded from icml.ir on 2026-10-31]



شـــکل۴-الف) طیف SERS باکتری سالمونلا با غلظت‌های ۱۰۶، ۱۰۵، ۱۰۴، ۱۰۳ و ۱۰۲ $cfu\ mL^{-1}$ که روی بســـتر پلاسمونیکی حکاکی شده‌اند و ب) منحنی تغییرات شدت قوی‌ترین سیگنال SERS مربوط به فسفولیپیدها در عدد موج ۹۹۸ cm^{-1}، I برحسب تغییرات لگاریتمی غلظت باکتری سالمونلا، C

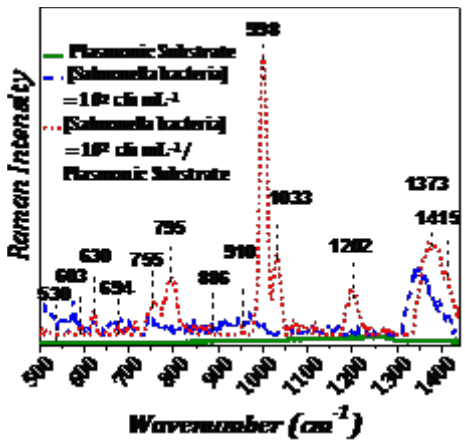
۲-ب نیز مشاهده شد ناشی‌از تشدید پلاسمون‌های سطحی نانوجزایر نقره و پراکندگی بالای نور از جزایر نقره میکرومتری است[۱۶و۱۷]. که با تابش نور (لیزر) به سطح ناصاف فلز (شکل۳) و تقویت میدان‌های الکتریکی دور و نزدیک ســـطح ناصاف، مولکول‌های سازندهٔ باکتری سالمونلا که در این میدان الکتریکی ارتقاءیافته قرار گرفته‌اند، قطبیده‌تر می‌شوند و درنتیجه سیگنال رامان ارتعاش‌های آن‌ها تقویت می‌شود.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، آشکارسازی باکتری ســـالمونلا با استفاده از بسترهای پلاسمونیکی که به روش سادهٔ چرخشی ساخته شدند، با استفاده از طیف ســـنجی رامان که تکنیکی غیرمخرب است بررســـی شد. ابتدا، بسترهای پلاسمونیکی فعال در SERS به روش شیمیایی ساخته شدند. غلظت‌های مختلـــف ۱۰۶، ۱۰۵، ۱۰۴، ۱۰۳ و ۱۰۲ $cfu\ mL^{-1}$ از باکتری ســـالمونلا روی بستر پلاســـمونیکی حکاکی شـــد. استفاده از بســـتر پلاسمونیکی ســـبب می‌شـــود که به‌دلیل تشدید پلاســـمون‌های ســـطحی نانوجزایر نقـــره و پراکندگـــی بالای نور از جزایـــر نقرهٔ میکرومتـــری، ارتعاش‌های مولکولی باکتری ســـالمونلا تقویت شوند. با کاهش غلظت باکتری، شدت ســـیگنال‌های SERS کاهش می‌یابد اما، بســـترهای پلاسمونیکی سبب می‌شوند حتی برای غلظت کمتر ۱۰۲ $cfu\ mL^{-1}$ باز هم قله‌های ارتعاش مولکولی فعال در رامان مشاهده شوند درصورتی‌که این قله‌ها برای باکتری حکاکی‌شده روی بستر غیرپلاسمونکی قابل مشاهده و شناسایی نیستند. بنابراین، بســـترهای پلاسمونیکی معرفی‌شده در این پژوهش می‌توانند به تشـــخیص کم‌هزینه و زودهنگام بیماری‌های ناشی از باکتری سالمونلا و پاتوژن‌های موجود در مواد غذایی کمک کنند.

جدول۱: ارتعاش‌های مولکولی و موقعیت آن‌ها برای باکتری سالمونلا[۱۵-۱۳]

ارتعاش‌های مولکولی باکتری سالمونلا	موقعیت ارتعاش‌های مولکولی باکتری سالمونلا (cm^{-1})
کربوهیدرات‌ها (کششی)	۵۳۰
COO- (کششی)	۶۰۳
COO- (خمشی)	۶۳۰-۶۹۴
C-N (کششی)	۷۵۵-۷۹۵
تیروزین، C-N (کششی)	۸۸۶
فسفولیپیدها	۹۱۰
فسفولیپیدها	۹۹۸
C-O و CH_2OH (کششی)	۱۰۳۳
CH (لیپید) و آمید I، II (پروتئین)	۱۲۰۲
C-H (خمشی-پروتئین)	۱۳۷۳
کربوکسیلیک‌اسید (کششی) N-H CH_2 (خمشی)	۱۴۱۵



شکل۵: طیف رامان بستر پلاسمونیکی (منحنی ممتد سبز)، طیف رامان باکتری سالمونلا با غلظت ۱۰۲ $cfu\ mL^{-1}$ حکاکی‌شده روی بستر شیشه‌ای (منحنی خط‌چین آبی) و طیف SERS باکتری ســـالمونلا با غلظت ۱۰۲ $cfu\ mL^{-1}$ حکاکی‌شده روی بستر پلاسمونیکی (منحنی نقطه‌چین قرمز)

[Downloaded from icml.ir on 2026-10-31]

References:

1. Novais Â, Freitas AR, Rodrigues C, and Peixe L. Fourier transform infrared spectroscopy : unlocking fundamentals and prospects for bacterial strain typing. European Journal of Clinical Microbiology and Infectious Diseases. 2018; 38: 427–48.

2. Duan N, Chang B, Zhang H, Wang Z and Wu S. Salmonella typhimurium detection using a surface-enhanced Raman scattering-based aptasensor. Int. J. Food Microbiology. 2016; 218: 38–43.

3. Wang C, Meloni MM, Wu X, Zhuo M, He T, Wang J and Dong P. Magnetic plasmonic particles for SERS-based bacteria sensing: A review. AIP Advances. 2019; 9: 010701.

4. Su SR, Chen YY, Li KY, Fang YC, Wang CH, Yang CY, Chau LK and Wang SC. Electrohydrodynamically enhanced drying droplets for concentration of Salmonella bacteria prior to their detections using antibody-functionalized SERS-reporter submicron beads. Sensors and Actuators B: Chemical. 2019; 283: 384–9.

5. Zhou H, Yang D, Ivleva NP, Mircescu NE, Niessner R, and Haisch C. SERS detection of bacteria in water by in situ coating with Ag nanoparticles. Analytical Chemistry. 2014; 86(3): 1525–33.

6. Mosier-Boss P. Review on SERS of bacteria. Biosensors. 2017; 7(4): 51.

7. Sharifi N and Taghavinia N. Silver nano-islands on glass fibers using heat segregation method. Materials Chemistry and Physics. 2009; 113: 63–6.

8. Wang LR and Fang Y. IR-SERS study and theoretical analogue on the adsorption behavior of pyridine carboxylic acid on silver nanoparticles. Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy. 2006; 63: 614–8.

9. Canamares MV, Garcia-Ramos JV, Sanchez-Cortes S, Castillejo M and Oujja M. Comparative SERS effectiveness of silver nanoparticles prepared by different methods: A study of the enhancement factor and the interfacial properties. Journal of Colloid and Interface Science. 2008; 326: 103–9.

10. Ren B, Liu GK, Lian XB, Yang ZL and Tian ZQ. Raman spectroscopy on transition metals. Analytical and Bioanalytical Chemistry. 2007; 388: 29–45.

11. Matricardi C, Hanske C, Garcia-Pomar JL, Langer J, Mihi A and . Liz-Marzan LM. Gold nanoparticle plasmonic superlattices as surface-enhanced Raman spectroscopy substrates. ACS Nano. 2018; 12(8): 8531–9.

12. Lin KQ, Yi J, Hu S, Liu BJ, Liu JY, Wang X and Ren B. Size effect on SERS of gold nanorods demonstrated via single nanoparticle spectroscopy. The Journal of Physical Chemistry C. 2016; 120 (37): 20806–13.

13. Zeiri L and Efrima S. Surface-enhanced Raman spectroscopy of bacteria: the effect of excitation wavelength and chemical modification of the colloidal milieu. Journal of Raman Spectroscopy. 2005; 36: 667–75.

14. Sengupta A, Laucks ML and Davis EJ. Surface-enhanced Raman spectroscopy of bacteria and pollen. Applied Spectroscopy. 2005; 59:1016–23.

15. Zeiri L, Bronk BV, Shabtai Y, Eichler J and Efrima S. Surface-enhanced Raman spectroscopy as a tool for probing specific biochemical components in bacteria. Applied Spectroscopy. 2004; 58(1): 33–40.

16. Chen HY, Lin MH, Wang CY, Chang YM and Gwo S. Large-scale hot spot engineering for quantitative SERS at the single-molecule scale. Journal of the American Chemical Society. 2015; 137(42): 13698–705.

17. Granger JH, Schlotter NE, Crawford AC and Porter MD. Prospects for point-of-care pathogen diagnostics using surface-enhanced Raman scattering (SERS). Chemical Society Reviews. 2016; 45: 3865–82.

[Downloaded from icml.ir on 2026-10-31]