

آشکارسازی مولکولی ژلاتین و مقایسه اثر نقره و طلا در بهبود سیگنال رامان آن

خلاصه

مقدمه: روش پراکندگی رامان بهبودیافته سطحی (SERS)، یکی از روش‌های کارآمد برای شناسایی مقادیر اندک و حتی شناسایی تک مولکول است. طیف‌سنجی رامان به کمک سطوح فلزی زبر می‌تواند برای شناسایی مقادیر اندک مواد گوناگون به کار گرفته شود. با قرار گرفتن گونه‌های مختلف در نزدیکی سطح فلز و جذب فیزیکی آن‌ها روی سطح فلزی به علت برهم‌کنش میان پلاسمون‌های سطحی فلز و ارتعاش‌های مولکولی گونه‌ها، شدت سیگنال رامان افزایش می‌یابد. ژلاتین نیز یکی از پرمصرف‌ترین مواد پروتئینی کلوئیدی در صنایع غذایی، دارویی، پزشکی و نظامی است که برای شناسایی این ماده می‌توان استفاده از تکنیک SERS را پیشنهاد کرد.

روش بررسی: در این مطالعه تجربی، محلول کلوئیدی نقره و محلول کلوئیدی طلا ساخته شدند و با استفاده از روش قطره‌افشان با چکاندن محلول کلوئیدی نقره و محلول کلوئیدی طلا بر روی زیرلایه‌های شیشه‌ای مجزا، بسترهای پلاسمونیک ساخته شدند. در نهایت، با استفاده از این بسترهای پلاسمونیک و طیف‌سنجی رامان، بهبود سیگنال رامان ارتعاش‌های مولکولی ژلاتین بررسی شدند و در ادامه بسترهای پلاسمونیک نقره و طلا از نظر آشکارسازی ارتعاش‌های مولکولی ژلاتین مقایسه شدند.

یافته‌ها: قله پلاسمونی نانوذرات نقره و نانوذرات طلا به ترتیب در حدود ۴۱۰ نانومتر و ۵۲۰ نانومتر و مشاهده ساختار FCC در مشخصه‌یابی XRD آن‌ها، تشکیل نانوذرات نقره و نانوذرات طلا را تأیید کرد. قله پلاسمونی طیف خاموشی بسترهای پلاسمونیک نقره و بسترهای پلاسمونیک طلا به ترتیب حدود ۴۴۲ نانومتر و ۵۵۳ نانومتر مشاهده شد. تصویر میکروسکوپ الکترونی گسیل میدانی (FESEM) بسترهای پلاسمونیک نشان می‌دهد که تعداد زیادی از ذرات نقره اندازه بین ۱۴۰۰ تا ۱۵۰۰ نانومتر و تعداد زیادی از ذرات طلا اندازه بین ۱۳۰۰ تا ۱۴۰۰ نانومتر دارند. زبری که برای بسترهای پلاسمونیک طلا و نقره در تصویر میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM) مشاهده می‌شود، به پراکندگی نور از نقاط زبر کمک می‌کند. با قرار دادن مولکول ژلاتین روی بسترهای پلاسمونیک نقره و یا طلا به دلیل تشدید پلاسمون‌های سطحی نانوذرات کوچک‌تر و پراکندگی نور از نانوذرات بزرگ‌تر نقره یا طلا، ارتعاش‌های مولکول ژلاتین تقویت شوند و شدت طیف SERS این دو بستر در مقایسه با شدت طیف رامان آن‌ها افزایش می‌یابد.

1. Surface Enhanced Raman Spectroscopy (SERS)

وحید اسکندری^۱

نفیسه شریفی^۲

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

۲. استادیار، گروه فوتونیک و پلاسما، دانشکده فیزیک، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران

نتیجه گیری: در طیف‌سنجی رامان، بسترهای پلاسمونیک که با نانوذرات و ذرات بزرگ‌تر نقره و طلا پوشش داده شده‌اند، مورد توجه هستند و سیگنال رامان ارتعاش‌های مولکولی ژلاتین را به دلیل تشدید پلاسمون‌های سطحی نانوذرات نقره و نانوذرات طلا و پراکندگی نور از ذرات بزرگ‌تر نقره و طلا تقویت می‌کنند. با کاهش غلظت ژلاتین حکاکی شده روی بسترهای پلاسمونیک به دلیل کاهش تعداد ارتعاش‌های مولکولی، سیگنال رامان نیز تضعیف می‌شود که با افزایش میزان زبری سطح بسترهای پلاسمونیک می‌توان سیگنال رامان را به دلیل افزایش میزان پراکندگی نور از مراکز زبر افزایش داد. در نتیجه با افزایش میزان پراکندگی نور از خود منجر به بهبود سیگنال می‌شوند. نتایج رامان به دست آمده نشان می‌دهد که بسترهای پلاسمونیک حاصل از نانوذرات نقره و نانوذرات طلا با روش‌های توسعه یافته نتایج امیدوارکننده‌ای را برای مطالعات مبتنی بر SERS نشان می‌دهد و می‌تواند منجر به توسعه نانوحسگرها شود.

واژه‌های کلیدی: ژلاتین، بسترهای پلاسمونیک، حسگر زیستی، نقره، طلا، طیف‌سنجی رامان بهبود یافته سطحی (SERS)

نویسنده مسئول: نفیسه شریفی تلفن: ۰۳۱۵۵۹۱۳۲۲۰
پست الکترونیک: sharifi@kashanu.ac.ir

مقدمه

نیاز دارند. از این رو، توسعه یک روش غیرمخرب، با کاربری ساده، سریع، کم‌هزینه، ناآلاینده با قابلیت حمل و کاربرد خارج از محیط آزمایشگاه و نیاز به آماده‌سازی کم‌تر نمونه بسیار ضروری است. از طرفی شناسایی و تشخیص مقادیر بسیار اندک از ژلاتین نیز مورد توجه است. با استفاده از طیف‌سنجی زیرقرمز و طیف‌سنجی رامان که هر دو طیف‌سنجی اثر انگشتی محسوب می‌شوند و ارتعاش‌های مولکولی ماده را بررسی می‌کنند، می‌توان مواد و آنالیت‌های بیولوژیکی را شناسایی کرد [۱۱ و ۱۲]. در طیف‌سنجی زیرقرمز به دلیل فعال بودن ارتعاش‌های مولکولی آب، شناسایی گونه‌های زیستی دشوار است و حساسیت آشکارسازهای آن نیز پایین است. در طیف‌سنجی رامان نیز به دلیل ضعیف بودن ذاتی سیگنال حاصل از پراکندگی رامان، مطالعه مولکول‌ها با غلظت‌های اندک عملاً امکان‌پذیر نیست [۱۳]. یکی از روش‌هایی که می‌توان سیگنال رامان را بهبود داد، استفاده از نانوساختارهای فلزی است که به دلیل تشدید پلاسمون‌های سطحی می‌توانند میدان الکتریکی قوی را در نزدیک نانوساختارها ایجاد کنند یا با افزایش میزان پراکندگی نور از این نانوساختارها، سیگنال پراکندگی را به طور مؤثر بهبود می‌دهند که به دنبال آن ارتعاش‌های مولکولی با سیگنال بهتر و بیشتری مشاهده خواهند شد. این روش طیف‌سنجی رامان بهبود یافته سطحی (SERS) نام دارد که یک روش حساس و انتخابی است که نتیجه آن بهبود پراکندگی رامان مولکول‌هایی است که بر روی ساختارهای فلزی جذب سطحی شده‌اند [۱۴]. در واقع، با تابش نور (لیزر) به سطح ناصاف فلزی،

ژلاتین یک ماده پروتئینی کلئیدی و قدیمی‌ترین ماکرومولکولی است که از هیدرولیز کلاژن موجود در پوست، استخوان و بافت پیوندی حیوانات از جمله دام، طیور و آبزیان به دست می‌آید [۱]. ژلاتین یکی از پر مصرف‌ترین مواد پروتئینی کلئیدی است که در چهار درجه متفاوت خوراکی، صنعتی، فوتوگرافی و دارویی تولید می‌شود. بخشی از ژلاتین تولید شده در جهان از پوست و استخوان گاو، خوک، گوساله و پوست ماهی کپور تهیه می‌گردد که مصرف برخی از آن‌ها از لحاظ شرعی در کشورهای مسلمان اشکال دارد. خطر انتقال بیماری جنون گاوی به انسان که تاکنون دام‌های زیادی را در اروپا و کشورهای دیگر مبتلا کرده است، به وسیله ژلاتین تولیدی از پوست و استخوان دام‌ها نیز وجود دارد [۲-۴]. در حال حاضر، برای تعیین مقدار ژلاتین روش‌های متعددی مانند کروماتوگرافی گازی^۱ و اسپکترومتری جرم^۲ [۵ و ۶]، کروماتوگرافی مایع با کارایی بالا (HPLC)^۳ [۷] و طیف‌سنجی تبدیل فوری رامان (FT-Raman)^۴ [۸-۱۰] به کار برده می‌شود. این روش‌ها روش‌هایی مخرب، دشوار، آلاینده، درون آزمایشگاهی و نیازمند آماده‌سازی نمونه، نیروی متخصص آموزش دیده، آزمایشگاه‌های مجهز و صرف وقت و هزینه بسیار هستند. طیف‌سنج‌های مبتنی بر الکترون و یون نیز به خلأ بالا

1. Gas Chromatography
2. Mass Spectroscopy
3. High-performance Liquid Chromatography (HPLC)
4. Fourier transform Raman methods (FT-Raman)

سطح آن‌ها آب‌دوست شوند. سپس، ۱۰۰ میکرولیتر از این محلول‌های کلئیدی به‌طور مجزا بر روی زیر لایه‌های شیشه‌ای پخش و در دمای آزمایشگاه خشک شدند و سپس به‌عنوان بسترهای پلاسمونیک برای تشخیص و تعیین غیرمخرب ژلاتین در غلظت‌های مختلف استفاده شدند. برای آشکار سازی مولکول ژلاتین ابتدا غلظت $M \times 10^{-1}$ از آن با استفاده از حلال آب بدون یون (DI) ساخته شد و غلظت‌های 10^{-2} ، 10^{-3} ، 10^{-4} ، 10^{-5} ، 10^{-6} و 10^{-7} مولار آن‌ها تهیه شد. در ادامه، ۱۰ میکرولیتر از هر کدام از غلظت‌های تهیه‌شده به‌صورت جداگانه و به روش قطره‌افشان بر روی بسترهای پلاسمونیک نقره و طلا به‌طور مجزا قرار گرفت و پس از خشک شدن، طیف رامان مولکول ژلاتین قرارداده‌شده روی شیشه و طیف SERS مولکول ژلاتین قرارداده‌شده روی بسترهای پلاسمونیک نقره و طلا اندازه‌گیری شدند.

مشخصه‌یابی

دستگاه طیف‌سنجی UV-Vis و الگوی پراش پرتوی X پودر نقره و پودر طلا به‌ترتیب به‌وسیله دستگاه Perkin-Elmer Lambda25 و دستگاه X Pert-Pro ساخت شرکت Panalytical کشور هلند با پرتوی تک‌فام $Cu K\alpha$ با طول‌موج 0.154 نانومتر، جریان 40 میلی‌آمپر و با ولتاژ 40 کیلوولت در دمای اتاق انجام شد. تصاویر میکروسکوپ الکترونی گسیل میدانی (FESEM) به‌وسیله دستگاه Hitach مدل S4160 و تصویر میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM) نمونه‌ها نیز با استفاده از دستگاه شرکت نانوسیستم پارس ساخت ایران بررسی شد. دستگاه طیف‌سنجی رامان Takram مدل P50C0R10 ساخت شرکت تکسان با تابش نور لیزر Nd:YAG، با طول‌موج 532 نانومتر و توان خروجی قابل تنظیم 75 میلی‌وات برای اندازه‌گیری طیف رامان و طیف SERS نمونه‌ها استفاده شد.

یافته‌ها و بحث

طیف جذب محلول کلئیدی نقره و طلا و طیف خاموشی بسترهای پلاسمونیک نقره و طلا

شکل ۱- (الف)، محلول کلئیدی نقره و طیف جذب آن و شکل ۱- (ب)، محلول کلئیدی طلا و طیف جذب آن را نشان می‌دهد. ظاهر شدن قله تشدید پلاسمونی به‌ترتیب در 410 نانومتر و 520 نانومتر تشکیل نانوذرات نقره و نانوذرات طلا را تأیید می‌کند [۱۹]. مشاهده یک قله جذبی در طیف‌های جذبی نانوذراتی مانند نقره و طلا بیانگر شکل کروی یا شبه کروی بودن نانوذرات است [۲۰].

پلاسمونیک زیستی SERS را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود با نشانند (الف)، نانوذرات نقره، تصویر داخل آن، بستر شیشه‌ای پوشیده‌شده از نانوذرات نقره را نشان می‌دهد (سمت راست) و (ب)، نانوذرات طلا روی بسترهای شیشه‌ای، تصویر داخل آن، بستر شیشه‌ای

در اثر تشدید پلاسمون‌های سطحی نانوساختارهای فلزی به‌وسیله میدان الکترومغناطیسی لیزر، میدان‌های الکتریکی بهبودیافته در اطراف فلز ایجاد می‌شود [۱۵ و ۱۶]، گویی میدان الکتریکی حاصل از تابش نور لیزر تقویت شده است. بنابراین مولکولی که در این میدان الکتریکی بهبودیافته قرار می‌گیرد، بیش‌تر قطبیده می‌شود و در نتیجه سیگنال رامان آن بهبود می‌یابد [۱۷]. در این روش هنگامی که آنالیت‌های مورد مطالعه در نزدیک سطح فلز قرار می‌گیرند یا به‌طور فیزیکی جذب نانوذرات فلزی می‌شوند، به‌علت برهمکنش آنالیت‌ها و پلاسمون‌های سطحی فلز، شدت سیگنال رامان افزایش می‌یابد و بدین ترتیب SERS می‌تواند برای تشخیص سریع و دقیق آنالیت‌های میکروبیولوژیکی استفاده شود. در این مطالعه به هدف طراحی و ساخت حسگر ساده با سرعت تشخیص بالا، حساسیت، گزینش‌پذیری، تکرارپذیری و عدم نیاز به تجهیزات پیچیده ابتدا نانوذرات نقره و نانوذرات طلا به‌ترتیب با عامل کاهنده ساکاروز و عامل کاهنده تری‌سدیم‌سیترات دوآبه با استفاده از روش ساده شیمیایی ساخته شدند و سپس بر روی زیر لایه‌های شیشه‌ای قرار گرفتند تا بسترهای پلاسمونیک نقره و طلا برای تشخیص و تعیین غیرمخرب ژلاتین در غلظت‌های مختلف استفاده شود. شکل ۱، طرح‌واره‌ای از روش ساخت حسگر پلاسمونیک زیستی SERS، قرار دادن ژلاتین روی آن‌ها به روش قطره‌افشان و نتایج طیف رامان ارائه می‌شود. که با تابش نور لیزر با طول‌موج 532 نانومتر، سیگنال نور رامان پراکنده‌شده اندازه‌گیری می‌شود.

روش بررسی

روش‌های ساخت و شناسایی

روش ساخت بسترهای پلاسمونیک نقره و طلا

ابتدا به‌منظور ساخت محلول کلئیدی نقره از روش شیمیایی تولنز استفاده شد که در روش تولنز از سه محلول آبی شامل $12(1)$ میلی‌لیتر محلول نقره نیترات 0.1 مولار، $20(2)$ میلی‌لیتر محلول پتاس 0.5 مولار و $10(3)$ میلی‌لیتر محلول ساکاروز 0.7 مولار استفاده می‌شود. با افزودن محلول ساکاروز بر روی محلول آمونیاکی نقره نیترات و پتاس با دمای 50 درجه سانتی‌گراد پس از گذشت حدود 4 دقیقه نانوذرات نقره تشکیل می‌شود [۱۸]، در ادامه به‌منظور ساخت محلول کلئیدی طلا به 20 میلی‌لیتر محلول 1 mM نمک طلای $HAuCl_4$ در حال جوش و هم‌خوردن، 2 میلی‌لیتر محلول $3.8/8$ mM از محلول تری‌سدیم‌سیترات دوآبه $(NaC_6H_5O_7.H_2O)$ اضافه شد که کلئید ارغوانی‌رنگ نهایی حاوی نانوذرات طلا است. سپس، قطعات شیشه‌ای با ابعاد $2 \text{ cm} \times 2 \text{ cm}$ پس از شستشو با شوینده و آب با استون شستشو داده شدند که همزمان از امواج فراصوت نیز استفاده شد. پس از خشک شدن این قطعات شیشه‌ای در دمای 40 درجه سانتی‌گراد به‌مدت 30 دقیقه در کوره حرارت‌دهی شدند تا آلودگی‌های آلی نیز از سطح شیشه حذف شوند و

در زاویه 2θ برابر با $38/38$ ، $45/52$ ، $64/89$ و $77/83$ درجه که به ترتیب مربوط به صفحات بلوری (۱۱۱)، (۲۰۰)، (۲۲۰) و (۳۱۱) است، ساختار FCC طلا را تأیید می‌کند.

تصاویر FE-SEM بسترهای پلاسمونیک نقره و طلا و توزیع اندازه آن‌ها

شکل ۳- (الف) و (ج) به ترتیب بسترهای پلاسمونیک نقره و طلا را نشان می‌دهد و مجموعه‌ای از ذرات کروی یا شبه کروی در بخش‌های مختلف بسترها مشاهده می‌شود که توزیع اندازه ذرات در شکل ۳- (ب) نقره و (د) طلا نشان می‌دهد که ذرات نقره اندازه‌های بین ۱۰۰ تا ۱۷۰۰ نانومتر دارند و تعداد زیادی از ذرات اندازه ۱۴۰۰ تا ۱۵۰۰ نانومتر دارند. در مورد ذرات نقره نیز اندازه‌های بین ۵۰ تا ۱۶۰۰ نانومتر دارند و تعداد زیادی از ذرات نقره اندازه ۱۳۰۰ تا ۱۴۰۰ نانومتر دارند. نانوذرات کوچک‌تر، میدان‌های الکتریکی نزدیک قابل توجهی در اطراف خود ایجاد می‌کنند که حاصل تشدید پلاسمون‌های سطحی نقره و طلا است و چنانچه مولکول‌های ژلاتین در این موقعیت‌ها قرار بگیرند، در معرض تابش میدان‌های الکتریکی نزدیک قرار می‌گیرند. ذرات بزرگ‌تر، میدان‌های الکتریکی نزدیک ناچیزی دارند و نور تابیده شده به آن‌ها از سطح آن‌ها پراکنده می‌شود یا میدان الکتریکی دور را تقویت می‌کنند [۲۲ و ۲۳].

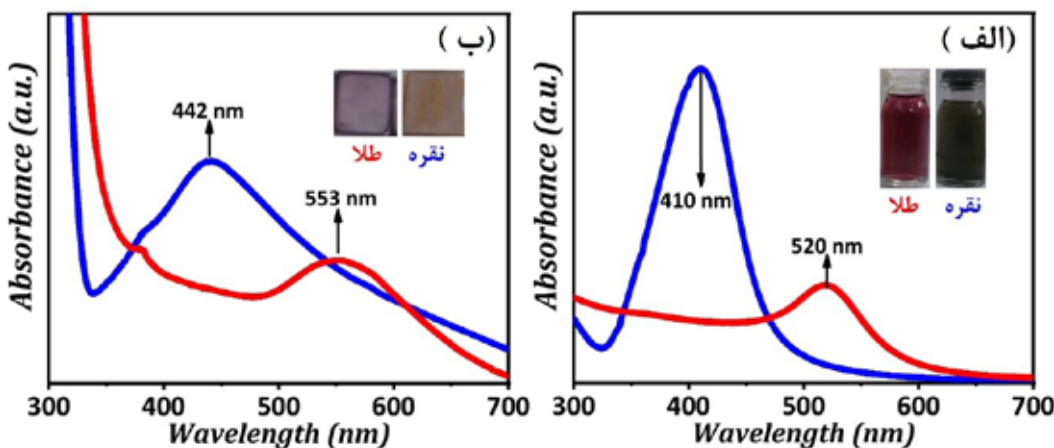
تصاویر AFM بسترهای پلاسمونیک نقره و طلا

شکل ۴- الف و ب، به ترتیب تصویر AFM دوبعدی و سه‌بعدی بسترهای پلاسمونیک نقره را نشان می‌دهد. با استفاده از نرم‌افزار Image Plus، (نسخه ۹/۲) میانگین زبری ۴/۴۲ نانومتر، میانگین مرتفع‌ترین زبری ۹/۲۳۸ نانومتر و میانگین عمیق‌ترین زبری ۳/۱۲۹ به دست آمد. شکل ۴- ج و د، به ترتیب تصویر AFM دوبعدی و سه‌بعدی بسترهای پلاسمونیک طلا را نشان می‌دهد. میانگین زبری ۲/۲۰ نانومتر، میانگین مرتفع‌ترین زبری

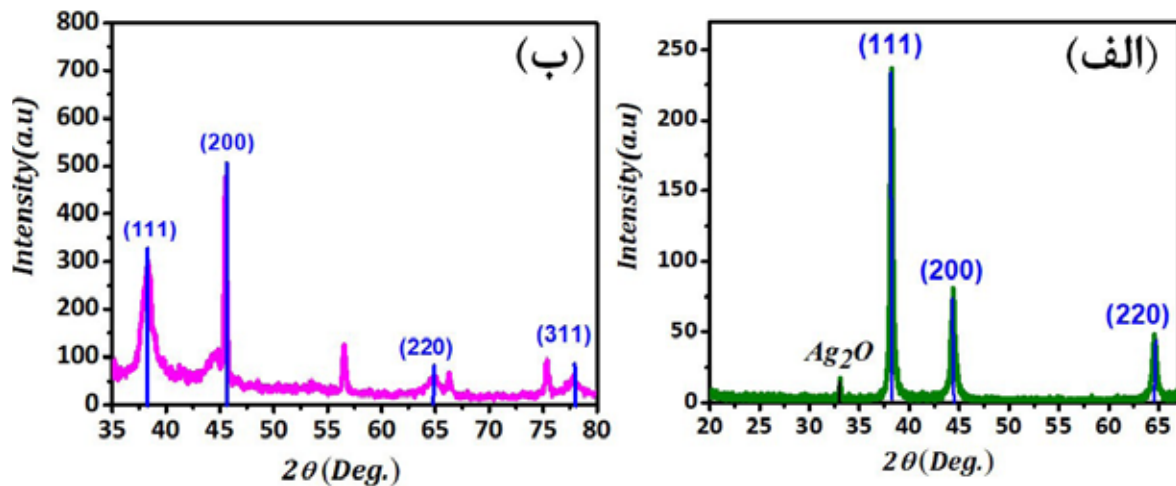
پوشیده شده از نانوذرات طلا را نشان می‌دهد (سمت راست). ظاهر شدن قله تشدید پلاسمونی در ۴۴۲ نانومتر و ۵۵۳ نانومتر به ترتیب تشکیل نانوذرات نقره و نانوذرات طلا روی بسترهای شیشه‌ای را تأیید می‌کند. با تغییر محیط دربردارنده این ذرات که از آب به شیشه و هوا تغییر می‌کند، جابه‌جایی در طول موج قله پلاسمونی رخ می‌دهد و ارتفاع آن کاهش و پهنای قله‌ها نیز افزایش می‌یابد به این دلیل که موقعیت قله پلاسمونی به ضریب شکست محیط دربردارنده آن‌ها وابسته است [۲۱]. با توجه به شکل ۱، بر خلاف محلول کلئیدی پایدار که نانوذرات نقره و نانوذرات طلا در داخل محلول آبی پراکنده هستند و به فاصله‌های مشخصی از یکدیگر قرار دارند، با قرار گرفتن نانوذرات نقره و نانوذرات طلا روی بسترهای شیشه‌ای، حین خشک شدن، ذرات در مجاورت یکدیگر قرار می‌گیرند و کلوخه‌هایی متشکل از چندین نانوذره روی بسترها شکل می‌گیرد به گونه‌ای که می‌توان این کلوخه‌ها را ذرات بزرگ‌تری در نظر گرفت که منجر به افزایش پهنای طیف می‌شود [۲۱]. کاهش شدت قله ناشی از پراکندگی نور از ذرات کلوخه شده است [۲۱]. اینک زمینۀ طیف خاموشی (طیف جذب + طیف پراکندگی) بسترهای فعال در SERS در مقایسه با طیف جذب در مقادیر بالاتری رخ داده است، ناشی از بازتاب و پراکندگی نور از سطح شیشه است.

طیف الگوی XRD نانوذرات نقره و نانوذرات طلا

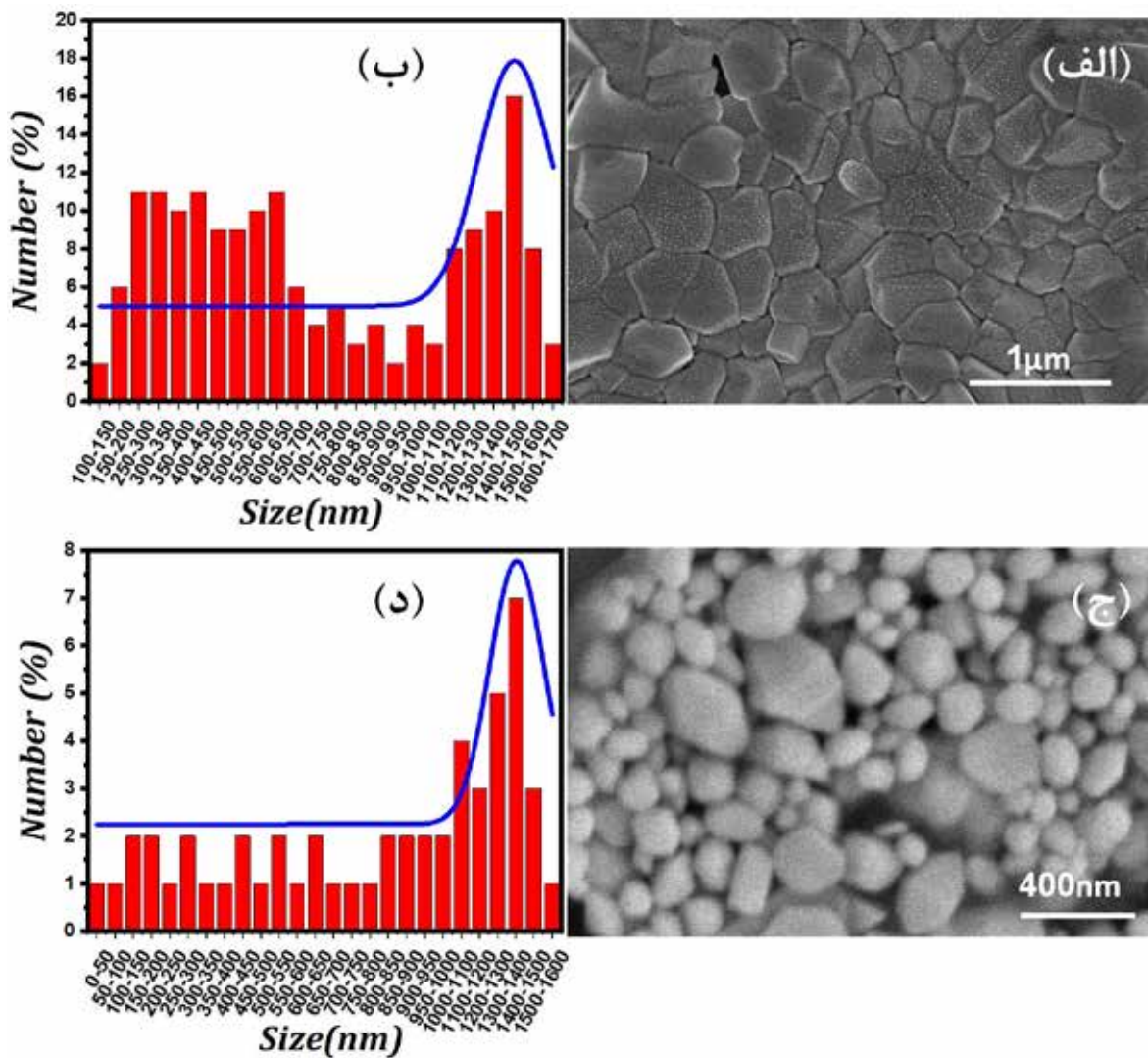
شکل ۲- (الف)، الگوی پراش اشعه ایکس نانوذرات نقره است که با مشاهده بزرگ‌ترین و اصلی‌ترین قله‌ها در زاویه 2θ برابر با $38/24$ ، $44/32$ و $64/57$ درجه که به ترتیب مربوط به صفحات بلوری (۱۱۱)، (۲۰۰) و (۲۲۰) است، ساختار FCC نقره را تأیید می‌کند. (قله ظاهر شده در زاویه 2θ برابر با $33/11$ درجه نقره اکسید است که به دلیل شرایط محیطی آزمایشگاه ظاهر شده است). شکل ۲- ب، الگوی پراش اشعه ایکس نانوذرات طلا است که با مشاهده بزرگ‌ترین و اصلی‌ترین قله‌ها



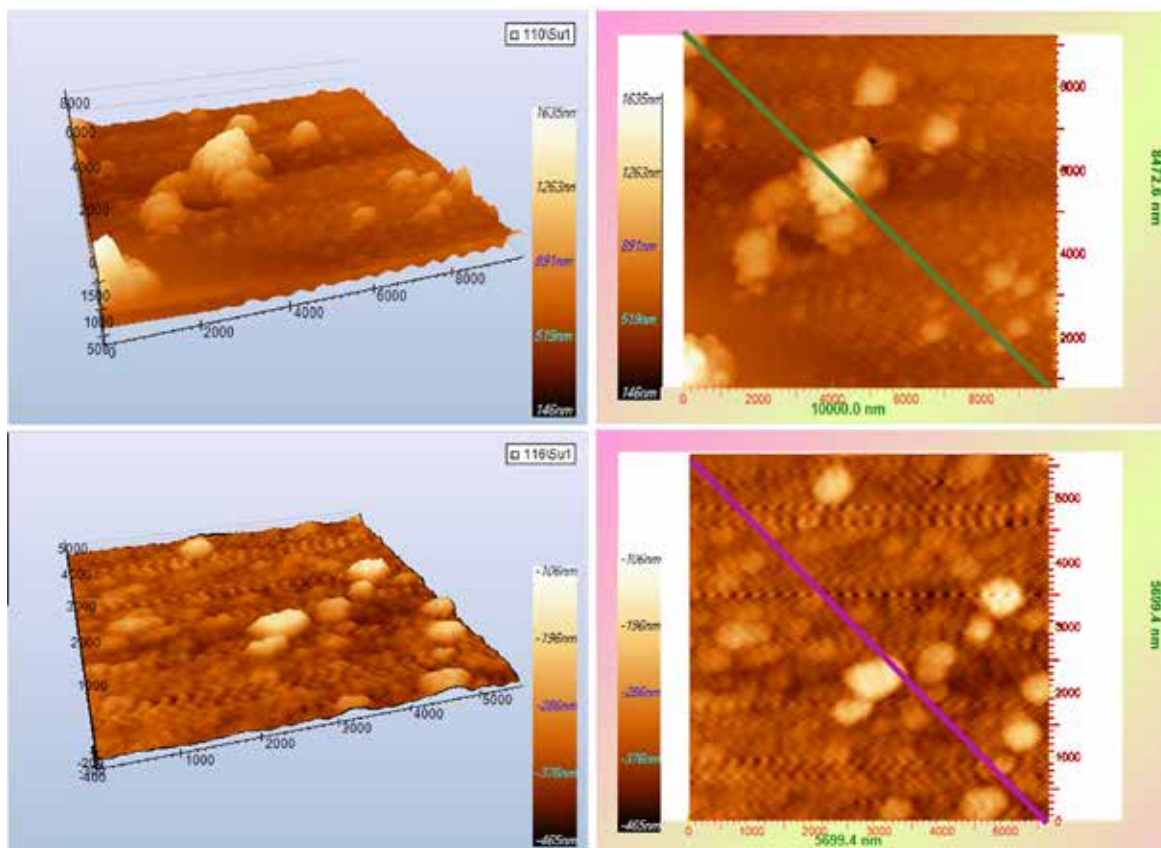
شکل ۱: (الف)، طیف جذب نانوذرات نقره ساخته شده به روش شیمیایی تولنز با پیشینه جذب در طول موج ۴۱۰ نانومتر (منحنی آبی) و تصویر ظرف حاوی محلول کلئیدی نانوذرات نقره (سمت راست) و طیف جذب نانوذرات طلا ساخته شده به روش شیمیایی با پیشینه جذب در طول موج ۵۲۰ نانومتر (منحنی قرمز) و تصویر ظرف حاوی محلول کلئیدی نانوذرات طلا (سمت چپ). (ب) طیف خاموشی بستر پلاسمونیک نقره (منحنی آبی) و تصویر این بستر (سمت راست) و طیف خاموشی بستر پلاسمونیک طلا (منحنی قرمز) و تصویر این بستر (سمت چپ)



شکل ۲: (الف)، الگوی پراش اشعه ایکس نانوذرات نقره و (ب)، الگوی پراش اشعه ایکس نانوذرات طلا



شکل ۳: (الف) تصویر FE-SEM بستر پلاسمونیک نقره، (ب) توزیع اندازه ساختارهای بستر پلاسمونیک نقره که اندازه‌های بین ۱۰۰ تا ۱۷۰۰ نانومتر دارند. (ج) تصویر FE-SEM بستر پلاسمونیک طلا، (د) توزیع اندازه ساختارهای بستر پلاسمونیک طلا که اندازه‌های بین ۵۰ تا ۱۶۰۰ نانومتر دارند.



شکل ۴: تصویر AFM (الف) دوبعدی و (ب) سه بعدی بسترهای پلاسمونیک نقره و تصویر AFM (ج) دوبعدی و (د) سه بعدی بسترهای پلاسمونیک طلا

ظاهر می‌شوند. ارتعاشات مولکولی مولکول ژلاتین [۲۵و۲] به صورت خط‌چین‌هایی بر روی طیف‌های مولکول ژلاتین در شکل ۵ نمایش داده شده است. در مورد مولکول ژلاتین قرارداده شده روی بستر پلاسمونیک نقره و طلا، ارتعاشات Tryptophan، ارتعاشات کششی C-N، کششی C-N، کششی N-H، کششی C-H، خمشی H-C-H، کششی N-H و کششی N-H به ترتیب در ۸۸۳، ۱۱۸۹، ۱۴۷۹، ۱۷۲۶، ۲۷۰۹، ۳۰۷۵، ۳۶۷۶ و ۴۵۴۳ cm^{-1} ظاهر می‌شوند. ارتعاشاتی که در طیف‌ها ظاهر شده‌اند، با خط‌چین‌های آبی نمایش داده شده است. بنابراین استفاده از نانوذرات نقره و نانوذرات طلا در بسترهای پلاسمونیک، بهبود ارتعاشات مولکولی مولکول ژلاتین را به دنبال دارد. با محاسبه فاکتور بهبود (EF)، بسترهای پلاسمونیک نقره و طلا مقایسه شدند که برای محاسبه فاکتور بهبود (EF) از رابطه (۱) استفاده شده است [۲۶].

$$EF = \frac{N_{vol} \times I_{surf}}{N_{surf} \times I_{vol}} \quad (1)$$

در رابطه (۱)، N_{surf} و N_{vol} به ترتیب غلظت ژلاتین قرارداده شده روی شیشه و قرار گرفته روی بسترهای پلاسمونیک است. I_{vol} و I_{surf} نیز به ترتیب شدت طیف رامن و شدت طیف SERS است.

5. Enhanced Factor

۹/۲۷۴ نانومتر و میانگین عمیق‌ترین زبری ۹/۱۶۳ به دست آمد. زبری سطحی که به وسیله نانوذرات نقره و نانوذرات طلا روی بسترهای شیشه‌ای حسگرهای پلاسمونیک زیستی SERS ایجاد شده است، می‌تواند مراکز برای پراکندگی نور باشد و باعث تقویت سیگنال رامن شود [۲۴].

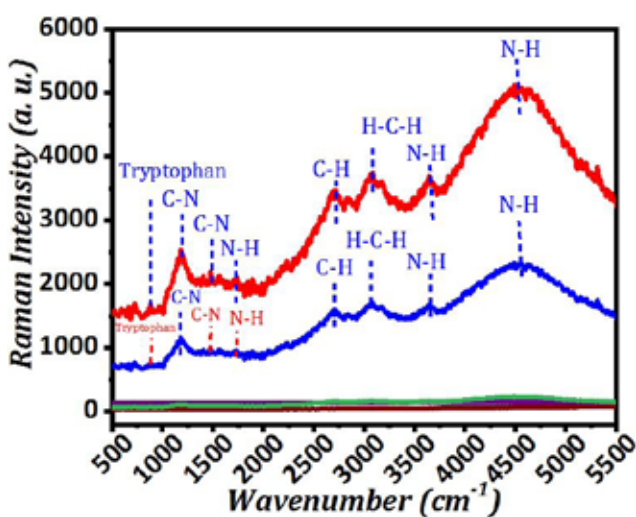
طیف رامن، طیف SERS و آشکارسازی مولکول ژلاتین با استفاده از بسترهای پلاسمونیک نقره و طلا

در شکل ۵ طیف رامن بسترهای پلاسمونیک نقره (منحنی قهوه‌ای) و طیف رامن بسترهای پلاسمونیک طلا (منحنی بنفش)، طیف رامن مولکول ژلاتین قرارداده شده با غلظت 10^{-1} مولار بر روی زیرلایه شیشه‌ای (منحنی سبز)، طیف SERS مولکول ژلاتین قرارداده شده با غلظت 10^{-2} مولار بر روی بسترهای پلاسمونیک نقره (منحنی آبی) و طیف SERS مولکول ژلاتین با غلظت 10^{-2} مولار قرارداده شده بر روی بسترهای پلاسمونیک طلا (منحنی قرمز) مشاهده می‌شوند. در طیف رامن مولکول ژلاتین که روی زیرلایه‌های شیشه‌ای قرار داده شده‌اند (منحنی سبز)، نشانی از ارتعاشات مولکولی مولکول ژلاتین مشاهده نمی‌شود. بنابراین عملاً شناسایی این گونه حتی با غلظت 10^{-2} مولار و با استفاده از طیف‌سنجی رامن امکان‌پذیر نیست. با قرار دادن ژلاتین با غلظت 10^{-2} مولار بر روی بسترهای پلاسمونیک، ارتعاشات مولکولی ژلاتین (شکل ۵)

این رابطه خطی است و ضریب رگرسیون (R^2) آن برابر با ۰/۸۹ است. می‌توان با استفاده از این نمودار با مشاهده شدت قله ارتعاشی مولکول C-H در طیف رامان، غلظت آن را به دست آورد. هدف از ساخت بسترهای پلاسمونیک، آشکار سازی غلظت‌های بسیار پایین ژلاتین است، خطی بودن منحنی کالیبراسیون غلظت‌های پایین از اهمیت بیشتری برخوردار است که در این مطالعه قابل مشاهده است و شکل ۶-ب، طیف SERS ژلاتین با غلظت‌های 10^{-2} (منحنی سیاه)، 10^{-3} (منحنی قرمز)، 10^{-4} (منحنی آبی)، 10^{-5} (منحنی صورتی) و 10^{-6} (منحنی قهوه‌ای) و 10^{-7} (منحنی بنفش) مولار قرار داده شده بر روی بسترهای پلاسمونیک طلا را نشان می‌دهد. مانند بسترهای پلاسمونیک نقره کاهش شدت قله‌های ارتعاشی مولکولی ژلاتین با کاهش غلظت مشاهده می‌شود که ناشی از کاهش ارتعاشی مولکولی است که در نتیجه کاهش غلظت ژلاتین رخ می‌دهد. ارتعاشی مولکولی ژلاتین در غلظت‌های کمتر از 10^{-7} مولار به راحتی قابل مشاهده نیستند. بنابراین بسترهای پلاسمونیک طلا می‌توانند تا غلظت 10^{-7} مولار از مولکول ژلاتین را شناسایی کنند. در داخل شکل ۶-ب، منحنی کالیبراسیون است که منحنی تغییرات شدت سیگنال SERS ارتعاش مولکولی C-H در عدد موج 1185 cm^{-1} را بر حسب تغییرات لگاریتمی غلظت ژلاتین، C نشان می‌دهد که با برازش انجام شده از رابطه (۳) تبعیت می‌کند.

$$I = 1514/4 C + 262/1 \quad (R^2 = 0/95) \quad (3)$$

رابطه خطی است و ضریب رگرسیون (R^2) آن برابر با ۰/۹۵ است که محاسبه غلظت ژلاتین با توجه به شدت طیف SERS را فراهم می‌آورد.

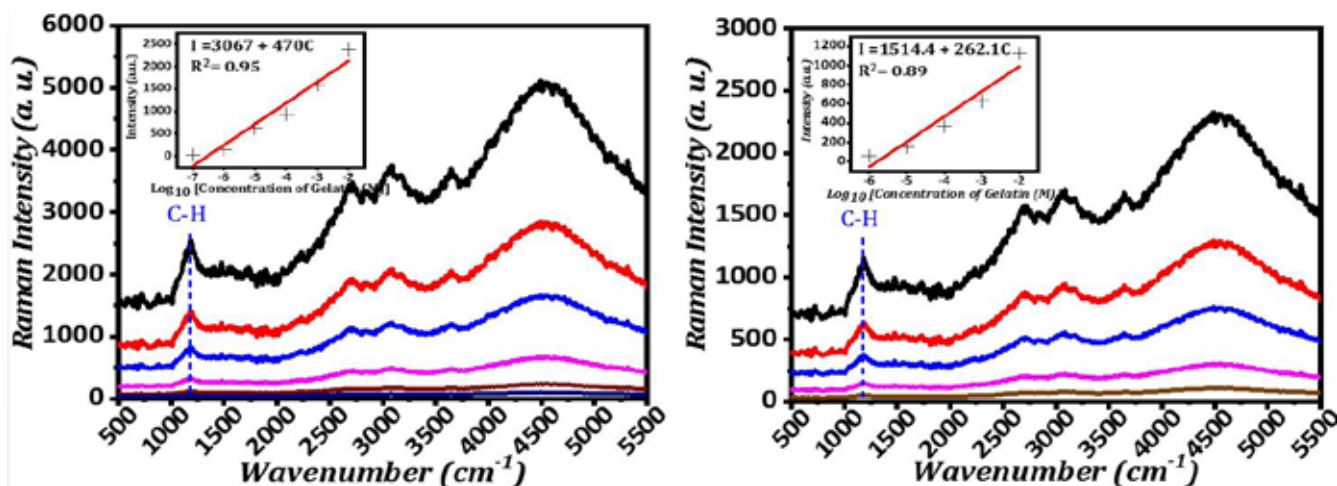


شکل ۵: طیف رامان بستر پلاسمونیک نقره (منحنی قهوه‌ای)، طیف رامان بستر پلاسمونیک طلا (منحنی بنفش)، طیف رامان ژلاتین با غلظت 10^{-2} قرار داده شده بر روی بستر شیشه‌ای (منحنی سبز)، طیف SERS ژلاتین قرار داده شده با غلظت 10^{-2} بر روی بستر پلاسمونیک نقره (منحنی آبی) و طیف SERS ژلاتین قرار داده شده با غلظت 10^{-2} بر روی بستر پلاسمونیک طلا با غلظت 10^{-2} (منحنی قرمز). ارتعاشات مولکولی که در طیف SERS ظاهر شده‌اند، با خط چین آبی و ارتعاشات مولکولی که ظاهر نشده‌اند، با خط چین قرمز مشخص شده است.

با جای گذاری داده‌های بسترهای پلاسمونیک در رابطه (۱)، فاکتور بهبود (EF) برای بسترهای پلاسمونیک نقره و طلا به ترتیب $8/9 \times 10^3$ و $19/8 \times 10^3$ به دست آمد که عملکرد بسترهای پلاسمونیک طلا در مقایسه با بسترهای پلاسمونیک نقره دارای فاکتور بهبود (EF) بالاتری است که تقویت بیشتر ارتعاشات مولکولی ژلاتین را سبب می‌شود. ارتعاشاتی از ژلاتین که در طیف‌ها ظاهر نشده‌اند با خط چین‌های قرمز نمایش داده شده است. معمولاً در دماهای پایین با از بین بردن افت و خیزهای حرارتی، ارتعاشاتی که به خصوص در عدد موج‌های کمتر اتفاق می‌افتند، قابل آشکار سازی می‌شوند [۲۷]. بنابراین، به این دلیل که طیف‌سنجی در دمای اتاق انجام شده است، ارتعاشات مولکولی که با خط چین‌های قرمز نمایش داده شده‌اند، در طیف SERS ظاهر نشده‌اند. بهبود سیگنال رامان در اثر استفاده از بسترهای پلاسمونیک به دلیل پراکندگی نور از نقاط زیر روی سطح شیشه است. نقاط زیری که با نقره‌اندود و طلا‌اندود کردن شیشه ایجاد شده است. ذرات بزرگ‌تر نقره و طلا که در شکل ۳- (الف) و (ب) مشاهده می‌شوند، با پراکنده کردن نور لیزر فرودی و رسیدن نور پراکنده شده به مولکول ژلاتین، سیگنال رامان آن‌ها را بهبود می‌دهند. در کنار پراکندگی نور از ذرات بزرگ‌تر نقره و طلا یکی دیگر از دلایل بهبود سیگنال رامان، تشدید پلاسمون‌های سطحی ذرات کوچک‌تر نقره و طلا یا همان میدان‌های الکتریکی قوی اطراف این نانوذرات است. نانوذرات نقره و طلای مشاهده شده در شکل ۳- (الف) و (ب) مانند لنز اپتیکی عمل می‌کنند و نور لیزر فرودی را در اطراف خود متمرکز می‌کنند. بنابراین شدت میدان الکتریکی در نزدیکی نانوذرات افزایش می‌یابد و با قرار گیری مولکول ژلاتین در اطراف نانوذرات، شدت میدان الکتریکی قوی را تجربه می‌کنند و قطبیده‌تر می‌شوند و در نتیجه ارتعاشی مولکولی آن‌ها تقویت می‌شود و سیگنال‌های پر شدت‌تری را نشان می‌دهند [۲۸ و ۲۹].

شکل ۶-الف، طیف SERS ژلاتین با غلظت‌های 10^{-2} (منحنی سیاه)، 10^{-3} (منحنی قرمز)، 10^{-4} (منحنی آبی)، 10^{-5} (منحنی صورتی) و 10^{-6} (منحنی قهوه‌ای) مولار قرار داده شده بر روی بسترهای پلاسمونیک نقره را نشان می‌دهد. با کاهش غلظت مولکول ژلاتین، شدت قله‌های ارتعاشی مولکولی آن کاهش می‌یابد که به دلیل کاهش تعداد مولکول‌های ژلاتین و در نتیجه کاهش تعداد ارتعاشی مولکولی آن است به گونه‌ای که در غلظت‌های کمتر از 10^{-6} مولار، ارتعاش‌های ژلاتین به راحتی قابل مشاهده نیستند. بنابراین بستر پلاسمونیک نقره می‌تواند تا غلظت 10^{-6} مولار ژلاتین را شناسایی کند. در داخل شکل ۶-الف، منحنی کالیبراسیون است که منحنی تغییرات شدت سیگنال SERS ارتعاش مولکولی C-H در عدد موج 1185 cm^{-1} را بر حسب تغییرات لگاریتمی غلظت ژلاتین، C نشان می‌دهد که با برازش انجام شده از رابطه (۲) پیروی می‌کند.

$$I = 1514/4 C + 262/1 \quad (R^2 = 0/89) \quad (2)$$



شکل ۶- الف) طیف SERS ژلاتین قرارداده شده با غلظت های ۱۰^{-۲} (منحنی سیاه)، ۱۰^{-۳} (منحنی قرمز)، ۱۰^{-۴} (منحنی آبی)، ۱۰^{-۵} (منحنی صورتی) و ۱۰^{-۶} (منحنی قهوه‌ای) بر روی بسترهای پلاسمونیک نقره. داخل شکل الف، منحنی کالیبراسیون تغییرات شدت، I، سیگنال SERS مربوط به ارتعاش C-H در عدد موج ۱۱۸۵ cm^{-۱}، بر حسب تغییرات لگاریتمی غلظت ژلاتین، C، برای بسترهای پلاسمونیک نقره نمایش داده شده است. ب) طیف SERS ژلاتین قرارداده شده با غلظت های ۱۰^{-۲} (منحنی سیاه)، ۱۰^{-۳} (منحنی قرمز)، ۱۰^{-۴} (منحنی آبی)، ۱۰^{-۵} (منحنی صورتی) و ۱۰^{-۶} (منحنی قهوه‌ای) بر روی بسترهای پلاسمونیک طلا. داخل شکل ب) منحنی کالیبراسیون تغییرات شدت، I، سیگنال SERS مربوط به ارتعاش C-H در عدد موج ۱۱۸۵ cm^{-۱}، بر حسب تغییرات لگاریتمی غلظت ژلاتین، C، برای بسترهای پلاسمونیک طلا نمایش داده شده است.

نتیجه گیری

نقره و طلا، مولکول های سازنده ژلاتین قطبیده تر می شوند و در نتیجه ارتعاش های شدیدتری ظاهر می شوند. از مزایای بسترهای حسگرهای پلاسمونیک زیستی SERS معرفی شده استفاده آسان و توانایی تشخیص سریع غلظت های اندک است که برای ساخت آن نیز هزینه چندانی صرف نمی شود و با آن ها می توان انواع پاتوژن های موجود در مواد غذایی و مواد بیولوژیکی را شناسایی کرد.

به منظور شناسایی و کنترل بیماری های متعدد ناشی از مولکول ژلاتین، تشخیص مولکول ژلاتین در غلظت های کم دارای اهمیت است. روش طیفسنجی رامان روشی غیرمخرب برای شناسایی مولکول ها است اما، به دلیل ضعیف بودن سیگنال رامان عملاً شناسایی غلظت های اندک از مولکول ها امکان پذیر نیست. با قرار دادن مولکول ژلاتین در معرض تشدید پلاسمون های سطحی نانوذرات فلزی مانند نقره و طلا و همچنین نور پراکنده شده از ذرات بزرگ فلزی می توان سیگنال رامان را بهبود داد. بنابراین، ابتدا نانوذرات نقره و نانوذرات طلا با استفاده از احیای شیمیایی نمک نقره و نمک طلا ساخته شدند و در ادامه با به کارگیری روش قطره چکان که روشی ساده، سریع و ارزان است، نانوذرات نقره و نانوذرات طلا در دمای اتاق بر روی بسترهای شیشه ای لایه نشانی شدند و این بسترها به عنوان بسترهای حسگرهای پلاسمونیک زیستی SERS جهت آشکارسازی مولکول ژلاتین استفاده شدند. با کاهش غلظت مولکول ژلاتین سیگنال رامان آن ها نیز کاهش می یابد که این بسترهای پلاسمونیک ساخته شده از نانوذرات نقره و نانوذرات طلا قادر به شناسایی مولکول ژلاتین به ترتیب تا غلظت ۱۰-۶ مولار و ۱۰-۷ مولار هستند. بهبود سیگنال رامان مولکول ژلاتین ناشی از تشدید پلاسمون های سطحی نانوذرات نقره و نانوذرات طلا که با دریافت نور لیزر فرودی، نور را در منطقه کوچکی در اطراف خود متمرکز می کنند و با قرارگیری مولکول ژلاتین در این مناطق و در نتیجه به دلیل دریافت میدان الکتریکی قوی تر و یا رسیدن نور حاصل از پراکندگی از نقاط زیر پوشش

References:

1. Zhang D, Yang H. Gelatin-stabilized copper nanoparticles: Synthesis, morphology, and their surface-enhanced Raman scattering properties. *Physica B*. 2013; 415: 44-8.
2. Lee CH, Zhang P. Facile synthesis of gelatin-protected silver nanoparticles for SERS applications. *J. Raman Spectroscopy*. 2013; 44: 823-6.
3. Bagrov DV, Nikishin II, Pavlova ER, Klinov DV. Distribution of Polylactide and Gelatin in Single Electrospun Nanofibers Studied by Raman Spectroscopy. *J. Applied Physics*. 2019; 2064: 040001-4.
4. Duconseille A, Gaillard C, Santé-Lhoutellier V, Astruc T. Molecular and structural changes in gelatin evidenced by Raman microspectroscopy. *J. Food Hydrocolloids*. 2018; 77: 777-86.
5. Patsias J, Papadopoulou-Mourkidou EJ. Rapid method for the analysis of a variety of chemical classes of pesticides in surface and ground waters by off-line solid-phase extraction and gas chromatography-ion trap mass spectrometry. *Journal of Chromatography*. 1998; 740: 83-98.
6. Goncalves C, Alpendurada MF. Solid-phase micro-extraction-gas-chromatography-(tandem) mass spectrometry as a tool for pesticide residue analysis in water samples at high sensitivity and selectivity with confirmation capabilities. *Journal of Chromatography*. 2004; 1020: 239-50.
7. Papadopoulou-Mourkidou E, Patsias JJ. Development of asemi-automated high-performance liquid chromatographic-diode array detection system for screening pesticides at trace levels in aquatic systems of the Axios River basin. *Journal of Chromatography*. 1996; 726: 99-113.
8. Skoulika SG, Georgiou CA. Univariate and Multivariate Calibration for the Quantitative Determination of Methyl-parathion in Pesticide Formulations by FT-Raman Spectroscopy. *Applied Spectroscopy*. 2000; 54: 747-52.
9. Sato-Berru RY, Medina-Valtierra J, Medina Gutierrez C, Frausto-Reyes C. Quantitative NIR-Raman analysis of methyl-parathion pesticide microdroplets on aluminum substrates. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*. 2004; 60: 2231-4.
10. Alak-Ala M, Vo-Dinh T. Surface-enhanced Raman spectrometry of organo phosphorus chemical agents. *ACS Publication Analytical Chemistry*. 1987; 59: 2149-53.
11. Ivanov AN, Evtugin GA, Brainina KZ, Budnikov GK, Stenina LE. Cholinesterase Sensors Based on Thick-Film Graphite Electrodes for the Flow-Injection Determination of Organophosphorus Pesticides. *Journal of Analytical Chemistry*. 2002; 57: 1042-8.
12. Alizadeh T. High Selective Parathion Voltammetric Sensor Development by Using an Acrylic Based Molecularly Imprinted Polymer-Carbon Paste Electrode. *Electroanalysis*. 2009; 21: 1490-8.
13. Duan N, Chang B, Zhang H, Wang Z, Wu S. Salmonella typhimurium detection using a surface-enhanced Raman scattering-based aptasensor. *International Journal Food Microbiology*. 2016; 218: 38-43.
14. Wang LR, 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.
15. Ren B, Liu GK, Lian XB, Yang ZL, Tian ZQ. Raman spectroscopy on transition metals. *Analytical and bioanalytical chemistry*. 2007; 388: 29-45.
16. Matricardi C, Hanske C, Garcia-Pomar JL, Langer J, Mihi A, Liz-Marzan LM. Gold Nanoparticle Plasmonic Superlattices as Surface-Enhanced Raman Spectroscopy Substrates. *ACS Nano*. 2018; 12: 8531-9.
17. Lin KQ, Yi J, Hu S, Liu BJ, Liu JY, Wang X, Ren B. Size effect on SERS of gold nanorods demonstrated via single nanoparticle spectroscopy. *The Journal of Physical Chemistry C*. 2016; 120: 20806-3.
18. Sharifi N, Taghavinia N. Silver nano-islands on glass fibers using heat segregation method. *Materials. Chemistry. and. Physics*. 2009; 113: 63-6.
19. Ngumbi PK, Mugo SW, Ngaruiya JM. Determination of Gold Nanoparticles Sizes via Surface Plasmon Resonance. *IOSR Journal of Applied Chemistry (IOSR-JAC)*. 2018; 11: 25-9.
20. Tarik Baytekin H, Baytekin B, Huda S, Yavuz Z, Grzybowski BA. Mechanochemical Activation and Patterning of an Adhesive Surface toward Nanoparticle Deposition. *Journal of the American Chemical Society*. 2015; 137: 1726-9.
21. Bohren CF, Huffman DR. Absorption and Scattering of Light by Small Particles. Wiley. New York. 1983; 306: 625.
22. Wang LR, 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.
23. Canameres MV, Garcia-Ramos JV, Sanchez-Cortes S, Castillejo M, 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.
24. Tarik Baytekin H, Baytekin B, Huda S, Yavuz Z, Grzybowski BA. Mechanochemical Activation and Patterning of an Adhesive Surface toward Nanoparticle Deposition. *Journal of the American Chemical Society*. 2015; 137: 1726-

9.

25. Brown GM, Hope G A. SERS study of the adsorption of gelatin at a copper electrode in sulfuric acid solution. *Journal of Electroanalytical Chemistry*. 1995; 397: 293-300.

26. Le Ru EC, Blackie E, Meyer M, Etchegoin PG. Surface Enhanced Raman Scattering Enhancement Factors: A Comprehensive Study. *The Journal of Physical Chemistry C*. 2007; 137: 13794-803.

27. Surovtsev NV, Adichtchev SV, Malinovsky V K, Ogienko AG, Drebuschak VA, Yu. Manakov A, Ancharov AI, Yunoshev AS, Boldyreva EV. Glycine phases formed from frozen aqueous solutions: Revisited. *THE JOURNAL OF CHEMICAL PHYSICS*. 2012; 137: 1065103.

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

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