معرفی طیف‌سنجی رامان و کاربرد آن در حوزه مواد غذایی

یگانه ترندک‌زاد [۱]، رسول خدابخشیان کارگر [۲*]، مهدی خجسته‌پور [۳]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد

۲- استادیار گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد

۳- استاد گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد

ایمیل نویسنده مسئول: Khodabakhshian@um.ac.ir

چکیده

ایمنی مواد غذایی در زنجیره تامین به شدت توسط فناوری‌های تشخیص مواد غذایی کمک می‌کند. روش‌های سنتی برای یافتن آلاینده‌های بیولوژیکی، شیمیایی و فیزیکی در مواد غذایی کار فشرده، پرهزینه، زمان‌بر هستند و اغلب باعث تغییر نمونه‌های غذا می‌شوند. طبق گفته صنایع غذایی، این اشکالات نیازمند ایجاد ابزارهای مفیدتری برای تشخیص مواد غذایی است که بتواند آلاینده‌های هر سه طبقه را شناسایی کند. طیف‌سنجی رامان می‌تواند غربالگری ایمنی مواد غذایی را به روشی سریع، ساده، حساس و آسان ارائه دهد. پیشرفت‌های اخیر در تکنیک‌های طیف‌سنجی رامان، توانایی شناسایی آلاینده‌های غذایی را افزایش داده است و کاربرد این تکنیک‌ها را در ایمنی مواد غذایی بسیار گسترش داده است. در این بررسی، اصول طیف‌سنجی رامان پیشرفته، طیف‌سنجی میکرو رامان و تصویربرداری توصیف می‌گردد و همچنین پیشرفت‌های اخیر در تشخیص خطرات بیولوژیکی، شیمیایی و فیزیکی در غذاها تشریح می‌شود. همچنین در مورد اشکالات و کاربردهای بالقوه تکنیک‌های طیف‌سنجی رامان برای نظارت بر ایمنی مواد غذایی بحث می‌گردد. هدف این بررسی، برجسته کردن کاربردهای احتمالی روش‌های طیف‌سنجی رامان به‌عنوان روشی نوآورانه برای تعیین ایمنی مواد غذایی است.

واژه‌های کلیدی: تشخیص سریع، تصویربرداری رامان، خطرات غذایی، طیف‌سنجی رامان، طیف‌سنجی رامان ارتقا یافته

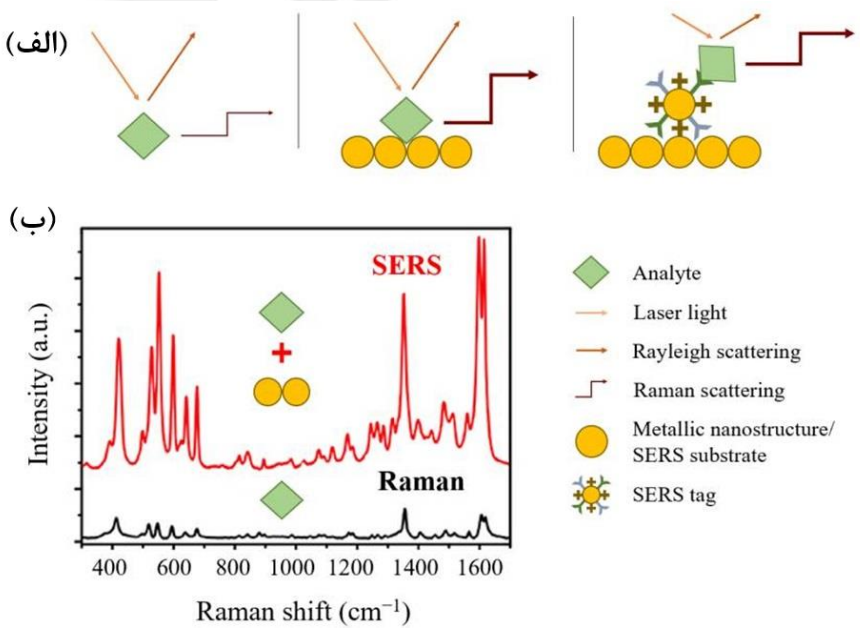
مقدمه

با توجه به آسیب‌پذیری زنجیره غذایی ما، ایمنی مواد غذایی به یک نگرانی حیاتی تبدیل شده است. نشان داده شده است که آلودگی مواد غذایی تأثیر منفی بر رشد اقتصادی دارد و همچنین باعث مشکلات جدی سلامتی و حتی مرگ می‌شود. طبق گزارش سازمان بهداشت جهانی، غذای ناایمن سالانه باعث ۶۰۰ میلیون بیماری و ۴۲۰۰۰ مرگ و میر می‌شود. تکنیک‌های ارزیابی کیفیت غذا اکنون بیش از هر زمان دیگری ضروری است زیرا نگرانی مصرف کنندگان در مورد کیفیت غذا افزایش یافته است. در نتیجه، تمام مراحل تولید مواد غذایی، مانند محتوا یا کیفیت اقلام، منشاء آنها و نحوه نگهداری، پردازش و نگهداری آنها اهمیت بیشتری یافته است. آنالیز غذا از تکنیک‌های مختلفی مانند روش‌های میکروبی، آنالیز حسی، روش‌های بیوشیمیایی و روش‌های فیزیکوشیمیایی استفاده می‌کند (T. Yang et al., ۲۰۱۷). سه نوع آلاینده می‌توانند به طور ناخواسته یا عمدی غذا را در سراسر زنجیره تامین مواد غذایی آلوده کنند: میکروارگانیسم‌ها (باکتری‌ها، ویروس‌ها و قارچ‌ها)، مواد شیمیایی (سموم، آفت کش‌ها، مواد تقلبی و آلرژی)، و آلاینده‌های فیزیکی (مانند فلزات، شیشه، پلاستیک، موی انسان و سنگ) . برای اطمینان از ایمن بودن مواد غذایی، یافتن آلاینده‌ها در ابتدای زنجیره تامین مواد غذایی ضروری است. یکی از معدود روش‌ها طیف‌سنجی رامان است که سریع، حساس، غیر مخرب و قیمت مناسبی در تشخیص آلاینده‌ها از هر سه طبقه‌بندی دارد (Rather et al., ۲۰۱۷).

در سال‌های اخیر، پیشرفت‌های چشمگیری در استفاده از یادگیری ماشین برای بهبود روش‌های ارزیابی ایمنی مواد غذایی صورت گرفته است (J. Pan et al., ۲۰۲۴; Y. Wang et al., ۲۰۲۴). تکنیک‌های طیف‌سنجی مورد استفاده برای تجزیه‌وتحلیل مواد غذایی شامل طیف‌سنجی فرابنفش، طیف‌سنجی فلورسانس، طیف‌سنجی رامان، طیف‌سنجی مادون قرمز، دو رنگی دایره‌ای، طیف‌سنجی اشعه‌ایکس، تشدید مغناطیسی هسته‌ای، رزونانس اسپین الکترون و طیف‌سنجی دی الکتریک، فتوسکوپی طیف‌سنجی، طیف‌سنجی دی‌الکتریک (Herrero, ۲۰۰۸). به منظور ارزیابی سیستم‌های کیفیت مواد غذایی در حین پردازش، پردازش و ذخیره‌سازی آن‌ها، طیف‌سنجی رامان یک تکنیک عملی است. طیف‌سنجی رامان دارای مزایای بسیاری است که آن را به ابزاری عالی برای آنالیز دارو تبدیل می‌کند، از جمله سهولت استفاده، جابجایی کم نمونه و تغییرات قابل توجه در استحکام پراکندگی بین مواد بسته بندی، مواد جانبی قرص و مواد فعال دارو (J. Qin et al., ۲۰۱۰).

فن‌آوری‌های تشخیص غذا نقش حیاتی در تضمین ایمنی مواد غذایی در زنجیره تامین ایفا می‌کند. روش‌های مرسوم تشخیص مواد غذایی برای آلاینده‌های بیولوژیکی، شیمیایی و فیزیکی، کار فشرده، پرهزینه، زمان‌بر هستند و اغلب نمونه‌های غذا را تغییر می‌دهند. این محدودیت‌ها نیاز صنایع غذایی را برای توسعه ابزارهای کاربردی‌تر تشخیص غذا که می‌توانند آلاینده‌های هر سه کلاس را شناسایی کنند، تحریک می‌کند. طیف‌سنجی رامان می‌تواند ارزیابی گسترده ایمنی مواد غذایی را به روشی غیر مخرب، آسان، حساس و سریع ارائه دهد. پیشرفت‌های اخیر روش‌های طیف‌سنجی رامان، قابلیت‌های تشخیص آلاینده‌های مواد غذایی را بیشتر بهبود می‌بخشد، که تا حد زیادی کاربردهای آن را در ایمنی مواد غذایی افزایش می‌دهد (Guo et al., ۲۰۲۴; Qin et al., ۲۰۱۲).

طیف‌سنجی رامان بر اساس یک پدیده نور پراکنده غیرکشسان برای تشخیص یک آنالیت از طریق ارتعاشات پیوند مولکولی است. هنگامی که یک نمونه در معرض نور لیزر قرار می‌گیرد، تعداد کمی از فوتون‌ها پراکنده می‌شوند. بیشتر پراکندگی نور پراکنده الاستیک (یعنی پراکندگی رایلی) است که فرکانس مشابه نور فرودی دارد. تقریباً ۱ فوتون از ۱۰۶–۱۰۸ فوتون به صورت غیر کشسانی پراکنده هستند (یعنی پراکندگی رامان) که منجر به تغییرات فرکانس (یعنی جابجایی رامان) بین فوتون‌های فرود و پراکنده می‌شود زیرا انرژی بین فوتون و مولکول منتقل می‌شود. در اینجا، یا انرژی فوتون نور فرودی با انتقال انرژی از مولکول‌ها به فوتون‌ها به دست می‌آید (پراکندگی رامان ضد استوکس)، یا انرژی فوتون نور فرودی با انتقال انرژی از فوتون‌ها به مولکول‌ها از بین می‌رود (پراکندگی استوکس رامان) (Jones et al., ۲۰۱۹). طیف‌های رامان بر اساس شیفت‌های رامان شناسایی شده به دست می‌آیند .هر پیک رامان در طیف مشخصه یک پیوند مولکولی خاص است که امکان شناسایی مولکولی آنالیت را با ایجاد یک اثر انگشت ارتعاشی خاص فراهم می‌کند. تکنیک‌های طیف‌سنجی رامان که معمولاً برای تشخیص ایمنی مواد غذایی استفاده می‌شوند عبارتند از طیف‌سنجی میکرو رامان، تصویربرداری رامان و طیف‌سنجی رامان تقویت‌شده سطحی[۱] (Lorenz et al., ۲۰۱۷).



شکل ۱- مقایسه طیف‌سنجی رامان و طیف‌سنجی رامان پیشرفته. (الف) تصویر شماتیک از طیف‌سنجی رامان، طیف‌سنجی رامان پیشرفته بدون برچسب و مبتنی بر برچسب. (ب) طیف رامان (سیاه) و طیف‌سنجی رامان پیشرفته (قرمز) پیوسیانین. طیف‌سنجی رامان پیشرفته مبتنی بر کاربرد نانوذرات طلای پلاسمونیک است. نمودار تفاوت‌های شدت بین سیگنال‌های رامان و طیف‌سنجی رامان پیشرفته پیوسیانین را به تصویر می‌کشد.

طیف‌سنجی رامان روشی سریع، حساس، غیر مخرب و مقرون به صرفه برای تشخیص هر سه نوع آلاینده ارائه می‌دهد. به دلیل وضوح طیفی بالاتر و توانایی انجام تجزیه و تحلیل کمی بر اساس شدت سیگنال رامان، از سایر روش‌های طیف‌سنجی بهتر عمل می‌کند. این بررسی

[۱] Surface-enhanced Raman spectroscopy

پیشرفت‌های اخیر در طیف‌سنجی رامان را برای شناسایی آلاینده‌های بیولوژیکی، شیمیایی و فیزیکی در زنجیره غذایی برجسته می‌کند، چالش‌های فعلی را مورد بحث قرار می‌دهد و پتانسیل کاربرد گسترده آن را برای افزایش ایمنی غذا بررسی می‌کند.محصولات کشاورزی ارزش بسیار زیادی دارند و نقش مهمی در اقتصادها و جوامع در سراسر جهان دارند. آنها برای امنیت غذایی اساسی هستند و مواد مغذی ضروری لازم برای بقا و رفاه انسان را فراهم می‌کنند. فراتر ارزش غذایی، محصولات کشاورزی از طریق ایجاد مشاغل در کشاورزی، فرآوری، توزیع و خرده فروشی به اقتصاد کمک می‌کند. در بسیاری از کشورهای در حال توسعه، کشاورزی منبع اصلی درآمد و اشتغال است که نقش مهمی در کاهش فقر و ثبات اقتصادی ایفا می‌کند. تنوع محصولات کشاورزی، از محصولات اصلی مانند برنج و گندم گرفته تا کالاهای با ارزشی مانند قهوه و کاکائو، اهمیت اقتصادی گسترده آنها را منعکس می‌کند (,.Xu et al۲۰۲۳).

کشاورزی همچنین نقش مهمی در پایداری محیط زیست و مدیریت زمین دارد. شیوه‌های کشاورزی پایدار می‌تواند سلامت خاک را بهبود بخشد، آب را حفظ کند و انتشار کربن را کاهش دهد و به مبارزه با تغییرات آب و هوایی کمک کند. محصولات کشاورزی، زمانی که مسئولانه رشد و برداشت شوند، از تنوع زیستی و استفاده پایدار از منابع طبیعی حمایت می‌کنند. علاوه بر این، افزایش محصولات ارگانیک و محلی منعکس کننده آگاهی رو به رشد مصرف کننده از اثرات زیست محیطی و تغییر به سمت الگوهای مصرف پایدارتر است. بنابراین، ارزش محصولات کشاورزی فراتر از مزایای اقتصادی و تغذیه ای آنها است و نقش حیاتی آنها را در ارتقای توسعه پایدار و نظارت بر محیط زیست در بر می‌گیرد (RAMAN & KRISHNAN, ۱۹۲۸).

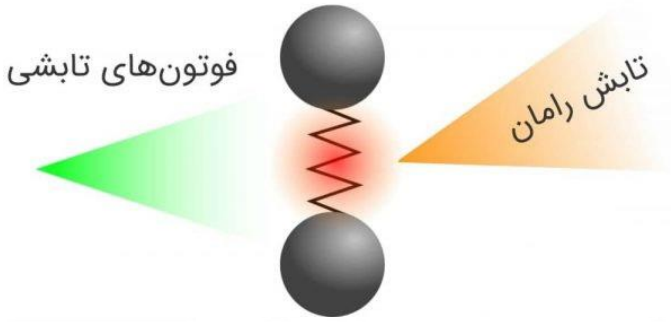
برای طیف‌سنجی تعاریف مختلفی می‌توان ارائه کرد ولی به‌صورت کلی طیف‌سنجی انبوهی از فن‌های مختلف است که از یک پرتو برای دست‌یابی به ساختار و خواص مواد استفاده می‌شود.می‌توان گفت که درواقع طیف‌سنجی بررسی برهمکنش حاصل از پرتو و ماده است. بر اساس تعاریف موجود اصل اساسی و مشترک بین همه فن‌های طیف‌سنجی تاباندن یک پرتو که می‌تواند باریکه‌ای از نور، دسته‌ای الکترون و غیره باشد، به یک نمونه و مشاهده نحوه واکنش ماده یا نمونه به چنین محرکی است.اکنون طیف‌سنجی یک علم بسیار گسترده‌ای است که خود شامل شاخه‌های متنوعی است (,.Xu et al۲۰۲۳). اهداف این مطالعه شامل بررسی و بهبود روش‌های طیف‌سنجی رامان برای تشخیص آلاینده‌های بیولوژیکی، شیمیایی و فیزیکی در زنجیره تامین مواد غذایی است. همچنین، تلاش می‌شود تا با بهینه‌سازی فرایندهای طیف‌سنجی، روشی جامع و غیرمخرب برای ارزیابی ایمنی مواد غذایی فراهم شود که بتواند به صنایع غذایی در تضمین کیفیت و ایمنی محصولات کمک کند.

مواد و روش‌ها

اصول طیف‌سنجی رامان :

یک پدیده نور پراکنده غیرکشسان به نام تأثیر رامان در ابتدا توسط دانشمندی به نام رامان توصیف شد. تعداد کمی از فوتون‌ها با قطبش و فرکانس شناخته شده از نمونه در معرض پرتو لیزر پراکنده می‌شوند. پراکندگی الاستیک و غیرکشسان هر دو در تابش پراکنده رخ می‌دهد.

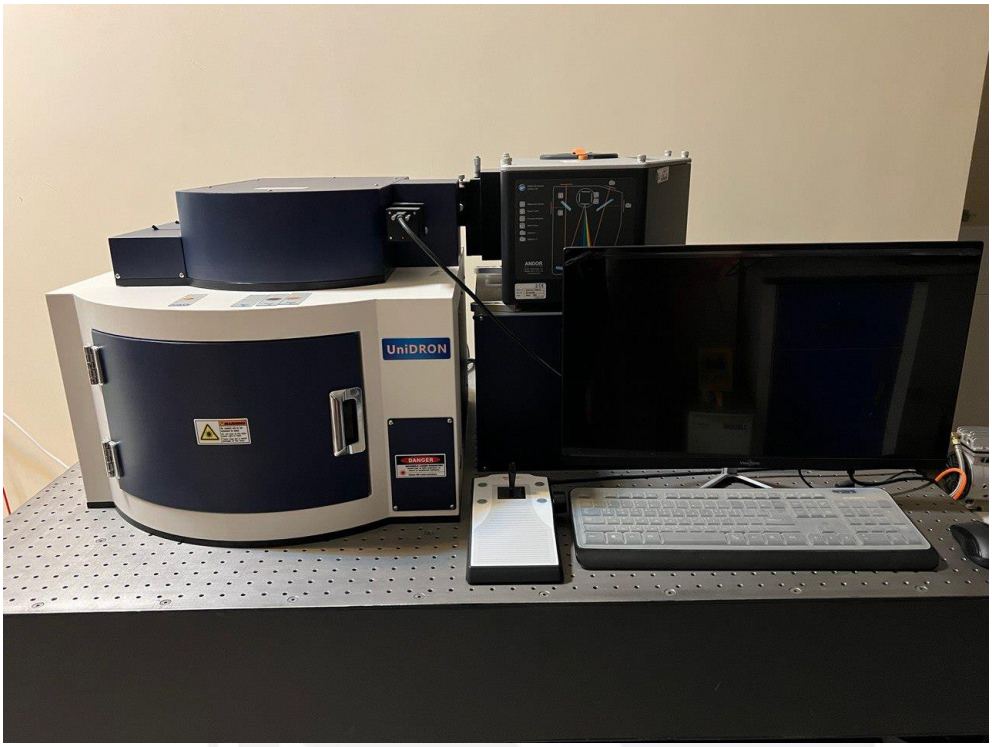
اکثریت پراکندگی به عنوان پراکندگی رایلی شناخته می‌شود که فرکانس مشابهی با نور فرودی دارد و زمانی رخ می‌دهد که نور به صورت کشسانی پراکنده شود. در مقابل، پراکندگی رامان زمانی اتفاق می‌افتد که نور به‌صورت غیرکشسانی پراکنده می‌شود، که بخش بسیار کوچک‌تری از کل نور پراکنده را تشکیل می‌دهد. انرژی ارتعاشی که در نتیجه برهمکنش بین فوتون‌ها و مولکول‌ها کاهش یا افزایش می‌یابد، در این فرآیند برای تغییر انرژی یا فرکانس پراکندگی رامان از نور فرودی استفاده می‌شود (Jones et al., ۲۰۱۹). تغییر رامان عبارتی است که برای توصیف تفاوت فرکانس بین تابش ورودی و پراکنده استفاده می‌شود. پراکندگی ضد استوکس اصطلاحی است که برای توصیف افزایش انرژی فوتون از نور ورودی به کار می‌رود. نقطه مقابل آن به عنوان پراکندگی استوکس شناخته می‌شود که از دست دادن انرژی فوتون از نور فرودی است. غیرعادی است که پراکندگی وجود داشته باشد. طیف‌سنجی رامان چندین مزیت از جمله هزینه‌های پایین‌تر، غیرمخرب بودن، مصونیت از تداخل آب و نیاز به نمونه کوچکی برای آنالیز را ارائه می‌دهد. طیف‌سنجی رامان در تجزیه و تحلیل مواد غذایی عمدتاً برای دو هدف استفاده می‌شود: تعیین ترکیب غذا و تعیین هرگونه تغییر ساختاری یا ساختاری که در نتیجه فرآوری مواد غذایی رخ می‌دهد (Li & Church, ۲۰۱٤).



شکل ۲- شماتیک **پراکندگی رامان در اثر برخورد فوتون با مولکول**

تکنیک‌های طیف‌سنجی رامان :

طیف‌سنجی رامان از یک پدیده نور پراکنده غیرالاستیک برای تشخیص آنالیت‌ها با اندازه‌گیری ارتعاشات پیوندهای مولکولی استفاده می‌کند. در این حالت، انرژی فوتون نور فرودی یا با تبدیل انرژی مولکول‌ها به فوتون به دست می‌آید (پراکندگی ضد استوکس رامان) یا با تبدیل انرژی فوتون‌ها به مولکول (پراکندگی استوکس رامان). یک آنالیت را می‌توان از نظر مولکولی با استفاده از یک اثر انگشت ارتعاشی منحصر به فرد تولید شده توسط هر پیک رامان در طیف شناسایی کرد، که برای یک پیوند مولکولی خاص متمایز است. تصویربرداری رامان، طیف‌سنجی رامان تقویت‌شده سطحی، و طیف‌سنجی میکرو رامان، روش‌های طیف‌سنجی رامان هستند که اغلب برای تعیین ایمنی مواد غذایی استفاده می‌شوند (Cutmore & Skett, ۱۹۹۳).



شکل۳- دستگاه طیف‌سنجی رامان

میکروسکوپ رامان و طیف‌سنجی میکرو رامان :

میکروسکوپ رامان نام ترکیبی از طیف‌سنجی رامان و میکروسکوپ نوری است. پراکندگی رامان در تنظیم میکروسکوپ رامان با هدف قرار دادن نور لیزر از طریق یک عدسی شیئی به سمت ماده انجام می‌شود. در مقابل، راه اندازی میکروسکوپ رامان کانفوکال دشوارتر است و نیاز به استفاده از روزنه‌های سوراخ سوزنی دارد. در طیف‌سنجی میکرو رامان کانفوکال، یک منبع نور نقطه‌ای پس از هدایت شدن توسط یک سوراخ سوزنی منبع و پرتو شکافنده، توسط یک عدسی شیئی به یک ناحیه محدود از پراش ماده متمرکز می‌شود. همان عدسی شیئی نوری را که از این ناحیه پراکنده یا ساطع می‌شود، جمع‌آوری می‌کند و قبل از هدایت آن از طریق یک سوراخ کوچک آشکارساز و به یک طیف‌سنج هدایت می‌کند. از آنجایی که سوراخ آشکارساز تنها سیگنال را از نقطه کانونی جمع‌آوری می‌کند و نور را از مناطق خارج از فوکوس رد می‌کند، به عنوان یک انتخابگر عمق عمل می‌کند. با توجه به بهبود وضوح عمق و افزایش کنتراست تصویر در اثر سرکوب نور سرگردان، میکروسکوپ‌های کانفوکال به عنوان ابزارهای تحلیلی در چند سال گذشته ارزش بیشتری پیدا کرده اند (Li & Church, ۲۰۱٤).

تصویر برداری رامان :

تصویربرداری رامان برای نشان دادن نحوه توزیع اجزا در یک نمونه با توجه به خواص شیمیایی آنها استفاده می‌شود. داده‌های مکانی و طیف‌سنجی رامان در تصویربرداری رامان ترکیب شده اند. در نتیجه، هر پیکسل در تصویر با یک طیف رامان مرتبط است، که با یک پایگاه داده رامان به خوبی تثبیت شده برای شناسایی یک آنالیت خاص یا مشاهدات پس‌زمینه طیفی در این ناحیه مقایسه می‌شود. به طور معمول،

هیچ نمونه ای برای تصویربرداری رامن لازم نیست. تصویربرداری رامان را می‌توان با استفاده از تکنیک‌های اسکن یا میدان گسترده انجام داد. دو راه برای انجام تصویربرداری اسکن وجود دارد که هر دو شامل یک میکروسکوپ کانفوکال هستند (Yaseen et al., ۲۰۱۷). اسکن نقطه ای به طور متوالی یک طیف رامان را در هر موقعیت مکانی جمع می‌کند. مختصات جانبی و محوری نمونه کنترل می‌شود با یک مرحله با دقت بالا در حالی که از یک نقطه مشخص به نقطه دیگر منتقل می‌شود. وضوح طیفی بالا و پوشش طیفی کامل از مزایای این رویکرد است. زمان زیادی می‌برد و به دلیل لیزر به نمونه‌ها آسیب می‌رساند. (۲) برخلاف اسکن نقطه ای، اسکن خطی با اعمال یک خط لیزری، محدوده فضایی هر اسکن را افزایش می‌دهد و یک خط از داده‌های فضایی و طیفی را برای هر اندازه گیری به دست می‌آورد. در یک مرحله رباتیک، نمونه عمود بر خط لیزری که در حال برخورد است حرکت می‌کند. اسکن خطی وضوح طیف بالاتری را ارائه می‌دهد و سریعتر از اسکن نقطه ای است، اما سیگنال پراکندگی رامان ضعیف تری را در مقایسه با اسکن نقطه ای به دلیل قدرت لیزر کمتر در هر منطقه تولید می‌کند. در تصویربرداری با میدان وسیع رامان، منطقه کامل نمونه با نور لیزر روشن می‌شود و اطلاعات مکانی آن در یک اسکن بدون حرکت نسبی لیزر و نمونه جمع‌آوری می‌شود (Petersen et al., ۲۰۲۱).

طیف‌سنجی رامان پیشرفته:

سیگنال پراکندگی رامان بسیار ضعیف، اشکال اصلی طیف‌سنجی سنتی رامان است. طیف‌سنجی رامان ممکن است نتواند مولکول‌ها را در غلظت‌های پایین تشخیص دهد، زیرا تنها بخش بسیار کوچکی از فوتون‌های فرودی به صورت غیرالاستیک پراکنده شده‌اند که استفاده از آن را در بخش مواد غذایی محدود می‌کند (Q. Yang et al., ۲۰۲۲). یک رویکرد طیف‌سنجی رامان به نام طیف‌سنجی رامان پیشرفته از بسترهای طیف‌سنجی رامان پیشرفته برای غلبه بر سیگنال پراکندگی رامان ذاتا ضعیف استفاده می‌کند. سیگنال رامان تک مولکولی با غلظت پایین را می‌توان با درجات بزرگی، معمولاً بین ۱۰۷ تا ۱۰۱۴، توسط این نانوساختارهای فلزی تقویت کرد. طیف‌سنجی رامان پیشرفته بدون برچسب (مستقیم) و مبتنی بر برچسب (غیر مستقیم) دو مفهومی‌هستند که متدولوژی‌های طیف‌سنجی رامان پیشرفته فعلی بر اساس آنها ساخته شده اند. رویکرد طیف‌سنجی رامان پیشرفته بدون برچسب بلافاصله با تکیه بر تعامل متقابل آنالیت با بستر طیف‌سنجی رامان پیشرفته، اثر انگشت ذاتی آنالیت را تشخیص می‌دهد. این فناوری مزایای مختلفی نسبت به فناوری‌های طیف‌سنجی رامان پیشرفته مبتنی بر برچسب دارد که از آن جمله می‌توان به سادگی، سرعت بالا، هزینه ارزان‌تر و عدم تعامل با سایر اجزاء اشاره کرد زیرا به برچسب‌های طیف‌سنجی رامان پیشرفته نیاز نیست (Xu et al., ۲۰۲۳). تکنیک‌های طیف‌سنجی رامان پیشرفته مبتنی بر برچسب از برچسب‌های طیف‌سنجی رامان پیشرفته استفاده می‌کنند که شامل اجزای تشخیص هدف برای گرفتن آنالیت‌ها و مولکول‌های گزارش‌دهنده رامان خاص برای اتصال به بستر طیف‌سنجی رامان پیشرفته است. تشخیص Multiplex، حساسیت بیشتر و تکرارپذیری از مزایای سیستم‌های طیف‌سنجی رامان پیشرفته مبتنی بر برچسب در مقابل بدون برچسب هستند (Gopal et al., ۲۰۱۶).

کاربرد طیف‌سنجی رامان در آنالیز مواد غذایی:

۲) طیف‌سنجی رامان برای تشخیص ویروس‌ها و میکروارگانیسم‌ها:

شناسایی باکتری‌ها و ویروس‌ها را می‌توان با استفاده از تکنیک‌های تحلیلی مختلف انجام داد. اگرچه تکنیک‌های استاندارد شمارش پلیت میکروبیولوژیکی مانند PCR[۱]، تکنیک‌های ایمونولوژیکی و سرولوژیکی به‌طور گسترده برای این منظور به کار گرفته شده‌اند، طیف‌سنجی رامان به دلیل مزایای ذکر شده در بالا، از جمله حساسیت بالا، قابلیت اطمینان و غیر مخرب بودن، محبوبیت پیدا می‌کند. ویروس‌های هپاتیت A، نوروالک، فلج اطفال، آسترو، انتریک آدنو، پاروو و روتاویروس‌ها علاوه بر میکروب‌هایی که به طور طبیعی در غذا وجود دارند، به عنوان آلاینده‌ها در غذاها شناسایی شده اند (J. Wang et al., ۲۰۱۵).

ویروس‌ها : استفاده از طیف‌سنجی رامان برای شناسایی ساختاری ویروس‌ها در مقالات متعددی گزارش شده است. به عنوان مثال، تحقیقات متعددی با استفاده از داده‌های ساختاری از طیف‌سنجی رامان برای ایجاد داروهای ضد ویروسی انجام شده است. تجزیه و تحلیل ویروس‌های منتقله از غذا با استفاده از طیف‌سنجی رامان تنها در تعداد بسیار کمی از موارد مورد مطالعه قرار گرفته است (Rösch et al., ۲۰۰۳). هپاتیت A، شایع ترین ویروس منتقله از غذا، تنها موضوع یک مطالعه بوده است که از طیف‌سنجی رامان استفاده کرده است. سیستئین پروتئاز معروف به پروتئیناز هپاتیت A ۳C برای چرخه زندگی این ویروس ضروری است و مسئول تبدیل پیش ساز پلی پروتئین به پروتئین‌های بالغ ویروسی است. در مطالعه فوق، گروه‌های آسیل در ناحیه فعال آنزیم با استفاده از طیف رامان مورد بررسی قرار گرفتند. تعدادی از مطالعات از طیف‌سنجی رامان برای بررسی ویروس‌های هپاتیت استفاده کرده‌اند، اما هیچ‌یک از آنها به عنوان ویروس‌های منتقله از غذا شناسایی نشده‌اند (Lorenz et al., ۲۰۱۷).

۲) طیف‌سنجی رامان برای تشخیص سم و مواد شیمیایی :

موادی که ناخواسته به مواد غذایی وارد شده اند به عنوان آلاینده نامیده می‌شوند. این ترکیبات ممکن است در نتیجه آلودگی در هر مرحله از ساخت، بسته بندی، حمل و نقل یا ذخیره سازی در مواد غذایی یافت شوند. آنها همچنین ممکن است نتیجه آلودگی محیط زیست باشند. تکنیک‌های تحلیلی متعددی برای شناسایی و تعیین کمیت این مواد توسعه یافته‌اند، زیرا آلاینده‌ها به طور کلی تأثیر مخربی بر کیفیت غذا دارند و سلامت انسان را نگران می‌کنند (Stewart et al., ۲۰۱۲).

سموم : به منظور یافتن سطوح کمی از آفت‌کش‌های باقی‌مانده سطح، میوه‌ها و سبزیجات مختلف با استفاده از طیف‌سنجی میکرو رامان و مادون قرمز نزدیک مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. علف کش‌های آترازین، پرومترین و سیمترین با استفاده از اشکال جامد آنها در حلال‌های قطبی و آپولار برای تعیین طیف رامان موردمطالعه قرار گرفتند. طیف‌های تجربی و نظری به‌دست‌آمده از آزمایش‌های رامان و

[۱] Polymerase chain reaction

طیف‌سنجی رامان سطحی مقایسه شدند. آفلاتوکسین تولید شده توسط آسپرژیلوس در ذرت به صورت کیفی و کمی با استفاده از طیف‌سنجی رامان در ارتباط با LDA[۱] مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. بسته به میزان آفلاتوکسین در نمونه‌ها، نوارهای رامان متفاوتی مشاهده شد (Lorenz et al., ۲۰۱۷).

مواد شیمیایی : بیشتر گیاهان مانند چمن، لوبیا تونکا، شبدر شیرین و چوب‌دار حاوی کومارین هستند که یک بنزوپیرون طبیعی است. قبل از اینکه استفاده مستقیم از آن به دلیل نگرانی از اینکه ممکن است اثرات مخرب کبدی در آزمایشات حیوانی داشته باشد غیرقانونی شود، به عنوان یک ماده غذایی طعم دهنده استفاده می‌شد. پلاستیک‌های پلی کربنات، قوطی‌های غذا و ظروف نگهداری مواد غذایی همگی حاوی ماده استروژنیک بیسفنول (BPA) هستند. به دلیل استفاده از کودها و فرآیندهای تولید، آب‌های زیرزمینی ممکن است با یون‌های پرکلرات آلوده شوند. یک تکنیک تشخیص بلادرنگ مفید برای پرکلرات، طیف‌سنجی رامان کشف شد. هیدروکربن‌های آروماتیک چند حلقه‌ای (PAH) با توجه به ظرفیت خود در ترویج سرطان‌زایی، خطر بالقوه‌ای برای سلامت انسان به همراه دارند (M. Pan et al., ۲۰۲۰). با استفاده از طیف‌سنجی UV[۲] ، شناسایی PAH (مانند نفتالین، آنتراسن، فنانترن و پیرن) در مقادیر بسیار ناچیز امکان پذیر شد. آلاجتال، ادواردز و اسکوئن از طیف‌سنجی فوریه رامان برای بررسی چگونگی تأثیر تفکیک طیفی بر طیف رامان چندین هیدروکربن پلی آروماتیک استفاده کردند. رزولوشن‌های طیفی مختلف اندازه‌گیری‌های رامان بر روی مولکول‌های نفتالین، آنتراسن، و پیرن و همچنین نفتالین بتاکاروتن، آنتراسن و پیرن انجام شد. در این مطالعه، تأثیر تفکیک طیفی بر روی طیف‌های رامان حاصل ارزیابی شد (Velusamy et al., ۲۰۱۰).

۳) طیف‌سنجی رامان برای تشخیص تقلب مواد غذایی :

طیف‌سنجی رامان، یک تکنیک ارتعاشی، یکی از ابزارهای تحلیلی است و محبوبیت زیادی به دست می‌آورد زیرا می‌تواند به سرعت، غیر مخرب و ارزان کالاهای غذایی را تجزیه و تحلیل کند و در عین حال ویژگی‌های اثر انگشت را نیز ارائه می‌دهد. علاوه بر این، با ترکیب طیف‌سنجی رامان با تجزیه و تحلیل داده‌های چند متغیره، امکان جمع‌آوری داده‌های کمی و کیفی وجود دارد. برای شناسایی بین روغن زیتون معتبر و روغن آغشته به روغن‌های پایین‌تر، از طیف‌سنجی رامان قابل حمل استفاده کرد (Tan et al., ۲۰۲۲). تحقیقات مربوطه با موفقیت روغن زیتون تقلبی را شناسایی کرده است که حاوی ۵٪ (v/v) یا کمتر از سایر روغن‌های خوراکی است. ژانگ و همکاران روغن‌های زیتون فوق بکر آلوده به سویا، ذرت یا روغن دانه آفتابگردان را با توصیف طیف‌های رامان آن‌ها در منطقه ۱۰۰۰ تا ۱۸۰۰ سانتی‌متر بررسی کردند. باند CH_2 نمونه‌های روغن به عنوان استانداردی برای نرمال سازی طیف رامان عمل می‌کند. در یک تحقیق جداگانه ، درجه تقلب در مجموعه‌ای از نمونه‌های روغن زیتون که حاوی ۵ درصد یا بیشتر روغن‌های مختلف از جمله روغن سویا، کلزا، آفتابگردان و ذرت بود، با موفقیت شناسایی شد. اصالت روغن‌های زیتون فوق بکر مختلف و تقلب آنها با روغن فندق نیز آزمایش شد (Liu et al., ۲۰۲۲). با استفاده از طیف‌سنجی رامان طیف‌های رامان حاصل با استفاده از فرکانس باند، که مربوط به حالت خمشی قیچی گروه‌های $-CH_2$ است، نرمال شد.

---

[۱] linear discriminant analysis
[۲] ultraviolet–visible

از طریق استفاده از طیف‌سنجی مادون قرمز نزدیک ،مادون قرمز فوریه و رامان فوریه ، می‌توان ارزیابی کرد که آیا روغن زیتون فوق بکر با روغن تفاله زیتون تقلب شده است یا خیر. با استفاده از طیف‌سنجی رامان قابل حمل در ارتباط با رگرسیون PLS[1]، تقلب کمی پودر شیر حاوی ملامین شناسایی شد. با استفاده از نوارهای متمایز ملامین، که در یک نوار قوی در ۶۷۳ سانتی متر−۱ و یک نوار ضعیف در ۹۸۲ سانتی متر−۱ یافت می‌شود، تقلب ملامین مشاهده شد. نوار ملامین که در ۶۷۶ سانتی متر در ۱ یافت می‌شود، در تحقیقات مشابهی برای آزمایش تقلب شیر خشک با ملامین استفاده شد. نمونه‌های شیرخشک که کربنات کلسیم به آنها تزریق شده بود با موفقیت برای شناسایی تقلب استفاده شد. تصویربرداری شیمیایی رامان همراه با روش‌های آنالیز مخلوط، امکان تشخیص همزمان چندین ماده تقلبی، از جمله سولفات آمونیوم، دی سیاندی‌آمید، ملامین و اوره را که در نمونه‌های پودر شیر وجود داشتند، می‌دهد. محققان با مقایسه طیف رامان این نمونه‌ها توانستند این چهار عامل تقلبی شیمیایی را شناسایی و جدا کنند (De Gussem et al., ۲۰۰۵).

۴) طیف‌سنجی رامان در تجزیه و تحلیل افزودنی‌های غذایی:

تشخیص افزودنی‌های غذایی نیز با استفاده از طیف‌سنجی رامان انجام شده است و روش‌های زیادی برای این امر به کار گرفته شده است. از طیف‌سنجی رامان برای بررسی دو کاروتنوئید اصلی، آستاگزانتین و کانتاکسانتین، که مسئول رنگ قرمز−نارنجی ماهی سالمون هستند، استفاده شد. طیف‌سنجی رامان برای بررسی کربن سیاه، رنگ دیگری که از سوزاندن هیدروکربن‌ها ایجاد می‌شود، استفاده شد. آمارانت یک رنگدانه رنگ‌آمیزی است که اغلب مورد استفاده قرار می‌گیرد و ساختار مولکولی آن مورد مطالعه قرار گرفته است. تارترازین یک رنگ مصنوعی است که پتانسیل ایجاد واکنش‌های آلرژیک را دارد. پیکا و همکاران ساختار مولکولی این ماده را بررسی کرد. اگرچه کورکومین نقش مهمی در سلامت انسان دارد و به عنوان رنگ‌کننده و عامل تثبیت‌کننده طبیعی در غذا استفاده می‌شود، اما حلالیت و پایداری کم آن کاربردهای بالقوه آن را محدود می‌کند. برای افزایش حلالیت و پایداری کورکومین از محصورسازی سیکلودکسترین و برای مشخص کردن این کمپلکس از طیف‌سنجی رامان استفاده شد. آسپارتام به عنوان یک شیرین کننده مصنوعی با استفاده از طیف‌سنجی رامان در تحقیقات متفاوتی مورد بررسی قرار گرفت. توانایی شناسایی افزودنی آزودی کربنامید اضافی در نمونه‌های ما با استفاده از مادون قرمز، رامان ارزیابی شد. درجه استیل‌زدایی کیتوزان ویژگی‌های شیمیایی و فیزیکی آن از جمله حلالیت، زیست تخریب پذیری و زیست سازگاری را تعیین می‌کند (Mishra et al., ۲۰۲۰). نشان داد که تعیین درجه استیل‌زدایی کیتوزان با محاسبه تعدادی باند از طیف طول موج‌های رامان و مادون قرمز مربوطه امکان پذیر است. مانیتول یک افزودنی غذایی متفاوت است که در تولید غذاهای کم کالری و همچنین در بخش داروسازی و سایر کالاهای لیوفیلیزه استفاده می‌شود. مطالعه ای به بررسی تغییراتی که در نوارهای یخ، آب و مانیتول به دلیل لیوفیلیزه شدن مانیتول رخ می‌دهد، پرداخت. در محدوده طیفی ۱۵۰−۲۵۰ سانتی متر در ۱ و ۱۰۰۰−۱۱۷۰ سانتی‌متر در ۱، نوارهای رامان یخ و مانیتول مشاهده شد. در طول فرآیند لیوفیلیزاسیون، مانیتول انواع مختلفی از اشکال چندشکلی را نشان داد (Brito et al., ۲۰۲۱).

[1] Partial Least Squares

۵) طیف‌سنجی رامان در تجزیه و تحلیل مواد خام :

یکی از مهمترین کاربردهای کنترل کیفیت در بخش مواد غذایی، تجزیه و تحلیل سریع و در محل مواد خام است. قبل از شروع فرآیند تولید مواد غذایی، مشاغل می‌توانند با ارزیابی کیفیت مواد اولیه در زمان و هزینه صرفه جویی کنند. شناسایی مواد خام بسیار مهم است زیرا تأثیر قابل توجهی بر کیفیت محصول نهایی دارد. طیف‌سنجی رامان به‌طور گسترده در بررسی مواد خام، به‌ویژه در تمایز نمونه‌های غذا، مشاهده فرآیندهای شیمیایی و بیولوژیکی، خصوصیات ترکیبی نمونه‌های غذا، و اصالت وعده‌های غذایی استفاده شده است. تجزیه و تحلیل مؤلفه اصلی (PCA)[۱] نمونه ای از روش شیمی سنجی بدون نظارت است. روش‌های کمومتری تحت نظارت شامل حداقل مربع جزئی (PLS)، تجزیه و تحلیل تفکیک حداقل مربعات جزئی (PLS-DA)، رگرسیون مؤلفه اصلی (PCR) و شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANN)[۲] است (HOU et al., ۲۰۲۳).

عسل : طیف‌سنجی رامان با PCA و ANN در مطالعه‌ای توسط Goodacre، Radovic و Anklam ترکیب شد تا نمونه‌های عسل متمایز را از کشورهای مختلف اروپایی با منشأهای دهانی و جغرافیایی مختلف متمایز کند. نتایج نشان می‌دهد که ۱۳ نمونه از ۱۴ نمونه عسل به درستی دسته‌بندی شده‌اند، اما کشور مبدا را نمی‌توان به‌طور دقیق پیش‌بینی کرد، زیرا نمونه‌های عسل کافی وجود نداشت. اوزبالچی و همکاران اخیراً تحقیقات بیشتری در مورد عسل انجام داده اند. در این مطالعه با استفاده از تکنیک‌های کمومتری بر روی طیف رامان نمونه‌های عسل، میزان قند نمونه‌های عسل اندازه‌گیری شد. کاروچی و همکاران از طیف‌سنجی رامان برای جداسازی نمونه‌های عسل به‌دست‌آمده از مکان‌های مختلف، بسیار شبیه به اولین مطالعه مورد بحث در این بررسی استفاده کرد. با استفاده از PCA در طیف رامان که جمع آوری کرده بودند، دانشمندان توانستند منشاء گیاهی و جغرافیایی عسل را شناسایی کرده و آنها را با ترکیب گرده عسل واقعی مطابقت دهند (Magwaza & Tesfay, ۲۰۱۵).

قهوه : سه مطالعه انجام شده است که از طیف‌سنجی رامان برای تشخیص قهوه سبز عربیکا و روبوستا استفاده می‌کند. طیف‌سنجی فوریه رامان برای انجام تحقیقات اولیه رامان در مورد این موضوع مهم مورد استفاده قرار گرفت. نمونه‌های لیپید گرفته شده از نمونه‌های قهوه با استفاده از طیف رامان آنالیز شدند. در عصاره قهوه عربیکا، که منحصر به این نوع قهوه است، دو قله کاهوول (۱۵۶۷ در مقابل ۱۴۷۸ سانتی متر−۱) وجود داشت که نمونه آن است. علاوه بر این، با استفاده از تکنیک کمومتری PCA، آنها با موفقیت بین این دو نوع قهوه با میزان موفقیت ۹۳٪ تمایز قائل شدند. با این حال، با مطالعه قبلی متفاوت است زیرا طیف رامان نمونه‌ها بدون استفاده از فرآیندهای شیمیایی یا فیزیکی روی دانه‌های قهوه به دست آمد. «شاخص طیفی کاهوول» که با استفاده از طیف نمونه‌هایی با منشاء جغرافیایی مختلف محاسبه شد، برای تمایز بین قهوه‌های مختلف استفاده شد. طیف‌های رامان نمونه‌ها با استفاده از طیف‌سنجی میکرو رامان مرئی به دست آمد و تفکیک قهوه‌ها در ۹۳ درصد مواقع با استفاده از دو مدل PCA جداگانه موفقیت‌آمیز بود (Pradana-López et al., ۲۰۲۱) .

---

[۱] Principal component analysis
[۲] Artificial Neural Networks

۶) طیف‌سنجی رامان برای تشخیص اجزای غذا :

از آنجایی که تاثیر بسزایی بر کیفیت، ارزش غذایی و ارزش اقتصادی دارد و همچنین به ویژگی‌های محصول نهایی کمک می‌کند، ترکیب نمونه‌های غذایی بسیار مهم است. هر دو اثر مطلوب و نامطلوب بر اجزای غذا در نتیجه عوامل محیطی و مرتبط با فرآوری ممکن است. بنابراین، نظارت دقیق بر این تغییرات در هر مرحله از فرآیند تولید مواد غذایی بسیار مهم است. روش‌های متعددی برای شناسایی این تغییرات در مواد غذایی وجود دارد و طی چند دهه گذشته طیف‌سنجی رامان برای این منظور محبوبیت پیدا کرده است. در این بخش مروری بر مطالعه کمی و کیفی اجزای غذا با استفاده از طیف‌سنجی رامان ارائه می‌شود (Mao et al., ۲۰۱۶).

پروتئین: محققان با استفاده از طیف‌سنجی رامان قادر به جمع‌آوری داده‌های جامع در مورد ویژگی‌های ساختاری پروتئین‌ها هستند. از آنجایی که پروتئین‌ها یکی از اجزای اصلی مواد غذایی هستند و تأثیر قابل توجهی بر کیفیت غذا دارند، مطالعات روی پروتئین‌های غذا برای چندین دهه انجام شده است و همچنان ضروری است. از آنجایی که پروتئین‌ها پلی پپتیدهای عظیمی هستند که هر کدام صدها اسید آمینه دارند، طیف رامان آنها از آرایش پیچیده ای از نوارهای همپوشانی تشکیل شده است. پراکندگی قوی رامان از زنجیره‌های پلی پپتیدی و اسیدهای آمینه معطر نیز در ایجاد نوارهای متمایز دیده شده در طیف رامان نقش دارد. چی و همکاران از طیف‌سنجی رامان رزونانس استفاده می‌کند که امکان تجزیه و تحلیل انتخابی ساختارهای ثانویه محلول‌های پروتئین و پپتید رقیق‌شده را دارد. طیف‌سنجی رامان نظارت بر دآمیداسیون پروتئین‌ها را ساده می‌کند، که فرآیند دیگری است. وونگ و همکاران درجه دآمیداسیون در پروتئین‌های غذایی را با استفاده از ایزوله‌های پروتئین سویا و آب پنیر و همچنین پودر سفیده تخم مرغ خشک شده با اسپری بررسی کرد (Blanch, ۲۰۰۳). از طیف‌سنجی رامان برای بررسی تغییرات ساختاری ساختارهای پروتئینی استفاده شد. در مطالعه فرر و همکاران، پروتئین گلوتن با استفاده از امولسیفایر سدیم استئاروئیل لاکتیلات از نظر شیمیایی تغییر داده شد و تأثیر این تغییر بر ساختار ثانویه و سوم این پروتئین با استفاده از طیف‌سنجی فوریه رامان مورد بررسی قرار گرفت. پریسیک و همکاران تاثیر نمک‌های مختلف بر ویژگی‌های هیدراتاسیون پروتئین‌های ساختاری را با ترکیب روش‌های طیف‌سنجی ارتعاشی، مانند طیف‌سنجی مادون قرمز نزدیک و میکروطیف‌سنجی ، رامان بررسی کرد. بررسی برهمکنش‌های بین کاتیون‌های نمک و باقی‌مانده‌های اسید آمینه آروماتیک و اهمیت آنها برای ساختار پروتئین نهایی انجام شد (Li & Church, ۲۰۱٤).

کربوهیدرات : از آنجایی که کربوهیدرات‌ها بزرگترین دسته از مواد آلی را تشکیل می‌دهند، نیاز به مشخصات ساختاری دقیق دارند. در بررسی ساختاری کربوهیدرات‌ها با استفاده از طیف‌سنجی رامان، تعداد زیاد اتم‌ها در واحد تکرار و فقدان یک موجودیت کاملاً تعریف‌شده، اهمیت تخصیص صحیح حالت ارتعاشی را افزایش داد. تجزیه و تحلیل عمیق عناصر ساختاری نمونه‌های غذایی نیز از طیف‌سنجی رامان استفاده کرد. رومن و همکاران این مطالعه اجزای ریشه هویج وحشی را بدون آماده‌سازی نمونه، از جمله نشاسته، پکتین، سلولز، لیگنین و حتی پلی استیلن‌های فعال زیستی در محل مورد ارزیابی قرار داد. با استفاده از یک تکنیک نقشه برداری رامان، آنها همچنین تجمع اجزایی را نشان دادند که مخصوص بافت‌های خاصی بود (Brito et al., ۲۰۲۱). توزیع این عناصر در ساختار دانه گندم نیز با استفاده از تصویربرداری

رامان مورد بررسی قرار گرفت. طیف‌سنجی رامان می‌تواند برای تشخیص تغییرات جزئی بین انواع ساختاری بسیار مشابه و شناسایی منابع کربوهیدرات‌ها استفاده شود. طیف‌سنجی رامان برای تمایز بین نمونه‌های آرد گندم نرم و سخت استفاده شد. با استفاده از رویکرد تصویربرداری رامان، ولنر و همکاران. محتوای و ساختار فیزیکی دانه‌های نشاسته کشف شده در دانه‌های ذرت نوع وحشی و جهش یافته را بررسی کرد. طیف‌سنجی رامان همچنین برای بررسی تأثیر فرآوری مواد غذایی بر کربوهیدرات‌ها، از جمله تغییر نشاسته، استفاده شده است. طیف‌های رامان جمع‌آوری‌شده برای ردیابی چگونگی تأثیر دمای بالا بر ساختار ساختاری مولکول‌های پلی‌ساکارید استفاده شد. برخلاف مطالعه قبلی، در این مطالعه از طیف‌سنجی رامان برای تعیین این‌که چگونه عملیات انجماد ساختار خمیر نان گندم را تغییر می‌دهد، استفاده شد (Das et al., ۲۰۲۱).

نتیجه‌گیری کلی

ادغام طیف‌سنجی رامان در پروتکل‌های ایمنی مواد غذایی، پیشرفت قابل‌توجهی را در تضمین یکپارچگی و کیفیت زنجیره تامین غذایی ما نشان می‌دهد. روش‌های سنتی برای شناسایی آلاینده‌های بیولوژیکی، شیمیایی و فیزیکی مدت‌هاست که با محدودیت‌هایی مانند شدت کار، زمان‌های طولانی تجزیه و تحلیل، تغییر نمونه‌ها و اغلب هزینه‌های بسیار زیاد مواجه شده‌اند. ظهور طیف‌سنجی رامان به‌عنوان یک جایگزین مناسب، این چالش‌ها را مستقیماً برطرف می‌کند و ابزاری غیر مخرب، سریع و بسیار حساس برای شناسایی آلاینده‌ها در هر سه کلاس ارائه می‌دهد.طیف‌سنجی رامان بر اساس اصل پراکندگی غیرکشسان نور که به عنوان اثر رامان شناخته می‌شود، عمل می‌کند، جایی که فوتون‌های فرود با ارتعاشات مولکولی در نمونه برهمکنش می‌کنند، که منجر به تغییرات مشخصه رامان می‌شود که به عنوان اثر انگشت مولکولی عمل می‌کنند. توانایی این تکنیک برای ارائه اطلاعات مولکولی دقیق بدون تغییر نمونه، آن را به ویژه برای کاربردهای ایمنی مواد غذایی مناسب می‌کند. طیف تکنیک‌های موجود در طیف‌سنجی رامان، از جمله طیف‌سنجی میکرو رامان، تصویربرداری رامان، و طیف‌سنجی رامان تقویت شده سطحی (طیف‌سنجی رامان پیشرفته)، تطبیق‌پذیری و کاربرد آن را در تجزیه و تحلیل مواد غذایی بیشتر می‌کند. پیشرفت‌های اخیر در فناوری رامان، قابلیت‌های آن را در تشخیص طیف گسترده‌ای از آلاینده‌ها، از میکروارگانیسم‌ها و سموم گرفته تا مواد تقلبی فیزیکی، با ویژگی و دقت بالا گسترش داده است. توسعه تکنیک‌های طیف‌سنجی رامان (ERS) به‌طور قابل‌توجهی محدودیت‌های تشخیص را بهبود بخشیده است و امکان شناسایی آلاینده‌هایی را در سطوح ردیابی که قبلاً غیرقابل تشخیص بودند، می‌دهد. علاوه بر این، نوآوری‌ها در تصویربرداری رامان، نقشه‌برداری فضایی آلاینده‌ها را در ماتریس‌های مواد غذایی امکان‌پذیر کرده است، و بینش‌هایی در مورد الگوهای توزیع ارائه می‌دهد که برای اقدامات کنترل کیفیت هدفمند بسیار مهم هستند.پتانسیل طیف‌سنجی رامان فراتر از تشخیص صرف است. ادغام آن در نظارت بر ایمنی مواد غذایی نوید کارایی افزایش یافته در انطباق با مقررات، پاسخ سریعتر به حوادث آلودگی و در نهایت، اطمینان بیشتر مصرف کننده به ایمنی و کیفیت محصولات غذایی را می‌دهد. همانطور که شبکه‌های جهانی تولید و توزیع مواد غذایی به طور فزاینده ای پیچیده و به هم مرتبط می‌شوند، نیاز به فناوری‌های تشخیص قوی، سریع و قابل اعتماد مانند طیف‌سنجی رامان بیش از پیش ضروری می‌شود.

با نگاهی به آینده، تلاش‌های تحقیق و توسعه در حال انجام در طیف‌سنجی رامان، نویدبخش بهبود بیشتر قابلیت‌های تشخیص، کاربرد گسترده‌تر در انواع مختلف مواد غذایی، و ادغام با سایر تکنیک‌های تحلیلی برای ارزیابی‌های جامع ایمنی مواد غذایی است. پرداختن به چالش‌های کنونی، مانند استانداردسازی پروتکل‌ها، مقیاس‌پذیری ابزار دقیق، و مقرون‌به‌صرفه بودن، در تسهیل پذیرش گسترده طیف‌سنجی رامان در صنایع غذایی حیاتی خواهد بود. طیف‌سنجی رامان در خط مقدم نوآوری‌های فناوری در ایمنی مواد غذایی قرار دارد و رویکردی متحول کننده برای حفاظت از سلامت عمومی و تضمین یکپارچگی زنجیره تامین غذای جهانی ارائه می‌کند. طیف‌سنجی رامان با استفاده از قدرت نور برای آشکار کردن بینش‌های مولکولی، تلاقی علم و صنعت را در جستجوی سیستم‌های غذایی ایمن‌تر و مطمئن‌تر برای همه نشان می‌دهد.

سپاسگذاری

این پژوهش در قالب طرح تحقیقاتی شماره ۶۱۵۰۱ با حمایت و همکاری دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد انجام شد.

منابع

Blanch, E. (۲۰۰۳). Vibrational Raman optical activity of proteins, nucleic acids, and viruses. *Methods*, *29*(۲), ۱۹۶–۲۰۹. https://doi.org/۱۰,۱۰۱۶/S۱۰٤٦-۲۰۲۳(۰۲)۰۰۳۱۰-۹

Brito, A. A. de, Campos, F., Nascimento, A. dos R., Corrêa, G. de C., Silva, F. A. da, Teixeira, G. H. de A., & Cunha Júnior, L. C. (۲۰۲۱). Determination of soluble solid content in market tomatoes using near-infrared spectroscopy. *Food Control*, *126*, ۱۰۸۰٦۸. https://doi.org/۱۰,۱۰۱٦/j.foodcont.۲۰۲۱,۱۰۸۰٦۸

Cutmore, E. A., & Skett, P. W. (۱۹۹۳). Application of Fourier transform Raman spectroscopy to a range of compounds of pharmaceutical interest. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular Spectroscopy*, *49*(٥–٦), ۸۰۹–۸۱۸. https://doi.org/۱۰,۱۰۱٦/۰٥۸٤-۸٥۳۹(۹۳)۸۰۱۰٥-J

Das, M., Gangopadhyay, D., Šebestík, J., Habartová, L., Michal, P., Kapitán, J., & Bouř, P. (۲۰۲۱). Chiral detection by induced surface-enhanced Raman optical activity. *Chemical Communications*, *57*(٥۲), ٦۳۸۸–٦۳۹۱. https://doi.org/۱۰,۱۰۳۹/D۱CC۰۱٥۰٤D

De Gussem, K., Vandenabeele, P., Verbeken, A., & Moens, L. (۲۰۰٥). Raman spectroscopic study of Lactarius spores (Russulales, Fungi). *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, *61*(۱۳–۱٤), ۲۸۹٦–۲۹۰۸. https://doi.org/۱۰,۱۰۱٦/j.saa.۲۰۰٤,۱۰,۰۳۸

Gopal, J., Abdelhamid, H. N., Huang, J.-H., & Wu, H.-F. (۲۰۱٦). Nondestructive detection of the freshness of fruits and vegetables using gold and silver nanoparticle mediated graphene enhanced Raman spectroscopy. *Sensors and Actuators B: Chemical*, *224*, ٤١٣–٤٢٤. https://doi.org/١٠,١٠١٦/j.snb.٢٠١٥,٠٨,١٢٣

Guo, W., Shafizadeh, A., Shahbeik, H., Rafiee, S., Motamedi, S., Ghafarian Nia, S. A., Nadian, M. H., Li, F., Pan, J., Tabatabaei, M., & Aghbashlo, M. (۲۰۲٤). Machine learning for predicting catalytic ammonia decomposition: An approach for catalyst design and performance prediction. *Journal of Energy Storage*, *89*, ١١١٦٨٨. https://doi.org/١٠,١٠١٦/j.est.٢٠٢٤,١١١٦٨٨

Herrero, A. M. (۲۰۰۸). Raman spectroscopy a promising technique for quality assessment of meat and fish: A review. *Food Chemistry*, *107*(٤), ١٦٤٢–١٦٥١. https://doi.org/١٠,١٠١٦/j.foodchem.٢٠٠٧,١٠,٠١٤

HOU, J., HE, Z., LIU, D., ZHU, Z., LONG, Z., YUE, X., & WANG, W. (۲۰۲۳). Mechanical damage characteristics and nondestructive testing techniques of fruits: a review. *Food Science and Technology*, *43*. https://doi.org/١٠,١٥٩٠/fst.٠٠١٨٢٣

J. Qin, K. Chao, & M. S. Kim. (۲۰۱۰). Raman Chemical Imaging System for Food Safety and Quality Inspection. *Transactions of the ASABE*, *53*(٦), ١٨٧٣–١٨٨٢. https://doi.org/١٠,١٣٠٣١/٢٠١٣,٣٥٧٩٦

Jones, R. R., Hooper, D. C., Zhang, L., Wolverson, D., & Valev, V. K. (۲۰۱۹). Raman Techniques: Fundamentals and Frontiers. *Nanoscale Research Letters*, *14*(١), ٢٣١. https://doi.org/١٠,١١٨٦/s١١٦٧١-٠١٩-٣٠٣٩-٢

Li, Y.-S., & Church, J. S. (۲۰۱٤). Raman spectroscopy in the analysis of food and pharmaceutical nanomaterials. *Journal of Food and Drug Analysis*, *22*(١), ٢٩–٤٨. https://doi.org/١٠,١٠١٦/j.jfda.٢٠١٤,٠١,٠٠٣

Liu, S., Huang, W., Lin, L., & Fan, S. (۲۰۲۲). Effects of Orientations and Regions on Performance of Online Soluble Solids Content Prediction Models Based on Near-Infrared Spectroscopy for Peaches. *Foods*, *11*(١٠), ١٥٠٢. https://doi.org/١٠,٣٣٩٠/foods١١١٠١٥٠٢

Lorenz, B., Wichmann, C., Stöckel, S., Rösch, P., & Popp, J. (۲۰۱۷). Cultivation-Free Raman Spectroscopic Investigations of Bacteria. *Trends in Microbiology*, *25*(۵), ٤١٣–٤٢٤. https://doi.org/۱۰,۱۰۱٦/j.tim.۲۰۱۷,۰۱,۰۰۲

Magwaza, L. S., & Tesfay, S. Z. (۲۰۱۵). A Review of Destructive and Non-destructive Methods for Determining Avocado Fruit Maturity. *Food and Bioprocess Technology*, *۸*(۱۰), ۱۹۹۵–۲۰۱۱. https://doi.org/۱۰,۱۰۰۷/s۱۱۹٤۷-۰۱۵-۱٥٦۸-y

Mao, J., Yu, Y., Rao, X., & Wang, J. (۲۰۱٦). Firmness prediction and modeling by optimizing acoustic device for watermelons. *Journal of Food Engineering*, *168*, ۱–٦. https://doi.org/۱۰,۱۰۱٦/j.jfoodeng.۲۰۱۵,۰۷,۰۰۹

Mishra, P., Woltering, E., & El Harchioui, N. (۲۰۲۰). Improved prediction of 'Kent' mango firmness during ripening by near-infrared spectroscopy supported by interval partial least square regression. *Infrared Physics & Technology*, *110*, ۱۰۳٤٥۹. https://doi.org/۱۰,۱۰۱٦/j.infrared.۲۰۲۰,۱۰۳٤٥۹

Pan, J., Shahbeik, H., Shafizadeh, A., Rafiee, S., Golvirdizadeh, M., Ghafarian Nia, S. A., Mobli, H., Yang, Y., Zhang, G., Tabatabaei, M., & Aghbashlo, M. (۲۰۲٤). Machine learning optimization for enhanced biomass-coal co-gasification. *Renewable Energy*, *229*, ۱۲۰۷۷۲. https://doi.org/۱۰,۱۰۱٦/j.renene.۲۰۲٤,۱۲۰۷۷۲

Pan, M., Liu, K., Yang, J., Liu, S., Wang, S., & Wang, S. (۲۰۲۰). Advances on Food-Derived Peptidic Antioxidants—A Review. *Antioxidants*, *9*(۹), ۷۹۹. https://doi.org/۱۰,۳۳۹۰/antiox۹۰۹۰۷۹۹

Petersen, M., Yu, Z., & Lu, X. (۲۰۲۱). Application of Raman Spectroscopic Methods in Food Safety: A Review. *Biosensors*, *11*(٦), ۱۸۷. https://doi.org/۱۰,۳۳۹۰/bios۱۱۰٦۰۱۸۷

Pradana-López, S., Pérez-Calabuig, A. M., Cancilla, J. C., Lozano, M. Á., Rodrigo, C., Mena, M. L., & Torrecilla, J. S. (۲۰۲۱). Deep transfer learning to verify quality and safety of ground coffee. *Food Control*, *122*, ۱۰۷۸۰۱. https://doi.org/۱۰,۱۰۱٦/j.foodcont.۲۰۲۰,۱۰۷۸۰۱

Qin, J., Chao, K., & Kim, M. S. (۲۰۱۲). Nondestructive evaluation of internal maturity of tomatoes using spatially offset Raman spectroscopy. *Postharvest Biology and Technology*, *71*, ۲۱–۳۱. https://doi.org/۱۰,۱۰۱٦/j.postharvbio.۲۰۱۲,۰٤,۰۰۸

RAMAN, C. V., & KRISHNAN, K. S. (۱۹۲۸). A New Type of Secondary Radiation. *Nature*, *۱۲۱*(۳۰٤۸), ٥۰۱–٥۰۲. https://doi.org/۱۰,۱۰۳۸/۱۲۱٥۰۱c۰

Rather, I. A., Koh, W. Y., Paek, W. K., & Lim, J. (۲۰۱۷). The Sources of Chemical Contaminants in Food and Their Health Implications. *Frontiers in Pharmacology*, *8*. https://doi.org/۱۰,۳۳۸۹/fphar.۲۰۱۷,۰۰۸۳۰

Rösch, P., Schmitt, M., Kiefer, W., & Popp, J. (۲۰۰۳). The identification of microorganisms by micro-Raman spectroscopy. *Journal of Molecular Structure*, *661–662*, ۳٦۳–۳٦۹. https://doi.org/۱۰,۱۰۱٦/j.molstruc.۲۰۰۳,۰٦,۰۰٤

Stewart, S., Priore, R. J., Nelson, M. P., & Treado, P. J. (۲۰۱۲). Raman Imaging. *Annual Review of Analytical Chemistry*, *5*(۱), ۳۳۷–۳٦۰. https://doi.org/۱۰,۱۱٤٦/annurev-anchem-۰٦۲۰۱۱-۱٤۳۱٥۲

Tan, B., You, W., Huang, C., Xiao, T., Tian, S., Luo, L., & Xiong, N. (۲۰۲۲). An Intelligent Near-Infrared Diffuse Reflectance Spectroscopy Scheme for the Non-Destructive Testing of the Sugar Content in Cherry Tomato Fruit. *Electronics*, *11*(۲۱), ۳٥۰٤. https://doi.org/۱۰,۳۳۹۰/electronics۱۱۲۱۳٥۰٤

Velusamy, V., Arshak, K., Korostynska, O., Oliwa, K., & Adley, C. (۲۰۱۰). An overview of foodborne pathogen detection: In the perspective of biosensors. *Biotechnology Advances*, *28*(۲), ۲۳۲–۲٥٤. https://doi.org/۱۰,۱۰۱٦/j.biotechadv.۲۰۰۹,۱۲,۰۰٤

Wang, J., Yang, M., Yang, L., Zhang, Y., Yuan, J., Liu, Q., Hou, X., & Fu, L. (۲۰۱٥). A Confocal Endoscope for Cellular Imaging. *Engineering*, *1*(۳), ۳٥۱–۳٦۰. https://doi.org/۱۰,۱٥۳۰۲/J-ENG-۲۰۱٥۰۸۱

Wang, Y., Shahbeik, H., Moradi, A., Rafiee, S., Shafizadeh, A., Khoshnevisan, B., Ghafarian Nia, S. A., Nadian, M. H., Li, M., Pan, J., Tabatabaei, M., & Aghbashlo, M. (۲۰۲٤). Predictive modeling for hydrogen storage in functionalized carbonaceous nanomaterials using machine learning. *Journal of Energy Storage*, *97*, ۱۱۲۹۱٤. https://doi.org/۱۰,۱۰۱٦/j.est.۲۰۲٤,۱۱۲۹۱٤

Xu, S., Huang, X., & Lu, H. (۲۰۲۳). Advancements and Applications of Raman Spectroscopy in Rapid Quality and Safety Detection of Fruits and Vegetables. *Horticulturae*, *9*(۷), ۸٤۳. https://doi.org/۱۰,۳۳۹۰/horticulturae۹۰۷۰۸٤۳

Yang, Q., Lin, H., Ma, J., Chen, N., Zhao, C., Guo, D., Niu, B., Zhao, Z., Deng, X., & Chen, Q. (۲۰۲۲). An Improved POD Model for Fast Semi-Quantitative Analysis of Carbendazim in Fruit by Surface Enhanced Raman Spectroscopy. *Molecules*, *27*(۱۳), ٤۲۳۰. https://doi.org/۱۰,۳۳۹۰/molecules۲۷۱۳٤۲۳۰

Yang, T., Wang, P., Guo, H., & He, L. (۲۰۱۷). Surface-Enhanced Raman Spectroscopy: A Tool for All Classes of Food Contaminants. In *Reference Module in Food Science*. Elsevier. https://doi.org/۱۰,۱۰۱٦/B۹۷۸-۰-۰۸-۱۰۰٥۹٦-٥,۲۱۰۹۰-۱

Yaseen, T., Sun, D.-W., & Cheng, J.-H. (۲۰۱۷). Raman imaging for food quality and safety evaluation: Fundamentals and applications. *Trends in Food Science & Technology*, *62*, ۱۷۷–۱۸۹. https://doi.org/۱۰,۱۰۱٦/j.tifs.۲۰۱۷,۰۱,۰۱۲

Introduction of Raman spectroscopy and its application in the field of food

Abstract

Food safety in the supply chain is greatly aided by food detection technologies. Traditional methods for finding biological, chemical, and food contaminants are labor intensive, time consuming, and alter food samples. According to the food industry, these drawbacks require the development of useful food detection tools that identify all three classes. Raman can provide food safety screening in a fast, simple, sensitive and easy way. Subsequent advances in Raman acquisition techniques have increased the detection of food contaminants and the application of these techniques to food has been greatly developed. In this review, we describe the principles of enhanced Raman evaluation (ERS), micro-Raman imaging, and imaging, as well as further developments in the detection of biological, chemical, and food hazards in foods. We also address potential issues and applications of Raman sensing techniques for food safety monitoring. The purpose of this review is to highlight the possible applications of Raman inspection methods as an innovative method for food safety determination.

Keywords: Raman spectroscopy, Enhanced Raman Spectroscopy (SERS), Raman imaging, food hazards, rapid detection