شیمی و نانوشیمی (پژوهش های شیمیایی و نانومواد سابق)
Chemistry & Nanochemistry
https://sanad.iau.ir/journal/crn
ISSN:3060-7442

حسگرهای فلورسانس مبتنی بر گوشی‌های هوشمند برای تشخیص ایمنی مواد غذایی

فاطمه صداقتی*

دانشگاه شیراز-مرکز آموزش عالی استهبان، استهبان، ایران

چکیده: ایمنی مواد غذایی یکی از مهم‌ترین مسائل بهداشتی است که مستقیماً بر سلامت و رفاه افراد تأثیر می‌گذارد. در دنیای امروز، با گسترش زنجیره تأمین مواد غذایی و افزایش نگرانی‌ها در خصوص آلودگی‌های میکروبی، شیمیایی و زیستی، نیاز به روش‌های سریع، دقیق و قابل‌اطمینان برای پایش ایمنی و کیفیت غذا بیش از پیش وجود دارد. در این راستا، حسگرهای مبتنی بر گوشی‌های هوشمند به عنوان یک راه‌حل نوآورانه و مقرون‌به‌صرفه مطرح شده‌اند. این حسگرها با استفاده از قابلیت‌های پیشرفته عکاسی و پردازش تصویر گوشی‌های هوشمند، امکان تشخیص سریع و دقیق آلودگی‌ها و مواد مضر را فراهم می‌کنند. حسگرهای فلورسانس "روشن-خاموش-روشن" به دلیل ویژگی‌های برجسته‌ای مانند حساسیت بالاو انتخاب‌پذیری عالی توجه زیادی را به خود جلب کرده‌اند. این مقاله مروری به بررسی جامع پلتفرم‌های تشخیص مبتنی بر گوشی‌های هوشمند که از مکانیسم فلورسانس "روشن-خاموش-روشن" استفاده می کنند، می‌پردازد و مواد فلورسانس رایج و اصول طراحی آن‌ها را معرفی می نماید. همچنین، کاربردهای اخیر این حسگرها در تشخیص ایمنی مواد غذایی و چالش‌ها و جهت‌گیری‌های توسعه آینده آن‌ها مورد تحلیل قرار گرفته است.

واژگان کلیدی: حسگرهای فلورسانس، پلتفرم قابل‌حمل، ایمنی مواد غذایی، گوشی هوشمند.

fsedaghati2013@gmail.com (f.sedaghati@saadi.shirazu.ac.ir)

۱- مقدمه

اطمینان از عاری بودن مواد غذایی از ترکیبات مضر نظیر آنتی‌بیوتیک‌ها، آفت‌کش‌ها و فلزات سنگین، نقش بسزایی در پیشگیری از بیماری‌های ناشی از غذا ایفا می‌کند. آلودگی‌های غذایی می‌توانند از مشکلات گوارشی خفیف تا بحران‌های شدید بهداشتی منجر شده و همچنین خسارات اقتصادی قابل توجهی از جمله بازگشت محصولات و از دست رفتن اعتماد مصرف‌کنندگان را به‌دنبال داشته باشند. برخی روش های تشخیص شامل روش‌هایی مانند کروماتوگرافی گازی(GC)، کروماتوگرافی مایع با کارایی بالا(HPLC)، طیف‌سنجی جرمی(MS) و الایزا(ELISA) می باشند[۱]. اگرچه روشهای ذکر شده کارآمد هستند، اما با مسائلی مانند پیچیدگی، صرف زمان زیاد و هزینه‌های بالا همراه‌اند. روش فلورسانس به دلیل سادگی، هزینه کم، انتخاب‌پذیری بالا، پایداری و حدتشخیص پایین، توجه زیادی را به خود جلب کرده است و به عنوان روشی مناسب برای غربالگری سریع ایمنی غذا شناخته می‌شود. با این حال، به‌دلیل ماهیت پیچیده ماتریس‌های غذایی، دستیابی به پایداری، حساسیت و گزینش‌پذیری مناسب در ردیاب‌های فلورسانس[۱]

[1] Flourescence probes

تاریخ دریافت : ۱۴۰۴/۵/۱۶
تاریخ پذیرش : ۱۴۰۴/۶/۱۱
https://doi.org/10.71508/crn.2025.140405161214258

همچنان یک چالش اساسی به‌شمار می‌رود. از این‌رو، توسعه‌ی روش‌های تشخیص کارآمد مبتنی بر ردیاب‌های فلورسانس، جهت شناسایی سریع، حساس و دقیق آلاینده‌های غذایی، از اهمیت حیاتی برخوردار است[۲]. در حسگرهای فلورسانس، برهم‌کنش میان مولکول‌های هدف و مواد دارای فلورسانس می‌تواند موجب تغییر در ویژگی‌های نشر نوری ردیاب‌ها، نظیر شدت، طول موج یا عمر فلورسانس شود. این تغییرات به‌عنوان سیگنال‌های قابل اندازه‌گیری، امکان شناسایی و اندازه گیری کمی مولکول‌های هدف را فراهم می‌سازند[۳].

برخی حسگرهای فلورسانس بر پایه‌ی مکانیسم "روشن–خاموش" عمل می‌کنند، اما این نوع مکانیسم از انتخاب‌پذیری نسبتاً پایینی برخوردار است که می‌تواند منجر به کاهش دقت تشخیص شود. به‌منظور رفع این محدودیت، حسگرهای نوینی با مکانیسم "روشن–خاموش–روشن" توسعه یافته‌اند که امکان شناسایی غیرمستقیم آنالیت‌ها را فراهم می‌سازند[۴–۶]. این رویکرد نه‌تنها از انتخاب‌پذیری بالایی برخوردار است، بلکه قابلیت تشخیص هم‌زمان چندین آنالیت را نیز داراست و بدین ترتیب، روشی مؤثر برای پایش ایمنی مواد غذایی محسوب می‌شود[۷، ۸].

در این رویکرد، ردیاب فلورسانس ابتدا توسط یک عامل بازدارنده خاموش می‌شود و در مرحله‌ی بعد، آنالیت هدف به سیستم افزوده می‌گردد. از طریق واکنش‌های اختصاصی نظیر فرآیندهای اکسایش–کاهش، برهم‌کنش‌های رقابتی و مکانیسم‌های مهار آنزیمی، مولکول‌های ردیاب آزاد شده و فلورسانس مجدداً بازیابی می‌شود. بنابراین، شدت فلورسانس بازیابی‌شده با غلظت آنالیت ارتباط داشته و می‌تواند برای اندازه‌گیری آن مورد استفاده قرار گیرد[۹]. در این زمینه پژوهشگران با استفاده از فناوری تشخیص فلورسانس "روشن–خاموش–روشن" گامهای مؤثری در پایش ایمنی مواد غذایی برداشته اند.

با توجه به نیازهای رو به رشد جامعه و تنوع روزافزون تقاضاها، ضروری است که سیستم حسگرهای پیچیده و زمان بر، به سمت حسگرهای ساده‌تر، کوچکتر، همراه با قابلیت تشخیص با چشم غیر مسلح توسعه یابد. دستگاه‌های سنجش مبتنی بر تلفن‌های هوشمند، با بهره‌گیری از دوربین‌های با وضوح بالا و توانمندی‌های پردازش داده پیشرفته، می توانند سیگنال‌ها را از طریق پورت‌های USB منتقل کنند که این امر به طور قابل توجهی پیچیدگی طراحی را کاهش داده و هزینه‌های مرتبط با سیستم‌های تشخیص را بهینه می‌سازد. در حال حاضر، برنامه‌های کاربردی نصب‌شده روی گوشی‌های هوشمند توانایی نمایش و تفسیر مؤثر تغییرات شدت و رنگ نور را دارند[۱۰، ۱۱]. بنابراین، ترکیب حسگرهای فلورسانس با دوربین و فناوری پردازش تصویر مربوط به گوشی‌های هوشمند، امکان انجام آنالیزهای دقیق‌تر ایمنی مواد غذایی در محل را فراهم می‌کند[۱۲]. علاوه بر این، فناوری چاپ سه‌بعدی امکان ساخت سریع و سفارشی نگهدارنده‌های انعطاف‌پذیر و اجزای جانبی مختلف برای حسگرها را فراهم کرده است. شایان ذکر است که روش‌های متنوع چاپ سه‌بعدی در تولید تجهیزات حسگرهای تجزیه‌ای به کار گرفته می‌شوند[۱۱].

در این راستا، پلتفرم‌های سنجش یکپارچه که ترکیبی از اجزای چاپ سه‌بعدی، تلفن‌های هوشمند و ردیاب‌های فلورسانس هستند، توسعه یافته و به طور مؤثری در ارزیابی ایمنی مواد غذایی استفاده می‌شوند[۱۳–۱۵]. این پلتفرم تشخیص یکپارچه قادر است شرایط پایدارتری را برای ردیابی آنالیت‌ها در محل فراهم کند. در این زمینه، دستگاه‌های قابل حمل مبتنی بر مکانیسم فلورسانس "روشن–خاموش–روشن" و استفاده از نرم‌افزارهای تجزیه و تحلیل مقادیر RGB قرمز(R) ، سبز (G) و آبی (B) نصب‌شده روی گوشی‌های هوشمند، طراحی شده‌اند. همچنین، توسعه سریع تکنولوژی رنگ‌سنجی تصویر دیجیتال منجر به نتایج تحقیقاتی چشمگیر و پیشرفت‌های قابل توجهی در این حوزه شده است[۱۶، ۱۷].

فلورسانس نشری نسبتی که با عنوان فلورسانس نسبت سنجی[1] نیز شناخته می‌شود، روشی برای تشخیص غلظت های آنالیت بر اساس مقایسه شدت‌های فلورسانس در دو یا چند طول موج است. این روش به دلیل برخورداری از قابلیت خودکالیبراسیون داخلی، دقت تشخیص را افزایش داده و احتمال بروز نتایج مثبت کاذب را کاهش می‌دهد.

[1] Ratiometric fluorescent

در یکی از مقالات مروری اخیر، روند توسعه حسگرهای قابل حمل مبتنی بر تلفن‌های هوشمند جهت تشخیص چشمی آلاینده‌های غذایی با استفاده از سیگنال‌های فلورسانس نسبت سنجی مورد بررسی قرار گرفته است[۱۸]. در این مقاله اشاره شده که روش‌های فلورسانس نشری نسبتی که در ترکیب با سیستم‌های مبتنی بر تلفن‌های هوشمند برای شناسایی آلاینده‌های غذایی به کار رفته‌اند، عمدتاً در دو دسته اصلی قرار می‌گیرند. اول الگوی تغییر تک‌سیگنال[1] که در این روش، سیگنال فلورسانس در یک طول موج نشری به‌طور وابسته به غلظت آلاینده تغییر می‌کند، در حالی‌که شدت فلورسانس در طول موج نشری دیگر ثابت باقی می‌ماند. دوم الگوی تغییر برگشت‌پذیر دو سیگنال[2] که در این حالت، افزایش سیگنال فلورسانس در یک طول موج نشری در اثر حضور آلاینده‌های غذایی، هم‌زمان با کاهش شدت سیگنال در طول موج نشری دیگر رخ می‌دهد.

روش فلورسانس رنگ سنجی روش پرکاربرد دیگری است که از هر دو روش فلورسانس و رنگ سنجی برای مشاهده سیگنال استفاده می نماید و حساسیت روش فلورسانس را با آسانی روش رنگ‌سنجی همراه می‌کند. معمولا مکانیسم آن به صورتی است که یک فلوروفور اغلب به مولکولی متصل می‌شود که خواص فلورسانس خود(شدت یا طول موج) را در پاسخ به یک آنالیت تغییر می‌دهد. این تغییر می‌تواند با تغییر رنگ قابل مشاهده نیز همراه باشد[۱۹، ۲۰].

بر اساس مطالب فوق، در این مقاله مروری، تمرکز بر گزارش پیشرفت‌های اخیر در زمینه‌ی تشخیص کیفیت و ایمنی مواد غذایی با استفاده از حسگرهای قابل حمل مبتنی بر تلفن هوشمند، بر پایه‌ی مکانیسم فلورسانس "روشن–خاموش–روشن" است. ابتدا مکانیسم تشخیص فلورسانس "روشن–خاموش–روشن" شرح داده می‌شود و سپس به معرفی برخی از مواد فلورسنت مورد استفاده در این سیستم ها و کاربردهای آنها پرداخته خواهد شد.

۲- مکانیسم های تشخیص

با توجه به مکانیسم فلورسانس "روشن–خاموش–روشن"، می توان آن را به دو مرحله مجزا تقسیم کرد: خاموش کردن فلورسانس(روشن–خاموش) و مرحله بعد بازیابی فلورسانس(خاموش–روشن). بنابراین بر اساس اصول پاسخ فلورسانس، این دو فرآیند به صورت جداگانه مورد بررسی قرار گرفتند. در حال حاضر، راههای مرسوم خاموش شدن فلورسانس می تواند شامل انتقال الکترون ناشی از نور(PET)[3][۲۱، ۲۲] ، انتقال انرژی رزونانس فلورسانس[4](FRET)[۲۳]، اثر فیلتر داخلی(IFE)[5][۲۴]، خاموش شدن ناشی از تجمع[6](ACQ)[۲۵، ۲۶]، انتقال بار داخلی(ICT)[7] و انتقال بار فلزبه لیگاند[8](MLCT)[۲۷] باشند.

PET یک فرآیند انتقال الکترون غیر تابشی است که بین مولکول های فلورسنت رخ می دهد. پس از برانگیختگی با نور، الکترون ها در مولکول دهنده، از حالت پایه به حالت برانگیخته منتقل می شوند. پس از آن، این مولکول های دهنده برانگیخته با مولکول های گیرنده برهم کنش دارند. برای اینکه PET رخ دهد، سطح انرژی نوار رسانایی مولکول گیرنده باید کمتر از سطح انرژی حالت برانگیخته مولکول دهنده باشد. این تراز سطح انرژی به الکترونهای مولکول دهنده برانگیخته اجازه می دهد تا به نوار رسانایی مولکول گیرنده منتقل شوند و فرآیند انتقال الکترون را تکمیل کنند. در نتیجه، فلورسانس مولکول دهنده خاموش می شود. همچنین PET اغلب با واکنش ردوکس(اکسایش–کاهش) یا تغییر در حالت بار مولکولی به دلیل انتقال الکترون های برانگیخته شده با نور، از یک مولکول به مولکول دیگر همراه است.

FRET یک فرآیند انتقال غیرتابشی انرژی از یک فلوروفور دهنده به یک فلوروفور گیرنده است، زمانی که این دو فلوروفور در نزدیکی یکدیگر قرار دارند. مولکول دهنده، پس از تحریک نور، به حالت برانگیخته می رسد و آماده آزاد کردن انرژی است. هنگامی که مولکول گیرنده در مجاورت مولکول دهنده قرار دارد، (معمولاً در فاصله ۱ تا ۱۰ نانومتر)، مولکول دهنده برانگیخته با

[1] Single-signal change
[2] Two-signal:reversible change

[3] Photoinduced electron transfer
[4] Fluorescence resonance energy transfer
[5] Inner filtering effect
[6] Aggregation-caused quenching
[7] Internal charge transfer
[8] Metal ligand charge transfer

گونه پذیرنده برهمکنش می کند و انتقال انرژی را تسهیل می کند. این انتقال انرژی مستقیما بر روی مولکول پذیرنده تأثیر می گذارد و منجر به خاموش شدن فلورسانس مولکول دهنده بدون انتشار فوتون می شود[۲۸].

اثر فیلتر داخلی نوعی خاموش‌سازی غیرمستقیم فلورسانس است که ناشی از جذب نور (مرحله برانگیختگی یا نشر) توسط ترکیبات دیگر در محیط می‌باشد و می‌تواند شدت سیگنال فلورسانس را به‌طور چشمگیری کاهش دهد[۲۹].

خاموشی ناشی از تجمع، پدیده‌ای است که در آن، تجمع مولکول‌های فلوروفور به‌جای تقویت، باعث کاهش یا از بین رفتن فلورسانس می‌شود. این پدیده به دلیل برهم‌کنش‌های بین‌مولکولی و افزایش مسیرهای غیرتابشی رخ می‌دهد[۲۶].

۳- مواد فلورسانس کننده

در روش تجزیه‌ای فلورسانس «روشن–خاموش–روشن»، دستیابی به دقت و حساسیت بالا مستلزم برهم‌کنش اختصاصی و مؤثر میان ماده فلورسانس و مولکول هدف است. ازاین‌رو، انتخاب ماده فلورسانس مناسب باید بر پایه‌ی ارزیابی دقیق پارامترهایی نظیر ویژگی‌های نوری، پایداری شیمیایی و فیزیکی، زیست‌سازگاری صورت گیرد و این ارزیابی می‌بایست متناسب با نوع کاربرد مورد نظر انجام شود. در حال حاضر، انواع مختلفی از مواد فلورسانس در این زمینه مورد استفاده قرار می‌گیرند که از جمله رایج‌ترین آن‌ها می‌توان به نقاط کوانتومی(QDs)[1]، مولکول‌های آلی کوچک، نانوخوشه ها[2] و چارچوب‌های فلزی–آلی (MOFs)[3] اشاره کرد.

۳-۱- نقاط کوانتومی

نقاط کوانتومی، نانوساختارهایی از جنس مواد نیمه‌رسانا هستند که معمولاً دارای اندازه‌ای کمتر از ۱۰۰ نانومتر در سه بُعد بوده و شکلی تقریباً کروی دارند[۳۰]. از آنجا که خواص نوری نقاط کوانتومی به شدت وابسته به اندازه آن‌هاست، تغییر در ابعاد این نانوساختارها امکان تنظیم پیوسته طول‌موج نشر را فراهم می‌سازد. افزون بر این، QDs به دلیل بازده کوانتومی بالا، پهنای نوار باریک فلورسانس، و پایداری فوتوشیمیایی خوب، از جایگاه ویژه‌ای در میان مواد فلورسانس برخوردارند و به‌عنوان یکی از پرمطالعه‌ترین دسته‌ها در این زمینه شناخته می‌شوند. تاکنون انواع مختلفی از نقاط کوانتومی توسعه یافته‌اند، از جمله نقاط کوانتومی گرافنی(GQDs)[۳۱]، کربنی(CQDs)[۳۲]، فسفر سیاه (BPQDs)[۳۳]، سیلیکونی(SiQDs)[۳۴] و پروسکایتی(PQDs)[۳۵]. این نانوساختارها، به‌دلیل برخورداری از ویژگی‌های نوری منحصربه‌فرد و قابلیت اصلاح سطحی آسان، به‌عنوان ردیاب‌های فلورسانس قدرتمند، بستر مناسبی برای توسعه حسگرهای حساس و گزینش‌پذیر در شناسایی و اندازه گیری ترکیبات هدف فراهم ساخته‌اند.

۳-۲- مولکول های آلی کوچک

ردیاب‌های فلورسانس مبتنی بر مولکول‌های آلی کوچک به دلیل برخورداری از مزایایی نظیر بازده کوانتومی بالا، پایداری در برابر فوتوبلیچینگ، ابعاد مولکولی کوچک و قابلیت اصلاح‌پذیری ساختاری، توجه گسترده‌ای را در طراحی حسگرهای تشخیصی به خود جلب کرده‌اند. مکانیسم عملکرد این ردیاب‌ها عمدتاً بر پایه برهم‌کنش‌های اختصاصی با آنالیت‌ها استوار است، به‌گونه‌ای که موجب تغییر در محیط شیمیایی گروه فلوروفور شده و در نهایت منجر به بروز پاسخ‌های نوری قابل اندازه‌گیری از جمله تغییر رنگ، جابه‌جایی در طول‌موج‌های طیفی یا تغییر در شدت فلورسانس می‌گردد[۳۶]. گروه‌های فلوروفور به‌کاررفته در این دسته از ردیاب‌ها عمدتاً مشتمل بر ساختارهای مزدوج بوده و از جمله رایج‌ترین آن‌ها می‌توان به مشتقات کومارین، بنزوتیازول، و فلورسئین اشاره نمود. علاوه‌براین، کمپلکس‌های حاصل از برهم‌کنش لیگاندهای آلی با یون‌های فلزی نیز به‌عنوان ردیاب‌های فلورسانس کارآمد معرفی شده‌اند و در بسیاری از موارد عملکرد بسیار خوبی از خود نشان داده‌اند[۳۷، ۳۸].

یکی از مزیت‌های بارز این ردیاب‌ها در مقایسه با مواد فلورسانس معدنی، قابلیت طراحی و مهندسی ساختاری بالا مطابق با نیازهای کاربردی خاص است؛ موضوعی که به‌ویژه در شناسایی اختصاصی مولکول‌های زیستی نظیر پروتئین‌ها و اسیدهای نوکلئیک حائز اهمیت است. با این حال، یکی از چالش‌های اصلی مرتبط با

[1] Quantum dots
[2] Nanoclusters
[3] Metal–organic frameworks

مولکول‌های آلی، محدودیت در حلالیت آن‌ها در محیط‌های آبی است که می‌تواند کارایی آن‌ها را در سامانه‌های زیستی تحت تأثیر قرار دهد. از این‌رو، به‌کارگیری این ردیاب‌ها نیازمند توسعه و بهینه‌سازی شرایط عملیاتی و اصلاح ساختاری مناسب متناسب با ویژگی‌های فیزیکی–شیمیایی آن‌هاست[۱۵].

۳-۳- نانوخوشه های فلزی

نانوخوشه های فلزی به‌عنوان دسته‌ای دیگر از مواد فلورسانس، ساختارهایی در مقیاس زیر نانومتر تا چند نانومتر هستند که از چند تا چند صد اتم فلزی تشکیل شده‌اند و ویژگی‌های نوری منحصربه‌فردی از خود نشان می‌دهند. پدیده‌های نوری در این نانوخوشه ها عمدتاً ناشی از دو مکانیسم اصلی‌اند: اثر محدودیت کوانتومی و اثر حالت‌های سطحی. اثر محدودیت کوانتومی ناشی از محدود شدن حرکت الکترون‌ها در ابعاد بسیار کوچک ساختار بوده و موجب تفکیک ترازهای انرژی و ایجاد ساختار شکاف نوار انرژی مجزا می‌شود. پهنای این نوار انرژی با اندازه‌ی خوشه رابطه‌ی مستقیم داشته و امکان تنظیم خواص نشر نوری را از طریق کنترل دقیق ابعاد فراهم می‌سازد. زمانی که نانوخوشه ها بر اثر تابش نور برانگیخته می شوند، الکترون‌ها از نوار ظرفیت به نوار رسانش انتقال یافته و در بازگشت به حالت پایه، انرژی خود را به‌صورت نشر تابشی(فلورسانس) یا غیرتابشی آزاد می‌کنند[۳۹]. در کنار این پدیده، سطح نانوخوشه ها به‌دلیل وجود اتم‌های سطحی و پیوندهای غیر اشباع، می توانند نقش کلیدی در فرآیندهای جذب و نشر انرژی ایفا کنند. فاکتورهایی مانند نوع فلز، ترکیب شیمیایی و اصلاحات سطحی می توانند رفتار فلورسانس را کنترل نمایند. این قابلیت‌ها سبب شده‌اند تا نانوخوشه های فلزی به‌عنوان ردیاب‌های فلورسانس در طراحی حسگرها برای شناسایی ترکیبات زیستی و شیمیایی مورد توجه گسترده قرار گیرند[۴۰].

۳-٤- چارچوبهای فلزی–آلی

چارچوب‌های فلزی–آلی مواد بلوری‌ای هستند که از اتصال یون‌ها یا خوشه‌های فلزی با لیگاندهای آلی تشکیل می‌شوند. این مواد دارای خواص فلوئورسانس هستند و این خاصیت آنها عمدتاً تحت تأثیر دو عامل اصلی قرار دارند: نخست، ساختار ترازهای انرژی مراکز فلزی درونMOFها نقش مهمی ایفا می‌کند. نحوه توزیع و آرایش این ترازهای انرژی می‌تواند بر شدت و نوع تابش فلوئورسانس تأثیر بگذارد. در این فرآیند، فلزات با جذب انرژی سبب می‌شوند الکترون‌ها از حالت پایه به ترازهای بالاتر انرژی منتقل شوند. بازگشت این الکترون‌های برانگیخته به حالت پایه همراه با آزادسازی انرژی به صورت تابش نور فلوئورسانس می‌شود. دومین عامل مؤثر، فرآیند تابش نوری از سوی لیگاندهای آلی در ساختارMOFهاست. این لیگاندها با جذب انرژی نوری، به حالت‌های برانگیخته منتقل شده و سپس انرژی جذب‌شده را به صورت نور بازتاب می‌دهند. علاوه بر این، انتقال و تبادل انرژی بین مراکز فلزی و لیگاندهای آلی درون ساختارMOFها نیز ممکن است رخ دهد، که خود بر ویژگی‌های نوری آن‌ها تاثیر می گذارد. بنابراینMOFها ویژگی‌های نوری متنوعی از خود نشان می‌دهند و توجه زیادی را در زمینه حسگرهای فلوئورسانس به خود جلب کرده‌اند[۴۱، ۴۲]. به عنوان نمونه، یک چارچوب فلزی–آلی مبتنی بر یوروپیوم (Eu- MOF) با پایداری بالا طراحی شده است که به عنوان یک حسگر فلوئورسانس چندمنظوره، گزینه‌ای مناسب برای پایش محیطزیست و شناسایی آلاینده‌ها در منابع آبی محسوب می‌شود[۴۳]. همچنین، در مطالعه ای دیگر حسگر فلورسانس بر پایه MOF طراحی شده که قادر است با حساسیت بسیار بالا، آنتی‌بیوتیک تتراسایکلین(TC) را در نمونه‌های آبی و غذایی شناسایی کند[۴۴].

با این حال، استفاده از MOFها به عنوان حسگر با چالش‌هایی نیز همراه است. این مواد در محیط‌های مرطوب یا اسیدی و بازی ناپایدار بوده و تجزیه می شوند. این محدودیت‌ها کاربرد آن‌ها را در برخی شرایط خاص محیطی محدود می‌سازد.

٤- اصول طراحی ردیاب‌های فلورسانس

در فرآیند آشکارسازی فلورسانس مبتنی بر مکانیسم "روشن–خاموش–روشن"، تفسیر نتایج اساساً بر تغییرات در شدت سیگنال‌های فلورسانس استوار است؛ از این رو، چنین رویکردی مستلزم ویژگی‌های ساختاری و عملکردی بسیار دقیق و مهندسی‌شده در مولکول‌های ردیاب می‌باشد.

بر همین اساس، در هنگام طراحی یک ردیاب توجه به پارامترها و اصول طراحی دقیق، امری ضروری و اجتناب‌ناپذیر است[۱۵]. پارامترهایی که می توان به آن اشاره نمود در ادامه آورده شده است.

٤-١- طراحی بخش پاسخگویی[1] در ساختار مولکول ردیاب

در مرحله اول، ساختار مولکولی باید به گونه‌ای طراحی شود که واحدهایی در آن وجود داشته باشد که بتوانند به تحریک‌های بیرونی(مانند نور، دما، pH و...) پاسخ دهند. وقتی این تحریک‌ها اتفاق می‌افتد، این واحدها باعث تغییر در سیگنال فلورسانس (نور ساطع‌شده از مولکول) می‌شوند. برای رسیدن به این هدف، می‌توان مولکول‌هایی طراحی کرد که شامل ساختارهای دهنده-گیرنده الکترون و یا دارای ساختارهای مزدوج باشند. این نوع طراحی‌ها باعث می‌شود بتوان با تغییر وضعیت این ساختارها(مثلاً با نور یا مواد شیمیایی)، شدت یا رنگ فلورسانس را تغییر داد.

٤-٢- حساسیت

دومین اصل طراحی، حساسیت است. ردیاب‌های فلورسانس باید از حساسیت بالایی برخوردار باشند و بتوانند به‌صورت سریع و متمایز به محرک هدف واکنش نشان دهند. این موضوع مستلزم آن است که ساختار مولکولی طراحی‌شده قادر باشد تغییرات آشکار و قابل اندازه‌گیری در سیگنال فلورسانس را در پاسخ به محرک‌های خاص ایجاد کند، در حالی که حساسیت خود را حتی در غلظت‌های پایین آنالیت هدف حفظ نماید. به‌طور کلی، روش‌های رایج برای بهبود حساسیت شامل استفاده از تقویت‌کننده‌های فلورسانس، بهینه‌سازی ساختار مواد فلورسانس و تنظیم شرایط آشکارسازی به‌منظور افزایش کارایی پاسخ سیگنال می باشد.

علاوه بر این، پیشرفت‌های حاصل‌شده در نانوفناوری منجر به توسعه‌ی ردیاب‌های فلورسانس با ساختار نانویی شده‌اند که به‌دلیل برخورداری از ویژگی‌های منحصربه‌فرد، حساسیت به‌مراتب بالاتری از خود نشان می‌دهند. کوچک‌سازی ردیاب‌ها تا نانومقیاس موجب افزایش چشمگیر سطح مؤثر آن‌ها می‌شود، که این امر احتمال برهم‌کنش با آنالیت‌های هدف را به‌طور قابل‌توجهی افزایش داده و در نتیجه، بهبود قابل ملاحظه‌ای در حساسیت آشکارسازی حاصل می‌گردد[۴۵].

٤-٣- انتخاب پذیری

سومین اصل کلیدی، انتخاب‌پذیری است که از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است. دستیابی به انتخاب‌پذیری بالا تضمین می‌کند که ردیاب بتواند به‌طور اختصاصی مولکول هدف را شناسایی و از سایر مواد مزاحم متمایز سازد، که این امر به‌طور چشمگیری احتمال بروز نتایج مثبت یا منفی کاذب را کاهش می‌دهد. این ویژگی به‌ویژه در نمونه‌های پیچیده که ممکن است حاوی آنالیت‌های متعدد باشند، بسیار مهم است. برای افزایش انتخاب‌پذیری، طراحی دقیق ساختار مولکولی ردیاب و انتخاب هدفمند لیگاندها نقش اساسی ایفا می‌کند. ساختار ردیاب باید به‌گونه‌ای طراحی شود که بتواند به‌طور خاص با مولکول هدف برهم‌کنش داشته باشد و از ویژگی‌های منحصربه‌فرد یا جایگاه‌های اتصال اختصاصی آن استفاده نماید. دستیابی به این ویژگی با استفاده از گروه‌های عاملی خاص یا لیگاندهایی با میل ترکیبی بالا نسبت به مولکول هدف امکان‌پذیر است[۴۶، ۴۷].

علاوه بر این، بهره‌گیری از ردیاب‌های فلورسانس با انتشار دوگانه یا مبتنی بر نسبت سنجی شدت سیگنال می‌تواند موجب ارتقاء قابل‌توجه انتخاب‌پذیری گردد. این نوع ردیاب‌ها با نشان دادن طول‌موج‌های نشر متفاوت یا تغییر در نسبت شدت‌های فلورسانس در پاسخ به حضور یا عدم حضور آنالیت هدف، امکان تمایز دقیق تر میان مولکول هدف و گونه‌های مزاحم را فراهم می‌سازند[۴۸].

٤-٤- پایداری

چهارمین معیار اساسی، پایداری است. ردیاب‌های فلورسانس باید دارای پایداری ساختاری بالا باشند تا توانایی حفظ عملکرد بهینه را در بازه زمانی طولانی، حتی در شرایط سخت آزمایشگاهی داشته باشند. یکی از ارکان اصلی پایداری، انتخاب ساختار

[1] Response unit

مولکولی با ثبات ذاتی است که از تخریب یا تغییرات عمده در ویژگی‌های فلورسانسی طی زمان جلوگیری نماید. علاوه بر این، کپسوله‌سازی ردیاب یا استفاده از پوشش‌های محافظ می‌تواند نقش مهمی در محافظت از ردیاب در برابر عوامل فیزیکی و شیمیایی مخرب بیرونی ایفا کرده و دوام عملکرد آن را افزایش دهد. ردیاب‌های فلورسانس عمدتاً در سیستم‌های محلول به‌کار گرفته می‌شوند و انتخاب حلال مناسب نقش تعیین‌کننده‌ای در حفظ پایداری این ردیاب‌ها ایفا می‌کند. انتخاب حلال باید به گونه‌ای باشد که با ساختار مولکولی ردیاب سازگار بوده و از فرآیندهای تخریب مولکولی یا مکانیزم‌های خاموش‌شدن فلورسانس جلوگیری نماید، چرا که این عوامل می‌توانند موجب کاهش قابل توجه شدت و کیفیت سیگنال فلورسانس شوند[۱۵، ۴۹].

٤-۵- سازگاری زیستی

در نهایت، سازگاری زیستی به‌عنوان یک پارامتر کلیدی و غیرقابل چشم‌پوشی در طراحی ردیاب‌های فلورسانس به‌ویژه برای کاربردهای بیولوژی مطرح است. مواد انتخابی باید به‌طور طبیعی با محیط زیست و سیستم های بیولوژی سازگار بوده و کمترین میزان سمیت سلولی را ایجاد کنند. علاوه بر این، اصلاح سطح ردیاب‌های فلورسانس و یا ایجاد لایه‌های محافظ، راهکاری مؤثر برای افزایش سازگاری زیستی این ردیاب‌ها محسوب می‌شود. استفاده از مولکول‌های زیست‌سازگار نظیر پلیمرهای زیستی یا مولکول‌های زیستی خاص، قادر است برهم کنش های غیر اختصاصی را کاهش داده و در عین حال پایداری را در محیط‌های بیولوژیک بهبود بخشد[۵۰، ۵۱].

۵- کاربرد حسگرهای فلورسانس در پایش ایمنی غذایی

حسگرهای قابل حمل مبتنی بر گوشی‌های هوشمند به‌عنوان یک راهکار بسیار مؤثر برای پایش ایمنی غذایی مطرح شده‌اند، که این موضوع در گزارش‌های متعددی از پژوهش‌های علمی به اثبات رسیده است[۵۲-۵۵]. در این قسمت به بررسی کاربرد حسگرهای قابل حمل مبتنی بر گوشی‌های هوشمند و بر اساس سیگنال فلورسانس "روشن–خاموش–روشن" برای تشخیص چشمی ایمنی مواد غذایی خواهیم پرداخت.

۵-۱- مواد مغذی

مواد مغذی، ترکیبات شیمیایی ضروری هستند که برای حفظ عملکردهای فیزیولوژیکی طبیعی بدن انسان مورد نیازهستند. علاوه بر این، برخی از این ترکیبات به‌طور گسترده‌ای در محصولات روزمره و صنایع داروسازی کاربرد دارند. از این رو، شناسایی دقیق آن‌ها از اهمیت بالایی برخوردار است. در این بخش، کاربرد این حسگرها در شناسایی و اندازه‌گیری آسکوربیک اسید، هیستیدین و گلوتاتیون مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۵-۱-۱- آسکوربیک / سید

آسکوربیک اسید(AA) که با نام ویتامین C نیز شناخته می‌شود، یک ماده مغذی ضروری است که نقش‌ها و اثرات متعددی در بدن انسان ایفا می‌کند. نخست آنکه، به‌عنوان یک آنتی‌اکسیدان، آسکوربیک اسید با حذف رادیکال‌های آزاد، از سلول‌ها در برابر آسیب‌های اکسیداتیو محافظت می‌کند. دوم، این ویتامین نقش حیاتی در سنتز کلاژن دارد؛ فرایندی که برای سلامت پوست، استخوان‌ها، عروق خونی و سایر بافت‌ها ضروری است. علاوه بر این، آسکوربیک اسید در تنظیم عملکرد سیستم ایمنی بدن و همچنین در فرایند جذب آهن نیز نقش مهمی دارد. با این حال، دریافت بیش از حد یا ناکافی آسکوربیک اسید می‌تواند منجر به آسیب‌های جدی به بدن انسان شود[۵۶، ۵۷]. اخیراً لی و همکارانش یک روش شناسایی کمی حساس و چشمی برای تشخیص آسکوربیک اسید با استفاده از حسگر هوشمند نقطه‌ای(SPOC) توسعه داده‌اند[۵۸]. در این مطالعه، تراشه فلورسانس کاغذی با چاپ جوهر حاوی نقاط کربنی دوپ‌شده با سیلیکون(SiCDs) و یون‌های Fe^{3+} روی کاغذ صافی تهیه شد؛ در این سامانه، SiCDs به‌عنوان منبع سیگنال فلورسانس و یون‌های Fe^{3+} به‌عنوان خاموش‌کننده‌ی سیگنال عمل می‌کنند. SiCDs در طول موج ۴۲۵ نانومتر نور فلورسانس آبی ساطع می‌کنند. شدت این فلورسانس پس از افزودن یون‌های Fe^{3+}

[1] Smartphones for point-of-care

به‌طور قابل توجهی کاهش یافت، اما با اضافه شدن آسکوربیک اسید به‌طور چشمگیری بازیابی شد. در عین حال، حضور AA به‌تنهایی هیچ‌گونه تغییری در شدت فلورسانس SiCDs ایجاد نکرد. یکی از مکانیسم‌های احتمالی در خاموشی فلورسانس را می‌توان به مکانیسم PET نسبت داد. در این فرآیند، یون‌های Fe^{3+} با گروه‌های عاملی $-NH_2$ ، –SH و –OH موجود بر سطح SiCDs پیوند برقرار می‌کنند که این برهم‌کنش منجر به انتقال الکترون به فرم غیرتابشی از حالت برانگیخته SiCDs به یون‌های Fe^{3+} شده و در نهایت کاهش شدت فلورسانس را به دنبال دارد. پس از افزودن AA، به دلیل وقوع واکنش اکسایش–کاهش و آزادسازی گروه‌های $-NH_2$ و –OH، سیگنال فلورسانس SiCDs می تواند بازیابی شود. تغییرات مشاهده‌شده در فلورسانس به غلظت AA وابسته بودند. برای تحلیل این تغییرات، داده‌های RGB تصاویر فلورسانس ثبت‌شده توسط تلفن همراه با استفاده از نرم‌افزار «AA-Tester» استخراج شدند و نمودار کالیبراسیون مربوطه ترسیم گردید. در نتیجه، این سیستم امکان شناسایی کمی و چشمی آسکوربیک اسید به‌صورت در محل را با استفاده از پلتفرمی قابل حمل مبتنی بر تلفن هوشمند فراهم آورد و حد تشخیص آن ۱۸/۱۲ نانومول بر لیتر گزارش شد.

به‌طور مشابه، ژو و همکاران حسگری مبتنی بر نقاط کربنی جهت شناسایی آسکوربیک اسید طراحی کردند که بر پایه‌ی مکانیسم فلورسانس "روشن–خاموش–روشن" عمل می‌نماید[۵۹]. در پی واکنش میان AA و یون‌های Fe^{3+}، بازیابی قابل‌توجهی در شدت فلورسانس نقاط کربنی مشاهده گردید که ناشی از فرآیند اکسایش–کاهش بین Fe^{3+} و AA بود. داده‌های فلورسانس به‌دست‌آمده با استفاده از دوربین، به‌عنوان سیگنال پاسخ عمل کرده و امکان تعیین کمی دقیق غلظت‌های AA در بازه‌ی ۰ تا ۱۵۰ میکرومولار را فراهم نمودند.

۵-۱-۲ - هیستیدین

هیستیدین(His) یکی از اسیدهای آمینه ضروری و غیرقابل جایگزین است که نقش کلیدی در فرآیندهای زیستی مختلف ایفا می‌کند. از جمله این نقش‌ها می‌توان به مشارکت در سنتز ناقل‌های عصبی، تنظیم فعالیت آنزیم‌ها و حفظ عملکردهای حیاتی بدن اشاره کرد. همچنین، شواهد متعددی وجود دارد که نشان می‌دهد اختلال در سطوح هیستیدین با بروز بیماری‌هایی نظیر دیابت و بیماری‌های قلبی–عروقی مرتبط است[۶۰، ۶۱]. از این‌رو، شناسایی و پایش لحظه‌ای هیستیدین از اهمیت بسزایی در حفظ سلامت و پیشگیری از ابتلا به این بیماری‌ها برخوردار است.

در سال ۲۰۲۳، یک ردیاب فلورسانس جدید مبتنی بر پپتید با نام DSSH[1] با استفاده از روش سنتز پپتید در فاز جامد(SPPS)[2] و شیمی Fmoc[3] طراحی و سنتز شد[۶۲]. در ساختار این ردیاب، گروه دانسیل[4] به عنوان حامل فلورسانس و تری‌پپتید SSH[5] نقش گیرنده یونی را داشته که جایگاه‌های مناسبی برای برهم‌کنش و کمپلکس شدن با یون Cu^{2+} در محیط آبی فراهم می‌کنند. در نتیجه، ردیاب DSSH در حضور یون مس(II) پاسخ‌های رنگی مشخص و تغییرات فلورسانس قابل ملاحظه‌ای را نشان داد(خاموشی فلورسانس) که مبتنی بر استوکیومتری اتصال ۱:۲ بین DSSH و Cu^{2+} بود. علاوه بر این، کمپلکس تشکیل‌شده بین DSSH و یون مس برای شناسایی هیستیدین مورد استفاده قرار گرفت. نتایج نشان داد که افزودن هیستیدین منجر به تغییر رنگ محلول از مشکی به زرد شده و سبب بازیابی سیگنال فلورسانس(روشن شدن مجدد) در سیستم DSSH-Cu^{2+} می‌شود. این ویژگی، پتانسیل بالای این ردیاب را برای شناسایی انتخابی و حساس هیستیدین در شرایط زیستی به‌خوبی نشان می‌دهد. در مقابل، تغییرات رنگی ناچیزی در حضور سایر اسیدهای آمینه مشاهده شد که بیانگر گزینش‌پذیری بالای ردیاب DSSH در شناسایی اختصاصی هیستیدین است. علاوه بر این، به‌واسطه ویژگی‌های فلورسانسی قابل توجه و سمیت سلولی پایین، از DSSH به‌طور مؤثری برای شناسایی هیستیدین در سلول‌های زنده RKO استفاده گردید. این سیستم دارای محدوده خطی نسبتاً محدود بین ۰ تا ۲۰ میکرومولار و حد تشخیص(LOD) معادل ۰/۹۷ میکرومولار می‌باشد.

در همین راستا، وو و همکاران با تلفیق نانوخوشه های طلا–نقره(AuAg NCs) در غشاهای نانوالیاف از استات

[1] Dansyl-Ser-Ser-His
[2] Solid-phase peptide synthesis
[3] 9-fluorenylmethyloxycarbonyl (Fmoc)
[4] dansyl group (short for 5-dimethylaminonaphthalene-1-sulfonyl)
[5] Ser–Ser–His

سلولز(AuAg-ENM) یک پلتفرم فلورسانس معرفی کردند که قادر به تعیین یون Cu^{2+} و شناسایی هیستیدین می‌باشد[۶۳]. سیستم AuAg-ENM با مکانیسم خاموشی فلورسانس از طریق انتقال انرژی غیرتابشی FRET به‌طور موفقیت‌آمیزی یون Cu^{2+} را شناسایی کرد. سپس، کمپلکس فلز–لیگاند یعنی همان (AuAg-ENM-Cu^{2+}) به‌سادگی توسط هیستیدین جابه‌جا شده و فرآیند FRET مختل می‌شود که منجر به توقف خاموشی فلورسانس می‌گردد. بازیابی فلورسانس با غلظت هیستیدین رابطه نزدیکی داشته و این امر امکان پایش کمی هیستیدین را از طریق افزایش شدت فلورسانس AuAg-ENM فراهم می‌سازد. در این مطالعه، بازه غلظتی ۱۰ تا ۱۰۰ میکرومولار و حد تشخیص برابر با ۱۶/۶۰ نانومولار برای هیستیدین گزارش گردید. علاوه بر این، پلتفرم AuAg-ENM انتخاب‌پذیری بالایی در پایش یون Cu^{2+} و هیستیدین در نمونه‌های مختلف از جمله آب، مواد غذایی و سرم نشان داد.

۵-۱- ۳ -گلوتاتیون

گلوتاتیون(GSH) یک تری‌پپتید است که تقریباً در تمام سلول‌های بدن حضور دارد و بیشترین غلظت آن در کبد مشاهده می‌شود. این مولکول نقش حیاتی در عملکردهای فیزیولوژیکی متعددی از جمله دفاع آنتی‌اکسیدانی، سم‌زدایی و تنظیم سیستم ایمنی ایفا می‌کند. اختلال در سطح گلوتاتیون می‌تواند به پیشرفت بیماری‌هایی مانند سندرم پارکینسون، نقص ایمنی، بیماری‌های کبدی و فیبروز کیستیک کمک کند. بنابراین، تشخیص به‌موقع GSH در فرآیندهای فیزیولوژیکی و پاتولوژیکی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است[۶۴].

در مطالعه‌ای که اخیراً توسط ژانگ و همکاران انجام شد[۶۵]، از غشای تخم‌مرغ(ESM[2]) به عنوان بستر، مس سولفات به عنوان پیش‌ماده و ال–سیستئین(L-Cys) به عنوان عامل محافظ و کاهنده استفاده گردید. با بهره‌گیری از یک روش ساده، آن‌ها موفق به تولید کامپوزیت فلورسانس قرمز درخشان متشکل از نانوخوشه‌های مس(CuNCs) به نام L-Cys/CuNCs@ESM شدند. در این مطالعه، نور قرمز منتشر شده توسط کامپوزیت L-Cys/CuNCs@ESM در حضور یون جیوه(Hg^{2+}) به طور مؤثری خاموش شد. اما با افزودن گلوتاتیون، فلورسانس خاموش شده بازسازی شده و پدیده فلورسانس روشن–خاموش–روشن به‌وضوح مشاهده گردید. با استفاده از این ویژگی منحصربه‌فرد، از روش آنالیز رنگ‌سنجی مبتنی بر تغییرات رنگ فلورسانس برای تشخیص چشمی گلوتاتیون استفاده شد. با افزایش غلظت GSH، تغییرات رنگی قابل مشاهده با چشم غیرمسلح قابل تفکیک بود. در این روش محدوده خطی غلظت GSH در بازه ۰/۰۵ تا ۱ میلی‌مولار و حد تشخیص برابر با ۲/۸ میکرومولار گزارش شده است.

۵-۲- آفت کش ها

سموم دفع آفات بدون شک نقش مهمی در افزایش عملکرد محصولات کشاورزی و حفاظت آن‌ها در برابر آفات و بیماری‌ها ایفا کرده‌اند. با این حال، این مواد شیمیایی می‌توانند تهدیدی جدی برای محیط زیست و سلامت انسان به شمار آیند. در فرآیند تولیدات کشاورزی، بقایای سموم دفع آفات معمولاً در محصولات کشاورزی باقی می‌مانند و سرعت تخریب طبیعی آن‌ها بسیار کند است. از این رو، این بقایای سموم از طریق تنفس، تماس پوستی یا بلع به آسانی وارد بدن انسان شده و می‌توانند به عملکردهای مختلف اندام‌ها آسیب جدی وارد کرده و خطرات قابل توجهی برای سلامت ایجاد نمایند[۶۶].

لو و همکاران یک حسگر فلورسانس مبتنی بر تلفن هوشمند را برای شناسایی یون جیوه(Hg^{2+}) و ترکیب تیورام(THR[3]) در حالت "روشن–خاموش–روشن" معرفی کردند[۶۷]. این حسگر از نانوخوشه های طلا(Au NCs) و چارچوب فلزی–آلی مبتنی بر آهن(Fe-MIL-88-NH_2) ساخته شده است. بار منفی اتم گوگرد موجود در Au NCs موجب تعامل مؤثر با Hg^{2+} می‌شود که در نتیجه آن، انتقال الکترون از گوگرد به یون جیوه رخ داده و مکانیسم خاموشی فلورسانس دینامیکی ایجاد می‌گردد. از سوی دیگر، تیورام که حاوی گروه‌های تیول است، در محیط‌های اسیدی تخریب شده و گروه‌های تیول بیشتری در دسترس قرار می‌گیرند که این امر موجب تسهیل اتصال با Hg^{2+} می‌شود. در

[1] Electrospun cellulose acetate nanofibrous membranes
[2] Eggshell membrane
[3] Thiram

نتیجه، نانوخوشه های طلا آزاد شده و فلورسانس بازیابی می‌گردد. بر اساس این طراحی، شناسایی سریع، دقیق و کم‌هزینه‌ی Hg^{2+} و THR محقق گردید که در آن، حدود تشخیص برای Hg^{2+} و THR به ترتیب ۷ نانومولار و ۰/۰۸۳ میکرومولار گزارش شد.

گروه تحقیقاتی جیانگ[۶۸] یک پلتفرم تشخیص چشمی برای تیورام پیشنهاد داده‌اند که از یک ردیاب فلورسانس با دو طول‌موج نشر متفاوت به نام rQDs@SiO2@CDs استفاده می کند. در این سامانه، نقاط کوانتومی کادمیوم تلورید با گسیل قرمز(rQDs) به‌عنوان مرجع داخلی، درون نانوذرات سیلیکا (SiO_2 NPs) قراردارند، در حالی که نقاط کربنی با گسیل آبی(bCDs) به‌عنوان واحد گزارشگر سیگنال[1] به‌صورت کووالانسی به سطح خارجی نانوذرات سیلیکا متصل گردیدند. فلورسانس آبی این نقاط کربنی توسط نانوذرات طلا(AuNPs) خاموش شده و در حضور آفت‌کش تیورام به دلیل برهم‌کنش اختصاصی، مجدداً بازیابی می‌شود. مقادیر رنگ های قرمز(R)، سبز(G) و آبی(B) در تصاویر به‌دست‌آمده از آزمایش، از طریق اپلیکیشن تشخیص رنگ نصب‌شده روی گوشی هوشمند استخراج گردید و نسبت شدت رنگ R/B به‌عنوان شاخصی برای اندازه‌گیری کمی آفت‌کش مورد استفاده قرار گرفت. این سامانه دارای حد تشخیص بسیار پایین معادل ۵۹ نانومولار و دامنه پاسخ خطی در بازه ۰ تا ۱ میکرومولار بوده است. با وجود پیشرفت‌های چشمگیر در روش‌های آنالیز براساس فلورسانس، تعداد ردیاب‌های فلورسانس مبتنی بر مولکول‌های کوچک که قادر به شناسایی مؤثر تیورام باشند، همچنان محدود است. برای پاسخگویی به این چالش، در سال ۲۰۲۳، اردمیر و همکاران[۶۹] یک ردیاب جدید فلورسانس با نشر قرمز(R6I) طراحی کردند که بر پایه واحدهای رودامین و ایزوفون ساخته شده بود. برخلاف مکانیسم‌های متداول خاموشی فلورسانس، این ردیاب از انتقال بار از فلز به لیگند(MLCT) برای خاموش‌سازی سیگنال فلورسانس در حضور یون مس دو ظرفیتی استفاده می کند. تشکیل برگشت‌پذیر کمپلکس $R6I–Cu^{2+}$ امکان شناسایی تیورام(THR) را فراهم می‌سازد، به‌گونه‌ای که تجزیه این کمپلکس در حضور تیورام منجر به بازیابی سیگنال فلورسانس قرمز ردیاب می‌شود. افزون بر این، ردیاب طراحی‌شده پاسخ خطی مطلوبی نسبت به یون‌های Hg^{2+}، Cu^{2+} و تیورام از خود نشان داد که حد تشخیص آن‌ها به‌ترتیب ۱۲۲/۰، ۲۹/۰ و ۷۲/۰ نانومولار به‌دست آمد.

در مطالعه‌ای اخیر، ونگ و همکاران[۷۰] ردیاب فلورسانس جدیدی با نام L طراحی کردند که در آن از فلوروفور دانسیل به‌عنوان بخش فلورسانس و تتراپپتید Ala-Ser-Arg-His-NH_2 به‌عنوان گروه تشخیص برای شناسایی ساده گلیفسات(Gly) استفاده شده است. این ردیاب در حضور یون‌های Cu^{2+} با تشکیل کمپلکس $L–Cu^{2+}$ (با نسبت مولی ۲:۱) کاهش قابل توجهی در شدت فلورسانس نشان می‌دهد. گلیفسات به دلیل دارا بودن گروه‌های عاملی آمینو، فسفات و کربوکسیلیک، تمایل بالایی برای کئوردیناسیون با یون‌های Cu^{2+} دارد. بنابراین با اضافه شدن گلیفسات به کمپلکس $L–Cu^{2+}$، یون‌های مس با مولکول گلیفسات برهم‌کنش داده و کمپلکس‌هایی پایدار تشکیل می‌دهند که منجر به بازیابی فلورسانس ردیاب L می‌شود. نکته حائز اهمیت آن است که کمپلکس $L–Cu^{2+}$ پاسخ فلورسانس خاموش–روشن کاملاً اختصاصی نسبت به گلیفسات نشان می‌دهد و حضور سایر آفت‌کش‌ها یا آنیون‌ها در سیگنال فلورسانس تأثیری ندارد. بر این اساس، این سیستم می‌تواند برای شناسایی گلیفسات در نمونه‌های واقعی نظیر شیر، آب هندوانه و نوشابه گازدار با کارایی بالا مورد استفاده قرار گیرد. علاوه بر این، تیم تحقیقاتی ونگ[۷۱] یک ردیاب جدید مبتنی بر تتراپپتید نشاندارشده با فلوئورسئین ایزوتیوسیانات(FITC) طراحی کرده است که قابلیت شناسایی یون‌های مس دو ظرفیتی(Cu^{2+}) و گلیفسات(Gly) را دارد. خاموشی فلورسانس در این ردیاب از طریق مکانیسم خاموشی ایستا[3] صورت می‌گیرد که وابسته به تشکیل کمپلکس بین ردیاب و یون فلزی است. پس از آن، آزمایشهایی جهت انتخاب پذیری برای گلیفسات انجام شد که امکان شناسایی چشمی را در بازه‌ی خطی ۰ تا ۱۲ میکرومولار فراهم کرد. حد تشخیص این سیستم برابر با ۰/۶۳ میکرومولار بوده است و قابلیت اتصال به پلتفرم‌های اندازه گیری مبتنی بر تلفن هوشمند را نیز دارد.

۵-۳- آنتی بیوتیک ها

[1] Signal report unit

[2] Glyphosate

[3] Static quenching

داروهای آنتی‌بیوتیک یکی از گروه‌های مهم دارویی در پزشکی به‌شمار می‌روند که با اثربخشی بالا در درمان عفونت‌های باکتریایی، نقش بسزایی در حفظ سلامت انسان ها و حیوان ها ایفا می‌کنند. با این حال، سوءمصرف و استفاده نادرست از آنتی‌بیوتیک‌ها منجر به بروز نگرانی‌های جدی در حوزه سلامت عمومی شده است. باقی‌مانده‌های آنتی‌بیوتیکی و متابولیت‌های آن‌ها در محصولات غذایی می‌توانند باعث بروز واکنش‌های آلرژیک و حتی تحریک فرآیندهای سرطانی شوند. این مخاطرات، ضرورت پایش مستمر جهت جلوگیری از آلودگی های غذایی به آنتی‌بیوتیک‌ها را به‌روشنی برجسته می‌سازد[۷۲].

در این راستا، تانگ و همکارانش[۵۳] یک حسگر فلورسانس نسبی طراحی کردند که از چارچوب‌های فلزی–آلی و نقاط کوانتومی CdTe برای شناسایی چشمی یون جیوه دو ظرفیتی(Hg^{2+}) به‌عنوان یکی از آلاینده‌های زیست‌محیطی و همچنین باقی‌مانده‌های دارویی نظیر ال–پنی‌سیلامین(L-PA)[1] استفاده شد. در این سیستم، NH_2-MIL-101(Fe) به‌عنوان سیگنال مرجع و نقاط کوانتومی CdTe به‌عنوان سیگنال پاسخ عمل می‌کنند. با افزودن Hg^{2+} به سیستم حسگری، شدت فلورسانس CdTe QDs در طول‌موج ۵۵۴ نانومتر به‌تدریج کاهش می‌یابد که این امر به دلیل واکنش Hg^{2+} با گروه‌های تیول موجود در سطح CdTe QDs است. با حضور L-PA، واکنش بین Hg^{2+} و گروه‌های تیول مختل شده و در نتیجه شدت فلورسانس نقاط کوانتومی CdTe بازیابی می‌شود. این تغییر منجر به تغییر رنگ ردیاب فلورسانس از آبی به سبز می‌شود که به‌راحتی با دوربین گوشی هوشمند قابل ثبت است. نسبت شدت رنگ سبز به آبی(G/B) رابطه خطی معناداری با غلظت L-PA نشان داد و حد تشخیص این روش برابر با ۸/۹۷ نانومولار محاسبه شد.

برای پایش حضور نورفلوکساسین[2](NOR)، ژانگ و همکارانش[۷۳] یک پلتفرم قابل‌حمل مبتنی بر تلفن هوشمند طراحی کردند که امکان اندازه گیری کمی NOR را فراهم می‌سازد. این سامانه از حسگرهای کاغذی فلورسانس چندرنگ استفاده می‌کند که بر پایه مکانیسم پاسخ "روشن–خاموش–روشن" عمل می‌نماید. در این روش، سیگنال فلورسانس نقاط کربنی آبی‌رنگ(BCDs) به‌طور انتخابی توسط یون‌های Fe^{3+} از طریق پدیده جذب درون‌فیلتر(IFE) خاموش می‌شود، در حالی‌که فلورسانس قرمز مربوط به نقاط کربنی قرمز(RCDs) بدون تغییر باقی می‌ماند. با افزودن نورفلوکساسین، رقابت اتصال بین NOR و BCDs باعث جدا شدن یون‌های Fe^{3+} از سطح BCDs می‌شود که در نتیجه‌ی آن، سیگنال فلورسانس آبی بازیابی می‌گردد. در این سیستم، نسبت شدت فلورسانس آبی به قرمز(B/R) با افزایش غلظت NOR افزایش می‌یابد. در محدوده‌ی ۰ تا ۸۰ میکرومولار، این نسبت رابطه‌ی خطی مناسبی با غلظت NOR نشان داده و حد تشخیص این سیستم برابر با ۷/۱۳ میکرومولار محاسبه شده است.

در یک مطالعه دیگر، یک تراشه کاغذی قابل‌حمل با استفاده از فناوری چاپ لیزری و نانوردیاب‌های فلورسانس چندرنگ[3](mCD-μPAD) طراحی شده و امکان شناسایی سریع و در محل سه آنتی‌بیوتیک رایج شامل سولفامتازین(SMZ)، اکسی‌تتراسایکلین(OTC) و کلرامفنیکل(CAP) را فراهم می‌کند. این حسگرها بر اساس مکانیسم خاموشی فلورسانس طراحی شده‌اند؛ به این صورت که نقاط کوانتومی کربنی به آپتامرهای اختصاصی متصل شده‌اند و این مجموعه به نانوورقه‌های MoS_2 متصل می‌شود. در حالت اولیه، به دلیل انتقال انرژی فلورسانس از نقاط کربنی(دهنده) به MoS_2(گیرنده) از طریق پدیدهFRET، سیگنال فلورسانس خاموش می‌شود. با ورود مولکول آنتی‌بیوتیک هدف، آپتامر به‌طور انتخابی به آن متصل شده و این اتصال باعث جدا شدن MoS_2 و در نتیجه، بازیابی سیگنال فلورسانس می‌شود. برای ثبت این تغییرات، از یک جعبه قابل‌حمل ساخته شده با استفاده از چاپ سه‌بعدی به همراه دوربین تلفن همراه استفاده می‌شود، که امکان شناسایی چشمی دقیق این آنتی بیوتیک ها را فراهم می‌کند. تحت شرایط بهینه، زمان پاسخ این سامانه تنها ۱۵ دقیقه بوده و حساسیت آن برای SMZ، OTC و CAP به ترتیب ۰/۴۷، ۰/۴۸ و ۰/۳۴ نانوگرم بر میلی‌لیتر گزارش شده است. همچنین در آزمایش‌های انجام‌شده بر روی نمونه‌های واقعی میگو، بازیابی

[1] L-penicillamine
[2] Norfloxacin
[3] Paper-based Analytical Device(μPAD)

بین ۹۵ تا ۱۰۶ درصد و خطای نسبی کمتر از ۶ درصد بوده که نشان‌دهنده دقت و کارایی بالای این روش است[۱۳].

۵-٤- یونهای مضر

یون‌های مضر مانند سرب(II)، فلورید(I)، جیوه(II) و کادمیوم(II) دارای سمیت بالایی هستند و می‌توانند منجر به مسمومیت‌های حاد یا مزمن شوند. ورود این یون‌ها به بدن از طریق مواد غذایی ممکن است باعث بروز مشکلات جدی سلامتی از جمله آسیب‌های عصبی، اختلال در عملکرد کبد و کلیه و حتی ابتلا به سرطان شود. از این‌رو، پایش دقیق یون‌های مضر، از اهمیت بالایی در حفظ ایمنی غذایی و سلامت عمومی برخوردار است[۷۴].

در مطالعه ای توسط هائو و همکارانش[۷۵]، یک سیستم حسگری چشمی بر اساس فلورسانس نسبت‌سنجی و تلفن هوشمند معرفی شده که از ترکیب نقاط کربنی دوپه‌شده با نیتروژن(N-CDs) و کمپلکس مورین–آلومینیوم با اختصار morin–Al^{3+} ساخته شده است. در این سامانه، N-CDs به‌عنوان سیگنال مرجع و morin–Al^{3+} به‌عنوان سیگنال پاسخ عمل می‌کند. در ابتدا، کمپلکس morin–Al^{3+} باعث خاموشی فلورسانس N-CDs از طریق پدیده جذب درون‌فیلتری می‌شود. با ورود یون فلورید(F^-)، این یون به‌صورت رقابتی با یون آلومینیوم در کمپلکس morin–Al^{3+} وارد واکنش شده و آن را از ترکیب خارج می‌کند. این فرآیند منجر به تضعیف سیگنال فلورسانس morin–Al^{3+} و مهار اثر پدیده جذب درون‌فیلتری شده و در نتیجه، فلورسانس N-CDs مجدداً بازیابی می‌شود. تغییر حاصل در رنگ فلورسانس از سبز به آبی به‌وضوح قابل مشاهده است و با استفاده از دوربین تلفن همراه ثبت شده و تحلیل می‌شود. بدین ترتیب، این پلتفرم امکان شناسایی چشمی، سریع و قابل‌حمل یون فلورید را با دقت بالا فراهم می‌سازد. حد تشخیص این روش ۲/۰۹ میکرومولار گزارش شده است و از این حسگر به‌طور مؤثر در پایش میدانی یون فلورید در نمونه‌های مختلف آب استفاده شده و نتایج رضایت‌بخشی ارائه داده است.

همچنین ونگ و همکارانش، یک حسگر فلورسانس رنگی برای شناسایی یون کادمیوم(Cd^{2+}) طراحی کردند که بر پایه پدیده‌ی نشر القاشده با تجمع(AIE) بود. برای استفاده آسان و تشخیص سریع، نوارهای کاغذی فلورسانس تهیه شدند که با کمک گوشی هوشمند امکان تشخیص میدانی و کمی Cd^{2+} را فراهم می‌کنند[۷۶]. این حسگر با ترکیب نانوخوشه های طلای پایدارشده با گلوتاتیون(AuNCs) که نور نارنجی از خود ساطع می‌کنند به همراه اکسید گرافن اصلاح‌شده با اتیلن‌دی‌آمین (EDA-GO) که دارای نور آبی است، ساخته شده است. سپس یون‌های مس(Cu^{2+}) به این ترکیب افزوده شدند تا نور نارنجی نانوخوشه ها را خاموش کنند؛ در این حالت، نور آبی بدون تغییر باقی می‌ماند و به‌عنوان رنگ مرجع استفاده می‌شود. با ورود یون کادمیوم، ساختار ترکیب تغییر کرده و نانوخوشه ها تجمع می‌یابند که باعث بازگشت نور نارنجی می‌شود. در نتیجه، رنگ حسگر از آبی به قرمز تغییر می‌کند. این تغییر رنگ حتی در غلظت‌های بسیار کم(تا ۳۳/۳ نانومولار) قابل تشخیص است. همچنین، استفاده از نوارهای کاغذی همراه با گوشی هوشمند، امکان شناسایی Cd^{2+} با حد تشخیص ۰/۱ میکرومولار را فراهم می‌کند.

٦- نتیجه‌گیری و چشم‌اندازها

استفاده از روش‌های فلورسانس «روشن–خاموش–روشن» به همراه فناوری تلفن‌های هوشمند، به‌عنوان رویکردی نوین برای پایش آنالیت‌ها مورد توجه قرار گرفته است. این مقاله با بررسی سازوکار فلورسانس «روشن–خاموش–روشن»، مروری بر مواد فلورسانس ارائه کرده و کاربرد این فرآیند در ردیابی و اندازه گیری مواد با کمک تلفن‌های هوشمند را بیان می‌کند. بررسی‌ها نشان می‌دهد حسگرهای قابل‌حمل دارای پتانسیل زیادی در زمینه‌هایی مانند پایش محیط‌زیست، ایمنی غذایی و سلامت انسان هستند. با این حال، چالش‌ها و محدودیت‌هایی در مسیر استفاده از این فناوری‌ها هنوز وجود دارد. به‌منظور استفاده بهتر از این سیستم ها، اقدامات زیر ضروری به نظر می‌رسد:

- تشخیص هم زمان چندآنالیت: در بسیاری از کاربردهای عملی، نیاز به شناسایی همزمان چندین ترکیب وجود دارد. این کار از طریق توسعه ردیاب‌های فلورسانس از طریق افزودن

واحدهای شناسایی متنوع و طراحی هوشمند ساختار مولکولی، امکان‌پذیر است.

- هوشمندسازی: ادغام هوش مصنوعی و الگوریتم‌های یادگیری ماشین، موجب پردازش حجم بالای داده‌های تجربی و شناسایی الگوها می‌شود. این امر دقت و کارایی سیستم‌های تشخیص را می تواند افزایش دهد.

- استفاده از چند حسگر: ترکیب مکانیسم فلورسانس «روشن–خاموش–روشن» با سایر روش‌ها مانند حسگرهای الکتروشیمیایی یا طیف‌سنجی رامان، می‌تواند دقت و کاربردپذیری سیستم‌ها را بهبود بخشد.

- دقت در ثبت سیگنال‌ها: برای تحلیل دقیق تصاویر فلورسانس با تلفن هوشمند، ثبت صحیح داده‌های رنگی مانند مقادیر RGB یا HSV ضروری است. لذا بهبود سخت‌افزار دوربین تلفن همراه و فراهم‌سازی شرایط نوری پایدار حین آزمایش، برای افزایش دقت داده‌های دیجیتال ضروری است.

مراجع

1. M. Alikord, A. Mohammadi, M. Kamankesh, N. Shariatifar, Crit. Rev. Food Sci. Nutr. 62, 4833 (2022).

2. X. Luo, Y. Han, X. Chen, W. Tang, T. Yue, and Z. Li, Trends Food Sci. Technol. 95, 149 (2020).

3. X. Sun, Y. Wang, and Y. Lei, Chem. Soc. Rev. 44, 8019 (2015).

4. S. Bera and S. K. Bhunia, Nanoscale 17, 7193 (2025).

5. S. Wangngae, S. Thisan, S. Kumphune, A. kamkaew, and S. Sutthasupa, Eur. Polym. J. 222, (2025).

6. D. J. Nelson, N. Vasimalai, S. A. John, and M. G. Sethuraman, J. Fluoresc. 35, 1139 (2025).

7. M. Wang, R. Shi, M. Gao, K. Zhang, L. Deng, Q. Fu, L. Wang, and D. Gao, Food Chem. 318, 126506 (2020).

8. A. S. Sharma, S. Ali, D. Sabarinathan, M. Murugavelu, H. Li, and Q. Chen, Compr. Rev. Food Sci. Food Saf. 20, 5765 (2021).

9. R. Iftikhar, I. Parveen, Ayesha, A. Mazhar, M. S. Iqbal, G. M. Kamal, F. Hafeez, A. L. Pang, and M. Ahmadipour, J. Environ. Chem. Eng. 11, 109030 (2023).

10. S. Soares, G. M. Fernandes, and F. R. P. Rocha, TrAC Trends Anal. Chem. 168, 117284 (2023).

11. B. R. Sun, A. G. Zhou, X. Li, and H.-Z. Yu, ACS Sensors 6, 1731 (2021).

12. H. Li, J. Yang, X. Hu, R. Han, S. Wang, and M. Pan, Chem. Eng. J. 473, 145401 (2023).

13. X. Tong, X. Lin, N. Duan, Z. Wang, and S. Wu, ACS Sensors 7, 3947 (2022).

14. D. Song, X. Chen, M. Wang, Z. Wu, and X. Xiao, Chem. Eng. J. 474, 146011 (2023).

15. W. Fu, X. Fu, Z. Li, Z. Liu, and X. Li, Chem. Eng. J. 489, 151225 (2024).

16. Y. Liu, G. Sun, P. Ma, and D. Song, Talanta 271, 125687 (2024).

17. Q. Wang, L. Shi, X. Wang, W. Zhou, and S. Shuang, Spectrochim. Acta Part A Mol. Biomol. Spectrosc. 306, 123573 (2024).

18. Y. Shen, Y. Wei, C. Zhu, J. Cao, and D. M. Han, Coord. Chem. Rev. 458, 214442 (2022).

19. Z. Yuan, Y. Zhang, W. Qu, J. Dong, R. Wang, and L. Jia, Spectrochim. Acta - Part A Mol. Biomol. Spectrosc. 331, (2025).

20. L. Sun, W. Wei, H. Zhang, J. Xu, and X. Zhao, Microchem. J. 174, 107079 (2022).

21. W. Sun, M. Li, J. Fan, and X. Peng, Acc. Chem. Res. 52, 2818 (2019).

22. Y. Gao, J. Qiu, M. Liu, X. Xiong, and H. Zhu, Chem. Eng. J. 466, 143100 (2023).

23. L. Wu, C. Huang, B. P. Emery, A. C. Sedgwick, S. D. Bull, X. P. He, H. Tian, J. Yoon, J. L. Sessler, and T. D. James, Chem. Soc. Rev. 49, 5110 (2020).

24. J. Zhang, R. Zhou, D. Tang, X. Hou, and P. Wu, TrAC Trends Anal. Chem. 110, 183 (2019).

25. J. Wu, A. Wang, P. Liu, Y. Hou, L. Song, R. Yuan, and Y. Fu, Sensors Actuators B Chem. 321, 128531 (2020).

26. X. Ma, W. Chi, X. Han, C. Wang, S. Liu, X. Liu, and J. Yin, Chinese Chem. Lett. 32, 1790 (2021).

27. N. Sinha and O. S. Wenger, J. Am. Chem. Soc. 145, 4903 (2023).

28. A. K. Verma, A. Noumani, A. K. Yadav, and P. R. Solanki, Diagnostics 13, (2023).

29. T. T. Trang, T. T. H. Pham, N. Van Dang, P. T. Nga, M. Van Linh, and X. H. Vu, RSC Adv. 14, 9538 (2024).

30. C. R. Kagan, L. C. Bassett, C. B. Murray, and S. M. Thompson, Chem. Rev. 121, 3186 (2021).

31. W. Fu, H. Cao, and A. K. Cheetham, Adv. Opt. Mater. 11, (2023).

32. S. Mondal, S. R. Das, L. Sahoo, S. Dutta, and U. K. Gautam, J. Am. Chem. Soc. 144, 2580 (2022).

33. R. Gui, H. Jin, Z. Wang, and J. Li, Chem. Soc. Rev. 47, 6795 (2018).

34. X. Cheng, E. Hinde, D. M. Owen, S. B. Lowe, P. J. Reece, K. Gaus, and J. J. Gooding, Adv. Mater. 27, 6144 (2015).

35. Y. Bai, M. Hao, S. Ding, P. Chen, and L. Wang, Adv. Mater. 34, (2022).

36. Aruna, V. P. Verma, A. P. Singh, and R. Shrivastava, J. Mol. Struct. 1295, 136549 (2024).

37. T. Zhang, Y. Liu, J. Li, W. Ren, and X. Dou, Sensors Actuators B Chem. 379, 133261 (2023).

38. M. Oguz, S. Erdemir, and S. Malkondu, Anal. Chim. Acta 1227, 340320 (2022).

39. Y. Xiao, Z. Wu, Q. Yao, and J. Xie, Aggregate 2, 114 (2021).

40. J. Yang, Y. Peng, S. Li, J. Mu, Z. Huang, J. Ma, Z. Shi, and Q. Jia, Coord. Chem. Rev. 456, 214391 (2022).

41. T. Song, Z. Liu, Q. Yun, X. Zhang, K. Yuan, and W. Hu, TrAC - Trends Anal. Chem. 171, (2024).

42. Y. Cai, T. Dong, Z. Bian, H. Liu, X. Liu, and A. Liu, Coord. Chem. Rev. 529, (2025).

43. G. D. Wang, Y. Z. Li, W. J. Shi, B. Zhang, L. Hou, and Y. Y. Wang, Sensors Actuators B Chem. 331, 129377 (2021).

44. X. Chen, J. Xu, Y. Li, L. Zhang, N. Bi, J. Gou, T. Zhu, and L. Jia, Food Chem. 405, 134899 (2023).

45. H. B. Wang, B. B. Tao, A. L. Mao, Z. L. Xiao, and Y. M. Liu, Sensors Actuators B Chem. 348, 130729 (2021).

46. T. Qin, X. Zhao, C. Song, T. Lv, S. Chen, Z. Xun, Z. Xu, Z. Zhang, H. Xu, C. Zhao, B. Liu, and X. Peng, Chem. Eng. J. 451, 139022 (2023).

47. X. Tian, L. C. Murfin, L. Wu, S. E. Lewis, and T. D. James, Chem. Sci. 12, 3406 (2021).

48. J. Xu, W. Yang, and Y. Liu, ACS Appl. Mater. Interfaces 15, 27065 (2023).

49. F. Song, X. Peng, E. Lu, R. Zhang, X. Chen, and B. Song, J. Photochem. Photobiol. A Chem. 168, 53 (2004).

50. Q. Luo, W. Wang, J. Tan, and Q. Yuan, Chinese J. Chem. 39, 1009 (2021).

51. A. Kumari, A. Sharma, U. Malairaman, and R. R. Singh, J. Lumin. 199, 174 (2018).

52. S. Tang, Y. Wang, G. Guo, T. Li, H. Xing, H. Hu, X. Leng, C. Gu, and D. Chen, Sci. Total Environ. 872, 162277 (2023).

53. K. Tang, Y. Chen, S. Tang, X. Wu, P. Zhao, J. Fu, H. Lei, Z. Yang, and Z. Zhang, Sci. Total Environ. 856, (2023).

54. T. Liu, L. Fu, C. Yin, M. Wu, L. Chen, and N. Niu, Microchem. J. 174, 107016 (2022).

55. E. M. Khalaf, H. Sanaan Jabbar, R. Mireya Romero-Parra, G. Raheem Lateef Al-Awsi, H. Setia Budi, A. S. Altamimi, M. Abdulfadhil Gatea, K. T. Falih, K. Singh, and K. A. Alkhuzai, Microchem. J. 190, (2023).

56. X. Gao, X. Zhou, Y. Ma, T. Qian, C. Wang, and F. Chu, Appl. Surf. Sci. 469, 911 (2019).

57. M. Doseděl, E. Jirkovský, K. Macáková, L. K. Krčmová, L. Javorská, J. Pourová, L. Mercolini, F. Remião, L. Nováková, and P. Mladěnka, Nutrients 13, 1 (2021).

58. C. Li, X. Xu, F. Wang, Y. Zhao, Y. Shi, X. Zhao, and J. Liu, Food Chem. 402, 134222 (2023).

59. G. T. XU, T. S. ZHAO, K. ZHANG, L. Z. GUO, Y. Q. HE, J. H. HU, Y. J. LIAO, X. MAI, and N. LI, Chinese J. Anal. Chem. 51, 100206 (2023).

60. P. Wang, X. Cao, S. Xue, Z. Wang, Y. Zhou, and J. Wu, Microchem. J. 207, (2024).

61. Y. Ma, B. Zhang, S. Wei, J. Xu, J. Wang, and T. Li, Sensors Actuators B Chem. 358, 131487 (2022).

62. P. Wei, L. Xiao, Y. Gou, F. He, and P. Wang, Spectrochim. Acta Part A Mol. Biomol. Spectrosc. 290, 122290 (2023).

63. H. Wu, R. Xie, Y. Hao, J. Pang, H. Gao, F. Qu, M. Tian, C. Guo, B. Mao, and F. Chai, Food Chem. 418, 135961 (2023).

64. Z. Han, D. Nan, H. Yang, Q. Sun, S. Pan, H. Liu, and X. Hu, Sensors Actuators B Chem. 298, 126842 (2019).

65. C. Zhang, M. Liang, C. Shao, Z. Li, X. Cao, Y. Wang, Y. Wu, and S. Lu, ACS Appl. Bio Mater. 6, 1283 (2023).

66. C. Li, W. Zhang, X. Xu, and L. Zhou, J. Agric. Food Chem. 73, 4982 (2025).

67. Z. Lu, J. Li, K. Ruan, M. Sun, S. Zhang, T. Liu, J. Yin, X. Wang, H. Chen, Y. Wang, P. Zou, Q. Huang, J. Ye, and H. Rao, Chem. Eng. J. 435, 134979 (2022).

68. S. Chu, H. Wang, X. Ling, S. Yu, L. Yang, and C. Jiang, ACS Appl. Mater. Interfaces 12, 12962 (2020).

69. S. Erdemir, M. Oguz, and S. Malkondu, J.

Hazard. Mater. 452, 131278 (2023).

70. P. Wei, L. Xiao, P. Hou, Q. Wang, and P. Wang, Anal. Bioanal. Chem. 415, 5985 (2023).

71. L. Xiao, P. Wei, X. Yang, and P. Wang, Microchem. J. 193, 109084 (2023).

72. S. Hernando-Amado, T. M. Coque, F. Baquero, and J. L. Martínez, Nat. Microbiol. 4, 1432 (2019).

73. J. Zhang, J. Wang, F. Ouyang, Z. Zheng, X. Huang, H. Zhang, D. He, S. He, H. Wei, and C. Y. Yu, Anal. Chim. Acta 1279, 341837 (2023).

74. M. Xiao, Z. Liu, N. Xu, L. Jiang, M. Yang, and C. Yi, ACS Sensors 5, 870 (2020).

75. Y. Hao, W. Dong, Y. Liu, X. Wen, S. Shuang, Q. Hu, C. Dong, and X. Gong, J. Hazard. Mater. 439, 129596 (2022).

76. H. Wang, L. Da, L. Yang, S. Chu, F. Yang, S. Yu, and C. Jiang, J. Hazard. Mater. 392, 122506 (2020).

شیمی و نانوشیمی (پژوهش های شیمیایی و نانومواد سابق)
Chemistry & Nanochemistry
https://sanad.iau.ir/journal/crn
ISSN:3060-7442

Smartphone-based fluorescent sensors for food safety detection

Fatemeh Sedaghati*

Estahban Higher Education Center- Shiraz University, Estahban, Iran.

Abstract: Food safety is one of the most critical public health issues, directly affecting human health and well-being. In today's world, with the expansion of the food supply chain and growing concerns over microbial, chemical, and biological contamination, there is an increasing need for rapid, accurate, and reliable methods to monitor food safety and quality. In this regard, smartphone-based sensors have emerged as an innovative and cost-effective solution. These sensors, leveraging the advanced imaging and image-processing capabilities of smartphones, enable the quick and precise detection of contaminants and harmful substances. Fluorescence sensors operating via an "on–off–on" mechanism have attracted significant attention due to their high sensitivity and excellent selectivity. This article provides a comprehensive review of smartphone-based sensing platforms that utilize the "on–off–on" fluorescence mechanism, introducing common fluorescent materials and the principles behind their design. In addition, recent applications of these sensors in food safety detection, along with current challenges and future development directions, are discussed.

Keywords: Fluorescent sensors, Portable platform, Food safety, Smartphone.

*Correspondent Author Email: *fsedaghati2013@gmail.com* (*f.sedaghati@saadi.shirazu.ac.ir*)

Summer2025 | Volume4 | Issue 2 | pages 51-66

https://doi.org/10.71508/crn.2025.140405161214258