



کاربردهای نقاط کوانتومی کربن در تشخیص و بسته‌بندی مواد غذایی

شب‌نام سیستانی^{۱*}، هاجر شکرچی‌زاده^۲

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران.

۲- دانشیار گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران.

اطلاعات مقاله	چکیده
تاریخ های مقاله : تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۱/۱۵ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۳/۳۰	نقاط کوانتومی کربن نسل جدیدی از نانو ذرات کربن هستند که به علت دارا بودن خصوصیات منحصر به فرد همچون ویژگی‌های فلورسانس عالی، سنتز آسان، زیست‌سازگاری مناسب، گروه‌های عملکردی فراوان و سمیت پایین پتانسیل خوبی برای آنالیز مواد غذایی و استفاده در بسته‌بندی‌ها دارند. امروزه نقاط کوانتومی کربن به دلیل عدم سمیت جایگزین نقاط کوانتومی نیمه هادی شده‌اند. استفاده از نقاط کربن در مواد بسته‌بندی به دلیل دارا بودن خاصیت آنتی‌اکسیدانی، ضد میکروبی و سدکنندگی سبب افزایش زمان نگهداری محصول، کاهش رشد میکروارگانیسم‌ها، بهبود ویژگی‌های مکانیکی، ایجاد مانع در برابر گازها، نور ماورای بنفش و کاهش ضایعات غذایی می‌شود. هدف این مقاله آشنایی با نقاط کوانتومی کربن، روش‌های سنتز و بررسی ویژگی نوری آن‌ها می‌باشد. سپس اصول طراحی حسگر فلورسانس شامل مکانیسم پوشش و بازیابی فلورسانس و کاربرد آن‌ها در نمونه‌های غذایی جهت تشخیص افزودنی‌های غذا، پاتوژن‌ها، بقایای آنتی‌بیوتیک‌ها، حشره‌کش‌ها، فلزات سنگین و مواد تغذیه‌ای مورد بررسی قرار خواهد گرفت. در نهایت، کاربرد نقاط کربن در بسته‌بندی‌های بهبود یافته، فعال، هوشمند و بسته‌بندی زیستی بیان خواهد شد.
کلمات کلیدی: بسته‌بندی، نانوحسگر، نقاط کوانتومی کربن، فلورسانس.	
DOI: 10.22034/FSCT.19.127.193 DOR: 20.1001.1.20088787.1401.19.127.22.5	
* مسئول مکاتبات: Shabnam668.ss@gmail.com	

۱- مقدمه

۲- معرفی نقاط کوانتومی کربن

نقاط کوانتومی کربن برای اولین بار در سال ۲۰۰۴ توسط زو و همکارانش از طریق الکتروفورز در طی خالص‌سازی نانولوله‌های کربنی تک دیواره کشف شدند. نقاط کوانتومی کربن، دسته جدیدی از نانو مواد کربن‌دار صفر بعدی می‌باشند که دارای شکل کروی و اندازه کمتر از ۱۰ نانومتر هستند. همانند سایر نقاط کوانتومی نیمه هادی متداول، مزیت مهم آن‌ها نسبت به رنگ‌های آلی، پایداری نوری بالا می‌باشد. همچنین برخلاف سایر نقاط کوانتومی، نقاط کوانتومی کربن معمولاً سمیت پایین و زیست‌سازگاری خوبی دارند [۵]. از لحاظ ساختار شیمیایی، اتم کربن sp^2 و sp^3 به عنوان هسته در پوسته‌های آمورف متشکل از گروه‌های عملکردی قرار گرفته است. همانگونه که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، گروه‌های عملکردی هیدروکسیل و کربوکسیل بسیاری روی سطح نقاط کربن حضور دارند که باعث حلالیت خوب در آب و سهولت عامل‌دار کردن توسط گونه‌های مختلف می‌شوند. مقدار اکسیژن نقاط کوانتومی کربن بین ۵ تا ۵۰ درصد وزن متغیر می‌باشد که به روش سنتز بستگی دارد [۶].

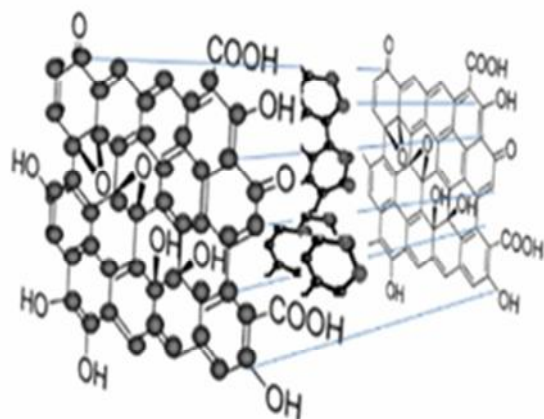


Fig 1 Chemical structure of carbon dots [7]

۳- سنتز نقاط کوانتومی کربن

به منظور تأمین منبع کربن در سنتز نقاط کوانتومی کربن، علاوه بر مواد توده‌ای بر پایه کربن می‌توان از پیش‌سازهای مولکولی کوچک، زیست توده‌ها، پلیمرهای طبیعی و مصنوعی استفاده کرد

نقاط کوانتومی کربن نسل جدیدی از نانو ذرات کربن می‌باشند که به علت مزیت‌های فراوان جهت اهداف آنالیز و بسته‌بندی در صنعت غذا بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند [۱]. آنالیز مواد غذایی جهت ارزیابی کیفیت و همچنین کنترل ایمنی، ضروری می‌باشد. از روش‌های متداول آنالیز می‌توان به طیف‌سنجی، ارزیابی ایمنی، کشت و شمارش کلنی، کروماتوگرافی، رزونانس مغناطیس هسته‌ای و روش‌های الکتروشیمیایی اشاره کرد. مزایای این روش‌ها شامل تکرارپذیری، حساسیت و انتخاب‌پذیری بالا می‌باشد. این روش‌ها نیازمند تجهیزات گران‌قیمت، افراد آموزش دیده و جداسازی‌های طولانی مدت می‌باشد. در مقایسه با روش‌های آنالیز متداول، آنالیز بر پایه فلورسانس دارای مزایایی از قبیل سادگی، حساسیت بالا، هزینه کم و تجهیزات ساده می‌باشد [۲]. رنگ‌های فلورسنت آلی و نقاط کوانتومی به طور متداول برای آنالیز فلورسانس مورد استفاده قرار می‌گیرند ولی به علت معایبی که دارند کاربرد آن‌ها در صنعت غذا محدود شده است. رنگ‌های فلورسنت آلی به راحتی رنگبری نوری شده و نقاط کوانتومی نیمه‌هادی به دلیل داشتن فلزات سنگین، سمیت بالایی دارند [۳]. از طرف دیگر، یکی از چالش‌های جدی امنیت مواد غذایی، آسب، آلودگی یا از بین رفتن مواد غذایی در حین نگهداری و حمل و نقل آن‌ها می‌باشد. برای حل این مشکل بسته‌بندی‌های جدید در حال توسعه هستند. ترکیب نقاط کوانتومی کربن در مواد بسته‌بندی می‌تواند خواص مکانیکی و سدکنندگی آن‌ها را بهبود ببخشد. تحقیقات متعددی درباره استفاده از نقاط کوانتومی کربن به عنوان افزودنی‌های آنتی‌اکسیدانی، ضد میکروبی و سدکنندگی نور UV در مواد بسته‌بندی برای کاهش تخریب شیمیایی و مهار رشد میکروارگانیسم‌های بیماریزا و عامل فساد وجود دارد که نشان‌دهنده پتانسیل عالی آن‌ها برای کاربرد در بسته‌بندی‌ها می‌باشد [۴]. هدف این مقاله آشنایی با نقاط کوانتومی کربن و بررسی پتانسیل آن‌ها جهت آنالیز مواد غذایی و کاربرد در بسته‌بندی مواد غذایی می‌باشد.

مولکول‌های مختلف باعث تغییر جذب به طول موج‌های بلندتر می‌شود [۱۲].

۴-۲- نشر فلورسانس

مهم‌ترین ویژگی نوری نقاط کربن، نشر فلورسانس می‌باشد. مکانیسم‌های اثر اندازه کوانتومی، نقص حالات سطحی و حالات مولکولی پدیده نشر فلورسانس را توجیه می‌کنند [۱۳]. اثر اندازه کوانتومی به تاثیر اندازه بر روی ترکیب تابشی جفت الکترون- حفره اشاره می‌کند و در صورتی که نقاط کربن کوچکتر از شعاع اکسایتون بور باشند، ایجاد می‌شود. نقاط کربن که دارای حوزه‌های π با اندازه محدود هستند، باند ظرفیت از باند هدایت جدا شده و الکترون‌های باند هدایت مستقیماً به فضای خالی در باند ظرفیت منتقل می‌شوند که در نتیجه آن امکان ترکیب الکترون- حفره و نشر فلورسانس فراهم می‌شود. در نقاط کربن خوشه‌های کربنی sp^2 در اسکلت کربن sp^3 پراکنده شده‌اند بنابراین ویژگی نوری آن توسط حالت الکترونی π در خوشه کربنی sp^2 مشخص می‌شود. از آنجا که سطح انرژی الکترون π و π^* در خوشه کربن sp^2 تحت تاثیر حالات σ و σ^* در اسکلت کربنی sp^3 می‌باشد، انتقال تابش جفت الکترون- حفره در خوشه کربن sp^2 می‌تواند باعث نشر فلورسانس شود [۱۴].

مکانیسم حالت مولکولی بیان می‌کند که سطح نقاط کربن، اصولاً از کربن و اکسیژن تشکیل شده و در این نوع ساختار باند شکاف کاملاً بستگی به اکسیژن دارد به گونه‌ای که با افزایش تعداد اتم اکسیژن در سطح نقاط کربن، باند شکاف باریک‌تر می‌شود و فلورسانس به سمت طول موج‌های بلندتر تغییر می‌کند [۱۵].

مکانیسم دیگر برای نشر فلورسانس، نقص حالات سطحی می‌باشد. نقص سطحی به ناحیه مرزی یا پوسته کروی گفته می‌شود که از ناحیه هسته کربن متمایز شده و شامل گروه‌های شیمیایی مختلف مانند کربن‌های sp^2 ، sp^3 و دیگر گروه‌های عملکردی می‌باشد. به طور کلی نقص سطحی توسط اکسیداسیون سطحی ایجاد شده و به عنوان یک مرکز حفره برای اکسایتون عمل می‌کند. هر چه درجه اکسیداسیون سطحی بالاتر باشد، نواقص سطحی و جایگاه انتشار بیشتری شکل گرفته و در نتیجه آن طول موج منتشر شده به سمت طول موج بلند تغییر می‌یابد

[۸]. روش‌های سنتز، بر اساس رابطه اندازه بین پیش‌ساز و نقاط کربن به دو دسته بالا به پایین و پایین به بالا تقسیم می‌شوند. در روش بالا به پایین، نانوذرات کربنی از تجزیه ساختارهای کربنی نسبتاً بزرگ شکل می‌گیرند. از تیمارهای این روش می‌توان به سایش لیزر، اولتراسونیک، اکسیداسیون الکتروشیمیایی و تخلیه قوس الکتریکی اشاره کرد. بیشتر روش‌های سنتز مبتنی بر روش بالا به پایین جهت تهیه نقاط کربن در مقیاس بزرگ مناسب نیستند چون دارای معایبی از جمله عملکرد کوانتومی پایین، شرایط واکنش سخت، تجهیزات پیچیده و گران‌قیمت می‌باشند [۹]. در روش پایین به بالا، نقاط کربن به عنوان مواد کربنی توده‌ای از تغییر ذرات پیش‌ساز به وسیله روش‌های فیزیکی و شیمیایی مانند هیدروترمال، سولوترمال، مایکروویو و پیرولیز حرارتی شکل می‌گیرند. این روش دارای مزایایی از قبیل سهولت عملیات، هزینه کم و کنترل دقیق مولکول‌های پیش‌ساز می‌باشد که باعث توجه ویژه محققین به این روش برای سنتز نقاط کربن شده است [۱۰].

۴-۳ ویژگی‌های نوری نقاط کربن

نقاط کربن با وجود ساختارهای مختلف، دارای ویژگی‌های نوری مشابه مانند جذب و انتشار فلورسانس هستند که اغلب برای کاربردهای بیشتر مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. همچنین عملکرد کوانتومی جهت ارزیابی بازده فلورسانس نقاط کربن سنتز شده قابل توجه می‌باشد [۱۱].

۴-۱- جذب

نقاط کربن عموماً جذب نور آشکاری در ناحیه فرابنفش و شدت جذب کمتری در ناحیه مرئی و نزدیک فرو سرخ دارند. اکثر نقاط کربن بدون در نظر گرفتن روش سنتز دارای دو پیک جذب می‌باشند که پیک در محدوده ۲۳۰-۲۷۰ نانومتر به انتقال $\pi-\pi^*$ از $C=C$ و پیک در ۳۰۰-۳۳۰ نانومتر به انتقال $n-\pi^*$ از $C=O$ نسبت داده می‌شود. روش سنتز و گروه‌های عاملی سطحی نقش مهمی در تعیین طول موج جذبی نقاط کربن دارند به گونه‌ای که نقاط کربن سنتز شده با روش‌های مختلف، ویژگی‌های جذبی متفاوتی از خود نشان می‌دهند. اصلاح سطحی نقاط کربن با

[۱۴]

۴-۳- عملکرد کوانتومی

تعداد فوتون‌های منتشر شده به تعداد فوتون‌های جذب شده را عملکرد کوانتومی می‌گویند که یکی از معیارهای مهم برای سنجش عملکرد نوری نقاط کربن می‌باشد [۱۶]. نقاط کربن سنتز شده از پیش‌سازهای متداول دارای گروه‌های خارج‌کننده الکترون مانند کربوکسیلیک و اپوکسی هستند که تراکم الکترون را کاهش داده و نقاط کربن با عملکرد نسبتاً پایین تولید می‌کند. برای استفاده از نقاط کربن در کاربردهای واقعی، عملکرد کوانتومی بالا نیاز است. به همین دلیل مطالعات بسیاری برای بهبود عملکرد کوانتومی اختصاص یافته که می‌توان به اصلاح شیمیایی سطح و دوپینگ با اتم‌های مختلف اشاره کرد [۱۷].

۵- تنظیم شیمیایی سطح

عملکرد کوانتومی پایین و فقدان گروه‌های عملکردی برای پیوند سطحی با واحدهای تشخیص از چالش‌های اساسی نقاط کربن برای استفاده در برنامه‌های کاربردی می‌باشد. رویکردهای تنظیم شیمیایی سطح با تعدیل گروه‌های شیمیایی سطحی یا شبکه $\pi-\pi$ و همچنین تنظیم درجه اکسیداسیون سطحی، می‌تواند باعث بهبود ویژگی‌های فلورسانس شوند [۲].

۵-۱- اصلاح شیمیایی سطح

در اصلاح شیمیایی، گونه‌های مختلف آلی و پلیمرها بر روی سطح نقاط کربن قرار می‌گیرند. به طور دقیق‌تر می‌توان گفت فرایند اصلاح شیمیایی سطح باعث حذف پراکندگی حامل‌های القاکننده نوری از جایگاه سطحی می‌شوند بنابراین تابش ترکیبی کارآمدتری ایجاد شده و ویژگی‌های فلورسانس بهبود پیدا می‌کند. یکی از روش‌های اصلاح شیمیایی سطحی، اکسیداسیون با استفاده از اسیدهای غلیظ برای ایجاد گروه‌های متنوع اکسیژن مانند هیدروکسیل، کربوکسیل و کربونیل بر روی نقاط کربن می‌باشد [۱۸]. گروه‌های عملکردی حاوی اکسیژن، باعث ترکیب الکترون-حفره و ایجاد تله انتشار سطحی می‌شوند و بسته به درجه اکسیداسیون، نشر فلورسانس تغییر می‌یابد [۱۹].

که طی سنتز و یا بعد از آن روی سطح نقاط کربن قرار می‌گیرند. در این فرایند، گروه‌های اپوکسی و کربوکسیلیک اسید که روی سطح نقاط کربن قرار دارند و باعث ترکیب غیر تابشی جفت الکترون-حفره می‌شوند با گروه‌های CNHR و CONHR جایگزین می‌شوند. گروه‌های جدید دارای آمین، تله انرژی نشر را روی سطح تثبیت می‌کنند. بنابراین نقاط کربن که با آمین اصلاح شده‌اند، عملکرد کوانتومی بالاتری در مقایسه با گروه‌های حاوی اکسیژن دارند [۲۰].

پوشاندن نقاط کربن با پلیمرها باعث افزایش طول عمر انتشار، بهبود ویژگی‌های فلورسانس و افزایش عملکرد کوانتومی می‌شود. اصلاح شیمیایی با پلیمرها باعث می‌شود که گروه‌های سطحی حساس و واکنش‌پذیر نقاط کربن در زیر لایه‌ای از پلیمر محافظت شود در نتیجه پایداری آن‌ها افزایش پیدا کند. از پلیمرهای متداولی که برای اصلاح شیمیایی استفاده می‌شوند می‌توان به پلی‌اتیلن گلاکول، پلی‌اتیلن آمین و پلی‌وینیل الکل اشاره کرد [۲۱].

۵-۲- دوپینگ با اتم‌های مختلف

یک رویکرد موثر برای تنظیم ساختار ذاتی نقاط کربن، دوپینگ با اتم‌های مختلف می‌باشد که به دو دسته دوپینگ با عناصر فلزی (F, B, P, S, N) و غیرفلزی (Mn, Zn, Cu) تقسیم می‌شود. دوپینگ از طریق تغییر ساختار سطحی و توزیع الکترون ویژگی‌های فلورسانس را تحت تاثیر قرار می‌دهد به گونه‌ای که با تنظیم میزان و نوع اتم دوپانت، می‌توان پیک نشر را تغییر داد و باعث افزایش راندمان فلورسانس شد. دوپانت‌های عناصر غیرفلزی مانند نیتروژن و سیلیکون باعث بهبود عملکرد کوانتومی می‌شوند در حالی که دوپانت‌های عناصر فلزی مانند مس و منگنز جهت تعدیل ساختار باندهای نقاط کربن مورد استفاده قرار می‌گیرند [۲۲]. با توجه به حامل بار (الکترون یا حفره)، انواع دوپینگ شامل نوع n و p می‌شود. در دوپینگ نوع n، دوپانت‌هایی مانند S, P, N و غیره الکترون اضافی را اهدا می‌کنند در حالیکه در دوپینگ نوع p دوپانت‌هایی مانند B حفره اضافی برای میزبان ایجاد می‌کنند [۱۸]. به دلیل شباهت زیاد بین نیتروژن و کربن، دوپینگ با نیتروژن به طور گسترده برای بهبود ویژگی‌های فلورسانس نقاط کربن مورد استفاده قرار می‌گیرد. اتم

پوشاننده، سطح تهییج در اثر انتقال بار یا انرژی به سطح پایه بر می‌گردد. در مقایسه با پوشش استاتیک برخی ویژگی‌ها متفاوت می‌باشند:

۱- طول عمر نقاط کربن در حضور و غیاب پوشاننده تغییر می‌کند.

۲- پوشش دینامیک فقط سطوح تهییج نقاط کربن را تحت تاثیر قرار می‌دهد بنابراین هیچ تغییری در طیف جذبی نقاط کربن مشاهده نمی‌شود.

۳- افزایش دما باعث افزایش اثر پوشش دینامیک می‌شود [۲۵].
FRET یک فرایند انتقال انرژی غیرتابشی است که در طی آن انرژی از طریق تهییج فلورسانس از یک مولکول (اهداننده) به مولکول مجاور (گیرنده) منتقل می‌شود. اولین شرط در این مکانیسم، همپوشانی طیف نشر اهداننده و طیف جذب گیرنده می‌باشد. انتقال انرژی در سطح تهییج اهدا کننده اتفاق می‌افتد که منجر به پوشش فلورسانس و کوتاه شدن طول عمر فلورسانس اهداننده می‌شود. از آنجا که این مکانیسم حاصل تعاملات وسیع دوقطبی- دوقطبی بین اهداننده و گیرنده می‌باشد، میزان اثر آن به جهت‌گیری نسبی انتقال دو قطبی در اهداننده و گیرنده بستگی دارد و وجود فاصله ۱-۱۰ نانومتر بین آن‌ها ضروری می‌باشد [۲۶].

IFE، تبدیل انرژی غیرتابشی می‌باشد که در آن نور منتشر شده یا تهییج شده توسط جاذب در سیستم تشخیص جذب می‌شود. در این مکانیسم طیف جذب جاذب با طیف نشر و یا تهییج نقاط کربن همپوشانی دارد. در این فرایند پیک جذب و طول عمر فلورسانس نقاط کربن تغییر نخواهد کرد زیرا تنها پوشش نشر اتفاق می‌افتد و ترکیب جدیدی تولید نمی‌شود [۲۷].

مکانیسم پوشش PET بیان می‌کند که بین نقاط کربن و پوشاننده انتقال الکترون اتفاق افتاده و رادیکال کاتیون یا آنیون شکل می‌گیرد. در این فرایند ترکیب ایجاد شده از انتقال الکترون بین گیرنده و دهنده الکترون، بدون انتشار نور به حالت پایه برمی‌گردد. بسته به نقش نقاط کربن، می‌توان این مکانیسم را به دو دسته اکسایشی و کاهش‌ی تقسیم کرد. در PET کاهش‌ی، نقاط کربن به عنوان گیرنده الکترون، الکترون را از دهنده دریافت می‌کنند. در PET اکسایشی، الکترون‌ها توسط نقاط کربن فعال

نیترژن، الکترون را به داخل نقاط کربن تزریق می‌کند و باعث تغییر محیط الکترونیکی داخلی و بهبود خواص فلورسانس می‌شود [۲۳].

۶- اصول طراحی حسگر فلورسانس

اصول تشخیص حسگر فلورسانس بر مبنای هر گونه تغییر در فلورسانس (شدت، طول موج و طول عمر) می‌باشد که این تغییرات با غلظت آنالیت مرتبط است. به طور کلی، طراحی حسگر فلورسانس بر پایه نقاط کربن شامل ۳ استراتژی می‌باشد:

- ۱- تعامل مستقیم آنالیت با نقاط کربن که منجر به تغییر سیگنال فلورسانس می‌شود.
- ۲- از طریق اصلاح نقاط کربن، گیرنده‌های خاص جهت ترکیب با آنالیت ایجاد می‌شود.
- ۳- ترکیب نقاط کربن با سایر حسگرها مانند فلوروفورها و پوشاننده فلورسانس انجام می‌شود [۲۴].

۶-۱- حسگر بر مبنای پوشش فلورسانس

در این دسته از حسگرها، فلورسانس نقاط کربن توسط آنالیت‌های آلی و غیرآلی پوشیده می‌شود. مکانیسم‌های پوشش در نقاط کربن شامل پوشش استاتیک، پوشش دینامیک، اثر فیلتر داخلی^۱ (IFE)، انتقال انرژی رزونانس فورستر^۲ (FRET) و انتقال الکترون تابشی^۳ (PET) می‌باشد. در پوشش استاتیک در اثر واکنش بین نقاط کربن و پوشاننده، سطح پایه غیر فلورسنت ایجاد می‌شود و ترکیب جدید بدون انتشار نور سریعاً به حالت پایه بر می‌گردد. در پوشش استاتیک:

- ۱- تغییر عمر فلورسانس در حضور و غیاب پوشاننده ناچیز می‌باشد.
- ۲- تشکیل سطح پایه جدید باعث تغییر طیف جذب نقاط کربن می‌شود.
- ۳- افزایش دما باعث کاهش پایداری سطح پایه و در نتیجه کاهش اثر پوشش استاتیک می‌شود.

پوشش دینامیک بیان می‌کند که در اثر برخورد نقاط کربن و

1. Inner filter effect
2. Förster resonance energy transfer
3. Photoinduced electron transfer

شده و به پوشاننده منتقل می‌شوند [۲۵].

۶-۲- حسگر بر مبنای بهبود فلورسانس

در این گروه از حسگرها، نقاط کربن در غیاب آنالیت فاقد فلورسانس یا فلورسانس ضعیف بوده و حضور آنالیت باعث بهبود فلورسانس آن‌ها می‌شود. مکانیسم‌های بهبود ناشی از تجمع (AIE)^۱ و بهبود ناشی از فلز (MEF)^۲ می‌توانند این پدیده را توجیه کنند [۲].

مکانیسم MEF به علت رزونانس پلاسمای سطحی می‌باشد که در اثر واکنش بین نقاط کربن و سطح نانو ساختارهای فلزی ایجاد می‌شود. پلاسمون سطحی به شبه ذراتی اطلاق می‌شود که در اثر نوسانات الکترونی به ارتباط بین دو ماده محدود شده‌اند. رفتار دو قطبی نقاط کربن باعث نوسان الکترون روی سطح فلز و در نتیجه پلاسمون سطحی می‌شود. پلاسمون سطحی با نور نزدیک فلز واکنش برقرار می‌کند و به علت تشدید پلاسمای سطحی، پلاریتون سطحی ایجاد می‌شود. سطح فلزی نانو ساختارها می‌تواند به پلاسمون نزدیک سطح آن محدود شود که به آن پلاسمون سطحی موضعی گفته می‌شود. پلاسمون سطحی موضعی که با پلاریتون سطحی اتصال برقرار کرده باعث افزایش میدان الکترومغناطیسی و در نتیجه افزایش میزان تهییج نقاط کربن و بهبود فلورسانس می‌شود. برای بهبود فلورسانس مطابق این مکانیسم فاصله بین نقاط کربن و نانو ساختار فلزی بایستی بین ۱۰-۲۰۰ نانومتر باشد [28].

مکانیسم AIE اشاره به بهبود فلورسانس در اثر تجمع مولکول یا نانو ذرات فلورسانس دارد. تجمع مواد فلورسانس، مانع ارتعاشات گروه‌های سطحی شده و همچنین اندازه اوربیتال π افزایش می‌یابد که در نتیجه آن میزان انرژی غیرتابشی کاهش و میزان تابش فلورسانس افزایش می‌یابد [29].

۶-۳- حسگر اصلاح شده با پلیمر قالب مولکولی (MIP)^۳

یک روش عملی برای بهبود انتخاب‌پذیری نانوحسگرهای فلورسانس، استفاده از تکنولوژی قالب مولکولی می‌باشد. این

تکنولوژی، استراتژی‌های لازم برای به دست آوردن پلیمر سه بعدی با جایگاه تشخیص مناسب را ارائه می‌دهد. در این دسته از حسگرها می‌توان از انتخاب‌پذیری بالای پلیمر قالب مولکولی و حساسیت بالای تشخیص فلورسانس نقاط کربن بهره برد [۳۰]. پلیمر قالب مولکولی یک پلیمر مصنوعی است که به تقلید از سیستم‌های بیولوژیکی آنتی‌ژن-آنتی‌بادی در طبیعت سنتز شده است. مکانیسم عملکرد آن‌ها مطابق نظریه قفل و کلید می‌باشد به گونه‌ای که به طور انتخابی فقط با مولکولی که در تولید آن‌ها به عنوان قالب استفاده شده، اتصال برقرار می‌کنند [۳۱]. سنتز پلیمر قالب مولکولی از طریق پلیمریزاسیون مونومر عملکردی و اتصال‌دهنده در حضور مولکول قالب انجام می‌شود. بعد از پلیمریزاسیون مولکول قالب جدا شده و یک پلیمر حاوی حفره به دست می‌آید که از لحاظ شکل، اندازه و گروه‌های عملکردی مکمل مولکول قالب می‌باشد [۳۲].

۷- کاربردهای نانوحسگر فلورسانس بر پایه نقاط کربن در صنایع غذایی

۷-۱- افزودنی‌های غذا

در فرآوری غذا، افزودنی‌ها به طور گسترده برای بهبود طعم، ماندگاری و بالا بردن ارزش غذایی استفاده می‌شوند. همواره سوءاستفاده از افزودنی‌ها اتفاق افتاده و یکی از عوامل بالقوه ایجاد مشکل در امنیت غذا می‌باشد. جهت تقویت نظارت بر افزودنی‌های غذایی، توسعه روش تشخیص سریع و قابل اعتماد ضروری می‌باشد. زو و همکارانش با استفاده از آلوه‌ورا نقاط کوانتومی کربن سنتز کردند که در حضور تارتازین فلورسانس نقاط کربن در اثر مکانیسم استاتیک پوشش پیدا می‌کرد. این حسگر برای شناسایی مقادیر کم تارتازین در عسل و آبنبات با محدوده تشخیص ۷۳ نانومولار به کار گرفته شد [۳۳].

۷-۲- پاتوژن

بیماری‌های عفونی یکی از مهم‌ترین دلایل مرگ و میر در سراسر جهان می‌باشند. عفونت ناشی از پاتوژن‌های مواد غذایی علاوه بر تهدید سلامت مصرف‌کننده، به دلیل تأخیر در توزیع محصول و

1. Aggregation-induced enhancement
2. Metal-enhanced fluorescence
3. Molecularly imprinted polymer

۷-۵- بقایای آنتی بیوتیک‌ها

آنتی‌بیوتیک‌ها به طور گسترده در کشاورزی، دامداری، پرورش آبزیان و صنعت داروسازی مورد استفاده قرار می‌گیرند. اگر باقیمانده آن‌ها از حد مجاز بیشتر باشد باعث آسیب به سلامت انسان از طریق زنجیره غذا و چرخه محیط زیست می‌شوند و به عنوان یک خطر بالقوه می‌توانند کیفیت غذا را تهدید کنند. به عنوان مثال پنی‌سیلین باعث بروز واکنش‌های آلرژیک پوست می‌شود. استرپتومایسین به کلیه و عصب شنوایی آسیب می‌رساند و تتراسایکلین باعث آسیب کبدی و زرد شدن دندان‌ها می‌شود. بنابراین توسعه روش‌های تشخیص آنتی‌بیوتیک که دارای حد تشخیص پایین‌تر از حد مجاز مصرف قانونی باشند، ضروری است [۳۸]. گوئو و همکارانش جهت تشخیص تتراسایکلین، حسگر فلورسانس با عملکرد کوانتومی ۳۰٪ از ضایعات پوست خرچنگ سنتز کردند که محدوده تشخیص آن ۰/۰۰۵ میلی‌گرم بر لیتر گزارش شده است [۳۹].

۷-۶- اجزای تغذیه‌ای

مطالعات متعددی جهت استفاده از حسگرهای فلورسانس برای تشخیص ترکیبات تغذیه‌ای مانند اسید آسکوربیک در میوه‌ها و سبزیجات [۴۰]، ویتامین ب۱۲ [۴۱]، رتینوئیک اسید [۴۲] و غیره انجام شده است. یکی از مکانیسم‌های متداول در تشخیص اجزای تغذیه‌ای، پوشاندن فلورسانس نقاط کربن توسط یون فلزی و سپس بازیابی فلورسانس به وسیله آنالیت می‌باشد. به عبارت دیگر تعاملات الکترواستاتیک بین یون فلزی و گروه‌های سطحی نقاط کربن باعث انتقال الکترون و پوشش فلورسانس می‌شود. با افزودن آنالیت در اثر کلاته شدن آنالیت و یون فلزی، فلورسانس بازیابی می‌شود. از این مکانیسم برای شناسایی گلوکاتایون و تیامین در مواد غذایی استفاده شده است [۳۳].

۸- نقاط کوانتومی کربن در بسته‌بندی مواد

غذایی

بسته‌بندی مواد غذایی جزء ضروری چرخه تأمین مواد غذایی است که به عنوان محافظ یا لایه مانع در برابر آلودگی، محیط خارجی و

فراخوانی از بازار، زیان مالی بزرگی را به صنعت وارد می‌کند. روش متداول برای تشخیص پاتوژن‌ها کشت گونه خاص و سپس بررسی خصوصیات بیوشیمیایی و ایمونولوژیکی آن می‌باشد که بسیار زمان‌بر است. به همین دلیل، نانوحسگرهای فلورسانس که در تشخیص پاتوژن‌ها سرعت بیشتری دارند، در حال توسعه هستند. از تحقیقات انجام شده در این زمینه می‌توان به حسگرهای فلورسانس برای تشخیص اشرشیا کلی در پودر هسته خرما و یا تشخیص باسیلوس سوبتیلیس در عصاره پاپایا اشاره کرد [۳۴].

۷-۳- فلزات سنگین

حضور یون فلزات سنگین مانند سرب، جیوه، کادمیوم و آرسنیک در مواد غذایی به آلودگی آب و خاک نسبت داده می‌شود. فلزات سنگین باعث تغییرات برگشت‌ناپذیر در ساختار پروتئینی و تأثیر منفی بر عملکرد سلول می‌شوند. مصرف بیش از حد آن‌ها باعث عوارض جانبی از قبیل اختلالات عصبی، تخریب کلیه و ضایعات استخوانی می‌شود [۳۵]. یانهونگ و همکارانش از سدیم سیترات و گلوکاتایون با استفاده از روش هیدروترمال، نقاط کوانتومی کربن سنتز کردند که برای تشخیص یون جیوه مورد استفاده قرار گرفت. جیوه باعث انتقال انرژی و پوشش فلورسانس نقاط کربن می‌شود [۳۶].

۷-۴- بقایای حشره‌کش‌ها

حشره‌کش‌ها به طور گسترده در کشاورزی به منظور کنترل علف هرز، آفات و همچنین بهبود تولید مواد غذایی استفاده می‌شوند. استفاده زیاد از حشره‌کش‌ها می‌تواند به آلودگی محیط غیر هدف و در نتیجه آلودگی مواد غذایی منجر شود. از اثرات منفی حشره‌کش‌ها برای انسان می‌توان به مسمومیت عصبی، اختلال غدد درون‌ریز، جهش‌زایی و سرطان‌زایی اشاره کرد. بنابراین وجود یک روش حساس و انتخابی برای آنالیز این ترکیبات ضروری می‌باشد. در مطالعاتی که اخیراً انجام شده نقاط کربن جهت تشخیص حشره‌کش‌هایی همچون پاراتیون متیل، دیمتوات، دیکلرئوس و کارباریل با محدوده تشخیص پایین به کار گرفته شده است [۳۷].

شده با نانوذرات کربن به دلیل دارا بودن ویژگی‌هایی از قبیل استحکام بالا، وزن کم و هزینه پایین برای کاربردهای مختلف از جمله بسته‌بندی مواد غذایی بسیار مناسب می‌باشند [۴۶].

نانوساختارهای کربنی از جمله نقاط کوانتومی کربن به وفور در ترکیب با نانوسلولز استفاده می‌شوند. افزودن نانوذرات کربن به نانوسلولز چندین مزایا دارد که از آن جمله می‌توان به افزایش استحکام مکانیکی، پایداری حرارتی، هدایت حرارت قابل تنظیم، شفافیت نوری و خاصیت فلورسانس ذاتی اشاره کرد. کامپوزیت نانوسلولز/نانوکربن به تنهایی یا به عنوان پرکننده برای پلیمرها و مواد مختلف بسته‌بندی جهت بهبود خواص فیزیکی و مکانیکی استفاده می‌شوند [۴۷]. در مطالعه‌ای از طریق روش هیدروترمال نقاط کربن با عملکرد کوانتومی بالا سنتز شد و برای اصلاح ماتریکس پلی‌وینیل‌الکل و نانو الیاف سلولزی مورد استفاده قرار گرفت. نتایج نشان داد که افزودن نقاط کربن به ماتریکس ذکر شده باعث افزایش مدول کششی و مقاومت کششی کامپوزیت می‌شود که علت آن برقراری پیوند هیدروژنی، نیروی واندروالس و سایر پیوندهای شیمیایی بین گروه‌های فعال سطحی نقاط کربن، پلی‌وینیل‌الکل و نانو الیاف سلولزی می‌باشد. تصاویر میکروسکوپ الکترونی نیز فرضیه آنها را تایید کرد به طوری که فیلم اصلاح شده با نقاط کربن نسبت به فیلم شاهد بخش شکست مترامتری داشت که نشان‌دهنده ترکیب و اتصال بهتر در فیلم دارای نقاط کربن می‌باشد. در نهایت، آن‌ها اظهار کردند که کامپوزیت تهیه شده به دلیل شفاف بودن، سدکننده نور UV و مقاومت مکانیکی خوب، پتانسیل وسیعی برای کاربرد در بسته‌بندی سبزیجات و میوه‌ها دارد [۴۸].

یو و همکارانش یک فیلم بر پایه نقاط کربن و کربوکسی‌متیل سلولز (CMC) سنتز کردند. مقاومت کششی فیلم سنتز شده ۵۵٪ بیشتر از فیلم CMC بود که نشان می‌دهد افزودن نقاط کربن باعث بهبود خصوصیات مکانیکی فیلم می‌شود که علت آن را به تعامل قوی بین نقاط کربن و فیلم نسبت دادند [۴۹].

۸-۱-۲- سدکنندگی نور UV

بسیاری از نانومواد به دلیل ترکیب اثرات پراکندگی و جذب می‌توانند نور UV را مسدود کنند در نتیجه در مواد بسته‌بندی به

آسیب مکانیکی در حین حمل و نقل عمل می‌کند و هدف اصلی آن تضمین کیفیت، سالم بودن، یکپارچگی و ایمنی محصول است. سیستم‌های بسته‌بندی علاوه بر حفظ کیفیت محصول، به کاهش ضایعات نیز کمک می‌کنند. عوامل متعددی از قبیل دما، غلظت اکسیژن، غلظت دی‌اکسیدکربن، رطوبت نسبی و محتوای رطوبت سبب تغییر کیفیت، ایمنی و ماندگاری محصولات غذایی طی نگهداری می‌شوند. از این رو، نیاز به نظارت در زمان واقعی بر ویژگی‌های مختلف یک محصول از لحاظ کیفیت غذا، خواص ارگانولپتیک و ایمنی کلی غذا ضروری می‌باشد که این امر منجر به توسعه تکنیک‌های جدید و کاربردهای پیشرفته بین‌رشته‌ای در صنعت بسته‌بندی شده است [۴۳].

استفاده از نانوذرات در بسته‌بندی مواد غذایی یک فناوری جدید است که به دلیل مزایای فراوان بسیار مورد توجه قرار گرفته است. نانوذرات به عنوان پرکننده در مواد بسته‌بندی باعث افزایش زمان نگهداری محصول، کاهش رشد میکروارگانیسم‌ها، بهبود ویژگی‌های مکانیکی و سدکنندگی در برابر گازها و نور ماورای بنفش می‌شوند. این بسته‌بندی‌ها به دلیل بهره بردن از کارایی بالای نانوساختارها و وزن کم آن‌ها جایگزین خوبی برای مواد بسته‌بندی پلاستیکی تجزیه ناپذیر محسوب می‌شوند. بسته‌بندی مواد غذایی را بر اساس کاربرد نانوذرات به چهار گروه بهبودیافته، فعال، هوشمند و بسته‌بندی بر پایه زیستی طبقه‌بندی می‌کنند [۴۴].

۸-۱-۱- بسته‌بندی بهبودیافته

هدف اصلی در این نوع بسته‌بندی استفاده از نانومواد کاربردی داخل مواد پلیمری جهت بهبود خصوصیات مکانیکی بسته‌بندی، سدکنندگی نور UV و تاثیر بر نفوذپذیری نسبت به بخار آب و اکسیژن می‌باشد [۴۵].

۸-۱-۱-۱- بهبود خصوصیات مکانیکی بسته‌بندی

نانوذرات به دلیل اندازه کوچک، نسبت سطح به حجم زیاد، استحکام بالا و فعالیت سطحی فوق‌العاده کاندیدای بالقوه‌ای برای سنتز نانوکامپوزیت‌های پلیمری هستند که در صورت اتصال به پلیمرهای مناسب باعث بهبود خواص مکانیکی از قبیل سختی، چقرمگی و مقاومت کششی پلیمر می‌شوند. پلیمرهای تقویت

عنوان مسدودکننده نور مورد استفاده قرار گرفته و از غذاهای حساس به تخریب نوری محافظت می‌کنند. تحقیقات نشان داده که نقاط کربن در جذب نور UV بسیار موثر هستند. اگرچه مکانیسم سدکنندگی نور UV در نقاط کربن هنوز به طور کامل شناخته نشده است ولی برخی این ویژگی را به گروه‌های عملکردی روی سطح نقاط کربن نسبت می‌دهند. در واقع الکترون‌های گذار از n به π^* و یا π به π^* انتقال پیدا می‌کنند که این الکترون‌ها عمدتاً توسط گروه‌های عملکردی مختلف تامین می‌شوند که به نوبه خود به پیش‌ساز مورد استفاده و روش سنتز بستگی دارند. در فیلم‌های دارای نقاط کربن انتقال پروتون درون مولکولی در حالت تهیج توسط تونل‌های O...H...O، O...H...N و ساختارهای مزدوج فراوان، پایداری نوری و خاصیت سدکنندگی فیلم در برابر نور UV را فراهم می‌کنند [۱]. پلی‌وینیل‌الکل یک پلیمر نیمه‌کریستالی است که به دلیل پیوند هیدروژنی بین مولکولی ساختاری خطی و محکم دارد که به طور گسترده در بسته‌بندی مورد استفاده قرار می‌گیرد. از مزایای آن می‌توان به عدم سمیت، زیست‌سازگاری و پایداری حرارتی اشاره کرد. یکی از معایب آن عبور نور می‌باشد که استفاده از آن را در بسته‌بندی محصولات حساس به نور محدود می‌کند. این پلیمر به دلیل توانایی تشکیل پیوند هیدروژنی گزینه مناسبی برای اختلاط با مواد دیگر از جمله نانوذرات و بهبود ویژگی‌های عملکردی آن‌ها می‌باشد. از این‌رو، تاکنون مطالعات زیادی روی پلی‌وینیل‌الکل جهت بهبود ویژگی‌های آن انجام شده است. در مطالعه‌ای نقاط کوانتومی کربن با استفاده از روش هیدروترمال با عملکرد کوانتومی بالا سنتز شدند سپس به کمک روش خشک کردن سیال با پلیمر پلی‌وینیل‌الکل ترکیب شدند. نتایج نشان داد که نسبت عبور نور UV با مقدار نقاط کوانتومی کربن نسبت عکس دارد بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که نقاط کوانتومی کربن خاصیت سدکنندگی پلیمر در برابر نور UV را بهبود می‌بخشد [۴۸].

۸-۱-۳- تاثیر بر نفوذپذیری گاز و بخار آب

از ویژگی‌های مهم مواد بسته‌بندی غذایی نفوذپذیری نسبت به اکسیژن و بخار آب می‌باشد زیرا بر واکنش‌های شیمیایی و رشد میکروبی و در نتیجه بر ایمنی و کیفیت مواد غذایی اثر می‌گذارند.

افزودن نقاط کربن به فیلم‌های پلیمری روی نفوذپذیری نسبت به اکسیژن و بخار آب تاثیر می‌گذارد که میزان این تاثیر به ویژگی‌های مولکولی و فیزیکوشیمیایی نقاط کربن و پلیمر بستگی دارد. نقاط کربن آمفی‌فیلک برای کنترل کشش سطحی، ترشوندگی، انعطاف‌پذیری و نفوذپذیری لایه پلیمری مناسب هستند. برای جلوگیری از جداسازی فاز نقاط کربن در شبکه‌های پلیمری و در نتیجه بهبود نفوذپذیری فیلم می‌توان از دوپینگ نقاط کربن و پلیمریزاسیون رادیکال استفاده کرد. نفوذپذیری فیلم‌های پروتئینی کلزا پس از افزودن نقاط کربن با گروه‌های آبدوست بر روی سطوح آن‌ها افزایش می‌یابد. همچنین فیلم‌های کیتوزان با خواص جذب آب بهبود یافته با استفاده از انواع و مقادیر مختلف نقاط کربن ساخته شده‌اند [۱].

از طرف دیگر، نقاط کوانتومی کربن می‌توانند باعث افزایش مقاومت در برابر آب شوند که علت آن را به کاهش تخلخل در فیلم و گروه‌های کربوکسیل فراوان در سطح نقاط کربن نسبت می‌دهند که به دلیل واکنش بین هیدروکسیل و کربوکسیل منجر به کاهش رادیکال‌های هیدروکسیل آزاد می‌شود و در نتیجه جذب آب فیلم کاهش پیدا می‌کند. در مطالعه‌ای از سیانوباکتر و با استفاده از روش هیدروترمال نقاط کربن سنتز کردند و از این نقاط کربن برای بهبود خواص فیلم پلی‌وینیل‌الکل/نانوسولنز استفاده کردند. با افزایش مقدار نقاط کربن از ۰/۱ میلی‌لیتر به ۴ میلی‌لیتر میزان جذب آب فیلم از ۱۱۹/۶ به ۴۲٪ کاهش پیدا کرد که نشان‌دهنده بهبود ویژگی سدکنندگی فیلم نسبت به رطوبت با استفاده از نقاط کربن می‌باشد [۵۰].

۸-۲- بسته‌بندی فعال

سالانه یک سوم از مواد غذایی تولید شده در جهان دور ریخته می‌شود. فساد مواد غذایی باعث آلودگی محیطی شده و بر سلامت انسان تاثیر می‌گذارد. علاوه بر این، منجر به ضرر اقتصادی و افزایش هزینه‌های درمان می‌شود. بنابراین توسعه فناوری برای کاهش ضایعات مواد غذایی و بهبود امنیت غذا مورد نیاز است. یکی از راهکارهای ممکن برای کاهش ضایعات و فساد مواد غذایی توسعه مواد فعال برای بسته‌بندی فعال به منظور افزایش ماندگاری محصول می‌باشد. بسته‌بندی فعال شامل پوشش‌های دارای خاصیت ضد میکروبی و خاصیت آنتی‌اکسیدانی

می‌باشد. این عوامل می‌توانند در بسته‌بندی‌های غیرقابل تجزیه معمولی گنجانده شوند یا در ترکیب با اجزای زیست تخریب‌پذیر استفاده شوند [۴۵].

۸-۲-۱- اثر ضد میکروبی

افزایش مقاومت میکروارگانیسم‌ها به آنتی‌بیوتیک‌ها و سایر مواد ضد عفونی‌کننده سبب شده تا محققان صنعت غذا به دنبال رویکردهای جایگزین ضد میکروب باشند. نقاط کوانتومی کربن پتانسیل عالی در کشندگی و مهار کردن باکتری‌ها، قارچ‌ها، ویروس‌ها و گونه‌های مقاوم به دارو نشان داده‌اند. مکانیسم این خاصیت شامل چسبندگی نقاط کوانتومی کربن به سطح باکتری، تخریب غشا یا دیواره سلول باکتری، القا استرس اکسیداتیو از طریق تخریب RNA/DNA و القای اکسیداتیو به پروتئین‌ها و سایر مولکول‌های زیستی داخل سلولی می‌باشد. مهمترین علت اثر کشندگی نقاط کوانتومی کربن روی میکروارگانیسم‌ها به علت تولید گونه‌های فعال اکسیژن است که منجر به تولید رادیکال‌های آزاد هیدروکسیل و اکسیژن منفرد می‌شود که باعث تخریب زیست مولکول‌های حیاتی در سلول، غیرفعال شدن پروتئین درون سلولی، پراکسیداسیون لیپیدها، اختلال در عملکرد میتوکندری و در نهایت مرگ سلول می‌شود [۵۱]. عزتی و همکارانش برای اصلاح فیلم ژلاتین/پکتین در بسته‌بندی مواد غذایی از نقاط کوانتومی کربن اصلاح شده با گوگرد استفاده کردند. فیلم به دست آمده خاصیت ضد میکروبی قوی در برابر باکتری‌های بیماری‌زای غذا همانند اشرشیا کلی و لیستریا مونوسیژنوس از خود نشان داد [۵۲].

در مطالعه‌ای دیگر، نقاط کوانتومی کربن غنی از نیتروژن سنتز شد و برای اصلاح نانو الیاف سلولز مورد استفاده قرار گرفت. فیلم بدست آمده به دلیل تولید گونه‌های فعال اکسیژن فعالیت ضدباکتریایی و ضد قارچی بالایی از خود نشان داد. فیلم تهیه شده برای بسته‌بندی میوه‌های نارنگی و توت‌فرنگی مورد استفاده قرار گرفت. نتایج نشان داد که رشد قارچ در سطح میوه به طور موثر مهار شده و عمر ماندگاری آن‌ها به ترتیب ۱۰ و ۲ روز افزایش پیدا کرد که نشان‌دهنده پتانسیل خوب آن برای کاربرد در بسته‌بندی‌های فعال می‌باشد [۵۳].

فان و همکارانش به منظور مهار میکروارگانیسم‌ها در بسته‌بندی

خیار تازه برش خورده از ترکیب نقاط کوانتومی کربن و کیتوزان استفاده کردند. نقاط کوانتومی کربن با کیتوزان پیوند قوی هیدروژنی برقرار کردند. نتایج نشان داد که قطر ناحیه بازدارندگی در برابر اشرشیا کلی و استافیلوکوکوس اورئوس با افزایش غلظت نقاط کوانتومی کربن بهبود می‌یابد. علاوه بر این، تعداد کل باکتری‌ها، کپک‌ها و مخمرها در طول دوره نگهداری کاهش پیدا کرد. بنابراین می‌توان اظهار کرد که این بسته‌بندی پتانسیل خوبی برای افزایش عمر نگهداری سایر سبزیجات نیز دارد [۵۴].

۸-۲-۲- خاصیت آنتی‌اکسیدان

ROSها از جمله اکسیژن منفرد و رادیکال‌های آزاد (هیدروژن پراکسید، هیدروکسیل و سوپر اکسید) نقش مهمی در فساد مواد غذایی، تخریب مواد شیمیایی، پلیمرها و تخریب ساختارهای بیولوژیکی دارند. از این رو، حضور ترکیبات آنتی‌اکسیدان و یا عوامل از بین برنده رادیکال‌های آزاد در غذا و بسته‌بندی مواد غذایی برای سلامتی ضروری هستند. اخیراً مجموعه‌ای از نانو نقاط کربنی مانند نقاط کربن نیتروژن دوپ شده، نقاط کربن سلنیوم دوپ شده، و نقاط کربن نیتروژن/گوگرد دوپ شده به آنتی‌اکسیدان‌هایی برای حذف ROS تبدیل شده‌اند. هاندوری و همکارانش توسط روش هیدروترمال نقاط کربن از پوسته نارگیل سنتز کردند. آزمایش ۲،۲-دی فنیل ۱-پیکریل هیدرازیل (DPPH) ثابت کرد که این نقاط کربن اثر مهار کنندگی خوبی بر رادیکال‌های آزاد دارند. لی و همکارانش نقاط کربن را از طریق روش هیدروترمال و با استفاده از اسید سیتریک و سلنوسیستین سنتز کردند و ثابت کردند که نقاط کربن سنتز شده توانایی مهار عالی برای H_2O_2 و رادیکال هیدروکسیل (OH) در شرایط آزمایشگاهی دارند. در جدول ۱ خواص آنتی‌اکسیدانی و کاربردهای نقاط کربن سنتز شده از منابع طبیعی بطور خلاصه آورده شده است. خاصیت آنتی‌اکسیدان نقاط کربن را به انتقال الکترون، الکترون‌های جفت نشده ناشی از نواقص سطحی، رفتار اهداکننده هیدروژن، نوع عنصر دوپینگ و گروه‌های عملکردی سطح نسبت می‌دهند. نقاط کربن سنتز شده در محیط الکترولیز NaOH دارای گروه‌های حاوی اکسیژن فعالتری مانند کربونیل و هیدروکسیل می‌باشند که می‌توان از آن‌ها به عنوان اهداکننده هیدروژن برای از بین بردن رادیکال‌های آزاد استفاده کرد و در

نتیجه ظرفیت آنتی‌اکسیدانی بالاتری بدست آورد. علاوه بر این، مطالعات اخیر نشان داده‌اند که گروه‌های کربوکسیل و آمین می‌توانند باعث حذف ROS شوند و در نتیجه فعالیت آنتی‌اکسیدانی نقاط کربن را افزایش دهند [۴].

Table 1 The antioxidant properties and applications of green fabricated CDs using natural materials as carbon sources

	Carbon source	Dopant	Synthesis method	Free Radical Scavenging	EC50 ($\mu\text{g/mL}$)	Application
TCDs P ₂ CDs	Tea waste, Grape pomace	-	Hydrothermal method (5 h, 180 °C)	DPPH	50 (TCDs) 75 (P ₂ CDs)	As antioxidant additives in non-aqueous media
Tea-CDs	Tea waste	Ethylene-diamine	Hydrothermal method (6 h, 150 °C)	$\cdot\text{OH}$ $\cdot\text{O}^{2-}$	80 ($\cdot\text{OH}$) 24.2 ($\cdot\text{O}^{2-}$)	Detection of CrO_4^{2-} , Fe^{3+} , ascorbic acid and L-Cys
CDs	Banana	-	Hydrothermal method (5 h, 150 °C)	DPPH $\cdot\text{OH}$ $\cdot\text{O}^{2-}$	15.02 (DPPH) 940.0 ($\cdot\text{OH}$) 96.14 ($\cdot\text{O}^{2-}$)	Against oxidative rancidity of frying oil
NPCQDs	Sesame oil	L-Aspartic acid, phosphoric acid	Hydrothermal method (8 h, 200 °C)	DPPH	-	Detection of Fe^{3+}
N, SCDs	Pomelo juice	Sulfamic acid	Hydrothermal method (12 h, 180 °C)	DPPH $\cdot\text{OH}$ $\cdot\text{O}^{2-}$	-	Detection of Cr(vi)
CDs	Salvia miltiorrhiza	-	Hydrothermal method (6 h, 100, 150, or 180 °C)	DPPH $\cdot\text{OH}$ $\cdot\text{O}^{2-}$	-	Reducing oxidative damage of Italian lettuce
RSFC-CDs	Radix sophorae flavescentis carbonisata	-	One-step pyrolysis method (1 h, 350 °C)	CAT SOD GSH-PxGSH	-	Inhibit ethanol-induced inflammation and oxidative stress

بخصوص برای مواد غذایی که نیاز به زنجیره سرد دارند نگران‌کننده است. نانوذرات به عنوان ذرات واکنشی در مواد بسته‌بندی برای اطلاع از وضعیت بسته به کار گرفته می‌شوند. به عبارت دیگر نانوحسگرهایی هستند که به تغییرات محیطی (مانند دما، رطوبت، سطح اکسیژن و آلودگی میکروبی) واکنش نشان می‌دهند. وقتی نانوحسگرها در بسته‌بندی مواد غذایی ادغام شوند، می‌توانند ترکیبات شیمیایی خاص و وضعیت تازگی محصول را نشان دهند [۵۵].

۸-۳-۱- نشانگر تازگی محصول

این امر با استفاده از فناوری تشخیص و برچسب‌های هوشمند که قادر به اندازه‌گیری تغییر شرایط محیطی داخل بسته‌بندی هستند،

۸-۳-۲- بسته‌بندی هوشمند

هدف این نوع بسته‌بندی نظارت بر وضعیت مواد غذایی یا محیط اطراف آن می‌باشد. در این فناوری یک نشانگر بصری اطلاعاتی از قبیل تازگی محصول، نشی بسته‌بندی، دمای نگهداری در طول زنجیره تولید و فساد را به تأمین‌کننده یا مشتری می‌دهد. عوامل کلیدی در کاربرد گسترده آن‌ها هزینه، استحکام و سازگاری با مواد بسته‌بندی مختلف می‌باشد. تاریخ انقضای مواد غذایی باتوجه به شرایط توزیع و نگهداری از سوی صنایع تعیین می‌شود. با این حال ممکن است که چنین شرایطی واقعی نباشد و محصولات در درجه حرارت نامطلوب قرار بگیرند و این امر

توجه به نقش کلیدی اکسیژن در فساد مواد غذایی، جای تعجب نیست که اکثر غذاها در محیطی عمدتاً بدون اکسیژن و تحت اتمسفر اصلاح شده بسته‌بندی می‌شوند. مشکل اصلی اتمسفر اصلاح شده فقدان نشانگر اکسیژن ساده و ارزان است که به مصرف‌کننده اطمینان دهد که بسته سالم است و ورودی اکسیژن قابل توجه نیست. در حال حاضر، این سطح از تضمین کیفیت در غذاهای اتمسفر اصلاح شده که فقط به نمونه‌برداری معمول از خط بسته‌بندی متکی هستند، امکان‌پذیر نمی‌باشد. به طور معمول، یک بسته از هر ۳۰۰ تا ۴۰۰ بسته برای آزمایش توسط یک تکنسین از خط خارج می‌شود و با استفاده از یک سیستم تحلیلی گران قیمت مانند FT-IR یا GC بررسی می‌شود و در صورتی که مشخص شود بسته‌ای به اندازه کافی مهر و موم نشده است، تمام ۳۰۰ تا ۴۰۰ بسته غذایی قبلی ناامن فرض شده و از بین رفته یا دوباره بسته‌بندی می‌شوند. این وضعیت نامطلوب باعث توجه ویژه به نشانگرهای اکسیژن ارزان، قابل اعتماد و ساده برای بسته‌بندی مواد غذایی شده است [۵۷].

یکی از روش‌های رایج برای نظارت بر اکسیژن، سنجش الکتروشیمیایی می‌باشد. حسگرهای الکتروشیمیایی با وجود حساسیت و گزینش‌پذیری بالا به دلیل مضرات تهاجمی، مصرف اکسیژن و گران بودن کاربرد کمی دارند. امروزه حسگرهای نوری در زمینه بسته‌بندی مواد غذایی توجه زیادی را به خود جلب کرده‌اند. یکی از روش‌های متداول برای این منظور استفاده از نانوذرات فلوروفور در ماتریکس جامد است. زو و همکارانش از ترکیب نقاط کربنی عامل‌دار شده با سیلان به عنوان فلوروفور غیر حساس به اکسیژن و روتینیوم‌دی‌کلرید به عنوان فلوروفور حساس به اکسیژن برای تهیه غشای فیبری استفاده کردند. غشای فیبری آماده شده از طریق تصویربرداری نسبت‌سنجی فوتولومینسانس به خوبی قادر به ارزیابی میزان اکسیژن در بسته‌بندی میوه‌ها می‌باشد بدین صورت که فلورسانس نقاط کوانتومی کربن در طول موج ۴۰۰ نانومتر بوده و شدت آن با تغییر غلظت اکسیژن تغییری نمی‌کند ولی شدت فلورسانس منتشر شده از روتینیوم‌دی‌کلرید در ۶۰۰ نانومتر وابسته به غلظت اکسیژن می‌باشد. همچنین آن‌ها برای نظارت بر غلظت اکسیژن به جای دستگاه طیف‌سنج نوری پرهزینه از دوربین دیجیتال استفاده کردند سپس غشای فیبری برای بسته‌بندی انگور مورد استفاده قرار گرفت که در ابتدا

انجام می‌شود. در بین روش‌های فراوان استفاده از برچسب هوشمند به دلیل مزایایی از قبیل نتایج دقیق، حساسیت بالا و سهولت استفاده بسیار مورد توجه قرار گرفته است. تغییر رنگ برچسب هوشمند که به ظرف بسته‌بندی چسبانده شده تازگی محصول را نشان می‌دهد. با نظارت بر تغییر رنگ نشانگر می‌توان پی برد که غذا برای مصرف نامناسب بوده و با نظارت دقیق بر بهترین تاریخ مصرف ضایعات غذا کاهش پیدا می‌کند. به عنوان مثال در نشانگر تازگی بسته‌بندی گوشت، اصل اساسی این است که نشانگر موجود در برچسب به ترکیبات نیتروژن فرار و آمین‌های موجود در محیط بسته‌بندی یا تغییرات pH محیطی ناشی از چنین اجزایی حساس است. هنگامی که چنین تغییرات حساسی تشخیص داده می‌شود، می‌توان آن را به مقادیر پاسخ تبدیل کرد، که معمولاً تغییرات رنگی است که با چشم غیرمسلح قابل تشخیص است، به طوری که تشخیص تازه بودن گوشت در زمان واقعی انجام می‌شود [۴]. کوشی و همکارانش از نقاط کربن ایزوله پروتئین سویا در فیلم‌های هوشمند مبتنی بر نشاسته- آنئوسیانین برای نظارت بر تازگی گوشت خوک بسته‌بندی شده استفاده کردند. هنگامی که نمونه‌های گوشت در دمای ۲۵ درجه سانتیگراد نگهداری شدند، در اثر فعالیت میکروارگانیسم‌ها میزان نیتروژن فرار در داخل بسته افزایش یافت و به دنبال آن pH نیز تغییر کرد. با افزایش زمان نگهداری، گوشت خوک تازه دچار فساد شد و رنگ شناساگر از بنفش به سبز تغییر پیدا کرد [۵۶].

۸-۳-۲- نشانگر اکسیژن

در ابتدا ممکن است نیاز به نشانگر اکسیژن در بسته‌بندی مواد غذایی ضروری به نظر نرسد، تا زمانی که پی‌بیریم علت اصلی فساد بیشتر مواد غذایی اکسیژن است. بخش عمده این فساد به صورت غیرمستقیم است زیرا اکسیژن به تعداد بی‌شماری از میکروارگانیسم‌های هوازی فاسدکننده غذا اجازه رشد و نمو می‌دهد. همچنین اکسیژن می‌تواند باعث فاسد شدن مستقیم بسیاری از غذاها از طریق واکنش‌های کاتالیز شده توسط آنزیم شود که از آن جمله می‌توان به قهوه‌ای شدن میوه‌ها و سبزیجات، تخریب اسید اسکوربیک، اکسید شدن طیف وسیعی از طعم‌ها و واکنش‌های غیر آنزیمی مانند اکسیداسیون لیپیدها اشاره کرد. در طول ذخیره‌سازی، تغییر سطح اکسیژن در بسته‌بندی شاخص مهمی از تازگی مواد غذایی و میزان تنفس محصولات می‌باشد. با

غذایی دارد [۶۰].

فان و همکارانش از نقاط کربن برای اصلاح پوشش‌های کیتوزان استفاده کردند. آن‌ها گزارش کردند که افزودن نقاط کربن در فرمولاسیون پوشش‌ها از رشد استافیلوکوکوس اورئوس و اشرشیا کلی بر روی سبزیجات جلوگیری می‌کند. علاوه بر این، پوشش‌ها مانع رشد کپک و مخمر در طول نگهداری شدند. در مطالعه‌ای دیگر از نقاط کربن در فیلم‌های هوشمند مبتنی بر نشاسته-آنتوسیانین استفاده کردند. نتایج تحقیقات آن‌ها نشان داد افزودن نقاط کربن باعث تقویت ماتریکس نشاسته شده و افزایش غلظت نقاط کربن خواص مکانیکی و سدکنندگی فیلم‌های زیست‌تخریب‌پذیر را بهبود می‌بخشد. علاوه بر این فیلم حاصل مقاومت به اکسیداسیون بالایی از خود نشان داد. این نتایج باعث تقویت پتانسیل بهبود دهندگی نقاط کربن در لایه‌ها و پوشش‌های زیست‌تخریب‌پذیر می‌شود. با این حال، یک تحقیق جامع برای کشف مواد زیستی بیشتر برای اصلاح با نقاط کربن و تأثیر استفاده طولانی مدت آن‌ها مورد نیاز است [۵۶].

۹- نتیجه گیری

بدون شک حسگرهای بر پایه نقاط کربن، چشم‌انداز امیدوارکننده‌ای در زمینه آنالیز مواد غذایی دارند. با این حال تحقیق روی نقاط کربن هنوز در مرحله اولیه است به عنوان مثال اصول مکانیسم فوتولومینسانس هنوز مبهم می‌باشد و نیاز است تا تحقیقات بیشتری انجام شود. اکثر روش‌های سنتز، نقاط کربن با عملکرد کوانتومی پایین تولید می‌کنند به همین دلیل تلاش‌های مختلف همچون دوپینگ و تغییر محیط واکنش برای بهبود عملکرد کوانتومی انجام شده است. از آنجا که نمونه‌های غذایی دارای اجزا بیولوژیکی و شیمیایی مختلف هستند، تشخیص هدف خاص بدون دخالت سایر اجزا نمونه یک چالش می‌باشد. این موضوع اهمیت استفاده از اتصال‌دهنده‌هایی که توانایی تشخیص هدف خاص را داشته باشند، نشان می‌دهد.

همانطور که در این مقاله بحث شد استفاده از نقاط کوانتومی کربن در بسته‌بندی مواد غذایی باعث بهبود کیفیت فیزیکی شیمیایی، بهبود خاصیت سدکنندگی و کاهش بار میکروبی می‌شود. علیرغم تمام مزایای آن‌ها نباید از معایب آن که ناشی از

فلورسانس آبی درخشان ساطع می‌کرد ولی در روز سوم نگهداری به دلیل تنفس رنگ فلورسنت به بنفش تغییر کرد و با افزایش فرآیند تنفس، رنگ فلورسنت در روزهای ۶ و ۷ نگهداری به قرمز روشن تبدیل شد. بنابراین می‌توان گفت که این غشاهای فیبری پتانسیل خوبی برای ارزیابی اکسیژن در بسته‌بندی محصولات کشاورزی دارند [۵۸].

۸-۴- بسته‌بندی بر پایه مواد زیستی

مواد بسته‌بندی متداول شامل پلاستیک‌ها مانند پلی‌وینیل کلراید، پلی‌استایرن، پلی‌اتیلن، پلی‌پروپیلن می‌باشند که به دلیل استحکام، مقاومت در برابر حرارت و رطوبت بطور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرند. استفاده از این مواد بدلیل ماهیت غیرقابل تجزیه تهدیدی برای محیط زیست محسوب می‌شود. بنابراین می‌توان اظهار داشت که مواد زیست تخریب‌پذیر بهترین انتخاب برای بسته‌بندی هستند. این پوشش‌ها و فیلم‌ها بصورت تک لایه، دولایه یا چند لایه از پلی‌ساکاریدها، لیپیدها و پروتئین‌ها می‌باشند که به دلیل ماهیت حساس، خاصیت مکانیکی و سدکنندگی ضعیف نمی‌توانند بطور کامل جایگزین مواد دیگر شوند ولی در صورتیکه با نانوذرات ادغام شوند عملکرد و پتانسیل کاربردی آنها بهبود پیدا می‌کند [۵۹]. گزارش‌های متعددی درباره استفاده از نقاط کوانتومی کربن برای بهبود عملکرد مواد بسته‌بندی زیست‌تخریب‌پذیر وجود دارد. زایلان از دسته همی سلولزها و دومین پلی‌ساکارید فراوان در گیاهان می‌باشد که به علت وزن مولکولی نسبتاً کم معمولاً عملکرد مکانیکی ضعیفی دارد. اصلاح آن‌ها با نقاط کربنی باعث بهبود فیلم‌سازی و عملکرد مکانیکی آن‌ها می‌شود. یانگ و همکارانش از نقاط کربن برای اصلاح ماتریکس کربوکسی‌متیل‌زایلان استفاده کردند. نتایج نشان داد که نقاط کربنی علاوه بر ایجاد خواص عالی نوری باعث بهبود پایداری حرارتی و استحکام مکانیکی فیلم نانوکامپوزیت می‌شوند به گونه‌ای که با افزودن ۹۲/۱ درصد وزنی از نقاط کربنی مقاومت کششی و مدول الاستیسیته به ترتیب ۱۱۴/۳ و ۹۰/۷ درصد افزایش پیدا می‌کند که علت آن ایجاد پیوند شیمیایی بین زایلان و نقاط کربنی می‌باشد. همچنین، این فیلم بطور موثر قادر به جذب نور UV و تبدیل آن به نور آبی می‌باشد. این فیلم با توجه به مزایای ذکر شده قابلیت خوبی برای استفاده در بسته‌بندی مواد

- 17(1):1-24.
- [10] Sagbas S, Sahiner N. 2019. Carbon dots: preparation, properties, and application. *Nanocarbon and its Composites: Elsevier*. 651-76.
- [11] Qu J-H, Wei Q, Sun D-W. 2018. Carbon dots: Principles and their applications in food quality and safety detection. *Critical reviews in food science and nutrition*. 58(14):2466-75.
- [12] Liu H, Ding J, Zhang K, Ding L. 2019. Construction of biomass carbon dots based fluorescence sensors and their applications in chemical and biological analysis. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*. 118:315-37.
- [13] Zhao Q, Song W, Zhao B, Yang B. 2020. Spectroscopic studies of the optical properties of carbon dots: recent advances and future prospects. *Materials Chemistry Frontiers*. 4(2):472-88.
- [14] Yan F, Sun Z, Zhang H, Sun X, Jiang Y, Bai Z. 2019. The fluorescence mechanism of carbon dots, and methods for tuning their emission color: a review. *Microchimica Acta*. 186(8):1-37.
- [15] Anwar S, Ding H, Xu M, Hu X, Li Z, Wang J, et al. 2019. Recent advances in synthesis, optical properties, and biomedical applications of carbon dots. *ACS Applied Bio Materials*. 2(6):2317-38.
- [16] Tang J, Zhang J, Zhang Y, Xiao Y, Shi Y, Chen Y, et al. 2019. Influence of group modification at the edges of carbon quantum dots on fluorescent emission. *Nanoscale Research Letters*. 14(1):1-10.
- [17] Gayen B, Palchoudhury S, Chowdhury J. 2019. Carbon dots: A mystic star in the world of nanoscience. *Journal of Nanomaterials*. 2019.
- [18] Li L, Dong T. 2018. Photoluminescence tuning in carbon dots: surface passivation or/and functionalization, heteroatom doping. *Journal of Materials Chemistry C*. 6(30):7944-70.
- [19] Yan F, Jiang Y, Sun X, Bai Z, Zhang Y, Zhou X. 2018. Surface modification and chemical functionalization of carbon dots: a review. *Microchimica Acta*. 185(9):1-34.
- [20] Hu S. 2016. Tuning optical properties and photocatalytic activities of carbon-based "quantum dots" through their surface groups.

مهاجرت نانوذرات در شرایط اسیدی می‌باشد غافل شد. بنابراین انجام آنالیز مهاجرت، زمانی که یک بسته‌بندی جدید بر اساس نانوذرات تولید می‌شود ضروری است. علاوه بر این، جنبه‌های اقتصادی کاربرد نقاط کوانتومی کربن در بسته‌بندی باید مورد بررسی قرار گیرد.

۱۰- منابع

- [1] Moradi M, Molaei R, Kousheh SA, T. Guimarães J, McClements DJ. 2021. Carbon dots synthesized from microorganisms and food by-products: active and smart food packaging applications. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 1-17.
- [2] Luo X, Han Y, Chen X, Tang W, Yue T, Li Z. 2020. Carbon dots derived fluorescent nanosensors as versatile tools for food quality and safety assessment: A review. *Trends in Food Science & Technology*. 95:149-61.
- [3] Yoo D, Park Y, Cheon B, Park M-H. 2019. Carbon dots as an effective fluorescent sensing platform for metal ion detection. *Nanoscale research letters*. 14(1):1-13.
- [4] Zhao L, Zhang M, Mujumdar AS, Wang H. 2022. Application of carbon dots in food preservation: a critical review for packaging enhancers and food preservatives. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 1-19.
- [5] Dong Y, Cai J, Chi Y. 2016. Carbon based dots and their luminescent properties and analytical applications. Carbon nanoparticles and nanostructures: *Springer*. 161-238.
- [6] Molaei MJ. 2020. Principles, mechanisms, and application of carbon quantum dots in sensors: a review. *Analytical Methods*. 12(10):1266-87.
- [7] Demchenko AP, Dekaliuk MO. 2013. Novel fluorescent carbonic nanomaterials for sensing and imaging. *Methods and applications in fluorescence*. 1(4):042001.
- [8] Chu K-W, Lee SL, Chang C-J, Liu L. 2019. Recent progress of carbon dot precursors and photocatalysis applications. *Polymers*. 11(4):689.
- [9] Sharma A, Das J. 2019. Small molecules derived carbon dots: synthesis and applications in sensing, catalysis, imaging, and biomedicine. *Journal of nanobiotechnology*.

- Chromatography A.* 1614:460603.
- [33] Song-Ling Y, HUANG J-J, Lin L, Hui-Jun F, Yuan-Ming S, Yu-Dong S, et al. 2017. Preparation of carbon dots and their application in food analysis as signal probe. *Chinese Journal of Analytical Chemistry.* 45(10):1571-81.
- [34] Huang C-C, Hung Y-S, Weng Y-M, Chen W, Lai Y-S. 2019. Sustainable development of carbon nanodots technology: Natural products as a carbon source and applications to food safety. *Trends in Food Science & Technology.* 86:144-52.
- [35] Yang T, Huang H, Zhu F, Lin Q, Zhang L, Liu J. 2016. Recent progresses in nanobiosensing for food safety analysis. *Sensors.* 16(7):1118.
- [36] Ma Y, Zhang Z, Xu Y, Ma M, Chen B, Wei L, et al. 2016. A bright carbon-dot-based fluorescent probe for selective and sensitive detection of mercury ions. *Talanta.* 161:476-81.
- [37] Nsiband S, Forbes P. 2016. Fluorescence detection of pesticides using quantum dot materials—a review. *Analytica Chimica Acta.* 945:9-22.
- [38] Wang Q, Zhao W-M. 2018. Optical methods of antibiotic residues detections: A comprehensive review. *Sensors and Actuators B: Chemical.* 269:238-56.
- [39] Guo F, Zhu Z, Zheng Z, Jin Y, Di X, Xu Z, et al. 2020. Facile synthesis of highly efficient fluorescent carbon dots for tetracycline detection. *Environmental Science and Pollution Research.* 27(4):4520-7.
- [40] Liu J, Chen Y, Wang W, Feng J, Liang M, Ma S, et al. 2016. “Switch-on” fluorescent sensing of ascorbic acid in food samples based on carbon quantum dots—MnO₂ probe. *Journal of agricultural and food chemistry.* 64(1):371-80.
- [41] Wang J, Wei J, Su S, Qiu J. 2015. Novel fluorescence resonance energy transfer optical sensors for vitamin B 12 detection using thermally reduced carbon dots. *New Journal of Chemistry.* 39(1):501-7.
- [42] Majumdar S, Bhattacharjee T, Thakur D, Chowdhury D. 2018. Carbon Dot based Fluorescence sensor for Retinoic acid. *ChemistrySelect.* 3(2):673-7.
- [43] Kalpana S, Priyadarshini S, Leena MM, *The Chemical Record.* 16(1):219-30.
- [21] Dimos K. 2018. Tuning carbon dots’ optoelectronic properties with polymers. *Polymers.* 10(12):1312.
- [22] Chen BB, Liu ML, Li CM, Huang CZ. 2019. Fluorescent carbon dots functionalization. *Advances in colloid and interface science.* 270:165-90.
- [23] Xu Q, Kuang T, Liu Y, Cai L, Peng X, Sreeprasad TS, et al. 2016. Heteroatom-doped carbon dots: synthesis, characterization, properties, photoluminescence mechanism and biological applications. *Journal of Materials Chemistry B.* 4(45):7204-19.
- [24] Sun X, Lei Y. 2017. Fluorescent carbon dots and their sensing applications. *TrAC Trends in Analytical Chemistry.* 89:163-80.
- [25] Zu F, Yan F, Bai Z, Xu J, Wang Y, Huang Y, et al. 2017. The quenching of the fluorescence of carbon dots: a review on mechanisms and applications. *Microchimica Acta.* 184(7):1899-914.
- [26] Zhang J, Zhou R, Tang D, Hou X, Wu P. 2019. Optically-active nanocrystals for inner filter effect-based fluorescence sensing: achieving better spectral overlap. *TrAC Trends in Analytical Chemistry.* 110:183-90.
- [27] Chen S, Yu Y-L, Wang J-H. 2018. Inner filter effect-based fluorescent sensing systems: a review. *Analytica chimica acta.* 999:13-26.
- [28] Li X, Que L. 2014. Fluorescence enhancement enabled by nanomaterials and nanostructured substrates: a brief review. *Reviews in Nanoscience and Nanotechnology.* 3(3):161-76.
- [29] Liu M-L, Chen B-B, Li C-M, Huang C-Z. 2019. Carbon dots prepared for fluorescence and chemiluminescence sensing. *Science China Chemistry.* 62(8):968-81.
- [30] Hao T, Wei X, Nie Y, Xu Y, Yan Y, Zhou Z. 2016. An eco-friendly molecularly imprinted fluorescence composite material based on carbon dots for fluorescent detection of 4-nitrophenol. *Microchimica Acta.* 183(7):2197-203.
- [31] BelBruno JJ. 2018. Molecularly imprinted polymers. *Chemical reviews.* 119(1):94-119.
- [32] Azizi A, Bottaro CS. 2020. A critical review of molecularly imprinted polymers for the analysis of organic pollutants in environmental water samples. *Journal of*

- dots. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 636:128123.
- [53] Ezati P, Rhim J-W, Molaei R, Priyadarshi R, Han S. 2022. Cellulose nanofiber-based coating film integrated with nitrogen-functionalized carbon dots for active packaging applications of fresh fruit. *Postharvest Biology and Technology*. 186:111845.
- [54] Fan K, Zhang M, Fan D, Jiang F. 2019. Effect of carbon dots with chitosan coating on microorganisms and storage quality of modified atmosphere packaged fresh cut cucumber. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 99(13):6032-41.
- [55] Silvestre C, Duraccio D, Cimmino S. 2011. Food packaging based on polymer nanomaterials. *Progress in polymer science*. 36(12):1766-82.
- [56] Amin U, Khan MU, Majeed Y, Rebezov M, Khayrullin M, Bobkova E, et al. 2021. Potentials of polysaccharides, lipids and proteins in biodegradable food packaging applications. *International Journal of Biological Macromolecules*. 183:2184-98.
- [57] Mills A. 2009. Oxygen indicators in food packaging. Sensors for environment, health and security: *Springer*. 371-88.
- [58] Xu Y, Yang D, Huo S, Ren J, Gao N, Chen Z, et al. 2021. Carbon dots and ruthenium doped oxygen sensitive nanofibrous membranes for monitoring the respiration of agricultural products. *Polymer Testing*. 93:106957.
- [59] Chausali N, Saxena J, Prasad R. 2022. Recent trends in nanotechnology applications of bio-based packaging. *Journal of Agriculture and Food Research*. 7:100257.
- [60] Yang Y, Zhao Y, Hu Y, Peng X, Zhong L. 2020. Xylan-derived light conversion nanocomposite film. *Polymers*. 12(8):1779.
- Moses J, Anandharamakrishnan C. 2019. Intelligent packaging: Trends and applications in food systems. *Trends in Food Science & Technology*. 93:145-57.
- [44] Emamhadi MA, Sarafraz M, Akbari M, Fakhri Y, Linh NTT, Khaneghah AM. 2020. Nanomaterials for food packaging applications: a systematic review. *Food and Chemical Toxicology*. 146:111825.
- [45] Primožič M, Knez Ž, Leitgeb M. 2021. (Bio) Nanotechnology in food science—food packaging. *Nanomaterials*. 11(2):292.
- [46] Thippeswamy BH, Maligi AS, Hegde G. 2021. Roadmap of Effects of Biowaste-Synthesized Carbon Nanomaterials on Carbon Nano-Reinforced Composites. *Catalysts*. 11(12):1485.
- [47] Bacakova L, Pajorova J, Tomkova M, Matejka R, Broz A, Stepanovska J, et al. 2020. Applications of nanocellulose/nanocarbon composites: Focus on biotechnology and medicine. *Nanomaterials*. 10(2):196.
- [48] Xu L, Zhang Y, Pan H, Xu N, Mei C, Mao H, et al. 2019. Preparation and performance of radiata-pine-derived polyvinyl alcohol/carbon quantum dots fluorescent films. *Materials*. 13(1):67.
- [49] You Y, Zhang H, Liu Y, Lei B. 2016. Transparent sunlight conversion film based on carboxymethyl cellulose and carbon dots. *Carbohydrate Polymers*. 151:245-50.
- [50] Xu L, Li Y, Gao S, Niu Y, Liu H, Mei C, et al. 2020. Preparation and properties of cyanobacteria-based carbon quantum dots/polyvinyl alcohol/nanocellulose composite. *Polymers*. 12(5):1143.
- [51] Dong X, Liang W, Meziani MJ, Sun Y-P, Yang L. 2020. Carbon dots as potent antimicrobial agents. *Theranostics*. 10(2):671.
- [52] Ezati P, Roy S, Rhim J-W. 2022. Pectin/gelatin-based bioactive composite films reinforced with sulfur functionalized carbon



Review article

Applications of carbon quantum dots in detection and packaging of foods

Sistani, Sh. ^{1*}, Shekarchizadeh, H. ²

1. Graduated Master, Department of Food Science and Technology, College of Agriculture, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.
2. Associate Professor, Department of Food Science and Technology, College of Agriculture, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

ARTICLE INFO

ABSTRACT

Article History:

Received 2022/ 04/ 04
Accepted 2022/ 06/ 20

Keywords:

Packaging,
Nanosensor,
Carbon quantum dots,
Fluorescence.

DOI: 10.22034/FSCT.19.127.193
DOR: 20.1001.1.20088787.1401.19.127.22.5

*Corresponding Author E-Mail:
Shabnam668.ss@gmail.com

Carbon quantum dots are a new generation of carbon nanoparticles that have good potential for food analysis and packaging due to their unique properties such as excellent fluorescence properties, easy synthesis, good biocompatibility, large functional groups, and low toxicity. Today, carbon quantum dots have replaced semiconductor quantum dots due to their non-toxicity. The use of carbon dots in packaging materials due to their antioxidant, antimicrobial and barrier properties increases product shelf life, reduces the growth of microorganisms, improves mechanical properties, the barrier against gases, UV light blocker, and reduces food waste. This paper aims to get acquainted with carbon quantum dots and synthesis methods and study their optical properties. Then, the principles of fluorescence sensor design, including the mechanism of fluorescence quenching and recovery and their application in food samples to detect food additives, pathogens, antibiotic residues, insecticides, heavy metals, and nutrients will be examined. Finally, the use of carbon dots in improved, active, intelligent and bio-packaging will then be discussed.