

# A Review on the Application of Carbon Quantum dots and Doped Carbon Quantum Dots in Fluorescent Sensors for the Detection of Metal Pollutants

Nargess Yousefi-Limaee\*, Yekta Rezaei

Department of Environmental Research, Institute for Color Science and Technology, P.O.Box:16765-654, Tehran, Iran.

## ARTICLE INFO

Article history:

Received: 06-04-2025

Accepted: 24-06-2025

Available online: 20-07-2025

Print ISSN: 2251-7278

Online ISSN: 2383-2223

DOI: 10.30509/jscw.2025.167510.1228

## Keywords:

Carbon Quantum Dot

Detection

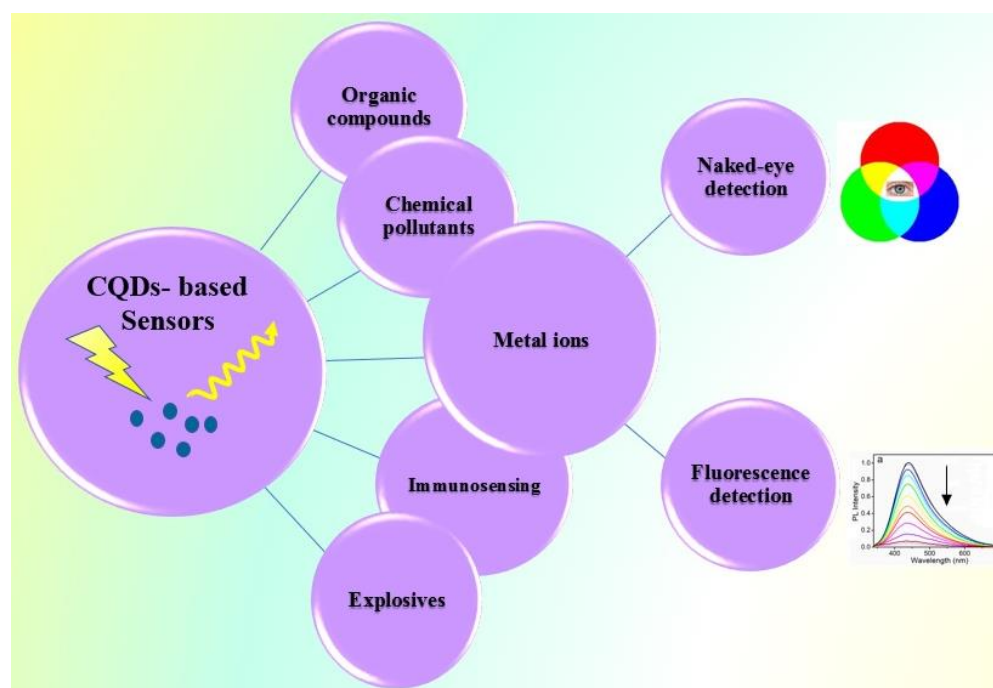
Heavy Metals

Fluorescent Sensor

Doped Carbon Quantum Dot

## ABSTRACT

Carbon quantum dots (CQDs) are zero-dimensional quasi-spherical nanoparticles smaller than 10 nm, composed of carbon and various surface groups. These compounds are utilized in applications such as metal ion detection, photodegradation of pollutants, bio-imaging, and drug delivery, due to their high solubility in water, optical stability, luminescence properties, and biocompatibility. Due to their fluorescent characteristics, carbon quantum dots can selectively respond to target molecules in environmental and biological samples. The fluorescence properties and color changes of carbon quantum dots serve as a key foundation for the performance of optical sensors in the accurate detection of metal pollutants. This article discusses the applications of carbon quantum dots across various fields, particularly their role as optical sensors for identifying one or more metal pollutants, either individually or simultaneously. It also explores the use of carbon quantum dots doped with one or more elements for detecting metal cations. Finally, the article examines the current challenges and prospects of using carbon quantum dots as sensors.



Corresponding author: \* [yousefi-n@icrc.ac.ir](mailto:yousefi-n@icrc.ac.ir)



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

## مروری بر کاربرد کربن کوانتوم دات‌ها و کربن کوانتوم دات‌های دوپ شده در حسگرهای فلور سنت برای شناسایی آلاینده‌های فلزی

نرگس یوسفی لیمائی<sup>۱\*</sup>، یکتا رضایی<sup>۲</sup>

۱- استادیار، گروه پژوهشی محیط‌زیست و رنگ، پژوهشگاه رنگ، تهران، ایران، صندوق‌پستی: ۶۵۴-۱۶۷۶۵.

۲- کارشناسی، گروه پژوهشی محیط‌زیست و رنگ، پژوهشگاه رنگ، تهران، ایران، صندوق‌پستی: ۶۵۴-۱۶۷۶۵.

### چکیده

کربن کوانتوم دات‌ها (CQDs)، نانوذرات شبه‌کروی صفر بعدی با اندازه کوچک‌تر از ۱۰ نانومتر می‌باشند که از کربن و گروه‌های سطحی چسبیده به سطح آنها تشکیل شده‌اند. این ترکیبات، با توجه به ویژگی‌هایی از جمله حالیت قابل توجه در آب، پایداری نوری، خواص لومینسانس، و زیست سازگاری در کاربردهای گوناگونی همچون شناسایی یون‌های فلزی، تجزیه نوری آلاینده‌ها، تصویر برداری زیستی و تحویل دارو کاربرد دارند. کربن کوانتوم دات‌ها به دلیل خواص فلورسنت قادر به پاسخ انتخابی به مولکول‌های هدف در نمونه‌های زیست محیطی و زیستی می‌باشند. ویژگی‌های فلورسانس و تغییرات رنگی کربن کوانتوم دات‌ها، پایه‌ای کلیدی در عملکرد حسگرهای نوری برای شناسایی دقیق آلاینده‌های فلزی به شمار می‌آید. در این مقاله، علاوه بر کاربردهای کربن کوانتوم دات در حوزه‌های گوناگون، کاربرد کربن کوانتوم دات به عنوان حسگر نوری در شناسایی یک یا چند آلاینده فلزی به صورت تک و یا هم‌زمان بیان شده است. سپس، به کاربرد کربن کوانتوم دات‌های دوپ شده با یک یا چند عنصر در شناسایی کاتیون‌های فلزی پرداخته شده است. در نهایت، چالش‌های موجود و چشم‌انداز آینده کاربرد کربن کوانتوم دات‌ها به عنوان حسگر مورد بررسی قرار گرفته است.

### اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۱/۱۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۴/۰۳

در دسترس به صورت الکترونیکی: ۱۴۰۴/۰۴/۲۹

شاپا چاپی: ۲۲۵۱-۷۲۷۸

شاپا الکترونیکی: ۲۳۸۳-۲۲۲۳

DOI: 10.30509/jscw.2025.167510.1228

### واژه‌های کلیدی:

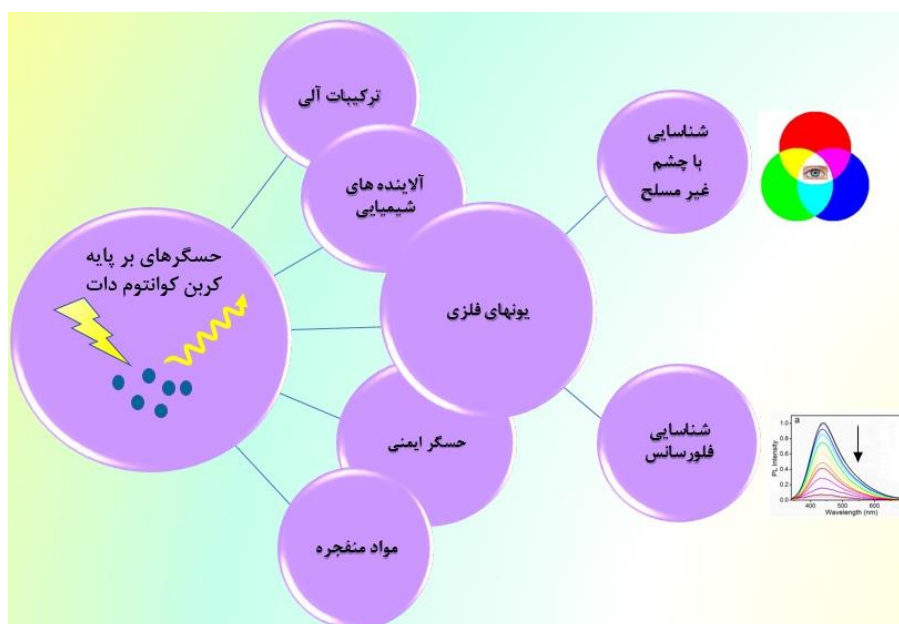
کربن کوانتوم دات

شناسایی

فلزات سنگین

حسگر فلورسنت

کربن کوانتوم دات دوپ شده



## ۱- مقدمه

نانو نورهای کربنی پس از کشف آن‌ها در فرایند خالص‌سازی نانولوله‌های کربنی، توجه بسیاری از پژوهشگران را در حوزه حسگرهای (شیمیایی/زیستی)، تصویربرداری زیستی، استخراج/بازیابی انرژی، زیست پزشکی و فوتوکاتالیست به خود جلب کرده‌اند. این کوچک‌ترین عضو خانواده کربنی دارای خواص نوری و فیزیکی - شیمیایی منحصر به فردی از جمله بازده کوانتومی بالا و لومینسانس قابل تنظیم است، اگرچه منشا این خواص هنوز به‌طور کامل توضیح داده نشده است. علاوه بر این، تنوع ذاتی آن‌ها (مانند ویژگی‌های سطحی، سازگاری محیطی و غیرسمی بودن) استفاده گسترده آن‌ها را به عنوان پروب‌های حسگر نسبت به سایر نانومواد و ترکیبات آلی تقویت کرده است. در مقابل، سایر اعضای این خانواده (مانند رنگرهای نشانگر و کوانتوم دانه‌های نیمه‌رسانا) گزارش شده‌اند که از مشکلاتی مانند سنتز پیچیده، سفیدشدن<sup>۱</sup> یا مسائل سمیت رنج می‌برند. در میان نانومواد فلورسنت کربنی مختلف، کربن کوانتوم دانه‌ها که به عنوان کربن دانه‌ها نیز شناخته می‌شوند، به دلیل قابلیت آن‌ها در پیوند با گیرنده‌های انتخابی مطلوب بر روی سطح شان توجه علمی را به خود جلب کرده‌اند. به دلیل اصلاح سطحی آسان آن‌ها با استفاده از گروه‌های عاملی متنوع (مانند کربوکسیل، اپوکسی و هیدروکسیل)، کربن کوانتوم دانه‌ها می‌توانند به راحتی انتخاب‌پذیری خود را در برابر مولکول‌های هدف جدید ارتقا دهند. همچنین از دیدگاه تجاری، به دلیل روش‌های سنتز تثبیت‌شده (از جمله تف کافت<sup>۲</sup>، سنتز هیدروترمال، سنتز میکروویو و غیره)، این مواد برای تولید در مقیاس بزرگ نیز مناسب هستند (۱).

امکان‌پذیری استفاده از کربن کوانتوم دانه‌ها در کاربردهای حسگری به‌طور گسترده‌ای برای تشخیص آلاینده‌های زیست محیطی مانند کاتیون‌ها، آنیون‌ها، مولکول‌های زیستی و آلاینده‌های آلی کوچک (علف‌کش‌ها/آفت‌کش‌ها) بررسی شده است. سازوکار اساسی حسگری برای استفاده از کربن کوانتوم دانه‌ها به عنوان پروب‌های حسگر بر اساس خاموشی یا تقویت فلورسانس ناشی از سنجیدنی<sup>۳</sup> با تشکیل کمپلکس با کربن کوانتوم دانه‌های از پیش خاموش‌شده (از طریق سازوکار انتقال الکترون/انرژی با گیرندگی یا دهنده‌گی الکترون توسط سنجیدنی) استوار است. در چند سال اخیر افزایش تعداد مقالات مرتبط با استفاده از کربن کوانتوم دانه‌ها به عنوان حسگر برای فلزات سنگین/شبه فلزات در محیط‌های آبی مشاهده شده است (۲).

آلودگی منابع آب به فلزات سنگین/شبه فلزات به دلیل اثرات زیان‌بار آن‌ها بر سلامت، یک چالش جهانی است. ماهیت غیرقابل تجزیه

و سمی بودن آن‌ها در مقادیر کم، لزوم نظارت بر سطح و تکامل آن‌ها در منابع آب در طول زمان را ضروری می‌سازد (۳). این آلاینده‌های معدنی عمده‌ترین سهم را از انواع آلاینده‌های معدنی تشکیل می‌دهند و عمدتاً به شکل کاتیون‌ها (مانند  $\text{Hg}^{2+}$ ،  $\text{Cd}^{2+}$ ،  $\text{Pb}^{2+}$ ،  $\text{Co}^{2+}$ ،  $\text{Fe}^{3+}$ ،  $\text{Zn}^{2+}$  و  $\text{Ni}^{2+}$ ) و آنیون‌ها (مانند  $\text{AsO}_4^{3-}$ ،  $\text{AsO}_3^{3-}$ ،  $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ ،  $\text{SeO}_3^{2-}$  و غیره) حضور دارند. لازم به ذکر است که برخی از این عناصر (به جز  $\text{Hg}$ ) در سطوح کم برای تنظیم فعالیت‌های سوخت و ساز<sup>۴</sup> انسانی و عملکردهای زیستی سلولی مانند انتقال و سیگنال‌دهی سلولی ضروری هستند. با این حال، حتی غلظت‌های بسیار کم فلزات سمی (مانند جیوه و آرسنیک) می‌توانند اثرات زیان‌باری در قالب آسیب به استخوان‌ها، اندام‌های حیاتی بدن (مانند کبد، کلیه و غیره) و سیستم عصبی مرکزی داشته باشند. این فلزات از طریق مهار آنزیم‌ها، تنش اکسایشی و نقص در سازوکارهای آنتی‌اکسیدانی باعث اختلالات سلولی می‌شوند. این مسیرها منجر به تشکیل گونه‌های اکسیژن فعال می‌شوند که می‌تواند باعث آسیب به DNA، پراکسایش لیپیدها، توقف مسیرهای سنتزی و کاهش پروتئین‌های سولفیدریل شود. وجود این آلاینده‌های معدنی عمدتاً به دلیل فعالیت‌های با منشا زمینی است، در حالی که فعالیت‌های صنعتی سطح و میزان آن‌ها را بیشتر کرده است (۴).

به‌طور کلی، روش‌های متداول مانند طیف‌سنجی جرمی پلاسمای جفت‌شده القایی (ICP-MS)، کروماتوگرافی یونی (IC)، طیف‌سنجی جذب اتمی (AAS)، طیف‌سنجی نشری نوری با پلاسمای جفت‌شده القایی (ICP-OES)، آزمون فعال‌سازی نوترونی و آزمون فلورسانس پرتو ایکس برای ارزیابی کیفی و کمی فلزات مورد استفاده قرار گرفته‌اند که در آن نمونه‌ها به‌صورت خارج از محل جمع‌آوری، ذخیره و قبل از آزمون پیش‌پردازش می‌شوند. با این حال، این گزینه‌های متداول معمولاً از چندین عیب از جمله ابزارهای گران‌قیمت، نیاز به تخصص و روش‌های آماده‌سازی پیچیده رنج می‌برند. به عنوان جایگزینی برای این روش‌های متداول، روش‌های حسگری با استفاده از انتقال نوری و الکتروشیمیایی به دلیل مزایای فراوان (مانند حساسیت خوب، طراحی ساخت‌افزار ساده‌تر و قابلیت استفاده در میدان) مورد توجه زیادی قرار گرفته‌اند. با این حال، ویژگی‌های تحلیلی این روش‌های قابل استفاده در میدان به شدت به قابلیت آن‌ها برای کاربردهای تحلیلی در بستر واقعی با حساسیت عالی، انتخاب‌پذیری، پایداری، غیرسمی بودن، قابلیت استفاده مجدد، بازه تشخیص و هزینه وابسته است (۵-۸).

در طول سالیان، پژوهشگران مواد طیف گسترده‌ای از نانومواد (مانند نانوذرات فلزی، نانوساختارهای نیمه‌رسانا، اکسیدها، پلیمرها، چارچوب‌های فلز-آلی و کالکوئیدها<sup>۵</sup>) را به عنوان پروب‌های حساس برای تشخیص فلزات سنگین/شبه فلزات در آب گزارش کرده‌اند. کربن

<sup>4</sup> Analyte

<sup>5</sup> Metabolic

<sup>6</sup> Chalcogenide

<sup>1</sup> Carbon nanolights

<sup>2</sup> Beaching

<sup>3</sup> Pyrolysis

کوانتوم دات‌ها به دلیل ویژگی‌های منحصربه‌فرد و کاربردهای بالقوه آن‌ها در رشته‌های مختلف، توجه زیادی را به این مواد جلب کرده است. کاربردهای متعدد آن‌ها شامل تصویربرداری زیستی، حسگرها، الکترونیک نوری، ذخیره‌سازی انرژی و کاتالیست است، اما تنها به این‌ها محدود نمی‌شود. کربن کوانتوم دات‌ها به عنوان پروب‌های فلورسانس برای برچسب‌گذاری و ردیابی سلول‌ها یا بافت‌ها در سیستم‌های زیستی در تصویربرداری زیستی قابلیت خود را نشان داده‌اند (۱۰). علاوه بر این، خواص فتولومینسانس برتر آن‌ها، این مواد را حسگرهایی مناسب می‌سازد که برای تشخیص انواع سنجیدنی‌ها مانند فلزات سنگین یا آلاینده‌های آلی استفاده می‌شوند. کربن کوانتوم دات‌ها در الکترونیک نوری برای ایجاد سلول‌های خورشیدی کارآمد مورد استفاده قرار گرفته‌اند. روش‌های تصویربرداری زیستی و حسگرهای زیستی که از کربن کوانتوم دات‌ها استفاده می‌کنند، تحولی در شناسایی و ویژگی‌یابی گزینه‌های دارویی در کشف دارو ایجاد کرده‌اند. کربن کوانتوم دات‌ها در کاربردهای متنوع، مزایای زیادی از خود نشان می‌دهند و به موادی بسیار مورد توجه در حوزه‌هایی چون الکترونیک نوری، پزشکی زیستی، تصفیه محیط‌زیست و ذخیره انرژی تبدیل شده‌اند. خواص نوری قابل تنظیم آن‌ها، به‌ویژه فتولومینسانس وابسته به اندازه، که امکان کنترل دقیق طول موج‌های انتشار را فراهم می‌آورد، یک مزیت قابل توجه است و استفاده از آن‌ها در LEDها، آشکارسازهای نوری و تصویربرداری زیستی را تسهیل می‌کند. علاوه بر این، طیف جذب گسترده آن‌ها باعث می‌شود که گزینه‌های مناسبی برای سلول‌های خورشیدی و نوردرمانی باشند. زیست‌سازگاری بالا و سمیت پایین آن‌ها، به‌ویژه در کاربردهای زیست‌پزشکی، جذابیت کربن کوانتوم دات‌ها را افزایش می‌دهد. زیست‌سازگاری بالای آن‌ها امکان استفاده ایمن در تصویربرداری زیستی، دارورسانی و تشخیص و درمان را فراهم می‌کند و روش‌های درمانی هدفمند و کارآمدی برای بیماری‌هایی هم‌چون سرطان ارائه می‌دهد. وجود گروه‌های عاملی غنی روی سطح کربن کوانتوم دات‌ها، از جمله گروه‌های هیدروکسیل، کربوکسیل و آمینو، اصلاح سطح آن‌ها را به راحتی ممکن می‌سازد و اتصال لیگاند‌های هدف و مولکول‌های زیستی را تسهیل کرده و در نتیجه، اختصاصی بودن و تطبیق‌پذیری آن‌ها در کاربردهای مختلف را افزایش می‌دهد (۱۱). کربن کوانتوم دات‌ها در حسگرهای محیطی و شناسایی، حساسیت فوق‌العاده‌ای به تغییرات محیطی و سنجیدنی‌ها نشان می‌دهند که آن‌ها را به ابزارهای ارزشمندی برای پایش محیط‌زیست، ایمنی غذایی، تشخیص پزشکی و کنترل فرایندهای صنعتی تبدیل کرده است. توانایی آن‌ها در تشخیص مواد مختلف، از فلزات سنگین گرفته تا مولکول‌های زیستی و گازها، تطبیق‌پذیری و کاربردپذیری آن‌ها را در محیط‌های گوناگون نشان می‌دهد. علاوه بر این، کربن کوانتوم دات‌ها در فناوری‌های ذخیره و تبدیل انرژی نیز به دلیل سطح مقطع بالا، رسانایی الکتریکی عالی و فعالیت الکتروکاتالیزی خود نوید بخش هستند. ادغام آن‌ها در ابرخازن‌ها، باتری‌ها

کوانتوم دات‌ها دارای خواص فلورسانس هستند که طی آن، پس از تحریک توسط نور در طول موج مشخص، نوری با رنگ خاص گسیل می‌کنند. این رنگ فلورسانسی، به اندازه نقاط کوانتومی، گروه‌های عاملی سطحی و نوع ماده دوپ‌شده (مثلاً نیتروژن، گوگرد، فلزات) بستگی دارد. بنابراین، بررسی تغییر رنگ تابشی کربن کوانتوم دات (در ناحیه مرئی) یک ابزار کلیدی در شناسایی نوری آلاینده‌های فلزی است. در حسگرهای نوری مبتنی بر کربن کوانتوم دات، در حضور یون‌های فلزی، شدت یا رنگ تابش فلورسانس می‌تواند کاهش<sup>۱</sup>، افزایش یا حتی جابجایی طیفی پیدا کند. این تغییر رنگ، نشانه‌ای از برهم‌کنش با یون هدف است و مبنای عملکرد حسگری به‌شمار می‌رود. با این حال، کشف اخیر کربن کوانتوم دات‌ها به طور قابل‌توجهی به گسترش انتخاب شرایط حسگری برای تشخیص فلزات سنگین کمک کرده است. در نتیجه، این بررسی بر کاربرد کربن کوانتوم دات‌ها در شناسایی فلزات سنگین در آب تمرکز دارد. همچنین کربن کوانتوم دات‌ها در دسته‌های کربن کوانتوم دات‌های اصلاح‌نشده و اصلاح‌شده برای تشخیص فلزات سنگین در آب بررسی شده‌اند. برای تنظیم خواص نوری و سطحی کربن کوانتوم دات‌ها، به طور کلی اصلاح سطحی، پاسیو کردن سطح<sup>۲</sup> یا دوپ کردن اتمی ترجیح داده می‌شود تا خواص طیفی آن، برای ویژگی‌های حسگری و یا انتخاب پذیری ارتقا یابد (۶).

همچنین، مسیر سنتز سبز برای به‌دست آوردن کربن کوانتوم دات‌ها از منابع طبیعی موجود به عنوان یک عمل اقتصادی قابل قبول شناخته شده است. این روش سنتز از دیدگاه تجاری برای تولید در مقیاس بزرگ کربن کوانتوم دات‌ها به دلیل دسترسی به پیش‌ماده‌های فراوان و ارزان قیمت/مواد زائد مناسب است. این امر به مدیریت پسماند نیز کمک خواهد کرد (۷).

در مقاله پیشین، روش تهیه حسگرهای نوری بر پایه کربن کوانتوم دات برای شناسایی یون‌های فلزی و سازوکار شناسایی آن، توضیح داده شد (۸). این بررسی با هدف برجسته‌سازی و بحث در مورد کاربرد کربن کوانتوم دات‌ها و کربن کوانتوم دات‌های دوپ‌شده به‌عنوان حسگرهای دوست‌دار محیط‌زیست برای آلاینده‌های فلزات سنگین/شبه فلزات در آب ترتیب داده شده است. به‌کارگیری کربن کوانتوم دات‌ها که دوست‌دار محیط‌زیست و مقرون به‌صرفه هستند، به عنوان مواد حسگر در سیستم‌های مختلف با قابلیت خوانش در محل و دیجیتال می‌تواند یک راه‌حل جامع و کم‌هزینه برای تشخیص فلزات سنگین/شبه فلزات به کاربران ارائه دهد (۶).

## ۲- کاربردهای کربن کوانتوم دات

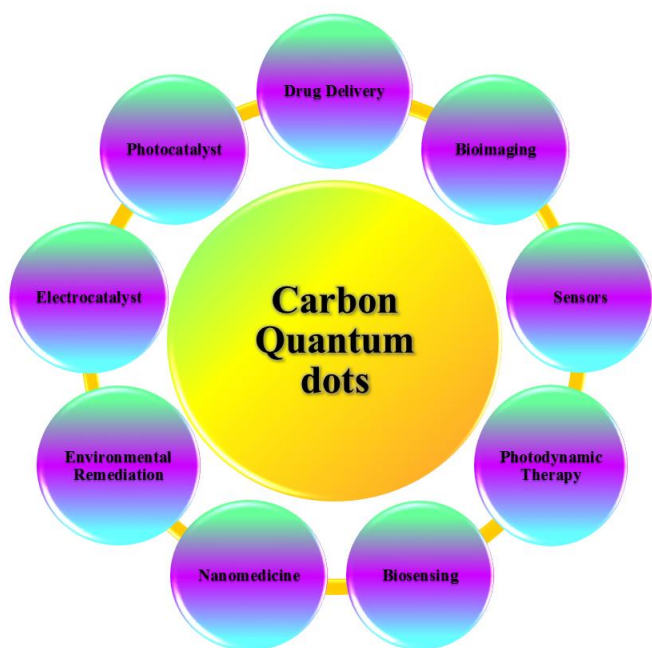
کربن کوانتوم دات‌ها نانومواد نوظهوری هستند که به‌دلیل خواص نوری، الکتریکی، حرارتی و زیست‌سازگاری منحصربه‌فردشان به طور گسترده در زمینه‌های مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرند (۹). استفاده از کربن

<sup>2</sup> Surface passivation

<sup>1</sup> Quenching

در سطح کربن کوانتوم دات ایجاد شود که بر عملکرد فلورسانس تاثیرگذار است (۱۵).

یکی از موضوعات قابل توجه در ارتباط با کربن کوانتوم دات‌ها، موضوع بازیابی آنها می باشد. برخی از کربن کوانتوم دات‌ها، امکان استفاده مجدد در فرایند شناسایی را دارند، به ویژه اگر فرایند جذب یون فلزی برگشت پذیر باشد. این موضوع در حسگرهای فلورسانس اهمیت بالایی دارد تا بتوانند در چند چرخه اندازه گیری بدون افت عملکرد کار کنند. در این میان، شستشو با بافرهای مناسب یا محلول‌های شیمیایی برای دفع یون‌های جذب شده و استفاده از تغییر شرایط pH یا دما برای آزادسازی یون‌های فلزی از سطح کربن کوانتوم دات، از روش‌های بازیابی کربن کوانتوم دات‌ها می باشد. ولیکن، فرایند بازیابی دارای محدودیت‌هایی نیز می باشد، از جمله زمانی که یون‌ها کمپلکس‌های قوی یا واکنش‌های شیمیایی غیرقابل برگشت با کربن کوانتوم دات‌ها تشکیل دهند. در این موارد، افت تدریجی عملکرد حسگر دیده می شود (۱۶).



شکل ۱: کاربردهای کربن کوانتوم دات‌ها در حوزه‌های مختلف.

Figure 1: Application areas of Carbon Quantum dots.

و الکتروکاتالیست‌ها به توسعه راه‌حل‌های انرژی کارآمد و پایدار کمک می کند (۱۲). دسترسی به روش‌های تولید انبوه، از جمله روش‌های هیدروترمال، سنتز به کمک مایکروویو و روش الکتروشیمیایی، امکان تولید انبوه و تجاری سازی کربن کوانتوم دات‌ها را فراهم کرده است. در نهایت، تنوع کربن کوانتوم دات‌ها به ادغام آن‌ها در مواد کاربردی مختلف مانند پلیمرها، کامپوزیت‌ها، منسوجات و پوشش‌ها می انجامد (۱۳). زمینه‌های کاربرد کربن کوانتوم دات‌ها در شکل ۱ نمایش داده شده‌اند.

کربن کوانتوم دات‌ها به دلیل خواص فلورسانس منحصر به فرد خود، ابزار موثری برای شناسایی فلزات سنگین در محیط‌های آبی هستند. حساسیت بالای آن‌ها به تغییرات شیمیایی و وجود گروه‌های عاملی سطحی، امکان شناسایی دقیق و سریع این فلزات را فراهم می کند. همچنین زیست سازگاری و کم خطر بودن کربن کوانتوم دات‌ها، آن‌ها را به گزینه‌ای مناسب برای استفاده در پایش محیط زیست و ایمنی غذایی تبدیل کرده است. در ادامه به کاربرد کربن کوانتوم دات‌ها در شناسایی فلزات مختلف به تفصیل پرداخته شده است.

## ۱-۲- ویژگی‌های کربن کوانتوم دات‌ها

با توجه به آنچه در ادامه ذکر خواهد شد کربن کوانتوم های دوپ شده و دوپ نشده دارای مزایا و معایبی می باشند که هر کدام به طور مجزا در بخش مربوطه بحث خواهد شد. جدول ۱، مزایا و معایب کربن کوانتوم دات‌های دوپ شده و نشده را بیان می کند (۹۰، ۱۴). در مجموع، کربن کوانتوم دات‌ها، به تنهایی مزایای متعددی در کاربردهای نوری دارند، اما دوپ کردن با عناصر مناسب موجب ارتقا عملکرد حسگری آن‌ها می شود. کربن کوانتوم دات‌ها، به دلیل ساختار کربنی و گروه‌های عاملی سطحی، پایداری نوری بالایی دارند و در طول زمان، تابش فلورسنت خود را حفظ می کنند. این ویژگی باعث می شود که در اندازه گیری‌های مکرر و در شرایط محیطی مختلف، عملکرد حسگر دچار افت قابل توجهی نشود. کربن کوانتوم دات‌های دوپ شده معمولاً پایداری نوری بهتری نسبت به دوپ نشده دارند، زیرا، فرایند دوپ کردن ساختار نانومواد را تقویت و انتقال بار را بهبود می بخشد. کربن کوانتوم دات‌های دوپ شده و دوپ نشده، معمولاً در محیط‌های آبی و متنوع شیمیایی مقاوم هستند. با این حال، در حضور یون‌های فلزی بسیار قوی و یا pH بسیار بالا/پایین ممکن است تغییراتی

جدول ۱: ویژگی‌ها (مزایا و معایب) کربن کوانتوم دات‌های دوپ شده و دوپ نشده (۸۸، ۸۶، ۱۰).

Table 1: Properties (advantages and disadvantages) of doped and undoped carbon quantum dots (1, 86, 88).

| Characteristics | CQDs (undoped)                                                                                                    | CQDs (doped)                                                                                                                                                             |
|-----------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Advantages      | -Simple and cost-effective synthesis<br>-High biocompatibility<br>-Good photostability<br>-Water dispersibility   | -Enhanced fluorescence intensity and quantum yield<br>-Increased selectivity toward specific ions<br>-Tunable optical band gap<br>-Reduced detection limit (LOD)         |
| Disadvantages   | -Relatively low sensitivity and selectivity toward certain ions<br>-Limited performance in simultaneous detection | -The doping process may require controlled conditions<br>-Potential reduction in biocompatibility with certain dopants<br>-Increased complexity of the synthesis process |

کوانتوم دات‌ها گزینه خوبی برای شناسایی  $Fe^{3+}$  در محیط‌های آبی هستند و قادر به تشخیص غلظت‌های تا ۰/۴۹ ppm می‌باشند (۱۹). در سال ۲۰۲۳ جمعی از محققان بر روی تولید کربن دات از زرده تخم‌مرغ تمرکز کردند. آن‌ها توانستند کربن دات‌هایی سنتز کنند که تحت تابش UV فلور سانس آبی رو شن از خود ساطع کرده و به طور انتخابی  $Fe^{3+}$  را در محلول شناسایی کند. محدوده خطی تشخیص این یون ۰/۴۵-۰/۰۵ mM تعیین شد. علاوه بر این، این کربن دات‌ها می‌توانند توسط سلول‌های سرطانی کبد انسان (HepG2) جذب شده و فلور سانس آبی رو شنی را ساطع کنند. شدت فلور سانس می‌تواند سطح  $Fe^{3+}$  درون سلولی را نشان دهد و بدین ترتیب این مواد می‌توانند برای تصویربرداری سلولی و پایش  $Fe^{3+}$  درون سلولی استفاده شوند (۲۰). یوسفی و همکارانش در تحقیقی، کربن کوانتوم دات با بازده کوانتومی فلور سانس بالا، به روش هیدروترمال، از برگ درخت جمبو تهیه نمودند. همچنین، از نانو الیاف پلی وینیل الکل/کیتوسان به عنوان بستر برای تثبیت کربن کوانتوم دات‌ها استفاده شد و برای شناسایی کاتیون‌های آهن (III) استفاده گردید. نتایج نشان دهنده کاهش خاصیت فلور سانس حسگر تهیه شده در مواجهه با آهن (III) در مقایسه با سایر کاتیون‌ها بوده است (شکل ۲) (۲۱). پژوهش‌های متعدد دیگری نیز در زمینه شناسایی  $Fe^{3+}$  در سال‌های اخیر انجام شده‌اند (۲۲-۲۵).

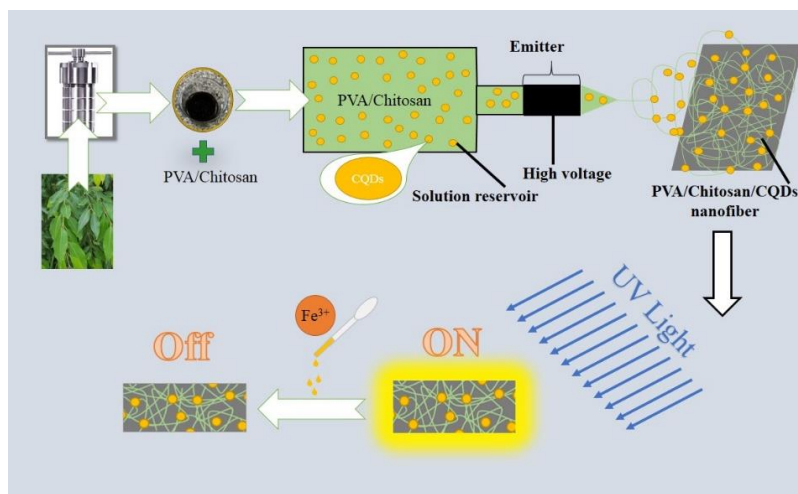
### ۳-۲- کاربرد کربن کوانتوم دات در شناسایی کاتیون جیوه (II)

پژوهش‌های زیادی برای شناسایی یون  $Hg^{2+}$  با استفاده از کربن کوانتوم دات‌ها صورت گرفته است (شکل ۳) (۲۶، ۲۷).

### ۳- کاربرد کربن کوانتوم دات در شناسایی آلاینده‌های فلزی

#### ۳-۱- کاربرد کربن کوانتوم دات در شناسایی کاتیون آهن (III)

در سال ۲۰۲۴ گروهی از محققان با استفاده از پودر تخمه کدو حلویی به روش کربون‌شدن به کمک مایکروویو، موفق شدند کربن دات سنتز کنند. ذرات سنتز شده دارای خواص فوتولومینس سانس با پیک ن شری به رنگ آبی رو شن در ۳۹۹ nm و بازده کوانتومی حدود ۹/۵ درصد بودند. کربن دات‌ها برای تشخیص یون‌های آهن با حد تشخیص  $2/54 \mu M$  استفاده شدند. تعامل بین یون‌های  $Fe^{3+}$  و کربن دات‌ها با استفاده از روش‌های طیف سنجی فلور سانس ارزیابی شد که روش شناسایی انتخابی و ساده‌ای برای یون‌های  $Fe^{3+}$  در محیط آبی است (۱۷). ژانگ و همکاران در سال ۲۰۲۲ از روش هیدروترمال از پایین به بالا برای تهیه کربن کوانتوم دات از گیاه سنبل آبی در دمای ثابت  $180^\circ C$  استفاده کردند. کربن کوانتوم دات‌ها دارای اندازه یکنواخت، ساختار گرافیت بی‌شکل، حلالیت بالا در آب و پایداری نوری بالا بودند. نتایج نشان داد که محلول آبی این مواد می‌تواند یون‌های  $Fe^{3+}$  را با سرعت، حساسیت و انتخاب‌پذیری بالا شناسایی کند. حد تشخیص  $0/084 \mu M$  در محدوده خطی  $0-30 \mu M$  گزارش شده است، که بسیار کمتر از حد تشخیص  $0/77 \mu M$  تعیین شده توسط سازمان بهداشت جهانی می‌باشد (۱۸). در پژوهشی دیگر در سال ۲۰۲۱، سنتز کربن کوانتوم دات‌ها با استفاده از آسکوربیک اسید به عنوان پیش‌ساز ارزان و دوست‌دار محیط‌زیست در راکتورهای با فشار و دمای بالا انجام شد. اندازه ذرات در محدوده ۲-۶ nm و دارای ساختار منظم گزارش شده است. آزمایشات نشان داد که کربن

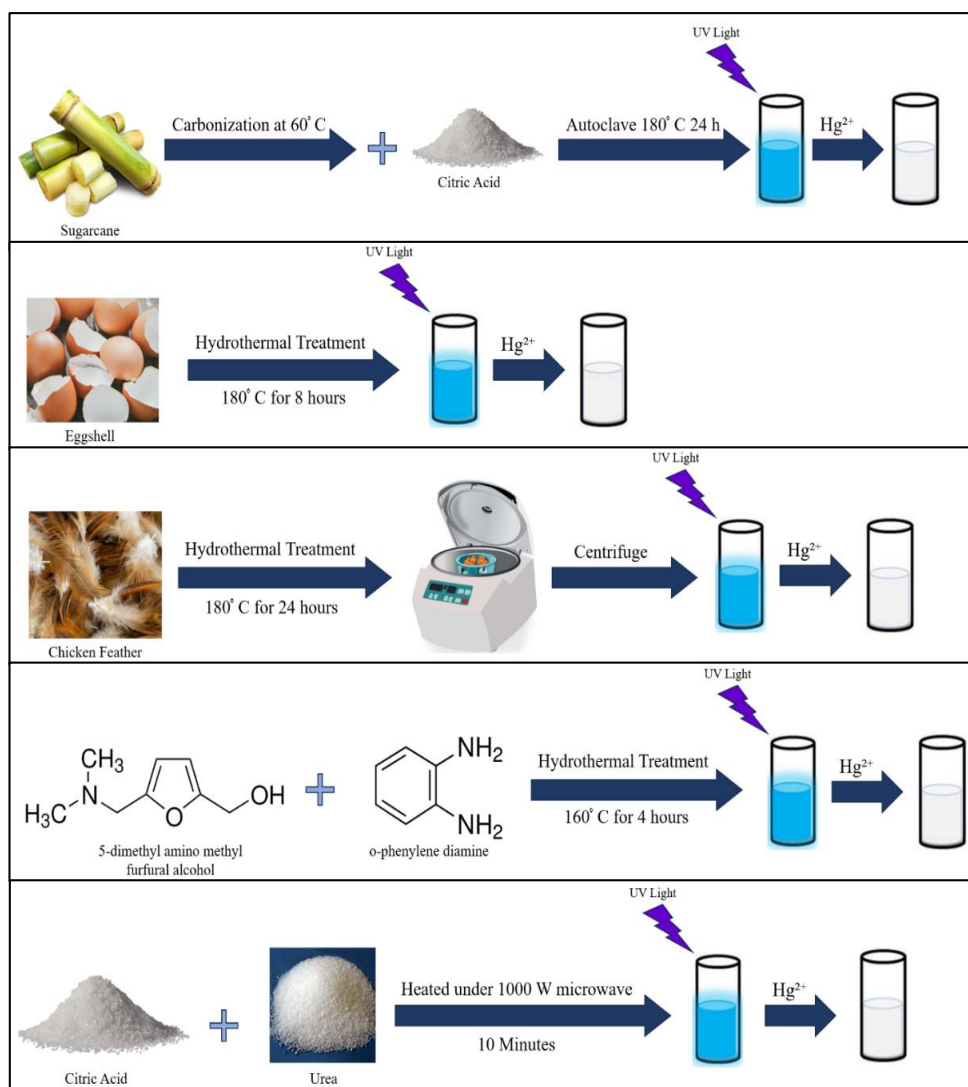


شکل ۲: تهیه کربن کوانتوم دات از برگ درخت جمبو و تثبیت آن بر روی پلی وینیل الکل/کیتوسان برای شناسایی آهن (III) (۱۷).

Figure 2: Preparation of CQDs from Syzygium Cumini leaves and its stabilization on PVA/Chitosan for the detection of Fe (III) (17).

<sup>2</sup> Zhang

<sup>1</sup> Limit of detection (LOD)



شکل ۳: کربن کوانتوم دات‌ها در شناسایی یون جیوه (II) (۲۶-۲۲).

Figure 3: Carbon Quantum Dots in Mercury (II) Sensing (22-26).

۴۲۰ داشتند و بازده سنتز تقریباً ۹/۶ درصد بود. این ذرات با استفاده از خواص فلورسانس خود توانستند یون  $Hg^{2+}$  را با حد تشخیص  $2/6 \mu M$  شناسایی کنند. همچنین محدوده خطی تشخیص  $10-100 \mu M$  می‌باشد (۲۹). دورایسامی<sup>۱</sup> و همکاران، در سال ۲۰۲۳ با روش هیدروترمال یک مرحله‌ای با بازده کوانتومی ۷۷/۲ درصد، کربن کوانتوم دات‌هایی به قطر ۵-۱۰ nm با فلورسنت سبز سنتز کردند. کربن کوانتوم دات‌ها به عنوان یک حسگر فلورسنت برای شناسایی انتخابی و با حساسیت بالای یون  $Hg^{2+}$  استفاده شدند. حد تشخیص این کاتیون  $6/2 \text{ nM}$  و محدوده خطی  $500-0 \mu M$  گزارش شده است (۳۰). در پژوهش دیگری در همان سال، کربن کوانتوم دات‌ها از طریق روش هیدروترمال سنتز شد. کربن کوانتوم دات‌های تولید شده در معرض تابش پرتو فرابنفش،

سنتز کربن کوانتوم دات‌ها با استفاده از نیشکر به عنوان منبع کربن به روش هیدروترمال، که از نظر محیط‌زیستی و اقتصادی مقرون به صرفه است، را بررسی کردند. این مواد به عنوان حسگر برای شناسایی یون‌های  $Hg^{2+}$  استفاده شد. حد تشخیص  $0/1 \mu M$  و محدوده خطی  $300-0 \mu M$  گزارش شده است. به دلیل سمیت سلولی پایین و زیست سازگاری خوب، از کربن کوانتوم دات‌های سنتز شده برای تصویربرداری زنده سلولی استفاده گشت که نتیجه قابل قبولی داشت (۲۸).

پژوهشگران در سال ۲۰۲۰ از پوسته تخم‌مرغ به عنوان منبع کربن برای سنتز کربن کوانتوم دات‌های محلول در آب استفاده کردند. کربن کوانتوم دات‌های عامل‌دار تولید شده حداکثر قله نشری فلورسانس در nm

<sup>1</sup> Duraisamy

حسگرهای شیمیایی فوق حساس برای تشخیص کاتیون Cr (VI) به کار رفت. محدوده خطی شناسایی برای این یون بازه  $0.250-0.014$   $\mu\text{M}$  تعیین شد و حد تشخیص  $0.014$   $\mu\text{M}$  به دست آمد (۳۶). جمعی از محققان در سال ۲۰۲۴ به روش هیدروترمال موفق شدند کربن کوانتوم دات‌هایی سنتز کنند که قادر به شناسایی یون Cr (VI) بود. شرایط بهینه برای شناسایی، دمای اتاق، pH از ۷ تا ۸ و زمان واکنش ۳۰ دقیقه به دست آمد. حد تشخیص  $3/86$   $\mu\text{M}$  و بازه خطی شناسایی  $20-90$   $\mu\text{M}$  بود (۳۷). تحقیقات دیگری نیز در این زمینه انجام گرفته است (۳۸-۴۰).

**۳-۴- کاربرد کربن کوانتوم دات در شناسایی کاتیون سرب (II)**  
مطالعاتی بر روی شناسایی یون سرب به کمک کربن کوانتوم دات‌ها صورت گرفته است. ژائو<sup>۴</sup> و همکارانش در سال ۲۰۲۴ کربن کوانتوم دات‌هایی با فلورسانس آبی رنگ تولید نمودند. ذرات تولید شده توانستند به عنوان حسگر بسیار حساس برای شناسایی یون  $\text{Pb}^{2+}$  به کار روند. در محدوده غلظت بین  $0.06-0.42$   $\mu\text{M}$  رابطه خطی وجود داشت و حد تشخیص مقدار  $0.42$   $\mu\text{M}$  مشخص گردید. همچنین این حسگر می‌تواند در حضور یون‌های فلزی دیگری نیز یون سرب (II) را شناسایی کند که می‌تواند گزینه‌ای مناسب برای کاربری در نمونه‌های آب واقعی باشد (۴۱). جمعی از پژوهشگران در سال ۲۰۲۲ کربن دات‌هایی با اصلاح شیمیایی با گلوکاتیون<sup>۵</sup> سنتز کردند که انتشار سبز رنگی از خود نشان دادند. این ماده توانست به عنوان حسگر فلورسنت یون  $\text{Pb}^{2+}$  را در محدوده خطی  $10-700$  nM شناسایی کند. همچنین حد تشخیص nM  $2/7$  گزارش شده است (۴۲). در پژوهشی در سال ۲۰۲۳ یک حسگر الکتروشیمیایی با استفاده از کربن کوانتوم دات‌های سنتز شده به روش هیدروترمال و یک کامپوزیت ژئولیتی برای شناسایی یون  $\text{Pb}^{2+}$  ساخته شد. این حسگر یون سرب (II) را با حد تشخیص  $0.04$  nM و در محدوده خطی غلظت  $1$  nM تا  $1$   $\mu\text{M}$  شناسایی نمود. همچنین در حضور یون‌های دیگر نیز توانست توانایی تشخیص خود را حفظ کند (۴۳). محققان در سال ۲۰۲۱ با استفاده از محصولات کشاورزی مقرون به صرفه و به روش هیدروترمال ساده، موفق به تولید کربن دات با بازده کوانتومی ۵۲ درصد شدند. خواص نوری این ماده تابعی از pH و طول موج گزارش شد. کربن دات‌ها توانستند یون فلزی  $\text{Pb}^{2+}$  را به صورت انتخابی و با حساسیت بالا در نمونه واقعی پساب با حد تشخیص  $0.18$  nM شناسایی نمایند (۴۴). در پژوهشی در سال ۲۰۲۳ پژوهشگران توانستند با آب هندوانه به عنوان ماده پیش‌ساز، کربن کوانتوم دات‌های عامل‌دار شده گوناگونی تولید کنند. در میان آن‌ها تنها کربن کوانتوم دات‌هایی که با اتیلن دی‌آمین عامل‌دار شده بودند توانستند یون  $\text{Pb}^{2+}$  را به صورت انتخابی شناسایی

انتشار زرد رنگ نشان دادند. از این ذرات برای شناسایی یون  $\text{Hg}^{2+}$  استفاده شد و مشخص گردید که محدوده خطی  $100-15$   $\mu\text{M}$  و حد تشخیص  $5/2$  nM می‌باشد. همچنین یون جیوه (II) در نمونه‌های آب واقعی نیز با موفقیت شناسایی شد (۳۱). ژانگ<sup>۱</sup> و همکارانش در سال ۲۰۱۹ کربن کوانتوم دات‌هایی اصلاح‌شده با پیروفسفات برای تشخیص جیوه (II) سنتز کردند. کاتیون  $\text{Hg}^{2+}$  با گروه‌های پیروفسفات روی سطح کربن کوانتوم دات‌های اصلاح‌شده با پیروفسفات واکنش داده و یک کمپلکس غیر فلورسنت تشکیل می‌دهد که منجر به خاموش شدن فلورسانس سبزرنگ می‌شود. شناسایی یون  $\text{Hg}^{2+}$  توسط این ذرات حد تشخیص nM  $2$  داشته و در محدوده  $0.1-1/4$   $\mu\text{M}$  خطی می‌باشد. کربن کوانتوم دات‌های اصلاح‌شده با پیروفسفات همچنین برای تشخیص یون جیوه (II) در سلول‌های هیپاتوسیت انسان نیز به کار رفت (۳۲).

**۳-۳- کاربرد کربن کوانتوم دات در شناسایی کاتیون کروم (VI)**  
وانگ<sup>۲</sup> و همکارانش در سال ۲۰۲۲ به روش هیدروترمال یک مرحله‌ای، کربن کوانتوم دات دارای فلورسنت آبی سنتز کردند. این کربن کوانتوم دات‌ها پایداری فلورسانس خوب، حلالیت در آب و سمیت سلولی کم از خود نشان دادند. از این ماده می‌توان به عنوان حسگر با حساسیت بالا برای تشخیص یون کروم (VI) استفاده نمود. حد تشخیص  $0.25$   $\mu\text{M}$  و محدوده خطی شناسایی  $100-1$   $\mu\text{M}$  برای این یون مشاهده شد. همچنین کربن کوانتوم دات‌های تولید شده موفق شدند کروم (VI) را در نمونه واقعی آب نیز شناسایی کنند (۳۳). یانگ<sup>۳</sup> و همکارانش در سال ۲۰۲۱ از کیتوسان و اورتو فنیلین دی‌آمین به روش کربن‌شدن هیدروترمال موفق به تولید کربن دات‌هایی با انتشار آبی شدند. این مواد حلالیت، پایداری و فلورسانس عالی را در محلول‌های آبی نشان دادند. کربن دات‌ها به عنوان حسگر برای شناسایی یون کروم (VI) به کار رفتند. این حسگر توانست در محدوده خطی  $130-1$   $\mu\text{M}$  به خوبی این کاتیون را شناسایی کند و همچنین حد تشخیص  $0.91$   $\mu\text{M}$  به دست آمد. این شناساگر می‌تواند برای نمونه‌های واقعی آب نیز به کار گرفته شود (۳۴). جمعی از محققان در سال ۲۰۲۴ کربن کوانتوم دات‌هایی با استفاده از ترکیبی از نان کامل، آرد سویا و آب لیمو به روش هیدروترمال سنتز کردند. بالاترین بازده کوانتومی  $2/31$  درصد به دست آمد. این کربن کوانتوم دات‌ها توانستند به طور انتخابی یون‌های کروم (VI) را با حد تشخیص  $8$  ppm شناسایی کنند و محدوده خطی تشخیص از  $2/5$  ppm تا  $50$  ppm گزارش شده است (۳۵). در پژوهشی در سال ۲۰۲۳ از یک روش هیدروترمال ساده برای سنتز کربن کوانتوم دات‌ها استفاده کردند که سپس به عنوان

<sup>4</sup> Zhao<sup>5</sup> Glutathione<sup>1</sup> Zhang<sup>2</sup> Wang<sup>3</sup> Yang

دات‌ها موفق شدند کاتیون  $\text{Cu}^{2+}$  را در نمونه‌های واقعی آب با حد تشخیص ۱۰ nM و محدوده خطی ۱۰۰-۰  $\mu\text{M}$  شناسایی کنند (۴۹). ژیاو<sup>۶</sup> و همکارانش در سال ۲۰۲۱ کربن کوانتوم دات‌هایی به طریق روش هیدروترمال در یک فرایند بسپارش و کربن‌شدن متوالی سنتز کردند. این ذرات خاصیت انتشار دوگانه فلورسانس به رنگ‌های سبز در ۵۰۵ nm و قرمز در ۶۸۲ nm را دارا بودند. حسگر ساخته شده از کربن کوانتوم دات‌ها با حساسیت بسیار زیاد به صورت خطی یون  $\text{Cu}^{2+}$  را در محدوده ۵۰-۰ nM شناسایی نمود. حد پایین تشخیص ۳۷ pM به دست آمد. این حسگر می‌تواند برای شناسایی یون  $\text{Cu}^{2+}$  در سلول‌های زنده نیز به کار گرفته شود (۵۰). پژوهش‌های دیگری نیز در زمینه شناسایی این یون انجام گرفته است (۵۱).

**۳-۶- کاربرد کربن کوانتوم دات در شناسایی کاتیون آهن (II)**  
لی<sup>۷</sup> و همکارانش در سال ۲۰۱۹ برای سنتز سریع و با بازده بالا کربن دات‌ها از آکریل آمید/کیتوسان به روش کربن‌شدن مایکروویو-هیدروترمال استفاده کردند. زمان واکنش و بازده سنتز به ترتیب ۳۰ دقیقه و ۴۵/۹ درصد بود. کربن دات‌های تولید شده توانستند یون  $\text{Fe}^{2+}$  را با حساسیت بالا و به صورت انتخابی شناسایی کنند و حد تشخیص برای این کاتیون فلزی ۱۶۰ nM به دست آمد. همچنین دامنه خطی غلظت ۵۰-۰  $\mu\text{M}$  گزارش شده است (۵۲). جمعی از پژوهشگران در سال ۲۰۲۱ با استفاده از گلوکز که یک پیش‌ساز در دسترس است، به طریق فرایند سنتز جریان هیدروترمال پیوسته توانستند کربن کوانتوم دات‌هایی با اندازه ۵/۵ ± ۲/۳ nm با شدت انتشار بهینه در ۴۴۶ nm تولید کنند. کربن کوانتوم دات‌ها بدون تغییرات اضافه دیگری توانستند یون آهن (II) را با حد تشخیص ۶/۰۹ ppm شناسایی کنند. ارزیابی چرخه حیات تایید می‌کند که فرایند سنتز جریان هیدروترمال پیوسته یک مسیر کارآمد و سبز برای سنتز کربن کوانتوم دات از پیش‌ساز گلوکز است (۵۳). داس<sup>۸</sup> و همکارانش در سال ۲۰۲۱ از عصاره ریشه جینسنگ به روش تابش مایکروویو موفق به تولید کربن دات شدند. این کربن دات‌ها با خاصیت انتشار فلورسانس توانستند یون  $\text{Fe}^{2+}$  را با حد تشخیص ۰/۲۷  $\mu\text{M}$  شناسایی کنند. همچنین محدوده خطی شناسایی این یون ۲۵-۰/۰۲  $\mu\text{M}$  به دست آمد (۵۴).

### ۳-۷- کاربرد کربن کوانتوم دات در شناسایی کاتیون‌های دیگر

کربن کوانتوم دات‌ها در شناسایی یون‌های فلزی دیگری نیز کاربرد دارند و از جمله آن‌ها می‌توان به  $\text{Ni}^{2+}$ ،  $\text{Co}^{2+}$ ،  $\text{Ag}^+$ ،  $\text{Mn}^{7+}$ ،  $\text{As}^{3+}$  و ... اشاره نمود. ورما<sup>۹</sup> و همکارانش در سال ۲۰۲۴ کربن کوانتوم دات‌هایی

کنند. حد تشخیص مقدار بسیار خوب ۱۹۰ pM به دست آمد که کم‌تر از حد مجاز در آب آشامیدنی (۷۲ nM) می‌باشد. این حسگر برای شناسایی یون سرب (II) در آب آلوده و سلول انسان به کار گرفته شد که می‌تواند به عنوان ابزار تشخیصی در محیط زیست و همچنین تحقیقاتی در زمینه‌های زیست پزشکی به کار رود (۴۵).

### ۳-۵- کاربرد کربن کوانتوم دات در شناسایی کاتیون مس (II)

لی<sup>۱</sup> و همکارانش در سال ۲۰۲۴ موفق شدند کربن کوانتوم دات‌هایی با انتشار سبز رنگ به وسیله روش مایکروویو سنتز کنند. این کربن کوانتوم دات‌ها توانستند یون  $\text{Cu}^{2+}$  را با دقت بالا و به صورت انتخابی در نمونه‌های واقعی آب شناسایی نمایند. حد تشخیص این کاتیون فلزی ۲/۴۶ nM و محدوده خطی غلظت ۱-۰/۱  $\mu\text{M}$  به دست آمد (۴۶). فنگ<sup>۲</sup> و همکارانش در سال ۲۰۲۳ کربن کوانتوم دات‌های عامل‌دار شده با پورفیرین با روش هیدروترمال تولید نمودند. با استفاده از این ماده حسگری حساس برای شناسایی یون  $\text{Cu}^{2+}$  تهیه شد. این حسگر توانست یون مس (II) را در محدوده خطی غلظت ۱۰ nM تا ۱۰  $\mu\text{M}$  شناسایی کند و حد تشخیص نیز ۲/۷۸ nM به دست آمد. پایداری، قدرت شناسایی انتخابی خوب و پاسخ مناسب در شرایط پیچیده، روشی کارآمد و با حساسیت بالا را برای شناسایی این یون فلزی فراهم می‌کند (۴۷). جمعی از محققان در سال ۲۰۲۰ با استفاده از سیتریک اسید، کربن دات‌هایی عامل‌دار شده با آمینو را تولید کردند. بازده کوانتومی این ذرات ۲۰ درصد به دست آمد. کربن دات‌های عامل‌دار شده یون فلزی  $\text{Cu}^{2+}$  را با سرعت بالا و به صورت انتخابی با حد تشخیص ۵ nM شناسایی نمودند. محدوده خطی تشخیص نیز غلظت ۶۰۰-۰/۰۰۵  $\mu\text{M}$  گزارش شده است. همچنین از این حسگر برای شناسایی یون مس (II) در دو نوع سلول استفاده شد که پتانسیل آن را برای کاربردهای تشخیص بیماری نشان می‌دهد (۴۸). در پژوهش دیگری در سال ۲۰۲۰ پژوهشگران موفق شدند به روش هیدروترمال یک مرحله‌ای کربن کوانتوم دات‌های عامل‌دار شده با پلی اتیلن ایمین<sup>۴</sup> با میانگین اندازه ذرات ۱/۹۸ nm سنتز کنند. بازده کوانتومی پس از عامل‌دار شدن از ۱۱/۳ درصد به ۲۷/۳ درصد افزایش یافت. با استفاده از این ماده حسگری ساخته شد که توانست با دقت بالا یون فلزی  $\text{Cu}^{2+}$  را با حد تشخیص ۸۰ nM شناسایی کند. محدوده خطی غلظت نیز ۴۰۰-۰/۰۸  $\mu\text{M}$  به دست آمد (۴۸). ساندراامورتی<sup>۵</sup> و همکارانش در سال ۲۰۱۹ با رویکردی سریع و آسان کربن کوانتوم دات‌هایی به روش تفکافت تولید نمودند. اندازه ذرات سنتز شده ۸-۲ nm بود که تابش فلورسانس آبی رنگ در طول موج ۳۴۰ nm نشان دادند. کربن کوانتوم

<sup>6</sup> Xiao

<sup>7</sup> Li

<sup>8</sup> Das

<sup>9</sup> Verma

<sup>1</sup> Li

<sup>2</sup> Feng

<sup>3</sup> Porphyrin

<sup>4</sup> Polyethyleneimine

<sup>5</sup> Sundramoorthy

نتایج نشان داد که این حسگر چهار یون فلزی سنگین نامبرده را در محدوده غلظت  $1-50 \mu\text{M}$  با دقت ۹۵ درصد شناسایی می‌کند (۶۱). جمعی از محققان در سال ۲۰۱۹ به روش هیدروترمال موفق به سنتز کربن کوانتوم دات شدند. کربن کوانتوم دات‌های تولید شده توانستند یون‌های  $\text{Hg}^{2+}$ ،  $\text{Cu}^{2+}$ ،  $\text{Pb}^{2+}$  و  $\text{Fe}^{3+}$  را به ترتیب با حد تشخیص  $3/3 \mu\text{M}$ ،  $0/45 \mu\text{M}$ ،  $0/27 \mu\text{M}$  و  $6/2 \mu\text{M}$  به خوبی شناسایی کنند (۶۲). در پژوهشی در سال ۲۰۲۰ پژوهشگران با استفاده از برگ نوعی گیاه کربن کوانتوم دات‌هایی با حلالیت آب بالا، پایدار و غیرسمی را به روش هیدروترمال تولید نمودند. میانگین اندازه ذرات حدود  $5 \text{ nm}$  و حداکثر بازده کوانتومی  $28/2$  درصد گزارش شده است. حسگر ساخته شده با کربن کوانتوم دات‌ها موفق شد یون فلزی  $\text{Al}^{3+}$  را در محدوده خطی  $0-6 \mu\text{M}$  با حد تشخیص  $0/5 \mu\text{M}$  و یون  $\text{Fe}^{3+}$  را در محدوده خطی  $0-6 \mu\text{M}$  با حد تشخیص  $0/3 \mu\text{M}$  با حساسیت بالا و به صورت انتخابی شناسایی نماید. همچنین این ماده به دلیل ویژگی زیست‌سازگاری می‌تواند برای تصویربرداری سلولی نیز مورد استفاده قرار گیرد (۶۳).

#### ۴- کاربرد کربن کوانتوم دات دوپ شده در شناسایی کاتیون‌های فلزی

دوپ کردن یک روش مفید برای تغییر ترکیب شیمیایی و ویژگی‌های ساختاری کربن کوانتوم دات‌ها است و خواص نوری، الکتریکی و شیمیایی آن‌ها را اصلاح می‌کند و در نتیجه، دامنه کاربرد آن‌ها را گسترش می‌دهد. کربن کوانتوم دات‌های دوپ شده را می‌توان به روش از بالا به پایین یا پایین به بالا تولید نمود. عناصر متداول مورد استفاده برای دوپ کردن شامل نیتروژن، گوگرد، بور، فسفر، باریم و غیره می‌باشند. عناصر و روش‌های مختلف دوپ کردن بر ویژگی‌های لومینسانس، طول موج فلورسانس، بازده کوانتومی و سایر عوامل کربن کوانتوم دات‌ها تأثیر می‌گذارند. علاوه بر این، تحقیقات اخیر نشان داده است که دوپ کردن با اتم‌ها، می‌تواند به طور قابل توجهی بازده کوانتومی فلورسانس کربن کوانتوم دات‌ها را افزایش دهد. با توجه به تمام این مزایا، تعداد فزاینده‌ای از محققان به بررسی دوپ کردن کربن کوانتوم دات‌ها پرداخته‌اند (۶۴).

#### ۴-۱- کاربرد کربن کوانتوم دات دوپ شده با یک عنصر در

##### شناسایی کاتیون‌های فلزی

#### ۴-۱-۱- کاربرد کربن کوانتوم دات دوپ شده با نیتروژن در

##### شناسایی کاتیون‌های فلزی

وو و همکارانش در سال ۲۰۲۴ به روش هیدروترمال با استفاده از نوعی گیاه، کربن کوانتوم دات‌های دوپ شده با نیتروژن تهیه کردند. این ذرات

از برگ‌های نوعی درخت سنتز کردند. ذرات تولید شده دارای دو انتشار سبز-آبی ( $485 \text{ nm}$ ) و قرمز رنگ ( $676 \text{ nm}$ ) بودند. حسگر ساخته شده با این ذرات توانست یون  $\text{As}^{3+}$  را با حد تشخیص  $12/15 \text{ nM}$  در نمونه آب واقعی شناسایی کند. زیست‌سازگاری و سمیت سلولی این حسگر و همچنین توانایی آن در شناسایی یون  $\text{As}^{3+}$  در سلول فیبروپلاست موش نیز مورد بررسی قرار گرفت و نتایج مطلوبی به همراه داشت (۵۵). ژانگ<sup>۱</sup> و همکارانش در سال ۲۰۲۰ موفق شدند با روش هیدروترمال، کربن کوانتوم دات‌هایی با شکل کروی منظم و اندازه متوسط  $7/15 \text{ nm}$  تولید کنند. کربن کوانتوم دات‌ها تحت تابش UV طول موج  $365 \text{ nm}$  نور فلورسنت آبی ساطع کرده و خواص طیف‌سنجی بسیار خوبی داشتند. حسگر ساخته شده از این ماده در بافر تنظیم شده با pH برابر ۷، یون  $\text{Mn}^{7+}$  را با دقت بالا و به صورت انتخابی با حد تشخیص  $2/3 \text{ nM}$  شناسایی کرد (۵۶). جمعی از محققان در سال ۲۰۱۹ کربن دات‌هایی سنتز کردند که بازده کوانتومی آن ۲۴ درصد بود. این ذرات توانستند کاتیون فلزی  $\text{Ag}^{+}$  را از طریق سازوکار خاموش شدن استاتیک شناسایی کنند. محدوده خطی غلظت برای این یون  $4-1 \mu\text{M}$  و حد تشخیص  $31 \text{ nM}$  گزارش شده است. کربن دات‌ها سمیت سلولی پایینی از خود نشان دادند و برای تصویربرداری یون  $\text{Ag}^{+}$  در سلول‌ها نیز مورد استفاده قرار گرفتند (۵۷). لی و همکارانش در سال ۲۰۱۹ کربن کوانتوم دات‌های عامل دار شده با آمین سنتز کرده و به عنوان حسگر یون  $\text{Co}^{2+}$  به کار بردند. این حسگر موفق شد با حساسیت بالا و به شکل انتخابی کاتیون مدنظر را با حد تشخیص  $12 \text{ nM}$  و محدوده خطی  $50 \text{ nM}$  تا  $40 \mu\text{M}$  شناسایی کند. پتانسیل کربن کوانتوم دات‌ها در نمونه‌های آب واقعی نیز مورد سنجش قرار گرفت (۵۸). جمعی از پژوهشگران در سال ۲۰۱۹ کربن دات‌هایی عامل دار شده با ایمیدازول<sup>۳</sup> سنتز کردند. حسگر ساخته شده با این ذرات برای شناسایی یون  $\text{Ni}^{2+}$  استفاده شد و نتایج نشان دادند که حد تشخیص  $0/93 \text{ mM}$  و محدوده خطی غلظت  $6-100 \text{ mM}$  می‌باشد (۵۹).

#### ۳-۸- کاربرد کربن کوانتوم دات در شناسایی چند کاتیون به

##### طور هم‌زمان

کربن کوانتوم دات‌ها می‌توانند برای شناسایی هم‌زمان چند یون نیز به کار روند. پژوهشگران در سال ۲۰۲۳، کربن کوانتوم دات‌هایی با شکل شبه کروی از الیاف نوعی درخت نخل تهیه کردند. این حسگر توانست یون  $\text{Fe}^{3+}$  را با حد تشخیص  $0/69 \mu\text{M}$ ، یون  $\text{Cu}^{2+}$  را با حد تشخیص  $0/99 \mu\text{M}$  و در نهایت یون  $\text{Hg}^{2+}$  را با حد تشخیص  $0/25 \mu\text{M}$  با حساسیتی بالا شناسایی کند (۶۰). ژو و همکارانش در سال ۲۰۲۲ با سنتز کربن کوانتوم دات، آن را به عنوان حسگر برای چهار یون  $\text{Cr}^{6+}$ ،  $\text{Fe}^{3+}$ ،  $\text{Fe}^{2+}$  و  $\text{Hg}^{2+}$  در نمونه‌های آب ساختمانی و واقعی به کار بردند.

<sup>4</sup> Xu

<sup>5</sup> Doped

<sup>6</sup> Wu

<sup>1</sup> Zhang

<sup>2</sup> Li

<sup>3</sup> Imidazole

۵/۴ و بازده کوانتومی ۳۲/۶ درصد به دست آمد. این کربن کوانتوم دات‌ها توانستند یون فلزی  $\text{Cu}^{2+}$  را با حد تشخیص  $0.032 \mu\text{M}$  و در بازه خطی غلظت  $0.260 - 0.032 \mu\text{M}$  شناسایی کنند. این حسگر برای نمونه‌های واقعی آب شیر نیز به کار گرفته شد (۷۴). یاداو و همکارانش در سال ۲۰۲۴ به روش تابش مایکروویو و استفاده از پیش‌سازهای سبز، کربن کوانتوم دات‌های دوپ‌شده با فسفر تولید نمودند. بازده کوانتومی مقدار قابل توجه ۳۳ درصد گزارش شده است. این ذرات به عنوان حسگر توانستند یون  $\text{Fe}^{3+}$  را با حد تشخیص  $51 \text{ nM}$  و یون  $\text{Hg}^{2+}$  را با حد تشخیص  $81 \text{ nM}$  شناسایی کنند. کربن کوانتوم دات‌ها علاوه بر این، توانایی تجزیه رنگ متیل نارنجی را نشان دادند و تنها در عرض ۲۴۰ دقیقه بدون هیچ گونه ادغام بیشتر با مواد دیگر، به بازده تخریب ۷۰ درصد رسیدند (۷۵). جمعی از محققان در سال ۲۰۲۳ موفق شدند با استفاده از شیر و فسفریک اسید به طریق روش هیدروترمال، کربن کوانتوم دات‌های دوپ‌شده با فسفر سنتز کنند. این ذرات تحت تابش فرابنفش از خود فلورسانس سبز ساطع کردند. حسگر کربن کوانتوم دات‌های دوپ‌شده توانست با حساسیت بالا کاتیون فلزی  $\text{Au}^{+3}$  را با حد تشخیص  $4/2 \text{ nM}$  و محدوده خطی  $10 - 140 \mu\text{M}$  شناسایی نماید و می‌تواند برای نمونه‌های واقعی آب نیز به کار گرفته شود (۷۶). جوزف و همکارانش در سال ۲۰۲۰ کربن کوانتوم دات‌های دوپ‌شده با فسفر را با استفاده از تری سدیم سیترات و فسفریک اسید به روش هیدروترمال تولید نمودند. بازده کوانتومی ۱۶/۱ درصد گزارش شده است. این مواد به عنوان حسگر موفق شدند یون فلزی  $\text{Fe}^{3+}$  را در محدوده خطی غلظت  $20 \text{ nM}$  تا  $3/0 \mu\text{M}$  با حد تشخیص  $9/5 \text{ nM}$  شناسایی کنند. کربن کوانتوم دات‌های دوپ‌شده با فسفر برای شناسایی این کاتیون در نمونه‌های آب واقعی نیز به کار رفتند (۷۷).

#### ۴-۱-۳- کاربرد کربن کوانتوم دات دوپ شده با سیلیکون در

##### شناسایی کاتیون‌های فلزی

ژانگ<sup>۵</sup> و همکارانش، در سال ۲۰۲۴ موفق به تولید کربن کوانتوم دات‌های دوپ‌شده با سیلیکون با بازده کوانتومی ۲۳/۳ درصد شدند. این ذرات سنتز شده به عنوان حسگر توانستند یون  $\text{Cu}^{2+}$  را با حد تشخیص  $32/66 \text{ nM}$  در محدوده خطی  $0.03 - 0.3 \mu\text{M}$ ، یون  $\text{Mn}^{2+}$  را با حد تشخیص  $26/7 \text{ nM}$  در محدوده خطی  $0.03 - 0.5 \mu\text{M}$  و در نهایت یون  $\text{Co}^{2+}$  را با حد تشخیص  $0.224 \mu\text{M}$  در محدوده خطی  $0.3 - 5 \mu\text{M}$  شناسایی کنند. از کربن کوانتوم دات‌های دوپ‌شده می‌توان برای شناسایی این یون‌های فلزی در نمونه‌های آب واقعی نیز استفاده نمود (۷۸). جمعی از محققان در سال ۲۰۲۳ با به کارگیری سیتریک اسید توانستند کربن کوانتوم دات‌های دوپ‌شده با فسفر را سنتز نمایند.

در طول موج  $415 \text{ nm}$  تابش فلورسانس پرشدنی از خود نشان دادند. کربن کوانتوم دات‌های دوپ‌شده توانستند یون  $\text{Cr}^{6+}$  را با حساسیت و گزینش‌پذیری بالا شناسایی کنند. محدوده خطی غلظت  $1 - 40 \mu\text{M}$  و حد تشخیص  $0.16 \mu\text{M}$  به دست آمد (۶۵). گروهی از پژوهشگران در سال ۲۰۲۲ کربن کوانتوم دات‌های دوپ‌شده با نیتروژن را از گلوکز در فرایند جریان هیدروترمال پیوسته سنتز کردند. بازده کوانتومی در حالت دوپ‌شده با نیتروژن از کم‌تر از ۱ درصد به ۹/۶ درصد افزایش یافت. این ذرات با پایداری در pHهای بین ۲ تا ۱۱، با حساسیت فوق‌العاده یون  $\text{Cr}^{6+}$  را با حد تشخیص  $0.95 \text{ ppm}$  شناسایی کردند (۶۶). جمعی از محققان در سال ۲۰۲۳ کربن کوانتوم دات‌های دوپ‌شده با نیتروژن پایدار را به طریق روش مایکروویو با بازده کوانتومی ۲۶/۹ درصد تولید نمودند. این ذرات تحت تابش فرابنفش با طول موج  $315 \text{ nm}$  تابش فلورسانسی به رنگ آبی روشن از خود نشان دادند. شکل ذرات سنتز شده کروی بوده و میانگین اندازه آن‌ها  $1/2 \pm 7/5 \text{ nm}$  به دست آمد. کربن کوانتوم دات‌های دوپ‌شده با حساسیت و گزینش‌پذیری بالا یون‌های  $\text{Mn}^{7+}$  را با حد تشخیص  $0.81 \mu\text{M}$  شناسایی نمودند. محدوده خطی غلظت  $2 - 30 \mu\text{M}$  گزارش شده است. از این حسگر در نمونه‌های آب واقعی نیز استفاده شده است (۶۷). پیائو و همکارانش در سال ۲۰۲۱ با استفاده از  $\text{H}_2\text{O}_2$  به عنوان اکسیدکننده و پلی‌اتریمید<sup>۴</sup> به عنوان پیش‌ساز نیتروژن در روش هیدروترمال، کربن کوانتوم دات‌های دوپ‌شده با نیتروژن سنتز کنند. ذرات تولید شده تابش فلورسانس آبی رنگ از خود نشان دادند و اندازه متوسط آن‌ها  $4 \text{ nm}$  گزارش شد. بازده کوانتومی نیز ۳۰/۷ درصد به دست آمد. کربن کوانتوم دات‌های دوپ‌شده به عنوان حسگر موفق شدند یون  $\text{Fe}^{3+}$  را با حد تشخیص  $2/22 \mu\text{M}$  شناسایی کنند (۶۸). جمعی از پژوهشگران در سال ۲۰۲۰ با استفاده از لیمو توانستند کربن کوانتوم دات‌های دوپ‌شده با نیتروژن را به روش هیدروترمال با اندازه متوسط  $3 \text{ nm}$  تولید کنند. این مواد دارای ویژگی‌های حلالیت در آب و پایداری یونی بالا بودند و بازده کوانتومی آن‌ها مقدار خوب ۳۱ درصد به دست آمد. ذرات تولید شده با دقت و به صورت انتخابی کاتیون‌های  $\text{Hg}^{2+}$  را با حد تشخیص  $5/3 \text{ nM}$  شناسایی کردند. کربن کوانتوم دات‌های دوپ‌شده با نیتروژن به دلیل سمیت پایین و زیست‌سازگاری خوب می‌تواند برای تصویربرداری سلول‌های زنده به کار رود (۶۹). پژوهش‌های متعدد دیگری نیز در این زمینه انجام شده است (۷۰-۷۳).

#### ۴-۱-۲- کاربرد کربن کوانتوم دات دوپ‌شده با فسفر در

##### شناسایی کاتیون‌های فلزی

پژوهشگران در سال ۲۰۲۲ موفق شدند کربن کوانتوم دات‌های دوپ‌شده با فسفر کروی شکل سنتز کنند. اندازه متوسط ذرات  $\text{nm}$

<sup>4</sup> Joseph

<sup>5</sup> Zhang

<sup>1</sup> Piao

<sup>2</sup> polyetherimide

<sup>3</sup> Yadav

تصویربرداری سلولی از یون های  $Hg^{2+}$  در سلول‌های سرطانی کبد انسان (HepG2) توسط میکروسکوپ فلورسانس استفاده شد (۸۴). تحقیقات دیگری نیز در این زمینه صورت گرفته‌اند (۸۵).

#### ۲-۲-۴- کاربرد کربن کوانتوم دات دوپ شده با نیتروژن و بور

##### در شناسایی کاتیون‌های فلزی

جمعی از محققان در سال ۲۰۲۲ با ۲-آمینو-۳-هیدروکسی پیریدین و سدیم بورهیدرید به عنوان منبع نیتروژن و منبع بور، موفق به سنتز کربن کوانتوم دات‌های دوپ‌شده با نیتروژن و بور به روش هیدروترمال شدند. بازده کوانتومی مقدار  $21/2$  به دست آمد. این ذرات به عنوان حسگر، یون فلزی سنگین  $Cd^{2+}$  را در محدوده خطی غلظت  $2/5-22/5 \mu M$  شناسایی نمودند. حد تشخیص  $0/45 \mu M$  گزارش شده است. نتایج این حسگر در نمونه‌های واقعی نیز رضایت‌بخش بوده است (۸۶). در پژوهش دیگری در همان سال، کربن کوانتوم دات‌های دوپ‌شده با نیتروژن و بور برای شناسایی یون‌های  $Al^{3+}$  و  $Fe^{2+}$  به کار گرفته شدند. حد تشخیص برای کاتیون  $Al^{3+}$  مقدار  $0/187 \mu M$  و برای کاتیون  $Fe^{2+}$  مقدار  $0/276 \mu M$  گزارش شده است. کربن کوانتوم دات‌های دوپ‌شده در نمونه‌های آب واقعی نیز نتایج خوبی از خود نشان دادند (۸۷). گروهی از پژوهشگران در سال ۲۰۲۰، کربن کوانتوم دات‌های دوپ‌شده با نیتروژن و بور با استفاده از آمونیوم سیترات به روش هیدروترمال سنتز کردند. بازده کوانتومی پس از دوپ شدن به مقدار  $59/01$  درصد رسید. این ذرات به عنوان حسگر توانستند یون  $Cr^{6+}$  را با حساسیت بالا و در محدوده خطی  $0/3-500 \mu M$  شناسایی کنند. حد تشخیص  $0/24 \mu M$  به دست آمد. این حسگر توانست با موفقیت یون  $Cr^{6+}$  را در نمونه‌های آب واقعی شناسایی کند که چشم‌انداز گسترده آن را برای تشخیص این کاتیون نشان می‌دهد (۸۸). پژوهش‌های دیگری نیز در این باره انجام گرفته است (۸۹).

#### ۲-۲-۴- کاربرد کربن کوانتوم دات دوپ‌شده با عناصر مختلف

##### در شناسایی کاتیون‌های فلزی

زکریا و همکارانش در سال ۲۰۲۴ کربن کوانتوم دات‌های دوپ‌شده با نیتروژن و اکسیژن را با بازده کوانتومی  $57/6$  درصد به روش کربن‌شدن تولید کردند. اندازه متوسط ذرات  $2 \text{ nm}$  و شکل آن‌ها کروی به دست آمد. کربن کوانتوم دات‌های دوپ‌شده به عنوان حسگر، یون  $Cr^{6+}$  را با حساسیت بالا و به صورت انتخابی شناسایی کردند. حد تشخیص این کاتیون مقدار  $5 \mu M$  به دست آمد که از حد مجاز آن که  $50 \mu M$  می‌باشد، پایین‌تر است (۹۰). جمعی از محققان در سال ۲۰۲۲ با دی‌استون آکریل آمید با یک روش هیدروترمال ساده توانستند کربن کوانتوم دات‌های دوپ‌شده با نیتروژن و سیلکون سنتز کنند. بازده

ذرات تولید شده حلالیت خوبی در آب داشتند و اندازه آن‌ها یکنواخت گزارش شده است. کربن کوانتوم دات‌های دوپ‌شده با فسفر با حساسیت بالا و به صورت انتخابی یون  $Hg^{2+}$  را شناسایی کردند. محدوده خطی غلظت  $0/02-50 \mu M$  و حد تشخیص  $0/015 \mu M$  به دست آمد. از این حسگر برای تشخیص مقدار این کاتیون در نمونه‌های واقعی نیز استفاده به عمل آمد (۷۹). گروهی از پژوهشگران در سال ۲۰۱۹ از طریق یک روش هیدروترمال ساده موفق شدند کربن کوانتوم دات‌های دوپ‌شده با سیلیکون سنتز کنند. بازده کوانتومی در اثر دوپ کردن با سیلیکون از  $7/8$  درصد به  $18/1$  درصد افزایش پیدا کرد. این ذرات به عنوان حسگر توانستند یون فلزی  $Fe^{3+}$  را در محدوده خطی غلظت  $0/01-2/5 \mu M$  با حد تشخیص  $0/02 \mu M$  شناسایی کنند. از این روش برای تعیین مقدار این یون در پلاسما نیز استفاده شد (۸۰). پژوهش‌های دیگری نیز در سال‌های اخیر به این موضوع اختصاص یافته‌اند (۸۱).

#### ۲-۲-۴- کاربرد کربن کوانتوم دات دوپ شده با دو یا چند عنصر

##### در شناسایی کاتیون‌های فلزی

#### ۱-۲-۴- کاربرد کربن کوانتوم دات دوپ‌شده با نیتروژن و گوگرد در شناسایی کاتیون‌های فلزی

جمعی از پژوهشگران در سال ۲۰۲۴ به روش هیدرو ترمال، کربن کوانتوم دات‌های دوپ‌شده با نیتروژن و گوگرد سنتز کردند. این ذرات به عنوان حسگری حساس توانستند یون فلزی  $Hg^{2+}$  را در محدوده خطی غلظت  $0/1-3/0 \mu M$  شناسایی کنند. حد تشخیص برای این یون مقدار  $0/45 \mu M$  گزارش شده است. توانایی این حسگر در آب‌های لوله‌کشی، آب معدنی و آب دریاچه نیز محک زده شد و نتایج، پتانسیل آن را برای شناسایی این کاتیون نشان می‌دهند (۸۲). یانگ<sup>۱</sup> و همکارانش در سال ۲۰۲۲، موفق شدند کربن دات‌های دوپ‌شده با نیتروژن و گوگرد با بازده کوانتومی  $21/82$  درصد تولید کنند. از ویژگی‌های آن‌ها می‌توان به پایداری بالا، تاثیر محیطی کم، کم‌هزینه‌بودن و حلالیت خوب در آب اشاره کرد. کربن دات‌های دوپ‌شده با نیتروژن و گوگرد با سازوکار افزایش فلورسانس، یون  $Cr^{6+}$  را با حساسیت بالا شناسایی کردند. حد تشخیص این کاتیون فلزی سنگین با استفاده از این حسگر،  $0/64 \mu M$  گزارش شده است (۸۳). گروهی از محققان در سال ۲۰۱۹ کربن دات‌های دوپ‌شده با نیتروژن و گوگرد با تابش فلورسانس آبی در  $435 \text{ nm}$  به روش هیدروترمال ساده سنتز کردند. بازده کوانتومی  $16/1$  درصد به دست آمد و با توجه به آزمایشات، سمیت سلولی کم و زیست‌سازگاری خوب این ذرات تایید گشت. کربن دات‌های دوپ‌شده به عنوان حسگر توانستند کاتیون فلزی  $Hg^{2+}$  را با حد تشخیص  $83 \text{ nM}$  شناسایی کنند. از این ماده برای

<sup>2</sup> Zachariah

<sup>1</sup> Yang

۳/۱ گزارش شده است. از کربن کوانتوم دات‌ها برای تصویربرداری و تشخیص یون‌های  $Hg^{2+}$  در سلول‌های سرطانی روده انسان (HCT-116) استفاده شد که کاربرد آن را در سیستم‌های زیستی نشان می‌دهد (۹۲). تحقیقات متعدد دیگری نیز در این خصوص انجام شده است (۹۳، ۹۴).

جدول ۲، مقایسه ای از کربن کوانتوم دات‌های دوپ‌شده و دوپ نشده جهت کاربرد در شناسایی یون‌ها را نشان می‌دهد. در همه مثال‌های عنوان‌شده روش شناسایی مبتنی بر فلورسانس بوده و نکات کلیدی هر تحقیق در آن برجسته شده است.

کوانتومی این ذرات ۷۵ درصد گزارش شده است. این مواد به‌عنوان حسگر برای شناسایی یون فلزی سنگین  $Cr^{6+}$  به کار رفتند. کربن کوانتوم دات‌ها، این یون را با حد تشخیص  $0.995 \mu M$  در محدوده خطی غلظت  $0.200 \mu M$  به خوبی شناسایی نمودند (۹۱). لی<sup>۱</sup> و همکارانش در سال ۲۰۲۲، کربن کوانتوم دات‌های دوپ‌شده با چند عنصر نیتروژن، گوگرد و بور با پایداری یونی و حلالیت خوب در آب و بازده کوانتومی ۱۷/۶ درصد تولید نمودند. این ذرات به عنوان حسگر توانستند با حساسیت بالا و به صورت انتخابی، کاتیون‌های  $Hg^{2+}$  را شناسایی کنند. محدوده خطی غلظت  $0.30-0 \mu M$  و حد تشخیص nM

جدول ۲: مقایسه ای از کربن کوانتوم دات‌های دوپ‌شده و دوپ‌نشده در شناسایی فلورسانس یون‌های فلزی.

Table 2: Comparative study of doped and undoped carbon quantum dots in fluorescence detection of metal ions.

| Row | Type of CQD                                                      | Target ion                                                    | Synthesis method        | Detection method | Limit of Detection (LOD)                                 | Key points                                              | References |
|-----|------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|-------------------------|------------------|----------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|------------|
| 1   | Undoped                                                          | $Pb^{2+}$ , $Ni^{2+}$ , $Mn^{2+}$ , $Co^{2+}$ , and $Cr^{3+}$ | thin film-CQD           | Fluorescence     | 0.006–0.019 ppm                                          | High accuracy in real water samples                     | (95)       |
| 2   | Undoped                                                          | Multiple metal ions                                           | green precursors        | Fluorescence     | -                                                        | Use of a green precursor for synthesis                  | (96)       |
| 3   | Undoped                                                          | $Fe^{3+}$                                                     | Hydrothermal            | Fluorescence     | $0.115 \mu M$                                            | a reference for constructing portable sensors           | (97)       |
| 4   | Undoped                                                          | $Cu^{2+}$                                                     | Hydrothermal            | Fluorescence     | 0.09 nM                                                  | Study the effect of particle size                       | (98)       |
| 5   | Doped with Eu and Tb                                             | $Mn^{2+}$ , $Cr^{6+}$                                         | Hydrothermal            | Fluorescence     | $Mn(II)$ (0.16 $\mu M$ )<br>$Cr(VI)$ (0.10 $\mu M$ )     | Simultaneous detection of multiple metal ions           | (99)       |
| 6   | Doped with N and P                                               | $Hg^{2+}$                                                     | Hydrothermal            | Fluorescence     | $0.0245 \mu M$                                           | High sensitivity                                        | (100)      |
| 7   | Doped with folic acid, m-phenylenediamine and p-phenylenediamine | $Hg^{2+}$                                                     | Hydrothermal            | Fluorescence     | 2.15 nM                                                  | Two probe preparation                                   | (101)      |
| 8   | Doped with Mn, Sr, Al, Ga and In                                 | Multiple metal ions                                           | simple heating approach | Fluorescence     | -                                                        | great potential for optical and electrical applications | (15)       |
| 9   | Doped with N and S                                               | $Pb^{2+}$ and $F^{-}$                                         | Hydrothermal            | Fluorescence     | 13.35 nM ( $Pb^{2+}$ )<br>43.17 nM ( $F^{-}$ )           | Simultaneous detection of $Pb^{2+}$ and $F^{-}$         | (102)      |
| 10  | Doped with N and S                                               | $Fe^{3+}$ and $Co^{2+}$                                       | solvothetmal method     | Fluorescence     | 0.82 $\mu M$ ( $Fe^{3+}$ )<br>1.19 $\mu M$ ( $Co^{2+}$ ) | Dual ion detection                                      | (103)      |

دیگری که نیاز به توجه دارد، توسعه کربن کوانتوم دات‌هایی است که در ناحیه قرمز عمیق یا نزدیک به فروسرخ دارای نشر با بازده کوانتومی بالا هستند، که استراتژی‌های سنتزی جدید در این خصوص، در حال توسعه هستند. اگرچه این موضوع به خوبی شناخته شده است که دوپ‌شدن می‌تواند بازده کوانتومی را به طور قابل توجهی بهبود بخشد، و منابع طبیعی که سرشار از نیتروژن، فسفر و گوگرد هستند، فراوان است، اما این موضوع، نیاز به مطالعه گسترده برای شناسایی میزان هر

## ۵- نتیجه‌گیری، چالش‌ها و چشم انداز آینده

با استفاده از انواع عوامل دوپ‌شونده، می‌توان طیف وسیعی از کربن کوانتوم دات‌های دوپ‌شده را به دست آورد. اکثر کربن کوانتوم دات‌ها در اثر تابش پرتو فرابنفش فلورسانس آبی ساطع می‌کنند، همچنین، گزارش‌های محدودی در خصوص کربن کوانتوم دات‌هایی که لومینسانس سبز ساطع می‌کنند، وجود دارد. تحقیقات بیشتر در این زمینه می‌تواند منجر به توسعه کاربرد شناسایی گردد. از جمله زمینه

<sup>1</sup> Lee

و ترکیبات شیمیایی گران قیمت، کاربرد اقتصادی این نانوذرات را محدود می‌کند. از این رو، استفاده از منابع طبیعی باعث کاهش هزینه‌ها و جایگزینی برای تولید در مقیاس بالا می‌باشد. این بررسی، کربن کوانتوم دات‌های تهیه شده از پیش‌سازهای گوناگون را برای شناسایی نوری فلزات سنگین و کاربرد آن به عنوان حسگر ارائه نمود. امید است که این بررسی به عنوان پله‌ای برای تحقیقات بیشتر در این حوزه، برای توسعه فناوری حسگرهای نوری باشد.

### تشکر و قدردانی

نویسندگان از حمایت‌های پژوهشگاه رنگ، تقدیر و تشکر می‌نمایند.

### تعارض منافع

هیچ گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.

یک از اجزا آن دارد. گروه‌های اکسوکرومیک عالی، به‌ویژه گروه‌های حاوی نیتروژن، به بازده کوانتومی بالای کربن کوانتوم دات‌ها کمک می‌کنند، که ممکن است ناشی از نیتروژن دوپ شده باشد که سطح انرژی جدیدی را به ساختار الکترونیکی کربن کوانتوم دات دوپ شده با نیتروژن وارد می‌کند. در مقایسه با کربن کوانتوم دات‌ها و کربن کوانتوم دات‌های دوپ شده با نیتروژن، کربن کوانتوم دات‌های دوپ شده با نیتروژن و گوگرد حاوی مقادیر فراوانی از گروه‌های نیتروژن و گوگرد هستند و این انواع گسترده از گروه‌های عملکردی سطح ممکن است عملکرد جدید و چشم انداز کاربردهای گسترده‌تری را برای مواد فلورسنت به ارمغان بیاورد. عوامل متعددی مانند دمای عملیاتی، حلال‌های به کار رفته، غلظت پیش‌سازها، pH و غیره، عملکرد، همگنی و خاصیت نورتایی کربن کوانتوم دات‌ها را تعیین می‌کنند. از جمله چالش‌های مطرح در این فناوری، سهولت تکرارپذیری و تولید در مقیاس بزرگ می‌باشد. زیرا استفاده از تجهیزات آزمایشگاهی پیچیده

### ۶- مراجع

- Wang Y, Hu A. Carbon quantum dots: synthesis, properties and applications. *J Mater Chem C*. 2014;2(34):6921-39. <https://doi.org/10.1039/C4TC00988F>.
- Lim SY, Shen W, Gao Z. Carbon quantum dots and their applications. *Chem Soc Rev*. 2015;44(1):362-81. <https://doi.org/10.1039/C4CS00269E>.
- Yousefi-Limaee N, Peik-Rayekan L, Seifpanahi-Shabani K. A review of ion-imprinted polymer for the removal and colorimetric detection of lead: preparation, mechanism and application. *J stud color world*. 2024;14:253-264. <https://doi.org/10.30509/JSCW.2024.167332.1195> [In Persian].
- Jaishankar M, Tseten T, Anbalagan N, Mathew B, Beeregowda K. Toxicity, mechanism and health effects of some heavy metals. *Interdiscip Toxicol*. 2014;7:60-72. <https://doi.org/10.2478/intox-2014-0009>.
- Yousefi-Limaee N, Rouhani S. A review on the application of molecularly imprinted polymers in the detection of pollutants: A case study of optical sensors. *J stud color world*. 2021;10(4):53-68. <https://doi.org/10.30509/JSCW.2021.167332.1195> [In Persian].
- Yousefi-Limaee N, Rouhani S, Kamandi R. Highly selective and sensitive colorimetric chemosensor using PVA/chitosan ion-imprinted nanofibers for copper ion detection and removal. *Heliyon*. 2024;10(15):e35193. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e35193>.
- Yousefi-Limaee N, Rouhani S, Olya ME, Najafi F. Selective 2,4-dichlorophenoxyacetic acid optosensor employing a polyethersulfone nanofiber-coated fluorescent molecularly imprinted polymer. *Polym*. 2019;177:73-83. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2019.05.067>.
- Yousefi-Limaee N, Rouhani S, Olya ME, Najafi F. Selective Recognition of Herbicides in Water Using a Fluorescent Molecularly Imprinted Polymer Sensor. *J Fluorescence*. 2020;30(2):375-87. <https://doi.org/10.1007/s10895-020-02508-z>.
- Devi P, Rajput P, Thakur A, Kim KH, Kumar P. Recent advances in carbon quantum dot-based sensing of heavy metals in water. *TrAC, Trends Anal Chem*. 2019;114:171-95. <https://doi.org/10.1039/D3SU00375B>.
- Lu Y, Liang X, Niyungeko C, Zhou J, Xu J, Tian G. A review of the identification and detection of heavy metal ions in the environment by voltammetry. *Talanta*. 2018;178:324-38. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2017.08.033>.
- Yousefi-Limaee N, Rezaei Y. CQDs-based optical sensors for the detection of metal ions: preparation and mechanism of detection. *J stud color world*. 2024;14:363-378. <https://doi.org/10.30509/JSCW.2024.167400.1210> [In Persian].
- Kong J, Wei Y, Zhou F, Shi L, Zhao S, Wan M, et al. Carbon Quantum Dots: Properties, Preparation, and Applications. *Molecules*. 2024;29(9):2002. <https://doi.org/10.3390/molecules29092002>.
- Rawat D, Singh RR. Fluorescent magnetic quantum dots in bioimaging. *magnetic quantum dots for bioimaging*: CRC Press; 2023.133-52. <https://doi.org/10.1201/9781003319870>.
- Li J, Zhao H, Zhao X, Gong X. Boosting efficiency of luminescent solar concentrators using ultra-bright carbon dots with large Stokes shift. *Nanoscale Horiz*. 2023;8(1):83-94. <https://doi.org/10.1039/D2NH00360K>.
- Li J, Gong X. The emerging development of multicolor carbon dots. *Small*. 2022;18(51):2205099. <https://doi.org/10.1002/sml.202205099>.
- Acharya B, Behera A, Behera S, Moharana S. Carbon quantum dots: A systematic overview of recent developments in synthesis, properties, and novel therapeutic applications. *Inorg Chem Commun*. 2024;112492. <https://doi.org/10.1016/j.inoche.2024.112492>.
- Ansari L, Hallaj S, Hallaj T, Amjadi M. Doped-carbon dots: Recent advances in their biosensing, bioimaging and therapy applications. *Colloids Surf B Biointerfaces*. 2021;203:111743. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2021.111743>.
- Han Y, Li W, Lin J, Zhao H, Wang X, Zhang Y. Carbon quantum dots capped with metal ions for efficient

- optoelectronic applications. *J Mater Chem C*. 2024; 12(16):5818-25. <https://doi.org/10.1039/D4TC00419A>.
19. Ozyurt D, Kobaisi MA, Hocking RK, Fox B. Properties, synthesis, and applications of carbon dots: A review. *Carbon Trends*. 2023;12:100276. <https://doi.org/10.1016/j.cartre.2023.100276>.
  20. Selvaraj H, Bruntha G, Ilangoan A. Synthesis of carbon dots via microwave-assisted process: specific sensing of Fe (iii) and antibacterial activity. *J Fluoresc*. 2024;1-11. <https://doi.org/10.1007/s10895-024-03845-z>.
  21. Zhao P, Zhang Q, Cao J, Qian C, Ye J, Xu S, et al. Facile and green synthesis of highly fluorescent carbon quantum dots from water hyacinth for the detection of ferric iron and cellular imaging. *Nanomater*. 2022;12(9):1528. <https://doi.org/10.3390/nano12091528>.
  22. Shabbir H, Tokarski T, Ungor D, Wojnicki M. Eco friendly synthesis of carbon dot by hydrothermal method for metal ions salt identification. *Mater*. 2021;14(24):7604. <https://doi.org/10.3390/ma14247604>.
  23. Chen J, Wang Y, Wang L, Liu M, Fang L, Chu P, et al. Multi-applications of carbon dots and polydopamine-coated carbon dots for Fe<sup>3+</sup> detection, bioimaging, dopamine assay and photothermal therapy. *Discover Nano*. 2023;18(1):30. <https://doi.org/10.1186/s11671-023-03809-5>.
  24. Yousefi-Limaee N, Tammari S. Preparation of a highly selective fluorescence sensor based on CQDs/PVA/Chitosan nanofiber. 16th International Seminar on Polymer Science & Technology (ISPST 2024), 7-9 September 2024, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran.
  25. Das GS, Shim JP, Bhatnagar A, Tripathi KM, Kim T. Biomass-derived carbon quantum dots for visible-light-induced photocatalysis and label-free detection of Fe (III) and ascorbic acid. *Sci Rep*. 2019;9(1):15084. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-49266-y>.
  26. Hu Y, Gao Z, Yang J, Chen H, Han L. Environmentally benign conversion of waste polyethylene terephthalate to fluorescent carbon dots for “on-off-on” sensing of ferric and pyrophosphate ions. *J Colloid Interface Sci*. 2019;538:481-8. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2018.12.016>.
  27. Li W, Liu Y, Wang B, Song H, Liu Z, Lu S, et al. Kilogram-scale synthesis of carbon quantum dots for hydrogen evolution, sensing and bioimaging. *Chin Chem Lett*. 2019;30(12):2323-7. <https://doi.org/10.1016/j.ccllet.2019.06.040>.
  28. Yan F, Zu F, Xu J, Zhou X, Bai Z, Ma C, et al. Fluorescent carbon dots for ratiometric detection of curcumin and ferric ion based on inner filter effect, cell imaging and PVDF membrane fouling research of iron flocculants in wastewater treatment. *Sens Actuators B Chem*. 2019;287:231-40. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2019.01.144>.
  29. Li D, Wang S, Azad F, Su S. Single-step synthesis of polychromatic carbon quantum dots for macroscopic detection of Hg<sup>2+</sup>. *Ecotoxicol Environ Saf*. 2020; 190:110141. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.110141>.
  30. Zhang Q, Zhang X, Bao L, Wu Y, Jiang L, Zheng Y, et al. The application of green-synthesis-derived carbon quantum dots to bioimaging and the analysis of mercury (II). *J anal methods chem*. 2019;2019(1):8183134. <https://doi.org/10.1155/2019/8183134>.
  31. Kasinathan K, Samayan S, Marimuthu K, Yim J-H. Green synthesis of multicolour fluorescence carbon quantum dots from sugarcane waste: Investigation of mercury (II) ion sensing, and bio-imaging applications. *Appl Surf Sci*. 2022;601:154266. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2022.154266>.
  32. Ye Z, Zhang Y, Li G, Li B. Fluorescent determination of mercury (II) by green carbon quantum dots synthesized from eggshell membrane. *Anal Lett*. 2020;53(18):2841-53. <https://doi.org/10.1080/00032719.2020.1759618>.
  33. Dhandapani E, Maadeswaran P, Raj RM, Raj V, Kandiah K, Duraisamy N. A potential forecast of carbon quantum dots (CQDs) as an ultrasensitive and selective fluorescence probe for Hg (II) ions sensing. *Mater Sci Eng B*. 2023;287:116098. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2022.116098>.
  34. Jaison AMC, Vasudevan D, Ponmudi K, George A, Varghese A. One pot hydrothermal synthesis and application of bright-yellow-emissive carbon quantum dots in Hg<sup>2+</sup> detection. *J Fluoresc*. 2023;33(6):2281-94. <https://doi.org/10.1007/s10895-023-03233-z>.
  35. Duan Q, Wang X, Zhang B, Li Y, Zhang W, Zhang Y, et al. A fluorometric method for mercury (II) detection based on the use of pyrophosphate-modified carbon quantum dots. *Mikrochim Acta*. 2019;186:1-7. <https://doi.org/10.1007/s00604-019-3872-0>.
  36. Huang Q, Bao Q, Wu C, Hu M, Chen Y, Wang L, et al. Carbon dots derived from Poria cocos polysaccharide as an effective “on-off” fluorescence sensor for chromium (VI) detection. *J Pharm Anal*. 2022;12(1):104-12. <https://doi.org/10.1016/j.jpha.2021.04.004>.
  37. Zhang Y, Dong Y, Zheng H, Yang X, Yao C. High Quantum Yield Fluorescent Chitosan-Based Carbon Dots for the Turn-On-Off-On Detection of Cr (VI) and H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>. *Nano*. 2021;16(09):2150103. <https://doi.org/10.1142/S1793292021501034>.
  38. Anpalagan K, Yin H, Cole I, Zhang T, Lai DT. Quantum Yield Enhancement of Carbon Quantum Dots Using Chemical-Free Precursors for Sensing Cr (VI) Ions. *Inorgan*. 2024;12(4):96. <https://doi.org/10.3390/inorganics12040096>.
  39. He Z, Shen J, Zhang J, Lin W, Gu H. Cleaner, High-Efficiency, and High-Value Conversion of Chrome-Containing Leather Solid Waste into Carbon Quantum Dots as Renewable Bimetallic Ions Detection Sensors. *ACS Sustain Chem Eng*. 2023;11(35):13126-41. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.3c03382>.
  40. Liu S, Wu Z, Nian N, Zhang P, Ni L. The Speciation of Heavy Metal Chromium in Water Environment by Carbon Quantum Dots System. *Water Air Soil Pollut*. 2024;235(7):449. <https://doi.org/10.1007/s11270-024-07222-1>.
  41. Das P, Maruthapandi M, Saravanan A, Natan M, Jacobi G, Banin E, et al. Carbon dots for heavy-metal sensing, pH-sensitive cargo delivery, and antibacterial applications. *ACS Appl. Nano Mater*. 2020;3(12):11777-90. <https://doi.org/10.1021/acsnm.0c02305>.
  42. Ghosh B, Roy S, Bardhan S, Mondal D, Saha I, Ghosh S, et al. Biocompatible carbon dot decorated  $\alpha$ -FeOOH nanohybrid for an effective fluorometric sensing of Cr (VI) in wastewater and living cells. *J Fluoresc*. 2022;32(4):1489-500. <https://doi.org/10.1007/s10895-022-02962-x>.
  43. Shen J, Gu H, He Z, Lin W. Wattle-bark-tannin-derived carbon quantum dots as multi-functional nanomaterials for intelligent detection of Cr<sup>6+</sup> ions, bio-imaging, and fluorescent ink applications. *Ind Eng Chem Res*. 2023;62(8):3622-34. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.2c04348>.

44. Luo J, Lei Y, Ge Q, Liu M, Jiang N, Huang Y-H, et al. Carbon quantum dots from hemicurc [6] bit and the application for the detection of Pb<sup>2+</sup>. *Spectrochim. Acta A*. 2024;317:124459. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2024.124459>.
45. Paydar S, Feizi F, Shamsipur M, Barati A, Chehri N, Taherpour AA, et al. An ideal ratiometric fluorescent probe provided by the surface modification of carbon dots for the determination of Pb<sup>2+</sup>. *Sens Actuators B Chem*. 2022; 369:132243. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2022.132243>.
46. Liu Q, Gao X, Liu Z, Gai L, Yue Y, Ma H. Sensitive and selective electrochemical detection of lead (ii) based on waste-biomass-derived carbon quantum dots@ zeolitic imidazolate framework-8. *Mater*. 2023;16(9):3378. <https://doi.org/10.3390/ma16093378>.
47. Chauhan P, Chaudhary S, Kumar R. Biogenic approach for fabricating biocompatible carbon dots and their application in colorimetric and fluorometric sensing of lead ion. *J Clean Prod*. 2021;279:123639. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123639>.
48. Rawat KS, Singh V, Sharma CP, Vyas A, Pandey P, Singh J, et al. Picomolar detection of lead ions (Pb<sup>2+</sup>) by functionally modified fluorescent carbon quantum dots from watermelon juice and their imaging in cancer cells. *J Imaging*. 2023;9(1):19. <https://doi.org/10.3390/jimaging9010019>.
49. Qian X, Wang Z, Chen Z, El-Bahy SM, Li D, Qin L, et al. Green-emitting carbon quantum dots as efficient fluorescent probes for Cu<sup>2+</sup> and EDTA detection by "turn-on-off" strategy. *Colloids Surf A Physicochem Eng Asp*. 2024 ;693:134089. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2024.134089>.
50. Zhang X, Hou X, Lu D, Chen Y, Feng L. Porphyrin functionalized carbon quantum dots for enhanced electrochemiluminescence and sensitive detection of Cu<sup>2+</sup>. *Molecules*. 2023;28(3):1459. <https://doi.org/10.3390/molecules28031459>.
51. Huang S, Wang W, Cheng J, Zhou X, Xie M, Luo Q, et al. Amino-functional carbon quantum dots as a rational nanosensor for Cu<sup>2+</sup>. *Microchem J*. 2020;159:105494. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2020.105494>.
52. Murugan N, Prakash M, Jayakumar M, Sundaramurthy A, Sundramoorthy AK. Green synthesis of fluorescent carbon quantum dots from Eleusine coracana and their application as a fluorescence 'turn-off' sensor probe for selective detection of Cu<sup>2+</sup>. *Appl Sur Sci*. 2019;476:468-80. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.01.090>.
53. Liu Y, Seidi F, Deng C, Li R, Xu T, Xiao H. Porphyrin derived dual-emissive carbon quantum dots: Customizable synthesis and application for intracellular Cu<sup>2+</sup> quantification. *Sens Actuators B Chem*. 2021;343:130072. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2021.130072>.
54. Han Z, Nan D, Yang H, Sun Q, Pan S, Liu H, et al. Carbon quantum dots based ratiometric fluorescence probe for sensitive and selective detection of Cu<sup>2+</sup> and glutathione. *Sens. Actuators B Chem*. 2019;298:126842. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2019.126842>.
55. Liu G, Li B, Liu Y, Feng Y, Jia D, Zhou Y. Rapid and high yield synthesis of carbon dots with chelating ability derived from acrylamide/chitosan for selective detection of ferrous ions. *Appl Surf Sci*. 2019;487:1167-75. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.05.069>.
56. Baragau I-A, Power NP, Morgan DJ, Lobo RA, Roberts CS, Titirici M-M, et al. Efficient continuous hydrothermal flow synthesis of carbon quantum dots from a targeted biomass precursor for on-off metal ions nanosensing. *ACS Sustain Chem Eng*. 2021;9(6):2559-69. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.0c08594>.
57. Tejwan N, Sharma A, Thakur S, Das J. Green synthesis of a novel carbon dots from red Korean ginseng and its application for Fe<sup>2+</sup> sensing and preparation of nanocatalyst. *Inorg Chem Commun*. 2021;134:108985. <https://doi.org/10.1016/j.inoche.2021.108985>.
58. Pratap R, Hassan N, Yadav M, Srivastava SK, Chaudhary S, Verma AK, et al. Biogenic synthesis of dual-emission chlorophyll-rich carbon quantum dots for detection of toxic heavy metal ions-Hg (ii) and As (iii) in water and mouse fibroblast cell line NIH-3T3. *Environ Sci Nano*. 2024;11(4):1636-53. <https://doi.org/10.1039/D3EN00789H>.
59. Liu F, Li H, Liao D, Xu Y, Yu M, Deng S, et al. Carbon quantum dots derived from the extracellular polymeric substance of anaerobic ammonium oxidation granular sludge for detection of trace Mn (vii) and Cr (vi). *RSC Adv*. 2020;10(53):32249-58. <https://doi.org/10.1039/D0R A06133F>.
60. Yan F, Bai Z, Zu F, Zhang Y, Sun X, Ma T, et al. Yellow-emissive carbon dots with a large Stokes shift are viable fluorescent probes for detection and cellular imaging of silver ions and glutathione. *Mikrochim Acta*. 2019;186:1-11. <https://doi.org/10.1007/s00604-018-3221-8>.
61. Wu Y, Liu Y, Yin J, Li H, Huang J. Facile ultrasonic synthesized NH<sub>2</sub>-carbon quantum dots for ultrasensitive Co<sup>2+</sup> ion detection and cell imaging. *Talanta*. 2019; 205:120121. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2019.120121>.
62. Gong Y, Liang H. Nickel ion detection by imidazole modified carbon dots. *Spectrochim. Acta A*. 2019;211:342-7. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2018.12.024>.
63. Raja S, da Silva GT, Anbu S, Ribeiro C, Mattoso LH. Biomass-derived carbon quantum dot: "On-off-on" fluorescent sensor for rapid detection of multi-metal ions and green photocatalytic CO<sub>2</sub> reduction in water. *Biomass Convers. Biorefinery*. 2023;1-13. <https://doi.org/10.1007/s13399-023-04247-0>.
64. Liu Y, Chen J, Xu Z, Liu H, Yuan T, Wang X, et al. Detection of multiple metal ions in water with a fluorescence sensor based on carbon quantum dots assisted by stepwise prediction and machine learning. *Environ Chem Lett*. 2022;20(6):3415-20. <https://doi.org/10.1007/s10311-022-01475-0>.
65. Radhakrishnan K, Panneerselvam P, Marieeswaran M. A green synthetic route for the surface-passivation of carbon dots as an effective multifunctional fluorescent sensor for the recognition and detection of toxic metal ions from aqueous solution. *Anal Methods*. 2019;11(4):490-506. <https://doi.org/10.1039/C8AY02451K>.
66. Arumugham T, Alagumuthu M, Amimodu RG, Munusamy S, Iyer SK. A sustainable synthesis of green carbon quantum dot (CQD) from Catharanthus roseus (white flowering plant) leaves and investigation of its dual fluorescence responsive behavior in multi-ion detection and biological applications. *Sustain Mater Technol*. 2020;23:e00138. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2019.e00138>.
67. Park Y, Yoo J, Lim B, Kwon W, Rhee S-W. Improving the functionality of carbon nanodots: doping and surface functionalization. *J Mater Chem*. 2016;4(30):11582-603. <https://doi.org/10.1039/C6TA04813G>.

68. Xie J, Wu Z, Sun J, Lv C, Sun Q. Green synthesis of carbon quantum dots derived from lycium barbarum for effective fluorescence detection of Cr (VI) sensing. *J Fluoresc.* 2024;34(2):571-8. <https://doi.org/10.1007/s10895-023-03300-5>.
69. Nguyen KG, Baragau I-A, Gromicova R, Nicolaev A, Thomson SA, Rennie A, et al. Investigating the effect of N-doping on carbon quantum dots structure, optical properties and metal ion screening. *Sci Rep.* 2022;12(1):13806. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-16893-x>.
70. Swathi R, Reddy GB, Rajkumar B, Ramakrishna D, Swamy PY. Jamun Seed-Derived Nitrogen-Doped Carbon Dots: A Novel Microwave-Assisted Synthesis for Ultra-Bright Fluorescence and Mn<sup>7+</sup> Detection. *J Fluoresc.* 2023;1-12. <https://doi.org/10.1007/s10895-023-03438-2>.
71. Liu R, Zhang Y, Piao Y, Meng L-Y. Development of nitrogen-doped carbon quantum dots as fluorescent probes for highly selective and sensitive detection of the heavy-ion Fe<sup>3+</sup>. *Carbon Lett.* 2021;31(4):821-9. <https://doi.org/10.1007/s42823-020-00222-1>.
72. Tadesse A, Hagos M, RamaDevi D, Basavaiah K, Belachew N. Fluorescent-nitrogen-doped carbon quantum dots derived from citrus lemon juice: green synthesis, mercury (II) ion sensing, and live cell imaging. *ACS omega.* 2020;5(8):3889-98. <https://doi.org/10.1021/acsomega.9b03175>.
73. Cheng S, Zhang J, Liu Y, Wang Y, Xiao Y, Zhang Y. One-pot synthesis of nitrogen-doped carbon dots for sensing of Co<sup>2+</sup> and tetracycline antibiotics, biological imaging, and fluorescent inks. *J. Nanoparticle Res.* 2022;24(2):44. <https://doi.org/10.1007/s11051-022-05398-3>.
74. Tan A, Yang G, Wan X. Ultra-high quantum yield nitrogen-doped carbon quantum dots and their versatile application in fluorescence sensing, bioimaging and anti-counterfeiting. *Spectrochim Acta A.* 2021;253:119583. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2021.119583>.
75. Xing S, Zheng K, Shi L, Kang K, Peng Z, Zhang X, et al. Fluorescence detection of pb<sup>2+</sup> in environmental water using biomass carbon quantum dots modified with acetamide-glycolic acid deep eutectic solvent. *Molecules.* 2024;29(7):1662. <https://doi.org/10.3390/molecules29071662>.
76. Zhang Y, Li Z, Sheng L, Meng A. Lemon juice-derived nitrogen-doped carbon quantum dots for highly sensitive and selective determination of ferrous ions and cell imaging. *Colloids Surf A Physicochem Eng Asp.* 2023;657:130580. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2022.130580>.
77. Preethi M, Viswanathan C, Ponpandian N. Fluorescence quenching mechanism of P-doped carbon quantum dots as fluorescent sensor for Cu<sup>2+</sup> ions. *Colloids Surf A Physicochem Eng Asp.* 2022;653:129942. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2022.129942>.
78. Yadav A, Yadav R, Lahariya V, Singh AK. Versatile P-doped carbon quantum dots derived from green precursor: an efficient metal ion sensor and photocatalytic behaviour in aqueous environment. *Res Chem Intermed.* 2024;50(4):1873-93. <https://doi.org/10.1007/s11164-023-05225-x>.
79. Zhang L, Li B, Zhou Y, Wu Y, Sun Q, Le T. Preparation of phosphorus-doped cow milk-derived carbon quantum dots and detection of Au<sup>3+</sup>. *J Food Process Eng.* 2023;46(7):e14349. <https://doi.org/10.1111/jfpe.14349>.
80. Kalaiyaran G, Joseph J, Kumar P. Phosphorus-doped carbon quantum dots as fluorometric probes for iron detection. *ACS omega.* 2020;5(35):22278-88. <https://doi.org/10.1021/acsomega.0c02627>.
81. Hao Y, Li T, Tian M, Dai Q, Zhang F, Chai F. A silicon-doped carbon dot-based multivariate fluorometric and colorimetric probe for the simultaneous detection of heavy metal ions and dopamine. *New J Chem.* 2024;48(4):1828-36. <https://doi.org/10.1039/D3NJ04627C>.
82. Liao S, Zhang L, Li S, Yue S, Wang G. Selective detection of mercury ions via single and dual signals by silicon-doped carbon quantum dots. *New J Chem.* 2023;47(30):14242-8. <https://doi.org/10.1039/D3NJ02521G>.
83. Desai ML, Basu H, Saha S, Singhal RK, Kailasa SK. Investigation of silicon doping into carbon dots for improved fluorescence properties for selective detection of Fe<sup>3+</sup> ion. *Opt Mater.* 2019;96:109374. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2019.109374>.
84. Zan M, Li C, Zhu D, Rao L, Meng Q-F, Chen B, et al. A novel "on-off-on" fluorescence assay for the discriminative detection of Cu (ii) and l-cysteine based on red-emissive Si-CDs and cellular imaging applications. *J Mater Chem B.* 2020;8(5):919-27. <https://doi.org/10.1039/C9TB02681A>.
85. Hu A, Chen G, Huang A, Cai Z, Yang T, Ma C, et al. o-phenylenediamine Derived Fluorescent Carbon Quantum dots for Detection of Hg (II) in Environmental Water. *J Fluoresc.* 2024;34(2):905-13. <https://doi.org/10.1007/s10895-023-03331-y>.
86. Chen Y, Cui H, Wang M, Yang X, Pang S. N and S doped carbon dots as novel probes with fluorescence enhancement for fast and sensitive detection of Cr (VI). *Colloids Surf A Physicochem Eng Asp.* 2022;638:128164. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2021.128164>.
87. Wu H, Tong C. Nitrogen-and sulfur-codoped carbon dots for highly selective and sensitive fluorescent detection of Hg<sup>2+</sup> ions and sulfide in environmental water samples. *J Agric Food Chem.* 2019;67(10):2794-800. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.8b07176>.
88. Wang Y, Xu G, Zhang X, Yang X, Hou H, Ai W, et al. N- and S-codoped carbon quantum dots for enhancing fluorescence sensing of trace Hg<sup>2+</sup>. *Phys Chem Chem Phys.* 2023;25(41):28230-40. <https://doi.org/10.1039/D3CP02924G>.
89. Yan Z, Yao W, Mai K, Huang J, Wan Y, Huang L, et al. A highly selective and sensitive "on-off" fluorescent probe for detecting cadmium ions and L-cysteine based on nitrogen and boron co-doped carbon quantum dots. *RSC Adv.* 2022;12(13):8202-10. <https://doi.org/10.1039/D1RA08219A>.
90. Wang C, Sun Q, Li C, Tang D, Shi H, Liu E, et al. Biocompatible double emission boron nitrogen co-doped carbon quantum dots for selective and sensitive detection of Al<sup>3+</sup> and Fe<sup>2+</sup>. *Mater Res Bull.* 2022;155:111970. <https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2022.111970>.
91. Wang Y, Hu X, Li W, Huang X, Li Z, Zhang W, et al. Preparation of boron nitrogen co-doped carbon quantum dots for rapid detection of Cr (VI). *Spectrochim Acta A.* 2020;243:118807. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2020.118807>.
92. Wu H, Pang L-F, Fu M-J, Guo X-F, Wang H. Boron and nitrogen codoped carbon dots as fluorescence sensor for Fe<sup>3+</sup> with improved selectivity. *J Pharm Biomed Anal.* 2020;180:113052. <https://doi.org/10.1016/j.jpba.2019.113052>.
93. John A, Roy RE, Hari H, Zachariah AK. Emerging stoke's shift-based cr (vi) fingerprint sensor from intensely blue fluorescent, high quantum yield, pepitas-derived carbon

- dots. ACS Appl Opt Mater. 2024;2(2):291-300. <https://doi.org/10.1021/acsaom.3c00411>.
94. Zhang J, Jing C, Wang B. A label-free fluorescent sensor based on Si, N-codoped carbon quantum dots with enhanced sensitivity for the determination of Cr (VI). Mater. 2022;15(5):1733. <https://doi.org/10.3390/ma15051733>.
  95. Mohandoss S, Khanal HD, Palanisamy S, You S, Shim J-J, Lee YR. Multiple heteroatom-doped photoluminescent carbon dots for ratiometric detection of Hg<sup>2+</sup> ions in cell imaging and environmental applications. Anal Methods. 2022;14(6):635-42. <https://doi.org/10.1039/D1AY02077C>.
  96. Karami C, Taher MA, Shahlaei M. A simple method for determination of mercury (II) ions by PNBS-doped carbon dots as a fluorescent probe. J Mater Sci Mater Electron. 2020;31:5975-83. <https://doi.org/10.1007/s10854-020-03157-5>.
  97. Mondal TK, Mondal S, Ghorai UK, Saha SK. White light emitting lanthanide based carbon quantum dots as toxic Cr (VI) and pH sensor. J Colloid Interface Sci. 2019;553:177-85. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2019.06.009>.
  98. Vyas T, Joshi A. Chemical sensor thin film-based carbon quantum dots (CQDs) for the detection of heavy metal count in various water matrices. Analyst. 2024;149(4):1297-309. <https://doi.org/10.1039/D3AN01571H>.
  99. Torres Landa SD, Reddy Bogireddy NK, Kaur I, Batra V, Agarwal V. Heavy metal ion detection using green precursor derived carbon dots. iScience. 2022;25(2):103816. <https://doi.org/10.1016/j.isci.2022.103816>.
  100. Yin Y, Huanhuan L, Weijun S, Xiaofeng H, and Sun C. Carbon quantum dot (cq-d)-based composite fluorescent hydrogel for the isolation and determination of iron (iii). Anal Lett. 2024;57(10):1595-610. <https://doi.org/10.1080/00032719.2023.2262631>.
  101. Liu Y, Feng S, Zhu Q. The effect of CQDs' particle size on its fluorescence behavior and Cu<sup>2+</sup> detection. Spectrochim Acta A Mol Biomol Spectrosc. 2025;341:126408. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2025.126408>.
  102. Che H, Tian X, Chen W, Dai C, Nie Y, Li Y, et al. Simultaneous visual detection of multiple heavy metal ions by a high-throughput fluorescent probe. Mikrochim Acta. 2023;190(8):311. <https://doi.org/10.1007/s00604-023-05882-0>.
  103. Yang D, Ma C, Chen G, Li L, Hu A, Huang A, et al. Investigation of the application and mechanism of Nitrogen and Phosphorus co-doped Carbon dots for Mercury Ion Detection. J Fluoresc. 2024;1-9. <https://doi.org/10.1007/s10895-024-03594-z>.
  104. Chu C, Zou C, Qiu Y, Huo D, Deng Y, Wang X, et al. Synthesis of two nitrogen-doped carbon quantum dots to construct fluorescence probes for sensitive Hg<sup>2+</sup> detection with dual signal output. Dalton Trans. 2023;52(23):7982-91. <https://doi.org/10.1039/D3DT00663H>.
  105. Aladesuyi OA, Oluwafemi OS. 'Off-On' determination of lead (Pb<sup>2+</sup>) and fluoride (F<sup>-</sup>) ion in fish and wastewater samples using N, S co-doped carbon quantum dots (N, S-CQDs). Appl Water Sci. 2024;14(7):153. <https://doi.org/10.1007/s13201-024-02191-6>.
  106. Yu J, Kalimuthu R, Liu X, Zhang W, Tan Y, Yan K, et al. Unveiling the quenching mechanism of metal ions using solvent-driven N, S-doped carbon quantum dots. Opt Mater. 2025;162:116948. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2025.116948>.

#### How to cite this article:

Yousefi-Limaee N, Rezaei Y. A review on the application of carbon quantum dots and doped carbon quantum dots in fluorescent sensors for the detection of metal pollutants. J Stud Color World. 2025;15(3):313-330. <https://doi.org/10.30509/jscw.2025.167510.1228> [In Persian].