مقاله علمی پژوهشی
مجله دوفصل نامه
مهندسی ژنتیک و ایمنی زیستی
ISSN 2588-5073 چاپی
ISSN 2588-5081 الکترونیکی
دوره ۱۲، شماره ۲، پاییز و زمستان ۱۴۰۲
صفحه ۳۰۴-۲۹۴

10.61186/gebsj.12.2.294

Research Article
Genetic Engineering and Biosafety Journal 2024
Volume 12, Number 2, Pages: 294-304

http://gebsj.ir/

https://ecc.isc.ac/showJournal/23064

اثرات نقاط کوانتومی کربن (Carbon Quantum Dots) بر گیاهان

The Effects of Carbon Quantum Dots on Plant

محمد دهقانی، فاطمه علی‌پور، کاوه مولایی، عارفه محمدیان مبارکه، جواد کریمی*

Mohammad Dehghani, Fatemeh Alipour, Kaveh Molaei, Arefeh Mohammadian Mobarakeh, Javad Karimi*

بخش زیست‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه شیراز، ایران

Department of Biology, Faculty of Sciences, Shiraz University, Shiraz, Iran

* نویسنده مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: *Corresponding Author, Email: javadkarimi@shirazu.ac.ir

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۷/۲۸ - تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۱/۲۴)
Received: 2023/10/20 | Accepted: 2024/02/13 | Published: 2024/03/14

چکیده

در حال حاضر، نقاط کوانتومی کربن به دلیل دارا بودن ویژگی‌های منحصر به فرد و مزایای مطلوب و جدید، توجه زیادی را به خود جلب کرده است. تبلور بالا، حلالیت در آب، پراکندگی خوب، اندازه کوچک، سمیت کم، مواد اولیه ارزان، پایداری شیمیایی بالا، سازگاری با محیط زیست، هزینه کم، پایداری در نور، انتقال بار مطلوب با رسانایی الکترونیکی پیشرفته و همچنین ویژگی‌های حرارتی و مکانیکی خاص برخی از این ویژگی‌هاست. نقاط کوانتومی کربنی کاربردهای متنوعی در زمینه‌های مختلف دارد. ساخت حسگرهای شیمیایی و زیستی دقیق، تصویربرداری زیستی، سلول‌های خورشیدی، ردیابی داروها، نانوپزشکی، سلول‌های خورشیدی، دیود ساطع نور (LED) و الکتروکاتالیزها پاره‌ای از این کاربردهاست. حسگرهای زیستی مبتنی بر نقاط کوانتومی کربن قادر به تشخیص انواع یون‌های فلزی، اسیدها، پروتئین‌ها، بیوتیول‌ها، پلی‌پپتیدها، DNA و miRNA، آلاینده‌های آب، هماتین، داروها، ویتامین‌ها و سایر مواد شیمیایی هستند. در مطالعه حاضر، به خواص نقاط کوانتومی کربن و برخی روش‌های ساخت و کاربرد آن‌ها پرداخته شده است. در ادامه مقاله، اثر نقاط کوانتومی کربن بر عوامل مهمی در گیاهان از قبیل رشد و نمو، فتوسنتز، جذب و انتقال مواد، مقاومت به تنش‌های زیستی و غیر زیستی و همچنین کاربرد در کشاورزی مورد بررسی قرار گرفته است.

واژه‌های کلیدی

نقاط کوانتومی کربن،
گیاه، رشد و نمو،
فتوسنتز،
تنفس،
تنش،
جذب و انتقال

Dehghani M, Alipour F, Molaei K, Mohammadian Mobarakeh A, Karimi J. The Effects of Carbon Quantum Dots on Plant. Genetic Engineering and Biosafety Journal 2023; 12 (2) :294-304: doi:
10.61186/gebsj.12.2.294
URL: http://gebsj.ir/article-1-468-fa.html

[Downloaded from gebsj.ir on 2026-06-01]

[DOI: 10.61186/gebsj.12.2.294]

Genetic Engineering and Biosafety Journal
Volume 12, Number 2, 2024

Abstract

Currently, carbon quantum dots have attracted considerable attention due to their unique properties and desirable advantages. High crystallinity, water solubility, good dispersibility, small size, low toxicity, inexpensive raw materials, high chemical stability, environmental compatibility, low cost, stability under light, desirable charge transfer with advanced electronic conductivity, as well as specific thermal and mechanical properties are some of these features. Carbon quantum dots have various applications in different fields. Fabrication of precise chemical and biological sensors, bioimaging, solar cells, drug tracking, nanomedicine, light-emitting diodes (LEDs), and electrocatalysts are some of these applications. Biological sensors based on carbon quantum dots are capable of detecting various metal ions, acids, proteins, biotin, polypeptides, DNA and miRNA, water pollutants, hematin, drugs, vitamins, and other chemicals. In the present study, the properties of carbon quantum dots and some of their fabrication and applications methods have been addressed. In continuation of the paper, the effect of carbon quantum dots on important factors in plants such as growth and development, photosynthesis, absorption and transportation of substances, resistance to biotic and abiotic stresses, as well as their application in agriculture has been investigated.

Keywords: Quantum Dots, Carbon, plant, Growth and Development, Photosynthesis, Respiration, Stress, Uptake and Transmission.

مقدمه

کربن عنصری شناخته‌شده‌ای در طبیعت است که اساس مولکول‌های زیستی را تشکیل می‌دهد. هنگامی که ذرات کربنی در مقیاس نانو، فرآوری و استخراج می‌شوند، به‌دلیل بالا بودن نسبت سطح به حجم این ذرات، انرژی بالای سطح و همچنین تبعیت از قوانین فیزیک کوانتومی، خواص فیزیکی و شیمیایی خاصی را از خود نشان می‌دهند (Michalet et al., 2005; Zuo et al., 2016b). یک عضو بسیار معروف از مواد نانویی کربنی، نقاط کوانتومی کربن هستند که اندازه این ذرات کمتر از ۱۰ نانومتر بوده و دارای خاصیت فلوئورسنس هستند. این ذرات نانویی در سال ۲۰۰۶ نقاط کوانتومی کربنی نامیده شدند (Ding et al., 2014). از ویژگی‌های نقاط کوانتومی کربن می‌توان به اندازه کوچک، حلالیت بالا در آب و دامنه متغییر امواج فلوئورسنت آن‌ها اشاره کرد (Mathew and Mathew, 2023; Zuo et al., 2016b). رنگ بازتاب فلوئورسنت این ذرات با تغییر طول موج برانگیختگی آن‌ها تغییر کرده و این ویژگی به کاربرد آن‌ها در تصویربرداری سلولی کمک شایانی کرده است. همچنین جایگاه‌های فعال و غیرفعال نقاط کوانتومی کربن می‌تواند برای تشخیص اسیدیته، ذرات فلزی و مواد ارگانیک موثر واقع شود (Karami and Abdouss, 2024; Zuo et al., 2016a). به‌دلیل ویژگی‌های ریخت‌شناسی، سطح عملکردی و ساختار منحصر به فرد این ذرات، در سال‌های اخیر مورد توجه بسیاری از دانشمندان واقع شده‌اند و مطالعات بسیاری بر آن‌ها انجام شده‌است (Michalet et al., 2005; Zheng et al., 2015). اگرچه زمان زیادی از کشف نقاط کوانتومی کربن نمی‌گذرد، اما به‌دلیل خواص خاص فیزیکی و شیمیایی، این نقاط کوانتومی نیمه‌رسانا به ابزاری قدرتمند برای پژوهش‌های مرتبط تبدیل شده‌اند (Lim et al., 2015; Zuo et al., 2016a). از جمله عواملی که این ذرات را پرکاربرد کرده است می‌توان به سمیت پایین، حلالیت بالا در آب و قدرت فلوئورسنت بالا اشاره نمود. همچنین از لحاظ نوری دارای طیف گسترده و پیوسته جذب و بازنشر، نور بازنشری موازی و باریک و همچنین پایداری نوری بالا اشاره نمود (Li et al., 2016; Sistani and Shekarchizadeh, 2022). از جمله این کاربردها می‌توان به تصویربرداری سلولی، حسگرهای شیمیایی و زیستی، سلول‌های خورشیدی، ردیابی داروها، غربالگری و مطالعه ژن‌ها اشاره کرد (Lim et al., 2015; Pajewska-Szmyt et al.,

[Downloaded from gebsj.ir on 2026-06-01]

[DOI: 10.61186/gebsj.12.2.294]

2020). در واقع وجود گروه‌های آمینی، کربوکسیلی، هیدروکسیلی و سایر گروه‌های عاملی در سطح نقاط کوانتومی کربن باعث شده‌اند که ویژگی‌های نوری آن‌ها بهبود یافته و همچنین قابلیت ردیابی این ذرات به طرز چشم‌گیری بالا برود (Lim et al., 2015). نقاط کوانتومی کربن با نور بازنشری آبی و سبز در پژوهش‌های فراوانی ساخته و فرآوری شده‌اند که دارای بازده کوانتومی بالایی بودند. اما نقاط کوانتومی با نور بازنشری قرمز و نارنجی به ندرت در پژوهش‌ها ساخته و فرآوری شده‌اند. نقاط کوانتومی کربن با نور بازنشری قرمز بسیار کارآمد هستند که از کاربردهای این ذرات می‌توان به نشانه‌گذاری مولکول‌های آلی در گیاهان اشاره کرد که این قابلیت می‌تواند در پیش‌بینی ساختار درونی گیاه به دانشمندان کمک کنند (Li et al., 2016).

به طور کلی برخی از نانومواد ساخته شده، می‌توانند در حل پاره‌ای از مشکلات کشاورزی بسیار پرکاربرد باشند (Li et al., 2020). البته برخی از این نانومواد، اثرات اثبات شده نامطلوبی هم بر گیاهان دارند که بایستی به آن توجه شود و نهایت احتیاط لازم در این زمینه صورت گیرید (Karimi and Mohsenzadeh, 2016; Sarmast and Salehi, 2016; Karimi and Mohsenzadeh, 2017). در میان ذرات نانو مقیاس، مواد نانویی با پایه کربن سمیت کمتری نسبت به مواد نانویی بر پایه فلزهای سنگین دارند (Bhattacharya et al., 2016; Mukherjee et al., 2016). به همین دلیل این ذرات کاربرد بیشتری در کشاورزی پیدا کرده‌اند (Ali et al., 2020; Mukherjee et al., 2016). تاکنون، تأثیر مثبت نانوذراتی مثل طلا، نقره، مس، آلومینیوم، دی اکسید تیتانیوم (TiO_2)، اکسید سریم (CeO_2)، دی‌اکسیدِ سیلیسیم (SiO_2) و نانوذرات کربنی بر رشد گیاهان گزارش شده است. اگر چه تغییری بسیار جزئی در ترکیب، غلظت، اندازه و روکش نانوذرات می‌تواند نتایج متفاوتی را به همراه داشته باشد (Akiyama et al., 2006; Shah and Belozerova, 2009; Su et al., 2009). همچنین می‌توان از این ذرات برای بررسی تصویربرداری از بافت زنده گیاهی استفاده کرد. به‌عبارتی یکی از مهم‌ترین ابزار برای ردیابی ناقلین و داروها در گیاهان، ردیابی نانوذرات فلوئورسنت متصل به آنان می‌باشد (Fang et al., 2012; Yang et al., 2023). از کاربردهای این نوع تصویربرداری می‌توان به تشخیص ساختار درونی گیاه، واکاوی سیستم انتقال مواد آلی در گیاه و مشخص نمودن مسیر حرکت مواد آلی در گیاه اشاره کرد. نقاط کوانتومی کربنی با قدرت فلوئورسنت بالا می‌توانند به روش یک مرحله‌ای و در مقیاس انبوه تولید شوند. بنابراین می‌توانند جایگزین مناسبی برای نقاط کوانتومی فلزات سنگین باشند و مشکلات زیست محیطی را کاهش دهند (Li et al., 2016).

فرآیندهای متفاوتی برای سنتز نقاط کربنی گزارش شده‌است که به طور عمده به دو دسته تقسیم می‌شوند: ۱. بالا به پایین ۲. پایین به بالا (Costas-Mora et al., 2015; Lim et al., 2015; Zuo et al., 2016b). فرآیندهای بالا به پایین روش‌هایی است که در آن مواد کربنی به نانوذرات کربنی شکسته می‌شوند که شامل سایش لیزری (Laser ablation)، تخلیه قوس الکتریکی (Arc discharge)، روش‌های الکتروشیمیایی (Electrochemical approaches) و تیمار پلاسما (Plasma treatment) می‌شود (Abuzairi et al., 2015; Kim et al., 2017; Xu et al., 2017; Zuo et al., 2016b). همچنین فرآیندهای پایین به بالا شامل روش‌های اکسایش شیمیایی (Chemical oxidation)، فرآیند پیرولیز (Pyrolytic process)، کربنیزه‌شدن هیدروترمال (Hydrothermal carbonization)، مایکروویو (Microwave) و میسل معکوس (Reverse micelle) می‌شود (Campos et al., 2016; Song et al., 2015; Xu et al., 2015; Zuo et al., 2016b).

در میان فرآیندهای نامبرده، روش کربنیزه‌شدن هیدروترمال به دلیل روش استخراج، استفاده از محیط آبی در استخراج و بازده کوانتومی بالای نقاط کوانتومی به‌دست آمده؛ سنتز سبز نقاط کوانتومی کربن نامیده می‌شود. در این فرآیند برای استخراج و فرآوری نقاط کوانتومی کربن از منابع کربنی موجود در طبیعت استفاده می‌شود. از جمله این منابع می‌توان موز، آب پرتغال، لیمو، دانه قهوه، برگ بامبو، گوجه‌فرنگی، شیر و آب هندوانه را نام برد (Arumugham et al., 2020).

اثرات نقاط کوانتومی کربن (Carbon Quantum Dots) بر رشد و نمو گیاهان

تاکنون تحقیقات محدودی در مورد اثرات نقاط کوانتومی کربن (Carbon Quantum Dots) بر رشد و نمو گیاهان گزارش شده

[Downloaded from gebsj.ir on 2026-06-01]
[DOI: 10.61186/gebsj.12.2.294]

است که با توجه به افزایش مصرف و گرایش روزافزون به این مواد، لازم است توجه بیشتر محققان به این حوزه و در کل اثرات بالقوه بر موجودات زنده افزایش یابد (Guerrero-Gonzalez et al., 2023). در این مورد به تعدادی از تحقیقات انجام شده، اشاره خواهد شد. در آزمایشی برای بررسی اثر نقاط کوانتومی کربن بر رشد جلبک‌ها از *Chlorella vulgaris* به‌عنوان نمونه شاخص استفاده شد. نتایج حاکی از این بود که نقاط کوانتومی کربن می‌توانند زیست‌توده و سرعت رشد این ریزجلبک را از ۱۷ تا ۲۰ درصد افزایش دهند. به این دلیل که نقاط کوانتومی کربن می‌توانند باعث شتاب در فرآیند فتوسنتز شده و رشد گیاه را افزایش دهد. به‌علاوه، نقاط کوانتومی کربن به‌عنوان آنتی‌اکسیدان می‌توانند از سلول‌های گیاه در برابر آسیب اشعه‌ی فرابنفش محافظت کنند. در واقع سمیت کم و زیست تخریب پذیری نقاط کوانتومی کربن، اثر مثبت روی گیاه دارد (Zhang et al., 2018). در آزمایشی دیگر، بیان شد که تیمار با نقاط کوانتومی کربن بازده تولید محصول برنج را تا ۱٤/۵ درصد افزایش می‌دهد. برای بررسی گیاهان تحت تیمار، از روش‌های تصویر برداری مختلفی استفاده شد و این مطالعات اثبات کردند که نقاط کوانتومی کربن توان نفوذ به همه‌ی بخش‌های گیاه برنج، از جمله هسته‌ی سلول را دارند. همچنین، نقاط کوانتومی کربن، جوانه‌زنی دانه، طویل شدن ریشه و تولید کربوهیدرات در گیاه برنج را افزایش می‌دهند (Li et al., 2020). گزارش‌های دیگری در مورد تأثیر نقاط کوانتومی کربن بر رشد گیاهان گزارش شده است. Tripathi و Sarkar بیان کردند که تیمار با نقاط کوانتومی کربن که توانایی انحلال‌پذیری در آب را دارند، برای گیاه گندم غیر سمی است و نقاط کوانتومی کربن می‌توانند برای افزایش محصول این غله استفاده شوند. با استفاده از میکروسکوپ الکترونی نگاره (SEM) و میکروسکوپ فلورسنس مشاهده شد که نقاط کوانتومی کربن قابل حل در آب، توانایی ورود به گیاه گندم را دارند و نتایج حاصل از طیف سنجی رامان هم این مشاهدات را تأیید کردند. نتایج بیانگر این موضوع بودند که نقاط کوانتومی کربن محلول در آب، توان گذر از سدهای زیستی درون گیاه گندم جوان را دارند و می‌توانند آب و مواد مغذی را همراه با خود، به درون گیاه حمل کنند و از این طریق می‌توانند باعث افزایش رشد گیاه گندم شوند.

اثرات نقاط کوانتومی کربن محلول در آب روی رشد ریشه و قسمت‌های هوایی گیاه گندم در شرایط نور و تاریکی بررسی شد و یافته‌ها حاکی از این بود که این نقاط کوانتومی کربن رشد ریشه و بخش‌های هوایی گیاه گندم را افزایش می‌دهند اما تأثیر آن‌ها روی رشد ریشه‌ی گیاه گندم به نسبت، بیشتر از بخش‌های هوایی است (Tripathi and Sarkar, 2015).

در آزمایشی که روی جوانه ماش انجام شد، مشخص گردید که این ذرات کوانتومی موجب طویل شدن و تقویت ریشه و کشیده‌گی ساقه می‌شوند و این گیاهان در مقایسه با گیاه کنترل حدود ۹ درصد افزایش در میزان کربوهیدرات را نشان می‌دهند. قدرت ریشه جوانه‌های ماشی که در معرض ذرات کربنی قرار گرفته‌اند نسبت به گروه کنترل حدود ۳٦ درصد افزایش یافته و با توجه به این‌که سیستم ریشه به دلیل جذب آب نقش مهمی در توسعه گیاهان دارد، اگر قدرت ریشه افزایش یابد، آب بیش‌تری جذب شده و گیاه سریع‌تر رشد می‌کند (Wang et al., 2018). در آزمایش دیگری مشخص شد نقاط کوانتومی کربن تولید محصول در هشت گیاه دولپه‌ای از جمله سویا، گوجه‌فرنگی، بادمجان، تربچه، هندوانه، فلفل دلمه، کلم و کرفس را تا حدود ۲۰ درصد افزایش دادند (Li et al., 2020). در آزمایش متفاوتی، میزان سمیت سه نوع ذرات کوانتومی کادمیوم-تلور، طلا و کربن را روی سلول‌های گیاهی و رشد آن‌ها بررسی کردند که متوجه شدند ذرات کوانتومی کادمیوم-تلور بیشترین اثر سمیت را روی سلول‌ها دارند به صورتی که منجر به مرگ نسبی سلول‌ها، کاهش متابولیسم، شکستگی کروماتین، هیدرولیز، تکه تکه شدن میتوکندری‌ها و به طور قابل توجهی مانع رشد آن‌ها می‌شوند. تحت همان شرایط، ذرات کوانتومی طلا، فقط فعالیت متابولیکی سلول را تا حدودی کاهش می‌دهند و تأثیر چندانی بر ظاهر، ساختار و همچنین رشد آن‌ها نمی‌گذارند. در حالی که ذرات کوانتومی کربن زیست سازگاری خوبی نشان داده‌اند و هیچ سمیت آشکاری برای سلول‌های زنده و رشد آن‌ها نداشته‌اند (Song et al., 2013). در نتیجه‌گیری کلی می‌توان چنین برداشت کرد که ذرات کوانتومی کربن از یک طرف اثرات مثبتی بر گیاهان دارند و از طرف دیگری هیچ گونه سمیتی نیز در اینجا نشان ندادند.

[Downloaded from gebsj.ir on 2026-06-01]

[DOI: 10.61186/gebsj.12.2.294]

اثرات نقاط کوانتومی کربن (Carbon Quantum Dots) بر فتوسنتز گیاهان

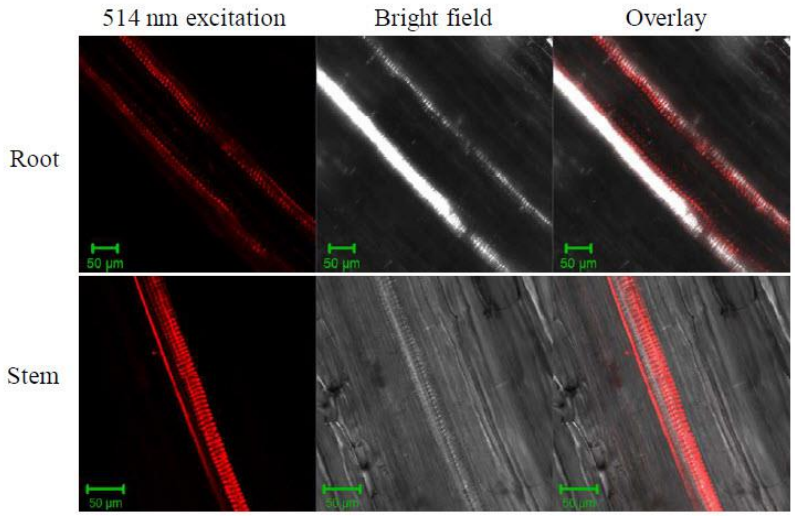
در طی فرآیند فتوسنتز تبدیل انرژی‌های مختلف به یکدیگر صورت می‌گیرد. در ابتدا انرژی نور خورشید که در کلروپلاست به دام افتاده به انرژی الکتریکی و سپس به انرژی شیمیایی تبدیل می‌شود (Huo, 2022). در این فرآیند رنگدانه‌هایی مثل کلروفیل و گزانتوفیل نقش آنتن‌هایی را برای گرفتن انرژی نورانی خورشید ایفا می‌کنند. انرژی جذب شده توسط رنگدانه‌ها، به فتوسیستم‌های نوری I و II منتقل می‌شود و در زنجیره‌های انتقال الکترون در فرآیند اکسید کردن آب، آزاد شدن اکسیژن و در نهایت تولید ترکیبات پرانرژی ATP و NADPH نقش دارد. در آخر ATP و NADPH در احیا کردن کربن دی اکسید به ترکیبات آلی و ساخت مواد قندی مورد استفاده قرار می‌گیرند. فرآیند تثبیت دی اکسید کربن نیز با همکاری آنزیم‌های فتوسنتزی کاتالیز می‌شود. بنابراین، فرآیندهای حد واسط انتقال الکترون و تثبیت دی اکسید کربن، نقش‌های کلیدی در بررسی میزان فتوسنتز ایفا می‌کنند (Okegawa and Motohashi, 2015). یافته‌های مشابهی وجود دارند که نشان داده‌اند نقاط کوانتومی کربن به عنوان گیرنده و دهنده‌های خوب و موثر الکترون عمل می‌کنند که می‌توانند در فرآیندهای تبدیل انرژی نورانی به سایر انواع انرژی در طی فتوسنتز به کار برده شوند (Li et al., 2020). نقاط کوانتومی کربن برخلاف رنگدانه‌های کلروپلاست، در منطقه‌ی فرابنفش جذب زیادی را از خود نشان می‌دهند. علاوه بر آن نقاط کوانتومی کربن با پراکنده شدن در آب، نور آبی و قرمز شدیدی را از خود نشان می‌دهند که می‌تواند توسط کلروپلاست جذب شود. در آزمایش دیگری مشخص شد که اگر روی سطح کلروپلاست‌های استخراج شده با نقاط کوانتومی کربن چوشانیده شود، میزان تولید ATP در این کلروپلاست‌های هیبریدی ۲/۸ برابر بیش‌تر از حالت عادی خواهد شد. همچنین، نقاط کوانتومی کربن در گیاه زنده باعث افزایش ۲۵ درصدی نرخ انتقال الکترون می‌شوند. این مطالعات نشان داد که نقاط کوانتومی کربن می‌توانند با افزایش جذب نور و بالا بردن کارایی فتوسیستم II، فعالیت فتوسنتزی را در کلروپلاست‌های استخراج شده و برگ‌های سالم، افزایش دهند (Li et al., 2018). به علاوه، نقاط کوانتومی کربن می‌توانند فعالیت آنزیم روبیسکو (ریبولوز بیس فسفات کربوکسیلاز اکسیژناز) را از حدود ۳٤ تا ۳۸ درصد افزایش دهند که افزایش کارایی روبیسکو، خود می‌تواند فتوسنتز را سرعت بخشد (Zhang et al., 2018). در آزمایشی رشد و فتوسنتز جوانه‌های ماش تحت تیمار با غلظت‌های مختلف نقاط کوانتومی کربن بررسی و نشان داده شد که میزان کربوهیدرات در گیاهان تحت تیمار، در مقایسه با گیاه کنترل ۲۱/۹ درصد افزایش را نشان می‌دهد. افزایش در میزان کربوهیدرات ممکن است با نقش نقاط کوانتومی کربن در فتوسنتز، در ارتباط باشد و نتیجه‌گیری این بود که نقاط کوانتومی کربن با بهبود میزان انتقال الکترون، فعالیت فتوسنتزی گیاه را تحت تأثیر قرار می‌دهند. به علاوه، نقاط کوانتومی کربن شاخص‌های فتوسنتزی همچون میزان کلروفیل و فعالیت روبیسکو را تحت تأثیر قرار می‌دهند و از این طریق بر افزایش فعالیت فتوسنتزی گیاه موثرند (Wang et al., 2018). بررسی‌های متعددی درباره‌ی تاثیر نقاط کوانتومی کربن بر فتوسنتز گیاهان انجام شده است. در یکی از این بررسی‌ها از *Arabidopsis thaliana* و *Arifolium repens* به عنوان گیاهان مدل استفاده شد و از روش‌های متنوعی برای تصویربرداری از گیاهان تحت تیمار استفاده شد و مشاهدات ثابت کردند که نقاط کوانتومی کربن در همه‌ی بخش‌های گیاه نفوذ می‌کنند. دی اکسید کربن تولید شده، در طی فرآیند فتوسنتز در چرخه‌ی کالوین به کربوهیدرات تبدیل می‌شود و افزایش تولید کربوهیدرات، نمایانگر افزایش فعالیت فتوسنتزی گیاه است. همچنین نقاط کوانتومی کربن می‌توانند فعالیت روبیسکو را تا ٤۲ درصد افزایش دهند که افزایش کارایی آنزیم روبیسکو در نهایت باعث افزایش فرآورده‌های فتوسنتزی می‌شود (Li et al., 2019).

اثرات نقاط کوانتومی کربن (Carbon Quantum Dots) بر جذب و انتقال مواد در گیاهان

گیاهان زیربنای بسیاری از اکوسیستم‌های طبیعی را تشکیل می دهند، از این رو برای ورود نانوذرات به اکوسیستم‌های طبیعی، جذب و انتقال این ذرات توسط گیاهان از اهمیت بسیار بالایی برخوردار می‌باشد. هنگامی که یک ذره در مقیاس نانو، از طریق جذب ریشه‌ای یا از طریق اندام هوایی به درون گیاه نفوذ می‌کند

[Downloaded from gebsj.ir on 2026-06-01]
[DOI: 10.61186/gebsj.12.2.294]

می‌تواند تأثیر خود بر رشد گیاه را به صورت مثبت یا منفی نشان دهد (Chichiricco and Poma, 2015). اگر چه مطالعاتی بسیاری روی تصویربرداری از سلول پستاندران با تکنولوژی نقاط کوانتومی کربن انجام گرفته است اما در مورد تصویربرداری از بافت زنده گیاهان با این تکنولوژی، مطالعات و پژوهش‌ها بسیار کمتری انجام گرفته است (Abuzairi et al., 2015; Li et al., 2016; Nair et al., 2011). محلول‌های نانوذرات، پویا هستند. بدین‌معنا که ذرات نانو به صورت مداوم در حالت محلول و نامحلول در گردش هستند. گیاهان ذرات نانو را چه در خاک و چه در محیط کشت به سرعت جذب کرده و در خود رسوب می‌دهند (Beattie and Haverkamp, 2011; Gardea-Torresdey et al., 2002; Petersen et al., 2014). پس می‌توان گفت که تنها عامل مهم در جذب ذرات نانو، غلظت ذرات نمی‌باشد. بلکه ظرفیت گیاه برای جذب این ذرات نیز فاکتور تعیین‌کننده در جذب ذرات نانو می‌باشد (Williamn et al., 2006). یک عامل تعیین‌کننده دیگر در جذب نانوذرات، پوشش سطحی این ذرات می‌باشد. بسیاری از ذرات نانو از جمله نقاط کوانتومی کربن، با انواع پلیمرها اندود داده می‌شوند تا پایداری، حلالیت و کاربرد آن‌ها افزایش یابد (Dietz and Herth, 2011; Zhu et al., 2012). اثر چنین پوشش‌های سطحی روی ذرات نانو در پژوهش‌های فراوانی بررسی شده‌است. به عنوان مثال در یک پژوهش، گزارش شده‌است که نقاط کوانتومی با پوششی از گروه‌های عاملی آمینی، توسط گیاه جذب شده و به بافت‌های هوایی گیاه منتقل شده‌اند (Nair et al., 2011). بسیاری از نانوذرات برای کاربرد زیستی مناسب نیستند چرا که محلولیت بسیار پایینی در آب داشته و نمی‌توانند جذب گیاه شوند. در واقع این ذرات فاقد جایگاهی فعالی در سطح خود هستند که بتواند با مولکول‌های آلی پیوند برقرار کند (Nony et al., 2004). اکثر نانوذرات که گیاهان می‌توانند آنان را جذب کنند، در غلظت کم کاملاً جذب گیاه شده و تأثیر مثبتی بر رشد گیاه دارند اما در غلظت‌های بالا، سمیت ایجاد می‌کنند (Dietz and Herth, 2011). یکی از پژوهش‌های انجام گرفته درباره جذب و انتقال نقاط کوانتومی کربن در گیاهان، روی گیاه لوبیا سبز انجام شده است (Li et al., 2016). لوبیا سبز گیاهی با رشد سریع است که موجب می‌شود اثرات فیزیولوژیکی نقاط کوانتومی کربن در زمان کوتاهی دیده شود. دانه‌های رشد یافته در محلول حاوی نقاط کوانتومی کربن، با گسیل نور فلوئورسانس نارنجی رنگ مایل به قرمز نشانگر افزایش جذب در گیاه هستند که این ناشی از نقش موثر نقاط کوانتومی کربن با غلظتی معین است. چراکه اثر نقاط کوانتومی کربن در غلظت‌های بسیار بالا اثری منفی و کاهش‌دهنده رشد خواهد بود (Li et al., 2016).

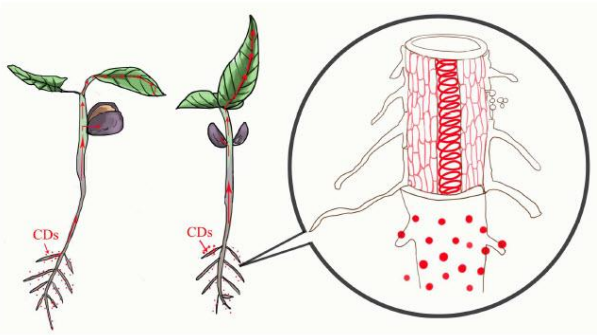


شکل ۱- برش عرضی از ساقه و ریشه لوبیا کشت داده شده در محیط دارای نقاط کوانتومی (۱ میلی‌گرم بر میلی‌لیتر) به‌مدت پنج روز به روش Laser scanning microscopy (Li et al., 2016).

Fig 1. Cross-section of the stem and root of cultivated beans in a quantum dot-containing environment (1 mg/ml) for five days using the Laser Scanning Microscopy method (Li et al., 2016).

[Downloaded from gebsj.ir on 2026-06-01]
[DOI: 10.61186/gebsj.12.2.294]

در این مطالعه مشاهده شد که نقاط کوانتومی کربن در غلظتی بین ۰ تا ۱ میلی‌گرم بر میلی‌لیتر، توسط گیاه جذب شده و در مراحل تکوین دانه، طویل شدن ریشه و ساقه و همچنین در توده زیستی زنده گیاه نقاط کوانتومی کربن انتقال یافت. به‌طور کلی نقاط کوانتومی کربن توسط ریشه‌ها جذب شده و توسط آب در سیستم آبکش گیاه یافت شدند. همچنین در ساختار دیواره سلولی این گیاه نیز، غلظت‌های قابل توجهی از نقاط کوانتومی کربن یافت شده است. غلظت این نانوذرات در دیواره ثانویه به مراتب بیشتر از دیواره نخستین بوده است (Li et al., 2016).



شکل ۲- شکل شماتیک از جذب، انتقال و انباشت نقاط کوانتومی در گیاه لوبیا (Li et al., 2016).

Fig 2. Schematic image of quantum dot uptake, transport, and accumulation in the bean plant (Li et al., 2016).

در مطالعه‌ای در گیاه ذرت مشخص شد که جذب، انتقال، ذخیره نقاط کوانتومی کربن در سلول‌های کلاهک ریشه، ریشه‌ها و برگ‌های آن، اتفاق افتاد. نتایج حاکی از آن بود که نقاط کوانتومی کربن می‌توانند در دیواره سلولی و غشاء سلولی کلاهک ریشه نفوذ کرده و وارد سلول شوند، اما توانایی ورود به هسته را ندارند. نقاط کوانتومی کربن از اپیدرم عبور کرده و درون کورتکس گیاه ذرت انباشته شده بودند. همچنین غلظت قابل توجهی از نقاط کوانتومی کربن از غلاف آوندی عبور کرده و توسط بافت آوند آبکشی به برگ‌ها منتقل شده بودند (Chen et al., 2016). همچنین در پژوهش انجام‌شده روی *Arabidopsis thaliana* مشاهده شد که پس از جذب نقاط کوانتومی توسط ریشه، سرعت انتقال نقاط کوانتومی به برگ‌های جوان بیش از سرعت انتقال به برگ‌های مسن‌تر بود. بدین ترتیب پس از بازه‌ای مشخص، مقدار نقاط کوانتومی در برگ‌های جوان بیشتر از برگ‌های مسن بود (Khan et al., 2022).

اثرات نقاط کوانتومی کربن (Carbon Quantum Dots) بر مقاومت به تنش‌های زیستی و غیر زیستی گیاهان

طبق گزارش سازمان غذا و کشاورزی در ایالات متحده اکثر زمین‌های کشاورزی جهان تحت اثر تنش‌های غیرزیستی متنوعی چون گرما، سرما، خشکی، شوری، فلزات سنگین، تابش شدید نور، استفاده نادرست از کودهای شیمیایی هستند که سالانه منجر به از دست رفتن نیمی از محصولات در جهان می‌شود. از طرفی دیگر عواملی چون عفونت‌های زیستی در گیاهان می‌تواند منجر به کاهش شدید محصولات شوند (Li et al., 2020). بنابراین دو عامل تنش‌های غیرزیستی و زیستی اثرات مهمی را بر میزان محصولات خواهد داشت. بر اساس مطالعات اخیر، مشخص شد که نقاط کوانتومی کربن در مقاومت گیاهان به تنش‌های غیر زیستی و زیستی موثر هستند. در مراحل اولیه تنش‌های غیر زیستی، افزایش تولید گونه‌های فعال اکسیژن (Reactive Oxygen Species) مشاهده می‌شود. (Su et al., 2018). امروزه مشخص شده است که گونه‌های فعال اکسیژن از طریق پاسخ به محرک‌های تنشی در رشد و نمو گیاه مشارک دارند اما در غلظت‌های بالا خود، آسیب‌رسان هستند. (Foyer and Noctor, 2005) تراکم ROS در سلول‌ها منجر به آسیب اکسیداتیو پروتئین‌ها، لیپیدها، کربوهیدرات‌ها و DNA می‌شود. نقاط کوانتومی کربن به علت وجود گروه‌های کربوکسیلی و آمینواسیدی الکترون‌دهنده و الکترون‌کشنده، دارای ویژگی شکار رادیکال هستند و با مکانیسم انتقال یک اتم هیدروژن به وسیله‌ی نقاط کوانتومی کربن، رادیکال‌های ناپایدار و فعال به شکل پایدار تبدیل شوند (Foyer and Noctor, 2005; Li et al., 2020). علاوه بر در پژوهشی دیگر اثر نقاط کوانتومی بر رشد دانه‌های لوبیا در شرایط خشکی تحت اثر پلی‌اتیلن گلیکول (PEG) مطالعه شد (Su et al., 2018). در این آزمایش، خشکی رشد دانه‌ها را بسیار محدود کرد که این کاهش رشد در اثر نقاط کوانتومی کربن است. از طرفی دیگر فعالیت‌های آنزیمی آنتی‌اکسیدان در دانه‌های تحت اثر نقاط کوانتومی بیشتر مورد تحقیق و بررسی قرار گرفت. نتایج نشان

[Downloaded from gebsj.ir on 2026-06-01]

[DOI: 10.61186/gebsj.12.2.294]

می‌دهد که نقاط کوانتومی کربن، فعالیت سوپراکسید دیسموتاز (SOD)، پراکسیداز (POD) و کاتالاز (CAT) را افزایش و محتوای مالون دی آلدهیدی (MAD) آن‌ها را کاهش می‌دهد. در نتیجه نقاط کوانتومی کربن با افزایش مقاومت به تنش، تنش خشکی را در گیاه کاهش می‌دهند (Su et al., 2018). با ترکیب ویژگی شکار رادیکال و همچنین گسترش فعالیت آنزیمی آنتی‌اکسیدان، نقاط کوانتومی کربن می‌توانند گیاهان را از تنش‌های غیرزیستی حفظ کنند. این کاربرد نقاط کوانتومی با استفاده از ریزجلبک *Chlorella vulagaris* نشان داده شد. در این مطالعه مشخص شد که نقاط کوانتومی کربن در اثر فعالیت آنتی‌اکسیدانی، می‌توانند ریزجلبک‌ها را در مقابل آسیب اشعه ماورای بنفش (UV) حفظ کرده و میزان رشد و زیست توده آن‌ها را افزایش دهد (Zhang et al., 2018). همچنین در آزمایش دگری نشان داده شد که نقاط کوانتومی کربن ترکیب شده با دانه‌های گندم و مرکبات قادرند به یون‌های کادمیم حل شده‌ی آزاد متصل شده و باعث جذب کمتر آن‌ها در گیاهان شوند. به این ترتیب نقاط کوانتومی کربن با تثبیت محتوای آنتوسیانینی، گسترش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان و کاهش آسیب پروکسیدی غشای سلولی از نقش بازدارنده‌ی این فلز سنگین در رشد گیاهان جلوگیری می‌کند. بنابراین نقاط کوانتومی با کاهش تنش‌های زیستی در گیاهان نقش مهمی را در مقاومت به تنش و افزایش تولید محصولات در کشاورزی ایفا می‌کنند (Li et al., 2018). در مورد تنش زیستی هم، عفونت زیستی ناشی از فیتوپاتوژن‌ها نوعی تنش زیستی مرسوم است که منجر به کاهش شدید محصولات می‌شود. در آزمایشی از ترکیب برگ‌های برنج با نقاط کوانتومی کربن مشاهده شد که گیاه مقاومت بالایی به عفونت ناشی از بیماری نشان می‌دهد. در این پژوهش مشخص شد که زخم‌های روی برگ‌ها در دانه‌های ۶۰ تا ۱۲۰ روز در مقایسه با نمونه‌ی کنترل کاهش یافته است. نقاط کوانتومی کربن می‌توانند وارد سلول‌ها شده و خود را به هسته برسانند و با اثر بر بیان ژن تیونین توانایی گیاه برنج در مقاومت به تنش‌ها را افزایش دهد (Li et al., 2018).

کاربرد نقاط کوانتومی کربن (Carbon Quantum Dots) در کشاورزی

تکنولوژی نانو در کشاورزی کاربردهای فراونی دارد. یکی از اهداف اصلی در این زمینه، افزایش کمی و کیفی محصولات غذایی است. یکی از معضلات کلان فعلی در مبحث کشاورزی مخصوصاً در ایران، مصرف روزافزون و بی‌رویه آفت‌کش‌ها، علف‌کش‌ها، کودهای شیمیایی و تنظیم‌کننده‌های رشد گیاهان است که این معضل را تا حدودی می‌توان با کمک حامل‌های نانو کنترل کرد (He et al., 2019). نیتروژن یکی از مهم‌ترین موادی است که در رشد گیاهان نقش دارد. به‌دلیل این‌که گیاه نمی‌تواند مستقیم نیتروژن را از هوای پیرامون خود بگیرد، بایستی آن را از خاک دریافت نماید. عوامل مختلفی در تثبیت نیتروژن در خاک نقش دارد که یکی از آن‌ها ازتوباکتر است. مشخص شده است که ازتوباکترهای حاوی ذرات کوانتومی کربن، در مقایسه با گروه کنترل خود، موفقیت بیشتری در عملِ تثبیت نیتروژن داشته‌اند (Khan et al., 2022). در کشاورزی موضوع کنترل عوامل عفونی و قارچی گیاهان نیز حائز اهمیت است که مکانیسم ضد باکتریایی و ضد قارچی ذرات کوانتومی کربن می‌توند کمک بزرگی باشد، به‌گونه‌ای که این ذرات موجب تخریب دیواره باکتری‌ها و همچنین از طریق آسیب به محتوای ژنی باکتری و قارچ‌ها موجب مرگ آن‌ها شود (Li et al., 2020). در آزمایش دیگری علائم سمیت ژنی در گیاهان برنجی که تحت تأثیر ذرات کوانتومی کربن قرار گرفته بودند، هشدار دهنده بود. شورای ملی استاندارد ارگانیک در سال ۲۰۱۰ استفاده از نانو مواد مهندسی شده را در تولید محصولات کشاورزی ممنوع کرد که ممکن است این ممنوعیت در انتظار ذرات کوانتومی کربن نیز باشد، همچنین عدم دانش و اطلاعات کافی در مورد این ذرات، ممکن است در آینده عوارضی و آثار مخربی در پی داشته باشد (Peralta-Videa et al., 2020). در ازمایش دیگری گیاه گندم با محلول نانوذرات کربنی آبیاری شد و در نهایت، افزایش رشد ریشه و ساقه در گیاهانی که در روشنایی و در تاریکی بودند، مشاهده شد (Tripathi and Sarkar, 2015). نکته قابل توجه این است که در مقیاس میکروسکوپی دریافتند که این ذرات کربنی محلول در آب از طریق منافذی در دیواره سلولی وارد شده و از مسیر آپوپلاستی و

[Downloaded from gebsj.ir on 2026-06-01]
[DOI: 10.61186/gebsj.12.2.294]

سیم‌پلاستی سلول‌های ریشه را طی می‌کنند (Verma, 2019). در آزمایشی با استفاده از کودهای نانوکربنی روند قابل توجهی در رشد گیاه برنج مشاهده شد و به وسیله میکروسکوپ الکترونی گذاره (TEM) دریافتند که انتقال از طریق فسفولیپید دو لایه‌ای رخ داده است (Yatim et al., 2019). محققان دیگری بذرهای متفاوتی را تحت تأثیر آب حاوی ذرات نانو کربنی قرار دادند و مشاهده کردند که این ذرات از طریق منافذ وارد پوسته بذر می‌شوند و در عین حال، باعث افزایش جذب آب و افزایش سرعت رشد گیاه می‌شوند (Joshi et al., 2020; Martinez-Ballesta et al., 2016). در تحقیقات دیگر مشخص شد که نقاط کربنی و نقاط نیتروژنی به مقداری کوچک‌اند که سلول‌های گیاه می‌توانند آن‌ها را جذب کنند؛ علاوه بر آن، این ذرات محلول در آب، غیرسمی، زیست‌سازگار و از نظر اقتصادی به صرفه‌اند (Peralta-Videa et al., 2020). اخیراً مطالعاتی که در زمینه ذرات کوانتومی بر گیاهان انجام شده است، نشان داده است که منجر به افزایش رشد و مقاومت گیاه به برخی تنش‌ها شده است که البته نیازمند آزمایش‌های تکمیلی است (Li et al., 2020).

نتیجه گیری

نقاط کوانتومی کربن به دلیل دارا بودن ویژگی‌ها قابل توجه و منحصر به فرد، در حوزه‌های مختلف از جمله الکترونیک، کشاورزی، نانوتکنولوژی، پزشکی و انرژی کاربرد و اهمیت بسیاری دارند. در این مطالعه ضمن اشاره به پاره‌ای از این خواص و کاربردها، برخی روش‌های ساخت نقاط کوانتومی کربن هم ارائه شد. همچنین اثرات این نقاط کوانتومی بر گیاهان در زمینه رشد و نمو، فتوسنتز، جذب و انتقال مواد، مقاومت به تنش‌های زیستی و غیر زیستی و کاربرد در کشاورزی مورد بررسی قرار گرفت. پیشنهاد می‌شود علی‌رغم اثبات مکرر نقش نقاط کوانتومی کربن در افزایش معیارهای کمی و کیفی در برخی محصولات کشاورزی، قبل از توصیه به مصرف عمومی توسط کشاورزان، تحقیقات تکمیلی مفصل‌تر انجام و جنبه‌های احتیاطی و ایمنی زیستی به دقت بررسی شود.

منابع

Abuzairi, T., Okada, M., Mochizuki, Y., Poespawati, N. R., Purnamaningsih, R. W., & Nagatsu, M. (2015). Maskless functionalization of a carbon nanotube dot array biosensor using an ultrafine atmospheric pressure plasma jet. *Carbon*, *89*, 208-216. doi: 10.1016/j.carbon.2015.03.015

Akiyama, T., Nakada, M., Terasaki, N., & Yamada, S. (2006). Photocurrent enhancement in a porphyrin-gold nanoparticle nanostructure assisted by localized plasmon excitation. *Chemical communications*, (4), 395-397. doi: 10.1039/B511487J

Ali, M., Sobze, J. M., Pham, T. H., Nadeem, M., Liu, C., Galagedara, L., Cheema, M., & Thomas, R. (2020). Carbon nanoparticles functionalized with carboxylic acid improved the germination and seedling vigor in upland boreal forest species. *Nanomaterials*, *10*(1), 176. doi: 10.3390/nano10010176

Arumugham, T., Alagumuthu, M., Amimodu, R. G., Munusamy, S., & Iyer, S. K. (2020). 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. *Sustainable Materials and Technologies*, *23*, e00138. doi: 10.1016/j.susmat.2019.e00138

Beattie, I. R., & Haverkamp, R. G. (2011). Silver and gold nanoparticles in plants: sites for the reduction to metal. *Metallomics*, *3*(6), 628-632. doi: 10.1039/c1mt00044f

Bhattacharya, K., Mukherjee, S. P., Gallud, A., Burkert, S. C., Bistarelli, S., Bellucci, S., Bottini, M., Star, A., & Fadeel, B. (2016). Biological interactions of carbon-based nanomaterials: from coronation to degradation. *Nanomedicine: Nanotechnology, Biology and Medicine*, *12*(2), 333-351. doi: 10.1016/j.nano.2015.11.011

Campos, B. B., Contreras-Caceres, R., Bandosz, T. J., Jimenez-Jimenez, J., Rodriguez-Castellon, E., da Silva, J. C. E., & Algarra, M. (2016). Carbon dots as fluorescent sensor for detection of explosive nitrocompounds. *Carbon*, *106*, 171-178. doi: 10.1016/j.carbon.2016.05.030

Chen, J., Dou, R., Yang, Z., Wang, X., Mao, C., Gao, X., & Wang, L. (2016). The effect and fate of water-soluble carbon nanodots in maize (*Zea mays* L.). *Nanotoxicology*, *10*(6), 818-828. doi: 10.3109/17435390.2015.1133864

Chichiricco, G., & Poma, A. (2015). Penetration and toxicity of nanomaterials in higher plants. *Nanomaterials*, *5*(2), 851-873. doi: 10.3390/nano5020851

Costas-Mora, I., Romero, V., Lavilla, I., & Bendicho, C. (2015). Luminescent assays based on carbon dots for inorganic trace analysis. *Reviews in Analytical Chemistry*, *34*(3-4), 61-76. doi: 10.1515/revac-2015-0003

Dietz, K. J., & Herth, S. (2011). Plant nanotoxicology. *Trends in plant science*, *16*(11), 582-589. doi: 10.1016/j.tplants.2011.08.003

Ding, C., Zhu, A., & Tian, Y. (2014). Functional surface engineering of C-dots for fluorescent biosensing and in vivo

[Downloaded from gebsj.ir on 2026-06-01]

[DOI: 10.61186/gebsj.12.2.294]

bioimaging. *Accounts of chemical research*, *47*(1), 20-30. doi: 10.1021/ar400023s

Fang, Y., Guo, S., Li, D., Zhu, C., Ren, W., Dong, S., & Wang, E. (2012). Easy synthesis and imaging applications of cross-linked green fluorescent hollow carbon nanoparticles. *ACS nano*, *6*(1), 400-409. doi: 10.1021/nn2046373

Foyer, C. H., & Noctor, G. (2005). Oxidant and antioxidant signalling in plants: a re-evaluation of the concept of oxidative stress in a physiological context. *Plant, Cell & Environment*, *28*(8), 1056-1071. doi: 10.1111/j.1365-3040.2005.01327.x

Gardea-Torresdey, J. L., Parsons, J., Gomez, E., Peralta-Videa, J., Troiani, H., Santiago, P., & Yacaman, M. J. (2002). Formation and growth of Au nanoparticles inside live alfalfa plants. *Nano Letters*, *2*(4), 397-401. doi: 10.1021/nl015673+

Guerrero-Gonzalez, R., Vazquez-Davila, F., Saucedo-Flores, E., Ruelas, R., Ceballos-Sanchez, O., & Pelayo, J. (2023). Green approach synthesis of carbon quantum dots from agave bagasse and their use to boost seed germination and plant growth. *SN Applied Sciences*, *5*(8), 1-12. doi: 10.1007/s42452-023-05428-2

He, X., Deng, H., & Hwang, H. (2019). La aplicacion actual de la nanotecnología en la alimentacion y la agricultura. *Journal of Food and Drug Analysis*, *27*(1), 1-21. doi: 10.22201/ceiich.24485691e.2019.23.67747

Huo, Y. (2022). A Phenazine Bio-Electrochemical System Integrates Photosynthesis and Fuel Cell. *12th International Conference on Bioscience, Biochemistry and Bioinformatics*. doi/10.1145/3510427.3510446

Joshi, A., Sharma, L., Kaur, S., Dharamvir, K., Nayyar, H., & Verma, G. (2020). Plant nanobionic effect of multi-walled carbon nanotubes on growth, anatomy, yield and grain composition of rice. *BioNanoScience*, *10*, 430-445. doi: 10.1007/s12668-020-00725-1

Karimi J. & Mohsenzadeh S. (2016). Effects of silicon oxide nanoparticles on growth and physiology of wheat seedlings. *Russian Journal of Plant Physiology*. *63*(1): 119–123. doi: 10.1134/S1021443716010106

Karimi J. & Mohsenzadeh S. (2017). Physiological effects of silver nanoparticles and silver nitrate toxicity in *Triticum aestivum*. *Iranian Journal of Science and Technology (Sciences)*, *41*(1): 111-120. doi: 10.1007/s40995-017-0200-6

Karami, M. H., & Abdouss, M. (2024). Recent advances of carbon quantum dots in tumor imaging. *Nanomedicine Journal*, *11*(1). doi: 10.22038/nmj.2023.73847.1798

Khan, A., Ezati, P., Kim, J. T., & Rhim, J. W. (2022). Biocompatible carbon quantum dots for intelligent sensing in food safety applications: Opportunities and sustainability. *Materials Today Sustainability*, 100306. doi: 10.1016/j.mtsust.2022.100306

Kim, S., Seo, J. K., Park, J. H., Song, Y., Meng, Y. S., & Heller, M. J. (2017). White-light emission of blue-luminescent graphene quantum dots by europium (III) complex incorporation. *Carbon*, *124*, 479-485. doi: 10.1016/j.carbon.2017.08.021

Kostov, K., Andonova-Lilova, B., & Smagghe, G. (2022). Inhibitory activity of carbon quantum dots against Phytophthora infestans and fungal plant pathogens and their effect on dsRNA-induced gene silencing. *Biotechnology & Biotechnological Equipment*, *36*(1), 949-959. doi: 10.1080/13102818.2022.2146533

Li, H., Huang, J., Liu, Y., Lu, F., Zhong, J., Wang, Y., Li, S., Lifshitz, Y., Lee, S.-T., & Kang, Z. (2019). Enhanced RuBisCO activity and promoted dicotyledons growth with degradable carbon dots. *Nano Research*, *12*, 1585-1593. doi: 10.1007/s12274-019-2397-5

Li, H., Huang, J., Lu, F., Liu, Y., Song, Y., Sun, Y., Zhong, J., Huang, H., Wang, Y., & Li, S. (2018). Impacts of carbon dots on rice plants: boosting the growth and improving the disease resistance. *ACS Applied Bio Materials*, *1*(3), 663-672. doi: 10.1021/acsabm.8b00345

Li, W., Wu, S., Zhang, H., Zhang, X., Zhuang, J., Hu, C., Liu, Y., Lei, B., Ma, L., & Wang, X. (2018). Enhanced biological photosynthetic efficiency using light-harvesting engineering with dual-emissive carbon dots. *Advanced Functional Materials*, *28*(44), 1804004. doi: 10.1002/adfm.201804004

Li, W., Zheng, Y., Zhang, H., Liu, Z., Su, W., Chen, S., Liu, Y., Zhuang, J., & Lei, B. (2016). Phytotoxicity, uptake, and translocation of fluorescent carbon dots in mung bean plants. *ACS applied materials & interfaces*, *8*(31), 19939-19945. doi: 10.1021/acsami.6b07268

Li, Y., Xu, X., Wu, Y., Zhuang, J., Zhang, X., Zhang, H., Lei, B., Hu, C., & Liu, Y. (2020). A review on the effects of carbon dots in plant systems. *Materials Chemistry Frontiers*, *4*(2), 437-448. doi: 10.1039/C9QM00614A

Lim, S. Y., Shen, W., & Gao, Z. (2015). Carbon quantum dots and their applications. *Chemical Society Reviews*, *44*(1), 362-381. doi: 10.1039/C4CS00269E

Martinez-Ballesta, M., Zapata, L., Chalbi, N., & Carvajal, M. (2016). Multiwalled carbon nanotubes enter broccoli cells enhancing growth and water uptake of plants exposed to salinity. *Journal of nanobiotechnology*, *14*(1), 1-14. doi: 10.1186/s12951-016-0199-4

Mathew, S., & Mathew, B. (2023). A review on the synthesis, properties, and applications of biomass derived carbon dots. *Inorganic Chemistry Communications*, 111223. doi.org/10.1016/j.inoche.2023.111223

Michalet, X., Pinaud, F., & Bentolila, L. (2005). Tsay JM, Doose S, Li JJ, et al. Quantum Dots for Live Cells, In Vivo Imaging, and Diagnostics. *Science*, *307*(5709), 538-544. doi: 10.1126/science.1104274

Mukherjee, A., Majumdar, S., Servin, A. D., Pagano, L., Dhankher, O. P., & White, J. C. (2016). Carbon nanomaterials in agriculture: a critical review. *Frontiers in plant science*, *7*, 172. doi: 10.3389/fpls.2016.00172

Nair, R., Poulose, A. C., Nagaoka, Y., Yoshida, Y., Maekawa, T., & Kumar, D. S. (2011). Uptake of FITC labeled silica nanoparticles and quantum dots by rice seedlings: effects on seed germination and their potential as biolabels for plants. *Journal of fluorescence*, *21*, 2057-2068. doi: 10.1007/s10895-011-0904-5

Nony, L., Gnecco, E., Baratoff, A., Alkauskas, A., Bennewitz, R., Pfeiffer, O., Maier, S., Wetzel, A., Meyer, E., & Gerber, C. (2004). Observation of individual molecules trapped on a nanostructured insulator. *Nano Letters*, *4*(11), 2185-2189. doi: 10.1021/nl048693v

Okegawa, Y., & Motohashi, K. (2015). Chloroplastic thioredoxin m functions as a major regulator of Calvin cycle enzymes during photosynthesis in vivo. *The Plant Journal*, *84*(5), 900-913. doi: 10.1111/tpj.13049

[Downloaded from gebsj.ir on 2026-06-01]

[DOI: 10.61186/gebsj.12.2.294]

Pajewska-Szmyt, M., Buszewski, B., & Gadzała-Kopciuch, R. (2020). Sulphur and nitrogen doped carbon dots synthesis by microwave assisted method as quantitative analytical nano-tool for mercury ion sensing. *Materials Chemistry and Physics*, *242*, 122484. doi: 10.1016/j.matchemphys.2019.122484

Peralta-Videa, J., Sreenivasan, S. T., & Narayan, M. (2020). Influence of carbon quantum dots on the biome. *Processes*, *8*(4), 445. doi: 10.3390/pr8040445

Petersen, E. J., Henry, T. B., Zhao, J., MacCuspie, R. I., Kirschling, T. L., Dobrovolskaia, M. A., Hackley, V., Xing, B., & White, J. C. (2014). Identification and avoidance of potential artifacts and misinterpretations in nanomaterial ecotoxicity measurements. *Environmental science & technology*, *48*(8), 4226-4246. doi: 10.1021/es4052999

Sarmast, M. K., Salehi, H. (2016). Silver Nanoparticles: An Influential Element in Plant Nanobiotechnology. *Mol Biotechnol 58, 441–449.* doi: 10.1007/s12033-016-9943-0

Shah, V., & Belozerova, I. (2009). Influence of metal nanoparticles on the soil microbial community and germination of lettuce seeds. *Water, air, and soil pollution*, *197*, 143-148. doi: 10.1007/s11270-008-9797-6

Sistani, S., & Shekarchizadeh, H. (2022). Applications of carbon quantum dots in detection and packaging of foods. *Journal of food science and technology (Iran)*, *19*(127), 193-209. doi.org/10.22034/fsct.19.127.193 (In Persian)

Song, Y., Feng, D., Shi, W., Li, X., & Ma, H. (2013). Parallel comparative studies on the toxic effects of unmodified CdTe quantum dots, gold nanoparticles, and carbon nanodots on live cells as well as green gram sprouts. *alanta*, *116*, 237-244. doi: 10.1016/j.talanta.2013.05.022

Song, Y., Zhu, S., Zhang, S., Fu, Y., Wang, L., Zhao, X., & Yang, B. (2015). Investigation from chemical structure to photoluminescent mechanism: a type of carbon dots from the pyrolysis of citric acid and an amine. *Journal of Materials Chemistry C*, *3*(23), 5976-5984. doi: 10.1039/C5TC00813A

Su, L. X., Ma, X. L., Zhao, K. K., Shen, C. L., Lou, Q., Yin, D. M., & Shan, C. X. (2018). Carbon nanodots for enhancing the stress resistance of peanut plants. *Acs Omega*, *3*(12), 17770-17777. doi: 10.1021/acsomega.8b02604

Su, M., Liu, H., Liu, C., Qu, C., Zheng, L., & Hong, F. (2009). Promotion of nano-anatase TiO_2 on the spectral responses and photochemical activities of D1/D2/Cyt b559 complex of spinach. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, *72*(5), 1112-1116. doi: 10.1016/j.saa.2009.01.010

Tripathi, S., & Sarkar, S. (2015). Influence of water soluble carbon dots on the growth of wheat plant. *Applied Nanoscience*, *5*, 609-616. doi: 10.1007/s13204-014-0355-9

Verma, S. K., Das A. K., Gantait S., Kumar V., Gurel E. (2019). Applications of carbon nanomaterials in the plant system: A perspective view on the pros and cons. *Science Total Environ*, *667*, 485-499. doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.02.409

Wang, H., Zhang, M., Song, Y., Li, H., Huang, H., Shao, M., Liu, Y., & Kang, Z. (2018). Carbon dots promote the growth and photosynthesis of mung bean sprouts. *Carbon*, *136*, 94-102. doi: 10.1016/j.carbon.2018.04.051

Wang, X. Jia Y. f. (2010). Study on adsorption and remediation of heavymetals by poplar and larch in contaminated soil. *EnvironmentalScience and Pollution Research*, *17*(7), 1331-1338. doi: 10.1007/s11356-010-0313-3

William, W. Y., Chang, E., Drezek, R., & Colvin, V. L. (2006). Water-soluble quantum dots for biomedical applications. *Biochemical and biophysical research communications*, *348*(3), 781-786. doi: 10.1016/j.bbrc.2006.07.160

Xu, H., Yan, L., Nguyen, V., Yu, Y., & Xu, Y. (2017). One-step synthesis of nitrogen-doped carbon nanodots for ratiometric pH sensing by femtosecond laser ablation method. *Applied Surface Science*, *414*, 238-243. doi: 10.1016/j.apsusc.2017.04.092

Xu, M., Xu, S., Yang, Z., Shu, M., He, G., Huang, D., Zhang, Y. (2015). Hydrophilic and blue fluorescent N-doped carbon dots from tartaric acid and various alkylol amines under microwave irradiation. *Nanoscale*, *7*(38), 15915-15923. doi: 10.1039/C5NR04209G

Yatim, N. M., Shaaban, A., Dimin, M. F., Mohamad, N., & Yusof, F. (2019). Urea functionalized multiwalled carbon nanotubes as efficient nitrogen delivery system for rice. *Advances in Natural Sciences: Nanoscience and Nanotechnology*, *10*(1), 015011. doi: 10.1088/2043-6254/ab0881

Zhang, M., Hu, L., Wang, H., Song, Y., Liu, Y., Li, H., Kang, Z. (2018). One-step hydrothermal synthesis of chiral carbon dots and their effects on mung bean plant growth. *Nanoscale*, *10*(26), 12734-12742. doi: 10.1039/C8NR01644E

Zhang, M., Wang, H., Song, Y., Huang, H., Shao, M., Liu, Y., Kang, Z. (2018). Pristine carbon dots boost the growth of Chlorella vulgaris by enhancing photosynthesis. *ACS Applied Bio Materials*, *1*(3), 894-902. doi: 10.1021/acsabm.8b00319

Zheng, X. T., Ananthanarayanan, A., Luo, K. Q., & Chen, P. (2015). Glowing graphene quantum dots and carbon dots: properties, syntheses, and biological applications. *Small*, *11*(14), 1620-1636. doi: 10.1002/smll.201402648

Zhu, Z. J., Wang, H., Yan, B., Zheng, H., Jiang, Y., Miranda, O. R., Vachet, R. W. (2012). Effect of surface charge on the uptake and distribution of gold nanoparticles in four plant species. *Environmental science & technology*, *46*(22), 12391-12398. doi: 10.1021/es301977w

Zuo, P., Lu, X., Sun, Z., Guo, Y., & He, H. (2016). A review on syntheses, properties, characterization and bioanalytical applications of fluorescent carbon dots. *Microchimica Acta*, *183*(2), 519-542. doi: 10.1007/s00604-015-1705-3

[Downloaded from gebsj.ir on 2026-06-01]

[DOI: 10.61186/gebsj.12.2.294]