



19<sup>th</sup> Iranian Soil Science Congress  
16-18 September, 2025



نوزدهمین کنگره علوم خاک ایران  
۲۵ تا ۲۷ شهریور ۱۴۰۴



۰۴۲۵۰-۳۲۰۳۱

مدیریت جامع نگر و هوشمند خاک و آب

Holistic and Smart Soil and Water Management

دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران

College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran



## بهبود گیاه‌پالایی کادمیم در ذرت با استفاده از کربن‌دات قارچی: تأثیر بر جذب و انتقال فلز

جلال صادقی<sup>۱\*</sup>، اکرم حلاج نیا<sup>۲</sup>، امیر لکزیان<sup>۲</sup>، مینا علیخانی مقدم<sup>۴</sup>، سید سجاد حسینی<sup>۵</sup>

۱- گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران (jalalsadeghi2@mail.um.ac.ir)

۲، ۳ و ۵- گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

۴- دانشگاه پیام نور، مشهد، ایران

### چکیده

پیشرفت‌های علوم نانو افق‌های تازه‌ای برای اصلاح خاک‌های آلوده به فلزات سنگین گشوده است. پژوهش حاضر به بررسی تأثیر کربن‌دات قارچی بر جذب و گیاه‌پالایی کادمیم توسط ذرت در خاک پرداخته است. آزمایش در شرایط گلخانه‌ای و با استفاده از تیمارهای شاهد، کربن‌دات قارچی، کادمیم و ترکیب کادمیم + کربن‌دات انجام شد. کربن‌دات‌ها با روش هیدروترمال سنتز و مشخصه‌یابی شدند و دارای ذرات کروی با قطر متوسط ۴/۳ نانومتر و پراکندگی یکنواخت بودند. خاک مورد مطالعه قلیایی، آهکی و با ماده آلی پایین بود و عناصر غذایی به‌ویژه فسفر قابل جذب در سطح نسبتاً پایینی قرار داشت. نتایج نشان داد که حضور کربن‌دات قارچی موجب افزایش چشمگیر شاخص‌های گیاه‌پالایی شد؛ به طوری که غلظت کادمیم در ساقه از ۲۶/۲ به ۵۴/۷ میکروگرم در گلدان افزایش یافت و فاکتور انتقال (TF) از ۱۸۸/۰ به ۲۶/۱ رسید. همچنین ضریب تجمع زیستی (BAC)، ضریب تغلیظ زیستی (BCF) و نرخ گیاه‌پالایی (PR) به ترتیب افزایش قابل توجهی را نشان دادند. این تغییرات نشان‌دهنده افزایش دسترسی زیستی کادمیم در خاک و ارتقای توانایی ذرت در انتقال فلز به بخش هوایی است. یافته‌ها حاکی از آن است که کربن‌دات قارچی با تقویت فرآیند استخراج گیاهی و افزایش ظرفیت گیاه‌پالایی، گزینه‌ای مؤثر برای بهبود خاک‌های آلوده به فلزات سنگین محسوب می‌شود و می‌تواند نقش مهمی در مدیریت پایدار خاک ایفا کند.

**واژگان کلیدی:** کادمیم، فاکتور انتقال T نانو زیست‌پالایی، نانو کربن

### مقدمه

پیشرفت‌های اخیر در علوم نانو افق‌های تازه‌ای برای اصلاح خاک‌های آلوده به فلزات سنگین گشوده است (Liu et al., 2020b). نانوذرات (NPs) به دلیل ویژگی‌های منحصر به فرد خود، نه تنها در مقایسه با روش‌های سنتی عملکرد بهتری در کاهش آلودگی دارند، بلکه قابلیت‌های جدیدی نیز ارائه می‌دهند (Mohareem et al., 2019).

در میان نانوذرات، کربن‌دات‌ها (CDs) به عنوان یکی از نوین‌ترین ترکیبات نانوکربنی توجه ویژه‌ای را به خود جلب کرده‌اند. این نانوماده نخستین بار توسط ژو و همکاران در سال ۲۰۰۴ گزارش شد (Xu et al., 2004) و متعاقباً سان و همکاران (Sun et al., 2006) نام‌گذاری آن را انجام دادند. کربن‌دات‌ها نانوذراتی کروی با اندازه کمتر از ۱۰ نانومتر هستند که علاوه بر داشتن بازده کوانتومی بالا و قابلیت تنظیم طول موج نشر، ویژگی‌هایی نظیر پایداری نوری مطلوب، سمیت پایین، سازگاری زیستی مناسب، اصلاح سطح آسان و خنثی بودن شیمیایی را دارا می‌باشند (Atchudan et al., 2020). این خصوصیات باعث شده است که کربن‌دات‌ها در حوزه‌های گوناگون از جمله تصویربرداری زیستی، ردیابی دارو، سنجش فلورسانس، فوتوکاتالیست، تولید LED، و ذخیره انرژی کاربرد گسترده‌ای داشته باشند (Hu et al., 2023). سنتز کربن‌دات‌ها از منابع



19<sup>th</sup> Iranian Soil Science Congress  
16-18 September, 2025



نوزدهمین کنگره علوم خاک ایران  
۱۴۰۴ شهریور ۲۷ تا ۲۵



۰۴۲۵۰-۳۲۰۳۱

مدیریت جامع نگر و هوشمند خاک و آب

Holistic and Smart Soil and Water Management

دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران

College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran



مختلف کربنی ارزان قیمت همانند بقایای گیاهی و یا کودهای دامی امکان پذیر می باشد. در این بین استفاده از ترکیبات تولید شده توسط میکروارگانیسم ها همانند اگزوپلی ساکاریدها نیز از جمله موارد دیگر جهت سنتز کربن دات می باشد.

مطالعات متعددی به بررسی برهم کنش نانوذرات مختلف با فلزات سنگین پرداخته اند. به عنوان نمونه، سباستین و همکاران (۲۰۱۹) نشان دادند که نانوذرات  $Fe_3O_4$  تحرک کادمیم و سایر فلزات را در خاک کاهش می دهند (Sebastian et al., 2019). وانگ و همکاران (۲۰۲۰) نیز گزارش کردند که استفاده از نانوذرات سیلیسیم موجب تثبیت بلندمدت کادمیم در خاک طی سه سال می شود (Wang et al., 2024).

با وجود این شواهد، مطالعات اندکی به بررسی برهم کنش **کربن دات ها** با فلزات سنگین در خاک پرداخته اند. بنابراین، هدف از پژوهش حاضر بررسی نقش کربن دات قارچی در جذب و فرآیندهای زیست پالایی کادمیم در خاک بود.

#### مواد و روش ها

این آزمایش در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار در شرایط گلخانه ای در دانشگاه فردوسی مشهد انجام شد. تیمارها شامل شاهد (بدون کربن دات و کادمیم)، **کربن دات قارچی** (۱۵۰ میلی گرم بر کیلوگرم)، کادمیم (۵۰ میلی گرم بر کیلوگرم) و **کادمیم+کربن دات قارچی** (۵۰ میلی گرم بر کیلوگرم + ۱۵۰ میلی گرم بر کیلوگرم) بودند. در مجموع دوازده گلدان وجود داشت.

قارچ *Alternaria alternata* از گروه گیاه پزشکی دانشگاه فردوسی مشهد تهیه و روی محیط کشت PDA کشت و به مدت ۷۲ ساعت در دمای ۳۰ درجه سانتی گراد گرما گذاری شد. زیست توده قارچی در ارلن ۲۵۰ میلی لیتری، هر کدام با ۱۰۰ میلی لیتر محیط کشت (گلوکز، ۴۰، عصاره مخمر، ۰/۱، پپتون، ۰/۵،  $KH_2PO_4$  و  $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ ، ۰/۵، گرم بر لیتر) قرار داده شد و نمونه ها برای مدت زمان ده روز در دمای ۲۸ درجه سانتی گراد و ۱۲۰ دور در دقیقه گرما گذاری شدند. در نهایت، اگزوپلی ساکارید تولید شده توسط اتانول استخراج شد (DuBois et al., 1956).

#### تهیه کربن دات

کربن دات از اگزوپلی ساکارید استخراج شده با استفاده از روش کربنیزاسیون هیدروترمال یک مرحله ای سنتز شد (Lin et al., 2019). بدین منظور اگزوپلی ساکارید قارچی در ۵۰ میلی لیتر آب مقطر دیونیزه (غلظت نهایی ۵۰۰ میلی گرم بر لیتر) حل شد. این محلول به اتوکلاو ۱۰۰ میلی لیتری با پوشش تفلون منتقل شد و سپس به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۲۰۰ درجه سانتی گراد نگهداری شد. محلول قهوه ای تیره به دست آمده تا دمای اتاق سرد شده و به مدت ۱۵ دقیقه با سرعت ۱۳۰۰۰ دور در دقیقه سانتریفیوژ شد. مایع رویی از فیلتر ۰/۲۲ میکرونی عبور داده شد و سپس برای آزمایش های بعدی خشک شد.

#### آماده سازی خاک، کاشت، داشت و برداشت

نمونه خاک از مزرعه تحقیقاتی دانشگاه فردوسی مشهد در عمق ۰-۳۰ سانتی متری جمع آوری و در هوا خشک شد. خواص فیزیکی و شیمیایی پایه با روش های آزمایشگاهی مرسوم اندازه گیری شدند (جدول ۱). برای تیمار، کلرید کادمیم به نمونه های خاک اضافه شد و رطوبت تمام نمونه های خاک به مدت دو هفته در ۷۰٪ ظرفیت زراعی (FC) خاک نگهداری شد.



19<sup>th</sup> Iranian Soil Science Congress  
16-18 September, 2025



نوزدهمین کنگره علوم خاک ایران  
۲۵ تا ۲۷ شهریور ۱۴۰۴



۰۴۲۵۰-۳۲۰۳۱

مدیریت جامع نگر و هوشمند خاک و آب

Holistic and Smart Soil and Water Management

دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران

College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran



نمونه‌های خاک مجدداً در هوا خشک و از الک ۴ میلی‌متری عبور داده شدند. کودهای مورد نیاز سه عنصر غذایی پر مصرف نیتروژن، فسفر و پتاسیم به میزان ۱۰۰، ۵۰ و ۵۰ کیلوگرم در هکتار از منابع اوره، فسفات آمونیوم و نترات پتاسیم به هر گلدان طبق دستورالعمل‌های عمومی اضافه و مخلوط شدند. کربن‌دات در آب حل شده و در هفته‌های اول و چهارم پس از کاشت به خاک اضافه شدند. اندازه دهانه و ارتفاع هر گلدان به ترتیب ۲۰ و ۱۸ سانتی‌متر و حاوی ۵ کیلوگرم خاک بود. چهار بذر ذرت سینگل کراس ۷۰۴ در هر گلدان کاشته شد. در مرحله دو برگی، دو گیاه در هر گلدان باقی گذاشته شد. در طول دوره رشد رطوبت گلدان‌ها در حد ظرفیت زراعی نگهداری شده و پس از دو ماه گیاهان از محل طوقه برداشت شدند و خاک و ریشه و گیاه جهت انجام آزمایشات به آزمایشگاه منتقل شدند.

#### پارامترهای اندازه‌گیری شده پس از برداشت

ریشه‌ها و ساقه‌ها با آب مقطر شسته و در دمای ۶۵ درجه سانتی‌گراد در آن تا وزن ثابت خشک شدند. غلظت در هر قسمت گیاه با دستگاه جذب اتمی (PG990) اندازه‌گیری شد. کل غلظت کادمیم در قسمت‌های گیاه نیز محاسبه گردید. کادمیم قابل دسترس خاک با روش DTPA-TEA (Lindsay & Norvell, 1978) استخراج و با دستگاه جذب اتمی PG990 اندازه‌گیری شد.

سه پارامتر فاکتور انتقال (TF) (Gonzaga et al., 2018)، فاکتور تجمع زیستی (BAC) و فاکتور تغلیظ زیستی (BCF) (Sidhu et al., 2018) و نرخ گیاه پالایی (PR) (Embrandiri et al., 2017) با استفاده از روابط ۱ تا ۴ به دست آمدند.

$$TF = \text{Cdshoot} / \text{Cdroot} \quad (1)$$

$$BAC = \text{Cdshoot} / \text{Cdsoil} \quad (2)$$

$$BCF = \text{Cdroot} / \text{Cdsoil} \quad (3)$$

$$PR = \frac{100 * \text{گیاه خشک وزن} * \text{هوایی اندام در کادمیم غلظت}}{\text{گلدان هر خاک وزن} * \text{خاک در کادمیم غلظت}} \quad (4)$$

Cdshoot: غلظت کل کادمیم در اندام هوایی، Cdroot: غلظت کل کادمیم در ریشه و Cdsoil: غلظت کادمیم قابل

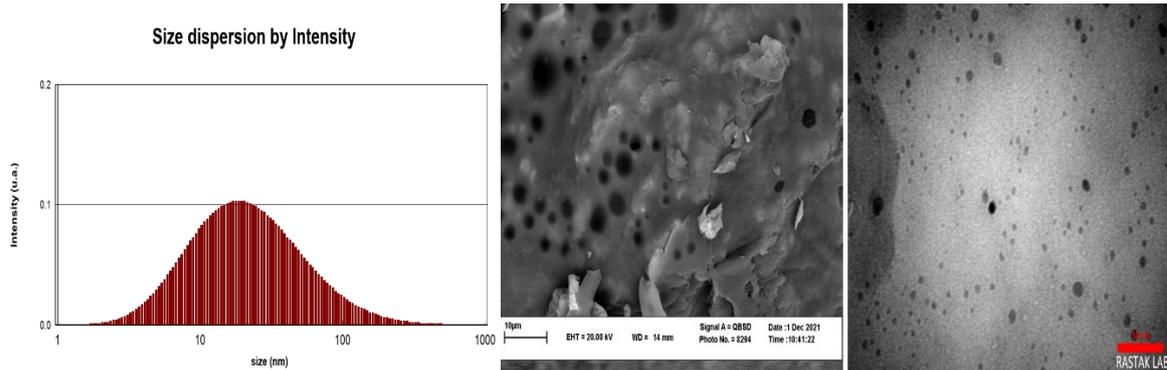
دسترس است.

در نهایت برای تجزیه تحلیل داده‌ها از نرم افزار آماری JMP 8 استفاده شده و مقایسات میانگین نیز با استفاده از روش توکی در سطح ۹۵ درصد معنی داری انجام شد.

#### نتایج و بحث

الگوی نمودار PSA کربن‌دات قارچی به صورت یک منحنی زنگوله‌ای شکل است که نشان‌دهنده توزیع نسبتاً یکنواخت اندازه ذرات در نمونه است. بیشینه شدت در محدوده اندازه‌های حدود ۲۰ تا ۳۰ نانومتر مشاهده می‌شود که بیانگر غالب بودن ذراتی با این اندازه در سامانه است. بیشتر ذرات در بازه‌های بین ۵ تا ۸۰ نانومتر قرار دارند. تصاویر FESEM ماهیت آمورف کربن با منافذ زیاد را نشان داد (شکل ۱). تصاویر TEM ذرات کروی را نشان داد که به طور یکنواخت و بدون تجمع

آشکار پراکنده شده اند قطر FCD بین ۴ تا ۵ نانومتر متغیر بود و قطر متوسط ۴/۳ نانومتر با استفاده از تصویر TEM اندازه ذرات تعیین شد.



شکل ۱- توزیع اندازه ذرات، FESEM و (b) TEM کربن دات فارچی

خاک مورد مطالعه دارای واکنش قلیایی و شوری کم بود که شرایط مناسبی برای رشد اغلب گیاهان فراهم می کند. میزان نیتروژن کل در حد مطلوب و فسفر قابل جذب پایین تر از حد بحرانی اندازه گیری شد. پتاسیم قابل جذب در محدوده متوسط قرار داشت. خاک از نظر ماده آلی فقیر و با آهک بالا بود. بافت خاک «لوم شنی رسی» و ظرفیت زراعی آن برآورد شد که نشان دهنده توان نگهداری متوسط آب است. به طور کلی، خاک قلیایی، آهکی، با ماده آلی پایین و عناصر غذایی نسبتاً محدود ارزیابی شد (جدول ۱).

جدول ۱- نتایج آنالیز اولیه خاک مورد مطالعه

پارامتر	واحد	مقدار	پارامتر	واحد	مقدار
pH	-	۸/۱	آهک	واحد	مقدار
هدایت الکتریکی	دسی زیمنس بر متر	۰/۵۲	بافت	-	لوم شنی رسی
نیتروژن کل	میلی گرم بر کیلوگرم	۵۲۴	شن	درصد	۶۳
فسفر قابل دسترس	میلی گرم بر کیلوگرم	۹/۸	رس	درصد	۲۴
پتاسیم قابل دسترس	میلی گرم بر کیلوگرم	۱۵۰	سیلت	درصد	۱۳
کربن آلی	درصد	۰/۴۱	ظرفیت زراعی	درصد	۱۹

نتایج مقایسه میانگین اثر تیمارهای آزمایشی بر وزن خشک اندام هوایی گیاه نشان داد که حضور کربن دات سبب افزایش معنی دار این پارامتر در مقایسه با شاهد شده و این در حالی بود که در حضور کادمیم و همچنین تیمار کادمیم+کربن دات وزن خشک گیاه کاهش یافت. در مورد غلظت کادمیم قابل دسترس نتایج بدین صورت بوده که حضور کربن دات سبب کاهش معنی دار و قابل ملاحظه این پارامتر در مقایسه با تیمار کادمیم به تنهایی شد.

نتایج مربوط به شاخص های گیاه پالایی در تیمارهای مختلف نشان داد که در تیمار شاهد و کربن دات، مقادیر کادمیم در ساقه، ریشه و همچنین تمامی شاخص های مرتبط با انتقال و انباشت، برابر صفر بوده است که مطابق با عدم حضور فلز سنگین در محیط رشد این گیاهان است. اما در تیمارهای آلوده به کادمیم، تفاوت های معناداری مشاهده شد. در تیمار کادمیم، مجموع کادمیم جذب شده در ساقه برابر با ۲۶/۲ میکروگرم بر گلدان و در ریشه ۶۰/۸ میکروگرم بر گلدان بود. فاکتور انتقال در این



۰۴۲۵۰-۳۲۰۳۱

مدیریت جامع نگر و هوشمند خاک و آب

Holistic and Smart Soil and Water Management

دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران

College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran



تیمار معادل ۰/۱۸۸ بود که بیانگر غلبه پدیده تثبیت گیاهی<sup>۱</sup> (پایداری در ناحیه ریشه) و انتقال اندک فلز به بخش هوایی گیاه است. همچنین ضریب تجمع زیستی برابر ۰/۲۱۳ و ضریب تغلیظ زیستی برابر ۱/۱۹ محاسبه شد که نشان می‌دهد گیاه توانایی جذب فلز از خاک را داشته اما عمدتاً در ریشه تجمع یافته است. نرخ گیاه‌پالایی نیز تنها ۰/۰۲۰ درصد بود که بیانگر ظرفیت پایین گیاه در استخراج کادمیم از خاک در این شرایط است.

در مقابل، در تیمار کادمیم همراه با کربن‌دات، افزایش قابل توجهی در شاخص‌های گیاه‌پالایی مشاهده شد. میزان کل کادمیم در ساقه به ۵۴/۷ میکروگرم بر گلدان افزایش یافت، در حالی که مقدار آن در ریشه به ۱۸/۸ میکروگرم کاهش پیدا کرد. این تغییر الگوی توزیع کادمیم، با افزایش چشمگیر فاکتور انتقال TF به ۱/۲۶ همراه بود که نشان‌دهنده برتری پدیده استخراج گیاهی<sup>۲</sup> (استخراج فلزات توسط اندام‌های هوایی) است. همچنین ضریب تجمع زیستی به ۱/۶۳ و ضریب تغلیظ زیستی به ۱/۴۲ افزایش یافتند که همگی حاکی از افزایش دسترسی زیستی فلز در خاک و توانایی گیاه در انتقال آن به ساقه هستند. نرخ گیاه‌پالایی نیز به ۰/۱۵۴ درصد رسید که بیش از ۷ برابر مقدار آن در تیمار کادمیم به تنهایی است (جدول ۲).

جدول ۲- نتایج مقایسه میانگین اثر تیمارهای آزمایشی بر شاخص‌های گیاه‌پالایی ذرت

تیمار	وزن خشک اندام هوایی گرم در گلدان	کادمیم قابل دسترس خاک	غلظت کل کادمیم اندام هوایی	غلظت کل کادمیم ریشه	فاکتور انتقال	ضریب تجمع زیستی	ضریب تغلیظ زیستی	نرخ گیاه‌پالایی درصد
شاهد	۵/۴۴b	۰c	۰c	۰c	۰c	۰c	۰c	۰c
کربن‌دات	۵/۷۹a	۰c	۰c	۰c	۰c	۰c	۰c	۰c
کادمیم	۴/۷c	۲۵/۲a	۲۶/۲a	۶۰/۸a	۰/۱۸۸b	۰/۲۱۳b	۱/۱۹b	۰/۰۲۰b
کادمیم+کربن‌دات	۴/۷۴c	۷/۵b	۵۴/۷b	۱۸/۸b	۱/۲۶a	۱/۶۳a	۱/۴۲a	۰/۱۵۴a

کربن‌دات‌های تهیه شده پتانسیل بالایی برای حذف فلز کادمیم از خاک دارند، که این موضوع به دلیل ساختار متخلخل، سطح ویژه بالا، اندازه نانومتری، گروه‌های عاملی متنوع و بار سطحی منفی آن‌هاست (Baby et al., 2019).

در سال‌های اخیر، ترکیب فناوری نانو با گیاه‌پالایی فلزات سنگین؛ به صورت گسترده مورد توجه قرار گرفته است (Liu et al., 2020a). مطالعات پیشین نیز نشان داده‌اند که نانو مواد می‌توانند به‌عنوان حامل فلزات سنگین عمل کرده و جذب آن‌ها را در گیاهان (مانند گیاه تنباکو) افزایش دهند (Sai et al., 2018). افزایش انتقال کادمیم در گیاه ذرت با استفاده از کربن‌دات یک ویژگی مطلوب در فرآیند گیاه‌پالایی است، اگرچه سازوکار دقیق این انتقال هنوز مشخص نیست و نیاز به مطالعات بیشتر دارد. (Chen et al., 2021) گزارش دادند که استفاده از دو نوع کربن‌دات (دارای گروه عاملی و بدون گروه عاملی) در محیط هیدروپونیک به ترتیب موجب افزایش ۷۵ و ۳۰ درصدی غلظت کادمیم در اندام هوایی گیاه شد. لازم به ذکر است که اثر

<sup>1</sup>- Phytostabilization  
<sup>2</sup>- Phytoextraction



19<sup>th</sup> Iranian Soil Science Congress  
16-18 September, 2025



نوزدهمین کنگره علوم خاک ایران  
۲۵ تا ۲۷ شهریور ۱۴۰۴



۰۴۲۵۰-۳۲۰۳۱

مدیریت جامع نگر و هوشمند خاک و آب

Holistic and Smart Soil and Water Management

دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران

College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran



کاهشی استفاده از کربن دات نیز گزارش شده است. به عنوان مثال در نهال‌های *Citrus maxima*، در سطوح ۵۰ و ۵۰۰ میلی گرم بر کیلوگرم کربن دات، غلظت کادمیم در ریشه و اندام هوایی کاهش یافت (Li et al., 2019). کاربرد کربن دات باعث افزایش شاخص‌های TF، BAC و BCF شد و مقدار این شاخص‌ها از یک فراتر رفت. این یافته‌ها نشان‌دهنده تأثیر مثبت کربن دات‌ها بر افزایش انتقال کادمیم به بخش‌های هوایی گیاه است. کاهش غلظت کادمیم در خاک و ریشه نیز احتمالاً به دلیل افزایش انتقال آن به اندام هوایی در حضور کربن دات‌هاست. افزایش TF از ۰/۱۸۸ به ۱/۲۶۴ در تیمار Cd+CD حاکی از غالب بودن فرآیند استخراج گیاهی در مقایسه با تثبیت گیاهی است. با اینکه مقدار BCF در هر دو تیمار Cd و Cd+CD بالاتر از یک بود، ریشه ذرت همچنان اندامی مناسب برای زیست‌پالایی کادمیم به شمار می‌رود. با این حال، زمانی که هم BCF و هم TF بیشتر از یک باشند، نشان‌دهنده این است که گیاه توانایی بهتری در حذف فلز از خاک از طریق استخراج گیاهی دارد (Mendez & Maier, 2008). مطالعه دیگری نشان داد که افزایش زیست‌توده گیاهی و فراهمی زیستی فلزات سنگین در خاک، از راهکارهای مؤثر در بهبود گیاه‌پالایی هستند (Ashraf et al., 2019). در این تحقیق، بر اساس وزن خشک اندام هوایی و غلظت کادمیم خاک، به نظر می‌رسد در حضور کربن دات‌ها، استخراج گیاهی فرآیند غالب بوده است. با اینکه نسبت گیاه‌پالایی کمتر از یک بود، ولی استفاده از کربن دات‌ها باعث افزایش قابل توجه این نسبت شد. برای اینکه یک گیاه بتواند فلزات سنگین را از خاک حذف کند، باید هم از نظر تولید زیست‌توده و هم توانایی جذب و ذخیره فلز در اندام‌ها، کارآمد باشد. در مجموع، نتایج این تحقیق نشان داد که گیاه ذرت در حضور کربن دات‌ها، ظرفیت مناسبی برای حذف کادمیم از خاک دارد.

### نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر نشان داد که کربن دات قارچی با افزایش ارتقای انتقال فلز به بخش هوایی ذرت، شاخص‌های گیاه‌پالایی را به‌طور چشمگیری بهبود می‌بخشد. البته توجه به ناکارآمدی این ترکیب در بهبود وزن خشک اندام هوایی در حضور کادمیم نیز از جمله مواردی است که باید به آن توجه داشت.

### فهرست منابع

- Ashraf, S., Ali, Q., Zahir, Z. A., Ashraf, S., & Asghar, H. N. (2019). Phytoremediation: Environmentally sustainable way for reclamation of heavy metal polluted soils. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 174, 714–727.
- Atchudan, R., Edison, T. N. J. I., Mani, S., Perumal, S., Vinodh, R., Thirunavukkarasu, S., & Lee, Y. R. (2020). Facile synthesis of a novel nitrogen-doped carbon dot adorned zinc oxide composite for photodegradation of methylene blue. *Dalton Transactions*, 49(48), 17725–17736.
- Baby, R., Saifullah, B., & Hussein, M. Z. (2019). Carbon nanomaterials for the treatment of heavy metal-contaminated water and environmental remediation. *Nanoscale Research Letters*, 14, 1–17.
- Chen, X., Wang, J., Hayat, K., Zhang, D., & Zhou, P. (2021). Small structures with big impact: Multi-walled carbon nanotubes enhanced remediation efficiency in hyperaccumulator *Solanum nigrum* L. under cadmium and arsenic stress. *Chemosphere*, 276, 130130.
- DuBois, M., Gilles, K. A., Hamilton, J. K., Rebers, P. A. t., & Smith, F. (1956). Colorimetric method for determination of sugars and related substances. *Analytical Chemistry*, 28(3), 350–356.
- Embrandiri, A., Rupani, P. F., Shahadat, M., Singh, R. P., Ismail, S. A., Ibrahim, M. H., & Kadir, M. O. A. (2017). The phytoextraction potential of selected vegetable plants from soil amended with oil palm decanter cake. *International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture*, 6, 37–45.
- Gonzaga, M. I. S., Mackowiak, C., Quintão de Almeida, A., Wisniewski, A., Figueiredo de Souza, D., da Silva Lima, I., & Nascimento de Jesus, A. (2018). Assessing biochar applications and repeated *Brassica juncea*



19<sup>th</sup> Iranian Soil Science Congress  
16-18 September, 2025



نوزدهمین کنگره علوم خاک ایران  
۲۵ تا ۲۷ شهریور ۱۴۰۴



۰۴۲۵۰-۳۲۰۳۱

مدیریت جامع نگر و هوشمند خاک و آب

Holistic and Smart Soil and Water Management

دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران

College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran



- L. production cycles to remediate Cu contaminated soil. *Chemosphere*, 201, 278–285. <https://doi.org/10.1016/J.CHEMOSPHERE.2018.03.038>
- Hu, G., Wang, Y., Zhang, S., Ding, H., Zhou, Z., Wei, J., Li, X., & Xiong, H. (2023). Rational synthesis of silane-functionalized carbon dots with high-efficiency full-color solid-state fluorescence for light emitting diodes. *Carbon*, 203, 1–10.
- 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.
- Lin, Y., Ye, G., Kuzyakov, Y., Liu, D., Fan, J., & Ding, W. (2019). Long-term manure application increases soil organic matter and aggregation, and alters microbial community structure and keystone taxa. *Soil Biology and Biochemistry*, 134, 187–196.
- Lindsay, W. L., & Norvell, W. A. (1978). Development of a DTPA Soil Test for Zinc, Iron, Manganese, and Copper. *Soil Science Society of America Journal*, 42(3), 421–428. <https://doi.org/10.2136/SSSAJ1978.03615995004200030009X>
- Liu, J., Li, R., & Yang, B. (2020a). Carbon dots: A new type of carbon-based nanomaterial with wide applications. *ACS Central Science*, 6(12), 2179–2195.
- Liu, J., Li, R., & Yang, B. (2020b). Carbon Dots: A New Type of Carbon-Based Nanomaterial with Wide Applications. *ACS Central Science*, 6(12), 2179–2195. <https://doi.org/10.1021/acscentsci.0c01306>
- Mendez, M. O., & Maier, R. M. (2008). Phytostabilization of mine tailings in arid and semiarid environments— an emerging remediation technology. *Environmental Health Perspectives*, 116(3), 278–283.
- Moharem, M., Elkhatib, E., & Mesalem, M. (2019). Remediation of chromium and mercury polluted calcareous soils using nanoparticles: Sorption–desorption kinetics, speciation and fractionation. *Environmental Research*, 170, 366–373.
- Sai, L., Liu, S., Qian, X., Yu, Y., & Xu, X. (2018). Nontoxic fluorescent carbon nanodot serving as a light conversion material in plant for UV light utilization. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 169, 422–428.
- Sebastian, A., Nangia, A., & Prasad, M. N. V. (2019). Cadmium and sodium adsorption properties of magnetite nanoparticles synthesized from Hevea brasiliensis Muell. Arg. bark: Relevance in amelioration of metal stress in rice. *Journal of Hazardous Materials*, 371, 261–272.
- Sidhu, G. P. S., Bali, A. S., Singh, H. P., Batish, D. R., & Kohli, R. K. (2018). Ethylenediamine disuccinic acid enhanced phytoextraction of nickel from contaminated soils using *Coronopus didymus* (L.) Sm. *Chemosphere*, 205, 234–243. <https://doi.org/10.1016/J.CHEMOSPHERE.2018.04.106>
- Wang, R., Funayama-Noguchi, S., Xiong, Z., Staudinger, C., & Wasaki, J. (2024). Phosphorus absorption kinetics and exudation strategies of roots developed by three lupin species to tackle P deficiency. *Planta*, 259(1), 29.
- Xu, X., Ray, R., Gu, Y., Ploehn, H. J., Gearheart, L., Raker, K., & Scrivens, W. A. (2004). Electrophoretic analysis and purification of fluorescent single-walled carbon nanotube fragments. *Journal of the American Chemical Society*, 126(40), 12736–12737.

### Enhancing Cadmium Phytoremediation in Maize Using Fungal Carbon Dots: Impacts on Metal Uptake “ and Translocation

Jalal Sadeghi<sup>1</sup>, Akram Halajnia<sup>1</sup>, Amir Lakzian<sup>1</sup>, Mina Alikhani Moghaddam<sup>2</sup>, Seyyed Sajjad Hosseini<sup>1</sup>  
1- Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran  
2- Payame Noor University, Mashhad, Iran

#### Abstract

Advances in nanoscience have opened new horizons for the remediation of heavy metal-contaminated soils. The present study investigated the effect of fungal carbon dots (FCDs) on cadmium uptake and phytoremediation by maize in soil. The experiment was conducted under greenhouse conditions using control, FCDs, cadmium, and cadmium + FCDs treatments. Carbon dots were synthesized via a hydrothermal method and characterized as



19<sup>th</sup> Iranian Soil Science Congress  
16-18 September, 2025



نوزدهمین کنگره علوم خاک ایران  
۱۴۰۴ شهریور ۲۷ تا ۲۵



۰۴۲۵۰-۳۲۰۳۱

مدیریت جامع نگر و هوشمند خاک و آب

Holistic and Smart Soil and Water Management

دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران

College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran



spherical particles with an average diameter of 3.4 nm and uniform dispersion. The soil was alkaline, calcareous, low in organic matter, and nutrients—particularly available phosphorus—were relatively limited. Results showed that the presence of FCDs significantly enhanced phytoremediation indices; cadmium concentration in shoots increased from 26.2 to 54.7  $\mu\text{g}$  per pot, and the translocation factor (TF) rose from 0.188 to 1.26. Moreover, the biological accumulation coefficient (BAC), bioconcentration factor (BCF), and phytoremediation rate (PR) all increased substantially. These changes indicate enhanced bioavailability of cadmium in the soil and improved maize ability to translocate the metal to aerial parts. The findings suggest that fungal carbon dots can effectively enhance plant-based extraction processes and serve as a promising tool for the remediation of heavy metal-contaminated soils, contributing to sustainable soil management.

**Keywords:** Nano-phytoremediation, carbon nanomaterials, cadmium, translocation factor, heavy metal-contaminated soil