



Selenium Passivation in Contaminated Soils Using Carboxymethyl Chitosan, Magnetite, and Their Composite: Effects on Maize (*Zea mays* L.) Growth and Nutrient Uptake

Khatereh Sarmasti¹ | Ahmad Golchin² | Mehran Misaghi³

1. Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, University of Zanjan, Zanjan, Iran. E-mail:

khatereh.sarmasti@gmail.com

2. Corresponding Author, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, University of Zanjan, Zanjan, Iran. E-mail:

agolchin2011@yahoo.com

3. Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, University of Zanjan, Zanjan, Iran. E-mail:

misaghi.mehran@yahoo.com

Article Info	ABSTRACT
Article type: Research Article	Contamination of calcareous soils with selenium (Se) significantly enhances its bioavailability, resulting in growth inhibition and the disruption of essential nutrient balance within plant tissues. Therefore, implementing effective immobilization strategies is crucial to mitigate Se toxicity and its adverse impacts on crop production. This study aimed to evaluate the remediation efficiency of carboxymethyl chitosan (CMCh), magnetite (Fe ₃ O ₄), and a magnetite-carboxymethyl chitosan composite (Fe ₃ O ₄ /CMCh) for Se immobilization, assessing their effects on growth performance, nutrient uptake, and distribution in maize (<i>Zea mays</i> L.). A greenhouse factorial experiment was conducted using a completely randomized design. Soils were artificially contaminated with Se at concentrations of 0, 2, 4, 8, 16, and 32 mg kg ⁻¹ . Following an equilibration period, amendments were applied at rates of 0, 0.25, 0.50, and 1% (w/w). After soil equilibration, maize seedlings were cultivated for 60 days. Subsequently, plant growth parameters and concentrations of Se, phosphorus (P), potassium (K), iron (Fe), and zinc (Zn) were determined in roots and shoots. Results indicated that increasing Se levels significantly reduced maize growth and decreased the translocation of P and Fe to aboveground tissues. Conversely, plant growth, as well as K and Zn concentrations, reached their maximum at 2 mg Se kg ⁻¹ , declining at higher levels. The amendments effectively reduced Se bioavailability; however, the Fe ₃ O ₄ /CMCh composite showed the highest efficiency by immobilizing approximately 90% of bioavailable Se. While Fe ₃ O ₄ /CMCh is an effective amendment for contaminated soils, its application in uncontaminated soils requires careful management to avoid excessive immobilization of essential micronutrients.
Article history:	
Received: Feb. 2, 2026	
Revised: May. 13, 2026	
Accepted: Aug. 8, 2026	
Published online: Sep. 2026	
Keywords: <i>Carboxymethyl Chitosan (CMCh), Magnetite (Fe₃O₄), Magnetite/Carboxymethyl Chitosan (Fe₃O₄/CMCh), Selenium Immobilization, Maize (<i>Zea mays</i> L.)</i>	
Cite this article: Sarmasti, Kh., Golchin, A., Misaghi, M., (2026) Selenium Passivation in Contaminated Soils Using Carboxymethyl Chitosan, Magnetite, and Their Composite: Effects on Maize (<i>Zea mays</i> L.) Growth and Nutrient Uptake, <i>Iranian Journal of Soil and Water Research</i> , 57 (7), 1765-1801. http://doi.org/10.22059/ijswr.2026.410154.670092	
© The Author(s).	Publisher: University of Tehran Press.
DOI: http://doi.org/10.22059/ijswr.2026.410154.670092	



EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Selenium (Se) is an essential micronutrient for humans and animals; however, excessive selenium concentrations in soils can induce phytotoxicity and severely impair plant growth and nutrient homeostasis. In calcareous soils, high pH and carbonate content often enhance selenium mobility and bioavailability, thereby increasing its uptake by plants and posing risks to crop productivity and food safety. Elevated selenium levels are known to interfere with the uptake, translocation, and internal distribution of essential nutrients, particularly phosphorus (P), iron (Fe), potassium (K), and zinc (Zn). In recent years, soil amendment strategies based on highly sorptive materials have gained attention as effective approaches for reducing selenium bioavailability. Biopolymer-derived sorbents and iron oxides, alone or in composite forms, have shown considerable potential for immobilizing trace elements in contaminated soils. Accordingly, this study aimed to evaluate the effectiveness of carboxymethyl chitosan (CMCh), magnetite (Fe_3O_4), and a magnetite–carboxymethyl chitosan composite ($\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{CMCh}$) in immobilizing selenium in contaminated calcareous soils and to assess their impacts on plant growth, nutrient uptake, and nutrient distribution in maize (*Zea mays* L.).

Methods

A greenhouse experiment was conducted using a factorial arrangement within a completely randomized design. Calcareous soil samples were artificially contaminated with selenium at six levels (0, 2, 4, 8, 16, and 32 mg Se kg^{-1} soil). Following an initial equilibration period, the soils were amended with CMCh, Fe_3O_4 , or $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{CMCh}$ at application rates of 0, 0.25, 0.50, and 1% (w/w). The treated soils were incubated again to allow sufficient interaction between selenium and the applied amendments. Maize seedlings were then transplanted into the amended soils and grown under controlled greenhouse conditions for 60 days. At harvest, plant growth parameters were recorded, and the concentrations of selenium, phosphorus, potassium, iron, and zinc were determined separately in roots and shoots using standard analytical procedures. Selenium immobilization efficiency was evaluated based on reductions in soil bioavailable selenium and plant selenium uptake.

Results

Increasing selenium concentrations in soil caused a significant decline in maize growth and biomass production. Elevated selenium levels also disrupted nutrient balance, particularly by reducing the concentration and translocation of phosphorus and iron to aboveground tissues. In contrast, plant growth as well as potassium and zinc concentrations reached their maximum at the lowest contamination level (2 mg Se kg^{-1} soil) and declined with further increases in selenium concentration. Application of all amendments significantly reduced selenium bioavailability in soil and its accumulation in plant tissues, leading to marked improvements in plant growth and nutrient status. Among the tested materials, the $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{CMCh}$ composite exhibited the highest immobilization efficiency, reducing bioavailable selenium by approximately 90% at the highest contamination level. This composite outperformed magnetite and CMCh applied individually and also exceeded the intrinsic immobilization capacity of the calcareous soil. Moreover, $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{CMCh}$ application improved nutrient distribution between roots and shoots, indicating a partial restoration of nutrient homeostasis under selenium stress.

Conclusions

Selenium contamination substantially impairs maize growth and disrupts the uptake and internal distribution of essential nutrients in calcareous soils. The application of sorptive soil amendments effectively reduced selenium bioavailability and alleviated its phytotoxic effects. Among the evaluated materials, the magnetite–carboxymethyl chitosan composite demonstrated superior performance in selenium immobilization and in improving plant growth and nutrient balance. Therefore, $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{CMCh}$ can be considered a promising amendment for the remediation and management of selenium-contaminated calcareous soils. Nevertheless, its application in uncontaminated soils should be carefully controlled to prevent excessive immobilization of essential micronutrients.

Funding

This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

Authorship contribution

Khatereh Sarmasti: Methodology, Investigation, Resources, Data curation.

Ahmad Golchin: Writing – original draft, Supervision, Methodology, Conceptualization, Resources.

Mehran Misaghi: Writing – review and editing, Investigation, Resources, Software, Formal analysis.

All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Declaration of Generative AI and AI-assisted technologies in the writing process

There is no use of any type of artificial intelligence-based technology in this paper.

Data availability statement

Data available on request from the authors.

Acknowledgements

The authors express their gratitude to the University of Zanjan, Zanjan, Iran, for its financial and technical support, which facilitated the completion of this study.

Ethical considerations

The authors avoided data fabrication, falsification, and plagiarism, and any form of misconduct.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

غیرمتحرک سازی سلیوم با استفاده از کربوکسی متیل کیتوسان، مگنتیت و کامپوزیت آن ها در خاک های آهکی آلوده و تأثیر آن بر رشد و جذب عناصر غذایی ذرت (*Zea mays L.*)

خاطره سرمستی^۱ | احمد گلچین^۲ | مهران میثاقی^۳

۱. گروه مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران. رایانامه: khatereh.sarmasti@gmail.com

۲. نویسنده مسئول، گروه مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران. رایانامه: agolchin2011@yahoo.com

۳. گروه مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران. رایانامه: misaghi.mehran@yahoo.com

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	
تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۱/۱۳	
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۲/۲۳	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۵/۱۷	
تاریخ انتشار: مهر ۱۴۰۵	
واژه های کلیدی: کربوکسی متیل کیتوسان (<i>CMCh</i>) مگنتیت (<i>Fe₃O₄</i>) کامپوزیت مگنتیت-کربوکسی متیل کیتوسان (<i>Fe₃O₄/CMCh</i>) غیرمتحرک سازی سلیوم ذرت (<i>Zea mays L.</i>)	آلودگی خاک های آهکی به سلیوم (Se) با افزایش زیست فراهمی این عنصر، می تواند موجب کاهش رشد گیاه و برهم خوردن تعادل تغذیه ای و توزیع عناصر غذایی در اندام های گیاهی شود. پژوهش حاضر، با هدف ارزیابی کارایی کربوکسی متیل کیتوسان (<i>CMCh</i>)، مگنتیت (<i>Fe₃O₄</i>) و کامپوزیت مگنتیت-کربوکسی متیل کیتوسان (<i>Fe₃O₄/CMCh</i>) در غیرمتحرک سازی سلیوم در خاک های آهکی آلوده و بررسی تأثیر آن بر رشد، جذب و توزیع عناصر غذایی در گیاه ذرت (<i>Zea mays L.</i>) انجام شد. آزمایش گلخانه ای به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی اجرا گردید. خاک ها به طور مصنوعی با مقادیر ۰، ۲، ۴، ۸، ۱۶ و ۳۲ میلی گرم سلیوم در کیلوگرم خاک آلوده شدند. پس از یک دوره خواباندن، جاذب های <i>CMCh</i> ، <i>Fe₃O₄</i> و <i>Fe₃O₄/CMCh</i> در سطوح ۰، ۲۵، ۵۰ و ۷۵ درصد وزنی به خاک افزوده شدند. پس از رسیدن خاک های تیمار شده به تعادل، نشاهای ذرت کشت و پس از ۶۰ روز، شاخص های رشد گیاه و غلظت سلیوم، فسفر، پتاسیم، آهن و روی در ریشه و اندام های هوایی اندازه گیری شد. نتایج نشان داد که افزایش غلظت سلیوم خاک موجب کاهش معنی دار رشد ذرت و کاهش غلظت و انتقال فسفر و آهن به اندام های هوایی گردید، در حالی که غلظت پتاسیم و روی در سطح ۲ میلی گرم در کیلوگرم سلیوم به بیشینه مقدار رسید و با افزایش آلودگی کاهش یافت. کاربرد جاذب ها با کاهش زیست فراهمی سلیوم، جذب این عنصر را محدود کرده و موجب بهبود رشد و تعادل تغذیه ای گیاه شد. در این میان، کامپوزیت <i>Fe₃O₄/CMCh</i> با غیرمتحرک سازی حدود ۹۰ درصد سلیوم قابل جذب، بیشترین کارایی را نشان داد. به طور کلی، این کامپوزیت به عنوان جاذبی مؤثر برای مدیریت آلودگی سلیوم در خاک های آهکی توصیه می شود، هر چند کاربرد آن در خاک های غیر آلوده باید با احتیاط انجام گیرد.

استناد: سرمستی؛ خاطره، گلچین؛ احمد، میثاقی؛ مهران، (۱۴۰۵) غیرمتحرک سازی سلیوم با استفاده از کربوکسی متیل کیتوسان، مگنتیت و کامپوزیت آن ها در خاک های آهکی آلوده و تأثیر آن بر رشد و جذب عناصر غذایی ذرت (*Zea mays L.*)، *مجله تحقیقات آب و خاک ایران*، ۵۷ (۷)، ۱۷۶۵-۱۸۰۱.



<http://doi.org/10.22059/ijswr.2026.410154.670092>

© نویسندگان.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

DOI: <http://doi.org/10.22059/ijswr.2026.410154.670092>

مقدمه

سلیوم (Se) یک ریز مغذی ضروری برای انسان و جانوران و مفید برای گیاهان است که نقش مهمی در سامانه های دفاع آنتی اکسیدانی، متابولیسم هورمون های تیروئیدی و تنظیم سیستم ایمنی ایفا می کند (Rayman, 2012). با این حال، سلیوم رفتاری دو گانه دارد در غلظت های کم آن (۰/۵ تا ۲ میلی گرم سلیوم در کیلوگرم بافت خشک گیاه) مفید بوده، اما در غلظت های بالا (بیش از ۴ میلی گرم سلیوم در کیلوگرم بافت خشک گیاه) می تواند آثار زیان باری ایجاد کند. فعالیت های انسانی از جمله استخراج معادن، استفاده از آب های حاوی سلیوم برای آبیاری و دفع پسماندهای صنعتی، منجر به تجمع بیش از حد سلیوم در خاک ها شده است. این تجمع می تواند از طریق زیست انباشت در محصولات کشاورزی، ایمنی غذایی و سلامت اکوسیستم ها را به خطر اندازد (Gupta & Gupta, 2017). مطالعات انجام شده در ایران نشان داده اند که غلظت سلیوم در خاک های کشاورزی در دامنه ۰/۴ تا ۰/۴۵ میلی گرم در کیلوگرم قرار دارد و بیشترین مقادیر در برخی مناطق مرکزی گزارش شده است (Nazemi et al., 2012).

سلنات (SeO_4^{2-}) و سلنیت (SeO_3^{2-}) که اشکال غالب و قابل جذب سلیوم در خاک هستند، به راحتی توسط گیاهان جذب می شوند و خطر تغلیظ زیستی در زنجیره غذایی را افزایش می دهند (Chellamuthu, 2015). از این رو، توسعه راهکارهای مؤثر برای غیرمتحرک سازی سلیوم در خاک های آلوده، با هدف کاهش اثرات سمی آن و در عین حال حفظ حاصلخیزی خاک و بهره وری محصولات، امری ضروری به شمار می رود. در سال های اخیر، اصلاح کننده های زیست پایه و مبتنی بر فناوری نانو به عنوان راهکارهایی پایدار برای پالایش فلزات سنگین و شبه فلزات مورد توجه قرار گرفته اند. در این میان، کربوکسی متیل کیتوسان (CMCh)، مگنتیت (Fe_3O_4) و مواد کامپوزیتی حاصل از آن ها، به دلیل ویژگی های فیزیکی و شیمیایی منحصر به فرد و سازگاری زیست محیطی، توجه زیادی را به خود جلب کرده اند.

کربوکسی متیل کیتوسان که یک مشتق محلول در آب از کیتوسان محسوب می شود، ضمن حفظ زیست سازگاری و زیست تخریب پذیری پلیمر مادر، به واسطه ورود گروه های کربوکسی متیل، ظرفیت کلاته کنندگی بالاتری از خود نشان می دهد (Mourya et al., 2010). وجود گروه های عاملی آمینی ($-\text{NH}_2$) و کربوکسیلی ($-\text{COOH}$) در ساختار CMCh، جذب مؤثر یون های فلزی را از طریق برهم کنش های الکترواستاتیکی، تبادل یونی و تشکیل کمپلکس های سطحی تسهیل می کند (Ahmad et al., 2015). برای مثال، کربوکسی متیل کیتوسان ظرفیت جذب بالایی برای آرسنیک (As^{3+}) و کادمیم (Cd^{2+}) در خاک های آلوده نشان داده است که این ویژگی به توانایی آن در تشکیل کمپلکس های پایدار با یون های فلزی نسبت داده می شود (Ullah et al., 2023). با این حال، پتانسیل کربوکسی متیل کیتوسان برای غیرمتحرک سازی سلیوم، به ویژه در سامانه های کشاورزی که گونه بندی و فراهمی سلیوم به شدت تحت تأثیر شرایط اکسایش-کاهش و میزان ماده آلی قرار دارد، کمتر مورد بررسی قرار گرفته است (Etteieb et al., 2021). نانوذرات مگنتیت (Fe_3O_4) به دلیل سطح ویژه بالا، قابلیت بازیابی مغناطیسی و میل ترکیبی قوی به اکسی آنیون هایی نظیر سلنیت و سلنات از طریق تبادل لیگاند و تشکیل کمپلکس های درون کره ای، به عنوان گزینه ای کارآمد برای اصلاح خاک مطرح شده اند (Ugwu et al., 2021). مطالعات نشان داده اند که نانوذرات Fe_3O_4 می توانند تحرک سلیوم را در خاک های قلیایی تا ۷۰ درصد کاهش دهند که این امر عمدتاً به تشکیل کمپلکس های سطحی $\text{Fe}-\text{O}-\text{Se}$ نسبت داده می شود (Chen et al., 2023). با این وجود، تمایل Fe_3O_4 به تجمع و اکسیداسیون در شرایط محیطی می تواند پایداری بلندمدت آن را محدود سازد.

به منظور غلبه بر این محدودیت ها، مواد کامپوزیتی متشکل از بیوپلیمرهایی نظیر کربوکسی متیل کیتوسان و Fe_3O_4 توسعه یافته اند. این کامپوزیت ها با بهره گیری از اثرات هم افزای اجزای سازنده، موجب بهبود پراکنش و پایداری ساختاری شده و هم زمان کارایی جذب آلاینده ها را افزایش می دهند (Abd El-Monaem et al., 2022). به عنوان نمونه، کربوکسی متیل کیتوسان به عنوان یک عامل پایدارکننده مؤثر برای نانوذرات Fe_3O_4 عمل کرده و با کاهش تجمع آن ها، واکنش پذیری نسبت به آلاینده های هدف را افزایش می دهد (Uva et al., 2017). نتایج پژوهش محققان نشان داد که کامپوزیت های Fe_3O_4 پوشش داده شده با CMCh، ظرفیت جذب سلیوم را تا ۴۰ درصد بیشتر از Fe_3O_4 اصلاح نشده افزایش دادند که این امر به اثرات توأم جاذبه الکترواستاتیکی کربوکسی متیل کیتوسان و فعالیت های ردوکس Fe_3O_4 نسبت داده شد (Freire et al., 2020).

با وجود این مزایا، اثرات منفی بالقوه این اصلاح کننده ها بر رشد گیاه نباید نادیده گرفته شود. نانوذرات Fe_3O_4 ممکن است در شرایط اکسیدکننده، آهن اضافی آزاد کرده و موجب بروز تنش اکسیداتیو و برهم خوردن تعادل عناصر غذایی در گیاه شوند. به عنوان مثال، آهن دوظرفیتی اضافی (Fe^{2+}) می تواند واکنش های فنتون را کاتالیز کرده و منجر به تولید رادیکال های هیدروکسیل ($\text{OH}^\bullet$) شود که به غشاهای



سلولی و بیومولکول‌ها آسیب می‌رسانند (Eskanolou, 2024). به‌طور مشابه، مصرف مقادیر بالای کربوکسی متیل کیتوسان ممکن است به‌طور ناخواسته عناصر غذایی ضروری نظیر روی (Zn^{2+}) و مس (Cu^{2+}) را کلاته کرده و فراهمی زیستی آن‌ها را کاهش دهد (Xu et al., 2021). افزون بر این، در صورت بهینه نبودن فرمولاسیون کامپوزیت، تجمع موضعی آهن و سایر فرآورده‌ها می‌تواند اثرات نامطلوبی بر جوامع میکروبی خاک و فرایندهای فیزیولوژیکی گیاه داشته باشد. مطالعه پژوهشگران نشان داد که مصرف بیش از حد اکسیدهای آهن، تنوع میکروبی خاک را تا ۲۵ درصد کاهش داده و به‌طور بالقوه چرخه عناصر غذایی را مختل می‌کند (Dai et al., 2021). این ملاحظات، ضرورت ارزیابی مقایسه‌ای کربوکسی متیل کیتوسان، Fe_3O_4 و کامپوزیت آن‌ها را، به‌ویژه از نظر تأثیر بر رشد گیاه و جذب عناصر غذایی، برجسته می‌سازد.

غیرممتحرک‌سازی سلیوم در خاک نه‌تنها فراهمی آن را کاهش می‌دهد، بلکه پیامدهای قابل توجهی بر رشد گیاه و پویایی عناصر غذایی دارد. سمیت سلیوم می‌تواند فعالیت‌های آنزیمی و تعادل تغذیه‌ای را مختل کرده و منجر به کاهش رشد و عملکرد گیاه شود (Lanza et al., 2021). برای مثال، سلیوم در فرایند جذب با گوگرد (S) رقابت کرده و سنتز اسیدهای آمینه حاوی گوگرد نظیر سیستئین و متیونین را مهار می‌کند (Castro et al., 2023). در مقابل، غیرممتحرک‌سازی کنترل‌شده سلیوم می‌تواند با کاهش سمیت گیاهی و تنش اکسیداتیو، جذب عناصر غذایی را بهبود بخشد (Rizwan et al., 2021). ذرت (*Zea mays L.*) به‌عنوان یکی از محصولات زراعی مهم در سطح جهان، نسبت به عدم تعادل سلیوم حساس است و از این‌رو، گیاهی مناسب برای ارزیابی راهکارهای اصلاحی محسوب می‌شود (Dhaliwal et al., 2022). مطالعات پیشین نشان داده‌اند که اصلاح‌کننده‌هایی مانند بیوچار و اکسیدهای آهن، با بهبود ساختار خاک و افزایش نگهداشت عناصر غذایی، رشد ذرت را ارتقا می‌دهند (Lee et al., 2018). به‌عنوان نمونه، کاربرد بیوچار در خاک‌های آلوده به سلیوم، از طریق افزایش ظرفیت نگهداشت آب و ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC)، زیست‌توده ذرت را تا ۳۰ درصد افزایش داد (Pellegrini et al., 2024). با این حال، کارایی نسبی کربوکسی متیل کیتوسان، Fe_3O_4 و کامپوزیت آن‌ها در این زمینه هنوز به‌طور جامع بررسی نشده است.

این پژوهش به بررسی عملکرد کربوکسی متیل کیتوسان، Fe_3O_4 و کامپوزیت $Fe_3O_4/CMCh$ در (۱) غیرممتحرک‌سازی سلیوم در خاک‌های آلوده، (۲) بهبود رشد ذرت، و (۳) تنظیم جذب عناصر غذایی ضروری شامل نیتروژن، فسفر، پتاسیم، آهن و روی می‌پردازد. با ارزیابی فراهمی سلیوم، ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک، شاخص‌های رشد گیاه و جذب عناصر غذایی در خاک‌های تیمار شده با جاذب‌ها، این تحقیق درصدد تبیین سازوکارهای مؤثر هر یک از اصلاح‌کننده‌ها در غیرممتحرک‌سازی سلیوم و حمایت از رشد گیاه است. انتظار می‌رود نتایج این مطالعه با ارائه دیدگاه‌های جدید درباره برهم‌کنش اصلاح‌کننده‌های خاک، فراهمی سلیوم و عملکرد محصول، به توسعه روش‌های پایدار اصلاح خاک کمک کرده و زمینه‌ساز بهبود ایمنی و بهره‌وری سامانه‌های کشاورزی در مناطق آلوده به سلیوم شود.

مواد و روش‌ها

سنتز جاذب‌ها

کلیه مراحل مربوط به آماده‌سازی و سنتز نانوذرات مگنتیت (Fe_3O_4)، کربوکسی متیل کیتوسان (CMCh) و کامپوزیت آن‌ها، به همراه نتایج مربوط به تأیید ویژگی‌های ساختاری آن‌ها، به تفصیل در فایل اطلاعات تکمیلی (Supplementary Material) بیان شده است.

نمونه‌برداری و آماده‌سازی خاک

یک نمونه خاک مرکب از یک زمین کشاورزی واقع در روستای کی‌ونان، استان کرمانشاه، ایران ($48^{\circ}40'95''$ شمالی و $35^{\circ}34'12''$ شرقی)، از عمق ۰ تا ۳۰ سانتی‌متری خاک، با استفاده از روش نمونه‌برداری تصادفی طبقه‌بندی‌شده جمع‌آوری شد. نمونه خاک پس از انتقال به آزمایشگاه، در دمای محیط خشک و سپس به‌طور کامل همگن‌سازی گردیده و از الک با قطر ۲ میلی‌متر عبور داده شد. ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک با استفاده از روش‌های استاندارد تعیین گردید. بافت خاک به روش هیدرومتر اندازه‌گیری شد (Gee & Bauder, 1986). مقدار pH خاک در گل اشباع و شوری خاک (EC) در عصاره اشباع اندازه‌گیری گردید (Richards, 1954). کربن آلی خاک به روش واکلی و بلک (Nelson & Sommers, 1982)، نیتروژن کل به روش هضم میکرو-کج‌دال (Bremner & Mulvaney, 1982)، ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC) با روش استات سدیم آمونیوم (Sumner & Miller, 1996) و فسفر قابل دسترس به روش Olsen et al. (۱۹۵۴) تعیین شد. غلظت ریزمغذی‌ها شامل روی (Zn)، آهن (Fe) و مس (Cu) پس از عصاره‌گیری با محلول DTPA، با استفاده از دستگاه طیف‌سنجی جذب اتمی اندازه‌گیری شد (جدول ۱). غلظت کل سلیوم خاک پس از هضم نمونه‌ها با اسید نیتریک ۴ نرمال تعیین گردید.

همچنین غلظت سلیوم قابل جذب پس از عصاره‌گیری خاک با محلول کربنات آمونیوم-DTPA بر اساس روش سلطان‌پور اندازه‌گیری شد. قرائت غلظت سلیوم در هر دو حالت فوق با استفاده از طیف‌سنجی نشر نوری پلاسمای جفت‌شده القایی (ICP-OES) انجام گرفت (Soltanpour & Schwab, 1977؛ APHA, 2017). به‌منظور شبیه‌سازی آلودگی سلیوم، خاک به‌صورت مصنوعی با سلنات سدیم (Na_2SeO_4) در سطوح ۰، ۲، ۴، ۸، ۱۶ و ۳۲ میلی‌گرم سلیوم در کیلوگرم خاک آلوده شد (Sarmasti et al., 2025). خاک‌های تیمار شده به مدت دو ماه تحت شرایط رطوبتی کنترل‌شده قرار گرفتند و طی این مدت چهار چرخه متوالی مرطوب-خشک (ظرفیت مزرعه-هوا خشک، ۵ درصد رطوبت وزنی) اعمال شد تا فرایند تثبیت سلیوم (Se stabilization) تقویت گردد. با توجه به اینکه خاک اولیه فاقد سلیوم بود (جدول ۱) سلیوم افزوده شده به خاک به عنوان سلیوم کل خاک در نظر گرفته شد. پس از آن، جاذب‌ها شامل Fe_3O_4 ، کربوکسی متیل کیتوسان و کامپوزیت مگنتیت-کربوکسی متیل کیتوسان در چهار سطح مصرف ۰، ۰/۲۵، ۰/۵۰ و ۱ درصد وزنی به خاک افزوده شدند. نمونه‌های خاک تیمار شده به مدت سه ماه در رطوبت معادل ظرفیت مزرعه‌ای ($\theta = 0/30$ سانتی‌متر مکعب بر سانتی‌متر مکعب) نگهداری شدند تا پیش از انجام آزمایش‌های بعدی، به شرایط تعادلی مناسب برسند.

جدول ۱. ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک مورد استفاده در پژوهش.

۳۵	%	شن
۳۴	%	سیلت
۳۱	%	رس
۱۶	$\text{Cmol(c}^+) \text{ kg}^{-1}$	ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC)
۷/۵۱	-	اسیدیته (pH)
۰/۸۳	dS m^{-1}	هدایت الکتریکی عصاره اشباع (EC_e)
۱۹/۸۱	%	ظرفیت زراعی
۳۸/۷۹	%	درصد اشباع
۰/۶۸	%	کربن آلی
۰/۰۶۱	%	نیتروژن کل
۱۳/۱۱	%	کربنات کلسیم معادل
۱۷/۸۴	mg kg^{-1}	فسفر قابل جذب
۳۳۲/۶۴	mg kg^{-1}	پتاسیم قابل جذب
۸/۱	mg kg^{-1}	آهن قابل جذب
۰/۸۳	mg kg^{-1}	روی قابل جذب
n.d.	mg kg^{-1}	سلیوم قابل جذب
n.d.	mg kg^{-1}	سلیوم کل

n.d. = Not detected

آزمایش گلخانه‌ای و آنالیز رشد گیاه

به‌منظور ارزیابی کارایی نانوذرات مگنتیت (Fe_3O_4)، کربوکسی متیل کیتوسان و کامپوزیت مگنتیت-کربوکسی متیل کیتوسان در غیرمتحرک‌سازی سلیوم و بهبود رشد گیاه ذرت (*Zea mays L.*)، یک آزمایش گلخانه‌ای به‌صورت فاکتوریل و در قالب طرح کاملاً تصادفی (CRD) اجرا شد. بذره‌های ذرت رقم هیبرید SC704 ابتدا به‌منظور ضدعفونی سطحی در محلول ۱۰ درصد هیپوکلریت سدیم (NaOCl) قرار داده شدند، سپس با آب دیونیزه شست‌وشو داده شده و بر روی کاغذ صافی مرطوب در شرایط کنترل‌شده جوانه‌دار شدند. پس از ۵ روز، نشاهای یکنواخت انتخاب و به گلدان‌های پلی‌اتیلنی با قطر ۲۵ سانتی‌متر، حاوی ۴ کیلوگرم خاک تیمار شده، منتقل گردیدند. گیاهان در شرایط کنترل‌شده گلخانه‌ای شامل دمای ۲۵/۱۸ درجه سانتی‌گراد (شب/روز)، دوره نوری ۱۶ ساعت روشنایی، رطوبت نسبی حدود ۷۰ درصد و آبیاری روزانه به‌منظور حفظ رطوبت خاک در حد ظرفیت مزرعه‌ای ($\theta = 0/30$ سانتی‌متر مکعب بر سانتی‌متر مکعب) رشد داده شدند. تأمین عناصر غذایی موردنیاز گیاه به‌صورت هفتگی و با استفاده از محلول غذایی هوگلند انجام گرفت (Arnon, 1950). پس از ۶۰ روز رشد، گیاهان برداشت شده و شاخص‌های رشد شامل ارتفاع گیاه (سانتی‌متر)، وزن خشک ریشه (گرم در گلدان) و وزن خشک بخش هوایی (گرم در گلدان) اندازه‌گیری و ثبت شدند. به‌منظور تعیین غلظت عناصر در بافت‌های گیاه، نمونه‌های گیاهی برداشت‌شده ابتدا در آون با دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۴۸ ساعت خشک، سپس آسیاب شدند و با استفاده از مخلوط اسید نیتریک-پراکسید



هیدروژن ($\text{HNO}_3\text{-H}_2\text{O}_2$) با نسبت حجمی ۴:۱) در دمای ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد هضم گردیدند (Zarcinas et al., 1987). غلظت سلیوم و عناصر غذایی شامل فسفر، پتاسیم، آهن و روی در عصاره‌های حاصل با استفاده از طیف‌سنجی نشر نوری پلاسما جفت‌شده القایی (ICP-OES) اندازه‌گیری شد، در حالی که مقدار نیتروژن کل گیاه به روش میکرو-کجلال تعیین گردید (Bremner, 1960).

تحلیل آماری داده‌های آزمایش

آزمایش حاضر به‌صورت فاکتوریل و شامل دو فاکتور بود: غلظت کل سلیوم خاک در شش سطح (۰، ۲، ۴، ۸، ۱۶ و ۳۲ میلی‌گرم سلیوم در کیلوگرم خاک) و نوع و میزان کاربرد جاذب در ده سطح (سه جاذب شامل نانوذرات مگنتیت، کربوکسی متیل کیتوسان و کامپوزیت مگنتیت-کربوکسی متیل کیتوسان در سه نرخ مصرف ۰/۲۵، ۰/۵۰ و ۱ درصد وزنی، به‌علاوه تیمار شاهد بدون مصرف جاذب). در مجموع، ترکیب این دو فاکتور منجر به ۶۰ تیمار آزمایشی شد. هر تیمار در سه تکرار اجرا گردید و در نهایت ۱۸۰ واحد آزمایشی (گلدان) مورد ارزیابی قرار گرفت. تجزیه و تحلیل داده‌ها با استفاده از تحلیل واریانس دوطرفه (Two-way ANOVA) و به کمک نرم‌افزار SAS نسخه ۹/۴ انجام شد. در صورت معنی‌دار شدن اثر تیمارها، مقایسه میانگین‌ها با استفاده از آزمون چنددامنه‌ای دانکن در سطوح احتمال ۵ و ۱ درصد انجام گرفت.

جدول ۲. نتایج تجزیه واریانس (ANOVA): اثر سطوح سلیوم خاک، انواع/مقادیر مصرف جاذب‌ها و برهم‌کنش آن‌ها بر قابل دسترس بودن و تثبیت سلیوم، شاخص‌های رشد ذرت، و جذب سلیوم و عناصر غذایی.

منابع تغییرات			درجه آزادی			میانگین مربعات		
سطوح سلیوم خاک	انواع/مقادیر مصرف جاذب‌ها	سطوح سلیوم خاک × انواع/مقادیر مصرف جاذب‌ها	خطا	۱۰۶	ارتفاع گیاه	وزن خشک ریشه	وزن خشک اندام هوایی	سلیوم ریشه
۵	۹	۵۹	۱۱۰۹۹/۲۲۹***	۵۲۶/۹۴۵***	۱۸۷۴۰/۲۷۶***	۲۸۴۳۳/۰۷۹***	۹۴۵/۰۸۵***	سلیوم اندام هوایی
۹	۹	۵۹	۱۶۴۶/۴۱۳***	۱۵۹/۵۳۳***	۷۵۵/۰۸۰***	۱۰۸۶/۶۴۶***	۱۸/۹۰۵***	سلیوم اندام هوایی
۵۹	۹	۵۹	۱۲۹۲/۰۲۱***	۴۷۷/۴۲۵***	۱۷۴۸/۴۶۶***	۲۸۱۵/۵۴۶***	۸۴/۶۷۴***	سلیوم اندام هوایی
خطا	خطا	خطا	۱۰۶					

ادامه جدول ۲

منابع تغییرات			درجه آزادی			میانگین مربعات			
سطوح سلنیوم خاک			۵	۱۴۶۲۷/۶۵۹***	۶۲۷۵۸/۷۴۴***	۳۲۹۹/۵۴۷***	۵۶۳۵/۵۹۵***	۹/۱۹۳***	پتاسیم ریشه
انواع/مقادیر مصرف جاذب‌ها			۹	۶۶۴۱/۰.۰۳***	۳۳۱۱/۱۷۶***	۱۹۰۱/۳۸۳***	۱۹۸۷/۹۳۶***	۶/۱۹۶***	روی بخش هوایی
سطوح سلنیوم خاک × انواع/مقادیر مصرف جاذب‌ها			۵۹	۲۳۰۵/۳۰۷***	۶۷۰۴/۶۲۴***	۶۷۸/۸۱۰***	۹۱۲/۵۷۶***	۱/۸۵۶***	روی ریشه
خطا			۱۰۶						

ادامه جدول ۲

منابع تغییرات		درجه	میانگین مربعات				
سطوح سلیوم خاک	انواع/مقادیر مصرف جاذب‌ها	آزادی	پتاسیم بخش هوایی	فسفر ریشه	فسفر بخش هوایی	سلیوم قابل دسترس	تثبیت سلیوم
۵	۹	۵۹	۹/۵۱۳***	۰/۷۸۶***	۰/۴۹۸***	۱۲۶/۹۹۹***	۸۷۵/۲۰۸***
۹	۹	۵۹	۹/۰۵۴***	۱/۱۴۲***	۰/۰۵۸***	۷/۹۴۸***	۱۰۷/۱۴۶*
۵۹	۹	۵۹	۲/۳۱۵***	۰/۱۴۶***	۰/۰۲۱***	۱۳/۷۴۹***	۱۹۱/۹۹۲***
خطا	خطا	۱۰۶					

معنی‌دار در سطح احتمال ۱ درصد

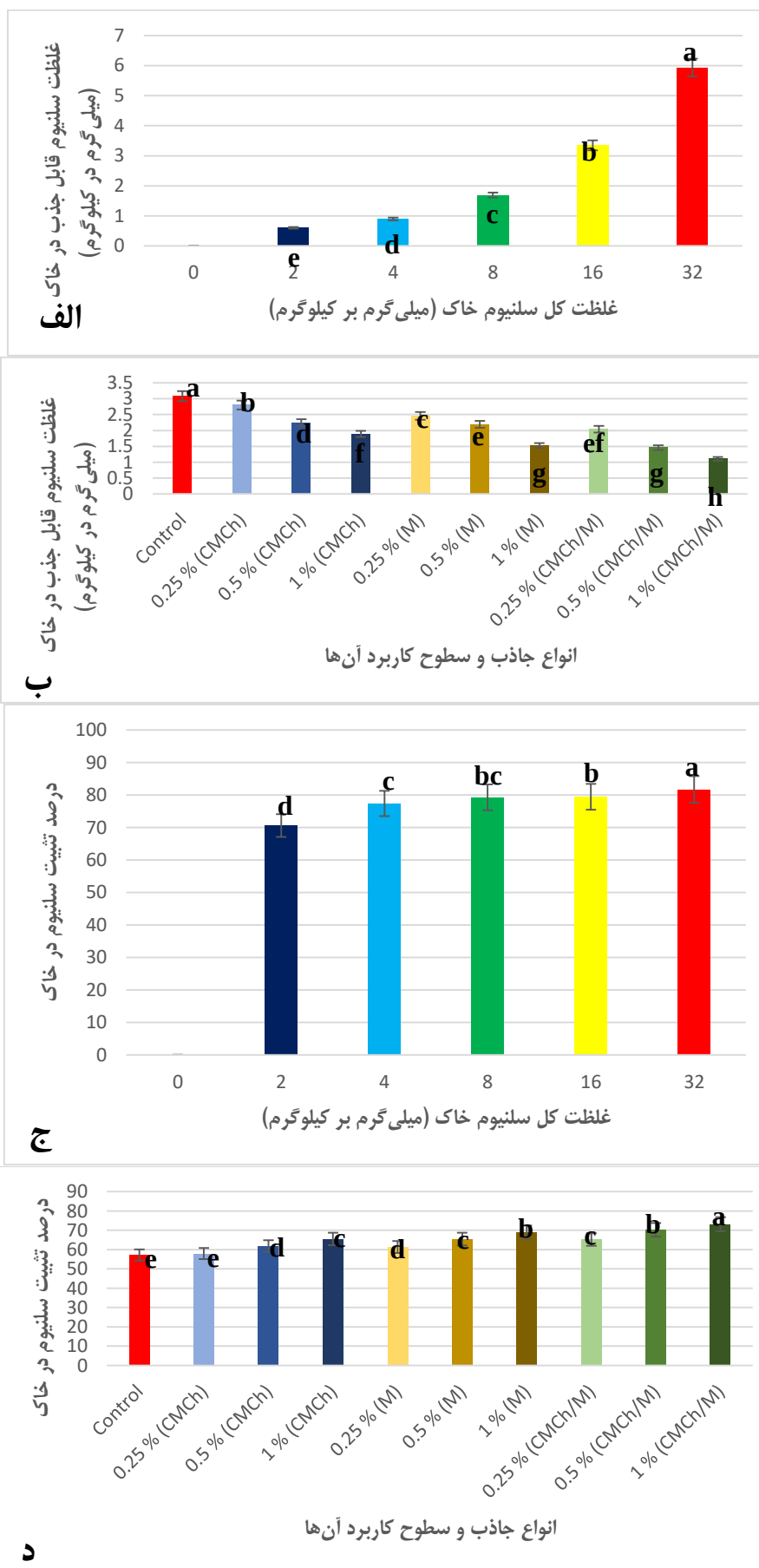
نتایج

اثر سطوح سلیوم کل خاک، نوع و میزان مصرف جاذب و برهم کنش آن‌ها بر غلظت سلیوم قابل دسترس و درصد تثبیت سلیوم نتایج تجزیه واریانس نشان داد که غلظت کل سلیوم خاک، نوع و میزان مصرف جاذب و همچنین اثرات متقابل آنها، تأثیر معنی داری در سطح احتمال ۱ درصد ($p < 0.01$) بر غلظت سلیوم قابل دسترس و درصد تثبیت سلیوم در خاک دارند (جدول ۲).

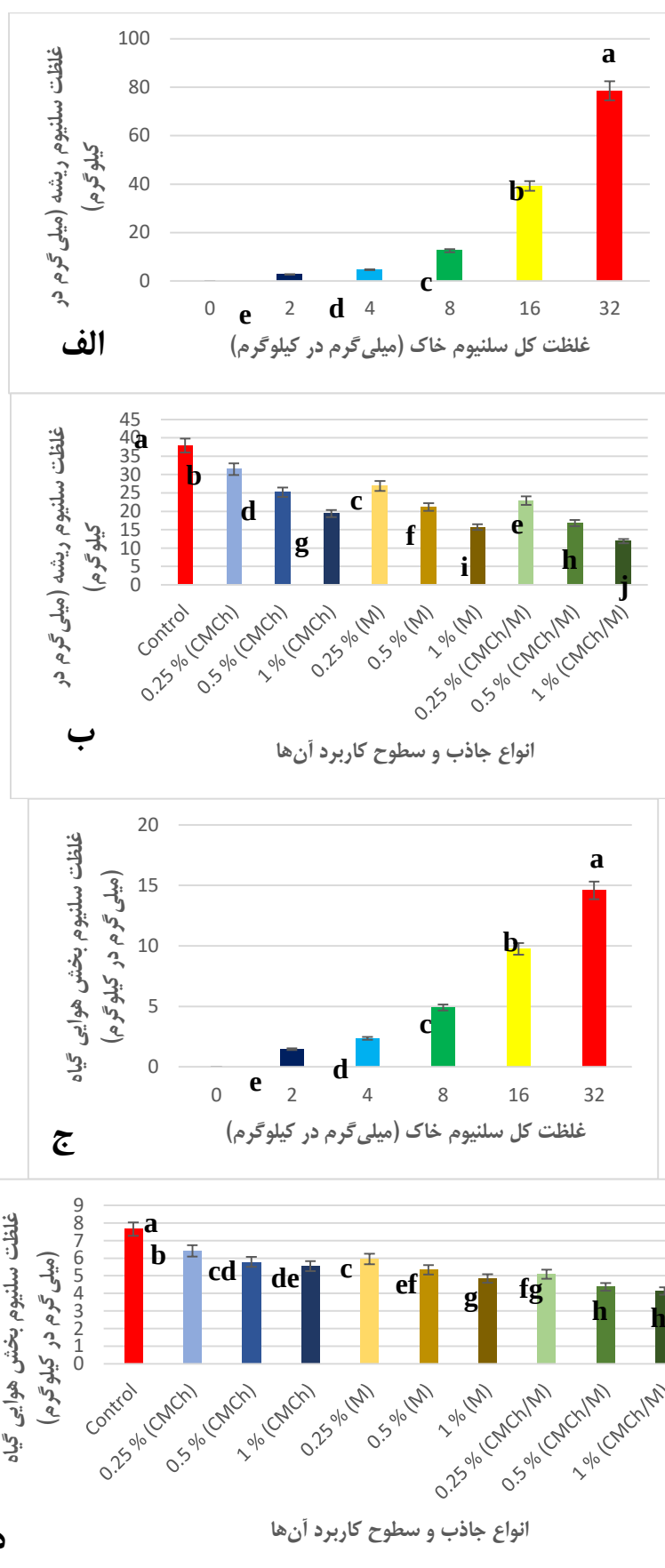
با افزایش میانگین غلظت کل سلیوم خاک، میانگین غلظت سلیوم قابل دسترس به طور معنی داری افزایش یافت (شکل ۱الف)، به طوری که بیشترین میانگین غلظت سلیوم قابل دسترس در تیمارهای حاوی ۳۲ میلی گرم سلیوم در کیلوگرم خاک و کمترین مقدار آن در تیمارهای فاقد سلیوم مشاهده شد. در مقابل، افزایش غلظت کل سلیوم خاک با افزایش درصد تثبیت سلیوم همراه بود (شکل ۱ج). در تیمارهای فاقد جاذب ولی حاوی ۲ تا ۳۲ میلی گرم سلیوم در کیلوگرم خاک، درصد تثبیت سلیوم بین ۶۲ تا ۷۱ درصد متغیر بود که نشان می دهد بخش قابل توجهی از سلیوم افزوده شده به خاک به طور طبیعی و در اثر واکنش با اجزای خاک‌های آهکی، از جمله کربنات‌ها و اکسیدهای آهن، تثبیت می شود. نوع و میزان مصرف جاذب نیز دارای تأثیر معنی داری بر میزان سلیوم قابل دسترس خاک بود. افزایش مقدار مصرف جاذب موجب کاهش قابل ملاحظه غلظت سلیوم قابل دسترس و به طور همزمان افزایش درصد تثبیت سلیوم شد (اشکال ۱ب و ۱د). در میان جاذب‌های مورد بررسی، کامپوزیت مگنتیت-کربوکسی متیل کیتوسان بیشترین کارایی را در کاهش قابلیت دسترسی و افزایش تثبیت سلیوم نشان داد و پس از آن به ترتیب مگنتیت و کربوکسی متیل کیتوسان قرار گرفتند. به طور مشخص، کمترین میانگین غلظت سلیوم قابل دسترس (۱/۱ میلی گرم در کیلوگرم خاک) در تیمارهای حاوی ۱ درصد کامپوزیت مگنتیت-کربوکسی متیل کیتوسان مشاهده شد، در حالی که بیشترین مقدار میانگین سلیوم قابل دسترس (۳/۱ میلی گرم در کیلوگرم خاک) به تیمارهای بدون مصرف جاذب اختصاص داشت (شکل ۱ب). از نظر درصد تثبیت، کامپوزیت مگنتیت-کربوکسی متیل کیتوسان نیز عملکرد برتری نسبت به اجزای منفرد خود نشان داد. کمترین درصد تثبیت سلیوم (۵۷/۷ درصد) در تیمار حاوی ۲ میلی گرم سلیوم در کیلوگرم خاک همراه با ۰/۲۵ درصد کربوکسی متیل کیتوسان اندازه گیری شد، در حالی که بیشترین مقدار تثبیت سلیوم (۹۰ درصد) مربوط به تیمار حاوی ۳۲ میلی گرم سلیوم در کیلوگرم خاک همراه با ۱ درصد کامپوزیت مگنتیت-کربوکسی متیل کیتوسان بود (جدول تکمیلی ۱). در کاربرد جداگانه ۱ درصد مگنتیت یا کربوکسی متیل کیتوسان در سطح آلودگی ۳۲ میلی گرم سلیوم در کیلوگرم خاک، درصد تثبیت سلیوم به ترتیب ۸۷ و ۸۴/۵ درصد به دست آمد (جدول تکمیلی ۱) که بیانگر نقش هم افزایی اجزای کامپوزیت در افزایش کارایی تثبیت سلیوم است. برهم کنش بین غلظت کل سلیوم خاک و نوع و میزان مصرف جاذب نیز اثر تعیین کننده ای بر غلظت سلیوم قابل دسترس در خاک داشت ($p < 0.01$). بیشترین غلظت سلیوم قابل دسترس (۹/۳ میلی گرم در کیلوگرم خاک) در تیمار حاوی ۳۲ میلی گرم سلیوم در کیلوگرم خاک و فاقد جاذب مشاهده شد، در حالی که کمترین مقدار آن (صفر میلی گرم در کیلوگرم خاک) در تیمارهای فاقد سلیوم، مستقل از نوع و مقدار مصرف جاذب، به دست آمد (شکل ۱الف). در تیمارهای حاوی سلیوم و جاذب، کمترین غلظت سلیوم قابل دسترس (۰/۲۹ میلی گرم در کیلوگرم خاک) مربوط به تیمار ۲ میلی گرم سلیوم در کیلوگرم خاک همراه با ۱ درصد کامپوزیت مگنتیت-کربوکسی متیل کیتوسان بود (جدول تکمیلی ۱). در مجموع، این نتایج نشان می دهد که بهینه سازی همزمان غلظت سلیوم خاک، نوع و میزان مصرف جاذب نقش کلیدی در کنترل قابلیت دسترسی سلیوم و افزایش تثبیت آن در خاک‌های آلوده ایفا می کند و کامپوزیت مگنتیت-کربوکسی متیل کیتوسان به عنوان یک جاذب کارآمد و پایدار، پتانسیل بالایی برای اصلاح این گونه خاک‌ها دارد.

اثر غلظت سلیوم کل خاک، نوع و مقدار مصرف جاذب و برهم کنش آن‌ها بر غلظت سلیوم بافت‌ها و شاخص‌های رشد گیاه نتایج تجزیه واریانس نشان داد که غلظت کل سلیوم خاک، نوع و مقدار مصرف جاذب و اثرات متقابل آن‌ها، تأثیر معنی داری ($p < 0.01$) بر غلظت سلیوم ریشه و بخش هوایی گیاه ذرت داشت. همچنین شاخص‌های رشد گیاه شامل ارتفاع بوته، وزن خشک ریشه و وزن خشک بخش هوایی نیز بطور معنی داری تحت تأثیر قرار گرفت (جدول ۲).

با افزایش غلظت سلیوم کل خاک، غلظت سلیوم در ریشه و بخش هوایی گیاه به طور معنی داری افزایش یافت، به طوری که در تمامی تیمارهای حاوی سلیوم تجمع سلیوم در ریشه به مراتب بیشتر از بخش هوایی گیاه بود (اشکال ۲الف و ۲ج). بالاترین میانگین غلظت سلیوم ریشه و بخش هوایی گیاه به ترتیب به میزان ۱۲۸ و ۱۹/۷ میلی گرم در کیلوگرم بافت خشک در تیمارهای حاوی ۳۲ میلی گرم سلیوم در کیلوگرم خاک اندازه گیری گردید که در حد مسمومیت بود. این تیمارها با ضعیف‌ترین وضعیت رشد گیاه همراه بودند، به طوری که میانگین ارتفاع گیاه به ۳۹/۵۰ سانتی متر، میانگین وزن خشک ریشه به ۱۰/۶۰ گرم در گلدان و میانگین وزن خشک بخش هوایی به ۱۲/۴۶



شکل ۱. اثر سطوح مختلف سeleniوم خاک و انواع و غلظت‌های متفاوت جاذب‌ها بر فراهمی سeleniوم (الف و ب) و تثبیت سeleniوم (ج و د).



شکل ۲. اثر سطوح مختلف سلیوم خاک و انواع و غلظت‌های متفاوت جاذب‌ها بر غلظت سلیوم در ریشه (الف و ب) و اندام هوایی گیاه (ج و د).

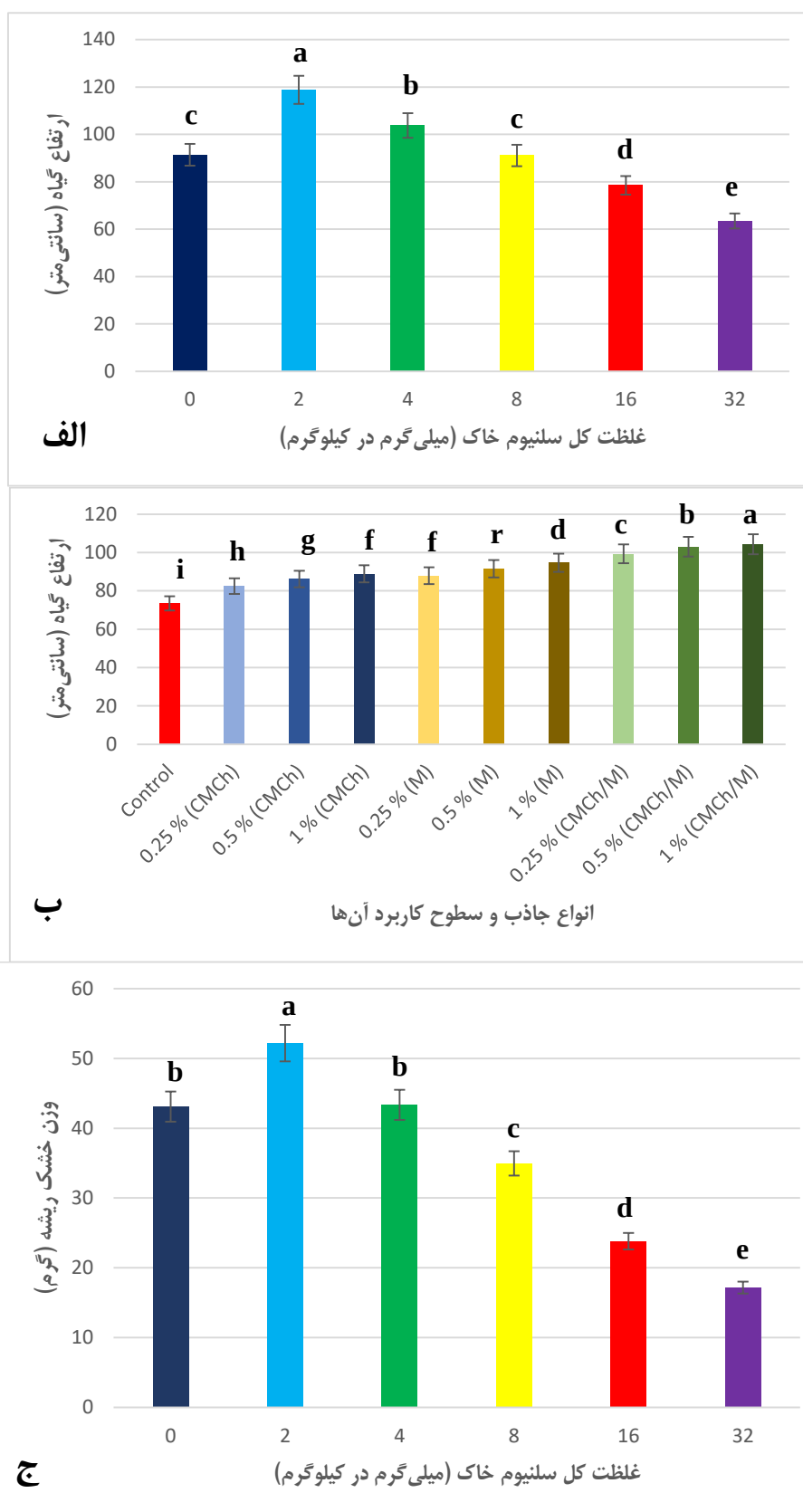


گرم در گلدان کاهش یافتند (اشکال ۳ الف، ج ۳ و ۵۳). پایین‌ترین میانگین غلظت سلیوم ریشه و بخش هوایی گیاه نیز در تیمارهای فاقد سلیوم مشاهده شد. کاربرد جاذب‌ها به‌طور معنی‌داری موجب کاهش غلظت سلیوم در ریشه و بخش هوایی گیاه شد (اشکال ۲ ب و ۲د). در سطح یکسان سلیوم خاک (۳۲ میلی‌گرم در کیلوگرم)، مصرف ۱ درصد کامپوزیت مگنتیت-کربوکسی‌متیل کیتوسان، غلظت سلیوم ریشه و بخش هوایی را به‌ترتیب به ۴۰/۲۹ و ۱۲/۱۲ میلی‌گرم در کیلوگرم کاهش داد که معادل کاهش ۶/۶۸ و ۵/۳۸ درصدی نسبت به تیمار شاهد بدون جاذب بود. این کاهش غلظت با بهبود چشمگیر شاخص‌های رشد همراه شد، به‌طوری‌که ارتفاع گیاه ۱۰۱/۳ درصد، وزن خشک ریشه ۸۰/۷ درصد و وزن خشک بخش هوایی ۱۳۱ درصد افزایش یافت (اشکال ۳ ب، ۳ د و ۳ ی). به‌طور مشابه، مصرف ۱ درصد مگنتیت موجب کاهش غلظت سلیوم ریشه و بخش هوایی به‌ترتیب به ۵۴/۴۳ و ۱۳/۱۸ میلی‌گرم در کیلوگرم شد و به‌دنبال آن، ارتفاع گیاه، وزن خشک ریشه و وزن خشک بخش هوایی به‌ترتیب ۷۲/۶، ۹۶ و ۱۰۴/۸ درصد افزایش یافتند. کاربرد ۱ درصد کربوکسی‌متیل کیتوسان نیز غلظت نهایی سلیوم ریشه و بخش هوایی را به‌ترتیب به ۶۷/۳۳ و ۱۴/۰۹ میلی‌گرم در کیلوگرم رساند و موجب افزایش ۵۷/۸ درصد در ارتفاع گیاه، ۹۵/۹ درصد در وزن خشک ریشه و ۸۷/۵ درصد در وزن خشک بخش هوایی شد. این نتایج نشان می‌دهد که کاهش غلظت سلیوم در بافت‌های گیاهی نقش کلیدی در کاهش اثرات فیتوتوکسیک و بهبود رشد گیاه دارد. تأثیر دووجهی سلیوم (هورمسیس) به‌طور مشخص در سطح ۲ میلی‌گرم سلیوم در کیلوگرم خاک مشاهده شد، به‌طوری‌که غلظت‌های پایین تا متوسط سلیوم با بیشترین بهبود رشد گیاه همراه بودند (اشکال ۳ الف، ج ۳ و ۵۳). در این سطح، بیشترین ارتفاع گیاه (۱۳۷/۷۷ سانتی‌متر) و وزن خشک بخش هوایی (۹۸/۳۹ گرم) در تیمار حاوی ۱ درصد کامپوزیت مگنتیت-کربوکسی‌متیل کیتوسان به‌دست آمد، در حالی‌که وزن خشک ریشه در دامنه ۵۴/۶۱ تا ۵۶/۱۹ گرم قرار داشت و اختلاف معنی‌داری بین انواع جاذب مشاهده نشد. این نتایج نشان می‌دهد که دسترسی محدود به سلیوم می‌تواند رشد گیاه را تحریک کند، اما با افزایش تجمع سلیوم در بافت‌ها و عبور از آستانه‌های بحرانی، این اثر مفید به‌سرعت کاهش یافته و جای خود را به اثرات سمی می‌دهد. در تیمارهای فاقد سلیوم، مصرف جاذب‌ها عموماً موجب کاهش ارتفاع گیاه و وزن خشک ریشه شد، به‌ویژه وقتی سطوح بالای جاذب مصرف شدند. این امر احتمالاً ناشی از کاهش قابلیت دسترسی به عناصر غذایی ضروری در اثر تثبیت بیش از حد آن‌ها توسط جاذب باشد. با این حال، وزن خشک بخش هوایی در تیمارهای حاوی کامپوزیت مگنتیت-کربوکسی‌متیل کیتوسان اندکی افزایش یافت که می‌تواند نشان‌دهنده اثرات مثبت جانبی این جاذب، از جمله بهبود نگهداشت عناصر غذایی یا اصلاح ویژگی‌های فیزیکی‌شیمیایی خاک باشد. در مجموع، رشد گیاه رابطه معکوسی با غلظت سلیوم در ریشه و بخش هوایی گیاه داشت. کاربرد جاذب‌ها، به‌ویژه کامپوزیت مگنتیت-کربوکسی‌متیل کیتوسان، با کاهش مؤثر غلظت سلیوم در بافت‌های گیاهی، موجب بهبود معنی‌دار رشد ذرت در غلظت‌های بالای سلیوم خاک شد. این نتایج کارایی بالایی جاذب‌های کامپوزیتی را به‌عنوان راهکاری عملی و مؤثر برای کاهش سمیت سلیوم در سامانه‌های کشاورزی تأیید می‌کند.

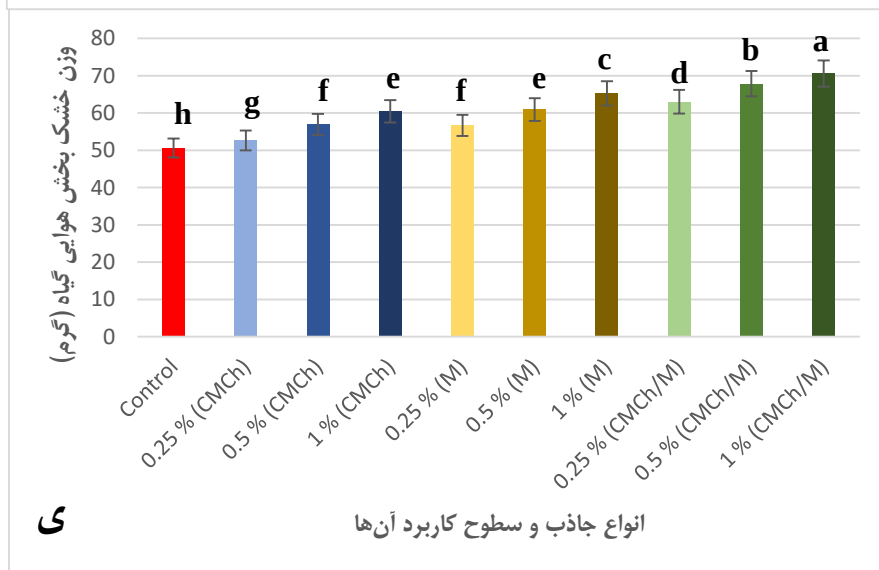
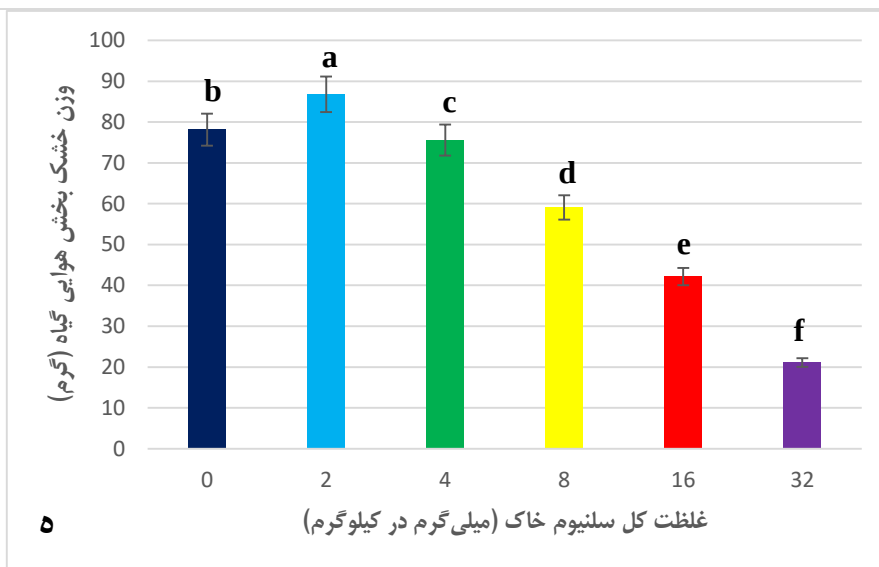
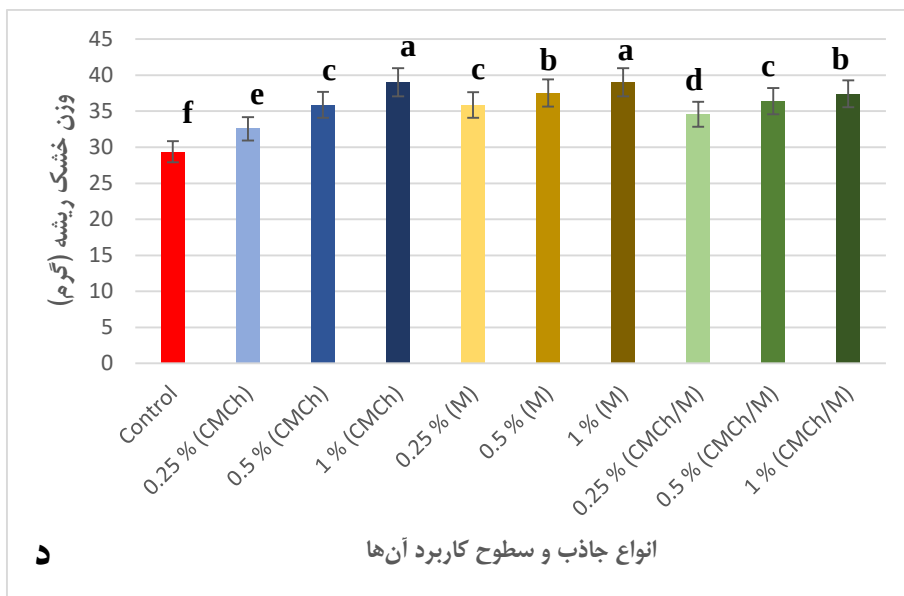
اثر سطوح سلیوم خاک، نوع و مقدار مصرف جاذب و برهم‌کنش آن‌ها بر توزیع فسفر در اندام‌های گیاه ذرت

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که غلظت کل سلیوم خاک، نوع و مقدار مصرف جاذب و اثرات متقابل آن‌ها تأثیر معنی‌داری ($p < 0.01$) بر غلظت فسفر ریشه و بخش هوایی گیاه ذرت داشتند (جدول ۲).

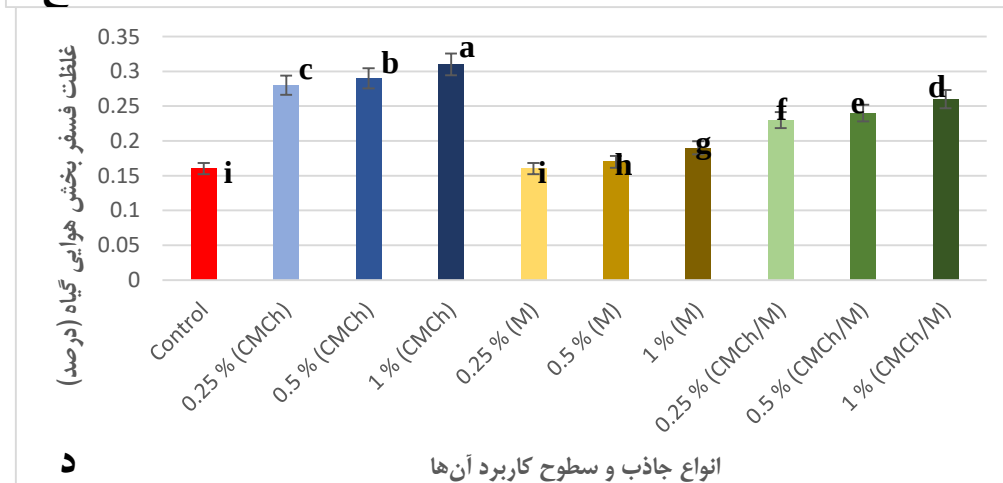
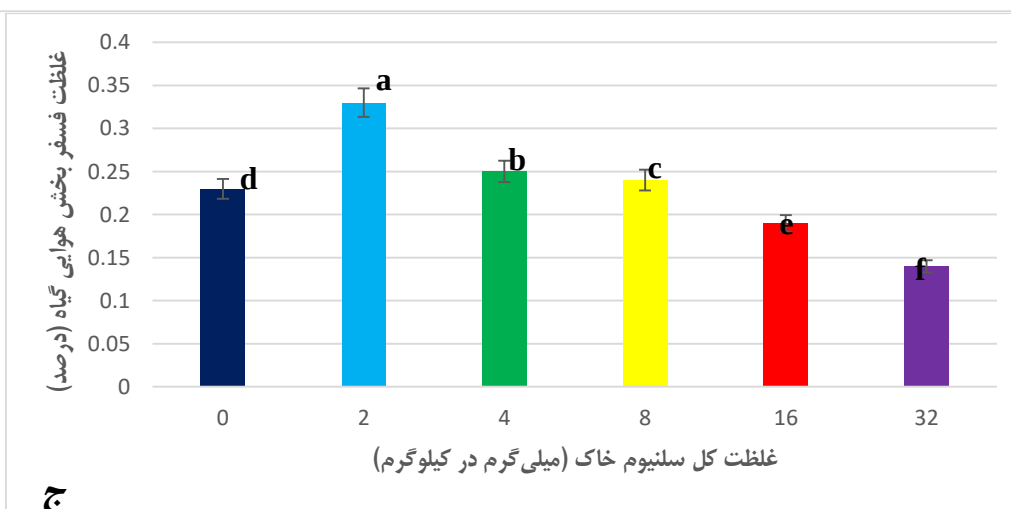
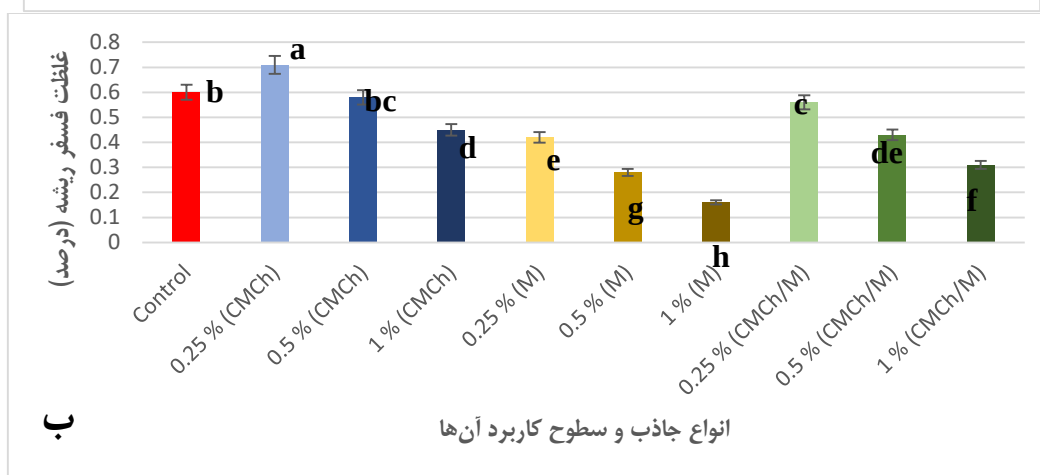
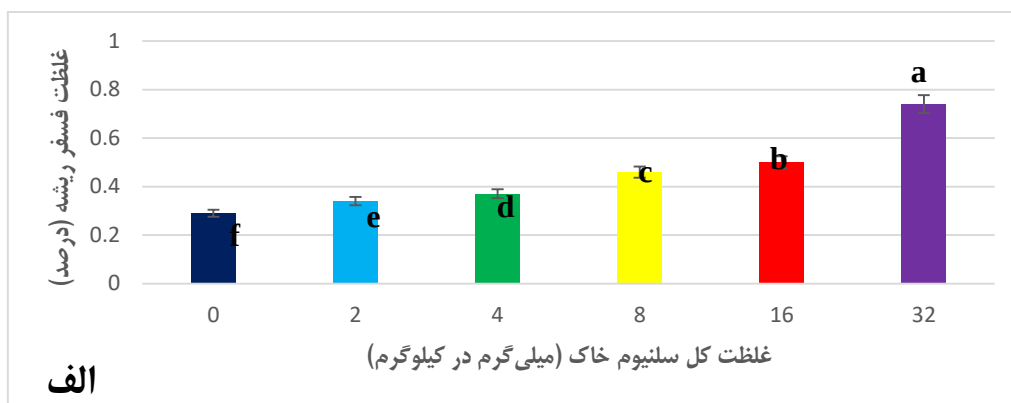
افزایش سطح سلیوم خاک از ۲ به ۳۲ میلی‌گرم سلیوم در کیلوگرم خاک موجب افزایش تجمع فسفر در ریشه و هم‌زمان کاهش غلظت فسفر در بخش هوایی گیاه شد (اشکال ۴ الف و ۴ ج). بیشترین غلظت فسفر بخش هوایی در تیمار حاوی ۲ میلی‌گرم سلیوم در کیلوگرم خاک مشاهده شد؛ به‌طوری‌که این مقدار حتی از تیمارهای فاقد سلیوم نیز بالاتر بود (شکل ۴ ج). در مقابل، کمترین غلظت فسفر بخش هوایی مربوط به تیمارهای حاوی ۳۲ میلی‌گرم سلیوم در کیلوگرم خاک بود. از سوی دیگر، بیشترین غلظت فسفر ریشه در تیمارهای دارای ۳۲ میلی‌گرم سلیوم در کیلوگرم خاک و کمترین مقدار آن در تیمارهای حاوی ۲ میلی‌گرم سلیوم در کیلوگرم خاک اندازه‌گیری شد (شکل ۴ الف). نوع و مقدار مصرف جاذب نیز اثر معنی‌داری بر توزیع فسفر در ریشه و بخش هوایی گیاه ذرت داشتند (اشکال ۴ ب و ۴ د). به‌طور کلی، تیمارهای حاوی کربوکسی‌متیل کیتوسان (CMCh) دارای بیشترین غلظت فسفر ریشه و بخش هوایی بودند و پس از آن، کامپوزیت مگنتیت-کربوکسی‌متیل کیتوسان قرار گرفت، در حالی‌که کمترین غلظت فسفر مربوط به تیمارهای حاوی مگنتیت به‌تنهایی بود (اشکال ۴ ب و ۴ د). صرف‌نظر از نوع جاذب، افزایش مقدار مصرف جاذب موجب کاهش غلظت فسفر ریشه و افزایش غلظت فسفر بخش هوایی گیاه شد. در تیمارهای فاقد جاذب، غلظت فسفر در ریشه بیشتر از تیمارهای حاوی مگنتیت و کامپوزیت مگنتیت-کربوکسی‌متیل کیتوسان و کمتر از تیمارهای حاوی CMCh بود (شکل ۴ ب). با این حال، غلظت فسفر در بخش هوایی در تمامی تیمارهای دارای جاذب بیشتر از تیمارهای بدون جاذب بود (شکل ۴ د). اثر متقابل غلظت سلیوم خاک، نوع و مقدار مصرف جاذب نیز بر غلظت فسفر ریشه و بخش



شکل ۳. اثر سطوح مختلف سلیوم خاک و انواع و غلظت‌های متفاوت جاذب‌ها بر شاخص‌های رشد گیاه شامل ارتفاع گیاه (الف و ب)، وزن خشک ریشه (ج و د) و وزن خشک اندام هوایی (ه و ی).



ادامه شکل ۳. اثر سطوح مختلف سلینوم خاک و انواع و غلظت‌های متفاوت جاذب‌ها بر شاخص‌های رشد گیاه شامل ارتفاع گیاه (الف و ب)، وزن خشک ریشه (ج و د) و وزن خشک اندام هوایی (ه و ی).



شکل ۴. اثر سطوح مختلف سلیوم خاک و انواع و غلظت‌های متفاوت جاذب‌ها بر غلظت فسفر در ریشه (الف و ب) و اندام هوایی گیاه (ج و د).



هوایی در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار بود (جدول ۲). در تیمارهای فاقد جاذب، افزایش غلظت سلیوم خاک از صفر به ۳۲ میلی گرم در کیلوگرم موجب افزایش غلظت فسفر ریشه از ۰/۴۱ به ۰/۹۲ درصد و هم‌زمان کاهش غلظت فسفر بخش هوایی از ۰/۲۹ به ۰/۰۵ درصد شد (جدول تکمیلی ۱). در تیمار حاوی ۱ درصد CMCh و ۳۲ میلی گرم سلیوم در کیلوگرم خاک، غلظت فسفر در ریشه و بخش هوایی به ترتیب ۰/۶۷ و ۰/۲۲ درصد بود. در همین سطح از سلیوم، کاربرد ۱ درصد کامپوزیت مگنتیت-کربوکسی متیل کیتوسان موجب ثبت فسفر به مقدار ۰/۵۳ درصد در ریشه و ۰/۱۷ درصد در بخش هوایی شد، در حالی که در تیمار حاوی ۱ درصد مگنتیت این مقادیر به ترتیب ۰/۳۸ و ۰/۱۰ درصد به دست آمدند (جدول تکمیلی ۱). در سطح ۲ میلی گرم سلیوم در کیلوگرم خاک و مصرف ۱ درصد CMCh، بیشترین غلظت فسفر در ریشه ۰/۳۷ درصد و بخش هوایی ۰/۴۶ درصد مشاهده شد (جدول تکمیلی ۱). در همین سطح از سلیوم، کاربرد ۱ درصد کامپوزیت مگنتیت-کربوکسی متیل کیتوسان با ثبت مقادیر ۰/۲۲ درصد در ریشه و ۰/۴۰ درصد در بخش هوایی در رتبه دوم قرار گرفت. در تیمار حاوی ۱ درصد مگنتیت، غلظت فسفر ریشه و بخش هوایی به ترتیب ۰/۰۸ و ۰/۳۴ درصد بود. در تیمارهای فاقد سلیوم، افزایش مقدار مصرف جاذب - مستقل از نوع آن - موجب کاهش غلظت فسفر در هر دو بخش ریشه و بخش هوایی شد که احتمالاً ناشی از افزایش جذب یا تثبیت فسفر توسط جاذب‌ها بوده است.

اثر سطوح سلیوم خاک، نوع و مقدار مصرف جاذب و اثر متقابل آن‌ها بر غلظت پتاسیم ریشه و بخش هوایی گیاه ذرت

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که غلظت کل سلیوم خاک، نوع و مقدار مصرف جاذب و همچنین اثرات متقابل آن‌ها، تأثیر معنی‌داری ($p < 0.01$) بر غلظت پتاسیم ریشه و بخش هوایی گیاه ذرت داشتند (جدول ۲). بیشترین غلظت پتاسیم در هر دو بخش گیاه در سطح ۲ میلی گرم سلیوم در کیلوگرم خاک مشاهده شد (اشکال ۵الف و ۵ج). با این حال، با افزایش غلظت سلیوم خاک، غلظت پتاسیم روند کاهشی نشان داد و کمترین مقادیر آن در تیمار حاوی ۳۲ میلی گرم سلیوم در کیلوگرم خاک ثبت گردید. این الگو در هر دو بخش ریشه و بخش هوایی مشاهده شد، هرچند غلظت پتاسیم در بخش هوایی در تمامی تیمارها به طور معنی‌داری بیشتر از ریشه بود (اشکال ۵الف و ۵ج). نوع و مقدار مصرف جاذب نیز اثر معنی‌داری بر غلظت پتاسیم ریشه و بخش هوایی ذرت داشتند (اشکال ۵ب و ۵د). در میان جاذب‌های مورد بررسی، کربوکسی متیل کیتوسان (CMCh) بیشترین اثر تقویتی را بر افزایش غلظت پتاسیم نشان داد و پس از آن کامپوزیت مگنتیت-کربوکسی متیل کیتوسان قرار گرفت، در حالی که کمترین مقادیر پتاسیم مربوط به تیمارهای حاوی مگنتیت به تنهایی بود. به طور کلی، افزایش مقدار مصرف جاذب‌ها موجب افزایش غلظت پتاسیم در هر دو بخش گیاه شد، هرچند این افزایش در ریشه از نظر آماری معنی‌دار نبود (اشکال ۵ب و ۵د). اثر متقابل غلظت سلیوم خاک و نوع و مقدار مصرف جاذب نیز نقش تعیین‌کننده‌ای در پویایی پتاسیم ایفا کرد. بیشترین غلظت پتاسیم در ریشه ۴/۷۲ درصد و بخش هوایی ۶/۳۱ درصد در تیمار حاوی ۲ میلی گرم سلیوم در کیلوگرم خاک همراه با مصرف ۱ درصد CMCh مشاهده شد. جایگزینی CMCh با کامپوزیت مگنتیت-کربوکسی متیل کیتوسان یا مگنتیت در همین سطح از سلیوم، موجب کاهش غلظت پتاسیم در ریشه و بخش هوایی گیاه گردید، به طوری که این مقادیر به ترتیب به ۴/۰۹ و ۵/۶۲ درصد و ۳/۵۸ و ۴/۸۷ درصد کاهش یافتند. در مقابل، کمترین غلظت پتاسیم در تیمار حاوی ۳۲ میلی گرم سلیوم در کیلوگرم خاک بدون مصرف جاذب مشاهده شد که به ترتیب ۱/۱۶ درصد در ریشه و ۲/۳۸ درصد در بخش هوایی بود. در تیمار شاهد (فاقد سلیوم و جاذب)، غلظت پتاسیم در ریشه و بخش هوایی به ترتیب ۳/۲۰ و ۴/۴۲ درصد اندازه‌گیری شد که در دامنه کفایت تغذیه‌ای این گیاه قرار دارد (Clover & Mallarino, 2013). در شرایط فاقد سلیوم، مصرف CMCh موجب افزایش معنی‌دار غلظت پتاسیم در هر دو بخش ریشه و هوایی نسبت به تیمار شاهد گردید، به طوری که بیشترین اثر افزایشی در سطوح پایین‌تر مقدار مصرف جاذب مشاهده شد. در مورد کامپوزیت مگنتیت-کربوکسی متیل کیتوسان، افزایش غلظت پتاسیم تنها در سطوح مصرف ۰/۲۵ و ۰/۵ درصد مشاهده شد، در حالی که در سطح مصرف ۱ درصد، غلظت پتاسیم نسبت به تیمار شاهد کاهش یافت. در مقابل، کاربرد مگنتیت به تنهایی در تمامی سطوح مصرف موجب کاهش غلظت پتاسیم در ریشه و بخش هوایی گردید که نشان می‌دهد در خاک‌های کم‌سلیوم یا فاقد سلیوم، استفاده از جاذب‌های مبتنی بر مگنتیت می‌تواند دسترسی پتاسیم را محدود نماید.

اثر سطوح سلیوم خاک، نوع و مقدار مصرف جاذب و برهم‌کنش آن‌ها بر غلظت روی ریشه و بخش هوایی گیاه ذرت

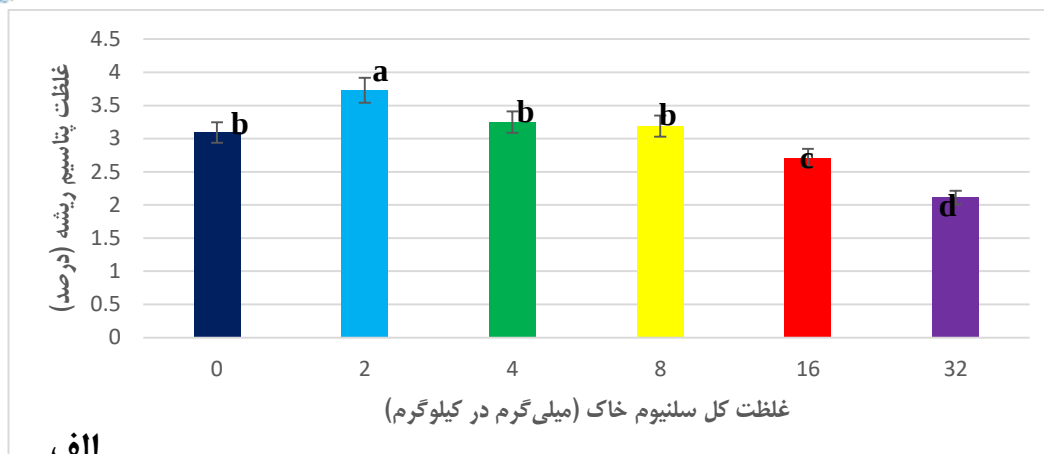
نتایج تجزیه آماری نشان داد که غلظت کل سلیوم خاک، نوع و مقدار مصرف جاذب و همچنین اثرات متقابل آن‌ها، تأثیر معنی‌داری ($p < 0.01$) بر غلظت روی ریشه و بخش هوایی گیاه ذرت داشتند (جدول ۲). تغییرات غلظت روی ریشه و بخش هوایی گیاه الگوی مشابهی را دنبال کرد (اشکال ۶الف و ۶ج). بیشترین غلظت روی ریشه و بخش هوایی گیاه در سطح ۲ میلی گرم سلیوم در کیلوگرم خاک مشاهده شد؛ با این حال، با افزایش غلظت سلیوم خاک، غلظت روی ریشه و بخش هوایی گیاه به طور معنی‌داری کاهش یافت، به طوری که کمترین مقادیر آن در تیمار حاوی ۳۲ میلی گرم سلیوم در کیلوگرم خاک ثبت گردید (اشکال ۶الف و ۶ج).

نوع و مقدار مصرف جاذب نیز دارای تأثیر معنی‌داری بر غلظت روی ریشه و بخش هوایی گیاه بود (اشکال ۷ و ۸). در میان جاذب‌های مورد بررسی، کامپوزیت مگنتیت-کربوکسی متیل کیتوسان بیشترین غلظت روی را در هر دو بخش گیاهی ایجاد کرد و پس از آن به ترتیب مگنتیت و کربوکسی متیل کیتوسان قرار گرفتند. به طور کلی، افزایش مقدار مصرف جاذب موجب افزایش معنی‌دار غلظت روی ریشه و بخش هوایی گیاه ذرت شد (اشکال ۷ و ۸). اثر متقابل غلظت سلیوم خاک و نوع و مقدار مصرف جاذب نیز تأثیر معنی‌داری بر غلظت روی ریشه و بخش هوایی داشت ($p < 0.01$) (جدول ۲). بیشترین غلظت روی ریشه (۷۷/۴۵ میلی گرم در کیلوگرم وزن خشک) و بخش هوایی (۹۴/۴۹ میلی گرم در کیلوگرم وزن خشک) در تیمار حاوی ۲ میلی گرم سلیوم در کیلوگرم خاک همراه با مصرف ۱ درصد کامپوزیت مگنتیت-کربوکسی متیل کیتوسان اندازه گیری شد (جدول تکمیلی ۱). با جایگزینی این جاذب با مگنتیت در همین سطح از سلیوم، غلظت روی ریشه و بخش هوایی به ترتیب به ۶۴/۵۷ و ۸۴/۵۲ میلی گرم در کیلوگرم کاهش یافت، در حالی که در تیمارهای حاوی کربوکسی متیل کیتوسان، این مقادیر به ترتیب ۵۷/۸۱ و ۷۶/۲۳ میلی گرم در کیلوگرم بودند (جدول تکمیلی ۱). کمترین غلظت روی ریشه (۷/۷۰ میلی گرم در کیلوگرم وزن خشک) و بخش هوایی (۱۱/۳۲ میلی گرم در کیلوگرم وزن خشک) در تیمار حاوی ۳۲ میلی گرم سلیوم در کیلوگرم خاک و فاقد جاذب مشاهده شد (جدول تکمیلی ۱). در تیمار شاهد (فاقد سلیوم و جاذب)، غلظت روی ریشه و بخش هوایی به ترتیب ۵۴/۱۵ و ۷۳/۵۳ میلی گرم در کیلوگرم بود. در تیمارهای فاقد سلیوم، کاربرد جاذب‌ها، موجب کاهش غلظت روی ریشه و بخش هوایی گیاه نسبت به تیمار شاهد شد و این کاهش با افزایش مقدار مصرف جاذب تشدید گردید (جدول تکمیلی ۱).

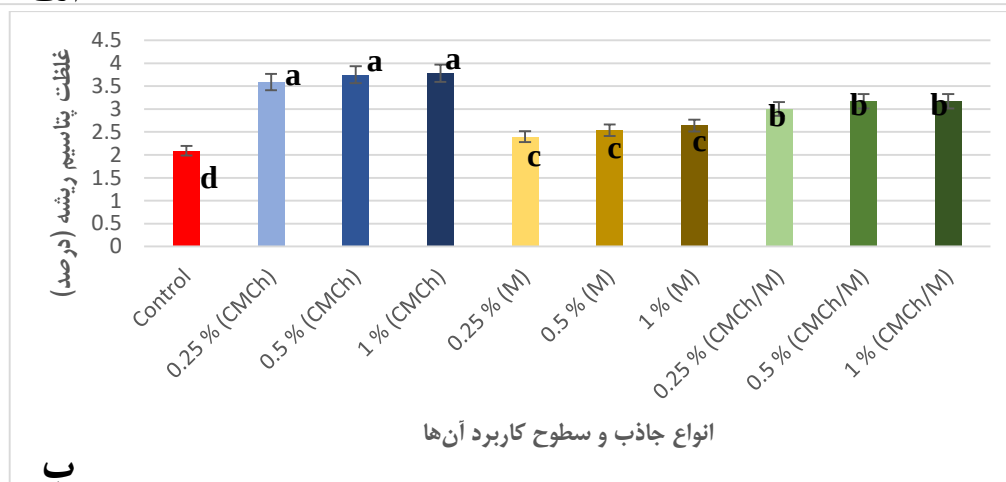
اثر سطوح سلیوم خاک، نوع و مقدار مصرف جاذب و برهم‌کنش آن‌ها بر غلظت آهن ریشه و بخش هوایی گیاه ذرت

نتایج تجزیه آماری داده‌ها نشان داد که غلظت کل سلیوم خاک، نوع و مقدار مصرف جاذب و همچنین اثرات متقابل آن‌ها، تأثیر معنی‌داری ($p < 0.01$) بر غلظت آهن ریشه و بخش هوایی گیاه ذرت داشتند (جدول ۲). برخلاف عنصر روی که الگوی تغییرات مشابهی را در ریشه و بخش هوایی نشان داد، آهن رفتار متضادی را در این دو بخش گیاه از خود بروز داد (اشکال ۷ الف و ۷ ج).

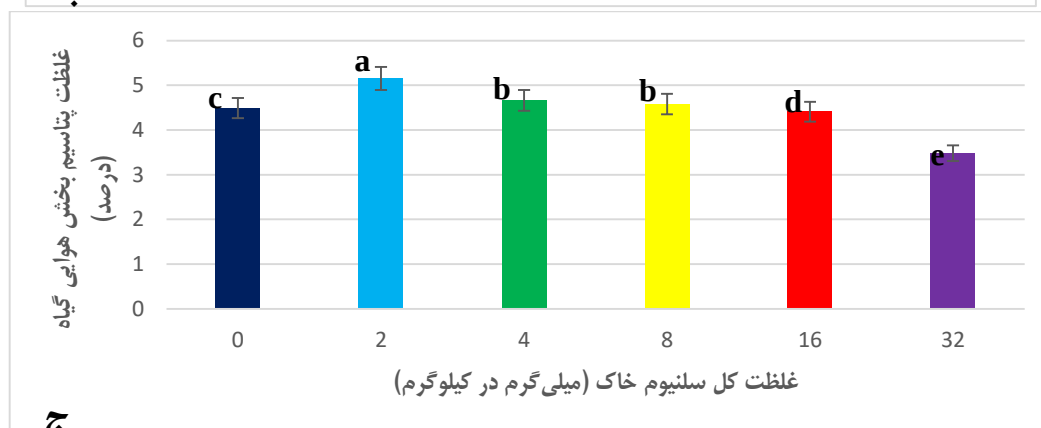
کمترین میانگین غلظت آهن ریشه (۴۵/۶۰ میلی گرم در کیلوگرم وزن خشک) در تیمارهای حاوی ۲ میلی گرم سلیوم در کیلوگرم خاک مشاهده شد (شکل ۷ الف). در مقابل، همین تیمارها دارای بیشترین غلظت آهن در بخش هوایی گیاه بودند، به طوری که مقدار آن به ۱۶۷/۴۱ میلی گرم در کیلوگرم وزن خشک رسید (شکل ۷ ج). برعکس، بیشترین میانگین غلظت آهن ریشه (۱۰۶/۴۱ میلی گرم در کیلوگرم وزن خشک) در تیمارهای دارای بالاترین سطح سلیوم خاک (۳۲ میلی گرم سلیوم در کیلوگرم خاک) اندازه گیری شد، در حالی که غلظت آهن در بخش هوایی این تیمارها به کمترین مقدار خود، با میانگین ۴۲/۲۸ میلی گرم در کیلوگرم وزن خشک، رسید (اشکال ۷ الف و ۷ ج). به طور کلی، غلظت آهن بخش هوایی در سطح ۲ میلی گرم سلیوم در کیلوگرم خاک به بیشینه مقدار خود رسید و با افزایش سطح سلیوم خاک کاهش یافت و در سطح ۳۲ میلی گرم سلیوم در کیلوگرم خاک به کمترین مقدار خود رسید؛ در حالی که این روند در ریشه‌ها به صورت معکوس مشاهده شد (اشکال ۷ الف و ۷ ج). نوع و مقدار مصرف جاذب نیز دارای تأثیر معنی‌داری بر غلظت آهن ریشه و بخش هوایی گیاه بود (اشکال ۷ ب و ۷ د). به طور کلی، مصرف جاذب‌ها در سطوح ۰/۵ و ۱ درصد موجب کاهش غلظت آهن ریشه و افزایش غلظت آن در بخش هوایی گیاه نسبت به تیمار شاهد (فاقد سلیوم و جاذب) شد. بیشترین کاهش غلظت آهن ریشه نسبت به تیمار شاهد در اثر مصرف کربوکسی متیل کیتوسان مشاهده شد؛ با این حال، این جاذب افزایش کمتری در غلظت آهن بخش هوایی نسبت به سایر جاذب‌ها ایجاد کرد. در مقابل، بیشترین افزایش غلظت آهن در بخش هوایی نسبت به تیمار شاهد مربوط به کامپوزیت مگنتیت-کربوکسی متیل کیتوسان بود (اشکال ۷ ب و ۷ د). اثر متقابل غلظت سلیوم خاک و نوع و مقدار مصرف جاذب نیز تأثیر معنی‌داری بر غلظت آهن ریشه و بخش هوایی گیاه داشت ($p < 0.01$) (جدول ۲). کمترین غلظت آهن بخش هوایی (۱۴/۷۷ میلی گرم در کیلوگرم وزن خشک) در تیمار حاوی ۳۲ میلی گرم سلیوم در کیلوگرم خاک و فاقد جاذب مشاهده شد (جدول تکمیلی ۱). در مقابل، بیشترین غلظت آهن بخش هوایی (۲۰۰/۰۲ میلی گرم در کیلوگرم وزن خشک) مربوط به تیمار حاوی ۲ میلی گرم سلیوم در کیلوگرم خاک همراه با مصرف ۱ درصد کامپوزیت مگنتیت-کربوکسی متیل کیتوسان بود (جدول تکمیلی ۱). کمترین غلظت آهن ریشه در تیمار حاوی ۲ میلی گرم سلیوم در کیلوگرم خاک همراه با مصرف ۱ درصد کربوکسی متیل کیتوسان مشاهده شد؛ تیماری که از نظر غلظت آهن بخش هوایی در رتبه سوم قرار داشت. بیشترین غلظت آهن ریشه (۱۳۴/۵۶ میلی گرم در کیلوگرم وزن خشک) در تیمار حاوی ۳۲ میلی گرم سلیوم در کیلوگرم خاک همراه با مصرف ۰/۲۵ درصد مگنتیت مشاهده شد (جدول تکمیلی ۱). در تیمار شاهد (فاقد سلیوم و جاذب)، غلظت آهن در ریشه و بخش هوایی به ترتیب ۶۸/۵۱ و ۱۷۳/۴۵ میلی گرم در کیلوگرم اندازه گیری گردید. در تیمارهای فاقد سلیوم و دارای جاذب، افزایش مقدار مصرف جاذب موجب کاهش غلظت آهن در هر دو بخش ریشه و هوایی شد (جدول تکمیلی ۱).



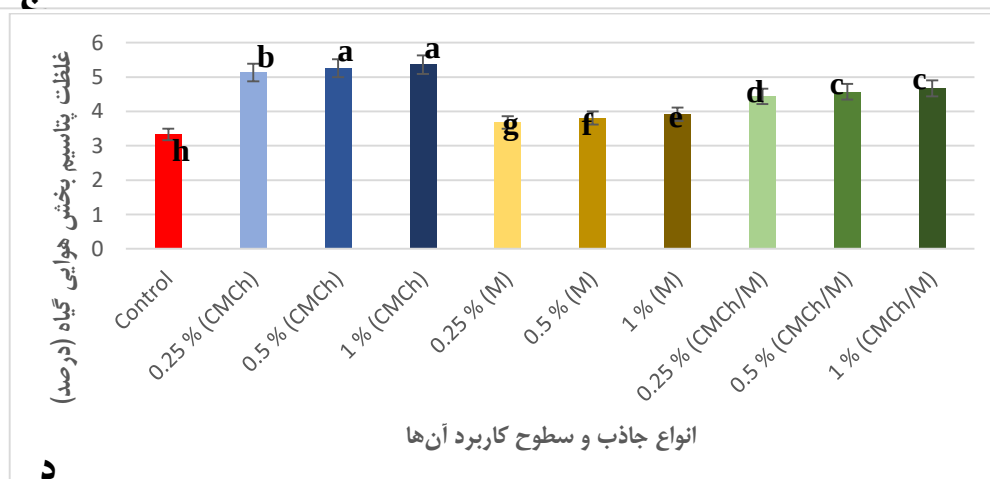
ب



ج

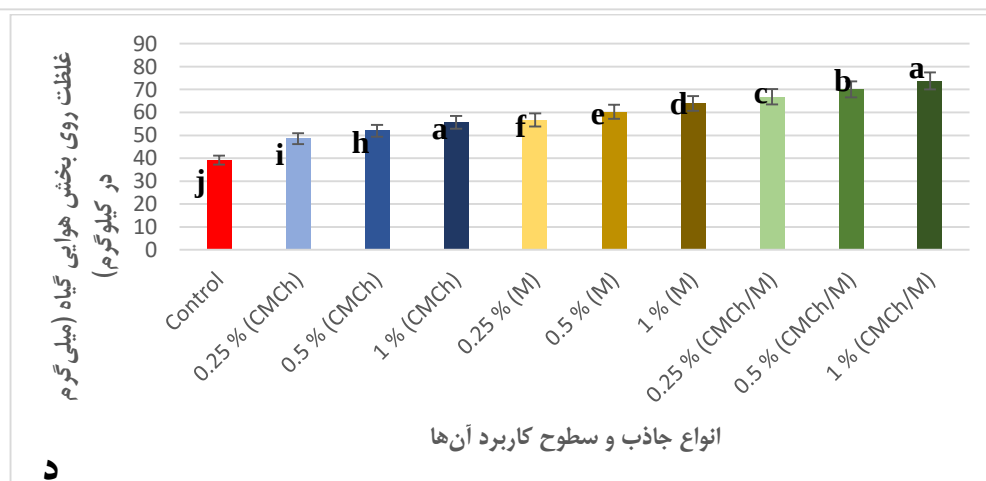
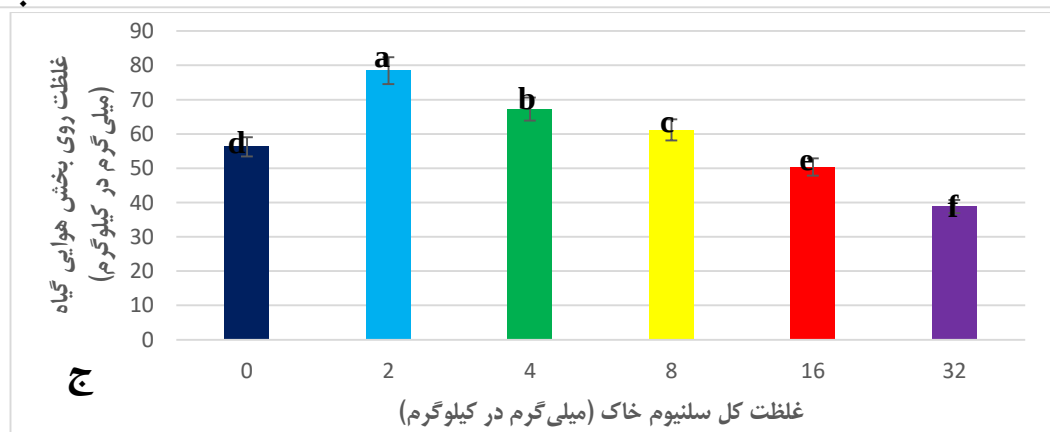
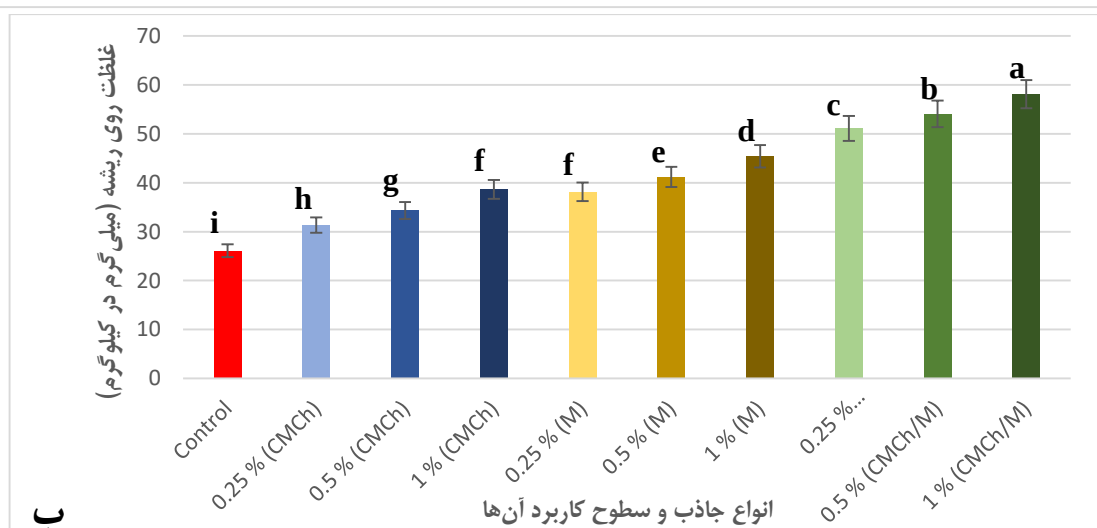
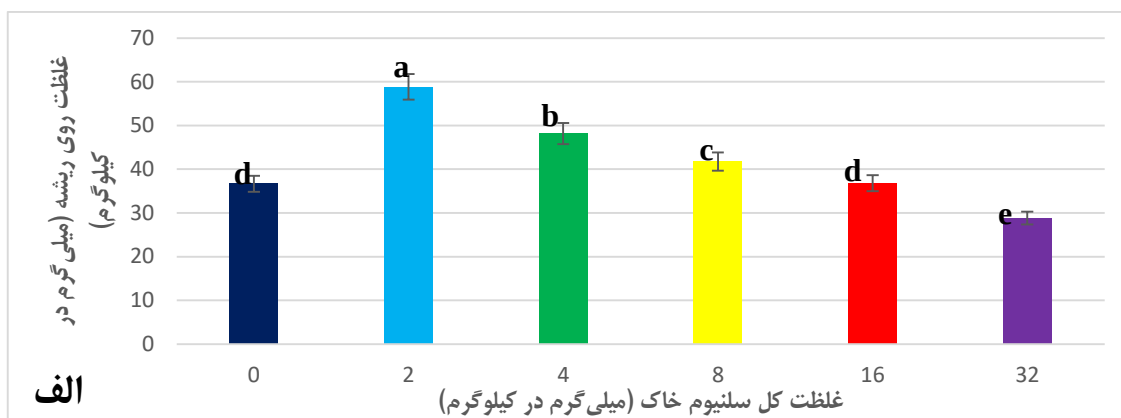


د

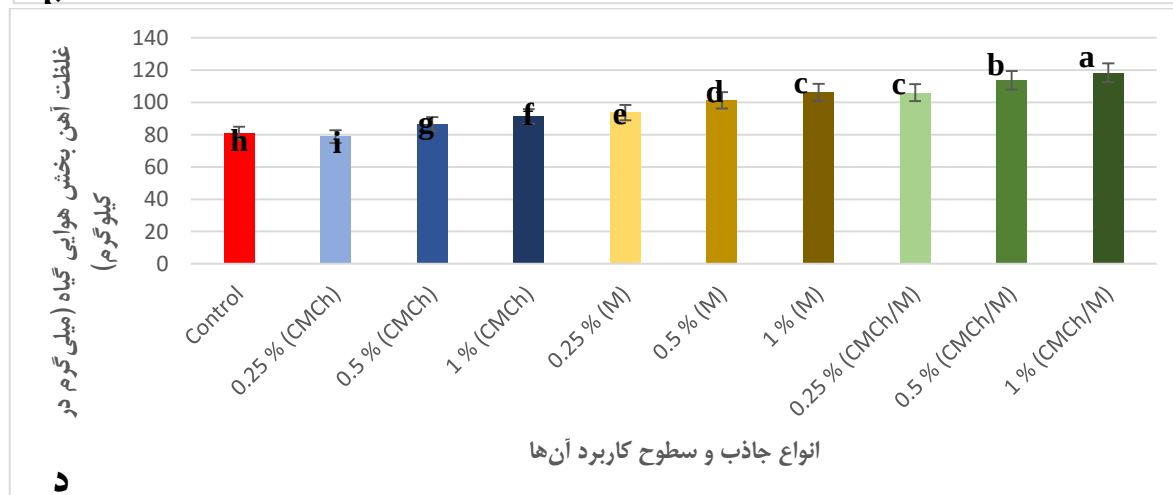
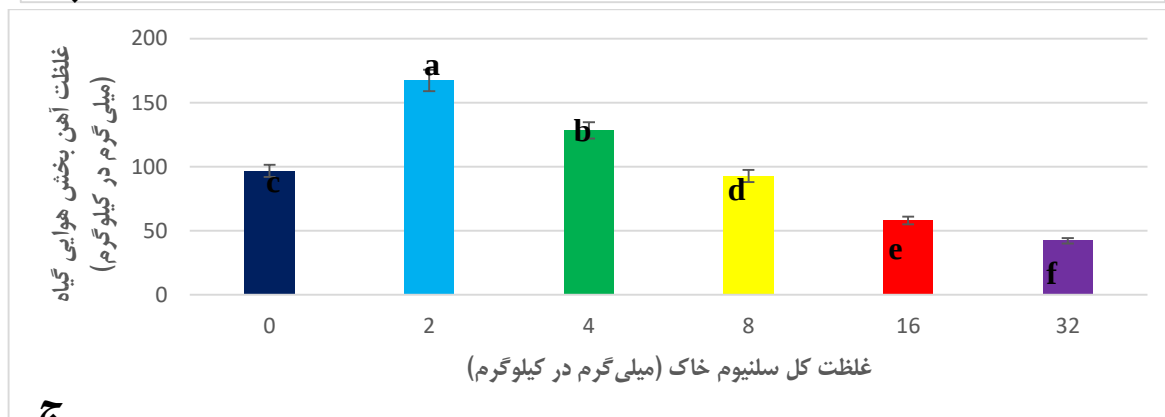
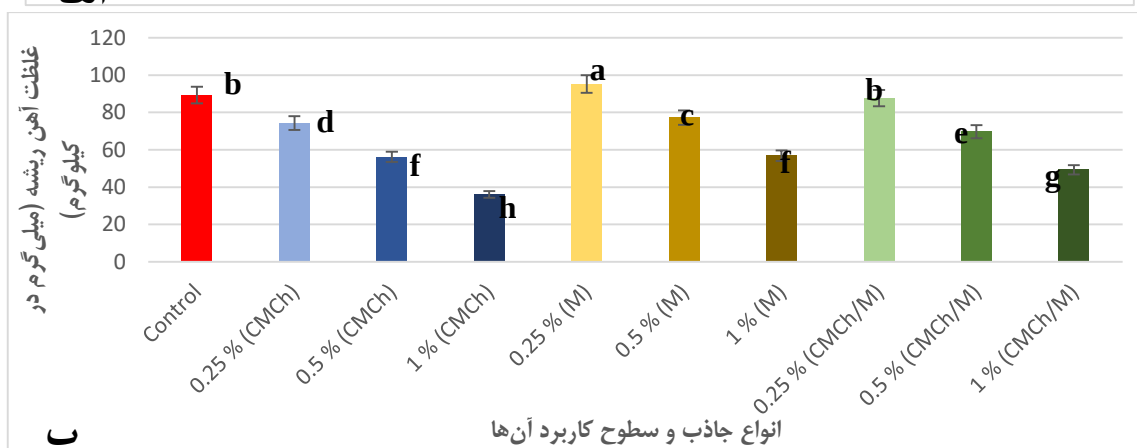
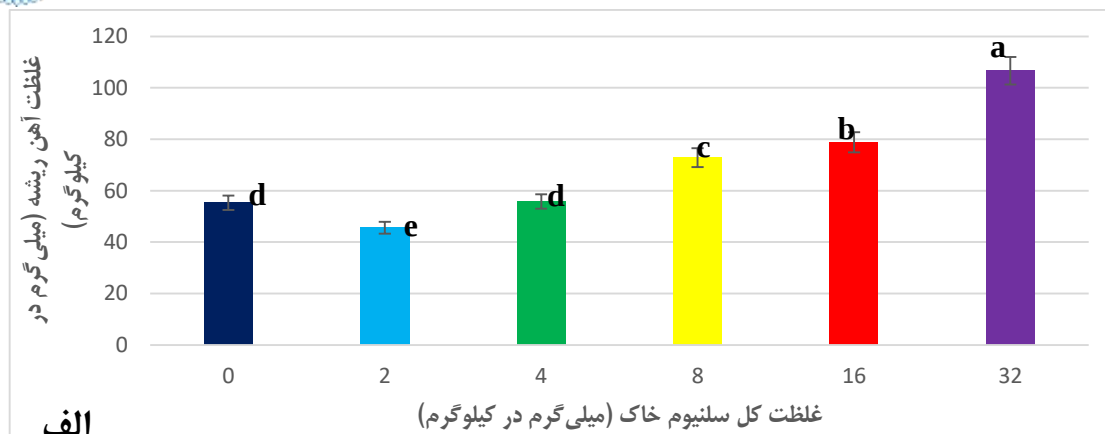


د

شکل ۵. اثر سطوح مختلف سلیوم خاک و انواع و غلظت‌های متفاوت جاذب‌ها بر غلظت پتاسیم در ریشه (الف و ب) و اندام هوایی گیاه (ج و د).



شکل ۶. اثر سطوح مختلف سلیوم خاک و انواع و غلظت‌های متفاوت جاذب‌ها بر غلظت روی در ریشه (الف و ب) و اندام هوایی گیاه (ج و د).



شکل ۷. اثر سطوح مختلف سeleniom خاک و انواع و غلظت های متفاوت جاذب ها بر غلظت آهن در ریشه (الف و ب) و اندام هوایی گیاه (ج و د).

بحث و بررسی

سلیوم کل خاک، قابلیت فراهمی آن و سازوکارهای تثبیت سلیوم توسط CMCh، Fe_3O_4 و کامپوزیت $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{CMCh}$

نتایج این پژوهش نشان داد که بین غلظت سلیوم کل خاک و میزان سلیوم قابل جذب، همبستگی مثبت و قوی وجود دارد ($R^2 = 0.89$)، $p < 0.01$). این رابطه با ایزوترم جذب فروندلیخ مطابقت دارد؛ مدلی که رفتار جذب غیرخطی را در سامانه‌های ناهمگن به خوبی توصیف می‌کند (Sparks, 2003). در غلظت‌های پایین سلیوم کل خاک (۲ میلی گرم در کیلوگرم)، جایگاه‌های فعال جذب به طور کامل اشغال نمی‌شوند و در نتیجه، سهم بیشتری از سلیوم بصورت قابل جذب باقی می‌ماند. با افزایش غلظت سلیوم کل خاک تا ۳۲ میلی گرم در کیلوگرم، اشغال تدریجی جایگاه‌های جذب افزایش یافته و سامانه به سمت حالت اشباع پیش می‌رود که این امر موجب کاهش نسبی سهم سلیوم قابل جذب می‌شود.

بر این اساس، درصد سلیوم تثبیت شده همزمان با افزایش سلیوم کل خاک افزایش یافت و از حدود ۶۲ درصد در سطوح پایین به حدود ۹۰ درصد در بالاترین سطح سلیوم رسید. این موضوع بیانگر فعال شدن سازوکارهای جذب مشارکتی و افزایش کارایی فرآیندهای تثبیت در غلظت‌های بالاتر سلیوم است. در چنین شرایطی، جذب چندلایه‌ای تقویت می‌شود؛ پدیده‌ای که به واسطه برهم کنش‌های ثانویه نظیر نیروهای واندروالس رخ می‌دهد و امکان جذب سلیوم فراتر از تشکیل تک لایه را فراهم می‌سازد (Fordyce, 2012). افزون بر این، رسوب گذاری نیز نقش مهمی در تثبیت سلیوم ایفا می‌کند، به ویژه در خاک‌های آهکی که شرایط لازم برای واکنش یون سلیت (SeO_3^{2-}) با یون کلسیم (Ca^{2+}) و تشکیل رسوبات کم محلول CaSeO_3 فراهم است. شرایط برای انجام این فرآیند از نظر ترمودینامیکی در غلظت‌های بالای سلیوم مطلوب تر بوده و به کاهش تحرک و فراهمی زیستی سلیوم منجر می‌شود (Suzuki et al., 2019). علاوه بر این، با افزایش غلظت سلیوم، تثبیت از طریق واکنش‌های اکسایش-کاهش نیز کارآمدتر می‌شود، به طوری که کاهش سلنات به سلیوم عنصری توسط Fe^{2+} ، به ویژه در غلظت‌های بالاتر از ۱۰ میلی گرم سلیوم در کیلوگرم خاک، تشدید می‌گردد (Gullett et al., 2023). این رفتار جذب غیرخطی با مدل لانگمویر نیز همخوانی دارد؛ مدلی که در آن ظرفیت جذب با اشباع تدریجی جایگاه‌های فعال به یک حالت پایدار می‌رسد. شایان ذکر است که حتی بدون افزودن جاذب‌های خارجی، اجزای طبیعی خاک از جمله کربنات کلسیم (CaCO_3) و اکسیدهای آهن و منگنز، از طریق سازوکارهایی نظیر تبادل لیگاند و رسوب گذاری سطحی، نقش مهمی در تثبیت پایه‌ای سلیوم ایفا می‌کنند، به طوری که ۶۲ تا ۷۱ درصد از سلیوم قابل دسترس در تیمارهای فاقد جاذب تثبیت شد (Smažiková et al., 2019). تثبیت سلیوم در خاک با استفاده از کربوکسی متیل کیتوسان (CMCh)، نانوذرات مگنتیت (Fe_3O_4) و کامپوزیت آن‌ها ($\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{CMCh}$)، حاصل برهم کنش مجموعه‌ای از سازوکارهای فیزیکی و شیمیایی متمایز اما مکمل است که ریشه در اصول شیمی خاک دارند. این سازوکارها به طور مستقیم با ویژگی‌های ساختاری و گروه‌های عاملی جاذب‌ها و همچنین گونه بندی سلیوم در خاک مرتبط هستند؛ گونه بندی‌ای که خود تحت تأثیر pH، پتانسیل اکسایش-کاهش و ترکیب کانی شناسی خاک قرار دارد. کربوکسی متیل کیتوسان، به عنوان مشتقی محلول در آب از کیتوسان، دارای گروه‌های عاملی کربوکسی متیل ($-\text{CH}_2\text{COO}^-$) و آمینی ($-\text{NH}_2$) است و می‌تواند با اکسی آنیون‌های سلیوم، از جمله سلیت و سلنات، از طریق چندین مسیر برهم کنش برقرار کند. این مسیرها شامل برقراری پیوند هیدروژنی، تبادل لیگاند و فرآیندهای تشکیل کلات است. گروه‌های هیدروکسیل ($-\text{OH}$) و آمینی CMCh قادرند با اکسی آنیون‌های سلیوم پیوندهای هیدروژنی تشکیل دهند؛ پدیده‌ای که در مطالعات مربوط به جاذب‌های مبتنی بر کیتوسان نیز گزارش شده است (Mallik et al., 2022). تبادل لیگاند عمدتاً در ریزمحیط‌های اسیدی موضعی نزدیک به زنجیره‌های CMCh رخ می‌دهد، جایی که سلیوم از طریق کمپلکس سازی سطحی جایگزین لیگاند‌های ضعیف تر، نظیر گروه‌های هیدروکسیل یا مولکول‌های آب، می‌شود (Egorov et al., 2022). همچنین، کلات سازی در این سامانه نقش مهمی دارد، زیرا گروه‌های غنی از الکترون ($-\text{NH}_2$ و $-\text{COO}^-$) می‌توانند با یون‌های سلیوم پیوند برقرار کرده و کمپلکس‌های نسبتاً پایدار تشکیل دهند (Chen et al., 2021). با این حال، در شرایط قلیایی که برای خاک‌های آهکی رایج است، گروه‌های آمینی CMCh عمدتاً بدون پروتون باقی می‌مانند و گروه‌های کربوکسی متیل دارای بار منفی ($-\text{COO}^-$) هستند. در چنین شرایطی، دافعه الکترواستاتیکی بین CMCh و گونه‌های آنیونی سلیوم ایجاد می‌شود که می‌تواند کارایی این جاذب را محدود کند. این محدودیت معمولاً با افزایش مقدار مصرف CMCh یا ترکیب آن با مواد فعال از نظر اکسایش-کاهش، مانند Fe_3O_4 ، تا حدی جبران می‌شود (Singh et al., 2021). نانوذرات مگنتیت (Fe_3O_4) سلیوم را عمدتاً از طریق کمپلکس سازی درون کره‌ای تثبیت می‌کنند. در این فرآیند، اکسی آنیون‌های سلیوم از طریق تبادل لیگاند به صورت شیمیایی بر روی جایگاه‌های سطحی $\text{Fe}-\text{OH}$ متصل شده و پیوندهای پایدار $\text{Fe}-\text{O}-\text{Se}$ را تشکیل می‌دهند (Su & Suarez, 2000). وجود حالت‌های

اکسایشی مختلف آهن (Fe^{2+}/Fe^{3+}) در ساختار مگنتیت، امکان انجام واکنش‌های اکسایش-کاهش را فراهم می‌کند و در نتیجه، گونه متحرک سلنات (Se^{6+}) می‌تواند به سلنیت کم‌محلول تر (Se^{4+}) یا حتی به سلنیوم عنصری (Se^0) کاهش یابد؛ فرآیندی که نقش مهمی در کاهش تحرک و فراهمی زیستی سلنیوم ایفا می‌کند (Shaheen et al., 2017). این فعالیت‌های اکسایش-کاهشی با اصول شیمی خاک حاکم بر انتقال الکترون در سامانه‌های غنی از آهن همخوانی دارد؛ سامانه‌هایی که در آن‌ها یون Fe^{2+} به‌ویژه در شرایط کم‌اکسیژن، به‌عنوان یک عامل کاهنده مؤثر عمل می‌کند (Gullett et al., 2023). با این حال، یکی از محدودیت‌های اساسی نانوذرات Fe_3O_4 ، تمایل آن‌ها به تجمع است که این پدیده با کاهش سطح ویژه و تعداد جایگاه‌های فعال سطحی همراه است و کارایی جذب را محدود می‌سازد. به‌کارگیری پایدارکننده‌هایی نظیر کربوکسی‌متیل کیتوسان (CMCh) با ایجاد یک ماتریس پلیمری پیرامون نانوذرات مگنتیت، از تجمع آن‌ها جلوگیری کرده و این محدودیت را تا حد زیادی برطرف می‌کند (Abbas & Krishnan, 2020). کامپوزیت $Fe_3O_4/CMCh$ سازوکارهای عملکردی هر دو جزء تشکیل دهنده را به‌صورت تجمعی در یک سامانه واحد تلفیق می‌کند. در این ساختار، CMCh با جلوگیری از تجمع نانوذرات Fe_3O_4 ، موجب حفظ سطح ویژه بالا و دسترسی به جایگاه‌های واکنش‌پذیر می‌شود (Chao et al., 2021). این کامپوزیت امکان جذب چندمسیره سلنیوم را فراهم می‌سازد؛ به‌طوری‌که Fe_3O_4 عمدتاً از طریق شیمیایی و تشکیل پیوندهای پایدار Fe-O-Se در فرآیند تثبیت سلنیوم نقش ایفا می‌کند، در حالی که CMCh از طریق پیوند هیدروژنی و کلات‌سازی به تقویت نگهداشت سلنیوم کمک می‌نماید (Dorraj et al., 2017). علاوه بر این، گروه‌های کربوکسیل موجود در CMCh با تعدیل بار سطحی مثبت Fe_3O_4 در شرایط pH قلیایی، تمایل این نانوذرات را برای برهم‌کنش با اکسی‌آنیون‌های سلنیوم افزایش می‌دهند و بدین ترتیب، بر دافعه الکترواستاتیکی غلبه می‌شود (Sun et al., 2015). از سوی دیگر، گروه‌های دهنده الکترون در ساختار CMCh می‌توانند ظرفیت کاهندگی Fe^{2+} را افزایش داده و فرآیند کاهش اکسی‌آنیون‌های متحرک سلنیوم را تسهیل کنند (Liu et al., 2024). برآیند این برهم‌کنش‌های ساختاری و شیمیایی، عملکرد برتر کامپوزیت $Fe_3O_4/CMCh$ را توضیح می‌دهد؛ به‌گونه‌ای که در نرخ مصرف ۱ درصد، حدود ۹۰ درصد از سلنیوم قابل‌دسترس خاک تثبیت شد، در حالی که این مقدار برای Fe_3O_4 و CMCh به‌تنهایی به‌ترتیب ۸۷ و ۸۴/۵ درصد بود. مطالعات مقایسه‌ای انجام‌شده در زمینه جاذب‌های مختلف، جایگاه عملکردی کامپوزیت $Fe_3O_4/CMCh$ را روشن‌تر می‌سازند. به‌عنوان مثال، بیوچار قادر است حدود ۷۰ درصد سلنیوم را عمدتاً از طریق کمپلکس‌سازی سطحی تثبیت کند، اما فاقد فعالیت اکسایش-کاهشی مؤثر است (Huang et al., 2022). هیدروکسیدهای دولایه‌ای (LDHs) نظیر Mg-Al-LDH حدود ۸۰ درصد سلنیوم را از طریق تبادل آنیونی حذف می‌کنند، اما در pH بالاتر از ۹، به دلیل رقابت شدید یون OH^- ، کارایی آن‌ها به‌طور محسوسی کاهش می‌یابد (Asiabi et al., 2017). چارچوب‌های فلزی-آلی (MOFs) مانند MIL-101(Fe) اگرچه ظرفیت جذب بالایی (در حدود ۹۵ میلی‌گرم بر گرم) دارند، اما در محیط‌های مرطوب خاک از پایداری ساختاری کافی برخوردار نیستند و این موضوع کاربرد آن‌ها را محدود می‌کند (Guo et al., 2023). در مقابل، کامپوزیت $Fe_3O_4/CMCh$ به‌طور هم‌زمان از سازوکارهای شیمی جذب، دگرگونی اکسایش-کاهشی و کلات‌سازی بهره می‌برد و در عین حال، در شرایط قلیایی خاک از پایداری ساختاری مطلوبی برخوردار است؛ ویژگی‌ای که برتری عملکردی آن را نسبت به بسیاری از جاذب‌های متداول توضیح می‌دهد. این یافته‌ها بر ضرورت اتخاذ راهبردهای اصلاح آلودگی سلنیوم مبتنی بر شرایط محل تأکید می‌کنند. در خاک‌های قلیایی، اگرچه رسوب‌گذاری $CaSeO_3$ می‌تواند به تثبیت بخشی از سلنیوم کمک کند، اما استفاده از جاذب‌هایی با توان تعدیل بار سطحی، نظیر کامپوزیت $Fe_3O_4/CMCh$ ، برای غلبه بر دافعه الکترواستاتیکی اکسی‌آنیون‌های سلنیوم ضروری است. در خاک‌هایی که سلنات گونه غالب سلنیوم محسوب می‌شود، ظرفیت اکسایش-کاهشی Fe_3O_4 نقش تعیین‌کننده‌تری ایفا می‌کند، در حالی که در خاک‌های غنی از سلنیت، توان کلات‌سازی CMCh اهمیت بیشتری می‌یابد. افزون بر این، در سطوح بالای آلودگی سلنیوم (برای مثال ۳۲ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک)، کاربرد حداقل ۱ درصد کامپوزیت $Fe_3O_4/CMCh$ برای نزدیک شدن سامانه به حالت اشباع جذب و دستیابی به حداکثر تثبیت ضروری به نظر می‌رسد.

پژوهش‌های آینده می‌بایست بر بررسی پایداری بلندمدت سلنیوم تثبیت‌شده و همچنین ارزیابی سمیت احتمالی و بالقوه این نانوذرات در خاک تمرکز یابند. با این حال، استحکام و هم‌افزایی سازوکارهای عملکردی کامپوزیت $Fe_3O_4/CMCh$ ، این ماده را به گزینه‌ای امیدبخش، کارآمد و نسبتاً پایدار برای مدیریت آلودگی سلنیوم در خاک‌های آلوده تبدیل می‌کند.

اثر سطوح سلنیوم خاک، نوع و مقدار مصرف جاذب و اثرات متقابل آن‌ها بر غلظت سلنیوم بافت‌های ذرت و پارامترهای رشد گیاه
نتایج این مطالعه نشان داد که افزایش غلظت کل سلنیوم خاک موجب افزایش غلظت سلنیوم بافت‌های گیاهی ذرت و هم‌زمان کاهش شاخص‌های رشد گیاه شد. در خاک بدون جاذب، با افزایش غلظت سلنیوم از ۲ به ۳۲ میلی‌گرم در کیلوگرم، تجمع سلنیوم در ریشه و بخش هوایی به‌طور معنی‌داری افزایش یافت، به‌طوری‌که بیشترین غلظت سلنیوم در ریشه (۱۲۸ میلی‌گرم در کیلوگرم) و بخش هوایی (۱۹/۷)

میلی گرم در کیلوگرم) در تیمار ۳۲ میلی گرم سلیوم در کیلوگرم خاک مشاهده شد. این الگو ناشی از افزایش قابلیت فراهمی سلیوم در خاک‌های فاقد جاذب است، جایی که گونه‌های محلول سلیوم، شامل سلیت و سلنات، بدون محدودیت قابل توجهی در محلول خاک باقی مانده و به راحتی از طریق ناقل‌های فسفات و سولفات توسط گیاه جذب می‌شوند (Gupta & Gupta, 2017). تجمع بالاتر سلیوم در ریشه نسبت به بخش هوایی، بیانگر محدودیت انتقال درون گیاهی، به‌ویژه برای سلیت، و نقش محبوس‌شدگی آپوپلاستی ریشه است؛ در حالی که سلنات به دلیل تحرک بیشتر، انتقال مؤثرتری به بخش هوایی دارد (Somagattu et al., 2024).

افزایش تجمع سلیوم در بافت‌های گیاهی با افت شدید رشد همراه بود. در بالاترین سطح سلیوم خاک و در شرایط بدون جاذب، کاهش معنی‌دار ارتفاع گیاه، وزن خشک ریشه و وزن خشک بخش هوایی مشاهده شد که نشان‌دهنده عبور غلظت سلیوم داخلی از آستانه تحمل گیاه است. سلیوم اضافی با اختلال در متابولیسم گوگرد، رقابت با سولفات در مسیرهای جذب و کاهش سنتز اسیدهای آمینه گوگرددار، موجب تضعیف رشد گیاه می‌شود و هم‌زمان با القای تنش اکسیداتیو، عملکرد سلولی را مختل می‌کند (Van Hoewyk, 2013). نوع و مقدار مصرف جاذب، مستقل از سطح سلیوم خاک، تأثیر معنی‌داری بر کاهش غلظت سلیوم بافت‌های گیاهی و بهبود رشد ذرت داشت. کاربرد جاذب‌ها موجب کاهش قابل توجه غلظت سلیوم ریشه و بخش هوایی شد و این اثر با افزایش مقدار مصرف جاذب تشدید گردید. در میان جاذب‌های مورد بررسی، کامپوزیت $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{CMCh}$ بیشترین کارایی را در کاهش جذب سلیوم نشان داد و پس از آن جاذب‌های Fe_3O_4 و CMCh قرار گرفتند. این برتری به عملکرد بهتر و سازوکارهای متنوع جذب، کلات‌سازی و دگرگونی اکسایش-کاهش در ساختار کامپوزیت نسبت داده می‌شود. Fe_3O_4 از طریق تشکیل پیوندهای پایدار Fe-O-Se و انجام واکنش‌های اکسایش-کاهش، گونه‌های متحرک سلیوم را به اشکال کم‌تحرک‌تر تبدیل می‌کند، در حالی که CMCh با دارا بودن گروه‌های عاملی NH_2 و COO^- در تثبیت سطحی سلیوم نقش دارد. ترکیب این دو جزء، ضمن جلوگیری از تجمع نانوذرات Fe_3O_4 ، سطح واکنش‌پذیری را افزایش داده و کارایی تثبیت سلیوم را افزایش می‌دهد. اثر متقابل سطوح سلیوم خاک و نوع و مقدار مصرف جاذب نشان داد که نقش جاذب‌ها در کاهش جذب سلیوم و بهبود رشد گیاه به‌ویژه در سطوح بالای آلودگی برجسته‌تر است. در سطح ۳۲ میلی گرم سلیوم در کیلوگرم خاک، مصرف ۱ درصد کامپوزیت $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{CMCh}$ موجب کاهش غلظت سلیوم در ریشه و بخش هوایی به ترتیب به میزان ۶/۸ درصد و ۵/۳۸ درصد نسبت به خاک بدون جاذب شد. این کاهش با افزایش چشمگیر شاخص‌های رشد همراه بود، به‌طوری که ارتفاع گیاه، وزن خشک ریشه و وزن خشک بخش هوایی به ترتیب ۳/۱۰ درصد، ۷/۸۰ درصد و ۱۳۱ درصد افزایش یافت. این نتایج نشان می‌دهد که کاهش غلظت سلیوم در بافت‌های گیاهی به زیر آستانه‌های سمیت (حدود ۱۰ میلی گرم در کیلوگرم در بخش هوایی) شرط اصلی بازیابی فرایندهای متابولیکی و رشد طبیعی گیاه است (Pupo et al., 2019). در مقابل، در خاک‌های فاقد سلیوم یا با غلظت‌های پایین آن، مصرف جاذب‌ها—به‌ویژه در مقادیر بالا—در برخی موارد موجب کاهش رشد گیاه شد که احتمالاً به محدود شدن قابلیت دسترسی عناصر غذایی ضروری بازمی‌گردد. این یافته بر اهمیت تنظیم هم‌زمان سطح آلودگی و مقدار مصرف جاذب تأکید می‌کند. به‌طور کلی، نتایج این بخش نشان می‌دهد که کاربرد هدفمند کامپوزیت $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{CMCh}$ ، به‌ویژه در خاک‌های با آلودگی بالای سلیوم، می‌تواند با کاهش جذب سلیوم توسط گیاه و تعدیل سمیت آن، رشد ذرت را به‌طور معنی‌داری بهبود بخشد و به‌عنوان راهکاری کارآمد در مدیریت خاک‌های آلوده به سلیوم مطرح شود. در غلظت‌های پایین سلیوم خاک (۲ میلی گرم در کیلوگرم)، اثر دوجبهی سلیوم (هورمسیس) به‌طور مشخص مشاهده شد، به‌گونه‌ای که بیشترین ارتفاع گیاه (۱۳۷/۷۷ سانتی‌متر) و وزن خشک بخش هوایی (۹۸/۳۹ گرم) در تیمار حاوی ۲ میلی گرم سلیوم در کیلوگرم خاک و ۱ درصد کامپوزیت $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{CMCh}$ به‌دست آمد. این پاسخ مثبت با نقش سلیوم به‌عنوان یک ریزمغذی مفید در مقادیر کم سازگار است؛ به‌طوری که سلیوم در غلظت‌های زیر آستانه سمیت می‌تواند با افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی نظیر گلوکاتایون پراکسیداز، ظرفیت دفاعی گیاه را در برابر تنش‌های اکسیداتیو بهبود بخشد (Sajedi et al., 2011). در بیشتر گیاهان، آستانه بروز مسمومیت سلیوم در بافت گیاهی در دامنه ۵ تا ۱۰۰ میلی گرم در کیلوگرم وزن خشک گزارش شده است (Gupta & Gupta, 2017). با این حال، در این آزمایش آثار مسمومیت و کاهش رشد زمانی مشاهده شد که غلظت سلیوم در بافت خشک گیاه از حدود ۴ میلی گرم در کیلوگرم فراتر رفت. افزون بر این، رهش تدریجی ریزمغذی‌هایی مانند آهن و روی و همچنین کربن آلی فعال از کامپوزیت $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{CMCh}$ می‌تواند جذب عناصر غذایی و رشد گیاه را تحریک کند (Liu et al., 2022). در همین راستا، محققان نیز افزایش معنی‌دار زیست‌توده گندم را در سطح ۲ میلی گرم سلیوم در کیلوگرم خاک گزارش کردند که به افزایش فعالیت سامانه‌های آنتی‌اکسیدانی نسبت داده شد (González-Lemus et al., 2022). در مقابل، در خاک‌های فاقد سلیوم، کاربرد جاذب‌ها—به‌ویژه در مقدار مصرف بالاتر (۱ درصد)—اثر منفی بر رشد گیاه داشت و منجر به کاهش ارتفاع گیاه و زیست‌توده ریشه شد. این پدیده می‌تواند ناشی از تثبیت ناخواسته عناصر غذایی ضروری نظیر فسفر و روی باشد که



توسط Fe_3O_4 و CMCh از طریق تبادل لیگاند یا برهم کنش های الکترواستاتیکی در سطح جاذب ها به دام می افتند و قابلیت فراهمی آن ها برای گیاه کاهش می یابد (Yasmin et al., 2024). علاوه بر این، مصرف مقادیر بالای جاذب می تواند ویژگی های فیزیکی خاک از جمله تخلخل، توزیع اندازه منافذ و نگهداشت آب را تغییر دهد و در نتیجه، توسعه ریشه و جذب عناصر غذایی را محدود سازد (Shaaban & Nunez-Delgado, 2024). پژوهشگران نیز کاهش حدود ۱۵ درصد زیست توده ریشه ذرت را در خاک های کم سلیوم در اثر مصرف ۱ درصد Fe_3O_4 گزارش کردند که آن را به تثبیت فسفر نسبت دادند؛ نتیجه ای که با الگوهای مشاهده شده در این پژوهش همخوانی دارد (Ávila et al., 2013). با این حال، نکته قابل توجه آن است که در خاک های فاقد سلیوم، زیست توده بخش هوایی در تیمار حاوی کامپوزیت $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{CMCh}$ اندکی افزایش یافت که نشان دهنده وجود مزایای جانبی این ماده فراتر از تثبیت سلیوم است. این اثر می تواند ناشی از انحلال تدریجی Fe_3O_4 و آزادسازی یون های Fe^{2+} و Fe^{3+} در محلول خاک باشد که در سنتز کلروفیل، انتقال الکترون و کارایی فتوسنتزی نقش کلیدی دارند (Yousaf et al., 2024). افزون بر این، گروه های کربوکسیل CMCh ممکن است با تعدیل موضعی pH خاک و بهبود ظرفیت نگهداشت کاتیونی، فراهمی عناصری مانند نیتروژن و پتاسیم را افزایش دهند (Xu et al., 2020). محققان نیز افزایش حدود ۱۲ درصد زیست توده بخش هوایی برنج را در اثر کاربرد کامپوزیت های مگنتیت- کیتوسان در شرایط مشابه گزارش کردند که مؤید این تفسیر است (Parandhaman et al., 2019).

در مجموع، رابطه معکوس میان محتوای سلیوم بافت های گیاهی و شاخص های رشد گیاه، نقش دوگانه سلیوم را به عنوان یک ریز مغذی ضروری در مقادیر کم و یک عامل سمیت گیاهی در غلظت های بالا آشکار می سازد. کامپوزیت $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{CMCh}$ به دلیل هم افزایی سازوکارهای جذب سطحی، کلات سازی و تثبیت وابسته به واکنش های اکسایش-کاهش، بالاترین کارایی را در کاهش سمیت سلیوم و بهبود رشد گیاه نشان داد. با این حال، کاربرد این کامپوزیت در خاک های دچار کمبود سلیوم باید با دقت و بر اساس وضعیت حاصلخیزی خاک مدیریت شود تا از بروز اثرات منفی بر فراهمی عناصر غذایی ضروری جلوگیری گردد. پژوهش های آینده لازم است بر تعیین مقدار مصرف بهینه جاذب متناسب با سطح سلیوم خاک و نیز ارزیابی پیامدهای بلندمدت آن بر سلامت خاک و بوم شناسی میکروبی تمرکز کنند.

پویایی فسفر در گیاه ذرت تحت تأثیر سمیت سلیوم و جاذب های مختلف

الگوی توزیع فسفر در گیاه ذرت تحت سطوح مختلف سلیوم خاک و نوع و مقدار مصرف جاذب ها، بازتابی از برهم کنش پیچیده میان رقابت یونی، شیمی سطح جاذب ها و سازوکارهای سازگاری فیزیولوژیک گیاه در شرایط تنش است. در غلظت های بالای سلیوم خاک (۳۲ میلی گرم در کیلوگرم)، شباهت ساختاری اکسی آنیون های سلیوم، به ویژه سلمات و سلتیت، با فسفات (PO_4^{3-}) موجب بروز مهار رقابتی در سطح ناقل های غشایی ریشه می شود. این رقابت عمده تاً در سطح پروتئین های خانواده PHT1 که مسئول جذب فسفر هستند رخ می دهد و انتقال فسفر از ریشه به بخش هوایی را به شدت محدود می کند (Terry et al., 2000). در نتیجه، غلظت فسفر در بخش هوایی از ۰/۲۹ درصد در خاک بدون سلیوم به ۰/۰۵ درصد در سطح ۳۲ میلی گرم سلیوم در کیلوگرم کاهش یافت. به طور هم زمان، تجمع فسفر در ریشه افزایش چشمگیری نشان داد و به ۰/۹۲ درصد رسید که احتمالاً ناشی از محبوس سازی فسفر در واکوئل ها یا اتصال آن به پروتئین ها است. تجمع ترکیبات فسفوری در ریشه به عنوان یک پاسخ حفاظتی در برابر تنش اکسیداتیو القا شده توسط سلیوم است (Schachtman & Shin, 2007). چنین تفکیک درون بافتی فسفر با نتایج مطالعاتی همخوانی دارد که نشان داده اند تنش سمی موجب نگهداشت فسفر در ریشه می شود تا سنتز ATP و پایداری متابولیکی سلول های ریشه حفظ گردد (Hermans et al., 2006).

نوع جاذب مصرف شده نقش تعیین کننده ای در تعدیل پویایی فسفر ایفا می کند، زیرا از یک سو فراهمی سلیوم و از سوی دیگر دسترسی فسفر را تحت تأثیر قرار می دهد. کامپوزیت $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{CMCh}$ به دلیل داشتن ظرفیت بالا برای اتصال به اکسی آنیون ها از طریق گروه های هیدروکسیل سطحی Fe_3O_4 و وجود گروه های عاملی کربوکسیل و آمینی در CMCh که کلات سازی سلیوم را تقویت می کنند، بیشترین کارایی را در تثبیت سلیوم از خود نشان می دهد (Yamani et al., 2016). با این حال، تمایل ذاتی Fe_3O_4 به یون PO_4^{3-} نیز موجب کاهش فراهمی فسفر می شود و در نتیجه، غلظت فسفر در بخش هوایی در حد میانی باقی می ماند؛ به طوری که در سطح ۳۲ میلی گرم سلیوم در کیلوگرم، غلظت فسفر شاخساره به حدود ۰/۱۷ درصد محدود شد. نانوذرات Fe_3O_4 که سلیوم و فسفر را به صورت غیرانتخابی و عمده تاً از طریق تبادل لیگاند جذب می کنند، بیشترین کاهش فسفر بخش هوایی را نشان دادند و غلظت آن را تا ۰/۱۰ درصد کاهش دادند (Ma et al., 2018). در مقابل، CMCh اگرچه در مقایسه با مواد مبتنی بر Fe_3O_4 کارایی کمتری در تثبیت سلیوم دارد، اما به دلیل تمایل بیشتر به جذب اکسی آنیون های سلیوم نسبت به فسفات، تداخل کمتری با فراهمی فسفر ایجاد می کند. افزون بر این، گروه های کربوکسیل CMCh می توانند کاتیون هایی نظیر Fe^{3+} و Al^{3+} را کلات سازی کرده و از تشکیل رسوبات نامحلول فسفات جلوگیری کنند؛ فرایندی که

منجر به افزایش تحرک و فراهمی فسفر در محلول خاک می شود (Zhang et al., 2023). این سازوکار، بازیابی بهتر فسفر بخش هوایی (۲۲/۰ درصد) را در سطح ۳۲ میلی گرم سلیوم در کیلوگرم در تیمار مصرف CMCh توضیح می دهد. کارایی CMCh به شدت به مقدار مصرف آن وابسته است. افزایش میزان مصرف CMCh موجب افزایش تثبیت سلیوم می شود، اما مصرف بیش از حد آن (بیش از ۱ درصد) می تواند با اشباع جایگاه های اتصال سلیوم و کلات سازی کاتیون های ضروری نظیر Ca^{2+} و Mg^{2+} ، به طور غیرمستقیم انحلال فسفات را افزایش داده و تعادل تغذیه ای خاک را بر هم زند (Tripathi et al., 2017). در مقابل، مصرف مقادیر بالای Fe_3O_4 می تواند منجر به تثبیت بیش از حد فسفر شود و حتی در خاک های بدون آلودگی سلیوم نیز کمبود فسفر را تشدید کند. این نتایج بر اهمیت بهینه سازی نوع و مقدار مصرف جاذب بر اساس سطح آلودگی سلیوم و وضعیت اولیه فسفر خاک تأکید دارند (Hawkesford et al., 2016). در شرایط سمیت شدید سلیوم، نگهداشت بالای فسفر در ریشه (۹۲/۰ درصد) بیانگر یک راهبرد سازگاری گیاه برای حفظ بقا، ترمیم غشاها و تداوم متابولیسم انرژی است، در حالی که کاهش هم زمان فسفر در بخش هوایی (۵/۰ درصد) نشان دهنده اولویت بندی متابولیسمی به نفع عملکردهای حیاتی ریشه است (Hermans et al., 2006). CMCh با کاهش تولید گونه های فعال اکسیژن و تعدیل تنش اکسیداتیو (Farouk et al., 2011) امکان بازیابی نسبی فسفر بخش هوایی تا ۲۲/۰ درصد را در سطح ۳۲ میلی گرم سلیوم در کیلوگرم فراهم می سازد. در سطوح پایین تر سلیوم (۲ میلی گرم در کیلوگرم)، مصرف ۱ درصد CMCh با جذب مؤثر مقادیر کم سلیوم بدون ایجاد اختلال در جذب فسفر، غلظت فسفر بخش هوایی را به ۴۶/۰ درصد افزایش داد. این پاسخ بیانگر اثر دوجبهی سلیوم (هورمسیس) است که در آن سلیوم در غلظت های کم به عنوان ریزمغذی عمل کرده و رشد و تغذیه گیاه را بهبود می بخشد (Feng et al., 2013). از دیدگاه کاربردی، مصرف CMCh در سطح ۱ درصد برای خاک های با آلودگی متوسط سلیوم (۲ تا ۸ میلی گرم در کیلوگرم) گزینه ای بهینه محسوب می شود، زیرا تعادلی میان تثبیت سلیوم و فراهمی فسفر برقرار می کند (Zhang et al., 2023). در مقابل، استفاده از Fe_3O_4 در خاک هایی با فسفر اولیه پایین توصیه نمی شود، زیرا تمایل بالای این ماده به تثبیت فسفر می تواند محدودیت های تغذیه ای شدیدی ایجاد کند. در زمینه گیاه پالایی، کامپوزیت های Fe_3O_4 /CMCh به ویژه در خاک های با آلودگی شدید سلیوم کارایی بالایی دارند، زیرا ضمن جذب مؤثر سلیوم، حداقل فسفر مورد نیاز برای رشد پایه گیاه را حفظ می کنند (Guo et al., 2023). از منظر پایش زیستی، کاهش غلظت فسفر بخش هوایی به کمتر از ۱/۰ درصد می تواند به عنوان شاخصی روشن از سمیت حاد سلیوم تلقی شود و نیاز به اقدامات اصلاحی فوری را نشان دهد (Hawkesford et al., 2016). در جمع بندی، بازتوزیع فسفر در ذرت تابعی از رقابت یونی سلیوم، گزینش پذیری جاذب ها و سازگاری های فیزیولوژیک گیاه در شرایط تنش است. در میان جاذب های بررسی شده، CMCh بیشترین کارایی را در حفظ و افزایش فراهمی فسفر تحت تنش سلیوم نشان داد، در حالی که Fe_3O_4 خطر تثبیت بیش از حد عناصر غذایی را به همراه دارد. برای مدیریت پایدار خاک های کشاورزی آلوده به سلیوم، پژوهش های آینده باید اثرات بلندمدت این جاذب ها بر پویایی عناصر غذایی، جوامع میکروبی خاک و عملکرد گیاه را در مقیاس مزرعه به طور جامع ارزیابی کنند.

اثر سلیوم و جاذب ها بر پویایی پتاسیم در بافت های گیاه ذرت

پویایی پتاسیم در ریشه و بخش هوایی گیاه ذرت تحت تأثیر سطوح مختلف سلیوم خاک و نوع و مقدار مصرف جاذب قرار گرفت. این تاثیر نتیجه برهم کنش میان رقابت یونی، ویژگی های جاذب و پاسخ های فیزیولوژیک گیاه به تنش است. در تیمار حاوی ۲ میلی گرم سلیوم در کیلوگرم خاک همراه با یک درصد جاذب مگنتیت-کربوکسی متیل کیتوسان، بیشترین رشد ذرت و بالاترین غلظت پتاسیم در ریشه (۴/۷ درصد) و بخش هوایی (۶/۳ درصد) مشاهده شد. این افزایش را می توان با اثر هم زمان سلیوم و جاذب توضیح داد. سلیوم در غلظت های پایین می تواند رشد گیاه و فعالیت جذب عناصر غذایی را تحریک کند (Dou et al., 2021). علاوه بر این، جزء کربوکسی متیل کیتوسان در جاذب به دلیل دارا بودن گروه های عاملی کربوکسیل و هیدروکسیل، می تواند برهم کنش های تبادلی در ناحیه ریشه را تقویت کرده و دسترسی ریشه به پتاسیم موجود در محلول خاک را افزایش دهد. بنابراین، غلظت نسبتاً بالاتر پتاسیم در این تیمار را می توان ناشی از بهبود دسترسی پذیری و جذب پتاسیم دانست، نه تجمع غیرعادی آن. مقادیر کم سلیوم موجب بهبود وضعیت تغذیه ای گیاه می شود. این پدیده نشان می دهد که سلیوم در غلظت های پایین می تواند با افزایش نفوذپذیری غشای ریشه و تحریک ناقل های K^+ ، از جمله کانال $AKT1$ ، از طریق مسیرهای سیگنال دهی اکسایش-کاهش، جذب پتاسیم را تقویت کند (Feng et al., 2013).

در مقابل، با افزایش غلظت سلیوم خاک تا ۳۲ میلی گرم در کیلوگرم، غلظت پتاسیم در ریشه (۱۶/۱ درصد) و بخش هوایی (۳۸/۲ درصد) به طور محسوسی کاهش یافت. این کاهش به بروز تنش اکسیداتیو القا شده توسط سلیوم نسبت داده می شود؛ به طوری که سلیوم اضافی با افزایش تولید گونه های فعال اکسیژن (ROS)، یکپارچگی غشاها و ریشه را مختل کرده و انتقال فعال و وابسته به ATP یون K^+



را محدود می‌کند (Van Hoewyk, 2013). افزون بر این، شباهت ساختاری سلنات با سولفات (SO_4^{2-}) می‌تواند موجب اختلال در عملکرد ناقل‌های سولفات شود که مسیرهای تنظیمی مشترکی با جذب پتاسیم دارند و بدین ترتیب، جذب K^+ را به‌طور غیرمستقیم کاهش می‌دهد (White & Broadley, 2003). نوع جاذب مصرف‌شده نقش تعیین‌کننده‌ای در فراهمی پتاسیم داشت. در این میان، CMCh عملکرد بهتری نسبت به Fe_3O_4 و کامپوزیت $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{CMCh}$ نشان داد و در سطح ۲ میلی‌گرم سلنیوم در کیلوگرم، غلظت پتاسیم بخش هوایی را به $6/31$ درصد رساند؛ در حالی که این مقدار در تیمار Fe_3O_4 حدود $4/87$ درصد بود. گروه‌های عاملی کربوکسیل و آمینی CMCh قادرند کاتیون‌های مزاحم نظیر کلسیم، Al^{3+} و Fe^{3+} را که با K^+ برای جذب در سطح ریشه رقابت می‌کنند، کلات‌سازی کنند و بدین ترتیب، رقابت یونی به زیان پتاسیم را کاهش دهند (Chandrasekaran & Paramasivan, 2024). در مقابل، نانوذرات Fe_3O_4 از طریق برهم‌کنش‌های الکترواستاتیکی و رسوب‌گذاری وابسته به pH، موجب کاهش فراهمی پتاسیم شدند؛ به‌گونه‌ای که غلظت پتاسیم به $3/58$ درصد در ریشه و $4/87$ درصد در بخش هوایی کاهش یافت. گروه‌های هیدروکسیل سطحی Fe_3O_4 در خاک‌های خنثی تا قلیایی بار منفی می‌یابند و می‌توانند جذب ضعیف K^+ را تسهیل کنند (Calatayud et al., 2014). افزون بر این، Fe_3O_4 با افزایش pH خاک، شرایط را برای رسوب پتاسیم به‌صورت ترکیبات کم‌محلول، فراهم می‌سازد (Sposito, 2008). کامپوزیت $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{CMCh}$ توانست تا حدی این اثرات منفی را به‌واسطه ظرفیت تبادل کاتیونی CMCh کاهش دهد، اما در میزان مصرف ۱ درصد، غلبه رفتار Fe_3O_4 همچنان موجب کاهش پتاسیم بخش هوایی تا $5/62$ درصد شد (Yamani et al., 2016). مقدار مصرف جاذب نیز نقش مهمی در تعدیل پاسخ گیاه داشت. افزایش مقدار CMCh از $0/25$ درصد به ۱ درصد باعث افزایش غلظت پتاسیم بخش هوایی از $4/42$ درصد به $6/31$ درصد شد که به اشباع جایگاه‌های اتصال سلنیوم و آزاد شدن ظرفیت CMCh برای کلات‌سازی کاتیون‌های رقیب نسبت داده می‌شود (Kavitha et al., 2020). با این حال، افزایش پتاسیم در ریشه از نظر آماری معنی‌دار نبود که احتمالاً به انتقال ترجیحی K^+ به بخش هوایی برای پشتیبانی از فتوسنتز و تنظیم روزه‌ها مربوط است (Schachtman & Shin, 2007). در مقابل، مصرف ۱ درصد کامپوزیت $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{CMCh}$ نسبت به مقادیر کمتر (مانند $0/5$ درصد) باعث کاهش پتاسیم بخش هوایی شد، زیرا جذب K^+ توسط Fe_3O_4 بر مزایای تبادل کاتیونی CMCh غلبه کرد (Ubani et al., 2024). Fe_3O_4 به‌تنهایی در تمام سطوح، حتی در خاک‌های بدون سلنیوم، باعث کاهش فراهمی پتاسیم شد که نشان‌دهنده نامناسب بودن آن برای خاک‌های دچار کمبود پتاسیم است. برهم‌کنش میان سطح سلنیوم خاک و نوع جاذب، این الگوها را روشن‌تر می‌سازد. در سطح ۲ میلی‌گرم سلنیوم در کیلوگرم، تثبیت سلنیوم توسط CMCh موجب کاهش سمیت و در نتیجه، عملکرد بهینه ناقل‌های K^+ شد (Farouk et al., 2011). جایگزینی CMCh با $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{CMCh}$ یا Fe_3O_4 دوباره محدودیت پتاسیم را تشدید کرد، زیرا Fe_3O_4 هم‌زمان سلنیوم و پتاسیم را جذب می‌کند. در سطح 32 میلی‌گرم سلنیوم در کیلوگرم خاک و عدم مصرف جاذب، غلظت پتاسیم در بخش هوایی گیاه کاهش و به $2/38$ درصد رسید که ضرورت استفاده از اصلاح‌کننده‌ها برای کاهش رقابت سلنیوم-پتاسیم را نشان می‌دهد. حتی تحت این تنش شدید، غلظت پتاسیم در بخش هوایی بیشتر از ریشه باقی ماند ($2/38$ درصد در برابر $1/16$ درصد) که بیانگر اولویت‌دهی متابولیکی به اندام‌های هوایی برای حفظ فرایندهای حیاتی نظیر فتوسنتز است (Hermans et al., 2006). در خاک‌های بدون سلنیوم نیز CMCh موجب افزایش غلظت پتاسیم ریشه و بخش هوایی شد که این امر به بهبود ساختار خاک و افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی نسبت داده می‌شود (Sharp et al., 2013). در مقابل، Fe_3O_4 باعث کاهش فراهمی پتاسیم شد که ناشی از جذب الکترواستاتیکی و رسوب‌گذاری وابسته به pH بود (Ashraf et al., 2019). رفتار کامپوزیت $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{CMCh}$ وابسته به مقدار مصرف بود، به‌طوری که در مقادیر $0/5 \geq$ درصد اثرات نسبتاً مطلوب و در مصرف ۱ درصد اثرات نامطلوب بر پتاسیم مشاهده شد. یافته‌های این مطالعه پیامدهای کاربردی مهمی برای مدیریت کشاورزی در خاک‌های دارای سطوح مختلف سلنیوم دارد. در خاک‌های با آلودگی متوسط سلنیوم (۲ تا ۸ میلی‌گرم در کیلوگرم)، مصرف ۱ درصد CMCh می‌تواند با بهینه‌سازی جذب پتاسیم، هم‌زمان اثرات سمی سلنیوم را کاهش دهد. در خاک‌های با آلودگی شدید سلنیوم (32 میلی‌گرم در کیلوگرم)، استفاده از کامپوزیت $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{CMCh}$ در مقادیر پایین‌تر ($0/5 \geq$ درصد) می‌تواند تعادلی میان تثبیت سلنیوم و حفظ پتاسیم برقرار سازد. در مقابل، در خاک‌های بدون سلنیوم، مصرف Fe_3O_4 توصیه نمی‌شود، زیرا می‌تواند از طریق جذب الکترواستاتیکی و رسوب‌گذاری وابسته به pH موجب کاهش پتاسیم شود، در حالی که CMCh گزینه‌ای مناسب برای افزایش فراهمی پتاسیم و بهبود وضعیت تغذیه‌ای گیاه است.

در جمع‌بندی، این مطالعه نشان داد که مقادیر کم سلنیوم از طریق اثر هورمسیس جذب پتاسیم در ذرت را افزایش می‌دهد، در حالی که غلظت‌های بالای سلنیوم با القای تنش اکسیداتیو، انتقال پتاسیم را مختل می‌کنند. CMCh به‌عنوان یک اصلاح‌کننده کارآمد، با کلاته کردن کاتیون‌های مزاحم و کاهش سمیت سلنیوم، تغذیه پتاسیمی گیاه را بهینه می‌سازد. در مقابل، Fe_3O_4 با کاهش فراهمی پتاسیم،

محدودیت‌های تغذیه‌ای ایجاد می‌کند و برای خاک‌های کم‌پتاسیم مناسب نیست. پژوهش‌های آینده باید بر ارزیابی اثرات بلندمدت این جاذب‌ها بر چرخه پتاسیم خاک و جوامع میکروبی خاک تمرکز کنند تا مدیریت پایدار عناصر غذایی در بوم‌سامانه‌های کشاورزی تحت تأثیر سلیوم به‌طور دقیق بهینه‌سازی شود.

اثر سلیوم و جاذب‌ها بر غلظت روی ریشه و بخش هوایی گیاه ذرت

نتایج این پژوهش نشان داد که غلظت روی ریشه و بخش هوایی گیاه ذرت به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر سطح سلیوم خاک، نوع و مقدار مصرف جاذب و اثر متقابل آن‌ها قرار دارد. تغییرات مشاهده‌شده در پویایی روی حاصل برهم‌کنش مجموعه‌ای از فرایندها شامل رقابت یونی، ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی جاذب‌ها و پاسخ‌های فیزیولوژیک گیاه به تنش سلیوم است.

در سطح پایین سلیوم خاک (۲ میلی‌گرم در کیلوگرم)، بیشترین غلظت روی در ریشه و بخش هوایی گیاه مشاهده شد که بیانگر بروز اثر دووجهی سلیوم (هورمسیس) است. در این شرایط، مقادیر کم سلیوم با افزایش نفوذپذیری غشاهای ریشه و تحریک فعالیت ناقل‌های یونی، جذب ریزمغذی‌ها از جمله روی را بهبود می‌بخشد (Feng et al., 2013). در مقابل، افزایش غلظت سلیوم تا ۳۲ میلی‌گرم در کیلوگرم موجب کاهش شدید غلظت روی شد. این کاهش به تنش اکسیداتیو القا شده توسط سلیوم نسبت داده می‌شود که با آسیب به غشاهای سلولی، اختلال در عملکرد ناقل‌های وابسته به ATP و مهار انتقال ریزمغذی‌ها همراه است (Schiavon & Pilon-Smits, 2017; Lima, 2016). افزون بر این، گونه‌های سلنات و سلنیت می‌توانند از طریق تغییر شرایط شیمیایی ریزوسفر یا تأثیر منفی بر بیان ژن‌های مرتبط با ناقل‌های فلزی، جذب روی را محدود کنند (White & Broadley, 2003; El-Ramady et al., 2015). نوع جاذب مصرف‌شده نقش مهمی در تعدیل این اثرات داشت. در میان جاذب‌ها، کامپوزیت $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{CMCh}$ بیشترین غلظت روی را در ریشه و بخش هوایی گیاه ایجاد کرد و پس از آن Fe_3O_4 و سپس CMCh به‌تنهایی قرار گرفتند. عملکرد برتر $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{CMCh}$ ناشی از سازوکار هم‌افزای اجزای آن است؛ به‌طوری که Fe_3O_4 با تثبیت مؤثر سلیوم از طریق تبادل لیگاند با گروه‌های هیدروکسیل سطحی، شدت تنش سلیوم را کاهش می‌دهد (López de Arroyabe Loyo et al., 2008). در حالی که CMCh با دارا بودن گروه‌های کربوکسیل و آمینی، از طریق کلات‌سازی و افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی، فراهمی یون Zn^{2+} را حفظ می‌کند (Mourya et al., 2010; Sun & Wang, 2006). این هم‌زمانی کاهش سمیت سلیوم و حفظ تحرک روی، شرایط مطلوب‌تری برای جذب این ریزمغذی فراهم می‌سازد. در مقابل، Fe_3O_4 به‌تنهایی، با وجود توان بالای تثبیت سلیوم، می‌تواند روی را نیز از طریق جذب الکترواستاتیکی یا رسوب‌گذاری وابسته به pH تثبیت کرده و فراهمی آن را کاهش دهد (Sposito, 2008; Nguyen et al., 2021). CMCh به‌تنهایی اگرچه تحرک روی را افزایش می‌دهد، اما به دلیل نداشتن جایگاه‌های مؤثر برای جذب آنیون‌های سلیوم، در شرایط تنش شدید سلیوم کارایی کمتری در کاهش سمیت از خود نشان می‌دهد (Palomo-Siguero, 2016). افزایش مقدار مصرف جاذب تا ۱ درصد، به‌ویژه در تیمار $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{CMCh}$ ، موجب افزایش معنی‌دار غلظت روی شد که به افزایش تعداد گروه‌های عاملی در دسترس برای تثبیت سلیوم و حفظ روی نسبت داده می‌شود. با این حال، در خاک‌های بدون سلیوم، مصرف جاذب‌ها—به‌خصوص Fe_3O_4 —باعث کاهش غلظت روی در گیاه شد. این موضوع احتمالاً ناشی از جذب رقابتی Zn^{2+} بر سطح جاذب‌ها یا تشکیل رسوبات کم‌محلول روی است که در خاک‌های غنی از ترکیبات آهن به‌خوبی گزارش شده است (Wang et al., 2015). این نتایج نشان می‌دهد که مصرف جاذب‌ها در خاک‌های غیرآلوده باید با دقت و بر اساس نیاز واقعی خاک انجام شود تا از تثبیت عناصر غذایی جلوگیری گردد. برهم‌کنش میان سطح سلیوم خاک و نوع و مقدار جاذب نیز اهمیت سازوکاری بالایی داشت. در سطح ۲ میلی‌گرم سلیوم در کیلوگرم، مصرف ۱ درصد $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{CMCh}$ بیشترین غلظت روی را در ریشه (۷۷/۴۵ میلی‌گرم در کیلوگرم) و بخش هوایی (۹۴/۴۹ میلی‌گرم در کیلوگرم) ایجاد کرد که نشان‌دهنده کاهش مؤثر سمیت سلیوم و بهبود فراهمی روی است. جایگزینی این کامپوزیت با Fe_3O_4 یا CMCh به‌تنهایی موجب کاهش غلظت روی شد و برتری عملکرد کامپوزیت را تأیید کرد. در مقابل، در سطح بالای سلیوم (۳۲ میلی‌گرم در کیلوگرم)، حتی کاربرد جاذب‌ها نیز نتوانست به‌طور کامل از کاهش روی جلوگیری کند که نشان می‌دهد شدت تنش اکسیداتیو از ظرفیت اصلاحی این مواد فراتر رفته است (Hasanuzzaman et al., 2020). همچنین، در شرایط بدون سلیوم، مصرف جاذب‌ها—به‌ویژه در مقادیر بالا—نسبت به خاک بدون جاذب باعث کاهش جذب روی شد که بر ضرورت بهینه‌سازی مقدار مصرف تأکید دارد (El-Ramady et al., 2015). از دیدگاه فیزیکوشیمیایی، Fe_3O_4 سلیوم را عمدتاً از طریق تشکیل کمپلکس‌های درون‌کره‌ای در جایگاه‌های هیدروکسیل سطحی تثبیت می‌کند (Ippolito et al., 2009)، اما این سطوح می‌توانند کاتیون‌هایی مانند Zn^{2+} را نیز جذب کنند. در مقابل، CMCh با ظرفیت بالای تبادل کاتیونی، تحرک روی را افزایش می‌دهد، ولی نقش محدودی در جذب آنیون‌های سلیوم دارد. بنابراین، ترکیب این دو ماده در قالب $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{CMCh}$ سازوکاری متعادل برای مدیریت هم‌زمان سمیت سلیوم و تغذیه روی فراهم می‌کند. از منظر کاربردی، در خاک‌های



با آلودگی متوسط سلیوم (۲ تا ۸ میلی گرم در کیلوگرم)، مصرف ۱ درصد $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{CMCh}$ گزینه‌ای مناسب برای کاهش سمیت سلیوم و بهبود تغذیه روی محسوب می‌شود. در خاک‌های با آلودگی شدید سلیوم (≤ 32 میلی گرم در کیلوگرم)، به‌کارگیری راهبردهای مکمل مانند انتخاب ارقام متحمل، مدیریت تغذیه‌ای مرحله‌ای یا تقویت سامانه آنتی‌اکسیدانی گیاه ضروری به نظر می‌رسد. در خاک‌های بدون سلیوم نیز باید از مصرف بی‌رویه جاذب‌ها، به‌ویژه مواد مبتنی بر آهن، پرهیز شود تا از بروز کمبود روی جلوگیری گردد.

در مجموع، پویایی روی در ذرت تابع برهم‌کنش پیچیده میان سطح سلیوم خاک، ویژگی‌های جاذب‌ها و پاسخ‌های فیزیولوژیک گیاه است. مقادیر کم سلیوم از طریق اثر هورمسیس جذب روی را افزایش می‌دهند، در حالی که غلظت‌های بالا با ایجاد تنش اکسیداتیو و رقابت یونی، جذب آن را محدود می‌کنند. در این میان، کامپوزیت $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{CMCh}$ متعادل‌ترین عملکرد را در کاهش سمیت سلیوم و حفظ فراهمی روی نشان داد. این نتایج بر ظرفیت اصلاح‌کننده‌های مهندسی‌شده برای مدیریت هم‌زمان آلودگی و تغذیه گیاه تأکید دارد و زمینه را برای توسعه راهبردهای پایدار مدیریت خاک در سامانه‌های کشاورزی فراهم می‌سازد.

اثر سلیوم کل خاک، نوع و مقدار جاذب و اثر متقابل آنها بر توزیع آهن در بافت‌های گیاه ذرت

نتایج این پژوهش نشان داد که سطوح مختلف سلیوم خاک، نوع و مقدار جاذب مصرفی و برهم‌کنش میان آن‌ها، به‌طور معنی‌داری غلظت و الگوی توزیع آهن را در ریشه و بخش هوایی گیاه ذرت تحت تأثیر قرار می‌دهند. تحلیل آماری داده‌ها حاکی از آن بود که اثرات اصلی هر یک از این عوامل و همچنین اثرات متقابل آن‌ها در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار است که بیانگر حساسیت بالای هموستازی آهن در ذرت به تغییرات شیمیایی محیط ریزوسفر و تیمارهای اصلاحی خاک است. این نتایج بر نقش تعیین‌کننده مدیریت هم‌زمان تنش سلیوم و نوع و مقدار جاذب در تنظیم تغذیه آهن تأکید می‌کند.

یکی از یافته‌های برجسته این مطالعه، مشاهده الگوی توزیع معکوس آهن میان ریشه و اندام هوایی در امتداد افزایش غلظت سلیوم خاک بود. در سطح پایین سلیوم (۲ میلی گرم در کیلوگرم خاک)، بیشترین غلظت آهن در اندام هوایی با مقدار $167/41$ میلی گرم در کیلوگرم وزن خشک ثبت شد، در حالی که غلظت آهن ریشه به کمترین مقدار خود، یعنی $45/60$ میلی گرم در کیلوگرم وزن خشک، کاهش یافت. در مقابل، در بالاترین سطح سلیوم خاک (۳۲ میلی گرم در کیلوگرم)، این روند به‌طور کامل معکوس شد؛ به‌گونه‌ای که غلظت آهن ریشه به $106/41$ میلی گرم در کیلوگرم افزایش یافت و هم‌زمان غلظت آهن اندام هوایی به $42/28$ میلی گرم در کیلوگرم وزن خشک کاهش پیدا کرد. این تغییر جهت نشان می‌دهد که مقادیر کم سلیوم می‌تواند انتقال آهن به اندام‌های هوایی را تسهیل کنند، در حالی که غلظت‌های بالای سلیوم احتمالاً با اختلال در فرایندهای جذب و جابجایی درون‌گیاهی، موجب تثبیت آهن در ریشه و محدود شدن انتقال آن به شاخساره می‌شوند. از دیدگاه فیزیولوژیک، این پاسخ می‌تواند به تأثیر سلیوم بر سامانه‌های تنظیم اکسایش-کاهش و بیان ناقل‌های آهن نسبت داده شود. در سطوح پایین سلیوم، افزایش فعالیت آنزیم آهن (III) ردوکتاز و القای بیان ناقل‌هایی نظیر IRT1 و FRO2، جذب آهن دوزوفیتی و انتقال آن به اندام‌های هوایی را تقویت می‌کند. در مقابل، تجمع بیش‌ازحد سلیوم با القای تنش اکسیداتیو، کاهش بیان آنزیم نیکوتیان‌آمین سنتاز و اختلال در بارگذاری آهن در آوند آبکش، موجب برهم‌خوردگی هموستازی آهن و کاهش تحرک آن در گیاه می‌شود. الگوهای مشابهی از تداخل سلیوم با جذب و انتقال آهن در گیاهانی نظیر برنج، اسفناج و گندم نیز گزارش شده است که از نتایج حاضر پشتیبانی می‌کند. جاذب‌های مورد استفاده در این پژوهش نقش مهمی در تعدیل توزیع آهن ایفا کردند و هم نوع جاذب و هم مقدار مصرف آن تعیین‌کننده بود. به‌طور کلی، افزایش مقدار جاذب از $0/5$ درصد به ۱ درصد باعث کاهش غلظت آهن در ریشه و افزایش آن در اندام هوایی شد که نشان می‌دهد جاذب‌ها با تنظیم فراهمی آهن در ریزوسفر و تسهیل انتقال درون‌گیاهی، الگوی توزیع این عنصر را تغییر می‌دهند. کربوکسی‌متیل کیتوسان (CMCh) بیشترین کاهش غلظت آهن ریشه را ایجاد کرد که احتمالاً به ظرفیت بالای این پلیمر در تثبیت یون‌های آهن در ناحیه ریزوسفر و تشکیل کمپلکس‌های پایدار مربوط است. با این حال، اثر CMCh بر افزایش آهن اندام هوایی محدود بود و نشان می‌دهد که بخشی از آهن تثبیت‌شده در ناحیه ریشه برای انتقال دوربرد در دسترس قرار نگرفته است. در مقابل، کامپوزیت $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{CMCh}$ مؤثرترین تیمار در افزایش غلظت آهن اندام هوایی بود؛ به‌طوری‌که در تیمار ۲ میلی گرم سلیوم در کیلوگرم خاک همراه با مصرف ۱ درصد این کامپوزیت، غلظت آهن شاخساره به $200/02$ میلی گرم در کیلوگرم وزن خشک رسید. این عملکرد برتر ناشی از هم‌افزایی دو جزء کامپوزیت است؛ به‌گونه‌ای که نانوذرات Fe_3O_4 منبعی از آهن قابل‌دسترس فراهم می‌کنند و CMCh از طریق کلات‌سازی Fe^{3+} ، انتقال آن در آوند چوبی را تسهیل می‌نماید. کاربرد Fe_3O_4 به‌تنهایی عمدتاً موجب افزایش غلظت آهن در ریشه شد، به‌ویژه در مقادیر پایین جاذب. برای مثال، در تیمار ۳۲ میلی گرم سلیوم در کیلوگرم خاک همراه با $0/25$ درصد Fe_3O_4 ، بیشترین غلظت آهن ریشه ($134/56$ میلی گرم در کیلوگرم وزن خشک) ثبت شد. این پدیده احتمالاً به آزادسازی موضعی یون‌های Fe^{2+} و Fe^{3+} و تبادل یونی در مجاورت ریشه

مربوط است. با این حال، محدود بودن افزایش آهن در بخش هوایی نشان می‌دهد که بخش عمده آهن در ریشه تثبیت شده و انتقال مؤثری به شاخساره صورت نگرفته است. اثر متقابل سلیوم و جاذب‌ها نقشی تعیین‌کننده در شکل‌دهی هموستازی آهن داشت و پاسخ گیاه را فراتر از اثرات منفرد هر عامل تغییر داد. ترکیب سطح پایین سلیوم با مصرف ۱ درصد $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{CMCh}$ بیشترین غلظت آهن اندام هوایی را ایجاد کرد که بیانگر کاهش سمیت سلیوم و افزایش کارایی جذب و انتقال آهن است. در مقابل، در تیمار سلیوم بالا بدون مصرف جاذب، غلظت آهن اندام هوایی به شدت کاهش یافت و به $14/77$ میلی‌گرم در کیلوگرم وزن خشک رسید که نشان‌دهنده اثر مخرب تنش کنترل‌نشده سلیوم بر جابجایی آهن است. افزودن Fe_3O_4 در این شرایط با تثبیت هم‌زمان آهن و سلیوم در ناحیه ریشه، نوعی تثبیت گیاهی ایجاد کرد که از انتقال این عناصر به اندام هوایی و بروز سمیت شدید جلوگیری نمود. در تیمارهای فاقد سلیوم، مصرف جاذب‌ها—به‌ویژه در مقادیر بالا—موجب کاهش غلظت آهن در هر دو بخش ریشه و اندام هوایی شد. این نتیجه نشان می‌دهد که مصرف بیش‌ازحد جاذب‌ها می‌تواند آهن قابل‌دسترس را در ریزوسفر تثبیت کرده و فراهمی آن برای گیاه را کاهش دهد. از این رو، کاربرد جاذب‌ها باید به‌گونه‌ای مدیریت شود که تعادل میان ظرفیت تثبیت و دسترسی عناصر غذایی حفظ گردد. از دیدگاه کاربردی، نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که کامپوزیت $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{CMCh}$ در شرایط سلیوم پایین می‌تواند گزینه‌ای مناسب برای افزایش آهن اندام هوایی و حتی غنی‌سازی زیستی باشد. در مقابل، در خاک‌های با سطوح بالای سلیوم، کاربرد Fe_3O_4 به‌تنهایی یا در قالب کامپوزیت، با تثبیت آهن و سلیوم در ریشه، نقش مؤثری در تثبیت گیاهی و کاهش خطر انتقال این عناصر به زنجیره غذایی ایفا می‌کند. تفاوت پاسخ آهن و روی نیز بر ضرورت مدیریت اختصاصی هر ریزمغذی تأکید دارد، زیرا آهن به‌شدت تحت تأثیر شرایط اکسایش—کاهش و برهم‌کنش‌های یونی قرار می‌گیرد. در مجموع، این مطالعه نشان داد که برهم‌کنش میان سلیوم خاک و جاذب‌های مختلف نقش تعیین‌کننده‌ای در تنظیم جذب، توزیع و تثبیت آهن در ذرت دارد. کامپوزیت $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{CMCh}$ در شرایط سلیوم پایین با افزایش آهن اندام هوایی، و Fe_3O_4 در شرایط سلیوم بالا با ایجاد تثبیت گیاهی، هر یک کارکرد اصلاحی متمایزی از خود نشان دادند. این بینش‌ها می‌تواند مبنای توسعه راهبردهای هدفمند مدیریت ریزمغذی‌ها و کاهش تنش‌های غیرزیستی در سامانه‌های کشاورزی باشد. پژوهش‌های آینده لازم است بر بررسی بیان مولکولی ناقل‌های آهن و ارزیابی عملکرد این جاذب‌ها در مقیاس مزرعه تمرکز کنند.

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که کامپوزیت $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{CMCh}$ به‌عنوان یک جاذب بسیار کارآمد، توان بالایی در کاهش سمیت سلیوم در خاک‌های آهکی آلوده دارد. در بالاترین سطح سلیوم خاک (32 میلی‌گرم در کیلوگرم)، مصرف ۱ درصد از این کامپوزیت توانست حدود ۹۰ درصد سلیوم را تثبیت کند و به‌طور معنی‌داری سلیوم قابل‌جذب خاک و جذب گیاهی آن را کاهش دهد. عملکرد $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{CMCh}$ به‌مراتب بهتر از Fe_3O_4 و CMCh به‌تنهایی بود و این برتری به بهبود محسوس شاخص‌های رشد ذرت منجر شد. افزایش غلظت سلیوم خاک از ۰ تا 32 میلی‌گرم در کیلوگرم، به‌طور طبیعی باعث افزایش سلیوم قابل‌جذب، تجمع آن در بافت‌های گیاهی و در نهایت کاهش رشد شد؛ با این حال، کاربرد جاذب‌ها—به‌ویژه $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{CMCh}$ —توانست این اثرات منفی را تا حد زیادی خنثی کند. بهترین وضعیت رشد گیاه در تیمار ۲ میلی‌گرم سلیوم در کیلوگرم خاک همراه با مصرف ۱ درصد $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{CMCh}$ مشاهده شد، به‌گونه‌ای که سلیوم قابل‌جذب خاک در سطح پایینی باقی ماند ($0/29$ میلی‌گرم در کیلوگرم) و غلظت سلیوم در بافت‌های گیاهی نیز محدود بود ($0/68$ تا $0/91$ میلی‌گرم در کیلوگرم وزن خشک). این یافته به‌خوبی بیانگر تأثیر دوجبهی سلیوم (هورمسیس) در مقادیر کم و کارایی بالای کامپوزیت در کنترل فراهمی آن است. بررسی پویایی عناصر غذایی نشان داد که پاسخ عناصر مختلف به سلیوم و جاذب‌ها به‌شدت وابسته به شرایط است. غلظت روی و پتاسیم در سطح ۲ میلی‌گرم سلیوم در کیلوگرم خاک و در حضور جاذب‌ها به بیشینه خود رسید، در حالی که آهن و فسفر الگوی متفاوتی از خود نشان دادند؛ به‌طوری‌که در غلظت‌های بالای سلیوم، تجمع آن‌ها در ریشه افزایش یافت و مقدارشان در بخش هوایی کاهش پیدا کرد. مصرف جاذب‌ها، به‌ویژه $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{CMCh}$ ، توانست انتقال آهن و فسفر به بخش هوایی را در شرایط سلیوم بالا بهبود دهد. با این حال، در خاک‌های بدون سلیوم، کاربرد جاذب‌ها موجب کاهش فراهمی فسفر، روی و آهن شد که نشان‌دهنده وجود پیامدهای جانبی بالقوه در خاک‌های غیرآلوده است و بر ضرورت مدیریت دقیق مقدار مصرف تأکید دارد. عملکرد برتر $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{CMCh}$ در افزایش جذب روی ($\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{CMCh} > \text{Fe}_3\text{O}_4 > \text{CMCh}$) و تنظیم توزیع آهن و فسفر، نقش چندمنظوره این کامپوزیت را در ایجاد تعادل میان اصلاح خاک و تغذیه گیاه برجسته می‌سازد. در مجموع، نتایج این مطالعه استفاده از $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{CMCh}$ را به‌عنوان راهکاری پایدار و مؤثر برای مدیریت خاک‌های آهکی آلوده به سلیوم پیشنهاد می‌کند و تیمار ۲ میلی‌گرم سلیوم در کیلوگرم خاک همراه با ۱ درصد $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{CMCh}$



را به عنوان بهترین گزینه از نظر رشد گیاه و تعادل عناصر غذایی معرفی می نماید. با این حال، در خاک های فاقد آلودگی سلیوم، مصرف این جاذب باید با احتیاط و بر اساس نیاز واقعی خاک انجام شود تا از کاهش ناخواسته فراهمی عناصر غذایی جلوگیری گردد. این پژوهش گامی مؤثر در جهت تلفیق فناوری های جاذب با مدیریت زراعی برای اصلاح خاک های آلوده به عناصر بالقوه سمی به شمار می رود و بر اهمیت توجه به برهم کنش های اختصاصی میان عناصر غذایی و جاذب ها در سامانه خاک-گیاه تأکید دارد.

ملاحظات اخلاقی

حامی مالی

برای انجام این پژوهش، هیچ گونه کمک هزینه (گرنه) خاصی از نهادهای تأمین کننده مالی در بخش های عمومی، تجاری یا غیرانتفاعی دریافت نشده است.

مشارکت نویسندگان

مشارکت نویسندگان در مقاله تقریباً به شکل زیر باشد:

نویسنده اول: خاطره سرمستی: روش شناسی، تحقیق و بررسی، منابع، سازمان دهی داده ها.
نویسنده دوم: احمد گلچین: نگارش - پیش نویس اولیه، سرپرستی (نظارت)، روش شناسی، مفهوم سازی، منابع.
نویسنده سوم: مهران میثاقی: نگارش - بررسی و ویرایش، تحقیق و بررسی، منابع، نرم افزار، تحلیل رسمی.
تمامی نویسندگان نسخه منتشر شده ی این مقاله را مطالعه کرده و با آن موافقت نموده اند.

اعلامیه هوش مصنوعی مولد و فناوری های مبتنی بر هوش مصنوعی در فرایند نگارش
نویسندگان از هیچ نوع فناوری مبنی بر هوش مصنوعی در فرایند نگارش استفاده نکرده اند.

بیانیه دسترسی به داده ها

بیانیه دسترسی به داده ها و سیاست اشتراک گذاری داده ها به شرح زیر است:
داده هایی پژوهش حاضر از طریق درخواست از نویسندگان قابل دسترسی است.

سپاسگزاری

نویسندگان از دانشگاه زنجان (زنجان، ایران) بابت حمایت های مالی و فنی که موجب تسهیل در انجام این مطالعه گردید، کمال تشکر و قدردانی را دارند.

پیروی از اصول اخلاق پژوهش

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این پژوهش علمی رعایت نموده اند و این موضوع مورد تأیید همه آنها است.

تعارض منافع

بنا بر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

REFERENCES

- Abbas, H. S., & Krishnan, A. (2020). Magnetic nanosystems as a therapeutic tool to combat pathogenic fungi. *Advanced Pharmaceutical Bulletin*, 10 (4), 512. <https://doi.org/10.34172/apb.2020.063>
- Abd El-Monaem, E. M., Eltaweil, A. S., Elshishini, H. M., Hosny, M., Abou Alsoaud, M. M., Attia, N. F., ... & Omer, A. M. (2022). Sustainable adsorptive removal of antibiotic residues by chitosan composites: An insight into current developments and future recommendations. *Arabian Journal of Chemistry*, 15 (5), 103743. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2022.103743>
- Ahmad, M., Ahmed, S., Swami, B. L., & Ikram, S. (2015). Adsorption of heavy metal ions: role of chitosan and cellulose for water treatment. *Langmuir*, 79, 109-155. [http://dx.doi.org/10.13040/IJPSR.0975-8232.IJP.2\(6\).280-89](http://dx.doi.org/10.13040/IJPSR.0975-8232.IJP.2(6).280-89)
- Ali, M. H., Azad, M. A. K., Khan, K. A., Rahman, M. O., Chakma, U., & Kumer, A. (2023). Analysis of crystallographic structures and properties of silver nanoparticles synthesized using PKL extract and nanoscale characterization techniques. *ACS omega*, 8 (31), 28133-28142.

- <https://doi.org/10.1021/acsomega.3c01261>
- Arnon, D. I. (1950). Dennis Robert Hoagland: 1884-1949. *Science*, 112 (2921), 739-742. <https://doi.org/10.1126/science.112.2921.739>
- Ashraf, N., Ahmad, F., Da-Wei, L., Zhou, R. B., Feng-Li, H., & Yin, D. C. (2019). Iron/iron oxide nanoparticles: advances in microbial fabrication, mechanism study, biomedical, and environmental applications. *Critical Reviews in Microbiology*, 45 (3), 278-300. <https://doi.org/10.1080/1040841X.2019.1593101>
- Asiabi, H., Yamini, Y., & Shamsayei, M. (2017). Highly selective and efficient removal of arsenic (V), chromium (VI) and selenium (VI) oxyanions by layered double hydroxide intercalated with zwitterionic glycine. *Journal of hazardous materials*, 339, 239-247. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2017.06.042>
- Ávila, F. W., Faquin, V., da Silva Lobato, A. K., Ávila, P. A., Marques, D. J., Silva Guedes, E. M., & Tan, D. K. Y. (2013). Effect of phosphite supply in nutrient solution on yield, phosphorus nutrition and enzymatic behavior in common bean ('Phaseolus vulgaris' L.) Plants. *Australian Journal of Crop Science*, 7 (5), 713-722. <https://search.informit.org/doi/abs/10.3316/INFORMIT.364985197020497>
- Bremner, J. M. (1960). Determination of nitrogen in soil by the Kjeldahl method. *The Journal of Agricultural Science*, 55 (1), 11-33. <https://doi.org/10.1017/S0021859600021572>
- Calatayud, M. P., Sanz, B., Raffa, V., Riggio, C., Ibarra, M. R., & Goya, G. F. (2014). The effect of surface charge of functionalized Fe₃O₄ nanoparticles on protein adsorption and cell uptake. *Biomaterials*, 35 (24), 6389-6399. <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2014.04.009>
- Casillas, H. A. M. (2007). Mechanisms, chemical pathways, and optimization of electrochemical water treatment by electrocoagulation for sustainable water utilization. Lamar University-Beaumont. <https://search.proquest.com/openview/59d7f9a309f7a907d85ebe5cbd01d233/1?pq-origsite=gscholar&cbl=18750>
- Castro, V., Carpena, M., Fraga-Corral, M., Lopez-Soria, A., Garcia-Perez, P., Barral-Martinez, M., ... & Prieto, M. A. (2023). Sulfur-containing compounds from plants. In *Natural Secondary Metabolites: From Nature, Through Science, to Industry* (pp. 363-402). Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-031-18587-8_11
- Chandrasekaran, M., & Paramasivan, M. (2024). Chitosan derivatives act as a bio-stimulants in plants: A review. *International Journal of Biological Macromolecules*, 132720. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.132720>
- Chao, L., Wang, Y., Chen, S., & Li, Y. (2021). Preparation and adsorption properties of chitosan-modified magnetic nanoparticles for removal of Mo (VI) ions. *Polish Journal of Environmental Studies*, 30 (3), 2489-2498. <https://doi.org/10.15244/pjoes/130039>
- Chellamuthu, P. (2015). *Bioremediation of Selenite Using Biological and Bioelectrical Systems* (Doctoral dissertation, University of Southern California). <https://search.proquest.com/openview/e56ade1a7bc5e2aa3400ee5200d5a0a0/1?pq-origsite=gscholar&cbl=18750&diss=y>
- Chen, G., Ge, F., Wang, Y., Liu, P., He, S., Shi, H., & Tan, Z. (2023). Dissolved-selenium removal using magnetic nanoparticles: A state-of-the-art review. *Journal of Water Process Engineering*, 53, 103831. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2023.103831>
- Chen, W., Cheng, H., Jiang, Q., & Xia, W. (2021). The characterization and biological activities of synthetic N, O-selenized chitosan derivatives. *International Journal of Biological Macromolecules*, 173, 504-512. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.01.084>
- Chen, W., Li, Y., Yang, S., Yue, L., Jiang, Q., & Xia, W. (2015). Synthesis and antioxidant properties of chitosan and carboxymethyl chitosan-stabilized selenium nanoparticles. *Carbohydrate polymers*, 132, 574-581. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2015.06.064>
- Clover, M. W., & Mallarino, A. P. (2013). Corn and soybean tissue potassium content responses to potassium fertilization and relationships with grain yield. *Soil Science Society of America Journal*, 77 (2), 630-642. <https://doi.org/10.2136/sssaj2012.0223>
- Dai, Z., Xiong, X., Zhu, H., Xu, H., Leng, P., Li, J., ... & Xu, J. (2021). Association of biochar properties with changes in soil bacterial, fungal and fauna communities and nutrient cycling processes. *Biochar*, 3, 239-254. <https://doi.org/10.1007/s42773-021-00099-x>
- Dhaliwal, S. S., Sharma, V., Shukla, A. K., Verma, V., Kaur, M., Shivay, Y. S., ... & Hossain, A. (2022). Biofortification—A frontier novel approach to enrich micronutrients in field crops to encounter the nutritional security. *Molecules*, 27 (4), 1340. <https://doi.org/10.3390/molecules27041340>
- Dorraj, M. S., Amani-Ghadim, A. R., Hanifehpour, Y., Joo, S. W., Figoli, A., Carraro, M., & Tasselli, F. (2017). Performance of chitosan based nanocomposite hollow fibers in the removal of selenium (IV) from water. *Chemical Engineering Research and Design*, 117, 309-317.



<https://doi.org/10.1016/j.cherd.2016.10.043>

- Dou, L., Tian, Z., Zhao, Q., Xu, M., Zhu, Y., Luo, X., ... & Li, H. (2021). Transcriptomic characterization of the effects of selenium on maize seedling growth. *Frontiers in Plant Science*, 12, 737029. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.737029>
- Egorov, A. R., Khubiev, O., Rubanik, V. V., Rubanik Jr, V. V., Lobanov, N. N., Savilov, S. V., ... & Kritchenkov, A. S. (2022). The first selenium containing chitin and chitosan derivatives: Combined synthetic, catalytic and biological studies. *International Journal of Biological Macromolecules*, 209, 2175-2187. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.04.199>
- El-Ramady, H., Abdalla, N., Alshaal, T., El-Henawy, A., Faizy, S. E. D. A., Shams, M. S., ... & Domokos-Szabolcsy, É. (2015). Selenium and its role in higher plants. *Pollutants in buildings, water and living organisms*, 235-296. https://doi.org/10.1007/978-3-319-19276-5_6
- Eskanolu, A. (2024). A surface chemistry approach to inhibition of particle-induced hydroxyl radical generation: a case study of respirable coal dust. The Pennsylvania State University. <https://search.proquest.com/openview/98f60a5dff841b03643c26c682ed9f0a/1?pq-origsite=gscholar&cbl=18750&diss=y>
- Etteieb, S., Magdouli, S., Komtchou, S. P., Zolfaghari, M., Tanabene, R., Brar, K. K., ... & Brar, S. K. (2021). Selenium speciation and bioavailability from mine discharge to the environment: a field study in Northern Quebec, Canada. *Environmental Science and Pollution Research*, 28 (36), 50799-50812. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-14335-1>
- Farouk, S. (2011). Role of chelators in alleviating oxidative damage in radish shoot subjected to cadmium stress. *Journal of Plant Production*, 2 (10), 1359-1378. <https://dx.doi.org/10.21608/jpp.2011.85663>
- Feng, R., Wei, C., & Tu, S. (2013). The roles of selenium in protecting plants against abiotic stresses. *Environmental and experimental botany*, 87, 58-68. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2012.09.002>
- Feng, Y., Kreslavski, V. D., Shmarev, A. N., Ivanov, A. A., Zharmukhamedov, S. K., Kosobryukhov, A., ... & Shabala, S. (2022). Effects of iron oxide nanoparticles (Fe₃O₄) on growth, photosynthesis, antioxidant activity and distribution of mineral elements in wheat (*Triticum aestivum*) Plants. *Plants*, 11 (14), 1894. <https://doi.org/10.3390/plants11141894>
- Foo, K. Y., & Hameed, B. H. (2010). Insights into the modeling of adsorption isotherm systems. *Chemical engineering journal*, 156 (1), 2-10. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2009.09.013>
- Fordyce, F. M. (2012). Selenium deficiency and toxicity in the environment. In *Essentials of medical geology: Revised edition* (pp. 375-416). Dordrecht: Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-007-4375-5_16
- Freire, T. M., Fechine, L. M., Queiroz, D. C., Freire, R. M., Denardin, J. C., Ricardo, N. M., ... & Fechine, P. B. (2020). Magnetic porous controlled Fe₃O₄-chitosan nanostructure: an ecofriendly adsorbent for efficient removal of azo dyes. *Nanomaterials*, 10 (6), 1194. <https://doi.org/10.3390/nano10061194>
- García-Bañuelos, M. L., Sida-Arreola, J. P., & Sánchez, E. (2014). Biofortification-promising approach to increasing the content of iron and zinc in staple food crops. *Journal of Elementology*, 19 (3). <http://dx.doi.org/10.5601/jelem.2014.19.3.708>
- Garousi, F. (2016). *Accumulation of Selenium in the Main Parts of Crops Grown in Soils and Hydroponics* (Doctoral dissertation, Debreceni Egyetem (Hungary)). <https://search.proquest.com/openview/ca9556a0187bacd38962fb94639d332c/1?pq-origsite=gscholar&cbl=2026366&diss=y>
- González-Lemus, U., Medina-Pérez, G., Espino-García, J. J., Fernández-Luqueño, F., Campos-Montiel, R., Almaraz-Buendía, I., ... & Urrutia-Hernández, T. (2022). Nutritional parameters, biomass production, and antioxidant activity of *Festuca arundinacea* Schreb. conditioned with selenium nanoparticles. *Plants*, 11 (17), 2326. <https://doi.org/10.3390/plants11172326>
- Gullett, K. L., Ford, C. L., Garvey, I. J., Miller, T. J., Leahy, C. A., Awaitey, L. N., ... & Fout, A. R. (2023). Formation of Red Elemental Selenium from Seleniferous Oxyanions: Deoxygenation by a Homogeneous Iron Catalyst. *Journal of the American Chemical Society*, 145 (38), 20868-20873. <https://doi.org/10.1021/jacs.3c05981>
- Guo, R., Chen, Q., Wang, F., Fang, M., Li, L., Niu, H., ... & Mo, Z. (2023). Selenium-contaminated water: Recent advances in material function and adsorption performance. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 11 (5), 110468. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.110468>
- Gupta, M., & Gupta, S. (2017). An overview of selenium uptake, metabolism, and toxicity in plants. *Frontiers in plant science*, 7, 2074. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.02074>
- Gupta, M., & Gupta, S. (2017). An overview of selenium uptake, metabolism, and toxicity in plants. *Frontiers*

- in plant science, 7, 2074. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.02074>
- Halim, M. A., Rahman, M. M., Megharaj, M., & Naidu, R. (2020). Cadmium immobilization in the rhizosphere and plant cellular detoxification: role of plant-growth-promoting rhizobacteria as a sustainable solution. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 68 (47), 13497-13529. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.0c04579>
- Hasanuzzaman, M., Bhuyan, M. B., Raza, A., Hawrylak-Nowak, B., Matraszek-Gawron, R., Nahar, K., & Fujita, M. (2020). Selenium toxicity in plants and environment: biogeochemistry and remediation possibilities. *Plants*, 9 (12), 1711. <https://doi.org/10.3390/plants9121711>
- Hawkesford, M. J., Kopriva, S., & De Kok, L. J. (2016). Nutrient use efficiency in plants. *Switzerland: Springer*. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-319-10635-9>
- Hermans, C., Hammond, J. P., White, P. J., & Verbruggen, N. (2006). How do plants respond to nutrient shortage by biomass allocation?. *Trends in plant science*, 11 (12), 610-617. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2006.10.007>
- Hossain, M. A., Hassan, L., Iftekharuddaula, K. M., Kumar, A., & Henry, R. (Eds.). (2021). *Molecular breeding for rice abiotic stress tolerance and nutritional quality*. John Wiley & Sons. [https://books.google.com/books?hl=en&lr=&id=bHlIhEAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP18&dq=Hossain,+M.+A.,+Hasan,+L.,+Iftekharuddaula,+K.+M.,+Kumar,+A.,+%26+Henry,+R.+\(Eds.\).+\(2021\).+Molecular+breeding+for+rice+abiotic+stress+tolerance+and+nutritional+quality.+John+Wiley+%26+Sons.&ots=HK6dLXPT_K&sig=h2dxq7AbPqBGS8W8o2_sdor-POY](https://books.google.com/books?hl=en&lr=&id=bHlIhEAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP18&dq=Hossain,+M.+A.,+Hasan,+L.,+Iftekharuddaula,+K.+M.,+Kumar,+A.,+%26+Henry,+R.+(Eds.).+(2021).+Molecular+breeding+for+rice+abiotic+stress+tolerance+and+nutritional+quality.+John+Wiley+%26+Sons.&ots=HK6dLXPT_K&sig=h2dxq7AbPqBGS8W8o2_sdor-POY)
- Huang, D., Wu, J., Wang, L., Liu, X., Meng, J., Tang, X., ... & Xu, J. (2019). Novel insight into adsorption and co-adsorption of heavy metal ions and an organic pollutant by magnetic graphene nanomaterials in water. *Chemical Engineering Journal*, 358, 1399-1409. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.10.138>
- Huang, P., Yang, W., Johnson, V. E., Si, M., Zhao, F., Liao, Q., ... & Yang, Z. (2022). Selenium-sulfur functionalized biochar as amendment for mercury-contaminated soil: High effective immobilization and inhibition of mercury re-activation. *Chemosphere*, 306, 135552. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.135552>
- Ippolito, J. A., Scheckel, K. G., & Barbarick, K. A. (2009). Selenium adsorption to aluminum-based water treatment residuals. *Journal of colloid and interface science*, 338 (1), 48-55. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2009.06.023>
- Iqbal, M., Shafiq, F., Anwar, S., Akram, N. A., Ashraf, M. A., Raza, S. H., ... & Ashraf, M. (2022). Selenium and nano-selenium-mediated heat stress tolerance in plants. In *Selenium and nano-selenium in environmental stress management and crop quality improvement* (pp. 149-171). Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-031-07063-1_8
- Jalali, M., Ghanati, F., & Modarres-Sanavi, A. M. (2016). Effect of Fe₃O₄ nanoparticles and iron chelate on the antioxidant capacity and nutritional value of soil-cultivated maize (*Zea mays*) plants. *Crop and Pasture Science*, 67 (6), 621-628. <https://doi.org/10.1071/CP15271>
- Jayakumar, R., Prabakaran, M., Nair, S. V., Tokura, S., Tamura, H., & Selvamurugan, N. (2010). Novel carboxymethyl derivatives of chitin and chitosan materials and their biomedical applications. *Progress in Materials Science*, 55 (7), 675-709. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2010.03.001>
- Juturu, R., Selvaraj, R., & Murty, V. R. (2024). Efficient removal of hexavalent chromium from wastewater using a novel magnetic biochar composite adsorbent. *Journal of Water Process Engineering*, 66, 105908. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2024.105908>
- Kavitha, E., Kedia, R., Babaria, N., Prabhakar, S., & Rajesh, M. P. (2020). Optimization of process using carboxymethyl chitosan for the removal of mixed heavy metals from aqueous streams. *International journal of biological macromolecules*, 149, 404-416. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.01.066>
- Kim, Y., Yuan, K., Ellis, B. R., & Becker, U. (2017). Redox reactions of selenium as catalyzed by magnetite: Lessons learned from using electrochemistry and spectroscopic methods. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 199, 304-323. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2016.10.039>
- Konate, A., He, X., Zhang, Z., Ma, Y., Zhang, P., Alugongo, G. M., & Rui, Y. (2017). Magnetic (Fe₃O₄) nanoparticles reduce heavy metals uptake and mitigate their toxicity in wheat seedling. *Sustainability*, 9 (5), 790. <https://doi.org/10.3390/su9050790>
- Lanza, M. G. D. B., & Dos Reis, A. R. (2021). Roles of selenium in mineral plant nutrition: ROS scavenging responses against abiotic stresses. *Plant Physiology and Biochemistry*, 164, 27-43. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2021.04.026>
- Latha, S., Gomathi, T., Pavithra, S., Sudha, P. N., Nalluri, A., & Bhardwaj, P. (2023). Chitosan-based porous carbon materials for agriculture and agro-waste applications. In *Handbook of Porous Carbon Materials* (pp. 763-812). Singapore: Springer Nature Singapore. <https://doi.org/10.1007/978-981-19-7188->



- Nazemi, L., Nazmara, S., Eshraghyan, M. R., Nasser, S., Djafarian, K., Yunesian, M., ... & Shahtaheri, S. J. (2012). Selenium status in soil, water and essential crops of Iran. *Iranian journal of environmental health science & engineering*, 9 (1), 11. <https://doi.org/10.1186/1735-2746-9-11>
- Lee, C. H., Wang, C. C., Lin, H. H., Lee, S. S., Tsang, D. C., Jien, S. H., & Ok, Y. S. (2018). In-situ biochar application conserves nutrients while simultaneously mitigating runoff and erosion of an Fe-oxide-enriched tropical soil. *Science of the total environment*, 619, 665-671. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.11.023>
- Lima, L. W. (2016). Selenium and sulfur: mitigation in plant stresses. <http://hdl.handle.net/11449/138897>
- Liu, C., Wang, C., Liu, Y., Huang, J., Xu, W., Li, J., ... & Xu, H. (2024). Selenium nanoparticles/carboxymethyl chitosan/alginate antioxidant hydrogel for treating steroid-induced osteonecrosis of the femoral head. *International Journal of Pharmaceutics*, 653, 123929. <https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2024.123929>
- Liu, Y., Wu, S., Nguyen, T. A., Chan, T. S., Lu, Y. R., & Huang, L. (2022). Biochar mediated uranium immobilization in magnetite rich Cu tailings subject to organic matter amendment and native plant colonization. *Journal of Hazardous Materials*, 427, 127860. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.127860>
- Lukaszewicz, S., Politycka, B., & Smolen, S. (2018). Effect of selenium on the content of essential micronutrients and their translocation in garden pea. *Journal of Elementology*, 23 (4). <http://dx.doi.org/10.5601/jelem.2017.22.4.1577>
- Ma, Z., Shan, C., Liang, J., & Tong, M. (2018). Efficient adsorption of Selenium (IV) from water by hematite modified magnetic nanoparticles. *Chemosphere*, 193, 134-141. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.11.005>
- Mallik, A. K., Kabir, S. F., Rahman, F. B. A., Sakib, M. N., Efty, S. S., & Rahman, M. M. (2022). Cu (II) removal from wastewater using chitosan-based adsorbents: a review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 10 (4), 108048. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.108048>
- Mayo, J. T., Yavuz, C., Yean, S., Cong, L., Shipley, H., Yu, W., ... & Colvin, V. L. (2007). The effect of nanocrystalline magnetite size on arsenic removal. *Science and technology of advanced materials*, 8 (1-2), 71. <https://doi.org/10.1016/j.stam.2006.10.005>
- Mourya, V. K., Inamdar, N. N., & Tiwari, A. (2010). Carboxymethyl chitosan and its applications. *Adv. Mater. Lett*, 1 (1), 11-33. <https://doi.org/10.5185/amlett.2010.3108>
- Murgia, I., Marzorati, F., Vigani, G., & Morandini, P. (2022). Plant iron nutrition: The long road from soil to seeds. *Journal of Experimental Botany*, 73 (6), 1809-1824. <https://doi.org/10.1093/jxb/erab531>
- Naseem, M., Anwar-ul-Haq, M., Wang, X., Farooq, N., Awais, M., Sattar, H., ... & El-ESAWI, M. A. (2021). Influence of Selenium on Growth, Physiology, and Antioxidant Responses in Maize Varies in a Dose-Dependent Manner. *Journal of Food Quality*, 2021 (1), 6642018. <https://doi.org/10.1155/2021/6642018>
- Nguyen, M. D., Tran, H. V., Xu, S., & Lee, T. R. (2021). Fe₃O₄ nanoparticles: structures, synthesis, magnetic properties, surface functionalization, and emerging applications. *Applied Sciences*, 11 (23), 11301. <https://doi.org/10.3390/app112311301>
- Palomo-Siguero, M., Gutiérrez, A. M., Pérez-Conde, C., & Madrid, Y. (2016). Effect of selenite and selenium nanoparticles on lactic bacteria: A multi-analytical study. *Microchemical Journal*, 126, 488-495. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2016.01.010>
- Parandhaman, T., Dey, M. D., & Das, S. K. (2019). Biofabrication of supported metal nanoparticles: exploring the bioinspiration strategy to mitigate the environmental challenges. *Green chemistry*, 21 (20), 5469-5500. <https://doi.org/10.1039/C9GC02291K>
- Patel, P. K., Pandey, L. M., & Uppaluri, R. V. (2023). Synthesized carboxymethyl-chitosan variant composites for cyclic adsorption-desorption based removal of Fe, Pb, and Cu. *Chemosphere*, 340, 139780. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.139780>
- Pellegrini, E., Contin, M., Mazhar, S., Bravo, C., & De Nobili, M. (2024). Flooding by sea and brackish waters enhances mobility of Cd, Zn and Pb from airborne dusts in coastal soils. *Science of the Total Environment*, 922, 171038. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.171038>
- Pupo, A., Ku, K. M., & Gallagher, J. E. (2019). Effects of MCHM on yeast metabolism. *PLoS One*, 14 (10), e0223909. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0223909>
- Rachtanapun, P., Rachtanapun, C., Jantrawut, P., Thanakkasarnanee, S., Kasi, G., Tantala, J., ... & Chaiwarit, T. (2023). Carboxymethyl chitosan-based materials in packaging, food, pharmaceutical, and cosmetics. In *Multifaceted Carboxymethyl Chitosan Derivatives: Properties and Biomedical Applications* (pp. 139-203). Cham: Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/12_2023_158

- Ramakrishnan, M., Arivalagan, J., Satish, L., Mohan, M., Christyraj, J. R. S. S., Chandran, S. A., ... & Kalishwaralal, K. (2022). Selenium: a potent regulator of ferroptosis and biomass production. *Chemosphere*, 306, 135531. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.135531>
- Rayman, M. P. (2012). Selenium and human health. *The Lancet*, 379 (9822), 1256-1268. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(11\)61452-9](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(11)61452-9)
- Rizwan, M., Ali, S., Rehman, M. Z. U., Rinklebe, J., Tsang, D. C., Tack, F. M., ... & Ok, Y. S. (2021). Effects of selenium on the uptake of toxic trace elements by crop plants: A review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 51 (21), 2531-2566. <https://doi.org/10.1080/10643389.2020.1796566>
- Saeed, K., Nisa, F. K., Abdalla, M. A., & Mühling, K. H. (2023). The interplay of sulfur and selenium enabling variations in micronutrient accumulation in red spinach. *International Journal of Molecular Sciences*, 24 (16), 12766. <https://doi.org/10.3390/ijms241612766>
- Sajedi, N. A., Ardakani, M. R., Madani, H., Naderi, A., & Miransari, M. (2011). The effects of selenium and other micronutrients on the antioxidant activities and yield of corn (*Zea mays* L.) under drought stress. *Physiology and Molecular Biology of Plants*, 17, 215-222. <https://doi.org/10.1007/s12298-011-0067-5>
- Sarmasti, K., Golchin, A., Bostani, A., & Misaghi, M. (2025). Magnetite/reduced graphene oxide composites: A sustainable strategy for selenium immobilization and improved corn growth. *Chemosphere*, 378, 144424. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2025.144424>
- Schachtman, D. P., & Shin, R. (2007). Nutrient sensing and signaling: NPKS. *Annu. Rev. Plant Biol.*, 58 (1), 47-69. <https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.58.032806.103750>
- Schiavon, M., & Pilon-Smits, E. A. (2017). The fascinating facets of plant selenium accumulation—biochemistry, physiology, evolution and ecology. *New Phytologist*, 213 (4), 1582-1596. <https://doi.org/10.1111/nph.14378>
- Shaheen, S. M., Frohne, T., White, J. R., DeLaune, R. D., & Rinklebe, J. (2017). Redox-induced mobilization of copper, selenium, and zinc in deltaic soils originating from Mississippi (USA) and Nile (Egypt) River Deltas: A better understanding of biogeochemical processes for safe environmental management. *Journal of Environmental Management*, 186, 131-140. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.05.032>
- Shang, H., Li, C., Cai, Z., Hao, Y., Cao, Y., Jia, W., ... & Xing, B. (2024). Biosynthesized selenium nanoparticles as an effective tool to combat soil metal stresses in rice (*Oryza sativa* L.). *ACS nano*, 18 (30), 19636-19648. <https://doi.org/10.1021/acsnano.4c04215>
- Sharp, R. G. (2013). A review of the applications of chitin and its derivatives in agriculture to modify plant-microbial interactions and improve crop yields. *Agronomy*, 3 (4), 757-793. <https://doi.org/10.3390/agronomy3040757>
- Shi, J., Zhang, J., Wang, C., Liu, Y., & Li, J. (2023). Research progress on the magnetite nanoparticles in the fields of water pollution control and detection. *Chemosphere*, 336, 139220. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.139220>
- Silverstein, R. M., Webster, F. X., & Kiemle, D. J. (2005). Chapter 3, Proton NMR spectrometry. *Spectrometric identification of organic compounds (7th ed.)*. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc, 127-203. <https://eclass.upatras.gr/modules/document/file.php/PHY1973/Silverstein%20-%20Spectrometric%20Identification%20of%20Organic%20Compounds%207th%20ed.pdf>
- Singh, S., Bashambu, L., Devi, P., & Kansal, S. K. (2021). Chemical Methods for Removal and Treatment of Selenium from Water. *Selenium Contamination in Water*, 206-227. <https://doi.org/10.1002/9781119693567.ch11>
- Smažiková, P., Praus, L., Száková, J., Tremlova, J., Hanč, A., & Tlustoš, P. (2019). Effects of organic matter-rich amendments on selenium mobility in soils. *Pedosphere*, 29 (6), 740-751. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(17\)60444-2](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(17)60444-2)
- Somagattu, P., Chinnannan, K., Yammanuru, H., Reddy, U. K., & Nimmakayala, P. (2024). Selenium dynamics in plants: Uptake, transport, toxicity, and sustainable management strategies. *Science of The Total Environment*, 175033. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.175033>
- Sparks, D. L. (2003). Environmental soil chemistry: An overview. *Environmental soil chemistry*, 2, 1-42. <https://www.sciencedirect.com/book/9780126564457/environmental-soil-chemistry>
- Sposito, G. (2008). *The chemistry of soils*. Oxford university press. Sposito, G. (2008). *The chemistry of soils*. Oxford university press. [https://books.google.com/books?hl=en&lr=&id=XCJnDAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR9&dq=Sposito,+G.+\(2008\).+The+chemistry+of+soils.+Oxford+university+press.&ots=iIo6j3DZ-B&sig=VYYtdeD4ca8sOZcKbFrYerSqkmw#v=onepage&q=Sposito%2C%20G.%20\(2008\).%20The%20chemist](https://books.google.com/books?hl=en&lr=&id=XCJnDAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR9&dq=Sposito,+G.+(2008).+The+chemistry+of+soils.+Oxford+university+press.&ots=iIo6j3DZ-B&sig=VYYtdeD4ca8sOZcKbFrYerSqkmw#v=onepage&q=Sposito%2C%20G.%20(2008).%20The%20chemist)



[ry%20of%20soils.%20Oxford%20university%20press.&f=false](https://doi.org/10.1016/j.reactfunctpolym.2005.11.008)

- Su, C., & Suarez, D. L. (2000). Selenate and selenite sorption on iron oxides an infrared and electrophoretic study. *Soil Science Society of America Journal*, 64 (1), 101-111. <https://doi.org/10.2136/sssaj2000.641101x>
- Sun, S., & Wang, A. (2006). Adsorption properties and mechanism of cross-linked carboxymethyl-chitosan resin with Zn (II) as template ion. *Reactive and Functional Polymers*, 66 (8), 819-826. <https://doi.org/10.1016/j.reactfunctpolym.2005.11.008>
- Sun, W., Pan, W., Wang, F., & Xu, N. (2015). Removal of Se (IV) and Se (VI) by MFe₂O₄ nanoparticles from aqueous solution. *Chemical Engineering Journal*, 273, 353-362. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2015.03.061>
- Terry, N., Zayed, A. M., De Souza, M. P., & Tarun, A. S. (2000). Selenium in higher plants. *Annual review of plant biology*, 51 (1), 401-432. <https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.51.1.401>
- Tripathi, N., Choppala, G., & Singh, R. S. (2017). Evaluation of modified chitosan for remediation of zinc contaminated soils. *Journal of Geochemical Exploration*, 182, 180-184. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2016.08.011>
- Ubani, O., Modise, S. J., Atagana, H. I., & Mearns, K. F. (2024). The application of magnetic sorbents in soil decontamination. In *Environmental Applications of Magnetic Sorbents* (pp. 7-1). Bristol, UK: IOP Publishing. <https://iopscience.iop.org/book/edit/978-0-7503-5909-2/chapter/bk978-0-7503-5909-2ch7.pdf>
- Ugwu, C. G., Bayode, A. A., Olorunnisola, D., & Unuabonah, E. I. (2021). Occurrence and Management of Selenium Oxyanions in water. *Progress and Prospects in the Management of Oxyanion Polluted Aqua Systems*, 103-128. https://doi.org/10.1007/978-3-030-70757-6_4
- Ullah, S., Hayat, K., & Qiao, X. (2023). Chitosan-based biostimulation: A novel approach for simultaneous remediation of co-existing cadmium and arsenic contamination in soil. *Air, Soil and Water Research*, 16, 11786221231216862. <https://doi.org/10.1177/11786221231216862>
- Uva, M., Tambasco, M., Grassi, G., Corsi, I., Protano, G., & Atrei, A. N. D. R. E. A. (2017). Carboxymethylcellulose hydrogels cross-linked with magnetite nanoparticles for the removal of organic and inorganic pollutants from water. *Journal of environmental chemical engineering*, 5 (4), 3632-3639. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2017.07.025>
- Van Hoewyk, D. (2013). A tale of two toxicities: malformed selenoproteins and oxidative stress both contribute to selenium stress in plants. *Annals of botany*, 112 (6), 965-972. <https://doi.org/10.1093/aob/mct163>
- Wang, J., Liu, G., Li, T., & Zhou, C. (2015). Physicochemical studies toward the removal of Zn (II) and Pb (II) ions through adsorption on montmorillonite-supported zero-valent iron nanoparticles. *RSC advances*, 5 (38), 29859-29871. <https://doi.org/10.1039/C5RA02108A>
- Wang, J., Zhou, C., Xiao, X., Xie, Y., Zhu, L., & Ma, Z. (2017). Enhanced iron and selenium uptake in plants by volatile emissions of *Bacillus amyloliquefaciens* (BF06). *Applied Sciences*, 7 (1), 85. <https://doi.org/10.3390/app7010085>
- Wang, L., Shi, C., Pan, L., Zhang, X., & Zou, J. J. (2020). Rational design, synthesis, adsorption principles and applications of metal oxide adsorbents: a review. *Nanoscale*, 12 (8), 4790-4815. <https://doi.org/10.1039/C9NR09274A>
- White, P. J., & Broadley, M. R. (2003). Calcium in plants. *Annals of botany*, 92 (4), 487-511. <https://doi.org/10.1093/aob/mcg164>
- Xiaoli, Y. A. N. G., Jiaxuan, M. A. O., Luran, M. A., Qijing, X. U., & Xue, L. I. U. (2023). Nanomaterial-immobilized Phytase: Preparation, Catalytic Efficiency and Influencing Factors. *Ecology and Environment*, 32 (10), 1889. <https://doi.org/10.16258/j.cnki.1674-5906.2023.10.017>
- Xu, C., Cao, L., Bilal, M., Cao, C., Zhao, P., Zhang, H., & Huang, Q. (2021). Multifunctional manganese-based carboxymethyl chitosan hydrogels for pH-triggered pesticide release and enhanced fungicidal activity. *Carbohydrate Polymers*, 262, 117933. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2021.117933>
- Xu, D., Li, H., Lin, L., Liao, M. A., Deng, Q., Wang, J., ... & Xia, H. (2020). Effects of carboxymethyl chitosan on the growth and nutrient uptake in *Prunus davidiana* seedlings. *Physiology and Molecular Biology of Plants*, 26, 661-668. <https://doi.org/10.1007/s12298-020-00791-5>
- Yamani, J. S., Lounsbury, A. W., & Zimmerman, J. B. (2016). Towards a selective adsorbent for arsenate and selenite in the presence of phosphate: Assessment of adsorption efficiency, mechanism, and binary separation factors of the chitosan-copper complex. *Water Research*, 88, 889-896. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2015.11.017>
- Yang, X., Alidoust, D., & Wang, C. (2020). Effects of iron oxide nanoparticles on the mineral composition and growth of soybean (*Glycine max* L.) plants. *Acta Physiologiae Plantarum*, 42, 1-11. <https://doi.org/10.1007/s11738-020-03104-1>
- Yasmin, K., Hossain, M. S., & Li, W. C. (2024). Simultaneous immobilization strategy of anionic metalloids

- and cationic metals in agricultural systems: A review. *Chemosphere*, 143106. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.143106>
- Yousaf, N., Sardar, M. F., Ishfaq, M., Yu, B., Zhong, Y., Zaman, F., ... & Zou, C. (2024). Insights in to iron-based nanoparticles (hematite and magnetite) improving the maize growth (*Zea mays* L.) and iron nutrition with low environmental impacts. *Chemosphere*, 362, 142781. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.142781>
- Zarcinas, B. A., Cartwright, B., & Spouncer, L. R. (1987). Nitric acid digestion and multi-element analysis of plant material by inductively coupled plasma spectrometry. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 18 (1), 131-146. <https://doi.org/10.1080/00103628709367806>
- Zhang, H., Yang, H., Shao, J., Chen, Y., Zhang, S., & Chen, H. (2023). Multifunctional carboxymethyl cellulose sodium encapsulated phosphorus-enriched biochar composites: Multistage adsorption of heavy metals and controllable release of soil fertilization. *Chemical Engineering Journal*, 453, 139809. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.139809>