

The Effect of Glutathione on Iron Availability of Different Sources in Peanut Plant in a Calcareous Soil

F. Shahabi¹, R. Khorassani^{1*}, Z. Gheshlaghi²

1- Department of Soil Science and Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

(*- Corresponding Author Email: khorasani@um.ac.ir)

2- Department of Environmental Engineering, Faculty of Environment, University of Tehran, Tehran, Iran

Received: 25 November 2024
Revised: 23 April 2025
Accepted: 26 April 2025
Available Online: 26 April 2025

How to cite this article:

Shahabi, F., Khorassani, R., & Gheshlaghi, Z. (2025). The effect of glutathione on iron availability of different sources in peanut plant in a calcareous soil. *Journal of Water and Soil*, 39(2), 121-138. (In Persian with English abstract).
<https://doi.org/10.22067/jsw.2025.90971.1450>

Introduction

This study examined the influence of glutathione on iron availability in calcareous soils and its effect on the iron availability from various iron sources for peanut plants. Calcareous soils, prevalent in many regions, challenge nutrient availability, particularly for micronutrients such as iron, manganese, and zinc, owing to their high pH levels. Despite adequate iron levels in these soils, plant accessibility remains restricted, often resulting in iron deficiency symptoms, such as chlorosis, due to impaired chlorophyll synthesis. Various strategies, including the development of resistant cultivars, organic amendments, and mineral or chelated iron fertilizers, have been explored to mitigate iron deficiency. Chelated iron fertilizers, especially iron sequestration (EDDHA) agents, are commonly used in calcareous soils to enhance iron availability in plants. However, their environmental impact and cost-effectiveness are concerns, prompting interest in alternatives such as iron oxides, which are cost-effective and environmentally friendly. Studies have suggested that iron oxides, particularly magnetite nanoparticles, support plant growth and enhance the availability of iron. Additionally, growth stimulants, such as glutathione (a tripeptide with antioxidant properties), have been investigated for their potential to alleviate iron deficiency. Glutathione not only boosts plant defense mechanisms but also improves reactive oxygen species availability. Recent studies have shown that the foliar application of glutathione in iron-deficient plants can significantly increase total iron uptake and enhance photosynthesis. This study aimed to investigate the effects of glutathione on iron bioavailability from various iron sources and growth parameters in peanuts cultivated in calcareous soils.

Materials and Methods

The experiment was conducted in a greenhouse at the Agricultural Research Center of Ferdowsi University of Mashhad and, employed a completely randomized factorial design with three replications. The factors were iron sources (control, iron sequestration (EDDHA), iron oxide, and iron filings) and glutathione foliar application (0, 1, and 2 mM, four times per growth season: 29, 38, 42, and 48 days after planting). Soil was sampled from a farm, and some of its physical and chemical properties were analyzed using conventional methods. Macronutrients were added at the recommended dosage to minimize interference with iron treatment. The iron levels were 0 and 50, 1370, and 108 mg kg⁻¹ for sequestration, iron oxide, and iron filings, respectively. Glutathione foliar treatments were applied at four growth stages (29, 38, 42, 48 days after planting) in concentrations of 0, 1, and 2 mM. The plants were grown in pots with soil moisture maintained at the field capacity. After 66 days, the plants were harvested, and parameters such as dry shoot weight, total iron uptake, and nitrogen content were measured. The



iron content in plants was determined using atomic absorption spectroscopy, and nitrogen was quantified applying the Kjeldahl method. Statistical analyses were conducted using SAS software, and mean comparisons were performed using Duncan's test at the 5% significance level.

Results and Discussion

The study revealed that glutathione, either alone or in combination with iron sources, notably improved peanut plant growth and iron uptake. Iron sequestration (EDDHA) was the most effective treatment, significantly increasing dry shoot weight, particularly when combined with 2 mM glutathione. The combination of glutathione and iron treatment substantially boosted total iron uptake in both the shoots and roots of peanut plants. Notably, iron sequestration (EDDHA) with glutathione resulted in a 20% increase in shoot iron uptake and a 34.3% increase in shoot nitrogen uptake compared to glutathione treatment alone. Glutathione application also enhanced iron filings, leading to a 55.6% increase in root iron uptake by shoots and a 50.6% increase in iron concentration in shoots, as extracted by phenanthroline. The results indicated that glutathione improved and facilitated iron translocation from the roots to the shoots. Iron filings, a cost-effective iron source, showed significant results when paired with glutathione, enhancing both shoot dry weight and iron uptake. This synergy between glutathione and iron treatments suggests that iron sequestration (EDDHA) is more effective when combined with glutathione, resulting in alleviating deficiency symptoms of iron, such as chlorosis, and promoting overall growth.

Conclusion

This study underscores the positive impact of glutathione on iron availability and growth in peanut plants grown in calcareous soils. Applying glutathione significantly increased iron uptake in both shoots and roots, nitrogen uptake, and plant biomass. Iron sequestration (EDDHA), combined with glutathione, emerged as the most effective treatment, improving shoot iron and nitrogen uptake by 20% and 34.3%, respectively. Additionally, glutathione enhanced the efficacy of iron filings, an economical iron source, suggesting its potential as an alternative to expensive iron fertilizers. Glutathione application also reduced chlorosis and improved iron translocation from roots to shoots, supporting its role in enhancing iron nutrition in crops grown in iron-deficient soils. This study offers insights into the role of glutathione in managing iron deficiency stress and recommends further exploration of optimal application rates and effects on diverse crops and soil conditions.

Keywords: Iron oxide, Iron sequestration (EDDHA), Glutathione

تأثیر گلوکاتینون بر قابلیت استفاده‌ی آهن از منابع مختلف در گیاه بادام‌زمینی در یک خاک آهکی

فاطمه بی بی شهابی^۱ - رضا خراسانی^{۱*} - زهرا قشلاقی^۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۹/۰۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۲/۰۶

چکیده

اغلب خاک‌های مناطق کشور آهکی هستند و از مشکلات اصلی آن‌ها، کم‌بود عناصر ریزمغذی مانند آهن به دلیل قلیابیت بالاست. این مطالعه جهت بررسی تأثیر منابع مختلف آهن و گلوکاتینون بر جذب و فراهمی آهن و رشد گیاه بادام‌زمینی، در قالب طرح پایه کاملاً تصادفی با آرایش فاکتوریل با دو فاکتور منابع آهن در چهار سطح (شاهد، سکوسترین آهن، اکسید آهن و براده آهن) در خاک و گلوکاتینون در سه سطح (صفر، ۱ و ۲ میلی‌مولار) به صورت محلول پاشی، به صورت کشت گلدانی در سه تکرار در گلخانه تحقیقاتی دانشگاه فردوسی مشهد انجام شد. نتایج نشان دادند که گلوکاتینون به تنهایی و یا در ترکیب با منابع آهن اثر مثبتی بر رشد اندام هوایی و بهبود جذب آهن داشت. در تیمار سکوسترین آهن، کاربرد گلوکاتینون ۱ میلی‌مولار موجب افزایش آهن فعال برگ (۱۱ درصد)، جذب کل آهن در اندام هوایی (۲۰ درصد)، وزن خشک اندام هوایی (۸ درصد) و جذب نیتروژن (۳۴/۳ درصد) شد و در سطح ۲ میلی‌مولار گلوکاتینون، جذب آهن در ریشه و وزن خشک ریشه به ترتیب ۳۷/۹ و ۳۴/۴ درصد افزایش یافت. در تیمار براده آهن، گلوکاتینون ۱ میلی‌مولار باعث افزایش آهن فعال برگ (۵۰/۶ درصد) و جذب نیتروژن (۵ درصد) گردید، در حالی که در سطح ۲ میلی‌مولار محلول پاشی گلوکاتینون، جذب آهن در ریشه، وزن خشک ریشه و وزن خشک اندام هوایی به ترتیب ۵۵/۶، ۳۹/۴ و ۱۲/۵ درصد افزایش نشان داد. همچنین، نسبت آهن فعال به کل در اندام هوایی در این سطح تا ۳۸/۴ درصد نسبت به تیمار براده آهن بدون گلوکاتینون بهبود یافت. این نتایج نشان می‌دهد که گلوکاتینون با بهبود فراهمی آهن در خاک آهکی و افزایش انتقال درون گیاهی آن، می‌تواند کارایی کودهای آهن، به ویژه منابع معدنی مانند براده آهن را افزایش دهد. بنابراین، کاربرد هم‌زمان گلوکاتینون با منابع مناسب آهن، به ویژه در شرایط قلیایی خاک، راه‌کاری مؤثر برای کاهش کلروز آهن و بهبود تغذیه گیاهان حساس از جمله بادام‌زمینی است.

واژه‌های کلیدی: اکسید آهن، سکوسترین آهن، گلوکاتینون

مقدمه

کم‌بود آن در گیاه سبب اختلال در فعالیت کوانزیم‌ها و پروتئین‌های مربوط به فرآیند رشد شده و در نهایت به کلروز یا زرد برگی در گیاه منجر می‌شود. برای جلوگیری از این مشکل، روش‌های مختلفی پیشنهاد شده است که از جمله مهم‌ترین آن‌ها انتخاب گونه‌های مقاوم به کم‌بود آهن، کاربرد مواد آلی و مصرف کودهای معدنی و کلاته است. همچنین کوددهی به شکل خاکی و محلول پاشی از مؤثرترین روش‌ها برای رفع کلروز آهن، به ویژه در شرایط خاک‌های آهکی، محسوب می‌شود. کلات‌های آهن ترکیبات شیمیایی هستند که در مقایسه با

با توجه به قرار گرفتن ایران در منطقه خشک و نیمه‌خشک کره زمین، خاک‌های اغلب مناطق کشور آهکی هستند. علی‌رغم وجود غلظت بالای آهن در این خاک‌ها، عواملی مانند قلیابیت بالا (pH بالا)، کم‌بود مواد آلی و همچنین حضور عناصری چون فسفر، فراهمی آهن را برای گیاهان محدود می‌کنند (Malakouti & Tehrani, 1991; Ghorashi, Haghnia, Lakzian, & Khorasani, 2012). آهن نقش مهمی در ساختار کلروپلاست و سنتز کلروفیل ایفا می‌کند.

۱- گروه مهندسی و علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
(*) نویسنده مسئول: (Email: khorasani@um.ac.ir)

۲- گروه مهندسی محیط‌زیست، دانشکده محیط‌زیست، دانشگاه تهران، تهران، ایران

ناقل‌های اختصاصی در غشای سلول‌های ریشه، انتقال آن به سمت اندام‌های هوایی در قالب کمپلکس‌هایی با اسیدهای آلی و ورود به ساختارهای پروتئینی فعال در فتوسنتز و تنفس است (Kobayashi & Nishizawa, 2012).

علاوه بر منابع مختلف آهن، کاربرد محرک‌های رشد نیز به‌عنوان روشی نوین و کارآمد برای رفع زرد برگی حاصله از کمبود آهن در گیاه مطرح شده‌است. یکی از مهم‌ترین این محرک‌ها، گلوکاتینون است. گلوکاتینون تری‌پتیدی، متشکل از اسیدهای آمینه گلوتامیک اسید، سیستین و گلیسین است که به‌واسطه ظرفیت بالای آنتی‌اکسیدانی و احیاکنندگی خود، در تنظیم بسیاری از فرآیندهای فیزیولوژیکی و پاسخ گیاهان به تنش‌ها نقش کلیدی دارد (Gill & Tuteja, 2010). یکی از ویژگی‌های مهم و کمتر بررسی‌شده گلوکاتینون، توانایی آن به‌عنوان یک عامل عصاره‌گیر و استخراج‌کننده آهن از منابع معدنی غیرمحلول مانند اکسیدهای آهن (Fe(III)) است. خاصیت احیاکنندگی بالای گلوکاتینون موجب انحلال بهتر اکسیدهای آهن و تبدیل آنها به فرم محلول و قابل‌جذب (Fe(II)) در ناحیه ریزوسفر شده و با کاهش موضعی pH خاک، فراهمی آهن برای گیاهان را به‌ویژه در خاک‌های آهکی افزایش می‌دهد (Zuchi, Watanabe, Bromke, Osorio, & Astolfi, 2015). ترکیب گلوکاتینون با سایر منابع آهن مانند کلات‌ها و کودهای معدنی نیز اثرات هم‌افزایی داشته و موجب بهبود جذب، انتقال و آسمیلاسیون آهن در گیاه می‌شود (Gheshlaghi, Khorassani, & Abadía, Kafi, & Fotovat, 2019). براساس نتایج گلوکاتینون به دلیل دارا بودن نقش دوگانه در سیگنال‌دهی و استخراج آهن، می‌تواند بهره‌وری استفاده از آهن را در گیاهان به‌طور قابل‌توجهی افزایش دهد. بادام‌زمینی به‌دلیل حساسیت به کمبود آهن، به‌ویژه در خاک‌های آهکی با pH بالا و بی‌کربنات، گیاهی مناسب برای ارزیابی فراهمی آهن محسوب می‌شود. با وجود کاربرد گسترده کلات‌های آهن، مشکلاتی نظیر پایداری کم برخی کلات‌ها در pH بالا، هزینه‌ی زیاد و نگرانی‌های زیست‌محیطی، ضرورت بررسی جایگزین‌های پایدارتر را افزایش داده‌است. گلوکاتینون، به‌عنوان ترکیبی زیستی با پتانسیل کلات‌کنندگی و احیای آهن، می‌تواند گزینه‌ای مؤثر در بهبود جذب آهن از منابع معدنی باشد. این پژوهش با هدف ارزیابی اثر گلوکاتینون بر افزایش جذب آهن از منابع مختلف آهن در گیاه بادام‌زمینی در شرایط طبیعی خاک آهکی انجام شد.

مواد و روش‌ها

نمونه خاک جهت کشت گلخانه‌ای از عمق ۳۰-۰ سانتی‌متر از منطقه‌ای با مشخصات طول جغرافیایی $18^{\circ} 16' 59''$ شرقی و عرض جغرافیایی $51^{\circ} 16' 36''$ شمالی و ارتفاع ۹۸۵ متر از سطح دریا، واقع

ترکیبات معدنی آهن (مانند کلرید آهن و سولفات آهن)، کارایی بیشتری دارند. یکی از مهم‌ترین این کلات‌ها، سکوسترین است که به‌طور خاص در خاک‌های آهکی استفاده می‌شود. با این حال، کلات‌های مصنوعی آهن علی‌رغم کارایی زیاد در فراهمی آهن برای گیاه، دارای معضلات زیست‌محیطی بوده و از نظر اقتصادی مقرون به‌صرفه نیستند (Malakouti, 1995). منابع معدنی مانند اکسیدهای آهن به‌عنوان گزینه‌های اقتصادی نیز مورد استفاده قرار گرفته‌اند. مطالعات نشان داده‌اند که اکسیدهای آهن، از جمله نانو اکسیدهای مگنتیت، تأثیر مثبتی بر رشد گیاه و فراهمی آهن دارند. نانو اکسیدهای مگنتیت باعث بهبود رشد گیاه منداب (Plaksenkova et al., 2019)، افزایش جذب عناصر غذایی در لوبیا (De Souza-Torres et al., 2019)، رشد گیاه در شرایط شوری در نخود (Abd-Alla, Nafady, Bashandy, & Hassan, 2019)، افزایش سطح کلروفیل و ظهور مولکول‌های کوچک ار ان آغیر کد دهنده (mi RNA) در بونجه (Kokina et al., 2020)، افزایش جذب آهن از ریشه و تجمع آهن در گندم (Iannone et al., 2016) شد. ذرات نانومتری مگنتیت با فرستادن سیگنال‌هایی سبب کاهش pH ریزوسفری خاک و افزایش غلظت پتاسیم، کلسیم، فسفر، آهن، منگنز در گیاه لوبیا شد (De Souza-Torres et al., 2019). همچنین تلقیح ریزوبیوم با نانو ذرات مگنتیت، محتویات لگ‌هموگلوبین در ریشه، فعالیت‌های آنزیم نیتروژناز و در نهایت رشد گیاه نخود در شرایط شوری را افزایش داد (Abd-Alla et al., 2019). این یافته‌ها نقش برجسته منابع مختلف آهن، شامل هر دو نوع کلات و معدنی (مانند اکسیدهای آهن)، در بهبود فراهمی آهن و رشد گیاه را نشان می‌دهند.

آهن در گیاهان به اشکال مختلفی شامل فرم‌های فعال و محلول (Fe(II))، اشکال ذخیره‌ای غیرمحلول مانند فریتین و نیز کمپلکس‌شده با پروتئین‌ها (نظیر فریدوکسین و سیتوکروم‌ها) وجود دارد (Marschner, 1995; Kobayashi & Nishizawa, 2012). فراهمی آهن در خاک، به‌ویژه در خاک‌های آهکی که عمدتاً آهن به شکل غیرمحلول Fe(III) است، مستقیماً روی میزان جذب و نوع اشکال بیوشیمیایی آهن درون گیاه تأثیر می‌گذارد. در این شرایط، گیاهان دولفه مانند بادام‌زمینی با ترشح کلات‌ها و ترکیبات احیاکننده (نظیر اسیدهای آلی)، آهن Fe(III) را به فرم قابل‌جذب Fe(II) تبدیل می‌کنند (Marschner, 1995; Roosta & Mohsenian, 2012). همچنین، آسمیلاسیون آهن درون گیاه به‌شدت وابسته به فراهمی آهن در خاک است، به‌طوری‌که کاهش قابلیت استفاده آهن خاک مستقیماً باعث کاهش جذب و آسمیلاسیون آهن در گیاه شده و منجر به کاهش رشد و سلامت گیاه می‌شود (Malakouti & Homae, 1989). تغییرات بیوشیمیایی آهن درون گیاه نیز شامل جذب فرم Fe(II) توسط

پودر براده آهن (با خلوص ۶۰/۵ درصد آهن، مجتمع صنعتی اسفراین خراسان شمالی) مورد استفاده قرار گرفتند.

بر اساس نتایج حاصل از آزمون استخراج‌پذیری آهن با استفاده از گلوکاتینون ۵ میلی‌مولار، میزان آهن استخراج‌شده از براده آهن و اکسید آهن به ترتیب ۲۷۷۸۰ و ۲۱۹۲/۶ میکروگرم در گرم ماده بود (مطابق جدول ۲). با استفاده از این داده‌ها، به‌منظور فراهم‌آوردن معادل ۳ میلی‌گرم آهن قابل‌استخراج در هر کیلوگرم خاک، مقادیر بهینه از هر منبع شامل ۵۰ میلی‌گرم سکوسترین آهن (Fe-EDDHA)، ۱۳۷۰ اکسید آهن، و ۱۰۸ میلی‌گرم براده آهن انتخاب و به خاک افزوده شد. این هم‌ارزی آهن قابل‌استخراج میان تیمارها بر پایه مطالعات پیشین (Gheshlaghi, Khorassani, & Abadía, 2022) و امکان مقایسه‌ی دقیق‌تر کارایی منابع آهن در شرایط خاکی انجام شد. ترکیبات معدنی پیش از استفاده، جهت یکنواختی و افزایش سطح تماس، از الک شماره ۱۰۰ (۱۵۰ میکرومتر) عبور داده شدند.

گلوکاتینون (GSH)، به‌عنوان یک عصاره‌گیر زیستی مؤثر جهت استخراج آهن از منابع کم‌محلول به کار گرفته شد. این تری‌پتید دارای گروه‌های تیول (R-SH) و ساختار احیاکننده است که توانایی کاهش و احیا آهن فریک (Fe(III)) به فرو قابل‌جذب (Fe(II)) و تشکیل کمپلکس‌های محلول با آهن را دارد (Aliaga, Carrasco-Pozo, López-Alarcón, Olea-Azar, & Speisky, 2011; Briat, Dubos, & Gaynard, 2015). بررسی‌ها نشان داده‌اند که پیش‌ماده گلوکاتینون یعنی γ -گلوکاتامیل‌سیستئین نیز دارای واکنش‌پذیری بالایی در تشکیل کمپلکس با آهن فریک (Fe(III)) است (Tsutsumi, Yamashita, Muraoka, Hirata, & Nagano, 2024). درحالی‌که سولفات آهن (FeSO_4) یکی از منابع رایج آهن محلول در کشاورزی است، اما در خاک‌های آهکی به‌سرعت به ترکیبات نامحلول نظیر هیدروکسید آهن ($\text{Fe}(\text{OH})_3$) تبدیل شده و قابلیت جذب آن توسط گیاه کاهش می‌یابد. در این شرایط، استفاده از منابع آهن کم‌محلول همراه با عصاره‌گیرهای زیستی مانند گلوکاتینون می‌تواند موجب فراهمی تدریجی و پایداری بیشتر آهن در خاک‌های قلیایی می‌شود (Rombola, Pinton, & Zocchi, 2019; Fuentes, Bosch, Hita, et al., 2023). محلول‌پاشی گلوکاتینون (تهیه‌شده از شرکت سیگما)، در چهار نوبت (۲۹، ۳۸، ۴۲ و ۴۸ روز بعد از کشت)، در سطوح تعریف شده صورت گرفت. طی دوره رشد، رطوبت خاک گلدان‌ها در حد ظرفیت زراعی حفظ گردید. گیاهان پس از ۶۶ روز برداشت شده و صفاتی از جمله وزن خشک اندام هوایی، وزن خشک ریشه، آهن فعال (استخراج شده با فنانترولین)، آهن کل اندام هوایی و نیتروژن اندام هوایی اندازه‌گیری شدند. تجزیه آماری داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SAS نسخه ۹٫۱ انجام گرفت و مقایسه میانگین‌ها نیز به کمک آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۵ درصد انجام شد. نمودارها نیز با استفاده از نرم‌افزار Excel رسم شدند.

در پردیس دانشگاه فردوسی مشهد نمونه‌برداری شد و پس از هوا خشک کردن و عبور آن از الک ۲ میلی‌متری، برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد نظر از جمله بافت خاک به روش هیدرومتری (Ge & Bauder, 1986)، pH (واکنش خاک) در گل اشباع به روش توماس (Thomas, 1996) با دستگاه pH متر، هدایت الکتریکی در عصاره گل اشباع به روش رودز (Rhoades, 1996) توسط دستگاه EC متر، نیتروژن کل خاک به روش کلدال (Bremner & Mulvaney, 1982)، فسفر قابل استفاده خاک به روش اولسن (Olsen & Sommers, 1982) توسط دستگاه اسپکتروفتومتر و پتاسیم قابل استفاده خاک به روش استات آمونیوم (Helmeck & Sparks, 1996) توسط دستگاه فلیم‌فوتومتر، کربن آلی به روش بی‌کرومات (Walkley & Black, 1934)، کربنات کلسیم معادل به روش خنثی‌سازی با اسید کلریدریک (Leoppert & Soares, 1996)، رطوبت ظرفیت زراعی به روش اشباع از کف و پس از خروج آب ثقلی از خاک (Alizadeh, 2006) اندازه‌گیری شدند. آهن قابل استفاده‌ی خاک نیز با استفاده از عصاره‌گیر DTPA-TEA (DTPA 0.005 نرمال، TEA 0.1 نرمال، CaCl_2 0.01 نرمال) به روش لیندزی و نورول (Lindsay & Norvell, 1978) عصاره‌گیری و غلظت آن با دستگاه جذب اتمی مدل (Shimadzu, AA-670)، اندازه‌گیری شد؛ نتایج در جدول ۱ ارائه شده است. بعد از آماده‌سازی خاک و با توجه به نتایج تجزیه خاک و نیاز کودی گیاه بادام‌زمینی، عناصر پرمصرف چون نیتروژن، فسفر و پتاسیم براساس توصیه کودی از منابع مختلف (نیترات کلسیم، سولفات پتاسیم و مونو فسفات کلسیم در غلظت‌های ۱۰۰، ۱۰۰ و ۸۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم)، به خاک اضافه شد (Zuo, Ren, Zhang, & Jiang, 2007; Rachaputi, Yashvir, & Wilson, 2021).

با توجه به حساسیت گیاه بادام‌زمینی به کمبود آهن در خاک‌های آهکی به دلیل تأثیر بی‌کربنات و افزایش pH و نیز حد بحرانی کمبود آهن (۵/۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم، Malakouti & Homae, 1989) در بادام‌زمینی گیاه مناسبی برای بررسی کمبود آهن است و با توجه به ارزش اقتصادی این گیاه، بهبود تغذیه آهن می‌تواند منجر به افزایش عملکرد شود. بنابراین، پژوهش حاضر به‌صورت آزمایش گلخانه‌ای در قالب طرح کاملاً تصادفی به‌صورت فاکتوریل با سه تکرار انجام شد. هر واحد آزمایشی شامل گلدان‌هایی حاوی ۷ کیلوگرم خاک با ۴ بوته بادام‌زمینی بود. فاکتورهای مورد بررسی شامل منابع مختلف آهن (کنترل - بدون مصرف آهن، سکوسترین آهن، اکسید آهن و براده آهن) به‌صورت مصرف خاکی، و گلوکاتینون به‌صورت محلول‌پاشی در سه سطح (صفر، ۱ و ۲ میلی‌مولار) بود.

به‌منظور تأمین مقدار یکنواختی از آهن قابل‌استخراج در کلیه‌ی تیمارها، سه منبع مختلف آهن شامل سکوسترین آهن (Fe-EDDHA)، ۶ درصد آهن از شرکت هلیو پتاسه فرانسه)، پودر اکسید آهن (Fe_3O_4)، مگنتیت با خلوص ۷۲ درصد آهن شرکت فرونز استال قرقیزستان) و

نتایج و بحث

اثرات منابع آهن و گلوپتاتین بر وزن خشک اندام هوایی

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که فقط برهم‌کنش آهن و گلوپتاتین بر وزن خشک اندام گیاهی در سطح احتمال ۵ درصد معنی‌دار بود (جدول ۳). براساس نتایج مقایسه میانگین داده‌ها و برهم‌کنش سطوح مختلف آهن و گلوپتاتین بر وزن خشک اندام هوایی (شکل ۱)، در سطح شاهد گلوپتاتین (GSH₀)، تفاوت معنی‌داری بین منابع مختلف آهن مشاهده نشد. در حالی که با کاربرد گلوپتاتین در سطوح ۱ و ۲ میلی مولار، منبع کلاته آهن (Fe(III)-EDDHA) بیشترین وزن خشک را نشان داد که نسبت به تیمار اکسید آهن (Fe_{Oxi}) به ترتیب ۲۷ و ۲۲ درصد افزایش داشت؛ اما این تفاوت در مقایسه با تیمار شاهد بدون آهن (Fe₀) و براده آهن (Fe_{Ore}) معنی‌دار نبود. در حالی که آهن اکسیدی

(Fe_{Oxi}) نیز وزن خشک اندام هوایی را بهبود بخشید، اما کارایی آن به طور قابل توجهی کمتر از آهن کلاته بود. وزن خشک اندام هوایی در گلوپتاتین در سطح یک میلی مولار (GSH₁) با آهن اکسیدی (Fe_{Oxi}) کمترین و معادل ۲۴/۷ گرم بر گلدان بود، اما با افزودن گلوپتاتین افزایش یافت و نشان داد که واکنش دوز-پاسخی به کاربرد گلوپتاتین دارد. همچنین افزودن گلوپتاتین در سطح دو میلی مولار اثربخشی براده آهن را نیز افزایش داده و سبب افزایش ۱۲/۵ درصدی (۳۲/۶۴ - ۲۹ گرم بر گلدان)، نسبت به براده آهن به تنهایی شد. بیشترین وزن خشک اندام هوایی در سکوسترین آهن با محلول‌پاشی گلوپتاتین در سطح دو میلی مولار (۳۵/۶۳) رسید. اگرچه این افزایش ۲۲ درصدی (۳۵/۶۳ - ۲۹/۲ گرم بر گلدان)، در مقایسه با تیمار سکوسترین آهن و فاقد گلوپتاتین معنی‌دار بود و نسبت به شاهد معنی‌دار نبود.

جدول ۱- خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک

Table 1- Physical and Chemical Properties of Soil

بافت خاک Texture Soil	اسیدیته pH	هدایت الکتریکی Electrical Conductivity (EC) (dS m ⁻¹)	کربن آلی Organic Carbon (OC) (%)	نیترोजن کل Total Nitrogen (%)	کربنات کلسیم معادل Calcium Carbonate Equivalent (CCE) (%)	رطوبت مزرعه Field Capacity Moisture (FC) (%)	فسفر قابل استفاده Available Phosphorus (mg kg ⁻¹)	پتاسیم قابل استفاده Available Potassium (mg kg ⁻¹)	آهن قابل استفاده DTPA Extractable Iron (DTPA-Fe) (mg kg ⁻¹)
Loam	7.4	1.04	0.58	0.06	15.3	18	6.82	153.13	2.07

جدول ۲- میزان آهن قابل استخراج از براده آهن و اکسید آهن با استفاده از عصاره‌گیرهای مختلف (برحسب میکروگرم بر گرم)

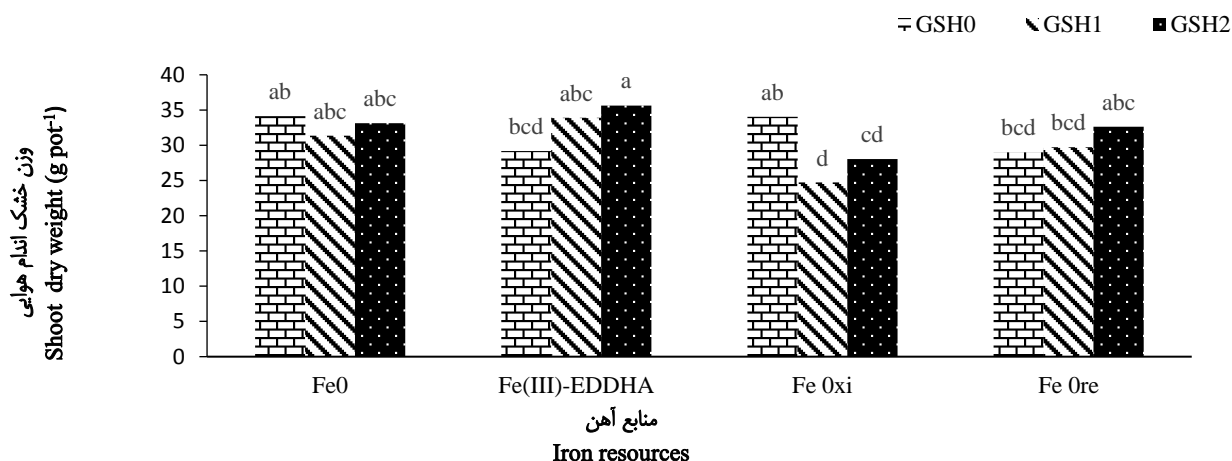
Table 2- Extractable iron content (µg/g) from Iron Filings and Iron Oxide using various extractants

عصاره‌گیر Extractant	آهن استخراج شده از براده آهن Iron extracted from iron filings	آهن استخراج شده از اکسید آهن Iron extracted from iron oxide
گلوپتاتین (۵ میلی مولار) Glutathione (GSH, 5 mM)	27,780	2,192.6
دی‌تیوتریتول (۰.۵ میلی مولار) Dithiothreitol (DTT, 0.5 mM)	294.4	153.8
تیوفنول (۵ میلی مولار) Thiophenol (5 mM)	52.8	3.4
آب دی‌یونیزه Deionized Water (MQ)	10.48	7.8
دی‌تی‌پی‌ای-تری‌اتانول‌آمین DTPA-TEA (pH 7.3)	2,086	219

جدول ۳- تجزیه واریانس اثرهای اصلی و متقابل فاکتورها بر صفات مورد مطالعه
Table 3- Analysis of variance for the main and interaction effects of factors on the studied traits

منبع تغییرات S.O.V	درجه آزادی DF	میانگین مربعات (Mean squares)					
		وزن خشک اندام هوایی Shoot dry weight	وزن خشک ریشه Root dry weight	غلظت آهن برگ عصاره‌گیری شده با فنانتروپین Phenanthroline-extracted leaf iron concentration	جذب آهن کل اندام هوایی Total iron uptake of shoot	جذب آهن کل ریشه Total iron uptake in root	جذب نیتروژن اندام هوایی Nitrogen uptake of the shoot
آهن Fe	2	34.18 ^{ns}	0.498 ^{ns}	1.72 ^{**}	5.51 ^{**}	0.05 ^{ns}	8627 ^{**}
گلوپتاتین Glutathione	3	18.64 ^{ns}	0.9772 ^{ns}	14.22 ^{**}	1.62 ^{ns}	0.11 [*]	8878 ^{**}
آهن*گلوپتاتین Glutathione*Fe	6	32.86 [*]	1.24 [*]	3.15 ^{**}	1.6 [*]	0.15 ^{**}	3498 ^{**}
خطا error	24	12.31	0.35	0.118	0.5	0.03	931
ضریب تغییرات CV	%	11.21	18	3.7	2.4	17.31	14.66

ns, **, and * represent non-significance, significance at the 1% level, and significance at the 5% level, respectively.



شکل ۱- اثر برهم‌کنش سطوح مختلف آهن و گلوپتاتین بر وزن خشک اندام هوایی

Fe₀: عدم کاربرد آهن، کنترل؛ Fe(III)-EDDHA: سکوسترین آهن؛ Fe_{0xi}: اکسید آهن؛ Fe_{0re}: براده آهن؛ GSH₀، GSH₁ و GSH₂ به ترتیب: صفر، یک و دو میلی‌مولار گلوپتاتین

Figure 1- The interaction effect of different levels of iron and glutathione on shoots dry weight

Fe₀: without Fe, control; Fe(III)-EDDHA: iron sequestration; Fe_{0xi}: iron oxide; Fe_{0re}: iron filings; GSH₀, GSH₁, and GSH₂: 0, 1, and 2 mM glutathione, respectively

مشابه‌ای گزارش کرده است که آهن کلاته (Fe(III)-EDDHA)، در ترکیب با محرک‌های رشد باعث بهبود محتوای کلروفیل و رشد اندام

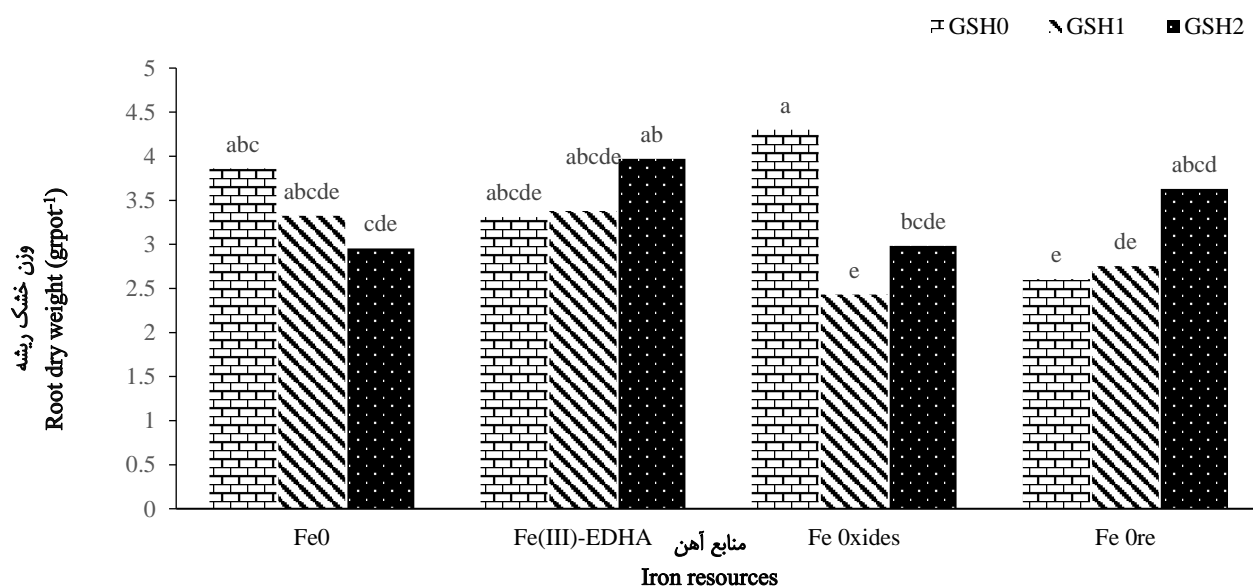
ولی نشان‌دهنده اثر هم‌افزایی سکوسترین و گلوپتاتین در افزایش وزن خشک اندام هوایی بود. سکوسترین هم‌چنین سبب افزایش ۸ درصد (۳۳/۹-۳۳/۳۵) و ۷/۶ درصدی (۳۳/۱-۳۵/۶) ماده خشک اندام هوایی در سطوح یک و دو میلی‌مولار گلوپتاتین در مقایسه با تیمار هم‌سطح گلوپتاتین و بدون آهن شد. مطالعه (Mohammadipour, Sedaghat-Hoor, & Mahboub-Khomami, 2013) نیز نتایج

هوایی در گیاه اسپاتیفیلوم^۱ شد.

اثرات منابع آهن و گلوپتاتین بر وزن خشک ریشه

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که برهم کنش آهن و گلوپتاتین بر وزن خشک ریشه در سطح احتمال ۵ درصد معنی دار بود (مطابق جدول ۳). براساس نتایج مقایسه میانگین داده‌ها و برهم کنش سطوح مختلف آهن و گلوپتاتین بر وزن خشک ریشه (مطابق شکل ۲)، در سطح شاهد گلوپتاتین (GSH₀)، بیشترین وزن خشک ریشه در تیمار اکسید آهن مشاهده شد که تفاوت معنی داری با شاهد Fe₀ نداشت، اما به طور معنی داری بیشتر از تیمار براده آهن (افزایش حدود ۴۳ درصد) بود. در سطح گلوپتاتین ۱ میلی مولار، تیمار سکوسترین آهن (Fe(III)-EDDHA) بیشترین وزن خشک ریشه را داشت که تفاوت معنی داری با تیمارهای شاهد (Fe₀) و براده آهن (Fe_{Ore}) نشان نداد؛ در حالی که تیمار اکسید آهن کاهش قابل توجهی (حدود ۳۷ درصد) نسبت به شاهد (Fe₀) نشان داد. در سطح ۲ میلی مولار گلوپتاتین نیز بالاترین وزن خشک ریشه در تیمار سکوسترین آهن (Fe(III)-EDDHA) مشاهده شد، اما تفاوت آن با تیمارهای شاهد آهن (Fe₀) و براده آهن (Fe_{Ore}) معنی دار نبود و نسبت به تیمار اکسید آهن افزایش (۲۵/۵ درصد) را نشان داد. همچنین سکوسترین آهن سبب افزایش تاثیر گلوپتاتین در سطوح یک و دو

میلی مولار به ترتیب، ۱/۶ و ۳۴/۴ درصدی (۳/۳۲-۳/۳۸ و ۲/۹۵-۳/۹۷ گرم بر گلدان)، در مقایسه با تیمار هم سطح گلوپتاتین و بدون آهن شد. این افزایش در سطح دو میلی مولار معنی دار شد. به طور کلی، افزایش معنی دار وزن خشک اندام هوایی و پایداری مطلوب وزن خشک ریشه در حضور سکوسترین آهن (Fe(III)-EDDHA) و گلوپتاتین به ویژه در سطوح بالاتر (۲ میلی مولار) می تواند به دلیل بهبود فراهمی آهن در خاک آهکی باشد. نتایج مطالعات قبلی نیز نشان داده‌اند که سکوسترین آهن (Fe(III)-EDDHA) به دلیل پایداری و انحلال پذیری بالا در شرایط قلیایی خاک، قابلیت جذب آهن و رشد گیاهان حساس به کمبود آهن را بهبود می بخشد (Malakouti & Homae, 1989; Lucena & Chaney, 2006). همچنین گلوپتاتین به عنوان ترکیبی با خاصیت احیاکنندگی و عصاره گیری آهن از ترکیبات معدنی می تواند باعث افزایش دسترسی گیاه به آهن شود (Gill & Tuteja, 2010; Gheshlaghi et al., 2019). با این حال کاهش وزن خشک ریشه در تیمار اکسید آهن در حضور گلوپتاتین ممکن است به دلیل تغییرات شیمیایی در ناحیه ریزوسفری باشد که منجر به کاهش فراهمی موضعی آهن شده است (Zuchi et al., 2015).



شکل ۲- اثر برهم کنش سطوح مختلف آهن و گلوپتاتین بر وزن خشک ریشه

Fe₀: عدم کاربرد آهن، کنترل؛ Fe(III)-EDDHA: سکوسترین آهن؛ Fe_{Ox}: اکسید آهن؛ Fe_{Ore}: براده آهن؛ GSH₀، GSH₁ و GSH₂ به ترتیب: صفر، یک و دو میلی مولار گلوپتاتین

Figure 2- The interaction effect of different levels of iron and glutathione on root dry weight

Fe₀: without Fe, control; Fe(III)-EDDHA: iron sequestration; Fe_{Ox}: iron oxide; Fe_{Ore}: iron filings; GSH₀, GSH₁, and GSH₂: 0, 1, and 2 mM glutathione, respectively

کمتری (۲۴ و ۷ درصد کمتر) داشته و تنها براده آهن و سوکسترین آهن، افزایش آماری معنی‌داری با آهن اکسیدی (Fe_{Oxi}) داشتند. علاوه بر این محلول‌پاشی گلوکاتینون در سطح یک میلی‌مولار، غلظت آهن در سوکسترین آهن را در مقایسه با گلوکاتینون به تنهایی ۱۱ درصد (۱۰/۴-۹/۳۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم) افزایش داد و همچنین افزودن گلوکاتینون در این سطح موجب افزایش ۵۰/۶ درصدی (۷/۳-۱۱) میلی‌گرم بر کیلوگرم) در براده آهن، نسبت به براده آهن به تنهایی شد و هر دو درصد افزایشی از نظر آماری معنی‌دار بود.

به‌طور کلی، این نتایج نشان می‌دهد که در حضور گلوکاتینون، اثربخشی منابع معدنی آهن به‌ویژه براده آهن (Fe_{Ore}) در سطح ۱ میلی‌مولار و اکسید آهن (Fe_{Oxi}) در سطح ۲ میلی‌مولار بهبود یافته و منجر به افزایش قابل توجه آهن قابل جذب در برگ گیاه بادام‌زمینی در خاک آهکی شده است. در شرایط بدون کاربرد گلوکاتینون (GSH_0)، اگرچه تیمار سوکسترین آهن و آهن اکسیدی (Fe_{Oxi} و $Fe(III)-EDDHA$) نسبت به تیمار شاهد بدون آهن، افزایش غلظت آهن را نشان دادند، اما میزان آهن قابل استخراج در تیمار براده آهن (Fe_{Ore})، بسیار پایین باقی ماند. این یافته با مطالعات پیشین هم‌خوانی دارد که نشان داده‌اند، ترکیبات معدنی مانند براده آهن (Fe_{Ore}) به‌دلیل پایداری بیشتر در فرم آهن فریک ($Fe(III)$) و حلالیت پایین در pH‌های بالا، در غیاب عوامل احیاکننده، قابلیت استفاده محدودی دارند (Lindsay & Schwab, 1982; Marschner, 1995). با کاربرد گلوکاتینون در سطح ۱ میلی‌مولار، تیمار براده آهن (Fe_{Ore}) بیشترین افزایش غلظت آهن را در برگ نشان داد. این امر احتمالاً به خاصیت احیاکنندگی گلوکاتینون مربوط می‌شود که می‌تواند فرم غیرمحلول آهن فریک ($Fe(III)$) به فرو قابل جذب ($Fe(II)$) تبدیل کرده و در عین حال با کاهش pH ریزوسفری، انحلال‌پذیری آهن را افزایش دهد (Zuchi et al., 2015; Gheshlaghi et al., 2019). همچنین مشخص شده است که گلوکاتینون می‌تواند با آهن کمپلکس تشکیل دهد و انتقال آن را از ریشه به اندام‌های هوایی تسهیل کند (Rouhier, Couturier, Johnson, & Jacquot, 2010). در سطح ۲ میلی‌مولار گلوکاتینون، بیشترین غلظت آهن برگ مربوط به تیمار اکسید آهن (Fe_{Oxi}) بود، که نسبت به سوکسترین آهن ($Fe(III)-EDDHA$) افزایش قابل توجهی نشان داد. این یافته قابل توجه است چرا که با وجود اینکه کلات‌های مصنوعی مانند سوکسترین آهن ($Fe(III)-EDDHA$) به‌دلیل پایداری شیمیایی بالاتر در خاک‌های آهکی شناخته شده‌اند (Lucena & Chaney, 2006)، اما کاربرد هم‌زمان گلوکاتینون با منابع معدنی آهن ممکن است از طریق اثرات هم‌افزایی در کاهش pH موضعی، احیای آهن فریک ($Fe(III)$) و همچنین افزایش تحرک آهن، باعث افزایش کارایی منابع معدنی آهن شود. این پدیده به‌ویژه در منابعی مانند آهن اکسیدی (Fe_{Oxi}) که سطح ویژه بالایی دارند و قابلیت پاسخ‌گویی به شرایط

در تیمار براده آهن نیز فراهمی اندک آهن به‌دلیل عدم حضور عوامل احیاکننده یا کلات‌کننده، موجب کاهش رشد ریشه در سطح شاهد شد، اما کاربرد گلوکاتینون در سطح ۲ میلی‌مولار تا حدودی این محدودیت را برطرف کرده و رشد ریشه را بهبود بخشید و موجب افزایش رشد ۳۹/۴۳ درصدی (۶/۶۳-۲/۳ گرم بر گلدان)، در مقایسه با مصرف براده آهن به تنهایی شد.

بنابراین، نتایج این پژوهش ضمن تأیید یافته‌های قبلی (Zuchi et al., 2015; Gheshlaghi et al., 2019)، نشان می‌دهد که کاربرد توأم سوکسترین آهن ($Fe(III)-EDDHA$) و گلوکاتینون می‌تواند به‌عنوان راه‌کاری مناسب برای بهبود فراهمی آهن و حفظ رشد گیاه بادام‌زمینی در خاک‌های آهکی پیشنهاد شود.

بررسی اثر منابع آهن و گلوکاتینون بر غلظت و جذب عناصر

غذایی در گیاه بادام‌زمینی

غلظت آهن فعال

براساس نتایج (جدول ۳)، تجزیه واریانس اثرهای اصلی و متقابل فاکتورها بر غلظت آهن قابل استخراج با معرف فنانتروپین در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار بود. برهم‌کنش سطوح مختلف آهن و گلوکاتینون بر غلظت آهن برگ عصاره‌گیری شده با فنانتروپین (شکل ۳)، نشان داد که هر دو عامل نقش قابل توجهی در بهبود فراهمی آهن قابل جذب در شرایط خاک آهکی داشتند. در سطح بدون گلوکاتینون (GSH_0)، تیمار سوکسترین آهن ($Fe(III)-EDDHA$) نسبت به تیمار شاهد (Fe_0) افزایش ۳۵/۲ درصدی در غلظت آهن عصاره‌گیری شده نشان داد، در حالی که تیمار اکسید آهن (Fe_{Oxi}) افزایش ۳۲/۲ درصدی و براده آهن (Fe_{Ore}) تنها افزایش ۸/۲ درصدی نسبت به Fe_0 داشت. از میان تیمارها، سوکسترین و آهن اکسیدی ($Fe(III)-EDDHA$ و Fe_{Oxi}) تفاوت معنی‌داری با Fe_0 نشان دادند، در حالی که براده آهن (Fe_{Ore}) از نظر آماری با Fe_0 تفاوت معنی‌داری نداشت. غلظت آهن فعال در شرایط عدم مصرف آهن (Fe_0)، آهن اکسیدی (Fe_{Oxi}) و براده آهن (Fe_{Ore}) با محلول‌پاشی گلوکاتینون در دو سطح ۱ و ۲ میلی‌مولار به‌ترتیب ۳۸ و ۴۹ درصد، ۹ و ۱۸ درصد و ۵۰ و ۲۲ درصد افزایش یافت. در سطح ۱ میلی‌مولار گلوکاتینون (GSH_1)، تیمار براده آهن (Fe_{Ore}) نسبت به آهن صفر و سوکسترین آهن ($Fe(III)-EDDHA$ و Fe_0) به‌ترتیب افزایش ۲۴/۴ و ۹ درصدی را نشان داد. در سطح ۲ میلی‌مولار گلوکاتینون (GSH_2)، تیمار اکسید آهن (Fe_{Oxi}) بیشترین مقدار آهن عصاره‌گیری شده را داشت و نسبت به سوکسترین آهن ($Fe(III)-EDDHA$) افزایشی معادل ۲۶ درصد نشان داد که از نظر آماری معنی‌دار بود. در این سطح، تیمارهای براده آهن و آهن صفر (Fe_0 و Fe_{Ore}) نسبت به آهن اکسیدی (Fe_{Oxi}) به‌ترتیب افزایش

بیشترین اثر افزایشی در نسبت مذکور مربوط به تیمار براده آهن (Fe_{Ore}) بود که از ۱/۹۶ در سطح صفر گلوپتاتینون به ۲/۷۲ در سطح ۲ میلی مولار افزایش یافت (افزایش حدود ۳۸/۴ درصد)، که این نتیجه احتمالاً ناشی از پتانسیل زیاد گلوپتاتینون در احیای آهن ($Fe(III)$) و تسهیل جذب آن از منابع معدنی مانند براده آهن است (Zuchi et al., 2015; Gheshlaghi et al., 2019).

نسبت غلظت آهن برگ قابل استخراج با فنانتروپین به آهن کل اندام هوایی در این پژوهش در دامنه ۱/۱۳ تا ۳/۴۳ قرار گرفت. این مقادیر در محدوده‌ی پایین‌تر گزارش‌های قبلی قرار دارند، به طوری که در مطالعات پیشین، دامنه‌هایی بین ۰/۷ تا ۲۲/۷ گزارش شده است. این اختلاف می‌تواند ناشی از تفاوت در منابع آهن، شرایط خاک، رقم گیاه، مراحل رشد و یا نوع تیمارهای زیستی باشد (Zuo et al., 2007; Kong, Dong, Xu, Liu, & Bai, 2014; Zhang, Dong, Kong, Liu, & Wang, 2014; Song, Dong, Tian, Wang, & He, 2017; Jiao, Wang, Ma, Zhang, & Jensen, 2021). با توجه به تنوع مطالعات انجام شده در گیاه بادام‌زمینی، نسبت آهن عصاره‌گیری شده با فنانتروپین بر غلظت آهن کل اندام هوایی در شرایط کشت و تیمارهای مختلف به ترتیب، ۰/۲-۷/۹ (Kong, Dong, Zhang, 2015; Wang, Xu, Liu, & Fan, 2015; Song, 2021) ۳/۴۷-۱۳/۶ (Zhang et al., 2014) ۳/۰۷-۱۱/۵۳ (Zuo et al., 2007) ۷/۹۹-۲۲/۷ (et al., 2017) ۱۱/۳۲-۱۸/۸۴ (Song, Dong, Tian, Bai, & He, 2016) ۱۳/۷۴-۱۶/۱۲ (Kong et al., 2014)، گزارش شده است. با این حال، تطابق عددی نسبی با بازه‌های گزارش شده نشان‌دهنده اعتبار نتایج حاضر و قابلیت استناد آن‌ها در شرایط مشابه کشت بادام‌زمینی است. نسبت‌های پایین‌تر در برخی تیمارها، نظیر سکوسترین آهن ($Fe(III)$ -EDDHA) در غیاب گلوپتاتینون، احتمالاً به تجمع آهن غیر فعال شده در بافت گیاه به‌ویژه در مراحل انتهایی رشد مربوط می‌شود (Kong et al., 2015; Jiao et al., 2021).

احیای ریزوسفری را دارند، بیشتر نمایان است (Chen, Yang, Qin, 2013; Abadía & Grusak, 2010; et al., 2010). به‌طور کلی، نتایج نشان می‌دهد که گلوپتاتینون نه تنها به عنوان آنتی‌اکسیدان عمل می‌کند، بلکه می‌تواند در شرایط قلیایی خاک، نقش فعالی در بهبود فراهمی آهن معدنی ایفا کند. به‌ویژه در سطوح پایین گلوپتاتینون، براده آهن بیشترین پاسخ را داشته و در سطوح بالاتر، اکسید آهن به عنوان منبع کارآمدتر ظاهر شده است. این تفاوت می‌تواند ناشی از تفاوت در ساختار و واکنش‌پذیری منابع آهن در تعامل با گلوپتاتینون و محیط خاک باشد.

نسبت غلظت آهن قابل استخراج با معرف فنانتروپین به غلظت آهن کل اندام هوایی

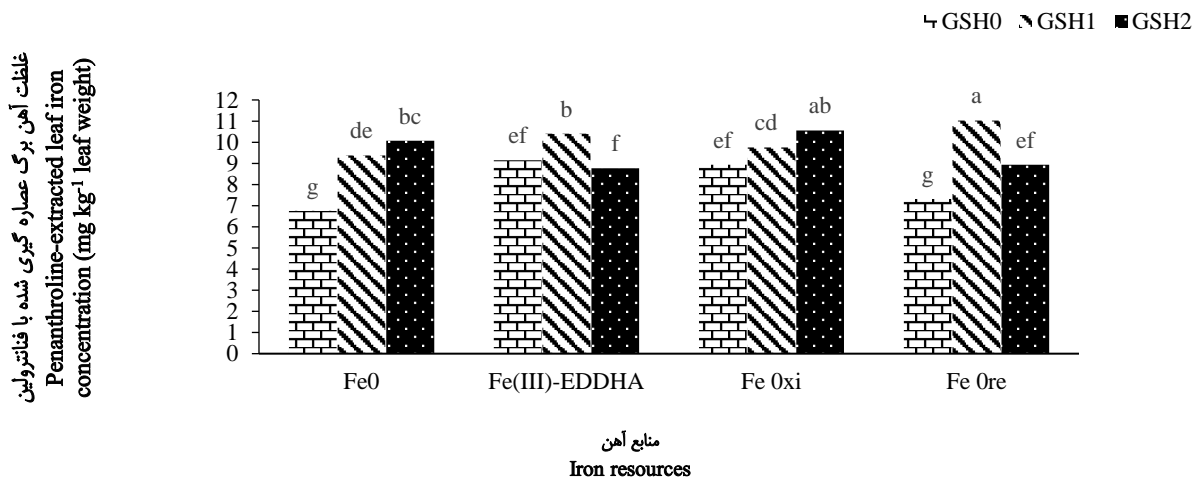
با توجه به جدول ۴، نسبت غلظت آهن برگ عصاره‌گیری شده با فنانتروپین به غلظت آهن کل اندام هوایی گیاه بادام‌زمینی، بسته به نوع منبع آهن و سطح گلوپتاتینون به کار رفته، در دامنه‌ای بین ۱/۱۳ تا ۳/۴۳ به دست آمد. این نسبت به عنوان شاخصی مهم در ارزیابی فراهمی آهن قابل استفاده برای گیاه شناخته می‌شود و بیانگر سهم آهن متحرک و فعال فیزیولوژیکی نسبت به آهن کل جذب شده در گیاه است (Marschner, 1995; Jungk, Waisel, & Kafkafi, 2002).

در تیمارهای بدون آهن (Fe_0) با افزایش گلوپتاتینون از صفر به ۲ میلی مولار، نسبت مذکور از ۲/۱۵ به ۲/۲۴ افزایش یافت (حدود ۴/۷ درصد افزایش). در تیمار سکوسترین آهن ($Fe(III)$ -EDDHA) نیز این نسبت از ۱/۹۵ در سطح بدون گلوپتاتینون به ۲/۳۲ در سطح ۲ میلی مولار گلوپتاتینون رسید (افزایش حدود ۱۸/۸ درصد)، که نشان‌دهنده بهبود استفاده فیزیولوژیکی از آهن جذب شده تحت تأثیر گلوپتاتینون است. در تیمار اکسید آهن (Fe_{Oxi})، افزایش سطح گلوپتاتینون از صفر به ۲ میلی مولار موجب افزایش نسبت از ۲/۲۸ به ۲/۴۰ شد (افزایش حدود ۴/۹ درصد)، که از تداوم عملکرد مثبت گلوپتاتینون در تحریک فعالیت جذب و استفاده از آهن حتی در منابع معدنی غیرکلاته حکایت دارد.

جدول ۴- نسبت غلظت آهن برگ عصاره‌گیری شده با فنانتروپین بر غلظت آهن کل اندام هوایی تحت تیمارهای مختلف در گیاه بادام‌زمینی

Table 4- Ratio of phenanthroline-extracted leaf iron concentration to total shoot iron concentration in peanut under different treatments

گلوپتاتینون Glutathione (mM)	کنترل Control (Fe_0)	سکوسترین آهن $Fe(III)$ -EDDHA	اکسید آهن Iron Oxide (Fe_{Oxi})	براده آهن Iron Ore (Fe_{Ore})
0	2.15	1.95	2.28	1.96
1	1.83	2.08	2.07	2.44
2	2.24	2.32	2.40	2.72
دامنه Range	1.13- 3.43			



شکل ۳- اثر برهم‌کنش سطوح مختلف آهن و گلوپروتئین بر غلظت آهن برگ عصاره‌گیری شده با فنانتروپین
 Fe₀: عدم کاربرد آهن، کنترل؛ Fe(III)-EDDHA: سکوسترین آهن؛ FeO_{xi}: اکسید آهن؛ FeO_{re}: براده آهن؛ GSH₀، GSH₁ و GSH₂ به ترتیب: صفر، یک و دو میلی‌مولار گلوپروتئین

Figure 3- The interaction effect of different levels of iron and glutathione on phenanthroline-extracted leaf iron concentration
 Fe₀: without Fe, control; Fe(III)-EDDHA: iron sequestration; FeO_{xi}: iron oxide; FeO_{re}: iron filings; GSH₀, GSH₁, and GSH₂: 0, 1, and 2 mM glutathione, respectively

نسبت به آهن صفر (Fe₀) داشت که از نظر آماری معنی‌دار نبود. در مجموع، تیمار سکوسترین آهن (Fe(III)-EDDHA) در تمامی سطوح گلوپروتئین کارایی بالاتری در افزایش جذب آهن کل نشان داد. در حالی که منابع معدنی آهن اکسیدی و براده آهن (FeO_{re}) و FeO_{xi})، به‌ویژه در سطوح بالای گلوپروتئین، نتایج ضعیف‌تری داشتند و حتی در برخی موارد با کاهش معنی‌دار جذب آهن همراه بودند. این نتایج تأییدکننده‌ی نقش مؤثر منابع کلاته آهن و گلوپروتئین در بهبود جذب آهن در شرایط محدودکننده مانند خاک‌های آهکی است که پیش‌تر نیز در مطالعاتی چون (Panjtandoust, Sorooshzadeh, & Ghanati, 2010; Koen, Szymańska, Klingner, Dobrowolska, Besson-Bard, & Wendehenne, 2012; Gheshlaghi *et al.*, 2019) گزارش شده بود.

جذب آهن کل ریشه

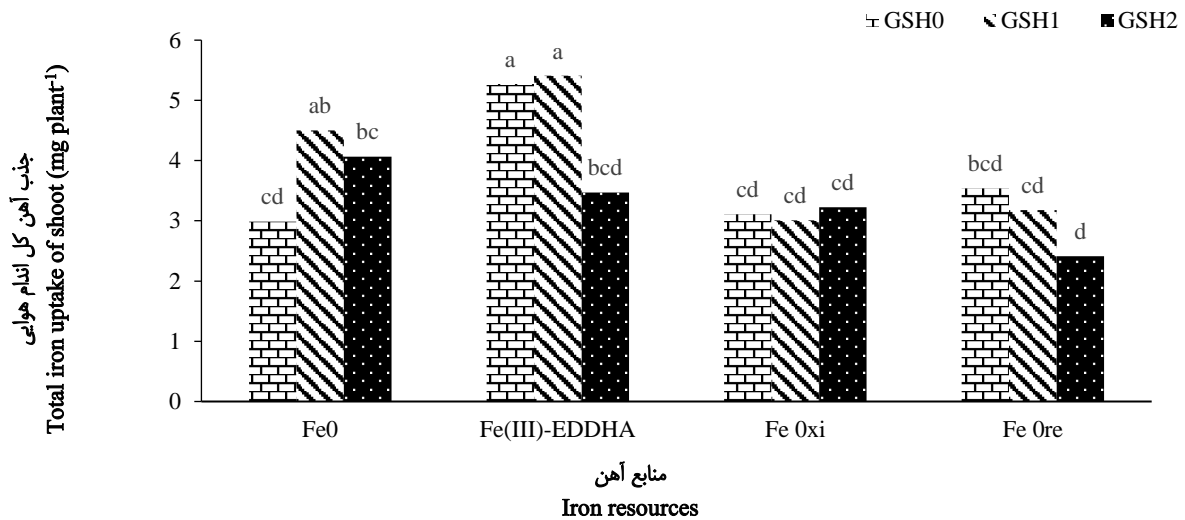
براساس نتایج تجزیه واریانس داده‌ها، اثر منابع گلوپروتئین و برهم‌کنش آهن و گلوپروتئین بر میزان جذب آهن کل در ریشه گیاه به ترتیب در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد معنی‌دار بود (جدول ۳). یافته‌ها (شکل ۵)، نشان داد که در سطح بدون گلوپروتئین (GSH₀)، تیمار اکسید آهن (FeO_{xi}) با افزایش حدود ۱۶/۴ درصدی نسبت به تیمار شاهد (Fe₀)، بیشترین جذب آهن ریشه را نشان داد، هرچند این اختلاف از نظر آماری معنی‌دار نبود. تیمار سکوسترین آهن (Fe(III)-EDDHA) نیز با کاهش حدود ۱۵/۵ درصدی نسبت به آهن صفر (Fe₀) عملکردی مشابه داشت و تفاوت آن از نظر آماری بی‌معنی بود.

جذب آهن کل اندام هوایی

بر اساس نتایج تجزیه واریانس داده‌ها، اثر منابع آهن و برهم‌کنش آهن و گلوپروتئین بر میزان جذب آهن کل در گیاه به ترتیب در سطح احتمال ۱ و ۵ درصد معنی‌دار بود (جدول ۳). نتایج مقایسه میانگین بر جذب آهن کل در اندام هوایی (شکل ۴)، نشان داد که در سطح بدون گلوپروتئین (GSH₀)، مصرف (Fe(III)-EDDHA) موجب افزایش ۷۶ درصدی و معنی‌داری جذب آهن نسبت به تیمار شاهد بدون آهن (Fe₀) شد. تیمارهای اکسید و براده آهن (FeO_{re} و FeO_{xi}) افزایش جذب حدود ۴ تا ۱۸ درصدی نسبت به آهن صفر (Fe₀) داشتند، اما این افزایش‌ها از نظر آماری معنی‌دار نبودند.

در سطح گلوپروتئین ۱ میلی‌مولار (GSH₁)، تیمار سکوسترین آهن (Fe(III)-EDDHA) با حدود ۸۱ درصد افزایش جذب نسبت به آهن صفر (Fe₀)، افزایش معنی‌داری را نشان داد. در همین سطح، تیمار براده آهن (FeO_{re}) حدود ۶ درصد و اکسید آهن (FeO_{xi}) حدود ۰/۶ درصد افزایش جذب نسبت به آهن صفر (Fe₀) داشتند که از نظر آماری غیرمعنی‌دار بودند. محلول پاشی گلوپروتئین در سطح یک میلی‌مولار، جذب آهن در سکوسترین آهن را در مقایسه با گلوپروتئین به تنهایی ۲۰ درصد (۴/۵-۴/۵ میلی‌گرم بر گیاه) افزایش داد.

در سطح گلوپروتئین ۲ میلی‌مولار (GSH₂)، تیمار سکوسترین آهن (Fe(III)-EDDHA)، افزایش ۱۶ درصدی نسبت به (Fe₀) را نشان داد. در مقابل، تیمار براده آهن (FeO_{re}) کاهش ۱۹/۳ درصدی نسبت به آهن صفر (Fe₀) را نشان داد که از نظر آماری معنی‌دار نبود. تیمار آهن اکسیدی (FeO_{xi}) نیز در این سطح افزایش اندکی (۸ درصد)،



شکل ۴- اثر برهم کنش سطوح مختلف آهن و گلوپاتیون بر جذب آهن کل اندام هوایی (۴ بوته در ۷ کیلوگرم خاک)

Fe₀: عدم کاربرد آهن، کنترل؛ Fe(III)-EDDHA: سکوسترین آهن؛ FeO_{xi}: اکسید آهن؛ FeO_{re}: براده آهن؛ GSH₀، GSH₁ و GSH₂ به ترتیب: صفر، یک و دو میلی مولار گلوپاتیون

Figure 4- Interaction effect of different levels of iron and glutathione on total iron uptake of shoot

Fe₀: without Fe, control; Fe(III)-EDDHA: iron sequestration; FeO_{xi}: iron oxide; FeO_{re}: iron filings; GSH₀, GSH₁, and GSH₂: 0, 1, and 2 mM glutathione, respectively

همچنین افزودن گلوپاتیون در این سطح موجب افزایش معنی دار جذب آهن در ۵۵/۶ درصدی (۱/۰۸ - ۰/۶۹ میلی گرم بر گیاه) در براده آهن، نسبت به براده آهن به تنهایی شد.

به طور کلی، نتایج نشان داد که تیمار سکوسترین آهن (-Fe(III)-EDDHA) در ترکیب با محلول پاشی گلوپاتیون ۲ میلی مولار، مؤثرترین تیمار در افزایش جذب آهن کل ریشه بود. در حالی که منابع معدنی آهن اکسیدی و براده آهن (FeO_{re} و FeO_{xi}) نیز در برخی سطوح گلوپاتیون منجر به بهبود نسبی جذب آهن شدند، اما این اثرات عمدتاً از نظر آماری معنی دار نبودند. این اختلاف عملکرد می تواند به تفاوت در حلالیت، پایداری در pH بالا، و کارایی جذب آهن از این منابع نسبت داده شود، به ویژه این تعامل به شکل مثبت تر بین سکوسترین آهن با گلوپاتیون در شرایط خاک آهکی دیده می شود (Roosta & Mohsenian, 2012; Gheshlaghi et al., 2019).

در این پژوهش، تیمار سکوسترین آهن (-Fe(III)-EDDHA) به ویژه در سطح ۲ میلی مولار گلوپاتیون، بیشترین افزایش جذب آهن ریشه را نشان داد، که این یافته با مطالعات قبلی مبنی بر تأثیر مثبت سکوسترین آهن بر جذب آهن ریشه در گیاه فلفل سیاه (Roosta & Mohsenian, 2012)، یونجه (Gheshlaghi et al., 2019) و اسپاتی فیلیوم (Mohammadipour et al., 2013) همخوانی دارد. این اثر به پایداری بالای سکوسترین آهن در محیط های قلیایی و فراهمی مداوم آهن برای ریشه نسبت داده می شود.

در مقابل، تیمار براده آهن (FeO_{re}) با کاهش حدود ۳۷ درصدی نسبت به آهن صفر (Fe₀)، کاهش معنی داری در جذب آهن ریشه نشان داد. کاربرد منابع آهن اکسیدی و براده آهن به تنهایی سبب افزایش ۱۶/۴ درصدی (۱/۱۱ - ۱/۲۹ میلی گرم بر گیاه) و کاهش ۳۷ درصدی (۰/۶۹ - ۱/۱۱ میلی گرم بر گیاه) نسبت به شاهد شد.

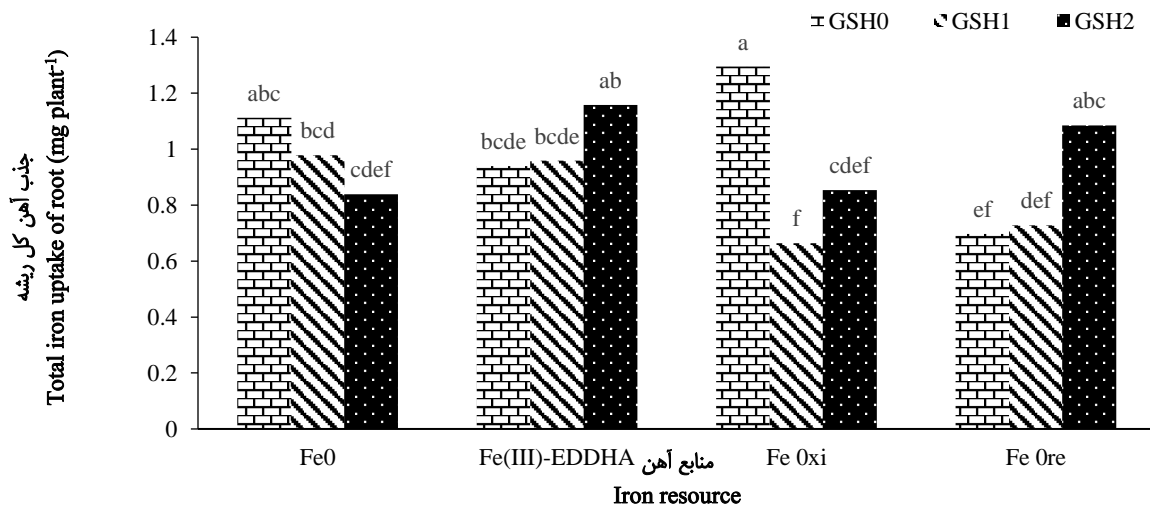
در سطح ۱ میلی مولار گلوپاتیون (GSH₁)، تیمار سکوسترین آهن (-Fe(III)-EDDHA)، جذبی معادل آهن صفر (Fe₀) داشت و اختلاف آماری بین آن ها مشاهده نشد. تیمار اکسید آهن (FeO_{xi}) در این سطح، کاهش حدود ۴۰ درصدی نسبت به آهن صفر (Fe₀) را نشان داد که این کاهش از نظر آماری معنی دار بود. تیمار براده آهن (FeO_{re}) نیز در این سطح با کاهش حدود ۳۴ درصدی، تفاوت معنی داری با آهن صفر (Fe₀) داشت. در سطح ۲ میلی مولار گلوپاتیون (GSH₂)، تیمار سکوسترین آهن (-Fe(III)-EDDHA) با افزایش حدود ۳۷/۹ درصدی نسبت به تیمار (GSH₂Fe₀)، بالاترین جذب آهن در ریشه را نشان داد که از نظر آماری معنی دار بود. تیمار براده آهن (FeO_{re}) نیز در این سطح، افزایش حدود ۲۹ درصدی در جذب آهن نسبت به آهن صفر (Fe₀) داشت، اما این اختلاف از نظر آماری معنی دار نبود. همچنین تیمار اکسید آهن (FeO_{xi}) در همین سطح با افزایش حدود ۱/۶ درصدی نسبت به تیمار (GSH₂Fe₀)، تفاوت آماری معنی داری نشان نداد. محلول پاشی گلوپاتیون در سطح دو میلی مولار، جذب آهن ریشه در سکوسترین آهن را در مقایسه با گلوپاتیون به تنهایی ۳۷/۹ درصد (۱/۱۵ - ۰/۸۳ میلی گرم بر گیاه) افزایش داد و

در تیمار سکوسترین آهن (Fe(III)-EDDHA) مشاهده شد، که با وجود جذب بالای آهن در ریشه، آهن قابل استخراج در برگ به نسبت کمتری افزایش یافت. چنین الگویی احتمالاً ناشی از محدودیت در انتقال درون گیاهی یا پتانسیل ذخیره‌سازی آهن به شکل غیر فعال در ریشه است (Koen *et al.*, 2012; Ramirez, Bartoli, & Lamattina, 2013; Shanmugam, Wang, Tshednee, & Karunakaran, & Yeh, 2015).

جذب نیتروژن اندام هوایی

براساس نتایج تجزیه واریانس داده‌ها، اثر منابع آهن و برهم‌کنش آهن و گلوپتاتین بر میزان جذب نیتروژن در اندام هوایی گیاه به‌ترتیب در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار بود (جدول ۳). براساس داده‌ها (شکل ۶)، جذب نیتروژن در اندام هوایی گیاه بادام‌زمینی به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر نوع منبع آهن و محلول‌پاشی گلوپتاتین قرار گرفت. در سطح بدون گلوپتاتین (GSH₀)، بیشترین مقدار جذب نیتروژن در تیمار سکوسترین آهن (Fe(III)-EDDHA) مشاهده شد که نسبت به تیمار شاهد (Fe₀) حدود ۱۳۲ درصد افزایش نشان داد. تیمارهای اکسید آهن و براده آهن (Fe_{Ore} و Fe_{Oxi}) نیز به‌ترتیب باعث افزایش ۴۹ و ۱۰۸ درصدی جذب نیتروژن نسبت به (Fe₀) شدند.

در مورد منابع معدنی آهن مانند اکسید آهن (Fe_{Oxi})، اگرچه در برخی سطوح گلوپتاتین (GSH₀) افزایش جزئی در جذب مشاهده شد، اما با افزایش سطح گلوپتاتین به ۱ و ۲ میلی‌مولار، جذب آهن کاهش یافت. این رفتار می‌تواند به واکنش‌های احتمالی بین گلوپتاتین و ترکیبات معدنی اکسید آهن در ریزوسفر مربوط باشد که منجر به کاهش تحرک و دسترسی آهن می‌شود. با این حال، گزارش‌هایی از تأثیر مثبت منابع اکسیدی بر افزایش جذب آهن در گیاهان مانند لوبیا (De Souza Rui, Ma, Hao, Guo, Rui, & Torres *et al.*, 2019) و سویا (Tang, & Zhu, 2016) وجود دارد، که نشان می‌دهد این تأثیر ممکن است تحت تأثیر نوع خاک، روش مصرف یا ویژگی‌های فیزیولوژیکی گیاه قرار گیرد. از سوی دیگر، گلوپتاتین با عملکرد احیاکننده قوی خود، در برخی تیمارها مانند براده آهن (Fe_{Ore}) موجب افزایش جذب آهن ریشه شد (افزایش ۲۹ درصدی در GSH₂ نسبت به کنترل)، اگرچه این افزایش از نظر آماری معنی‌دار نبود اما این نتیجه هم‌راستا با یافته‌هایی (Gheshlaghi *et al.*, 2019) است که نشان دادند، گلوپتاتین می‌تواند با انحلال مجدد آهن رسوب‌شده در آپوپلاست ریشه و تسهیل انتقال آن به اندام هوایی نقش مؤثری در مقابله با کمبود آهن ایفا کند. بررسی الگوی جذب آهن در اندام هوایی و ریشه نشان داد که در برخی تیمارها، گلوپتاتین موجب افزایش جذب آهن ریشه شد. اما این آهن به‌طور کامل به بخش‌های هوایی منتقل نشد. این موضوع به‌ویژه



شکل ۵- اثر برهم‌کنش سطوح مختلف آهن و گلوپتاتین بر جذب آهن کل ریشه

Fe₀: عدم کاربرد آهن، کنترل؛ Fe(III)-EDDHA: سکوسترین آهن؛ Fe_{Oxi}: اکسید آهن؛ Fe_{Ore}: براده آهن؛ GSH₀، GSH₁ و GSH₂ به‌ترتیب: صفر، یک و دو میلی‌مولار گلوپتاتین

Figures 5- Interaction effect of different levels of iron and glutathione on total iron uptake in roots

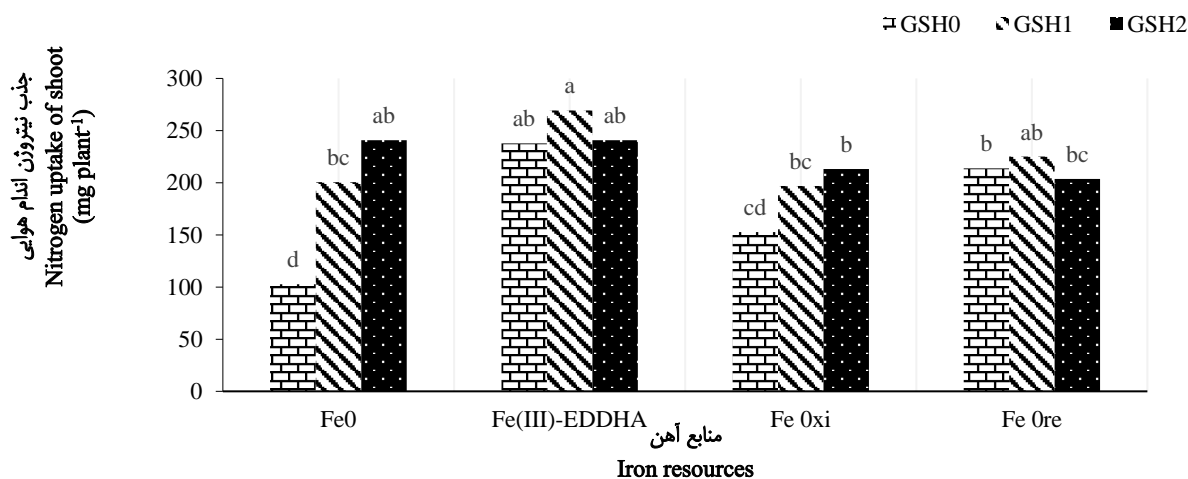
Fe₀: without Fe, control; Fe(III)-EDDHA: iron sequestration; Fe_{Oxi}: iron oxide; Fe_{Ore}: iron filings; GSH₀, GSH₁, and GSH₂: 0, 1, and 2 mM glutathione, respectively

داشته، ولی تفاوت‌های میان آن‌ها نسبت به گلوپتاتینون سطح یک میلی‌مولار (GSH₁) کاهش یافت و جذب نیتروژن به حدود ۹۸ تا ۱۳۴ درصد نسبت به شاهد رسید.

این یافته‌ها نشان می‌دهد که کاربرد گلوپتاتینون به‌ویژه در سطح ۱ میلی‌مولار به‌طور مؤثری باعث بهبود جذب نیتروژن در اندام هوایی گیاه شد. افزایش جذب نیتروژن می‌تواند ناشی از نقش آهن در فعال‌سازی آنزیم‌های کلیدی در چرخه نیتروژن (نظیر نیترات‌ردوکتاز) و اثر هم‌افزایی گلوپتاتینون در بهبود جذب عناصر غذایی باشد (Marschner, 1995; Mohammadipour et al., 2013). مطالعات قبلی نیز اثربخشی مثبت منابع آهن کلاته و اکسیدی آهن در بهبود عملکرد نیتروژنی گیاهان را گزارش کرده‌اند (Yang et al., 2020; De Souza-Torres et al., 2021). در مجموع، ترکیب منابع مؤثر آهن به‌ویژه سکوسترین آهن (Fe(III)-EDDHA) با گلوپتاتینون، راه‌کاری عملی برای بهبود جذب نیتروژن در شرایط کم‌بود آهن در خاک‌های آهکی محسوب می‌شود. در این پژوهش، تعامل منابع مختلف آهن و سطوح گلوپتاتینون تأثیر معناداری بر جذب نیتروژن در اندام هوایی گیاه بادام‌زمینی داشت. در سطح بدون گلوپتاتینون (GSH₀)، تیمارهای سکوسترین آهن و براده آهن (Fe(III)-EDDHA و Fe_{Ore}) موجب افزایش معنی‌دار جذب نیتروژن نسبت به تیمار شاهد (Fe₀) شدند.

در سطح گلوپتاتینون ۱ میلی‌مولار (GSH₁)، جذب نیتروژن در تمام تیمارهای آهنی افزایش چشم‌گیری نسبت به آهن صفر (Fe₀) داشت. بیشترین مقدار جذب در تیمار سکوسترین آهن (Fe(III)-EDDHA) با افزایش حدود ۱۶۲ درصد نسبت به آهن صفر (Fe₀) مشاهده شد، در حالی که تیمارهای اکسید آهن و براده آهن (Fe_{Oxi} و Fe_{Ore}) نیز افزایشی به ترتیب معادل ۹۲ و ۱۲۰ درصد نسبت به آهن صفر (Fe₀) نشان دادند. محلول‌پاشی گلوپتاتینون در سطح یک میلی‌مولار، جذب نیتروژن در سکوسترین آهن را در مقایسه با گلوپتاتینون به تنهایی ۳۴/۳ درصد (۲۶۹-۲۰۰ میلی‌گرم بر گیاه) افزایش داد و هم‌چنین افزودن گلوپتاتینون در این سطح موجب افزایش ۵ درصدی (۲۲۵-۲۱۳/۸ میلی‌گرم بر گیاه) جذب در براده آهن نسبت به براده آهن به تنهایی شد. جذب نیتروژن اندام هوایی در منابع براده و سکوسترین آهن با محلول‌پاشی گلوپتاتینون در دو سطح ۱ و ۲ میلی‌مولار در مقایسه با شاهد به ترتیب افزایش ۱۲۰-۹۸ درصدی (۱۰۲-۲۲۵ و ۱۰۲-۲۰۳ میلی‌گرم بر گیاه در براده آهن) و ۱۳۵-۱۶۲ درصدی (۱۰۲-۲۶۹/۴ و ۱۰۲-۲۴۰ میلی‌گرم بر گیاه در سکوسترین آهن) دیده شد.

در سطح ۲ میلی‌مولار گلوپتاتینون (GSH₂) تیمار آهن صفر (Fe₀) پاسخ مثبتی به گلوپتاتینون نشان داد و جذب نیتروژن در آن نسبت به گلوپتاتینون صفر (GSH₀)، ۱۳۵ درصد افزایش یافت. تیمارهای سکوسترین آهن، آهن اکسیدی و براده آهن نیز (Fe(III)-EDDHA، Fe_{Ore} و Fe_{Oxi}) نیز در این سطح جذب بالایی (۱۰۷، ۱۳۴ و ۹۸ درصد)



شکل ۶- اثر برهم‌کنش سطوح مختلف آهن و گلوپتاتینون بر جذب نیتروژن اندام هوایی

Fe₀: عدم کاربرد آهن، کنترل؛ Fe(III)-EDDHA: سکوسترین آهن؛ Fe_{Oxi}: اکسید آهن؛ Fe_{Ore}: براده آهن؛ GSH₀ و GSH₁: به ترتیب: صفر، یک و دو میلی‌مولار گلوپتاتینون

Figure 6- Interaction effect of different levels of iron and glutathione on nitrogen uptake in shoots.

Fe₀: without Fe, control; Fe(III)-EDDHA: iron sequestration; Fe_{Oxi}: iron oxide; Fe_{Ore}: iron filings; GSH₀, GSH₁, and GSH₂: 0, 1, and 2 mM glutathione, respectively

وضعیت تغذیه‌ای گیاه بادام‌زمینی در خاک آهکی داشتند. تیمار سکوسترین آهن (Fe(III)-EDDHA) در ترکیب با گلوکاتینون در سطح ۲ میلی‌مولار، بیشترین افزایش را در جذب آهن کل در اندام هوایی، جذب آهن در ریشه، وزن خشک اندام هوایی و جذب نیتروژن نسبت به سایر تیمارها ایجاد کرد. هم‌چنین محلول‌پاشی گلوکاتینون به‌تنهایی نیز موجب افزایش آهن فعال در برگ، جذب کل آهن و بهبود انتقال آهن از ریشه به اندام هوایی شد. در میان منابع معدنی، براده آهن در ترکیب با گلوکاتینون عملکرد نسبتاً مطلوبی در افزایش آهن فعال، جذب آهن ریشه و وزن خشک گیاه نشان داد. بررسی نسبت آهن فعال به آهن کل نیز نشان داد که کاربرد گلوکاتینون، به‌ویژه در سطوح بالاتر، موجب افزایش سهم آهن فیزیولوژیکی قابل استفاده در گیاه شد. این نتایج بیانگر نقش مؤثر گلوکاتینون در افزایش فراهمی آهن از منابع مختلف و بهبود شاخص‌های رشدی و تغذیه‌ای گیاه در خاک‌های آهکی است. از طرفی، براده آهن (Fe_{ore}) که یک منبع معدنی و ارزان‌قیمت محسوب می‌شود، در ترکیب با گلوکاتینون عملکرد مناسبی در افزایش آهن فعال، جذب آهن و رشد گیاه داشت و می‌تواند به‌عنوان جایگزینی اقتصادی برای کودهای کلاته در مدیریت تغذیه آهن در خاک‌های آهکی مدنظر قرار گیرد. به‌طور کلی، این پژوهش تأکید می‌کند که کاربرد تلفیقی منابع آهن با ترکیبات محرک زیستی مانند گلوکاتینون، راهکاری عملی، مؤثر و اقتصادی برای بهبود تغذیه آهن در گیاهان حساس به کمبود آهن، به‌ویژه در خاک‌های آهکی، محسوب می‌شود و می‌تواند در قالب برنامه‌های کوددهی پایدار در کشاورزی مورد استفاده قرار گیرد.

سپاسگزاری

از معاونت محترم پژوهشی و فناوری دانشگاه فردوسی مشهد برای حمایت مالی از این طرح پژوهشی با کد ۵۴۵۹۳-۳ تشکر و قدردانی می‌شود.

این افزایش احتمالاً به پایداری بالای کلات سکوسترین آهن (Fe(III)-EDDHA) در خاک‌های آهکی (Lucena & Chaney, 2006) و هم‌چنین فراهمی نسبی آهن در تیمار براده آهن (Fe_{ore}) برمی‌گردد. این نتایج نشان می‌دهند که حتی در غیاب ترکیبات محرک مانند گلوکاتینون، استفاده از منابع مناسب آهن می‌تواند نقش مؤثری در بهبود وضعیت تغذیه‌ای گیاه ایفا کند.

در سطح گلوکاتینون ۱ میلی‌مولار (GSH₁)، جذب نیتروژن در تمامی تیمارهای آهن نسبت به شاهد (Fe₀) افزایش یافت و تیمار سکوسترین آهن (Fe(III)-EDDHA) همراه با گلوکاتینون سطح یک میلی‌مولار (GSH₁) بیشترین تأثیر مثبت و معنی‌دار را نشان داد. این یافته مؤید نقش هم‌افزایی گلوکاتینون با منابع آهن (به‌ویژه کلات‌ها)، در بهبود فراهمی آهن و افزایش جذب نیتروژن در گیاه است (Marschner, 1995; Gheshlaghi et al., 2019).

در سطح ۲ میلی‌مولار گلوکاتینون (GSH₂)، هرچند روند افزایشی جذب نیتروژن هم‌چنان حفظ شد، اما اختلاف بین تیمارها کاهش یافت و در برخی موارد تفاوت‌ها از نظر آماری معنی‌دار نبودند. این امر می‌تواند ناشی از رسیدن به نقطه اشباع پاسخ فیزیولوژیکی گیاه و یا اثرات منفی مصرف بیش از حد گلوکاتینون باشد (Koen et al., 2012). یافته‌های این پژوهش با نتایج مطالعات پیشین در گیاهان خانواده بقولات، از جمله یونجه و سویا، هم‌راستا بوده و بر نقش کلیدی آهن و ترکیبات محرک مانند گلوکاتینون در بهبود جذب نیتروژن، به‌ویژه در شرایط کمبود آهن در خاک‌های آهکی، تأکید دارد (Yang et al., 2020; De Souza-Torres et al., 2021).

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که منابع مختلف آهن و سطوح گلوکاتینون، به‌ویژه در ترکیب با یکدیگر، تأثیر معنی‌داری بر بهبود

References

- Abadía, J., & Grusak, M.A. (2013). Iron deficiency in plants: An insight from proteomic approaches. *Plant Nutrition*. <https://doi.org/10.3389/fpls.2013.00254>
- Abd-Alla, M.H., Nafady, N.A., Bashandy, S.R., & Hassan, A.A. (2019). Mitigation of salt-stress effects on nodulation, nitrogen fixation and growth of chickpea (*Cicer arietinum* L.) by triple microbial inoculation. *Rhizosphere*, 10(12), 100–148. <https://doi.org/10.1016/j.rhisph.2019.100148>
- Aliaga, M.E., Carrasco-Pozo, C., López-Alarcón, C., Olea-Azar, C., & Speisky, H. (2011). Superoxide-dependent reduction of Fe³⁺ and release of Fe²⁺ from ferritin by the physiologically occurring Cu(I)-glutathione complex. *Bioorganic & Medicinal Chemistry*, 19(1), 534–541. <https://doi.org/10.1016/j.bmc.2010.10.064>
- Alizadeh, A. (2006). *The relationship between water, soil and plant* (6th ed.). Imam Reza University Press. (In Persian)
- Bremner, J.M., & Mulvaney, C.S. (1982). Total nitrogen. In A. L. Page (Ed.), *Methods of soil analysis: Part 2 – Chemical and microbiological properties* (2nd ed., pp. 595–624). Soil Science Society of America. <https://doi.org/10.2134/agronmonogr9.2.2ed.c31>
- Briat, J.-F., Dubos, C., & Gaymard, F. (2015). Iron nutrition, biomass production and plant product quality. *Trends in Plant Science*, 20(1), 33–40. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2014.07.005>

7. Chen, W.-W., Yang, J.-L., Qin, C., Jin, C.-W., Mo, J.-H., Ye, T., & Zheng, S.-J. (2010). Nitric oxide acts downstream of auxin to trigger root ferric-chelate reductase activity in response to iron deficiency in *Arabidopsis thaliana*. *Plant Physiology*, *154*(2), 810–819. <https://doi.org/10.1104/pp.110.161109>
8. De Souza-Torres, A., Govea-Alcaide, E., Masunaga, S.H., Fajardo-Rosabal, L., Effenberger, F., Rossi, L.M., & Jardim, R.F. (2019). Impact of Fe₃O₄ nanoparticles on nutrient accumulation in common bean plants grown in soil. *SN Applied Sciences*, *1*(3), Article 321. <https://doi.org/10.1007/s42452-019-0321-y>
9. De Souza-Torres, A., Govea-Alcaide, E., Gómez-Padilla, E., Masunaga, S.H., Effenberger, F.B., Rossi, L.M., & Jardim, R.F. (2021). Fe₃O₄ nanoparticles and *Rhizobium* inoculation enhance nodulation, nitrogen fixation and growth of common bean grown in soil. *Rhizosphere*, *17*, 100275. <https://doi.org/10.1016/j.rhisph.2020.100275>
10. Fuentes, M., Bosch, G., Hita, D., Olaetxea, M., Erro, J., Zamarréño, Á.M., & García-Mina, J.M. (2023). Supramolecular arrangement of lignosulfonate-based iron complexes and consequences for Ca²⁺ interaction at alkaline pH and Fe uptake. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, *71*(30), 11404–11417. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.3c03474>
11. Gee, G.W., & Bauder, J.W. (1986). Particle-size analysis. In A. Klute (Ed.), *Methods of soil analysis: Part 1 – Physical and mineralogical methods* (2nd ed., pp. 383–411). Soil Science Society of America. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.1.2ed.c15>
12. Gheshlaghi, Z., Khorassani, R., & Abadía, J. (2022). Two Fe mining by-products and three thiol compounds alleviate Fe deficiency in soybean grown in calcareous soil under greenhouse conditions. *Plant and Soil*, *479*, 1–22. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-1656181/v1>
13. Gheshlaghi, Z., Khorassani, R., Abadía, J., Kafi, M., & Fotovat, A. (2019). Glutathione foliar fertilisation prevents lime-induced iron chlorosis in *Medicago scutellata* grown in soil. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, *182*(4), 607–624. <https://doi.org/10.1002/jpln.201800692>
14. Ghorashi, L.S., Haghnia, G.H., Lakzian, A., & Khorasani, R. (2012). Effect of lime, phosphorus and organic matter on maize ability for iron uptake. *Journal of Water and Soil*, *26*(4), 818–820. (In Persian with English abstract).
15. Gill, S.S., & Tuteja, N. (2010). Reactive oxygen species and antioxidant machinery in abiotic stress tolerance in crop plants. *Plant Physiology and Biochemistry*, *48*, 909–930. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2010.08.016>
16. Helmke, P.A., & Sparks, D.L. (1996). Lithium, sodium, potassium, rubidium and cesium. In D. L. Sparks (Ed.), *Methods of soil analysis: Part 3 – Chemical methods* (pp. 551–576). Soil Science Society of America. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.3.c19>
17. Iannone, M.F., Groppa, M.D., De Sousa, M.E., Van Raap, M.B.F., & Benavides, M.P. (2016). Impact of magnetite nanoparticles on wheat development: Evaluation of oxidative damage. *Environmental and Experimental Botany*, *131*, 77–88. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2016.07.004>
18. Jiao, N., Wang, F., Ma, C., Zhang, F., & Jensen, E.S. (2021). Interspecific interactions of iron and nitrogen use in peanut–maize intercropping on calcareous soil. *European Journal of Agronomy*, *128*, 126303. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2021.126303>
19. Jungk, A., Waisel, Y., & Kafkafi, U. (2002). Dynamics of nutrient movement at the soil–root interface. In Y. Waisel, A. Eshel, & U. Kafkafi (Eds.), *Plant roots: The hidden half* (3rd ed., pp. 587–616). Marcel Dekker. <https://doi.org/10.1201/9780203909423>
20. Kobayashi, N., & Nishizawa, N.K. (2012). Iron uptake, translocation and regulation in higher plants. *Annual Review of Plant Biology*, *63*, 131–152. <https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-042811-105522>
21. Koen, E., Szymańska, K., Klinguer, A., Dobrowolska, G., Besson-Bard, A., & Wendehenne, D. (2012). Nitric oxide and glutathione impact expression of iron-uptake and transport genes and metal content in *Arabidopsis thaliana* under iron deficiency. *Plant Signaling & Behavior*, *7*(10), 1246–1250. <https://doi.org/10.4161/psb.21548>
22. Kokina, I., Plaksenkova, I., Jermałonoka, M., & Petrova, A. (2020). Impact of iron oxide nanoparticles on yellow medick (*Medicago falcata* L.) plants. *Journal of Plant Interactions*, *15*(1), 1–7. <https://doi.org/10.1080/17429145.2019.1708489>
23. Kong, J., Dong, Y., Xu, L., Liu, S., & Bai, X. (2014). Foliar application of salicylic acid and nitric oxide alleviates iron-deficiency-induced chlorosis in peanut (*Arachis hypogaea* L.). *Botanical Studies*, *55*, 9. <https://doi.org/10.1186/1999-3110-55-9>
24. Kong, J., Dong, Y., Zhang, X., Wang, Q., Xu, L., Liu, S., & Fan, Z. (2015). Exogenous salicylic acid affects physiological characteristics of peanut seedlings under iron-deficiency stress. *Journal of Plant Nutrition*, *38*(1), 127–144. <https://doi.org/10.1080/01904167.2014.920391>
25. Loeppert, R.H., & Suarez, D.L. (1996). Carbonate and gypsum. In D. L. Sparks (Ed.), *Methods of soil analysis: Part 3 – Chemical methods* (pp. 437–474). Soil Science Society of America. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.3.c15>

26. Lindsay, W.L., & Norvell, W.A. (1978). Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese and copper. *Soil Science Society of America Journal*, 42, 421–428. <https://doi.org/10.2136/sssaj1978.03615995004200030009x>
27. Lindsay, W.L., & Schwab, A.P. (1982). The chemistry of iron in soils and its availability to plants. *Journal of Plant Nutrition*, 5(4–7), 821–840. <https://doi.org/10.1080/01904168209363012>
28. Lucena, J.J., & Chaney, R.L. (2006). Synthetic iron chelates as substrates of root ferric-chelate reductase in iron-stressed cucumber plants. *Journal of Plant Nutrition*, 29(3), 423–439. <https://doi.org/10.1080/01904160500524886>
29. Malakouti, M.J. (1995). *Sustainable agriculture and yield increase through balanced fertilization*. Karaj Agricultural Education Publishing. (In Persian with English abstract)
30. Malakouti, M.J., & Homaeae, M. (1989). *Soil fertility of arid and semiarid regions: Difficulties and solutions*. Tarbiat Modares University Press. (In Persian with English abstract)
31. Malakouti, M.J., & Tehrani, M.M. (1991). Effects of micronutrients on yield and quality of agricultural products. In *Proceedings of the Workshop on Micronutrients* (pp. 342–360). Tarbiat Modares University. (In Persian with English abstract)
32. Marschner, H. (1995). *Mineral nutrition of higher plants* (2nd ed.). Academic Press.
33. Mohammadipour, R., Sedaghat-Hoor, S., & Mahboub-Khomami, A. (2013). Effect of soil and foliar iron fertilization on growth of *Spathiphyllum illusion*. *European Journal of Experimental Biology*, 3(6), 232–240. (In Persian with English abstract)
34. Olsen, S.R., & Sommers, L.E. (1982). Phosphorus. In A. L. Page (Ed.), *Methods of soil analysis: Part 2 – Chemical and microbiological properties* (2nd ed., pp. 403–427). Soil Science Society of America. <https://doi.org/10.2134/agronmonogr9.2.2ed.c24>
35. Panjtandoust, M., Sorooshzadeh, A., & Ghanati, F. (2010). Effect of soil and foliar iron application on qualitative characteristics of peanut (*Arachis hypogaea* L.) in calcareous soil. Department of Agronomy, Tarbiat Modares University. (In Persian with English abstract)
36. Plaksenkova, I., Jermaļonoka, M., Bankovska, L., Gavarane, I., Gerbreders, V., Sledevskis, E., & Kokina, I. (2019). Effects of Fe₃O₄ nanoparticle stress on growth and development of rocket (*Eruca sativa*). *Journal of Nanomaterials*, 2019, 2678247. <https://doi.org/10.1155/2019/2678247>
37. Rachaputi, R., Yashvir, S.C., & Wilson, G.C. (2021). Crop physiology case histories for major crops (Chap. 11, pp. 360–382). In V. O. Sadras & D. Calderini (Eds.), *Crop physiology* (2nd ed.). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819194-1.00011-6>
38. Ramirez, L., Bartoli, C.G., & Lamattina, L. (2013). Glutathione and ascorbic acid protect *Arabidopsis thaliana* against detrimental effects of iron deficiency. *Journal of Experimental Botany*, 64(11), 3169–3178. <https://doi.org/10.1093/jxb/ert153>
39. Rhoades, J.D. (1996). Salinity: Electrical conductivity and total dissolved solids. In D. L. Sparks (Ed.), *Methods of soil analysis: Part 3 – Chemical methods* (pp. 417–435). Soil Science Society of America. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.3.c14>
40. Rombolà, A.D., Pinton, R., & Zocchi, G. (2019). Glutathione foliar fertilisation prevents lime-induced iron chlorosis in kiwifruit (*Actinidia deliciosa*). *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 182(2), 271–277. <https://doi.org/10.1002/jpln.201800692>
41. Roosta, H.R., & Mohsenian, Y. (2012). Effects of foliar spray of different Fe sources on pepper (*Capsicum annuum* L.) plants in an aquaponic system. *Scientia Horticulturae*, 146, 182–191. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2012.08.018>
42. Rouhier, N., Couturier, J., Johnson, M.K., & Jacquot, J.-P. (2010). Glutaredoxins: Roles in iron homeostasis. *Trends in Biochemical Sciences*, 35(1), 43–52. <https://doi.org/10.1016/j.tibs.2009.08.005>
43. Rui, M., Ma, C., Hao, Y., Guo, J., Rui, Y., Tang, X., & Zhu, S. (2016). Iron oxide nanoparticles as a potential iron fertilizer for peanut (*Arachis hypogaea*). *Frontiers in Plant Science*, 7, 815. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00815>
44. Shanmugam, V., Wang, Y.-W., Tsednee, M., Karunakaran, K., & Yeh, K.-C. (2015). Glutathione plays an essential role in nitric-oxide-mediated iron-deficiency signalling and tolerance in *Arabidopsis thaliana*. *The Plant Journal*, 84(3), 464–477. <https://doi.org/10.1111/tpj.13011>
45. Song, Y., Dong, Y., Tian, X., Bai, X., & He, Z. (2016). An exogenous source of nitric oxide modulates iron nutritional status in peanut seedlings (*Arachis hypogaea* L.). *Journal of Plant Growth Regulation*, 35(3), 730–743. <https://doi.org/10.1007/s00344-016-9578-1>

46. Song, Y., Dong, Y., Tian, X., Wang, W., & He, Z. (2017). Mechanisms of exogenous nitric oxide and 24-epibrassinolide in alleviating iron deficiency stress of peanut seedlings. *Pedosphere*, 27(5), 987–997. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(17\)60446-6](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(17)60446-6)
47. Thomas, G.W. (1996). Soil pH and soil acidity. In D. L. Sparks (Ed.), *Methods of soil analysis: Part 3 – Chemical methods* (pp. 475–490). Soil Science Society of America. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.3.c16>
48. Tsutsumi, R., Yamashita, T., Muraoka, M., Hirata, K., & Nagano, K. (2024). γ -Glutamylcysteine, a glutathione precursor, exhibits higher thiol reactivity for complex formation with iron(III) ions than glutathione. *BPB Reports*, 7(6), 218–222. https://doi.org/10.1248/bpbreports.7.6_218
49. Walkley, A., & Black, I.A. (1934). An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science*, 37(1), 29–38. <https://doi.org/10.1097/00010694-193401000-00003>
50. Yang, X., Alidoust, D., & Wang, C. (2020). Effects of iron oxide nanoparticles on mineral composition and growth of soybean (*Glycine max* L.). *Acta Physiologiae Plantarum*, 42, 128. <https://doi.org/10.1007/s11738-020-03104-1>
51. Zhang, X., Dong, Y., Kong, J., Liu, Z., & Wang, Q. (2014). Effects of nitric oxide on alleviation of iron-deficiency stress in peanut. *Journal of Plant Nutrition*, 37(13), 2108–2127. <https://doi.org/10.1080/01904167.2014.920371>
52. Zuchi, S., Watanabe, M., Bromke, M., Osorio, S., & Astolfi, S. (2015). The interplay between sulfur and iron nutrition in tomato. *Plant Physiology and Biochemistry*, 93, 62–71. <https://doi.org/10.1104/pp.15.00995>
53. Zuo, Y., Ren, L., Zhang, F., & Jiang, R.F. (2007). Bicarbonate concentration as affected by soil water content controls iron nutrition of peanut in calcareous soil. *Plant Physiology and Biochemistry*, 45(5), 357–364. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2007.03.017>