

فراهمی برخی عناصر کم‌مصرف در یک خاک آهکی آلوده به نیکل تحت تأثیر کاربرد سیلیکون و زغال‌زیستی پس از کشت ذرت

حمیدرضا بوستانی^{۱*}، مهدی نجفی‌قیری^۲، احسان بیژن‌زاده^۳، اسماعیل فرخ‌نژاد^۴

*۱- بخش مهندسی خاک و آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی داراب، دانشگاه شیراز (نویسنده مسئول)؛

Hr.boostani@shirazu.ac.ir

۲- بخش مهندسی خاک و آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی داراب، دانشگاه شیراز

۳- بخش اگرواکولوژی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی داراب، دانشگاه شیراز

۴- بخش مهندسی خاک و آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی داراب، دانشگاه شیراز

چکیده

در خاک‌های آلوده به فلزات سنگین استفاده از زغال‌زیستی و سیلیکون در جهت غیرمتحرک کردن فلزات سنگین مرسوم است. هدف از مطالعه حاضر بررسی تأثیر سیلیکون و زغال‌زیستی بر فراهمی برخی عناصر کم‌مصرف در خاک آهکی آلوده به نیکل پس از کشت ذرت بود. آزمایشی فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار انجام شد. فاکتورها شامل زغال‌زیستی (سبوس برنج و کود گوسفندی در دمای ۳۰۰ و ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد هر کدام ۲ درصد وزنی) و سطوح سیلیکون (۰، ۲۵۰ و ۵۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک) بودند. خاک آهکی آلوده به نیکل (۳۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم) بر اساس طرح آزمایشی تیمار و ذرت کشت شد. پس از ۹۰ روز، عناصر کم‌مصرف خاک با محلول DTPA استخراج و اندازه‌گیری شدند. زغال‌زیستی کود دامی ۵۰۰ بیشترین افزایش را در محتوای آهن (۸/۷٪) و روی (۴۲٪) نشان داد، درحالی‌که سیلیکون به‌طور کلی فراهمی عناصر را کاهش داد. استفاده همزمان از زغال‌زیستی و سیلیکون اغلب سبب کاهش فراهمی آهن، منگنز، مس و روی در خاک شد. اگرچه کاربرد همزمان سیلیکون و زغال‌زیستی ممکن است در تثبیت نیکل مؤثرتر باشند، اما کاهش فراهمی عناصر کم‌مصرف را به‌دنبال دارند. بنابراین، استفاده همزمان از این اصلاح‌کننده‌ها باید همراه با مدیریت تغذیه‌ای برای جلوگیری از کمبود عناصر در گیاهان باشد.

واژگان کلیدی: خاک آهکی، نیکل، سیلیکون، زغال‌زیستی، عناصر کم‌مصرف، ذرت.

مقدمه

خاک‌های آهکی که با محتوای بالای کربنات کلسیم مشخص می‌شوند، اغلب به‌دلیل pH قلیایی و ظرفیت‌بافری بالا، چالش‌هایی را برای دسترسی به عناصر غذایی ایجاد می‌کنند. در این خاک‌ها اغلب فراهمی زیستی عناصر غذایی کم‌مصرف ضروری مانند آهن (Fe)، روی (Zn)، منگنز (Mn) و مس (Cu) برای رشد و نمو گیاه، محدود است (Najafi-Ghiri, 2014). وجود فلزات سنگین، مانند نیکل (Ni)، با رقابت بالقوه با عناصر غذایی کم‌مصرف برای جذب یا تغییر خواص شیمیایی خاک، پویایی این فلزات در خاک را پیچیده‌تر می‌کند. آلودگی نیکل، که اغلب ناشی از فعالیت‌های انسانی مانند انتشار گازهای صنعتی یا معدن‌کاری است، می‌تواند بهره‌وری محصول را کاهش دهد و با تشکیل کمپلکس‌های نامحلول یا رقابت برای مکان‌های اتصال در خاک، بر فراهمی زیستی عناصر غذایی کم‌مصرف تأثیر بگذارد (Shahzad et al., 2018). در این زمینه، اصلاح‌کننده‌های خاک مانند سیلیکون (Si) و بیوچار به عنوان یک راهکار امیدوارکننده برای کاهش سمیت فلزات سنگین و افزایش دسترسی به عناصر غذایی در خاک‌های آلوده شناخته شده‌اند (Bijanazadeh et al., 2024).

سیلیکون، یک عنصر مفید برای گیاهان از طریق افزایش مقاومت گیاه در برابر تنش و کاهش فراهمی زیستی فلزات سنگین با افزایش بی‌حرکتی آن‌ها در ماتریس خاک شناخته شده است (Yan et al., 2023). زغال‌زیستی، ماده‌ای غنی از کربن که از گرم‌کافت مواد آلی تولید می‌شود، به دلیل توانایی در بهبود حاصلخیزی خاک، افزایش حفظ عناصر غذایی و کاهش تحرک فلزات سنگین از

طریق جذب و تشکیل کمپلکس شناخته شده است (Boostani et al., 2025). ذرت، یک محصول اساسی با نیازهای بالای عناصر غذایی، به‌ویژه به کمبود عناصر غذایی کم‌مصرف و سمیت فلزات سنگین حساس است. در خاک‌های آهکی، که کمبود عناصر غذایی کم‌مصرف به‌طور ذاتی شایع است، درک اثرات متقابل سیلیکون و زغال‌زیستی برای بهینه‌سازی کشت ذرت از نظر فراهمی زیستی عناصر غذایی کم‌مصرف در حضور فلز نیکل بسیار مهم است. بنابراین هدف از مطالعه حاضر بررسی زیست‌فراهمی برخی عناصر کم‌مصرف (آهن، منگنز، مس و روی) در یک خاک آهکی آلوده به نیکل تحت تاثیر کاربرد سیلیکون و زغال‌زیستی پس از کشت ذرت بود.

مواد و روش‌ها

یک آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی در محیط گلخانه با سه تکرار انجام شد. فاکتور اول شامل تیمارهای بیوچار شامل سبوس‌برنج و کودگوسفندی تولید شده در دمای ۳۰۰ و ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲ ساعت در شرایط اکسیژن محدود هر کدام به میزان ۳ درصد وزنی بود. فاکتور دوم شامل سطوح کاربرد سیلیسیم (۰، ۲۵۰ و ۵۰۰ میلی‌گرم سیلیسیم در کیلوگرم خاک) بود. بر اساس طرح آزمایش، سطوح سیلیسیم به ۲ کیلوگرم از نمونه‌های خاک آلوده به نیکل (۳۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک) اضافه شد و پس از خشک کردن خاک و مخلوط کردن آن، بیوچارهای تهیه شده به مقدار مورد نیاز اضافه شدند. بلافاصله پس از آن، نمونه‌های خاک تیمار شده به گلدان‌های پلاستیکی منتقل شدند و برای تسهیل واکنش‌های مورد نیاز، رطوبت نمونه‌ها به مدت دو هفته در حد ظرفیت مزرعه نگه داشته شد. پس از آن، ۶ بذر ذرت (*Zea mays* L. 604) در هر گلدان کاشته شد و در مرحله ۴ برگی، ۲ گیاه تا پایان کشت در هر گلدان نگهداری شدند. در طول رشد گیاه، از آب مقطر برای حفظ رطوبت خاک گلدان‌ها در حد ظرفیت مزرعه استفاده شد. پس از ۹۰ روز، گیاهان از سطح خاک برداشت شدند. پس از جدا کردن ریشه‌ها و خشک شدن در هوا، خاک گلدان‌ها با استفاده از الک ۲ میلی‌متری الک شد و متعاقباً آهن، منگنز، مس و روی آنها توسط محلول DTPA استخراج و توسط دستگاه جذب اتمی (PG990) اندازه‌گیری شد.

نتایج و بحث

برخی از خصوصیات زغال‌های زیستی مورد استفاده در جدول ۱ آورده شده است. حداکثر مقادیر پهاش و قابلیت هدایت الکتریکی زغال‌های زیستی در تیمارهای زغال زیستی کود دامی به دست آمد که با افزایش دمای گرماکافت از ۳۰۰ درجه سانتیگراد به ۵۰۰ درجه سانتیگراد افزایش یافت (جدول ۱). این امر به محتوای بالاتر خاکستر (نمک‌های قلیایی) در زغال‌های زیستی کود دامی نسبت به زغال‌های زیستی سبوس‌برنج نسبت داده می‌شود (جدول ۱). طبیعی است که زغال‌های زیستی گیاهی حاوی مقادیر کمتری از مواد جامد محلول نسبت به زغال‌های زیستی مبتنی بر فضولات حیوانی باشند (Ippolito et al., 2020). غلظت عناصر غذایی کم‌مصرف (آهن، منگنز، مس و روی) در زغال‌های زیستی با افزایش دمای گرماکافت افزایش یافت و بیشترین مقدار در زغال‌های زیستی کود دامی یافت شد (جدول ۱).

جدول ۱- ویژگی‌های زغال‌های زیستی مورد استفاده

ویژگی	زغال‌زیستی کود دامی ۳۰۰	زغال‌زیستی کود دامی ۵۰۰	زغال‌زیستی سبوس‌برنج ۳۰۰	زغال‌زیستی سبوس‌برنج ۵۰۰
پهاش (۱:۲۰)	۹/۹۶	۱۱	۹	۱۰/۳۰
قابلیت هدایت الکتریکی (۱:۲۰)	۳/۹۴	۴/۲۸	۱/۸۴	۱/۱۷
(دسی‌زیمنس بر متر)				
آهن (میلی‌گرم بر کیلوگرم)	۱۸۷۵	۲۰۱۹	۲۰۷	۳۵۸
روی (میلی‌گرم بر کیلوگرم)	۵۲	۶۰/۷	۱۸/۲	۱۸/۵۰
مس (میلی‌گرم بر کیلوگرم)	۲۰/۱	۲۰/۸	۱/۵	۲/۸
منگنز (میلی‌گرم بر کیلوگرم)	۲۳۶	۲۴۱	۱۰۵	۱۳۹
درصد خاکستر	۵۳/۸	۶۰	۳۴/۲	۴۴/۸

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثرات اصلی تیمارها و برهمکنش آن‌ها بر میزان آهن، مس و منگنز استخراج شده توسط DTPA در سطح احتمال یک درصد معنی دارد بود درحالی که روی عصاره‌گیری شده توسط DTPA فقط تحت تاثیر اثرات اصلی تیمارها قرار گرفت. به طور کلی اثرات اصلی کاربرد سیلیس در خاک نشان داد که با افزایش سطوح سیلیس از ۰ به ۵۰۰ میلی گرم بر کیلوگرم خاک مقدار آهن، منگنز، مس و روی عصاره‌گیری شده توسط DTPA به طور معنی داری کاهش یافت (جدول و شکل). این کاهش احتمالا می‌تواند به افزایش پهایش خاک در اثر کاربرد سطوح سسلیس در خاک مربوط باشد. افزایش پهایش خاک به انحلال متاسیلیکات سدیم در آب نسبت داده می‌شود که منجر به هیدرولیز یون‌های متاسیلیکات و تشکیل مونوسیلیک اسید و همچنین تشکیل هیدروکسید سدیم می‌شود (Ma et al., 2021).

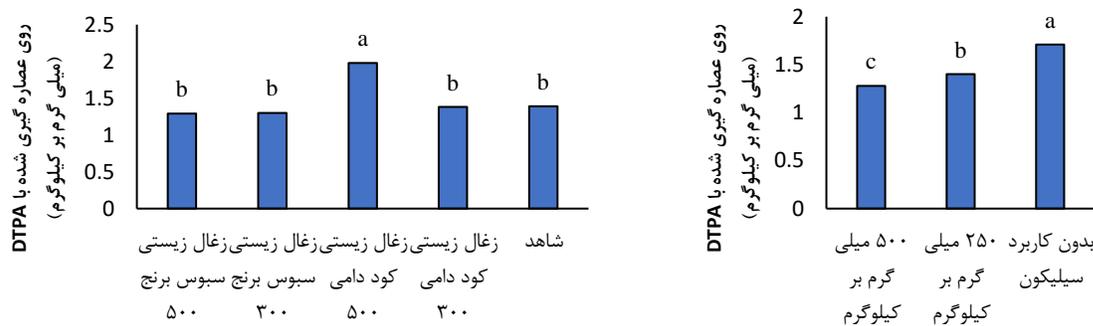
جدول ۲- مقدار آهن، مس و منگنز عصاره‌گیری شده توسط DTPA (میلی گرم بر کیلوگرم) در یک خاک آهکی آلوده به نیکل پس از کشت ذرت در اثر کاربرد زغال‌زیستی و سطوح سیلیکون

شاهد	زغال‌زیستی کود دامی ۳۰۰	زغال‌زیستی کود دامی ۵۰۰	زغال‌زیستی سبوس‌برنج ۳۰۰	زغال‌زیستی سبوس‌برنج ۵۰۰	اثرات اصلی
آهن					
۲/۹۸ b	۲/۴۷ c	۳/۴۸ a	۱/۹۲ e-g	۱/۹۶ ef	۲/۵۶ A
۲/۳۹ cd	۲/۲۵ d	۲/۴۳ cd	۱/۷۹ fg	۱/۹۱ e-g	۲/۱۵ B
۲/۲۳ d	۲/۰۲ e	۲/۳۵ cd	۱/۷۴ g	۱/۸۴ e-g	۲/۰۳ C
۲/۵۳ B	۲/۲۵ C	۲/۷۵ A	۱/۸۱ D	۱/۹۰ D	اثرات اصلی
مس					
۱/۱۲ a	۰/۹۷ b-d	۰/۹۸ b-d	۰/۹۲ cd	۰/۹۹ bc	۰/۹۹ A
۱/۰۴ b	۰/۹۲ cd	۰/۹۵ cd	۰/۹۳ cd	۰/۹۸ bc	۰/۹۶ B
۰/۹۶ cd	۰/۹۱ d	۰/۹۲ cd	۰/۹۳ cd	۰/۹۴ cd	۰/۹۳ C
۱/۰۴ A	۰/۹۳ BC	۰/۹۵ BC	۰/۹۲ C	۰/۹۷ B	اثرات اصلی
منگنز					
۱۰/۵۱ fg	۱۶/۶۵ c	۱۰/۸۶ f	۱۸/۰۵ a	۱۰/۱۵ gh	۱۳/۲۴ A
۹/۵۹ i-k	۱۶/۳۲ cd	۱۰/۰۷ g-i	۱۷/۴۸ b	۹/۶۵ h-j	۱۲/۶۲ B
۱۰/۴۴ fg	۱۵/۰۴ e	۹/۴۶ jk	۱۶/۱۰ d	۹/۰۶ k	۱۲/۰۲ C
۱۰/۱۸ C	۱۶/۰۰ B	۱۰/۱۳ C	۱۷/۲۱ A	۹/۶۲ D	اثرات اصلی

در هر قسمت، در هر ستون و یا ردیف، اعداد دارای حروف بزرگ و کوچک مشترک از نظر آماری در سطح ۵ درصد آزمون دانکن معنی‌دار نیستند.

همچنین اثرات اصلی کاربرد زغال‌زیستی نشان داد که در بین همه تیمارها، تنها تیمار زغال‌زیستی کود دامی ۵۰۰ بود که سبب افزایش معنی دار غلظت آهن و روی عصاره‌گیری شده توسط DTPA به ترتیب به میزان ۸/۷ و ۴۲ درصد نسبت به تیمار شاهد (بدون کاربرد زغال‌زیستی) شد، در صورتی که تیمارهای دیگر زغال‌زیستی یا سبب کاهش معنی دار زیست فراهمی این دو عنصر شدند یا تغییر معنی داری را ایجاد نکردند (جدول ۲ و شکل ۱). از سویی دیگر، کاربرد همه تیمارهای زغال‌زیستی سبب کاهش معنی دار غلظت مس عصاره‌گیری شده توسط DTPA شدند (جدول ۲). در بین تیمارهای زغال‌زیستی نیز تنها زغال‌های زیستی سبوس‌برنج ۳۰۰ و کود دامی ۳۰۰ سبب افزایش معنی دار غلظت منگنز عصاره‌گیری شده توسط DTPA نسبت به تیمار شاهد به ترتیب به میزان ۶۹ و ۵۷ درصد شدند (جدول ۲). اثر متقابل تیمارها (سطوح سیلیکون و زغال‌زیستی) نیز نشان داد که بیشترین میزان آهن و منگنز عصاره‌گیری شده توسط DTPA به ترتیب در تیمارهای مرکب زغال‌زیستی کود دامی ۵۰۰ و زغال‌زیستی

سبوس برنج ۳۰۰ در زمان بدون کاربرد سیلیس حاصل شد (جدول ۲). در آزمایشی به صورت انکوباسیون با افزودن سه نوع زغال زیستی (کاه و کلش گندم، ضایعات هرس سیب و ضایعات هرس انگور) و سطوح مختلف (۰، ۱، ۲، ۴ و ۸ درصد وزنی) آنها به یک خاک آهکی تاثیرات متفاوتی بر فراهمی عناصر غذایی کم مصرف مشاهده شد (Moradi et al., 2017). با کاربرد زغال زیستی کاه و کلش گندم در خاک، فراهمی آهن به طور معنی داری کاهش یافت در حالی که فراهمی منگنز به طور معنی داری افزایش یافت. همچنین نشان دادند که با افزایش سطوح همه زغال های زیستی فراهمی مس به طور معنی داری کاهش یافت.



شکل ۱- مقدار روی عصاره گیری شده توسط DTPA (میلی گرم بر کیلوگرم) در یک خاک آهکی آلوده به نیکل پس از کشت ذرت در اثر کاربرد زغال زیستی و سطوح سیلیکون

به طور کلی به نظر می رسد استفاده همزمان از زغال زیستی کود دامی یا سبوس برنج با سیلیکون سبب کاهش فراهمی آهن، منگنز، مس و روی در خاک می شود، هرچند که ممکن است استفاده همزمان از زغال زیستی و سیلیکون بر غیرمتحرک شدن فلز نیکل و کاهش فراهمی آن از طریق افزایش بیشتر پهاش خاک موثرتر باشد. این در حالی است که استفاده تنها از زغال زیستی کود دامی یا سبوس برنج در مواردی سبب افزایش فراهمی برخی عناصر غذایی کم مصرف شد.

نتیجه گیری

با توجه به نتایج می توان بیان کرد که استفاده از زغال زیستی و سیلیکون در خاک های آهکی آلوده به نیکل، ممکن است به دلیل ظرفیت جذب قوی و بی تحرکی نیکل در خاک، تاثیر قابل توجهی در تثبیت نیکل خاک داشته باشد ولی به طور ناخواسته فراهمی برخی عناصر غذایی کم مصرف خاک را کاهش می دهد و به طور بالقوه منجر به کمبود این عناصر در محصولات خواهد شد. بنابراین استفاده همزمان زغال زیستی و سیلیکون در خاک های آهکی آلوده به نیکل، مستلزم یک رویکرد متعادل در استفاده از کود های حاوی عناصر غذایی کم مصرف متناسب با نوع خاک و نیازهای محصول است.

فهرست منابع

- Bijanazadeh, E., Boostani, H. R., Hardie, A. G., Najafi-Ghiri, M. (2024). Co-application of silicon and biochar affected anatomical and biochemical properties of corn leaf (*Zea mays* L.) under soil nickel toxicity. *Heliyon*, 10, 21-28.
- Boostani, H. R., Najafi-Ghiri, M., Khalili, D. (2025) Comparative effectiveness of pristine and H3PO4-modified biochar in combination with bentonite to immobilize cadmium in a calcareous soil, *Scientific Reports*, 15, 14301.
- Ippolito, J. A., Cui, L., Kammann, C., Wrage-Mönnig, N., Estavillo, J. M., Fuertes-Mendizabal, T., Cayuela, M. L., Sigua, G., Novak, J., Spokas, K. (2020). Feedstock choice, pyrolysis temperature and type influence biochar characteristics: a comprehensive meta-data analysis review. *Biochar*, 2, 421-438.

- Ma, C., Ci, K., Zhu, J., Sun, Z., Liu, Z., Li, X., Zhu, Y., Tang, C., Wang, P., Liu, Z. (2021). Impacts of exogenous mineral silicon on cadmium migration and transformation in the soil-rice system and on soil health. *Science of the Total Environment*, 143, 750-759.
- Moradi, N., Rasouli-Sadaghiani, M. H., Sepehr, E. (2017). Effect of Biochar Types and Rates on Some Soil properties and Nutrients Availability in a Calcareous Soil. *Water and Soil*, 31, 1232-1246. (In persian).
- Najafi-Ghiri, M. (2014). Effects of zeolite and vermicompost applications on potassium release from calcareous soils. *Soil and Water Research*, 9, 31-37.
- Shahzad, B., Tanveer, M., Rehman, A., Cheema, S. A., Fahad, S., Rehman, S., Sharma, A. (2018). Nickel; whether toxic or essential for plants and environment-A review. *Plant Physiology and Biochemistry*, 132, 641-651.
- Yan, G., Jin, H., Yin, C., Hua, Y., Huang, Q., Zhou, G., Xu, Y., He, Y., Liang, Y., Zhu, Z. (2023). Comparative effects of silicon and silicon nanoparticles on the antioxidant system and cadmium uptake in tomato under cadmium stress. *Science of The Total Environment*, 904, 166819.

Availability of some micronutrients in a Nickel-contaminated calcareous soil as affected by silicon and biochar application after maize cultivation

Hamid Reza Boostani^{1*}, Mahdi Najafi-Ghiri², Ehsan Bijanzadeh³, Esmail Farrokhnejad⁴

1*-Department of Soil and Water Engineering, College of Agriculture and Natural Resources of Darab, Shiraz University, Corresponding author: Hr.boostani@shirazu.ac.ir

2- Department of Soil and Water Engineering, College of Agriculture and Natural Resources of Darab, Shiraz University

3- Department of Agroecology, College of Agriculture and Natural Resources of Darab, Shiraz University

4- Department of Soil and Water Engineering, College of Agriculture and Natural Resources of Darab, Shiraz University

Abstract

In heavy metal-contaminated soils, biochar and silicon are commonly used to immobilize toxic metals. This study investigated the effects of Si and biochar on the availability of selected micronutrients in a Ni-contaminated calcareous soil after maize cultivation. A factorial experiment was conducted in a completely randomized design with three replications. The treatments included biochar (rice husk and sheep manure pyrolyzed at 300°C and 500°C, each applied at 2% w/w) and Si levels (0, 250, and 500 mg kg⁻¹ soil). The Ni-contaminated calcareous soil (300 mg Ni kg⁻¹) was treated accordingly, and maize was grown for 90 days. Post-harvest, soil micronutrients (Fe, Mn, Cu, and Zn) were extracted using DTPA and measured. Results showed that sheep manure biochar produced at 500°C significantly increased Fe (8.7%) and Zn (42%) availability, whereas Si application generally reduced micronutrient bioavailability. The combined application of biochar and Si frequently decreased the availability of Fe, Mn, Cu, and Zn in the soil. Although the co-application of Si and biochar may enhance Ni immobilization, it concurrently reduces micronutrient accessibility. Thus, integrated nutrient management is essential when using these amendments to prevent micronutrient deficiencies in crops.

Keywords: Calcareous soil, Nickel, Silicon, Biochar, Micronutrients, Maize.