



The Effect of Mycorrhizal Fungus Inoculation and Biochar on Shoot Biomass and Some Biochemical Parameters of Corn (*Zea mays* L.) Under Cobalt Stress Conditions

Frahad Ahmadi¹, Siavash Hosseini Sarghin^{*2}, Adel Siosemardeh³, Weria Weisany⁴

¹ PhD student, Department of Biology, Urmia University, Urmia, Iran

² Associate Professor of Biology Department, Urmia University, Urmia, Iran

³ Professor of Agriculture and Plant Breeding Department, Faculty of Agriculture, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran

⁴ Associate Professor of the Department of Agronomy and Horticulture Sciences, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

* Corresponding Author's Email: siavoshhosseinisarghin@gmail.com

(Received: February. 26, 2025 – Accepted: June. 10, 2025)

ABSTRACT

Objective: The high speed of industrialization and irrational use of natural resources have led to the accumulation of heavy metals in environment. The accumulation of heavy metals, especially cobalt in agricultural fields and Water reserves is a concern due to natural factors as well as human factors. Applying low-cost soil amendments can limit the mobility of cobalt in the soil and its uptake by plants.

Material and methods: In this study, the effect of soil amendments (biochar and mycorrhiza) on the physiological and biochemical parameters of corn plants under cobalt stress was investigated in a pot experiment. The factorial experiment was carried out in the form of a completely random design with three replications in pots at the University of Kurdistan in 2022. Inoculation with mycorrhizal fungus (inoculation mycorrhizal fungus and no inoculation), application of biochar (five percent of soil weight and no biochar) and different concentrations of cobalt at three levels of zero, 60, and 120 ppm were considered.

Results: In this study, applying cobalt has a negative effect on the fresh and dry weight of shoot, leaf soluble protein, leaf soluble sugar and the absorption of macronutrients and micronutrients in roots.

Conclusion: While in the combined treatments of biochar and mycorrhiza there was a significant increase in the mentioned parameters. So that the amount of fresh and dry weight of shoot are 14.5, 14.8, percentage, respectively increased compare to the control. This study showed that the inoculation of mycorrhizal plants with biochar can improve corn growth, nutrient uptake in cobalt-contaminated soil.

Keywords: Heavy metals, Soil amendments, Corn

Cite this article: Ahmadi, F., Hosseini Sarghin, S., Siosemardeh, A., Weisany, W. 2025. The Effect of Mycorrhizal Fungus Inoculation and Biochar on Shoot Biomass and Some Biochemical Parameters of Corn (*Zea mays* L.) Under Cobalt Stress Conditions. *Journal of Sustainable Agricultural Science Research*, 5 (1), 1-14.

DOI: <https://doi.org/10.22059/jci.2025.368420.2866>



© The Author(s).

DOI: <https://doi.org/10.22059/jci.2025.368420.2866>

Publisher: Islamic Azad University of Kerman Branch Press.

اثر تلقیح قارچ میکوریزا و بیوچار بر زیست توده اندام هوایی و برخی از پارامترهای بیوشیمیایی گیاه ذرت (*Zea mays* L.) در شرایط تنش کبالت

فرهاد احمدی^۱، سیاوش حسینی سرقین^{۲*}، عادل سی و سه مرده^۳ و وریا ویسانی^۴

۱- دانشجوی دکتری، گروه زیست شناسی، دانشگاه ارومیه

۲- دانشیار، گروه زیست شناسی، دانشگاه ارومیه

۳- استاد گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکده کشاورزی، دانشگاه کردستان

۴- دانشیار گروه علوم باغی زراعی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران

* ایمیل نویسنده مسئول: siavoshhosseinisarghin@gmail.com

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۲/۸ - تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۳/۲۰)

چکیده

هدف: تجمع فلزات سنگین به ویژه کبالت (Co) در مزارع کشاورزی و ذخایر آبی به دلیل عوامل طبیعی و همچنین عوامل انسانی نگران کننده است. بکاربردن اصلاح کننده های خاک کم هزینه می تواند تحرک کبالت در خاک و جذب آن توسط گیاهان را محدود کند

مواد و روش ها: به همین منظور در یک آزمایش گلدانی اثر اصلاح کننده های خاک (بیوچار و میکوریزا) بر روی پارامترهای فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی گیاه ذرت تحت تنش کبالت مورد بررسی قرار گرفت. این آزمایش بصورت فاکتوریل و در قالب طرح کاملاً تصادفی در سه تکرار و به صورت گلدانی در دانشگاه کردستان در سال ۱۴۰۱ اجرا شد. تلقیح با قارچ میکوریزا (تلقیح بذور با قارچ میکوریزا و عدم تلقیح بذور)، کاربرد بیوچار (پنج درصد وزن خاک و عدم کاربرد بیوچار) و غلظت های مختلف کبالت در سه سطح صفر، ۶۰، ۱۲۰ پی پی ام در نظر گرفته شدند. **یافته ها:** در تحقیق حاضر، بکاربردن کبالت بر وزن تر و خشک اندام هوایی، پروتئین محلول برگ، قند محلول برگ و جذب عناصر درشت مغذی و ریز مغذی ریشه اثر منفی می گذارد.

نتیجه گیری: در حالی که در تیمارهای ترکیبی بیوچار و میکوریزا افزایش قابل توجهی در پارامترهای ذکر شده داشت. به طوری که میزان وزن تر و خشک اندام هوایی به ترتیب ۱۴/۵، ۱۴/۸ درصد افزایش نسبت به شاهد مشاهده شد. این مطالعه نشان داد که تلقیح گیاهان میکوریزا همراه با بیوچار می تواند رشد ذرت، جذب مواد مغذی را در خاک آلوده به کبالت بهبود بخشد.

واژه های کلیدی: فلزات سنگین، اصلاح کننده های خاک، ذرت

استناد:

Ahmadi, F., Hosseini Sarghin, S., Siosemardeh, A., Weisany, W. 2025. The Effect of Mycorrhizal Fungus Inoculation and Biochar on Shoot Biomass and Some Biochemical Parameters of Corn (*Zea mays* L.) Under Cobalt Stress Conditions. Journal of Sustainable Agricultural Science Research, 5 (1), 1-14.

DOI: <https://doi.org/10.22059/jci.2025.368420.2866>



© The Author(s).

DOI: <https://doi.org/10.22059/jci.2025.368420.2866>

ناشر: انتشارات دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرمان

مقدمه

فلزات سنگین در خاک عمده‌تاً به دلیل فعالیت‌های انسانی مانند استفاده از کودها کشاورزی، ترکیبات شیمیایی، استخراج معادن، احتراق سوخت های فسیلی و صنایع فلزکاری در حال گسترش است (Page et al., 2006). تجمع فلزات سنگین در خاک به دلیل اثرهای نامطلوب آن بر امنیت و بازارپسندی مواد غذایی، رشد گیاهان، ریز اندامگان خاک از نگرانی‌های مهم در کشاورزی است. به دلیل وابستگی متقابل موجودات زنده، سمیت فلزات اثر زیادی بر گیاهان دارد و کل اکوسیستم را تحت اثر قرار می‌دهند (Nagajyoti et al., 2010). کبالت، یک فلز سنگین شناخته شده است که در برخی فرآیندهای بیوشیمیایی و فیزیولوژیکی گیاهان نقش دارد (Hu et al., 2021). اما سطوح بالای کبالت در خاک باعث سمیت در گیاهان می‌شود که در مورفولوژی و فیزیولوژی آنها منعکس می‌گردد (El-Sheekh et al., 2003). یکی از شیوه‌های مدیریت برای تولید محصول موفق در شرایط تنش؛ استفاده از اصلاح کننده‌های خاک می‌باشد. ضایعات جامد آلی را می‌توان به اشکال مختلف (مانند کمپوست و بیوچار) برای اصلاح خاک تبدیل کرد که منجر به یک رویکرد برد-برد به سمت کشاورزی پرحاصل و سازگار با محیط زیست می‌شود (Santana et al., 2020). بیوچار که بیوکربن نیز نامیده می‌شود، در اثر پیرولیز کردن زیست توده در شرایط بی‌هوازی به دست می‌آید (Zhang et al., 2020). بهبود فیزیولوژیکی گیاه در بکاربردن بیوچار در پژوهش‌های مختلف گزارش شده است (Afzal et al., 2024). در مطالعه‌ی اثر بیوچار بروی گیاه ذرت تحت تنش کبالت توسط (Rafique et al.,

2019) صورت گرفته بود، گزارش دادند بیوچار به تنهایی یا ترکیب با کودهای زیستی می‌تواند رشد ذرت را افزایش داده و جذب کادمیوم را کاهش دهد. همچنین گزارش شده بیوچار یک رویکرد پایدار و مقرون به صرفه برای حذف فلزات سنگین است و در ارتقای رشد گیاهان نقش موثری دارد و باعث بردباری گیاهان ذرت تحت تنش فلزات سنگین می‌شود (Zahra et al., 2024). بیوچار وارد شده به خاک، ذخایر کربن آلی خاک را بهبود می‌بخشد. این منجر به افزایش خواص خاک، از جمله افزایش pH خاک، بالابردن ظرفیت نگهداری آب و جلوگیری از نفوذ مواد مغذی به قسمت‌های عمیق‌تر خاک می‌شود (Guo et al., 2020). اثرهای تثبیت عناصر سنگین خاک، محدودیت جذب و انباشت عناصر سنگین توسط گیاهان، افزایش زیست توده گیاهی و رقیق شدن عناصر سنگین در بافت‌های گیاهی، چهار عملکرد محوری بیوچار برای کاهش قابلیت دسترسی زیستی فلزات سنگین هستند (Ni et al., 2020). یکی از میکروارگانیسم‌هایی که برای تغذیه گیاه مفید در نظر گرفته شده است، قارچ‌های میکوریزی آربوسکولار هستند (Malusá et al., 2012). بررسی‌ها نشان می‌دهد قارچ‌های میکوریزی منبع انرژی و مواد مغذی هستند که می‌توانند کلونیزاسیون را افزایش دهند و از طریق مکانیسم‌های متعددی مانند بازیافت مواد مغذی، بهبود ساختار اطراف خاک، تحریک هورمون‌های گیاهی، افزایش تحمل به تنش خاک و در دسترس قرار دادن مواد معدنی برای گیاهان، رشد گیاه را تقویت می‌کنند (Bamdad et al., 2022). (Alshegaihi et al., 2024) گزارش دادند که کاربرد قارچ‌های میکوریزی افزایش معنی‌داری در رشد و زیست توده گیاه، جذب

عناصر غذایی، ترکیبات غیر آنزیمی دارد و باعث کاهش تنش اکسیداتیو و افزایش جذب ریز مغذی‌ها مانند مس در بخش‌های مختلف گیاه می‌شود. در عین حال، همزیستی قارچ‌های میکوریزی همچنین تحمل گیاهان را به تنش‌های زیستی و غیرزیستی مانند عوامل بیماری‌زا، خشکی، شوری، فلزات سنگین و آلاینده‌های آلی افزایش می‌دهد (Begum et al., 2019). (IIA et al., 2021) پارامترهای فیزیولوژی گیاه ذرت را در واکنش به اصلاح کننده‌های بیوچار و میکوریزا بررسی کردند و گزارش دادند ترکیب بیوچار و قارچ میکوریزی به طور قابل توجهی وزن خشک ریشه و ساقه را نسبت به شاهد افزایش می‌دهد. علاوه بر این، (Sun et al., 2022) نشان دادند ترکیبی دوگانه بیوچار و قارچ میکوریزی عملکرد ذرت را در مقایسه با شاهد افزایش می‌دهد. نتایج تحقیقات نشان می‌دهد که بیوچار می‌تواند به قارچ میکوریزی کمک کند تا ریشه‌ها را کلونیزاسیون کند، که به نوبه خود جذب فسفر و زیست توده را در ذرت افزایش دهد (Meng et al., 2024). همچنین (Jia et al., 2024) نشان دادند بکاربردن بیوچار، قارچ میکوریزی و کاربرد ترکیبی آنها به ترتیب باعث افزایش ضریب ۴/۸، ۶۲/۱ و ۲۲/۳ در زیست توده اندام هوایی ذرت شد به طوری که زیست توده اندام هوایی ذرت تحت تیمار بیوچار بالاترین میزان را داشت. (Rahman et al., 2023) نشان دادند که برگ‌های گیاه ذرت مقادیر زیادی گونه‌های فعال اکسیژن و مالون‌دی‌الدهید در پاسخ به تنش عناصر سنگین تولید می‌کنند نتایج آنها حاکی از تنش اکسیداسیون می‌باشد که با افزایش سطوح مالون‌دی‌الدهید و در برگ‌های ذرت تحت تنش عناصر سنگین ظاهر می‌شود. از سوی دیگر، گیاهان تیمار

شده با بیوچار، انعطاف پذیری بالایی در برابر تنش نشان دادند. این تحقیق با هدف بررسی واکنش گیاه به تنش کبالت و تعیین اثر بخشی بیوچار و میکوریزا در بهبود رشد و افزایش جذب مواد مغذی در اندام هوایی گیاهان ذرت انجام شده است. اهداف تحقیق شامل: ۱- ارزیابی رشد گیاهان ذرت در حضور فلز سنگین کبالت، ۲- ارزیابی اثرهای بیوچار و میکوریزا بر تنش اکسیداتیو و زیست توده در گیاهان ذرت تحت تنش کبالت و ۳- تعیین نقش بیوچار و میکوریزا به تنهایی و به صورت ترکیبی در جذب عناصر ریزمغذی و درشت مغذی توسط گیاهان ذرت تحت تنش.

مواد و روش‌ها

اعمال تیمارها و آماده سازی نمونه ها

این آزمایش بصورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی به صورت گلدانی در دانشگاه کردستان در سال ۱۴۰۱ اجرا شد. فاکتورهای مورد بررسی شامل تلقیح با قارچ میکوریزا در دو سطح (تلقیح با قارچ میکوریزا و بدون میکوریزا)، کاربرد بیوچار در دو سطح (پنج درصد وزن خاک و بدون بیوچار) و غلظت‌های مختلف کبالت در سه سطح مختلف صفر، ۶۰، ۱۲۰ پی‌پی‌ام بود. ابتدا بذره‌های گیاه ذرت هیبرید سینگل کراس (۶۷۸ BC) از موسسه‌ی بذر ونهال تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی استان کردستان تهیه شد. تعداد ۲۰۰ عدد بذر یکنواخت و همگن انتخاب شدند و برای جلوگیری از آلودگی قارچی توسط هیپوکلریت سدیم ۱٪ به مدت ۵ دقیقه ضد عفونی شدند. سپس بذرها چندین بار با آب مقطر شستشو داده شدند. پس از این مرحله ۱۰ عدد بذر در درون ظروف پتری سترون حاوی یک لایه کاغذ

شدند. مواد تلقیحی مورد آزمایش از نوع قارچ میکوریزای آربسکولار به نام گلوموس اینترادایسز *Glomus intraradices* از شرکت زیست فناوریان توران (پارک علوم و فناوری استان سمنان- ایران) و بیوچار هم از شرکت تعاونی تولیدی فصل پنجم (پارک و علوم فناوری فارس- شیراز - ایران) خریداری شد. محلول آبی کلرید کبالت شش ابه در غلظت‌های صفر، ۶۰ و ۱۲۰ میلی گرم در لیتر بعد از ظهور چهار برگگی گیاه به تیمارهای مناسب اضافه شد. کشت در تاریخ ۱۴۰۱/۲/۱ انجام شد و به مدت ۸۰ روز به طول انجامید. قبل از کشت، خاک زراعی از مزرعه‌ی کشاورزی دانشگاه کردستان تهیه و ویژگی فیزیکی و شیمیایی آن تعیین شد (جدول ۱).

صافی قرار داده شدند. بعد از چهار روز بذرها جوانه زدند و اساس جوانه زنی آن‌ها خروج ریشه‌چه و ساقه‌چه بود. در ادامه بذور جوانه زده شده به گلدان‌ها که با توجه به سطوح صفر و پنج در صد حجمی بیوچار و مخلوط با خاک و ماسه (۲:۱) پر شده بودند انتقال داده شد. از گلدان‌ها با ابعاد ارتفاع ۸۰ سانتی‌متر و قطر ۴۰ سانتی‌متر استفاده شد. درکف گلدان‌ها چندین منفذ کوچک وجود داشت تا آب ماسه در حد ظرفیت مزرعه باشد. در داخل هر گلدان چهار بذر جوانه زده در عمق هفت سانتی‌متری خاک کشت شد. جهت آماده سازی تیمارهای میکوریزی پنج گرم مایه تلقیح برای هریک از دانه رست‌ها استفاده شد و دانه‌رست‌ها روی مایه تلقیح کاشته

جدول ۱- ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک آزمایشی و بیوچار

نمونه	بافت خاک	pH	مواد آلی	ظرفیت تبادل کاتیونی	هدایت الکتریکی دسی زیمنس بر متر	نیتروژن	فسفات	پتاسیم	آهن	مس	منیزیم	منگنز	روی
پی‌پی‌ام													
خاک	لومی	۶/۸	۱/۷	۲۰/۲	۰/۰۲۵	۰/۰۴	۲۳۶	۳۵	۴/۱	۰/۹۵	۲/۱	۱/۲	۰/۴
بیوچار		۸/۴	۲۶	۲۴	۱/۲	۲/۳	۸۹	۱۰۵	۹/۵	۲۸	۲۷	۶۵	۲۶

وزن خشک (DW) نمونه در ۲۰ میلی‌لیتر آب مقطر) اندازه‌گیری شد

وزن تر ریشه و اندام هوایی

عملیات برداشت شامل جداسازی اندام هوایی از سطح خاک و جداسازی ریشه‌ها با شستشوی کامل خاک اطراف ریشه صورت گرفت. نمونه‌های گیاهی (اندام هوایی و ریشه) پس از توزین به مدت ۷۲ ساعت در داخل آون با دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد خشک شدند. نمونه‌های خشک شده توزین و سپس آسیاب و برای انجام آنالیزهای بعدی در ظروف پلاستیکی با برچسب مناسب نگهداری شدند. برای

آنالیز خاک و بیوچار

درصد نیتروژن کل خاک و بیوچار با روش کج‌لدال تعیین شد (Sparks et al., 2020). غلظت فسفر به روش رنگ سنجی (وانادات- مولیبدات) با دستگاه اسپکتوفتومتر در طول موج ۴۷۰ نانومتر انجام شد. (Temminghoff & Houba, 2004) برای ارزیابی Fe, Mn, Cu و Zn از عصاره DTPA استفاده شد و عناصر با استفاده از دستگاه جذب اتمی اندازه‌گیری شد (Lindsay & Norvell, 1978). هدایت الکتریکی (EC) با دستگاه EC متر در عصاره‌های خاک و آب با نسبت w/v ۱:۲، (۱۰ گرم

آزمایش‌هایی که نیاز به وزن تر داشتند در حین جمع آوری داخل کیسول ازت مایع نگهداری و تا شروع آزمایش در فریز -40° درجه سانتی‌گراد در آزمایشگاه نگهداری شدند.

اندازه‌گیری پارامترهای بیوشیمیایی

اندازه‌گیری میزان پراکسیداسیون لیپیدهای غشایی به وسیله تست تیوباریتوریک اسید با سنجش میزان مالون‌دی‌آلدهید انجام شد. در این روش، نیم گرم نمونه گیاهی در ۴ میلی‌لیتر تری‌کلرواستیک اسید یک درصد ساییده و داخل لوله آزمایش ریخته شد. سپس لوله‌ها در سانتریفیوژ با دور 1500 g به مدت ۲۰ دقیقه قرار داده شد. بعد از عمل سانتریفیوژ بر روی یک میلی‌لیتر از محلول رویی هر یک از نمونه‌ها، ۴ میلی‌لیتر تیوباریتوریک اسید ۵ درصد اضافه شد و در حمام آب گرم 90° درجه سانتی‌گراد به مدت ۳۰ دقیقه قرار گرفت. بعد از گذشت ۳۰ دقیقه لوله‌های آزمایش از حمام، خارج شدند و پس از سرد شدن در حمام آب یخ به مدت ۵ دقیقه در 10000 دور در دقیقه سانتریفیوژ گردیدند و غلظت مالون‌دی‌آلدهید با استفاده از ضریب تصحیح 155 mM cm^{-1} محاسبه و بر اساس واحد میکرومول بر گرم وزن تر (f.w) سنجش $\mu\text{mol g}^{-1}$ بیان شد (Jambunathan, 2010). سنجش میزان پراکسید هیدروژن از روش (Loreto & Velikova, 2001) صورت گرفت. برای این کار، $0/3$ گرم از نمونه پودر شده در ۳ میلی‌لیتر TCA (۱٪) مخلوط شد. نمونه‌ها در 10000 دور در دقیقه و چهار درجه سانتی‌گراد به مدت ۱۰ دقیقه سانتریفیوژ شدند. در ادامه $0/75$ میلی‌لیتر بافر فسفات پتاسیم (۱۰ میلی‌مولار، $\text{pH} = 7$) و $1/5$ میلی‌لیتر یدید پتاسیم (یک مولار) به $0/75$ میلی‌لیتر محلول رویی اضافه شد. پس

از مخلوط کامل، جذب در طول موج 390 نانومتر ثبت شد غلظت پراکسید هیدروژن نمونه‌ها به وسیله مقایسه جذب آن‌ها در 390 نانومتر و منحنی استاندارد آن تعیین گردید. اندازه‌گیری سنجش کربوهیدرات‌ها از روش آنترون انجام شد (Thimmaiah, 2004) و سنجش غلظت پروتئین کل عصاره‌های گیاهی با استفاده از روش (Bradford, 1976) انجام پذیرفت.

اندازه‌گیری عناصر ریز مغذی و درشت مغذی گیاه و خاک

به منظور اندازه‌گیری غلظت ریز مغذی و درشت مغذی، یک گرم از نمونه‌های پودر شده ریشه گیاه در دمای 450° درجه سانتی‌گراد به روش خشک سوزانی، خاکستر و در ۱۰ میلی‌لیتر اسید نتتریک به صورت محلول در آورده شد (Cindric *et al.*, 2012). در عصاره به دست آمده غلظت پتاسیم با استفاده از فلیم فتومتر به روش نشر شعله‌ای و غلظت روی، منگنز، منیزیم، آهن، مس و منگنز با استفاده از دستگاه جذب اتمی اندازه‌گیری شد. غلظت فسفر به روش رنگ سنجی (وانادات-مولیبدات) با دستگاه اسپکتوفتومتر در طول موج 470 نانومتر انجام شد (Temminghoff & Houba, 2004) و غلظت پتاسیم با روش داگنال بدست آمد (Dagnall *et al.*, 1971). تجزیه و تحلیل عنصری در آزمایشگاه آزمایش خاک، گروه آموزشی علوم و مهندسی خاک دانشگاه کردستان انجام شد.

تجزیه و تحلیل آماری

تجزیه و تحلیل داده‌ها با استفاده نرم افزار SPSS نسخه ۲۶ و مقایسه همه متغیرها از آنالیز واریانس (ANOVA) استفاده شد. برای تعیین تفاوت بین تمام تیمارها، از آزمون چندگانه دانکن استفاده شد. نتایج به عنوان میانگین $\pm$ انحراف معیار (SD) برای سه نمونه در هر گروه ارائه شده است. معنی‌داری در سطح احتمال پنج درصد در نظر گرفته شد. و رسم نمودار با استفاده از اکسل انجام شد.

نتایج و بحث

وزن تر و خشک اندام هوایی

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها در جدول ۲ نشان می‌دهد که اثرهای اصلی، متقابل کبالت، قارچ‌های مایکوریزا و بیوچار بر صفات وزن تر و خشک اندام هوایی در سطح احتمال ۰/۰۵ معنی‌دار بود. مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که با افزایش کبالت وزن تر و خشک اندام هوایی روند کاهش داشت. در بررسی برهمکنش تیمارها بر صفات وزن خشک و تر اندام هوایی، بالاترین وزن تر و خشک اندام هوایی به ترتیب با ۱۰۳ و ۳۱ گرم مربوط به اثر ترکیبی مایکوریزا و بیوچار و کمترین وزن تر و خشک اندام هوایی مربوط به تیمار ۱۲۰ پی‌پی‌ام با ۶۹ و ۱۶ گرم بدست آمد (شکل ۱). نتایج نشان داد که به کاربردن بیوچار و مایکوریزا وزن تر و خشک اندام هوایی به ترتیب با ۱۴/۵ و ۱۴/۸ درصد نسبت به شرایط عدم کاربرد اصلاح‌کنندها افزایش یافت (شکل ۱). کاهش

مشابهی در وزن تر و خشک اندام هوایی در گیاهان تیمار شده با کبالت گزارش شده است (Romdhane et al., 2021; Thukral, 2014). کبالت در سطوح بالا ممکن است با مهار تقسیم سلولی یا طولیل شدن سلولی یا ترکیبی از هر دو به طور مستقیم از رشد ریشه و اندام هوایی جلوگیری کند و در نتیجه به همان نسبت جذب مواد مغذی و آب در خاک توسط ریشه محدود می‌شود (Jayakumar et al., 2007). غلظت‌های بالای کبالت زیست توده گیاه را محدود می‌سازد پژوهش‌ها نشان می‌دهد که گونه‌های فعال اکسیژن باعث افزایش پراکسیداسیون لیپیدها در حضور عنصر سنگین شده و این موازنه آبی و تغذیه گیاه را برهم زده و عاملی موثر در کاهش رشد زیست توده گیاه شده است (Morrissey et al., 2009). بررسی‌ها نشان می‌دهد که کودهای زیستی همانند قارچ مایکوریزا نقش مهمی در جذب عناصر کم مصرف و پر مصرف دارد و باعث افزایش زیست توده گیاهی می‌شود. شکل‌گیری همزیستی قارچ‌های مایکوریزا با گیاه جذب نیتروژن و فسفر خارج از ریزوسفر را از طریق گسترش ناحیه جذب در گیاهان میزبان افزایش می‌یابد و بر وزن خشک اندام هوایی اثر می‌گذارد (Zhao et al., 2021). که این با نتایج ما مطابقت دارد. در آزمایش که توسط (Jia et al., 2024) بر روی گیاه ذرت انجام گرفت، زیست توده بیشتر گیاهان ذرت تلقیح شده با قارچ‌های مایکوریزا در مقایسه با گیاهان غیر تلقیح شده به توانایی شبکه هیف خارجی مایکوریزا برای افزایش جذب آب و مواد مغذی گیاه میزبان نسبت دادند.

جدول ۲- منابع تغییر، درجه آزادی و میانگین مربعات صفات مورد بررسی در ذرت

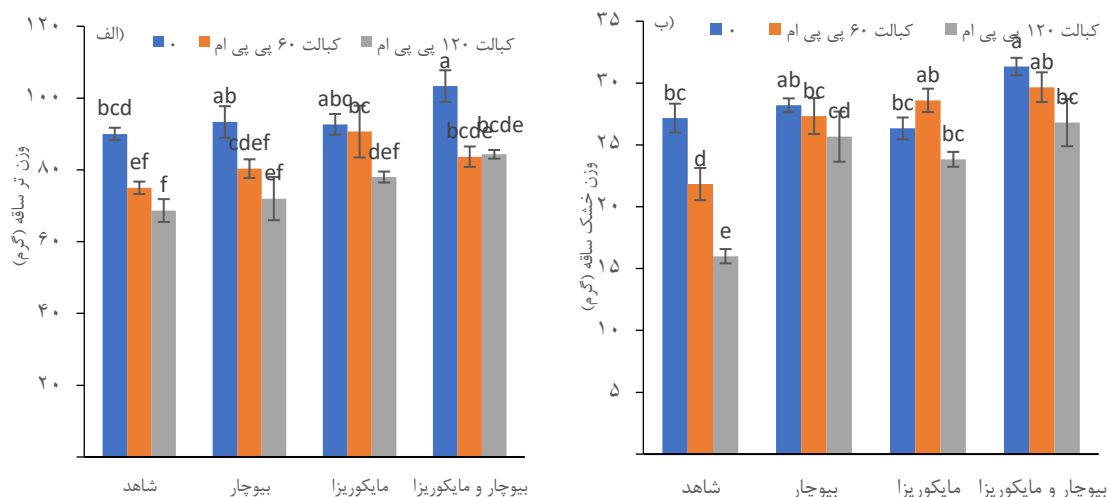
میانگین مربعات						منبع تغییرات	درجه
ازادی	وزن تر اندام هوایی	وزن خشک اندام هوایی	پراکسیداسیون هیدروژن	مالون‌دی‌الدهید	پروتئین محلول	قندهای محلول	
۲	۱۹۰۰/۵۸**	۸۷/۸۲۷**	۵/۲۱۲**	۷۶۳/۷۵۷**	۲۷/۳۶۰**	۲۶/۱۹۴**	کبالت
۱	۸۵۰/۱۱۱**	۱۴۶/۳۲۹**	۱/۴۷۷**	۵۷/۸۴**	۹۵/۲۶۶**	۳۳۶/۶۹۴**	مایکوریزا
۱	۱۸۲*	۱۱۴/۵۶۱*	۰/۱۱۵**	۲۴/۳۲۸**	۹۵/۶۷**	۴۴/۳۶۱*	بیوچار
۲	۳۶/۰۲۸ ^{ns}	۲۱/۳۰۱*	۰/۰۷۷*	۱۰/۳۸۶*	۱۲/۴۳۵**	۲۶/۸۶۱*	کبالت × مایکوریزا
۲	۶۴/۰۸۳ ^{ns}	۱/۶۱ ^{ns}	۰/۰۳۴ ^{ns}	۲/۳۳۴ ^{ns}	۵/۱۲۷*	۶/۱۹۴ ^{ns}	کبالت × بیوچار
۱	۱۷۳ ^{ns}	۱۲/۲۷۳ ^{ns}	۰/۰۱۱ ^{ns}	۳/۵۳۸ ^{ns}	۱/۱۱۶ ^{ns}	۵۸/۶۹۴*	بیوچار × مایکوریزا
۲	۱۶۱/۰۸۳*	۲۳/۱۲۱*	۰/۰۱۶ ^{ns}	۰/۷۳۴ ^{ns}	۳/۵۷۱*	۱۹/۸۶۱*	کبالت × مایکوریزا × بیوچار
	۴۲/۱۱۱	۴/۴۰۵	۰/۰۱۱	۱/۳۷۳	۰/۶۷۳	۴/۱۸	خطا

ns، * و **: به ترتیب بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار و اختلاف معنی‌دار در سطوح احتمال پنج و یک درصد می‌باشند.

جدول ۳- منابع تغییر، درجه آزادی و میانگین مربعات صفات مورد بررسی در ذرت

میانگین مربعات						منبع تغییرات	درجه
ازادی	اهن	روی	منگنز	پتاسیم	فسفات	منیزیم	
۲	۶۱۸/۷۵۹**	۲/۳۵۴**	۷/۰۳۸**	۸۴۶/۷۲۶**	۲۶۵۴۶/۹۸**	۳۵/۰۹۹**	کبالت
۱	۱۹۳/۷۱۹**	۰/۵۹۸**	۱/۷۸۸**	۵۸۱/۶۰۴**	۴۸۱۷/۰۸۴**	۶۹/۹۸۷**	مایکوریزا
۱	۳۷/۹۴۴**	۰/۲۲۳**	۰/۶۶**	۱۱۴/۰۲۴**	۳۰۳۶/۵۷۴**	۱۸/۶۳۹**	بیوچار
۲	۴۰/۲۸۶**	۰/۳۳۲**	۰/۹۹۴**	۱۰/۹۴۲ ^{ns}	۲۹۷۳/۷۹۳**	۱۰/۴۹۶**	کبالت × مایکوریزا
۲	۱۷/۲۰۱**	۰/۰۶۷**	۰/۲**	۳۱/۹۳۶*	۳۶۶/۶۹۰ ^{ns}	۱/۳۷۶ ^{ns}	کبالت × بیوچار
۱	۰/۶۱۹ ^{ns}	۰/۰۴۶*	۰/۱۳*	۱۱۹/۷۶۲*	۳۴۹/۳۲۷ ^{ns}	۹/۹۵۸*	بیوچار × مایکوریزا
۲	۸/۷۵۹*	۰/۱۳۳**	۰/۳۹۶**	۳۳۹/۹۲۰**	۱۰۵۸/۷۷۰*	۱۵/۵۶۴**	کبالت × مایکوریزا × بیوچار
	۱/۵۱۹	۰/۰۱	۰/۰۳۱	۹/۲۱۴	۲۷۳/۹۶۷	۰/۷۵۲	خطا

ns، * و **: به ترتیب بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار و اختلاف معنی‌دار در سطوح احتمال پنج و یک درصد می‌باشند.



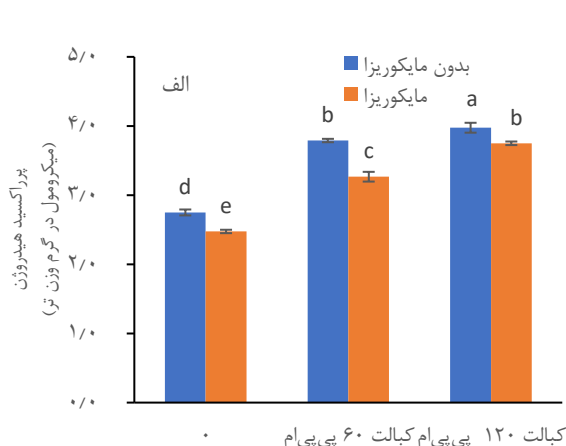
شکل ۱- نمودار مقایسه میانگین اثرات بیوچار و میکوریزا در شرایط تنشی روی وزن تر و خشک اندام هوایی (الف و ب) را نشان می‌دهد. داده‌ها نشان دهنده میانگین سه تکرار در هر تیمار $\pm$ SE است. حروف کوچک مشابه بالای هر ستون با استفاده از آزمون دانکن در $P \leq 0.05$ تفاوت معنی‌داری ندارند.

مالون‌دی‌الدهید و پراکسیداسیون هیدروژن

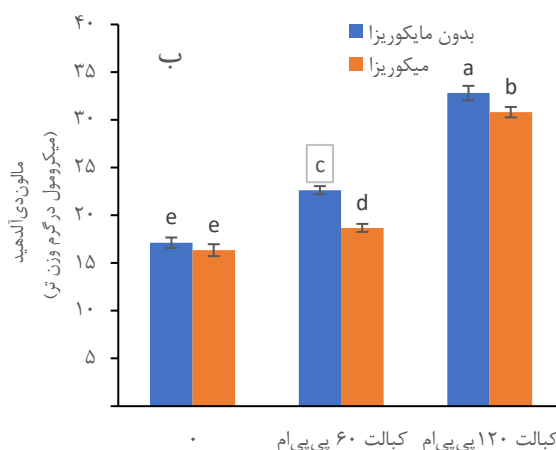
نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان می‌دهد مقدار پراکسیداسیون هیدروژن و مالون‌دی‌الدهید صرفاً، روی عامل‌های کبالت و میکوریزا اثر می‌گذارد (جدول ۲). بررسی مقایسه میانگین‌ها نشان داد با افزایش غلظت کبالت مقدار پراکسیداسیون هیدروژن روند افزایشی داشت بطوری که با افزایش کبالت در غلظت‌های ۶۰ و ۱۲۰ پی‌پی‌ام مقدار پراکسیداسیون هیدروژن به ترتیب ۳۵ و ۳۷ درصد نسبت به شاهد کاهش یافت (شکل ۲ الف). با این حال، افزودن میکوریزا در غلظت‌های ۶۰ و ۱۲۰ پی‌پی‌ام کبالت طور موثر شاخص‌های تنش اکسیداتیو را کاهش داد و به ترتیب منجر به کاهش ۱۴ و ۶ درصدی در مقایسه با گیاهان تحت تنش شد. در این مطالعه مشاهده شد به کاربرد هر دو سطح کبالت به طور قابل توجهی محتوای مالون‌دی‌الدهید را نسبت به شاهد افزایش می‌دهد به طوری که افزایش تنش در غلظت‌های ۶۰ و ۱۲۰ پی‌پی‌ام به ترتیب موجب

افزایش ۳۳ و ۹۱ درصدی محتوای مالون‌دی‌الدهید نسبت به گیاه شاهد شد (شکل ۲ ب). در حالی کاربرد میکوریزا سطح تنش را کاهش داد و در غلظت‌های ۶۰ و ۱۲۰ پی‌پی‌ام تنشی، به ترتیب ۱۷/۵ و ۷ درصد محتوای مالون‌دی‌الدهید را نسبت به تیمارهای کبالت کاهش داد. پراکسیداسیون لیپیدی غشایی فرآیندی است که در آن اسیدهای چرب غیراشباع به تدریج به قطعات هیدروکربنی کوچک مانند مالون‌دی‌الدهید تبدیل می‌شوند که در نهایت منجر به مرگ سلولی می‌شود (Anjum et al., 2015). پراکسیداسیون اسیدهای چرب تحت تنش فلزات سنگین توسط چندین محقق گزارش شده است (Dalo et al., 2019) که با نتایج این تحقیق مطابقت دارد. تنش فلزات سنگین مانند کبالت منجر به تنش اکسیداتیو می‌شود و یکی از اثرهای مضر آن افزایش پراکسیداسیون اسیدهای چرب غشاء است. این، به نوبه خود، گونه‌های مختلف فعال اکسیژن، از جمله رادیکال سوپراکسید (O_2^-)، رادیکال هیدروکسیل (OH^-)، و پراکسید هیدروژن (H_2O_2) را تحریک

برگ و ریشه در به کاربردن اصلاح کننده مایکوریزا مشاهده شد. (Turan, 2021) با اثر بیوچار و مایکوریزا روی گیاه ماش تحت تنش نیکل مشاهده کرد که گیاهان تحت تیمار اثر اصلاح کننده‌های خاک از جمله بیوچار مقدار مالون‌دی‌الدهید را نسبت به گیاه شاهد کاهش می‌دهد. (Li et al., 2023) نشان دادند گیاه یونجه تلقیح یافته با مایکوریزا تحت تنش کادمیوم در مقایسه با گیاهان تحت تیمار کادمیوم، محتوای مالون‌دی‌الدهید به طور قابل توجهی ۵۳٪ کاهش یافت، که نشان می‌دهد تلقیح مایکوریزا می‌تواند به طور قابل توجهی آسیب اکسیداتیو غشای سلولی ناشی از تنش تنش را کاهش دهد. با توجه نتیجه آزمایش همبستگی مثبتی در کاربرد قارچ مایکوریزا و کاهش مالون‌دی‌الدهید وجود دارد به طوری که درجه اکسیداسیون لیپیدهای غشایی توسط گیاهان کاهش و محیط خاک بهبود می‌یابد.



می‌کند. اگر غلظت آنها تنظیم نشود، این گونه‌های اکسیژن فعال می‌تواند به بیومولکول‌هایی مانند لیپیدها، پروتئین‌ها و اسیدهای نوکلئیک آسیب برساند (Garcia-Caparrós et al., 2021; Shahbaz et al., 2019). در بررسی‌های که توسط (Wa et al., 2017) انجام شد مشاهده کردند که کبالت آگزوژن باعث تخریب شدید لیپیدهای غشا شد، که با محتوای مالون‌دی‌الدهید بالاتر اثبات شد. آنها همچنین نشان داد که گونه‌های فعال اکسیژن به میزان زیادی در گیاهان جو در معرض تنش کبالت انباشته شده است. نتایج یافته‌های قبلی نشان می‌دهد قرار گرفتن اسفناج و جو در معرض کبالت باعث افزایش محتوای مالون‌دی‌الدهید و گونه‌های فعال اکسیژن می‌شود (Pandey et al., 2009; Wa et al., 2017). و (Zhu et al., 2020). اثرهای اصلاح کننده‌ها بر مالون‌دی‌الدهید برگ و ریشه گیاه کتان را در واکنش به فلزات سنگین مورد بررسی قرار دادند، کاهش در محتوای مالون‌دی‌الدهید



شکل ۲- نمودار مقایسه میانگین اثرهای بیوچار و مایکوریزا در شرایط تنشی روی پراکسیداسیون هیدروژن برگ (الف) و مالون‌دی‌الدهید ریشه (ب) را نشان می‌دهد. داده‌ها نشان دهنده میانگین سه تکرار در هر تیمار $\pm SE$ است. حروف کوچک مشابه بالای هر ستون با استفاده از آزمون دانکن در $P < 0.05$ تفاوت معنی‌داری ندارند.

پروتئین کل اندام هوایی

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها مربوط به پروتئین کل اندام هوایی در جدول (۲) نشان داده شده است. بر اساس نتایج تجزیه واریانس داده‌ها اثر تنش کبالت، مقادیر میکوریزا و بیوچار و برهمکنش آنها در سطح احتمال ۰/۰۵ معنی‌دار بود. افزایش تنش کبالت از ۶۰ به ۱۲۰ پی‌پی‌ام باعث کاهش غلظت پروتئین شد. کمترین کاهش در غلظت ۱۲۰ پی‌پی‌ام با ۱/۷۶ میلی گرم در گرم وزن تر مشاهده شد (شکل ۳). بیشترین مقدار غلظت پروتئین کل اندام هوایی در تیمارهای ترکیبی بیوچار و میکوریزا بود این مقدار ۸۹/۱۱ میلی گرم در گرم وزن تر بود (شکل ۳ الف). غلظت پروتئین‌ها به علت تنش‌های محیطی تغییر می‌یابد تیمار گیاهان با عنصر سنگین کبالت باعث تغییر در مقدار پروتئین‌ها می‌شود. مشابه نتایج این تحقیق، کاهش محتوای پروتئین در سطوح بالای کبالت در لوبیا چشم بلبلی و نعنا گزارش شده است (Azarakhsh et al., 2015; Vijayarengan, 2011). (Jayakumar et al., 2007) بررسی کردند که سطوح بالای کبالت خاک به طور قابل توجهی محتوای اسید آمینه و پروتئین را در برگ های *R. sativus* کاهش می‌دهد. افزایش بیشتر سطح کبالت باعث کاهش محتوای اسید آمینه و پروتئین می‌شود، روند مشابهی در برنج به دلیل فلزات سنگین مانند آرسنیک (Pandey et al., 2015) و در گندم به دلیل نیکل (Rehman et al., 2022) مشاهده شد. نیتروژن پیش ماده ای برای سنتز اسیدهای آمینه است. از آنجایی که محتوای نیتروژن گیاهان تیمار شده با فلز کاهش می‌یابد، در نهایت، دلیل کاهش اسیدهای آمینه و محتوای پروتئین گیاهان، به دلیل محدود بودن

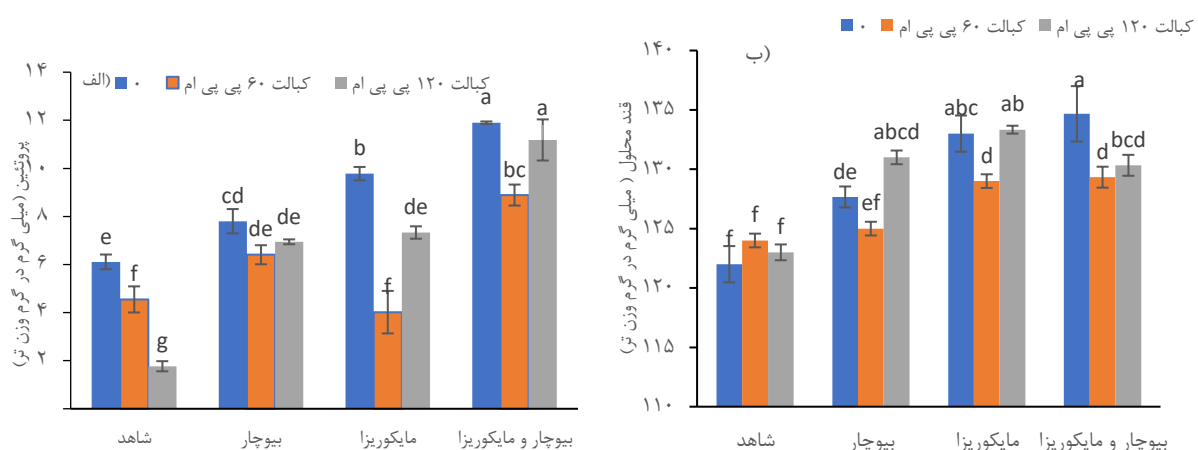
نیتروژن برای سنتز اسیدهای آمینه است (Jayakumar et al., 2007). با توجه به مقایسه میانگین داده‌ها میزان پروتئین گیاهان تلقیح یافته با میکوریزا و کاربرد بیوچار بیشتر از گیاهان غیرمیکوریزایی است که با نتایج ما مطابقت دارد. علاوه بر این پژوهشگران نشان دادند که گیاهان گندم تلقیح یافته با میکوریزا و کاربرد بیوچار نسبت به گیاهان غیرمیکوریزای تحت غلظت بالای نیکل محتوای پروتئین بیشتری داشتند (Rehman et al., 2022). (Kanwal et al., 2015) بیان کردند در گیاهان غیرمیکوریز، کاهش محتوای پروتئین کل ممکن است به دلیل اثرها سمی روی و کادمیوم بر متابولیسم سلولی و سنتز پروتئین باشد. در این تحقیق می‌توان اظهار داشت که کاربرد قارچ های میکوریزا و بیوچار باعث افزایش پروتئین و بهبود گیاه ذرت در شرایط تنش کبالت شد.

قند محلول اندام هوایی

اثر تنش کبالت، بیوچار و میکوریزا و برهمکنش آنها بر مقدار قندهای محلول در سطح احتمال ۰/۰۵ معنی‌دار بود (جدول ۲). با افزایش غلظت عنصر سنگین موجب افزایش قند محلول شد که این افزایش در هر دو سطح معنی‌دار نبودند. بررسی اثر ترکیبی هر دو اصلاح کننده بیوچار و میکوریزا بر قند محلول مثبت بود و موجب افزایش قند محلول نسبت به تیمارهای تنشی بدون اصلاح کننده‌ها شد. بیشترین مقدار قندهای محلول مربوط به هر دو اصلاح کننده با ۱۳۴ میلی گرم برگرم وزن تر و کمترین مقدار مربوط به شاهد ۱۲۲ میلی گرم برگرم وزن تر بود (شکل ۳ ب). گیاهان به تجمع مواد محلول به عنوان یک شاخص فیزیولوژیکی حساس پاسخ می‌دهند. کربوهیدراتها از متابولیت‌های سازگار

مقایسه با گیاهان غیرتلقیح شده در مواجهه با تنش ممکن است در نتیجه افزایش قندهای محلول در برگ گیاهان تلقیح شده با مایکوریزا باشد. غلظت‌های بالاتر قندهای محلول در برگ‌ها ممکن است گیاهان تلقیح شده با مایکوریزا را قادر به حفظ پتانسیل بالاتر آب برگ در طول تنش و محافظت از گیاهان در برابر تنش اکسیداتیو کند (Kumar *et al.*, 2010). بنابراین افزایش انباشت قند در گیاهان مایکوریزا با افزایش ترکیبات کربن در سیستم ریشه، هیدرولیز نشاسته، غلظت بالاتر اسید آلی در سیستم ریشه در گیاهان همزیست مرتبط است (Sheng *et al.*, 2011). به طور کلی گیاه مایکوریزا می‌تواند توانایی تنظیم اسمزی را از طریق گسترش هیف‌های خارجی بالا برده و با جذب نیتروژن و فسفر خارج از ریزوسفر نوعی ساز و کار کارآمدی برای محافظت از خود داشته باشد (Xu *et al.*, 2016). همین امر دلیل افزایش مقدار کربوهیدرات محلول در برگ ذرت در این تحقیق باشد.

هستند که مانع کمبود آب در شرایط تنشی در سلول می‌شوند و گیاه را از آسیب در شرایط تنشی حفاظت می‌کند (Xu *et al.*, 2021). سازگاری اسمزی گیاهی توسط انواع متابولیت‌ها و اسمولیت‌ها از جمله قندهای محلول و پروتئین‌های محلول بهبود می‌یابد (Rehman *et al.*, 2022) مشاهده کردند محتوای قند و پروتئین محلول در برگ گیاهان تلقیح شده با مایکوریزا در مقایسه با گیاهان غیرتلقیح بیشتر بود. تجمع پروتئین ممکن است با افزایش فعالیت روبیسکو مرتبط باشد و قند محلول انباشته شده می‌تواند از طریق سنتز مولکول‌های آلی کوچک بر محافظت از آنزیم‌های متابولیک کلیدی اثر بگذارد. گزارش‌ها حاکی از آن است که بیوجار و مایکوریزا به طور موثر پروتئین گندم و محتویات قند محلول را به صورت جداگانه و ترکیبی تحت تنش نیکل افزایش می‌دهد (Rehman *et al.*, 2022) که با نتایج این تحقیق مطابقت دارد. به نظر می‌رسد رشد بهتر گیاهان تلقیح شده با مایکوریزا در

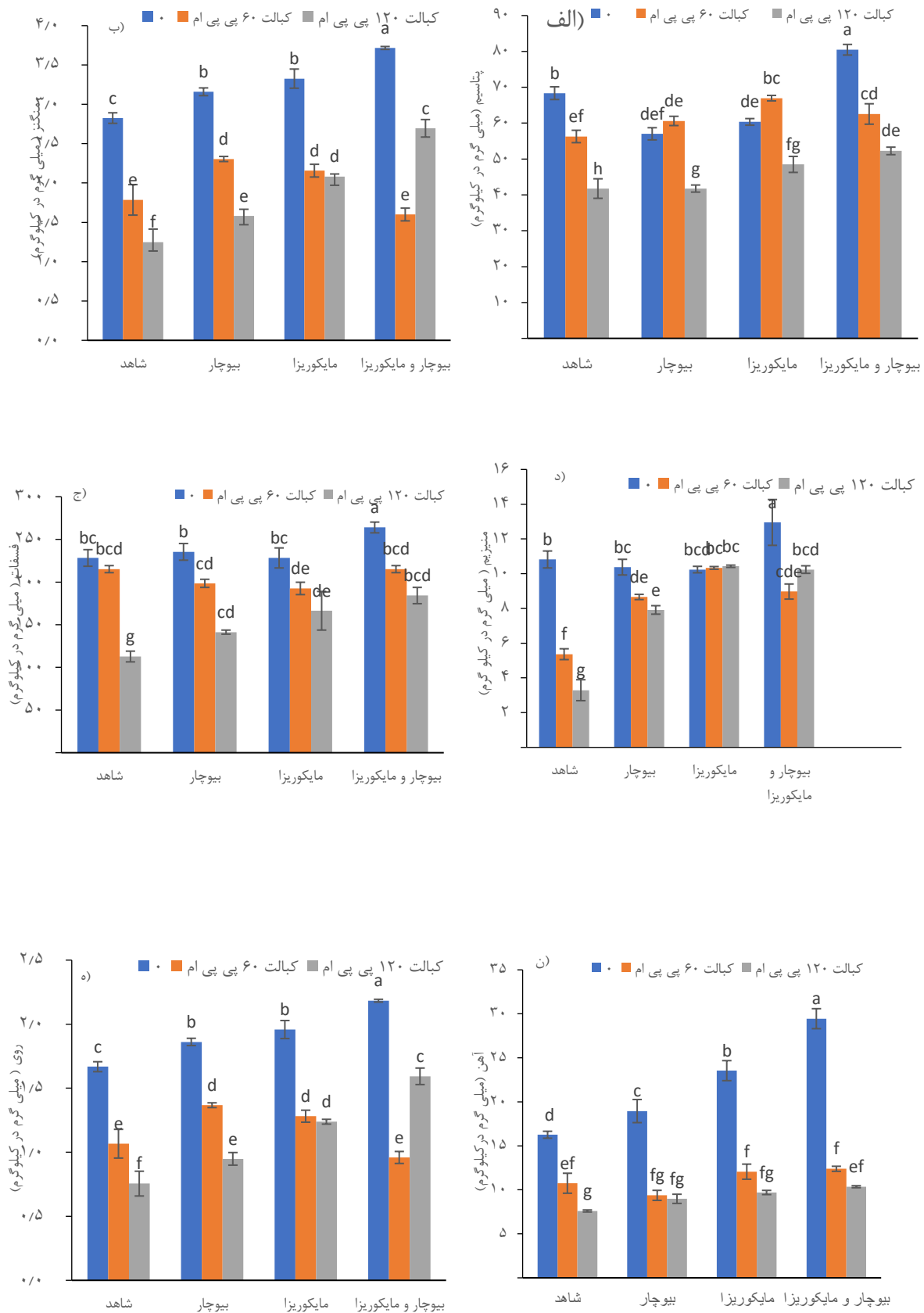


شکل ۳- نمودار مقایسه میانگین اثرهای بیوجار و مایکوریزا در شرایط تنشی روی پروتئین محلول برگ (الف) و قند محلول (ب) برگ را نشان می‌دهد. داده‌ها نشان دهنده میانگین سه تکرار در هر تیمار $\pm$ SE است. حروف کوچک مشابه بالای هر ستون با استفاده از آزمون دانکن در $P \leq 0.05$ تفاوت معنی‌داری ندارند.

مواد درشت مغذی و ریز مغذی

تجزیه واریانس آزمایش نشان داد که اثر تیمارهای اصلی و برهمکنش آنها بر مواد مغذی و ریز مغذی معنی دار بود به طوری که عناصر آهن و روی در سطح احتمال ۰/۰۵ و منیزیم، پتاسیم، و منگنز و فسفر در سطح احتمال ۰/۰۱ معنی دار بودند (جدول ۳). وجود کبالت در گیاهان منجر به کاهش مقدار مواد مغذی و ریز مغذی ریشه شد که برای عناصر ریز مغذی و درشت مغذی در شرایط تیمارتنشی ۱۲۰ پی پی ام کمترین مقدار را نسبت به شاهد به خود اختصاص داده بودند. در مقابل، جذب عناصر ریز مغذی و درشت مغذی در ریشه گیاهان با استفاده از هر یک از اصلاح ها و یا به صورت ترکیبی افزایش یافت. به طوریکه بیشترین افزایش در ترکیب مایکوریزا و بیوچار برای پتاسیم (۱۸٪)، منگنز (۳۲٪)، فسفر (۱۵٪)، منیزیم (۱۹٪)، روی (۳۱٪) و آهن (۸۰٪) نسبت به شاهد مشاهده شد (شکل ۳ الف- ن). بر اساس نتایج این تحقیق، بیشترین میزان جذب عناصر مربوط به استفاده از بیوچار و مایکوریزا بود. استفاده از بیوچار و مایکوریزا با کاهش اثر تنش کبالت و تامین عناصر ریز مغذی و درشت مغذی ضروری گیاهان، مزایای قابل توجهی برای رشد و سلامت گیاهان دارد. این یافته ها

با گزارش های دیگری که نشان می دهند کودهای زیستی قادر به افزایش جذب مواد ریز مغذی و درشت مغذی هستند همخوانی دارد (Ahmadabadi et al., 2018; Turan et al., 2018; Zhao et al., 2021). بیوچار منبع ارزشمندی از مواد مغذی درشت (نیتروژن، فسفات و پتاسیم) و ریز (آهن، روی، مس و منگنز) است (Agegnehu et al., 2015; Zubair et al., 2021). ثابت شده است که کاربرد بیوچار در جذب نیتروژن، فسفر و پتاسیم به دلایل زیر اثر بسزایی دارد: (۱) بیوچار با تغییر موقتی در pH برای جذب مواد مغذی کمتر در دسترس، مفید می باشد (Liu et al., 2016). (۲) ظرفیت تبادل کاتیونی بالا در ساختار شیمیایی بیوچار می تواند منجر به حفظ پتاسیم شود، از این رو، پتاسیم می تواند برای گیاه بیشتر در دسترس باشد (Heitkötter & Marschner, 2015). همچنین اثرهای مثبت مایکوریزا بر جذب عناصر غذایی درشت را می توان با افزایش سطح جذبی هیف و ریشه و ترشح فسفاتازها به خارج از سلول ذکر کرد (Gul & Whalen, 2016; Zhang et al., 2016) با توجه به اثر مایکوریزه شدن، یافته های حاصل از این تحقیق با سایر محققان سازگار است، که ممکن است جذب مواد مغذی پس از مایکوریزه شدن را بهبود بخشد (Adeyemi et al., 2021).



شکل ۴- نمودار مقایسه میانگین اثرهای بیوچار و میکوریزا در شرایط تنشی روی غلظت عناصری مانند پتاسیم (الف)، منگنز (ب)، فسفر (ج)، منیزیم (د)، روی (ه)، آهن ریشه (ن) را نشان می‌دهد. داده‌ها نشان دهنده میانگین سه تکرار در هر تیمار $\pm SE$ است. حروف کوچک مشابه بالای هر ستون با استفاده از آزمون دانکن در $P < 0.05$ تفاوت معنی‌داری ندارند.

نتیجه‌گیری

همراه با بیوچار می‌تواند رشد ذرت، جذب مواد مغذی را در خاک آلوده به کبالت بهبود بخشد.

تشکر و قدردانی

نویسندگان بدین وسیله از حمایت‌های مالی دانشگاه کردستان و دانشگاه ارومیه تشکر و قدردانی خود را اعلام می‌نمایند.

در حالی که در تیمارهای ترکیبی بیوچار و میکوریزا افزایش قابل توجهی در پارامترهای ذکر شده داشت. به طوری که میزان وزن تر و خشک اندام هوایی به ترتیب ۱۴/۵، ۱۴/۸ درصد افزایش نسبت به شاهد مشاهده شد. این مطالعه نشان داد که تلقیح گیاهان میکوریزا

REFERENCES

- Adeyemi, N. O., Atayese, M. O., Sakariyawo, O. S., Azeez, J. O., & Ridwan, M. 2021. Arbuscular mycorrhizal fungi species differentially regulate plant growth, phosphorus uptake and stress tolerance of soybean in lead contaminated soil. *Journal of Plant Nutrition*, 44(11), 1633-1648.
- Afzal, S., Alghanem, S. M. S., Alsudays, I. M., Malik, Z., Abbasi, G. H., Ali, A., Noreen, S., Ali, M., Irfan, M., & Rizwan, M. 2024. Effect of biochar, zeolite and bentonite on physiological and biochemical parameters and lead and zinc uptake by maize (*Zea mays* L.) plants grown in contaminated soil. *Journal of Hazardous Materials*, 469, 133927. ##
- Agegehu, G., Bass, A. M., Nelson, P. N., Muirhead, B., Wright, G., & Bird, M. I. 2015. Biochar and biochar-compost as soil amendments: Effects on peanut yield, soil properties and greenhouse gas emissions in tropical North Queensland, Australia. *Agriculture, ecosystems & environment*, 213, 72-85.
- Ahmadabadi, Z., Zarei, M., Yasrebi, J., Ronaghi, A., Ghasemi, R., Saharkhiz, M. J., Kasmaei, L. S., & Schnug, E. 2018. Influence of arbuscular mycorrhiza fungi, rice-husk-driven biochar and compost on dry matter yield, nutrients uptake and secondary metabolites responses of Iranian borage *Echium amoenum* Fisch & CA Mey. *Journal of Cultivated Plants/Journal für Kulturpflanzen*, 70. (۱۲).
- Alshegaihi, R. M., Alatawi, A., & Alenezi, M. A. 2024. Ameliorative effects of plant growth promoting rhizobacteria and arbuscular mycorrhizal fungi on Cu stress in maize (*Zea mays* L.) with a focus on oxidative damage, antioxidant responses, and gene expression. *Journal of soil science and plant nutrition*, 1-19.
- Anjum, N. A., Sofo, A., Scopa, A., Roychoudhury, A., Gill, S. S., Iqbal, M., Lukatkin, A. S., Pereira, E., Duarte, A. C., & Ahmad, I. 2015. Lipids and proteins—major targets of oxidative modifications in abiotic stressed plants. *Environmental Science and Pollution Research*, 22, 4099-4121.

- Azarakhsh, M., Asrar, Z., & Mansouri, H. 2015. Effects of seed and vegetative stage cysteine treatments on oxidative stress response molecules and enzymes in *Ocimum basilicum* L. under cobalt stress. *Journal of soil science and plant nutrition*, 15(3), 651-662.
- Bamdad, H., Papari, S., Lazarovits, G., & Berruti, F. 2022. Soil amendments for sustainable agriculture: Microbial organic fertilizers. *Soil Use and Management*, 38(1), 94-120 .
- Begum, N., Qin, C., Ahanger, M. A., Raza, S., Khan, M. I., Ashraf, M., Ahmed, N., & Zhang, L. 2019. Role of arbuscular mycorrhizal fungi in plant growth regulation: implications in abiotic stress tolerance. *Frontiers in plant science*, 10, 1068 .
- Bradford, M. M. 1976. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. *Analytical biochemistry*, 72(1-2), 248-254 .
- Cindrić, I. J., Krizman, I., Zeiner, M., Kampać, Š., Medunić, G., & Stingeder, G. 2012. ICP-AES determination of minor-and major elements in apples after microwave assisted digestion. *Food chemistry*, 135(4), 2675-2680 .
- Dagnall, R., Kirkbright, G., West, T., & Wood, R. 1971. Multichannel atomic fluorescence and flame photometric determination of calcium, copper, magnesium, manganese, potassium, and zinc in soil extracts. *Analytical Chemistry*, 43(13), 1765-1769 .
- Dalo, E., Sadikaj, R., & Sahiti, H. 2019. Assessment of accumulation of heavy metals and lipid peroxidation in common reed (*Phragmites australis*) in the Albanian Part of Lake Ohrid. *Journal of Ecological Engineering*, 20(4), 114-120 .
- El-Sheekh, M., El-Naggar, A., Osman, M., & El-Mazaly, E. 2003. Effect of cobalt on growth, pigments and the photosynthetic electron transport in *Monoraphidium minutum* and *Nitzschia perminuta*. *Brazilian Journal of Plant Physiology*, 15, 159-166 .
- Garcia-Caparrós, P., De Filippis, L., Gul, A., Hasanuzzaman, M., Ozturk, M., Altay, V., & Lao, M. T. 2021. Oxidative stress and antioxidant metabolism under adverse environmental conditions: a review. *The Botanical Review*, 87, 421-466 .
- Gul, S., & Whalen, J. K. (2016). Biochemical cycling of nitrogen and phosphorus in biochar-amended soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 103, 1-15.
- Guo, X.-x., Liu, H.-t., & Zhang, J. 2020. The role of biochar in organic waste composting and soil improvement: A review. *Waste Management*, 102, 884-899.
- Heitkötter, J., & Marschner, B. 2015. Interactive effects of biochar ageing in soils related to feedstock, pyrolysis temperature, and historic charcoal production. *Geoderma*, 245, 56-64 .
- ##
- Hu, X., Wei, X., Ling, J., & Chen, J. 2021. Cobalt: an essential micronutrient for plant growth? *Frontiers in plant science*, 12, 768523.
- IIA, A. E. S. 2021. Effect of biochar rates on A-mycorrhizal fungi performance and maize plant growth, Phosphorus uptake, and soil P availability under calcareous soil conditions. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 52(8), 815-831.
- Jambunathan, N. (2010). Determination and detection of reactive oxygen species (ROS), lipid peroxidation, and electrolyte leakage in plants. *Plant stress tolerance: methods and protocols*, 291-297.

- Jayakumar, K., Jaleel, C. A., & Vijayarengan, P. 2007. Changes in growth, biochemical constituents, and antioxidant potentials in radish (*Raphanus sativus* L.) under cobalt stress. *Turkish Journal of Biology*, 31(3), 127-136 .
- Jia, Q., Sun, J., Gan, Q., Shi, N.-N., & Fu, S. 2024. Zea mays cultivation, biochar, and arbuscular mycorrhizal fungal inoculation influenced lead immobilization. *Microbiology Spectrum*, 12(4), e03427-03423 .
- Kanwal, S., Bano, A., & Malik, R. N. 2015. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on metals uptake, physiological and biochemical response of *Medicago sativa* L. with increasing Zn and Cd concentrations in soil. *American Journal of Plant Sciences*, 6(18), 2906-2923 .
- Kumar, A., Sharma, S., & Mishra, S. 2010. Influence of arbuscular mycorrhizal (AM) fungi and salinity on seedling growth, solute accumulation, and mycorrhizal dependency of *Jatropha curcas* L. *Journal of Plant Growth Regulation*, 29, 297-306 .
- Li, W., Chen, K., Li, Q., Tang, Y., Jiang, Y., & Su, Y. 2023. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on alleviating cadmium stress in *Medicago truncatula* Gaertn. *Plants*, 12(3), 547.
- Lindsay, W. L., & Norvell, W. (1978). Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese, and copper. *Soil science society of America journal*, 42(3), 421-428.
- Liu, A., Tian, D., Xiang, Y., & Mo, H. 2016. Biochar improved growth of an important medicinal plant (*Salvia miltiorrhiza* Bunge) and inhibited its cadmium uptake. *J Plant Biol Soil Health*, 3(2), 1-6 .
- Loreto, F., & Velikova, V. 2001. Isoprene produced by leaves protects the photosynthetic apparatus against ozone damage, quenches ozone products, and reduces lipid peroxidation of cellular membranes. *Plant Physiology*, 127(4), 1781-1787 .
- Malusá, E., Sas-Paszt, L., & Ciesielska, J. 2012. Technologies for beneficial microorganisms inocula used as biofertilizers. *The scientific world journal*, 2012(1), 491206 .
- Meng, L., Cheng, Z., Wang, Y., Li, S., & Clarke, N. 2024. Arbuscular Mycorrhizal Fungal Interacted with Biochar and Enhanced Phosphate-Solubilizing Microorganism Abundance and Phosphorus Uptake in Maize. *Agronomy*, 14(8), 1678 .
- Morrissey, J., Baxter, I. R., Lee, J., Li, L., Lahner, B., Grotz, N., Kaplan, J., Salt, D. E., & Gueriot, M. L. 2009. The ferroportin metal efflux proteins function in iron and cobalt homeostasis in Arabidopsis. *The Plant Cell*, 21(10), 3326-3338 .
- Nagajyoti, P. C., Lee, K. D., & Sreekanth, T. 2010. Heavy metals, occurrence and toxicity for plants: a review. *Environmental chemistry letters* 8, 199-216.
- Ni, J. J., Bordoloi, S., Shao, W., Garg, A., Xu, G., & Sarmah, A. K. 2020. Two-year evaluation of hydraulic properties of biochar-amended vegetated soil for application in landfill cover system. *Science of the Total Environment*, 712, 136486.
- Page, V., Le Bayon, R.-C., & Feller, U. 2006. Partitioning of zinc, cadmium, manganese and cobalt in wheat (*Triticum aestivum*) and lupin (*Lupinus albus*) and further release into the soil. *Environmental and experimental Botany*, 58(1-3), 269-278 .
- Pandey, C., Raghuram, B., Sinha, A. K., & Gupta, M. 2015. miRNA plays a role in the antagonistic effect of selenium on arsenic stress in rice seedlings. *Metallomics*, 7(5), 857-866 .

- Pandey, N., Pathak, G. C., Pandey, D. K., & Pandey, R. 2009. Heavy metals, Co, Ni, Cu, Zn and Cd, produce oxidative damage and evoke differential antioxidant responses in spinach. *Brazilian Journal of Plant Physiology*, 21, 103-111 .
- Rafique, M., Ortas, I., Rizwan, M., Sultan, T., Chaudhary, H. J., Işik, M., & Aydin, O .2019 .Effects of *Rhizophagus clarus* and biochar on growth, photosynthesis, nutrients, and cadmium (Cd) concentration of maize (*Zea mays*) grown in Cd-spiked soil. *Environmental Science and Pollution Research*, 26, 20689-20700 .
- Rahman, M. M., Das, A. K., Sultana, S., Ghosh, P. K., Islam, M. R., Keya, S. S., Ahmed, M., Nihad, S. A. I., Khan, M. A. R., & Lovell, M. C. 2023. Biochar potentially enhances maize tolerance to arsenic toxicity by improving physiological and biochemical responses to excessive arsenate .*Biochar*, 5(1), 71 .
- Rehman, S., Mansoor, N., Al-Dhumri, S. A., Amjad, S. F., Al-Shammari, W. B., Almutari, M. M., Alhusayni, F. S., Al Bakre, D. A., Lalarukh, I., & Alshahri, A. H. 2022. Associative effects of activated carbon biochar and arbuscular mycorrhizal fungi on wheat for reducing nickel food chain bioavailability. *Environmental Technology & Innovation*, 26, 102539.
- Romdhane, L., Panozzo, A., Radhouane, L., Dal Cortivo, C., Barion, G., & Vamerali, T. 2021. Root characteristics and metal uptake of maize (*Zea mays* L.) under extreme soil contamination. *Agronomy*, 11(1), 178 .
- Santana, K. V., Apolônio, F. C., & Wisniewski, A. 2020. Valorization of cattle manure by thermoconversion process in a rotary kiln reactor to produce environmentally friendly products. *BioEnergy research*, 13, 605-617 .
- Shahbaz, A. K., Ramzani, P. M. A., Saeed, R., Turan, V., Iqbal, M., Lewińska, K., Abbas, F., Saqib, M., Tauqeer, H. M., & Iqbal, M. 2019. Effects of biochar and zeolite soil amendments with foliar proline spray on nickel immobilization, nutritional quality and nickel concentrations in wheat. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 173, 182-191 .
- Sheng, M., Tang, M., Zhang, F., & Huang, Y. 2011. Influence of arbuscular mycorrhiza on organic solutes in maize leaves under salt stress. *Mycorrhiza*, 21, 423-430 .
- Sparks, D. L., Page, A. L., Helmke, P. A., & Loeppert, R. H. 2020. *Methods of soil analysis, part 3: Chemical methods* (Vol. 14). John Wiley & Sons .
- Sun, J., Jia, Q., Li, Y., Zhang, T., Chen, J., Ren, Y., Dong, K., Xu, S., Shi, N.-N., & Fu, S. 2022. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi and biochar on growth, nutrient absorption, and physiological properties of maize (*Zea mays* L.). *Journal of Fungi*, 8(12), 1275 .
- Temminghoff, E. E., & Houba, V .J. (2004). Plant analysis procedures. Dordrecht.
- Thimmaiah, S. (2004). Standard Methods of Biochemical Analysis Kalyani Publisher. *Ludhiyana, India*.
- Thukral, A. 2014. Effects of macro-and nano-cobalt oxide particles on barley seedlings and remediation of cobalt chloride toxicity using sodium hypochlorite. *International Journal of Plant & Soil Science*, 3(6), 751-762.
- Turan, V. 2021. Arbuscular mycorrhizal fungi and pistachio husk biochar combination reduces Ni distribution in mungbean plant and improves plant antioxidants and soil enzymes. *Physiologia Plantarum*, 173(1), 418-429.

- Turan, V., Ramzani, P. M. A., Ali, Q., Abbas, F., Iqbal, M., Irum, A., & Khan, W.-u.-D. 2018. Alleviation of nickel toxicity and an improvement in zinc bioavailability in sunflower seed with chitosan and biochar application in pH adjusted nickel contaminated soil. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 64(8), 1053-1067 .
- Vijayarengan, P. 2011. Changes in growth, biochemical constituents and antioxidant potentials in cowpea (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.) under cobalt stress. *International Journal of Research in Environmental Science and Technology*, 2, 74-82 .
- Wa Lwalaba, J. L., Zvogbo, G., Mulembo, M., Mundende, M., & Zhang, G. 2017. The effect of cobalt stress on growth and physiological traits and its association with cobalt accumulation in barley genotypes differing in cobalt tolerance. *Journal of Plant Nutrition*, 40(15), 2192-2199 .
- Xu, N., Tan, G., Wang, H., & Gai, X. 2016. Effect of biochar additions to soil on nitrogen leaching, microbial biomass and bacterial community structure. *European journal of soil biology*, 74, 1-8 .
- Xu, Z., He, M., Xu, X., Cao, X., & Tsang, D. C. 2021. Impacts of different activation processes on the carbon stability of biochar for oxidation resistance. *Bioresource Technology*, 338, 125555 .
- Zahra, A., Kayani, S., Shahzad, A., Sert, T. D., Ozcelik, H., Qin, M., Naeem, M., & Billah, M. 2024. Wood biochar induced metal tolerance in Maize (*Zea mays* L.) plants under heavy metal stress. *Environmental Research*, 262, 119940 .
- Zhang, D., Pan, G., Wu, G., Kibue, G. W., Li, L., Zhang, X., Zheng, J., Zheng, J., Cheng, K., & Joseph, S. 2016. Biochar helps enhance maize productivity and reduce greenhouse gas emissions under balanced fertilization in a rainfed low fertility inceptisol. *Chemosphere*, 142, 106-113.
- Zhang, H., Zhen, H., Huang, C., Wang, K., & Qiao, Y. 2020. The effects of biochar and AM fungi (*Funneliformis mosseae*) on bioavailability Cd in a highly contaminated acid soil with different soil phosphorus supplies. *Environmental Science and Pollution Research*, 27, 44440-44451 .
- Zhao, Z., Chen, L., & Xiao, Y. 2021. The combined use of arbuscular mycorrhizal fungi, biochar and nitrogen fertilizer is most beneficial to cultivate *Cichorium intybus* L. in Cd-contaminated soil. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 217, 112154.
- Zhu, Y., Wang, H., Lv, X., Zhang, Y., & Wang, W. 2020. Effects of biochar and biofertilizer on cadmium-contaminated cotton growth and the antioxidative defense system. *Scientific reports*, 10(1), 20112.
- Zubair, M., Ramzani, P. M. A., Rasool, B., Khan, M. A., Akhtar, I., Turan, V., Tauqeer, H. M., Farhad, M., Khan, S. A., & Iqbal, J. 2021. Efficacy of chitosan-coated textile waste biochar applied to Cd-polluted soil for reducing Cd mobility in soil and its distribution in moringa (*Moringa oleifera* L.). *Journal of environmental management*, 284, 112047 .