فرآیند و کارکرد گیاهی، جلد ۱۲، شماره ۵۴، خرداد و تیرماه ۱۴۰۲ صفحه: ۲۹۱-۳۰۵

مقاله پژوهشی

# اثر مقادیر مختلف سولفات مس بر رشد، جذب عناصر غذایی و انباشت مس در خارمریم (*Silybum marianum*) و افسنطین (*Artemisia absinthium*)

ناطق لشکری صنمی[۱]، جمشید قربانی[۱*]، بابک متشرع‌زاده[۲]، سیدمحمد حجتی[۳] و قربان وهاب‌زاده[۴]

[۱] گروه مرتعداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران

[۲] گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

[۳] گروه جنگلداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران

[۴] گروه آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران

(تاریخ دریافت:۱۴۰۱/۰۵/۲۲، تاریخ پذیرش نهایی:۱۴۰۱/۰۸/۲۴)

**چکیده**

**این پژوهش به منظور بررسی توانایی جذب و انباشت مس و اثر آلودگی آن بر رشد و محتوای عناصر معدنی گیاهان مرتعی خارمریم و افسنطین در شرایط گلخانه انجام شد. در یک آزمایش فاکتوریل بر پایه طرح کاملاً تصادفی، مس در سه سطح صفر (شاهد)، ۱۰۰ و ۲۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم به صورت سولفات مس با سه تکرار به گلدان‌ها اعمال و سپس بذر دو گیاه کشت شدند. بعد از دو ماه و کامل شدن رشد، گیاهان برداشت شده و ویژگی‌های رویشی و محتوای کلسیم، منیزیم، پتاسیم، فسفر، آهن، روی، منگنز و مس در اندام هوایی و ریشه اندازه‌گیری شدند. نتایج نشان داد که با آلودگی سولفات مس، رشد اندام هوایی و زیرزمینی افسنطین تحت تأثیر قرار نمی‌گیرد اما زیست-توده اندام هوایی به همراه حجم، سطح و طول ریشه خارمریم در غلظت‌های بالاتر مس کاهش معنی‌داری می‌یابد. با افزایش غلظت سولفات مس در خاک، انباشت مس در ریشه هر دو گیاه و در اندام هوایی خارمریم افزایش معنی‌داری نشان داد. بیشترین جذب مس با ۵۳/۵۰ و ۱۶۸/۷۲ میلی‌گرم در کیلوگرم در اندام هوایی و ریشه خارمریم مشاهده شد. فاکتور انتقال کمتر از یک در هر دو گیاه توانایی آنها را برای تجمع فلز مس در ریشه نشان می‌دهد. در سطح آلودگی ۲۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم سولفات مس، غلظت پتاسیم در اندام هوایی خارمریم به طور معنی‌داری بیشتر از افسنطین بود. افزایش غلظت سولفات مس در خاک، محتوای عناصر کم مصرف در گیاه افسنطین را تحت تأثیر قرار نداده اما موجب کاهش معنی‌دار منگنز و روی در اندام هوایی و ریشه خارمریم و افزایش معنی‌دار آهن در اندام هوایی خارمریم شد.**

**کلمات کلیدی: بوم‌شناسی احیا، باطله زغال‌سنگ، تنش سولفات مس، فلزات سنگین**

**مقدمه**

مس عنصری ضروری برای رشد طبیعی گیاه و متابولیسم بوده و در برخی از فرآیندهای فیزیولوژیکی مثل زنجیره‌های انتقال الکترون فتوسنتزی و تنفسی، تثبیت نیتروژن، متابولیسم پروتئین، فعالیت آنتی‌اکسیدانی و متابولیسم دیواره سلولی نقش مهمی داشته (Marschner, 1995) و به عنوان یک جز ساختاری و کاتالیزوری پروتئین‌ها و آنزیم‌ها عمل کرده و نقش مهمی در تشکیل لیگنین در دیواره سلول دارد (Pilon *et al.*,

*نویسنده مسؤل، نشانی پست الکترونیکی: J.ghorbani@sanru.ac.ir

[ Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-17 ]

[ DOR: 20.1001.1.23222727.1402.12.54.18.8 ]

2006). با این حال، حضور بیش از حد مس در خاک می‌تواند باعث کاهش رشد گیاه و اختلال در جذب و انتقال مواد معدنی شود (Madejon *et al*., 2009). در نتیجه تشدید فعالیت‌های معدن‌کاری و ذوب فلز، کاربرد کودهای آلی و معدنی، استفاده نامناسب از قارچ‌کش و آفت‌کش‌های حاوی مس و لجن فاضلاب، مقدار زیادی مس در محیط آزاد شده و موجب آلودگی خاک می‌شوند (Adrees *et al*., 2015). در مقایسه با سایر عناصر ضروری مثل منگنز و روی و عناصر غیر ضروری مثل کادمیوم، غلظت‌های بالای مس سمیت بیشتری برای گیاهان، حیوانات و انسان‌ها به همراه دارد (Dresler *et al*., 2014). غلظت طبیعی مس در گیاهان در محدده بین ۲۰-۳ میلی‌گرم در کیلوگرم است (Adrees *et al*., 2015). در گیاهان مقادیر سمی مس، باعث تولید انواع اکسیژن فعال، تنش اکسیداتیو و اختلال در فرآیندهای اصلی فتوسنتز می‌شوند (Ambrosini *et al*., 2018). در خاک‌های آلوده به مس، گیاهان به روش‌های مختلفی با تنش احتمالی این عنصر مقابله می‌کنند. برخی از گونه‌های گیاهی برای جلوگیری از جذب و انتقال زیاد یون‌های فلزی، روش پیشگیری را اتخاذ می‌کنند. این گیاهان در خاک‌های بسیار آلوده هم مقدار کمی مس را در بافت‌های خود جمع می‌کنند. در مقابل، گیاهان انباشت‌گر می‌توانند انباشت زیاد مس را در بافت‌ها و اندام هوایی موجب شوند (Kabata-Pendias and Pendias, 2001). نتایج تحقیقات مختلف نشان داده که غلظت‌های بالای عناصر کم‌مصرف مثل مس در خاک می‌تواند رشد و عملکرد گیاه را تحت تأثیر قرار دهد. براساس گزارش Vijayarengan و Uthayam (۲۰۱۷)، غلظت سولفات مس تا ۵۰ میلی‌گرم در کیلوگرم، موجب افزایش مقادیر نیتروژن، پتاسیم، فسفر، کلسیم و منیزیم در گیاه *Raphanus sativus* شد، درحالی‌که غلظت‌های بالاتر مس (۲۵۰-۱۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم) کاهش این عناصر را در پی داشت. با توجه به نتایج بررسی Marques و همکاران (۲۰۱۸) غلظت پایین‌تر سولفات مس (تا ۲۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم) به رشد گیاه *Hymenaea courbaril* کمک کرد، اما در غلظت بالاتر (۸۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم)، آلودگی سولفات مس موجب کاهش طول ریشه، سطح ریشه، حجم ریشه و زی‌توده خشک گیاه شد. در پژوهش Pietrini و همکاران (۲۰۱۹)، ارتفاع، قطر و تعداد ساقه‌ها در گیاه *Arundo donax* تحت تأثیر تیمارهای آلودگی مس قرار نگرفت، اما غلظت ۳۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم مس منجر به کاهش غلظت آهن و روی در اندام هوایی و اختلال در ویژگی‌های فتوسنتزی شد. این مطالعه نشان داد که اگر چه تنش مس ممکن است بر تعادل عناصر غذایی گیاه تأثیر بگذارد اما این گیاه می‌تواند تا ۳۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم مس را بدون هیچ نوع اثر نامطلوب بر تولید زیست-توده تحمل کند.

استخراج زغال‌سنگ آلودگی ناشی از فلزات سنگین را افزایش می‌دهد. حضور سولفیدهایی مثل کالکوپیریت ($CuFeS_2$)، کوولیت (CuS) و کالکوسیت ($Cu_2S$) در باطله‌های معدنی ناشی از استخراج زغال‌سنگ باعث پراکندگی مس در محیط می‌شود (Masto *et al*., 2017). انطباق بهتر گیاه با اثرات آلودگی فلز و جلوگیری از بروز تنش ناگهانی ناشی از افزودن فلز سنگین از مهم‌ترین دلایل طرح این موضوع بود. زیرا در طبیعت تنش‌های غیرزنده از جمله آلودگی فلزات معمولاً به مرور و به صورت تدریجی در اثر آزادسازی از سنگ بستر، آبیاری با آب‌های آلوده و نیز تجمع فلز ناشی از کاربرد کودهای شیمیایی و آلی اتفاق می‌افتد (نجفی و سرهنگ‌زاده، ۱۳۹۳).

خارمریم (*Silybum marianum* (L.) Gaertn) و افسنطین (*Artemisia absinthium* L.) دو گیاه مرتعی از تیره کاسنی هستند که توانایی رویش طبیعی در باطله‌های زغال‌سنگ در معادن کارمزد سوادکوه در استان مازندران را دارند. این دو گیاه به دلیل استخراج ترکیبات مؤثره مهم مانند ابسنطین برای افسنطین (Szopa *et al*., 2020) و سیلی‌بین و سیلی‌مارین (نصیری و جوانمرد، ۱۴۰۰) برای خارمریم در صنایع داروسازی اهمیت بالایی دارند. عصاره‌های تهیه‌شده از خارمریم اهمیت اقتصادی بالایی داشته و در سال ۲۰۱۴ مکمل‌های تهیه‌شده از این گیاه در بازار فروش مکمل‌های طبیعی با فروش ۹/۲ میلیون دلار رتبه ششم را در میان ۲۰ گیاه

[ Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-17 ]

[ DOR: 20.1001.1.23222727.1402.12.54.18.8 ]

پرفروش کسب و در بازار امریکا نیز مکمل‌های تهیه‌شده از این گیاه، از بین ۵۰ مکمل گیاهی پرفروش با فروش ۱۶/۴ میلیون دلار در جایگاه دوازدهم قرار گرفت (Smith *et al.*, 2015). با آگاهی از اثر فلزات سنگین بر ویژگی‌های جوانه‌زنی و رشد گیاهان، می‌توان توانایی آن‌ها را برای استفاده در احیای خاک‌های آلوده ارزیابی کرد (Dahmani-Muller *et al.*, 2000). در همین رابطه، لشکری صنمی و همکاران (۱۴۰۱) ویژگی‌های جوانه‌زنی این گیاهان را در تنش فلزهای سنگین مورد بررسی قرار داده و قابلیت تحمل و توانایی جوانه‌زنی آن‌ها را در غلظت‌های بالای آلودگی گزارش دادند. همچنین اظهار داشتند که مس نسبت به سرب و کادمیوم در کاهش بنیه بذر اثر بیشتری داشت. با توجه به تداوم بهره‌برداری از معادن و تجمع تدریجی ترکیبات حاوی فلز مس در انباشت‌های رها شده باطله‌های زغال‌سنگ، بررسی پاسخ گیاهان معرفی شده به مقادیر چند برابری غلظت‌های معمول این فلز می‌تواند شناخت ما را نسبت به میزان تحمل و حد بردباری این گونه‌ها افزایش دهد. در این تحقیق تغییرات رشد و پاسخ تغذیه‌ای (کلسیم، منیزیم، پتاسیم، فسفر، آهن، منگنز، روی و مس) خارمریم و افسنطین در تنش سولفات مس مورد مطالعه قرار گرفت.

## مواد و روش‌ها

**طراحی و اجرای آزمایش:** پس از بازدیدهای میدانی از باطله‌های معدنی زغال‌سنگ منطقه کارمزد سوادکوه در استان مازندران (طول‌های جغرافیایی ″۳۸ ′۵۷ °۵۲ تا ″۱۲ ′۵۸ °۵۲ شرقی و عرض‌های جغرافیایی ″۵۷ ′۰۵ °۳۶ تا ″۵۳ ′۰۶ °۳۶ شمالی) بذر خارمریم و افسنطین جمع‌آوری شدند. خاک مورد آزمایش از عمق ۳۰-۰ سانتی‌متری خاک غیرآلوده که معمولاً به عنوان خاک زراعی بوده، از مزرعه پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران تهیه شد. نمونه‌های خاک ابتدا در هوا خشک و بخشی از آن‌ها برای سنجش ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی از الک دو میلی‌متری عبور داده شدند (جدول ۱). در نقاط تصادفی از منطقه معدنی مقدار کافی باطله زغال‌سنگ تهیه و ویژگی‌های آنها نیز تعیین شد (جدول ۱). آنالیز ویژگی‌های خاک و باطله براساس روش‌های معمول و استاندارد تعیین شد. این پژوهش به صورت آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار در گلخانه پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران طراحی و اجرا شد. تیمارها شامل دو گونه خارمریم و افسنطین و سه سطح آلودگی خاک به مس با سه تکرار در غلظت‌های صفر، ۱۰۰ و ۲۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم با کاربرد سولفات مس ۵ آبه ($CuSO_4.5H_2O$) بود (۰/۲۵۱ گرم و ۰/۵۰۲ گرم سولفات مس در یک لیتر آب برابر با غلظت واقعی ۱۰۰ و ۲۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم مس بود). سطح مس براساس اندازه‌گیری اولیه غلظت آن در باطله، بررسی پاسخ گیاهان به استفاده چند برابری آن‌ها و غلظت بحرانی سولفات مس برای گیاهان (۱۰۰-۲۰ میلی‌گرم در کیلوگرم) (Alloway, 1990) در نظر گرفته شد.

یک کیلوگرم بستر کشت شامل مخلوط خاک و باطله با نسبت ۱:۴ که قبلاً از الک چهار میلی‌متر عبور داده شدند، به هر گلدان اضافه شد. بذرهای سالم گیاهان خارمریم و افسنطین در گلدان‌های مجزا و در عمق دو سانتی‌متری و با فواصل منظم در خاک کشت شدند. ایجاد آلودگی به این صورت بوده که فلز مس به شکل نمک سولفات مس در مقدار مشخصی از آب-مقطر حل و در طول دوره داشت با فاصله زمانی هر دو هفته یک‌بار به همراه آبیاری در همه گلدان‌های تیمار شده اعمال شد (متشرع‌زاده و همکاران، ۱۳۹۳). مدت زمان روشنایی و تاریکی گلخانه ۱۲ ساعت، دما ۲۵ درجه سلسیوس و رطوبت نسبی ۶۵ درصد تنظیم شد.

بعد از جوانه زدن بذرها، تعداد گیاهچه‌های موجود در هر گلدان تنک و در نهایت دو گیاهچه قوی و سالم حفظ شدند. در پایان ماه دوم، ارتفاع گیاهان با خط‌کش اندازه‌گیری شد. برای اندازه‌گیری وزن تر اندام‌های گیاهی، بخش‌های هوایی و ریشه گیاهان پس از خروج از خاک، تفکیک و شستشو شدند. سپس رطوبت سطحی آنها با کاغذ صافی گرفته و با ترازوی دیجیتال با دقت ۰/۰۱ گرم توزین شد. طول ریشه با خط‌کش تعیین شد. برای اندازه‌گیری حجم ریشه از یک استوانه مدرج (۱۰۰ میلی‌لیتر) که تا حجم خاصی درون آن آب وجود داشت

[ Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-17 ]
[ DOR: 20.1001.1.23222727.1402.12.54.18.8 ]

**جدول ۱- ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک و باطله زغال‌سنگ مورد استفاده برای کشت گلدانی (برای آهن، روی، منگنز، سرب و مس، مقادیر قابل جذب در خاک و مقادیر کل آنها در باطله اندازه‌گیری شد).**

| ویژگی‌های اندازه‌گیری شده | خاک | باطله زغال‌سنگ |
|---|---|---|
| شن (٪) | ۳۰ | ۷۶/۸۶ |
| سیلت (٪) | ۵۰ | ۱۲/۱۰ |
| رس (٪) | ۲۰ | ۱۱/۰۴ |
| نیتروژن کل (٪) | ۰/۰۷ | ۰/۱۱ |
| کربن آلی (٪) | ۱/۶۷ | ۶/۱۲ |
| واکنش خاک | ۸/۱۸ | ۴/۷۵ |
| قابلیت هدایت الکتریکی (dS/m) | ۲/۷۳ | ۰/۵۶ |
| کربنات کلسیم معادل (٪) | ۹/۳۱ | ۳/۲۶ |
| پتاسیم قابل جذب (mg/kg) | ۱۱۶/۴۶ | ۲۲۲/۱۷ |
| فسفر قابل جذب (mg/kg) | ۲/۸۹ | ۶/۷۲ |
| کلسیم | ۱۲/۵ ($meq.l^{-1}$) | ۳۳۰۰ (mg/kg) |
| منیزیم | ۱۱ ($meq.l^{-1}$) | ۸۳۰۰ (mg/kg) |
| آهن (mg/kg) | ۹/۵۱ | ۲۰۹۰۰ |
| روی (mg/kg) | ۳/۰۹ | ۶۰ |
| منگنز (mg/kg) | ۸/۳۱ | ۱۹۳ |
| سرب (mg/kg) | ۱/۵۳ | ۳۴ |
| مس (mg/kg) | ۱/۶۳ | ۳۳ |

(۷۰ میلی‌لیتر) استفاده شد و تغییر حجم آب بعد از قرار گرفتن ریشه گیاه درون استوانه مدرج، به عنوان حجم ریشه در نظر گرفته شد.

برای تعیین وزن خشک، قسمت‌های مختلف گیاه به طور جداگانه در پاکت‌های کاغذی قرار داده شدند و در آون به مدت ۴۸ ساعت در دمای ۷۰ درجه سلسیوس خشک و پس از اندازه‌گیری آسیاب شدند. برای تجزیه‌های شیمیایی، یک گرم نمونه پودر گیاه در کوره با دمای ۵۵۰ درجه سلسیوس خاکستر شد. خاکستر در ۲۰ میلی‌لیتر اسید کلریدریک (HCl) یک نرمال مخلوط و صاف شد. حجم محلول صاف شده با آب مقطر به ۱۰۰ میلی‌لیتر رسانده شد (امامی، ۱۳۷۵). از این محلول برای تعیین عناصر کم‌مصرف و پرمصرف استفاده شد. اندازه‌گیری پتاسیم اندام هوایی و ریشه توسط دستگاه فلیم فتومتر مدل JENWAY-PFP7 تعیین شد (Ryan *et al.*, 2007). تعیین فسفر اندام هوایی و ریشه نمونه‌ها به این صورت بود که ۵ میلی‌لیتر از عصاره تهیه‌شده را در یک بالن ژوژه ۲۵ میلی‌لیتری ریخته و ۵ میلی‌لیتر معرف نیترو- وانادو- مولیبدات به آن افزوده و در نهایت حجم آن را به ۲۵ میلی‌لیتر رساندیم. سپس با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر میزان جذب محلول در طول‌موج ۴۵۰ نانومتر خوانده شد (Ryan *et al.*, 2007). کلسیم و منیزیم به روش کلسیمتری و عناصر منگنز، آهن، روی و مس با استفاده از دستگاه جذب اتمی مدل Shimadzu-AA 6400 شناسایی و اندازه‌گیری شدند. فاکتور انتقال (Transfer factor) از تقسیم غلظت مس در اندام هوایی به غلظت مس در ریشه به دست آمد (Xiao *et al.*, 2017).

نرمال بودن داده‌ها با استفاده از آزمون کولموگروف- اسمیرنوف کنترل شد و داده‌های درصدی به دلیل عدم پیروی از توزیع نرمال، تبدیل لگاریتمی شدند. تجزیه واریانس داده‌ها

[ Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-17 ]
[ DOR: 20.1001.1.23222727.1402.12.54.18.8 ]

**جدول ۲- نتایج تجزیه واریانس اثر تنش سولفات مس بر شاخص‌های رشد در خارمریم و افسنطین**

| منبع تغییرات | درجه آزادی | وزن تر اندام هوایی | وزن خشک اندام هوایی | وزن تر ریشه | وزن خشک ریشه | حجم ریشه | سطح ریشه | ارتفاع گیاه | طول ریشه |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | (گرم) | | | | (سانتی‌متر مکعب) | | (سانتی‌متر) | |
| گیاه | ۱ | ۴۲۴/۷۲*** | ۱۷/۷۳** | ۲۷/۳۰*** | ۱۱/۲۶** | ۱۳/۳۶** | ۱۸/۱۶** | ۱۴/۳۱** | ۱۱/۵۱** |
| سطوح مس | ۲ | ۳۲/۰۹*** | ۱۸/۳۶*** | ۴/۰۳* | ۱۰/۶۹** | ۹/۴۰** | ۱۱/۳۴** | ۱۰/۲۴** | ۷/۰۱** |
| اثر متقابل | ۲ | ۸/۰۵** | ۶/۲۸* | ۰/۷۳ns | ۲/۱۸ns | ۴/۸۲* | ۴/۵۱* | ۳/۲۱ns | ۵/۰۶* |
| خطا | ۱۲ | ۴/۵ | ۰/۱۱ | ۶/۳۵ | ۰/۰۷ | ۵/۳۹ | ۱۷/۴۱ | ۲۰/۷۷ | ۸/۹۷ |

**اعداد مقادیر F و معنی‌داری آنها در سطح ۰/۰۵ (*)، ۰/۰۱ (**)، ۰/۰۰۱ (***) و عدم معنی‌داری (ns)**

به‌صورت آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با استفاده از بسته Agricolea در محیط نرم‌افزار آماری R و مقایسه میانگین‌ها با آزمون دانکن انجام شد.

## نتایج

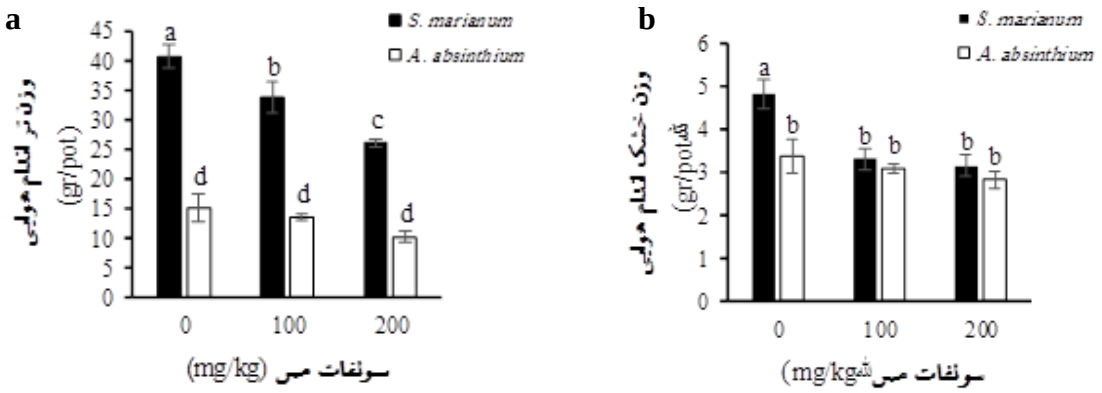
برخی از مهم‌ترین خصوصیات توصیفی خاک و باطله زغال سنگ در جدول ۱ ارائه شده و همان‌طور که مشخص بوده، باطله زغال‌سنگ دارای شرایط اسیدی بوده و حاوی مقادیر بالاتر عناصر بود.

**اثر آلودگی سولفات مس بر ویژگی‌های رشد:** نتایج تجزیه واریانس نشان داد که تنش سولفات مس ویژگی‌های رویشی دو گونه گیاهی را به شکل متفاوتی تحت تأثیر قرار داد (جدول ۲). با افزایش غلظت سولفات مس، وزن تر اندام هوایی گیاه خارمریم کاهش معنی‌داری نشان داد ($P<0.01$) و از ۴۰/۸۱ گرم در تیمار شاهد به ۲۶/۱۳ گرم در تیمار ۲۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم سولفات مس رسید (جدول ۲ و شکل ۱). اما وزن تر اندام هوایی گیاه افسنطین تحت تأثیر افزایش غلظت سولفات مس قرار نگرفت. خارمریم در تمام تیمارها وزن تر اندام هوایی بیشتری نسبت به افسنطین داشت (شکل ۱). با افزایش غلظت سولفات مس، وزن خشک اندام هوایی تنها در گیاه خارمریم کاهش معنی‌داری ($P<0.05$) یافت (شکل ۱). بیشترین وزن خشک اندام هوایی با ۴/۸۳ گرم در گلدان در تیمار شاهد مربوط به گیاه خارمریم مشاهده شد. در غلظت‌های ۱۰۰ و ۲۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم سولفات مس، وزن خشک اندام هوایی خارمریم و افسنطین اختلاف معنی‌داری با هم نداشتند (شکل ۱). در گیاه خارمریم سطح ریشه با افزایش آلودگی سولفات مس، کاهش معنی‌داری ($P<0.05$) داشت. اما در گیاه افسنطین با وجود کاهش سطح ریشه، اختلاف بین تیمارها معنی‌دار نبود (شکل ۲). سطح ریشه گیاه خارمریم در تیمار شاهد (۳۷/۷۱ سانتی‌متر مربع) و ۱۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم (۲۶/۶۴ سانتی‌متر مربع) بیشتر از سایر تیمارها بود. خارمریم و افسنطین با کمترین سطح ریشه در بالاترین غلظت سولفات مس، تفاوت معنی‌داری با هم نداشتند (شکل ۲).

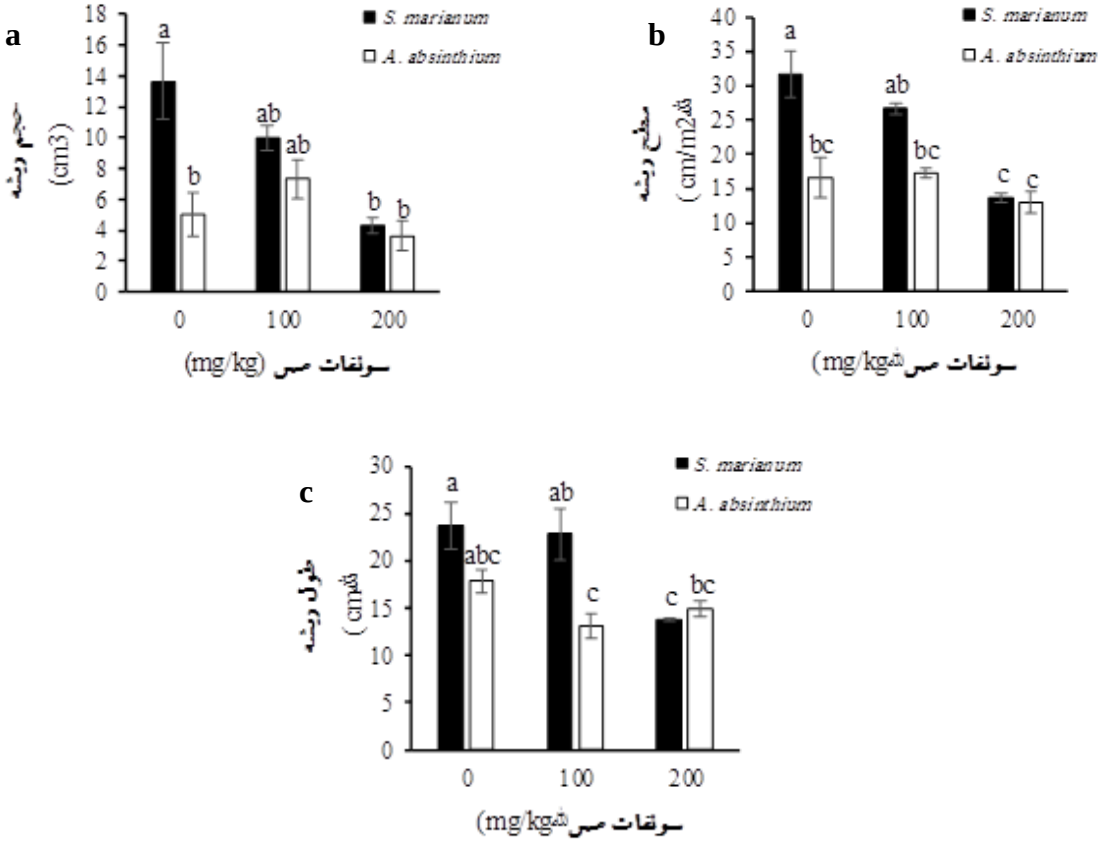
حجم ریشه گیاه خارمریم با افزایش غلظت سولفات مس کاهش معنی‌داری ($P<0.05$) یافت، اما در مورد گیاه افسنطین بین تیمارها کاهش معنی‌داری مشاهده نشد (شکل ۲). حجم ریشه گیاه خارمریم در تیمار شاهد (۱۳/۳۶ سانتی‌متر مکعب) با حجم ریشه گیاه خارمریم (۱۰/۰۰ سانتی‌متر مکعب) و افسنطین (۷/۳۳ سانتی‌متر مکعب) در تیمار ۱۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم سولفات مس اختلاف معنی‌داری نداشت. در مقایسه بین گونه‌ها، خارمریم با ۸/۷۲ سانتی‌متر مکعب دارای حجم ریشه بیشتری نسبت به گونه افسنطین (۴/۵۵ سانتی‌متر مکعب) بود (شکل ۲). کمترین حجم ریشه خارمریم و افسنطین در غلظت‌های ۲۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم سولفات مس بوده که اختلاف معنی‌دار باهم نداشتند (شکل ۲). با افزایش غلظت سولفات مس، طول ریشه گیاه خارمریم کاهش معنی‌داری ($P<0.05$) نشان داد (شکل ۲). بین تیمارهای سولفات مس در گیاه افسنطین، کاهش معنی‌داری از نظر طول ریشه مشاهده

[ Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-17 ]

[ DOR: 20.1001.1.23222727.1402.12.54.18.8 ]




**شکل ۱- میانگین وزن تر (a) و خشک (b) اندام هوایی گیاه خارمریم و افسنطین در تیمارهای سولفات مس (حروف مشترک روی ستون‌ها نشان‌دهنده عدم اختلاف معنی‌دار است (P<0.05)).**




**شکل ۲- میانگین ویژگی‌های رویشی ریشه حجم ریشه (a)، سطح ریشه (b) و طول ریشه (c) خارمریم و افسنطین در تیمارهای سولفات مس (حروف مشترک روی ستون‌ها نشان‌دهنده عدم اختلاف معنی‌دار است (P<0.05)).**

نشد (شکل ۲).

**اثر آلودگی** سولفات **مس بر محتوای عناصر پرمصرف:** نتایج تجزیه واریانس نشان داد که میزان درشت‌مغذی‌ها (کلسیم، منیزیم، پتاسیم و فسفر) در گیاهان تحت تنش

[ Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-17 ]

[ DOR: 20.1001.1.23222727.1402.12.54.18.8 ]

**جدول ۳- نتایج تجزیه واریانس اثر تنش سولفات مس بر مقادیر عناصر پرمصرف در خارمریم و افسنطین (واحدها به صورت درصد و اعداد تبدیل لگاریتم شدند).**

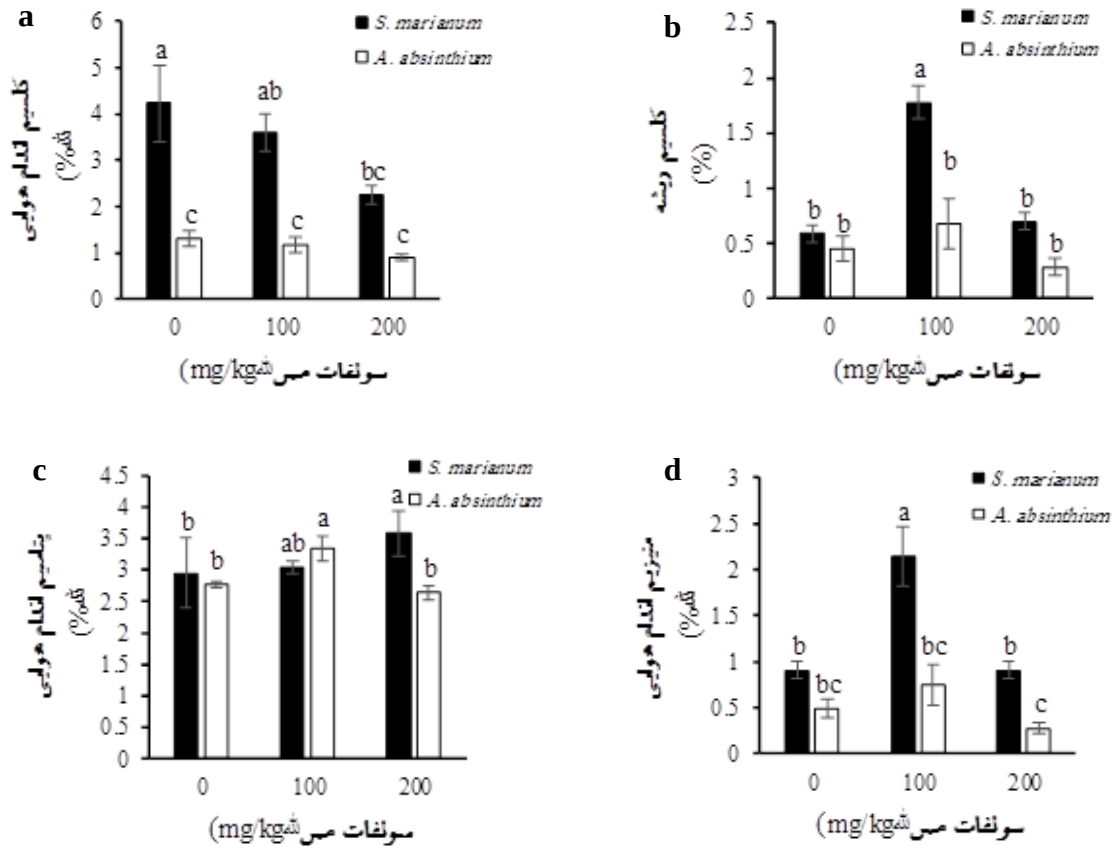
| منبع تغییرات | درجه آزادی | کلسیم اندام هوایی | کلسیم ریشه | منیزیم اندام هوایی | منیزیم ریشه | پتاسیم اندام هوایی | پتاسیم ریشه | فسفر اندام هوایی | فسفر ریشه |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| گیاه | ۱ | ۱۶۵/۹۲$^{***}$ | ۲۳/۶۹$^{***}$ | ۸۶/۲۶$^{***}$ | ۱۱/۹۵$^{**}$ | ۲/۴۱$^{ns}$ | ۱۶/۴$^{**}$ | ۰/۰۰۹$^{ns}$ | ۷۶/۳۳$^{***}$ |
| سطوح مس | ۲ | ۱۲/۹۱$^{**}$ | ۱۴/۶۷$^{***}$ | ۳۰/۳۶$^{***}$ | ۶/۹۹$^{**}$ | ۱/۵۲$^{ns}$ | ۴/۹۸$^{*}$ | ۷/۳۴$^{**}$ | ۴/۵۸$^{*}$ |
| اثر متقابل | ۲ | ۲/۳۷$^{*}$ | ۴/۲۹$^{**}$ | ۴/۸۶$^{*}$ | ۲/۰۸$^{ns}$ | ۴/۲۴$^{*}$ | ۱/۰۳$^{ns}$ | ۱/۸۱$^{ns}$ | ۰/۳۲$^{ns}$ |
| خطا | ۱۲ | ۰/۰۰۲ | ۰/۰۰۳ | ۰/۰۰۱ | ۰/۰۰۳ | ۰/۰۰۳ | ۰/۰۰۵ | ۰/۰۰۰۱ | ۰/۰۰۰۳ |

**اعداد مقادیر F و معنی‌داری آنها در سطح ۰/۰۵ (*)، ۰/۰۱ (**)، ۰/۰۰۱ (***) و عدم معنی‌داری (ns)**

سولفات مس اختلاف داشته و برای کلسیم اندام هوایی و ریشه، منیزیم اندام هوایی و پتاسیم اندام هوایی اثر متقابل معنی‌دار شد (جدول ۳). مقدار کلسیم اندام هوایی در گیاه خارمریم با افزایش غلظت سولفات مس خاک به‌طور معنی‌داری کاهش یافت ($P<0.05$) اما در گیاه افسنطین تحت تأثیر افزایش غلظت سولفات مس قرار نگرفت (شکل ۳). در تیمار شاهد و ۱۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم، اندام هوایی گیاه خارمریم دارای بیشترین درصد کلسیم بود. در همه تیمارها، درصد کلسیم اندام هوایی گیاه خارمریم اختلاف معنی‌داری با گیاه افسنطین داشت (شکل ۳). مقدار کلسیم در ریشه گیاه خارمریم در غلظت ۱۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم به طور معنی‌دار بیشترین مقدار بود و در غلظت ۲۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم کاهش معنی‌داری ($P<0.01$) داشت (شکل ۳). کلسیم ریشه در گیاه افسنطین تحت تأثیر افزایش غلظت سولفات مس قرار نگرفت (شکل ۳). در بالاترین سطح آلودگی، مقدار کلسیم ریشه دو گیاه با یکدیگر اختلاف معنی‌داری نداشتند (شکل ۳). درصد منیزیم اندام هوایی در گیاه خارمریم در غلظت ۱۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم به طور معنی‌دار ($P<0.05$) بیشترین مقدار (۲/۱۵ درصد) بود (شکل ۳). در سطوح بالاتر آلودگی، مقدار منیزیم اندام هوایی گیاه خارمریم به طور معنی‌داری بیشتر از افسنطین بود (شکل ۳). همزمان با افزایش غلظت سولفات مس خاک، درصد پتاسیم اندام هوایی گیاه خارمریم افزایش معنی‌داری ($P<0.05$) یافت (شکل ۳). در گیاه افسنطین بیشترین مقدار پتاسیم (۳/۳۴ درصد) مربوط به تیمار ۱۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم سولفات مس بود (شکل ۳). در تیمارهای شاهد و ۱۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم سولفات مس، اختلاف معنی‌داری از نظر مقدار پتاسیم اندام هوایی در گیاهان مشاهده نشد اما در بالاترین سطح آلودگی، درصد پتاسیم اندام هوایی گیاه خارمریم (۳/۵۸ درصد) بیشتر از گیاه افسنطین (۲/۶۴ درصد) بود (شکل ۳).

**اثر آلودگی سولفات مس بر محتوای عناصر کم‌مصرف:** نتایج آنالیز واریانس نشان داد که در بررسی عناصر کم‌مصرف، اثر متقابل برای غلظت آهن و منگنز در اندام هوایی، غلظت روی در ریشه و غلظت مس در اندام هوایی و ریشه گیاهان معنی‌دار شد (جدول ۴). تجمع عناصر کم‌مصرف در اندام هوایی و ریشه گیاه خارمریم بیشتر از افسنطین بود (شکل ۴ و ۵). با افزایش غلظت سولفات مس در تیمار ۱۰۰ و ۲۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک، غلظت آهن در اندام هوایی گیاه خارمریم به ۱۲۲۸/۷۸ و ۹۵۱/۹۷ میلی‌گرم در کیلوگرم ماده خشک افزایش معنی‌داری ($P<0.01$) یافت، درحالی‌که غلظت آهن در اندام هوایی گیاه افسنطین با افزایش غلظت سولفات مس تغییر معنی‌داری را نشان نداد (شکل ۴). در همه سطوح تیمار سولفات مس، غلظت آهن در اندام هوایی گیاه خارمریم به طور معنی‌داری بیشتر از افسنطین بود. غلظت منگنز اندام هوایی گیاه خارمریم با افزایش غلظت مس خاک کاهش معنی‌داری ($P<0.05$) یافت، اما در گیاه افسنطین تحت تأثیر افزایش غلظت سولفات مس کاهش معنی‌داری در منگنز اندام هوایی مشاهده نشد (شکل ۴). بیشترین غلظت منگنز در تیمار

[ Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-17 ]
[ DOR: 20.1001.1.23222727.1402.12.54.18.8 ]




**شکل ۳- میانگین کلسیم اندام هوایی (a)، کلسیم ریشه (b)، پتاسیم (c) و منیزیم (d) اندام هوایی خارمریم و افسنطین در تیمارهای سولفات مس (حروف مشترک روی ستون‌ها نشان‌دهنده عدم اختلاف معنی‌دار است (P<0.05)).**

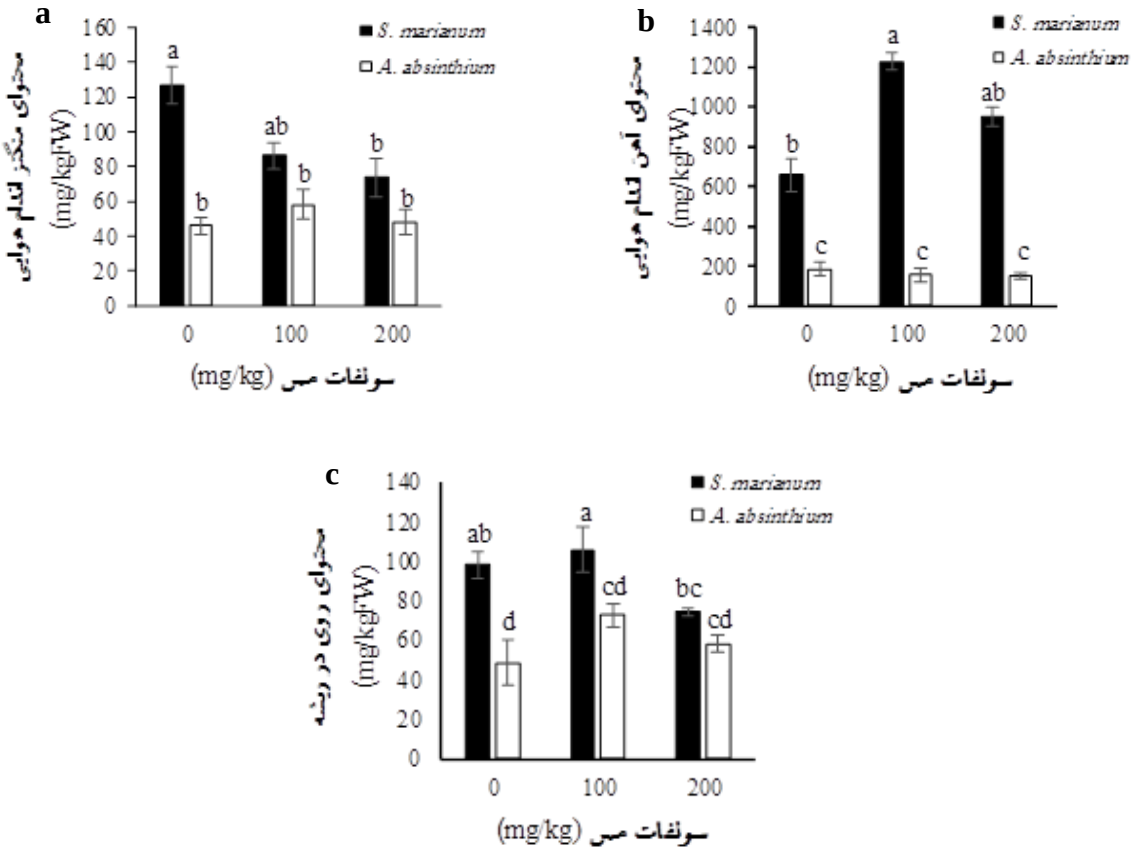
**جدول ۴- نتایج تجزیه واریانس اثر تنش سولفات مس بر محتوای عناصر کم‌مصرف و فاکتور انتقال مس در گیاهان خارمریم و افسنطین (واحدها میلی‌گرم بر کیلوگرم ماده خشک)**

| منبع تغییرات | درجه آزادی | آهن اندام هوایی | آهن ریشه | منگنز اندام هوایی | منگنز ریشه | روی اندام هوایی | روی ریشه | مس اندام هوایی | مس ریشه | فاکتور انتقال مس |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| گیاه | ۱ | ۱۷۹/۷*** | ۵۲/۸** | ۲۴/۷۸*** | ۲۷/۵۸*** | ۸/۰۸* | ۵۹/۲** | ۸۰/۳۹*** | ۶۶/۸۲*** | ۲/۰۴ns |
| سطوح مس | ۲ | ۷/۱۴** | ۰/۶۱ns | ۲/۶۵ns | ۵/۱۰* | ۳/۵۹ns | ۱۰/۱** | ۵۳/۳۵*** | ۱۷۵/۹*** | ۱۵/۶۸** |
| اثر متقابل | ۲ | ۸/۸۷** | ۲/۲۲ns | ۳/۹۷* | ۱/۲۰ns | ۱/۲۹ns | ۵/۰۲* | ۳۲/۱۳*** | ۳۵/۹۰*** | ۲/۳۹ns |
| خطا | ۱۲ | ۱۵۳۲ | ۶۴۲۰ | ۳۶۶ | ۱۳۷۲ | ۲۰۵/۴۹ | ۸۲/۳ | ۱۲/۱۷ | ۷۵/۰ | ۰/۰۰۳ |

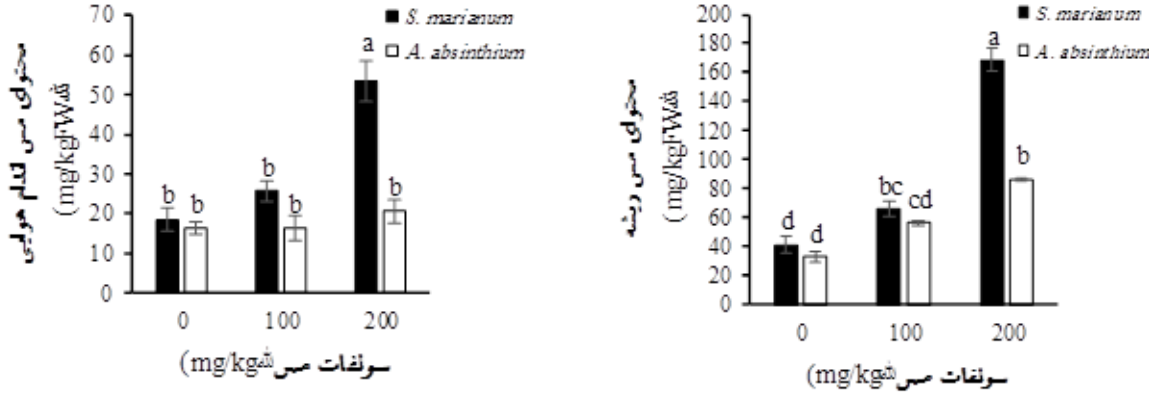
**اعداد مقادیر F و معنی‌داری آنها در سطح ۰/۰۵ (*)، ۰/۰۱ (**)، ۰/۰۰۱ (***) و عدم معنی‌داری (ns)**

شاهد و ۱۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم سولفات مس مربوط به گیاه خارمریم بود. اختلافی در غلظت منگنز اندام هوایی گیاه خارمریم و افسنطین در سطح آلودگی ۲۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم سولفات مس وجود نداشت (شکل ۴). غلظت روی در ریشه گیاه خارمریم و افسنطین تا غلظت ۱۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم سولفات مس افزایش داشته و در غلظت ۲۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم کاهش یافت (P<0.05) که با تیمار شاهد اختلاف معنی‌داری نداشت (شکل ۴). بیشترین غلظت روی در

[ Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-17 ]
[ DOR: 20.1001.1.23222727.1402.12.54.18.8 ]




**شکل ۴- میانگین محتوای منگنز (a) و آهن (b) اندام هوایی و محتوای روی (c) در ریشه خارمریم و افسنطین در تیمارهای سولفات مس (حروف مشترک روی ستون‌ها نشان‌دهنده عدم اختلاف معنی‌دار است (P<0.05)).**




**شکل ۵- میانگین محتوای مس اندام هوایی (a) و ریشه (b) خارمریم و افسنطین در تیمارهای سولفات مس (حروف مشترک روی ستون‌ها نشان‌دهنده عدم اختلاف معنی‌دار است (P<0.05)).**

ریشه گیاه خارمریم و در تیمارهای شاهد (۹۸/۲۳ میلی‌گرم در کیلوگرم ماده خشک) و ۱۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم (۱۰۶/۰۸ میلی‌گرم در کیلوگرم ماده خشک) مشاهده شد (شکل ۴). در بالاترین سطح آلودگی، غلظت روی در ریشه دو گیاه با

[ Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-17 ]
[ DOR: 20.1001.1.23222727.1402.12.54.18.8 ]

یکدیگر اختلاف معنی‌داری نداشتند (شکل ۴).

با افزایش غلظت سولفات مس در خاک، غلظت مس در اندام هوایی و ریشه گیاه خارمریم به‌طور معنی‌داری ($P<0.001$) افزایش یافت (شکل ۵). برای افسنطین تنها غلظت مس در ریشه دارای افزایش معنی‌دار بود (شکل ۵). در بالاترین سطح آلودگی سولفات مس، اندام هوایی و ریشه گیاه خارمریم با تجمع به ترتیب ۵۳/۵۰ و ۱۶۸/۷۲ میلی‌گرم در کیلوگرم ماده خشک، اختلاف قابل توجهی با گیاه افسنطین داشت (شکل ۵). نتایج نشان داد که فاکتور انتقال مس تحت تأثیر اثر متقابل گیاه و سطح مس قرار نگرفت (جدول ۴).

## بحث

از ویژگی‌های رویشی گیاه، وزن تر و خشک اندام هوایی، حجم ریشه، سطح ریشه و طول ریشه برای هر دو گونه تحت تأثیر آلودگی سولفات مس قرار گرفتند. اگر چه صفات مذکور در گیاه خارمریم بیشتر از افسنطین بوده اما با افزایش غلظت سولفات مس، این ویژگی‌ها در گیاه خارمریم به‌طور معنی‌داری کاهش یافتند و در بالاترین سطح آلودگی، به کمترین میزان رسیدند. اما برای گیاه افسنطین ویژگی‌های رویشی تحت تأثیر تنش سولفات مس قرار نگرفت. دلیل کاهش طول ریشه، بر اساس یافته Kabir و همکاران (۲۰۰۸) احتمالاً ناشی از تأثیر منفی فلزات سنگین بر آنزیم‌های هیدرولیتیکی مانند آمیلاز بوده که وظیفه تبدیل نشاسته به قند را داشته و در نتیجه موجب نارسایی مواد غذایی به ریشه و ساقه می‌شوند. کاهش رشد گیاه در هنگام تنش فلز، به دلیل کاهش جذب و ذخیره آب، جلوگیری از جذب مواد غذایی و تنش ثانویه مانند تنش اکسیداتیو است (Eun *et al*., 2000). با توجه به مشاهدات Manivasagaperumal و همکاران (۲۰۱۱)، سمیت مس موجب کاهش رشد، میزان ماده خشک و تولید گونه *Vigna radiate* شد. کاهش زیست‌توده در تنش مقادیر سمی فلزات ممکن است با توجه به کاهش میزان پروتئین، مهار فتوسنتز و همچنین انتقال کربوهیدرات باشد (Manivasagaperumal *et al*., 2011). نتایج Cuba-Diaz و همکاران (۲۰۱۴) کاهش تعداد و طول ریشه را در گونه *Colobanthus quitensis* با افزایش آلودگی سولفات مس نشان داد. وزن تر و خشک گیاه بین تیمارها اختلاف معنی‌داری با شاهد نداشتند. در گیاهان *Brassica juncea* و *Brassica napus* کاهش ویژگی‌های مورفولوژیکی با افزایش سطح سولفات مس مشاهده شد (Feigl *et al*., 2013).

اثر آلودگی مس در محتوای عناصر معدنی توسط گیاه و مقادیر آنها در اندام گیاهی، غلظت مس در محیط ریشه، مدت زمان قرار گرفتن در معرض آلودگی و شرایط رویشی بستگی دارد (Adrees *et al*., 2015). نتایج این تحقیق نشان داد که کلسیم اندام هوایی و ریشه، منیزیم اندام هوایی و پتاسیم اندام هوایی تحت تأثیر تنش سولفات مس قرار گرفتند. اما درصد منیزیم و پتاسیم در ریشه و درصد فسفر در اندام هوایی و ریشه تحت تأثیر آلودگی سولفات مس قرار نگرفتند. در مورد کلسیم اندام هوایی، گیاه خارمریم کاهش معنی‌داری را نشان داد. کلسیم اندام هوایی و ریشه در گیاه افسنطین تحت تأثیر افزایش مس در خاک قرار نگرفت. تا غلظت ۱۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم سولفات مس، مقدار کلسیم ریشه و منیزیم اندام هوایی در خارمریم به بیشترین میزان رسید و با افزایش آلودگی به ۲۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم، با کاهش مواجه شد. برخی گزارشات نشان داده که مقادیر بیش از حد مس هوموستازی مواد معدنی را تغییر می‌دهد (Adrees *et al*., 2015). تفاوت در جذب کلسیم و منیزیم در گیاه به واسطه سازوکارهای متفاوتی است که برای جذب آنها در اندام‌های مختلف گیاه وجود دارد (Yilmaz *et al*., 2009). کاهش جذب کلسیم تحت تنش مس ممکن است با توجه به عملکرد آنتاگونیستی کلسیم با روی و احتمالاً نتیجه تنظیم اسمزی باشد (Vijayarengan and Uthayam, 2017). در راستای نتایج این تحقیق، مطالعه Vijayarengan و Uthayam (۲۰۱۷) نشان داد که در اثر سمیت سولفات مس تا سطح ۵۰ میلی‌گرم در کیلوگرم، میزان عناصر نیتروژن، فسفر، پتاسیم، کلسیم و منیزیم در گونه *Raphanus sativus* بهبود یافته بود اما در غلظت‌های بالاتر (۲۵۰–۱۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم) این پارامترها کاهش

[ Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-17 ]

[ DOR: 20.1001.1.23222727.1402.12.54.18.8 ]

یافتند. در پژوهش مشابه دیگر انجام‌شده توسط Manivasagaperumal و همکاران (۲۰۱۱)، عناصر کم‌مصرف و پرمصرف در گونه *Vigna radiata* تا غلظت ۵۰ میلی‌گرم در کیلوگرم سولفات مس افزایش یافت اما غلظت‌های بالاتر از این مقدار دارای اثر معکوس بر این ویژگی‌ها بود.

افزایش غلظت سولفات مس، پتاسیم اندام هوایی را در گیاه خارمریم افزایش داد و در بالاترین سطح آلودگی، پتاسیم اندام هوایی به میزان قابل توجهی بیشتر از گیاه افسنطین بود. با توجه به نتایج Wyszkowski (۲۰۱۹) افزایش سولفات مس تا ۲۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم موجب افزایش پتاسیم می‌شود. در برخی گیاهان به منظور تعادل کاتیون- آنیون، تنظیم اسمزی، حرکت آب و انتقال انرژی، حفظ تثبیت دی‌اکسید کربن فتوسنتزی و محافظت از کلروپلاست‌ها در برابر آسیب اکسیداتیو ناشی از تأثیر تنش‌های غیرزیستی مثل سمیت فلزات، پتاسیم افزایش می‌یابد (Cakmak, 2005).

برای محتوای عناصر کم‌مصرف اثر معنی‌دار برای غلظت آهن و منگنز در اندام هوایی و غلظت روی در ریشه مشاهده شد. غلظت آهن در اندام هوایی گیاه خارمریم با افزایش غلظت سولفات مس افزایش یافت و در سطوح آلودگی مس به بالاترین میزان رسید، درحالی‌که در اندام هوایی گیاه افسنطین، غلظت آهن تحت تأثیر تنش سولفات مس قرار نگرفت. بر اساس یافته‌های Lequeux و همکاران (۲۰۱۰)، در تنش فلزات تغییر روند برخی از عناصر مانند آهن مشخص نیست. نتایج Ali و همکاران (۲۰۰۲) نشان داد افزایش جذب آهن اندام هوایی و ریشه گونه ذرت با افزایش آلودگی مس ناشی از وجود رابطه خطی بین غلظت‌های مس و آهن در بافت گیاهی بود. با توجه به پژوهش Ambrosini و همکاران (۲۰۱۸) افزایش بیش از حد مس در خاک ممکن است دسترسی به آهن و روی را کاهش دهد، اما در پژوهشی روی صنوبر، کاهش میزان تجمع روی و افزایش آهن با آلودگی مس گزارش شد (Marzilli *et al*., 2018). آهن با کاهش میزان جذب فلزات در گیاهان مختلف، توانایی کاهش سمیت فلزات را دارد. گزارش‌ها حاکی از آن است که آهن با خنثی‌سازی سمیت فلزات، ویژگی‌های فیزیولوژیکی، مورفولوژیکی و بیوشیمیایی را بهبود می‌بخشد (ul Hassan *et al*., 2017).

براساس نتایج، با افزایش غلظت سولفات مس در خاک، غلظت روی در ریشه گیاه خارمریم در غلظت ۱۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم سولفات مس افزایش و سپس کاهش یافت. در بالاترین غلظت، در هر دو گیاه بین محتوای روی در ریشه با شاهد اختلاف معنی‌داری دیده نشد. در تیمار شاهد و غلظت ۱۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم میزان روی در ریشه خارمریم بیشتر از افسنطین بوده است. کاهش میزان روی در گیاه برنج در نتیجه افزایش غلظت سولفات مس در خاک توسط Reddy و همکاران (۲۰۱۷) گزارش شد. از طرفی Lequeux و همکاران (۲۰۱۰) افزایش روی را در ریشه‌های گونه *Arabidopsis thaliana* تحت تنش مس گزارش کردند. طبق گفته Hafeez و همکاران (۲۰۱۳) روی باعث کاهش سمیت مس و بهبود جذب خودش در گیاهان می‌شود. فلز روی دارای قدرت یونی مشابه با مس بوده و برای مولکول‌های حامل فلز در رقابت با یکدیگر هستند (Feigl *et al*., 2013). طبق نظر Marschner (۱۹۹۵) روی در ساختار سوپراکسید دیسموتاز وجود دارد و ممکن است افزایش این آنزیم آنتی‌اکسیدانی در گیاه ناشی از آلودگی فلزات سنگین منجر به افزایش غلظت روی در گیاه شود. با وجود محتوای بیشتر منگنز در اندام هوایی گیاه خارمریم نسبت به افسنطین، با افزایش آلودگی سولفات مس غلظت منگنز در اندام هوایی گیاه خارمریم کاهش معنی‌داری داشت و در گیاه افسنطین روند کاهشی- افزایشی مشاهده نشد. با توجه به نتایج Karimi و همکاران (۲۰۱۲) کاهش میزان منگنز اندام هوایی و ریشه با افزایش غلظت سولفات مس مشاهده شد. این‌طور به نظر می‌رسد که بین مس و منگنز برای محل‌های انتقال در پلاسمالما رقابت وجود دارد (Lidon and Henriques, 1992).

نتایج نشان داد که غلظت مس در اندام هوایی و ریشه گیاه خارمریم بیشتر از افسنطین بود و با افزایش غلظت مس خاک، غلظت آن در اندام هوایی و ریشه خارمریم افزایش یافت. در گونه *Brassica juncea* غلظت‌های بالاتر مس موجب افزایش

[ Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-17 ]

[ DOR: 20.1001.1.23222727.1402.12.54.18.8 ]

قابل توجه آن در اندام هوایی و ریشه شد (Feigl *et al.*, 2013). در هر دو گونه ریشه میزان بالاتری از فلز مس را جذب کرده بود. گزارش شده که تنها حدود ۲۰-۱۰ درصد مس جذب شده به اندام هوایی منتقل می‌شود (Yang *et al.*, 2002). برخی مطالعات روی گونه‌های *Chloris gayana*، *Syzygium aromaticum*، *Cucumis sativus* و برخی گونه‌های اکالیپتوس حاکی از تمایل تجمع مس در بافت‌های ریشه بود (Emamverdian *et al.*, 2015). براساس گفته Marschner (۱۹۹۵) اثرات سمی مس عمدتاً در ریشه مشاهده می‌شود. از آنجایی که ریشه‌ها اولین اندام در تماس با آلودگی مس بوده، لذا تجمع مس در ریشه گیاهان نسبت به اندام هوایی بیشتر است (Ouzounidou, 1994). با توجه به نتایج، فاکتور انتقال مس با افزایش غلظت آن در خاک کاهش یافت. فاکتور انتقال پایین مس در غلظت‌های بالاتر، حاکی از انتقال کم مس از ریشه به اندام هوایی و مربوط به سازوکار دفاعی گیاهان در جلوگیری از انتقال آن به اندام هوایی است (Payus and Talip, 2014).

## نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج، غلظت مس در اندام هوایی و ریشه گیاهان با افزایش غلظت آن در خاک افزایش یافت. انباشت بیشتر مس در ریشه با فاکتور انتقال کوچکتر از یک برای هر دو گونه همراه بود. در واقع توانایی گیاهان برای تجمع فلز در ریشه و جلوگیری از انتقال آن به بافت‌های فتوسنتزی به تحمل مس کمک کرد. به‌طورکلی، از نظر عملکرد رویشی و ترکیب محتوای غذایی، در گیاه افسنطین اختلاف معنی‌داری بین تیمار شاهد با سطوح آلودگی مشاهده نشد که نشان‌دهنده تأثیرپذیری کمتر این گیاه نسبت به تنش سولفات مس بود، اما از نظر ظرفیت جذب مس به ویژه در بالاترین سطح آلودگی سولفات مس، گیاه خارمریم توانایی بیشتری را نسبت به افسنطین نشان داد. این موضوعات احتمالاً به سازوکارهایی مربوط بوده که بسته به هر گیاه می‌تواند متفاوت باشد. هر دو گیاه قادر به رشد در غلظت‌های بالای سولفات مس بوده و می‌توانند مناسب برای احیا باطله‌های زغال‌سنگ در مناطق مشابه باشند. البته افسنطین به واسطه فرم رویشی و چند ساله بودن می‌تواند در اولویت قرار گیرد.

## تشکر و قدردانی

این مقاله بخشی از رساله دکتری بوده که با حمایت مالی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری و نیز در دوره فرصت مطالعاتی داخل (گروه علوم و مهندسی خاک دانشگاه تهران) به انجام رسیده و بدین وسیله قدردانی می‌شود.

## منابع

امامی، ع. (۱۳۷۵) روش‌های تجزیه گیاه. نشریه شماره ۹۸۲. سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، مؤسسه تحقیقات خاک و آب، تهران.

لشکری صنمی، ن.، قربانی، ج.، حجتی، س. م.، وهاب‌زاده، ق. و متشرع‌زاده، ب. (۱۴۰۱) ویژگی‌های جوانه‌زنی بذر گیاهان روئیده در معادن زغال‌سنگ به تنش فلزات مس، سرب و کادمیوم. علوم محیطی ۲۰: ۱۹۸-۱۷۹.

متشرع‌زاده، ب.، آقایی، ل. و ثواقبی فیروزآبادی، غ. ر. (۱۳۹۳) تأثیر کاربرد کادمیوم و سرب بر میزان جذب این عناصر و رشد دو رقم لوبیا چیتی. مجله تنش‌های محیطی در علوم زراعی ۷: ۲۷۱-۲۵۷.

نجفی، ن. ا. و سرهنگ‌زاده، ا. (۱۳۹۳) اثر شور و غرقاب شدن خاک بر غلظت برخی عناصر پرمصرف و سدیم در بخش هوایی ذرت. نشریه دانش آب و خاک ۲۴: ۲۷۵-۲۵۹.

نصیری، ی. و جوانمرد، ع. (۱۴۰۰) اجزای عملکرد و عملکرد کمی و کیفی گیاه دارویی خارمریم (*Silybum marianum* L.) تحت کاربرد نهاده‌های آلی و زیستی. دانش کشاورزی و تولید پایدار ۳۱: ۲۲-۱.

[ Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-17 ]

[ DOR: 20.1001.1.23222727.1402.12.54.18.8 ]

Adrees, M., Ali, S., Rizwan, M., Ibrahim, M., Abbas, F., Farid, M., Zia-ur-Rehman, M., Irshad, M. K. and Bharwana, S. A. (2015) The effect of excess copper on growth and physiology of important food crops: A review. Environmental Science and Pollution Research 22: 8148-8162.

Ali, N. A., Bernal, M. P. and Ater, M. (2002) Tolerance and bioaccumulation of copper in *Phragmites australis* and *Zea mays*. Plant and Soil 239: 103-111.

Alloway, B. J. (1990) Heavy Metals in Soils. John Wiley and Sons, New York, USA.

Ambrosini, V. G., Rosa, D. J., de Melo, G. W. B., Zalamena, J., Cella, C., Simao, D. G., da Silva, L. S., Dos Santos, H. P., Toselli, M., Tiecher, T. L. and Brunetto, G. (2018) High copper content in vineyard soils promotes modifications in photosynthetic parameters and morphological changes in the root system of 'Red Niagara' plantlets. Plant Physiology and Biochemistry 128: 89-98.

Cakmak, I. (2005) The role of potassium in alleviating detrimental effects of abiotic stresses in plants. Journal of Plant Nutrition and Soil Science 168: 521-530.

Cuba-Diaz, M., Acuna, D., Cordero, C. M. and Klagges, M. (2014) Optimizacion de parametros para la propagacion in vitro de *Colobanthus quitensis* (Kunth) Bartl. Gayana Botanica 71: 58-67.

Dahmani-Muller, H., van Oort, F., Gelie, B. and Balabane, M. (2000) Strategies of heavy metal uptake by three plant species growing near a metal smelter. Environmental Pollution 109: 231-238.

Dresler, S., Hanaka, A., Bednarek, W. and Maksymiec, W. (2014) Accumulation of low-molecular-weight organic acids in roots and leaf segments of *Zea mays* plants treated with cadmium and copper. Acta Physiologiae Plantarum 36: 1565-1575.

Emamverdian, A., Ding, Y., Mokhberdoran, F. and Xie, Y. (2015) Heavy metal stress and some mechanisms of plant defense response. The Scientific World Journal 1-18.

Eun, S. O., Youn, H. S. and Lee, Y. (2000) Lead disturbs microtubule organization in the root meristem of *Zea mays*. Physiologia Plantarum 110: 357-365.

Feigl, G., Kumar, D., Lehotai, N., Tugyi, N., Molnar, A., Ordog, A., Szepesi, A., Gemes, K., Laskay, G., Erdei, L. and Kolbert, Z. (2013) Physiological and morphological responses of the root system of Indian mustard (*Brassica juncea* L. Czern.) and rapeseed (*Brassica napus* L.) to copper stress. Ecotoxicology and Environmental Safety 94: 179-189.

Hafeez, B. M. K. Y., Khanif, Y. M. and Saleem, M. (2013) Role of zinc in plant nutrition-a review. Journal of Experimental Agriculture International 3: 374-391.

Kabata-Pendias, A. and Pendias, H. (2001) Trace Elements in Soils and Plants. CRC, Florida.

Kabir, M., Iqbal, M. Z., Shafiq, M. and Farooqi, Z. R. (2008) Reduction in germination and seedling growth of *Thespesia populnea* L., caused by lead and cadmium treatments. Pakistan Journal of Botany 40: 2419-2426.

Karimi, P., Khavari-Nejad, R. A., Niknam, V., Ghahremaninejad, F. and Najafi, F. (2012) The effects of excess copper on antioxidative enzymes, lipid peroxidation, proline, chlorophyll, and concentration of Mn, Fe, and Cu in *Astragalus neo-mobayenii*. The Scientific World Journal 1-6.

Lequeux, H., Hermans, C., Lutts, S. and Verbruggen, N. (2010) Response to copper excess in *Arabidopsis thaliana*: Impact on the root system architecture, hormone distribution, lignin accumulation and mineral profile. Plant Physiology and Biochemistry 48: 673-682.

Lidon, F. C. and Henriques, F. S. (1992) Copper toxicity in rice, a diagnostic criteria and its effect on Mn and Fe contents. Soil Science 154: 130-135.

Madejon, P., Ramirez-Benitez, J. E., Corrales, I., Barcelo, J. and Poschenrieder, C. (2009) Copper-induced oxidative damage and enhanced antioxidant defenses in the root apex of maize cultivars differing in Cu tolerance. Environmental and Experimental Botany 67: 415-420.

Manivasagaperumal, R., Vijayarengan, P., Balamurugan, S. and Thiyagarajan, G. (2011) Effect of copper on growth, dry matter yield and nutrient content of *Vigna radiata* (L.) Wilczek. Journal of Phytology 3: 53-62.

Marques, D. M., Junior, V. V., da Silva, A. B., Mantovani, J. R., Magalhaes, P. C. and de Souza, T. C. (2018) Copper toxicity on photosynthetic responses and root morphology of *Hymenaea courbaril* L.(Caesalpinioideae). Water, Air and Soil Pollution 229: 1-14.

Marschner, H. (1995) Mineral Nutrition of Higher Plants. Academic Press, London, UK.

Marzilli, M., Di Santo, P., Palumbo, G., Maiuro, L., Paura, B., Tognetti, R. and Cocozza, C. (2018) Cd and Cu accumulation, translocation and tolerance in *Populus alba* clone (Villafranca) in autotrophic in vitro screening. Environmental Science and Pollution Research 25: 10058-10068.

Masto, R. E., George, J., Rout, T. K. and Ram, L. C. (2017) Multi element exposure risk from soil and dust in a coal industrial area. Journal of Geochemical Exploration 176: 100-107.

Ouzounidou, G. (1994) Copper-induced changes on growth, metal content and photosynthetic function of *Alyssum montanum* L. plants. Environmental and Experimental Botany 34: 165-172.

Payus, C. and Talip, A. F. A. (2014) Assessment of heavy metals accumulation in paddy rice (*Oryza sativa*). African Journal of Agricultural Research 9: 3082-3090.

[ Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-17 ]

[ DOR: 20.1001.1.23222727.1402.12.54.18.8 ]

Pietrini, F., Carnevale, M., Beni, C., Zacchini, M., Gallucci, F. and Santangelo, E. (2019) Effect of different copper levels on growth and morpho-physiological parameters in giant reed (*Arundo donax* L.) in semi-hydroponic mesocosm experiment. Water 11: 1-20.

Pilon, M., Abdel-Ghany, S. E., Cohu, C. M., Gogolin, K. A. and Ye, H. (2006) Copper cofactor delivery in plant cells. Current Opinion in Plant Biology 9: 256-263.

Reddy, T. P., Lakshmi, D. V., Kamalakar, J. and Rao, S. (2017) Effect of copper contamination on soil biochemical activity and performance of rice (*Oryza sativa* L.). International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences 5: 45-51.

Ryan, J., Estefan, G. and Rashid, A. (2007) Soil and Plant Analysis Laboratory Manual. International Center for Agricultural Research in the Dry Areas (ICARDA), Aleppo, Syria.

Smith, T., Lynch, M. E., Johnson, J., Kawa, K., Bauman, H. and Blumenthal, M. (2015) Herbal dietary supplement sales in US increase 6.8% in 2014. HerbalGram 107: 52-59.

Szopa, A., Pajor, J., Klin, P., Rzepiela, A., Elansary, H. O., Al-Mana, F. A., Mattar, M. A. and Ekiert, H. (2020) *Artemisia absinthium* L. importance in the history of medicine, the latest advances in phytochemistry and therapeutical, cosmetological and culinary uses. Plants 9: 1063.

ul Hassan, Z., Ali, S., Rizwan, M., Ali, Q., Haider, M. Z., Adrees, M. and Hussain, A. (2017) Role of iron in alleviating heavy metal stress. In: Essential Plant Nutrients, Uptake, Use Efficiency and Management (eds. Naeem, M., Ansari, A. A. and Gill, S. S.) Pp. 335-350. Springer, Cham.

Vijayarengan, P. and Uthayam, M. C. (2017) Changes in nutrients content of Radish (*Raphanus sativus*) under copper toxicity. International Journal of Advanced Research in Biological Sciences 4: 88-93.

Wyszkowski, M. (2019) Soil contamination with copper and its effect on selected soil properties after applying neutralizing substances. Polish Journal of Environmental Studies 28: 2465-2471

Xiao, R., Wang, S., Li, R., Wang, J. J. and Zhang, Z. (2017) Soil heavy metal contamination and health risks associated with artisanal gold mining in Tongguan, Shaanxi, China. Ecotoxicology and Environmental Safety 141: 17-24.

Yang, X. E., Long, X. X., Ni, W. Z., Ye, Z. Q., He, Z. L., Stoffella, P. J. and Calvert, D. V. (2002) Assessing copper thresholds for phytotoxicity and potential dietary toxicity in selected vegetable crops. Journal of Environmental Science and Health 37: 625-635.

Yilmaz, K., Akinci, I. E. and Akinci, S. (2009) Effect of lead accumulation on growth and mineral composition of eggplant seedlings (*Solarium melongena*). New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science 37: 189-199.

[ Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-17 ]

[ DOR: 20.1001.1.23222727.1402.12.54.18.8 ]

# Effect of different copper sulfate concentrations on growth, mineral nutrient uptake and copper accumulation in *Silybum marianum* and *Artemisia absinthium*

**Nateq Lashkari Sanami[1], Jamshid Ghorbani[1*], Babak Motesharezadeh[2], Seyed Mohammad Hodjati[3], Ghorban Vahabzadeh[4]**

**[1] Department of Rangeland Management, Faculty of Natural Resources, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran**
**[2] Department of Soil Science Engineering, Faculty of Agricultural Engineering and Technology, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran**
**[3] Department of Forestry, Faculty of Natural Resources, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran**
**[4] Department of Watershed Management, Faculty of Natural Resources, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran**
**(Received: 13/08/2022, Accepted: 15/11/2022)**

**Abstract**

This study was conducted to investigate the potential of copper (Cu) absorption and accumulation and the effects of its contamination on the growth and mineral nutrient content of *Artemisia absinthium* and Silybum marianum under greenhouse conditions. This was done under factorial experiment based on a completely randomized design and Copper sulfate (CuSO4.5H2O) solution was added to the pots with three replicates at 0 (control), 100 and 200 mg/kg and then seeds of two plant species were sown. Plant harvesting was done after two months when growth was completed and then plant growth characteristics and mineral elements (Ca, Mg, K, P, Fe, Zn, Mn, and Cu) were measured for roots and shoots. The results showed that there was no effect of copper sulfate stress on roots and shoots of *A. absinthium* while shoot biomass and root volume, area and length of *S. marianum* were significantly reduced. The Cu accumulation in roots of both plant species and in shoots of *S. marianum* significantly increased by increasing the copper sulfate in soil. The highest level of Cu accumulation was found in shoots and roots of *S. marianum* with 53.50 and 168.72 mg/kg dry matter, respectively. A transfer factor less than one for both plants indicated their ability to copper accumulation in the roots. Potassium content in the shoot of *S. marianum* was significantly greater than that in *A. absinthium* at treatment of 200 mg/kg. There was no effect of copper sulfate stress on the micronutrients content of *A. absinthium* while it caused a significant decrease in Mn and Zn in shoot and root of *S. marianum*, respectively, and a significant increase in Fe in the shoot of *S. marianum*.

**Keywords:** Restoration Ecology, Coal waste, Copper sulfate stress, Heavy metals

Corresponding author, Email: J.ghorbani@sanru.ac.ir

[ Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-17 ]

[ DOR: 20.1001.1.23222727.1402.12.54.18.8 ]