نشریه فیزیولوژی محیطی گیاهی، سال دهم، شماره ۴۰، زمستان ۱۳۹۴ / صفحات: ۳۰-۲۱

# بررسی تجمع آهن ، مس و پاسخ آنتی‌اکسیدانی گونه‌های گیاهی غالب در اطراف معدن سرخه شهرستان مرند

**لیلا حکیمی*[۱]، مژگان فرزامی سپهر[۲]**

[۱] مربی، گروه باغبانی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد ساوه، ساوه

[۲] استادیار، گروه زیست‌شناسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد ساوه، ساوه

**تاریخ دریافت: ۱۳۹٤/۱۰/۱۰ تاریخ پذیرش: ۱۳۹٤/۱۲/۱۵**

**چکیده**

قابلیت فراوان برخی از گونه‌ها در تجمع انتخابی عناصر و ترکیبات آلوده‌کننده امکان استفاده از آنها را در پاکسازی محیط‌های آلوده فراهم نموده است. گیاهان می‌توانند از طریق تجمع، تثبیت و انتقال مواد از آلودگی‌های محیط‌زیست بکاهند و به این دلیل ممکن است تغییراتی در سیستم‌های آنتی‌اکسیدانی گیاه ایجاد شود. مطالعه حاضر به‌منظور بررسی تجمع آهن و مس در ریشه و اندام هوایی گونه‌های *Alyssum linifolium*، *Salvia multicaulis*، *Muscari neglactum* و *Verbascum Thapsus* و پاسخ آنتی‌اکسیدانی آنها به غلظت عناصر موجود در منطقه کانسار مس سرخه در استان آذربایجان شرقی انجام شد. نتایج نشان داد که بیشترین و کمترین مقدار جذب آهن به‌ترتیب در ریشه *M. neglactum* و *V. thapsus* بود. همچنین بیشترین و کمترین مقدار جذب مس در ریشه به‌ترتیب مربوط به *M. neglactum* و *V. thapsus* بود در حالی که تفاوت معنی‌داری بین اندام‌های هوایی گونه‌ها برای هر دو عنصر وجود نداشت. بیشترین و کمترین فعالیت انزیم سوپراکسید دیسموتاز و اسکوربات پراکسیداز به‌ترتیب در گونه *M. neglactum* و *V. Thapsus* مشاهده شد، در حالی که تفاوت معنی‌داری بین میزان مالون دی آلدهید در میان گونه‌های نامبرده وجود نداشت.

***واژه‌های کلیدی***: اندام هوایی، آهن، ریشه، فعالیت آنتی‌اکسیدانی، گیاه‌پالایی، مس.

**مقدمه**

آلودگی خاک به فلزات سنگین یکی از مهم‌ترین مسائل محیط‌زیست در سرتاسر جهان محسوب می‌شود (Bodar et al., 2006، Fotakis and Timbrell, 2006;). فلزات سنگین در معرض فرآیندهای تخریب نبوده و در محیط‌زیست باقی می‌مانند، اگرچه زیست‌فراهمی[۲] این مواد شیمیایی در ارتباط با ترکیب خاک متغیر است (Doumett et al., 2008). تمامی فلزات سنگین در غلظت‌های زیاد سمیت‌های شدیدی ایجاد کرده و جزء آلاینده‌ها در نظر گرفته می‌شوند (Chehregani and Hajisadeghian, 2009). در سال‌های اخیر تلاش‌های متعددی در راستای یافتن روشی برای حذف فلزات سنگین از خاک صورت گرفته که گیاه‌پالایی یکی از این یافته‌هاست (Chehregani et al., 2009؛ حکیمی، ۱۳۹۳). این فناوری روشی کم‌هزینه و با تخریب کم بوده (Salt et al., 1995) که در سال‌های اخیر به‌دلیل هماهنگی با طبیعت و قابلیت اعمال در مقیاس‌های وسیع مورد توجه قرار گرفته است (زینلی‌نژاد و فرزامی‌سپهر، ۱۳۹٤). گیاهان قادرند به طرق مختلف

*نویسنده مسئول: hakimi_l@yahoo.com

2. Bioavailability

آلا ینده‌ها را از محیط زیست دورنمایند. کاربرد گیاهان در اصلاح زیستی محیط‌های آلوده در سراسر جهان در حال گسترش بوده ودر زمینه فن‌آوری‌های پاکسازی نوین به‌عنوان انقلاب سبز مطرح شده است (حکیمی، ۱۳۹۳).

آهن و مس از جمله فلزات سنگین هستند که نقش مهمی در فرایندهای فیزیولوژیکی گیاه دارند (Sawidis, 2011). به‌طورکلی در برگ‌های تمام گونه‌های گیاهی علامت اصلی کمبود آهن جلوگیری از رشد کلروپلاست است. سمیت آهن مشکل جدی در تولید محصول مورد نظر می‌باشد. حد بحرانی سمیت آهن در برگ‌ها ppm ۵۰۰ بوده و به عوامل دیگر از جمله مقدار عناصر غذایی دیگر بستگی دارد (Sawidis, 2011). علایم سمیت آهن ظهور نقاط قهوه‌ای بسیار کوچک برروی برگ می‌باشد که به رنگ قهوه‌ای یکنواخت تبدیل می‌شود (Kabata-Pendias and Mukherjee, 2007). مس، نیز عنصر ضروری برای گیاه محسوب می شود و از اجزای مهم آنزیم‌های کلیدی گیاه است. این عنصر در فرآیندهای مهمی مثل فتوسنتز، تنفس، متابولیسم نیترات‌ها و تولید مثل دخالت کرده، به علاوه در مقاومت گیاه در مقابل بیماری‌ها نیز نقش مهمی ایفا می‌کند. به‌دلیل پیوند محکم مس با نیتروژن و پروتئین‌ها، مس در گیاهان تحرک کمی دارد. این عنصر در ریشه و ریزوسفر اغلب به شکل کمپلکس یافت می‌شود اما جذب آن تابعی از فعالیت $Cu^{2+}$ است (Kabata-Pendias and Mukherjee, 2007).

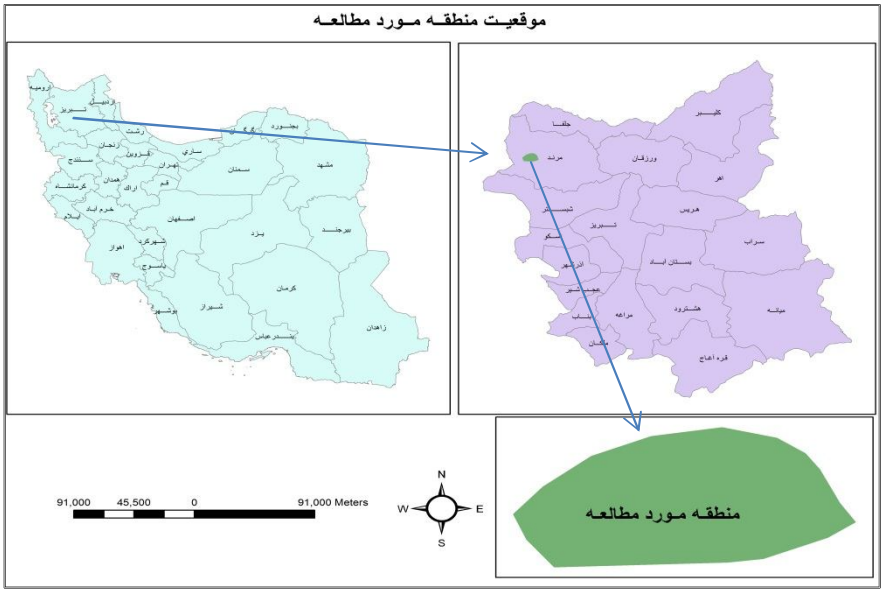
وقتی گیاه تحت تنش آلودگی قرار می‌گیرد اشکال مولکولی فعال اکسیژن (ROS) زیاد می‌شود. این گونه‌ها در جریان فعالیت‌های انتقال الکترون اغلب در کلروپلاست و میتوکندری تولید می‌شوند و به‌نوبه خود سبب ایجاد اثرات سمی مختلف در گیاهان مانند کاهش رشد، کاهش محتویات کلروفیل و فتوسنتز، مهار فعالیت آنزیمی، آسیب به مولکول‌های زیستی مانند لیپیدها، پروتئین‌ها و اسیدهای نوکلئیک به‌ویژه DNA، پراکسیداسیون غشای سلولی (که از دست دادن یون‌ها و آسیب به اندامک‌های مهم سلولی نظیر کلروپلاست‌ها و میتوکندری‌ها را به دنبال دارد) می‌شوند (Mishra et al., 2006). گیاهان برای مقابله با این گونه‌ها دارای سازوکار دفاعی آنتی‌اکسیدان هستند. شواهد فیزیولوژیکی و ژنتیکی به روشنی مشخص کرده‌اند که سیستم آنتی‌اکسیدان گیاه یک جز مهم از مکانیسم‌های حفاظتی در برابر تنش است (Sairam and Srivastava, 2001).

آهن و مس از عناصر مهم منطقه کانسار مس سرخه دراستان آذربایجان شرقی هستند. همچنین گونه‌های *Alyssum linifolium*، *Salvia multicaulis*، *Muscari neglactum* و *Verbascum Thapsus* از گیاهان دارویی غالب منطقه می‌باشند که سطح وسیعی از منطقه را پوشش داده‌اند. تاکنون مطالعه‌ای روی مقدار جذب این عناصر توسط این گونه‌ها و پاسخ فیزیولوژیکی آنها به این غلظت عناصر انجام نشده است. بنابراین مطالعه حاضر به‌منظور بررسی تجمع آهن و مس در ریشه و اندام هوایی و پاسخ آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی سوپراکسید دیسموتاز و آسکوربات پراکسیداز و همچنین غلظت مالون دی آلدهید به این مقدار تجمع فلز در ریشه و اندام هوایی گونه‌های نامبرده انجام شد.

## مواد و روش‌ها

**موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه:** معدن مس سرخه از نظر موقعیت جغرافیایی در طول ٤٥ درجه و ٢٦ دقیقه و ١٠ ثانیه شرقی و عرض ٣٨ درجه و ٢٥ دقیقه و ٥٩ ثانیه شمالی واقع شده است. کانسار مس سرخه در استان آذربایجان شرقی در ۲۵ کیلومتری شهرستان مرند و در حدود ۱۸ کیلومتری جنوب غربی

بخش کشک‌سرای حواشی روستای سرخه واقع شده است. این معدن در کوهستان‌های میشو با شیب توپوگرافی زیاد و پوشش گیاهی کم به شکل مرتع قرار دارد (شکل ۱).




**شکل ۱:** موقعیت معدن مس سرخه در استان آذربایجان شرقی

**عملیات صحرایی:** این بررسی‌ها طی اواخر بهار ۱۳۹۲ و در زمان گلدهی گیاهان از منطقه مذکور به عمل آمد. به‌دلیل پوشش سنگی منطقه مس خانسار خاک‌زایی کم است. ابتدا فلور منطقه بررسی و گیاهان غالب مشخص گردید و از این گیاهان نمونه‌برداری به عمل آمد.

**گیاهان مورد مطالعه:** گونه‌های *Alyssum linifolium*، *Salvia multicaulis*، *Muscari neglactum* و *Verbascum Thapsus* گونه‌های غالب منطقه هستند. *A. linifolim* (گل عسل) گیاهی یک ساله از خانواده Brassicaceae که ارتفاع آن ۵ تا ۳۰ سانتی‌متر و گستردگی آن بین ۲۰ تا ۳۰ سانتی‌متر است. *S. multicaulis* (سالویا) گیاهی دارویی از خانواده Lamiaceae با ارتفاع ۵۰ سانتی‌متر و تاج پوشش آن برابر ۱۱۰×۱۵۰ سانتی‌متر می‌باشد. *M. neglectum* (سنبلک سرمه کلاغ) گیاهی دارویی از خانواده Liliaceae با ارتفاع ۱۰ تا ۱۵ سانتی‌متر است. *V. Thapsus* (خرگوشک) گیاهی دارویی چندساله از خانواده Scrophulariaceae با ارتفاع ۶۰ تا ۲۰۰ سانتی‌متر است. لازم به ذکر است گیاهان در هرباریوم دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تهران شناسایی شدند.

**آزمایش خاک:** در این تحقیق پس از تمیز کردن محل برداشت خاک، دقت گردید تا غیریکنواختی در سطح زمین مشاهده نگردد (تأثیر حیوانات، بقایای پوسیده گیاهان، فعالیت‌های انسانی و...). جهت حفر چاله با یک بیل و تیشه گودالی به ابعاد ۵۰ در ۵۰ سانتی‌متر و عمق حدود ۴۰ سانتی‌متر حفر گردید. پس از حفر چاله به‌منظور تبخیر آب موجود نمونه‌گیری چند ساعت بعد انجام گرفت. ریشه‌ها و سنگریزه‌ها جدا گردید. کلیه مشخصات مورد نظر برای شناسایی نمونه روی اتیکت نوشته شد. نمونه‌های برداشت شده به آزمایشگاه منتقل و مورد بررسی قرار گرفت. سپس نمونه‌ها عصاره‌گیری شدند به‌طوری‌که از هر نمونه

خاک ۲۵ گرم برداشته شد و ۵۰ میلی‌لیتر محلول DTPA اضافه و به‌مدت ۲ ساعت در مخزن قرار داده شد. سپس سانتریفیوژ شده و در نهایت عصاره نمونه‌ها با عبور از صافی جدا شدند.

**تعیین غلظت عناصر:** برای تعیین غلظت عناصر آهن و مس از دستگاه جذب اتمی ( FASS, BUCK model VGP210) استفاده شد.

**تعیین غلظت عناصر در گیاهان برداشت شده:** به منظور تعیین محتوای یونی گونه‌ها، گونه‌های برداشت شده با آب مقطر شستشو داده شده، سپس ریشه و اندام هوایی از هم جدا شد. نمونه‌ها در سایه و به دور از آلودگی خشک شدند. نمونه‌ها در هاون چینی پودر و برای تهیه خاکستر آماده شدند. مقدار ۱ گرم از پودر خشک شده گیاهان در داخل کپسول چینی به‌مدت ٤ ساعت در دمای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد داخل کوره قرار داده شدند. پس از سرد شدن خاکستر حاصله در ۵ میلی‌لیتر اسید کلریدریک ۲ نرمال حل گردید، محلول فوق از کاغذ صافی که به‌وسیله اسید شستشو داده شده بود عبور داده شد (Walsh, 1971). میزان عناصر Fe، Cu توسط دستگاه جذب اتمی قرائت شد.

**سنجش میزان پروتئین:** از دستگاه پلیت ریدر برای اندازه‌گیری غلظت پروتئین استفاده شد. برای این منظور، یک میلی‌لیتر محلول بردفورد داخل تیوب‌های ۱/۵ میلی‌لیتر ریخته شد و سپس ۵۰ میکرولیتر به آن عصاره اضافه شد و پس از ۲۰ دقیقه جذب در طول‌موج ۵۹۵ نانومتر اندازه‌گیری شد (Giannopolitis and Ries, 1977).

## سنجش فعالیت آنزیم‌ها

**فعالیت سوپراکسید دیسموتاز:** اندازه‌گیری فعالیت سوپراکسید دیسموتاز طبق روش Dhindsa و همکاران (۱۹۸۱) انجام شد. فعالیت این آنزیم به‌صورت فوتومتریک بررسی شد. بافر اصلی واکنش شامل بافر فسفات (pH=۷/۸) ۱۰۰ میلی‌مولار، متیونین ۱۲ میلی‌مولار، نیتروبلو تترازولیوم ۷۵ میکرومولار، EDTA ۱۰۰ میکرومولار و ترایتون ایکس- صد ۲۵ درصد بود. از بافر اصلی به هر چاهک ۲۹۰ میکرولیتر اضافه شد. سپس از بافر ریبوفلاوین ۲ میکرومولار، ۵ میکرومول به مخلوط واکنش اضافه و دستگاه در طول‌موج ٥٦٠ نانومتر کالیبره شد. برای سنجش هر نمونه، ۱۰ میکرولیتر از عصاره پروتئینی استفاده شد. این واکنش بر اساس میزان احیای نوری نیتروبلوتترازولیوم و توانایی آنزیم سوپراکسید دیسموتاز در ممانعت از این واکنش بررسی گردید.

**فعالیت آسکوربات پراکسیداز:** فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیدازبا روش Ranieri و همکاران (۲۰۰۳) سنجیده شد. در اثر واکنش بین آسکوربات پراکسیداز و اسید آسکوربیک و $H_2O_2$، دهیدروآسکوربات تولید می‌شود که در طول‌موج ۲۹۰ نانومتر قرائت شد. محیط واکنش حاوی ٦٠٠ میکرولیتر از EDTA ۰/۱ میلی‌مولار، ۱۵۰۰ میکرولیتر بافر فسفات ۵۰ میلی‌مولار (pH=۷)، ٤٠٠ میکرولیتر اسید آسکوربیک ۰/۵ میلی‌مولار، ٤٠٠ میکرولیتر $H_2O_2$ ۳۰ درصد و ۵۰ میکرولیتر عصاره آنزیمی بود.

**سنجش مالون دی آلدهید:** میزان اکسیداسیون گیاه براساس تجمع مالون دی آلدهید برگ با استفاده از تیوباربیتوریک اسید با روش Valentovic و همکاران (۲۰۰٦) تعیین شد. ۲۰۰ میلی‌گرم نمونه برگی از بخش میانی ساقه در دو میلی‌لیتر بافر استخراج (TCA یک درصد) هموژن شده و به‌مدت پانزده دقیقه در سانتریفیوژ با سرعت ۱۳۰۰۰ دور در دقیقه قرار داده شد. یک میلی‌لیتر از محلول رویی به‌دست آمده با دو میلی‌لیتر محلول تیوباربیتوریک اسید (TBA پنج درصد) حاوی اسید تری‌کلرواستیک (TCA بیست درصد) مخلوط و در حمام آب جوش (۹۵ درجه سانتی‌گراد) به‌مدت ۳۰ دقیقه قرار داده شد. نمونه‌ها

در آب یخ قرار داده شد. سپس با سرعت ۱۰۰۰۰ دور در دقیقه به مدت ده دقیقه سانتریفیوژ شد و جذب آن‌ها در طول موج ۵۳۲ نانومتر دردستگاه اسپکتروفتومتر (Shimadzu UV-160) تعیین شد. غلظت مالون دی آلدهید براساس فرمول زیر محاسبه شد که D اشاره به چگالی و E ضریب تمایز مولار (مول/سانتی‌متر ۱۰۵×۱/۵۶) دارد.

$$C = D/E$$

پژوهش حاضر با استفاده از آزمون فاکتوریل در قالب کاملاً تصادفی با نرم‌افزار SAS تجزیه و تحلیل شد. مقایسه میانگین داده‌ها با استفاده از آزمون دانکن انجام شد.

## نتایج

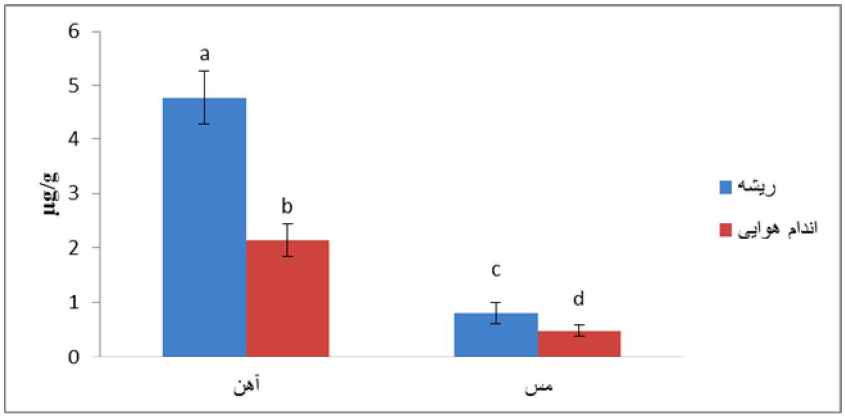
**آنایز نمونه‌های خاک:** آنایز نمونه‌های خاک نشان داد که میانگین غلظت عناصر آهن و مس در خاک به‌ترتیب ۲۱٤/۱۵±۱۸/۷۱ppm و ٤/٦۲±۰/۰ppm بود.

**غلظت مس و آهن در ریشه و برگ:** آنالیز تجزیه واریانس نشان داد که غلظت آهن و مس برای گونه و اندام در سطح یک درصد معنی‌دار بود ولی اثر متقابل گونه و اندام فقط برای مس معنی‌دار بود (جدول۱).

نتایج غلظت عناصر به تفکیک اندام نشان داد که ریشه بیشترین مقدار آهن و مس را به نسبت اندام هوایی داشت. حداقل جذب در اندام هوایی مربوط به مس و حداکثر آن در ریشه برای آهن مشاهده شد (شکل۲).

**جدول ۱:** تجزیهٔ واریانس صفات آهن و مس برای گونه‌های بررسی‌شده در منطقه تحقیق

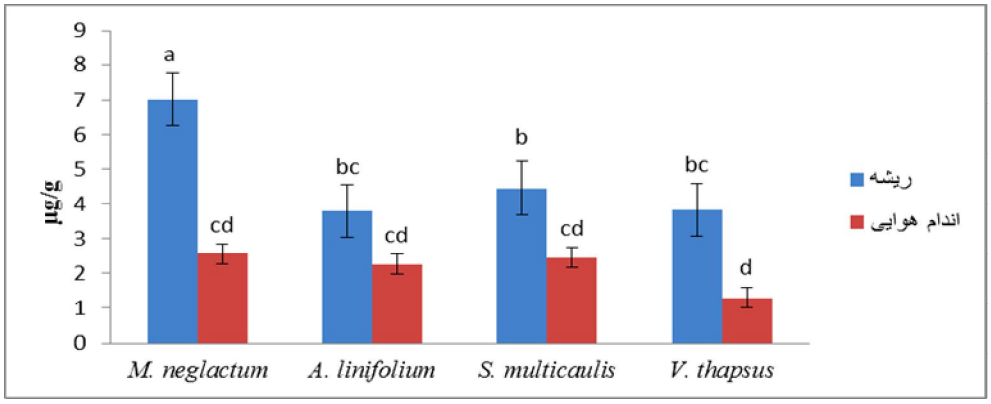
| منابع تغییرات | درجه آزادی | میانگین مربعات | |
|---|---|---|---|
| | | آهن | مس |
| گونه | ۳ | ۵/۵۰ ** | ۰/۵۰ ** |
| اندام | ۱ | ٤۱/٤۲ ** | ۰/٦۰ ** |
| گونه*اندام | ۳ | ۲/٤۵ ns | ۱/۲٦ ** |
| خطا | | ۰/۹۷ | ۰/۰۱ |



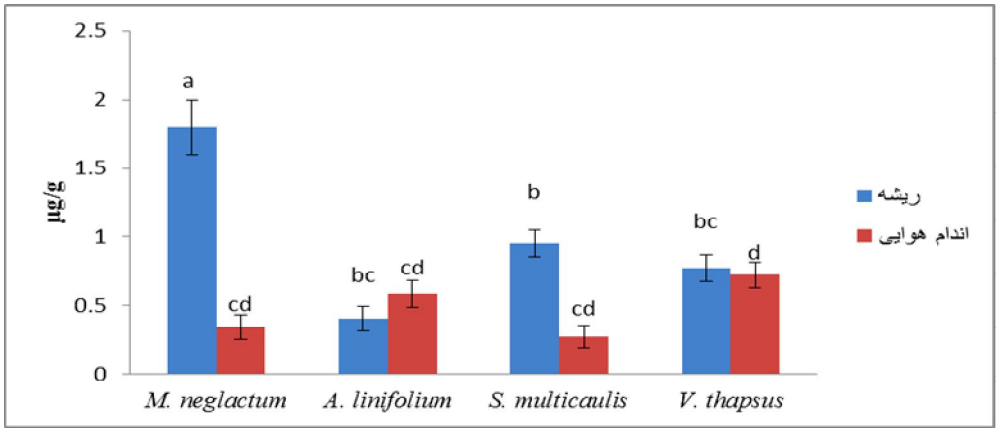

**شکل۲:** مقدار عناصر آهن و مس به تفکیک ریشه و اندام هوایی گونه‌های مورد بررسی

نتایج غلظت آهن به تفکیک گونه در ریشه و اندام‌هوایی گونه‌های مورد مطالعه نشان داد که بیشترین و کمترین مقدار جذب در ریشه به‌ترتیب در *M. neglactum* (۷/۰۱ µg/g) و *V. thapsus* (۳/۸۲ µg/g) بود، در حالی که تفاوت معنی‌داری بین اندام‌های هوایی گونه‌ها مشاهده نشد (شکل۳).

همچنین نتایج غلظت مس به تفکیک گونه در ریشه و اندام هوایی گونه‌های مورد مطالعه نشان داد که بیشترین و کمترین مقدار جذب در ریشه به‌ترتیب در *M. neglactum* (۲/۵٦ µg/g) و *V. thapsus* (µg/g ۱/۳۰) مشاهده شد، در حالی که تفاوت معنی‌داری بین اندام‌های هوایی گونه‌ها مشاهده نشد (شکل ٤).

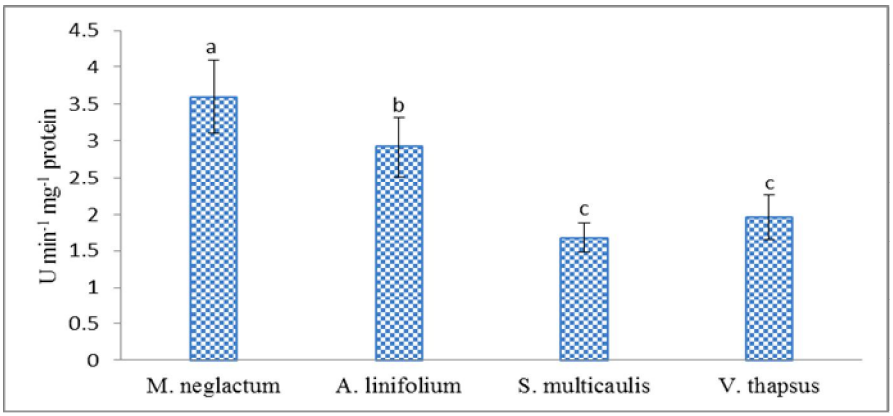



**شکل۳**: غلظت آهن به تفکیک گونه در ریشه و اندام هوایی گونه‌های مورد مطالعه

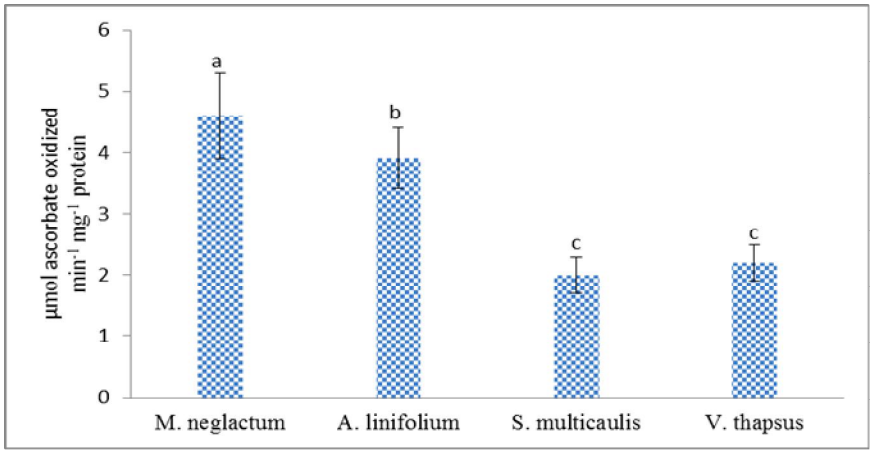



**شکل٤**: غلظت مس به تفکیک گونه در ریشه و اندام هوایی گونه‌های مورد مطالعه

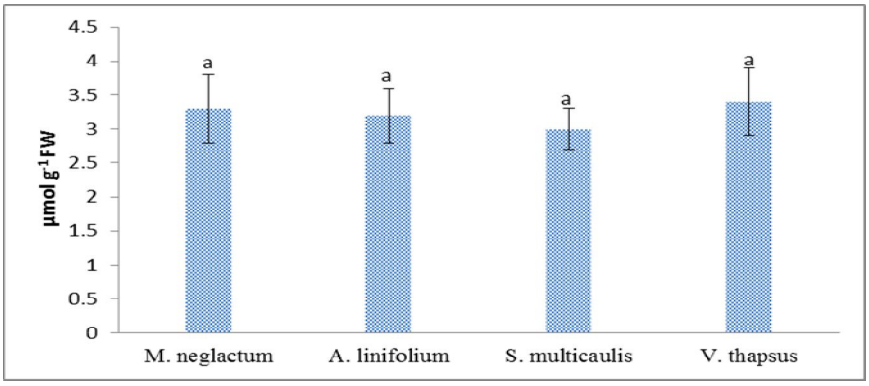
**فعالیت‌های فیزیولوژیکی**: بیشترین و کمترین فعالیت سوپراکسید دیسموتاز (SOD) و آسکوربات پراکسیداز (APX) به‌ترتیب در گونه *M. neglactum* و *V. Thapsus* مشاهده شد در حالی که تفاوت معنی‌داری برای مالون دی‌آلدهید (MDA) در میان گونه‌های نامبرده وجود نداشت (شکل‌های ٥، ٦ و ٧).




**شکل٥**: فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز در اندام‌هوایی گونه‌های مورد مطالعه




**شکل ٦:** فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز (APX) در اندام هوایی گونه‌های مورد مطالعه




**شکل ۷:** غلظت مالون دی آلدهید در اندام هوایی گونه‌های مورد مطالعه

**بحث**

آلودگی‌های زیست محیطی منطقه خانسار به‌عنوان نمادی از آلودگی شدید صنعتی در آذربایجان مطرح است. نتایج این تحقیق نشان داد مقدار جذب در ریشه گونه *M. neglactum* بیشتر از سایر گونه‌هاست و این بدان معنا است که این گونه ظرفیت جذب بیشتری نسبت به سایر گونه‌های منطقه مطالعه دارد. همچنین طبق نتایج به‌دست آمده مقدار عناصر در ریشه گیاه مورد مطالعه بیشتر از اندام هوایی بود. این بدان معنا است که حرکت این فلزات از ریشه به اندام هوایی یا خیلی ضعیف است یا اصلاً وجود ندارد. این نتایج همسو با نتایج Yoon و همکاران (۲۰۰٦) است، که نشان دادند گونهٔ *Gentiana pennelliana* نسبت به سایر گونه‌های منطقه مورد مطالعه قدرت جذب بالایی از عنصر مس را نشان داد و می‌توان این گونه را به‌عنوان جاذب مس پیشنهاد داد. همچنین در تحقیق حاضر همه گونه‌ها رفتار یکسانی رو نسبت به تجمع آهن و مس در اندام‌های هوایی خود نشان دادند. یعنی اختلاف معنی‌داری برای این عناصر در اندام‌هوایی وجود نداشت. حرکت عناصر از ریشه به اندام‌های هوایی خیلی کند است، پس این گونه‌ها نمی‌توانند عناصر را به آسانی از طریق خزان اندام‌های هوایی مثل برگ دفع کنند. Nouri و همکاران (۲۰۱۱) نشان دادند که هیچ کدام از گونه‌های *Centaurea virgata* و *Echinophora platyloba* از لحاظ تثبیت آهن مناسب نیستند. همچنین در این تحقیق، نسبت جذب عنصر مس بیشتر از آهن در گیاهان مورد مطالعه بود. بدین معنی که مقدار مس موجود در ریشه یا اندام هوایی نسبت به مقدار آن در خاک بیشتر از این

مقدار برای آهن است. بنابراین می‌توان گفت جذب مس سریعتر صورت می‌گیرد که دلیل آن به علت مورد استفاده قرار گرفتن این عنصر در واکنش‌های مختلف موجود در گیاه از جمله هورمون‌های گیاهی و فتوسنتز می‌باشد (Kabata-Pendias and Mukherjee, 2007). گونه‌هایی مثل *V. thapsus* که قدرت جذب آهن ضعیفی دارند، نمی‌توانند در خاک‌های عادی که از لحاظ میزان آهن فقیر می باشند به راحتی رشد کنند. تحقیقات نشان داده است سیستم ریشه‌ای و نوع گیاه از فاکتورهای مهم جذب عناصر می‌باشند (Yoon et al., 2006). در این تحقیق مشاهده شد گونه *V. thapsus* قادر به جذب آهن به مقدار کافی نمی‌باشد، بنابراین انتظار می‌رود ساخت سبزینه در برگ‌ها کاهش یافته و بدنبال آن برگ‌ها رنگ پریده خواهند شد. در این حالت ابتدا فاصله بین رگبرگ‌ها، و سپس با شدت یافتن کمبود آهن، به جز رگبرگ‌ها، تمام سطح برگ زرد می‌شود و در مراحل پیشرفته‌تر برگ‌ها سوخته و خشک می‌شوند. از آن جا که آهن در گیاه پویا نیست، این علایم ابتدا در برگ‌های جوان و در قسمت‌های بالای ساقه مشاهده می‌شود (Grotz and Guerinot, 2006).

مطالعات نشان داده است که کارایی فتوسنتز گیاهان مختلف تحت تأثیر فلزات سنگین قرار می‌گیرد. به‌عنوان مثال عنوان شده است مس مازاد مستقیماً انتقال الکترون فتوسنتزی و همچنین فعالیت‌های آنزیمی را در طول چرخه کالوین یا آسمیلاسیون خالص $CO_2$ مهار می‌کند. از طرف دیگر با کاهش محتوای رنگیزه‌های فتوسنتزی و ساختار کلروپلاست، تغییر ترکیب پروتئین و لیپیدهای غشای تیلاکوئید رشد و نمو گیاه تحت تاثیر قرار می‌گیرد (Ke Shi-Sheng et al., 2007). کارگرخرمی و جامعی (۱۳۹۲) نشان دادند که گیاه *Hibiscus esculentus* L. قدرت جذب مس ضعیفی دارد و غلظت بالای مس باعث اثرات منفی روی رنگ و سطح برگ و فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان گیاه شد. بر اساس نتایج تحقیق حاضر می‌توان گونه *M. neglactum* را به‌عنوان گونه بیش انباشت مس و آهن معرفی کرد و می‌توان کشت این گونه را به جای گونه‌های ضعیف‌تر از این نظر مانند *V. thapsus* و *S. multicaulis* توسعه داد.

طبق نتایج به‌دست آمده در این تحقیق بیشترین فعالیت سوپر اکسید دیسموتازدر (SOD) گیاه *M. neglactum* مشاهده شد. SOD به‌عنوان اولین خط دفاعی سیستم آنتی‌اکسیدانی در مقابل ROS فعال می‌شود و باعث تبدیل رادیکال $O_2$ به $H_2O_2$ می‌گردد، در ادامه $H_2O_2$ ایجاد شده به مولکول آب و اکسیژن تجزیه گشته که این عمل توسط آنزیم کاتالاز انجام می‌شود (Gratao et al., 2005). تحقیقات نشان داده است آنزیم سوپراکسید دیسموتاز اولین آنزیمی است که در چرخه آنتی‌اکسیدانی فعال می‌شود که در شرایط تنش فعالیت آن افزایش می‌یابد (Chakraborty and Pradhan, 2011). در این پژوهش به‌دلیل غلظت بالای عناصر مس و آهن در گیاه *M. neglactum* نسبت به سایر گونه‌های مورد مطالعه، به نظر می‌رسد این گیاه برای مقابله با ROS تولید شده فعالیت SOD را افزایش داد.

همچنین نتایج تحقیق حاضر نشان داد فعالیت آنزیم آسکوربات پرکسیداز (APX) در گیاه *M. neglactum* بیشتر از سایر گونه‌هاست. افزایش فعالیت APX سبب تجزیهٔ بیشتر $H_2O_2$ و تحمل بیشتر گیاه در برابر صدمات اکسایشی القاء شده به‌وسیله تنش است. ژن‌های APX سیتوسولی که به تنش‌های محیطی از جمله آلودگی پاسخ می‌دهند، تأثیر مهمی در حفاظت اجزای سلولی در برابر تنش اکسایشی ایفا می‌کند و می‌توان از طریق افزایش بیان ژن APX، تحمل گیاهان را نسبت به تنش‌های اکسایشی افزایش داد (Jin et al., 2006). از طرف دیگر محصول واکنش فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز یعنی $H_2O_2$

سوبسترای فعالیت APX می‌باشد بنابراین $H_2O_2$ می‌تواند نقش سیگنال را برای القای APX ایفا کند (Faize et al., 2011). در این پژوهش *M. neglactum* برای مقابله با ROS مقدار فعالیت انزیم‌های انتی‌اکسیدانی از جمله SOD و APX را افزایش داد. نتایج آنزیمی تحقیق حاضر هم‌سو با یافته‌های Doğanlarو Atmaca (۲۰۱۱) روی فعالیت‌های آنتی‌اکسیدانی گونه *Platanus orientalis* و Baek و Woo (۲۰۱۰) روی گونه‌های *Erythrina oreintalis* و *Pinus indicus* است.

گزارش شده است غشاهای سلولی گیاه عموماً به عنوان جایگاه‌های اولیه صدمات ناشی از فلزات مطرح می‌شوند (Belkhadi et al., 2010). در پژوهش حاضر میزان مالون دی آلدهیددر اندام هوایی تفاوت معنی‌داری در بین گونه‌های مورد مطالعه نداشت در این رابطه می‌توان چنبن عنوان نمود غلظت عناصر در این گیاهان در حدی نبود که اختلاف معنی‌داری را در پراکسیداسیون غشای سلولی ایجاد کند. *M. neglactum* با وجود مقدار بالای غلظت عناصر مس و آهن نسبت به گونه‌های *S. multicaulis*، *V. Thapsus* و *A. linifolium* تفاوت معنی‌داری از لحاظ میزان مالون دی آلدهید مشاهده نشد.

## نتیجه‌گیری نهایی

در مجموع با توجه به مقدار جذب عناصر مس و آهن و واکنش آنتی‌اکسیدانی گونه‌های *M. neglactum*، *S. multicaulis*، *V. Thapsus* و *A. linifolium* می‌توان بیان کرد که *M. neglactum* جاذب مناسبی برای این عناصر است و همچنین واکنش آنتی‌اکسیدانی مناسبی نسبت به تنش ناشی از این عناصر ایجاد می‌کند. همچنین مقدار مالون دی آلدهید در این گونه زیاد نبود که این مطلب نشان‌دهنده مقاومت بالای آن در مقابل این عناصر است.

## منابع


**حکیمی، ل. (۱۳۹۳).** ارزیابی توان گیاه پالایی و بررسی پاسخ‌های فیزیولوژیکی-آنزیمی دو گونه زرشک و ارغوان نسبت به آلاینده‌های سرب و کادمیم. پایان‌نامه دکتری، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم تحقیقات. صفحه ۱۶۱.

**زینلی‌نژاد، م. و فرزامی‌سپهر، م. (۱۳۹٤).** مطالعه موردی معدن مس میدوک با تکیه بر تراکم عناصر سنگین در خاک و گیاهان منطقه. نشریه فیزیولوژی محیطی گیاهی، سال ۱۰، شماره ۳۸، صفحات ۳۸-۲٤.

**غازانشاهی، ج. (۱۳۷٦).** آنالیز خاک و گیاه، انتشارات رهنما، صفحه ۳۱۱.

**کارگرخرمی، ر. و جامعی، س. (۱۳۹۲).** تاثیر غلظت‌های مختلف مس و نیکل بر روی برخی شاخص‌های رشدی و فیزیولوژیکی در گیاه بامیه (*Hibiscus esculentus*). فرآیند و کارکرد گیاهی، شماره ٤، صفحات ٤٤-۳۳.

**محمودی، ش. و حکیمیان، م. (۱۳۷٤).** مبانی خاک‌شناسی، انتشارات دانشگاه تهران، شماره نشر ۲۲٦۷، صفحه ۷۰۱.

**Baek, S. and Woo, S. (2010).** Physiological and biochemical responses of two tree species in urban areas to different air pollution levels. Photosynthetica. 48: 23-29.

**Belkhadi, A., Hediji, H., Abbes, Z., Nouairi, I., Barhoumi, Z., Zarrouk, M. Chaıbi, W. and Djebal, W. (2010).** Effects of exogenous salicylic acid pre-treatment on cadmium toxicity and leaf lipid content in *Linum usitatissimum* L. Ecotoxicology and Environmental Safety. 73:1004–1011.

**Bodar, C.W.M., Pronk, M.E.J., and Sijm, D.T.H.M. (2005)**. The European Union risk assessment on zinc and zinc compounds: The process and the facts. Integrated Environmental Assessment and Management Abbreviation, 1: 301–319.

**Chakraborty, U. and Pradhan, D. (2011**). High temperature-induced oxidative stress in *Lens culinaris*, role of antioxidants and amelioration of stress by chemical pre-

treatments. Journal of Plant Interactions. 6(1): 43-52.

**Chehregani, A. and Hajisadeghian, S. (2009).** New chromosome counts in some species of Asteraceae from Iran. Nordic Journal of Botany. 27: 247–250.

**Dhindsa, R.S., Plumb-Dhindsa, P. and Thoroe, T.A. (1981).** Leaf senescence: correlated with increased levels of membrane permeability and lipid peroxidation, and decreased levels of superoxide dismutase and catalase. Journal of Experimental Botany. 32(1): 93-101.

**Doğanlar, Z.B. and Atmaca M. (2011**). Influence of airborne pollution on Cd, Zn, Pb, Cu, and Al accumulation and physiological parameters of plant leaves in Antalya (Turkey). Water, Air, and Soil Pollution. 214(1-4): 509-523.

**Doumett, S., Lamperi, L., Checchini, L., Azzarello, E., Mugnai, S., Mancuso, S., Petruzzelli, G. and Del Bubba, M. (2008).** Heavy metal distribution between contaminated soil and *Paulownia tomentosa*, in a pilot-scale assisted phytoremediation study: Influence of different complexing agents. Chemosphere. 72(10): 1481-1490.

**Faize, M., Burgos, L., Faize, L., Piqueras, A., Nicolas, E., Barba-Espin, G. and Hernandez, J.A. (2011).** Involvement of cytosolic ascorbate peroxidase and Cu/Zn-superoxide dismutase for improved tolerance against drought stress. Journal of Experimental Botany. 32(2): 231-238.

**Fotakis, G., and Timbrel, J.A. (2006).** Role of trace elements in cadmium chloride uptake in hematoma cell lines. Toxicology Letter. 164: 79-103.

**Giannopolitis, C.N., and Ries, S.K. (1977).** Superoxide dismutases I. Occurrence in higher plants. Plant Physiology. 59(2): 309-314.

**Gratao, P., Polle, A., Lea, P. and Azevedo, R. (2005**). Making the life of heavy metal-stressed plants a little easier. Functional Plant Biology, 32: 481–494.

**Grotz, N. and Guerinot, M.L. (2006).** Molecular aspects of Cu, Fe and Zn homeostasis in plants. Biochimica et Biophysica Acta (BBA). Molecular Cell Research. 63(7): 595-608.

**Jin, J., Shan, N., Ma, N., Bai, J. and Gau, J. (2006)**. Regulation of ascorbate peroxidase at the transcript level is involved in tolerance to postharvest water deficit stress in the cut rose (*Rosa hybrida* L.) cv. Samantha. Postharvest Biology and Technology. 40(3): 236-242.

**Kabata-Pendias, A. and Mukherjee, A.B. (2007)**. Trace elements from soil to human. Springer Science and Business Media.

**Ke Shi-Sheng, W.S., Xiong, Z.T., Chen, S.J. and Chen, J.J. (2007)**. Effects of copper and mineral nutrition on growth, copper accumulation and mineral element uptake in two *Rumex japonicus* populations from a copper mine and an uncontaminated field sites. Environmental and Experimental Botany. 59: 59-67.

**Mishra, S., Srivastava, S., Tripathi, R.D., Govindarajan, R. and Kuriakose, R.S. (2006**). Phytochelatin synthesis and response of antioxidants during cadmium stress in *Bacopa monnieri* L. Journal Plant Physiology. 44: 25–37.

**Nouri, J., Lorestani, B., Yousefi, N., Khorasani, N., Hasani, A.H., Seif, F. and Cheraghi, M. (2011).** Phytoremediation potential of native plants grown in the vicinity of Ahangaran lead–zinc mine (Hamedan, Iran). Environmental Earth Sciences. 62(3): 639-644.

**Ranieri, A., Castagna, A., Pacini, J., Baldan, B., Sodi, A.M. and Soldatini, G.F. (2003)**. Early production and scavenging of hydrogen peroxide in the apoplast of sunflower plants exposed to ozone. Journal of Experimental Botany. 54(392): 2529-2540.

**Sairam, R. and Srivastava, G. (2001).** Water stress tolerance of wheat (*Triticum aestivum* L.). Variations in hydrogen peroxide accumulation and antioxidant activity in tolerant and susceptible genotypes. Journal of Agronomy and Crop Science. 186: 63-70.

**Salt, D.E., Prince, R.C., Pickering, I.J. and Raskin, I. (1995).** Mechanisms of cadmium mobility and accumulation in Indian mustard. Plant Physiology. 109(4): 1427-1433.

**Sawidis, T., Breuste, J., Mitrovic, M., Pavlovic, P. and Tsigaridas, K. (2011).** Trees as bioindicator of heavy metal pollution in three European cities. Environmental Pollution. 159: 3560-3570.

**Valentovic, P., Luxova, M., Kolarovi, L. and Gasparikora, O. (2006).** Effect of osmotic stress on compatible solutes content, memberane stability and water relation in two maize. Plant Soil Environment. 52(4):186-191.

**Walsh, L.M. (1971).** Instrumental methods for analysis of soils and plant tissue. Soil science society of America. lnc. Madison. Wisconsin. USA. 222PP.

**Yoon, J., Cao, X., Zhou, Q. and Ma, L.Q. (2006).** Accumulation of Pb, Cu, and Zn in native plants growing on a contaminated Florida site. Science of the Total Environment. 368(2): 456-464.