



Assessment of phytoremediation ability and accumulation of different concentrations of silver in the harmel plant (*Peganum harmala* L.)

Kobra. Mahdavian 

¹ Department of Biology, Faculty of Science, Payame Noor University, Tehran, Iran Email: k.mahdavian@pnu.ac.ir

Article type:	Abstract
Research article	The presence of toxic levels of silver in the environment significantly impacts the physiological changes in plants, adversely affecting their growth capabilities. When silver concentrations are extremely high, this pollution can lead to the destruction of sensitive plant species. Under such conditions, vulnerable plants may experience damage from the toxic effects of silver, and in some cases, they may die. However, silver-resistant plants can continue to grow and reproduce despite the contamination. This research aimed to investigate the effects of high silver concentrations on various characteristics of the harmel plant, including the lengths of aerial and root organs, the dry weight of these organs, silver accumulation, and the transfer factor. To achieve this, harmel plants were exposed to varying concentrations of silver (0, 1, 5, 10, 20, 40, and 80 mg/L) for 15 days. The results showed that increasing silver concentrations led to reduced lengths of both aerial and root organs, as well as a decrease in the dry weight of these organs. However, the level of silver accumulation in both aerial and root organs significantly increased. Additionally, the transfer factor was notably higher in response to different silver concentrations compared to the control treatment. Consequently, the findings suggest that the harmel plant has a high capacity for silver accumulation and tolerance, making it a suitable candidate for silver phytoremediation. These results are especially important for developing environmental management strategies and mitigating pollution caused by heavy metals.
Article history	
Received: 15.07.2024	
Revised: 13.09.2024	
Accepted: 16.09.2025	
Published: 20.04.2025	
Keywords	
Harmel	
Growth parameters	
Silver accumulation	
Heavy metals	
Phytoremediation	

Cite this article as: Mahdavian, K. (2025). Assessment of phytoremediation ability and accumulation of different concentrations of silver in the harmel plant (*Peganum harmala* L.) *Journal of Plant Environmental Physiology*, 76(4): 132-144.



©The author(s)

Publisher: Islamic Azad University, Gorgan branch

Doi: <https://doi.org/10.71890/iper.2024.1107520>

ارزیابی توانایی گیاه پالایی و تجمع غلظت‌های مختلف نقره در گیاه اسپند (*Peganum harmala* L.)

کبری مهدویان ^۱

^۱ گروه زیست شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران، رایانامه: k.mahdavian@pnu.ac.ir

نوع مقاله:	چکیده
مقاله پژوهشی	وجود مقادیر سمی نقره در محیط زیست گیاهان منجر به بروز تغییرات فیزیولوژیک می‌شود که می‌تواند اثرات منفی شدیدی بر توان رشد گیاه داشته باشد. در شرایطی که مقادیر نقره به شدت بالا باشد، این آلودگی می‌تواند به از بین رفتن گیاهان حساس منجر شود. در واقع، در چنین شرایطی گیاهان حساس به واسطه تأثیرات سمی نقره دچار آسیب و در برخی موارد از بین می‌روند؛ اما گیاهان مقاوم در برابر نقره با وجود چنین آلودگی‌هایی همچنان قادر به ادامه رشد و تولید مثل هستند. هدف از انجام این تحقیق، بررسی تأثیر غلظت‌های بالای نقره بر روی ویژگی‌های مختلف گیاه اسپند، از جمله طول اندام‌های هوایی و ریشه، وزن خشک اندام‌های هوایی و ریشه، تجمع نقره و فاکتور انتقال بود. برای این منظور، گیاهان اسپند به مدت ۱۵ روز تحت تیمار غلظت‌های مختلف نقره به میزان ۰، ۱، ۵، ۱۰، ۲۰، ۴۰ و ۸۰ میلی‌گرم در لیتر قرار گرفتند. نتایج به دست آمده نشان دادند که افزایش غلظت نقره منجر به کاهش طول اندام‌های هوایی و ریشه، همچنین کاهش وزن خشک این اندام‌ها می‌شود. با این حال، میزان تجمع نقره در هر دو اندام هوایی و ریشه به طور واضحی افزایش می‌یابد. به علاوه، مقدار فاکتور انتقال در پاسخ به غلظت‌های مختلف نقره نسبت به تیمار شاهد به طور معنی‌داری افزایش یافت. بنابراین، از نتایج این تحقیق می‌توان نتیجه‌گیری کرد که گیاه اسپند از توانایی بالایی برای تجمع و تحمل نقره برخوردار است و به همین دلیل می‌تواند به عنوان یک گزینه مناسب در عرصه گیاه‌پالایی نقره مورد استفاده قرار گیرد. این یافته‌ها به‌ویژه در خصوص توسعه روش‌های مدیریت زیست‌محیطی و کاهش آلودگی‌های ناشی از فلزات سنگین اهمیت دارند.
واژه‌های کلیدی:	اسپند
پارامترهای رشد	تجمع نقره.
فلزات سنگین	گیاه پالایی

استناد: مهدویان، کبری (۱۴۰۳). ارزیابی توانایی گیاه پالایی و تجمع غلظت‌های مختلف نقره در گیاه اسپند (*Peganum*

harmala L.) فیزیولوژی محیطی گیاهی، ۷۶ (۴)، ۱۳۲-۱۴۴.

Doi: <https://doi.org/10.71890/iper.2024.1107520>

ناشر: دانشگاه آزاد اسلامی، واحد گرگان

© نویسندگان.



مقدمه

اصطلاح فلزات سنگین به فلزاتی اطلاق می‌شود که چگالی آن‌ها بیش از ۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب است. از منظر زیست‌شناسی و فیزیولوژی گیاهی، فلزات سنگین عناصر فلزی یا نیمه‌فلزی هستند که تأثیرات سمی بر رشد گیاه دارند. این عناصر شامل نیکل (Ni)، منگنز (Mn)، آرسنیک (As)، مس (Cu)، روی (Zn)، آهن (Fe)، کبالت (Co)، کادمیوم (Cd)، نقره (Ag) و سرب (Pb) می‌باشند (Auburn, 2000). در حالی که موجودات زنده برای رشد و متابولیسم خود به مقادیر جزئی از برخی فلزات (مانند آهن، مولیبدن، وانادیوم، کبالت، مس، روی و منگنز) نیاز دارند، فلزات سنگینی چون کادمیوم، کروم، آلومینیوم، سرب، آرسنیک، سلیسیم، نقره و جیوه برای گیاهان و دیگر موجودات غیرضروری به شمار می‌آیند (Panda and Choudhary, 2005). نقره به عنوان یکی از فلزات سنگین با سمی‌ترین ویژگی‌ها شناخته می‌شود و حضور آن در محیط زیست، به ویژه در خاک‌ها و گیاهان، می‌تواند تأثیرات زیست‌محیطی و سلامتی قابل توجهی به دنبال داشته باشد. آلودگی ناشی از نقره و سایر فلزات سنگین، نه تنها بر کیفیت خاک و باروری آن تأثیر می‌گذارد، بلکه از طریق ورود به زنجیره غذایی، می‌تواند خطرات جدی برای سلامت انسان و سایر موجودات زنده ایجاد کند. این آلودگی‌ها معمولاً ناشی از فعالیت‌های صنعتی، معدن‌کاری، استفاده بیش از حد از مواد شیمیایی حاوی فلزات سنگین، و حتی دفع نادرست پسماندهای صنعتی هستند (Oladoye et al., 2022; Tiwari et al., 2024). فلزات سنگین در اثر آلودگی‌های صنعتی نظیر معدن‌کاوی و فرایندهای ذوب فلزی، آلودگی‌های کشاورزی شامل استفاده از حشره‌کش‌ها و فاضلاب‌های شهری و آلودگی‌های شهری حاصل استفاده از فلز سنگین در مواد سوختی،

رنگ‌ها و دیگر مواد در خاک افزایش می‌یابند (Cheraghi et al., Malekmohammadi et al., 2019). گیاهان با استفاده از دو نوع راهبرد، اجتناب و تحمل در برابر سمیت یون‌های فلزی مقاومت می‌کنند. بدیهی است که گونه‌های مختلف از نظر جذب فلز با یکدیگر تفاوت دارند و برای هر گونه نیز جذب فلز با توجه به نوع آن متفاوت است. تعداد کمی از گیاهان قادر به تحمل غلظت‌های بالای فلزات سنگین در خاک می‌باشند. چنین گیاهانی که فلزات را در غلظت‌های بالا در اندام‌های هوایی نسبت به ریشه خود و بدون بروز هر گونه علائم سمیت تجمع می‌دهند، گیاهان بیش تجمع دهنده نامیده می‌شوند (Baker, 1981).

گیاهانی که بتوانند بیش از ۳۰۰۰ میلی گرم بر کیلوگرم روی، ۳۰۰ میلی گرم بر کیلوگرم مس، کبالت و کروم، ۱۰۰۰ میلی گرم بر کیلوگرم آرسنیک، نیکل و سرب؛ و برای نقره ۱ میلی گرم بر کیلوگرم در وزن خشک را در اندام‌های هوایی خود تجمع دهند به عنوان بیش تجمع دهنده آن فلز محسوب می‌شوند، در حالیکه این غلظت‌ها برای گیاهان معمولی کشنده می‌باشد (Van der Ent et al., 2013). از کل گونه‌های گیاهان آوندی، حدود ۵۰۰ گونه بیش تجمع دهنده فلز شناسایی شده که بیشتر آن‌ها از خانواده شب بو و به ویژه از جنس *Alyssum* و *Thlaspi* می‌باشند (Krämer, 2010). محدوده معمول نقره در خاک‌های غیر آلوده ۰/۱ تا ۱ میکروگرم بر گرم وزن خشک گزارش شده است، در حالیکه در خاک‌های معدنی غنی از نقره معمولاً ۵ میکروگرم بر گرم وزن خشک است (Adriano, 1986). بالاترین غلظت نقره در باکتری‌ها، قارچ‌ها و جلبک‌های سبز گزارش شده است. داده‌های اندکی بر روی محتوی نقره در گیاهان گزارش شده است. میانگین محتوی برای جلبک‌ها

۰/۲۵ میلی گرم بر کیلوگرم و برای گیاهان ۰/۰۶ میلی گرم بر کیلوگرم گزارش شده است (Bowen, 1966). وجود مقادیر سمی فلزات سنگین در محیط زیست گیاهان باعث ایجاد تغییرات فیزیولوژیک شده و می تواند موجب کاهش توان رشد گیاه و در حالت شدیدتر باعث از بین رفتن گیاه شود. گیاهان حساس در چنین شرایطی آسیب دیده و از بین می روند در حالی که گیاهان مقاوم در این شرایط همچنان به رشد و تولید مثل خود ادامه می دهند. سمیت نقره برای گونه های گیاهی با غلظت ۷۵ میلی گرم بر لیتر گزارش شده است. خسارات مورفولوژیکی، کلروز و خسارت به کلروپلاست و میتوکندری در گیاه *Potamogeton crispus* L. در معرض با غلظت های ۵ تا ۲۰ میکرومولار نقره گزارش شده است. بنابراین تجمع نقره در گیاه منجر به استرس اکسیداتیو شده است (Xu et al., 2010). علاوه بر این، اثر سمیت نقره با توجه به گونه های گیاهی متفاوت است، مثلاً گونه های بیش تجمع دهنده به طور طبیعی سمیت نقره بیشتری را نسبت به گیاهان حساس تحمل می کنند. غلظت فلزات سنگین بیش از حد مجاز، زندگی انسان، حیات گیاهی و سایر اشکال حیات را تهدید می کند. فعالیت های مختلف طبیعی و انسانی فلزات سنگین سمی را در خاک، هوا و آب منتشر می کنند. گیاهان فلزات سنگین سمی را از ریشه و قسمت برگ داخل گیاه مصرف می کنند. فلزات سنگین ممکن است با جنبه های مختلف گیاهان، مانند بیوشیمی، مولکول های زیستی، و فرآیندهای فیزیولوژیکی تداخل داشته باشند که معمولاً به تغییرات مورفولوژیکی و تشریحی تبدیل می شوند. آنها از استراتژی های مختلفی برای مقابله با اثرات سمی آلودگی فلزات سنگین استفاده می کنند (Kain and Arya, 2024; Ejaz et al., 2023) گیاهان به شیوه های مختلفی مانند جذب انتخابی فلز، اتصال فلز

به سطح ریشه، اتصال فلز به دیواره سلولی و القای آنتی اکسیدان ها به اثرات سمی فلز سنگین پاسخ می دهند. انواع مختلفی از آنتی اکسیدان ها از قبیل تیول غیر پروتئینی (NP-SH)، سیستئین، گلوتاتیون، آسکوربیک اسید، پرولین و آنزیم های آنتی اکسیدان از قبیل سوپراکسید دیسموتاز، آسکوربات پراکسیداز، گایاکول پراکسیداز، کاتالاز و گلوتاتیون ردوکتاز وجود دارد که ممکن است گیاهان با آن ها به فلز سنگین پاسخ دهند. با این حال، واکنش بسته به گونه های گیاهی، غلظت فلز و شرایط مواجهه متفاوت خواهد بود (Kumar et al., 2018). حضور فلزات سنگین در محیط در یک غلظت معینی به عنوان عامل تنش زای محیطی سبب تحریک سنتز بیشتر کاروتنوئیدها در گیاه می شود در حالی که، غلظت بالای این ترکیبات از طریق تحریک و بهم ریختگی ساختار کاروتنوئیدها از میزان آن ها در گیاه می کاهد. آنتی اکسیدان های آنزیمی و غیر آنزیمی نقش مهمی در کاهش تنش ناشی از فلزات سنگین ایفا می کنند. آنزیم های آنتی اکسیدانی مانند سوپراکسید دیسموتاز و کاتالاز، با تبدیل رادیکال های آزاد به مولکول های غیر مضر، از آسیب اکسیداتیو جلوگیری می کنند. همچنین، ترکیبات غیر آنزیمی مانند ویتامین C و E نیز به عنوان عامل های حفاظتی عمل کرده و به تقویت سیستم دفاعی گیاهان کمک می کنند. این مکانیسم ها به کاهش اثرات منفی فلزات سنگین و بهبود سلامت گیاهان کمک می کنند. افزایش فعالیت این آنتی اکسیدان ها می تواند منجر به تحمل بیشتر گیاهان در برابر شرایط استرس زا شود (Mahdavian, 2022). اسپند گیاه دارویی چند ساله یا پایا از تیره Zygophyllaceae است که در بردارنده مواد ضد میکروبی از نوع فلاونوئیدها و آلکالوئیدها می باشد (Cheraghi-Niromand et al., 2015). هدف از این تحقیق، بررسی تأثیر غلظت های بالای نقره بر برخی

از ویژگی‌های رشدی گیاه اسپند است. به طور خاص، این مطالعه به تحلیل تأثیر نقره بر طول اندام‌های هوایی و ریشه، وزن خشک اندام‌های هوایی و ریشه، میزان تجمع نقره در بافت گیاه و همچنین فاکتور انتقال در گیاه اسپند می‌پردازد. بررسی این عوامل می‌تواند درک بهتری از نحوه تأثیر غلظت‌های بالای نقره بر رشد و توسعه گیاه اسپند به‌ویژه در شرایط محیطی آلوده را فراهم کند.

مواد و روش‌ها

جهت کشت بذر اسپند، در هر گلدان تعداد ۵ عدد بذر گیاه اسپند کاشته شد و ۳ تکرار در هر غلظت از تیمار در نظر گرفته شد. پس از گذشت ۵ روز آبیاری با آب مقطر گیاهچه‌های حاصل به مدت ۴۰ روز با محلول غذایی تغییر یافته ۰/۵ غلظت هوگلند تغذیه شدند. بعد از گذشت ۶ هفته، گیاهان به مدت ۱۵ روز در معرض تیمار نقره (۰، ۱، ۵، ۱۰، ۲۰، ۴۰ و ۸۰ میلی گرم در لیتر $AgNO_3$) قرار گرفتند. pH محلول غذایی و محلول حاوی نقره در محدوده ۶ تنظیم شد. محلول‌های غذایی هر هفته با محلول‌های تازه جایگزین گردید و گیاهان در اتاقک کشت با دمای متناوب ۲۵/۲۰ درجه سانتی‌گراد (شب/روز)، تناوب نوری (۱۶ ساعت نور)، شدت نور ۶۵ میکرومول فوتون بر مترمربع بر ثانیه رشد کردند (Mahdavian et al., 2016).

در پایان تیماردهی، طول ساقه و ریشه با استفاده از خط کش اندازه‌گیری شد. طول ساقه از یقه تا قسمت انتهایی

ساقه و طول ریشه از یقه تا انتهای ریشه در نظر گرفته شد. برای هر تیمار ۳ تکرار در نظر گرفته شد و مقادیر بر اساس سانتیمتر گزارش شد.

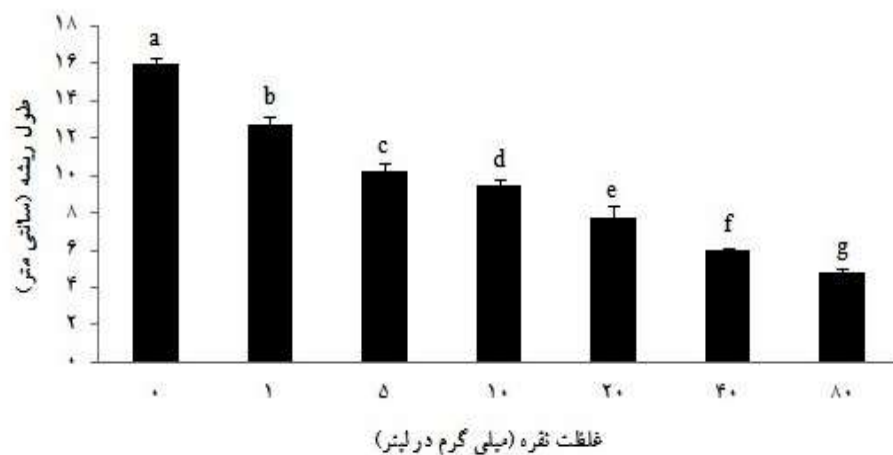
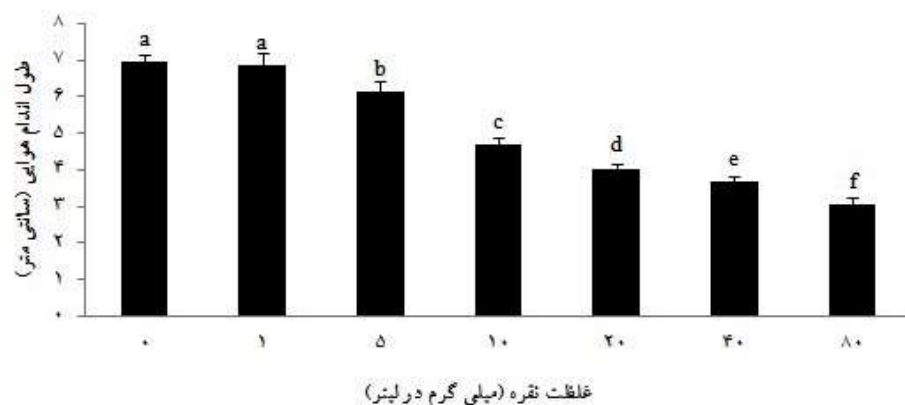
برای اندازه‌گیری وزن خشک، اندام هوایی و ریشه گیاه به طور جداگانه به مدت ۴۸ ساعت در آون با دمای ۷۰ درجه سانتیگراد قرار داده شد و پس از خشک شدن کامل نمونه‌ها، وزن خشک آنها اندازه‌گیری شد.

تعیین میزان تجمع فلز در بخش هوایی و ریشه گیاه بر اساس روش Reeves و همکاران (۱۹۹۹) اندازه‌گیری شد (Reeves et al., 1999). به منظور تعیین و اندازه‌گیری میزان فلز تجمع یافته در بخش هوایی و ریشه گیاه بین ۰/۰۵ تا ۰/۱ گرم از گیاهان، خشک شده، خرد شده و درون لوله‌های آزمایش شیشه‌ای ریخته شدند. سپس به هر نمونه ۴ میلی‌لیتر هیدروکلریک اسید ۳۷ درصد، ۴ میلی‌لیتر اسید نیتریک ۶۵ درصد، ۱/۵ میلی‌لیتر پرکلریک اسید، ۱/۵ میلی‌لیتر پراکسید هیدروژن اضافه شد، سپس نمونه‌ها در بن‌ماری یا حمام شنی در دمای ۱۵۰ تا ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲ ساعت قرار داده شدند. در این مرحله محلول کاملاً بیرنگ می‌شود. پس از آن نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در زیر هود نگهداری شدند. سپس محلول‌ها توسط قیف و کاغذ صافی، صاف شده و حجم محلول به کمک آب مقطر به ۵۰ میلی‌لیتر رسانده شد. مقدار نقره موجود در نمونه‌ها توسط دستگاه طیف سنج جذب اتمی (Shimadzu 6200 AAS in England) مورد اندازه‌گیری قرار گرفت.

نتایج

ریشه در تیمار نقره ۸۰ میلی گرم در لیتر مشاهده شد. طول اندام هوایی و ریشه در تیمار ۸۰ میلی گرم در لیتر نسبت به شاهد به ترتیب ۵۶ و ۷۰ درصد کاهش نشان دادند.

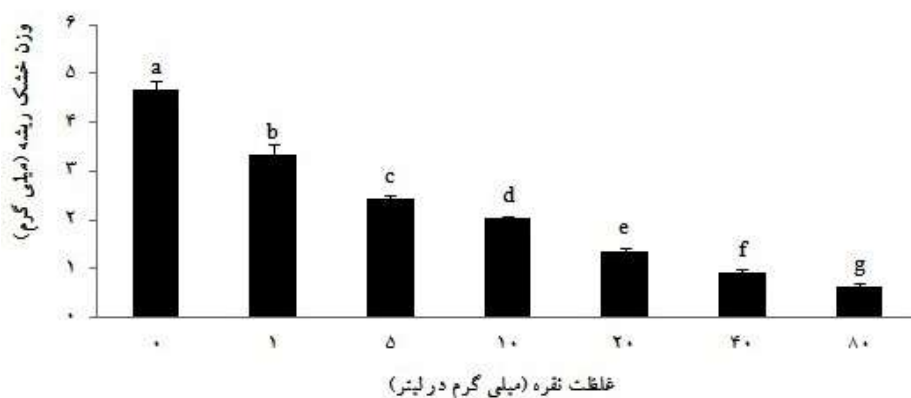
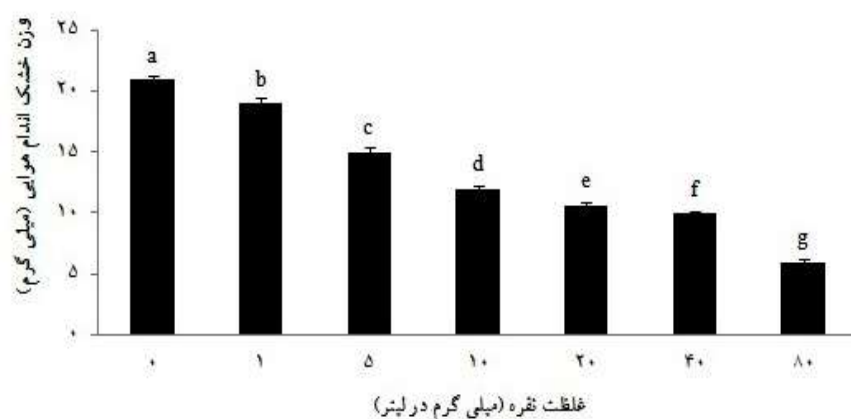
طبق شکل ۱، تیمار نقره باعث کاهش معنی دار در سطح ۵ درصد طول اندام هوایی و ریشه گیاه نسبت به شاهد شده است. بیشترین طول اندام هوایی و ریشه در گیاهان شاهد و کمترین طول اندام هوایی و



شکل ۱. اثر غلظت های مختلف نقره بر طول اندام هوایی (a) و طول ریشه (b) گیاه اسپند. مقادیر، میانگین ۳ تکرار $\pm$ انحراف معیار است. حروف غیر مشترک، بیان کننده تفاوت معنی دار با استفاده از آزمون دانکن است.

است. کمترین وزن خشک در اندام هوایی و ریشه در غلظت ۸۰ میلی گرم در لیتر نقره نسبت به شاهد به ترتیب ۷۱ و ۸۶ درصد مشاهده شد.

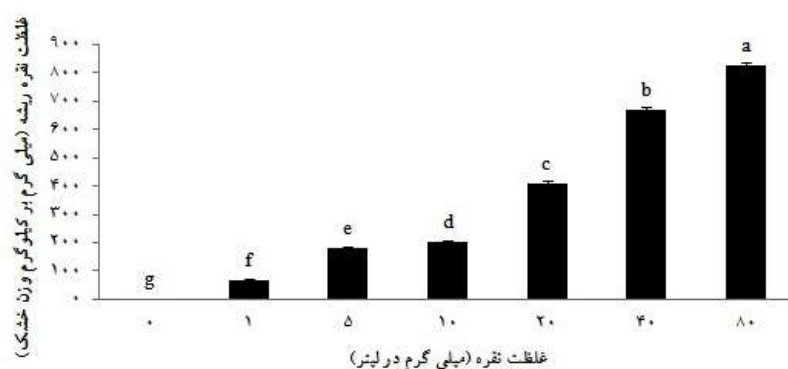
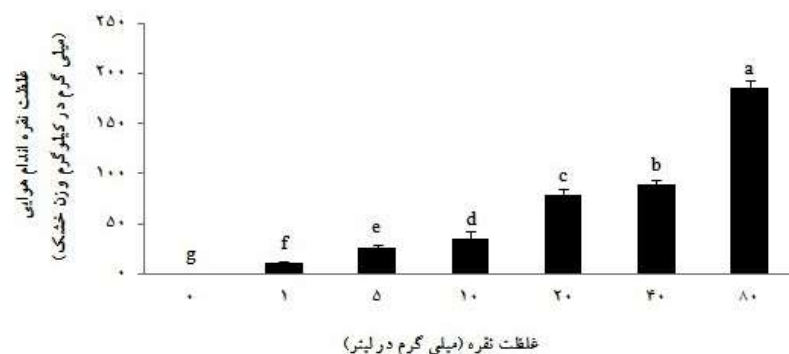
با توجه به شکل ۲ واضح است که تیمار نقره در تمام غلظت ها باعث کاهش معنی دار وزن خشک اندام هوایی و ریشه در گیاه اسپند نسبت به شاهد شده



شکل ۲. اثر غلظت‌های مختلف نقره بر وزن خشک اندام هوایی (a) و وزن خشک ریشه (b) گیاه اسپند. مقادیر، میانگین ۳ تکرار $\pm$ انحراف معیار است. حروف غیر مشترک، بیان کننده تفاوت معنی دار با استفاده از آزمون دانکن است.

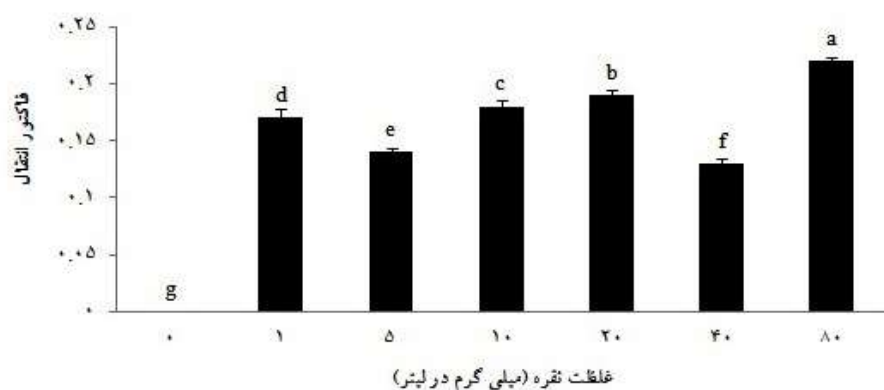
بطوریکه بیشترین غلظت نقره اندام هوایی و ریشه در غلظت ۸۰ میلی گرم در لیتر نقره مشاهده شد.

بر اساس شکل ۳؛ تیمار نقره در تمام غلظت‌ها باعث افزایش معنی دار غلظت نقره تجمع یافته در اندام هوایی و ریشه نسبت به گیاهان شاهد شده است



شکل ۳. اثر غلظت‌های مختلف نقره بر محتوای نقره اندام هوایی (a) و محتوای نقره ریشه (b) گیاه اسپند. مقادیر، میانگین ۳ تکرار $\pm$ انحراف معیار است. حروف غیر مشترک، بیان کننده تفاوت معنی دار با استفاده از آزمون دانکن است.

بر اساس شکل ۴؛ تیمار نقره در تمام غلظت‌ها باعث افزایش معنی دار فاکتور انتقال نسبت به گیاهان شاهد شد. بیشترین مقدار فاکتور انتقال در تیمار ۸۰ میلی گرم در لیتر مشاهده شد.



شکل ۴. اثر غلظت‌های مختلف نقره بر مقدار فاکتور انتقال گیاه اسپند. مقادیر، میانگین ۳ تکرار $\pm$ انحراف معیار است. حروف غیر مشترک، بیان کننده تفاوت معنی دار با استفاده از آزمون دانکن است.

بحث

تحقیقات نشان داده‌اند که فلزات سنگین نظیر نقره، کادمیوم، کروم و سرب می‌توانند بر فرآیندهای متابولیک گیاهان تأثیر گذاشته و منجر به اختلال در جذب عناصر غذایی، کاهش فتوسنتز و افزایش استرس اکسیداتیو شوند. این اثرات نه تنها بر رشد گیاهان، بلکه بر کیفیت و کمیت محصولات کشاورزی نیز تأثیر می‌گذارد (Nedae Ziabari et al., 2024; Salvati et al., 2023; Talebzadeh et al., 2023; Biyok et al., 2023). نقره یکی از سمی‌ترین فلزات است و غلظتش در بافت‌های گیاهی معمولاً کمتر از ۰/۰۱ میلی‌گرم بر کیلوگرم است (Kabata-Pendias, 2011)، اگر چه می‌تواند در گیاهانی از نواحی معدن سرب و نقره بالاتر باشد. همچنین در این تحقیق مقدار نقره در گیاه اسپند محدوده‌ای از ۰/۱ تا ۰/۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم در ریشه‌ها و ۰/۲ تا ۰/۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم در اندام‌های هوایی وجود دارد. فاکتور انتقال توانایی گیاهان را در انتقال فلزات از ریشه به ساقه محاسبه می‌کند که از نسبت غلظت فلز در اندام هوایی به غلظت فلز در ریشه به دست می‌آید. در این تحقیق با افزایش غلظت نقره در خاک، فاکتور انتقال در گیاه اسپند نسبت به شاهد افزایش می‌یابد. گیاهانی با فاکتور انتقال بیشتر از یک، فلزات سنگین را به اندام هوایی منتقلی می‌کنند در حالی که گیاهانی با فاکتور انتقال کمتر از یک قابلیت انتقال فلز سنگین را از ریشه به اندام هوایی کمتر نشان می‌دهند (Yoon et al., 2006).

وجود فلزات سنگین در محیط زیست گیاهان نوعی عامل تنش‌زا می‌باشد که باعث ایجاد تغییرات فیزیولوژیک شده و می‌تواند موجب کاهش توان رشد گیاه و در حالت شدیدتر باعث از بین رفتن گیاه شود. گیاهان را بر اساس قابلیت رشد در خاک‌های آلوده به فلزات سنگین به دو گروه حساس و مقاوم تقسیم

می‌کنند. گیاهان حساس در این شرایط آسیب دیده و از بین می‌روند، در حالیکه گیاهان مقاوم در این شرایط همچنان به رشد و تولید مثل خود ادامه می‌دهند (Baker et al., 2000). نتایج مطالعه حاضر نشان داد که طول اندام هوایی و ریشه در گیاه اسپند تحت تأثیر تیمار نقره کاهش یافت. مشابه نتایج تحقیق حاضر در جو (et al., 2017) و (Fayez et al., 2019) *Pennisetum glaucum* (Khan) گزارش شده است. کاهش طول ریشه می‌تواند به دلیل دسترسی مستقیم این اندام به غلظت‌های بالای این یون و جذب بالای آن باشد. در واقع، نقره به عنوان یک فلز سنگین می‌تواند تأثیرات متفاوتی بر روی گیاهان داشته باشد (Danish et al., 2024). هرچند این فلز می‌تواند باعث بهبود شرایط رشدی گیاه شود در غلظت‌های بالا از طریق تحریک رها سازی برای گیاه سمی بوده و آسیب‌های متفاوتی را در گیاهان توسط ROS موجب می‌شود. فرآیندهای بیولوژیکی از طریق تولید ROS شامل رادیکال‌های هیدروکسیل، اکسیژن منفرد و پراکسید هیدروژن در سلول‌های گیاهی است و مسیرهای سیگنالینگ را فعال می‌کند که منجر به تغییراتی در مکانیسم‌های فیزیولوژیکی، بیوشیمیایی و مولکولی در متابولیسم سلولی می‌شود. با این حال، ROS بیش از حد باعث استرس اکسیداتیو می‌شود، حالت عدم تعادل بین تولید ROS و خنثی شدن رادیکال‌های آزاد توسط آنتی اکسیدان‌ها، و در نتیجه باعث آسیب به اجزای سلولی از جمله لیپیدها، اسیدهای نوکلئیک، متابولیت‌ها و پروتئین‌ها می‌شود که در نهایت منجر به مرگ می‌شود. بنابراین، حفظ سطح فیزیولوژیکی ROS برای ارگانیسم‌های هوایی، که بر عملکرد ترکیبی آنتی اکسیدان‌های آنزیمی و غیر آنزیمی متکی است، بسیار مهم است. به منظور بهبود تحمل گیاهان در برابر محیط‌های نامناسب، تقویت درک استرس

اکسیداتیو و سیستم های آنتی اکسیدانی حیاتی است (Adhikary et al., 2024; Xie et al., 2019). غلظت های بالای نیترات نقره تولید اتیلن را افزایش می دهند. بنابراین اتیلن انتقال اکسین را مختل کرده و باعث کاهش رشد می شود (Lentini et al., 1988). Jiang و همکاران (۲۰۱۲) گزارش کردند که وزن خشک گیاه *Spirodela polyrhiza* تحت تاثیر تیمار نقره کاهش یافت. در حالی که در غلظت های پایین ممکن است نقره اثرات مثبتی بر روی رشد گیاهان داشته باشد، در غلظت های بالا، این فلز به عنوان یک سم عمل کرده و می تواند آسیب های جدی به نواحی مختلف گیاه وارد کند. بررسی ها نشان داده اند که نقره می تواند منجر به تولید ROS شود که به نوبه خود می تواند منجر به استرس اکسیداتیو و آسیب بافتی در گیاه گردد (Shahzad et al., 2024).

بر اساس نتایج به دست آمده از اثر غلظت های متفاوت نقره در شرایط هیدروپونیک، مشخص شد که با افزایش غلظت نقره در محلول غذایی، میزان نقره در اندام هوایی و ریشه افزایش یافت. همچنین غلظت نقره در ریشه بیشتر از اندام هوایی است. همچنین گزارش شده است که فلز نقره تمایل بیشتری به تجمع در ریشه نسبت به اندام هوایی دارد. این موضوع می تواند نشان دهنده مکانیسم های خاصی باشد که گیاهان برای مدیریت و کنترل این عنصر سنگین به کار می برند (Smith and Carson, 1977). Jiang و همکاران (۲۰۱۲) گزارش کردند که در بافت های گیاهی *Spirodela polyrhiza* تجمع نقره افزایش یافت. این افزایش می تواند به دلیل اثرات خاص نقره بر روی تنفس و فتوسنتز گیاه باشد که تحت استرس های مربوط به فلزات سنگین قرار دارند.

همچنین افزایش غلظت نقره در اندام هوایی گیاه *Ocimum basilicum* L. تحت تنش نقره نیز گزارش شد (Nejatzadeh-Barandozi et al., 2014). اخیراً تحقیقاتی نشان دادند که غلظت های بالا نقره می تواند منجر به اختلال در فرایندهای فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی گیاهان گردد (Tran et al., 2023). به طور کلی، تجمع نقره در اندام های مختلف گیاهی در شرایط هیدروپونیک می تواند به نشانه هایی از سازگاری و مدیریت این فلز سنگین توسط گیاهان اشاره داشته باشد. در حالی که غلظت های بالای نقره می تواند اثرات منفی بر روی رشد و توسعه گیاه داشته باشد، تحقیقات جدید نشان می دهد که گیاهان توانایی خاصی در مواجهه با این نوع تنش ها دارند (Shahraki et al., 2024).

نتیجه گیری نهایی

در این تحقیق اثر غلظت های مختلف نقره بر طول اندام هوایی و ریشه، وزن خشک اندام هوایی و ریشه، تجمع نقره و فاکتور انتقال گیاه اسپند مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد که افزایش غلظت نقره باعث کاهش طول اندام هوایی، ریشه، وزن خشک اندام هوایی و ریشه می شود اما میزان تجمع نقره در اندام هوایی و ریشه افزایش می یابد. همچنین مقدار فاکتور انتقال نیز تحت تیمار غلظت های مختلف نقره در مقایسه با شاهد به طور معنی داری افزایش یافت. بنابراین از این تحقیق می توان نتیجه گیری کرد که گیاه اسپند توانایی بالایی در تجمع و تحمل نقره دارد و می تواند جهت گیاه پالایی نقره مورد استفاده قرار گیرد.

سپاسگزاری

نگارنده از حوزه معاونت محترم پژوهشی دانشگاه پیام نور به دلیل حمایت مالی از پژوهش حاضر، صمیمانه سپاسگزاری می نماید.

References

- Adhikary, K., Sarkar, R., Chatterjee, P., Roy Chowdhury, S., Karak, P., Ahuja, D. and Maiti, R. (2024). The Homeostatic Phyto-defense Mechanism for Reactive Oxygen Species under Environmental Stress Conditions: A Review. *Research Journal of Pharmacy and Technology*. 17 (7): 3505-3513.
- Adriano, D.C. (1986). Trace elements in the terrestrial environment. Springer-Verlag, New York.
- Auburn, A. (2000). Heavy metal soil contamination. *Urban Technical Note*. 3: 1-7.
- Baker, A.J.M. (1981). Accumulators and excluders - strategies in the response of plants to heavy metals. *Journal of Plant Nutrition*. 3: 643-654.
- Baker, A.J.M., McGrath, S.P., Reeves, R.D. and Smith, J.A.C. (2000). Metal hyperaccumulator plants: a review of the ecology and physiology of a biological resource for phytoremediation of metal-polluted soils. In: Terry N., Banuelos G. (Eds.), *Phytoremediation of Contaminated Soil and Water*. CRC Press, Boca Raton, pp. 85-107.
- Biyok, B., Soltani, S. and Hashemi, A.S. (2022). Investigation of heavy metal (Pb^{+}) effect in presence of (Ca^{2+}) on photosynthetic pigments and antioxidant enzymes activity of *Entomorpha* sp. *Journal of Plant Environmental Physiology*. 68(4): 55-68.
- Bowen, H.J. (1966). Trace Elements in Biochemistry. Academic Press, London, pp. 367.
- Cheraghi, M., Bigmohammadi, Z. and Shayesteh, K. (2013). Concentration of lead and zinc in greenhouse cucumbers of Hamadan province in 2012, *Quarterly Scientific - Research Journal Food Hygiene*. 3(2): 53. (In Persian)
- Cheraghi-Niromand, M., Farzaei, M.H. and Amin, G. (2015). Medicinal properties of *Peganum harmala* L. in traditional Iranian medicine and modern phytotherapy: a review. *Journal of Traditional Chinese Medicine*. 35 (1): 104-109.
- Danish, S., Hussain, G., Shah, S. H., Mehmood, H., Fahad, S., Alharbi, S. A. and Salmen, S. H. (2024). Green synthesized silver nanoparticles alleviate lead toxicity in maize and wheat. *Pakistan Journal of Botany*. 56(6).
- Ejaz, U., Khan, S.M., Khalid, N., Ahmad, Z., Jehangir, S., Fatima Rizvi, Z., Lho, L.H., Han, H. and Raposo, A. (2023). Detoxifying the heavy metals: a multipronged study of tolerance strategies against heavy metals toxicity in plants. *Frontiers in Plant Science*. 14: 1154571.
- Fayez, K., El-Deeb, B. and Mostafa, N. (2017). Toxicity of biosynthetic silver nanoparticles on the growth, cell ultrastructure and physiological activities of barley plant. *Acta Physiologiae Plantarum*. 39: 155.
- Jiang, H.S., Li, M., Chang, F.Y., Li, W. and Yin, L.Y. (2012). Physiological analysis of silver nanoparticles and $AgNO_3$ toxicity to *Spirodela polyrhiza*. *Environmental Toxicology and Chemistry*. 31: 1880-1886.
- Kabata-Pendias, A. (2011). Trace Elements in Soils and Plants. fourth ed. CRC Press, Boca Raton, FL.
- Kain, D. and Arya, A.S. (2024). Biochemical and Molecular Aspects of Phytoremediation toward Mitigation of Heavy Metals. In *Challenges and Sustainable Solutions in Bioremediation* 74-85. CRC Press.
- Khan, I., Raza, M.A., Khalid, M.H.B., Awan, S.A., Raja, N.I., Zhang, X., Min, S., Wu, B.C., Hassan, M.J. and Huang, L. (2019). Physiological and Biochemical Responses

- of Pearl Millet (*Pennisetum glaucum* L.) Seedlings Exposed to Silver Nitrate (AgNO_3) and Silver Nanoparticles (AgNPs). International Journal of Environmental Research and Public Health. 16: 2261.
- Krämer, U. (2010). Metal hyperaccumulation in plants. Annual Review of Plant Biology. 61: 517-534.
- Kumar, A., Narasimha, M. and Prasad, V. (2018). Plant lead intractions: Transport, toxicity, tolerance, and detoxification mechanisms. Ecotoxicology and Environmental Safety. 166: 401-418.
- Lentini, Z., Mussell, H., Mutschler, M.A. and Earle, E.D. (1988). Ethylene generation and reversal of ethylene effects during development in vitro rapid-cycling *Brassica campestris* L. Plant Science. 54: 75-81.
- Mahdavian, K. (2022). Investigation of the metal bioremediation ability of two populations of *Peganum Harmala*. Avicenna Journal of Environmental Health Engineering. 9(1): 18-24.
- Mahdavian, K., Ghaderian, S.M., and Schat, H. (2016). Pb accumulation, Pb tolerance, antioxidants, thiols, and organic acids in metallicolous and non-metallicolous *Peganum harmala* L. under Pb exposure. Environmental and Experimental Botany. 126: 21-31.
- Malekmohammadi, S., Behbahaninia, A. and Farahani, M. (2019). Survey of Lead and Zink Pollution in Surface Soils around the Shokouhie Industrial Estate. Human & Environment. 17(4): 13-24. (In Persian)
- Nedae Ziabari, S.Z., Sedaghatoor, S., Kaviani, B. and Baniasad, M. (2024). Phytoremediation ability of three succulent ornamental plants; cactus (*Opuntia humifusa*), kalanchoe (*Kalanchoe blossfeldiana*) and bryophyllum (*Bryophyllum delagoensis*) under heavy metals pollution. Science of the Total Environment. 947: 174579.
- Nejatzadeh-Barandozi, F., Darvishzadeh, F. and Aminkhani, A. (2014). Effect of nano silver and silver nitrate on seed yield of (*Ocimum basilicum* L.). Organic and Medicinal Letters. 4: 11.
- Oladoye, P.O., Olowe, O.M. and Asemoloye, M.D. (2022). Phytoremediation technology and food security impacts of heavy metal contaminated soils: a review of literature. Chemosphere. 288: 132555.
- Panda, S.K. and Choudhury, S. (2005). Changes in nitrate reductase activity and oxidative stress response in the moss *polytrichum commune* subjected to chromium, copper and zinc phytotoxicity. Plant Physiology. 17: 191-197.
- Reeves, R.D., Baker, A.J.M., Borhidi, A. and Berazain, R. (1999). Nickel hyperaccumulation in the serpentine flora of Cuba. Annals of Botany. 83: 29-38.
- Salvati, J., Fallah Amoli, H., Niknejad, Y. and Berari Tari, D. (2023). Effects of different concentrations of lead on some biochemical and physiological parameters of rice (*Oryza sativa* L.). Journal of Plant Environmental Physiology. 18(4): 1-18.
- Shahraki, S.H., Ahmadi, T., Jamali, B. and Rahimi, M. (2024). The biochemical and growth-associated traits of basil (*Ocimum basilicum* L.) affected by silver nanoparticles and silver. BMC Plant Biology. 24(1): 92.
- Shahzad, U., Saqib, M., Jhazab, H. M., Abou Fayssal, S., Ahmad, R and Qayyum, A. (2024). Different concentrations of silver nanoparticles trigger growth, yield, and quality of strawberry (*Fragaria ananassa* L.) fruits. Journal of Plant Nutrition and Soil Science. 187(5), 668-677.
- Smith, I.C. and Carson, B.L. (1977). Trace metals in the environment, Michigan: Ann Arbor Science Publishers. 490.

- Talebzadeh, Z., Rahbarian, R., Nadaf, M. and Sobanian, H. (2023). Evaluation of biochemical parameters of *Portulaca oleracea* under chromium and salinity. Journal of Plant Environmental Physiology. 70(2): 1-16.
- Tiwari, B., Fatima, G., Hadi, N. R. and Qassam, H. (2024). Metal Toxicity: Significant Health Assessment. Kufa Medical Journal. 20(2): 213–235.
- Tran, I.T., Heiman, J.A., Lydy, V.R. and Kissoon, T. (2023). Silver inhibits *Lemna minor* growth at high initial frond densities. Plants (Basel). 12(5):1104.
- Van der Ent, A., Baker, A.J.M., Reeves, R.D., Pollard, A.J. and Schat, H. (2013). Hyperaccumulators of metal and metalloid elements: facts and fiction. Plant and Soil. 362: 319-334.
- Xie, X., He, Z., Chen, N., Tang, Z., Wang, Q. and Cai, Y. (2019). The roles of environmental factors in regulation of oxidative stress in plant. BioMed Research International. 9732325.
- Xu Q.S., Hu J.Z., Xie K.B., Yang H.Y., Du K.H. and Shi G. X. 2010. Accumulation and acute toxicity of silver in *Potamogeton crispus* L. Journal of Hazardous Materials. 173: 186–193.
- Yoon, J., Cao, X., Zhou, O. 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: 456–464.