

## مقاله پژوهشی

# مطالعه اثر آلودگی کادمیوم و آبیاری با آب مغناطیس بر رشد و آنتی‌اکسیدان‌های گیاه وتیور

الهه جعفری هفشجانی<sup>۱</sup>، مهران هودجی<sup>۲\*</sup>، فائزه قناتی<sup>۳</sup>، یعقوب حسینی<sup>۴</sup> و ولی علیپور<sup>۵</sup>

## چکیده

کادمیوم یک آلاینده مهم زیست‌محیطی محسوب می‌شود که آثار نامطلوب آن بر تهدید سلامت عمومی در مطالعات گذشته گزارش شده است. به‌منظور ارزیابی قابلیت گیاه وتیور در برداشت کادمیوم در شرایط آبیاری با آب مغناطیس، این مطالعه به‌صورت طرح فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار به‌صورت آزمایش‌گلدانی اجرا شد. فاکتورهای مورد مطالعه شامل کادمیوم در چهار سطح (۰، ۰.۵، ۱ و ۲ میلی‌گرم در لیتر) و آبیاری در سه سطح (کاملاً مغناطیس، نیمه‌مغناطیس و غیرمغناطیس) بودند. نتایج نشان داد که استفاده از آب مغناطیس در آبیاری به‌طور معنی‌داری پاسخ‌های آنتی‌اکسیدانی و برداشت کادمیوم توسط گیاه را تحت‌تأثیر قرار داد. به‌طوری‌که بیشترین غلظت کادمیوم ریشه و شاخساره، فاکتور انتقال و شاخص تجمع زیستی به تیمار آب کاملاً مغناطیس اختصاص داشت و با تغییر غلظت کادمیوم، اثرگذاری آب مغناطیس بر پاسخ‌های گیاهی نیز تغییر کرد. فعالیت آنتی‌اکسیدان‌های آنزیمی و غیرآنزیمی نیز با افزایش آلودگی کادمیوم افزایش نشان داد؛ اما به‌طور نسبی میزان این افزایش در حضور آبیاری با آب کاملاً مغناطیس بیشتر از سطوح دیگر آبیاری بود. به‌طور کلی، یافته‌های این تحقیق نشان داد که استفاده از آب مغناطیس برای افزایش مقاومت گیاهان به تنش آلودگی کادمیوم مفید بوده و روشی کارآمد برای کاهش آلودگی فلزات سنگین در محیط‌زیست محسوب می‌شود؛ با این‌وجود، برای تأیید این نتایج، انجام مطالعات بیشتر روی سایر گیاهان و در سطوح بیشتر آلودگی پیشنهاد می‌شود.

**واژه‌های کلیدی:** آلودگی خاک، فلزات سنگین، رشد و پاسخ‌های آنتی‌اکسیدانی گیاه.

ارجاع: جعفری هفشجانی ا.، هودجی م.، قناتی ف.، حسینی ی. و علیپور و. ۱۴۰۱. مطالعه اثر آلودگی کادمیوم و آبیاری با آب مغناطیس بر رشد و آنتی‌اکسیدان‌های گیاه وتیور. مجله پژوهش آب ایران. ۴۷: ۱۰۳-۱۱۳. <https://dx.doi.org/10.22034/IWRJ.2022.14086.2456>

۱- گروه خاکشناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه آزاد اسلامی اصفهان، واحد خوراسگان، اصفهان، ایران.  
۲- گروه خاکشناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه آزاد اسلامی اصفهان، واحد خوراسگان، اصفهان، ایران.  
۳- گروه زیست‌شناسی گیاهی، دانشکده زیست‌شناسی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.  
۴- بخش تحقیقات خاک و آب، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی فارس، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، شیراز، ایران.  
۵- گروه بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی هرمزگان، بندرعباس، ایران.

\* نویسنده مسئول: [mehranhoudaji1@gmail.com](mailto:mehranhoudaji1@gmail.com)

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۵/۲۷ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۶/۱۹

## مقدمه

فلزات سنگین مهم‌ترین آلاینده‌های معدنی در محیط‌زیست محسوب می‌شوند که آثار ناشی از مسمومیت آن‌ها بر سلامت عمومی، به‌عنوان چالشی مهم محسوب می‌شود (موسوی و همکاران، ۲۰۲۲؛ موسوی و همکاران، ۲۰۱۸). فلزات سنگین در نتیجه فعالیت‌های مختلف انسانی به محیط‌زیست وارد می‌شوند که در مطالعات گذشته به‌طور مفصل به آن‌ها پرداخته شده است (موسوی، ۲۰۲۲؛ موسوی و احمدآبادی، ۱۳۹۲؛ موسوی و همکاران، ۱۳۹۰). کادمیوم یک آلاینده مهم معدنی محسوب می‌شود که به‌طور جدی برای سلامتی گیاه، دام و انسان، سمی محسوب می‌شود. کادمیوم با اثرگذاری منفی بر جوانه‌زنی، رشد ریشه و اندام هوایی، فتوسنتز، تقسیم سلولی و تعرق گیاهان، باعث کاهش معنی‌دار عملکرد شده و در سطوح پیشرفته، مرگ گیاه را به‌دنبال دارد (موسوی و همکاران، ۲۰۱۰؛ موسوی و همکاران، ۲۰۱۳). روش‌های متعددی برای اصلاح خاک‌های آلوده به فلزات سنگین وجود دارد که اکثر آن‌ها ضمن اینکه ناپایدار بوده و از نظر اقتصادی مقرون‌به‌صرفه نیستند، می‌توانند به میزان زیادی شرایط و خصوصیات توده خاک را تحت‌تأثیر قرار دهند (جیلانی و همکاران، ۲۰۱۷؛ مشیری و همکاران، ۲۰۱۹؛ موسوی و نصرآبادی، ۲۰۱۸؛ موسوی و همکاران، ۲۰۲۲؛ سیار و همکاران، ۲۰۲۰). در سال‌های اخیر، مطالعات متعددی درباره ارزیابی کارایی تکنیک گیاه‌پالایی در حذف فلزات بالقوه سمی از خاک انجام شده است (گراوند و همکاران، ۲۰۲۱؛ موسوی و همکاران، ۲۰۱۱؛ سیار و همکاران، ۲۰۲۰). در گیاه‌پالایی معمولاً از گونه‌های گیاهی استفاده می‌شود که زیست‌توده بالایی تولید می‌کنند و در برابر مسمومیت فلزات سنگین نیز مقاوم هستند (بان و همکاران، ۲۰۲۰). گیاه وتیور (*Vetiver Zizanioides*) یکی از این گونه‌های گیاهی است که به‌دلیل سرعت رشد بالا، قدرت سازگاری با طیف وسیعی از تنش‌های محیطی و مقاومت در برابر آلودگی‌های فلزات سنگین در خاک و آب شناخته شده است (گراوند و همکاران، ۲۰۲۱؛ پیداتالا و همکاران، ۲۰۱۸). راهبردهای متعددی برای کمک به افزایش کارایی گیاه‌پالایی استفاده شده است، از جمله استفاده از کلات‌ها، اصلاح ژنتیکی، تلقیح باکتریایی و کشت مخلوط که نه تنها هزینه‌ها را افزایش می‌دهند، بلکه خطرات زیست‌محیطی

را نیز افزایش می‌دهند (تانگ و همکاران، ۲۰۱۹). یکی از روش‌هایی که اخیراً بسیار مورد توجه قرار گرفته است، استفاده از میدان مغناطیسی است. مغناطیس برای افزایش جوانه‌زنی بذر، فعال‌کردن متابولیسم، تولید زیست‌توده و عملکرد، و افزایش مقاومت گیاه به فلزات سنگین استفاده شده است (عبداللهی و همکاران، ۲۰۱۹؛ قناتی و همکاران، ۲۰۱۵؛ سورندران و همکاران، ۲۰۱۶). لیو و همکاران (۲۰۱۹) گزارش کردند که میدان مغناطیسی خارجی ۱۲۰ مگاتسلا به‌طور قابل‌توجهی کارایی *N. caerulea* را برای برداشت کادمیوم و روی بهبود می‌بخشد. آن‌ها همچنین گزارش کردند که در مقایسه با شاهد، مقدار قابل‌توجهی کادمیوم (۲۳/۶ درصد) در برگ‌های مرده گیاه تحت تیمار مغناطیسی اندازه‌گیری شد.

گزارشات بسیاری مبنی بر افزایش پاسخ دفاعی گیاهان در شرایط حضور میدان مغناطیسی وجود دارد (گروال و ماهشوری، ۲۰۱۱؛ رزمجو و علینیان، ۲۰۱۷؛ سورندران و همکاران، ۲۰۱۶). اینکه تیمار مغناطیسی باعث تنش اکسیداتیو یا افزایش فعالیت آنزیم‌های دفاعی گیاه، افزایش غلظت و طول عمر رادیکال‌های آزاد می‌شود، نشان‌دهنده ارتباط مغناطیس درمانی با اثرات آن بر گیاهان است (صاحب‌جامعی و همکاران، ۲۰۰۷). از طرف دیگر، مغناطیس‌درمانی می‌تواند جذب فلزات سنگین را افزایش دهد که باعث افزایش تولید گونه‌های اکسیژن واکنش‌پذیر در گیاهان و نیز منجر به استرس اکسیداتیو مانند پراکسید هیدروژن می‌شود. حسن‌الزمان و همکاران (۲۰۲۰) گزارش کردند که با افزایش تولید رادیکال‌های آزاد، فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی مانند سوپراکسید دیسموتاز<sup>۱</sup> (SOD)، پراکسیداز<sup>۲</sup> (POD)، کاتالاز<sup>۳</sup> (CAT) و غیر آنتی‌اکسیدان‌ها شامل آنتوسیانین‌ها، فلاونوئیدها و فنل‌ها نیز افزایش می‌یابد.

آب مغناطیسی در مطالعات بسیاری مورد بررسی قرار گرفته است. با این حال، تا به امروز مطالعات کمی درباره اثرات آب مغناطیسی بر کارایی گیاه‌پالایی و پاسخ‌های بیوشیمیایی گیاهان انجام شده است؛ بنابراین، هدف از این مطالعه، بررسی اثرات آب مغناطیسی بر پاسخ‌های بیوشیمیایی گیاه وتیور در شرایط آلودگی کادمیوم و کارایی گیاه‌پالایی آن است.

1- Superoxide dismutase

2- Peroxidase

3- Catalase

## مواد و روش‌ها

مورد استفاده در این پژوهش از پساب فاضلاب شهری بندرعباس بود که از منطقه تصفیه‌خانه دوراهی ایسینی با مختصات طول ۵۶ درجه و ۱۸ دقیقه و عرض ۲۷ درجه و ۲۱ دقیقه تهیه و با استفاده از روش‌های استاندارد خصوصیات آن تعیین شد (جدول ۲).

این پژوهش در سال ۱۳۹۹ در محل نهالستان مرکزی سازمان پارک‌ها و فضای سبز شهرداری بندرعباس (طول جغرافیایی ۵۶ درجه و ۳۵ دقیقه و عرض جغرافیایی ۲۷ درجه و ۲۱ دقیقه) به صورت فاکتوریل و در قالب بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار اجرا شد. برای این منظور، از خاک سطحی (۰-۳۰ سانتی‌متری) واقع در دهستان باغو شهرستان بندرعباس، نمونه خاک تهیه شد. پس از هواخشک کردن خاک و عبور از الک دو میلی‌متری، برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی از جمله بافت خاک به روش هیدرومتر (گی و اور، ۲۰۰۲)، ماده آلی به روش اکسایش با اسید کرومیک و سپس تیتراسیون با فروآمونیم سولفات (والکی و بلک، ۱۹۳۴)، pH خاک در خمیر اشباع (کلوت، ۱۹۸۶)، قابلیت هدایت الکتریکی در عصاره اشباع (برمنر، ۱۹۹۶)، نیتروژن کل به روش کجلدال (برمنر، ۱۹۹۶)، کربنات کلسیم معادل به روش خنثی‌سازی توسط اسید کلریدریک (اسپارکس، ۲۰۲۰) و فسفر قابل استفاده توسط عصاره‌گیری با بی‌کربنات سدیم (السون، ۱۹۵۴) تعیین شد. برای اندازه‌گیری شکل قابل جذب عناصر آهن، منگنز، سرب و کادمیوم از عصاره‌گیر دی‌اتیلن‌تری‌آمین پنتااستیک اسید (لیندسی و نورول، ۱۹۷۸) استفاده و غلظت آن‌ها به وسیله دستگاه جذب اتمی تعیین شد (جدول ۱).

در این مطالعه از گیاه وتیور (*Vetiver Zizanioides*)، به‌عنوان گونه گیاهی مقاوم به شرایط آب‌وهوایی شهر بندرعباس استفاده شد. گیاه مورد نظر به صورت قلمه، از پایه‌های مادری تهیه و مورد استفاده قرار گرفت. پساب

جدول ۱- برخی از ویژگی‌های شیمیایی و فیزیکی خاک مورد آزمایش

مقدار	خصوصیات
۷۸	شن (%)
۱۲	سیلت (%)
۱۰	رس (%)
شن لومی	بافت خاک
۲۹/۷۷	رطوبت ظرفیت زراعی (%v)
۱/۴۱۸	جرم مخصوص ظاهری خاک (gr/cm <sup>3</sup> )
۱/۱۸	ماده آلی (%)
۷/۵۲	pH
۱/۹	قابلیت هدایت الکتریکی (dS/m)
۵۴/۲۵	کربنات کلسیم معادل (%)
۱۳/۱	ظرفیت تبادل کاتیونی (cmol <sup>+</sup> /kg)
۶/۵	فسفر قابل جذب (mg/kg)
۶/۱	منگنز قابل جذب (mg/kg)
۳۰	پتاسیم (mg/kg)
۴/۳	آهن قابل جذب (mg/kg)
۰/۰۸	نیتروژن کل (%)
۰	کادمیوم قابل جذب (mg/kg)
۰	سرب قابل جذب (mg/kg)

جدول ۲- خصوصیات اولیه پساب خروجی تصفیه‌خانه شهر بندرعباس

مقدار	واحد	پارامتر
۷/۵	-	pH
۴۰/۷	NTU	کدورت
۴۳۰۰	µs/cm	قابلیت هدایت الکتریکی
۶۳/۲	mg/L	کل جامدات محلول (TSS)
۳۴۳۶	mg/L	نیاز بیوشیمیایی اکسیژن (BOD)
۸۴/۷	mg/L	نیاز شیمیایی اکسیژن (COD)
۳/۳۶	mg/L	فسفات
۰	mg/L	سرب
۰	mg/L	کادمیوم

### مغناطیده‌کردن آب

به‌منظور مغناطیده‌کردن آب، در این مطالعه از روش مورد استفاده توسط قناتی و همکاران (۲۰۱۵) استفاده شد. براین‌اساس، یک دستگاه هم‌زن یون مغناطیس ساخت شرکت فناوری ایرانیان پژوهش نصیر (فاپن) برای مغناطیده‌کردن آب مورد استفاده قرار گرفت. دستگاه مذکور شامل یک لوله نسبتاً بلند پارامغناطیس است. در این قسمت از لوله که بخش فعال آن است، میدان مغناطیسی متناوب وجود دارد. هنگام عبور آب از این قسمت، نیروی مغناطیسی متناوب به یون‌ها در طول محور اعمال می‌شود. میدان مغناطیسی سینوسی در داخل لوله از یک‌سری آهن‌ربا ساخته شده که با دقت در کنار هم چیده شده‌اند. بعد از تهیه پساب فاضلاب مورد نظر، با اضافه‌کردن حجم مشخصی از نیترات کادمیوم به آن، غلظت‌های مورد نظر تهیه شد. دستگاه هم‌زن یون مغناطیس در مسیر آب قرار داده شد و براساس نوع تیمار آبیاری (مغناطیس، نیمه‌مغناطیس و غیرمغناطیس) جریان مغناطیس در مدار قرار گرفته شد.

### تیمارهای مورد استفاده و روش اجرای تحقیق

این آزمایش به‌صورت گلدانی در گلدان‌هایی با ارتفاع ۶۰ سانتی‌متر و قطر دهانه ۴۲ سانتی‌متر انجام گرفت. هر گلدان از ۱۰ کیلوگرم خاک و ۲ کیلوگرم زهکش پر شد. عناصر غذایی مورد نیاز رشد گیاهان براساس نتایج آزمون خاک، به خاک همه گلدان‌ها به‌صورت محلول اضافه و خاک و عناصر غذایی به‌صورت فیزیکی نیز به‌طور کامل و یکنواخت مخلوط شد. قبل از پرکردن گلدان‌ها، به تعداد مناسب سوراخ در کف گلدان‌ها به‌منظور اطمینان از زهکشی مناسب ایجاد شد. تیمارهای مورد آزمایش در این تحقیق شامل آبیاری (در سه سطح آبیاری با آب مغناطیده در کل دوره آزمایش  $(W_1)$ ، آبیاری با آب نیمه‌مغناطیس (یک‌بار استفاده از آب غیرمغناطیده و یک‌بار استفاده از آب مغناطیده)  $(W_2)$  و آبیاری با آب غیرمغناطیده در کل آزمایش) و کادمیوم (در چهار سطح صفر  $(Cd_0)$ ، ۰/۵  $(Cd_1)$ ، ۱  $(Cd_2)$  و ۲  $(Cd_3)$  میلی‌گرم کادمیوم در لیتر آب آبیاری) بودند. کادمیوم از منبع نیترات کادمیوم تأمین شد. دور آبیاری براساس رساندن رطوبت خاک به رطوبت ظرفیت مزرعه از طریق وزن‌کردن گلدان‌ها انجام شد.

(بصیرت و همکاران، ۲۰۱۹). پس از استقرار اولیه گیاه، آبیاری اعمال شد. مدت زمان اعمال تیمارها در یک بازه ۵ ماهه در نظر گرفته شد.

### اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی

بعد از حدود ۵ ماه از تاریخ کشت، اقدام به برداشت گیاهان از گلدان‌ها شد. جداسازی ریشه‌ها و اندام هوایی با دقت انجام و پس از شست‌وشو با آب مقطر، به‌منظور خشک‌شدن در آون (در دمای ۷۰ درجه سلسیوس و به مدت ۷۲ ساعت) قرار گرفته و وزن خشک آن‌ها تعیین شد. برای اندازه‌گیری غلظت فلزات سنگین در بافت‌های گیاهی از روش‌های استاندارد (بیچ، ۱۹۸۲) استفاده و با دستگاه جذب اتمی مدل Trace AII200 قرائت انجام شد. برای اندازه‌گیری پراکسیداز از روش استاندارد استفاده شد (صاحب‌جمعی و همکاران، ۲۰۰۷) و با استفاده از اسپکتروفتومتر در طول زمان یک دقیقه در طول موج ۴۷۰ نانومتر قرائت انجام شد. به‌منظور اندازه‌گیری فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز (SOD) بعد از تهیه عصاره مورد نیاز (قناتی و همکاران، ۲۰۱۵) قرائت با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر انجام شد. فعالیت آنزیم کاتالاز نیز از روش استاندارد مورد استفاده توسط عبدالملکی و همکاران (۲۰۰۷) اندازه‌گیری شد. برای سنجش فلاونوئیدها، بعد از تهیه عصاره مورد نظر، میزان جذب نمونه‌ها پس از سردشدن، توسط اسپکتروفتومتر در سه طول موج ۲۷۰، ۳۰۰ و ۳۳۰ نانومتر خوانده شد (کریزک و همکاران، ۱۹۹۳). به‌منظور سنجش آنتوسیانین، بعد از تهیه محلول مورد نظر، میزان جذب آن در طول موج ۵۵۰ نانومتر با دستگاه اسپکتروفتومتر خوانده شد (هارا و همکاران، ۲۰۰۳). به‌منظور استخراج فنل کل در نمونه‌ها، از روش استاندارد سینگلتن (۱۹۹۹) استفاده شد. سپس، مقدار کل ترکیبات فنلی با اندازه‌گیری جذب نمونه‌ها در طول موج ۷۳۰ نانومتر با استفاده از منحنی استاندارد گالیک اسید محاسبه شد (سینگلتن، ۱۹۹۹)؛ همه محاسبات آماری با استفاده از نرم‌افزار SAS انجام گرفت و برای مقایسه میانگین‌ها از آزمون چنددامنه‌ای دانکن در سطح احتمال پنج درصد و به‌منظور رسم نمودارها از نرم‌افزار Excel استفاده شد.

## نتایج و بحث

## نتایج تجزیه واریانس اثر تیمارهای اعمال شده بر وضعیت برداشت کادمیوم، آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی و آنتی‌اکسیدان‌های غیر آنزیمی گیاه و تیور

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که استفاده از سطوح مختلف آب مغناطیس و آلودگی کادمیوم به‌طور معنی‌داری انباشت کادمیوم در ریشه و اندام هوایی، شاخص تجمع زیستی و فاکتور انتقال کادمیوم از ریشه به اندام هوایی را تحت‌تأثیر قرار داد (جدول ۳). همچنین، اثر متقابل سطوح مختلف آب آبیاری و غلظت کادمیوم بر آن‌ها معنی‌دار شد ( $P < 0.05$ ). تولید زیست‌توده، فعالیت

آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی و آنتی‌اکسیدان‌های غیر آنزیمی گیاه و تیور به‌طور معنی‌داری تحت‌تأثیر تیمارهای اعمال شده قرار گرفت. براساس نتایج تجزیه واریانس مربوط به این صفات (جدول ۴)، اثر سطوح مختلف کادمیوم بر فاکتورهای ذکر شده معنی‌دار شد؛ درحالی‌که سطوح مختلف آب مغناطیس تنها بر فعالیت آنزیم کاتالاز (CAT)، آنتوسیانین و وزن خشک بوته معنی‌دار نشد. اثر متقابل تیمارهای مورد مطالعه نیز به استثنای فعالیت آنزیم سوپراکسیددیسموتاز (SOD)، آنتوسیانین و وزن خشک بوته، بر بقیه موارد معنی‌دار شد ( $P < 0.05$ ).

جدول ۳- نتایج تجزیه واریانس اثر تیمارهای مختلف بر وضعیت غلظت، انباشت و انتقال کادمیوم در گیاه و تیور

منبع تغییر	درجه آزادی	کادمیوم ریشه	کادمیوم اندام هوایی	شاخص تجمع زیستی	فاکتور انتقال
آب مغناطیس (A)	۲	۰/۰۴**	۰/۰۱**	۱/۲۳**	۰/۰۳*
غلظت کادمیوم (B)	۳	۰/۴۷**	۰/۱۷**	۲/۵۲**	۰/۸۹**
اثر متقابل AB	۶	۰/۰۰۱*	۰/۰۰۴*	۰/۲۱**	۰/۰۳**
خطا	۲۴	۰/۰۰	۰/۰۱	۰/۰۵	۰/۰۱
ضریب تغییرات C.V.%	۱۶/۲	۱۹	۲۷/۸	۱۶/۵	۱۱

ns و \* \*\* به ترتیب غیرمعنی‌دار و معنی‌دار در سطح ۵ و ۱ درصد

جدول ۴- نتایج تجزیه واریانس اثر تیمارهای مختلف بر صفات رشدی و آنزیمی گیاه و تیور

منبع تغییر	درجه آزادی	CAT	POD	SOD	فلاونوئید	فنول	آنتوسیانین	وزن خشک بوته
آب مغناطیس (A)	۲	۰/۵۴ns	۴۳۴۳**	۱۵۰۸**	۴۴۸۰**	۸۰۳**	۹/۶ns	۸۴ns
غلظت کادمیوم (B)	۳	۷/۸۹**	۱۰۰۷**	۹۳۰۸**	۱۱۹۲۹**	۱۷۷۹**	۱۸۱/۲*	۲۷۵۱**
اثر متقابل AB	۶	۱/۱۰**	۱۱۶۴**	۴۶۰ns	۳۲۵۱**	۳۳۱**	۲۵/۲ns	۳۸ns
خطا	۲۴	۰/۲۸	۱۸۷	۴۸۹	۵۵۷	۸۵	۵۳/۲	۱۲۸
ضریب تغییرات C.V.%	۵/۵	۵/۳	۷/۹	۱۹/۶	۱۴/۰	۱۷/۷	۸/۷	۸/۷

ns و \* \*\* به ترتیب غیرمعنی‌دار و معنی‌دار در سطح ۵ و ۱ درصد

## مقایسه میانگین اثر تیمارهای مختلف بر وضعیت برداشت کادمیوم، آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی و آنتی‌اکسیدان‌های غیر آنزیمی گیاه و تیور

نتایج مقایسه میانگین اثر سطوح مختلف آب مغناطیس حکایت از نبود اثر معنی‌دار بر فعالیت آنتوسیانین و وزن خشک بوته داشت؛ درحالی‌که به‌طور معنی‌داری فعالیت SOD را تحت‌تأثیر قرار داد (جدول ۵). استفاده از آب مغناطیس به‌طور معنی‌داری فعالیت SOD را افزایش داد (حدود ۲۸/۷۳ درصد افزایش در مقایسه با تیمار آب بدون مغناطیس). این میزان افزایش در تیمار آب

نیمه‌مغناطیس حدود ۱۲/۳۱ درصد در مقایسه با تیمار آب نیمه‌مغناطیس بود.

با افزایش غلظت کادمیوم از صفر به ۲ میلی‌گرم در لیتر، فعالیت SOD نیز افزایش یافت که تنها در سطح ۲ میلی‌گرم در لیتر افزایش معنی‌داری در مقایسه با سایر سطوح مشاهده شد (حدود ۹۲/۴ درصد افزایش در مقایسه با تیمار شاهد). وضعیت کاملاً معکوسی برای وزن خشک بوته مشاهده شد که حکایت از اثر منفی آلودگی کادمیوم بر تولید زیست‌توده است (جدول ۶). آثار منفی آلودگی کادمیوم بر رشد و عملکرد گیاهان به ایجاد اختلال در

اندازه‌گیری شد که اختلاف معنی‌داری با یکدیگر نداشتند؛ به‌طور کلی این‌گونه برداشت می‌شود که گیاه در پاسخ به سطوح بالای آلودگی کادمیوم اقدام به افزایش سطح SOD و آنتوسیانین می‌کند که به نوعی مکانیسمی دفاعی برای تعدیل آثار تنش محیطی محسوب می‌شود که با نتایج حسن‌الزمان و همکاران (۲۰۲۰) مطابقت دارد.

جوانه‌زنی، رشد ریشه و اندام هوایی، فتوسنتز، تقسیم سلولی و تعرق گیاه و ایجاد اختلال در جذب عناصر غذایی ضروری مورد نیاز گیاهان مربوط می‌شود که در سطوح پیشرفته آلودگی می‌تواند مرگ گیاه را به دنبال داشته باشد (لنگ و همکاران، ۲۰۲۱). بیشترین میزان آنتوسیانین به ترتیب در سطوح ۲ و ۵ میلی‌گرم در لیتر

جدول ۵- مقایسه اثر آب مغناطیس بر صفات مورد مطالعه گیاه وتیور

صفت	آب کاملاً مغناطیس	آب نیمه مغناطیس	آب غیرمغناطیس
SOD	۳۱۶/۸ <sup>a</sup>	۲۷۶/۴ <sup>b</sup>	۲۴۶/۱ <sup>c</sup>
آنتوسیانین	۴۰/۳ <sup>a</sup>	۴۱/۶ <sup>a</sup>	۴۱/۷ <sup>a</sup>
وزن خشک بوته	۱۲۷/۵ <sup>a</sup>	۱۲۹/۱ <sup>a</sup>	۱۳۳/۷ <sup>a</sup>

میانگین‌های موجود در هر ردیف که حداقل دارای یک حرف مشترک هستند، در سطح ۵ درصد آزمون LSD اختلاف معنی‌داری با هم ندارند.

جدول ۶- مقایسه اثر غلظت‌های مختلف کادمیوم بر صفات مورد مطالعه گیاه وتیور

صفت غلظت کادمیوم	SOD	آنتوسیانین	وزن خشک بوته
شاهد	۲۲۴/۶ <sup>b</sup>	۳۹/۳ <sup>b</sup>	۱۵۴/۶ <sup>a</sup>
کادمیوم ۰/۵	۲۲۹/۳ <sup>b</sup>	۴۰/۸ <sup>ab</sup>	۱۲۸/۱ <sup>b</sup>
کادمیوم ۱	۲۳۳/۰ <sup>b</sup>	۳۷/۰ <sup>b</sup>	۱۲۱/۷ <sup>bc</sup>
کادمیوم ۲	۴۳۲/۳ <sup>a</sup>	۴۷/۵ <sup>a</sup>	۱۱۴/۶ <sup>c</sup>

میانگین‌های موجود در هر ستون که حداقل دارای یک حرف مشترک هستند، در سطح ۵ درصد آزمون LSD اختلاف معنی‌داری با هم ندارند.

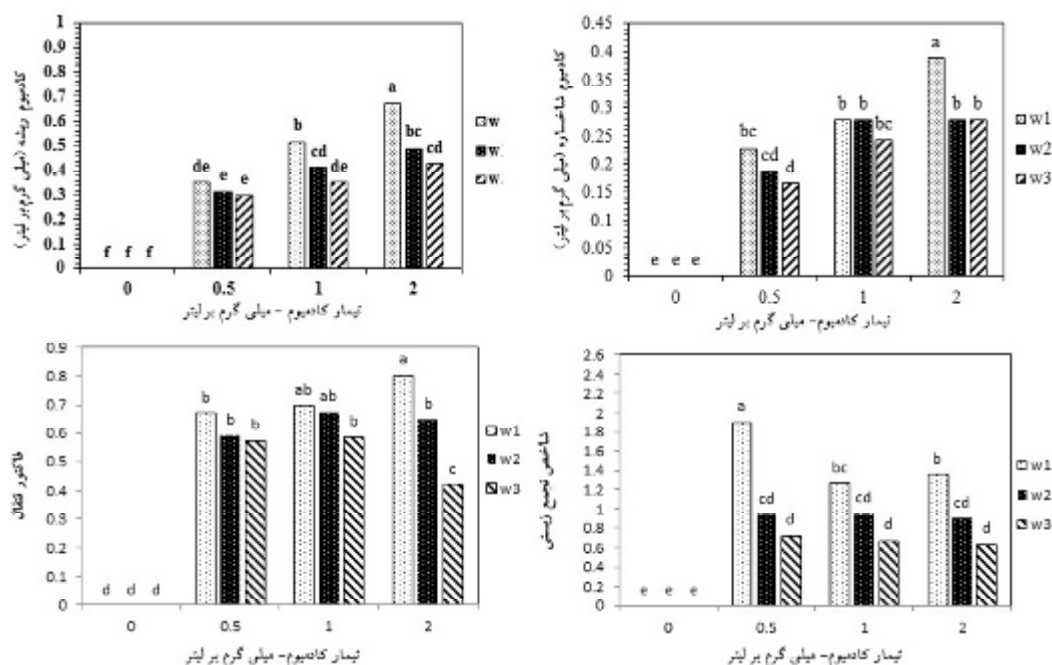
کادمیوم به اندازه‌ای بود که در مقایسه با تیمار شاهد، حدود ۲۴ درصد افزایش غلظت کادمیوم در برگ اندازه‌گیری شد. اثرگذاری بر فعل و انفعالات متابولیسمی، پاسخ‌های تعرقی و سیستم‌های آنتی‌اکسیدانی گیاه در شرایط بروز تنش (در اینجا آلودگی کادمیوم)، از عوامل اثرگذار بر افزایش مقاومت گیاه و جذب عناصر در شرایط حضور میدان مغناطیسی گزارش شده است (رزمجو و علینیان، ۲۰۱۷؛ سورندران و همکاران، ۲۰۱۶).

استفاده از آب مغناطیس اثر معنی‌داری بر شاخص تجمع زیستی و فاکتور انتقال کادمیوم از ریشه به اندام هوایی داشت. بیشترین فاکتور انتقال کادمیوم به تیمار آب کاملاً مغناطیس در سطح آلودگی ۲ میلی‌گرم کادمیوم در لیتر اختصاص داشت که با کاهش سطح آلودگی کادمیوم، میزان این فاکتور نیز کاهش نشان داد. بیشترین شاخص تجمع زیستی در تیمار آب کاملاً مغناطیس و سطح غلظتی ۰/۵ میلی‌گرم کادمیوم در لیتر آب آبیاری اتفاق افتاد که دارای اختلاف معنی‌داری با سایر تیمارها بود و با افزایش سطح آلودگی کادمیوم از ۰/۵ به ۲ میلی‌گرم در لیتر، شاخص تجمع زیستی در سطوح مختلف آب

وضعیت برداشت، انباشت و انتقال کادمیوم در بافت‌های گیاهی وتیور نیز به‌طور معنی‌داری تحت‌تأثیر تیمارهای اعمال‌شده قرار گرفت (شکل ۱). با افزایش غلظت کادمیوم در کنار استفاده از آب مغناطیس به‌منظور آبیاری، میزان تجمع کادمیوم هم در ریشه و هم در اندام هوایی به‌طور معنی‌داری افزایش یافت. به‌طوری‌که بیشترین انباشت کادمیوم، هم در ریشه و هم در اندام هوایی به کاربرد آب کاملاً مغناطیس به‌همراه سطح غلظتی ۲ میلی‌گرم کادمیوم در لیتر اختصاص داشت و با کاهش سطح آلودگی کادمیوم در سطوح مختلف آب آبیاری، این میزان انباشت در ریشه و اندام هوایی کاهش یافت (شکل ۱). اینکه گیاه جذب انتخابی نداشته و با افزایش غلظت عناصر شامل ضروری و غیرضروری در محیط ریشه، میزان جذب و انباشت آن نیز در بافت‌های گیاهی افزایش پیدا می‌کند، امری کاملاً بدیهی در علم تغذیه گیاهی است. با این‌وجود، نکته قابل‌توجه اثر میدان مغناطیسی در افزایش قابلیت گیاه در جذب عناصر است که در مطالعه اخیر توسط لیو و همکاران (۲۰۱۹) گزارش شده است. اثر میدان مغناطیسی در افزایش قابلیت گیاه *N. caerulea* در جذب

الکتریکی بیولوژیکی طبیعی که در گیاهان مانع مهاجرت یون‌ها است را خنثی می‌کند (لیو و همکاران، ۲۰۱۹). ضمن اینکه باید توجه داشت که اثر میدان‌های مغناطیسی و آب مغناطیس در افزایش قابلیت گیاهان در برداشت فلزات سنگین، به رقم و گونه گیاهی وابستگی معنی‌داری دارد (میشرا و همکاران، ۲۰۱۷).

مغناطیس از روند کاهشی تبعیت می‌کرد (شکل ۱). اثرگذاری آب مغناطیس بر افزایش فاکتور انتقال کادمیوم از ریشه به اندام هوایی و نیز شاخص تجمع زیستی کادمیوم به این یافته مهم اشاره دارد که میدان‌های مغناطیسی نه تنها انرژی لازم برای عبور کادمیوم از موانع بین شاخه‌ها و برگ‌ها را فراهم می‌کنند، بلکه میدان



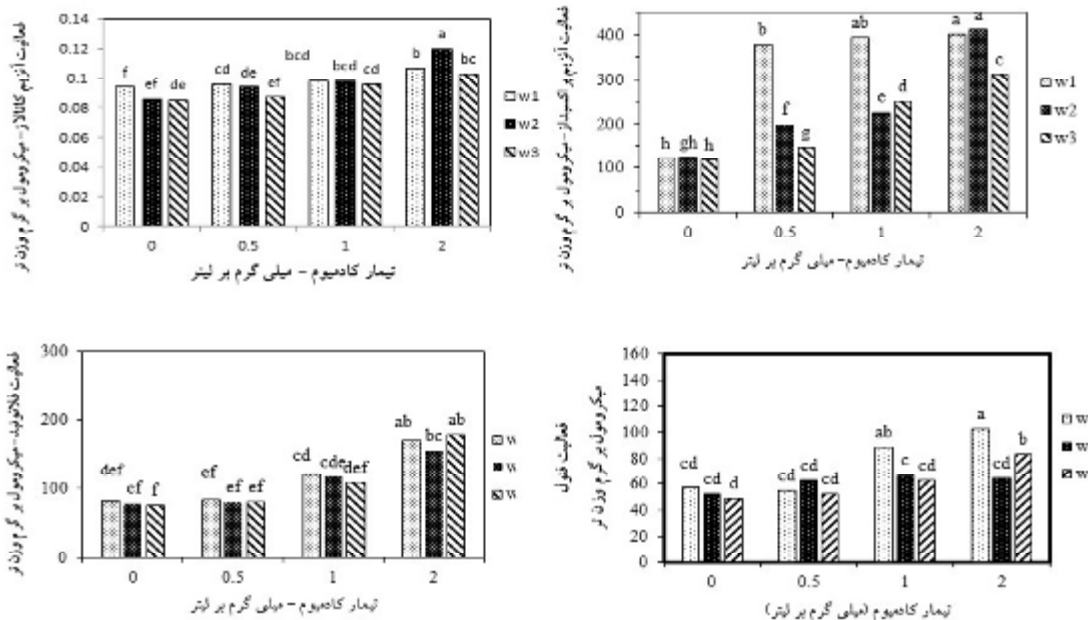
شکل ۱- اثر متقابل سطوح کادمیوم و آب مغناطیس بر غلظت، فاکتور انتقال و شاخص تجمع زیستی کادمیوم  
W1: آب کاملاً مغناطیس؛ W2: آب نیمه مغناطیس؛ W3: آب بدون مغناطیس

افتاد که دارای اختلاف معنی‌داری با سایر تیمارها بود ( $P < 0.05$ ). با کاهش سطح آلودگی کادمیوم، فعالیت CAT در سطوح مختلف آب آبیاری از روندی تقریباً نزولی تبعیت می‌کرد (شکل ۲) که با نتایج گائو و همکاران (۲۰۱۹) و کین و همکاران (۲۰۱۸) مبنی بر افزایش فعالیت POD و SOD در سطوح بالای آلودگی کادمیوم مطابقت دارد. وضعیت تقریباً مشابهی برای فعالیت آنتی‌اکسیدان‌های غیرآنزیمی اتفاق افتاد. با افزایش سطح آلودگی کادمیوم، فعالیت فلاونوئید و فنول نیز در سطوح مختلف آب آبیاری افزایش یافت. به نحوی که به طور میانگین، اثر آبیاری با آب کاملاً مغناطیس بر میزان فعالیت فلاونوئید و فنول در مقایسه با تیمارهای آب نیمه مغناطیس و غیرمغناطیس بیشتر بود (شکل ۲). قناتی و همکاران (۲۰۱۵) گزارش کردند که قابلیت گیاه در

فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی و آنتی‌اکسیدان‌های غیرآنزیمی نیز در سطوح مختلف آب آبیاری با افزایش سطح آلودگی کادمیوم از روند تقریباً صعودی تبعیت می‌کرد (شکل ۲). بیشترین فعالیت آنزیم پروکسیداز (POD) در سطح ۲ میلی‌گرم در لیتر کادمیوم و در شرایط آبیاری با آب کاملاً مغناطیس و آب نیمه مغناطیس اتفاق افتاد که با سطح ۱ میلی‌گرم در لیتر کادمیوم و در شرایط آبیاری با آب کاملاً مغناطیس فاقد اختلاف معنی‌داری بود. بررسی‌ها نشان داده که فعالیت آنزیم POD به شدت توسط کادمیوم در ریشه‌ها، ساقه‌ها و برگ‌ها افزایش می‌یابد که نشان می‌دهد POD نقشی اساسی در حذف گونه‌های اکسیژن واکنش‌پذیر دارد (عباس و همکاران، ۲۰۱۷). بیشترین فعالیت CAT نیز در سطح ۲ میلی‌گرم در لیتر کادمیوم و در شرایط آبیاری با آب نیمه مغناطیس اتفاق

در شرایط رویارویی با آلودگی کادمیوم اقدام به بروز یک سری پاسخ‌های بیوشیمیایی نظیر تغییر در میزان فعالیت آنتی‌اکسیدان‌های آنزیمی و غیر آنزیمی می‌کند که استفاده از آب مغناطیس با تشدید این فعالیت‌های آنتی‌اکسیدانی گیاه را در مقابله با بروز آثار تنش یاری می‌کند.

جذب بیشتر عناصر غذایی در شرایط آبیاری با آب مغناطیس افزایش می‌یابد؛ زیرا آب مغناطیس سنتز پلی‌فنل‌ها، به‌ویژه آنتوسیانین و فلاونوئیدها را در گیاه تسریع می‌کند و این اثری مثبت بر ارتقای سلامتی، رشد و عملکرد گیاهان در حضور میدان مغناطیسی است. به‌طور کلی، داده‌های اندازه‌گیری شده نشان داد که گیاهان



1

شکل ۲- اثر متقابل سطوح کادمیوم و آب مغناطیس بر فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی و آنتی‌اکسیدان‌های غیر آنزیمی گیاه وتیور W1: آب کاملاً مغناطیس؛ W2: آب نیمه‌مغناطیس؛ W3: آب بدون مغناطیس

به‌دست‌آمده از این تحقیق، انجام مطالعات بیشتر در سطوح بیشتر آلودگی، سایر فلزات سنگین و گیاهان مختلف پیشنهاد می‌شود.

### منابع

- موسوی س. م. و احمدآبادی ز. ۱۳۹۲. مقایسه پتانسیل لجن فاضلاب با کمپوست زباله شهری از نظر غنی‌کردن خاک با برخی عناصر ریزمغذی به زراعی کشاورزی (مجله کشاورزی پردیس ابوریحان). ۱۵(۳): ۵۳-۶۳.
- موسوی س. م. بهمنیار م. ع. و پیردشتی ه. ا. ۱۳۹۰. وضعیت نیکل و کروم در خاک و گیاه برنج تحت تیمار با ورمی کمپوست. مجله الکترونیک مدیریت خاک و تولید پایدار. ۱(۱): ۴۳-۶۲.
- Abbas G. Saqib M. Akhtar J. and Murtaza G. 2017. Physiological and biochemical

### نتیجه‌گیری

نتایج به‌دست‌آمده از این مطالعه نشان داد که استفاده از آب مغناطیس برای افزایش مقاومت گیاهان به تنش آلودگی کادمیوم می‌تواند مفید واقع شود. گیاه وتیور در شرایط رویارویی با افزایش سطح آلودگی کادمیوم، اقدام به بروز پاسخ‌های رشدی و آنتی‌اکسیدانی می‌کند که گیاهان برای مقابله با آثار نامطلوب محیطی محسوب می‌شود. درمقابل، استفاده از تکنیک آب مغناطیس در آبیاری گیاهان در شرایط آلودگی کادمیوم می‌تواند ضمن اثرگذاری معنی‌دار بر نوع پاسخ‌های گیاهی، به گیاه در تحمل تنش‌های محیطی (در اینجا آلودگی کادمیوم) کمک کند. استفاده از آب مغناطیس اثر معنی‌داری بر شاخص تجمع زیستی و فاکتور انتقال کادمیوم از ریشه به اندام هوایی داشت. باین‌وجود، برای تأیید نتایج



- oxygen species and antioxidant defense in plants under abiotic stress: revisiting the crucial role of a universal defense regulator. *Antioxidants*. 9(8): 681.
- 15) Jeelani N. Yang W. Xu L. Qiao Y. An S. and Leng X. 2017. Phytoremediation potential of *Acorus calamus* in soils co-contaminated with cadmium and polycyclic aromatic hydrocarbons. *Scientific reports*. 7(1): 1-9.
  - 16) Klute A. 1986. *Methods of soil analysis. Part I. Physical and mineralogical methods.* Soil Science Society of America, Inc. Publisher, Madison, WI.
  - 17) Krizek D. T. Kramer G. F. Upadhyaya A. and Mirecki R. M. 1993. UV-B response of cucumber seedlings grown under metal halide and high-pressure sodium/deluxe lamps. *Physiologia Plantarum*. 88(2): 350-358.
  - 18) Leng Y. Li Y. Ma Y. H. He L. F. and Li S. W. 2021. Abscisic acid modulates differential physiological and biochemical responses of roots, stems, and leaves in mung bean seedlings to cadmium stress. *Environmental Science Pollution Research*. 28(5): 6030-6043.
  - 19) Lindsay W. L. and Norvell W. A. 1978. Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese, and copper. *Soil science society of America journal*. 42(3): 421-428.
  - 20) Luo J. He W. Yang D. Wu J. and Gu X. S. 2019. Magnetic field enhance decontamination efficiency of *Noccaea caerulescens* and reduce leaching of non-hyperaccumulated metals. *Journal of hazardous materials*. 368: 141-148.
  - 21) Mishra S. Mishra A. and Küpper H. 2017. Protein biochemistry and expression regulation of cadmium/zinc pumping ATPases in the hyperaccumulator plants *Arabidopsis halleri* and *Noccaea caerulescens*. *Frontiers in plant science*. 8: 835.
  - 22) Moshiri F. Ebrahimi H. Ardakani M. R. Rejali F. and Mousavi S. M. 2019. Biogeochemical distribution of Pb and Zn forms in two calcareous soils affected by mycorrhizal symbiosis and Alfalfa rhizosphere. *Ecotoxicology and environmental safety*. 179: 241-248.
  - 23) Mousavi S. M. 2022. Silicon and nano-silicon mediated heavy metal stress tolerance in plants Silicon and Nano-silicon in Environmental Stress Management and Crop Quality Improvement. pp. 181-191. Elsevier.
  - 24) Mousavi S. M. Bahmanyar M. and Pirdashti H. 2011. Phytoextraction of nickel and chrome in paddy soil amended with characterization of *Acacia stenophylla* and *Acacia albida* exposed to salinity under hydroponic conditions. *Canadian Journal of Forest Research*. 47(9): 1293-1301.
  - 4) Abdollahi F. Amiri H. Niknam V. Ghanati F. and Mahdigholi K. 2019. Effects of static magnetic fields on the antioxidant system of almond seeds. *Russian Journal of Plant Physiology*. 66(2): 299-307.
  - 5) Abdolmaleki P. Ghanati F. Sahebamei H. and Sarvestani A. S. 2007. Peroxidase activity, lignification and promotion of cell death in tobacco cells exposed to static magnetic field. *The Environmentalist*. 27(4): 435-440.
  - 6) Basirat M. Mousavi S. M. Abbaszadeh S. Ebrahimi M. and Zarebanadkouki M. 2019. The rhizosphere: a potential root trait helping plants to tolerate drought stress. *Plant and Soil*. 445(1): 565-575.
  - 7) Bremner J.M. 1996. Nitrogen-total. *Methods of soil analysis: Part 3 Chemical methods*. 5: 1085-1121.
  - 8) Gee G.W. and Or D. 2002. Particle-size analysis. *Methods of soil analysis. Part 2.4* 4(598): 255-293.
  - 9) Ghanati F. Mohamadalkhani S. Soleimani M. Afzalzadeh R. and Hajnorouzi A. 2015. Change of growth pattern, metabolism, and quality and quantity of maize plants after irrigation with magnetically treated water. *Electromagnetic biology medicine*. 34(3): 211-215.
  - 10) Gravand F. Rahnavard A. and Pour G. M. 2021. Investigation of Vetiver Grass Capability in Phytoremediation of Contaminated Soils with Heavy Metals (Pb, Cd, Mn, and Ni). *Soil Sediment Contamination: An International Journal*. 30(2): 163-186.
  - 11) Grewal H. S. and Maheshwari B. L. 2011. Magnetic treatment of irrigation water and snow pea and chickpea seeds enhances early growth and nutrient contents of seedlings. *Bioelectromagnetics*. 32(1): 58-65.
  - 12) Guo J. Qin S. Rengel Z. Gao W. Nie Z. Liu H. Li C. and Zhao P. 2019. Cadmium stress increases antioxidant enzyme activities and decreases endogenous hormone concentrations more in Cd-tolerant than Cd-sensitive wheat varieties. *Ecotoxicology environmental safety*. 172: 380-387.
  - 13) Hara M. Oki K. Hoshino K. and Kuboi T. 2003. Enhancement of anthocyanin biosynthesis by sugar in radish (*Raphanus sativus*) hypocotyl. *Plant Science*. 164(2): 259-265.
  - 14) Hasanuzzaman M. Bhuyan M. Zulfiqar F. Raza A. Mohsin S.M. Mahmud J.A. Fujita M. and Fotopoulos V. 2020. Reactive

- biochar: an updated analysis. Archives of Agronomy and Soil Science. 1-26.
- 34) Olsen S. R. 1954. Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate: US Department of Agriculture.
- 35) Page A. L. 1982. Methods of Soil Analysis, Part 2-Chemical and Microbiological Properties. . Soil Science Society of America.
- 36) Pidatala V. R. Li K. Sarkar D. Wusirika R. and Datta R. 2018. Comparative metabolic profiling of vetiver (*Chrysopogon zizanioides*) and maize (*Zea mays*) under lead stress. Chemosphere. 193: 903-911.
- 37) Qin S. Liu H. Nie Z. Gao W. Li C. Lin Y. and Zhao P. 2018. AsA–GSH cycle and antioxidant enzymes play important roles in Cd tolerance of wheat. Bulletin of environmental contamination toxicology. 101(5): 684-690.
- 38) Razmjoo J. and Alinian S. 2017. Influence of magnetopriming on germination, growth, physiology, oil and essential contents of cumin (*Cuminum cyminum* L.). Electromagnetic biology and medicine. 36(4): 325-329.
- 39) Sahebamei H. Abdolmaleki P. and Ghanati F. 2007. Effects of magnetic field on the antioxidant enzyme activities of suspension-cultured tobacco cells. Bioelectromagnetics: Journal of the Bioelectromagnetics Society, The Society for Physical Regulation in Biology Medicine, The European Bioelectromagnetics Association. 28(1): 42-47.
- 40) Singleton V. L. 1999. Lamuela-Raventos: Analysis of Total Phenoles and Other Oxidation Substares and Antioxidants by Means of Folin-Ciocalteu Reagent. Methods in enzymology. 299: 152.
- 41) Siyar R. Ardejani F. D. Farahbakhsh M. Norouzi P. Yavarzadeh M. and Maghsoudy S. 2020. Potential of Vetiver grass for the phytoremediation of a real multi-contaminated soil, assisted by electrokinetic. Chemosphere. 246: 125802.
- 42) Sparks D. L. Page A. L. Helmke P. A. and Loeppert R. H. 2020. Methods of soil analysis, part 3: Chemical methods (Vol. 14): John Wiley & Sons.
- 43) Surendran U. Sandeep O. and Joseph E. 2016. The impacts of magnetic treatment of irrigation water on plant, water and soil characteristics. Agricultural Water Management. 178: 21-29.
- 44) Tang L. Hamid Y. Zehra A. Sahito Z. A. He Z. Hussain B. Gurajala H. K. and Yang X. 2019. Characterization of fava bean (*Vicia faba* L.) genotypes for phytoremediation of municipal solid waste and sewage sludge. Journal of Environmental Science and Engineering. 5(5).
- 25) Mousavi S. M. Bahmanyar M. A. and Pirdashti H. 2010a. Lead and cadmium availability and uptake by rice plant in response to different biosolids and inorganic fertilizers. American Journal of Agricultural and Biological Sciences. 5(1): 25-31.
- 26) Mousavi S. M. Bahmanyar M. A. and Pirdashti H. 2013. Phytoavailability of some micronutrients (Zn and Cu), heavy metals (Pb, Cd), and yield of rice affected by sewage sludge perennial application. Communications in soil science plant analysis. 44(22): 3246-3258.
- 27) Mousavi S. M. Bahmanyar M. A. Pirdashti H. and Gilani S. S. 2010b. Trace metals distribution and uptake in soil and rice grown on a 3-year vermicompost amended soil. African Journal of Biotechnology. 9(25): 3780-3785.
- 28) Mousavi S.M. Brodie G. Payghamzadeh K. Raiesi T. and Kumar A. 2022a. Lead (Pb) bioavailability in the environment, its exposure and effect. Journal of Advances in Environmental Health Research. 10(1).
- 29) Mousavi S. M. Moshiri F. and Moradi S. 2018a. Mobility of heavy metals in sandy soil after application of composts produced from maize straw, sewage sludge and biochar: Discussion of Gondek et al. (2018). Journal of environmental management. 222: 132-134.
- 30) Mousavi S. M. Motesharezadeh B. Hosseini H. M. Alikhani H. and Zolfaghari A. A. 2018b. Geochemical fractions and phytoavailability of zinc in a contaminated calcareous soil affected by biotic and abiotic amendments. Environmental geochemistry health. 40(4): 1221-1235.
- 31) Mousavi S. M. Motesharezadeh B. Hosseini H. M. Alikhani H. and Zolfaghari A. A. 2018c. Root-induced changes of Zn and Pb dynamics in the rhizosphere of sunflower with different plant growth promoting treatments in a heavily contaminated soil. Ecotoxicology and environmental safety. 147: 206-216.
- 32) Mousavi S. M. and Nasrabadi M. 2018. Discussion of Remediation of Heavy Metals Contaminated Silty Clay Loam Soil by Column Extraction with Ethylenediaminetetraacetic Acid and Nitro Triacetic Acid by Dariush Naghipour, Jalil Jaafari, Seyed Davoud Ashrafi, and Amir Hossein Mahvi. Journal of Environmental Engineering. 144(5): 07018003.
- 33) Mousavi S. M. Srivastava A. and Cheraghi M. 2022b. Soil health and crop response of

- cadmium and lead co-contaminated soils coupled with agro-production. *Ecotoxicology environmental safety*. 171: 190-198.
- 45) Walkley A. and Black I. A. 1934. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil science*. 37(1): 29-38.
- 46) Yan A. Wang Y. Tan S. N. Yusof M. L. M. Ghosh S. and Chen Z. 2020. Phytoremediation: a promising approach for revegetation of heavy metal-polluted land. *Frontiers in Plant Science* 11.

