مجله ایمنی زیستی
دوره ۱۳، شماره ۲، تابستان ۱۳۹۹

تأثیر تنش فلزات سنگین (کادمیوم) بر ویژگی‌های مورفولوژیکی و فیزیولوژیکی گیاهان دارویی مختلف

مینا امانی[1*] و سعیده علیزاده سالطه[2]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد گروه باغبانی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران
۲- استادیار گروه علوم باغبانی، گیاهان دارویی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

mina76amani@yahoo.com

چکیده

گیاهان به‌طور مداوم با شرایط محیطی نامطلوب مانند تنش فلزات سنگین مواجه هستند. به‌تازگی کادمیوم به‌عنوان یکی از بهترین آلاینده‌های زیست‌محیطی مطرح است. در میان فلزات سنگین، کادمیوم به‌عنوان یک فلز سمی و غیرضروری، به سرعت از طریق ریشه‌ها جذب و در بافت‌های مختلف گیاهی تجمع می‌یابد که وجود چنین شرایطی مانع رشد گیاهان در سرتاسر دنیا است. علایم اصلی سمیت کادمیوم برای گیاهان کلروز و بازداری از رشد است. گیاهان راهکارهای مختلفی برای خنثی‌کردن اثر بازدارندگی کادمیوم دارند که شامل اتصالات دیواره سلولی، کلاته شدن با فیتوکلاتین‌ها، تجمع کادمیوم در واکوئل و افزایش کرک‌های برگ است. باوجود سمیت گیاهی بالای آن، کادمیوم توسط ریشه‌های گیاهان جذب و به بافت‌های بالای سطح خاک منتقل و به این‌صورت وارد زنجیره غذایی می‌شود که به‌عنوان یک تهدید برای سلامت انسان است. این مقاله براساس مطالعات قبلی در خصوص مکانیسم‌های مقابله شامل تحمل گیاهان به فلزات سنگین در شرایط محیطی است.

واژه‌های کلیدی: فلزات سنگین، گیاهان دارویی، کادمیوم، آلاینده‌های زیست‌محیطی، میکروارگانیسم‌ها.

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-25]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1397.11.4.4.6]

مقدمه

بررسی‌های سازمان بهداشت جهانی نشان داده است، در سال‌های اخیر استفاده از داروهای گیاهی به‌طور چشمگیری در سراسر جهان افزایش یافته است. با گسترش محبوبیت و تجارت گیاهان دارویی، سلامت، امنیت و کیفیت مواد خام گیاهان دارویی و محصولات فرآوری‌شده آنها به یک نگرانی عمده سازمان‌های جهانی تبدیل شده است. آلودگی‌های زیست‌محیطی، از جمله فلزات سنگین یکی از معیارهای کنترل کیفیت گیاهان دارویی و محصولات فرآوری‌شده آنها هستند. تحقیقات مختلف نشان داده است، غلظت فلزات سنگین در گیاهان دارویی به محیط رشد آنها، نوع گونه گیاهی، شرایط خشک کردن، ذخیره‌سازی، حمل و نقل و فرآوری آنها بستگی دارد. موارد گوناگونی از آلودگی به فلزات سنگین در گیاهان دارویی و پتانسیل بالای این گیاهان در جذب و انتقال فلزات سنگین به بخش‌های قابل استفاده توسط محققان مختلف گزارش شده است. همچنین مشخص شده است که آلودگی گیاهان دارویی و فرآورده‌های آنها با فلزات سنگین ممکن است در طول کشت، فرآوری، یا افزودن عمدی به فرآورده‌های گیاهی در طب سنتی هند و چین با ادعای خواص درمانی آنها انجام شود. با توجه به افزایش روزافزون استفاده از فرآورده‌های گیاهی در کشور، تحقیقات کافی در مورد آلودگی‌های شیمیایی از جمله فلزات سنگین در این گیاهان و فرآورده‌های آنها انجام نشده است. به‌طور مکرر عوارض جانبی جدی برای بیمارانی که از داروهای گیاهی استفاده کرده‌اند، گزارش شده است که عمده این عوارض مربوط به وجود فلزات سنگین در این داروها بوده است. بنابراین باید مراقب بود که گیاهان دارویی آلوده، به زنجیره غذایی انسان وارد نشوند. با توجه به افزایش استفاده از کودهای شیمیایی، سموم و آفت‌کش‌های مختلف برای افزایش عملکرد محصولات کشاورزی از یک طرف و توسعه شهرنشینی و فعالیت‌های صنعتی و همچنین مکان برداشت نامعلوم و آلوده گیاهان دارویی در ایران، عدم نظارت و نبود مقررات ملی برای جمع‌آوری گیاهان وحشی و احتمال جمع‌آوری از مکان‌های آلوده به فلزات

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-25]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1397.11.4.4.6]

سنگین، ممکن است در مواردی این عناصر در گیاهان دارویی انباشته شوند. اقدامات نظارتی کافی و کنترل کیفیت گیاهان دارویی و محصولات فرآوری‌شده آنها در کشور باید انجام شود (۷).

امروزه با کمک علوم بیوشیمی و ژنتیک مولکولی پیشرفت‌های زیادی در بررسی جزئیات مکانیسم‌های مقاومت به آلاینده‌ها در گیاهان و اساس مولکولی و ژنتیکی آنها انجام شده است. مهندسان ژنتیک با تولید گیاهان تراریخته از طریق انتقال ژن‌های عامل مقاومت به گیاهان و یا بیش‌بیانی آنها، موجب توسعه گیاه‌پالایی اقتصادی‌تر و کارآمدتر می‌شوند.

تنش فلزات سنگین

همزمان با پیشرفت و توسعه صنایع، استخراج معادن، ذوب فلزات و مصرف کودهای شیمیایی حاوی عناصر سنگین، آلودگی خاک به فلزات سنگین به یکی از مشکلات زیست محیطی عمده در جوامع بشری تبدیل شده است. تجمع عناصر سنگین مانند کادمیوم، نیکل و کروم در خاک، به‌ویژه در زمین‌های کشاورزی، امری تدریجی بوده و غلظت عناصر می‌تواند به سطحی برسد که امنیت غذایی بشر را تهدید کند. یون‌های فلزات سنگین زمانی که در مقادیر زیاد در محیط وجود داشته باشند، به وسیله ریشه گیاهان جذب و به اندام هوایی منتقل می‌شوند که این امر موجب اختلال در سوخت و ساز گیاه و کاهش رشد می‌شود. علاوه‌بر این، وجود مقادیر زیاد فلزات سنگین در خاک، فعالیت‌های زیستی و حاصلخیزی خاک را کاهش داده و در نتیجه باعث کاهش عملکرد و کیفیت محصولات و در مقابل افزایش غلظت این عناصر در تولیدات کشاورزی می‌شود که برای سلامتی انسان، دام یا سایر مصرف‌کننده‌ها خطرناک است. در بین فلزات سنگین، کادمیوم دارای اهمیت ویژه‌ای است، زیرا به راحتی توسط گیاه جذب شده و سمیت آن ۲ تا ۲۰ برابر سایر فلزات سنگین برای گیاه است. در زمین‌های کشاورزی، کادمیوم موجود در کودهای فسفری یکی از منابع عمده آلودگی خاک با این عنصر سمی است (۱۰).

آلودگی در گیاهان دارویی

بررسی‌های سازمان بهداشت جهانی نشان داده است، در سال‌های اخیر استفاده از

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-25]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1397.11.4.4.6]

داروهای گیاهی به‌طور چشمگیری در سراسر جهان افزایش یافته است. با گسترش محبوبیت و تجارت گیاهان دارویی، سلامت، امنیت و کیفیت مواد خام گیاهان دارویی و محصولات فرآوری‌شده آنها به یک نگرانی عمده سازمان‌های جهانی تبدیل شده است. آلودگی‌های زیست‌محیطی، از جمله فلزات سنگین یکی از معیارهای کنترل کیفیت گیاهان دارویی و محصولات فرآوری‌شده آنها هستند. تحقیقات مختلف نشان داده است، غلظت فلزات سنگین در گیاهان دارویی به محیط رشد آنها، نوع گونه گیاهی، شرایط خشک کردن، ذخیره‌سازی، حمل و نقل و فرآوری آنها بستگی دارد. موارد گوناگونی از آلودگی به فلزات سنگین در گیاهان دارویی و پتانسیل بالای این گیاهان در جذب و انتقال فلزات سنگین به بخش‌های قابل استفاده به وسیله محققان مختلف گزارش شده است. همچنین مشخص شده است که آلودگی گیاهان دارویی و فرآورده‌های آنها با فلزات سنگین ممکن است در طول کشت، فرآوری، یا افزودن عمدی به فرآورده‌های گیاهی در طب سنتی هند و چین با ادعای خواص درمانی آنها انجام شود. با توجه به افزایش روزافزون استفاده از فرآورده‌های گیاهی در کشور، تحقیقات کافی در مورد آلودگی‌های شیمیایی از جمله فلزات سنگین در این گیاهان و فرآورده‌های آنها انجام نشده است. به‌طور مکرر گزارشاتی مبنی بر ایجاد عوارض جانبی جدی برای بیمارانی که از داروهای گیاهی استفاده کرده‌اند، وجود دارد که عمده این عوارض مربوط به وجود فلزات سنگین در این داروها بوده است. بنابراین باید مراقب بود که گیاهان دارویی آلوده، به زنجیره غذایی انسان وارد نشوند. با توجه به افزایش استفاده از کودهای شیمیایی، سموم و آفت کش‌های مختلف برای افزایش عملکرد محصولات کشاورزی از یک طرف و توسعه شهرنشینی و فعالیت‌های صنعتی و همچنین مکان برداشت نامعلوم و آلوده گیاهان دارویی در ایران، عدم نظارت و نبود مقررات ملی برای جمع‌آوری گیاهان وحشی و احتمال جمع‌آوری از مکان‌های آلوده به فلزات سنگین، ممکن است در مواردی این عناصر در گیاهان دارویی انباشته شوند. اقدامات نظارتی کافی و

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-25]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1397.11.4.4.6]

کنترل کیفیت گیاهان دارویی و محصولات فرآوری‌شده آنها در کشور باید انجام شود (۷).

مکانیسم سمیت فلزات سنگین

سمیت فلزات سنگین وابسته به اتصال آنها به لیگاندهای گوناگون است. در میان این لیگاندها در سیستم‌های بیولوژیک، گروه کربوکسیل، ایمیدازول، گروه سولفیدریل و آمین‌های آلیفاتیک با اهمیت هستند. اتصال فلزات سنگین به گروه‌های مانند گروه سولفیدریل در پروتئین‌ها، ممکن است منجر به تغییر شکل پروتئین‌ها و در نتیجه از دست دادن فعالیت در بیشتر آنزیم‌هایی شود که دربردارنده گروه‌های سولفیدریل در مرکز فعالشان هستند .به‌علاوه، اتصال فلزات به گروه‌های سولفیدریل که از لحاظ فیزیولوژیکی ترکیباتی فعال با وزن مولکولی کم هستند. همچنبن منجر به دخالت آنها در متابولیسم سلولی می‌شود. بنابراین اتصال به گروه‌های سولفیدریل به تنهایی ممکن است بیش از این اختلافات گوناگون متابولیسمی را افزایش می‌دهند. فلزات سنگین در پیوستگی به لیگاندهای دربرگیرنده اکسیژن، نیتروژن و سولفور متفاوت هستند و همچنین این اختلاف وابسته به ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی یون‌های فلزات سنگین است (۱۰).

تنش فلز سنگین کادمیوم

کادمیوم یک فلز آلاینده محیطی است که در طبیعت منتشر می‌شود. منابع مختلف شامل صنایع، فاضلاب شهری و مواد سوختی غلظت این آلاینده را افزایش می‌دهند. همچنین استفاده از کودهای شیمیایی، مخصوصاً کودهای فسفاته مقدار این عنصر را در خاک افزایش می‌دهد. کادمیوم اگرچه برای رشد گیاه ضروری نیست، اما این فلز به راحتی از طریق پوست ریشه جذب می‌شود و سپس از راه سیمپلاستی یا آپوپلاستی وارد بافت چوب می‌شود. در اغلب گونه‌های گیاهی کادمیوم در ریشه تجمع می‌یابد و مقدار کمی به برگ‌ها منتقل می‌شود. کادمیوم اغلب در واکوئل سلول‌های گیاهان عالی تجمع می‌یابد، همچنین تجمع کادمیوم در دیواره سلول و تیغه میانی بین آندودرم و دایره محیطیه نیز گزارش شده است. بررسی‌ها نشان دادند که کادمیوم بر تقسیم سلول‌ها، رشد کلی گیاه، تقسیم سلولی منطقه

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-25]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1397.11.4.4.6]

مریستمی و تنظیم رشد و نمو گیاهان اثر می‌گذارد. همچنین کادمیوم باعث کلروز و نکروز برگ‌ها نیز می‌شود. همچنین غلظت زیاد کادمیوم در محیط رشد، جذب آهن بوسیله گیاه را مختل می‌کند. سمیت کادمیوم ممکن است باعث کمبود فسفر یا بروز مشکلات مربوط به انتقال منگنز در داخل گیاه شود. به‌طور معمول کادمیوم در جذب و انتقال عناصری مانند کلسیم، منیزیم، فسفر، پتاسیم و همچنین آب در گیاه دخالت دارد. کادمیوم بر فرآیندهای اصلی گیاهان نظیر فتوسنتز، تکثیر سلولی و جذب آب توسط ریشه‌های گیاه اثر می‌گذارد (۲۱).

اختلالات فیزیولوژیکی ناشی از تنش کادمیوم

حضور فلزات سنگین از جمله کادمیوم در گیاه باعث به وجود آمدن اختلالات فیزیولوژیکی به شرح زیر می‌شود: مراحل انجام انواع چرخه‌های فیزیولوژیکی در گیاهان به‌وسیله افزایش محتوی کادمیوم اطراف گیاه تحت تأثیر قرار می‌گیرد. حضور کادمیوم در سلول با تشکیل انواع ROS (ناشی از اثر مستقیم یا غیرمستقیم فلزات) منجر به آسیب شدید به ترکیبات سلولی می‌شود. کادمیوم با تأثیر روی کلروپلاست یا دستگاه فتوسنتزی از طریق تأثیر روی آنزیم‌ها به‌ویژه آنزیم‌هایی که غنی از گروه سولفیدریل هستند، باعث اختلال در فتوسنتز می‌شود. این فلز قادر به آسیب‌رساندن به هسته سلول و واکوئل یا حتی تخریب آنها است. این فلز می‌تواند با متورم ساختن و یا تشکیل حفرات در سطح اندامک‌های مختلف از جمله کلروپلاست و میتوکندری، به آنها آسیب برساند یا آنها را تخریب کند. همچنین فلز کادمیوم با دخالت در بیوسنتز کلروفیل و دخالت در فرآیندهای پراکسیداسیون لیپید در غشاهای فتوسنتزی باعث کاهش محتوی کلروفیل می‌شود و بوجود آورنده اختلالات در فعالیت آنزیم‌ها بخصوص آنزیم‌های دخیل در فتوسنتز است. همچنین باعث کاهش هدایت هیدرولیکی آب در ریشه، تداخل در جذب عناصر معدنی و ریزمغذی‌ها می‌شود. به‌عنوان مثال مقادیر بالای کادمیوم به‌دلیل ایجاد اختلالات متابولیسمی، تولید انواع اکسیژن واکنشگر را در سلول افزایش داده و منجر به وقوع تنش اکسیداتیو در گیاه می‌شود. کادمیوم بر فرآیندهای

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-25]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1397.11.4.4.6]

فیزیولوژیکی و متابولیکی گیاه مانند تنفس، فتوسنتز، روابط آبی گیاه و تبادلات گازی روزنه‌ها اثر منفی دارد. همچنین این عنصر در مسیر بیوسنتز کلروفیل، اجزای چرخه کالوین و واکنش‌های نوری فتوسنتز اختلال ایجاد می‌کند (۱۴).

اختلالات مورفولوژیکی ناشی از کادمیوم

اثرات مورفولوژیکی حاصل از فلز کادمیوم شامل پیچش برگی، کلروزه و نکروزه شدن برگ‌ها، قرمز و قهوه‌ای شدن حاشیه برگ‌ها، کاهش سطح برگ‌ها، کاهش ماده خشک کل، قهوه‌ای شدن ریشه‌ها و کاهش رشد گیاه می‌شود. بازدارندگی جوانه‌زنی از جمله اثرات شناخته‌شده کادمیوم است. بین بازدارندگی جوانه‌زنی بذر و غلظت فلز کادمیوم، رابطه همبستگی خطی وجود دارد. کاهش قدرت جوانه‌زنی ممکن است در ارتباط با اثرات منفی کادمیوم بر جذب و حرکت آب باشد (۱۸).

مکانیسم‌های دفاعی و سازگاری مورد استفاده گیاه در برابر سمیت فلزات سنگین از جمله کادمیوم

گیاهان جهت رشد در خاک‌های آلوده به فلز سنگین از سه راهکار استفاده می‌کنند، گونه‌های اجتناب‌کننده که غلظت عنصر در بخش هوایی، حتی در غلظت‌های بالای آن در خاک، در مقادیر پایین نگه داشته می شود. گونه‌های متحمل که میزان فلزات سنگین در گیاه با غلظت عناصر مذکور در خاک یکسان است و گونه‌های تجمع‌دهنده که قادر به تغلیظ فلز در بخش هوایی خود، بیش از غلظت عنصر در خاک هستند (۲۳). برخی از گیاهان در مقابل تنش کادمیوم قادر به تحمل بیش از حد ظرفیت اندامک‌ها و بافت خود هستند. این راهکار برای مقابله با سمیت کادمیوم شامل جذب و توزیع کادمیوم به‌عنوان بیش تجمع‌دهنده تعریف شده است (۱۹).

گیاهان دارای شبکه‌ای مرتبط به هم و پیچیده از راهکارهای دفاعی برای جلوگیری یا تحمل مسمومیت در برابر فلزات سنگین از جمله کادمیوم هستند. موانع فیزیکی اولین خط دفاعی گیاه در برابر فلزات سمی هستند. برخی از ساختارهای مورفولوژیکی مانند کوتیکول ضخیم، بافت‌های بیولوژیکی فعال مانند کرک‌ها، دیواره‌ی سلولی و همچنین همزیستی میکوریزایی می‌توانند به‌عنوان

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-25]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1397.11.4.4.6]

موانع زمانی‌که گیاه با تنش کادمیوم مواجه می‌شود، عمل کنند. برای مثال کرک‌ها به‌عنوان جایگاه ذخیره فلزات سنگین با هدف سم‌زدایی عمل می‌کنند یا با ترشح متابولیت‌های ثانویه مختلف برای خنثی‌سازی اثرات خطرناک فلزات سنگین وارد عمل می‌شوند (۱۶). از سوی دیگر، گاهی فلز کادمیوم بر موانع بیولوژیکی غلبه می‌کند و وارد بافت و سلول‌های گیاهی می‌شود، در این حال، گیاهان با فعال کردن چندین مکانیسم دفاعی سلولی اثرات نامطلوب فلز کادمیوم را کاهش می‌دهند یا خنثی می‌سازند. بیوسنتز مولکول‌های زیستی متنوع سلولی روش اصلی برای تحمل یا خنثی‌سازی مسمومیت با کادمیوم است. این پدیده شامل القای سنتز هزاران پروتئین با وزن مولکولی اندک است مانند نیکوتین آمین، پوترسین، اسپرمین، اسیدهای آلی، گلوتاتیون، فیتوکلاتین‌ها، ترشحات سلولی مانند فلاونوئیدها، ترکیبات فنلی، پروتون‌ها، پروتئین‌های شوک حرارتی و اسیدهای آمینه خاص، مانند پرولین، هیستیدین و هورمون‌هایی مانند سالیسیلیک اسید (SA)، جاسمونیک اسید و اتیلن است، این کلاته‌کننده‌ها به‌عنوان لیگاند به فلز متصل می‌شوند. در گیاهان بیش‌تجمع‌دهنده اثرات سمی تجمع بالای فلزات سنگین به حداقل می‌رسد که تحت تأثیر مکانیسم سم‌زدایی است. چنین ساز و کارهایی ممکن است به‌طور عمده براساس کلاته کردن و طبقه‌بندی کردن فلز در جایگاه‌های درون سلولی انجام شود (۱۲). برای جلوگیری از اتصال فلزات سنگین به پروتئین‌های فیزیولوژیکی مهم و همچنین به‌منظور تسهیل انتقال این فلزات در واکوئل است. مهمترین این کلاته‌کننده‌ها در انتقال کادمیوم از آوند چوبی نقش دارند. اتصال کادمیوم به کلاته‌کننده‌های فیتوکلاتین و گلوتاتیون از طریق تیول، که در هر دو کلاته‌کننده‌ها وجود دارند و انتقال سریع و فعال کادمیوم در چنین گیاهانی از آوند چوبی، که احتمالاً توسط تعرق تنظیم می‌شود، انجام می‌شود (۱۵).

با افزایش بارگذاری کادمیوم در آوند چوبی باعث انتقال کادمیوم از آوند چوبی به ساقه از طریق مسیر سیمپلاست می‌شود. پس از انتقال کادمیوم به ساقه برای افزایش جریان فلز در ساقه ذخیره‌سازی، سم‌زدایی

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-25]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1397.11.4.4.6]

و جداسازی فلزات سنگین، از جمله کادمیوم در ساقه راهکارهای کلیدی در گیاهان بیش تجمع‌دهنده است (۱۳). تنظیم‌کننده‌های مختلف رشد و دیگر مواد شیمیایی، در تولید مقاومت در برابر بسیاری از تنش‌ها در تعدادی از گیاهان نقش دارند. پاسخ سالیسیلیک اسید در برابر تنش کادمیوم، طول دوره رشد گیاه را زودتر کرد که از این طریق به گیاه در معرض تنش در جلوگیری از آسیب تجمع کادمیوم کمک کرده و می‌تواند نقش مؤثری در بیان پروتئین‌های خاص یا آنزیم‌های مربوط به دفاع در برابر تنش کادمیوم داشته باشد. بررسی برخی از مطالعات SA اثر محافظتی بر روی غشا از طریق افزایش سطح چربی کل، تغییر در ترکیب اسید چرب و متابولیسم چربی‌ها دارد (۱۹). کاربرد برون‌زای ABA باعث کاهش تعرق، کاهش محتوای کادمیوم و افزایش تحمل به کادمیوم در برخی از گونه‌های گیاهی می‌شود. جلوگیری از جذب کادمیوم توسط ریشه‌های گیاه می‌تواند یک راهکار مهم در به حداقل رساندن اثر سوء بیولوژیکی این عنصر باشد. زمانی‌که راهکارهای فوق قادر به مهار مسمومیت فلزات سنگین نباشند، تعادل سیستم‌های ردوکس سلولی در گیاهان بر هم می‌خورد که منجر به افزایش القای سنتز انواع اکسیژن واکنشگر می‌شود (۱۷). برای کاهش اثرات مضر چنین ترکیباتی، سلول‌های گیاهی مکانیسم دفاعی آنتی‌اکسیدان را در خود توسعه داده‌اند که از آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان می‌توان به سوپراکسید دیسموتاز، کاتالاز، آسکوربات پراکسیداز، گایاکول پراکسیداز و گلوتاتیون ردوکتاز و از آنتی‌اکسیدان‌های غیرآنزیمی به آسکوربات، گلوتاتیون، کاروتنوئیدها، آلکانوئیدها، توکوفرول، پرولین و ترکیبات فنلی (فلاونوئیدها، تانن و لیگنین) اشاره کرد که به‌عنوان سرکوبگرهای ROS عمل می‌کنند. سیستم آنتی‌اکسیدانی با حذف اکسیژن واکنشگر، ماکرومولکول‌های سلول از جمله پروتئین‌ها، لیپیدها و اسیدنوکلئیک‌ها را در برابر اثرات زیان‌آور آنها محافظت می‌کند. پاسخ‌های گوناگون گیاه به تنش کادمیوم، احتمالاً به سطح کادمیوم ذخیره‌شده و به غلظت گروه‌های تیولی موجود در گیاه بستگی دارد. تیول‌ها دارای خصوصیات آنتی‌اکسیدانی قوی

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-25]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1397.11.4.4.6]

هستند که می‌توانند تنش اکسیداتیو را بی‌اثر کنند و موجب کاهش اثر سمی کادمیوم در گیاه شود. همانطوری‌که اشاره شد، برخی از مولکول‌های دیگر در سم‌زدایی فلزات می‌توانند با نقش چندگانه بصورت آنتی‌اکسیدان، کلاته‌کننده و غیره عمل کنند. دخیل بودن هر یک از این مکانیسم‌ها و مولکول‌های زیست محیطی به گونه گیاه و سطح تحمل فلزی آنها، مرحله رشد گیاه و نوع فلز بستگی دارد (۲۲). جستجوی مولکول سیگنال که واسطه تحمل به تنش هستند گام مهمی در درک بهتر از چگونگی سازگاری گیاهان در شرایط تنش‌زا است. به‌طور کلی پاسخ گیاهان به فلز سنگین کادمیوم به شبکه‌ای از مکانیسم‌های فیزیولوژیکی و مولکولی وابسته است، این مکانیسم‌ها عبارتند از:

الف. اتصال به ترکیبات دیواره سلولی

ب. حرکت کادمیوم از سیتوپلاسم به بخش‌هایی نظیر واکوئل‌ها در داخل سلول

ج. اتصال یون‌های کادمیوم با مواد مختلف در داخل سلول

د. تجمع اسمولیت‌ها و القا برخی از آنتی اکسیدان‌های آنزیمی و غیرآنزیمی

و فعال‌سازی یا تغییر مسیرهای متابولیسم گیاهی برای عملکرد صحیح این مسیرها (۲۰).

تأثیر کادمیوم بر میزان قندهای محلول

بسیاری از شرایط تنش‌زای محیطی بر متابولیسم قندها و پخش مواد فتوسنتزی در گیاهان در حال رشد اثر می‌گذارند. افزایش میزان کربوهیدرات در گیاه نشان‌دهنده کاهش میزان آب در سلول‌ها است و کاهش میزان آب نیز عامل مهمی در کاهش رشد گیاه به‌شمار می‌رود. بسیاری از فلزات سنگین فعالیت پروتئین‌های کانالی آب را در گیاهان تغییر می‌دهند، روزنه‌های برگ را می‌بندند و در نتیجه جریان آب در گیاه را متوقف می‌سازند. در شرایط تنش، افزایش کربوهیدرات‌های محلول به حفظ متابولیسم پایه مطلوب کمک می‌کند.

در مطالعه بر روی گیاه دارویی *Eucalyptus occidentalis* مشاهده شد که با افزایش غلظت کادمیوم ابتدا بر میزان قندهای محلول اضافه، ولی در غلظت‌های بالاتر کاهش یافته است. وجود یون کادمیوم در سیتوسول سلول‌های برگ باعث افزایش فعالیت آنزیم‌های تجزیه‌کننده قندهای

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-25]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1397.11.4.4.6]

غیرمحلول و اسید اینورتاز و سوکروز سنتاز می‌شود. در نتیجه در غلظت‌های پایین کادمیوم بر مقدار قندهای محلول اضافه شده است، ولی علت کاهش در غلظت‌های بالاتر احتمالاً به دلیل کاهش فتوسنتز یا تحریک سرعت تنفس می‌شود (۶). اندازه گیری غلظت قندهای محلول گلوکز، مانوز و زایلوز نشان داد که میزان این قندها در سطوح بالاتر کادمیوم افزایش می‌یابد، ولی به دلیل حساسیت بیشتر مانوز و زایلوز به تنش کادمیوم افزایش آنها بیشتر از گلوکز بود. به نظر می‌رسد کادمیوم با کاهش انتقال آب به برگ‌ها و در نتیجه اختلال در سرعت تعرق برگ منجر به بروز تغییرات فراساختاری اندامک‌های سلول و تغییر در رفتار آنزیم‌های کلیدی چند مسیر متابولیسمی از جمله متابولیسم قند می‌شود و با کاهش انتقال آب به برگ‌ها و به دنبال تجمع کادمیوم در سلول‌ها، محتوی قندهای احیاکننده در گیاه افزایش می‌یابد. این پدیده احتمالاً مکانیسم سازشی گیاه برای حفظ پتانسیل اسمزی در شرایط سمیت با کادمیوم است. علاوه‌بر نقش قندها در تنظیم فشار اسمزی تصور می‌شود با افزایش قندهای حل‌شونده گیاه بتواند ذخیره کربوهیدراتی خود را برای حفظ متابولیسم پایه سلول در شرایط محیطی تحت تنش در حد مطلوب نگه دارد. در این تحقیق نیز کادمیوم باعث افزایش غلظت هر سه نوع قندهای محلول مورد بررسی شده است که نشان‌دهنده نوعی سازگاری و تعدیل اسمزی به‌عنوان یکی از مکانیسم‌های مقاومت در مقابل تنش است. در این آزمایش محلول‌پاشی اسید هیومیک تأثیر معنی‌داری بر میزان قندهای محلول داشت. کاربرد اسید هیومیک و اثر متقابل تنش کادمیوم و اسید هیومیک بر غلظت قندهای محلول گلوکز، مانوز و زایلوز معنی‌دار نبود (۱۱).

تأثیر کادمیوم بر میزان پرولین

زمانی‌که گیاهان در معرض تنش‌های غیرزیستی قرار می‌گیرند میزان پرولین آنها افزایش می‌یابد و ساختارهای سلولی و آنزیمی را در برابر فاکتورهای تنش‌زا حفاظت می‌کند. به نظر می‌رسد افزایش میزان پرولین در کاهش اثرات تنش نقش دارد. پرولین تحمل گیاهان به تنش را از طریق سازوکارهایی مانند تنظیم اسمزی،

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-25]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1397.11.4.4.6]

حفاظت آنزیم‌ها در برابر دناتوره شدن و تثبیت سنتز پروتئین، افزایش می‌دهد. پرولین یکی از ترکیبات مهم سیستم دفاعی گیاهان در شرایط تنش است و به مقدار زیادی در گیاهان عالی دیده می‌شود و به مقدار بسیار بیشتری از سایر آمینواسیدها در شرایط دارای تنش تجمع پیدا می‌کند. چهار دلیل برای افزایش تجمع پرولین در حین تنش پیشنهاد شده است که عبارتند از:

۱. تحریک سنتز آن از اسید گلوتامیک

۲. کاهش انتقال آن از طریق آوند آبکش

۳. جلوگیری از اکسیداسیون آن در طول تنش

۴. تخریب و اختلال در فرایند سنتز پروتئین.

در مطالعه‌ی شریعت و همکاران (۱۳۸۹) بر روی *E. occidentalis* مشاهده شد که در اثر افزایش غلظت کادمیوم میزان پرولین در برگ‌ها تا پنج برابر افزایش یافت. در حقیقت مکانیسم متابولیکی جهت مقابله با تنش کادمیم منجر به افزایش میزان این آنزیم گشته است (۶).

محمودی و همکاران (۱۳۹۸) نشان دادند که مقدار آمینواسید پرولین گیاهچه‌ها با افزایش غلظت کادمیوم به‌طور معناداری افزایش یافت. تولید پرولین یکی از سازوکارهای مهم سمیت‌زدایی فلزات سنگین سمی در بیشتر گیاهان است و تجمع پرولین در گیاهچه‌های قرار گرفته در معرض تنش فلزات سنگین از جمله کادمیوم موجب کاهش آسیب به غشا و پروتئین‌ها می‌شود. مقدار آمینواسید پرولین گیاهچه‌های حاصل از بذرهای پیش تیمارشده در شرایط بدون تنش کادمیوم و کاربرد کادمیوم به‌طور معناداری بیشتر از گیاهچه‌های حاصل از بذرهای شاهد بود (۹).

تأثیر کادمیوم بر میزان رنگیزه‌های گیاهی

کلروفیل‌ها مولکول‌های ضروری هستند که مسئول دریافت انرژی خورشیدی در سیستم‌های فتوسنتزی هستند. در صورتی‌که تنش‌های شدید و طولانی مدت اعمال شود به احتمال زیاد مقدار کلروفیل کاهش می‌یابد. با افزایش یون کادمیوم از مقدار رنگیزه‌های *E. occidentalis* به‌طور معنی‌داری کاسته شد. بنابراین محتوای کلروفیل برگ به مقدار قابل‌توجهی کاهش می‌یابد. نتایج حاصل از این تحقیق نیز

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-25]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1397.11.4.4.6]

بیانگر کاهش چشمگیر در مقدار کلروفیل برگ است. از طرفی دیگر وجود کادمیوم در سلول‌های برگ باعث کاهش میزان کاروتنوئیدها می‌شود (۶).

نتایج تحقیق پورتبریزی و همکاران (۱۳۹۷) نشان داد که میزان کلروفیل برگ‌ها با افزایش غلظت کادمیوم در محیط رشد کاهش یافت که در نهایت منجر به کاهش فتوسنتز و رشد شده و علایم کمبود به صورت کلروز در برگ‌ها بروز کرد. کاهش میزان رنگیزه‌های فتوسنتزی در گیاهان تحت تیمار می‌تواند به دلیل آسیب‌های اکسیداتیو و بازدارندگی مراحل مختلف سبز کلروفیل باشد. علاوه‌بر این به نظر می‌رسد سمیت کادمیوم و تولید انواع مختلف اکسیژن واکنشگر سبب کاهش رنگیزه‌های فتوسنتزی و محدود کردن جذب عناصر غذایی لازم برای ساخته شدن و تولید کلروفیل می‌شود و در نتیجه زردی برگ‌ها دیده می‌شود. علاوه‌بر این فلزات سنگین با بازدارندگی بیوسنتز پروتئین‌های کمپلکس LHCII در سطح رونویسی تشکیل این کمپلکس را مختل می‌کنند که باعث فتواکسید شدن کلروفیل تازه تشکیل‌شده می‌شود. القای سنتز کاروتنوئیدها در شرایط تنش می‌تواند به دلیل نقش حفاظتی آنها در تشکیلات فتوسنتز باشد، زیرا این رنگیزه‌ها مسئول خاموش‌کردن اکسیژن و جلوگیری از پراکسیداسیون لیپیدها و در نهایت تنش اکسیداتیو هستند (۱).

تأثیر کادمیوم بر درصد و عملکرد اسانس

اسانس رزماری (*Salvia rosmarinus*) در گیاهان میکوریزی کمتر از گیاهان غیرمیکوریزی بود، اما عملکرد اسانس در گیاهان میکوریزی به میزان قابل‌توجهی بیشتر از گیاهان غیرمیکوریزی حاصل شد. به‌دلیل عملکرد بالاتر پیکر رویشی، گیاهان میکوریزی رزماری عملکرد اسانس بیشتری از گیاهان غیرمیکوریزی داشتند. همچنین ترکیبات اسانس در گیاهان میکوریزی نسبت به غیرمیکوریزی متفاوت بود. در نهایت نتایج حاصل از تحقیق آنها نشان داد که عملکرد اسانس *S. rosmarinus* در گیاهان میکوریزی افزایش یافت (۱).

حسین‌پور و افشاری (۱۳۹۴) نشان دادند که در بین سطوح مختلف فلزات سنگین، بیشترین عملکرد اسانس را گیاهان شاهد

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-25]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1397.11.4.4.6]

به خود اختصاص دادند. استفاده از کادمیوم عملکرد اسانس ریحان *Ocimum basilicum* را به‌طور معنی‌داری کاهش دادند (۳).

تأثیر کادمیوم بر تعداد روزنه‌ها

در تحقیق شریعت و همکاران (۱۳۸۹) بر روی گیاه دارویی *E. occidentalis* مشاهده شد که تنش کادمیوم باعث کاهش تعداد روزنه در سطح روئی و زیری برگ شد. احتمالاً کادمیوم از پیشروی تقسیم سلول‌های محافظ، مریستم‌ها، تمایز آنها به سلول‌های محافظ مادر و یا تقسیم نهایی سلول محافظ مادر به دو جفت سلول‌های محافظ جلوگیری می‌کند. همچنین باعث کاهش تراکم مزوفیل کلروپلاست‌ها، ارگانل‌های محتوی کلروفیل و افزایش تعداد سلول‌های مزوفیل زیر روزنه می‌شوند. طبق نتایج به دست آمده از تحقیق آنها میزان کاهش تعداد روزنه در سطح روئی و زیری تقریباً به یک نسبت صورت گرفت، ولی نقش کادمیوم در این تقابل ناشناخته است. همچنین این امکان وجود دارد که کادمیوم مسبب تغییراتی در محیط بین سلولی می‌شود که متعاقباً ممکن است باعث کنترل رشد روزنه‌ها شود (۶).

تأثیر کادمیوم بر فعالیت آنتی‌اکسیدانی، فنل، فلاونوئید و مالون دی آلدهید

سیستم آنتی‌اکسیدانی آنزیمی یکی از مکانیسم‌های اصلی سمیت‌زدایی فلزات سنگین در گیاهان است. آنزیم‌های آنتی اکسیدان نقش مهمی را در سازگاری و بقای گیاهان در طی دوره تنش ایفا می‌کنند. میزان فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان بسته به مدت و نوع تنش، گونه گیاهی و بخش‌های گیاه متفاوت است. این آنزیم‌ها از خورنده‌های مهم پراکسید هیدروژن هستند. آنزیم کاتالاز در پراکسی‌زوم واقع شده و به نور حساس است. بنابراین دامنه فعالیت آن برای سم‌زدایی پراکسید هیدروژن محدود است و آنزیم‌های دیگری نیز باید در سم‌زدایی سهیم باشند.

بر طبق مطالعات انجام‌شده توسط حسین‌پور و افشاری (۱۳۹۴) بر روی گیاه *O. basilicum* L. تنش شوری موجب افزایش میزان آنزیم‌های سوپراکسید دیسموتاز، کاتالاز و پراکسیداز شد. آنزیم‌های سوپر اکسید دیسموتاز، کاتالاز و پراکسیداز موجود در گیاهانی که تحت

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-25]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1397.11.4.4.6]

تنش کادمیوم بودند به‌طور معنی‌داری کاهش یافت. تیمار شوری در این آزمایش توانست از اثر مضر سرب و کادمیوم بر سوپراکسید دیسموتاز، کاتالاز و پراکسیداز جلوگیری کند (۳).

در مطالعه محمودی و همکاران (۱۳۹۸) نشان داده شد که میزان فعالیت آنزیم کاتالاز گیاهچه‌های گاوزبان اروپایی (*Borago officinalis*) با افزایش شدت تنش کادمیوم به‌طور معناداری کاهش می‌یابد. همچنین میزان فعالیت آنزیم پراکسیداز گیاهچه‌های حاصل از بذرهای گاوزبان با افزایش شدت تنش کادمیوم کاهش یافت. علت کاهش فعالیت آنزیم‌های پاداکساینده در اثر تنش کادمیوم به تکمیل ظرفیت فعالیت این آنزیم‌ها برای رادیکال‌های آزاد، تأثیر منفی افزایش تولید رادیکال‌های آزاد اکسیژن و همچنی تأثیر منفی احتمالی کادمیوم در تولید این آنزیم‌ها در غلظت‌های زیاد کادمیوم نسبت داده می‌شود (۹).

نتایج حسن‌پور و همکاران (۱۳۹۸) بر روی سه گونه دارویی *Mentha aquatic*, *Eryngium caucasicum* و *Froriepia subpinnata* Ledeb. نشان داد که میزان فنول، فلاونوئید و فعالیت آنتی‌اکسیدان در هر سه گیاه با افزایش سطوح کادمیوم افزایش یافت. در واقع یکی از سازوکارهای مؤثر در افزایش میزان تحمل عناصر سنگین تولید و انباشتگی ترکیبات فنلی است. افزایش ترکیبات فنلی در این مطالعه می تواند نشانه‌ای از مکانیسم‌های مقاومت گیاهان در برابر تنش ناشی از کادمیوم باشد. افزایش ترکیبات فنل، فلاونوئید و فعالیت آنتی‌اکسیدانی در تمام سطوح نسبت به شاهد ممکن است به دلیل تحریک سیستم دفاعی گیاهان در پاسخ به تنش ناشی از عناصر سنگین باشد (۲).

تأثیر کادمیوم بر وزن اندام‌های گیاه

در تحقیق شریعت و همکاران (۱۳۸۹) بر روی گیاه دارویی *E. occidentalis* مشاهده شد که در حضور یون کادمیوم رشد گیاه بسیار کاهش می‌یابد. در حقیقت کادمیوم از تقسیم سلول‌های منطقه مریستمی و رشد سلول‌های منطقه رشد جلوگیری می‌کند. از طرف دیگر تمایز زودرس و چوبی شدن دیواره سلول‌های واقع در منطقه رشد طولی سلول می‌تواند از دلایل دیگر کاهش رشد

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-25]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1397.11.4.4.6]

ریشه باشد که این اثر همراه با تغییر رنگ ریشه نیز خواهد بود. مشاهدات حاصل از تحقیق حاضر نیز حاکی از تغییر رنگ ریشه بود و ریشه‌ها قهوه‌ای رنگ بودند. کاهش وزن اندام‌ها به علت اختلال در متابولیسم کلی سلول‌هاست. همانطوری‌که از نتایج تحقیق مشخص است این اختلال بیشتر در ساقه و برگ دیده می‌شود (۶).

محمدی و همکاران (۱۳۹۲) گزارش کردند که بیشترین وزن تر بوته در گیاهان میکوریزی بدون آلوده به فلزهای سنگین دیده شد که به‌طور معنی‌داری بیشتر از دیگر تیمارها در گیاه دارویی همیشه‌بهار (*Calendula officinalis*) بود. وزن خشک بوته *C. officinalis* به‌طور معنی‌داری تحت تاثیر قارچ میکوریزی، فلزهای سنگین و اثرات متقابل بین آنها قرار گرفت. وزن خشک بوته در گیاهان میکوریزی بدون آلوده به فلزهای سنگین به‌طور معنی‌داری بیشتر از دیگر تیمارها بود (۸).

پورتبریزی و همکاران (۱۳۹۷) بیان کردند که گیاهان میکوریزی غیرآلوده به فلزات سنگین دارای بیشترین وزن تر اندام‌های هوایی بودند که به‌طور معنی‌داری بیشتر از سایر تیمارها بود. وزن تر اندام هوایی در گیاهان میکوریزی رشدیافته در هر غلظت از فلز سنگین، به‌طور معنی‌داری بیشتر از گیاهان غیرمیکوریزی رشدیافته در همان غلظت فلز بود. افزایش وزن خشک اندام هوایی و دیگر صفات رشدی، با جذب بالای فسفر در گیاه و پتانسیل کلونیزاسیون مطلوب ریشه و به تبع آن رشد میسیلیوم‌های خارجی و گسترش سیستم ریشه‌ای گیاه مرتبط است (۱).

سلیمان‌نژاد و همکاران (۱۳۹۶) نشان دادند که سطوح مختلف کادمیوم در خردل اتیوپی (*Brassica carinata*) و خردل هندی (*Brassica juncea*) اثر معنی‌داری در طول و وزن خشک ریشه و بخش هوایی گیاهان در مقایسه با گیاه شاهد نداشت، ولی وزن خشک بخش هوایی *B. carinata* در مقایسه با *B. juncea* بیشتر بود (۵).

در مطالعه پورتبریزی و همکاران (۱۳۹۷) مشاهده شد که با افزایش غلظت کادمیوم وزن گیاهان تیمار شده نسبت به شاهد کاهش می‌یابد. به نظر می‌رسد که کاهش وزن خشک اندام‌های هوایی و ریشه می تواند در اثر اختلال در فرایند فتوسنتز و

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-25]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1397.11.4.4.6]

متابولیسم نیتروژن باشد و در اثر کاهش رنگیزه‌های فتونستزی، تولید بیوماس و رشد در گیاه مورد مطالعه کاهش یافته است (۱).

محمودی و همکاران (۱۳۹۷) مشاهده کردند که وزن خشک گیاهچه‌های *B. officinalis* با افزایش غلظت کادمیوم کاهش یافت. علت کاهش وزن خشک گیاهچه‌ها در اثر به کار بردن کادمیوم احتمالاً از کاهش انتقال مواد غذایی از لپه به محور جنینی ناشی می‌شود. زیرا عواملی که رشد محور جنینی را تحت تأثیر قرار می‌دهند بر انتقال مواد غذایی از لپه به محور جنینی اثر می‌گذارند (۹).

تأثیر کادمیوم بر خصوصیات جوانه‌زنی

جوانه‌زنی از مراحل مهم و حساس چرخه زندگی گیاهان و یک فرایند کلیدی در سبز شدن گیاهچه به شمار می‌رود. هر گیاهی که بتواند در مرحله جوانه‌زنی مقاومت بیشتری نشان دهد، می‌تواند دوره اول رویش را موفق‌تر طی کند. از این رو محققان به دنبال افزایش استقرار گیاهچه‌ها در شرایط تنش هستند. کاهش درصد جوانه‌زنی بذرها در حضور غلظت‌های زیاد فلز سنگی کادمیوم را ناشی از تأثیر این ماده بر فعالیت آنزیم آمیلاز می‌دانند که آنزیمی کلیدی در فرایند جوانه‌زنی است. نتایج تحقیق شریعت و همکاران (۱۳۸۹) بر روی گیاه دارویی *E. occidentalis* نشان داد که افزایش غلظت کادمیوم باعث کاهش تعدادی از صفات جوانه‌زنی از جمله طول ریشه‌چه، شاخص بنیه بذر و سرعت جوانه‌زنی منجر به کاهش شد ولی در مورد صفاتی از جمله شاخص جوانه‌زنی، درصد جوانه‌زنی، طول ساقه‌چه در تیمارهای پایین کادمیوم، افزایش و بعد از آن منجر به کاهش این صفات شد. یکی از دلایل این امر می‌تواند مربوط به این موضوع باشد که ساقه‌چه بیرون از محلول کادمیوم قرار دارد و ریشه‌چه در تماس مستقیم با این فلز سنگین است، در نتیجه بیشتر تحت تأثیر آثار مخرب کادمیوم است (۶).

مطالعه محمودی و همکاران (۱۳۹۸) نشان داد که تنش کادمیوم باعث کاهش درصد جوانه‌زنی در بذرهای *B. officinalis* شد. کاهش درصد جوانه‌زنی ممکن است به علت تجمع کادمیوم در سلول و در نتیجه میل ترکیبی آن با گروه سولفیدریل

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-25]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1397.11.4.4.6]

پروتئین‌ها باشد که موجب کاهش سنتز و تولید پروتئین‌های ساختمانی و موردنیاز فرایندهای رشد، تقسیم سلولی و جوانه‌زنی می‌شود. در شرایط بدون تنش کادمیوم، میانگین درصد جوانه‌زنی بذرهای پیش تیمار شده به‌طور معناداری بیشتر از بذرهای شاهد بود و اختلاف معناداری از نظر درصد جوانه‌زنی بین بذرهای پیش تیمار شده مشاهده نشد (۹).

تأثیر کادمیوم بر ویژگی‌های رویشی و زایشی گیاه

نتایج مطالعه پورتبریزی و همکاران (۱۳۹۷) نشان‌دهنده بروز واکنش‌های متعدد در گیاه ماریتیغال (*Silybum marianum*) بود. کلروز و کاهش رشد از مهمترین آثار سمیت کادمیوم به‌ویژه در غلظت‌های بالا در مورد گیاه مورد مطالعه محسوب می‌شود. فلزات سنگین با کاهش شدید فتوسنتز و انتقال مواد فتوسنتزی و تقسیم سلولی، رشد گیاه را به شدت کاهش می‌دهند. همچنین در گیاهان تحت تنش سطح برگ نسبت به گیاه شاهد کاهش چشمگیری دارد. کادمیوم تأثیرات منفی بر جذب آب دارد که نتیجه آن کاهش فشار تورژسانس است. این کاهش همراه با کاهش قابلیت ارتجاعی دیواره سلول باعث کوچک‌شدن سلول‌ها و کاهش فضای بین سلولی در گیاهان تحت تنش می‌شود (۱).

نتایج تحقیقات محمدی و همکاران (۱۳۹۲) بر روی *C. officinalis* نشان داد که گیاهان میکوریزی رشدیافته در خاک بدون آلوده به فلزهای سنگین سریعتر وارد مرحله زایشی شدند و کمترین زمان را از انتقال نشاء تا آغاز غنچه‌دهی و آغاز گل‌دهی به خود اختصاص دادند. در گیاهان میکوریزی و بدون میکوریزی، افزایش غلظت فلزهای سنگین، باعث تأخیر در زمان آغاز غنچه‌دهی و گل‌دهی *C. officinalis* شد. گیاهان میکوریزی در تمام سطوح فلزهای سنگین سریعتر از گیاهان بدون میکوریزی آلوده به فلزات سنگین وارد مرحله زایشی شدند. زمان آغاز گل‌دهی و غنچه‌دهی گیاهان میکوریزی رشدیافته در سطح صفر فلزهای سنگین زودتر از گیاهان بدون میکوریزی آلوده وارد مرحله زایشی شدند. طبق مطالعات آنها با افزایش غلظت فلزهای سنگین سرب و کادمیوم در خاک، سبب کاهش میزان

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-25]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1397.11.4.4.6]

رشد و عملکرد *C. officinalis* شد. تأثیر منفی فلز کادمیوم روی رشد و عملکرد *C. officinalis* بسیار بیشتر از فلز سرب دیده شد و با این که غلظت کادمیوم در خاک کمتر از سرب بود، اما تأثیر شدیدتری در کاهش رشد *C. officinalis* نشان داد، به‌طوری که گیاهان بدون میکوریزی آلوده به کادمیوم ۸۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم وارد مرحله زایشی نشدند. به‌طورکلی تغییرات دیده شده در ویژگی‌های رشدی *C. officinalis* ممکن است از علائم اثرات سمی فلزهای سنگین بر غشای پلاسمایی در نتیجه تولید رادیکال‌های آزاد باشد. همچنین سرب و کادمیوم ممکن است در جذب آب و عناصر غذایی در *C. officinalis* اختلال ایجاد کنند که می‌تواند کاهش عملکرد را در این شرایط توجیه کند. تغییر کلروپلاست نیز در گیاهان رشد یافته در شرایط تنش فلزهای سنگین دیده شده است. در این آزمایش تلقیح گیاهان با قارچ میکوریزی توانست تا حدی تحمل این گیاه را در رویارویی با تنش فلزهای سنگین بالا ببرد. به‌طوری که گیاهان تلقیح‌شده با قارچ میکوریزی رشد و عملکرد بالاتری نسبت به گیاهان بدون میکوریزی در تمام سطوح فلزها داشتند. حتی گیاهان تلقیح شده با قارچ میکوریزا در کادمیوم ۱۶ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک وارد مرحله زایشی شدند (۸).

نتایج تحقیقات محمودی و همکاران (۱۳۹۸) نشان داد که طول گیاهچه‌های حاصل از بذرهای *B. officinalis* با اعمال تنش کادمیوم به‌طور معناداری کاهش یافت. بیشترین طول گیاهچه در شرایط بدون تنش مشاهده شد و به‌طور معناداری بیشتر از شرایط تنش کادمیوم بود. از آنجا که محل اولیه تجمع کادمیوم ریشه‌چه است و مقداری از آن به اندام هوایی منتقل می‌شود، این امر سبب کاهش طول گیاهچه‌های قرار گرفته در معرض تنش کادمیوم می‌شود (۹).

پورتبریزی و همکاران (۱۳۹۷) مشاهده کردند که با افزایش سطح کادمیوم و سرب برخی شاخص‌های رشدی و عملکرد گیاه رزماری *S. rosmarinus* نظیر زیست‌توده، ارتفاع بوته، سطح برگ و دیگر صفات رشدی به‌طور معنی‌داری کاهش یافت، اما تلقیح گیاهان مورد بررسی با قارچ میکوریزی آربوسکولار در شرایط تنش

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-25]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1397.11.4.4.6]

فلزات سنگین سرب و کادمیوم، منجر به افزایش این صفات در مقایسه با شاهد بدون تلقیح قارچ شد. بیشترین ارتفاع بوته در گیاهان میکوریزی غیرآلوده به فلزات سنگین مشاهده شد که به‌طور معنی‌داری بیشتر از سایر تیمارها بود. همچنین کمترین ارتفاع بوته در گیاهان غیرمیکوریزی آلوده به کادمیوم ۸۰ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک مشاهده شد. با افزایش سطوح سرب و کادمیوم خاک، از طول ساقه فرعی *S. rosmarinus* کاسته شد. همچنین بیشترین تعداد برگ در گیاهان میکوریزی غیرآلوده به فلزات سنگین مشاهده شد که به‌طور معنی‌داری بیشتر از سایر تیمارها بود. کمترین تعداد برگ و همچنین کمترین سطح برگ در گیاهان غیرمیکوریزی آلوده به کادمیوم ۸۰ میلی گرم در کیلوگرم خاک مشاهده شد (۱).

نتایج تحقیق یداللهی و همکاران (۱۳۹۴) نشان داد که با افزایش شدت تنش کادمیوم صفت ارتفاع گیاه کاهش می‌یابد، به‌طوری‌که بیشترین ارتفاع بوته در تیمار شاهد مشاهده شد. فلزات سنگین مانند کادمیوم از طریق مسیرهای اکسیداتیو و تولید رادیکال‌های آزاد باعث بروز ناهنجاری‌های کروموزومی شده و در نتیجه باعث کاهش رشد گیاه می‌شوند. براساس نتایج ارائه‌شده ارتفاع گیاه به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر محلول‌پاشی اسید هیومیک قرار گرفت. مکانیسم‌های مختلفی در ارتباط با تأثیر اسید هیومیک بر رشد رویشی گیاهان ارائه شده است. یکی از مهمترین این مکانیسم‌ها، تأثیر اسید هیومیک بر جذب عناصر از طریق کلاته‌کردن عناصر ضروری که سبب افزایش جذب عناصر شده و باروری خاک و تولید در گیاهان را افزایش می‌دهد. همین امر سبب شده کاربرد اسید هیومیک سبب افزایش قابل‌توجهی در بهبود صفات رویشی شود، به‌طوری‌که اعمال بیشترین مقدار این اسید باعث افزایش ارتفاع گیاه نسبت به شاهد شد. به عبارتی دیگر، اثر متقابل تنش کادمیوم و اسید هیومیک بر ارتفاع گیاه معنی‌دار نبود. بررسی واکنش صبر زرد (*Aloe vera*) نسبت به سطوح مختلف کادمیوم حاکی از آن است که افزایش کادمیوم سبب کاهش معنی‌دار طول برگ شد و بیشترین طول برگ در تیمار شاهد به دست آمد. براساس

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-25]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1397.11.4.4.6]

نظر محققین افزایش تنش کادمیوم ممکن است باعث تحلیل برگ و ساقه شود. علاوه‌بر این کاهش ارتفاع و سطح برگ در شرایط تنش کادمیوم ناشی از کاهش تقسیم و گسترش سلولی است. طول برگ گیاه به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر محلول‌پاشی اسید هیومیک قرار گرفت. بنابراین بالاترین سطح اسید هیومیک نسبت به شاهد بیشترین مقدار طول برگ را داشته که این نتیجه حاکی از نقش مثبت اسید هیومیک در افزایش طول برگ است. اسید هیومیک با افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی، ظرفیت نگهداری آب در خاک و همچنین ایفای نقش بر نفوذپذیری غشا به‌عنوان ناقل پروتئین، فعال‌کردن تنفس، چرخه کربس، فتوسنتز و تولید آمینواسید و آدنوزین تری فسفات باعث افزایش رشد گیاهان می‌شود. از طرفی طول برگ تحت تأثیر اثر متقابل سمیت کادمیوم و اسید هیومیک قرار نگرفت (۱۱).

توانایی تجمع کادمیوم در بخش‌های هوایی و ریشه‌ای گیاه

نتایج تحقیق سلیمان‌نژاد و همکاران (۱۳۹۶) نشان داد که عدم تغییر عوامل رشد و عدم وجود علائم مسمومیت در هر دو گونه مورد بررسی تحت تیمارهای مختلف کادمیوم بیانگر توانایی این گیاهان به تحمل غلظت بالای کادمیوم خاک است. شاخص‌های متفاوتی برای ارزیابی واکنش ژنوتیپ‌ها در شرایط محیطی مختلف و تعیین تحمل و حساسیت آنها ارائه شده است. در مقایسه ارزیابی تحمل، هر دو گیاه *B. carinata* و *B. juncea* شاخص تحمل تنش زیادی را نسبت به کادمیوم نشان دادند. همچنین *B. carinata* در سطوح مختلف آلودگی کادمیوم، شاخص تحمل تنش بالاتری نسبت به *B. juncea* داشت. از نظر شاخص تحمل *B. carinata* نسبت به آلودگی بالای کادمیوم، کمترین میزان شاخص تحمل را نشان داد. همچنین با افزایش غلظت آلودگی کادمیوم در خاک، غلظت کادمیوم در ریشه و بخش هوایی هر دو گیاه *B. carinata* و *B. juncea* به‌طور معنی‌داری افزایش یافت. غلظت کادمیوم *B. juncea* نسبت به گونه دیگر بیشتر بود. در *B. juncea* با افزایش غلظت آلودگی کادمیوم در خاک، تغلیظ زیستی کادمیوم در ریشه و بخش هوایی گیاه افزایش

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-25]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1397.11.4.4.6]

معنی‌داری را نشان داد، ولی در فاکتور انتقال هر دو گیاه افزایش معنی‌داری مشاهده نشد، اما فاکتور انتقال *B. juncea* حدوداً ۷۰ درصد بیشتر از *B. carinata* بود. در این بررسی مشخص شد که افزایش میزان آلودگی کادمیوم در خاک منجر به افزایش غلظت آن در ریشه و بخش هوایی هر دو گیاه شد، ولی میزان کادمیوم در ریشه هر دو گیاه بیشتر از بخش هوایی بود. بنابراین جا به جایی کادمیوم از ریشه به بخش هوایی ممکن است توسط موانع داخلی برای دفاع از بخش هوایی محدود شده باشد. ریشه گیاه جایگاه اصلی بی‌حرکت‌سازی کادمیوم است، که به‌طور عمده از طریق حفظ یون‌های سمی در دیواره سلولی و ایجاد برخی موانع کارآمد برای محدود کردن ورود کادمیوم به آوند چوب اتفاق می‌افتد و در نتیجه جلوی انتقال آن به بخش هوایی را می‌گیرد. در گیاهان مورد بررسی ما نیز احتمالاً کاهش فاکتور انتقال، سبب تحمل زیاد گیاه شد (۵).

نتایج حاصل از مطالعه ذوفن و همکاران (۱۳۹۷) نشان داد که فاکتور تغلیظ زیستی برای ارزیابی کارایی جذب و تجمع و فاکتور انتقال برای تعیین میزان توانایی برای تحمل و انتقال فلزات سنگین در گیاهان مورد استفاده قرار می‌گیرد. نتایج حاصل از محاسبه فاکتور تغلیظ زیستی برای اندام‌های هوایی و ریشه‌ها حاکی از آن است که در این مطالعه کادمیوم می‌تواند هم در ریشه‌ها و هم در اندام‌های هوایی تغلیظ شود. با وجود این، غلظت کادمیوم تجمع یافته در ریشه‌ها بالاتر از ساختارهای هوایی بود. نتایج نشان داد که با افزایش غلظت کادمیوم، میزان انتقال آن از ریشه به بخش هوایی دچار کاهش شد. این موضوع احتمالاً به علت ممانعت از انتقال بیشتر کادمیوم از ریشه به سمت بخش‌های هوایی در پنیرک (*Malva sylvestris*) است. با بررسی میزان جذب کادمیوم توسط *M. sylvestris* و با در نظر گرفتن بیوماس، به نظر می‌رسد که ریشه‌های این گیاه توانایی و پتانسیل بالاتری نسبت به اندام های هوایی برای جذب و تجمع کادمیوم دارند. بنابراین، تصور می‌شود که افزایش غلظت کادمیوم در محیط الزاما منجر به انتقال بیشتر آن به بخش‌های هوایی *M.*

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-25]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1397.11.4.4.6]

sylvestris نمی‌شود و احتمالاً این گیاه در مواجه با غلظت‌های بالاتر کادمیوم در محیط از مکانیسم‌هایی برای ممانعت از انتقال بیشتر آن به بخش‌های هوایی استفاده می‌کند. ممانعت از انتقال بیشتر کادمیوم به بخش‌های هوایی و تجمع بالاتر در ریشه‌های برخی گیاهان مورد مطالعه، ممکن است که راهکاری دفاعی برای جلوگیری از بروز اثرات سمی کادمیوم در اندام‌های هوایی باشد. در این مطالعه با توجه به تجمع بالاتر کادمیوم در ریشه‌ها نسبت به بخش‌های هوایی به نظر می‌رسد که *M. sylvestris* با کنترل نحوه توزیع و انتقال کادمیوم بین بخش‌های ریشه‌ای و هوایی و نگهداری بخش عمده‌ای از این فلز در ریشه‌ها از انتقال بیشتر آن به قسمت‌های هوایی ممانعت کرده است. با اینحال، گونه‌های گیاهی تیمارشده با کادمیوم در شرایط کنترل‌شده رشدی، توانایی متفاوتی را در توزیع کادمیوم در بافت‌ها و اندام‌های مختلف از خود ارائه داده‌اند. معمولاً اطلاعات مربوط به بیوماس و شاخص تحمل در گیاهان تا حدی می‌توانند در شناسایی بیش‌انباشت‌گرها مفید باشند (۴).

گیاه‌پالایی

گیاه‌پالایی یا Phytoremediation (شامل پیشوند یونانی phyto به معنی گیاه و ریشه لاتین remedium به معنی اصلاح یا حذف یک عامل مزاحم و خارج)، یک نوع پاکسازی با استفاده از گیاه جهت حذف یا غیرسمی‌سازی آلودگی‌های زیست‌محیطی است. گیاهان درگیر در گیاه‌پالایی، سازگار به رشد در شرایط سخت زیست‌محیطی در آب یا خاک بوده و قادر به جذب، تحمل، انتقال، احیاء و تثبیت مواد بسیار سمی (فلزات سنگین، مواد پرتوزا، آلی مانند حلال‌ها، نفت خام، آفت‌کش‌ها، مواد منفجره و هیدرکربن‌های آروماتیک) از خاک و آب‌های آلوده هستند. گیاه‌پالایی در مقایسه با سایر تکنولوژی‌های پاکسازی، مخرب محیط زیست نبوده و در نهایت خاک را دست نخورده و فعال از نظر زیست‌شناسی تحویل می‌دهد. از مزیت‌های اصلی این روش، هزینه به‌طور نسبی کم (حدود ۱۰-۲۰ درصد هزینه روش‌های مکانیکی)، قابلیت اجرا و نگهداری آسان، دارای چندین مکانیسم جهت حذف، حفظ منابع طبیعی، دوست‌دار محیط زیست، در

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-25]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1397.11.4.4.6]

نهایت حذف راحت مواد گیاهی آلوده، ظاهر زیبای روش و محبوبیت عمومی بالا است. این روش یک‌سری عیب‌هایی چون طولانی بر روی شبکه غذایی، امکان انتقال آلودگی به آب‌های زیرزمینی، تنها موثر بر ترکیبات به‌طور نسبی آب‌گریز، نتایج متغیر، سرنوشت ناشناخته آلاینده نهایی، سمیت و قابلیت زیست‌فراهمی محصول نهایی تجزیه زیست‌شناسی ناشناخته است. گونه‌های گیاهی رایج مورد استفاده در گیاه‌پالایی ترکیبات آلی و غیرآلی شامل درختان هیبرید صنوبر، بید، سرخس، آفتابگردان، شبدر، خردل هندی و تاج خروس است (۲۴).

تولید گیاهان تراریخته جهت گیاه پالایی

عامل اصلی محدود کننده استفاده گیاهان در سطح وسیع، نیاز به زمان زیاد جهت پاکسازی خاک است. به‌تازگی بررسی‌های زیادی در زمینه امکان افزایش بیان ژن‌های موجود، معرفی ژن‌های انسانی یا باکتریایی به گیاهان به‌منظور افزایش توانایی ذاتی گیاه در مقابله با زنوبیوتیک‌ها منتشر شده است. در میان انواع مکانیسم‌های طبیعی که به گیاهان توانایی رشد در مناطق آلوده به فلزات سنگین می‌دهد، مطالعات بسیاری بر روی فیتوکلاتین‌ها انجام شده است. با هدف بهبود جذب فلزات، گیاهان تراریختی طراحی شدند که میزان تولید گلوتاتیون سنتتاز یا فیتوکلاتین سنتتاز آنها افزایش یافته بود که از طریق این دو مورد، انباشته‌سازی کادمیوم افزایش یافت. در برخی از آزمایشگاه‌ها ژن‌های رمزکننده انواع متالوتیونین‌ها (مخمر، حشرات، پستانداران و انسان‌ها) را به گیاه منتقل کردند، که این پیشنهادات باعث افزایش مقاومت به برخی از فلزات سنگین شد. مقایسه لاین‌های تراریخته توتون با گیاهان شاهد، بیانگر افزایش مقاومت و رشد خوب آن در خاک آلوده به کادمیوم به همراه افزایش انباشته‌سازی کادمیوم در طول کشت هیدروپونیک و کشت در ماسه حاوی کادمیوم بود.

براساس پژوهش‌های گزارش‌شده، گیاهانی با سیستم ریشه بسیار منشعب، جهت افزایش سطح تماس برای جذب کارآمد فلزات سمی ضروری است. ریشه‌های مویی القاشده در برخی بیش‌انباشت‌کننده‌ها موجب عملکرد بالای گیاه در

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-25]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1397.11.4.4.6]

ریزوفیلتراسیون رادیواکتیوها و فلزات سنگین شده است (۲۴).

نتیجه‌گیری

فلزات سنگین به‌صورت خالص در خاک ممکن است هیچ‌گونه تأثیر مستقیمی بر رشد و نمو گیاهی نداشته باشند، ولی شکل‌هایی از این عناصر که در دسترس گیاه هستند و از طریق محلول خاک جذب گیاه می‌شوند، بر رشد و نمو گیاه تأثیر می‌گذارند. فلزات سنگین معمولاً سمی یا حتی سرطان‌زا هستند که از طریق گیاهان جذب شده و وارد زنجیره غذایی می‌شوند. فلزات سنگین بر مولکول‌های آلی مانند پروتئین‌ها، آنزیم‌ها و لیپیدها اثر نامطلوب داشته و از جمله تغییرات آنها می‌توان به غیرفعال‌کردن پروتئین‌ها و آنزیم‌ها، اکسیدکردن چربی‌ها و اختلال در متابولیسم قندها اشاره کرد. غلظت‌های بالای فلزات سنگین موجب ایجاد تنش شده و با تولید رادیکال‌های آزاد اکسیژن به سلول‌های گیاهی آسیب وارد می‌کنند. رادیکال‌های آزاد هیدروکسیل آغازگر واکنش‌هایی است که موجب پراکسیداسیون چربی می‌شود. برای کم‌کردن و از بین بردن انواع اکسیژن‌های فعال و اجتناب از آسیب‌های اکسیداتیو در گیاهان، فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان نظیر کاتالاز، سوپراکسید دیسموتاز و پراکسیداز افزایش می‌یابد. تنش فلزات سنگین از طریق القای پاسخ‌های دفاعی موجب تحریک مسیر بیوسنتز و انباشت متابولیت‌های ثانویه می‌شود. یکی از علت‌های مهم آسیب بافتی در گیاهانی که در معرض فلزات سنگین قرار می‌گیرند، ایجاد تنش اکسیداتیو است. رادیکال‌های اکسیژن به‌طور عمده در کلروپلاست و میتوکندری تولید می‌شوند و ایجاد آسیب‌های اکسیداتیو بر چربی‌ها، پروتئین‌ها، نوکلئیک اسیدها و اختلال در متابولیسم سلول، اختلال در فرآیندهای مهم تنفس و فتوسنتز و کاهش رشد می‌شود. آلودگی‌های زیست‌محیطی توسط آلاینده‌ها، آلی یا غیرآلی، به علت اثرهای آن بر سلامتی انسان‌ها و حیوانات اهمیت زیادی دارد. بنابراین معرفی کارآمدترین و ارزانترین فناوری جهت ترویج سم‌زدایی و بهبود زیست‌بوم لازم و ضروری است. مطالعات زیادی در زمینه شناسایی گونه‌های

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-25]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1397.11.4.4.6]

گیاهی و مکانیسم‌های سم‌زدایی آنها انجام شده است. مکانیسم‌های جذب آلاینده‌ها و انباشته‌سازی آنها در گونه‌های مختلف گیاهی متفاوت است. به‌تازگی با استفاده از روش‌های ژنتیکی و مولکولی قوی، پیشرفت قابل‌توجهی در زمینه شناسایی ژن‌های گیاهی مسئول فنوتیپ مقاومت و همولوگ‌های آنها در گیاهان بیش‌انباشت‌کننده، انجام شده است. با تولید گیاهان تراریخته با قابلیت پاک‌سازی محیط زیست می‌توان از توسعه بیشتر آلاینده‌ها، ورود آنها به زنجیره غذایی و یا آلوده‌سازی آب‌های زیرزمینی جلوگیری کرد. بنابراین، امید است که مهندسی ژنتیک ابزار جدید قدرتمندی را جهت بهبود ظرفیت گیاهان در پاکسازی آلاینده‌های زیست‌محیطی ارائه دهد.

فهرست منابع

References

۱. پورتبریزی، ث.ف.، پورسیدی، ش.، عبدالشاهی، ر. و نادرنژاد، ن. (۱۳۹۷). تاثیر تنش فلز کادمیوم بر برخی صفات مورفولوژیک و فیزیولوژیک گیاه دارویی ماریتیغال. مجله فرایند و کارکرد گیاهی. ۷ (۲۶): ۱۸۵-۱۹۶.

۲. حسن‌پور، ر.، زعفریان، ف.، رضوانی، م. و جلیلی، ب. (۱۳۹۸). بررسی اثر کادمیوم بر تغییرات رنگدانه‌ای، فیتوشیمیایی و آنتی‌اکسیدانی سه گونه دارویی *Mentha aquatica* L.، *Eryngium caucasicum* و *Froriepia subpinnata*. اکوفیتوشیمی گیاهان دارویی. ۷ (۲): ۹۱-۱۰۳.

۳. حسین‌پور، م.ع. و افشاری، ح. (۱۳۹۴). بررسی سطوح مختلف کادمیوم و سرب بر برخی خصوصیات فیتوشیمیایی گیاه *Ocimum basilicum L.* در شرایط تنش شوری. فصلنامه اکوفیتوشیمی گیاهان دارویی.

۴. ذوفن، پ.، نیسی، ا، و رستگارزاده، س. (۱۳۹۷). ارزیابی برخی شاخص‌های رشدی و توانایی تجمع کادمیوم در بخش‌های هوایی و ریشه‌ای پنیرک در شرایط هیدروپونیک. مجله پژوهش‌های گیاهی (مجله زیست شناسی ایران). ۳۱ (۲): ۴۵۸-۴۶۸.

۵. سلیمان‌نژاد، ز.، عبدل‌زاده، ا. و صاقی‌پور، ح. ر. (۱۳۹۶). توان گیاه پالایی دو گونه خردل اتیوپی و خردل هندی در خاک آلوده به کادمیوم. فصلنامه علوم محیطی. ۱۵ (۳): ۱۷۳-۱۸۶.

۶. شریعت، آ.، عصاره، م. ح. و قمری زارع، ع. (۱۳۸۹). اثر کادمیم بر برخی پارامترهای فیزیولوژی در *Eucalyptus occidentalis*. مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، علوم آب و خاک. ۱۴ (۵۳): ۱۵۴-۱۴۵.

۷. عسگری لجایر، ح.، نجفی، ن. و مقیسه، ا. (۱۳۹۳). اثر آلودگی خاکها به فلزات سنگین بر تولید گیاهان دارویی. نشریه مدیریت اراضی. ۲ (۲): ۱۱۱-۱۲۲.

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-25]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1397.11.4.4.6]

۸. محمدی، س.، تبریزی، ل.، دلشاد، م. و متشرع‌زاده ب. (۱۳۹۲). بررسی رشد و عملکرد گیاه دارویی همیشه بهار در شرایط همزیستی با قارچ میکوریزا آربسکولار و تنش فلزهای سنگین. مجله کشاورزی بوم شناختی. ۳ (۲): ۴۸-۵۹.

۹. محمودی، ف.، شیخ‌زاده، پ.، زارع، ن.، و اسماعیل‌پور، ب. (۱۳۹۸). بهبود جوانه‌زنی بذر، رشد و ویژگی‌های بیوشیمیایی گیاهچه‌های گاوزبان اروپایی در شرایط تنش کادمیوم با استفاده از پیش تیمار بذر. زیست شناسی گیاهی ایران. ۱۱ (۳۹): ۲۳-۴۲.

۱۰. متشرع‌زاده، ب. (۱۳۸۷). بررسی امکان افزایش کارایی گیاه پالایی خاک آلوده به فلزات سنگین توسط عوامل زیستی. پایان‌نامه دکتری خاک شناسی. دانشگاه تهران.

11. یداللهی، پ.، اصغری‌پور، م. ر. و گلشنی، ف. (۱۳۹۴). تاثیر محلول‌پاشی اسید هیومیک بر گیاه دارویی صبر زرد در خاک‌های آلوده به کادمیوم. مجله فرایند و کاربرد گیاهی. ۴ (۱۴): ۵۰-۶۱.

12. Altinozlu H., Karagoz A., Polat T. and Unver I. (2012). Nickel hyperaccumulation by natural plants in Turkish serpentine soils. Turkish Journal of Botany. 36(3): 269-280.

13. Brahim L. and Mohamed M. (2011). Effects of copper stress on antioxidative enzyms, chlorophyll and protein context in *Artiplex halimus*. Afican Journal of Biotechnology. 10 (50): 10143-10148.

14. Goncalvez J., Beker A., Cargnelutti D., Tabaldi L., Pereira L., Battisti V., Spanevello R., Morsch V., Nicoloso F. and Schetinger M. (2007). Cadmium toxicity causes oxidative stress and induces response of the antioxidant system in cucumber seedling. Brazilian Journal Plant Physiology. 19 (3): 223-232.

15. Hassan Z. and Aarts M.G. (2011). Opportunities and feasibilities for biotechnological improvement of Zn, Cd or Ni tolerance and accumulation in plants. Environmental and Experimental Botany. 72(1): 53-63.

16. Lee S., Moon J.S., Domier L.L. and Korban S.S. (2002). Molecular characterization of phytochelatin synthase expression in transgenic *Arabidopsis*. Plant Physiology and Biochemistry. 40 (9): 727–733.

17. Mourato M., Reis R. and Martins L.L. (2012). Characterization of plant antioxidative system in response to abiotic stresses: a focus on heavymetal toxicity. in Advances in Selected Plant Physiology Aspects Montanaro G. and Dichio B., (Eds). In Tech, Vienna, Austria. 12: 23–44.

18. Nagajyoti P.C., Sreekanth T.V.M. and Lee K.D. (2010). Heavy metals, occurrence and toxicity for plants: a review. Environmental Chemistry Letters. 8 (3): 199–216.

19. Popova L.P., Maslenkova L.T., Yordanova R.Y., Ivanova A.P., Krantev A.P., Szalai G. and Janda T. (2009). Exogenous treatment with salicylic acide attenuates Cadmium toxicity in pea seedlings. Plant Physiology and Biochemistry. 47 (3): 224-231.

20. Qiu R.L., Zhao X., Tang Y.T., Yu F.M. and Hu P.J. (2008). Antioxidative response to Cd in a newly discovered cadmium hyperaccumulator, *Arabis paniculata* F. Chemosphere. 74 (1): 6-12.

21. Ramos I., Esteban E., Lucena J.J. and Garate A. (2002). Cadmium uptake and subcellular distribution in plants of *Lactuca* spp. Cd-Mn intraction. Plant Science. 162 (5): 761-767.

22. Solanki R. and Dhankhar R. (2011). Biochemical changes and adaptive strategies of plants under heavy metal stress. Biologia. 66 (2): 195-204.

23. Taylor J.L.S., Rabe T., McGaw L.J., Jager A.K. and Van Staden J. (2001). Towards the scientific validation of traditional medicinal plants. Plant Growth Regulation. 34 (1): 23-37.

24. Wenzel W.W. (2009). Rhizosphere processes and management in plant-assisted bioremediation (phytoremediation) of soils. Plant Soil. 321: 385–400.

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-25]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1397.11.4.4.6]

The Effect of Heavy Metal Stress (Cadmium) on Morphological and Physiological Characteristics of Various Medicinal Plants

Mina Amani[*1], Saeideh Alizadeh-Salteh[2]

1- MSc. Student Of Horticultural Sciences, Majoring In Medicinal Plants, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

2- Assistant Professor, Department of Horticultural Sciences, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

mina76amani@yahoo.com

Abstract

Plants continuously confronted with unfavorable environmental conditions such as heavy metal stress Cadmium (Cd) is currently one of the most important environmental pollutants. Among heavy metals, cadmium (Cd) is a non-essential and toxic metal rapidly taken up by roots and accumulated in various plant tissues which hamper the crop growth and productivity worldwide. The main symptoms of Cd toxicity to plants are stunting and chlorosis. Plants employ various strategies to counteract the inhibitory effect of Cd, which include cell wall binding, chelation with phytochelatins (PCs), compartmentation of Cd in vacuole and enrichment in leaf trichomes. In spite of its high phytotoxicity, Cd is easily taken up by plant roots and transported to above-ground tissues and enters into the food chain where it may pose serious threats to human health.This review has focused on recent evidevce that identifies potential mechanism that may be involved in the tolerance plant to heavy metal in envierment.

Keywords: Heavy Metals, Medicinal Plants, Cadmium, Environmental Pollutants, Microorganisms.

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-25]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1397.11.4.4.6]