

ارزیابی سطح آلودگی اکوسیستم‌ها در ناحیه صنعتی غرب بندرعباس با رویکرد تاب‌آوری در برابر فلزات سنگین

حسن شاهرخی: دانشجوی دکتری دانشگاه تهران، پردیس بین‌المللی کیش، کیش

احمد نوحه گر*: استاد ژئومورفولوژی، گروه برنامه‌ریزی، مدیریت و آموزش محیط زیست، دانشکده محیط زیست، دانشگاه تهران، تهران

نوع مقاله: پژوهشی

تاریخچه مقاله (تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۱/۹ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۵/۷)



چکیده

مطالعه حاضر در راستای ارزیابی آلودگی اکولوژی گیاهی در ناحیه صنعتی غرب بندرعباس انجام شد؛ ابتدا غلظت فلزات سنگین شامل Ni، Cu، Cr، Pb، Zn و Cd در شش نقطه از ناحیه در خاک و برگ درختچه‌های آکاسیا اندازه‌گیری و با شاخص‌های I_{geo}، CF، PLI، BCF، MAI و RI ارزیابی شد. واکنش بیوشیمیایی آکاسیا شامل رنگیزه‌های فتوسنتزی، پرولین، اسید آسکوربیک و آب نسبی برگ در برابر آلودگی اندازه‌گیری شد. در نهایت، شاخص تحمل به آلودگی برای درختچه‌های آکاسیا به دست آمد. نتایج نشان داد که غلظت مس، کادمیوم، سرب، کروم و نیکل در خاک پنج نقطه، بیش از حد زمینه‌ای آن در نقطه شاهد (نزدیکی روستای تل سیاه) بود. از لحاظ شاخص I_{geo}، محوطه صنایع و پالایشگاه برای کادمیوم، سرب، کروم و نیکل در طبقه آلودگی متوسط تا شدید قرار داشت. شاخص BCF نیز نشان داد که درختچه‌های آکاسیا انباشت‌گر متوسط است. از لحاظ شاخص‌های تجمعی MAI، PLI و RI، درختچه‌های آکاسیا قابلیت جذب و انباشت بالایی داشتند. از لحاظ شاخص خطر اکولوژیکی RI، در محوطه صنایع و اسکله شهیدرجایی به ترتیب اعداد ۸۱۳ و ۷۵۷ به دست آمد که بیانگر آلودگی بالا است. واکنش درختان آکاسیا نسبت به آلودگی به گونه‌ای بود که غلظت رنگیزه‌های فتوسنتزی در نقاط آلوده کمتر از نقطه شاهد و تفاوت آنها در سطح ۹۵ درصد معنادار بود. اما غلظت پرولین و اسید آسکوربیک - که بیانگر پاسخ گیاه در برابر تنش آلودگی است - در نقاط آلوده بسیار بالا بود و نشان داد که درختچه‌های آکاسیا در برابر آلودگی فلزات سنگین واکنش مناسبی نشان می‌دهد. شاخص تحمل نیز نشان داد که تحمل آکاسیا در نقاط آلوده کمتر از نقطه شاهد است، اما اختلاف آنها زیاد نیست و نشان می‌دهد که گیاه می‌تواند آلودگی را تحمل کند. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که این درختچه‌ها توانایی گیاه‌بالایی دارند و می‌توان از آنها در کمربند سبز ناحیه صنعتی استفاده کرد. واژگان کلیدی: آکاسیا، خطر زیستی، صنعت، غرب بندرعباس، کلروفیل.

۱- مقدمه

فلزات سنگین، عناصری هستند که جرم اتمی بیش از ۵۵/۸ گرم در مول دارند. این عناصر تجزیه زیستی اندکی دارند، اما قابلیت تجمع زیستی آنها بسیار بالا است و در مواقعی که غلظت آنها بیش از حد آستانه باشد، سلامت محیط زیست را با خطر مسمومیت و آلودگی مواجه می‌سازند (Gardea-Torresdey et al, 2005). انتقال و تجمع آنها در زنجیره غذایی موجودات زنده به گونه‌ای است که این عناصر پس از اینکه از منابع آلودگی شامل صنایع و خودروها منتشر می‌شوند، بر سطح برگ و خاک بستر گیاه رسوب می‌کنند و از طریق ریشه جذب می‌شوند. به دلیل ثابت بودن گیاهان در محیط می‌توان از آنها به عنوان نشانه‌های زیستی برای بررسی و ارزیابی آلودگی محیط استفاده کرد (Monserat et al, 2003). ذرات معلق منتشر شده از منابع سوختنی شامل صنایع معدنی - فلزی، پالایشگاه، پتروشیمی، نیروگاه حرارتی و آگزوز وسایل نقلیه، حاوی فلزات سنگین است. این ذرات بر اساس شرایط جوی منطقه، توپوگرافی و وزن آئرودینامیکی خود، پس از طی زمان‌های کوتاه تا بلندمدت بر سطح زمین رسوب می‌کند، سپس به خاک وارد می‌شود و گیاهان آن را از طریق ریشه جذب و در بافت‌های گیاهی جمع می‌کند (Kozanecka et al, 2002).

گیاهان، فلزات سنگین را عمدتاً از طریق ریشه و تا حدی از طریق برگ جذب می‌کنند. جذب برگ می‌تواند از طریق روزنه، ترک‌های کوتیکولی و منافذ آبی رخ دهد (Khalilova and Mammadov, 2016). جذب فلزات سنگین ممکن است به تجمع آنها در سبزیجات و درختان میوه و در نتیجه ورود آنها به زنجیره غذایی منجر شود که یکی از راه‌های اصلی قرار گرفتن انسان در معرض آلودگی است و می‌تواند به عقب‌ماندگی، شیوع سرطان، بیماری کلیوی، اختلال غدد و اثرات ایمنی و عصبی منجر شود (Abdu et al, 2017). غلظت بالای فلزات سنگین می‌تواند بر رشد و عملکرد بسیاری از محصولات تأثیر بگذارد؛ به گونه‌ای که عناصر روی و کادمیوم، فعالیت متابولیک گیاه را کاهش می‌دهد و به آسیب اکسیداتیو منجر می‌شود (Asati et al, 2015). مس باعث ایجاد استرس اکسیداتیو و گونه‌های اکسیژن فعال می‌شود (Rasool et al, 2022). جیوه نیز می‌تواند به آسیب دیدگی و اختلالات فیزیولوژیکی منجر شود (Li et al, 2022). کروم بر فتوسنتز، انتقال الکترون، فتوفسفوریلاسیون و فعالیت‌های آنزیمی تأثیر می‌گذارد. سرب نیز به مورفولوژی غیر طبیعی گیاه منجر می‌شود (Isinkaralar et al, 2022). نیکل تعادل مواد مغذی را تخریب می‌کند و در نتیجه، عملکرد غشای سلولی را مختل می‌سازد (Cetin et al, 2022). آهن نیز رادیکال‌های آزاد تولید می‌کند که به طور برگشت‌ناپذیر ساختار سلولی را مختل می‌سازد؛ به غشاء، DNA و پروتئین‌ها آسیب می‌رساند و به نکروز، پژمردگی برگ و به دنبال آن تغییر رنگ ریشه و تأخیر در رشد اندام هوایی منجر می‌شود (Dixit et al, 2015).

صنایع فلزی و معدنی به واسطه مصرف سوخت‌های فسیلی برای تولید انرژی، به انتشار ذرات معلق به ویژه کربن نسوخته منجر می‌شود که از طریق دودکش در هوای محیطی تخلیه و سرانجام بر سطح زمین رسوب می‌کند. از سوی دیگر، انتقال مواد اولیه معدنی و فلزی به کارخانه و تخلیه و بارگیری آن، به انتشار پودر و غبار این مواد در هوای محیطی آلودگی محیط زیست منطقه منجر می‌شود. ناحیه غربی شهر بندرعباس که محل تجمع صنایع فلزی - معدنی است، انتشار مواد آلاینده از طریق دودکش صنایع، حمل و بارگیری مواد و انتشار آن از ترافیک خودرویی، به آلودگی این منطقه

منجر شده است. منطقه یک، بخش ساحلی است و درختچه‌های بومی شامل آکاسیا، کهور و کُنار، گیاهان غالب آن هستند که نسبت به شرایط محیطی و آب و هوایی محل مقاوم‌اند، اما توسعه و افزایش صنایع در این منطقه به تشدید آلودگی محیط زیستی منجر می‌شود؛ به گونه‌ای که غلظت فلزات سنگین، گازهای سمی و آلاینده‌های ثانویه افزایش می‌یابد و محیط زیست منطقه را به خطر می‌اندازد. صنایع آلومینیوم، مجتمع‌های فولادی، پالایشگاه‌های تولید فرآورده‌های نفتی، کارخانه تولید روی و دیگر صنایع، از سال ۱۳۷۰ رشد زیادی داشتند که این روند توسعه به افزایش سطح آلودگی محیط زیست منجر شد. مدیریت و برنامه‌ریزی در راستای پایداری اکوسیستم، مستلزم ارزیابی و شناخت سطح آلودگی در محیط زیست منطقه است و پژوهش حاضر نیز در این راستا انجام می‌شود. ناحیه صنعتی غرب بندرعباس مشتمل بر چندین مجتمع صنعتی فلزی - معدنی است که می‌توان به پالایشگاه نفت بندرعباس، پالایشگاه نفت ستاره خلیج فارس، فولاد هرمزگان، آلومینیوم المهدی، فولاد کاوه، صبا فولاد و شرکت تولید روی بندرعباس اشاره کرد. این صنایع در فاصله کمتر از پنج کیلومتری اسکله شهید رجایی قرار دارند و محور مواصلاتی پر ترافیک بندرعباس - بندرخمیر نیز از میان این صنایع عبور می‌کند. تجمع این صنایع و ترافیک زیاد حمل و نقل جاده‌ای، به آلودگی شدید محیط زیست و اکوسیستم‌های این ناحیه منجر می‌شود، اما سطح آلودگی آن در جنبه‌های مختلف نامعلوم مانده است.

فلزات سنگین در خاک معدن متروکه سرب - روی آی قلعه سی در جنوب شرقی تکاب ارزیابی شد و نتایج نشان داد که متوسط غلظت فلزات سرب، روی، آرسنیک، مس و جیوه در نمونه‌های خاک حاصل از باطله‌ها نسبت به متوسط خاک جهانی به جز کادمیوم و نسبت به استاندارد خاک هلند به جز جیوه بالا است. در نمونه‌های خاک اطراف معدن نیز غلظت فلزات بالا است و با دور شدن از رگه معدنی و معدن متروکه از غلظت آنها کاسته می‌شود. خاک منطقه از نظر شاخص - های زمین انباشت، ضریب غنی‌شدگی، ضریب و درجه آلودگی و شاخص بار آلودگی برای عناصر سرب و روی، در اطراف محدوده معدنی آلودگی بالا تا بی‌نهایت دارد (Dahrazma et al, 2013).

تأثیر پساب صنعتی بر آلودگی خاک با فلزات سنگین در جنوب غربی اصفهان نیز ارزیابی شد و نتایج نشان داد که با توجه به استانداردهای ارائه شده برای زمین‌های کشاورزی و اطراف مناطق صنعتی در مورد غلظت فلزات سنگین و مقایسه نمونه‌های خاک با استانداردهای جهانی، می‌توان خاک منطقه را تنها از نظر فلز نیکل آلوده دانست که این مسئله ممکن است به آلودگی پایین پساب مورد مطالعه با فلزات سنگین نسبت داده شود (Nasr Azadan and Hodji, 2013). آلودگی فلزات سنگین در خاک‌های مجاور صنایع فولاد کرمان نیز با شاخص‌های آلودگی ارزیابی شد. نتایج نشان داد که غلظت نیکل، روی، آهن، سرب، کروم و کادمیوم به ترتیب ۹/۹۸، ۵۴/۶۸، ۱۵۰۶۳/۳۳، ۲۰/۸۹، ۳/۵۴ و ۰/۰۳۸ میلی‌گرم در کیلوگرم بود. شاخص آلودگی نشان داد که نود درصد نمونه‌ها دارای آلودگی متوسط تا قابل توجه با عنصر سرب است. نتایج درصد شاخص غنی‌شدگی، غنای عنصر آهن (۶۸/۱۸ درصد) را نشان می‌دهد. مقادیر دیگر شاخص‌ها، بیانگر درجه پایین آلودگی خاک است. غلظت سرب و کادمیوم نیز بیشتر تحت تأثیر مجتمع‌های فولاد و غلظت سایر عناصر تحت تأثیر منابع طبیعی و انسانی است (Sistani et al, 2017). در حاشیه شهر شانگهای در کشور چین، پژوهشگران از خاک، برگ و غبار صنعتی رسوب کرده بر روی سطح برگ سبزیجات، نمونه‌برداری و غلظت فلزات سنگین را بررسی کردند. نتایج آنها

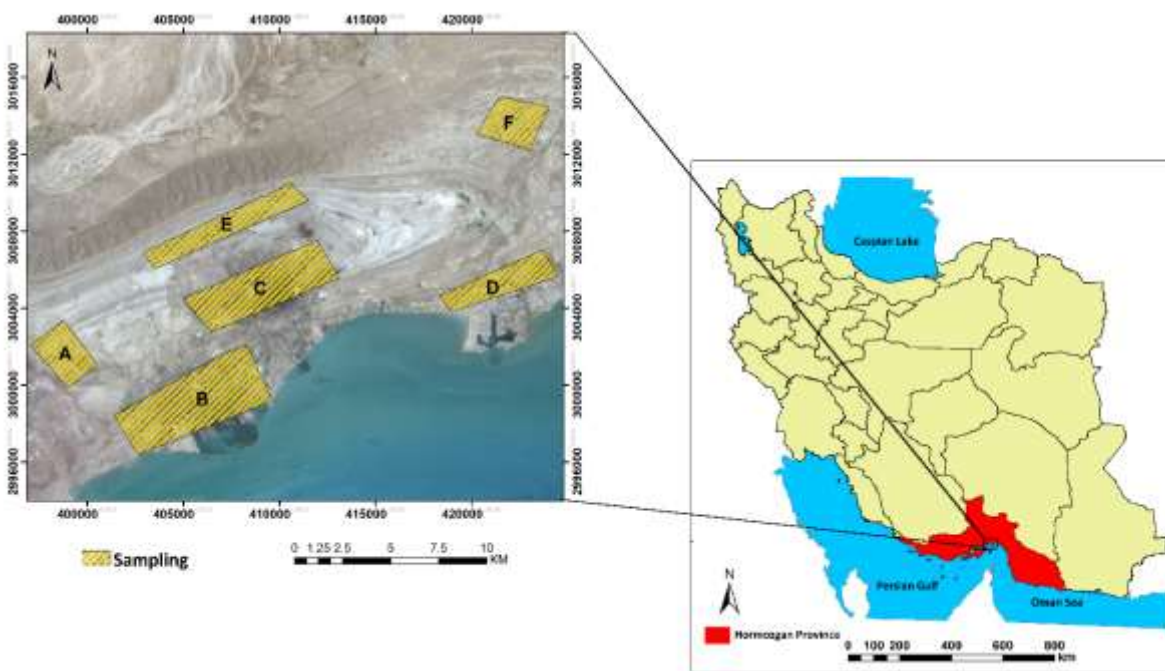
نشان داد که غلظت سرب در رسوبات غباری بر سطح برگ بیش از غلظت آن در خاک کشاورزی است که دلیل اصلی آن، انتشار غبارها از نیروگاه سوخت پسماندهای شهری است. اما غلظت کادمیوم، روی و جیوه در خاک کشاورزی بیش از غبارهای رسوب کرده بر روی برگ است و ضریب انتقال فلزات سنگین در خاک و سبزیجات بین ۰/۵ تا ۰/۷ می‌باشد (Bi et al, 2018). در شمال غربی کشور چین در شهر صنعتی لانژو نیز غلظت فلزات سنگین در غبارهای صنعتی اندازه‌گیری شد و نتایج نشان داد که شاخص خطر اکولوژیکی این ذرات بالاست، غلظت عناصر نیز بیش از مقدار زمینه‌ای آن در خاک است و مس بیشترین فراوانی غلظت بالا را دارد (Jiang et al, 2018). در شهر جودپور راجستان هند، ذرات غبار بر سطح برگ کمربند سبز شهری رسوب کرد و در آن، غلظت فلزات سنگین به‌ویژه سرب و مس از حد مجاز بیشتر بود. اما با توجه به اینکه اندام‌های گیاهی این درختان غیر خوراکی است، مشکلی در محیط زیست منطقه به‌وجود نیامد و حتی به‌عنوان یک روش گیاه‌پالایی برای این شهر شناخته شد (Poppek et al, 2021). استفاده از گیاهان برای حذف آلاینده‌ها از محیط‌زیست یا بی‌خطر کردن آنها، به‌عنوان گیاه‌پالایی شناخته می‌شود که روشی سازگار با محیط زیست است تا خاک‌های آلوده به فلزات سنگین را پالایش کند. درختان با ریشه‌های قوی قابلیت بیشتری در گیاه‌پالایی دارند؛ به طوری که در کمربند جاده‌ای پولیسیا در اوکراین، درختان جنگلی که ریشه‌های قوی دارند، فلزات سنگین ناشی از رسوب غبار جاده‌ای و ذرات خروجی از آگروز خودروها را جذب و از انتشار آن در اکوسیستم منطقه جلوگیری می‌کنند (Maksimtsev et al, 2021). در نواحی مجاور کارخانه سیمان ایلام درختان پهن‌برگ به‌ویژه گونه‌های بلوط، عرعر و اکالیپتوس می‌توانند فلزات سنگین زیادی را جذب کنند. در باتلاق حویزه در جنوب عراق، غلظت فلزات سنگین در گیاهان آبی بیش از حد مجاز جهانی آن است که این شرایط باعث شده باتلاق به یک منبع آلودگی تبدیل شود (AI-Abbawy et al, 2021). در مناطقی که از درختچه‌های کهور برای خوراک دام استفاده نمی‌شود، می‌توان از آنها به‌عنوان نشانه‌های زیستی استفاده کرد؛ به گونه‌ای که در پنج نقطه از مکزیک، از برگ این درختان برای بررسی فلزات سنگین استفاده شد. نتایج نشان داد که غلظت شش برابر کادمیوم نسبت به حد استاندارد آن، ناشی از غبارهای صنعتی و غلظت بالای سرب، ناشی از کشاورزی و تردد خودروها بود (Jáuregui et al, 2018). در هندوستان از درختان بی‌ثمر و ثمردار برای ارزیابی فلزات سنگین استفاده شد و نتایج نشان داد که درختان آکاسیا - که از برگ و میوه آن برای دام استفاده می‌شود - یک انباشت‌گر زیستی فلزات سنگین است و اگرچه در جذب فلزات سنگین از خاک نقش مهمی دارد، با توجه به اینکه دام‌ها میوه آن را مصرف می‌کنند نمی‌توان از آن برای گیاه‌پالایی استفاده کرد (Maiti et al, 2016). درختان کهور با ریشه‌های بلند و قدرتمندی که دارند می‌توانند فلزات سنگین را از محیط جذب کنند. پژوهشگران از این درختان نیز به‌عنوان نشانه‌های زیستی برای فلزات سنگین و گیاه‌پالایی استفاده می‌کنند (Keeran et al, 2019).

اگرچه مطالعاتی به صورت طرح‌های بین‌سازمانی در خصوص آلودگی هوا یا ارزیابی محیط زیستی انجام شده، ارزیابی آلودگی خاک، فلزات سنگین یا اثرات آن بر گیاهان منطقه - که بیانگر زیستی است - بررسی نشده است؛ در حالی که می‌توان با ارزیابی سطح آلودگی در گیاهان، سطح آلاینده‌گی محیط زیست را نمایان ساخت. بنابراین، رهیافت اصلی پژوهش حاضر، ارزیابی سطح آلودگی محیط‌زیست ناحیه صنعتی غرب بندرعباس است که با بررسی فلزات سنگین در

خاک و برگ درختچه‌های آکاسیا در منطقه انجام و واکنش این درختچه‌ها - که بومی این ناحیه است - در برابر آلودگی فلزات سنگین بررسی شد.

۲- منطقه مورد مطالعه

این پژوهش در راستای اثرگذاری آلودگی هوای ناشی از ناحیه صنعتی در غرب بندرعباس بر اکوسیستم خشکی، به شعاع پانزده کیلومتر به جهات چهارگانه به مرکزیت "منطقه ویژه اقتصادی خلیج فارس" انجام شد. منطقه ویژه اقتصادی صنایع معدنی و فلزی خلیج فارس، در کیلومتر ۱۳ بزرگراه شهید رجایی در غرب بندرعباس در استان هرمزگان - سواحل شمالی خلیج فارس - واقع شده است. این منطقه صنعتی ۴۵۰۰ هکتار وسعت دارد. منطقه در دامنه ارتفاعی صفر تا ۳۴ متر از سطح دریا گسترده شده است و کمتر از دو کیلومتر از ساحل فاصله دارد. مهم‌ترین صنایع مستقر در منطقه ویژه شامل پالایشگاه نفت بندرعباس، پالایشگاه نفت ستاره خلیج فارس، آلومینیوم مهدی، مجتمع فولاد هرمزگان، فولاد کاوه جنوب کیش، شرکت تولید روی بندرعباس، صبا فولاد خلیج فارس، شرکت مادکوش و صنایع وابسته در مقیاس کوچک و انبارهای نفتی و معدنی است (شکل ۱). بررسی مطالعات گذشته بیانگر تأثیر آلودگی هوا بر اکوسیستم‌های نواحی اطراف صنایع است؛ به همین دلیل، در پژوهش حاضر برای شناخت این تأثیرات، از خاک و گیاهان نواحی اطراف منطقه ویژه اقتصادی خلیج فارس نمونه برداری شد. برای اندازه‌گیری غلظت فلزات سنگین در خاک و پاسخ درختچه‌های آکاسیا نسبت به تنش آلودگی، شش نقطه در محدوده مورد مطالعه نشانه‌گذاری و از خاک و برگ درختچه‌های آکاسیای این مکان‌ها نمونه برداری شد (جدول ۱).



شکل ۱: منطقه مورد مطالعه و نقاط تعیین شده برای نمونه برداری خاک و برگ درختچه‌های آکاسیا

جدول ۱: نقاط تعیین شده برای اندازه‌گیری خاک و برگ درختچه‌های آکاسیا برای جامعه آزمایش

ردیف	نشانه	محل
۱	A	شرق گنبد نمکی گچین (بخش بایر در غرب ناحیه صنعتی)
۲	B	اسکله شهید رجایی (جنوب ناحیه صنعتی)
۳	C	ناحیه صنعتی (منطقه ویژه اقتصادی خلیج فارس)
۴	D	اطراف اسکله باهنر (شرق ناحیه صنعتی)
۵	E	شمال ناحیه صنعتی (اراضی بایر شمال پالایشگاه نفت بندرعباس)
۶	F	شاهد (نزدیک روستای تل سیاه)

۳- مواد و روش

نمونه‌برداری از خاک و برگ

جامعه آزمایش در قالب بلوک‌های کامل تصادفی ($RCBD^1$) اجرا شد. طرح ذکر شده یکی از طرح‌های آزمایشی است که در کشاورزی برای نمونه‌برداری از خاک و گیاه استفاده می‌شود. منطقه به چندین بلوک تقسیم می‌شود که در هر بلوک، تکرار نمونه‌برداری وجود دارد و این قطعه‌بندی زمین به نمونه‌برداری از خاک کمک می‌کند تا از محل‌های مناسب نمونه‌برداری شود. از هر محل مورد نظر، ده نمونه (تکرار) خاک در عمق صفر تا ده سانتی‌متری نمونه‌برداری شد، سپس در پاکت قرار گرفت و برچسب زده شد. برای سنجش غلظت فلزات سنگین نیز نمونه‌های خاک شامل سرب (Pb)، کادمیوم (Cd)، روی (Zn)، مس (Cu)، کروم (Cr) و نیکل (Ni) به آزمایشگاه محیط زیست بندرعباس انتقال یافت. پس از الک کردن و پودر کردن نمونه‌های خاک، غلظت فلزات سنگین در هر نمونه با استفاده از دستگاه جذب اتمی (AAS) به روش شعله سنجیده شد. همچنین در محدوده مورد مطالعه، از نقاط تعیین شده و برگ درختچه‌های آکاسیا نمونه‌برداری و به آزمایشگاه منتقل شد. فلزات سنگین نیز بر حسب میلی‌گرم در کیلوگرم و با استفاده از دستگاه جذب اتمی سنجیده شد (Ren et al, 2022). آکاسیای چتری (*Acacia tortilis*) نام گونه‌ای از نوع آکاسیا و از خانواده بقولات است و اغلب شاخه‌های خاردار تولید می‌کند. این گیاه به‌طور طبیعی در طیف وسیعی از خاک می‌روید و به خشکی مقاومت دارد. آکاسیا به کاهش فرسایش آبی و بادی، حفاظت از آب و خاک، افزایش تنوع گونه‌ای، ایجاد چشم‌اندازهای زیبا، افزایش نفوذپذیری آب و سایر کارکردهای زیست‌محیطی منجر می‌شود. گونه اصلی این گروه با داشتن خار، برگ‌های کوچک، تا حدودی رنگ‌پریدگی برگ‌ها، خزان یا کاهش فوق‌العاده سطح برگگی در فصل خشک سال و به‌ویژه تاج سرسخت و پخ یا چتری بودن آن و وابستگی به سفره‌های آب زیرزمینی در بندرعباس، تراکم بالایی دارد و جزء گونه‌های بیابانی محسوب می‌شود.

¹ Randomized Complete Block Design

پس از نرمال‌بودن داده‌ها، از آزمون پارامتریک تحلیل واریانس یک‌طرفه (ANOVA) برای مقایسه غلظت فلزات سنگین استفاده شد. برای شناسایی اختلاف میانگین فلزات سنگین در بین نقاط نمونه‌برداری شده، از آزمون مقایسه میانگین دانکن استفاده و نمودار فراوانی و اختلاف آنها با نرم‌افزار SPSS تحلیل شد.

ارزیابی آلودگی فلزات سنگین

برای تعیین غلظت زمینه‌ای فلزات سنگین، از نقطه شاهد به دور از ناحیه صنعتی استفاده و غلظت زمینه‌ای محلی تعیین شد. اگرچه متوسط غلظت‌های زمینه‌ای جهانی و استانداردهای آمریکا، ژاپن و دیگر استانداردها وجود دارد، با توجه به تفاوت‌های زمینه‌ای و وجود عناصر متفاوت در خاک‌های هر منطقه از جهان، از غلظت محلی منطقه مورد مطالعه برای غلظت زمینه‌ای استفاده شد. سپس شاخص‌های آلودگی خاک و گیاه در محدوده صنعتی با این غلظت محلی مقایسه شد.

شاخص زمین‌انباشتگی ژئوشیمیایی^۱

شاخص زمین‌انباشتگی ژئوشیمیایی، سطح آلودگی فلزات سنگین در خاک را نسبت به متوسط و استاندارد آن مقایسه می‌کند و از رابطه ۱ به دست می‌آید:

$$I_{geo} = \log_2 (C_n / 1.5 B_n)$$

رابطه ۱

که در آن، I_{geo} معرف شاخص زمین‌انباشتگی، C_n غلظت اندازه‌گیری شده فلز سنگین در نمونه و B_n غلظت زمینه‌ای همان فلز سنگین است. ضریب ۱/۵ نیز برای کمینه کردن تغییرات احتمالی در غلظت‌های زمینه‌ای ناشی از فعالیت‌های زمین‌شناسی انجام می‌شود (Barbieri, 2016).

جدول ۲: درجه‌بندی سطح آلودگی فلزات سنگین براساس شاخص تجمع ژئوشیمیایی مولر (Muller, 1979)

ردیف	آلودگی	شاخص I_{geo}	عدد به دست آمده برای شاخص تجمع ژئوشیمیایی
۱	کاملاً ناآلوده	۰	۰
۲	نا آلوده تا آلودگی متوسط	۱	۰ - ۱
۳	متوسط آلودگی	۲	۱ - ۲
۴	آلودگی متوسط تا شدید	۳	۲ - ۳
۵	آلودگی شدید	۴	۳ - ۴
۶	آلودگی شدید تا بسیار شدید	۵	۴ - ۵
۷	آلودگی بسیار شدید	۶	۵

^۱ Geo Accumulation Index

شاخص آلودگی (CF¹)

این شاخص از تقسیم غلظت فلز در نمونه برداشت شده به غلظت همان فلز در نمونه متوسط (در این مطالعه نمونه شاهد) به دست می‌آید (جدول ۳):

جدول ۳: رده‌بندی ضریب آلودگی (CF) فلزات سنگین

ردیف	ضریب آلودگی CF	ضریب آلودگی
۱	کوچک‌تر از ۱	آلودگی پایین
۲	۱ تا ۳	آلودگی متوسط
۳	۳ تا ۶	آلودگی قابل توجه
۴	بزرگ‌تر مساوی ۶	آلودگی بسیار بالا

شاخص بار آلودگی (PLI²)

این شاخص، تخمینی از سطح آلودگی فلزات را نشان می‌دهد. این شاخص از طریق حاصل ضرب شاخص‌های آلودگی فلزات به صورت رابطه ۲ محاسبه می‌شود (Mohiuddin et al, 2010):

$$PLI = \sqrt[3]{CF_{cd} \times CF_{zn} \times CF_{pb} \times CF_{cu}} \quad \text{رابطه ۲}$$

شاخص تجمع زیستی (BCF³)

این شاخص، از تقسیم غلظت فلز سنگین در بافت گیاهی به غلظت همان عنصر در خاکی که گیاه در آن مستقر است، به دست می‌آید (رابطه ۳). اگر مقدار این شاخص بیش از یک باشد، بیانگر بیش انباشت گر است. اگر بین ۰/۱ تا ۱ باشد، بیانگر متوسط انباشت گر و اگر کمتر از ۰/۱ باشد، غیر انباشت گر خواهد بود (Almahasheer, 2019).

$$BCF = C_{Plant\ Tissue} / C_{Soil} \quad \text{رابطه ۳}$$

شاخص انباشت (MAI⁴)

از آنجایی که گیاهان می‌توانند چندین فلز را به‌طور هم‌زمان در خود انباشته کنند، شاخص تجمع فلز برای بررسی مقدار انباشت هم‌زمان فلزات گوناگون، توسط گونه‌های گیاهی جامعه آزمایش از طریق رابطه ۴ محاسبه می‌شود (Hu et al, 2014):

$$MAI = \left(\frac{1}{N}\right) \times \sum_{j=1}^N I_j \quad \text{رابطه ۴}$$

¹ Contamination factor

² Pollution Load Index

³ Bioaccumulation index

⁴ Metal Accumulation index

که در آن، N تعداد فلزات اندازه‌گیری شده (شش فلز سنگین در پژوهش حاضر) و Ij برای هر فلز، از تقسیم میانگین غلظت در اندام گیاه بر مقدار انحراف معیار آن محاسبه می‌شود.

شاخص ارزیابی اکولوژیکی (RI¹)

شاخص خطر اکولوژیکی، شاخص پاسخ سمی بودن برای فلزات کادمیوم، مس، سرب و روی به ترتیب برابر ۳۰، ۵، ۵ و ۱ است که در پژوهش حاضر توان خطر اکولوژیکی براساس رابطه ۵ محاسبه می‌شود (Hakanson, 1980):

$$E_r^i = \frac{c_i^i}{c_0^i} \times T_r^i \quad \text{رابطه ۵}$$

$$RI = \sum_{i=1}^7 E_r^i \quad \text{رابطه ۶}$$

که Eri شاخص توان خطر اکولوژیکی، Ci و C0i به ترتیب مقدار اندازه‌گیری شده و مقدار طبیعی و Tri برابر شاخص پاسخ سمی بودن فلز (Zn=1, Pb=5, Cd=30, Cu = 5) است (Liu et al, 2018). طبقه‌بندی سطح آلودگی فلزات سنگین در خاک و برگ گیاهان با شاخص‌های ذکر شده، در جدول ۴ ارائه شده است.

جدول ۴: ارزیابی خطر اکولوژیکی فلزات سنگین

شاخص خطر RI	خطر اکولوژیکی
کوچک‌تر از ۱۵۰	خطر پایین
۱۵۰ - ۳۰۰	خطر متوسط
۳۰۰ - ۶۰۰	خطر زیاد
بزرگ‌تر از ۶۰۰	خطر خیلی زیاد

ضریب تجمع زیستی فلزات سنگین در خاک بستر و برگ درختچه‌های آکاسیا^۲، از طریق معادله ضریب انتقال (غلظت فلز در بافت گیاه تقسیم بر غلظت فلز در خاک بستر) محاسبه شد. براساس این معادله، اگر ضریب انتقال بیش از یک باشد، برای تثبیت فلز سنگین و گیاه پالایی مناسب است.

واکنش درختچه‌های آکاسیا در برابر فلزات سنگین در خاک و برگ نیز بررسی شد. پارامترهای بیوشیمیایی آکاسیا شامل کلروفیل a، b و all، پرولین، اسید آسکوربیک، محتوای آب نسبی برگ و PH اندازه‌گیری شد. کلروفیل‌ها به روش آرنون با دستگاه اسپکتروفتومتر اندازه‌گیری (Palta, 1990) و محتوای آب نسبی برگ نیز با رابطه ۷ اندازه‌گیری شد.

غلظت اسید آسکوربیک نیز به روش اسمیرنوف اندازه‌گیری شد (Smirnoff, 1996).

¹ Risk Index

² Acacia Shrubs

شاخص تحمل به آلودگی هوا (APTI¹): بعد از اندازه‌گیری چهار پارامتر فوق، شاخص تحمل به آلودگی هوا (APTI) با استفاده از رابطه ۸ محاسبه شد (Singh and Rao, 1983):

$$\text{APTI} = [\text{AA} (\text{ph} + \text{Tcl}) + \text{RWC}] / 10 \quad \text{رابطه ۸}$$

در این رابطه، منظور از AA (اسید آسکوربیک)، TcI (کلروفیل کل) و RWC (محتوی آب نسبی برگ) است.

۴- یافته‌ها (نتایج)

فلزات سنگین در خاک

برای غلظت Cu در بین نقاط B، C و E (به ترتیب اسکله شهیدرجایی، محوطه صنایع و پالایشگاه نفت بندرعباس) تفاوت معناداری وجود نداشت و بیشترین غلظت را به خود اختصاص داده بود و با دیگر نقاط در سطح ۹۹ درصد اختلاف معناداری داشت. نقطه شاهد (F) نیز در رتبه آخر قرار داشت و تنها با نقطه A فاقد اختلاف بود.

غلظت Cd در نقاط اندازه‌گیری شده در سطح ۹۵ درصد با هم اختلاف معناداری داشت و هر کدام در یک طبقه جداگانه قرار گرفت، فقط دامنه شرقی گنبد نمکی گچین (A) و اسکله شهید باهنر (D) در یک طبقه قرار داشت. به ترتیب محوطه صنایع (C)، اسکله شهیدرجایی (B) و پالایشگاه نفت بندرعباس (E)، بیشترین غلظت Cd را به خود اختصاص داد.

غلظت Cr در تمام نقاط اندازه‌گیری شده در سطح ۹۵ درصد با هم اختلاف معناداری داشت و هر کدام در یک طبقه جداگانه قرار گرفت. به ترتیب اسکله شهیدرجایی (B) و محوطه صنایع (C)، بیشترین غلظت کادمیوم را به خود اختصاص داد.

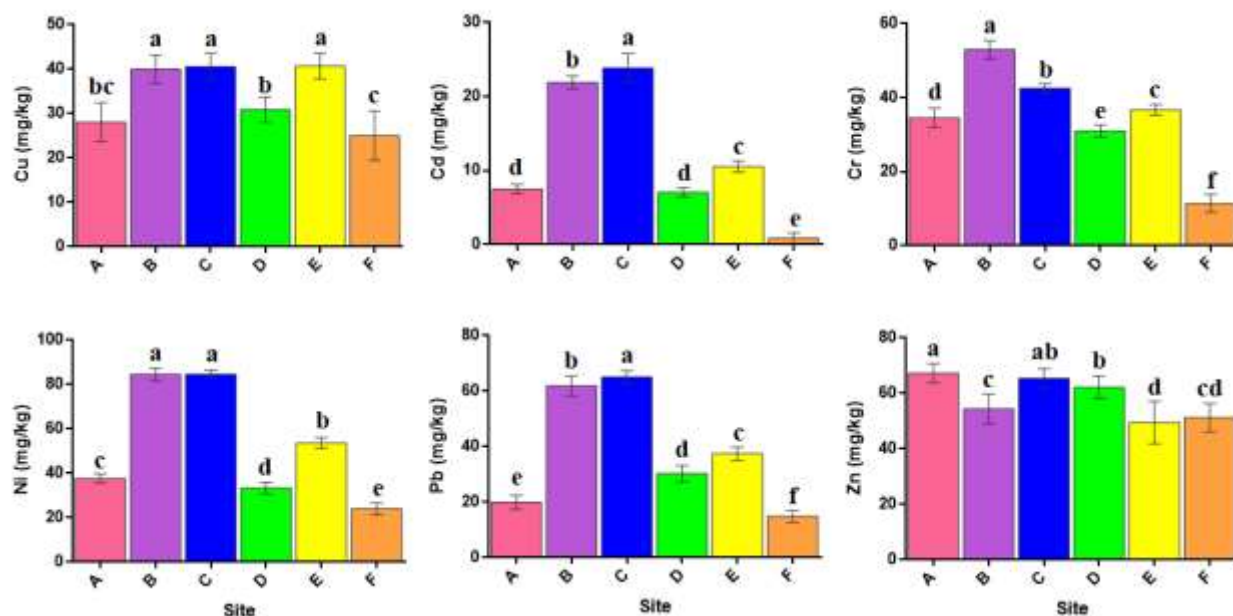
نیکل یکی از فلزات سنگینی است که در صنایع فولادی و آبکاری تولید و ضایعات آن به صورت عناصر پودری نیکل به محیط وارد می‌شود. نتایج نشان داد که اختلاف غلظت Ni در خاک‌های نقاط اندازه‌گیری شده در سطح ۹۹ درصد معنادار بود. بیشترین غلظت Ni نیز در اسکله شهیدرجایی (B) و محوطه صنایع (C) دیده شد که در یک طبقه بود و با دیگر نقاط اختلاف داشت. نقاط دیگر نیز هر کدام در یک طبقه جداگانه قرار گرفتند و با دیگر طبقات، اختلاف معناداری در سطح ۹۹ درصد داشتند.

غلظت Pb در تمام نقاط اندازه‌گیری شده در سطح ۹۵ درصد با هم اختلاف معناداری داشت و هر کدام در یک طبقه جداگانه قرار گرفتند. به ترتیب محوطه صنایع (C) و اسکله شهیدرجایی (B)، بیشترین غلظت کادمیوم را به خود اختصاص داد.

بیشترین غلظت Zn نیز در دامنه شرقی گنبد نمکی گچین (A) بود. محوطه صنایع و اسکله شهید باهنر (B و D) نیز در رتبه دوم بودند که با دیگر نقاط در سطح ۹۹ درصد اختلاف معناداری داشتند. اسکله شهیدرجایی (B) در رتبه سوم قرار

¹ Air Pollution Tolerance Index

داشت و با نقطه شاهد (F) فاقد اختلاف بود. کمترین غلظت Zn نیز در پالایشگاه نفت بندرعباس در شمال منطقه (E) دیده شد (شکل ۲).



شکل ۲: غلظت فلزات سنگین در خاک سطحی نقاط تعیین شده در منطقه مورد مطالعه

(*اندیس‌ها بیانگر اختلاف بین نقاط اندازه‌گیری شده با آزمون دانکن است).

غلظت فلزات سنگین در خاک، با شاخص‌های Igeo و CF ارزیابی شد و نتایج آن در جدول ۵ و ۶ ارائه شده است. بر اساس شاخص Igeo، فلزات Cu و Zn عمدتاً در طبقه غیرآلوده قرار داشتند و تنها در محوطه صنایع (C) آلودگی آن متوسط بود. آلودگی متوسط تا بسیار شدید نیز مربوط به فلزات Cd و Pb بود که در محوطه صنایع (C) آلودگی آن بسیار شدید بود. در اسکله شهید باهنر و پالایشگاه نفت بندرعباس (D و E) نیز آلودگی متوسط بود. برای Cr و Ni سطح آلودگی در اسکله شهیدرجایی و محوطه صنایع (B و C) آلودگی شدید تا بسیار شدید، اما در دیگر نقاط آلودگی متوسط بود (جدول ۵).

بر اساس شاخص CF، غلظت فلزات Cu و Zn در تمام نقاط آلودگی متوسط بود. غلظت Cd و Pb به جز نقطه شاهد، در دیگر نقاط آلودگی بسیار بالا بود. غلظت Cr آلودگی قابل توجه بود و غلظت Ni در نقاط B و C آلودگی بسیار بالا و در دیگر نقاط آلودگی قابل توجه داشت. در نقطه شاهد نیز همه فلزات آلودگی متوسط داشتند (جدول ۶).

جدول ۵: ارزیابی آلودگی خاک نقاط اندازه‌گیری شده با شاخص زمین انباشتگی

Ni	Cr	Pb	Cd	Zn	Cu	Igeo
۱/۳۲	۱/۲	۰/۴۱	۲/۳۲	۰/۳۵	۰/۱۴	گنبد نمکی گچین
آلودگی متوسط	آلودگی متوسط	غیر آلوده تا آلودگی متوسط	آلودگی متوسط تا شدید	غیر آلوده تا آلودگی متوسط	غیر آلوده تا آلودگی متوسط	(A)
۲/۴۹	۱/۸۲	۲/۰۴	۳/۸۶	۰/۰۵	۰/۶۴	اسکله شهید رجایی
آلودگی متوسط تا شدید	آلودگی متوسط	آلودگی متوسط تا شدید	آلودگی شدید	غیر آلوده تا آلودگی متوسط	غیر آلوده تا آلودگی متوسط	(B)
۸/۴	۴/۲	۶/۵۲	۲۳/۸	۱/۸۶	۲/۳۸	محوطه صنایع
آلودگی بسیار شدید	آلودگی شدید تا بسیار شدید	آلودگی بسیار شدید	آلودگی بسیار شدید	آلودگی متوسط	آلودگی متوسط تا شدید	(C)
۱/۱۵	۱/۰۴	۱	۲/۲	۰/۲۴	۰/۲۷	اسکله شهید باهنر
آلودگی متوسط	آلودگی متوسط	آلودگی متوسط	آلودگی متوسط تا شدید	غیر آلوده تا آلودگی متوسط	غیر آلوده تا آلودگی متوسط	(D)
۱/۸۴	۱/۲۹	۱/۳	۲/۸	۰/۰۵	۰/۶۷	پالایشگاه نفت بندرعباس
آلودگی متوسط	آلودگی متوسط	آلودگی متوسط	آلودگی متوسط تا شدید	غیر آلوده تا آلودگی متوسط	غیر آلوده تا آلودگی متوسط	(E)
۰/۶	۰/۳	۰/۰۱	۰/۰۷	۰/۰۳	۰/۰۲	شاهد
غیر آلوده تا آلودگی متوسط	غیر آلوده تا آلودگی متوسط	غیر آلوده تا آلودگی متوسط	غیر آلوده تا آلودگی متوسط	غیر آلوده تا آلودگی متوسط	غیر آلوده تا آلودگی متوسط	

جدول ۶: ارزیابی آلودگی خاک نقاط اندازه‌گیری شده با شاخص فاکتور آلودگی

Ni	Cr	Pb	Cd	Zn	Cu	CF
۳/۷	۳/۴	۲	۷/۵	۱/۹۲	۱/۶۵	گنبد نمکی گچین (A)
آلودگی قابل توجه	آلودگی قابل توجه	آلودگی متوسط	آلودگی بسیار بالا	آلودگی متوسط	آلودگی متوسط	
۸/۴	۵/۳	۶/۱	۲۱/۹	۱/۵	۲/۳	اسکله شهید رجایی (B)
آلودگی بسیار بالا	آلودگی قابل توجه	آلودگی بسیار بالا	آلودگی بسیار بالا	آلودگی متوسط	آلودگی متوسط	
۸/۴	۴/۲	۶/۵	۲۳	۱/۸	۲/۳	محوطه صنایع (C)
آلودگی بسیار بالا	آلودگی قابل توجه	آلودگی بسیار بالا	آلودگی بسیار بالا	آلودگی متوسط	آلودگی متوسط	
۳/۳	۳/۱	۳	۷	۱/۷	۱/۸	اسکله شهید باهنر (D)
آلودگی قابل توجه	آلودگی قابل توجه	آلودگی متوسط	آلودگی بسیار بالا	آلودگی متوسط	آلودگی متوسط	
۵/۳	۳/۶	۳/۷	۱۰	۱/۴	۲/۳	پالایشگاه نفت بندرعباس (E)
آلودگی قابل توجه	آلودگی قابل توجه	آلودگی قابل توجه	آلودگی بسیار بالا	آلودگی متوسط	آلودگی متوسط	
۲/۴	۱/۱	۱/۴	۰/۸	۱/۴	۱/۴	شاهد
آلودگی متوسط	آلودگی متوسط	آلودگی متوسط	آلودگی متوسط	آلودگی متوسط	آلودگی متوسط	

فلزات سنگین در برگ درختچه‌های آکاسیا

بر اساس غلظت Pb در برگ درختچه‌های آکاسیا، نقاط اسکله شهید رجایی، محوطه صنایع و پالایشگاه نفت بندرعباس (B, C و E) در طبقه اول قرار گرفتند و با دیگر نقاط اختلاف معناداری داشتند. نقطه شاهد (F) نیز در رتبه آخر قرار داشت.

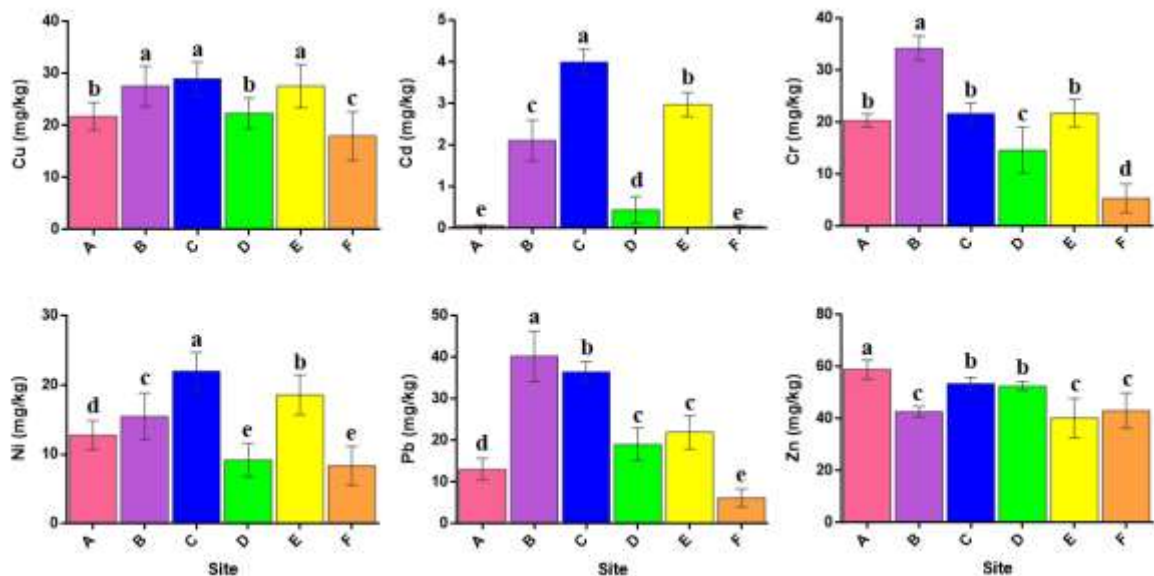
بیشترین غلظت Cd در برگ درختچه‌های آکاسیا در محوطه صنایع مستقر در منطقه ویژه اقتصادی خلیج فارس (C) بود که با دیگر نقاط در سطح ۹۹ درصد اختلاف معناداری داشت. پالایشگاه نفت بندرعباس (E) در رتبه دوم و اسکله شهید رجایی (B) در رتبه سوم قرار داشت و هر کدام در یک طبقه مجزا بودند و با دیگر نقاط در سطح ۹۹ درصد اختلاف معناداری داشتند.

بیشترین غلظت Cr در درختچه‌های آکاسیا در اسکله شهید رجایی (B) بود که با دیگر نقاط در سطح ۹۹ درصد اختلاف معناداری داشت. محوطه صنایع مستقر در منطقه ویژه اقتصادی خلیج فارس (C)، دامنه شرقی گنبد نمکی گچین (A) و پالایشگاه نفت بندرعباس (E) در طبقه دوم بودند و با هم اختلافی نداشتند، اما با دیگر نقاط در سطح ۹۹ درصد اختلاف معناداری داشتند. کمترین مقدار هم مربوط به نقطه شاهد (F) بود.

بیشترین غلظت Ni در درختچه‌های آکاسیا در محوطه صنایع (C) بود که با دیگر نقاط در سطح ۹۹ درصد اختلاف معناداری داشت. پالایشگاه نفت بندرعباس (E) نیز در طبقه دوم بود و با دیگر نقاط در سطح ۹۹ درصد اختلاف معناداری داشت. کمترین مقدار هم مربوط به نقطه شاهد (F) و اسکله شهید باهنر (D) بود که با تمام طبقات در سطح ۹۹ درصد اختلاف داشت، اما با هم اختلافی نداشت (شکل ۴-۳۳).

بیشترین غلظت Pb در درختچه‌های آکاسیا در اسکله شهید رجایی (B) بود که با دیگر نقاط در سطح ۹۹ درصد اختلاف معناداری داشت. محوطه صنایع مستقر در منطقه ویژه اقتصادی خلیج فارس (C) در طبقه دوم بود و با دیگر نقاط در سطح ۹۹ درصد اختلاف معناداری داشت. کمترین مقدار هم مربوط به نقطه شاهد (F) بود که با تمام طبقات در سطح ۹۹ درصد اختلاف داشت.

بیشترین غلظت Zn در نقطه A در گنبد نمکی گچین بود که با دیگر نقاط در سطح ۹۹ درصد اختلاف معناداری داشت. نقاط C و D که به محوطه صنایع و اسکله باهنر بازمی‌گشت، در طبقه دوم بود و با دیگر نقاط در سطح ۹۹ درصد اختلاف معناداری داشت. کمترین مقدار هم به نقاط B, E و F - که به اسکله شهید رجایی، پالایشگاه نفت بندرعباس و نقطه شاهد مربوط بود - بازمی‌گشت که در یک طبقه بود و با دیگر نقاط اختلاف معناداری در سطح ۹۹ درصد داشت (شکل ۳).



شکل ۳: غلظت فلزات سنگین در برگ درختچه‌های آکاسیا در نقاط تعیین شده در منطقه مورد مطالعه (*اندیس‌ها بیانگر اختلاف بین نقاط اندازه‌گیری شده با آزمون دانکن است).

شاخص تجمع زیستی (BCF) هر فلز سنگین در درختچه‌های آکاسیا در محدوده مورد مطالعه محاسبه شد. عنصر Pb بر اساس شاخص تجمع در گیاه به گونه‌ای است که محدوده مورد مطالعه، در طبقه انباشت‌گر متوسط قرار داشت؛ چون اعداد به دست آمده برای این شاخص در محدوده بین ۰/۱ تا ۱ و انباشتگی آن متوسط بود، برای دیگر عناصر (Zn و Cd، Cr، Ni) نیز بر اساس شاخص تجمع زیستی، درختچه‌های آکاسیا در همه نقاط در طبقه انباشت‌گر متوسط قرار داشت (جدول ۷).

جدول ۷: ارزیابی تجمع زیستی فلزات سنگین در درختچه‌های آکاسیا

Ni	Cr	Pb	Cd	Zn	Cu	BCF
۰/۳۳	۰/۵۹	۰/۶۵	۰/۰۰۹	۰/۸۷	۰/۷۷	گنبدنمکی گچین (A)
۰/۱۸	۰/۶۴	۰/۶۵	۰/۰۹	۰/۷۸	۰/۶۹	اسکله شهیدرجایی (B)
۰/۲۶	۰/۵۱	۰/۵۵	۰/۱۶	۰/۸۱	۰/۷۱	محوطه صنایع (C)
۰/۲۷	۰/۴۷	۰/۶۳	۰/۰۶	۰/۸۴	۰/۷۲	اسکله شهید باهنر (D)
۰/۳۴	۰/۵۹	۰/۵۸	۰/۲۸	۰/۸۱	۰/۶۷	پالایشگاه نفت بندرعباس (E)
۰/۳۵	۰/۴۷	۰/۴۱	۰/۰۶	۰/۸۱	۰/۷۲	شاهد

ارزیابی تجمعی فلزات سنگین در خاک و برگ درختچه‌های آکاسیا

شاخص تجمع فلز (MAI) نشان داد که بیشترین تجمع فلزات سنگین (شش فلز اندازه‌گیری شده مس، روی، کادمیوم، سرب، کروم و نیکل) در محوطه صنایع مستقر در منطقه ویژه اقتصادی خلیج فارس به دست آمد. پس از آن درختچه‌های آکاسیا در اسکله شهید رجایی بیشترین تجمع فلز را داشت. با توجه به اینکه غلظت فلزات سنگین در اندام هوایی آکاسیا در نقطه شاهد بسیار کم بود، شاخص تجمع فلز در این نقطه (شمال شرقی محدوده مورد مطالعه) کمترین مقدار را به خود اختصاص داد. بر اساس شاخص ارزیابی خطر اکولوژیکی (RI)، نقطه شاهد در طبقه خطر پایین آلودگی، اسکله شهید باهنر و دامنه شرقی گنبد نمکی گچین در طبقه خطر متوسط آلودگی، پالایشگاه نفت بندرعباس و زمین‌های شمال منطقه ویژه اقتصادی خلیج فارس در طبقه خطر آلودگی زیاد و ناحیه صنعتی و اسکله شهید رجایی در طبقه خطر آلودگی بالا و شدید قرار داشت (جدول ۸).

جدول ۸: ارزیابی انباشت فلزات سنگین در اکوسیستم محدوده مورد مطالعه

ردیف	Station	MAI	PLI	RI
۱	دامنه شرقی گنبدنمکی گچین (A)	۵۷/۲	۱/۴۵	۲۷۱
۲	اسکله شهید رجایی (B)	۶۱/۱	۱/۷۲	۷۵۷
۳	محوطه صنایع (C)	۸	۱/۵۷	۸۱۳
۴	اسکله شهید باهنر (D)	۵۴/۶	۱/۴۵	۲۶۰
۵	پالایشگاه نفت بندرعباس (E)	۴۴/۶	۱/۵۰	۳۸۲
۶	شاهد	۲۱/۷	۱/۳۶	۵۶

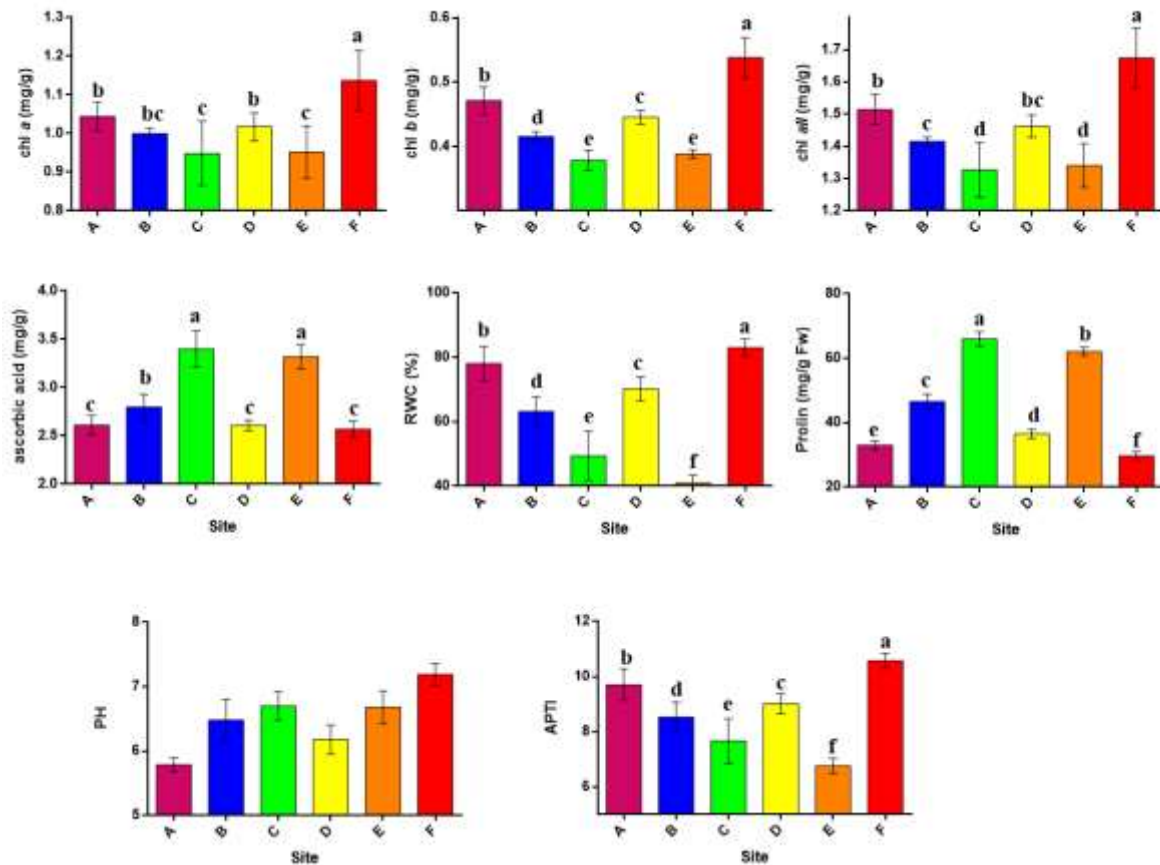
میانگین نرخ انتقال فلزات سنگین از خاک به درختچه‌های آکاسیا برای هر فلز محاسبه شد. نتایج نشان داد که به طور میانگین، بیشترین میزان انتقال از خاک به گیاه مربوط به عنصر Zn (0.79%) بود. پس از آن نیز Cu (0.68%)، Cr (0.67%) و Pb (0.67%) در رتبه‌های بعدی قرار داشتند. ضریب انتقال Ni از خاک به گیاه 0.19% به دست آمد. کمترین نرخ انتقال نیز مربوط به Cd (0.11%) بود. با توجه به اینکه عنصر Zn یکی از عناصر غذایی اصلی برای گیاه محسوب می‌شود، میزان انتقال آن به گیاه خطر آفرین نیست.

واکنش درختچه‌های آکاسیا به فلزات سنگین

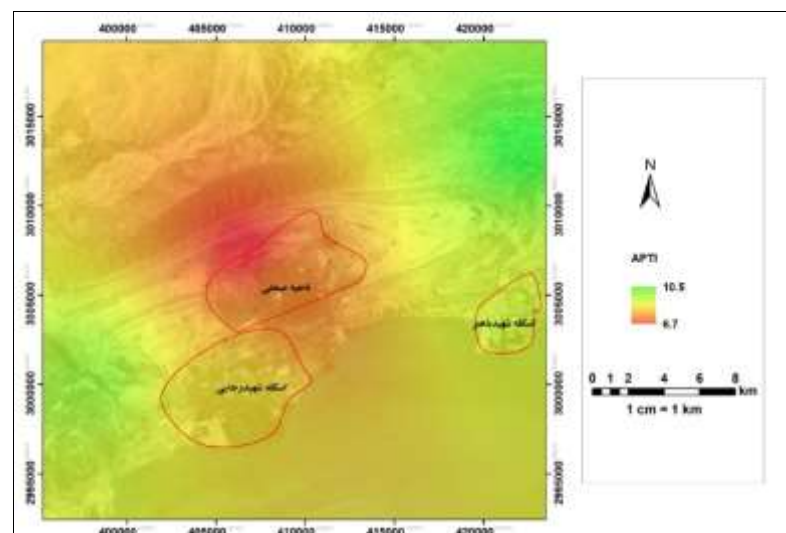
کلروفیل a که یکی از مهم‌ترین رنگیزه‌های فتوسنتزی در گیاه است، نسبت به تنش آلودگی خاک ناشی از فلزات سنگین و انتقال آن به درختچه‌های آکاسیا تغییر کرد و غلظت آن در نقاط مختلف در سطح ۹۹ درصد معنادار بود. بیشترین غلظت این رنگیزه فتوسنتزی در نقطه شاهد (F) بود که به دور از تنش آلودگی و میانگین محتوی کلروفیل a در آن، ۱/۲ میلی‌گرم در گرم بود. کمترین محتوی کلروفیل a نیز در محوطه صنایع (C) و پالایشگاه نفت بندرعباس (E) دیده شد که در تنش زیاد آلودگی خاک و هوا قرار داشت و ورود فلزات سنگین به خاک و درختچه‌های آکاسیا به کاهش رنگیزه فتوسنتزی این گیاه در این نقاط منجر شد. بیشترین غلظت کلروفیل b نیز در نقطه شاهد (F) دیده شد که به دور از تنش آلودگی و میانگین آن، ۰/۵۳۴ میلی‌گرم در گرم بود و با تمام نقاط دیگر در سطح ۹۹ درصد اختلاف

معناداری داشت. کمترین محتوی کلروفیل b نیز در محوطه صنایع (C) و پالایشگاه نفت بندرعباس (E) مشاهده شد که در تنش زیاد آلودگی خاک و هوا قرار داشت. کلروفیل کل - که از جمع کلروفیل‌های a و b به دست آمد - در بین نقاط اندازه‌گیری شده متفاوت بود و اختلاف آنها در سطح ۹۹ درصد معنادار بود. بیشترین مقدار کلروفیل کل نیز مربوط به نقطه شاهد (F) بود (۱/۷ میلی گرم در گرم) که به دور از آلودگی و تنش فلزات سنگین قرار داشت. اما کمترین محتوای این ماده، در سایت محوطه (C) و پالایشگاه نفت بندرعباس (E) به دست آمد که با دیگر نقاط در سطح ۹۹ درصد اختلاف معناداری داشت.

گیاه در تقابل با تنش‌های محیطی، ساز و کارهای دفاعی می‌گیرد. یکی از راهکارهای مناسب آنها در پاسخ به تنش‌های محیطی به‌ویژه آلودگی، افزایش آنزیم‌های سازگار در اندام‌های مختلف گیاه است. یکی از این آنزیم‌ها، اسید آسکوربیک و پرولین است که اعمالی مانند تنظیم اسمزی و حفاظت از ساختار سلولی را بر عهده می‌گیرد. نتایج این مطالعه نشان داد که در سایت‌های آلوده (B، C و E)، مقدار پرولین در درختچه‌های آکاسیا به دلیل آلاینده‌های هوا و خاک به‌ویژه سمی بودن فلزات سنگین افزایش یافت و بیشترین مقدار آن، دقیقاً در درختچه‌های آکاسیا در محوطه صنایع مستقر در منطقه ویژه اقتصادی خلیج فارس (C) بود که با دیگر طبقات نیز اختلاف معناداری در سطح ۹۹ درصد داشت. کمترین مقدار پرولین نیز در درختچه‌های آکاسیا در نقطه شاهد (F) بود که در طبقه آخر قرار گرفت و با دیگر نقاط اختلاف معناداری داشت. اسید آسکوربیک نیز در درختچه‌های آکاسیا در سایت‌های صنعتی و آلوده بندرعباس بالاتر از نقاط شاهد بود. بیشترین میزان این پارامتر، در درختچه‌های آکاسیا در پالایشگاه نفت بندرعباس و محوطه صنایع (C) بود که با دیگر نقاط اختلاف معناداری در سطح ۹۹ درصد داشت. اما غلظت این اسید در سه نقطه شاهد، اسکله شهید باهنر و دامنه شرقی گنبد نمکی گچین (A, D, F) تفاوتی نداشت و با هم در یک طبقه قرار گرفت. آب برگ تحت تأثیر تنش خشکی و دیگر تنش‌های محیطی است؛ در شرایط آلودگی و تنش فلز سنگین و سمی بودن گیاه، غلظت اسمولیت‌ها افزایش و محتوی آب برگ کاهش می‌یابد. در این مطالعه نیز نتایج نشان داد که آب برگ در سایت‌های آلوده C و F - که مربوط به محوطه صنایع و پالایشگاه نفت بندرعباس است - به کمترین مقدار خود رسید و اختلاف بین نقاط نمونه‌برداری در سطح ۹۹ درصد معنادار بود. بیشترین آب برگ نیز مربوط به نقطه شاهد (F) بود که به دور از آلودگی و آب برگ بین ۸۰ تا ۸۵ درصد بود. اما در سایت‌های آلوده منطقه ویژه اقتصادی خلیج فارس، این آب به کمتر از پنجاه درصد رسید که این امر، واکنش گیاه در برابر آلودگی را نشان می‌داد (شکل ۴). پس از اندازه‌گیری پارامترهای بیوشیمیایی درختچه‌های آکاسیا در تنش آلودگی خاک و گیاه به فلزات سنگین در سایت‌های مختلف، شاخص تحمل به آلودگی آن محاسبه شد. مطالعه نشان داد که از نظر شاخص تحمل به آلودگی، اختلاف بین نقاط شاهد و دیگر نقاط با هم متفاوت بود و اختلاف معناداری در سطح ۹۹ درصد داشت. در سایت‌های بسیار آلوده در اسکله شهید رجایی، محوطه صنایع و پالایشگاه نفت بندرعباس - که غلظت فلزات سنگین در خاک و آلودگی هوا بسیار زیاد بود - شاخص تحمل به آلودگی گیاه کاهش یافت و به زیر ۹ رسید. اما در دامنه شرقی گنبد نمکی گچین، اسکله شهید باهنر و نقطه شاهد، شاخص تحمل این گیاه بیش از ۹ بود و ارزیابی خوب و مناسبی داشت (شکل ۵).



شکل ۴: میانگین پارامترهای بیوشیمیایی درختچه‌های آکاسیا تحت تأثیر تنش‌های مختلف فلزات سنگین



شکل ۵: پهنه‌بندی شاخص تحمل به آلودگی در محدوده مورد مطالعه

۵- بحث و نتیجه‌گیری

ناحیه صنعتی غرب بندرعباس، آلوده‌ترین منطقه ساحلی استان هرمزگان است؛ زیرا تراکم صنایع، اسکله و حمل و نقل دریایی - خشکی و نیروگاه در آن بسیار زیاد می‌باشد. تعدد این منابع، آلودگی این ناحیه از بندرعباس را به همراه داشته‌است. انتشار آلاینده‌ها از صنایع نیز به آلودگی هوا منجر می‌شود، اما این آلاینده‌ها پس از طی زمانی مشخص، بر

سطح زمین رسوب می‌کند و به آلودگی اکوسیستم خاکی می‌انجامد. از طرف دیگر، ریختن مواد روغنی، پسماندها و پساب‌های صنعتی به سطح زمین، بر آلودگی خاک می‌افزاید (Pichtel, 2016). برای اندازه‌گیری سطح آلودگی فلزات سنگین و سمی در اکوسیستم، شاخص‌های ارزیابی عملکرد بسیار مطلوبی دارند و برنامه‌های مدیریتی برای حفاظت و پالایش محیط از آلودگی نیز بر اساس نتایج این شاخص‌ها نوشته می‌شوند (Sharma, 2017).

در این مطالعه، سطح آلودگی فلزات سنگین ناشی از صنایع در محدوده مورد نظر با شاخص‌های آلودگی ارزیابی شد. بر اساس شاخص زمین‌انباشتگی، نواحی نزدیک به صنایع و محوطه کارخانه‌های صنعتی و پالایشگاه نفت بندرعباس، بیشترین آلودگی را داشت و نسبت به استاندارد فلزات سنگین در خاک بسیار بالاتر بود. ارزیابی با شاخص زمین-انباشتگی برای فلزات روی و مس کم بود و در طبقه غیر آلودگی تا آلودگی متوسط قرار داشت؛ اما برای فلزات کادمیوم، سرب، کروم و نیکل در نقاط مورد اندازه‌گیری عمدتاً آلودگی متوسط تا بسیار شدید بود که در نقاط نزدیک به صنایع عمدتاً برای همه فلزات، سطح آلودگی متوسط تا شدید بود. هر چه از کارخانه‌های صنعتی دور شویم، از غلظت آلاینده‌ها کاسته می‌شود و خطر آلاینده‌گی آن نیز کاهش می‌یابد. شاخص آلودگی نیز برای کادمیوم، سرب، کروم و نیکل زیاد بود و آلودگی قابل توجه، متوسط و شدید بود. در کارخانه فولاد کرمان نیز خطر آلودگی خاک به کادمیوم و سرب بیش از سایر فلزات بود و خاک نزدیک کارخانه، در طبقه آلودگی متوسط تا قابل توجه قرار داشت (Sistani et al, 2017). در کارخانه فولاد یزد نیز خطر کادمیوم در خاک بسیار زیاد و آلودگی آن قابل توجه بود، اما خطر سرب کم بود و در طبقه آلودگی متوسط قرار داشت. ریسک آلودگی خاک اطراف معدن منگنز و نارچ به فلزات منگنز و سرب و تا حدی فلز مس، در اثر فعالیت‌های معدن‌کاری آلوده بود؛ اما درباره دو فلز روی و نیکل، غنی-شدگی قابل توجهی مشاهده نشد (Abbaszadeh et al, 2020). در خاک‌های پیرامون معدن سرب و روی کوشک بافق، خطر آلودگی سرب بسیار فراتر از استاندارد ایران و جهان بود، اما دیگر فلزات غلظت پایینی داشت و برای محیط زیست منطقه فاقد خطر بود (Sohrabizadeh et al, 2020). خاک‌های اطراف صنایع غیرفلزی شهرستان اردکان نیز بر اساس شاخص آلودگی عناصر سرب، روی و آرسنیک در کلاس آلودگی شدید و شاخص آلودگی دو عنصر روی و آلومینیوم در کلاس بسیار بالای آلودگی قرار داشت (Shojaee Barjoe et al, 2020). با توجه به تعدد صنایع در غرب بندرعباس و تراکم بالای ترافیک خودرویی و حمل و نقلی، غلظت سرب، کادمیوم، کروم و نیکل بیش از حد استاندارد بود و خطر آلودگی این فلزات متوسط، قابل توجه و شدید بود. در ناحیه صنعتی شمال شرقی کشور چین - که صنعت فولاد در آنجا غالب بود - شاخص زمین‌انباشت، آلودگی شدیدی را برای کادمیوم در خاک نشان داد که از صنعت فولاد انتشار می‌یافت (Qing et al, 2015). در ناحیه صنعتی آبشرون در کشور آذربایجان نیز غلظت فلزات سنگین در خاک با شاخص‌های زمین‌انباشت و شاخص آلودگی ارزیابی شد. نتایج نشان داد که منابع انسانی، دلیل اصلی آلودگی متوسط خاک این منطقه است (Khalilova and Mammadov, 2016). شاخص بار آلودگی در این مطالعه نیز نشان داد که نقاط نزدیک به صنایع و اسکله شهیدرجایی، بار آلودگی شدیدی داشتند؛ اما با فاصله گرفتن از صنایع، مقدار عددی این شاخص و بار آلودگی نیز کاهش یافت. بر اساس شاخص بار آلودگی، دلتای رود نیل در شمال مصر منطقه‌ای بسیار آلوده است؛ زیرا صنایع پساب و پسماندهای خود را به این دلتا تخلیه می‌کنند و این امر به تجمع آلاینده‌ها در خاک منجر می‌شود (Abowaly et al, 2021). اما در منطقه حویزه عراق اگرچه صنایع نفتی وجود داشت،

به دلیل عدم انتشار آلاینده‌ها در محیط، بار آلودگی فلزات سنگین در خاک اطراف صنایع بسیار کم بود و در طبقه متوسط قرار داشت (Awadh et al, 2015). در دشت میان‌آب خوزستان، خاک‌ها از لحاظ کادمیوم، سرب و آرسنیک آلودگی کمی داشتند و شاخص بار آلودگی آن نیز آلودگی اندکی را نشان می‌داد (Jorfi et al, 2017).

ارزیابی تجمع فلز و تجمع زیستی فلزات سنگین در بافت گیاهی می‌تواند تحلیل درستی از نقش گیاهان در حذف آلودگی از محیط باشد. پژوهشگران نیز از شاخص‌های BCF و MAI برای نواحی صنعتی و شهری استفاده کردند و نشان دادند که درختان کاج و شاه توت، قابلیت گیاه‌پالایی دارند و آلودگی را از محیط حذف می‌کنند (Ma et al, 2020). غبارهای صنعتی با رسوب بر سطح خاک، پس از مدتی توسط ریشه‌های گیاهان جذب می‌شوند و با توجه به قدرت تجمع‌پذیری فلزات سنگین، این عناصر در بافت گیاهی جمع می‌شوند. اگر گیاه موردنظر جزئی از زنجیره غذایی انسان و حیوان باشد، خطر زیستی آلودگی افزایش می‌یابد. در سبزیجات مصرفی شهر کرج شامل کلم، کاهو، پیاز و اسفناج، غلظت فلزات سنگین در برگ بیش از ساقه و ریشه است، همچنین در بین فلزات سنگین، غلظت کروم، منگنز و آهن در تمامی گیاهان بیش از حد استاندارد جهانی آن است (Rouniasi et al, 2016). در بزرگراه پولیسیا اوکراین نیز غلظت کادمیوم، مس و سرب بیش از حد استاندارد آن بود و ضریب انتقال آن از خاک به ریشه و از ریشه به برگ بسیار زیاد بود (Maksimtsev et al, 2021)، اما در صورتی که گیاه، فاقد میوه و در زنجیره غذایی نقش زیادی نداشته باشد و از طرفی، به آلودگی مقاوم باشد، می‌تواند در تثبیت آلودگی و حذف آلاینده‌ها از اکوسیستم‌های محیطی مهم باشد. پژوهشگران نشان داده‌اند که بیشترین تجمع فلزات سنگین در ریشه و برگ گیاهان است که می‌توان از آن به‌عنوان یک نشانه زیستی در بررسی‌های آلودگی زیستی استفاده کرد (Al-Awadhi and Aldhafiri, 2016). گیاهان به‌ویژه گونه‌های درختی، برای گیاه‌پالایی و حذف آلودگی فلزات سنگین از محیط زیست کاربرد زیادی دارند که می‌توان با جذب فلزات سنگین از خاک و هوای محل، از غلظت آلودگی بکاهد و به نوعی در حفاظت محیط زیست نقش زیادی داشته باشند. درختچه‌های آکاسیا و کهور از درختان بومی نواحی خشک است که با ریشه‌های عمیق، منابع معدنی و آب را از خاک جذب می‌کنند و زنده می‌مانند. اندام هوایی آکاسیا و میوه آن در زنجیره غذایی انسان نقشی ندارد و می‌توان از آن در گیاه‌پالایی محیط زیست از آلودگی استفاده کرد (Keeran et al, 2019). در شهر جودپور راجستان هند، غبارهای جوی بر سطح برگ در کمربند سبز شهری رسوب کرد و در آن غلظت فلزات سنگین به‌ویژه سرب و مس از حد مجاز بیشتر بود، اما با توجه به غیرخوراکی بودن اندام‌های گیاهی این درختان، مشکلی در محیط زیست منطقه به‌وجود نیامد و به‌عنوان یک روش گیاه‌پالایی برای این شهر شناخته شد (Popek et al, 2021). نتایج پژوهشگران در چین نیز نشان داد که کونوکارپوس، عرعر و ارس (Chai et al, 2019)، در مناطق گرمسیری هند گونه درختی چریش (Karmakar and Padhy, 2019) و در اکوادور درخت کاج (Alexandrino et al, 2020) در جذب فلزات سنگین ناشی از ترافیک شهری توان بالایی داشتند. برای گونه *Populus nigra L* بالاترین مقدار شاخص تجمع زیستی برای کادمیوم بود (Wu et al, 2010 & Saba et al, 2015). درختان توس نقره‌ای (*Betula pendula*) بیشترین تجمع را برای روی و سرب داشت که پژوهشگران در جنوب لهستان برای پالایش زیستی هوای شهری پیشنهاد دادند از این گونه گیاهی استفاده شود (Nadgórska-Socha et al, 2017). در نواحی مجاور کارخانه سیمان ایلام نیز درختان پهن‌برگ به‌ویژه گونه‌های بلوط، عرعر و اکالیپتوس می‌توانند فلزات سنگین زیادی را جذب کنند. در

نواحی خشک و بیابانی مکزیک، درختان آکاسیا توسط فلز آرسنیک آلوده می‌شوند و غلظت آن در برگ گیاهان به حداکثر می‌رسد. از درختچه‌های کهور می‌توان در مناطقی که برای خوراک دام‌ها از آن استفاده نمی‌شود، به‌عنوان نشانه‌های زیستی استفاده کرد. در مکزیک (Jáuregui et al, 2018)، محیط کشت آزمایشگاهی (Buendía-González et al, 2010) و پسماندهای صنعتی (Muro-González et al, 2020) درختچه‌های کهور در برابر آرسنیک، کادمیوم و کروم سازگاری بالایی داشت. در هندوستان نیز از درختان بی‌ثمر و ثمردار برای ارزیابی فلزات سنگین استفاده شد و نتایج نشان داد که درختچه‌های آکاسیا و کهور، یک انباشت‌گر زیستی فلزات سنگین است و در جذب این فلزات از خاک نقش مهمی دارد (Maiti et al, 2016). در پژوهش حاضر با استفاده از شاخص‌های ارزیابی آلودگی، توانایی درختچه‌های آکاسیای چتری - که بومی استان هرمزگان است - در تجمع فلزات سنگین در مکان‌های مختلفی از ناحیه آلوده غرب بندرعباس بررسی شد و نتایج نشان داد که درختچه‌های آکاسیا، انباشت‌گر متوسط فلزات سنگین است و می‌تواند در گیاه‌پالایی محیط‌زیست و حذف آلاینده‌ها از اکوسیستم نقش مثبتی داشته باشد.

در این مطالعه، واکنش بیوشیمیایی درختچه‌های آکاسیا در برابر آلودگی فلزات سنگین نیز اندازه‌گیری شد. آلودگی بر میزان رنگیزه‌های فتوسنتزی این درختچه‌ها در منطقه صنعتی غرب بندرعباس تأثیر دارد؛ به طوری که میزان کلروفیل a، b و کلروفیل کل در نقاط آلوده و نزدیک صنایع نسبت به نقطه پاک و شاهد و نقاط دور از صنایع در سطح ۹۹ درصد کاهش معناداری دارد. نتایج این پژوهش حاکی از آن است که آلودگی می‌تواند با کاهش رنگیزه‌ها به کاهش فتوسنتز در گیاه منجر شود. مطالعات نشان می‌دهد که یکی از دلایل کاهش میزان کلروفیل‌ها، وجود فلزات سنگین در تنش آلودگی خاک است؛ به گونه‌ای که یون منیزیم مرکزی کلروفیل می‌تواند به‌وسیله فلزات سنگین جایگزین شود. این امر به جلوگیری از به دام انداختن نور فتوسنتزی و در نتیجه از بین رفتن کلروفیل و کاهش فعالیت فتوسنتزی گیاه منجر می‌شود (Mosleh Arany et al, 2012). همچنین رادیکال‌های آزاد تولید شده در شرایط تنش آلودگی به فلزات سنگین می‌تواند به تجزیه کلروفیل‌ها منجر شود. در طی تنش آلودگی، کلروفیل در کلروپلاست‌ها تجزیه و ساختارهای تیلاکوئید محو می‌شود. فلزات سنگین به‌ویژه کادمیوم و سرب نیز با تولید اکسیژن‌های فعال، به مهار بیوسنتز کلروفیل و تخریب پراکسیداتیو اجزای سلولی منجر می‌شود. همچنین کادمیوم و سرب جایگزین فلزات آهن، روی و منیزیم در متالوآنزیم‌ها می‌شود و به کمبود این عناصر در گیاه می‌انجامد و در نتیجه، میزان کلروفیل کاهش می‌یابد. به طور کلی، غلظت کلروفیل‌ها در ناحیه صنعتی کمتر از شاهد است که می‌تواند به دلیل حضور کادمیوم، سرب، کروم و نیکل باشد که جایگزین فلزات ضروری در گیاه شده‌است (Virk and Singh, 1990). اسید آسکوربیک یک ترکیب آنتی‌اکسیدان قوی با وزن مولکولی کم و محلول در آب است. این آنزیم با رادیکال‌های آزاد اکسیژن ناشی از حضور فلزات سنگین در گیاه مبارزه می‌کند و آنها را خنثی می‌سازد. پرولین نیز یکی از امینواسیدهای ویژه است که در شرایط تنش آلودگی به فلزات سنگین، به گیاه کمک می‌کند تا بتواند آب کمتری از دست بدهد و مواد محلول و معدنی بیشتری جذب کند و گیاه در شرایط تنش زنده بماند. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که در درختچه‌های آکاسیا در شرایط تنش آلودگی به فلزات سنگین، غلظت اسید آسکوربیک و پرولین نسبت به شاهد در سطح ۹۹ درصد اختلاف دارد و افزایش می‌یابد. این افزایش به درختچه آکاسیا کمک می‌کند تا بتواند در شرایط تنش آلودگی به فیزیولوژی و ساز و کار خود ادامه دهد و زنده بماند (Nazari Alamdarloo et al, 2020). بنابراین،

اگرچه رنگیزه‌های فتوسنتزی درختچه‌های آکاسیا در برابر فلزات سنگین کاهش می‌یابد، افزایش اسید آسکوربیک و پرولین در گیاه باعث می‌شود گیاه زنده بماند، خود را برای تنش آلودگی آماده کند و این تنش نتواند آکاسیا را از بین ببرد. مشاهدات میدانی در مطالعه حاضر نیز نشان می‌دهد که درختچه‌های آکاسیا در نواحی صنعتی و شاهد از لحاظ ظاهری تفاوت چندانی ندارد و آکاسیا توانسته است در این شرایط سخت آلودگی زنده بماند. شاخص تحمل به آلودگی هوا در درختچه‌های آکاسیا در نقاط مورد مطالعه نیز محاسبه شد و نتایج آن نشان داد که در سایت‌های بسیار آلوده در اسکله شهید رجایی، محوطه صنایع و پالایشگاه نفت بندرعباس - که غلظت فلزات سنگین در خاک و آلودگی هوا بسیار زیاد است - شاخص تحمل گیاه کاهش می‌یابد و به ۷ می‌رسد؛ اما در دامنه شرقی گنبد نمکی گچین، اسکله شهید باهنر و نقطه شاهد، شاخص تحمل این گیاه بیش از ۹ است و ارزیابی خوب و مناسبی دارد. بنابراین، تفاوت زیادی بین نقاط شاهد و آلوده وجود ندارد و این امر تحمل درختچه‌های آکاسیا را در برابر تنش آلودگی نشان می‌دهد. در ناحیه شهری یزد، شاخص APTI - که شاخص تحمل به آلودگی هوا است - گیاهان اخترگلی، خرزهره، اقاچیا، سرو، شاه پسند، پیراکانتا، نارون و کاج بین ۷ تا ۸/۵ بود (Sabouri Hemmatabadi et al, 2022). در کویت پاکستان نیز این شاخص برای درختان بومی و بی‌ثمر بین هفت تا چهارده بود. همچنین این مطالعه نشان داد که در ناحیه صنعتی و بسیار آلوده غرب بندرعباس، شاخص تحمل به آلودگی هوا برای درختچه‌های آکاسیا بین هفت تا یازده است که در این شرایط تنش آلودگی، عدد این شاخص مناسب است. با توجه به روند خشکسالی‌های اخیر، کاهش سطح ایستایی آبخوان‌ها، سیلابی شدن بارش‌ها و افزایش روند فرسایش خاک‌های سطحی در منطقه، می‌توان با کاشت و توسعه درختچه‌های بومی به‌ویژه آکاسیای چتری و کهور ایرانی از فرسایش محیطی جلوگیری کرد و خطر حذف خاک‌های سطحی و از بین رفتن آن را به حداقل رساند. اگرچه صنایع غرب بندرعباس به آلودگی خاک، خشکسالی‌ها، ساخت و سازهای منجر به گسسته شدن ذرات خاک سطحی و در نهایت فرسایش خاک می‌انجامد، با توجه به تاب‌آوری درختچه‌های بومی آکاسیا در برابر آلودگی و تنش خشکی، کاشت این درختچه‌ها از فرسایش محیطی جلوگیری می‌کند.

نتیجه‌گیری

آلاینده‌های هوا که از دودکش صنایع، بارگیری و تخلیه مواد معدنی و فلزی، انتشار ذرات معلق از وسایل نقلیه و منابع نمک و آهک و دیگر فلزات و سنگ‌های معدنی در غرب بندرعباس انتشار می‌یابد و به هوای محیطی وارد می‌شود، پس از مدت زمانی بر سطح زمین رسوب می‌کند. در این مطالعه، فلزات سنگین در نقاط مختلف ناحیه اندازه‌گیری و سطح آلودگی خاک با شاخص‌های آلودگی ارزیابی شد. با فاصله از ناحیه صنعتی، غلظت فلزات سنگینی که بر محیط رسوب می‌کنند، کمتر می‌شود و در این مطالعه، بیشترین غلظت فلزات سنگین در محوطه صنایع و اسکله شهید رجایی است، اما با فاصله از صنایع به سمت شرق و غرب از غلظت آلاینده‌های خاک کاسته می‌شود. می‌توان گفت کادمیوم، روی و سرب، منشأ انسانی (صنعتی) دارد. درختچه‌های آکاسیا با جذب فلزات سنگین در خاک و تجمع عناصر در اندام گیاهی خود - که یک انباشت‌گر متوسط است - در حذف آلاینده‌ها از اکوسیستم‌های منطقه نقش زیادی دارند و می‌توانند در گیاه‌پالایی مفید واقع شوند. در این مطالعه پاسخ بیوشیمیایی درختچه‌های آکاسیا نسبت به آلودگی فلزات سنگین بررسی شد و نتایج نشان داد که اگرچه غلظت کلروفیل در درختچه‌های آلوده نسبت به شاهد کاهش یافته

است، با توجه به اینکه میزان اسید آسکوربیک و پرولین در گیاه افزایش می‌یابد و به تقویت و مقاومت گیاه در برابر آلودگی منجر می‌شود، می‌توان گفت این درختچه می‌تواند در برابر آلودگی فلزات سنگین واکنش بهینه داشته باشد. اما متأسفانه در بندرعباس، گونه مهاجم کهور آمریکایی (کرت دریایی) در میان کهورهای بومی و آکاسیا کاشته شده و به علت عمق ریشه‌های این گونه مهاجم، سلامت گونه‌های بومی به خطر افتاده است؛ در حالی که نتایج این پژوهش نشان می‌دهد آکاسیای چتری - که گونه بومی است - می‌تواند فلزات سنگین را جذب و آنها را از محیط حذف کند. بنابراین، پیشنهاد می‌شود با گسترش کهورهای ایرانی و آکاسیای چتری و حذف گونه مهاجم آمریکایی، علاوه بر احیای اکوسیستم منطقه صنعتی، از آلودگی محیط زیست جلوگیری و در راستای حفاظت از این محیط گام برداشته شود. در نواحی صنعتی هندوستان و چین که غلظت آلودگی فلزات سنگین در خاک بسیار زیاد است، از گیاهان بومی و بی-ثمر برای ارزیابی آلودگی خاک و حتی گیاه‌پالایی استفاده می‌شود. در این مطالعه علاوه بر اینکه سطح آلودگی خاک در اکوسیستم غرب بندرعباس ارزیابی شد، به واکنش درختچه‌های آکاسیا به غلظت‌های مختلف فلزات سنگین نیز پرداخته می‌شود. نتایج نیز بیانگر تاب‌آوری این گیاه بومی و مقاومت بالای آن در برابر آلودگی است که به دلیل جذب فلزات سنگین می‌تواند به پاک شدن خاک از آلودگی منجر شود و دیگر اجزای اکوسیستم را از گزند آلودگی حفظ کند. بنابراین، توصیه می‌شود کاشت درختچه آکاسیای چتری به همراه کهور ایرانی در منطقه غرب بندرعباس توسعه یابد.

منابع

1. Abbaszadeh, M.; Mirzaei, R.; & A. Bakhtiari, 2020. Risk Assessment and Spatial Modeling of Heavy Metals Contamination in Topsoil around Venarj Manganese Mine by Artificial Neural Networks Method, 24-44.
2. Abdu, N.; Abdullahi, A. A.; & A. Abdulkadir, 2017. Heavy metals and soil microbes, *Environmental chemistry letters*, 15(1), 65-84.
3. Abowaly, M. E.; Belal, A. A. A.; Abd Elkhalek, E. E.; Elsayed, S.; Abou Samra, R. M.; Alshammari, A. S.; ... & E. M. Eid, 2021. Assessment of soil pollution levels in North Nile Delta, by integrating contamination indices, GIS, and multivariate modeling, *Sustainability*, 13(14), 8027.
4. Al-Abbawy, D. A.; Al-Thahaibawi, B. M. H.; Al-Mayaly, I. K.; & K. H. Younis, 2021. Assessment of some heavy metals in various aquatic plants of Al-Hawizeh Marsh, southern of Iraq, *Biodiversitas Journal of Biological Diversity*, 22(1).
5. Al-Awadhi, J. M., & B. T. Aldhafiri., (2016). Heavy metal concentrations in roadside-deposited sediments in Kuwait City. *Arabian Journal of Geosciences*. 9(8), 1-14.
6. Alexandrino, K.; Viteri, F.; Rybarczyk, Y.; Andino, J. E. G.; & R. Zalakeviciute, 2020. Biomonitoring of metal levels in urban areas with different vehicular traffic intensity by using *Araucaria heterophylla* needles, *Ecological Indicators*, 117, 106701.
7. Almahsheer, H., 2019. High levels of heavy metals in Western Arabian Gulf mangrove soils, *Molecular biology reports*, 46(2), 1585-1592.
8. Asati, A.; Pichhode, M.; & K. Nikhil, 2016. Effect of heavy metals on plants: an overview. International, *Journal of Application or Innovation in Engineering & Management*, 5(3), 56-66.

9. Barbieri, M. J. J. G. G., 2016. The importance of enrichment factor (EF) and geoaccumulation index (Igeo) to evaluate the soil contamination, *J Geol Geophys*, 5(1), 1-4.
10. Bi, C.; Zhou, Y.; Chen, Z.; Jia, J.; & X. Bao, 2018. Heavy metals and lead isotopes in soils, road dust and leafy vegetables and health risks via vegetable consumption in the industrial areas of Shanghai, China, *Science of the Total Environment*, 619, 1349-1357.
11. Cetin, M.; Aljama, A. M. O.; Alrabiti, O. B. M.; Adiguzel, F.; Sevik, H.; & I. Zeren Cetin, 2022. Using topsoil analysis to determine and map changes in Ni Co pollution, *Water, Air, & Soil Pollution*, 233(8), 1-11.
12. Chai, M.; Li, R.; Ding, H.; & Q. Zan, 2019. Occurrence and contamination of heavy metals in urban mangroves: A case study in Shenzhen, China, *Chemosphere*, 219, 165-173.
13. Dahrazma, B.; Azarpeykan, A.; Modabberi, S.; & A. Sayyareh, 2015. Assessment of heavy metals contamination in the soil of Ay Ghalasi abandoned lead-zinc mine area, southeast Takab, *Scientific Quarterly Journal of Geosciences*, 24(94), 129-138.
14. Dahrazma, B.; Azarpikan, A.; Modbari, S.; & A. Garet, 2013. Assessment of Heavy Metals Contamination in the Soil of ay Ghalasi Abandoned Lead-Zinc Mine Area, Southeast Takab, *Geoscience Quarterly, (Engineering Geology and Environment)*, 24(94), 129-138.
15. Dixit, R.; Malaviya, D.; Pandiyan, K.; Singh, U. B.; Sahu, A.; Shukla, R.; ... & D. Paul, 2015. Bioremediation of heavy metals from soil and aquatic environment: an overview of principles and criteria of fundamental processes, *Sustainability*, 7(2), 2189-2212.
16. Gardea-Torresdey, J. L.; Peralta-Videa, J. R.; De La Rosa, G.; & J. G. Parsons, 2005. Phytoremediation of heavy metals and study of the metal coordination by X-ray absorption spectroscopy, *Coordination chemistry reviews*, 249(17-18), 1797-1810.
17. Hakanson, L., 1980. An ecological risk index for aquatic pollution control. A sedimentological approach, *Water research*, 14(8), 975-1001.
18. Hu, Y.; Wang, D.; Wei, L.; Zhang, X.; & B. Song, 2014. Bioaccumulation of heavy metals in plant leaves from Yan' a city of the Loess Plateau, China, *Ecotoxicology and environmental safety*, 110, 82-88.
19. Isinkaralar, K.; Koc, I.; Erdem, R.; & H. Sevik, 2022. Atmospheric Cd, Cr, and Zn deposition in several landscape plants in Mersin, Türkiye, *Water, Air, & Soil Pollution*, 233(4), 1-10.
20. Jáuregui, J. A.; Ortiz, J. C. R.; Montoya, A. H.; Filippini, M. F.; Carretero, E. M.; Flores, P. E. D.; ... & F. A. B. Morales, 2018. Heavy metals in atmospheric dust deposited in leaves of *Acacia farnesiana* (Fabaceae) and *Prosopis laevigata* (Fabaceae), *Revista de La Facultad de Ciencias Agrarias*, 50(2).
21. Jiang, Y.; Shi, L.; Guang, A. L.; Mu, Z.; Zhan, H.; & Y. Wu, 2018. Contamination levels and human health risk assessment of toxic heavy metals in street dust in an industrial city in Northwest China, *Environmental geochemistry and health*, 40(5), 2007-2020.
22. Jorfi, S.; Maleki, R.; Jaafarzadeh, N.; & M. Ahmadi, 2017. Pollution load index for heavy metals in Mian-Ab plain soil, Khuzestan, *Iran. Data in brief*, 15, 584-590.
23. Karmakar, D., & P. K. Padhy., (2019). Air pollution tolerance, anticipated performance, and metal accumulation indices of plant species for greenbelt development in urban industrial area. *Chemosphere*. 237, 124522.
24. Keeran, N. S.; Balasundaram, U.; Govindan, G.; & A. K. Parida, 2019. *Prosopis juliflora*: a potential plant for mining of genes for genetic engineering to enhance phytoremediation of metals, In *Transgenic plant technology for remediation of toxic metals and metalloids* (pp. 381-393), Academic Press.

25. Khalilova, H., & V. Mammadov., (2016). Assessing the anthropogenic impact on heavy metal pollution of soils and sediments in urban areas of Azerbaijan's oil industrial region. *Polish Journal of Environmental Studies*, 25(1), 159-166.
26. Kozanecka, T.; Chojnicki, J.; & W. Kwasowski, 2002. Content of heavy metals in plant from pollution-free regions, *Polish Journal of Environmental Studies*, 11(4), 395-400.
27. Li, L.; Han, L.; Liu, A.; & F. Wang, 2022. Imperfect but hopeful: New advances in soil pollution and remediation, *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(16), 10164.
28. Liu, J.; Liu, Y. J.; Liu, Y.; Liu, Z.; & A. N. Zhang, 2018. Quantitative contributions of the major sources of heavy metals in soils to ecosystem and human health risks: A case study of Yulin, China, *Ecotoxicology and environmental safety*, 164, 261-269.
29. Ma, Y.; Wang, Y.; Chen, Q.; Li, Y.; Guo, D.; Nie, X.; & X. Peng, 2020. Assessment of heavy metal pollution and the effect on bacterial community in acidic and neutral soils, *Ecological Indicators*, 117, 106626.
30. Maiti, S. K.; Kumar, A.; & J. Ahirwal, 2016. Bioaccumulation of metals in timber and edible fruit trees growing on reclaimed coal mine overburden dumps, *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 30(3), 231-244.
31. Maksimtsev, S.; Dudarets, S.; & V. Yukhnovskiy, 2021. Accumulation of heavy metals in soil and litter of roadside plantations in Western Polissia of Ukraine, *Folia Forestalia Polonica*, 63(3), 232-242.
32. Mohiuddin, K. M.; Zakir, H. M.; Otomo, K.; Sharmin, S.; & N. Shikazono, 2010. Geochemical distribution of trace metal pollutants in water and sediments of downstream of an urban river, *International Journal of Environmental Science & Technology*, 7(1), 17-28.
33. Monserrat, J. M.; Geracitano, L. A.; & A. Bianchini, 2003. Current and future perspectives using biomarkers to assess pollution in aquatic ecosystems.
34. Mosleh Arany, A.; Soleimani, Z.; & H. Sowdaizadeh, 2012. Investigation on the effect of drought stress in *Prosopis juliflora*, *p. cineraria* (L.) Durce and *P. koelziana* Burkil in three life cycles (germination, seedling, maturity), *Iranian Journal of Forest and Poplar Research*, 20(1), 123-136.
35. Muller, G., 1979. Schwermetalle in den sediments des RheinsVeränderungen seit 1971, Umsch.
36. Muro-González, D. A.; Mussali-Galante, P.; Valencia-Cuevas, L.; Flores-Trujillo, K.; & E. Tovar-Sánchez, 2020. Morphological, physiological, and genotoxic effects of heavy metal bioaccumulation in *Prosopis laevigata* reveal its potential for phytoremediation, *Environmental Science and Pollution Research*, 27(32), 40187-40204.
37. Nadgórska-Socha, A.; Kandziora-Ciupa, M.; Trzęsicki, M.; & G. Barczyk, 2017. Air pollution tolerance index and heavy metal bioaccumulation in selected plant species from urban biotopes, *Chemosphere*, 183, 471-482.
38. Nasrazadani, A., & M. Hoodaji., (2014). Evaluation of the Effect of an Industrial Wastewater Sample on Heavy Metals Contaminated Soil. *Journal of Environmental Science and Technology*. 16(1), 437-450.
39. Nazari Alamdarloo, B.; Mosleh Arany, A.; Shojaee Barjoe, S.; Azimzadeh, H.; & B. Kiani 2020. Air pollution tolerance index and heavy metals (Pb and Cd) bioaccumulation in selected plant species (trees, shrubs and herbs) in high-traffic areas of Yazd city, *ijhe*, 13(2), 299-318.
40. Palta, J. P., 1990. Leaf chlorophyll content, *Remote sensing reviews*, 5(1), 207-213.
41. Pichtel, J., 2016. Oil and gas production wastewater: Soil contamination and pollution prevention, *Applied and Environmental Soil Science*, 2016.

42. Popek, R.; Mahawar, L.; Shekhawat, G. S.; & A. Przybysz, 2021. Phyto-Cleaning of Particulate Matter from Polluted Air by Woody Plant Species in the Near-Desert City of Jodhpur (India) and the Role of Heme Oxygenase in Their Response to PM Stress Conditions.
43. Qing, X.; Yutong, Z.; & L. Shenggao, 2015. Assessment of heavy metal pollution and human health risk in urban soils of steel industrial city (Anshan), Liaoning, Northeast China, *Ecotoxicology and environmental safety*, 120, 377-385.
44. Rasool, B.; Zubair, M.; Khan, M. A.; Ramzani, P. M. A.; Dradrach, A.; Turan, V.; ... & Z. A. Virk, 2022. Synergetic efficacy of amending Pb-polluted soil with P-loaded jujube (*Ziziphus mauritiana*) twigs biochar and foliar chitosan application for reducing Pb distribution in moringa leaf extract and improving its anti-cancer potential, *Water, Air, & Soil Pollution*, 233(8), 1-21.
45. Ren, S.; Song, C.; Ye, S.; Cheng, C.; & P. Gao, 2022. The spatiotemporal variation in heavy metals in China's farmland soil over the past 20 years: A meta-analysis, *Science of the Total Environment*, 806, 150322.
46. Rouniasi, N.; & H. Parvizi Mosaed., (2016). Investigating the Amount of Heavy Metals in Different Parts of Some Consumable Vegetables in Karaj City. *Ijhe*. 9(2), 171-184.
47. Saba, G.; Parizanganeh, A. H.; Zamani, A.; & J. Saba, 2015. Phyto remediation of Heavy Metals Contaminated Environments: Screening for Native Accumulator Plants in Zanjan - Iran, *International Journal of Environmental Research*, 9(1), 309-316.
48. Sabouri Hemmatabadi, Z.; Shirmardi, M.; Bemanikharanagh, A.; Dehestani Ardakani, M.; & M. J. Ghaneei-Bafghi, 2022. Evaluation the air pollution tolerance index and anticipated Pollution index of Plants in green space (Case study: Ardakan pelletizing factory), *Journal of Natural Environment*, 75(2), 226-239.
49. Sharma, R. K., 2017. Soil Pollution—Various Causes and Their Remedy, *Environmental Pollution Biodegradation and Bioremediation Edition*, 1, 214-236.
50. Shojaee Barjooee, S.; Azimzadeh, H.; & A. Mosleh Arani, 2020. Ecological Risk Assessment of Some Heavy Metals in the Dust Emitted from Non-Metallic Industries of Ardakan County of Yazd in Summer 2018: A Descriptive Study, *JRUMS 2020*, 19(2), 173-192.
51. Singh, S. K., & D. N. Rao., (1983). Evaluation of plants for their tolerance to air pollution. *In Proceedings of symposium on air pollution control*. 1(1), 218-224.
52. Sistani, N.; Moinidin, M.; Taleshi, M. S. A.; Khorasani, N.; Hamidian, A. H.; & R. Azimi yancheshmeh, 2017. Source identification of heavy metal pollution nearby Kerman steel industries, *Journal of Natural Environment*, 70(3), 627-641.
53. Smirnoff, N., 1996. The function and metabolism of ascorbic acid in plants, *Annals of Botany*, 78, 661-669.
54. Sohrabizadeh, Z.; Sodaiezadeh, H.; Hakimizadeh, M. A.; Taghizadeh Mehrjardi, R.; & M. J. Ghanei Bafaqi, 2020. Evaluation of Heavy Metal Contamination in Soil Samples around the Lead-Zinc Mine of Kushk, Bafq, using Pollution Indicators and Principal Component Analysis, *Geography and Environmental Planning*, 31(1), 15-34.
55. Virk, S. S., & O. S. Singh., (1990). Osmotic properties of drought stressed periwinkle (*Catharanthus roseus*) genotypes. *Annals of Botany*. 66(1), 23-30.
56. Wu, F.; Yang, W.; Zhang, J.; & L. Zhou, 2010. Cadmium accumulation and growth responses of a poplar (*Populus deltoids* × *Populus nigra*) in cadmium contaminated purple soil and alluvial soil, *Journal of Hazardous Materials*, 177(1-3), 268-273.

Evaluation of the Pollution Level of Ecosystems in the Industrial Area of West Bandar Abbas by a Resilience Approach against Heavy Metals

Hasan Shahrokhi: *PhD. Candidate, University of Tehran - Kish International Campus, Kish, Iran*

Ahmad Nohegar¹: *Professor of Geomorphology, Department of Management Planning and Environmental Education, Faculty of Environment, University of Tehran, Iran.*

Received: 2023/01/29

Accepted: 2023/07/29



Extended abstract

1- Introduction

Heavy metals are elements that have an atomic mass of more than 55.8 g/mol; these elements have little biodegradability, but their ability to bioaccumulate is very high, and when their concentration exceeds the threshold, they threaten the health of the environment with the risk of toxicity and pollution. West Bandar Abbas industrial area consists of several industrial complexes located less than 5 km from Shahid Rajaei wharf, and the high-traffic transport axis passes through these industries. The concentration of these industries and traffic of the transport road have caused severe pollution of the environment and ecosystems in this area, but the level of pollution in various aspects remains unknown. Although studies have been conducted on air pollution or environmental assessment, the assessment of soil pollution, heavy metals and their effects on the plants of the region, which are biological markers, have not been investigated since it is possible to reveal the level of environmental pollution by evaluating the level of pollution in plants. Therefore, the main approach of the current research is to evaluate the level of environmental pollution in the industrial area of west of Bandar Abbas by examining heavy metals in the soil and leaves of Acacia in the area, and also investigating the reaction of Acacia, which are native to this area, against pollution.

2- Methodology

The experiment was implemented in the RCBD plan. From each location, 10 soil samples (replicates) were taken at a depth of 0 to 10 cm and placed in an envelope and labeled. Soil samples were transferred to Bandar Abbas soil laboratory to measure the concentration of heavy metals including lead (Pb), cadmium (Cd), zinc (Zn), copper (Cu), chromium (Cr) and nickel (Ni), which were evaluated by Igeo, CF, PLI, BCF, MAI and RI indexes. Biochemical reactions of Acacia, including its photosynthetic pigments, proline, ascorbic acid and relative leaf water against pollution were measured. Finally, APTI was obtained for Acacia.

3- Results

In this study, the level of heavy metal pollution caused by industries in the target area was evaluated by inspecting some pollution indicators. According to the Igeo index, the areas close to the industries and the area of industrial factories and Bandar Abbas oil refinery are the most polluted areas and contain much higher heavy metals than the standard heavy metals in the soil. Evaluation of Igeo for zinc and copper metals is low and it is in the class of non-pollution to moderate pollution, but for cadmium, lead, chromium and nickel in the measured points, it is mostly moderate to very severe pollution, and in the places close to the industries, mainly for all metals, the level of pollution is moderate to severe. Away from the industrial factories, the concentration of pollutants and the risk of pollution decrease. The CF is also high for cadmium, lead, chromium and nickel, and the pollution level is significant, moderate and severe. The PLI in this study showed that the points near Shahid Rajaei industries and wharf have high pollution loads, but with the distance from the industries, the numerical value of this index decreases and the pollution load also decreases. In this study, the biochemical

¹ Corresponding Author: Nohegar @ut.ac.ir

reaction of Acacia against heavy metal contamination was also measured. Pollution has an effect on the content of photosynthetic pigments of Acacia in the industrial area of west of Bandar Abbas to the extent that the amount of chlorophyll a, b and total chlorophyll in the polluted areas and near the industries compared to the clean and control areas and the areas far from the industries showed a significant decrease at 99% level. The results of this research also indicated that pollution can reduce photosynthesis in plants by reducing pigments. In addition, it was found that in Acacia under the stress of heavy metal pollution, the concentration of ascorbic acid and proline differed by 99% and increased compared to the control condition. This increase helps the Acacia to continue its physiology and mechanism and survive under the stress of pollution. Furthermore, APTI was calculated in the Acacia in the studied locations and the results showed that in the highly polluted sites in Shahid Rajaei Wharf, Bandar Abbas Oil Refinery and Industrial Area, the concentration of heavy metals in the soil as well as the air pollution is very high. APTI is reduced and reaches 7; however, in the eastern slope of Salt Dome, Shahid Bahonar Wharf and Point Shahid, the APTI of Acacia plant is more than 9 which is evaluated as good and suitable.

4- Discussion & Conclusions

By absorbing heavy metals in the soil and accumulating elements in the plant organ, which is a medium accumulator, Acacia plays a crucial role in removing the pollutants from the ecosystems of the region and can be useful in phytoremediation. In this study, the biochemical response of Acacia to heavy metal pollution was investigated and the results showed that although the concentration of chlorophyll in infected Acacia decreased compared to the control condition, the amount of ascorbic acid and proline in the plant increased which strengthens the plant's resistance against pollution; in fact, it can be said that Acacia trees have the ability to react optimally against heavy metal pollution. Nevertheless, in Bandar Abbas, unfortunately, the invasive species of American Acacia has been planted among native Acacia, and due to the deep roots of this invasive species, the health of the native species has been endangered. On the whole, the results of this research showed that Acacia, which is a native species, has the ability to absorb heavy metals and remove them from the environment. Therefore, it is suggested that by spreading Iranian Acacia and removing the invasive American species, we can revive the ecosystem of the industrial area, prevent environmental pollution and take positive steps towards environmental protection.

Key Words: Acacia; Biohazard; Industry; West of Bandar Abbas; Chlorophyll.