

گیاه‌پالایی برای حذف اتیل‌بنزن از محیط‌های آلوده

سهیلا علیزاده^۱، مجید هاشمی^{۲*}

^۱ مرکز تحقیقات مهندسی بهداشت محیط، دانشگاه علوم پزشکی کرمان، کرمان، ایران

^۲ گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی کرمان، کرمان، ایران

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۰۲/۱۷؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۴/۲۵

چکیده

زمینه و هدف: اتیل‌بنزن یک آلاینده‌ی زیست‌محیطی است که از منابع متعددی تولید می‌شود و می‌تواند آب، خاک و هوا را آلوده کند. روش‌های مختلفی برای پاک‌سازی این آلاینده از محیط‌زیست وجود دارد. گیاه‌پالایی به دلیل ماهیت دوست‌دار محیط‌زیست آن و مقرون و به‌صرفه بودن یک روش مناسب برای حذف آلاینده‌های زیست‌محیطی است. مطالعه حاضر مروری بر مطالعات پیشین درباره‌ی گیاه‌پالایی اتیل‌بنزن در متون برگرفته از پایگاه‌های اطلاعاتی Medline, Web of Science, ProQuest, Scopus و Pubmed است.

مواد و روش‌ها: در جست‌وجوی اولیه در مجموع تعداد ۴۵ مقاله در بازه‌ی زمانی ۲۰۰۹ تا ۲۰۲۲ یافت شد و در اولین مرحله‌ی غربالگری عنوان و چکیده‌ی مقالات به‌صورت هم‌زمان مورد بررسی قرار گرفت که در انتهای این مرحله ۲۶ مقاله باقی ماند. متن کامل ۸ مقاله نیز مورد بررسی قرار گرفت و از این تعداد ۳ مقاله باقی ماند. در نهایت از ۴۵ مقاله تعداد ۲۹ مقاله باقی ماند که پس از حذف موارد تکراری تعداد ۱۲ مقاله مرتبط ثبت شد معیار مورد نظر برای انتخاب مقالات استفاده از یک گیاه زنده برای پاک‌سازی اتیل‌بنزن از محیط با روش‌های مختلف گیاه‌پالایی بود.

یافته‌ها و نتیجه‌گیری: بررسی‌ها نشان داد گیاهان قادر به حذف اتیل‌بنزن از محیط‌های مختلف آب، هوا و خاک هستند. حذف اتیل‌بنزن هوابرد از طریق برگ گیاه یکی از مهم‌ترین کاربردهای گیاه‌پالایی اتیل‌بنزن است. در گیاه‌پالایی نباید تأثیر میکروارگانیسم‌ها بر گیاهان را نادیده گرفت. آن‌ها می‌توانند باعث افزایش راندمان گیاه‌پالایی شوند؛ هرچند استفاده برخی گونه‌ها ممکن است بی‌تأثیر باشد یا حتی دارای تأثیر منفی بر گیاه‌پالایی باشد. علاوه بر باکتری‌ها تأثیر برخی از قارچ‌ها نیز بر جذب اتیل‌بنزن از ناحیه‌ی میکوریز که باعث افزایش توانایی جذب گیاه می‌شود مشاهده شده است. گیاه‌پالایی می‌تواند یک گزینه‌ی مناسب برای حذف آلودگی اتیل‌بنزن از محیط به‌خصوص شکل گازی این آلاینده در محیط‌های بسته باشد. با استفاده از میکروارگانیسم‌ها می‌توان به تقویت راندمان این روش کمک کرد.

واژه‌های کلیدی: اتیل‌بنزن، گیاه‌پالایی، هوا، آب، خاک

مقدمه

ترکیبات آلی با وزن مولکولی کم که در دمای محیط بخار تولید می‌کنند به‌عنوان ترکیبات آلی فرار^۱ شناخته می‌شوند. آژانس حفاظت از محیط‌زیست (EPA) نظارت بر VOCها را به دلیل تأثیرات سلامتی آنها که از سردرد و حالت تهوع تا سرطان را شامل می‌شود، اجباری کرده است.^۲ این ترکیبات بیشتر در نتیجه‌ی فعالیت‌های انسانی بخصوص صنایع مختلف ایجاد می‌شوند.^۳ آلاینده‌های آروماتیک تک حلقه‌ای مانند بنزن، تولوئن، اتیل‌بنزن و ایزومرهای زایلن (ترکیبات BTEX) جزو هیدروکربن‌های آلی فرار هستند.^۴

اتیل‌بنزن [CAS No. 100-41-4] یک مایع بی‌رنگ (نقطه جوش ۱۳۶.۲ °C، فشار بخار ۱/۲۷ کیلو پاسکال (۲۵ °C)) است.^۵ اتیل‌بنزن (EB) به‌طور طبیعی در قطران زغال‌سنگ و نفت یافت می‌شود.^۶ به‌عنوان ماده خام در ساخت مونومر استایلن، پلاستیک و لاستیک استفاده می‌شود.^۷ EB همچنین در سوخت خودرو (از جمله روغن دیزل) مصرف‌شده و در نهایت می‌تواند از خودروها نیز منتشر شود. در مناطق مسکونی، منبع EB در فضای باز ممکن است ترافیک بزرگراهی و در هوای داخلی ممکن است از مواد جلا زده باشد. سیگار ممکن است منبع اضافی برای EB می‌باشد؛ بنابراین، واضح است که EB در همه جای زندگی شغلی و همچنین غیر شغلی وجود دارد.^۸

آژانس بین‌المللی تحقیقات سرطان (IARC) اتیل‌بنزن را در گروه B۲ سرطان‌زا طبقه‌بندی کرده است که احتمالاً برای انسان سرطان‌زا هستند.^{۹،۱۰} تعدادی از حوادث مربوط به سرطان‌های تنفسی در میان کارگران کارخانه‌ای که در آن BTEX و مشتقات کلردار تولید می‌شد، گزارش شده است.^{۱۱} طبق اعلام اداره ایمنی و بهداشت شغلی (OSHA)، حد مجاز مواجهه برای اتیل‌بنزن در هوا تا ۱۰۰ پی‌پی‌ام است.^{۱۲} EB موجود در محصولات مصرفی مانند فرش، رنگ، تنباکو و بنزین، با آلکیلاسیون بنزن (C₆H₆) با اتیلن (C₂H₄) تولید

می‌شود که منجر به غلظت محیطی ۲-۱/۳ ppm می‌شود. آژانس ثبت مواد سمی و بیماری‌ها (ATSDR، ۲۰۱۰)، غلظت EB هوا در سایت‌های دفع زباله‌های جامد شهری را ۱۷۸۰۰۰-۷۸۰۰۰ میکروگرم بر مترمکعب گزارش کرده است که به‌عنوان یکی از آلاینده‌های اصلی هوا مطرح می‌شود.^۹

قرار گرفتن انسان در معرض اتیل‌بنزن بسته به شغل، محل سکونت و سبک زندگی از مسیرهای متفاوتی رخ می‌دهد. شناخته‌شده‌ترین راه مواجهه از طریق استنشاق بخار و یا غبار و تا حدی از طریق تماس پوستی یا بلع است. در طول سوخت‌گیری خودرو، مصرف‌کنندگان ممکن است در معرض اتیل‌بنزن قرار بگیرند. علاوه بر این، از آنجاکه اتیل‌بنزن می‌تواند در اثر احتراق ناقص مواد طبیعی ایجاد شود، این ماده شیمیایی می‌تواند از دود ناشی از آتش‌سوزی جنگل و سیگار نیز به بدن وارد شود.^{۱۳}

گیاه‌پالایی فرایندی است که طی آن آلاینده‌های مختلف مانند هیدروکربن‌ها، آلکان‌ها، فنل‌ها، حلال‌های پلی‌کلره، آفت‌کش‌ها، کلرواستامیدها، مواد منفجره، عناصر کمیاب، فلزات سنگین سمی، متالوئیدها و شیرابه دفن زباله توسط گیاه حذف و پالایش می‌شود. گیاه‌پالایی روشی مقرون‌به‌صرفه و از نظر زیست‌محیطی مناسب برای حفظ منابع آب‌وخاک است.^{۱۴} هدف اصلی توسعه فن‌آوری گیاه‌پالایی استفاده از یک روش دوستدار محیط‌زیست و مقرون‌به‌صرفه است. این روش از پتانسیل ذاتی طبیعی گیاهان و میکروب‌ها برای تمیز کردن مکان‌های آلوده استفاده کرده و به حفظ وضعیت طبیعی محیط‌زیست کمک می‌کند. این روش می‌تواند برای تصفیه مکان‌هایی با بیش از یک آلاینده نیز استفاده شود اما محدودیت‌هایی نیز وجود دارد، از جمله این‌که فرآیند گیاه‌پالایی با توجه به سطح تحت پوشش و عمق در دسترس ریشه محدود می‌شود. همچنین تعامل گیاه و میکروب در شرایط مختلف رشد متفاوت است (به‌عنوان مثال آب‌وهوا، دما،

benzol"[Title/Abstract])) OR ("Vegetation-enhanced bioremediation"[Title/Abstract])
 Pubmed و Medline, Web of Science, ProQuest, Scopus جست‌وجو شد. برای این کلیدواژه‌ها در مجموع تعداد ۴۵ مقاله در بازه‌ی زمانی ۲۰۰۹ تا ۲۰۲۲ یافت شد و در اولین مرحله‌ی غربالگری عنوان و چکیده‌ی مقالات به‌صورت هم‌زمان مورد بررسی قرار گرفت که در انتهای این مرحله ۲۶ مقاله باقی ماند. متن کامل ۸ مقاله نیز مورد بررسی قرار گرفت و از این تعداد ۳ مقاله باقی ماند. در نهایت از ۴۵ مقاله ۲۹ مقاله باقی ماند که پس از حذف موارد تکراری تعداد ۱۲ مقاله مرتبط ثبت شد (شکل ۱). معیار اصلی برای انتخاب مقالات استفاده از یک گیاه زنده برای پاک‌سازی اتیل‌بنزن از محیط با روش‌های مختلف گیاه‌پالایی بود. ارزیابی کیفیت مطالعات از طریق سامانه‌ی منبع یاب، SJR (Scientific Journal Rankings) و بررسی سایتیشن، ایمپکت فاکتور و شاخص SNIP (Source-normalized Impact per Paper) انجام شد.

یافته‌ها

گیاهان مورد استفاده در گیاه‌پالایی اتیل‌بنزن

موجود در هوا و فرایند بیوشیمیایی

اتیل‌بنزن به دلیل فراریت بالا به‌صورت گسترده‌ای در محیط پخش می‌شود. اتیل‌بنزن به‌عنوان یک آلاینده هوا، به‌ویژه یک آلاینده داخلی منتشر می‌شود. اتیل‌بنزن به‌راحتی از طریق استنشاق جذب می‌شود^{۱۳}. اتیل‌بنزن هنوز از کاربرد و اهمیت اقتصادی بالایی برخوردار است و احتمالاً آلاینده‌های محیطی پایدار در هوا باقی خواهد گذاشت؛ بنابراین، ممکن است یک خطر آشکار برای سلامت عمومی باشد^{۱۴}.

شدت نور، ارتفاع و غیره). با این حال محدودیت‌های گیاه‌پالایی را می‌توان با استفاده از گیاهانی که دارای زیست‌توده بالا، رشد سریع‌تر و توانایی سازگاری با شرایط محیطی سخت هستند، برطرف کرد^{۱۲}. چندین راه وجود دارد که از طریق آن گیاهان مکان‌های آلوده را تمیز یا اصلاح می‌کنند؛ که شامل Phytovolatilization، Rhizofiltration، Phytoextraction، Hydraulic، Phytodegradation، Phytostabilization، Control، Phytodegradation (phytostimulation) می‌شود. در این مطالعه برای اولین بار به‌مرور مطالعات گذشته درباره‌ی گیاه‌پالایی اتیل‌بنزن و تأثیر میکروارگانیسم‌ها بر گیاه‌پالایی اتیل‌بنزن پرداخته شده است.

مواد و روش‌ها

برای انجام این مطالعه کلیدواژه‌های

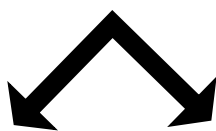
```
(((((Phytoremediation[Title/Abstract])
AND (Ethylbenzene[Title/Abstract])) OR
((Phytoremediation[Title/Abstract]) AND ("Ethyl
benzene"[Title/Abstract])) OR
((Phytoremediation[Title/Abstract]) AND ("Ethyl-
benzene"[Title/Abstract])) OR
((Phytoremediation[Title/Abstract]) AND ("Alpha
Methyl Toluene "[Title/Abstract])) OR
((Phytoremediation[Title/Abstract]) AND ("Alpha
MethylToluene "[Title/Abstract])) OR
((Phytoremediation[Title/Abstract]) AND ("Alpha-
MethylToluene "[Title/Abstract])) OR
((Phytoremediation[Title/Abstract]) AND
("alphaMethyltoluene"[Title/Abstract])) OR
((Phytoremediation[Title/Abstract]) AND ("Phenyl
ethane"[Title/Abstract])) OR
((Phytoremediation[Title/Abstract]) AND ("Phenyl-
ethane"[Title/Abstract])) OR
((Phytoremediation[Title/Abstract]) AND
("Ethylbenzol"[Title/Abstract])) OR
((Phytoremediation[Title/Abstract]) AND
("Ethylbenzol"[Title/Abstract])) OR
((Phytoremediation[Title/Abstract]) AND ("Ethyl
benzol"[Title/Abstract])) OR
((Phytoremediation[Title/Abstract]) AND ("Ethyl-
```



در پایگاه‌های اطلاعاتی Medline ,Web of Science , ProQuest, Scopus و جست‌وجو انجام شد



در این پایگاه‌های اطلاعاتی ۴۵ مقاله مرتبط با موضوع وجود داشت



از ۴۵ مقاله‌ی موجود نیاز به مطالعه‌ی متن کامل ۸ مقاله برای بررسی مرتبط بودن با موضوع

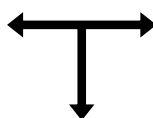
عنوان و چکیده‌ی ۳۷ مورد از ۴۵ مقاله برای بررسی مرتبط بودن با موضوع مطالعه شد



۳ مقاله باقی



۲۶ مقاله باقی



حذف موارد



در نهایت ۱۲ مقاله باقی ماند

شکل ۱: فلوجارت سرچ پریسما

حذف ۵ ppm اتیل بنزن در شرایط یکسان به مدت ۲۴ ساعت مقایسه شدند. نتایج نشان داد که *Z. zamiifolia* بالاترین پتانسیل جذب اتیل بنزن از هوای آلوده را دارد. مقایسه کارایی جذب اتیل بنزن بر اساس میکرو مول در هر مترمربع از سطح برگ نشان داد که *Z. zamiifolia* می‌تواند ۱۳۳/۹ میکرو مول بر مترمربع اتیل بنزن را جذب کند در حالی که *S. trifasciata* و *S. kirkii* می‌توانند به ترتیب حدود ۳۸/۳ و ۲۲/۳ میکرو مول در مترمربع اتیل بنزن جذب کنند. نتایج در ۲۴ ساعت نتایج در ۲۴ ساعت که *Z. zamiifolia* یک گیاه مناسب برای تصفیه اتیل بنزن از هوای آلوده است.

برگ‌ها و ساقه‌های *Z. zamiifolia* به ترتیب می‌توانند ۲۶ و ۱۶ درصد اتیل بنزن را در عرض ۱۲ ساعت حذف کنند. جذب در عرض ۲۴ ساعت به ترتیب به ۴۵ و ۲۰ درصد افزایش یافت. مشخص شد که برگ‌ها می‌توانند اتیل بنزن بیشتری نسبت به ساقه‌ها حذف کنند. مطالعات دیگر توضیح دادند که روزنه و موم کوتیکول مسیرهای مهمی برای جذب ترکیبات آلی فرار هستند. جذب اتیل بنزن توسط *Z. zamiifolia* از طریق مسیر روزنه (۷۵٪) و مسیر کوتیکول (۲۵٪) بود^{۱۵}. کوتیکول‌های گیاهی ساختارهای پیچیده‌ای هستند و از یک داربست ماکرومولکولی از کوتین و انواع لیپیدهای آلی تشکیل شده‌اند که عموماً موم نامیده می‌شوند. ساختار و ترکیب کوتیکول بسیار پیچیده است و می‌تواند به‌طور گسترده‌ای در بین گونه‌های گیاهی و درون گونه‌های گیاهی در مراحل مختلف رشد و اندام متفاوت باشد^{۱۶}. غشای کوتیکولی در برابر از دست دادن آب توسط تعرق مقاومت می‌کند و تهاجم پاتوژن و نفوذ مواد شیمیایی را محدود می‌کند^{۱۷}. روزنه‌های گیاه در اپیدرم قرار دارند که هرکدام توسط دو سلول محافظ محدود شده‌اند. روزنه‌ها در گیاهان آوندی ایجاد می‌شوند. سلول‌های نگهبان با تغییر شکل خود، اندازه روزنه را کنترل می‌کنند. روزنه‌ها بیشتر در قسمت‌های هوایی سبز گیاهان، به‌ویژه برگ‌ها دیده می‌شوند. آن‌ها

گیاه‌پالایی یکی از تکنیک‌های در دسترس و ساده برای حذف بنزن، تولوئن، اتیل بنزن و زایلن (BTEX) از هوای داخل ساختمان است. در یک مطالعه با هدف ارزیابی گیاه‌پالایی غلظت‌های کم BTEX توسط گیاهان هیرکانی از جمله *Ruscus hyrcanus* و *Danae racemosa* غلظت ۲۰ $\mu\text{L/L}$ اتیل بنزن با استفاده از سرنگ همیلتون به داخل محفظه‌ای به حجم ۱۴۴ لیتر تزریق شد. BTEX توسط یک آشکارساز یونیزاسیون شعله کروماتوگرافی گازی آنالیز شد. راندمان حذف به‌صورت زیر محاسبه شد:

$$\text{رابطه (۱)} \quad (\text{leaf area}) (\text{mg/m}^3 / \text{h.cm}^2) = (P \times F \times CV) / (L \times T)$$

که در آن P غلظت گاز حذف شده در یک محفظه با گیاهان ($\mu\text{L/L}$)، F عامل تبدیل ($\mu\text{L/L}$) به (mg/m^3)، CV حجم محفظه (m^3)، L کل سطح برگ (cm^2) و T زمان قرار گرفتن در معرض گاز (۷۲ ساعت) است.

Ruscus Hyrcanus در طول ۳ روز و *D. racemosa* در طول ۴ روز اتیل بنزن (غلظت ۲۰ $\mu\text{L/L}$) را حذف کرد. میزان گیاه‌پالایی اتیل بنزن توسط *R. hyrcanus* و *D. racemosa* به ترتیب $17.33 \text{ mg/m}^3/\text{h.cm}^2$ و $2.9 \text{ mg/m}^3/\text{h.cm}^2$ بود.

لازم به ذکر است که BTEX برای این گیاهان سمی نبود. علائم سمیت مانند کلروز یا نکروز در *R. hyrcanus* و *D. racemosa* مشاهده نشد و برخی از آن‌ها برگ‌ها و میوه‌های جدید (توت قرمز) تولید کردند^{۱۴}.

در یک مطالعه از گیاه *Z. zamiifolia* برای حذف اتیل بنزن استفاده شد. بر اساس مطالعات قبلی *S. trifasciata* کارآمدترین گیاه در جذب تولوئن از هوای آلوده و *S. kirkii* بهترین گیاه برای حذف تری‌متیل‌آمین از هوای آلوده بود. علاوه بر این، *Z. zamiifolia* به‌عنوان بهترین گیاه برای جذب زایلن از هوای آلوده گزارش شده است؛ بنابراین، *S. trifasciata*، *S. kirkii* و *Z. zamiifolia* برای مطالعه کارایی

همچنین می‌توانند روی ساقه‌ها ظاهر شوند اما تعداد روزنه‌ها در برگ بیشتر است. قسمت‌های هوایی برخی از گیاهان زمینی بدون کلروفیل (*Neottia*، *Monotropa*) و ریشه‌ها به‌طور معمول روزنه ندارند، اما ریزوم‌ها چنین ساختاری دارند.^{۱۸} روزنه‌ها مسیرهای مستقیمی را بین برگ‌ها و هوا ایجاد می‌کنند: آن‌ها رابط فعال بین گیاهان و محیط جو هستند.^{۱۹} روزنه‌ها تنظیم‌کننده‌های قدرتمند تبادل گاز هستند و روابط خطی بین سرعت فتوسنتز و هدایت روزنه‌ای اغلب در درختان مشاهده می‌شود.^{۲۰}

اتیل‌بنزن توسط *Z. zamiifolia* از طریق برگ‌ها و ساقه‌های گیاه جذب شده و سپس به ریشه منتقل می‌شود. اتیل‌بنزن ممکن است توسط آنزیم‌های گیاهی یا مکانیسم‌های دیگر در گیاه به ۱- فیل اتانول و استوفنون تجزیه شود. باکتری‌هایی مانند *P. putida 39/D*، *Pseudomonas sp. NCIB 9816-4* و *Pseudomonas sp. NCIB 10643* دارای آنزیم‌های اکسیژناز بوده که می‌تولند لیتیل‌بنزن را تجزیه کنند. آنزیم‌های مونواکسیژناز و دی‌اکسیژناز آنزیم‌های مهم در گیاهان هستند. آن‌ها به‌طور کلی متعلق به خانواده پروتئین‌های هم (heme) هستند که در مجموع سیتوکروم P450 نامیده می‌شوند. سیتوکروم‌های گیاهی P450 در طیف وسیعی از واکنش‌های بیوسنتزی دخیل هستند؛ بنابراین، *Z. zamiifolia* ممکن است برای تجزیه اتیل‌بنزن که می‌تواند منبع کربن برای رشد آن باشد، اکسیژناز تولید کند. هم گیاهان و هم میکروارگانیسم‌ها دارای آنزیم‌هایی برای تجزیه اتیل‌بنزن هستند و از اتیل‌بنزن به‌عنوان منبع کربن استفاده می‌کنند.^{۱۵}

در یک بررسی دیگر نیز حذف بنزن، تولوئن، اتیل‌بنزن و زایلن توسط *Z. zamiifolia* مورد مطالعه قرار گرفت. آزمایش‌ها نشان داد که *Z. zamiifolia* در کاهش این ترکیبات در هوای آلوده داخلی (۲۰ ppm از هر آلاینده) در ۱۲۰ ساعت مؤثر است. کارایی حذف اتیل‌بنزن بر واحد سطح برگ این گیاه $0.92 \pm 0.02 \text{ mmolm}^{-2}$ در ۷۲ ساعت مواجهه بود بود و

سمیت آلاینده روی برگ و ریشه گیاهان پیدا نشد. گیاهان *Z. zamiifolia* سالم به نظر می‌رسیدند و برخی از آن‌ها ریشه‌های جدیدی تولید کردند. در این مطالعه، اندازه‌گیری فلورسانس کلروفیل (Fv/Fm) تجزیه و تحلیل شد.^{۲۱} پارامتر فلورسانس کلروفیل Fv/Fm که نسبت فلورسانس متغیر به حداکثر فلورسانس پس از انطباق با تاریکی است، اطلاعاتی در مورد عملکرد فتوسیستم II (PSII) ارائه می‌کند و حداکثر بازده کوانتومی فتوسیستم II را نشان می‌دهد. شرایط تنش محیطی می‌تواند حداکثر بازده کوانتومی PSII را کاهش دهد و در شرایط تنش شدید کاهش آشکار Fv/Fm مشاهده شده است.^{۲۲} این پارامترها منعکس‌کننده جذب، انتقال، توزیع و اتلاف انرژی نور در برگ گیاه است و برای این پارامترها برای تعیین عملکرد فتوسنتزی استفاده می‌شوند.^{۲۱} نسبت Fv/Fm می‌تولند بینشی در مورد تولدایی گیاهان برای تحمل آلودگی هوا (داخلی) توسط مواد شیمیایی آلی فرار بدهد. از این شاخص می‌توان برای شناسایی گیاهان مناسب برای بازیابی/جذب VOCها در هوای آلوده استفاده کرد.^{۲۳} نتایج تفاوت معنی‌داری را در نسبت Fv/Fm ($p > 0.05$) بین گیاه کنترل و تیمار پس از قرار گرفتن در معرض آلاینده‌ها نشان داد. این احتمالاً نشان می‌دهد که غلظت ۲۰ ppm بنزن، تولوئن، اتیل‌بنزن یا زایلن به‌لندازه‌ای که بر فتوسنتز گیاهان تأثیر بگذارد زیاد نیست.

در این گیاه ۷۵٪ درصد جذب از طریق مسیرهای روزنه‌ای و ۲۵ درصد با مسیرهای غیر روزنه‌ای و کوتیکول صورت گرفته است. روزنه‌ها و کوتیکول‌های گیاهان مسیرهای مهمی برای جذب VOC هستند. اگرچه اتیل‌بنزن می‌تواند مستقیماً روی کوتیکول‌های مومی گیاه نفوذ کند.

بررسی تأثیر تنش آبی و نور بر میزان حذف نشان داد که در گیاهان آبیاری شده جذب بیشتری انجام شده است. نرخ تنفس کمی در شرایط تحت تنش آب یافت شد. همچنین

η می‌تواند به‌عنوان سرعت مشخصه‌ی تجمع / جذب آلاینده روی برگ گیاه مشاهده شود و با توجه به نوع گونه‌ی گیاه و آلاینده اختصاصی است. میزان این واحد برای گیاه *Zamioculcas zamiifolia* و برای آلاینده‌ی اتیل‌بنزن η (m/h)=0.0357 است.^۱

مقایسه‌ی حذف اتیل‌بنزن توسط گونه‌های گیاهی *Chlorophytum*، *Codiaeum variegatum* 'Lemon lime', *Cordyline fruticosa*, *Dracaena sanderiana*, *comosum*, *Aglaonema commutatum* نشان داد که بیشترین حذف اتیل‌بنزن از هوا با *Chlorophytum comosum* صورت می‌پذیرد.

اتیل‌بنزن می‌تواند به داخل کوتیکول گیاه نفوذ کنند. با این حال، به نظر نمی‌رسد که میزان حذف با تعداد روزنه‌ها در ارتباط باشد. بر اساس مطالعات مشخص شد که موم S. *Sansevieria hyacinthoides trifasciata* جذب بیشتری از اتیل‌بنزن دارند و حاوی اسید هگزادکانوئیک بالابودند. هگزادکانوئیک اسید ممکن است در جذب اتیل‌بنزن توسط موم کوتیکول گیاهان نقش داشته باشد.

تجزیه و تحلیل فلورسانس کلروفیل یا پتانسیل بازده کوانتومی فتوسیستم II (Fv/Fm) یا پارامترهای آن در گیاهان *Dracaena deremensis* در معرض اتیل‌بنزن به‌ویژه در *Kalanchoe* (Lemon lime), *Dracaena sanderiana* *blossfeldiana* و *Cordyline fruticosa* با گروه کنترل تفاوت معنی‌دار نشان دادند (جدول ۱).^{۲۳}

جذب در گیاهان در شرایط روشنایی افزایش پیدا کرد. روزنه‌ها در روشنایی باز و در تاریکی بسته‌اند.^{۲۱}

مدل‌های مختلفی برای استفاده از گیاهان گلدانی در کاهش آلودگی هوای داخلی پیشنهاد شده است. یکی از این مدل‌ها تأثیر قرار دادن یک سطح برگ معین در یک محیط داخلی بر اساس نوع گیاه و VOC را ارزیابی می‌کند و سطح برگ لازم برای به دست آوردن یک بازده کاهش VOC خاص را می‌دهد. علاوه بر این، می‌تواند فرآیند لازم برای استانداردسازی پروتکل‌ها را در این زمینه، به‌ویژه برای آزمایش‌ها در محیط‌های واقعی را هدایت کند. مدل ارائه‌شده در زیر آورده شده است:

$$V \frac{dc}{dt} = V \cdot c_{out} - V \cdot c + S - A_1 \eta c \quad \text{رابطه (۲)}$$

با غلظت اولیه $c(t_0) = c_0$ ، V برابر است با حجم داخلی محفظه (m^3)؛ $V \cdot c$ نرخ جریان حجمی به دلیل تهویه (m^3/h)؛ c غلظت داخلی آلاینده ($\mu g/m^3$)؛ c_{out} غلظت خارجی آلاینده؛ S یک اصطلاح است که منابع داخلی عمومی آلاینده را نشان می‌دهد ($\mu g/h$). آخرین اصطلاح در سمت چپ معادله ($V \frac{dc}{dt}$) اصطلاح جدیدی است که میزان حذف توسط گیاهان را نشان می‌دهد ($\mu g/h$). به‌طور خاص جذب گیاهی VOC یک مکانیسم شبه مرتبه اول با ثابت جنبشی که حاصل ضرب سطح برگ (A_1 m^2) وارد شده به اتاق و میزان حذف در واحد سطح برگ η (m/h) است در نظر گرفته می‌شود.

جدول ۱: مقایسه‌ی حذف اتیل‌بنزن توسط کوتیکول و میزان Fv/Fm در گیاهان مختلف (Sriprapat W, Suksabye P, Areephak S, Klantup P, Waraha A, Sawattan A, Thiravetyan P. Uptake of toluene and ethylbenzene by plants: removal of volatile indoor air contaminants. *Ecotoxicol Environ Saf.* 2014 Apr;102:147-51)^{۲۳}

نام علمی گیاه	حذف اتیل‌بنزن توسط کوتیکول (μmol)	حذف اتیل‌بنزن توسط Fv/Fm برای گیاه مواجهه یافته	Fv/Fm برای گیاه کنترل
<i>Aloe vera</i>	2.50±0.04	0.684±0.017	0.658±0.016
<i>Sansevieria masoniana</i>	2.68±0.16	0.535±0.036	0.506±0.016
<i>Sansevieria trifasciata</i>	2.74±0.13	0.541±0.051	0.499±0.002

0.537±0.062	0.537±0.062	2.73±0.23	<i>Sansevieria hyacinthoides</i>
0.516±0.044	0.573±0.101	2.03±0.03	<i>Sansevieria ehrenbergii</i>
0.832±0.010	0.804±0.004	1.80±0.18	<i>Kalanchoe blossfeldiana</i>
0.413±0.012	0.253±0.041	2.36±0.11	<i>Dracaena deremensis</i> 'Lemon lime'
0.336±0.019	0.251±0.036	2.10±0.08	<i>Codiaeum variegatum</i>
0.536±0.062	0.517±0.011	2.02±0.08	<i>Chlorophytum comosum</i>
0.720±0.048	0.728±0.076	1.77±0.33	<i>Dracaena sanderiana</i>
0.659±0.010	0.473±0.016	1.55±0.06	<i>Cordyline fruticosa</i>
0.718±0.080	0.682±0.060	1.65±0.04	<i>Aglaonema commutatum</i>

موجود در خاک و فرایند بیوشیمیایی

آلودگی خاک توسط نفت به دلیل وقوع گسترده نشت از مخازن ذخیره‌سازی زیرزمینی نفت و نشت در چاه‌های تولید نفت، پالایشگاه‌ها، خطوط لوله و ایستگاه‌های توزیع به یک نگرانی زیست‌محیطی مهم تبدیل شده است. هیدروکربن‌های آروماتیک تک حلقه‌ای مانند تولوئن، اتیل‌بنزن و سه ایزومر زایلن معمولاً با نفت خام و فرآورده‌های نفتی مانند بنزین و سوخت دیزل مرتبط هستند. به‌عنوان مثال، گزارش شده است که تولوئن، اتیل‌بنزن و زایلن حدود ۱۸ درصد حجمی بنزین را تشکیل می‌دهند.^{۲۶}

در یک مطالعه از گیاه *Canna* برای حذف ترکیبات BTEX از خاک استفاده شد. این گیاه قادر به جذب و انباشت BTEX از ناحیه‌ی ریشه و ریزم و انتقال این مواد به ساقه بود. برای انجام این آزمایش تجمع اتیل‌بنزن در گیاه در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد از خاک (آب به میزان ۲۰٪ وزنی خاک) با غلظت اولیه‌ی ۴۱۰ میلی‌گرم اتیل‌بنزن بر کیلوگرم خاک و یک غلظت دیگر به میزان ۳۰٪ غلظت اولیه استفاده شد. این غلظت‌ها نشان‌دهنده‌ی محدوده‌ی غلظت اتیل‌بنزن در طبیعت است. نقش خواص فیزیکی‌وشیمیایی BTEX در سیستم تقسیم‌بندی آلاینده بین دو فاز خاک/آب موردبررسی قرار گرفت. بین مقادیر $\log K_d$ ، ضریب تقسیم اکتانول/آب (K_{ow}) و وزن مولکولی اجزای BTEX روابط خطی برقرار بود. این نشان داد که پارتیشن‌بندی ترکیبات BTEX در سیستم خاک / آب توسط خواص فیزیکی‌وشیمیایی آن‌ها کنترل می‌شود.^{۲۷}

در یک مطالعه اثربخشی گیاهان گلدانی برای کاهش آلودگی هوا داخلی به‌صورت تجربی آزمایش شد. در این مطالعه از دو گونه‌ی گیاهی 'Janet' *Dracaena deremensis* و 'Sweet Chico' *Spathiphyllum* و 'Craig' استفاده از ۶ گلدان به مدت ۸ هفته در یکی از ساختمان‌ها میزان اتیل‌بنزن از ۰/۵ ppb به حد غیرقابل تشخیص کاهش پیدا کرده است اما در ساختمان دیگر تفاوتی در میزان اتیل‌بنزن مشاهده نشده است.^{۲۴}

توانایی گیاه *D. dermensis* و *O. microdasys* نیز برای حذف BTEX موردبررسی قرار گرفت. برای این منظور گیاهان در لتافک‌های مهروموم‌شده قرار گرفتند. بعد از یک ساعت، تصفیه‌ی گاز به گیاهان تحمیل شد. گیاه *O. microdasys* توانست غلظت ۲ ppm اتیل‌بنزن را از هوا در محفظه‌های آزمایش به‌طور کامل پس از ۵۷ ساعت حذف کند. با این حال، *D. dermensis* می‌تواند اتیل‌بنزن را از هوا در محفظه‌های آزمایش پس از ۱۰۰ ساعت به‌طور کامل حذف کند. میزان حذف اتیل‌بنزن در محفظه‌های آزمایش $1 \text{ mg/m}^2 \text{ d}^1$ و $3.65 \text{ mg/m}^2 \text{ d}^1$ و $2.1 \text{ mg/m}^2 \text{ d}^1$ به ترتیب برای *O. microdasys* و *D. dermensis* می‌باشد. همچنین نرخ حذف اتیل‌بنزن از هوا در محفظه‌ی آزمایش بر اساس سطح برگ $1.3535 \text{ mg/m}^2 \text{ d}^1$ و $0.76 \text{ mg/m}^2 \text{ d}^1$ به ترتیب برای *O. microdasys* و *D. dermensis* بود.^{۲۵}

گیاهان مورد استفاده در گیاه‌پالایی اتیل‌بنزن

گیاهان آبی شود^{۲۰}. در یک مطالعه که در کانادا انجام شد از ۶۰ نمونه آب آشامیدنی، اتیل بنزن در ۲۷ مورد شناسایی شد^{۲۱}. در یک مطالعه گیاهپالایی دو سایت آلوده به نفت با درختان صنوبر به مدت ۴ سال کاهش اتیل بنزن را به میزان ۱۲ درصد در آب زیرزمینی نشان داد. تخمین زده شد که ریشه درختان در یک سایت تقریباً ۳۳ ماه پس از کاشت به ۰/۳ متر زیر سطح آب زیرزمینی رسیده است. همچنین تخمین زده شده ریشه‌ها در حدود ۳۱ ماه به ۰/۳ متر زیر آب زیرزمینی در سایت دیگر رسیده است. پس از رسیدن ریشه‌های صنوبر به آب‌های زیرزمینی، اصلاح آلاینده‌ها در آب‌های زیرزمینی گسترش پیدا کرده است^{۲۸}.

در یک مطالعه که باهدف گیاهپالایی ترکیبات آروماتیک چند حلقه‌ای از آب زیرزمینی نسبتاً شور با سطح پایین‌تر از ۲۵۰ فوت توسط درختان صنوبر پیوندی با اندوفیت تقویت شده و سازگار بانمک انجام شد وجود اتیل بنزن در نمونه‌های به دست آمده از قسمت ساقه‌ی تعدادی از درختان صنوبر مشاهده شد که منشأ آن به کرئوزوت نسبت داده شده است^{۳۱}. در جدول ۲ گونه‌های گیاهی مختلف که در حضور اتیل بنزن قادر به رشد هستند بیان شده است.

جدول ۲: گونه‌های گیاهی قادر به رشد در حضور اتیل بنزن

گونه‌های گیاهی قادر به رشد در حضور اتیل بنزن
-S. kirkii -S. trifasciata -Z. zamiifolia -Clitoria ternatea f Dracaena deremensis -Chlorophytum comosum - Spathiphyllum 'Sweet Chico'-'Janet Craig' Baccharis - canna - O. microdasys - D.dermensis Senecia salignus Fraxinus sp. - salicifolia درختان صنوبر- درختان صنوبر پیوندی با اندوفیت تقویت شده و سازگار بانمک - نی و اسفناج آبی- تره‌فرنگی

میکروارگانیزم‌های مؤثر در گیاهپالایی

میکروارگانیزم‌ها می‌توانند نقش مهمی در فرایند گیاهپالایی داشته باشند. در یک مطالعه باهدف انتخاب و کاربرد باکتری‌های لندوفیت برای بهبود گیاهپالایی آلاینده‌های

گیاهپالایی توسط درخت صنوبر به دلیل ویژگی‌های ریشه‌زایی، رشد سریع در دو سایت آلوده به نفت به مدت نزدیک به چهار سال مورد استفاده قرار گرفت که غلظت اتیل بنزن در خاک به میزان ۶۷٪ کاهش یافت. علاوه بر این، غلظت اکسیژن، متان و دی‌اکسید کربن در گاز خاک‌نشان داد که ریشه درختان خاک را آبیگری کرده و اجازه نفوذ اکسیژن به عمق خاک را می‌دهد و شرایط لازم را برای زیست پالایی ریزوسفر ایجاد می‌کند^{۲۸}.

در یک مطالعه دیگر به شناسایی گیاهان در یک سایت آلوده به بنزن، تولوئن، اتیل بنزن و زایلن (BTEX) و برخی دیگر از هیدروکربن‌ها پرداخته شد. یک ویژگی مهم گیاهان شناسایی شده، خواص دارویی و بقای آن‌ها در شرایط مزرعه با غلظت هیدروکربن بالا (LHF، MHF، HHF و BTEX) بود که آن‌ها را گونه‌های مناسبی برای گیاهپالایی خاک می‌کند. میزان اتیل بنزن در این سایت آلوده ۱۱۷ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک بود و گیاه Baccharis salicifolia-Senecia salignus Fraxinus sp. در محل آلوده به اتیل بنزن رشد و تکثیر پیدا کرده بود^{۲۹}.

گیاهان مورد استفاده در گیاهپالایی اتیل بنزن

موجود در آب و فرایند بیوشیمیایی

اکوسیستم‌های آبی در برابر مواجهه با مواد پتروشیمی مانند اتیل بنزن و زایلن و اثرات نامطلوب آن‌ها آسیب‌پذیر هستند^{۳۱}. اتیل بنزن به دلیل کاربرد گسترده آن، از طریق مسیرهای مختلف مانند پساب‌های صنعتی، رسوب اتمسفری گازهای گلخانه‌ای و وسایل نقلیه وارد آب‌های سطحی و زیرزمینی می‌شود. غلظت محیطی آن می‌تواند از نانوگرم در لیتر تا میلی‌گرم در لیتر متغیر باشد. اتیل بنزن بین ۱ تا ۱۰ میلی‌گرم در لیتر برحسب LC₅₀ یا EC₅₀ می‌تواند باعث ایجاد سمیت حاد در موجودات آبی از جمله ماهی، بی‌مهرگان و

B. cereus ERBP که در معرض اتیل‌بنزن قرار نگرفته بود، جمعیت بالا در *C. ternatea* در مواجهه با EB را نشان داد. نتیجه را می‌توان با دو مکانیسم ممکن توضیح داد. اول، گیاه ممکن است ترکیب سیگنال دهی را برای افزایش *B. cereus ERBP* در شاخساره با قرار گرفتن در معرض EB ترشح کند. دوم، *B. cereus ERBP* می‌تواند از اتیل‌بنزن به‌عنوان یک ماده مغذی برای رشد خود استفاده کند.^۹

سیتوکروم P450s (CYPs) بزرگ‌ترین خانواده آنزیمی است که در واکنش‌های هیدروکسیلاسیون وابسته به NADPH و یا O₂ در تمام حوزه‌های حیات دخیل است. در گیاهان و حیوانات، CYPها نقش اصلی را در سم‌زدایی زنبیوتیک‌ها ایفا می‌کنند. علاوه بر این، CYPها به‌عنوان کاتالیزورهای همه‌کاره عمل می‌کنند و نقش مهمی در بیوسنتز متابولیت‌های ثانویه، آنتی‌اکسیدان‌ها و فیتوهورمون‌ها در گیاهان عالی دارند. دخالت CYPs در متابولیسم زنبیوتیک در میان میکروارگانیسم‌ها، حشرات، گیاهان و انسان‌ها به‌خوبی شناخته‌شده است که به ترتیب در برابر آنتی‌بیوتیک‌ها، حشره‌کش‌ها، علف‌کش‌ها و داروها مقاومت ایجاد می‌کند.^{۳۳} این آنزیم‌ها برای کاتالیز کردن اکسیداسیون ترکیبات زنبیوتیک جهت تبدیل اولیه هیدروکربن‌های غیرفعال برای دفاع شیمیایی در گیاهان بیان می‌شوند. گزارش شده است که CYP83D1 در تخریب فنیل اوره پلی آروماتیک نقش دارد. سطح بیان CYP83D1 در نهال‌های *C. Ternatea* طبیعی تلقیح شده با باکتری *B. cereus ERBP* که به مدت ۳ روز متوالی در معرض EB قرار گرفته بودند، دو برابر بیشتر از نهال *C. ternatea* طبیعی غیر تلقیح شده که در معرض EB قرار گرفته بودند و نهال‌های طبیعی *C. ternatea* تلقیح شده بدون قرار گرفتن در معرض EB است.^۹

نتایج مشابهی نیز در نهال‌های استریل *C. ternatea* یافت شد. این نشان می‌دهد که تلقیح *B. cereus ERBP* به نهال *C. ternatea* تحت تنش EB می‌تواند به‌طور قابل توجهی بیان

فنی انتخاب کلنی‌های مورفولوژیکی متفاوت از کشت‌های تلقیح شده با مواد بافت گیاهی منجر به یافتن ۲۱۹ سویه شد. در مجموع ۱۸۰ سویه از نی (*P. australis*) و ۳۹ سویه‌ها از اسفناج آبی (*I. aquatica*) جدا شدند که بیست‌وپنج سویه می‌توانستند از ترکیبات آروماتیک به‌عنوان تنها منبع کربن استفاده کنند و تنها یک مورد مربوط به گیاه اسفناج آبی بود. سویه‌هایی *Pseudomonas xylooxidans*، *Achromobacter xylooxidans*، *Pseudomonas putida vancouverensis*، *Pseudomonas fluorescens putida*، *Acinetobacter baumannii fluorescens*، *Acinetobacter baumannii baumannii*، *Stenotrophomonas Serratia marcescens johnsonii*، *Stenotrophomonas maltophilia maltophilia*، *Stenotrophomonas sp.*، *Stenotrophomonas rhizophila*، *Bacillus subtilis*، *Bacillus pumilus*، *Bacillus pumilus*، *Microbacterium sp.*، *Paenibacillus sp.*، *Erwinia* محیط حاوی اتیل‌بنزن بودند؛ اما سویه‌های *Stenotrophomonas maltophilia sp.*، *Stenotrophomonas maltophilia*، *Chryseobacterium sp.*، *maltophilia* قادر به رشد در محیط حاوی اتیل‌بنزن نبودند.^{۳۳} مشاهده شد که تلقیح *B. cereus ERBP* باعث کمک به گیاه‌پالایی اتیل‌بنزن توسط *Clitoria ternatea* می‌شود. برگ *C. ternatea* فرورفته در ۱.۶ × ۱۰۷ CFU/ml از *B. Cereus ERBP* راندمان بالاتری برای حذف EB نسبت به شاهد (*C. ternatea* برگ) به‌صورت جداگانه و برگ *C. ternatea* فرورفته در نوترینت براث) نشان داد که میزان آن به ۰.۸۵٪ می‌رسید. افزایش (۵/۵ × ۱۰۸ CFU/mL) در تعداد سلول‌های باکتری *B. Cereus ERBP* پس از قرار گرفتن در معرض ۱۵ پی‌پی‌ام EB مشاهده شد. تفاوت بین برگ *C. ternatea* آغشته به NB و برگ *C. ternatea* آغشته به *B. Cereus ERBP* نشان می‌دهد که این باکتری می‌تواند از EB برای اهداف تغذیه‌ای خود استفاده کند و یک جفت مناسب با میزبان *C. ternatea* برای اصلاح مؤثر EB هوابرد از هوای داخل خانه باشد. مقایسه بین گیاه آغشته به *B. cereus ERBP* که در معرض اتیل‌بنزن قرار گرفته و گیاه آغشته به

اندازه‌گیری شده است که تفاوت معنی‌داری با نوع غیر تلقیح شده با EB نداشت؛ بنابراین در شرایط تلقیح شده با EB افزایش قابل‌توجهی توسط *C. ternatea* در هر دو شکل استریل و طبیعی نشان داده شده است. بر اساس مطالعه، بنزوئیک اسید یکی از متابولیت‌های اتیل‌بنزن است.^۹

حذف افزایش‌یافته اتیل‌بنزن توسط میکروارگانیسم‌های جداشده از برگ و خاک *Z. zamiifolia* مورد مطالعه قرار گرفت. مشخص شد که *P. aeruginosa* بالاترین کارایی را در افزایش حذف اتیل‌بنزن دارد. این نتایج نشان داد که تعداد میکروارگانیسم‌ها عامل اصلی مؤثر بر راندمان حذف اتیل‌بنزن نیست. کارایی حذف اتیل‌بنزن برای هر باکتری ممکن است به مکانیسم‌های خاص هر باکتری، مانند کارایی آنزیم‌های اکسیژناز بستگی داشته باشد *Z. zamiifolia* استریل می‌تواند ۵ ppm اتیل‌بنزن را ظرف ۶۰ ساعت حذف کند. برخی از سویه‌ها ممکن است قادر به تجزیه اتیل‌بنزن نباشند یا برخی مواد شیمیایی را تولید کنند که تخریب توسط سایر میکروارگانیسم‌ها را مهار کند. نتایج نشان داد که باکتری‌های اپیفیتیک مانند *B. myloliquefaciens subsp. plantarum* *Acinetobacter*، *Exiguobacterium sp. MH3*، *NAU-B3*، *sp. 10095* و *A. calcoaceticus* سویه *HPC253* هیچ تأثیری بر حذف اتیل‌بنزن نداشتند. در نتیجه، راندمان حذف اتیل‌بنزن بین یک گیاه طبیعی و استریل بسیار مشابه بود. علاوه بر این، گیاه استریل قادر به جذب تنها ۴۵ درصد اتیل‌بنزن در ۱۲ ساعت بود، در حالی که گیاه استریل با *P. aeruginosa*، *Bacillus sp. N6*، *B. cereus E33L*، *putida TISTR1522*، *B. cereus* سویه *6B254-3L* و *ZQN5* توانست اتیل‌بنزن بیشتری (به ترتیب ۶۸، ۵۳، ۶۶، ۶۴، ۶۵، ۵۳ و ۶۲ درصد) را در عرض ۱۲ ساعت جذب کند. گیاه استریل قادر به جذب کامل اتیل‌بنزن در ۶۰ ساعت بود، در حالی که گیاهان استریل تلقیح شده با *P. aeruginosa* و *B. cereus ZQN5* توانستند اتیل‌بنزن را

CYP83D1 را افزایش دهد. علاوه بر این، نهال‌های *C. ternatea* طبیعی تلقیح شده دارای سطوح بیان بالاتری نسبت به نهال‌های *C. ternatea* استریل تلقیح شده که در معرض EB قرار داشتند بود. بیان آنزیم‌های P450 می‌تواند مستقیماً با هیدروکسیلاسیون و تخریب ترکیبات زنبوبوتیک از طریق افزایش تمایلات آن‌ها به آنزیم‌های سیستم سم‌زدایی که در تغییر شکل بیشتر آن‌ها نقش دارند، مرتبط باشد. فعالیت‌های دهیدروژناز (LOC100783159) در فرآیند بیولوژیکی درگیر در بسیاری از تبدیل‌های بیولوژیکی کاملاً شناخته شده است. اتیل‌بنزن به ۱- فنیل اتانول و سپس به استوفنون دهیدروژنه می‌شود، استوفنون نیز به بنزالدهید متابولیزه می‌شود. این تبدیل به ترتیب توسط اتیل‌بنزن دهیدروژناز و ۱- فنیل اتانول دهیدروژناز کاتالیز می‌شود. گزارش شده است که این دهیدروژناز در هیدروژناسیون یک ترکیب معطر کینین نقش دارد. بیان دهیدروژناز در حضور استرس EB تحت تأثیر تلقیح نهال‌های طبیعی *B. cereus ERBP* قرار گرفت. نهال‌های طبیعی *C. ternatea* تلقیح شده پس از قرار گرفتن در معرض EB نسبت به نهال‌های طبیعی *C. ternatea* تلقیح شده بدون قرار گرفتن در معرض EB و گیاه طبیعی غیر تلقیح شده تحت تنش EB افزایش برابری در بیان دهیدروژناز نشان دادند. علاوه بر این، نتایج مشابهی نیز در نهال‌های استریل *C. ternatea* یافت شد. با مقایسه گیاه طبیعی و استریل، تلقیح *B. cereus ERBP* در گیاه طبیعی (گیاه طبیعی که استریل نشده و باکتری هم تلقیح نشده است) باعث افزایش جزئی در سطح بیان دهیدروژناز در مواجهه با EB نسبت به استریل شد. این آنزیم‌ها به‌عنوان کاتالیزور زیستی کلیدی برای کاتالیز اتیل‌بنزن به ۱- فنیل اتانول و سپس بیشتر به استوفنون در نظر گرفته می‌شوند؛ بنابراین، بیان بالاتر دهیدروژنازها می‌تواند هیدروکسیلاسیون اتیل‌بنزن فعال نشده را به محصول نهایی آن افزایش دهد. به‌طور خلاصه، افزایش بیان *CYP83D1* و دهیدروژناز (LOC100783159) در گیاه تلقیح شده بدون EB

- Stenotrophomonas sp.- rhizophila
- Bacillus pumilus -Bacillus pumilus
- Paenibacillus sp- Bacillus subtilis
Microbacterium sp

در یک مطالعه اثر arbuscular mycorrhiza (AM) بر ماندگاری بنزن، تولونن، اتیل‌بنزن و زایلن (BTEX) در بسترهای آلوده مصنوعی مورد ارزیابی قرار گرفت. گیاهان تره‌فرنگی با سه گونه قارچ *Gigaspora rosea* AM، *Gigaspora margarita* و *Glomus mossea* با استفاده از یک سیستم ویژه که در آن هوای داخلی و نمونه‌های بستر با کروماتوگرافی گازی برای محتوای BTEX آنالیز شدند، رشد کردند. کاهش شدید در غلظت BTEX در بسترها به‌طور کلی در حضور گیاهان میکوریز مشاهده شد.

وزن‌تر ریشه و اندام هوایی در همه تیمارها یکسان بود به‌جز افزایش ناشی از همزیستی *Gigaspora rosea* در حضور اتیل‌بنزن (جدول ۴). هیچ رابطه آشکاری بین سطوح کلونیزاسیون ریشه و ناپدید شدن BTEX وجود نداشت. کاهش غلظت BTEX مشاهده‌شده در حضور گیاهان میکوریز می‌تواند به دلیل تخریب (جزئی یا کامل) آلاینده‌ها باشد که در چندین سویه باکتری نیز مشاهده‌شده است. سایر احتمالات می‌تواند افزایش پراکندگی در محیط باشد (اما غلظت کم BTEX در داخل کابینت‌ها این امر را بعید می‌کند) یا جذب و تجمع در بافت‌های گیاهی یا در ساختارهای قارچی باشد^{۳۴}.

به‌طور کامل در مدت‌زمان کوتاه‌تری (۳۶ ساعت) جذب کنند. علاوه بر این، گیاهان تلقیح شده با *P. putida TISTR1522*، *Bacillus sp. 6B254* و *Bacillus sp. N6*، *B. cereus E33L* 3L توانستند اتیل‌بنزن را ظرف ۴۸ ساعت حذف کنند، اما سایر میکروارگانیسم‌های جداشده قادر به افزایش حذف اتیل‌بنزن توسط گیاهان نبودند^{۱۵}. در جدول ۳ باکتری‌های مرتبط با گیاهانی که در حضور اتیل‌بنزن قادر به رشد هستند، بیان شده است.

جدول ۳: باکتری‌های مرتبط با گیاهانی که در حضور اتیل‌بنزن قادر به رشد هستند

باکتری‌های مرتبط با گیاهانی که در حضور اتیل‌بنزن قادر به رشد هستند	تأثیر مثبت در گیاه‌پالایی
P. - B. cereus ZQN5 -B. cereus ERBP B. -aeruginosa - P. putida TISTR1522 - Bacillus sp. N6 -cereus E33L P. aeruginosa - Bacillus sp. 6B254-3L B. cereus ZQN5-	تأثیر مثبت در گیاه‌پالایی
B. amyloliquefaciens subsp. Plantarum Exiguobacterium sp. MH3 - NAU-B3 and A. - Acinetobacter sp. 10095- calcoaceticus strain HPC253	بدون تأثیر در گیاه‌پالایی
- Achromobacter xylosoxidans - Pseudomonas vancouverensis Pseudomonas - Pseudomonas putida - Pseudomonas fluorescens- putida - Pseudomonas fluorescens -Acinetobacter baumannii - Acinetobacter baumannii - Acinetobacter baumannii Serratia - Acinetobacter johnsonii Stenotrophomonas - marcescen Stenotrophomonas - maltophilia Stenotrophomonas - maltophilia	بررسی نشده

جدول ۴: مقایسه‌ی فاکتورهای مختلف رشد در گیاه کنترل و همزیست با قارچ‌های میکوریز

درجه‌ی تشکیل آربوسکولار	درجه‌ی کلنیزاسیون میکوریزی	نرخ وزن ریشه / برگ	وزن برگ (g)	۳۴
(%)	(%)			
-	-	0.866±0.124a	0.131±0.013a	AMF
41.515±6.081bc	51.060±5.603bc	1.077±0.196a	0.095±0.015ab	BEG12
4.766±1.880a	11.461±3.333a	0.960±0.136a	0.126±0.018ab	BEG34
10.439±5.668b	24.702±5.240a	1.664±0.124b	0.071±0.013b	BEG9

متابولیت‌های اتیل‌بنزن

در نهال *C. ternatea* اتیل‌بنزن نه تنها جذب شد بلکه به متابولیت‌های آن (به عبارتی ۱- فنیل اتانول، استوفنون، بنزالدئید و اسید بنزوئیک) تبدیل شد^۹. داده‌های حاصل از تجزیه و تحلیل HPLC نشان داد که اتیل‌بنزن، ۱- فنیل اتانول و استوفنون در تیمار *Z. zamiifolia* یافت شد در حالی که این ترکیبات در گیاهان شاهد یافت نشد. مقادیر اتیل‌بنزن موجود در برگ‌ها در روزهای ۱ و ۵ به ترتیب حدود ۲۲.۴۴ و ۱۵.۷۸ نانو مول در گرم وزن تازه بود. مقادیر اتیل‌بنزن موجود در

ساقه و ریشه در روزهای ۱، ۴ و ۵، ۱۴.۰۰، ۱۰.۵۰ و ۱۲.۱۶ نانو مول در گرم وزن ساقه تازه و ۱۱.۰۰، ۳.۶۷ و ۴.۸۲ نانو مول در گرم وزن ریشه بود. علاوه بر این، ۱- فنیل اتانول ۰.۴۴ نانو مول در گرم وزن تازه ساقه در روز ۴ یافت شد. استوفنون در تمام قسمت‌های گیاه در روزهای ۱، ۴ و ۵ آزمایش‌ها یافت شد. به‌طور مشابه، در طول تجزیه و تحلیل GC-MS، اتیل‌بنزن نیز در برگ‌ها در روزهای ۱ و ۵ یافت شد^{۱۰}. در جدول ۵ مدل‌های مختلف گیاه‌پالایی استفاده شده برای حذف اتیل‌بنزن ارائه شده است.

جدول ۵: مدل‌های مختلف گیاه‌پالایی استفاده شده برای حذف اتیل‌بنزن

گروه گیاه	محیط	محل جذب	میزان حذف	میکروارگانسیم‌های مؤثر بر گیاه‌پالایی	میزان حذف	رفرنس
<i>Clitoria ternatea</i>	هوا	برگ	طبیعی ۴۰٪-استریل ۲۰٪ (در مدت ۳ روز و اتیل‌بنزن ۱۵ ppm)	<i>B. cereus</i> ERBP	طبیعی تلقیح شده حذف ۸۰٪-استریل تلقیح شده حذف ۴۰٪ (در مدت ۳ روز و اتیل‌بنزن ۱۵ ppm)	۹
<i>Z. zamiifolia</i>	هوا		۱۳۳.۹ میکرو مول بر مترمربع اتیل‌بنزن در ۲۴ ساعت			۱۵
<i>S. trifasciata</i>	هوا		۳۸.۳ میکرو مول بر مترمربع اتیل‌بنزن در ۲۴ ساعت			۱۵
<i>S. kirkii</i>	هوا		۲۲.۳ میکرو مول بر مترمربع اتیل‌بنزن در ۲۴ ساعت			۱۵
<i>Z. zamiifolia</i>	هوا	برگ	۶۰ ساعت ۵ ppm	<i>B. amyloliquefaciens</i> subsp. <i>plantarum</i> NAU-B3, <i>Exiguobacterium</i> sp. MH3, <i>Acinetobacter</i> sp. 10095, and <i>A. calcoaceticus</i> strain HPC253	بدون تأثیر	۱۵
<i>Z. zamiifolia</i>	هوا	برگ	۶۰ ساعت ۵ ppm	<i>B. P. aeruginosa</i> E33L, <i>Bacillus</i> sp. N6 (cereus ZQN5), <i>P. putida</i>) TISTR1522 و	۳۶ ساعت ۵ ppm	۱۵
<i>Z. zamiifolia</i>	هوا	برگ	۶۰ ساعت ۵ ppm	<i>B. P. aeruginosa</i> E33L, <i>Bacillus</i> sp. N6 (cereus ZQN5), <i>P. putida</i>) TISTR1522 و	۴۸ ساعت ۵ ppm	۱۵

	Bacillus sp. 6B254- (3L)					
۱۵	۳۶ ساعت ۵ ppm	B. و P. aeruginosa cereus ZQN5	۶۰ ساعت ۵ ppm	برگ	هوا	Z. zamiifolia ۳ چرخه‌ی تزریق اتیل‌بنزن (چرخه‌ی اول)
۱۵			0.92±0.02 mmolm ⁻² at 72 h of exposure برگ ۲۶ و ساقه ۱۶ در عرض ۱۲ ساعت	۷۵٪ از مسیرهای روزنه‌ای و ۲۵٪ مسیرهای غیر روزنه‌ای و کوتیکول به ترتیب/برگ و ساقه	هوا	Z. zamiifolia
۲۳				کوتیکول موم روزنه	هوا ۲۳	Chlorophytum comosum
۲۴			کاهش میزان اتیل‌بنزن از ۰.۵ ppm به زیر حد قابل تشخیص بعد از ۸ هفته		هوا	f Dracaena deremensis و 'Janet Craig' Spathiphyllum 'Sweet Chico' D.dermensis
۲۵			15.22 mg/ m ³ m ² d l		هوا	O. microdasys
۲۵			26.45 mg/ m ³ m ² d l		هوا	
۲۷			بالاترین فاکتور غلظت ریشه ۱.۱ و بالاترین فاکتور غلظت ریزوم ۰.۵ است (۴۰٪) -بالاترین فاکتور غلظت ریشه ۱ و بالاترین فاکتور غلظت ریزوم ۰.۳۵ (۲۰٪) ۶۷ درصد کاهش در طول ۴ سال	خاک با محتوای آب ۴۰ درصد و ۲۰ درصد		canna
۲۸			۱۲ درصد کاهش داده در عرض ۴ سال		آب زیرزمینی	درختان صنوبر
۱۴			mg/m ³ /h.cm ² 17.33		هوای بسته	Ruscus hyrcanus
۱۴			mg/m ³ /h.cm ² 2.9		هوای بسته	Danae racemosa
۳۴		Glomus mosseae Gigaspora rosea Gigaspora margarita				تره‌فرنگی

بحث

در کل بررسی‌ها نشان داد گیاهان قادر به حذف اتیل‌بنزن
از محیط‌های مختلف آب، هوا و خاک هستند. با این حال بیشتر

گیاه‌پالایی هوای داخلی یک استراتژی نوآورانه، مقرون‌به‌صرفه و سازگار با محیط‌زیست برای کنترل کیفیت هوای داخل ساختمان است که می‌تواند روش‌های سنتی (مانند تهویه و کنترل منبع)، به‌ویژه در محیط‌های غیر صنعتی را کامل کند. از اواخر دهه ۸۰، مشخص شده است که گیاهان گلدانی ساده که به‌عنوان فیلترهای زیستی غیرفعال استفاده می‌شوند، می‌توانند VOCهای (ترکیبات آلی فرار) را حتی در غلظت‌های پایین از هوای داخل خانه حذف کنند.^۱

در گیاه‌پالایی نباید تأثیر میکروارگانیسم‌ها بر گیاهان را نادیده گرفت. در موارد زیادی مشاهده شده است که میکروارگانیسم‌ها می‌توانند به افزایش راندمان گیاه‌پالایی کمک کنند هرچند ممکن است تأثیرات متفاوت دیگری هم داشته باشند به‌عنوان مثال در بررسی تأثیر میکروارگانیسم‌های جدا شده از برگ و خاک *Z. zamiifolia* بر حذف اتیل‌بنزن مشاهده شد؛ برخی از سویه‌ها ممکن است قادر به تجزیه اتیل‌بنزن نباشند یا برخی مواد شیمیایی را تولید کنند که تخریب توسط سایر میکروارگانیسم‌ها را مهار کند. همچنین نشان داده شد که تعداد میکروارگانیسم‌ها عامل اصلی مؤثر بر راندمان حذف اتیل‌بنزن نیست. کارایی حذف اتیل‌بنزن برای هر باکتری ممکن است به مکانیسم‌های خاص هر باکتری، مانند کارایی آنزیم‌های اکسیژناز بستگی داشته باشد. با وجود موارد استثنا به‌صورت کلی باکتری‌های اپی‌فیتیک سرعت حذف اتیل‌بنزن را افزایش می‌دهند. پاشش میکروارگانیسم‌ها روی برگ‌ها باید در هوای بیرون استفاده شود تا آلاینده‌های سمی در زمان کوتاه‌تری حذف شوند. باین‌حال، باید توجه داشت که میکروارگانیسم‌های مورد استفاده باید برای سلامت انسان غیر بیماری‌زا باشند.^{۱۵}

علاوه بر باکتری‌ها، تأثیر برخی از قارچ‌ها نیز بر جذب اتیل‌بنزن از ناحیه‌ی میکوریز که باعث افزایش طولنایی جذب گیاه می‌شود مشاهده شده است.^{۳۴}

مطالعاتی که گیاه‌پالایی اتیل‌بنزن را به‌صورت اختصاصی بررسی کرده‌اند به حذف اتیل‌بنزن در هوا پرداخته‌اند و این مسئله که در بسیاری از بررسی‌ها اتیل‌بنزن به‌عنوان یکی از ترکیبات BTEX مطالعه شده و داده‌های این مطالعات به‌صورت کلی برای BTEXها بیان شده اطلاعات زیادی را از دسترس خارج می‌کند.

حذف اتیل‌بنزن هوابرد از طریق برگ گیاه یکی از مهم‌ترین راه‌های گیاه‌پالایی اتیل‌بنزن است. به‌عنوان مثال برگ‌ها و ساقه‌های *Z. zamiifolia* به ترتیب می‌توانند ۲۶ و ۱۶ درصد اتیل‌بنزن را در عرض ۱۲ ساعت حذف کنند. مشخص شد که برگ‌ها می‌توانند اتیل‌بنزن بیشتری نسبت به ساقه‌ها حذف کنند.^{۱۵} گیاهان عمدتاً اجزای محیطی را از خاک یا آب دریافت می‌کنند، اما نقطه کانونی ورود آلاینده‌های هوا قسمت‌های هوایی گیاه است. روزنه‌ها و کوتیکول‌های موجود بر روی برگ‌ها به‌عنوان نقطه اصلی ورود هر آلاینده هوا عمل می‌کنند.^{۳۵}

از جمله مزایای گیاه‌پالایی می‌توان به هزینه‌ی پایین آن در مقایسه دیگر روش‌های حذف آلودگی اشاره کرد به‌عنوان مثال مقایسه‌ی هزینه‌ی گیاه‌پالایی با درخت صنوبر در سایت‌های پالایشگاه و مزرعه مخزن قدیمی در Cabin Creek، ویرجینیای غربی، برای پاک‌سازی خاک‌ها و آب‌های زیرزمینی آلوده به نفت نشان داد که هزینه‌ی این روش نسبت به سوزاندن خاک خارج از سایت یا تهویه‌ی خاک هزینه‌ی بسیار کم‌تری دارد. اگرچه زمان لازم برای پاک‌سازی می‌تواند گیاه‌پالایی را محدود کند، اما ثابت شده است که اگر مسیرهای قریب‌الوقوع برای در معرض قرار گرفتن انسان و خطر دیگری وجود نداشته نباشد، یک استراتژی مقرون‌به‌صرفه برای بهبود سایت است.^{۲۸}

ترکیبات آلی فرار آلاینده‌های اصلی هوای داخل خانه هستند که غلظت آن‌ها اغلب چندین برابر بیشتر از فضای باز است. آن‌ها به‌عنوان عوامل ایجادکننده "بیماری مربوط به ساختمان" یا "سندرم ساختمان بیمار" شناخته می‌شوند.^{۲۴}

گیاه‌پالایی می‌تواند یک گزینه‌ی مناسب برای حذف آلودگی اتیل‌بنزن از محیط به‌خصوص شکل گازی این آلاینده در محیط‌هایی بسته باشد. با استفاده از میکروارگانیزم‌ها می‌توان به تقویت راندها این روش کمک کرد. استفاده از گیاهان گل‌دانی برای اهداف تزئینی همواره مورد توجه و علاقه‌ی عموم افراد جامعه قرار داشته است علاوه بر این انتخاب گیاهان مناسب می‌تواند به بهبود کیفیت هوای داخلی بدون پرداخت هیچ هزینه‌ی اضافی کمک کند.

بعضی از روش‌های گیاه‌پالایی علاوه بر جذب اتیل‌بنزن منجر به تولید متابولیت‌های آن در گیاه می‌شوند. ۱- فنیل اتانول، استوفنون، بنزالدئید و اسیدبنزوئیک از جمله این متابولیت‌ها هستند^{۹، ۱۰}. با این حال متابولیت‌های اتیل‌بنزن هم ممکن است اثرات سوئی بر سلامتی داشته باشند. به‌عنوان مثال متابولیت اصلی اتیل‌بنزن، ۱-فنیل اتانول، آدنوم توبولار کلیه را با دوز بالا در موش‌های صحرایی نر القا می‌کند^{۱۱}.

نتیجه‌گیری

Reference

- 1.
2. V. Di Talia GA, A Model for the Evaluation of Vocs Abatement by Potted Plants in Indoor Environments, Chemical Engineering Transactions. 86 (2021) 415-420. doi:10.3303/CET2186070.
3. Jayawardhana Y, Keerthanan S, Lam SS, Vithanage M. Ethylbenzene and toluene interactions with biochar from municipal solid waste in single and dual systems. Environ Res 2021;197: 111102.
4. Iyer A, Mitevska V, Samuelson J, et al. Polymer-Plasticizer Coatings for BTEX Detection Using Quartz Crystal Microbalance. Sensors (Basel, Switzerland) 2021;21(16): 5667.
5. Révész F, Farkas M, Kriszt B, et al. Effect of oxygen limitation on the enrichment of bacteria degrading either benzene or toluene and the identification of *Malikia spinosa* (Comamonadaceae) as prominent aerobic benzene-, toluene-, and ethylbenzene-degrading bacterium: enrichment, isolation and whole-genome analysis. Environmental science and pollution research international 2020;27(25): 31130-42.
6. Committee for Recommendation of Occupational Exposure Limits JSfOH Occupational exposure limits for acetaldehyde, 2-bromopropane, glyphosate, manganese and inorganic manganese compounds, and zinc oxide nanoparticle, and the biological exposure indices for cadmium and cadmium compounds and ethylbenzene, and carcinogenicity, occupational sensitizer, and reproductive toxicant classifications. Journal of occupational health 2021;63(1): e12294-e.
7. Capella KM, Roland K, Geldner N, et al. Ethylbenzene and styrene exposure in the United States based on urinary mandelic acid and phenylglyoxylic acid: NHANES 2005-2006 and 2011-2012. Environmental research 2019;171: 101-10.
8. Kawai T, Sakurai H, Ikeda M. Biological monitoring of occupational ethylbenzene exposure by means of urinalysis for un-metabolized ethylbenzene. Industrial health 2019;57(4): 525-9.
9. Eze MO. Metagenome Analysis of a Hydrocarbon-Degrading Bacterial Consortium Reveals the Specific Roles of BTEX Biodegraders. Genes 2021;12(1): 98.
10. Daudzai Z, Treesubstorn C, Thiravetyan P. Inoculated *Clitoria ternatea* with *Bacillus cereus* ERBP for enhancing gaseous ethylbenzene phytoremediation: Plant metabolites and expression of ethylbenzene degradation genes. Ecotoxicol Environ Saf 2018;164: 50-60.
11. Harrath AH, Alrezaki A, Jalouli M, et al. Ethylbenzene exposure disrupts ovarian function in Wistar rats via altering folliculogenesis and steroidogenesis-related markers and activating autophagy and apoptosis. Ecotoxicology and Environmental Safety 2022;229: 113081.
12. Rubin JA, Görres JH. Potential for Mycorrhizae-Assisted Phytoremediation of Phosphorus for Improved Water Quality. International journal of environmental research and public health 2020;18(1): 7.
13. Sood A, Uniyal PL, Prasanna R, Ahluwalia AS. Phytoremediation potential of aquatic macrophyte, *Azolla*. Ambio 2012;41(2): 122-37.
14. Midorikawa K, Uchida T, Okamoto Y, et al. Metabolic activation of carcinogenic ethylbenzene leads to oxidative DNA damage. Chemico-Biological Interactions 2004;150(3): 271-81.

15. Fooladi M, Moogouei R, Jozi S, et al. Phytoremediation of BTEX from indoor air by Hyrcanian plants. *Environmental Health Engineering and Management* 2019;6: 233-40.
16. Toabaita M, Vangnai AS, Thiravetyan P. Removal of Ethylbenzene from Contaminated Air by *Zamioculcas zamiifolia* and Microorganisms Associated on *Z. zamiifolia* Leaves. *Water, Air, & Soil Pollution* 2016;227(4): 115.
17. Zarrouk O, Pinheiro C, Misra CS, et al. Chapter 20 - Fleshy Fruit Epidermis is a Protective Barrier Under Water Stress. In: García Tejero IF, Durán Zuazo VH, editors. *Water Scarcity and Sustainable Agriculture in Semiarid Environment*: Academic Press; 2018. p. 507-33.
18. Carrillo-López A, Yahia EM. Chapter 6 - Morphology and Anatomy. In: Yahia EM, editor. *Postharvest Physiology and Biochemistry of Fruits and Vegetables*: Woodhead Publishing; 2019. p. 113-30.
19. Kirkham MB. Chapter 24 - Stomatal Anatomy and Stomatal Resistance. In: Kirkham MB, editor. *Principles of Soil and Plant Water Relations (Second Edition)*. Boston: Academic Press; 2014. p. 431-51.
20. Landsberg J, Sands P. Chapter 2 - Weather and Energy Balance. *Terrestrial Ecology*. 4: Elsevier; 2011. p. 13-48.
21. Beadle C, Sands R. TREE PHYSIOLOGY | Physiology and Silviculture. In: Burley J, editor. *Encyclopedia of Forest Sciences*. Oxford: Elsevier; 2004. p. 1568.vv-
22. Sriprapat W, Thiravetyan P. Phytoremediation of BTEX from Indoor Air by *Zamioculcas zamiifolia*. *Water, Air, & Soil Pollution* 2013;224.
23. Ibaraki Y, Murakami J, editors. DISTRIBUTION OF CHLOROPHYLL FLUORESCENCE PARAMETER FV/FM WITHIN INDIVIDUAL PLANTS UNDER VARIOUS STRESS CONDITIONS 2007: International Society for Horticultural Science (ISHS), Leuven, Belgium.
24. Sriprapat W, Suksabye P, Areephak S, et al. Uptake of toluene and ethylbenzene by plants: removal of volatile indoor air contaminants. *Ecotoxicol Environ Saf* 2014;102: 147-51.
25. Wood RA, Burchett MD, Alquezar R, et al. The Potted-Plant Microcosm Substantially Reduces Indoor Air VOC Pollution: I. Office Field-Study. *Water, Air, and Soil Pollution* 2006;175(1): 163-80.
26. Mosaddegh MH, Jafarian A, Ghasemi A, Mosaddegh A. Phytoremediation of benzene, toluene, ethylbenzene and xylene contaminated air by *D. deremensis* and *O. microdasys* plants. *Journal of environmental health science & engineering* 2014;12(1): 39.-
27. Liu Y, Zhou Q, Xie X, et al. Oxidative stress and DNA damage in the earthworm *Eisenia fetida* induced by toluene, ethylbenzene and xylene. *Ecotoxicology* 2010;19(8): 1551-9.
28. Boonsaner M, Borrirukwisitsak S, Boonsaner A. Phytoremediation of BTEX contaminated soil by *Canna×generalis*. *Ecotoxicol Environ Saf* 2011;74(6): 1700-7.
29. El-Gendy AS, Svingos S, Brice D, et al. Assessments of the efficacy of a long-term application of a phytoremediation system using hybrid poplar trees at former oil tank farm sites. *Water Environ Res* 2009; 81(5): 486-98.
30. Rodriguez Vazquez R, Sánchez S, Mena-Espino X, Amezcua-Allieri M. Identification of the medicinal plant species with the potential for remediation of hydrocarbons contaminated soils. *Acta Physiologiae Plantarum* 2016;38.
31. Zheng S, Zhou Q, Gao J, et al. Behavioral alteration and DNA damage of freshwater snail *Bellamya aeruginosa* stressed by ethylbenzene and its tissue residue. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 2012;81: 43-8.
32. Landmeyer JE, Rock S, Freeman JL, et al. Phytoremediation of slightly brackish, polycyclic aromatic hydrocarbon-contaminated groundwater from 250 ft below land surface: A pilot-scale study using salt-tolerant, endophyte-enhanced hybrid poplar trees at a Superfund site in the Central Valley of California. April–November 2019. *Remediation Journal* 2020;31(1): 73-89.
33. Ho YN, Mathew DC, Hsiao SC, et al. Selection and application of endophytic bacterium *Achromobacter xylosoxidans* strain F3B for improving phytoremediation of phenolic pollutants. *J Hazard Mater* 2012;219-220: 43-9.
34. Pandian BA, Sathishraj R, Djanaguiraman M, et al. Role of Cytochrome P450 Enzymes in Plant Stress Response. *Antioxidants* 2020;9(5): 454.
35. Volante A, Lingua G, Cesaro P, et al. Influence of three species of arbuscular mycorrhizal fungi on the persistence of aromatic hydrocarbons in contaminated substrates. *Mycorrhiza* 2005;16(1): 43-50.
36. Agarwal P, Sarkar M, Chakraborty B, Banerjee T. Chapter 7 - Phytoremediation of Air Pollutants: Prospects and Challenges. In: Pandey VC, Baudh K, editors. *Phytomanagement of Polluted Sites*: Elsevier; 2019. p. 221-41

Phytoremediation to Remove ethylbenzene from Contaminated Media

Soheila Alizadeh^{1,2}, Majid Hashemi*^{1,2}

¹Environmental Health Engineering Research Center, Kerman University of Medical Sciences, Kerman, Iran

²Department of Environmental Health Engineering, Faculty of Public Health, Kerman University of Medical Sciences, Kerman, Iran

*E-mail: mhashemi120@gmail.com

Received: 7 May 2022 ; Accepted: 16 July 2022

ABSTRACT

Background and Aim: Ethyl benzene is an environmental pollutant that is produced from various sources and can pollute water, soil, and air. There are several ways to clean this pollutant from the environment. Phytoremediation is a suitable method for removing environmental pollutants due to its environmentally friendly nature and cost-effectiveness. The present study is a review of previous studies on the phytoremediation of ethylbenzene in literature from Medline, Web of Science, ProQuest, Scopus, and PubMed databases.

Methods: In the initial search, a total of 45 articles were found in the period 2009 to 2022, and in the first screening stage, the title and abstract of the articles were reviewed simultaneously, leaving 26 articles at the end of this stage. The full text of 8 articles was reviewed and 3 of them remained. Finally, out of 45 articles, 29 articles remained. After removing the duplicates, 12 related articles were registered. Our criteria for selecting articles was the use of a live plant to purify ethylbenzene from the environment by various phytoremediation methods.

Findings and Conclusions: Studies showed that plants can remove ethyl benzene from various environments of water, air, and soil. Removal of airborne ethylbenzene through plant leaves is one of the most important phytoremediation applications of ethylbenzene. In phytoremediation, the effect of microorganisms on plants should not be ignored. They can increase phytoremediation efficiency; however, the use of some species may be ineffective or even hurt phytoremediation. In addition to bacteria, the effect of some fungi has also been observed in the absorption of ethylbenzene from the microcrystalline zone, which increases the plant's ability to absorb. Phytoremediation can be a good option to remove ethylbenzene pollution from the environment, especially the gaseous form of this pollutant in closed environments. Microorganisms can be used to help increase the efficiency of this method.

Keywords: Ethylbenzene, Phytoremediation, Air, Water, Soil