مجله مهندسی بهداشت محیط، بهار ۱۴۰۱، سال ۹، شماره ۳: ۳۹۹-۴۱۶

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 دوست دار 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 Scopus , ProQuest ,Web of Science, Medline و Pubmed است.

مواد و روش‌ها: در جست‌وجوی اولیه درمجموع تعداد ۴۵ مقاله در بازه‌ی زمانی ۲۰۰۹ تا ۲۰۲۲ یافت شد و در اولین مرحله‌ی غربالگری عنوان و چکیده‌ی مقالات به‌صورت هم‌زمان موردبررسی 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. درنهایت 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 گونه ها ممکن است بی‌تأثیر باشد یا حتی دارای تأثیر منفی بر گیاه‌پالایی باشد. علاوه بر باکتری‌ها تأثیر برخی از قارچ‌ها نیز برجذب اتیل‌بنزن از ناحیه‌ی میکوریز که باعث افزایش توانایی جذب گیاه می‌شود مشاهده‌شده 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

***نویسنده مسئول:** گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی کرمان، کرمان، ایران
ایمیل: ***mhashemi120@gmail.com*** – شماره تماس: ۹۸۳۴۳۱۳۲۵۴۳۵

مقدمه

ترکیبات آلی با وزن مولکولی کم که در دمای محیط بخار تولید می‌کنند به‌عنوان ترکیبات آلی فرار[1] شناخته می‌شوند[2]. 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[3]. این ترکیبات بیشتر درنتیجه‌ی فعالیت‌های انسانی بخصوص صنایع مختلف ایجاد می‌شوند[2]. آلاینده‌های آروماتیک تک حلقه‌ای مانند بنزن، تولوئن، اتیل‌بنزن و ایزومرهای زایلن (ترکیبات BTEX) جزو هیدروکربن‌های آلی فرار هستند[4].

اتیل‌بنزن [CAS No. 100-41-4] یک مایع بی‌رنگ (نقطه‌جوش ۱۳۶.۲ °C، فشار بخار ۱/۲۷ کیلو پاسکال (۲۵ °C)) است[5]. اتیل‌بنزن (EB) به‌طور طبیعی در قطران زغال‌سنگ و نفت یافت می‌شود[6]. به‌عنوان ماده خام در ساخت مونومر استایلن، پلاستیک و لاستیک استفاده می‌شود[5]. EB همچنین در سوخت خودرو (ازجمله 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 می باشد؛ بنابراین، واضح است که EB در همه جای زندگی شغلی و همچنین غیر شغلی وجود دارد[7].

آژانس بین‌المللی تحقیقات سرطان (IARC) اتیل‌بنزن را در گروه B۲ سرطان‌زا طبقه‌بندی کرده است که احتمالاً برای انسان سرطان‌زا هستند[6,8]. تعدادی از حوادث مربوط به سرطان‌های تنفسی در میان کارگران کارخانه‌ای که در آن BTEX و مشتقات کلردار تولید می‌شد، گزارش‌شده است[8]. طبق اعلام اداره ایمنی و بهداشت شغلی (OSHA)، حد مجاز مواجهه برای اتیل‌بنزن در هوا تا ۱۰۰ پی پی ام است[3]. EB موجود در محصولات مصرفی مانند فرش، رنگ، تنباکو و بنزین، با آلکیلاسیون بنزن (C_6H_6) با اتیلن (C_2H_4) تولید می‌شود که منجر به غلظت محیطی ۲ -۱/۳ ppm می‌شود. آژانس ثبت مواد سمی و بیماری‌ها (آژانس برای مواد سمی و ثبت بیماری 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[9].

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، ازآنجاکه 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[1].

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 ازنظر زیست‌محیطی مناسب برای حفظ منابع آب‌وخاک است[11]. 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، ازجمله 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 (به‌عنوان‌مثال آب‌وهوا، دما،

شـــدت نور، ارتفـاع و غیره). بـا این‌حـال محـدودیـت‌هـای گیاه‌پالایی را می‌توان با استفاده از گیاهانی که دارای زیست‌توده بالا، رشد سریع‌تر و توانایی سازگاری با شرایط محیطی سخت هسـتند، برطرف کرد[۱۲]. چندین راه وجود دارد که از طریق آن گیاهان مکان‌های آلوده را تمیز یا اصـــلاح می‌کنند؛ که شـــامل Phytovolatilization ،Rhizofiltration ،Phytoextraction Hydraulic ،Phytodegradation ،Phytostabilization Control، (phytostimulation) Phytodegradation می‌شود.

در این مطالعه برای اولین بار به‌مرور مطالعات گذشـــته درباره‌ی گیاه‌پالایی اتیل‌بنزن و تأثیر میکروارگانســـیم‌ها بر گیاه‌پالایی اتیل‌بنزن پرداخته شده است.

مواد و روش‌ها

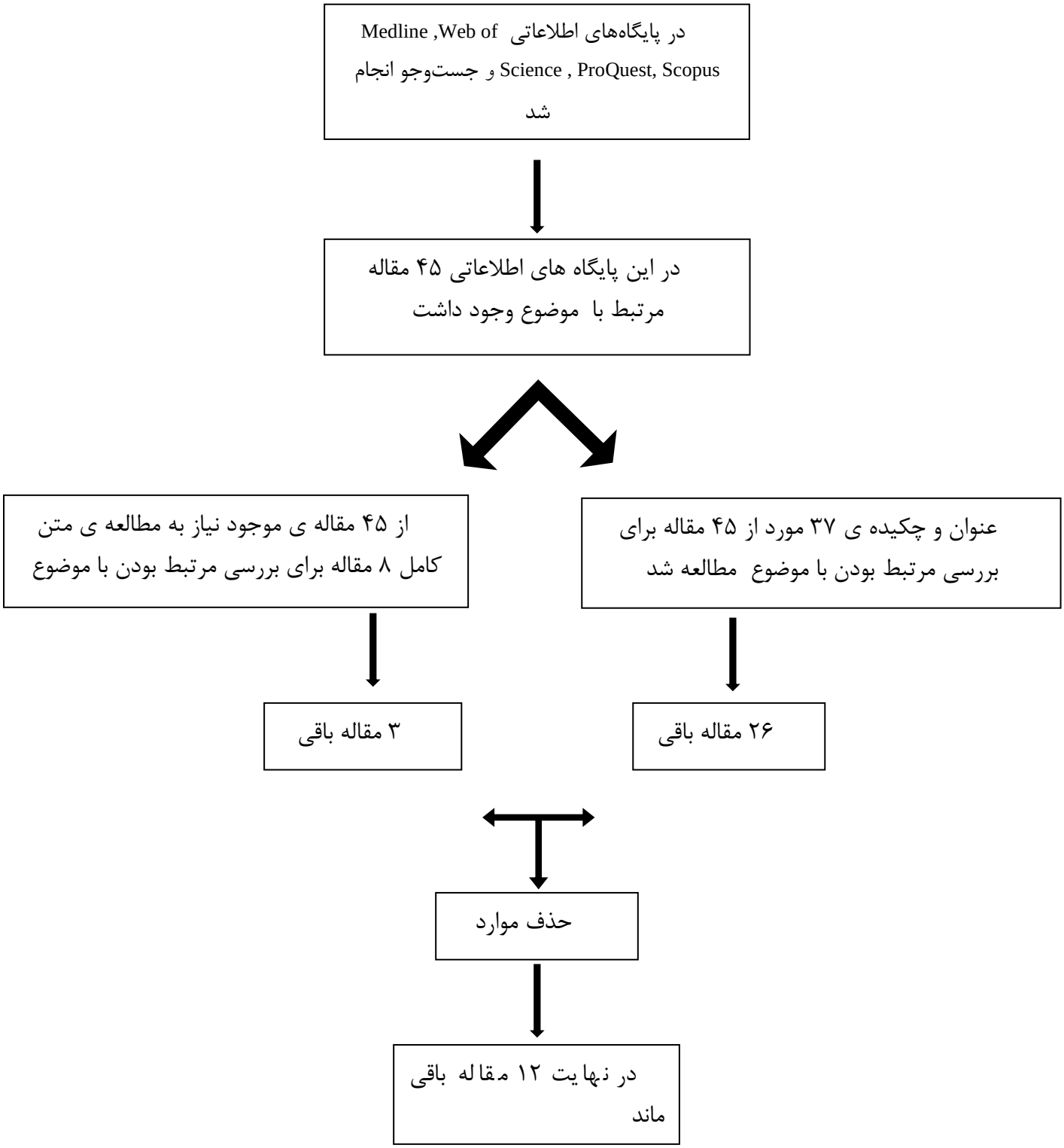
برای انجام این مطالعه کلیدواژه‌های

((((((((((((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-benzol"[Title/Abstract]))) OR ("Vegetation-enhanced bioremediation"[Title/Abstract]) در پایگاه‌های اطلاعاتی Pubmed و Medline ,Web of Science , ProQuest, Scopus جســـت‌وجو شـــد. برای این کلیدواژه‌ها درمجموع تعداد ۴۵ مقاله در بازه‌ی زمانی ۲۰۰۹ تا ۲۰۲۲ یافت شـــد و در اولین مرحلـه‌ی غربـالگری عنوان و چکیـده‌ی مقـالات بـه‌صـــورت هم‌زمان موردبررســـی 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. درنهایت از ۴۵ مقاله تعداد ۲۹ مقـالـه بـاقی مـانـد کـه پس از حـذف موارد تکراری تعـداد ۱۲مقاله مرتبط ثبت شـد (شـکل ۱). معیار اصـلی برای انتخاب مقالات اسـتفاده از یک گیاه زنده برای پاک‌سـازی اتیل‌بنزن از محیط بـا روش‌هـای مختلف گیـاه‌پـالایی بود. ارزیـابی کیفیـت مطالعـات از طریق ســـامانـه‌ی منبع یـاب،SJR (Scientific Journal Rankings) و بررســی ســایتیشــن، ایمپکت فاکتور و شـــاخص SNIP (Source-normalized Impact per Paper) انجام شد.

یافته‌ها

گیاهان مورداستفاده در گیاه‌پالایی اتیل‌بنزن موجود در هوا و فرایند بیوشیمیایی

اتیل‌بنزن به دلیل فراریت بالا به‌صـــورت گســـترده‌ای در محیط پخش می‌شود. اتیل‌بنزن به‌عنوان یک آلاینده هوا، به‌ویژه یک آلاینده داخلی منتشـر می‌شـود. اتیل‌بنزن به‌راحتی از طریق اسـتنشـاق جذب می‌شـود[۱۳]. اتیل‌بنزن هنوز از کاربرد و اهمیت اقتصـادی بالایی برخوردار اسـت و احتمالاً آلاینده‌های محیطی پایدار در هوا باقی خواهد گذاشـت؛ بنابراین، ممکن اسـت یک خطر آشکار برای سلامت عمومی باشد[۱۰].



شکل ۱: **فلوچارت سرچ پریسما**

گیاه‌پالایی یکی از تکنیک‌های در دسترس و ساده برای حذف بنزن، تولوئن، اتیل‌بنزن 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 µL/L اتیل‌بنزن با استفاده از سرنگ همیلتون به داخل محفظه‌ای به حجم ۱٤٤ لیتر تزریق شد. BTEX توسط یک آشکارساز یونیزاسیون شعله کروماتوگرافی گازی آنالیز شد. راندمان حذف به‌صورت زیر محاسبه شد:

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

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

Ruscus Hyrcanus در طول ۳ روز و D. racemose در طول ٤ روز اتیل‌بنزن (غلظت ۲۰µL/L) را حذف کرد. میزان گیاه‌پالایی اتیل‌بنزن توسط R. hyrcanus و D. racemosa به ترتیب $17.33\ mg/m^3/h.cm^2$و $2.9\ mg/m^3/h.cm^2$ 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.[14]

در یک مطالعه از گیاه Z. zamiifolia برای حذف اتیل‌بنزن 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 گزارش‌شده است؛ بنابراین، S. trifasciata، S. kirkii و Z. zamiifolia برای مطالعه کارایی حذف ۵ ppm اتیل‌بنزن در شرایط یکسان به مدت ۲٤ ساعت مقایسه شدند. نتایج نشان داد که Z. zamiifolia بالاترین پتانسیل جذب اتیل‌بنزن از هوای آلوده را دارد. مقایسه کارایی جذب اتیل‌بنزن بر اساس میکرو مول در هر مترمربع از سطح برگ نشان داد که Z. zamiifolia می‌تواند ۱۳۳/۹ میکرو مول بر مترمربع اتیل‌بنزن را جذب کند درحالی‌که S. trifasciata و S. kirkii می‌توانند به ترتیب حدود ۳۸/۳ و ۲۲/۳ میکرو مول در مترمربع اتیل‌بنزن جذب کنند. نتایج در ۲٤ ساعت تائید کرد که Z. zamiifolia یک گیاه مناسب برای تصفیه اتیل‌بنزن ازهوای آلوده است.

برگ‌ها و ساقه‌های Z. zamiifolia به ترتیب می‌توانند ۲٦ و ۱٦ درصد اتیل‌بنزن را در عرض ۱۲ ساعت حذف کنند. جذب در عرض ۲٤ ساعت به ترتیب به ٤٥ و ۲۰ درصد افزایش یافت. مشخص شد که‌برگ‌ها می‌توانند اتیل‌بنزن بیشتری نسبت به ساقه‌ها حذف کنند. مطالعات دیگر توضیح دادند که روزنه و موم کوتیکول مسیرهای مهمی برای جذب ترکیبات آلی فرار هستند. جذب اتیل‌بنزن توسط Z. zamiifolia از طریق مسیر روزنه (۷۵٪) و مسیر کوتیکول (۲۵٪) بود[15]. کوتیکول‌های گیاهی ساختارهای پیچیده‌ای هستند و از یک داربست ماکرومولکولی از کوتین و انواع لیپیدهای آلی تشکیل‌شده‌اند 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[16]. غشای کوتیکولی در برابر از دست دادن آب توسط تعرق مقاومت می‌کند و تهاجم پاتوژن و نفوذ مواد شیمیایی را محدود می‌کند[17]. روزنه‌های گیاه در اپیدرم قرار دارند که هرکدام توسط دو سلول محافظ محدودشده‌اند. 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

همچنین می‌توانند روی ساقه‌ها ظاهر شوند اما تعداد روزنه‌ها در برگ بیشتر است. قسمت‌های هوایی برخی از گیاهان زمینی بدون کلروفیل (Monotropa، Neottia) و ریشه‌ها به‌طورمعمول روزنه ندارند، اما ریزوم‌ها چنین ساختاری دارند[18]. روزنه‌ها مسیرهای مستقیمی رابین برگ‌ها و هوا ایجاد می‌کنند: آن‌ها رابط فعال بین گیاهان و محیط جو هستند[19]. روزنه‌ها تنظیم‌کننده‌های قدرتمند تبادل گاز هستند و روابط خطی بین سرعت فتوسنتز و هدایت روزنه‌ای اغلب در درختان مشاهده می‌شود[20].

اتیل‌بنزن توسط Z. zamiifolia از طریق برگ‌ها و ساقه‌های گیاه جذب‌شده و سپس به ریشه منتقل می‌شود. اتیل‌بنزن ممکن است توسط آنزیم‌های گیاهی یا مکانیسم‌های دیگر در گیاه به ۱- فنیل اتانول و استوفنون تجزیه شود. باکتری‌هایی مانند *Pseudomonas sp. NCIB 9816-4*، *P. putida 39/D* و *Pseudomonas sp. NCIB 10643* دارای آنزیم‌های اکسیژناز بوده که می‌تولنند لتیل‌بنزن را تجزیه کنند. آنزیم‌های مونواکسیژناز و دی‌اکسیژناز آنزیم‌های مهم در گیاهان هستند. آن‌ها به‌طورکلی متعلق به خانواده پروتئین‌های هم (heme) هستند که درمجموع 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[15].

در یک بررسی دیگر نیز حذف بنزن، تولوئن، اتیل‌بنزن و زایلن توسط Z. zamiifolia موردمطالعه 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 ± 0.02 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) تجزیه‌وتحلیل شد[21]. 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 مشاهده‌شده است[22]. این پارامترها منعکس‌کننده جذب، انتقال، توزیع و اتلاف انرژی نور در برگ گیاه است و برای این پارامترها برای تعیین عملکرد فتوسنتزی استفاده می‌شوند[21]. نسبت Fv/Fm می‌تولند بینشی در مورد تولنایی 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 [23]. نتایج تفاوت معنی‌داری را در نسبت Fv/Fm ($p>0/05$) بین گیاه کنترل و تیمار پس از قرار گرفتن در معرض آلاینده‌ها نشان نداد. این احتمالانشان می‌دهد که غلظت ۲۰ ppm بنزن، تولوئن، اتیل‌بنزن یا زایلن به‌اندازه‌ای 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 انجام‌شده است. نرخ تنفس کمی در شرایط تحت تنش آب یافت شد. همچنین

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 پیشنهادشده 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، می‌توانند 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:

رابطه (۲) $$V\frac{dc}{dt}=V^{\cdot}c_{out}-V^{\circ}c+S-A_I\eta c$$

با غلظت اولیه $c_{\circ}=(t_{\circ})c$، V برابر است با حجم داخلی محفظه (m^3)؛ V°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 حاصل‌ضرب سطح برگ A_I (m^2) واردشده به اتاق و میزان حذف در واحد سطح برگ η (m/h) است در نظر گرفته می‌شود.

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 گونه های 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 بااین‌حال، به نظر نمی‌رسد که میزان حذف با تعداد روزنه‌ها در ارتباط باشد. بر اساس مطالعات مشخص شد که موم .S trifasciataو Sansevieria hyacinthoides جذب بیشتری از اتیل‌بنزن دارند و حاوی اسیدهگزادکانوئیک بالابودند. هگزادکانوئیک‌اسید ممکن است در جذب اتیل‌بنزن توسط موم کوتیکول گیاهان نقش داشته باشد.

تجزیه‌وتحلیل فلورسانس کلروفیل یا پتانسیل بازده کوانتومی فتوسیستم II (Fv/Fm) یا پارامترهای آن در گیاهان در معرض اتیل‌بنزن به‌ویژه در Dracaena deremensis (Lemon lime), Dracaena sanderiana ،Kalanchoe blossfeldiana و Cordyline fruticose با گروه کنترل تفاوت معنی‌دار نشان دادند (جدول ۱)[۲۳].

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)	Fv/Fm برای گیاه مواجهه یافته با اتیل‌بنزن	Fv/Fm برای گیاه کنترل
Aloe vera	2.50±0.04	0.684±0.017	0.658±0.016
Sansevieria masoniana	2.68±0.16	0.535±0.036	0.506±0.016
Sansevieria trifasciata	2.74±0.13	0.541±0.051	0.499±0.002

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

در یک مطالعه اثربخشی گیاهان گلدانی برای کاهش آلودگی هوا داخلی به‌صورت تجربی آزمایش شد. در این مطالعه از دو گونه‌ی گیاهی f Dracaena deremensis 'Janet Craig' و Spathiphyllum 'Sweet Chico' استفاده شد. با استفاده از ٦ گلدان به مدت ٨ هفته دریکی از ساختمان‌ها میزان اتیل‌بنزن از ۰/۵ ppb به حد غیرقابل تشخیص کاهش پیداکرده است اما در ساختمان دیگر تفاوتی در میزان اتیل‌بنزن مشاهده نشده است[۲٤].

توانایی گیاه D.dermensis و O. microdasys نیز برای حذف BTEX موردبررسی قرار گرفت. برای این منظور گیاهان در اتاقک‌های مهروموم‌شده قرار گرفتند. بعد از یک ساعت، تصفیه 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 بااین‌حال، D. dermensis می‌تواند اتیل‌بنزن را از هوا در محفظه‌های آزمایش پس از ۱۰۰ ساعت به‌طور کامل حذف کند. میزان حذف اتیل‌بنزن در محفظه‌های آزمایش $mg/\ m^2\ d^1$ ۳.٦۵ و $mg/\ m^2\ d^1$ ۲.۱ به ترتیب برای O. microdasys و D. dermensis می‌باشد. همچنین نرخ حذف اتیل‌بنزن از هوا در محفظه‌ی آزمایش بر اساس سطح برگ $mg/\ m^2\ d^1$ 1.3535 و $mg/\ m^2\ d^{10}$ 76. به ترتیب برای O. microdasys و D. dermensis بود[۲۵].

گیاهان مورداستفاده در گیاه‌پالایی اتیل‌بنزن 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 تبدیل‌شده 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. به‌عنوان‌مثال، گزارش‌شده است که تولوئن، اتیل‌بنزن و زایلن حدود ۱۸ درصد حجمی بنزین را تشکیل می‌دهند[۲٦].

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 ٤۱۰ 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 فیزیکوشیمیایی BTEX در سیستم تقسیم‌بندی آلاینده بین دو فاز خاک/آب موردبررسی قرار گرفت. بین مقادیر log Kd، 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 فیزیکوشیمیایی آن‌ها کنترل می‌شود[۲۷].

گیاه‌پالایی توسط درخت صنوبر به دلیل ویژگی‌های ریشه‌زایی، رشد سریع در دو سایت آلوده به نفت به مدت نزدیک به چهار سال مورداستفاده قرار گرفت که غلظت اتیل‌بنزن در خاک به میزان ٦٧٪ کاهش یافت. علاوه بر این، غلظت اکسیژن، متان و دی‌اکسید کربن در گاز خاک‌نشان داد که ریشه درختان خاک را آبگیری 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، اتیل‌بنزن و زایلن (BTEX) و برخی دیگر از هیدروکربن‌ها پرداخته شد. یک ویژگی مهم گیاهان شناسایی‌شده، 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 اتیل‌بنزن در این سایت آلوده ۱۱۷ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک بود و گیاه Baccharis salicifolia-Senecia salignus Fraxinus sp. در محل آلوده به اتیل‌بنزن رشد و تکثیر پیداکرده بود[۲۹].

گیاهان مورداستفاده در گیاه‌پالایی اتیل‌بنزن موجود در آب و فرایند بیوشیمیایی

اکوسیستم‌های آبی در برابر مواجهه با مواد پتروشیمی مانند اتیل‌بنزن و زایلن و اثرات نامطلوب آن‌ها آسیب‌پذیر هستند[۲۶]. اتیل‌بنزن 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 می‌تولند از نانوگرم در لیتر تا میلی‌گرم در لیتر متغیر باشد. اتیل‌بنزن بین ۱ تا ۱۰ میلی‌گرم در لیتر برحسب LC_{50} یا EC_{50} می‌تواند باعث ایجاد سمیت حاد در موجودات آبزی ازجمله ماهی، بی‌مهرگان و گیاهان آبزی شود[۳۰]. در یک مطالعه که در کانادا انجام شد از ٦٠ نمونه آب آشامیدنی، اتیل‌بنزن در ۲۷ مورد شناسایی شد[۲٦].

در یک مطالعه گیاه‌پالایی دو سایت آلوده به نفت با درختان صنوبر به مدت ٤ سال کاهش اتیل‌بنزن 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 زده‌شده ریشه‌ها در حدود ۳۱ ماه به ۰/۳ متر زیرآب زیرزمینی در سایت دیگر رسیده است. پس از رسیدن ریشه‌های صنوبر به آب‌های زیرزمینی، اصلاح آلاینده‌ها در آب‌های زیرزمینی گسترش پیداکرده 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 تقویت‌شده و سازگار بانمک انجام شد وجود اتیل‌بنزن در نمونه‌های به‌دست‌آمده از قسمت ساقه‌ی تعدادی از درختان صنوبر مشاهده شد که منشأ آن به کرئوزوت نسبت داده‌شده است[۳۱]. در جدول ۲ گونه‌های گیاهی مختلف که در حضور اتیل‌بنزن قادر به رشد هستند بیان شده است.

جدول۲:گونه‌های گیاهی قادر به رشد در حضور اتیل‌بنزن

گونه‌های گیاهی قادر به رشد در حضور اتیل‌بنزن
-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 تقویت‌شده و سازگار بانمک - نی و اسفناج آبی- تره‌فرنگی

میکروارگانیسم‌های مؤثر در گیاه‌پالایی

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

فنلی انتخاب کلنی‌های مورفولوژیکی متفاوت از کشت‌های تلقیح شده با مواد بافت گیاهی منجر به یافتن ۲۱۹ سویه شد. درمجموع 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 ،Achromobacter xylosoxidans vancouverensis، Pseudomonas putida ، Pseudomonas putida، Pseudomonas fluorescens ، Acinetobacter baumannii، fluorescens Acinetobacter ، Acinetobacter baumannii، baumannii Stenotrophomonas ، Serratia marcescen، johnsonii ، Stenotrophomonas maltophilia، maltophilia Stenotrophomonas sp. ،Stenotrophomonas rhizophila ، Bacillus subtilis ، Bacillus pumilus، Bacillus pumilus Paenibacillus sp، Microbacterium sp* قادر به رشد در محیط حاوی اتیل‌بنزن بودند؛ اما سویه‌های *Erwinia sp، Stenotrophomonas maltophilia، Stenotrophomonas maltophilia Chryseobacterium sp* قادر به رشد در محیط حاوی اتیل‌بنزن نبودند[۳۲]. مشاهده شد که تلقیح *B. cereus ERBP* باعث کمک به گیاه‌پالایی اتیل‌بنزن توسط *Clitoria ternatea* می‌شود. برگ C. ternatea فرورفته در ۱.٦ × ۱۰۷ CFU/ml از *B. Cereus ERBP* رشد بالاتری برای حذف EB نسبت به شاهد (برگ C. ternatea به‌صورت جداگانه و برگ C. ternatea فرورفته در نوترینت براث) نشان داد که میزان آن به 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 قرارگرفته و گیاه آغشته به *B. cereus ERBP* که در معرض اتیل‌بنزن قار 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 O_2 در تمام حوزه‌های حیات دخیل است. در گیاهان و حیوانات، CYPها نقش اصلی را در سم‌زدایی زنوبیوتیک‌ها 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 زنوبیوتیک 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 زنوبیوتیک جهت تبدیل اولیه هیدروکربن‌های غیرفعال برای دفاع شیمیایی در گیاهان بیان می‌شوند. گزارش‌شده است که CYP83D1در 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 قرارگرفته بودند، دو برابر بیشتر از نهال C. ternatea طبیعی غیر تلقیح شده که در معرض EB قرارگرفته 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. ternateaتحت تنش EB می‌تواند به‌طور قابل‌توجهی بیان

CYP83D1را افزایش دهـد. علاوه بر این، نهـال‌هـای C. ternateaطبیعی تلقیح شـده دارای سـطوح بیان بالاتری نسـبت به نهال‌های C. ternatea اسـتریل تلقیح شـده که در معرض EB قرار داشتند بود. بیان آنزیم‌های P450 می‌تواند مستقیماً با هیدروکسـیلاسـیون و تخریب ترکیبات زنوبیوتیک از طریق افزایش تمایلات آن‌ها به آنزیم‌های سـیسـتم سـم‌زدایی که در تغییر شـکل بیشـتر آن‌ها نقش دارند، مرتبط باشـد. فعالیت‌های دهیدروژناز (LOC100783159) در فرآیند بیولوژیکی درگیر در بسیاری از تبدیل‌های بیولوژیکی کاملاً شـناخته‌شـده اسـت. اتیل‌بنزن به ۱- فنیل اتانول و سـپس به اسـتوفنون دهیدروژنه می‌شـود، اسـتوفنون نیز به بنزآلدهید متابولیزه می‌شـود. این تبدیل به ترتیب توسـط اتیل‌بنزن دهیدروژناز و ۱- فنیل اتانول دهیدروژناز کاتالیز می‌شـود. گزارش‌شـده اسـت که این دهیدروژناز در هیدروژناسـیون یک ترکیب معطر کینین نقش دارد. بیان دهیدروژناز در حضور استرس EB تحت تأثیر تلقیح B. cereus ERBP قـرار گـرفـت. نـهـال‌هـای طـبـیـعـی C. ternatea تلقیح شـده پس از قرار گرفتن در معرض EB نسـبت به نهال‌های طبیعی C. ternatea تلقیح شـده بدون قرار گرفتن در معرض EB و گیاه طبیعی غیر تلقیح شـده تحت تنش EB افزایش برابری در بیان دهیدروژناز نشـان دادند. علاوه بر این، نتایج مشـابهی نیز در نهال‌های اسـتریل 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 نشـده اسـت) باعث افزایش جزئی در سـطح بیان دهیدروژناز در مواجهه با EB نسبت به استریل شـد. این آنزیم‌ها به‌عنوان کاتالیزور زیسـتی کلیدی برای کاتالیز اتیل‌بنزن به ۱- فنیل اتانول و سـپس بیشـتر به اسـتوفنون در نظر گرفته می‌شـونـد؛ بنـابراین، بیـان بـالاتر دهیـدروژنـازهـا می‌توانـد هیدروکسیلاسیون اتیل‌بنزن فعال نشده را به محصول نهایی آن افزایش دهـد. بـه‌طور خلاصـه، افزایش بیـان CYP83D1 و دهیدروژناز (LOC100783159) در گیاه تلقیح شده بدون EB اندازه‌گیری شـده اسـت که تفاوت معنی‌داری با نوع غیر تلقیح شـده با EB نداشـت؛ بنابراین در شـرایط تلقیح شـده با EB افزایش قابل‌توجهی توسـط C.ternatea در هر دو شـکل اسـتریل و طبیعی نشـان داده‌شـده اسـت. بر اسـاس مطالعه، بنزوئیک اسید یکی از متابولیت‌های اتیل‌بنزن است.[۹]

حذف افزایش‌یافته اتیل‌بنزن توسـط میکروارگانیسـم‌های جداشـده از برگ و خاک Z. zamiifolia موردمطالعه قرار گرفت. مشخص شد که *P. aeruginosa* بالاترین کارایی را در افزایش حذف اتیل‌بنزن دارد. این نتایج نشـان داد که تعداد میکروارگانیسم‌ها عامل اصلی مؤثر بر راندمان حذف اتیل‌بنزن نیست. کارایی حذف اتیل‌بنزن برای هر باکتری ممکن است به مکانیسـم‌های خاص هر باکتری، مانند کارایی آنزیم‌های اکسیژناز بستگی داشته باشد Z. zamiifolia استریل می‌تواند ۵ ppm اتیل‌بنزن را ظرف ٦٠ سـاعت حذف کند. برخی از سـویه‌ها ممکن اسـت قادر به تجزیه اتیل‌بنزن نباشـند یا برخی مواد شـیمیایی را تولید کنند که تخریب توسـط سـایر میکروارگانیسـم‌ها را مهار کند. نتایج نشـان داد که باکتری‌های اپی‌فیتیک مانند *B. myloliquefaciens subsp. plantarum* ،*Exiguobacterium sp. MH3* ،*NAU-B3* *Acinetobacter sp. 10095* و *A. calcoaceticus* سـویه *HPC253* هیچ تأثیری بر حذف اتیل‌بنزن نداشـتند. درنتیجه، راندمان حذف اتیل‌بنزن بین یک گیاه طبیعی و استریل بسیار مشابه بود. علاوه بر این، گیاه اسـتریل قادر به جذب تنها ٤٥ درصـد اتیل‌بنزن در ١٢ سـاعت بود، درحالی‌که گیاه اسـتریل با *P. aeruginosa*، *P. putida TISTR1522*، *B. cereus E33L*، *Bacillus sp. N6*، *B. cereus* سویه *ZQN5* و *Bacillus sp. 6B254-3L* توانست اتیل‌بنزن بیشـتری (به ترتیب ٦٨، ٥٣، ٦٦، ٦٤، ٦٥، ٥٣ و ٦٢ درصد) را در عرض ١٢ ساعت جذب کند. گیاه استریل قادر به جذب کامل اتیل‌بنزن در ٦٠ سـاعت بود، درحالی‌که گیاهان اسـتریل تلقیح شـده با *P. aeruginosa* و *B. cereus ZQN5* توانسـتند اتیل‌بنزن را

به‌طور کامل در مدت‌زمان کوتاه‌تری (۳۶ ساعت) جذب کنند. علاوه بر این، گیاهان تلقیح شده با *P. putida TISTR1522*، *B. cereus E33L*، *Bacillus sp. N6* و *Bacillus sp. 6B254-3L* توانستند اتیل‌بنزن را ظرف ٤٨ 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–
بدون تأثیر در گیاه‌پالایی	B. amyloliquefaciens subsp. Plantarum Exiguobacterium sp. MH3 – NAU-B3 and A. – Acinetobacter sp. 10095– calcoaceticus strain HPC253
بررسی نشده	– 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 – Stenotrophomonas sp.– rhizophila – Bacillus pumilus –Bacillus pumilus – Paenibacillus sp– Bacillus subtilis Microbacterium sp

در یک مطالعه اثر arbuscular mycorrhiza (AM) بر ماندگاری بنزن، تولوئن، اتیل‌بنزن و زایلن (BTEX) در بسترهای آلوده مصنوعی مورد ارزیابی قرار گرفت. گیاهان تره‌فرنگی با سه گونه قارچ Gigaspora rosea AM، Gigaspora margarita، 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 به‌طورکلی 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 ٤). 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 BTEXدر داخل کابینت‌ها این امر را بعید می‌کند) یا جذب و تجمع در بافت‌های گیاهی یا در ساختارهای قارچی باشد[۳٤].

جدول ٤: مقایسه‌ی فاکتورهای مختلف رشد در گیاه کنترل و همزیست با قارچ‌های میکوریز

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

متابولیت‌های اتیل‌بنزن

در نهال C. ternatea اتیل‌بنزن نه‌تنها جذب شـــد بلکه به متابولیت‌هـای آن (بـه عبـارتی ۱- فنیـل اتـانول، اســـتوفنون، بنزآلدئید و اسـید بنزوئیک) تبدیل شـد[۹]. داده‌های حاصـل از تجزیه‌وتحلیل HPLC نشـان داد که اتیل‌بنزن، ۱- فنیل اتانول و اســتوفنون در تیمار Z. zamiifolia یافت شـد درحالی‌که این ترکیبات در گیاهان شـاهد یافت نشـد. مقادیر اتیل‌بنزن موجود در برگ‌ها در روزهای ۱ و ۵ به ترتیب حدود ۲۲.٤٤ و ۱۵.۷۸ نـانو مول در گرم وزن تـازه بود. مقـادیر اتیـل‌بنزن موجود در سـاقه و ریشـه در روزهای ۱، ٤ و ۵ ،۱٤.۰۰ ،۱۰.۵۰ و ۱۲.۱٦ نانو مول در گرم وزن ســـاقه تازه و ۱۱.۰۰، ۳.٦۷ و ٤.۸۲ نانو مول در گرم وزن ریشه بود. علاوه بر این، ۱-فنیل اتانول ۰.٤٤ نانو مول در گرم وزن تازه ساقه در روز ٤ یافت شد. استوفنون در تمام قســـمت‌های گیاه در روزهای ۱، ٤ و ۵ آزمایش‌ها یافت شـــد. به‌طور مشـــابه، در طول تجزیه‌وتحلیل GC-MS، اتیل‌بنزن نیز در برگ‌ها در روزهای ۱ و ۵ یافت شـــد[۱۵]. در جدول ۵ مدل‌های مختلف گیاه‌پالایی استفاده‌شده برای حذف اتیل‌بنزن ارائه شده است.

جدول ۵: مدل‌های مختلف گیاه‌پالایی استفاده‌شده برای حذف اتیل‌بنزن

گونه‌ی گیاه	محـیـط لَلوده بـه اتیل‌بنزن	مـحـل جـذب اتیل‌بنزن در گیاه	میزان حذف	میکروارگانیسـم‌های مؤثر بر گیاه‌پالایی	میزان حذف	رفرنس
Clitoria ternatea	هوا	برگ	طبیعی ٤۰٪-اسـتریل ۲۰٪(در مدت ۳ روز و اتیل‌بنزن ۱۵ppm)	B. cereus ERBP	طبیعی تلقیح شـده حذف ۸۰٪-اسـتریل تلقیح شـده حـذف ٤۰٪(در مـدت ۳ روز و اتـیـل‌بـنـزن ۱۵ppm)	۹
Z. zamiifolia	هوا		۱۳۳.۹ میکرو مول بر مترمربع اتیل‌بنزن در ۲٤ ساعت			۱۵
S. trifasciata	هوا		۳۸.۳ میکرو مول بر مترمربع اتیل‌بنزن در ۲٤ ساعت			۱۵
S. kirkii	هوا		۲۲.۳ میکرو مول بر مترمربع اتیل‌بنزن در ۲٤ ساعت			۱۵
Z. zamiifolia **۳ چرخـه‌ی تـزریـق اتیل‌بنزن**	هوا	برگ	٦۰ ساعت 5ppm	B. amyloliquefaciens subsp. plantarum NAU-B3, Exiguobacterium sp. MH3, Acinetobacter sp. 10095, and A. calcoaceticus strain HPC253	بدون تأثیر	۱۵
Z. zamiifolia **۳ چرخـه‌ی تـزریـق اتیل‌بنزن** **چرخه‌ی دوم (مشـــابه چرخه‌ی سوم)**	هوا	برگ	٦۰ ساعت 5ppm	P. aeruginosa، B. cereus E33L، Bacillus sp. N6 و B. cereus ZQN5)	۳٦ ساعت 5ppm	۱۵
				P. putida (TISTR1522 و	٤۸ ساعت 5ppm	

				Bacillus sp. 6B254-(3L	
Z. zamiifolia ۳ چرخه‌ی تزریق اتیل‌بنزن (چرخه‌ی اول)	هوا	برگ	۶۰ ساعت ppm5	P. aeruginosa و B. cereus ZQN5	۳۶ ساعت ppm5	۱۵
Z. zamiifolia	هوا	۷۵٪ از مسیرهای روزنه‌ای و ۲۵٪ مسیرهای غیر روزنه‌ای و کوتیکول به ترتیب/برگ و ساقه	0.92 ± 0.02 mmolm^{-2} at 72 h of exposure برگ ۲۶ و ساقه ۱۶ در عرض ۱۲ ساعت			۱۵
Chlorophytum comosum	هوا ۲۳	کوتیکول موم روزنه				۲۳
Dracaena deremensis ‘Janet Craig’ و Spathiphyllum ‘Sweet Chico’	هوا		کاهش میزان اتیل‌بنزن از ۰.۵ppm به زیر حد قابل‌تشخیص بعد از ۸ هفته			۲۴
D.dermensis	هوا		15.22 mg/ m^3 m^2 d1			۲۵
O. microdasys	هوا		26.45 mg/ m^3 m^2 d1			۲۵
canna	خاک با محتوای آب ۴۰ درصد و ۲۰ درصد		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			۲۷
درختان صنوبر	آب زیرزمینی		۱۲ درصد کاهش داده در عرض ۴ سال			۲۸
Ruscus hyrcanus	هوای بسته		mg/m^3/h.cm^2 17.33			۱۴
Danae racemosa	هوای بسته		mg/m^3/h.cm^2 2.9			۱۴
تره‌فرنگی				Glomus mosseae Gigaspora rosea Gigaspora margarita		۳۴

بحث

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

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 برایBTEXها بیا ن شده اطلاعات زیادی را از دسترس خارج می‌کند.

حذف اتیل‌بنزن هوابرد از طریق برگ گیاه یکی از مهم‌ترین راه‌های گیاه‌پالایی اتیل‌بنزن است. به‌عنوان‌مثال برگ‌ها و ساقه‌های Z. zamiifolia به ترتیب می‌توانند ۲۶ و ۱۶ درصد اتیل‌بنزن را در عرض ۱۲ ساعت حذف کنند. مشخص شد که‌برگ‌ها 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].

ازجمله مزایای گیاه‌پالایی می‌توان به هزینه‌ی پایین آن در مقایسه دیگر روش‌های حذف آلودگی اشاره کرد به‌عنوان‌مثال 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 ثابت‌شده 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 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، مشخص‌شده 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 مشاهده‌شده است که میکروارگانیسم‌ها می‌توانند به افزایش راندمان گیاه‌پالایی کمک کنند هرچند ممکن است تأثیرات متفاوت دیگری هم داشته باشند به‌عنوان‌مثال در بررسی تأثیر میکروارگانیسم‌های جداشده 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. باوجود 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. بااین‌حال، باید توجه داشت که میکروارگانیسم‌های مورداستفاده باید برای سلامت انسان غیر بیماری‌زا باشند[۱۵].

علاوه بر باکتری‌ها، تأثیر برخی از قارچ‌ها نیز برجذب اتیل‌بنزن از ناحیه‌ی میکوریز که باعث افزایش توانایی جذب گیاه می‌شود مشاهده‌شده است[۳۴].

بعضـــی از روش‌های گیامپالایی علاوه برجذب اتیل‌بنزن منجر به تولید متابولیت‌های آن در گیاه می‌شـــوند. ۱- فنیل اتانول، اســـتوفنون، بنزآلدئید و اســـیدبنزوئیک ازجمله این متابولیت‌ها هســـتند[۹،۱۵]. بااین‌حال متابولیت‌های اتیل‌بنزن هم ممکن است اثرات سوئی بر سلامتی داشته باشند. به‌عنوان‌مثال متابولیت اصـلی اتیل‌بنزن، ۱-فنیل اتانول، آدنوم توبولار کلیه را با دوز بالا در موش‌های صحرایی نر القا می‌کند[۱۳].

نتیجه‌گیری

گیاه‌پالایی می‌تواند یک گزینه‌ی مناســـب برای حذف آلودگی اتیل‌بنزن از محیط به‌خصـوص شـکل گازی این آلاینده در محیط‌هایی بسـته باشـد. با اسـتفاده از میکروارگانیسـم‌ها می‌توان به تقویت رلندمان این روش کمک کرد. اســـتفاده از گیـاهـان گلـدانی برای اهـداف تزئینی همواره موردتوجـه و علاقه‌ی عموم افراد جامعه قرار داشـــته اســـت علاوه بر این انتخاب گیاهان مناســـب می‌تواند به بهبود کیفیت هوای داخلی بدون پرداخت هیچ هزینه‌ی اضافی کمک کند.

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, Treesubsuntorn 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 CONDITIONS2007: 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, Bauddh K, editors. Phytomanagement of Polluted Sites: Elsevier; 2019. p. 221-41

Journal of Environmental Health Engineering, May 2022; Vol. 9, No. 3: 399-416

Phytoremediation to Remove ethylbenzene from Contaminated Media

Soheila Alizadeh[1,2], Majid Hashemi*[1,2]

[1]Environmental Health Engineering Research Center, Kerman University of Medical Sciences, Kerman, Iran
[2]Department 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