

## کارایی روش استخراج بخارات آلاینده‌ها (SVE) در پاک‌سازی خاک‌های آلوده

### به ترکیبات نفتی

سعید گیتی پور<sup>۱\*</sup>

[Gitipour@ut.ac.ir](mailto:Gitipour@ut.ac.ir)

عماد صنعتی فروش<sup>۲</sup>

هادی تره باری<sup>۳</sup>

محمودرضا عبدی<sup>۴</sup>

علیرضا گیتی پور<sup>۵</sup>

سعید حیدری<sup>۶</sup>

تاریخ پذیرش: ۹۳/۱۱/۱۵

تاریخ دریافت: ۹۳/۰۴/۱۵

### چکیده

**زمینه و هدف:** آلودگی خاک‌های محوطه پالایشگاهها و پمپ بنزینها در اثر تماس با بنزین به یکی از مشکلات مهم زیست محیطی تبدیل شده‌است. خطرات ناشی از نشت بنزین به درون خاک و انتقال آن به منابع آب‌های زیر زمینی بیشتر ناشی از وجود ترکیبات BTEX (بنزن، تولوئن، اتیل بنزن، زایلن) می‌باشد، چراکه میزان سمیت و فراریت این ترکیبات بالا بوده و به میزان قابل توجهی در سوخت بنزین معمولی یافت میشوند.

**روش بررسی:** در این تحقیق فرآیند حذف آلاینده‌های BTEX از خاک‌های آلوده به بنزین با استفاده از روش استخراج بخارات آلاینده‌ها (SVE) مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور نمونه خاک طبیعی غیر آلوده پس از آلوده شدن با بنزین با استفاده از روش SVE مورد پاک‌سازی واقع شده است. آزمایش‌های فرآیند پاک‌سازی در سه بازه زمانی ۴، ۸ و ۱۲ ساعت و در سه دمای متفاوت ۲۰، ۴۰ و ۶۰ درجه سانتی‌گراد انجام گرفت.

**یافته‌ها:** این پژوهش نشان داد که کارایی روش SVE در حذف ترکیبات BTEX از خاک بسیار مناسب بوده و در مقیاس آزمایشگاهی به بیش از ۹۹٪ می‌رسد. همچنین بر اساس نتایج آزمایش‌های صورت گرفته قابلیت حذف این ترکیبات با روش SVE رابطه‌ای معکوس با نقطه جوش آن‌ها دارد. ضمناً بالا بردن دمای آزمایش‌ها باعث تسریع در فرآیند پاک‌سازی نمونه‌های خاک گردید. به طوری که افزایش دما از ۲۰ درجه سانتی‌گراد به ۴۰ درجه سانتی‌گراد و نیز از ۴۰ درجه به ۶۰ درجه سانتی‌گراد میزان بازدهی حذف ترکیبات BTEX را در مدت ۱۲ ساعت به ترتیب ۱۰٪ و ۲۶٪ بیش‌تر نمود.

**نتیجه‌گیری:** دستاوردهای حاصل از این پژوهش نشان می‌دهد که روش استخراج بخارات آلاینده‌ها جهت حذف ترکیبات آلی آروماتیک از خاک یک روش مناسب و کارا است که در صورت اجرای صحیح می‌توان به بازدهی بالایی در دفع این‌گونه آلاینده‌ها از خاک دست یافت.

**واژه‌های کلیدی:** آلودگی خاک، بنزین، استخراج بخارات آلاینده‌ها، ترکیبات BTEX، دما.

\*۱- (مسئول مکاتبات): دانشیار دانشکده محیط زیست، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی محیط زیست، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

۳- دانشجوی دکتری محیط زیست، دانشکده علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

۴- دانشیار دانشکده عمران، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران.

۵- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه سین سیناتی، امریکا.

۶- استادیار دانشکده عمران، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

## **Application of Soil Vapor Extraction (SVE) Technique for the Treatment of Hydrocarbon Contaminated Soils**

**Saeid Gitipour**<sup>1\*</sup>

[Gitipour@ut.ac.ir.com](mailto:Gitipour@ut.ac.ir.com)

**Emad Sanati Farvash**<sup>2</sup>

**Hadi Tarebari**<sup>3</sup>

**Mahmoodreza Abdi**<sup>4</sup>

**Alireza Gitipour**<sup>5</sup>

**Saeid Heidari**<sup>6</sup>

### **Abstract**

**Background and Objective:** In recent years, production and use of petroleum products, such as gasoline, have been increasing. This increase is followed by numerous ecological consequences. Among them, the most important ecological effects of using gasoline is contamination of soils at refineries and gas stations. Hazards of gasoline leakage into the soil and its migration to groundwater could be attributed to the existence of BTEX compounds, which are the main constituents of gasoline with high toxicity and volatility values.

**Method:** In this study, the removal of BTEX contaminants from soil samples contaminated with gasoline has been investigated using Soil Vapor Extraction technique. The treatment tests were conducted at 3 time intervals of 4, 8 and 12 hours and 3 different temperatures of 20, 40 and 60°C. **Results:** The results of tests indicate the high suitability of SEV technique showing %99 removal efficiency for BTEX compounds from soil samples. Moreover, the results of the analysis present that the removal of contaminants an inverse relation with their boiling points in this techniques. Also, raising the temperature of the samples from 20°C to 40°C and from 40°C to 60°C during 12 hours increased the removal efficiencies of BTEX compounds by %10 and %26, respectively.

**Conclusion:** The results of this study revealed that SVE technique for the removal of aromatic organic compound from soil is an efficient technique which can lead to high efficiency for the removal of such contaminants from soil, if implemented properly.

**Keywords:** Soil contamination, Gasoline, Soil Vapor Extraction (SVE), BTEX compounds, Temperature.

---

1- Associate Professor, Graduate Faculty of Environment, University of Tehran, Tehran, Iran. \* ( *Corresponding Author* )

2- Graduate Faculty of Environment, University of Tehran, Tehran, Iran.

3- Graduate Faculty of Environment, University of Tehran, Tehran, Iran.

4- Associate Professor, Faculty of Civil Engineering, Khajeh Nasir Toosi, Tehran Iran.

5- Graduate Faculty of Chemical Engineering, University of Cincinnati, USA.

6- Assistant Professor, Faculty of Civil Engineering, Tehran South Branch, IAU, Tehran, Iran.

## مقدمه

یکی از انواع آلودگی‌های محیط زیست آلودگی خاک است که عوامل و شرایط مختلفی می‌تواند سبب آن گردد. آلوده شدن خاک از سویی به دلیل تماس مستقیم با افراد و از سوی دیگر به سبب ورود آلاینده‌ها به چرخه‌های غذایی موجودات زنده موجب ایجاد مشکلات و معضلات بهداشتی و زیست محیطی فراوانی می‌گردد (۱). آلودگی خاک از طریق فرآورده‌های نفتی اغلب از طریق نشت یا تراوش از مخازن نگهداری، لوله‌ها و تجهیزات انتقال سوخت ایجاد می‌شود (۲). پاک‌سازی خاک‌های آلوده به این مواد از سال‌های گذشته مورد توجه قرار گرفته و روش‌های متعددی نیز در این راستا ابداع و به‌کارگرفته شده است. برخی از فن‌آوری‌های پاک‌سازی خاک عبارتند از: استخراج بخارات از خاک، شستشوی خاک، تثبیت و جامدسازی، روش‌های الکتروشیمیایی، پاک‌سازی زیستی و گیاه‌پالایی. تمامی این روش‌ها بر اساس ایجاد تغییرات فیزیکی، شیمیایی، الکتریکی، حرارتی و یا بیولوژیکی بر روی آلاینده‌ها است تا بتوان آنها را استخراج، تثبیت و یا غیرسمی نمود (۳).

استخراج بخارات آلاینده: متد پاک‌سازی استخراج بخارات آلاینده‌ها یا متد SVE (Soil Vapor Extraction) یک روش در محل برای پاک‌سازی خاک‌های آلوده است که با استفاده از آن غلظت مواد فرار موجود در قسمت‌های غیراشباع خاک کاهش می‌ابد. در این روش با ایجاد خلا در شبکه خاک گرادیان فشار منفی به‌وجود آمده و باعث حرکت بخارات به سمت چاه‌های استخراج می‌شود (۴). مزیت روش SVE نسبت به سایر روش‌های مشابه در دسترس بودن تجهیزات، نصب آسان وسایل، داشتن کم‌ترین مزاحمت برای سایر فعالیت‌های محوطه، و قابلیت ترکیب آسان آن با سایر فن‌آوری‌های پاک‌سازی (مانند تزریق هوا) و در نهایت هزینه نسبتاً پایین آن در مقایسه با دیگر روش‌ها می‌باشد (۵). همچنین موثر بودن این فن‌آوری در کاهش غلظت اجزای آلی فرار و برخی از اجزای آلی نیمه فرار که در محصولات نفتی وجود دارند به اثبات رسیده است (۶). روش SVE عموماً در حالتی که ماده نفتی سبکتر باشد (فرارتر باشد) موفقیت‌آمیزتر خواهد بود (۷). در طی سال‌های ۱۹۸۵ تا ۲۰۰۵ میلادی ۲۵۵ سایت آلوده به ترکیبات آلی فرار و نیمه فرار در آمریکا توسط روش SVE مورد پاک‌سازی واقع شده اند که طبق گزارش U.S.EPA این روش بیش‌ترین کاربرد را در بین روش‌های محلی داشته است (۸).

۲ عامل مهم در میزان اثرگذاری روش استخراج بخارات نقش اساسی دارند: عامل اول نفوذپذیری خاک آلوده و عامل دوم فرارپذیری آلاینده‌ها می‌باشد (۹). میزان تخلخل خاک و همچنین نفوذپذیری بالای آن در بهبود عملکرد روش SVE بسیار مؤثر می‌باشد (۱۰). در ضمن افزایش میزان رطوبت نیز توانایی خاک را در انتقال هوا که یکی از مهمترین موارد در SVE می‌باشد کاهش می‌دهد. این موضوع به‌خصوص در خاک‌های ریزدانه اهمیت زیادی می‌یابد، چراکه منجر به باقی ماندن آب در خاک می‌شود (۱۱). افزایش میزان مواد

آلی خاک و نیز بالا بودن حلالیت آلاینده‌ها در آب از کارایی فرآیند SVE می‌کاهد (۱۲). لازم به ذکر است که طبق بررسی‌های صورت گرفته، رابطه تغییر این پارامترها با میزان بازدهی حذف آلاینده‌ها رابطه‌ای غیر خطی می‌باشد (۱۳).

نخستین آزمایش‌ها در مقیاس پایلوت بر روی پاک‌سازی بنزین که به صورت NAPL در خاک‌های ریزدانه ماسه‌ای توسط Cliff و Hoag در سال ۱۹۸۵ صورت گرفت. آن‌ها موفق شدند ۷۰٪ از ۱۸۰۰ لیتر بنزین موجود را با موفقیت طی ۹۰ روز از خاک خارج نمایند (۱۴). همچنین در سال ۲۰۰۸ میلادی Manoel و Rosane عملیات استخراج بخارات را برای پاک‌سازی خاک در یک سایت صنعتی آلوده به حلال‌های کلریدی در برزیل بررسی نمودند که اقدامات آن‌ها شامل طراحی، نظارت و راهبری پاک‌سازی برای محوطه آلوده بوده است. در این تحقیق نیز در یک بازه ۹ ماهه حدود ۴۵٪ از آلاینده‌ها از خاک محوطه حذف گردیدند (۱۵). در تحقیق دیگری در سال ۲۰۰۵ میلادی اکبرآبادی به بررسی روش‌های گوناگون به‌سازی خاک‌های آلوده پرداخت و در پایان از بین تمام روش‌های پاک‌سازی خاک روش SVE را به عنوان بهترین و اجرایی‌ترین متد برای اصلاح خاک‌های آلوده به مواد آلی فرار (به‌ویژه آلاینده‌های نفتی) معرفی نمود (۱۶).

معرفی ترکیبات BTEX: BTEX شامل ترکیباتی از هیدروکربن‌های فرار هستند که بیش‌ترین سمیت را در بین ترکیبات آروماتیک موجود در سوخت بنزین دارند. به همین علت جداسازی این ترکیبات از خاک، بیش‌ترین تأثیر را در کاهش سمیت دارد (۱۷ و ۱۸). آلودگی به BTEX همچنین ممکن است به دلیل استفاده از بنزین در غلظت بالا و سایر مشتقات نفتی مانند دیزل، نفت کوره و غیره رخ دهد (۱۹). نسبت وجود این ترکیبات در بنزین را می‌توان در جدول ۱ ملاحظه نمود.

جدول ۱- درصد غلظت ترکیبات BTEX در بنزین معمولی (۲۰)

Table 1-Concentrations of BTEX compounds in ordinary gasoline (%)

ترکیب	درصد وزنی
بنزن	۰/۱۲ - ۳/۵
تولون	۲/۳۷ - ۲۱/۸
اتیل بنزن	۰/۳۶ - ۲/۸۶
متا زایلن + پارا زایلن	۲/۴۵ - ۵/۴۵
ارتو زایلن	۰/۶۸ - ۲/۸۶

هر مرحله اندازه گیری شد. سپس نمودارهای بازدهی حذف برای هر یک از آلاینده‌های مورد نظر رسم گردید و کارایی حذف آلاینده‌ها بررسی شد. در مجموع ۴۵ آزمایش انجام و پس از هر آزمایش نمونه‌های خاک اصلاح شده جهت تعیین غلظت ۴ آلاینده مورد نظر، با استفاده از دستگاه کروماتوگرافی گازی آنالیز شده اند.

خاک مورد استفاده: برای بررسی میزان تاثیر این روش در پاک‌سازی خاک، نمونه ای از خاک ماسه بادی که در جمع آوری ریخت و پاش‌های نفتی استفاده فراوانی دارد و از نظر نفوذپذیری نیز مناسب می‌باشد به عنوان خاک مورد استفاده در آزمایش‌ها انتخاب گردید. جهت تعیین خصوصیات مهندسی خاک یادشده آزمایش‌های مختلف ژئوتکنیکی از قبیل تعیین چگالی، تعیین درصد رطوبت، تعیین درصد مواد آلی و آزمایش دانه بندی بر روی آن انجام گرفت. روش‌های استاندارد نمونه‌برداری و آزمایشگاهی که در این تحقیق استفاده شد، برگرفته از استانداردهای U.S.EPA و ASTM بوده که نام آزمایش‌ها، خلاصه تجهیزات و دستگاه‌ها و استانداردهای مورد استفاده در جدول ۲ مشاهده می‌گردد.

این تحقیق به منظور بررسی کارایی روش SVE در پاک‌سازی خاک‌های آلوده به ترکیبات Benzene, Toluene, Ethylbenzene, Xylynes که به صورت خلاصه به آن‌ها BTEX گفته می‌شود و نیز چگونگی تأثیر افزایش دما و زمان ماند در فرآیند پاک‌سازی می‌باشد. بدین منظور، در این مطالعه آزمایش‌های نمونه‌های خاک در دماهای ۲۰، ۴۰ و ۶۰ درجه سانتی‌گراد و زمان‌های ماند ۴، ۸ و ۱۲ ساعت مورد بررسی قرار گرفت تا اثرات این متغیرها در بهبود کیفی این روش در حذف آلاینده‌های فوق الذکر مشخص گردد.

#### روش بررسی

در این پژوهش آزمایش‌ها در مقیاس پایلوت انجام گردیدند. نمونه‌ی خاک آلوده به بنزین پس از قرار گرفتن در پایلوت ساخته شده در بازه‌های زمانی مختلف ۴ ساعت، ۸ ساعت و ۱۲ ساعت و در دماهای مختلف ۲۰ درجه سانتی‌گراد (دمای محیط)، ۴۰ درجه سانتی‌گراد و ۶۰ درجه سانتی‌گراد به روش SVE مورد پاک‌سازی قرار گرفته و مقدار غلظت آلاینده‌های BTEX در

جدول ۲- روش و دستگاه‌های مورد استفاده در آزمایش‌های ژئوتکنیک

Table 2 - Methods and devices used in geotechnical tests

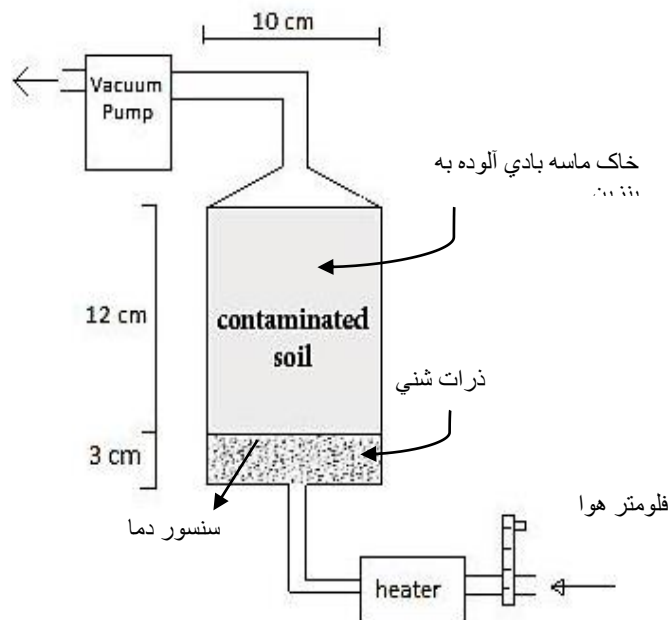
تجهیزات	استاندارد	نام آزمایش
بیل، کیسه‌های پلاستیکی	EPA Method 5035	نمونه‌برداری از خاک
ترازو، بوتله جینی، آون، دسیکاتور	ASTM D2216	تعیین رطوبت خاک
ترازو، بوتله جینی، کوره، دسیکاتور	ASTM D 2974	تعیین میزان مواد آلی خاک
سری الک‌ها، ترازو، بیلچه	ASTM D433	تعیین دانه‌بندی خاک
دستگاه آزمایش نفوذپذیری با هد ثابت	ASTM D 2434-87	نفوذپذیری خاک

شکل از جنس شیشه بوده که قطر داخلی آن ۱۰ cm و به ارتفاع ۱۵cm می‌باشد. در کف این استوانه شیشه ای مجرایی به قطر داخلی ۱ cm به منظور ورود جریان هوا و مجرای دیگری به همان قطر در بالای محفظه (در استوانه) جهت خروج جریان هوا تعبیه گردید. جهت پخش یکنواخت جریان هوا در سطح مقطع خاک لایه ای از شن (به ارتفاع ۳ سانتی‌متر) در پایین محفظه ریخته شده و بر روی این لایه شنی یک صفحه توری فلزی دایره ای

آماده سازی پایلوت آزمایشگاهی: جهت انجام آزمایش‌های مورد نظر دستگاهی در مقیاس آزمایشگاهی طراحی گردید که توسط آن آزمایش SVE صورت پذیرفت (به شکل ۱ مراجعه شود). سپس خاک آلوده به آلاینده‌های BTEX به درون این دستگاه منتقل گردیده و تحت جریان مکش هوا قرار گرفت به نحوی که آلاینده‌های درون خاک بصورت بخار از میان ذرات آن خارج گردند. دستگاه SVE شامل یک محفظه‌ی استوانه ای

جهت انجام آزمایش‌های SVE، از یک نمونه‌ی بنزین (با چگالی ۰/۷۴ گرم بر سانتی‌متر مکعب) متعلق به پمپ‌بنزینی شهری واقع در تهران، به‌عنوان آلاینده استفاده گردید. ابتدا ۱۵۰ گرم از این بنزین، جهت افزایش حجم آلاینده در مقدار مشخصی از حلال هگزان نرمال که فراریت بالایی دارد حل شد. سپس حلال حاصل به آرامی به خاک اضافه شده و هم‌زده شد. در این آزمایش‌ها با توجه به فراریت بنزین و به منظور اطمینان از فقدان خطا در نتایج آنالیز نمونه‌ها، میزان غلظت اولیه آلاینده‌ها پس از اختلاط کامل خاک و بنزین اندازه‌گیری گردید. آزمایش‌ها SVE در ۳ بازه زمانی ۴، ۸ و ۱۲ ساعت و هر کدام نیز در ۳ دمای ۲۰، ۴۰ و ۶۰ درجه سانتی‌گراد انجام گرفت. سپس نمونه‌های خاک در مراحل مختلف آزمایش جمع‌آوری گردیده و به منظور آنالیز آلاینده‌های BTEX استخراج شد.

شکل هم‌اندازه با مقطع ستون قرار گرفت. سپس خاک آلوده واقع در بالای توری فلزی در ۳ لایه مساوی متراکم شده و جریان مکش هوا با استفاده از پمپ خلا که به مجرای فوقانی محفظه شیشه‌ای متصل بود، ایجاد گردید. برای تنظیم و ثابت نگه داشتن درجه حرارت سیستم از دستگاه تولید حرارت به همراه کنترل‌کننده دیجیتال استفاده شد. این دستگاه شامل یک المنت تولید حرارت و همچنین یک کنترل‌کننده دیجیتال است که با استفاده از یک سنسور در مسیر جریان هوای ورودی به ستون خاک، دمای هوای ورودی به خاک را تنظیم نموده و در دمای مورد نظر در آزمایش‌ها نگه می‌داشت. عملکرد کنترل‌کننده به این صورت است که در صورت خارج شدن دمای سیستم از یک محدوده تعریف شده برای دستگاه، المنت را فعال و یا غیرفعال می‌سازد تا دما همیشه در محدوده مورد نظر باقی بماند. دبی هوای عبوری نیز به‌وسیله یک فلومتر که در محل ورود هوا به دستگاه گرم‌کننده متصل شده بر روی مقدار ۱ lit/min تنظیم گردید.



شکل ۱- نمای کلی از دستگاه آزمایش SVE

Figure 1 - A Schematic diagram of SVE test apparatus

غلظت نهایی هر ترکیب (C) بر حسب ppm با استفاده از رابطه‌ی ۵ به‌دست آمد (۱۵):

$$C = C_1 \times C.F. \times D.F \quad (\text{رابطه ۵})$$

که در آن  $C_1$ : غلظت به‌دست آمده از آنالیز GC برحسب mg/L و C.F. ضریب غلظت (Concentration Factor) به دست آمده از محلول استاندارد است. همچنین D.F فاکتور رقیق‌سازی (Dilution Factor) می‌باشد.

آنالیز نمونه‌های خاک با استفاده از دستگاه کروماتوگرافی گازی (GC): قبل از تزریق محلول‌های استخراج شده به دستگاه کروماتوگراف گازی، ۵ محلول استاندارد (در غلظت‌های متفاوت) از آلاینده‌های BTEX بر اساس غلظت تخمینی آن‌ها در خاک آلوده تهیه و به دستگاه GC تزریق گردید تا بر اساس آن منحنی کالیبراسیون جهت اندازه‌گیری سطوح زیر منحنی‌های رسم شده توسط دستگاه کروماتوگرام و تعیین غلظت آلاینده‌های BTEX مشخص شد. به دلیل غلظت بالای ترکیبات BTEX موجود در نمونه‌های خاک آلوده، نمونه‌های استخراج شده به میزان ۲۰۰ برابر رقیق شده و سپس ۱ میکرولیتر از هر یک از این محلول‌ها به دستگاه GC تزریق گردیدند.

## یافته ها

بر اساس سیستم طبقه‌بندی متحده و نتایج بدست آمده از آزمایش دانه‌بندی، خاک از نوع ماس‌های با دانه‌بندی ضعیف می‌باشد. همچنین نتایج حاصل از آزمایش‌های ژئوتکنیک که برای تعیین خصوصیات مهندسی خاک مورد آزمایش، انجام گرفته در جدول ۳ آورده شده است.

جدول ۳- مشخصات خاک

Table 3 - Soil characteristics

مقدار	مشخصات
۱/۳۲ gr/cm <sup>3</sup>	چگالی خاک
٪۳	رطوبت خاک
٪۱/۴	درصد مواد آلی خاک
۶/۴×۱۰ <sup>-۸</sup> cm/sec	نفوذپذیری خاک (K)

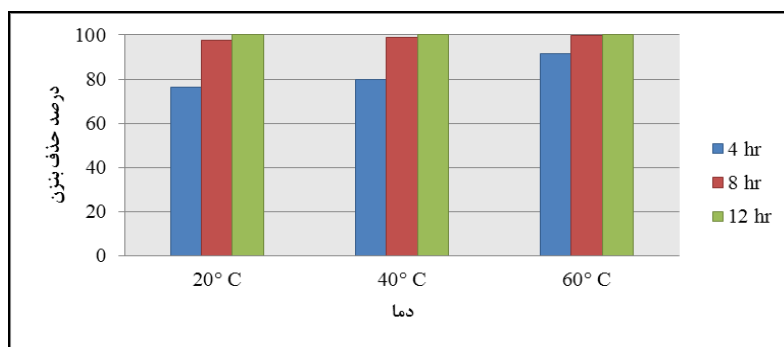
غلظت اولیه آلاینده‌ها در خاک: جهت تعیین غلظت اولیه آلاینده‌ها، از خاک آلوده قبل از انجام آزمایش‌های SVE نمونه برداری و سپس نمونه‌ها آنالیز گردید که میانگین نتایج آنالیز ترکیبات BTEX در جدول ۴ آورده شده است.

جدول ۴- مقادیر غلظت BTEX در نمونه‌های آلوده شده بر حسب ppm

Table 4 - Concentrations of BTEX compounds in contaminated samples (ppm)

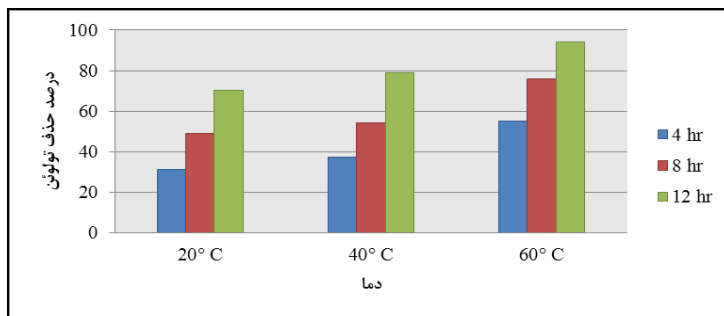
نام ترکیب	نمونه ۱	نمونه ۲	میانگین
Benzene	۸۱۴	۹۳۰	۸۷۲
Toluene	۳۷۰۵	۳۲۵۵	۳۴۸۰
Ethylbenzene	۲۵۵۱	۲۷۳۷	۲۶۴۴
Xylene	۳۳۱۹	۳۲۲۵	۴۲۷۲
Total (BTEX)	۱۰۳۸۹	۱۰۱۴۷	۱۰۲۶۸

بازدهی حذف آلاینده‌ها: بعد از هر آزمایش، میزان غلظت ترکیبات BTEX در خاک توسط دستگاه GC (کروماتوگرافی گازی) اندازه‌گیری شد و سپس بر مبنای نتایج به‌دست آمده و همچنین آنالیز نمونه اولیه (نمونه پاک سازی نشده)، نمودارهای میزان حذف ترکیبات BTEX در دماهای مختلف برای هر یک از آلاینده‌ها در شکل‌های ۲ تا ۵ نشان داده شده است.



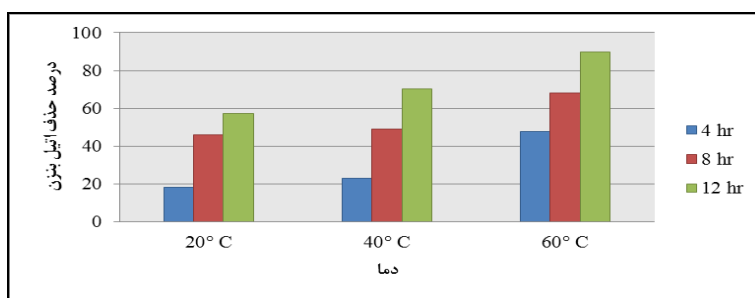
شکل ۲- درصد حذف بنزن در زمان‌های ماند و دماهای مختلف

Figure 2 - Benzen removal rates under different temperatures and retention times (%)



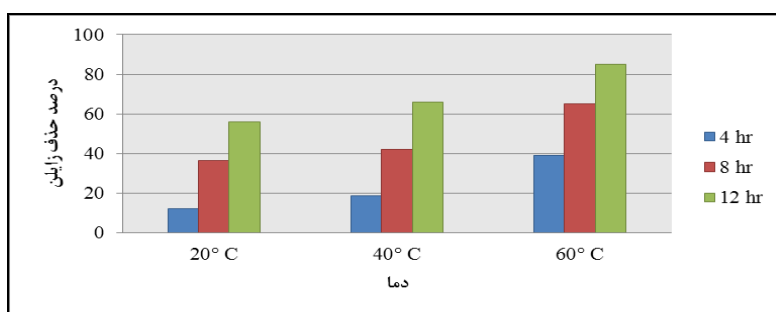
شکل ۳- درصد حذف تولوئن در زمان‌های ماند و دماهای مختلف

Figure 3 - Toluene removal rates under different temperatures and retention times (%)



شکل ۴- درصد حذف اتیل بنزن در زمان‌های ماند و دماهای مختلف

Figure 4 - Ethyl benzene removal rates under different retention times and temperatures (%)



شکل ۵- درصد حذف زایلین در زمان‌های ماند و دماهای مختلف

Figure 5 - Xylene removal rates under different retention times and temperatures (%)

دما تا ۶۰ درجه سانتی‌گراد تأثیر چشم‌گیری در افزایش درصد حذف تولوئن داشته است. بدین صورت که این افزایش کارایی روش پاک‌سازی را در مدت ۴ ساعت از ۳۷/۳ درصد به ۵۵/۰۶ درصد، در مدت ۸ ساعت از ۵۴/۳۱ درصد به ۷۶/۰۱ درصد و در مدت ۱۲ ساعت از ۷۹/۱۴ درصد به ۹۳/۹۱ درصد رسانده است. با دقت در نتایج نشان داده شده در اشکال ۴ و ۵ مشخص می‌گردد که حذف ترکیبات اتیل بنزن و زایلین در دماهای ۲۰ و ۴۰ درجه سانتی‌گراد در بازه زمانی ۴ تا ۸ ساعت بیش‌تر از ۴ ساعت اول بوده است. البته با افزایش دما به ۶۰ درجه سانتی‌گراد میزان بازدهی در ۴ ساعت اول به طور محسوسی بیش‌تر شده است. به طوری که درصد حذف اتیل بنزن و زایلین در این دما نسبت به ۴۰ درجه سانتی‌گراد به ترتیب ۲۴٪ و ۲۱٪ افزایش

با توجه به شکل ۲ در مجموع درصد حذف بنزن در آزمایش‌ها بسیار بالا بوده، به طوری که در دمای محیط و در زمان ماند ۴ ساعت به ۷۶٪ و در زمان‌های ماند ۸ و ۱۲ ساعت به بالای ۹۷٪ می‌رسد. همچنین با توجه به شکل می‌توان بیان کرد که افزایش دما نقش چندانی در حذف این آلاینده ایفا نمی‌کند، در حالی که با افزایش زمان ماند به ۸ ساعت و بالاتر می‌توان به درصدهای حذفی نزدیک به ۹۹٪ رسید. همچنین بخش عمده ای از این ترکیب در ۴ ساعت اول از محیط خاک خارج گردیده که نشان دهنده تأثیر فراریت بالای این ترکیب در حذف آن می‌باشد. درصدهای حذف آلاینده تولوئن (شکل ۳) بیانگر این نکته است که میزان حذف آن در ۴ ساعت اول بیشتر از ۴ ساعت دوم و سوم می‌باشد. همچنین افزایش دما از ۲۰ به ۴۰ درجه سانتی‌گراد بازدهی حذف را تا به میزان اندکی افزایش داده است، در صورتی که افزایش

حذف از خاک را دارا بوده و زایلین نیز کمترین میزان قابلیت حذف را در بین ۴ آلاینده دارد.

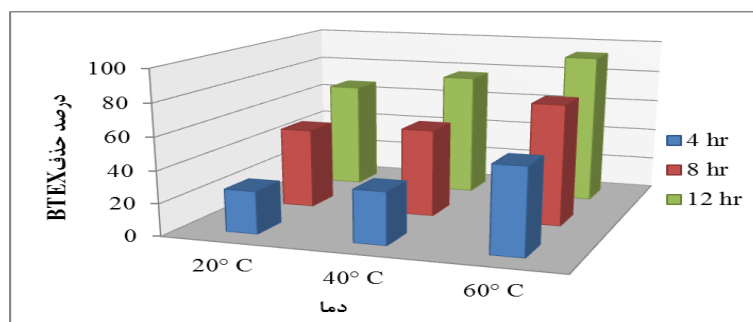
بازدهی حذف کل آلاینده‌های BTEX، با توجه به اهمیت مجموع غلظت‌های ترکیبات BTEX، نمودار میزان حذف مجموع ۴ آلاینده‌ی مورد مطالعه در شکل ۶ نمایش داده شده است، تا تأثیر افزایش دما و زمان ماند در فرآیند پاک‌سازی این ترکیبات از خاک مشخص شود.

یافته است. لازم به ذکر است مقادیر مربوط به بازدهی زایلین بر اساس مجموع غلظت ۳ ایزومر آن می‌باشد.

طبق نمودارهای نشان داده شده ترتیب دارا بودن قابلیت حذف به روش استخراج بخارات برای ترکیبات BTEX در هر سه بازه زمانی به صورت زیر می‌باشد:

بنزن < تولوئن < اتیل بنزن < زایلین

که رابطه فوق با مقادیر فشارهای بخار و فراریت آلاینده‌های BTEX در توافق است. به طوری که بنزن به دلیل فراریت بالای آن بیش‌ترین قابلیت



شکل ۶- بازدهی حذف کل ترکیبات BTEX در زمان‌های ماند و دماهای مختلف

Figure 6 - BTEX compounds removal Efficiencies under different retention times and temperatures (%)

از ۴۰ درجه به ۶۰ درجه سانتی‌گراد بیشتر از تأثیر آن از ۲۰ به ۴۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشد که دلالت بر خروج آلاینده‌های BTEX به‌صورت رابطه ای غیرخطی با افزایش دما دارد. همچنین بر اساس اشکال ۲ تا ۵ در بخش نتایج هرچه آلاینده‌های موجود در خاک فراریت کم‌تری داشته باشند، افزایش حرارت نقش مهم‌تری در پاک‌سازی آن‌ها از خاک ایفا می‌نماید. بطوری‌که این افزایش کارایی بیش‌تری در حذف ترکیبات اتیل بنزن و زایلین نسبت به آلاینده‌های بنزن و تولوئن داشته است.

نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که حداکثر کارایی حذف آلاینده‌های BTEX در بازه‌های زمانی ۴، ۸ و ۱۲ ساعت به ترتیب برابر با ۵۲/۸۷، ۷۴/۸۶ و ۹۳/۵۵ درصد بوده است. این نتایج با تحقیقاتی که در زمینه پاک‌سازی خاک از ترکیبات BTEX توسط Albergaria و همکاران در سال ۲۰۰۸ صورت گرفت، همخوانی دارد. تحقیقات آن‌ها نشان داد که روش استخراج آلاینده‌ها بر روی خاک ماسه ای با درصد رطوبت کم‌تر از ۲٪ در بازه‌های زمانی مختلف ۶ تا ۳۲ ساعت دارای کارایی حذف بیش از ۹۰٪ برای ترکیبات بالا بوده است (۶). در خاتمه دستاوردهای حاصل از این پژوهش نشان می‌دهد که روش استخراج بخارات آلاینده‌ها جهت حذف ترکیبات آلی آروماتیک از خاک یک روش مناسب و کارا است که در صورت اجرای صحیح می‌توان به بازدهی بالایی در دفع این‌گونه آلاینده‌ها از خاک دست یافت.

#### منابع

- 1- Winegardner, D., 1995. An Introduction to Soils for Environmental Professionals, CRC Press LLC, Boca Raton. pp 270.

همان‌گونه که در نمودار بالا نشان داده شده است، بالاترین میزان پاک‌سازی در هر سه دمای مورد آزمایش در طول ۱۲ ساعت رخ داده است. به طوری که افزایش دما از ۲۰ به ۴۰ درجه سانتی‌گراد و نیز از ۴۰ به ۶۰ درجه سانتی‌گراد، میزان بازدهی حذف ترکیبات BTEX را در مدت ۱۲ ساعت به ترتیب ۱۰٪ و ۲۶٪ بهبود بخشیده است و در نهایت بازدهی ۹۳/۵۵ درصد حاصل شده است.

#### بحث و نتیجه گیری

بر اساس نتایج به‌دست آمده، چهار ترکیب خطرناک بنزن، تولوئن، اتیل بنزن و زایلین با استفاده از روش استخراج آلاینده‌های فرار قابل حذف هستند که دلیل آن فراریت بالای این ترکیبات و موثر بودن عملکرد روش پاک‌سازی SVE می‌باشد. هر چه فراریت یک ترکیب بیش‌تر باشد، خاک آلوده به زمان پاک‌سازی کم‌تری نیاز دارد و به عبارت دیگر در یک زمان مشخص بازدهی حذف آن ترکیب بیش‌تر خواهد شد. در پژوهشی که توسط Rathfelder و همکارانش در مورد پاک‌سازی خاک‌های آلوده به بنزن، تولوئن و زایلین صورت گرفت نتایج مشابهی به‌دست آمد. به طوری که در آزمایش‌های این محققان بنزن، تولوئن و زایلین به ترتیب زودتر از خاک حذف گردیده اند (۲۱).

افزایش دمای خاک نیز می‌تواند میزان کارایی روش SVE را ارتقا دهد. این مسأله ناشی از بالا رفتن فشار بخار آلاینده‌ها در اثر افزایش دما بوده که موجب افزایش فراریت آن‌ها و بالا رفتن کارایی روش استخراج می‌گردد (۲۲).

همچنین در مطالعات Webb و Phelan که بر روی یک رشته از ترکیبات آلی صورت پذیرفت، با افزایش دما افزایش میزان حذف آلاینده‌ها گزارش شده است (۲۳). نتایج آزمایش‌های تحقیق حاضر نشان داد که تأثیر افزایش حرارت



- zone by soil vapor extraction. *Journal of Hazardous Materials* 176, 294–299
- 14- Hoag, G.E. and Cliff, B., 1985. The use of the soil venting technique for the remediation of petroleum contaminated soils. In: E.J. Calabrese and P.T. Kostechi, (Editors), *Soils Contaminated by Petroleum, Environmental and Public Health Effects*. Wiley, New York N.Y.
- 15- Manoel, M.M.N & Rosane, C.M., 2008, "Soil vapor extraction of chlorinated solvents at an industrial site in Brazil", Departamento de Geociencias, Universidade Federal de Alagoas, Maceio AL. Brazil, *Journal of hazardous materials*, Elsevier
- ۱۶- اکبرآبادی، محمد مصطفی، ۱۳۸۷، "بررسی روش استخراج مواد فرار در بهسازی خاک‌های آلوده"، چهارمین همایش زمین‌شناسی و محیط زیست. تهران.
- 17- Caselli M., de Gennaro G., Marzocca A., Trizio L., Tutino M., 2010. Assessment of the impact of the vehicular traffic on BTEX concentration in ring roads in urban areas of Bari (Italy). *Chemosphere*, 81:306e11.
- 18- Watts, R.J., Haller, D.R., Jones, A.P., Teel, A.L., 2000. A foundation for the risk-based treatment of gasoline-contaminated soils using modified Fenton's reactions", *Journal of Hazardous Materials*, Vol. B76, 73-89.
- ۱۹- هدایتی، مهسا، ارزیابی بازدهی روش خاکشویی جهت پاک‌سازی خاک آلوده به هیدروکربنهای نفتی با تأکید بر BTEX ترکیبات پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده محیط زیست دانشگاه تهران، ۱۳۸۹، صفحه ۱۴۸.
- 20- Qiang .G., April 2003. Development of microorganism-enhanced in situ remediation systems within a western canadian context, A Thesis for the Degree of Master of Applied Science in Environmental Systems Engineering, University of Regina, Canada. pp224.
- 21- Rathfelder k., Yeh W. W-G., Mackay D., 1991. Mathematical simulation of soil vapor extraction systems: model development and numerical examples. *Journal of Contaminant Hydrology* 8, 263-297.
- 22- Abdel, M. O. M., Hogan E. A., Soil vapor extraction, *Developments in Geotechnical Engineering*, Elsevier, 408 pp.
- 23- Webb S. W., Phelan J. M., 1997. Effect of soil layering on NAPL removal behavior in soil-heated vapor extraction. *Journal of Contaminant Hydrology* 27, 285-308.
- 2- Gitipour, S., Narenjkar, K., Sanati Farvash, E., & Asghari, H. (2014). Soil flushing of cresols contaminated soil: application of nonionic and ionic surfactants under different pH and concentrations. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 12(1), 129.
- ۳- رضایی، بهجت، بررسی کارایی روش استخراج بخارات از خاک در پاک‌سازی خاک‌های آلوده به مواد نفتی، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده عمران دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ۱۳۸۹، صفحه ۱۷۷.
- 4- Khan, F.I., Husain, T., Hejazi, R., 2004. An overview and analysis of site remediation technologie. *Environmental Management* 71, 95-122
- 5- U.S Environmental Protection Agency, 1994. Soil vapor extraction, treatment technologies for site cleanup. pp33.
- 6- Albergaria, J.T., Alvim-Ferraz, M.C.M., Delerue-Matos, C., 2008. Soil Vapor Extraction in sandy soils: Influence of airflow rate", *Chemosphere* 73, 1557-1561.
- 7- Jose .T.A, Maria. A.F, Cristina.D.M., 2008. Soil vapor extraction in sandy soils: Influence of airflow rate. *Chemosphere* 73, 1557-1561.
- 8- U.S. Environmental Protection Agency, 2007. *Treatment Technologies for Site Cleanup: Annual Status Report, Twelfth Edition*. pp290.
- 9- U.S. Environmental Protection Agency, 1995. In situ remediation technology status report: Surfactant enhancements. Office of Solid Waste and Emergency Response, Technology Innovation Office, Washington, DC 20460. pp22.
- 10- Poulsen, T.G., Moldrup, P., Yamaguchi, T., Schjonning, P., Hansen, J.A., 1999. Predicting soil-water and soil-air transport properties and their effects on soil-vapor extraction efficiency. *Ground Water Monitoring* 19, 61–70.
- 11- Yoon, H., Kim, J.H., Liljestrand, H.M., Khim, J., 2002. Effect of water content on transient nonequilibrium NAPL-gas mass transfer during soil vapor extraction, *J.Contam Hydrol* 54, 1–18
- 12- Alvim-Ferraz, M.C.M., Albergaria, J.T., Delerue-Matos, C., 2006. Soil remediation time to achieve clean-up goals: II: influence of natural organic matter and water contents. *Chemosphere* 64, 817–825.
- 13- Chuan-yu, Q., Yong-sheng, Z., Wei, Z., Yu-song, L., 2010. Study on influencing factors on removal of chlorobenzene from unsaturated