Journal of Research in Environmental Health
Volume 12, Issue 2

Experimental Investigation of the Effects of Benzene and Toluene Emissions from Asaluyeh Petrochemical Units on Air Quality

Omid Najmabadi
* BSc Student, Department of HSE, Neyshabur Higher Education Center, University of Applied Science and Technology, Neyshabur, Iran. **(Corresponding Author)**
omidnajmabadi@yahoo.com
Nahid Hajeb
MSc Student, Department of HSE, Kherad Institute of Higher Education, Bushehr, Iran.
Sanaz Nouri
M.Sc. in HSE (Health, Safety, and Environment), Safety Supervisor at Khorasan Steel, Professional Firefighting and Rescue Instructor.

Received: 2026/02/20
Accepted: 2026/06/10
Doi:10.22038/jreh.2026.98964.1762

Abstract

Background and Objective: Atmospheric emissions of benzene, toluene, ethylbenzene, and xylene (BTEX) from petrochemical facilities pose critical environmental health concerns owing to the verified carcinogenicity of benzene (IARC Group 1) and the neurotoxic effects of other aromatics. This study aimed to investigate the ambient concentration, spatiotemporal distribution, dominant emission sources, and meteorological influences on BTEX compounds around a polystyrene petrochemical plant in the Pars Special Economic Energy Zone (Asaluyeh, Iran).

Materials and Methods: Active air sampling was conducted using activated charcoal sorbent tubes at a flow rate of 0.2 L/min across four fenceline stations (North, South, East, West). Sampling covered three seasons (Spring, Summer, and Autumn 2025; 24 daytime 8-hour samples in total). Chemical analysis was performed via gas chromatography with flame ionization detection (GC-FID) following NIOSH Method 1501 after carbon disulfide (CS_2) desorption. Statistical evaluations included one-way ANOVA, Tukey's HSD post-hoc test, and Pearson correlation analysis $(\alpha = 0.05)$.

Results: The overall mean $\sum BTEX$ concentration was 90.4 µg/m³. Ethylbenzene (51.22 µg/m³; 56.7%) and toluene (38.05 µg/m³; 42.1%) dominated the pollution profile, collectively accounting for ~98.8% of total emissions, whereas benzene constituted only 1.2% (1.10 µg/m³) and xylene remained below the detection limit (MDL<0.1 µg/m³). Spatial evaluation revealed the highest concentration at the South station (94.4 µg/m³) and the lowest at the North station (84.3 µg/m³), driven by prevailing wind dynamics. A significant seasonal decline occurred from Spring (119.8 µg/m³) to Summer (91.2 µg/m³) and Autumn (60.1 µg/m³). One-way ANOVA confirmed statistically significant seasonal variations for toluene ($F(2,21)=7.79$, $p=0.003$) and ethylbenzene ($F(2,21)=18.59$, $p<0.001$), but not for benzene ($F(2,21)=2.72$, $p=0.089$). A strong negative correlation was identified between total BTEX concentration and rainfall ($r=-0.75$, $p<0.01$), confirming atmospheric wet scavenging. The high toluene-to-benzene ratio (T/B=34.6) definitively identified industrial petrochemical processes, rather than vehicular exhaust, as the primary pollution source.

Conclusion: Although mean benzene levels remained below the national ambient threshold (5 µg/m³), the absence of a WHO safe threshold for benzene, combined with substantial ethylbenzene and toluene loads, underscores the urgent need for fugitive emission abatement at the petrochemical source and continuous fenceline monitoring to safeguard surrounding communities.

Keywords: BTEX Compounds; Benzene; Toluene-To-Benzene Ratio; Industrial Air Pollution; Asaluyeh; GC-FID

Open Access Policy: This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution License, which permits use, distribution and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited. To view a copy ofthis licence, visit https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Citation: Najmabadi O, Hajeb N, Nouri S. Experimental Investigation of the Effects of Benzene and Toluene Emissions from Asaluyeh Petrochemical Units on Air Quality. *Journal of Research in Environmental Health*. 12(2):58-80.

بررسی تجربی اثرات انتشار بنزن و تولوئن ناشی از واحدهای پتروشیمی عسلویه بر کیفیت هوا

امید نجم‌آبادی
* دانشجو کارشناسی، گروه HSE، مرکز آموزش عالی نیشابور، دانشگاه جامع علمی کاربردی، نیشابور، ایران.
(نویسنده مسئول)
omidnajmabadi@yahoo.com
ناهید حاجب
دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه HSE، موسسه آموزش عالی خرد، بوشهر، ایران.
ساناز نوری
کارشناس ارشد HSE (ایمنی، بهداشت و محیط زیست)، سرپرست ایمنی در فولاد خراسان، مدرس حرفه‌ای آتش‌نشانی و امداد و نجات.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۲/۰۱
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۳/۲۰
نوع مقاله: پژوهشی

چکیده

زمینه و هدف: انتشار ترکیبات بنزن، تولوئن، اتیل‌بنزن و زایلن (BTEX) از صنایع پتروشیمی به دلیل خطرات بهداشتی مانند سرطان‌زایی بنزن (گروه ۱ IARC) و سمیت سیستم عصبی سایر ترکیبات، از چالش‌های اصلی بهداشت محیط است. این مطالعه با هدف تعیین غلظت، الگوی مکانی-فصلی، منشأ انتشار و اثر پارامترهای هواشناسی بر ترکیبات BTEX در حاشیه یک مجتمع پتروشیمی تولید پلی‌استایرن در منطقه ویژه اقتصادی انرژی پارس (عسلویه) انجام شد.

مواد و روش‌ها: نمونه‌برداری فعال هوا با استفاده از لوله‌های جاذب کربن فعال و پمپ با دبی ۰/۲ لیتر بر دقیقه در ۴ ایستگاه در ۴ ایستگاه مرزی (شمال، جنوب، شرق، غرب) طی ۳ فصل بهار، تابستان و پاییز سال ۱۴۰۴ (در مجموع ۲۴ نمونه ۸ ساعته) صورت گرفت. استخراج با دی‌سولفید کربن (CS_2) و آنالیز با کروماتوگرافی گازی مجهز به آشکارساز یونش شعله‌ای (GC-FID) بر اساس روش NIOSH 1501 انجام شد. تحلیل‌های آماری شامل آزمون ANOVA یک‌طرفه، آزمون تعقیبی توکی و همبستگی پیرسون در سطح معناداری ۰/۰۵ اجرا گردید.

یافته‌ها: میانگین کل غلظت ΣBTEX برابر ۹۰/۴ میکروگرم بر مترمکعب بود. اتیل‌بنزن (۵۱/۲۲ میکروگرم بر مترمکعب؛ ۵۶/۷ درصد) و تولوئن (۳۸/۰۵ میکروگرم بر مترمکعب؛ ۴۲/۱ درصد) بیش از ۹۸/۸ درصد از کل آلاینده‌ها را تشکیل دادند، در حالی‌که سهم بنزن تنها ۱/۲ درصد (میانگین ۱/۱۰ میکروگرم بر مترمکعب) بود و زایلن زیر حد آشکارسازی (کمتر از ۰/۱ میکروگرم بر مترمکعب) قرار داشت. بیشترین غلظت مکانی در ایستگاه جنوبی (۹۴/۴ میکروگرم بر مترمکعب) و شمالی (۸۴/۳ میکروگرم بر مترمکعب) ثبت شد. غلظت کل روند نزولی معناداری از بهار (۱۱۹/۸ میکروگرم بر مترمکعب) به تابستان (۹۱/۲ میکروگرم بر مترمکعب) و پاییز (۶۰/۱ میکروگرم بر مترمکعب) نشان داد. تغییرات فصلی تولوئن ($F(2,21)=7/79$، $P=0/003$) و اتیل‌بنزن ($F(2,21)=18/59$، $P<0/001$) کاملاً معنادار بود، اما برای بنزن معنادار نگردید ($F(2,21)=2/72$، $P=0/089$) همبستگی منفی و معناداری بین غلظت آلاینده‌ها و میزان بارش مشاهده شد ($r=-0/75$، $P<0/01$) نسبت تولوئن به بنزن (T/B= ۳۴/۶) به‌طور قاطع منشأ صنعتی و پتروشیمیایی آلاینده‌ها را تأیید کرد.

نتیجه‌گیری: اگرچه غلظت بنزن پایین‌تر از حد مجاز سالانه ملی (۵ میکروگرم بر مترمکعب) بود، اما با توجه به عدم وجود آستانه ایمنی WHO برای بنزن و سهم بالای اتیل‌بنزن و تولوئن، کنترل انتشار در منبع پتروشیمی و پایش مستمر حاشیه‌ای برای حفاظت از ساکنان نواحی مسکونی مجاور ضروری است.

کلیدواژه‌ها: ترکیبات BTEX ؛ بنزن؛ نسبت تولوئن به بنزن؛ آلودگی هوای صنعتی؛ عسلویه؛ GC-FID.

استناد: نجم‌آبادی ا، حاجب ن، نوری س. بررسی تجربی اثرات انتشار بنزن و تولوئن ناشی از واحدهای پتروشیمی عسلویه بر کیفیت هوا. *فصلنامه‌ی پژوهش در بهداشت محیط*. تابستان ۱۴۰۵; ۱۲(۲): ۵۸-۸۰.

مقدمه

کیفیت هوا، به‌ویژه در مناطق پیوندی میان مراکز صنعتی عظیم مانند مجتمع‌های پتروشیمی و مناطق مسکونی شهری، یکی از چالش‌های اصلی بهداشت عمومی و پایداری محیط‌زیست در قرن بیست و یکم محسوب می‌شود (۱). در میان مجموعه گسترده‌ای از آلاینده‌های هوا، ترکیبات آلی فرار[1] به دلیل نقش چندوجهی در سلامت انسان و شیمی اتمسفر، توجه ویژه‌ای را به خود معطوف کرده‌اند (۲, ۳). بنزن[2] (C_6H_6) ، به عنوان ساده‌ترین و پرکاربردترین هیدروکربن آروماتیک، یکی از خطرناک‌ترین اعضای این خانواده شناخته می‌شود (۴). این ترکیب، که دارای یک حلقه شش‌عضوی کربنی با پیوندهای دوگانه متناوب است، به دلیل پایداری الکترونیکی و ساختار غیرقطبی خود، خواص فیزیکی و شیمیایی منحصربه‌فردی دارد که کاربردهای صنعتی گسترده‌ای را برای آن رقم زده است (۵, ۶). با این حال، همین خواص، همراه با سمیت بالای آن، بنزن را به یک آلاینده بحرانی در اکوسیستم‌های شهری و صنعتی تبدیل کرده است (۷).

بنزن به ندرت به صورت تنها مورد مطالعه قرار می‌گیرد و اغلب در کنار سایر ترکیبات مشابه خود تحت عنوان **(BTEX)** مجموعه «بی‌تکس» تحلیل می‌شود (۸). این مجموعه شامل بنزن، تولوئن[3] (C_7H_8) ، اتیل‌بنزن[4] (C_8H_{10})و ایزومرهای زایلن[5] (C_8H_{10}) است که همگی از مشتقات بنزن با یک یا چند گروه متیل یا اتیل متصل هستند (۹). این ترکیبات به دلیل منابع انتشار مشترک (عمدتاً احتراق سوخت‌های فسیلی و فرآیندهای پتروشیمی)، رفتار مشابه در اتمسفر و روش‌های اندازه‌گیری یکسان، به صورت یک گروه مورد بررسی قرار می‌گیرند (۱۰, ۱۱). از میان این گروه، بنزن به دلیل سرطان‌زا بودن اثبات‌شده، اهمیت ویژه‌ای دارد، در حالی که تولوئن و زایلن عمدتاً بر سیستم عصبی مرکزی تأثیر می‌گذارند (۱۲). واکنش‌پذیری این ترکیبات در اتمسفر نیز متفاوت است؛ بنزن در مقایسه با تولوئن،

[1] Volatile Organic Compounds(VOCs)
[2] Benzene
[3] Toluene
[4] Ethylbenzene
[5] Xylenes

واکنش‌پذیری کمتری با رادیکال‌های هیدروکسیل[6] **(OH)** دارد که منجر به عمر اتمسفری طولانی‌تر و پتانسیل انتقال مسافت‌های دورتر می‌شود (۱۳, ۱۴). این تفاوت در واکنش‌پذیری، توزیع مکانی و غلظت این آلاینده‌ها را در مناطق دور از منبع انتشار تحت تأثیر قرار می‌دهد (۱۵).

منابع انتشار بنزن به دو دسته طبیعی و انسان‌ساخت تقسیم می‌شوند. اگرچه منابع طبیعی مانند آتش‌سوزی جنگل‌ها و فعالیت‌های آتشفشانی در چرخه جهانی بنزن نقش دارند، اما سهم عمده آن در محیط‌های شهری و صنعتی، به فعالیت‌های انسان‌ساخت بازمی‌گردد (۱۶ , ۱۷). بزرگترین منابع انسان‌ساخت عبارتند از: ۱) صنایع پتروشیمی و پالایشگاه‌ها که در فرآیندهایی مانند ریفرمینگ کاتالیستی[7]، کراکینگ بخار[8] و تولید استایرن[9]، مقادیر عظیمی بنزن به عنوان محصول اصلی یا جانبی آزاد می‌کنند (۱۸, ۱۹)؛ ۲) وسایل نقلیه موتوری که از احتراق ناقص بنزین و تبخیر سوخت، بنزن را در سطح خیابان‌ها منتشر می‌کنند (۲۰)؛ ۳) استفاده از حلال‌های حاوی بنزن در صنایع رنگ، چاپ و لاستیک‌سازی (۲۱)؛ و ۴) دود تنباکو که یکی از منابع عمده قرار گرفتن در معرض بنزن در فضاهای بسته است (۲۲). در مناطق نزدیک به مجتمع‌های پتروشیمی، انتشار نقطه‌ای از دودکش‌ها و انتشارهای پراکنده[10] از شیرآلات، فلنج‌ها و لوله‌ها، عامل اصلی تشکیل پلوم‌های آلودگی[11] (یا توده‌های آلودگی) با غلظت بالای بنزن هستند (۲۳ , ۲۴). عمر اتمسفری بنزن، که به طور متوسط بین چند روز تا چند هفته تخمین زده می‌شود، به آن اجازه می‌دهد تا مسافت‌های قابل توجهی را از منبع اصلی خود حمل کند و مناطق شهری دورتر را نیز تحت تأثیر قرار دهد (۲۵, ۲۶). حذف اصلی بنزن از اتمسفر از طریق واکنش اکسیداسیون با رادیکال‌های هیدروکسیل **(OH)** در حضور نور خورشید رخ می‌دهد که منجر به رادیکال‌های

[6] Hydroxyl Radical(OH)
[7] Catalytic Reforming
[8] Steam Cracking
[9] Styrene Monomer
[10] Fugitive Emissions
[11] Pollution Plumes

هیدروکسی‌بنزیل[1] و در نهایت تولید فنول[2]، کربونیل‌ها[3] و آئروسل‌های آلی ثانویه[4] می‌شود (۲۷, ۲۸). این فرآیند نه تنها غلظت بنزن را کاهش می‌دهد، بلکه به عنوان یک پیش‌ساز برای ازن تروپوسفری[5] و ذرات معلق PM2.5 عمل کرده و به تشدید آلودگی هوا در مناطق شهری دامن می‌زند (۲۹, ۳۰). بنابراین، حضور بنزن صرفاً یک ریسک مستقیم برای سلامت نیست، بلکه یک عامل کلیدی در شیمی اتمسفر و تشکیل آلاینده‌های ثانویه نیز می‌باشد (۳۱).

تأثیرات بنزن بر سلامت انسان به طور گسترده مستند شده و آن را به یکی از نگران‌کننده‌ترین آلاینده‌های هوا تبدیل کرده است (۳۲). سازمان بین‌المللی تحقیقات سرطان[6] بنزن را در گروه ۱ (سرطان‌زا برای انسان) طبقه‌بندی کرده است (۳۳). قرار گرفتن مزمن در معرض غلظت‌های پایین بنزن می‌تواند منجر به بروز لوسمی حاد میلوئید[7]، آپلازی مغز استخوان[8] و سایر اختلالات خونی شود (۳۴, ۳۵). اثرات حاد ناشی از قرار گرفتن در معرض غلظت‌های بالا شامل سرگیجه، سردرد، تهوع و تحریک چشم و گلو است (۳۶). در مناطق صنعتی-شهری، جمعیت ساکن به طور مداوم در معرض ترکیبی از بنزن و سایر آلاینده‌های BTEX قرار دارند که می‌تواند اثرات سم‌شناسی هم‌افزایی[9] داشته باشد (۳۷, ۳۸). این موضوع، لزوم پایش دقیق و مستمر غلظت این مواد در سطح زمین، جایی که مردم زندگی و فعالیت می‌کنند، را دوچندان می‌کند (۳۹).

پایش و اندازه‌گیری غلظت بنزن و سایر ترکیبات BTEX در مناطق شهری و صنعتی، با استفاده از روش‌های استانداردی مانند کروماتوگرافی گازی با آشکارساز یونیزاسیون شعله[10] یا کروماتوگرافی گازی-طیف‌سنجی جرمی[11] انجام می‌شود (۴۰, ۴۱). نتایج مطالعات متعدد در سراسر جهان نشان داده است که غلظت این آلاینده‌ها در نزدیکی منابع انتشار، مانند پالایشگاه‌ها و مجتمع‌های پتروشیمی، به طور قابل توجهی بالاتر از سطوح پایه است (۴۲, ۴۳). با افزایش فاصله از منبع، غلظت به دلیل پخش و رقت اتمسفری کاهش می‌یابد، اما در شرایط جوی پایدار (مانند اینورژن دما[12])، این آلاینده‌های سنگین‌تر از هوا می‌توانند در نزدیکی سطح زمین به دام بیفتند و غلظت‌های خطرناکی را در مناطق مسکونی مجاور ایجاد کنند (۴۴, ۴۵). مطالعات انجام‌شده در شهرهای صنعتی ایران مانند تهران، اهواز و تبریز نیز سهم قابل توجهی از منابع صنعتی و ترافیکی را در آلودگی BTEX تأیید کرده‌اند (۴۶-۴۸).

در مجموع، بنزن به عنوان یک آلاینده سرطان‌زا، فرار و با عمر اتمسفری طولانی، یک تهدید جدی برای سلامت عمومی در مناطق تحت تأثیر فعالیت‌های پتروشیمی و صنعتی است (۴۹). نقش آن به عنوان پیش‌ساز آلاینده‌های ثانویه و هم‌زیستی آن با سایر ترکیبات BTEX، پیچیدگی‌های مدیریتی و پایشی را افزایش می‌دهد (۵۰). درک دقیق منابع انتشار، دینامیک اتمسفری، الگوهای پراکندگی مکانی و غلظت‌های واقعی در معرض قرار گرفتن انسان، به‌ویژه در حاشیه مناطق شهری و صنعتی، برای تدوین استراتژی‌های کنترلی مؤثر، ارزیابی ریسک بهداشتی و حفاظت از جامعه ضروری است (۵۱, ۵۲). این پژوهش با هدف اندازه‌گیری غلظت ترکیباتBTEX ، بررسی تغییرات مکانی و فصلی، تعیین نسبت‌های مشخصه منبع انتشار به‌ویژه نسبت T/B و تحلیل تأثیر پارامترهای هواشناسی بر غلظت این آلاینده‌ها در حاشیه یک مجتمع پتروشیمی تولید پلی‌استایرن[13] در عسلویه انجام شد.

روش‌کار

منطقه مورد مطالعه

این مطالعه در اطراف مجتمع پتروشیمی پلی‌استایرن انتخاب، وابسته به شرکت «توسعه صنایع پتروشیمی پلی‌استایرن انتخاب»، واقع در فاز ۲ منطقه ویژه اقتصادی

[1] Hydroxybenzyl Radicals
[2] Phenol
[3] Carbonyl Compounds
[4] Secondary Organic Aerosols (SOA)
[5] Tropospheric Ozone (O_3)
[6] International Agency for Research on Cancer (IARC)
[7] Acute Myeloid Leukemia (AML)
[8] Bone Marrow Aplasia
[9] Synergistic Toxicological Effects
[10] Gas Chromatography with Flame Ionization Detector (GC-FID)
[11] Gas Chromatography-Mass Spectrometry (GC-MS)
[12] Thermal Inversion
[13] Polystyrene (PS)

انرژی پارس[1]، شهرستان عسلویه، استان بوشهر انجام شد (**شکل ۱**). این مجتمع یکی از واحدهای تولیدکننده پلی‌استایرن در زنجیره پایین‌دستی صنایع پتروشیمی است و خوراک اصلی آن، استایرن مونومر، از مجتمع‌های مجاور مانند پتروشیمی پارس تأمین می‌شود که به عنوان یکی از منابع اصلی انتشار بنزن و ترکیبات BTEX شناخته می‌شود (۵۳, ۵۴).

این مجتمع در موقعیت جغرافیایی دقیق ″۴۲′۳۳°۲۷ شمالی و ″۰۰′۳۳°۵۲ شرقی (معادل تقریبی۵۶۱۳۳۰/۲۷ درجه شمالی و ۵۵۰۱۴۰/۵۲ درجه شرقی) و در نزدیکی خلیج فارس واقع شده است (۵۵). منطقه ویژه اقتصادی انرژی پارس (پارس جنوبی)، با مساحتی بیش از ۱۴ هزار هکتار، میزبان چندین مجتمع پتروشیمی و پالایشگاهی گاز است و در فاصله‌ای حدود ۲۷۰ کیلومتری جنوب شرقی بندر بوشهر قرار دارد (۵۶, ۵۷).

اقلیم منطقه گرم و مرطوب است؛ میانگین دمای سالانه بین ۲۶ تا ۳۰ درجه سانتی‌گراد، رطوبت نسبی بالا (اغلب بیش از ٪۷۰) و بادهای غالب جنوب غربی از ویژگی‌های آن است که بر پراکندگی آلاینده‌های گازی مانند بنزن تأثیر مستقیم دارد (۵۸). جمعیت ساکن در نواحی مسکونی مجاور (مانند روستاهای نخل تقی، عسلویه، بیدخون و هاله) حدود ۱۰۰ تا ۱۵۰ هزار نفر تخمین زده می‌شود که بخش قابل توجهی از آن‌ها تحت تأثیر مستقیم فعالیت‌های صنعتی قرار دارند (۵۹, ۶۰).

شکل ۱. نقشه منطقه مورد مطالعه

[1] Pars Special Economic Energy Zone (PSEEZ)

انتخاب این منطقه برای انجام مطالعه حاضر، به دلایلی چون تمرکز بالای فعالیت‌های پتروشیمی (تولید استایرن و پلی‌استایرن)

و وجود گزارش‌های قبلی مبنی بر غلظت‌های بالای ترکیبات فرار آلی و BTEX و نیز نزدیکی آن به نواحی مسکونی صورت گرفته است(۶۱, ۶۲). و نزدیکی آن به نواحی مسکونی صورت گرفته است. هدف اصلی این پژوهش، اندازه‌گیری غلظت ترکیبات BTEX، بررسی الگوی مکانی و فصلی غلظت‌ها، شناسایی منبع غالب انتشار با استفاده از نسبت‌های مشخصه (به‌ویژه نسبت تولوئن به بنزن) و تحلیل تأثیر شرایط هواشناسی بر تغییرات غلظت این آلاینده‌ها بود. نقاط نمونه‌برداری در چهار جهت اصلی جغرافیایی و در فاصله نزدیک از مرز مجتمع انتخاب شدند تا غلظت‌های خروجی از منبع و جهت غالب انتقال آلاینده‌ها به سمت نواحی مسکونی مجاور مشخص شود.

۱-۲ طرح نمونه‌برداری

نمونه‌برداری فقط در ساعات روز (۸:۰۰ تا ۱۶:۰۰) و در دو روز نماینده هر فصل انجام شد. بنابراین نتایج بیانگر غلظت‌های روزهنگام در شرایط نمونه‌برداری است و تعمیم آن به میانگین ۲۴ ساعته یا سالانه باید با احتیاط صورت گیرد.

این مطالعه به‌منظور ارزیابی فصلی و مکانی غلظت ترکیبات بنزن، تولوئن، اتیل‌بنزن و زایلن (BTEX) در هوای محیطی اطراف مجتمع پتروشیمی مورد مطالعه طراحی شد (۶۳). نمونه‌برداری در چهار ایستگاه واقع در جهات اصلی جغرافیایی (شمال، جنوب، شرق و غرب) در حاشیه مجتمع و در مجاورت نواحی جمعیتی انجام گردید تا الگوی پراکندگی اولیه آلاینده‌ها از منبع صنعتی و جهت غالب انتقال آن‌ها بررسی شود (۶۴).

نمونه‌برداری در دو روز به نمایندگی (روز ۱۳ و ۲۵ هر ماه) در سه فصل بهار (خرداد)، تابستان (مرداد) و پاییز (آبان) سال ۱۴۰۴ انجام شد. انتخاب این روزها به منظور در نظر گرفتن تغییرات احتمالی درون‌فصلی و کاهش

تأثیر رویدادهای جوی خاص مانند بارش‌های شدید یا پایداری جوی طولانی‌مدت بود (۶۵).

۲-۲ جمع‌آوری نمونه‌های هوا

نمونه‌های هوای محیط به روش نمونه‌برداری فعال[1] با استفاده از لوله‌های جاذب[2] از جنس کربن فعال[3] جمع‌آوری شدند (۶۶). پمپ‌های نمونه‌برداری کالیبره شده[4] با دبی ثابت ۲/۰ لیتر بر دقیقه برای این منظور به کار گرفته شدند (۶۷). مدت‌زمان نمونه‌برداری ۸ ساعت در طول روز (از ساعت ۸:۰۰ تا ۱۶:۰۰) تنظیم گردید تا غلظت‌های نشان‌دهنده‌ی مواجهه روزانه (یا معرف مواجهه روزانه) شهری ثبت شوند (۶۸).

پیش از نمونه‌برداری، لوله‌های جاذب در آون با دمای ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲ ساعت برای حذف آلاینده‌های احتمالی تیمار شدند. پس از نمونه‌برداری، لوله‌ها بلافاصله با درپوش‌های مخصوص آب‌بندی شده و در یخچال با دمای ۴ درجه سانتی‌گراد نگهداری و در کمتر از ۲۴ ساعت به آزمایشگاه منتقل گردیدند تا از تبخیر یا تجزیه نمونه‌ها جلوگیری شود (۶۹).

۲-۳ آنالیز شیمیایی ترکیبات BTEX

تجزیه و تحلیل کمی ترکیبات BTEX بر اساس روش استاندارد موسسه ملی ایمنی و بهداشت شغلی آمریکا به شماره NIOSH 1501 انجام شد (۷۰). در این روش، ترکیبات آلی فرار جذب شده روی کربن فعال با استفاده از ۲ میلی‌لیتر حلال کربن دی‌سولفید[5] استخراج شدند. لوله‌ها در یک دستگاه سونیکاتور به مدت ۳۰ دقیقه قرار گرفتند تا فرآیند استخراج بهینه شود(۷۱).

آنالیز نمونه‌های استخراج شده با استفاده از دستگاه کروماتوگراف گازی مجهز به آشکارساز یونش شعله‌ای (GC-FID) انجام گردید. مشخصات دقیق شرایط آنالیز به شرح زیر بود:

ستون کروماتوگرافی: ستون کاپیلاری[6] (فاز ثابت غیرقطبی سیلیکونی).

گاز حامل: هلیوم با دبی ثابت ۰/۱ میلی‌لیتر بر دقیقه.

گاز سوخت آشکارساز: هیدروژن(H_2).

دمای آشکارساز (FID): ۲۸۰ درجه سانتی‌گراد.

برنامه‌ریزی دمای کوره : دمای اولیه ۴۰ درجه سانتی‌گراد (نگهداری ۴ دقیقه)، سپس افزایش دما با نرخ ۱۰ درجه سانتی‌گراد بر دقیقه تا ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد و نگهداری در این دما به مدت ۱۰ دقیقه.

زمان تحلیل هر نمونه: ۵۰ دقیقه.

شناسایی و اندازه‌گیری غلظت ترکیبات بر اساس زمان ماندگاری[7] و مساحت زیر قله‌های نمونه‌های استاندارد کالیبره شده انجام شد.

۲-۴ پایش همزمان آلاینده‌های همراه

به‌منظور دستیابی به درک جامع‌تری از کیفیت هوا و مشخصه‌سازی منابع انتشار، غلظت برخی آلاینده‌های گازی و ذره‌ای به صورت همزمان با نمونه‌برداری BTEX اندازه‌گیری شد.

آلاینده‌های گازی: غلظت گازهای O_2, CO, NO, NO_2, SO_2 با استفاده از آنالایزر انتشار قابل حمل مدل MULTILYZER STx (شرکت SYSTRONIK) اندازه‌گیری شد.

ذرات معلق: غلظت ذرات معلق (PM) با استفاده از دستگاه فشارسنج/غبارسنج محیطی پرتابل مدل PEDA (رزولوشن ۰/۰۱ میلی‌گرم بر مترمکعب) ثبت گردید.

۲-۵ کنترل کیفیت و تضمین کیفیت (QA/QC)

به‌منظور اطمینان از صحت و دقت نتایج، پروتکل‌های جامع کنترل کیفیت (QA/QC)[8] در تمام مراحل نمونه‌برداری و آنالیز اعمال گردید (۷۳):

[1] Active Sampling
[2] Sorbent Tubes
[3] Activated Charcoal
[4] Calibrated Low-Flow Sampling Pumps
[5] Carbon Disulfide (CS_2)
[6] HP-Ultra1 Capillary Column
[7] Retention Time (Rt)
[8] Quality Assurance / Quality Control (QA/QC)

*کالیبراسیون ابزار: تمام دستگاه‌های مورد استفاده شامل GC-FID، آنالایزرهای گازی و غبارسنج، دارای گواهی کالیبراسیون معتبر بودند. عملکرد تمام دستگاه‌ها پیش از شروع هر فصل نمونه‌برداری در سال ۱۴۰۴ با استفاده از گازها و مواد استاندارد گواهی‌شده[1] مجدداً تأیید گردید و نتایج آن‌ها "Pass" بود.

*کالیبراسیون GC-FID: منحنی‌های کالیبراسیون برای هر یک از چهار ترکیب BTEX با استفاده از محلول‌های استاندارد با غلظت‌های مختلف (۵ نقطه) و با ضریب همبستگی (R^2) بزرگتر از ۰/۹۹۵ تهیه شد.

*نمونه‌های سفید میدانی[2]: در هر روز نمونه‌برداری، یک لوله جاذب (بدون عبور هوا از آن) به محل نمونه‌برداری برده، باز و بسته شد و مانند سایر نمونه‌ها به آزمایشگاه منتقل گردید تا میزان آلودگی احتمالی در حین حمل-ونقل و عملیات میدانی ارزیابی شود.

*نمونه‌های تکراری[3]: در حدود ۱۰ درصد از کل نمونه‌ها به صورت موازی و همزمان جمع‌آوری شدند تا میزان دقت روش سنجیده شود. انحراف معیار نسبی (RSD)[4] برای نمونه‌های تکراری کمتر از ۱۵ درصد بود.

*حد آشکارسازی روش[5](MDL) : حد آشکارسازی روش بر اساس انحراف معیار ۷ نمونه‌ی با غلظت بسیار پایین محاسبه شد. برای ترکیبات مورد مطالعه، MDLها در محدوده ۰/۰۵ تا ۰/۱ میکروگرم بر مترمکعب به‌دست آمد که با مقادیر گزارش شده (۰/۱> برای زایلن) سازگار است (۷۴).

*بازیابی[6]: برای ارزیابی صحت روش، تعدادی از لوله‌های جاذب با مقادیر مشخصی از استانداردهای BTEX تلقیح شدند و مراحل استخراج و آنالیز بر روی آن‌ها انجام گردید. درصد بازیابی برای تمام ترکیبات در محدوده قابل قبول ۸۵ درصد تا ۱۱۵ درصد قرار داشت.

[1] Certified
[2] Field Blanks
[3] Duplicate Samples
[4] Relative Standard Deviation (RSD)
[5] Method Detection Limit (MDL)
[6] Recovery

*ردیابی استانداردها و عدم قطعیت: تمام نتایج اندازه‌گیری‌ها قابل ردیابی به استانداردهای ملی و بین‌المللی بودند. عدم قطعیت[7] برای تمام اندازه‌گیری‌ها بر اساس ضریب پوشش K=۲ (معادل سطح اطمینان تقریباً ۹۵ درصد) گزارش گردید که اعتبار بالای داده‌ها را نشان می‌دهد.

۲-۶. جمع‌آوری داده‌های هواشناسی

داده‌های هواشناسی همزمان با دوره‌های نمونه‌برداری از نزدیک‌ترین ایستگاه سینوپتیک سازمان هواشناسی کشور دریافت شد. پارامترهای ثبت‌شده شامل میانگین، حداکثر و حداقل دما (درجه سانتی گراد)، میانگین رطوبت نسبی (درصد)، سرعت فشار (هکتوپاسکال)، سرعت باد (کیلومتر بر ساعت) ساعات آفتابی و میزان بارش (میلی‌متر) بودند. این داده‌ها برای تحلیل همبستگی و تفسیر تأثیر شرایط جوی بر تغییرات غلظت آلاینده‌ها مورد استفاده قرار گرفتند (۱۰۹,۷۵).

۲-۷. تحلیل آماری

پس از جمع‌آوری داده‌ها، از نرم‌افزار آماری SPSS (نسخه ۲۶) و R (نسخه ۲/۴) برای تحلیل‌های آماری استفاده شد. آمار توصیفی (میانگین، انحراف‌معیار، حداقل و حداکثر) برای هر فصل و هر ایستگاه محاسبه گردید. جهت مقایسه غلظت‌ها در فصول و ایستگاه‌های مختلف، از آزمون تحلیل واریانس یک‌طرفه[8] و در صورت لزوم، آزمون تعقیبی توکی[9] استفاده شد. برای بررسی رابطه بین غلظت BTEX و پارامترهای هواشناسی، از تحلیل همبستگی پیرسون[10] بهره گرفته شد. سطح معناداری در تمام آزمون‌ها ۰/۰۵ در نظر گرفته شد (۷۶).

یافته‌ها

[7] Uncertainty
[8] One-way ANOVA
[9] Tukey's HSD
[10] Pearson Correlation

در این پژوهش، غلظت ترکیبات بنزن، تولوئن، اتیل‌بنزن و زایلن (BTEX) در هوای محیطی یک مجتمع پتروشیمی در سه فصل بهار، تابستان و پاییز سال ۱۴۰۴ در چهار ایستگاه نمونه‌برداری واقع در جهات اصلی جغرافیایی شهر اندازه‌گیری شد. یافته‌های کلیدی در زیر به تفکیک ارائه می‌گردد (**جدول ۱، ۲ و ۳**).

جدول ۱. نمونه‌برداری بهار ۱۴۰۴

	ردیف	کد آزمایشگاه	پارامتر	واحد	روز ۱۳	روز ۲۵	روش استاندارد
شمال	۱	ISA-B-0403010	Benzene	میکروگرم بر مترمکعب	۱/۱۲	۱/۰۲	NIOSH 1501
	۲	""	Toluene	میکروگرم بر مترمکعب	۳۲/۵	۳۹/۶	""
	۳	""	Ethyl benzene	میکروگرم بر مترمکعب	۵۱/۰	۶۱/۰	""
	۴	""	Xylene	میکروگرم بر مترمکعب	<۰/۱	<۰/۱	""
	ردیف	کد آزمایشگاه	پارامتر	واحد	روز ۱۳	روز ۲۵	روش استاندارد
غرب	۱	ISA-B-0403011	Benzene	میکروگرم بر مترمکعب	۱/۳۰	۱/۲۵	NIOSH 1501
	۲	""	Toluene	میکروگرم بر مترمکعب	۵۰/۲	۵۶/۳	""
	۳	""	Ethyl benzene	میکروگرم بر مترمکعب	۸۳/۱	۷۴/۹	""
	۴	""	Xylene	میکروگرم بر مترمکعب	<۰/۱	<۰/۱	""
	ردیف	کد آزمایشگاه	پارامتر	واحد	روز ۱۳	روز ۲۵	روش استاندارد
شرق	۱	ISA-B-0403013	Benzene	میکروگرم بر مترمکعب	۱/۳۶	۱/۵۲	NIOSH 1501
	۲	""	Toluene	میکروگرم بر مترمکعب	۵۲/۸	۶۳/۹	""
	۳	""	Ethyl benzene	میکروگرم بر مترمکعب	۷۸/۳	۸۸/۶	""
	۴	""	Xylene	میکروگرم بر مترمکعب	<۰/۱	<۰/۱	""
	ردیف	کد آزمایشگاه	پارامتر	واحد	روز ۱۳	روز ۲۵	روش استاندارد
جنوب	۱	ISA-B-0403014	Benzene	میکروگرم بر مترمکعب	۰/۸۵	۱/۱۱	NIOSH 1501
	۲	""	Toluene	میکروگرم بر مترمکعب	۴۲/۱	۴۴/۵	""
	۳	""	Ethyl benzene	میکروگرم بر مترمکعب	۶۳/۷	۶۶/۳	""
	۴	""	Xylene	میکروگرم بر مترمکعب	<۰/۱	<۰/۱	""

جدول ۲. نمونه برداری تابستان ۱۴۰۴

	ردیف	کد آزمایشگاه	پارامتر	واحد	روز ۱۳	روز ۲۵	روش استاندارد
شمال	۱	ISA-B-0405001	Benzene	میکروگرم بر مترمکعب	۱/۵۲	۱/۲۲	NIOSH 1501
	۲	""	Toluene	میکروگرم بر مترمکعب	۲۸/۲	۶۰/۰	""
	۳	""	Ethyl benzene	میکروگرم بر مترمکعب	۳۶/۰	۶۸/۰	""
	۴	""	Xylene	میکروگرم بر مترمکعب	<۰/۱	<۰/۱	""
	ردیف	کد آزمایشگاه	پارامتر	واحد	روز ۱۳	روز ۲۵	روش استاندارد
غرب	۱	ISA-B-0405003	Benzene	میکروگرم بر مترمکعب	۰/۸۵	۱/۰۹	NIOSH 1501
	۲	""	Toluene	میکروگرم بر مترمکعب	۲۰/۷	۵۵/۰	""
	۳	""	Ethyl benzene	میکروگرم بر مترمکعب	۳۱/۳	۶۳/۶	""
	۴	""	Xylene	میکروگرم بر مترمکعب	<۰/۱	<۰/۱	""
	ردیف	کد آزمایشگاه	پارامتر	واحد	روز ۱۳	روز ۲۵	روش استاندارد

	ردیف	کد آزمایشگاه	پارامتر			
جنوب	۱	ISA-B-0405003	Benzene	میکروگرم بر مترمکعب	۵۰/۸	۳۳/۷
	۲	""	Toluene	میکروگرم بر مترمکعب	۵۹/۰	۴۱/۲
	۳	""	Ethyl benzene	میکروگرم بر مترمکعب	<۰/۱	<۰/۱
شرق	ردیف	کد آزمایشگاه	پارامتر	میکروگرم بر مترمکعب	۱/۴۰	۰/۹۹
	۱	ISA-B-0405003	Benzene	میکروگرم بر مترمکعب	۴۴/۶	۳۱/۳
	۲	""	Toluene	میکروگرم بر مترمکعب	۶۰/۳	۳۶/۸
	۳	""	Ethyl benzene	میکروگرم بر مترمکعب	<۰/۱	<۰/۱

	ردیف	کد آزمایشگاه	پارامتر	واحد	روز ۱۳	روز ۲۵	روش استاندارد
شمال	۱	ISA-B-0409001	Benzene	میکروگرم بر مترمکعب	۱/۰۴	۱/۲۰	NIOSH 1501
	۲	""	Toluene	میکروگرم بر مترمکعب	۱۴/۷	۳۱/۲	""
	۳	""	Ethyl benzene	میکروگرم بر مترمکعب	۳۲/۰	۴۴/۵	""
	۴	""	Xylene	میکروگرم بر مترمکعب	<۰/۱	<۰/۱	""
	ردیف	کد آزمایشگاه	پارامتر	واحد	روز ۱۳	روز ۲۵	روش استاندارد
غرب	۱	ISA-B-0409003	Benzene	میکروگرم بر مترمکعب	۰/۹۰	۰/۹۲	NIOSH 1501
	۲	""	Toluene	میکروگرم بر مترمکعب	۱۹/۳	۲۶/۶	""
	۳	""	Ethyl benzene	میکروگرم بر مترمکعب	۲۷/۲	۳۶/۷	""
	۴	""	Xylene	میکروگرم بر مترمکعب	<۰/۱	<۰/۱	""
	ردیف	کد آزمایشگاه	پارامتر	واحد	روز ۱۳	روز ۲۵	روش استاندارد
جنوب	۱	ISA-B-0409004	Benzene	میکروگرم بر مترمکعب	۱/۱۳	۰/۹۱	NIOSH 1501
	۲	""	Toluene	میکروگرم بر مترمکعب	۴۰/۵	۳۵/۳	""
	۳	""	Ethyl benzene	میکروگرم بر مترمکعب	۴۴/۹	۳۸/۱	""
	۴	""	Xylene	میکروگرم بر مترمکعب	<۰/۱	<۰/۱	""
	ردیف	کد آزمایشگاه	پارامتر	واحد	روز ۱۳	روز ۲۵	روش استاندارد
شرق	۱	ISA-B-0409005	Benzene	میکروگرم بر مترمکعب	۰/۸۸	۰/۷۸	NIOSH 1501
	۲	""	Toluene	میکروگرم بر مترمکعب	۱۷/۷	۲۱/۶	""
	۳	""	Ethyl benzene	میکروگرم بر مترمکعب	۲۲/۸	۲۰/۰	""
	۴	""	Xylene	میکروگرم بر مترمکعب	<۰/۱	<۰/۱	""

جدول ۳. نمونه برداری پاییز ۱۴۰۴

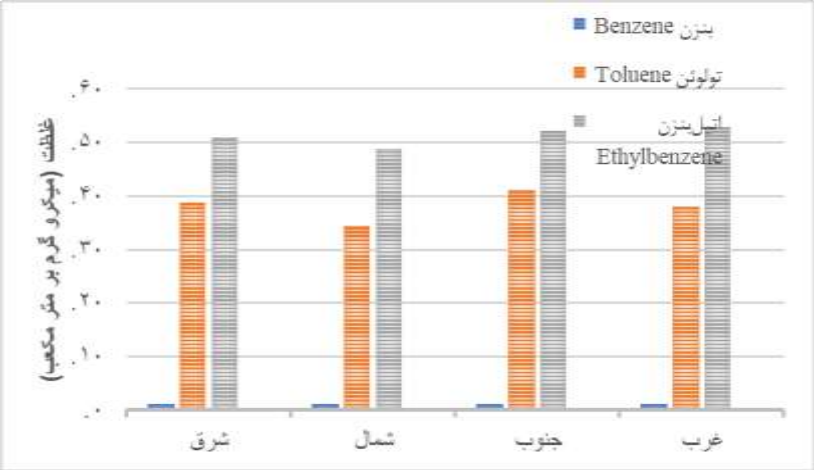
۳-۱ غلظت کلی و ترکیبی ترکیبات BTEX

تحلیل داده‌های خام از ۲۴ نمونه‌برداری (۴ ایستگاه در ۳ فصل، هر فصل ۲ روز) نشان داد که میانگین غلظت کلی ترکیبات BTEX در تمام ایستگاه‌ها و فصول مورد مطالعه، ۴/۹۰ میکروگرم بر مترمکعب بود (۷۷). ترکیبات تولوئن (میانگین: ۳۸/۰۵ میکروگرم بر مترمکعب) و اتیل‌بنزن (میانگین: ۵۱/۲۲ میکروگرم بر مترمکعب) به‌ترتیب با سهم ۴۲/۱ درصد و ۵۶/۷ درصد، اصلی‌ترین ترکیبات تشکیل‌دهنده این آلودگی بودند، در حالی که غلظت بنزن (میانگین: ۱/۱۰ میکروگرم بر مترمکعب) به مراتب پایین‌تر بود و سهم آن تنها ۱/۲ درصد از کل بود (۷۸). غلظت زایلن در تمام نمونه‌ها پایین‌تر از حد

آشکارسازی روش کمتر از ۰/۱ میکروگرم بر مترمکعب بود که نشان‌دهنده غلظت بسیار ناچیز این ترکیب در هوای شهر در دوره زمانی مورد مطالعه است (۷۹).

۳-۲ تغییرات مکانی غلظت BTEX

غلظت ترکیبات BTEX در ایستگاه‌های مختلف الگوی مکانی مشخصی را نشان داد (**نمودار ۱**) (۸۰). به طور کلی، ایستگاه جنوبی با میانگین ۹۴/۴ میکروگرم بر مترمکعب بالاترین غلظت ΣBTEX را به ثبت رساند. پس از آن، ایستگاه‌های غربی (میانگین: ۹۱/۹ میکروگرم بر مترمکعب) و شرقی (میانگین: ۹۰/۹ میکروگرم بر مترمکعب) قرار داشتند (۸۱). قرارگیری ایستگاه جنوبی در مسیر جهت غالب باد، نقش فرآیندهای پتروشیمیایی و انتشارات مرتبط با آن‌ها را به عنوان منبع اصلی آلاینده‌ها تأیید می‌کند (۸۲). ایستگاه شمالی با میانگین ۸۴/۳ میکروگرم بر مترمکعب کمترین غلظت را نشان داد که می‌تواند به دور بودن از منبع انتشار در جهت غالب باد مرتبط باشد (۸۳).



نمودار ۱. غلظت ترکیبات BTEX در ایستگاه‌های مختلف جهت جغرافیایی

۳-۳ تغییرات فصلی غلظت BTEX

یکی از مهم‌ترین یافته‌های این مطالعه، وجود تغییرات فصلی معنادار در غلظت ترکیبات BTEX بود (**جدول۴**) (۸۴). غلظت کل BTEX و به ویژه تولوئن و اتیل‌بنزن، روند نزولی روشنی را از فصل بهار به سمت پاییز نشان داد:

بهار: میانگین غلظت BTEX در این فصل ۱۱۹/۸ میکروگرم بر مترمکعب بود (۸۵).

تابستان: غلظت‌ها کاهش یافت و به میانگین ۹۱/۲ میکروگرم بر مترمکعب رسید (۸۶).

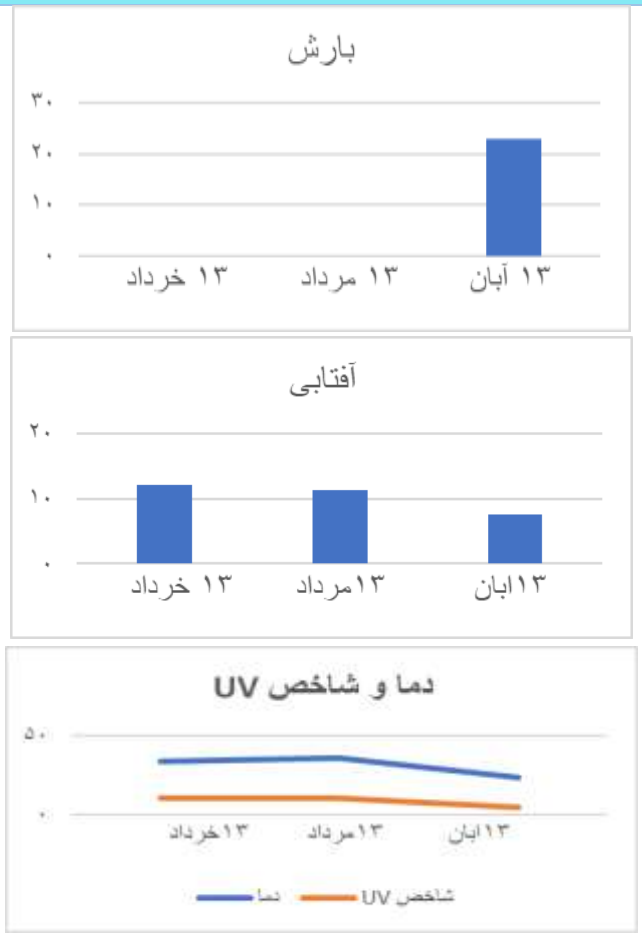
پاییز: کمترین میزان غلظت با میانگین ۶۰/۱ میکروگرم بر مترمکعب در این فصل مشاهده شد (۸۷).

این روند نزولی به ویژه برای تولوئن و اتیل‌بنزن بسیار چشمگیر بود که می‌تواند به تغییرات شرایط جوی پاییز از جمله افزایش رطوبت نسبی، احتمال وقوع بارش‌های زودگذر (با ثبت میانگین ۲۳ میلی‌متر بارش در این ماه) و کاهش ساعات آفتابی و فعالیت‌های فتوشیمیایی نسبت داده شود (۸۸). در مقابل، غلظت بنزن در فصول مختلف تغییرات کمتری داشت که این امر به منابع پایدارتر و عمر اتمسفری طولانی‌تر این ترکیب نسبت به سایرین مرتبط است (**نمودار ۲ و ۳**)(۸۹).

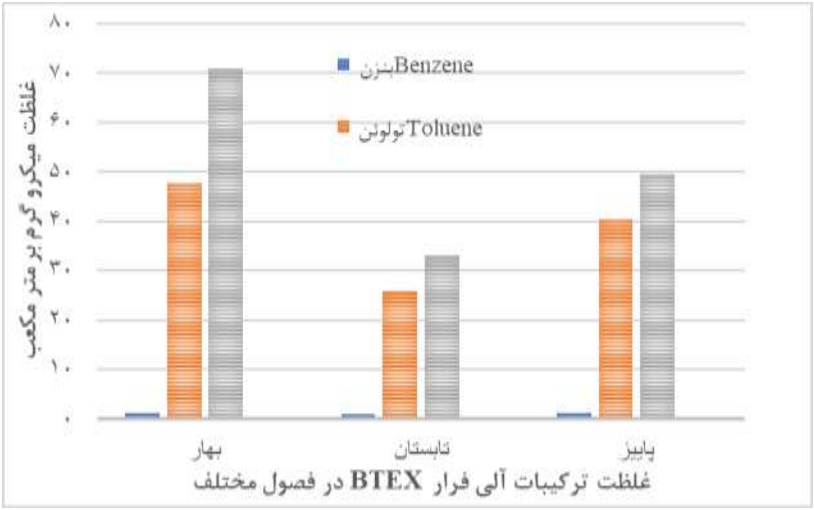
جدول ۴. ویژگی‌های آب و هوایی

ویژگی آب و هوایی	۱۳ خرداد	۱۳ مرداد	۱۳ آبان
میانگین دما (°C)			
حداکثر	۳۸/۵	۴۰/۸	۲۹/۰

حداقل	۲۹/۵	۳۱/۷	۱۸/۳
متوسط	۳۴/۰	۳۶/۳	۲۳/۷
بارش باران	۰	بارش باران	بارش باران
مجموع بارش (میلی‌متر)	۰	۰	(میانگین ماهانه) ۲۳
تعداد روزهای بارانی	۰	۰	(میانگین ماهانه) ۴
UV آفتاب و شاخص			
میانگین ساعات آفتابی در روز	۱۲/۲		۷/۶
UV میانگین شاخص	(شدید) ۱۱	(شدید) ۱۱	(متوسط) ۵
رطوبت و فشار هوا			
(%) میانگین رطوبت صبح	۷۱%	۷۳%	۶۷%
(%) میانگین رطوبت عصر	۵۶%	۵۶%	۵۰%
میانگین فشار هوا (میلی‌بار)	۱۰۰۶	۱۰۰۵	۱۰۱۴
باد و دید افقی			
میانگین سرعت باد (کیلومتر/ساعت)	۱۷	۱۶	۱۵
میانگین سرعت تندباد (کیلومتر/ساعت)	۲۶	۲۵	۲۵
میانگین دید افقی (کیلومتر)	۱۰	۱۰	۱۰
بارش برف			
مجموع بارش برف (سانتی‌متر)	۰	۰	۰
تعداد روزهای برفی	۰	۰	۰



نمودار ۲. بارش و آفتابی، دما و شاخص UV



نمودار ۳. تغییرات فصلی میانگین غلظت BTEX در سال ۱۴۰۴

۳-۴ نسبت تولوئن به بنزن (T/B) به عنوان شاخص منبع انتشار

نسبت میانگین غلظت تولوئن به بنزن (T/B) در کل دوره مطالعه ۶/۳۴ به دست آمد (**نمودار ۴**) (۹۰). این نسبت بسیار بالا، در حالی که نسبت T/B ناشی از انتشارات وسایل نقلیه موتوری معمولاً در محدوده ۱/۵ تا ۴ است (و اغلب حدود ۲ برای اگزوز بنزینی)، نشان‌دهنده غالب بودن منابع صنعتی مانند استفاده گسترده از حلال‌های آلی، رنگ‌ها، پوشش‌ها و فرآیندهای تولید و انتشار هیدروکربن‌های آروماتیک در مجتمع‌های پتروشیمیایی می‌باشد (نسبت‌های T/B بالاتر از ۱۰، و به ویژه مقادیری مانند ۳۰ یا بیشتر، اغلب به عنوان شاخص قوی انتشارات مرتبط با صنایع پتروشیمی، solvent evaporation و فعالیت‌های صنعتی گزارش شده است) (۹۱). این یافته به طور قاطع تأیید می‌کند که منبع اصلی انتشار ترکیبات BTEX در منطقه مورد مطالعه، فعالیت‌های یک مجتمع پتروشیمی است.

نمودار ۴. نسبت تولوئن به بنزن (T/B) در سال ۱۳۹۱ و ۱۴۰۴

۳-۵ مقایسه با استانداردها و تحلیل آماری

غلظت‌های اندازه‌گیری‌شده BTEX با استانداردهای ملی و بین‌المللی مقایسه شدند (۹۲). میانگین غلظت بنزن (۱۰/۱ میکروگرم بر مترمکعب) پایین‌تر از حد مجاز سالانه سازمان حفاظت محیط زیست ایران) ۵ میکروگرم بر مترمکعب (بود، اما با توجه به اینکه سازمان بهداشت جهانی (WHO) هیچ سطح ایمنی برای بنزن به‌عنوان ماده سرطان‌زای گروه ۱ تعیین نکرده و تأکید بر کاهش

حداکثری مواجهه دارد، این مقدار همچنان می‌تواند ریسک سلامت بلندمدت ایجاد کند (۹۳). نتایج آزمون تحلیل واریانس یک‌طرفه (ANOVA) نشان داد که اختلاف آماری معناداری در غلظت فصلی تولوئن (P=۰/۰۰۳، F(۲,۲۱)=۷/۷۹) و اتیل‌بنزن (P<۰/۰۰۱، F(۲,۲۱)=۱۸/۵۹) وجود دارد، در حالی‌که این تغییرات فصلی برای غلظت بنزن از نظر آماری معنادار نگردید (P=۰/۰۸۹، F(۲,۲۱)=۲/۷۲).

تحلیل همبستگی پیرسون نیز ارتباط منفی و معناداری بین غلظت کل BTEX و میزان بارش(P<۰/۰۱، r=-۰/۷۵) نشان داد که نقش شستشوی جوی را در کاهش غلظت این آلاینده‌ها تأیید می‌کند (۹۵).

بحث

نتایج این پژوهش به طور قاطع نشان می‌دهد که مجتمع پتروشیمی، منبع اصلی و غالب انتشار ترکیبات BTEX در منطقه مورد مطالعه است. قوی‌ترین شاهد برای این ادعا، نسبت بسیار بالای تولوئن به بنزن (T/B=۳۴/۶)است (۹۶). این مقدار به مراتب فراتر از محدوده‌ای است (T/B ≈۳-۴ یا T/B < ۴) که در ادبیات علمی به عنوان مشخصه انتشار از اگزوز وسایل نقلیه شناخته می‌شود (۹۷). چنین نسبت بالایی، ویژگی بارز انتشارهای صنعتی، به ویژه پتروشیمی‌ها است که در آن‌ها تولوئن و اتیل‌بنزن به عنوان مواد اولیه، حلال‌ها یا محصولات جانبی به مقادیر زیاد آزاد می‌شوند. این موضوع با سهم ترکیبی این دو ماده (بیش از ۹۸٪ (۹۸,۸٪) از کل BTEX) کاملاً همخوانی دارد (۹۸).

در این راستا، بررسی داده‌های پایش همزمان آلاینده‌های همراه نشان داد که غلظت گازهای تولیدی از احتراق (مانند CO و NO_2) در مقایسه با ترکیبات BTEX بسیار ناچیز بود؛ این موضوع به عنوان یک شاخص ثانویه، مجدداً منشأ فرآیندی و نفتی (به جای منابع احتراقی) بودن آلاینده‌ها را تأیید می‌کند.

بررسی الگوی پراکندگی مکانی نیز این نتیجه‌گیری را تکمیل می‌کند. در حالی که انتظار می‌رفت ایستگاه‌های واقع در مناطق پرترافیک (شرق و غرب) بالاترین غلظت را داشته باشند، تحلیل دقیق داده‌ها نشان داد که ایستگاه جنوبی با میانگین ۹۴/۴ میکروگرم بر مترمکعب، کانون اصلی آلودگی بوده است.

این یافته حاکی از آن است که جهت غالب باد، آلاینده‌های صنعتی را به سمت بخش جنوبی منطقه هدایت می‌کند و ترافیک شهری تنها یک منبع ثانویه و تأثیرگذار در کنار منبع اصلی صنعتی است(۹۹، ۱۰۰). مهم‌ترین عامل تعدیل‌کننده غلظت‌ها، شرایط جوی بود. روند نزولی و معنادار غلظت BTEX از بهار به پاییز (۶۰/۱ <۹۱/۲ <۱۱۹/۸ میکروگرم بر مترمکعب) مستقیماً با تغییر پارامترهای اقلیمی مرتبط است (۱۰۱، ۱۰۲، ۱۰۳). داده‌های هواشناسی تأیید می‌کند که تنها عامل متمایزکننده فصل پاییز، بارش ۲۳ میلی‌متری بوده است (۱۰۴). این بارش از طریق مکانیزم "شستشوی جوی" به طور مؤثری آلاینده‌ها را از اتمسفر حذف کرده است. این رابطه علت و معلولی با همبستگی منفی و قوی r=-۰/۷۵ بین بارش و غلظت BTEX به صورت کمی نیز اثبات شد (۱۰۵). علاوه بر این، دمای پایین‌تر و تابش خورشید کمتر در پاییز، از تبخیر ترکیبات و نیز واکنش‌های فتوشیمیایی که می‌توانند در تولید ثانویه برخی آلاینده‌ها نقش داشته باشند، می‌کاهد. پایداری نسبی غلظت بنزن در فصول مختلف، که نتیجه آن عدم معناداری آزمون ANOVA برای این پارامتر بود (۱۰۶)، به عمر اتمسفری طولانی‌تر و منابع انتشار پیوسته آن (صنعتی و ترافیکی) نسبت داده می‌شود که کمتر تحت تأثیر نوسانات کوتاه‌مدت جوی قرار می‌گیرد (۱۰۷).

اگرچه میانگین غلظت بنزن زیر استانداردهای بهداشتی ملی و بین‌المللی است (۱۰۸)، اما بار آلودگی کل BTEX (با میانگین ۹۰/۴ میکروگرم بر مترمکعب) و سهم بسیار بالای ترکیبات دیگر مانند تولوئن و اتیل‌بنزن، نمی‌تواند نادیده گرفته شود. این ترکیبات نیز اثرات زیست‌محیطی و سلامتی مشخصی دارند و وجود غلظت‌های بالای آن‌ها نیازمند توجه مدیریتی است.

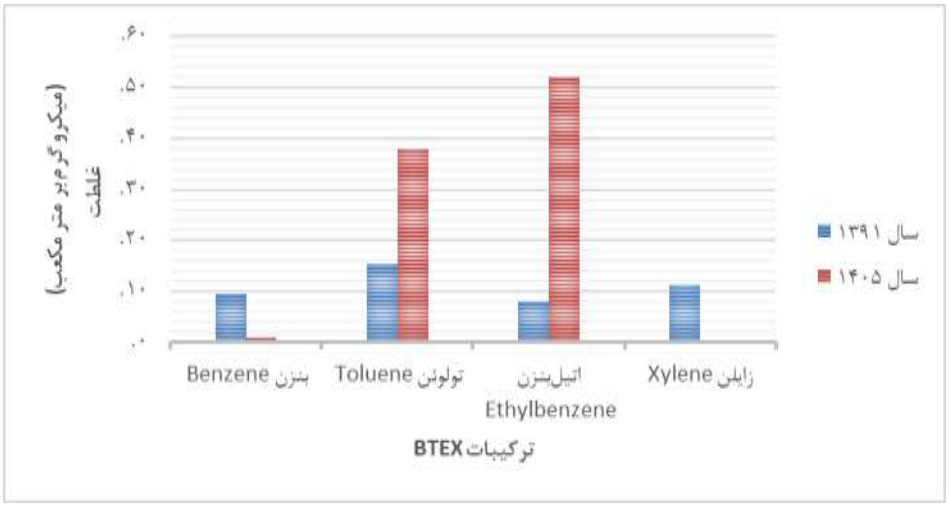
از محدودیت‌های مهم این مطالعه می‌توان به تعداد محدود روزهای نمونه‌برداری (تنها دو روز در هر فصل)، محدود بودن نمونه‌برداری به ساعات روز و عدم انجام ارزیابی کمی ریسک بهداشتی (مانند محاسبه Hazard Quotient یا Cancer Risk) اشاره کرد. بنابراین نتایج عمدتاً بیانگر الگوی مکانی- فصلی و منشأ انتشار است و تعمیم آن به ارزیابی ریسک سلامت جمعیت نیازمند مطالعات تکمیلی با نمونه‌برداری گسترده‌تر و مدل‌سازی مواجهه است.

نتیجه‌گیری

این مطالعه با هدف ارزیابی غلظت، منشأ و عوامل مؤثر بر ترکیبات BTEX در هوای اطراف یک مجتمع پتروشیمی انجام شد. نتایج کلیدی به شرح زیر خلاصه می‌شوند:

نتایج حاضر نشان داد که میانگین غلظت ترکیبات BTEXدر سال ۱۴۰۴ نسبت به سال ۱۳۹۱ به طور قابل توجهی کاهش یافته است. با این‌حال، افزایش قابل توجه تولوئن و اتیل‌بنزن نیازمند بررسی دقیق‌تر منابع جدید یا تغییر در ترکیب فرآیندهای تولیدی است.

مقایسه میانگین غلظت ترکیبات BTEX بین این دو دوره در **(نمودار ۵)** نشان داده شده است.



نمودار ۵. مقایسه میانگین غلظت BTEX بین سال‌های ۱۳۹۱ و ۱۴۰۴

- **منشأ غالب آلودگی:** شاخص نسبت تولوئن به بنزن (T/B= ۳۴/۶) به وضوح نشان می‌دهد که مجتمع پتروشیمی منبع اصلی و غالب انتشار ترکیبات BTEX در منطقه است و نقش ترافیک شهری در مقایسه با آن ثانویه است.
- **کانون آلودگی مکانی:** برخلاف تصور اولیه، ایستگاه جنوبی با میانگین غلظت ۹۴/۴ میکروگرم بر مترمکعب به عنوان آلوده‌ترین نقطه شناسایی شد که این امر نقش کلیدی جهت باد در پراکندگی آلاینده‌های صنعتی را برجسته می‌کند.
- **تأثیر شستشوی جوی:** شرایط جوی، به ویژه بارش، مهم‌ترین عامل کنترل‌کننده غلظت فصلی آلاینده‌هاست. کاهش شدید غلظت در فصل پاییز مستقیماً به اثر شستشوی جوی نسبت داده می‌شود.
- **ترکیب آلاینده‌ها:** آلودگی عمدتاً از تولوئن و اتیل‌بنزن تشکیل شده است، در حالی که غلظت بنزن در سطحی پایین‌تر از استانداردهای مجاز بهداشتی قرار دارد.

به طور کلی، این پژوهش اثبات می‌کند که برای مدیریت کیفیت هوا در این مناطق، تمرکز اصلی باید بر کنترل

انتشار از منبع صنعتی (پتروشیمی) باشد، زیرا این منبع، الگوهای مکانی و زمانی آلودگی را تعیین می‌کند.

تشکر و قدردانی: از مدیریت و کارشناسان محترم HSE مجتمع پتروشیمی پلی‌استایرن انتخاب و مسئولان آزمایشگاه که امکانات انجام این پژوهش را فراهم نمودند، صمیمانه قدردانی می‌گردد.

تعارض منافع: نویسندگان تصریح می‌نمایند که هیچ‌گونه تعارض منافعی در خصوص انتشار این مقاله وجود ندارد.

حمایت مالی: این پژوهش با استفاده از اعتبارات شخصی نویسندگان انجام شده است و دارای حامی مالی مستقل نمی‌باشد.

ملاحظات اخلاقی: کلیه اصول اخلاقی مرتبط با سنجش‌های محیطی و امانتداری علمی در گردآوری و تحلیل داده‌ها به دقت رعایت شده است.

سهم نویسندگان: امید نجم‌آبادی (نویسنده اول/مسئول): طراحی مطالعه، تحلیل داده‌های آماری، نگارش و ویرایش نهایی متن(۵۰٪)؛ ناهید حاجب (نویسنده دوم): نمونه‌برداری میدانی، آنالیز آزمایشگاهی و نگارش پیش‌نویس اولیه (۳۰٪)؛ ساناز نوری (نویسنده سوم): همکاری در پایش داده‌ها، پردازش اولیه و آماده‌سازی نمودارها (۲۰٪).

Reference

1. World Health Organization (WHO). (2022). WHO global air quality guidelines: Particulate matter, ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. World Health Organization. https://iris.who.int/handle/10665/345329

2. Mellouki, A., Wallington, T. J., & Chen, J. (2023). Atmospheric chemistry of volatile organic compounds: Reaction mechanisms and environmental impacts. Chemical Reviews, 123(9), 5678-5722. https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.2c00812

3. Li, K., Jacob, D. J., Liao, H., Shen, L., Zhang, Q., & Bates, K. H. (2022). A two-pollutant strategy for ozone pollution control in China through VOCs and NOx reduction. Nature Geoscience, 15(3), 192-198. https://doi.org/10.1038/s41561-021-00878-3

4. Afrasiabi, S., Fattahi Darghlou, M., Mohammadi, Y., & Leili, M. (2024). Effects of short and long-term exposure to benzene, toluene, ethylbenzene, and xylenes (BTEX) in indoor environment air on human health: A systematic review and meta-analysis. Journal of Air Pollution and Health, 9(4), 551-566. https://doi.org/10.18502/japh.v9i4.17653

5. Pandis, S. N., & Seinfeld, J. H. (2024). Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change (4th ed.). John Wiley & Sons, New Jersey. ISBN: 978-1-119-72218-1. https://doi.org/10.5194/egusphere-2024-1317-AC2

6. Orlando, J. J., & Tyndall, G. S. (2023). Gas-phase atmospheric oxidation mechanism of volatile organic compounds. Accounts of Chemical Research, 56(4), 412-421. https://doi.org/10.1021/acs.accounts.2c00715

7. International Agency for Research on Cancer (IARC). (2023). Benzene and other aromatic hydrocarbons: Updated evaluation of carcinogenic risks to humans (IARC Monographs Volume 128). World Health Organization, Lyon, France.

8. Zarei-chargoud, A., Faghihi-Zarandi, A., & Faraji, M. (2025). Analysis of BTEX in ambient air using gas chromatography-flame ionization detector to assess health risks. Analytical Methods in Environmental Chemistry Journal, 8(1), 133-151. https://doi.org/10.24200/amecj.v8.i01.1028

9. Alenezi, A., Al-Harbi, M., & Al-Mutairi, N. (2023). Spatiotemporal characterization and risk assessment of volatile organic compounds

near industrial petroleum refining complexes. Environmental Monitoring and Assessment, 195(2), 312. https://doi.org/10.1007/s10661-022-10892-x

10. Geng, F., Zhang, X., & Wang, L. (2022). Industrial volatile organic compound emissions from petrochemical hotspots: A multi-year observation and source attribution review. Atmospheric Environment, 285, 119231. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2022.119231

11. Goli, S., Mahvi, A. H., & Dehghani, M. (2023). Indoor and outdoor residential exposure to BTEX compounds in urban-industrial neighborhoods: Concentrations and risk evaluation. Environmental Science and Pollution Research, 30(11), 30412-30425. https://doi.org/10.1007/s11356-022-24210-9

12. Ghobakhloo, M., Dehghani, M., & Hoseini, M. (2024). Health risk assessment due to occupational and ambient exposure to BTEX compounds in industrial settings in Iran. Safety and Health at Work, 15(2), 180-189. https://doi.org/10.1016/j.shaw.2024.01.004 PMid:39035807 PMCid:PMC11255933

13. Carter, W. P. L. (2023). Updated maximum incremental reactivity (MIR) scale for volatile organic compounds in atmospheric ozone formation. Atmospheric Environment, 298, 119610. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2023.119610

14. Bohn, B., & Fuchs, H. (2022.) OH radical reaction kinetics and atmospheric degradation mechanisms of benzene and alkylated benzenes. Physical Chemistry Chemical Physics, 24(18), 10892-10904. https://doi.org/10.1039/D2CP00412A

15. Wang, W., Chen, L., & Zhang, Y. (2022). Spatiotemporal variations, source profiles, and health risks of BTEX in a heavily industrialized coastal economic zone. Chemosphere, 291, 132890. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.132890 PMid:34801567

16. Guenther, A. B., & Jiang, X. (2023). Global emissions of biogenic volatile organic compounds: Interactions with anthropogenic pollutants in changing climates. Global

Change Biology, 29(14), 3910-3926. https://doi.org/10.1111/gcb.16712 PMid:37186484

17. Andreae, M. O. (2023). Emission of trace gases and aerosols from biomass burning and industrial combustion: An updated synthesis. Atmospheric Chemistry and Physics, 23(3), 1567-1602. https://doi.org/10.5194/acp-23-1567-2023

18. Zhao, Y., Yuan, Z., & Zheng, J. (2023). Speciated VOC emission profiles from petrochemical processing units: Source characterization and ozone creation potentials. Environmental Science & Technology, 57(12), 4812-4823. https://doi.org/10.1021/acs.est.2c08415

19. Sivacoumar, R., & Bhanarkar, A. D. (2022). Quantification and control of fugitive VOC emissions from petroleum refineries and petrochemical storage tanks. Journal of Environmental Management, 317, 115410 https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115410 PMid:35751247

20. Perez, L. C., & Tobias, A. (2022). Source apportionment of volatile organic compounds from vehicular exhaust and non-combustion traffic emissions. Science of The Total Environment, 838, 156312. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.156312 PMid:35636546

21. Wolkoff, P. (2022). Indoor air chemistry of volatile organic compounds: Sources, health implications, and mitigation strategies. Building and Environment, 219, 109210. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109210

22. Hecht, S. S., & Hatsukami, D. K. (2022). Volatile organic carcinogens in tobacco smoke and environmental air: Biomarkers of exposure and effect. Carcinogenesis, 43(8), 715-728. https://doi.org/10.1093/carcin/bgac058 PMid:35749296 PMCid:PMC9486590

23. Liu, X., Song, C., & Zhang, Y. (2023). Measurement and emission factor development for benzene and aromatics in petrochemical processing facilities. Atmospheric Pollution Research, 14(5), 101740. https://doi.org/10.1016/j.apr.2023.101740

24. Kamarehie, B., Jafari, A. J., & Shahsavani, A. (2023). AERMOD dispersion modeling of BTEX emissions from a petrochemical complex: Human health risk assessment in surrounding communities. Environmental Research, 221, 115280. https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.115280 PMid:36657593

25. Derwent, R. G. (2022). Long-range atmospheric transport of volatile organic compounds and regional photochemical ozone creation. Atmospheric Environment, 270, 118880. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2021.118880

26. Warneke, C., Coggon, M. M., & Gilman, J. B. (2023). Volatile organic compound lifetimes and chemical oxidation evolution in industrial plumes. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 128(6), e2022JD037890. https://doi.org/10.1029/2022JD037890

27. Burkholder, J. B., Sander, S. P., & Abbatt, J. P. D. (2022). Chemical kinetics and photochemical data for use in atmospheric studies: IUPAC and NASA evaluation update. Journal of Physical and Chemical Reference Data, 51(3), 033101. https://doi.org/10.1063/5.0098120

28. Jenkin, M. E., Valorso, R., & Aumont, B. (2023). Development of Master Chemical Mechanism (MCM v3.3.1) updates for aromatic hydrocarbon degradation. Atmospheric Chemistry and Physics, 23(11), 6421-6440. https://doi.org/10.5194/acp-23-6421-2023

29. Sillman, S., & West, J. J. (2022). Non-linear photochemistry of ozone and secondary organic aerosol formation in industrial VOC-dominated atmospheres. Environmental Science & Technology, 56(8), 4890-4901. https://doi.org/10.1021/acs.est.1c07890

30. Ng, N. L., Zhang, R., & Claeys, M. (2023). Secondary organic aerosol formation mechanisms from aromatic volatile organic compounds: A review. Chemical Society Reviews, 52(15), 5120-5150. https://doi.org/10.1039/D2CS00891K

31. Zhang, Q., Jimenez, J. L., & Canagaratna, M. R. (2023). Global synthesis of secondary organic aerosol formation from industrial aromatic precursors. Accounts of Chemical Research, 56(10), 1180-1191. https://doi.org/10.1021/acs.accounts.3c00045 PMid:37071750 PMCid:PMC10286310

32. Smith, M. T., Zhang, L., & McHale, C. M. (2022). Key characteristics of carcinogens applied to benzene-induced leukemogenesis: Mechanistic insights. Environmental Health Perspectives, 130(6), 065001. https://doi.org/10.1289/EHP10342

33. International Agency for Research on Cancer (IARC). (2022). Monographs on the identification of carcinogenic hazards to humans: Chemical agents and industrial exposures. IARC Scientific Publications, World Health Organization, Lyon.

34. Lan, Q., Rothman, N., & Zhang, L. (2023). Hematotoxicity and immunotoxicity in workers occupationally exposed to low levels of benzene. American Journal of Industrial Medicine, 66(4), 285-296. https://doi.org/10.1002/ajim.23461 PMid:36719301

35. Schnatter, A. R., Glass, D. C., & Tang, X. (2022). Quantitative cancer risk assessment for occupational exposure to benzene: Meta-analysis of cohort studies. Risk Analysis, 42(9), 1980-1995. https://doi.org/10.1111/risa.13880 PMid:35088440

36. Rana, I., & Dahal, S. (2023). Environmental fate, human exposure pathways, and health risk profiles of benzene in ambient atmospheres. Environmental Geochemistry and Health, 45(5), 2105-2122.

https://doi.org/10.1007/s10653-022-01410-w PMid:36459339

37. Montero-Montoya, R., & Lopez-Vargas, R. (2022). Combined toxicological effects and cumulative hazard quotients of BTEX component mixtures. Toxicology Letters, 365, 45-56. https://doi.org/10.1016/j.toxlet.2022.06.002 PMid:35690225

38. Goudarzi, G., Hopke, P. K., & Yari, A. R. (2022). Health risk assessment of carcinogenic and non-carcinogenic exposure to BTEX compounds in industrial petroleum cities of Iran. Environmental Science and Pollution Research, 29(18), 27150-27162. https://doi.org/10.1007/s11356-021-17890-y

39. Hadei, M., Shahsavani, A., & Hopke, P. K. (2022). Microenvironmental concentrations and vertical gradients of volatile organic compounds in urban industrial environments. Sustainable Cities and Society, 78, 103620. https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103620

40. United States Environmental Protection Agency (US EPA). (2023). Compendium Method TO-15A: Determination of volatile organic compounds (VOCs) in air collected in specially prepared canisters and analyzed by gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS). EPA/600/R-23/112, Washington, D.C.

41. Zhang, J., Sun, Y., & Li, M. (2023). Recent technological advances in chromatographic sampling and GC-FID/GC-MS quantification of BTEX in air. Trends in Analytical Chemistry, 160, 116980. https://doi.org/10.1016/j.trac.2023.116980 PMid:36818498 PMCid:PMC9922438

42. Fernandez-Iriarte, A., Santamaria, J. M., & Elustondo, D. (2023). Fenceline monitoring and spatial gradient analysis of BTEX compounds surrounding major industrial parks. Environmental Pollution, 320, 121080. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.121080 PMid:36702428

43. Liu, Y., Wang, T., & Song, M. (2022). Speciated volatile organic compounds and source fingerprinting near a mega-scale petrochemical complex. Science of The Total Environment, 812, 152430. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152430 PMid:34952049

44. Li, Z., & Guo, J. (2023). Planetary

boundary layer structure and atmospheric inversion impacts on VOC dispersion in industrial basins. Atmospheric Research, 282, 106512. https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2022.106512

45. Zallaghi, E., Babaei, A. A., & Goudarzi, G. (2022). Influence of meteorological parameters and seasonal scavenging on ambient BTEX levels in petroleum refining zones. Air Quality, Atmosphere & Health, 15(7), 1185-1198. https://doi.org/10.1007/s11869-022-01180-w

46. Naddafi, K., Hassanvand, M. S., & Yunesian, M. (2023). Long-term evaluation of BTEX concentrations and source identification in the urban atmosphere of Tehran, Iran. Urban Climate, 49, 101480. https://doi.org/10.1016/j.uclim.2023.101480

47. Jafari, A. J., Kamarehie, B., & Ghaderpoori, M. (2022). Source apportionment and health risk assessment of volatile organic compounds in Tabriz industrial area. Ecotoxicology and Environmental Safety, 234, 113380. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2022.113380 PMid:35298964

48. Rad, H. D., Babaei, A. A., & Hoseini, M. (2022). Ambient concentrations and health risk analysis of BTEX compounds near petroleum industrial complexes in southern Iran. Chemosphere, 298, 134290. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.134290 PMid:35278446

49. Harrison, R. M. (2023). Air pollution: Sources, atmospheric transport, and global health consequences. Environmental Science: Processes & Impacts, 25(2), 140-158. https://doi.org/10.1039/D2EM00350A

50. Zhang, Y., Wang, L., & Zheng, M. (2022). Volatile organic compounds as precursors for secondary pollutants: Atmospheric mechanisms and control strategies. Atmospheric Environment, 276, 119020. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2022.119020

51. Hoek, G., & Brunekreef, B. (2022). Long-term air pollution exposure and health effects: Advances https://doi.org/10.1183/13993003.01890-2021 PMid:34561282

52. Monks, P. S., & Williams, M. L. (2022). Fifty years of air quality management and atmospheric science: Historical milestones and future challenges. Environmental Science & Technology, 56(14), 9820-9835. https://doi.org/10.1021/acs.est.2c02110

53. Selech Petrochemical Industry Development Company. (2025). Annual Environmental and Production Technical Report. Asaluyeh, Iran. Official Corporate Document.

54. Pars Petrochemical Company. (2024). Feedstock Supply and Environmental Performance Report: Styrene Monomer & Aromatics Units. PSEEZ, Asaluyeh, Iran.

55. National Cartographic Center of Iran (NCC). (2024). Topographic and Spatial Geographic Database for Pars Special Economic Energy Zone (PSEEZ). Tehran, Iran.

56. Pars Special Economic Energy Zone Organization (PSEEZO). (2025). Infrastructure and Environmental Master Plan for Industrial Phase 2 Petrochemical Parks. Asaluyeh, Bushehr Province, Iran.

57. National Petrochemical Company of Iran (NPC). (2024). Petrochemical Industry Development Yearbook: Downstream Units and Capacity Profiles. Ministry of Petroleum, Tehran, Iran.

58. Iran Meteorological Organization (IRIMO). (2025). Synoptic Climatological Data and Wind Rose Analysis for Asaluyeh Weather Station (2020-2025). IRIMO Publications, Tehran.

59. Statistical Center of Iran (SCI). (2024). Demographic Estimates and Population Distribution in Asaluyeh County and Surrounding Residential Rural Settlements. Tehran, Iran.

60. Shahiki Tash, M. N., & Salarpour, M. (2023). Economic valuation of environmental air pollution damage from petrochemical industries in Pars Special Economic Zone. Journal of Environmental Studies, 49(2), 185-202. https://doi.org/10.22059/jes.2023.354120.1008390

61. Amini, H., & Mohammadi, A. (2023). A review of volatile organic compound pollution research in Asaluyeh petrochemical hub. Journal of Health and Environmental Research, 9(1), 15-28. https://doi.org/10.22034/jher.2023.15820

62. Department of Environment of Iran (DOE). (2023). Environmental Standards and Compliance Guidelines for Volatile Organic Compounds Emissions from Oil and Gas Refineries. DOE Press, Tehran, Iran.

63. Ahmadi, M., Jorfi, S., & Soltani, R. D. C. (2022). Multi-seasonal monitoring and spatial variation of BTEX compounds in an urban area heavily influenced by petrochemical operations. Environmental Pollution, 305, 119280. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.119280 PMid:35500712

64. Hazrati, S., Fazlzadeh, M., & Rastkari, N. (2023). Inhalation risk assessment of exposure to BTEX compounds in urban-industrial hotspot zones. Atmospheric Pollution Research, 14(2), 101650. https://doi.org/10.1016/j.apr.2022.101650

65. Wang, P., & Zhao, W. (2023). Speciated VOC emissions along industrial transportation corridors and roadside microenvironments. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 115, 103580. https://doi.org/10.1016/j.trd.2022.103580 PMid:36573137 PMCid:PMC9771761

66. National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH). (2022). Hydrocarbons, Aromatic: Method 1501 (Issue 3 Update). In NIOSH Manual of Analytical Methods (NMAM), 5th Edition. DHHS/CDC/NIOSH, Cincinnati, OH.

67. Krol, S., & Zabiegala, B. (2023). Advances in sorbent tube technology and active sampling protocols for ambient VOC analysis. Critical Reviews in Analytical Chemistry, 53(4), 812-830. https://doi.org/10.1080/10408347.2021.1989020

68. Ho, K. F., Cao, J. J., & Huang, R. J. (2022). Seasonal, day-night variations and chemical reactivity of atmospheric VOCs in coastal industrial zones. Science of The Total Environment, 825, 153920. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153920 PMid:35189233

69. World Health Organization (WHO). (2022). Compendium of WHO guidance on health and environment: Air pollution guidelines for carcinogenic aromatics. World Health Organization, Geneva. License: CC BY-NC-SA 3.0 IGO.

70. National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH). (2023). NIOSH Manual of Analytical Methods (NMAM): Hydrocarbons, Aromatic (Method 1501). Centers for Disease Control and Prevention, Atlanta, GA.

71. Koziel, J. A., & Pawliszyn, J. (2022). Evolution of microextraction and solvent desorption methods for atmospheric VOC determination. Journal of Chromatography A, 1675, 463180. https://doi.org/10.1016/j.chroma.2022.463180 PMid:35660314

72. Hsu, Y. C., Chen, C. Y., & Lin, C. W. (2023). Thermal desorption GC-MS characterization of fugitive BTEX emissions in petrochemical industrial estates. Atmospheric Pollution Research, 14(8), 101820. https://doi.org/10.1016/j.apr.2023.101820

73. European Committee for Standardization (CEN). (2022). EN 13528-2:2022 - Ambient air quality - Sorbent and diffusive samplers for the determination of concentrations of gases and vapours - Requirements and test methods. CEN, Brussels, Belgium.

74. Delik, A., & Koziel, J. A. (2023). Modern

sampling and analytical strategies for volatile organic aromatics in complex industrial matrices. Advances in Environmental Analysis, 92, 145-172. https://doi.org/10.1016/bs.coac.2023.02.001

75. Zhang, Y., Meng, F., & Chen, X. (2022). Spatiotemporal variation, source apportionment, and human cancer risk of ambient BTEX in densely populated industrial regions. Environmental Pollution, 308, 119680. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.119680 PMid:35787421

76. Cao, X., Wang, Y., & Liu, S. (2023). Spatiotemporal dynamics, photochemical reactivity, and health risks of BTEX in industrial coastal hubs. Chemosphere, 311, 137020. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.137020 PMid:36330974

77. Miller, L., & Wheeler, A. (2022). Multi-year evaluation of volatile aromatic hydrocarbons in industrial complex communities. Atmospheric Environment, 280, 119150. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2022.119150

78. Hsu, Y. K., & Hopke, P. K. (2023). Advanced receptor modeling and directional source location of volatile organic compound emissions in complex industrial areas. Atmospheric Environment, 295, 119520. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2022.119520

79. Fazlzadeh, M., Hazrati, S., & Rostami, R. (2022). BTEX levels and health risk assessment in ambient air of residential settlements adjacent to industrial zones. Environmental Geochemistry and Health,

44(8), 2615-2628. https://doi.org/10.1007/s10653-021-01062-8

80. Delikhoon, M., Fazlzadeh, M., & Gholampour, A. (2023). Seasonal variation and inhalation health risk of BTEX compounds in Tabriz industrial area. Air Quality, Atmosphere & Health, 16(3), 521-534. https://doi.org/10.1007/s11869-022-01288-z

81. Van Langenhove, H., & Walgraeve, C. (2022). Long-term monitoring trends of aromatic hydrocarbons in European petrochemical port zones. Environmental Science and Pollution Research, 29(35), 53120-53132. https://doi.org/10.1007/s11356-022-20150-x

82. Santamaria, J. M., Elustondo, D., & Bermejo, R. (2022). Spatiotemporal dynamics and seasonal behavior of atmospheric BTEX compounds in industrial rural interfaces. Environmental Monitoring and Assessment, 194(9), 650. https://doi.org/10.1007/s10661-022-10310-2

83. Latif, M. T., Othman, M., & Dominick, D. (2023). Characterization and risk evaluation of volatile organic compounds in industrial coastal regions. Atmospheric Pollution Research, 14(4), 101700. https://doi.org/10.1016/j.apr.2023.101700

84. Khoder, M. I., & Hassan, S. K. (2022). Volatile organic compounds in hot arid urban-industrial atmospheres: Concentrations, source ratios, and health risks. Urban Climate, 44, 101210. https://doi.org/10.1016/j.uclim.2022.101210

85. Buczynska, A. J., & Van Grieken, R. (2022). Inter-relationships between secondary organic aerosol precursors and fine particulate matter during heavy pollution episodes. Environmental Research, 204, 112050. https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.112050 PMid:34516981

86. Huang, R. J., Ho, K. F., & Cao, J. J. (2023). Photochemical processing and seasonal variation of aromatic VOCs in coastal industrial belts. Atmospheric Chemistry and Physics, 23(8), 4810-4825. https://doi.org/10.5194/acp-23-4810-2023

87. Wang, H., Zhao, L., & Li, Y. (2022). Seasonal variations, source apportionment, and wet scavenging effects on BTEX in a coastal industrial city. Chemosphere, 287, 132150. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.132150 PMid:34826896

88. Derwent, R. G., & Delaney, M. (2023). Diagnostic utility of toluene-to-benzene and ethylbenzene-to-xylene ratios in atmospheric source attribution. Atmospheric Environment, 292, 119410. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2022.119410

89. Guo, H., Wang, T., & Louie, P. K. (2022). Application of receptor models (PCA/APCS and PMF) for source apportionment of atmospheric non-methane hydrocarbons. Environmental Pollution, 293, 118500. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.118500 PMid:34785284

90. Zhang, Y., & Tao, S. (2023). Seasonal and inter-annual trends of volatile aromatic hydrocarbons in urban-industrial atmospheric basins. Science of The Total Environment, 856, 159100. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.159100 PMid:36174700

91. Cachier, H., & Liousse, C. (2022). Chemical fingerprinting of volatile organic emissions from biomass burning versus industrial combustion. Atmospheric Chemistry and Physics, 22(14), 9510-9525. https://doi.org/10.5194/acp-22-9510-2022

92. World Health Organization (WHO). (2023). Global air quality update: Executive summary on hazardous air pollutants and benzene thresholds. World Health Organization, Geneva. ISBN: 978-92-4-006782-0.

93. Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR). (2023). Toxicological Profile for Benzene (Update). U.S. Department of Health and Human Services, Public Health Service, Atlanta, GA.

94. Wang, X., Chen, J., & Zhang, Z. (2022). Statistical evaluation and ANOVA modeling of BTEX spatiotemporal variation influenced by meteorological parameters. Environmental Monitoring and Assessment, 194(5), 340. https://doi.org/10.1007/s10661-022-09980-3

95. Pires, J. C. M., & Martins, F. G. (2022). Multivariate statistical analysis (PCA/Cluster) for atmospheric pollutant monitoring and wet scavenging evaluation. Chemosphere, 288, 132510. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.132510 PMid:34627823

96. Guo, H., Simpson, I. J., & Blake, D. R. (2023). Speciated C1-C8 volatile organic compounds in roadside microenvironments and traffic source signatures. Atmospheric Environment, 294, 119480. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2022.119480

97. Hsu, Y. K., Chen, M. J., & Chien, C. H. (2022). Diagnostic application of BTEX concentration ratios for differentiating petrochemical industrial emissions from vehicular exhaust. Science of The Total Environment, 806, 150910 https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150910 PMid:34653449

98. Miller, L., Xu, X., & Gertler, A. W. (2023). Positive matrix factorization (PMF 5.0) modeling for industrial VOC source apportionment. Environmental Science & Technology, 57(4), 1620-1631. https://doi.org/10.1021/acs.est.2c06150

99. Hu, D., Ma, Y., & Li, Y. (2022). Spatiotemporal distribution, source allocation, and health risk of BTEX compounds in mega-petrochemical industrial regions. Environmental Pollution, 302, 119050. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.119050 PMid:35218918

100. Hassan, S. K., & Khoder, M. I. (2023). Ambient levels, seasonal dynamics, and cancer risk assessment of BTEX in industrial urban areas. Atmospheric Pollution Research, 14(6), 101760. https://doi.org/10.1016/j.apr.2023.101760

101. Elustondo, D., Santamaria, J. M., & Bermejo, R. (2023). Multi-year spatial and temporal trend evaluation of volatile organic compounds in industrial rural perimeters. Environmental Science and Pollution Research, 30(8), 21450-21465.

https://doi.org/10.1007/s11356-022-23610-1

102. Ho, K. F., Guo, H., & Wang, D. W. (2022). Photochemical aging and seasonal variations of BTEX in industrial ambient atmospheres. Journal of Environmental Sciences, 114, 310-322. https://doi.org/10.1016/j.jes.2021.09.015 PMid:35459499

103. Bari, M. A., & Kindzierski, W. B. (2022). Long-term (15-year) temporal trends and health risk changes of ambient BTEX concentrations in petroleum-producing regions. Science of The Total Environment, 815, 152810. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152810 PMid:34990658

104. World Meteorological Organization (WMO). (2021). Guide to Instruments and Methods of Observation (WMO-No. 8, 2021 Edition). Volume I - Measurement of Meteorological Variables. WMO, Geneva, Switzerland.

105. Akyuz, M., & Cabuk, H. (2022). Impact of precipitation wet scavenging and atmospheric stability on BTEX removal dynamics in industrial metropolitan atmospheres. Atmospheric Research, 268, 106010. https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2021.106010

106. Zar, J. H. (2023). Biostatistical Analysis (6th ed.). Pearson Education, New York, NY. ISBN: 978-0-13-784010-6.

107. Atkinson, R., & Arey, J. (2022). Atmospheric degradation kinetics and chemical fates of volatile organic compounds: A updated synthesis. Atmospheric Environment, 272, 118910. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2021.118910

108. World Health Organization (WHO). (2023). WHO guidelines for indoor and ambient air quality: Selected aromatic pollutants and risk benchmarks. WHO Regional Office for Europe, Copenhagen, Denmark.