



Available online: <https://ijhe.tums.ac.ir>

مقاله پژوهشی



## حذف بنزن از هوا با استفاده از فتوکاتالیست $\text{TiO}_2 - \text{Bi}_2\text{O}_3$ پوشش داده شده بر فوم شیشه تحت تابش فرابنفش

رضانعلی دیان‌تی تیلکی<sup>۱\*</sup>، رقیه کاسب<sup>۱</sup>، اسماعیل بابانژاد آریمی<sup>۱</sup>، محمد دیان‌تی<sup>۲</sup>

۱- گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی مازندران، ساری، ایران  
۲- گروه ترموسینتیک و کاتالیست، دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، ایران

### چکیده

### اطلاعات مقاله:

**زمینه و هدف:** بنزن یکی از مواد آلی فرار سرطانزا است که در هوای آلوده یافت می‌شود. هدف از این مطالعه حذف بنزن از هوا با استفاده از فتوکاتالیست کامپوزیت  $\text{TiO}_2 - \text{Bi}_2\text{O}_3$  تثبیت شده روی فوم شیشه تحت تابش فرابنفش بود.

**روش بررسی:** در یک راکتور کوارتز فوم شیشه پوشش داده با کامپوزیت  $\text{TiO}_2 - \text{Bi}_2\text{O}_3$  قرار داده شد و سپس راکتور در داخل یک اتاقک شیشه ای درپوش دار به پمپ هوا متصل و لامپ UV (۲۵۴ nm) در کنار آن نصب گردید. حجم‌های معین (μL) بنزن از طریق سیتوم به داخل اتاقک تزریق شد. با روشن شدن پمپ، هوای آلوده به بنزن از فتوراکتور عبور می‌کرد. با نمونه گیری از هوای داخل اتاقک و استفاده از دستگاه GC-FID، غلظت بنزن اندازه گیری شد.

**یافته‌ها:** طیف XRD و تصاویر SEM تأیید کننده وجود  $\text{TiO}_2 - \text{Bi}_2\text{O}_3$  و آنالیز BET تأیید کننده وجود مزو حفره در فتوکاتالیست کامپوزیت تهیه شده است. میزان جذب سطحی بنزن در کامپوزیت ۱۵ درصد و از مدل لانگمویر تبعیت نمود. سینتیک فرایند از نوع درجه یک بود. با افزایش غلظت بنزن راندمان حذف کاهش یافت. برای غلظت ۳۹ ppm بنزن در مورد  $\text{TiO}_2$  و تابش فرابنفش به مدت ۷۵ min، راندمان حذف ۷۵ درصد بود در حالی که در مورد  $\text{TiO}_2 - \text{Bi}_2\text{O}_3$  با شرایط مشابه راندمان حذف حدود ۹۰ درصد بدست آمد.

**نتیجه گیری:** استفاده از فتوکاتالیست کامپوزیت  $\text{TiO}_2 - \text{Bi}_2\text{O}_3$  و تابش UV-A موجب افزایش راندمان ۱۵ درصد حذف بنزن نسبت به  $\text{TiO}_2$  به تنهایی شده است.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۵/۰۱  
تاریخ ویرایش: ۱۴۰۴/۰۷/۲۳  
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۷/۲۸  
تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۹/۲۳

**واژگان کلیدی:** فوم شیشه، بنزن، هوا، فتوکاتالیست،  $\text{TiO}_2 - \text{Bi}_2\text{O}_3$

پست الکترونیکی نویسنده مسئول:  
[dianati.tilaki@gmail.com](mailto:dianati.tilaki@gmail.com)

Please cite this article as: Dianati Tilaki R, Kaseb R, Babanejad Arimi E, Dianati M. Benzene removal from air using  $\text{Bi}_2\text{O}_3 - \text{TiO}_2$  photocatalyst coated on glass foam under ultraviolet light irradiation. *Iranian Journal of Health and Environment*. 2025;18(3):489-504.



## مقدمه

ترکیبات آلی فرار (VOCs) دسته مهمی از آلاینده ها هستند که آلودگی هوا را در محیط های داخلی ایجاد می کنند. بنزن از جمله مهمترین این مواد است که نیازمند توجه ویژه ای است. آژانس بین المللی تحقیقات سرطان (IARC) بنزن را سرطان زای انسانی گروه A اعلام نموده است. تخمین زده شده است که مواجهه با  $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$  بنزن در طول زندگی منجر به حدود ۶ مورد سرطان خون در هر ۱ میلیون نفر می شود (۱). مواجهه کوتاه مدت انسان با غلظت های نسبتاً زیاد بنزن، می تواند منجر به اثراتی مانند سردرد، خواب آلودگی، سرگیجه، از دست دادن هوشیاری، سوزش چشم، تحریک پوست، آریتمی قلبی، تحریک تنفسی و آنمی آپلاستیک گردد. مواجهه طولانی مدت با بنزن با لوسمی لنفوسیتی و غیر لنفوسیتی حاد و مزمن، کاهش تعداد سلول های خونی و هیپوپلازای مغز استخوان ارتباط آشکاری دارد (۲، ۳). چون بنزن در نفت خام وجود دارد لذا همه انواع مشتقات نفتی حاوی مقادیری از بنزن هستند. بنزن از طریق تبخیر از بنزین، نفت سفید و گازوئیل، دود حاصله از احتراق انواع سوخت ها، دود سیگار و تنباکو، تبخیر از تینر و رنگ، تبخیر از خوشبو کننده ها، حشره کش ها، پاک کننده ها، تبخیر از دستگاه های فتوکپی، فکس و چاپ، احتراق و سوخت در ساختمان ها (بخاری، آشپزخانه، موتورخانه شوفاژ، پارکینگ و...) وارد هوای محیط های داخلی می شود (۴، ۵). اتحادیه اروپا برای محافظت از سلامتی انسان، حداکثر میانگین سالانه غلظت بنزن در هوا را  $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (۰/۰۱۵ ppm) اعلام نمود. با این حال سازمان جهانی بهداشت (WHO) هیچ سطح ایمن در مواجهه با بنزن را توصیه نمی کند (۶). بر اساس استانداردهای سازمان ایمنی و بهداشت شغلی (OSHA)، میانگین وزنی- زمانی ۸ ساعته (TWA) غلظت بنزن در هوای محیط کار  $3/25 \text{ mg}/\text{m}^3$  (۱ ppm) است (۷).

برخی روش ها از جمله جذب سطحی با مواد جاذب نظیر کربن فعال، زغال زیستی (بیوجار)، سوزاندن و اکسیداسیون برای حذف بنزن و سایر مواد آلی فرار از هوا مورد مطالعه قرار گرفته

اند (۸). یکی از روش های حذف بنزن از هوا اکسیداسیون فتوکاتالیستی است که بسیار مورد توجه قرار گرفته است (۹، ۱۰). در فرایندهای فتوکاتالیستی از مواد نیمه رسانا بعنوان فتوکاتالیست و نور بعنوان منبع انرژی استفاده می شود. در مواد نیمه رسانا شکاف انرژی (بین نوار ظرفیت و نوار هدایت) نسبت به مواد عایق بسیار کمتر است، لذا نور (بخصوص فرابنفش) انرژی لازم برای تحریک الکترون ها و انتقال آنها به نوار هدایت را تامین می کند. به ازای هر الکترون منتقل شده یک حفره با بار مثبت در نوار ظرفیت باقی می ماند، در صورتی که یک الکترون از یک اتم نزدیک بتواند این فضای خالی را پر کند، یک واکنش زنجیره ای بین الکترون ها و حفرات به وجود می آید که اساس کار واکنش های فتوکاتالیستی است. الکترون های برانگیخته با متصل شدن به مولکول های اکسیژن آنرا به یون سوپر اکسید ( $\text{O}_2^-$ ) تبدیل می کنند و حفره ها (بار مثبت) با متصل شدن به مولکول های آب یون های هیدروکسیل ( $\text{OH}^\bullet$ ) ایجاد می کنند که بدین ترتیب امکان وقوع واکنش های اکسیداسیون- احیا برای تخریب آلاینده های آلی فراهم می شود (۱۱). برای وقوع یک واکنش فتوکاتالیستی، لازم است تا ۴ مرحله اتفاق بیفتد که عبارتند از: جذب انرژی نور برای تولید جفت های الکترون- حفره، جدایش بارهای برانگیخته (بار مثبت حفره و بار منفی الکترون)، انتقال الکترون ها و حفره ها به سطح فتوکاتالیست و استفاده از بارهای موجود در سطح برای واکنش های اکسایش و احیا (۱۲).

تیتانیوم دی اکسید ( $\text{TiO}_2$ ) به دلیل پایداری شیمیایی بالا، هزینه کم و نداشتن خطرات محیط زیستی، مدت طولانی است که به عنوان یک فتوکاتالیست مبنا مورد مطالعه قرار می گیرد. با این حال، دراستفاده از  $\text{TiO}_2$  برخی عوامل محدودکننده وجود دارند که مهمترین آنها نیاز به تابش فرابنفش برای برانگیخته شدن به دلیل شکاف انرژی ( $\text{band gap} = 3/2 \text{ eV}$ ) و همچنین ترکیب مجدد الکترون- حفره که منجر به کاهش بازده کوانتومی می شود، است (۱۳، ۱۴). در مطالعات متعددی نشاندهنده (دوپ نمودن) عناصر و ترکیبات مختلف روی  $\text{TiO}_2$

امکان تثبیت هم زمان فتوکاتالیست های  $\text{TiO}_2$  و  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  روی فوم شیشه به روش آغشته سازی (impregnation) به منظور بهبود کارایی فرایند است. هدف از این مطالعه حذف فتوکاتالیستی بنزن از هوا با استفاده از  $\text{TiO}_2$ - $\text{Bi}_2\text{O}_3$  پوشش داده شده روی فوم شیشه است.

### مواد و روش‌ها

مواد و وسائل: نانوذرات تیتانیوم دی اکسید ( $\text{TiO}_2$ ) آناتاز با اندازه ذرات ۱۸ nm و شکاف انرژی ۳/۲ eV و نانوذرات اکسید بیسموت ( $\text{Bi}_2\text{O}_3$ ) با اندازه ذرات ۸۰ nm و شکاف انرژی ۲/۸ eV (هر دو با خلوص درصد ۹۹/۹ ساخت شرکت US Nano)، و بنزن (شرکت مرک) و فوم شیشه در این مطالعه مورد استفاده قرار گرفتند. لامپ UV-A با طول موج ۳۶۵ nm و توان ۱۶ W به طول ۲۰ cm و قطر ۱۹ mm و لامپ مرئی (فیلمان تنگستن) با توان ۱۶ W و قطر ۱۶ mm (هر دو مدل فیلیپس) بعنوان منبع تابش نور استفاده شدند. از یک اتاقک شیشه ای درپوش دار به ابعاد ۶۰ × ۳۰ × ۴۰ cm به حجم ۷۲ L بعنوان فضای بسته استفاده شد. به منظور حفاظت در برابر تابش فرابنفش و همچنین بازتاب نور، اتاقک با فویل آلومینیومی پوشانده شد. به منظور تبخیر و پخش بخارات بنزن در اتاقک از یک هیتر برقی ۲۰۰ W مجهز به ترموستات و یک مینی فن استفاده شد. دستگاه قرائت مستقیم دما، رطوبت و  $\text{CO}_2$  مدل TES1370 در داخل اتاقک قرار داده شد. از یک لوله کوارتزی به قطر ۱ cm و طول ۱۵ cm با قابلیت اتصال به پمپ هوا بعنوان راکتور (نگهدارنده بسترکاتالیست) استفاده شد. به این دلیل لوله کوارتز انتخاب شد که می تواند نور فرابنفش را عبور دهد و به سطح فتوکاتالیست برساند. از یک پمپ هوا با دبی ۴ L/min جهت عبور دادن هوا در بستر کاتالیست استفاده شد. از دستگاه UV سنج لوترون مدل UV340-A جهت اندازه گیری شدت تابش فرابنفش در سطح راکتور استفاده شد. کلیدهای روشن و خاموش نمودن کلید و وسائل در بیرون اتاقک قرار داده شد. دستگاه کروماتوگرافی

با هدف کاهش شکاف انرژی به منظور استفاده از نور مرئی یا انرژی خورشیدی ( $h\nu < 2/3 \text{ eV}$ ) انجام شده است (۱۵). گزارش شده است با اینکه اتم های نشانده شده (دوپانت ها) موجب جابجائی نوار جذبی به ناحیه مرئی می شوند اما کارایی کوانتومی  $\text{TiO}_2$  کاهش می یابد که علت آن ترکیب مجدد الکترون - حفره در مکان های استقرار دوپانت ها است (۱۶). روش هائی برای بهبود خواص فتوکاتالیستی  $\text{TiO}_2$  از طریق جداسازی الکترون - حفره مورد مطالعه قرار گرفته است. یکی از این روش ها بارگذاری بیسموت (Bi) بصورت اکسید ( $\text{Bi}_2\text{O}_3$ ) روی سطح آن است (۱۷). شکاف انرژی در  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  ۲/۹ eV است که با تابش نور مرئی برانگیختگی صورت می گیرد (۱۸). حضور  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  در سطح  $\text{TiO}_2$  سرعت اکسیداسیون را افزایش می دهد زیرا واکنش فتوکاتالیستی در حضور نور مرئی را امکان پذیر می سازد. از طرف دیگر،  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  نسبتاً ارزاتر و دارای سمیت کمتری است (۱۹). با توجه به اینکه  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  یک نیمه هادی نوع p با تحرک حفره بالا و  $\text{TiO}_2$  یک نیمه هادی نوع n است لذا انتقال الکترونی بین این دو صورت می گیرد که موجب جلوگیری از ترکیب مجدد الکترون - حفره می شود. بنابراین افزودن  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  به  $\text{TiO}_2$  می تواند منجر به بهبود راندمان فرایند فتوکاتالیستی و افزایش حذف آلاینده ها شود (۲۰، ۲۱). در فرایندهای فتوکاتالیستی لازم است از یک ماده بی اثر جهت بی تحرک سازی و تثبیت نانوذرات فتوکاتالیست استفاده شود، لذا استفاده از ماده ای که ویژگی های لازم برای این کار را داشته باشد مهم است (۲۲). اخیراً مطالعاتی درباره استفاده از فوم شیشه بعنوان ماده نگهدارنده جهت تثبیت فتوکاتالیست انجام شده است (۲۳). فوم شیشه ماده ای سبک و متخلخل، مقاوم در برابر سایش و خرد شدن، عایق گرما و صدا، مقاوم در برابر اسید، دارای سطح ناصاف و زبری مناسب برای چسبیده شدن محکم لایه فتوکاتالیست روی آن است (۲۴).

ضرورت انجام این مطالعه بهبود حذف فتوکاتالیستی بنزن از هوا است زیرا ترکیب مجدد الکترون - حفره در  $\text{TiO}_2$  موجب کاهش کارایی حذف بنزن می شود و سوال پژوهشی این مطالعه

گازی (GC-FID) مدل CHROMPACK به منظور تعیین غلظت بنزن مورد استفاده قرار گرفت.

روش پوشش دهی فتوکاتالیست روی فوم شیشه: در این مطالعه کلوخه‌های فوم شیشه (قطر ۲-۴ mm) با استفاده از  $TiO_2$  و  $Bi_2O_3$  به روش آغشته سازی (impregnation) و سپس کلسینه کردن پوشش دهی شدند. به این منظور ۰/۵ g  $TiO_2$  و ۰/۵ g  $Bi_2O_3$  به ۵۰ mL محلول آب - اتانول (۱ به ۱) اضافه شد و به مدت ۳۰ min روی همزن مغناطیسی ۸۰ rpm قرار گرفت و در مرحله بعد ۵ g از کلوخه فوم شیشه به آن اضافه و به مدت ۳ h به آرامی مخلوط شد. سپس به مدت ۲۴ h در داخل آون با دمای  $100^\circ C$  قرار گرفت تا خشک گردید و بعد از آن به مدت ۳ h در کوره در دمای  $450^\circ C$  جهت کلسینه شدن قرار گرفت. برای پوشش دهی فوم شیشه با هر کاتالیست بصورت جداگانه، ۰/۵ g  $TiO_2$  و ۰/۵ g  $Bi_2O_3$  به ۵۰ mL محلول آب- اتانول (۱ به ۱) اضافه شد و بقیه مراحل مطابق روش فوق به انجام رسید.

روش آزمایش فرایند فتوکاتالیستی: در هر سری آزمایش بصورت جداگانه بستر مورد استفاده در لوله کوارتزی ۳ g فوم شیشه پوشش داده شده با کاتالیست بود شامل: فوم شیشه پوشش داده شده با تیتانیوم دی اکسید ( $FG/TiO_2$ )، فوم شیشه پوشش داده شده با بیسموت اکسید ( $FG/Bi_2O_3$ ) و فوم شیشه پوشش شده با کامپوزیت دو فتوکاتالیست ( $FG/TiO_2-Bi_2O_3$ ). همچنین لوله کوارتزی حاوی فوم شیشه فاقد کاتالیست (FG) تحت تابش فرابنفش و مرئی نیز بعنوان شاهد مورد آزمایش قرار گرفتند.

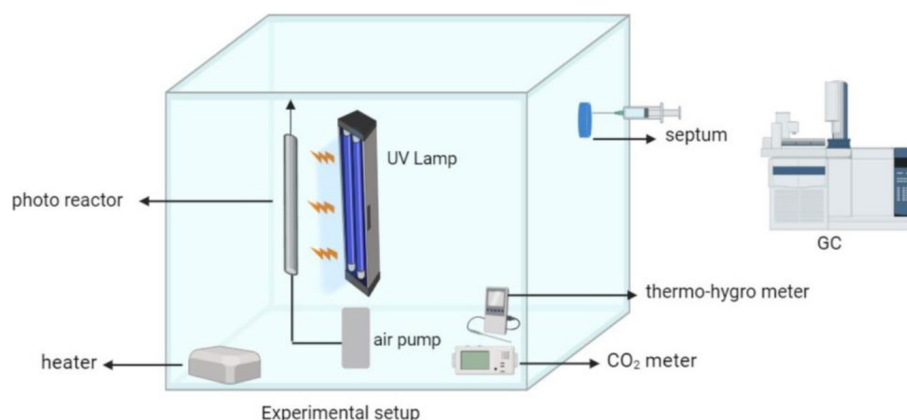
راکتور حاوی کاتالیست به پمپ هوا متصل و لامپ های UV و مرئی در فاصله ۱ cm از آن در داخل اتاقک نصب شدند. پس از اطمینان از عدم نشت گاز در اتاقک، در دفعات متفاوت حجم های معین (۲۰۰ و ۵۰ و  $10 \mu L$ ) بنزن با استفاده از سرنگ GC از طریق سیتوم به داخل آن تزریق شد. هیتر برقی گرمای لازم برای تبخیر و همچنین فن گردش هوا جهت پخش بنزن در اتاقک را ایجاد نمود. پس از تزریق بنزن و توقف ۱۰ min

به منظور تبخیر و یکنواخت شدن بنزن، نمونه برداری از هوای اتاقک انجام و غلظت بنزن مورد آنالیز قرارگرفت که به این صورت غلظت اولیه بنزن ۳۹، ۱۹۵ و ۷۸۰ ppm تعیین شد. دمای داخل اتاقک  $40^\circ C$  و رطوبت نسبی ۳۰ درصد اندازه گیری شد. جهت تعیین میزان جذب سطحی بنزن، عبور هوا از راکتور به مدت ۲ h بدون روشن نمودن لامپ (در تاریکی) انجام شد. سپس با روشن نمودن لامپ فرایند فتوکاتالیستی آغاز می‌شد. شدت تابش فرابنفش در سطح لوله کوارتر حاوی بستر کاتالیست  $2/3 \text{ mw/cm}^2$  اندازه گیری شد.

در زمان تماس های مختلف (۹۰-۳۰ min)، با استفاده از سرنگ ۱ mL GC هوا از طریق سیتوم از اتاقک نمونه برداری می شد و با استفاده از دستگاه کروماتوگرافی گازی (GC-FID) مدل Chrompack به منظور تعیین غلظت بنزن مورد آنالیز قرار گرفت. به منظور تعیین میزان جذب یا تجزیه بنزن در شرایط فاقد کاتالیست آزمایشات کنترل با استفاده از لوله کوارتر حاوی فوم شیشه بدون کاتالیست با تابش فرابنفش و مرئی انجام شد. به منظور تعیین میزان جذب سطحی بنزن آزمایشات بدون تابش فرابنفش یا مرئی (در شرایط تاریکی) نیز انجام شد. ستون (column) آنالیز BTEX، به طول ۶۰ m، قطر داخلی ۰/۲۵ mm و ضخامت لایه نازک  $0.25 \mu m$  مورد استفاده قرار گرفت. شرایط آنالیز شامل دمای تزریق  $260^\circ C$ ، دمای آشکارساز  $280^\circ C$  و جریان گاز هیدروژن  $30 \text{ mL/min}$  ایجاد شد. برنامه ریزی دمائی دستگاه از  $40^\circ C$  (ایزوترمال به مدت ۱ min) شروع شد، سپس با سرعت  $15^\circ C/\text{min}$  (ایزوترمال به مدت ۴ min) به  $90^\circ C$  افزایش یافت و با سرعت  $10^\circ C/\text{min}$  تا  $170^\circ C$  (ایزوترمال به مدت ۴ min) گرم شد. دستگاه با استفاده از چهار غلظت استاندارد کالیبره شد (۲۵).

تعیین خصوصیات فوم شیشه پوشش داده شده با  $TiO_2-Bi_2O_3$  خصوصیات فوم شیشه پوشش داده شده با کاتالیست های مورد نظر با انجام آزمون های XRD، SEM، BET مشخص شد.

ایزوترم BET در دمای ۷۷ K (۷۷ کلوین) با استفاده از دستگاه آنالیز مساحت سطح ویژه و اندازه منافذ مدل BELSORP MR1 بدست آمد. آنالیز XRD توسط دستگاه پراش سنج اشعه ایکس مدل Shimadzu 7000 انجام شد. مورفولوژی سطح با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) شده است.



شکل ۱- شماتیک سیستم راکتور فتوکاتالیستی مورد آزمایش

پس از به تعادل رسیدن جذب سطحی است. با انجام جابجائی معادله ۳ بدست می آید.

$$\frac{1}{N_{ads}} = \frac{1}{N_t} + \frac{1}{N_t \cdot K} \frac{1}{C_e} \quad (3)$$

سینتیک فرایند اکسیداسیون فتوکاتالیستی معمولاً با استفاده از رابطه (L-H) Langmuir-Hinshelwood (معادله ۴) توصیف می شود.

$$r = k \frac{K_B C_B}{(1 + K_B C_B)} \quad (4)$$

در معادله ۴،  $r$  نشان دهنده سرعت واکنش ( $\text{mg/m}^3 \cdot \text{min}$ )،  $k$  برابر با ثابت سرعت واکنش ( $\text{mg/m}^3 \cdot \text{min}$ )،  $C_B$  غلظت بنزن

جذب سطحی و سینتیک واکنش

میزان پوشش سطحی ( $\Theta$ ) مولکول های جذب شونده روی مکان های فعال در سطح فتوکاتالیست با معادله ۱ تعریف می شود:

$$\Theta = \frac{N_{ads}}{N_t} \quad (1)$$

با فرض کاربرد مدل جذب سطحی Langmuir در مورد جذب سطحی مولکول های گاز روی سطح فتوکاتالیست معادله ۲ را می توان نوشت:

$$\Theta = \frac{N_{ads}}{N_t} = \frac{K C_e}{1 + K C_e} \quad (2)$$

در معادله ۲،  $K$  ثابت جذب سطحی و  $C_e$  غلظت باقیمانده ماده

( $\text{mg}/\text{m}^3$ ) و KB برابر با ثابت جذب سطحی بنزن ( $\text{mg}/\text{m}^3$ ) است.

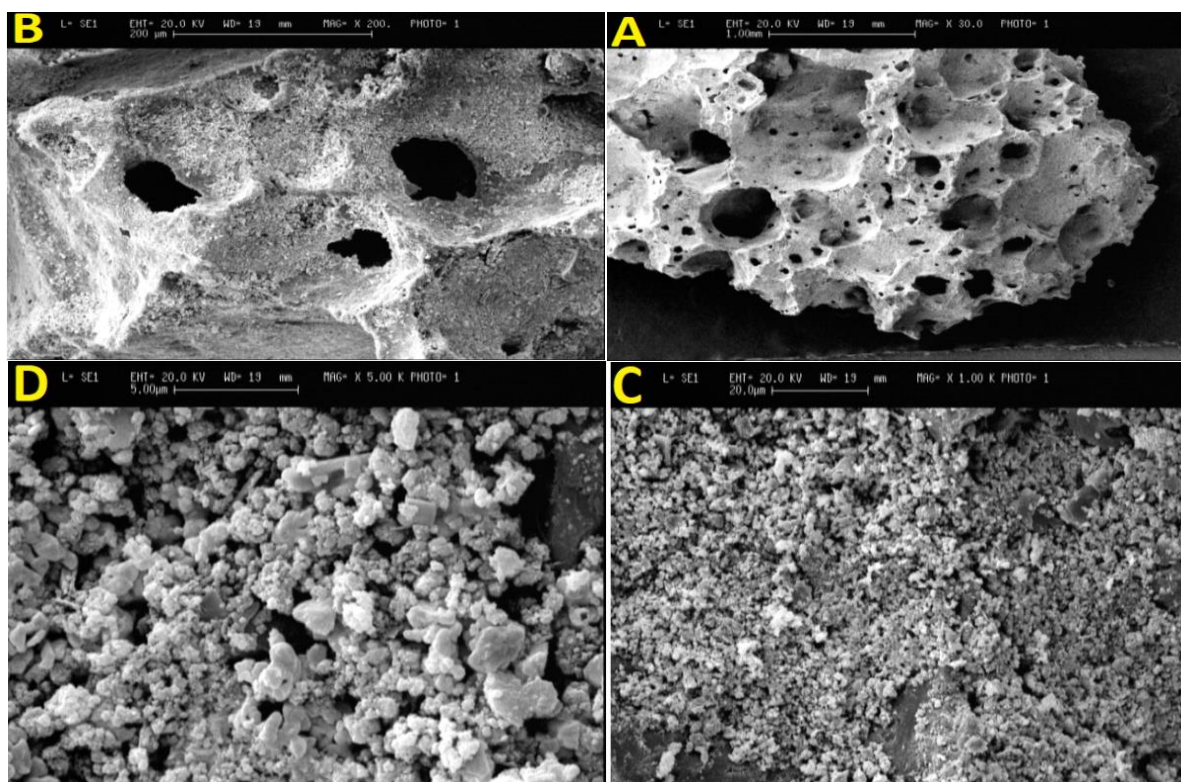
### یافته‌ها

در این مطالعه از فوم شیشه برای تثبیت  $\text{TiO}_2$ ،  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  و  $\text{TiO}_2\text{-Bi}_2\text{O}_3$  استفاده شد و اثر پارامترهای غلظت بنزن، زمان تابش، نوع تابش و نوع کاتالیست در حذف بنزن مورد بررسی قرار گرفت. به منظور مشخص نمودن خصوصیات سطح (موفولوژی) فوم شیشه حاوی کاتالیست، تصاویر میکروسکوپ الکترونی (SEM) تهیه شد. همچنین به منظور تعیین سطح ویژه، اندازه، حجم و توزیع حفره ها، آزمون BET انجام شد. آزمون XRD

به منظور مشخص نمودن حضور فتوکاتالیست روی سطح فوم شیشه انجام شد.

در شکل ۲ تصاویر میکروسکوپ الکترونی با بزرگنمایی های مختلف از فوم شیشه پوشش داده شده با دو فتوکاتالیست ( $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ ) نشان داده شده است.

در تصویر A شکل ۲ که با بزرگنمایی  $\times 300$  است، وجود منافذ در فوم شیشه دیده می شود. تصویر B که با بزرگنمایی  $\times 2000$  است ایجاد پوشش فتوکاتالیست روی سطح فوم شیشه را نشان می دهد. تصاویر C و D با بزرگنمایی های  $\times 10000$  و  $\times 50000$  پوشش نسبتاً یکنواخت فتوکاتالیست روی سطح فوم شیشه را نشان می دهند.



شکل ۲- تصاویر SEM از فوم شیشه پوشانده شده با کامپوزیت  $\text{TiO}_2\text{-Bi}_2\text{O}_3$  با بزرگنمایی های مختلف به ترتیب A: ۳۰ برابر، B: ۲۰۰ برابر، C: ۱۰۰۰ برابر، D: ۵۰۰۰ برابر

حدود ۶۴ nm است که وجود منافذ مزوپور را تأیید می کند. در جدول ۱ خصوصیات فوم شیشه پوشانده شده با کاتالیست های مورد آزمایش آورده شده است.

آنالیز ایزوترم BET مربوط به جذب سطحی گاز نیتروژن در دمای ۷۷ K روی فوم شیشه پوشانده شده با کامپوزیت  $\text{TiO}_2\text{-Bi}_2\text{O}_3$  نشان می دهد سطح ویژه  $36 \text{ m}^2/\text{g}$ ، حجم کل منافذ  $0.05 \text{ cm}^3/\text{g}$  و میانگین قطر منافذ

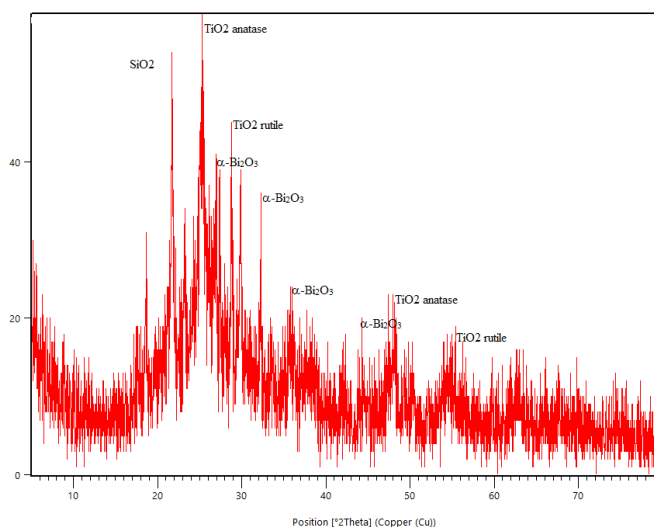
جدول ۱- خصوصیات فوم شیشه پوشانده شده با کاتالیست های مورد آزمایش

| نوع بستر                                 | سطح ویژه ( $\text{m}^2/\text{g}$ ) | حجم کل منافذ ( $\text{cm}^3/\text{g}$ ) | میانگین قطر منافذ (nm) |
|------------------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------------|------------------------|
| FG                                       | ۸۸/۴                               | ۰/۱۱                                    | ۱۰۰                    |
| FG/ $\text{TiO}_2$                       | ۴۵                                 | ۰/۰۵۵                                   | ۵۳                     |
| FG/ $\text{Bi}_2\text{O}_3$              | ۴۲                                 | ۰/۰۷                                    | ۶۰                     |
| FG/ $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ | ۳۶/۲                               | ۰/۰۵                                    | ۶۴                     |

فوم شیشه پوشیده شده با  $\text{TiO}_2\text{-Bi}_2\text{O}_3$  نشان داده شده است. می توان وجود پیک پهن در محدوده زاویه  $18.2^\circ$  تا  $33^\circ$  را به سیلیس آمورف با گروه سیلانول ( $\text{Si-OH}$ ) در فوم شیشه نسبت داد (۲۷). همچنین فازهای نیمه کریستالی با پیک های ضعیف در فوم شیشه مورد آزمایش مشاهده می شود. پیک های در  $2\theta$  از  $25^\circ$  ( $101$ ) و  $48^\circ$  ( $101$ ) وجود  $\text{TiO}_2$  فاز آاناتاز را نشان می دهند در حالی که پیک های  $27^\circ$  ( $110$ ) و  $54^\circ$   $\text{TiO}_2$  فاز روتیل را نشان می دهند (۲۸). همچنین وجود پیک ها در زاویه  $29^\circ$  و  $32^\circ$  به  $\alpha\text{-Bi}_2\text{O}_3$  و پیک های  $33^\circ$  و  $46^\circ$  به  $\beta\text{-Bi}_2\text{O}_3$  نسبت داده می شود (۲۹).

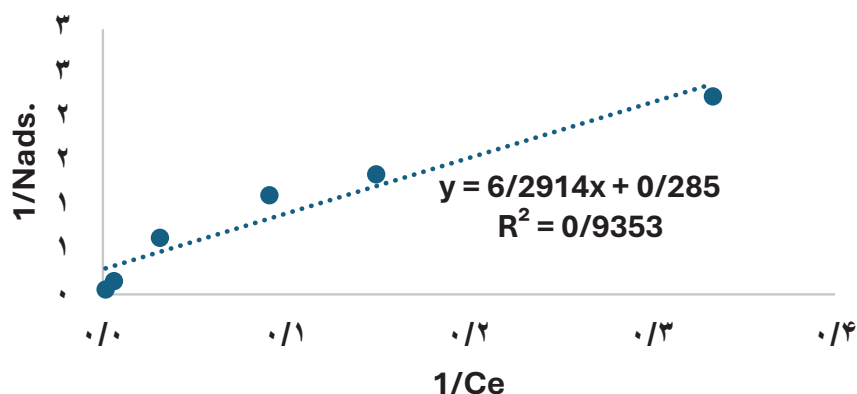
ایزوترم جذب- واجذب نیتروژن مربوط به فوم شیشه پوشانده شده با  $\text{TiO}_2\text{-Bi}_2\text{O}_3$  تعیین گردید. ایزوترم جذب بدست آمده به صورت ترکیبی از ایزوترم نوع I (جذب سطحی گاز در فشار پائین) و ایزوترم نوع IV (در محدوده فشار متوسط) بر اساس طبقه بندی IUPAC است.

جهت تعیین میزان یکنواختی حفره های فوم شیشه پوشش داده شده با فتوکاتالیست و توزیع اندازه حفره ها از آنالیز BJH استفاده گردید که توزیع اندازه حفره ها را در محدوده ۱ تا ۱۰۰ nm با میانگین قطر حفره ۶۴ nm را نشان می دهد (۲۶). در شکل ۳ طیف پراش اشعه ایکس (XRD) مربوط به نمونه



شکل ۳- طیف XRD نمونه فوم شیشه پوشانده شده با  $\text{TiO}_2\text{-Bi}_2\text{O}_3$

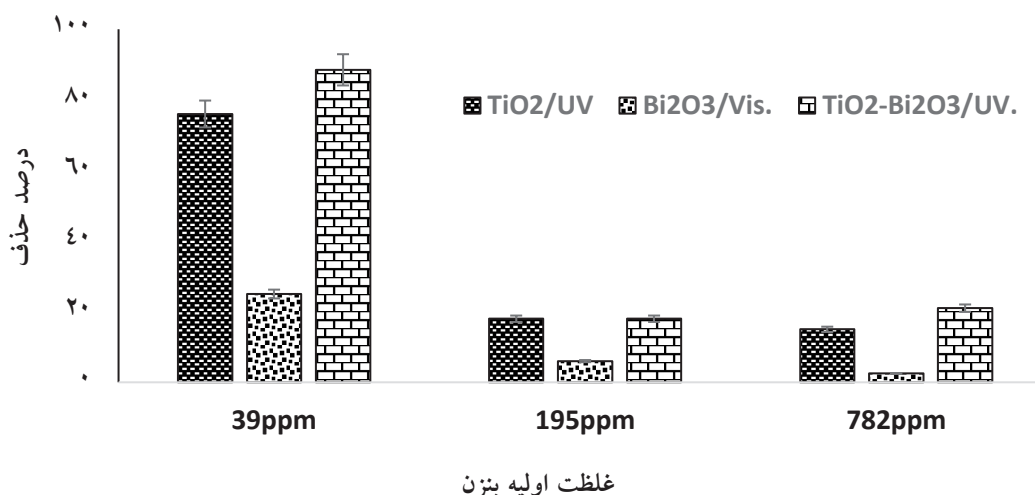
در شکل ۴ ایزوترم لانگمویر برای جذب سطحی بنزن روی فتوکاتالیست  $\text{FG/Bi}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$  نشان داده شده است.



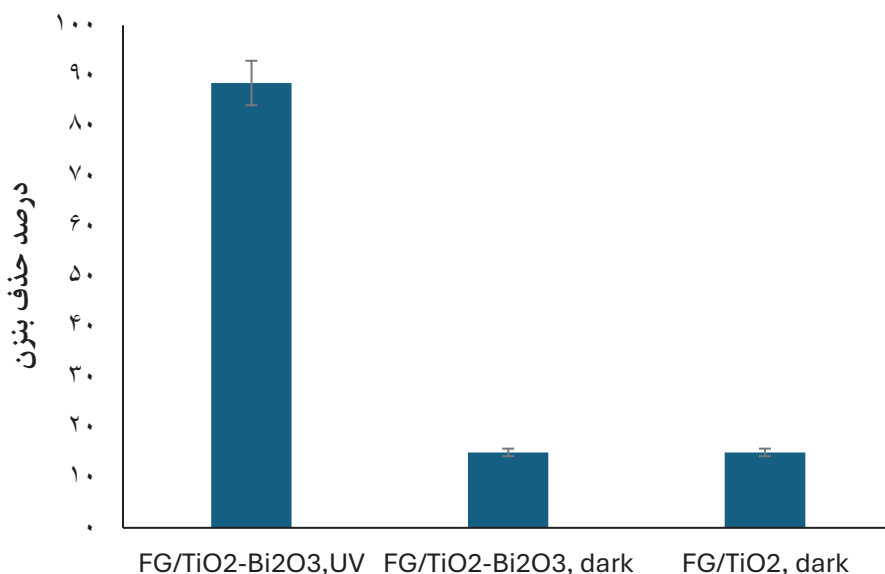
شکل ۴- ایزوترم جذب سطحی بنزن روی  $\text{FG/Bi}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$

که راندمان حذف در غلظت ۳۹ ppm برابر با ۲۶ درصد، در ۱۹۵ ppm برابر با ۶ درصد و در غلظت ۷۸۲ ppm برابر با ۲/۵ درصد بدست آمد. با استفاده از کاتالیست  $\text{TiO}_2\text{-Bi}_2\text{O}_3$  و تابش فرابنفش، نتایج نشان می دهد که راندمان حذف در غلظت ۳۹ ppm برابر با ۸۸ درصد، در غلظت ۱۹۵ ppm برابر با ۱۸ درصد و در غلظت ۷۸۲ ppm برابر با ۲۱ درصد بود.

در شکل ۵ حذف غلظت های مختلف بنزن با استفاده از کاتالیست های مختلف پوشش داده شده روی فوم شیشه در زمان تابش ۷۵ min نشان داده شده است. ملاحظه می شود که با استفاده از کاتالیست  $\text{TiO}_2$  با تابش فرابنفش راندمان حذف بنزن در غلظت ۳۹ ppm برابر با ۷۶ درصد، ۱۹۵ ppm برابر با ۱۸ درصد و ۷۸۲ ppm برابر با ۱۵ درصد بود. با استفاده از کاتالیست  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  و تابش نور مرئی نتایج نشان می دهد



شکل ۵- اثر نوع کاتالیست بر حذف فتوکاتالیستی غلظت های مختلف بنزن از هوا (دما  $50^\circ\text{C}$ ، زمان تابش ۷۵ min، رطوبت نسبی ۳۰ درصد، دبی پمپ ۴ L/min)

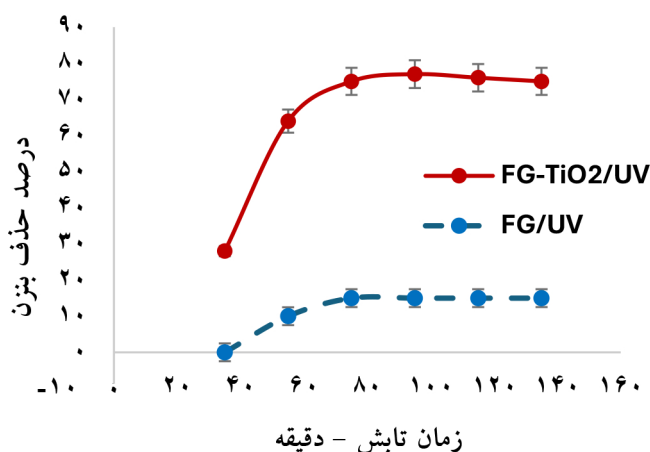


شکل ۶- حذف بنزن با استفاده از فتوکاتالیست کامپوزیت  $\text{FG/Bi}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$  و مقایسه با شاهد (جذب سطحی)

(غلظت ۳۹ ppm، دما ۴۰ °C، رطوبت نسبی ۳۰ درصد، دبی پمپ ۴ L/min)

۸۸ درصد نشان می دهد در حالی که در راکتورهای شاهد فاقد تابش فرابنفش (تاریکی)، حدود ۱۵ درصد حذف مشاهده شد.

شکل ۶ حذف بنزن با غلظت ۳۹ ppm با استفاده از بستر پوشش داده شده با  $\text{TiO}_2\text{-Bi}_2\text{O}_3$  با تابش فرابنفش را بیش از

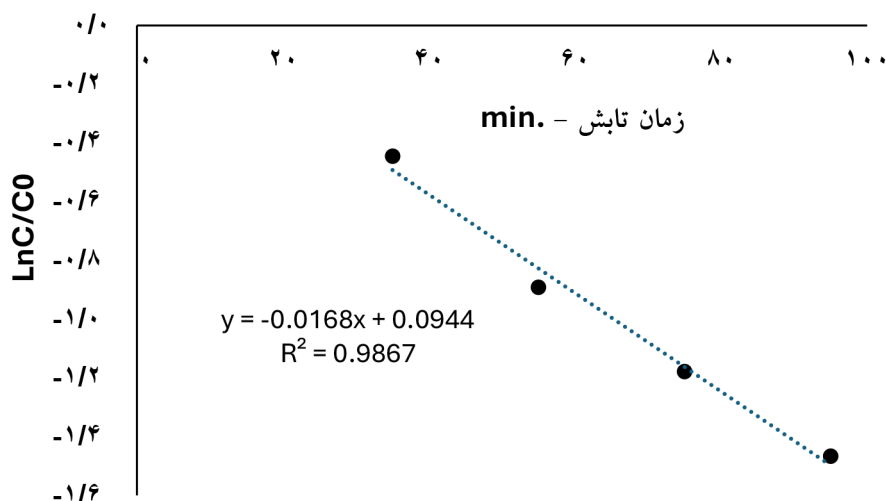


شکل ۷- اثر زمان تابش فرابنفش بر میزان حذف بنزن (۳۹ ppm) با استفاده از فوم شیشه پوشش داده شده با  $\text{TiO}_2$  در

مقایسه با فوم شیشه فاقد کاتالیست (غلظت ۳۹ ppm، دما ۴۰ °C، رطوبت نسبی ۳۰ درصد، دبی ۴ L/min)

در شکل ۷ حذف بنزن با استفاده از فوم شیشه پوشش داده شده با  $\text{TiO}_2$  در مقایسه با فوم شیشه فاقد کاتالیست با تابش فرابنفش نشان داده شده است. همانگونه که ملاحظه می شود حذف بنزن

به میزان ۷۵ درصد با استفاده از فوم شیشه حاوی  $\text{TiO}_2$  با تابش فرابنفش بدست آمده است در حالی که با همین بستر فاقد کاتالیست با تابش فرابنفش راندمان حذف ۱۵ درصد بود.



شکل ۸- سینتیک فرایند فتوکاتالیستی حذف بنزن (۳۹ ppm) توسط  $\text{TiO}_2\text{-Bi}_2\text{O}_3$  پوشش داده شده روی فوم شیشه

در شکل ۸ نمودار سینتیک درجه یک برای فرایند حذف فتوکاتالیستی بنزن از هوا با کاربرد فتوکاتالیست کامپوزیت  $\text{TiO}_2\text{-Bi}_2\text{O}_3$  پوشش داده شده روی فوم شیشه نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می شود ایجاد خط راست با  $R^2 = 0.9867$  نشان دهنده تبعیت سینتیک فرایند از مدل سینتیکی درجه یک می باشد.

## بحث

ایزوترم جذب - واجذب نیتروژن در دمای ۷۷ K مربوط به نمونه های فوم شیشه پوشش داده شده با  $\text{TiO}_2\text{-Bi}_2\text{O}_3$  نشان دهنده وجود حلقه هیسترسیس و تأیید کننده این موضوع است که ایزوترم بصورت ترکیبی از نوع یک و نوع چهار بر اساس طبقه بندی IUPAC است (۲۷). بر اساس طبقه بندی IUPAC از شش نوع حلقه هیسترسیس شناسائی شده، نمودار نشان داده شده در شکل ۴ از نوع  $H_3$  بوده و نشان

دهنده وجود مزوحفره (۲ تا ۵۰ nm) در فوم شیشه است، در حالی که ایزوترم نوع I مشخصه مواد ریز متخلخل با جذب قابل توجه در ریز منافذ در فشارهای نسبی کم است؛ ایزوترم نوع IV مشخصه مواد با منافذ ساین متوسط (مزوپور) است که در آن عمل تراکم فاز بخار در منافذ میکرو اتفاق می افتد (۳۰). در مطالعه ای نمونه های آناتاز  $\text{TiO}_2$  دوپ شده با  $\text{Bi}^{3+}$  به روش سنتز هیدروترمال سل-ژل تهیه شد. نتایج آزمون های تعیین خصوصیات نشان می دهد که یون های دوپ شده  $\text{Bi}^{3+}$  فاز آناتاز  $\text{TiO}_2$  را تغییر نمی دهند. یافته های این مطالعه نشان داد که تخریب فتوکاتالیستی فنل توسط نور UV-vis با استفاده از  $\text{TiO}_2$  دوپ شده با ۵ درصد وزنی  $\text{Bi}^{3+}$ ، کلسینه شده در دمای  $600^\circ\text{C}$  با درجه معدنی سازی نزدیک به ۱۰۰ درصد دارای راندمان بالاتری نسبت به  $\text{TiO}_2$  بوده است که با یافته های مطالعه حاضر همخوانی دارد (۳۱). در یک مطالعه روش هیدروترمال دو مرحله ای برای سنتز

دارای ساختار کریستالی آنتاز بدون ناخالصی است. با توجه به نتایج مطالعات فوتوکاتالیستی، کاتالیزور  $\text{Bi-TiO}_2$  فعالیت کاتالیزوری بهبود یافته ای را در تخریب برای MB نشان داد و گسترش دامنه پاسخ طیفی را نشان داد که به ناحیه مرئی منتقل شده است. تخریب MB در حضور  $\text{Bi-TiO}_2$  پس از ۱۸۰ min تابش نور مرئی به ۷۰٪ درصد رسید. کاهش قابل توجهی در فعالیت کاتالیزوری MB در طول پنج چرخه در تست قابلیت استفاده مجدد مشاهده نشد، که نشان می‌دهد کاتالیزور  $\text{Bi-TiO}_2$  در طول زمان، پایداری و عملکرد خود را بخوبی حفظ می‌کند (۲۱).

حذف فوتوکاتالیستی بنزن (۱۶۰ ppm) از هوا با استفاده از کامپوزیت  $\text{Bi}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$  با تابش نور مرئی (۵۰۰ W) مورد بررسی قرار گرفت. مقدار ۱/۳۵ g فوتوکاتالیست کامپوزیتی (به قطر دانه های ۰/۲۱ تا ۰/۲۵ mm) در یک فتوراکتور کوارتز به ابعاد ۰/۱×۳×۴ cm قرار داده شد. مقادیر  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  در کامپوزیت ۵، ۱۰، ۲۰، ۵۰ و ۶۵ درصد جداگانه تهیه و مورد آزمایش قرار گرفت. با استفاده از کامپوزیت حاوی ۱۰ درصد اکسید بیسموت و تابش نور مرئی به مدت ۵ h، راندمان حذف بنزن به حدود ۷۵ درصد رسید و غلظت  $\text{CO}_2$  تولید شده به حدود ۲۰۰ ppm افزایش یافت. در حالی که در همین شرایط با تابش فرابنفش، حداکثر راندمان حذف بنزن حدود ۱۵ درصد بود که موجب تولید ۸۰ ppm  $\text{CO}_2$  گردید. با افزایش درصد بیسموت راندمان حذف بنزن کاهش یافت و در کامپوزیت حاوی ۶۵ درصد اکسید بیسموت راندمان حذف بنزن به کمتر از ۵ درصد رسید. آزمایشات در شرایط مشابه با استفاده از کاتالیست  $\text{TiO}_2$  (P25) و تابش فرابنفش نیز انجام شد که نشان داد راندمان حذف بنزن حدود ۵ درصد با تابش فرابنفش به مدت ۸ h بود که غلظت  $\text{CO}_2$  تولید شده به حدود ۲۵ ppm رسید. با استفاده از  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  و تابش نور مرئی حذف بنزن مشاهده نشد. در مطالعه حاضر نیز حذف بنزن توسط  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  با تابش نور مرئی مورد آزمایش قرار گرفت که کارایی قابل توجهی نداشته است که با یافته های مطالعات قبلی در

فوتوکاتالیست ناهمگون  $\text{Bi}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$  مورد استفاده قرار گرفت. با کاربرد دوزهای مختلف  $\text{LiOH}$ ،  $\text{TiO}_2$  بصورت میله های عمودی شاخه دار روی شیشه هادی الکتریسیته (FTO) رشد نمود، بگونه ای که نانوذرات  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  روی شاخه های  $\text{TiO}_2$  قرار گرفته بودند. فوتوکاتالیست  $\text{TiO}_2\text{-Bi}_2\text{O}_3$  فعالیت فوتوکاتالیستی بالاتری را با پایداری بالا در زیر نور مرئی نشان داد که بسیار بالاتر از  $\text{TiO}_2$  و  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  خالص بود (۱۷) که در مطالعه حاضر نیز استفاده از  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  به همراه  $\text{TiO}_2$  موجب افزایش حدود ۱۵ درصدی کارایی حذف بنزن شده است.

در مطالعه دیگری عملکرد فوتوکاتالیستی نانوذرات ZnO دوپ شده با Bi برای تخریب چهار رنگ آلی تحت نور خورشید مورد بررسی قرار گرفت. عملکرد فوتوکاتالیستی نانوذرات ZnO دوپ شده با Bi برای تخریب آلاینده های برموتیمول بلو و اریوکروم بلک T بهتر از متیل رد و بروموکروزول گرین بود. علیرغم همه اینها، نانوذرات ZnO دوپ شده با Bi می توانند تمام رنگ های آزمایش شده را با کارایی بالا و بدون هیچ عامل کمکی حذف کنند (۲۸).

در یک مطالعه فوتوکاتالیست  $\text{Gd-Bi}_2\text{O}_3$  در مقایسه با  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  فاقد Gd، کارایی فوتوکاتالیستی بیشتری در جهت تخریب رنگ‌ها تحت تابش فرابنفش نشان داد. افزایش فعالیت فوتوکاتالیستی  $\text{Gd-Bi}_2\text{O}_3$  به کاهش شکاف انرژی در  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  بواسطه دوپ شدن  $\text{Gd}^{3+}$  نسبت داده شد (۳۲).

در مطالعه دیگری گزارش شده است که فعالیت فوتوکاتالیست  $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2/\text{Bi}_2\text{O}_3$  بیشتر از  $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$ ،  $\text{Bi}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$  و  $\text{TiO}_2$  خالص بود. فعالیت فوتوکاتالیستی بیشتر کامپوزیت به دلیل وجود  $\text{SiO}_2$  (موجب افزایش سطح تماس و گروه های هیدروکسیل) و همچنین تشکیل اتصالات ناهمگون بین  $\text{TiO}_2$  و  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  و افزایش کارایی جداسازی الکترون-حفره نسبت داده شده است (۲۰).

در یک مطالعه فوتوکاتالیست  $\text{TiO}_2$  دوپ شده با بیسموت ( $\text{Bi-TiO}_2$ ) با موفقیت با استفاده از روش سل-ژل به کمک سورفاکتانت تهیه شد. مشخص شد که کاتالیزور  $\text{Bi-TiO}_2$

این زمینه مطابقت دارد.

در یک مطالعه فتوکاتالیست کامپوزیت ناهمگون در نسبت های مختلف Bi/Ti با اضافه نمودن مقادیر مختلف  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  به کلونید  $\text{TiO}_2$  تهیه شد. مشخص شد که بارگذاری بیش از ۵ درصد مولی  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  می تواند منجر به تشکیل  $\text{Bi}_x\text{TiO}_y$  شود. داده های XRD نشان داد که  $\text{Bi}_x\text{TiO}_y$  تادمای  $500^\circ\text{C}$  آمورف باقیمانده و در دمای بالاتر  $700^\circ\text{C}$  به فاز متمایز  $\text{Bi}_2\text{Ti}_4\text{O}_{11}$  متبلور می شود. علاوه بر این، دمای کلسینه نیز تأثیر مهمی بر فعالیت فتوکاتالیستی داشت. مشخص شد که  $\text{TiO}_2$  حاوی ۱۰ درصد مولی Bi کلسینه شده در دمای  $400^\circ\text{C}$ ، بهترین فعالیت فتوکاتالیستی را نشان داد. ریزساختارهای آمورف  $\text{Bi}_x\text{TiO}_y$  تشکیل شده در کریستال  $\text{TiO}_2$  سهم قابل توجهی در ایجاد سطح ویژه بیشتر و افزایش فعالیت فتوکاتالیستی دارند. Zuo و همکاران (۲۷) اشاره کردند که دوپ نمودن بیسموت باعث می شود که  $\text{TiO}_2$  با یون های  $\text{Bi}^{3+}$  واکنش داده و  $\text{Bi}_x\text{TiO}_y$  را تولید کند که منجر به کاهش شکاف انرژی می شود و انرژی آستانه برای فعال سازی نور کاهش می یابد و به طور بالقوه باعث افزایش فعالیت فتوکاتالیستی می شود. Xu و همکاران فعالیت فتوکاتالیستی بیشتر در  $\text{TiO}_2$  دوپ شده با Bi بالاتر از ۱ درصد را به تشکیل فاز  $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$  در  $\text{TiO}_2$  نسبت دادند. Mazurkevich و همکار (۲۹) گزارش نمودند که کاهش فعالیت فتوکاتالیستی در غلظت های زیاد  $\text{Bi}_2\text{O}_3$ ، ممکن است به دلیل تشکیل تیتانات های بیسموت باشد که فعالیت فتوکاتالیستی کمتری دارند.

## نتیجه گیری

در این مطالعه حذف بنزن در غلظت اولیه ۳۹ ppm از هوا طی

فرایند فتوکاتالیستی با استفاده از کامپوزیت  $\text{TiO}_2\text{-Bi}_2\text{O}_3$  پوشش داده شده روی فوم شیشه تحت تابش فرابنفش (UV-A) حدود ۹۰ درصد بدست آمد و در مقایسه با فوم شیشه  $\text{TiO}_2$  که ۷۵ درصد بود حدود ۱۵ درصد بیشتر است که علت آن را می توان به جلوگیری از ترکیب مجدد الکترون-حفره توسط  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  نسبت داد. همچنین حذف بنزن طی فرایند جذب سطحی توسط  $\text{TiO}_2$  و  $\text{TiO}_2\text{-Bi}_2\text{O}_3$  پوشش داده شده روی فوم شیشه حدود ۱۵ درصد بدست آمد. با افزایش غلظت بنزن کارایی فرایند کاهش یافت. سینتیک فرایند درجه یک تعیین گردید. از جمله محدودیت های این مطالعه در نظر نگرفتن اثر پارامترهای دما، رطوبت و دوز کاتالیست بر میزان حذف بنزن بود که پیشنهاد می شود در مطالعات بعدی بررسی های بیشتری در این زمینه صورت پذیرد.

## ملاحظات اخلاقی

نویسندگان همه نکات اخلاقی از جمله عدم سرقت ادبی، انتشار دوگانه، تحریف داده ها و داده سازی را در این مقاله رعایت کرده اند. کد اخلاق این تحقیق IR.MAZUMZ.REC.1398.6828 ثبت شده است.

## تشکر و قدردانی

این مقاله حاصل طرح تحقیقاتی با عنوان "حذف بنزن از هوا با استفاده از فتوکاتالیست  $\text{TiO}_2$  بارگذاری شده با  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  با تابش نور مرئی و فرابنفش" با کد ۶۸۲۶ مصوب معاونت تحقیقات و فناوری دانشگاه علوم پزشکی مازندران است که نویسندگان بدین وسیله از آن معاونت محترم تشکر و قدردانی می نمایند.

## References

1. Kumari P, Soni D, Aggarwal SG. Benzene: A critical review on measurement methodology, certified reference material, exposure limits with its impact on human health and mitigation strategies. *Environmental Analysis, Health and Toxicology*. 2024;39(2):e2024012.
2. Masekameni MD, Moolla R, Gulumian M, Brouwer D. Risk assessment of benzene, toluene, ethyl benzene, and xylene concentrations from the combustion of coal in a controlled laboratory environment. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2019;16(1):95.
3. Zare Jeddi M, Yunesian M, Ahmadkhaniha R, Kashani H, Rastkari N. Semi quantitative and quantitative health risk assessment of gas station workers exposure to benzene. *Iranian Journal of Health and Environment*. 2015;8(3):391-400 (in Persian).
4. Mai JL, Yang WW, Zeng Y, Guan YF, Chen SJ. Volatile organic compounds (VOCs) in residential indoor air during interior finish period: Sources, variations, and health risks. *Hygiene and Environmental Health Advances*. 2024;9:100087.
5. Sekar A, Varghese GK, Varma MR. Analysis of benzene air quality standards, monitoring methods and concentrations in indoor and outdoor environment. *Heliyon*. 2019;5(11):e02918.
6. Notario A, Gutierrez Alvarez I, Adame JA. Atmospheric benzene measurements in the main metropolitan and industrial areas of Spain from 2014 to 2017. *Atmospheric Research*. 2020;238:104896.
7. Xu F, Wang B, Hu J, Cai N, Han L, Jiang M, et al. Optimization of benzene exposure risk assessment: An integrated approach utilizing internal and external concentrations with a focus on biomarkers S-PMA & t, t-MA. *Science of the Total Environment*. 2024;926:171719.
8. Mobasser S, Wager Y, Ditttrich TM. Indoor air purification of volatile organic compounds (VOCs) using activated carbon, zeolite, and organosilica sorbents. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2022;61(20):6791-801.
9. Almaie S, Vatanpour V, Rasoulifard MH, Koyuncu I. Volatile organic compounds (VOCs) removal by photocatalysts: A review. *Chemosphere*. 2022;306:135655.
10. Thiruvengkatachari R, Vigneswaran S, Moon IS. A review on UV/TiO<sub>2</sub> photocatalytic oxidation process (Journal Review). *Korean Journal of Chemical Engineering*. 2008;25(1):64-72.
11. Haghighat Mamaghani A, Haghighat F, Lee CS. Photocatalytic oxidation technology for indoor environment air purification: The state-of-the-art. *Applied Catalysis B: Environmental*. 2017;203:247-69.
12. Xiong L, Tang J. Strategies and challenges on selectivity of photocatalytic oxidation of organic substances. *Advanced Energy Materials*. 2021;11(8):2003216.
13. Na Phattalung S, Harding DJ, Pattanasattayavong P, Kim H, Lee J, Hwang DW, et al. Band gap narrowing of TiO<sub>2</sub> nanoparticles: A passivated Co-doping approach for enhanced photocatalytic activity. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*. 2022;162:110503.
14. Rastkari N, Izadpanah F. Photocatalytic removal of formaldehyde from air using titanium oxide-reduced graphene composite. *Iranian Journal*

- of Health and Environment. 2016;9(1):139-46 (in Persian).
15. Imai K, Fukushima T, Kobayashi H, Higashimoto S. Visible light responsive TiO<sub>2</sub> for the complete photocatalytic decomposition of volatile organic compounds (VOCs) and its efficient acceleration by thermal energy. *Applied Catalysis B: Environment and Energy*. 2024;346:123745.
  16. Jiang D, Otitoju TA, Ouyang Y, Shoparwe NF, Wang S, Zhang A, et al. A review on metal ions modified TiO<sub>2</sub> for photocatalytic degradation of organic pollutants. *Catalysts*. 2021;11(9):1039.
  17. Huang Y, Wei Y, Wang J, Luo D, Fan L, Wu J. Controllable fabrication of Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiO<sub>2</sub> heterojunction with excellent visible-light responsive photocatalytic performance. *Applied Surface Science*. 2017;423:119-30.
  18. Ho CH, Chan CH, Huang YS, Tien LC, Chao LC. The study of optical band edge property of bismuth oxide nanowires  $\alpha$ -Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. *Optics Express*. 2013;21(10):11965-72.
  19. Sharma S, Sharma A, Chauhan NS, Tahir M, Kumari K, Mittal A, et al. TiO<sub>2</sub>/Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/PANI nanocomposite materials for enhanced photocatalytic decontamination of organic pollutants. *Inorganic Chemistry Communications*. 2022;146:110093.
  20. Ren C, Qiu W, Zhang H, He Z, Chen Y. Degradation of benzene on TiO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub>/Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub> photocatalysts under UV and visible light. *Journal of Molecular Catalysis A: Chemical*. 2015;398:215-22.
  21. Altın I. Bi doped TiO<sub>2</sub> as a Photocatalyst for enhanced photocatalytic activity. *Sakarya University Journal of Science*. 2023;27(3):660-69.
  22. Goutham R, Badri Narayan R, Srikanth B, Gopinath K. Supporting materials for immobilisation of nano-photocatalysts. In: Inamuddin, Sharma G, Kumar A, Lichtfouse E, Asiri A, editors. *Nanophotocatalysis and Environmental Applications: Materials and Technology*. Switzerland: Springer Cham; 2019. p. 49-82.
  23. Cruz GM, Murr CG, Stafin G, Grzebielucka EC, Borges CPF, Arrua MEP, et al. A novel foam glass obtained from solid waste: A sustainable strategy for application in the degradation of an environmental pollutant. *Ceramics International*. 2022;48(18):26351-60.
  24. Murr CG, Kozlinskei LL, Grzebielucka EC, Borges CP, Arrua MEP, de Souza EC, et al. Foamed glass functionalized with iron compounds: A strategic material for heterogeneous photocatalysis. *Materials Chemistry and Physics*. 2023;304:127880.
  25. Kumari P, Garg G, Soni D, Aggarwal SG. Measurement of benzene and other volatile organic compounds: implications for its inhalation health risk associated with the workers at a fuel station in Delhi. *Asian Journal of Atmospheric Environment*. 2023;17(7):1-11.
  26. Fu S, Fang Q, Li A, Li Z, Han J, Dang X, et al. Accurate characterization of full pore size distribution of tight sandstones by low-temperature nitrogen gas adsorption and high-pressure mercury intrusion combination method. *Energy Sciences & Engineering*. 2021;9(1):80-100.
  27. Zuo H, Sun J, Deng R, Su R, Wei F, Wang D. Preparation and characterization of Bi<sup>3+</sup>-TiO<sub>2</sub> and its photocatalytic activity. *Chemical Technology Engineering*. 2007;30(5):577-82.
  28. Honarmand M, Sanandaji F. Intensified photodegradation of organic dyes using Bi-doped ZnO nanoparticles. *Journal of Geomine*.

- 2023;1(4):159-64.
29. Mazurkevich YS, Kobasa IM. TiO<sub>2</sub>-Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub> materials. *Inorganic Materials*. 2002;38:522-26.
30. Rahman MM, Muttakin M, Pal A, Shafiullah AZ, Saha BB. A statistical approach to determine optimal models for IUPAC-classified adsorption isotherms. *Energies*. 2019;12(23):4565.
31. Murcia Lopez S, Hidalgo M, Navio J. Synthesis, characterization and photocatalytic activity of Bi-doped TiO<sub>2</sub> photocatalysts under simulated solar irradiation. *Applied Catalysis A: General*. 2011;404(1-2):59-67.
32. Dhanasekarana E, Sivakumarb N, Sriharanc N. Enhanced photocatalytic degradation of Gd-doped Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub> for selective dyes under UV light irradiation. *Journal of Optoelectronic and Biomedical Materials*. 2022;14(3):77-87.



Available online: <https://ijhe.tums.ac.ir>

Original Article



## Benzene removal from air using $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ photocatalyst coated on glass foam under ultraviolet light irradiation

Ramazanali Dianati Tilaki<sup>1,\*</sup>, Roghayeh Kaseb<sup>1</sup>, Esmail Babanejad Arimi<sup>1</sup>, Mohammad Dianati<sup>2</sup>

1- Department of Environmental Health Engineering, Faculty of Health, Mazandaran University of Medical Sciences, Sari, Iran

2- Department of Thermokinetics and Catalysis, Faculty of Chemical Engineering, Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

### ARTICLE INFORMATION:

**Received:** 23 July 2025

**Revised:** 15 October 2025

**Accepted:** 20 October 2025

**Published:** 14 December 2025

**Keywords:** Foam glass, Benzene, Air, Photocatalyst,  $\text{TiO}_2\text{-Bi}_2\text{O}_3$

### ABSTRACT

**Background and Objective:** Benzene is a carcinogenic volatile organic compound commonly found in polluted air. This study aimed to remove benzene from air using a  $\text{TiO}_2\text{-Bi}_2\text{O}_3$  composite photocatalyst immobilized on glass foam under ultraviolet (UV) light irradiation.

**Materials and Methods:** Glass foam coated with the  $\text{TiO}_2\text{-Bi}_2\text{O}_3$  composite was placed in a quartz reactor, which was connected to an air pump inside a sealed glass chamber. A UV lamp (254 nm) was installed next to the reactor. Known volumes ( $\mu\text{L}$ ) of benzene were injected into the chamber through a septum. When the pump was activated, benzene-contaminated air passed through the photoreactor. Benzene concentration was measured by collecting air samples from the chamber and analyzing them using a GC-FID device.

**Results:** XRD spectra and SEM images confirmed the presence of  $\text{TiO}_2$  and  $\text{Bi}_2\text{O}_3$ , while BET analysis verified the mesoporous structure of the composite photocatalyst. The surface adsorption of benzene by the composite was 15% and followed the Langmuir model. The process kinetics were first-order, and the removal efficiency decreased with increasing benzene concentration. At a benzene concentration of 39 ppm, the removal efficiency after 75 minutes of  $\text{TiO}_2$  and UV irradiation was 75%, whereas for  $\text{TiO}_2\text{-Bi}_2\text{O}_3$  under similar conditions, the efficiency increased to approximately 90%.

**Conclusion:** Using a  $\text{TiO}_2\text{-Bi}_2\text{O}_3$  composite photocatalyst under UV-A irradiation improved benzene removal efficiency by about 15% compared with  $\text{TiO}_2$  alone.

**\*Corresponding Author:**

dianati.tilaki@gmail.com

Please cite this article as: Dianati Tilaki R, Kaseb R, Babanejad Arimi E, Dianati M. Benzene removal from air using  $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$  photocatalyst coated on glass foam under ultraviolet light irradiation. *Iranian Journal of Health and Environment*. 2025;18(3):489-504.

