

## اثر نانوذرات آهن صفر بر حذف ترکیبات آلی فرار از هوا با استفاده از بستر زئولیت اصلاح‌شده

روح‌اله رستمی<sup>۱</sup>، احمد جنیدی جعفری<sup>۲\*</sup>

۱. کارشناس ارشد مهندسی بهداشت محیط دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی سمنان.

ro.rostamy@gmail.com

۲. دانشیار گروه مهندسی بهداشت محیط دانشگاه علوم پزشکی ایران

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۱/۱۱/۲۴

تاریخ وصول مقاله: ۱۳۹۱/۳/۶

### چکیده

ترکیبات آلی فرار از جمله آلاینده‌های مضر برای سلامت بشر و محیط‌زیست شناخته شده و برخی از آن‌ها عوارضی مانند سرطان‌زایی و جهش‌زایی را نشان داده‌اند. از این رو امروزه این ترکیبات کاربردهای متعددی در محیط زندگی انسان و صنعت دارند، کنترل آلودگی محیط زندگی به این ترکیبات ضرورت یافته است. در این تحقیق استفاده از نانوذرات آهن صفر بر کارایی حذف ترکیبات آلی فرار در بستر زئولیت طبیعی بررسی شد.

زئولیت کلینوپتیلولیت پس از اصلاح اسیدی به‌منزله بستر استفاده و با نانوذرات آهن صفر با گستره اندازه ۳۰-۶۰ نانومتر پوشش داده شد. ترکیبات BTX شامل بنزن، تولوئن و زایلین‌ها به‌منزله شاخص ترکیبات آلی فرار به کار برده شدند. نتایج به‌دست‌آمده نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار در میزان حذف آلاینده‌ها با و بدون استفاده از نانوذرات آهن بود ( $P=0.008$ )، به طوری که میانگین حذف زئولیت بدون نانوذره  $24/84 \pm 43/31$  و در زئولیت حاوی نانوذرات  $83/83 \pm 1/3$  درصد بود. استفاده از نانوذرات آهن موجب تجزیه کامل‌تر ترکیبات آلی فرار در این مطالعه شد و بازده تجزیه کامل ۵۷/۸۲ درصد به دست آمد. طبق نتایج، استفاده از نانوذرات آهن کارایی حذف ترکیبات آلی فرار در زئولیت را افزایش می‌دهد و موجب تجزیه مقدار بیشتری از آلاینده‌ها در واحد حجم زئولیت می‌شود، به طوری که مقدار آلاینده‌هایی را که به طور کامل به دی اکسید کربن تبدیل می‌شوند افزایش می‌دهد.

### کلیدواژه

VOCs، آلودگی هوا، بنزن، تولوئن، زایلین.

### ۱. سرآغاز

مواد شوینده و ضدعفونی‌کننده کاربرد دارند. همچنین، سوخت‌های فسیلی از ترکیبات آلی تشکیل شده‌اند و هنگامی که در منازل و اماکن مختلف ذخیره می‌شوند، می‌توانند هیدروکربورهای فرار متصاعد کنند (Hadjizadeh, 2003; Keshavarzi, et al. 2011; Zaker, et al. 2003). از جمله ترکیبات شاخص VOC می‌توان به ترکیبات BTX اشاره کرد که بنزن، تولوئن و زایلین‌ها را شامل می‌شوند و آثار بهداشتی و زیست‌محیطی متعددی مانند کم‌خونی و سرطان‌زایی برای آن‌ها متصور است. با توجه به ضررهای

ترکیبات آلی فرار (VOCs) به‌منزله ترکیبات آلی پایدار با فشار بخار ۰/۱ میلی‌متر جیوه یا بالاتر در دما و فشار متعارف شناخته می‌شوند. این ترکیبات به لحاظ زیست‌محیطی مردود شده‌اند، زیرا در ایجاد آوزون تروپوسفری، مه دود فتوشیمیایی، اثر گلخانه‌ای و آثار سمی برای محیط‌زیست مشارکت دارند (Grassian, 2005). ترکیبات آلی فرار به طور گسترده‌ای در محصولات استفاده‌شده در منازل نظیر رنگ‌ها، لاک‌الکل، چسب‌ها،

میلی‌متر استفاده شد. برای ارتقای کارایی، دانه‌های زئولیت طی دو مرحله ۶ ساعته با اسید کلردریک ۱ نرمال شستشو و آب‌کشی و در دمای ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد خشک شدند (Hernandez, et al. 2005). نانوذرات آهن صفر با استفاده از دستگاه اولتراسونیک به حالت سوسپانسیون آبی درآمد و به دانه‌های زئولیت افزوده و ۲۴ ساعت در شیکر تکان داده شد. سپس، به آرامی در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد در داخل اون خشکاننده شدند. با انجام پیش‌آزمون، مقداری نانوذرات به زئولیت اضافه شد که در نهایت حدود ۴/۵ درصد وزنی زئولیت بود. برای فعال‌سازی نانوذرات ۲ ساعت از کوره با دمای ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد استفاده شد (Hong, et al. 2003; Li, et al. 2003). آزمون تعیین تخلخل به صورت اشباع‌کردن با آب روی دانه‌های زئولیت نانوذره‌دار و بدون نانوذره صورت گرفت (Braj, 2001). برای تصویربرداری از سطح زئولیت‌ها، از میکروسکوپ نوری مدل نیکن (Nikon) استفاده شد.

برای انجام آزمایش‌ها از استوانه استیل به قطر ۴/۵ و طول ۳۰ سانتی‌متر استفاده شد و دانه‌های زئولیت با نانوذره و بدون نانوذره به طور جداگانه و به مقدار ۲۰۰ گرم داخل آن قرار گرفت. با گذر جریان هوای آلوده به ترکیبات BTX، میزان حذف آن‌ها با تعیین غلظت ورودی و خروجی، اندازه‌گیری شد. برای آلوده‌کردن جریان هوای عبوری به ترکیبات BTX، بخشی از جریان مذکور از یک ارلن حاوی ترکیبات BTX عبور داده شد. دبی جریان هوای عبوری برابر ۱/۵ لیتر در دقیقه تنظیم و نمونه‌برداری در حین عبور جریان هوا در دمای ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد انجام شد. این دما با توجه به سایر مطالعات انجام‌گرفته در این زمینه در نظر گرفته شد. تأمین دمای لازم با استفاده از المنت‌های برقی ۲۵۰ وات به تعداد ۶ عدد که به دور استوانه استیل پیچیده شده بودند، صورت گرفت. نمونه‌برداری از جریان ورودی و خروجی با دبی جریان نمونه‌برداری ۱۰۰ میلی‌لیتر در دقیقه و به حجم ۲ لیتر انجام شد (Keshavarzi, et al. 2003; NIOSH, 1995).

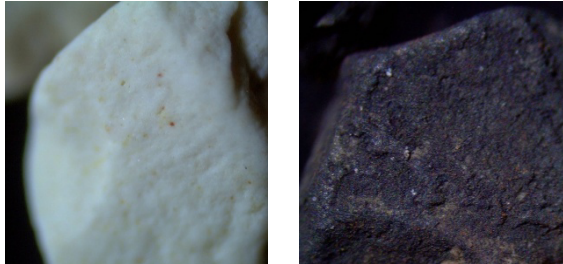
بهداشتی و زیست‌محیطی ترکیبات BTX و وفور منابع تولید و انتشار این ترکیبات در صنایع، محیط‌های کار، منازل و محیط‌های شهری (Fazlzadeh Davil M, et al. 2012)، کنترل غلظت این آلاینده‌ها در حد استاندارد برای حفظ سلامتی افراد و محیط‌زیست ضروری به نظر می‌رسد. بنابراین، پژوهش در این راستا می‌تواند برای کنترل و کاهش غلظت این آلاینده‌ها و مشابه آن‌ها راهکارهای مناسبی را در اختیار قرار دهد.

مطالعاتی در جهت کنترل و حذف ترکیبات آلی فرار از هوا انجام شده که در آن‌ها از روش‌های بیولوژیک، جذبی و کاتالیستی مختلف بهره گرفته شده است. در این مطالعات به خواص جذبی برخی زئولیت‌های طبیعی مانند کلینوپتیلولیت برای ترکیبات آلی فرار اشاره شده است (Hernandez, et al. 2005). همچنین، امروزه مطالعات در زمینه نانوفناوری، نشان‌دهنده خواص مختلف مواد در ابعاد نانو برای مواد مختلف است. از آن جمله می‌توان به افزایش خاصیت اکسایش، کاهش و کاتالیز ترکیبات مختلف از طریق عناصر فلزات واسطه در ابعاد نانو اشاره کرد (Henn & Waddill, 2006). بنابراین، ترکیبات آلی فرار می‌توانند از طریق بسترهای جاذب مانند زئولیت جذب یا از طریق عوامل اکسنده یا کاهنده تجزیه شوند و با عوامل کاتالیستی روند تجزیه آن‌ها سرعت یابد. تجزیه کامل ترکیبات آلی به تولید دی‌اکسید کربن و آب منجر می‌شود که به اصطلاح به آن معدنی‌شدن می‌گویند. چنانچه روند معدنی‌شدن ناقص باشد ترکیبات واسطه‌ای غیر از آب و دی‌اکسید کربن نیز ایجاد خواهند شد (Rostami, et al. 2012b). بنابراین، با توجه به اهمیت کنترل ترکیبات آلی فرار آلاینده هوای محیط، هدف از این مطالعه بررسی تأثیر افزودن نانوذرات آهن صفر به زئولیت کلینوپتیلولیت ایرانی، که فراوان‌ترین نوع زئولیت طبیعی ایرانی محسوب می‌شود و به سهولت در دسترس است، به منظور حذف ترکیبات BTX است.

## ۲. مواد و روش بررسی

در این پژوهش از زئولیت با دانه‌های با قطر متوسط ۱-۲

۵۰/۶۶ است. همچنین، حجم کل ۲۰۰ گرم از هر یک به ترتیب برابر ۲۳۵/۸۶ و ۲۳۱/۸۴ میلی‌لیتر بود. بنابراین، با توجه به این نتایج می‌توان زمان ماند جریان هوا را در هر یک با توجه به دبی جریان ۱/۵ لیتر بر دقیقه به دست آورد که به ترتیب برابر ۴/۸۴ و ۴/۶۷ ثانیه است.



شکل ۱. الف. دانه زئولیت با نانوذرات آهن صفر، ب. دانه زئولیت بدون نانوذره، بزرگنمایی ۱۰۰ برابر

نتایج حاصل نشان‌دهنده بازده بیشتری در حذف آلاینده‌ها با زئولیت حاوی نانوذرات آهن صفر است. این نتایج در جدول ۱ نشان داده شده است. همچنین، شکل ۲ نشان‌دهنده میانگین بازده حذف آلاینده‌ها در هر نوع زئولیت است. با توجه به نتایج، میانگین بازده حذف آلاینده‌ها در زئولیت بدون نانوذره ۴۳/۳۱ و در زئولیت حاوی نانوذره ۸۳/۸۳ دصد بوده است.

جدول ۱. بازده حذف ترکیبات بنزن، تولوئن و زایلن‌ها در زئولیت حاوی نانوذرات آهن و زئولیت بدون نانوذره

انحراف معیار	بازده حذف (%)	نوع آلاینده	
۵/۳۷	۷۸/۳۰	بنزن	زئولیت
۳/۲۵	۶۲/۱۰	تولوئن	بدون
۱/۸۴	۳۰/۲۰	pزایلن	نانوذره
۳/۳۹	۳۲/۱۵	mزایلن	
۳/۳۹	۱۸/۸۰	oزایلن	
۴/۳	۸۲/۵۴	بنزن	زئولیت
۱/۹۹	۸۳/۸۹	تولوئن	با
۰/۹۱	۸۳/۱۴	pزایلن	نانوذرات
۰/۵۸	۸۳/۶۱	mزایلن	
۱/۶۸	۸۵/۹۹	oزایلن	آهن

نتایج نشان داده شده در جدول ۱، نشان‌دهنده نزدیک‌بودن بازده حذف آلاینده‌ها به یکدیگر در زئولیت

نمونه‌برداری با حداقل ۲ بار تکرار برای هر نمونه انجام گرفت.

برای نمونه‌برداری ترکیبات BTX از چارکول تیوب ساخت شرکت اس کی سی (SKC) استفاده و برای استخراج نمونه‌ها، حلال دی سولفید کربن ( $CS_2$ ) به میزان ۲ میلی‌لیتر به کار برده شد. برای آنالیز نمونه‌های BTX از دستگاه کروماتوگرافی گازی با آشکارساز یونش شعله‌ای (GC-FID) ساخت شرکت کروم تک (Chrom, Tech) با ستون به طول ۲۵ متر و قطر ۰/۳۲ میلی‌متر و کاربرد گاز حامل هلیوم و طبق تکنیک ۶۲۲۰ استاندارد متد استفاده شد (Bahrami, et al. 2008).

سنجش میزان دی اکسید کربن در جریان ورودی و خروجی از طریق دتکتور تیوب ساخت شرکت گاز تک (GAS-TEC) صورت گرفت. برای نمونه‌برداری دی اکسید کربن از پمپ دستی گاز تک و طبق دستورالعمل دتکتور استفاده شد.

ترکیبات شیمیایی استفاده‌شده در این پژوهش شامل بنزن، تولوئن، زایلن، دی سولفید کربن و اسید هیپوکلریک با درجه خلوص آزمایشگاهی و از شرکت مرک آلمان تهیه شدند.

### ۳. نتایج

نتایج حاصل از افزودن نانوذرات روی دانه‌های زئولیت که با تفاضل وزن زئولیت به دست آمد، نشان‌دهنده بازده میانگین ۹۳/۹۴ درصد در افزودن نانوذرات آهن صفر به زئولیت است. بنابراین، با داشتن وزن اولیه نانوذرات و زئولیت، مقدار نانوذره افزوده شده به زئولیت برابر ۴/۶۹ درصد وزنی زئولیت به دست آمد. شکل ۱ نشان‌دهنده تصاویر سطح زئولیت و زئولیت حاوی نانوذرات آهن است که حاکی از پوشش سطح دانه‌های زئولیت با نانو ذرات است.

نتایج حاصل از تعیین تخلخل زئولیت بدون نانوذره و نانوذره‌دار به ترتیب نشان‌دهنده درصد تخلخل ۵۱/۳۴ و

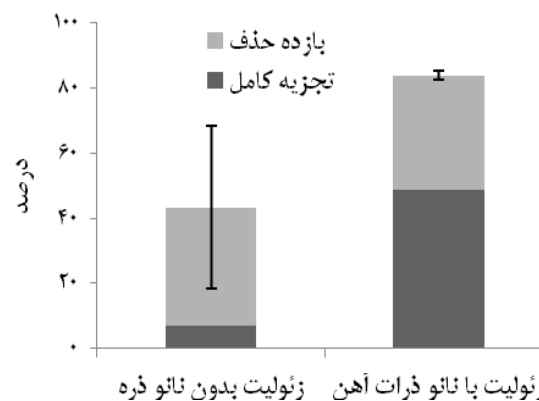
نتایج جدول ۲ نشان می‌دهد که جرم بیشتری از آلاینده‌ها نیز بر زئولیت حاوی نانوذرات آهن وارد شده است. با این حال بازده آن در حذف آلاینده‌ها به مقدار زیادی بیش از زئولیت بدون نانوذره بوده است.

با توجه به دبی جریان هوای عبوری و غلظت آلاینده‌ها مقدار جرم کل آلاینده‌ها و میزان جرم حذف‌شده آن‌ها در هر یک از انواع زئولیت محاسبه شد که نتایج حاصل از آن همراه جرم اعمال‌شده هر آلاینده و جرم حذف‌شده آن در واحد حجم خالص زئولیت که با داشتن حجم کل و میزان تخلخل به دست آمده، در جدول ۲ آورده شده است.

نتایج جدول ۲ نشان می‌دهد که جرم بیشتری از آلاینده‌ها نیز بر زئولیت حاوی نانوذرات آهن وارد شده است. با این حال بازده آن در حذف آلاینده‌ها به مقدار زیادی بیش از زئولیت بدون نانوذره بوده است.

نتایج حاصل از اندازه‌گیری میزان دی اکسید کربن در جریان هوای ورودی نشان داد که غلظت آن تقریباً ثابت و برابر ۵۰۰ قسمت در میلیون (ppm) است. اما غلظت آن در هوای خروجی هر یک از زئولیت‌ها با هم تفاوت داشت به طوری که در هوای خروجی زئولیت بدون نانوذره

حاوی نانوذرات آهن نسبت به زئولیت بدون نانوذره است، به طوری که انحراف معیار آن برابر ۱/۳۱ است. در حالی که انحراف معیار بازده‌های حذف آلاینده‌های مختلف در زئولیت بدون نانوذره برابر ۲۴/۸۴ است.



شکل ۲. نمودار میانگین بازده حذف و درصد تجزیه کامل آلاینده‌ها در زئولیت بدون نانوذره و زئولیت حاوی نانوذرات آهن صفر

با توجه به دبی جریان هوای عبوری و غلظت آلاینده‌ها مقدار جرم کل آلاینده‌ها و میزان جرم حذف‌شده آن‌ها در هر یک از انواع زئولیت محاسبه شد که نتایج حاصل از آن همراه جرم اعمال‌شده هر آلاینده و جرم حذف‌شده آن در واحد حجم خالص زئولیت که با داشتن حجم کل و میزان تخلخل به دست آمده، در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۲. جرم اعمال‌شده و جرم حذف‌شده آلاینده‌ها در زئولیت حاوی نانوذرات آهن صفر و زئولیت بدون نانوذره

جرم حذف‌شده بر واحد حجم ( $\mu\text{g}/\text{cm}^3$ )	جرم اعمال‌شده بر واحد حجم ( $\mu\text{g}/\text{cm}^3$ )	جرم حذف‌شده ( $\mu\text{g}$ )	جرم اعمال‌شده ( $\mu\text{g}$ )	نوع آلاینده	حجم خالص زئولیت ( $\text{cm}^3$ )	
۱۲/۷۱	۱۶/۲۴	۱۴۵۸/۹۷	۱۸۶۳/۴۴	بنزن	۱۱۴/۷۷	زئولیت بدون نانوذره
۰/۴۸	۰/۷۸	۵۵/۲۳	۸۸/۹۳	تولوئن		
۰/۰۵	۰/۱۶	۵/۶۱	۱۸/۵۷	pزایلن		
۰/۰۶	۰/۲۰	۷/۳۷	۲۲/۹۲	mزایلن		
۰/۰۲	۰/۱۱	۲/۲۶	۱۲/۰۱	oزایلن		
۱۳/۳۳	۱۷/۴۸	۱۵۲۹/۴۳	۲۰۰۵/۸۷	جمع		
۱۸/۱۸	۲۲/۰۳	۲۰۷۹/۸۸	۲۵۱۹/۸۳	بنزن	۱۱۴/۳۹	زئولیت با نانوذرات آهن
۲/۵۴	۳/۰۲	۲۸۹/۹۶	۳۴۵/۶۳	تولوئن		
۰/۹۰	۱/۰۸	۱۰۲/۹۸	۱۲۳/۸۷	pزایلن		
۰/۸۲	۰/۹۹	۹۴/۲۳	۱۱۲/۶۹	mزایلن		
۰/۴۶	۰/۵۳	۵۲/۰۲	۶۰/۵۰	oزایلن		
۲۲/۹۰	۲۷/۶۵	۲۶۱۹/۰۷	۳۱۶۲/۵۲	جمع		

زنوئلیت حاوی نانوذره و بدون نانوذره، غلظت دی اکسید کربن خروجی از زنوئلیت نانوذره‌دار نیز بیشتر بوده است. این امر نشان‌دهنده تأثیر نانوذرات بر تجزیه کامل مقدار بیشتری از آلاینده‌ها و تبدیل آن‌ها به دی اکسید کربن بوده است. تجزیه ناقص این آلاینده‌ها می‌تواند به تولید ترکیبات متعدد اکسی‌فنیل یا ترکیباتی نظیر اسیدهای فرمیک، اگزالیک، استیک و سایر ترکیبات آلی منجر شود (Einaga & Futamura, 2004; Rostami, et al. 2012b). با حضور نانوذرات آهن به‌منزله عامل کاهنده (Hong, et al. 2003)، انجام فرایند اکسیداسیون و احیا نیز به‌طور مؤثرتری می‌تواند برای تجزیه آلاینده‌ها صورت گرفته باشد. آهن با دادن الکترون به آلاینده‌ها می‌تواند موجب کاهش آن‌ها شود (Wang, et al. 2008). این عمل می‌تواند در حضور بخار آب و درجه حرارت بالا موجب ایجاد رادیکال‌های آزاد هیدروکسیل ( $\text{OH}^\cdot$ ) و هیدروژن ( $\text{H}^\cdot$ ) شود و این رادیکال‌ها با واکنش با آلاینده‌ها موجب تجزیه آن‌ها شوند (Garin, 2004). زانگ نشان داده است که در کاربرد نانوذرات آهن صفر برای تجزیه ترکیبات آلی در آب، این نانوذرات با دادن الکترون به آهن دو مثبت ( $\text{Fe}^{2+}$ ) تبدیل می‌شوند (Zhang, 2003). این نتیجه تأییدکننده نظر فوق در خصوص آزادکردن الکترون از طریق نانوذرات آهن است. با توجه به نتایج، جرم آلاینده‌های ورودی به زنوئلیت حاوی نانوذرات آهن نیز مقادیر بیشتری داشته و جرم حذف‌شده به ازای واحد حجم خالص در آن بیشتر است، بنابراین قابلیت حذف مقادیر بیشتری از آلاینده‌ها را نسبت به زنوئلیت بدون نانوذره دارد. اکسیداسیون بیشتر نانوذرات آهن به تولید آهن سه مثبت ( $\text{Fe}^{3+}$ ) منجر می‌شود که با ترکیب با اکسیژن، اکسید آهن سه ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) یا هماتیت را ایجاد می‌کند (Qi & Yang, 2005). کاربرد نانوذرات آهن همراه نانوذرات اکسید مس ( $\text{Cu}_2\text{O}$ ) به صورت ترکیبی و در بستر زنوئلیت برای حذف ترکیبات BTX، نشان داده است که بازده تجزیه کامل آلاینده‌های حذف‌شده ۸۲/۷۸ درصد بوده و میانگین بازده حذف آلاینده‌ها نیز ۵۶/۹۸

برابر ۵۲۵ قسمت در میلیون و در خروجی زنوئلیت حاوی نانوذرات آهن برابر ۶۵۰ قسمت در میلیون بود. با استفاده از غلظت دی اکسید کربن خروجی، محاسبه‌ها نشان داد که بازده تجزیه کامل آلاینده‌های حذف‌شده در زنوئلیت بدون نانوذره ۱۶/۴۴ و در زنوئلیت حاوی نانوذرات ۵۷/۸۲ درصد بوده که در نمودار ۲ نشان داده شده است.

#### ۴. بحث و نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از نشان دادن نانوذرات روی دانه‌های زنوئلیت بازده این فرایند به‌طور متوسط ۹۳/۹۴ درصد حاکی از آن است که روند نانوذره‌دار کردن زنوئلیت با این روش عملکرد مناسبی داشته و به لحاظ هدرنرفتن نانوذرات از لحاظ اقتصادی نیز می‌تواند مقبول واقع شود. میزان نانوذرات آهن نشسته روی زنوئلیت برابر ۴/۶۹ درصد وزنی زنوئلیت بوده است. این مقدار نانوذرات نزدیک به میزان نانوذراتی است که در سایر مطالعات استفاده و این مقدار توصیه نیز شده است (Chen & Tang, 2007; Zou, et al. 2006).

نتایج حاصله نشان‌دهنده زمان مانده‌های بسیار نزدیک در زنوئلیت حاوی نانوذره و بدون نانوذره است. بنابراین، این عامل را چندان نمی‌توان در تفاوت نتایج به‌دست‌آمده بین دو نوع زنوئلیت دخیل دانست.

با توجه به نتایج، زنوئلیت حاوی نانوذرات آهن توان بیشتری در حذف ترکیبات BTX نشان داده است. نتایج آزمون آماری آنالیز واریانس صورت‌گرفته، اختلاف معنی‌داری را در بازده حذف آلاینده‌ها مابین زنوئلیت بدون نانوذره و زنوئلیت با نانوذرات آهن ( $P=0/008$ ) نشان می‌دهد. همچنین، واکنش‌ها و مکانیزمی که موجب حذف آلاینده‌ها در آن شده روی همه آلاینده‌ها تأثیرگذار بوده و بازده حذف آن‌ها نزدیک به هم بوده است. این مسئله می‌تواند اطمینان بیشتری را برای کاربرد زنوئلیت حاوی نانوذرات آهن برای حذف انواع ترکیبات آلی فرار به دست دهد. علاوه بر تفاوت چشمگیر بازده حذف آلاینده‌ها در

تجزیه ترکیبات آلی‌اند، وجود داشته است (Zou, et al. 2006). بنابراین، در این مطالعه نیز مکانیسم‌های جذب و کاتالیز می‌توانند بر بازده حذف آلاینده‌ها تأثیرگذار باشند، زیرا خاصیت جذب ژئولیت را مطالعات دیگری نیز نشان داده‌اند (Hernandez, et al. 2005). با توجه به مباحث فوق، در ژئولیت بدون نانوذره با توجه به اینکه نانوذرات، که خاصیت کاتالیزوری قوی‌تری از خود نشان داده‌اند، حضور ندارند، مکانیسم جذب غالب بوده و در ژئولیت حاوی نانوذره با توجه به افزایش غلظت دی‌اکسید کربن خروجی که ناشی از افزایش تجزیه کامل آلاینده‌هاست، مکانیسم کاتالیز مؤثرتر بوده است. این مکانیسم قادر به حذف همه ترکیبات BTX با بازدهی نزدیک به هم بوده است. این در حالی است که مکانیسم جذب که در ژئولیت بدون نانوذره قالب بوده، چنین نتیجه‌ای نداده است.

### تشکر و قدردانی

بدین وسیله از معاونت محترم پژوهشی دانشگاه علوم پزشکی ایران که تأمین هزینه این پژوهش را به عهده گرفتند قدردانی می‌شود.

درصد گزارش شده است (Rostami, et al. 2012b). در مقایسه با آن، نانوذرات آهن در بستر ژئولیت بازده کمتری در تجزیه کامل آلاینده‌ها داشته‌اند، اما میانگین بازده حذف آلاینده‌ها بالاتر بوده است. در مطالعه‌ای دیگر، کاربرد نانوذرات اکسید مس در بستر ژئولیت، موجب کاهش میانگین بازده حذف ترکیبات BTX شده، اما تجزیه کامل این ترکیبات را در بستر ژئولیت افزایش داده است. بنابر نتایج این مطالعه، حضور نانوذرات اکسید مس موجب کاهش جذب آلاینده‌ها در بستر ژئولیت شده است (Rostami, et al. 2012a). نتایج این مطالعه نشان‌دهنده قابلیت بیشتر نانوذرات آهن در حذف و تجزیه کامل ترکیبات BTX نسبت به نانوذرات اکسید مس است.

در مطالعه‌ای که زو و همکارانش انجام داده‌اند، برای حذف ترکیبات آلی فرار از دی‌اکسید تیتانیوم ( $\text{TiO}_2$ ) نانوذره‌ای روی دی‌اکسید سیلیسیم ( $\text{SiO}_2$ ) متخلخل استفاده و نشان داده شد که تولوئن که به‌منزله شاخص ترکیبات آلی فرار در نظر گرفته شده با مکانیسم جذب و کاتالیز حذف می‌شود. به طوری که در هوای خروجی، تولوئن تصفیه نشده، آب و دی‌اکسید کربن که محصول

### منابع

- Bahrami, A., A., Jonidi-Jafari, H., Mahjub. 2008. Environmental Exposure to Xylenes in Drivers and Petrol Station Workers by Urinary Methylhippuric Acid. *Journal of Research in Health Sciences*, Vol.8, No.2, PP:61-8.
- Braja, M. D. 2001. *Soil Mechanics Laboratory Manual*. 6 edn, Oxford University Press, USA.
- Chen, J. C., C. T., Tang. 2007. Preparation and application of granular ZnO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> catalyst for the removal of hazardous trichloroethylene. *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 142, No. 1-2, PP: 88-96.
- Einaga, H., S., Futamura. 2004. Catalytic oxidation of benzene with ozone over alumina-supported manganese oxides. *Journal of Catalysis*, Vol. 227, No. 2, PP: 304-12.
- Fazlzadeh Davil, M., et al. 2012. A Survey of 24 Hour Variations of BTEX Concentration in the Ambient Air of Tehran. *Journal of Babol University of Medical Sciences*, Vol. 14, No. Suppl.1, PP: 50-5.
- Garin, F. 2004. Environmental catalysis. *Catalysis Today*, Vol. 89, No. 3, PP: 255-68.
- Grassian, V. H. 2005. *Environmental Catalysis*. CRC Press Taylor & Francis Group.
- Hadjizadeh Zaker, N., et al. 2011. Concentrations and Sources of Petroleum Hydrocarbons in the Sediments of Anzali Port in the Caspian Sea, Iran. *Journal of Environmental Studies*, Vol. 37, No. 4, PP: 99-106.
- Henn, K. W., D. W., Waddill. 2006. Utilization of nanoscale zero-valent iron for source remediation—A case study. *Remediation Journal*, Vol. 16, No. 2, PP: 57-77.
- Hernandez, M., et al. 2005. Quantitative study of the adsorption of aromatic hydrocarbons (benzene, toluene, and p-Xylene) on dealuminated clinoptilolites. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, Vol. 44, No. 9, PP: 2908-16.

- Hong, S. S., G. H., Lee. G. D., Lee. 2003. Catalytic combustion of benzene over supported metal oxides catalysts. Korean Journal of Chemical Engineering, Vol. 20, No. 3, PP: 440-4.
- Keshavarzi, H., F. S., Halak. M., Mirmohamadi. 2003. Survey and measurement of VOCs in closed domestic ambient and public places. Environmental Studies, Vol. 29, No. 32, PP: 41-6.
- Li, P., et al. 2003. The removal of carbon monoxide by iron oxide nanoparticles. Applied Catalysis B: Environmental, Vol. 43, No. 2, PP: 151-62.
- NIOSH .1995. NIOSH Manual of Analytical Methods. in Hydrocarbons.
- Qi, G., R. T., Yang. 2005. Ultra-active Fe/ZSM-5 catalyst for selective catalytic reduction of nitric oxide with ammonia. Applied Catalysis B: Environmental, Vol. 60, No. 1-2, PP: 13-22.
- Rostami, R., et al. 2012a. Survey of Modified Clinoptilolite Zeolite and Cooper Oxide Nanoparticles-Containing Modified Clinoptilolite Efficiency for Polluted Air BTX Removal. Iranian Journal of Health and Environment, Vol. 5, No. 1, PP: 1-8.
- Rostami, R., et al. 2012b. Benzene-Toluene-Xylene (BTX) Removal from Polluted Airflow by Combined Filter of Zero Valence Iron and Copper oxide Nanoparticles on Iranian Amended Clinoptilolite Bed. Journal of Babol University of Medical Sciences, Vol. 14, No. Suppl. 1, PP: 23-9.
- Wang, S.-P., et al. 2008. An Investigation of Catalytic Activity for CO Oxidation of  $\text{CuO/Ce}_x\text{Zr}_{1-x}\text{O}_2$  Catalysts. Catalysis Letters, Vol. 121, No. 1, PP: 70-6.
- Zhang, W. x. 2003. Nanoscale Iron Particles for Environmental Remediation: An Overview. Journal of Nanoparticle Research, Vol. 5, No. 3-4, PP: 323-32.
- Zou, L., et al. 2006. Removal of VOCs by photocatalysis process using adsorption enhanced  $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$  catalyst. Chemical engineering and processing, Vol. 45, No. 11, PP: 959 -64.