

## حذف زایلن از جریان هوای آلوده با استفاده از فرایند ازن زنی کاتالیزوری

غلامرضا موسوی<sup>۱</sup>، علی خوانین<sup>۲</sup>، حمیدرضا مکرمی<sup>۲</sup>

نویسنده مسئول: تهران، تقاطع بزرگراه جلال آل احمد و چمران، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده علوم پزشکی [moussavi@modares.ac.ir](mailto:moussavi@modares.ac.ir)

پذیرش: ۸۹/۰۵/۰۲

دریافت: ۸۹/۰۲/۰۴

### چکیده

**زمینه و هدف:** ترکیبات آلی فرار یکی از متداول ترین گروه آلاینده های منتشر شده از صنایع مختلف به صورت هوای آلوده هستند که به دلیل اثرات نامطلوب بهداشتی و زیست محیطی باید قبل از تخلیه در محیط تصفیه شوند. این مطالعه با هدف بررسی کارایی کربن فعال، ازن و ترکیب کربن فعال و ازن (ازن زنی کاتالیزوری) در حذف غلظت های مختلف زایلن انجام شد.

**روش بررسی:** سیستم آزمایشگاهی مورد استفاده در این مطالعه شامل پمپ تزریق سرنگی، پمپ تزریق هوا، دستگاه مولد ازن و راکتور شیشه ای حاوی کربن فعال بود. برای بررسی کارایی عملکرد سیستم ها بر حسب راندمان حذف و ظرفیت حذف با هم مقایسه گردید.

**یافته ها:** نتایج نشان داد که کارایی فرایند ازن زنی در حذف زایلن بیش تر از کربن فعال و ازن زنی به تنهایی بود. به طوری که زمان ظهور زایلن در خروجی و ظرفیت حذف آن در شرایط مشابه برای غلظت  $300 \text{ ppm}$  به ترتیب  $1/4$  و  $2/8$  برابر سیستم جذب کربن فعال به تنهایی بود. کربن فعال در حضور ازن به عنوان کاتالیزور عمل کرده و باعث افزایش راندمان تجزیه زایلن شده است.

**نتیجه گیری:** سیستم ازن زنی کاتالیزوری می تواند به عنوان روش مناسب با کارایی بالا برای حذف زایلن از جریان هوای آلوده در غلظت های بالا استفاده شود. این سیستم می تواند به راحتی برای تبدیل وضعیت سیستم های جذب کربن فعال نصب شده به ازن زنی کاتالیزوری استفاده شود.

**واژگان کلیدی:** ترکیبات آلی فرار، زایلن، جذب، کربن فعال، ازن زنی کاتالیزوری

۱- دکترای بهداشت محیط، استادیار دانشکده علوم پزشکی، دانشگاه تربیت مدرس

۲- دکترای بهداشت حرفه ای، استادیار دانشکده علوم پزشکی، دانشگاه تربیت مدرس

۲- کارشناس ارشد بهداشت حرفه ای، دانشکده علوم پزشکی، دانشگاه تربیت مدرس

## مقدمه

ترکیبات آلی فرار (Volatile Organic Compounds) VOCs یکی از عوامل مهم آلودگی هوا هستند. این ترکیبات طیف گسترده ای از ترکیبات آلی با نقطه جوش پایین تر از  $100^{\circ}\text{C}$  و یا فشار بخار بیش تر از یک اتمسفر در  $25^{\circ}\text{C}$  را شامل می شوند. به تعبیر دیگر مواد آلی فرار مواد مایع یا جامداند که محتوی کربن، هیدروژن، نیتروژن یا گوگرد هستند که با سرعت چشم گیری تبخیر می شوند. این ترکیبات بعد از ذرات معلق بیش ترین فراوانی و تنوع انتشار را دارند و از معمولی ترین آلاینده های قابل انتشار از صنایع شیمیایی و پتروشیمی محسوب می شوند (۱). قرارگیری در معرض مواد آلی فرار می تواند باعث ایجاد عوارض بهداشتی مختلفی بر روی سیستم اعصاب مرکزی و دیگر ارگان های داخلی مانند کبد شود. هم چنین در صورت انتشار در اتمسفر می توانند باعث تشکیل مه دود فتوشیمیایی، گرم شدن کره زمین، تغییرات آب و هوایی و دیگر مشکلات محیط زیستی شوند (۲ و ۳). با توجه به مشکلات ذکر شده و هم چنین با عنایت به الزامات و محدودیت های قانونی برای صنایع جهت کاهش آلاینده های خروجی به اتمسفر (۴ و ۵)، لازم است قبل از انتشار مواد آلی فرار در محیط و اتمسفر، کنترل شوند.

روش های که تاکنون برای حذف مواد آلی فرار از هوای محیط به کار می روند، در اکثر مواقع دارای معایبی هستند که استفاده از آنها را محدود می کند. از جمله متداول ترین فرایندهای مورد استفاده، روش جذب سطحی می باشد (۶-۷). در میان جاذب های مختلفی که در تکنولوژی جذب سطحی استفاده می شوند، کربن فعال به علت سادگی کار با آن، هزینه های عملیاتی پایین و بازیافت موثر اغلب مواد آلی فرار از آن، به طور گسترده برای حذف مواد آلی فرار از هوای آلوده در صنایع استفاده می شود (۸ و ۹). کارایی کربن فعال در حذف آلاینده ها از هوای آلوده در دهه های اخیر به اثبات رسیده است (۱) و در حال حاضر، روش جذب سطحی با جاذب کربن

متخلخل، گسترده ترین روش تصفیه هوای حاوی ترکیبات فرار از هوا است (۹). از مهم ترین معایب این روش کاهش کارایی آن در زمانی است که با مواد جذب شده سطحی به حالت اشباع یا تعادل رسیده، در نتیجه نیاز به احیای مکرر آن و به دنبال آن افزایش هزینه است. هم چنین فرایند جذب سطحی فقط باعث تغییر فاز آلاینده از هوا به روی جسم جامد می شود (۱). از دیگر فرایندهای مورد استفاده برای تصفیه مواد آلی فرار روش اکسیداسیون شیمیایی به ویژه استفاده از گاز ازن است. این گاز پتانسیل اکسیداسیون زیادی داشته و بیش تر ترکیبات آلی فرار را اکسید می کند و اکسیژن و دیگر محصولات جانبی اکسیداسیون تولید می کند (۱۰ و ۱۱). به هر حال کارایی این گاز به تنهایی پایین و ممکن است در اثر واکنش با مواد آلی فرار، بعضی از ترکیبات واسطه خطرناک تولید شود (۱۲). از دیگر معایب آن، خطر تاثیر سلامتی حاد و احتمالا مزمن آن حتی در غلظت های جزئی در هوا است (۱۳). نتایج تحقیق Chen و همکاران بر روی تصفیه کننده های هوا نشان داد، کارایی حذف مواد آلی فرار با استفاده از ازن پایین بوده و سطح ازن باقی مانده داخلی می تواند بالا و در سطوح خطرناک برای سلامتی باشد (۱۲).

اخیرا یکی از روش های مؤثر جهت حذف آلاینده های آلی به ویژه از آب یا فاضلاب و تا حدی هوا (خصوصا در غلظت های پایین)، استفاده ترکیبی از جاذب سطحی و ازن به عنوان ازن زنی کاتالیزوری جهت بازیابی جاذب سطحی می باشد (۱۰ و ۱۴). مطالعات نشان می دهد که در این فرایند تصفیه ترکیبی، جاذب سطحی ممکن است بر اساس دو فرایند به عنوان کاتالیزور عمل نماید و باعث افزایش کارایی فرایند حذف گردد، این دو فرایند عبارتند از: ۱- شکستن مولکول های ازن به اتم های اکسیژن ۲- ایجاد یک بستر محصور کننده جهت افزایش زمان ماند برای واکنش بین ازن و مواد آلی فرار می باشد (۱۵، ۱۶ و ۱۷). هم چنین نتایج تحقیقات دیگر در این زمینه نشان می دهد که ازن باعث اصلاح ویژگی های بافتی و

## مواد و روش ها

سیستم آزمایشی مورد استفاده در این تحقیق شامل راکتور، پمپ تزریق سرنگی، پمپ تزریق هوا، دستگاه مولد ازن، محفظه اختلاط، روتامتر، شبکه لوله کشی و سایر متعلقات مربوط می باشد. نمایی کلی از سیستم مورد استفاده در شکل ۱ نشان داده شده است.

در این تحقیق، جهت نزدیک کردن شرایط فرایند با شرایط واقعی، از راکتور با جریان مداوم به صورتی که جهت جریان از پایین به بالا باشد، استفاده شد. راکتور مورد استفاده از جنس شیشه پیرکس و به شکل استوانه، به ارتفاع ۵۰ سانتی متر و قطر داخلی ۳۰ میلی متر ساخته شد و برای قرار دادن کربن فعال در درون راکتور، در فاصله ۱۰ سانتی متری از انتهای راکتور، یک صفحه مشبک نصب شد. برای تولید ازن مورد نیاز از ژنراتور تولید ازن با نشان تجاری ARDA مدل AEGCOG-5S استفاده شد. در این ژنراتور ازن از طریق ایجاد تخلیه ی الکتریکی به وسیله جریان متناوب در میان یک شکاف تخلیه و با حضور اکسیژن یا هوای خشک تولید می شود. جهت تامین هوا و تولید میزان دوزهای مختلف ازن از یک پمپ تزریق هوا که دبی آن با کمک درجه تنظیم پمپ امکان پذیر بود، به همراه یک روتامتر استفاده شد. برای تهیه هوای حاوی زایلن در غلظت های مورد نظر (۳۰۰-۵۰ ppm) از دستگاه تزریق سرنگی به همراه پمپ تزریق هوا استفاده گردید. برای ساخت غلظت های مختلف زایلن در فاز گازی دمای مایع زایلن، دمای محیط آزمایش و میزان دبی پمپ تزریق هوا در طی مراحل انجام آزمایش ثابت نگه داشته شد و فقط میزان تزریق مایع زایلن توسط دستگاه تزریق سرنگی، به عنوان پارامتر متغیر در نظر گرفته شد. به این صورت که فقط با تغییرات میزان تزریق مایع زایلن، میزان غلظت های مختلف از گاز زایلن فراهم می شد. مایع زایلن با خلوص ۹۹٪ از شرکت مرک تهیه گردید. با توجه به این که هر گونه نوسان در میزان دبی پمپ تزریق هوا می تواند بر میزان غلظت گاز تاثیر داشته باشد و هم چنین جهت یکنواخت سازی و ثابت کردن غلظت مورد نظر، یک

شیمیایی سطح جاذب سطحی و در نتیجه افزایش کارایی آن می گردد (۱۶). در واقع استفاده ترکیبی از ازن و یک جاذب سطحی مناسب می تواند معایب استفاده از هریک از آنها را به تنهایی جبران نموده و منجر به بهبود عملکرد آنها در تصفیه ترکیبات آلی فرار در هوا گردد. همان طور که قبلا ذکر شد از معایب اصلی استفاده از جاذب های سطحی (کربن فعال)، اشباع شدن و در نتیجه کاهش کارایی آن در مدت زمانی کم، و از معایب اصلی استفاده از ازن، خطر آزاد شدن آن در محیط است. با به کارگیری ترکیبی از این دو روش، علاوه بر این که ازن باعث اکسید کردن ترکیبات آلی فرار جذب سطحی شده بر روی جاذب می گردد، خود جانشین این ترکیبات شده و باعث می شود که زمان اشباع شدن جاذب سطحی افزایش یابد که این به نوبه خود کارایی کربن فعال در حذف آلاینده را افزایش خواهد داد و هم چنین از آزاد شدن ازن به محیط جلوگیری خواهد شد (۱۴ و ۱۰). در چندین مطالعه کارایی فرایند ازن زنی کاتالیزوری در حذف آلاینده های هوا بررسی شده است. Kastener و همکاران مطالعه هایی را بر روی حذف ترکیبات گوگرد با استفاده ترکیبی از مواد بازیافتی به عنوان جاذب سطحی و ازن انجام دادند (۱۷ و ۱۸). نتایج این تحقیق نشان داد کارایی تبدیل این فرایند در دمای اتاق بالا است. هم چنین نتایج مطالعه Einaga و Futamura (۱۵) بر روی اکسیداسیون کاتالیزوری بنزن با استفاده از ازن و اکسیدهای منگنز حمایت شده با آلومینیوم به عنوان کاتالیزور، نشان می دهد که اکسیدهای منگنز باعث افزایش سرعت تجزیه ازن به اتم های اکسیژن و واکنش با بنزن می شوند. با این وجود، با توجه به قابلیت بالایی جذب سطحی و خصوصیات کاتالیزوری کربن فعال، مطالعات خیلی کمی بر روی فرایند ازن زنی کاتالیزوری مواد آلی فرار با استفاده از کربن فعال انجام شده است. لذا این مطالعه با هدف بررسی کارایی حذف زایلن که یکی از پرکاربردترین و خطرناک ترین مواد آلی فرار در صنایع است (۱۹)، از جریان هوای آلوده در فرایند ازن زنی کاتالیزوری و با استفاده از جاذب سطحی کربن فعال انجام شده است.

سه بار تکرار هر پارامتر به عنوان مقدار آن گزارش شد. هم چنین تمامی آزمایش ها در دمای آزمایشگاه (۲۳-۲۵ °C) و فشار اتمسفر و زیر هود انجام شد. اندازه گیری غلظت زایلن با استفاده از دستگاه خوانش مستقیم Phocek ۵۰۰۰ ساخت کشور انگلستان که با روش آشکارسازی یون ها (PID) که به صورت هم زمان نمونه برداری و اندازه گیری را انجام می دهد، صورت گرفت. هم چنین به منظور اندازه گیری غلظت ازن در فاز گازی از روش جذب یدید پتاسیم و به دنبال آن یدومتری استفاده شد (۲۰).

### یافته ها

#### کارایی کربن فعال در حذف زایلن

نتایج کارایی کربن فعال به تنهایی در حذف زایلن در شکل ۲ نشان داده شده است. در این مرحله از آزمایش متغیرهای تاثیرگذار بر کارایی سیستم (دما: ۲۳-۲۵ °C، دبی جریان هوای ورودی به راکتور: ۱/۱۷ L/min، کربن فعال: ۱۰ گرم، رطوبت نسبی: ۵٪) ثابت نگه داشته شد و فقط کارایی سیستم بر میزان غلظت های مختلف زایلن مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان می دهد که با افزایش غلظت زایلن از ۵۰ به ppm ۳۰۰، نقطه شکست و زمان اشباع کربن فعال کاهش یافته است.

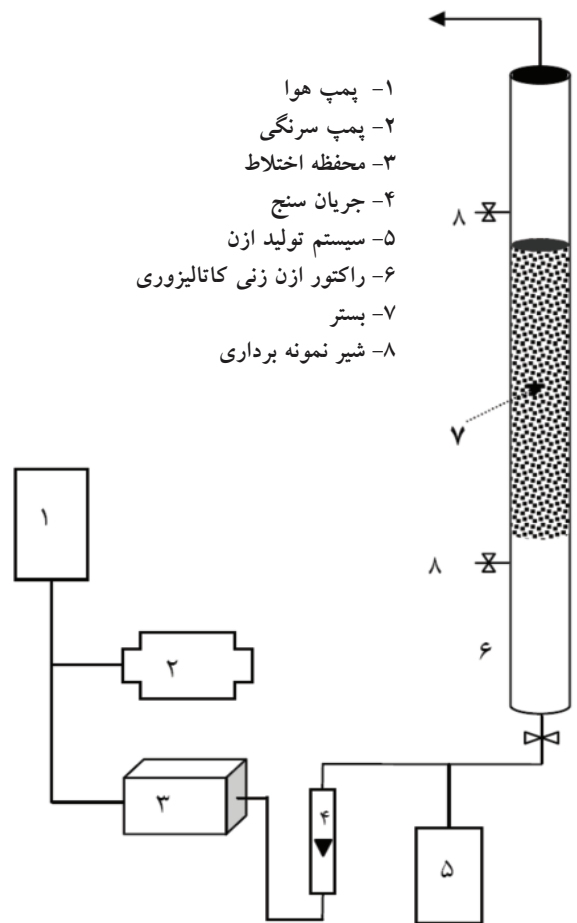
#### کارایی ازن در حذف زایلن

نتایج کارایی ازن به تنهایی در حذف زایلن در شکل ۳ نشان داده شده است. در این مرحله از آزمایش به طور ثابت از ۰/۲ ازن برای غلظت های ۳۰۰-۵۰۰ ppm زایلن استفاده شد و سایر متغیرهای تاثیر گذار بر کارایی سیستم مانند مرحله قبل ثابت نگه داشته شد. همان طور که در شکل ۳ مشاهده می شود، راندمان حذف زایلن با افزایش غلظت آن در ورودی از ۵۰ ppm ۳۰۰ از ۱۰ به ۸٪ کاهش یافت.

#### کارایی ازن زنی کاتالیزوری (کربن فعال و ازن) در حذف زایلن

نتایج کارایی فرایند ترکیبی کربن فعال و ازن در حذف زایلن بر حسب غلظت خروجی و نقطه شکست سیستم در شکل ۴

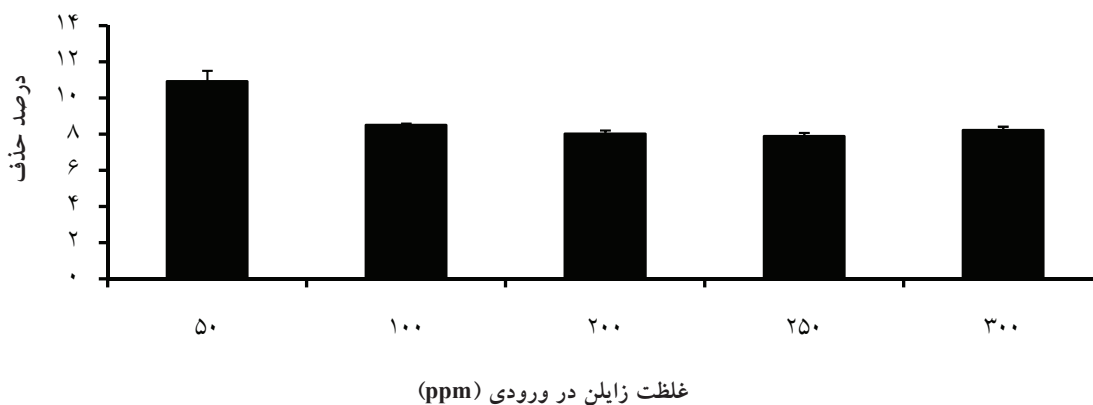
- ۱- پمپ هوا
- ۲- پمپ سرنگی
- ۳- محفظه اختلاط
- ۴- جریان سنج
- ۵- سیستم تولید ازن
- ۶- راکتور ازن زنی کاتالیزوری
- ۷- بستر
- ۸- شیر نمونه برداری



شکل ۱: شماتیک سیستم آزمایش مورد استفاده در مطالعه

محفظه اختلاط بعد از دستگاه تزریق سرنگی نصب گردید. هم چنین جهت سنجش میزان دقیق دبی هوا از یک روتامتر کالیبره شده استفاده گردید. از کربن فعال با اندازه ۲-۲/۳۸ میلی متر (مش ۸-۱۰) با سطح ویژه  $900 \text{ m}^2/\text{g}$ ، ساخت شرکت مرک، به عنوان کاتالیزور استفاده شد. جهت حذف هر گونه آلودگی احتمالی و رطوبت از سطح کربن، قبل از استفاده از آن، به مدت ۴ ساعت در دمای ۳۵۰ درجه سانتی گراد قرار داده شد. لازم به ذکر است در هر مرحله از آزمایش، از ۱۰ گرم کربن فعال استفاده شد.

در این تحقیق به طور جداگانه کارایی کربن، ازن و ترکیب کربن فعال و ازن در حذف زایلن مورد بررسی قرار گرفت. برای هر مرحله، کلیه آزمایش ها سه بار تکرار شد و میانگین



شکل ۲: کارایی حذف زاین در فرایند ازن زنی

کاهش کارایی باشد. هم چنین یافته‌های این مطالعه نشان داد که هنگام استفاده از کربن فعال به تنهایی، نقطه ظهور زاین در خروجی (نقطه شکست) با افزایش غلظت از ۵۰ به ۳۰۰ ppm از ۱۸ به ۶ ساعت کاهش یافت (شکل ۵). بر این اساس، کربن فعال برای کاربرد در غلظت‌های بالای زاین مناسب نیست، چون زود اشباع می‌شود که نیاز به احیا دارد. جاذب‌های سطحی مانند کربن فعال از طریق فرایند جذب سطحی باعث حذف آلاینده از جریان هوا می‌شوند. هر چند که این فرایند حذف فقط به صورت تغییر فاز آلاینده از هوا به روی جسم جامد می‌باشد. در این تحقیق برای رفع محدودیت روش‌های ازن زنی و کربن فعال، از ترکیب این دو روش (ازن زنی کاتالیزوری) استفاده گردید. نتایج نشان داد، کارایی روش ازن زنی کاتالیزوری به طور قابل توجهی نسبت به کارایی هر کدام از روش‌های ازن زنی و کربن فعال به تنهایی بیشتر است. برای نشان دادن برتری فرایند ازن زنی کاتالیزوری نسبت به کربن فعال، زمان ظهور زاین در خروجی راکتور در دو فرایند در شکل ۵ مقایسه شده است. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود، زمان ظهور زاین در خروجی راکتور ازن زنی کاتالیزوری با افزایش غلظت از ۵۰ به ۳۰۰ ppm از ۲۰/۲ تا ۸/۴ ساعت کاهش یافت. در مقایسه، این زمان برای کربن فعال تنها بین ۱۸ تا ۶ ساعت

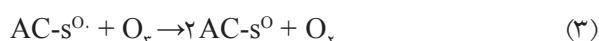
نشان داده شده است. در این مرحله از آزمایش به طور ثابت از ۱۰ گرم کربن فعال و ۰/۲ g/h ازن برای غلظت‌های ppm ۳۰۰-۵۰ استفاده شد و دیگر متغیرهای تاثیر گذار بر کارایی سیستم ثابت نگه داشته شد. بر اساس این شکل نقطه شکست حذف زاین در سیستم ازن زنی کاتالیزوری نسبت به سیستم جذب روی کربن فعال به تنهایی دیرتر اتفاق می‌افتد.

## بحث و نتیجه گیری

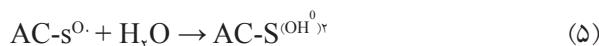
این مطالعه با هدف بررسی کارایی فرایند ازن زنی کاتالیزوری در حذف زاین از جریان هوای آلوده انجام شد. برای نمایش بهتر اثر بخشی ازن زنی کاتالیزوری، حذف زاین در سیستم ازن زنی تنها و کربن فعال تنها نیز بررسی شد. یافته‌های این تحقیق نشان داد، راندمان حذف زاین با استفاده از ازن به تنهایی در غلظت‌های مورد بررسی در این تحقیق پایین است و به طور میانگین کم‌تر از ۱۰٪ است. با توجه به شکل ۲، مشخص گردید با افزایش غلظت زاین، کارایی ازن در حذف زاین کاهش یافت، به طوری که با افزایش غلظت آن در ورودی راکتور از ۵۰ به ۳۰۰ ppm از ۱۰ به ۸٪ کاهش یافت. نتایج مطالعه ی Chao و همکارانش بر روی حذف تولوئن نشان داد که کارایی ازن به تنهایی در حدود ۸٪ بود که با یافته‌های مطالعه حاضر مطابقت دارد (۱۴). احتمالاً کوتاه بودن زمان ماند برای واکنش بین ازن و زاین می‌تواند دلیل اصلی این

بوده است. در نتیجه مشخص می شود که زمان ظهور زایلن در خروجی ازن زنی کاتالیزوری در شرایط مشابه برای فرایند ازن زنی کاتالیزوری بیش تر بوده است. به عنوان نمونه این زمان برای غلظت ۳۰۰ ppm در فرایند ازن زنی کاتالیزوری ۴۰٪ نسبت به کربن فعال تنها افزایش یافته است. به طور متوسط، در تمامی غلظت ها افزایش کارایی ۲۲٪ مشاهده گردید. kwong و همکارانش جهت حذف تولوئن، تاثیر ازن عبوری بر روی جذب های سطحی زئولیت و MCM-۴۱ را مورد ارزیابی قرار دادند. یافته های آنها نشان داد که میزان حذف تولوئن در فرایند ازن زنی کاتالیزوری نسبت به فرایند جذب سطحی زئولیت و MCM-۴۱ به تنهایی، ۴۰-۲۰٪ افزایش یافت (۲۱). هم چنین در این مطالعه، حداکثر ظرفیت حذف زایلن (ظرفیت حذف در نقطه اشباع) بر حسب گرم زایلن به ازای گرم کربن در دو سیستم کربن فعال تنها و ازن زنی کاتالیزوری با هم مقایسه و نتایج در شکل ۶ نشان داده شده است. نتایج نشان دهنده ظرفیت بیش تر فرایند ازن زنی کاتالیزوری در حذف زایلن بوده است، به طوری که اثر بخشی این فرایند در غلظت های بالاتر بیش تر بوده است. بر اساس این شکل، ظرفیت حذف زایلن در فرایند ازن زنی کاتالیزوری در غلظت ۳۰۰ ppm، ۲/۸ برابر سیستم کربن تنها بوده است. به طور متوسط، در تمامی غلظت ها افزایش کارایی ۲/۳ برابری مشاهده گردید. این نتیجه تاییدکننده کارایی بالاتر سیستم ترکیبی ازن زنی کاتالیزوری نسبت به کارایی کربن فعال به تنهایی است. عوامل متعددی می توانند بر این افزایش کارایی تاثیرگذار باشند. از دلایل بیش تر بودن حذف زایلن در فرایند ازن زنی کاتالیزوری نسبت به فرایند جذب به تنهایی این است که در فرایند ازن زنی کاتالیزوری جذب سطحی به عنوان کاتالیزور عمل نموده و باعث تجزیه ازن به اتم های فعال اکسیژن می شود. هم چنین کربن فعال با ایجاد یک بستر محصور کننده (با جذب سطحی هردوی ازن و ماده آلی فرار) زمان ماند برای واکنش ازن-VOC را افزایش می دهد و باعث افزایش کارایی فرایند حذف می شود (۱۴). از طرف دیگر جذب سطحی باعث افزایش سطح تماس ازن و مولکول های زایلن

جذب شده بر روی جاذب سطحی می شود. نتایج تحقیقات نشان می دهد در فرایند ازن زنی کاتالیزوری، در اثر واکنش میان ازن و جایگاه های اسید لوویس جاذب سطحی، ازن به اتم های فعال اکسیژن (رادیکال های اکسیژن) تجزیه می شود. این رادیکال ها باعث اکسیداسیون مولکول های زایلن جذب شده بر روی جاذب سطحی می شوند (۱۰ و ۱۴). مطالعات نشان می دهد که  $O_p$  در جایگاه های اسید لوویس جاذب سطحی، طبق واکنش های زیر به  $O^0$  و  $O_p$  تجزیه می شود (۲۱ و ۲۲):



در این معادلات  $AC-S^0$  و  $AC-s$  به ترتیب نشانگر جایگاه اسید لوویس در جاذب سطحی و مولکول های ازن جذب سطحی شده و  $AC-S^0$  و  $AC-S^0$  نشانگر گونه های اکسید سطحی هستند. علاوه بر موارد ذکر شده،  $AC-S^0$  هم چنین می تواند با مولکول های موجود در بخار آب در هوای ورودی، واکنش داده و طبق واکنش ۵، منجر به تولید رادیکال هیدروکسیل ( $OH^0$ ) شده که در تجزیه مولکول های زایلن شرکت نموده و باعث افزایش کارایی حذف می گردد:



با عبور هوای حاوی زایلن و ازن و تماس آن با بستر، واکنش های کاتالیز شده فوق انجام شده و زایلن طبق واکنش های کلی زیر تجزیه می شود. در فرایند ازن زنی کاتالیزوری در صورت واکنش کامل زایلن ( $C_8H_{10}$ ) با رادیکال های حاصل از تجزیه  $O_p$  از جمله  $OH^0$  و  $O^0$  و  $O_p$ ، معادله کلی می تواند به صورت زیر باشد:

اکسیداسیون غیر مستقیم:

(۶)



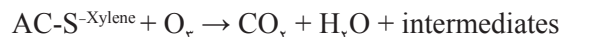
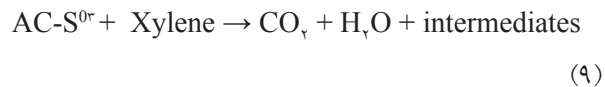
(۷)



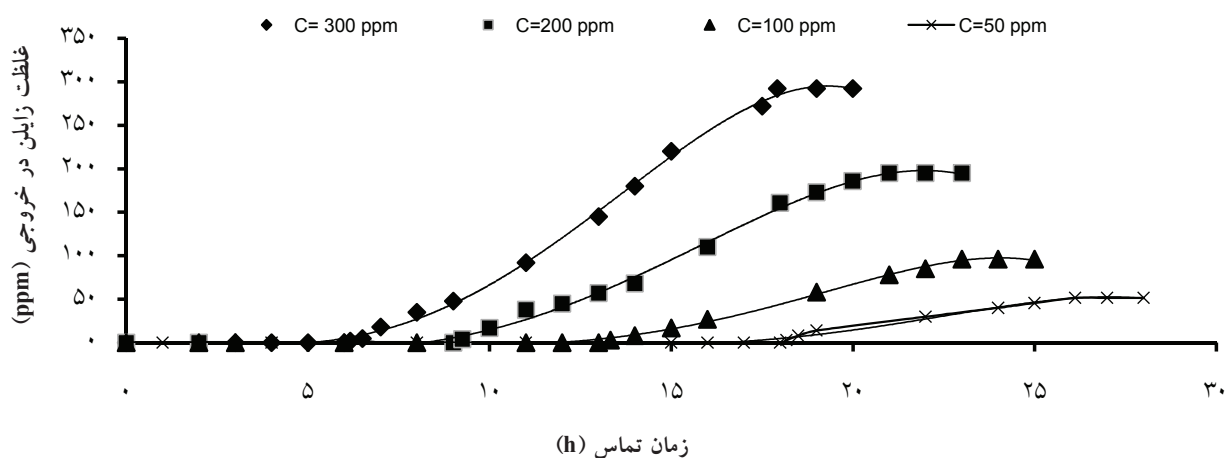
اکسیداسیون مستقیم:

در خروجی فرایند مشاهده نمی گردد. در واقع بیش تر این ترکیبات بر روی کاتالیزور جذب شده بودند (۲۱). این ویژگی از دیگر امتیازهای این فرایند نسبت به دیگر فرایندهای تصفیه هوا است. در این مطالعه مشاهده گردید بعد از چندین ساعت، کارایی سیستم های کربن فعال و ازن زنی کاتالیزوری کاهش می یابد (شکل های ۳ و ۴). این کاهش کارایی ممکن است به علت اشباع جایگاه های فعال جاذب سطحی و در نتیجه غیرفعال شدن کاتالیزور بر اثر جذب سطحی مولکول های  $H_2O$ ،  $CO_2$  و ترکیبات واسطه باشد (۱۴). نگاه دقیق تر به شکل های ۳ و ۴ نشان می دهد که غلظت زایلین خروجی در سیستم کربن فعال پس از اشباع شدن با غلظت ورودی تقریباً برابر شد. این در حالی است که در فرایند ازن زنی کاتالیزوری غلظت خروجی پس از اشباع کم تر از ورودی بوده است. این امر نشان دهنده اثر هم افزایی کاربرد توأم کربن فعال و ازن است که در آن، کربن فعال به عنوان کاتالیزور عمل نموده و باعث تجزیه مولکول های ازن به رادیکال اکسیژن و مولکول اکسیژن می شود. این رادیکال ها باعث تشدید تجزیه زایلین عبوری از بستر کربن می شوند. یافته های این مطالعه بر روی عملکرد فرایند ازن زنی کاتالیزوری با کاتالیزور کربن فعال

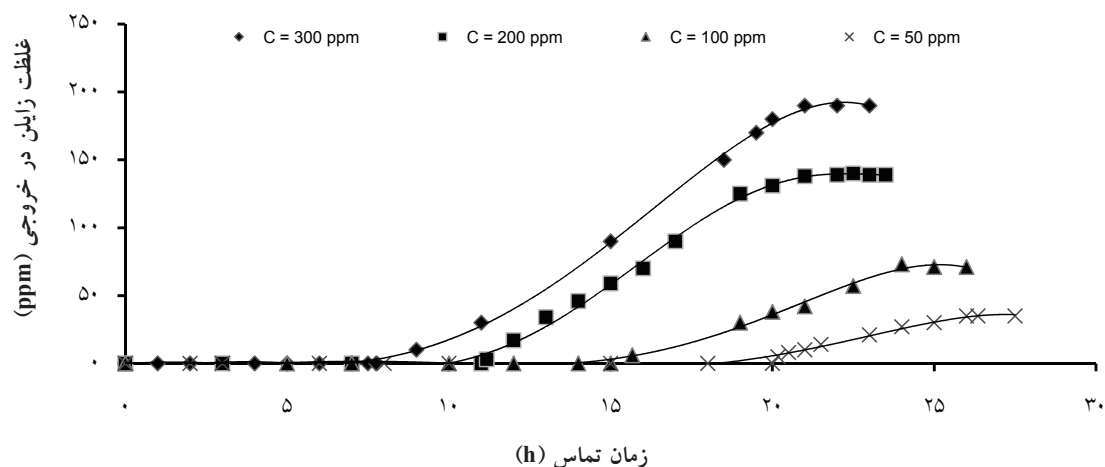
$$AC-S^{0r} + \text{Xylene} \rightarrow CO_2 + H_2O + \text{intermediates} \quad (8)$$



همان طور که در واکنش های فوق دیده می شود، زایلین به دو روش اکسیداسیون غیرمستقیم (واکنش های ۶ و ۷) و نیز اکسیداسیون مستقیم با ازن (واکنش ۸، ۹ و ۱۰) در فرایند ازن زنی کاتالیزوری تجزیه و حذف می شود. در واقع رادیکال های تولیدی یا ازن به باندهای C-C و C-H زایلین حمله کرده و باعث تجزیه آن به  $CO_2$  و  $H_2O$  می شود (۲۳). در صورت انجام واکنش کامل، محصول نهایی تجزیه زایلین،  $CO_2$  و  $H_2O$  خواهد بود. در عمل، به علت واکنش ناقص، ترکیبات واسطه نیز تولید می شود که به دلیل سطح ویژه بالای کربن فعال، می توانند جذب آن شده و این امکان وجود دارد که مجدداً توسط رادیکال های تولید شده و یا توسط ازن تجزیه شوند. نتایج تحقیقات نشان می دهد که در طی فرایند جذب سطحی در فرایند ازن زنی کاتالیزوری، اثری از ترکیبات واسطه



شکل ۳: کارایی حذف زایلین در سیستم کربن فعال در غلظت های مختلف



شکل ۴: کارایی حذف زایلین در فرایند ازن زنی کاتالیزوری در غلظت های مختلف

دارد. اکسیژن ترکیبات واسطه رادیکالی که یکی از دلایل غیرفعال شدن کاتالیزور است را اکسید می کند (۲۱)

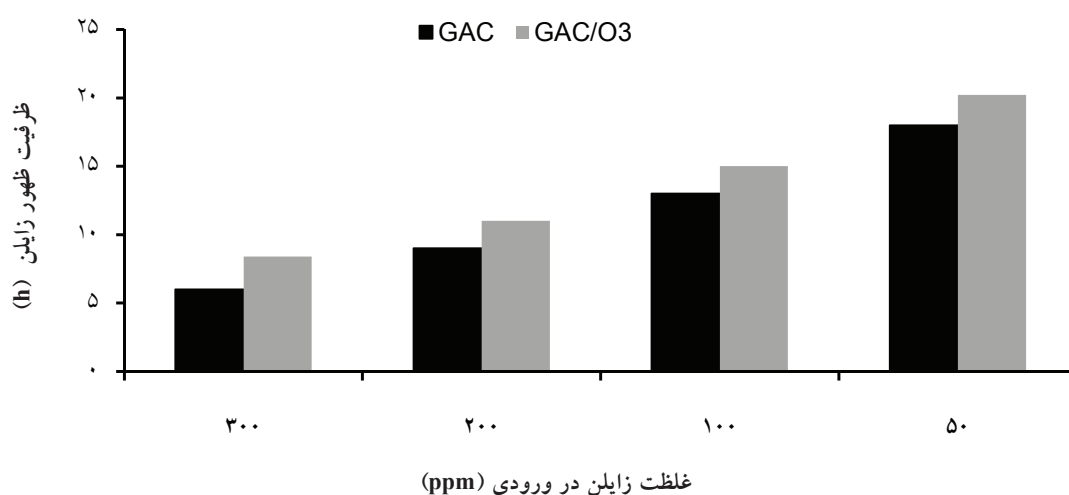
$$R^0 + O \rightarrow RO_2^0 \rightarrow CO_2 + H_2O \quad (11)$$

در این معادله  $R^0$  نشان دهنده ترکیبات واسطه رادیکالی است. علاوه بر این، در صورت حضور اکسیژن، میزان تجزیه ازن برای اکسیداسیون مواد آلی فرار افزایش می یابد (۲۵).

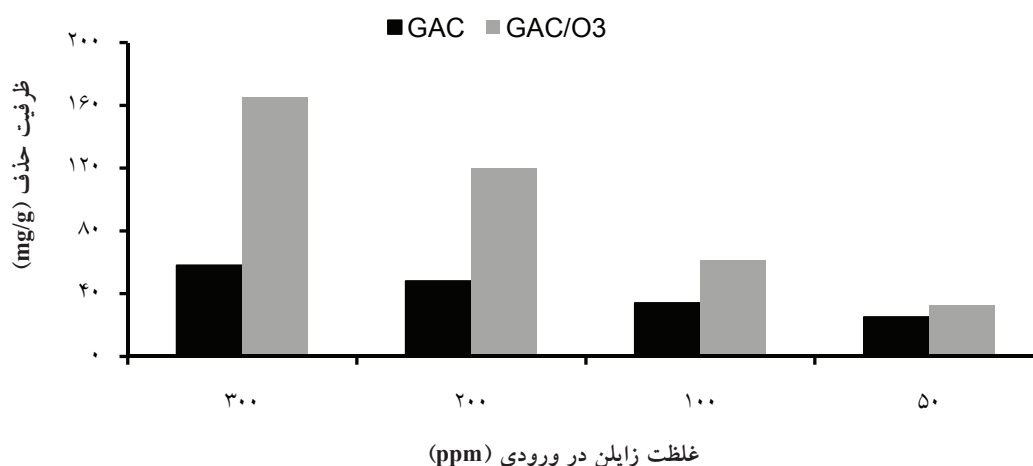
به طور خلاصه، نتایج این تحقیق نشان داد که استفاده از فرایند ازن زنی کاتالیزوری با توجه به کارآمدی و کم هزینه بودن،

در حذف فنل از فاضلاب شور، حاکی از آن است که کربن فعال خاصیت کاتالیزوری خود را بعد از استفاده مجدد حفظ می نماید (۲۴). دلیل این مشاهده با غالب بودن واکنش های کاتالیزوری نسبت به واکنش های اکسیداسیون- جذب در فرایند ازن زنی کاتالیزوری و یا احیا و بازیابی مجدد کربن فعال توصیف می گردد.

تحقیقات صورت گرفته نشان می دهد در فرایند ازن زنی کاتالیزوری، علاوه بر ازن، مولکول اکسیژن نیز نقش مهمی در تجزیه مواد آلی فرار



شکل ۵: مقایسه زمان ظهور زایلین در سیستم کربن فعال با فرایند ازن زنی کاتالیزوری در غلظت های مختلف



شکل ۶: مقایسه ظرفیت حذف زایلن در سیستم کربن فعال با فرایند ازن زنی کاتالیزوری در غلظت های مختلف

است. به علاوه، این سیستم می تواند به راحتی برای تبدیل وضعیت سیستم های جذب کربن فعال نصب شده موجود به ازن زنی کاتالیزوری استفاده شود.

می تواند یک روش موثر برای حذف مواد آلی فرار برای صنایع باشد.

به هر حال کارایی این سیستم برای دیگر مواد آلی فرار تحت شرایط آزمایشی مشابه، ممکن است متفاوت باشد، بنابراین برای تصدیق کارایی این سیستم به ارزیابی های بیش تری نیاز

## منابع

1. Khan FI, Ghoshal AK. Removal of volatile organic compounds from polluted air. *J Loss Prevent Process Indus.* 2000;13:527-45.
2. U.S. Environmental Protection Agency (USEPA). Sources of indoor air pollution- organic gases (volatile organic compounds, VOCs). Available from: <http://www.epa.gov/iaq/voc.html>.
3. Uchiyama S, Hasegawa S. Investigation of a long-term sampling period for monitoring volatile organic compounds in ambient air. *Environ Sci Technol.* 2000;34:4656-61.
4. Jeong J, Sekiguchi K, Sakamoto K. Photochemical and photocatalytic degradation of gaseous toluene using short-wavelength UV irradiation with TiO<sub>2</sub> catalyst: comparison of three UV sources. *Chemosphere.* 2004;57:663-71.
5. Cooper D, Alley F. *Air Pollution Control*, 2d ed. New York: Waver land Press Inc; 2002.
6. Delage F, Cloirec P. Mass transfer and warming during adsorption of high concentrations of VOCs on an activated carbon bed: experimental and theoretical analysis. *Environ Sci Technol.* 2000;34:4816-21.
7. Song W, Tondeur L, Luo L, Li J. VOC Adsorption in Circulating Gas Fluidized Bed. *J Adsorption.* 2005;11:853-58.
8. Davidson CT, Daugulis A. The treatment of gaseous benzene by two-phase partitioning bioreactors: a high performance alternative to the use of biofilters. *J Appli Microbio Biotechnol.* 2003; 62: 297-301.
9. Feny YY, Xiao DL, Shai XC. Adsorption of VOC on modified activated carbon fiber. *J Porous Mater.* 2008;23:231-8.
10. Kwong CW, Chao YH, Hui KS, Wan MP. Removal of VOCs from indoor environment by ozonation over different porous materials. *J Atmos Environ.* 2008;42:2300-11.
11. Weschler CJ. Ozone in indoor environments: concentration and chemistry. *Indoor Air.* 2000;10:269-88.
12. Chen W, Zhang JS, Zhang Z. Performance of air cleaners for removing multiple volatile organic compounds in indoor air. *ASHRAE Trans.* 2005;111:1101-14.
13. Lippmann M. Health effects of ozone: a critical review. *J Air Pollut Control Assoc.* 1989;39:672-95.
14. Chao CYH, Kwong CW, HuiPotential KS. Potential use of a combined ozone and zeolite system for gaseous toluene elimination. *J Hazard Mater.* 2007;143:118-27.
15. Einaga H, Futamura S. Catalytic oxidation of benzene with ozone over alumina-supported manganese oxides. *J Cataly.* 2004;227:304-12.
16. Zaror CA. Enhanced oxidation of toxic effluents using simultaneous ozonation and activated carbon treatment, *J Chem Technol Biotechnol.* 1997;70:21-28.
17. Kastner JR, Buquoi Q, Ganagavaram R, Das KC. Catalytic ozonation of gaseous reduced sulfur compounds using wood fly ash, *Environ Sci Technol.* 2005;39:1835-42.
18. Kastner JR, Das KC, Melear ND. Catalytic oxidation of gaseous reduced sulfur compounds using coal fly ash. *J Hazard Mater.* 2002;95:81-90.
19. Agency for Toxic Substances and Disease Registry (1996). Public Health Statement: Xylene. Available: <http://www.atsdr.cdc.gov/toxprofiles/tp71-c1-b.pdf>.
20. APHA, WEF, AWWA. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater.* 21st ed. Washington DC: APHA; 2005.
21. Kwong Cw, Chao CYH, Hui KS, Wan MP. Catalytic ozonation of Toluene using Zeolite and MCM-41 materials. *Environ Sci Technol.* 2008; 42: 8504-09.
22. Li W, Gibbs GV, Oyama ST. Mechanism of ozone decomposition on a manganese oxide catalyst.1. In situ Raman spectroscopy and ab initio molecular orbital calculations. *J Am Chem. Soc.* 1998;120:9041-46.
23. Seto T, Kwon SB, Hirasawa M, Yabe A. Decomposition of toluene with surface-discharge microplasma device. *Jpn J Appl Phys.* 2005;44:5206-10.
24. Moussavi Gh, Khavanin A, Alizadeh R. The

investigation of catalytic ozonation and integrated catalytic ozonation/biological processes for the removal of phenol from saline wastewaters. J Hazard Mat. 2009;1711:75-81.

25. Einaga H, Ogata A. Benzene oxidation with

ozone over supported manganese oxide catalysts: Effect of catalyst support and reaction conditions. J Hazard Mater. 2009;164:1236-41.

## **Removal of Xylene from Waste Air Stream Using Catalytic Ozonation Process**

**\*Moussavi G.R., Khavanin A., Mokarami H.R.**

Department of Occupational and Environmental Health, Faculty of Medical Sciences, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

Received; 24 April 2010 Accepted; 24 July 2010

### **ABSTRACT**

**Backgrounds and Objectives:** Volatile organic compounds (VOCs) are one of the common groups of contaminants encountered in the industrial activities, emitted through air stream into the atmosphere. To prevent the human and environmental health from the adverse effects of VOCs, air streams containing VOCs need to be treated before discharging to environment. This study was aimed at investigating the catalytic ozonation process for removing xylene from a contaminated air stream.

**Materials and Methods:** In the present work, a bench scale experimental setup was constructed and used for catalytic ozonation of xylene. The performance of catalytic ozonation process was compared with that of single adsorption and ozonation in removal of several concentration of xylene under the similar experimental conditions.

**Results:** The results indicated that the efficiency of catalytic ozonation was higher than that of single adsorption and ozonation in removal of xylene. The emerging time and elimination capacity of xylene for inlet concentration of 300 ppm was 1.4 and 5.8 times of those in adsorption system. The activated carbon acted as catalyst in the presence of ozone and thus attaining the synergistic effect for xylene degradation.

**Conclusion:** catalytic ozonation process is an efficient technique the treatment of air streams containing high concentrations of xylene. The adsorption systems can also be simply retrofitted to catalytic ozonation process and thereby improving their performance for treating VOCs.

**Key words:** Volatile organic compounds, Xylene, Adsorption, Activated carbon, Catalytic ozonation

---

\*Corresponding Author: [moussavi@modares.ac.ir](mailto:moussavi@modares.ac.ir)  
**Tel:** +98 21 82883827 **Fax:** +98 21 82883825