بررسی اثر زمان واکنش، دوز ازن و رطوبت نسبی بر کارایی فرایند uv/o_3 در تجزیه بنزن از جریان هوا

رجب رشیدی[1]، سید غلام رضا موسوی*[2]، علی خوانین[3]

1) گروه بهداشت حرفه ای، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی لرستان
2) گروه بهداشت محیط، دانشکده پزشکی، دانشگاه تربیت مدرس تهران
3) گروه بهداشت حرفه ای، دانشکده پزشکی، دانشگاه تربیت مدرس تهران

تاریخ دریافت: 91/3/16 تاریخ پذیرش: 91/12/15

چکیده

مقدمه: فرایند uv/o_3 از جمله روش های اکسیداسیون پیشرفته است که برای تجزیه ترکیبات آلی فرار به کار گرفته می شود. این مطالعه با هدف بررسی کارایی فرایند uv/o_3 در حذف بنزن از جریان هوا با توجه به اثرات رطوبت نسبی، دوز ازن و زمان ماند بر راندمان این روش انجام شده است.

مواد و روش ها: مطالعه حاضر از نوع تجربی و در مقیاس آزمایشگاهی انجام شده است. تجهیزات آزمایشی شامل پمپ هوا، پمپ تزریق سرنگی، محفظه اختلاط، روتامتر، ژنراتور تولید ازن، راکتور مجهز به یک لامپ کم فشار 15 وات uv-c و سیستم تولید رطوبت(شامل ایمپینجر و هیتر) بود. غلظت 80ppm بنزن به صورت مداوم با توجه به مقادیر مختلف رطوبت، دوز ازن و زمان ماند در معرض فرایند uv/o_3 توام، قرار گرفت و میزان غلظت های قبل و بعد از در معرض قرارگیری با فرایند مذکور با هم مقایسه گردید. داده ها با استفاده از آمار توصیفی و استنباطی و به کارگیری آزمون آنالیز واریانس سه طرفه(Three- way ANOVA) مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت.

یافته های پژوهش: یافته ها نشان داد که هر سه فاکتور رطوبت نسبی، دوز ازن و زمان ماند بر راندمان فرایند uv/o_3 مؤثر است. به طوری که با افزایش رطوبت نسبی تاحدود 60 درصد کارایی سیستم در حذف بنزن ارتقاء یافت. علاوه بر آن افزایش دوز ازن و زمان ماند نیز سبب افزایش میزان حذف بنزن تا 24/5 درصد در فرایند uv/o_3 شد.

بحث و نتیجه گیری: روش uv/o_3 با توجه به سادگی کار و انجام واکنش در شرایط عادی محیط، می تواند به عنوان یک روش کارآمد برای حذف بنزن از جریان هوا مورد استفاده قرار گیرد و در این خصوص با تأثیر متغیرهایی از جمله رطوبت نسبی، دوز ازن و زمان ماند کارایی سیستم را ارتقاء داد.

واژه های کلیدی: ترکیبات آلی فرار، بنزن، ازن، جریان هوا ، اشعه ماوراء بنفش

***نویسنده مسئول:** گروه بهداشت حرفه ای، دانشکده پزشکی، دانشگاه تربیت مدرس

Email: moussavi@modares.ac.ir

[Downloaded from sjimu.medilam.ac.ir on 2026-11-08]

مقدمه

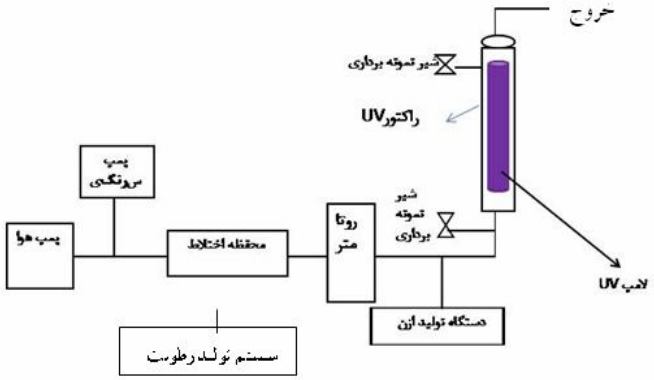
ترکیبات آلی فرار(VOCs) را می توان از دسته آلاینده های عمده عصر صنعت به حساب آورد. امروزه این گروه از ترکیبات آن چنان در زندگی اجتماعی و اقتصادی انسان ریشه دوانده اند که حتی در امور روزمره آحاد مختلف جامعه کاربرد زیادی پیدا کرده اند. VOCs به دلیل همین گستره وسیع کاربرد، در حال حاضر بعد از ذرات معلق به عنوان مهم ترین آلاینده زیست محیطی به حساب می آیند،(1). این ترکیبات با ایجاد اکسیدان های فتوشیمیایی، ایجاد باران های اسیدی، تخریب لایه ازن و ایجاد تغییر در اکوسیستم ها، سهم عمده ای در آلودگی کره خاکی دارند،(2). VOCs به طرق مختلف سلامتی انسان را تهدید کرده، به طوری که اثرات سوء بهداشتی ناشی از آن ها بسیار متنوع می باشد. این مواد علاوه بر آسیب جدی به کلیه ها، کبد، بافت خون و سیستم اعصاب مرکزی، موجب تحریک چشم ها، بینی، گلو بروز سردرد و حالت تهوع شده و هم چنین در تماس طولانی مدت با برخی از آن ها از جمله بنزن و تولوئن می تواند سبب ایجاد سرطان شود،(3). از بین هزاران نوع ترکیب آلی فرار که وجود دارد، بنزن دارای بالاترین درجه سرطان زایی و بیشترین کاربرد در ابعاد مختلف زندگی انسانی می باشد. آژانس بین المللی تحقیق بر روی سرطان(IARC) و انجمن دولتی متخصصین بهداشت صنعتی آمریکا(ACGIH) بنزن را به عنوان یک سرطان زای انسانی تأیید کرده اند،(4). به جرات می توان گفت که علی رغم مخاطرات ذکر شده در خصوص بنزن، اما به راحتی نمی توان از کاربرد بنزن و مصرف آن در بخش های مختلف زندگی صرف نظر کرد. بنا بر این قوانین محدودکننده ای از جمله پروتکل گوتنبرگ و قانون هوای پاک ایالات متحده برای کنترل انتشار این نوع آلاینده ها به محیط وضع شده است،(۵،۶). در دهه های اخیر، روش های مختلفی برای کنترل و حذف VOCs و از جمله بنزن در هوا به کار گرفته شده است. از جمله این روش ها استفاده از اشعه UV و گاز ازن به همراه سایر کاتالیست ها می باشد. در چندین مطالعه،کارایی فرایند UV و ازن به طور جداگانه با کاتالیست های مختلف در حذف ترکیبات آلی فرار از هوا بررسی شده است،(۷،۸). ایچیئورا در سال 2003 میلادی به مطالعه فتواکسیداسیون بنزن، تولوئن و اتیل بنزن با استفاده از اشعه UV پرداخت. وی در کار خود شرایط متفاوتی از جمله رطوبت نسبی را مورد بررسی قرار داد. نتایج تحقیق مذکور نشان داد که اشعه UV در حضور رطوبت می تواند سبب افزایش سرعت تخریب VOCs شود،(9). هاوارد-رد در پژوهش خود تأثیر رطوبت در حذف بنزن از هوا را مورد مطالعه قرار داد. تحقیق مذکور حاکی از آن بود که یکی از عوامل مؤثر بر جذب سطحی کربن فعال، رطوبت موجود در جریان هوای حاوی آلاینده است. وی در نتیجه کار خود اعلام کرد که با افزایش رطوبت نسبی بیش از 60 درصد از میزان حذف آلاینده به شدت کاسته می شود،(10). در پژوهش صورت گرفته توسط وانگ و همکاران، مزیت مهم استفاده از اشعه UV در مقایسه با سایر روش ها نظیر بیوفیلتراسیون، کاتالیز حرارتی و جذب سطحی را مقرون به صرفه بودن این نوع تکنولوژی برای حذف ترکیبات آلی فرار اعلام کرده اند،(11). نتایج تحقیق ایناگا و همکاران بر روی اکسیداسیون کاتالیزوری ازن نشان داد که میزان اکسیداسیون بنزن در فرایند ازن زنی کاتالیزوری با افزایش رطوبت به واکنش بهبود می یابد،(12). در مطالعه ای که یو(YU) و همکاران برای حذف تولوئن از جریان هوا با استفاده از ازن و دی اکسیدتیتانیوم انجام داده اند نیز به تأثیر مثبت رطوبت بر راندمان سیستم اشاره کرده اند،(13). در بررسی به عمل آمده برای حذف تولوئن از هوا با استفاده از ازن و جاذب های سطحی، یافته ها حاکی از آن بود که با افزایش دوز ازن و یا افزایش زمان واکنش، نسبت واکنش کاتالیزوری از بهبود خوبی برخوردار شده، به طوری که افزایش زمان ماند، منجر به افزایش 50 درصد واکنش می شود،(14). در مطالعه ای که توسط موسوی و همکاران انجام گرفته است، تأثیر متغیرهای زمان ماند، دوز ازن و رطوبت نسبی بر کارایی فرایند ازن زنی کاتالیزوری در حذف زایلن از جریان هوا بررسی شده است. نتایج نشان داد که با افزایش دوز ازن و زمان ماند، راندمان حذف زایلن افزایش می یابد. هم چنین با افزایش رطوبت نسبی تا 50 درصد کارایی

[Downloaded from sjimu.medilam.ac.ir on 2026-11-08]

فرایند حذف ارتقاء یافته، در حالی که با افزایش رطوبت نسبی به بالای 50 درصد راندمان حذف زایلن در فرایند ازن زنی کاتالیزوری کاهش یافت،(15). همان طوری که از مطالعات صورت گرفته پیداست، برای حذف ترکیبات آلی فرار از هوا، کمتر از فرایند توام uv/o_3 و توجه به پارامترهای تأثیرگذار در این واکنش ها مثل رطوبت نسبی و زمان ماند استفاده گردیده است. لذا این مطالعه با هدف بررسی کارایی فرایند uv/o_3 در تجزیه بنزن از هوای آلوده با در نظر گرفتن زمان ماند، دوز ازن و رطوبت نسبی انجام شده است.

مواد و روش ها:

در این مطالعه سیستم مورد استفاده به صورت آزمایشگاهی بوده و شامل راکتور، لامپ UV-C، پمپ هوا، پمپ تزریق سرنگی مدل TOP-3500 ساخت ژاپن، محفظه اختلاط شیشه ای با ظرفیت 20 لیتر، روتامتر، ایمپینجر، هیتر، ژنراتور تولید ازن مدل COG-OM ساخت ARDA فرانسه مطابق شکل شماره 1 برقرار گردید.



شکل شماره 1. سیستم آزمایشگاهی مورد استفاده در این پژوهش

مشخصات راکتور

راکتور مورد استفاده از جنس استیل و به شکل استوانه با ارتفاع 45 cm، قطر داخلی 7 cm و حجم مفید 1/35 لیتر و کاملاً آب بند شده بود. به منظور نزدیک کردن شرایط کار با شرایط واقعی، از جریان هوای مداوم در جهت پایین به بالا راکتور، استفاده شد. در مرکز راکتور یک عدد لامپ ماوراء بنفش 15 وات با میزان تابش 1950µw/cm2 که به وسیله جداره شیشه ای از جنس کوارتز از فضای داخلی راکتور جدا شده بود، نصب گردیده بود. برای کنترل جریان و هم چنین برداشت نمونه، در قسمت ورودی و خروجی راکتور دو شیر در نظر گرفته شده بود.

تولید ازن و سنجش آن در جریان هوا

ازن مورد نیاز توسط ژنراتور تولید ازن تأمین گردید. در این ژنراتور، ازن از طریق ایجاد تخلیه الکتریکی به وسیله جریان متناوب در میان یک شکاف تخلیه و با حضور اکسیژن یا هوای خشک تولید می شود. در این مطالعه از جریان هوا برای تولید ازن استفاده شد. جهت تأمین هوا و تولید دوزهای مختلف ازن از یک پمپ هوا که دبی آن با کمک درجه تنظیم می شد، به همراه یک روتامتر استفاده گردید. اندازه گیری دوز ازن در جریان هوا با روش جذب یدید پتاسیم(یدومتری) انجام شد. به منظور تعیین غلظت ازن، ازن خروجی از ژنراتور برای مدت 10 دقیقه از درون دو ظرف(ایمپینجر) که هر یک حاوی 200cc محلول 2 درصد یدید پتاسیم بودند، عبور داده شد.(شکل شماره 2) سپس محتوی هر یک از ظرف ها به داخل بشر ریخته شد و 10 میلی لیتر اسید سولفوریک 2 نرمال به آن ها اضافه گردید.(محلول زرد مایل به قرمز به دست آمد) در ادامه با استفاده از تیو سولفات سدیم 0/005 نرمال تا ناپدید شدن رنگ ید، تیتراسیون صورت گرفت.(محلول بی رنگ گردید) سپس 1 تا 2 قطره چسب نشاسته به محلول اضافه گردید تا آبی رنگ شود. در ادامه مجدداً با تیوسولفات

[Downloaded from sjimu.medilam.ac.ir on 2026-11-08]

سدیم، تیتراسیون تا از بین رفتن رنگ آبی ادامه یافت و محلول کاملاً بی رنگی به دست آمد. در پایان حجم تیوسولفات سدیم مصـــرفی یادداشـــت و مـــیزان ازن تولیدی از رابطه زیر تعیین شد.(16)

$$\text{دوز ازن (mg/min)} = \left(\frac{(A+B)\times N\times 24}{T}\right)$$

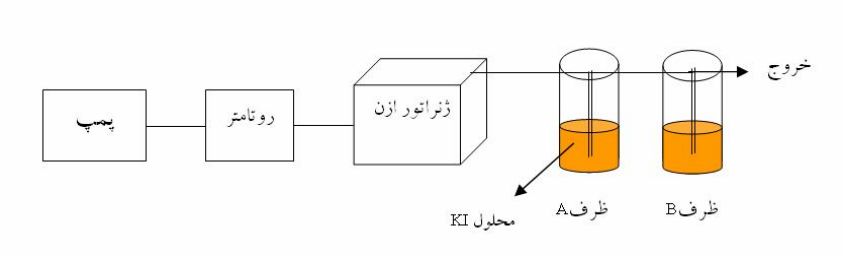
در این رابطه:

A: میلی لیتر تیوسولفات سدیم مصرفی برای ظرف اول

B: میلی لیتر تیو سولفات سدیم مصرفی برای ظرف دوم

N: نرمالیته تیوسولفات سدیم

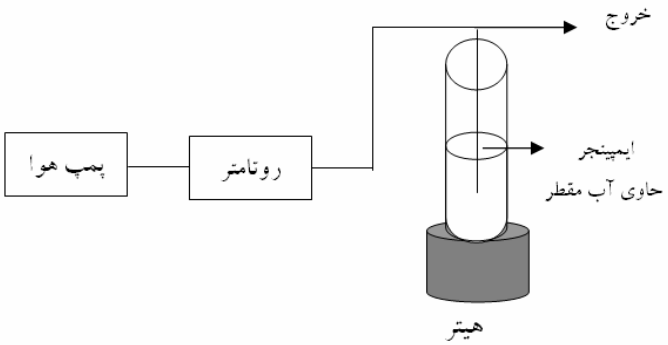
T: زمان ازن زنی بر حسب دقیقه



شکل شماره 2. شماتیک سیستم تولید و سنجش ازن در جریان هوا

سیستم تولید رطوبت

سطوح مختلف رطوبت نسبی مورد استفاده در این تحقیق(70-40 درصد) با استفاده از سیستمی شامل پمپ هوا، ایمپینجر، روتامتر و هیتر ساخته شد. بدین صورت که با تولید هوا توسط پمپ هوا و تنظیم میزان جریان با استفاده از روتامتر، جریان مشخص هوا توسط شیلنـــگ های رابـــط از درون ایمـــپینجر حاوی 200cc آب مقطر که بر روی هیتر قرار گرفته بود، عبور داده می شـــد.(شکل شماره 3) با تغییر میزان جریان هوای عبوری از درون ایمـــپینجر و یا تغـــییر دمای آب درون ایمپیـــنجر و انـــدازه گیری مرتـــب رطوبت در خروجی سیستـــم توســـط رطوبت سنج دیجیتال مدل TES 1360 ساخت تایوان، رطوبت های مورد نظر ساخته شد.



شکل شماره 3. شماتیک سیستم تولید رطوبت

[Downloaded from sjimu.medilam.ac.ir on 2026-11-08]

چگونگی تولید اشعه UV-C

اشعه UV-C با به کارگیری یک عدد لامپ 15 وات ماوراء بنفش تک طول موجی 254 نانومتر ساخت شرکت فیلیپس هلند که در درون ستون شیشه ای استوانه ای شکل از جنس کوارتز و در مرکز راکتور نصب گردیده بود، فراهم شد. به منظور سنجش میانگین دانسیته توان تابشی لامپ در فضای داخل راکتور، میزان اشعه ماوراء بنفش در دو ناحیه روی لامپ و فاصله 2cm از لامپ(با توجه به قطر داخلی راکتور) توسط دستگاه دیجیتال اندازه گیری اشعه UV-C ساخت کشور تایوان مدل 732 بر حسب میکرو وات بر سانتی متر مربع سنجش گردید و میانگین آن یعنی 1950µw/cm2 ملاک عمل قرار گرفت.

چگونگی تولید بخارات بنزن در جریان هوا

در این مطالعه، از غلظت بنزن 80ppm در جریان هوا استفاده شد. بدین منظور از بنزن 99 درصد شرکت Merck برای ساخت غلظت مذکور در جریان هوا استفاده گردید. برای این کار پمپ تزریق سرنگی(Syring Pump) به همراه پمپ هوا به کار گرفته شد. برای دست یابی به غلظت مورد نظر بنزن در جریان هوای ورودی به راکتور، سعی گردید که دمای محیط آزمایش و مایع بنزن ثابت مانده و با تغییر میزان تزریق بنزن توسط پمپ سرنگی و یا تغییر دبی هوا با استفاده از روتامتر، به غلظت 80ppm بنزن در هوا برسیم. البته با توجه به این که هر گونه نوسان جریان هوا می تواند بر میزان غلظت مؤثر باشد، لذا به منظور آرامش جریان از یک مخزن شیشه ای 20 لیتری بعد از دستگاه تزریق سرنگی استفاده گردید. از دستگاه قرائت مستقیم Phochek 5000 ساخت انگلستان برای اندازه گیری غلظت بنزن در جریان هوا استفاده شد. این دستگاه با روش آشکارساز یون ها (PID) به صورت هم زمان نمونه برداری و سنجش را انجام می دهد. البته به منظور بررسی صحت کار دستگاه Phochek برای هر متغیر تعدادی نمونه با روش گاز کروماتوگرافی یونش شعله ای(FID) نیز اندازه گیری گردید، که نتایج به دست آمده با نتایج حاصل از دستگاه قرائت مستقیم مشابه بود.

چگونگی انجام آزمایشات

برای بررسی تأثیر فرایند uv/o_3 در تجزیه بنزن از جریان هوا، غلظت 80 ppm بنزن در جریان هوای عبوری از درون راکتور، به طور مداوم در معرض فرایند مذکور قرار گرفت. به منظور بررسی تأثیر زمان واکنش با تغییر دبی جریان هوای ورودی به راکتور از L/min 5-0/5 با توجه به حجم راکتور به ترتیب زمان ماندهایی بین(162 و 81 و 27 و 14 ثانیه) برای در معرض قرارگیری بنزن با فرایند uv/o_3 فراهم شد. مقدار تابش اشعه UV-C با توجه به ثابت بودن لامپ در مرکز راکتور، یک حالت و به میزان 1950 µw/cm2 بود. دوزهای مختلف ازن(0/4 g/h و 0/3 و 0/2) نیز با تغییر میزان هوای ورودی به ژنراتور ازن، تأمین گردید. هم چنین تأثیر درصدهای مختلف رطوبت(70 و 60 و 50 و 40) در چگونگی حذف بنزن از جریان هوا با توجه به زمان ماند و دوزهای مختلف ازن مورد بررسی قرار گرفت. کلیه آزمایشات پنج بار در دمای بین 25°C- 23 و زیر هود تکرار گردید.

روش تجزیه و تحلیل داده ها

با توجه به این که برای هر مرحله آزمایشات 5 بار تکرار شده بود، در نتیجه برای هر پارامتر میانگین 5 بار تکرار ملاک عمل قرار گرفت. پس از ورود داده ها به کامپیوتر، اطلاعات آماری با استفاده از نرم افزار SPSS-win 16 و به کارگیری آزمون تحلیل واریانس سه طرفه(Three- Way ANOVA) آنالیز گردیدند و نتایج در قالب جداول و نمودارهای خطی ارائه و مورد بحث قرار گرفتند.

یافته های پژوهش

تأثیر رطوبت نسبی هوای ورودی به راکتور بر میزان حذف بنزن در فرایند uv/o_3

برای بررسی تأثیر رطوبت نسبی بر کارایی حذف بنزن در فرایند uv/o_3، مقادیر رطوبت کمتر از 40، 50، 60 و 70 درصد در زمان ماندهای مختلف در دمای ثابت 25 °C-23 مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که با افزایش رطوبت نسبی هوای ورودی به راکتور تا حدود 60 درصد کارایی سیستم uv/o_3 سیر صعودی دارد. اما رطوبت هوای حدود 70 درصد و بالاتر سبب تنزل کارایی سیستم در حذف بنزن شد(نمودار شماره

[Downloaded from sjimu.medilam.ac.ir on 2026-11-08]

۱،۲ و جدول شماره 1). به طوری که بیشترین میزان حذف بنزن(24/5 درصد) در زمانی اتفاق افتاد که رطوبت هوای ورودی به سیستم بین 50 تا 60 درصد بود.(جدول شماره 1)

تأثیر دوز ازن بر میزان حذف بنزن از جریان هوا در فرایند uv/o_3

جهت بررسی تأثیر دوز ازن بر روی حذف بنزن در فرایند uv/o_3، دوز ازن از 0/2 تا g/h 0/4 و زمان ماند واکنش بین 162-14 ثانیه تغییر داده شد. در این مرحله از آزمایش رطوبت نسبی 50 درصد(با توجه به این که این میزان رطوبت شرایط بهینه در فرایند uv/o_3 برای حذف بنزن بود) و دمای آزمایش 23-25°C در نظر گرفته شد. همان طوری که از نمودارهای شماره ۳،۴ و جدول شماره 1 ملاحظه می گردد، درصد حذف بنزن در سیستم آزمایشی با افزایش دوز ازن از 0/2 به g/h 0/4 از 20/1 درصد به 24/5 درصد ارتقاء یافت.

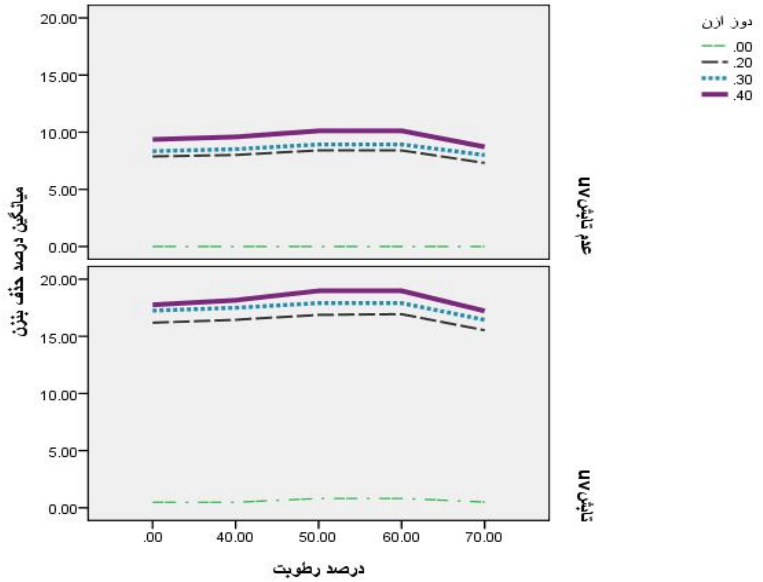
تأثیر زمان واکنش بر میزان حذف بنزن در فرایند uv/o_3

برای بررسی اثر زمان واکنش بر کارایی فرایند uv/o_3 در حذف بنزن از جریان هوا، زمان های واکنش 14،27، 81 و 162 ثانیه در نظر گرفته شد. در این مرحله از کار رطوبت نسبی 50 درصد و دمای واکنش 23-25°C نگه داشته شد. نتایج نمایانگر آن بود که با افزایش زمان واکنش از 14 به 162 ثانیه درصد حذف بنزن در دوز ازن g/h 0/4 از 16/7 درصد به 24/5 درصد ارتقاء یافت.(نمودار شماره 4 و جدول شماره 1)

جدول شماره 1. درصد حذف بنزن در فرایند UV/O_3 برای زمان ماند، رطوبت نسبی و دوزهای ازن مختلف

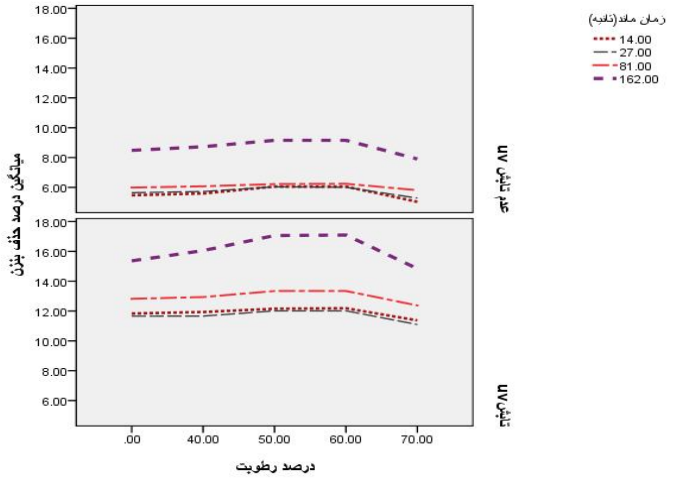
دوز ازن (g/h)	0/2				0/3				0/4			
زمان ماند(ثانیه)رطوبت نسبی	14	27	81	162	14	27	81	162	14	27	81	162
کمتر از 40	15/2	14/7	16/3	18/8	15/9	16	17	20	16/1	16/3	17/1	21/5
40	15/4	15/1	16/5	19/5	16	16/3	17/1	20/6	16/2	16/3	17/3	23
50	15/8	15/5	16/8	20/1	16/2	16/6	17/4	21/5	16/7	16/7	18/1	24/5
60	15/9	15/7	16/8	20/3	16/2	16/6	17/4	21/5	16/8	16/7	18/1	24/5
70	14/6	14/9	15/8	18/1	15/1	15/1	16/1	19/6	15/7	15/6	16/6	20/9

P<0.001

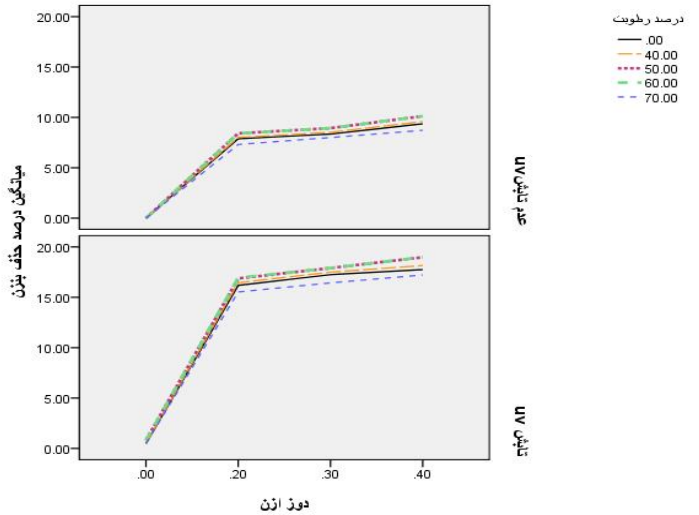


نمودار شماره 1. تاثیر رطوبت نسبی هوای ورودی به راکتور بر میزان حذف بنزن در فرایند UV/O_3 با توجه به دوزهای مختلف ازن

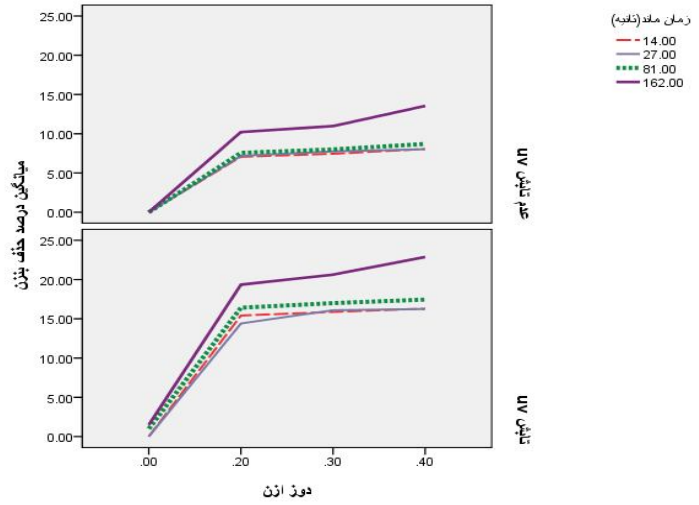
[Downloaded from sjimu.medilam.ac.ir on 2026-11-08]



نمودار شماره 2. تاثیر رطوبت نسبی هوای ورودی به راکتور بر میزان حذف بنزن در فرایند UV/O_3 با توجه به زمان ماند های مختلف



نمودار شماره 3. تاثیر دوز ازن بر میزان حذف بنزن از جریان هوا در فرایند UV/O_3 برای مقادیر مختلف رطوبت



نمودار شماره 4. تاثیر زمان ماند بر میزان حذف بنزن از جریان هوا در فرایند UV/O_3 برای دوزهای مختلف ازن

[Downloaded from sjimu.medilam.ac.ir on 2026-11-08]

بحث و نتیجه گیری

این پژوهش به منظور بررسی اثر رطوبت نسبی، دوز ازن و زمان واکنش بر کارایی فرایند uv/o_3 در تجزیه بنزن از جریان هوا انجام شده است. نتایج این تحقیق نشان داد که با افزایش رطوبت نسبی هوای ورودی به راکتور تا حدود 60 درصد، راندمان فرایند uv/o_3 افزایش می یابد. به طوری که بالاترین درصد حذف بنزن(24/5 درصد) در رطوبت 50 تا 60 درصد اتفاق افتاد. اما با افزایش رطوبت سیستم از 60 درصد به بالا میزان حذف بنزن سیر نزولی پیدا نمود و در رطوبت 70 درصد به 20/9 درصد کاهش یافت.(جدول شماره 1) در سایر مطالعاتی که از روش های اکسیداسیون پیشرفته برای حذف ترکیبات آلی فرار استفاده شده، نیز به تأثیر رطوبت موجود در هوا بر چگونگی حذف تأکید گردیده است. یو(YU) و همکاران میزان رطوبت 20 درصد را برای ارتقاء حذف VOC ها در روش های اکسیداسیون پیشرفته اعلام کرده اند،(13). موسوی و همکاران در مطالعه ای به بررسی اثر رطوبت نسبی بر چگونگی حذف زایلن در فرایند ازن زنی کاتالیزوری پرداخته اند. آنان میزان رطوبت نسبی 50 درصد را شرایط بهینه برای عملکرد سیستم گزارش کرده اند.(15). ایناگا و همکاران نیز برای تجزیه بنزن از جریان هوا با استفاده از ازن زنی کاتالیزوری به تأثیر مثبت رطوبت نسبی بر میزان حذف تأکید داشته اند،(12). در رابطه با اثر بخشی رطوبت بر وضعیت حذف بنزن در فرایند uv/o_3، به طور کلی می توان گفت، یکی از فاکتورهای مهمی که در واکنش های AOP (Advanced Oxidation Processes) سبب حذف ترکیبات آلی فرار می شود، تشکیل رادیکال های $\dot{O}H$ می باشد،(10). در نتیجه افزایش راندمان حذف بنزن با حضور رطوبت در فرایند uv/o_3 می تواند دلیل خوبی برای تشکیل رادیکال های هیدروکسیل در داخل راکتور باشد. در واقع تشکیل رادیکال های OH بر اثر واکنش بین بخار آب موجود در جریان هوا و فرایند uv/o_3 طبق معادلات زیر می باشد. در سایر مطالعات مشابه نیز به این نکته اشاره شده است.(13)

$$H_2O+O_3+UV \rightarrow H_2O_2+O_2$$
$$H_2O_2+UV \rightarrow 2\dot{O}H$$
$$H_2O_2+2O_3 \rightarrow 2\dot{O}H$$

کاهش راندمان حذف بنزن در فرایند uv/o_3 برای رطوبت های بالاتر از 60 درصد شاید به دلیل مملو شدن فضای داخل راکتور از بخار آب و در نتیجه تمایل بیشتر فاکتورهای رادیکالی($\dot{O}H$ و $\dot{O}$) به مولکول های آب که نسبت به پیوندهای دوگانه بنزنی از استحکام کمتری برخوردار بوده، باشد. آزمون تحلیل واریانس سه طرفه نشان داد که بین متغیر رطوبت و میزان حذف بنزن رابطه معنی داری وجود دارد.($P<0.001$). به عبارتی میزان رطوبت بر درصد حذف بنزن در فرایند uv/o_3 تأثیر دارد.

در رابطه با تأثیر دوز ازن بر میزان حذف بنزن از جریان هوا، یافته های این مطالعه نشان داد که با افزایش دوز ازن ورودی به راکتور، راندمان فرایند uv/o_3 در تجزیه بنزن بیشتر می شود. به طوری که با افزایش دوز ازن از 0/2 به 0/4 g/h میزان حذف بنزن از 20/1 به 24/5 درصد رسید. آزمون توکی(Tukey) نشان داد که بین دوزهای مختلف ازن و میزان حذف بنزن رابطه معنی داری وجود دارد.($P<0.001$) به تعبیر دیگر هر چه میزان دوز ازن بیشتر شود، درصد حذف بنزن نیز افزایش می یابد. در سایر مطالعات انجام شده در این زمینه نیز گزارش شده است که دوز ازن بیشتر باعث ارتقاء کارایی فرایند حذف آلاینده های آلی از هوا می شود. به طوری که در بررسی به عمل آمده برای حذف تولوئن در واکنش های ازن زنی کاتالیزوری، با افزایش دوز ازن نسبت واکنش کاتالیزوری بهبود یافته است،(14). در مطالعه ای که توسط موسوی و همکاران برای حذف زایلن از هوا با استفاده از فرایند ازن زنی کاتالیزوری به عمل آمده است، نیز با افزایش دوز ازن ورودی به راکتور، راندمان حذف زایلن افزایش یافته است،(15). نکته قابل توجه در این رابطه آن است که هر چند با افزایش دوز ازن، راندمان سیستم حذف آلاینده ارتقاء می یابد، اما از آنجایی که فرایند uv/o_3 بدون حضور هیچ گونه جاذبی صورت می گیرد، در نتیجه مقدار زیادی از ازن بدون شرکت در واکنش از خروجی سیستم خارج می شود. لذا این نکته می بایست

[Downloaded from sjimu.medilam.ac.ir on 2026-11-08]

در ارتباط با آلودگی هوا مد نظر قرار گیرد. در پژوهش حاضر با افزایش دوز ازن از 0/2 به 0/4 g/h میزان ازن در خروجی راکتور از 0/05 به 0/15 g/h افزایش یافت.

در خصوص چگونگی تأثیر O_3 در تجزیه بنزن از جریان هوا می توان گفت از آن جایی که ازن یک ماده اکسیدکننده است، می تواند هم به صورت مستقیم مولکول های بنزن را تجزیه کند و هم با حمله به مولکول های آب سبب تجزیه آن ها و ایجاد رادیکال هیدروکسیل($\dot{O}H$) شده، که در نهایت این رادیکال نیز در واکنش با مولکول های بنزن نقش عمده ای دارد. از طرفی ازن در اثر واکنش با اشعه UV به اتم های فعال اکسیژن(رادیکال های اکسیژن) تجزیه شده که این رادیکال ها نیز خود به دو صورت در تجزیه بنزن شرکت دارند. نخست آنکه، رادیکال های $\dot{O}$ می تواند مستقیماً به مولکول های بنزن حمله کرده و یا غیرمستقیم با ایجاد $\dot{O}H$ ناشی از واکنش با مولکول های بخار آب موجود در هوای ورودی به راکتور، مطابق با معادلات زیر سبب اکسیداسیون بنزن شوند.(۷،۸)

$$Benzen + O_3 \rightarrow CO_2 + H_2O + \text{int}\,erediates$$

$$UV + O_3 \rightarrow O_2 + {}^{\bullet}O$$

$${}^{\bullet}O + Benzen \rightarrow CO_2 + H_2O + \text{int}\,erediates$$

$${}^{\bullet}O + H_2O \rightarrow 2{}^{\bullet}OH$$

$${}^{\bullet}OH + Benzen \rightarrow CO_2 + H_2O + \text{int}\,erediates$$

البته در فرایند uv/o_3 به دو دلیل نمی توان انتظار درصد حذف بالایی را داشت. یکی به دلیل دینامیک بودن سیستم، زمان تماس فاکتورهای اکسیدکننده ای نظیر O_3 با ترکیبات آلی فرار و مولکول های بخار آب اندک بوده و لذا امکان کمتری برای تشکیل اتم های فعال اکسیژن و رادیکال های $\dot{O}H$ وجود دارد. و نکته دوم آن که این روش بدون حضور هیچ گونه کاتالیزوری صورت می گیرد، در نتیجه امکان انجام واکنش های غیرمستقیم بین آلاینده و فاکتورهای اکسیدکننده به خاطر در اختیار نبودن بستر مناسب برای بالا بردن زمان ماند، کمتر است. در بررسی تأثیر زمان واکنش بر میزان حذف بنزن نیز یافته ها نشان داد که هر چه زمان واکنش طولانی تر باشد، باعث می شود که بنزن برای مدت بیشتری در معرض خاصیت اکسیدکنندگی فرایند uv/o_3 قرار گیرد و در نتیجه امکان تجزیه آن زیادتر می شود. در مطالعه ای که برای حذف تولوئن با استفاده از ازن و جاذب های سطحی صورت گرفته است، افزایش زمان واکنش منجر به افزایش 50 درصد راندمان کار شده است،(14). در سایر مطالعات نیز به تأثیر زمان ماند بر راندمان حذف VOC ها در فرایندهای اکسیداسیون پیشرفته تأکید شده است، که با نتایج حاصل از مطالعه حاضر هم خوانی دارد،(15). در این مطالعه ملاحظه گردید، هنگامی که زمان واکنش از 14 به 162 ثانیه افزایش یافت، درصد حذف بنزن برای کلیه مقادیر ازن، ارتقاء پیدا کرد. به طوری که برای دوز ازن 0/4 g/h از 16/7 درصد به 24/5 درصد رسید. آزمون مقایسات دو به دو توکی نشان داد که بین زمان ماندهای مختلف و میزان حذف بنزن در فرایند uv/o_3 رابطه معنی داری وجود دارد.($P<0.001$) به طوری که هر چه زمان ماند واکنش افزایش یابد میزان حذف بنزن نیز بیشتر می شود.

نتایج این مطالعه نشان داد که فرایند uv/o_3 می تواند در حذف ترکیبات آلی فرار مؤثر باشد. در نتیجه با توجه به امکان پذیر بودن این فرایند در شرایط معمول، این فرایند تصفیه می تواند به عنوان یک روش کارآمد در برنامه کنترل آلاینده های فرار قرار گیرد. هم چنین در این خصوص می توان با تأثیر متغیرهایی از جمله رطوبت هوا، دوزهای مختلف ازن و کنترل زمان واکنش به ارتقاء این فرایند کمک کرد.

سپاسگزاری

از معاونت محترم تحقیقات و فناوری دانشگاه علوم پزشکی لرستان به خاطر فراهم کردن فضای لازم برای انجام آزمایشات و هم چنین کلیه افرادی که ما را در مراحل مختلف کار این پروژه یاری نموده اند کمال تشکر را داریم.

[Downloaded from sjimu.medilam.ac.ir on 2026-11-08]

References

1-Khan FI, Ghoshal AK. Removal of volatile organic compounds from polluted air. J Loss Prevent Process Indus 2000;13:527-45.
2-Di-Nardi SR. The occupational environment: Its evaluation, control and management. Environ Health 2003;8:78-82.
3-World Health Organization (WHO). Indoor Air Pollution and Health. Pollution 2008;45:421-9.
4-Smith CJ, Perfetti TA, Rumple MA. IARC Group 2A Carcinogens reported in cigarette mainstream smoke. J Food Chem Toxicol 2000;38:371-83.
5-Thod G. Indoor environment quality. Air Pollut 2001;311:112-8.
6-Hogue C. Cancer risk: In chemical and engineeering news. Chem Pollut 2005;72: 423-7.
7-Souhail A. Degradation of polycyclic aromatic hydrocarbons (pahs) in water and sediments by field effect TIO2 catalysis. Environl Protect 2005;56:42-52.
8-Linda-Zou YL. Removal of VOCs by photocatalysis process using adsorption enhanced TiO_2-SiO_2 catalyst. Chem Engineer Process 2006;45:959-64.
9-Ichiura H, Kitaoka T, Tanaka H. Removal of indoor pollutants under UV irradiation by a composite TiO_2-Zeolite sheet prepared using papermaking. Chemo Issu Tech 2003;77:79-83.
10-Howard-Reed C, Nabinger Sj. Predicting gaseous air cleaner performance in the Field. Proceed Indoor Air 2005;91:1335-9.
11-Wang LK, Pereira NC, Hung YT. Air Pollution Control Engineering. Humana Press 2004;123:154-53.
12-Einaga H, Ogatab A. Benzene oxidation with ozone over supported manganese oxide catalysts: Effect of catalyst support and reaction conditions. J Hazard Mat 2008;23: 64-70.
13-Yu KP, Lee GWM. Decomposition of gas-phase toluene by combination of ozone and photocatalytic oxidation process (TiO_2/UV, TiO_2/UV/O_3, and UV/O_3). Appli Catal B: Environ 2007;75:29-38.
14-Kwong Cw, Chao CYH, Hui KS, Wan MP. Catalytic ozonation of Toluene using Zeolite and MCM-41 materials. Environ Sci Technol 2008;42:8504-9.
15-Moussavi GR, Khavanin A, Mokarami HR. An investigation of the effects of reaction time, ozone dosage, and relative humidity on the efficacy of the catalytic ozonation process in removing xylene from the airflow. J Occupation Health 2010;7: 60-7.
16-Clescer LS, Greenberg AE, Eaton AD, editors. Standard methods for the examination of water and wastewater. 21th ed. Washington DC:American Public Health Association; 2005.

[Downloaded from sjimu.medilam.ac.ir on 2026-11-08]

The Effect of Reaction Time, Ozone Dosage and Relative Humidity on The Performance of UV/O_3 Process in The Removal of Benzene From The Airflow

Rashidi R[1], Moussavi S.Gh.R[2], Khavanin A[3]*

(Received: 5 Jun. 2012 Accepted: 5 Mar. 2013)

Abstract

Introduction: UV/O_3 process is an advanced oxidation process that can be used to break down volatile organic compounds. This study was designed to examine the effectiveness of the UV/O_3 process in the removal of benzene from the airflow, considering the effects of such intervening factors as relative humidity, ozone dosage, and exposure time.

Methods & Materials: The present study was an experimental research that was carried out on a laboratory scale. The laboratory equipment included an air pump, an injection pump, a mixing chamber, a rotameter, an ozone generator, a low-pressure15-watt UV-C lamp, and a humidity generating system (consisting of an impinger and a heater). A concentration of 80 ppm of benzene was constantly exposed to the combined UV/O_3 process under varying conditions of changing humidity levels, changing ozone dosages, and changing exposure times and the different concentrations of benzene were measured and compared before and after exposure to the UV/O_3 process. The data were analyzed using descriptive and inferential statistics and three-way ANOVA.

Findings: The findings showed that all three factors of relative humidity, ozone dosage, and exposure time affected the effectiveness of the UV/O_3 process in removing benzene. Elevation of relative humidity enhanced the effectiveness of the system in removing benzene up to 60%. In addition, increasing ozone dosage and exposure time led to improvements in the removal of benzene up to 24.5% via the UV/O_3 process.

Discussion & Conclusion: Given the ease of use and feasibility of performing the UV/O_3 process under common environmental conditions, this method can be used as a powerful procedure in removing benzene from the airflow. Additionally, changing variables such as relative humidity, ozone dosage, and exposure time can enhance the effectiveness of the system.

Keywords: volatile organic compounds, benzene, ozone, ultraviolet radiation, airflow

1. Dept of Occupational Health, School of Health, Lorestan University of Medical Sciences, Lorestan, Iran
2. Dept of Environmental Health, School of Medicine, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
3. Dept of Occupational Health, School of Medicine, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
** (corresponding author)*

[Downloaded from sjimu.medilam.ac.ir on 2026-11-08]