

# Removal of Air Ammonia in a Spray Tower by Dilute Sulfuric Acid Solution using Operating Parameter Alteration

Mohammad Bagher Abdollahi<sup>1</sup> , Mohammad Javad Jafari<sup>2</sup>, Davod Panahi<sup>3</sup>, Nafise Azimi<sup>4</sup>, Ali Reza Rahmati<sup>5,\*</sup> 

<sup>1</sup> Lecturer, Department of Occupational Health and Work Safety, Shoushtar Faculty of Medical Sciences, Shoushtar, Iran

<sup>2</sup> Professor, Department of Occupational Health and Work Safety, School of Public Health and Safety, Shahid Beheshti University of Medical Sciences, Tehran, Iran

<sup>3</sup> Assistant Professor, Department of Occupational Health and Work Safety, School of Public Health and Safety, Shahid Beheshti University of Medical Sciences, Tehran, Iran

<sup>4</sup> MSc, School of Health, Hamadan University of Medical Sciences, Hamadan, Iran

<sup>5</sup> MSc, School of Health, Shahid Beheshti University of Medical Sciences, Tehran, Iran

\* **Corresponding Author:** Ali Reza Rahmati, School of Health, Shahid Beheshti University of Medical Sciences, Tehran, Iran. Email: alrahmati@aol.com

## Abstract

**Received:** 23/12/2019

**Accepted:** 08/04/2020

### How to Cite this Article:

Abdollahi MB, Jafari MJ, Panahi D, Azimi N, Rahmati AR. Removal of Air Ammonia in a Spray Tower by Dilute Sulfuric Acid Solution using Operating Parameter Alteration. *J Occup Hyg Eng.* 2020; 7(2): 1-7. DOI: 10.52547/johe.7.2.1

**Background and Objective:** Workplace air quality is a very important factor in community health, which is measured using airborne contaminants evaluation and measurement. One of these airborne pollutants in industries is ammonia gas. Spray towers are important components of air pollution control. This study aimed to investigate the effects of dilute sulfuric acid solution on the efficiency of ammonia removal in a spray tower.

**Materials and Methods:** This study evaluated the rate of ammonia removal from the air stream using a spray tower with laboratory criterion by altering the liquid pressure and nozzles, as well as the inlet density. The volume of the used airstream was 3737.82 l/min; moreover, one, two, and three 20-micron diameter nozzles were used with the dilute sulfuric acid solution. The data were analyzed in SPSS software (version 21) through one-way ANOVA.

**Results:** An increase in the number of nozzles and washing liquid pressure of the spray tower increased the ammonia removal efficiency and enhanced the input load of the system which reduced the elimination efficiency ( $P < 0.05$ ).

**Conclusion:** An increase in the number of nozzles, the operating pressure of the washing liquid, and the density of the pollutant gas lead to a higher level of spraying tower efficiency in terms of eliminating the ammonia gas from the air stream.

**Keywords:** Air; Ammonia Removal; Spray Tower; Sulfuric Acid Solution

## حذف آمونیاک هوا در یک برج پاشنده توسط محلول رقیق اسید سولفوریک با استفاده از تغییر پارامترهای عملیاتی

محمد باقر عبدالمهی<sup>۱</sup>، محمد جواد جعفری<sup>۲</sup>، داود پناهی<sup>۳</sup>، نفیسه عظیمی<sup>۴</sup>، علیرضا رحمتی<sup>۵\*</sup>

<sup>۱</sup> مربی، گروه بهداشت حرفه‌ای و ایمنی کار، دانشکده علوم پزشکی شوشتر، شوشتر، ایران

<sup>۲</sup> استاد، گروه بهداشت حرفه‌ای و ایمنی کار، دانشکده بهداشت و ایمنی، دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی، تهران، ایران

<sup>۳</sup> استادیار، گروه بهداشت حرفه‌ای و ایمنی کار، دانشکده بهداشت و ایمنی، دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی، تهران، ایران

<sup>۴</sup> کارشناس ارشد، گروه مهندسی بهداشت حرفه‌ای، دانشکده بهداشت، مرکز تحقیقات علوم بهداشتی، دانشگاه علوم پزشکی همدان، همدان، ایران

<sup>۵</sup> کارشناس ارشد، گروه مهندسی بهداشت حرفه‌ای و ایمنی کار، دانشکده بهداشت و ایمنی، دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی، تهران، ایران

\* نویسنده مسئول: علیرضا رحمتی، گروه مهندسی بهداشت حرفه‌ای و ایمنی کار، دانشکده بهداشت و ایمنی، دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی، تهران، ایران. ایمیل: alrahmati@aol.com

### چکیده

**سابقه و هدف:** کیفیت هوای محیط کار عامل بسیار مهمی در سلامت جامعه است که از طریق اندازه‌گیری و ارزیابی آلودگی‌های هوا برد سنجیده می‌شود. یکی از این آلاینده‌های هوا برد در صنایع، گاز آمونیاک است. برج‌های اسپری به‌عنوان یکی از اجزای مهم کنترل آلودگی هوا محسوب می‌شوند. لذا این مطالعه با هدف بررسی تأثیر استفاده از محلول رقیق‌شده اسید سولفوریک بر کارایی حذف آمونیاک هوا در یک برج پاشنده انجام پذیرفت.

**مواد و روش‌ها:** در این مطالعه با استفاده از یک برج اسپری در معیار آزمایشگاهی، میزان حذف آمونیاک از جریان هوا با تغییر فشار مایع و نازل‌ها و تراکم ورودی ارزیابی شد. گذر حجمی جریان هوای استفاده‌شده ۳۷۳۷/۸۲ لیتر بر دقیقه بود. نازل استفاده‌شده نیز دارای قطر ۲۰ میکرون و به‌صورت یک، دو و سه‌تایی با محلول رقیق اسید سولفوریک بود. داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SPSS نسخه ۲۱ و آزمون آماری آنوای یک‌طرفه تجزیه و تحلیل شدند.

**یافته‌ها:** افزایش تعداد نازل‌ها و فشار مایع شست‌وشودهنده برج اسپری سبب افزایش معنی‌دار ( $P < 0.05$ ) درصد کارایی حذف گاز آمونیاک از هوا با کمک برج اسپری و افزایش بار ورودی به سیستم سبب کاهش کارایی حذف می‌شود ( $P < 0.05$ ).

**نتیجه‌گیری:** با افزایش تعداد نازل‌ها، فشار عملیاتی مایع شست‌وشودهنده و تراکم گاز آلاینده می‌توان به کارایی‌های مناسبی در حذف گاز آمونیاک از جریان هوا با استفاده از برج اسپری دست یافت.

**واژگان کلیدی:** برج پاشنده؛ حذف آمونیاک؛ محلول اسید سولفوریک؛ هوا

### مقدمه

وارد بدن شود و باعث تحریک و سوزش چشم، بینی، گلو، درد قفسه سینه، ادم ریوی، سوختگی پوست و تاول شود [۲]. حد مجاز شغلی این ماده از سوی انجمن متخصصان بهداشت صنعتی آمریکا (ACGIH: American Conference of Governmental Industrial Hygienists) برای یک نوبت کار هشت‌ساعته، ۲۵ قسمت در میلیون اعلام شده است [۳]. همچنین حد مجاز شغلی (REL: Recommended Exposure Limit) آن از سوی انستیتوی تحقیقاتی ایمنی و بهداشت شغلی آمریکا (NIOSH: National Institute of Safety and Health) برای میانگین وزنی زمانی ۲۵ قسمت در میلیون اعلام شده است که این مقدار

بی‌تردید کیفیت هوا به‌عنوان یکی از شاخصه‌های مهم در محیط کار و جامعه محسوب می‌شود که در سلامت افراد و طبیعتاً افزایش بهره‌وری مؤثر است. بررسی کیفیت هوای محیط کار از طریق اندازه‌گیری آلودگی هوا برد صورت می‌پذیرد. لذا تصفیه آلاینده‌های خروجی از صنایع ضروری است. یکی از این آلاینده‌ها، گاز آمونیاک است که پالایش این گاز از نقطه‌نظر اقتصادی و محیط‌زیستی بسیار اهمیت دارد. این گاز هم به‌صورت مصنوعی و هم طبیعی تولید می‌شود [۱].

با توجه به بوی آزاردهنده آن، آلودگی هوا با آمونیاک اهمیت دارد. این ماده می‌تواند از طریق تماس پوستی، چشمی و استنشاق

برای حد مواجهه کوتاه مدت ۳۵ قسمت در میلیون اعلام شده است [۱،۴].

حذف گاز آمونیاک از هوای محیط کار و رساندن آن به حد استانداردهای زیست محیطی الزامی است و باید روش مناسبی برای پالایش آن انتخاب شود [۲]. از جمله روش های حذف این گاز می توان به شست و شودهنده های تر اشاره کرد. این تجهیزات برای کنترل و حذف بسیاری از آلاینده های هوا استفاده می شوند [۵-۸]. آمونیاک در صنایع بزرگ و مهمی اعم از صنایع فلزی، صنایع داروسازی، صنایع دباغی و چرم سازی، صنایع لاستیک و پلاستیک، تولید شوینده ها و پاک کننده ها و تولید مواد شیمیایی به عنوان ماده اولیه برای تهیه اسید نیتریک و به عنوان خنک کننده در سیستم های تبرید کاربرد دارد. تاکنون روش های مختلفی برای حذف آمونیاک مورد توجه قرار گرفته است. از جمله این روش ها می توان به استفاده از شست و شودهنده های تر، چگالش و روش بیوفیلتراسیون اشاره کرد [۲].

شست و شودهنده های تر جزء وسایل کنترل کننده آلودگی هوا طبقه بندی می شوند که به منظور پالایش و جداسازی گازها از جریان هوای خروجی به کار برده می شوند. اگر یک شست و شودهنده تر برای حذف گاز آمونیاک از هوای محیط کار با پارامترهای طراحی بهینه به کار گرفته شود، ممکن است کارایی حذف و پالایش در حدود ۹۹ درصد را به همراه داشته باشد [۹]. از مهم ترین پارامترهایی که در طراحی برج های اسپری مدنظر قرار می گیرد می توان به ارتفاع و قطر برج، نوع نازل ها، فشار محلول و ... اشاره کرد [۱۰]؛ بنابراین، نازل و مشخصات فیزیکی آن از آیتم های بسیار مهم در طراحی برج اسپری محسوب می شود. در نتیجه ویژگی نازل ها یکی از متغیرهای مهم در کارایی و ملاحظات اقتصادی برج اسپری است [۱۱]. برج اسپری نوعی از شست و شودهنده های تر است که برای پالایش آمونیاک به کار می رود [۷] و مزایای زیادی از جمله قابلیت جداسازی هم زمان ذرات و گازها از جریان هوا، افت فشار پایین، طراحی ساده، هزینه تجهیزات و نگهداری کم دارد [۱۲].

مایع اسپری استفاده شده در برج های اسپری باید حلالیت و نرخ جذب زیادی برای گاز مدنظر داشته و از نظر اقتصادی نیز مقرون به صرفه باشد. برای افزایش کارایی برج اسپری می توان مواد شیمیایی مختلفی به مایع شست و شودهنده افزود [۱۳، ۲].

با توجه به مطالب ذکر شده درباره سمی بودن گاز آمونیاک و لزوم حذف این ماده از هوای محیط کار و قابلیت برج اسپری در حذف این ماده از هوای محیط کار و همچنین با توجه به در دسترس بودن منابع علمی و حمایت های دانشگاهی، هدف این مطالعه بررسی تغییرات کارایی برج اسپری در حذف گاز آمونیاک با توجه به تغییرات فیزیکی نازل هاست.

در مطالعه جعفری و همکاران در زمینه حذف گاز آمونیاک از هوای محیط کار با برج اسپری مشاهده شد که بهینه سازی پارامترهای طراحی برج های اسپری (اندازه نازل، تعداد نازل و

فشار مایع شست و شودهنده) باعث بهبود و افزایش کارایی حذف گاز آمونیاک می شود. نوآوری پژوهش حاضر اولاً استفاده از برج اسپری در حذف یک گاز است؛ چون این نوع پالایشگر عمدتاً در حذف ذرات و میست ها استفاده می شود. در ثانی با بهینه سازی برخی از پارامترهای طراحی برج اسپری اعم از فشار عملیاتی مایع شست و شودهنده و چیدمان و موقعیت قرارگیری نازل ها، کارایی حذف بررسی شد.

### مواد و روش ها

پژوهش حاضر از نوع کاربردی-آزمایشگاهی بود و برای بررسی تأثیر استفاده از ترکیب محلول رقیق شده اسید سولفوریک (۰/۰۱ مولار) در یک برج اسپری در حذف گاز آمونیاک انجام شد. مشخصات کلی برج اسپری استفاده شده در این پژوهش در جدول ۱ آورده شده است.

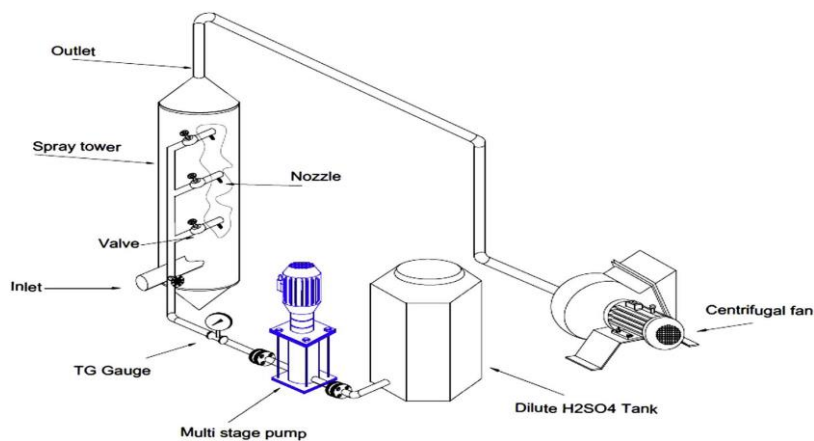
جدول ۱: مشخصات برج اسپری

متغیر	مقدار
گذر حجمی جریان هوا (لیتر بر دقیقه)	۳۷۳۷/۸۲
گذر حجمی مایع (لیتر بر دقیقه)	۵
نسبت گاز به مایع	۷۴۷/۵۶
سرعت جریان هوا (متر بر ثانیه)	۱/۲۷
قطر (متر)	۰/۲۵
سطح مقطع (مترمربع)	۰/۰۴۹
ارتفاع برج (متر)	۱/۳۸
زمان ماند (ثانیه)	۱/۰۹۵

سرعت جریان هوای استفاده شده در برج های اسپری بر اساس استانداردهای انجمن متخصصان بهداشت صنعتی آمریکا بین ۱/۲۶-۱/۲۸ لیتر بر دقیقه توصیه شده است [۱۴]؛ لذا بر اساس این استاندارد، میانگین سرعت هوا در این پژوهش ۱/۲۷ متر بر ثانیه لحاظ شد. همچنین با توجه به قطر ۰/۲۵ متر برج و سرعت مذکور، میزان گذر حجمی ۳۷۳۷/۸۲ لیتر بر دقیقه محاسبه شد. برج اسپری استفاده شده در این پژوهش در شکل ۱ آورده شده است.



شکل ۱: برج اسپری استفاده شده در پژوهش



شکل ۲: نمای کلی آزمایش

شست و شودهنده در هر میانگین تراکم ورودی، کارایی حذف گاز آمونیاک با افزایش فشار محلول افزایش و با افزایش تراکم ورودی آمونیاک کاهش می‌یابد (افزایش کارایی در تراکم‌های ۲۴/۱ و ۵۲ قسمت در میلیون به صورت نمایی و در تراکم ۶۸ قسمت در میلیون به صورت خطی افزایش می‌یابد). نتایج نشان داد بیشترین کارایی حذف (۹۳/۷۷ درصد) مربوط به فشار ۱۲ بار و میانگین تراکم ورودی ۲۴/۱ قسمت در میلیون است. کمترین کارایی (۵۱/۴۷ درصد) در میانگین تراکم ورودی ۶۸ قسمت در میلیون و فشار ۹ به دست آمد (نمودار ۱).

در ادامه، وضعیت حذف آمونیاک با استفاده از دو نازل ۲۰ میکرونی در نمودار ۲ آورده شده است.

نتایج نشان می‌دهد بیشترین کارایی حذف (۹۵/۸۵ درصد) مربوط به فشار ۱۲ بار و میانگین تراکم ورودی ۲۴/۱ قسمت در میلیون است. کمترین کارایی (۸۷/۸ درصد) در میانگین تراکم ورودی ۶۸ قسمت در میلیون و فشار ۹ به دست آمد (نمودار ۳).

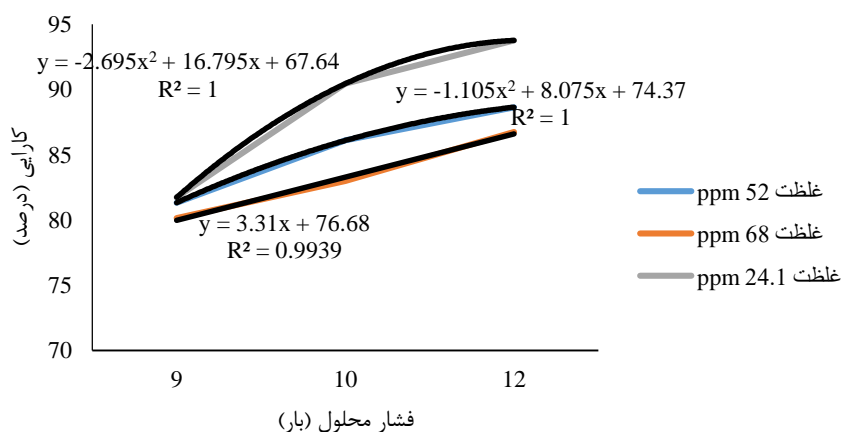
پس از جمع‌آوری داده‌ها، ابتدا به منظور تعیین نرمال بودن آن‌ها از آزمون کولموگروف اسمیرنوف استفاده شد. به علت نرمال بودن داده‌ها از آزمون آماری آنوای یک‌طرفه استفاده شد که نشان داد در صورت استفاده از اسید سولفوریک ۰/۰۱

در این پژوهش، جریان هوای مورد نیاز با هواکش مدل HVDLT-MK2 تهیه و گذر حجمی و فشار معادل با فشارسنج مدل 504, Type 4 متصل به ونتوری نوع H و استفاده از نمودارهای مربوطه قرائت شد. با قراردادن فشارسنج مدل TG بعد از خروجی پمپ، افت فشار کل مایع شست و شودهنده اندازه‌گیری شد. از نازل ۲۰ میکرون در ۳ فشار مختلف (۹، ۱۰ و ۱۲ بار) برای پاشش مایع شست و شودشو استفاده شد. شکل ۲ نمای شماتیک کل شامل نازل‌ها، برج اسپری، الکتروپمپ و سیستم لوله‌کشی را نشان می‌دهد.

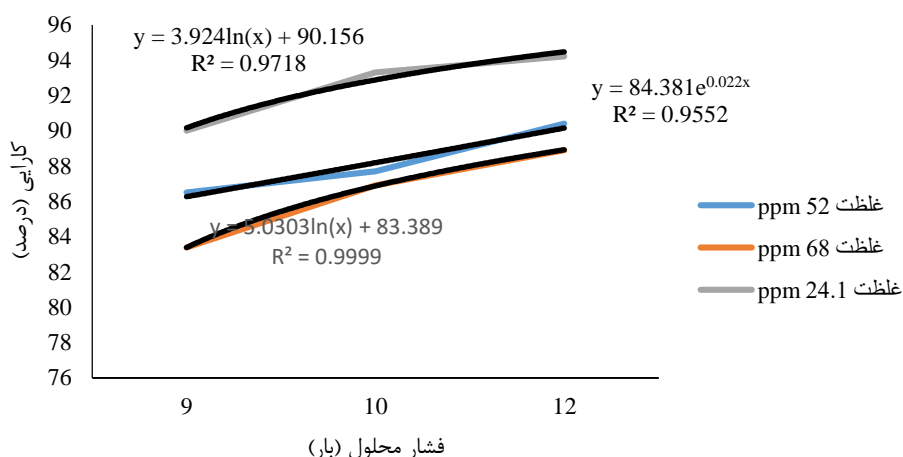
در این پژوهش از سیلندر مخصوص و رگولاتور متصل به آن برای تأمین گاز آمونیاک استفاده شد. نازل‌ها در سه حالت یک، دو و سه تایی استفاده شدند و در مجموع ۱۶۲ آزمایش انجام پذیرفت. برای تجزیه و تحلیل داده‌ها از روش تحلیل واریانس چندطرفه استفاده شد. سپس مقایسه‌های چندگانه با استفاده از آزمون توکی انجام شد. تحلیل آماری داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SPSS نسخه ۲۱ انجام گرفت.

## یافته‌ها

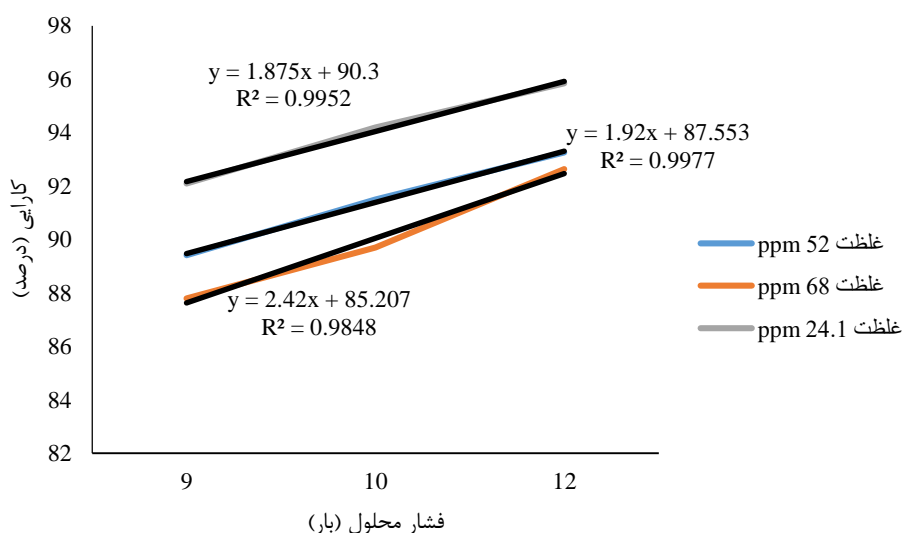
نتایج نشان می‌دهد استفاده از یک نازل ۲۰ میکرونی به همراه اسید سولفوریک ۰/۰۱ مولار به عنوان مایع



نمودار ۱: کارایی حذف گاز آمونیاک نسبت به فشار محلول مایع شست و شودهنده با یک نازل ۲۰ میکرونی و مایع شست و شودهنده آب و اسید سولفوریک



**نمودار ۲:** کارایی حذف گاز آمونیاک نسبت به فشار محلول مایع شست‌وشودهنده با دو نازل ۲۰ میکرونی و مایع شست‌وشودهنده آب و اسید سولفوریک



**نمودار ۳:** کارایی حذف گاز آمونیاک نسبت به فشار محلول مایع شست‌وشودهنده با سه نازل ۲۰ میکرونی و مایع شست‌وشودهنده آب و اسید سولفوریک

### بحث

فشار مایع شست‌وشودهنده نقش بسیار مهمی در برج‌های اسپری دارد، به‌طوری‌که در شست‌وشودهنده‌های تر با افزایش انرژی مصرفی (افزایش مایع و هوای تزریق‌شده به پالایشگر) کارایی جداسازی افزایش می‌یابد [۵]. در مطالعه حاضر با افزایش فشار مایع شست‌وشودهنده محلول رقیق اسید سولفوریک از ۹ بار به ۱۲ بار، کارایی حذف گاز آمونیاک در تراکم‌های ۵۲، ۲۴/۱ و ۶۸ قسمت در میلیون با وجود یک نازل ۲۰ میکرونی به ترتیب ۱۲/۰۳، ۷/۳۱ و ۶/۶۲ درصد افزایش یافت. این افزایش کارایی می‌تواند ناشی از واکنش شیمیایی اسید سولفوریک با گاز آمونیاک و خروج قطرات مایع شست‌وشودهنده با سرعت بیشتری از نازل‌ها باشد.

در این پژوهش با افزایش فشار مایع جاذب محلول رقیق اسید سولفوریک از ۹ بار به ۱۲ بار، کارایی حذف گاز آمونیاک در تراکم‌های ۵۲، ۲۴/۱ و ۶۸ قسمت در میلیون با دو نازل ۲۰ میکرونی به ترتیب ۴/۲، ۳/۹ و ۵/۵۲ درصد افزایش یافت.

مولار به‌عنوان مایع شست‌وشودهنده، افزایش فشار مایع شست‌وشودهنده برج اسپری باعث افزایش معنی‌دار ( $P < 0.05$ ) درصد کارایی حذف گاز آمونیاک از جریان هوا می‌شود. بر اساس آزمون آماری آنوای یک‌طرفه، در برج اسپری افزایش تعداد نازل‌ها سبب افزایش معنی‌دار ( $P < 0.05$ ) درصد کارایی حذف گاز آمونیاک از هوا توسط برج اسپری می‌شود. با استفاده از همین آزمون آماری، در این شرایط افزایش تراکم گاز آمونیاک در ورودی برج اسپری باعث کاهش معنی‌دار ( $P < 0.05$ ) کارایی حذف آمونیاک از جریان هوا توسط برج اسپری می‌شود (جدول ۲).

**جدول ۲:** تأثیر متغیرهای مختلف بر کارایی حذف گاز آمونیاک با مایع شست‌وشودهنده آب و اسید سولفوریک با آزمون آماری آنوای یک‌طرفه

متغیر مؤثر بر کارایی حذف	اثر معنی‌داری	P
افزایش فشار مایع	افزایش معنی‌دار	۰/۰۵۲
افزایش تعداد نازل‌ها	افزایش معنی‌دار	۰/۰۲۱
افزایش تراکم گاز ورودی	کاهش معنی‌دار	۰/۰۵۸

است) اهمیت دارد [۸]. با ثابت بودن گذر حجمی مایع جاذب (۵ لیتر بر دقیقه)، افزایش تراکم ورودی باعث کاهش نسبت مولی ماده جاذب به ماده جذب‌شونده و درنهایت باعث کاهش کارایی حذف می‌شود. در مطالعه حاضر، گذر حجمی جریان هوا ۳۷۳۷/۸۲ لیتر بر دقیقه بود که با افزایش تراکم ورودی از ۲۴/۱ قسمت در میلیون به ۶۸ قسمت در میلیون در فشار ۱۲ بار، با وجود یک، دو و سه نازل ۲۰ میکرونی، کارایی حذف به ترتیب ۷/۰۱، ۵/۳ و ۳/۲۱ درصد بیشتر کاهش یافت.

از جمله محدودیت‌های این مطالعه می‌توان به این مورد اشاره نمود که کارایی بهینه پالایش در شرایط بهینه (از جمله استفاده از سه نازل در شرایطی که از فشار عملیاتی بیشینه استفاده گردد)، چنانچه از تراکم‌های چند برابر حدود آستانه استفاده گردد، کاهش می‌یابد که دلیل آن کاهش نسبت مولی ماده جاذب (در این پژوهش اسید سولفوریک رقیق) به ماده جذب‌شده (در این پژوهش آمونیاک) می‌باشد.

### نتیجه‌گیری

نتایج کلی این پژوهش نشان داد افزایش تعداد نازل‌ها (از یک به سه) و همچنین افزایش فشار مایع شست‌وشودهنده که در این پژوهش از محلول رقیق‌شده اسید سولفوریک ۰/۰۱ مولار استفاده شد از ۹ بار به ۱۲ بار، باعث افزایش کارایی حذف گاز آمونیاک از جریان هوا توسط برج اسپری می‌شود. همچنین با افزایش تراکم گاز آمونیاک ورودی به برج اسپری، کارایی حذف گاز آمونیاک کاهش می‌یابد.

### تشکر و قدردانی

این مقاله برگرفته از پایان‌نامه آقای علیرضا رحمتی دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی بهداشت حرفه‌ای، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی می‌باشد. پایان‌نامه فوق بخشی از یک طرح پژوهشی است که به تصویب معاونت پژوهشی دانشگاه رسیده است. بدین وسیله از دانشکده بهداشت و معاونت پژوهشی دانشگاه علوم پزشکی تشکر و قدردانی می‌شود.

### تضاد منافع

در این پژوهش، هیچ‌گونه تضاد منافع و تعارضی وجود ندارد.

### ملاحظات اخلاقی

در این پژوهش، کلیه ملاحظات اخلاقی مورد نظر دانشگاه علوم پزشکی و همچنین مقررات ایمنی و بهداشتی و ایمنی کار با مواد شیمیایی رعایت گردیده است.

### سهم نویسندگان

محمد باقر عبدالمهی: گردآوری و تهیه نسخه اصلی مقاله  
محمد جواد جعفری: استاد راهنما در تهیه کل پایان‌نامه

این افزایش کارایی می‌تواند به دلیل خروج قطرات مایع شست‌وشودهنده با سرعت بیشتری از دو نازل ۲۰ میکرونی و واکنش شیمیایی اسید سولفوریک با گاز آمونیاک باشد.

همچنین مشاهده شد با افزایش فشار مایع شست‌وشودهنده محلول رقیق اسید سولفوریک از ۹ بار به ۱۲ بار، کارایی حذف گاز آمونیاک در تراکم‌های ۲۴/۱، ۵۲ و ۶۸ قسمت در میلیون با وجود سه نازل ۲۰ میکرونی به ترتیب ۳/۷۵، ۳/۸۴ و ۴/۸۴ درصد افزایش یافت. علت افزایش کارایی ممکن است ناشی از واکنش شیمیایی اسید سولفوریک با گاز آمونیاک و خروج قطرات مایع شست‌وشودهنده با سرعت بیشتری از نازل‌ها باشد.

در مطالعه Norman و همکاران در سال ۲۰۰۳ مشخص شد با افزایش فشار مایع شست‌وشودهنده، اندازه جریان به اندازه نازل افزایش می‌یابد. تعداد واحدهای انتقال فاز مایع با افزایش فشار نازل یا سرعت اسپری افزایش می‌یابد. بیشترین تأثیر افزایش فشار نازل، افزایش انتقال جرم هنگام اسپری جریان است. نتایج مطالعه حاضر با نتایج Norman و همکاران مطابقت دارد [۶].

همچنین نتایج این پژوهش نشان داد افزایش تعداد نازل ۲۰ میکرونی از یک به سه، کارایی حذف گاز آمونیاک با جاذب محلول رقیق‌شده اسید سولفوریک در تراکم‌های ۲۴/۱، ۵۲ و ۶۸ قسمت در میلیون در فشار ثابت ۱۲ بار به ترتیب از ۹۳/۷۷ به ۹۵/۸۵، ۸۸/۶۵ به ۹۳/۲۶ و ۸۶/۷۶ درصد رسید. این افزایش کارایی می‌تواند به دلیل افزایش واکنش فعال سطحی و انتقال آب اسیدی بیشتر باشد.

مطالعه Koller و همکاران در سال ۲۰۱۱، توانایی برج اسپری در جذب ترکیبات دی‌اکسید کربن را سنجید. در این مطالعه همچنین تأثیر تعداد نازل بررسی و مشاهده شد در صورت استفاده از یک نازل به تنهایی، نرخ جداسازی قابل توجهی به همراه ندارد، ولی استفاده از سه نازل به صورت سری، باعث افزایش واکنش فعال سطحی و انتقال جرم و درنهایت باعث افزایش کارایی حذف شد. نتایج مطالعه حاضر با نتایج مطالعه Koller و همکاران همخوانی دارد [۱۵].

مطالعه Kuntz و همکاران در سال ۲۰۱۱ نشان داد افزایش تعداد قطرات مایع اولین عاملی است که اندکی در افزایش عملکرد انتقال جرم نقش دارد. افزایش تعداد قطرات که توسط نازل تولید می‌شوند، باعث افزایش سطح برای انتقال جرم می‌شود. نتایج مطالعه حاضر با نتایج Kuntz و همکاران یکسان است [۱۶].

Qing و همکاران در سال ۲۰۱۱ از یک برج اسپری برای حذف دی‌اکسید کربن استفاده کردند. نتایج آنان نشان داد افزایش تراکم ورودی دی‌اکسید کربن از ۰/۰۵ به ۰/۱۵ درصد، اندکی باعث کاهش کارایی حذف دی‌اکسید کربن در برج اسپری می‌شود. نتایج این مطالعه با مطالعه حاضر یکسان است [۱۷].

با توجه به اینکه مکانیسم اصلی حذف گازها، جذب است، نسبت مولی ماده جاذب (که در اینجا آب به همراه اسید سولفوریک است) به ماده جذب‌شونده (که در اینجا گاز آمونیاک



این پژوهش بخشی از یک طرح تحقیقاتی جامع می باشد و لذا تمام تجهیزات در دانشکده موجود بوده است.

داود پناهی: استاد مشاور در پایان نامه دانشجو  
نفیسه عظیمی: همکاری در تهیه نسخه نهایی مقاله  
علیرضا رحمتی: دانشجو و مجری پایان نامه

## REFERENCES

1. US Department of Health and Human Services. NIOSH pocket guide to chemical hazards. Niosh pocket guide to chemical hazards. Washington, D.C: US Department of Health and Human Services; 1997.
2. Phillips J. Control and pollution prevention options for ammonia emissions. Vienna, VA: Vigyan, Inc; 1995.
3. American Conference of Governmental Industrial Hygienists. Threshold limit values for chemical substances and physical agents and biological exposure indices. Washington, D.C.: American Conference of Governmental Industrial Hygienists; 1995.
4. Occupational Safety and Health Administration. Sampling and analytical methods. Washington, D.C: United States Department of Labor september; 2014.
5. American Conference of Governmental Industrial Hygienists. Industrial ventilation: a manual of recommended practice for design. Washington, D.C: American Conference of Governmental Industrial Hygienists; 2013.
6. Zhang Y. Indoor air quality engineering. Florida: CRC Press; 2004.
7. Theodore L. Air pollution control equipment calculations. New Jersey: John Wiley & Sons; 2008.
8. Gorbanishahna F. Design and application of scrubber for air pollution control. 1<sup>st</sup> ed. Tehran: Fanavaran Press; 2013. [Persian]
9. Epperly W, Broderick R, Peter-Hoblyn J, Epperly W, Broderick R, Peter-Hoblyn J. Control of nitrogen oxides emissions from stationary sources. Proceedings of the American Power Conference, Chicago, USA; 1988.
10. Wang LK, Pereira NC, Hung YT. Air pollution control engineering. Totowa, NJ: Humana Press; 2004.
11. Bahrani A. Collection of air pollutants. Tehran: Fanavaran Press; 2010. P. 200. [Persian]
12. Bozorgi Y, Keshavarz P, Taheri M, Fathikaljahi J. Simulation of a spray scrubber performance with Eulerian/Lagrangian approach in the aerosol removing process. *J Hazard Mater*. 2006;137(1):509-17. PMID: 16600492 DOI: 10.1016/j.jhazmat.2006.02.037
13. Burton DJ. Current topics in industrial ventilation. *Appl Indust Hyg*. 1988;3(8):F20-1. DOI: 10.1080/08828032.1988.10390286
14. Aguilar M, Abaigar A, Merino P, Estellés F, Calvet S. Effect of water scrubbing on ammonia emissions from a gestating sows building in the south of Europe. Proceedings of the 14th International Conference of the FAO ESCORENA Network on the Recycling of Agricultural, Municipal and Industrial Residues in Agriculture, Lisbon, Portugal; 2010.
15. Koller M, Wappel D, Trofaier N, Gronald G. Test results of CO2 spray scrubbing with Monoethanolamine. *Energy Proc*. 2011;4:1777-82. DOI: 10.1016/j.egypro.2011.02.053
16. Kuntz J, Aroonwilas A. Mass-transfer efficiency of a spray column for CO2 capture by MEA. *Energy Proc*. 2009;1(1):205-9. DOI: 10.1016/j.egypro.2009.01.029
17. Qing Z, Yincheng G, Zhenqi N. Experimental studies on removal capacity of carbon dioxide by a packed reactor and a spray column using aqueous ammonia. *Energy Proc*. 2011;4:519-24. DOI: 10.1016/j.egypro.2011.01.083