

# مدل سازی حذف زیستی $H_2S$ از جریان های گازی در صافی های چکنده زیستی

جواد شاطرزاده، رضا قشلاقی\*، محمود اخوان مهدوی

مشهد، دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده مهندسی، گروه مهندسی شیمی

پیام نگار: gheslaghi@um.ac.ir

## چکیده

روش های شیمیایی و فیزیکی حذف سولفید هیدروژن هزینه اجرایی بسیار بالایی دارند و باعث ایجاد آلودگی ثانویه می شوند. در سال های اخیر روش های زیستی جهت غلبه بر هزینه های فرایند و دفع ضایعات، توجه فزاینده ای را به خود معطوف کرده اند. در این مطالعه صافی چکنده زیستی که در آن جریان مایع به صورت غیرهمسو با جریان گاز وارد راکتور می شود مدل سازی دینامیکی شده است. در این مدل، سولفید هیدروژن از فاز گاز وارد توده مایع شده و سپس در اختیار زیست لایه قرار می گیرد. اثر نرخ جریان گاز، سرعت جریان مایع، ارتفاع ستون و مدت اقامت بر عملکرد زیست راکتور بررسی شد. بر اساس پیش بینی های مدل، با افزایش شدت جریان گاز تا  $1/8 m^3 h^{-1}$ ، ظرفیت حذف افزایش و بازدهی حذف کاهش یافت. همچنین افزایش سرعت مایع از ۲ به ۱۵ متر بر ثانیه باعث افزایش بازدهی حذف از ۲۶٪ به ۹۹/۷٪ گردید. ارتفاع های بیشتر ستون زیست راکتور باعث افزایش بازدهی حذف شد و در اقامت های کوتاه مدت تأثیر بیشتری مشاهده گردید.

کلمات کلیدی: صافی چکنده زیستی، سولفید هیدروژن، ظرفیت حذف، بازدهی حذف، مدل سازی

## ۱- مقدمه

باعث ایجاد خوردگی در موتورهای احتراق می شود [۲]. بنابراین، نیاز مبرمی برای مطالعه روش هایی که بتوانند این گاز مضر را از جریان هوا حذف کنند، احساس می شود.

روش های سنتی مورد استفاده برای حذف سولفید هیدروژن را میتوان به روش های (فیزیکی - شیمیایی) (مانند جذب به وسیله حلال های شیمیایی مانند انواع آمین ها)، جذب از طریق کربن فعال، اکسایش حرارتی، و غیره تقسیم کرد [۳]. اما اغلب این روش ها به دلیل نیاز به عملیاتی همچون احیای مجدد حلال، تأمین شرایط دمایی مورد نیاز و نیاز به تجهیزات گران قیمت، هزینه های زیادی را

سولفید هیدروژن ( $H_2S$ )، گازی بی رنگ، سمی و قابل اشتعال است که داری بویی شبیه بوی تخم مرغ گندیده می باشد [۱]. این گاز از طریق فرایندهای مختلفی مانند پالایش نفت، تصفیه فاضلاب و پساب ها، صنایع غذایی و همچنین کارخانجات کاغذسازی وارد جریان هوا می شود. علاوه بر آسیب های خطرناکی که استنشام غلظت های نسبتاً بالای این گاز برای انسان می تواند داشته باشد، یکی از بزرگترین عواملی که باعث ایجاد محدودیت در مصرف بیوگازها می شود وجود سولفید هیدروژن در این گازهاست، زیرا

سطحی بر روی بازدهی حذف را نیز در نظر می‌گرفت [۳]. در سال ۲۰۰۲ راناسینگ<sup>۵</sup> و همکارانش مدل جدیدی را با در نظر گرفتن محتوای رطوبت و موازنه انرژی ارائه کردند. در مدل آن‌ها تعادل بین فاز مایع و فاز آب و فیلم زنده که به عنوان یک فاز همگن در نظر گرفته شده است، با قانون هنری بیان شد و مصرف سوستر از قانون موند تبعیت می‌کرد [۱۵]. عیب عمده مدل‌های بالا در این بود که معادلات را در شرایط پایدار در نظر گرفته بودند و تغییرات سیستم نسبت به زمان در نظر گرفته نمی‌شد. این امر می‌تواند باعث ایجاد خطا در پیش‌بینی مدل شود. همچنین از آنجا که مدل‌های ذکر شده برای پیش‌بینی رفتار زیست‌صافی‌ها مورد استفاده قرار گرفته اند، تأثیر تغییرات سرعت مایع چکنده در این مدل‌ها در نظر گرفته نمی‌شود در حالی که سرعت مایع چکنده نقش بسیار مهمی در عملکرد صافی چکنده زیستی دارد. به همین منظور در این تحقیق یک مدل دینامیک و پویا جهت پیش‌بینی رفتار یک صافی چکنده زیستی مورد استفاده قرار گرفته است. همچنین اثر عوامل مختلفی مانند شدت جریان گاز، شدت جریان مایع و ارتفاع ستون بر روی عملکرد راکتور ارزیابی شده است.

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱ فرضیات مدل

به منظور مدل‌سازی فرایند حذف در داخل راکتور، سه فاز در نظر گرفته شد: فاز گاز، فاز مایع و زیست‌لایه (فاز جامد). فرض شد که جریان مایع و گاز در خلاف جهت یکدیگر وارد می‌شوند. سولفید هیدروژن ابتدا وارد فاز مایع شده و سپس در اختیار ریزاندام‌ها که بر روی زیست‌لایه قرار دارند قرار می‌گیرد و در آنجا توسط این باکتری‌ها مصرف و به عنصر گوگرد تبدیل می‌شود. همچنین با در نظر گرفتن فرضیات مورد استفاده توسط سایر نویسندگان [۱۶ و ۱۰] برای به دست آوردن معادلات ریاضی، فرضیات ساده کننده زیر در نظر گرفته شده است:

- ۱- جریان داخل راکتور به صورت پلاگ است بنابراین هیچ گرادیان سرعت شعاعی نداریم.
- ۲- هیچ گونه محدودیت اکسیژن و مواد غذایی در زیست‌لایه وجود ندارد.
- ۳- در داخل فاز مایع هیچگونه واکنشی اتفاق نمی‌افتد.

5. Ranasinghe

تحمیل می‌کنند [۴]. همچنین این روش‌ها آلودگی ثانویه ایجاد می‌کنند و نمی‌توانند این آلاینده را با بازدهی بالا از جریان گاز حذف کنند. بنابراین محققان به دنبال روش‌های جایگزینی هستند که علاوه بر این که بتوانند معایب و کاستی‌های روش‌های سنتی را از بین ببرند، از لحاظ اقتصادی نیز با صرفه‌تر باشند [۵]. نتایج تحقیقات دانشمندان نشان می‌دهد که روش‌های حذف زیستی می‌توانند جایگزین بسیار مناسبی برای روش‌های سنتی باشند [۹-۶].

یکی از پرکاربردترین زیست‌راکتورها که امروزه از آنها، حتی در مقیاس صنعتی، استفاده فراوان می‌شود، صافی‌های چکنده زیستی<sup>۱</sup> می‌باشند [۱۰]. اساس کار آنها بدین صورت است که جریان گاز آلوده از روی بستری که به وسیله آکنه‌ها پر شده است عبور می‌کند تا در اختیار ریزاندام‌های تثبیت شده بر روی آکنه‌ها، که قادر به حذف اجزای مورد نظر هستند، قرار بگیرد. اجزای مورد نظر، ابتدا از طریق انتقال جرم از فاز گاز وارد فاز مایع می‌شوند. فاز مایع به صورت پیوسته در خلاف جهت یا هم جهت با جریان گاز وارد راکتور می‌شود. این اجزاء سپس از طریق نفوذ وارد فاز جامد یا زیست‌لایه می‌شوند و در اختیار ریزاندام‌ها قرار می‌گیرند [۱۱]. در سال‌های اخیر مطالعات زیادی بر روی صافی‌های چکنده زیستی صورت گرفته است؛ نتایج حاصل نشان می‌دهد که این راکتورها دارای ساختاری پیچیده می‌باشند و عوامل مختلفی می‌توانند بر عملکرد آن‌ها تأثیر داشته باشند [۱۳ و ۱۲].

بنابراین، این مدل‌سازی می‌تواند کمک شایانی برای بررسی بهتر صافی‌های چکنده زیستی و همچنین بررسی اثر عوامل مختلف بر روی آن‌ها و رسیدن به نقطه بهینه عملیاتی بکند. اولین تلاش برای مدل‌سازی توسط اتنگراف<sup>۲</sup> صورت پذیرفت [۱۴]. مدل آنها مدلی بسیار ساده برای توصیف زیست‌صافی‌های معمولی بود که در آن معادلات جبری جداگانه برای دو ناحیه محدودیت نفوذ و محدودیت سرعت واکنش در نظر گرفته شد. به علت سادگی این مدل، بسیاری از محققان از این مدل استفاده کرده‌اند. پس از آن شریف‌دین<sup>۳</sup> و بالتزیس<sup>۴</sup> با استفاده از نتایج مدل اتنگراف، مدلی را در نظر گرفتند که ناحیه گذار را نیز در خود جای می‌داد و همچنین اثر جذب

1. Biotrickling Filters  
2. Ottengraf  
3. Shareefdeen  
4. Baltzis

غلظت سولفید هیدروژن در سطح مشترک (زیست لایه - مایع) برابر غلظت سولفید هیدروژن در جریان مایع می‌باشد. همچنین با نوشتن موازنه جرم در زیست لایه رابطه (۳) به دست می‌آید که در آن  $C_b$  نشان دهنده غلظت سولفید هیدروژن در زیست لایه می‌باشد.  $R_{max}$  و  $K_s$  نشان دهنده ضریب نفوذ سولفید هیدروژن، ماکسیمم سرعت واکنش و ثابت (میکائلیس- منتن) می‌باشند.

$$\frac{dC_b}{dt} = D \frac{\partial^2 C_b}{\partial x^2} - R_{max} \frac{C_b}{C_b + K_s} \quad (3)$$

برای به دست آوردن ضریب انتقال جرم در فاز مایع و گاز و همچنین نسبت سطح مرطوب به سطح کلی از روابط اندا<sup>۱</sup>، شروود<sup>۲</sup> و شولمن<sup>۴</sup> استفاده شده است [۱۷ و ۱۶ و ۱۱].

در این تحقیق از روش خطی برای حل معادلات استفاده شده که برای معادلات دیفرانسیل پاره‌ای و ناخطی کاربرد دارد. اساس این روش تبدیل معادلات دیفرانسیل جزئی به معادلات دیفرانسیل معمولی است، بدین ترتیب که مشتقات مکانی توسط روش تفاضل‌های محدود نوشته می‌شوند، ولی مشتق زمانی بدون تغییر باقی می‌ماند، لذا معادلات به دستگاه معادلات دیفرانسیل معمولی تبدیل می‌شوند. معادلات حاصل را می‌توان توسط روش‌های رانگ‌کوتا مرتبه ۲، ۳ و یا ۴ حل کرد. طبیعی است استفاده از رانگ‌کوتا مرتبه بالاتر زمان محاسبات را اندکی افزایش می‌دهد ولی دقت بیشتری در محاسبات ایجاد می‌کند. در این تحقیق از روش رانگ‌کوتا مرتبه ۴ برای حل دستگاه معادلات مذکور به کمک نرم‌افزار متلب استفاده شده است. در نهایت غلظت سولفید هیدروژن در جریان خروجی برای شرایط متفاوت محاسبه شده است.

### ۳-۲ تحلیل نتایج

برای بررسی و تحلیل عملکرد یک صافی چکنده زیستی از پارامترهایی مانند بازدهی حذف<sup>۵</sup> که بیان گر نسبت غلظت حذف شده سولفید هیدروژن به غلظت ورودی آن می‌باشد و ظرفیت حذف گاز آلاینده<sup>۶</sup> که نشان دهنده مقدار جرم حذف شده از آلاینده در

انتقال ماده آلاینده از فاز گاز به زیست لایه به صورت مستقیم (بدون انتقال به فاز مایع) قابل اغماض می‌باشد.

۵- نفوذ داخل زیست لایه به وسیله قانون فیک بیان می‌شود.

۶- اثر pH در نظر گرفته نشده است. فرض می‌کنیم که عملیات در یک pH ثابت صورت می‌پذیرد.

۷- در سطح مشترک بین (گاز- مایع) و (مایع- زیست لایه) حالت تعادلی برقرار است.

۸- غلظت  $H_2S$  در سطح مشترک مایع و زیست لایه برابر غلظت آن در توده مایع می‌باشد و از مقاومت داخلی فاز مایع صرف نظر می‌شود.

۹- سرعت واکنش حذف زیستی  $H_2S$  از طریق رابطه میکائیلیس منتن<sup>۱</sup> بیان می‌شود.

### ۲-۲ معادلات مدل

بر اساس فرضیات بالا دسته معادلات دیفرانسیل معمولی زیر که هر کدام بیانگر تغییرات غلظت جسم منتقل شونده (در اینجا سولفید هیدروژن) در فازهای مختلف است به دست می‌آید که با حل همزمان آنها می‌توان غلظت آن جزء را در جریان خروجی به دست آورد. با نوشتن موازنه جرم در فاز گاز برای سولفید هیدروژن داریم:

$$V \frac{dC_g}{dt} = F_g (C_{g.in} - C_g) - K_L A_w \left( \frac{C_g}{H} - C_l \right) \quad (1)$$

که در این رابطه  $V$  بیانگر حجم راکتور،  $C_g$  نشان دهنده غلظت سولفید هیدروژن در جریان گاز،  $K_L, F_g, A_w$  و  $H$  به ترتیب نشان دهنده شدت جریان گاز ورودی، ضریب انتقال جرم کلی در فاز مایع، سطح مرطوب شده و ثابت هنری می‌باشند.

با نوشتن موازنه جرم سولفید هیدروژن در فاز مایع معادله (۲) به دست می‌آید. که در آن  $C_l$  و  $C_{l,b}^*$  به ترتیب بیان گر غلظت سولفید هیدروژن در جریان مایع و سطح مشترک (مایع- زیست لایه) می‌باشند.

$$V \frac{dC_l}{dt} = F_l (C_{l.in} - C_l) + K_L A_w \left( \frac{C_g}{H} - C_l \right) - k_t A_w (C_l - C_{l,b}^*) \quad (2)$$

1. Michaelis Menten

2. Onda
3. Sherwood
4. Shulman
5. Removal Efficiency (RE)
6. Elimination Capacity (EC)

جدول های (۲) و (۳) مقایسه نتایج حاصل از پیش بینی مدل و نتایج آزمایشگاهی را در زمان های اقامت بستر خالی متفاوت (۹ و ۴۵ ثانیه) نشان می دهند. همان گونه که مشاهده می شود بین نتایج حاصل از پیش بینی مدل و نتایج آزمایشگاهی تطابق خوبی وجود دارد. بیشترین خطای مشاهده شده در زمان اقامت ۹ ثانیه ۱۰٪ و در زمان اقامت ۴۵ ثانیه حدود ۱۷٪ بود.

**جدول ۲- مقایسه ظرفیت حذف های به دست آمده توسط مدل و نتایج آزمایشگاهی عبدحق و همکارانش در EBRT=9s**

درصد خطای نسبی	ظرفیت حذف آزمایشی (gm <sup>-3</sup> h <sup>-1</sup> )	پیش بینی ظرفیت حذف توسط مدل (gm <sup>-3</sup> h <sup>-1</sup> )	نرخ بارگذاری (gm <sup>-3</sup> h <sup>-1</sup> )
۰	۰	۰	۰
۱۰/۰	۷/۱۵	۷/۸۷	۱۰
۰/۲	۱۱/۱۱	۱۱/۱۳	۲۰
۸/۵	۱۵/۲۰	۱۶/۵۰	۳۰
۰/۴	۲۰/۱۳	۲۰/۲۲	۴۰
۹/۴	۲۲/۳۱	۲۲/۴۰	۵۰

**جدول ۳- مقایسه ظرفیت حذف های به دست آمده توسط مدل و نتایج آزمایشگاهی عبدحق و همکارانش در EBRT=45s**

درصد خطای نسبی	ظرفیت حذف آزمایشی (gm <sup>-3</sup> h <sup>-1</sup> )	پیش بینی ظرفیت حذف توسط مدل (gm <sup>-3</sup> h <sup>-1</sup> )	نرخ بارگذاری (gm <sup>-3</sup> h <sup>-1</sup> )
۰	۰	۰	۰
۴/۲	۱/۶۷	۱/۶۰	۲
۱۶/۹	۳/۶۱	۳/۰۰	۴
۱۱/۷	۴/۲۱	۳/۷۲	۵
۵/۱	۶/۲۸	۵/۹۶	۸
۸/۳	۸/۱۲	۷/۴۵	۱۰

### ۳-۱ اثر افزایش دبی گاز

برای بررسی اثر شدت جریان گاز بر روی عملکرد راکتور (با حجم ۳/۵ لیتر)، شدت جریان گاز در سرعت های مایع ۱۰ و ۱۵ متر بر ساعت تا مقدار ۱/۸ متر مکعب بر ساعت (معادل نرخ بارگذاری ۵۰ gm<sup>-3</sup>h<sup>-1</sup>) افزایش داده شد. همان گونه که در شکل (۱) نشان

مدت یک ساعت و در واحد حجم راکتور است، در مقادیر مختلف زمان اقامت بستر خالی<sup>۱</sup> و بار آلاینده<sup>۲</sup> که بیان گر مقدار جرم ورودی سولفید هیدروژن در ساعت به ازای واحد حجم راکتور می باشد بر طبق معادلات زیر استفاده شده است [۱۸].

$$RE (\%) = \frac{(C_{in} - C_{out})}{C_{in}} \quad (4)$$

$$EC = \frac{F_g}{V} (C_{in} - C_{out}) \quad (5)$$

$$EBRT = \frac{V}{F_g} \quad (6)$$

$$L = \frac{F_g}{V} C_{in} \quad (7)$$

### ۳- نتایج و بحث

برای بررسی صحت و درستی مدل، نتایج حاصل از پیش بینی های مدل با نتایج آزمایشگاهی به دست آمده توسط عبدحق و همکارانش [۱۸] مقایسه شدند. بدین منظور داده های آزمایشگاهی آنها به شرح زیر استفاده شد: راکتوری با طول فعال ۶۰ سانتی متر و قطر ۸/۸ سانتی متر در نظر گرفته شد که بر اساس آن حجم راکتور برابر با ۳/۶۴ لیتر می شود. سایر پارامترهای مورد استفاده در مدل در جدول (۱) آمده است.

**جدول ۱- مقدار اولیه پارامترهای مورد استفاده در مدل**

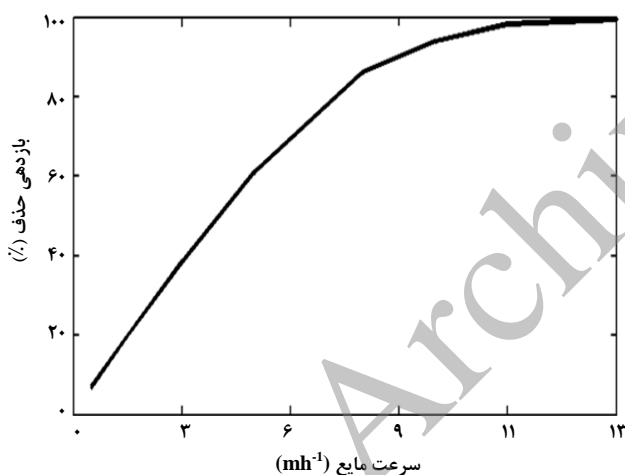
پارامتر	نماد	مقدار اولیه	منبع
ثابت هنری	H	۰/۳۸۷	[۱۹]
ضریب نفوذ سولفید هیدروژن	D	۵/۷۶۹ × ۱۰ <sup>-۷</sup> (m <sup>2</sup> h <sup>-1</sup> )	[۱۹]
ثابت (میکابیلِس - منتن)	K <sub>s</sub>	۰/۰۲۷۹ (gm <sup>-3</sup> )	[۱۶]
حداکثر سرعت واکنش	R <sub>max</sub>	۵۸۴۰۰ (gm <sup>-3</sup> h <sup>-1</sup> )	[۱۶]

1. Empty Bed Residence Time (EBRT)
2. Loading (L)

ندارد. در این ناحیه حذف سولفید هیدروژن به وسیله سرعت تخریب زیستی<sup>۱</sup>، انتقال در فاز مایع و یا نفوذ به داخل فیلم زنده کنترل می‌شود [۲۱]. به همین علت، افزایش شدت جریان گاز ورودی و غلظت اولیه سولفید هیدروژن که باعث افزایش نرخ بار گذاری می‌شوند تأثیری در افزایش ظرفیت حذف ندارد.

### ۳-۲ اثر افزایش سرعت مایع چکنده

برای بررسی اثر سرعت مایع چکنده، مقدار آن در غلظت اولیه ۰/۱ گرم بر متر مکعب و زمان اقامت بستر خالی ثابت ۴۵ ثانیه از ۲ به ۱۵ متر بر ساعت افزایش داده شد. همان گونه که در شکل (۲) مشاهده می‌شود با افزایش سرعت جریان مایع، بازدهی حذف افزایش پیدا می‌کند. افزایش سرعت جریان مایع از یک سو باعث افزایش سطح مرطوب آکنه‌ها می‌شود [۱۴] و از سوی دیگر مقاومت در برابر انتقال جرم در فاز مایع را کاهش می‌دهد [۲۲] و در نتیجه باعث افزایش انتقال جرم سولفید هیدروژن به زیست‌لایه می‌شود.



شکل ۲- اثر افزایش سرعت مایع چکنده بر روی بازده حذف در غلظت اولیه ثابت  $0/1 \text{ gm}^3$  و EBRT برابر ۴۵ ثانیه

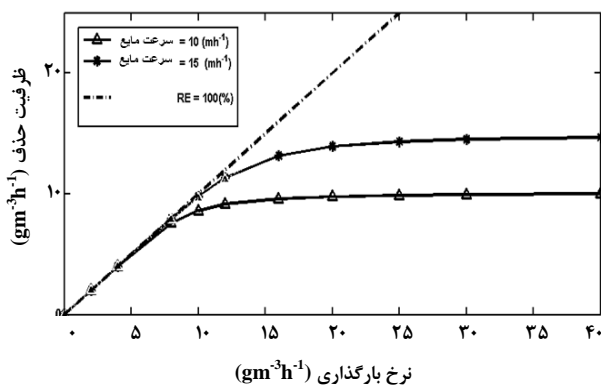
میزان افزایش بازدهی حذف در سرعت‌های پایین مایع به مراتب بیشتر از محدوده‌های بالای سرعت مایع است. برای مثال با افزایش سرعت مایع از ۲ به ۸ متر بر ثانیه، بازدهی حذف از ۲۶٪ به ۸۷٪ افزایش می‌یابد، در حالی که با افزایش سرعت از ۸ به ۱۴ متر بر ثانیه تنها ۱۲٪ افزایش پیدا می‌کند.

داده شده است با افزایش میزان نرخ بارگذاری، به واسطه افزایش شدت جریان ورودی گاز، ما شاهد سه ناحیه مختلف عملیاتی هستیم. این نواحی در نتایج آزمایشگاهی سایر نویسندگان نیز مشاهده شده است [۱۸ و ۲۰].

ناحیه اول، نرخ بارگذاری پایین جریان گاز است که در آن ظرفیت حذف به صورت کاملاً خطی و با شیب ۴۵ درجه با افزایش میزان نرخ بار گذاری افزایش پیدا می‌کند. در این ناحیه، زیست‌راکتور با مقداری کمتر از حداکثر میزان ظرفیت حذف خود کار می‌کند.

در ناحیه دوم (نرخ بارگذاری متوسط) با افزایش میزان نرخ بارگذاری مقدار ظرفیت حذف افزایش پیدا می‌کند اما نرخ افزایش آن از میزان افزایش نرخ بارگذاری به مراتب کمتر است. با افزایش مقدار نرخ بارگذاری به تدریج بازدهی حذف کاهش می‌یابد و از خط عملیاتی با بازدهی حذف ۱۰۰٪ فاصله می‌گیریم. علت این پدیده این است که افزایش شدت جریان گاز ورودی باعث می‌شود که ریزاندام‌ها زمان کافی برای حذف کامل سولفید هیدروژن را نداشته باشند.

در ناحیه سوم (نرخ بارگذاری بالا) زیست‌راکتور با حداکثر ظرفیت حذف خود کار می‌کند و افزایش نرخ بارگذاری هیچ تأثیری در افزایش ظرفیت حذف نخواهد داشت. با افزایش نرخ بارگذاری از خط عملیاتی ظرفیت حذف ۱۰۰٪ فاصله گرفته می‌شود. به این ناحیه، ناحیه محدودیت واکنشی می‌گویند.



شکل ۱- اثر افزایش نرخ بارگذاری بر روی ظرفیت حذف (EC) در غلظت اولیه  $0/1 \text{ gm}^3$  و سرعت‌های مایع ۱۰ و ۱۵ متر بر ساعت

همان گونه که مشاهده می‌شود، افزایش میزان نرخ بارگذاری از ۲۰ تا ۵۰ گرم بر متر مکعب بر ساعت تغییری در مقدار ظرفیت حذف

مزیت زمان اقامت‌های بیشتر در ارتفاع‌های کمتر محسوس تر است. علت این است که با افزایش ارتفاع زیست‌راکتور، سیستم به حالت حداکثری عملکرد خود نزدیک می‌شود، لذا اقامت بیشتر سیالات تأثیر کمتری در افزایش بازدهی خواهد داشت. از آن جا که ارتفاع ستون تعیین کننده حجم زیست‌راکتور می‌باشد، با توجه به نتایج حاصله می‌توان نتیجه گرفت که افزایش حجم زیست‌راکتور باعث افزایش بازدهی حذف می‌شود. اما با توجه به این که حجم راکتور تأثیر زیادی بر هزینه ساخت راکتور دارد [۲۴]، انجام محاسبات دقیق به منظور افزایش بهره وری اقتصادی راکتور امری ضروری به نظر می‌رسد.

#### ۴- جمع بندی

در این تحقیق یک مدل پویا و دینامیک برای حذف سولفید هیدروژن از جریان گاز در صافی‌های چکنده زیستی ارائه شد. اثر افزایش شدت جریان گاز، ارتفاع ستون و همچنین افزایش سرعت مایع چکنده بر عملکرد آن مورد بررسی قرار گرفت. افزایش شدت جریان گاز باعث افزایش ظرفیت حذف سولفید هیدروژن می‌شود اما بعد از رسیدن به نرخ بارگذاری بالا، با افزایش شدت جریان گاز مقدار ظرفیت حذف تغییری نمی‌کند و بازدهی حذف کاهش می‌یابد. با افزایش ارتفاع ستون، بازدهی حذف سولفید هیدروژن افزایش می‌یابد و همچنین افزایش سرعت مایع باعث افزایش ظرفیت حذف و بازدهی حذف سولفید هیدروژن می‌شود.

#### ۵- تشکر و قدردانی

بدین وسیله مولفین قدردانی خود را از شورای پژوهشی دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد برای حمایت از این پروژه توسط طرح شماره ۱۸۹۱ تاریخ ۱۳۹۰/۰۲/۲۴ اعلام می‌دارند.

#### ۶- پیوست

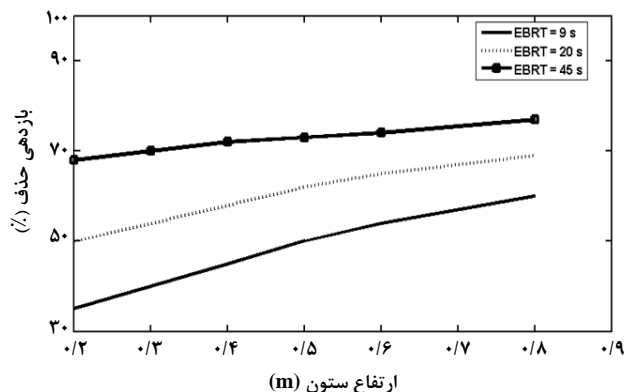
##### ۶-۱ علائم اختصاری

پارامتر	واحد	تعریف
$A_w$	$m^2$	سطح مرطوب
$C_{in}$	$gm^{-3}$	غلظت سولفید هیدروژن در جریان ورودی
$C_{out}$	$gm^{-3}$	غلظت سولفید هیدروژن در جریان خروجی
$C_l$	$gm^{-3}$	غلظت سولفید هیدروژن در فاز مایع

همان گونه که در شکل (۱) نشان داده شد، با افزایش سرعت جریان مایع، راکتور در نرخ بارگذاری بیشتری وارد ناحیه سوم می‌شود در نتیجه افزایش سرعت مایع باعث افزایش ظرفیت حذف زیست‌راکتور می‌گردد. اما باید توجه داشت که سرعت بالای مایع نیاز مند پمپ‌های قدرتمندتر است که باعث افزایش هزینه عملیاتی می‌شود. همچنین سرعت جریان مایع باید به گونه‌ای باشد که باعث ایجاد پدیده طغیان در زیست‌راکتور نشود.

#### ۳-۳ اثر ارتفاع ستون

از آن جا که ارتفاع ستون یکی از مهم ترین فاکتورهای طراحی زیست‌راکتور صافی چکنده است، بررسی اثر آن امری ضروری به نظر می‌رسد. شکل (۳) نشان دهنده تغییرات بازدهی حذف بر حسب ارتفاع بستر در مقدارهای مختلف زمان اقامت بستر خالی ۹ تا ۴۵ ثانیه و در غلظت اولیه  $0.1 m^3 h^{-1}$  می‌باشد. همان گونه که مشاهده می‌شود، با افزایش ارتفاع ستون، که منجر به افزایش حجم بستر می‌شود، بازدهی حذف سولفید هیدروژن افزایش می‌یابد. این پیش‌بینی منطبق بر مشاهدات دیگر محققان است [۱۸ و ۲۳].



شکل ۳- تغییرات بازدهی حذف بر حسب ارتفاع ستون در زمان‌های اقامت بسترهای خالی مختلف

همچنین افزایش مدت اقامت خالی بستر در ارتفاع‌های متفاوت، باعث افزایش حذف سولفید هیدروژن می‌شود. به عنوان مثال در مدت اقامت ۴۵ ثانیه و در بستری با ارتفاع ۰/۶ متر، ۷۵٪ از مقدار سولفید هیدروژن ورودی از جریان گاز حذف می‌شود در حالی که میزان حذف سولفید هیدروژن در بستری با همان ارتفاع اما با زمان اقامت خالی بستر، معادل ۹ ثانیه تنها و برابر ۵۴٪ می‌باشد. البته

- termoperation of a biofilter for simultaneous removal of H<sub>2</sub>S and NH<sub>3</sub>", Air & Waste Management Association, 52, pp. 1389-1398, (2002).
- [8] Gabriil, D., Deshusses, M.A., "Performance of a Biotricking Ffilter Full-scale Treating H<sub>2</sub>S at a Gas Contact Time of 1.6 to 2.2 Seconds", Environmental Progress, 22, pp. 111-118, (2003).
- [9] Jensen, A.B., Webb, C., "Treatment of H<sub>2</sub>s containing gases: A review of microbial alternatives", Enzyme and Microbial Technology, 17, pp. 2-10, (1995).
- [10] Sharvelle, S., Arabi, M., McLamore, E., Banks, M.K., "Model Development for Biotrickling Filter Treatment of Graywater Simulant and Waste Gas I", Journal of Environmental Engineering, 134(10), pp. 813-825, (2008).
- [11] Baltzis, B.C., Mpanias, C.J., Bhattacharya, S., "Modeling the Removal of VOC Mixtures in Biotrickling Filters", Biotechnology and Bioengineering, 72(4) pp. 389-401 (2000)
- [12] Vedova, L.D., "Biofiltration of industrial waste gases in trickle-bed bioreactors-case study: trichloroethylene removal", pp. 31-32, (2008).
- [13] Dirk-Faitakis, C., Alle, D.G., "Development and simulation studies of an unsteady state biofilter model for the treatment of cyclic air emissions of an  $\alpha$ -pinene gas stream", Journal of Chemical Technology and Biotechnology, 80, pp. 737-745, (2005).
- [14] Diks, R.M.M., Ottengraf, S.P.P., "Verification studies of a simplified model for the removal of dichloromethane from waste gases using a biological trickling filter". Bioprocess Engineering, 6, pp. 131-140, (1991).
- [15] Ranasinghe, M.A., Jordan, P.J., Gostomski, P.A., "Modelling the mass and energy balance in a compost biofilter", in Proceedings of the 9th Asian Pacific Confederation of Chemical Engineering Congress: Christchurch, New Zealand, (2002).
- [16] Kim, S., Deshusses, M.A., "Development and Experimental Validation of a Conceptual Model for Biotrickling Filtration of H<sub>2</sub>S", Environmental Progress, 22, pp. 119-128, (2003).
- [17] Jin, Y., Veiga, M.C., Kennes, C., "Effects of pH, CO<sub>2</sub>, and Flow Pattern on the Autotrophic Degradation of Hydrogen Sulfide in a Biotrickling Filter", Biotechnology and Bioengineering, 92(4), pp. 462-471, (2005).
- [18] Abdehagh, N., Namini, M.T., Heydrian, S.M., Bonakdarpour, B., Zare, D., "Performance of a Biotrickling Filter Employing Thiobacillus thioparus Immobilized on Polyurethane Foam For Hydrogen Sulfide Removal", Iranian Journal of Environmental Health Science & Engineering, 8(3), pp. 245-254, (2010).

$C_g$	$\text{gm}^{-3}$	غلظت سولفید هیدروژن در فاز گاز
$C_b$	$\text{gm}^{-3}$	غلظت سولفید هیدروژن در زیست لایه
$C_{*i,b}$	$\text{gm}^{-3}$	غلظت سولفید هیدروژن در سطح مشترک (مایع-زیست لایه)
$D$	$\text{m}^2\text{h}^{-1}$	ضریب نفوذ سولفید هیدروژن
$EBRT$	s	مدت اقامت در بستر خالی
$EC$	$\text{gm}^3\text{h}^{-1}$	ظرفیت حذف
$F_l$	$\text{m}^3\text{h}^{-1}$	شدت جریان مایع
$F_g$	$\text{m}^3\text{h}^{-1}$	شدت جریان گاز
$H$		ثابت هنری
$L$	$\text{gm}^3\text{h}^{-1}$	نرخ بارگذاری
$K_l$	$\text{mh}^{-1}$	ضریب انتقال جرم کلی در فاز مایع
$K_s$	$\text{gm}^{-3}$	ثابت (میکائیس-منتن)
$R_{max}$	$\text{gm}^3\text{h}^{-1}$	ماکسیمم سرعت واکنش
$RE$	%	بازدهی حذف
$V$	$\text{m}^3$	حجم راکتور

### مراجع

- [1] Son, H.J., Lee, J.H., "H<sub>2</sub>S removal with an immobilized cell hybrid reactor", Process Biochemistry, 40, pp. 2197-2203, (2005).
- [2] Syed, M., Soreanu, G., Falletta, P., Beland, M., "Removal of hydrogen sulfide from gas streams using biological processes - A review", Canadian Biosystems Engineering, 48 (2), pp. 1-14, (2006).
- [3] Shareefdeen, Z., Herner B., Wilson S., "Biofiltration of nuisance sulfur gaseous odors from a meat rendering plant", Journal of Chemical Technology and Biotechnology, 77, pp. 1296-1299, (2002).
- [4] Buisman, C.J.N., Post, R., Ijspeert, P., Geraarts, S., Lettinga, G., "Biotechnological process for sulphide removal with sulphur reclamation", Acta Biotechnological, 9, pp. 271-283, (1989).
- [5] Sercu, B., Nunez, D., Van Langenhov, H., Aroca, G., Verstraete W., "Operational and microbiological aspects of a bioaugmented two-stage biotrickling filter removing hydrogen sulfide and dimethyl sulfide", Biotechnology and Bioengineering, 90: pp. 259-269, (2005).
- [6] Elias, A., Barona, A., Arreguy, A., Rios, J., Aranguiz, I., Penas, J., "Evaluation of a packing material for the biodegradation of H<sub>2</sub>S and product analysis", Process Biochemistry, 37, pp. 813-820, (2002).
- [7] Kim, H., Kim, Y.j., Chung, J.S., Quang, X., "Long-

- [19] Perry, R.H., Green, D.W., "Perry's Chemical Engineers' Handbook", McGraw-Hill, pp. 132, 457, (1999).
- [20] Oyarzun, P., Arancibia, F., Canales, C., Aroca, G.E., "Biofiltration of high concentration of hydrogen sulphide using *Thiobacillus thioautotrophicus*", Process Biochemistry, 39, pp. 165-170, (2003).
- [21] Kim, S., Deshusses, M.A., "Understanding the limits of  $H_2S$  degrading biotrickling filter using a differential biotrickling filter". Chemical Engineering Journal, 113, pp. 119-126, (2005).
- [22] Hartmans, S., Tramper, J., "Dichloromethane removal from waste gases with a biotrickling filter". Bioprocess Engineering, 6, pp. 83-92, (1991).
- [23] Chetpattananondh, P., Nitipavachon, Y., Bunyakan, C., "Biofiltration of air contaminated with methanol and toluene". Songklanakarin Journal of Science and Technology, 7, pp. 761-773, (2005).
- [24] Deshusses, M.A., Cox, H.H.J., "A cost benefit approach to reactor sizing and nutrient supply for biotrickling filters for air pollution control". Environmental Progress, 18, pp 188-196, (1999).

Archive of SID