

## مطالعه تجربی و مدلسازی جذب همزمان مخلوط CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>S توسط نانوسیال سیلیس-آب در یک برج پر شده

داوود خفری نژاد<sup>۱</sup>، الهام عامری<sup>۱\*</sup>، سیدحمید اسماعیلی فرج<sup>۲\*</sup>

۱. گروه مهندسی شیمی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد شهرضا، شهرضا، ایران
۲. دانشکده مهندسی شیمی و مواد، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

### چکیده

در این تحقیق مطالعه تجربی و مدلسازی ریاضی فرآیند جذب گازهای دی-اکسیدکربن و سولفیدهیدروژن با استفاده از جاذب نانوسیال سیلیس-آب در یک برج پر شده انجام شده است. یک دستگاه آزمایشگاهی متشکل از دو برج پر شده با حلقه های راشیگ پلاستیکی جهت فرآیند جذب و دفع آماده شد. آزمایشات تجربی برای سه شدت جریان ۳، ۷ و ۱۵ لیتر بر دقیقه برای گاز و ۰/۳۵، ۰/۵۰ و ۱ لیتر بر دقیقه برای مایع انجام شده و کسر مولی دی-اکسیدکربن و سولفیدهیدروژن در دو فاز گاز و مایع بدست آمده است. سپس با استفاده از موازنه جرم کلی و جزئی، سیستم مورد بررسی مدل شده است. مقایسه نتایج مدل بدست آمده با نتایج تجربی نشان از تطابق نزدیک بین داده‌های تجربی و مدل دارد و متوسط خطای نسبی حدود ۱۰ درصد بوده است. با استفاده از مدل بدست آمده نمودار غلظت اجزاء، شار مولی انتقال جرم و شار جرمی برای مایع و گاز ترسیم شده است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش شدت جریان گاز میزان شدت انتقال جرم افزایش می‌یابد و شیب تغییرات کسر مولی در هر دو فاز مایع و گاز افزایش می‌یابد. از طرفی شار انتقال جرم فاز گاز در شدت جریانهای بالای خوراک گازی بیش از دو برابر افزایش نشان می‌دهد. همچنین شدت انتقال جرم دی اکسید کربن بیشتر از سولفید هیدروژن بوده است که علت آن بالاتر بودن غلظت دی اکسید کربن در گاز ورودی است.

### مشخصات مقاله

تاریخچه مقاله:  
دریافت: ۲۰ اردیبهشت ۱۴۰۰  
دریافت پس از اصلاح: ۳ مهر ۱۴۰۰  
پذیرش نهایی: ۸ آبان ۱۴۰۰

### کلمات کلیدی:

جذب  
نانوسیال  
نانوذرات سیلیس  
برج پر شده  
مدلسازی

\* عهده دار مکاتبات

سید حمید اسماعیلی فرج؛

h.esmaeili@shahroodut.ac.ir

الهام عامری؛

ameri@iaush.ac.ir

حقوق ناشر محفوظ است.

## ۱- مقدمه

گاز طبیعی علاوه بر ترکیبات هیدروکربنی سنگین و بخار آب، در اغلب موارد حاوی ترکیبات مضر و ترکیبات گوگردی بوده و جداسازی آنها تا حد مطلوب ضروری می باشد. گازهای نظیر  $\text{CO}_2$  و  $\text{H}_2\text{S}$  ترکیبات بسیار خورنده و سمی بوده و به تجهیزات و محیط زیست صدمات جدی وارد می سازند. این گازها با آب ترکیباتی نظیر اسید سولفوریک و اسیدکربونیک تولید می گردد. از این رو به ترکیبات  $\text{CO}_2$  و  $\text{H}_2\text{S}$  گازهای اسیدی اطلاق می شود [۱].

روشهای مختلفی برای جداسازی گازهای اسیدی از جریان گاز طبیعی در مقیاس آزمایشگاهی و صنعتی وجود دارد که مهمترین آنها جداسازی با محلول آمینی است. علی رغم گستردگی استفاده صنعتی از آمینها، مشکلاتی در بر دارد که از آن جمله خوردگی، سمیت، کف زایی را می توان نام برد [۲-۴]. بعلاوه خطر بخار شدن بخشی از ماده جاذب آمینی و وارد شدن آن به جریان گازی و آلوده کردن محیط زیست را به همراه خواهد داشت. از مزایای اصلی استفاده از آب به عنوان جاذب برای جذب ناخالصیهای گازی، سهولت دسترسی و ارزان بودن آن است. از این جهت برای ترکیبات گازی قابل حل در آب، این ماده جاذب مهمی به حساب می آید. استفاده از آب خصوصاً در سیستم هایی که حجم زیادی از گاز در فشار کم باید تحت عمل تصفیه قرار بگیرد اهمیت می یابد. مطالعات متعددی درخصوص استفاده از جاذبهای پایه آبی برای جداسازی گازها صورت گرفته است [۵-۱۵].

برای بعضی گازها که در فشار معمول حلالیت کمی در آب دارند (مانند  $\text{CO}_2$ )، از فشار زیاد استفاده می شود. آمونیاک، دی اکسید گوگرد، دی اکسید کربن، سولفید هیدروژن، فلئوئورید هیدروژن، کلرید هیدروژن، تترافلئوئورید سیلیسیم و کلر از موادی می باشند که جهت جداسازی آن ها به صورت صنعتی از آب استفاده می شود. از میان موارد ذکر شده حلالیت دی اکسید کربن، سولفید هیدروژن و کلر در آب کم می باشد و جذب آنها توسط فاز مایع کنترل می شود. برای بالا بردن میزان جذب این گازها توسط آب افزودنیهای متعددی پیشنهاد شده است [۱۶]. استفاده از نانوسیالات بعنوان جاذب فیزیکی اخیراً توسط محققین مورد توجه قرار گرفته شده است. مطالعات متعددی در خصوص خواص فیزیکی نانو سیال و اثرات نانو ذرات در افزایش سرعت انتقال جرم صورت گرفته است [۱۷-۲۳]. در خصوص بهبود فرآیند جذب با نانو سیال نیز مکانیسمهای متعددی توسط محققین مطرح شده است که می توان اثر نانو ذرات بر

ضریب انتقال جرم حجمی گاز- مایع (kLa)، اثرات هیدرودینامیکی که برآیند دو عامل کاهش سطح تماس موثر انتقال جرم و حرکات براونی نانوذرات می باشد و نیز اثر گریزینگ (Grazing effect) که براساس این اثر فاز گاز شامل جزء A در تماس با سوسپانسیون قرار گرفته و پس از جذب جزء A توسط ذرات در فصل مشترک به توده مایع منتقل می شود، اشاره کرد [۸].

برای اولین بار کریشنامورتی و همکارانش در سال ۲۰۰۶ به بررسی اثر انتقال جرم در نانوسیال پرداختند. آنها طی یک آزمایش ضریب نفوذ برای یک قطره رنگ در نانو سیال و نیز در آب بدون یون اندازه گیری نمودند. نتایج آزمایشات آنها نشان داد که حضور نانو ذرات در سیال پایه منجر به افزایش ضریب انتقال جرم می شود [۲۴].

ما (Ma) و همکارانش در سالهای ۲۰۰۷ و ۲۰۰۹ از نانو لوله های کربنی جهت فرآیند جداسازی آمونیاک در یک برج جذب حبابی استفاده نمودند و نتیجه گرفتند که غلظت بهینه ۰/۴ درصد جرمی برای نانو لوله های کربنی منجر به بیشترین سرعت جذب می شود [۲۵ و ۲۶].

در سال ۲۰۰۷ کیم و همکارانش از نانو ذرات مس، اکسید مس و اکسید آلومینیوم برای بهبود جذب آمونیاک استفاده نمودند. نتایج حاصل از تحقیقات کیم و همکارانش نشان داد که نانو ذرات مس نسبت به دو نانو ذره دیگر عملکرد مناسبتری دارد بطوریکه استفاده از آن با غلظت ۰/۱ درصد وزنی افزایش سرعت جذب ۳/۲۱ برابر نسبت به سیال پایه را در بر خواهد داشت. همچنین حضور ماده فعال سطحی به تنهایی یا در کنار حضور نانو ذرات می تواند بر سرعت جذب موثر باشد بطوریکه در سیستم بدون نانو ذره اثر افزودن ۷۰۰ ppm ماده ۲-اتیلن ۱- هگزانول منجر به افزایش ۴/۸ برابری سرعت جذب و افزودن همزمان نانو ذره و فعال سطحی با غلظتهای یاد شده باعث بهبود سرعت جذب به نسبت ۵/۳۲ برابر سیال پایه می شود [۲۷].

در سال ۲۰۱۲ پانگ و همکاران به بررسی این سیستم به کمک نانو ذرات نقره در یک برج جذب حبابی پرداختند. [۲۸]. همچنین مطالعات بر روی اثر نانو ذرات مختلف بر فرآیند جذب آمونیاک-آب توسط یانگ و همکاران (۲۰۱۱) [۲۹] صورت گرفته است.

در سال ۲۰۰۶ پارک و همکارانش به بررسی فرآیند جذب دی اکسید کربن در محلول کلئیدی سیلیکا در یک مخزن همزن دار پرداختند. آنها با توجه به خواص رئولوژیکی محلول کلئیدی سیلیکا که رفتاری غیر نیوتنی دارد به محاسبه ضریب

این تحقیق فرآیند جذب گازهای اسیدی دی اکسید کربن و سولفید هیدروژن توسط جاذب فیزیکی نانو سیال در یک برج پر شده مورد بررسی قرار گرفته شده است. همچنین با انتخاب یک المان از طول بستر پر شده و نوشتن معادلات موازنه جرم کلی و جزئی فرآیند مورد نظر مدل‌سازی شده است.

## ۲- مواد و روشها

### ۲-۱- مواد بکار رفته

در این تحقیق در مقیاس آزمایشگاهی از نانو ذره سیلیس استفاده شده است که از سنتز آزمایشگاهی به روش سل-ژل بدست آمده است. برای این منظور از روش Stöber استفاده شده است. در این روش از تترا اتیل اورتو سیلیکات (TEOS)، اتانول بعنوان حلال و نیز هیدروکسید آمونیاک ۲۵ درصد وزنی بعنوان کاتالیست استفاده شده است [۴۰]. تمام ترکیبات ذکر شده ساخت شرکت مرک آلمان مورد استفاده قرار گرفته‌اند. برای ساخت نانوسیال سیلیس-آب، ۲/۵ گرم نانو ذره سیلیس پس از توزین در مقداری آب مقطر پخش شده و سپس به حجم ۵۰۰ میلی لیتر می‌رسد. غلظت نانو ذرات در این مخلوط ۰/۵ mg/L است. مخلوط حاصل ابتدا بصورت مکانیکی به مدت ۳۰ دقیقه هم زده شده و سپس در معرض امواج فوق صوت قرار می‌گیرد. برای تولید امواج فوق صوتی از دستگاه تولید امواج فوق صوتی مدل هایلشر (Hielscher) با سیکل ۰/۵ و دامنه ۶۵٪ استفاده شده است. طی سه مرحله، در مجموع ۶۰ دقیقه نانو سیال اصطلاحاً سونیکیت شده و جهت رقیق سازی و استفاده در برج جذب آماده می‌باشد. مطابق نتایج تحقیقات قبلی [۳۶ و ۳۷] بهترین کسر جرمی نانو ذره سیلیس در نانو سیال برای جذب سولفید هیدروژن و دی اکسید کربن غلظت ۱۰۰ میلی گرم بر لیتر است که معادل ۰/۰۱ درصد جرمی است. لذا در این تحقیق به اقتباس از مراجع مذکور آزمایشات با نانوسیال سیلیس ۰/۰۱ درصد جرمی انجام شده است.

### ۲-۲- آزمونهای مشخصه یابی نانوذرات

برای تعیین مشخصات نانو ذرات سنتز شده آزمونهایی انجام گرفته است که در ادامه تشریح خواهند شد. برای تعیین اندازه و شکل نانوذرات سیلیس از این ذرات تصویربرداری میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM) انجام شده است. برای نانوذرات سیلیس آزمون پراکندگی دینامیکی نور (DLS) اندازه و شکل نانوذرات تعیین شده است. برای تعیین گروه‌های عاملی

انتقال جرم پرداختند و برای این منظور به یک سری معادلات بدون بعد دست یافتند [۳۰]. آنها در سال ۲۰۰۷ با استفاده از سیال پایه آمینی از جمله مونو اتانول آمین نیز به نتیجه مشابه رسیدند و معادله تعیین ضریب انتقال جرم در هر دو حالت یکسان بدست آمد [۳۱ و ۳۲]. همچنین در این زمینه می‌توان به کارهای صورت گرفته توسط کیم و همکاران در سال ۲۰۰۸ [۳۳] اشاره نمود.

کوماتی و همکارانش (۲۰۰۸) در یک آزمایش موفقیت آمیز به بررسی جذب دی‌اکسید کربن در نانو سیال شامل ذرات مغناطیسی موجود در سیال پایه متیل دی‌اتانول آمین در مقیاس صنعتی پرداختند و نتیجه گرفتند که استفاده از نانو سیال بجای سیال پایه منجر به افزایش سرعت جذب خواهد شد [۳۴]. همچنین بررسی اثر میدان توسط دارونجوقی و همکاران در سال ۲۰۱۸ مورد بررسی قرار گرفته است [۳۵].

اسماعیلی فرج و همکاران در تحقیقات جامعی به بررسی میزان جذب گازهای اسیدی دی اکسید کربن و سولفید هیدروژن در نانوسیالات سیلیس-آب و اکسید گرافن-آب در برج حبایی تک حباب پرداختند [۳۶-۴۳]. همچنین آنها در مقیاس نیمه صنعتی یک برج حبایی با رژیم جریان حبایی<sup>۱</sup> را برای جداسازی آلاینده‌های موجود در بیوگاز بکار بردند [۴۱]. نتایج حاکی از کاهش غلظت آلاینده‌ها در محدوده ۷۰ تا ۱۰۰ درصد بسته به زمان ماند و بار آلاینده ورودی در جریان بیوگاز بوده است [۴۱].

در سال ۲۰۱۴ شفیعیان و همکارانش در یک کار تحقیقاتی به مرور مطالعات صورت گرفته در زمینه مدل‌سازی برج پرشده برای جذب دی اکسید کربن پرداختند [۴۴]. اولوتوی و همکارانش در سال ۲۰۰۶ به بررسی مدل ریاضی جهت جذب دی اکسید کربن در محلول سود در یک برج پرشده پرداختند. همچنین برای صحت سنجی مدل تعدادی تست تجربی در سیستم مورد بررسی انجام شده است که نتایج مقایسه نتایج مدل با تستهای تجربی نشان از تطابق خوب بین آنها دارد [۴۵]. همچنین تایلز و همکارانش در سال ۲۰۱۶ مدل‌سازی جذب دی اکسید کربن در دو برج پرشده معمولی و برج پرشده چرخان<sup>۲</sup> پرداختند [۴۶].

نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد که هم مدل‌سازی و هم مطالعات تجربی در خصوص فرآیندهای جذب گاز با استفاده از نانوسیالات در برجهای پرشده تاکنون توسط محققین مورد مطالعه قرار نگرفته است. بر همین اساس برای نخستین بار در

<sup>2</sup> Rotating Packed Bed

<sup>1</sup> Bubbly

تخلخل بستر با استفاده از پر کردن برج از آب و سپس اندازه-گیری حجم آب داخل بستر حدوداً ۸۰ درصد اندازه‌گیری شد. مایع جاذب که نانوسیال می‌باشد از بالا بر سطح پرکنها پاشیده می‌شود. نمونه گاز صنعتی سنتز شده شامل ۴۰ درصد گاز دی اکسید کربن ۴ درصد سولفید هیدروژن و مابقی هوا وارد برج جذب می‌شود. برای کنترل شدت جریان گازها از فلوکنترلر مدل Brooks، آمریکا استفاده شده است. گاز مورد نظر توسط یک کمپرسور از پایین برج جذب و از طریق روزنه ایجاد شده در کف ستون جذب به داخل برج ارسال می‌شود. در طول فرآیند جریان مایع از بالا به پایین و جریان گاز از پایین به بالا بصورت جریان متقابل بطور مداوم برقرار بوده است. در اثر تماس گاز با جاذب نانوسیال ناخالصی‌های آن از جمله سولفید هیدروژن و دی اکسید کربن جذب نانوسیال می‌شوند. برای تعیین میزان دی اکسید کربن و سولفید هیدروژن در فاز گاز از دستگاه کروماتوگرافی گازی مدل Agilent (آمریکا) و مجهز به آشکار ساز TCD استفاده شده است.

در آزمون جذب گاز از سه شدت جریان مختلف ۱۵، ۷ و ۳ لیتر بر دقیقه برای جریان گاز استفاده شده است. جاذب در یک سیکل بسته وارد برج جذب شده و پس از تماس با حبابهای گاز و جذب سولفید هیدروژن و دی اکسید کربن به محفظه هوادهی جهت احیا ارسال می‌شود. در محفظه هوادهی جاذب مایع، بسته به شدت جریان مایع، به مدت ۱/۵ تا ۳/۵ دقیقه در معرض هوادهی با شدت نسبتاً بالایی (۱۰ لیتر بر ثانیه) قرار گرفته است. بدین وسیله گازهای جذب شده تا حدود زیادی از جاذب دفع می‌گردد.

برای بررسی اثر میزان جذب گازها در برج جذب در شرایط پایا، از نقاط بالا و پایین برج غلظت گازهای سولفید هیدروژن و دی اکسید کربن اندازه‌گیری شده است. لازم بذکر است که ارتفاع صفر همان ورودی گاز و خروجی مایع از برج جذب و ارتفاع ۳۰ نیز خروجی گاز و ورودی مایع جاذب به برج می‌باشد. با توجه به اینکه بخشی از سولفید هیدروژن و دی اکسید کربن جذب شده در مرحله دفع ممکن است در جاذب مانده و از آن خارج نشود لذا در شرایط پایا غلظت این گازها در جاذب ورودی به برج جذب غیر صفر است اما چنانکه در بخش نتایج اشاره خواهد شد مقدار آن بسیار کم است.

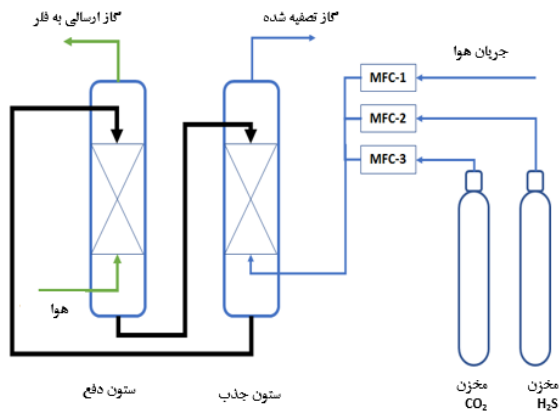
موجود بر سطح نانوذرات از آزمون طیف سنجی تبدیل فوریه مادون قرمز (FT-IR) بهره برده شد. آزمون FT-IR بر اساس جذب تابش و بررسی جهش‌های ارتعاشی مولکول‌ها و یون‌های چند اتمی صورت می‌گیرد. این روش به عنوان روشی پر قدرت و توسعه یافته برای تعیین ساختار و اندازه‌گیری گونه‌های شیمیایی به کار می‌رود. همچنین این روش عمدتاً برای شناسایی ترکیبات آلی به کار می‌رود، زیرا طیف‌های این ترکیبات معمولاً پیچیده هستند و تعداد زیادی پیک های ماکسیمم و مینیمم دارند که می‌توانند برای اهداف مقایسه‌ای به کار گرفته شوند.

یکی از پارامترهای مهم در نانوسیالات پایداری آنها است. پایداری به زبان ساده یعنی اینکه نانوذرات در داخل سیال شناور بمانند و در مدت زمان کوتاهی ته نشین نشوند. نانوذرات سیلیس از نوع آبدوست بوده و در آب بسیار پایدار است. برای بررسی پایداری نانو سیال معمولاً از آزمون پتانسیل زتا استفاده می‌شود. مطابق مرجع [۴۷] زمانیکه مقدار پتانسیل زتا در محدوده ۳۱- تا ۴۰- میلی ولت باشد پایداری متوسط، زمانیکه پتانسیل زتا بالاتر از ۴۰- میلی ولت باشد پایداری بالا خواهد بود و می‌توان نانوسیال را پایدار در نظر گرفت. پایداری نانوذرات بخصوص زمانیکه در برج پر شده بکار برده شوند بسیار حائز اهمیت است. از این جهت در این تحقیق علاوه بر انجام تست پتانسیل زتا برای نمونه نانوسیال با غلظت ۰/۱ درصد وزنی، پس از گذشت زمانهای ۲۴ و ۳۶ ساعت نیز از نانوسیال تصویر برداری شده است تا بتوان بصورت چشمی پایداری نانوسیال را مشاهده نمود.

### ۲-۲- شرح دستگاه آزمایشات

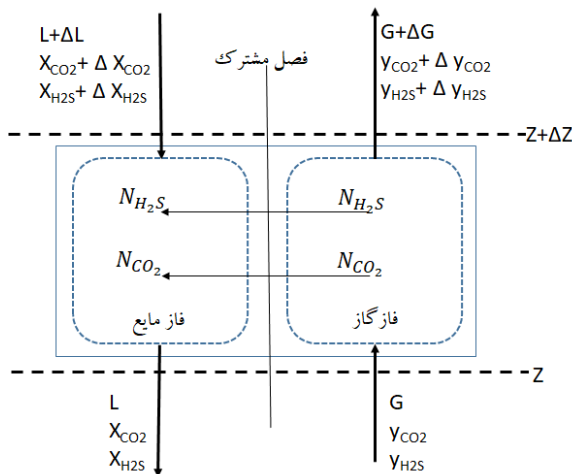
دستگاه جذب مورد استفاده برای انجام آزمایشات مطابق شکل (۱) متشکل از دو ستون جذب و دفع است. برج جذب بکار رفته عبارتست از یک ستون از جنس پلی وینیل کلراید (PVC) به قطر داخلی ۶۳ میلیمتر و طول ۵۰ سانتیمتر. در داخل این ستون حدود یک لیتر حجم بستر می‌باشد که با استفاده از پرکنهای پلاستیکی از نوع حلقه‌های راشیگ با قطر خارجی ۷ میلیمتر و طول ۷ میلیمتر و ضخامت ۱/۶ میلیمتر پر شده است. لذا طول بستر معادل ۳۰ سانتیمتر خواهد بود.

## مطالعه تجربی و مدلسازی جذب همزمان مخلوط $CO_2/H_2S$ توسط نانوسیال سیلیس-آب در یک برج پرشده



شکل ۱: الف) تصویر دستگاه جذب گاز آزمایشگاهی (ب) شماتیک دستگاه آزمایشگاهی

انتقال جرم صرفاً از گاز به مایع در نظر گرفته می‌شود.  
از انحلال هوا در جاذب صرف‌نظر می‌شود.



شکل ۲: المان دیفرانسیلی از مقطع برج پرشده

از برقراری موازنه جرم کلی و جزئی برای دو فاز مایع و گاز بصورت مجزا معادلات دیفرانسیل حاکم بر فرآیند به شرح زیر بدست خواهد آمد.

$$\frac{dG}{dz} = -\frac{Pa}{RT} \left[ k_{g,H_2S} (y_{H_2S} - y_{H_2S,i}) + k_{g,CO_2} (y_{CO_2} - y_{CO_2,i}) \right] \quad (1)$$

$$\frac{dy_{CO_2}}{dz} = \frac{Pa}{GRT} \left[ k_{g,H_2S} (y_{H_2S} - y_{H_2S,i}) y_{CO_2} - k_{g,CO_2} (y_{CO_2} - y_{CO_2,i}) (1 - y_{CO_2}) \right] \quad (2)$$

### ۲-۴- مدلسازی فرآیند

مدلسازی فرآیند جذب در برج پر شده برای شرایط پایا صورت می‌گیرد. مطابق مرجع [۴۸] یک المان مانند شکل ۲ در نظر گرفته می‌شود. فرض می‌شود که دو فاز مایع و گاز بصورت مجزا از هم از طریق فصل مشترک با یکدیگر در ارتباط باشند. گاز با شار جرمی  $G$  و غلظت  $y_{CO_2}$  و  $y_{H_2S}$  وارد المان شده و با شار جرمی  $G+\Delta G$  و غلظتهای  $y_{CO_2} + \Delta y_{CO_2}$  و  $y_{H_2S} + \Delta y_{H_2S}$  از المان خارج می‌شود. بطور مشابه مایع از بالای المان با شار جرمی  $L+\Delta L$  و غلظتهای  $x_{CO_2} + \Delta x_{CO_2}$  و  $x_{H_2S} + \Delta x_{H_2S}$  وارد برج شده و با شار جرمی  $L$  و غلظتهای  $x_{CO_2}$  و  $x_{H_2S}$  از المان خارج می‌شود. در طول المان انتقال جرم از گاز به مایع اتفاق افتاده و لذا تغییرات غلظت فاز گاز و مایع به همین دلیل است. فرض می‌شود که انتقال جرم در جهت نشان داده شده در شکل ۲ یعنی از فاز گاز به مایع رخ دهد و از انتقال جرم سایر اجزاء صرف‌نظر شود.

مهمترین فرضیات مدل به شرح زیر است:

- ✓ فرآیند یک بعدی (در راستای محوری) فرض می‌شود.
- ✓ از پراکندگی محوری چشم پوشی خواهد شد.
- ✓ مسئله در حالت پایا در نظر گرفته می‌شود.
- ✓ خواص فیزیکی سیالات در طول برج ثابت فرض می‌گردد.
- ✓ نانوسیال بعنوان یک سیال تک فاز با خواص متفاوت از سیال پایه فرض می‌شود.
- ✓ فرآیند در دمای ثابت فرض می‌شود.
- ✓ برای نانوسیال آبی جذب فیزیکی در نظر گرفته می‌شود و واکنش شیمیایی در نظر گرفته نخواهد شد.
- ✓ پراکندگی بی اثر فرض می‌شوند و تخلخل بستر ثابت و یکنواخت در نظر گرفته خواهد شد.

نيز كسر مولی اجزاء در طول برج برخی از پارامترها در طول برج تغییر می کنند. برای تعیین پارامترهای متغیر از روابط ارائه شده در جدول (۲) استفاده می شود.

جدول (۱): ویژگیهای فیزیکی و ترمودینامیکی و عملیاتی در

بسترهای مورد آزمایش

پارامتر	نماد	مقدار	واحد	مرجع
حلالیت CO <sub>2</sub> در آب ۳۰۰ K	$y_{CO_2i}$	۱/۵	gr/kg	[۱۶]
حلالیت H <sub>2</sub> S در آب ۳۰۰ K	$y_{H_2S_i}$	۳/۳	gr/kg	[۵۰]
ضریب نفوذ CO <sub>2</sub> در هوا	$D_{CO_2-air}$	$1/77 \times 10^{-6}$	m <sup>2</sup> /s	[۵۰]
ضریب نفوذ H <sub>2</sub> S در هوا	$D_{H_2S-air}$	$1/50 \times 10^{-6}$	m <sup>2</sup> /s	[۵۰]
ضریب نفوذ CO <sub>2</sub> در H <sub>2</sub> S	$D_{CO_2-H_2S}$	$1/19 \times 10^{-6}$	m <sup>2</sup> /s	[۵۰]
ضریب نفوذ CO <sub>2</sub> در نانوسیال	$D_{CO_2-nf}$	$2/10 \times 10^{-9}$	m <sup>2</sup> /s	[۳۷]
ضریب نفوذ H <sub>2</sub> S در نانوسیال	$D_{H_2S-nf}$	$2/90 \times 10^{-9}$	m <sup>2</sup> /s	[۳۷]
ویسکوزیته گاز	$\mu_g$	$1/85 \times 10^{-4}$	Pa.s	[۵۱]
ویسکوزیته سیال پایه	$\mu_{bf}$	$8/88 \times 10^{-4}$	Pa.s	[۵۱]
قطر برج	ID	۶۳	mm	-
طول بستر	Z	۳۰	cm	-
سطح ویژه پرکنها	a	۹۰	m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup>	-
تخلخل بستر	$\epsilon$	۰/۸	-	-
قطر معادل کره هم سطح	d	۱۳	mm	-
دمای فرآیند	T	۳۰۰	K	-
فشار فرآیند	P	۱/۲	bar	-
دبی جریان گاز	$Q_g$	۱۵ و ۷/۳	LPM	-
دبی جریان مایع	$Q_L$	۰/۵ ، ۰/۳۵ و ۱	LPM	-
غلظت CO <sub>2</sub> در گاز ورودی	$y_{CO_2}$	۴۰	%	-
غلظت H <sub>2</sub> S در گاز ورودی	$y_{H_2S}$	۰/۴	%	-
غلظت CO <sub>2</sub> در مایع ورودی	$x_{CO_2}$	۰/۰۵	%	-
غلظت H <sub>2</sub> S در مایع ورودی	$x_{H_2S}$	۰/۰۰۳	%	-

$$\frac{dy_{H_2S}}{dz} = \frac{Pa}{GRT} \left[ k_{g,CO_2} (y_{CO_2} - y_{CO_2i}) y_{H_2S} - k_{g,H_2S} (y_{H_2S} - y_{H_2Si}) (1 - y_{H_2S}) \right] \quad (3)$$

$$\frac{dL}{dz} = -a \left[ k_{L,H_2S} (x_{H_2Si} - x_{H_2S}) + k_{L,CO_2} (x_{CO_2i} - x_{CO_2}) \right] \quad (4)$$

$$\frac{dx_{CO_2}}{dz} = \frac{a}{L} \left[ k_{L,H_2S} (x_{H_2Si} - x_{H_2S}) x_{CO_2} - k_{L,CO_2} (x_{CO_2i} - x_{CO_2}) (1 - x_{CO_2}) \right] \quad (5)$$

$$\frac{dx_{H_2S}}{dz} = \frac{a}{L} \left[ k_{L,CO_2} (x_{CO_2i} - x_{CO_2}) x_{H_2S} - k_{L,H_2S} (x_{H_2Si} - x_{H_2S}) (1 - x_{H_2S}) \right] \quad (6)$$

برای حل معادلات فوق نیاز به شش شرط مرزی داریم که به قرار زیر خواهند بود:

$$@z = 0 \rightarrow G = G_{in}, y_{CO_2} = 0.4, y_{H_2S} = 0.04 \quad (7)$$

$$@z = l \rightarrow L = L_{in}, x_{CO_2} = x_{inCO_2}, x_{H_2S} = x_{inH_2S} \quad (8)$$

بدین ترتیب مدل و شرایط مرزی بدست آمده و بایستی با استفاده از روشهای عددی مدل حاصل را حل نمود. برای حل مدل از روش رنگ-کاتای مرتبه چهارم استفاده می شود [۴۹]. با توجه به معادلات فوق مشاهده می شود بدلیل اعمال فرض تک فاز بودن نانوسیال در معادلات حاکم تغییری ایجاد نشده است. این در حالیست که اثر نانوذرات روی خواص فیزیکی همین سیال تک فاز فرض شده از طریق معادلاتی که در جدول (۱) و (۲) بیان شده اند لحاظ می گردد.

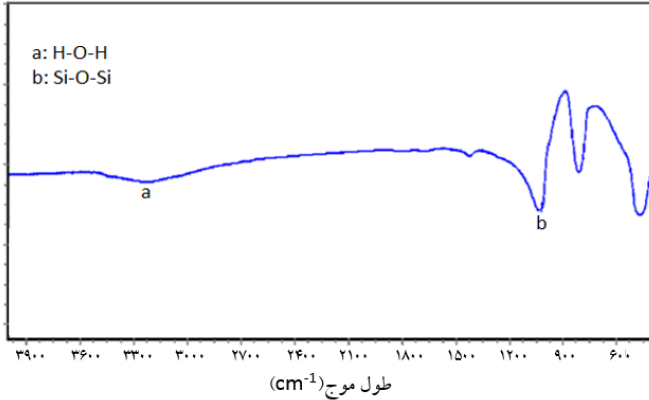
## ۵-۲- خواص فیزیکی و هندسی فرآیند

برای شبیه سازی فرآیند بایستی ابتدا ویژگیهای هندسی برج و خواص فیزیکی و پارامترهای عملیاتی بدرستی محاسبه شوند. این اطلاعات از مشخصات برج جذب آزمایشگاهی و نیز روابط فیزیکی و ترمودینامیکی بدست خواهند آمد. خواص مورد استفاده در شبیه سازی و روابط آنها در جداول (۱) و (۲) ارائه شده است. لازم بذکر است که برخی از پارامترها در طول برج ثابت در نظر گرفته شده اند اما با تغییر شار جرمی گاز و مایع و

## مطالعه تجربی و مدل‌سازی جذب همزمان مخلوط $CO_2/H_2S$ توسط نانوسیال سیلیس-آب در یک برج پرشده

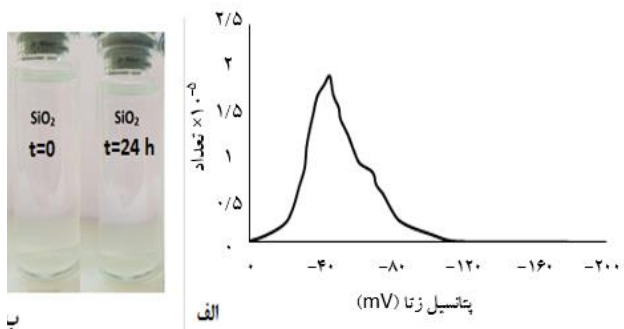
شکل (۳): تصویر TEM از نانوذرات سیلیس سنتز شده

برای بررسی گروه‌های عاملی در نانوذره مورد مطالعه، از آزمون FT-IR استفاده شده است. شکل (۵) آزمون FT-IR برای نانوذرات سیلیس را نشان می‌دهد. براساس این آزمون در نمونه سیلیس تنها پیوندهای Si-O-Si که گروه عاملی سیلوکسان معروف است وجود دارد و هیچگونه گروه عاملی دیگری بر سطح نانوذرات وجود ندارد.



شکل (۴): نتایج آزمون FT-IR برای نانوذرات سیلیس سنتز شده

نتایج آزمون پتانسیل زتا برای نانوسیال سیلیس-آب در شکل (۵) آمده است. براساس این شکل مقدار پتانسیل زتا برای نانوسیال سیلیس-آب برابر  $45/2$  میلی ولت می‌باشد و با توجه به آنچه قبلاً ذکر گردید این یعنی اینکه نانوسیال از پایداری بالایی برخوردار است. همچنین تصاویر نانوسیال در زمانهای صفر و ۲۴ ساعت نیز در شکل ۵ نشان داده شده است. چنانکه ملاحظه می‌شود هیچگونه تغییر محسوسی در دو نمونه بعد از گذشت ۲۴ ساعت مشاهده نمی‌شود.



شکل (۵): نتایج آزمون پایداری نانوسیال الف) تست پتانسیل زتا ب) بررسی پایداری

### ۳-۲- مقایسه نتایج تجربی و شبیه سازی:

در این بخش نتایج تجربی جذب دی اکسید کربن و سولفید هیدروژن در جاذب نانوسیال سیلیس-آب مورد بررسی

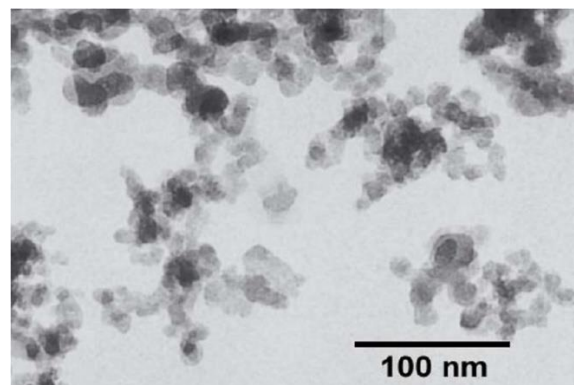
جدول (۲): روابط کمکی برای تعیین خواص سیستم

پارامتر	رابطه	مرجع
ضریب نفوذ A در B در فاز گازی	$D_{AB} = \frac{1.858 \times 10^{-27} T^{\frac{3}{2}}}{P \sigma_{AB}^2 \phi} \left( \frac{1}{M_A} + \frac{1}{M_B} \right)^{\frac{1}{2}}$	[۵۰]
ضریب نفوذ A در مخلوط گازی	$D_{Am} = \frac{1 - y_A}{\frac{y_B}{D_{AB}} + \frac{y_C}{D_{AC}}}$	[۵۰]
دانسیته گاز	$\rho_g = \frac{PM_g}{RT}$	[۵۰]
جرم مولکولی متوسط گاز	$M_g = \sum y_i M_i = y_A M_A + y_B M_B + y_C M_C$	[۵۰]
سرعت ظاهری گاز و مایع	$U_g = \frac{Q_g}{\frac{\pi}{4} ID^2}$ , $U_L = \frac{Q_L}{\frac{\pi}{4} ID^2}$	[۵۰]
شار جرمی گاز و مایع	$G = \rho_g U_g$ , $L = \rho_L U_L$	[۵۰]
عدد رینولدز	$Re_g = \frac{G \cdot d}{\mu_g (1 - \epsilon)}$ , $Re_L = \frac{L \cdot d}{\mu_L}$	[۵۱]
عدد اشمیت	$Sc_i = \frac{v_{gi}}{D_{im}}$	[۵۱]
ضریب انتقال جرم فاز گاز	$k_g = 1.195 \frac{G}{M_g} Re^{-0.36} Sc^{\frac{2}{3}}$	[۵۱]
ضریب انتقال جرم فاز مایع	$k_L = 25.1 \frac{L}{M_L} Re^{0.45} Sc^{0.5}$	[۵۱]
ویسکوزیته نانوسیال	$\mu_{nf} = \mu_{bf} (1 - \phi)^{2.5}$	[۴۰]
دانسیته نانوسیال	$\rho_{nf} = \phi \rho_p + (1 - \phi) \rho_{bf}$	[۴۰]

## ۳- نتایج و بحث

### ۳-۱- نتایج مشخصه یابی نانوسیال

مطابق تصویر TEM برای نمونه سیلیس که در شکل (۳) آمده است می‌توان استنباط کرد که اندازه ذرات مطابق انتظار حدود ۲۰ نانومتر است. همچنین می‌توان استنباط نمود که ذرات سیلیس به شکل کروی می‌باشند.



جدول (۴): مقایسه نتایج تجربی و شبیه سازی جذب سولفید

هیدروژن				$Q_g$ (LPM)	$Q_L$ (LPM)
خطا (%)	نتایج شبیه سازی	نتایج تجربی			
	$Y_{Aout}$	$Y_{Aout}$	$Y_{Ain}$		
-۳	۰/۰۰۱۷	۰/۰۰۱۶۵	۰/۰۳۵۱	۳	
-۲۱/۶	۰/۰۰۱۸	۰/۰۰۱۴۸	۰/۰۳۷	۷	۰/۳۵
-۶/۱	۰/۰۰۱۹	۰/۰۰۱۷۹	۰/۰۳۹	۱۵	
۱۵/۴	۰/۰۰۱۷	۰/۰۰۲۰۱	۰/۰۴۰	۳	
۸/۲	۰/۰۰۱۸	۰/۰۰۱۹۶	۰/۰۴۰	۷	۰/۵۰
۱۱/۲	۰/۰۰۱۹	۰/۰۰۲۱۴	۰/۰۴۰	۱۵	
-۸/۳	۰/۰۰۱۷	۰/۰۰۱۵۷	۰/۰۴۰	۳	
-۴	۰/۰۰۱۸	۰/۰۰۱۷۳	۰/۰۴۳	۷	۱
-۶/۷	۰/۰۰۱۹	۰/۰۰۱۷۸	۰/۰۳۵	۱۵	

### ۳-۳- نتایج حاصل از شبیه سازی

در طول شبیه سازی معادلات دیفرانسیل ارائه شده در روابط (۱) تا (۸) با استفاده از روش عددی رانگ-کاتای مرتبه چهار حل شده و مقادیر پارامترهای شار جرمی، کسر مولی دی-اکسید کربن و کسر مولی سولفید هیدروژن در هر دو فاز گاز و مایع محاسبه می‌شود. لازم به ذکر است که در طول شبیه سازی سه مقدار مختلف شدت جریان گاز (۳، ۷ و ۱۵ LPM) و سه مقدار مختلف برای جریان مایع (۰/۳۵، ۰/۵۰ و ۱ LPM) در نظر گرفته شد که مطابق با شرایط عملیاتی آزمایشات انتخاب شده‌اند. بدلیل زیاد بودن نتایج برای کلیه حالات فوق فقط به ارائه نمودارها برای مقدار جریان مایع LPM ۰/۳۵ بسنده شده است. در شکل (۶) شار جرمی جریان گاز ارائه شده است. در این شکل برای سه نوع مختلف دبی حجمی ۳، ۷ و ۱۵ لیتر بر دقیقه برای گاز ورودی، سه منحنی مختلف برای شار جرمی گاز در طول بستر بدست آمده است. چنانکه ملاحظه می‌شود در ابتدای طول بستر انتقال جرم باعث کاهش شار جرمی گاز شده و به مرور در طول بستر کاهش شار جرمی تعدیل شده و نهایتاً در یک مقدار ثابت در طول بستر ادامه پیدا خواهد کرد.

در شکل‌های (۷) و (۸) به ترتیب نمودارهای کسر مولی دی اکسید کربن و سولفید هیدروژن در فاز گاز نشان داده شده است. مطابق این نمودارها، در هر سه شدت جریان حجمی ۳، ۷ و ۱۵ لیتر بر دقیقه برای گاز ورودی، در ابتدای بستر سرعت انتقال جرم و در نتیجه شیب تغییرات غلظت اجزاء زیاد بوده و در ادامه در طول بستر روند کاهش غلظت اجزاء کاهش می‌یابد و تقریباً در هر دو نمودار از ارتفاع ۲۵ سانتیمتر به بالاتر غلظت

قرار می‌گیرد و با نتایج حاصل از مدلسازی مقایسه می‌گردد. چنانکه ذکر گردید برای تعیین میزان گاز جذب شده از آنالیز گاز ورودی و خروجی استفاده شده است. برای این منظور گاز ورودی به برج در طول زمان مورد آنالیز قرار گرفته و برای خلاصه نویسی کسر مولی دی اکسید کربن ورودی با  $Y_{Ain}$  و کسر مولی سولفید هیدروژن ورودی با  $Y_{Bin}$  نشان داده شده است. بدیهی است که کسر مولی هوای ورودی ( $Y_{Cin}$ ) برابر  $1 - Y_{Ain} - Y_{Bin}$  خواهد بود. برای تعیین غلظت خروجی گاز نیز به روش مشابه و بلافاصله پس از اندازه‌گیری غلظت گاز ورودی اقدام شده است و کسر مولی هر یک از اجزاء گاز خروجی شامل دی اکسید کربن و سولفید هیدروژن و هوا به ترتیب با  $Y_{Cout}$ ،  $Y_{Bout}$ ،  $Y_{Aout}$  نامگذاری شده است.

نتایج حاصل از اندازه گیری غلظت دی اکسید کربن در فاز گازی در سه شدت جریان گاز ورودی مختلف ۳، ۷ و LPM ۱۵ در شدت جریانهای مختلف جذب ورودی در جدول (۳) ارائه شده است. همچنین نتایج مشابه برای جذب سولفید هیدروژن در جدول (۳) گزارش شده است. بررسی نتایج این جدول از تطابق مناسب شبیه سازی با نتایج تجربی حکایت دارد بنحوی که متوسط خطای نسبی برای جذب دی اکسید کربن ۱۱/۹ درصد و متوسط خطای نسبی برای جذب سولفید هیدروژن ۹/۴ درصد بوده است که این میزان خطا برای شبیه سازی قابل قبول خواهد بود.

جدول (۳): مقایسه نتایج تجربی و شبیه سازی جذب دی اکسید

کربن					
خطا (%)	نتایج شبیه سازی	نتایج تجربی		$Q_g$ (LPM)	$Q_L$ (LPM)
		$Y_{Aout}$	$Y_{Ain}$		
-۱۳/۴	$6/17 \times 10^{-4}$	$5/44 \times 10^{-4}$	۰/۴۳	۳	
-۱۳/۶	$7/08 \times 10^{-4}$	$6/23 \times 10^{-4}$	۰/۴۲	۷	۰/۳۵
۷/۳	$1/4 \times 10^{-3}$	$1/51 \times 10^{-3}$	۰/۳۹	۱۵	
۹/۵	$6/16 \times 10^{-4}$	$6/81 \times 10^{-4}$	۰/۴۱	۳	
-۹/۷	$6/97 \times 10^{-4}$	$6/35 \times 10^{-4}$	۰/۴۰	۷	۰/۵۰
۱۳/۲	$1/4 \times 10^{-3}$	$1/612 \times 10^{-3}$	۰/۴۲	۱۵	
-۲۶/۸	$6/16 \times 10^{-4}$	$4/86 \times 10^{-4}$	۰/۴۰	۳	
-۸/۲	$6/97 \times 10^{-4}$	$6/44 \times 10^{-4}$	۰/۴۰	۷	۱
-۵/۳	$1/4 \times 10^{-3}$	$1/33 \times 10^{-3}$	۰/۳۹	۱۵	

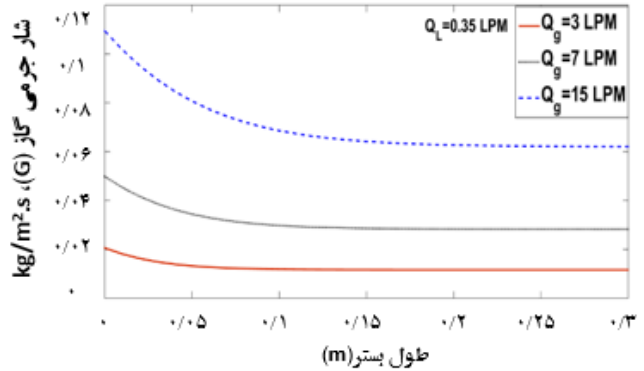


## مطالعه تجربی و مدلسازی جذب همزمان مخلوط $CO_2/H_2S$ توسط نانوسیال سیلیس-آب در یک برج پرشده

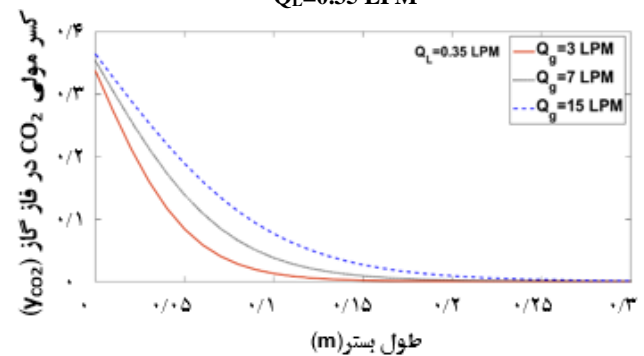
پایین) افزایش می‌یابد و پس از طی بستر در یک مقدار ثابت از برج خارج می‌شود. از این شکل می‌توان نتیجه گرفت که افزایش دبی حجمی گاز ورودی منجر به افزایش بار جرمی ورودی شده و لذا میزان جرم منتقل شده بیشتر خواهد بود در نتیجه شار جرمی مایع در حالت  $Q_g=15$  LPM بیشترین مقادیر را خواهد داشت.

در شکل‌های (۱۰) و (۱۱) نمودارهای تغییرات غلظت اجزاء گازی شامل ترکیبات دی اکسید کربن و سولفید هیدروژن در فاز مایع نشان داده شده است. روند افزایش غلظت این اجزاء در فاز مایع صعودی خواهد بود اما نرخ صعود در بدو ورود مایع به برج بیشتر است زیرا غلظت این مواد در فاز گاز کمتر است اما با انتقال مایع در طول بستر مایع به حالت اشباع نزدیک شده و لذا نیروی محرکه انتقال جرم کاهش می‌یابد. در هر دو نمودار ملاحظه می‌شود که افزایش شدت جریان حجمی گاز ورودی منجر به افزایش بار جرمی ورودی شده و لذا مقدار بیشتری از ترکیبات دی اکسید کربن و سولفید هیدروژن همراه جریان گاز وارد برج شده و لذا مقادیر این ترکیبات در فاز مایع در شدت جریانهای زیادتر گاز ورودی بیشتر از سرعت‌های کم خواهد بود.

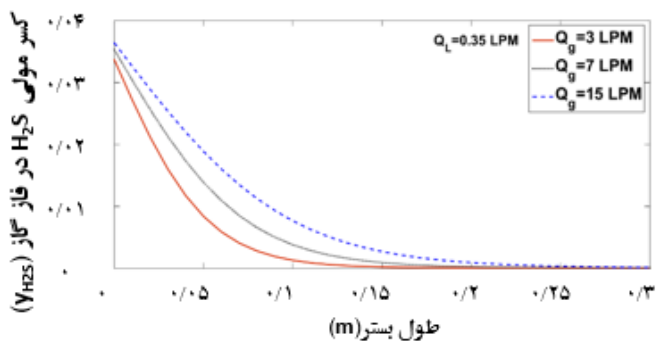
اجزاء تغییر آنچنانی نخواهد داشت زیرا غلظت اجزاء در فاز گاز که نیروی محرکه انتقال جرم است بسیار کم می‌شود. نکته دیگر اینکه با مقایسه نمودارهای (۷) و (۸) ملاحظه می‌شود که غلظت دی اکسید کربن در فاز گاز خروجی از برج بسیار کم شده و تقریباً نزدیک به صفر می‌شود در حالیکه برای سولفید هیدروژن بیشتر از مقدار آن می‌باشد. لذا می‌توان گفت نانوسیال سیلیس-آب جذب بهتری برای جذب دی اکسید کربن است.



شکل (۶): تغییرات شار جرمی فاز گاز در طول بستر در حالت  $Q_L=0.35$  LPM

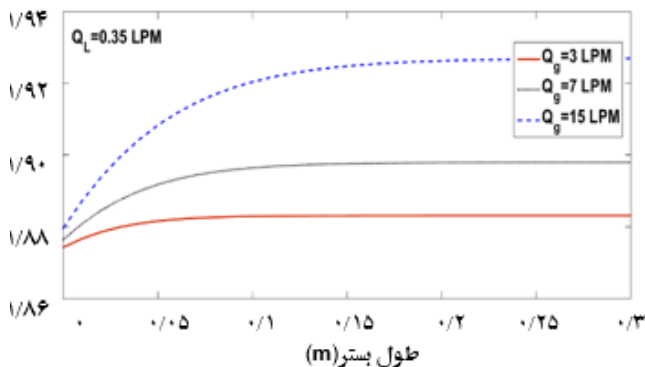


شکل (۷): تغییرات کسر مولی  $CO_2$  در فاز گاز در طول بستر در حالت  $Q_L=0.35$  LPM

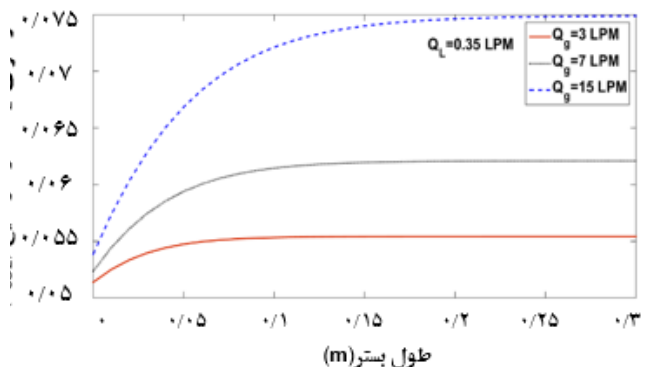


شکل (۸): تغییرات کسر مولی  $H_2S$  در فاز گاز در طول بستر در حالت  $Q_L=0.35$  LPM

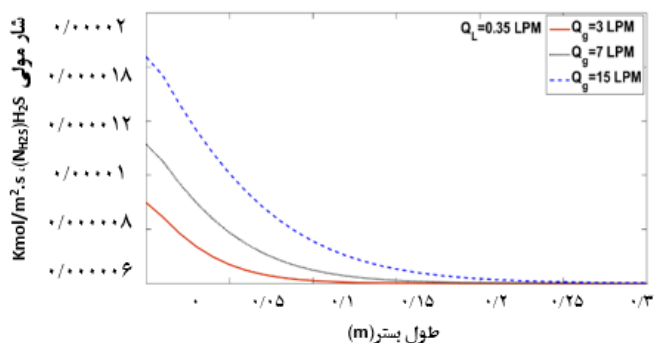
در شکل (۹) تغییرات شار جرمی فاز مایع در طول بستر در هر سه حالت دبی جریان گاز ورودی ۳، ۷ و ۱۵ لیتر بر دقیقه نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که در این حالت نیز جریان مایع در بدو ورودی به برج مبادله جرم داشته و بواسطه دریافت اجزاء گازی مقدار آن در طول برج (از بالای برج به



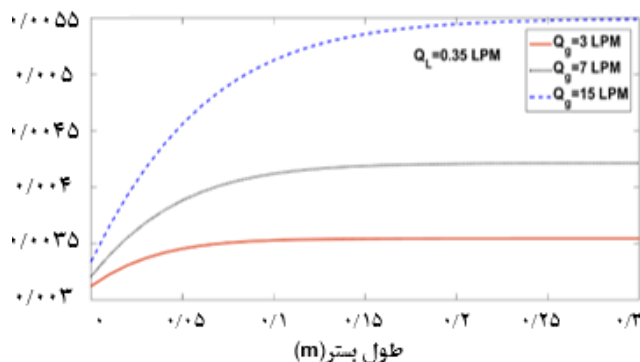
شکل (۹): تغییرات شار جرمی فاز مایع در طول بستر در حالت  $Q_L=0.35$  LPM



شکل (۱۰): تغییرات کسر مولی  $CO_2$  در فاز مایع در طول بستر در حالت  $Q_L=0.35$  LPM



شکل (۱۳): تغییرات شار مولی انتقال جرم  $H_2S$  در طول بستر در حالت  $Q_L=0.35$  LPM



شکل (۱۱): تغییرات کسر مولی  $H_2S$  در فاز مایع در طول بستر در حالت  $Q_L=0.35$  LPM

#### ۴- نتیجه گیری

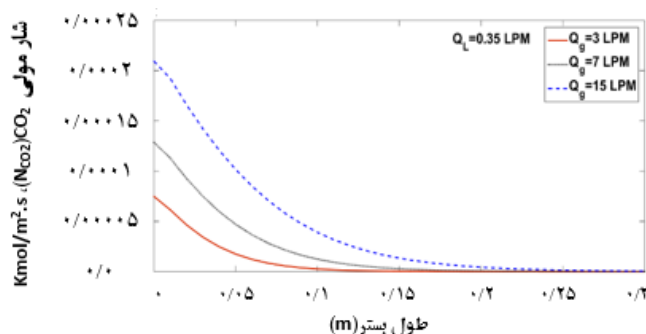
در این تحقیق مطالعه تجربی و مدلسازی برج پرشده با جاذب نانوسیال برای جداسازی گازهای اسیدی دی اکسید کربن و سولفید هیدروژن از یک مخلوط گازی صورت گرفت. از نانوسیال سیلیس-آب بعنوان جاذب در این برج استفاده شد. برای بررسی مدل و صحت سنجی آن ابتدا یک سیستم آزمایشگاهی تهیه و راه اندازی شد. نانوذرات سیلیس به قطر متوسط ۲۰ نانومتر با غلظت ۰/۰۱ درصد وزنی به آب بعنوان سیال پایه افزوده شد. سه شدت جریان مختلف ۷، ۳ و ۱۵ لیتر بر دقیقه برای گاز ورودی و سه شدت جریان مختلف ۰/۳۵، ۰/۵۰ و ۱ لیتر بر دقیقه برای مایع جاذب در طول آزمایشات انتخاب شد و غلظت گاز ورودی و خروجی در شرایط پایا اندازه گیری شد. برای مدلسازی فرآیند با انتخاب یک المان در طول برج و با فرض تغییرات تنها در راستای محوری موازنه‌های جرم کلی و جزئی فاز گاز و مایع نوشته شد. برای حل مدل بدست آمده از روش عددی رانگ-کاتای مرتبه چهارم استفاده شد. برای تعیین خواص انتقال جرمی از معادلات موجود در مراجع بهره برده شد. نتایج آزمونهای تجربی با نتایج مشابه در شبیه سازی بصورت جداگانه مورد بررسی قرار گرفتند و نتایج مقایسه حاکی از دقت بالای مدل (حدود ۱۰ درصد خطا) و تطابق آن با داده‌های تجربی است. همچنین نتایج شبیه سازی نشان می‌دهد که با افزایش شدت جریان گاز ورودی به برج شدت انتقال جرم افزایش یافته و شیب تغییرات نمودار شار جرمی گاز و مایع در بدو ورود به برج تغییرات چشمگیری خواهند داشت. همچنین کسرهای مولی دی اکسید کربن و سولفید هیدروژن در فاز گاز با حرکت گاز در طول برج کاهش یافته و تقریباً در پایان برج به غلظت تعادلی نزدیک می‌شوند. در فاز مایع بر خلاف فاز گاز غلظت اجزاء محلول افزایش یافته و نهایتاً به حد مشخصی که نزدیک شرایط اشباع حلالیت است می‌رسد.

برای محاسبه شار انتقال جرم برای دو گاز مورد بررسی از معادلات زیر استفاده می‌شود:

$$N_A = \frac{k_g P}{RT} (y_A - y_{A_i}) = k_L (x_{A_i} - x_A) \quad (9)$$

در شکل‌های (۱۲) و (۱۳) شار مولی انتقال جرم برای اجزاء دی اکسید کربن و سولفید هیدروژن در شدت جریانهای حجمی مختلف گاز ورودی بر اساس معادلات ۹ محاسبه و ترسیم شده است. مطابق این اشکال ملاحظه می‌شود که در ابتدای طول بستر شدت انتقال جرم بیشتر بوده است و به مرور در طول بستر روند کاهش خواهد داشت. همچنین می‌توان به وضوح نتیجه گرفت که افزایش دبی جریان گاز ورودی منجر به افزایش شدت انتقال جرم خواهد شد زیرا سرعت بارگذاری جرمی افزایش می‌یابد.

با مقایسه دو شکل مذکور می‌توان نتیجه گرفت که شدت انتقال جرم دی اکسید کربن بیشتر از سولفید هیدروژن بوده است که علت آن بالاتر بودن غلظت دی اکسید کربن در گاز ورودی است.



شکل (۱۲): تغییرات شار مولی انتقال جرم  $CO_2$  در طول بستر در حالت  $Q_L=0.35$  LPM

15. Kennes, C., Rene, E.R., Veiga, M.C., "Bioprocesses for air pollution control", *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, Vol. 84, pp. 1419-1436, 2009.
16. Humeau, P., Pre, P., Cloirec, P.L., "Optimization of Bioscrubber Performances: Experimental and Modeling Approaches", *Journal of Environmental Engineering*, Vol. 130, No. 3, pp. 314-322, 2004.
17. Potivichayanon, S., Pokethitiyook, P., Kruatrachue, M., "Hydrogen sulfide removal by a novel fixed-film bioscrubber system", *Process Biochemistry*, Vol. 41, pp. 708-715, 2006.
18. Janssen, A., Hoksberg, A., Seriwala, M., Abry, R., Ngai, C., "The shell-paques/THIOPAQ gas desulfurization process: successful start-up first commercial unit, [www.paques.nl](http://www.paques.nl) .
19. Zdeb, M., Pawlowska, M., Lebiocka, M., "The Kinetics of Hydrogen Sulfide Degradation In Organic Substrates", *The 7th International Conference Environmental Engineerin*, pp. 22-23, 2008
20. Buis, H., Efinger, D., Gommel, A., Mulder, R., *Purification of biogas of hydrogen sulfide, comprises removing washing phase impurities e.g. hydrogen sulfide from gas phase of biogas in scrubber using washing medium containing sulfides to aerobic reactor*, Patent DE 102011007653A1, 2012.
21. Gayh, U., Stooss, A., Behrendt, J., Otterpohl, R., "Desulphurisation of Biogas Analysis, Evaluation and Optimisation", *Third International Symposium on Energy from Biomass and Waste*, Venice, 2010.
22. Iranpoure, R., Cox, H.H.J., Deshusses, M.A., and Schroder, E.D., "Literature review of air pollution control biofilters and biotrickling filters for odor and volatile organic compound removal", *Environmental Process*, Vol. 24, No. 3, 254-267, 2005.
23. Zhou, M. Cai, W.F., and Xu, C.J. "A New Way of Enhancing Transport Process -The Hybrid Process Accompanied by Ultrafine Particles", *Korean Journal of Chemical Engineering*, Vol. 20, No. 2, pp. 347-353, 2003.
24. Krishnamurthy, S., Bhattacharya, P., Phelan, P.E., Prasher, R.S., "Enhanced Mass Transport in Nanofluids", *Nano Letters*, Vol. 6, No. 3, pp. 419-423, 2006.
25. Ma, X., Su, F., Chen, J., Zhang, Y., "Heat and mass transfer enhancement of the bubble absorption for a binary nanofluid", *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 21, pp. 1813-1818, 2007.
26. Ma, X., Su, F., Chen, J., Bai, T., Han, Z., "Enhancement of bubble absorption process using a CNTs-ammonia binary nanofluid", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 36, pp. 657-660, 2009.
27. Kim, J.K., Jung, J.Y., Kang, Y.T., "Absorption performance enhancement by nano-particles and chemical surfactants in binary nanofluids", *International Journal of Refrigeration*, Vol. 30, pp. 50-57, 2007.
1. Fischer, M.E., *Biogas Purification: H<sub>2</sub>S Removal using Biofiltration*, MSC Thesis, University of Waterloo, 2010.
2. Rattanapan, C., Boonsawang, P., Kantachote, D., "Hydrogen Sulfide Removal from Biogas Using Pure and Mixed Cultures of Sulfide-Oxidizing Bacteria Biofiltration", *International Journal of Green Energy*, Vol. 8, No. 7, pp.705-714, 2011.
3. Zhao, Q., Leonhardt, E., MacConnell, C., Frear, C., Chen, S., *Purification Technologies for Biogas Generated by Anaerobic Digestion*, CSANR Research Report, 2010 - 001.
4. Shareefdeen, Z., and Singh, A., *Biotechnology for odor and air pollution control*, Springer, Berlin, 2005.
5. Frare, L.M., Vieira, M.G.A., Silva, M.G.C., Pereira, N.C., Gimenes, M.L., "Hydrogen Sulfide Removal from Biogas Using Fe/EDTA Solution: Gas/Liquid Contacting and Sulfur Formation", *Environmental Progress & Sustainable Energy*, Vol. 29, No. 1, pp. 34-41, 2010.
6. Fortuny, M., Baeza, J.A., Gamisans, X., Casas, C., Lafuente, J., Deshusses, M.A., Gabriel, D., "Biological sweetening of energy gases mimics in biotrickling filters", *Chemosphere*, Vol. 71, No. 1, pp.10-17, 2008.
7. Lee, J.K., Koo, J., Hong, H., Kang, Y.T., "The effects of nanoparticles on absorption heat and mass transfer performance in NH<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>O binary nanofluids", *International Journal of Refrigeration*, Vol. 33, pp. 269-275, 2010.
8. Ashrafmansouri, S.S., Nasr Esfahany, M., "Mass transfer in nanofluids", *International Journal of Thermal Science*, Vol. 82, pp. 84-99, 2014.
9. Chronic Toxicity Summary: *Hydrogen Sulfide*, CAS registry number: 7783-06-4.
10. *Hydrogen sulfide*, according to U.S. Code of Federal Regulations 29 CFR 1910.1200, Hazard Communication, Safety Data Sheet P-4611, 2015.
11. Syed, M., Soreanu, G., Falletta, P., Béland, M., "Removal of hydrogen sulfide from gas streams using biological processes - A review", *Canadian Biosystems Engineering*, Vol. 48, pp. 1 -14, 2006.
12. Mahmood, Q., Zheng, P., Cai, J., Hayat, Y., Hassan, M.J., WU, D.L., HU, B.L., "Sources of sulfide in waste streams and current biotechnologies for its removal", *Journal of Zhejiang University Science A*, Vol. 8, No.7, pp. 1126-1140, 2007.
13. Tosati, J., Jinsiriwanit, S., "Improving the quality of hydrogen sulfide contaminated biogas by bioscrubber", *Conference of Current Opinion in Biotechnology, Thailand*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.capbio.2013.05.183>.
14. Moosavi, G.R., Mesdaghinia, A.R., Naddafi, K., Vaezi, F., Nabizadeh, R., "Biotechnology Advances in Treatment of Air Streams Containing H<sub>2</sub>S", *Journal of Biological Sciences*, Vol. 5, No. 2, pp. 170-175, 2005.

40. M.H., Karimi Darvanjooghi, M., Nasr Esfahany, S.H. Esmaeili-Faraj, "Investigation of the Effects of Nanoparticle Size on CO<sub>2</sub> Absorption by Silica-Water Nanofluid" Separation and Purification Technology, 195, 208-215, 2018.
41. S.H. Esmaeili-Faraj, M., Nasr Esfahany, M.H., Karimi Darvanjooghi, "Application of water based nanofluids in bioscrubber for improvement of biogas sweetening in a pilot scale" Chemical Engineering & Processing: Process Intensification, 143 107603, 2019.
42. S.H. Esmaeili Faraj, M. Nasr Esfahany, M. Jafari-Asl, "Mass Transfer Enhancement by Binary Nanofluid for Absorption of Hydrogen Sulfide", The 8th International Chemical Engineering Congress & Exhibition (IChEC), Kish Island, Iran, 2014.
43. S. Karamian, F. Esmaeilzadeh, D. Mowla, S. H. Esmaeili-Faraj, Investigation of Mass Transfer for Absorption by Nanofluids, The 10th International Chemical Engineering Congress & Exhibition (IChEC), Isfahan, Iran, 6-10 May, 2018.
44. M.S. Shafeeyan, W.M.A.W. Daud, A. Shamiri, A review of mathematical modeling of fixed-bed columns for carbon dioxide adsorption, chemical engineering research and design 92, 2014, 961-988.
45. M. Thiels, D.S.H. Wong, C.H. Yu, J.L. Kang, S.S. Jang, C.S. Tan, Modelling and Design of Carbon Dioxide Absorption in Rotating Packed Bed and Packed Column, 11th IFAC Symposium on Dynamics and Control of Process Systems, including Biosystems, June 6-8, 2016. NTNU, Trondheim, Norway.
46. M.A. Olutoye and A. Mohammed, Modelling of a Gas-Absorption Packed Column for Carbon Dioxide-Sodium Hydroxide System, AU J.T. 10(2): 132-140, 2006.
47. Salopek, B., "Mesurment and Application of Zeta Potential", *Rudarsko-geoloiko-naftni zbornik*, Vol. 4, pp. 147- 151, 1992.
48. Rahimpour, M.R., Kashkooli, A.Z., Modeling and simulation of Industrial carbon dioxide absorber using amine-promoted potash solution, Iranian journal of science and technology, Transaction B, 28(B6), 653-666, 2004.
۴۹. مهربانی، ارجمند، محبی، ابولفضل، کاربرد ریاضیات در مهندسی شیمی، انتشارات ارکان، اصفهان، ایران، ۱۳۸۳
50. Treybal, R.E., Mass transfer Operation, 3<sup>rd</sup> Edition, Mc-Grow-Hill Co., 1980.
51. Bird, R.B., Stewart, W.E., Lightfoot, E.N., Transport Phenomena, 9<sup>th</sup> edition Mc-Grow-Hill Co., 1989.
28. Pang, C., Wu, W., Sheng, W., Zhang, H., Kang, Y.T., "Mass transfer enhancement by binary nanofluids (NH<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>O Ag nanoparticles) for bubble absorption process", *international journal of refrigeration*, Vol. 35, No. 8, pp. 2240-2247, 2012.
29. Yang, L., Du, K., Niu, X.F., Cheng, B., Jiang, Y.F., "Experimental study on enhancement of ammoniaewater falling film absorption by adding nano-particles", *International Journal Of Refrigeration*, Vol. 34, pp. 640-647, 2011.
30. Park, S.W., Lee, J.W., Choi, B.S., Lee, J.W., "Absorption of Carbon Dioxide into Aqueous Colloidal Silica Solution", *Separation Science and Technology*, Vol. 41, pp. 1661-1677, 2006.
31. Park, S.W., Choi, B.S., Lee, J.W., "Effect of elasticity of aqueous colloidal silica solution on chemical absorption of carbon dioxide with 2-amino-2-methyl-1-propanol", *Korea-Australia Rheology Journal*, Vol. 18, pp. 133-141, 2006.
32. Park, S.W., Choi, B.S., Kim, S.S., Lee, J.W., "Chemical Absorption of Carbon Dioxide into Aqueous Colloidal Silica Solution Containing Monoethanolamine", *Journal of Industrial Engineering and Chemistry*, Vol. 13, No. 1, pp. 133-142, 2007.
33. Kim, W.G., Kang, H.U., Jung, K.M., Kim, S.H., "Synthesis of Silica Nanofluid and Application to CO<sub>2</sub> Absorption", *Separation Science and Technology*, Vol. 43, pp. 3036-3055, 2008.
34. Komati, S., Suresh, A.K., "Anomalous Enhancement of Interphase Transport Rates by Nanoparticles: Effect of Magnetic Iron Oxide on Gas-Liquid Mass Transfer", *Industrial Engineering and Chemistry Research*, Vol. 49, 390-405, 2010.
35. M.H. Karimi Darvanjooghi, M. Pahlevaninezhad, A. Abdollahi, S.M. Davoodi, Investigation of the Effect of Magnetic Field on Mass Transfer Parameters of CO<sub>2</sub> Absorption Using Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>-Water Nanofluid, *AICHE Journal* 63 (6), 2176-2186.
36. Esmaeili-Faraj, S.H., Nasr Esfahany, M., Jafari-Asl, M., Etesami, N., "Hydrogen Sulfide Bubble Absorption Enhancement in Water-Based Nanofluids", *Industrial and Engineering Chemistry Research*, Vol. 53, No. 43, pp. 16851-16858, 2014.
37. Esmaeili-Faraj, S.H., Nasr Esfahany, M., "Absorption of Hydrogen Sulfide and Carbon Dioxide in Water Based Nanofluids", *Industrial & Engineering Chemistry Research*, Vol. 55, No. 16, pp. 4682-4690, 2016.
38. Esmaeili Faraj, S.H., Nasr Esfahany, "Influence of SiO<sub>2</sub> and Graphene Oxide Nanoparticles on Biological Removal of Sulfide", *Environmental Technology*, 38 (21), 2763-2774, 2017.
39. Esmaeili Faraj, S.H., Nasr Esfahany, M., Kadivar, M. and Ziluoee, H., "Removal of Vinyl Chloride from an Air Stream by Biotrickling Filter", *Journal of Environmental Science and Health*, part A, 47, 2263-2269, 2012.

## Experimental study and modeling of simultaneous absorption of $CO_2 / H_2S$ mixture by silica-water nanofluid in a packed bed column

Davoud Khafari-Nezhad<sup>1</sup>, Elham Ameri<sup>1,\*</sup>, Seyed Hamid Esmaeili-Faraj<sup>2,\*</sup>

1. Department of Chemical Engineering, Shahreza Branch, Islamic Azad University, Shahreza, Iran

2. Department of Chemical Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

---

### ABSTRACT

In this research, mathematical modeling for the absorption process of carbon dioxide and hydrogen sulfide gases using silica-water nanofluid has been performed in a packed bed column. A laboratory apparatus consisting of two towers packed with plastic Raschig rings was prepared for the absorption and desorption process. Experimental tests were performed for three flow rates of 3, 7 and 15 LPM for gas and 0.35, 0.50 and 1 LPM for liquid and the molar fraction of  $CO_2$  and  $H_2S$  in two phases of gas and the liquid are measured. The modeling of the process was done using the overall and partial mass balance equations. Comparison of the obtained model results with the experimental results shows a close correlation between the experimental data and the model and the average relative error was about 10%. Using the obtained model, the component concentration, transferred molar flux and mass flux for liquid and gas are plotted along the column. The results show that with increasing the gas flow rate, both the rate of mass transfer and the slope of the molar fraction gas components were increased. On the other hand, the mass transfer flux in higher gas flow rates achieved to more than twofold. Also, the mass transfer of carbon dioxide was higher than that of hydrogen sulfide, which is due to the higher concentration of carbon dioxide in the inlet gas.

---

### ARTICLE INFO

Article history:

Received: May 10, 2021

Received in revised form: September 25, 2021

Accepted: October 30, 2021

---

#### Key words:

Absorption

Nanofluid

Silica nanoparticles

Packed bed column

Modeling

\* Corresponding authors

S.H. Esmaeili-Faraj:

[h.esmaeili@shahroodut.ac.ir](mailto:h.esmaeili@shahroodut.ac.ir)

E. Ameri:

[ameri@iaush.ac.ir](mailto:ameri@iaush.ac.ir)

---

All right reserved.