

## مدلسازی حذف همزمان دی اکسید کربن و سولفید هیدروژن در یک تماس دهنده غشایی الیاف توخالی پلی پروپیلن در حضور مونو اتانول آمین

محمد رضا طلاق<sup>\*</sup> - المن امیر احمدی

بخش مهندسی شیمی، نفت و گاز - دانشگاه صنعتی شیراز، ایران

### چکیده

در این مقاله یک مدل ریاضی دو بعدی برای جداسازی هم زمان  $H_2S$  و  $CO_2$  در یک تماس دهنده غشایی الیاف توخالی پلی پروپیلن در حضور مونو اتانول آمین ارائه شده است. مدلسازی در دو جهت شعاعی و محوری بر مبنای کاملاً خشک برای جریان غیر همسوی گاز و مایع بررسی شده است. برای ارزیابی مدل، نتایج حاصل از مدلسازی با داده های تجربی حذف  $CO_2$  در حضور حلال های فیزیکی آب و شیمیایی MEA مقایسه شدند. نتایج نشان داد که درصد دفع  $CO_2$  و  $H_2S$  با افزایش دبی جریان مایع، تعداد الیاف ها، طول غشاء، غلظت حلال افزایش می یابد. ولی با افزایش دبی جریان گاز به علت کم شدن زمان تماس کاهش می یابد. همچنین مشخص شد که در غلظت های کم حلال،  $H_2S$  به طور کامل حذف می شود. نهایتاً، نتایج نشان داد که با افزایش خیس شدگی میزان دفع این گازها کاهش می یابد.

### مشخصات مقاله

تاریخچه مقاله:

دریافت: ۲۱ بهمن ۱۳۹۶

دریافت پس از اصلاح: ۸ مهر ۱۳۹۷

پذیرش نهایی: ۱۵ آبان ۱۳۹۷

کلمات کلیدی:

تماس دهنده غشایی

الیاف توخالی

مونواتانول آمین

دی اکسید کربن

سولفید هیدروژن

مدلسازی ریاضی

حقوق ناشر محفوظ است.

\* \* \* عهده دار مکاتبات:

talaghat@sutech.ac.ir

## ۱- مقدمه

مشکلات ناشی از وجود گازهای اسیدی (به گازهایی نظیر  $H_2S$  و  $CO_2$  موجود در گازهای طبیعی که با آب ترکیباتی نظیر اسید سولفوریک و اسید کربنیک تولید می-کنند، گازهای اسیدی<sup>۱</sup> می-گویند) و گازهای ترش در جریان مختلف گازی در صنایع شیمیایی، به ویژه صنعت نفت، این صنایع را با چالش‌های اجتناب ناپذیری روبرو کرده است. گاز طبیعی عمدتاً دارای ناخالصی‌هایی نظیر  $H_2S$  و  $CO_2$  می‌باشد که وجود این گازها در گاز طبیعی سبب خوردگی خطوط لوله و نیز مسموم شدن کاتالیست‌ها می‌گردد. بنابراین برای کنترل خوردگی و بقیه مشکلات حاصل از وجود گازهای اسیدی در صنایع مختلف شیمیایی از قبیل پالایشگاه‌ها، صنایع پتروشیمی و صنایع گاز، حذف این گازها تا غلظت‌های بسیار پایین ضروری می‌باشد. در این بین "تماس‌دهنده‌های غشایی الیاف توخالی<sup>۲</sup>" نظر محققان فراوانی را در سراسر دنیا به خود جلب کرده است [۲۰۱].

## ۱-۱- انتخاب نوع فرآیند شیرین‌سازی

نوع فرآیند شیرین‌سازی گاز می‌تواند بر طراحی و انتخاب کلیه تجهیزات فرآیندی واحد تصفیه گاز و چگونگی دفع گازهای اسیدی و بازیافت گوگرد، نهم‌دایی، تفکیک مایعات هیدروکربنی و بازیابی محصولات آن تأثیر بگذارد. هر یک از فرآیندهای مطرح شده دارای مزایا و معایبی می‌باشند. انتخاب بهینه فرآیند شیرین‌سازی مستلزم بررسی همه جانبه ملاحظات فنی- اقتصادی است. به طور کلی می‌توان گفت عوامل مؤثر در انتخاب نوع فرآیند تصفیه گاز عبارتند از [۳]:

- انواع ناخالصی‌های موجود در گاز ترش
- غلظت هر یک از ناخالصی‌ها در گاز ترش و لزوم استخراج آنها تا حد مورد نظر
- حجم، دما و فشار گاز ترش
- امکان‌سنجی بازیافت گوگرد
- لزوم استخراج (انتخابی) یک یا چند ماده آلاینده بدون جداسازی مابقی آنها

## ۱-۲- روش‌های جداسازی

روش‌های جداسازی به طور کلی به دو دسته روش‌های مکانیکی و روش‌های انتقال جرم تقسیم می‌شوند: جداسازی بر اساس روش‌های مکانیکی خود به سه دسته صاف

- میزان ترکیبات سنگین هیدروکربنی و آروماتیک‌ها در گاز ترش
- مقررات و حساسیت‌های زیست محیطی
- هزینه‌های سرمایه‌گذاری و عملیاتی
- پرداخت حق امتیاز استفاده از دانش فنی فرآیند شیرین‌سازی
- مشخصات و حد مجاز ناخالصی‌ها و محصولات مایع تولید شده

ترکیب گاز ترش و شرایط عملیاتی آن در انتخاب نوع فرآیند تصفیه گاز نقش بسزایی دارد. فشار جزئی بالای گازهای اسیدی شانس انتخاب فرآیند شیرین‌سازی مبتنی بر حلال-های فیزیکی را افزایش می‌دهد. از طرف دیگر، حضور مقادیر قابل توجهی از ترکیبات سنگین هیدروکربنی در گاز ترش، شانس انتخاب حلال‌های فیزیکی را کاهش می‌دهد. فشار جزئی پایین گازهای اسیدی و لزوم شیرین‌سازی گاز ترش تا حد استاندارد، عموماً موجب بکارگیری حلال‌های آمینی می‌شود. به هر حال، گزینش نوع فرآیند کار ساده‌ای نیست و متغیرهای متعددی باید در نظر گرفته شوند. در انتخاب فرآیند شیرین‌سازی، کسب اطلاع از ترکیب گاز، میزان جریان، دما و فشار خوراک ورودی واحد الزامی می‌باشد و غلظت گازهای اسیدی و ناخالصی‌های دیگر در گاز شیرین خروجی واحد بر اساس محدودیت‌های دریافت‌کنندگان گاز، معین می‌گردد. توجیه اقتصادی استخراج گازهای اسیدی تحت تأثیر فشارهای جزئی گازهای اسیدی می‌باشد. با توجه به مطالب ارائه شده می‌توان گفت که پس از محاسبه فشارهای جزئی گازهای اسیدی و تعیین ضرورت تصفیه گاز ترش، هر یک از حالات چهار گانه ذیل می‌توانند بعنوان راهنمای انتخاب روش شیرین‌سازی مناسب مد نظر قرار گیرند [۳]:

- استخراج  $CO_2$  (بدون حضور  $H_2S$ )
- استخراج  $H_2S$  (بدون حضور  $CO_2$ )
- استخراج  $H_2S$  و  $CO_2$  به طور هم‌زمان
- استخراج انتخابی  $H_2S$  در حضور  $CO_2$

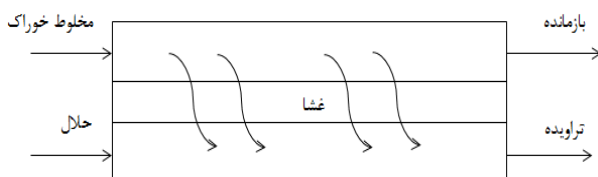
<sup>1</sup> Acid gas

<sup>2</sup> Hollow Fiber Membrane Contactors

## مدلسازی حذف همزمان دی اکسید کربن و سولفید هیدروژن در یک تماس دهنده غشایی الیاف توخالی پلی پروپیلن در حضور مونو اتانول آمین

همدیگر قابل امتزاج هستند [۶].

کلی ترین فرآیند غشایی در شکل (۱) نشان داده شده است که در آن خوراک<sup>۶</sup> به صورت بازمانده<sup>۷</sup> (آن بخش از غشا که از خوراک نمی گذرد، یعنی بازداشته می شود) و تراویده<sup>۸</sup> (آن بخش از خوراک که از غشاء می گذرد) جدا می شود. حلال اختیاری نشان داده شده در شکل (۱) مایع یا گاز است که برای کمک به خروج تراویده به کار می رود. در حالت کلی، روش های غشایی در مواقعی که غلظت مواد کم باشد، کارایی بسیار زیادی دارند [۷].



شکل (۱) شمای کلی فرآیند غشایی [ با اقتباس از مرجع ۸ ]

### ۲-۱-۱- غشاهای الیاف تو خالی

الیاف توخالی به لوله های موئینی اطلاق می شود که در آنها جداره الیاف به عنوان سطح انتخاب پذیر عمل می کند. مسایل اقتصادی در استفاده از غشاهای در فرآیند جداسازی سبب توسعه غشاهایی شده که نسبت سطح به حجم آنها بزرگ می باشد و ایده ای برای استفاده از الیاف توخالی است. این غشاهای دارای ساختاری فشرده با سطح غشایی بالایی هستند به گونه ای که با میزان مواد یکسان، مقدار کمتری از غشای الیاف تو خالی را در مقایسه با غشاهای مسطح می توان ساخت. الیافها را می توان به صورت دسته ای بسته بندی کرد و به شکل لوله درآورد تا نهایتاً به غشاء تبدیل شوند. برای تولید چند متر مربع از این غشاهای به کیلومترها الیاف نیاز است. ساخت غشای الیاف توخالی نیازمند کنترل دقیق و سختی است، به گونه ای که با تغییر هر یک از شرایط عملیاتی، غشایی با خواص جدید حاصل می شود. بنابراین شناخت پارامترهای موثر بر غشاء و کنترل آنها از اهمیت خاصی برخوردار است [۱]. با این حال برای رشد بازار این فناوری، غشاهایی با گزینش پذیری بالاتر و تراوش پذیری بیشتر مورد

کردن<sup>۳</sup>، غربالگری<sup>۴</sup> و شناور سازی<sup>۵</sup> تقسیم بندی می شوند. جداسازی بر اساس روش های انتقال جرم به چهار دسته کلی زیر تقسیم می شوند [۴]:

- تماس مستقیم دو فاز غیر قابل امتزاج
- تماس مستقیم دو فاز قابل امتزاج
- استفاده از پدیده کشش سطحی
- انتقال جرم یا جداسازی به کمک غشاء

### ۱-۲-۱- جداسازی فازها با استفاده از غشاء

طی زمان نزدیک به نیم قرن، فرآیند های غشایی جایگاه بالایی را در صنایع جداسازی و استخراج پیدا کرده است. در حقیقت کاربرد غشاهای در فرآیند های جداسازی، استخراج، تغلیظ و پالایش محصولات به صورت پیوسته و بدون افزایش ماده اضافی دیگر امکان پذیر می باشد. در حال حاضر فرآیندهای غشایی در صنایع مختلف مور استفاده قرار می گیرد که از آن جمله می توان به کاربرد آن در صنایع غذایی (پالایش آب میوه و تصفیه شیر و لاکتوز)، پزشکی (همودیالیز با کلیه های مصنوعی) و تصفیه آب (تولید آب آشامیدنی) اشاره کرد [۵]. با توجه به اینکه بالا بودن ریسک سرمایه گذاری، یکی از موانع اصلی برای سرمایه گذاری کردن و تولید انبوه غشاهای در ایران است، سرمایه گذاری برای این امر منوط به وجود بازار های داخلی است. استفاده از غشاء ها در بعضی از فرآیند های جداسازی مانند شیرین سازی آب که در سطح وسیعی انجام می شود ممکن است توجیه اقتصادی برای سرمایه گذاری در این حوزه را داشته باشد. این تکنولوژی در برخی از حوزه ها در دنیا هنوز در مقیاس آزمایشگاهی است و به مرحله صنعتی نرسیده است. در این زمینه دستیابی به تکنولوژی فرآیند نیز در زمینه های تصفیه پساب های صنعت نفت، شیرین سازی گاز های ترش و ارتقای کیفیت حلال ها و برش های نفتی با استفاده از غشاء ها در حال انجام است [۵]. غشاء به عنوان یک فاز که اجزای خوراک به صورت انتخابی از آن عبور می کنند، تعریف می گردد. به عبارت دیگر، غشاء به صورت فازی که اجزای جدا شونده خوراک با سرعت های متفاوت از آن عبور می کنند، عمل می کند. در این روش، معمولاً تغییر فازی صورت نمی گیرد و محصولات نیز در

<sup>6</sup> Feed

<sup>7</sup> Residue

<sup>8</sup> Extract

<sup>3</sup> Filtration

<sup>4</sup> Screening

<sup>5</sup> Floatation

شده است [۱۶]. در سال ۲۰۰۹ رجب زاده و همکاران سیستم جذب  $\text{CO}_2$  در MEA را به کمک یک تماس دهنده‌ی غشایی الیاف توخالی از جنس PVDF با ساختارهای غشایی گوناگون بررسی کردند. همچنین در این تحقیق جذب  $\text{CO}_2$  خالص در MEA بصورت آزمایشگاهی نیز بررسی شده است. نتایج تئوری و آزمایش به صورت رضایت بخشی منطبق می‌باشند [۱۷]. سهرابی و همکاران<sup>۱۴</sup> در سال ۲۰۱۱ فرآیند جذب  $\text{CO}_2$  در محلول‌های DEA و MEA و پتاسیم کربنات در تماس دهنده‌ی غشایی الیاف توخالی را مدل‌سازی عددی کرده‌اند. این کار با استفاده از نرم افزار COMSOL انجام شده است [۱۸]. گلخوار و همکاران<sup>۱۵</sup> در سال ۲۰۱۳ به بررسی جذب  $\text{CO}_2$  به کمک نانو حلال‌های سیلیکا و کربن نانو تیوب (CNT) در یک تماس دهنده‌ی غشایی الیاف توخالی پرداختند. تأثیرات پارامترهای مختلف شامل نوع نانو فلویید، غلظت نانو ذرات، دبی جریان‌های گاز و مایع، دمای حلال مورد استفاده و غلظت  $\text{CO}_2$  بر میزان جداسازی  $\text{CO}_2$  بررسی شده است [۱۹]. در سال ۲۰۱۴ معصومی و همکاران<sup>۱۶</sup> فرآیند جذب دی‌اکسیدکربن را در محلول DEAB در یک تماس دهنده غشایی الیاف توخالی مدل‌سازی کردند و به مقایسه جذب این گاز در محلول‌های MEA و DEA و MDEA با DEAB پرداختند [۲۰].

### ۳-مدل سازی ریاضی

در طی تحقیق مدل‌سازی حذف دی‌اکسید کربن و سولفید هیدروژن از گاز طبیعی مورد بررسی شده است. در این مطالعه از یک مدل ۲ بعدی با محور تقارن استفاده شده است. گاز ترش حاوی  $\text{CO}_2$  و  $\text{H}_2\text{S}$  درون پوسته جریان دارد و حلال مورد استفاده از درون لوله عبور می‌کند. جریان‌های گاز و حلال مخالف جهت یکدیگر در حال حرکت هستند. شکل (۲) شماتیکی مربوط به هندسه تماس دهنده غشایی را نشان می‌دهد.

نیاز می‌باشند. غشاءهای موجود می‌توانند ناخالصی‌های گاز طبیعی را تا حد مناسبی کاهش دهند، که این امر به علت تراوش پذیری بیشتر  $\text{CO}_2$  و  $\text{H}_2\text{S}$  نسبت به گاز طبیعی در غشاء است. از مزایای استفاده از فرآیندای غشایی، سرمایه‌گذاری اندک و امکان استفاده از آنها در سر چاه می‌باشد که این امر احتمال بروز خوردگی در لوله‌های انتقال به بخش تصفیه مرکزی را برطرف می‌کند و ایمنی خطوط لوله را افزایش می‌دهد. همچنین سیستم‌های غشایی، کوچک و فشرده می‌باشند و فضایی حدود ۱۵٪ فضای واحدهای جذب آمینی را اشغال می‌کنند و برای مناطق دور افتاده و سکوهایی نفتی روی دریا مناسب می‌باشند [۹].

### ۲-مروری بر تحقیقات گذشته

کی و کاسلر<sup>۹</sup> در سال ۱۹۸۵ از غشای متخلخل پلی پروپیلنی برای جذب دی‌اکسید کربن در محلول سود استفاده نمودند. در این کار برای نخستین بار از غشای الیاف توخالی برای جذب گاز در مایع استفاده شد [۱۰-۱۱]. در سال ۱۹۹۳ کروتن و همکارانش<sup>۱۰</sup> تأثیر عوامل مختلف بر انتقال جرم را در یک تماس دهنده غشایی الیاف توخالی برای جذب  $\text{CO}_2$  در مخلوط آب و گلیکول به‌عنوان حلال بررسی نمودند [۱۲-۱۳]. در سال ۲۰۰۴ وانگ و همکارانش<sup>۱۱</sup> به پدیده‌ی ترشوندگی و اثر آن در جذب شیمیایی  $\text{CO}_2$  به کمک تماس دهنده‌ی غشایی الیاف توخالی پرداختند [۱۴]. آن‌ها همچنین در سال ۲۰۰۵ به مدل‌سازی و آزمایش جذب  $\text{CO}_2$  در تماس دهنده غشایی الیاف توخالی پرداختند. در سال ۲۰۰۸ المرزوقی و همکاران<sup>۱۲</sup> سیستم جذب  $\text{CO}_2$  از مخلوط  $\text{CO}_2$ - $\text{CH}_4$  را به کمک حلال‌های MEA و NaOH به وسیله-ی یک تماس دهنده‌ی غشایی الیاف توخالی مقایسه کرده‌اند. در این تحقیق اثرات پدیده‌ی ترشوندگی غشاء نیز بررسی شده است [۱۵]. کشاورز و همکاران<sup>۱۳</sup> در سال ۲۰۰۷ به بررسی و شبیه سازی فرآیند جداسازی  $\text{CO}_2$  به کمک تماس-دهنده غشایی الیاف توخالی با در نظر گرفتن ترشوندگی جزئی پرداختند. در این کار DEA به‌عنوان حلال در نظر گرفته

<sup>9</sup> Qi & Cussler

<sup>10</sup> Kreulen et.al

<sup>11</sup> Wang et.al

<sup>12</sup> Al-Marzouqi et.al

<sup>13</sup> Keshavarz et.al

<sup>14</sup> Sohrabi et.al

<sup>15</sup> Golkhar et.al

<sup>16</sup> Masoumi et.al

مدلسازی حذف همزمان دی اکسید کربن و سولفید هیدروژن در یک تماس دهنده غشایی الیاف توخالی پلی پروپیلن در حضور مونو اتانول آمین

$$\begin{aligned} & -\left[ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (rN_{Ar}) + \frac{\partial N_{Az}}{\partial z} + \frac{\partial N_{A\theta}}{r\partial\theta} \right] \\ & \pm R_A = \frac{\partial C_A}{\partial t} \end{aligned} \quad (6)$$

اگر از قانون فیک (معادله (7)) در معادله (6) استفاده شود، معادله (8) حاصل می شود:

$$N_A = J_A + C_A V = -D_{AB} \frac{\partial C_A}{\partial r} + C_A V \quad (7)$$

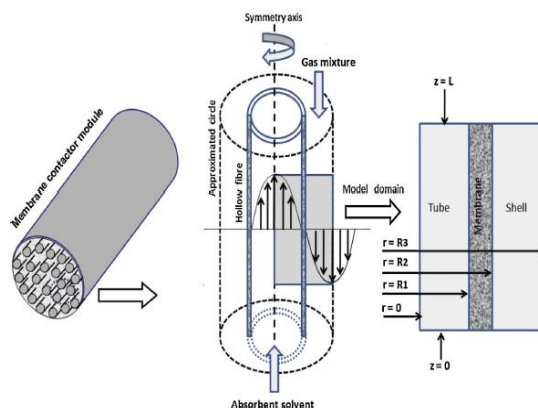
$$\left[ \begin{aligned} & -\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (-D_{AB} r \frac{\partial C_A}{\partial r} + C_A r V_r) - \\ & \frac{\partial}{\partial z} (-D_{AB} \frac{\partial C_A}{\partial z} + C_A V_z) - \\ & \frac{\partial}{r\partial\theta} (-D_{AB} \frac{\partial C_A}{\partial\theta} + C_A V_\theta) \pm R_A = \frac{\partial C_A}{\partial t} \end{aligned} \right] \quad (8)$$

$$\left[ \begin{aligned} & \frac{\partial C_A}{\partial t} + V_r \frac{\partial C_A}{\partial r} + V_z \frac{\partial C_A}{\partial z} + \frac{1}{r} V_\theta \frac{\partial C_A}{\partial\theta} = \\ & D_{AB} \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \frac{\partial C_A}{\partial r}) + \frac{\partial^2 C_A}{\partial z^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 C_A}{\partial\theta^2} \right] \\ & \pm R_A \end{aligned} \right] \quad (9)$$

معادله (9) معادله کلی انتقال جرم در مختصات استوانه ای است. فرضیه های حاکم بر مسئله مورد بررسی عبارت است از:

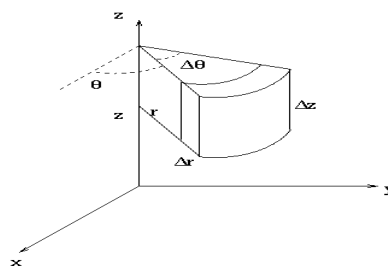
- حالت پایدار و شرایط همدمای برقرار می باشد.
- حالت پایدار و شرایط همدمای برقرار می باشد.
- توزیع سرعت در درون پوسته برای فاز گاز و درون مجرا برای فاز مایع کاملاً گسترش یافته و سهموی می باشد.
- قانون سطح آزاد هاپل<sup>17</sup> برقرار است.
- جریان مایع است.
- در سطح بین غشاء و مجرا قانون هنری<sup>18</sup> برقرار است.
- ضخامت غشاء و اندازه منافذ به صورت یکنواخت است.

در فرآیند مدلسازی، از غشای غیرمرطوب استفاده شده است و عمل حذف در حضور آمین (MEA) انجام می شود. جریان



شکل (2) شماتیکی از تماس دهنده غشایی فیبر توخالی [ با اقتباس از مرجع 21 ]

موازنه جرم بر روی المان استوانه ای مطابق شکل (3) بصورت زیر نوشته می شود:



شکل (3) المان حجمی در مختصات استوانه ای

$$\text{input} - \text{output} \pm \text{generation} = \text{accumulation} \quad (1)$$

$$\left[ \begin{aligned} & N_{Ar} M_A S_r \Big|_r - N_{Ar} M_A S_r \Big|_{r+\Delta r} + \\ & N_{Az} M_A S_z \Big|_z - N_{Az} M_A S_z \Big|_{z+\Delta z} + \\ & N_{A\theta} M_A S_\theta \Big|_\theta - N_{A\theta} M_A S_\theta \Big|_{\theta+\Delta\theta} \pm \\ & r \Delta r \Delta z \Delta\theta R_A = r \Delta r \Delta z \Delta\theta \frac{\partial C_A}{\partial t} \end{aligned} \right] \quad (2)$$

$$S_r = r \Delta\theta \Delta z \quad (3)$$

$$S_z = r \Delta r \Delta\theta \quad (4)$$

$$S_\theta = r \Delta r \Delta z \quad (5)$$

با جایگذاری معادله های (3) تا (5) در معادله (2) و تقسیم معادله بر المان حجم  $\Delta V = r \Delta\theta \Delta r \Delta z$  و با استفاده از

تعریف مشتق می توان نوشت:

<sup>17</sup> Happel free surface theory

<sup>18</sup> Henry law

۳-۱-۲- مکانیسم واکنش سولفید هیدروژن با آمین

واکنش بین هیدروژن سولفید و MEA نیز به توسط معادله های (۱۲) و (۱۳) نشان داده شده است:



سرعت واکنش های دی اکسید کربن، هیدروژن سولفید، مونواتانول آمین،  $MEACOO^-$ ،  $MEA^+$  و  $HS^-$  به ترتیب توسط معادله های (۱۴) تا (۱۹) نشان داده شده است:

$$R_{CO_2-MEA} = k_{CO_2-MEA} [CO_2][MEA] \quad (14)$$

$$R_{H_2S} = -k_{H_2S-MEA} \left( [H_2S][MEA] - \frac{[HS^-][MEA^+]}{K_{eq}} \right) \quad (15)$$

$$R_{MEA} = 2k_{MEA} \left( [CO_2][MEA] - k_{H_2S-MEA} \left( [H_2S][MEA] - \frac{[HS^-][MEA^+]}{K_{eq}} \right) \right) \quad (16)$$

$$R_{MEA^+} = k_{MEA} \left( [CO_2][MEA] + k_{H_2S-MEA} \left( [H_2S][MEA] - \frac{[HS^-][MEA^+]}{K_{eq}} \right) \right) \quad (17)$$

$$R_{MEACOO^-} = k_{MEA} [CO_2][MEA] \quad (18)$$

$$R_{HS^-} = -k_{H_2S-MEA} \left( [H_2S][MEA] - \frac{[HS^-][MEA^+]}{K_{eq}} \right) \quad (19)$$

۳-۲- انتقال جرم در فاز مایع

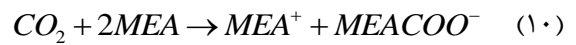
اگر معادله پیوستگی در مختصات استوانه‌ای را برای جزء (i) در فاز مایع نوشته شود، معادله (۲۰) حاصل می شود [۲۴]:

سیال در مجرا آرام در نظر گرفته شده است. همچنین در سمت مجرا نفوذ محوری و شعاعی در طول تماس دهنده حاکم است. در این مطالعه واکنش های  $CO_2$  و  $H_2S$  در غشا و همچنین در مجرا اتفاق می افتد. بر این اساس  $CO_2$  و  $H_2S$  بر اثر نفوذ درون غشا و عبور از آن و جذب در سیال جاذب از گاز جدا می شوند. مدل سرعت سیال در پوسته بر اساس مدل سطح آزاد هاپل است. ۰ هندسه مدول و خواص ترکیبات شرکت کننده در واکنش را نشان می دهد.

۳-۱-۳- معادله های حاکم

۳-۱-۱- مکانیسم واکنش دی اکسید کربن با آمین

واکنش بین دی اکسید کربن و MEA به صورت زیر است:



$$k_{MEA} (m^3 mol^{-1} s^{-1}) = \frac{10^{\left(\frac{10}{92-2152T}\right)}}{1000} \quad (11)$$

جدول (۱): ابعاد مدول تماس دهنده غشایی، خواص و پارامترهای

مدل برای سیستم  $CO_2-H_2S-MEA$

منابع	مقدار	پارامتر
-	۰/۲۲	قطر داخلی مجرا (mm)
-	۰/۳	قطر خارجی مجرا (mm)
-	۰/۵۲۹	قطر داخلی پوسته (mm)
-	۲۲	طول مدل L (cm)
-	۳۶۰۰	تعداد فیبر
[۲۲]	$1/8 \times 10^{-8}$	$D_{CO_2-shell} (m^2 s^{-1})$
[۲۳]	$1/51 \times 10^{-9}$	$D_{CO_2-tube} (m^2 s^{-1})$
-	$D_{CO_2-shell} \left(\frac{\epsilon}{\tau}\right)$	$D_{CO_2-mem} (m^2 s^{-1})$
[۲۲]	$2/0.1 \times 10^{-8}$	$D_{H_2S-shell} (m^2 s^{-1})$
-	$1/52 \times 10^{-9}$	$D_{H_2S-tube} (m^2 s^{-1})$
-	$D_{H_2S-shell} \left(\frac{\epsilon}{\tau}\right)$	$D_{H_2S-mem} (m^2 s^{-1})$
[۲۳]	$9/32 \times 10^{-10}$	$D_{MEA-tube} (m^2 s^{-1})$
-	$D_{MEA-tube}$	$D_{MEA^+-tube} (m^2 s^{-1})$
-	$D_{MEA-tube}$	$D_{MEACOO^--tube} (m^2 s^{-1})$
-	$D_{H_2S-tube}$	$D_{HS^--tube} (m^2 s^{-1})$
[۲۳]	۰/۸	$m_{CO_2} (mol.mol^{-1})$
-	۲/۳	$m_{H_2S} (mol.mol^{-1})$
-	۰/۴	$\epsilon (porosity)$
-	۲	$\tau (tortuosity)$

مدلسازی حذف همزمان دی اکسید کربن و سولفید هیدروژن در یک تماس دهنده غشایی الیاف توخالی پلی پروپیلن در حضور مونو اتانول آمین

$$\left[ D_{ij} \frac{\partial C_{ij}}{\partial r} = D_{im} \frac{\partial C_{im}}{\partial r} \text{ for } r=R_{inter} \text{ and } 0 \leq z \leq L \right] \quad (25)$$

با به کار گرفتن قانون Henry در سطح تماس گاز - مایع می توان از رابطه (26) به عنوان شرط مرزی استفاده کرد:

$$\left[ D_{ij} = HC_{ig} \text{ for } r=R_w \text{ and } 0 \leq z \leq L \right] \quad (26)$$

در رابطه های فوق،  $R_{w}$  و  $R_{internal}$  به ترتیب شعاع داخلی الیاف و مجموع شعاع داخلی و جزء ترشده غشاء می باشند. برای مختصات استوانه ای با استفاده از قانون نفوذ فیک برای تخمین فلاکس نفوذی از معادله (27) استفاده می شود:

$$\left[ \begin{aligned} V_{z-tube} \frac{\partial C_{i-tube}}{\partial z} &= D_{i-tube} \left[ \frac{\partial^2 C_{i-tube}}{\partial r^2} \right. \\ &+ \left. \frac{1}{r} \frac{\partial C_{i-tube}}{\partial r} + \frac{\partial^2 C_{i-tube}}{\partial z^2} \right] - R_i \\ i &= CO_2 \text{ and } H_2S \end{aligned} \right] \quad (27)$$

شرایط مرزی معادله (27) توسط رابطه های (28) تا (30) نشان داده شده است:

$$\left[ \begin{aligned} \text{at } z = 0 \quad C_{i-tube} &= 0 \\ C_{sol-tube} &= C_{initial} \\ (i = \text{all species}) \end{aligned} \right] \quad (28)$$

$$\left[ \begin{aligned} \text{at } r = 0 \quad \frac{\partial C_{i-tube}}{\partial r} &= 0 \\ (\text{for symmetry}) \\ (i = \text{all species}) \end{aligned} \right] \quad (29)$$

$$\left[ \begin{aligned} \text{at } r = R_1 \\ C_{i-tube} &= C_{i-mem} \times m_i \\ (i = CO_2 \text{ and } H_2S) \end{aligned} \right] \quad (30)$$

### 3-3- انتقال جرم در فاز گاز

تا به حال چندین روش برای توصیف توزیع سرعت گاز در پوسته ارائه شده است. در این کار از مدل سطح آزاد هاپل استفاده شده است که توسط معادله (31) محاسبه می شود:

$$\left[ \begin{aligned} \frac{\partial C_i}{\partial t} + V_r \frac{\partial C_i}{\partial r} + V_z \frac{\partial C_i}{\partial z} \\ + \frac{1}{r} V_\theta \frac{\partial C_i}{\partial \theta} \end{aligned} \right] = \quad (20)$$

$$\left[ \begin{aligned} D_i \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial C_i}{\partial r} \right) + \right. \\ \left. \frac{\partial^2 C_i}{\partial z^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 C_i}{\partial \theta^2} \right] \pm R_i \end{aligned} \right]$$

با توجه به فرضیات زیر می توان معادله (20) را به صورت معادله (21) نوشت [25]:

- (1) شرط حالت پایا<sup>19</sup> برقرار است.
- (2) سرعت در راستای شعاعی صفر می باشد.
- (3) سرعت و گرادیان غلظت در راستای زاویه ای (θ) صفر می باشد.
- (4) در راستای زاویه ای (θ) نفوذ وجود ندارد
- (5) در راستای محوری (z) که راستای حرکت سیال می باشد از عبارت نفوذ در برابر عبارت جابجایی صرف نظر می شود.

$$\left[ \begin{aligned} V_z \frac{\partial C_i}{\partial z} &= D_i \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial C_i}{\partial r} \right) \right] \\ + R_i \quad 0 \leq r \leq R_{internal} \end{aligned} \right] \quad (21)$$

که در رابطه (21) زیر نویس  $i$  مربوط به جزء نفوذ کننده و  $D_i$  ضریب نفوذ آن جزء در فاز مایع می باشد. با توجه به آرام بودن جریان مایع درون مجرا، توزیع سرعت محوری توسط معادله (22) نشان داده می شود [10]:

$$V_{z-tube} = 2\bar{V} \left[ 1 - \left( \frac{r}{r_1} \right)^2 \right] \quad (22)$$

شرایط مرزی معادله (21) بصورت زیر است:

$$\left[ C_i = 0 \text{ for } z = 0 \text{ and } 0 \leq r \leq R_{internal} \right] \quad (23)$$

$$\left[ \frac{\partial C_i}{\partial r} = 0 \text{ for } r = 0 \text{ and } 0 \leq z \leq L \right] \quad (24)$$

در سطح مشترک مایع و غشاء برای جزء نفوذ کننده، از شرط مرزی رابطه (25) استفاده می شود که در این رابطه  $D_{im}$  ضریب نفوذ آن جزء در غشاء می باشد.

<sup>19</sup> Steady State

جابه جایی در جهت  $r$  معادله برای قسمت پوسته توسط معادله (۳۶) بیان می شود که شرایط مرزی این معادله توسط رابطه های (۳۷) تا (۳۹) داده شده است:

$$\left[ \begin{array}{l} V_{i-shell} \frac{\partial C_{i-shell}}{\partial z} = \\ D_{i-tube} \left[ \frac{\partial^2 C_{i-shell}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial C_{i-shell}}{\partial r} + \frac{\partial^2 C_{i-shell}}{\partial z^2} \right] \\ i = CO_2 \text{ and } H_2S \end{array} \right] \quad (36)$$

$$\left[ \begin{array}{l} \text{at } z = L \quad C_{i-shell} = C_{i-initial} \\ (i = CO_2 \text{ and } H_2S) \end{array} \right] \quad (37)$$

$$\left[ \begin{array}{l} \text{at } r = R_2 \\ C_{i-shell} = C_{i-mem} \\ i = CO_2 \text{ and } H_2S \end{array} \right] \quad (38)$$

$$\left[ \begin{array}{l} \text{at } r = R_3 \quad \frac{\partial C_{i-shell}}{\partial r} = 0 \\ (\text{for symmetry}) \end{array} \right] \quad (39)$$

#### ۳-۴- معادلات حاکم در بخش غشاء:

معادله حاکم در فاز غشاء مانند معادلات حاکم در دو فاز دیگر است. البته با این تفاوت که می توان از گرادیان غلظت محوری در فاز غشاء صرف نظر کرد. معادله حاکم در این بخش توسط معادله (۴۰) نشان داده شده است:

$$\left[ \begin{array}{l} D_{im} \left[ \frac{\partial^2 C_{im}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial C_{im}}{\partial r} \right] = 0 \\ i = CO_2 \text{ and } H_2S \end{array} \right] \quad (40)$$

که در این رابطه  $D_{im}$  ضریب نفوذ جزء نفوذ کننده در غشاء می باشد که اگر غشاء از گاز پر شده باشد از معادله (۴۱) و اگر از مایع پر شده باشد از معادله (۴۲) محاسبه می شود.

$$D_{im} = \frac{D_{ie} \varepsilon}{\tau} \quad (41)$$

$$D_{im} = \frac{D_{iL} \varepsilon}{\tau} \quad (42)$$

$\varepsilon$  و  $\tau$  در روابط بالا به ترتیب میزان خلل و فرج غشاء و ضریب پیچش منافذ<sup>۲۰</sup> آن می باشد. با توجه به این که قطر منافذ غشاء بسیار ریز است، حرکت درون این منافذ تحت تأثیر نفوذ

$$V_{z-shell} = 2\bar{V} \left[ 1 - \left( \frac{R_o}{R_e} \right)^2 \right] \times \left[ \frac{\left( \frac{r}{R_e} \right)^2 - \left( \frac{R_o}{R_e} \right)^2 + 2 \ln \left( \frac{R_o}{r} \right)^2}{3 + \left( \frac{R_o}{R_e} \right)^4 - 4 \left( \frac{R_o}{R_e} \right)^2 + 4 \ln \left( \frac{R_o}{R_e} \right)} \right] \quad (31)$$

فرضیاتی که برای ساده سازی معادله حاکم در فاز مایع صورت گرفت، برای فاز گاز نیز معتبر است؛ همچنین در فاز گاز واکنش شیمیایی وجود ندارد. بنابراین معادله حاکم در فاز گاز توسط معادله دیفرانسیلی پاره ای (۳۲) نشان داده می شود:

$$\left[ \begin{array}{l} V_z \frac{\partial C_{ig}}{\partial z} = D_{ig} \left[ \frac{\partial^2 C_{ig}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial C_{ig}}{\partial r} \right] \\ R_o \leq r \leq R_e \\ i = CO_2 \text{ and } H_2S \end{array} \right] \quad (32)$$

فاز گاز ایده آل فرض می شود؛ بنابراین شرط مرزی برای قسمت پوسته به صورت معادله (۳۳) می باشد:

$$\left[ \begin{array}{l} C_{ig} = \frac{P}{RT} y_i \\ \text{for } z = 0 \text{ and } \\ R_o \leq r \leq R_e \end{array} \right] \quad (33)$$

$y_i$  در رابطه (۳۳) جزء مولی ماده نفوذ کننده در گاز ورودی به تماس دهنده می باشد. در حالت های غشای ترنشده یا با ترشدگی جزئی که در سطح تماس فاز گاز و دهانه ی منافذ غشاء وجود دارد، می توان از معادله (۳۴) به عنوان شرط مرزی استفاده نمود:

$$\left[ \begin{array}{l} D_{ig} \frac{\partial C_{ig}}{\partial r} = D_{im} \frac{\partial C_{im}}{\partial r} \\ \text{for } r = R_o \text{ and } \\ 0 \leq z \leq L \end{array} \right] \quad (34)$$

هم چنین در شعاع سطح آزاد با توجه به ثابت شدن غلظت، از شرط مرزی رابطه (۳۵) استفاده می شود:

$$\left[ \begin{array}{l} D_{ig} \frac{\partial C_{ig}}{\partial r} = 0 \text{ for } r = R_e \\ \text{and } 0 \leq z \leq L \end{array} \right] \quad (35)$$

با فرض عدم واکنش شیمیایی درون پوسته و همچنین صرف نظر از نفوذ جابجایی و مولکولی در جهت  $\theta$  و همچنین نفوذ

<sup>20</sup> Tortuosity of membrane pores



## مدلسازی حذف همزمان دی اکسید کربن و سولفید هیدروژن در یک تماس دهنده غشایی الیاف توخالی پلی پروپیلن در حضور مونو اتانول آمین

نودسن<sup>۲۱</sup> خواهد بود [۲۶]. بر اساس نوع جنس غشاء و دیگر خواص آن، منافذ غشاء می‌تواند در حالت کاملاً تر نشده<sup>۲۲</sup> از مایع و در حالت کاملاً تر شده<sup>۲۳</sup> از مایع پر شود. اما در حالت ترشوندگی جزئی<sup>۲۴</sup> درصدی از منفذ را گاز و بقیه را مایع پر می‌کند. موازنه جرم حالت پایا بر انتقال  $CO_2$  و  $H_2S$  درون غشاء برای شرایط کاملاً خیس شدگی توسط معادله (۴۳) و شرایط مرزی آن با معادله (۴۴) بیان می‌شود:

با توجه به پیچیدگی معادلات ابتدا فرآیند جذب  $CO_2$  در آب را که به صورت جذب ساده‌ی فیزیکی می‌باشد بررسی شد. در این بررسی نتایج بدست آمده از این مدل‌سازی با داده‌های آزمایشگاهی کرور و سیرکار [۲۷] و همچنین داده‌های آزمایشگاهی ژانگ و همکاران (جذب مخلوط گازی  $CO_2 - N_2$  در آب خالص) [۲۵] مقایسه گردید. اطلاعات مدول‌ها در تحقیقات فوق‌الذکر که در این مطالعه نیز از آن‌ها استفاده شده در جدول (۲) ارائه شده است.

شکل (۴) نتایج حاصل از مدل‌سازی جذب  $CO_2$  خالص در آب خالص با داده‌های آزمایشگاهی کرور و سیرکار در شرایط یکسان نشان می‌دهد. در این بررسی سرعت مایع ثابت است و نتایج برای دو حالت مختلف وقتی که غشاء خشک و یا کاملاً مرطوب است مقایسه شده است. در داده‌های آزمایشگاهی ژانگ و همکاران ترکیب درصد گاز به صورت ۲۰ درصد  $CO_2$  و ۸۰ درصد  $N_2$  است. مایع ورودی نیز آب خالص است. داده‌های آزمایشگاهی و تئوری نشان می‌دهند که با افزایش سرعت گاز ورودی به تماس دهنده، غلظت  $CO_2$  در مایع خروجی کاهش می‌یابد.

جدول (۲) مشخصات مدول‌های غشایی الیاف توخالی

خاصیت	مدل ۱ کرور و سیرکار [۲۳]	مدل ۲ ژانگ و همکاران [۲۱]
قطر خارجی الیاف (μm)	۳۰۰	۳۰۰
قطر داخلی الیاف (μm)	۲۴۰	۲۲۰
طول الیاف (cm)	۳۰	۱۱/۳
تعداد الیاف	۱۳۲	۱۱۰۰
خلل و فرج (%)	۴۰	۴۰
ضریب پیچیدگی	۲/۵	۳/۵
قطر منافذ (μm)	۰/۰۳	۰/۰۴

$$\left[ D_{i-mem} \left[ \frac{\partial^2 C_{i-mem}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial C_{i-mem}}{\partial r} + \frac{\partial^2 C_{i-mem}}{\partial z^2} \right] - R_i = 0 \right. \\ \left. i = CO_2 \text{ and } H_2S \right] \quad (43)$$

$$\left[ \begin{array}{l} at \quad r = R_1 \\ C_{i-mem} = \frac{C_{i-tube}}{m_i} \\ i = CO_2 \quad \text{and} \quad H_2S \end{array} \right] \quad (44)$$

در  $r = R_1$  و  $r = R_2$  به ترتیب شرایط مرزی معادله (۳۰) و (۳۸) برقرار است.

در این تحقیق معادله‌های دیفرانسیل حاکم با استفاده از روش المان محدود حل شده است.

### ۴- نتایج و بحث

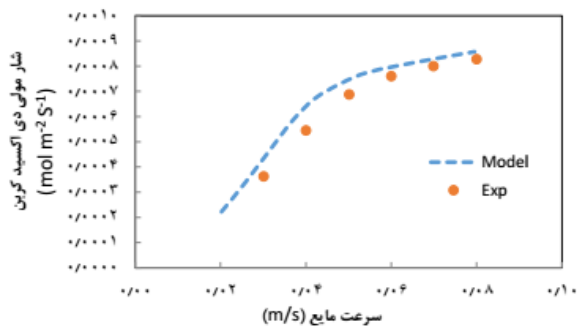
در این تحقیق فرآیند جذب گازهای اسیدی توسط یک تماس دهنده الیاف توخالی در حضور آمین‌ها مدل‌سازی شده است. در این مطالعه مایع در  $Z = 0$  وارد مجرای تماس دهنده شده و در  $Z=L$  از آن خارج می‌شود. در مقابل آن مخلوط گازها از سوی مقابل در  $Z=L$  وارد پوسته تماس دهنده شده و در  $Z=0$  از آن خارج می‌گردد. همچنین تأثیر عواملی هم‌چون سرعت گاز و سرعت مایع و تاثیرات مقدار تخلخل غشاء، تعداد الیاف‌ها و غلظت آمین بر مقدار جذب در سیستم جذب

<sup>21</sup> Knudsen

<sup>22</sup> Non-wetting

<sup>23</sup> Overall-wetting

<sup>24</sup> Partial-wetting

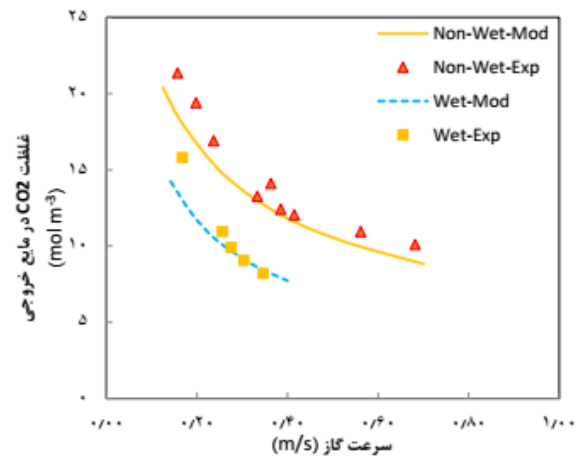


شکل (۵) مقایسه داده های آزمایشگاهی [۲۵] و نتایج مدل سازی شار جذب  $CO_2$  در سرعت های مختلف مایع تحت شرایط غشایی ترنشده. (گاز ورودی: مخلوط  $CO_2$  و  $N_2$ ، غلظت  $CO_2$ : ۸/۴۲ مول بر متر مکعب، مایع ورودی: محلول ۲ مولار DEA، مدول (۲)

توزیع غلظت دی اکسید کربن و سولفید هیدروژن در بخش های پوسته، غشاء و مجرای تماس دهنده غشایی در شکل های (۶) تا (۸) نشان داده شده است.

در این تماس دهنده غشایی، حلال مایع از قسمت پایین تماس دهنده ( $z = 0$ ) یعنی جایی که غلظت هیدروژن سولفید و دی اکسید کربن صفر فرض شده است وارد می شود، در حالی که مخلوط گازی از قسمت بالای تماس دهنده ( $z = L$ ) یعنی جایی که غلظت  $CO_2$  و  $H_2S$  مقدار بیشینه خود را دارند وارد می شود. هنگامی که گاز از درون پوسته عبور می نماید به علت اختلاف غلظت بین پوسته و غشاء،  $CO_2$  و  $H_2S$  به درون غشاء جریان یافته و پس از عبور از این قسمت توسط حلال در قسمت مجرا جذب می شود. همان طور که از این شکل ها مشاهده می گردد هیدروژن سولفید پس از طی ۳۰٪ مسیر از بدو ورود به پوسته به طور کامل جذب می گردد و غلظت آن در ادامه مسیر حرکت گاز صفر می باشد.

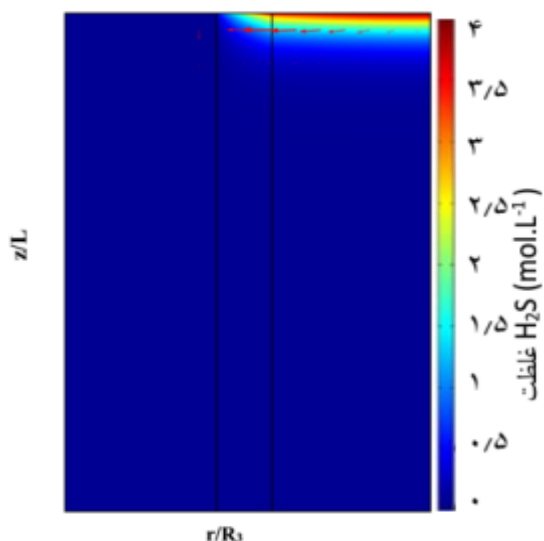
گرادیان غلظت  $CO_2$  و بردارهای فلاکس درون مجرا، غشاء و پوسته ی تماس دهنده غشایی در جذب هم زمان  $CO_2$  و  $H_2S$  در شکل (۶) نمایش داده شده است.



شکل (۴) مقایسه داده های آزمایشگاهی [۲۷] و مدل سازی غلظت  $CO_2$  در مایع خروجی از تماس دهنده در سرعت های مختلف و تحت شرایط غشایی تر شده و غشایی تر نشده

با مشاهده شکل (۴) می توان نتیجه گرفت که نتایج حاصل از مدل سازی با داده های آزمایشگاهی تطابق خوبی دارند، و مدل می تواند جذب ساده ی فیزیکی  $CO_2$  در آب به خوبی پیش بینی نماید. اکنون می توان دقت این مدل را برای پیش بینی جذب همراه با واکنش گازهای اسیدی در محلول MEA مطالعه نمود. برای اعتبارسنجی مدل، به دلیل عدم وجود داده ی آزمایشگاهی برای جذب هم زمان  $CO_2$  و  $H_2S$  در محلول مونیو اتانول آمین، در سیستم دوم (داده های آزمایشگاهی ژانگ و همکاران) نتایج به دست آمده از مدل حاضر را با داده های آزمایشگاهی به دست آمده توسط ژانگ و همکاران [۲۵] برای جذب  $CO_2$  در DEA مقایسه شد که نتایج آن در شکل (۵) نشان داده شده است. همانند نتایج مدل-سازی جذب  $CO_2$  در آب، نتایج جذب  $CO_2$  در DEA نیز از توافق خوبی با داده های آزمایشگاهی برخوردار است. در مدل سازی برای جذب گازهای اسیدی در یک تماس دهنده غشایی در حضور آمین و بررسی اثر پارامترهای مختلف بر روی میزان جذب گازهای اسیدی، فرض شده است که محلول ۱M مونیو اتانول آمین به عنوان حلال در مجرا جریان دارد، و مخلوط گازی شامل ۱۰ درصد  $CO_2$ ، ۱۰ درصد  $H_2S$  و ۸۰ درصد  $CH_4$  در طول پوسته و در خلاف جهت جریان آمین حرکت میکند. دما ۲۹۸ درجه کلون و فشار سیستم ۱atm در نظر گرفته شده است.

مدلسازی حذف همزمان دی اکسید کربن و سولفید هیدروژن در یک تماس دهنده غشایی الیاف توخالی پلی پروپیلن در حضور مونو اتانول آمین



شکل (۷) کانتور توزیع غلظت هیدروژن سولفید در جذب هم زمان

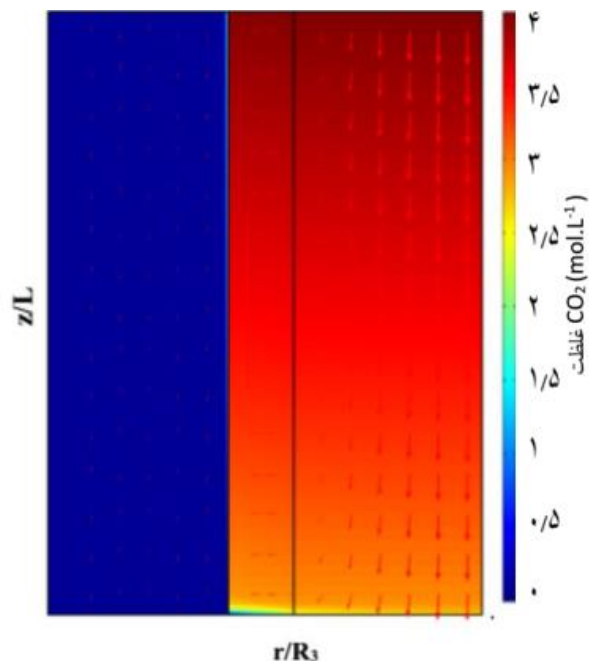
$H_2S$  و  $CO_2$  در طول پوسته، غشاء و مجرا

$$r_1=0.11\text{mm}, r_2=0.15\text{mm}, r_3=0.265\text{mm}, L=22\text{cm}, C_{CO_2 i}=4\text{mol.L}^{-1}, C_{H_2S i}=4\text{mol.L}^{-1}, C_{MEA i}=1000\text{mol.m}^{-3}, v_g=3.33\text{ms}^{-1}, v_l=0.67\text{ms}^{-1}$$

افت غلظت  $H_2S$  درون پوسته در ۳۰٪ ابتدایی مسیر بسیار سریع صورت می پذیرد که این ناشی از حلالیت بالای هیدروژن سولفید در  $MEA$  یا همان  $m_{H_2S}=2/3$  و واکنش سریع با  $MEA$  است. بردارهای فلاکس در درون پوسته پس از ۳۰٪ ابتدایی مسیر ناپدید می شوند. آشکار است که  $H_2S$  به طور کامل به درون مجرا منتقل شده و جذب آمین می شود. شکل (۸) گرادیان غلظت و بردارهای فلاکس (نفوذی و همرفت) مونو اتانول آمین درون مجرای تماس دهنده غشایی را در جذب هم زمان  $CO_2$  و  $H_2S$  نمایش می دهد. گرادیان غلظت و بردارهای فلاکس  $MEA$  در مرز مجرا و غشا حداقل مقدار خود را داراست. این مکان محل ورود  $CO_2$  و  $H_2S$  به درون مجرا و واکنش آنها با  $MEA$  است. در فاصله دورتر از مرز غشا و مجرا غلظت  $MEA$  به دلیل عدم حضور  $CO_2$  و  $H_2S$  بالاست.

۲-۴- پروفایل های غلظت محوری در مرز پوسته-غشاء و مجرا-غشاء

توزیع غلظت  $H_2S$  و  $CO_2$  در طول مرز پوسته-غشاء، در شکل (۹) نشان داده شده اند. غلظت های اولیه  $CO_2$  و  $H_2S$  برابر با  $C_0 = 4\text{mol.L}^{-1}$  می باشد. در شکل (۹) مشاهده می



شکل (۸) کانتور توزیع غلظت دی اکسید کربن در جذب هم

زمان  $H_2S$  و  $CO_2$  در طول پوسته غشا و مجرا

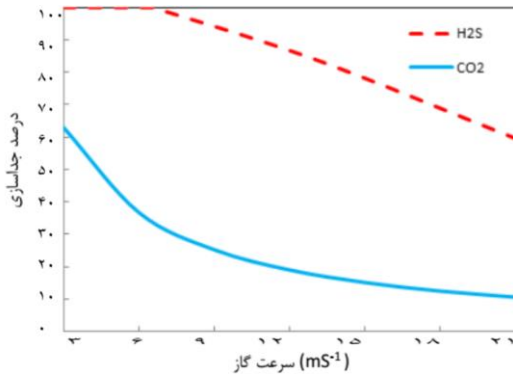
$$r_2=0.15\text{mm}, r_3=0.265\text{mm}, L=22\text{cm}, C_{CO_2 i}=4\text{mol.L}^{-1}, C_{H_2S i}=4\text{mol.L}^{-1}, r_1=0.11\text{mm}, C_{MEA i}=1000\text{mol.m}^{-3}, v_g=3.33\text{ms}^{-1}, v_l=0.67\text{ms}^{-1}$$

با حرکت گاز به درون پوسته، به دلیل اختلاف غلظت، گاز به درون غشاء نفوذ می کند و سپس با انجام یک فرآیند شیمیایی جذب آمین جاری در درون مجرا میشود. در پوسته و مجرا بردارهای فلاکس در جهت  $Z$  و  $r$  بر اثر همرفت و نفوذ می باشند. در حالیکه بردارهای فلاکس در ناحیه غشاء در جهت  $r$  و فقط براساس نفوذ رسم می شوند. بردارهای فلاکس در ناحیه پوسته و غشاء جایی که توسط گاز اشغال شده است بلندترند، در حالی که این بردارها در ناحیه مجرا بسیار کوتاهند. آشکار است که  $CO_2$  به سرعت با  $MEA$  واکنش داده و مصرف می شود.

گرادیان غلظت  $H_2S$  و بردارهای فلاکس درون مجرا، غشاء و پوسته ی تماس دهنده غشایی در جذب هم زمان  $H_2S$  و  $CO_2$  در شکل (۷) نمایش داده شده است.

### ۱-۳-۴- تأثیر سرعت گاز بر جذب هم زمان $\text{CO}_2$ و $\text{H}_2\text{S}$ و درصد جداسازی آنها

در شکل (۱۰) تأثیر سرعت گاز (ترم همرفت در پوسته) بر جذب هم زمان  $\text{CO}_2$  و  $\text{H}_2\text{S}$  تحت شرایط غشای خشک، نشان داده شده است.



شکل (۱۰) تأثیر سرعت گاز بر درصد جداسازی  $\text{CO}_2$  و  $\text{H}_2\text{S}$  در

جذب هم زمان آنها

$$L=22\text{cm}, C_{\text{CO}_2-i}=4\text{mol.L}^{-1}, C_{\text{MEA-i}}=1000\text{molm}^{-3}, \\ C_{\text{H}_2\text{S-i}}=4\text{mol.L}^{-1}, v_1=0/67\text{ms}^{-1}$$

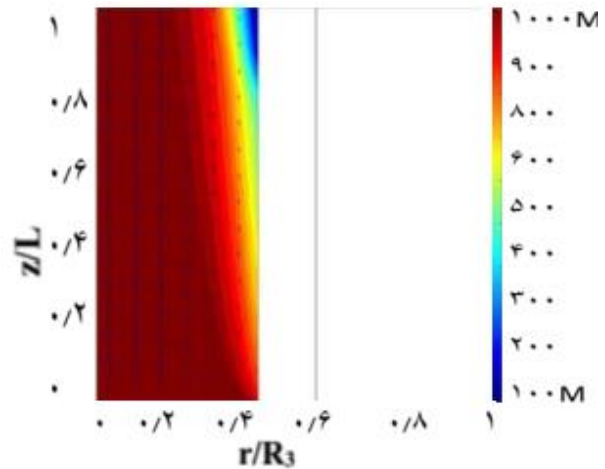
همانگونه که در این شکل مشخص است، تغییرات میزان جذب  $\text{CO}_2$  بصورت منحنی و تغییرات جذب  $\text{H}_2\text{S}$  بصورت خطی می باشد؛ اما جذب هر دو گاز با افزایش سرعت گاز کاهش می یابد. از سرعت  $3 \text{ m/s}$  تا  $7 \text{ m/s}$  میزان درصد جداسازی  $\text{H}_2\text{S}$  به میزان ۱۰۰٪ است و با توجه به سمی بودن گاز  $\text{H}_2\text{S}$  این مورد بسیار حائز اهمیت است. درصد جداسازی  $\text{CO}_2$  نیز در سرعت های پایین گاز بالا می باشد، اما با افزایش سرعت گاز درصد جداسازی  $\text{CO}_2$  کاهش پیدا می کند.

درصد جداسازی  $\text{H}_2\text{S}$  به چند دلیل بیشتر از  $\text{CO}_2$  می باشد؛ نخست به نوع واکنش میان این گازها با MEA مربوط می شود. سرعت واکنش شیمیایی  $\text{H}_2\text{S}$  با MEA بیشتر است. همچنین ضریب نفوذ و ثابت هنری  $\text{H}_2\text{S}$  در MEA از  $\text{CO}_2$  بیشتر است. در نهایت می توان به این دلیل نیز اشاره کرد که هر چه سرعت گاز بالاتر رود، زمان ماند فاز گاز در مدول یعنی همان زمان تماس کاهش یافته و درصد جداسازی کاهش می یابد.

### ۲-۳-۴- تأثیر سرعت مایع بر جذب هم زمان $\text{CO}_2$ و $\text{H}_2\text{S}$ و درصد جداسازی آنها

تأثیر افزایش یا کاهش سرعت مایع برخلاف تأثیر سرعت گاز در جداسازی  $\text{CO}_2$  و  $\text{H}_2\text{S}$  است. همانگونه که در شکل (۱۱) مشخص می باشد، تغییر سرعت مایع در سرعت های پایین گاز، اثر چندانی بر فرآیند جذب  $\text{H}_2\text{S}$  ندارد.

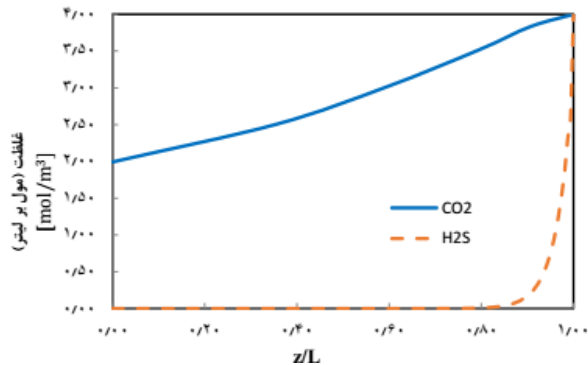
شود غلظت  $\text{CO}_2$  به صورت خطی در طول مدل کاهش می یابد، تا آنجا که در خروجی به حداقل خود می رسد.



شکل (۸) کانتور توزیع غلظت MEA در جذب

هم زمان  $\text{CO}_2$  و  $\text{H}_2\text{S}$

$$r_1=0.11\text{mm}, r_2=0.15\text{mm}, r_3=0.265\text{mm}, L=22\text{cm}, \\ C_{\text{CO}_2-i}=4\text{mol.L}^{-1}, C_{\text{H}_2\text{S-i}}=4\text{mol.L}^{-1}, C_{\text{MEA-i}}=1\text{mol.L}^{-1}, \\ v_g=3.33\text{ms}^{-1}, v_l=0.67\text{ms}^{-1}$$



شکل (۹) محاسبه مدل برای پروفایل غلظت  $\text{CO}_2$  و  $\text{H}_2\text{S}$  در

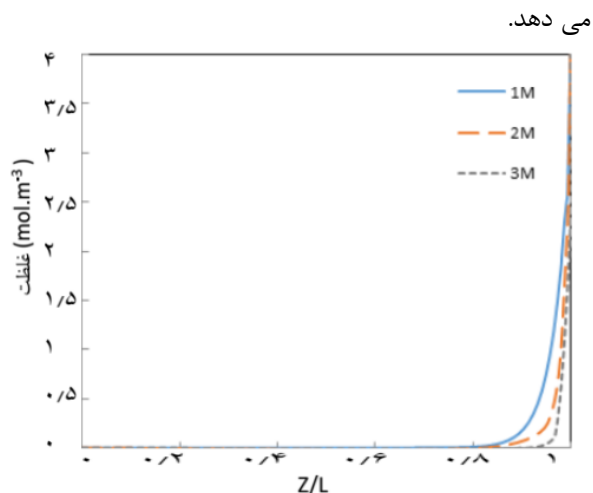
طول غشاء (مرز پوسته- غشاء)

$$r_1=0.11\text{mm}, r_2=0.15\text{mm}, r_3=0.265\text{mm}, L=22\text{cm}, \\ C_{\text{CO}_2-i}=4\text{mol.L}^{-1}, C_{\text{H}_2\text{S-i}}=4\text{mol.L}^{-1}, C_{\text{MEA-i}}=1000\text{molm}^{-3}, \\ v_g=3.33\text{ms}^{-1}, v_l=0.67\text{ms}^{-1}$$

### ۳-۴- تأثیر سرعت گاز و مایع بر جذب هم زمان $\text{CO}_2$ و $\text{H}_2\text{S}$

اهمیت بررسی اثر سرعت فازهای گاز و مایع بر فرآیند جذب در تشخیص میزان مقاومت هر یک از آنها در برابر انتقال جرم می باشد. پس از پی بردن به این موضوع که کدام فاز مقاومت بیشتری در برابر انتقال جرم دارد می توان اقداماتی برای از بین بردن یا کاهش آن مقاومت انجام داد.

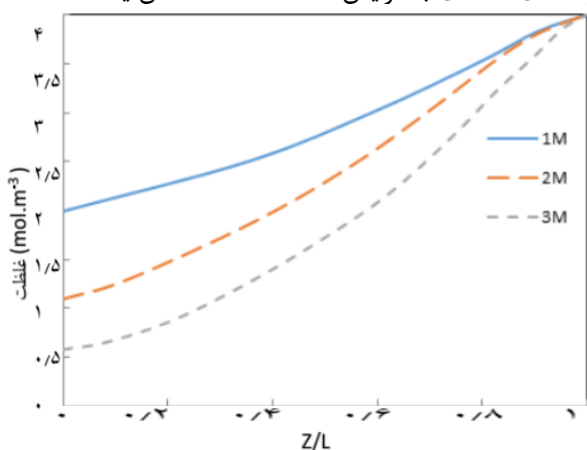
مدلسازی حذف همزمان دی اکسید کربن و سولفید هیدروژن در یک تماس دهنده غشایی الیاف توخالی پلی پروپیلن در حضور مونو اتانول آمین



شکل (۱۳) تاثیر غلظت اولیه MEA بر پروفایل غلظت  $H_2S$  در طول غشاء (مرز غشاء- پوسته)

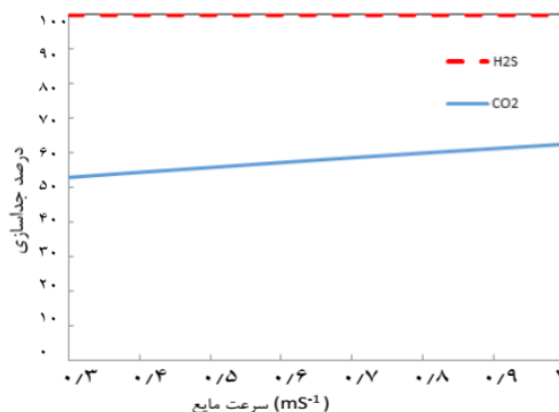
$r_1=0.11\text{mm}$ ,  $r_2=0.15\text{mm}$ ,  $r_3=0.265\text{mm}$ ,  $L=22\text{cm}$ ,  $C_{CO_2 i}=4\text{mol.L}^{-1}$ ,  $C_{H_2S i}=4\text{mol.L}^{-1}$ ,  $v_g=3.33\text{ms}^{-1}$ ,  $v_l=0.67\text{ms}^{-1}$

با افزایش غلظت آمین اختلاف غلظت در مرز مجرا-غشاء افزایش یافته و باید سبب جذب بیشتر و سریع تر ترکیبات مورد نظر از مخلوط می شود. همانطور که در شکل (۱۳) نمایان است با اینکه افزایش غلظت آمین سبب تسریع فرآیند جذب  $H_2S$  شده است، اما با غلظت آمین 1M نیز جذب کامل این ترکیب در کمتر از سی درصد ابتدایی مسیر حرکت گاز صورت گرفته و غلظت  $H_2S$  به صفر رسیده است. در شکل (۱۴) مشاهده می شود که غلظت  $CO_2$  در خروجی از پوسته ( $z = 0$ ) با افزایش غلظت MEA کاهش یافته است.



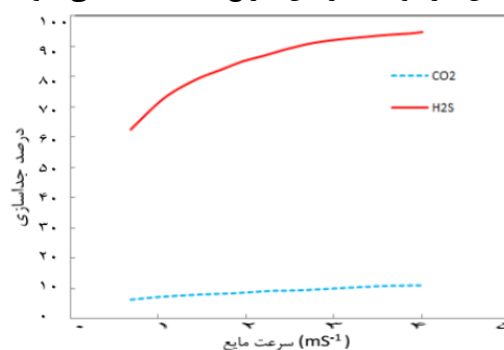
شکل (۱۴) تاثیر غلظت اولیه MEA بر پروفایل غلظت  $CO_2$  در طول غشاء (مرز غشاء- پوسته)

$r_1=0.11\text{mm}$ ,  $r_2=0.15\text{mm}$ ,  $r_3=0.265\text{mm}$ ,  $L=22\text{cm}$ ,  $C_{CO_2 i}=4\text{mol.L}^{-1}$ ,  $C_{H_2S i}=4\text{mol.L}^{-1}$ ,  $v_g=3.33\text{ms}^{-1}$ ,  $v_l=0.67\text{ms}^{-1}$



شکل (۱۱) تاثیر سرعت مایع بر درصد جداسازی  $H_2S$  و  $CO_2$   
 $L=22\text{cm}$ ,  $C_{CO_2 i}=4\text{mol.L}^{-1}$ ,  $C_{MEA i}=1000\text{molm}^{-3}$ ,  $C_{H_2S i}=4\text{mol.L}^{-1}$ ,  $v_g=3.33\text{m/s}$

دلیل افزایش جذب با بالا بردن سرعت مایع این است که غلظت گاز در سطح خروجی فیبر کاهش می یابد که این امر موجب افزایش گرادیان غلظت در مرز غشاء-مجرا و افزایش میزان جداسازی این ترکیبات از مخلوط گاز می شود. همان گونه از شکل (۱۱) پیداست در سرعت های پایین گاز در سرعت های مختلف آمین، جداسازی  $H_2S$  به طور کامل انجام شده است ولی این افزایش سرعت آمین موجب بیشتر شدن حذف  $CO_2$  می شود. اما در سرعت های بالای گاز همچون شکل (۱۲) مشاهده می شود که افزایش سرعت آمین در مجرا سبب می شود جداسازی  $CO_2$  به آرامی افزایش یابد، در حالی که این امر موجب افزایش سریع جذب  $H_2S$  می شود.

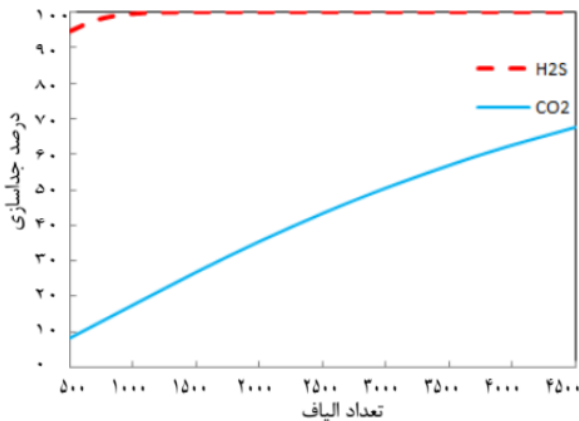


شکل (۱۲) تاثیر سرعت مایع بر درصد جداسازی  $H_2S$  و  $CO_2$   
 $L=22\text{cm}$ ,  $C_{CO_2 i}=4\text{mol.L}^{-1}$ ,  $C_{MEA i}=1000\text{molm}^{-3}$ ,  $C_{H_2S i}=4\text{mol.L}^{-1}$ ,  $v_g=20\text{ms}^{-1}$

۳-۳-۴- تاثیر غلظت آمین بر جذب هم زمان  $CO_2$  و  $H_2S$  و درصد جداسازی آنها

شکل های (۱۳) و (۱۴) تاثیرات غلظت آمین (MEA) بر غلظت  $H_2S$  و  $CO_2$  در امتداد مرز غشاء-پوسته را نشان

در این شکل با افزایش تعداد فیبر راکتور در طول ثابت، درصد جذب افزایش یافته است. این تغییر در مقادیر عددی کم تاثیری ناچیز بر جداسازی  $H_2S$  دارد و همان گونه که از شکل (۱۶) نمایان است در مقادیر عددی بالای فیبر، تاثیری بر میزان جداسازی  $H_2S$  ندارد چون  $H_2S$  بطور کامل جذب شده است.



شکل (۱۶) تاثیر تعداد فیبر بر درصد جذب هم زمان  $H_2S$  و  $CO_2$

$$r_1=0.11\text{mm}, r_2=0.15\text{mm}, r_3=0.265\text{mm}, L=22\text{cm}, \\ C_{CO_2i}=4\text{mol.L}^{-1}, C_{H_2Si}=4\text{mol.L}^{-1}, C_{MEAi}=1000\text{molm}^{-3}, \\ v_g=3.33\text{ms}^{-1}, v_l=0.67\text{ms}^{-1}$$

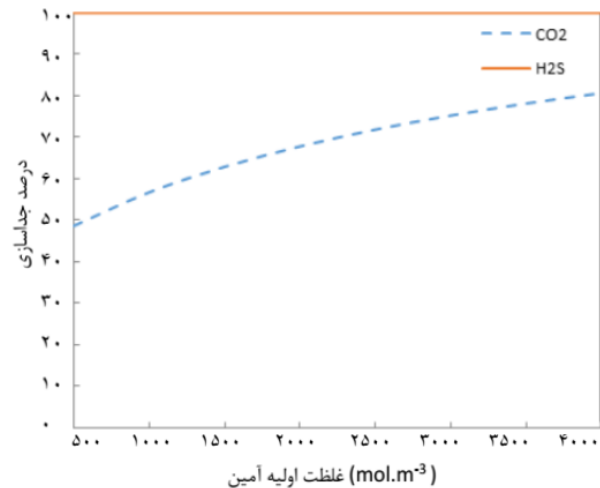
۵-۳-۴- تاثیر میزان رطوبت غشا بر جذب هم زمان

### $H_2S$ و $CO_2$

برای بررسی اثر پدیده ترشوندگی بر جذب هم زمان و درصد بازیابی گازهای  $CO_2$  و  $H_2S$  میزان این پارامتر در سرعت گاز و مایع ثابت و در درصد ترشوندگی مختلف غشاء محاسبه و در شکل (۱۷) نشان داده شده است. در اکثر موارد پدیده ترشوندگی غشاء نقش منفی در فرآیند جذب دارد. در این جا نیز مشاهده می شود که میزان جذب  $CO_2$  و  $H_2S$  با افزایش درصد ترشوندگی کاهش می یابد. البته اثر این پدیده بر جذب  $CO_2$  مؤثرتر است. شکل (۱۷) اثر ترشوندگی جزئی غشاء بر روی درصد جداسازی  $CO_2$  و  $H_2S$  را نشان می دهد.

این شکل نشان می دهد که ترشوندگی غشاء می تواند درصد جداسازی  $CO_2$  را کاهش دهد. در این شکل پروفایل مربوط به  $CO_2$  یک افت مداوم در تغییر حالت از غشای کاملاً خشک به غشاء با ترشوندگی جزئی دارد. اما بر خلاف پروفایل  $CO_2$ ، نمودار مربوط به  $H_2S$  با افزایش درصد ترشوندگی غشاء تغییر محسوسی ندارد؛ البته کاهش نیافتن درصد جداسازی  $H_2S$  به عنوان یک نکته مثبت و حائز اهمیت محسوب می گردد. برای پیشگیری از ایجاد پدیده ترشوندگی مهم ترین عامل انتخاب جنس غشاء می باشد. بگونه ای که جنس غشاء و حلال و ترکیبات احتمالی به وجود آمده در اثر جذب باید نسبت به هم

به این ترتیب با توجه به شکل (۱۵) که نمایان گر درصد جداسازی  $CO_2$  و  $H_2S$  از خروجی پوسته در غلظت های اولیه گوناگون MEA است، نشان داده شده که افزایش غلظت آمین توانسته است برای بالا بردن میزان حذف  $CO_2$  تاثیر گذار باشد، که این افزایش جداسازی به دلیل شیب تند ابتدای نمودار در غلظت های پایین آمین اقتصادی تر از غلظت های بالا است.



شکل (۱۵) درصد جداسازی  $CO_2$  و  $H_2S$  از خروجی پوسته با

غلظت های اولیه مختلف آمین

$$r_1=0.11\text{mm}, r_2=0.15\text{mm}, r_3=0.265\text{mm}, L=22\text{cm}, C_{CO_2i}=4\text{mol.L}^{-1}, C_{H_2Si}=4\text{mol.L}^{-1}, v_g=3.33\text{ms}^{-1}, v_l=0.67\text{ms}^{-1}$$

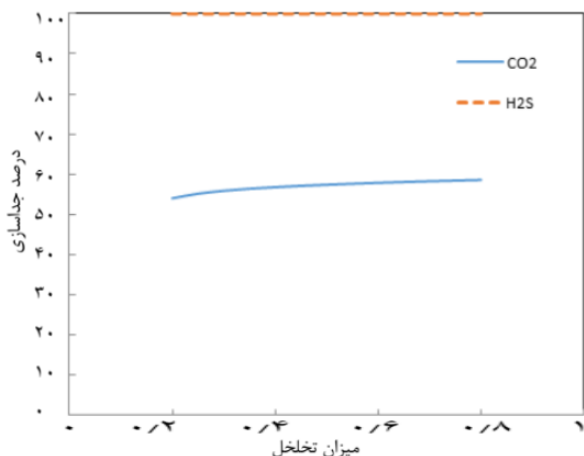
۴-۳-۴- تاثیر تعداد فیبر بر جذب هم زمان  $CO_2$  و

### $H_2S$

با افزایش تعداد غشاء در مدل  $R_3$  که در رابطه Happel معرفی شد (شعاعی فرضی که تا آنجا گاز بر روی یک غشاء تاثیر می گذارد) به دلیل تابعیت با معکوس تعداد غشاء ها (N) کاهش می یابد و این کاهش، در دبی ثابت گاز باعث افزایش سرعت گاز شده است (به دلیل کوچک شدن سطح مقطع) که این افزایش سرعت گاز باعث شده تا گاز فرصت کمتری برای تماس با مایع جاذب داشته باشد و درصد جذب کاهش یابد. از طرفی افزایش تعداد غشاء در راکتور باعث افزایش سطح تماس گاز و مایع جاذب شده که این باعث افزایش درصد جذب شده است. پس تعداد غشاء در راکتور نقشی دو طرفه ایفا کرده است ولی تاثیر مثبتی که افزایش سطح تماس به وجود آورده به مراتب بیشتر از تاثیر منفی افزایش سرعت گاز به دلیل افزایش تعداد غشاء در راکتور است. پس با افزایش تعداد غشاء در راکتور درصد جذب افزایش یافته است. شکل (۱۶) این واقعیت را تایید می کند.



## مدلسازی حذف همزمان دی اکسید کربن و سولفید هیدروژن در یک تماس دهنده غشایی ایفای توخالی پلی پروپیلن در حضور مونو اتانول آمین



شکل (۱۸) تأثیر میزان تخلخل غشاء بر جذب همزمان CO<sub>2</sub> و

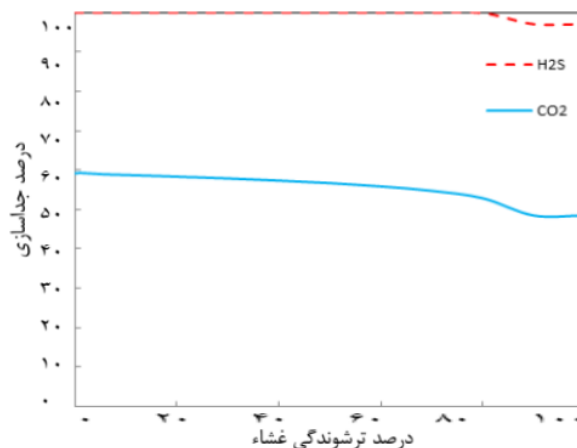
### H<sub>2</sub>S

$r_1=0.11\text{mm}$ ,  $r_2=0.15\text{mm}$ ,  $r_3=0.265\text{mm}$ ,  $L=22\text{cm}$ ,  
 $C_{\text{CO}_2\text{i}}=4\text{mol.L}^{-1}$ ,  $C_{\text{H}_2\text{S}\text{i}}=4\text{mol.L}^{-1}$ ,  $C_{\text{MEA}\text{i}}=1000\text{molm}^{-3}$ ,  
 $v_g=3.33\text{ms}^{-1}$ ,  $v_l=0.67\text{ms}^{-1}$

### ۵- نتیجه گیری کلی

در این تحقیق نیز کارایی تماس دهنده‌های غشایی ایفای تو خالی در جذب همزمان گازهای CO<sub>2</sub> و H<sub>2</sub>S بررسی گردید. به همین منظور از یک مدل ریاضی برای فرآیند جذب همراه با واکنش گازهای اسیدی در حلال مونواتانول آمین در یک مدول غشایی ایفای توخالی استفاده شده است. پس از اعتبار سنجی مدل با داده‌های آزمایشگاهی موجود در تحقیقات مشابه قبلی، تأثیر برخی از شرایط عملیاتی مانند سرعت فازها، غلظت آمین، تعداد فیبرها، میزان تخلخل و پدیده ترشوندگی غشاء بر فرآیند جذب بررسی شد. نتایج حاصل از بررسی اثر سرعت فازهای مایع و گاز بر میزان جذب و درصد جداسازی گازهای CO<sub>2</sub> و H<sub>2</sub>S مشخص شد که سرعت گاز بر درصد جداسازی CO<sub>2</sub> و H<sub>2</sub>S تأثیر منفی دارد که البته اثر آن بر درصد جداسازی CO<sub>2</sub> بیشتر از H<sub>2</sub>S است. در مورد اثر سرعت مایع بر میزان جذب و درصد جداسازی نتایج متفاوت است به گونه‌ای که تغییر سرعت مایع در سرعت‌های زیاد گاز بر درصد جداسازی CO<sub>2</sub> تأثیر کم و بر درصد جداسازی H<sub>2</sub>S تأثیر بیشتری نسبت به سرعت‌های پایین گاز داشت.

آبگریز باشند و مایع نتواند وارد منافذ غشاء شود.



شکل (۱۷) تأثیر درصد ترشوندگی غشاء بر جذب

### همزمان CO<sub>2</sub> و H<sub>2</sub>S

$r_1=0.11\text{mm}$ ,  $r_2=0.15\text{mm}$ ,  $r_3=0.265\text{mm}$ ,  $v_g=3.33\text{ms}^{-1}$ ,  
 $v_l=0.67\text{ms}^{-1}$ ,  $L=22\text{cm}$ ,  $C_{\text{CO}_2\text{i}}=4\text{mol.L}^{-1}$ ,  $C_{\text{H}_2\text{S}\text{i}}=4\text{mol.L}^{-1}$ ,  
 $C_{\text{MEA}\text{i}}=1000\text{molm}^{-3}$ ,

### ۶-۳-۴- تأثیر میزان تخلخل غشاء بر جذب هم زمان

### H<sub>2</sub>S و CO<sub>2</sub>

برای بررسی اثر تخلخل بر جذب همزمان و درصد بازیابی گازهای CO<sub>2</sub> و H<sub>2</sub>S میزان این پارامتر در سرعت گاز و مایع ثابت و در میزان تخلخل‌های مختلف غشاء محاسبه و در شکل (۱۸) نشان داده شده است. افزایش تخلخل غشاء در فرآیند جذب، سبب افزایش مقدار عددی شعاع سطح آزاد و به تبع آن جذب CO<sub>2</sub> می شود، اما در محدوده مورد بررسی تمام H<sub>2</sub>S موجود در گاز جذب آمین شده است و غلظت آن در انتهای پوسته صفر می باشد.

## فهرست علائم و اختصارات

R	ثابت گازها (atm.m <sup>3</sup> .mol.K)
S	سطح مقطع (m <sup>2</sup> )
T	درجه حرارت (K)
$\bar{V}$	سرعت (m.s <sup>-1</sup> )
$\bar{V}$	سرعت متوسط در درون مجرا (m.s <sup>-1</sup> )
$V_{z-shell}$	سرعت گاز در درون پوسته (m.s <sup>-1</sup> )
$\varepsilon$	تخلخل
$C_i$	غلظت هر جزء (mol.m <sup>-3</sup> )
$C_{CO_2-shell}$	غلظت دی اکسید کربن درون پوسته (mol.m <sup>-3</sup> )
$C_{CO_2-tube}$	غلظت دی اکسید کربن درون مجرا (mol.m <sup>-3</sup> )
$C_{CO_2-mem}$	غلظت دی اکسید کربن درون غشاء (mol.m <sup>-3</sup> )
$C_{sol-tube}$	غلظت حلال درون مجرا (mol.m <sup>-3</sup> )
$C_{sol-mem}$	غلظت حلال درون غشاء (mol.m <sup>-3</sup> )
$D_i$	ضریب نفوذ پذیری جزء i (m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> )
$D_{CO_2-shell}$	ضریب نفوذ پذیری دی اکسید کربن درون پوسته (m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> )
$D_{CO_2-tube}$	ضریب نفوذ دی اکسید کربن در درون مجرا (m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> )
$D_{CO_2-mem}$	ضریب نفوذ دی اکسید کربن در درون غشاء (m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> )
$D_{H_2S-shell}$	ضریب نفوذ پذیری سولفید هیدروژن درون پوسته (m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> )
$D_{H_2S-tube}$	ضریب نفوذ سولفید هیدروژن در درون مجرا (m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> )
$D_{H_2S-mem}$	ضریب نفوذ سولفید هیدروژن در درون غشاء (m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> )
$D_{MEA-tube}$	ضریب نفوذ منواتانول آمین در درون مجرا (m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> )
$D_{MEA^+-tube}$	ضریب نفوذ MEA <sup>+</sup> در درون مجرا (m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> )
$D_{im}$	ضریب نفوذ هر جزء در درون غشاء (m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> )
$k_i$	ثابت سرعت واکنش جزء i

تغییر غلظت آمین نشان داد که افزایش غلظت سبب افزایش اختلاف غلظت در مرز مجرا-غشاء شده و جذب را بهبود می بخشد اما این افزایش غلظت برای کاهش میزان H<sub>2</sub>S خروجی، اقتصادی نیست زیرا که تمام H<sub>2</sub>S موجود در مخلوط گازها با آمین های رقیق تر هم به طور کامل جذب می شود اما تاثیر غلظت آمین تاثیر به سزایی برای کاهش CO<sub>2</sub> خروجی ایفا میکند. همچنین نتایج نشان داد که افزایش تعداد الیاف و میزان تخلخل غشاء منجر به بهبود امر جداسازی CO<sub>2</sub> و H<sub>2</sub>S می شوند.

پدیدهی ترشوندگی غشاء و اثر آن بر میزان جذب درصد جداسازی نشان داد که ترشددگی غشاء می تواند جذب CO<sub>2</sub> و H<sub>2</sub>S را کاهش دهد. البته با توجه نتایج مشخص شد که تاثیر این پدیده بر جذب CO<sub>2</sub> بیشتر از H<sub>2</sub>S است. با توجه به سمی و خطرناک بودن گاز H<sub>2</sub>S و نیاز به جداسازی حداکثر آن، بالا بودن درصد جداسازی H<sub>2</sub>S (نزدیک به ۱۰۰٪) و ناچیز بودن اثر پدیدهی ترشددگی بر درصد جداسازی آن می تواند به عنوان نکات مثبت این روش حائز اهمیت باشد. در مجموع با توجه به نتایج این مدل سازی می توان اظهار داشت استفاده از تماس دهنده های غشایی الیاف توخالی برای جداسازی هم زمان گازهای CO<sub>2</sub> و H<sub>2</sub>S به کمک حلال MEA مفید می باشد.

## تشکر و قدردانی

نویسندگان از دانشگاه صنعتی شیراز بخاطر در اختیار گذاشتن امکانات اجرای پژوهش کمال تشکر را دارند.



مدلسازی حذف همزمان دی اکسید کربن و سولفید هیدروژن در یک تماس دهنده غشایی الیاف توخالی پلی پروپیلن در حضور مونو اتانول آمین

[14] R. Wang, H. Zhang, P. Feron, and D. Liang, "Influence of membrane wetting on CO<sub>2</sub> capture in microporous hollow fiber membrane contactors." Separation and Purification Technology, 46(1), pp. 33-40, 2005.

[15] M. Al-Marzouqi, M. El-Naas, S. Marzouk, and N. Abdullatif, "Modeling of chemical absorption of CO<sub>2</sub> in membrane contactors." Separation and Purification Technology, 62(3), pp. 499-506, 2008.

[16] P. Keshavarz, J. Fathikalajahi, and S. Ayatollahi, "Analysis of CO<sub>2</sub> separation and simulation of a partially wetted hollow fiber membrane contactor." Journal of Hazardous Materials, 152(3), pp. 1237-1247, 2008.

[17] S. Rajabzadeh, S. Yoshimoto, M. Teramoto, M. Al-Marzouqi, and H. Matsuyama, H., "CO<sub>2</sub> absorption by using pvdf hollow fiber membrane contactors with various membrane structures." Separation and Purification Technology, 69(2), pp. 210-220, 2009.

[18] M.R. Sohrabi, A. Marjani, S. Moradi, M. Davallo, and S. Shirazian, S., "Mathematical modeling and numerical simulation of CO<sub>2</sub> transport through hollow-fiber membranes." Applied Mathematical Modelling, 35(1), pp. 174-188, 2011.

[19] A. Golkhar, P. Keshavarz, P., and D. Mowla, "Investigation of CO<sub>2</sub> removal by silica and CNT nanofluids in microporous hollow fiber membrane contactors." Journal of Membrane Science, 433, pp. 17-24, 2013.

[20] S. Masoumi, P. Keshavarz, and Z. Rastgoo, "Theoretical investigation on CO<sub>2</sub> absorption into deaerated solution using hollow fiber membrane contactors." Journal of Natural Gas Science and Engineering, 18, pp. 23-30, 2014.

[21] R. Faiz, and M. Al-Marzouqi, "Mathematical modeling for the simultaneous absorption of CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>S using MEA in hollow fiber membrane contactors." Journal of Membrane Science, 342(1), pp. 269-278, 2009.

[22] E.L. Cussler, "Diffusion: Mass transfer in fluid systems." Cambridge university press, 2009.

[23] S. Paul, A.K. Ghoshal, and B. Mandal, "Removal of CO<sub>2</sub> by single and blended aqueous alkanolamine solvents in hollow-fiber membrane contactor: Modeling and simulation." Industrial & Engineering Chemistry Research, 46(8), pp. 2576-2588, 2007.

[24] R.B. Bird, W.E. Stewart, and E.N. Lightfoot, "Transport phenomena." John Wiley & Sons, 2007.

[25] H.Y. Zhang, R. Wang, D.T. Liang, and J.H. Tay, "Modeling and experimental study of CO<sub>2</sub> absorption in a hollow fiber membrane contactor." Journal of Membrane Science, 279(1), pp. 301-310, 2006.

[26] S. Karoor, and K.K. Sirkar, "Gas absorption studies in microporous hollow fiber membrane modules." Industrial & Engineering Chemistry Research, 32(4), pp. 674-684, 1993.

$\tau$

ضریب پیچش

زیر نویس ها

g

گاز

i

جزء i

r

بعد در جهت r

$\theta$

بعد در جهت  $\theta$

z

بعد در جهت z

### فهرست منابع

[1] A. Gabelman, and S.T. Hwang, "Hollow fiber membrane contactors." Journal of Membrane Science, 159(1), pp. 61-106, 1999.

[2] D.L.V. Katz, "Handbook of natural gas engineering." McGraw-Hill, 1959.

[3] M. Stewart and K. Arnold, "Gas sweetening and processing field manual: part 1, Gas Sweetening" pages 87-92, 2011

DOI:10.1016/B978-1-85617-982-9.00002-8

[4] R.E. Treybal, "Mass transfer operations." New York, 1980.

[5] C.J. Geankoplis, "Transport processes and separation process principles:(includes unit operations)." Prentice Hall Professional Technical Reference, 2003.

[6] G. Srikanth, "Technology and business opportunities." Water Conditioning & Purification, 2008.

[7] R. Baker, "Membrane technology in the chemical industry: Future directions." Membrane Technology: in the Chemical Industry, pp. 268-295, 2001.

[8] J.D. Seader, E.J. Henley, and D.K. Roper, D.K., "Separation process principles." 1998.

[9] S. Adhikari, and S. Fernando, "Hydrogen membrane separation techniques." Industrial & Engineering Chemistry Research, 45(3), pp. 875-881, 2006.

[10] Z. Qi, and E. Cussler, "Microporous hollow fibers for gas absorption: I. Mass transfer in the liquid." Journal of Membrane Science, 23(3), pp. 321-332, 1985.

[11] Z. Qi, and E. Cussler, "Microporous hollow fibers for gas absorption: II. Mass transfer across the membrane." Journal of Membrane Science, 23(3), pp. 333-345, 1985.

[12] H. Kreulen, C. Smolders, G. Versteeg, and W.P.M. Van Swaaij, "Microporous hollow fibre membrane modules as gas-liquid contactors. Part I. Physical mass transfer processes: A specific application: Mass transfer in highly viscous liquids." Journal of Membrane Science, 78(3), pp. 197-216, 1993.

[13] H. Kreulen, C. Smolders, G. Versteeg, and W.P.M. Van Swaaij, "Microporous hollow fibre membrane modules as gas-liquid contactors part 2. Mass transfer with chemical reaction." Journal of Membrane Science, 78(3), pp. 217-238, 1993.

# Modeling of simultaneous removal of carbon dioxide and hydrogen sulfide in a polypropylene hollow fiber membrane contact in the presence of monoethanolamine

Mohammad Reza Talaghat\*, Elman Amirahmadi

Shiraz University of Technology, Shiraz, Iran

---

## ABSTRACT

In this paper, a two-dimensional mathematical model was presented for the removal of CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>S in a polypropylene hollow fiber membrane contactor in the presence of MEA. Modeling was performed in both axial and radial directions under the dry condition for countercurrent gas-liquid flow arrangement. To evaluate the model, the results of this modeling were compared with experimental data of removal of CO<sub>2</sub> in the presence of water physical solvent and MEA chemical solvent. The results showed that the CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>S removal efficiency increased with the increase of the liquid flow rate, number of fibers, membrane length, and solvent concentration, but, decrease by increasing gas flow rate because of lower hold up time. It was also found that in low amine discharges, hydrogen sulfide is completely removed. Finally, the results showed that by increasing the wetting, the removal of these gases is reduced.

---

## ARTICLE INFO

Article history:

Received: February 10, 2018

Received in revised form: September 30, 2018

Accepted: November 6, 2018

---

### Key words:

Membrane Contactor

Hollow Fiber

MEA

Carbon Dioxide

Hydrogen Sulfide

Mathematical Modeling

All right reserved

---

\* Corresponding author  
talaghat@sutech.ac.ir