

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه اصفهان  
دانشکده فنی و مهندسی  
گروه مهندسی شیمی

پایان نامه ی کارشناسی ارشد رشته ی مهندسی شیمی

مدلسازی ریاضی و شبیه سازی جذب گاز CO<sub>2</sub> در راکتورهای دارای

جریان های برخوردی محوری

استادان راهنما:

دکتر امیر رحیمی

دکتر محمد رضا احسانی

پژوهشگر:

امیر حسین هرندی زاده

اسفند ماه ۱۳۸۷

۱۳۸۸ / ۴ / ۲

اداره خلاعات مدرک علمی بزن  
تهیه مدارک

۱۱۴۳۳۱

کلیه حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات،  
ابتکارات و نوآوری های ناشی از تحقیق موضوع  
این پایان نامه متعلق به دانشگاه اصفهان است.

شبهه نگارش پایان نامه  
رعایت شده است  
تخصصیات تکمیلی دانشگاه اصفهان



دانشگاه اصفهان

دانشکده فنی و مهندسی

گروه مهندسی شیمی

پایان نامه ی کارشناسی ارشد رشته ی مهندسی شیمی  
آقای امیر حسین هرندی زاده تحت عنوان

مدلسازی ریاضی و شبیه سازی جذب گاز CO<sub>2</sub> در راکتورهای دارای  
جریان های برخوردی محوری

در تاریخ ۱۳۸۷/۱۲/۵ توسط هیأت داوران زیر بررسی و با درجه عالی به تصویب نهایی رسید.

۱- استاد راهنمای پایان نامه دکتر امیر رحیمی با مرتبه ی علمی استادیار

۲- استاد راهنمای پایان نامه دکتر محمد رضا احسانی با مرتبه ی علمی دانشیار

۳- استاد داور داخل گروه دکتر محمد صادق حاتمی پور با مرتبه ی علمی استادیار

۴- استاد داور خارج از گروه دکتر ارجمند مهربانی با مرتبه ی علمی دانشیار

امضا  
۱۲/۱۲/۸۷

امضا

امضا

امضا

امضای مدیر گروه

دکتر علی رضا سلیمانی نظر

## سپاسگذاری:

پروردگار را شاکرم که به من قدرت تفکر و یادگیری عطا فرمود و به من فرصت داد تا در مسیر کسب علم گام بردارم.  
از پدر و مادر عزیزم که در تمام مراحل زندگی یاور و پشتیبان من بودند صمیمانه تشکر می‌کنم.  
از جناب دکتر امیر رحیمی و جناب آقای دکتر محمد رضا احسانی که در کلیه مراحل این پژوهش با صبر و شکیبایی مشوق و راهنمای من بودند کمال تشکر را دارم که بدون یاری این دو بزرگوار انجام این پژوهش هرگز میسر نمی‌گشت و برای این دو استاد ارجمند آرزوی سلامتی و موفقیت دارم.

تقدیم بہ پدر و مادرم

بہ خاطر مہربانی ہائیشان

## چکیده:

در این پژوهش، مدل‌سازی ریاضی و شبیه‌سازی جذب فیزیکی و واکنشی غیر همدمای گاز دی اکسید کربن در یک راکتور دارای جریان‌های برخوردی محوری مورد توجه قرار گرفته است. با استفاده از داده‌های توزیع زمان ماند، رفتار هیدرودینامیکی غیرایده‌ال این سیستم با آرایشی از سیستم‌های ایده‌ال نظیر مخزن همزده ایده‌ال و یا راکتور با جریان قالبی جایگزین و مورد مدل‌سازی ریاضی قرار گرفته است. از معادلات حاکم بر عملکرد این سیستم‌ها در قالب سه مدل مجزا شامل مدل‌های راکتور با جریان قالبی، مدل مخزن‌های همزده سری و آنالیز احتمال Markov-Chain جهت مدل‌سازی رفتار سیستم واقعی استفاده شده است. همچنین توزیع اندازه قطرات جهت دستیابی به مدل واقعی‌تر به جای استفاده از یک اندازه متوسط برای قطر قطره به کار برده شده است. مقایسه دقت نتایج حاصل از مدل‌ها با نتایج آزمایشگاهی گزارش شده حاکی از دقت قابل قبول مدل‌های پیشنهادی است. همچنین تاثیر پارامترهای عملیاتی بر میزان سرعت جذب و کسر مولی جزء جذب‌شونده در فاز گازی مورد بررسی و تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. از میان مدل‌های پیشنهادی در صورت وجود داده‌های توزیع زمان ماند مرتبط با شرایط عملیاتی، آنالیز احتمال Markov-Chain قابلیت توسعه و تطبیق بهتر با سیستم را از خود نشان می‌دهد. مدل همچنین به کمک مدل‌های پیش‌گفته جذب شیمیایی در این نوع سیستم‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. علاوه بر این مقایسه‌ای بین سیستم‌های متداول جذب با راکتورهای دارای جریان‌های برخوردی صورت گرفته و مزیت این سیستم‌ها در قالب ضرایب کلی انتقال جرم حجمی نشان داده شده است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد راکتورهای با جریان‌های برخوردی در مواردی که مقاومت انتقال جرم در فاز مایع باشد چندان نسبت به سیستم‌های متداول دارای برتری و مزیت نیستند و بالعکس در جذب‌هایی از قبیل جذب شیمیایی که در آن مقاومت انتقال جرم عمدتاً در فاز گاز می‌باشد از کارایی بسیار بهتری نسبت به سیستم‌های متداول برخوردارند.

کلمات کلیدی: راکتورهای دارای جریان‌های برخوردی، مدل‌سازی ریاضی، جذب گاز، غیر همدمای، ضریب انتقال

جرم حجمی

## فهرست مطالب

صفحه

عنوان

### فصل اول: آشنایی با اصول عملکرد، مزیت‌ها و کاربردهای راکتورهای دارای جریان‌های برخوردی

- ۱-۱) راکتورهای دارای جریان‌های برخوردی و ویژگی‌های آن‌ها..... ۲
- ۲-۱) بهینه‌سازی فرآیندها و اساس جریان‌های برخوردی..... ۳
- ۱-۲-۱) شاخص‌های راندمان در فرآیندهای انتقال..... ۳
- ۳-۱) طبقه‌بندی راکتورهای با جریان‌های برخوردی..... ۸
- ۴-۱) تئوری رفتار هیدرودینامیکی انواع جریان..... ۱۶
- ۱-۴-۱) جریان‌های برخوردی تکفاز..... ۱۶
- ۲-۴-۱) تئوری رفتار یک ذره مجزا..... ۱۷
- ۳-۴-۱) تئوری رفتار سیستم‌های چند ذره‌ای..... ۱۸
- ۵-۱) کاربردها و تحقیقات صورت گرفته بر روی راکتورهای دارای جریان برخوردی..... ۱۸
- ۱-۵-۱) فرآیندهای خشک کردن..... ۱۹
- ۲-۵-۱) فرآیندهای احتراق..... ۲۱
- ۳-۵-۱) فرآیندهای جامد - مایع..... ۲۲
- ۴-۵-۱) فرآیندهای گاز - جامد..... ۲۳
- ۵-۵-۱) فرآیندهای گاز - مایع..... ۲۴
- ۶-۵-۱) فرآیندهای مایع - مایع..... ۳۰

### فصل دوم: جذب گاز

- ۱-۲) عملیات جذب..... ۳۴
- ۱-۱-۲) مدل انتقال جرم دو فیلمی برای سیستم‌های گاز-مایع..... ۳۶



۳۸.....	۱-۱-۲ (۱-۱) معادله سرعت برای انتقال جرم یا جذب فیزیکی جزء A
۳۹.....	۲-۱-۲ (۲-۱) معادله سرعت برای انتقال جرم همراه با واکنش شیمیایی
۴۰.....	۳-۱-۲ (۳-۱) فاکتور پیشرفت واکنش
۴۰.....	۴-۱-۲ (۴-۱) طبقه‌بندی جذب همراه با واکنش بر اساس محل واکنش شیمیایی
۴۳.....	۵-۱-۲ (۵-۱) عدد هاتا معیاری برای تعیین ناحیه سینتیکی
۴۳.....	۲-۱-۲ (۲-۱) روابط مربوط به محاسبه فاکتور پیشرفت واکنش در حالت‌های مختلف از سرعت واکنش
۴۸.....	۲-۲ (۲-۲) جذب گاز به کمک جریان‌های برخوردی
۴۸.....	۱-۲-۲ (۱-۲-۲) تطبیق جریان‌های برخوردی برای سیستم‌های واکنشی گاز - مایع
۵۰.....	۲-۲-۲ (۲-۲-۲) تحقیقات اخیر
۵۰.....	۳-۲-۲ (۳-۲-۲) تجهیزات جذب
۵۰.....	۱-۳-۲-۲ (۱-۳-۲-۲) اتمایزر (افشانک)
۵۱.....	۲-۳-۲-۲ (۲-۳-۲-۲) ساختار محفظه جذب
۵۴.....	۴-۲-۲ (۴-۲-۲) نتایج مهم تحقیقات
۵۵.....	۱-۴-۲-۲ (۱-۴-۲-۲) مطالعات آزمایشگاهی جهت تایید افزایش شدت جذب با جریان‌های برخوردی
۵۵.....	۲-۴-۲-۲ (۲-۴-۲-۲) ضریب انتقال جرم
۵۶.....	۳-۴-۲-۲ (۳-۴-۲-۲) دیگر نتایج

### فصل سوم: مدلسازی ریاضی

۶۰.....	۱-۳ (۱-۳) مدلسازی ریاضی جذب فیزیکی
۶۱.....	۱-۱-۳ (۱-۱-۳) مدلسازی ریاضی بر مبنای مدل راکتور با جریان قالبی
۶۱.....	۱-۱-۱-۳ (۱-۱-۱-۳) معادله موازنه جرم جزئی برای جزء جذب‌شونده در فاز گاز

۲-۱-۱-۳	معادله موازنه انرژی برای فاز گاز	۶۳
۳-۱-۱-۳	معادله موازنه انرژی برای قطره مایع	۶۴
۴-۱-۱-۳	معادله تغییرات رطوبت گاز	۶۴
۵-۱-۱-۳	معادله تغییرات اندازه قطرات	۶۵
۶-۱-۱-۳	معادله موازنه جرم جزئی برای تجمع جزء جذب‌شونده در قطره مایع	۶۵
۷-۱-۱-۳	معادله موازنه مومنتوم برای قطره مایع	۶۵
۲-۱-۳	مدلسازی ریاضی بر مبنای مدل مخزن‌های همزده سری	۶۷
۱-۲-۱-۳	معادلات حاکم بر مدل مخزن‌های همزده سری	۶۷
۱-۱-۲-۱-۳	معادله موازنه جرم جزئی برای جزء جذب‌شونده در فاز گاز	۶۷
۲-۱-۲-۱-۳	معادله موازنه انرژی برای فاز گاز	۶۸
۳-۱-۲-۱-۳	معادله موازنه انرژی برای قطره مایع	۶۸
۴-۱-۲-۱-۳	معادله موازنه جرم برای رطوبت سیستم	۶۹
۵-۱-۲-۱-۳	معادله موازنه جرم برای قطره مایع	۶۹
۶-۱-۲-۱-۳	معادله موازنه جرم جزئی برای جزء جذب‌شونده تجمعی در قطره مایع	۶۹
۲-۲-۱-۳	کاربرد داده‌های زمان ماند برای تعیین پارامترهای مدل مخزن‌های همزده سری	۷۰
۳-۱-۳	مدلسازی ریاضی بر مبنای آنالیز احتمال Markov-Chain	۷۱
۱-۳-۱-۳	آنالیز احتمال Markov-Chain	۷۱
۲-۳-۱-۳	مفاهیم اصلی مدل Markov-Chain	۷۱
۳-۳-۱-۳	تابع احتمال برخورد قطرات	۷۴
۴-۳-۱-۳	رابطه‌ی بین بردارهای حالت Markov-Chain و RTD	۷۵

- ۳-۱-۳ کاربرد آنالیز احتمال Markov-Chain برای RTD راکتورهای دارای جریان های برخوردی..... ۷۷
- ۳-۱-۳ مدلسازی R و  $\Delta t$ ..... ۷۷
- ۳-۱-۳ معادلات حاکم در حالت استفاده از آنالیز احتمال Markov-Chain..... ۷۹
- ۳-۱-۳ کاربرد داده های زمان ماند برای تعیین پارامترهای آنالیز احتمال Markov-Chain..... ۸۱
- ۳-۲ مدلسازی ریاضی جذب شیمیایی..... ۸۱
- ۳-۲-۱ مدلسازی ریاضی بر مبنای مدل راکتور با جریان قالبی..... ۸۲
- ۳-۲-۱-۱ معادله موازنه جرم جزئی برای جزء جذب شونده در فاز گاز..... ۸۲
- ۳-۲-۲-۱ معادله موازنه انرژی برای فاز گاز..... ۸۳
- ۳-۲-۳ معادله موازنه انرژی برای قطره مایع..... ۸۴
- ۳-۲-۴ معادله موازنه مومنتوم برای قطره مایع..... ۸۴
- ۳-۲-۵ فاکتور پیشرفت واکنش..... ۸۵
- ۳-۲-۵-۱ جذب گاز در یک قطره کروی مایع..... ۸۵
- ۳-۲-۵-۲ جذب شیمیایی گاز در یک قطره کروی مایع..... ۸۸
- ۳-۲-۲ مدلسازی ریاضی بر مبنای مدل مخزن های همزده سری..... ۹۰
- ۳-۲-۲-۱ معادله موازنه جرم جزئی برای جزء جذب شونده در فاز گاز..... ۹۰
- ۳-۲-۲-۲ معادله موازنه انرژی برای فاز گاز..... ۹۰
- ۳-۲-۳ معادله موازنه انرژی برای قطره مایع..... ۹۱
- ۳-۲-۳ مدلسازی ریاضی بر مبنای آنالیز احتمال Markov-Chain..... ۹۱
- ۳-۳ تعیین پارامترهای به کار رفته در مدلسازی..... ۹۲
- ۳-۳-۱ توزیع اندازه قطرات..... ۹۲

## عنوان

## صفحه

- ۹۳ ..... ۲-۳-۳) ضرایب انتقال جرم و حرارت
- ۹۴ ..... ۳-۳-۳) سطح تماس موثر
- ۹۴ ..... ۴-۳-۳) ضریب دراگ
- ۹۵ ..... ۵-۳-۳) دانسیته محلول آمین
- ۹۵ ..... ۶-۳-۳) ویسکوزیته محلول آمین
- ۹۶ ..... ۷-۳-۳) ضریب نفوذ دی‌اکسیدکربن در محلول آمین
- ۹۷ ..... ۸-۳-۳) دانسیته مخلوط گازی
- ۹۷ ..... ۹-۳-۳) ویسکوزیته مخلوط گازی
- ۹۸ ..... ۱۰-۳-۳) ضریب نفوذ  $CO_2$  در مخلوط گازی
- ۹۹ ..... ۱۱-۳-۳) سینتیک واکنش
- ۱۰۰ ..... ۴-۳) حل مدل‌ها و محاسبات عددی

## فصل چهارم: نتایج

- ۱۰۲ ..... ۱-۴) تحلیل نتایج حاصل از داده‌های RTD جهت تعیین پارامترهای مدل مخزن‌های همزده سری
- ۱۰۳ ..... ۲-۴) تحلیل نتایج حاصل از داده‌های RTD جهت تعیین پارامترهای آنالیز احتمال Markov-Chain
- ۱۰۸ ..... ۳-۴) بررسی دقت مدل‌های ریاضی ارائه شده در حالت جذب فیزیکی
- ۱۱۴ ..... ۴-۴) بررسی دقت مدل‌های ریاضی ارائه شده در حالت جذب شیمیایی
- ۱۱۷ ..... ۵-۴) بررسی تاثیر پارامترهای عملیاتی بر عملکرد جذب‌کننده در حالت جذب فیزیکی
- ۱۲۳ ..... ۶-۴) بررسی تاثیر پارامترهای عملیاتی بر عملکرد جذب‌کننده در حالت جذب شیمیایی

## فصل پنجم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات

- ۱۲۵ ..... ۱-۵) نتیجه‌گیری

صفحه

عنوان

۱۲۶..... (۲-۵) پیشنهادات

۱۲۷..... منابع و مأخذ

## فهرست شکل‌ها

صفحه	عنوان
۲.....	شکل (۱-۱) اساس جریان‌های برخوردی (Tamir, 1994).....
۸.....	شکل (۲-۱) شاخص راندمان در سیستم الکتروشیمیایی SS و IS (Oren et al., 1992).....
۹.....	شکل (۳-۱) آرایش‌های مختلف راکتورهای با جریان‌های برخوردی (Tamir, 1994).....
	شکل (۴-۱) راکتور با جریان برخوردی متشکل از دو سطح برخورد متحرک
۱۳.....	(Elperin & Meltzer, 1975).....
۱۴.....	شکل (۵-۱) شماتیک راکتور با جریان‌های برخوردی به صورت افقی و چرخان (Kuts et al., 1974).....
۱۵.....	شکل (۶-۱) شماتیک راکتور با جریان‌های برخوردی به صورت عمودی و چرخان (Kuts et al., 1974).....
۱۶.....	شکل (۷-۱) شماتیک راکتورهای با جریان‌های برخوردی به صورت چند مرحله‌ای (Elperin, 1967).....
۱۷.....	شکل (۸-۱) مسیر حرکت ذره درون راکتور دارای جریان برخوردی به صورت محوری (Tamir, 1994).....
	شکل (۱-۲). شماتیک توزیع غلظت در مدل دو فیلمی برای انتقال جرم A از فاز گاز به مایع (بدون واکنش).....
۳۷.....	.....
	شکل (۲-۲). شماتیک توزیع غلظت در مدل دو فیلمی برای انتقال جرم A از فاز گاز به مایع (همراه با واکنش).....
۳۹.....	.....
۴۲.....	شکل (۳-۲). انواع سیستم‌های گاز-مایع همراه با واکنش شیمیایی (Leven Spiel, 1999).....
۴۳.....	شکل (۴-۲). شماتیک توزیع غلظت در مدل دو فیلمی برای واکنش در فیلم و توده مایع.....
۴۶.....	شکل (۵-۲). مقادیر فاکتور پیشرفت واکنش بر مبنای محاسبات عددی (Leven Spiel, 1999).....
۴۷.....	شکل (۶-۲). تماس‌دهنده‌های مخزن و برج جهت واکنش‌های گاز - مایع (Leven Spiel, 1999).....
۵۱.....	شکل (۷-۲). شماتیک اتمایزهای بادی (Tamir, 1994).....
۵۲.....	شکل (۸-۲). شماتیک جذب‌کننده‌های دارای دو جریان برخوردی (Tamir, 1994).....
۵۳.....	شکل (۹-۲). شماتیک جذب‌کننده‌ی حبابی دارای دو جریان برخوردی (Tamir et al., 1990).....
۵۴.....	شکل (۱۰-۲). شماتیک راکتور حلقه‌ای دارای جریان برخوردی (Gaddis & Vogelwohl, 1992).....
۵۸.....	شکل (۱-۳). شماتیک جذب‌کننده دارای جریان‌های برخوردی محوری.....
	شکل (۲-۳) مسیر فرضی حرکت قطره درون راکتور دارای جریان‌های برخوردی محوری جهت مدلسازی فرآیند.....
۵۹.....	.....

- شکل (۳-۳). شماتیک دو جذب کننده تک جریانی..... ۶۰
- شکل (۴-۳). آرایش مخازن جایگزین جذب کننده دارای جریان های برخوردی با آرایش مخزن های همزده  
سری..... ۶۷
- شکل (۵-۳). شماتیک یک مخزن همزده سری..... ۷۵
- شکل (۶-۳). شماتیک جذب گاز در یک قطره کروی..... ۸۵
- شکل (۱-۴). مقایسه زمان ماند تجربی قطرات در جذب کننده دارای جریان های برخوردی محوری  
(Sohrabi & Jamshidi, 1997) با مدل مخزن های همزده سری ..... ۱۰۲
- شکل (۲-۴). نمونه ای از آرایش های انتخابی آنالیز Markov-Chain جهت مقایسه RTD این آرایش ها با  
داده های تجربی RTD..... ۱۰۴
- شکل (۳-۴). مقایسه زمان ماند تجربی قطرات در جذب کننده دارای جریان های برخوردی محوری  
(Sohrabi & Jamshidi, 1997) با زمان ماند منتج از آرایش منتخب مربوط به آنالیز Markov-Chain..... ۱۰۶
- شکل (۴-۴). تاثیر پارامتر R بر غلظت ردیاب در مخازن موجود در آرایش منتخب مربوط به آنالیز احتمال  
Markov-Chain..... ۱۰۷
- شکل (۵-۴). بررسی تاثیر طول دستگاه جذب کننده بر میزان سرعت جذب گاز (a) جذب CO<sub>2</sub> در آب  
و (b) جذب استون در آب..... ۱۱۰
- شکل (۶-۴). بررسی تاثیر سرعت جریان های گاز و مایع بر میزان سرعت جذب گاز و مقایسه نتایج مدل  
با نتایج آزمایشگاهی (Tamir, 1986; Tamir & Herskowits, 1985)..... ۱۱۱
- شکل (۷-۴). بررسی تاثیر سرعت جریان های گاز و مایع بر میزان سرعت جذب گاز CO<sub>2</sub> در جذب کننده  
تک جریانی و مقایسه نتایج مدل با نتایج آزمایشگاهی (Tamir & Herskowits, 1985)..... ۱۱۳
- شکل (۸-۴). بررسی شدت تقویت سرعت جذب گاز CO<sub>2</sub> در سیستم دارای دو جریان برخوردی و مقایسه  
نتایج مدل با نتایج آزمایشگاهی (Tamir & Herskowits, 1985)..... ۱۱۴
- شکل (۹-۴). بررسی تاثیر سرعت جریان گاز بر میزان درصد تبدیل محلول آبی MEA با انواع مدل ها و  
مقایسه با نتایج تجربی (Sohrabi & Jamshidi, 1997)..... ۱۱۵
- شکل (۱۰-۴). بررسی تاثیر طول دستگاه جذب کننده بر میزان درصد تبدیل محلول آبی MEA با انواع  
مدل ها و مقایسه با نتایج تجربی (Sohrabi & Jamshidi, 1997)..... ۱۱۶

- شکل (۴-۱۱). تغییرات سرعت قطره بر حسب زمان و طول دستگاه بر مبنای شبیه‌سازی مدل راکتور با جریان قالبی..... ۱۱۸
- شکل (۴-۱۲). تغییرات دمای گاز بر حسب زمان..... ۱۱۹
- شکل (۴-۱۳). تغییرات رطوبت گاز بر حسب زمان..... ۱۱۹
- شکل (۴-۱۴). بررسی تاثیر سرعت گاز بر جزء مولی نهایی  $CO_2$  در فاز گاز بر مبنای شبیه‌سازی مدل راکتور با جریان قالبی..... ۱۲۰
- شکل (۴-۱۵). بررسی تاثیر دمای گاز بر جزء مولی نهایی  $CO_2$  در فاز گاز بر مبنای شبیه‌سازی مدل راکتور با جریان قالبی..... ۱۲۱
- شکل (۴-۱۶). نحوه تغییرات ضریب انتقال حرارت قطره در طول دستگاه بر مبنای شبیه‌سازی مدل راکتور با جریان قالبی..... ۱۲۲
- شکل (۴-۱۷). نحوه تغییرات ضریب انتقال جرم قطره در طول دستگاه بر مبنای شبیه‌سازی مدل راکتور با جریان قالبی..... ۱۲۲
- شکل (۴-۱۸). تغییرات دمای گاز و قطرات بر حسب زمان بر مبنای شبیه‌سازی مدل راکتور با جریان قالبی..... ۱۲۳
- شکل (۴-۱۹). تغییرات درصد تبدیل قطره محلول آبی MEA در طول دستگاه بر مبنای شبیه‌سازی مدل راکتور با جریان قالبی..... ۱۲۴



## فهرست جدول‌ها

صفحه	عنوان
۲۰	جدول (۱-۱) مقایسه بین انواع خشک‌کن و ISD.....
۲۷	جدول (۲-۱) ضرائب انتقال جرم برای جذب‌کننده‌های مختلف.....
۲۹	جدول (۳-۱) توان ورودی برای جذب‌کننده‌های مختلف.....
۳۰	جدول (۴-۱) مقایسه دستگاه‌های ایجادکننده‌ی امولسیون.....
۳۲	جدول (۵-۱) ضرائب انتقال جرم برای استخراج‌کننده‌های مختلف.....
۳۳	جدول (۶-۱) توان ورودی در استخراج‌کننده‌های مختلف.....
۴۷	جدول (۱-۲). خصوصیات تماس‌دهنده‌های گاز - مایع (Leven Spiel, 1999).....
۴۹	جدول (۲-۲). خصوصیات واکنش‌ها در فاز مایع با مقادیر متنوع Ha.....
۵۶	جدول (۳-۲). ضرائب انتقال جرم حجمی در جذب‌کننده‌های دارای دو جریان برخوردی.....
۸۰	جدول (۱-۳). معادلات حاکم بر آنالیز احتمال Markov-Chain جهت فیزیکی.....
۹۲	جدول (۲-۳). معادلات حاکم بر آنالیز احتمال Markov-Chain جهت جذب شیمیایی.....
۹۵	جدول (۳-۳). مقادیر $V_i$ و $b_i$ برای MEA و آب.....
۱۰۵	جدول (۱-۴). ماتریس‌های احتمال گذر آرایش‌های شکل (۲-۴).....
۱۰۹	جدول (۲-۴). بررسی تاثیر طول دستگاه جذب‌کننده بر میزان سرعت جذب $CO_2$ .....
۱۱۲	جدول (۳-۴). بررسی تاثیر سرعت جریان‌های گاز و مایع بر میزان سرعت جذب گاز $CO_2$ و مقایسه نتایج مدل‌ها با نتایج آزمایشگاهی (Tamir & Herskowits, 1985).....
۱۱۷	جدول (۴-۴). سطح بین‌فازی فازهای گاز و مایع در جذب واکنشی گاز $CO_2$ و محلول آبی MEA.....

علائم:

$m^2 / s$	شتاب حرکت قطره	$\bar{a}_e$
$m^2$	سطح تصویر قطره	$A_D$
$m^2$	سطح کل قطرات کلاس i ام	$A_{Di}$
$Kmol / m^3$	غلظت	$C$
-	ضریب دراگ	$C_F$
$J / kg \cdot ^\circ C$	گرمای ویژه مخلوط گاز	$C_S$
$J / kg \cdot ^\circ C$	گرمای ویژه گاز	$C_{PB}$
$J / kg \cdot ^\circ C$	گرمای ویژه قطره	$C_{PD}$
$m^2 / s$	ضریب نفوذ A در فاز گاز	$D_{Ag}$
$m^2 / s$	ضریب نفوذ A در فاز مایع	$D_{AL}$
$m$	قطر جذب کننده	$D_{Cell}$
$m$	قطر قطره کلاس i ام	$D_i$
$m$	قطر اولیه قطره کلاس i ام	$D_{ii}$
-	فاکتور پیشرفت واکنش	$E$
$Kg \text{ mol gas} / s$	دبی گاز	$G$
$Kg \text{ dry gas} / s$	دبی گاز خشک	$G'_y$
$W / m^2 \cdot ^\circ C$	ضریب انتقال حرارت قطره کلاس i ام	$h_{Di}$
$J / Kg \text{ dry gas}$	آنتالپی	$H$
$\text{bar} / \text{mole fraction}$	ثابت هنری	$H_A$
$Kg \text{ vapor} / Kg \text{ dry gas}$	رطوبت	$H_u$
-	شاخص تقویت انتقال حرارت	$I_{heat}$
-	شاخص تقویت انتقال جرم	$I_{mass}$
$\text{mol} / m^2 \cdot s$	ضریب انتقال جرم در فاز گاز جهت تبخیر	$k_y$
$\text{mol} / m^2 \cdot s$	ضریب انتقال جرم در فاز گاز جهت جذب	$k_{yB}$
$W / m \cdot ^\circ C$	ضریب انتقال حرارت هدایتی	$k'_a$
$m / s$	ضریب انتقال جرم در فاز مایع	$k_L$
$m / s$	ضریب کلی انتقال جرم حجمی در طرف مایع	$K_L$

m/s	ضریب انتقال جرم در فاز گاز	$k_G$
m/s	ضریب کلی انتقال جرم حجمی در طرف گاز	$K_G$
m	فاصله بین دو نازل	L
kg	جرم قطره نام	$m_{Di}$
Kg / Kgmol	جرم مولکولی	M
-	تعداد دسته اندازه قطرات	N
Kmol / m <sup>2</sup> .s	شار جذب از قطره کلاس نام	$N_{Ai}$
Kmol / m <sup>2</sup> .s	شار تبخیر در قطره کلاس نام	$N_{Bi}$
bar	فشار جزئی اشباع CO <sub>2</sub> در سطح قطره	$P_B^*$
-	درصد حجمی کلاس نام قطرات	$P_i$
bar	فشار هوا	$P_t$
m <sup>3</sup> / s	سرعت جریان هوا	$Q_{air}$
m <sup>3</sup> / s	سرعت جریان گاز	$Q_g$
Kg / s	دبی جرمی آب	$Q_w$
m <sup>3</sup> / s	دبی حجمی آب	$Q'_w$
Kmol / s	سرعت جذب گاز در سیستم دو جریان برخوردی	$R_1$
Kmol / s	سرعت جذب گاز در سیستم تک جریانی	$R_2$
s	زمان متوسط بین برخوردهای موفق	$t_m$
s	زمان ماند متوسط	$\bar{t}$
K	دمای مینا	$T_O$
K	دمای قطره کلاس نام	$T_{Di}$
K	دمای گاز	$T_g$
m / s	سرعت هوا	$V_a$
m / s	سرعت قطره نام	$V_{Di}$
m <sup>3</sup>	حجم جذب کننده	$V_r$
Kg/s	دبی جرمی مایع	$W_D$
kgmol / kg	جزء مولی جزء جذب شونده در قطره بر مبنای جرم قطره	$x_A$
-	جزء مولی جزء جذب شونده در قطره	$X_A$
-	کسر مولی جزء جذب شونده در فاز گاز	$y_A$
-	کسر مولی رطوبت در فاز گاز	$y_B$
-	جزء مولی اشباع جزء جذب شونده در سطح قطره در فاز گاز	$y_A^*$

-	کسر مولی بخار اشباع جزء جذب شونده در حال تعادل روی سطح قطره	$y_B^*$
m	طول جذب کننده با جریان های برخوردی	$z$
-	تعداد قطرات	$Z$
-	تعداد قطرات اولیه	$Z_0$

### علائم اختصاری یونانی:

-	تابع توزیع حجمی فرکانسی	$f(D)$
$kg/m^3$	چگالی هوا	$\rho_a$
$kg/m^3$	چگالی مایع	$\rho_L$
$^{\circ}C$	گرادیان دما	$\Delta T$
$Ns/m^2$	ویسکوزیته گاز	$\mu_a$
$m^2/s$	ویسکوزیته سینماتیک فاز گاز	$\nu_a$
$kJ/kg$	گرمای نهان تبخیر	$\lambda_o$
$s^2$	واریانس	$\sigma^2$

### اعداد بدون بعد:

-	عدد اولر	Eu
-	عدد هاتا	Ha
-	عدد پرانتل	Pr
-	عدد رینولدز	Re
-	عدد اشمیت	Sc
-	عدد شروود	Sh

### زیروندها:

A	ماده جذب شونده
B	ماده جذب کننده
o	حالت مرجع
i	کلاس نام