بسم الله الرحمن الرحيم

**دانشگاه صنعتی شیراز**

**دانشکده مهندسی شیمی گروه مهندسی شیمی**

**پایان نامه کارشناسی ارشد**

**در رشته مهندسی شیمی و گرایش مهندسی شیمی**

# جداسازی گاز دی اکسید کربن از مخلوط گازها (متان –دی اکسید کربن و نیتروژن –دی اکسید کربن) بوسیله ی آمین ها(MEA-DEA-MDEA-AMP)و مخلوط آن ها با استفاده از تماس دهنده ی غشایی فیبر توخالی پلی پروپیلن

**نگارش:**

**احمد رضا بهمنی**

**استاد راهنما:**

**دکتر محمد رضا طلاقت**

**شهریور ماه ۱۳۹۳**

**بسمه تعالی**

# جداسازی گاز دی اکسید کربن از مخلوط گازها(متان –دی اکسید کربن و نیتروژن – دی اکسید کربن) بوسیله ی آمین ها (MEA-DEA-MDEA-AMP) و مخلوط آن ها با استفاده از تماس دهنده ی غشایی فیبر توخالی پلی پروپیلن

**پایان نامه ارائه شده به عنوان بخشی از فعالیتهای تحصیلی**

**نگارش:**

**احمد رضا بهمنی**

**برای اخذ درجه کارشناسی ارشد**

**گروه مهندسی شیمی، دانشکده مهندسی شیمی، نفت و گاز**
**دانشگاه صنعتی شیراز**

**ارزیابی پایان نامه توسط هیات داوران با درجه: عالی**

دکتر محمد رضا طلاقت ، استادیار مهندسی شیمی (استاد راهنما ).....

دکتر فاطمه سبزی، استادیار شیمی فیزیک (استاد مشاور).....

دکتر جعفر جوانمردی، دانشیار مهندسی شیمی (داور).....

---

مدیر امور آموزشی و تحصیلات تکمیلی دانشگاه : دکتر اکبر رهیده

---

حق چاپ محفوظ و مخصوص به دانشگاه صنعتی شیراز است.

# تأییدیه‌ی صحت و اصالت نتایج

اینجانب احمد رضا بهمنی دانشجوی رشته مهندسی شیمی مقطع تحصیلی کارشناسی ارشد به شماره دانشجویی ۹۱۱۲۴۰۰۱ تأیید می نماید کلیه نتایج این پایان نامه/رساله، بدون هیچگونه دخل و تصرف ، حاصل مستقیم پژوهش صورت گرفته توسط اینجانب است. در مورد اقتباس مستقیم و غیر مستقیم از سایر آثار علمی، اعم از کتاب، مقاله، پایان نامه با رعایت امانت و اخلاق علمی، مشخصات کامل منبع مذکور درج شده است.

در صورت اثبات خلاف مندرجات فوق، به تشخیص مقامات ذی صلاح دانشگاه صنعتی شیراز، مطابق قوانین و مقررات مربوط و آئین نامه های آموزشی، پژوهشی و انضباطی عمل خواهد شد و اینجانب حق هرگونه اعتراض و تجدیدنظر را، نسبت به رأی صادره، از خود ساقط می کند. همچنین، هرگونه مسئولیت ناشی از تخلف نسبت به صحت و اصالت نتایج مندرج در پایان نامه/رساله در برابر اشخاص ذی نفع (اعم از حقیقی و حقوقی) و مراجع ذی صلاح (اعم از اداری و قضایی) متوجه اینجانب خواهد بود و دانشگاه صنعتی شیراز هیچ گونه مسئولیتی دراین زمینه نخواهند داشت.

**تبصره ۱- کلیه حقوق مادی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شیراز است.**

**تبصره ۲- اینجانب تعهد می نماید بدون اخذ مجوز از دانشگاه صنعتی شیراز دستاوردهای این پایان نامه/ رساله را منتشر نکند و یا در اختیار دیگران قرار ندهد.**

نام و نام خانوادگی دانشجو: احمد رضا بهمنی

تاریخ و امضاء

# مجوز بهره‌برداری از پایان‌نامه

کلیه حقوق مادی و معنوی مترتب بر نتایج پایان نامه متعلق به دانشگاه و انتشار نتایج نیز تابع مقرارت دانشگاهی است و با موافقت استاد راهنما به شرح زیر، بلامانع است:

☐ بهره‌برداری از این پایان‌نامه/ رساله برای همگان بلامانع است.

☐ بهره‌برداری از این پایان‌نامه/ رساله با اخذ مجوز از استاد راهنما، بلامانع است.

☐ بهره‌برداری از این پایان‌نامه/ رساله تا تاریخ ..... ممنوع است.

نام استاد راهنما: دکتر محمد رضا طلاقت

تاریخ:

امضا:

تقدیم به: (اختیاری)

.....

تشکر و قدردانی:

با سپاس فراوان از راهنمایی‌ها و زحمات استاد محترم و گران‌قدر جناب آقای دکتر طلاقت که از ابتدای راه و در طی انجام این تحقیق، با راهنمایی‌های خود مرا در نگارش این اثر یاری نمودند و همچنین قدردانی و تقدیر از استاد بزرگوار، سرکار خانم دکتر سبزی استاد محترم مشاور که با هدایت و حمایت‌های بی‌دریغشان یاری‌ام نمودند.

چکیده

# جداسازی گاز دی اکسید کربن از مخلوط گازها(متان – دی اکسید کربن و نیتروژن- دی اکسید کربن) بوسیله ی آمین‌ها(MEA-DEA-MDEA-AMP)و مخلوط آن‌ها با استفاده از تماس دهنده‌ی غشایی فیبر توخالی پلی‌پروپیلن


بوسیله:

احمد رضا بهمنی



هدف اصـــلی از این تحقیق شـــبیه ســـازی جذب دی اکســـید کربن از مخلوط‌های گازی $CO_2/N_2$ و $CO_2/CH_4$ توســـط تماس دهنده‌ی غشـــایی فیبر توخالی پلی‌پروپیلن با اســـتفاده از محلول‌هـای آبی N-متیل دی اتانول آمین (MDEA)، ۲-آمین-۲-متیل-۱-پروپانول (AMP)، دی اتانول آمین (DEA)، منواتانول آمین (MEA) و مخلوطی از آن‌ها می‌باشـد. شبیه سازی بر مبنای شرایط کاملاً مرطوب برای جریان متقاطع گاز-مایع توسط نرم افزار COMSOL (ورژن ۲۰۱۲) صـورت گرفته است. فرایند نفوذ واکنشی در فاز مایع صورت گرفته است. در این شبیه سـازی هر دو ترم نفوذ محوری و شـعاعی در هر سـه قسمت مجرا، غشاء و پوسته مورد بررسی قرار گرفته اسـت. نتایج این شبیه‌سازی نیز نشان می‌دهد که محلول آبی خالص MEA از سایر محلول‌های آبی برای جذب $CO_2$ مناسب تر می‌باشد. همچنین نتایج حاصل نشان می‌دهد که با اضـــافه کردن MEA به محلول MDEA و AMP به محلول DEA ســـرعت جذب دی اکســـید کربن افزایش می‌یابد. نتایج این شبیه‌سازی نیز نشان می‌دهد که میزان جذب دی اکسید کربن با افزایش دبی جریان مایع، تعداد فیبرها، طول غشـــاء، غلظت حلال و نســـبت تخلخل به انحنا افزایش می‌یـابـد. امـا با افزایش دبی جریان گاز حذف $CO_2$ به علت کاهش زمان تماس کاهش می‌یابد. به علاوه مقایسه بین نتایج حاصل از محاسبات و داده‌های تجربی نشان می‌دهد که این مدل تطابق خوبی با داده‌های تجربی دارد.



**واژه‌هـــای کلیـــدی:** تماس دهنده‌ی غشـــایی فیبر توخالی، جذب، $CO_2$، AMP، DEA، MEA، MDEA و شبیه‌سازی

فهرست مطالب

**۱.فصل اول: مقدمه** **۱**

۱-۱- پیشگفتار..... ۲

۱-۲- روش های جداسازی..... ۳

۱-۲-۱- جداسازی به روش های مکانیکی..... ۳

۱-۲-۲- جداسازی براساس روش‌های انتقال جرم..... ۳

۱-۲-۲-۱-تماس مستقیم دو فاز غیر قابل امتزاج..... ۴

۱-۲-۲-۲-تماس مستقیم دو فاز قابل امتزاج..... ۸

۱-۲-۲-۳-استفاده از پدیده ی کشش سطحی..... ۸

۱-۲-۲-۴-جداسازی فازها با استفاده از غشاء..... ۹

۱-۲-۲-۴-۱-تقسیم بندی غشاها..... ۱۱

۱-۲-۲-۴-۱-۱- تقسیم بندی براساس مکانیسم حاکم بر جداسازی..... ۱۱

۱-۲-۲-۴-۱-۲- تقسیم بندی براساس جنس غشاء..... ۱۹

۱-۲-۲-۴- ۱-۳-تقسیم بندی براساس شکل هندسی غشاء..... ۲۳

۱-۲-۲-۴- ۱-۴-تقسیم بندی براساس ساختار غشاء..... ۲۵

۱-۲-۲-۴-۳-مشکلات کاربرد غشاها..... ۲۶

**۲.فصل دوم: مروری بر تحقیقات انجام شده** **۲۷**

۲-۱- مقدمه..... ۲۸

۲-۲-مطالعات انجام شده بر روی جذب دی اکسید کربن توسط غشاها..... ۲۹

**۳.فصل سوم: مدل سازی ریاضی جذب دی اکسید کربن** **۳٤**

۳-۱- مدل سازی ریاضی ..... ۳۵

۳-۱-۲- مدل سازی قسمت پوسته ..... ۳۷

۳-۱-۳- مدل سازی قسمت غشاء ..... ۳۸

۳-۱-۴- مدل سازی قسمت مجرا..... ۳۹

۳-۲- مکانیسم واکنش $CO_2$ با آمین‌ها ..... ۴۰

۳-۳- خواص فیزیکی و شیمیایی ..... ۴۵

۳-۴- حل عددی معادلات حاکم ..... ۴۸

۳-۴-۱- روش المان محدود..... ۴۸

۳-۴-۲- انتگرال وزنی و تشکیل روابط ضعیف..... ۴۹

۳-۴-۳-روش تغییراتی و باقیمانده وزنی ..... ۵۰

۳-۴-۴-روش گالرکین ..... ۵۳
۳-۵-روش خط ..... ۵۵
۳-۶-تحلیل نرم افزار COMSOL Multiphysics ..... ۵۶

**٤.فصل چهارم: نتایج شبیه سازی و تفسیر آنها** **۵۸**
۴-۱- اعتبار سازی ..... ۵۹
۴-۲- مخلوط گازی $CO_2/N_2$ ..... ۶۱
۴-۳- مخلوط گازی $CO_2/CH_4$ ..... ۶۷
۴-۴-جذب $CO_2$ از مخلوط $CO_2/CH4$ توسط مخلوط آمین ها ..... ۷۴
۴-۵-جذب $CO_2$ از مخلوط $CO_2/N_2$ توسط مخلوط آمین ها ..... ۸۷

**۵.فصل پنجم: جمع‌بندی و پیشنهادها** **۱۰۰**
۵-۱- بحث و نتیجه‌گیری ..... ۱۰۱
۵-۲- پیشنهادها ..... ۱۰۱

**٦.مراجع** **۱۰۳**

فهرست شکل‌ها

**شکل (۱-۱)** کلی‌ترین فرایند غشایی ..... ۱۱
**شکل (۱-۲)** میکروفیلتراسیون ..... ۱۲
**شکل (۱-۳)** اولترافیلتراسیون ..... ۱۳
**شکل (۱-٤)** نانوفیلتراسیون ..... ۱۴
**شکل (۱-۵)** جداسازی اسمز معکوس ..... ۱۵
**شکل (۱-۶)** فرایند الکترودیالیز ..... ۱۶
**شکل (۱-۷)** فرایند جداسازی گاز ..... ۱۷
**شکل (۱-۸)** فرایند تراوش تبخیری ..... ۱۸
**شکل (۱-۹)** نمونه‌ای از غشای پلیمری ..... ۱۹
**شکل (۱-۱۰)** نمونه‌ای از غشای سرامیکی ..... ۲۱
**شکل (۱-۱۱)** نمونه‌ای از غشای فلزی ..... ۲۲
**شکل (۱-۱۲)** نمونه‌ای از غشای مارپیچی ..... ۲۳
**شکل (۱-۱۳)** نمونه‌ای از غشای الیاف میان‌تهی ..... ۲۴
**شکل (۱-۱٤)** نمونه‌ای از غشای صفحه‌ای ..... ۲۴
**شکل (۱-۱۵)** نمونه‌ای از غشای لوله‌ای ..... ۲۵
**شکل (۳-۱)** شماتیکی از تماس دهنده‌ی غشایی فیبر توخالی ..... ۳۵
**شکل (۳-۲)** المان حجمی در مختصات استوانه‌ای ..... ۳۶
**شکل (۳-۳)** ساختار شیمیایی آمین‌ها ..... ۴۱
**شکل (٤-۱)** اعتبار سازی شبیه سازی با داده های تجربی ..... ۶۰
**شکل (٤-۲)** اعتبار سازی شبیه سازی با داده های تجربی ..... ۶۰
**شکل (٤-۳)** کانتور توزیع غلظت دی اکسید کربن به غلظت اولیه آن (C/Co) در تماس دهنده‌ی فیبر توخالی برای جذب $CO_2$ در حضور محلول MEA ..... ۶۱
**شکل (٤-٤)** کانتور توزیع غلظت دی اکسید کربن به غلظت اولیه آن (C/Co) در تماس دهنده‌ی فیبر توخالی برای جذب $CO_2$ در حضور محلول AMP ..... ۶۲

**شکل (٤-٥)** کانتور توزیع غلظت دی اکسید کربن به غلظت اولیه آن (C/Co) در تماس دهنده‌ی فیبر توخالی برای جذب $CO_2$ در حضور محلول DEA ..... ۶۲
**شکل (٤-۶)** کانتور توزیع غلظت دی اکسید کربن به غلظت اولیه آن (C/Co) در تماس دهنده‌ی فیبر توخالی برای جذب $CO_2$ در حضور محلول MDEA ..... ۶۳
**شکل (٤-۷)** تاثیر دبی جریان گاز بر روی غلظت خروجی $CO_2$ در تماس دهنده‌ی فیبر توخالی ..... ۶۳
**شکل (٤-۸)** تاثیر دبی جریان مایع بر روی غلظت خروجی $CO_2$ در تماس دهنده‌ی فیبر توخالی ..... ۶۴
**شکل (٤-۹)** تاثیر تعداد فیبرها بر روی غلظت خروجی $CO_2$ در تماس دهنده‌ی فیبر توخالی ..... ۶۵
**شکل (٤-۱۰)** تاثیر نسبت تخلخل به انحنا بر روی غلظت خروجی $CO_2$ در تماس دهنده‌ی فیبر توخالی ..... ۶۵
**شکل (٤-۱۱)** تاثیر طول غشاء بر روی غلظت خروجی $CO_2$ در تماس دهنده‌ی فیبر توخالی ..... ۶۶
**شکل (٤-۱۲)** تاثیر غلظت حلال بر روی غلظت خروجی $CO_2$ در تماس دهنده‌ی فیبر توخالی ..... ۶۶
**شکل (٤-۱۳)** کانتور توزیع غلظت دی اکسید کربن به غلظت اولیه آن (C/Co) در تماس دهنده‌ی فیبر توخالی برای جذب $CO_2$ در حضور محلول MEA ..... ۶۸
**شکل (٤-۱٤)** کانتور توزیع غلظت دی اکسید کربن به غلظت اولیه آن (C/Co) در تماس دهنده‌ی فیبر توخالی برای جذب $CO_2$ در حضور محلول AMP ..... ۶۸
**شکل (٤-۱۵)** کانتور توزیع غلظت دی اکسید کربن به غلظت اولیه آن (C/Co) در تماس دهنده‌ی فیبر توخالی برای جذب $CO_2$ در حضور محلول DEA ..... ۶۹
**شکل (٤-۱۶)** کانتور توزیع غلظت دی اکسید کربن به غلظت اولیه آن (C/Co) در تماس دهنده‌ی فیبر توخالی برای جذب $CO_2$ در حضور محلول MDEA ..... ۶۹
**شکل (٤-۱۷)** تاثیر دبی جریان گاز بر روی غلظت خروجی $CO_2$ در تماس دهنده‌ی فیبر توخالی ..... ۷۰
**شکل (٤-۱۸)** تاثیر دبی جریان مایع بر روی غلظت خروجی $CO_2$ در تماس دهنده‌ی فیبر توخالی ..... ۷۱

**شکل (٤-١٩)** تاثیر تعداد فیبرها بر روی غلظت خروجی $CO_2$ در تماس دهنده‌ی فیبر توخالی ..... ٧١
**شکل (٤-٢٠)** تاثیر نسبت تخلخل به انحنا بر روی غلظت خروجی $CO_2$ در تماس دهنده‌ی فیبر توخالی ..... ٧٢
**شکل (٤-٢١)** تاثیر طول غشاء بر روی غلظت خروجی $CO_2$ در تماس دهنده‌ی فیبر توخالی ..... ٧٣
**شکل (٤-٢٢)** تاثیر غلظت حلال بر روی غلظت خروجی $CO_2$ در تماس دهنده‌ی فیبر توخالی ..... ٧٣
**شکل (٤-٢٣)** کانتور توزیع غلظت دی اکسید کربن به غلظت اولیه آن (C/Co) در تماس دهنده‌ی فیبر توخالی برای جذب $CO_2$ در حضور محلول 30wt% MDEA ..... ٧٥
**شکل (٤-٢٤)** کانتور توزیع غلظت دی اکسید کربن به غلظت اولیه آن (C/Co) در تماس دهنده‌ی فیبر توخالی برای جذب $CO_2$ در حضور محلول 28.5wt% MDEA+1.5wt% MEA ..... ٧٦
**شکل (٤-٢٥)** کانتور توزیع غلظت دی اکسید کربن به غلظت اولیه آن (C/Co) در تماس دهنده‌ی فیبر توخالی برای جذب $CO_2$ در حضور محلول 27wt% MDEA+3wt% MEA .. ٧٦
**شکل (٤-٢٦)** کانتور توزیع غلظت دی اکسید کربن به غلظت اولیه آن (C/Co) در تماس دهنده‌ی فیبر توخالی برای جذب $CO_2$ در حضور محلول 25.5wt% MDEA+4.5wt% MEA ..... ٧٧
**شکل (٤-٢٧)** کانتور توزیع غلظت دی اکسید کربن به غلظت اولیه آن (C/Co) در تماس دهنده‌ی فیبر توخالی برای جذب $CO_2$ در حضور محلول 21wt% MDEA+9wt% MEA .. ٧٧
**شکل (٤-٢٨)** کانتور توزیع غلظت دی اکسید کربن به غلظت اولیه آن (C/Co) در تماس دهنده‌ی فیبر توخالی برای جذب $CO_2$ در حضور محلول 15wt% MDEA+15wt% MEA ٧٨
**شکل (٤-٢٩)** کانتور توزیع غلظت دی اکسید کربن به غلظت اولیه آن (C/Co) در تماس دهنده‌ی فیبر توخالی برای جذب $CO_2$ در حضور محلول 9wt% MDEA+21wt% MEA .. ٧٨
**شکل (٤-٣٠)** کانتور توزیع غلظت دی اکسید کربن به غلظت اولیه آن (C/Co) در تماس دهنده‌ی فیبر توخالی برای جذب $CO_2$ در حضور محلول 30wt% MEA ..... ٧٩
**شکل (٤-٣١)** کانتور توزیع غلظت دی اکسید کربن به غلظت اولیه آن (C/Co) در تماس دهنده‌ی فیبر توخالی برای جذب $CO_2$ در حضور محلول 30wt% DEA ..... ٧٩

**شکل (٤-٣٢)** کانتور توزیع غلظت دی اکسید کربن به غلظت اولیه آن (C/Co) در تماس دهنده‌ی فیبر توخالی برای جذب $CO_2$ در حضور محلول 4.5wt% AMP+25.5Wt% DEA ..... ٨٠
**شکل (٤-٣٣)** کانتور توزیع غلظت دی اکسید کربن به غلظت اولیه آن (C/Co) در تماس دهنده‌ی فیبر توخالی برای جذب $CO_2$ در حضور محلول 21wt% AMP+9Wt% DEA..... ٨٠
**شکل (٤-٣٤)** کانتور توزیع غلظت دی اکسید کربن به غلظت اولیه آن (C/Co) در تماس دهنده‌ی فیبر توخالی برای جذب $CO_2$ در حضور محلول 30wt% AMP..... ٨١
**شکل (٤-٣٥)** تاثیر دبی جریان گاز بر روی غلظت خروجی $CO_2$ در تماس دهنده‌ی فیبر توخالی ..... ٨٢
**شکل (٤-٣٦)** تاثیر دبی جریان گاز بر روی غلظت خروجی $CO_2$ در تماس دهنده‌ی فیبر توخالی ..... ٨٢
**شکل (٤-٣٧)** تاثیر دبی جریان مایع بر روی غلظت خروجی $CO_2$ در تماس دهنده‌ی فیبر توخالی ..... ٨٣
**شکل (٤-٣٨)** تاثیر دبی جریان مایع بر روی غلظت خروجی $CO_2$ در تماس دهنده‌ی فیبر توخالی ..... ٨٣
**شکل (٤-٣٩)** تاثیر تعداد فیبرها بر روی غلظت خروجی $CO_2$ در تماس دهنده‌ی فیبر توخالی ..... ٨٤
**شکل (٤-٤٠)** تاثیر تعداد فیبرها بر روی غلظت خروجی $CO_2$ در تماس دهنده‌ی فیبر توخالی ..... ٨٤
**شکل (٤-٤١)** تاثیر نسبت تخلخل به انحنا بر روی غلظت خروجی $CO_2$ در تماس دهنده‌ی فیبر توخالی ..... ٨٥
**شکل (٤-٤٢)** تاثیر نسبت تخلخل به انحنا بر روی غلظت خروجی $CO_2$ در تماس دهنده‌ی فیبر توخالی ..... ٨٥
**شکل (٤-٤٣)** تاثیر طول غشاء بر روی غلظت خروجی $CO_2$ در تماس دهنده‌ی فیبر توخالی ..... ٨٦
**شکل (٤-٤٤)** تاثیر طول غشاء بر روی غلظت خروجی $CO_2$ در تماس دهنده‌ی فیبر توخالی ..... ٨٦
**شکل (٤-٤٥)** کانتور توزیع غلظت دی اکسید کربن به غلظت اولیه آن (C/Co) در تماس دهنده‌ی فیبر توخالی برای جذب $CO_2$ در حضور محلول 30wt% MDEA ..... ٨٨

**شکل (٤-٤٦)** کانتور توزیع غلظت دی اکسید کربن به غلظت اولیه آن (C/Co) در تماس دهنده‌ی فیبر توخالی برای جذب $CO_2$ در حضور محلول 28.5wt% MDEA+1.5wt% MEA ..... ۸۸
**شکل (٤-٤٧)** کانتور توزیع غلظت دی اکسید کربن به غلظت اولیه آن (C/Co) در تماس دهنده‌ی فیبر توخالی برای جذب $CO_2$ در حضور محلول 27wt% MDEA+3wt% MEA .. ۸۹
**شکل (٤-٤٨)** کانتور توزیع غلظت دی اکسید کربن به غلظت اولیه آن (C/Co) در تماس دهنده‌ی فیبر توخالی برای جذب $CO_2$ در حضور محلول 25.5wt% MDEA+4.5wt% MEA ..... ۸۹
**شکل (٤-٤٩)** کانتور توزیع غلظت دی اکسید کربن به غلظت اولیه آن (C/Co) در تماس دهنده‌ی فیبر توخالی برای جذب $CO_2$ در حضور محلول 21wt% MDEA+9wt% MEA .. ۹۰
**شکل (٤-٥٠)** کانتور توزیع غلظت دی اکسید کربن به غلظت اولیه آن (C/Co) در تماس دهنده‌ی فیبر توخالی برای جذب $CO_2$ در حضور محلول 15wt% MDEA+15wt% MEA ۹۰
**شکل (٤-٥١)** کانتور توزیع غلظت دی اکسید کربن به غلظت اولیه آن (C/Co) در تماس دهنده‌ی فیبر توخالی برای جذب $CO_2$ در حضور محلول 9wt% MDEA+21wt% MEA .. ۹۱
**شکل (٤-٥٢)** کانتور توزیع غلظت دی اکسید کربن به غلظت اولیه آن (C/Co) در تماس دهنده‌ی فیبر توخالی برای جذب $CO_2$ در حضور محلول 30wt% MEA ..... ۹۱
**شکل (٤-٥٣)** کانتور توزیع غلظت دی اکسید کربن به غلظت اولیه آن (C/Co) در تماس دهنده‌ی فیبر توخالی برای جذب $CO_2$ در حضور محلول 30wt% DEA ..... ۹۲
**شکل (٤-٥٤)** کانتور توزیع غلظت دی اکسید کربن به غلظت اولیه آن (C/Co) در تماس دهنده‌ی فیبر توخالی برای جذب $CO_2$ در حضور محلول 4.5wt% AMP+25.5Wt% DEA ..... ۹۲
**شکل (٤-٥٥)** کانتور توزیع غلظت دی اکسید کربن به غلظت اولیه آن (C/Co) در تماس دهنده‌ی فیبر توخالی برای جذب $CO_2$ در حضور محلول 21wt% AMP+9Wt% DEA..... ۹۳
**شکل (٤-٥٦)** کانتور توزیع غلظت دی اکسید کربن به غلظت اولیه آن (C/Co) در تماس دهنده‌ی فیبر توخالی برای جذب $CO_2$ در حضور محلول 30wt% AMP..... ۹۳
**شکل (٤-٥٧)** تاثیر دبی جریان گاز بر روی غلظت خروجی $CO_2$ در تماس دهنده‌ی فیبر توخالی ..... ۹۴
**شکل (٤-٥٨)** تاثیر دبی جریان گاز بر روی غلظت خروجی $CO_2$ در تماس دهنده‌ی فیبر توخالی ..... ۹۴

**شکل (٤-٥٩)** تاثیر دبی جریان مایع بر روی غلظت خروجی $CO_2$ در تماس دهنده‌ی فیبر توخالی ..... ۹۵
**شکل (٤-٦٠)** تاثیر دبی جریان مایع بر روی غلظت خروجی $CO_2$ در تماس دهنده‌ی فیبر توخالی ..... ۹۵
**شکل (٤-٦١)** تاثیر تعداد فیبرها بر روی غلظت خروجی $CO_2$ در تماس دهنده‌ی فیبر توخالی ..... ۹۶
**شکل (٤-٦٢)** تاثیر تعداد فیبرها بر روی غلظت خروجی $CO_2$ در تماس دهنده‌ی فیبر توخالی ..... ۹۶
**شکل (٤-٦٣)** تاثیر نسبت تخلخل به انحنا بر روی غلظت خروجی $CO_2$ در تماس دهنده‌ی فیبر توخالی ..... ۹۷
**شکل (٤-٦٤)** تاثیر نسبت تخلخل به انحنا بر روی غلظت خروجی $CO_2$ در تماس دهنده‌ی فیبر توخالی ..... ۹۷
**شکل (٤-٦٥)** تاثیر طول غشاء بر روی غلظت خروجی $CO_2$ در تماس دهنده‌ی فیبر توخالی ..... ۹۸
**شکل (٤-٦٦)** تاثیر طول غشاء بر روی غلظت خروجی $CO_2$ در تماس دهنده‌ی فیبر توخالی ..... ۹۸

فهرست جدول‌ها

**جدول (۳-۱)** سرعت واکنش آمین‌ها ..... ۴۳
**جدول (۳-۲)** پارامتر های سینتیکی مخلوط آمین‌ها در دمای ۳۱۳ درجه کلوین..... ۴۴
**جدول (۳-۳)** پارامتر های سینتیکی آمین‌های خالص در دمای ۲۹۸ درجه کلوین..... ۴۴
**جدول (۳-٤)** پارامترهای غشایی مورد استفاده ..... ۴۶
**جدول (۳-۵)** ضرایب نفوذ آمین‌ها و CO2 در دمای ۲۹۸ درجه کلوین ..... ۴۶
**جدول (۳-۶)** ضرایب نفوذ آمین‌ها و $CO_2$ در دمای ۳۱۳ درجه کلوین ..... ۴۷

فهرست نشانه‌های اختصاری

| | |
|---|---|
| $C_{CO_2-tube}$ | غلظت دی اکسید کربن در درون مجرا ( $mol/m^3$) |
| $C_{CO_2-membrane}$ | غلظت دی اکسید کربن در درون غشاء ( $mol/m^3$) |
| $C_{CO_2-shell}$ | غلظت دی اکسید کربن در درون پوسته ( $mol/m^3$) |
| $C_{solvent-tube}$ | غلظت حلال در درون مجرا ( $mol/m^3$) |
| $C_{solvent-membrane}$ | غلظت حلال در درون غشاء ( $mol/m^3$) |
| $C_{CO_2-tube,initial}$ | غلظت اولیه دی اکسید کربن در درون مجرا ( $mol/m^3$) |
| $C_{CO_2-shell,initial}$ | غلظت اولیه دی اکسید کربن در درون پوسته ( $mol/m^3$) |
| $D_{CO_2-tube}$ | ضریب نفوذ دی اکسید کربن در درون مجرا ( $m^2/s$) |
| $D_{CO_2-membrane}$ | ضریب نفوذ دی اکسید کربن در درون غشاء ( $m^2/s$) |
| $D_{CO_2-shell}$ | ضریب نفوذ دی اکسید کربن در درون پوسته ( $m^2/s$) |
| $D_{solvent-tube}$ | ضریب نفوذ حلال در درون مجرا ( $m^2/s$) |
| $D_{solvent-membrane}$ | ضریب نفوذ حلال در درون غشاء ( $m^2/s$) |
| $J$ | فلاکس مولی ($mol/m^2s$) |
| $L$ | طول فیبر (m) |
| $M$ | جرم مولکولی (kg/mol) |
| $m$ | حلالیت فیزیکی |
| $N$ | فلاکس مولی ($mol/m^2s$) |
| $Q_{Liquid}$ | دبی جریان مایع ( mL/min) |
| $Q_{Gas}$ | دبی جریان گاز ( mL/min) |
| $r_1$ | شعاع داخلی مجرا (m) |
| $r_2$ | شعاع خارجی مجرا (m) |
| $r_3$ | شعاع داخلی پوسته (m) |
| $R_{CO_2}$ | سرعت واکنش دی اکسید کربن ( $mol\ m^{-3}\ s^{-1}$) |
| $R_{solvent}$ | سرعت واکنش حلال ( $mol\ m^{-3}\ s^{-1}$) |

| | |
|---|---|
| $S$ | سطح مقطع ($m^2$) |
| $t$ | زمان (s) |
| $K$ | دما (T) |
| $V_{z-tube}$ | سرعت در درون مجرا ( m/s) |
| $V_{z-shell}$ | سرعت در درون پوسته ( m/s) |
| $\overline{V_{Gas}}$ | سرعت متوسط گاز در درون پوسته ( m/s) |
| $\overline{V_{Liq}}$ | سرعت متوسط مایع در درون مجرا ( m/s) |
| $\varepsilon$ | تخلخل |
| $\tau$ | انحنا |
| $\mu$ | ویسکوزیته ( Pa s) |
| $\rho$ | دانسیته ( $kg/m^3$) |
| $e$ | تعداد المان ها |

# فصل اول: مقدمه