



دانشگاه صنعتی شیراز
دانشکده مهندسی شیمی، نفت و گاز

پایان نامه کارشناسی ارشد
رشته مهندسی شیمی (گرایش گاز)

مطالعه سینتیک تشکیل هیدرات متان در حضور مایعات یونی

بوسیله:

علی رسول زاده

استاد راهنما:

دکتر جعفر جوانمردی

بهمن ۱۳۹۰

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

بسمه تعالی

مطالعه سینتیک تشکیل هیدرات متان در حضور مایعات یونی

پایان نامه ارائه شده به عنوان بخشی از فعالیت های تحصیلی

توسط:

علی رسول زاده

برای اخذ درجه کارشناسی ارشد

گروه مهندسی شیمی (گرایش گاز)، دانشکده مهندسی شیمی، نفت و گاز

دانشگاه صنعتی شیراز

ارزیابی پایان نامه توسط هیات داوران با درجه : عالی

دکتر جعفر جوانمردی، دانشیار مهندسی شیمی (استاد راهنما)

دکتر محمدرضا طلاق، استادیار مهندسی شیمی (استاد مشاور)

دکتر علیرضا شریعتی، دانشیار مهندسی شیمی (استاد مدعو از دانشگاه شیراز)

مدیر امور آموزشی و تحصیلات تکمیلی دانشگاه : مهندس نصرت الله علی قنبری

حق چاپ محفوظ و مخصوص به دانشگاه صنعتی شیراز است.

تقدیم به :

خدایی که آفرید

جهان را، انسان را، عقل را، علم را، معرفت را، عشق را

و به کسانی که عشقشان را در وجودم دمید.

خدای را بسی شاکرم که از روی کرم، پدر و مادری فدکار نسیم ساخته تا در سایه درخت پر بار وجودشان
بیاایم و از ریشه آنها شاخ و برگ گیرم و از سایه وجودشان در راه کسب علم و دانش تلاش نمایم. والدینی
که بودنشان تاج افتخاری است بر سرم و نامشان دلیلی است بر بودنم، چرا که این دو وجود پس از
پروردگار مایه هستی ام بوده اند، دستم را گرفتند و راه رفتن را در این وادی زندگی پر از فراز و نشیب
آموختند. آموزگارانم که برایم زندگی، بودن و انسان بودن را معنا کردند.

پاسکزاری:

به مصداق «من لم یسکر المخلوق لم یسکر الخالق» بسی شایسته است از استاد فریخته و فرزانه جناب آقای دکتر جوانمردی که با کرامتی چون خورشید، سرزمین دل را روشنی بخشید و کاشن سرای علم و دانش را با راهنمایی های کارساز و سازنده بارور ساختند، تقدیر و تشکر نمایم.

همچنین از زحمات جناب آقای دکتر طلاق استادمشاورم نیز کمال تشکر را دارم.

با سپاس از سه وجود مقدس:

آنان که ناتوان شدند تا ما به توانایی برسیم...

موباشان سپید شد تا ما رو سفید شویم...

و عاشقان سوختند تا کرم ما بخش وجود ما و رو سبک راهمان باشند...

پدرانمان

مادرانمان

استادانمان

چکیده

مطالعه سینتیک تشکیل هیدرات متان در حضور مایعات یونی

به وسیله ی :

علی رسول زاده

در این کار پارامترهای سینتیکی در مراحل تشکیل و تجزیه هیدرات متان مانند زمان تأخیر، سرعت اولیه تشکیل هیدرات، پایداری هیدرات در فشار اتمسفریک و ظرفیت ذخیره سازی هیدرات متان در حضور آب خالص و محلول های با غلظت های مختلف از مایعات یونی به صورت آزمایشگاهی بررسی شد و یک رابطه نیمه تجربی بر مبنای داده های آزمایشگاهی، برای محاسبه زمان تأخیر ارائه شده است. از نتایج مشخص گردید که هر سه مایع یونی ۱- بوتیل ۳-متیل ایمیدازولیوم تترا فلوروبورات، ۱-بوتیل ۳-متیل ایمیدازولیوم دی سیانامید و تترا اتیل آمونیوم کلراید که مورد استفاده قرار گرفتند، زمان تأخیر تشکیل هیدرات متان را نسبت به آب خالص افزایش می دهند. در مورد پارامتر سرعت اولیه تشکیل هیدرات متان، دو مایع یونی دارای کاتیون از شاخه ایمیدازولیوم سرعت اولیه تشکیل هیدرات را افزایش می دهند، در حالیکه مایع یونی دارای کاتیون از شاخه آمونیوم سرعت اولیه تشکیل هیدرات را کاهش می دهد. هر سه مایع یونی پایداری هیدرات در فشار اتمسفریک را کاهش می دهند و سرانجام هر سه مایع یونی ظرفیت ذخیره سازی هیدرات را افزایش می دهند. همچنین رابطه ارائه شده برای محاسبه زمان تأخیر از دقت خوبی برخوردار است.

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
۱	فصل اول: مقدمه ای بر هیدرات های گازی
۲	۱-۱- هیدرات های گازی
۳	۲-۱- اساس هیدرات های گازی
۴	۳-۱- تاریخچه هیدرات های گازی
۶	۴-۱- ساختار هیدرات
۷	۱-۴-۱- ساختار یک
۸	۲-۴-۱- ساختار دو
۹	۳-۴-۱- ساختار H
۱۳	۵-۱- بازدارنده های ترمودینامیکی
۱۵	۶-۱- بازدارنده های سینتیکی
۱۷	۷-۱- بازدارنده های ضد کلوخه ای شدن
۱۷	۸-۱- بازدارنده های دو منظوره
۱۸	۹-۱- پیش بینی شرایط تشکیل هیدرات
۱۹	۱۰-۱- کاربردهای هیدرات
۱۹	۱-۱۰-۱- هیدرات به عنوان منبع عظیم گاز طبیعی
۲۰	۲-۱۰-۱- جذب دی اکسید کربن از هوا
۲۱	۳-۱۰-۱- فرآیند جداسازی گاز از مخلوط گازها
۲۱	۴-۱۰-۱- ذخیره سازی و انتقال گاز طبیعی
۲۳	۵-۱۰-۱- نمک زدایی از آب دریا
۲۳	۱-۵-۱۰-۱- مزایای نمک زدایی از آب دریا با استفاده از تشکیل هیدرات
۲۴	۱۱-۱- ضرورت و هدف از انجام این تحقیق
۲۵	فصل دوم: مایعات یونی و هیدرات های نیمه کلاتریت
۲۶	۱-۲- مایعات یونی
۲۸	۲-۲- مزایای مایعات یونی

- ۳۰-۳-۲- برخی از کاربردهای مایعات یونی
 ۳۱-۴-۲- تحقیقات گذشته در زمینه تأثیر مایعات یونی روی هیدرات
 ۳۳-۵-۲- هیدرات های نیمه کلاتریت
 ۳۵-۶-۲- استوکیومتری و ساختار نیمه کلاتریت ها برای ذخیره سازی گاز

۴۰- فصل سوم: سینتیک هسته زایی، رشد و تجزیه هیدرات

- ۴۴-۱-۳- مرحله هسته زایی
 ۴۵-۱-۱-۳- هسته زایی همگن
 ۴۷-۲-۱-۳- هسته زایی ناهمگن
 ۴۸-۲-۳- فوق اشباع
 ۴۹-۳-۳- مرحله رشد
 ۵۱-۴-۳- معادلات تجربی فرآیند هسته زایی
 ۵۱-۵-۳- اثر حافظه آب
 ۵۲-۶-۳- زمان تأخیر
 ۵۲-۱-۶-۳- مدل اسلون و فلیفل
 ۵۳-۲-۶-۳- مدل ناتاراجان و همکاران
 ۵۳-۳-۶-۳- مدل کاشیف و فیروزآبادی
 ۵۵-۷-۳- مبانی لایه مرزی
 ۵۵-۱-۷-۳- مرحله نفوذ
 ۵۵-۲-۷-۳- مرحله واکنش
 ۵۶-۸-۳- مروری بر تحقیقات صورت گرفته روی سینتیک تشکیل هیدرات
 ۵۷-۱-۸-۳- مدل انگلوز و بیشنوی
 ۵۸-۲-۸-۳- مدل اسکوبورگ و راسموسن
 ۵۹-۳-۸-۳- مدل هری و همکاران
 ۶۰-۴-۸-۳- مدل اسلون
 ۶۱-۹-۳- تجزیه هیدرات
 ۶۲-۱۰-۳- روابط تجربی برای تجزیه هیدرات
 ۶۳-۱۱-۳- پدیده خود نگهدارندگی

فصل چهارم: بررسی آزمایشگاهی سینتیک هسته زایی، رشد و تجزیه هیدرات متان

- ۶۴- در حضور مایعات یونی و ارائه یک مدل نیمه تجربی برای محاسبه زمان تأخیر
 ۶۵-۱-۴- تجهیزات آزمایشگاهی

۶۶	۱-۱-۴- سلول تعادلی
۶۷	۲-۱-۴- حمام الکل
۶۷	۳-۱-۴- سیستم هوشمند کنترل دما
۶۷	۴-۱-۴- سنسورهای دما و فشار
۶۸	۵-۱-۴- کپسول های گاز
۶۸	۶-۱-۴- پمپ خلأ
۶۸	۷-۱-۴- رایانه و نرم افزار ذخیره سازی
۶۸	۸-۱-۴- ترازوی دیجیتالی
۶۸	۹-۱-۴- دستگاه تهیه آب مقطر
۶۸	۱۰-۱-۴- مواد مورد نیاز
۶۹	۲-۴- نحوه انجام آزمایش ها
۶۹	۱-۲-۴- آماده سازی سیستم
۷۰	۲-۲-۴- مکانیزم انجام آزمایش
۷۱	۳-۴- پروفایل های لازم برای بررسی پارامترها
۷۱	۱-۳-۴- زمان تأخیر
۷۱	۲-۳-۴- سرعت اولیه تشکیل هیدرات
۷۱	۳-۳-۴- پایداری هیدرات
۷۲	۴-۳-۴- ظرفیت ذخیره سازی هیدرات
۷۲	۴-۴- نحوه انجام محاسبات
۷۲	۱-۴-۴- زمان تأخیر
۷۴	۲-۴-۴- سرعت اولیه تشکیل هیدرات
۷۵	۳-۴-۴- ظرفیت ذخیره سازی هیدرات
۷۵	۱-۳-۴-۴- محاسبه ظرفیت ذخیره سازی
۷۶	۵-۴- مدل سازی
۷۸	۱-۵-۴- محاسبه دمای تشکیل هیدرات متان
۸۲	۲-۵-۴- نحوه محاسبه فعالیت آب در حضور مایعات یونی

فصل پنجم: نتایج، بحث و پیشنهادات

۸۸	
۸۹	۱-۵- اثر نسبت اولیه حجم گاز به مایع
۹۰	۲-۵- زمان تأخیر
۹۰	۱-۲-۵- نتایج زمان تأخیر در حضور آب خالص

۹۲	۵-۲-۲- نتایج زمان تأخیر در حضور محلول های با غلظت های مختلف ۱- بوتیل ۳- متیل ایمیدازولیوم تترافلوروبورات
۹۴	۵-۲-۳- نتایج زمان تأخیر در حضور محلول ۱۰ درصد وزنی ۱- بوتیل ۳- متیل ایمیدازولیوم دی سیانامید
۹۵	۵-۲-۴- نتایج زمان تأخیر در حضور محلول ۱۰ درصد وزنی تترا اتیل آمونیوم کلراید
۹۷	۵-۲-۵- اثر مایعات یونی بر زمان تأخیر در فشارهای اولیه یکسان
۹۸	۵-۳-۳- سرعت اولیه تشکیل هیدرات متان
۱۰۰	۵-۳-۱- نتایج سرعت اولیه تشکیل هیدرات متان در حضور آب خالص
۱۰۱	۵-۳-۲- نتایج سرعت اولیه تشکیل هیدرات متان در حضور محلول های با غلظت های مختلف ۱- بوتیل ۳- متیل ایمیدازولیوم تترافلوروبورات
۱۰۳	۵-۳-۳- نتایج سرعت اولیه تشکیل هیدرات متان در حضور محلول ۱۰ درصد وزنی ۱- بوتیل ۳- متیل ایمیدازولیوم دی سیانامید
۱۰۴	۵-۳-۴- نتایج سرعت اولیه تشکیل هیدرات متان در حضور محلول ۱۰ درصد وزنی ۱- بوتیل ۳- متیل ایمیدازولیوم تترا اتیل آمونیوم کلراید
۱۰۶	۵-۴- پایداری هیدرات
۱۰۹	۵-۵- ظرفیت ذخیره سازی هیدرات
۱۱۳	۵-۶- بحث روی نتایج
۱۱۴	۵-۷- پیشنهادات
۱۱۵	فهرست منابع

فهرست جدول ها

صفحه	عنوان
۳	جدول (۱-۱) مولکول های مهمان تشکیل دهنده هیدرات
۴	جدول (۲-۱) اجزای مختلف گاز طبیعی و نحوه اشغال حفره ها توسط آن ها
۱۰	جدول (۳-۱) خصوصیات فیزیکی ساختارهای مختلف هیدرات
۳۰	جدول (۱-۲) کاتیون ها و آنیون های تشکیل دهنده مایعات یونی
۳۱	جدول (۲-۲) مایعات یونی مختلف مورد استفاده در کار شایو و آدیدهارما
۳۲	جدول (۳-۲) مایعات یونی مختلف مورد استفاده در کار شایو و همکاران
۳۲	جدول (۴-۲) مایعات یونی مورد استفاده توسط ویلانو و کلاند
۳۳	جدول (۵-۲) مایعات یونی مورد استفاده در کار شایو و همکاران
۳۶	جدول (۶-۲) ساختار دو نمک تترا بوتیل آمونیوم برماید و تترا ایزو پنتیل آمونیوم فلوراید و ویژگی آن ها
۴۵	جدول (۱-۳) حلالیت گازهای طبیعی در آب در دمای ۲۹۸ کلوین
۴۹	جدول (۲-۳) نیروهای محرکه مختلف استفاده شده در هسته زایی
۵۰	جدول (۳-۳) مدل های مختلف رشد هیدرات
۵۳	جدول (۴-۳) پارامترهای مدل ناتاراجان برای گازهای مختلف
۵۸	جدول (۵-۳) ضریب مدل انگلزوز برای گازهای متان و اتان در دماهای مختلف
۵۹	جدول (۶-۳) ضریب معادله اسکوبورگ و راسموسن بر حسب (Cm^3/s) در دمای ۲۷۴ کلوین و دوره های مختلف همزن
۶۲	جدول (۷-۳) مدل های تجزیه هیدرات
۶۹	جدول (۱-۴) مواد مورد استفاده در آزمایش
۸۰	جدول (۲-۴) مقادیر تابع پتانسیل کیهارا
۸۰	جدول (۳-۴) پارامترهای ثوابت لانگمویر
۸۱	جدول (۴-۴) پارامترهای تغییر فاز آب برای ساختار یک
۸۳	جدول (۵-۴) پارامترهای مورد استفاده در معادله UNIQUAC

- جدول (۴-۶) پارامترهای مورد استفاده برای ۱-بوتیل ۳-متیل ایمیدازولیوم دی سیانامید در معادله NRTL ۸۳
- جدول (۴-۷) پارامترهای مورد استفاده برای تترا اتیل آمونیوم کلراید در معادله NRTL ۸۳
- جدول (۴-۸) مقادیر دمای تشکیل هیدرات متان محاسبه شده در حضور آب خالص توسط برنامه نویسی در فشارهای مختلف ۸۴
- جدول (۴-۹) مقادیر دمای تشکیل هیدرات متان محاسبه شده در حضور محلول ۱-بوتیل ۳-متیل ایمیدازولیوم دی سیانامید توسط برنامه نویسی در فشارهای مختلف ۸۴
- جدول (۴-۱۰) مقادیر دمای تشکیل هیدرات متان محاسبه شده در حضور محلول ۱-بوتیل ۳-متیل ایمیدازولیوم تترافلوروبورات توسط برنامه نویسی در فشارهای مختلف ۸۵
- جدول (۴-۱۱) مقادیر دمای تشکیل هیدرات متان محاسبه شده در حضور محلول تترا اتیل آمونیوم کلراید توسط برنامه نویسی در فشارهای مختلف ۸۶
- جدول (۴-۱۲) پارامترهای بهینه شده در معادله (۴-۴۸) ۸۷
- جدول (۵-۱) نتایج آزمایشگاهی و محاسبه شده مربوط به زمان تأخیر تشکیل هیدرات متان در حضور آب خالص ۹۰
- جدول (۵-۲) نتایج آزمایشگاهی و محاسبه شده مربوط به زمان تأخیر تشکیل هیدرات متان در حضور محلول های با غلظت های مختلف ۱-بوتیل ۳-متیل ایمیدازولیوم تترافلوروبورات ۹۲
- جدول (۵-۳) زمان های تأخیر برای تشکیل هیدرات متان در حضور محلول ۱۰ درصد وزنی ۱-بوتیل ۳-متیل ایمیدازولیوم تترافلوروبورات در فشار اولیه آزمایش ۵۰ بار و شرایط یکسان ۹۳
- جدول (۵-۴) نتایج آزمایشگاهی و محاسبه شده مربوط به زمان تأخیر تشکیل هیدرات متان در حضور محلول ۱۰ درصد وزنی ۱-بوتیل ۳-متیل ایمیدازولیوم دی سیانامید ۹۴
- جدول (۵-۵) نتایج آزمایشگاهی و محاسبه شده مربوط به زمان تأخیر تشکیل هیدرات متان در حضور محلول ۱۰ درصد وزنی تترا اتیل آمونیوم کلراید ۹۵
- جدول (۵-۶) سرعت اولیه تشکیل هیدرات متان در حضور آب خالص ۱۰۰
- جدول (۵-۷) سرعت اولیه تشکیل هیدرات متان در حضور محلول های با غلظت های مختلف ۱-بوتیل ۳-متیل ایمیدازولیوم تترافلوروبورات ۱۰۱
- جدول (۵-۸) سرعت اولیه تشکیل هیدرات متان در حضور محلول ۱۰ درصد ۱-بوتیل ۳-متیل ایمیدازولیوم دی سیانامید ۱۰۳
- جدول (۵-۹) سرعت اولیه تشکیل هیدرات متان در حضور محلول ۱۰ درصد تترا اتیل آمونیوم کلراید ۱۰۴

- جدول (۵-۱۰)** درصد تجزیه هیدرات متان پس از گذشت ۱۰ ساعت در دمای ۵- درجه سانتیگراد و فشار اولیه ۵۰ بار
۱۰۷
- جدول (۵-۱۱)** درصد تجزیه هیدرات متان پس از گذشت ۱۰ ساعت در دمای ۵- درجه سانتیگراد و فشار اولیه ۶۰ بار
۱۰۷
- جدول (۵-۱۲)** درصد تجزیه هیدرات متان پس از گذشت ۱۰ ساعت در دمای ۵- درجه سانتیگراد و فشار اولیه ۷۰ بار
۱۰۸
- جدول (۵-۱۳)** ظرفیت ذخیره سازی هیدرات متان در حضور محلول های مختلف در فشار اولیه ۵۰ بار
۱۱۱
- جدول (۵-۱۴)** ظرفیت ذخیره سازی هیدرات متان در حضور محلول های مختلف در فشار اولیه ۶۰ بار
۱۱۱
- جدول (۵-۱۵)** ظرفیت ذخیره سازی هیدرات متان در حضور محلول های مختلف در فشار اولیه ۷۰ بار
۱۱۱

فهرست شکل ها

صفحه	عنوان
۳	شکل (۱-۱) نحوه متصل شدن مولکول های آب به هم از طریق پیوند هیدروژنی
۶	شکل (۲-۱) موقعیت جهانی مخازن هیدرات گازی
۷	شکل (۳-۱) ساختارهای مختلف هیدرات
۸	شکل (۴-۱) هیدرات با ساختار یک
۸	شکل (۵-۱) هیدرات با ساختار دو
۹	شکل (۶-۱) هیدرات با ساختار H
۱۰	شکل (۷-۱) ساختارهای مختلف کریستال هیدرات (هیدرات با ساختار یک (a)، هیدرات با ساختار دو (b) و هیدرات با ساختار H (c))
۱۱	شکل (۸-۱) مقایسه قطر گاز تشکیل دهنده هیدرات (مهمان) و حفره ها اشغال شده در ساختارهای مختلف با استفاده از آزمایش پراش اشعه ایکس
۱۲	شکل (۹-۱) نحوه گرفتگی خطوط لوله
۱۵	شکل (۱۰-۱) نمودار تعادلی تشکیل هیدرات در حضور غلظت های مختلف متانول به عنوان بازدارنده ترمودینامیکی
۱۶	شکل (۱۱-۱) بازدارنده های سینتیکی مختلف
۲۶	شکل (۱-۲) تعداد انتشارات با موضوع مایعات یونی
۲۸	شکل (۲-۲) نمای سه بعدی مایعات یونی مختلف
۳۴	شکل (۳-۲) ساختار هیدرات نیمه کلاتریت نمک تترا بوتیل آمونیوم برماید با عدد هیدرات ۳۸
۳۷	شکل (۴-۲) کسر جرمی هیدروژن ذخیره شده به عنوان تابعی از کسر مولی تترا بوتیل آمونیوم برماید در محلول
۳۹	شکل (۵-۲) نحوه ذخیره گاز هیدروژن در نیمه کلاتریت تترا بوتیل آمونیوم برماید
۴۱	شکل (۱-۳) نمودار مقدار گاز مصرفی بر حسب زمان
۴۲	شکل (۲-۳) مراحل تشکیل و تجزیه هیدرات متان

- شکل (۳-۳) تشکیل کریستال بر حسب فوق سرمایش ۴۳
- شکل (۴-۳) تشکیل هیدرات بر حسب فوق سرمایش ۴۳
- شکل (۵-۳) شمای تشکیل هسته ها بر اساس مبانی هسته زایی همگن ۴۶
- شکل (۶-۳) مقایسه انرژی آزاد گیبس سطحی و انرژی آزاد گیبس حجمی به عنوان
تابعی از اندازه خوشه ۴۷
- شکل (۷-۳) شکل فرضی از تشکیل هیدرات روی سطح کریستال ۴۹
- شکل (۸-۳) مدل فرضی انتقال جرم از توده به سطح کریستال هیدرات ۵۶
- شکل (۹-۳) تصویر ذهنی تجزیه هیدرات ۶۱
- شکل (۱۰-۳) سرعت های متوسط تجزیه هیدرات متان تا ۵۰٪ تجزیه کامل در فشار
۱ بار ۶۳
- شکل (۱-۴) شماتیک مجموعه آزمایشگاهی هیدرات ۶۵
- شکل (۲-۴) تصویری از مجموعه آزمایشگاهی هیدرات ۶۶
- شکل (۳-۴) شماتیک سلول تعادلی ۶۶
- شکل (۴-۴) سلول تعادلی داخل آزمایشگاه ۶۷
- شکل (۵-۴) تصویر دستگاه UPS ۷۰
- شکل (۶-۴) تشخیص زمان تأخیر از روی نمودار فشار-زمان ۷۳
- شکل (۷-۴) تشخیص زمان تأخیر از روی نمودار فشار-دما ۷۳
- شکل (۸-۴) تشخیص زمان تأخیر از روی نمودار مول متان مصرفی-زمان ۷۳
- شکل (۹-۴) مقدار مول گاز مصرفی بر حسب زمان ۷۴
- شکل (۱-۵) تشکیل هیدرات متان در حضور ۲۰ سی سی (R_v=220) و ۳۰ سی سی
R_v=130) آب خالص ۸۹
- شکل (۲-۵) تأثیر فشار اولیه آزمایشگاهی روی زمان تأخیر تشکیل هیدرات متان
در حضور آب خالص ۹۱
- شکل (۳-۵) زمان های تأخیر برای تشکیل هیدرات متان در حضور محلول ۱۰ درصد وزنی
۱-بوتیل ۳-متیل ایمیدازولیوم تترافلوروبورات در فشار اولیه آزمایش ۵۰ بار و
شرایط یکسان ۹۳
- شکل (۴-۵) تأثیر فشار اولیه آزمایشگاهی روی زمان تأخیر تشکیل هیدرات متان در حضور
محلول های با غلظت های مختلف از ۱-بوتیل ۳-متیل ایمیدازولیوم
تترافلوروبورات ۹۴

- شکل (۵-۵) تأثیر فشار اولیه آزمایشگاهی روی زمان تأخیر تشکیل هیدرات متان
 ۹۵ در حضور محلول ۱۰ درصد وزنی ۱- بوتیل ۳- متیل ایمیدازولیوم دی سیانامید
- شکل (۶-۵) تأثیر فشار اولیه آزمایشگاهی روی زمان تأخیر تشکیل هیدرات متان
 ۹۶ در حضور محلول ۱۰ درصد وزنی تترا اتیل آمونیوم کلراید
- شکل (۷-۵) تأثیر مایعات یونی مختلف بر زمان تأخیر در فشار اولیه ۷۰ بار
 ۹۷
- شکل (۸-۵) تأثیر مایعات یونی مختلف بر زمان تأخیر در فشار اولیه ۶۰ بار
 ۹۷
- شکل (۹-۵) تأثیر مایعات یونی مختلف بر زمان تأخیر در فشار اولیه ۵۰ بار
 ۹۷
- شکل (۱۰-۵) مقایسه نتایج زمان تأخیر آزمایشگاهی و زمان تأخیر محاسبه شده
 ۹۸ از روی شکل و پراکندگی نتایج
- شکل (۱۱-۵) مول متان مصرفی بر حسب زمان
 ۹۹
- شکل (۱۲-۵) تغییرات فشار و مصرف گاز متان در اثر تشکیل هیدرات در حضور
 ۹۹ آب خالص
- شکل (۱۳-۵) سرعت تشکیل هیدرات متان در حضور آب خالص برای دو فشار اولیه
 ۱۰۰ مختلف
- شکل (۱۴-۵) نمودار فشار بر حسب زمان برای محلول ۱ درصد وزنی ۱- بوتیل ۳- متیل
 ۱۰۲ ایمیدازولیوم تترافلوروبورات
- شکل (۱۵-۵) نمودار فشار بر حسب زمان برای محلول ۱۰ درصد وزنی
 ۱۰۲ ۱- بوتیل ۳- متیل ایمیدازولیوم تترافلوروبورات
- شکل (۱۶-۵) سرعت تشکیل هیدرات متان برای سه محلول مختلف در فشار اولیه
 ۱۰۳ ۵۰ بار
- شکل (۱۷-۵) نمودار فشار بر حسب زمان برای چهار محلول مختلف در فشار اولیه
 ۱۰۴ ۵۰ بار
- شکل (۱۸-۵) درصد افزایش سرعت اولیه تشکیل هیدرات متان در حضور مایعات یونی
 ۱۰۵ مختلف نسبت به آب خالص در فشار ۵۰ بار
- شکل (۱۹-۵) درصد افزایش سرعت اولیه تشکیل هیدرات متان در حضور مایعات یونی
 ۱۰۵ مختلف نسبت به آب خالص در فشار ۶۰ بار
- شکل (۲۰-۵) درصد افزایش سرعت اولیه تشکیل هیدرات متان در حضور مایعات یونی
 ۱۰۶ مختلف نسبت به آب خالص در فشار ۷۰ بار
- شکل (۲۱-۵) تغییرات فشار تجزیه هیدرات متان بر حسب زمان در دمای ۵- درجه سانتیگراد
 ۱۰۶ و فشار اولیه ۵۰ بار

- شکل (۲۲-۵) تغییرات فشار تجزیه هیدرات متان بر حسب زمان در دمای ۵- درجه سانتیگراد و فشار اولیه ۶۰ بار
۱۰۷
- شکل (۲۳-۵) تغییرات فشار تجزیه هیدرات متان بر حسب زمان در دمای ۵- درجه سانتیگراد و فشار اولیه ۷۰ بار
۱۰۸
- شکل (۲۴-۵) تغییرات فشار تجزیه هیدرات متان بر حسب زمان و فشار اولیه ۷۰ بار
۱۱۰
- شکل (۲۵-۵) تغییرات فشار تجزیه هیدرات متان بر حسب دمای سلول و فشار اولیه ۷۰ بار
۱۱۰
- شکل (۲۶-۵) تغییرات فشار تجزیه هیدرات متان بر حسب دمای محیط و فشار اولیه ۷۰ بار
۱۱۰
- شکل (۲۷-۵) درصد افزایش ظرفیت ذخیره سازی هیدرات متان در غلظت های مختلف مایعات یونی نسبت به آب خالص در فشار اولیه ۵۰ بار
۱۱۲
- شکل (۲۸-۵) درصد افزایش ظرفیت ذخیره سازی هیدرات متان در غلظت های مختلف مایعات یونی نسبت به آب خالص در فشار اولیه ۶۰ بار
۱۱۲
- شکل (۲۹-۵) درصد افزایش ظرفیت ذخیره سازی هیدرات متان در غلظت های مختلف مایعات یونی نسبت به آب خالص در فشار اولیه ۷۰ بار
۱۱۲

فهرست نشانه های اختصاری

- a : شعاع کره سخت
 a_w : معرف فعالیت آب
 B^0 : آهنگ هسته زایی
 C : ضریب فراوانی
 C : غلظت محلول فوق اشباع
 C^{eq} : غلظت محلول اشباع
 C_{mi} : ضریب لانگمویر جزء i در حفره نوع m
 C_{w0} : غلظت اولیه آب
 D : ضریب نفوذ جزء حل شونده
 f : فوگاسیته گاز در حال تعادل
 f^{eq} : فوگاسیته در حالت تعادل
 J : سرعت هسته زایی
 k : ثابت بولتزمن
 k_d : ضریب انتقال جرم
 k_r : ثابت سرعت برای واکنش در سطح
 M_h : وزن مولکولی هیدرات
 M_w : وزن مولکولی آب
 N_a : ثابت آووگادرو
 n_w : عدد هیدرات
 n_{tot}^0 : مقدار کل مول گاز اولیه موجود در سیستم
 n_{cell} : مقدار مول گاز درون راکتور
 n_f : مقدار مول گاز درون اتصالات
 P : فشار
 q_i : مساحت سطح مولکولی
 $R(t)$: شدت انتقال بر واحد حجم
 R : ثابت گازها
 R : شعاع متوسط حفره

r_c : شعاع بحرانی
 r_i : حجم مولکولی هیدرات
 R_v : نسبت حجمی اولیه گاز به مایع
 S : فوق اشباع
 SS : فولاد ضد زنگ
 t_{ind} : زمان تأخیر
 T : دما
 T_a : دمای محیط
 T_{cell} : دمای سلول
 T_s : دمای تعادل
 T_0 : نقطه انجماد آب
 $V(t)$: حجم گاز مصرف شده برای تشکیل هیدرات در لحظه t
 V_s : حجم اولیه محلول
 V_{cell} : حجم سلول
 V_f : حجم اتصالات
 V_M : حجم مولی بلور
 x_{int} : کسر مولی ماده تشکیل دهنده هیدرات در سطح مشترک گاز-مایع
 x_b : کسر مولی ماده تشکیل دهنده هیدرات در توده مایع
 y_L : ضخامت فیلم
 y : فاصله از سطح تماس گاز-مایع
 Z_{cell} : ضریب تراکم متان در دمای سلول
 Z_a : ضریب تراکم متان در دمای محیط
 Z : عدد همسایگی هر حفره