

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه اصفهان

دانشکده مهندسی

گروه مهندسی شیمی

## پایان نامه‌ی کارشناسی ارشد رشته‌ی مهندسی شیمی

مدل سازی ریاضی و شبیه سازی عملیات نمرزدایی هوا توسط تری اتیلن گلایکول (TEG) در

یک برج آکنده

استادان راهنما:

دکتر امیر رحیمی

دکتر محمدرضا طلایی

پژوهشگر:

داوود باباخانی

۱۳۸۸ / ۴ / ۶

اطلاعات درك صحنی برز  
تمت درك

بهمن ماه ۱۳۸۷

۱۱۴۲۱۶

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

پنجمین کارگاه پایان نامه  
رعایت شده است.  
تخصصیات تکمیلی دانشگاه اصفهان



دانشگاه اصفهان  
دانشکده مهندسی  
گروه مهندسی شیمی

پایان نامه‌ی کارشناسی ارشد رشته‌ی مهندسی شیمی آقای داوود باباخانی تحت عنوان

**مدل سازی ریاضی و شبیه سازی عملیات نمرزدایی هوا توسط تری اتیلن گلیکول (TEG)**

**در یک برج آکنده**

در تاریخ ۸۷/۱۲/۴ توسط هیأت داوران زیر بررسی و با درجه عالی به تصویب نهایی رسید.

امضا  
امضا  
امضا  
امضا

۱- استاد راهنمای اول پایان نامه دکتر امیر رحیمی با مرتبه‌ی علمی استادیار

۲- استاد راهنمای دوم پایان نامه دکتر محمد رضا طلایی با مرتبه‌ی علمی استادیار

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

۴- استاد داور خارج از گروه دکتر محمد رضا احسانی با مرتبه‌ی علمی دانشیار

۱۳۸۸ / ۴ / ۶

امضای مدیر گروه  
دکتر رضا سلیمانی نظر

امضا

## سیاسگزاری

سیاس و ستایش بی حد آن خدایی راست که به انسان علم نوشتن به قلم آموخت و آنچه او نمی دانست تعلیمش داد. در انجام این پایان نامه خود را رهین رهنمودهای مشفقانه‌ی استاد گرانمایه جناب آقای دکتر امیر رحیمی و مشاورت دلسوزانه‌ی استاد ارجمند جناب آقای دکتر محمدرضا طلایی می دانم. بزرگان و عزیزانی که با حوصله‌ی تمام و نکته بینی‌های دقیق، بنده را در گذر از این مهم به عهده گرفتند و با متانت و صبر، پاسخگوی پرسش‌های بنده در زمینه‌های مختلف بودند. بی شک اگر راهنمایی و راهگشایی این عزیزان نبود، اینجانب نیز به این موفقیت نائل نمی شدم.

باباخانی

## تقدیم به:

پدر زحمتکش و مادر مهربانم، اقیانوس بی کران صفا و صمیمیت که لحظه لحظه زندگیم را مرهون فداکاری‌ها و دعا‌های اویم.

خواهر و برادران عزیزم که هر کدام به نحوی مرا در امر تحصیل یاری کرده‌اند.

پدر و مادر همسرم که با چراغ هدایتی که در دست داشتند، عالمانه و حکیمانه راه پیشرفت علمی مرا روشن و در حل مشکلات دوران تحصیل مرا یار و یاور بودند.

همسر عزیزم که با بردباری و خوش‌رویی، مرا در راه کسب علم و معرفت تشویق نمود و با تحمل مشکلاتی مرا یاری کرد.

## چکیده

در تحقیق حاضر فرآیند نمزدایی هوا در یک برج پرشده با آکنه‌های تصادفی و یا ساختاریافته تحت مدل‌سازی ریاضی قرار گرفته است. معادلات دیفرانسیل حاکم بر سیستم با استفاده از قوانین بقاء جرم و انرژی به دست آمده‌اند. این معادلات با استفاده از روش‌های عددی و به کمک روابط تجربی مختلفی که توسط پژوهشگران جهت محاسبه‌ی ضرایب انتقال جرم و حرارت و همچنین سطح موثر انتقال جرم برای آکنه‌های تصادفی و ساختاریافته ارائه شده است، حل شده و نتایج حاصل از آن با مقادیر آزمایشگاهی و صنعتی موجود در منابع معتبر مقایسه شده است. بدین منظور یک بسته نرم‌افزاری با استفاده از زبان برنامه‌نویسی فرترن تهیه شده است. به کمک مدل‌سازی صورت گرفته نقش روابط تجربی مختلف ارائه شده جهت پیش‌بینی سطح موثر انتقال جرم و ضرایب انتقال در پیش‌بینی مدل بررسی و تأثیرپذیری نتایج مدل‌سازی از آن‌ها مطالعه گردید. نتایج نشان دادند که تحت شرایط یکسان عملیاتی، استفاده از روابط تجربی مختلف جهت محاسبه ضریب انتقال جرم و یا سطح موثر انتقال جرم باعث می‌گردد تا پیش‌بینی مدل در خصوص پارامترهای عملیاتی خروجی از برج مانند دمای هوا و مایع نمزدا، رطوبت هوا و غلظت مایع نمزدا بسیار متفاوت باشد. نتایج به دست آمده در این خصوص نشان می‌دهد برای برج‌های نمزدایی با آکنه‌ی تصادفی استفاده از رابطه تجربی شی و مرسمن جهت محاسبه سطح موثر انتقال جرم، رابطه تریبال جهت محاسبه ضریب انتقال حرارت و رابطه چانگ و همکاران جهت محاسبه ضریب انتقال جرم می‌تواند پیش‌بینی بهتری از مقادیر خروجی از برج به دست دهد. همچنین جهت مدل‌سازی فرآیند نمزدایی هوا در یک برج آکنه با آکنه‌های ساختاریافته، استفاده از رابطه تجربی روخا و همکاران جهت محاسبه سطح موثر انتقال جرم، رابطه تریبال جهت محاسبه ضریب انتقال حرارت و رابطه چانگ و همکاران جهت محاسبه ضریب انتقال جرم بهترین پیش‌بینی را از مقادیر خروجی از برج خواهد داد. حداکثر خطای حاصل از نتایج مدل در این موارد کمتر از ۱۰٪ می‌باشد. همچنین با عنایت به اینکه مدل حاضر می‌تواند برای فرآیند احیاء مایع نمزدا نیز مورد استفاده قرار گیرد، نتایج حاصل از آن با داده‌های آزمایشگاهی فرآیند احیاء مقایسه شده و خطای حاصل از آن در حدود ۱۰٪ به دست آمده است. بنابراین از مدل حاضر و بسته نرم‌افزاری تهیه شده می‌توان در امر مدل‌سازی و شبیه‌سازی فرآیند نمزدایی هوا و احیاء مایع نمزدا در یک برج پرشده استفاده کرد. از اهداف دیگر این تحقیق مقایسه بین آکنه‌های تصادفی و ساختاریافته از نقطه نظر راندمان نمزدایی و افت فشار ایجاد شده در سیستم است. نتایج نشان دادند که با استفاده از آکنه ساختاریافته ارتفاع لازم از آکنه جهت راندمان جداسازی یکسان، کمتر از آکنه تصادفی می‌باشد که این امر منجر به کاهش هزینه‌ها خواهد شد. همچنین افت فشار ایجاد شده در سیستم با استفاده از آکنه ساختاریافته کمتر خواهد بود.

همچنین با عنایت به اینکه با استفاده از حل تحلیلی زمان لازم جهت حصول نتایج کمتر از روش عددی می‌باشد، در ادامه‌ی این تحقیق برای برج نمزدا یک حل تحلیلی ارائه شده و نتایج حاصل از آن با استفاده از روابط تجربی تأیید شده قبلی با مقادیر آزمایشگاهی مقایسه شده است. همچنین مقایسه‌ای بین نتایج حاصل از حل تحلیلی حاضر با حل‌های تحلیلی که توسط برخی از پژوهشگران به دست آمده‌اند صورت گرفته است. نتایج حاصله حاکی از آن است که دقت حل تحلیلی ارائه شده در تحقیق حاضر بیشتر از حل‌های تحلیلی دیگران می‌باشد. علاوه بر آنچه ذکر گردید مقادیر پارامترهای مورد نیاز جهت محاسبه‌ی راندمان نمزدایی

با استفاده از مدل به دست آمده و مقادیر راندمان نهمزدایی پیش‌بینی شده با مقادیر تجربی که توسط برخی از محققین ارائه شده، مقایسه شده است.

**واژگان کلیدی:** نهمزدایی از هوا، ستون پر شده، مایع نهمزدا، حل‌تحلیلی



## فهرست مطالب

صفحه

عنوان

### فصل اول: مروری بر مطالعات آزمایشگاهی و مدل سازی صورت گرفته

|    |   |
|----|---|
| ۳  | ۱-۱ تحقیقات آزمایشگاهی صورت گرفته‌ی اخیر..... |
| ۷  | ۲-۱ مدل های ریاضی ارائه شده .....             |
| ۷  | ۱-۲-۱ مدل فومو و گوسوامی (۲۰۰۲).....          |
| ۸  | ۲-۲-۱ مدل گندهیداسان (۲۰۰۴) .....             |
| ۱۰ | ۳-۲-۱ مدل چن و همکاران (۲۰۰۶) .....           |
| ۱۱ | ۴-۲-۱ مدل چنگ کین و همکاران (۲۰۰۶) .....      |
| ۱۳ | ۵-۲-۱ مدل گندهیداسان (۲۰۰۵) .....             |
| ۱۴ | ۶-۲-۲ مدل لونگو و گاسپارلا (۲۰۰۵) .....       |

### فصل دوم: مدل سازی ریاضی

|    |   |
|----|---|
| ۱۷ | ۱-۲ بازدهی برج های نمزدا .....                            |
| ۱۸ | ۲-۲ مدل ریاضی .....                                       |
| ۱۹ | ۱-۲-۲ موازنه‌ی جرم بخار آب در فاز گاز (حجم کنترل I) ..... |
| ۲۰ | ۲-۲-۲ موازنه‌ی انرژی در فاز گاز (حجم کنترل I) .....       |
| ۲۱ | ۳-۲-۲ موازنه‌ی جرم کلی روی حجم کنترل III .....            |
| ۲۱ | ۴-۲-۳ موازنه‌ی جرم بخار آب روی حجم کنترل III .....        |
| ۲۱ | ۴-۲-۳ موازنه‌ی انرژی در فاز مایع (حجم کنترل II) .....     |
| ۲۲ | ۳-۲ ضرایب انتقال جرم و حرارت .....                        |
| ۲۳ | ۱-۳-۲ محاسبه‌ی ضرایب انتقال جرم و حرارت .....             |
| ۲۶ | ۴-۲ سطح مؤثر انتقال جرم و حرارت .....                     |
| ۲۸ | ۵-۲ فشار بخار تعادلی .....                                |
| ۲۸ | ۱-۵-۲ فشار بخار تعادلی لیتیوم کلراید .....                |

|    |  |
|----|--|
| ۲۸ | ..... ۲-۵-۲ فشار بخار تعادلی تری اتیلن گلایکول |
| ۳۱ | ..... ۲-۶ خواص فیزیکی محلول تری اتیلن گلایکول  |
| ۳۳ | ..... ۲-۷ افت فشار                             |
| ۳۳ | ..... ۲-۷-۱ نقطه‌ی انباشتگی و نقطه‌ی طغیان     |
| ۳۴ | ..... ۲-۷-۲ روابط مربوط به پیش‌بینی افت فشار   |
| ۳۷ | ..... ۲-۸ حل عددی                              |
| ۳۸ | ..... ۲-۹ حل تحلیلی                            |

### فصل سوم: نتایج و بحث

|    |   |
|----|---|
| ۴۵ | ..... ۳-۱ آنالیز دقت مدل و حل عددی  |
| ۶۰ | ..... ۳-۲ تأثیر پارامترهای عملیاتی بر روی فرآیند نم‌زدایی و احیاء                 |
| ۷۰ | ..... ۳-۳ ارتفاع ستون دیفرانسیلی بر اساس تعداد واحدهای انتقال فاز گاز             |
| ۷۱ | ..... ۳-۴ آنالیز حل تحلیلی  |
| ۷۹ | ..... ۳-۵ مقایسه‌ی آکنه‌های تصادفی و ساختاریافته                                  |
| ۸۴ | ..... ۳-۶ مقایسه‌ی محلول‌های لیتیوم کلراید و تری اتیلن گلایکول در فرآیند نم‌زدایی |
| ۸۵ | ..... ۳-۷ راندمان نم‌زدایی  |

### فصل چهارم: نتیجه گیری و پیشنهادات

|    |                     |
|----|---------------------|
| ۹۰ | ..... منابع و مآخذ: |
|----|---------------------|

## فهرست شکل‌ها

| عنوان  | صفحه |
|--|------|
| شکل (۱-۱) سیستم نم‌زدایی هوا.....  | ۳    |
| شکل (۱-۲) شمایی از یک جزء دیفرانسیلی در یک برج نم‌زدا.....   | ۲۰   |
| شکل (۲-۲) فشار بخار محلول لیتیوم کلراید (یوامورا، ۱۹۶۷).....   | ۲۹   |
| شکل (۳-۲) فشار بخار محلول تری‌اتیلن‌گلایکول (Dow chemical company data, ۱۹۵۶).....   | ۳۰   |
| شکل (۴-۲) مقایسه‌ی بین مقادیر تجربی فشار بخار محلول لیتیوم کلراید با مقادیر پیش‌بینی شده توسط رابطه‌ی (۳۴-۲).....  | ۳۰   |
| شکل (۵-۳) مقایسه‌ی بین مقادیر تجربی فشار بخار محلول تری‌اتیلن‌گلایکول با مقادیر پیش‌بینی شده توسط رابطه‌ی (۳۵-۲).....  | ۳۱   |
| شکل (۶-۲) تغییرات افت فشار با دبی حجمی هوا.....  | ۳۴   |
| شکل (۱-۳) نمودار نتایج حاصل از مدل مربوط به تغییرات رطوبت هوا در طول برج در شرایط استفاده از روابط تجربی متفاوت و مقایسه‌ی آن با نتایج آزمایشگاهی چانگ و همکاران (۱۹۹۶) در فرآیند نم‌زدایی هوا با استفاده از محلول لیتیوم کلراید در یک برج پرشده با آکنه‌های ساختاریافته.....              | ۴۸   |
| شکل (۲-۳) نمودار نتایج حاصل از مدل مربوط به تغییرات دمای هوا در طول برج در شرایط استفاده از روابط تجربی متفاوت و مقایسه‌ی آن با نتایج آزمایشگاهی چانگ و همکاران (۱۹۹۶) در فرآیند نم‌زدایی هوا با استفاده از محلول لیتیوم کلراید در یک برج پرشده با آکنه‌های ساختاریافته.....               | ۴۸   |
| شکل (۳-۳) نمودار نتایج حاصل از مدل مربوط به تغییرات دمای محلول مایع نم‌زدا در طول برج در شرایط استفاده از روابط تجربی متفاوت و مقایسه‌ی آن با نتایج آزمایشگاهی چانگ و همکاران (۱۹۹۶) در فرآیند نم‌زدایی هوا با استفاده از محلول لیتیوم کلراید در یک برج پرشده با آکنه‌های ساختاریافته..... | ۴۹   |
| شکل (۴-۳) نمودار نتایج حاصل از مدل مربوط به تغییرات غلظت محلول مایع نم‌زدا در طول برج در شرایط استفاده از روابط تجربی متفاوت و مقایسه‌ی آن با نتایج آزمایشگاهی چانگ و همکاران (۱۹۹۶) در فرآیند نم‌زدایی هوا با استفاده از محلول لیتیوم کلراید در یک برج پرشده با آکنه‌های ساختاریافته..... | ۴۹   |
| شکل (۵-۳) نمودار نتایج حاصل از مدل مربوط به تغییرات دبی محلول مایع نم‌زدا در طول برج در شرایط استفاده از روابط تجربی متفاوت و مقایسه‌ی آن با نتایج آزمایشگاهی چانگ و همکاران (۱۹۹۶) در فرآیند نم‌زدایی هوا با استفاده  |      |

از محلول لیتیوم کلراید در یک برج پر شده با آکنه‌های ساختاریافته ..... ۵۰

شکل ۳-۶) نمودار نتایج حاصل از مدل مربوط به تغییرات رطوبت هوا در طول برج در شرایط استفاده از روابط تجربی متفاوت و مقایسه‌ی آن با نتایج آزمایشگاهی فومو و گوسوامی (۲۰۰۲) در فرآیند نمزدایی هوا با استفاده از محلول لیتیوم کلراید در یک برج پر شده با آکنه‌های تصادفی ..... ۵۱

شکل ۳-۷) نمودار نتایج حاصل از مدل مربوط به تغییرات دمای هوا در طول برج در شرایط استفاده از روابط تجربی متفاوت و مقایسه‌ی آن با نتایج آزمایشگاهی فومو و گوسوامی (۲۰۰۲) در فرآیند نمزدایی هوا با استفاده از محلول لیتیوم کلراید در یک برج پر شده با آکنه‌های تصادفی ..... ۵۲

شکل ۳-۸) نمودار نتایج حاصل از مدل مربوط به تغییرات دمای محلول مایع نمزدا در طول برج در شرایط استفاده از روابط تجربی متفاوت و مقایسه‌ی آن با نتایج آزمایشگاهی فومو و گوسوامی (۲۰۰۲) در فرآیند نمزدایی هوا با استفاده از محلول لیتیوم کلراید در یک برج پر شده با آکنه‌های تصادفی ..... ۵۲

شکل ۳-۹) نمودار نتایج حاصل از مدل مربوط به تغییرات غلظت محلول مایع نمزدا در طول برج در شرایط استفاده از روابط تجربی متفاوت و مقایسه‌ی آن با نتایج آزمایشگاهی فومو و گوسوامی (۲۰۰۲) در فرآیند نمزدایی هوا با استفاده از محلول لیتیوم کلراید در یک برج پر شده با آکنه‌های تصادفی ..... ۵۳

شکل ۳-۱۰) نمودار نتایج حاصل از مدل مربوط به تغییرات دبی محلول مایع نمزدا در طول برج در شرایط استفاده از روابط تجربی متفاوت و مقایسه‌ی آن با نتایج آزمایشگاهی فومو و گوسوامی (۲۰۰۲) در فرآیند نمزدایی هوا با استفاده از محلول لیتیوم کلراید در یک برج پر شده با آکنه‌های تصادفی ..... ۵۳

شکل ۳-۱۱) نمودار نتایج حاصل از مدل مربوط به تغییرات رطوبت هوا در طول برج در شرایط استفاده از روابط تجربی متفاوت و مقایسه‌ی آن با مقادیر صنعتی (کوهل و نیلسن، ۱۹۶۰) در فرآیند نمزدایی هوا با استفاده از محلول تری‌اتیلن‌گلیکول در یک برج پر شده با آکنه‌های تصادفی ..... ۵۴

شکل ۳-۱۲) نمودار نتایج حاصل از مدل مربوط به تغییرات دمای هوا در طول برج در شرایط استفاده از روابط تجربی متفاوت و مقایسه‌ی آن با مقادیر صنعتی (کوهل و نیلسن، ۱۹۶۰) در فرآیند نمزدایی هوا با استفاده از محلول تری‌اتیلن‌گلیکول در یک برج پر شده با آکنه‌های تصادفی ..... ۵۵

شکل ۳-۱۳) نمودار نتایج حاصل از مدل مربوط به تغییرات دمای محلول مایع نمزدا در طول برج در شرایط استفاده از روابط تجربی متفاوت و مقایسه‌ی آن با مقادیر صنعتی (کوهل و نیلسن، ۱۹۶۰) در فرآیند نمزدایی هوا با استفاده از محلول تری‌اتیلن‌گلیکول در یک برج پر شده با آکنه‌های تصادفی ..... ۵۵

شکل ۳-۱۴) نمودار نتایج حاصل از مدل مربوط به تغییرات غلظت محلول مایع نمزدا در طول برج در شرایط استفاده از روابط تجربی متفاوت و مقایسه‌ی آن با مقادیر صنعتی (کوهل و نیلسن، ۱۹۶۰) در فرآیند نمزدایی هوا با استفاده از

- محلول تری اتیلن گلاکول در. یک برج پرشده با آکنه‌های تصادفی. ۵۶.....
- شکل ۳-۱۵) نمودار نتایج حاصل از مدل مربوط به تغییرات دبی محلول مایع نمزدا در طول برج در شرایط استفاده از روابط تجربی متفاوت و مقایسه‌ی آن با مقادیر صنعتی (کوهل و نیلسن، ۱۹۶۰) در فرآیند نمزدایی هوا با استفاده از محلول تری اتیلن گلاکول در یک برج پرشده با آکنه‌های تصادفی. ۵۶.....
- شکل ۳-۱۶) نمودار نتایج حاصل از مدل مربوط به تغییرات رطوبت هوا در طول برج در شرایط استفاده از روابط تجربی متفاوت و مقایسه‌ی آن با نتایج آزمایشگاهی فومو و گوسوامی (۲۰۰۲) در فرآیند احیاء محلول لیتیوم کلراید در یک برج پرشده با آکنه‌های تصادفی. ۵۸.....
- شکل ۳-۱۷) نمودار نتایج حاصل از مدل مربوط به تغییرات دمای هوا در طول برج در شرایط استفاده از روابط تجربی متفاوت و مقایسه‌ی آن با نتایج آزمایشگاهی فومو و گوسوامی (۲۰۰۲) در فرآیند احیاء محلول لیتیوم کلراید در یک برج پرشده با آکنه‌های تصادفی. ۵۸.....
- شکل ۳-۱۸) نمودار نتایج حاصل از مدل مربوط به تغییرات دمای محلول مایع نمزدا در طول برج در شرایط استفاده از روابط تجربی متفاوت و مقایسه‌ی آن با نتایج آزمایشگاهی فومو و گوسوامی (۲۰۰۲) در فرآیند احیاء محلول لیتیوم کلراید در یک برج پرشده با آکنه‌های تصادفی. ۵۹.....
- شکل ۳-۱۹) نمودار نتایج حاصل از مدل مربوط به تغییرات غلظت محلول مایع نمزدا در طول برج در شرایط استفاده از روابط تجربی متفاوت و مقایسه‌ی آن با نتایج آزمایشگاهی فومو و گوسوامی (۲۰۰۲) در فرآیند احیاء محلول لیتیوم کلراید در یک برج پرشده با آکنه‌های تصادفی. ۵۹.....
- شکل ۳-۲۰) نمودار نتایج حاصل از مدل مربوط به تغییرات دبی محلول مایع نمزدا در طول برج در شرایط استفاده از روابط تجربی متفاوت و مقایسه‌ی آن با نتایج آزمایشگاهی فومو و گوسوامی (۲۰۰۲) در فرآیند احیاء محلول لیتیوم کلراید در یک برج پرشده با آکنه‌های تصادفی. ۶۰.....
- شکل ۳-۲۱) تأثیر رطوبت هوای ورودی بر روی ارتفاع مؤثر آکنه در فرآیند نمزدایی هوا با استفاده از محلول لیتیوم کلراید. ۶۲.....
- شکل ۳-۲۲) تأثیر رطوبت هوای ورودی بر روی گرادیان انتقال جرم در فرآیند نمزدایی هوا با استفاده از محلول لیتیوم کلراید. ۶۳.....
- شکل ۳-۲۳) تأثیر دبی هوا بر روی ارتفاع مؤثر آکنه در فرآیند نمزدایی هوا با استفاده از محلول لیتیوم کلراید. ۶۳.....
- شکل ۳-۲۴) تأثیر غلظت ورودی مایع نمزدا بر روی ارتفاع مؤثر آکنه در فرآیند نمزدایی هوا با استفاده از محلول لیتیوم کلراید. ۶۴.....
- شکل ۳-۲۵) تأثیر غلظت ورودی مایع نمزدا بر روی گرادیان انتقال جرم در فرآیند نمزدایی هوا با استفاده از محلول

- لیتیوم کلراید..... ۶۴
- شکل ۳-۲۶) تأثیر دبی مایع نمزدا بر روی ارتفاع مؤثر آکنه در فرآیند نمزدایی هوا با استفاده از محلول لیتیوم کلراید ۶۵
- شکل ۳-۲۷) تأثیر دمای ورودی هوا بر روی ارتفاع مؤثر آکنه در فرآیند نمزدایی هوا با استفاده از محلول لیتیوم کلراید..... ۶۵
- شکل ۳-۲۸) تأثیر دمای ورودی مایع نمزدا بر روی ارتفاع مؤثر آکنه در فرآیند نمزدایی هوا با استفاده از محلول لیتیوم کلراید..... ۶۶
- شکل ۳-۲۹) تأثیر دمای ورودی مایع نمزدا بر روی گرادیان انتقال جرم در فرآیند نمزدایی هوا با استفاده از محلول لیتیوم کلراید..... ۶۶
- شکل ۳-۳۰) تأثیر رطوبت ورودی هوای بر روی ارتفاع مؤثر آکنه در فرآیند احیاء محلول لیتیوم کلراید..... ۶۸
- شکل ۳-۳۱) تأثیر دبی هوای بر روی ارتفاع مؤثر آکنه در فرآیند احیاء محلول لیتیوم کلراید..... ۶۸
- شکل ۳-۳۲) تأثیر غلظت ورودی مایع نمزدا بر روی ارتفاع مؤثر آکنه در فرآیند احیاء محلول لیتیوم کلراید..... ۶۹
- شکل ۳-۳۳) تأثیر دبی مایع نمزدا بر روی ارتفاع مؤثر آکنه در فرآیند احیاء محلول لیتیوم کلراید..... ۶۹
- شکل ۳-۳۴) تأثیر دمای ورودی مایع نمزدا بر روی ارتفاع مؤثر آکنه در فرآیند احیاء محلول لیتیوم کلراید..... ۷۰
- شکل ۳-۳۵) نمودار نتایج حاصل از حل تحلیلی مربوط به تغییرات رطوبت هوا در طول برج در شرایط استفاده از بهترین روابط تجربی به دست آمده و مقایسه‌ی آن با نتایج آزمایشگاهی فومو و گوسوامی (۲۰۰۲) در فرآیند نمزدایی هوا با استفاده از محلول لیتیوم کلراید در یک برج پر شده با آکنه‌های تصادفی..... ۷۲
- شکل ۳-۳۶) نمودار نتایج حاصل از حل تحلیلی مربوط به تغییرات دمای هوا در طول برج در شرایط استفاده از بهترین روابط تجربی به دست آمده و مقایسه‌ی آن با نتایج آزمایشگاهی فومو و گوسوامی (۲۰۰۲) در فرآیند نمزدایی هوا با استفاده از محلول لیتیوم کلراید در یک برج پر شده با آکنه‌های تصادفی..... ۷۳
- شکل ۳-۳۷) نمودار نتایج حاصل از حل تحلیلی مربوط به تغییرات دمای مایع نمزدا در طول برج در شرایط استفاده از بهترین روابط تجربی به دست آمده و مقایسه‌ی آن با نتایج آزمایشگاهی فومو و گوسوامی (۲۰۰۲) در فرآیند نمزدایی هوا با استفاده از محلول لیتیوم کلراید در یک برج پر شده با آکنه‌های تصادفی..... ۷۳
- شکل ۳-۳۸) نمودار نتایج حاصل از حل تحلیلی مربوط به تغییرات رطوبت هوا در طول برج نمزدا در شرایط استفاده از بهترین روابط تجربی به دست آمده و مقادیر مختلف عدد لوییس و مقایسه‌ی آن با نتایج آزمایشگاهی فومو و گوسوامی (۲۰۰۲) در فرآیند نمزدایی هوا با استفاده از محلول لیتیوم کلراید در یک برج پر شده با آکنه‌های تصادفی..... ۷۴
- شکل ۳-۳۹) نمودار نتایج حاصل از حل تحلیلی مربوط به تغییرات دمای هوا در طول برج نمزدا در شرایط استفاده از بهترین روابط تجربی به دست آمده و مقادیر مختلف عدد لوییس و مقایسه‌ی آن با نتایج آزمایشگاهی فومو و گوسوامی

(۲۰۰۲) در فرآیند نم‌زدایی هوا با استفاده از محلول لیتیوم کلراید در یک برج پرشده با آکنه‌های تصادفی.....۷۴

شکل ۳-۴۰) نمودار نتایج حاصل از حل تحلیلی مربوط به تغییرات دمای هوا در طول برج نم‌زدا در شرایط استفاده از بهترین روابط تجربی به دست آمده و مقادیر مختلف عدد لوییس و مقایسه‌ی آن با نتایج آزمایشگاهی فومو و گوسوامی (۲۰۰۲) در فرآیند نم‌زدایی هوا با استفاده از محلول لیتیوم کلراید در یک برج پرشده با آکنه‌های تصادفی.....۷۵

شکل ۳-۴۱) نمودار نتایج حاصل از حل تحلیلی مربوط به تغییرات رطوبت هوا در طول برج احیاء در شرایط استفاده از بهترین روابط تجربی به دست آمده و مقادیر مختلف عدد لوییس و مقایسه‌ی آن با نتایج آزمایشگاهی فومو و گوسوامی (۲۰۰۲) در فرآیند احیاء محلول لیتیوم کلراید در یک برج پرشده با آکنه‌های تصادفی.....۷۵

شکل ۳-۴۲) نمودار نتایج حاصل از حل تحلیلی مربوط به تغییرات دمای هوا در طول برج احیاء در شرایط استفاده از بهترین روابط تجربی به دست آمده و مقادیر مختلف عدد لوییس و مقایسه‌ی آن با نتایج آزمایشگاهی فومو و گوسوامی (۲۰۰۲) در فرآیند احیاء محلول لیتیوم کلراید در یک برج پرشده با آکنه‌های تصادفی.....۷۶

شکل ۳-۴۳) نمودار نتایج حاصل از حل تحلیلی مربوط به تغییرات دمای مایع نم‌زدا در طول برج احیاء در شرایط استفاده از بهترین روابط تجربی به دست آمده و مقادیر مختلف عدد لوییس و مقایسه‌ی آن با نتایج آزمایشگاهی فومو و گوسوامی (۲۰۰۲) در فرآیند احیاء محلول لیتیوم کلراید در یک برج پرشده با آکنه‌های تصادفی.....۷۶

شکل ۳-۴۴) نمودار مقایسه‌ی نتایج حاصل از حل‌های تحلیلی مربوط به رطوبت خروجی هوا در طول برج نم‌زدا در شرایط استفاده از بهترین روابط تجربی به دست آمده و با استفاده از نتایج آزمایشگاهی فومو و گوسوامی (۲۰۰۲) در فرآیند نم‌زدایی هوا با استفاده از محلول لیتیوم کلراید در یک برج پرشده با آکنه‌های تصادفی.....۷۸

شکل ۳-۴۵) نمودار مقایسه‌ی نتایج حاصل از حل‌های تحلیلی مربوط به دمای خروجی هوا در طول برج نم‌زدا در شرایط استفاده از بهترین روابط تجربی به دست آمده و با استفاده از نتایج آزمایشگاهی فومو و گوسوامی (۲۰۰۲) در فرآیند نم‌زدایی هوا با استفاده از محلول لیتیوم کلراید در یک برج پرشده با آکنه‌های تصادفی.....۷۸

شکل ۳-۴۶) نمودار مقایسه‌ی نتایج حاصل از حل‌های تحلیلی مربوط به دمای خروجی مایع نم‌زدا در طول برج نم‌زدا در شرایط استفاده از بهترین روابط تجربی به دست آمده و با استفاده از نتایج آزمایشگاهی فومو و گوسوامی (۲۰۰۲) در فرآیند نم‌زدایی هوا با استفاده از محلول لیتیوم کلراید در یک برج پرشده با آکنه‌های تصادفی.....۷۹

شکل ۳-۴۷) نمودار تأثیر آکنه‌های تصادفی و ساختار یافته در پیش‌بینی ارتفاع مورد نیاز از آکنه جهت دستیابی به یک راندمان مشخص از نم‌زدایی با استفاده از مقادیر آزمایشگاهی چانگ و همکاران (۱۹۹۶).....۸۱

شکل ۳-۴۸) نمودار تأثیر آکنه‌های تصادفی و ساختار یافته در پیش‌بینی ارتفاع مورد نیاز از آکنه جهت دستیابی به یک راندمان مشخص از نم‌زدایی با استفاده از داده‌های صنعتی کوهل و نیلسن (۱۹۶۰).....۸۲

شکل ۴-۴۹) نمودار تأثیر شکل آکنه‌ی تصادفی بر روی افت فشار بستر خیس.....۸۲

- شکل ۴-۵۰) نمودار تأثیر شکل آکنه‌ی ساختاریافته بر روی افت فشار بستر خیس ..... ۸۳
- شکل ۳-۵۱) نمودار مقایسه و تأثیر آکنه‌های تصادفی و ساختاریافته بر روی افت فشار بستر خیس ..... ۸۳
- شکل ۳-۵۲) مقایسه‌ی محلول‌های نم‌زدای لیتیوم کلراید و تری‌اتیلن‌گلیکول در فرآیند نم‌زدایی هوا با استفاده از نتایج آزمایشگاهی فومو و گوسوامی در یک برج پرشده با آکنه‌ی تصادفی (۲۰۰۲) ..... ۸۴
- شکل ۳-۵۳) تأثیر دبی هوا بر روی راندمان نم‌زدایی با استفاده از داده‌های فومو و گوسوامی (۲۰۰۲) ..... ۸۶
- شکل ۳-۵۴) تأثیر دبی محلول مایع نم‌زدا بر روی راندمان نم‌زدایی با استفاده از داده‌های فومو و گوسوامی (۲۰۰۲) ..... ۸۶



## فهرست جداول

| عنوان   | صفحه |
|---|------|
| جدول (۱-۱) چکیده مشخصات و نتایج مطالعات آزمایشگاهی اخیر در خصوص برج‌های نم‌زدا / احیاء در دوره‌ی زمانی ۲۰۰۰-۲۰۰۷..... | ۵    |
| جدول (۱-۲) روابط تجربی جهت محاسبه‌ی بازده‌ی نم‌زدایی.....   | ۱۸   |
| جدول (۲-۲) روابط تجربی جهت محاسبه‌ی ضریب انتقال جرم.....  | ۲۵   |
| جدول (۳-۲) روابط تجربی جهت محاسبه‌ی ضریب انتقال حرارت.....  | ۲۵   |
| جدول (۴-۲) روابط تجربی جهت محاسبه‌ی سطح مؤثر انتقال جرم.....  | ۲۷   |
| جدول (۵-۲) روابطی جهت محاسبه‌ی خواص ترموفیزیکی محلول تری‌اتیلن‌گلیکول.....  | ۳۲   |
| جدول (۶-۲) خواص فیزیکی نم‌زدهای مایع در ۲۵ درجه سانتیگراد.....  | ۳۳   |
| جدول (۷-۲) مشخصه‌های فیزیکی آکنه و ثابت‌های رابطه‌ی (۲-۴۰)، (رالف، ۱۹۸۷).....   | ۳۷   |
| جدول (۱-۳) شرایط عملیاتی و مشخصه‌های فیزیکی برج نم‌زدا.....   | ۴۶   |

## کوتاه نوشت‌ها

|  |                 |
|--|-----------------|
| سطح مخصوص آکنه به ازای واحد حجم، $m^2/m^3$                                     | $a_p$           |
| مساحت سطح مرطوب آکنه، $m^2/m^3$  | $a_w$           |
| سطح مقطع انتقال جرم، $m^2$   | $A$             |
| عرض کانال، $m$   | $B$             |
| نسبت ظرفیت حرارتی هوا به مایع، (بدون بعد)                                      | $c^*$           |
| حرارت مخصوص، $kJ/kg^\circ C$   | $c_p$           |
| ثابت‌های معادله‌ی (۲-۴۰)   | $C_1, C_2, C_3$ |
| ضریب نفوذ برای ترکیب کلیدی، $m^2/s$  | $D$             |
| قطر، $m$   | $d$             |
| ضریب انتقال جرم، $kmol/m^2s$   | $F$             |
| ضریب اصطکاک برای عبور جریان از یک ذره‌ی ساده، (بدون بعد)                       | $f_0$           |
| فلاکس جرمی هوا، $kg/m^2s$  | $G$             |
| ثابت گرانش، $m/s^2$  | $g$             |
| آنتالپی مخلوط هوا و بخار آب به ازای واحد جرم هوای خشک، $kJ/kg \text{ dry air}$ | $H$             |
| آنتالپی، $kJ/kg$   | $h$             |
| آنتالپی هوا در تعادل با مایع نهم‌زدای ورودی، $kJ/kg$                           | $h_e$           |
| تجمع مایع عملیاتی در بستر آکنه زیر نقطه انباشتگی، (بدون بعد)                   | $h_p$           |
| ضریب انتقال حرارت، $kw/m^2K$   | $h$             |
| ضریب انتقال حرارت اصلاح شده برای انتقال همزمان جرم و انرژی، $kJ/m^3s$          | $h'a_p$         |
| ارتفاع معادل با یک مرحله‌ی ایده‌آل، $m$  | $HETP$          |
| ضریب کلی انتقال جرم، $kmol/m^2s$   | $K$             |
| هدایت حرارتی گاز، $kw/mK$  | $k$             |

|   |           |
|---|-----------|
| فلاکس جرمی محلول مایع نمزدا، $kg/m^2s$        | $L$       |
| عدد لوییس (بدون بعد)                          | $Le$      |
| دبی چگالش آب، $g/s$                           | $m$       |
| نسبت ظرفیت حرارتی، (بدون بعد)                 | $m^*$     |
| دبی جرمی، $kg/s$                              | $m$       |
| وزن مولکولی، $kg/kmol$                        | $M$       |
| فلاکس انتقال جرم بخار آب، $kmol/m^2s$         | $N$       |
| عدد ناسلت، (بدون بعد)                         | $Nu$      |
| تعداد واحدهای انتقال جرم، (بدون بعد)          | $NTU$     |
| فشار، $Pa$                                    | $P$       |
| عدد پرائنتل، بدون بعد                         | $Pr$      |
| فلاکس حرارتی، $kJ/s$                          | $q$       |
| فلاکس حرارتی به ازای مساحت سطح مقطع، $kw/m^2$ | $q''$     |
| نسبت جرمی هوا به مایع بدون آب (بدون بعد)      | $R_m$     |
| نسبت ظرفیت حرارتی مخصوص بخار (بدون بعد)       | $R_{cv}$  |
| عدد رینولدز، (بدون بعد)                       | $Re$      |
| عدد اشمیت، (بدون بعد)                         | $Sc$      |
| عدد شروود، (بدون بعد)                         | $Sh$      |
| ضلع کانال، $m$                                | $S$       |
| دما، $^{\circ}C$                              | $T$       |
| دمای سیال گرم کننده، $^{\circ}C$              | $T_{h,i}$ |
| دمای آب خنک کننده، $^{\circ}C$                | $T_{c,i}$ |
| سرعت ظاهری، $m/s$                             | $U$       |
| رطوبت هوا ( $kg$ هوای خشک / $kg$ آب)          | $w$       |

|   |                  |
|---|------------------|
| غلظت مایع نمزدا، ( $kg$ محلول/ $kg$ مایع نمزدا) | $X$              |
| جزء مولی آب در محلول، $kmol/kmol$               | $x$              |
| رطوبت هوا ( $kg$ هوای خشک/ $kg$ آب)             | $Y$              |
| غلظت مولی آب در هوا، $kmol/kmol$                | $y$              |
| ارتفاع پکینگ، $m$                               | $Z$              |
| حروف یونانی                                     |                  |
| نسبت اختلاف فشار بخار به رطوبت، (بدون بعد)      | $\alpha$         |
| نسبت اختلاف دما، (بدون بعد)                     | $\beta$          |
| گرمای نهان چگالش یا تبخیر، $kJ/kg$              | $\lambda$        |
| بازدهی نمزدایی                                  | $\epsilon_y$     |
| بازدهی حرارتی                                   | $\epsilon_H$     |
| جزء خالی آکنه                                   | $\epsilon$       |
| عملکرد مبدل حرارتی                              | $\epsilon_{HE}$  |
| ویسکوزیتهی دینامیک، $kg/ms$                     | $\mu$            |
| دانسیته، $kg/m^3$                               | $\rho$           |
| ویسکوزیته، $N/m^2$                              | $\nu$            |
| کشش سطحی، $N/m$                                 | $\sigma$         |
| افت فشار بستر خیس، $Pa/m$                       | $\Delta P_{irr}$ |
| افت فشار بستر خشک، $Pa/m$                       | $\Delta P_d$     |
| اختلاف حرارت رقت، $J/kg$                        | $\Delta h_s$     |
| زیرنویس‌ها                                      |                  |
| هوا   | $a$              |
| برج   | $c$              |
| بستر خشک  | $d$              |
| مؤثر، شرایط تعادل                               | $e$              |