دانشگاه سیستان و بلوچستان

تحصیلات تکمیلی

پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی شیمی- گرایش فرآیندهای جداسازی

عنوان:

مطالعه همزمان انتقال‌جرم وحرارت سینی غربالی با استفاده از دینامیک‌سیالات‌محاسباتی

استاد راهنما:

دکتر رهبررحیمی

تحقیق و نگارش:

طلعت معینی

شهریور۹۲

بسمه تعالی

این پایان نامه با عنوان " **مطالعه همزمان جرم و حرارت سینی غربالی با استفاده از دینامیک‌سیالات محاسباتی** "، قسمتی از برنامه آموزشی دوره کارشناسی ارشد مهندسی‌شیمی توسط طلعت معینی با راهنمایی دکتر رهبررحیمی تهیه شده است. استفاده از مطالب آن به منظور اهداف آموزشی با ذکر مرجع و اطلاع کتبی به حوزه تحصیلات تکمیلی دانشگاه سیستان و بلوچستان مجاز می‌باشد.

طلعت معینی

این پایان نامه ۶ واحد درسی شناخته می‌شود و در تاریخ ..... توسط هیئت داوران بررسی و درجه ..... به آن تعلق گرفت.

	نام و نام خانوادگی	امضاء	تاریخ
استاد راهنما:	دکتر		
استاد مشاور:			
داور ۱:			
داور ۲:			
نماینده تحصیلات تکمیلی:			

دانشگاه سیستان و بلوچستان

تعهدنامه اصالت اثر

اینجانب **طلعت معینی** تعهد می‌کنم که مطالب مندرج در این پایان نامه حاصل کار پژوهشی اینجانب است و به دستاوردهای پژوهشی دیگران که در این نوشته از آن استفاده شده است مطابق مقررات ارجاع گردیده است. این پایان نامه پیش از این برای احراز هیچ مدرک هم سطح یا بالاتر ارائه نشده است.

کلیه حقوق مادی و معنوی این اثر متعلق به دانشگاه سیستان و بلوچستان می‌باشد.

نام و نام خانوادگی دانشجو: طلعت معینی

امضاء

تقدیم به:

روح پدر بزرگوارم :

کسی که از نگاهش صلابت ، از رفتارش محبت و از صبرش ایستادگی را آموختم تکیه‌گاهی که همواره در طول تحصیل مشوق و حامی و وجودش مایه دلگرمی و آرامش من بود.

و

مادر دلسوز و مهربانم :

که سجده‌ی ایثارش گل محبت را در وجودم پروراند و دامان گهربارش لحظه‌های مهربانی را به من آموخت یگانه فرشته مهربانی که تمام تجربه‌های زیبای زندگیم ، مدیون حضور اوست.

سپاسگزاری

سپاس و ستایش خدای جل و جلاله را که آثار قدرت او بر چهره روز روشن، تابان است و انوار حکمت او در دل شب تار، درفشان. آفریدگاری که خویشتن را به ما شناساند و درهای علم را بر ما گشود و عمری و فرصتی عطا فرمود تا بدان، بنده ضعیف خویش را در طریق علم و معرفت بیازماید.

بسی شایسته است از استاد راهنمای گرانقدرم جناب آقای **پروفسور رهبر رحیمی** کمال تشکر را داشته باشم که همواره به عنوان الگوی یک انسان بزرگ در خاطرم خواهد ماند.

از استاد فرزانه و دلسوز جناب آقای **دکتر محبی کلهری** که راهنماییهای ارزشمندشان همواره راه‌گشای راهم بودکمل تشکر را دارم .

از اساتید بزرگوارم جناب آقایان دکتر **حسین آتشی** و **فرشاد فرشچی تبریزی** که داوری این پایان نامه را بر عهده داشتند تشکر می‌کنم.

از خانواده عزیز و همراهان همیشگی‌ام که با فداکاری وشکیبایی بی‌دریغ خود مرا دلگرم نموده و در پیمودن این راه دشوار تنهایم نگذاشته‌اند سپاسگزاری می‌کنم و از خدای منان برایشان سلامتی وتندرستی را خواستارم.

در پایان هم از همه دوستانم که در راه انجام پایان‌نامه مرا یاری کردندتشکر و قدردانی می‌کنم.

چکیده :

سینی‌های غربالی به طور گسترده در برج‌های تقطیر، جذب و دفع، استخراج و راکتورهای دوغابی استفاده می‌شوند.آگاهی از جزییات هیدرودینامیک این سینی‌ها در طراحی درست و رفع مشکل‌های عملیاتی این سینی‌ها و افزایش بازده آن‌ها نقش غیرقابل انکاری دارد.امروزه با توجه به هزینه بالای انجام تحقیقات آزمایشگاهی ، روی آوردن به مدل‌سازی مخصوصاً استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی رو به افزایش است.

در پژوهش حاضر یک مدل سه بعدی ، دو فازی در چارچوب اولری- اولری برای شبیه‌سازی هیدرودینامیک، انتقال جرم و حرارت سینی غربالی با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی ارائه شده است .

برای شبیه‌سازی هیدرودینامیک هردو هندسه که هندسه ۱ شامل دو سینی و هندسه ۲ شامل نصف سینی است از سیستم آب – هوا استفاده شده است با توجه به اهمیت ناحیه سر کف سینی فاز گاز را فاز پراکنده و فاز مایع را پیوسته در نظرمی گیریم همچنین جریان فاز مایع آشفته و فاز گاز آرام است. شبیه‌سازی‌ها در دبی‌های مختلف گاز و مایع انجام شده است و پارامترهای هیدرولیکی مثل ارتفاع مایع زلال، ارتفاع سر کف و توزیع مایع روی سینی بررسی و با داده‌های آزمایشگاهی سولاری و بل و برخی از روابط تجربی مقایسه شده است.

برای شبیه‌سازی‌های انتقال جرم و حرارت که برای هندسه ۲ انجام شده است از سیستم متانول – پروپانول استفاده شده است همچنین برای محاسبه ضریب انتقال حرارت،رابطه رانز مارشال و ضریب انتقال جرم ، رابطه SRS به کار گرفته شده است. بازده مورفری و نقطه‌ای در سینی محاسبه شده است همچنین توزیع غلظت مایع و توزیع دمای مایع در طول سینی نشان داده شده است .

در این تحقیق اثرات غیریکنواختی جریان مانند نواحی ساکن، چرخشی و توزیع نامناسب سرعت در روی سینی بر روی بازده نقطه‌ای، مورفری و توزیع دمای مایع در روی سینی بررسی شده است .

کلمات کلیدی: سینی غربالی- هیدرودینامیک – انتقال جرم – انتقال حرارت – دینامیک سیالات محاسباتی – تقطیر

فهرست مطالب

فصل اول مقدمه ۱

۱-۱- مقدمه ۲

۱-۲- ضرورت انجام پروژه ۲

۱-۳- اهداف و نوآوری پروژه ۳

۱-۴- ساختار پروژه ۳

فصل **دوم مروری بر مفاهیم کلی و روابط استفاده شده** ۴

۲-۱- مقدمه ۵

۲-۲- تاریخچه‌ی تقطیر ۵

۲-۳- مزیت‌های عمده‌ی تقطیر ۶

۲-۴- عوامل موثر بر تقطیر ۶

۲-۴-۱- فشار عملیاتی ۷

۲-۴-۲- میزان مایع برگشتی ۷

۲-۴-۳- شرایط خوراک ورودی ۷

۲-۵- برج تقطیر ۸

۲-۵-۱- برج‌های آکنده ۸

۲-۵-۲- برج‌های سینی دار ۸

۲-۵-۲-۱- انواع سینی‌ها ۱۰

۲-۵-۲-۱-۱- سینی کلاهکی ۱۰

۲-۵-۲-۱-۲- سینی غربالی ۱۲

۲-۵-۲-۱-۳- سینی دریچه‌ای ۱۳

۲-۵-۲-۱-۴- سینی MVG ۱۴

۲-۵-۲-۱-۵- سینی دودکشی ۱۴

۲-۵-۲-۱-۶- سینی باران زا ۱۵
۲-۵-۲-۱-۷-Vacuum ۱۵
۲-۵-۲-۱-۸- سینی‌های سانتریفوژ ۱۶
۲-۵-۳- مشکلات ایجاد شده در برج‌های تقطیر ۱۶
۲-۵-۳-۱- پدیده ماندگی ۱۷
۲-۵-۳-۲- پدیده طغیان ۱۷
۲-۵-۳-۳- پدیده انسداد ۱۷
۲-۵-۳-۴- پدیده مخروطی شدن ۱۸
۲-۵-۳-۵- پدیده چکه کردن ۱۸
۲-۵-۳-۶- پدیده شرشر کردن ۱۸
۲-۵-۴- نمودار عملیاتی ۱۸
۲-۶- سینی غربالی ۱۹
۲-۷- هیدرودینامیک سینی ۲۰
۲-۷-۱- رژیم‌های جریان در روی سینی ۲۱
۲-۷-۱-۱- رژیم سر کف ۲۱
۲-۷-۱-۲- رژیم اسپری ۲۲
۲-۷-۱-۳- رژیم امولسیون ۲۲
۲-۷-۲- افت فشار ۲۲
۲-۷-۲-۱- افت فشار خشک ۲۳
۲-۷-۲-۲- افت فشار تر ۲۳
۲-۷-۲-۳- افت فشار کشش سطحی ۲۴
۲-۷-۳- ارتفاع مایع زلال ۲۴
۲-۷-۴- ارتفاع سر کف ۲۵
۲-۷-۵- متوسط جزء حجمی مایع در سر کف ۲۵
۲-۷-۶- شیب هیدرولیکی ۲۶
۲-۸- انتقال جرم ۲۶

۲-۸-۱- نظریه رسوخ ۲۶
۲-۸-۲- نظریه جایگزینی سطح ۲۷
۲-۸-۳- تئوری ترکیبی فیلمی – نفوذ عمقی و تجدید سطوح اتفاقی ۲۸
۲-۸-۴- تئوری کشش سطح ۲۸
۲-۸-۵- تئوری SRS ۲۹
۲-۹- بازده سینی‌ها ۳۰
۲-۹-۱- بازده کلی ۳۰
۲-۹-۲- بازده مورفری ۳۰
۲-۹-۳- بازده نقطه‌ای ۳۰
۲-۹-۴- رابطه بین بازده مورفری و نقطه‌ای سینی ۳۱
۲-۹-۴-۱- روابط تجربی برای بازده ۳۲
۲-۹-۵- انتقال حرارت ۳۲
۲-۹-۶- بازده حرارتی ۳۴
۲-۱۰- نتیجه‌گیری ۳۵
فصل سوم مروری بر کارهای گذشته ۳۵
۳-۱- مقدمه ۳۷
۳-۲- کارهای تجربی و مدل های ریاضی ۳۷
۳-۳- مروری بر شبیه‌سازی‌های هیدرودینامیک، انتقال حرارت و انتقال جرم ۳۸
۳-۴- نتیجه‌گیری ۴۳
فصل چهارم مدلسازی سیستم با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی و روش حل ۴۳
۴-۱- مقدمه ۴۵
۴-۲- دینامیک سیالات محاسباتی ۴۵
۴-۲-۱- مزایا و معایب CFD نسبت به روش‌های آزمایشگاهی ۴۶

۴-۲-۲- مراحل اصلی شبیه‌سازیCFD ۴۷
۴-۳- اجزای روش حل عددی ۴۷
۴-۳-۱- روش تفاضل محدود ۴۸
۴-۳-۲- روش حجم محدود ۴۸
۴-۳-۳- روش المان محدود ۴۸
۴-۳-۴- گسسته سازی ۴۸
۴-۴- مراحل مدل‌سازی ۴۹
۴-۵- مدل های ارائه شده برای بررسی جریان چند فازی ۴۹
۴-۶- فرضیات مدل‌سازی ۵۰
۴-۷- معادلات حاکم بر جریان سیال ۵۱
۴-۷-۱- معادله پیوستگی ۵۱
۴-۷-۲- معادله‌ی اندازه حرکت ۵۱
۴-۷-۳- معادله بقای انرژی ۵۲
۴-۷-۴- معادله انتقال جرم ۵۲
۴-۸- معادلات کمکی ۵۳
۴-۸-۱- ضریب انتقال حرارت ۵۵
۴-۸-۲- ضریب انتقال جرم ۵۵
۴-۹- نیروهای بین فازی ۵۶
۴-۹-۱- نیروی درگ ۵۶
۴-۹-۲- نیروی شناوری ۵۶
۴-۹-۳- نیروی جرم مجازی ۵۶
۴-۹-۴- نیروی بالابرنده ۵۷
۴-۹-۵- نیروی نفوذ درهمی ۵۸
۴-۹-۶- نیروی اثرات دیواره ۵۸

۴-۱۰- مدل های آشفتگی ۵۹
۴-۱۱- مشخصات هندسی ۶۱
۴-۱۲- شبکه‌بندی ۶۲
۴-۱۲-۱- استقلال از شبکه ۶۳
۴-۱۳- شرایط مرزی ۶۴
۴-۱۴- شرایط اولیه ۶۶
۴-۱۵- بررسی اثر گام زمانی ۶۷
۴-۱۶- سخت‌افزار به‌کاررفته در شبیه‌سازی ۶۷
۴-۱۷- نتیجه‌گیری ۶۸
فصل پنجم نتایج شبیه‌سازی و تحلیل آن ۶۸
۵-۱- مقدمه ۷۰
۵-۲- نتایج شبیه سازی ۷۰
۵-۲-۱- همگرایی سیستم ۷۰
۵-۲-۱-۱- همگرایی سیستم هندسه ۱ ..... ۷۰
۵-۲-۱-۲- همگرایی هندسه۲ ..... ۷۱
۵-۲-۲- نتایج هیدرودینامیک هندسه ۱ ..... ۷۱
۵-۲-۲-۱- توزیع سرعت افقی مایع ۷۲
۵-۲-۲-۲- الگوی جریان مایع روی سینی ۷۳
۵-۲-۲-۳- ارتفاع مایع زلال و ارتفاع سرکف ۷۵
۵-۲-۲-۴- توزیع مایع درون سیستم ۷۷
۵-۲-۳- نتایج هندسه ۲ ..... ۷۹
۵-۲-۳-۱- نتایج هیدرودینامیک ۷۹
۵-۲-۳-۱-۱- ارتفاع سرکف و ارتفاع مایع زلال ۷۹
۵-۲-۳-۱-۲- توزیع سرعت افقی مایع ۸۱
۵-۲-۳-۱-۳- الگوی جریان مایع روی سینی ۸۲

۵-۲-۳-۱-۴- توزیع مایع درون سینی ۸۳
۵-۲-۳-۲- نتایج انتقال جرم ۸۴
۵-۲-۳-۲-۱- توزیع کسرمولی مایع ۸۵
۵-۲-۳-۲-۲- بازده نقطهای ۸۶
۵-۲-۳-۲-۳- بازده مورفری ۸۷
۵-۲-۳-۳- نتایج انتقال حرارت ۸۸
۵-۳- نتیجه‌گیری ۹۱
فصل ششم نتیجه‌گیری وپیشنهادات ۹۲
۶-۱- نتیجه‌گیری ۹۳
۶-۲- پیشنهادات ۹۴
مراجع ۹۵
پیوست ۱۰۰

فهرست جدول‌ها

عنوان جدول

صفحه

جدول ۲-۱. برخی از ضرایب انتقال حرارت ۳۳

جدول ۴-۱. مشخصات هندسی سینی سولاری و بل..... ۶۲

جدول ۴-۲. حساسیت ارتفاع مایع زلال نسبت به تعداد گره‌های شبکه‌بندی..... ۶۴

جدول ۴-۳. مشخصات اصلی سخت‌افزار استفاده‌شده برای شبیه‌ساز..... ۶۷

فهرست شکل ها

شکل عنوان

صفحه

شکل ۲-۱. شماتیکی از برج سینی دار. ۱۰

شکل ۲-۲. سینی کلاهکی. ۱۱

شکل ۲-۳. سینی غربالی. ۱۲

شکل ۲-۴. سینی دریچه‌ای ۱۳

شکل ۲-۵. نمونه‌ای از دریچه های هدایت بخار سینی MVG ۱۵

شکل ۲-۶. سینی دودکشی ۱۵

شکل ۲-۷. طرحواره ای از مکانیزم تماس بخار و مایع در یک سوراخ سینی های Vacuum ۱۶

شکل۲-۸.نمودارعملیات سینی غربالی ۱۹

شکل ۴-۱. هندسه برج تقطیر: الف) هندسه۱؛ ب) هندسه ۲ .....۶۲

شکل ۴-۲. الف) شبکه‌بندی نصف سینی غربالی ب) شبکه‌بندی دو سینی غربالی.....۶۳

شکل ۵-۱. تغییرات ارتفاع مایع زلال با زمان درهندسه ۱..... ۷۱

شکل ۵-۲. تغییرات ارتفاع مایع زلال با زمان در هندسه ۲..... ۷۱

شکل ۵-۳.پروفایل سرعت افقی مایع برای $QL = ۰/۰۰۶۹۴ m^3/s$ و $Fs = ۱/۰۱۵$ ۷۲

شکل ۵-۴. پروفایل سرعت افقی مایع برای $QL = ۰/۰۱۷۸ m^3/s$ و $Fs = ۰/۸۰۱$ ۷۳

شکل ۵-۵. توزیع سرعت مایع در سینی ۱ در ارتفاعات مختلف از کف سینی ۷۴

شکل ۵-۶. توزیع سرعت مایع در سینی۲ در ارتفاعات مختلف از کف سینی ۷۴

شکل ۵-۷. ارتفاع مایع زلال بر حسب F - فاکتور در دبی ثابت مایع$QL = ۰/۰۱۷۸ \ m^3/s$ ۷۵

شکل ۵-۸. ارتفاع مایع زلال برحسب دبی مایع ،QL ، در$Fs = ۰/۴۶۲$ ۷۶

شکل ۵-۹.تغییرات ارتفاع سرکف با پارامتر F در دبی ثابت مایع $QL = ۰/۰۱۷۸\ m^3/s$ ۷۷
شکل ۵-۱۰.کانتورهای کسر حجمی مایع در صفحه،$X= 0$، در مرکز سینی برای $QL=۰/۰۰۶۹۴\ m^3/s$.... ۷۸
شکل ۵-۱۱.کانتورهای کسرحجمی مایع دردبی ثابت بخاردر صفحه،$X= 0$، در مرکز سینی برای$Fs=۱/۴۶۴$ ۷۹
شکل ۵-۱۲. تغییرات ارتفاع مایع زلال با F – فاکتور در دبی ثابت $QL = ۰/۰۱۷۸\ m^3/s$ ۸۰
شکل ۵-۱۳. تغییرات متوسط کسرمولی مایع در سرکف با دبی مایع درF- فاکتور ثابت$QL =۰/۰۱۷۸\ m^3/s$ ۸۰
شکل ۵-۱۴. تغییرات ارتفاع سرکف با F – فاکتور در دبی ثابت $QL = ۰/۰۱۷۸\ m^3/s$ ۸۰
شکل ۵-۱۵. پروفایل سرعت افقی مایع در $QL =۰/۰۱۷۸\ m^3/s$ و $FS =۰/۴۶۲$..... ۸۱
شکل ۵-۱۶. بردارهای سرعت در ارتفاعات مختلف از کف سینی در $QL = ۰/۰۱۷۸\ m^3/s$ و$FS =۰/۴۶۲$. ۸۲
شکل ۵-۱۷. بردارهای سرعت در ارتفاعات مختلف از کف سینی در $QL =۰/۰۱۷۸\ m^3/s$ و$FS =۰/۸۰۱$ .. ۸۳
شکل ۵-۱۸. کانتورهای کسر حجمی مایع در $QL = ۰/۰۰۶۹۴\ m^3/s$ ۸۴
شکل ۵-۱۹ .منحنی کسرمولی متانول در فاز مایع برای$Xm = ۰/۲۷۹$ ۸۵
۵-۲۰ . منحنی کسرمولی متانول در فاز مایع برای$Xm = ۰/۴۱$ ۸۶
۵-۲۱. منحنی کسرمولی متانول در فاز مایع برای$Xm = ۰/۵۵۵$ ۸۶
شکل ۵-۲۲. منحنی کسرمولی متانول در فاز مایع برای$Xm = ۰/۷۷۱$ ۸۶
۵-۲۳.منحنی کسرمولی متانول در فاز مایع برحسب کسرمولی متوسط مایع..... ۸۷
شکل ۵-۲۴.منحنی بازده نقطهای در $Xm = ۰/۲۷۹$ ۸۸
شکل ۵-۲۵. منحنی بازده نقطهای در کسرمولی های متفاوت در طول سینی ۸۸
شکل ۵-۲۶. بازده مورفری سینی ۸۹
شکل ۵-۲۷ . بازده مورفری سینی در طول سینی در کسرمولی های متفاوت..... ۸۹
شکل ۵-۲۸ . منحنی توزیع دما در طول سینی برای$Xm = ۰/۲۷۹$ ۹۰
شکل ۵-۲۹منحنی توزیع دما در طول سینی برای$Xm = ۰/۵۵۵$ ۹۰
شکل ۵-۳۰. منحنی توزیع دما در طول سینی برای$Xm = ۰/۶۴۴۷$ ۹۰
شکل ۵-۳۱. منحنی توزیع دما در طول سینی برای$Xm = ۰/۷۷۱$ ۹۱
شکل ۵-۳۲. منحنی توزیع دما در طول سینی برای کسرمولیهای متفاوت ۹۱

فهرست علائم

علامت	نشانه
$A_B(m^2)$	سطح حباب ساز
$A_{cl}(m^2)$	سطح مقطع ورودی مایع
$A_p(m^2)$	سطح مقطع سوراخ‌های سینی
$a_e(m^{-1})$	سطح مشترک موثر بر واحد حجم
C_D	ضریب درگ
$D_{AG}(m/s^2)$	ضریب نفوذ جزء A در فاز گاز
$D_{AL}(m/s^2)$	ضریب نفوذ جزء A در فاز مایع
$d_G(m)$	قطر حباب گاز
$d_h(m)$	قطر سوراخ
$F_S(m/s\left(kg/m^3\right)^{0.5})$	F-factor
$g(m/s^2)$	شتاب گرانش
$G(Kmol/s)$	دبی مولی فاز گاز
$h_{cl}(m)$	ارتفاع مایع زلال
$h_{dt}(m)$	افت فشار خشک
$h_f(m)$	ارتفاع سر کف
$h_\sigma(m)$	افت فشار
$h_T(m)$	افت فشار کل
$K_G(m/s)$	ضریب انتقال جرم فاز گاز
$K_L(m/s)$	ضریب انتقال جرم فاز مایع
K_{OG} (m/s)	ضریب انتقال جرم کلی فاز گاز
K_{OL} (m/s)	ضریب انتقال جرم کلی فاز مایع
$L(Kmol/s)$	دبی مولی فاز مایع

L_{W} (m)	طول بند
m	شیب منحنی تعادل
$M_{\mathrm{A}}(^{kg}/_{kgmol})$	وزن مولکولی جزء A
$M_{\mathrm{B}}(^{kg}/_{kgmol})$	وزن مولکولی جزء B
$M_{\mathrm{GL}}(\mathrm{kg}m^{-2}s^{-2})$	انتقال اندازه حرکت بین فازی
$P_{\mathrm{G}}(N/m^2)$	فشار فاز گاز
$P_{\mathrm{L}}(N/m^2)$	فشار فاز مایع
Q_{G} (m^3/s)	دبی حجمی گاز
Q_{L} (m^3/s)	دبی حجمی مایع
Q_{LG} (w/m^3)	حرارت منتقل‌شده بین فاز گاز و مایع
$r_G{}^{\mathrm{average}}$	متوسط ماندگی گاز در سر کف
$\mathrm{r_G}$	کسر حجمی فاز گاز
$\mathrm{r_L}$	کسر حجمی فاز مایع
$S_{\mathrm{LG}}(\ kg/\mathrm{m}^3\mathrm{s})$	سرعت انتقال جرم بین فازی
$\theta, t(sec)$	زمان
$T_{\mathrm{G}}(K)$	دمای گاز
$T_{\mathrm{L}}(K)$	دمای مایع
$\mathrm{U_h(m/s)}$	سرعت گاز در سوراخ‌های سینی
$\mathrm{U_{L,in}(m/s)}$	سرعت مایع ورودی
$V_{\mathrm{S}}, U_{sg}(\mathrm{m/s})$	سرعت ظاهری گاز
$V_{\mathrm{R}}(\mathrm{m/s})$	سرعت متوسط صعود حباب‌ها
$V_{\mathrm{slip}}(\mathrm{m/s})$	سرعت لغزش حباب‌ها نسبت به مایع
$W(\mathrm{m})$	طول بند
x_{i}	کسر مولی جزء i در فاز مایع

x_{m}	غلظت متوسط متانول در فاز مایع
y_{i}	کسر مولی جزء i در فاز گاز
ε	میزان انحراف انرژی جنبشی آشفتگی
$\beta_{\mathrm{LG}}(\mathrm{w/m^2k})$	ضریب انتقال حرارت بین فازی
$\rho_{\mathrm{L}}(kg/m^3)$	چگالی مایع
$\rho(\mathrm{kg/m^3})$	چگالی
$\rho_{\mathrm{G}}(kg/m^3)$	چگالی گاز
$\mu_{\mathrm{eff,G}}(kg/m\ s)$	لزجت موثر گاز
$\mu_{\mathrm{eff,L}}(kg/m\ s)$	لزجت موثر مایع
$\sigma(\mathrm{N/m})$	کشش سطحی

فصل اول

مقدمه