دانشگاه سیستان و بلوچستان

تحصیلات تکمیلی

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی شیمی طراحی فرآیند های جداسازی

عنوان:

بررسی هیدرودینامیک و انتقال جرم راکتور هواخیز با استفاده از آنالیز CFD

اساتید راهنما:

دکتر مرتضی زیودار

پروفسور رهبر رحیمی

تحقیق و نگارش:

مهدی مهدوی

مهرماه ۱۳۹۱

بسمه تعالی

این پایان نامه با عنوان بررسی هیدرودینامیک و انتقال جرم راکتور هواخیز با استفاده از آنـالیز CFD قسـمتی از برنامه آموزشی دوره کارشناسی ارشد مهندسی شیمی توسط دانشجو مهدی مهدوی تحت راهنمـایی اسـتاد پایان نامه دکتر مرتضی زیودار و پروفسور رهبر رحیمی 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 می باشد.

مهدی مهدوی

این پایان نامه ۶ واحد درسی شناخته می شود و در تاریخ ..... توسط هیئت داوران بررسـی و درجـه ..... به آن تعلق گرفت.

امضاء **تاریخ**

استاد راهنما: دکتر مرتضی زیودار

استاد راهنما: پروفسور رهبر رحیمی

داور 1: دکتر داود محبی

داور 2: دکتر جعفر صادقی

نماینده تحصیلات تکمیلی دکتر قدرت ا... رودینی

تعهدنامه اصالت اثر

اینجانب مهدی مهدوی تأیید می کنم 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 ارایه نشده است.

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

نام و نام خانوادگی دانشجو: مهدی مهدوی

امضاء

این اثر ناچیز را تقدیم می کنم به:

خانواده ی عزیزم

سپاسگزاری

اکنون که به لطف و یاری خداوند تحقیق و نگارش این پایان نامه به اتمام رسیده است، بر خود لازم می دانم که از استاد گرانقدر دکتر مرتضی زیودار و دکتر رهبر رحیمی که راهنمایی این پروژه را به عهده داشتند و در طول این تحقیق از راهنمایی های ایشان بهره برده ام مراتب تشکر و قدردانی را بجا آورم. از تمامی اساتید بزرگوارم که در طول تحصیل همواره راهنما و مشوق بنده بوده اند سپاسگزارم . از دکتر طالب زارعی و مهندسین حسین نسیم افزا، مصطفی نیرومند، مهدی محمدی و هیمن خالد و سایر دوستان عزیزم که در انجام این تحقیق مرا یاری کرده اند بسیار تشکر و قدر دانی می کنم.

از خداوند متعال برای همه این عزیزان آرزوی موفقیت و سربلندی را در تمامی مراحل زندگیشان دارم.

مهدی مهدوی

مهرماه ۱۳۹۱

چکیده:

راکتورهای هواخیز در صنعت به خصوص برای تولید برخی ترکیبات مانند اسیدهای ارگانیک،گلایکول‌ها ،الکل‌هاو پارافین‌ها کاربرد فراوان دارند. به علت توانایی این راکتورها در ایجاد اختلاط و سرعت چرخش بالا همچنین در تصفیه پساب‌ها، تولید مواد شیمیایی، فرآیند لیچینگ نیز استفاده می شوند. بسیاری از فرآیندهای بیولوژیکی مانند نیتروژن زدایی به مقادیر زیاد اکسیژن نیاز دارند. بنابراین انتقال اکسیژن پارامتر مهمی در فعالیت متابولیک و بازدهی کلی فرآیند است.

این تحقیق شامل دو بخش است.مرحله ی اول ساخت راکتور هواخیز و انجام آزمایش بر روی آن و مرحله ی دوم شبیه سازی سه بعدی این راکتور. در قسمت آزمایش‌ها به بررسی میزان انتقال اکسیژن از هوا به آب پرداخته شده است.انتقال جرم در راکتورهای چندفازی به عملکرد هیدرودینامیکی قسمت‌های مختلف راکتور وابسته است .هیدرودینامیک به اثر متقابل شرایط عملیاتی ، هندسه راکتور و خواص فیزیکی- شیمیایی فازها مرتبط است.پارامترهای مهم هیدرودینامیکی در راکتورهای هواخیز کسر حجمی گاز و سرعت گردش مایع است. آزمایشها بر روی راکتور هواخیزی به ارتفاع ۲ متر، قطر ناودانی ۱۵ سانتی متر و قطر بالابرنده ۱۰ سانتی مترصورت گرفت.در تمام آزمایش‌ها ارتفاع اولیه مایع ۱۱۰ سانتی متر بوده است و از سیستم آب- هوا برای این راکتور استفاده شده است.

در مرحله‌ی دوم این راکتور به صورت سه بعدی در نرم افزار Ansys.CFX 11 شبیه سازی شد.و در محدوده سرعت گاز ورودی ۰/۰۱۸ m/sec -۰/۰۰۱۷۳، مقادیر پارامترهای هیدرودینامیکی و انتقال جرم در تمام قسمت‌های راکتور بدست آمد.

در این شبیه سازی علاوه بر نظریه هیگبی از نظریه‌های دیگری برای پیش بینی ضریب انتقال جرم حجمی مایع استفاده گردید. در نهایت مقادیر حاصل از شبیه سازی با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه شد که در مورد پارامترهای هیدرودینامیکی به طور متوسط اختلاف ۲۰ درصدی بین نتایج مشاهده شد.

کلمات کلیدی : راکتور هواخیز، دینامیک سیالات محاسباتی، هیدرودینامیک و انتقال جرم

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فصل اول : مقدمه ۱

۱-۱- مقدمه: ۲

۱-۲-اهداف پایان‌نامه ۴

۱-۳-ساختار پایان‌نامه ۵

فصل دوم : درآمدی بر راکتورهای هواخیز ۶

۲-۱- بیوراکتور ۷

۲-۲ -انواع بیوراکتورها ۷

۲-۲-۱- راکتور همزن دار پیوسته ۷

۲-۲-۲ –برج‌های حبابکار ۸

۲-۲-۳ -راکتورهای هواخیز ۹

۲-۳- انتخاب نوع راکتور ۱۳

۲-۴- مبانی راکتورهای هواخیز ۱۳

۲-۴-۱ - سرعت ظاهری گاز ۱۴

۲-۴-۲ -کسر حجمی گاز ۱۴

۲-۴-۳- سرعت لغزش ۱۵

۲-۴-۴ - زمان اختلاط ۱۶

۲-۴-۵ - سرعت ظاهری مایع ۱۶

۲-۴-۶ – رژیم‌های جریان ۱۸
۲-۴-۷- نسبت سطح مقطع‌ها ۱۹
۲-۴-۸ - ضریب کلی انتقال جرم گاز- مایع ۱۹
۲-۵ - عوامل مؤثر بر ضریب انتقال جرم ۲۵
۲-۵-۱ -انتقال جرم در راکتور هواخیز ۲۵
۲-۵-۲ - اثر سرعت ظاهری گاز ۲۷
۲-۵-۳- اثر هندسه راکتور ۲۸
۲-۵-۴- اثر خواص مایع ۳۲
۲-۶ -کارایی راکتورهای هواخیز ۳۲
۲-۶-۱ - ارتفاع راکتور ۳۳
۲-۶-۲- جداکننده گاز – مایع ۳۳
۲-۶-۳- نسبت سطح مقطع ها ۳۳
۲-۶-۴ -توزیع کننده گاز ۳۴
۲-۶-۵ -تجهیزات داخلی ۳۴
فصل سوم : کارهای آزمایشگاهی ۳۵
۳-۱-مقدمه ۳۶
۳-۲-پایلوت آزمایشگاهی راکتور هواخیز ۳۶
۳-۳-کالیبراسیون روتامتر گازی ۳۹
۳-۴-روشهای اندازه گیری : ۴۱
۳-۴-۱-کسر حجمی گاز: ۴۱
۳-۴-۲-سرعت گردش مایع و زمان اختلاط: ۴۲
۳-۴-۳-ضریب انتقال جرم ۴۳

۳-۵-شرایط انجام آزمایش‌ها ۴۴

۳-۶-نتیجه گیری ۴۴

فصل چهارم : دینامیک سیالات محاسباتی..... ۴۵

۴-۱- مقدمه ۴۶

۴-۲- دینامیک سیالات محاسباتی(CFD)..... ۴۶

۴-۳- روش‌های حل در دینامیک سیالات محاسباتی ۴۷

۴- ۴- معادلات حاکم بر جریان سیال ۵۰

۴-۴-۱- معادلات حاکم بر جریان سیال در حالت دو فازی..... ۵۰

۴-۴-۲- مدل‌های جریان آشفته..... ۵۱

۴-۴-۳- مدل‌های نیروی دراگ ۵۲

۴-۴-۴- مدل‌های ارائه شده برای بررسی جریان چند فازی..... ۵۴

۴-۵-گسسته سازی(Discritization)..... ۵۷

۴-۶-شریط مرزی ۵۷

۴-۶-۱-شرط مرزی ورودی ۵۸

۴-۶-۲-شرط مرزی خروجی..... ۵۸

۴-۷-فرضیات مورد استفاده در مدل سازی ۵۹

۴-۸- مروری بر نرم افزار CFX..... ۶۰

۴-۹- نتیجه گیری..... ۶۱

فصل پنجم : نتایج و تجزیه و تحلیل ۶۲

۵-۱-مقدمه ۶۳

۵-۲-مدل سازی دینامیک سیالات محاسباتی ۶۳

۵-۳-محاسبات استقلال از شبکه..... ۶۵

۵-۴-هیدرودینامیک سیستم ۶۶
۵-۴-۱-ماندگی گاز ۶۶
۵-۴-۲-سرعت ظاهری مایع ۷۱
۵-۴-۳-انتقال جرم ۷۴
۵-۵- نتیجه گیری ۷۹
فصل ششم : نتیجه گیری و پیشنهادات ۸۱
۶-۱-نتیجه گیری ۸۲
۶-۲-پیشنهادات ۸۳
پیوست‌ها ۹۰

فهرست شکل‌ها

عنوان شکل **صفحه**

شکل (۲-۱) انواع راکتورهای گاز مایع ۹

شکل (۲-۲) انواع راکتورهای هواخیز ۱۰

شکل (۲-۳) قسمت های مختلف دو نوع راکتور هواخیز ۱۷

شکل (۲-۴) رژیم های جریان در راکتور هواخیز ۱۸

شکل (۲-۵) مقاومت در مقابل انتقال جرم ۲۰

شکل (۳-۱) نمودار جریان مورد استفاده راکتور هواخیز ۳۶

شکل (۳-۲) طرحواره ی راکتور مورد استفاده و توزیع کننده گاز بکار رفته ۳۷

شکل (۳-۳) نمایی از راکتور هواخیز مورد آزمایش ۳۹

شکل (۳-۴) نحوه ی محاسبه ی ضریب انتقال جرم در سرعت ظاهری(Ug=0.008728(m/sec ۴۳

شکل(**۴-۱**) روش‌های مختلف حل عددی چند فازی ۵۵

شکل (۴-**۲**) مراحل حل در نرم افزار CFX. ۶۰

شکل (**۵-۱**) نمایی از راکتور هواخیز و شرایط مرزی آن ۶۳

شکل (۵-۲) نمایی از شبکه بندی راکتور هواخیز در نرم افزار Workbench ۶۵

شکل (۵-۳) بررسی استقلال از شبکه سیستم ۶۷

شکل (۵-۴) بررسی زمان پایداری سیستم ۶۷

شکل (۵-۵) انتخاب بهترین ضریب دراگ برای سیستم مورد نظر بر مبنای ماندگی کلی گاز ۶۸

شکل (۵-۶) کانتور ماندگی گاز در راکتور در سرعت های مختلف گاز ورودی ۶۹

شکل (۵-۷) نمودار ماندگی گاز حاصل از نتایج آزمایشگاهی،CFD و روابط تجربی ۷۰

شکل (۵-۸)تغییرات متوسط ماندگی گاز در بالابرنده با فاصله گرفتن از مرکز راکتور ۷۱

شکل (۵-۹)نمایش بردارهای سرعت مایع در سه ناحیه ی، پایین (a) وسط (b) و بالای برج(c) ۷۲

شکل(۵-۱۰)مقادیر متوسط سرعت ظاهری مایع در بالابرنده حاصل از نتایج آزمایشگاهی و CFD ۷۳

شکل (۵-۱۱) مقادیر متوسط سرعت ظاهری مایع در ناودانی حاصل از نتایج آزمایشگاهی و CFD.....۷۳

شکل (۵-۱۲)تغییرات متوسط سرعت ظاهری مایع در بالابرنده با فاصله گرفتن از مرکز راکتور.....۷۴

شکل (۵- ۱۳) مقایسه بین ضریب انتقال جرم حجمی بدست آمده حاصل کار آزمایشگاهی و روابط تجربی.۷۵

شکل (۵-۱۴)کانتور تغییرات میزان غلظت اکسیژن محلول در مایع در زمان های مختلف ۷۶

شکل(۵-۱۵) تغییرات ضریب انتقال جرم حجمی در طول راکتور در سرعت ظاهری گاز ورودی.....۷۷

شکل (۵-۱۶) میزان غلظت اکسیژن جذب شده در آب در سرعت های مختلف گاز ورودی به راکتور براساس نظریه های موجود ۷۸

فهرست جداول

عنوان جدول **صفحه**

جدول (**۲-۱**) روابط تجربی منتشر شده برای پیش بینی ماندگی گاز در راکتورهای هواخیز..... ۱۴

جدول (۲-۲) برخی از روابط پیش بینی شده برای محاسبه سرعت چرخش مایع ۱۷

جدول (**۲-۳**) روابط تجربی برای محاسبه‌ی ضریب انتقال جرم حجمی..... ۲۴

جدول (**۳-۱**) مشخصات راکتور هواخیز مورد آزمایش..... ۳۸

جدول (**۳-۲**) نتایج مربوط به دبی مشاهده شده و دبی واقعی برای روتامترهای گاز..... ۴۰

جدول (۳-۳) مقادیر ارتفاع مایع بعد از هوادهی و ماندگی گاز بدست آمده حاصل کار آزمایشگاهی..... ۴۱

جدول (۳-۴) مقادیر بدست آمده مربوط به سرعت و زمان چرخش مایع..... ۴۲

جدول (**۵**-۱) خواص استفاده شده در شبیه سازی صورت گرفته..... ۶۴

جدول (**۵-۲**) مشخصات شبکه بندی راکتور شبیه سازی شده..... ۶۵

فهرست علایم

علامت	نشانه
$A\ (m^2)$	سطح مقطع
$D_L\ (\frac{m^2}{s})$	ضریب نفوذ مایع
$d_B(m)$	قطر حباب های گاز
$d_o(m)$	قطر روزنه توزیع کننده گاز
$\mathrm{Eo}=\frac{g\ \rho\ d_B^2}{\sigma}$	عدد بدون بعد اتووس
$g(\frac{m}{s^2})$	شتاب جاذبه
$h_D(m)$	ارتفاع ستون
$\mathrm{Re}=\frac{\rho u d}{\mu}$	عدد بدون بعد رینولدز
$U_{ld}(\frac{m}{s})$	سرعت ظاهری مایع در ناودانی
$U_{lr}(\frac{m}{s})$	سرعت ظاهری مایع در بالابرنده
$\rho\ (\frac{kg}{m^3})$	دانسیته
$\mu\ (\frac{kg}{m.s})$	گرانروی ملکولی
$\sigma\ (\frac{N}{m})$	کشش سطحی
ε	ماندگی گاز
$\upsilon\ (\frac{m^2}{s})$	ویسکوزیته سینماتیکی

فصل اول

مقدمه

۱-۱- مقدمه:

سیستم‌های چند فازی زیر مجموعه‌ای از سیستم‌های چند سیالی هستند که در آنها فاز پراکنده را قطرات یا حباب‌ها تشکیل می‌دهند. این سیستم‌ها شامل اختلاط گاز در مایع و نیز اختلاط مایع در مایع است که در محدوده وسیعی از صنایع شیمیایی مانند تولید، ذخیره و انتقال منابع گاز و نفت، پتروشیمی، بیوتکنولوژی، تبدیل انرژی، فرآیندهای جداسازی و محیط زیست مشاهده می‌شوند. عملیات صنعتی مانند تقطیر، جذب، دفع، واکنش‌های چندفازی، استخراج مایع- مایع، انتقال حرارت تماس مستقیم و غیره مثال‌هایی از سیستم-های چندسیالی هستند. جریان‌های چندسیالی در رژیم‌های مختلف جریان دیده می‌شوند که وابسته به شکل هندسی تجهیزات و شرایط عملیاتی هستند.

جریان‌های حبابکار عموماً شامل حباب‌های گاز پخش شده در فاز مایع هستند. این جریان‌ها به طور گسترده در تجهیزات تماس گاز - مایع مانند تانک‌های اختلاط، برج‌های حبابکار و راکتورهای هواخیز مشاهده می-شوند که عملکرد آنها تحت تأثیر جریان چندسیالی و اثرات متقابل بین فازهاست.اگرچه امروزه مخازن همزن-دار با تزریق گاز معمول‌ترین راکتور صنعتی هستند اما بهترین راکتور برای کشت میکروبی نمی‌باشند. انواع زیادی از بیوراکتورها امروزه استفاده می‌شوند. راکتورهای هواخیز گونه‌ای مهم از راکتورهای حبابکار هستند. درک پیچیدگی‌های دینامیک سیالات در برج‌های حبابکار به خاطر کاربرد وسیع آنها در صنایع بیولوژیکی اهمیت فراوانی دارد. همچنین درک اثری که هیدرودینامیک این سیستم‌ها بر روی نرخ تولید مواد شیمیایی از طریق فرآیندهای انتقال مانند انتقال اکسیژن بین فازها، اختلاط و اثرات (pH) دارد.

تاریخچه راکتورهای هواخیز از سال ۱۷۹۷ شروع می‌شود هنگامی که یک مهندس معدن آلمانی به نام لوشر آزمایشات خود را با قرار دادن یک لوله استوانه‌ای در یک برج حبابکار انجام داد از آن موقع این راکتورها به عنوان یک روش پمپاژ برای سیالات مانند آب، اسید سولفوریک و روغن استفاده می‌شدند. بعداً تا سال ۱۹۴۰ قوانین حاکم بر این راکتورها برای طراحی تخمیر کننده‌ها استفاده می‌شد که به خاطر مسایل اقتصادی و نگهداری مورد توجه قرار گرفت. در سال ۱۹۵۵ برای اولین بار لفرانکویس راکتورهای هواخیز را به عنوان بیوراکتور به صورت پتنت درآورد. امروزه نیز این راکتورها به صورت گسترده در صنایع مختلف بخصوص برای تولید مواد با پایه بیولوژیکی (مانند اسیدهای ارگانیک، گلایکول ها، الکل‌ها) استفاده می‌شوند.

بسیاری از محققین توجه خود را معطوف فاکتورهای موثر بر کارایی برج‌های حبابکار و مخازن اختلاط و طراحی و افزایش مقیاس آنها کرده‌اند. با این وجود راکتورهای هواخیز بعد از توسعه آنها در ۱۹۴۰ بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند. این توجه به خاطر مشخصات اختلاط عالی و سرعت گردش مایع مناسب و کاربرد گسترده آنها در صنعت است. به خصوص در تولید ترکیبات با پایه بیولوژیکی (مانند اسیدهای ارگانیک، گلایکول‌ها، آمین‌ها، الکل‌ها، آلکالوئیدها و پروتئین‌ها و ...) همچنین کاربرد آنها در پاکسازی خاک‌های آلوده به نفت و همچنین تصفیه هوازی آب‌های آلوده به کار می‌روند. در مقایسه با برج‌های حبابکار و مخازن اختلاط، طراحی مکانیکی نسبتاً ساده‌تر، تنش برشی کمتر، ظرفیت بالا، اختلاط خوب، عدم حضور همزن مکانیکی، مصرف پایین انرژی، افزایش مقیاس آسان و قیمت پایین در این راکتورها باعث افزایش کاربرد آنها در صنایع بیوشیمیایی شده است.

راکتورهای هواخیز گونه‌ای مهم از راکتورهای حبابکار هستند و اختلاف آنها با برج های حبابکار در این است که در برج‌های حبابکار جریان سیال تصادفی است در حالی که در راکتورهای هواخیز جریان چرخشی و سیکلی است. راکتورهای هواخیز عموما به ۴ قسمت عمده تقسیم می‌شوند که هر کدام شکل جریان خاص خود را داشته و راکتور را به قسمت‌هایی با جریان دوفازی بالا رونده و جریان به سمت پایین تقسیم‌بندی می‌کند. قسمت اول که گاز وارد آن می‌شود بالابر[1] نام دارد. جریان چندفازی به صورت هم جهت به سمت بالا حرکت می‌کند. این قسمت بیشترین کسر حجمی گاز را دارد که باعث می‌شود بیشترین انتقال جرم در این قسمت اتفاق بیفتد. مخلوط چندفازی پس از این قسمت وارد جداکننده بالای برج می‌شود که با توجه به شکل هندسی خاص آن تمام یا قسمتی از گاز از مایع جدا می‌شود. سپس از ناودان به پایین حرکت می‌کند. مایع این سیکل را پیوسته تکرار می‌کند.

در نتیجه تفاوت کسر حجمی گاز در دو قسمت راکتور، دانسیته مخلوط در دو قسمت متفاوت بوده و باعث گردش مایع می‌شود. وقتی جداسازی خوبی در بالای راکتور بین گاز و مایع صورت گیرد اختلاف دانسیته در دو قسمت بیشترین است که باعث بیشترین سرعت گردش مایع می‌شود.

[1] -Riser

کسر حجمی گاز، سرعت گردش مایع، زمان اختلاط و سرعت انتقال جرم مهمترین پارامترهای بررسی عملکرد راکتورهای هواخیز هستند. به خاطر سادگی آنها عملکرد هیدرودینامیک و انتقال جرم توسط پارامترهای کمی مانند سرعت گاز ورودی و شکل هندسی مسئله کنترل می‌شود.

در مقایسه با مخازن اختلاط و برجهای حبابکار ، تنش برشی در راکتورهای هواخیز کمتر و یکنواخت تر در طول راکتور است که این مزیت این گونه راکتورها باعث کاربرد گسترده آنها در عملیات بیولوژیکی می‌شود. البته امروزه کاربرد گسترده راکتورهای هواخیز به خاطر کمبود روابط و مدلهای پیشگوی پارامترهای مؤثر بر عملکرد آنها محدود شده است.

با توجه به هزینه های بالای انجام آزمایشات صنعتی و کارهای آزمایشگاهی، روی آوردن به روش‌های مدل-سازی روز به روز افزایش یافته است.در این میان ، در سال های اخیر استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی[1] در زمینه های گوناگون در مهندسی شیمی مورد توجه قرار گرفته است.

در این تحقیق به بررسی هیدرودینامیک و انتقال جرم پرداخته شده است.ابتدا به ساخت راکتور هواخیز پرداخته شد و سپس این راکتور به صورت سه بعدی شبیه سازی گردید.در شبیه سازی از نرم افزار تجاری Workbench برای رسم هندسه و شبکه بندی آن و از CFX 11 برای تعریف فیزیک مسئله،اعمال شرایط مرزی، اجرای مدل و تحلیل نتایج استفاده شده است.

۱-۲-اهداف پایان نامه

این تحقیق به بررسی پارامترهای هیدرودینامیک و انتقال جرم راکتورهای هواخیز پرداخته است.با نگاهی به پژوهش‌های صورت گرفته در زمینه راکتورهای هواخیز دیده می‌شود که بیشترین بررسی‌های انتقال جرم صورت گرفته بر پایه‌ی نظریه‌ی رسوخ هیگبی[2] است.در این تحقیق از نظریه‌های دیگری برای بررسی ضریب انتقال جرم مایع در راکتورهای هواخیز استفاده شده است،نظریه‌هایی که براساس فرضیه‌ی سطح متحرک و ثابت بین فاز گاز و فاز مایع و همچنین نظریه‌ی آشفتگی است. و در پایان این نتایج با مقادیر آزمایشگاهی مقایسه شده است.

---

[1] CFD

[2] Higbie

۱-۳-ساختار پایان‌نامه

با توجه به اهداف پروژه، در فصل دوم مفاهیم و روابط کلی هیدرودینامیک و نظریه‌های انتقال جرم به صورت خلاصه بیان خواهد شد.در فصل سوم به کارهای آزمایشگاهی صورت گرفته پرداخته شده است.فصل چهارم شامل مدل‌سازی سیستم به روش دینامیک سیالات محاسباتی، معادلات پیوستگی ،اندازه حرکت و انتقال جرم حاکم در این شبیه سازی و روش حل آن‌ها، می باشد.هندسه‌ی سیستم مورد نظر و شرایط فیزیکی آن و ارائه ی نتایج حاصل از شبیه سازی و تحلیل و توصیف آن‌ها در فصل پنجم گنجانده خواهد شد و در فصل ششم نتیجه گیری و ارائه پیشنهادات برای کارهای بعدی ذکر خواهد شد.

فصل دوم

درآمدی بر راکتورهای هواخیز