



دانشکده فنی و مهندسی
گروه مهندسی شیمی

پایان نامه جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد رشته مهندسی شیمی گرایش
طراحی فرآیندها

مدلسازی دینامیک سیالات محاسباتی اختلاط مواد با لزجت بالا در ظروف بهم زن با
پره ی ویسکوجت

استاد راهنما:

دکتر مسعود رحیمی

نگارش:

سعیده امرایی

تیر ماه ۱۳۸۹

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
۱	فصل اول - مروری بر استفاده از تکنولوژی دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) در مدلسازی اختلاط توسط پروانه در ظروف بهمزن
۳	۱-۱- مطالعات صورت گرفته در زمینه مدلسازی اختلاط توسط پروانه
۱۵	۲-۱- مروری بر مطالعات تجربی و مطالعات صورت گرفته با استفاده از CFD در زمینه اختلاط سیالات با لزجت بالا توسط پروانه
۳۴	۳-۱- مروری بر معیارهای مورد استفاده جهت تحلیل نتایج بدست آمده از CFD و توصیف جریان
۳۴	۱-۳-۱- توان و عدد توان
۳۵	۲-۳-۱- عدد جریان پره
۳۶	۳-۳-۱- زمان و شدت جریان چرخش
۳۷	۴-۳-۱- عدد جریان و حوری و زمان چرخش میانگین محوری
۳۸	۵-۳-۱- سرعت میانگین حجمی و اندیس اختلاط
۳۹	۶-۳-۱- اندیس جداشدگی
۳۹	۷-۳-۱- سرعت و توان مکش به سمت پایین (N _{JD} , P _{JD})
۴۰	۸-۳-۱- میدان سرعت و خطوط جریان
۴۰	۹-۳-۱- ردیابی ذرات
۴۱	۴-۱- مروری بر مطالعات عددی و تجربی صورت گرفته در زمینه اختلاط دو فاز مایع و جامد
۴۵	فصل دوم - دینامیک سیالات محاسباتی و مدلسازی جریانهای چند فازی
۴۶	۱-۲- دینامیک سیالات محاسباتی چیست؟
۴۷	۱-۱-۲- پیش تحلیل گر
۴۷	۲-۱-۲- حل کننده
۴۹	۳-۱-۲- تحلیلگر نهایی
۵۰	۲-۲- مقدمه‌ای بر مدلسازی جریانهای چند فازی
۵۰	۱-۲-۲- رژیم‌های جریان چند فازی
۵۱	۲-۲-۲- مثالهای از سیستم چند فازی
۵۲	۳-۲-۲- روشهای مدلسازی چند فازی
۵۲	۱-۳-۲-۲- روش اولر- لاگرانژ

صفحه	عنوان
۵۳	۲-۲-۳-۲-۲- روش اولر - اولر
۵۶	۲-۲-۴- انتخاب یک مدل چند فازی
۵۷	۲-۲-۵- محدودیت‌های موجود در استفاده از مدل‌های جریان چند فازی
۵۷	۲-۲-۵-۱- مدل VOF
۵۷	۲-۲-۵-۲- مدل mixture
۵۸	۲-۲-۵-۳- مدل Eulerian
۵۸	۲-۲-۵-۴- مدل Discrete phase
۵۹	۲-۲-۶- مروری بر روش‌های مدل‌سازی فاز مجزا
۶۰	۲-۲-۷- ثبات و همگرایی
۶۰	۲-۳-۳- معادلات حاکم بر مدل DPM
۶۰	۲-۳-۱- معادلات حرکات ذرات
۶۷	۲-۳-۲- پراکنندگی توربولنت ذرات
۷۳	۲-۳-۳- فرسایش و به هم پیوستگی ذرات
۷۴	۲-۴- پیوستگی بین فازهای پیوسته و مجزا
۷۷	۲-۵- تنظیم شرایط اولیه برای فاز مجزا
۷۷	۲-۵-۱- مروری بر شرایط اولیه
۷۹	۲-۵-۳- انواع ذرات
۷۹	۲-۵-۴- انواع شرایط مرزی فاز مجزا
۸۲	فصل سوم- انجام محاسبات توسط روش محاسبات دینامیکی سیال (CFD)
۸۳	۳-۱- تولید شکل هندسی
۸۴	۳-۱-۱- MRF
۸۴	۳-۲- مش بندی
۸۸	۳-۳- شرایط مرزی
۸۸	۳-۴- انتخاب معادلات اساسی جهت حل مسأله
۸۸	۳-۵- انتخاب شیوه محاسباتی و فرمول بندی حل
۸۸	۳-۵-۱- خلاصه‌ای از روش‌های عددی

صفحه	عنوان
۹۱	۳-۵-۲- خطی سازی: روش ضمنی در برابر روش صریح
۹۳	۳-۵-۳- مجزا سازی
۹۹	۳-۵-۴- حل کننده ی تفکیکی
۱۰۴	۳-۵-۵- حل کننده ی پیوسته
۱۰۶	۳-۵-۶- انتخاب روش مجزاسازی
۱۰۷	۳-۵-۷- انتخاب روش ارتباط فشار- سرعت
۱۰۸	۳-۶- تعیین خواص
۱۰۹	۳-۷- تعیین شرایط مرزی
۱۱۰	۳-۸- اجرای برنامه، بررسی و تحلیل نتایج
۱۱۰	۳-۸-۱- همگرایی در حل
۱۱۰	۳-۸-۲- تعریف مانده ها در حل تفکیکی
۱۱۳	فصل چهارم- ساخت پایلوت و انجام آزمایشات در مخزن پایلوت
۱۱۴	۴-۱- ساخت مخزن
۱۱۵	۴-۲- ساخت پره
۱۱۸	۴-۲-۱- بفل
۱۱۸	۴-۳- سایر تجهیزات مورد استفاده در آزمایش
۱۲۴	۴-۴- انجام آزمایشات در مخزن پایلوت
۱۲۸	۴-۵- نتایج آزمایشگاهی
۱۲۸	۴-۵-۱- تفاوت عملکرد اندازه های مختلف پره ویسکوجت
۱۴۹	۴-۵-۲- توان مصرفی پره Visco-Jet در اندازه های مختلف
۱۵۵	فصل پنجم- مدلسازی
۱۵۶	۵-۱- ساخت پره و مخزن
۱۵۸	۵-۱-۱- ساخت بفل
۱۵۸	۵-۱-۲- ساخت MRF
۱۵۹	۵-۲- مش بندی سیستم
۱۶۰	۵-۳- شرایط مرزی سیستم

صفحه	عنوان
۱۶۱	۴-۵- حل حالت پایدار مسئله
۱۶۳	فصل ششم- تحلیل نتایج و پیشنهادات
۱۶۴	۱-۶- بررسی نتایج مدلسازی اختلاط توسط اندازه های مختلف پره Visco- Jet
۱۶۴	۱-۱-۶- ساختار بدون بفل
۱۷۵	۲-۱-۶- ساختار بفل دار
	۳-۱-۶- نتیجه گیری و پیشنهادات

فهرست اشکال

صفحه	عنوان
۱۰	شکل (۱-۱) شکل هندسی مخزن‌های اختلاط در سه اندازه مختلف
۱۰	شکل (۲-۱) بردارهای سرعت داخل تانک به ازای ۲۰۰ rpm
۱۱	شکل (۳-۱) با شش پره توربینی با زاویه 45°
۱۲	شکل (۴-۱) نمودارهای بردار بدون بعد محوری- شعاعی
۱۳	شکل (۵-۱) نمایی از یک تانک بفل‌دار با پره‌های توربینی
۱۴	شکل (۶-۱) توزیع غلظت ردیاب پیش‌بینی شده در زمان‌های مختلف
۲۴	شکل (۷-۱) مخلوط‌کننده rotor-stator
۷۴	شکل (۱-۲) انتقال ممتوم، جرم و حرارت بین فازهای پیوسته و مجزا.
۷۸	شکل (۲-۲) تزریق ذره به صورت الف) سطحی، ب) خطی، ج) مخروط میان‌تهی.
۷۸	شکل (۳-۲) تزریق ذره معرف جریان ذره منفرد
۷۹	شکل (۴-۲) تزریق ذره معرف توزیع فضایی اولیه جریانهای ذرات.
۷۹	شکل (۵-۲) تزریق ذره معرف توزیع اسپری اولیه سرعت ذره.
۸۰	شکل (۶-۲) شرط مرزی «انعکاس» برای فاز مجزا
۸۱	شکل (۷-۲) شرط مرزی "تله" برای فاز مجزا
۸۱	شکل (۸-۲) شرط مرزی "escape" برای فاز مجزا
۸۸	شکل (۱-۳) الگوی مش‌بندی TGrid
۹۰	شکل (۲-۳) نگاهی به روش حل تفکیکی
۹۱	شکل (۳-۳) نگاهی به روش حل پیوسته
۹۴	شکل (۴-۳) حجم کنترلی برای مجزاسازی معادله انتقال
۹۶	شکل (۵-۳) تغییرات متغیر ϕ بین $x=0$ تا $x=l$
۹۷	شکل (۶-۳) حجم کنترل یک بعدی
۱۱۴	شکل (۱-۴) نمایی از مخزن اختلاط
۱۱۵	شکل (۲-۴) چند شکل مختلف از پره Visco- Jet
۱۱۵	شکل (۳-۴) نمایی از سیستم همزده همراه با پره Vico- Jet
۱۱۷	شکل (۴-۴) سائزهای مختلف پره Visco- Jet. الف) مخروطهای ساخته شده. ب) پره‌ها پس از

صفحه	عنوان
۱۱۷	ساخته شدن (d_1/d_2): نسبت قطر کوچک به قطر بزرگ مخروط)
۱۱۸	شکل (۵-۴) نمایی از مخزن اختلاط همراه با بفل های نصب شده.
۱۱۹	شکل (۶-۴) نمایی ازدورسنج
۱۱۹	شکل (۷-۴) صفحه با شیارهای سیاه و سفید
۱۲۰	شکل (۸-۴) دو نمونه سنسور مورد استفاده در ساخت دورسنج
۱۲۰	شکل (۹-۴) سنسور استفاده شده در ساخت دورسنج
۱۲۱	شکل (۱۰-۴) مدار مورد استفاده در سنسور
۱۲۲	شکل (۱۱-۴) مدار تقویت کننده
۱۲۳	شکل (۱۲-۴) آمپر متر مورد استفاده جهت اندازه گیری جریان
۱۲۳	شکل (۱۳-۴) نمایی از دستگاه ترکمتر استفاده شده
۱۲۴	شکل (۱۴-۴) دانه های پلیمری مورد استفاده در انجام آزمایشات
۱۲۵	شکل (۱۵-۴) یک نمای کلی از تجهیزات آزمایشگاهی
۱۲۸	شکل (۱۶-۴) نمودار گشتاور- جریان
۱۳۰	شکل (۱۷-۴) عملکرد پره Visco-jet با نسبت $d_1/d_2 = 0/2$ برای ساختار بدون بفل
۱۳۱	شکل (۱۸-۴) عملکرد پره Visco-jet با نسبت $d_1/d_2 = 0/3$ برای ساختار بدون بفل
۱۳۲	شکل (۱۹-۴) عملکرد پره Visco-jet با نسبت $d_1/d_2 = 0/4$ برای ساختار بدون بفل
۱۳۳	شکل (۲۰-۴) عملکرد پره Visco-jet با نسبت $d_1/d_2 = 0/5$ برای ساختار بدون بفل
۱۳۴	شکل (۲۱-۴) عملکرد پره Visco-jet با نسبت $d_1/d_2 = 0/6$ برای ساختار بدون بفل
۱۳۵	شکل (۲۲-۴) عملکرد پره Visco-jet با نسبت $d_1/d_2 = 0/7$ برای ساختار بدون بفل
۱۳۶	شکل (۲۳-۴) عملکرد پره Visco-jet با نسبت $d_1/d_2 = 0/8$ برای ساختار بدون بفل
۱۳۷	شکل (۲۴-۴) عملکرد پره Visco-jet با نسبت $d_1/d_2 = 0/9$ برای ساختار بدون بفل
۱۳۸	شکل (۲۵-۴) عملکرد پره Visco-jet با نسبت $d_1/d_2 = 1$ برای ساختار بدون بفل
۱۳۹	شکل (۲۶-۴) عملکرد پره Visco-jet با نسبت $d_1/d_2 = 0/2$ برای ساختار بفل دار
۱۴۰	شکل (۲۷-۴) عملکرد پره Visco-jet با نسبت $d_1/d_2 = 0/3$ برای ساختار بفل دار
۱۴۱	شکل (۲۸-۴) عملکرد پره Visco-jet با نسبت $d_1/d_2 = 0/4$ برای ساختار بفل دار
۱۴۲	شکل (۲۹-۴) عملکرد پره Visco-jet با نسبت $d_1/d_2 = 0/5$ برای ساختار بفل دار

صفحه	عنوان
۱۴۳	شکل (۳۰-۴) عملکرد پره Visco-jet با نسبت $d_1/d_2 = 0/6$ برای ساختار بفل دار
۱۴۴	شکل (۳۱-۴) عملکرد پره Visco-jet با نسبت $d_1/d_2 = 0/7$ برای ساختار بفل دار
۱۴۵	شکل (۳۲-۴) عملکرد پره Visco-jet با نسبت $d_1/d_2 = 0/8$ برای ساختار بفل دار
۱۴۶	شکل (۳۳-۴) عملکرد پره Visco-jet با نسبت $d_1/d_2 = 0/9$ برای ساختار بفل دار
۱۴۷	شکل (۳۴-۴) عملکرد پره Visco-jet با نسبت $d_1/d_2 = 1$ برای ساختار بفل دار
۱۴۹	شکل (۳۵-۴) نسبت $P_{JD(f)}/P_{JD(f) \min}$ برای ساختار بدون بفل در اندازه‌های مختلف پره‌ی Visco-Jet
۱۴۹	شکل (۳۶-۴) نسبت $P_{JD 4-6}/P_{JD 4-6 \min}$ برای ساختار بدون بفل در اندازه‌های مختلف پره‌ی Visco-Jet
۱۵۱	شکل (۳۷-۴) نسبت $P_{JD(f)}/P_{JD(f) \min}$ برای ساختار بفل دار در اندازه‌های مختلف پره‌ی Visco-Jet
۱۵۱	شکل (۳۸-۴) نسبت $P_{JD 4-6}/P_{JD 4-6 \min}$ برای ساختار بفل دار در اندازه‌های مختلف پره‌ی Visco-Jet
۱۵۷	شکل (۱-۵) پره Visco-Jet ساخته شده از نمای بالا
۱۵۷	شکل (۲-۵) پره Visco-Jet همراه شفت
۱۵۷	شکل (۳-۵) شکل نهایی سیستم همزده همراه پره Visco-Jet
۱۵۸	شکل (۴-۵) مخزن ساخته شده همراه بفل
۱۵۹	شکل (۵-۵) سیستم همزده ساخته شده همراه MRF
۱۶۰	شکل (۶-۵) شکل مش‌بندی شده سیستم همزده
۱۶۵	شکل (۱-۶) بردار سرعت بدست آمده در برش افقی (ارتفاع $Z = 0/07 \text{ cm}$) برای اندازه $d_2/d_1 = 0/5$
۱۶۵	شکل (۲-۶) بردار سرعت در برش عمودی که از وسط مخروط $X = 0/023 \text{ cm}$ عبور می‌کند.
۱۶۶	شکل (۳-۶) کانتور سرعت در برش افقی $Z = 0/07 \text{ cm}$
۱۶۶	شکل (۴-۶) کانتور سرعت در برش عمودی ($X = 0/023 \text{ cm}$)
۱۶۷	شکل (۵-۶) کانتور سرعت در برش عمودی که از مرکز پره عبور می‌کند.
۱۶۷	شکل (۶-۶) مسیر حرکت ذرات به سمت شفت
۱۶۸	شکل (۷-۶) مسیر حرکت ذرات به سمت شفت
۱۶۹	شکل (۸-۶) تصویر واقعی حرکت ذرات به سمت شفت
۱۶۹	شکل (۹-۶) مسیر حرکت ذرات در برش عمودی $X = 0/023$ (از روبرو)

صفحه	عنوان
۱۷۰	شکل (۶-۱۰) مسیر حرکت ذرات در برش عمودی $X=0/023$ (از بالا)
۱۷۰	شکل (۶-۱۱) مسیر حرکت ذرات جامد در برش عمودی که از مرکز پره عبور می کند. (از روبرو)
۱۷۱	شکل (۶-۱۲) سرعت $N_{JD(f)}$ در اندازه‌های مختلف پره Visco- Jet برای ساختار بدون بفل
۱۷۲	شکل (۶-۱۳) سرعت N_{JD4-6} در اندازه‌های مختلف پره Visco- Jet برای ساختار بدون بفل
۱۷۳	شکل (۶-۱۴) نسبت $P_{JD(f)}/P_{JD(f) \min}$ برای ساختار بدون بفل در اندازه‌های مختلف پرهی Visco- Jet
۱۷۳	شکل (۶-۱۵) نسبت $P_{JD4-6}/P_{JD4-6 \min}$ برای ساختار بدون بفل در اندازه‌های مختلف پرهی Visco- Jet
۱۷۴	شکل (۶-۱۶) شدت جریان محوری متوسط بدست آمده برای اندازه‌های مختلف پره Visco- Jet
۱۷۵	شکل (۶-۱۷) عدد جریان محوری متوسط بدست آمده برای اندازه‌های مختلف پره Visco- Jet
۱۷۵	شکل (۶-۱۸) زمان چرخش محوری متوسط بدست آمده برای اندازه‌های مختلف پره Visco- Jet
۱۷۵	شکل (۶-۱۹) انرژی مصرفی در هر اندازه از پره Visco- Jet
۱۷۶	شکل (۶-۲۰) بردار سرعت بدست آمده در برش افقی (ارتفاع $Z=0/07 \text{ cm}$) برای اندازه $d_2/d_1=0/5$
۱۷۷	شکل (۶-۲۱) بردار سرعت در برش عمودی که از وسط مخروط $X=0/023 \text{ cm}$ عبور می کند.
۱۷۷	شکل (۶-۲۲) کانتور سرعت در برش افقی $Z=0/07 \text{ cm}$
۱۷۸	شکل (۶-۲۳) کانتور سرعت در برش عمودی ($X=0/023 \text{ cm}$)
۱۷۸	شکل (۶-۲۴) کانتور سرعت در برش عمودی که از مرکز پره عبور می کند.
۱۷۹	شکل (۶-۲۵) بردار سرعت در برش عمودی که از مرکز پره عبور می کند.
۱۸۰	شکل (۶-۲۶) مسیر حرکت ذرات به سمت شفت
۱۸۰	شکل (۶-۲۷) تصویر واقعی حرکت ذرات به سمت شفت
۱۸۱	شکل (۶-۲۸) مسیر حرکت ذرات در برش عمودی $X=0/023$ (از روبرو)
۱۸۱	شکل (۶-۲۹) مسیر حرکت ذرات در برش عمودی $X=0/023$ (از بالا)
۱۸۲	شکل (۶-۳۰) مسیر حرکت ذرات جامد در برش عمودی که از مرکز پره عبور می کند. (از روبرو)
۱۸۳	شکل (۶-۳۱) سرعت $N_{JD(f)}$ در اندازه‌های مختلف پره Visco- Jet برای ساختار بفل دار
۱۸۳	شکل (۶-۳۲) سرعت N_{JD4-6} در اندازه‌های مختلف پره Visco- Jet برای ساختار بفل دار
۱۸۴	شکل (۶-۳۳) اثر اندازه‌های مختلف پره Visco- Jet روی توان $P_{JD(f)}$ برای ساختار بفل دار

صفحه	عنوان
۱۸۴	شکل (۶-۳۴) اثر اندازه های مختلف پره Visco- Jet روی توان PID4-6 برای ساختار بفل دار
۱۸۵	شکل (۶-۳۵) شدت جریان محوری متوسط بدست آمده برای اندازه های مختلف پره Visco- Jet
۱۸۵	شکل (۶-۳۶) عدد جریان محوری متوسط بدست آمده برای اندازه های مختلف پره Visco- Jet
۱۸۶	شکل (۶-۳۷) زمان چرخش محوری متوسط بدست آمده برای اندازه های مختلف پره Visco- Jet
۱۸۶	شکل (۶-۳۸) انرژی مصرفی در هر اندازه از پره Visco- Jet

فهرست جداول

صفحه	عنوان
۸۶	جدول (۱-۳) اجزاء و ویژگیهای الگوهای مش‌بندی حجم
۸۶	جدول (۲-۳) خصوصیات انواع مختلف مش‌بندی حجم
۸۷	جدول (۳-۳) سازگاری انتخاب اجزاء با انتخاب نوع مش
۱۱۶	جدول (۱-۴) ابعاد استاندارد پره Visco-Jet
۱۱۶	جدول (۲-۴) اندازه‌های پره Visco-Jet ساخته شده مطابق ابعاد استاندارد
۱۱۷	جدول (۳-۴) اندازه سائزهای مختلف پره Visco-Jet
۱۲۴	جدول (۴-۴) ویسکوزیته گلیسرین در دماهای مختلف
۱۲۶	جدول (۵-۴) سرعت $N_{JD(f)}$ و N_{JD4-6} برای اندازه‌های مختلف پره Visco-Jet برای حالت بدون بفل بر حسب rpm.
۱۲۷	جدول (۶-۴) سرعت $N_{JD(f)}$ و N_{JD4-6} برای اندازه‌های مختلف پره Visco-Jet برای حالت بفل‌دار بر حسب rpm.
۱۴۹	جدول (۷-۴) توان مصرفی کل در حالت بدون بفل
۱۵۰	جدول (۸-۴) توان مصرفی پره در حالت بدون بفل
۱۵۲	جدول (۹-۴) توان مصرفی کل در حالت بفل‌دار
۱۵۲	جدول (۱۰-۴) توان مصرفی پره در حالت بفل‌دار
۱۷۲	جدول (۱-۶) توان مصرفی پره در حالت بدون بفل
۱۷۳	جدول (۲-۶) درصد خطا بین توان تجربی و مدل‌سازی برای حالت بدون بفل در اندازه‌های مختلف پره Visco-Jet
۱۸۳	جدول (۳-۶) توان مصرفی در حالت بفل‌دار
۱۸۴	جدول (۲-۶) درصد خطا بین توان تجربی و مدل‌سازی برای حالت بفل‌دار در اندازه‌های مختلف پره Visco-Jet

چکیده

اختلاط نقش قابل توجهی در فرایندهای صنعتی ایفا می‌کند. عملیات اختلاط و همزدن از قدیمی‌ترین فرایندهای مهندسی شیمی است که شامل همگن کردن یک محیط و ماده در یک ظرف با استفاده از یک یا ترکیبی از پروانه‌های چرخشی می‌باشد. اختلاط دو یا چند سیال مخلوط شدنی، اختلاط جامد-مایع و اختلاط گاز-مایع به طور گسترده‌ای در صنایع معدنی، غذایی، داروسازی، پلیمر، متالوژی، بیوشیمی و فرایندهای صنعتی دیگر بکار می‌رود. همزدن یک برهمکنش پیچیده در جریان بالک سیال می‌باشد که نفوذ مولکولی و آشفته‌گی ایجاد می‌کند. اختلاط سیالات با گرانش بالا عمده‌تاً در جریان با رژیم آرام انجام می‌شود. ایجاد سوسپانسیونهایی با گرانش بالا در غلظتهای زیاد از ذرات جامد یک عملیات واحد، در تولید سوخته‌های فضایی، داروها، مواد شیمیایی خاص و پوششها کاربرد دارد. این عملیات عموماً در سیستمهای بسته و نیمه بسته و در مخزنهای همزن دار انجام می‌گیرد.

برای یک زمان طولانی طراحی سیستمهای اختلاط به طور تجربی تعیین می‌شد. این روش بسیار وقت گیر و گران قیمت بوده و بزرگنمایی فرایند براساس قواعد تجربی موجود در ساخت واحد، طراحی و پایه گذاری شده است. امروزه شبیه‌سازی کامپیوتری جریانهای اختلاط و همزدن در مخازن، CFD، بطور گسترده برای بهینه سازی ساختار همزن‌ها و ایجاد دید بهتر روی نمونه‌های جریان پیچیده تولیدشده به وسیله برهمکنش بین پروانه و دیواره درونی مخزن انجام می‌شود.

در این مطالعه عملکرد اندازه‌های مختلف پره Visco-jet در اختلاط دو فاز جامد و مایع با ویسکوزیته بالا، به صورت آزمایشگاهی و با استفاده از مدلسازی CFD مورد بررسی قرار گرفته است. موارد اختلاط در دو حالت مخزن بدون بفل و بفل دار و با یک سیال نیوتنی لزج بررسی شده‌اند. در این تحقیق سرعت چرخش پره در جایی که ذرات کمتر از ۴-۶ ثانیه روی سطح مایع باقی می‌مانند، برای اندازه‌های مختلف تعیین شده است. همچنین سرعت چرخش پره در لحظه‌ای که اولین ذره شروع به حرکت می‌کند نیز محاسبه شده‌است. هدف بدست‌آوردن یک اندازه بهینه برای پره‌ی Visco-Jet با بهترین عملکرد، کمترین سرعت و کمترین مصرف انرژی می‌باشد. با استفاده از نتایج آزمایشگاهی پره‌ای که نسبت قطر کوچک به بزرگ مخروط‌های آن ۰/۵ می‌باشد، به عنوان اندازه بهینه شناخته شده است. نتایج برای هر دو ساختار یکسان می‌باشد. این مسئله با استفاده از مدل سازی CFD توجیه شده است. برای این منظور پارامترهای هیدرودینامیکی مانند شدت جریان محوری متوسط، عدد جریان محوری متوسط، زمان چرخش محوری متوسط، توان مصرفی و انرژی مصرفی برای اندازه‌های مختلف محاسبه شده است.

علاوه بر این در مطالعه اخیر، توان مصرفی در اندازه‌های مختلف به صورت پارامتر بدون بعد نسبت توان مصرفی به کمترین توان مصرفی ارائه شده است.

فصل اول

مروری بر استفاده از تکنولوژی دینامیک سیالات
محاسباتی (CFD) در مدلسازی اختلاط توسط پروانه در
ظروف بهمزن

مقدمه

اختلاط^۱ به معنای مخلوط شدن مواد مختلف جهت بدست آوردن خواص فیزیکی یکسان در سیال جهت انجام فرآیندهای بعدی می‌باشد. اختلاط در فرآیندهای صنعتی و عملیات مربوط به آنها نقش عمده‌ای دارد و همیشه برای دستیابی به یک مخلوط همگن صورت می‌گیرد. عمل اختلاط می‌تواند توسط همزن‌های مکانیکی (پروانه) و یا جت‌های سیال صورت گیرد. در صنایع شیمیایی، نفت و پتروشیمی اختلاط یک فرآیند بسیار مهم در خیلی از کارخانجات می‌باشد و می‌تواند برای اهداف بسیاری مثل همگن‌سازی خواص فیزیکی و ترکیبات، جلوگیری از لایه لایه شدن و ته‌نشینی ذرات معلق برای بهبود نرخ انتقال گرما، انتقال جرم، سرعت واکنش‌های شیمیایی و غیره به کار برده شود. از جمله مثال‌های عملیات اختلاط می‌توان به امتزاج دو مایع یا کمک به انحلال جامد در مایع، استخراج جامد-مایع، جذب گاز، کریستالیزاسیون و استخراج مایع-مایع اشاره کرد.

از دیدگاه حل عددی، یکی از مشخصه‌های اصلی تانک‌های بفل‌دار و نیز تانک‌هایی که وجود همزن و جت در آنها باعث عدم تقارن می‌شود یا تانک‌هایی که همزن روی دیوار جانبی نصب می‌گردد، این است که شکل دامنه‌ی جریان (شامل سطح مایع، دیوار تانک، همزن و شفت آن) با زمان تغییر می‌کند. این خصوصیت، تانک مجهز به همزن را از اکثر راکتورهایی که در فرآیندهای صنعتی مهندسی شیمی استفاده می‌شوند جدا می‌نماید. اولین شبیه‌سازی‌های جریان آشفتگی داخل تانک‌های اختلاط بفل‌دار به صورت دو بعدی بودند. در این شبیه‌سازی‌ها اثرات همزن متحرک و بفل‌های ساکن به ترتیب به عنوان منابع و چاه‌های اندازه حرکت، در معادلات میانگین دایره‌ای برای مؤلفه‌ی مماسی سرعت منظور شده‌اند. منابع مناسب اندازه حرکت به نوع همزن بستگی دارد که در معادلات مؤلفه‌های مماسی و شعاعی سرعت متوسط، منظور می‌گردند [۲۱]. الگوی جریان کلی بدست آمده از این شبیه‌سازی‌ها تطابق قابل قبولی با داده‌های آزمایشگاهی نشان دادند و مقدمه‌ی خوبی برای بسط‌های بعدی CFD برای مدل‌سازی جریان داخل تانک‌های اختلاط بودند. پیش از مدل‌سازی تانک‌های اختلاط بفل‌دار بوسیله‌ی CFD، به علت نیاز صنعت به توضیح دقیق‌تر هیدرودینامیک جریان نسبت به مدل ایده‌آل تانک‌های اختلاط بفل‌دار، مدل‌های دیگری از جمله مدل‌های چرخش^۲، مدل‌های نفوذ گردابه‌ای^۳ و مدل‌های شبکه‌ی مناطق^۴ ارائه گردید.

¹ Mixing

² Circulation models

³ Eddy diffusion

⁴ Network of zones

در مدل‌های چرخشی فرض اساسی این است که اختلاط توسط جریان میانگین کنترل می‌شود [۳، ۴ و ۵]. مدل‌های نفوذ گردابه‌ای فرض می‌کنند که کل فرآیند اختلاط توسط نفوذ گردابه‌ای کنترل می‌شود [۶، ۷ و ۸]. دو مدل جدیدتر شبکه‌ی مناطق و CFD، نسبت به مدل‌های دیگر بسیار دقیق‌تر هستند. علت اصلی این امر این است که تأثیر سرعت مکانی سیال در این مدل‌ها مد نظر قرار می‌گیرد.

در مدل‌های شبکه‌ی مناطق با توجه به شکل هندسی ظرف، ابتدا منطقه‌ی سیالی توسط یک شبکه‌ی دو بعدی به مناطق کوچک تقسیم می‌شود. این شبکه‌ی دو بعدی به همراه یک سری حلقه‌های هم مرکز در پایین و یک سری حلقه در بالای پروانه، اساس شبکه‌ی سه بعدی را که با بسط این شبکه (با چرخش در جهت شعاعی/محوری) بدست می‌آید، تشکیل می‌دهند. به عبارت دیگر الگوی جریان در داخل تانک پیش فرض می‌شود. در این مدل تبادل اغتشاش بین حلقه‌های مختلف بوسیله‌ی ضرایب β ، β_r و β_i مد نظر قرار می‌گیرد [۹-۱۲]. همچنان که بیان شد مدل شبکه‌ی مناطق قادر به محاسبه‌ی الگوی جریان در تانک اختلاط نمی‌باشد بدین صورت که الگوی جریان سیال در مناطق مختلف به صورت پیش فرض به این مدل داده می‌شود و فقط معادلات موازنه‌ی جرم بین مناطق مختلف نوشته و حل می‌گردد.

۱-۱- مطالعات صورت گرفته در زمینه مدلسازی اختلاط توسط پروانه

اولین شبیه‌سازی سه بعدی یک تانک اختلاط بفل‌دار که در مقالات^۱ آزاد منتشر شد، توسط Middleton و همکارانش در سال ۱۹۸۶ [۱۳] انجام شده است. کد تهیه شده توسط آنها فقط برای تانک‌های اختلاط بفل‌دار قابل استفاده بود و برای اهداف عمومی‌تر کاربرد نداشت. آنها علاوه بر پیش‌بینی الگوی جریان، یک واکنش متوالی - انتخابی را شبیه‌سازی کردند. یکی از اجزاء واکنش به صورت نقطه‌ای به داخل تانک تزریق شد. درصد نهایی مواد بستگی به کیفیت اختلاط ایجاد شده توسط جریان چرخشی^۲ داخل تانک داشت. این شبیه‌سازی قادر بود پیش‌بینی خوبی از درصد تبدیل نهایی به صورت تابعی از سرعت چرخش پروانه بدست دهد. سرعت واکنش سریعتر (از بین دو واکنش) به حدی کم بود که فقط ترکیب‌های مقیاس بزرگ الگوی جریان در پیشرفت واکنش مؤثر بودند.

چندین سال قبل از استفاده‌ی CFD در شبیه‌سازی تانک‌های اختلاط بفل‌دار نقش بفل‌ها و حرکت پروانه بررسی شدند. مروری بر تحقیقات انجام شده نشان از شبیه‌سازی فرآیندهای مقیاس بزرگ با استفاده از "شرایط مرزی پروانه" دارد. در این روش منطقه‌ای که بوسیله‌ی پروانه جاروب می‌شود، به عنوان یک جعبه سیاه^۳ که سطوح آن برای جریان ایجاد شده توسط پروانه، دارای ورودی و خروجی و یا منابع^۴ اندازه حرکت می‌باشد، در نظر گرفته می‌شود. Pericleous و همکارانش در سال ۱۹۸۷ [۲] نشان دادند که با استفاده از

¹ Open literature

² Circulating flow

³ Black box

⁴ Sources

تئوری آیرودینامیکی، برای حرکت خود پروانه می‌توان به پیشرفت‌هایی نایل شد؛ اما اعمال "شرایط مرزی پروانه" نیازمند داده‌های آزمایشگاهی به عنوان ورودی می‌باشد که معمولاً به صورت دایره‌ای میانگین‌گیری می‌شود و شبیه‌سازی حاصل قادر به پیش‌بینی اثر گردابه‌ی ایجاد شده دنبال پره‌ی پروانه و برخورد متناوب بین گردابه و بفل‌ها نیست. Van der Molen و همکارانش در سال ۱۹۷۸ با آزمایشات تجربی نشان دادند که اثرات اخیر بسیار تأثیرگذار هستند.

پس از Middleton و همکارانش، شبیه‌سازی‌های سه بعدی دیگری با استفاده از "شرایط مرزی پروانه" بر روی تانک‌های اختلاط بفل‌دار شامل بهمن‌های شعاعی [۱۵-۱۷] و همچنین بهمن‌های محوری [۱۸ و ۱۹] انجام گردید. از بین این شبیه‌سازی‌ها برخی با استفاده از کدهای تجاری و بعضی با استفاده از کدهای شخصی^۱ بر روی همزن‌ها و مخازن با شکل هندسی استاندارد انجام شدند.

در تحقیقی دیگر جزئیات مشخصات جریان آشفته در یک تانک بهمن بفل‌دار مجهز به یک همزن از نوع توربین صفحه‌ای^۲ توسط Ranade و همکارانش در سال ۱۹۹۰ بدست آمد [۲۰]. پس از مرور داده‌های آزمایشگاهی موجود، کمبود داده‌های آزمایشگاهی در این زمینه بیان گردیده و برخی از این کمبودها با ارائه‌ی داده‌های آزمایشگاهی جدید برطرف شد. جریان میانگین و مشخصات آشفته‌گی نیز برای حجم توده با استفاده از LDA^۳ اندازه‌گیری شد. با اعمال موازنه‌ی انرژی اطراف همزن، بازدهی هیدرولیک توربین برابر با ۶۵٪ بدست آمد. همچنین اثر قطر تانک بر روی مشخصات جریان مورد بررسی قرار گرفت.

Gosman و همکارانش در سال ۱۹۹۲ [۲۱] با مدلسازی اولر - اولر جریان آشفته دو فازی در تانک‌های همزن‌دار یک گام مهم به جلو برداشته‌اند. اگرچه مقدار بار جامدی که آنها در نظر گرفتند به قدری کم بود که اتصال برگشتی به مایع قابل نظر بوده و نبود مکانیزم‌های ادغام و تکه تکه شدن در شبیه‌سازی گاز-مایع آنها باعث به وجود آمدن تفاوت قابل ملاحظه‌ای مابین نتایج کار شبیه‌سازی و داده‌های تجربی شده است.

Stoots و همکارانش در سال ۱۹۹۵ [۲۲] الگوی جریان آشفته ایجاد شده توسط یک همزن Rushton در داخل یک تانک اختلاط را از روی خروجی‌های رمزگذار نصب شده بر روی شفت^۴ بوسیله‌ی LDA اندازه-گیری نموده‌اند.

Harris و همکارانش در سال ۱۹۹۶ [۲۳] توانایی‌های CFD برای مهندسی راکتورهای شیمیایی را با بررسی یک سری مثال‌های صنعتی مورد مطالعه قرار دادند. در این مقاله قابلیت‌های CFD برای مهندسی راکتورهای شیمیایی با بررسی یکسری مثالها از کاربردهای صنعتی نشان داده شده است. در مثال بعدی که یک جریان ایزوترمال غیرنیوتونی را در یک اکسترودر نشان می‌دهد، کاربرد CFD در فهم نقش پروفایل دما و توزیع

¹In-house

²Disk turbine

³Laser Doppler Anemometry

⁴Shaft-mounted encoder

زمان اقامت در تعیین کیفیت محصول مورد بررسی قرار گرفته است. در این کاربرد محدودیت در توان محاسباتی موجود و همچنین اثبات آزمایشگاهی مدل‌های رئولوژیکال مهم می‌باشد. شبیه‌سازی CFD واکنش‌های گازی آشفته با واکنش‌های موازی و متناوب به عنوان مثال سوم مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور چندین مدل در کد تجاری CFD استفاده شده و با داده‌های تجربی مورد تأیید قرار گرفته است. در نهایت بحثی در مورد نیازها و انتظارات صنعت فرایندهای شیمیایی در زمینه مدلسازی CFD با تمرکز بر روی جریانهای دو فازی ارائه شده است.

Tabor و همکارانش در سال ۱۹۹۶ [۲۴] جریان سیال را درون یک تانک اختلاط مجهز به یک همزن شش پروانه راشتن شبیه‌سازی نمودند. محاسبات برای کل حجم تانک شامل حجمی که با پروانه می‌چرخد، با دو تکنیک متفاوت انجام گردید: یک روش کاملاً ناپایا و یک تقریب حالت پایا. سرعت‌های محاسبه شده با داده‌های آزمایشگاهی موجود در مقالات مقایسه و تطابق خوبی مشاهده گردید. همچنین در این تحقیق گرده‌های ایجاد شده توسط پره‌های همزن مورد بررسی قرار گرفتند.

Daskopoulos و همکارانش در سال ۱۹۹۶ [۲۵] پیشرفت‌های جدید در شبیه‌سازی CFD جریان‌های پیچیده داخل راکتورهای بهمزن بفل‌دار شامل کارهای انجام گرفته بوسیله‌ی کدهای شخصی را مرور و بررسی نمودند. آنها با بررسی بر روی مدل‌های آشفته‌گی استفاده شده در این شبیه‌سازی‌ها بیان کردند که این مدل در پیش‌بینی کیفی جریان متوسط موفق بوده‌اند اما خصوصیات آشفته‌گی را مخصوصاً در مناطق دور از پروانه، کمتر از مقادیر واقعی پیش‌بینی می‌کنند.

Lee و همکارانش در سال ۱۹۹۶ [۲۶] مشخصات جریان در داخل یک تانک بهمزن شامل توربین راشتن را بوسیله‌ی CFD پیش‌بینی نموده و با استفاده از LDA اندازه‌گیری کرده‌اند. برای شبیه‌سازی، از یک مش چرخان حول پروانه و یک مش ساکن برای بقیه‌ی تانک استفاده شده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی با داده‌های آزمایشگاهی بدست آمده مورد مقایسه قرار گرفته و توانایی‌ها و محدودیت‌های حل عددی بیان گردیده است.

Sheng و همکارانش در سال ۱۹۹۸ [۲۷] روش‌هایی را برای معتبر کردن شبیه‌سازی‌های CFD انجام شده بر اساس معادلات ناویر-استوکس با استفاده از اندازه‌گیری‌های PIV^۱ ارائه نموده و برای یکی از معمول‌ترین مسایل در صنعت فرآیند شیمیایی (پیش‌بینی جریان در داخل یک تانک بهمزن) به کار گرفتند. از داده‌های PIV، سرعت متوسط، انرژی سینتیکی آشفته، تنش‌های رینولدز و سرعت‌های توزیع^۲ استخراج گردید. همچنین با استفاده از داده‌های PIV، اثر شرایط مرزی بر نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های CFD مورد بررسی قرار گرفت. برای شبیه‌سازی CFD از حرکت نسبی پروانه‌ها صرف‌نظر گردید و حضور پره‌ها با قرار دادن

^۱ Particle Image Velocimetry

^۲ Dissipation rates

داده‌های آزمایشگاهی، به عنوان شرایط مرزی در معادلات منظور و برای توصیف تلاطم از مدل $RNG k-\epsilon$ استفاده گردید.

Kraitschev و همکارانش در سال ۱۹۹۸ [۲۸] کاربرد یک پروانه‌ی جدید (توربین NS) را برای اختلاط گاز-مایع و بازدهی انرژی آنرا برای چند سیستم تخمیر مورد بررسی قرار دادند. سیستم جدید بیانگر کاهش توان (بیش از ۳۰٪) در دو مساله‌ی صنعتی تولید آنتی‌بیوتیک و همچنین صرفه‌جویی انرژی در چند مطالعه‌ی شبیه‌سازی خاص می‌باشد. در این تحقیق داده‌های بازده پخش گاز^۱ برای اثبات بازده زیاد پروانه ارائه گردیده است.

Brucato و همکارانش در سال ۱۹۹۸ [۲۹] شبیه‌سازی‌های عددی جریان در تانک‌های اختلاط را بر اساس شرایط مرزی پروانه و مش لغزنده بیان کرده و مورد بحث و بررسی قرار داده‌اند. سه روش شرط مرزی پروانه، MRF و مش لغزنده برای شبیه‌سازی جریان استفاده شده است. محاسبات شبیه‌سازی برای تانک اختلاط با یک و دو پروانه راشتن و همچنین یک پروانه محوری با شیب پره ثابت انجام شد و نتایج بدست آمده در هر مورد با نتایج آزمایشگاهی موجود در مقالات مقایسه گردید. نتایج حاصل از روش اول تنها در مواقعی که اطلاعات دقیق آزمایشگاهی از جریان اطراف پروانه در دسترس باشد مطلوب می‌باشد و در مواردی که این داده‌ها به اندازه کافی دقیق نباشند، جواب‌های غیرمنطقی بدست خواهد داد. دو روش دیگر که نیازمند داده‌های آزمایشگاهی نیست، نتایج خوبی بدست داده و برای مسایل کلی‌تری قابل استفاده می‌باشند.

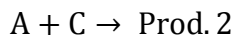
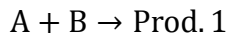
Patwardhan و همکارانش در سال ۱۹۹۹ [۳۰] رابطه بین الگوی جریان و اختلاط را مورد بررسی قرار دادند. الگوی جریان برای حدود ۴۰ پروانه محوری مطالعه شد. پروانه‌ها در زاویه‌ی پره، پیچ پره، عرض پره، قطر پروانه و مکان پروانه با هم تفاوت داشتند. جریان متوسط و مشخصات آشفستگی ایجاد شده توسط تمام پروانه‌ها اندازه‌گیری شد و بر اساس داده‌های حاصل، الگوی جریان داخل تانک بدست آمده توسط CFD تأیید شده و برای شبیه‌سازی اختلاط مورد استفاده قرار گرفت. نشان داده شد که زمان اختلاط محاسبه شده تطابق بسیار خوبی با داده‌های آزمایشگاهی دارد.

Jaworski و همکارانش در سال ۲۰۰۰ [۳۱] پاسخ‌های نوسانی ۶ هدایت‌سنج را که در داخل یک تانک اختلاط مجهز به همزن راشتن توزیع شده‌اند، اندازه‌گیری نمودند. در این تحقیق سه سرعت مختلف مورد بررسی قرار گرفت و زمانهای اختلاط نهایی t_{95} تعیین شد. آزمایشات انجام گرفته توسط نرم افزار Fluent و با استفاده از تکنیک مش لغزنده مدل شدند. هر دو مدل $k-\epsilon$ و $RNG k-\epsilon$ سرعت‌های متوسط مکانی شعاعی و محوری مشابهی پیش‌بینی نمودند همچنین هر دو مدل مناطق زیادی را با چرخش مماسی در امتداد

¹ Gas dispersion

مخالف چرخش پروانه پیش‌بینی می‌کنند ولی تمام خواص مکانی آشفستگی و مؤلفه‌ی مماسی سرعت متوسط به طور قابل ملاحظه‌ای متفاوت بود.

Brucato و همکارانش در سال ۲۰۰۰ [۳۲] با کمک دینامیک سیالات محاسباتی الگوی جریان در یک تانک راکتور همزده را پیش‌بینی کردند که در این تانک یک فرایند حساس به اختلاط شامل دو واکنش موازی رقابتی به ترتیب زیر جریان داشت.



داده‌های آزمایشگاهی برای $A = \text{OH}^-$ ، $B = \frac{1}{2}\text{Cu}^{++}$ و $C = \text{ETHYL-CHLOROACETATE}$ بدست آمده است. برای این واکنش مشخص شده است که انتخاب‌پذیری نهایی فرایند که به آسانی با یک تحلیل ساده رنگ‌سنجی باقیمانده Cu^{++} اندازه‌گیری می‌شود، به سرعت همزدن و در نتیجه به دوره اختلاط در فرایند ناپیوسته بستگی دارد. شبیه‌سازی‌های سه بعدی بر پایه الگوی جریان که در اینجا انجام گرفته است با وجود آنکه هیچ پارامتر قابل تنظیمی وجود نداشت به پیش‌بینی‌هایی منجر شد که به خوبی با داده‌های تجربی مطابقت می‌کند. نکته جالب توجه اینکه این نتایج امیدوار کننده در حالی بدست آمده که مدلسازی فقط با در نظر گرفتن پدیده اختلاط توده‌ای انجام گرفته است و پدیده اختلاط موضعی نادیده گرفته شده است به این معنی که سیستم طوری در نظر گرفته شده است که در هر زمان به طور محلی کاملاً در مقیاس کوچک هم زده می‌شود. تطابق خوب بدست آمده مابین پیش‌بینی‌های شبیه‌سازی و داده‌های تجربی قابل صرف‌نظر بودن پدیده اختلاط را تأیید می‌نماید.

مدلسازی جریان‌های آرام، جریان همراه با انتقال حرارت و یا جریان همراه با واکنش با استفاده از CFD نتایج جالب توجهی می‌دهد. مدلسازی جریان آرام از نظر تئوری با توجه به این نکته که معادله‌ی اضافه‌ای لازم نیست، ساده است. به عنوان نمونه Thaibault و همکارانش در سال ۲۰۰۲ [۳۳] مقدار مصرف توان همزن‌های

هم‌محور را در هر دو مورد سیالات نیوتنی و سیالات غیرنیوتنی در رژیم جریان آرام با استفاده از روشهای CFD تحلیل نمودند و به توافق خوبی میان داده‌های تجربی و محاسبات عددی عدد توان به عنوان یک تابع از عدد رینولدز رسیدند.

شبیه‌سازی سیستم‌های همزده با پروانه در طول سالهای اخیر بیشتر و بیشتر شده است و ویژگیهای تانکهای اختلاط از جهات گوناگون در سیستمهای مختلف با شرایط متفاوت در مقالات بسیار زیادی مورد بررسی قرار گرفته است. سابقه مطالعات در زمینه اختلاط سیالات با لزجت بالا توسط پروانه‌های مختلف در بخش بعدی مورد بررسی قرار گرفته است.