

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

١٠١٦

١٠١٦٥



دانشگاه شهید باهنر کرمان

دانشکده فنی مهندسی

بخش مهندسی شیمی

پایان نامه تحصیلی برای دریافت درجه کارشناسی ارشد مهندسی شیمی

پیش بینی میزان جذب آلاینده ها در شوینده های
ونتوری با مدلسازی ریاضی، شبکه های عصبی و
الگوریتم ژنتیک

استاد راهنما:

دکتر علی محبی

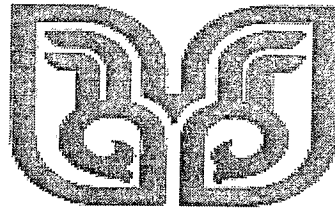
مؤلف:

محبوبه طاهری

۱۳۸۷ / ۹ / ۲۳

اسفند ماه ۱۳۸۶

۱۰۸۳۱۵



دانشگاه شهید باهنر کرمان

این پایان نامه به عنوان یکی از شرایط احراز درجه کارشناسی ارشد به

گروه : مهندسی شیمی
دانشکده : فنی و مهندسی
دانشگاه شهید باهنر کرمان

تسلیم شده است و هیچگونه مدرکی به عنوان فراغت از تحصیل دوره مزبور شناخته نمی شود.

دانشجو: محبوبه طاهری

استاد راهنما : دکتر علی محبی

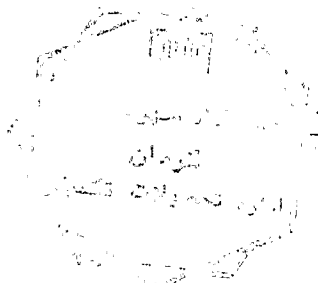
استاد مشاور: -----

داور ۱ : دکتر حسن هاشمی پور

داور ۲ : دکتر عطا الله سلطانی

معاونت پژوهشی و تحصیلات تکمیلی یا نماینده تحصیلات تکمیلی دانشکده : دکتر مهین شفتعی

حق چاپ محفوظ و مخصوص به دانشگاه شهید باهنر کرمان است



تقدیم به:

پدر و مادر عزیزم

که وجودشان برایم همه مهر، محبت و نعمت است،
با دلی آکنده از شرمساری بر دستانشان بوسه می زنم.

و تقدیم به:

برادر عزیزم و خواهر مهربانم

همراهان صمیمی زندگی ام، دوستان همیشگی و یاران فداکارم

با هر چه عشق، نام تو را نتوان نوشت.

بی شک پیمودن مسیر پرفراز و نشیب علم‌آموزی میسر نمی‌گردید مگر به مدد الطاف پروردگاری و لطف بیکران و محبت‌های خالصانه آنانی که در این راه همدم بودند. از استاد راهنمای گرانقدر و بزرگوارم جناب آقای دکتر محبی که در امر راهنمایی و بررسی این اثر، صبورانه زحمات فراوانی را متحمل شده‌اند، تشکر می‌نمایم. تشکر خود را به داوران محترم این پایان‌نامه آقایان دکتر هاشمی‌پور رفسنجانی و دکتر سلطانی گوهرریزی تقدیم داشته و زحماتشان را سپاس می‌گویم.

چکیده

شوینده‌های ونتوری یکی از مؤثرترین دستگاه‌های کنترل آلودگی هوا بشمار می‌روند. در این تحقیق به منظور شبیه‌سازی جذب گاز دی‌اکسید گوگرد (SO_2) در آب و هیدروکسید سدیم در شوینده ونتوری، یک مدل ریاضی سه بعدی ارائه شده است. مدل فوق که براساس توزیع نامنظم قطرات در عرض شوینده بنا گردیده براساس مدل پخشی در جریان گاز می‌باشد که با استفاده از توزیع غلظت قطرات در شوینده، معادله پیوستگی برای آلاینده گازی را حل می‌کند. همچنین فرآیند انتقال جرم هم به قطرات و هم به فیلم مایع روی دیواره در نظر گرفته شده است. در این مدل، جریان درون شوینده ونتوری مشابه جریان دوفازی حلقوی فرض شده است. جریانهای دوفازی حلقوی شامل جریان یک لایه فیلم مایع روی دیواره دستگاه و یک جریان گاز محتوی قطرات مایع در مرکز می‌باشد.

در این تحقیق از روش حجم محدود برای حل معادلات دیفرانسیل پاره‌ای غلظت آلاینده‌ها در فاز گاز و غلظت قطرات، و از روش تفاضل محدود برای غلظت آلاینده‌ها در فاز مایع استفاده شده است. همچنین روش رانگ کاتای درجه چهار برای حل معادله سرعت قطره بکار گرفته شده است که کلیه معادلات حاکم توسط یک برنامه کامپیوتری در محیط نرم افزار Matlab کدنویسی شده‌اند.

از داده‌های تجربی ویسواناتان که توزیع غلظت قطرات در سطح مقطع شوینده ونتوری را می‌دهد، جهت تعیین عدد پکلت استفاده شده است. مدل جهت پیش‌بینی غلظت قطرات توافق خوبی با داده‌های تجربی نشان می‌دهد که میزان خطا ۰/۵۸۷ است. جهت بررسی دقت مدل موجود برای پیش‌بینی میزان جذب گاز از داده‌های تجربی ارائه شده توسط جانسون و همکاران و آزمایشهای انجام شده توسط *O.A.P* استفاده شد. توافق خوب نتایج مدل پیشنهادی با داده‌های تجربی نشان‌دهنده قابلیت این مدل در پیش‌بینی راندمان جداسازی گاز در شوینده‌های ونتوری می‌باشد.

در مرحله بعد از شبکه‌های عصبی برای پیش‌بینی راندمان جداسازی ذرات و آلاینده‌های گازی در شوینده‌های ونتوری استفاده شد که تعداد نرون در لایه مخفی به روش حدس و خطا بدست آمد و نتایج رضایت‌بخشی حاصل گردید. برای افزایش کارایی شبکه‌های عصبی، الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی پارامترهای شبکه عصبی از جمله تعداد نرون در لایه مخفی، نرخ ممتوم و نرخ یادگیری بکار گرفته شد. با مقایسه ضرایب همبستگی شبیه‌سازی شبکه‌ها

در هر دو روش اصلاح وزن ممتوم و لونبرگ مارکورت، مشاهده شد که الگوریتم ژنتیک نتایج بهتری را نسبت به روش حدس و خطا می‌دهد.

فهرست مطالب

۱	فصل اول مقدمه
۲	۱-۱ مقدمه‌ای بر آلودگی هوا
۲	۲-۱ منابع آلودگی هوا
۳	۳-۱ طبقه‌بندی آلاینده‌ها
۳	۴-۱ طبقه‌بندی آلاینده‌ها بر حسب حالت ماده
۳	۵-۱ اثرات آلودگی هوا
۳	۱-۵-۱ اثرات آلودگی هوا بر سلامتی انسان
۴	۲-۵-۱ اثرات آلودگی هوا بر داراییها
۴	۳-۵-۱ اثرات آلودگی هوا بر قابلیت دید
۴	۴-۵-۱ اثرات آلودگی هوا بر گیاهان
۵	۶-۱ دستگاههای کنترل آلودگی هوا
۶	۱-۶-۱ ته‌نشین کننده‌های ثقلی
۶	۲-۶-۱ سیکلونها
۷	۳-۶-۱ برجهای آبپاش
۸	۴-۶-۱ شوینده‌های سیکلونی
۸	۵-۶-۱ شوینده‌های ونتوری
۱۱	فصل دوم مروری بر کارهای گذشته
۱۲	۱-۲ مروری بر مدل‌های ارائه شده جهت پیش‌بینی راندمان جداسازی
۱۶	۱-۱-۲ مدل کالورت
۱۹	۲-۱-۲ مدل طاهری و شیه
۱۹	۱-۲-۱-۲ معادلات انتقال
۲۰	۲-۲-۱-۲ سرعت قطرات آب
۲۰	۳-۲-۱-۲ نفوذ گردابه‌ها
۲۱	۴-۲-۱-۲ راندمان جداسازی

۲۲	۳-۱-۲ مدل فتیحی و همکاران
۲۶	۴-۱-۲ مدل آنانتانارایانان و ویسواناتان
۲۷	۱-۴-۱-۲ حرکت قطرات
۲۷	۲-۴-۱-۲ سرعت قطره مایع
۲۸	۳-۴-۱-۲ نفوذ گردابه‌ها
۲۸	۴-۴-۱-۲ حرکت ذره
۲۸	۵-۴-۱-۲ تعیین راندمان جداسازی کلی
۲۹	۵-۱-۲ مدل طلایی و همکاران
۳۲	فصل سوم مدل‌سازی ریاضی
۳۳	۱-۳ مدل‌سازی ریاضی
۳۶	۱-۱-۳ توزیع غلظت قطرات
۳۸	۱-۱-۳ ضریب نفوذ گردابه‌ای
۴۱	۲-۱-۱-۳ سرعت قطرات، افت فشار و دبی فیلم مایع
۴۷	۲-۱-۳ محاسبه N_d
۴۹	۱-۲-۱-۳ محاسبه ضرایب انتقال جرم برای قطرات و فیلم مایع بر مبنای فاز گاز
۴۹	۲-۲-۱-۳ محاسبه ضرایب انتقال جرم برای قطرات و فیلم مایع بر مبنای فاز مایع
۵۱	۱-۲-۲-۱-۳ مکانیزم جذب در آب
۵۲	۲-۲-۲-۱-۳ مکانیزم جذب در محلول آلکالین
۵۲	۲-۳ معرفی پارامترهای استفاده شده در معادلات جداسازی
۵۴	۳-۳ تعیین معادلات جداسازی به روش حجم محدود
۵۴	۱-۳-۳ توزیع غلظت قطرات
۶۲	۲-۳-۳ توزیع غلظت آلاینده‌ها در فاز گاز
۷۵	۳-۳-۳ توزیع غلظت آلاینده‌ها در فاز مایع
۷۶	فصل چهارم شبکه‌های عصبی مصنوعی
۷۷	۱-۴ شباهت با مغز
۷۹	۲-۴ شبکه‌های عصبی
۷۹	۳-۴ سلول عصبی مصنوعی

۸۰	۱-۳-۴ تقسیم‌بندی براساس ساختار
۸۱	۲-۳-۴ تقسیم‌بندی براساس الگوریتم یادگیری
۸۲	۴-۴ نگرش کلی بر آموزش شبکه
۸۳	۱-۴-۴ حرکت به پیش
۸۴	۲-۴-۴ برگشت به عقب- تنظیم وزنه‌های لایه خروجی
۸۵	۵-۴ تنظیم وزنه‌های لایه پنهان
۸۵	۶-۴ سلول عصبی بایاس در شبکه
۸۶	۷-۴ اندازه حرکت
۸۷	۸-۴ اندازه گام
۸۷	۹-۴ مبنای ریاضی الگوریتم انتشار برگشتی
۹۰	۱۰-۴ نحوه ارائه زوجهای آموزشی به شبکه
۹۱	۱۱-۴ تابع انتقال
۹۲	۱۲-۴ پایان آموزش
۹۲	۱۳-۴ تعداد نرون در لایه‌ها
۹۳	فصل پنجم الگوریتم ژنتیک
۹۴	۱-۵ مقدمه‌ای بر الگوریتم ژنتیک
۹۵	۲-۵ ساختار عمومی الگوریتم ژنتیک
۹۶	۳-۵ تولیدمثل
۹۶	۱-۳-۵ روش چرخ رولت
۹۷	۲-۳-۵ روش رقابتی
۹۷	۳-۳-۵ روش رتبه‌بندی
۹۷	۴-۵ عملگرهای ژنتیکی
۹۷	۱-۴-۵ پیوند
۹۹	۲-۴-۵ جهش
۹۹	۵-۵ همگرایی الگوریتم ژنتیک
۱۰۰	۶-۵ معیار توقف محاسبات الگوریتم ژنتیک
۱۰۰	۷-۵ معرفی نرم‌افزار NeuroSolution

۱۰۳	فصل ششم نتایج
۱۰۴	۱-۶ نتایج بخش مدل‌سازی
۱۱۵	۲-۶ کاربرد شبکه‌های عصبی در پیش‌بینی راندمان جداسازی در شوینده‌های و نتوری
۱۱۹	۳-۶ بهینه‌سازی شبکه‌های عصبی با استفاده از الگوریتم ژنتیک
۱۳۲	فصل هفتم بحث، نتیجه‌گیری و پیشنهادات
۱۳۳	۱-۷ بحث و نتیجه‌گیری
۱۳۸	۲-۷ پیشنهادات
۱۳۹	منابع
۱۴۳	پیوست الف معادلات جداسازی مورد نیاز جهت برنامه‌نویسی کامپیوتری
۱۴۴	الف-۱ توزیع غلظت قطرات
۱۴۸	الف-۲ توزیع غلظت آلاینده‌ها در فاز گاز
۱۴۸	الف-۲-۱ جذب در محلول هیدروکسید سدیم غلیظ
۱۵۱	الف-۲-۲ جذب در آب
۱۵۶	الف-۲-۳ جذب در محلول هیدروکسید سدیم رقیق

فهرست شکلها و نمودارها

- شکل ۱-۱ ته‌نشین کننده ثقلی ۶
- شکل ۲-۱ سیکلون ۷
- شکل ۳-۱ برج آبپاش ۷
- شکل ۴-۱ شوینده و نتوری ۹
- شکل ۱-۳ موازنه جرم در یک حجم کنترل در جریان گاز برای آلاینده‌ها ۳۴
- شکل ۲-۳ موازنه جرم در یک حجم کنترل برای جریان قطرات ۳۷
- شکل ۳-۳ موازنه نیرو بر یک المان دیفرانسیلی ۴۲
- شکل ۴-۳ موازنه شارها در یک حجم کنترل ۵۷
- شکل ۵-۳ سلولها در هر سطح مقطع ۵۷
- شکل ۶-۳ شرط مرزی برای سلول ۱ ۶۲
- شکل ۷-۳ شرط مرزی برای سلول ۷ ۶۳
- شکل ۱-۴ مشخصات اصلی یک نرون بیولوژیک ۷۸
- شکل ۲-۴ شبکه با یک نرون ۸۰
- شکل ۳-۴ تابع انتقال تانژانت سیگموئید ۹۲
- شکل ۴-۴ تابع انتقال تانژانت هایپربولیک ۹۲
- شکل ۱-۵ شکل‌های مختلف عملگر پیوند ۹۸
- شکل ۲-۵ صفحه گرافیکی NeuroSolution ۱۰۱
- شکل ۱-۶ مشخصات فیزیکی و نتوری مورد استفاده توسط ویسواناتان ۱۰۴
- شکل ۲-۶ سرعت گاز و قطره در طول شوینده ویسواناتان ۱۰۵
- شکل ۳-۶ مقایسه نتایج مدل با داده‌های تجربی ویسواناتان و همکاران برای $L/G = 0.0004 m^3 / m^3$ و اعداد پکلت مختلف. ۱۰۶
- شکل ۴-۶ مقایسه نتایج مدل با داده‌های تجربی ویسواناتان و همکاران برای $L/G = 0.00093 m^3 / m^3$ و اعداد پکلت مختلف ۱۰۶
- شکل ۵-۶ مقایسه نتایج مدل با داده‌های تجربی ویسواناتان و همکاران برای $L/G = 0.00147 m^3 / m^3$ و اعداد پکلت مختلف ۱۰۶

- اعداد پکلت مختلف
 شکل ۶-۶ مقایسه نتایج مدل با داده‌های تجربی ویسواناتان و همکاران برای $L/G = 0.00179 m^3 / m^3$ و
 اعداد پکلت مختلف
 شکل ۷-۶ مقایسه نتایج مدل با مدل فتحی و همکاران و داده‌های تجربی برای
 $L/G = 0.0004 m^3 / m^3$
 شکل ۸-۶ مقایسه نتایج مدل با مدل فتحی و همکاران و داده‌های تجربی برای
 $L/G = 0.00093 m^3 / m^3$
 شکل ۹-۶ مقایسه نتایج مدل با مدل فتحی و همکاران و داده‌های تجربی برای
 $L/G = 0.00147 m^3 / m^3$
 شکل ۱۰-۶ مقایسه نتایج مدل با مدل فتحی و همکاران و داده‌های تجربی برای
 $L/G = 0.00179 m^3 / m^3$
 شکل ۱۱-۶ سرعت گاز و قطره در طول شوینده جانسون و همکاران
 شکل ۱۲-۶ مقایسه نتایج مدل با داده‌های تجربی جانسون و همکاران برای $L = 0.242 GPM$
 شکل ۱۳-۶ مقایسه نتایج مدل با داده‌های تجربی جانسون و همکاران برای $L = 0.134 GPM$
 شکل ۱۴-۶ اثر دبی مایع روی نرخ جذب و مقایسه نتایج مدل با داده‌های تجربی جانسون و همکاران
 شکل ۱۵-۶ سرعت گاز و قطره در طول شوینده *O.A.P*
 شکل ۱۶-۶ پیش‌بینی غلظت فاز مایع در امتداد شوینده و مقایسه نتایج مدل با داده‌های تجربی *O.A.P*
 برای آب
 شکل ۱۷-۶ پیش‌بینی غلظت فاز مایع در امتداد شوینده و مقایسه نتایج مدل با داده‌های تجربی *O.A.P*
 برای هیدروکسید سدیم ۰/۰۱ نرمال
 شکل ۱۸-۶ پیش‌بینی غلظت فاز مایع در امتداد شوینده و مقایسه نتایج مدل با داده‌های تجربی *O.A.P*
 برای هیدروکسید سدیم ۰/۰۳ نرمال
 شکل ۱۹-۶ طرح شماتیک شبکه‌های عصبی
 شکل ۲۰-۶ میانگین مجذور خطا برای مقادیر متفاوتی از تعداد نرونها در لایه مخفی در شبکه اول
 شکل ۲۱-۶ نتایج مرحله آموزش شبکه اول
 شکل ۲۲-۶ نتایج مرحله آموزش شبکه دوم

- شکل ۶-۲۳ نتایج مرحله شبیه‌سازی شبکه اول ۱۱۹
- شکل ۶-۲۴ نتایج مرحله شبیه‌سازی شبکه دوم ۱۱۹
- شکل ۶-۲۵ بهترین عدد برازندگی (عکس MSE) در کل نسلها بر حسب شماره نسل در شبکه اول ۱۲۰
- شکل ۶-۲۶ بهترین عدد برازندگی (عکس MSE) در کل نسلها بر حسب شماره نسل در شبکه دوم ۱۲۱
- شکل ۶-۲۷ بهترین عدد برازندگی (عکس MSE) در کل نسلها بر حسب شماره نسل در شبکه سوم ۱۲۱
- شکل ۶-۲۸ بهترین عدد برازندگی (عکس MSE) در کل نسلها بر حسب شماره نسل در شبکه چهارم ۱۲۱
- شکل ۶-۲۹ متوسط عدد برازندگی (عکس MSE) در هر نسل بر حسب شماره نسل در شبکه اول ۱۲۲
- شکل ۶-۳۰ متوسط عدد برازندگی (عکس MSE) در هر نسل بر حسب شماره نسل در شبکه دوم ۱۲۲
- شکل ۶-۳۱ متوسط عدد برازندگی (عکس MSE) در هر نسل بر حسب شماره نسل در شبکه سوم ۱۲۲
- شکل ۶-۳۲ متوسط عدد برازندگی (عکس MSE) در هر نسل بر حسب شماره نسل در شبکه چهارم ۱۲۳
- شکل ۶-۳۳ مقایسه داده‌های تجربی با نتایج شبیه‌سازی شبکه اول توسط GA-ANNs ۱۲۴
- شکل ۶-۳۴ مقایسه داده‌های تجربی با نتایج شبیه‌سازی شبکه دوم توسط GA-ANNs ۱۲۵
- شکل ۶-۳۵ مقایسه داده‌های تجربی با نتایج شبیه‌سازی شبکه سوم توسط GA-ANNs ۱۲۵
- شکل ۶-۳۶ مقایسه داده‌های تجربی با نتایج شبیه‌سازی شبکه چهارم توسط GA-ANNs ۱۲۵
- شکل ۶-۳۷ نتایج شبیه‌سازی شبکه اول توسط مدل GA-ANNs ۱۲۶
- شکل ۶-۳۸ نتایج شبیه‌سازی شبکه دوم توسط مدل GA-ANNs ۱۲۶
- شکل ۶-۳۹ نتایج شبیه‌سازی شبکه سوم توسط مدل GA-ANNs ۱۲۶
- شکل ۶-۴۰ نتایج شبیه‌سازی شبکه چهارم توسط مدل GA-ANNs ۱۲۷
- شکل ۶-۴۱ اثر قطر ذره بر راندمان جداسازی شبکه اول (شوینده و نتوری مستطیلی) برای
 $L/G = 0.00144m^3 / m^3$ ۱۲۸
- شکل ۶-۴۲ اثر قطر ذره بر راندمان جداسازی شبکه اول (شوینده و نتوری مستطیلی) برای
 $L/G = 0.001733m^3 / m^3$ ۱۲۸
- شکل ۶-۴۳ اثر سرعت گاز در گلوگاه بر راندمان جداسازی شبکه اول (شوینده و نتوری مستطیلی) ۱۲۹
- شکل ۶-۴۴ اثر نسبت دبی مایع به گاز بر ضریب f شبکه سوم (شوینده و نتوری مدور) ۱۲۹
- شکل ۶-۴۵ اثر قطر ذره بر ضریب f شبکه سوم (شوینده و نتوری مدور) برای
 $L/G = 0.003743m^3 / m^3$ ۱۳۰

- شکل ۶-۴۶ اثر قطر ذره بر ضریب f شبکه سوم (شوینده و توری مدور) برای $L/G = 0.00454 m^3 / m^3$ ۱۳۰
- شکل ۶-۴۷ اثر سرعت گاز در گلوگاه بر ضریب f شبکه سوم (شوینده و توری مستطیلی) ۱۳۱
- شکل ۷-۱ مقایسه مدل ریاضی با مدل طلایی و همکاران و داده‌های تجربی جانسون و همکاران در $L = 0.242 GPM$ برای حذف SO_2 از جریان گاز در محلول هیدروکسید سدیم ۰/۶ نرمال ۱۳۳
- شکل ۷-۲ مقایسه مدل ریاضی با مدل طلایی و همکاران و داده‌های تجربی جانسون و همکاران در $L = 0.134 GPM$ برای حذف SO_2 از جریان گاز در محلول هیدروکسید سدیم ۰/۶ نرمال ۱۳۴
- شکل ۷-۳ مقایسه مدل با مدل طلایی و همکاران و داده‌های تجربی $O.A.P$ برای حذف SO_2 از جریان گاز در آب ۱۳۵
- شکل ۷-۴ مقایسه مدل با مدل طلایی و همکاران و داده‌های تجربی $O.A.P$ برای حذف SO_2 از جریان گاز در محلول رقیق هیدروکسید سدیم ۱۳۵
- شکل ۷-۵ مقایسه مدل با مدل طلایی و همکاران و داده‌های تجربی $O.A.P$ برای حذف SO_2 از جریان گاز در محلول رقیق هیدروکسید سدیم ۱۳۶
- شکل ۷-۶ مقایسه داده‌های آزمایشگاهی با $GA-ANNs$ و مدل آنانتانارایانان و ویسواناتان ۱۳۷

فهرست جداول

۱۱۵	جدول ۱-۶ دامنه داده‌های تجربی مورد استفاده در شبکه اول
۱۱۶	جدول ۲-۶ دامنه داده‌های تجربی مورد استفاده در شبکه دوم
۱۱۶	جدول ۳-۶ دامنه داده‌های تجربی مورد استفاده در شبکه سوم
۱۱۶	جدول ۴-۶ دامنه داده‌های تجربی مورد استفاده در شبکه چهارم
۱۲۳	جدول ۵-۶ نتایج آموزش شبکه اول با مدل GA-ANNs
۱۲۳	جدول ۶-۶ نتایج آموزش شبکه دوم با مدل GA-ANNs
۱۲۳	جدول ۷-۶ نتایج آموزش شبکه سوم با مدل GA-ANNs
۱۲۴	جدول ۸-۶ نتایج آموزش شبکه چهارم با مدل GA-ANNs
۱۲۴	جدول ۹-۶ نتایج شبیه‌سازی شبکه‌ها با مدل GA-ANNs
۱۳۷	جدول ۱-۷ مقایسه روشهای مختلف آموزش برای شبکه‌ها بر اساس ضریب همبستگی و میانگین مجذور خطا

فهرست علائم و نشانه‌ها

- A_c : سطح مقطع هسته جریان m^2
 A : سطح مقطع m^2
 C : نسبت دبی جرمی قطرات به دبی جرمی کل مایع
 C_D : ضریب دراگ
 C'' : غلظت اولیه $NaOH$ kg/m^3
 C_d : غلظت قطرات No/m^3 : غلظت گاز $grmol/m^3$
 C_l : غلظت مایع $grmol/m^3$
 C'_g : غلظت بدون بعد گاز C_g/C_{g0}
 C_{g0} : غلظت اولیه گاز $grmol/m^3$
 D_d : قطر میانگین قطرات m
 D_H : قطر هیدرولیک گلوگاه شوینده m
 D_{AB} : ضریب نفوذ جزء A در B m^2/s
 D_g : ضریب نفوذ در گازها m^2/s
 D_l : ضریب نفوذ در مایع m^2/s
 D'' : نفوذ $NaOH$ در آب m^2/s
 D' : نفوذ SO_2 در آب m^2/s
 E : نفوذ گردابه‌ای m^2/s
 F : شار موضعی به شار یکنواخت
 f : ضریب اصطکاک
 G : دبی حجمی گاز m^3/s
 H : عرض گلوگاه شوینده m
 i : نسبت مولی SO_2 به $NaOH$
 K_l : ضریب انتقال جرم بر مبنای فاز مایع m/s
 K_g : ضریب انتقال جرم بر مبنای فاز گاز m/s

- K : ثابت تعادل واکنش $grmol/lit$
- L_0 : دبی حجمی مایع ورودی به ونتوری m^3/s
- L : طول گلوگاه شوینده m
- L^{**} : طول نفوذ جت مایع m
- l_g : طول اختلاط پرائتل گاز m
- l_d : طول اختلاط قطرات m
- m : نسبت دبی جرمی مایع به گاز
- N_A : میزان انتقال جرم جزء A $grmol/m^2s$ $N_{A_{reaction}}$: میزان انتقال جرم در نتیجه واکنش شیمیایی
- $grmol/m^2s$
- \dot{N} : تعداد قطرات در هر ثانیه No/s
- N_{pe} : عدد بدون بعد پکلت
- N_{μ} : عدد بدون بعد ویسکوزیته مایع
- N_{Re} : عدد بدون بعد رینولدز
- N_{Sc} : عدد بدون بعد اشمیت
- N_{Sh} : عدد بدون بعد شروود
- P : فشار
- P_{SO_2} : فشار جزئی SO_2 atm
- Q : دبی حجمی m^3/s
- S : توان منبع No/m^3s
- T : دما K
- U_g : سرعت بدون بعد گاز V_g/V_{g0}
- U_d : سرعت بدون بعد قطرات V_d/V_{d0}
- V : سرعت m/s
- V_{g0} : سرعت گاز در گلوگاه m/s
- V'_g : سرعت متوسط نوسانات گاز m/s
- V_0 : سرعت برشی m/s
- V_j : سرعت جت مایع m/s

V_s : سرعت ظاهری m/s

W : ضخامت شوینده m

W : دبی جرمی Kg/s

We : عدد بدون بعد وبر

x : طول m

y : عرض m

z : ضخامت m

X_c : کیفیت سیال هسته

X : طول بدون بعد x/L

Y : عرض بدون بعد y/H

Z : ضخامت بدون بعد z/W

α_o : جزئی از گلوگاه که توسط سیال هسته اشغال شده

α_g : جزء حجمی سیال هسته که توسط گاز اشغال شده

δ : ضخامت فیلم مایع m

ρ : دانسیته kg/m^3

μ : ویسکوزیته kg/ms

σ : کشش سطحی N/m

τ : تنش برشی

ε : زبری دیواره

ϕ : فاکتور افزایش انتقال جرم

زیرنویسها

c : هسته

d : قطره

f : فیلم مایع

g : گاز

l : مایع

o : نازل

فصل اول

مقدمه