بسم الله الرحمن الرحيم

**دانشکده فنی و مهندسی**

**بخش مهندسی شیمی**

**پایان نامه تحصیلی برای دریافت درجه کارشناسی ارشد رشته مهندسی شیمی**

**گرایش پیشرفته**

---

# مدل سازی ریاضی و شبیه سازی فرایند خشک کردن دانه های نیترات آمونیم در دو خشک کن چرخشی سری با جریان هوای داغ همسو و ناهمسو

---

**مؤلف:**

**حامد عباس فرد**

**استادان راهنما :**

**دکتر حسن هاشمی‌پور رفسنجانی**

**دکتر ستار قادر**

**دیماه ۱۳۹۱**

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

**بخش 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 : حامد عباس فرد

استاد راهنما ۱ : دکتر حسن هاشمی پور رفسنجانی

استاد راهنما ۲ : دکتر ستار قادر

داور ۱ : دکتر محمد مهدی افصحی

داور۲ : دکترعطاالله سلطانی گوهرریزی

نماینده تحصیلات تکمیلی در جلسه دفاع : دکتر علی محبی

معاون آموزشی و پژوهشی دانشکده : دکتر مریم احتشام زاده

**حق چاپ محفوظ و مخصوص به دانشگاه شهید باهنر کرمان است.**

## این پایان نامه را تقدیم می کنم به:

در درجه اول به روح گرانقدر برادرم شهید مهدی عباس فرد که در سن ۱۴ سالگی تکلیف الهی و دفاع از ناموس و وطنش را بر تحصیل علم و دانش ترجیح داد و جانش را در این راه هدیه کرد و دیگر هیچگاه فرصت به پایان رساندن تحصیلش را پیدا نکرد.

سپس به مادرم که سالها رنج دوری از همسر و فرزندش را فراموش کرد و چون شمعی در راه آسایش و آرامش من آب شد.

به همسرم که با کمی ها و کاستی های من ساخت و محیط خانه را برای پیشرفت و تحصیل من به بهترین وجه فراهم کرد.

# تشکر و قدردانی

امروز سپاسگزارم خداوندی هستم که به من لطف کرده و اجازه داده تا یک روز دیگر زنده باشم و زندگی کنم بلکه بتوانم قدمی در راه شناخت او و خدمت به بشریت بردارم.

از استادان راهنمای گرانقدرم ، جناب آقای دکتر حسن هاشمی پور رفسنجانی و آقای دکتر ستار قادر که علی رغم دشواری مسوولیتهای محوله راهنمایی این پایان نامه را به عهده گرفتند، سپاسگزارم. راهنماییهای ارزندۀ ایشان در تمامی مدت انجام تحقیق روشنگر راه این پژوهش بود.

از اساتید ارجمندم دکتر سلطانی گوهرریزی و دکتر افصحی که زحمت مطالعه و داوری این پایان نامه را بر خود هموار کرده و با رهنمود های ارزنده خود در غنی شدن این پایان نامه کمک رسانده اند، کمال تشکر و امتنان را دارم.

حامد عباس فرد

دیماه ۱۳۹۱

## چکیده

نیترات آمونیوم علاوه بر آنکه در مصارف کشاورزی مورد استفاده قرار می گیرد، بدلیل برخوردار بودن از خاصیت انفجاری، در صنایع نظامی و معدنی نیز از اهمیت ویژه ای برخوردار است. در تولید نیترات آمونیوم انفجاری مقدار زیادی رطوبت همراه آن وجود دارد، که معمولا در آخرین مرحله فرایند تولید لازم است خشک شود.. برای دستیابی به کیفیت مناسب و قابل عرضه در بازار لازم است رطوبت و دمای نیترات آمونیوم در محدوده خاصی کنترل شود. بدیهی است کنترل دما در فرایند خشک کردن مواد منفجره و آتش گیر از اهمیت بسیاری برخوردار می باشد. این مهم بدون شناخت دقیق از فرایند امکان پذیر نخواهد بود.

در این پایان نامه مدلسازی ریاضی و شبیه سازی خشک کن های چرخشی واحد نیترات آمونیوم مجتمع پتروشیمی شیراز با ظرفیت تولید روزانه ۶۵۰ تن نیترات آمونیوم انجام گردیده است. مدل سازی ریاضی دو خشک کن چرخشی سری با جریان های همسو و ناهمسوی شامل معادلات انتقال حرارت و جرم توسعه داده شده است. بر اساس داده های آزمایشگاهی، روابط جدید رطوبت تعادلی و سرعت خشک شدن برای نیترات آمونیوم ارایه گردیده است. نتایج حاصل از مدلسازی با مقادیر صنعتی مقایسه گردید. میانگین انحراف مطلق نتایج شبیه سازی، برای جریان همسو ۴/۰۴٪ رطوبت محصول، ۲/۳۳٪ دمای محصول و ۱/۸۴٪ دمای هوا و برای جریان نا همسو ۹/۰۱٪ رطوبت محصول ، ۲/۰۳٪ دمای محصول و ۴/۵۷٪ دمای هوا می باشد. این در حالی است که تا کنون مدل های ارایه شده در بهترین شرایط حدود ۸٪ انحراف را نشان می دهند.

از میان کلیه پارامترهای موثر بررسی شده در این تحقیق، شیب و سرعت چرخش خشک کن بیشترین تاثیر را روی محتوای رطوبت نیترات خروجی از خشک کن دارند. از میان کلیه پارامترهای عملیاتی نیز دمای هوای ورودی و رطوبت نیترات ورودی روی رطوبت محصول خروجی از خشک کن همسو بیشترین تاثیر را دارند. از طرف دیگر همین رفتار در مورد جریان نا همسو نیز صادق است با این تفاوت که افزایش ۳۰٪ دمای هوای ورودی به خشک کن تاثیر چندانی روی رطوبت نیترات خروجی از خشک کن ندارد.

دمای نیترات ورودی و دمای هوای ورودی به خشک کن بیشترین تاثیر را روی دمای محصول خروجی در هر دو نوع جریان دارند. با این تفاوت که در مورد جریان همسو دمای نیترات ورودی و در مورد جریان نا همسو دمای هوای ورودی تاثیر بیشتری روی دمای نیترات خروجی دارد.

بنابراین کنترل دما در خشک کن با جریان نا همسو برای مواد منفجره از حساسیت بیشتری برخوردار است.

**کلمات کلیدی:** واحد نیترات آمونیوم، خشک کن چرخشی، جریان همسو و نا همسو، مدل سازی ریاضی، رطوبت تعادلی، سرعت خشک کردن

فهرست مطالب

**پیشگفتار ..... ۲**

پیشگفتار ..... ۳

**فصل اول ..... ۵**

**تئوری و بررسی منابع ..... ۵**

۱-۱ مقدمه ..... ۶

۱-۲ فرایند خشک کردن ..... ۶

۱-۳ اصول پایه ای و اصطلاحات ..... ۸

۱-۴ خواص ترمودینامیکی هوای مرطوب و جامد مرطوب ..... ۹

۱-۴-۱ سایکرومتری(رطوبت سنجی) ..... ۹

۱-۴-۲ محتوای رطوبت تعادلی ..... ۱۳

۱-۴-۳ درجه فعالیت آب ..... ۱۷

۱-۵ سینتیک خشک شدن ..... ۱۸

۱-۶ انواع فرایندها و دستگاههای خشک کردن ..... ۲۷

۱-۶-۱ خشک کن های پیوسته ..... ۲۸

۱-۶-۲ خشک کن های مستقیم ..... ۲۹

۱-۶-۳ خشک کن های انجمادی ..... ۳۰

۱-۶-۴ خشک کن های مداوم ..... ۳۰

۱-۶-۵ خشک کن های تونلی ..... ۳۱

۱-۶-۶ خشک کن های بشکه ای ..... ۳۱

۱-۷ مدل های زمان اقامت ..... ۳۲

۱-۸ مدل های انتقال حرارت و جرم ..... ۳۷

۱-۹ مدل های کلی خشک کن ..... ۴۲
۱-۱۰ نیترات آمونیوم ..... ۴۵
۱-۱۱ تاریخچه نیترات آمونیوم ..... ۴۶
۱-۱۲ خواص نیترات آمونیم ..... ۴۸
۱-۱۳ تولید صنعتی نیترات آمونیم ..... ۵۰
۱-۱۳-۱ خنثی سازی ..... ۵۱
۱-۱۳-۲ تغلیظ سازی ..... ۵۱
۱-۱۳-۳ عملیات تکمیلی ..... ۵۲
۱-۱۳-۴ انبار کردن نیترات ..... ۵۳
۱-۱۳-۵ کنترل آلودگی ..... ۵۳

**فصل دوم ..... ۵۵**

**بررسی خشک شدن دانه های نیترات آمونیوم ..... ۵۵**
۲-۱ واحد تولید نیترات در مجتمع پتروشیمی شیراز ..... ۵۶
۲-۲ تعیین رطوبت تعادلی و سرعت خشک شدن نیترات آمونیوم ..... ۶۱
۲-۳ زمان اقامت نیترات آمونیوم ..... ۶۴

**فصل سوم ..... ٦٧**

**مدلسازی ریاضی و شبیه سازی ..... ٦٧**
۳-۱ معادلات سرعت خشک شدن، رطوبت تعادلی و ضریب انتقال حرارت ..... ۶۸
۳-۲ مدل سازی و شبیه سازی ..... ۶۹
۳-۳ موازنه جرم ..... ۷۰
۳-۳-۱ رطوبت در جامد ..... ۷۰
۳-۳-۲ رطوبت در هوا ..... ۷۱
۳-۴ موازنه حرارت ..... ۷۱

۳-۴-۱ دمای جامد ..... ۷۱
۳-۴-۲ دمای هوا ..... ۷۲
۳-۵ حل عددی ..... ۷۳

**فصل چهارم ..... ۷۵**

**نتایج و جمع بندی ..... ۷۵**
۴-۱ اعتبار سنجی مدل ..... ۷۶
۴-۲ نتایج و بحث ..... ۷۹
۴-۳ نتیجه گیری نهایی و پیشنهادات ..... ۸۹
فهرست منابع و مراجع ..... ۹۱

# فهرست جداول

جدول ۱-۱ خواص ترمودینامیکی و انتقالی سیستم هوا آب [۲ و ۳]..... ۹

جدول ۱-۲ تعاریف عمومی مربوط به فرایندهای خشک کردن و سایکرومتری..... ۹

جدول ۱-۳ کمترین مقدار برای رشد میکروبی یا هاگ ها [۹]..... ۱۷

جدول ۱-۴ محتوای رطوبت بحرانی تقریبی برای بعضی از مواد..... ۲۰

جدول ۱-۵ زمان های خشک شدن برای مدل های مختلف نرخ خشک شدن[۲]..... ۲۲

جدول ۱-۶ حل هایی برای قانون دوم فیک در بعضی از هندسه های ساده [۲]..... ۲۴

جدول ۱-۷ ضرائب معادله ۱-۲۲..... ۳۵

جدول ۱-۸ مقدار M و K برای مواد مختلف[۳۸] ..... ۳۸

جدول ۱-۹ ضرایب معادله ۱-۳۷[۳۸]..... ۴۱

جدول ۱-۱۰ نقطه ذوب نیترات آمونیوم در رطوبت های مختلف (وزن مولکولی آن ۸۰/۰۴ و دانسیته و گرمای ویژه آن در $^{\circ}C$ ۲۰ برابر با ۱/۷۲۵ ($G/CM^3$) و ۰/۴۲۲ $KCAL/KG^{\circ}C$ ) ...۴۸

جدول ۱-۱۱ رطوبت نسبی هوا..... ۴۸

جدول ۲-۱ مشخصات خوراک ورودی به راکتور..... ۵۶

جدول ۲-۲ مشخصات محصول نهایی نیترات آمونیوم ..... ۵۹

جدول ۲-۳ مقادیر ثابت ها و باقیمانده رابطه ۲-۲ در دماهای مختلف..... ۶۳

جدول ۲-۴ مقایسه خطای مدل های مختلف زمان اقامت با مقدار واقعی..... ۶۵

جدول ۴-۱ پارامتر های استفاده شده در مدلسازی خشک کن..... ۷۵

جدول ۴-۲ نتایج اعتبار سنجی مدل با مقادیر صنعتی الف) جریان همسو ب) جریان ناهمسو ..... ۷۷

## فهرست شکل ها

شکل ۱-۱ نمودار سایکرومتریک..... ۱۲

شکل ۱- ۲ نمودارعمومی جذب سطحی دما ثابت..... ۱۴

شکل ۱- ۳ نمودارهای رطوبت تعادلی برای مواد جامد مختلف..... ۱۵

شکل ۱- ۴ انواع مختلف رطوبت در فرایند خشک کردن..... ۱۶

شکل ۱-۵ منحنی عمومی نرخ خشک شدن ناپیوسته در شرایط ثابت خشک شدن ..... ۲۰

شکل ۱-۶ مراحل تولید نیترات آمویوم..... ۵۳

شکل ۲-۱ شکل شماتیک واحد نیترات آمونیوم پتروشیمی شیراز..... ۵۶

شکل ۲-۲ شکل خشک کن نیترات آمونیوم و سطح مقطع خشک کن..... ۵۹

شکل ۲-۳ شکل دستگاه EMC..... ۶۲

شکل ۲-۴ میزان رطوبت بر مبنای خشک نیترات آمونیوم در زمان های مختلف با جریان های هوا در رطوبت نسبی ۲۰٪، در دمای ۲۹، ۳۸ و ۴۴ درجه سانتیگراد..... ۶۴

شکل ۲-۵ منحنی های رطوبت تعادلی نیز در شرایط مختلف جریان هوا..... ۶۵

شکل ۳-۱ المان حجمی جهت اعمال موازنه جرم و حرارت: الف) جریان همسو ب) جریان ناهمسو..... ۷۰

شکل ۴-۱ پروفایل رطوبت نیترات آمونیوم و رطوبت مطلق هوا در طول خشک کن الف) جریان همسو ب) جریان ناهمسو..... ۸۰

شکل ۴-۲ پروفایل دمای نیترات آمونیوم و هوا در طول خشک کن الف) جریان همسو ب) جریان ناهمسو..... ۸۱

شکل ۴-۳ نمودار رطوبت خروجی نیترات آمونیوم از خشک کن به ازای تغییر در رطوبت ورودی به خشک کن برای جریان همسو و ناهمسو..... ۸۲

شکل ۴-۴ نمودار رطوبت خروجی نیترات آمونیوم از خشک کن به ازای تغییر در دمای نیترات ورودی برای جریان همسو و ناهمسو..... ۸۳

شکل ۴-۵ نمودار رطوبت خروجی نیترات آمونیوم از خشک کن به ازای تغییر در دمای هوای ورودی برای جریان همسو و ناهمسو..... ۸۳

شکل ۴-۶ نمودار دمای خروجی نیترات آمونیوم از خشک کن به ازای تغییر در دمای هوای ورودی برای جریان همسو و نا همسو ..... ۸۴

شکل ۴-۷ نمودار دمای خروجی نیترات آمونیوم از خشک کن به ازای تغییر در دمای نیترات ورودی برای جریان همسو و ناهمسو..... ۸۵

شکل ۴-۸ نمودار مقایسه ای رطوبت خروجی نیترات آمونیوم از خشک کن به ازای تغییر ۳۰٪± در پارامترهای مختلف (نقطه چین معرف مبنای مقایسه است) الف) جریان همسو ب) جریان ناهمسو..... ۸۶

شکل ۴-۹ نمودار مقایسه ای دمای خروجی نیترات آمونیوم از خشک کن به ازای تغییر ۳۰٪± در پارامترهای مختلف (نقطه چین معرف مبنای مقایسه است) الف) جریان همسو ب) نا همسو..... ۸۷

# پیشگفتار

## پیشگفتار

در تولید بسیاری از محصولات شیمیایی و معدنی مقدار زیادی رطوبت به همراه مواد وجود دارد، که معمولا در آخرین پروسه لازم است از جسم جامد خارج شود. این کار از طریق فرایند خشک کردن حرارتی که یکی از واحدهای عملیاتی مهم در اکثر بخش های صنعتی است صورت می پذیرد.

با بالا رفتن استانداردهای عمومی زندگی، تقاضا برای فناوریهای خشک کردن با کارایی انرژی بالاتر و اثرات زیست محیطی کمتر در سراسر جهان رو به افزایش است. در واقع، کاهش مصرف انرژی فرایندهای خشک کردن برای کشورهای با رشد صنعتی زیاد در درجه اهمیت بالایی قرار دارد. همچنین افزایش اخیر قیمت نفت، باعث تقویت و توجه بیشتر به مسائل تحقیق و توسعه در زمینه خشک کردن شده است. این امر با افزایش تقریبی مقالات ارائه شده در موضوعات مختلف خشک کردن قابل مشاهده است.

برای دستیابی به کیفیت مناسب و قابل عرضه محصول در بازار لازم است رطوبت در محدوده خاصی کنترل شود. در پاره ای از موارد علاوه بر رطوبت، دمای جسم نیز باید به دقت کنترل شود. بدیهی است در فرایند خشک کردن مواد منفجره و آتش گیر این موضوع از اهمیت بیشتری برخوردار می باشد. در صنعت تولید مواد انفجاری کنترل دقیق دما و رطوبت در طی فرایند خشک کردن، برای افزایش ایمنی بسیار ضروری به نظر می رسد. این مهم بدون شناخت دقیق از فرایند امکان پذیر نخواهد بود.

خشک کن ها در صنعت انرژی زیادی را مصرف می کنند. در طی این فرایند لازم است دمای مواد جامد جهت تبخیر رطوبت افزایش یابد و با توجه به آنکه گرمای نهان تبخیر آب مقدار زیادی است، لازم است انرژی زیادی جهت این کار مصرف گردد. همچنین هوا با دما و رطوبت مناسب نیز مورد نیاز است.

بازده خشک کن، که برابر با نسبت انرژی تئوری مورد نیاز برای تبخیر مواد، به میزان انرژی مصرفی واقعی می باشد، در صنعت حدود ٪۴۵-۴۰ است، که حتی تا ٪۱۰ نیز می تواند کاهش یابد. به عنوان مثال، طبق ارقام اعلام شده در صورتی که ٪۲ صرفه جویی در مصرف انرژی خشک کن ها در امریکا صورت گیرد، تقریبا معادل چهار میلیون بشکه نفت در سال مصرف انرژی کمتر

خواهد بود. بنابراین افزایش بازدهی خشک کن ها از لحاظ اقتصادی نیز بسیار مورد توجه می باشد.

به دلیل محدودیت های سیستم های کنترلی، در بسیاری از صنایع ممکن است محصول بیش از اندازه مورد نیاز خشک شود که این امر باعث افزایش گرد و غبار و در نتیجه اتلاف محصول و آلودگی محیط زیست می شود. همچنین افزایش بیش از حد دما در مورد موادی که به دما حساس می باشند خطر آتش سوزی و انفجار را تشدید خواهد کرد. جالب است بدانید در یک خشک کن بزرگ در صورتی که با بهبود سیستم کنترلی ۱٪ به میزان رطوبت خروجی اضافه گردد، تقریبا ۵۰۰۰۰۰ دلار در سال صرفه جویی خواهد شد.

در این پایان نامه سعی شده است با بررسی و بدست آوردن پارامترها و روابط مورد نیاز برای فرایند خشک کردن دانه های نیترات آمونیوم، بهترین مدل ریاضی که بتواند بهترین نتایج در مقایسه با مقادیر صنعتی را نشان دهد ارائه نماید. مدل سازی فرایند این امکان را فراهم می سازد تا دما و رطوبت خروجی (همچنین در نقاط مختلف درون خشک کن) به خوبی پیش بینی شود.

فصل اول

# تئوری و بررسی منابع

## ۱-۱ مقدمه

در فرایندهای مختلف خشک کردن، مواد جامد، شبه جامد و مایع با تبخیر مایع درون آنها و تبدیل آن به فاز بخار با اعمال گرما، به محصولات جامد خشک تبدیل می شوند. به عنوان یک مورد خاص در خشک کردن انجمادی که مایع موجود در ماده در زیر نقطه سه گانه آن منجمد می شود، خشک کردن توسط فرایند تصعید و تبدیل رطوبت از جامد به بخار به طور مستقیم صورت می گیرد. بنابراین این تعریف، تبدیل مواد به حالت تغلیظ شده آن (تبخیر[1]) و آب زدایی مکانیکی مانند فیلتراسیون، سانترفیوژ کردن، ته نشین کردن، جداسازی فوق بحرانی آب از ژل ها که باعث تولید ژل با تخلخل زیاد (عصاره گیری[2]) می شود و یا خشک کردن مایعات و گازها به وسیله غربال های مولکولی[3] (جذب سطحی) را شامل نمی گردد. تغییر فاز و ایجاد فاز جامد به عنوان محصول نهایی، هدف اصلی فرایندهای خشک کردن است. خشک کردن یکی از فرایندهای مهم در صنایع شیمیایی، کشاورزی، بیوتکنولوژی، دارویی، غذایی، پلیمری، کاشی و سرامیک، چوب و کاغذ و تهیه مواد معدنی است.

## ۱-۲ فرایند خشک کردن

خشک کردن تقریبا یکی از قدیمی ترین، عمومی ترین و متنوع ترین فرایندهای صنایع شیمیایی است. در متون قدیمی تا کنون به حدود ۴۰۰ نوع خشک کن مختلف اشاره شده است و این در حالی است که در حال حاضر حدود ۱۰۰ نوع خشک کن مختلف در دنیا وجود دارد. این فرایند به خاطر انرژی نهان تبخیر آب با تقطیر به عنوان یکی از فرایندهای انرژی بر رقابت دارد و به طور ذاتی فرایندی با راندمان پایین است، زیرا در آن در اکثر موارد از هوای گرم به عنوان واسطه تبادل گرما استفاده می شود. مطالعات مختلف، مصرف انرژی جهانی فرایندهای خشک کردن صنعتی را بین ٪۱۵-۱۰ برای امریکا، کانادا، فرانسه و انگلیس و ٪۲۵-۲۰ برای دانمارک و آلمان گزارش کرده اند.

---

[1] Evaporation

[2] Extraction

[3] Molecular sieve

میزان مصرف انرژی در فرایندهای خشک کردن از کم که کمتر از ٪۵ در صنایع شیمیایی تا زیاد که بیشتر از ٪۳۵ در فرایندهای تولید کاغذ است، درجه بندی می شود. به عنوان مثال در امریکا، هزینه خشک کن ها حدود ۸۰۰ میلیون دلار در سال تخمین زده شده است. بنابراین هزینه اصلی خشک کن ها، هزینه عملکردی است که بیشتر از هزینه سرمایه گذاری اولیه آنها می باشد.

خشک کردن مواد مختلف ممکن است به یک یا چند دلیل لازم باشد: برای جابجایی آسان جریان آزاد مواد جامد، حفظ و نگه داری، کاهش هزینه های حمل و نقل، رسیدن به کیفیت مورد نظر محصول و غیره. در بسیاری از فرایندها، خشک کردن نا مناسب ممکن است باعث صدمات جبران ناپذیر به کیفیت مواد و نیز غیر قابل فروش شدن محصول شود.

قبل از پرداختن به اصول اولیه، لازم است که به ویژگی های منحصر به فرد فرایندهای خشک کردن توجه شود که آن را به موضوعی جالب در حوزه تحقیق و توسعه تبدیل کرده است:

- اندازه مواد ممکن است از میکرون تا ده ها سانتی متر باشد (در ضخامت و یا عمق).
- تخلل مواد ممکن است از صفر تا ٪۹۹/۹ باشد.
- زمان خشک کردن ممکن است بین ۰/۲۵ ثانیه (خشک کردن دستمال کاغذی) تا پنج ماه (برای چوب های سخت باشد) باشد.
- ظرفیت تولید ممکن است بین ۰/۱ kg/h تا ۱۰۰ ton/h باشد.
- دمای خشک کردن ممکن است کمتر از نقطه سه گانه تا بیشتر از دمای نقطه بحرانی مایع باشد.
- فشار عملکرد ممکن است جزیی از میلی بار تا ۲۵ اتمسفر باشد.
- اعمال گرما ممکن است در حالت پیوسته یا نا پیوسته به صورت جابجایی، هدایت، تشعشع یا میدان های مغناطیسی باشد.

واضح است که نمی توان از ساختار طراحی یکتایی برای انواع مختلف خشک کردن استفاده کرد. لازم است با مراجعه به اصول انتقال گرما، جرم و مومنتوم که با مفاهیم خواص مواد (کیفیت)