دانشکده کشاورزی

پایان نامه کارشناسی ارشد در رشته مکانیک ماشینهای کشاورزی

بهینه سازی و ارزیابی یک خشک کن مایکروویو– بستر سیال با بازگردش هوای خروجی: مطالعه موردی خشک کردن ذرت

به کوشش:
سمیرا توکلی

استاد راهنما:
دکتر داریوش زارع

اساتید مشاور:
دکتر علی زمردیان
دکتر مهرداد نیاکوثری

اسفند ماه ۱۳۹۱

بسم الله الرحمن الرحيم

به نام خدا

اظهارنامه

اینجانب سمیرا توکلی سروستانی (۸۹۱۳۸۶) دانشجوی رشته مهندسی کشاورزی گرایش مکانیک ماشین های کشاورزی دانشکده کشاورزی دانشگاه شیراز اظهار می کنم که این پایان نامه حاصل پژوهش خودم بوده و در جاهایی که از منابع دیگران استفاده کرده ام، نشانی دقیق و مشخصات کامل آن را نوشته ام. همچنین اظهار می کنم که تحقیق و موضوع پایان نامه ام تکراری نیست و تعهد می نمایم که بدون مجوز دانشگاه دستاورد های آن را منتشر ننموده و یا در اختیار غیر قرار ندهم. کلیه حقوق این اثر مطابق با آیین نامه مالکیت فکری و معنوی متعلق به دانشگاه شیراز است.

نام و نام خانوادگی:

تاریخ و امضا:

تقدیم به

ماحصل آموخته هایم را تقدیم می کنم

به دستان پر مهر پدر و مادر مهربانم شاید که حاصل تلاشم بتواند اندکی از خستگی سالیان زندگیتان را بزداید.

بوسه بر دستان پرمهرتان.

بنام خدا

بهینه سازی و ارزیابی یک خشک کن مایکروویو- بستر سیال با بازگردش هوای خروجی: مطالعه موردی خشک کردن ذرت

به کوشش

سمیرا توکلی سروستانی

پایان نامه

ارائه شده به تحصیلات تکمیلی دانشگاه شیراز به عنوان بخشی از فعالیت‌های تحصیلی لازم برای اخذ درجه کارشناسی ارشد

در رشته

مکانیک ماشینهای کشاورزی

از دانشگاه

شیراز

جمهوری اسلامی ایران

ارزیابی کمیته پایان نامه با درجه‌ی: عالی

دکتر داریوش زارع، دانشیار بخش مکانیک ماشینهای کشاورزی (رییس کمیته).....

دکتر علی زمردیان، استاد بخش مکانیک ماشینهای کشاورزی.....

دکتر مهرداد نیاکوثری،دانشیار بخش علوم و صنایع غذایی.....

اسفند ماه ۱۳۹۱

سپاسگزاری

پس از سپاس بیکران از خداوند مهربان که توانایی و داناییم بخشید. سپاسگزارم از استاد راهنمای گرامی دکتر داریوش زارع که در به ثمر رسیدن این پایان نامه از هیچ کمک و و راهنمایی مضایقه نکردند و اساتید مشاور گرانقدردکتر زمردیان و دکتر نیاکوثری و همچنین دوستان و همکلاسیهای دوران تحصیلم در دانشگاه شیراز.

سپاس ویژه از آقای مهندس محسن رنجبران که همیشه راهنمای من بودند.

چکیده

بهینه سازی و ارزیابی یک خشک کن مایکروویو- بستر سیال با بازگردش هوای خروجی: مطالعه موردی خشک کردن ذرت

به کوشش

سمیرا توکلی سروستانی

برای شبیه سازی و پیش بینی رفتار خشک شدن دانه های مرطوب در یک خشک کن بستر سیال مایکروویو با بازگردش هوای خروجی در این تحقیق یک مدل ریاضی عمومی معرفی گردید. این مدل بر پایه اصول ترمودینامیکی بناشد و با استفاده از آزمایش های متعدد خشک کردن ذرت در یک خشک کن بستر سیال مایکروویو مجهز به سامانه بازگردش هوای خروجی در مقیاس آزمایشگاهی، اعتبار سنجی شد. به طور کلی این مدل روند تغییرات رطوبت محصول و همچنین دما و رطوبت هوای خروجی را، در یک خشک کن بستر سیال مایکروویو با بازگردش هوای خروجی، با میانگین خطای کمتر از ۹ ٪ پیش بینی می کنند. همچنین میزان انرژی ویژه مصرفی مربوط به خشک کردن ذرت در شرایط بستر سیال مایکروویو و دو حالت بدون بازگردش هوای خروجی و با بازگردش هوای خروجی مورد بررسی قرار گرفت. با به کار گیری دوباره هوای گرم خروجی در خشک کردن بستر سیال- مایکروویو ذرت از رطوبت ۴۳/۰۰ ٪ تا ۱۶/۲۸٪ بر مبنای وزن خشک، مقدار انرژی ویژه مصرفی حداکثر تا ۶۰/۳۲ ٪ با بازگردش تمام هوای خروجی نسبت به حالت بدون بازگردش هوا خروجی کاهش یافت. همچنین حداکثر کاهش در زمان خشک شدن محصول در حالت بازگردش کامل هوای گرم خروجی نسبت به حالت بدون بازگردش هوای خروجی ۲۸/۷۸ ٪ محاسبه گردید. که این امر به دلیل افزایش دمای هوای ورودی رخ می‌دهد.

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فصل اول: مقدمه..... ۴

۱-۱ خشک کردن..... ۴

۱-۲ خشک کن های بستر سیال مایکروویو..... ۶

۱-۳ بازگردش هوای خروجی..... ۸

۱-۴ شبیه سازی کامپیوتری خشک کن های بستر سیال مایکروویو..... ۹

۱-۴-۱ اهمیت شبیه سازی کامپیوتری..... ۹

۱-۴-۲ مدل سازی ریاضی خشک کن بستر سیال مایکروویو با بازگردش هوای خروجی..... ۱۰

۱-۵ رطوبت سنجی (سایکرومتری)..... ۱۰

۱-۶ دانه ذرت..... ۱۲

۱-۷ اهداف تحقیق..... ۱۳

۱-۷-۱ اهداف اصلی..... ۱۳

۱-۷-۲ اهداف فرعی تحقیق..... ۱۳

فصل دوم: مروری بر تحقیقات پیشین..... ۱۵

۲-۱ مدل سازی خشک کن های بستر سیال با روش های ترمودینامیکی..... ۱۵

۲-۲ مدل سازی خشک کردن مواد غذایی به روش هوای گرم مایکروویو..... ۱۶

۲-۳ بازگردش هوای خروجی..... ۲۰

فصل سوم: مواد و روشها..... ۲۳

۳-۱ آزمایش تجربی..... ۲۳

۳-۱-۱ مواد..... ۲۳

۳-۱-۲ تجهیزات آزمایش..... ۲۴

۳-۱-۳ سامانه بازگردش هوای خروجی..... ۲۶

۳-۱-۴ روش کار..... ۳۰

۳-۱-۴-۱ محاسبه دانسیته توان مایکروویو در سطح ماده غذایی درون اجاق مایکروویو..... ۳۰

۳-۱-۴-۲ آزمایش خشک کردن لایه نازک..... ۳۱

۳-۱-۴-۳ آزمایش خشک کردن بستر سیال مایکروویو..... ۳۲

۳-۲ مدل سازی ریاضی خشک شدن لایه نازک دانه ذرت به روش هوای گرم- مایکروویو. ۳۳

۳-۲-۱ روش تحلیل آماری..... ۳۴

۳-۲-۲ مدل سازی ریاضی خشک شدن لایه نازک دانه ذرت به روش هوای گرم ۳۵

۳-۳ مدل سازی ریاضی خشک کن بستر سیال مایکروویو با روش ترمودینامیکی..... ۳۶

۳-۳-۱ مدل سازی خشک شدن بستر سیال..... ۳۷

۳-۳-۲ مدل سازی خشک شدن بستر سیال- مایکروویو..... ۳۷

۳-۳-۲-۱ معادله تغییرات رطوبت یک دانه ذرت در طی خشک شدن هوای گرم- مایکروویو ۳۸
۳-۳-۲-۲ مدل سازی انرژی تولید شده در درون مواد داخل بستر در اثر نفوذ توان مایکروویو ۳۹
۳-۳-۲-۳ مدل سازی ترکیب بی دررو هوای بازگشتی و هوای محیط ۴۱
۳-۳-۳ گسسته سازی و حل عددی معادلات بقای جرم و بقای انرژی ۴۴
۳-۳-۴ معادلات خصوصیات ذرت ۴۸

فصل چهارم: نتایج و بحث ۵۱

۴-۱ مدل سازی ریاضی خشک شدن لایه نازک ذرت ۵۱
۴-۱-۱ تاثیر انرژی مایکروویو بر رفتار خشک شدن لایه نازک ذرت ۵۵
۴-۱-۲ تاثیر دمای هوای خشک کننده بر روی نحوه خشک شدن محصول ۵۶
۴-۲ مدل سازی خشک کن بستر سیال مایکروویو به روش ترمودینامیکی ۵۷
۴-۲-۱ اعتبار سنجی مدل ۵۷
۴-۲-۲ پیش بینی رطوبت محصول بدون بازگردش هوای خروجی ۶۱
۴-۲-۳ پیش بینی دما و رطوبت هوای خشک کننده بدون بازگردش هوای خروجی ۶۳
۴-۲-۴ پیش بینی رطوبت محصول با بازگردش هوای خروجی ۶۵
۴-۲-۵ پیش بینی دما و رطوبت هوای خشک کننده با بازگردش هوای خروجی ۶۸
۴-۲-۶ تعیین مصرف ویژه انرژی (SEC) ۷۱

فصل پنجم: نتیجه گیری و پیشنهادات ۷۷

۵-۱ نتیجه گیری ۷۷

۵-۲ پیشنهادات ۷۹
منابع فارسی ۸۰
منابع لاتین ۸۰

فهرست جداول

عنوان **صفحه**

جدول (۳-۱) مدل های ریاضی به کار رفته در تعیین معادله لایه نازک مناسب ۳۴

جدول (۳-۲) خصوصیات ترمودینامیکی سیستم هوا-بخار (Zare et al., 2006) ۳۶

جدول (۴-۱) نتایج آنالیز آماری مربوط به مدل سازی خشک شدن لایه نازک ذرت در شرایط هوای گرم ۵۲

جدول (۴-۲) نتایج آنالیز آماری مربوط به مدل سازی خشک شدن لایه نازک ذرت در شرایط هوای گرم- مایکروویو ۵۳

جدول (۴-۳) اعتبار سنجی مدل ریاضی خشک کن بستر سیال مایکروویو به روش ترمودینامیکی برای خشک کردن دانه ذرت از ۴۳/۰۰ تا ۱۶/۲۸ ٪ بر مبنای وزن خشک... ۵۹

جدول (۴-۴) اعتبار سنجی مدل ریاضی خشک کن بستر سیال با بازگردش هوای خروجی مایکروویو به روش ترمودینامیکی برای خشک کردن دانه ذرت از ۴۳/۰۰ تا ۱۶/۲۸ ٪ بر مبنای وزن خشک. ۶۰

جدول (۴-۶) مصرف ویژه انرژی برای خشک کردن دانه ذرت از رطوبت ۴۳ ٪ تا ۱۶/۲۸ ٪ بر مبنای وزن خشک. ۷۲

جدول (۴-۷) کاهش زمان و انرژی مصرفی در اثر بازگردش هوای خروجی در یک خشک کن بستر سیال نسبت به حالت بدون بازگردش هوای خروجی، جهت خشک کردن نمونه های ۹۳/۰۰ گرمی ذرت. ۷۴

فهرست تصاویر

عنوان **صفحه**

شکل (۱-۱) کاربرد نمودار رطوبت سنجی ۱۱

شکل (۳-۱) اندازه گیری ابعاد ذرت با استفاده از کولیس ۲۴

شکل (۳-۲) بستر خشک کن نصب شده در کف و وسط آون مایکروویو ۲۵

شکل (۳-۳) الف) سرعت سنج سیم داغ ب) دستگاه دما و رطوبت سنج نسبی دیجیتالی.. ۲۶

شکل (۳-۴) هود تعبیه شده در پشت مایکروویو بمنظور هدایت هوای گرم خروجی از خشک کن ۲۷

شکل (۳-۵) تصویر روبروی خشک کن بازگردشی بستر سیال _ مایکروویو ۲۸

شکل (۳-۶) نمای روبروی خشک کن بازگردشی بستر سیال _ مایکروویو ۲۸

شکل (۳-۷) تصویر پشت خشک کن بازگردشی بستر سیال _ مایکروویو ۲۹

شکل (۳-۸) نمای پشت خشک کن بازگردشی بستر سیال _ مایکروویو ۲۹

شکل (۳-۹) روش کالریمتریک جهت تخمین دانسیته توان مایکروویو ۳۰

شکل (۳-۱۰) ترازوی دیجیتالی GF–300 ..... ۳۲

شکل (۳-۱۱) مخلوط بیدررو دو جریان هوای مختلف ۴۲

شکل (۳-۱۲) رسم فرآیند مخلوط شدن دو هوا روی نمودار سایکرومتریک ۴۲

شکل (۳-۱۳) فلوچارت کد برنامه شبیه سازی تحت نرم افزار MATLAB ۴۷

شکل (۴-۱) مقایسه داده های تجربی و داده های پیش بینی شده نسبت رطوبتی (MR) به وسیله مدل Two Term مربوط خشک شدن لایه نازک ذرت در شرایط هوای گرم. ۵۴

شکل (۴-۲) مقایسه داده های تجربی و داده های پیش بینی شده نسبت رطوبتی (MR) به وسیله مدل Verma *et al* مربوط به خشک شدن لایه نازک ذرت در شرایط استفاده هوای گرم- مایکروویو. ۵۴

نمودار (۴-۳) تغییرات نسبت رطوبتی در طول زمان خشک شدن لایه نازک ذرت به روش هوای گرم مایکروویو با دمای هوای ۴۰ °C و سطوح مختلف دانسیته توان مایکروویو. (—) پیش بینی مدل ریاضی Verma *et al*، (♦) ۰/۸۹ W/g، (■) ۱/۶۰ W/g، (▲) ۳/۲۰ W/g، (●) ۴/۳۰ W/g و (×) ۵/۳۰ W/g. ۵۵

نمودار (۴-۴) تغییرات نسبت رطوبتی در طول زمان خشک شدن لایه نازک ذرت به روش هوای گرم مایکروویو با دانسیته توان مایکروویو ۳/۲۰ W/g و سطوح مختلف دمای هوای ورودی. (—) پیش بینی مدل ریاضی Verma *et al*، (Δ) ۳۰°C، (□) ۴۰°C، (○) ۵۰°C. ۵۶

شکل (۴-۵) تغییرات نسبت رطوبتی در طول زمان خشک شدن لایه نازک ذرت به روش هوای گرم بدون کاربرد مایکروویو در سطوح مختلف دمای هوای ورودی. (—) پیش بینی مدل ریاضی Two Term، (♦) ۳۰°C، (□) ۴۰°C، (○) ۵۰°C. ۵۷

نمودار (۴-۶) نمایش تغییرات رطوبت ذرت در خشک کن بستر سیال مایکروویو بدون بازگردش هوای خروجی با دانسیته توان مایکروویو ۴/۳ و سطوح مختلف دمای هوای ورودی۳۰ و ۵۰ °C. (—) پیش بینی مدل ریاضی (■)۳۰ °C و (▲)۵۰ °C. ۶۲

نمودار (۴-۷) نمایش تغییرات رطوبت ذرت در خشک کن بستر سیال مایکروویو بدون بازگردش هوای خروجی با دمای هوای ورودی ۵۰ °C و سطوح مختلف دانسیته توان مایکروویو. (—) پیش بینی مدل ریاضی ،(□) ۰/۸۹ W/g، (▲) ۱/۶۰ W/g، (○) ۳/۲۰ W/g، (♦) ۴/۳۰ W/g و (●) ۵/۳۰ W/g. ۶۳

نمودار (۴-۸) نمایش تغییرات دمای هوای خروجی برای شرایط خشک کردن بستر سیال مایکروویو بدون بازگردش هوای خروجی با دمای هوای ورودی ۵۰ °C و سطوح مختلف دانسیته توان مایکروویو. (—) پیش بینی مدل ریاضی ، (+) ۰/۸۹ W/g، (▲) ۱/۶۰ W/g، (○) ۳/۲۰ W/g و (♦) ۵/۳۰ W/g. ۶۴

نمودار (۴-۹) نمایش تغییرات دمای هوای خروجی برای شرایط خشک کردن بستر سیال مایکروویو بدون بازگردش هوای خروجی با سطوح مختلف دانسیته توان مایکروویو W/g ۵/۳۰ و سطوح مختلف دمای هوای ورودی. (—) پیش بینی مدل ریاضی ، (□)۳۰ °C ، (◊)۴۰ °C ، (○)۵۰ °C. ۶۴

نمودار(۴-۱۰) نمایش تغییرات رطوبت هوای خروجی برای شرایط خشک کردن با دانسیته توان مایکروویو W/g ۳/۲ و سطوح مختلف دمای هوای ورودی. (—) پیش بینی مدل ریاضی، (○)۳۰ °C، (Δ) ۴۰ °C، (□) ۵۰ °C. ۶۵

نمودار (۴-۱۱) نمایش تغییرات رطوبت ذرت در خشک کن بستر سیال مایکروویو با بازگردش هوای خروجی با دمای هوای ورودی ۳۰ °C و سطح دانسیته توان مایکروویو W/g۳/۲۰. (—) پیش بینی مدل ریاضی ،(□) ۱۰۰٪ بازگشت هوای گرم، (▲)۷۰٪ بازگشت هوای گرم ، (○) ۵۰٪ بازگشت هوای گرم، (♦) بدون بازگشت هوای گرم.....۶۶

نمودار (۴-۱۲) نمایش تغییرات رطوبت هوای خروجی برای شرایط خشک کردن با دانسیته توان مایکروویو W/g ۰/۸۹ و دمای هوای ورودی ۳۰ °C. (—) پیش بینی مدل ریاضی، (○)بدون بازگردش هوای خروجی، (◊)۵۰٪بازگردش هوای خروجی ، (Δ) ۷۰٪ بازگردش هوای خروجی، (□) ۱۰۰٪ بازگردش هوای خروجی. ۶۹

نمودار (۴-۱۳) نمایش تغییرات دمای هوای خروجی برای شرایط خشک کردن با دانسیته توان مایکروویو W/g ۴/۳ و دمای هوای ورودی ۳۰ °C. (—) پیش بینی مدل ریاضی، (○)بدون بازگردش هوای خروجی، (♦)۵۰٪بازگردش هوای خروجی ، (□) ۷۰٪ بازگردش هوای خروجی، (▲) ۱۰۰٪ بازگردش هوای خروجی. ۷۰

فهرست نشانه های اختصاری

c_a	ظرفیت گرمایی ویژه هوا، J/kg °C
c_p	ظرفیت گرمایی ویژه محصول، J/kg °C
c_w	ظرفیت گرمایی ویژه آب، J/kg °C
d_{eff}	قطر موثر دانه ذرت، m
E	میدان الکتریکی امواج مایکروویو، V/m
f	فرکانس امواج مایکروویو، Hz
g	شتاب گرانش، m/s^2
h	ارتفاع بستر، m
H	توان الکتریکی مصرفی کل دستگاه خشک کن بستر سیال مایکروویو، W
h_{fg}	گرمای نهان تبخیر آب، J/kg
h_1	آنتالپی هوای محیط، kJ/kg
h_2	آنتالپی هوای بازگشتی، kJ/kg
h_3	آنتالپی هوای مخلوط شده، kJ/kg
k_p	ضریب نفوذ حرارت در محصول، W/m.K
m	جرم، kg
m_{ev}	مقدار آب تبخیر شده در طی زمان خشک کردن محصول، kg
m_w	وزن اولیه آب درون دانه های بستر، N
$\dot{m}_{da1}$	دبی جرمی هوای خشک ورودی،kg/s
$\dot{m}_{da2}$	دبی جرمی هوای خشک بازگشتی، kg/s
$\dot{m}_{da3}$	دبی جرمی هوای خشک مخلوط شده، kg/s
M	رطوبت محصول بر مبنای وزن خشک ، kg/kg
M_e	رطوبت تعادلی محصول، kg/kg
M_0	رطوبت اولیه محصول، kg/kg
MR	نسبت رطوبت
p_0	میزان توان جذب شده مایکروویو توسط ماده غذایی. W
P	فشار، Pa

P_{mic}	نرخ تولید انرژی گرمایی در درون ماده غذایی بر واحد جرم آن، W/kg
P_{vs}	فشار بخار اشباع، kPa
P_0	دانسیته توان مایکروویو در سطح ماده غذایی، W/kg
Q_{mic}	نرخ تولید انرژی گرمایی در درون ماده غذایی بر واحد حجم آن، W/m^3
RH	رطوبت نسبی هوا
t	زمان، s
T	دما، °C
T_{abs}	دمای مطلق، K
T_{in}	دمای هوای ورودی به بستر، °C
T_{out}	دمای هوای خروجی از بستر، °C
T_1	دمای هوای محیط، °C
T_2	دمای هوای بازگشتی، °C
T_3	دمای هوای مخلوط شده، °C
v_a	سرعت هوا، m/s
v_{mf}	سرعت کمینه سیالیت بستر، m/s
V_w	حجم آب، m^3
W	رطوبت هوا بر مبنای وزن خشک، kg/kg
W_{in}	رطوبت هوای ورودی به بستر، kg/kg
W_{out}	رطوبت هوای خروجی از بستر، kg/kg
W_1	رطوبت هوای محیط، kg/kg
W_2	رطوبت هوای بازگشتی، kg/kg
W_3	رطوبت هوای مخلوط شده، kg/kg
حروف یونانی	
ϵ	تخلخل محصول در حالت بستر ثابت، m^3/m^3
ϵ_0	نفوذ پذیری الکتریکی امواج مایکروویو در خلا (= ۸/۸۵۴ × ۱۰$^{-۱۲}$ F/m)
ϵ''	فاکتور افت دی الکتریک
ϵ'	ثابت دی الکتریک
θ	دمای محصول، °C
λ_0	طول موج امواج مایکروویو،m
δ_p	عمق نفوذ امواج مایکروویو در درون ماده غذایی، m
ρ_a	دانسیته هوا، kg/m^3
ρ_p	دانسیته محصول، kg/m^3