بسم الله الرحمن الرحیم

دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده کشاورزی

مطالعه مقایسه‌ای خشک‌کردن گوجه‌فرنگی با روش‌های سنتی و خورشیدی با همرفت طبیعی

پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد

مهندسی علوم و صنایع غذایی

علی اکبری

اساتید راهنما

دکتر محمد شاهدی

دکتر ناصر همدمی

۱۳۸۵

دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده کشاورزی

پایان نامه کارشناسی ارشد رشته علوم و صنایع غذایی آقای علی اکبری

تحت عنوان

مطالعه مقایسه‌ای خشک‌کردن گوجه‌فرنگی با روش‌های سنتی و خورشیدی با همرفت طبیعی

در تاریخ ۱۳۸۶/۱/۲۰ توسط کمیته تخصصی زیر مورد بررسی و تصویب نهایی قرار گرفت.

۱- استاد راهنمای پایان نامه	دکتر محمد شاهدی
۲- استاد راهنمای پایان نامه	دکتر ناصر همدمی
۳- استاد مشاور پایان نامه	دکتر شهرام دخانی
۴- استاد مشاور پایان نامه	دکتر مرتضی صادقی
۵- استاد داور پایان نامه	دکتر مهدی کدیور
۶- استاد داور پایان نامه	دکتر امین ا... معصومی
سرپرست تحصیلات تکمیلی دانشکده	دکتر بهرام شریف‌نبی

تقدیر و تشکر

سپاس خداوندی را که به من موهبت شناختن و آموختن عطا کرد. اینک در پایان دوره ای دیگر از تحصیل، بر خود لازم می‌دانم از زحمات ارزنده پدر و مادر مهربان و همسر فداکارم که در طول دوران تحصیل یاورم بوده اند، قدردانی نمایم. از استاد گرامی جناب آقای دکتر شاهدی که نه تنها در این پایان‌نامه بلکه در طول مدت تحصیل و خدمت اینجانب در گروه صنایع غذایی همواره راهنما و یاور من بوده‌اند، صمیمانه سپاسگزارم. از استاد گرانقدر جناب آقای دکتر همدمی که همچون معلمی دلسوز گام به گام مرا در انجام تحقیق راهنمایی نمودند،کمال تشکر را دارم. از جناب آقایان دکتر دخانی و دکتر صادقی که مشاوره این پایان نامه را بر عهده داشتند تشکر می کنم. از اساتید داور جناب آقایان دکتر کدیور و دکتر معصومی که با دقت فراوان پایان نامه را مورد بررسی قرار دادند، قدردانی می‌نمایم.

از مساعدت جناب آقای مهندس سکوت مدیر عامل محترم شرکت سولار پلار و همکاران محترم ایشان بخاطر ساخت دستگاه خشک کن خورشیدی، بسیار سپاسگزارم.

از همکاران محترم جناب آقایان مهندس خشوعی، مهندس اخوان و خانم مهندس طلایی بخاطر همکاری در طول تحقیق قدر دانی می‌نمایم. از کمک‌های آقای مولایی و آقای رحمتی تشکر می کنم.

علی اکبری

فروردین ۱۳۸۶

کلیه حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات،

ابتکارات و نوآوریهای ناشی از تحقیق موضوع این

پایان نامه (رساله) متعلق به دانشگاه صنعتی اصفهان

و شرکت سولار پلار است.

تقدیم به

پدر و مادر مهربان

و همسر فداکارم

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فهرست مطالب..... ۸
فهرست شکل ها و نمودارها..... ۱۱
فهرست جداول..... ۱۳
چکیده..... ۱۵
فصل اول: مقدمه و بررسی منابع
۱-۱- خشک کردن موادغذائی..... ۱۶
۱-۱-۱- مقدمه..... ۱۶
۱-۱-۲- مکانیسم خشک کردن..... ۱۷
۱-۱-۳- خشک کردن محصولات کشاورزی با استفاده از نور خورشید..... ۱۸
- طبقه بندی خشک کن های خورشیدی..... ۱۹
- قسمتهای مختلف خشک کن خورشیدی..... ۲۱
۱-۲- تغییرات کیفی مواد غذائی در فرایند خشک کردن..... ۲۴
۱-۲-۱ چروکیدگی..... ۲۴
۱-۲-۲ جذب مجدد آب..... ۲۴
۱-۲-۳ رنگ..... ۲۷
۱-۳- مدل سازی فرآیند خشک کردن..... ۲۹
۱-۳-۱- مدلهای پدیده شناختی یا مکانیسمی..... ۳۰
- روش‌های حل معادلات انتشار..... ۳۱
الف- روش های تجزیه ای..... ۳۱
ب- روش های حل عددی..... ۳۱
- تعیین ضریب انتشار..... ۳۳
الف- روش های مبتنی بر تعیین نفوذ پذیری..... ۳۳
ب- روش های مبتنی بر منحنی غلظت- فاصله..... ۳۳
ج- روش های مبتنی برمنحنی های همدمای جذب و دفع و داده های خشک کردن..... ۳۳
۱-۳-۲- مدلهای توصیفی یا تجربی..... ۳۷
۱-۴- خشک‌کردن گوجه فرنگی..... ۴۲
۱-۵- اهداف..... ۴۵

عنوان **صفحه**

فصل دوم: مواد و روش ها

۲-۱- مواد و دستگاه‌ها ۴۶
۲-۱-۱- تهیه و نگهداری ماده اولیه ۴۶
۲-۱-۲- مواد شیمیایی ۴۶
۲-۱-۳- دستگاها ۴۶
- ساخت دستگاه خشک‌کن خورشیدی ۴۷
۲-۲- اندازه‌گیری درصد ترکیبات و آماده سازی نمونه ها ۴۸
۲-۲-۱- آزمایشات تجزیه تقریبی نمونه های گوجه‌فرنگی ۴۸
۲-۲-۲- آماده‌سازی نمونه ها ۴۸
۲-۲-۳- تیمارکردن نمونه ها ۴۸
۲-۳- روش‌های خشک‌کردن نمونه ها ۵۰
۲-۳-۱- خشک‌کردن در آون آزمایشگاهی ۵۰
۲-۳-۲- خشک‌کردن در دستگاه خشک‌کن خورشیدی ۵۰
۲-۳-۳- خشک‌کردن در معرض نور مستقیم خورشید (روش سنتی) ۵۱
۲-۴- آزمایشات طی و بعد از خشک‌کردن ۵۱
۲-۴-۱- اندازه‌گیری کاهش رطوبت طی زمان خشک کردن ۵۱
۲-۴-۲- اندازه‌گیری ظرفیت جذب مجدد آب محصول طی زمان خشک کردن ۵۲
۲-۴-۳- اندازه‌گیری چروکیدگی محصول طی زمان خشک کردن ۵۳
۲-۴-۴- اندازه‌گیری شاخص‌های رنگ محصول نهایی ۵۳
۲-۵- طرح آماری مورد استفاده و روش آنالیز نتایج ۵۳
۲-۶- برآورد ضرایب ثابت در مدل‌های تجربی و انتخاب مدل مناسب برای توصیف سینتیک خشک‌کردن ۵۳
۲-۷- تعیین ضریب انتقال جرم ۵۴
۲-۸- توسعه مدل ریاضی ۵۶

فصل سوم: نتایج و بحث

۳-۱- ترکیبات نمونه گوجه‌فرنگی ۶۰
۳-۲- منحنی‌های خشک‌کردن ۶۱
۳-۲-۱- منحنی‌های خشک‌کردن در آون آزمایشگاهی ۶۱
۳-۲-۲- منحنی های خشک کردن در خشک کن خورشیدی و در خشک کردن سنتی (در معرض نور مستقیم خورشید) ۶۲
۳-۲-۳- منحنی های خشک کردن ورقه های گوجه‌فرنگی تیمار شده ۶۴
۳-۳- بررسی چروکیدگی ورقه های گوجه‌فرنگی طی زمان خشک کردن ۶۶

عنوان **صفحه**

۳-۳-۱- چروکیدگی ورقه های گوجه‌فرنگی در آون ۶۶
۳-۳-۲- چروکیدگی ورقه های گوجه‌فرنگی در خشک کن خورشیدی و در خشک کردن سنتی ۶۷
۳-۳-۳- چروکیدگی ورقه های گوجه‌فرنگی تیمار شده ۶۸
۳-۴- بررسی ظرفیت جذب مجدد آب ورقه های گوجه‌فرنگی طی زمان خشک کردن ۷۰
۳-۴-۱- جذب مجدد آب ورقه های گوجه‌فرنگی ۷۰
۳-۴-۲- جذب مجدد آب ورقه های گوجه‌فرنگی تیمار شده ۷۲
۳-۵- بررسی رنگ ورقه های گوجه‌فرنگی خشک شده ۷۳
۳-۵-۱- رنگ ورقه های گوجه‌فرنگی خشک شده در آون ۷۳
۳-۵-۲- رنگ ورقه های گوجه‌فرنگی خشک شده در خشک کن خورشیدی و در خشک کردن سنتی ۷۵
۳-۵-۳- رنگ ورقه های گوجه‌فرنگی خشک شده تیمارشده ۷۶
۳-۶- ضریب انتشار موثر رطوبت ۷۷
۳-۶-۱- تعیین ضریب انتشار موثر رطوبت ۷۷
۳-۶-۲- تعیین ضریب انتشار موثر رطوبت در ورقه های گوجه‌فرنگی تیمار شده ۸۰
۳-۷- برآورد ضرایب ثابت در مدلهای تجربی و انتخاب مدل مناسب برای توصیف سینتیک خشک کردن ۸۲
۳-۷-۱- خشک‌کردن در آون ۸۲
- بررسی تغییرات ضرایب ثابت مدل تجربی منتخب (مدل وانگ) به عنوان تابعی از دمای هوا ۸۳
- ارزیابی مدل تجربی منتخب (مدل وانگ) در دماهای مختلف ۸۴
۳-۷-۲- خشک‌کردن در خشک کن خورشیدی و در روش سنتی ۸۵
- ارزیابی مدل تجربی منتخب (مدل پیج) در زمان های مختلف ۸۷
۳-۸- استفاده از مدل عددی ایجاد شده برای توصیف سینتیک خشک کردن در خشک کن خورشیدی ۸۹
- ارزیابی مدل عددی ایجاد شده (در زمان های مختلف) ۸۹

فصل چهارم: نتیجه گیری و پیشنهادها

۴-۱- نتیجه گیری ۹۲
۴-۲- پیشنهادها ۹۴
پیوست ها ۹۶
منابع ۱۰۴

فهرست شکل‌ها و نمودارها

عنوان **صفحه**

شکل ۲-۱- طرحواره خشک‌کن خورشیدی ساخته شده..... ۴۹
شکل ۳-۱- نمودار سینتیک افت رطوبت در دماهای مختلف خشک کردن (نسبت رطوبت تابعی از زمان) ۶۱
شکل ۳-۲- نمودار شدت افت رطوبت در دماهای مختلف خشک کردن (تابعی از زمان و رطوبت)..... ۶۲
شکل ۳-۳- سینتیک افت رطوبت در دو ضخامت و دو روش خشک کردن خورشیدی(نسبت رطوبت تابعی از زمان) .. ۶۲
شکل ۳-۴- شدت افت رطوبت و تغییرات دمای هوا در دو روش خشک کردن خورشیدی (در زمان ۸۵/۵/۱۹)..... ۶۳
شکل ۳-۵- شدت افت رطوبت و تغییرات دمای هوا در دو روش خشک کردن خورشیدی (در زمان ۸۵/۵/۲۱)..... ۶۳
شکل ۳-۶- نمودار سینتیک افت رطوبت، طی خشک کردن ورقه های گوجه فرنگی تیمارشده با کلرورکلسیم ۶۵
شکل ۳-۷- شدت افت رطوبت طی خشک‌کردن ورقه های گوجه فرنگی تیمارشده باکلرورکلسیم (تابعی از زمان) ۶۵
شکل ۳-۸- نمودار تغییرات درصد چروکیدگی محصول در دماهای مختلف خشک کردن(تابعی از زمان)..... ۶۶
شکل ۳-۱۰- تغییرات درصد چروکیدگی ورقه های گوجه فرنگی تیمار شده با کلرورکلسیم (تابعی از رطوبت)..... ۶۹
شکل ۳-۱۱- نمودار تغییرات ظرفیت جذب آب محصول بعنوان تابعی از رطوبت (در دماهای مختلف هوا)..... ۷۰
شکل ۳-۱۲- نمودارتغییرات ظرفیت حفظ ماده خشک محصول بعنوان تابعی از رطوبت (دماهای مختلف هوا) ۷۱
شکل ۳-۱۳- تغییرات قابلیت جذب مجدد آب طی خشک کردن بعنوان تابعی از رطوبت (در دماهای مختلف هوا)..... ۷۱
شکل ۳-۱۴- شاخص های رنگ گوجه فرنگی خشک شده در دماهای مختلف هوای خشک کن ۷۴
شکل ۳-۱۵- مقایسه شاخص های رنگ گوجه فرنگی خشک شده در روش های مختلف خشک کردن خورشیدی..... ۷۵
شکل۳-۱۶- نمودارمقایسه شاخص‌های رنگ محصول خشک شده تیمارشده باکلرورکلسیم(دمای هوای ۷۰درجه سانتیگراد) ۷۷
شکل ۳-۱۷- ضرایب انتشار موثر رطوبت در ورقه های گوجه فرنگی به عنوان تابعی از دمای هوای خشک کردن ۷۷
شکل ۳- ۱۸- نمودار توصیف تغییرات ضریب انتشار موثر رطوبت بعنوان تابعی از دمای هوا بوسیله رابطه آرنیوس..... ۷۹
شکل ۳-۱۹- نمودار بررسی تطابق ضرایب نفوذ آزمایشگاهی و پیش‌بینی شده بوسیله رابطه آرنیوس ۷۹
شکل۳-۲۰- ضریب همبستگی بین ضرایب انتشار رطوبت آزمایشگاهی و پیشبینی شده بوسیله رابطه آرنیوس..... ۸۰
شکل ۳-۲۱- مقایسه ضرایب انتشار موثر رطوبت طی خشک کردن گوجه فرنگی تیمارشده در محلول کلرورکلسیم..... ۸۱
شکل ۳-۲۲- توصیف تغییرات ضریب ثابت a (درمدل وانگ) بعنوان تابعی از دما بوسیله رابطه آرنیوس ۸۴
شکل ۳-۲۳- توصیف تغییرات ضریب ثابت b (درمدل وانگ) بعنوان تابعی از دما بوسیله رابطه آرنیوس ۸۴
شکل۳-۲۴-مقایسه مقادیر نسبت رطوبت تجربی و پیش‌بینی شده بوسیله مدل وانگ (دمای حدواسط: ۵۵درجه سانتی گراد)..... ۸۵
شکل۳-۲۵- مقایسه مقادیر نسبت رطوبت تجربی و پیش‌بینی شده بوسیله مدل پیج (دستگاه خشک‌کن خورشیدی، ضخامت ۱ سانتی‌متر، ۱۳۸۵/۶/۲)..... ۸۸

عنوان **صفحه**

شکل۳-۲۶- مقایسه مقادیر نسبت رطوبت تجربی و پیش‌بینی شده بوسیله مدل پیج (خشک‌کردن خورشیدی سنتی، ضخامت ۱ سانتی‌متر، ۱۳۸۵/۶/۲).....۸۸
شکل ۳-۲۷- مقایسه مقادیر افت وزن تجربی و پیش‌بینی شده بوسیله مدل عددی (ضخامت ۱ سانتی‌متر، ۱۳۸۵/۶/۲۱)... ۹۰

فهرست جداول

عنوان **صفحه**

جدول ۱-۱- مدل های تجربی مورد استفاده در خشک کردن لایه نازک مواد غذائی ۴۰
جدول ۳-۱- درصد ترکیبات نمونه گوجه فرنگی ۶۰
جدول ۳-۲-نتایج تجزیه واریانس اثر دمای هوا بر چروکیدگی ورقه های گوجه فرنگی (بعد از حذف اثر رطوبت)..... ۶۷
جدول ۳-۳- تجزیه واریانس اثر ضخامت ورقه ها و روش خشک کردن بر چروکیدگی (بعد از حذف اثر رطوبت)..... ۶۸
جدول۳-۴- نتایج تجزیه واریانس اثر تیمار کلرورکلسیم روی چروکیدگی (بعد از حذف عامل رطوبت)..... ۶۹
جدول ۳-۵- نتیجه تجزیه واریانس اثر تیمارهای مختلف کلرورکلسیم بر WAC، DHC و RA ورقه های گوجه فرنگی ۷۲
جدول ۳-۶مقایسه میانگین شاخص‌های جذب مجدد آب در تیمارهای کلرورکلسیم(آزمون دانکن درسطح احتمال ۱درصد)۵۹
جدول ۳-۷- نتایج تجزیه واریانس اثر دمای هوای آون روی شاخص های رنگ ورقه های گوجه فرنگی خشک شده... ۷۴
جدول ۳- ۸- مقایسه میانگین شاخص‌های رنگ ورقه های گوجه فرنگی خشک شده در دماهای مختلف هوا ۷۴
جدول ۳-۹- تجزیه واریانس اثر روش خشک کردن روی شاخص‌های رنگ ورقه‌های گوجه‌فرنگی خشک شده ۷۶
جدول ۳-۱۰- مقایسه میانگین شاخص‌های رنگ ورقه‌های گوجه‌فرنگی خشک شده در دو روش خشک کردن..... ۷۶
جدول ۳-۱۱- نتایج تجزیه واریانس اثر دمای هوا بر ضرایب انتشار موثر رطوبت..... ۷۸
جدول ۳-۱۲-مقایسه میانگین‌های ضرایب انتشار رطوبت در دماهای مختلف هوا(آزمون دانکن درسطح احتمال ۱درصد)..... ۷۸
جدول ۳-۱۳- نتایج تجزیه واریانس اثر تیمارهای مختلف کلرورکلسیم روی مقادیر ضریب انتشار موثر رطوبت ۸۱
جدول ۳-۱۴- مقادیر ضریب همبستگی، کای اسکور و ریشه میانگین مربعات خطا بین داده های تجربی و نتایج پیش‌بینی شده توسط هر مدل (دمای هوای خشک کردن: ۵۰ درجه سانتی گراد)..... ۸۲
جدول ۳- ۱۵- مقادیر ضریب همبستگی، کای اسکور و ریشه میانگین مربعات خطا بین داده های تجربی و نتایج پیش‌بینی شده توسط هر مدل (دمای هوای خشک کردن: ۶۰ درجه سانتی گراد)..... ۸۳
جدول ۳-۱۶- مقادیر ضریب همبستگی، کای اسکور و ریشه میانگین مربعات خطا بین داده های تجربی و نتایج پیش‌بینی شده توسط هر مدل (دمای هوای خشک کردن: ۷۰ درجه سانتی گراد)..... ۸۳
جدول ۳-۱۷- مقادیر ضریب همبستگی، کای اسکور و ریشه میانگین مربعات خطا بین داده های تجربی و نتایج پیش‌بینی شده توسط هر مدل (دمای هوای خشک کردن: ۸۰ درجه سانتی گراد)..... ۸۳
جدول ۳-۱۸- مقادیر ضریب همبستگی، کای اسکور و ریشه میانگین مربعات خطا بین داده های تجربی و نتایج پیش‌بینی شده توسط هر مدل (دستگاه خشک‌کن خورشیدی، ضخامت ۱ سانتی‌متر، ۱۳۸۵/۵/۱۹)..... ۸۶
جدول ۳-۱۹- مقادیر ضریب همبستگی، کای اسکور و ریشه میانگین مربعات خطا بین داده های تجربی و نتایج پیش‌بینی شده توسط هر مدل(دستگاه خشک‌کن خورشیدی، ضخامت ۱/۵ سانتی‌متر، ۱۳۸۵/۵/۲۲)..... ۸۶

فهرست پیوست‌ها

عنوان **صفحه**

جدول ۳-۲۰- مقادیر ضریب همبستگی، کای اسکور و ریشه میانگین مربعات خطا بین داده های تجربی و نتایج پیش‌بینی شده توسط هر مدل (دستگاه خشک‌کن خورشیدی، ضخامت ۱/۵ سانتی‌متر، ۱۳۸۵/۵/۲۵).....۸۶
جدول ۳-۲۱- مقادیر ضریب همبستگی، کای اسکور و ریشه میانگین مربعات خطا بین داده های تجربی و نتایج پیش‌بینی شده توسط هر مدل (خشک‌کردن خورشیدی سنتی، ضخامت ۱ سانتی‌متر، ۱۳۸۵/۵/۱۹).....۸۷
جدول ۳-۲۲- مقادیر ضریب همبستگی، کای اسکور و ریشه میانگین مربعات خطا بین داده های تجربی و نتایج پیش‌بینی شده توسط هر مدل (خشک‌کردن خورشیدی سنتی، ضخامت ۱/۵ سانتی‌متر، ۱۳۸۵/۵/۲۲).....۸۷
جدول ۳-۲۳- مقادیر ضریب همبستگی، کای اسکور و ریشه میانگین مربعات خطا بین داده های تجربی و نتایج پیش‌بینی شده توسط هر مدل (خشک‌کردن خورشیدی سنتی، ضخامت ۱/۵ سانتی‌متر، ۱۳۸۵/۵/۲۵).....۸۷

چکیده

از بین روشهای مختلف خشک کردن، خشک کردن خورشیدی دارای مزایای متعددی می‌باشد و استفاده از یک دستگاه خشک‌کن خورشیدی در جهت تولید محصولی با کمیت و کیفیت بالا بسیار مطلوب است. کیفیت محصول خشک شده بوسیله معیارهایی مانند چروکیدگی، قابلیت جذب مجدد آب و رنگ محصول ارزیابی می‌گردد. امروزه از مدل سازی ریاضی به عنوان ابزاری برای شبیه سازی پدیده‌های انتقال(جرم و حرارت) طی فرایند خشک کردن و پیش‌بینی رفتار محصول خشک استفاده می‌شود. در این تحقیق، با ساخت یک دستگاه خشک‌کن خورشیدی، ورقه‌های گوجه‌فرنگی در آن خشک شده و با ورقه‌های گوجه‌فرنگی خشک شده با روش سنتی مقایسه گردید. همچنین در یک آون آزمایشگاهی (در دماهای ۵۰، ۶۰، ۷۰ و ۸۰ درجه سانتی‌گراد) نیز، ورقه‌های گوجه‌فرنگی خشک شد و مشخص گردید که سرعت افت رطوبت در آنها در دماهای بالاتر بیشتر است. همچنین در منحنی‌های سرعت افت رطوبت محصول نسبت به زمان، یک مرحله سرعت ثابت و یک مرحله سرعت نزولی مشاهده‌گردید. با خشک‌کردن ورقه‌های گوجه‌فرنگی در دستگاه خشک‌کن خورشیدی ساخته شده و با روش خشک‌کردن سنتی آفتابی نیز نتیجه‌گیری شد که سرعت خشک‌شدن در خشک‌کن خورشیدی بیشتر از روش سنتی است. بررسی تغییرات درصد چروکیدگی ورقه‌های گوجه‌فرنگی، طی خشک شدن در دماهای مختلف هوا نیز نشان داد که اثر دمای هوای خشک‌کن بر چروکیدگی محصول معنی‌دار نیست. همچنین مشخص‌شد که قابلیت جذب مجدد آب محصول نیز مستقل از دمای هوای خشک‌کن است. محصول خشک شده در دمای پایین هوا(۵۰ درجه سانتی‌گراد)، دارای رنگ قرمزتر و روشنتری نسبت به دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد بود. با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی، مقدار ضریب انتشار موثر رطوبت درونی ورقه‌های گوجه‌فرنگی برای دماهای مختلف در محدوده $۷/۷۴\times۱۰^{-۱۱}$ تا $۲/۰۵\times۱۰^{-۱۰}$ مترمربع بر ثانیه برآورد شد. تنایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر دمای هوا بر ضرایب انتشار موثر رطوبت در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار است. تغییرات ضریب انتشار رطوبت به عنوان تابعی از دمای هوای خشک‌کردن با رابطه آرنیوس توصیف‌گردید و مقدار انرژی اکتیواسیون محاسبه‌شد. همچنین در این تحقیق با بررسی ۱۳ مدل تجربی مختلف و با محاسبه ضرایب همبستگی، ریشه میانگین مربعات خطا و کای اسکور بین داده‌های تجربی و نتایج پیش‌بینی شده توسط هر مدل، مناسبترین مدل توصیف‌کننده سینتیک خشک‌کردن ورقه‌های گوجه‌فرنگی مشخص شد. مدل تجربی وانگ برای خشک‌کردن ورقه‌های گوجه‌فرنگی در دماهای مختلف هوا در آون و مدل پیج برای خشک‌کردن ورقه‌های گوجه‌فرنگی درروش خشک‌کردن خورشیدی مناسب بودند. در ادامه تحقیق برای توصیف انتقال یک بعدی رطوبت طی خشک‌کردن ورقه‌های گوجه‌فرنگی در خشک‌کن خورشیدی، از یک مدل مکانیسمی ایجاد شده با روش حل عددی قانون دوم فیک استفاده‌گردید. مقایسه داده‌های تجربی سینتیک خشک‌کردن ورقه‌های گوجه‌فرنگی در خشک‌کن خورشیدی، با نتایج تئوریک پیش‌بینی‌شده توسط مدل ایجاد شده نشان‌داد که همبستگی خوبی(بیش از ۹۸ درصد) بین آنها وجود دارد و مدل مکانیسمی مذکور قادر است بخوبی افت رطوبت محصول را طی خشک‌کردن پیش‌بینی نماید.

فصل اول

مقدمه و بررسی منابع

۱-۱- خشک کردن مواد غذایی

۱-۱-۱- مقدمه

در صنعت مواد غذایی تمایل فزاینده‌ای برای توسعه روش‌های اقتصادی بمنظور تهیه محصولات غذایی با ارزش تغذیه ای و حسی بالا وجود دارد. خشک‌کردن یکی از گسترده‌ترین روش‌های مورد استفاده برای نگهداری میوه‌ها و سبزی‌ها است. طی خشک کردن، برای رسیدن به یک فعالیت آبی نهایی که پایداری میکروبی محصول را بیمه و تغییرات فیزیکی و شیمیایی را به حداقل می رساند، درصد آب ماده غذایی کاهش می یابد [۵]. با افزایش روز افزون مقاومت مصرف کنندگان در برابر کاربرد مواد شیمیایی درنگهداری مواد غذایی و افزایش محبوبیت مواد غذایی خشک شده با کیفیت بالا و جذب دوباره آب مناسب، جذابیت بیشتری درزمینه مطالعه فرایند خشک‌کردن بوجود آمده است. کیفیت محصول غذایی به میزان تغییرات فیزیکی و بیوشیمیایی که در طول فرآیند خشک شدن در آن رخ می دهد بستگی دارد. کاهش وزن و حجم محصول تولید شده، هزینه حمل و نقل و انبارداری را کاهش داده و تنوع به محصول می دهد. با پیشرفت علم، روش‌های گوناگون و دستگاه‌های متنوعی برای انجام عملیات خشک کردن ابداع شده است [۱۴]. در عملیات خشک کردن، با تبخیر آب که حرارت مورد نیاز آن با استفاده از هوای گرم تامین می‌شود، درصد رطوبت محصول کاهش می یابد و سینتیک خشک کردن تحت تاثیر دمای هوا و خواص ماده است. افزایش سرعت خشک کردن یکی از اهداف مهم در مهندسی مواد غذایی است که این کار مستلزم مشخص

کردن عوامل محدودکننده سرعت می باشد و مربوط به انتقال جرم و حرارت در قسمت داخلی محصول می گردد. عواملی که بر سرعت خشک کردن تاثیر می گذارند عبارتند از:

الف) ترکیبات ماده غذایی، به طور مثال وجود چربی و یا وجود حالت امولسیون خشک شدن را کند می کند. همچنین هرچه غلظت مواد محلول بیشتر باشد، ماده غذایی دیرتر خشک می شود. از طرف دیگر حالت‌های مختلف آب موجود در ماده غذایی شامل آب آزاد، آب جذب سطحی، آب موجود در ژل‌ها و کلوئیدها و آب هیدراته در ساختمان سلولی بر سرعت خشک کردن تاثیر می گذارند. ب) نوع تجهیزات و روش خشک کردن ج) شرایط خشک کردن نظیر میزان رطوبت هوا و ماده غذایی، دما و سرعت هوا د) سطح ماده غذایی ه) ضخامت ماده غذایی [۵].

۱-۱- ۲- مکانیسم خشک کردن

خشک کردن، فرآیند کاهش رطوبت از طریق انتقال هم زمان حرارت و جرم است. انتقال حرارت از هوای اطراف به ماده غذایی موجب تبخیر رطوبت سطحی و کاهش فشار بخار آب در سطح می گردد. در اثر این حالت، گرادیان فشار بخار آب در ماده غذایی بوجود می آید که نیروی رانشی لازم برای خارج کردن آب از ماده غذایی را تامین می کند. حرکت آب از مرکز ماده غذایی به سطح به وسیله مکانیسم های ذیل انجام می گیرد:

-انتقال آب به وسیله نیروی موئینه

- جابجایی آب به دلیل وجود اختلاف در غلظت مواد محلول در قسمت‌های مختلف ماده غذایی

- جابجایی بخار آب در هوای درون فضاهای ماده غذایی (ناشی از وجود گرادیان فشار بخار آب)[۲۶].

رطوبت ماده غذایی در طی خشک کردن با سرعت ثابتی کاهش نمی یابد. منحنی سرعت خشک کردن مواد غذایی معمولا دارای دو دوره زمانی مجزا می‌باشد: الف) مرحله سرعت ثابت خشک کردن[۱] ب) مرحله سرعت نزولی خشک کردن[۲]

دوره سرعت ثابت خشک کردن همیشه ظاهر نمی شود و این مشکلاتی را در توصیف نقطه شروع

۱- Constant rate period of drying
۲- Falling rate period of drying

برای دوره دوم ایجاد می کند [۲۶].

در مرحله سرعت ثابت، انتقال رطوبت از مرکز به سطح ماده غذایی و تبخیر آن از سطح، با یک سرعت انجام می شود و سطح ماده غذایی مرطوب است. از عوامل موثر بر سرعت خشک کردن در این مرحله می توان به خصوصیات ماده غذایی، دما، رطوبت نسبی و جریان هوا اشاره نمود [۲۶].

با پیشرفت فرآیند خشک کردن، منحنی به نقطه ای بنام نقطه بحرانی می رسد که پس از آن مرحله سرعت نزولی شروع می شود. در این مرحله سرعت حرکت آب از مرکز به سطح ماده غذایی کمتر از سرعت تبخیر سطحی رطوبت است. بنابراین سطح ماده غذایی خشک می شود. این مرحله طولانی ترین مرحله، طی فرآیند خشک کردن است. در دوره سرعت نزولی عواملی که میزان خشک کردن را کنترل می کنند، تغییر کرده و به تدریج سرعت انتقال جرم درون ماده غذایی، عامل کنترل کننده می شود که به همراه عواملی مانند دمای هوا و ضخامت ماده غذایی تأثیرگذار خواهند بود و رطوبت نسبی هوا و سرعت هوا تأثیری ندارد [۲۶].

با توجه به تنوع منابع انرژی مورد استفاده، سیال منتقل کننده گرما و دستگاه‌های خشک‌کن، روش‌های گوناگون خشک‌کردن وجود دارد که یکی از آنها استفاده از انرژی خورشیدی است.

۱-۱-۳- خشک کردن محصولات کشاورزی با استفاده از نور خورشید

از میان انواع مختلف منابع انرژی های تجدیدپذیر، انرژی خورشیدی از مهمترین آنها می باشد. استفاده از این نوع انرژی زمانی بیشتر اهمیت پیدا می‌کند که توجه بیشتری به بحران پایان یافتن منابع انرژی های تجدیدناپذیر و مسأله آلودگی محیط زیست داشته باشیم.

با توجه به اهمیت صنعت غذا در تأمین غذای سالم، متنوع و ارزان برای جامعه، لزوم استفاده از انرژی خورشیدی در این صنعت نیز بیشتر آشکار می گردد و در میان فرآیندهای غذایی مختلف، خشک کردن یکی از پرمصرف ترین فرآیندها در مصرف انرژی است.

در کشورما بیشتر از روش‌های خشک‌کردن خورشیدی(آفتابی) سنتی استفاده می شود ولی مشکلات روش خشک کردن سنتی شامل افت کمی، رشد میکروارگانیسم ها وایجاد فساد، حمله حشرات، پرندگان و جوندگان، بارش ناگهانی باران وسایر شرایط جوی و...، موجب افت کمی وکیفی در محصول می شود. در بسیاری از مناطق روستایی کشورهای در حال توسعه، خرید

خشک‌کن‌های صنعتی برای کشاورزان از لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه نیست و کشاورزان خرده پا به ندرت از این تجهیزات استفاده می کنند [۴]. لذا استفاده از انرژی خورشید بصورت کنترل شده بسیار جذاب خواهد بود. بعلت در دسترس بودن انرژی لایزال خورشید در کشورما که در فصل برداشت اغلب محصولات کشاورزی با شدت مناسبی وجود دارد و بعلت ساختار کشاورزی و متمرکز نبودن آن در بیشتر مناطق کشاورزی و روستایی و اقتصادی نبودن استقرار صنایع در این گونه مناطق، استفاده از خشک‌کن‌های خورشیدی که از لحاظ قیمت، کاربرد ساده وانعطاف آن برای محصولات مختلف مناسب باشند، باعث افزایش کمی و کیفی محصولات خشک می شود [۴].

- طبقه‌بندی خشک‌کن‌های خورشیدی

بطور عمومی خشک‌کن‌های خورشیدی را بر اساس نحوه جریان هوا به دو دسته فعال[۱] با همرفت اجباری و دیگری غیر فعال با همرفت طبیعی تقسیم می شوند. در خشک‌کن‌های فعال جریان هوا با استفاده از مکنده یا دمنده برقرار می شود و اغلب این خشک‌کن ها علاوه بر انرژی خورشیدی از انرژی کمکی دیگری مانند سوخت‌های فسیلی یا انرژی الکتریکی بهره می‌گیرند ولی در خشک‌کن‌های غیرفعال، جریان هوا در اثر اختلاف چگالی هوای سرد و گرم در داخل خشک‌کن ایجاد می شود [۲۳].

سیستم‌های خشک‌کردن خورشیدی غیرفعال عبارتند از:

الف- خشک‌کردن در معرض تابش مستقیم نور خورشید[۲]: این نوع خشک‌کردن همان روش سنتی است که سالهای متمادی در مناطق گرمسیری استفاده شده است. در این نوع خشک‌کردن، محصول در معرض تابش مستقیم خورشید خشک می شود. با وجود سنتی بودن، این روش بعلت مزایای زیر همچنان بطور گسترده در کشورهای در حال توسعه مورد استفاده قرار می گیرد :

۱- سرمایه‌گذاری پایین یا بدون سرمایه اولیه ۲- هزینه عملیاتی اندک ۳- عدم نیاز به سوخت ۴ - نیروی انسانی ساده ۵- عدم وجود مشکلات زیست محیطی

۱- Active
۲- Open-to-sun drying

اما معایب آن عبارتند از:

۱- حمله حشرات، جوندگان وپرندگان ۲- رشد میکروارگانیسم ها در شرایط رطوبت ودمای بالا ۳- عدم کنترل عوامل موثر بر خشک‌کردن وعدم یکنواختی در خشک‌شدن ۴- تغییرات نامطلوب در رنگ وطعم ۵- تاثیر شرایط جوی مانند بارش باران و... ۶- قرارگرفتن در معرض گرد وخاک ۷- ایجاد لکه در محصول در اثر تابش مستقیم نور خورشید. بنابراین محصول دارای کیفیت بسیار پایینی بوده وحتی گاهی غیر قابل مصرف می باشد [۲۳].

ب- خشک‌کن خورشیدی با جریان طبیعی هوا[۱]: این نوع خشک کن ها نیز کاملاً به انرژی خورشیدی وابسته اند و از حرکت روبه بالای هوای گرم سود می برند.

مزایای این روش نسبت به روش سنتی عبارتند از:۱- سطح کمتر مورد نیاز برای همان میزان محصول در مقایسه با روش سنتی ۲- محصول از لحاظ کمی و کیفی در سطح بالاتری است چون مورد تهاجم حشرات ، پرندگان، جوندگان و میکروارگانیسم ها نیست و در معرض گرد وخاک قرار نمی گیرد. ۳- زمان خشک‌شدن کوتاه است و بنابراین میزان بیشتری از محصول را می‌توان تولید نمود. ۴- محافظت در برابر بارش باران ۵- اقتصادی‌بودن ازنظر سرمایه‌گذاری اولیه، هزینه‌های تعمیر و نگهداری و هزینه تولید (استفاده از کارگران غیر ماهر و بومی).

این دو نوع خشک‌کن خورشیدی فعال و غیر فعال نیز هر کدام به سه دسته مستقیم[۲] ، غیر مستقیم[۳] و تلفیقی[۴] تقسیم می شوند (پیوست شماره ۱). در انواع مستقیم، محصول در محفظه خشک‌کن در معرض مستقیم نور خورشید قرار می گیرد که در برخی از محصولات نور مستقیم خورشید نوعی رنگ رسیدگی مطلوب ایجاد می کند. در انواع غیر مستقیم، دیوارهای محفظه خشک‌کن مات بوده و از کلکتور[۵] (جمع کننده) مجزا استفاده می شود. در این نوع خشک‌کن ها، عمل جذب انرژی خورشید توسط کلکتور انجام گرفته و هوای گرم شده در کلکتور به سمت محفظه خشک‌کن حرکت کرده و محصول در محفظه خشک می شود. نوع تلفیقی خشک‌کن‌ها ترکیبی از دو نوع

۱- Natural-circulation solar-energy crop dryers
۲- Direct
۳- Indirect
۴- Mixed mode
۵-Collector

مستقیم و غیر مستقیم است یعنی هم هوای گرم شده در کلکتور از سرتاسر بستر محصول در محفظه عبور می کند و هم خود بستر در معرض تابش مستقیم نور خورشید قرار دارد [۲۳].

– قسمت‌های مختلف خشک‌کن خورشیدی

در خشک‌کن‌های خورشیدی با توجه به انواع مختلف آن، قسمت‌های متنوعی ممکن است وجود داشته باشد ولی کلکتور و محفظه خشک‌کن از اجزاء مهم این خشک‌کن‌ها محسوب می شوند. محفظه خشک‌کن به صورت‌های مختلف طراحی شده و محل اصلی خشک‌کردن محصول می باشد. کلکتورهای خورشیدی مهمترین وسیله تبدیل انرژی خورشیدی به سایر شکلهای مفید انرژی هستند که از جنبه‌های مختلف با مبدلهای حرارتی معمولی تفاوت دارند. تبادل انرژی در مبدل‌های حرارتی معمولاً بین دو سیال انجام می شود و سرعت انتقال حرارت زیاد است و تابش انرژی در این وسایل عامل مهمی به شمار نمی رود. ولی در کلکتورهای خورشیدی انتقال انرژی از یک منبع تابش در دوردست به یک سیال صورت می گیرد. کلکتورهای مسطح یا تخت و کلکتورهای متمرکز کننده دو گروه عمده کلکتورهای خورشیدی هستند [۲۴]. در ساخت خشک‌کن‌های خورشیدی با جریان طبیعی هوا، کلکتور نقش مهی را ایفا می کند. کلکتورهای نوع صفحه تخت (مسطح) از لحاظ تکنیکی و اقتصادی نسبت به سایر کلکتورها ارجحیت دارند. این نوع کلکتورها در خشک‌کن‌های غیرمستقیم و تلفیقی بکار می روند و با استفاده از این نوع کلکتورها، می‌توان دمای هوای ورودی به محفظه خشک‌کن را به میزان ۳۵ درجه سانتیگراد افزایش داد [۲۴].

این نوع کلکتور شامل یک صفحه جذب‌کننده تیره (سیاه رنگ) است که گرمای جذب شده بوسیله آب یا هوا منتقل می شود که در فرآیند خشک‌کردن از هوا استفاده می شود. این نوع کلکتور به دو گروه عمده تقسیم می شود :۱-کلکتورهای بدون پوشش و ۲-کلکتورهای با پوشش.

انواع بدون پوشش ساده‌تر بوده و برای هر دو سیستم اجباری و طبیعی بکار می رود و معمولاً از صفحه فلزی مواج ساخته می شود. اگر چه اینگونه کلکتورها از لحاظ بازتابش نوری[۱] ۱۰٪ از انواع

۱- Optical losses