





دانشکده کشاورزی

گروه مهندسی مکانیک ماشین‌های کشاورزی

پایان نامه جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد رشته مکانیک ماشین‌های کشاورزی

### موضوع

طراحی، ساخت و ارزیابی خشک‌کن ترکیبی مایکروویو- جریان هوای گرم

### اساتید راهنما

دکتر علی محمد نیکبخت

دکتر پرویز احمدی مقدم

### تنظیم و نگارش

امین حاضر وظیفه

مهر ۱۳۹۱

## چکیده

رطوبت بالای موجود در محصولات کشاورزی سبب رشد و فعالیت میکروارگانیسم‌ها و ایجاد واکنش‌های شیمیایی نامطلوب شده و ماندگاری مواد غذایی را کاهش می‌دهد. خشک کردن یکی از شاخص‌ترین عملیات فرآوری محصولات کشاورزی است که در نتیجه کاهش میزان رطوبت محصول، مدت انبارداری محصولات را افزایش می‌دهد. خشک کردن فرآیندی است که با صرف زمان و انرژی همراه است و با توجه به محدودیت منابع انرژی در جهان، در چند سال اخیر روش‌های متعددی برای کاهش زمان و انرژی مصرفی مورد توجه محققان قرار گرفته است. در این تحقیق نیز با در نظر گرفتن اهمیت این موضوع یک دستگاه خشک‌کن مایکروویو-جریان هوای گرم طراحی و ساخته شد. در این خشک‌کن برای تولید امواج مایکروویو از یک لامپ مگنترون با توان نامی  $1/3 \text{ W}$  و فرکانس  $2/45 \text{ GHz}$  استفاده گردید. به منظور تولید جریان هوای گرم نیز از  $6$  گرم‌کن  $700 \text{ W}$  به همراه دمنده‌ای با دور  $1750 \text{ rpm}$  استفاده شد. ارزیابی دستگاه با خشک کردن برش‌های سیب توسط سه روش جریان هوای گرم، مایکروویو و ترکیب مایکروویو-جریان هوای گرم مورد بررسی قرار گرفت. در طول فرآیند خشک‌شدن تغییرات نسبت رطوبت محصول و آهنگ تبخیر نسبت به زمان در مقابل تغییرات توان مایکروویو ( $500 \text{ W}$ ،  $1000 \text{ W}$ ،  $1500 \text{ W}$  و  $2000 \text{ W}$ )، دمای هوا ( $40^\circ\text{C}$ ،  $50^\circ\text{C}$  و  $60^\circ\text{C}$ ) و سرعت هوای ورودی ( $0/5 \text{ m/s}$ ،  $1 \text{ m/s}$ ،  $1/5 \text{ m/s}$  و  $2 \text{ m/s}$ ) مورد مطالعه قرار گرفت و میزان کل انرژی مصرفی در هر سه روش باهم مقایسه گردید. نتایج نشان داد که خشک کردن برش‌های سیب با روش‌های مایکروویو و ترکیبی، شامل سه مرحله، افزایش در آهنگ تبخیر، خشک‌شدن با آهنگ ثابت و مرحله نزولی فرآیند می‌باشد. این در حالی است که در روش جریان هوای گرم، مرحله خشک‌شدن با آهنگ ثابت مشاهده نگردید. کمترین زمان انجام فرآیند در روش ترکیبی با توان مایکروویو  $2000 \text{ W}$ ، دمای هوای  $70^\circ\text{C}$  و سرعت هوای  $2 \text{ m/s}$  ملاحظه گردید و کمترین میزان انرژی مصرفی نیز در روش مایکروویو با توان  $2000 \text{ W}$  رخ داد.

کلمات کلیدی: خشک کردن، مایکروویو، هوای گرم، سیب.

۱- فصل اول (مقدمه و هدف).....	۱
۱-۱- خشک کردن و اهمیت آن .....	۱
۲-۱- روش‌های خشک کردن.....	۲
۳-۱- اهمیت مایکروویو .....	۳
۴-۱- اهداف تحقیق .....	۴
۲- فصل دوم (تئوری مسئله و مروری بر تحقیقات گذشته).....	۵
۱-۲- مقدمه .....	۵
۲-۲- فرآیند خشک شدن .....	۵
۳-۲- محتوای رطوبتی .....	۶
۱-۳-۲- روش‌های اندازه‌گیری رطوبت .....	۷
۴-۲- رطوبت تعادلی و منحنی رطوبت تعادلی .....	۸
۵-۲- منحنی‌های فرآیند خشک شدن.....	۸
۶-۲- انتقال حرارت .....	۹
۷-۲- مایکروویو .....	۱۰
۸-۲- خشک‌کن‌ها .....	۱۴
۱-۸-۲- خشک‌کن جریان هوای گرم .....	۱۵
۲-۸-۲- خشک‌کن مایکروویو .....	۱۵
۱-۸-۲- خشک‌کن ترکیبی مایکروویو- جریان هوای گرم.....	۱۶
۹-۲- مروری بر تحقیقات گذشته .....	۱۷
۳- فصل سوم (مواد و روش‌ها).....	۲۱
۱-۳- مقدمه .....	۲۱
۲-۳- ساختمان خشک‌کن .....	۲۱
۱-۲-۳- بدنه دستگاه .....	۲۳
۲-۲-۳- مولد جریان هوای گرم.....	۲۳
۳-۲-۳- مولد مایکروویو.....	۲۵
۴-۲-۳- انرژی سنج .....	۲۶

۲۷.....	۳-۲-۵- محفظه محصول
۲۸.....	۳-۲-۶- اندازه‌گیری جرم محصول توسط نیروسنج در طول فرآیند خشک‌شدن
۳۰.....	۳-۲-۷- تابلوی کنترل کننده دستگاه.....
۳۰.....	۳-۳-۳- ارزیابی دستگاه.....
۳۰.....	۳-۳-۱- آماده‌سازی نمونه‌ها.....
۳۱.....	۳-۳-۲- تعیین رطوبت اولیه.....
۳۱.....	۳-۴-۴- انجام آزمایش.....
۳۳.....	۳-۵-۵- روابط و تئوری‌های خشک‌کردن.....
۳۵.....	۴- فصل چهارم (نتایج و بحث).....
۳۵.....	۴-۱- مقدمه.....
۳۵.....	۴-۲- آزمایش اول (روش جریان هوای گرم).....
۳۵.....	۴-۲-۱- تغییرات نسبت رطوبت محصول در فرآیند خشک‌کردن به روش جریان هوای گرم.....
۳۸.....	۴-۲-۲- تغییرات آهنگ تبخیر در فرآیند خشک‌کردن به روش جریان هوای گرم.....
۴۰.....	۴-۲-۳- میزان انرژی مصرفی در طول فرآیند خشک‌کردن به روش جریان هوای گرم.....
۴۲.....	۴-۳-۳- آزمایش دوم (روش مایکروویو).....
۴۲.....	۴-۳-۱- تغییرات نسبت رطوبت محصول در فرآیند خشک‌کردن به روش مایکروویو.....
۴۳.....	۴-۳-۲- تغییرات آهنگ تبخیر در فرآیند خشک‌کردن به روش مایکروویو.....
۴۵.....	۴-۳-۳- میزان انرژی مصرفی در طول فرآیند خشک‌کردن به روش مایکروویو.....
۴۶.....	۴-۴-۴- آزمایش سوم (روش ترکیبی مایکروویو-جریان هوايگرم).....
	۴-۴-۱- تغییرات نسبت رطوبت محصول در فرآیند خشک‌کردن
۴۶.....	به روش ترکیبی مایکروویو-جریان هوای گرم.....
	۴-۴-۲- تغییرات آهنگ تبخیر در فرآیند خشک‌کردن
۵۳.....	به روش ترکیبی مایکروویو-جریان هوای گرم.....
	۴-۴-۳- میزان انرژی مصرفی در طول فرآیند خشک‌کردن
۶۰.....	به روش ترکیبی مایکروویو-جریان هوای گرم.....
	۴-۵- مقایسه سه روش خشک‌کردن
۶۳.....	(جریان هوای گرم، مایکروویو و ترکیب مایکروویو-جریان هوای گرم)

۶۳	۴-۵-۱- مقایسه زمان خشک شدن در آزمایشات مختلف
۶۵	۴-۵-۲- مقایسه انرژی مصرفی در آزمایشات مختلف
۶۶	۵- فصل پنجم
۶۶	نتیجه گیری و پیشنهادات
۶۶	۵-۱- نتیجه گیری
۶۶	۵-۱-۱- نتایج مربوط به خشک کردن برش های سیب به روش جریان هوای گرم
۶۶	۵-۱-۲- نتایج مربوط به خشک کردن برش های سیب به روش مایکروویو
	۵-۱-۳- نتایج مربوط به خشک کردن برش های سیب به روش ترکیبی مایکروویو-جریان هوای گرم
68	
۶۸	۵-۱-۴- نتایج مربوط به مقایسه روش های خشک کردن
۶۸	۵-۲- پیشنهادات

- جدول ۳-۱: روش‌های خشک کردن با تیمارهای مختلف ..... ۳۳
- جدول ۴-۱: زمان فرآیند در سرعت‌های مختلف و دماهای ثابت  $40^{\circ}\text{C}$  و  $70^{\circ}\text{C}$  در خشک کردن به روش جریان هوای گرم ..... ۳۷
- جدول ۴-۲: بیشینه مقدار آهنگ تبخیر در سرعت‌های مختلف و دماهای ثابت  $40^{\circ}\text{C}$  و  $70^{\circ}\text{C}$  در خشک کردن به روش جریان هوای گرم ..... ۴۰
- جدول ۴-۳: میزان مصرف انرژی در سرعت‌های مختلف و دماهای ثابت  $40^{\circ}\text{C}$  و  $70^{\circ}\text{C}$  در خشک کردن به روش جریان هوای گرم ..... ۴۲
- جدول ۴-۴: زمان انجام فرآیند در توان‌های مختلف در خشک کردن به روش میکروویو ..... ۴۳
- جدول ۴-۵: بیشینه مقدار آهنگ تبخیر در توان‌های مختلف در خشک کردن به روش میکروویو ..... ۴۴
- جدول ۴-۶: انرژی مصرفی کل در توان‌های مختلف در خشک کردن به روش میکروویو ..... ۴۵
- جدول ۴-۷: زمان فرآیند در دماهای مختلف، سرعت ثابت  $0.5\text{ m/s}$  و توان‌های ثابت  $500\text{ W}$  و  $2000\text{ W}$  در خشک کردن به روش ترکیبی ..... ۵۱
- جدول ۴-۸: زمان فرآیند در سرعت‌های مختلف، توان ثابت  $500\text{ W}$  و دماهای ثابت  $50^{\circ}\text{C}$  و  $60^{\circ}\text{C}$  در خشک کردن به روش ترکیبی ..... ۵۲
- جدول ۴-۹: زمان فرآیند در سرعت‌های مختلف، توان ثابت  $2000\text{ W}$  و دماهای ثابت  $50^{\circ}\text{C}$  و  $60^{\circ}\text{C}$  در خشک کردن به روش ترکیبی ..... ۵۳
- جدول ۴-۱۰: بیشینه مقدار آهنگ تبخیر در سرعت‌های مختلف، دمای ثابت  $60^{\circ}\text{C}$  و توان‌های ثابت  $500\text{ W}$  و  $2000\text{ W}$  در خشک کردن به روش ترکیبی ..... ۵۸
- جدول ۴-۱۱: بیشینه مقدار آهنگ تبخیر در سرعت‌های مختلف، دمای ثابت  $40^{\circ}\text{C}$  و توان ثابت  $2000\text{ W}$  در خشک کردن به روش ترکیبی ..... ۵۸
- جدول ۴-۱۲: بیشینه مقدار آهنگ تبخیر در دماهای مختلف، توان ثابت  $500\text{ W}$  و سرعت هوای  $0.5\text{ m/s}$  ..... ۵۹
- جدول ۴-۱۳: میزان مصرف انرژی در دماهای مختلف، سرعت ثابت  $0.5\text{ m/s}$  و توان‌های  $500\text{ W}$  و  $2000\text{ W}$  در خشک کردن به روش ترکیبی ..... ۶۲
- جدول ۴-۱۴: میزان مصرف انرژی در سرعت‌های مختلف، دمای ثابت  $50^{\circ}\text{C}$  و توان  $1000\text{ W}$  در خشک کردن به روش ترکیبی ..... ۶۲
- جدول ۴-۱۵: بیشترین و کمترین زمان انجام فرآیند در هر سه روش خشک کردن ..... ۶۵
- جدول ۴-۱۶: بیشترین و کمترین میزان انرژی مصرفی در هر سه روش خشک کردن ..... ۶۵

- شکل ۱-۲: خازن استوانه‌ای ..... ۷
- شکل ۲-۲: منحنی رطوبت تعادلی ..... ۸
- شکل ۳-۲: طیف الکترومغناطیسی ..... ۱۱
- شکل ۴-۲: میدان الکتریکی و مغناطیسی در داخل فضای لامپ مگنترون ..... ۱۲
- شکل ۵-۲: حرکت سیکلوئیدی الکترون در داخل فضای لامپ مگنترون ..... ۱۳
- شکل ۶-۲: دایره‌ای که حرکت سیکلوئیدی الکترون جابجایی نقطه خاصی از محیط آن می‌باشد ..... ۱۳
- شکل ۱-۳: نمایی از خشک‌کن ساخته شده ..... ۲۱
- شکل ۲-۳: نمای شماتیکی از اجزای سازنده خشک‌کن ..... ۲۲
- شکل ۳-۳: نمای شماتیک بدنه دستگاه ..... ۲۳
- شکل ۴-۳: سرعت سنج جریان هوا ..... ۲۴
- شکل ۵-۳: نمایی از کانال عایق‌بندی شده در داخل بدنه دستگاه ..... ۲۵
- شکل ۶-۳: شکل شماتیک کانال، گرم‌کن‌ها و دمنده ..... ۲۵
- شکل ۷-۳: شکل شماتیک لامپ مگنترون ..... ۲۶
- شکل ۸-۳: شکل شماتیک مدار تغذیه لامپ مگنترون ..... ۲۶
- شکل ۹-۳: انرژی سنج ..... ۲۷
- شکل ۱۰-۳: نمایی از محفظه و سینی محصول ..... ۲۸
- شکل ۱۱-۳: نیروسنج خمشی (Sewhacnm, AB120, Korea) ..... ۲۸
- شکل ۱۲-۳: شکل شماتیکی از نیروسنج و سینی آویخته شده از آن ..... ۲۹
- شکل ۱۳-۳: موتور دور آرام (Kangbo Model) ..... ۳۰
- شکل ۱۴-۳: برش سیب‌ها توسط اسلایسر ..... ۳۲
- شکل ۱۵-۳: تصاویری از نمونه‌های سیب برش‌خورده ..... ۳۲
- شکل ۱۶-۳: نمای شماتیکی از قرار گرفتن برش‌های سیب بر روی سینی محصول ..... ۳۲
- شکل ۱-۴: تغییرات نسبت رطوبت به صورت تابعی از زمان خشک‌شدن  
به روش جریان هوای گرم در دماها و سرعت‌های مختلف هوای ورودی ..... ۳۶
- شکل ۲-۴: تغییرات آهنگ خشک‌شدن (تبخیر) نسبت به زمان خشک‌شدن  
به روش جریان هوای گرم در سرعت و دماهای مختلف ..... ۳۹



- شکل ۳-۴: انرژی مصرفی در طول فرآیند خشک کردن برش‌های سیب  
 به روش جریان هوای گرم در دما و سرعت‌های مختلف..... ۴۱
- شکل ۴-۴: تغییرات نسبت رطوبت محصول به صورت تابعی از زمان خشک کردن  
 به روش مایکروویو در توان‌های مختلف..... ۴۳
- شکل ۵-۴: تغییرات آهنگ خشک شدن (تبخیر) نسبت به زمان خشک شدن  
 به روش مایکروویو در توان‌های مختلف..... ۴۴
- شکل ۶-۴: انرژی مصرفی در طول فرآیند خشک کردن برش‌های سیب  
 به روش مایکروویو در توان‌های مختلف..... ۴۵
- شکل ۷-۴: تغییرات نسبت رطوبت محصول به صورت تابعی از زمان خشک شدن  
 به روش ترکیبی مایکروویو- جریان هوای گرم در دمای ثابت  $40^{\circ}\text{C}$ ..... ۴۷
- شکل ۸-۴: تغییرات نسبت رطوبت محصول به صورت تابعی از زمان خشک شدن  
 به روش ترکیبی مایکروویو- جریان هوای گرم در دمای ثابت  $50^{\circ}\text{C}$ ..... ۴۸
- شکل ۹-۴: تغییرات نسبت رطوبت محصول به صورت تابعی از زمان خشک شدن  
 به روش ترکیبی مایکروویو- جریان هوای گرم در دمای ثابت  $60^{\circ}\text{C}$ ..... ۴۹
- شکل ۱۰-۴: تغییرات نسبت رطوبت محصول به صورت تابعی از زمان خشک شدن  
 به روش ترکیبی مایکروویو- جریان هوای گرم در دمای ثابت  $70^{\circ}\text{C}$ ..... ۵۰
- شکل ۱۱-۴: تغییرات آهنگ تبخیر به صورت تابعی از زمان خشک شدن  
 به روش ترکیبی مایکروویو- جریان هوای گرم در دمای ثابت  $40^{\circ}\text{C}$ ..... ۵۴
- شکل ۱۲-۴: تغییرات آهنگ تبخیر به صورت تابعی از زمان خشک شدن  
 به روش ترکیبی مایکروویو- جریان هوای گرم در دمای ثابت  $50^{\circ}\text{C}$ ..... ۵۵
- شکل ۱۳-۴: تغییرات آهنگ تبخیر به صورت تابعی از زمان خشک شدن  
 به روش ترکیبی مایکروویو- جریان هوای گرم در دمای ثابت  $60^{\circ}\text{C}$ ..... ۵۶
- شکل ۱۴-۴: تغییرات آهنگ تبخیر به صورت تابعی از زمان خشک شدن  
 به روش ترکیبی مایکروویو- جریان هوای گرم در دمای ثابت  $70^{\circ}\text{C}$ ..... ۵۷
- شکل ۱۵-۴: انرژی مصرفی در طول فرآیند خشک کردن برش‌های سیب  
 به روش ترکیبی مایکروویو-جریان هوای گرم در توان، دما و سرعت‌های مختلف..... ۶۱
- شکل ۱۶-۴: نتایج ولیس و همکاران، ۲۰۰۴ در مورد آهنگ تبخیر  
 در خشک کردن میوه سیب به روش جریان هوای گرم..... ۶۳

## ۱- فصل اول

### مقدمه و هدف

#### ۱-۱- خشک کردن و اهمیت آن

یکی از راه‌کارهای مؤثر در کاهش ضایعات محصولات کشاورزی و جلوگیری از فساد آنها در مرحله پس از برداشت، کاهش میزان رطوبت محصول تا حد مطلوب می‌باشد. رطوبت بالای موجود در محصول سبب رشد و فعالیت میکروارگانیسم‌ها، آنزیم‌ها و ایجاد واکنش‌های شیمیایی نامطلوب شده و ماندگاری آنها را کاهش می‌دهد. خشک کردن یکی از شاخص‌ترین و قدیمی‌ترین روش‌های فرآوری و نگهداری محصولات کشاورزی است که معمولاً در طی فرآیند تبخیر یا تصعید که با تغییر فاز همراه است اتفاق می‌افتد و سبب خارج شدن آب از محصول می‌گردد. کاهش میزان رطوبت محصول سبب تقلیل در سرعت فعل و انفعالات شیمیایی از قبیل قهوه‌ای شدن و اکسیداسیون شده و در نتیجه شکل ظاهری محصول حفظ می‌گردد. بدین ترتیب می‌توان مواد غذایی را در فصول پربار برای فصول کم‌محصول و یا برای فروش در مناطق دیگر انبار کرد (گوکسو<sup>۱</sup> و همکاران، ۲۰۰۵).

خشک کردن باعث استفاده راحت‌تر مواد غذایی در فرآیندهایی مانند خرد کردن، آسیاب کردن و مخلوط کردن می‌شود. همچنین وزن و حجم مواد غذایی در طول این فرآیند کاهش می‌یابد که باعث سهولت در بسته بندی، حمل و نقل و انبارداری می‌گردد و در نتیجه هزینه‌های وابسته به آنها نیز کاهش می‌یابد (لی<sup>۲</sup> و همکاران، ۲۰۱۱).

---

<sup>1</sup> Goksu

<sup>2</sup> Li

## ۱-۲- روش‌های خشک کردن

در گذشته برای سالیان طولانی از تابش مستقیم آفتاب و یا جریان باد برای خشک کردن محصولات استفاده می‌شد ولی مشکلات متعددی در استفاده از این روش‌ها وجود دارد که می‌توان به تغییرات نامناسب در کیفیت غذا، قرار گرفتن محصول در محیط غیر قابل کنترل، طولانی بودن زمان خشک شدن، غیربهداشتی - بودن محصول، حمله حشرات، پرندگان و جوندگان به محصول و بارندگی‌های غیر منتظره اشاره نمود. برای مرتفع کردن نارسایی‌های مذکور، رفته رفته از روش‌های صنعتی برای خشک کردن محصولات کشاورزی استفاده گردید. در این روش‌ها فرآیند خشک کردن محصول در فضایی با شرایط کنترل شده انجام می‌پذیرد و پارامترهای مؤثر بر روی شاخص‌های کیفی محصول مانند درجه حرارت، دبی جابجایی هوا، رطوبت نسبی و میزان رطوبت محصول، تحت کنترل فرآیند را پشت سر می‌گذارند. در واقع عمل خشک کردن، علی‌رغم ظاهری ساده، نیاز به کنترل دقیق و آگاهی از شرایط محصول در زمان‌های مختلف در طول فرآیند را دارد و در صورت استفاده از روش‌های نامناسب در کنار افت شدید کیفیت محصول نهایی، تولید کننده دچار ضررهای مالی نیز خواهد شد. از این رو، خشک کردن محصولات در شرایط کنترل شده روندی رو به رشد را نشان می‌دهد که ریشه در انتظارات مصرف کنندگان دارد (زیرجانی و همکاران، ۱۳۸۷).

معمول‌ترین نوع خشک‌کن‌های صنعتی، خشک‌کن جریان هوای گرم می‌باشد که هوای گرم پس از تماس با محصول سبب تبخیر رطوبت و خشک شدن محصول می‌گردد. البته این نوع خشک‌کن‌ها نیز معایبی نظیر ایجاد سوختگی سطحی و چروکیدگی بالا در محصول را دارند و همچنین مدت زمان خشک کردن و انرژی مصرفی در این نوع خشک‌کن‌ها بالا است (داس<sup>۱</sup> و همکاران، ۲۰۰۴).

امروزه در کشورهای پیشرفته برای حل مشکلات ذکر شده و همچنین افزایش راندمان بهره‌وری از انرژی همراه با صرف زمان کمتر، از تکنولوژی‌های مدرن‌تر برای خشک کردن محصولات کشاورزی استفاده می‌شود. در این راستا تحقیقات زیادی بر روی خشک‌کن‌های خلائی، مادون قرمز، مایکروویو و خشک‌کن‌های ترکیبی مانند مادون قرمز- جریان هوای گرم و مایکروویو- جریان هوای گرم و غیره صورت گرفته است.

تاریخچه تولید فرآورده‌های خشک در ایران به دوران بسیار قدیم بازمی‌گردد. با گذشت سالیان طولانی در بخش فرآوری محصولات، تغییرات عمده‌ای پدیدار نشده و هنوز هم به طور غالب از روش‌های سنتی و یا از روش صنعتی معمول جریان هوای گرم برای خشک کردن محصولات استفاده می‌شود. در بازار عرضه و فروش فرآورده‌های خشک در سطح جهانی هنگامی می‌توان حضور موثر داشت و با دیگر کشورهای تولید کننده به رقابت پرداخت که قادر به بکارگیری روش‌های نوین بود و طبق استانداردهای قابل قبول محصولات را تولید و عرضه نمود.

یکی از روش‌های نوین برای خشک کردن محصولات کشاورزی که در دهه اخیر عملاً توجه زیادی به آن شده است استفاده از امواج مایکروویو برای خشک کردن محصولات کشاورزی می‌باشد. مایکروویو یک موج

<sup>1</sup> Das

الکترومغناطیس (ترکیب میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی) با فرکانسی در محدوده ۳۰۰MHz تا ۳۰۰۰۰۰MHz است که به ترتیب دارای طول موجی در محدوده ۱m تا ۱mm می‌باشد. این امواج قادرند با تغییر قطبیت مولکول‌ها (در حدود چند میلیارد بار در ثانیه)، در مواد دو قطبی همچون آب ایجاد گرما کنند (کوچک زاده و شفیع، ۲۰۱۰). محصولات غذایی و کشاورزی نیز به علت دارا بودن آب در هنگام قرارگیری در معرض امواج مایکروویو، گرم شده و این گرما سبب تبخیر مولکول‌های آب و خشک‌شدن محصول می‌گردد بدون اینکه حرارتی از بیرون به محصول داده شود (الهرشه<sup>۱</sup> و همکاران، ۲۰۰۹).

### ۱-۳- اهمیت مایکروویو

از آنجا که فرآیند خشک‌کردن توأم با صرف زمان و انرژی است، طی سالیان اخیر بدلیل محدودیت منابع انرژی در جهان، روش‌هایی که در عین حفظ کیفیت محصول، میزان انرژی مصرفی را در طول فرآیند خشک‌کردن کاهش می‌دهند بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند. به این دلیل امروزه مایکروویو به یک منبع جذاب انرژی حرارتی در فرآیند خشک‌کردن تبدیل شده است، چرا که زمان خشک‌شدن در استفاده از این روش بسیار کاهش یافته و در نتیجه میزان انرژی مصرفی در طول فرآیند به طور چشم‌گیری کاهش می‌یابد. از طرف دیگر کیفیت محصول خشک شده نیز در مقایسه با سایر روش‌های معمول خشک‌کردن بسیار افزایش می‌یابد. از دیگر مزیت‌های سیستم مایکروویو این است که بدلیل تمرکز انرژی، این سیستم فقط ۲۰ تا ۳۵ درصد نسبت به سایر روش‌های خشک‌کردن نیاز به فضا دارد. این مزایای قابل توجه سبب شده است که مایکروویو، کاربردهای متعددی در صنایع شیمیایی، اتومبیل‌سازی و به ویژه صنایع غذایی داشته باشد (مسکن، ۲۰۰۰).

علیرغم مزایای ذکر شده در استفاده از مایکروویو در فرآیند خشک‌کردن، این روش می‌تواند بسته به خواص حرارتی و دی‌الکتریک محصول، باعث گرمادهی غیریکنواخت شود (عباسی سوراکی و مولا، ۲۰۰۸). همچنین بدلیل سرعت بالای انتقال جرم در این روش، دفع رطوبت خارج شده از محصول مشکل بوده و سبب ایجاد میعان بخار در داخل محفظه می‌شود. برای فایق آمدن بر مشکلات ذکر شده می‌توان از ترکیب مایکروویو با جریان هوای گرم، اعمال پالسی مایکروویو و همچنین روش ترکیبی مایکروویو - خلاء در فرآیند خشک‌کردن استفاده کرد (گانسکاران<sup>۲</sup>، ۱۹۹۹).

جریان هوای گرم در حذف آب آزاد موجود در سطح یا نزدیکی‌های سطح محصول نسبتاً موثر است و سیستم مایکروویو نیز تأثیر مهمی در حذف آب آزاد درون محصول دارد و آب درونی را بر اثر افزایش فشار به طرف سطح محصول هدایت می‌کند. بنابراین ترکیب مناسب این دو سیستم می‌تواند عمل خشک‌کردن را بهبود ببخشد (آندرس و همکاران، ۲۰۰۳).

<sup>1</sup> Al-Harashsheh

<sup>2</sup> Abbasi souraki and mowla

<sup>3</sup> Gunasekaran

### ۱-۴-اهداف تحقیق

- استفاده از روش‌های نوین برای خشک کردن محصولات کشاورزی.
- دستیابی به مطلوب‌ترین روش خشک کردن محصولات در سه روش (جریان هوای گرم، مایکروویو و ترکیب مایکروویو-جریان هوای گرم).
- مقایسه مدت زمان صرف شده برای خشک کردن محصول در سه روش فوق.
- ارزیابی میزان انرژی مصرفی در روش‌های مذکور و دستیابی به بهترین روش.

## ۲- فصل دوم

### تئوری مسئله و مروری بر تحقیقات گذشته

#### ۲-۱- مقدمه

اکثر محصولات کشاورزی و باغی به هنگام برداشت رطوبت بالایی دارند و در صورتی که پس از طی مدت اندکی از زمان برداشت مصرف نشوند بدلیل رشد و فعالیت باکتری‌ها و آنزیم‌ها، فاسد شده و کیفیت خود را از لحاظ ظاهری و ارزش غذایی از دست می‌دهند. این موضوع با توجه به جمعیت رو به رشد جهان و افزایش تقاضا سبب خواهد شد که بازار عرضه با کمبود عمده‌ای مواجه شود. یکی از روش‌های افزایش مدت ماندگاری محصولات و تقلیل در سرعت فعل و انفعالات شیمیایی نامطلوب، خشک کردن محصولات و آبدایی از آنها تا رطوبت مطلوب می‌باشد. در واقع واژه خشک شدن به حذف بخشی از رطوبت نسبی مواد (محصولات کشاورزی و باغی) از طریق تبخیر اشاره دارد که موجب تثبیت میکروبیولوژی و افزایش دوره انبارداری آنها می‌گردد (پهلوانزاده ۱۳۷۷).

#### ۲-۲- فرآیند خشک شدن

زمانی که به محصولی حرارت داده می‌شود، رطوبت موجود در آن پس از دریافت گرمای نهان تبخیر، در درجه حرارت ثابتی تغییر فاز داده و به بخار تبدیل می‌شود (توکلی پور، ۱۳۸۳). بر اثر خروج رطوبت تبخیر شده از محصول، ناحیه‌ای از بخار آب با فشار کم در سطح آن ایجاد می‌گردد که بدلیل اختلاف فشار موجود بین داخل محصول و ناحیه کم فشار سطح آن، یک گرادیان فشار از داخل به طرف هوای محیط حاصل می‌گردد. این گرادیان به همراه نیروی لوله‌های مویین موجود در داخل محصول، نیروی محرکه لازم برای دفع آب را تأمین می‌کنند (سهرابی ۱۳۷۷).

فرآیند خشک کردن شامل انتقال هم‌زمان جرم و گرما است؛ بطوری که گرما به روش هدایتی به داخل محصول نفوذ کرده و موجب تبخیر شدن رطوبت می‌شود. رطوبت تبخیر شده نیز به سطح مشترک محصول و هوا از طریق منافذ موجود در داخل محصول منتقل شده و به کمک روش جابجایی وارد هوا می‌شود (سیتکی، ۱۳۸۲).

آب موجود در محصولات کشاورزی و باغی به سه حالت مختلف: رطوبت پیوندی، غیر پیوندی و آزاد در آنها یافت می‌شود. رطوبتی از محصول که فشار بخار آن در یک درجه حرارت معین کمتر از فشار بخار آب خالص در همان درجه حرارت باشد رطوبت پیوندی نامیده می‌شود که چنین رطوبتی در دیواره‌های سلولی بافت گیاهان، ترکیبات شیمیایی سست با مواد سلولزی و یا در لوله‌های مویین و شکاف‌های عمیق محصول یافت

می‌شود. رطوبت غیر پیوندی به رطوبتی گفته می‌شود که فشار بخار آن در یک درجه حرارت معین برابر با فشار بخار آب خالص در همان درجه حرارت باشد. تنها رطوبتی که قابل تبخیر است و مقدار آن در محصول به رطوبت نسبی محیط بستگی دارد، رطوبت آزاد نامیده می‌شود (توکلی پور، ۱۳۸۰).

## ۲-۳- محتوای رطوبتی

بطور کلی محتوای رطوبتی عبارت است از مقدار آبی که به ازای جرم واحد محصول، در آن وجود دارد. محتوای رطوبتی یا بر پایه تر و یا بر پایه خشک بیان می‌شود، که به ترتیب مقدار آب به ازای جرم واحد محصول خشک و مقدار آب به ازای جرم واحد محصول تر تعریف شده و از طریق روابط زیر بدست می‌آیند (معادله‌های ۱-۲، ۲-۲ و ۳-۲).

$$MC_{w.b} = \frac{M_w}{M_T} \times 100 \quad (1-2)$$

$$MC_{d.b} = \frac{M_w}{M_d} \times 100 \quad (2-2)$$

$$M_T = M_w + M_d \quad (3-2)$$

محتوای رطوبتی بر پایه تر و خشک از طریق روابط زیر قابل تبدیل به یکدیگر هستند (معادله‌های ۴-۲ و ۵-۲) (۵)

$$MC_{w.b} = \frac{MC_{d.b}}{1 + MC_{d.b}} \quad (4-2)$$

$$MC_{d.b} = \frac{MC_{w.b}}{1 - MC_{w.b}} \quad (5-2)$$

که در این روابط

$MC_{w.b}$ : محتوای رطوبتی بر پایه تر

$MC_{d.b}$ : محتوای رطوبتی بر پایه خشک

$M_w$ : جرم آب موجود در محصول (gr)

$M_d$ : جرم محصول خشک‌شده (gr)

$M_T$ : جرم کل محصول (gr)

## ۲-۳-۱- روش‌های اندازه‌گیری رطوبت

روش‌های اندازه‌گیری رطوبت به دو بخش روش‌های مستقیم و غیرمستقیم تقسیم می‌شوند. در روش‌های مستقیم، طی عملیات آزمایشگاهی و تحقیقی که نیازمند مدت زمان طولانی هستند، محتوای رطوبتی مواد با دقت و صحت بالایی اندازه‌گیری می‌شود. این در حالی است که روش‌های غیر مستقیم، جنبه تجاری و صنعتی دارند و دقت داده‌های بدست آمده از این طریق به اندازه روش‌های مستقیم نمی‌باشد. تنها مزیت این روش نسبت به مستقیم این است که محتوای رطوبتی مواد در مدت زمان بسیار اندکی اندازه‌گیری می‌شود (AOAC، ۱۹۹۵). انواع روش‌های مستقیم اندازه‌گیری محتوای رطوبتی محصول شامل، واکنش شیمیایی، آون، تقطیر، تابش مایکروویو، تابش مادون قرمز می‌باشد. از بین روش‌های مذکور، آون در ایران بسیار رایج است و روش استاندارد بسیاری از کشورها نیز می‌باشد. در این شیوه، رطوبت موجود در محصول در محیط آون تبخیر شده و با محاسبه مقدار کاهش وزن آن از طریق تفاضل وزن اولیه و ثانویه، محتوای رطوبتی محصول مشخص می‌گردد (AOAC، ۱۹۹۵).

انواع روش‌های غیر مستقیم اندازه‌گیری محتوای رطوبتی محصول شامل مقاومت الکتریکی، خازنی، رطوبت نسبی، صوتی و امواج مادون قرمز می‌باشد. روش خازنی، دقیق‌ترین روش غیرمستقیم می‌باشد و در خشک-کن‌های صنعتی بسیار رایج است. اساس کار این شیوه تغییر در ظرفیت خازن است، بدین ترتیب که محصول مورد نظر را در بین صفحات خازن قرار می‌دهند و متناسب با تغییر در ظرفیت خازن، محتوای رطوبتی محصول مشخص می‌گردد (شکل ۲-۱) (AOAC، ۱۹۹۵).



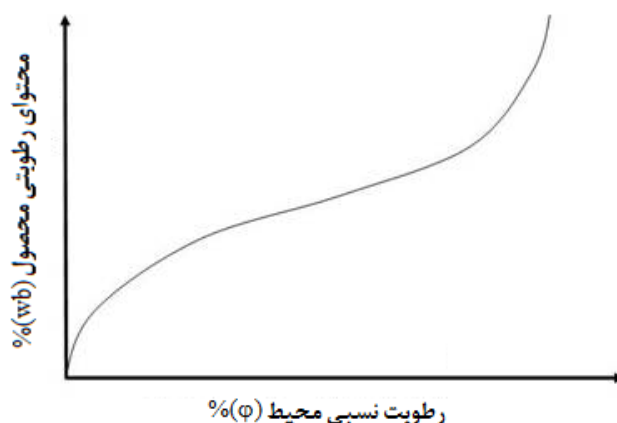
شکل ۲-۱: خازن استوانه‌ای



## ۲-۴- رطوبت تعادلی و منحنی رطوبت تعادلی

وقتی محصولی در یک محیط با درجه حرارت و رطوبت ثابت و فشار بخار جزئی ثابت  $p$  قرار می‌گیرد. آنقدر رطوبت از دست می‌دهد و یا رطوبت می‌گیرد که فشار بخار داخلی محصول برابر با فشار بخار جزئی  $p$  شود. در این حالت رطوبت محصول به رطوبت تعادلی رسیده است و آن را با  $(EMC^1)$  نشان می‌دهند. رطوبت نسبی هوای اطراف محصول نیز در این لحظه، رطوبت نسبی تعادلی نامیده می‌شود و با  $(ERH^2)$  نمایش می‌دهند (AOAC, ۱۹۹۵).

منحنی رطوبت محصول در مقابل رطوبت نسبی محیط، منحنی رطوبت تعادلی یا منحنی هم‌دما نامیده می‌شود (شکل ۲-۲). از آنجایی که شکل این منحنی‌ها عموماً S شکل می‌باشد به منحنی‌های s-shaped یا سیگموئید نیز معروف می‌باشند. این نمودارها برای هر محصولی منحصر به فرد است، بنابراین به عنوان یک منحنی مشخصه برای مشخص کردن یک محصول مطرح می‌شوند (AOAC, ۱۹۹۵).



شکل ۲-۲: منحنی رطوبت تعادلی

## ۲-۵- منحنی‌های فرآیند خشک شدن

اساساً فرآیند خشک شدن و مراحل آزدایی از محصول به کمک منحنی‌هایی مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد. از جمله این منحنی‌ها می‌توان به منحنی پیشروی خشک شدن (نمودار رطوبت محصول بر حسب زمان)، منحنی دما (نمودار رطوبت محصول بر حسب دمای محصول) و منحنی‌های آهنگ خشک شدن و نسبت رطوبت به صورت تابعی از زمان اشاره کرد (پهلوان‌زاده، ۱۳۷۷).

<sup>1</sup> Equal Moisture Content

<sup>2</sup> Equal Relative Humidity

نسبت رطوبت در کنترل فرآیند خشک کردن حائز اهمیت است. آهنگ تبخیر نیز به عنوان مقدار رطوبت خارج شده از محصول در واحد زمان تعریف می‌شود و یکی از پارامترهای مهم در توصیف فرآیند خشک شدن می‌باشد. **نسبت رطوبت<sup>۱</sup> بی‌بعد و آهنگ تبخیر<sup>۲</sup> بر حسب** (ثانیه × کیلوگرم ماده خشک / کیلوگرم رطوبت) به صورت روابط زیر تعریف می‌شوند (معادله‌های ۲-۶ و ۲-۷) (کایا و آیدین<sup>۳</sup>، ۲۰۰۹).



$$MR = \frac{M - M_e}{M_o - M_e} \quad (۶-۲)$$

$$DR = \frac{M_{t+\Delta t} - M_t}{\Delta t} \quad (۷-۲)$$

که در روابط بالا  $MR$ ،  $DR$ ،  $M$ ،  $M_o$ ،  $M_e$ ،  $M_t$  و  $M_{t+\Delta t}$  به ترتیب مقادیر نسبت رطوبت، آهنگ تبخیر، رطوبت لحظه‌ای، رطوبت اولیه، رطوبت تعادلی و رطوبت در لحظه‌های  $t$  و  $t+\Delta t$  بر حسب (کیلوگرم ماده خشک / کیلوگرم رطوبت) هستند و  $t$  نیز زمان خشک شدن بر حسب ثانیه می‌باشد.

## ۲-۶- انتقال حرارت

گرما شکلی از انرژی است که به علت اختلاف دما بین دو سیستم، از مرز سیستم ترمودینامیکی عبور کرده و از یک سیستم به سیستم دیگر منتقل می‌شود. این جریان تا زمانی ادامه می‌یابد که هر دو سیستم هم‌دما شوند. انرژی گرمایی در یک ماده توسط حرکت‌های تصادفی مولکول‌ها، اتم‌ها و اجزای ریز اتم به وجود می‌آید. و درجه حرارت صرفاً نشان‌دهنده اندازه این حرکت‌ها است. بنابراین انتقال حرارت عبارت است از انتقال برخی از این حرکت‌های مولکولی و یا اتمی از نقطه‌ای به نقطه دیگر (صفری، ۱۳۷۸).

حرارت به سه روش هدایت، جابجایی و تابشی از نقطه‌ای به نقطه دیگر منتقل می‌شود. در روش هدایت یا رسانش، حرارت بر اثر تماس فیزیکی و بدون حرکت توده‌ای از ماده، از ذره‌ای به ذره دیگر منتقل می‌شود. رسانش در واقع انتقال انرژی از ذرات پر انرژی به ذرات کم انرژی ماده، بر اثر برهم کنش‌های بین آنها است. فلزات دارای هدایت گرمایی بالایی هستند و الکترون‌های آزاد موجود در فلز، وظیفه حمل انرژی و هدایت الکتریکی را بر عهده دارند. این در حالی است که گازها برخلاف فلزات از پایین‌ترین هدایت گرمایی برخوردارند.

انتقال گرما به روش همرفتی یا جابجایی به واسطه حرکت سیال‌ها اتفاق می‌افتد. در واقع همرفت فرآیندی است که در آن، حرارت از طریق انتقال جرم توده‌ای از سیال، از نقطه‌ای به نقطه دیگر منتقل می‌شود. اگرچه جابجایی یکی از روش‌های انتقال حرارت است، اما جابجایی چیزی جز هدایت در سیال متحرک نیست. اگر

<sup>1</sup> Moisture ratio

<sup>2</sup> Drying rate

<sup>3</sup> Kaya and Aydin

فرآیند انتقال انرژی ترکیبی از هدایت حرارتی و حرکت سیال باشد، جابجایی یا همرفت نامیده می‌شود.

تابش گرمایی، انرژی منتشرشده از یک منبع مولد انرژی با امواج الکترومغناطیس است؛ که البته تمامی موادی که دارای دمای بالاتر از صفر مطلق هستند، مولد این انرژی می‌باشند. تابش گرمایی نتیجه حرکات تصادفی اتم‌ها و مولکول‌ها در ماده است و از آنجایی که این اتم‌ها و مولکول‌ها از ذرات باردار تشکیل شده‌اند (پروتون‌ها و الکترون‌ها) حرکات آنها باعث انتشار امواج الکترومغناطیسی که حامل انرژی هستند، می‌شود (صفری، ۱۳۷۸).

در فرآیند خشک‌شدن، هرکدام از روش‌های انتقال حرارت به صورت جداگانه یا ترکیبی برای خشک‌کردن محصولات بکار گرفته می‌شود. که در چند دهه اخیر به دلیل برخی از ویژگی‌های مطلوب انتقال حرارت به روش تابشی، این روش مورد توجه محققان بسیاری قرار گرفته است. لذا در این راستا تحقیقات زیادی در مورد ورود علم نوین میکروویو به بخش کشاورزی، بخصوص صنایع فرآوری و خشک‌کردن محصولات کشاورزی انجام گرفته است. زیرا با بهره گرفتن از تشعشع امواج میکروویو برای خشک‌کردن محصولات، حرارت به روش تابشی، منتقل می‌گردد.

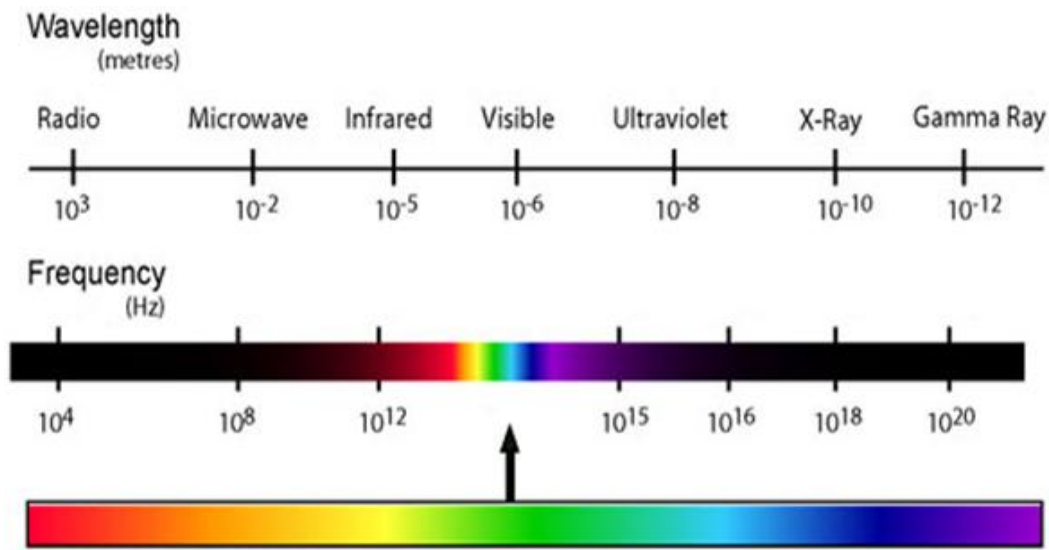
## ۲-۷- مایکروویو

مایکروویو را می‌توان شاخه‌ای از علم الکترونیک- الکترومغناطیس در باند فرکانسی ۳۰۰ مگاهرتز تا ۳۰۰ گیگاهرتز دانست که به ترتیب دارای طول موجی در محدوده ۱ متر تا ۱ میلی‌متر می‌باشند. باند فرکانسی کمتر از مایکروویو، امواج با فرکانس بسیار بالا<sup>۱</sup> و بالاتر از آن امواج میلیمتری<sup>۲</sup> نامیده می‌شوند (شکل ۲-۳). تولد علم مایکروویو را می‌توان در خلال جنگ جهانی دوم (۱۹۳۹ تا ۱۹۴۵ میلادی) که عمدتاً همراه با پیشرفت تکنولوژی رادار بود دانست (رزم پوش، ۱۳۶۸). از آنجایی که امواج مایکروویو دارای فرکانس بالا و طول موج کوتاهی هستند با توجه به معادله (۲-۸) حامل انرژی زیادی خواهند بود؛ لذا از این امواج در صنعت استفاده‌های زیادی می‌شود (چنگ<sup>۳</sup>، ۱۳۸۹). امروزه مایکروویو علاوه بر اینکه بیش از ۶۰ درصد سیستم‌های راداری را در بر می‌گیرد در ارتباطات، هوانوردی، تشخیص پزشکی و غیره، نقش عمده‌ای دارد. ابعاد علم مایکروویو نسبت به آنچه که در بدو تولدش دیده می‌شد، گسترش فراوان یافته به طوری که امروزه از این علم در صنعت کشاورزی نیز به وفور استفاده می‌شود که می‌توان از کاربردهای امواج مایکروویو در انبارداری محصولات کشاورزی، کنترل سطح مخازن آب در مزارع، آبیاری سطح مزارع، کنترل و مانیتورینگ زمین‌های کشاورزی و نظارت بر عملکرد ماشین‌آلات از راه دور، دفع آفات و حشرات از مزارع و خشک‌کردن محصولات کشاورزی اشاره کرد (رزم پوش، ۱۳۶۸).

<sup>۱</sup> UHF

<sup>۲</sup> Millimetric Waves

<sup>۳</sup> cheng



شکل ۲-۳: طیف الکترومغناطیسی

$$E = \frac{hc}{\lambda} \quad (۸-۲)$$

که در این رابطه

$E$ : انرژی موج (J)،  $h$ : ثابت پلانک ( $6.626 \times 10^{-34}$  J.s)،  $c$ : سرعت موج (m/s) و  $\lambda$ : طول موج (m) می‌باشند.

برای تولید امواج میکروویو در توان‌های پایین از قطعات نیمه‌هادی استفاده می‌شود که نمونه‌ای از آن در گوشی‌های تلفن همراه استفاده می‌گردد. امواج میکروویو در توان ۲W و فرکانس ۹۰۰MHZ الی ۱۵۰۰MHZ توسط قطعات نیمه‌هادی در این گوشی‌ها تولید شده و به عنوان موج حامل برای انتقال اطلاعات استفاده می‌گردد.

برای تولید امواج میکروویو در توان‌های بالا از لامپ‌های میدان متقاطع<sup>۱</sup> استفاده می‌شود که شامل کلیه لامپ‌هایی است که میدان الکتریکی و مغناطیسی در فضای داخل لامپ همدیگر را قطع کرده و بر هم عمود می‌باشند. این مجموعه را انواع مختلف لامپ‌های مگنترون نیز می‌نامند. برای ایجاد میدان الکتریکی در فضای داخلی این لامپ‌ها از آند و کاتد استفاده می‌گردد که توسط یک منبع الکتریکی تغذیه می‌شوند. جهت این میدان الکتریکی از آند به کاتد می‌باشد. برای تولید میدان مغناطیسی که عمود بر میدان الکتریکی

<sup>۱</sup> CFT