



موسسه آموزش عالی انرژی
دانشکده فنی مهندسی

عنوان:

ارائه مدل ریاضی جهت پیش بینی رطوبت ضایعات میوه درون خشک کن تابشی به کمک نرم افزار متلب

پایان نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد
در رشته مهندسی مکانیک گرایش تبدیل انرژی

استاد راهنما:

جناب آقای دکتر میرزایی

استاد مشاور:

جناب آقای دکتر مداح

پژوهشگر:

علی باهوش

شهریور ۹۷

بسم الله الرحمن الرحيم

تأییدیه‌ی صحت و اصالت نتایج

باسمه تعالی

اینجانب علی باهوش به شماره دانشجویی ۱۷۲۹ دانشجوی رشته مکانیک مقطع تحصیلی کارشناسی ارشد تأیید می‌نمایم که کلیه‌ی نتایج این پایان‌نامه/رساله حاصل کار اینجانب و بدون هرگونه دخل و تصرف است و موارد نسخه‌برداری‌شده از آثار دیگران را با ذکر کامل مشخصات منبع ذکر کرده‌ام. در صورت اثبات خلاف مندرجات فوق، به تشخیص دانشگاه مطابق با ضوابط و مقررات حاکم (قانون حمایت از حقوق مؤلفان و مصنفان و قانون ترجمه و تکثیر کتب و نشریات و آثار صوتی، ضوابط و مقررات آموزشی، پژوهشی و انضباطی ...) با اینجانب رفتار خواهد شد و حق هرگونه اعتراض در خصوص احقاق حقوق مکتسب و تشخیص و تعیین تخلف و مجازات را از خویش سلب می‌نمایم. در ضمن، مسئولیت هرگونه پاسخگویی به اشخاص اعم از حقیقی و حقوقی و مراجع ذی‌صلاح (اعم از اداری و قضایی) به عهده‌ی اینجانب خواهد بود و دانشگاه هیچ‌گونه مسئولیتی در این خصوص نخواهد داشت.

نام و نام خانوادگی:

امضا و تاریخ:

مجوز بهره‌برداری از پایان‌نامه

بهره‌برداری از این پایان‌نامه در چهارچوب مقررات کتابخانه و با توجه به محدودیتی که توسط استاد راهنما به شرح زیر تعیین می‌شود، بلامانع است:

- ☐ بهره‌برداری از این پایان‌نامه / رساله برای همگان بلامانع است.
- ☐ بهره‌برداری از این پایان‌نامه / رساله با اخذ مجوز از استاد راهنما، بلامانع است.
- ☐ بهره‌برداری از این پایان‌نامه / رساله تا تاریخ ممنوع است.

نام استاد یا اساتید راهنما:

تاریخ:

امضا:

چکیده

در این پژوهش مدل‌سازی یک خشک کن همرفتی - مایکروویو مورد بررسی قرار گرفته شد. نسبت رطوبت بر حسب سه متغیر ورودی سرعت هوای گرم ورودی، دمای هوای گرم و توان مایکروویو به کمک شبکه عصبی پیش بینی شد همچنین در گام بعد یک بهینه سازی به کمک مدل سطح پاسخ (RSM) انجام گرفت. نتایج مدل‌سازی نشان داد ساختار شبکه عصبی ۳-۶-۱ بهترین ساختار شبکه در پیش بینی نسبت رطوبت است زیرا بالاترین دقت و کمترین خطای مدل‌سازی را دارد. لایه ورودی سه نرون (سه متغیر مستقل) و لایه خروجی یک نرون (یک متغیر وابسته) دارد. همچنین تعداد نرون در لایه پنهان ۶ عدد است. در این مطالعه از ۷۳ داده واقعی استفاده گردید. داده‌ها به صورت تصادفی توسط نرم افزار متلب به سه دسته آموزش (۷۰٪)، صحنه سنجی (۱۵٪) و تست (۱۵٪) جداسازی شد. میزان خطای میانگین برای داده تست درپیش بینی مقدار نسبت رطوبت کمتر از ۷ درصد بدست آمد. مقدار خطای میانگین مربعات برای داده آموزش صحنه سنجی و تست به ترتیب ۰/۰۱۰۲ ، ۰/۰۰۶۹ و ۰/۰۱۷ بدست آمد.

مقادیر ماتریس وزن و بایاس برای مدل شبکه عصبی بدست آمد و ارائه گردید، به کمک مدل رویه پاسخ ارتباط میان متغیرهای مستقل (دما - سرعت و توان) و متغیر وابسته (نسبت رطوبت) در فرآیند خشک کردن ترکیبی با مایکروویو استخراج شد و معادله آن ارائه گردید حداقل رطوبت به ازای دمای ۷۰ درجه سانتیگراد و سرعت هوای ۲ متر بر ثانیه بدست می آید. مقدار رطوبت در این حالت در حدود ۲ درصد است. حداقل نسبت رطوبت به ازای سرعت هوای ۲ متر بر ثانیه و توان ۲/۵ کیلووات در حدود ۳/۵ درصد است. در این حالت دمای هوا ۵۵ درجه سانتیگراد در نظر گرفته شده است. حداقل نسبت رطوبت به ازای دمای ۷۰ درجه و توان ۲/۵ کیلووات در حدود ۴/۵ درصد است. در این حالت سرعت هوا ۱/۵ متر بر ثانیه در نظر گرفته شده است.

لغات کلیدی : خشک کن مایکروویو- سرعت هوا- توان مایکروویو

فهرست مطالب

فصل ۱: کلیات پژوهش

۱-۱- مقدمه.....	۱
۱-۲- اهمیت و ضرورت تحقیق.....	۲
۱-۳- سوالات تحقیق و فرضیات پژوهش.....	۵
۱-۴- هدف تحقیق.....	۶
۱-۵- بیان مساله.....	۷
۱-۶- لغات و اصطلاحات فنی تخصصی.....	۷
۱-۶-۱- خشک کردن به روش مایکروویو.....	۷
۱-۷- فرآیند خشک کردن محصولات و اصول آن.....	۹
۱-۸- انواع سیستم های خشک کردن مواد غذایی.....	۱۱
۱-۸-۱- خشک کردن با هوای داغ.....	۱۲
۱-۸-۲- امواج مایکروویو و مکانیسم حرارت دهی آن.....	۱۳
۱-۹- عوامل موثر بر خاصیت دی الکتریک مواد.....	۱۵
۱-۹-۱- محتوای رطوبتی.....	۱۵
۱-۹-۲- دانسیته.....	۱۶
۱-۹-۳- دما.....	۱۷
۱-۹-۴- ظرفیت گرمایی ویژه.....	۱۷
۱-۹-۵- رسانایی حرارتی.....	۱۷
۱-۹-۶- عمق نفوذ.....	۱۸
۱-۹-۷- تجهیزات مایکروویو.....	۱۸
۱-۱۰- خصوصیات خشک کردن با پرتوهای مایکروویو.....	۱۹
۱-۱۰-۱- مزایای خشک کردن با مایکروویو.....	۲۰
۱-۱۰-۲- معایب استفاده از مایکروویو.....	۲۱
۱-۱۰-۳- ویژگی های کیفی محصولات خشک شده.....	۲۳

فصل ۲: مروری بر مقالات

۲-۱- مروری بر کار گذشتگان.....	۲۴
۲-۲- نتیجه گیری.....	۲۵

فصل ۳: خشک کردن ترکیبی با مایکروویو

۳-۱- مقدمه.....	۳۶
۳-۲- اصول خشک کردن ترکیبی با انرژی مایکروویو.....	۳۸
۳-۳- مراحل خشک شدن با انرژی مایکروویو.....	۳۹
۳-۴- روش های اندازه گیری رطوبت.....	۳۹
۳-۵- منحنی رطوبت تعادلی.....	۴۰
۳-۵-۱- روابط مهم در فرآیند خشک شدن.....	۴۱
۳-۶- جمع آوری داده های مورد نیاز مدلسازی.....	۴۲
۳-۷- مواد و روشها.....	۴۳

۴۳	۱-۷-۳- تجهیزات آزمایشگاهی.....
۴۴	۸-۳- روند تجربی.....
۴۴	۱-۸-۳- آماده سازی نمونه های سیب پیش خشک شده.....
۴۵	۲-۸-۳- خشک کردن تفاله سیب های تازه و تفاله فرآوری شده به وسیله مایکروویو.....

فصل ۴: مدل سازی ۴۹

۵۰	۱-۴- مقدمه.....
۵۰	۲-۴- مدل سازی.....
۵۱	۳-۴- داده های مستقل و وابسته.....
۵۳	۴-۴- توپولوژی مدل.....
۵۳	۵-۴- رابطه ریاضی مدل شبکه عصبی.....
۵۵	۱-۵-۴- توابع فعال سازی.....
۵۶	۲-۵-۴- میانگین مربعات خطا.....
۵۶	۳-۵-۴- ضریب همبستگی.....
۵۹	۶-۴- نتایج.....
۶۸	۷-۴- ارائه مدل شبکه و ماتریس وزن و بایاس.....
۶۹	۸-۴- نتایج بهینه سازی به کمک RSM.....

فصل ۵: نتیجه گیری ۷۳

۷۴	۱-۵- مقدمه.....
۷۴	۲-۵- جمع بندی.....
۷۶	۳-۵- پیشنهادات برای آینده.....

مراجع ۷۷

فهرست جداول

- جدول (۱-۱) مقایسه پنج روش خشک کردن مواد غذایی از جنبه هزینه‌های سرمایه گذاری و عملیاتی..... ۴
- جدول (۴-۱) ماتریس وزن و بایاس شبکه عصبی مورد استفاده در این پژوهش جهت پیش بینی راندمان استخراج..... ۶۸
- جدول (۴-۲) ماتریس IW (وزن لایه ورودی) شبکه عصبی جهت پیش بینی راندمان استخراج..... ۶۸
- جدول (۴-۳) ماتریس b1 (بایاس لایه پنهان) شبکه عصبی جهت پیش بینی راندمان استخراج..... ۶۸
- جدول (۴-۴) ماتریس LW (وزن لایه پنهان) شبکه عصبی جهت پیش بینی راندمان استخراج..... ۶۹
- جدول (۴-۵) ماتریس b2 بایاس لایه آخر شبکه عصبی جهت پیش بینی راندمان استخراج..... ۶۹
- جدول (۴-۶) ضرایب معادله RSM..... ۶۹
- جدول (۴-۷) جدول مقادیر بهینه به کمک روش RSM..... ۶۹
- جدول (۴-۸) آنالیز حساسیت متغیرهای مستقل ۷۰

فهرست اشکال

شکل (۱-۱) روش کار	۷
شکل (۱-۲) طیف امواج الکترومغناطیسی	۱۳
شکل (۳-۱) منحنی رطوبت تعادلی محصول	۴۱
شکل (۳-۲) شماتیک مایکروبو سیستم خشک کن	۴۳
شکل (۴-۱) مهم‌ترین سؤالات مطرح‌شده در ارتباط با مفهوم مدل‌سازی به کمک شبکه عصبی در این پژوهش	۵۱
شکل (۴-۴) توپولوژی مورد استفاده در این پژوهش	Error! Bookmark not defined.
شکل (۴-۵) تفسیر مقادیر مختلف ضریب همبستگی	۵۸
شکل (۴-۶) داده‌های کل مربوط به مدل‌سازی نسبت رطوبت و مقادیر واقعی آن	۶۰
شکل (۴-۷) داده‌های آموزشی مربوط به مدل‌سازی نسبت رطوبت و مقادیر واقعی آن	Error! Bookmark not defined.
شکل (۴-۸) داده‌های صحنه سنجی مربوط به مدل‌سازی نسبت رطوبت و مقادیر واقعی آن	Error! Bookmark not defined.
شکل (۴-۹) داده‌های تست مربوط به مدل‌سازی نسبت رطوبت و مقادیر واقعی آن	۶۳
شکل (۴-۱۰) نمودار رگرسیون برای نسبت رطوبت	۶۴
شکل (۴-۱۱) پارامترهای تنظیمی شبکه عصبی برای پیش‌بینی نسبت رطوبت	۶۵
شکل (۴-۱۲) هیستوگرام خطا برای پیش‌بینی نسبت رطوبت	۶۶
شکل (۴-۱۳) نمودار کارایی مدل شبکه عصبی برای پیش‌بینی نسبت رطوبت	۶۷
شکل (۴-۱۴) اثر دما و سرعت هوا بر روی نسبت رطوبت	۷۰
شکل (۴-۱۵) اثر توان و سرعت هوا بر روی نسبت رطوبت	Error! Bookmark not defined.
شکل (۴-۱۶) اثر دما و توان مایکروبو بر روی نسبت رطوبت	۷۲

فصل ۱:

کلیات پژوهش

۱-۱- مقدمه

تفاله سیب یکی از فرآورده‌های جانبی تولید آب سیب است که منبعی مهم از کربوهیدرات‌ها، ویتامین C، مواد معدنی و فیبر غذایی است. سالانه بیش از ۱۰ میلیون تن تفاله سیب در سال تولید می‌شود. با این حال، تفاله سیب به شدت فسادپذیر است زیرا حاوی ۸۰/۲ درصد رطوبت و مقادیر زیادی ساکارید است و pH آن بین ۳ الی ۴ است. این مقدار زیاد از تفاله یک معضل زیست‌محیطی جدی است و باعث اتلاف منابع بدون دفع کردن صحیح آنها می‌شود. یک روش امیدوارکننده آن است که تفاله سیب به شکل محصول خشک شده ذخیره شود تا به عنوان غذای حیوانات استفاده شود یا روی آن فرآورش‌های بیشتری مثل بازیابی مواد مغذی انجام بگیرد.[۱]

روش خشک کردن طبیعی (سایه و آفتاب) معایب زیادی مثل عدم امکان جابه جایی مقادیر زیاد ماده گیاهی و حصول به استانداردهای ثابت کیفیت دارد خشک کردن با امواج مایکروویو یکی از روش‌های جدید در خشک کردن محصولات کشاورزی می‌باشد، کوتاه بودن زمان خشک کردن در این روش از مزایای مهم آن است. خشک کردن با مایکروویو سبب تولید گیاهان خشک شده با رنگ مناسب و درصد بالای مواد مؤثره میشود فرایند خشک کردن با مایکروویو روشی به نسبت ارزان بوده که امروزه توجه بسیاری از محققین را به خود جلب نموده است.[۲]

خشک کردن مواد مرطوب فرآیندی پیچیده است که شامل انتقال همزمان جرم و حرارت می‌شود[۳] خشک کردن لایه نازک، فرآیند خشک شدن در یک لایه از اجزای نمونه یا قطعات برش خورده آن است. در یک سیستم خشک‌کن مایکروویو، انرژی مایکروویو یک ظرفیت تولید حرارت داخلی دارد و می‌تواند به سادگی در لایه‌های داخلی نفوذ کند تا به شکل مستقیم رطوبت داخل نمونه را جذب کند. جذب سریع انرژی

باعث تبخیر سریع آب می‌شود و یک شار خروجی از بخاری که به سرعت در حال آزاد شدن است ایجاد می‌شود، لذا جهت گرادیان حرارتی و گرادیان رطوبتی یکسان است.

از نظر تئوری روش خشک کردن مایکروویو می‌تواند باعث کاهش زمان خشک شدن شده و یک محصول نهایی با کیفیت تولید کند و به این ترتیب به عنوان جایگزینی آینده‌دار شناخته می‌شود که کمک شایانی به دفع تفاله سیب می‌کند. یک فرآیند خشک کردن دو مرحله‌ای که در مرحله ابتدایی آن خشک کردن توسط هوای همرفت اجباری صورت می‌گیرد و خشک کردن نهایی به کمک مایکروویو انجام می‌شود گزارش شده است. این روش خشک کردن باعث کیفیت بهتر محصول و صرفه‌جویی قابل توجه از نظر زمان و انرژی می‌شود. [۴] همچنین در خشک کردن تکه‌های سیب، قارچ خوراکی [۵] و کشمش، پیشنهاد شده که انرژی مایکروویو باید در مرحله سرعت کاهشی یا زمانی که مقدار رطوبت اندک است اعمال شود تا خشک کردن به اتمام برسد.

۲-۱- اهمیت و ضرورت تحقیق

تفاله سیب منبع مهمی از کربوهیدرات‌ها، ویتامین C و مواد معدنی و فیبر غذایی بشمار می‌رود که سالانه مقادیر زیادی از آن بدون دفع مناسب از بین می‌رود که دفع غیر اصولی آن سبب ایجاد یک معضل زیست‌محیطی نیز می‌گردد بدلیل وجود رطوبت بسیار زیاد تفاله سیب این ماده بشدت فسادپذیر است. خشک کردن این محصول یک تکنیک مفید برای بازیابی ارزش غذایی مغذی این محصول به‌شمار می‌رود.

تفاله سیب فرآورده جانبی با ارزش حاصل از کارخانجات فرآوری سیب است. این محصول علاوه بر مزایای فراوان در تغذیه دام و طیور، کاربردهای مفیدی در صنایع مختلف دارد. در تفاله سیب مقادیر

مناسبی پکتین، فیبر رژیمی و مقدار زیادی از آنتی اکسیدان ها و ترکیبات فنولی یافت می شود، که از نظر تغذیه ای و پزشکی بسیار حائز اهمیت است. علاوه بر این، ترکیبات دیگری در تفاله سیب وجود دارد، که از نقطه نظر صنعتی بویژه در صنایع غذایی و دارویی دارای جایگاه فوق العاده ای است. از این رو با توجه به وابستگی کشور به واردات این محصولات، لزوم بکارگیری فناوری های جدید، و بکارگیری خصوصیات و پتانسیل کاربردهای آنها به منظور گسترش صنایع مربوطه و قطع وابستگی صنایع کشور به این فراورده ها بیش از پیش ضروری به نظر می رسد.

خشک کردن میوه ها و سبزیجات تفاله ها یکی از قدیمی ترین و در عین حال گسترده ترین روش های شناخته شده جهت نگهداری غذا و از مهم ترین فرآیندها برای حفظ کیفیت مواد غذایی است. هدف عمده در خشک کردن محصولات کشاورزی، کاهش رطوبت تا حدی است که در طولانی مدت قابل نگهداری باشند که با کاهش فعالیت های میکروبی و آنزیمی و تقلیل سرعت فعل و انفعالات شیمیایی، زمان ماندگاری محصول را افزایش و با کاهش قابل توجه در وزن و حجم آنها، هزینه های بسته بندی، ذخیره سازی و حمل و نقل آن را سهولت می بخشد. [۶] در خشک کن های معمول صنعتی با هوای گرم به خاطر اینکه هدایت حرارتی پایین است راندمان انرژی پایین می آید و مدت زمان طولانی تری برای خشک کردن لازم است. با توجه به این موارد، امروزه روش های دیگری برای خشک کردن مواد غذایی مورد توجه قرار گرفته اند که از آن جمله می توان به خشک کردن با مایکروویو اشاره کرد. [۷] بر خلاف روش های دیگر خشک کردن که در آنها گرما باید از سطح به عمق نفوذ کند، در این روش گرما در خود ماده غذایی به وجود می آید گرایش های جدید در توسعه فرآیندهای غذایی در زمینه خشک کردن، منجر به ایجاد روش های ترکیبی مختلف خشک کردن شده است.

خشک کردن با مایکروویو هنوز در صنعت رایج نیست. و برای این محدودیت دلایل چندی موجود است که پیش از این شناخته شده نبودند، بنابراین موجب بروز شکست‌های غیر منتظره و در نتیجه دلسرد شدن استفاده کنندگان احتمالی شده‌اند. در مقابل بعضی کاربردهای موفق و ادامه دار نیز وجود دارند. شیفمان^۱ خشک کردن غلات را مثال زده است. استفاده از خشک‌کن هوای داغ به همراه مایکروویو و خلاء در آلمان و لهستان برای خشک کردن میوه‌ها متداول است.[۸]

خشک کردن به روش مایکروویو عموماً کاربردهای خاص خود را دارد. برای مثال، در مورد موادی که ممکن است در دماهای پایین مواد آسیب ببینند مورد استفاده قرار می‌گیرد. خشک کردن در دماهای پایین متناسب با خلاء بکار گرفته شده صورت می‌پذیرد. به علت اینکه انتقال حرارت به وسیله همرفت در این شرایط بسیار پایین است، انتقال حرارت و در نتیجه سرعت خشک شدن با استفاده از مایکروویو نسبت به روش استاندارد بسیار بالاتر است. در مقیاس صنعتی محصولی که باید خشک شود به شکل خمیری روی یک نقاله پخش شده وارد محفظه مایکروویو که تحت خلاء قرار دارد شده می‌شود. کاربرد صنعتی این سامانه تولید کنسانتره آب میوه پودر چای و آنزیم هاست.

هائوری^۲ هزینه‌های مورد نیاز برای تاسیس و نیز نیاز به انرژی برای ۵ روش خشک کردن را ارائه نمود (جدول زیر). با ظرفیت یکسان هزینه مورد نیاز برای تاسیس یک واحد خشک‌کن تحت خلاء و مجهز به انرژی مایکروویو بسیار بالاست، در حالی که هزینه انرژی پایین تر است.[۲۸]

^۱ Shifman

^۲ Hauri

جدول (۱-۱) مقایسه پنج روش خشک کردن مواد غذایی از جنبه هزینه های سرمایه گذاری و عملیاتی

نسبت هزینه سرمایه گذاری (با ظرفیت برابر) %	انرژی مورد نیاز (کیلووات بر کیلوگرم آب)	نوع فرآیند
۱۰۰	۱/۹	خشک کن هوا (نواری)
۱۲۰	۱/۶	خشک کن افشانه ای
۰/۱۱۳	۱/۳	خشک کن تحت خلاء
۱۹۰	۱/۵	خشک کن ترکیبی مایکروویو-خلأ
۲۳۰	۲	خشک کن انجمادی

۳-۱- سوالات تحقیق و فرضیات پژوهش

در زیر اصلی ترین سوالات تحقیق و فرضیات پژوهش ارائه شده است.

- ارتباط بین درصد رطوبت (M) به عنوان متغیر وابسته با توان مایکروویو (p) ، سرعت هوای خشک کردن (V)، مدت زمان خشک کردن (t) به چه شکل است؟
- کدام یک از مدل های لایه نازک بهترین پیش بینی رطوبت را در طول دوره ی خشک کردن ارائه میدهد؟

- هر کدام از متغیر مستقل تا چه اندازه بر رطوبت محصول خروجی اثر گذار هستند؟

مدل های لایه نازک قادرند رطوبت موجود در تفاله سیب را با دقت مناسب پیش بینی کنند. ارتباط میان نسبت رطوبت با متغیرهای وابسته طی یک رابطه ریاضی ارائه خواهد شد تا با داشتن مدت زمان خشک کردن توان مایکروویو و سرعت جریان هوا میزان رطوبت محصول را پیش بینی کرد. به کمک مدلسازی ریاضی مناسب می توان ارتباط موثر بین متغیرهای مستقل و وابسته را پیدا کرد. همچنین می توان بهترین

مدل لایه نازک جهت پیش بینی رطوبت را مشخص کرد و در انتها می توان تاثیر هر متغیر مستقل را بر پارامتر رطوبت محصول خروجی مورد بررسی قرار داد.

۴-۱- هدف تحقیق

تاکنون اطلاعاتی در زمینه مدلسازی و نفوذپذیری موثر تفاله سیب در حال خشک شدن به شکل عمومی در دسترس نبوده است. از این رو مطالعه خشک کردن تفاله سیب از نظر حفاظت محیط زیست و بازیافت منابع در این پژوهش مد نظر می باشد. همچنین در این پژوهش مدل شبکه عصبی و مدل پاسخ سطح را به منظور بررسی میزان دقت هر مدل مورد بررسی قرار می دهیم و بهترین مدل را انتخاب خواهیم کرد. از دیگر اهداف پژوهش استخراج ارتباط بین رطوبت بر حسب توان مایکروویو- سرعت هوای داغ- سرعت هوای خشک کردن و بررسی اثر هر کدام بر میزان حذف رطوبت است.

خشک کردن یکی از قدیمی ترین روشهای نگهداری محصولات کشاورزی بعد از برداشت است. این فرایند شامل حذف رطوبت با استفاده از عمل تبخیر تا حد رسیدن به یک آستانه خاص است تا بتوان محصول را برای مدت طولانی انبار کرد و فعالیت آنزیمی، میکروارگانیسم ها و مخمرها را در آن متوقف نمود. مزایای خشک کردن شامل افزایش زمان ماندگاری محصول خشک شده در مقایسه با سایر روش های تولید محصول با وزن و حجم کمتر، عدم نیاز به سردخانه، کاهش هزینه های حمل و نقل و بسته بندی می باشد هدف کاربردی این پژوهش ارائه یک مدل ریاضی به جامعه مهندسين صنايع غذایی جهت مدلسازی میزان رطوبت تفاله سیب در خشک کن مایکروویو تحت شرایط مختلف است.

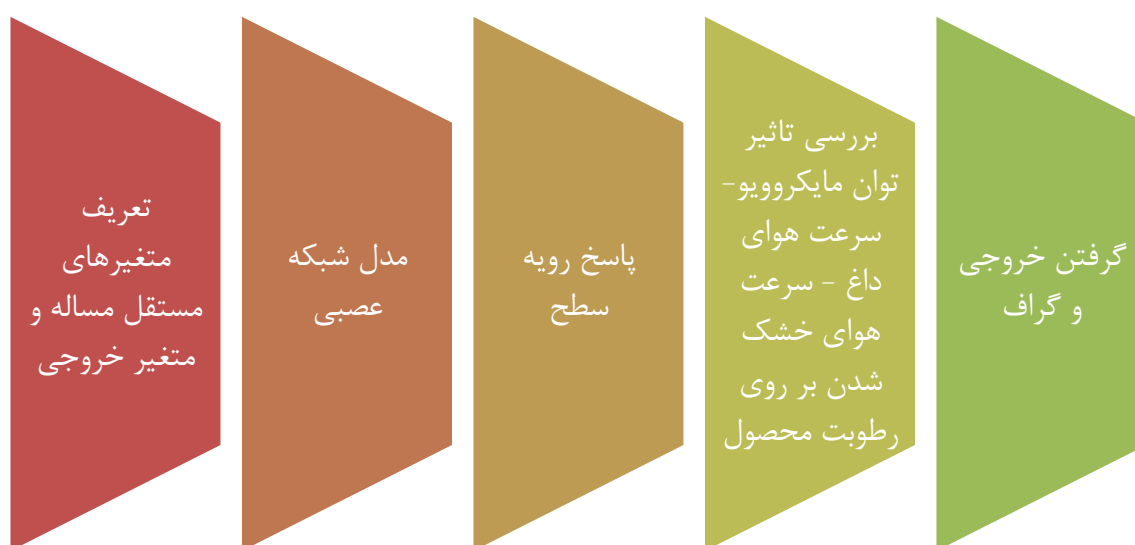
اهداف اصلی این مطالعه بطور خاص الف) بررسی تاثیر توان خروجی مایکروویو و بر روی سینتیک خشک کردن ب) انتخاب مدل لایه نازک بهینه خشک کردن به منظور شبیه سازی و افزایش مقیاس فرآیند ج) ارائه کردن معادلات شدت خشک کردن برای ارائه پیشنهادهایی به منظور طراحی بهینه طرح خشک کن

است.

۱-۵- بیان مساله

به کمک مدل شبکه عصبی و پاسخ رویه سطح خشک کردن تفاله سیب به کمک امواج مایکروویو مورد بررسی قرار می گیرد.

شکل (۱-۲) روش کار



۱-۶- لغات و اصطلاحات فنی تخصصی

۱-۶-۱- خشک کردن به روش مایکروویو

یکی از روش هایی که طی دهه اخیر توجه زیادی به آن مبذول شده، خشک کردن با استفاده از اشعه مایکروویو است. پرتوهای مایکروویو از دسته پرتوهای الکترومغناطیسی با طول موج بلند و فرکانس می باشند. در هنگام عبور این امواج از بافت ماده غذایی، مولکول های قطبی نظیر آب و نمک ها به ارتعاش درآمده و همین ارتعاش موجب تبدیل انرژی مایکروویو به حرارت می شود. قابل توجه اینکه بر خلاف

روش‌های دیگر خشک کردن که در آنها گرما باید از سطح به عمق نفوذ کند، در این روش گرما در خود ماده غذایی به وجود خواهد آمد. مثال‌های متعددی از کاربردهای خشک کردن مایکروویو وجود دارد که مایکروویو مزیت‌های قابل توجهی را فراهم کرده است.

کاربرد مایکروویو در خشک کردن گستره وسیعی از صنایع از جمله صنایع غذایی را دربر می‌گیرد. در هر مورد، سیستم‌های خشک کردن مایکروویو، زمان خشک کردن را به طور قابل توجهی کاهش داده‌اند بدون اینکه اثر منفی بر کیفیت محصول بگذارند. در خشک کردن با مایکروویو، گرما، حاصل از تبدیل انرژی مایکروویو به انرژی حرارتی در درون مواد مرطوب است و دمای مطلوب را برای خشک کردن سریع مواد فراهم می‌کند. گرمایش حجمی ناشی از نفوذ مایکروویو و کاهش هزینه‌های فرآیند، مایکروویو را به منبع جذاب انرژی حرارتی تبدیل کرده است. زمان‌های کوتاه تر فرآوری، به میزان قابل توجهی هزینه‌های تولید برخی از محصولات را کاهش می‌دهد.

همچنین به خاطر تمرکز انرژی، سیستم مایکروویو فقط ۲۰ تا ۳۵ درصد نسبت به سایر روش‌های خشک کردن نیاز به فضا دارد و چون نتایج تحقیقات نشان داده که کاربرد نادرست مایکروویو باعث تولید محصولات با کیفیت بد شده پیشنهاد شده که انرژی مایکروویو باید در مرحله محتوای رطوبتی پایین، در انتهای عمل خشک کردن استفاده شود.

در این روش گرما در خود بافت ماده غذایی تولید شده و از آسیب دیدن و سوختن قسمتهای سطحی ماده غذایی جلوگیری می‌شود. با توجه به هزینه‌های بالای خشک کردن با استفاده از انرژی مایکروویو و همچنین برخی دیگر از معایب آن در روش ترکیب خشک کن هوای داغ و مایکروویو بسیار مورد توجه قرار گرفته است. هدف از ترکیب روش‌ها در تمامی موارد، استفاده از مزایای هرکدام از روش‌های مذکور بوده است. در این رابطه استفاده از انرژی مایکروویو بسته به چگونگی و زمان استفاده از آن می‌تواند

نتایجی متفاوت و بعضاً متضاد داشته باشد. اثرات این انرژی بر رنگ محصول و نیز میزان تخلخل آن از این قبیل موارد هستند.[۹]

۷-۱- فرآیند خشک کردن محصولات و اصول آن

عملیات خشک کردن تأثیر زیادی بر روی کیفیت محصول و قیمت آن می‌گذارد. کیفیت محصول غذایی به میزان تغییرات فیزیکی و بیوشیمیایی که در طول فرآیند خشک کردن در آن رخ می‌دهد بستگی دارد. درجه ی حرارت، زمان و فعالیت آبی در حین فرآیند خشک کردن بر روی کیفیت محصول نهایی تأثیر می‌گذارد. دماهای پایین اثر مثبتی بر روی کیفیت نهایی محصول دارد، ولی زمان فرآیند را نیز طولانی تر می‌کند. اگرچه در فعالیت آبی پائین رشد میکروارگانیسم ها کند یا متوقف می‌شود ولی سرعت اکسیداسیون لیپید^۱ افزایش می‌یابد.

بسیاری از غذاهای خشک شده قبل از مصرف بازآپوشی می‌شوند. ساختار، چگالی و اندازه ی ذره ی یک ماده ی غذایی خشک شده در حل شدن آن در آب یا بازآپوشی نقش مهمی را ایفا می‌کند. کاهش اندازه ی ذرات و افزودن امولسیفایرهای چون لسیتین یا عوامل فعال کننده ی سطحی موجب سهولت بازآپوشی می‌شود. پایداری یک ماده ی غذایی در مدت ذخیره سازی با کاهش فعالیت آبی، افزایش می‌یابد و فرآورده هایی که در دمای پایین تری خشک می‌شوند در طول مدت انبارداری پایداری بیشتری از خود نشان می‌دهند.[۱۰] به طور کلی سه هدف زیر برای خشک کردن مواد غذایی قابل بیان است.

الف- کیفیت محصول

- حداقل کردن واکنش های شیمیایی و بیوشیمیایی

^۱ Lipid oxidation

- انتخاب شرایط به صورتی که در طول خشک کردن فقط آب از ماده ی غذایی جدا شود و مواد دیگر مانند نمک ها و مواد مولد عطر فرار و طعم دهنده، حذف نشود.
- ساختار محصول حفظ شود.
- چگالی کنترل شود.
- بازآپوشی (حل شدن در آب) سریع و با سهولت صورت گیرد.
- ماده ی غذایی در طول مدت انبار شدن، پایدار بوده، به سرد کردن و بسته بندی نیاز کمتری داشته باشد.
- ماده ی غذایی خشک شده رنگ مطلوبی داشته باشد.
- از آلودگی و تقلبات مبرا باشد.

ب- اقتصاد فر آیند

- اتلاف محصول به حداقل برسد.
- جداسازی آب سریع صورت گیرد.
- منبع انرژی ارزان باشد.
- مشکلات حمل و نقل مواد جامد حداقل شود.
- تا حد ممکن عملیات خشک کردن به صورت پیوسته باشد.
- از دستگاه های ساده و غیر پیچیده استفاده شود تا هزینه های تعمیر و نگهداری به حداقل کاهش یابد.

ج- موارد دیگر

- تاثیرات مخرب بر محیط زیست حداقل باشد. [۱۰]

- با توجه به این موارد طراحی فرآیند خشک کردن نیازمند تحلیل دقیق انتقال جرم و حرارت در داخل ساختمان محصول است تا از این طریق بتوان به حداکثر بازده و مناسب ترین کیفیت دست یافت.

خشک کردن فرآیند حذف رطوبت از طریق انتقال همزمان جرم و حرارت می باشد. انتقال حرارت در داخل ساختمان محصول صورت می گیرد و به اختلاف دمای بین سطح محصول و سطح آب در بعضی نواحی درون آن بستگی دارد. چنانچه انرژی حرارتی کافی به آب داده شود تا تبخیر گردد، بخارات از سطح آب درون محصول به سطح آن منتقل می شوند. عاملی که باعث انتشار بخارات مرطوب می شود، تفاوت فشار بخار در سطح آب نسبت به فشار بخار هوا در سطح محصول است. انتقال جرم و حرارت در داخل ساختمان محصول در سطح مولکولی انجام می شود، با این تفاوت که انتقال حرارت تابع ضریب هدایت حرارتی ساختمان محصول بوده، ولی انتقال جرم به انتشار مولکولی بخار آب در هوا بستگی دارد. انتقال جرم و حرارت در سطح محصول به صورت همزمان و از طریق جابجایی انجام می شود. انتقال بخار از سطح محصول به هوا و انتقال حرارت از هوا به سطح به محصول به ترتیب تابع اختلاف فشار بخار موجود و اختلاف دماست. در یک خشک کن، انرژی گرمایی می تواند بصورت هدایت، جابجایی و یا تابش از یک منبع حرارتی به ماده غذایی منتقل شود. [۱۰]

۸-۱- انواع سیستم های خشک کردن مواد غذایی

خشک کردن یکی از قدیمی ترین و با صرفه ترین روش های نگهداری مواد غذایی است. از نقطه نظر محیطی، مصرف انرژی، بهبود منابع غذایی برای جامعه انسانی و کاهش آسیب به ماده غذایی، بهبود تکنولوژی خشک کردن ضروری است. بسته به شرایط و روش خشک کردن با یک ماده اولیه مشابه، ممکن است محصولاتی با خصوصیات کاملاً متفاوت بدست آید. هر نوع روش خشک کردن دارای

پارامترهای مختص به خود است که بایستی به خوبی تنظیم گردند. هر گونه تغییر در این پارامترها منجر به تغییر در سرعت حرکت آب و در نتیجه سرعت خشک کردن خواهد شد. هم اکنون در خشک کردن مواد غذایی از روش های مختلفی استفاده می شود که هر کدام از این روش ها دارای مزایا و معایب مختص به خود هستند.

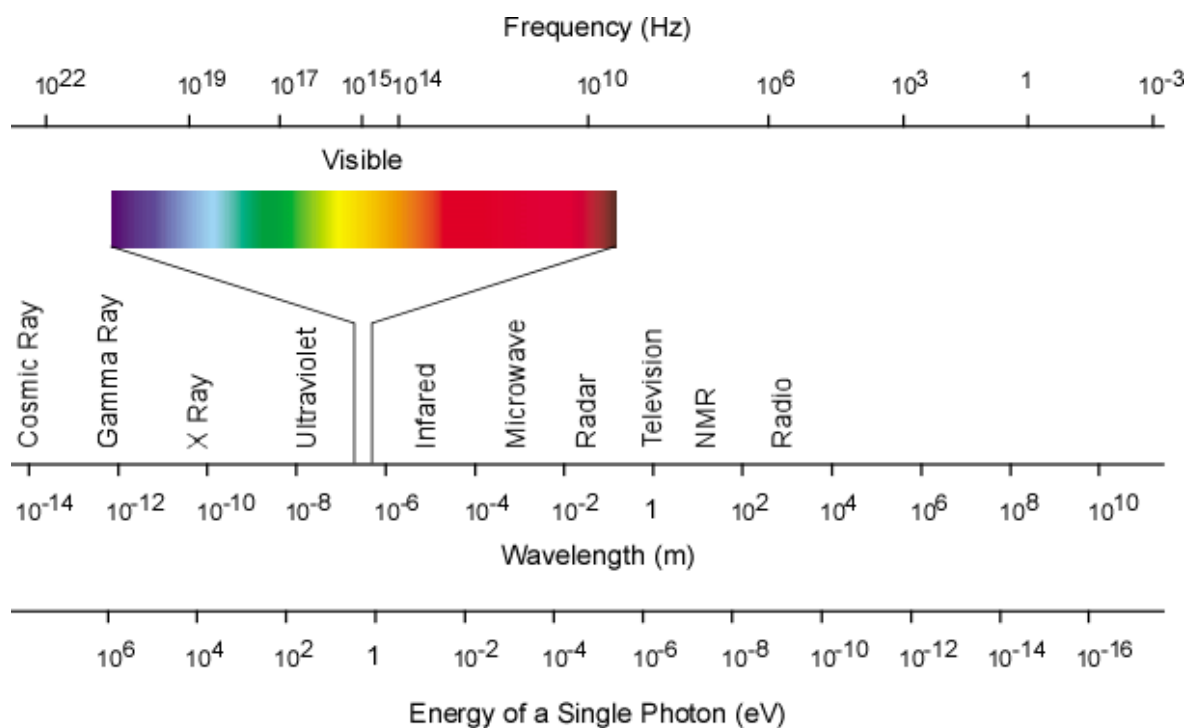
۱-۸-۱- خشک کردن با هوای داغ

خشک کردن با هوای داغ پرکاربردترین عملیات آبیگری در صنایع غذایی و شیمیائی است. کیفیت محصول خشک شده شدیداً با درجه حرارت هوا و ویژگی ابعادی مواد تأثیر می پذیرد. درجه حرارت بالا و زمان های خشک کردن طولانی در روش مرسوم خشک کردن با هوا ممکن است باعث آسیب جدی بر روی طعم، رنگ، ارزش غذایی و کاهش دانسیته توده و ظرفیت آبیگری محصول غذایی شود. این روش باعث کاهش ظرفیت جذب آب و حرکت مواد حلال از بخش های داخلی تر می گردد. امروزه از این روش به تنهایی و یا در ترکیب با روش های دیگر در صنعت خشک کردن مواد غذایی استفاده می گردد.

۱-۸-۲- امواج مایکروویو و مکانیسم حرارت دهی آن

امواج مایکروویو بخشی از طیف الکترومغناطیسی هستند که دارای فرکانس حدود ۳۰۰-۳۰۰۰۰۰ مگاهرتز و طول موج ۱-۰/۰۰۱ متر در هوا می باشند و این طیف بین دی الکتریک و هادون قرمز واقع شده اند.

شکل (۱-۳) طیف امواج الکترومغناطیسی [۱۱]



امواج مایکروویو بر خلاف اشعه ایکس و گاما، قادر به شکستن پیوندهای شیمیایی و آسیب رسانی به مولکول های مواد غذایی نیستند. در روشهای حرارت دهی متداول، گرما از منبع حرارتی خارجی به ماده غذایی منتقل می شود، در صورتی که در روش مایکروویو، حرارت داخل ماده غذایی تولید می شود. دو مکانیسم اصلی تولید حرارت در مایکروویو عبارتند از: پلاریزاسیون یونی و چرخش دو قطبی.

پلاریزاسیون یونی زمانی که یون های موجود در یک محلول شیمیایی به طرف یک میدان الکتریکی حرکت می کنند، روی می دهد. یونهای مثبت و منفی و نمک محلول در غذا نظیر کلرید سدیم در میدان الکتریکی به سمت بار مخالف یون حرکت کرده (سدیم به طرف قطب منفی و کلرید به سمت قطب مثبت)، تکرار تصادف این یون های مهاجر منجر به تولید حرارت می شود. هرچه تعداد دفعات برخورد در واحد زمان بیشتر باشد انرژی جنبشی زیادتر شده و حرارت بیشتری تولید می گردد.

مکانیسم گرم شدن در اثر چرخش دو قطبی بستگی به وجود مولکول های قطبی دارد. همزمان با جذب امواج توسط ماده غذایی مولکولهای دو قطبی (به ویژه مولکول آب) با میدان هم جهت می شوند. وقتی میدان به طور متناوب به کار برده می شود، با معکوس شدن قطبیت میدان، مولکول های قطبی، مجدداً خودشان را در راستای میدان تغییر یافته قرار می دهند. قرار گرفتن مولکول ها به اندازه $10^6 \times 2450$ بار در ثانیه (در امواج با فرکانس ۲۴۵۰ مگاهرتز) در راستای میدان باعث ایجاد اصطکاک و در نتیجه تولید حرارت می شود. پس از جذب انرژی میکروویو و تبدیل آن به انرژی حرارتی، حرارت توسط فرایندهای جابه جایی و هدایت به تمام قسمت های ماده غذایی منتقل می شود.

ویژگی های تعیین کننده در حرارت دیدن مواد غذایی پرتوتابی شده با RF و MW، خواص دی الکتریک آن ها می باشد. این ویژگی ها، ثابت دی الکتریک (ϵ') و فاکتور جذب (ϵ'') می باشند که قابلیت رسانایی الکتریکی و تانژانت افت جذب انرژی رابطه دارند. [۱۲]

$$\epsilon = \epsilon' - j\epsilon'' \quad (1-1)$$

$$\tan \delta = \frac{\epsilon''}{\epsilon'} \quad (1-2)$$

ثابت دی الکتریک (ϵ') تعیین کننده نحوه توزیع میدان الکترو مغناطیسی در داخل ماده و همچنین مقدار انرژی قابل ذخیره در آن می باشد. فاکتور جذب (ϵ'') بیانگر این نکته است که چه مقدار انرژی در داخل بافت ماده غذایی می تواند تولید یا پراکنده شود.

تانژانت افت جذب انرژی نسبت جذب دی الکتریک به ثابت دی الکتریک است. اصطلاح فاکتور یا تانژانت جذب برای نشان دادن میزان افت انرژی میکروویو حین عبور و یا هنگام جذب بوسیله ماده غذایی می باشد. موادی که به میزان زیادی انرژی میکروویو را جذب می کنند مواد جاذب نام دارند.

¹ Dielectric constant

موادی که قابلیت جذب نسبتاً زیادی دارند به راحتی پرتوهای مایکروویو را جذب کرده و دمای آن‌ها را افزایش می‌دهد. در محدوده فرکانسی پرتوهای مایکروویو، چرخش دو قطبی مولکول‌های آب بر سایر ویژگی‌های حرارتی این پدیده حاکم می‌باشد. تغییر قطبیت میدان الکتریکی موجب چرخش دو قطبی مولکول‌های آب می‌شود. در حالت عادی مولکول‌های آب به صورت تصادفی آرایش یافته‌اند، اما در میدان الکتریکی و تحت اثر پرتوهای مایکروویو تغییر آرایش به صورت اجباری انجام می‌شود و در صورتیکه میدان الکتریکی حذف شود مولکول‌های آب بلافاصله آرایش تصادفی خود را باز خواهند یافت و بوسیله میدان الکتریکی که این بار در جهت مخالف دفعه پیش (جریان متناوب) اعمال می‌شود، مولکول‌های آب مجدداً آرایش اجباری متفاوت از مرحله قبل پیدا می‌کنند، این تغییرات در قطبیت میدان الکتریکی به میزان چند میلیون در ثانیه به وقوع می‌پیوندد، که موجب ایجاد اصطکاک و در نهایت تولید حرارت می‌شود. [۱۲]

۹-۱- عوامل موثر بر خاصیت دی الکتریک مواد

۹-۱-۱- محتوای رطوبتی

در دمای 25°C ، آب دارای ثابت دی الکتریک در حدود ۷۵ می‌باشد. ثابت دی الکتریک محصولات با رطوبت بالا به میزان زیادی تحت تاثیر ثابت دی الکتریک بالای آب قرار گرفته و در نتیجه دارای ثابت دی الکتریک بالایی می‌باشند. اثر مستقیم حرارت دهی دی الکتریک، افزایش سریع دمای درونی ماده غذایی بوده که بسته به نحوه توزیع رطوبت در ماده در حال خشک شدن پروفیل حرارتی آن را تغییر می‌دهد. در فرآیند خشک کردن، محتوای رطوبتی می‌تواند به دو صورت باشد: آب آزاد و آب پیوسته. آب آزاد که در فضاهای خالی و بافت متخلخل ماده غذایی وجود دارد، فشار بخار تعادل را تحت تاثیر

قرار می دهد، تاثیر آب پیوسته در این مورد بسیار کمتر است. ثابت دی الکتریک آب پیوسته چیزی در حدود ۰/۰۰۳ و آب آزاد در حدود ۱۲ است. علت این امر رفتارهای متفاوت این دو نوع آب نسبت به چرخش ها و تغییر جهت های میدان الکترومغناطیسی است. بنابراین محصولاتی که دارای محتوای رطوبتی به شکل پیوسته هستند نسبت به آنهایی که رطوبتشان به صورت آزاد و در فضاهای خالی وجود دارد، کمتر در مقابل پرتوهای میکروویو از خود حساسیت نشان می دهند.

تحریک رطوبتی به وسیله میکروویو پدیده ای است که به علت جذب انتخابی انرژی میکروویو در نقاط با محتوای رطوبتی بالا، دیده می شود. همانطور که می دانیم جاهایی که محتوای رطوبتی بالا است، فاکتور جذب نیز بیشتر است. تورنر^۱ و لوفور^۲ این پدیده را پمپ میکروویو نامیدند. علت این پدیده جذب انتخابی انرژی میکروویو و مشخصاً ایجاد گرادیان فشار بخار بین داخل و خارج در مایع و حرکت بخار بطرف سطح ماده غذایی می باشد. این تاثیر، ناشی از واکنش متفاوت آب نسبت به سایر مواد در برابر چرخش، حرارت داخلی و تحریک ایجاد شده بوسیله انرژی الکترومغناطیسی است.

۱-۹-۲- دانسیته

تاثیر دانسیته بر روی خواص دی الکتریک مواد به فاکتور پایین جذب هوا در مقایسه با آب و سایر حلال ها بر می گردد. در موادی با دانسیته کمتر، حضور هوا در فضاهای خالی منجر به کاهش ویژگی های دی الکتریک شده، بنابر این میزان حرارت دهی بوسیله پرتوهای میکروویو کاهش می یابد. [۵]

^۱ Torner

^۲ Lofer

۱-۹-۳- دما

دما می تواند ویژگی های دی الکتریک ماده غذایی را تحت تاثیر قرار دهد. خاصیت دی الکتریک مواد، زیر نقطه انجماد نسبت به شرایط عادی معمولاً کمتر است. ظاهراً ثابت دی الکتریک مایعات تحت تاثیر دما قرار نمی گیرد ولی در فاکتور جذب دی الکتریک با افزایش دما تحت تاثیر قرار می گیرد. بعنوان مثال فاکتور جذب دی الکتریک آب در 25°C برابر ۱۲ است در حالیکه در 95°C به $2/44$ کاهش پیدا می کند. در بعضی مواد جامد نظیر نایلون و اکریلیک^۱ با افزایش دما میزان فاکتور جذب افزایش پیدا می کند که در نتیجه تغییر ساختار ماده در اثر انرژی میکروویو است. این مواد دارای خاصیتی هستند که ضریب حرارتی مثبت در محتوای رطوبتی پایین نامیده می شود و معنی آن افزایش ویژگی های دی الکتریک با افزایش دما می باشد. [۱۲]

۱-۹-۴- ظرفیت گرمایی ویژه

ظرفیت گرمایی ویژه، خصوصیات دی الکتریک ماده غذایی را تحت تاثیر قرار نمی دهد، اما می تواند توجه کننده این نکته باشد که چرا بعضی مواد در اثر اعمال انرژی میکروویو سریعتر گرم می شوند. ظرفیت گرمایی ویژه نشان دهنده مقدار حرارت مورد نیاز برای بالا بردن دمای واحد جرم ماده غذایی به میزان یک درجه می باشد. از این رو موادی که ظرفیت گرمایی ویژه پایین تری دارند، در پرتو دهی ثابت با انرژی میکروویو سریع تر از موادی که ظرفیت گرمایی ویژه بالاتری دارند گرم می شوند. [۱۲]

۱-۹-۵- رسانایی حرارتی

رسانایی حرارتی به همراه ثابت دی الکتریک و فاکتور جذب دی الکتریک، بیانگر کارایی انرژی میکروویو

^۱ acrylic

در حرارت دهی به ماده غذایی هستند. رسانایی حرارتی، ویژگی های دی الکتریک ماده غذایی را تحت تاثیر قرار نمی دهد. اما در توزیع و انتقال انرژی تولید شده در سراسر بافت ماده غذایی نقشی مهم بازی می کند. اهمیت این عامل زمانی افزایش پیدا می کند که پرتوهای مایکروویو حرارت را بصورت غیر یکنواخت در بافت ماده غذایی تولید کرده و در نهایت برای توزیع بهتر انرژی حرارتی بهتر است به صورت پالسی باشد تا فرصت کافی جهت انتقال و توزیع یکنواخت حرارت بوسیله رسانایی در بافت ماده غذایی بوجود آید. در صورتی که ماده غذایی جهت انتقال حرارت تولید شده بوسیله مایکروویو، دارای قابلیت رسانایی خوبی نباشد، حرارت دادن و یا خشک کردن متناوب تاثیر خوبی نخواهد داشت. بکارگیری پرتوهای مایکروویو به صورت پالسی نه تنها فرصت انتقال حرارت را در اختیار ماده غذایی قرار می دهد، بلکه موجب می شود ماده غذایی به صورتی صحیح خشک شود. با جلوگیری از حرارت دادن بیش از حد بعضی نواحی به علت اختلاف در ویژگی های دی الکتریک در داخل محصول بوسیله فرآیند پالسی، این هدف قابل دستیابی است. [۱۲]

۱-۹-۶- عمق نفوذ

توانایی و قابلیت پرتوهای مایکروویو در نفوذ به عمق ماده را عمق نفوذ می نامند. و این عمقی است که در آن میزان انرژی پرتوها به ۳۷٪ مقدار اولیه شان کاهش پیدا می کند. عمق نفوذ را نمی توان یکی از ویژگی های ماده غذایی دانست بلکه حاصل اثر ترکیبی از ویژگی های آن است. طول موج، ثابت دی الکتریک و فاکتور جذب دی الکتریک همگی عمق نفوذ را تحت تاثیر قرار می دهند. [۱۲]

۱-۹-۷- تجهیزات مایکروویو

تجهیزات مورد استفاده در مقیاس صنعتی دارای اجزاء مهم منبع تغذیه، مولد، هدایت کننده و بکار گیرنده امواج می باشند. اهمیت سایر اجزاء مانند تغییر دهنده رکتی فایر و ابزار های کنترل انرژی مایکروویو

اطمینان از یکنواختی و ایمنی کار است. نقش منبع تغذیه، دریافت انرژی الکتریکی و تبدیل آن به ولتاژ بالایی است که مورد نیاز مگنترون^۱ می باشد. معمولاً مگنترون به چند هزار ولت، جریان مستقیم نیاز دارد. مگنترون یا لوله جریان قوی، نوسان کننده ای است که توانایی تبدیل الکتریسیته ورودی به انرژی مایکروویو را دارد. هدایت کننده یک مجرای مکعب مستطیلی تو خالی است که انرژی تولید شده را از مگنترون به محفظه آون انتقال می دهد. بکار گیرنده از فلز ساخته شده و دارای انواع مختلفی است اما نوع محفظه ای آن در صنعت بیشترین کاربرد را دارد. در هر صورت نحوه طراحی و نوع بکار گیرنده تابع نوع کاربرد آن است. میزان کارایی کلی تبدیل انرژی الکتریکی به مایکروویو ۴۵ تا ۵۰ درصد است. افت های آن شامل افت حاصل از تبدیل جریان متناوب به مستقیم، جریان مستقیم به پرتوهای مایکروویو و نیز هدر رفتن انرژی در هدایت کننده و بکار گیرنده است. مولد های مایکروویو که در حال حاضر مورد استفاده قرار می گیرند دارای یک لوله تو خالی تحت خلاء که در آن یک تفنگ الکترونی قرار دارد، می باشد. سه نوع رایج از مولد های مایکروویو مگنترون ها، کلیسترون ها و لوله های منتقل کننده امواج می باشند.

۱-۱۰- خصوصیات خشک کردن با پرتوهای مایکروویو

آرزوی رهایی نسبی از مشکلات ناشی از خشک کردن با هوای داغ و جلوگیری از کاهش کیفیت و دستیابی به فرایند گرمایی مؤثر و سریع منجر به افزایش کاربرد انرژی مایکروویو برای خشک کردن مواد غذایی شده است. استفاده از هوای داغ برای جداسازی آب آزاد نزدیک به سطح بسیار مؤثر می باشد در حالیکه استفاده از انرژی مایکروویو روشی مفید در جداسازی آب آزاد داخلی است. بخاطر هدایت گرمایی پائین ماده غذایی، انتقال گرمایی به بخش های داخلی غذا طی گرم سازی مرسوم

^۱ Magnetron

محدود می شود و با جداسازی آب انتقال گرمایی مواد جامد بخاطر کاهش همرفتی به میزان مشخصی کاهش خواهد یافت. روش مایکروویو در مقایسه با روش هوای داغ بخاطر نفوذ امواج مایکروویو به بدنه محصول از کاهش کیفیت محصول جلوگیری می نماید و توزیع سریع و یکنواخت انرژی در محصول ایجاد می نماید.

۱-۱۰-۱- مزایای خشک کردن با مایکروویو

الف) کوتاه نمودن زمان خشک کردن

زمان فرآیند می تواند به میزان ۵۰ درصد کاهش یابد. در برخی مقالات به کوتاه شدن زمان خشک شدن به میزان ۵۰ تا ۸۰ درصد و در بعضی نیز به ۲۵ تا ۹۰ درصد نیز اشاره شده است.

ب) بهبود کیفیت محصول

پژوهش های صورت گرفته نشان داده است که استفاده از انرژی مایکروویو به صورت ترکیبی همراه با سایر روش های خشک کردن، موجب بهبود کیفیت فراورده پایانی شده است. در بعضی موارد حذف پدیده سخت شدن سطح، تنش های داخلی، بازده بیشتر و کاهش از دست رفتن ویتامین C و عطر محصولات خشک شده با مایکروویو نسبت به سایر روش های دیگر بوده است. برخی محققین معتقدند که استفاده از خشک کن هوا و متعاقب آن مایکروویو موجب بهبود شاخص های کیفی محصول می شود.

ج) حرارت دادن سریع و حجمی

در مقایسه با روش های حرارت دهی رایج به علت مکانیسم حرارات دهی حجمی، حرارت دادن ماده غذایی با استفاده از امواج مایکروویو بسیار سریع تر انجام می شود. علاوه بر این حرارت در داخل بافت ماده غذایی تولید می شود و نیازی به انتقال آن با روش های انتشار و رسانایی به داخل ماده غذایی

نیست.

(د) سرعت خشک شدن بالاتر

طی خشک شدن ماده غذایی با استفاده از روش های رایج ابتدا رطوبت سطحی ماده غذایی خارج می شود، سپس تحت تاثیر مکانیسم انتشار رطوبت از عمق حرکت کرده جایگزین رطوبت سطح می شود. پرتودهی مایکروویو منجر به ایجاد حرارت داخلی شده در نتیجه افزایش دما، فشار داخلی افزایش یافته و این فشار موجب رانده شدن رطوبت از عمق به طرف سطح شده و امکان خشک شدن سریع تر را فراهم خواهد نمود. علاوه بر این برخی محققین گزارش کرده اند که مزیت عمده کاربرد انرژی مایکروویو نسبت به روش رایج کارایی بسیار بالاتر آن در مرحله سرعت نزولی خشک کردن است. [۱۳]

(د) تولید بافت حجیم شده و متخلخل

در سیستم های مایکروویو، پرتوها می توانند به سادگی از خلال دیواره های خشک مقاوم در برابر انتقال حرارت عبور کرده خود را به لایه های مرطوب برسانند و در آنجا بصورت مستقیم توسط آب جذب شده به حرارت تبدیل شوند. جذب سریع انرژی موجب تبخیر شدید آب شده که این جریانی فرار و دمنده به طرف خارج ایجاد می نماید. علاوه بر بهبود و سرعت بخشیدن به فرآیند خشک کردن این جریان خروجی می تواند تا حدودی از بروز چروکیدگی و پلاسیدگی محصول در حال خشک شدن جلوگیری نماید، بنابراین ویژگی باز جذب آب بهبود می یابد.

۱-۱۰-۲- معایب استفاده از مایکروویو

حرارت دهی غیر یکنواخت بر اثر تجمع بالای حرارت در لبه ها و گوشه های محصول منجر به بیش گرم شدگی موضعی می گردد. باید روشی برای کنترل انتقال جرم بوسیله کنترل انرژی ورودی بکار گیرد.

زیرا انتقال سریع جرم منجر به آسیب به بافت غذا می گردد که از آن جمله می توان به پف کردگی اشاره نمود.

- هزینه نصب اولیه بالای میکروویو استفاده صنعتی آنرا محدود ساخته است.
 - هزینه عملیاتی بسیار بالا است که از آن جمله می توان تعویض مگنترون را نام برد.
 - عدم خروج برخی مواد فرار نامطلوب به دلیل کوتاه بودن زمان حرارت دهی
- گزارش‌هایی مبنی بر پایین بودن کیفیت و نیز از دست رفتن عطر در پودر تولید شده از آبمیوه‌ها بوسیله این روش نسبت به آبمیوه تازه وجود دارد. دلیل این اتفاق احتمالا پایین بودن دما پیرامون محصول است که از انجام تبخیر سطحی و نیز ایجاد یک لایه سخت سطحی جلوگیری کرده و در نتیجه مواد فرار و عطری می‌توانند به سهولت از بافت محصول خارج شوند. دوم اینکه زمان کوتاه فرآیند اجازه وقوع واکنش‌های چند مرحله‌ای مانند واکنش مایلارد و تولید بعضی عطرهای مخصوص و احتمالا دلخواه را نمی‌دهد. گزارش‌هایی مبنی بر غیر قابل قبول بودن عطر و طعم محصولات خشک شده با این روش از نظر مصرف کننده وجود دارد و دلیل آن سوختگی و خرابی بافت محصول عنوان شده است.
- بعضی آسیب‌های فیزیکی در نتیجه بالا رفتن دما بصورت موضعی - حتی با کاهش رطوبت و فاکتور جذب - مشاهده می‌گردد. ترکیب مواد شیمیایی موجود در بافت ماده غذایی موجب غیر یکنواختی در توزیع رطوبت و در نتیجه غیر یکنواختی در حرارت دیدن ماده غذایی می‌شود. تعدادی از پژوهشگران عقیده دارند هرچند که با استفاده از میکروویو می‌توان سریع‌تر به نقطه تعادلی رسید اما نمی‌توان از آن عبور کرد، آنها اعلام کردند که استفاده از میکروویو در این حالت موجب سوختن و سیاه شدن محصول می‌شود.

۱-۱۰-۳- ویژگی های کیفی محصولات خشک شده

ویژگی هایی که تحت عنوان کیفیت قرار می گیرند را می توان به صورت زیر طبقه بندی کرد:

- (۱) ویژگی های ساختمانی، مانند دانسیته، تخلخل، اندازه منافذ و حجم مخصوص.
- (۲) ویژگی های ظاهری، مانند رنگ و ظاهر محصول.
- (۳) ویژگی های بافتی، مانند رفتار محصول در آزمایش های فشار، تحلیل رفتن تنش، و آزمایش های کشش.
- (۴) ویژگی های حرارتی، حالات محصول را شامل می شود: شیشه ای، کریستالی، لاستیکی.
- (۵) ویژگی های حسی، مانند: عطر، طعم، مزه.
- (۶) ویژگی های تغذیه ای مانند: میزان ویتامین، پروتئین و سایر مواد مغذی.
- (۷) ویژگی های مربوط به جذب مجدد آب، مانند: سرعت و ظرفیت آبدگیری

فصل ۲:

مروری بر مقالات

۱-۲- مروری بر کار گذشتگان

مدل‌سازی‌های ریاضی و مطالعات تجربی متعددی در مورد مشخصه‌های خشک کردن محصولات سیب از جمله برش‌های سیب [۱۴-۱۶] تکه‌های استوانه‌ای سیب و سیب مربعی شکل [۱۷] انجام گرفته‌اند. فتون و همکارانش [۱۸] از تفاله سیب برای مقایسه دو روش خشک کردن استفاده کرده‌اند. این دو روش، خشک کردن مادون قرمز و روش متداول آون هستند. میلزارک [۱۹] و همکارانش با استفاده از انرژی خورشیدی و یک درام خشک کردن تفاله میوه جات و همچنین سبزیجات را مورد بررسی قرار دادند آنها از یک خشک کن دو محفظه در مقیاس آزمایشگاهی استفاده کردند. آنها با بکارگیری کلکتور توانستند ۴۰ کیلووات انرژی خورشیدی را جذب کنند. متغیرهای مستقل در پژوهش آنها ۱- آب اضافه، ۲- زمان خاموش شدن، ۳- دمای سطح درام بود. متغیر وابسته در پژوهش رطوبت و رنگ پوسته تفاله انتخاب شد. آنها توانستند شرایط بهینه خشک شدن مناسب با حداقل تغییر رنگ را استخراج کنند. کار پژوهشی آنها نشان داد انرژی حرارتی خورشیدی پتانسیل خوبی برای گرمای خشک کردن میوه و سبزیجات دارد.

درتای و ژو [۲۰] در خشک کردن نعنای با دو روش هوای داغ و مایکروویو بیان کردند مایکروویو می‌تواند مدت زمان خشک کردن برگ نعنای را در مقایسه با خشک کردن با هوای داغ ۹۰-۸۵ درصد کاهش دهد. علاوه بر این، تغییر رنگ در طول خشک کردن مورد بررسی قرار گرفت. پارامترهای رنگی برگ نعنای خشک شده از نمونه‌های خشک شده با مایکروویو بهتر بود. همچنین آزمایشات جذب مجدد آب نشان داد میزان جذب آب در نمونه‌های خشک شده با مایکروویو اختلاف معنی داری نسبت به نمونه‌های خشک شده با هوای داغ دارند.

در مطالعات ازبک و دادالی [۲۱] در مورد خشک کردن برگ‌های نازک نعنای توسط مایکروویو نتایج حاکی از آن بود که با افزایش قدرت خروجی مایکروویو از ۱۸۰ تا ۹۰۰ وات، زمان خشک شدن از ۵/۱۲ تا ۳۰ دقیقه کاهش می‌یابد. اخیراً استفاده از روش‌های ترکیبی خشک کردن نیز جهت بهینه‌سازی کیفیت محصول نهایی و کاهش زمان فرآیند، اهمیت بیشتری یافته است.

نتایج آزمایشات جوادی یانبلاغ و همکاران [۲۲] در تولید سیب خشک به وسیله خشک کن خورشیدی و روش خشک کردن یا آون هوای گرم نشان داد که سرعت خشک شدن در آون، ۷۵ درصد بیشتر از خشک کردن در خشک کن خورشیدی است و همچنین کمترین زمان خشک کردن با روش هوای خشک بود.

نصرالهی و همکاران [۲۳] در خشک کردن با آون و مایکروویو برگ گلابی سردشت بیان کردند با افزایش دمای آون و توان مایکروویو مقدار قند کل افزایش و اسید اسکوربیک کاهش یافت. میزان اتلاف اسید اسکوربیک در خشک کردن با مایکروویو در مقایسه با آون کمتر بود. در خشک کردن مایکروویو، زمان لازم برای رسیدن به رطوبت نهایی مورد نظر کاهش یافت. و در نهایت خشک کردن با مایکروویو در مقایسه با آون نتایج بهتری را نشان داد.

مهدی نژاد شانی و همکاران [۲۴] ویژگی‌های آنتی اکسیدانی عصاره‌های مختلف علف چشمه را بررسی و گزارش نمودند که بیشترین بازده استخراج در عصاره متانولی و بیش‌ترین میزان ترکیبات فنولی در عصاره استنی مشاهده شد.

در تحقیقات استاذزاده و همکارانش [۲۵] اثر روش‌های مختلف خشک کردن بر ویژگی‌های کمی و کیفی گیاه علف چشمه شامل افت رطوبت، فعالیت آنتی اکسیدانی، مقادیر ویتامین ث، فسفر، کلسیم و آهن بررسی شد. جهت خشک کردن برگ‌ها از خشک کن‌های آون هوای داغ با دماهای ۵۰، ۴۰ و ۶۰ درجه سانتیگراد، مایکروویو با توان‌های ۱۸۰، ۳۶۰ و ۴۵۰ وات و روش آفتابی سنتی استفاده شد. از نظر مدت

زمان خشک شدن، طولانی ترین و کوتاه ترین زمان به ترتیب مربوط به تیمارهای خشک شده به وسیله آفتاب به مدت ۱۹۲۰ دقیقه و مایکروویو ۴۵۰ وات به مدت ۲۲ دقیقه بود. در نمودارهای شدت افت رطوبت محصول، یک دوره سرعت ثابت و یک دوره سرعت نزولی دیده شد. با افزایش توان مایکروویو و دمای آون هوای داغ سرعت خشک کردن افزایش و زمان آن کاهش یافت. در روش آفتاب به دلیل نوسانات دمایی، خشک کردن با سرعت کمتری انجام شد. بیشترین میزان ویتامین ث، آهن و کلسیم به ترتیب در تیمارهای خشک شده با آون ۶۰ درجه سانتی گراد (۶/۹ میلی گرم بر صد گرم)، آفتاب (۵۱۹/۸ppm) و مایکروویو ۱۸۰ وات (۲۱۰/۶۸ گرم بر کیلوگرم) به دست آمد. همچنین، بیشترین مقدار فسفر در خشک کردن با آون ۴۰ درجه سانتی گراد (۰/۵۲۳ گرم درصد) حاصل گردید. به طور کلی، تیمارهای خشک شده با آون و مایکروویو با توجه به دارا بودن محتوای رطوبت کمتر در یک وزن ثابت نسبت به تیمارهای خشک شده با آفتاب، مقدار اصلاح بیشتری را در خود حفظ نمودند. بالاترین میزان فعالیت آنتی اکسیدانی به تیمار خشک شده با مایکروویو ۳۶۰ وات تعلق داشت. با توجه به نتایج می توان اظهار نمود که خشک کردن گیاه علف چشمه با استفاده از آون ۴۰ درجه سانتی گراد و مایکروویو با توان ۱۸۰ وات از این جهت که میزان مواد مؤثره در گیاه به طور قابل ملاحظه‌ای نسبت به تیمارهای دیگر حفظ میشود، مطلوب تر می باشد.

در تحقیق عسکری و همکارانش [۹] برشهای نازک سیب (به قطر ۲۲ میلیمتر و ضخامت ۴ میلیمتر) واریته زرد لبنانی با استفاده از روش ترکیبی پوشش دادن، خشک کردن با هوای داغ و انرژی مایکروویو، تحت فرآیند قرار گرفتند. جهت جلوگیری از قهوه ای شدن آنزیمی نمونه ها درحین فرآیند، روش آنزیم بری حرارتی با آب داغ (یک دقیقه، ۸۰°C)، مورد استفاده قرار گرفت. به منظور ایجاد محصولی با بافت حجیم و متخلخل از محلول های ۲٪ نشاسته، پکتین و کربوکسی متیل سلولز به همراه ۱٪ کلسیم کلراید

استفاده شد. پس از فرآیندهای آنزیم بری، پوشش دادن (۱ دقیقه، دردمای اتاق) خشک کردن با هوای داغ (70°C و سرعت جریان ۱ متر بر ثانیه) و نهایتاً خشک کردن با انرژی مایکروویو (۳۰۰ وات، ۱۰ ثانیه)، محصولی با بافت حجیم و متخلخل بدست آمد که نسبت به محصول خشک شده در خشک کن های مرسوم هوای داغ دارای ویژگی های کیفی بهتری می باشد. از مهمترین ویژگیهای کیفی محصولات خشک شده به این روش تخلخل بالای آن است.

در تحقیق جیری^۱ [۲۶] و همکارانش قارچ های دکمه ای تحت یک سیستم اصلاح شده مایکروویو - خلاء با انرژی خروجی ۰ تا ۶۰۰ وات خشک شدند. اثر متغیر های خشک کردن مثل انرژی مایکروویو، فشار سیستم، ضخامت محصول بر روی منحنی های خشک کردن و ویژگی های باز جذب آب بررسی شدند. خشک کن هوای داغ تحت درجه حرارت های مختلف برای مقایسه با خشک کن ترکیبی استفاده شد. خشک کن هوای داغ - مایکروویو ۷۰ تا ۸۰ درصد زمان خشک کردن را کاهش داد. محصولات خشک شده ویژگی های باز جذب بهتری را نشان دادند. فشار سیستم اثر اندکی بر روی نرخ خشک کردن داشت. ویژگی باز جذب آب با فشار سیستم تاثیر گرفت. اثر روش های مختلف خشک کردن بر روی ساختار ورقه های قارچ خشک شده مقایسه شدند. روش خشک کردن با هوای داغ محصولی با چروکیدگی بالا و تخلخل کمتری ایجاد می کند. ولی در روش ترکیبی بخاطر کاهش زمان و درجه حرارت ساختار متخلخلی دیده شد.

نانتاوان تردتایی^۲ و ویبیاو زو^۳ [۲۷] بررسی شرایط خشک کردن برگ نعناع با روش ترکیبی مایکروویو - خلاء و همچنین خشک کردن آن تحت هوای داغ پرداختند. در این تحقیق برای خشک کردن تحت مایکروویو - خلاء از شدت توان های مایکروویو برابر با ۸، ۹/۶ و ۱۱/۲ که فشاری برابر با ۱۳/۳۳ می

¹ Giri² Nantawan Therdthai³ Weibiao Zhou

باشد استفاده شد. برای خشک کردن با هوای داغ از دو دمای هوای ۶۰ و ۷۰ درجه سانتیگراد استفاده شد. مدل های فیک و لوئیس به منظور توصیف سینتیک خشک کردن تحت شرایط مختلف، مورد استفاده قرار گرفت. نتایج نشان داد که خشک کردن تحت مایکروویو - خلا می تواند زمان خشک کردن برگ نعنای را به اندازه ی ۹۰-۸۵٪ بیشتر از خشک کردن تحت هوای داغ کاهش دهد. به علاوه، تغییرات رنگ در طول خشک کردن مشاهده گردید. L^* ، a^* و b^* حاصل از برگ های نعنای خشک شده تحت خلا و مایکروویو، بالاتر از آنهایی که تحت هوای داغ خشک شدند، بود. از طریق بررسی میکروگراف های الکترونی اسکن شده، مشاهده گردید که نمونه های خشک شده تحت مایکروویو - خلا دارای منافذ بیشتر و ساختار منظم تر از آنهایی که تحت هوای داغ خشک شدند، هستند. نتایج حاصل از آزمایشات مربوط به آبیگری مجدد در دمای ۳۰ درجه سانتیگراد سرعت آبیگری مجدد نمونه های خشک شده تحت مایکروویو - خلا در شدت توان های مایکروویو برابر با ۹/۶ و ۱۱/۲ به طور مشخصی بیشتر از نمونه های خشک شده تحت هوای داغ ۶۰ و ۷۰ درجه سانتیگراد بود.

آدام فیگل^۱ [۲۸] به بررسی ویژگی های کیفی و سینتیک خشک کردن چغندر خشک شده تحت هوای داغ و مایکروویو - خلا، پرداخت. او ابتدا تا رسیدن به محتوای رطوبت $db \frac{kg}{kg}$ ۰/۲۷ از هوای داغ ۶۰ درجه سانتیگراد جهت خشک کردن چغندر استفاده کرده و در ادامه از روش ترکیبی مایکروویو - خلا با توان های مایکروویو برابر با ۲۴۰، ۳۶۰ و ۴۸۰ وات به منظور تکمیل فرآیند خشک کردن استفاده نمود. نمونه های کنترل با روش خشک کردن انجمادی، خشک شدند. سینتیک خشک کردن چغندر با استفاده از توابع نمایی توضیح داده شد. نتایج نشان داد که خشک کردن تکمیلی با روش مایکروویو - خلا زمان کل خشک کردن را کاهش داده و همچنین میزان چروکیدگی را در مقایسه با خشک کردن تحت هوای

^۱ Adam Figiel

داغ کاهش می دهد. در دوره ی دمایی نزولی یک افزایش مشخصی در پارامترهای L^* ، a^* و b^* دیده شد. نمونه هایی که تحت مایکروویو- خلاء خشک شدند، پتانسیل آگیری مجدد بهتر و ظرفیت آنتی اکسیدانی بالاتر از آنهایی که تحت هوای داغ خشک شدند، داشتند. افزایش توان مایکروویو و کاهش زمان خشک کردن اولیه با هوای داغ، کیفیت چغندرهای خشک شده به روش ترکیبی را افزایش داد.

لویی هانگ^۱ و همکارانش [۲۹] در تحقیقی به بررسی اثر روش خشک کردن ترکیبی روی ترکیبات، بافت، آروما و ریز ساختار برش های سیب، پرداختند. در این تحقیق برش های سیب با روش خشک کردن ترکیبی و همچنین با روش خشک کردن انجمادی^۲ (FD) خشک گردیدند. استفاده از روش انجمادی (FD) در ابتدای فرآیند خشک کردن و ادامه دادن آن به وسیله روش خشک کردن ترکیبی مایکروویو- خلاء^۳ (MWVD)، در مقایسه با نمونه هایی که فقط با روش انجمادی خشک شده بودند، نمونه های خشک شده با میزان قند کاهش یافته و پکتین کل بیشتر و همچنین میزان فنول کل کمتر، ایجاد کرد. باقیمانده ی آروما در نمونه های خشک شده با روش ترکیبی $MWVD + FD$ نسبت به نمونه های خشک شده با روش FD وضعیت بدتری داشت. کاربرد مایکروویو اثر مشخصی روی فنول کل، پکتین و آروما داشت. به علاوه، حرارت بالا در زمان طولانی تر در مرحله ی ابتدایی فرآیند و دمای بالا در زمان کم در مرحله بعدی (خشک کردن با مایکروویو- خلاء)، در طول فرآیند خشک کردن ترکیبی $MWVD + FD$ به ترتیب میزان قند کاهش یافته کمتر و وضعیت بدتری برای باقیمانده آروما ایجاد می کرد. همچنین سرعت خشک کردن بالا در فرآیند خشک کردن تحت مایکروویو- خلاء ایجاد ساختار سلولی بدتری کرد.

¹ Lue-Lue Huang

² freeze drying

³ combined vacuum microwave drying methods

زنفنگ لی^۱ و همکارانش [۳۰] در تحقیقی به کنترل سرعت خشک کردن در مرحله میانی خشک کردن با مایکروویو پرداختند. خشک کردن مایکروویوی سیب در دمای ثابت از منحنی های خشک کردن خاصی پیروی می کند. مرحله ی میانی فرآیند خشک کردن، سرعت خشک کردن و تبخیر رطوبت بیشتری را نشان می دهد. ضمناً، عطر و طعم های بیشتری در این مرحله از بین می رود و رنگ سطح کم می گردد. به منظور بهبود اثرات خشک کردن، منحنی های خشک کردن در این مطالعه کنترل شدند و تغییر پیدا کردند. فرآیند خشک کردن کنترل شده منجر به پروفیل دمایی ایتیمایز شده گردید. به منظور ساده کردن روش های خشک کردن، سیب ها مجدداً با پروفیل دمایی به دست آمده، در حالی که منحنی های خشک کردن به صورت آنلاین مشاهده می گردید اما کنترل نمی شد، خشک گردیدند. بر اساس نتایج، کاهش سرعت خشک کردن در مرحله ی میانی می تواند کیفیت محصول را از لحاظ رنگ، طعم، مزه و ظاهر بهبود بخشد. این در حالی است که زمان خشک کردن و مصرف انرژی همچنان قابل قبول می باشد. [۳۸]

کارینا دوروفجوا^۲ و همکارانش [۳۱] در تحقیقی محتوای ویتامین C را در نوعی توت خشک شده به روش ترکیبی مایکروویو-خلأ و همچنین خشک شده تحت هوای داغ، مورد بررسی قرار دادند. نمونه مورد آزمایش به صورت حرارتی و مکانیکی به منظور تبخیر بهتر رطوبت در فرآیند خشک کردن، انجام گرفت. در طول آزمایشات نمونه ها با هوای داغ ۵۰ درجه سانتیگراد با سرعت $1/2 \frac{m}{s}$ خشک شدند. محتوای رطوبت آنها برابر با ۹٪ بود. پارامترهای کیفی که در طول آزمایش ها بررسی شد شامل محتوای رطوبت (به روش خشک کردن در آون) و محتوای ویتامین C (LVS EN 14130:2003) بود. از طریق آزمایش ثابت شد که زمان خشک کردن نمونه ها با روش های مختلف خشک کردن اساساً به

¹ Zhenfeng Li² Karina Dorofjeva

وضعیت و نوع پیش فرآیند بستگی دارد. در طول فرآیند خشک کردن در مدت ۱۰ دقیقه محتوای رطوبت نمونه ها از میانگین ۹۴٪ و ۸۶٪ به ۹٪ کاهش یافت. با توجه به اینکه ویتامین C کمترین مقاومت را در بین کل ویتامین ها دارد و می تواند به آسانی در طول فرآیندها و نگهداری، از بین برود و همچنین مضرتترین فاکتور برای ویتامین C در معرض نور، اکسیژن و حرارت طولانی قرار گرفتن می باشد، در این تحقیق مشخص گردید که از بین رفتن ویتامین C در نمونه های خشک شده با روش ترکیبی مایکروویو-خلأ در مقایسه با هوای داغ، کمتر می باشد.

کریستین اچ سامن^۱ و همکارانش [۳۲] روش ترکیبی مایکروویو-خلأ را مورد بررسی قرار دادند. آنها در این تحقیق بیان کردند که خشک کردن تحت مایکروویو-خلأ یک روش خشک کردن مؤثر و سریع می باشد و میتواند باعث دستیابی به خصوصیات منحصر به فرد و بهبود کیفیت محصولات در مقایسه با محصولات خشک شده به روش های قدیمی، گردد. آنها همچنین به این نتیجه رسیدند که از آنجایی که خلأ نقطه ی جوش آب را کم می کند باعث کاهش دمای فرآیند خشک کردن می گردد. توان مایکروویو و فشار خلأ روی سرعت خشک کردن مؤثر می باشند و به دلیل اینکه دماها در طول فرآیند خشک کردن تقریباً پایین نگه داشته می شوند و خشک کردن با سرعت در فشار اکسیژن پایین اتفاق می افتد، ترکیبات غذایی حساس به اکسیداسیون و تخریب حرارتی می توانند در سطح بالاتری نسبت به خشک کردن با هوای داغ، حفظ گردند.

در تحقیق جین یانگ^۲ و همکارانش [۳۳] اثر روش های مختلف خشک کردن (خشک کردن با هوای داغ، خشک کردن با مایکروویو و خشک کردن انجمادی تحت خلأ) روی فعالیت آنتی اکسیدانی سیب زمینی شیرین مورد بررسی قرار گرفت. طبق نتایج بدست آمده، سیب زمینی شیرین خشک شده تحت

¹ Christine H Scamen

² Jing Yang

مایکروویو، بیشترین فعالیت آنتی اکسیدانی و نمونه های خشک شده تحت هوای داغ کمترین فعالیت را دارا می باشند.

در تحقیقی دیگر ورقه های کیوی با ضخامت ۵/۰۳ میلی متر توسط مسکن^۱ و همکاران [۳۴] در معرض خشک کن ترکیبی هوای داغ - مایکروویو قرار گرفتند. سرعت خشک کردن، چروکیدگی، ظرفیت آبدگیری مجدد مقایسه شدند. سرعت خشک کردن افزایش و زمان آن کاهش یافت. چروکیدگی طی مایکروویو بیشتر از هوای داغ بود. کمترین چروکیدگی با روش ترکیبی دیده شد.

بوده‌ریو^۲ و همکاران [۳۵] تغییرات ترکیبات آروماتیک موز را طی دوره رسیدن و هوای داغ بررسی نمودند و در بررسی دیگری نمونه های موز به سه روش خشک کن هوای داغ، مایکروویو و ترکیب دو روش فراوری شدند. استفاده از مایکروویو در انتهای فرایند زمان خشک کردن را تا ۶۴٪ کاهش داد. رنگ موزها روشن تر بود و مقدار جذب آب بالاتر شد.

اگنیزکا ناویرسکا^۳ و همکارانش [۳۶] تحقیق در رابطه با بکارگیری روش های خلاء- مایکروویو، خلاء و خشک کردن انجمادی در مقایسه با خشک کردن انتقالی کدو تنبل، انجام دادند. طبق نتایج بدست آمده هر کدام از این روشها موثرتر و بهتر از روش خشک کردن انتقالی می باشند و در عین حال سرعت آنها نیز بیشتر می باشد.

رویز دیاز^۴ [۳۷] ورقه های میوه پرتقال را تحت خشک کن ترکیبی مایکروویو - هوای داغ قرار داد و مدل آبدگیری - باز جذب آب را بررسی نمودند.

پیوترووسکی^۵ و همکاران [۳۸]، توت فرنگی را با استفاده از روش ترکیبی مایکروویو- هوای داغ خشک

¹ Maskan

² Boudhriou

³ Agnieszka Nawirska

⁴ Ruiz Diaz

⁵ Piotrowski

کرده و تأثیر آبیگری اسمزی بر توت فرنگی های خشک شده با این روش را بررسی کردند. افزایش انرژی میکروویو در روش خشک کردن ترکیبی، بدون آنکه تحت تأثیر انجام یا عدم انجام فرآیند اسمزی قرار بگیرد، بر کاهش زمان فرآیند مؤثر بوده و کاربرد آبیگری اسمزی قبل از خشک کن ترکیبی اثری بر زمان خشک کردن نهایی نداشت.

برگ های جعفری توسط سویسال^۱ [۳۹] در یک آون میکروویو خانگی خشک شدند. اثرات انرژی خروجی میکروویو بر زمان خشک کردن و سرعت خشک کردن و کیفیت محصول نهایی از نظر رنگ بررسی شد. با پیشرفت فرآیند و کاهش رطوبت محصول، در جذب انرژی میکروویو کاهش دیده شد که خللی در سرعت خشک کردن ایجاد نمود. از نظر رنگ با اعمال انرژی میکروویو محصول رنگ سبز خوبی را نشان داد. در نتیجه در مقایسه با استفاده از هوای داغ به تنهایی میکروویو زمان خشک کردن را شدیداً کاهش می دهد و کیفیت محصول را بالا می برد.

وونگ^۲ و همکاران [۴۰] از یک آون میکروویو آزمایشگاهی و با انرژی ورودی ۱۰۰ تا ۱۰۰۰ وات با فاصله زمانی ثابت برای خشک کردن ورقه های میوه هلو با وزن های متفاوت استفاده نمودند. باز جذب آب با افزایش انرژی میکروویو افزایش می یابد همینطور در مصرف انرژی نهایی خشک کردن صرفه جویی می شود.

هردیا^۳ و همکاران [۴۱] خشک کردن گوجه فرنگی را بوسیله خشک کن ترکیبی میکروویو - اسمزی انجام دادند و کیفیت گوجه فرنگی های خشک شده را بهبود بخشیدند. در این کار انواع محلول های اسمزی فرموله شده با نمک، قند، لاکتات کلسیم قبل از خشک کن میکروویو - هوای داغ بکار رفت. تأثیر انرژی میکروویو بر روی منحنی های خشک کردن بررسی شد. همینطور همبستگی با ویژگی های

¹ Soysal² Wang³ Heredia

دی الکتریک نمونه ها نیز مطالعه گردید.

نمونه های سیر توسط شرما^۱ و همکاران [۴۲] در یک خشک کن آزمایشگاهی هوای داغ و ترکیبی هوای داغ - میکروویو خشک گردیدند. آزمایشات ترکیبی میکروویو - هوای داغ با اندازه نمونه های ۱۰۰ گرمی تحت ۴۰، ۵۰، ۶۰ درجه سانتیگراد با توان میکروویو ۴۰ وات انجام شدند. برای مقایسه خشک کردن با هوای داغ نمونه ها با سایز مشابه و با درجات حرارت هوای خشک ۶۰، ۷۰ درجه سانتیگراد و سرعت هوای ۲ متر بر ثانیه بکار برده شد.

در پژوهشی ک توسط ایکنور الی باس^۲ [۴۳] در رابطه با بررسی پارامترهای خشک کردن کدو تنبل توسط میکروویو، هوای داغ و ترکیب این دو روش انجام شد. نتایج نشان می دهد که رنگ محصول، مصرف انرژی مورد نیاز و زمان خشک کردن زمانی بهینه می گردد که از این دو روش به طور همزمان استفاده گردد و بهترین شرایط این ترکیب دمای هوای برابر ۵۰ درجه سانتیگراد و توان میکروویوی برابر ۳۵۰ وات می باشد.

کریستینا بیلباوساینز^۳ و همکارانش [۴۴] پژوهشی در رابطه با خشک کردن سیب به وسیله روش ترکیبی میکروویو با هوای تحت فشار با دمای ۴۰ درجه سانتیگراد انجام دادند و نتایج آزمایشات می گوید که افزایش دمای نمونه ها بر تبخیر داخلی نمونه ها اثر گذاشته و باعث افزایش فشار داخلی آن ها می شود. رایشن^۴ و همکارانش [۴۵] به بررسی ویژگی های کیفی و تغییرات ساختاری در سیب زمینی در طول خشک کردن میکروویوی پرداختند. آنها بیان کردند که ویژگی کیفی سیب زمینی خشک شده بر اساس میزان حفظ ویتامین C یا اسید آسکوربیک و همچنین میزان آب گیری مجدد و ویژگی ساختاری در

¹ Sharma

² Ilknur Alibas

³ Cristina Bilbao-Sáinz

⁴ raisheh

ارتباط با چروکیدگی می باشد. طبق نتایج بدست آمده مشخص گردید که میزان تخریب آسکوربیک اسید به دمای هوا، توان مایکروویو و محتوای رطوبت بستگی دارد. در نمونه های خشک شده با مایکروویو کاهش میزان تخریب ویتامین C مشاهده شد و چروکیدگی حجمی نمونه ها یک ارتباط خطی با محتوای رطوبت داشت. با خشک کردن مایکروویوی دو دوره ی چروکیدگی مشاهده گردید و نمونه های خشک شده با این روش پتانسیل بیشتری برای آبدگیری مجدد داشتند.

آنگل کالین سانچز^۱ و همکارانش [۴۶] اثر سطح خلأ و توان مایکروویو را روی ترکیبات آروماتیک و کیفیت رزماری که با روش مایکروویو- خلأ خشک شده بود، مورد بررسی قرار دادند. سنیتیک خشک کردن شامل ۲ دوره بود: دوره خطی تا رسیدن به یک نقطه ی بحرانی و دوره ی نمایی بعد از آن نقطه. زمان مورد نیاز برای خشک کردن رزماری در مقادیر بالاتر توان مایکروویو و میزان خلأ، کوتاهتر بوده و در شرایط ضعیف خشک کردن تحت خلأ- مایکروویو (به عنوان مثال در ۷۲-۷۴ کیلوپاسکال و ۳۶۰ وات) بیشترین غلظت مواد فرار بدست آمد و بهترین کیفیت ایجاد گردید.

۲-۲- نتیجه گیری

انجام این تحقیق با توجه به اینکه تاکنون هیچ مطالعه ای بر فرآیندهای مختلف خشک کردن تفاله سیب به روش جابجایی و مایکروویو در ایران انجام نشده است امری ضروری به نظر می رسد. اهداف این تحقیق عبارتند از مدلسازی و بهینه کردن شرایط خشک کردن تفاله سیب با روش ترکیبی هوای داغ و مایکروویو، بررسی سنیتیک خشک کردن تفاله سیب و انتخاب بهترین مدل توصیف کننده فرآیند خشک کردن تفاله سیب با هوای داغ، مایکروویو و روش ترکیبی آنها.

¹ Angel Calin-Sanchez

فصل ۳:

خشک کردن ترکیبی با مایکروویو

۱-۳- مقدمه

فرآیند خشک کردن یکی از شناخته شده ترین و مهمترین روشهای محافظت از محصولات کشاورزی پس از برداشت است، برای تولید محصول بهتر از نظر کیفی، نیاز به خشک کردن در شرایط عملیاتی مناسب و کنترل شده است. انجام صحیح عملیات خشک کردن به علت امکان بروز برخی تغییرات نامطلوب در ماده غذایی اهمیت زیادی دارد. [۴۷]

برای کاهش آب موجود در مواد غذایی به منظور افزایش عمر ماندگاری به ویژه مواد غذایی دارای ترکیبات قندی (نظیر میوه ها و تفاله های آنها)، نیازمند زمان طولانی و دمای نسبتاً بالا می باشد که همین عوامل موجب بروز برخی تغییرات نامطلوب در آن می شوند که از جمله میتوان به تغییر رنگ، طعم، عطر، کاهش مواد مغذی، افزایش وزن مخصوص (به علت چروکیدگی شدید) و کاهش ظرفیت آبگیری مجدد محصول خشک شده اشاره کرد.

خشک کردن فرآیندی است که نیاز به صرف زمان، انرژی و هزینه است. با توجه به محدودیت منابع انرژی در جهان، در چند سال اخیر محققان توجه زیادی به روش های متعدد برای کاهش زمان و انرژی مصرفی و افزایش کیفیت محصول داشته اند. در این مطالعه نیز با در نظر گرفتن اهمیت این مساله از داده های بدست آمده از یک دستگاه خشک کن مایکروویو- جریان هوای گرم برای مدلسازی فرآیند و سینتیک خشک کردن استفاده شده است. در این خشک کن برای تولید امواج مایکروویو از یک لامپ مگنترون با توان نامی و فرکانس مشخص و قابل اغیر استفاده شده است. به منظور تولید جریان هوای گرم نیز از یک گرم کن با توان مشخص به همراه دمنده ای با دورهای مختلف استفاده شده است. ارزیابی دستگاه با خشک کردن تفاله های سیب توسط چندین روش جریان هوای گرم، مایکروویو و ترکیب مایکروویو- جریان هوای گرم مورد بررسی قرار گرفت. [۴۸]

در مطالعه حاضر به منظور دستیابی به بهترین روش، خشک کردن ترکیبی مورد مطالعه قرار گرفته شده است. ترکیب دمایی و زمانی برای خشک کردن تفاله سیب، در دو حالت مورد مطالعه و مدلسازی قرار

می‌گیرد. استفاده از هوای داغ جهت فراورش اولیه، سپس استفاده از خشک کن مایکروویو و حالت دوم استفاده مستقیم از مایکروویو بدون فراورش اولیه (بدون پیش خشک کردن). در این فصل ابتدا به بیان اصول خشک کردن با انرژی مایکروویو پرداخته می‌شود سپس داده های مورد نیاز برای مدلسازی و روش گردآوری آنها ارائه می‌گردد.

۲-۳- اصول خشک کردن ترکیبی با انرژی مایکروویو

حرارت دهی و خشک کردن با استفاده از پرتوهای مایکروویو و رادیویی متفاوت از خشک کردن به روش های سنتی می‌باشد. روش های مرسوم خشک کردن تابع گرادیان دمای موجود بین سطح و داخل ماده غذایی هستند به عبارت دیگر، در روش های سنتی ابتدا دمای سطح ماده افزایش یافته سپس با تشکیل اختلاف دما به سطح و داخل ماده حرارت از طریق جابجایی به داخل نفوذ می‌کند. روش انتقال حرارت در مایکروویو و امواج رادیویی تابع گرادیان دما نیست. حرارت دهی به کمک مایکروویو مکانیزم حجمی دارد نه سطحی به عبارت دیگر، انتقال حرارت با استفاده از پرتوهای مذکور از نوسان مولکول های دوقطبی و حرکت یون ها در واکنش به جریان متناوب در فرکانس های بالا صورت می‌گیرد و انرژی حاصله به صورت حجمی جذب ماده غذایی مرطوب می‌گردد. بدین صورت فشار بخار داخلی افزایش یافته، رطوبت از داخل به طرف سطح یعنی جایی که تبخیر در آنجا صورت می‌گیرد می‌رود. در صورتیکه نیرویی جهت تبخیر رطوبت از سطح نباشد بخار حاصله ممکن است مجدداً در روی سطح به حالت مایع درآید. به همین دلیل معمولاً حرارت دهی با استفاده از مایکروویو و امواج رادیویی برای تشدید کارایی و بالا بردن سرعت فرآیند خشک کردن به همراه یک فرآیند خشک کردن هوای داغ به کار می‌رود. [۴۷]

۳-۳- مراحل خشک شدن با انرژی مایکروویو

الف) مرحله اول، در این مرحله انرژی مایکروویو در بافت ماده مرطوب به انرژی حرارتی تبدیل می‌شود و با گذشت زمان دمای ماده مرطوب افزایش پیدا می‌کند. مقدار رطوبت جدا شده در این مرحله نسبتاً

پایین است.

ب) مرحله دوم، در این مرحله به علت افزایش سریع حرارت و نیز ایجاد فشار داخلی میزان رطوبت جدا شده بالا است. در بعضی مطالعات گزارش شده که در این حالت مقدار فشار داخلی ۱۰۰ کیلو پاسکال بیش از فشار اتمسفری است.

ج) مرحله سوم، مرحله ای است که در آن میزان رطوبت بصورت محلی و نقطه ای کاهش یافته و انرژی مورد نیاز برای تبخیر رطوبت کمتر از انرژی حرارتی حاصل از پرتوهای میکروویو است. در نتیجه انرژی حاصله موجب حرارت دیدن بیش از حد ماده غذایی می شود. پارامترهای مربوط به میکروویو که بر روی کیفیت مواد غذایی مؤثر می باشد عبارتند از [۴۷]:

الف) نیروی دی الکتریک (قدرت میکروویو)

ب) زمان قرار گرفتن در معرض پرتو های میکروویو

۴-۳- روش های اندازه گیری رطوبت

روش های اندازه گیری رطوبت به دو دسته قابل تقسیم است دسته اول روش های مستقیم و دسته دوم روش های غیر مستقیم است. در روش مستقیم، میزان رطوبتی مواد، با دقت و صحت بالایی طی عملیات آزمایشگاهی و تحقیقی که نیازمند مدت زمان طولانی می باشد، قابل اندازه گیری است.

این در حالی است که روش های غیر مستقیم، جنبه تجاری و صنعتی دارند و دقت داده های بدست آمده از این طریق به اندازه روش های مستقیم نیست. ولیکن، تنها مزیت این روش نسبت به مستقیم این است که محتوای رطوبتی مواد در مدت زمان بسیار کوتاه قابل اندازه گیری می باشد. [۴۹]

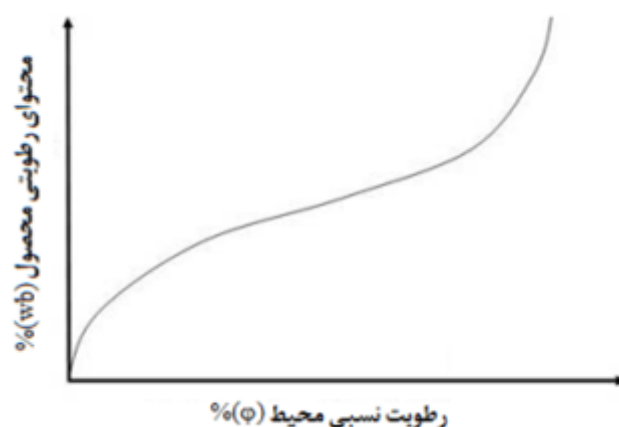
انواع روش های مستقیم اندازه گیری محتوای رطوبتی محصول شامل، واکنش شیمیایی، تابش میکروویو، تابش مادون قرمز، آون، تقطیر است. از بین روش های مذکور، آون در کشور ما رایج است و روش استاندارد بسیاری از کشورها نیز می باشد. در این شیوه، رطوبت موجود در محصول در محیط آون تبخیر شده و با محاسبه مقدار کاهش وزن آن از طریق تفاضل وزن اولیه و ثانویه، محتوای رطوبتی محصول مشخص می

انواع روش های غیر مستقیم اندازه گیری محتوای رطوبتی محصول شامل مقاومت الکتریکی، خازنی، رطوبت نسبی، صوتی و امواج مادون قرمز می باشد. روش خازنی، دقیق ترین روش غیر مستقیم می باشد و در خشک کن های 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 می دهند و متناسب با تغییر در ظرفیت خازن، محتوای رطوبتی محصول مشخص می گردد. در این پژوهش از روش اول که دقت و تکرارپذیری بالاتری دارد و قابلیت اطمینان آن بیشتر است استفاده شده است.

۳-۵- منحنی رطوبت تعادلی

وقتی یک ماده یا محصول در محیطی با درجه حرارت و رطوبت و فشار بخار جزئی خاصی قرار دارد به میزانی رطوبت از دست می دهد و یا به رطوبت آن اضافه می شود که فشار بخار داخلی محصول برابر با فشار بخار جزئی محیط می شود. در این حالت رطوبت محصول برابر با رطوبت تعادلی محیط شده و به آن محتوی رطوبت تعادلی گویند. رطوبت نسبی هوای اطراف محصول نیز در این لحظه، رطوبت نسبی تعادلی نامیده می شود.

شکل (۳-۱) منحنی رطوبت تعادلی محصول



مطابق ۰ منحنی رطوبت محصول در مقابل رطوبت نسبی محیط، منحنی رطوبت تعادلی یا منحنی هم دما نشان داده شده است از آنجایی که شکل این منحنی‌ها عموماً S مانند می باشد به منحنی های S شکل یا سیگموئید نیز معروف هستند. این نمودارها برای هر محصولی منحصر به فرد است، بنابراین به عنوان یک منحنی مشخصه برای مشخص کردن یک محصول مطرح می شوند. [۵۰]

۱-۵-۳- روابط مهم در فرآیند خشک شدن

فرآیند خشک کردن و حذف آب از محصول به کمک منحنی هایی مورد تجزیه و تحلیل قرار می گیرد. از جمله این منحنی ها، منحنی پیشروی خشک شدن (نمودار رطوبت محصول بر حسب زمان)، منحنی دما (نمودار رطوبت محصول بر حسب دمای محصول) و منحنی های آهنگ خشک شدن و نسبت رطوبت به صورت تابعی از زمان می باشد که در زیر روابط مربوط به آنها ارائه می گردد.

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 می شود و یکی از پارامترهای مهم در توصیف فرآیند خشک شدن می باشد. نسبت رطوبت بی بعد و آهنگ تبخیر به صورت روابط زیر تعریف می شوند. [۵۰]

$$MR = \frac{M - M_o}{M_o - M_e} \quad (۳-۱)$$

$$DR = \frac{M_{t+\Delta t} - M_t}{\Delta t} \quad (۳-۲)$$

۶-۳- جمع آوری داده های مورد نیاز مدل سازی

آزمایشات صورت گرفته به وسیله هوای داغ نشان داد که درصد رطوبت در نزدیک ۴۰ درصد وزنی که در حدود ۰/۶۷ گرم آب به ازای هر گرم از ماده خشک است، نقطه مشخصی در نمودارهای شدت خشک کردن است که شدت بالا شدت آب زدایی به شدت پایین تر آب زدایی تبدیل می شود. از این نقطه به بعد آب پیوسته شروع به حذف شدن می کند. بنابراین مقایسه بین خشک کردن به وسیله میکروویو به صورت

تنها و خشک کردن ترکیبی مایکروویو شامل پیش خشک کردن با هوای داغ و در ادامه خشک کردن نهایی به وسیله امواج مایکروویو می تواند روش مناسبی باشد. در این پژوهش خشک کردن نمونه از پیش خشک شده به وسیله مایکروویو را به عنوان خشک کردن تفاله سیب پیش فرآوری شده و خشک کردن مایکروویو به تنهایی را به عنوان خشک کردن تفاله سیب تازه تعریف شدند. آزمایشات صورت گرفته نشان داد درصد رطوبت در انتهای خشک کردن با هوای داغ در حدود ۴۰ درصد وزنی است.

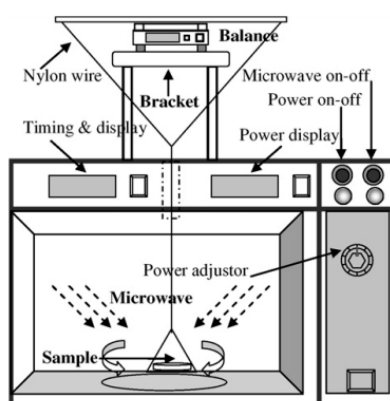
هدف کلی این مطالعه، آنالیز و مدل سازی خصوصیات خشک کردن به وسیله مایکروویو با و بدون پیش خشک کردن به وسیله هوای داغ است. اهداف مشخص این مطالعه به صورت الف) تعریف تاثیر توان خروجی مایکروویو بر روی سینتیک خشک کردن ب) انتخاب مدل لایه نازک بهینه خشک کردن به منظور شبیه سازی و افزایش مقیاس فرآیند ج) ارائه کردن معادلات شدت خشک کردن برای ارائه پیشنهادهایی به منظور طراحی بهینه طرح خشک کن است.

۳-۷- مواد و روش ها

۳-۷-۱- تجهیزات آزمایشگاهی

شکل زیر نشان دهنده طرح واره سیستم خشک کردن به وسیله مایکروویو است. آون برنامه دار آزمایشگاهی با بیشینه توان خروجی ۷۰۰ وات در فرکانس ۲۴۵۵ مگاهرتز برای آزمایشات خشک کردن استفاده شده است.

شکل (۳-۲) شماتیک مایکروویو سیستم خشک کن



آون دارای کنترلر دیجیتال است که قابلیت تنظیم کننده توان خروجی میکروویو و کنترل زمان فرآیند را دارد. توان‌ها به صورت خطی از صفر تا ۷۰۰ وات با تنظیم کردن ولتاژ یا جریان تنظیم می‌شوند. با تنظیم ولتاژ یا جریان، سیستم کنترلی میدان مغناطیسی لوله مگنترون و توان خروجی میکروویو را کنترل می‌کند. بازه زمانی بین ۰ تا ۹۹۹ ثانیه یا قابل تنظیم است. ابعاد محفظه داخلی برابر با $۲۴۰ \times ۳۵۰ \times ۳۵۰$ میلی‌متر است. آون دارای فن برای ورود جریان هوا در اتاقک خشک‌کن و خنک کردن مگنترون می‌باشد. رطوبت از محفظه خشک‌کن با این فن به وسیله گذراندن آن از محفظه‌ها در سمت راست دیواره آون به محیط بیرونی خارج می‌شود. ترازوی دیجیتال با دقت $۰/۰۱$ گرم بر روی سبدهی در بالای کوره میکروویو برای تعیین جرم استفاده شد. همچنین سینی نمونه‌گیری در محفظه کوره میکروویو بر روی ترازو به وسیله سیم نایلونی از طریق حفره تهویه در مرکز سقف محفظه قرار گرفته است. از یک خشک‌کن الکتریکی با ظرفیت توان ۳ کیلو وات و محفظه‌ای به ابعاد $۵۰۰ \times ۴۵۰ \times ۴۵۰$ میلی‌متر برای پیش خشک کردن تفاله سیب استفاده شد.

نمونه‌های سیب تازه خریداری شدند. نمونه‌ها به دلیل ساختار دانه‌ای از منظر ماکروسکوپی غیرهمگن بودند. تفاله سیب درصد رطوبت اولیه برابر $(۰/۴ + ۸۰/۲)$ داشت که با خشک کردن تفاله سیب تازه در خشک‌کن گرمایی در ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۱۲ ساعت به دست آمد. تعیین درصد رطوبت سه بار انجام شد.

۸-۳- روند تجربی

۸-۳-۱- آماده سازی نمونه های سیب پیش خشک شده

تفاله سیب تازه با درصد رطوبت اولیه برابر $(۰/۴ + ۸۰/۲)$ در خشک‌کن الکتریکی در دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد پیش گرم شده و جریان هوا با شدت جریان $(۰/۳ + ۱/۲)$ متر بر ثانیه عبور داده شود [۵۱] تا درصد رطوبت به ۴۰% برسد. درصد رطوبت حذف شده در نمونه‌ها با بارگذاری اولیه ۲۵ گرم و ضخامت در حدود ۱۰ میلی‌متر با استفاده از ترازوی دیجیتال اندازه‌گیری شد و در بازه زمانی چهار دقیقه انجام

گرفت. نمونه‌های پیش خشک شده درون کیسه پلاستیکی به منظور استفاده بعدی در خشک کن مایکروویو به نحوه بسته بندی شدند تا از نفوذ رطوبت به آن جلوگیری شود. نمونه های بدست آمده (نمونه های از پیش خشک شده) به خوبی با هم مخلوط مخلوط شده تا رطوبت اولیه تفاله سیب قبل از خشک کردن با مایکروویو یکسان و یکنواخت شود.

۳-۸-۲- خشک کردن تفاله سیب های تازه و تفاله فرآوری شده به وسیله مایکروویو

نمونه های تفاله سیب تازه و نمونه های تفاله سیب فرآوری شده (نمونه های تفاله سیب از پیش خشک شده) در خشک کن مایکروویو قرار گرفته و با توان خروجی ۱۵۰-۳۰۰-۴۵۰-۶۰۰ وات خشک شدند. ضخامت نمونه ها در حدود ۱۰ میلیمتر با بارگذاری اولیه ۲۵ گرم بود. رطوبت نسبی هوای محیطی در حدود ۳۰ درصد است. حذف رطوبت نمونه ها در خشک کن مایکروویو به صورت همزمان با ترازوی دیجیتال اندازه گیری شد و در بازه زمانی یک دقیقه نتایج ثبت شد. روند خشک کردن تا زمانی ادامه یافت که درصد رطوبت نمونه ها تا حدود ۵ درصد وزنی کاهش یافت و رطوبت تغییر بیشتری نداشت. هر آزمایش سه بار انجام شد.

فرایندها و پدیده‌های مانند خشک کردن غالباً وابسته به متغیرهای زیاد بوده و روابط پیچیده‌ای بین اجزاء آنها وجود دارد که موجب بروز خطا در دقت و صحت پیش‌بینی‌ها می‌شود. با توجه به پیچیدگی و غیرخطی بودن این پدیده استفاده از شبکه عصبی مصنوعی با عملکردی مشابه مغز انسان به عنوان ابزاری مناسب قابل توجه است. روند کلی کارکرد شبکه‌های عصبی مصنوعی در قالب مدل ریاضی زیر است.

$$\hat{Y}_t = f_0 \left[\sum_{j=1}^{HN} WO_j \times f_h \left(\sum_{i=1}^m WH_{ij} X_{it} + b_j \right) + b_0 \right] \quad (3-3)$$

که در آن \hat{Y}_t مقدار متغیر پیش‌بینی، WH_{ij} وزن ارتباط دهنده آمین نرون در خروجی لایه اول و آمین نرون در ورودی لایه میانی، m تعداد نرون لایه ورودی، HN تعداد نرون لایه میانی، WO_j وزن نرون خروجی آمین لایه میانی با ورودی نرون لایه خروجی، f_h تابع محرک لایه میانی و f_0 تابع محرک لایه خروجی. ساختار کلی مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی متشکل از سه لایه است که برای هر لایه کارایی خاصی پیش‌بینی شده است. در لایه اول اطلاعات ورودی برای فرایند مدل‌سازی معرفی می‌شود. لایه دوم مشتمل بر یک یا چند لایه مخفی است و پردازش اطلاعات را انجام می‌دهد. پس از پردازش اطلاعات، نتایج حاصل از عملکرد مدل در لایه سوم یا لایه خروجی تولید می‌شود. ساختار شبکه عصبی با تعیین تعداد لایه‌ها، تعداد نرون‌ها در هر لایه، تابع محرک، یا کنترل‌کننده خروجی هر نرون، روش آموزش، الگوریتم تصحیح وزن‌ها و نوع مدل، تعیین می‌شود در این مطالعه و براساس پژوهش‌های انجام شده، ساختار انتخابی شبکه از نوع پرسپترون چند لایه (MLP) در گروه شبکه‌های پیش‌خور با ناظر و قانون یادگیری انتشار به عقب به عنوان شبکه‌ای ساده و پرکاربرد در مدل‌سازی فرایند خشک کردن است. شبکه مورد استفاده متشکل از سه لایه (ورودی، میانی، خروجی) با تعدادی نرون در هر یک از لایه‌هاست. برای توصیف عملکرد خشک کن میکروویو از برخی متغیرهای در دسترس تحت عنوان نیاز اطلاعاتی نرون‌های لایه ورودی استفاده شد. در این راستا مقادیر سرعت هوا، دمای هوا و توان میکروویو به عنوان ورودی در نظر گرفته شد.

بصورت تصادفی داده‌ها به دو دسته آموزشی (۸۰ درصد)، برای یافتن رابطه بین ورودی‌ها و خروجی‌های

مشاهداتی و آزمون (۲۰ درصد)، برای ارزیابی عملکرد شبکه صورت گرفت. جهت رسیدن شبکه به پایداری در جواب، تعداد تکرار محاسباتی شبکه معادل ۱۲۰ تکرار در نظر گرفته شد. روش آموزش شبکه بر پایه قانون‌های لوبزگر مارکوات، به واسطه عملکرد مناسب و سرعت بالای آن در رسیدن به جواب و تابع محرک تانژانت هایپربولیک در لایه میانی و خروجی بود هدف از آموزش شبکه دستیابی شبکه به کمینه مطلق خطا و عدم ایجاد کمینه محلی خطا است.

برای دستیابی کمینه خطا، در هر بار اجرای شبکه، بردار مقادیر برآوردی با بردار مقادیر هدف (داده‌های واقعی) مقایسه و در صورت وجود خطا، ضرایب وزنی بردارهای ورودی اصلاح می‌شود. از آنجایی که محدوده متغیرهای بردار ورودی دارای تغییرات وسیع است، و وارد کردن مقدار داده‌های خام باعث کاهش سرعت و دقت شبکه می‌شود. برای اجتناب از چنین شرایطی و همچنین هم‌ارزش کردن داده‌ها، تمامی داده‌ها می‌باید قبل از آموزش، استاندارد شوند. استانداردسازی به منظور حداقل نمودن تغییرات وزن نرون‌ها و پاسخ سریع‌تر، نرون‌ها به سیگنال‌های ورودی است در انجام این بررسی و به منظور آموزش و اجرای شبکه عصبی، نرم افزار متلب مورد توجه قرار گرفت. این نرم‌افزار از توانمندی استاندارد سازی اتوماتیک داده‌ها در محدوده [۱ و ۰] برخوردار و مجهز به ابزار اعتبارسنجی متقابل است که در بررسی خوبی آرایش کاربرد دارد. از آنجایی که هیچ شبکه‌ای با ساختار اطلاعاتی مشخص به عنوان مناسب‌ترین شبکه وجود ندارد، شبکه‌ها با معیارهای مختلف آزمون شوند تا مطلوب‌ترین نوع شبکه برای هدف دلخواه شناسایی شد برای هر آرایش، کمینه مجذور میانگین مربعات خطای نرمال (NRMSE) از رابطه زیر و بیشینه ضریب همبستگی (r) از رابطه بعدی محاسبه شد. در صورتی که آرایش خوب عمل کند مقدار NRMSE به صفر و مقدار r به یک نزدیک خواهد بود. در غیر این صورت آرایش پیشنهادی سبب بیش‌آموزی شبکه شده و نرم‌افزار، آموزش شبکه را پایان می‌دهد.

$$NRMSE = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (T_i - Y_i)^2}{n}}}{\frac{\sum_{i=1}^n T_i}{n}} \quad (3-4)$$

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (T_i - \bar{T}_i) (Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (T_i - \bar{T}_i)^2 (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (3-5)$$

در روابط فوق، T_i : مقدار واقعی (هدف)، Y_i مقدار پیش‌بینی شده، n تعداد الگوها، \bar{Y} : میانگین مقادیر پیش‌بینی شده توسط شبکه عصبی مصنوعی و \bar{T}_i میانگین مقادیر واقعی. همچنین در این مطالعه مطابق روال عمومی دیگر پژوهش‌های صورت گرفته، نتایج اجرای حالات مختلف الگوریتم شبکه عصبی مصنوعی، که در قالب جداول و نمودارهای مختلف ترسیم شد. به علاوه با ترسیم نتایج در نمودار رگرسیونی، مطابق مدل خطی ($Y = a + bT$) مناسب بودن عملکرد به کار گرفته شده، ارزیابی شد. در این رابطه a و b ضرایب ثابت مدل برازشی هستند.

فصل ۴:

مدلسازی

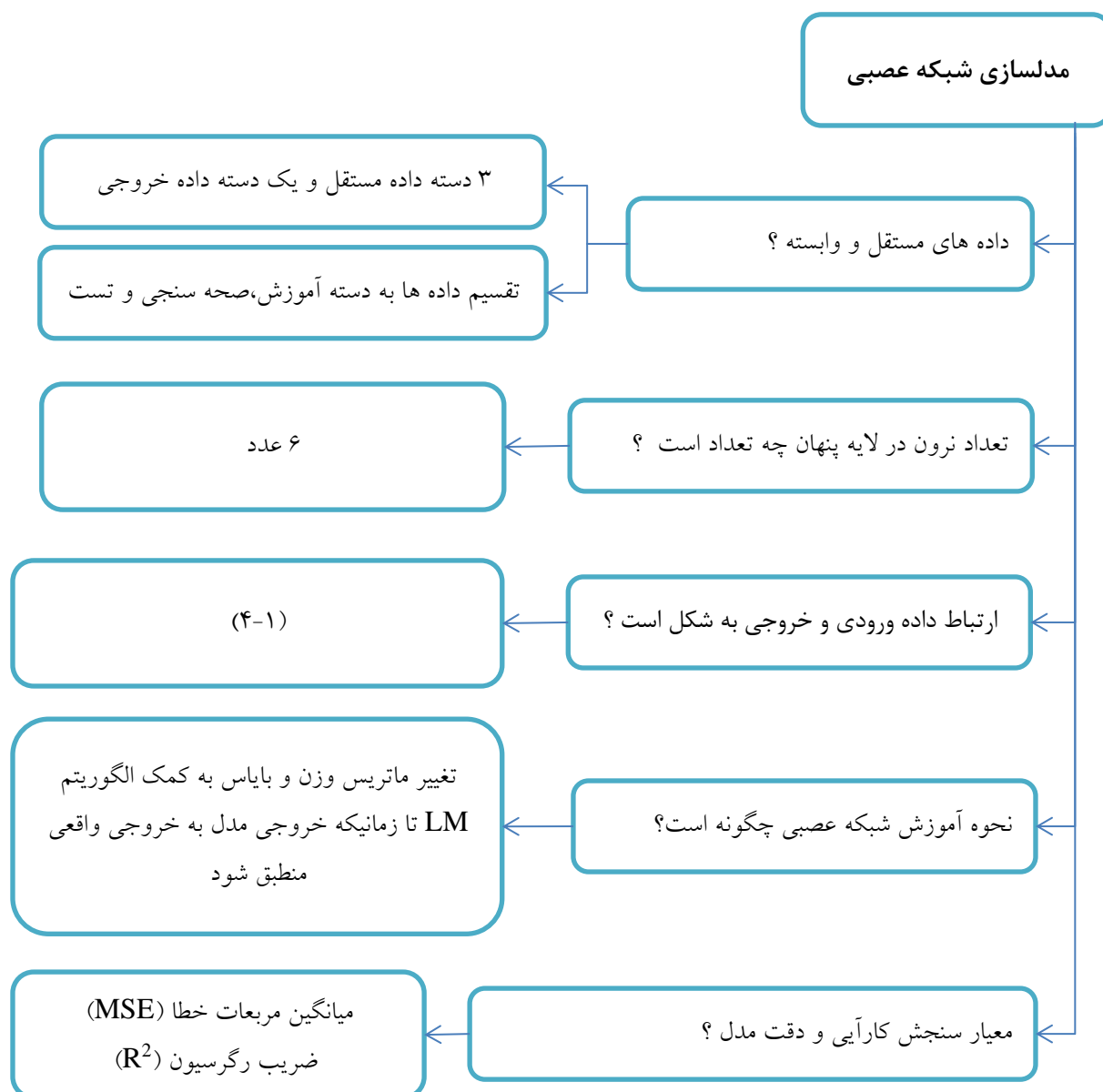
۱-۴- مقدمه

در این پژوهش مدلسازی نسبت رطوبت بر حسب سه متغیر ورودی سرعت هوای گرم، دمای هوای گرم و توان مایکروویو به کمک شبکه عصبی پیش بینی می‌گردد همچنین در گام بعد یک بهینه سازی به کمک مدل سطح پاسخ (RSM) انجام می‌گیرد.

۲-۴- مدل سازی

در این بخش، مدل سازی نسبت رطوبت بر حسب ۳ متغیر ورودی صورت می‌گیرد. ارائه این مدل به شکل یک رابطه ریاضی است. برای ساخت مدل ریاضی شبکه عصبی می بایست به سوالاتی که در بخش زیر آمده است پاسخ داد.

شکل (۴-۱) مهم‌ترین سؤالات مطرح‌شده در ارتباط با مفهوم مدل‌سازی به کمک شبکه عصبی در این پژوهش



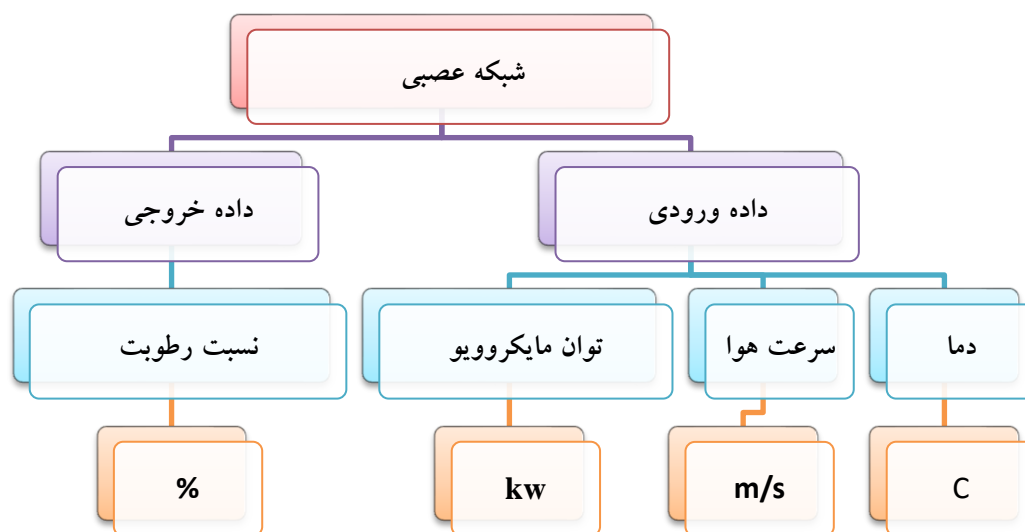
۴-۳- داده‌های مستقل و وابسته

مدل شبکه عصبی یک مدل داده محور می‌باشد و نیازمند داده‌های واقعی می‌باشد. بنابراین ۳

دسته داده ورودی (سرعت هوا - دمای هوا - توان مایکروویو) و یک دسته داده خروجی

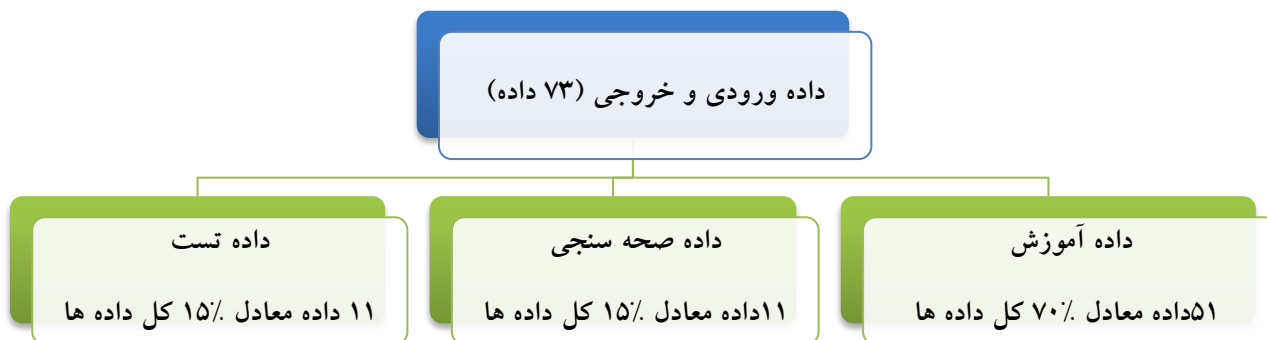
(نسبت رطوبت) داریم تعداد کل داده‌ها ۷۳ عدد می‌باشد.

شکل (۲-۴) داده مستقل و وابسته جهت ساخت مدل



داده به ۳ بخش مطابق نمودار زیر تقسیم بندی گردید. به کمک داده‌های آموزش مدل ساخته میشود. به کمک داده صحنه سنجی زمان توقف الگوریتم را تهمین می‌زنیم. در انتها به کمک داده‌های تست عملکرد ارزیابی میگردد.

شکل (۳-۴) تقسیم داده‌های واقعی به ۳ دسته

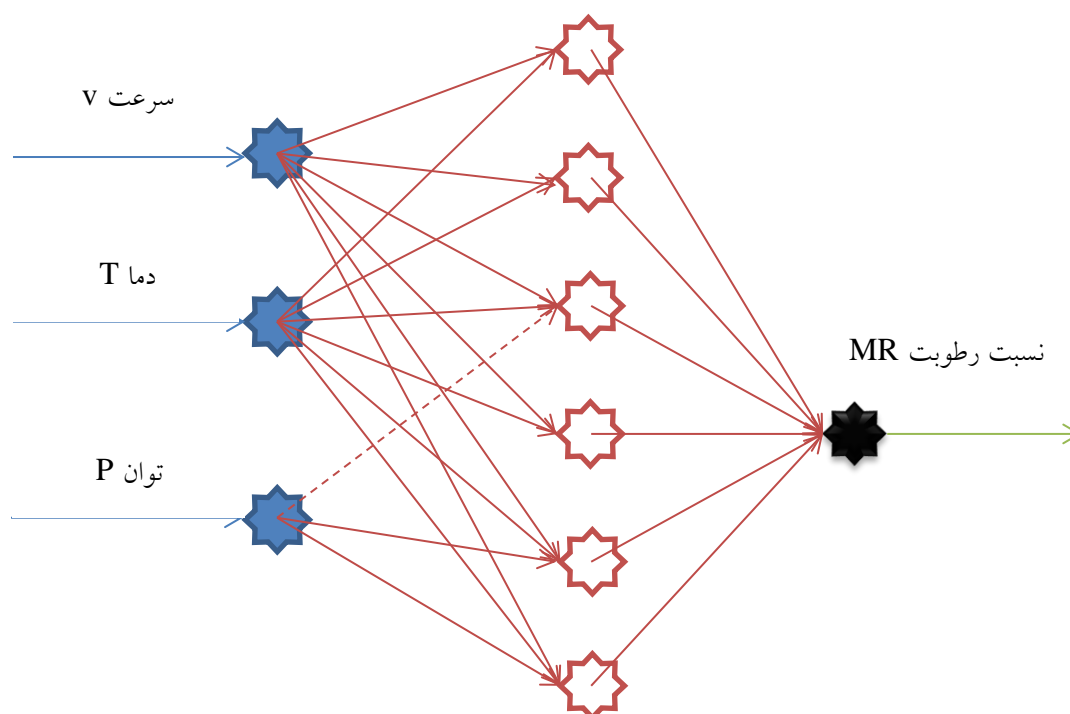


در این پژوهش به دنبال ارائه یک مدل ریاضی که بتواند نسبت رطوبت را برحسب ۳ مشخصه ورودی خشک کن هستیم که با توجه به داده محور بودن مدل از داده تجربی واقعی استفاده شد.

۴-۴- توپولوژی مدل

مطابق شکل زیر ساختار و توپولوژی شبکه عصبی ۳-۶-۱ است این بدان معنا است که لایه ورودی سه نرون (سه متغیر مستقل) و لایه خروجی یک نرون (یک متغیر وابسته) دارد. همچنین تعداد نرون در لایه پنهان ۶ عدد است.

شکل (۴-۴) توپولوژی مورد استفاده در این پژوهش



داده‌های مستقل و داده وابسته به کمک شبکه‌ای از یالها مطابق نمودار بالا به یکدیگر متصل اند. یال‌های ارتباط دهنده نرون‌ها حاوی مقادیر وزن می‌باشند که اطلاعات را با یک وزن مشخص از یک لایه به لایه بعدی انتقال می‌دهد.

۴-۵- رابطه ریاضی مدل شبکه عصبی

داده‌های مستقل و وابسته به کمک رابطه ریاضی زیر با یکدیگر ارتباط دارند

$$MR_{NN} = [LW]_{1 \times 6} \times \tanh \left([IW]_{6 \times 4} \times \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ \dots \\ X_3 \end{bmatrix}_{3 \times 1} + [b_1]_{6 \times 1} \right) + [b_2]_{1 \times 1} \quad (4-1)$$

۲۴ عدد یال بین لایه ورودی و لایه پنهان وجود دارد بنابراین ۲۴ وزن قابل تعریف است که در

داخل ماتریس IW جای می گیرد

$$IW_{6 \times 4} = \begin{bmatrix} IW_{11} & IW_{12} & \dots & IW_{13} \\ IW_{21} & IW_{22} & \dots & IW_{23} \\ \dots & \dots & \dots & IW_{\dots} \\ IW_{S1} & IW_{S2} & \dots & IW_{63} \end{bmatrix}_{6 \times 3} \quad (4-2)$$

ماتریس $IW_{6 \times 4}$ ماتریس وزن لایه ورودی نامیده می شود. ماتریس $[LW]_{6 \times 1}$ به ماتریس

وزن لایه پنهان معروف می باشد. درایه های هر دو ماتریس همگی مجهول بوده و در طی فرآیند

آموزش، محاسبه می شوند

$$LW_{1 \times 7} = [IW_{11} \quad IW_{12} \quad \dots \quad IW_{16}]_{1 \times 6} \quad (4-3)$$

ماتریس b_1 به ماتریس بایاس لایه ورودی و ماتریس b_2 به ماتریس لایه پنهان معروف هستند.

$$b_1 = \begin{bmatrix} b^1 \\ b^2 \\ \dots \\ b^6 \end{bmatrix}_{6 \times 1} \quad (4-4)$$

$$b_2 = [b_2]_{1 \times 1} \quad (4-5)$$

بطور خلاصه ارتباط بین داده های ورودی و خروجی و ماتریس وزن و بایاس در شکل زیر

نمایش داده شده است. توابع انتقال بین لایه ها با $(f_1$ و $f_2)$ نشان داده شده اند که در اغلب

موارد تابع تانژانت هایپربولیک به عنوان تابع f_1 و تابع خطی به عنوان تابع f_2 انتخاب می گردد.

ماتریس P_R ماتریس داده‌های ورودی به شبکه عصبی را نشان می‌دهد همان‌طور که مشاهده می‌کنید این ماتریس سه ورودی دارد این سه ورودی شامل دما، سرعت هوا، توان مایکروویو است.

$$P_R = \begin{bmatrix} V \\ T \\ P \end{bmatrix}_{3 \times 1} \quad (۴-۶)$$

رابطه‌ی بین خروجی شبکه و ورودی شبکه (P_R) به شکل زیر است.

$$MR_{NN} = [LW]_{1 \times 6} \times \tanh \left([IW]_{6 \times 3} \times \begin{bmatrix} V \\ T \\ P \end{bmatrix}_{3 \times 1} + [b_1]_{6 \times 1} \right) + [b_2]_{1 \times 1} \quad (۴-۷)$$

۴-۵-۱- توابع فعال‌سازی

در بخش قبل دو تابع (f_1 و f_2) معرفی گردید که این دو تابع به تابع انتقال یا تابع فعال‌سازی معروف‌اند این توابع درواقع یک قسمت در شبکه‌های عصبی هستند که ورودی آن‌ها یک عدد حقیقی است و خروجی آن‌ها معمولاً یک عدد بین ۰ و ۱، یا ۱- و ۱+ است. درواقع این توابع یک عدد ورودی است که آن را به یک بازه مشخص (مثلاً ۱- تا ۱+) تبدیل می‌کنند. به این توابع، توابع فعال‌ساز، توابع انتقال^۱ نیز می‌گویند. نحوه سنجش معیار کارایی و دقت مدل شبکه عصبی از دو معیار مختلف برای اندازه‌گیری دقت شبکه و میزان خطا در این پژوهش استفاده شده است. معیار اول میزان میانگین مربعات خطا^۲ (MSE) و دومی ضریب همبستگی (R^2) است.

^۱ Transfer Function

^۲ Mean Square Error (MSE)

۴-۵-۲- میانگین مربعات خطا

میانگین مربعات خطا یک معیار خطای بسیار پرکاربرد برای اندازه‌گیری دقت یک مدل است که توسط رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$MSE = \sum_{i=1}^N \frac{(y_i^{model} - y_i^{real})^2}{N} \quad (4-8)$$

صورت کسر میزان خطای پیش‌بینی مدل نسبت به داده واقعی است

$$(E_i = y_i^{model} - y_i^{real})$$

میزان این خطا برای N نمونه به توان ۲ رسیده سپس میانگین‌گیری می‌شود. به عبارت دیگر این شاخص، ابتدا اختلاف تک‌تک مقادیر مشاهده‌شده را با مقادیر پیش‌بینی‌شده به وسیله مدل (مثلاً در تحلیل رگرسیون) محاسبه نموده و به توان دو می‌رساند. از این اختلافات میانگین گرفته و در این شاخص معیاری برای دقت نتایج است و معمولاً هرچه مدل بهتر بر داده‌ها منطبق باشد مقدار آن کمتر می‌شود. مقدار ایده آل آن صفر است (زمانی که پیش‌بینی مدل و مقدار واقعی بر هم منطبق باشند)

۴-۵-۳- ضریب همبستگی

روش دیگر برای ارزیابی دقت، محاسبه ضریب همبستگی است. ضریب همبستگی ابزاری آماری برای تعیین نوع و درجه رابطه یک متغیر کمی با متغیر کمی دیگر (و یا یک مجموعه داده با یک مجموعه داده دیگر) است. در واقع ضریب همبستگی، یکی از معیارهای مورد استفاده در تعیین همبستگی دو متغیر (یا دو مجموعه داده) است که شدت رابطه و هم‌چنین نوع رابطه

(مستقیم یا معکوس) را نشان می‌دهد. این ضریب بین ۱ و -۱ است و در صورت عدم وجود رابطه بین دو متغیر، برابر صفر خواهد بود.

اگر R صفر باشد، به این معنی است که هیچ رابطه خطی بین داده‌ها وجود ندارد. اگر R یک باشد، به این حالت همبستگی کامل و مستقیم گفته می‌شود؛ بدین معنی که با افزایش (کاهش) مقدار یکی از متغیرها، دیگری نیز به‌طور قطعی افزایش (کاهش) می‌یابد. اگر R منفی یک باشد، در این حالت همبستگی را کامل و معکوس می‌گوییم؛ بدین معنی که با افزایش (کاهش) مقدار یکی از متغیرها، مقدار دیگری کاهش (افزایش) می‌یابد. اگر R بین صفر و یک باشد، همبستگی ناقص و معکوس است؛ بدین معنی که با افزایش (کاهش) مقدار یکی از متغیرها، مقدار دیگری به‌طور نسبی کاهش (افزایش) می‌یابد و اگر R بین منفی یک و صفر باشد، همبستگی ناقص و مستقیم است؛ بدین معنی که با افزایش (کاهش) مقدار یکی از متغیرها، مقدار دیگری به‌طور نسبی افزایش (کاهش) می‌یابد.

هرچه این ضریب به صفر نزدیک‌تر باشد، نشان‌دهنده رابطه ضعیف‌تر بین داده‌ها و هرچه به یک یا منفی یک نزدیک‌تر باشد، نشان‌دهنده رابطه قوی‌تر بین داده‌ها است. ضریب مثبت بیانگر رابطه مستقیم و ضریب منفی بیانگر رابطه معکوس خواهد بود. مطابق یک قاعده کلی بر اساس مقادیر زیر می‌توان درباره میزان همبستگی متغیرها طبق جدول ۲ قضاوت کرد. همین تفسیر برای مقادیر منفی نیز قابل استفاده است:

شکل (۴-۵) تفسیر مقادیر مختلف ضریب همبستگی

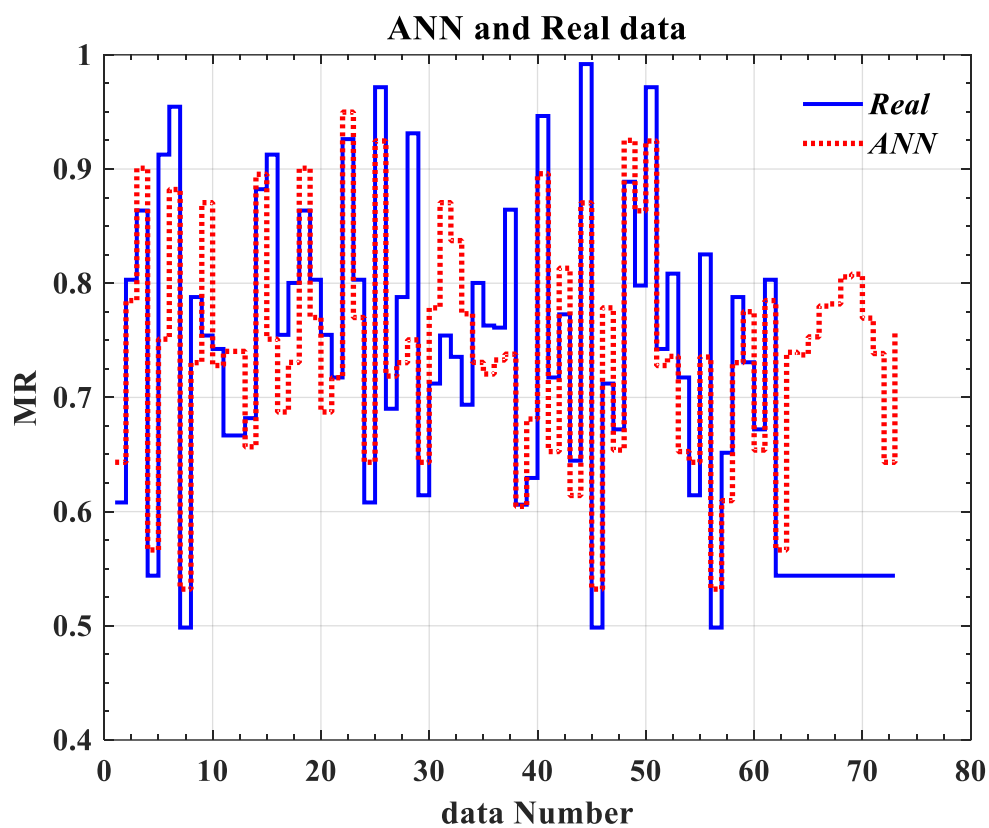
تفسیر	ضریب همبستگی
خیلی اندک و قابل چشم پوشی	۰/۱۹-۰/۰
خیلی اندک تا اندک	۰/۳۹-۰/۲۰
متوسط	۰/۶۹-۰/۴۰
زیاد	۰/۸۹-۰/۷۰
خیلی زیاد	۱/۰۰-۰/۹

۴-۶- نتایج

در این مطالعه از ۷۳ داده واقعی استفاده گردید. داده‌ها به صورت تصادفی توسط نرم‌افزار متلب به سه دسته آموزش (۷۰٪)، صحنه سنجی (۱۵٪) و تست (۱۵٪) جداسازی شد. نکات زیر در حین مدلسازی اهمیت ویژه ای دارند.

- داده‌های آموزش در مرحله تعیین وزن و بایاس مورد استفاده قرار گرفت.
- از داده‌های صحنه سنجی برای جلوگیری از آموزش بیش از حد استفاده می شود تا شبکه خاصیت عمومی خود را حفظ کند.
- داده تست به منظور بررسی میزان دقت و عملکرد واقعی سیستم جهت معتبر کردن مدل استفاده می شود.

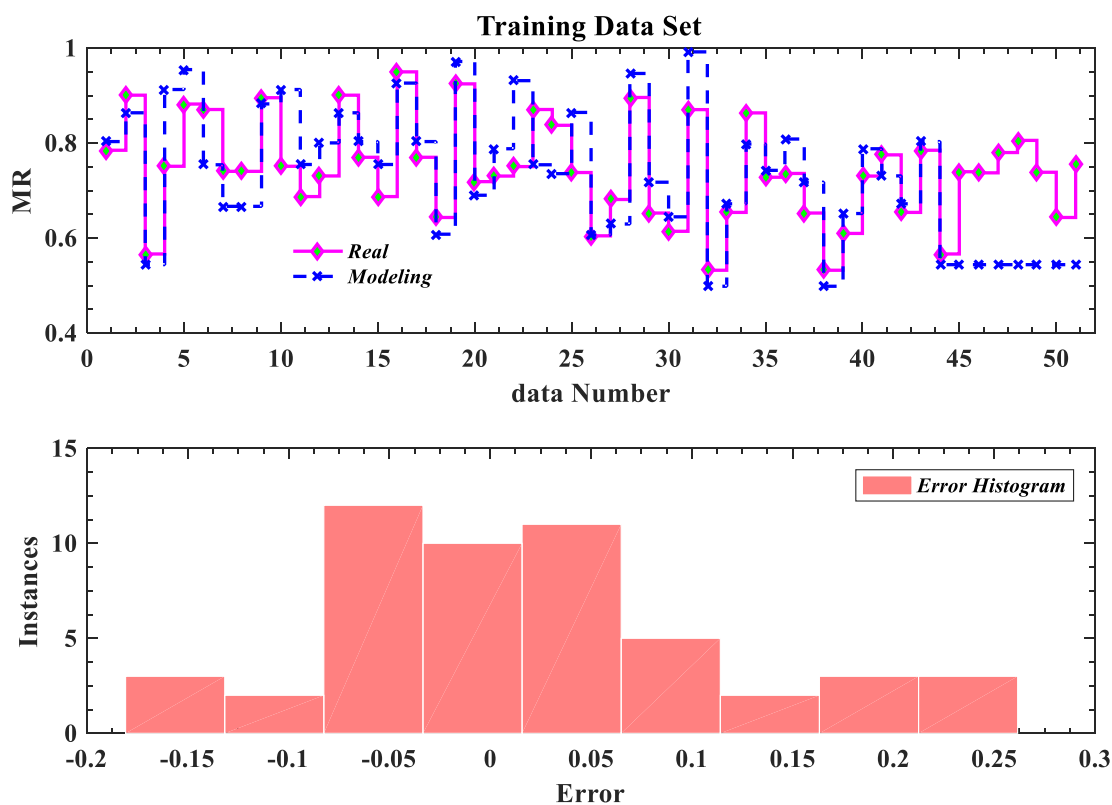
شکل (۶-۴) داده های کل مربوط به مدلسازی نسبت رطوبت و مقادیر واقعی آن



در ادامه این فصل نتایج مربوط به مدلسازی و شبکه عصبی به تفکیک برای دسته آموزش

صحه سنجی و تست ارائه میگردد.

شکل (۴-۷) داده های آموزشی مربوط به مدلسازی نسبت رطوبت و مقادیر واقعی آن



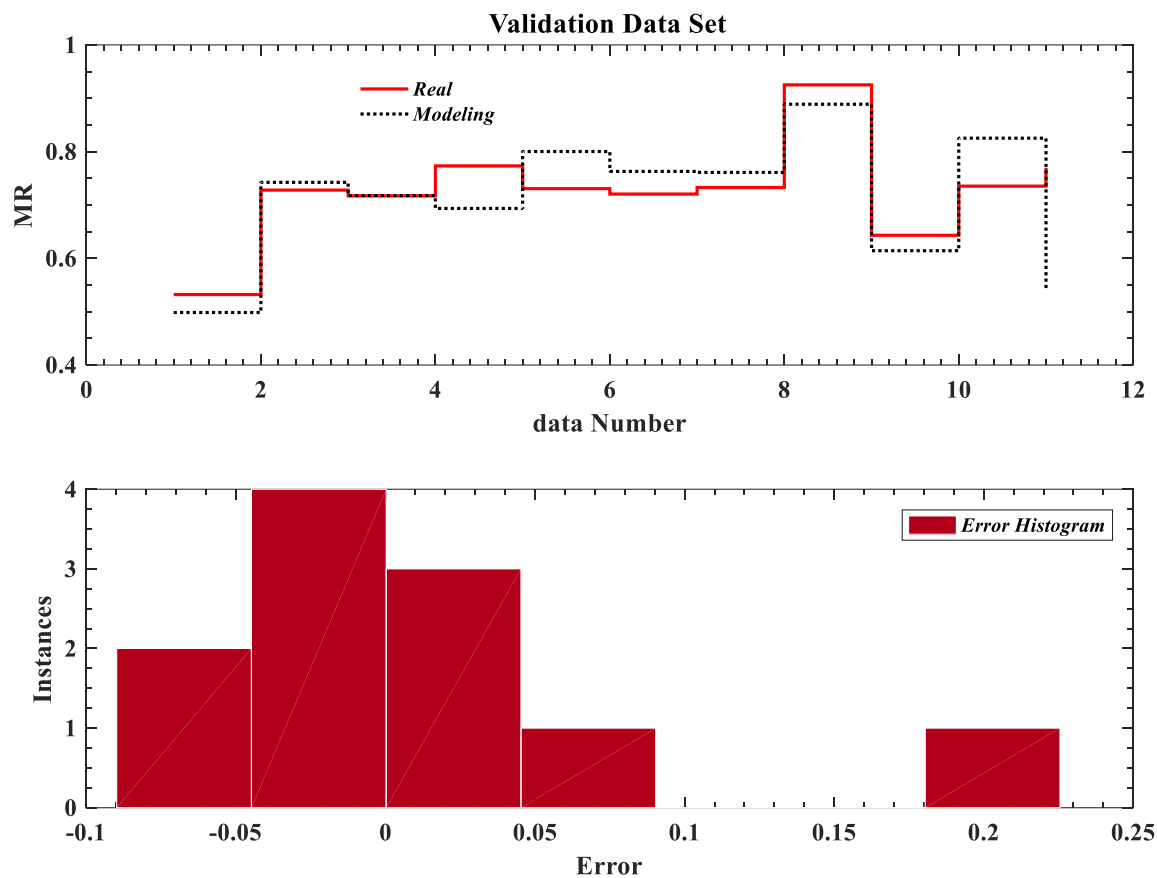
تطابق خوبی بین نتایج شبکه و نتایج واقعی مشاهده شد و خطا کوچک است و شبکه عصبی

اصولی آموزش دیده است هیستوگرام خطای نیز ترسیم گردید تا توزیع خطا بهتر مشاهده

گردد.

در شکل بعدی نتایج مربوط به صحنه سنجی ارائه شده است.

شکل (۸-۴) داده های صحه سنجی مربوط به مدلسازی نسبت رطوبت و مقادیر واقعی آن

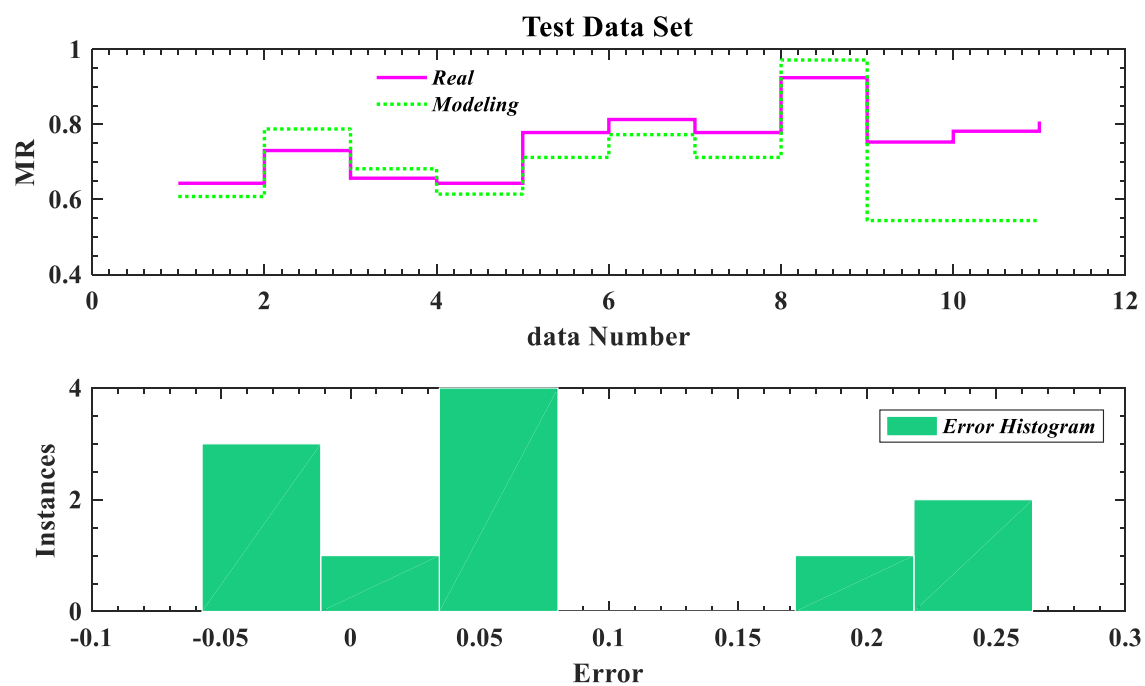


همانطور که مشاهده می کنید دقت مدل در مرحله صحه سنجی نیز مناسب است.

در مرحله تست عملکرد واقعی شبکه عصبی در برابر داده جدید بررسی می شود میزان خطا

در زیر ارائه شده است. میزان خطای میانگین کمتر از ۷ درصد بدست آمد.

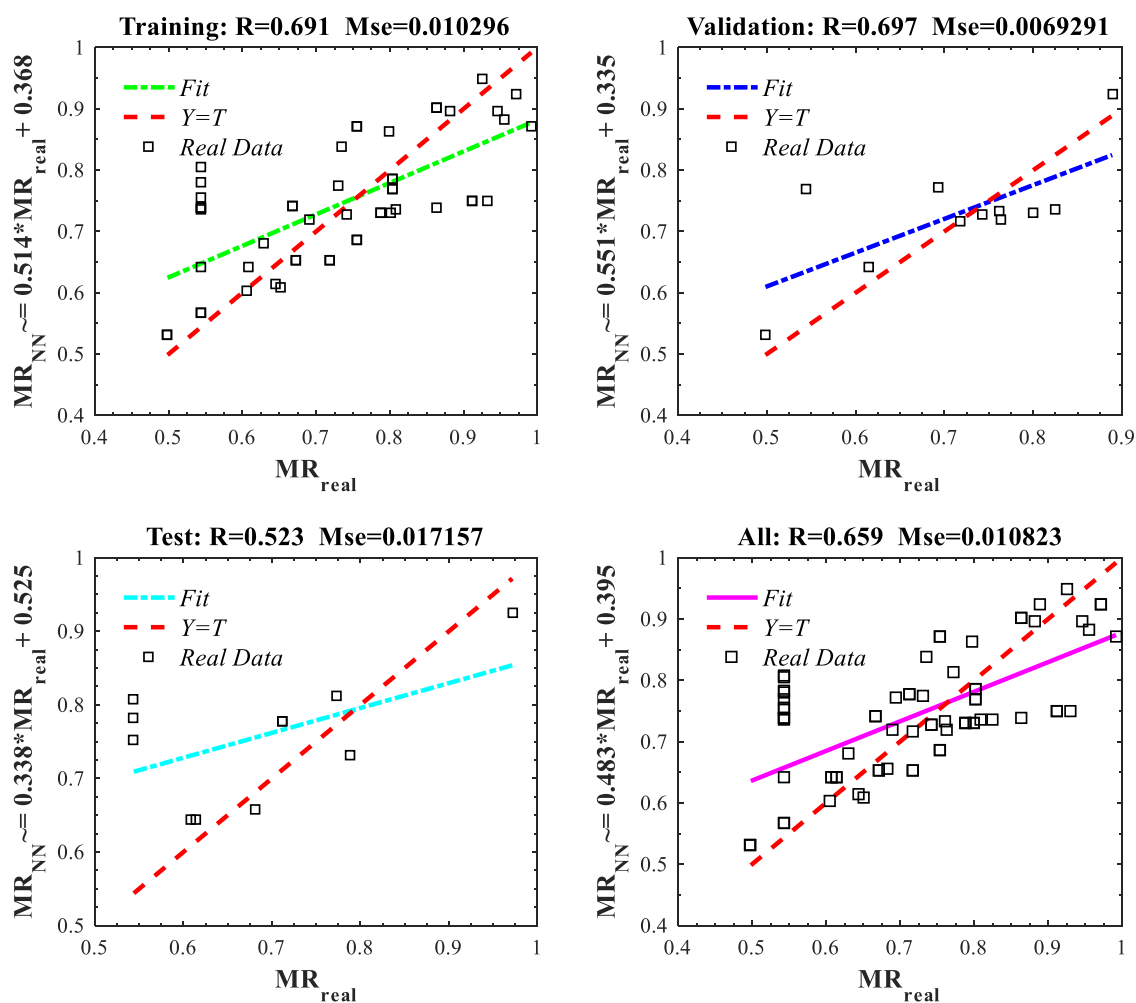
شکل (۹-۴) داده های تست مربوط به مدلسازی نسبت رطوبت و مقادیر واقعی آن



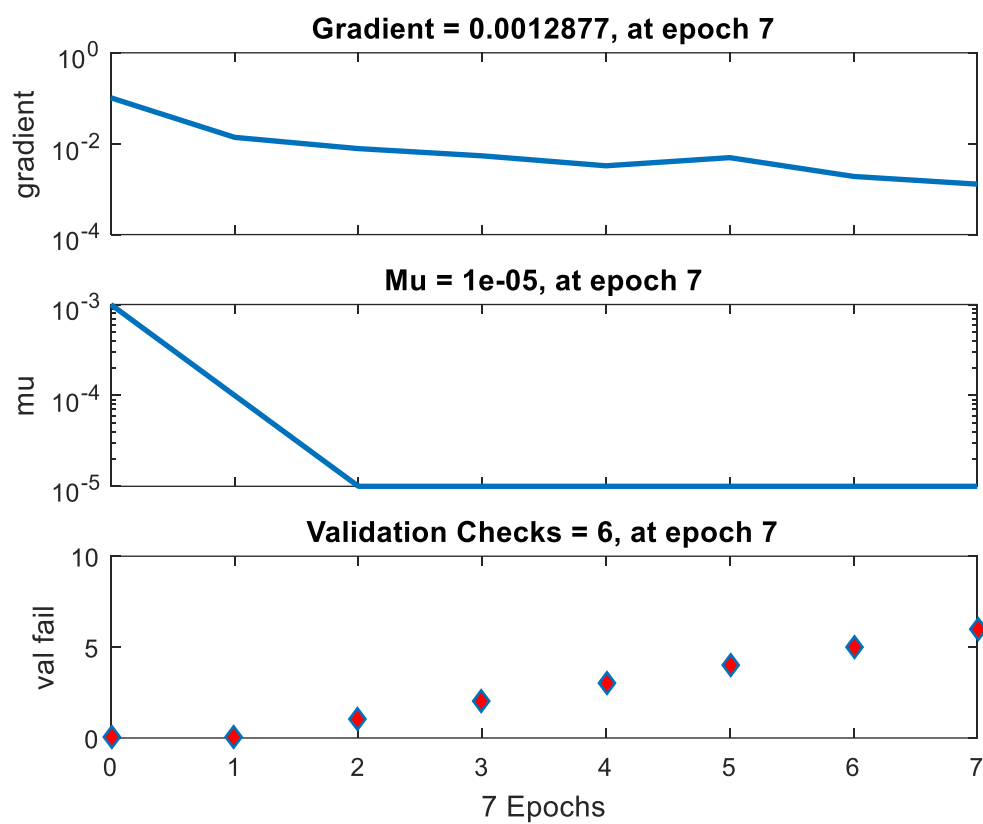
نمودار ضریب رگرسیون برای داده های آموزش صحنه سنجی و تست در زیر به همراه معادله

خط رگرسیون و میزان خطا و ضریب همبستگی ارائه شده است.

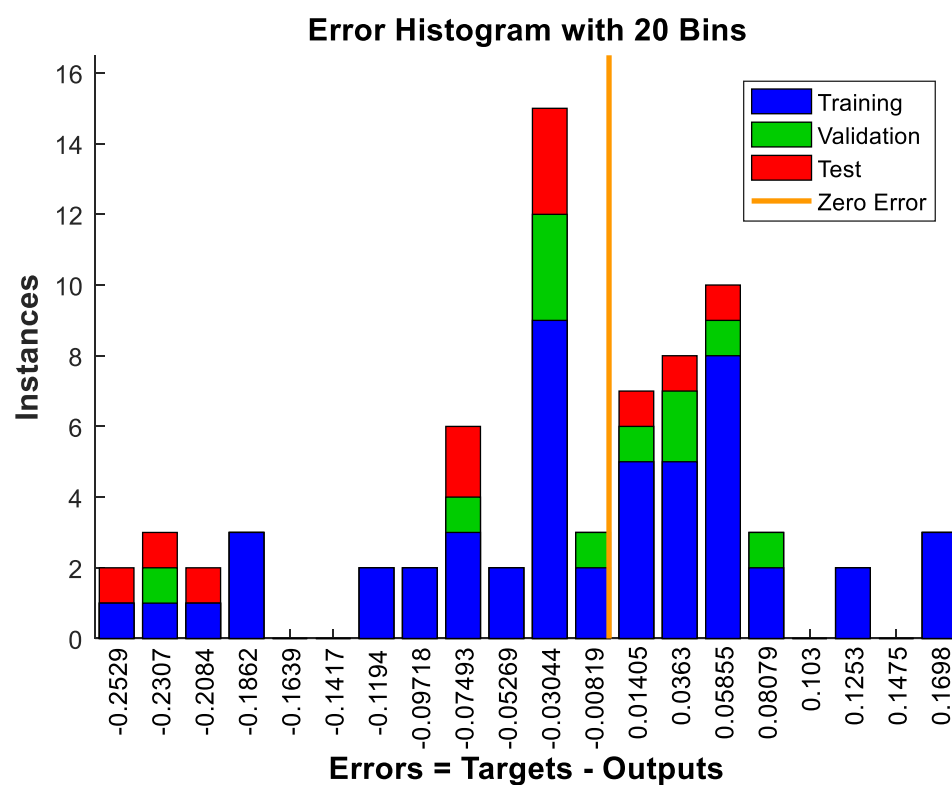
شکل (۱۰-۴) نمودار رگرسیون برای نسبت رطوبت



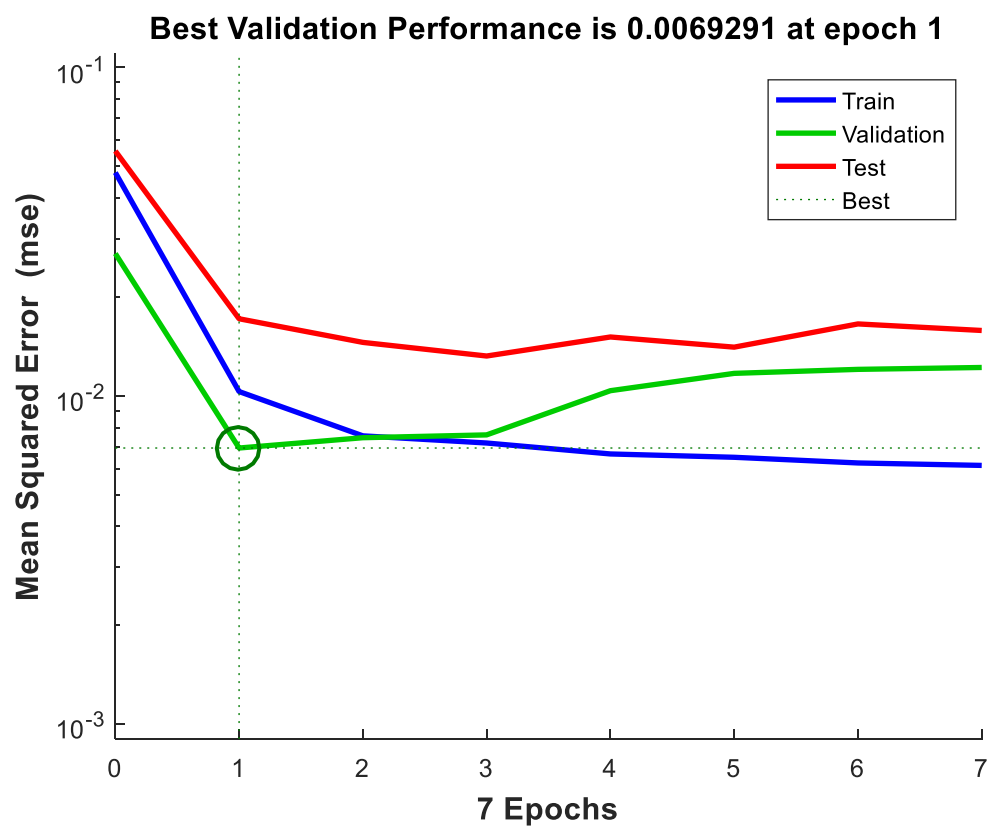
شکل (۴-۱۱) پارامترهای تنظیمی شبکه عصبی برای پیش بینی نسبت رطوبت



شکل (۴-۱۲) هیستوگرام خطا برای پیش بینی نسبت رطوبت



شکل (۱۳-۴) نمودار کارایی مدل شبکه عصبی برای پیش بینی نسبت رطوبت



۴-۷- ارائه مدل شبکه و ماتریس وزن و بایاس

مقادیر ماتریس وزن و بایاس مربوط به شبکه عصبی به کمک نرم افزار متلب استخراج شد که به شرح زیر است.

$$MR_{NN} = [LW]_{1 \times 6} \times \tanh \left([IW]_{6 \times 3} \times \begin{bmatrix} V \\ T \\ P \end{bmatrix}_{3 \times 1} + [b_1]_{6 \times 1} \right) + [b_2]_{1 \times 1} \quad (۴-۹)$$

در رابطه ی بالا T,P,V به ترتیب سرعت هوا توان مایکروویو و دما است و ماتریس IW,LW,b1,b2 در طی فرآیند آموزش شبکه با داده های واقعی بدست آمد که به شرح زیر

هستند

جدول (۴-۱) ماتریس وزن و بایاس شبکه عصبی مورد استفاده در این پژوهش جهت پیش بینی راندمان استخراج

IW	LW	b1	b2
.	جدول (۴-۴)	جدول (۴-۳)	جدول (۴-۵)

جدول (۴-۲) ماتریس IW (وزن لایه ورودی) شبکه عصبی جهت پیش بینی راندمان استخراج

1.72971783972928	-0.358871285279489	1.65626738110396
0.377079157223098	-1.27081260711123	-3.88175371545298
-0.102518258771073	-1.75809611082424	-2.61540700475448
1.79625005566783	3.89997181424684	-0.354944296782189
2.60176293059901	0.224239689154365	2.79719998488271
0.260441416510425	0.469215310654917	2.35711881956322

جدول (۴-۳) ماتریس b1 (بایاس لایه پنهان) شبکه عصبی جهت پیش بینی راندمان استخراج

-1.11272532244136
3.25110978684880
1.80263696575032
0.460390615024902
-0.461471924960688

2.01930766857813

جدول (۴-۴) ماتریس LW (وزن لایه پنهان) شبکه عصبی جهت پیش بینی راندمان استخراج

0.887789	-1.21194	0.651475	0.396543	-0.65907	0.287506
----------	----------	----------	----------	----------	----------

جدول (۴-۵) ماتریس b2 بایاس لایه آخر شبکه عصبی جهت پیش بینی راندمان استخراج

0.517709320

۴-۸- نتایج بهینه سازی به کمک RSM

به کمک مدل سطح پاسخ معادله نسبت رطوبت بر حسب متغیرهای مستقل استخراج شد و معادله به شکل زیر است.

$$F = b_0 + b_1 * x_1 + b_2 * x_2 + b_3 * x_3 + b_{11} * x_1.^2 + b_{22} * x_2.^2 + b_{33} * x_3.^2 + b_{12} * x_1.* x_2 + b_{13} * x_1.* x_3 + b_{23} * x_2.* x_3$$

ضرایب معادله بالا در جدول زیر است.

جدول (۴-۶) ضرایب معادله RSM

b1=-43.204	b11=10.924	b12=0.149
b2=-1.242	b22=0.01	b13=1.4
b3=-2.504	b33=0.896	b23=-0.031

شرایط بهینه خشک کردن به کمک این روش استخراج شد نتایج بهینه به شرح جدول زیر است.

جدول (۴-۷) جدول مقادیر بهینه به کمک روش RSM

متغیر اول	متغیر دوم	متغیر سوم	متغیر وابسته
سرعت هوا	دمای هوا	توان مایکروویو	نسبت رطوبت
۲ m/s	۷۰ C	۲/۵ kw	۱/۵ %

در ادامه اثر هر متغیر مستقل بر روی متغیر وابسته بررسی و رسم گردید. در این حالت متغیر

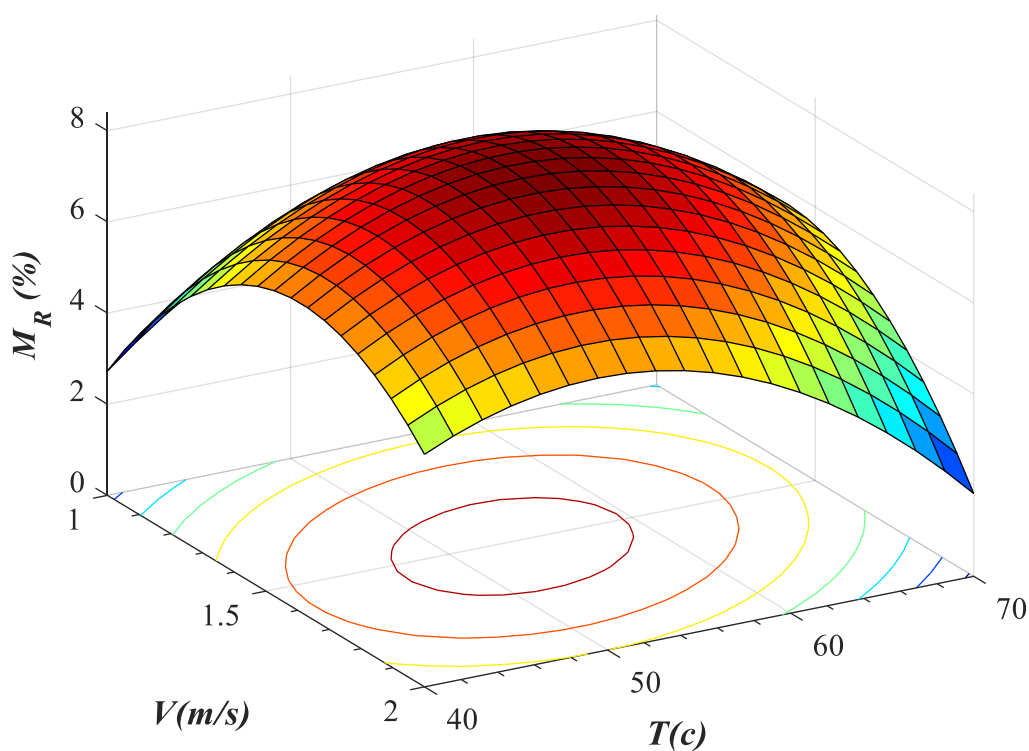
سوم ثابت و برابر میانگین بازه مطابق جدول زیر در نظر گرفته شد.

جدول (۸-۴) آنالیز حساسیت متغیرهای مستقل

بررسی اثر دما و سرعت هوا	مقدار توان مایکروویو	$P = 1.5 \text{ kw}$.
بررسی اثر سرعت هوا و توان	مقدار دمای هوا ثابت	$T = 55 \text{ }^{\circ}\text{C}$	Error!
بررسی اثر دما و توان مایکروویو	مقدار سرعت هوا ثابت	$V = 1.5 \text{ m/s}$	Error!

در شکل زیر نمودار نسبت رطوبت بر حسب سرعت هوا و دما رسم شده است با توجه به این نمودار حداقل رطوبت به ازای دمای ۷۰ درجه سانتیگراد و سرعت هوای ۲ متر بر ثانیه بدست می‌آید. مقدار رطوبت در این حالت در حدود ۲ درصد است.

شکل (۱۴-۴) اثر دما و سرعت هوا بر روی نسبت رطوبت



در ادامه اثر توان و سرعت و همچنین اثر دما و توان بر روی نسبت رطوبت رسم شده است.

با توجه به نمودار **Error! Reference source not found.** و حداقل نسبت رطوبت

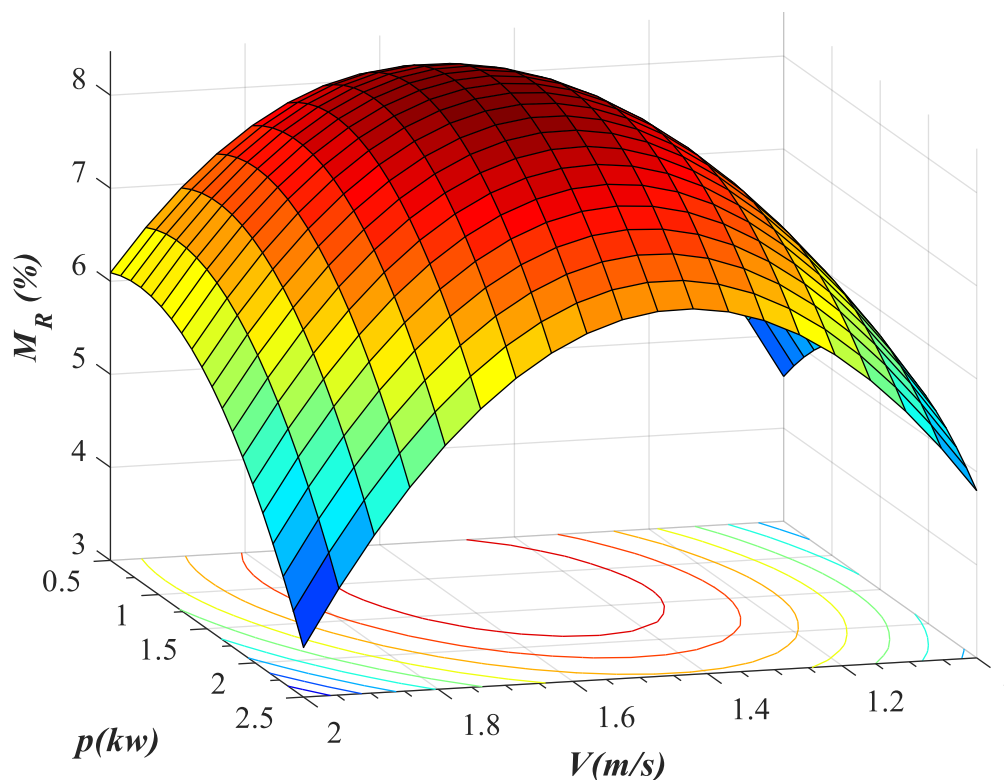
به ازای سرعت هوای ۲ متر بر ثانیه و توان ۲/۵ کیلووات در حدود ۳/۵ درصد است. در این

حالت دمای هوا ۵۵ درجه سانتیگراد در نظر گرفته شده است.

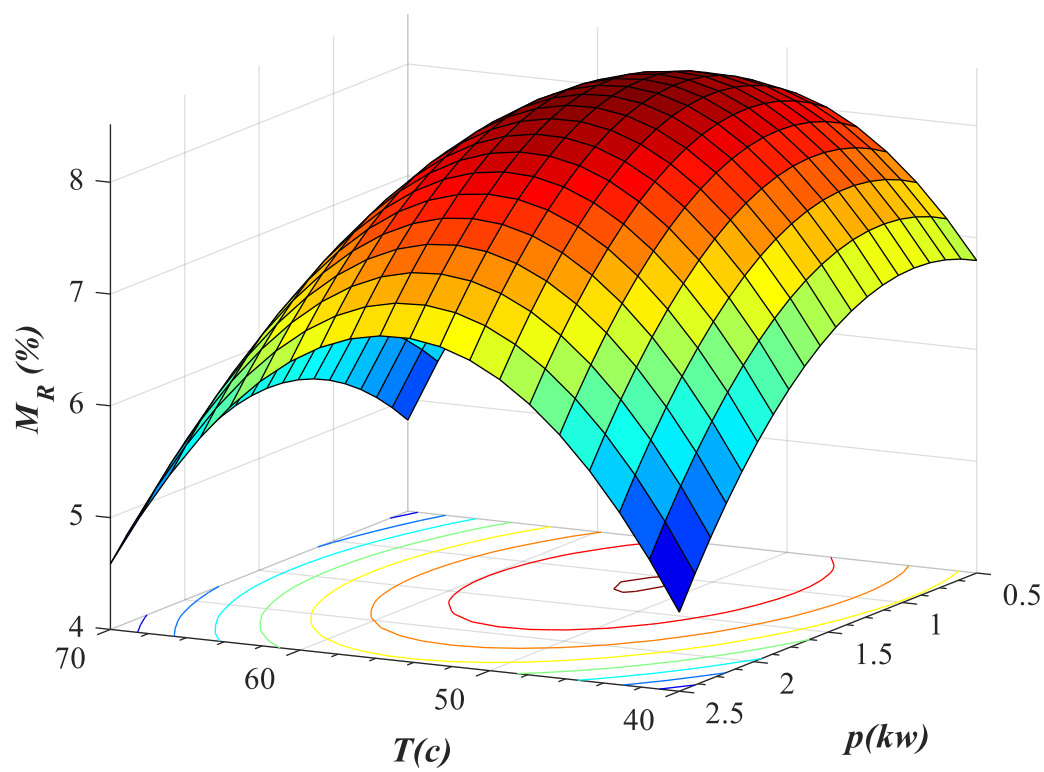
با توجه به نمودار **Error! Reference source not found.** حداقل نسبت رطوبت به ازای دمای ۷۰ درجه و توان ۲/۵ کیلووات در

حدود ۴/۵ درصد است. در این حالت سرعت هوا ۱/۵ متر بر ثانیه در نظر گرفته شده است.

شکل (۴-۱۵) اثر توان و سرعت هوا بر روی نسبت رطوبت



شکل (۴-۱۶) اثر دما و توان مایکروویو بر روی نسبت رطوبت



فصل ۵:

نتیجه گیری

۱-۵- مقدمه

در این پژوهش مدل سازی نسبت رطوبت بر حسب سه متغیر ورودی سرعت هوای گرم ورودی، دمای هوای گرم و توان مایکروویو به کمک شبکه عصبی پیش بینی می گردد همچنین در گام بعد یک بهینه سازی به کمک مدل سطح پاسخ (RSM) انجام گرفت.

۲-۵- جمع بندی

- ساختار شبکه عصبی ۳-۶-۱ به عنوان بهترین ساختار انتخاب گردید زیرا بالاترین دقت و کمترین خطای مدل سازی دارد. لایه ورودی سه نرون (سه متغیر مستقل) و لایه خروجی یک نرون (یک متغیر وابسته) دارد. همچنین تعداد نرون در لایه پنهان ۶ عدد است.
- در این مطالعه از ۷۳ داده واقعی استفاده گردید. داده ها به صورت تصادفی توسط نرم افزار متلب به سه دسته آموزش (۷۰٪)، صحنه سنجی (۱۵٪) و تست (۱۵٪) جداسازی شد. نکات زیر در حین مدل سازی اهمیت ویژه ای دارند.
- میزان خطای میانگین برای داده تست درپیش بینی مقدار نسبت رطوبت کمتر از ۷ درصد بدست آمد.
- مقدار خطای میانگین مربعات برای داده آموزش صحنه سنجی و تست به ترتیب ۰/۰۱۰۲، ۰/۰۰۶۹ و ۰/۰۱۷ بدست آمد
- مقادیر ماتریس وزن و بایاس برای مدل شبکه عصبی بدست آمد و ارائه گردید
- به کمک مدل رویه پاسخ ارتباط میان متغیرهای مستقل (دما-سرعت و توان) و متغیر وابسته (نسبت رطوبت) در فرآیند خشک کردن ترکیبی با مایکروویو استخراج شد و معادله آن

ارائه گردید

- حداقل رطوبت به ازای دمای ۷۰ درجه سانتیگراد و سرعت هوای ۲ متر بر ثانیه بدست می آید. مقدار رطوبت در این حالت در حدود ۲ درصد است.
- حداقل نسبت رطوبت به ازای سرعت هوای ۲ متر بر ثانیه و توان ۲/۵ کیلووات در حدود ۳/۵ درصد است. در این حالت دمای هوا ۵۵ درجه سانتیگراد در نظر گرفته شده است.
- حداقل نسبت رطوبت به ازای دمای ۷۰ درجه و توان ۲/۵ کیلووات در حدود ۴/۵ درصد است. در این حالت سرعت هوا ۱/۵ متر بر ثانیه در نظر گرفته شده است.

۳-۵- پیشنهادات

- در راستای بهبود و ارتقاء و ادامه این تحقیق پیشنهادات زیر ارائه میگردد
- اندازه گیری تجربی شاخص تغییر رنگ ، هاردنس و مدلسازی آن به کمک تکنیک های هوش مصنوعی مانند انفیس و شبکه عصبی
 - بهینه سازی شرایط خشک کردن ترکیبی به کمک الگوریتم ژنتیک الگوریتم کوچ پرندگان
 - پیش بینی رطوبت محصول با استفاده از روش SVM
 - بکار گیری انواع دیگر خشک کن به جای استفاده از خشک کن میکروویو
 - بهینه سازی هزینه بهره برداری و هزینه سرمایه گذاری و یافتن شرایط بهینه دمای هوا سرعت خشک کردن و توان میکروویو
 - اندازه گیری میزان تخلخل محصول و استخراج شرایط بهینه بر اساس آن
 - استفاده از مدل های لایه نازک در پیش بینی و مدلسازی نسبت رطوبت محصول

مراجع

- [1] Madrera, R.R., Bedriñana, R.P. and Valles, B.S., 2017. Enhancement of the nutritional properties of apple pomace by fermentation with autochthonous yeasts. *LWT-Food Science and Technology*, 79, pp.27-33.
- [2] Ebadi, T., Rahmati, M., Azizi, M., Hasanazadeh khayyat, M. (2009). Effects of different drying methods (natural method, oven and microwave) on drying time, essential oil content and composition of Savory (*Satureja hortensis* L.). *Iranian J. Med. Aromat. Plants*, 26(4), 477-489.
- [3] Jiang, J., Dang, L., Yuensin, C., Tan, H., Pan, B. and Wei, H., 2017. Simulation of microwave thin layer drying process by a new theoretical model. *Chemical Engineering Science*, 162, pp.69-76
- [4] Maskan, M. (2000). Microwave/air and microwave finish drying of banana. *Journal of Food Engineering*, 44, 71-78.
- [5] Funebo, T., & Ohlsson, T. (1998). Microwave-assisted air dehydration of apple and mushroom. *Journal of Food Engineering*, 38(3), 353-367.
- [6] Akpinar, K., Bicer, Y., and Cetinkay, F. 2006. Modelling of thin layer drying of parsley leaves in a convective dryer and under open sun. *Journal of Food Engineering*, 3: 308-315.
- [7] Aghajani, N., Kashaninezhad, M., Kadivar, M., and Hosseini, S.H. 2009. Effect of temperature and dryer type on physicochemical properties of barley malt (two varieties). *Journal of Agricultural Sciences and Natural Resources*. 16: 147- 157.
- [8] Schiffmann, R.F. (2001). Microwave processes for the food industry. In: Datta, A.K., Anantheswaran, R.C. (Eds), *Handbook of Microwave Technology for Food Applications*. New York: Marcel Dekker.
- [۹] عسکری غلامرضا ، امام جمعه زهرا (۱۳۸۳) بکارگیری روش خشک کردن ترکیبی (پوشش دادن ، خشک کن هوا و مایکروویو در خشک کردن برگه‌های نازک سیب علوم کشاورزی ایران ۳(۳۵)
- [۱۰] توکلی پور، حمید (۱۳۸۰)، خشک کردن مواد غذایی اصول و روش ها، انتشارات آیش. چاپ اول.
- [۱۱] حامد موسویان. محمدتقی و محمدپور. وحید(۱۳۸۵)، بررسی پارامترهای مؤثر در فرایند خشک کردن مواد غذایی با امواج مایکروویو، ششمین همایش ملی دانشجویی مهندسی شیمی و پنجمین همایش ملی دانشجویی مهندسی نفت.

[۱۲] عسگری، غلام رضا (۱۳۸۲)، بررسی و مقایسه ویژگی های فیزیکی برش های نازک سیب خشک شده با استفاده از سه روش خشک کردن با هوای داغ، مایکروویو و انجمادی، پایان نامه ی دوره دکتری، دانشگاه تهران.

[13] Singh H. (2001). Osmotic dehydration of carrot shreds. *Journal of Food Science and Technology*, 38(2): 152-154.

[14] Nieto, A., Salvatori, D., Castro, M. A., & Alzamora, S. M. (2016). Air drying behaviour of apples as affected by blanching and glucose impregnation. *Journal of Food Engineering*, 36(1), 63–79.

[15] Sacilik, K., & Elicin, A. K. (2006). The thin layer drying characteristics of organic apple slices. *Journal of Food Engineering*, 73, 281–289.

[16] Ramaswamy, H. S., & van Nieuwenhuijzen, N. H. (2002). Evaluation and modeling of two-stage osmo-convective drying of apple slices. *Drying Technology*, 20(3), 651–667.

[17] Velic, D., Planinic, M., Tomas, S., & Bilic, M. (2014). Influence of airflow velocity on kinetics of convection apple drying. *Journal of Food Engineering*, 64(1), 97–102.

[18] Fenton, G. A., & Kennedy, M. J. (1998). Rapid dry weight determination of kiwifruit pomace and apple pomace using an infrared drying technique. *New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science*, 26, 35–38.

[19] Milczarek, R.R., Ferry, J.J., Alleyne, F.S., Olsen, C.W., Olson, D.A. and Winston, R., 2017. Solar thermal drum drying performance of prune and tomato pomaces. *Food and Bioproducts Processing*, 106, pp.53-64.

[20] Therdthai, N., and Zhou, W. 2009. Characterization of microwave vacuum drying and hot air drying of mint leaves (*Mentha cordifolia* Opiz ex Fresen). *Journal of Food Engineering*, 3: 482-489.

[21] Özbek, B., and Dadali, G. 2007. Thin-layer drying characteristics and modelling of mint leaves undergoing microwave treatment. *Journal of Food Engineering*, 4: 541–549.

[22] Yanbalagh, D., Noori Bigdeli, H. (1394). Comparison of dried apple production by solar dryer and drying with hot air (oven). First National Conference on Agricultural and Environmental Sciences Iran, Ardabil Research Center of the Earth cave, (pp.8).

[23] Nasrollahi, F., Esmaeeli, M. (1393). Effect of drying on quality Pear sheet of Sardasht. The first national conference between meals. Institute of Food Science and Technology Research Mashhad, Mashhad, (pp.8).

[24] Mehdinejad Shanii, M., Arabshahi Dolouee, S., Fadavi, A. (1393). Study of antioxidant properties different extracts of Watercress (*Nasturtium Officinale* L). The Second National Conference of Medicinal Plants and Sustainable Agriculture, Hamedan, (pp.21).

[۲۵] استاذزاده، سیده حسنا، سیدالنگی، سیده زهرا. (۱۳۹۵). 'اثر فرایند خشک کردن بر خصوصیات کمی و کیفی برگ گیاه علف چشمه فناوری‌های نوین غذایی، ۴(۱)

[26] Giri, S. K. and Prasad, Suresh. (2005). Drying kinetics and rehydration characteristics of microwave-vacuum and convective hot-air dried mushrooms . Journal of Food Engineering, 78 : 512-521.

[27] Therdthai, N., Zhou, W. (2008). Characterization of microwave vacuum drying and hot air drying of mint leaves (*Mentha cordifolia* Opiz ex Fresen). Journal of Food Engineering. 3(91): 482- 489

[28] Figiel, A. (2010). Drying kinetics and quality of beetroots dehydrated by combination of convective and vacuum-microwave methods. Journal of Food Engineering. 4(98): 461-470.

[29] Huang, L & Zhang, M. (2011). Influence of combination drying methods on composition, texture, aroma and microstructure of apple slices. LWT-Food science and Technology. In press.

[30] Li, Zh., Raghavan, G.S.V., Wang, N & Vignoeault, C. (2010). Drying rate control in the middle stage of microwave drying. 2(104): 234-238.

[31] Dorofejeva, K., Rakcejeva, T., Galoburda, R., Dukalska, L & Kviesis, J. (2011). Vitamin C content in Latvian cranberries dried in convective and microwave vacuum driers. Procedia Food Science. 1: 433-440.

[32] Scaman, C.H & Durance, T.D. (2007). Combined microwave vacuum-drying. Emerging Technologies for Food. 507-533.

[33] Yang, J., Chen, J., Zhao, Y & Mao, L. (2010). Effects of drying processes on the antioxidant properties in sweet potatoes. Agricultural Sciences in China.

[34] Maskan, M. (2001) . Kinetics of color change of kiwifruits during hot air and microwave drying. Journal of Food Engineering, 48: 169-175.

[35] - Boudhriou, N., Giampaoli, p. and Bonazzi, C. (2003). Changes in aromatic components of banana during ripening and air-during. U- Technol, 36: 633-642.

[36] Nawirska, A., Figiel, A., Kucharska, A.Z., Łętowska, A.S & Biesiada, A. (2009). Drying kinetics and quality parameters of pumpkin slices dehydrated using different methods. Journal of Food Engineering. 1(94): 14-20.

[37] Ruiz Diaz, G., Martinez, J., Fito, p. and chiralt, A. (2003) Modelling of dehydration - rehydration of orange slices in combined microwave - air drying. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 4: 203-209.

- [38] Piotrowski, Dawid., Lenart, Andrzej. and Wardzynski, Andrzej. (2004). Influence of osmotic dehydration on microwave - convection drying of frozen strawberries. *Journal of Food Engineering* . 65: 519 – 525.
- [39] Soysal , Y. (2004). Microwave Drying characteristics of parsley. *Biosystem Engineering* , 89: 167 – 173.
- [40] Wang, Zhengfu., Sun, Junhong., Chen, Fang., Liao, Xiaojun. and Hu Xiaosong. (2006). Mathematical modeling on thin layer microwave drying of apple pomace with and without hot air pre-drying . *Journal of Food Engineering*, 24: 1159-1164.
- [41] Heredia, A., Barrera, C. and Andres, A. (2006). Drying of cherry tomato by combination of different dehydration techniques. Comparison of kinetics and other related properties. *Journal of Food Engineering*, 80: 111-118.
- [42] Sharma, G. p. and Prasad, Suresh. (2006a). Optimization of process parameters for microwave drying of garlic cloves. *Journal of Food Engineering*. 75: 441 – 446.
- [43] Alibas, I. (2007). Microwave, air and combined microwave–air-drying parameters of pumpkin slices. *LWT - Food Science and Technology*. 8(40): 1445-1451.
- [44] Cristina Bilbao-Sáinz, Ana Andrés, Amparo Chiralt, Pedro Fito. (2006). Microwaves phenomena during drying of apple cylinder. *Journal of Food Engineering*. 1(74):160-167.
- [45] Khraisheh, M.A.M., McMinn, W.A.M & Magee, T.R.A. (2004). Quality and structural changes in starchy foods during microwave and convective drying. *Food Research International*. 5(37): 497-503.
- [46] Sanchez, A.C., Szumny, A., Figiel, A., Jalszynski, K., Adamski, M & Barrachina, A.A.C. (2010). Effect of vacuum level and microwave power on rosemary volatile composition during vacuum-microwave drying. *Journal of Food Engineering*. 2(103): 219-227.
- [47] Guo, Qiushan, et al. "Microwave processing techniques and their recent applications in the food industry." *Trends in Food Science & Technology* 67 (2017): 236-247.
- [48] Atuonwu, J. C., and S. A. Tassou. "Quality assurance in microwave food processing and the enabling potentials of solid-state power generators: A review." *Journal of Food Engineering* (2018).
- [49] Gaukel, V., T. Siebert, and U. Erle. "Microwave-assisted drying." *The Microwave Processing of Foods* (Second Edition). 2017. 152-178.
- [50] Babu, A. K., et al. "Review of leaf drying: Mechanism and influencing parameters, drying methods, nutrient preservation, and mathematical models." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 90 (2018): 536-556.
- [51] Technical report of microwave drying unit of Tehran university

Abstract

The precise modeling of the drying process behavior is one of the important factors in the evaluation of apple pulp indexes. In this research, experimental data on the drying process of fresh and pre-dried apple pulp drying process (total of two states) were investigated in different microwave power (150-300-450-600 W) for ten thin layer models. The results showed that the optimum moisture content reached 71% shorter than the first one. The results also showed that 31.16% and 35.05%, and 26.97% and 76.26% of the total drying time of fresh apples, only dehydration was dried from the first half of the curve and the rest (70% Time) will only reduce the moisture content of the product from 0.5 to zero. In general, roughly 70% of the total time spent on drying was used to remove the secondary half of the microwave drying moisture with or without pre-drying.

Except for the first part of the curve, which is related to the start of the drying process. In other words, there was a very short upsurge in the initial periods. This observation is consistent with the previous reports of thin layer drying of biological products. At the initial time interval, the temperature of the debris is low, and the microwave energy, instead of the evaporation of moisture, only increases the temperature of the product. This causes the moisture to have a relatively fast but short climb at the beginning of the process. On average, energy consumption in Mode 2 is less than 25% less than Mode 1. Therefore, it can be concluded that the drying process is carried out using hot air cooled and then microwave drying with high energy efficiency. These observations were consistent with previous reports.

The optimal coefficients of each of the 10 models were calculated and presented for both types of fresh apples and preheated apples in different microwave powers using the PSO algorithm. The model (page model) offers the highest accuracy and the least predictive error compared to other models. So that the maximum error of this model in estimating the moisture content of the product is less than 2,2, 1,6, 3 and 1,4% respectively for power The microwave was 150-300-450-600 watts. These coefficients and thin-layer models can be a good guide for industrial designers and operating instructions for microwave oven drying.

Keywords: Apple Pulp - Microwave - Convection - Thin Film Model



Energy Institute of Higher Education

**Presenting a mathematical model to predict the
moisture content of fruit waste in a radiant dryer
using MATLAB software**

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirement for the
Degree of Master of Science (Doctor of Philosophy) in Mechanical -
energy conversion**

**By:
Ali Bahoush**

**Supervisor:
Dr. Mirzaei**

**Advisor:
Dr. Maddah**

August 2018