دانشکده کشاورزی
گروه علوم و صنایع غذایی

پایان نامه جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد رشته علوم و صنایع غذایی

موضوع:

تاثیر خواص مکانیکی در بافت و شاخص های کیفی کیوی خشک شده با سه روش: هوای داغ، اسمز و مایکروویو

استاد راهنما:
آقای دکتر محسن اسمعیلی

اساتید داور:
آقای دکتر محمود رضا زادباری **خانم دکتر فریبا زینالی**

تنظیم و نگارش:
سیده الهام خلیلی

بهمن ماه ۱۳۹۰

تقدیم به...

پدر بزرگوار و مادر مهربانم که فروغ نگاهشان، گرمی کلامشان و روشنی رویشان سرمایه جاودانگی زندگی من بوده است. در برابر وجود پرمهرشان زانوی ادب بر زمین می نهم و با دلی سرشار از عشق و محبت بر دستانشان بوسه می زنم.

همسر عزیزم، یاور همیشگی زندگیم: اسوه صداقت و صبوری

تقدیم به حضور مهربان تنها **برادرم** شهاب الدین

و **مادر همسرم** که پیوسته مدیون محبت هایش بوده و خواهم بود.

تقدیر وسپاس بیکران از زحمات استاد ارجمندم آقای دکتر اسمعیلی که راهنمای راهم بودند و صبورانه مرا آموختند که برای رسیدن در تکاپو باشم.
هم چنین از تمامی اساتید گرانقدر گروه صنایع غذایی که در شش سال دوره تحصیلم از دانش ایشان بهره مند گشتم.
و خانواده عزیزم که همواره مرا همراهی نمودند.

چکیده

خشک کردن یکی از فرایند های مهم پس از برداشت محصولات کشاورزی است. کیفیت محصول خشک شده نه تنها تابع تغییرات فیزیکی، شیمیایی و بیوشیمیایی حین فرآیند است بلکه خواص فیزیکو شیمیایی میوه تازه مورد استفاده نیز می تواند کیفیت محصول نهایی را تحت تأثیر قرار دهد. در این تحقیق اثر سه روش خشک کردن (آون، اسمز-آون و اسمز-مایکروویو) و هاردنس میوه تازه کیوی (رقم هایوارد) روی رنگ (اختلاف کل رنگ، شدت رنگ و زاویه هیو) و بافت (هاردنس و سفتی) محصول نهایی بررسی شد. میوه ها بر اساس مقدار هاردنس به سه دسته سفت، با سفتی متوسط و نرم تقسیم بندی شد. برای انجام آزمایش میوه تازه از بازار خریداری و تا زمان مصرف در یخچال با دمای ۴ °C نگهداری گردید. قبل از خشک کردن نمونه ها، رنگ (مقادیر L، a و b)، هاردنس، درجه بریکس، درصد قند و درصد رطوبت آنها اندازه گیری شد. به منظور بررسی مکانیسم خشک شدن میوه کیوی و توصیف روند فرآیند، ضریب نفوذ موثر رطوبت (D_{eff}) محاسبه و مناسبترین مدل ریاضی از بین ۹ مدل آزمایش شده تعیین گردید. مناسبترین مدل ریاضی براساس بیشترین مقدار ریشه سوم میانگین هندسی نسبت ضریب تبیین (R^2) به ضرب مقدار مربع خی (χ^2) در ریشه مربعات میانگین خطا ($RMSE$)، انتخاب شد.

نتایج نشان داد که شدت خشک شدن میوه کیوی در دو روش آون و اسمز-آون فقط دارای سرعت نزولی بوده ولی در روش اسمز-مایکروویو هر دو دوره سرعت ثابت و نزولی مشاهده می شود. بیشترین مقدار D_{eff} در روش خشک کردن با اسمز-مایکروویو بدست آمد. مقدار این ضریب در روش خشک کردن اسمز-مایکروویو از (m^2/s) $۲/۴۳\times۱۰^{-۸}$ تا $۶/۰۷۵\times۱۰^{-۸}$ ، در روش اسمز- آون (m^2/s) $۰/۸۱\times۱۰^{-۹}$ تا $۱/۰۰\times۱۰^{-۹}$ و در روش آون (m^2/s) $۰/۹۷\times۱۰^{-۹}$ تا $۱/۰۰\times۱۰^{-۹}$ بدست آمد. نتایج نشان داد که هاردنس یا میزان سفتی میوه در روند خشک کردن موثرند. برای توصیف رفتار خشک کردن با روش اسمز مایکروویو برای میوه کیوی با هر میزان هاردنس مدل پیج مناسبترین مدل انتخاب شد. در خشک کردن میوه هایی با درجه سفتی بیشتر و متوسط، مدل تقریب نفوذ برای روش خشک کردن اسمز-آون و مدل هندرسون و پابیس اصلاح شده برای روش آون بهترین برازش را نشان دادند. نتایج همچنین نشان داد که در هر سه روش خشک کردن، بیشترین اختلاف کل رنگ میوه خشک مربوط به میوه های سفت است. صرف نظر از میزان هاردنس میوه تازه، نمونه های خشک شده با روش اسمز- آون کمترین اختلاف کل رنگ و نمونه های خشک شده با روش آون بیشترین اختلاف کل رنگ را داشتند. بر اساس نتایج، روش خشک کردن به شدت بر روی رنگ محصول و زاویه هیو اثر گذار است. میوه های خشک حاصل از میوه های نرم مورد استفاده در روش اسمز-آون دارای بیشترین هاردنس و سفتی بودند. میانگین هاردنس و سفتی محصول خشک حاصل از روش اسمز-آون بدون در نظر گرفتن هاردنس اولیه میوه به ترتیب ۱/۵۷±۰/۰۹ ۴ و ۱۰/۱۸±۳۰/۵۴ نیوتن محاسبه شد.

واژگان کلیدی: خشک کردن، کیوی، بافت و رنگ، سینتیک

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فصل اول: مقدمه ۱
فصل دوم: مرور منابع ۳
۲-۱ کیوی ۳
۲-۲ خشک کردن ۳
۲-۲-۱ مراحل مختلف فرایند خشک شدن ۴
۲-۳ خشک کردن به روش هوای داغ ۶
۲-۴ خشک کردن اسمزی ۶
۲-۵ خشک کردن مایکروویوی ۸
۲-۵-۱ پلاریزاسیون یونی ۹
۲-۵-۲ چرخش دوقطبی ۹
۲-۵-۳برهم‌کنش میدان الکترومغناطیسی با مواد ۱۰
۲-۵-۴ خواص دی‌الکتریک ۱۰
۲-۵-۵ مزایای خشک کردن مایکروویوی ۱۳
۲-۶ تغییرات ایجاد شده در مواد غذایی طی فرایند خشک کردن ۱۵
۲-۶-۱ ویژگی‌های ساختمانی ۱۵
۲-۶-۲ ویژگی‌های ظاهری و عینی ۱۶
۲-۶-۳ ویژگی‌های بافتی ۱۷
۲-۶-۴ آبگیری مجدد ۱۸
۲-۶-۵ چروکیدگی ۱۹
۲-۷ ضریب نفوذ مؤثر رطوبت D_{eff} ۱۹
۲-۸ مدلهای خشک کردن ۲۰
۲-۸-۱مدلهای نیمه تئوری ۲۱
۲-۹ پیشینه تحقیقات انجام شده ۲۴
فصل سوم: مواد و روشها ۲۸
۳-۱ مواد ۲۸
۳-۱-۱ کیوی ۲۸
۳-۱-۲ ساکارز ۲۸
۳-۱-۳ اسلایسر ۲۸
۳-۱-۴ اجاق مایکروویو ۲۸
۳-۱-۵ وسایل آزمایشگاهی ۲۸
۳-۱-۶ رفراکتومتر رومیزی ۲۹
۳-۱-۷ خشک کن ۲۹

۳-۱-۸ بافت سنج ۲۹
۳-۱-۹ رنگ سنج ۲۹
۳-۱-۱۰ ترازوی دیجیتالی ۲۹
۳-۲ روش ها ۲۹
۳-۲-۱ آماده سازی نمونه ۲۹
۳-۲-۲ اندازه گیری رطوبت اولیه نمونه ها ۲۹
۳-۲-۳ اندازه گیری بریکس نمونه ها ۳۰
۳-۲-۴ اندازه گیری اسیدیته ۳۰
۳-۲-۵ اندازه گیری قند ۳۰
۳-۲-۶ پیش تیمار اسمزی ۳۰
۳-۲-۷ خشک کردن به روش آون ۳۰
۳-۲-۸ خشک کردن به روش مایکروویو ۳۰
۳-۲-۹ اندازه گیری بافت ۳۱
۳-۲-۱۰ اندازه گیری رنگ ۳۰
۳-۲-۱۱ تجزیه و تحلیل آماری ۳۶
۴-۲-۱۱ نحوه محاسبه ضریب نفوذ مؤثر رطوبت ۳۶
فصل چهارم: نتایج و بحث ۳۷
۴-۱ ویژگی های کیوی تازه ۳۷
۴-۲ منحنی های خشک کردن ۳۷
۴-۳ ضریب نفوذ مؤثر رطوبت ۳۹
۴-۴ سینتیک خشک شدن ۴۰
۴-۵ مطالعه تأثیر روش خشک کردن در رنگ و بافت محصول نهایی ۴۷
۴-۵-۱ رنگ ۴۷
۴-۵-۲ بافت ۴۹
۴-۶ مطالعه تأثیر خواص مکانیکی اولیه در رنگ و بافت محصول نهایی ۵۲
۴-۶-۱ رنگ ۵۲
۴-۶-۲ بافت ۵۴
۴-۷مطالعه اثر متقابل روش خشک کردن و خواص مکانیکی اولیه در رنگ و بافت محصول ۵۶
نتیجه گیری نهایی ۶۰
پیشنهادات ۶۱
منابع ۶۲

فهرست جداول

جدول ۱-۱ مدلهای ریاضی مورد استفاده در برازش داده های خشک کردن ۲۳
جدول ۳-۱ تنظیمات دستگاه آنالیزر بافت برای انجام آزمون تراکمی و نفوذ ۳۴
جدول ۴-۱ مشخصات کیوی تازه ۳۷
جدول ۴-۲ مقادیر ضریب نفوذ مؤثر رطوبت در سه روش خشک کردن ۴۰
جدول ۴-۳ مناسبترین مدل جهت پیش بینی فرایند خشک شدن بر اساس سفتی اولیه و روش خشک کردن ۴۱
جدول ۴-۴ مقادیر ضریب همبستگی، مربع کای و ریشه میانگین مربعات خطا بین داده های تجربی و نتایج پیش بینی شده توسط مدل نیوتن ۴۲
جدول ۴-۵ مقادیر ضریب همبستگی، مربع کای و ریشه میانگین مربعات خطا بین داده های تجربی و نتایج پیش بینی شده توسط مدل دو جمله ای ۴۲
جدول ۴-۶ مقادیر ضریب همبستگی، مربع کای و ریشه میانگین مربعات خطا بین داده های تجربی و نتایج پیش بینی شده توسط مدل لگاریتمی ۴۳
جدول ۴-۷ مقادیر ضریب همبستگی، مربع کای و ریشه میانگین مربعات خطا بین داده های تجربی و نتایج پیش بینی شده توسط مدل تقریب نفوذ ۴۳
جدول ۴-۸ مقادیر ضریب همبستگی، مربع کای و ریشه میانگین مربعات خطا بین داده های تجربی و نتایج پیش بینی شده توسط مدل پیج ۴۴
جدول ۴-۹ مقادیر ضریب همبستگی، مربع کای و ریشه میانگین مربعات خطا بین داده های تجربی و نتایج پیش بینی شده توسط مدل پیج اصلاح شده ۴۴
جدول ۴-۱۰ مقادیر ضریب همبستگی، مربع کای و ریشه میانگین مربعات خطا بین داده های تجربی و نتایج پیش بینی شده توسط مدل پیج اصلاح شده ۲ ..... ۴۵
جدول ۴-۱۱ مقادیر ضریب همبستگی، مربع کای و ریشه میانگین مربعات خطا بین داده های تجربی و نتایج پیش بینی شده توسط مدل هندرسون و پابیس اصلاح شده ۴۵
جدول ۴-۱۲ مقادیر ضریب همبستگی، مربع کای و ریشه میانگین مربعات خطا بین داده های تجربی و نتایج پیش بینی شده توسط مدل ونگ و سینگ ۴۶

فهرست اشکال

شکل۱-۱ منحنی شدت خشک شدن ۵
شکل ۳-۱ شکل ساده اجاق میکروویو و قسمت های مختلف آن.....۳۱
شکل ۳-۲ نمونه منحنی نفوذ در روی میوه تازه کیوی با پروب استوانه ای (2 mm) ۳۲
شکل ۳-۳ نمونه منحنی نفوذ در روی میوه تازه کیوی بدون پوست با پروب استوانه ای (6 mm) ۳۲
شکل ۳-۴ نمونه منحنی نفوذ در روی کیوی خشک شده با پروب استوانه ای (6 mm) ۳۳
شکل ۳-۵ نمونه منحنی فشرش در روی کیوی خشک شده با پروب استوانه ای (25 mm) ۳۴
شکل ۳-۶ دستگاه اندازه گیری بافت ۳۵
شکل ۴-۱ منحنی شدت خشک کردن با روش آون ۳۸
شکل ۴-۲ منحنی شدت خشک کردن با روش اسمز- آون ۳۸
شکل ۴-۳ منحنی شدت خشک کردن با روش اسمز- مایکروویو ۳۹
شکل ۴-۴ منحنی تأثیر روش خشک کردن روی اختلاف کل رنگ ۴۷
شکل ۴-۵ منحنی تأثیر روش خشک کردن روی زاویه هیو ۴۸
شکل ۴-۶ منحنی تأثیر روش خشک کردن روی کروما شدت رنگ ۴۹
شکل ۴-۷ منحنی تأثیر روش خشک کردن روی هاردنس محصول آزمون نفوذ ۵۰
شکل ۴-۸ منحنی تأثیر روش خشک کردن روی هاردنس محصول آزمون تراکمی ۵۱
شکل ۴-۹ منحنی تأثیر هاردنس اولیه روی اختلاف کل رنگ محصول ۵۲
شکل ۴-۱۰ منحنی تأثیر هاردنس اولیه روی کروما ۵۳
شکل ۴-۱۱ منحنی تأثیر هاردنس اولیه روی زاویه هیو ۵۴
شکل ۴-۱۲ منحنی تأثیرهاردنس اولیه روی هاردنس محصول (آزمون نفوذ) ۵۵
شکل ۴-۱۳ منحنی تأثیر هاردنس اولیه روی هاردنس محصول (آزمون تراکمی) ۵۵
شکل ۴-۱۴ منحنی اثر متقابل هاردنس اولیه و روش خشک کردن روی اختلاف کل رنگ محصول ۵۶
شکل ۴-۱۵ منحنی اثر متقابل هاردنس اولیه و روش خشک کردن روی کروما ۵۷
شکل ۴-۱۶ منحنی اثر متقابل هاردنس اولیه و روش خشک کردن روی زاویه هیو ۵۸
شکل ۴-۱۷ منحنی اثر متقابل هاردنس اولیه و روش خشک کردن روی هاردنس محصول (آزمون نفوذ) ۵۹
شکل ۴-۱۸ منحنی اثر متقابل هاردنس اولیه و روش خشک کردن روی هاردنس محصول (آزمون تراکمی) ۵۹

فصل اول

مقدمه

فراوری محصولات کشاورزی، به مقدار قابل ملاحظه‌ای تنوع موادغذایی را افزایش داده است. روش‌های اصلی فراوری موادغذایی شامل کنسرو کردن، منجمد کردن، خشک کردن، نمک سود کردن، قرار دادن در آب نمک و سرکه[1] و خشک کردن می‌باشد[۵]. موادغذایی فراوری شده به منظور رفع نیازهای غذایی انسان، در مواقعی که مواد تازه در دسترس نیست، مورد استفاده قرار می‌گیرند. امروزه در مقایسه با گذشته، سهم بیشتری از محصولات کشاورزی، فراوری می‌شوند[۷].

یکی از فرایند های مهم پس از برداشت محصولات کشاورزی خشک کردن آنهاست. هدف از خشک کردن مواد غذایی تولید محصولی با کیفیت بالا و قابلیت نگهداری بیشتر با کاربرد ویژه و خصوصیات مشخص، با صرف حداقل هزینه و با بیشترین راندمان تولید است. کیفیت محصول خشک شده تابع تغییرات فیزیکی، شیمیایی و بیوشیمیایی است که در حین فرآیند خشک کردن اتفاق می افتد. این تغییرات خود متأثر از شرایط خشک کردن و خصوصیات فیزیکوشیمیایی ماده تحت فرآیند است. ممکن است از یک نوع ماده بسته به روش خشک کردن و شرایط حاکم بر فرآیند و تحت تأثیر عوامل مؤثر بر ماده، مواد خشک با خواص متفاوت ایجاد شود[۳]. میوه کیوی از سال ۱۳۴۷ وارد ایران شده و از سال ۱۳۶۷ به صورت تجاری به بازار عرضه شد. ایران با تولید سالانه ۲۸۹۸۰ تن از این میوه مقام چهارم را در دنیا به خود اختصاص می دهد[۴]. روش های مختلفی برای خشک کردن میوه ها و سبزیجات وجود دارد که هر یک معایب و مزایای مخصوص به خود را دارند. رایج ترین روش خشک کردن در مواد غذایی استفاده از هوای داغ است که به مدت طولانی تغییرات اساسی در مشخصات میوه تازه ایجاد می کند[۱۶]. در روش مایکروویو به دلیل آنکه انتقال گرما به روش هدایت صورت نمی گیرید و حرارت در کل بافت ماده غذایی تولید می گردد لذا سرعت انتقال حرارت در آن سریع تر از سایر روش های خشک کردن می باشد[۱۵و ۵۵]. پیش خشک کردن اسمزی نیز تکنیکی است که به منظور تولید محصولات با میزان رطوبت متوسط (IMF) به کار می رود. این فرایند شامل غوطه ورسازی قطعات غذایی در یک محلول هایپرتونیک می باشد[۸۵]. در این فرایند به دلیل استفاده محدود و کوتاه مدت از جریان هوای گرم برای تکمیل عملیات خشک کردن، نه تنها ویژگی های مطلوب محصول در حد قابل توجهی حفظ می گردد، بلکه میزان نیاز به انرژی حرارتی جهت حفظ آب اضافی محصول شدیداً کاهش می یابد. از طرفی با به کارگیری محلول اسمزی، تا حد قابل ملاحظه ای از واکنش های قهوه ای شدن آنزیمی جلوگیری شده و امکان حذف مواد شیمیایی نظیر ترکیبات گوگردی، افزایش خواهد یافت[۱۸]. یک روش مناسب برای درک پدیده های درگیر در فرایند خشک کردن، مدل سازی آن و پیش بینی رفتار ماده غذایی در طی فرایند است[۷۶].

---

[1] Pickling

ویژگی‌های ظاهری و رنگی موادغذایی خشک شده به روش خشک کردن وابسته است. بافت محصول نهـایی از مهمترین صفات میوه ها و سبزیجات است[۵۸]، اگرچه اکثر مصرف کننده ها طعم را مهم ترین عامل مـی دانند، ولی تحقیقات نشان داده است که خصوصیات بافتی مهم تر از خواص طعمی هستند[۲۲]. میوه کیوی در ابتدای برداشت بافت سفتی دارد اما در طی دوره نگهداری به تدریج بافـت نرمـی پیـدا کـرده و از میـزان ویتامین های آن کاسته می شود[۱۱]. از آنجا که خواص فیزیکی و شیمیایی ماده خام می تواند در کیفیـت محصول نهایی اثرگذار باشد، این سؤال باقی می ماند که آیا ویژگی مکانیکی (بافتی) میوه خام مورد اسـتفاده در فرآیند خشک کردن می تواند کیفیت نهایی محصول را تحت تأثیر قرار دهد یا نه؟

هدف از این تحقیق بررسی اثر روش خشک کردن و سفتی میوه تازه روی خواص کیفی محصول نهایی مانند بافت و رنگ و معرفی مناسب ترین مدل جهت خشک کردن میوه با توجه به سفتی اولیه است.

فصل دوم

مرور منابع

۲-۱ کیوی

گیاه کیوی(*Actinidia deliciosa*) درختچه ای با ساقه های خزنده و برگ های قلبی شکل است که در قرن اخیر به دنیا معرفی شده است. مبدأ اصلی گیاه کیوی جنگل های مناطق معتدل اطراف رودخانه یانگ تسه در جنوب چین است. این میوه دارای ارقام مختلفی نظیر هایوارد، برونو، مانتی و آبوت می باشد که با توجه به شرایط اقلیمی و آب و هوایی مناطق مختلف با کیفیت های متفاوت قابل برداشت است[۲]. محبوبیت این میوه در سطح جهانی در سالهای اخیر افزایش یافته است و از نظر تولید جهانی بعد از موز، پرتقال و سیب در رتبه چهارم قرار دارد. طبق آخرین تحقیقات سازمان جهانی غذا و دارو، کیوی به عنوان یک ماده غذایی و دارویی معرفی شده است زیرا منبع بسیار خوبی از ویتامین C، فیبر رژیمی و ویتامین های K و E است. این میوه همچنین دارای ترکیبات آنتی اکسیدانی، انواع مواد معدنی و فیبر مناسب است[۸۸]. اصولاً تشخیص زمان مناسب برداشت کیوی بر خلاف سایر میوه ها به دلیل عدم وقوع تغییرات قابل مشاهده در رنگ، اندازه و شکل میوه مشکل است[۷۲]. این میوه طی رسیدن تغییرات بافتی پیدا کرده و در اثر بالا رفتن غلظت قندهای محلول و تغییر مواد پکتیکی از حالت نامحلول به محلول نرم می شود[۴۵].

۲-۲ خشک کردن

با کاهش دما، کاهش رطوبت و یا هر دو می‌توان به میزان قابل‌ملاحظه‌ای طول دوره نگهداری مواد غذایی را افزایش داد. کاهش رطوبت به وسیله عملیات خشک کردن ممکن است. خشک کردن موادغذایی بخشی از مهندسی صنایع غذایی است که هدف آن به‌کارگیری مجموعه عملیات واحد جهت افزایش زمان ماندگاری محصول، پاسخ سریع به نیازهای بازار مصرف، کاهش هزینه‌ها، افزایش راندمان و کیفیت است. خشک کردن، فرایند حذف رطوبت از طریق انتقال همزمان جرم و حرارت است. انتقال حرارت از فضای پیرامون ماده غذایی موجب تبخیر رطوبت سطحی می‌شود. هم‌چنین رطوبت می‌تواند از درون جسم به سطح محصول منتقل و سپس تبخیر شود. توسعه و گسترش کاربردهای خشک کردن آن را به عنوان یک فرایند مهم و حیاتی نه فقط در صنعت غذا بلکه در بسیاری از صنایع پایه و مهم مطرح کرده است[۳].

خشک کردن موادغذایی راهی مناسب و مطمئن برای نگهداری و ذخیره‌سازی آنها می‌باشد[۸]. خشک کردن یکی از قدیمی‌ترین روش‌های حفاظت از موادغذایی است. انسان‌ها در گذشته میوه‌ها، سبزی‌ها، گوشت و ماهی را با استفاده از نور خورشید خشک می‌کردند[۹]. این فرایند باعث کاهش فعالیت آبی ماده غذایی تا حد ایمن از طریق حذف آب موجود در آن به‌واسطه تبخیر یا تصعید می‌گردد[۱۵]. به‌طور کلی خشک کردن موادغذایی عبارت است از خارج کردن رطوبت از آن به طوری که باکتری‌ها و عوامل بیماری زا قادر به رشد

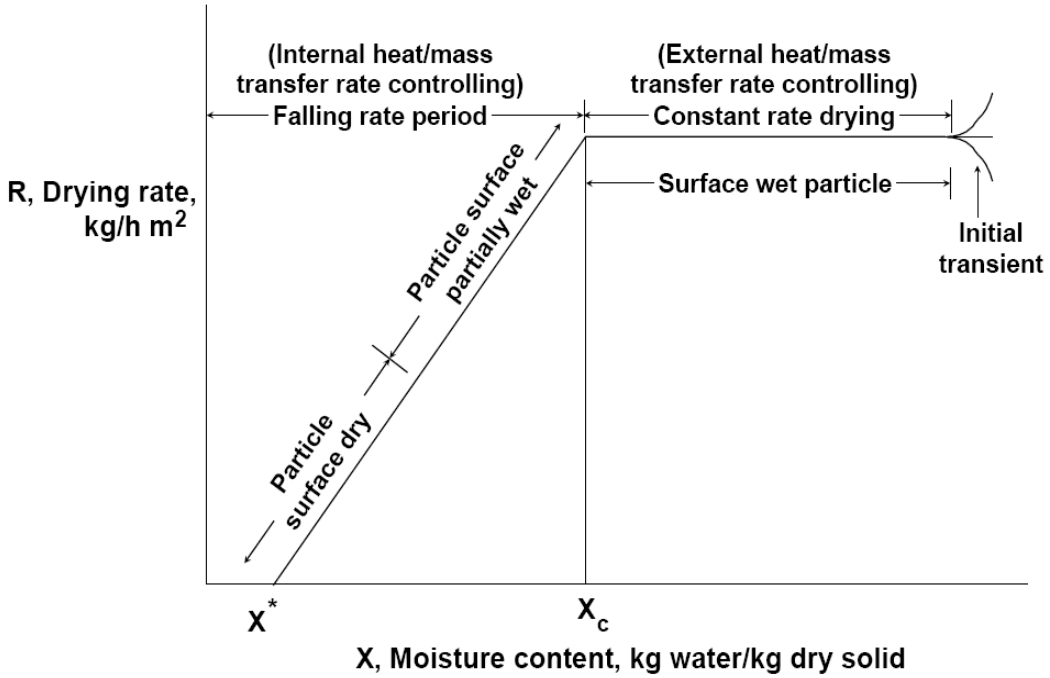
نبوده و از فساد ماده غذایی جلوگیری شود[۱۰]. خشک کردن ضمن دارا بودن نقش حفاظتی از طریق کاهش فعالیت آبی، به دلیل کاهش وزن و حجم محصول پس از خشک شدن به میزان زیادی هزینه‌های حمل‌ونقل و ذخیره‌سازی را کاهش می‌دهد[۵]. خشک کردن میوه ها وسبزیجات به توجه ویژه ای نیاز دارد زیرا به عنوان منبع مهم ویتامین ها و مواد معدنی مورد نیاز بدن انسان می باشند وبه همین دلیل به عنوان یک بخش مهم در صنعت کشاورزی مطرح است[۱۴].

برای کاهش رطوبت یک ماده توسط منبع گرم کننده، جسم را در تماس با هوای گرم قرار می‌دهند. به دلیل نیاز به انرژی زیاد در این فرایند می‌توان خشک کردن را یکی از پرهزینه‌ترین فرایندهای مهندسی شیمی و صنایع غذایی در نظر گرفت. بنابراین در موارد مختلفی دیده می‌شود که ابتدا رطوبت مواد توسط روش‌های مکانیکی تا حدی کاهش یافته و سپس برای رسیدن به رطوبت نهایی از روش‌های خشک کردن حرارتی استفاده می‌کنند. در ابتدا خشک کردن به صورت بسیار ساده و تنها با قرار دادن قطعات جامد مرطوب در زیر نور خورشید انجام می‌شد. کم‌کم خشک‌کن‌های غیر مداوم و سپس انواع مداوم ساخته شدند. با پیشرفت علم خشک کردن و بررسی روش‌های مختلف گردش هوای گرم درون خشک کن و روش‌های حرارت‌دهی مختلف برای افزایش بازدهی و سرعت خشک‌کن‌ها، هزینه خشک کردن تا حد زیادی کاهش یافته است[۶].

۲-۲-۱ مراحل مختلف فرایند خشک شدن:

هنگامی‌که موادغذایی خشک می‌شوند رطوبت آنها با آهنگ ثابتی کاهش نمی‌یابد. با پیشرفت زمان خشک شدن موادغذایی، از سرعت خروج رطوبت تحت شرایط ثابت کاسته می‌شود[۱۰]. طی فرایند خشک شدن تغییرات رطوبت و درجه‌حرارت مواد معمولاً توسط انتقال جرم و حرارت بین سطح ماده و محیط اطراف و داخل ماده کنترل می‌شود. شدت خشک شدن[1] که منعکس‌کننده تغییرات مقدار رطوبت ماده نسبت به زمان است به شدت تحت تأثیر پارامترهایی از فرایند خشک کردن مانند درجه‌حرارت، رطوبت، سرعت نسبی هوا، جهت جریان هوا، ضخامت محصول و فشار کل می‌باشد[۸].

[1] Drying rate



شکل۱-۱ منحنی شدت خشک شدن[۶۱]

همان‌طور که در شکل۱-۱ مشاهده می‌شود یک دوره اولیه کوتاه طی روند خشک شدن دیده می‌شود. این منحنی ناحیه گرم شدن محصول را نشان می‌دهد. در این دوره مواد با شرایط خشک شدن به تعادل می‌رسند. معمولاً دمای ماده جامد طی این دوره افزایش می‌یابد و بر سرعت خشک شدن افزوده می‌شود[۱۰].

دومین مرحله خشک شدن مرحله خشک شدن با سرعت ثابت[۱] نامیده می‌شود. پس از آن مرحله سوم خشک شدن شروع می‌شود که به آن مرحله نزولی سرعت خشک شدن[۲] گفته می‌شود[۸]. در مرحله خشک شدن با سرعت ثابت، انتقال گرما از سطح به مرکز و انتقال رطوبت از مرکز به سطح محصول اتفاق می‌افتد و آب به سرعت از مرکز ماده غذایی به سطح آمده و از آنجا تبخیر می‌شود در حالی که سطح محصول به صورت اشباع و مرطوب باقی می‌ماند. در حقیقت سرعت خروج آب از منافذ ماده غذایی به سطح آن با سرعت تبخیر آب در سطح ماده غذایی یکسان می‌باشد. هر چه عمق بستر محصول بیشتر و سرعت ثابت خشک شدن بالاتر باشد موجب می‌شود که فاز سرعت ثابت خشک شدن در میزان رطوبت بیشتری به اتمام برسد. تبخیر آب تا نقطه بحرانی در یک سطح معین با سرعت ثابتی انجام می‌گیرد و می‌توان آن را به تبخیر آب از یک سطح آب آزاد تشبیه کرد. در نقطه بحرانی سطح محصول دیگر مرطوب نبوده بلکه کاملاً خشک است زیرا رطوبت سطحی محصول طی خشک شدن تبخیر شده است.

[1] Constant rate period
[2] Fallimg rate period

از این پس مرحله نزولی سرعت خشک شدن آغاز می‌شود. با ادامه تبخیر رطوبت به تدریج لایه ضخیمی در سطح محصول به وجود می آید درحالی‌که هنوز رطوبت بخش مرکزی باقی مانده است. لایه‌های خارجی خشک شده به حالت مانعی برای انتقال گرما به داخل ماده غذایی درآمده و به علت بسته شدن راه‌های خروج رطوبت از سرعت خشک شدن کاسته می‌شود. در این صورت از طرفی سرعت انتقال گرما به مرکز ماده غذایی کند شده و از طرف دیگر رطوبت می‌بایست فاصله بیشتری را جهت خروج از ماده غذایی طی کند. لایه‌های خشک سطحی به تدریج به مرکز ماده نزدیک می‌شوند و آب از لایه‌های داخلی ماده تبخیر شده و از منافذ ماده غذایی خشک کندتر از حالت اول (مرحله خشک شدن با سرعت ثابت) به طرف بالا آمده و از سطح ماده غذایی خارج می‌شود. به علاوه در اثر خشک شدن محصول رطوبت نسبی تعادلی نیز به وجود آمده و انتقال رطوبت کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر هر چه رطوبت به محیط اطراف انتقال یابد مجدداً به‌وسیله محصول جذب می‌گردد. در این حالت به‌طور مداوم از سرعت تبخیر آب کاسته می‌شود و این عمل تا رسیدن به نقطه تعادل آبی[1] ادامه خواهد داشت[۹].

۲–۳ خشک کردن به روش هوای داغ

یکی از ساده ترین و متداولترین روش های خشک کردن استفاده از هوای داغ با روش جابه جایی است، خشک کردن با حرارت‌دهی جابه‌جایی هوا شامل قرار گرفتن ماده غذایی یا محصولات کشاورزی از قبیل دانه‌ها، میوه‌ها و سبزیجات در معرض هوا با دماهای بالا برای مدت زمان طولانی است[۹۵]. در خشک کردن به شیوه جابه‌جایی، لایه‌های خارجی محصول به شیوه جابه‌جایی حرارت می‌بینند و انتقال حرارت به بخش‌های داخلی محصول به شیوه هدایت دنبال می‌شود. رطوبت ابتدا از سطح محصول خارج می‌گردد. در نتیجه گرادیان رطوبتی ایجاد می‌شود که مکانیسم اصلی جریان رطوبت خروجی است[۶]. در این روش به دلیل کاهش ضریب هدایت حرارتی مواد غذایی در دوره سرعت نزولی فرایند خشک کردن، سرعت انتقال حرارت به بخش‌های داخلی ماده غذایی کاهش می‌یابد، از این رو با پیشرفت خشک شدن، سرعت تبخیر آب سریع‌تر از حرکت رطوبت به سطح محصول است که منجر به خشک شدن پوسته خارجی می‌شود.
زمان طولانی حرارت‌دهی، تخریب ویژگی‌های کیفی محصول از قبیل طعم، رنگ و ارزش تغذیه‌ای، کاهش دانسیته حجمی و قابلیت جذب مجدد آب در محصول خشک شده و کارایی پایین انرژی از معایب این روش است[۱۲و ۹۵].

۲–۴ خشک کردن اسمزی

یکی دیگر از روش های کاهش محتوای رطوبت میوه ها و سبزیجات به عنوان پیش تیمار، آبگیری اسمزی است. خشک کردن اسمزی خواص کیفی بهتری در محصول ایجاد می کند[۸۲]. اساس فرآیند خشک کردن به روش اسمزی قرار دادن قطعات ماده غذایی در یک محلول هایپرتونیک (شامل ساکاریدها، کلرید سدیم،

[1] Equilibrium moisture content

سوربیتول، گلیسرول و ...) است. این محلول ها معمولاً دارای فشار اسمزی بالاتر و فعالیت آبی کمتری در مقایسه با محیط سلولی موادغذایی هستند. از آنجا که دیواره سلولی بسیاری از مواد غذایی می تواند به عنوان یک غشای نیمه تراوا عمل کند، بنابراین یک نیروی محرکه جهت حرکت آب بین ماده غذایی و محلول اسمزی ایجاد می شود. البته این دیواره کاملاً انتخابی عمل نمی کند و گاهی مواد جامد محلول در مایع اسمزی، به درون ماده غذایی تراوش می شود[۴۱و ۴۹]. در طی این فرایند دو جریان اصلی وجود دارد که عبارتند از:

الف- شار یا جریان آب از داخل ماده غذایی به محلول اطراف

ب- جریان نفوذ مواد حل شده در محلول به ماده غذایی که در جهت خلاف جریان اول است[۴۸].

جریان سومی نیز مربوط به تراوش مواد با وزن مولکولی پایین و محلول در آب است. هر چند که این جریان خیلی ناچیز و قابل چشم پوشی است، ولی از نظر ارزش تغذیه ای و ویژگی های ارگانولپتیکی محصول نهایی می تواند تأثیر مهمی داشته باشد[۴۷]. قابلیت نفوذ قندها و ترکیبات با وزن مولکولی بالا به درون بافت گیاهی کم است و شدت جریان آب از غذا به محیط اسمزی بیشتر از شدت جریان مواد حل شده از محیط اسمزی به درون ماده می باشد و به همین علت به این فرایند خشک کردن اسمزی گفته می شود[۵۰]. انتقال آب و مواد حل شده در فرایند را می توان به وسیله تعیین درصد کاهش آب[1] (WL) و درصد جذب مواد[2](SG) به دست آورد. پارامترهای ذکر شده به عواملی از جمله نوع محلول اسمزی، به هم زدن، شکل، اندازه و ضخامت نمونه ماده غذایی، نسبت ماده غذایی به محلول اسمزی، دمای محلول، زمان تیمار و... بستگی دارد[۸۲]. همچنین خشک کردن اسمزی این امکان را فراهم می آورد تا از طریق محلول اسمزی عناصر، آنتی اکسیدان ها و سایر مواد افزودنی و نگهدارنده را به ترکیبات ماده غذایی اضافه کنیم[۴۶- ۷۳ و ۸۵].

مهمترین معایب فرایند آبگیری اسمزی، نفوذ مواد جامد محلول به درون بافت مواد غذایی است. کاربرد پوشش های خوراکی قبل از آبگیری اسمزی مناسب ترین راه حل برای جلوگیری از تأثیرات نامطلوب این فرایند بر ماده غذایی است[۵۶]. پوشش هایی از نوع چربی ها، آلجیناتها، کربوهیدراتها و صمغ های گیاهی بر روی میوه ها و سبزی ها کاربرد دارند. این پوشش ها به عنوان ممانعت کننده مصنوعی عمل می کنند و مانع نفوذ محلول اسمزی به درون بافت ماده غذایی می شوند در حالی که تأثیر منفی بر پدیده انتقال و خروج آب از بافت ماده غذایی نخواهند داشت و از کریستالیزه شدن شکر بر روی بافت میوه جلوگیری می کنند[۶۲]. شرایط خشک کردن اسمزی کیوی به عنوان تابعی از غلظت ساکارز، ضخامت نمونه، دما و زمان فرایند بررسی شده و شرایط فرایند با استفاده از روش رویه پاسخ بهینه شده است. نتایج این تحقیق نشان می دهد که کلیه ی فاکتورهای فوق، بر روی از دست دادن آب نمونه ی خشک شده مؤثر هستند و ضخامت نمونه ها، دما و زمان فرایند تأثیر محسوس تری نسبت به غلظت ساکاروز بر روی کسب مواد جامد دارند. در

[1]Water loss
[2]Solid gaine

این تحقیق شرایط بهینه برای خشک کردن اسمزی کیوی، غلظت ۶۰ درصد ساکارز، دمای ۳۰-۴۰ درجه سانتی گراد، زمان ۱۵۰ دقیقه و ضخامت ۸ میلی متر گزارش شده است[۲۵].

۲-۵ خشک کردن مایکروویوی

استفاده از انرژی مایکروویو در سال‌های اخیر به‌طور چشمگیری افزایش یافته است و برای طیف وسیعی از مواد غذایی نظیر میوه ها و سبزیجات به کار می رود. این امر به دلیل کاهش زمان فرایند در نتیجه نفوذ امواج مایکروویو و حرارت‌دهی حجمی است. کاهش زمان فرایند می‌تواند به میزان زیادی هزینه‌های تولید محصولات را کاهش دهد. ازاین‌رو استفاده از انرژی مایکروویو در خشک کردن محصولات کشاورزی به منظور غلبه بر معایب تکنیک‌های خشک کردن جابه‌جایی مورد توجه قرار گرفت[۱۰۲]. خشک کردن با مایکروویو باعث بهبود خواص کیفی محصول نظیر افزایش ظرفیت آبدار شدن، کاهش تجزیه رنگها و کاهش شمارش میکروبی می شود[۵۵- ۷۰و ۷۴]. خشک کردن موادغذایی با استفاده از روش‌های حرارت‌دهی ترکیبی مانند حرارت‌دهی سطحی و حجمی نسبت به روش‌های رایج خشک کردن، می تواند محصولاتی با کیفیت بالاتر ایجاد کند[۹۱]. در خشک کردن با مایکروویو خروج رطوبت سریع تر بوده و به دلیل تمرکز انرژی، سیستم مایکروویو فقط ۲۰ تا ۳۵ درصد نسبت به سایر روش های خشک کردن نیاز به فضا دارد. نتایج نشان داده که استفاده از مایکروویو در مرحله محتوای رطوبتی پایین، در انتهای عمل خشک کردن کیفیت بهتری را حاصل کرده است. امواج مایکروویو شباهت‌هایی با نور مرئی دارند. این امواج می‌توانند به صورت پرتو کانونی شوند. امواج مایکروویو می‌توانند از داخل لوله‌های توخالی نیز عبور کنند. اشعه مایکروویو، اشعه غیریونیزه است و به‌طورکلی با اشعه‌های یونیزه‌کننده مانند اشعه ایکس و گاما تفاوت دارد. این امواج بر عکس پرتوهای ایکس و گاما به دلیل داشتن فرکانس‌های پایین قادر به شکستن پیوندهای شیمیایی و آسیب‌رسانی به مولکول‌های موادغذایی نیستند. پرتوهایی با فرکانس ۳۰۰ مگاهرتز تا ۳۰۰ گیگاهرتز (از طول موج ۱ میلی‌متر تا ۱ متر) در محدوده امواج مایکروویو قرار می‌گیرند[۵۵].

به طور کلی فرایند خشک کردن به وسیله انرژی مایکروویو دارای ۳ مرحله است:

۱- مرحله گرم‌شدن[1]: در این مرحله انرژی مایکروویو در بافت ماده مرطوب به انرژی حرارتی تبدیل می‌شود و با گذشت زمان، دمای ماده مرطوب افزایش می‌یابد. از آنجایی که فشار بخار مرطوب در ماده غذایی بیش از محیط است، ماده غذایی شروع به از دست دادن رطوبت می‌کند اما رطوبت جداشده در این مرحله نسبتاً کم است.

۲- مرحله خشک شدن سریع[2]: در این مرحله به علت افزایش سریع حرارت و نیز ایجاد فشار داخلی، میزان رطوبت جداشده بالاست. در بعضی مطالعات گزارش شده که در این حالت مقدار فشار داخلی ۱۰۰ کیلو پاسکال بیشتر از فشار اتمسفری است. بیشتر افت رطوبت در این مرحله رخ می‌دهد.

[1] Heating-up period
[2] Rapid drying period

۳- مرحله سرعت نزولی[1]: در این مرحله میزان رطوبت به صورت محلی و نقطه‌ای کاهش می‌یابد. در اینجا میزان انرژی مورد نیاز برای تبخیر رطوبت کمتر از انرژی حرارتی حاصل از پرتوهای مایکروویو است، در نتیجه انرژی حاصل ممکن است موجب حرارت دیدن بیش از حد ماده غذایی[2] گردد[۱۰۲].
دو مکانیسم مهمی که تولید گرما در یک ماده واقع در میدان مایکروویو را شرح می‌دهند عبارتند از:
پلاریزاسیون یونی[3] و چرخش دوقطبی[4]

۲-۵-۱ پلاریزاسیون یونی:

از آنجایی‌که یون‌ها واحدهای بارداری هستند، هنگامی‌که یک محلول غذایی محتوی یون در یک میدان الکتریکی قرار می‌گیرد یون‌ها در اثر بار خود با یک حرکت شتاب‌دار دارای حرارت می‌شوند. به عنوان مثال در یک محلول آب‌نمک، یون‌های سدیم ، کلرید، هیدرونیوم و هیدروکسیل وجود دارد که ممکن است به‌دلیل قطبیت‌شان تحت‌تأثیر میدان الکتریکی در جهت مخالف حرکت و با مولکول‌های آب غیر یونیزه برخورد کنند. در نتیجه انرژی سینتیکی افزایش می‌یابد. زمانی که قطبیت تغییر می‌کند یون‌ها در جهت مخالف آرایش می‌یابند. از آنجایی که این تغییر قطبیت میلیون‌ها بار در ثانیه رخ می‌دهد، تعداد زیادی برخورد و انتقال انرژی صورت می‌گیرد. در واقع دو مرحله تبدیل انرژی وجود دارد:
در ابتدا انرژی میدان الکتریکی به انرژی سینتیکی سازمان‌یافته[5] تبدیل می‌شود، سپس این انرژی به صورت انرژی سینتیکی مغشوش[6] در می‌آید و در این نقطه به عنوان حرارت تلقی می‌شود. این نوع حرارت‌دهی به دما یا فرکانس وابسته نیست. توان ایجاد شده به‌ازای واحد حجم (P_V) از طریق هدایت یونی در معادله زیر نشان داده شده است:

$$P_v = E^2 qn\mu \qquad (۱-۲)$$

q میزان بار الکتریکی هر یک از یون‌ها، n دانسیته یون (تعداد یون به ازای واحد حجم) و μ میزان تحرک یون‌هاست[۷۷].

۲-۵-۲ چرخش دوقطبی

بسیاری از مولکول‌ها از قبیل آب ماهیت قطبی دارند، به این معنا که دارای یک مرکز بار نامتقارن هستند. مولکول‌های قطبی به وسیله تغییر قطبیت میدان الکتریکی تحت تأثیر قرار می‌گیرند. این مولکول‌ها معمولاً دارای یک جهت تصادفی هستند، اما در صورتی‌که میدان الکتریکی اعمال شود، این مولکول‌ها مطابق قطبیت میدان تغییر جهت می‌دهند. زمانی‌که میدان الکتریکی به صفر میرسد دوقطبی‌ها به آرایش قبلی خود باز

[1] Reduced drying rate period
[2] Over heating
[3] Ionic conduction
[4] Dipolar rotation
[5] Induced ordered kinetic energy
[6] Disordered kinetic energy

می‌گردند و زمانی‌که دوباره میدان الکتریکی افزایش می‌یابد به صورت ردیف‌های دوتایی آرایش می‌یابند. این افزایش و کاهش میدان در یک فرکانس میلیون‌ها بار در ثانیه اتفاق می‌افتد. این امر منجر به تبدیل انرژی از شکل الکتریکی به انرژی پتانسیل ذخیره‌ای[۱] در مواد و سپس به سینتیک تصادفی ذخیره‌ای[۲] یا انرژی حرارتی در مواد می‌گردد[۷۷]. عوامل مختلفی بر روی گرمایش یک ماده با مایکروویو تأثیر می گذارند از جمله؛ اندازه، شکل، حالت، خواص ماده و تجهیزات فرآوری[۸۱].

۲-۵-۳ برهم‌کنش میدان الکترومغناطیسی با مواد

مواد بر اساس نحوه برهم‌کنش با میدان الکترومغناطیسی به ۴ گروه تقسیم می‌شوند:

۱- مواد هادی[۳]: موادی با الکترون‌های آزاد از قبیل فلزات، موادی هستند که امواج الکترومغناطیسی را منعکس می‌کنند مانند انعکاس نور از آینه. این مواد برای هدایت کردن امواج الکترومغناطیسی به شکل به کارگیرنده و هدایت‌کننده موج به کار می‌روند.

۲- مواد عایق[۴]: مواد غیرهادی الکتریسیته از قبیل شیشه، سرامیک و هوا به صورت عایق عمل می‌کنند. این مواد امواج الکترومغناطیسی را به مقدار ناچیز منعکس یا جذب می‌کنند و عمدتاً آن را عبور می‌دهند. بنابراین آنها انتقال دهنده امواج هستند. این مواد هم‌چنین به عنوان مواد غیرجاذب[۵] شناخته می‌شوند.

۳- مواد دی‌الکتریک[۶]: این مواد خصوصیاتی بین هدایت‌کننده ها و مواد عایق دارند و به عنوان مواد جاذب[۷] امواج مایکروویو شناخته می‌شوند. این گروه انرژی الکترومغناطیسی را جذب و آن را به حرارت تبدیل می‌کنند. از جمله این مواد می‌توان آب، روغن‌ها، چربی، موادغذایی و دیگر مواد حاوی رطوبت را نام برد.

۴- ترکیبات مغناطیسی: این مواد با ترکیبات مغناطیسی امواج الکترومغناطیس واکنش می‌دهند. آنها معمولاً به عنوان دستگاه نگهدارنده به منظور جلوگیری از هدر رفتن انرژی الکترومغناطیسی استفاده می‌شوند. هم‌چنین ممکن است به شکل دستگاه‌های خاص برای حرارت‌دهی استفاده شوند[۷۷].

۲-۵-۴ خواص دی‌الکتریک

ویژگی‌هایی که باعث می‌شوند مواد به‌طور موفقیت‌آمیز به وسیله میدان مایکروویو یا الکتریکی حرارت ببینند، خصوصیات دی‌الکتریک آنها از قبیل ثابت دی‌الکتریک نسبی[۸] ($\acute{\varepsilon}$)، افت دی‌الکتریک نسبی (ε'') و فاکتور اتلاف انرژی[۹] ($\tan\delta$) است.

---

[1] Stored potential energy
[2] Stored random kinetic
[3] Conductors
[4] Insulators
[5] non lossy dielectric
[6] Dielectrics
[7] Lossy dielectric
[8] Relative dielectric constant
[9] Dissipation factor

ثابت دی‌الکتریک نسبی ($\acute{\varepsilon}$)، توانایی ماده را در نگهداری انرژی الکتریکی نشان می‌دهد و تعیین‌کننده نحوه توزیع میدان الکترومغناطیسی در داخل ماده و هم‌چنین مقدار انرژی قابل ذخیره در آن می‌باشد.
افت دی‌الکتریک نسبی (ε'')، به توانایی ماده در اتلاف انرژی الکتریکی اشاره دارد. این خواص معیاری از قدرت عایق‌کنندگی ماده را پیش روی ما قرار می‌دهند. موادغذایی در حقیقت عایق‌های خیلی ضعیفی هستند. بنابراین وقتی این مواد در میدان مایکروویو قرار می‌گیرند مقدار زیادی انرژی جذب می‌کنند که نتیجه آن گرمایش فوق العاده سریع خواهد بود. افت دی‌الکتریک یک ماده بیان کننده آن است که یک میدان الکتریکی خارجی تا چه اندازه به گرما تبدیل می‌شود و از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\varepsilon'' = \varepsilon' \tan\delta \qquad (۲-۲)$$

تانژانت افت ($\tan\delta$)، معیاری از میزان نفوذ میدان الکتریکی در ماده و مقدار اتلاف انرژی الکتریکی به صورت حرارت را در اختیار قرار می‌دهد. با تعیین ثابت دی‌الکتریک و فاکتور افت دی‌الکتریک مواد می‌توان قابلیت رسانایی الکتریکی مواد (ثابت دی‌الکتریک کل)[1] را با استفاده از رابطه زیر تعیین کرد:

$$\varepsilon = \varepsilon' - J\varepsilon'' \qquad (۳-۲)$$

$J = \sqrt{-1}$ که نشان‌دهنده ۹۰ درجه تغییر جهت بین بخش‌های واقعی($\acute{\varepsilon}$) و غیر واقعی(ε'') ثابت دی‌الکتریک کلی است[۷۷].
این فاکتورها توسط چندین پارامتر تحت تأثیر قرار می‌گیرند:
۱- محتوای رطوبتی:
به دلیل ماهیت قطبی مولکول‌های آب، محتوای رطوبتی موادغذایی می‌تواند فاکتور مهمی در تعیین خصوصیات دی‌الکتریک آنها باشد. از آنجایی‌که آب دارای ثابت دی‌الکتریک بالا، حدود ۷۸ در دمای اتاق است، بنابراین با افزایش درصد رطوبت، ثابت دی‌الکتریک به میزان زیادی افزایش می‌یابد.
۲- دانسیته:
تأثیر دانسیته بر خواص دی‌الکتریک مواد به فاکتور پایین جذب هوا در مقایسه با آب و سایر حلال‌ها بر می‌گردد. ثابت دی‌الکتریک هوا، یک است. بنابراین حضور آن در مواد منجر به کاهش ثابت دی‌الکتریک می‌شود. در موادی با دانسیته کمتر، حضور هوا در فضاهای خالی باعث کاهش ویژگی‌های دی‌الکتریک می‌گردد، در نتیجه حرارت‌دهی به وسیله مایکروویو کاهش می‌یابد.
۳- دما:
وابستگی دما و ثابت دی‌الکتریک بسیار پیچیده است و ممکن است بسته به نوع ماده، ثابت دی‌الکتریک افزایش یا کاهش یابد. به طور کلی یک ماده در زیر نقطه انجمادش، ثابت دی‌الکتریک و افت دی‌الکتریک

[1] Complex dielectric constant

پایین‌تری نشان می‌دهد. میزان کاهش به میزان آبی که به صورت غیرمنجمد است و نیز به هدایت یونی آب آزاد بستگی دارد. فاکتور افت دی‌الکتریک با افزایش دما تحت تأثیر قرار می‌گیرد. به عنوان مثال فاکتور افت دی‌الکتریک آب در دمای $25^{\circ}c$ برابر ۱۲ است، درحالی‌که در $95^{\circ}c$ به ۲/۴۴ کاهش می‌یابد. بعضی مواد مثل چوب دارای یک ضریب حرارتی مثبت[1] در رطوبت‌های پایین هستند به این معنا که با افزایش دما، فاکتور افت دی‌الکتریک آنها افزایش می‌یابد. این امر منجر به حرارت دیدن مهارنشدنی آنها می‌شود و ممکن است در صورت ادامه حرارت‌دهی بسوزند.

۴- فرکانس:

خصوصیات دی‌الکتریک به وسیله فرکانس میدان الکترومغناطیسی تحت تأثیر قرار می‌گیرد. هر چند حرارت‌دهی صنعتی به فرکانس‌های ISM محدود شده است، اما می‌تواند در اندازه‌گیری رطوبت مفید واقع شود.

۵- رسانایی حرارتی[2]:

هدایت گرمایی، اغلب نقش کمتری در حرارت‌دهی مایکروویو و دی‌الکتریک در مقایسه با حرارت‌دهی جابه‌جایی دارد زیرا سرعت بالا و زمان کوتاه حرارت‌دهی می‌توانند هدایت گرمایی را تحت تأثیر قرار دهند. رسانایی حرارتی ویژگی‌های دی‌الکتریک ماده غذایی را تحت تأثیر قرار نمی‌دهد، اما در توزیع و انتقال انرژی تولید شده در سراسر بافت ماده غذایی نقش مهمی ایفا می‌کند[۷۷و ۸۳].

۶- گرمای ویژه:

ظرفیت گرمایی ویژه، خصوصیات دی‌الکتریک ماده غذایی را تحت تأثیر قرار نمی‌دهد. اما می‌تواند توجیه‌کننده این نکته باشد که چرا بعضی از مواد در اثر اعمال انرژی مایکروویو سریع‌تر گرم می‌شوند. ظرفیت گرمایی ویژه نشان‌دهنده مقدار حرارت مورد نیاز برای بالا بردن دمای واحد جرم ماده غذایی به میزان ۱ درجه سلسیوس می‌باشد. در مورد موادغذایی کم‌رطوبت، تأثیر گرمای ویژه بر روی فرایند گرمایش به مراتب بیش‌تر از تأثیر فاکتور افت دی‌الکتریک است. بنابراین موادغذایی کم‌رطوبت به لحاظ گرمای ویژه پایینی که دارند با سرعت قابل قبول توسط مایکروویو گرم می‌شوند.

۷- عمق نفوذ[3]:

از آنجایی‌که حرارت‌دهی الکترومغناطیسی به صورت حجمی است، اینکه انرژی تا چه عمقی می‌تواند نفوذ کند بسیار اهمیت دارد. توانایی و قابلیت پرتوهای مایکروویو در نفوذ به عمق ماده را عمق نفوذ می‌نامند که در آن انرژی پرتوها به ۳۷٪ $(1/e)$ مقدار اولیه کاهش می‌یابد. عمق نفوذ را نمی‌توان یکی از ویژگی‌های ماده غذایی دانست بلکه حاصل اثر ترکیبی از ویژگی‌های آن است. طول موج، ثابت دی‌الکتریک و فاکتور افت دی‌الکتریک، همگی عمق نفوذ را تحت تأثیر قرار می‌دهند.

موضوع مهم دیگر در مورد عمق نفوذ، اندازه قطعه ای است که حرارت داده می‌شود. اگر قطعه چندین بار بزرگتر از عمق نفوذ باشد، گرادیان دمایی متداول می‌شود. اگر قطعه در مقایسه با عمق نفوذ کوچک باشد، به

[1] Positive temperature coefficient
[2] Thermal conductivity
[3] Penetration depth