بسم الله الرحمن الرحیم

دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده مهندسی کشاورزی

اندازه‌گیری غیرمخرب رطوبت خرما با استفاده از روش ضریب دی‌الکتریک

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک ماشین‌های کشاورزی

رحمت‌اله باقری

اساتیدراهنما

دکتر سید احمد میره‌ای

دکتر مرتضی صادقی

۱۳۹۲

دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده مهندسی کشاورزی

پایان‌نامه کارشناسی ارشد رشته مکانیک ماشین‌های کشاورزی آقای رحمت‌اله باقری

تحت عنوان

اندازه‌گیری غیرمخرب رطوبت خرما با استفاده از روش ضریب دی‌الکتریک

در تاریخ ۱۳۹۲/۱۱/۲ توسط کمیته تخصصی ذیل مورد بررسی و تصویب نهایی قرار گرفت:

۱- استاد راهنمای پایان‌نامه	دکتر سید احمد میره‌ای
۲- استاد راهنمای پایان‌نامه	دکتر مرتضی صادقی
۳- استاد مشاور پایان‌نامه	دکتر امین الله معصومی
۴- استاد مشاور پایان‌نامه	مهندس علی شهرکی
۵- استاد داور	دکتر عباس همت
۶- استاد داور	دکتر ناصر همدمی
۷- سرپرست تحصیلات تکمیلی دانشکده	دکتر محمد مهدی مجیدی

به نام آنکه جان را فکرت آموخت چراغ دل به نور دانش افروخت

خدای مهربان را سپاسگزارم از برای تمام نعمت‌هایش که به این حقیر عطا فرمود، نعمت‌هایی همچون پدر و مادر فداکارم، همسر عزیزتر از جانم، اساتید دلسوز و گرانقدرم و دوستان گرامی‌ام.

همسر مهربانم، از اینکه با صبر فراوان خویش، مرا در پیمودن این راه یاری نمودی سپاسگزارم.

پدر و مادر نازنینم از شما به خاطر تمام زحماتی که برایم کشیده‌اید متشکرم.

اساتید خوبم جناب آقایان دکتر سید احمد میره‌ای، دکتر مرتضی صادقی، مهندس علی شهرکی و دکتر امین‌اله معصومی از همه شما متشکرم، تشکرمن در قبال زحمات بی‌دریغ شما ناچیز است، امیدوارم خداوند منان از شما تشکر نماید.

دوستان عزیزم مهندس شهرام موم‌کش و مهندس محمدجواد حاجی‌احمدی، اگر تلاش و یاری صمیمانه شما نبود، پیمودن این مسیر برایم بسیار دشوار بود، امیدوارم در تمام مراحل زندگی موفق باشید.

کلیه حقوق مادی مترتب برنتایج مطالعات،
ابتکارات و نوآوری‌های ناشی ازتحقیق موضوع این
پایان نامه متعلق به دانشگاه صنعتی اصفهان است.

تقدیـم به

خدایـی که آفرید

جهان را، انسان را، عقل را، علم را، معرفت را، عشق را

وبه کسانی که عشقشان را در وجودم دمید

پدر و مادر مهربانم

همسر عزیزم

و اساتید گرانقدرم

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فهرست مطالب ..... هشت
چکیده ۱
فصل اول: مقدمه و اهداف
۱-۱- مقدمه ۲
۱-۲- اهداف ۳
فصل دوم: مرور منابع
۲-۱- کیفیت در محصولات کشاورزی ۴
۲-۲- تعریف کیفیت و مؤلفه‌های آن ۴
۲-۳- روش‌های ارزیابی کیفیت در محصولات کشاورزی ۵
۲-۴- روش‌های غیرمخرب ارزیابی کیفیت ۵
۲-۱-۴- طیف‌سنجی فروسرخ نزدیک (NIRS) ۶
۲-۴-۲- نشر صوت ۶
۲-۴-۳- روش فراصوت ۶
۲- ۵- روش غیرمخرب دی‌الکتریک ۷
۲-۵-۱- بنیان اندازه‌گیری خواص دی‌الکتریک مواد ۸
۲-۵-۲- تئوری دی‌الکتریک ۸
الف- گذردهی ۸
ب- عمق نفوذ ۱۱
۲-۵-۳- سازوکارهای دی‌الکتریک ۱۲
الف- جهت‌گیری ملکول‌های قطبی ۱۳
ب- قطبی شدن الکترونیکی و اتمی ۱۴
ج- هدایت یونی ۱۶
د- قطبی شدن بارهای فضا یا فصل مشترک ۱۷
۲-۵-۴- روش‌های اندازه‌گیری خواص دی‌الکتریکی و کاربردهای آن‌ها ۱۸
الف- روش صفحات موازی ۱۹
ب- پروب کواکسیال انتها باز ۱۹
ج- روش آشفتگی حفره‌ای ۲۰
د- روش خط انتقال ۲۳
ه- روش خط انتقال کواکسیال و موج‌بر ۲۴
و- روش طیف‌نگاری حوزه زمان ۲۵

ز- روش‌های انتقالی فضای آزاد ۲۶
ح- خط انتقال مایکرواستریپ ۲۷
ط- پروب دی‌الکتریکی کلوییدی ۲۷
۲-۶- کاربرد روش دی‌الکتریک در محصولات کشاورزی ۲۸
۲-۷- خرما ۳۳
۲-۷-۱- تاریخچه و منشأ خرما ۴۳
۲-۷-۲- مراکز کشت و کار خرما در دنیا ۳۴
۲-۷-۳- سطح زیر کشت، میزان تولید و عملکرد خرما در ایران ۳۴
۲-۷-۴- خصوصیات گیاه شناسی ۳۴
۲-۷-۵- ترکیبات شیمیایی و خواص خرما ۳۵
۲-۷-۶- مراحل رسیدگی خرما ۳۶
۲-۷-۷- پارامترهای مؤثر بر رسیدگی خرما ۳۷
۲-۷-۸- اهمیت رطوبت در خرما ۳۸
۲-۷-۹- ارقام خرما ۳۹
فصل سوم: مواد و روش‌ها
۳-۱- اندازه‌گیری با استفاده از مولد سیگنال و اسپکتروم آنالایزر ۴۲
۳-۱-۱- خازن ۴۳
۳-۱-۲- اسپکتروم آنالایزر ۴۴
۳-۱-۳- مولد سیگنال ۴۵
۳-۱-۴- سامانه اندازه‌گیری داده‌های دی‌الکتریک ۴۶
۳-۱-۵- تهیه نمونه‌ها ۴۷
۳-۱-۶- اندازه‌گیری رطوبت خرما ۴۷
۳-۲- تحلیل داده‌ها ۴۸
۳-۲-۱- نحوه محاسبه ضریب دی‌الکتریک خرما ۴۹
۳-۲-۲- مدل‌سازی رطوبت ۵۴
۳-۲-۳- روش رگرسیون خطی چندمتغیره ۵۴
۳-۳- توسعه سامانه دی‌الکتریک ۵۶
۳-۳-۱- تراشه مدل AD9951 ..... ۵۷
۳-۳-۲- تقویت کننده Gali-5 ..... ۵۸
۳-۳-۳- LCD ۵۸
۳-۳-۴- ریزکنترل‌گرهای AVR ۵۹
الف- آشنایی با نرم‌افزار Code vision AVR ۶۰

ب- خصوصیات ریزکنترل‌گر ATmega128 ..... ۶۱
۳-۳-۵- منبع تغذیه (باتری) ۶۲
۳-۳-۶- مشخصات مدار ۶۳
۳-۳-۷- ارزیابی سامانه دی‌الکتریک برای اندازه‌گیری رطوبت خرما ۶۵
۳-۳-۸- روش شبکه‌های عصبی مصنوعی ۶۵
فصل چهارم: نتایج و بحث
۴-۱- انجام آزمایشات با استفاده از مولد تابع و اسپکتروم آنالایزر ۶۸
۴-۱-۱- مشخصات نمونه‌ها ۶۸
۴-۱-۲- تغییرات توان مصرفی خازن با فرکانس در رطوبت‌های مختلف ۶۸
۴-۱-۳- تغییرات گذردهی با فرکانس در رطوبت‌های مختلف ۶۹
۴-۱-۴- مدل‌سازی رطوبت خرما با استفاده از داده‌های توان مصرفی خازن ۷۱
الف- مدل‌سازی با استفاده از داده‌های تمام فرکانس‌ها ۷۱
ب- مدل‌سازی با استفاده از داده‌های شش فرکانس مؤثر ۷۲
۴-۱-۵- مدل‌سازی با استفاده از مقادیر گذردهی خرما ۷۵
۴-۲- ارزیابی سامانه دی‌الکتریک ۷۶
۴-۲-۱- مشخصات نمونه‌ها ۷۷
۴-۲-۲- تغییرات اختلاف پتانسیل مدار با رطوبت ۷۷
۴-۲-۳- مدل‌سازی رطوبت با استفاده از شبکه عصبی برای داده‌های حاصله از سامانه دی‌الکتریک ۷۸
فصل پنجم: نتیجه‌گیری و پیشنهادها
۵-۱- نتیجه‌گیری ۸۰
۵-۲- پیشنهادها ۸۱
پیوست ۱ ..... ۸۲
پیوست ۲ ..... ۸۳
منابع ۸۵

چکیده

در این تحقیق، توانایی روش دی‌الکتریک با صفحات موازی در تخمین غیرمخرب مقدار رطوبت خرما مورد ارزیابی قرار گرفت. ابتدا با استفاده از یک خازن با صفحات موازی از جنس آلومینیوم، ولتاژ متناوب سینوسی از طریق یک دستگاه مولد تابع به نمونه‌های خرما اعمال و با استفاده از یک دستگاه اسپکتروم آنالایزر پاسخ سیگنال خروجی مدار در محدوده فرکانسی ۱ تا ۱۰۰ MHz اندازه‌گیری گردید. سپس ارتباط مقادیر توان مصرفی خازن در فرکانس‌های مختلف با رطوبت نمونه‌ها مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج نشان داد که در یک رطوبت معین، با افزایش فرکانس، توان مصرفی افزایش می‌یابد. هم‌چنین مقادیر توان مصرفی در طول رسیدگی و همزمان با کاهش رطوبت کاهش می‌یابد. در مرحله دوم، از مدل‌های رگرسیون خطی چندمتغیره به منظور استخراج رابطه بین رطوبت و مقادیر توان در فرکانس‌های مختلف استفاده شد. نتایج مدلسازی با استفاده از کل محدوده فرکانس اعمالی نشان داد که درصد رطوبت با ضریب تبیین پیشگویی برابر ۰/۹۶، ریشه میانگین مربعات خطای ۵/۲۸٪ و نسبت انحراف استاندارد ۲/۹۷ قابل پیش‌بینی می‌باشد. پس از بررسی ضرایب رگرسیون بدست آمده، تعداد شش فرکانس مؤثر در مدلسازی رطوبت خرما تعیین شدند. این فرکانس‌ها عبارت بودند از ۴، ۱۴، ۲۰، ۴۰، ۶۰ و ۹۰ مگاهرتز. نتایج مدلسازی رطوبت با استفاده از شش فرکانس، مشابه نتایج بدست آمده از کل محدوده فرکانسی با ضریب تبیین پیشگویی برابر ۰/۸۹، ریشه میانگین مربعات خطای ۵/۲۵٪ و نسبت انحراف استاندارد ۲/۹۹ ارزیابی شد. در مرحله سوم، به منظور محاسبه ضریب دی‌الکتریک خرما، ابتدا نمونه‌های خرما به صورت یک استوانه هم حجم بیضی‌گون سه محوری شبیه‌سازی شده و از طریق آن حجم هوای محصور بین خرما و صفحات موازی بدست آمد. سپس با کمک روابط الکتریکی و با در نظر گرفتن توان مصرفی خازن در حالت بدون خرما، ضریب دی‌الکتریک هر نمونه محاسبه گردید. نتایج نشان داد که در نمونه‌های با رطوبت بالاتر و یا مراحل اولیه رسیدگی خرما، با افزایش فرکانس تا حدود ۳۰ MHz، گذردهی ابتدا کاهش یافته و سپس افزایش می‌یابد. همچنین نرخ افزایش گذردهی نسبت به فرکانس برای رطوبت‌های بالاتر بیشتر است به نحوی که در فرکانس‌های نزدیک ۱۰۰ MHz، تغییرات منحنی‌های ضریب دی‌الکتریک نسبت به رطوبت و یا رسیدگی خرما بیشتر از فرکانس‌های پایین‌تر می‌باشد. بررسی‌های بیشتر در مورد مقادیر ضریب گذردهی نشان داد که بین مقادیر لگاریتم دی‌الکتریک در هر فرکانس با لگاریتم رطوبت یک رابطه کاملاً خطی وجود دارد به نحوی که برای مثال در فرکانس ۱۰۰ مگاهرتز مقدار ضریب تبیین بین مقادیر یاد شده برابر ۰/۸۳ بدست آمد. نتایج مدل‌سازی MLR با استفاده از داده‌های ضریب دی‌الکتریک نشان داد که مقدار رطوبت با ضرایب تبیین ۰/۹۴ و ۰/۹۳ و ریشه میانگین مربعات خطای ۳/۸۵ و ۴/۴۳٪ به ترتیب در مرحله کالیبراسیون و آزمون قابل پیش‌بینی است که نشان دهنده توانایی مدل برآورد رطوبت از روی داده‌های دی‌الکتریک خازن در دامنه ۱ تا ۱۰۰MHz است. هم‌چنین نتایج بهبود قابل توجه ۱۶٪ در کاهش مقدار خطای برآورد رطوبت در مرحله آزمون را نسبت به حالت استفاده از داده‌های توان مصرفی نشان داد. موفقیت این مدل در پیش‌بینی میزان رطوبت، زمینه‌ساز طراحی و ساخت سامانه‌ای گردید که از اهداف آن تخمین رطوبت خرما به صورت میدانی بود. در ساخت این سامانه از قطعات الکترونیکی شامل تراشه، ریزکنترل‌گر، نوسان‌ساز، رگولاتور، تقویت کننده، صفحه نمایشگر و غیره به نحوی استفاده شد که عملکردی مشابه روش اول از آن مشاهده شود. خازن مورد استفاده در روش اول، این بار به سامانه جدید متصل گردید و ارتباط ولتاژ مصرفی مدار در شش فرکانس انتخابی از حالت قبل (به استثنای جایگزینی فرکانس ۲ با ۹۰ مگاهرتز) با رطوبت نمونه‌ها بررسی شد. از روش شبکه عصبی مصنوعی به منظور استخراج رابطه بین رطوبت و مقادیر ولتاژ در شش فرکانس انتخابی استفاده شد. نتایج نشان داد در طول رسیدگی و همزمان با کاهش رطوبت نمونه‌ها، ولتاژ مصرفی افزایش می‌یابد. نتایج مدلسازی نشان داد که با استفاده از سامانه ساخته شده، رطوبت خرمای مضافتی با ضریب تبیین آزمون ۰/۷۲ و ریشه میانگین مربعات خطای پیش‌بینی ۳/۵۴ ٪ قابل تخمین است.

کلمات کلیدی: اسپکتروم آنالایزر، مولد تابع، ضریب گذردهی، رگرسیون، لگاریتم، فرکانس

فصل اول

مقدمه و اهداف

۱-۱ مقدمه

در سال‌های اخیر توجه شایانی به روش‌های غیر مخرب برای ارزیابی محصولات کشاورزی شده است. هدف از توسعه این روش‌ها، برآورد ویژگی‌های کیفی و همچنین تشخیص عیوب و آفت‌های داخلی محصول به نحو سریع، غیر مخرب و قابل اطمینان می‌باشد. امروزه روش‌های غیر مخرب بسیار متنوعی توسعه یافته‌اند که قادر به تشخیص مؤلفه‌های گوناگون کیفیت در طیف وسیعی از محصولات کشاورزی شده‌اند [۳۲]. در میان روش‌های غیر مخرب، روش دی‌الکتریک به دلیل مزایایی همچون ارتباط مقادیر ثابت دی‌الکتریک با برخی مؤلفه‌های کیفی محصول مانند رطوبت، سرعت بالا، هزینه کمتر نسبت به بسیاری از روش‌های غیرمخرب دیگر، کارایی بالا در صنعت کشاورزی [۶۹]، مانند طراحی و ساخت سامانه‌های فرآوری محصولات، کنترل کیفیت و غیره توسط محققین بسیاری مورد توجه قرار گرفته است [۱۱، ۲۶، ۴۱، ۵۵]. بر مبنای روش دی‌الکتریک، هنگامی که ماده‌ای درون یک میدان الکتریکی متناوب قرار گیرد، ذرات باردار مثبت و منفی دائماً نسبت به حرکت تمایل نشان می‌دهند. درون محصولات کشاورزی حرکت کاتیون‌ها، آنیون‌ها و مولکول‌های قطبی که نسبت به دیگر ذرات بیشترین مصرف انرژی را به خود اختصاص می‌دهند، همگی مستلزم وجود رطوبت می‌باشند. بنابراین، با اندازه‌گیری ضریب دی‌الکتریک محصولات کشاورزی می‌توان مقدار رطوبت را تشخیص داد [۴۱].

از طرف دیگر خرما یکی از محصولات عمده کشاورزی ایران و یکی از منابع اصلی تحصیل ارز برای کشور می‌باشد. ایران یکی از تولیدکنندگان عمده خرما در سطح جهان به شمار می‌رود که از لحاظ سطح زیر کشت دارای مقام اول و از لحاظ تولید دارای مقام دوم در جهان است. اندازه‌گیری رطوبت خرما می‌تواند نقش مهمی در بهینه‌سازی زمان برداشت، انبارمانی و کیفیت مناسب در زمان فروش این محصول داشته باشد [۶۷،۴۶]. روش آزمایشگاهی برای اندازه‌گیری رطوبت خرما مبتنی بر استفاده از آون می‌باشد که روشی زمان‌بر، مخرب و نامناسب برای استفاده در سیستم‌های درجه‌بندی می‌باشد.

با توجه مطالب ذکر شده، توسعه یک سامانه به نحوی که بتواند میزان رطوبت محصول خرما را به صورت سریع، دقیق و غیر مخرب تعیین نماید، می‌تواند نقش مهمی در توسعه سیستم‌های درجه‌بندی و بسته‌بندی این محصول ارزشمند داشته باشد.

۱-۲ اهداف

اهداف انجام این تحقیق را می‌توان به صورت زیر برشمرد:

الف- استفاده از روش دی‌الکتریک با صفحات موازی در محدوده فرکانسی ۱ تا ۱۰۰ MHz با استفاده از دستگاه اسپکتروم آنالایزر و مولد تابع برای اندازه‌گیری غیرمخرب رطوبت خرمای رقم مضافتی.

ب- مدلسازی رطوبت با استفاده از داده‌های توان مصرفی و ضریب دی‌الکتریک خازن.

ج- تشخیص فرکانس‌های مهم و تأثیرگذار در تشخیص مقدار رطوبت خرما.

د- طراحی، ساخت و ارزیابی یک سامانه قابل حمل و میدانی مبتنی بر روش غیرمخرب دی‌الکتریک که بتواند میزان رطوبت خرما را در مراحل مختلف رسیدگی به نحوی سریع، غیر مخرب و با دقت قابل قبول اندازه‌گیری کند.

فصل دوم

مرور منابع

۲-۱ کیفیت در محصولات کشاورزی

در سال‌های اخیر، حجم مبادلات بازرگانی محصولات کشاورزی به طور چشمگیری افزایش یافته است. تقاضای رو به رشد برای محصولات با کیفیت و سالم، نیازمند توسعه فناوری‌های پیشرفته پس از برداشت می‌باشد. کیفیت محصول که در قیمت‌گذاری آن تأثیرگذار است، عاملی است که مصرف‌کنندگان بر اساس آن انتخاب و خرید می‌نمایند.

۲-۲ تعریف کیفیت و مؤلفه‌های آن

به طور کلی کیفیت عبارتست از میزان تناسب و خوب بودن یک محصول برای یک استفاده خاص [۱۴]. کیفیت از نظر تولید کننده محصولات کشاورزی به معنای عملکرد بالا همراه با کمترین عوارض و خرابی، از نظر فروشنده به معنای ماندگاری بالا و سلامت محصول تا زمان فروش و از نظر مصرف‌کننده به معنای ظاهر و طعم خوب است.

مؤلفه‌های کیفیت برای ارزیابی محصولات کشاورزی از منظرهای گوناگونی توسط محققین طبقه‌بندی شده است. از یک منظر می‌توان مؤلفه‌های کیفیت را به دو دسته بیرونی و درونی تقسیم نمود. مؤلفه‌های بیرونی کیفیت شامل شکل (میزان کرویت، نسبت قطر به عمق و غیره)، اندازه (حجم، ابعاد و غیره)، عیوب بیرونی (کوفتگی، زخمی شدن یا خال زدگی) و رنگ (یکنواختی رنگ یا شدت یک رنگ خاص) می‌باشند.

از مؤلفه‌های درونی کیفیت می‌توان به طعم (مانند شیرینی، ترشی، گسی، رطوبت یا آبدار بودن)، میزان رسیدگی، عیوب درونی (مانند آفت‌های داخلی، سرمازدگی، قارچ و غیره)، ماده مغذی (مانند پروتئین، کربوهیدرات، ویتامین، عناصر معدنی و غیره) و بافت (مانند سفتی، آبدار بودن و تردی) اشاره نمود [۴۵].

۲-۳ روش‌های ارزیابی کیفیت در محصولات کشاورزی

ویژگی‌های کیفی یک محصول را می‌توان به دو روش حسی[1] و عینی[2] ارزیابی نمود. در روش حسی، از افراد ماهر و با تجربه به منظور تعیین برخی از مؤلفه‌های کیفیت استفاده می‌شود، ولی برای بازرسی مقادیر زیاد میوه بر اساس درجه رسیدگی، نیاز به تعداد زیادی از این افراد می‌باشد.

روش‌های عینی نیز روش‌هایی هستند که دقیق بوده و مستلزم استفاده از ابزارهای اندازه‌گیری می‌باشند. این روش‌ها را می‌توان به دو دسته مستقیم یا مرجع و غیر مستقیم تقسیم نمود. در دسته روش‌های مرجع، مؤلفه مورد نظر با استفاده از استانداردهای موجود و به طور مستقیم اندازه‌گیری می‌شود، مانند اندازه‌گیری وزن به وسیله ترازوی دیجیتال با دقت بالا. اما در روش‌های غیرمستقیم، ارزیابی مؤلفه‌های کیفی مورد نظر به کمک روش‌های غیرمستقیمی که از قبل و با استفاده از داده‌های مرجع توسعه یافته‌اند تعیین می‌شوند، مانند تعیین اندازه با استفاده از ماشین بینایی.

از منظری دیگر می‌توان روش‌های ارزیابی کیفیت را به دو گروه مخرب و غیرمخرب تقسیم نمود. در روش‌های مخرب، محصول در طول تعیین یا اندازه‌گیری ویژگی کیفی تخریب شده و به طور مثال بریده یا سوراخ می‌شود. اما در روش‌های غیرمخرب، هدف، تعیین مؤلفه(های) کیفیت محصول بدون تخریب و آسیب رساندن به آن می‌باشد. در زیر به مروری کلی بر این روش‌ها می‌پردازیم.

۲-٤ روش‌های غیر مخرب ارزیابی کیفیت

بسیاری از فاکتورهای کیفی محصولات کشاورزی با ویژگی‌های فیزیکی یا شیمیایی آن‌ها مرتبط هستند که اغلب می‌توان با روش‌های غیرمخرب مربوط، آن‌ها را تعیین کرد [۳۸]. روش‌هایی غیرمخرب محسوب می‌شوند که اثرات مخرب فتوفیزیکی، حرارتی، شیمیایی، مکانیکی و فتوشیمیایی بر محصول نداشته باشند [۴]. روش غیرمخرب نسبت به مخرب دارای مزایای فراوانی همچون استفاده از تعداد زیاد نمونه بدون آسیب به آن‌ها، سرعت بالاتر، قابلیت استفاده قبل از برداشت (هنگامی که هنوز محصول بر روی درخت است) و پس از برداشت (بهره‌گیری در خطوط درجه‌بندی محصولات کشاورزی) هستند. در ۳۰ سال اخیر محققان بسیاری از این روش‌ها برای ارزیابی کیفیت و طبقه‌بندی تعداد زیادی از محصولات کشاورزی استفاده نموده و در این زمینه پیشرفت زیادی بوجود آمده است.

در روش‌های غیرمخرب ممکن است بیش از یک مؤلفه بر داده‌های بدست آمده تأثیر بگذارد که اندازه‌گیری را با خطا مواجه خواهد ساخت و به همین دلیل این سیستم‌ها به کالیبراسیون (واسنجی) قوی نیازمندند. استفاده از این روش‌ها با پیشرفت فن آوری‌های مدرن، هم تکامل یافته و هم آسان‌تر شده است [۴].

1- Subjective

2- Objective

اولین و قدیمی‌ترین روش آزمون غیر مخرب، بازرسی چشمی است، علاوه بر آن سایر روش‌هایی که عموماً در کشاورزی توسعه یافته‌اند و از آن‌ها استفاده می‌شود عبارتند از روش‌های اپتیکی شامل روش‌های طیف‌سنجی فروسرخ نزدیک (NIRS)، لیزر و رامان، ماشین بینایی و غیره، روش‌های مکانیکی شامل روش‌های صوتی، فراصوت، ضربه و غیره، روش‌های الکتریکی شامل روش دی‌الکتریک و مقاومت رسانایی و سایر روش‌هایی که در حال حاضر در مرحله تحقیقاتی می‌باشند.

در ادامه، چند روش غیرمخرب مهم معرفی شده و سپس به بررسی مبانی و اصول حاکم بر روش غیرمخرب دی‌الکتریک که موضوع این تحقیق می‌باشد، پرداخته می‌شود.

۲-٤-۱ طیف‌سنجی فروسرخ نزدیک (NIRS)

این روش در سی سال اخیر به منظور تعیین برخی خصوصیات میوه‌ها مانند رنگ، سفتی، میزان اسیدیته، نشاسته و مواد جامد محلول استفاده شده است. طیف NIR با پوشش طول موج‌های بین ۷۵۰ تا ۲۵۰۰ نانومتر برای تعیین ترکیبات شیمیایی شامل گروه‌های OH^-، CH^-، NH^- مناسب می‌باشد. در حال حاضر این فناوری به منظور بررسی خصوصیات داخلی میوه‌ها صنعتی شده است که به طور مثال می‌توان به سامانه‌های جداسازی هندوانه، هلوو مرکبات بر مبنای طیف‌سنجی عبوری و یا بازتابی NIR ، تعیین رنگ، میزان اسیدیته، SSC، سفتی و نشاسته سیب، ماده خشک، سفتی و SSC کیوی، درجه رسیدگی هلو و غیره اشاره نمود [۴].

۲-٤-۲ نشر صوت

مثال ساده‌ای از این روش، تشخیص میزان رسیدگی هندوانه با بهره‌گیری از زدن بر روی میوه و گوش دادن به پاسخ آن می‌باشد. مبنای روش صوت بر اصول تشدید استوار است که در یک بسامد معین صوتی (بسامد تشدید) جسم به شدت ارتعاش می‌نماید. بین بسامد تشدید و مدهای ارتعاشی ارتباط مشخصی وجود دارد. بسامدهای ارتعاشی به مدول کشسان، سفتی، چگالی، اصطکاک داخلی، شکل و اندازه محصول ارتباط داده می‌شود [۱۴]. از روش صوتی بیشتر به منظور اندازه‌گیری سفتی میوه‌ها و سبزیجات استفاده می‌شود.

۲-٤-۳ روش فراصوت

با استفاده از امواج فراصوت می‌توان اطلاعات مربوط به ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی مواد غذایی را تعیین نمود. از این روش می‌توان برای اندازه‌گیری ضخامت، سیالیت، تشخیص جسم خارجی، تعیین ترکیبات تشکیل دهنده ماده، اندازه ذرات و غیره استفاده نمود.

بیشتر روش‌های فراصوت بر اساس انعکاس امواج از درون یا سطح ماده و یا عبور آن‌ها از ماده استوار است. سرعت امواج و ضریب میرایی دو ویژگی مهم از خواص فراصوتی است که مانند بیشتر شاخص‌های فراصوت تحت تاثیر خواص کشسان و چگالی ماده است.

مشکلاتی مانند نفوذ امواج به داخل نمونه، میرایی زیاد بافت محصولات کشاورزی و تکرارپذیری کم سیگنال‌ها از جمله معایب این روش می‌باشد. از این روش برای اندازه‌گیری خواص محصولاتی از قبیل گوجه فرنگی، سیب، هویج، گلابی، سیب زمینی، خیار و غیره در دو مرحله پیش و پس از برداشت استفاده شده است [۵].

۲-۵ روش غیرمخرب دی‌الکتریک

مطالعه‌ی خواص الکتریکی محصولات کشاورزی در دو دهه گذشته مورد علاقه‌ی بسیاری از پژوهشگران بوده است. تلاش‌های فراوانی برای تعیین خواص دی‌الکتریک و الکتریکی انواع زیادی از مواد کشاورزی اعم از غلات و دانه‌ها تا میوه‌ها و سبزیجات انجام شده است. اطلاعات مبنایی زیادی در این زمینه توسط نلسون (۱۹۷۳) منتشر شده است [۵۳]. خواص الکتریکی در بسیاری از محصولات کشاورزی ارتباط زیادی با محتوای رطوبتی آن‌ها دارد. این رابطه بین محتوای رطوبتی و خواص الکتریکی به عنوان پایه‌ای برای توسعه‌ی ابزارهای تجاری در اندازه‌گیری رطوبت غلات و دانه‌ها مورد استفاده قرار گرفته است. در این زمینه دو نوع رطوبت‌سنج رسانایی و خازنی تولید و مورد بهره‌برداری قرار گرفته است.

زلنی (۱۹۵۴) اصول کلی را در این زمینه تعریف نموده، مزایا و معایب این دو نوع رطوبت‌سنج را مورد بحث قرار داد [۹۰]. تنظیمات و کارکردن با نوع رطوبت‌سنج رسانایی نسبتاً آسان است، اما دقت آن تحت تأثیر توزیع غیریکنواخت رطوبت در داخل محصولات و به‌خصوص در پوسته و سطح آنهاست. نوع خازنی اندازه‌گیر رطوبت به توزیع غیریکنواخت رطوبت خیلی حساس نمی‌باشد ولی دقت و توانایی تکرار نتایج به طرز قرار گرفتن دانه‌ها در بین صفحات خازنی وابسته است. متتوز (۱۹۶۳) در مورد عوامل مؤثر در طراحی نوع خازنی اندازه‌گیر رطوبت تحقیقاتی انجام داده و طرح یک مدل اصلاح شده‌ی آن را ارائه داده است.

خواص دی‌الکتریک محصولات غذایی و بیولوژیکی یکی از پارامترهای بسیار ارزشمند در مهندسی و تکنولوژی غذایی است [۳۵]. توجه در خواص دی‌الکتریک محصولات کشاورزی و غذایی اصولاً در پیش‌بینی نرخ گرمادهی متمرکز شده است، به نحوی که رفتار مواد غذایی در مواجهه با میدان‌های با فرکانس بالا در کاربردهای گرمادهی دی‌الکتریک و آنچه عملیات حرارتی نامیده می‌شود، توصیف می‌گردد [۸۷]. تأثیر خواص دی‌الکتریک بر روی گرم کردن مواد غذایی از طریق فرکانس‌های رادیویی (RF) و فرکانس‌های ماکروویو(MW) مدت‌هاست که شناخته شده و کاربردهای بسیاری نیز در این زمینه ارائه گردیده است [۴۹].

برای مثال امواج ماکروویو به صورت تجاری در فرآیندهای الکترو-گرمایی صنعت بکار می‌رود و هم‌چنین این امواج به طور وسیعی در محیط زندگی ما (آشپزخانه‌ها) مورد استفاده قرار می‌گیرد [۴۷].

محاسبات مربوط به توزیع انرژی الکترومغناطیسی در فرکانس‌های رادیویی (RF) و مایکروویو(MW) برای سیستم‌های گرمایی توسط معادلات ماکسول انجام می‌شود. از آنجا که رفتار دی‌الکتریک غذاها خصوصیات گرمایی آن‌ها را تحت تأثیر قرار می‌دهد، بدین منظور از نظر مهندسی، خواص دی‌الکتریک مهم‌ترین خواص فیزیکی مرتبط با فرکانس‌های رادیویی و مایکروویو می‌باشد. نکته‌ی حائز اهمیت این است که داده‌های مربوط به خواص دی‌الکتریک محصولات، به‌خصوص در طراحی‌های جدید اکثراً در دسترس است تا نیازهای فرآیندهای مطلوب را برآورده کند. با گذر زمان، نیاز به این‌گونه اطلاعات با توجه به ابزارهای مدل‌سازی کامپیوتری و استفاده‌ای که از آن‌ها در طراحی سیستم‌های RF وMW می‌شود، بیش از پیش آشکار می‌گردد [۸۱]. خوشبختانه مطالعات بسیاری بر روی خواص دی‌الکتریک محصولات کشاورزی و مواد بیولوژیکی در فرکانس‌ها، دماها و محتوای رطوبتی مختلف گزارش شده است که می‌تواند در جهت پیشبرد اهداف بعدی مورد استفاده قرار گیرد.

۲-۵-۱ بنیان اندازه‌گیری خواص دی‌الکتریک مواد

هر ماده دارای مجموعه‌ای منحصر به فرد از شاخصه‌های الکتریکی است که به خواص دی‌الکتریک آن وابسته است. اندازه‌گیری دقیق این خواص به دانشمندان و مهندسین، آمادگی دسته‌بندی مواد بر اساس کاربردهای مورد نظر را می‌دهد. اطلاعات ارزشمندی که بر اساس همین اندازه‌گیری‌ها بدست می‌آید می‌تواند به منظور طراحی‌های اساسی یا پیش‌بینی فرآیند ساخت و تولید و نیز کنترل کیفیت استفاده گردد [۱۶].

۲-۵-۲ تئوری دی‌الکتریک

خواص دی‌الکتریک می‌تواند با فرکانس، دما، جهت‌گیری یون‌ها و ملکول‌های قطبی (جهت یابی ذرات باردار)، ترکیب ماده، فشار و ساختار ملکولی مواد تغییر کند [۱۶]. برای درک بهتر مبانی روش دی‌الکتریک ابتدا بایستی با مفاهیم زیر آشنا بود.

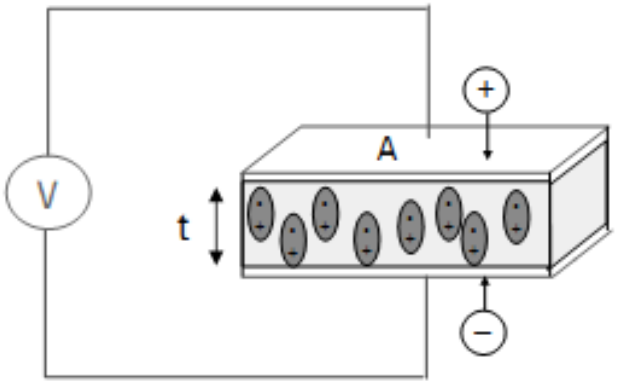
الف- گذردهی

یک ماده هنگامی به عنوان دی‌الکتریک شناخته می‌شود که اگر درون یک میدان الکتریکی خارجی قرار گیرد، توانایی ذخیره انرژی را داشته باشد. چنانچه مطابق شکل ۲-۱، یک اختلاف ولتاژ ثابت (منبع ولتاژ DC) دو سر یک خازن متشکل از صفحات موازی و ماده‌ای درون آن اعمال شود، این خازن نسبت به شرایط مشابه بدون ماده دی‌الکتریک، انرژی بیشتری ذخیره می‌نماید. این بدان علت است که با حضور ماده در بین صفحات، بارهای ناهمنام

در بین و نزدیک هر صفحه افزایش یافته که این امر مقدار انرژی ذخیره شده در خازن را مطابق با رابطه ۲-۱ افزایش می‌دهد.

$$U = \frac{1}{2} QV \qquad (۱-۲)$$

که در این رابطه U انرژی ذخیره شده در خازن (ژول)، Q بار ذخیره شده (کولن) و V اختلاف پتانسیل اعمالی به دو سر خازن (ولت) می‌باشد.



شکل ۲-۱- خازن با صفحات موازی و میدان DC

ظرفیت خازن برای شرایط با و بدون ماده دی‌الکتریک به ترتیب با C و C_0 (فاراد) نشان داده می‌شوند و از روابط ۲-۲ و ۲-۳ به دست می‌آیند.

$$C_0 = \varepsilon_0 \frac{A}{t} \qquad (۲-۲)$$

$$C = \varepsilon_r C_0 \qquad (۳-۲)$$

که در آن $\varepsilon_0 \approx \frac{1}{36\pi} \times 10^{-9}\ F/m$ ضریب گذردهی خلأ، A مساحت صفحات (m^2)، t فاصله بین صفحات (m) و ε_r گذردهی نسبی یا همان ثابت دی‌الکتریک کلی (k) می‌باشد [۸]. k یا ε_r شامل دو جزء حقیقی ε_r' و موهومی ε_r'' است (رابطه ۲-۴) که بیان‌گر قابلیت به ترتیب ذخیره‌سازی و هدررفت دی‌الکتریک می‌باشند.

$$k = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} = \varepsilon_r = \varepsilon_r' - j\varepsilon_r'' \qquad (۴-۲)$$

تا زمانی که جریان مستقیم در مدار شکل (۲-۱) برقرار باشد، اختلاف پتانسیل اعمالی به دو سر خازن مقدار ثابتی داشته و جزء موهومی گذردهی نسبی صفر می‌باشد، و در این حالت $\varepsilon_r = \varepsilon_r'$ است.

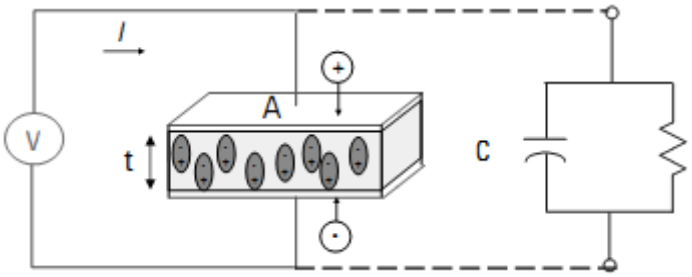
از منظر تئوری الکترومغناطیس، چگالی متغیر الکتریکی D_f برابر است با:

$$D_f = E\varepsilon \qquad (۵-۲)$$

در اینجا $\varepsilon = \varepsilon_0\varepsilon_r$ گذردهی کامل (یا گذردهی)، ε_r گذردهی نسبی و E میدان الکتریکی است.

گذردهی واکنش ماده با یک میدان متناوب الکتریکی E را توصیف می‌کند. تناوب این میدان با زمان به صورت هارمونیک است. به دنبال این تناوب، ذرات ماده‌ای که درون این میدان قرار گیرد، حرکات متناوبی وابسته به زمان دارند. برای نمایش وابستگی گذردهی به زمان می‌توان آن را به صورت مجموعه‌ای با اجزاء حقیقی و موهومی تعریف نمود [۳۹].

ثابت دی‌الکتریک (k) معادل گذردهی نسبی(ε_r) یا نسبت گذردهی کامل به فضای آزاد (ε_0) است. جزء حقیقی گذردهی (ε_r') ضریبی است متناسب با میزان انرژی که به دلیل وجود میدان الکتریکی خارجی در جسم ذخیره می‌شود. جزء موهومی گذردهی (ε_r'') که ضریب هدررفت نیز نامیده می‌شود، ضریبی متناسب با انرژی اتلافی یا تبدیل شده به گرما درون ماده دی‌الکتریک می‌باشد. جزء موهومی همیشه بزرگ‌تر از صفر و معمولاً بسیار کوچک‌تر از جزء حقیقی است. ضریب هدررفت شامل اثرات اتلاف دی‌الکتریک و هدایت نمودن جریان الکتریکی می‌شود [۸۰].



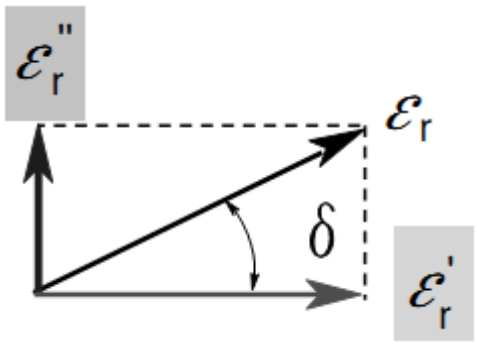
شکل ۲-۲- خازن باصفحات موازی و میدان متناوب

شکل ۲-۲، شماتیکی از قرارگرفتن خازن با صفحات موازی در یک میدان متناوب را نشان می‌دهد. با استفاده از قانون اهم می‌توان جریان متناوب الکتریکی مدار که شامل دو جزء حقیقی (I_{Re}) و موهومی (I_{Im}) می‌باشد را مطابق با رابطه (۲-۶) بدست آورد [۱۶].

$$I = I_{\mathrm{Re}} + I_{\mathrm{Im}} = V(j\omega C_0)(k' - jk'') \qquad (۶-۲)$$

به همین دلیل است که در منابع الکترونیک، خازن واقعی در مدارهای با جریان متناوب را با مجموعه خازن ایده‌آل و مقاومت موازی معادل‌سازی می‌نمایند [۸]. در این رابطه $j = \sqrt{-1}$ بردار یکه مختلط و $\omega = 2\pi f$ می‌باشد که f بیان کننده فرکانس است.

هنگامی که گذردهی نسبی بر اساس مؤلفه‌های خود به صورت برداری نشان داده می‌شود (شکل۲-۳)، با محور حقیقی زاویه‌ی δ می‌سازد. تانژانت این زاویه همان نسبت انرژی هدررفته به انرژی ذخیره شده در خازن می‌باشد (رابطه ۲-۷).



شکل ۲-۳- نموداربرداری تانژانت هدررفت

$$\tan\delta = \frac{\varepsilon_r''}{\varepsilon_r'} = \frac{1}{Q} \qquad (۷-۲)$$

که در آن Q شاخص کیفیت می‌باشد و هر چه بیشتر باشد خازن ایده‌آل‌تر است. زاویه بالا در صنعت مایکروویو کاربرد فراوانی دارد. برای مواد با اتلاف کم، چون $\tan\delta \approx \delta$، این مقدار می‌تواند با واحدهای زاویه، میلی رادیان یا میکرورادیان نیز بیان گردد [۱۶].

ب- عمق نفوذ

مواد غذایی که عموماً فاقد ترکیبات مغناطیسی‌اند، هنگام مواجهه با امواج الکترومغناطیس، تنها به میدان الکتریکی پاسخ نشان می‌دهند. علاوه بر این، چون این مواد اغلب هدایت‌گرهای ضعیف الکتریکی می‌باشند، در ذخیره یا هدررفت انرژی توانا هستند [۸۰]. با افزایش نفوذ موج درون ماده، از توان آن کاسته می‌شود. فاصله‌ای که توان موج از مقدار ورودی خود به $1/e$ (e=۲/۷۱۸) یا ۳۶/۸٪ همان مقدار کاهش می‌یابد، به عنوان عمق نفوذ، تعریف می‌شود. گاهی اوقات، d_p به عنوان فاصله‌ای که توان مایکروویو به ۵۰٪ توان انتقالی می‌رسد، تعریف می‌شود. عمق نفوذ طبق رابطه ۲-۸ تابعی از ε_r' و ε_r'' می‌باشد:

$$d_p = \frac{\lambda_0\sqrt{\varepsilon_r'}}{2\pi\varepsilon_r''} \qquad (۸-۲)$$

در اینجا λ_0 طول موج مایکروویو در فضای آزاد است (برای ۲۴۵۰MHz، $\lambda_0 = 122mm$).

اکثر محصولات غذایی رایج دارای ε_r'' کمتر از ۲۵ هستند که این موضوع d_p از ۶ تا ۱۰ mm را در پی دارد [۸۷]. برای یک ماده، عمق نفوذ به طور معکوس به فرکانس وابسته است [۸۰].