خواص دی الکتریک محصولات کشاورزی و کاربردهای آن‌ها

محمد طهماسبی[۱]، عبداله گلمحمدی[۲]، مهساسادات رضوی[۳]

[۱]دانشجوی دکتری مکانیک بیوسیستم؛ دانشگاه محقق اردبیلی؛ m.tahmasebi@uma.ac.ir
[۲]دانشیار گروه مهندسی بیوسیستم؛ دانشگاه محقق اردبیلی؛ agolmohammadi42@gmail.com
[۳]دانشجوی دکتری مکانیک بیوسیستم؛ دانشگاه محقق اردبیلی؛ mahsarazavi.68@gmail.com

چکیده

خواص دی‌الکتریک خواص ذاتی هستند که تعامل الکترومغناطیسی مواد را توصیف می‌کنند و اغلب به عنوان امضای الکتریکی یک ماده در نظر گرفته می‌شوند. استفاده از این خواص امکان توسعه حسگرهای کاربردی در سنجش و پایش غیر مخرب محصولات کشاورزی و گرمایش دی‌الکتریک آن‌ها در فرآیندهای پس از برداشت محصول را فراهم می‌سازد. لذا در این مقاله رفتار دی‌الکتریکی مواد کشاورزی و اصول اساسی تئوری پراکندگی دی الکتریک مورد بحث قرار گرفته است. عوامل موثر بر خواص دی‌الکتریکی محصولات کشاورزی و نحوه اثر این عوامل تشریح شده است. همچنین مهم‌ترین روش‌های اندازه‌گیری این خواص و کاربردهای آن‌ها در بخش کشاورزی مورد بحث و بررسی قرار گرفته است.

کلمات کلیدی: اندازه‌گیری دی‌الکتریک، اندازه‌گیری‌های غیرمخرب، محصولات کشاورزی، مواد دی‌الکتریک.

Dielectric Properties of Agricultural Products and Their applications

Mohammad Tahmasebi[1*], Abdollah Golmohammadi[2], Mahsa S. Razavi[1*]
[1*]PhD Student of Mechanical Engineering of Biosystem, University of Mohaghegh Ardabili; m.tahmasebi@uma.ac.ir
[2]Associated Professore at Engineering Department of Biosystem, University of Mohaghegh Ardabili; agolmohammadi42@gmail.com
[3]PhD Student of Mechanical Engineering of Biosystem, University of Mohaghegh Ardabili; Mahsarazavi.68@gmail.com

ABSTRACT

Dielectric properties are intrinsic properties that describe the electromagnetic wave−material interaction and they are often referred to as the electrical signature of a material. Using these properties enables the development applicable sensors for non-destructive measuring and monitoring of agricultural products and their dielectric heating in Products postharvest processes. So in this article, dielectric behavior of agricultural materials and the basic principles of dielectric dispersion theory are discussed. Factors affecting the dielectric properties of agricultural products are described. Also, the most important methods of measuring these properties and their applications in the agricultural sector have been discussed.

Keywords: Agricultural products, Dielectric measurements, Dielectric materials, Non-destructive measurements.

یازدهمین کنگره ملی مهندسی مکانیک بیوسیستم و مکانیزاسیون کشاورزی ایران

۱- محمد طهماسبی؛ دانشجوی دکتری مکانیک بیوسیستم ، دانشگاه محقق اردبیلی؛ ۰۹۱۸۸۴۹۶۴۷۶

۱-مقدمه

مواد دی‌الکتریک دسته ای از مواد است که در مقایسه با فلزات که هادی بسیار خوبی از جریان الکتریکی به شمار می‌روند، هادی ضعیفی از جریان الکتریکی می‌باشند و با به‌کار بردن میدان الکتریکی، قطبیده می‌شود. همانطور که در شکل ۱ مشخص است، وقتی یک ماده دی‌الکتریک در میدان الکتریکی قرار می‌گیرد، بارهای الکتریکی هم‌چون یک رسانا در ماده جریان پیدا نمی‌کند؛ اما به دلیل قطبش دی‌الکتریک به مقدار ناچیزی از حالت تعادل خودشان جابه‌جا می‌شوند و بارهای مثبت در جهت میدان و بارهای منفی در خلاف جهت میدان قرار می‌گیرند. این خاصیت باعث به وجودآمدن یک میدان داخلی می‌شود که به طور جزئی میدان خارجی را تضعیف می‌کند. واژه دی‌الکتریک است که موادی مانند هوا، شیشه، کاغذ یا چوب که به عنوان مواد دی الکتریک کلاسیک شناخته می‌شوند و دارای قطبیدگی بالا می‌باشند اطلاق می گردد. وقتی فضای بین صفحات یک خازن با دی الکتریک پر می‌شود، ظرفیت خازن با ضریب ε افزایش می‌یابد. مقدار ε با یک عدد که ثابت دی‌الکتریک نامیده می شود، بیان می گردد. بسیاری از مواد از جمله مواد غذایی، موجودات زنده و بسیاری از محصولات کشاورزی اگرچه در برخی دماها جریان الکتریکی را به خوبی از خود عبور می‌دهند، اما آن‌ها هنوز هم به عنوان مواد دی‌الکتریک طبقه بندی می‌گردند.

اولین گزارش ها در زمینه خواص دی‌الکتریکی محصولات کشاورزی و مواد غذایی، به حدود ۸۵ سال پیش بر می‌گردد که تحقیقاتی به منظور تعیین محتوای رطوبتی غلات بر پایه اندازه‌گیری مقاومت دی الکتریک و استفاده از جریان مستقیم انجام شد (Debye, 1929)؛ در سال‌های بعد جریان متناوب نیز مورد استفاده قرار گرفت (Nelson, 2006). به طور کلی خواص دی‌الکتریک محصولات کشاورزی و مواد غذایی وابسته به رطوبت، وزن مخصوص ظاهری، دما و بسامد مدار تحریک و ترکیب و ساختار محصول می‌باشد (Gradinarsky et al., 2006).

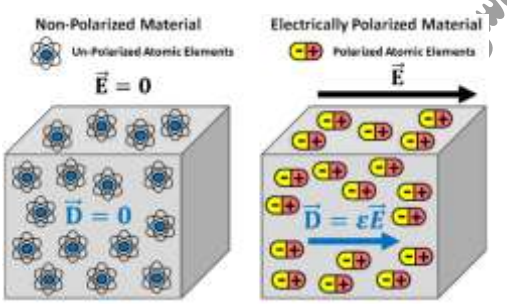

Figure 1. Polarization of a dielectric material under the influence of an electric field.

شکل ۱- قطبش یک ماده دی‌الکتریک تحت تاثیر میدان الکتریکی.

۲-ماهیت دی الکتریکی مواد

ماهیت الکتریکی این مواد را می‌توان با خواص دی‌الکتریکی آن‌ها با توجه به اثرات توزیع میدان‌های الکترومغناطیسی و جریان در منطقه اشغال شده توسط مواد و تعیین رفتار مواد در میدان‌های الکتریکی تشریح نمود. بنابراین، خواص دی‌الکتریک تعیین کننده چگونگی گرم شدن به وسیله فرکانس‌های رادیویی و یا ماکروویو در برنامه های کاربردی گرمایش دی الکتریک می‌باشد. این اثرات بر میدان‌های الکتریکی وسیله‌ای برای سنجش غیر مخرب خواص معین دیگر مواد، که ممکن است با خواص دی الکتریک در ارتباط باشد را نیز فراهم می‌سازد. بنابراین خواص دی‌الکتریکی محصولات کشاورزی، ممکن است برای کاربردهای سنجش کیفیت در صنایع کشاورزی و همچنین گرمایش دی‌الکتریک مهم باشد. چند تعاریف ساده خواص دی الکتریک در بحث در مورد کاربرد آن‌ها ممکن است مفید واقع گردد.

انتشار از طریق خلاء یا سرعت نور ویژگی اساسی تمام اشکال انرژی الکترومغناطیسی است. سرعت انتشار انرژی الکترومغناطیسی (V) در یک ماده بستگی به ویژگی های الکترومغناطیسی مواد داشته و برابر است با:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\mu . \varepsilon}} \qquad (۱)$$

که در آن μ تراوایی مغناطیسی و ε گذردهی الکتریکی ماده است. در خلاء داریم:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 . \varepsilon_0}} \qquad (۲)$$

که در آن μ_0 و ε_0 نفوذپذیری و گذردهی در خلاء هستند. اغلب مواد غذایی و محصولات کشاورزی غیر مغناطیسی هستند بنابراین μ_0 به عنوان نفوذ پذیری مغناطیسی آن‌ها در نظر گرفته می‌شود. با این حال، این مواد گذردهی متفاوتی در مقایسه با خلاء دارند. گذردهی مطلق (ε_a) می‌تواند به عنوان یک مقدار پیچیده به صورت زیر نشان داده شود:

$$\varepsilon_a = \varepsilon'_a - j\varepsilon''_a \quad (۳)$$

در این جا برابر $j=\sqrt{-1}$ می‌باشد. نسبت گذردهی مختلط به خلاء برابر است با:

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon_a}{\varepsilon_0} = \varepsilon'_r - j\varepsilon''_r \quad (۴)$$

که در آن ε_0 گذردهی نسبی در خلاء ($۸/۸۵\times10^{-۱۲}$ farad.m^{-1}) جزء حقیقی ثابت دی‌الکتریک و r ثابت دی الکتریکی اتلافی می‌باشد. ثابت دی الکتریک ε' مرتبط با توانایی یک ماده برای ذخیره انرژی در میدان الکتریکی و ε'' با توانایی مواد در جذب یا پراکندگی انرژی برای تبدیل انرژی الکتریکی به انرژی گرمایی در ارتباط است. ثابت دی‌الکتریک اتلافی به عنوان مثال، شاخص تمایل مواد به گرم کردن در یک گرم‌کننده مایکروویو است. ثابت دی الکتریک حقیقی نیز به دلیل اثر آن بر توزیع میدان الکتریکی به نوبه خود از اهمیت بالایی برخوردار است؛ به عنوان مثال اگر فاصله بین صفحات یک خازن تخت موازی که صفحات آن به وسیله خلاء یا هوا از یکدیگر جدا شده‌اند با یک ماده دی‌الکتریک پر شود برای محاسبه ظرفیت جدید آن باید مقدار ظرفیت اولیه در ثابت دی‌الکتریکی حقیقی ماده پرکننده بین صفحات ضرب گردد.

همچنین باید توجه داشت که $\varepsilon = \varepsilon' - j\varepsilon'' = |\varepsilon|e^{-j\delta}$ در صورتی که δ زاویه از دست دادن دی‌الکتریک باشد. اغلب تانژانت از دست دادن ($Tan\delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'}$) و یا همچنین ضریب تلفات به عنوان یک پارامتر دی الکتریک توصیفی و گاهی اوقات ضریب قدرت ($\frac{Tan\delta}{\sqrt{1+Tan^2\delta}}$) در مورد خواص دی‌الکتریکی یک ماده، مورد استفاده قرار می‌گیرد. در صورتی که $\omega = 2\pi f$ باشد، هدایت الکتریکی σ بر حسب S/m برابر است با $\sigma = \omega\varepsilon_0\varepsilon''$. فرکانس زاویه ای، با فرکانس f برحسب هرتز می‌باشد (Nelson, 2015).

۳-عوامل موثر بر خواص دی الکتریکی مواد

به طور کلی خواص دی‌الکتریک محصولات کشاورزی و مواد غذایی وابسته به رطوبت، وزن مخصوص ظاهری، دما و بسامد مدار تحریک و ترکیب و ساختار محصول می‌باشد (Gradinarsky et al., 2006) که در ادامه به تشریح هر یک از این عوامل خواهیم پرداخت.

رطوبت

خواص دی الکتریکی مواد جاذب رطوبت به شدت وابسته به شکل رطوبت جذب شده توسط ساختار مواد می‌باشد. اثر آب مقید بسیار کمتر از آبی است که در آن مولکول های قطبی می‌توانند آزادانه با یک میدان الکتریکی قطبش نمایند ضریب ثابت دی‌الکتریک و ضریب دی‌الکتریکی اتلافی با افزایش سطح رطوبت در رطوبت کم با آهنگ ملایمی افزایش می‌یابد. اما هنگامی که رطوبت به سطح معینی می‌رسد، افزایشی شدید برای برخی از مواد مشاهده شده است (Tahmasebi et al., 2014a). در برخی از محدوده های بسامدی، ممکن است ضریب دی الکتریکی اتلافی با افزایش رطوبت، کاهش یابد (Nelson, 1978). شکل ۲ اثر رطوبت بر خواص دی‌الکتریک شلتوک برنج در بسامد نشان می‌دهد.

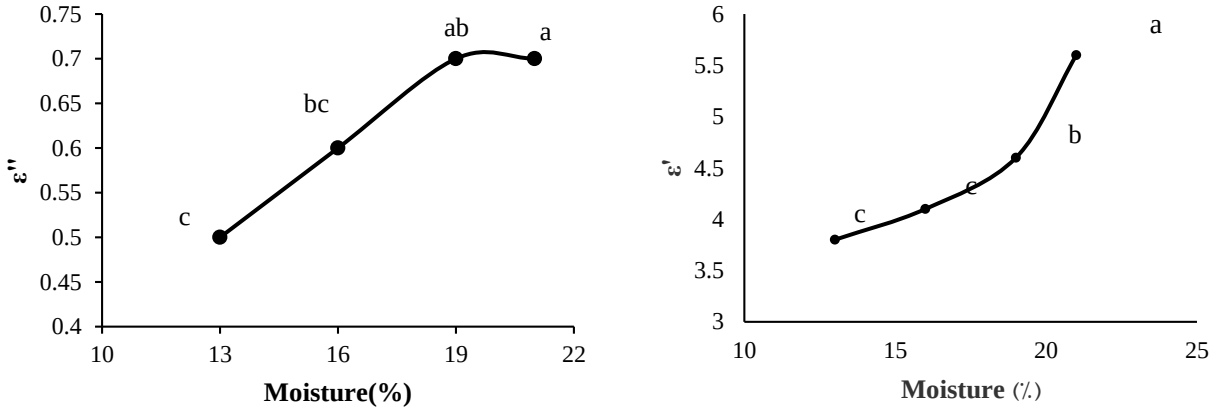

Figure 2. Effect of moisture content in dielectric properties of paddy (Tahmasebi et al., 2016).

شکل ۲- اثر رطوبت بر خواص دی‌الکتریکی شلتوک (Tahmasebi et al., 2016).

بسامد

به استثنای برخی از مواد که اساسا انرژی RF و مایکروویو کمی جذب می‌کنند، خواص دی الکتریک بسیاری از مواد، بطور قابل توجهی به بسامد اعمال شده وابسته است. وابستگی به بسامد بر خواص دی‌الکتریک ناشی از قطبش مولکول‌های دو قطبی دائمی، با میدان الکتریکی اعمال شده است، قطبش الکترونیکی جابجایی الکترون از اتم در رابطه با هسته است، و قطبش اتمی جابجایی هسته در رابطه با یکی دیگر است (Nelson, 1973). رابطه ریاضی توسعه یافته توسط دبای (Debye, 1929) به توصیف این فرایند برای مواد قطبی خالص می‌پردازد:

$$\varepsilon = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{1 + j\omega\tau} \quad (۵)$$

در اینجا ε_∞ نشان دهنده ثابت دی الکتریک در بسامدهای بالا است به صورتی که جهت گیری مولکولی هم کمکی به قطبش نداشته باشند، ε_s نشان دهنده ثابت دی الکتریک استاتیک در بسامد صفر (مدارهای dc) و τ زمان استراحت یا دوره‌های مرتبط با زمان بازگشت دوقطبی‌ها به جهت‌گیری تصادفی هنگام حذف میدان الکتریکی می‌باشد. با تبدیل معادله (۵) به قسمت حقیقی و موهومی داریم:

$$\varepsilon' = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{1 + (\omega\tau)^2} \quad (۶)$$

$$\varepsilon'' = \frac{(\varepsilon_s - \varepsilon_\infty)\omega\tau}{1 + (\omega\tau)^2} \quad (۷)$$

روابط تعریف شده توسط این معادلات در شکل ۳ نشان داده شده است؛ در بسامدهای بسیار پایین و بسیار بالا با توجه به روند آرامش مولکولی، ثابت دی‌الکتریک دارای مقادیر ثابت است و تلفات صفر است. در بسامدهای متوسط، ثابت دی الکتریک در معرض یک پراکندگی بوده و حداکثر تلفات دی الکتریک وقتی که $\omega=1/\tau$ در فرکانس آرامش اتفاق می‌افتد. معادله دبای می‌تواند این رابطه را به صورت مرکب در حدود بالای فرکانس نشان دهد (شکل ۴). این نمودار همچنین معادله کول-کول نیز نامیده می‌شود (Cole & Cole, 1941).

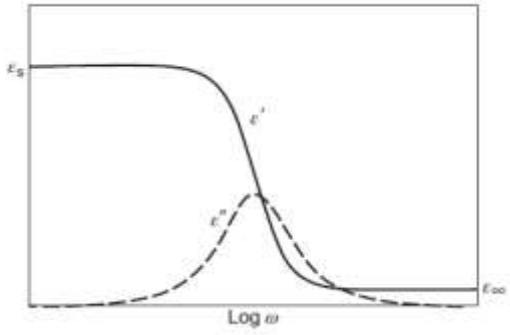

Figure 3. Dielectric constant and loss factor for a material following the Debye relaxation (Nelson, 1973)

شکل ۳- ثابت دی الکتریک و ضریب تلفات برای یک ماده براساس آرامش دبای (Nelson, 1973)

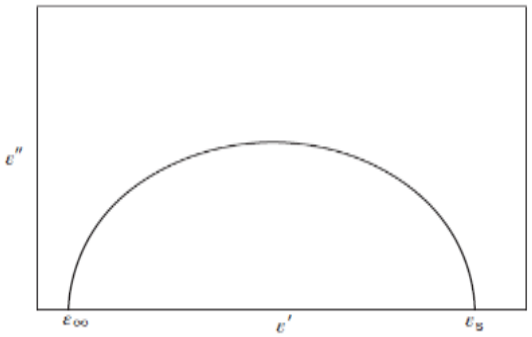

Figure 4. Cole-Cole diagram for a material following the Debye relaxation (Nelson, 1973).

شکل۴-نمودار کول-کول برای یک ماده براساس آرامش دبای (Nelson, 1973)

دما

رفتار محصول در اثر تغییر دما به شدت به بسامد تحریک و رطوبت محصول بستگی دارد. در بسامدهای پایین ضریب دی الکتریک نسبی با افزایش دما تمایل به کاهش دارد. در حالی که ضریب اتلاف بسته به اینکه آیا فرکانس عامل بالاتر یا پایین‌تر از فرکانس آرامش است، ممکن است افزایش یا کاهش یابد (Nelson, 2015). شکل ۶ اثر دما بر خواص دی الکتریک در بسامدهای مختلف برای سیب نشان می‌دهد.

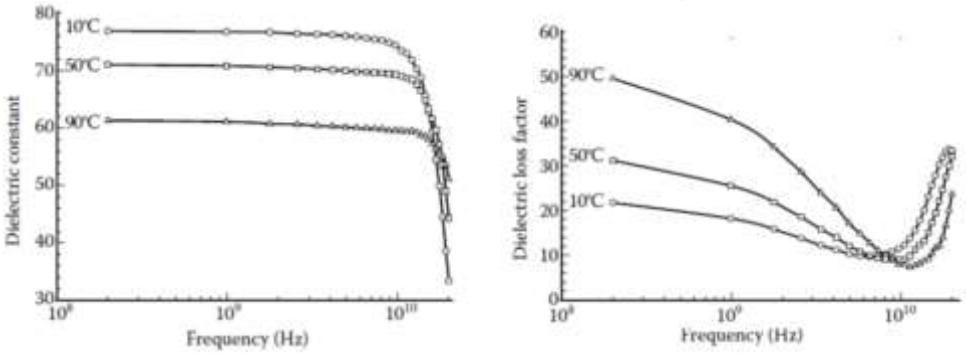

Figure 4. Effect of temperature on dielectric properties of apple at different frequencies (Nelson & Bartley 2002)

شکل ۴-اثر دما بر خواص دی‌الکتریک سیب در بسامدهای مختلف (Nelson & Bartley 2002)

جرم مخصوص ظاهری

از آنجا که خواص دی الکتریک یک دی الکتریک بستگی به مقدار جرم تعامل با میدان‌های الکترومغناطیسی، جرم در واحد حجم، و یا چگالی خواهد داشت. این امر به ویژه با دی الکتریک ذرات مانند مواد ساییده یا گرانول قابل توجه است. در فهم ماهیت وابستگی خواص دی الکتریک به چگالی ذرات مواد، روابط بین خواص دی الکتریک مواد جامد و مخلوط هوا-ذرات، مانند گرانول یا پودر نمونه مواد جامد، مفید هستند. در برخی موارد، زمانی که تنها ذرات نمونه مواد در دسترس است و یا برای برخی از مواد، ساخت نمونه با ابعاد دقیق مورد نیاز برای اندازه‌گیری خواص دی الکتریک دشوار است و اندازه گیری با مواد ساییده به راحتی انجام می‌شود. در چنین مواردی، روابط اثبات شده برای تبدیل خواص دی الکتریک نمونه ذرات به خواص دی الکتریک مواد جامد مهم هستند. چند معادله ترکیبی دی الکتریک شناخته شده برای این منظور در نظر گرفته شده است (Nelson & You,1990). نلسون و کراکوفسکی (Nelson & Kraszewski., 1998) گزارش نمودند که خواص دی الکتریک مواد ذرات در محدوده وسیعی از جرم مخصوص ظاهری روابط خطی بین جذر و ریشه مکعب ثابت دی الکتریک و جرم مخصوص ظاهری ذرات مواد وجود دارد. به عنوان مثال اثر جرم مخصوص ظاهری خواص دی الکتریک کاه گندم در رطوبت های ۱۰/۴٪ تا ۲۰/۳٪ در شکل ۷ نشان داده شده است.

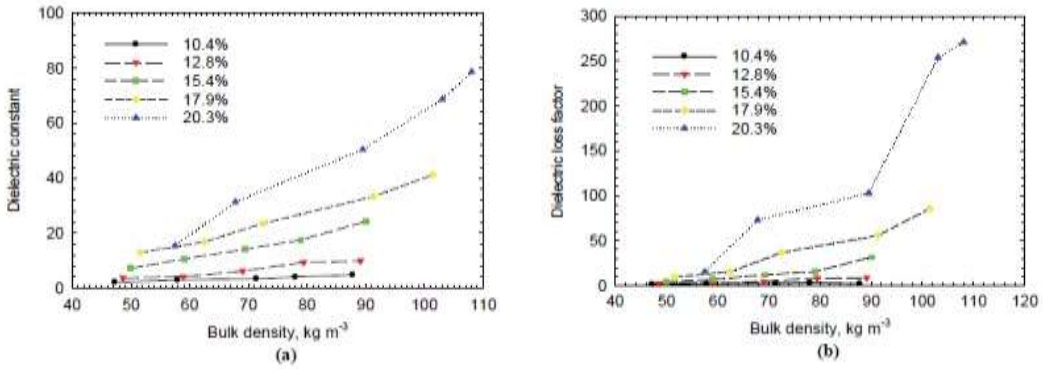

Figure 5. Effect of bulk density of dielectric properties of wheat straw on different moisture content (Guo et al., 2013)

شکل ۵-اثر جرم مخصوص ظاهری خواص دی الکتریک کاه گندم در رطوبت های مختلف (Guo et al., 2013)

ترکیب و ساختار محصول

خواص دی الکتریک مواد غذایی در درجه اول توسط ترکیب شیمیایی آن‌ها و به میزان کمتری، با ساختار فیزیکی آن‌ها در ارتباط است. با توجه به تفاوت در ضرایب دی الکتریکی آب، قندها، نمک‌ها، پروتئین‌ها، چربی‌ها و مواد نشاسته که بخش اعظمی از بافت محصول را تشکیل می‌دهند، ترکیبات مختلفی از این مواد و یا تغییرات نسبت آن‌ها در طول سیکل فیزیولوژیک محصول می‌تواند بر خواص دی الکتریکی محصولات کشاورزی و مواد غذایی اثرگذار باشد (Nelson, 2015).

۴-روش‌های اندازه گیری خواص دی الکتریک

تا کنون روش‌های مختلفی برای اندازه‌گیری خواص دی‌الکتریکی مواد مختلف ارائه گردیده است که عبارتند از:

روش مقاومت همراه

این تکنیک برای اندازه گیری سطح و حجم مقاومت مواد جامد استفاده می‌شود. مواد بین دو صفحه الکترود اصلی و محافظ قرار می‌گیرد. اندازه‌گیری با استفاده از اهم‌متر در برابر اعمال یک ولتاژ DC در یک طرف (مقاومت سطح) و یا در هر دو طرف (مقاومت حجم) از نمونه انجام می‌گیرد. این روش یک روش ارزان با محاسبات نسبتا ساده است در حالی که آن دارای برخی معایب مانند: تنها اندازه‌گیری DC می‌تواند باشد و نمونه باید یک ورق مسطح باشد (Içier & Baysal, 2004).

روش صفحات موازی

در روش صفحات موازی که متداول‌ترین روش در پژوهش‌های مربوط به کشاورزی و صنایع غذایی است، با برقراری جریان از طریق مدار تغذیه، مولد موج فعال شده و یک جریان متناوب با موجی سینوسی را بر روی حسگر خازنی اعمال می‌کند، مقدار این جریان پس از گذشتن از حسگر با توجه به خصوصیات نمونه بین صفحات حسگر تغییر کرده و پس از یک سو شدن محاسبه می‌گردد(Tahmasebi et al., 2017). این روش، روشی ارزان قیمت، با محاسبات نسبتا ساده و دقت بالا است اما در این روش محدودیت بسامد وجود دارد، همچنین نمونه باید یک ورق مسطح، صاف و نازک باشد (Içier & Baysal, 2004).

روش مدار مجتمع

در این روش نمونه بخشی از عایق یک مدار مجتمع است. انواع مواد، به جز گازها، می‌توانند اندازه‌گیری شوند. اما، روش مناسب برای مواد با ضریب دی‌الکتریکی اتلافی بسیار کم نیست و دارای محدودیت در بسامد است. (Nyfors & Vainikainen,1989; Rynnanen, 1995).

روش پروب کواکسیال

خواص دی الکتریک MUT تحت تاثیر دامنه و فاز سیگنال منعکس‌شده در مرز آن‌ها است. تجزیه و تحلیل شبکه بردار می‌تواند بازتاب اندازه‌گیری ضریب نمونه و یک کامپیوتر و نرم افزار می‌تواند هدایت و تبدیل داده‌های اندازه‌گیری به ثابت دی الکتریک در مقابل فرکانس را فراهم سازد. روشی آسان، ایده آل غیر مخرب برای بسیاری از مواد از جمله مایعات و مواد نیمه جامد است؛ این روش همچنین بدون نیاز به آماده‌سازی نمونه و دارای یک محدوده فرکانس وسیع (۲۰۰ مگاهرتز تا ۲۰ گیگاهرتز) است (Içier & Baysal, 2004)؛ با این حال، نیازمند نمونه با ضخامت بیشتر از یک سانتی‌متر و صافی سطح مواد جامد است (Ryynanen, 1995).

روش خطوط انتقال

این روش خود از شیوه‌های مختلف مدار باز، اتصال کوتاه و بار تطبیق استفاده می‌کند. در تمامی این شیوه‌ها، پارامترهای پراکندگی شبکه اندازه‌گیری می‌شود و سپس به کمک این پارامترها، خصوصیات ماده مورد نظر استخراج می‌گردد (Chen et al, 2004).

طیف سنجی حوزه زمان

برای اندازه‌گیری خواص دی الکتریک مواد در محدوده گسترده‌ای از فرکانس اندازه‌گیری شده توسط حوزه زمان استفاده می‌شود. این روش طیف فرکانس از ۱۰ مگاهرتز تا ۱۰ گیگاهرتز را پوشش می‌دهد. اندازه‌گیری بسیار سریع و دارای دقت بالا اما پر هزینه است. نمونه باید یکدست و بسیار کوچک باشد (Karpowicz et al., 2008).

استفاده از تشدید در رزوناتورهای دی الکتریکی

در این شیوه ابعاد ماده باید با توجه به فرکانس رزونانس، کوچک باشند، در داخل دی الکتریک‌ها در مجاورت یک خط انتقال یا یک منبع ماکروویو، تشدید ایجاد می‌گردد. از معایب این روش دقت پایین به دلیل وابستگی جواب به پارامترهای مختلف از جمله ابعاد ماده، فاصله تا منبع ماکروویو، توان منبع است. همچنین در هیچ مرجعی روش محاسباتی دقیقی برای آن ذکر نشده است (Mongia & Bhartia, 1994).

یازدهمین کنگره ملی مهندسی مکانیک بیوسیستم و مکانیزاسیون ایران (دانشگاه‌های کشاورزی)

۵-کاربرد خواص دی الکتریک در کشاورزی و صنایع غذایی

متداول‌ترین کاربرد خواص دی‌الکتریک در کشاورزی و صنایع غذایی عبارتند است از :

- گرمایش دی‌الکتریک
- سنجش رطوبت
- اندازه‌گیری دبی جرمی
- سنجش کیفیت

گرمایش دی‌الکتریک

کم بودن کارایی انرژی و طولانی بودن زمان خشک کردن طی دوره سرعت نزولی از معایب مهم خشک کردن با جریان هوای داغ است. به دلیل کاهش ضریب هدایت حرارتی مواد غذایی در دوره سرعت نزولی فرآیند خشک کردن با روش جابجایی، سرعت انتقال حرارت به قسمت های درونی ماده غذایی کاهش می‌یابد. به منظور بر طرف کردن این مشکلات و جلوگیری از کاهش کیفیت محصول و برای رسیدن به فرآیند مؤثر و سریع انتقال حرارت، استفاده از مایکروویو برای خشک کردن مواد غذایی توسعه یافته است. بر خلاف سیستم‌های گرمایشی متداول، به دلیل نفوذ امواج مایکروویو به داخل ماده غذایی، حرارت در سرتاسر ماده غذایی انتشار می‌یابد. به همین دلیل در روش مایکروویو سرعت انتقال گرما سریع‌تر از سایر روش‌های حرارتی است. اگرچه تجهیزات یک سیستم خشک‌کن مایکروویوی در مقایسه با خشک‌کن جابجایی فقط به ۳۰-۲۵٪ فضا نیاز دارد، ولی اگر از آن به طور مناسب استفاده نشود می‌تواند منجر به افت کیفیت محصول گردد. اصولاً گرمایش مواد غذایی با مایکروویو رابطه مستقیم با ویژگی‌های دی الکتریکی آن‌ها داشته و این ویژگی خود متأثر از ضریب افت دی‌الکتریک نسبی است. تانژانت اتلاف ($Tan\delta$) الکتریکی در ماده و مقدار اتلاف انرژی الکتریکی در ماده به صورت حرارت است (Zhang et al., 2006).

سنجش رطوبت

تخمین رطوبت محصولات کشاورزی مهم‌ترین کاربرد روش دی‌الکتریکی است (Tahmasebi, 2014). هم اکنون به صورت گستره از رطوبت سنج‌هایی که بر پایه خواص دی الکتریکی آب ساخته شده‌اند (شکل ۶)، در اندازه‌گیری محتوای رطوبتی محصول به صورت استاتیکی استفاده می‌شود. همچنین تحقیقات گسترده‌ای جهت استفاده از خواص دی الکتریک در سنجش برخط رطوبت محصولات کشاورزی، مواد غذایی و خاک‌های اراضی کشاورزی صورت گرفته است. شکل ۷ نمونه یک حسگر خازنی توسعه داده شده توسط خورسندی و همکاران را به منظور اندازه‌گیری رطوبت خاک را نشان می‌دهد.

اساس این روش متکی بر ارتباط بین خواص دی الکتریک محصول و مقدار آب موجود در آن‌ها می‌باشد. خواص دی الکتریک دانه در درجه اول متناسب با جرم آب در نمونه است، چرا که گذردهی نسبی آب در حدود ۸۰ است در حالی که این ویژگی برای دانه خشک کمتر از سه است. بنابراین، میزان رطوبت در یک نمونه دانه با استفاده از خواص دی الکتریک به سهولت قابل اندازه‌گیری می‌باشد (Lawrence et al., 1998).

Figure 6. A sample of a moisture meter based on dielectric properties

شکل ۶- نمونه‌ای از یک رطوبت سنج بر پایه خواص دی الکتریکی

یازدهمین کنگره ملی مهندسی مکانیک بیوسیستم (ماشین‌های کشاورزی) و مکانیزاسیون ایران

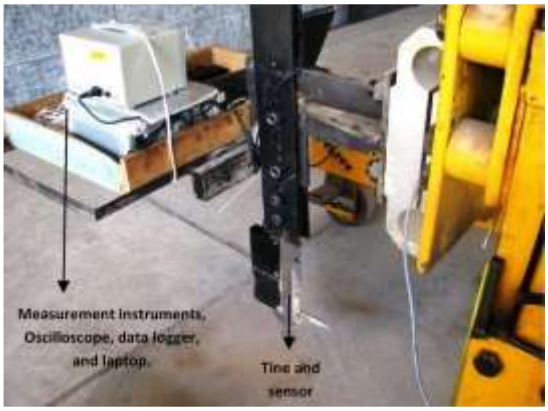

Figure 7. Dielectric-based sensor for measuring soil moisture content (Naderi-Boldaji et al., 2011)

شکل ۷- سنسور مبتنی بر خواص دی الکتریک برای اندازه گیری رطوبت خاک (Naderi-Boldaji et al., 2011)

اندازه‌گیری دبی جرمی

عملکرد سنسورهای خازنی جهت اندازه‌گیری دبی جرمی (شکل ۸) بر اساس این واقعیت که ثابت دی‌الکتریک مخلوط هوا و مواد بین دو صفحه موازی با افزایش نسبت محصول به هوا، افزایش می‌یابد و موجب تغییر در مقدار بار ذخیره شده بر روی این صفحات می‌گردد (Kumhala et al., 2009). این روش به عنوان شاخص خوبی از میزان محصول عبوری در سیستم‌های انتقال محصولات کشاورزی یا سنجش لحظه‌ای عملکرد در ماشین‌های برداشت مورد استفاده قرار گیرد (Tahmasebi et al., 2014b).

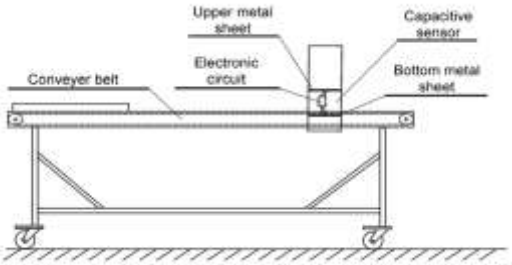

Figure 8. The system developed by Kumhala et al., 2009, for measuring sugar beets and potatoes mass flow rate by using dielectric properties

شکل ۸- سیستم توسعه داده شده توسط Kumhala et al., 2009 به منظور اندازه گیری دبی جرمی چغندرقند و سیب زمینی با استفاده از خواص دی الکتریک

سنجش کیفیت

با توجه به این که در طی فرآیند رسیدگی میوه، مقدار ترکیبات موجود در محصول و همچنین ساختار میوه دچار تغییر می‌شود، خواص دی الکتریکی محصول نیز دچار تغییر خواهد شد. بنابراین اندازه‌گیری خواص دی‌الکتریک می‌تواند سنجش خوبی از میزان رسیدگی محصول باشد (Soltani et al., 2011). به عنوان مثال در میوه‌های قندی مثل سیب و موز در طی فرآیند رسیدگی میزان قند موجود در محصول افزایش و میزان نشاسته آن به شدت کاهش می‌یابد. از آنجایی که ضریب دی الکتریک قند کمتر از نشاسته است، ثابت دی الکتریک محصول در طی فرآیند رسیدن محصول کاهش می‌یابد، که می‌توان از این روش به عنوان معیاری برای مقدار رسیدگی محصول استفاده نمود (شکل ۹).

بررسی تغییرات ضریب دی الکتریک در دوره نگه‌داری محصول یکی دیگر از کاربردهای خواص دی الکتریک جهت پیش‌بینی شاخص‌های کیفی محصول است (Ragni et al., 2006).

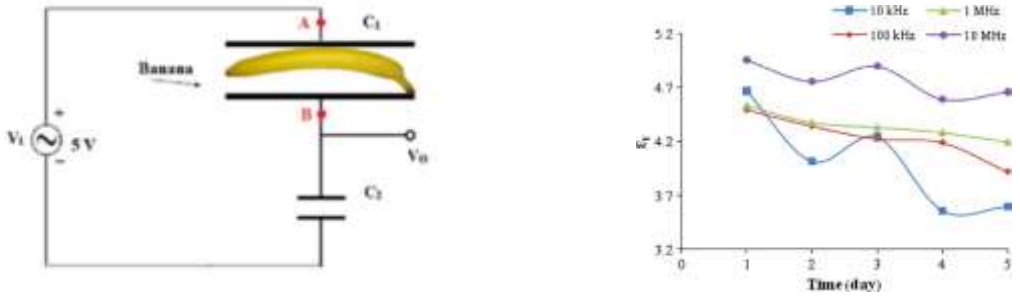

Figure 9. banana ripening by assessment using dielectric properties (Soltani et al., 2011)

شکل ۹- سنجش رسیدگی موز با استفاده از خواص دی الکتریک (Soltani et al., 2011)

۶-نتیجه‌گیری

خواص دی الکتریکی محصولات کشاورزی یکی از مهم‌ترین خصوصیات فیزیکی محصولات کشاورزی و غذایی به شمار می‌رود؛ ارتباط این خواص با بسیاری از مولفه‌های کمی و کیفی محصول، سرعت بالا، هزینه کم و کارایی فراوان استفاده از آن را به عنوان یک فناوری جدید و غیر مخرب سنجش طیف وسیعی از ویژگی‌های کمی و کیفی محصولات کشاورزی فراهم می سازد.

۷-مراجع

Chen, H., Ran, L., Huangfu, J., Zhang, X., Chen, K., Grzegorczyk, T. M., & Kong, J. A. (2004). Left-handed materials composed of only S-shaped resonators. *Physical Review E*, *70*(5), 057605.

Cole, K. S., & Cole, R. H. (1941). Dispersion and absorption in dielectrics I. Alternating current characteristics. *The Journal of chemical physics*, *9*(4), 341-351.

Debye, P. J. W. (1929). *Polar molecules*. Chemical Catalog Company, Incorporated.

Gradinarsky, L., Brage, H., Lagerholm, B., Björn, I. N., & Folestad, S. (2006). In situ monitoring and control of moisture content in pharmaceutical powder processes using an open-ended coaxial probe. *Measurement science and technology*, *17*(7), 1847.

Guo, W., Yang, J., Zhu, X., Wang, S., & Guo, K. (2013). Frequency, moisture, temperature, and density-dependent dielectric properties of wheat straw. *Transactions of the ASABE*, *56*(3), 1069-1075.

Içier, F., & Baysal, T. (2004). Dielectrical properties of food materials—2: Measurement techniques. *Critical reviews in food science and nutrition*, *44*(6), 473-478.

Karpowicz, N., Dai, J., Lu, X., Chen, Y., Yamaguchi, M., Zhao, H., ... & Fletcher, C. (2008). Coherent heterodyne time-domain spectrometry covering the entire "terahertz gap". *Applied Physics Letters*, *92*(1), 011131.

Kraszewski, A. W., Trabelsi, S., & Nelson, S. O. (1997). Moisture content determination in grain by measuring microwave parameters. *Measurement Science and Technology*, *8*(8), 857.

Kumhála, F., Prošek, V., & Blahovec, J. (2009). Capacitive throughput sensor for sugar beets and potatoes. *biosystems engineering*, *102*(1), 36-43.

Lawrence, K. C., Windham, W. R., & Nelson, S. O. (1998). Wheat moisture determination by 1-to 110-MHz swept-frequency admittance measurements. *Transactions of the ASAE*, *41*(1), 135.

Mongia, R. K., & Bhartia, P. (1994). Dielectric resonator antennas—A review and general design relations for resonant frequency and bandwidth. *International Journal of Microwave and Millimeter-Wave Computer-Aided Engineering*, *4*(3), 230-247.

Naderi-Boldaji, M., Sharifi, A., Jamshidi, B., Younesi-Alamouti, M., & Minaee, S. (2011). A dielectric-based combined horizontal sensor for on-the-go measurement of soil water content and mechanical resistance. *Sensors and Actuators A: Physical*, *171*(2), 131-137.

Nelson, S. (2015). *Dielectric properties of agricultural materials and their applications*. Academic Press.

Nelson, S. O. (1973). Microwave dielectric properties of grain and seed. *Transactions of the ASAE*, *16*(5), 902-905.

Nelson, S. O. (1978). Frequency and moisture dependence of the dielectric properties of high-moisture corn. *Journal of Microwave Power*, *13*(2), 213-218.

Nelson, S. O. (2006). Agricultural applications of dielectric measurements. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, *13*(4), 688-702.

Nelson, S. O., & Bartley, P. G. (2002). Frequency and temperature dependence of the dielectric properties of food materials. *Transactions of the ASAE*, *45*(4), 1223.

Nelson, S. O., & Kraszewski, A. W. (1998). Sensing pulverized material mixture proportions by resonant cavity measurements. *IEEE transactions on instrumentation and measurement*, *47*(5), 1201-1204.

Nelson, S. O., & You, T. S. (1990). Relationships between microwave permittivities of solid and pulverised plastics. *Journal of physics D: applied physics*, *23*(3), 346.

Nyfors, E., & Vainikainen, P. (1989). *Industrial microwave sensors* (pp. p-28). Artech House.

Ragni, L., Gradari, P., Berardinelli, A., Giunchi, A., & Guarnieri, A. (2006). Predicting quality parameters of shell eggs using a simple technique based on the dielectric properties. *Biosystems Engineering*, *94*(2), 255-262.

Ryynänen, S. (1995). The electromagnetic properties of food materials: a review of the basic principles. *Journal of Food Engineering*, *26*(4), 409-429.

Soltani, M., Alimardani, R., & Omid, M. (2011). Evaluating banana ripening status from measuring dielectric properties. *Journal of Food Engineering*, *105*(4), 625-631.

Tahmasebi, M. (2014). *Investigation the parameters affecting the transfer of agricultural production the conveyor system by using capacitive sensors*. (Unpublished master's thesis). Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran (Persian).

Tahmasebi, M., Golmohammadi, A., Tabatabaei-Kolor, R. (2017). Measuring of Paddy mass flow using capacitive sensor and modeling with using multiple regression, ANN, and ANFIS models. *Iranian Journal of Biosystem Engineering*, 48(2), 221-227 (Persian).

Tahmasebi, M., Tabatabaei-Kolor, R. Hashemi, J. (2014a). The feasibility of a Capacitive Sensing Method for Measurement of Moisture content in paddy pazhohesh Variety. *The 8th National Congress on Agr. Machinery Eng. (Biosystems) & Mechanization*, mashad, Iran (Persian).

Tahmasebi, M., Tabatabaei-Kolor, R. Hashemi, J. (2014b). Investigation of using capacitive method for paddy mass flow determination. *The 8th National Congress on Agr. Machinery Eng. (Biosystems) & Mechanization*, mashad, Iran (Persian).

Tahmasebi, M., Tabatabaei-Kolor, R. Hashemi, J. (2016). Effect of moisture content and frequency in dielectric properties of two paddy variety. *Iranian Journal of Biosystem Engineering*, 47(1), 51-61. (Persian)

Zhang, M., Tang, J., Mujumdar, A. S., & Wang, S. (2006). Trends in microwave-related drying of fruits and vegetables. *Trends in Food Science & Technology*, *17*(10), 524-534.

یازدهمین کنگره ملی مهندسی مکانیک بیوسیستم و مکانیزاسیون ایران