یازدهمین کنگره ملی مهندسی مکانیک
بیوسیستم و مکانیزاسیون ایران

روشها و تکنیک های اندازه گیری خصوصیات دی الکتریک محصولات کشاورزی

مطهره واعظی زاده[۱]، محسن شمسی[۲]، کامبیز افروز[۳]، محمد علی رستمی[۴]

۱. دانشجوی دکتری مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه شهید باهنر کرمان، m.vaezizadeh@gmail.com
۲. دانشیار گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه شهید باهنر کرمان، mbkshamsi@gmail.com
۳. دانشیار گروه مهندسی برق و الکترونیک، دانشگاه شهید باهنر کرمان، afrooz@uk.ac.ir
۴. استادیار پژوهش، بخش تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان کرمان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرمان، ایران. marostami1351@gmail.com

چکیده

اندازه گیری خصوصیات دی الکتریک مواد غذایی و کشاورزی کاربردهای زیادی از استفاده فرکانس های رادیویی و امواج ماکروویو را در صنایع غذایی و کشاورزی در دهه های اخیر ارائه داده است. این خصوصیات کاربردهای مهمی در صنایع غذایی که ماکروویو و فرکانس های رادیویی کار می کنند فراهم کرده اند. بنابراین آگاهی از این خصوصیات اطلاعات مفیدی در خصوص واکنش این مواد در مواجهه با امواج الکترومغناطیس در طول گرمایش دی الکتریک ارائه می دهد. آگاهی از خصوصیات دی الکتریک مواد غذایی به منظور درک بهتر و مدل سازی رفتار ماده در میدان مغناطیسی در فرکانس ها و درجه حرارت خاص کمک بسیار زیادی می کند. و کاربرد های مفید دیگر در استفاده از گرمایش الکترومغناطیس از قبیل کنترل آفات و حشرات ، صنایع پاستوریزه و هموژنیزه کردن و غیره ارائه می دهد. هدف از ارائه این مطالعه ، ارائه روشها و تکنیک های مختلف اندازه گیری خصوصیات دی الکتریک محصولات کشاورزی و مزایا و معایب هر کدام است.

کلمات کلیدی: خصوصیات دی الکتریک، امواج الکترومغناطیس، روش خط انتقال، روش پراب کواکسیال انتها باز، روش حفره رزونانس

The Dielectric Properties of Agri-food Materials measuring techniques

Motahareh Vaezi Zadeh [1], Mohsen Shamsi[2], Kambiz Afrooz[3], Mohammad Ali Rostami[4]

1. Biosystem Engineering Department, Ph.D. student, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran, m.vaezizadeh@gmail.com
2. Biosystem Engineering Department, Associate Professor, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran, mbkshamsi@gmail.com
3. Electrical Engineering Department, Associate Professor, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman Iran, afrooz@uk.ac.ir,
4. Agricultural Engineering Research Department, Assistant Professor, Kerman Agricultural and Resource Research and Education Center, Areeo,Kerman, Iran. marostami1351@gmail.com

Abstract

The dielectric properties of food and agriculture materials has been widely used in recent decades for using of radio frequency and microwave in the food industries. These properties have gained great importance and applications for foods that are subjected to microwave or radio frequency heating treatments. So, dielectric properties are the main parameters that provide information about how materials interact with electromagnetic energy during dielectric heating. The knowledge of the dielectric properties of foodstuff in order to understand and model the response of the material to the electromagnetic field, at certain desired frequencies and temperatures. The many useful applications of electromagnetic heating for foods have emerged and have been published in the literature, such as pest and insect control, pasteurization, homogenization, etc. the main purpose of this study is to discuss the various methods and techniques of measurement of dielectric properties of agri-food and biological materials.

Keywords: dielectric properties, electromagnetic waves, transmission line method, open ended coaxial probe method, resonant cavity method

---

[۱] مطهره واعظی زاده ، کرمان، خ شیخ احمد کافی جنوبی ۱۴ سمت راست درب ۱۷، ۰۹۱۳۸۴۷۶۷۱۴

۱-مقدمه

خصوصیات دی الکتریک مواد غذایی و بیولوژیکی در توسعه صنایع غذایی نقش مهمی را ایفا می کنند. از آنجاکه فاکتورهای زیادی از جمله میزان رطوبت ، شکل آب موجود در محصول اعم از آب آزاد، منجمد و مقید در بین سلولها ، چگالی حجمی (میزان هوای موجود در بین محصول)، میزان نمک موجود در محصول، ترکیبات شیمیایی محصول (میزان کربوهیدرات، چربی، فیبر و غیره) بر روی خصوصیات دی الکتریک ماده تاثیر می گذارند بنابراین دانشمندان و محققان در طی دهه گذشته کاربردهای زیادی برای آن در صنایع و در سطوح آزمایشگاهی یافته اند. با تغییر رطوبت محصول میزان خصوصیات دی الکتریک محصول به شدت تغییر می کند بنابراین از این خصوصیات برای اندازه گیری میزان رطوبت محصول به روش غیر مخرب و با سرعت بالا استفاده کرد . (Nelson., 1991) زمانیکه مواد غذایی و محصولات بیولوژیک در معرض میدان الکترو مغناطیس متناوب در حوزه فرکانس های رادیویی (۳ کیلو هرتز تا ۳۰۰ مگا هرتز) و امواج ماکروویو (۳۰۰ مگا هرتز تا ۳۰۰ گیگا هرتز) قرار می گیرند، درجه حرارت درون ماده به سرعت با جذب انرژی افزایش می یابد بنابراین می توان از این خصوصیت در صنایع پخت و پز، یخ زدایی، پاستوریزه و هموژنیزه کردن و غیره استفاده کرد. (Venkatesh & Raghavan., 2004; Gao et al., 2011) استفاده از ماکروویو ها در صنایع غذایی و در مصارف خانگی یکی از کاربردهای عمده خصوصیات دی الکتریک مواد غذایی در زندگی روزمره می باشد. یکی دیگر از کاربردهای خصوصیات دی الکتریک که در طی چند دهه اخیر به آن توجه زیادی شده است استفاده از امواج الکترومغناطیس برای کنترل و از بین بردن آفات و حشرات و همچنین استفاده از آن برای کنترل بیماریها می باشد. (Zhu et al., 2012; Gao el al., 2012)

توزیع انرژی الکترومغناطیس در سیستم های گرمایشی فرکانس رادیویی و ماکروویو به وسیله معادلات ماکسول کنترل می شود. از لحاظ طراحی و ساخت مهندسی هیترهای الکترومغناطیس، خصوصیات دی الکتریک ماده نقش خیلی مهمی را ایفا می کنند. بنابراین اندازه گیری و آگاهی از این خصوصیات در مدلسازی و پیش بینی فرآیند بسیار مهم است. برای اندازه گیری این خصوصیات روشهای متفاوتی از سوی دانشمندان و محققان ارائه شده است که هر کدام دارای مزایا و معایب خاصی هستند بنابراین هدف از ارائه این مقاله بررسی روش های مختلف اندازه گیری خصوصیات دی الکتریک مواد غذایی و محصولات بیولوژیک می باشد.

۲- تعریف خصوصیات دی الکتریک

وقتی موج الکترومغناطیس از درون یک ماده عبور می کند انرژی حاصل از این موج به سه دسته تقسیم می شود یک قسمت آن از سطح ماده منعکس می شود، مقداری از آن بر روی سطح ماده انتقال می یابد و مقداری از آن توسط ماده جذب می شود. نسبت انرژی که در این سه دسته که تقسیم می شود خصوصیات دی الکتریک نسبی ماده یا ضریب گذر دهی نسبی نامیده می شد. به عبارت دیگر ضریب گذر دهی نسبی ماده عبارت است از میزان توانایی ماده در جذب، ذخیره سازی و انتقال الکترومغناطیس می باشد. ضریب گذر دهی نسبی ماده یک مقدار مختلط است که از دو قسمت حقیقی و موهومی تشکیل شده است و با معادله ۱ تعریف می شود.

$$\varepsilon_r = \varepsilon_r' - j\varepsilon_r'' \qquad (۱)$$

که در آن ε_r ضریب گذردهی نسبی، $j = \sqrt{-1}$, ε_r' و ε_r'' به ترتیب ثابت دی الکتریک و فاکتور کاهش دی الکتریک نامیده می شوند. قسمت حقیقی ضریب گذردهی (ε_r') که ثابت دی الکتریک نامیده می شود و بر میزان توانایی ماده برای ذخیره سازی انرژی الکترومغناطیس، وقتیکه ماده در مواجهه با امواج الکترومغناطیس قرار می گیرد، دلالت دارد و تحت تاثیر توزیع میدان الکتریکی و زاویه انتشار موج قرار دارد. قسمت موهومی ضریب گذردهی (ε_r'') یا فاکتور کاهش دی الکتریک که تحت تاثیر جذب و انتشار انرژی الکترومغناطیس قرار دارد و به توانایی ماده جهت اتلاف انرژی در زمان مواجه با یک میدان الکتریکی متناوب یا مکانیزم های پلاریزاسیون مختلف اتلاق می شود و عامل اصلی تولید گرما در ماده دی الکتریک می باشد. (Ikediala et al., 2000; Sosa- Morales et al., 2010) فاکتور کاهش دی الکتریک سهم مهمی از میزان گرمای تولید شده در مواد غذایی و محصولات بیولوژیک ایفا می کند.

مکانیزم های مختلفی شامل مکانیزم دوقطبی، الکترونیک، یونی و واکنش های ماکسول- واگنر بر روی فاکتور کاهش دی الکتریک موثر هستند. (Metaxas & Meredith., 1983). در فرکانسهای رادیویی (RF) و ماکروویو (MW) (فرکانس های رادیویی برای صنایع غذایی ۵۰-۱ مگا هرتز و فرکانس های ماکروویو ۹۱۵ و ۲۴۵۰ مگاهرتز می باشند) هدایت یونی و چرخش یونی نقش مهمی در فاکتور کاهش دی الکتریک ایفا می کنند (Ryynanen., 1995). فاکتور کاهش دی الکتریک به صورت معادله ۲ تعریف می شود.

$$\varepsilon^{"} = \varepsilon_d^{"} + \varepsilon_\sigma^{"} = \varepsilon_d^{"} + \frac{\sigma}{\varepsilon_0 \omega} \quad (۲)$$

که در آن زیرنویس های d و σ به ترتیب برای چرخش دوقطبی و هدایت یونی بیان شده است، σ هدایت یونی ماده بر حسب $\frac{S}{m}$ ، ω فرکانس زاویه ای موج بر حسب Hz و ε_0 ضریب گذردهی خلا است که مقدار آن برابر با $8.854 \times 10^{-12} \frac{F}{m}$ می باشد.

مواد دی الکتریک مانند مواد غذایی و محصولات کشاورزی انرژی الکتریکی در فرکانس های رادیویی و ماکروویو را به انرژی گرمایی تبدیل می کنند. میزان افزایش درجه حرارت درونی ماده زمانیکه ماده در معرض امواج الکترومغناطیس قرار می گیرند از طریق معادله ۳ محاسبه می شود.

$$\rho C_p \frac{dT}{dt} = 55.63 \times 10^{-12} f E^2 \varepsilon^{"} \quad (۳)$$

که در آن C_p گرمای ویژه ماده بر حسب $\frac{J}{Kg℃}$ ، ρ چگالی ماده بر حسب $\frac{Kg}{m^3}$ ، E شدت میدان الکتریکی برحسب $\frac{V}{m}$ ، f فرکانس میدان الکترومغناطیس بر حسب Hz و $\frac{dT}{dt}$ نرخ افزایش درجه حرارت با گذشت زمان و بر حسب $\frac{℃}{s}$ می باشد. همانطور که معادله ۳ نشان می دهد نرخ افزایش درجه حرارت تابع فرکانس، فاکتور کاهش دی الکتریک، شدت میدان الکتریکی و مدت زمانیکه ماده در معرض این امواج قرار دارد، می باشد و تغییر هر یک نرخ افزایش درجه حرارت درون ماده تغییر می نماید. (Komarov et al., 2005)

هدایت الکتریکی مواد غذایی ضعیف است و آنها زمانیکه در معرض میدان الکترومغناطیس قرار می گیرند می توانند انرژی را ذخیره و تلف کنند. عمق نفوذ پارامتر دیگری است که با خصوصیات دی الکتریک ماده رابطه دارد و به عمق نفوذ انرژی ماکروویو و فرکانس رادیویی به درون ماده در زمانیکه این انرژی به میزان $1/e$ و یا ۳۶٫۸٪ مقدار انرژی انتقالی افت کند، اتلاق می شود و از طریق معادله ۴ و ۵ قابل محاسبه می باشد.

$$d_p = \frac{\lambda_0 \sqrt{\varepsilon'}}{2\pi\varepsilon^{"}} \quad (۴)$$

که در آن λ_0 طول موج الکترومغناطیس در خلا می باشد. عمق نفوذ موج الکترومغناطیس در درون ماده را از طریق معادله ۵ نیز می توان براحتی محاسبه کرد.

$$d_p = \frac{c}{2\pi f \sqrt{2\varepsilon' \left[\sqrt{1+\left(\varepsilon^{"}/\varepsilon'\right)^2} - 1\right]}} \quad (۵)$$

که در آن c سرعت نور در خلا بر حسب m/s و f هم فرکانس موج بر حسب Hz می باشد.

پس از محاسبه و استخراج خصوصیات دی الکتریک ماده می توان عمق نفوذ ماده را در فرکانس های مختلف محاسبه کرد همانطور که معادله ۵ نشان می دهد عمق نفوذ با فرکانس رابطه عکس دارد. در فرکانس های پایین تر عمق نفوذ بیشتر و در مقابل گرمای سطحی بیشتری را در فرکانس های بالاتر داریم. بنابراین عمق نفوذ انرژی الکترومغناطیسی در فرکانس های رادیویی به مراتب خیلی بالاتر از امواج ماکروویو می باشد. برای مثال عمق نفوذ در عنبه در فرکانس ۲۷/۱۲ مگاهرتز ۶ برابر بیشتر از عمق نفوذ در فرکانس ۱۸۰۰ مگاهرتز در دمای ۲۰ درجه سانتی گراد می باشد. (Sosa-Morales et al., 2009)

۳- روشهایی برای اندازه گیری و تخمین خصوصیات دی الکتریک ماده

روشها و تکنیک های مختلفی برای اندازه گیری خصوصیات دی الکتریک مواد کشاورزی و غذایی وجود دارند (Icier & Baysal., 2004). انتخاب روش و تکنیک مناسب برای اندازه گیری این خصوصیات و نوع پراب نگهدارنده ماده جهت اندازه گیری این خصوصیات وابسته به نوع ماده (جامد، مایع، گاز و نیمه جامد و غیره) ، رنج فرکانسی مورد نظر، دقت اندازه گیری، دسترسی و هزینه تجهیزات مورد نیاز می باشد.

وکتور نتورک آنالایزر ((Vector Network Analyzer (VNA)، اسکالر نتورک آنالایزر (Scalar Network Analyzer) و ایمپدانس آنالایزر (Impedance Analyzer) از تجهیزات و دستگاه هایی هستند که برای اندازه گیری خصوصیات دی الکتریک ماده مورد استفاده قرار می گیرند و هر کدام دارای مزایا و معایب خاص خود می باشند که در بین دستگاه های بالا وکتور نتورک آنالایزر از همه گرانتر است ولی دقت آن و گستره کاربرد آن بالاتر می باشد. برای طراحی و ساخت پراب جهت نگهداری نمونه برای اندازه گیری روش ها و تکنیک های مختلفی وجود دارد که سه روش و تکنیک پراب کواکسیال انتها باز (Open ended coaxial probe)، خط انتقال (Transmission line) ، کویتی رزونانس (Resonant cavity) از همه مشهورتر و کاربردی تر هستند.

روش و تکنیکی که برای اندازه گیری خصوصیات دی الکتریک انتخاب می شود بستگی به نمونه ماده دی الکتریک، خصوصیات فیزیکی و الکتریکی ماده، فرکانس مورد نظر و میزان دقت اندازه گیری دارد.

۳-۱- روش خط انتقال

روش خط انتقال یک روش مشهور در بین روش های اندازه گیری پهنا باند می باشد از این روش، تکنیکهای مختلفی مانند تکنیک فضای آزاد (Free –Space technique) ، روش پراب کواکسیال انتها باز یا مدار باز (Open- circuit network method) و روش مدار کوتاه (Short- circuit network method) استخراج شده است. معمولاً سه سلول و محفظه اندازه گیری شامل موج بر مستطیلی (Rectangular waveguide) ، خط کواکسیال (Coaxial line) ، خط میکروستریپ (Microstrip line) برای روش خط انتقال مورد استفاده قرار می گیرد.

در این روش یک تکه از نمونه مورد آزمایش در داخل یک بخش از موج بر و یا خط کواکسیال قرار داده می شود و یک موج الکترومغناطیس مستقیماً به داخل نمونه وارد می شود (شکل ۱). این روش از دو پورت تشکیل شده است که این دو پورت به وکتور نتورک آنالایزر متصل می شود. نتورک آنالایزر پارامترهای پراکنندگی مختلط (Complex scattering parameter) را که شامل سیگنال منعکس شده (Reflected signal) (S_{11} یا S_{22}) و سیگنال انتقال داده شده (Transmitted signal) (S_{21} یا S_{12}) را اندازه گیری می کند. خصوصیات دی الکتریک ماده از طریق پارامترهای پراکنندگی اندازه گیری شده و معادلات ریاضی محاسبه می گردند.

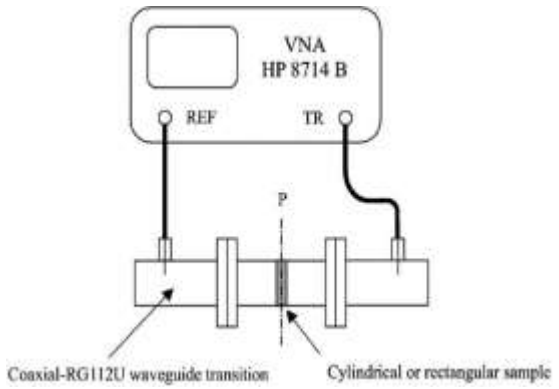

Figure1. Rectangular waveguide transmission line technique

شکل۱: شماتیک خط انتقال به روش موجبر

در این روش باید نمونه مورد آزمایش به صورت مستطیل مسطح و یا بصورت حلقوی بسته به نوع خط انتقال تهیه شود. در فرکانس ۲۴۵۰ مگاهرتز اندازه نمونه به خصوص برای چربی ها و روغن ها بزرگ می شود. برای اندازه گیری در فرکانس ۹۱۵ مگاهرتز و فرکانس های پایین تر، تکنیک خط کواکسیال مناسبتر از روش موج بر می باشد زیرا در روش موج بر در فرکانس های پایین اندازه موج بر و نمونه تهیه شده افزایش می یابد. با طراحی یک محفظه نگهدارنده عمودی در انتهای خط انتقال می توان خصوصیات دی الکتریک مایعات و مواد ویسکاز را اندازه گیری کرد.

خصوصیات دی الکتریک مواد با ثابت دی الکتریک و فاکتور کاهش دی الکتریک خیلی پایین را می توان با استفاده از یک سلول یا محفظه کواکسیال که دارای دو پورت می باشد و نمونه مورد آزمایش در بین خط انتقال قرار می گیرد، بنابراین موج الکترومغناطیس از پورت ورودی به پورت خروجی انتشار می یابد. تغییرات ایمپدانس و خصوصیات انتشار (پارامتر S) توسط وکتور نتورک آنالایزر اندازه گیری می شود. برای افزایش دقت اندازه گیری در این روش بایستی دستگاه وکتور نتورک آنالایزر یا ایمپدانس آنالایزر قبل از انجام آزمایشات با کیت های استاندارد مختلف Open, Short & 50 Ω load کالیبره شود که بتواند رفتارهای رزونانسی مختلف را در خط انتقال ایجاد نماید.

خصوصیات دی الکتریک ماده ای که در نزدیک انتهای خط انتقال قرار داده شده است از طریق فرمول ۶ محاسبه می گردد.

$$\varepsilon' = \left(\frac{\lambda}{2\pi d}\right)^2 (x^2 - y^2) + \left(\frac{\lambda}{\lambda_{qc}}\right)^2 \quad ; \quad \varepsilon'' = \left(\frac{\lambda}{2\pi d}\right)^2 2xy \qquad (۶)$$

که در آن λ برابر با طول موج خلا ، λ_{qc} طول موج quasi cutoff ، d ضخامت نمونه ، x و y به ترتیب قسمت های حقیقی و موهومی ایمپدانس ورودی به مدار می باشد.(Courtney., 1998)

بطور کلی، روش خط انتقال نسبت به روش پراب کواکسیال انتها باز در یک بازه فرکانسی یکسان یک روش گرانتر است و اندازه گیری های آن سخت تر و آماده سازی نمونه زمانبرتر است. این روش دارای دقت بالا برای اندازه گیری خصوصیات دی الکتریک مواد با فاکتور کاهش دی الکتریک بالا است ولی به علت ساختار صلب آن شکل و اندازه نمونه بایستی مطابق با ساختار خط انتقال اصلاح و آماده سازی شود و نمونه در داخل خط انتقال کاملاً فیت قرار گیرد. در برخی از نمونه ها، برای افزایش دقت اندازه گیری بایستی اندازه گیری ها چندین بار و ضخامت های مختلف انجام گیرد.

علارغم تمامی نکات ارائه شده برای این روش، هنوز این روش بطور گسترده بخاطر سادگی آن مورد استفاده قرار می گیرد. استفاده از خط کواکسیال به عنوان سلول و محفظه نگهدارنده نمونه بیشترین کاربرد را در این روش دارد. دقت این روش از روش پراب کواکسیال انتها باز بیشتر ولی از روش کویتی رزونانس کمتر است (Yaw., 2012).

۲-۳-روش پراب کواکسیال انتها باز

روش پراب کواکسال انتها باز یکی از رایج ترین و مشهورترین روشها برای اندازه گیری خصوصیات دی الکتریک مواد می باشد. این روش یک روش غیر مخرب، با پهنای باند فرکانس های رادیویی و ماکروویو، موثر در اندازه گیری خصوصیات دی الکتریک در درجه حرارت های بالا می باشد. بطور اساسی روش پراب کواکسیال یک روش اصلاح شده از روش خط انتقال می باشد. نوک پراب با سطح مسطح ماده جامد تماس برقرار می کند و یا اینکه در داخل مایع غوطه ور می شود. از آنجاکه در این روش نمونه بایستی کاملاً با پراب در تماس باشد و وجود هوا در بین پراب و نمونه باعث ایجاد خطای زیادی می شود لذا سطح نمونه بایستی کاملاً صاف شود تا پراب بطور صحیح با نمونه در تماس مستقیم قرار گیرد. از این روش برای موادی که نمی توان آنها را تخریب کرد (در صورت تخریب ساختار ماده تغییر می کند) و سطح تماس مناسبی بین پراب و نمونه ایجاد کرد مناسب نمی باشد و لذا بایستی از روش های دیگر استفاده نمود.

در شکل ۲ شماتیک پراب کواکسیال انتها باز نشان داده شده است. در این روش نمونه در داخل یک محفظه یا سلول که قبل طراحی و ساخته شده است قرار می گیرد که جهت برقراری تماس لازم بین نمونه و پراب کواکسیال یک پستون و فنر در زیر آن تعبیه می شود. پراب توسط یک کابل کواکسیال

به دستگاه وکتور نتورک آنالایزر یا ایمپدانس آنلایزر متصل می شود. میدانهای الکترومغناطیس انتهای پراب به داخل نمونه مورد آزمایش نفوذ می کند و دستگاه پارامترهای سیگنال انعکاس (S_{11}) (اندازه و فاز) را اندازه گیری می نماید. خصوصیات دی الکتریک ماده از طریق فرمول ۷ محاسبه می گردد.

$$\varepsilon' = (\mathrm{A}_e f)^{-1}\left\{\frac{-2\Gamma''}{(1+\Gamma')^2+\Gamma''^2}\right\} \quad ; \quad \varepsilon'' = (\mathrm{A}_e f)^{-1}\left\{\frac{1-\Gamma'^2-\Gamma''^2}{(1+\Gamma')^2+\Gamma''^2}\right\} \qquad (۷)$$

که در آن $\Gamma = \Gamma' - j\Gamma''$ ضریب انعکاس داده شده موج است و A_e یک ضریب تجربی است که وابسته به خصوصیات ایمپدانس پراب و اندازه محفظه نگهداری ماده دارد. به منظور کاهش خطای آزمایش و افزایش دقت اندازه گیری لازم است قبل از اندازه گیری دستگاه وکتور نتورک آنالایزر یا ایمپدانس آنالایزر کالیبره شود بدین منظور از کیت کالیبراسیون که شامل سه کیت استاندارد *Open, short & 50Ω* است دستگاه کالیبره می شود و پس از کالیبراسیون نمونه را از طریق کابل کواکسیال به دستگاه متصل می کنیم و پارامتر مورد نظر را استخراج می کنیم.

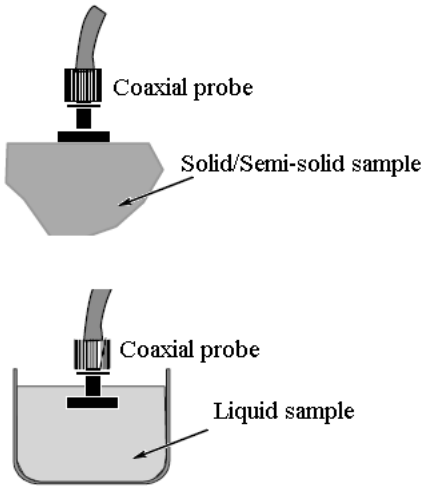

Figure 2: Open-ended Coaxial Probe Method for Determining the Dielectric Properties of Semi-Solid and Liquid Materials

شکل۲: نحوه قرار گیری پراب کواکسیال انتها باز در اندازه گیری خصوصیات دی الکتریک مواد نیمه جامد و مایع

این روش یک روش ساده برای اندازه گیری خصوصیات دی الکتریک ماده بدون اینکه لازم باشد هندسه ماده اصلاح شود. این روش برای اندازه گیری خصوصیات دی الکتریک مواد بیولوژیکی مانند حشرات در دماهای مختلف (۲۰-۶۰ °C) جهت کنترل آفات و حشرات بسیار موثر است و همچنین از این تکنیک برای اندازه گیری خصوصیات دی الکتریک در بازه فرکانسی گسترده از ۱ تا ۱۸۰۰ مگاهرتز با دقت خوبی مورد استفاده قرار گرفته است . (Wang et al.,2003)

در بکارگیری این تکنیک برای اندازه گیری خصوصیات دی الکتریک مواد در فرکانس های خیلی پایین و خیلی بالا و همچنین مواد با ثابت دی الکتریک و فاکتور کاهش دی الکتریک پایین بایستی دقت لازم صورت گیرد بخاطر اینکه خطای اندازه گیری در این شرایط افزایش می یابد. بنابراین بایستی توجه داشت که برای کاهش خطای اندازه گیری باید به نکات زیر توجه کرد.

- زمانیکه خصوصیات دی الکتریک ماده در دماهای بالا اندازه گیری می شود بایستی توجه کرد که کانتاکتور و کابل کواکسیال کمترین انبساط را داشته باشند.
- تماس مناسبی بایستی بین پراب و نمونه وجود داشته باشد بطوریکه در مایعات بایستی پراب در داخل مایع به فشار فرو رود و صافی سطح مواد جامد بایستی کمتر از $0.5\mu m$ باشد. (Arai et al., 1995)

- اختلالات ایجاد شده در اثر گرما، ارتعاش و یا هر عامل دیگری در درون ماده بعد از انجام کالیبراسیون و در طی زمان اندازه گیری بایستی کاهش یابد.

در کل این روش برای اندازه گیری خصوصیات دی الکتریک مایعات و مواد جامد نرم بسیار مناسب است. این روش کاملاً دقیق، سریع و مناسب برای پهنای باند فرکانسی گسترده (۲۰۰ مگاهرتز تا ۲۰ گیگاهرتز) می باشد. اندازه گیری به این روش احتیاج به کمترین زمان آماده سازی ماده را دارد و همچنین می توان این خصوصیات را در درجه حرارت های مختلف اندازه گیری کرد. یکی از عیوب این روش این است که این روش برای اندازه گیری خصوصیات دی الکتریک مواد با ثابت دی الکتریک و فاکتور کاهش دی الکتریک پایین مانند پلاستیکها، روغن ها و غیره مناسب نمی باشد همچنین هوای موجود بین نمونه و پراب بر روی دقت اندازه گیری اثر می گذارد.

۳-۳- روش کویتی رزونانس یا حفره رزونانس

روش حفره رزونانس (Resonant cavity method) بطور گسترده در اندازه گیری خصوصیات دی الکتریک مواد با فاکتور کاهش دی الکتریک پایین مورد استفاده قرار می گیرد. روش حفره رزونانس یکی از مشهورترین روشها در بین روشهایی است که با اختلال و آشفتگی میدان الکترومغناطیس کار می کنند، می باشد. روش آشفتگی ((Perturbation method (PM) میدان الکترومغناطیس شامل مقایسه بین خصوصیات میدان الکترومغناطیس در فضای خالی با قسمتی از حفره که نمونه به صورت مکعب یا استوانه در آن بار گزاری شده می باشد (Komarov & Yakovlev., 2003). شماتیکی از یک نمونه آزمایشگاهی حفره رزونانس در شکل ۳ نشان داده شده است.

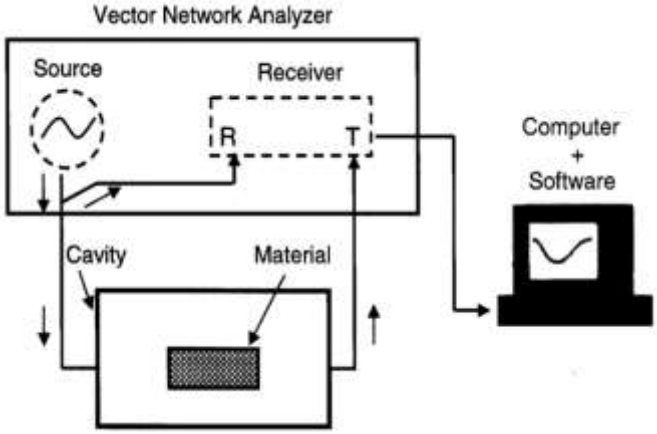

Figure 3: Resonant cavity technique
شکل۳: شماتیک حفره یا کویتی رزونانس

بر اساس تئوری آشفتگی (PM) ، ثابت دی الکتریک و فاکتور کاهش دی الکتریک نمونه تحت آزمایش از طریق فرمول ۸ تخمین زده می شوند.

$$\varepsilon' = 1 + A^{-1}\frac{V_c}{V_s}\frac{\Delta f}{f_0} \quad ; \quad \varepsilon'' = B^{-1}\frac{V_c}{V_s}\left(\frac{1}{Q_1} - \frac{1}{Q_0}\right) \tag{۸}$$

که در آن f_0 و Q_0 به ترتیب فرکانس رزونانس و فاکتور کویتی خالی ، f_1 و Q_1 به ترتیب فرکانس رزونانس و فاکتور کویتی با نمونه مورد آزمایش، V_c و V_s به ترتیب حجم کویتی و نمونه، $\Delta f = f_0 - f_1$ و A و B وابسته به پارامترهای شکل ، اندازه و موقعیت قرارگیری نمونه در داخل کویتی و ساختار و پیکر بندی کویتی دارد. باید یک نکته را در اینجا مد نظر قرار داد که زمانی معادله ۸ صحیح است که سه فرضیه اصلی زیر رعایت شده باشد.

- نمونه مورد آزمایش در توزیع میدان الکترومغناطیس درون کویتی اختلال ایجاد نکند.
- دیواره فلزی کویتی بر روی نتایج کویتی اثر نگذارد.
- مقادیر Q_0 و Q_1 در فرکانس یکسان محاسبه شده باشند.

البته بایستی توجه داشت که گاهی اوقات موقعیت قرار گیری نمونه در داخل کویتی نیز از فاکتورهای اصلی در طراحی کویتی می باشد زیرا ممکن است موقعیت نمونه روی دقت اندازه گیری اثر نامطلوب بگذارد و دقت اندازه گیری را پایین آورد. روش کویتی دارای دقت بالاتری نسبت به سایر روشها است و می توان از آن در اندازه گیری خصوصیات دی الکتریک مواد با خصوصیات دی الکتریک متوسط و خیلی پایین بهره گرفت و همچنین می توان از نمونه های کوچک استفاده کرد ولی از این روش در اندازه گیری خصوصیات دی الکتریک نمونه فقط در یک فرکانس خاص (فرکانس رزونانس) می توان

استفاده کرد بنابراین هر کویتی فقط برای یک فرکانس مورد استفاده قرار می گیرد و برای فرکانس های مختلف بایستی کویتی های مختلف طراحی کرد و در نتیجه ساخت و تولید آنها گران است.

خلاصه خصوصیات سه روش اندازه گیری خصوصیات دی الکتریک در جدول ۱به صورت خلاصه نمایش داده شده است. در کل انتخاب روش اندازه گیری وابسته به نوع ماده، رنج فرکانسی مورد نظر، دقت اندازه گیری و میزان دسترسی به تجهیزات و هزینه دارد.

جدول۱- خلاصه روش های اندازه گیری خصوصیات دی الکتریک و مزایا و معایب آنها

Table 1: The dielectric properties of material methods

تکنیک اندازه گیری	معرفی	مواد پیشنهادی	بازه فرکانسی	مزایا	معایب
پراب کواکسیال انتها باز	یک خط کواکسیال به شکل صفحات موازی که با ماده در تماس است و توسط وکتور نتورک آنالایزر انعکاس حاصل از عبور موج از درون نمونه اندازه‌گیری می‌شود	مایعات و نیمه جامد	200MHz-20GHz	استفاده آسان، غیر مخرب برای برخی از مواد، آماده‌سازی نمونه لازم نیست	دقت محدود($\pm$5%) سطح نمونه باید مسطح باشد.
خط انتقال	نمونه مکعبی یا استوانه ای شکل در فضای داخلی خط انتقال را پر می کند و تغییر ایمپدانس را به دنبال دارد.	مایعات و جامدات	<100MHz	نسبت به روش پراب دقت و حساسیت بالاتری دارد	آماده‌سازی نمونه بسیار سخت و مشکل است و این سبب کاهش دقت می‌گردد.
حفره رزونانس	نمونه آماده‌شده داخل یک محفظه به نام محفظه رزونانس قرار داده می‌شود	جامدات	1MHz-100GHz	آماده‌سازی نمونه آسان است و در رنج درجه حرارتی بالایی کار می‌کند	در تک فرکانس مورد استفاده قرار می گیرد.

۴-منابع

Arai, M., Binner, J. G. P., & Cross, J. A. (1995). Estimating errors due to sample surface roughness in microwave complex permittivity measurements obtained using a coaxial probe. *Electrons Letters*, 31(2), 115-117.

Courtney, C. C. (1998). Time-domain measurement of the electromagnetic properties of materials. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 46(5), 517-522.

Gao, M., Tang, J., Villa-Rojas, R., Wang, Y., &Wang, S. (2011). Pasteurization process development for controlling Salmonella in in-shell almonds using radio frequency energy. *Journal of Food Engineering*, 104(2), 299-306.

Gao, M., Tang, J., Johnson, J.A., &Wang, S. (2012). Dielectric properties of ground almond shells in the development of radio frequency and microwave pasteurization. *Journal of Food Engineering*, 112(4), 282-287.

Ikediala, J. N., Tang, J., Drake, S. R., &Neven, L. G. (2000). Dielectric properties of apple cultivars and codling moth larvae. *Transactions of the ASAE*, 43, 1175-1184.

Icier, F., &Baysal, T. (2004). Dielectric properties of food materials-2: measurement techniques. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 44, 473-478.

Komarov, V.V., Wang, S., &Tang, J. (2005). Permittivity and measurements. In K. Chang (Ed), *Encyclopedia of RF and microwave engineering.* 3693-3711. New York: John Wiley and Sons, Inc.

Komarav, V.V., &Yakovlev, V. V., (2003). Modelling control over determination of dielectric properties by perturbation technique, *Microwave and Optical Technology Letters*, 39(6), 443-446.

Metaxas, A.C., &Meredith, R., (1983). Industrial Microwave Heating, *IEEE Power Engineering Series.*

Nelson, S.O., (1991). Dielectric properties of agriculture products- measurements and applications. *IEEE Transactions of Electrical Insulation*, 26(5), 845-869.

Ryynanen, S., (1995). The electromagnetic properties of food materials: A review basic principles. *Journal of Food Engineering*, 27(4), 409-429.

Sosa-Morales, M. E., Tiwari, G., Wang, S., Tang, J., Lopez-Malo, A., &Garcia, H.S. (2009). Dielectric heating as a potential post-harvest treatment of disinfesting mangoes I: relation between dielectric properties and ripening. *Biosystems Engineering*, 103, 297-303.

Sosa-Morales, M.E., Valerio-Junco, L., Lopez-Malo, A., &Garcia, H.S. (2010). Dielectric properties of foods: Reported data in the 21st century and their potential applications. *LWT- Food Science and Technology*, 43, 1169-1179.

Venkatesh, M.S., &Raghavan, G. S.V., (2004). An overview of microwave processing and dielectric properties of agri-food materials. *Biosystems Engineering*, 88(1), 1-18.

Wang, S., Tang, J., Johnson, J. A., Mitcham, E., Hansen, J. D., Hallman, G., Drake, S. R., &Wang, Y. (2003). Dielectric properties of fruits and insect pests as related to radio frequency and microwave treatments. *Biosystem Enginnering*, 85,201-212.

Yaw, K.C. (2012). Measurement of dielectric material properties application note. *Rhode and Shawrtz Technical Publication.*

Zhu, X.H., Guo, W. C., Wu, X.L., &Wang, S.J. (2012). Dielectric properties of chestnut flour relevant to drying with radio frequency and microwave energy. *Journal of Food Engineering*, 113(1), 143-150.