

اندازه‌گیری خصوصیات دی‌الکتریک میوه‌های تازه و خشکبار در بسامد رادیویی و مایکروویو به‌وسیله تکنیک خط انتقال کوآکسیال

مطهره واعظی‌زاده^۱، محسن شمسی^{۲*}، کامبیز افروز^۳ و محمد علی رستمی^۴

چکیده

اندازه‌گیری خصوصیات دی‌الکتریک مواد غذایی و کشاورزی برای توسعه فناوری‌های الکتریکی مانند گرم‌کن‌های مایکروویو و بسامد رادیویی، اندازه‌گیری غیرمخرب رطوبت در صنایع کشاورزی و غذایی بسیار حائز اهمیت است. در این مقاله، برای اندازه‌گیری خصوصیات دی‌الکتریک مواد غذایی و کشاورزی در بسامد رادیویی و مایکروویو، یک سیستم خط انتقال کوآکسیال دو دهانه ارائه شد. پراب کوآکسیال طراحی و به‌وسیله استیل ضدزنگ ساخته شد. پراب طراحی شده می‌تواند خصوصیات دی‌الکتریک مواد با اندازه‌های کوچک یا مقادیر کم را در درجه حرارت‌های مختلف اندازه‌گیری نماید. خصوصیات دی‌الکتریک سیب درختی زرد و قرمز به‌عنوان میوه تازه و گردو و پسته به‌عنوان خشکبار در محتوی رطوبت اولیه اندازه‌گیری شدند. تمامی آزمایش‌ها در پنج سطح درجه حرارت از ۶۰-۲۰ درجه سانتی‌گراد و در چهار بسامد ۱۴، ۲۷، ۴۱ و ۹۱۵ مگاهرتز اندازه‌گیری شدند. برای تهیه مخلوط همگن از میوه‌های تازه و خشکبار از آسیاب استفاده شد. محتوی رطوبت اولیه سیب قرمز، سیب زرد، پسته و گردو به ترتیب ۸۵، ۸۲، ۶ و ۳٪ (بر اساس وزن تر) است. خصوصیات دی‌الکتریک نمونه‌ها به‌وسیله خط انتقال کوآکسیال دو دهانه و دستگاه وکتور نتورک آنالایزر اندازه‌گیری شد. نتایج نشان دادند که با افزایش بسامد، ثابت دی‌الکتریک و فاکتور افت دی‌الکتریک کاهش یافته است. ثابت دی‌الکتریک و فاکتور افت دی‌الکتریک با درجه حرارت رابطه مستقیم داشته اما در بسامد مایکروویو ۹۱۵ مگاهرتز تقریباً ثابت می‌شود. همچنین نتایج نشان دادند که مقدار ثابت دی‌الکتریک و فاکتور افت دی‌الکتریک سیب درختی به‌دلیل محتوی رطوبت بالا از گردو و پسته با محتوی رطوبت پایین بیشتر است. با افزایش بسامد و افزایش دمای نمونه، عمق نفوذ کاهش یافت.

واژه‌های کلیدی: بسامد رادیویی، ثابت دی‌الکتریک، خط انتقال کوآکسیال، فاکتور افت دی‌الکتریک، مایکروویو.

ارجاع: واعظی‌زاده، م.، شمسی، م.، افروز، ک. و رستمی، م. ع. ۱۳۹۸. اندازه‌گیری خصوصیات دی‌الکتریک میوه‌های تازه و خشکبار در بسامد رادیویی و مایکروویو به‌وسیله تکنیک خط انتقال کوآکسیال. نشریه پژوهش‌های مکانیک ماشین‌های کشاورزی. ۸(۲): ۴۱-۵۲.

۱- دکتری مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه شهید باهنر کرمان.

۲- دانشیار گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه شهید باهنر کرمان.

۳- دانشیار گروه مهندسی برق و الکترونیک، دانشگاه شهید باهنر کرمان.

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.

* نویسنده مسئول: shamsi@uk.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۸/۲۶

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۹/۲۶

مقدمه

مواد دی‌الکتریک به موادی با هدایت الکتریکی ضعیف اطلاق می‌شود. به‌طور کلی، اگر هدایت الکتریکی ماده‌ای ضعیف باشد، هدایت حرارتی آن نیز ضعیف می‌شود. این خصوصیت به کاهش نرخ انتقال حرارت در روش‌های گرمایش سنتی منجر می‌شود. از روش‌های گرمایش سنتی می‌توان روش‌های همرفتی، انتقالی و تشعشعی که گرما در اثر گرادیان دما و از طریق سطح به درون ماده نفوذ می‌کند را نام برد. مواد دی‌الکتریک شامل مواد غذایی و محصولات کشاورزی قادرند در زمانی که در معرض این امواج قرار می‌گیرند انرژی الکترومغناطیس را به انرژی گرمایی تبدیل کنند. انرژی الکترومغناطیس بر اثر برخوردی مولکولی و تعامل بین آن‌ها از درون ماده به بیرون هدایت می‌شود. در نتیجه دمای ماده سریع‌تر از روش‌های گرمایش سنتی افزایش می‌یابد و تولید گرما در درون ماده به‌صورت حجمی اتفاق می‌افتد. میزان افزایش درجه حرارت درونی ماده زمانی که ماده در معرض امواج الکترومغناطیس قرار می‌گیرد از طریق معادله (۱) محاسبه می‌شود.

$$\rho C_p \frac{dT}{dt} = 55.63 \times 10^{-12} f E^2 \varepsilon \quad (1)$$

که در آن C_p گرمای ویژه ماده بر حسب $J/kg \cdot ^\circ C^{-1}$ ، E شدت میدان الکتریکی چگالی ماده بر حسب kgm^{-3} ، ε فاکتور افت دی‌الکتریک، f بسامد بر حسب Nm^{-1} ، ε فاکتور افت دی‌الکتریک، f بسامد میدان الکترومغناطیس بر حسب Hz و $\frac{dT}{dt}$ نرخ افزایش درجه حرارت با گذشت زمان و بر حسب $^\circ C s^{-1}$ است. همان‌طور که معادله (۱) نشان می‌دهد، نرخ افزایش درجه حرارت، تابعی از بسامد، فاکتور افت دی‌الکتریک، شدت میدان الکتریکی و مدت زمانی که ماده در معرض این امواج قرار دارد، بوده و تغییر هر یک از این فاکتورها، نرخ افزایش درجه حرارت در واحد زمان را تغییر می‌دهد (Komarov *et al.*, 2005). محققان زیادی تأثیر گرمایش دی‌الکتریک با بسامد رادیویی برای کنترل آفات و حشرات را مورد مطالعه قرار داده‌اند که برخی از آن‌ها عبارتند از کنترل سریع و حجمی آفات برای دانه‌ها و محصولات خشک‌شده (Mitcham *et al.*, 2004)، توت (Ikediala *et al.*, 2002)، پرتقال (Birla *et al.*, 2008)، سیب درختی (Wang *et al.*, 2006) و انبه (Sosa-Morales *et al.*, 2009). برای درک بهتر چگونگی تغییر درجه حرارت درونی محصول و میزان افزایش آن، شناخت خصوصیات دی‌الکتریک محصول کشاورزی اهمیت بسیار دارد. تا به

خصوصیات دی‌الکتریک مواد غذایی و بیولوژیکی نقش مهمی در صنایع غذایی ایفا می‌کنند. خصوصیات دی‌الکتریک ماده تحت تأثیر فاکتورهای زیادی از جمله میزان رطوبت، شکل آب موجود در محصول اعم از آب آزاد، منجمد و مقید بین سلولی، چگالی حجمی (میزان هوای موجود در بین محصول)، درصد نمک، ترکیبات شیمیایی (کربوهیدرات، چربی، فیبر و غیره) قرار می‌گیرند. دانشمندان و محققان در طی دهه‌های گذشته کاربردهای زیادی برای خصوصیات دی‌الکتریک در صنایع و سطوح آزمایشگاهی یافته‌اند. در بررسی مواد غذایی اندازه‌گیری خصوصیات دی‌الکتریک در مواجهه با امواج الکترومغناطیس بسیار مهم و حائز اهمیت است. از طرفی آگاهی از این خصوصیات در کیفیت سنجش ماده به‌وسیله تجهیزات مایکروویو و بسامدهای رادیویی بسیار مؤثر است. یکی از برجسته‌ترین تجهیزات سنجش کیفیت، اندازه‌گیری سریع میزان رطوبت محصولات کشاورزی با استفاده از امواج مایکروویو و بسامدهای رادیویی است. (Nelson & Bartley, 2002 & Sacilik *et al.*, 2006) غذایی و محصولات بیولوژیک در معرض میدان الکترومغناطیس متناوب در حوزه بسامدهای رادیویی (۳ کیلوهرتز تا ۳۰۰ مگاهرتز) و امواج مایکروویو (۳۰۰ مگاهرتز تا ۳۰ گیگاهرتز) قرار می‌گیرند، درجه حرارت درون ماده با جذب انرژی به‌سرعت افزایش می‌یابد. می‌توان از این خصوصیت در صنایع پخت‌وپز، یخ‌زدایی، پاستوریزه و هموژنیزه‌کردن و غیره استفاده نمود (Venkatesh & Raghavan, 2004; Gao *et al.*, 2011). اندازه‌گیری غیرمخرب و سریع برخی از خصوصیات فیزیکی و شیمیایی محصولات کشاورزی مانند اندازه‌گیری محتوی رطوبت محصول، میزان رسیدگی و کیفیت محصول از کاربردهای دیگر خصوصیات دی‌الکتریک است که در طی چند دهه اخیر به آن توجه زیادی شده است (Tahmasebi *et al.*, 2016). از کاربردهای دیگر اندازه‌گیری خصوصیات دی‌الکتریک محصولات کشاورزی، دریافت اطلاعات لازم برای طراحی و ساخت سیستم‌های نوین به‌منظور کنترل و از بین بردن آفات، حشرات و بیماری‌ها با استفاده از امواج الکترومغناطیس است (Zhu *et al.*, 2012; Gao *et al.*, 2012).

است با نسبت فاکتور افت دی‌الکتریک به ثابت دی‌الکتریک که به صورت معادله (۳) نمایش داده می‌شود (Piyasena *et al.*, 2003).

$$\tan \delta = \frac{\epsilon''}{\epsilon'} = \frac{\epsilon_r''}{\epsilon_r'} \quad (۳)$$

بر روی فاکتور افت دی‌الکتریک، مکانیزم‌های مختلفی از جمله مکانیزم دوقطبی، الکترونیکی، یونی و واکنش‌های ماکسول- واگنر مؤثر هستند (Metaxas & Meredith, 1983). در بسامدهای رادیویی (RF) و مایکروویو (MW) (بسامدهای رادیویی برای صنایع غذایی ۵۰-۱ مگاهرتز و بسامدهای مایکروویو ۹۱۵ و ۲۴۵۰ مگاهرتز هستند) هدایت یونی و چرخش یونی در فاکتور افت دی‌الکتریک نقش مهمی ایفا می‌کنند (Ryynanen, 1995). فاکتور افت دی‌الکتریک به صورت معادله (۴) تعریف می‌شود.

$$\epsilon'' = \epsilon_d'' + \epsilon_\sigma'' = \epsilon_d'' + \frac{\sigma}{\epsilon_0 \omega} \quad (۴)$$

که در آن زیرنویس‌های d و σ به ترتیب برای چرخش دوقطبی و هدایت یونی بیان شده‌اند، σ هدایت یونی ماده بر حسب Sm^{-1} ، ω بسامد زاویه‌ای موج بر حسب Hz و ϵ_0 ضریب گذردهی خلأ است.

برای اندازه‌گیری خصوصیات دی‌الکتریک مواد غذایی و کشاورزی روش‌ها و تکنیک‌های مختلفی وجود دارند (Icier & Baysal, 2004). مهم‌ترین این روش‌ها و تکنیک‌های اندازه‌گیری عبارتند از پراب کوآکسیال انتها باز (open ended coaxial line)، خط انتقال (Transmission line)، حفره رزونانس (Resonant cavity) که هر کدام دارای مزایا و معایب خاص خود هستند. انتخاب روش و تکنیک مناسب برای اندازه‌گیری این خصوصیات به نوع ماده دی‌الکتریک (جامد، مایع، گاز و نیمه جامد و غیره)، بسامد اندازه‌گیری مورد نظر و دقت اندازه‌گیری بستگی دارد.

یکی از متداول‌ترین و مشهورترین روش‌ها برای اندازه‌گیری خصوصیات دی‌الکتریک مواد، روش پراب کوآکسیال انتها باز است. در این روش انتهای پراب یا با سطح مسطح ماده جامد در تماس است یا درون مایع غوطه‌ور می‌شود. سیگنال منعکس شده (Reflected signal) (S_{11} یا S_{22}) توسط دستگاه وکتور نتورک آنالایزر اندازه‌گیری و به این ترتیب خصوصیات دی‌الکتریک ماده تعیین می‌شود. روش حفره رزونانس (Resonant cavity method)، خصوصیات دی‌الکتریک مواد را به صورت

حال خصوصیات دی‌الکتریک بسیاری از محصولات مانند میوه‌های تازه (Sosa-Morales *et al.*, 2009 (a,b); Venkatesh & Raghavan, 2004; Wang *et al.*, 2005) سبزیجات (Sipahioglu & Barringer, 2003; Venkatesh & Raghavan, 2004) و مواد غذایی خشک شده (Berbert *et al.*, 2001; Guo *et al.*, 2010; Sacilik *et al.*, 2006) اندازه‌گیری شده است.

وقتی موج الکترومغناطیس به یک ماده برخورد می‌کند، انرژی موج تابشی به سه بخش تقسیم می‌شود: یک بخش آن از سطح ماده منعکس و مابقی آن وارد ماده می‌شود که بخشی از آن توسط ماده جذب و مابقی آن از درون ماده عبور می‌کند. ضریب گذردهی نسبی ماده یعنی میزان توانایی ماده در جذب، ذخیره‌سازی و انتقال انرژی الکترومغناطیسی که یک مقدار مختلط بوده و از دو قسمت حقیقی و موهومی تشکیل شده با معادله (۲) تعریف می‌شود.

$$\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r = \epsilon_0 (\epsilon_r' - j\epsilon_r'') = \epsilon' - j\epsilon'' \quad (۲)$$

که در آن ϵ ضریب گذردهی و ϵ_r ضریب گذردهی نسبی و ϵ_0 یک عدد ثابت است و به طور معمول ضریب گذردهی خلأ نامیده می‌شود و مقدار آن برابر با $\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} \text{Fm}^{-1}$ است. ϵ_r' و ϵ_r'' به ترتیب ثابت دی‌الکتریک نسبی و فاکتور افت دی‌الکتریک نسبی و $j = \sqrt{-1}$ هستند. قسمت حقیقی ضریب گذردهی ϵ_r' یا ϵ_r ، که ثابت دی‌الکتریک نامیده می‌شود عبارت است از میزان توانایی ماده برای ذخیره‌سازی انرژی الکترومغناطیس، زمانی که ماده در مواجهه با امواج الکترومغناطیس قرار می‌گیرد. ثابت دی‌الکتریک ماده تحت تأثیر توزیع میدان الکتریکی و زاویه انتشار موج قرار می‌گیرد. قسمت موهومی ضریب گذردهی ϵ_r'' یا ϵ_r'' ، فاکتور افت دی‌الکتریک است که تحت تأثیر جذب و انتشار انرژی الکترومغناطیس قرار دارد و به توانایی ماده برای اتلاف انرژی در زمان مواجهه با یک میدان الکتریکی متناوب یا مکانیزم‌های پلاریزاسیون مختلف اطلاق می‌شود و عامل اصلی تولید گرما در ماده دی‌الکتریک است (Ikediala *et al.*, 2000; Sosa-Morales *et al.*, 2010). فاکتور افت دی‌الکتریک در میزان گرمای تولیدشده در مواد غذایی و محصولات بیولوژیک نقش مهمی ایفا می‌کند.

تازنات افت دی‌الکتریک، خصوصیت دیگری است که میزان پراکندگی انرژی در ماده را توصیف می‌کند و برابر

استفاده قرار می‌گیرند اطلاعات بسیار مفیدی را در اختیار محققان قرار می‌دهد. همچنین اندازه‌گیری این خصوصیات برای اندازه‌گیری غیرمخرب و سریع محتوی رطوبت و کیفیت مواد مختلف بسیار مؤثر است.

هدف کلی از این پژوهش، اندازه‌گیری ثابت دی‌الکتریک و فاکتور افت دی‌الکتریک محصولات کشاورزی با تلفات زیاد (سیب زرد و قرمز) و تلفات کم (پسته و گردو) با استفاده از پراب جدید طراحی شده با روابط و الگوریتم جدید در بسامدها و درجه حرارت‌های مختلف است. بنابراین (۱) اندازه‌گیری ثابت دی‌الکتریک و فاکتور افت دی‌الکتریک سیب درختی زرد و قرمز، پسته و گردو در بسامدهای ۱۳/۵۶، ۲۷/۱۲، ۴۰/۶۸ و ۹۱۵ مگاهرتز (بسامدهای مجاز در کاربردهای علمی، صنعتی و پزشکی)، (۲) اندازه‌گیری ثابت دی‌الکتریک و فاکتور افت دی‌الکتریک در درجه حرارت‌های مختلف (۲۰-۶۰°C و ۳) محاسبه و تخمین عمق نفوذ سیب درختی زرد، قرمز، پسته و گردو را می‌توان اهداف این پژوهش به شمار آورد.

مواد و روش‌ها

تهیه و آماده‌سازی مواد اولیه

در این مطالعه، نمونه‌های سیب درختی زرد و قرمز از باغات گلزار، پسته از باغات رفسنجان و گردو از باغات بردسیر واقع در استان کرمان در مهرماه ۱۳۹۶ تهیه شد. نمونه‌ها در داخل کیسه‌های پلاستیکی قرار داده شده و در دمای 5°C نگهداری شدند. محتوی رطوبت اولیه هر یک از نمونه‌ها با سه بار تکرار به روش آون اندازه‌گیری شد. نمونه‌ها با کمک ترازوی دیجیتالی وزن شده و در دمای 2 ± 100 خشک شدند و این عمل تا ثابت شدن وزن نمونه‌ها ادامه پیدا کرد. (AOAC, 2000)

از آنجاکه هوای موجود بین نمونه‌ها بر روی خصوصیات دی‌الکتریک ماده تأثیر می‌گذارد، برای اندازه‌گیری خصوصیات دی‌الکتریک مواد با کمترین خطای اندازه‌گیری باید نمونه‌های همگن و یکنواخت تهیه شود. در نتیجه برای تهیه مخلوط یکنواخت و همگن از سیب درختی، پسته و گردو از خردکن و آسیاب برقی استفاده شد.

اندازه‌گیری خصوصیات دی‌الکتریک

در این مطالعه، همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده است، یک خط انتقال کوآکسیال طراحی و ساخته شد.

تک‌بسامد (بسامد رزونانس) اندازه‌گیری می‌نماید. لذا برای اندازه‌گیری خصوصیات دی‌الکتریک در یک بازه بسامدی گسترده به تعداد زیادی رزوناتور نیاز است و در نتیجه ساخت و تولید آن‌ها هزینه‌بر است. روش حفره رزونانس از سایر روش‌ها دقت بیشتری دارد و نمونه مورد آزمایش در فضای خالی حفره به صورت مکعب یا استوانه بارگذاری می‌شود. خصوصیات دی‌الکتریک با اندازه‌گیری بسامد رزونانس و فاکتور کیفیت اندازه‌گیری می‌شود. دقت روش حفره رزونانس تحت تأثیر میزان هوای موجود بین نمونه و چگالی آن قرار می‌گیرد بنابراین آماده‌سازی نمونه برای دستیابی به دقت بالا بسیار مهم است. روش خط انتقال، یک روش و تکنیک کارآمد در اندازه‌گیری خصوصیات دی‌الکتریک است که در آن نمونه مورد آزمایش در داخل بخشی از موج‌بر (مستطیلی یا استوانه‌ای) یا خط کوآکسیال قرار داده می‌شود. خصوصیات دی‌الکتریک ماده با اندازه‌گیری سیگنال منعکس شده و انتقال داده شده (Transmitted signal) (S_{21} یا S_{12}) توسط دستگاه وکتور نتورک آنالایزر اندازه‌گیری می‌شود. به‌طور کلی، روش خط انتقال کوآکسیال دو دهانه‌ای از روش پراب گران‌تر ولی از روش حفره رزونانس ارزان‌تر است. دقت این روش نیز از روش پراب انتها باز بیشتر ولی از روش حفره رزونانس در تک بسامد کمتر است. در صورتی که آماده‌سازی نمونه مورد آزمایش به‌خوبی انجام گیرد و نمونه کاملاً فضای خالی داخل خط انتقال را پر نماید و هوا در بین نمونه وجود نداشته باشد این روش دارای دقت اندازه‌گیری بسیار بالایی است (Yaw, 2012).

در این مقاله، برای اندازه‌گیری خصوصیات دی‌الکتریک مواد بیولوژی مایع، نیمه‌جامد و جامد، یک پراب جدید طراحی و ساخته شد. برای اندازه‌گیری ثابت دی‌الکتریک و فاکتور افت دی‌الکتریک مواد، روابط ریاضی جدید ارائه شد. مهم‌ترین مزیت این تکنیک، توانایی تخمین ضریب گذردهی و نفوذپذیری مواد با تلفات کم تا زیاد در درجه حرارت‌های مختلف و در حجم و اندازه‌های متفاوت نمونه از اندازه‌ها و مقادیر بزرگ تا کوچک در بازه بسامدی گسترده است.

اندازه‌گیری خصوصیات دی‌الکتریک محصولات کشاورزی، برای طراحی و ساخت سیستم‌های گرم‌کن‌ها و خشک‌کن‌های بسامد رادیویی و مایکروویو که برای خشک‌کردن و مبارزه با آفات و حشرات و بیماری‌ها مورد

که در آن $\omega = 2\pi f$ بسامد زاویه‌ای، f بسامد بر حسب هرتز و c سرعت نور در خلأ است. کل تلفات سیستم شامل تلفات هادی (α_c) و تلفات دی‌الکتریک (α_d) است و با معادله (۷) نمایش داده می‌شود.

$$\alpha = \alpha_c + \alpha_d = \frac{1}{2L} \ln \left(\frac{1 - |S_{11}|^2}{|S_{21}|^2} \right) \quad (۷)$$

در نهایت فاکتور افت دی‌الکتریک از معادله (۸) محاسبه می‌شود.

$$\varepsilon'' = \frac{2\varepsilon' \alpha_d}{\beta} \quad (۸)$$

خصوصیات دی‌الکتریک نمونه‌ها در پنج درجه حرارت ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۵۰ و ۶۰ درجه سانتی‌گراد و چهار بسامد ۱۳/۵۶، ۲۷/۱۲، ۴۰/۶۸ و ۹۱۵ مگاهرتز که بسامدهای مجاز در کاربردهای علمی، صنعتی و پزشکی هستند (Guo *et al.*, 2011(a); Jiao *et al.*, 2011; Ozturk *et al.*, 2016)، توسط دستگاه وکتور نتورک آنالایزر اندازه‌گیری شدند. درجه حرارت تمامی نمونه‌ها توسط حمام آب چرخشی و کنترلر دما کنترل شد. خصوصیات دی‌الکتریک مواد در بسامدها و درجه حرارت‌های مشخص و در محتوی رطوبت اولیه و با سه بار تکرار محاسبه شدند.

اثر خصوصیات دی‌الکتریک بر روی عمق نفوذ

هدایت الکتریکی مواد دی‌الکتریک ضعیف است و در نتیجه زمانی که در معرض میدان الکترومغناطیس قرار می‌گیرند، انرژی را در خود ذخیره و تلف می‌کنند. میزان نفوذ انرژی الکترومغناطیس در درون ماده، زمانی که میزان این انرژی به مقدار $1/e$ و یا $36/8\%$ مقدار انرژی انتقال داده شده افت کند، عمق نفوذ نامیده می‌شود. عمق نفوذ از طریق معادلات (۹) یا (۱۰) قابل محاسبه است.

$$d_p = \frac{\lambda_0 \sqrt{\varepsilon'}}{2\pi \varepsilon''} \quad (۹)$$

$$d_p = \frac{c}{2\pi f \sqrt{2\varepsilon' \left[\sqrt{1 + \left(\varepsilon''/\varepsilon' \right)^2} - 1 \right]}} \quad (۱۰)$$

که در آن λ_0 طول موج الکترومغناطیس در خلأ بر حسب m ، c سرعت نور در خلأ بر حسب ms^{-1} و f بسامد موج بر حسب Hz است.

پس از محاسبه و استخراج خصوصیات دی‌الکتریک ماده می‌توان عمق نفوذ ماده را در بسامدهای مختلف محاسبه کرد. همان‌طور که معادلات نشان می‌دهند عمق نفوذ با بسامد رابطه عکس دارد. در بسامدهای بالا، عمق نفوذ

برای ساده‌کردن عملیات ماشین‌کاری و ساخت آسان‌تر، از استیل ضدزنگ که دارای هدایت الکتریکی خوبی است برای ساخت پراب استفاده شد. از آنجاکه با تغییر درجه حرارت، خصوصیات دی‌الکتریک مواد تغییر می‌کند، برای اندازه‌گیری این خصوصیات در درجه حرارت‌های مختلف، پراب به‌صورت دوجداره ساخته شد. برای اندازه‌گیری خصوصیات دی‌الکتریک، دستگاه وکتور نتورک آنالایزر با کمک کیت‌های کالیبراسیون استاندارد *Open, Short, Thru* و *50Ω* کالیبره شد. همچنین برای افزایش دقت اندازه‌گیری، چند دقیقه قبل از اندازه‌گیری، دستگاه روشن و در حالت آماده برای کار نگه داشته شد و در طول مدت اندازه‌گیری کابل‌ها و پراب در موقعیت ثابت نگه‌داشته شدند. قبل و بعد از هر آزمایش پراب به‌وسیله آب مقطر شستشو و با پارچه خشک شد.

نمونه‌های همگن‌شده از ماده تحت آزمایش در درون خط انتقال کوآکسیال قرار داده شدند به‌طوری‌که فضای داخلی پراب را کاملاً پر نمایند (شکل ۱- الف و ب). برای اندازه‌گیری خصوصیات دی‌الکتریک، سیگنال‌های منعکس شده (S_{11} یا S_{22}) و انتقال داده شده (S_{12} یا S_{21}) توسط دستگاه نتورک آنالایزر اندازه‌گیری شدند (شکل ۱- ج). S_{11} برابر با ضریب انعکاس موج الکترومغناطیس در دهانه ورودی است درحالی‌که در دهانه خروجی انعکاس موج وجود نداشته باشد. به‌همین ترتیب S_{22} که برابر با ضریب انعکاس دهانه خروجی است درحالی‌که در دهانه ورودی انعکاس موج وجود نداشته باشد. همچنین S_{21} ضریب انتقال است و برابر است با نسبت توان منعکس شده در دهانه خروجی به توان وارد شده به دهانه ورودی و S_{12} برابر با نسبت توان منعکس شده در دهانه ورودی به توان منعکس شده از دهانه خروجی است. ضریب انتقال S_{21} که یک عدد مختلط است که دارای اندازه و فاز است و به‌صورت رابطه ۵ نمایش داده می‌شود (Vaezi Zadeh *et al.*, 2019).

$$S_{21} = |S_{21}| e^{j\varphi} = |S_{21}| e^{-j\beta L} \quad (۵)$$

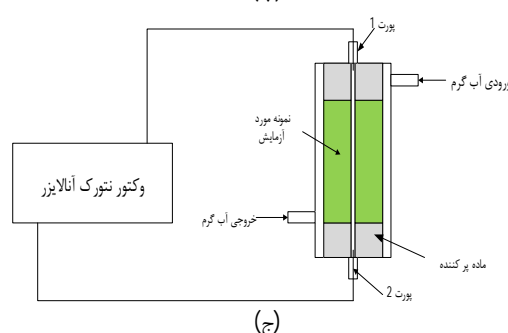
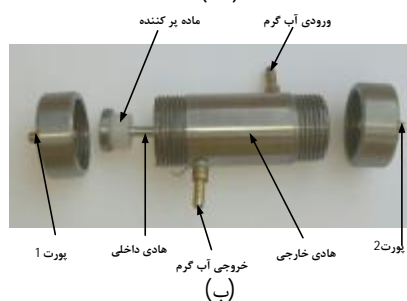
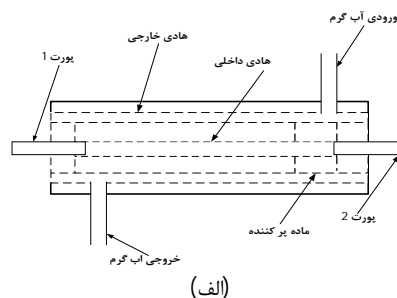
که در آن φ و β به ترتیب فاز S_{21} و ثابت فاز خط کوآکسیال بر حسب $rad s^{-1}$ و L طول نمونه مورد آزمایش بر حسب متر است. ثابت دی‌الکتریک از معادله (۶) محاسبه می‌شود.

$$\varepsilon'_r = \left(\frac{\beta c}{\omega} \right)^2 \quad (۶)$$

افت دی‌الکتریک با افزایش بسامد، کاهش می‌یابد. در ناحیه بسامد رادیویی و مایکروویو هدایت یونی و چرخش دوقطبی بر روی خصوصیات دی‌الکتریک مواد اثر می‌گذارند. ثابت دی‌الکتریک مواد در بسامدهای بالا به دلیل وجود میدان‌های الکترومغناطیس متناوب سریع موجب کاهش جهت‌گیری مولکول‌های دوقطبی، انحراف باندهای یونی و مکانیزم پلاریزاسیون دوقطبی می‌شود که به کاهش پلاریزاسیون در درون ماده منجر می‌شود. (Yu *et al.*, 2015; Shrestha & Baik, 2011). معادله (۴) نشان می‌دهد فاکتور افت دی‌الکتریک، تحت تأثیر هدایت یونی و چرخش مولکول‌های دوقطبی قرار دارد که در آن مکانیزم هدایت یونی با بسامد رابطه عکس دارد به همین دلیل با افزایش بسامد، هدایت یونی کاهش می‌یابد. در نتیجه با افزایش بسامد به سمت بی‌نهایت، تأثیر مکانیزم هدایت یونی بر روی فاکتور افت دی‌الکتریک به سمت صفر میل می‌کند. در نتیجه اثر هدایت یونی حذف می‌شود. بنابراین فاکتور افت دی‌الکتریک تحت تأثیر چرخش مولکول‌های دوقطبی قرار می‌گیرد. ثابت دی‌الکتریک و فاکتور افت دی‌الکتریک سیب درختی زرد و قرمز با افزایش بسامد، کاهش می‌یابد. مقدار ثابت دی‌الکتریک به ترتیب از $62/8$ تا $49/5$ و $67/3$ تا $55/9$ برای سیب درختی زرد و قرمز در دمای 20 درجه سانتی‌گراد از بسامد 14 تا 915 مگاهرتز تغییر می‌کند. فاکتور افت دی‌الکتریک نیز به ترتیب از $145/5$ تا $10/2$ و $110/2$ تا $8/1$ برای سیب درختی زرد و قرمز در 20 درجه سانتی‌گراد از بسامد 14 تا 915 مگاهرتز تغییر می‌کند.

مقادیر میانگین ثابت دی‌الکتریک و فاکتور افت دی‌الکتریک برای پسته و گردو در دمای 20°C در شکل ۳ نشان داده شده است. ثابت دی‌الکتریک و فاکتور افت دی‌الکتریک برای پسته و گردو با افزایش بسامد، کاهش می‌یابد. با افزایش بسامد، میزان کاهش ثابت دی‌الکتریک و فاکتور افت دی‌الکتریک در بازه بسامد رادیویی (کمتر از 100 مگاهرتز) شدیدتر است. میزان پراکندگی آب آزاد و مقید و هدایت یونی ماده بر روی خصوصیات دی‌الکتریک ماده تأثیر می‌گذارد. با کاهش محتوی رطوبت نمونه، مولکول‌های دوقطبی آب موجود در ماده غذایی به‌وسیله پیوندهای شیمیایی با مولکول‌های دیگر مانند پروتئین، نشاسته و قند مرتبط هستند. بنابراین این پیوندها به

کمتر و در نتیجه گرمای سطحی بیشتری نسبت به بسامدهای پایین‌تر به‌وجود می‌آید. بنابراین عمق نفوذ انرژی الکترومغناطیسی در بسامدهای رادیویی به‌مراتب از امواج مایکروویو بالاتر است.



شکل ۱- الف و ب) طرح‌واره و اجزای خط انتقال کوآکسیال، ج) طرح‌واره سامانه اندازه‌گیری خصوصیات دی‌الکتریک نمونه

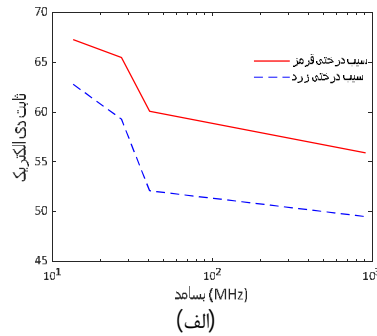
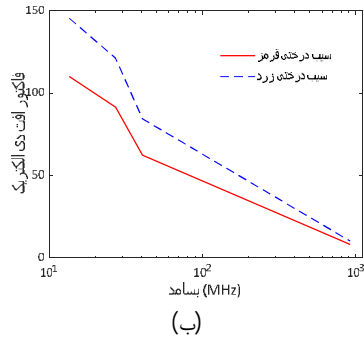
نتایج و بحث

رابطه بین خصوصیات دی‌الکتریک و بسامد

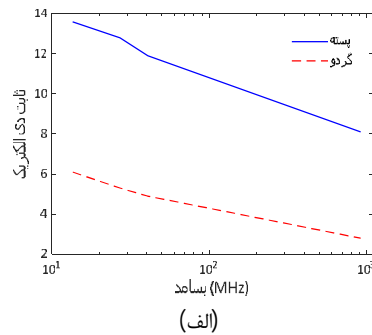
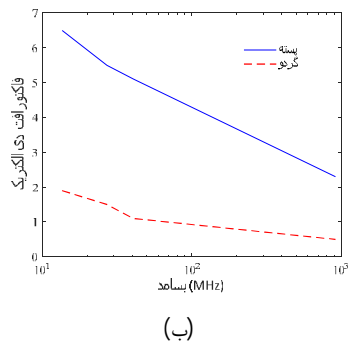
میانگین و انحراف معیار خصوصیات دی‌الکتریک سیب درختی قرمز و زرد، پسته و گردو در جدول ۱ در چهار بسامد 14 ، 27 ، 41 ، 915 مگاهرتز و در پنج درجه حرارت 20 ، 30 ، 40 ، 50 و 60 درجه سانتی‌گراد نشان داده شده است. ثابت دی‌الکتریک و فاکتور افت دی‌الکتریک برای سیب درختی زرد و قرمز در 20 درجه سانتی‌گراد از 14 تا 915 مگاهرتز در شکل ۲ نشان داده شده است. ثابت دی‌الکتریک و فاکتور

(Raghavan, 2004). از آنجاکه محتوی رطوبت پسته و گردو از سیب درختی پایین‌تر است لذا خصوصیات دی‌الکتریک پسته و گردو کمتر است.

کاهش واکنش مولکول‌های دوقطبی آب در میدان‌های متناوب الکترومغناطیس منجر می‌شوند و در نتیجه خصوصیات دی‌الکتریک کاهش می‌یابد (Venkatesh &



شکل ۲- ثابت دی‌الکتریک و فاکتور افت دی‌الکتریک سیب درختی زرد و قرمز در درجه حرارت ۲۰°C

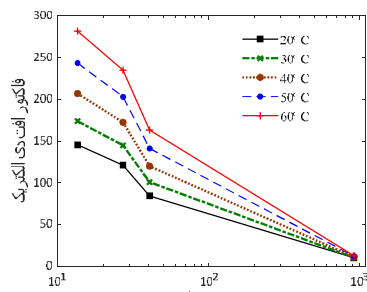


شکل ۳- ثابت دی‌الکتریک و فاکتور افت دی‌الکتریک گردو و پسته در درجه حرارت ۲۰°C

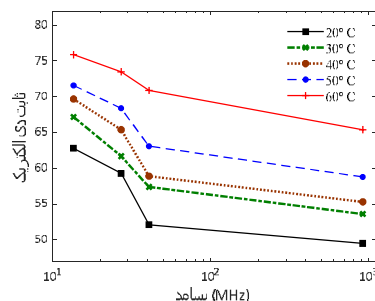
می‌دهد فاکتور افت دی‌الکتریک تحت تأثیر افت یونی و دوقطبی قرار دارد و بنابراین در یک میدان الکترومغناطیس متناوب، میزان هدایت یونی و چرخش مولکول‌های دوقطبی به ترتیب به افت یونی و دوقطبی در ماده دی‌الکتریک منجر می‌شوند. افزایش درجه حرارت ماده تا ۶۰°C منجر به کاهش ویسکوزیته ماده و در نتیجه کاهش اصطکاک بین مولکولی می‌شود. کاهش ویسکوزیته در درجه حرارت بالا منجر به افزایش هدایت یونی و چرخش مولکول‌های دوقطبی و در نتیجه افزایش فاکتور افت دی‌الکتریک ماده می‌شود. فاکتور افت دی‌الکتریک با افزایش میزان مولکول‌های دوقطبی و یونها در مواد با محتوی رطوبت بالا افزایش می‌یابد. نتایج به دست آمده با نتایج گزارش شده توسط محققان دیگر بر روی میوه‌های خشک (Alfaifi *et al.*, 2013)، میوه‌های هسته‌دار (Ling *et al.*, 2015) و برخی مواد غذایی با محتوی رطوبت بالا (Wang *et al.*, 2008) مطابقت دارد.

تأثیر درجه حرارت بر خصوصیات دی‌الکتریک

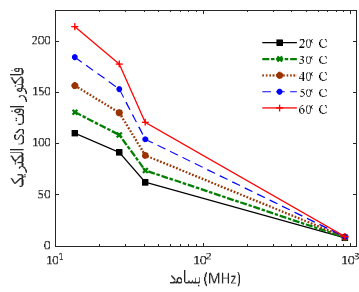
جدول ۱ میانگین و انحراف معیار ثابت دی‌الکتریک و فاکتور افت دی‌الکتریک نمونه‌های آزمایش شده در درجه حرارت‌های مختلف در بسامدهای ۱۴، ۲۷، ۴۱ و ۹۱۵ مگاهرتز را نشان می‌دهد. برای نمونه‌های آزمایش شده، ثابت دی‌الکتریک با افزایش درجه حرارت به دلیل هدایت یونی بالاتر در درجه حرارت‌های بالا افزایش می‌یابد. (Guo *et al.*, 2010; Jha *et al.*, 2011; Wang *et al.*, 2013) برای همه نمونه‌ها با افزایش درجه حرارت در یک بسامد ثابت، فاکتور افت دی‌الکتریک افزایش می‌یابد. شکل ۴ و ۵ به ترتیب ثابت دی‌الکتریک و فاکتور افت دی‌الکتریک برای نمونه‌های آزمایش شده به عنوان تابعی از درجه حرارت و بسامد را نشان می‌دهند. درجه حرارت بالا منجر به تحریک حرارتی مولکول‌ها و در نتیجه افزایش نوسان مولکول‌های دوقطبی و حرکت یونها در درون ماده می‌شود. بنابراین فاکتور افت دی‌الکتریک ماده با افزایش درجه حرارت افزایش می‌یابد. همان‌طور که معادله (۴) نشان



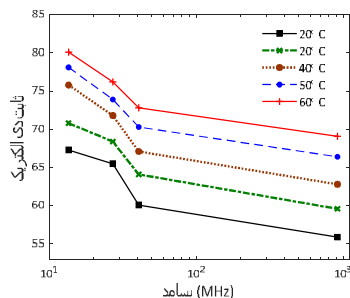
(الف)



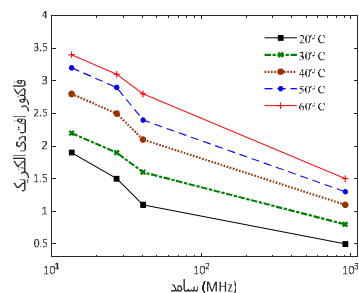
(الف)



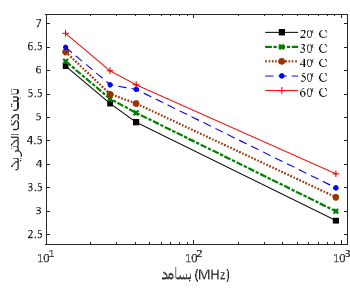
(ب)



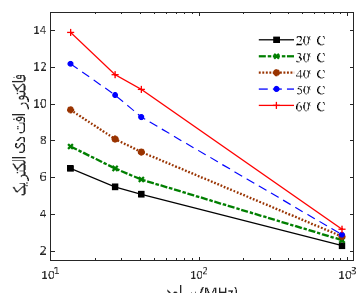
(ب)



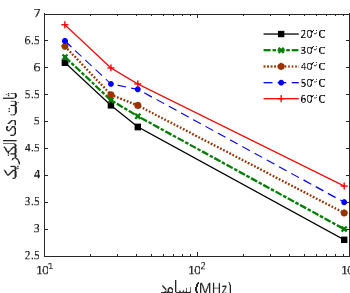
(ج)



(ج)



(د)



(د)

شکل ۵- فاکتور افت دی‌الکتریک (الف) سیب‌درختی زرد، (ب) سیب‌درختی قرمز، (ج) گردو، (د) پسته تابعی از بسامد در درجه حرارت‌های مختلف

شکل ۴- ثابت دی‌الکتریک (الف) سیب‌درختی زرد، (ب) سیب‌درختی قرمز، (ج) گردو، (د) پسته تابعی از بسامد در درجه حرارت‌های مختلف

شده است. عمق نفوذ با افزایش بسامد و درجه حرارت کاهش می‌یابد. بر طبق معادلات (۹) و (۱۰) عمق نفوذ با خصوصیات دی‌الکتریک ماده رابطه عکس دارد. با افزایش ثابت دی‌الکتریک و فاکتور افت دی‌الکتریک، عمق نفوذ کاهش می‌یابد. از آنجاکه با افزایش رطوبت، ثابت

عمق نفوذ
عمق نفوذ محاسبه شده با استفاده از خصوصیات دی‌الکتریک اندازه‌گیری شده از سیب زرد و قرمز، گردو و پسته در چهار بسامد ۱۴، ۲۷، ۴۱ و ۹۱۵ مگاهرتز و پنج درجه حرارت ۲۰-۶۰ درجه سانتی‌گراد در جدول ۲ آورده

نتیجه‌گیری

در این مطالعه، یک پراب خط انتقال کوآکسیال برای اندازه‌گیری خصوصیات دی‌الکتریک مواد غذایی و کشاورزی در درجه حرارت‌های مختلف طراحی و ساخته شد. خصوصیات دی‌الکتریک سیب درختی زرد، قرمز، گردو و پسته در چهار بسامد ۱۴، ۲۷، ۴۱ و ۹۱۵ مگاهرتز و پنج درجه حرارت مختلف ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۵۰ و ۶۰ درجه سانتی‌گراد به‌وسیله پراب خط انتقال کوآکسیال و با کمک دستگاه وکتور نتورک آنالایزر اندازه‌گیری شد. نتایج به‌دست‌آمده نشان دادند که ثابت دی‌الکتریک با کاهش بسامد و افزایش درجه حرارت افزایش یافت. فاکتور افت دی‌الکتریک برای نمونه‌های آزمایش‌شده با افزایش بسامد و کاهش درجه حرارت کاهش یافت. محاسبات عمق نفوذ بر اساس خصوصیات دی‌الکتریک اندازه‌گیری شده نشان داد که با افزایش بسامد و درجه حرارت مقدار آن کاهش می‌یابد. عمق نفوذ در بازه بسامد رادیویی (کمتر از ۵۰ مگاهرتز) عمیق‌تر از بسامد میکروویو (۹۱۵ مگاهرتز) است. بنابراین می‌توان در بسامدهای رادیویی نسبت به بسامدهای میکروویو، درجه حرارت یکنواخت‌تری به‌دست آورد.

دی‌الکتریک و فاکتور افت دی‌الکتریک، افزایش می‌یابد در نتیجه با افزایش رطوبت عمق نفوذ کاهش می‌یابد (Venkatesh & Raghavan, 2004).

بیشترین عمق نفوذ در بسامد ۱۴ مگاهرتز مشاهده می‌شود و مقدار آن به‌ترتیب از ۲۷۸/۱ تا ۴۶۳/۳، ۱۱۲/۹ تا ۲۰۵/۲، ۳۱/۷ و ۲۰/۴ و ۱۷/۰ تا ۲۵/۵ سانتی‌متر برای گردو، پسته، سیب درختی قرمز و زرد تغییر می‌کند. گردو با کمترین محتوی رطوبت (۳٪ w.b) بیشترین عمق نفوذ و سیب درختی قرمز با بیشترین محتوی رطوبت (۸۵٪ w.b) کمترین عمق نفوذ را دارند. در بسامدهای میکروویو (بسامدهای بالای ۱۰۰۰ مگاهرتز) عمق نفوذ بسیار کوچک شده و در نتیجه تأثیر درجه حرارت و بسامد بسیار کم خواهد بود. برای یکنواختی درجه حرارت و کنترل مؤثر آفات و حشرات با گرمایش دی‌الکتریک، ضخامت مواد غذایی که در معرض امواج الکترومغناطیس قرار می‌گیرند نباید بیشتر از ۲ الی ۳ برابر عمق نفوذ باشد (Guo et al., 2011 (b)).

بنابراین محدودیت عمق نفوذ در میوه‌های بزرگ و با محتوی رطوبت بالا مخصوصاً در بسامدهای میکروویو به عدم یکنواختی درجه حرارت در درون ماده منجر می‌شود.

جدول ۱- ثابت دی‌الکتریک و فاکتور افت دی‌الکتریک سیب درختی زرد، قرمز، گردو و پسته در چهار بسامد و پنج درجه حرارت مختلف

مواد	دما °C	ثابت دی‌الکتریک (ϵ')				فاکتور افت دی‌الکتریک (ϵ'')			
		۱۴	۲۷	۴۱	۹۱۵	۱۴	۲۷	۴۱	۹۱۵
سیب درختی زرد	۲۰	۶۲/۸± ۱/۰	۵۷/۴± ۰/۷	۵۲/۱± ۰/۵	۴۹/۵± ۰/۲	۱۴۵/۵± ۲/۶	۱۲۱/۳± ۱/۲	۸۴/۴± ۰/۸	۱۰/۲± ۱/۱
	۳۰	۶۷/۲± ۰/۹	۵۷/۴± ۰/۷	۵۷/۴± ۰/۷	۵۳/۶± ۰/۲	۱۷۳/۹± ۳/۰	۱۴۵/۰± ۱/۴	۱۰۰/۹± ۰/۹	۱۰/۵± ۱/۲
	۴۰	۶۹/۷± ۱/۱	۶۵/۴± ۰/۸	۵۸/۹± ۰/۸	۵۵/۳± ۰/۴	۲۰۶/۹± ۱/۹	۱۷۲/۵± ۱/۸	۱۲۰/۰± ۱/۱	۱۱/۱± ۰/۹
	۵۰	۷۱/۶± ۰/۹	۶۸/۴± ۰/۷	۶۳/۱± ۰/۸	۵۸/۸± ۰/۲	۲۴۳/۵± ۲/۳	۲۰۳/۱± ۱/۴	۱۴۱/۲± ۱/۴	۱۲/۲± ۱/۰
	۶۰	۷۵/۹± ۱/۲	۷۳/۵± ۰/۱	۷۰/۹± ۰/۸	۶۵/۴± ۰/۲	۲۸۱/۷± ۱/۷	۲۳۵/۰± ۲/۳	۱۶۳/۴± ۱/۸	۱۲/۸± ۰/۷
سیب درختی قرمز	۲۰	۶۷/۳± ۳/۱	۶۵/۵± ۱/۶	۶۰/۱± ۱/۳	۵۵/۹± ۱/۱	۱۱۰/۲± ۴/۸	۹۱/۵± ۱/۶	۶۲/۳± ۰/۸	۸/۱± ۰/۱
	۳۰	۷۰/۸± ۲/۶	۶۸/۴± ۱/۲	۶۴/۱± ۰/۹	۵۹/۶± ۱/۱	۱۳۰/۷± ۵/۳	۱۰۸/۵± ۱/۸	۷۳/۹± ۰/۹	۸/۵± ۰/۲
	۴۰	۷۵/۸± ۳/۲	۷۱/۸± ۱/۷	۶۷/۱± ۱/۳	۶۲/۸± ۱/۲	۱۵۶/۶± ۵/۷	۱۳۰/۱± ۱/۹	۸۸/۵± ۱/۰	۸/۸± ۰/۲
	۵۰	۷۸/۱± ۳/۵	۷۳/۹± ۱/۸	۷۰/۳± ۱/۴	۶۶/۴± ۰/۹	۱۸۴/۳± ۶/۲	۱۵۳/۱± ۲/۱	۱۰۴/۲± ۱/۳	۹/۱± ۰/۱
	۶۰	۸۰/۱± ۳/۳	۷۶/۲± ۱/۹	۷۲/۸± ۱/۵	۶۹/۱± ۰/۸	۲۱۴/۰± ۶/۳	۱۷۷/۷± ۲/۰	۱۲۰/۹± ۱/۷	۹/۴± ۰/۳
گردو	۲۰	۶۱/۱± ۱/۴	۵/۳± ۱/۱	۴/۹± ۱/۲	۲/۸± ۰/۱	۱/۹± ۰/۱	۱/۵± ۰/۲	۱/۱± ۰/۵	۰/۵± ۰/۱
	۳۰	۶/۲± ۱/۷	۵/۴± ۱/۴	۵/۱± ۱/۴	۳/۰± ۰/۲	۲/۲± ۰/۹	۱/۹± ۰/۳	۱/۶± ۰/۲	۰/۸± ۰/۱
	۴۰	۶/۴± ۱/۹	۵/۵± ۱/۲	۵/۳± ۰/۸	۳/۳± ۰/۱	۲/۸± ۰/۳	۲/۵± ۰/۲	۲/۱± ۰/۴	۱/۱± ۰/۲
	۵۰	۶/۵± ۱/۵	۵/۷± ۱/۴	۵/۶± ۰/۸	۳/۵± ۰/۳	۳/۲± ۰/۲	۲/۹± ۰/۵	۲/۴± ۰/۴	۱/۳± ۰/۲
	۶۰	۶/۸± ۳/۲	۶/۰± ۱/۶	۵/۷± ۰/۹	۳/۸± ۰/۱	۳/۴± ۰/۳	۳/۱± ۰/۷	۲/۸± ۰/۱	۱/۵± ۰/۳
پسته	۲۰	۱۳/۶± ۱/۴	۱۲/۸± ۰/۸	۱۱/۹± ۱/۶	۸/۱± ۰/۱	۶/۵± ۰/۸	۵/۵± ۰/۴	۵/۱± ۰/۳	۲/۳± ۰/۱
	۳۰	۱۴/۵± ۱/۵	۱۳/۷± ۱/۲	۱۲/۸± ۱/۲	۸/۷± ۰/۱	۷/۷± ۰/۹	۶/۵± ۰/۵	۵/۹± ۰/۴	۲/۶± ۰/۷
	۴۰	۱۵/۷± ۱/۵	۱۴/۳± ۰/۹	۱۳/۱± ۱/۷	۹/۴± ۰/۱	۹/۷± ۰/۷	۸/۱± ۰/۲	۷/۴± ۰/۹	۲/۸± ۰/۲
	۵۰	۱۶/۷± ۱/۲	۱۵/۱± ۰/۹	۱۳/۹± ۱/۷	۹/۹± ۰/۲	۱۲/۲± ۰/۸	۱۰/۵± ۰/۹	۹/۳± ۰/۵	۲/۹± ۰/۱
	۶۰	۱۷/۴± ۱/۶	۱۵/۷± ۱/۳	۱۴/۴± ۱/۴	۱۰/۳± ۰/۲	۱۳/۹± ۰/۳	۱۱/۶± ۱/۱	۱۰/۸± ۰/۱	۳/۲± ۰/۲

جدول ۲- عمق نفوذ سیب درختی زرد، قرمز، گردو و پسته در چهار بسامد و پنج درجه حرارت مختلف

عمق نفوذ (cm)				دما °C	ماده
بسامد (MHz)					
۹۱۵	۴۱	۲۷	۱۴		
۳/۶ ± ۰/۱	۱۲/۱ ± ۰/۳	۱۴/۳ ± ۰/۴	۲۵/۵ ± ۰/۹	۲۰	سیب درختی زرد
۳/۷ ± ۰/۱	۱۰/۸ ± ۰/۲	۱۲/۷ ± ۰/۳	۲۲/۸ ± ۰/۸	۳۰	
۳/۵ ± ۰/۲	۹/۶ ± ۰/۲	۱۱/۴ ± ۰/۳	۲۰/۴ ± ۰/۴	۴۰	
۳/۳ ± ۰/۲	۸/۴ ± ۰/۲	۱۰/۳ ± ۰/۱	۱۸/۵ ± ۰/۲	۵۰	
۳/۳ ± ۰/۱	۸/۰ ± ۰/۱	۹/۵ ± ۰/۱	۱۷/۰ ± ۰/۲	۶۰	
۴/۸ ± ۰/۱	۱۶/۱ ± ۰/۲	۱۸/۲ ± ۰/۶	۳۱/۷ ± ۰/۱	۲۰	سیب درختی قرمز
۴/۸ ± ۰/۲	۱۴/۳ ± ۰/۹	۱۶/۱ ± ۰/۵	۲۸/۲ ± ۰/۲	۳۰	
۴/۷ ± ۰/۲	۱۲/۵ ± ۰/۴	۱۴/۲ ± ۰/۷	۲۵/۱ ± ۰/۵	۴۰	
۴/۷ ± ۰/۴	۱۱/۲ ± ۰/۴	۱۲/۷ ± ۰/۲	۲۲/۵ ± ۰/۳	۵۰	
۴/۶ ± ۰/۱	۱۰/۰ ± ۰/۱	۱۱/۵ ± ۰/۳	۲۰/۴ ± ۰/۲	۶۰	
۱۷/۵ ± ۰/۹	۲۳۷/۸ ± ۶/۲	۲۷۳/۰ ± ۲/۲	۴۶۳/۳ ± ۲/۱	۲۰	گردو
۱۱/۴ ± ۱/۰	۱۶۷/۷ ± ۶/۹	۲۱۸/۶ ± ۵/۱	۴۰۴/۸ ± ۳/۹	۳۰	
۸/۷ ± ۱/۲	۱۳۱/۱ ± ۵/۴	۱۶۹/۳ ± ۵/۷	۳۲۵/۵ ± ۳/۳	۴۰	
۷/۶ ± ۰/۷	۱۱۸/۳ ± ۴/۴	۱۴۹/۴ ± ۳/۲	۲۸۸/۶ ± ۳/۰	۵۰	
۶/۹ ± ۰/۵	۱۰۲/۹ ± ۵/۱	۱۴۳/۵ ± ۳/۳	۲۷۸/۱ ± ۳/۵	۶۰	
۶/۵ ± ۰/۱	۸۱/۲ ± ۳/۰	۱۱۷/۱ ± ۲/۴	۲۰۵/۲ ± ۴/۲	۲۰	پسته
۶/۰ ± ۰/۳	۷۳/۰ ± ۳/۴	۱۰۲/۹ ± ۱/۸	۱۷۹/۹ ± ۵/۱	۳۰	
۵/۸ ± ۰/۱	۵۹/۵ ± ۲/۹	۸۵/۲ ± ۲/۱	۱۵۰/۱ ± ۳/۷	۴۰	
۵/۷ ± ۰/۲	۴۹/۴ ± ۳/۵	۶۸/۶ ± ۱/۹	۱۲۴/۸ ± ۳/۸	۵۰	
۵/۳ ± ۰/۲	۴۳/۸ ± ۳/۱	۶۳/۷ ± ۲/۷	۱۱۲/۹ ± ۴/۴	۶۰	

6. Gao, M. Tang, J. Villa-Rojas, R. Wang, Y. and 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.

7. Guo, W. Liu, Y. Zhu, X. and Wang, S. 2011b. Temperature-dependent dielectric properties of honey associated with dielectric heating, *Journal of Food Engineering*, 102(3): 209-216.

8. Guo, W. Wang, S. Tiwari, G. Johnson, J. A. and Tang, J. 2010. Temperature and moisture dependent dielectric properties of legume flour associated with dielectric heating, *LWT- Food Science and Technology*, 43(2): 193-201.

9. Guo, W. Wu, X. Zhu, X. and Wong, S. 2011a. Temperature-dependent dielectric properties of chestnut and chestnut weevil from 10 to 4500 MHz, *Biosystem Engineering*, 110: 340-347.

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

منابع

1. Alfaifi, B. Wang, S. Tang, J. Rasco, B. Sablani, S. and Jiao, Y. 2013. Radio frequency disinfestation treatments for dried fruit: Dielectric properties, *LWT- Food Science and Technology*, 50: 746-754.

2. AOAC, A. O. 2000. Official methods of analysis (17th ed.). Gaithersburg, MD: AOAC.

3. Berbert, P. A. Queiroz, D. M. Sousa, E. F. Molina, M. B. Melo, E. C. and Faroni, L. R. D. 2001. Dielectric properties of parchment coffee. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 80(1): 65-80.

4. Birla, S. Wang, S. Tang, J. and Tiwari, G. 2008. Characterization of Radio Frequency Heating of Fresh Fruits Influenced by Dielectric Properties. *Journal of Food Engineering*, 89: 390-398.

5. Gao, M. Tang, J. Johnson, J. A. and 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.

22. Ryynanen, S. 1995. The electromagnetic properties of food materials: a review of the basic principles, *Journal of food engineering*, 26(4): 409-429.
23. Sacilik, K. Tarimci, C. and Colak, A. 2006. Moisture content and bulk density dependence of dielectric properties of safflower seed in the radio frequency range, *Journal of food engineering*, 78(4): 1111-1116.
24. Shrestha, B. L. and Baik, O. 2011. Permittivity of mixtures of saponaria vaccaria and ethanol-water solution for RF heating assisted extraction of saponins, *IEEE Transactions Instrumentation and Measurement*, 60(8): 2861-2871.
25. Sipahioglu, O. and Barringer, S. A. 2003. Dielectric properties of vegetables and fruits as a function of temperature, ash and moisture content, *journal of food science*, 68(1): 234-239.
26. Sosa-Morales, M. E. Tiwari, G. Wang, S. Tang, J. Garcia, H. S. and Lopez-Malo, A. 2009a. Dielectric heating as a potential post-harvest treatment of disinfesting mangoes, Part I: Relation between dielectric properties and ripening, *Biosystems Engineering*, 103(3): 297-303.
27. Sosa-Morales, M. E. Tiwari, G. Wang, S. Tang, J. Garcia, H. S. and Lopez-Malo, A. 2009b. Dielectric heating as a potential post-harvest treatment of disinfesting mangoes, Part II: Development of RF-based protocols and quality evaluation of treated fruits, *Biosystems Engineering*, 103(3): 287-296.
28. Sosa-Morales, M. E. Valerio-Junco, L. Lopez-Malo, A. and Garcia, H. S. 2010. Dielectric properties of foods: Reported data in the 21st Century and their potential applications, *LWT - Food Science and Technology*, 43(8): 1169-1179.
29. Tahmasebi, M. Tabatabaei, K. R. and Hashemi, J. 2016. Effect of moisture content and frequency in dielectric properties of two paddy varieties, *Iranian Journal of Biosystems Engineering*, 47(1): 51-61. (In farsi)
30. Vaezi Zadeh, M. Afrooz, K. Shamsi, M. and Rostami, M. A. 2019. Measuring the dielectric properties of date palm fruit, date palm leaflet, and Dubas bug at radio and microwave frequency using two-port coaxial transmission/reflection line technique. *Biosystems Engineering*, 181: 73-85.
31. Venkatesh, M. S. and Raghavan, G. S. V. 2004. An overview of microwave processing and dielectric properties of agri-food materials. *Biosystems Engineering*, 88(1): 1-18.
32. Wang, S. Birla, S. L. Tang, J. and Hansen, J. 11. Ikediala, J. N. Hansen, J. D. Tang, J. Drake, S. R. and Wang, S. 2002. Development of saline-water immersion technique with RF energy as a postharvest treatment against codling moth in cherries. *Postharvest Biology and Technology*, 24: 25-37.
12. Ikediala, J. N. Tang, J. Drake, S. R. and Neven, L. G. 2000. Dielectric properties of apple cultivars and codling moth larvae. *Transactions of the ASAE*, 43: 1175-1184.
13. Jha, S. Narsaiah, K. Basediya, A. Sharma, R. Jaiswal, P. Kumar, R. and Bhardwaj, R. 2011. Measurement techniques and application of electrical properties for nondestructive quality evaluation of foods—a review. *Journal of Food Science Technology*, 48(4): 387-411.
14. Jiao, S. Johnson, J. A. Tang, J. Tiwari, G. and Wang, S. 2011. Dielectric properties of cowpea weevil, black-eyed peas and mung beans with respect to the development of radio frequency heat treatments, *Biosystems Engineering*, 108: 280-291.
15. Komarov, V. V. Wang, S. and 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.
16. Ling, B. Guo, W. Hou, L. Li, R. and Wang, S. 2015. Dielectric Properties of Pistachio Kernels as Influenced by Frequency, Temperature, Moisture and Salt Content, *Food and Bioprocess Technology*, 8(2): 420-430.
17. Metaxas, A. C. and Meredith, R. J. 1983. *Industrial microwave heating*. Peter Peregrinus Ltd., London.
18. Mitcham, E. J. Veltman, R. H. Feng, X. de Castro, E. Johnson, J. A. Simpson, T. L. Biasi, W. V. Wang, S. and Tang, J. 2004. Application of radio frequency treatments to control insects in in-shell walnuts, *Postharvest Biology and Technology*, 33(1): 93-100.
19. Nelson, S. O. and Bartley, J. P. G. 2002. Frequency and temperature dependence of the dielectric properties of food materials. *Transactions of the ASAE*, 45(4): 1223-1227.
20. Ozturk, S. Kong, F. Trabelsi, S. and Singh, R. K. 2016. Dielectric properties of dried vegetable powders and their temperature profile during radio frequency heating, *Journal of Food Engineering*, 169: 91-100.
21. Piyasena, P. Dussault, C. Koutchma, T. Ramaswamy, H. S. and Awash. G. B. 2003. Radio frequency heating of foods: principles, applications and related properties-a review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 3(6): 587-606.

- D. 2006. Postharvest treatment to control codling moth in fresh apples using water assisted radio frequency heating. *Postharvest Biology and Technology*, 40(1): 89-96.
33. Wang, S. Monzon, M. Gazit, Y. Tang, J. Mitcham, E. J. and Armstrong, J. W. 2005. Temperature-Dependent Dielectric Properties of Selected Subtropical and Tropical Fruits and Associated Insect Pests, *Transactions of the ASAE*, 48(5): 1873-1881.
34. Wang, Y. Tang, Y. Rasco, B. Kong, F. and Wang, S. 2008. Dielectric properties of salmon fillets as a function of temperature and composition, *Journal of Food Engineering*, 87: 236-246.
35. Wang, Y. Zhang, L. Gao, M. Tang, J. and Wang, S. 2013. Temperature- and Moisture-Dependent Dielectric Properties of Macadamia Nut Kernels, *Food and Bioprocess Technology*, 6(8): 2165-2176.
36. Yaw, K. C. 2012. Measurement of dielectric material properties application note. Rhode and Shawrtz Technical Publication.
37. Yu, D. U. Shrestha, B. L. and Baik, O. D. 2015. Radio Frequency Dielectric Properties of Bulk Canola Seeds under Different Temperatures, Moisture Contents, and Frequencies for Feasibility of Radio Frequency Disinfestation, *International Journal of Food Properties*, 18(12): 2746-2763.
38. Zhu, X. H. Guo, W. C. Wu, X. L. and 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.