

اندازه‌گیری رطوبت خرما با روش غیر مخرب دی‌الکتریک

- رحمت‌اله باقری^۱، سیداحمد میره‌ای^{۲*}، مرتضی صادقی^۳، امین‌اله معصومی^۴، شهرام موم‌کش^۵
۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه ماشین‌های کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان
 ۲. استادیار، گروه ماشین‌های کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان
 ۳. دانشیار، گروه ماشین‌های کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان
 ۴. استادیار، گروه ماشین‌های کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان
 ۵. دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه ماشین‌های کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان
- (تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۷/۲۰ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۳/۳/۴)

چکیده

برآورد سریع و غیر مخرب رطوبت اهمیت بسزایی در مدیریت برداشت، انبارداری، فروش، و فراوری خرما دارد. در این تحقیق با روش خازن با صفحات موازی، ولتاژ متناوب سینوسی به محصول خرما اعمال و با دستگاه اسپکتروم آنالایزر پاسخ سیگنال خروجی مدار در محدوده فرکانسی ۱ تا ۱۰۰ MHz اندازه‌گیری گردید. از مدل‌های رگرسیون خطی چندمتغیره (MLR) به منظور استخراج رابطه بین رطوبت و مقادیر توان در فرکانس‌های گوناگون استفاده شد. نتایج مدل‌سازی با استفاده از تمامی محدوده فرکانس اعمال شده نشان داد که درصد رطوبت با R^2_p برابر ۰/۹۵۶، ریشه میانگین مربعات خطای (RMSEP) ۵/۲۸ درصد، و نسبت انحراف استاندارد (SDR) ۲/۹۷ قابل پیش‌بینی است. پس از بررسی ضرایب رگرسیون، تعداد شش فرکانس مؤثر در مدل‌سازی رطوبت خرما به منظور سادگی روش ارائه شده، تعیین شدند. نتایج مدل‌سازی رطوبت با استفاده از شش فرکانس، مشابه نتایج بدست آمده از کل محدوده فرکانسی ارزیابی شد.

کلیدواژگان: آنالایزر، اسپکتروم مدل‌سازی، خازن، مولد تابع، نسبت انحراف استاندارد.

مقدمه

در سال‌های اخیر توجه شایانی به روش‌های غیر مخرب برای ارزیابی محصولات کشاورزی شده است. هدف از توسعه این روش‌ها، برآورد ویژگی‌های کیفی و همچنین تشخیص عیوب و آفت‌های داخلی محصول به نحوی سریع، غیر مخرب، و قابل اطمینان است. امروزه روش‌های غیر مخرب بسیار متنوعی شرح و بسط یافته‌اند که قادر به تشخیص مؤلفه‌های گوناگون کیفیت در طیف وسیعی از محصولات کشاورزی شده‌اند (Jha, 2010). روش‌های اپتیکی مانند اسپکتروسکوپی NIR^۱ یا Vis/NIR، و تصویر برداری فراطیفی^۲، روش‌های مکانیکی مانند روش‌های ضربه، تحریک اجباری^۳، صوتی، و فراصوت^۴، روش‌های تصویربرداری تشدید مغناطیسی هسته (MRI)^۵، روش‌های الکتریکی مانند روش دی‌الکتریک و غیره از روش‌هایی هستند

که کاربرد آن‌ها در تشخیص غیر مخرب مؤلفه‌های کیفیت محصولات کشاورزی در مقالات متعددی گزارش شده است (Venkatesh & Nelson, 2008؛ Jha, 2010؛ Sun, 2008؛ Raghavan, 2005).

در میان روش‌های غیر مخرب، روش دی‌الکتریک به دلیل مزایایی همچون ارتباط مقادیر ثابت دی‌الکتریک با برخی مؤلفه‌های کیفی محصول مانند رطوبت، سرعت بالا (Nelson, 2005)، هزینه کمتر در مقایسه با بسیاری از روش‌های غیر مخرب دیگر، و کارایی بالا در صنعت کشاورزی (Soltani et al., 2011) مانند طراحی و ساخت سامانه‌های فراوری محصولات، کنترل کیفیت، و مانند اینها توجه محققان بسیاری را جلب کرده است (Guo et al., 2011؛ Mckeown et al., 2012؛ Nelson, 2010؛ Anonymous, 2006).

بر مبنای روش دی‌الکتریک، هنگامی که ماده‌ای درون میدان الکتریکی متناوب قرار گیرد، ذرات باردار مثبت و منفی دائماً نسبت به حرکت تمایل نشان می‌دهند. درون محصولات کشاورزی حرکت کاتیون‌ها، آنیون‌ها، و مولکول‌های قطبی که در مقایسه با دیگر ذرات بیشترین مصرف انرژی را به خود اختصاص

* نویسنده مسئول: samireei@cc.iut.ac.ir

1. Near Infrared Spectroscopy
2. Hyper Spectral Imaging
3. Forced Excitation
4. Sonic & Ultrasonic Testing
5. Nuclear Magnetic Resonance Imaging

می‌دهند، نیاز به رطوبت دارند. بنابراین، با اندازه‌گیری ضریب دی‌الکتریک محصولات کشاورزی می‌توان مقدار رطوبت را تشخیص داد (Mckeown et al., 2012). تاکنون محققان روش‌های گوناگونی برای اندازه‌گیری خواص دی‌الکتریک در طیف وسیعی از محصولات کشاورزی و صنایع غذایی گسترش داده‌اند. این روش‌ها شامل اندازه‌گیری‌های هدایت‌گر موج^۱، سلول مقاومتی^۲، خازن با صفحات موازی^۳، مدار گلوپی^۴ (لامپد)، پروب کواکسیال^۵، خط انتقال^۶، حفره تشدیدکننده^۷، فضای باز^۸، و طیف‌نگاری حوزه زمان^۹ هستند (Hlavacova, 2003; Sosa-Morales et al., 2010). برای مثال، Puranik et al. (1991) با روش انعکاس‌سنجی حوزه‌ی زمان در محدوده ۱۰ MHz تا ۱۰ GHz، خواص دی‌الکتریک ترکیب آب و عسل، Berbert et al. (2001) با روش صفحات موازی در محدوده ۷۵ kHz تا ۵ MHz، رطوبت دانه قهوه به‌منظور استفاده در رطوبت‌سنج‌های بر خط برای کنترل اتوماتیک خشک‌کن‌های قهوه، Guo et al. (2007) با روش کواکسیال در ۵۱ فرکانس از ۱۰ تا ۱۸۰۰ MHz، مواد جامد محلول، سفتی، و رطوبت سه رقم سبب در مدت انبارداری، Castro-Giráldez et al. (2010) با روش صفحات موازی در محدوده فرکانسی ۵۰ تا ۵۰۰ MHz، مقدار قند و اسید مالیک سبب در طول دوران رسیدگی، Ragni et al. (2010) با روش هدایت‌گر موج در محدوده ۳ تا ۲۰ GHz، شاخص‌های کیفی تخم‌مرغ، Sacilik & Colak (2010) با روش صفحات موازی در محدوده ۱ تا ۱۰۰ MHz، رطوبت دانه‌های ذرت، Soltani et al. (2011) با استفاده از صفحات موازی در فرکانس‌های ۱۰ و kHz و ۱۰۰ و ۱ MHz، مواد جامد محلول و سفتی موز، و Castro-Giráldez et al. (2011) با روش کواکسیال در محدوده ۵۰۰ MHz تا ۲۰ GHz، کنترل رفتار تراوشی در کیوی را تعیین کردند.

هدف از این تحقیق بررسی توانایی روش دی‌الکتریک در محدوده فرکانسی ۱ تا ۱۰۰ MHz با دستگاه اسپکتروم آنالایزر و در حالت صفحات موازی در اندازه‌گیری رطوبت خرمای رقم مضافتی و همچنین مدل‌سازی رطوبت با استفاده از داده‌های دی‌الکتریک است. انجام‌دادن چنین تحقیقی می‌تواند در تکوین سیستمی قابل حمل به‌منظور تعیین سریع رطوبت خرما بسیار مفید و مؤثر باشد.

مواد و روش‌ها

تهیه نمونه‌ها

در این تحقیق، نمونه‌های خرمای رقم مضافتی در چهار تاریخ گوناگون برداشت (۲۱ تیرماه، ۱۰ و ۲۴ مردادماه، و ۱۵ شهریورماه سال ۱۳۹۱) از نخل‌های متفاوت متعلق به مرکز تحقیقات کشاورزی شهید مقبلی واقع در شهرستان جیرفت استان کرمان تهیه شدند. خرماهای برداشت‌شده در حداقل زمان ممکن به آزمایشگاه خواص فیزیکی گروه مهندسی مکانیک ماشین‌های کشاورزی دانشگاه صنعتی اصفهان منتقل و در یخچال در دمای ۵ درجه سلسیوس نگهداری شدند. از بین نمونه‌های تهیه‌شده در هر تاریخ برداشت، تعداد ۲۵ نمونه سالم که به‌خوبی معرف هر یک از مراحل گوناگون رسیدگی خرما (شامل کیمری، خارک، رطب، و خرما یا تمر) بودند به‌طور

از طرف دیگر، اندازه‌گیری رطوبت خرما می‌تواند نقش مهمی در بهینه‌سازی زمان برداشت، انبارمانی، و کیفیت مناسب در زمان فروش این محصول مهم داشته باشد (Mireei, et al.).

1. Wave Guide Measurements
2. Resistivity Cell
3. Parallel Plate
4. Lumped Circuit
5. Coaxial Probe
6. Transmission Line
7. Resonant Cavity
8. Free Space
9. Time Domain Spectroscopy

به مدت ۷۲ ساعت و محاسبه درصد کاهش وزن بر مبنای وزن تر نمونه بود (Elleuch et al. 2008; Keramat Jahromi et al. 2008).

تحلیل داده‌ها

همان‌طور که در شکل ۱ نشان داده شده است، صفحات موازی، نمونه خرما، و هوای محصورشده بین خرما و صفحات را می‌توان به صورت خازنی در نظر گرفت. بنابراین، ضریب دی‌الکتریک خازن شامل ضرایب دی‌الکتریک نمونه و هوای محصورشده است. اما از آنجا که حجم هوا و ضریب دی‌الکتریک آن در مقایسه با نمونه بسیار کمتر است، می‌توان از ضریب دی‌الکتریک هوا صرف نظر و ضریب دی‌الکتریک خازن را با برابر با ضریب دی‌الکتریک نمونه خرما فرض کرد.

از طرفی دیگر، ظرفیت هر خازن را می‌توان با رابطه ۱ به دست آورد (Kharazizadeh, 1991):

$$C = \epsilon_r \frac{A}{D} \times (8.854 \times 10^{-12}) \quad (\text{رابطه ۱})$$

که در آن C ظرفیت خازن (F)، A مساحت صفحات خازن (m^2)، D فاصله میان صفحات (m)، و ϵ_r گذردهی نسبی گذردهی ماده دی‌الکتریک نسبت به هوا) است. توان مصرفی خازن نیز برابر است با:

$$P = \frac{V^2}{2 X_c} \quad (\text{رابطه ۲})$$

که در آن P توان مصرفی خازن (W)، V بیشینه ولتاژ سینوسی (V) است که به دو سر خازن اعمال می‌شود، و X_c مقاومت معادل خازن (Ω) است که خود از رابطه ۳ به دست می‌آید:

$$X_c = \frac{1}{2\pi fC} \quad (\text{رابطه ۳})$$

که در آن f فرکانس (Hz) است.

با جایگذاری روابط ۱ و ۳ در رابطه ۲ توان مصرفی خازن مطابق رابطه ۴ به دست می‌آید:

$$P = (8.854 \times 10^{-12}) \pi \epsilon_r V^2 f \frac{A}{D} \quad (\text{رابطه ۴})$$

طبق رابطه ۴، توان مصرفی در هر خازن که به طور عمده شامل توان الکتریکی ذخیره‌شده و اتلافی خازن است، با مقادیر گذردهی دی‌الکتریک رابطه مستقیم دارد. بنابراین، برای سادگی بیشتر می‌توان به جای مقادیر دی‌الکتریک، از مقادیر توان مصرفی در خازن برای مدل‌سازی رطوبت محصول استفاده کرد. بدین منظور، پس از جمع‌آوری داده‌ها، نمونه‌ها ابتدا به شیوه کاملاً تصادفی به دو دسته کالیبراسیون (شامل ۷۵ درصد کل

تصادفی انتخاب و برای آزمایش استفاده شدند. به نحوی که در مجموع تعداد ۱۰۰ عدد نمونه سالم برای کل آزمایش‌ها استفاده شد. قبل از شروع آزمایش‌ها، نمونه‌ها حداقل به مدت ۲ ساعت از یخچال خارج شدند تا در هنگام آزمایش به تعادل با دمای اتاق (حدود ۲۵ درجه سلسیوس) برسند. سپس هر نمونه شماره‌گذاری شد و ابعاد اصلی و جرم آن به ترتیب با کولیس دیجیتال با دقت ۰/۰۱ میلی‌متر و ترازوی دیجیتال (مدل A&D GF-400، ساخت ژاپن) با دقت ۰/۰۰۱ گرم اندازه‌گیری و ثبت شد.

سامانه اندازه‌گیری داده‌های دی‌الکتریک

برای انجام آزمایش، سامانه اندازه‌گیری داده‌های دی‌الکتریک محصول خرما طراحی گردید. این سامانه شامل یک دستگاه مولد تابع^۱ مدل TR4153A، یک دستگاه اسپکتروم آنالایزر^۲ مدل R4131D (هر دو ساخت شرکت ADVANTEST)، دو عدد صفحه موازی، و محفظه نگهداری نمونه است. صفحات موازی از جنس آلومینیوم و بیضی‌شکل با قطرهای کوچک و بزرگ به ترتیب ۲۷ و ۴۲ میلی‌متر بودند که با استفاده از پروب‌های کواکسیال به مولد تابع و اسپکتروم آنالایزر مطابق شکل ۱ متصل می‌شدند. این صفحات در فاصله یکسان نسبت به یکدیگر در محفظه نگهداری نمونه قرار می‌گرفتند. دستگاه مولد تابع در محدوده فرکانسی ۱ تا ۱۰۰ MHz اختلاف ولتاژ سینوسی با بیشینه مقدار ۴۰ میلی‌ولت را به دو سر مدار اعمال می‌کند. در نتیجه میدان‌های الکتریکی متناوبی بین صفحات موازی به وجود می‌آید که دستگاه اسپکتروم آنالایزر توان مصرفی مدار را به تفکیک فرکانس اندازه‌گیری و روی صفحه نمایشگر خود نشان می‌دهد. آزمایش‌ها به دو صورت، یکی بدون نمونه و دیگری با قراردادن هر نمونه در داخل سامانه در محدوده فرکانسی مورد نظر انجام گردیدند تا با مقایسه این حالات ضرایب دی‌الکتریک نمونه‌ها به دست آیند. این آزمایش‌ها در پژوهشکده فلوا واقع در دانشگاه صنعتی اصفهان انجام گرفت. بلافاصله پس از جمع‌آوری داده‌های دی‌الکتریک، رطوبت نمونه‌ها با روش مرجع اندازه‌گیری شد. بدین منظور هر نمونه خرما ابتدا بریده و هسته داخلی آن برداشته شد و سپس از باقیمانده آن برای اندازه‌گیری رطوبت استفاده شد. روش اندازه‌گیری رطوبت خرما مبتنی بر استاندارد AOAC شامل خشک‌کردن نمونه در آن در دمای ۱۰۵ درجه سلسیوس

1. Function Generator
2. Spectrum Analyzer

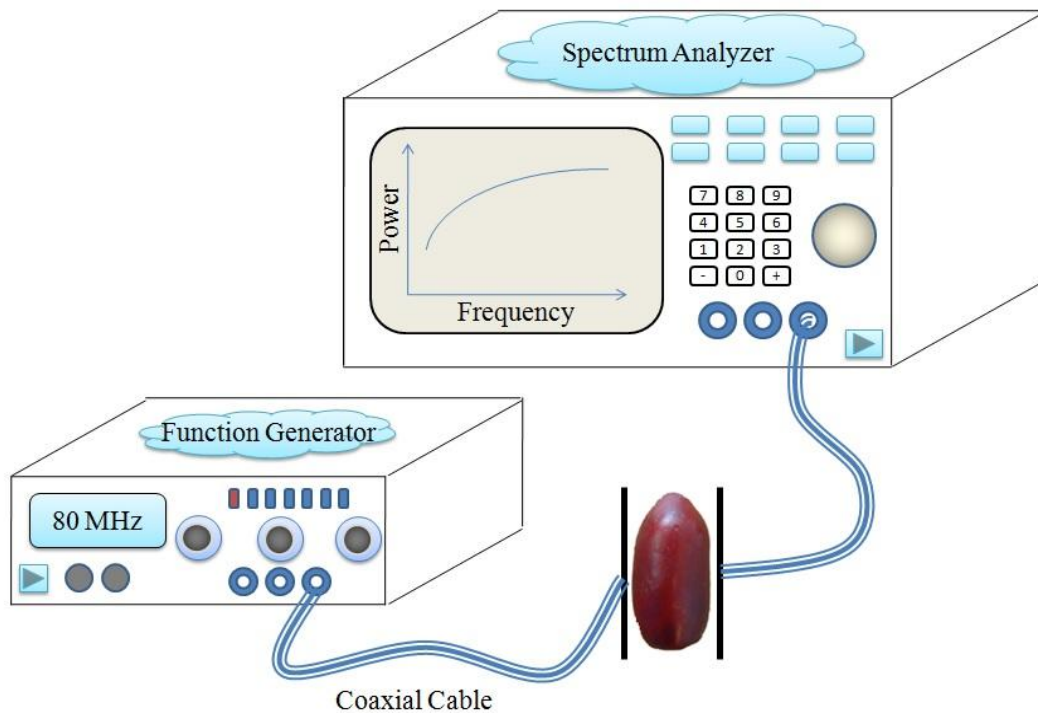
(RMSEP)، و نسبت انحراف استاندارد (SDR) است. SDR بهترین پارامتر در ارزیابی قابلیت پیشگویی مدل‌های رگرسیون محسوب می‌شود که با تقسیم انحراف استاندارد مقادیر رطوبت در دسته آزمون بر میانگین مربعات خطای پیش‌بینی (RMSEP) به دست می‌آید (Mireei et al., 2013).

نتایج و بحث

جدول ۱، مشخصات رطوبت خرماهای مضافتی استفاده شده در دو دسته کالیبراسیون و آزمون را نشان می‌دهد. همان‌طور که در جدول ۱ نشان داده شده است، نزدیکی مقادیر حداقل، حداکثر، و همچنین ضرایب تغییرپذیری رطوبت در دو دسته کالیبراسیون و آزمون بیانگر این است که نمونه‌ها به‌طور یکنواخت در دو دسته توزیع شده‌اند. همچنین بازه وسیع دامنه رطوبتی نمونه‌ها (۳۴ تا ۸۱ درصد) نشان‌دهنده آن است که نمونه‌های انتخاب شده کلیه مراحل گوناگون رسیدگی خرما را پوشش می‌دهند.

نمونه‌ها) و آزمون (شامل ۲۵ درصد کل نمونه‌ها) تقسیم شدند. از دسته داده‌های کالیبراسیون برای مدل‌سازی رابطه بین توان مصرفی خازن با رطوبت و از دسته داده‌های آزمون، به‌منظور اعتبارسنجی و تعیین قدرت پیش‌بینی مدل استفاده شد. در این تحقیق، برای مدل‌سازی از روش رگرسیون خطی چندمتغیره (MLR)^۱ استفاده شد. در این روش، ابتدا از مقادیر توان در کل فرکانس‌های ثبت شده در دامنه ۱ تا ۱۰۰ MHz به‌عنوان ورودی (متغیر مستقل) برای مدل‌سازی و برآورد رطوبت (متغیر وابسته) استفاده گردید. در مرحله بعد با مشاهده منحنی ضرایب کالیبراسیون، توانایی هر فرکانس در پیش‌بینی مقدار رطوبت ارزیابی شد. سپس تعداد ۶ فرکانس که بیشترین توانایی در برآورد رطوبت داشتند، شناسایی و از آن‌ها برای مدل‌سازی رطوبت با روش MLR استفاده شد.

پارامترهای آماری برای ارزیابی مدل‌ها شامل مقادیر ضریب تبیین در دو مرحله کالیبراسیون (R_c^2) و آزمون (R_p^2)، ریشه میانگین مربعات خطای کالیبراسیون (RMSEC) و آزمون

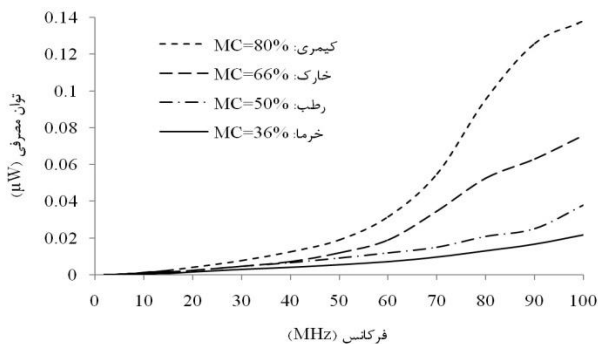


شکل ۱. طرح‌واره مدار استفاده شده برای اندازه‌گیری ثابت دی‌الکتریک خرما

جدول ۱. مشخصات رطوبت نمونه‌های خرماهای مضافتی (بر پایه تر) استفاده شده برای مدل‌سازی رطوبت با استفاده از روش دی‌الکتریک

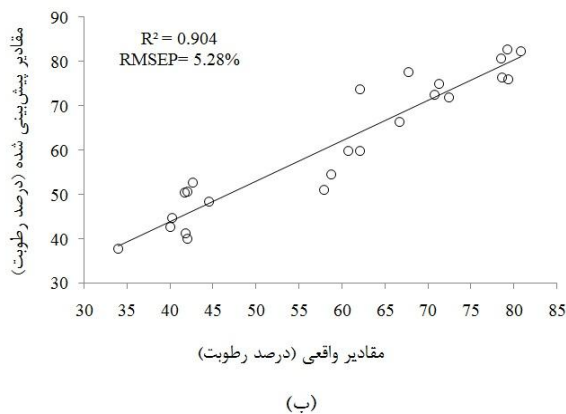
| دسته داده | تعداد نمونه‌ها | حداقل | حداکثر | میانگین | انحراف استاندارد | ضریب تغییرپذیری (درصد) |
|-------------|----------------|-------|--------|---------|------------------|------------------------|
| کالیبراسیون | ۷۵ | ۳۵/۷ | ۸۱ | ۵۸/۸۶ | ۱۵/۶۷ | ۲۶/۶۲ |
| آزمون | ۲۵ | ۳۴ | ۸۰/۷۸ | ۵۸/۹۷ | ۱۵/۷ | ۲۶/۶۲ |

دی‌الکتریک کاهش می‌یابد که این امر مشابه نتایج تحقیقات گذشته است (Nelson 1991؛ Sacilik *et al.*, 2007).

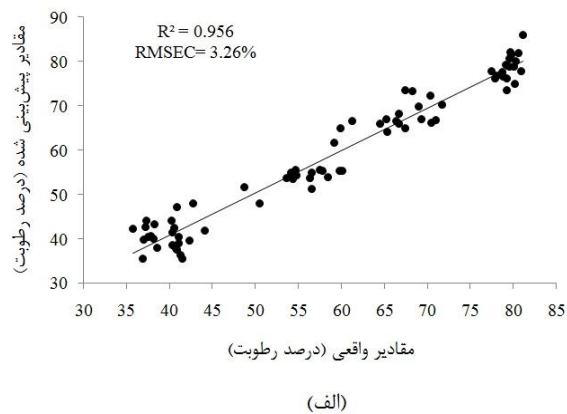


شکل ۲. ارتباط توان مصرفی خازن با فرکانس در مراحل گوناگون رسیدگی خرما

شکل ۳ مقادیر رطوبت به‌دست‌آمده با مدل MLR در دامنه ۱ تا ۱۰۰ MHz در برابر مقادیر واقعی اندازه‌گیری‌شده به‌وسیله روش‌های مرجع در دو مرحله کالیبراسیون و آزمون را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، ضرایب تبیین (R^2) ۰/۹۵۶ و ۰/۹۰۴ و ریشه میانگین مربعات خطای ۳/۲۶ و ۵/۲۸ درصد برای مراحل به‌ترتیب کالیبراسیون و آزمون، نشان‌دهنده توانایی مدل‌های برآورد رطوبت از روی داده‌های دی‌الکتریک در دامنه ۱ تا ۱۰۰ MHz است.



(ب)



(الف)

شکل ۳. مقادیر رطوبت به‌دست‌آمده با مدل MLR در دامنه ۱ تا ۱۰۰ MHz در برابر مقادیر واقعی اندازه‌گیری‌شده به‌وسیله روش‌های مرجع در دو مرحله الف. کالیبراسیون و ب. آزمون

رگرسیون انتخاب شدند. این فرکانس‌ها، عبارت بودند از فرکانس‌های ۴، ۱۴، ۲۰، ۴۰، ۶۰، و ۹۰ MHz. از آنجا که هدف نهایی از انجام این تحقیق، توسعه سیستمی قابل حمل به‌منظور تعیین سریع رطوبت خرماست، نمی‌توان از تمام فرکانس‌ها در توسعه چنین سامانه‌ای استفاده کرد. همان‌طور که در قسمت مواد و روش‌ها نیز توضیح داده شد، تأمین تمامی فرکانس‌ها در دامنه ۱ تا ۱۰۰ MHz نیازمند دستگاه‌های پیشرفته و پرهزینه

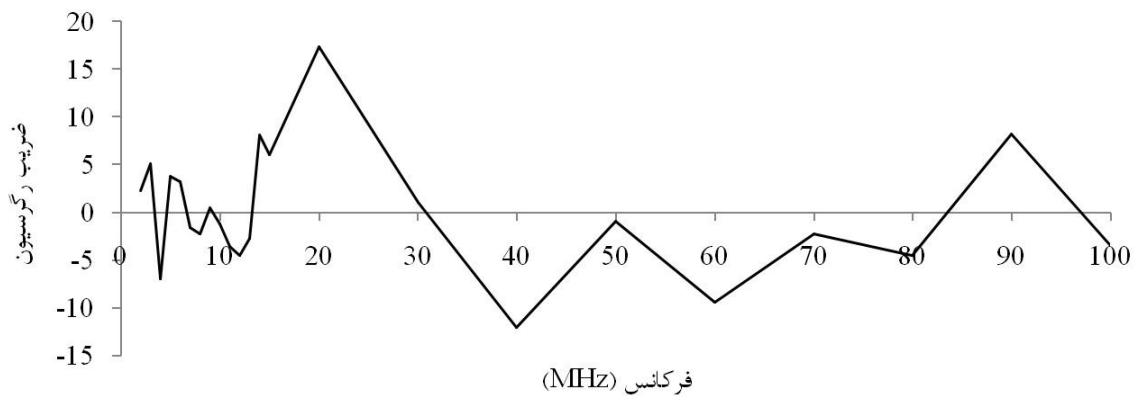
شکل ۲ نمودارهای توان مصرفی خازن برحسب فرکانس را در مراحل گوناگون رسیدگی خرما شامل کیمری، خارک، رطب، و خرما نشان می‌دهد. مطابق شکل، در کلیه مراحل رسیدگی، با افزایش فرکانس، توان مصرفی نیز افزایش می‌یابد. ذرات باردار ماده دی‌الکتریک در اثر قرارگیری در میدان الکتریکی متناوب، مطابق با فرکانس اعمالی شروع به حرکت می‌کنند. در محدوده فرکانسی این تحقیق و درون محصولات کشاورزی و غذایی، حرکات چرخشی مولکول‌های قطبی آب و یون‌های محلول در آن، بیشترین مصرف انرژی را به‌خود اختصاص می‌دهند. با افزایش فرکانس، در مدت زمان کمتر به انرژی بیشتری برای غلبه بر اصطکاک موجود میان این ذرات نیاز است (Anonymous, 2006)، به همین دلیل، با افزایش فرکانس، توان مصرفی نیز افزایش می‌یابد.

همچنین شکل ۲ نشان می‌دهد که در هر فرکانس، توان مصرفی با افزایش درصد رطوبت، افزایش می‌یابد. این امر بدان علت است که با افزایش رطوبت، زمینه افزایش حضور تعداد ذرات باردار و آزادی حرکت آن‌ها بیشتر می‌گردد. از آنجا که توان مصرفی خازن با مقادیر گذردهی دی‌الکتریک رابطه مستقیم دارد (رابطه ۴)، می‌توان گفت با پیشرفت مراحل رسیدگی و همزمان کاهش رطوبت محصول، ضریب گذردهی

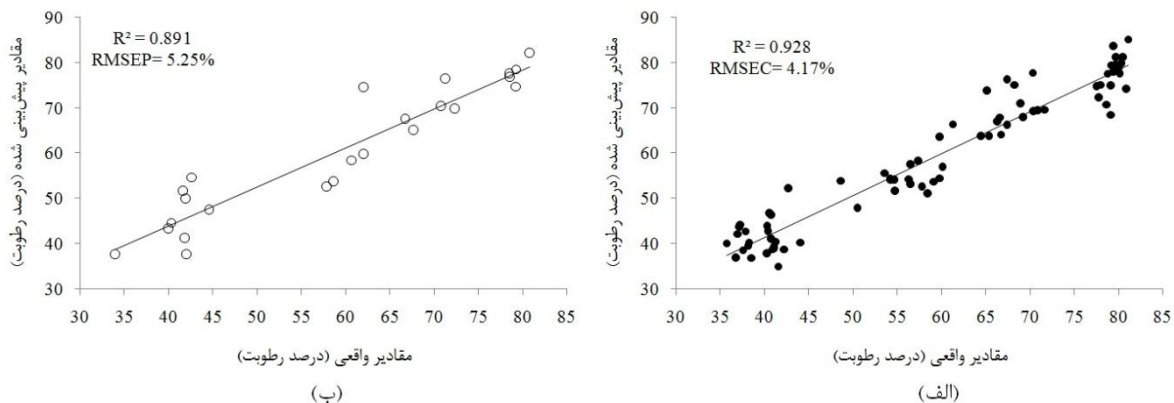
شکل ۴ منحنی ضرایب رگرسیون MLR را در مقایسه با فرکانس در دامنه ۱ تا ۱۰۰ MHz نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، تأثیر برخی فرکانس‌ها در برآورد رطوبت نسبتاً بالا است، در حالی که در برخی فرکانس‌های دیگر، مقادیر ضریب رگرسیون کم و بعضاً صفر است. به‌منظور تشخیص فرکانس‌های مؤثرتر در برآورد رطوبت خرما، مقادیر قدر مطلق ضرایب رگرسیون استخراج و تعداد ۶ فرکانس با بالاترین ضرایب

مشخص نیز، مدل‌های پیش‌بینی رطوبت دقت و توانایی لازم را ندارند. در این تحقیق تعداد ۶ فرکانس به نحوی انتخاب شدند که در حقیقت مصالحه‌ای بین پیچیدگی و هزینه از یک طرف و دقت و توانایی لازم برای پیش‌بینی رطوبت از طرف دیگر، در سامانه‌ای باشد که برای کاربرد قابل حمل و مزرعه‌ای در دست طراحی و ساخت است.

اسپکتروم آنالیزر و مولد تابع است که مناسب کاربرد مزرعه‌ای نیستند. اما با تشخیص چند فرکانس مهم در برآورد رطوبت، می‌توان سامانه‌ای طراحی کرد که مقادیر توان در این چند فرکانس را اندازه‌گیری کند. هرچه تعداد فرکانس‌ها در چنین سامانه‌ای کمتر باشد، پیچیدگی و در نتیجه هزینه تمام‌شده آن نیز کمتر خواهد بود. با این حال، کمتر از یک تعداد فرکانس



شکل ۴. ضرایب رگرسیون مدل برآورد رطوبت نسبت به فرکانس در دامنه ۱ تا ۱۰۰ MHz



شکل ۵. مقادیر رطوبت به دست آمده با مدل MLR با استفاده از شش فرکانس ۴، ۱۴، ۲۰، ۴۰، ۶۰ و ۹۰ MHz در برابر مقادیر واقعی اندازه‌گیری شده به وسیله روش‌های مرجع در دو مرحله الف. کالیبراسیون و ب. آزمون

بهبتری در مرحله کالیبراسیون در مقایسه با مدل MLR با استفاده از شش فرکانس شد، اما در مرحله آزمون هر دو مدل دارای نتایج مشابهی بودند. این امر بدان معناست که تعداد ۶ فرکانس انتخاب‌شده اطلاعات لازم برای تخمین رطوبت از روی داده‌های دی‌الکتریک در دامنه ۱ تا ۱۰۰ MHz را به دست می‌دهند و مابقی فرکانس‌ها در این دامنه، چندان در مدل‌سازی رطوبت خرما مؤثر نیستند.

همان‌طور که جدول ۲ نشان می‌دهد، مقدار نسبت انحراف استاندارد (SDR) به دست آمده (SDR = ۲/۹۹) نشان از توانایی خوب روش دی‌الکتریک در برآورد رطوبت خرماست. با این حال، نتایج به دست آمده نسبتاً ضعیف‌تر از نتایج پیش‌بینی رطوبت

مقادیر رطوبت به دست آمده توسط مدل MLR با استفاده از شش فرکانس ۴، ۱۴، ۲۰، ۴۰، ۶۰ و ۹۰ MHz در برابر مقادیر واقعی اندازه‌گیری شده با روش‌های مرجع در دو مرحله کالیبراسیون و آزمون در شکل ۵ نشان داده شده است. همان‌طور که نشان داده شده است، ضرایب تبیین ۰/۹۲۸ و ۰/۸۹۱ و همچنین ریشه میانگین مربعات خطای ۴/۱۷ و ۵/۲۵ درصد در دو مرحله به ترتیب کالیبراسیون و آزمون نشان‌دهنده، همراه با نتایج نسبتاً خوب مدل‌سازی رطوبت با استفاده از شش فرکانس ذکر شده است. با این حال، همان‌طور که در جدول ۲ نیز نشان داده شده است، با اینکه مدل MLR با استفاده از تمامی فرکانس‌ها در دامنه ۱ تا ۱۰۰ MHz منجر به نتایج نسبتاً

رطوبت در این ناحیه مربوط به مهیا کردن زمینه به‌منظور افزایش حضور تعداد یون‌های محلول و همچنین افزایش تعداد مولکول‌های قطبی است که انرژی الکتریکی را جذب و یا ذخیره می‌کنند. با این وجود، هزینه ساخت سامانه‌های مبتنی بر روش دی‌الکتریک به مراتب کمتر از سامانه‌های مبتنی بر اسپیکتروسکوپی NIR و غیر قابل مقایسه با سامانه‌های FT-NIR است که این امر می‌تواند توسعه چنین سامانه‌هایی را با وجود دقت کمتر، توجیه‌پذیر کند.

خرما با روش اسپیکتروسکوپی NIR در وضعیت تقابلی (۳/۶۰ SDR= Mireei, et al. 2010b) و ضعیف‌تر از نتایج حاصل با روش اسپیکتروسکوپی FT-NIR (۷/۴۰ SDR= Mireei, et al. 2010b) است. دلیل این امر، وجود باندهای جذب بسیار قوی آب در ناحیه فرسرخ نزدیک (NIR) است که به تشکیل پیک‌های جذب آب در طیف NIR به‌دست‌آمده از محصولات کشاورزی می‌انجامد. چنین باندهای جذب قوی آب در فرکانس‌های ۱ تا ۱۰۰ MHz هرگز مشاهده نمی‌شود و تأثیر

جدول ۲. نتایج مدل‌سازی رطوبت با استفاده از داده‌های دی‌الکتریک در دامنه ۱ تا ۱۰۰ MHz و شش فرکانس ۹۰، ۶۰، ۴۰، ۲۰، ۱۴، ۴ و ۹۰ MHz

| آزمون | | | کالیبراسیون | | فرکانس‌های استفاده‌شده (MHz) |
|-------|-------|---------|-------------|---------|------------------------------|
| SDR | RMSEP | R^2_p | RMSEC | R^2_c | |
| ۲/۹۷ | ۵/۲۸ | ۰/۹۰۴ | ۳/۲۶ | ۰/۹۵۶ | دامنه ۱ تا ۱۰۰ |
| ۲/۹۹ | ۵/۲۵ | ۰/۸۹۱ | ۴/۱۷ | ۰/۹۲۸ | ۹۰، ۶۰، ۴۰، ۲۰، ۱۴، ۴ |

نتیجه‌گیری
 نتایج این تحقیق نشان داد که روش دی‌الکتریک در دامنه ۱ تا ۱۰۰ MHz، روشی توانمند در برآورد رطوبت خرماست. مقادیر توان مصرفی خازن متشکل از صفحات موازی و خرما با افزایش فرکانس در هر نمونه و همچنین افزایش رطوبت در هر فرکانس، زیاد می‌شد. مدل‌های MLR در دامنه ۱ تا ۱۰۰ MHz توانستند رطوبت خرما را با $R^2_p=0/904$ ، $RMSEP=5/28$ و SDR قابل قبول ۲/۹۷ پیش‌بینی کنند. این در حالی است که با استفاده از مدل‌های ساده‌تر و شش فرکانس مؤثرتر ۴، ۱۴، ۲۰، ۴۰، ۶۰، ۹۰ MHz، رطوبت خرما با نتایج مشابه $R^2_p=0/891$ ، $RMSEP=5/25$ و SDR برابر ۲/۹۹ قابل پیش‌بینی است. نتایج این تحقیق می‌تواند در توسعه سامانه مبتنی بر اندازه‌گیری توان مصرفی خازن در شش فرکانس توصیه‌شده به‌منظور تشخیص سریع و غیر مخرب رطوبت خرما، استفاده شود. با توجه به اهمیت رطوبت در خرما، توسعه چنین سامانه‌ای می‌تواند در زمینه‌های مدیریت برداشت، انبارداری، فروش، و فراوری خرما نقش بسزایی داشته باشد.

REFERENCES

- Anonymous. (2006). Basics of measuring the dielectric properties of materials, Application Note. *Agilent literature number*, 5989–2589 EN.
- Berbert, P. A., Queiroz, D. M., Sousa, E. F., Molina, M. B., Melo, E. C. & Faroni, L. R. D. (2001). Dielectric properties of parchment coffee. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 80(1), 65-80.
- Castro-Giráldez, M., Fito, P. J., Dalla Rosa, M. & Fito, P. (2011). Application of microwaves dielectric spectroscopy for controlling osmotic dehydration of kiwifruit (*Actinidia Deliciosa* cv Hayward). *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 12(4), 623-627.
- Castro-Giráldez, M., Fito, P. J., Chenoll, C. & Fito, P. (2010). Development of a dielectric spectroscopy technique for the determination of apple (Granny Smith) maturity. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 11(4), 749-754.
- Elleuch, M., Besbes, S., Roiseux, O., Blecker, C., Deroanne, C., Drira, N. & Attia, H. (2008). Date flesh: chemical composition and characteristics of the dietary fibre. *Journal of Food Chemistry*, 111, 676-682.
- Guo, W., Nelson, S. O., Trabelsi, S., & Kays, S. J. (2007). 10–1800 MHz dielectric properties of fresh apples during storage. *Journal of Food Engineering*, 83, 562-569.
- Guo, W., Zhu, X., Nelson, S. O., Yue, R., Liu, H. & Liu, Y. (2011). Maturity effects on dielectric properties of apples from 10 to 4500 MHz. *LWT-Food Science and Technology*, 44, 224-230.
- Hlavacova, Z. (2003). Low frequency electric properties utilization in agriculture and food treatment. *Research in Agricultural Engineering*, 49(4), 125-136.
- Ismail, K. M. & Alyahya, S. A. (2003). A quick method for measuring date moisture content. *Transaction of ASAE*, 46(2), 401-405.
- Jha, S. N. (2011). *Nondestructive evaluation of food quality, Theory and Practice*. Berlin: Springer.
- Keramat Jahromi, M., Jafari, A., Rafiee, S., Mirasheh, R. & Mohtasebi, S. S. (2008). Changes in physical properties of date fruit (cv. Shahani)

- during three edible stages of ripening. *American-Eurasian Journal of Agricultural and Environmental Science*, 3(1), 132-136.
- Kharazizadeh, S. (1991). *Fundamentals of electronics*. Tehran: Mojtame Fanni Tehran. (In Farsi)
- Mckeown, M., Trabelsi, S., Tollner, E. & Nelson, S. O. (2012). Dielectric spectroscopy measurements for moisture prediction in *Vidalia* onions. *Journal of Food Engineering*, 111, 505-510.
- Mireei, S. A., Mohtasebi, S. S., Massudi, R., Rafiee, S. & Arabanian, A. S. (2010a). Feasibility of a near infrared spectroscopy for analysis of date fruits. *International Agrophysics*, 24, 351-356.
- Mireei, S. A., Mohtasebi, S. S., Massudi, R., Rafiee, S. & Arabanian, A. S. (2010b). Using FT-NIR spectroscopy in nondestructive maturity determination of 'Shahani' date fruits. *Iranian Journal of Biosystems Engineering*, 41(2), 113-120. (In Farsi)
- Mireei, S. A., Mohtasebi, S. S., Sadeghi, M. & Rafiee, S. (2013). Comparison between reflectance, transmission and interactance modes of NIR spectroscopy in non-destructive moisture content determining of 'Mazafati' date fruit. *Iranian Journal of Biosystems Engineering*, 43(2), 133-141. (In Farsi)
- Nelson, S. O. (1991). Dielectric properties of agricultural products measurements and applications. *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, 26(5), 845-869.
- Nelson, S. O. (2005). Dielectric spectroscopy in agriculture. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 351, 2940-2944.
- Nelson, S. O. (2008). Dielectric properties of agricultural products and some applications. *Research in Agricultural Engineering*, 54, 104-112.
- Nelson, S. O. (2010). Fundamentals of dielectric properties measurements and agricultural applications. *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy*, 44(2), 98-113.
- Puranik, S., Kumbhakarne, A. & Mehrotra, S. (1991). Dielectric properties of honey-water mixtures between 10 MHz and 10 GHz using time domain technique. *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy*, 26(4), 196-201.
- Ragni, L., Cevoli, C. & Berardinelli, A. (2010). A waveguide technique for non-destructive determination of egg quality parameters. *Journal of Food Engineering*, 100, 343-348.
- Sacilik, K. & Colak, A. (2010). Determination of dielectric properties of corn seeds from 1 to 100 MHz. *Powder Technology*, 203, 365-370.
- Sacilik, K., Tarimc, C. & Colak, A. (2007). Moisture content and bulk density dependence of dielectric properties of safflower seed in the radio frequency range. *Journal of Food Engineering*, 78, 1111-1116.
- Schmilovitch, Z., Hoffman, A., Egozi H. & Grinshpun, J. (2006). Determination of single-date water content by a Novel RF device. *Transaction of ASAE*, 22(3), 401-405.
- Schmilovitch, Z., Hoffman, A., Egozi, H., Ben-Zvi, R., Bernstein, Z. & Alchanatis, V. (1999). Maturity determination of fresh dates by near infrared spectrometry. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 79, 86-90.
- Soltani, M., Alimardani, R. & Omid, M. (2011). Evaluating banana ripening status from measuring dielectric properties. *Journal of Food Engineering*, 105, 625-631.
- Sosa-Morales, M. E., Valerio-Junco, L., López-Malo, A. & García, 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. (2005). An overview of dielectric properties measuring techniques. *Canadian Biosystems Engineering*, 47(7), 15-30.