

امکان سنجی استفاده از ویژگی‌های خازنی برای تعیین میزان رسیدگی سیب

علی حیاتی^۱، محمد حسین رئوفت^۲، سعادت کامگار^{۳*}، فیروز جهانی^۴

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه شیراز

۲. استاد گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه شیراز

۳. استادیار گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه شیراز

۴. دانشجوی کارشناسی ارشد گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه شیراز

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۸/۱۵ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۶/۱۰/۲۴ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۶/۱۰/۲۵)

چکیده

درجه‌بندی محصولات کشاورزی بر اساس رسیدگی برای بسیاری از میوه‌ها و سبزیجات از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. روش‌های مختلفی برای تشخیص میزان رسیدگی میوه به کار گرفته شده است که بعضی مخرب و برخی دیگر غیر مخرب هستند. در این تحقیق برای تعیین رسیدگی میوهی سیب در دوران انبارمانی بر اساس ویژگی‌های ظرفیت خازنی ابتدا یک سامانه‌ی آزمایشگاهی به منظور اندازه‌گیری ظرفیت حسگر خازنی طراحی و ساخته شد. سپس مدلی برای استخراج ثابت دی‌الکتریک سیب پیشنهاد گردید و در ادامه رابطه‌ی بین ثابت دی‌الکتریک و میزان رسیدگی میوه بررسی شد. نمونه‌ها از سیب پائیزه رقم رد دلشیز و گلدن دلشیز انتخاب شدند. تمام نمونه‌های بالغ در یک روز برداشت شدند و هر کدام از ارقام به سه گروه ۴۵ تایی، و هر گروه به سه دسته ۱۵ تایی کوچک، متوسط و بزرگ تقسیم شدند. ثابت دی‌الکتریک سیب در طی رسیدن میوه در شرایط کنترل شده دما و رطوبت اندازه‌گیری شد. نتایج این مرحله نشان داد ثابت دی‌الکتریک در طی رسیدن میوه کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر در بسامد ۱۰۰ kHz ثابت دی‌الکتریک در طی رسیدن میوه روند کاهشی منظمی را دنبال کرده و ازین رو این اطلاعات ذیقیمت است. ادامه‌ی مطالعات از جمله بررسی رابطه "زمان رسیدن - میزان مواد جامد محلول" و "زمان رسیدن - استحکام" در این بسامد انجام گرفت. نتایج این مرحله نشان داد که استحکام در طی رسیدن میوه روند کاهشی دارد و میزان مواد جامد محلول (TSS) در طی مراحل رسیدن روند افزایشی را طی می‌کند.

واژه‌های کلیدی: سیب، حسگر خازنی، بسامد، درجه بندی میوه

مقدمه

روش‌های شیمیایی (از طریق اندازه‌گیری مواد جامد در محلول) و روش‌های غیرمخرب مانند روش آکوستیک و ماشین بینایی اشاره کرد. واضح است که روش‌های مخرب را نمی‌توان در انبارها و سردخانه‌ها به شکل تجاری و مفید به کار بست زیرا موجب صرف زمان طولانی و هزینه می‌گردد. قابلیت کاربری این روش‌ها در آزمایشگاه‌ها می‌باشد. روش ماشین بینایی برای بسیاری از محصولات که کیفیت آنها وابسته به ویژگی‌های سطح میوه است مفید می‌باشد. اشعه ایکس، امواج صوت و مافوق صوت برای محصولاتی که ویژگی‌های درونی آنها با کیفیت در ارتباط است می‌تواند به کار گرفته شود. در بسیاری از میوه‌ها بهترین شاخص کیفی میزان قند موجود در میوه و میزان سفتی آن می‌باشد. اندازه‌گیری قند و استحکام نیاز به تخریب میوه و نمونه‌برداری از آن دارد. همچنین بیشتر روش‌های غیرمخرب که تاکنون ابداع شده‌اند گران‌قیمت و پیچیده هستند یا به صورت کاربردی قابل استفاده نیستند (Abbott, 1968). پس باید

درجه‌بندی میوه‌ها براساس رسیدگی فرآیندی لازم و ضروری است. یکنواختی رسیدگی میوه‌ها به هنگام حمل و نقل باعث کاهش تلفات و زیان‌های مالی ناشی از آن می‌شود. همچنین میوه‌های یکدست از لحاظ رسیدگی از بازاریسندی بیشتری برخوردارند. تشخیص میزان رسیدگی در مواقعی که رنگ ظاهری رابطه‌ای با میزان رسیدگی میوه ندارد به آسانی صورت نمی‌پذیرد و در نتیجه درجه‌بندی میوه براساس رسیدگی به آسانی ممکن نیست. بنابراین درجه‌بندی خودکار و دقیق میوه بر پایه میزان رسیدگی برای مکانیزه کردن صنعت کشاورزی در بخش فرآوری، بسته‌بندی و افزایش سودآوری مفید می‌باشد. روش‌های مختلفی برای تعیین رسیدگی میوه ابداع شده است که می‌توان به روش مخرب نظیر روش مکانیکی (استحکام)،

رابطه رگرسیونی خوبی را استخراج کنند. بهترین نتیجه در بسامد ۴۰ مگاهرتزی بدست آمد (Nelson et al., 2007). خواص دی‌الکتریک سویا را در پنج سطح مختلف رسیدگی بررسی نموده و گزارش دادند ثابت دی‌الکتریک سویا متناسب با میزان رطوبت است. ثابت دی‌الکتریک سویای تازه بیشتر از سویای خشک بود. ثابت دی‌الکتریک از ۱۸۰ برای سویای جوان تا ۴۰ برای سویای بالغ تغییر می‌کرد. همچنین مقدار پروتئین سویا رابطه معکوس با ثابت دی‌الکتریک داشت (Sirikulrat and Sirikulrat, 2008).

سیب با نام علمی مالوس دومستیکا^۱ یک میوه درختی سردسیری از تیره گلسرخیان و از زیر تیره پوامیده می‌باشد که انواع مختلفی دارد، مانند سیب گلاب، سیب سرخ، سیب سبز، سیب وحشی. سیب برای هضم غذا مفید است و همچنین حاوی ۸۷٪ آب، ویتامین‌های A، B1، B2، B6، C مواد معدنی و کلسیم، منگنز، آهن، ید، پتاسیم و فسفر است. سیب غنی از فیبر بوده و در هضم و دفع راحت به دستگاه گوارش کمک می‌کند (Jalili, 2004). موطن سیب غرب آسیا شرق اروپا و جنوب غربی سیرری گزارش شده است. از بین ۵۰ کشور عمده تولید کننده سیب در جهان، ایران با تولید ۲ هزار تن سیب در سال رتبه هفتم را در بین این کشورها پس از چین، آمریکا، لهستان و چند کشور دیگر به خود اختصاص داده است (Talai, 1998).

باتوجه مطالعات انجام شده و کمبود منابع اطلاعاتی در داخل کشور تحقیقی با هدف طراحی و ساخت یک سامانه برای اندازه‌گیری ظرفیت خازنی سیب و یافتن ارتباط میان ویژگی دی‌الکتریک میوه‌ی سیب با خواص مکانیکی و خواص شیمیایی آن، طراحی و انجام گردید.

مواد و روش‌ها

برای تعیین رسیدگی میوه‌ی سیب بر اساس ویژگی‌های ظرفیت خازنی ابتدا یک سامانه‌ی آزمایشگاهی به منظور اندازه‌گیری ظرفیت حسگر خازنی طراحی و ساخته شد. سپس مدلی برای استخراج ثابت دی‌الکتریک سیب پیشنهاد گردید و در ادامه رابطه‌ی بین ثابت دی‌الکتریک و میزان رسیدگی میوه بررسی شد. دستگاهی که بر پایه این روش عمل می‌کند می‌تواند جایگزین افراد خیره شود. از این دستگاه می‌توان در کنترل فرآیند رساندن مصنوعی میوه‌ها از جمله سیب در سردخانه‌ها استفاده نمود. دستگاه مورد نظر از بدنه، منبع تغذیه، مولد موج، میکروکنترلر AVR، نمایشگر و حسگرهای خازنی تشکیل شده

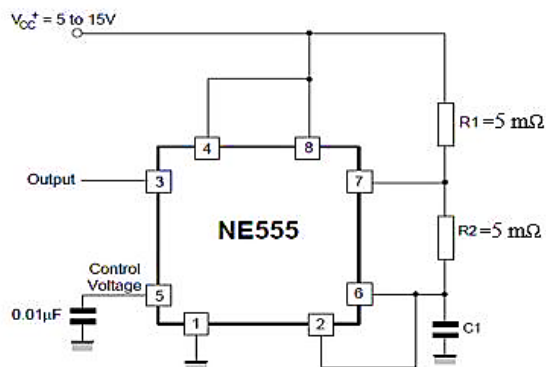
به دنبال روشی ارزان و ساده در تشخیص رسیدگی محصول بود. به نظر می‌رسد که استفاده از روش دی‌الکتریک و واسنجی آن برای میوه‌های مختلف می‌تواند در کیفیت سنجی غیرمخرب اینگونه محصولات ما را یاری دهد. این ایده بر اساس تغییر خواص دی‌الکتریک میوه در طی رسیدن مطرح شده است. ثابت دی‌الکتریک در سطوح مختلف رسیدگی با استفاده از روش خازنی اندازه‌گیری و رابطه آن با رسیدگی بررسی می‌شود.

خواص دی‌الکتریک محصولات کشاورزی همواره موضوع تحقیق بسیاری از دانشمندان می‌باشد. اولین آزمایش‌ها در رابطه با خواص دی‌الکتریک روی هویج در بسامد ۱۸ کیلوهرتز تا ۵ مگاهرتز انجام شد. رابطه ثابت دی‌الکتریک و هدایت الکتریکی را با ابعاد و رطوبت محصول، بسامد و دما بررسی و گزارش شد که ثابت دی‌الکتریک و هدایت الکتریک تا رطوبت ۸٪ ثابت بوده و سپس به سرعت رشد داشته است (Dunlap & Makower, 1945). در تحقیقی نشان داده شد که می‌توان ثابت دی‌الکتریک میوه آووکادو با قرار دادن آن بین صفحات خازن به عنوان یک ماده دی‌الکتریک، اندازه‌گیری کرد. ماده دی‌الکتریک خازن از میوه و هوا تشکیل شده بود و ماده بین خازن اندازه‌گیری شده نیز ترکیبی از خازن‌های سری-موازی بوده است. نتایج تحقیق نشان داد که ظرفیت خازنی آووکادو افزایش معنی‌داری در طی رسیدن میوه داشته است (Zachariah & Louis, 1965). در پژوهشی دیگر خواص دی‌الکتریک بعضی از مواد غذایی مانند گوشت خام، ماهی و نخود فرنگی را در بسامد ۸/۲ گیگاهرتز و در محدوده دمایی ۲۰- تا ۶۰ درجه سانتی‌گراد اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که این خواص شدیداً تحت تأثیر ترکیبات شیمیایی، ابعاد و دمای محصول است (Bengtsson & Risman, 1971).

در تحقیقی (Kato 1997) از روش خازنی برای تشخیص کیفیت هندوانه استفاده کرد. او روش جدیدی را برای میوه‌های کروی شکل براساس چگالی آنها ارائه نمود که حجم میوه را توسط خازن و جرم میوه را با ترازو اندازه می‌گرفت. او سامانه‌ای طراحی کرد که درجه پوکی و مواد جامد محلول میوه (حدود ۸۰٪ مواد جامد محلول قند می‌باشد) را براساس چگالی تخمین می‌زد. خواص دی‌الکتریک هندوانه کامل را در سطوح مختلف رسیدگی و در محدوده بسامدی ۱۰ مگاهرتز تا ۸/۱ گیگاهرتز استخراج کردند و ارتباط این خواص را با مهم‌ترین مشخصه‌ی کیفی هندوانه یعنی مقدار قند موجود در بافت بررسی نمودند. رابطه هر یک از مقادیر ثابت دی‌الکتریک و ضریب اتلاف با میزان قند میوه چندان رضایت‌بخش نبود. آنها با تقسیم ثابت دی‌الکتریک و ضریب اتلاف بر میزان مواد جامد محلول توانستند

1. *Malus domestica*

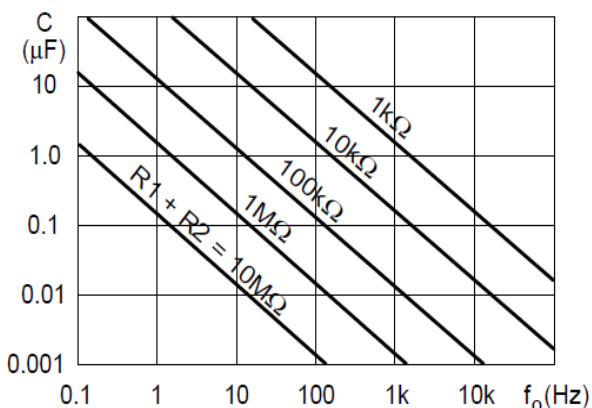
شد. گروه دوم و سوم در شرایط کنترل شده دما و رطوبت (سردخانه موجود در بخش علوم و صنایع غذایی دانشکده کشاورزی دانشگاه شیراز) قرار گرفتند و پس از گذشت ۵ روز ابتدا ثابت دی‌الکتریک گروه‌های دوم از سیب رد و گلدن اندازه‌گیری شد و سپس آزمایش‌های تکمیلی (اندازه‌گیری خواص فیزیکی، مکانیکی و شیمیایی میوه) بر روی گروه‌های دوم از سیب رد و گلدن انجام شد. پس از گذشت پنج روز دیگر آزمایش‌های مشابه بر روی گروه‌های سوم نیز انجام شد.



شکل ۲. مدار استفاده شده برای اندازه‌گیری ظرفیت خازن

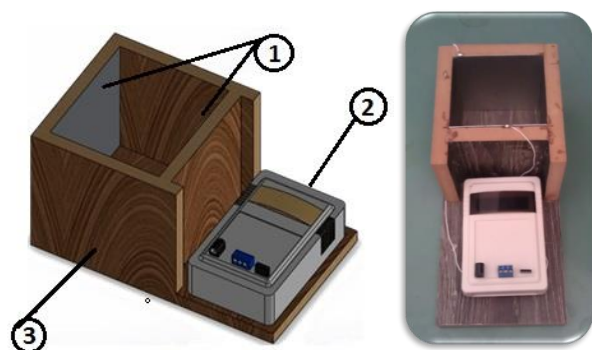
طرز کار سامانه

سامانه طوری طراحی شد که بتوان در بسامدهای مختلف، ظرفیت خازن را بدست آورد. بدین منظور به جای یکی از مقاومت‌ها در مدار از یک مقاومت متغیر (پتانسیومتر) استفاده شد. مطابق با شکل ۳ با ثابت بودن ظرفیت خازن، با تغییر در مقدار مقاومت بسامد نیز متناسب با مقاومت تغییر می‌کند و بدین ترتیب می‌توان در بسامدهای مختلف ظرفیت خازن را بدست آورد. با روشن کردن سامانه و قرار دادن نمونه در بین صفحات، مقدار فرکانس خروجی از حسگر خازن روی LCD نمایش داده می‌شود و با قرار دادن مقدار فرکانس در رابطه ۱ ظرفیت خازن با دقت بالا بدست می‌آید.



شکل ۳: نمودار ظرفیت - بسامد IC555

بود. جنس بدنه طوری انتخاب شد که رطوبت محیط بر آن بی اثر باشد. همچنین جنس قطعه از فلز انتخاب نشد زیرا با حسگر تشکیل یک خازن داده و بر داده‌ها اثر می‌گذاشت. فیبر MDF بدلیل چگال بودن، محکم و بدون گره بودن و همچنین مقاومت زیاد نسبت به نفوذ آب، شرایط ایده‌آل برای ساخت بدنه را داشت. لذا این ماده برای ساخت بدنه انتخاب شد (شکل ۱). جنس صفحات خازن از آلومینیوم انتخاب شد زیرا این فلز دارای پایداری زیادی است و پس از گذشت زمان و در شرایط جوی نامساعد اکسیده نمی‌شود. به همین دلیل بر اندازه‌گیری‌ها اثر نامطلوب نمی‌گذارد. از ورق آلومینیوم با ابعاد $100 \times 100 \times 0.5$ میلی‌متر برای ساخت حسگرها استفاده شد (شکل ۱).



شکل ۱. سامانه ساخته شده ۱: صفحات خازن ۲: جعبه پلاستیکی حاوی قطعات الکترونیکی ۳: بدنه چوبی

در مدار سامانه یک میکروکنترلر مدل AT mega 8 تعبیه شده است. این میکروکنترلر به یک ولتاژ ۵ ولت نیاز دارد. برای تولید ولتاژ ۵ ولت از رگولاتور KA7805 استفاده گردید. همچنین برای تبدیل جریان متناوب به جریان مستقیم از یک پل دیود و خازن ۱۰۰۰ میکروفاراد استفاده شد. میزان جریان مصرفی سامانه ساخته شده برابر ۱۰۰ میلی آمپر بود. آی‌سی ۵۵۵ یکی از معروف‌ترین و پرکاربردترین المان‌های موجود در بازار است که به آی‌سی تایمر نیز معروف است. در مدار از این قطعه برای ایجاد پالس با فرکانس‌های متفاوت استفاده گردید (شکل ۲).

در این تحقیق نمونه‌ها از سیب پائیزه رقم رد دلشیز و گلدن دلشیز انتخاب و مورد آزمایش قرار گرفتند. تمام نمونه‌های بالغ در یک روز برداشت شدند و هر کدام از ارقام به سه گروه ۴۵ تایی، و هر گروه به سه دسته ۱۵ تایی کوچک، متوسط و بزرگ تقسیم شدند. در روز اول ابتدا ثابت دی‌الکتریک گروه‌های اول از سیب رد و گلدن اندازه‌گیری شد و سپس آزمایش‌های تکمیلی (اندازه‌گیری خواص فیزیکی، مکانیکی و شیمیایی میوه) بر روی گروه‌های اول از سیب رد و گلدن انجام

$$C_{apple} = \frac{\epsilon_r \times \epsilon_0 \times A'}{t} \quad (\text{رابطه ۶})$$

که در آن t قطر میانگین سیب (m) عمود بر صفحات خازن می‌باشد. با جایگذاری روابط (۵) و (۶) در رابطه (۴) و ساده کردن آن، معادله مربوط به محاسبه ثابت دی الکتریک بدست می‌آید:

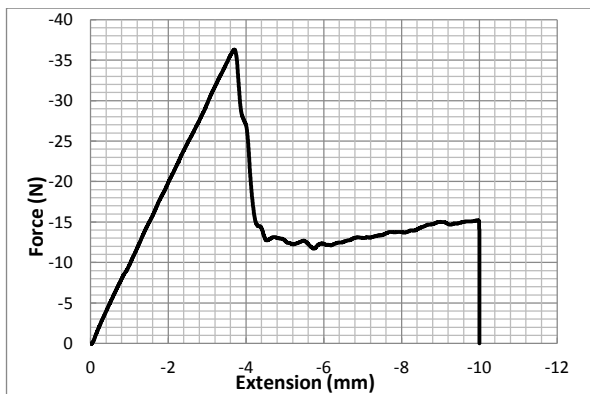
$$\epsilon_r = \frac{C'_{eq} \times t}{(A' \times \epsilon_0) - (C'_{eq} \times (d - t))} \quad (\text{رابطه ۷})$$

با جایگذاری مقادیر بدست آمده در رابطه فوق مقدار ثابت دی الکتریک (ϵ_r) محاسبه می‌گردد. با توجه به رابطه ۷ دو پارامتر سطح تصویر و ضخامت میوه در محاسبه ثابت دی الکتریک نقش تعیین کننده دارند.

خواص مکانیکی

خواص مکانیکی میوه با استفاده از دستگاه اینسترون قابل استخراج است. در این روش یک میله به قطر استاندارد، با سرعت ثابت و به طور عمود بر سطح میوه درون آن نفوذ می‌کند. خاصیت مکانیکی که در این تحقیق اندازه گیری شد، سفتی میوه بود. منظور از سفتی حداکثر نیرویی است که به میوه وارد و باعث تخریب بافت آن می‌شود.

پس از انتقال نمونه‌ها به آزمایشگاه، خواص مکانیکی نمونه‌ها با استفاده از دستگاه اینسترون (مدل ساخت ایران- Santam STM-20) موجود در آزمایشگاه مقاومت مصالح بخش مکانیک ماشین‌های دانشکده کشاورزی دانشگاه شیراز به دست آمد. از یک پروب به قطر ۸mm استفاده شد و سرعت نفوذ پروب به میوه ۱۵mm/min تنظیم و نقطه نفوذ در قسمت پهلویی میوه و ۲cm دورتر از قسمت میانی به سمت دم میوه جایی که بیشترین ضخامت را دارد انتخاب شد. همچنین ۲cm² از پوست میوه در زیر پروب برداشته شد. نفوذ پروب داخل میوه ۱۰mm انتخاب شد. و نمودار نیرو- تغییر شکل توسط دستگاه رسم گردید.



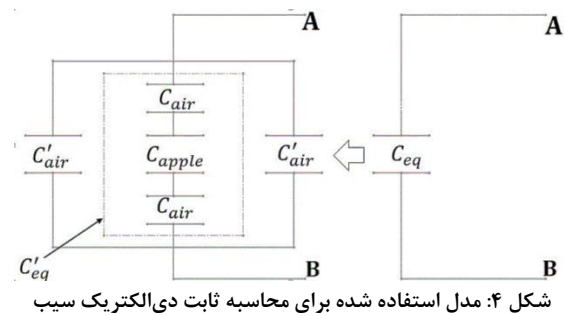
شکل ۵. نمودار نیرو - تغییر شکل رسم شده توسط دستگاه اینسترون

$$C_1 = \frac{1.44}{f(R_1 + 2R_2)} \Rightarrow \text{ظرفیت خازن} \quad (\text{رابطه ۱})$$

که در آن:

C_1 : ظرفیت حسگر (فاراد F)، f : بسامد ولتاژ ورودی (Hz)،
 R_1 : مقاومت اول مورد استفاده در مدار (Ω), R_2 : مقاومت دوم مورد استفاده در مدار (Ω) می‌باشد.

هنگامی که سیب داخل حسگر قرار می‌گیرد، دو ماده دی الکتریک هوا - میوه بر ظرفیت خازن اثر می‌گذارند. برای بدست آوردن ثابت دی الکتریک که فقط مربوط به میوه باشد از مدل شکل ۴ استفاده شد. برای استخراج ثابت دی الکتریک و حذف اثر هوا شبیه‌سازی الکتریکی بر اساس ضخامت و سطح تصویر میوه انجام شد. بدین ترتیب که با تصویر کردن سطح میوه بر صفحات، قسمت های اضافی که حاوی اثر هوا است (C'_{eq}) از ظرفیت کل کم شده و ظرفیت حسگر محاسبه می‌گردد.



در شکل C'_{eq} همان ظرفیت حسگر است که از رابطه ۲ محاسبه می‌شود.

برای بدست آوردن C'_{eq} داریم:

$$C'_{eq} = C_{eq} - 2C'_{air} \quad (\text{رابطه ۲})$$

که C'_{air} از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$C'_{air} = \epsilon_0 \frac{(A-A')}{2d} \quad (\text{رابطه ۳})$$

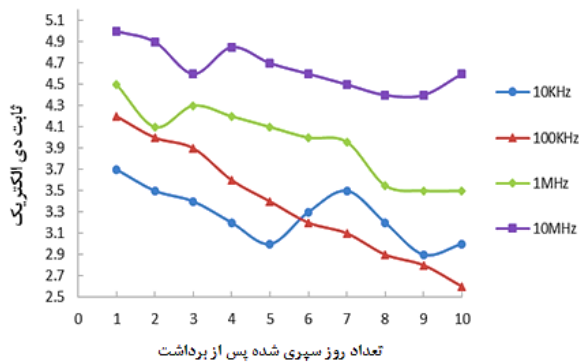
که در آن:

A : مساحت صفحه خازن آزمایشگاهی (m^2), A' :
 مساحت تصویری سیب موازی با صفحات خازن (m^2), d :
 فاصله صفحات خازن (m), ϵ_0 : ضریب گذردهی خلأ و برابر با $10^{-12} \times 8/85$ F/m می‌باشد. از طرف دیگر داریم:

$$\frac{1}{C'_{eq}} = \frac{1}{C'_{air}} + \frac{1}{C_{apple}} \quad (\text{رابطه ۴})$$

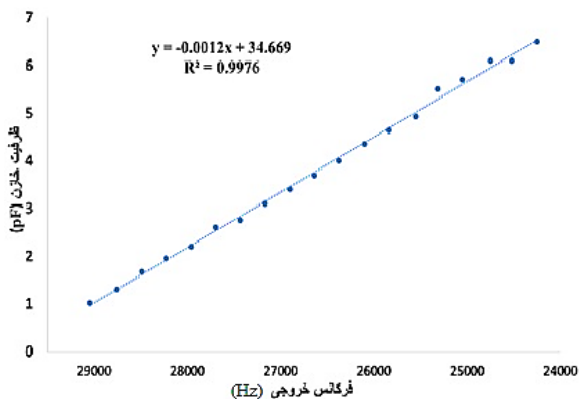
که C_{apple} و C'_{air} از روابط زیر بدست می‌آیند:

$$C_{apple} = \frac{\epsilon_0 \times A}{\frac{d-t}{2}} \quad (\text{رابطه ۵})$$



شکل ۷. ثابت دی الکتریک سیب در بسامدهای مختلف در طی رسیدن میوه (هر دو وارپته)

پس از انتخاب بسامد سیگنال ورودی، سامانه برای اندازه‌گیری ظرفیت حسگر در بسامد ۱۰۰ kHz واسنجی شد. نمودار واسنجی فرکانس - ظرفیت در شکل ۹ نشان داده شده است. همانطور که از شکل ۸ پیداست رابطه‌ی خطی بین فرکانس خروجی و ظرفیت خازن برقرار است. ضریب تبیین بدست آمده ($R^2 = 0.9976$) نشان می‌دهد که سامانه به خوبی می‌تواند ظرفیت حسگر را اندازه‌گیری نماید.



شکل ۸. نمودار واسنجی سامانه برای اندازه‌گیری ظرفیت خازن (هر دو وارپته)

ثابت دی الکتریک و خواص شیمیایی

شکل ۹ و ۱۰ تغییرات TSS (میزان مواد جامد محلول) سیب رد و گلدن دلشیز را با سه اندازه کوچک، متوسط و بزرگ در سه مرحله مختلف رسیدگی (طی ۱۰ روز رسیدن) نشان می‌دهد. همانطور که از شکل ۹ پیداست، TSS سیب رد با سه اندازه کوچک، متوسط و بزرگ از ۸/۲٪ در روز اول به ۱۷/۶٪ در روز دهم افزایش پیدا کرده است. ضریب تبیین حاصل از خطی برابر ۰/۹۳۷ بدست آمد که نشان می‌دهد تغییرات TSS سیب رد با اندازه متوسط در طول رسیدن میوه به صورت خطی افزایش می‌یابد.

همچنین با توجه به شکل ۱۰، TSS سیب گلدن با سه اندازه کوچک، متوسط و بزرگ از ۸/۳٪ در روز اول به ۱۸/۶٪ در



شکل ۶. دستگاه اینسترون مدل (ساخت ایران-STM-20)

خواص شیمیایی

میزان مواد جامد محلول (TSS) میوه‌ها با استفاده از یک رفاکتومتر رومیزی (ساخت آتاگو ژاپن-Refract meters WYA-2S) موجود در بخش علوم و صنایع غذایی دانشکده کشاورزی دانشگاه شیراز اندازه‌گیری شد. برای اندازه‌گیری TSS با استفاده از رفاکتومتر به عصاره‌گیری از میوه نیاز است. برای این کار میوه به طور عرضی به دو نیم تقسیم شد و از نیمه‌ای که دم سیب همراه آن بود عصاره‌گیری شد.

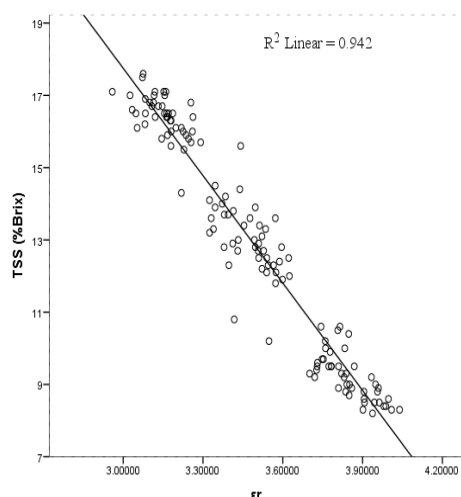
برای استفاده از این رفاکتومتر چند قطره از نمونه مورد نظر روی منشور قرار داده شد و پس از محکم کردن منشور لامپ مقابل آن قرار گرفت. پس از شروع به کار دستگاه مقدار نوردهی عدسی‌ها به کمک ناب موجود روی دستگاه تغییر داده شد. نتایج به صورت دیجیتال همراه با دما در این دستگاه نشان داده می‌شد و پس از هر بار اندازه‌گیری دستگاه برای تست بعدی تمیز گردید.

نتایج و بحث

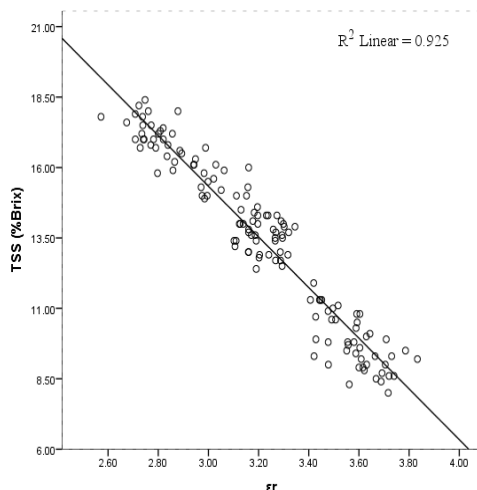
ثابت دی الکتریک دستگاه در بسامدهای مختلف در طی رسیدن

شکل ۷ تغییرات ثابت دی الکتریک سیب را در طی ۱۰ روز فرآیند رسیدن و در بسامدهای ۱۰ kHz، ۱۰۰ kHz، ۱ MHz و ۱۰ MHz نشان می‌دهد. آزمایشات اولیه نشان داد که در بسامدهای ۱۰ kHz، ۱ MHz و ۱۰ MHz تغییرات منظمی مشاهده نشد، اما در بسامد ۱۰۰ kHz ثابت دی الکتریک روند کاهشی داشت. ثابت دی الکتریک در بسامد ۱۰۰ kHz بهترین رابطه را با خواص فیزیکی- مکانیکی سیب دارد و بهتر توانست این خواص را پیش‌بینی نماید. بنابراین سیگنال مربعی با این بسامد و با ولتاژ ۵ Vp-p برای دستگاه انتخاب شد.

می‌دهد. با افزایش درصد TSS در طول رسیدگی میزان ضریب گذردهی کاهش یافته است که در هر دو نمودار سیب رد و گلدن، ضریب تبیین حاصل از رگرسیون تابع خطی و به ترتیب برابر ۰/۹۴۲ و ۰/۹۲۵ به دست آمد. به این دلیل است که نرم تر شدن بافت و شیرین شدن میوه در طی رسیدن مترادف با افزایش مواد جامد محلول می باشد که باعث روند کاهشی ثابت دی الکتریک در طی انبارمانی می شود (Joyce et al., 2002).



شکل ۱۱. نمودار تغییرات TSS سیب رد دلشیز را با سه اندازه درهم (کوچک، متوسط و بزرگ)، با ثابت دی الکتریک

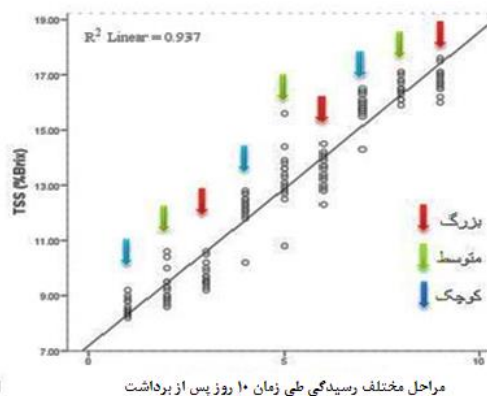


شکل ۱۲. تغییرات TSS سیب گلدن دلشیز با ثابت دی الکتریک برای سه اندازه درهم (کوچک، متوسط، بزرگ)

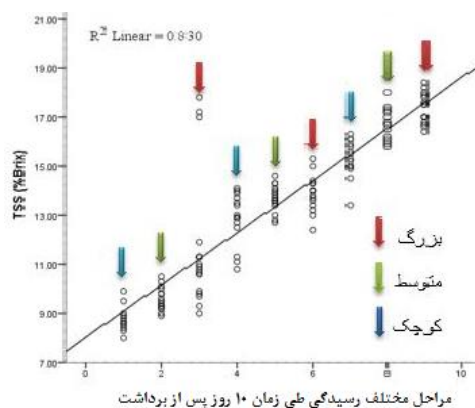
ثابت دی الکتریک و خواص مکانیکی

شکل ۱۳ و ۱۴ تغییرات استحکام سیب رد و گلدن دلشیز را با سه اندازه کوچک، متوسط و بزرگ در سه مرحله مختلف رسیدگی (طی ۱۰ روز رسیدن) نشان می‌دهد. تغییرات استحکام هر دو رقم در طی رسیدن روند کاهشی داشت.

روز دهم افزایش پیدا کرده است. ضریب تبیین حاصل از رگرسیون خطی برابر ۰/۸۳ بدست آمد که نشان می‌دهد تغییرات TSS سیب رد با اندازه متوسط در طول رسیدن میوه به صورت خطی می‌یابد. از آنجا که میوه قبل از رسیدگی کامل برداشت و انبار می شود فرایند رسیدگی میوه پس از برداشت تکمیل می شود لذا میزان کل مواد جامد محلول میوه طی انبارمانی به عنوان یکی از شاخص های رسیدگی مطرح است. افزایش مواد جامد محلول بیشتر به دلیل تبدیل نشاسته به قندهای محلول رخ می دهد (Li et al., 1997). در طی مدت انبارمانی تا رسیدگی کامل، به دلیل شکستن نشاسته موجود تبدیل آن به قند ساده ابتدا روند افزایشی در میزان مواد جامد محلول و پس از آن میوه وارد مرحله پوسیدگی می شود در این مرحله به دلیل اتمام ذخیره نشاسته نه تنها قندی تولید نمی شود بلکه به خاطر مصرف قندهای ساده در فرایند تنفس میزان مواد جامد محلول روند کاهشی طی می کند.

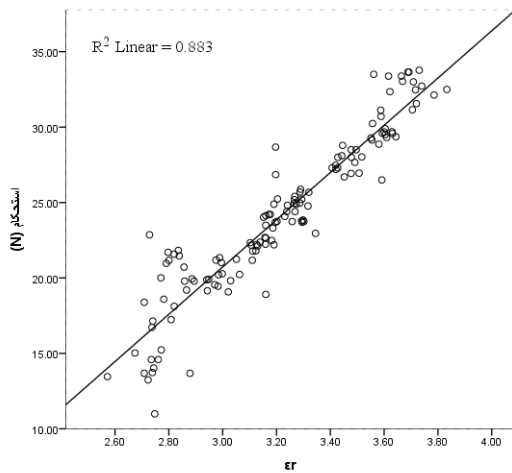


شکل ۹. نمودار تغییرات TSS سیب رد دلشیز با سه اندازه کوچک، متوسط و بزرگ در طی سه مرحله رسیدن



شکل ۱۰. نمودار تغییرات TSS سیب گلدن دلشیز با سه اندازه کوچک، متوسط و بزرگ در طی رسیدن

شکل ۱۱ و ۱۲ تغییرات TSS سیب رد و گلدن دلشیز را با سه اندازه کوچک، متوسط و بزرگ، با ثابت دی الکتریک نشان



شکل ۱۶. تغییرات استحکام سیب گلدن دلشیز (با سه اندازه کوچک، متوسط و بزرگ) با ثابت دی‌الکتریک

مقایسه میانگین صفات مورد بررسی مربوط به سه مرحله رسیدگی سیب رد دلشیز در جدول ۱ آورده شده است. از نظر سفتی بافت میوه، میزان مواد جامد محلول (TSS) و ضریب دی‌الکتریک میوه در مراحل مختلف رسیدگی اختلاف معنی‌داری وجود دارد.

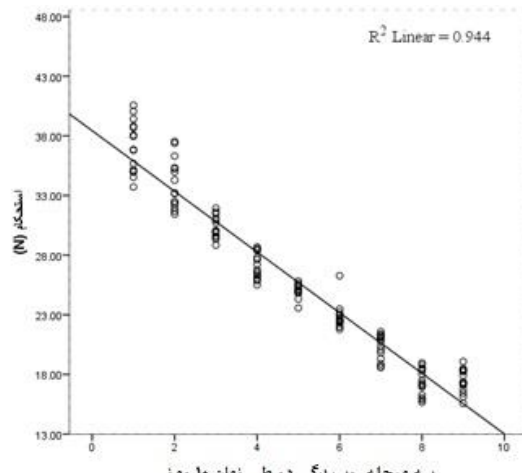
جدول ۱. مقایسه میانگین صفات مورد بررسی سه مرحله رسیدگی سیب رقم رد دلشیز

مرحله رسیدگی	ضریب دی‌الکتریک	مواد جامد محلول (TSS)	استحکام (N)
مرحله اول رسیدگی	*۳/۸۵ a	*۹/۲۱a	*۳۳/۷۸a
مرحله دوم رسیدگی	*۳/۴۷b	*۱۲/۹۸b	*۲۴/۹۷b
مرحله سوم رسیدگی	*۳/۱۵c	*۱۶/۴۸c	*۱۸/۳۸c

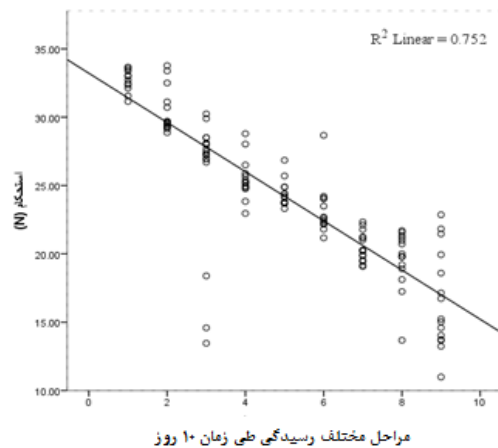
در هر ستون میانگین‌های دارای حروف متفاوت در سطح احتمال ۰/۰۵ تفاوت معنی‌داری با هم دارند.

مقایسه میانگین صفات مورد بررسی مربوط به سه مرحله رسیدگی سیب گلدن دلشیز در جدول ۲ آورده شده است. از نظر سفتی بافت میوه، میزان مواد جامد محلول (TSS) و ضریب دی‌الکتریک میوه در مراحل مختلف رسیدگی اختلاف معنی‌داری وجود دارد.

مقایسه میانگین صفات مورد بررسی مربوط به سه اندازه در سه مرحله رسیدگی سیب رقم رد دلشیز در جدول ۳ آورده شده است. در مرحله اول رسیدگی از نظر میزان مواد جامد محلول (TSS) و ضریب دی‌الکتریک میوه اختلاف معنی‌داری

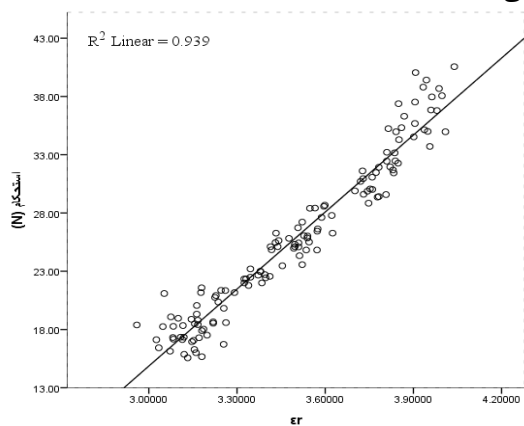


شکل ۱۳. تغییرات استحکام سیب رد دلشیز با سه اندازه در هم (کوچک، متوسط و بزرگ) طی رسیدن سه مرحله رسیدگی در طی زمان ۱۰ روز



شکل ۱۴. تغییرات استحکام سیب گلدن دلشیز (سه اندازه کوچک، متوسط و بزرگ) طی رسیدن مراحل مختلف رسیدگی طی زمان ۱۰ روز

شکل ۱۵ و ۱۶ تغییرات استحکام سیب رد و گلدن دلشیز را با سه اندازه کوچک، متوسط و بزرگ، با ثابت دی‌الکتریک نشان می‌دهد که با افزایش استحکام، ثابت دی‌الکتریک نیز افزایش می‌یابد.



شکل ۱۵. تغییرات استحکام سیب رد دلشیز (با سه اندازه کوچک، متوسط و بزرگ) با ثابت دی‌الکتریک

شده است. در مرحله اول از نظر سفتی بافت میوه، میزان مواد جامد محلول (TSS) و ضریب دی‌الکتریک میوه اختلاف معنی‌داری وجود دارد. در مرحله دوم رسیدگی از نظر ضریب دی‌الکتریک میوه اختلاف معنی‌داری بین سه اندازه وجود دارد. اما از نظر میزان مواد جامد محلول (TSS) و سفتی بافت میوه اختلاف معنی‌داری بین گروه کوچک و متوسط مشاهده نشد. مقایسه میانگین صفات مورد بررسی مربوط به سه اندازه در مرحله سوم رسیدگی سیب گلدن دلشیز نشان می‌دهد که از نظر ضریب دی‌الکتریک و میزان مواد جامد محلول (TSS) میوه اختلاف معنی‌داری بین سه اندازه وجود دارد. اما از نظر سفتی بافت اختلاف معنی‌داری بین گروه کوچک و متوسط مشاهده نشد.

جدول ۴. مقایسه میانگین صفات مورد بررسی سه اندازه سیب رقم گلدن دلشیز به ترتیب در مراحل اول، دوم و سوم رسیدگی.

اندازه / مرحله	ضریب دی‌الکتریک	مواد جامد محلول (TSS)	استحکام (N)
کوچک / اول	*۳/۶۹a	*۸/۸۶a	*۳۲/۸۱a
متوسط / اول	*۳/۵۸b	*۹/۸۴b	*۲۹/۶۳b
بزرگ / اول	*۳/۴۶c	*۱۰/۶۵c	*۲۷/۵۶c
کوچک / دوم	*۳/۲۸a	*۱۳/۴۰a	*۲۴/۷۹a
متوسط / دوم	*۳/۲۱b	*۱۳/۷۰ab	*۲۴/۲۶a
بزرگ / دوم	*۳/۱۴c	*۱۳/۹۷b	*۲۲/۷۲b
کوچک / سوم	*۳/۰۰a	*۱۵/۷۰a	*۲۰/۰۸a
متوسط / سوم	*۲/۸۳b	*۱۶/۷۸b	*۱۹/۸۱a
بزرگ / سوم	*۲/۷۲c	*۱۷/۵۰c	*۱۵/۴۸b

در هر ستون میانگین‌های دارای حروف متفاوت در سطح احتمال ۰/۰۵ تفاوت معنی‌داری با هم دارند.

همانطور که در جدول‌های مقایسه میانگین مشاهده شد در یک مرحله رسیدگی بین اندازه‌های کوچک، متوسط و بزرگ اختلاف معنی‌دار در سطح ۵٪ مشاهده شد این اختلاف می‌تواند به این دلیل باشد:

در رابطه با میزان مواد جامد محلول (TSS): هر چه سیب از نظر اندازه و ابعاد بزرگتر باشد تنفس بیشتر می‌شود و تنفس بیشتر موجب افزایش تولید اتیلن (تولید اتیلن به طور طبیعی توسط بافت سیب انجام می‌شود و رابطه تنگاتنگی با تنفس میوه دارد) و نهایتاً منجر به رسیده‌تر شدن میوه می‌گردد. بنابراین در یک مرحله رسیدگی بین اندازه‌ها اختلاف معنی‌دار بین صفات اندازه‌گیری شده وجود داشت.

معادله ضریب دی‌الکتریک ϵ_r را بر اساس رسیدگی و اندازه می‌توان به صورت زیر تعریف کرد البته اندازه و رسیدگی به صورت کد می‌باشد. کد ۱، ۲ و ۳ به ترتیب برای اندازه

بین سه اندازه وجود دارد. اما از نظر سفتی بافت میوه اختلاف معنی‌داری بین اندازه متوسط و بزرگ وجود ندارد. مقایسه میانگین صفات مورد بررسی مربوط به سه اندازه در مرحله دوم رسیدگی سیب رد دلشیز نشان می‌دهد که از نظر سفتی بافت میوه و ضریب دی‌الکتریک میوه اختلاف معنی‌داری بین سه اندازه وجود دارد. اما از نظر میزان مواد جامد محلول (TSS) اختلاف معنی‌داری بین گروه متوسط و بزرگ مشاهده نشد. همچنین مقایسه میانگین صفات مورد بررسی مربوط به سه اندازه در مرحله سوم رسیدگی سیب رد دلشیز نشان داد که از نظر سفتی بافت میوه و ضریب دی‌الکتریک میوه اختلاف معنی‌داری بین سه اندازه وجود دارد. اما از نظر میزان مواد جامد محلول (TSS) اختلاف معنی‌داری بین گروه متوسط و بزرگ مشاهده نشد.

جدول ۲. مقایسه میانگین صفات مورد بررسی سه مرحله رسیدگی سیب رقم گلدن دلشیز

مرحله رسیدگی	ضریب دی‌الکتریک	مواد جامد محلول (TSS)	استحکام (N)
مرحله اول رسیدگی	*۳/۸۵a	*۹/۷۸ a	*۳۰/۰۰a
مرحله دوم رسیدگی	*۳/۲۱b	*۱۳/۶۹b	*۲۳/۹۲b
مرحله سوم رسیدگی	*۲/۸۵c	*۱۶/۶۶c	*۱۸/۴۶c

در هر ستون میانگین‌های دارای حروف متفاوت در سطح احتمال ۰/۰۵ تفاوت معنی‌داری با هم دارند.

جدول ۳. مقایسه میانگین صفات مورد بررسی سه اندازه سیب رقم رد دلشیز به ترتیب در مراحل اول، دوم و سوم رسیدگی

اندازه / مرحله	ضریب دی‌الکتریک	مواد جامد محلول (TSS)	استحکام (N)
کوچک / اول	*۳/۹۵a	*۸/۵۵a	*۳۷/۰۷a
متوسط / اول	*۳/۸۴b	*۹/۳۱b	*۳۳/۹۷b
بزرگ / اول	*۳/۷۵c	*۹/۷۴c	*۳۰/۲۹b
کوچک / دوم	*۳/۵۶a	*۱۲/۱۶a	*۲۷/۰۷a
متوسط / دوم	*۳/۴۸b	*۱۳/۲۹b	*۲۵/۰۲b
بزرگ / دوم	*۳/۳۷c	*۱۳/۵۲b	*۲۲/۸۱c
کوچک / سوم	*۳/۲۰a	*۱۵/۸۶a	*۲۰/۳۳a
متوسط / سوم	*۳/۱۵b	*۱۶/۵۴b	*۱۷/۴۳b
بزرگ / سوم	*۳/۰۹c	*۱۶/۸۱b	*۱۷/۳۹c

در هر ستون میانگین‌های دارای حروف متفاوت در سطح احتمال ۰/۰۵ تفاوت معنی‌داری با هم دارند.

مقایسه میانگین صفات مورد بررسی مربوط به سه اندازه در سه مرحله رسیدگی سیب گلدن دلشیز در جدول ۴ آورده

مطالعات استفاده شد. میزان مواد جامد محلول TSS در هر دو رقم سیب رد و گلدن در طی زمان رسیدن روند افزایشی و ثابت دی الکتریک روند کاهشی را دنبال می کرد. تغییرات استحکام سیب رد و گلدن دلشیز را با سه اندازه کوچک، متوسط و بزرگ در سه مرحله مختلف رسیدگی (طی ۱۰ روز رسیدن) نشان می‌دهد که تغییرات استحکام هر دو رقم در طی رسیدن روند کاهشی داشته است. ضمناً کاهش استحکام کاهش ثابت دی الکتریک را نیز به دنبال داشت. در مجموع نتایج این تحقیق نشان داد که دستگاه ساخته شده دارای توانایی بالایی برای تشخیص زمان بازار پسندی میوه سیب است.

REFERENCES

- Abbott, J. A., Bachman, G. S., Childers, N. F., Fitzgerald, J. V. and Matuski, F. J. (1968). Sonic techniques for measuring texture of fruits and vegetables. *Food Technology*, 22 (5), 101-112.
- Bengtsson, N. E. and Risman, P. O. (1971). Dielectric properties of food at 3 GHz as determined by a cavity perturbation technique. *Journal of Microwave Power*, 6(2), 107-123.
- Dunlap, W. C., and Makower B. (1945). Radio frequency dielectric properties of dehydrated carrots. *Journal of Physical Chemistry*, 49, 601-622.
- Jalili, Kh. (2004). *Postharvest physiology* (Vol. 2). (p 229). Orumieh University. (In Farsi)
- Joyce, D. C., Hockings, P. D., Mazucco, R. A., and Shorter A. J. (2002). H-nuclear magnetic resonance imaging of ripening 'Kensington Pride' mango fruit. *Functional Plant Biology*, 29, 873-879.
- Kato, K. (1997). Electrical density sorting and estimation of soluble solids content of

کوچک، متوسط و بزرگ و کدهای ۱، ۲ و ۳ برای مرحله اول، دوم و سوم رسیدگی می‌باشد. با توجه به علامت ضریب اندازه و رسیدگی با افزایش اندازه و مرحله رسیدگی ضریب دی الکتریک کاهش می‌یابد.

$$\epsilon_r = -0.09 \text{ size} - 0.35 \text{ maturity} + 4.36 \quad \text{سیب رد} \quad \text{(رابطه ۸)}$$

$$R^2=0.89$$

$$\epsilon_r = -0.11 \text{ size} - 0.37 \text{ maturity} + 4.16 \quad \text{سیب گلدن} \quad \text{(رابطه ۹)}$$

$$R^2=0.92$$

نتیجه گیری کلی

با توجه به نتایج به دست آمده در بسامد ۱۰۰ kHz ثابت دی الکتریک روند کاهشی داشت. ازین بسامد برای ادامه

watermelon. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 67, 161 – 170.

Li, M., Slaughter, C. D. and Thompson, J. F. (1997). Optical chlorophyll sensing system for banana ripening. *Postharvest Biology and Technology*, 12, 273–283

Nelson, S. O., Guo, W., Trabelsi, S. and J Kays, S. (2007). Dielectric spectroscopy of watermelons for quality sensing. *Measurements science technology*, 18: 1887–1892. 15.

Sirikulrat, k. and Sirikulrat, N. (2008). Dielectric properties of different maturity soybean. *KMITL Science Journal*, 8 (2), 12-18.

Talai, A. (1998). *Fruit trees physiology in temperate regions*. Tehran University publication. (In Farsi)

Zachariah, G. and Louis, C. (1965). Evaluation of some physical methods for determining avocado maturity. *Erickson California Avocado Society, Yearbook* 49, 110-115.