

طراحی، ساخت، و ارزیابی دستگاه اندازه‌گیری مقاومت و امپدانس الکتریکی میوه

فاطمه حاج‌حیدری^۱، جعفر مساح^{۲*}، محمدعلی حداد درفشی^۳

۱. دانشجوی سابق کارشناسی ارشد، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه

۲. دانشیار، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران

۳. دانشیار، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۹/۲۹ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۱/۱۰/۵)

چکیده

اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی و امپدانس الکتریکی روشی نو در ارزیابی کیفیت مواد غذایی است. روش‌های الکتریکی علاوه بر تشخیص عوامل کیفی، نسبت به تغییرات غلظت و وضعیت آب در بافت‌های گیاهی حساس هستند. بنابراین، از این روش برای تشخیص رسیدگی، آسیب‌دیدگی، رسیدن بیش از حد، پوسیدگی یا عوامل کیفی دیگر استفاده می‌شود. در تحقیقات گذشته، الکتروود استفاده‌شده در آزمایش‌های اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی و امپدانس الکتریکی در بافت میوه فرو برده می‌شد و مقاومت الکتریکی بافت بین دو الکتروود اندازه‌گیری می‌شد. الکتروودها معمولاً سوزنی‌شکل هستند و به میوه آسیب می‌رسانند. به همین دلیل در بررسی تغییرات مقاومت الکتریکی و امپدانس الکتریکی، نیاز به تعویض نمونه آزمایشی بود. هدف این تحقیق طراحی، ساخت، و ارزیابی دستگاه اندازه‌گیری مقاومت و امپدانس الکتریکی میوه و بررسی امکان استفاده از الکتروود صفحه‌ای مخصوص، بدون آسیب‌رساندن به بافت میوه برای اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی میوه بود. الکتروودها دو صفحه مسی‌اند که میوه در بین این دو صفحه در حالی که نیروی ثابتی به آن وارد می‌شد قرار می‌گرفت. وسایل و قطعات اصلی به‌کاررفته در این دستگاه عبارت‌اند از: LCR متر، مبدل نیرو، نمایشگر، پایه اصلی، قاب، فک. آزمایش با این وسیله روی سیب قرمز انجام شد. آزمایش‌های اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی در دو بسامد جریان ۱ kHz و ۱۲۰ Hz انجام شد. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که با کاهش رطوبت میوه و در نتیجه افزایش غلظت یونی، مقاومت الکتریکی میوه کاهش می‌یابد. همچنین، در صورت نگهداری سیب در دمای محیط و در نتیجه ادامه‌یافتن فرایند رسیدن میوه، تغییرات مقاومت الکتریکی برحسب زمان، به فرم تابع درجه سوم تغییر می‌کند، و وزن محصول برحسب زمان، به‌صورت کاملاً خطی کاهش می‌یابد.

کلیدواژگان

آسیب‌دیدگی میوه، امپدانس الکتریکی میوه، الکتروود صفحه‌ای، مقاومت الکتریکی میوه، نگهداری سیب.

مناسب حفظ کیفیت محصول است. مقاومت الکتریکی و ظرفیت خازنی محصولات کشاورزی با تغییر در اندازه رطوبت میوه و همچنین تحت‌تأثیر ساختار درونی بافت آن تغییر می‌کنند. بنابراین، بررسی خصوصیات الکتریکی روشی برای سنجش کیفیت و ترکیب ساختار درونی (مثل اندازه رطوبت میوه) محصولات باغی است. از اندازه‌گیری عامل امپدانس الکتریکی محصولات کشاورزی، در بررسی وضعیت فیزیولوژیکی بافت‌های چوبی و نباتی و آسیب‌دیدگی‌های میوه مثل سرمازدگی

مقدمه

بررسی کیفیت محصولات باغی نیازمند اطلاعات گسترده در زمینه خصوصیات فیزیکی و تغییرات این خصوصیات در ارتباط با یکدیگر است. افزایش اطلاعات در این زمینه کمک مؤثری برای فراهم‌سازی شرایط

Email: jmassah@ut.ac.ir

* نویسنده مسئول

این رابطه به صورت رابطه ۳ نیز بیان می‌شود:

$$Z = \sqrt{R^2 + \frac{1}{(2\pi fC)^2}} \quad \text{رابطه ۳}$$

در این رابطه C ظرفیت خازنی ماده بر حسب فاراد و f بسامد جریان بر حسب هرتز است. در جریان متناوب قانون اهم به این صورت بیان می‌شود:

$$Z = \frac{V}{I} \quad \text{رابطه ۴}$$

برای اندازه‌گیری امپدانس الکتریکی و مقاومت الکتریکی نیاز به منبع تولید جریان متناوب (AC) با بسامد معین و الکترودهای مخصوص برای انتقال جریان به میوه است. برای این منظور به دو روش عمل می‌شود: استفاده از دستگاه مولد تابع^۱ و نوسان‌نما^۲، و LCR متر (Bauchot et al., 2000).

پیش از سال ۲۰۰۰ میلادی برای اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی و مقاومت خازنی دستگاه مولد تابع و نوسان‌نما استفاده می‌شد. دستگاه مولد تابع تولیدکننده جریان متناوب و نوسان‌نما تنظیم‌کننده بسامد جریان است. هم‌اکنون از دستگاه LCR متر برای اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی و ظرفیت خازنی استفاده می‌شود (Bauchot et al., 2000).

برای انتقال جریان تولیدشده به میوه از الکترودهای متفاوتی استفاده شده است. در اغلب تحقیقات انجام‌شده در زمینه بررسی مقاومت الکتریکی و امپدانس الکتریکی از الکترودهای سوزنی شکل استفاده شده است (Desai and Liang, 1977; Rotz and Mohsenin, 1978; Harker and Dunlop, 1994; Harker and Forbes, 1997; Puchalski, 1994; Puchalski and Brusewitz, 2000; Jackson and Harker, 2000). استفاده از الکترودهای سوزنی سبب تخریب بافت میوه می‌شود. بنابراین، در آزمایش‌های بعدی امکان استفاده از همان نمونه‌های قبلی وجود ندارد و برای بررسی تغییرات خصوصیات الکتریکی میوه در طول دوره نگهداری آن، نیاز به تعویض نمونه در هر آزمایش است. تعویض مداوم نمونه در انجام هر آزمایش در دوره زمانی معین، سبب ایجاد خطا در

و لهیدگی استفاده شده است (Zhang and Willison, 1992; Harker and Forbes, 1997; Jackson and Harker, 2000). در میوه‌ها از اندازه‌گیری امپدانس الکتریکی برای تعیین وضعیت داخلی و رسیدگی نیز استفاده شده است (Weaver and Jackson, 1966; Zachariah, 1976; Furmanski and Buescher, 1979; Lougheed et al., 1981). مقدار امپدانس الکتریکی در بافت‌های گیاهی پارامتر پایداری نیست و در زمان کوتاهی تحت تأثیر عوامل گوناگون تغییر می‌کند. وضعیت فیزیولوژیکی و آسیب‌دیدگی پوست میوه و عواملی از این دست، پارامتر مذکور را تغییر می‌دهد (Zhang and Willison, 1992).

تمامی مواد در برابر عبور جریان الکتریکی از خود مقاومت نشان می‌دهند که بر حسب نوع ماده مقدار مقاومت الکتریکی آنها متفاوت است. در صورتی که محصولات کشاورزی در مسیر جریان الکتریکی I قرار گیرند، در مقابل عبور جریان مقاومت نشان می‌دهند. در صورتی که از جریان مستقیم (DC) استفاده شود، مقاومت محصول در برابر عبور جریان، فقط به صورت مقاومت الکتریکی R است. قانون اهم، در جریان مستقیم چنین بیان می‌شود:

$$R = \frac{V}{I} \quad \text{رابطه ۱}$$

که در آن مقاومت الکتریکی R بر حسب اهم؛ اختلاف پتانسیل الکتریکی V بر حسب ولت؛ جریان الکتریکی I بر حسب آمپر است.

در صورت استفاده از منبع جریان متناوب (AC) مقاومت محصول در برابر عبور جریان، هم به صورت مقاومت الکتریکی R، هم به صورت مقاومت خازنی R_c است. برای اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی میوه، مداری الکتریکی تشکیل می‌شود که میوه در این مدار به منزله مقاومت R عمل می‌کند. با اعمال اختلاف پتانسیل V به دو سر مدار و اندازه‌گیری جریان عبوری I از میوه، مقاومت الکتریکی محصول محاسبه می‌شود.

مقدار مقاومت خازنی بر اساس ظرفیت خازنی محصول محاسبه می‌شود. حاصل مقاومت الکتریکی و مقاومت خازنی، امپدانس الکتریکی یا مقاومت الکتریکی ظاهری Z است که با رابطه ۲ محاسبه می‌شود (Rao, 2005).

$$Z = \sqrt{R^2 + R_c^2} \quad \text{رابطه ۲}$$

1. Function Generator
2. Oscilloscope.

محققان در بررسی امپدانس مواد بیولوژیک دریافتند که با رسیدن بسامد جریان به مقدار ثابت، امپدانس نمونه کاهش می‌یابد. افزایش بسامد سبب می‌شود مقاومت خازنی به سمت صفر میل کند. بنابراین، در بسامدهای بالا، امپدانس برابر با مقدار R می‌شود. محققان زیادی به بررسی تأثیر انتخاب بسامدهای گوناگون بر امپدانس الکتریکی میوه پرداخته‌اند. در بررسی‌های انجام‌شده برای مطالعهٔ آسیب‌های واردشده به میوه، فرکانس بین ۵۰ Hz تا ۱ MHz مطالعه شده است. نتایج این آزمایش‌ها نشان داد که بسامدهای پایین برای بررسی آسیب‌دیدگی میوه مناسب‌تر است (Harker and Dunlop, 1994; Harker and Dunlop, 1994; Jackson and Harker, 2000; Bauchot et al., 2000; Ohnishi et al., 2004; Wu et al., 2008). نتایج این تحقیقات نشان داده است که جریان فرکانس پایین، از غشاء پلاسمای بافت سالم نمی‌تواند عبور کند و برای تشخیص بافت آسیب‌دیده‌ای که غشاء پلاسمای آن از بین رفته، مفید است. توانایی جداسازی مسیر جریان بین سلولی و درون سلولی به کمک جریان بسامد پایین، امکان بررسی تغییرات پرتوپلاسم و دیوارهٔ سلولی ایجادشده در طول انبارداری و یا در اثر فساد میوه را فراهم می‌سازد.

هدف این تحقیق طراحی و ساخت دستگاه اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی با استفاده از الکتروود صفحه‌ای است. مهمترین ویژگی این دستگاه در مقایسه با دستگاه‌های دیگر اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی و قابلیت اندازه‌گیری غیرمخرب آن است، بدیهی است در این حالت نتایج آزمایش‌ها به نتایج واقعی نزدیک‌تر است. در این تحقیق علاوه بر ساخت دستگاه مذکور، برای ارزیابی آن تغییرات مقاومت الکتریکی سیب در دورهٔ زمانی معین بررسی شد.

■ مواد و روش‌ها

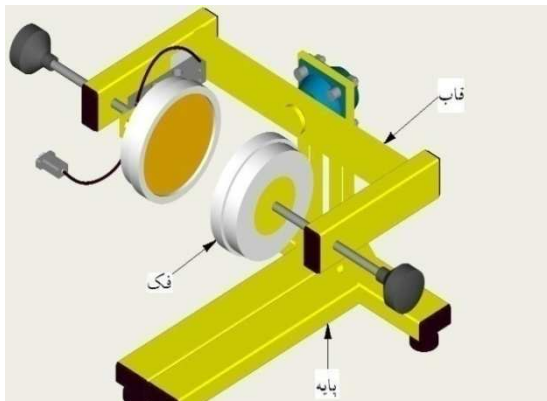
به منظور انجام آزمایش‌ها به صورت غیرمخرب اقدام به طراحی و ساخت الکتروود مناسب برای اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی میوه گردید. در شکل ۱ تصویر کامل دستگاه طراحی شده برای اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی میوه نشان داده شده است. این دستگاه دارای میدل نیرو بوده و امکان اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی میوه‌هایی با ابعاد مختلف را داراست.

نتایج آزمایش می‌شود، زیرا با هر بار تعویض میوهٔ آزمایش‌شده، شرایط آزمایش (رطوبت میوه، ابعاد، و غیره) تغییر می‌کند.

دسای و لیانگ (Desai and Liang, 1977) برای اندازه‌گیری امپدانس میوه‌ای بومی در استرالیا از ۴ الکتروود سوزنی استفاده کردند، به صورتی که در هر سمت میوه ۲ الکتروود فرو برده شده بود. روتز و محسنین (Rotz and Mohsenin, 1978) برای اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی سیب از دو الکتروود سوزنی استفاده کردند. هارکر و دانلوپ (Harker and Dunlop, 1994) برای اندازه‌گیری امپدانس شلیل از ۴ الکتروود سوزنی شکل، به قطر ۰/۶ میلی‌متر از جنس نقره استفاده کردند. الکتروودها به صورت خطی با فاصلهٔ ۱ سانتی‌متر در بافت میوه با عمق ثابت فرو برده شده بود. هارکر در تحقیقات بعدی خود از همین جنس الکتروود و با همین ابعاد استفاده کرد با این تفاوت که به جای ۴ الکتروود از ۵ الکتروود که به صورت شعاعی در بافت میوه فرو برده شده بود، بهره گرفت (Harker and Forbes, 1997; Jackson and Forbes, 1997; Harker, 1994). Puchalski, 2000) مقاومت الکتریکی

سیب را با استفاده از الکتروودهایی با صفحه‌های باریک از جنس کروم و به عرض ۱۰ میلی‌متر و طول ۱۴ میلی‌متر که با فاصلهٔ ۱۵ میلی‌متر روی قطعه‌ای پلاستیکی قرار داده شده بود، اندازه‌گیری کرد. همچنین او در تحقیق دیگری برای اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی بافت له‌شده سیب از این الکتروودها استفاده کرد (Puchalski and Brusewitz, 2000). فقط در آزمایش‌های انجام‌شده به وسیلهٔ (Jha and Matsuoka, 2004) از روش غیرمخرب استفاده شده است.

آن‌ها برای اندازه‌گیری تغییرات مقاومت الکتریکی بادمجان در طول زمان از دو الکتروود پلاتینی به قطر ۰/۴ میلی‌متر که روی صفحه‌ای قابل تنظیم چسبانده شده بود، استفاده کردند. الکتروودهای پلاتینی با فاصله ۱۰ میلی‌متر از یکدیگر روی این صفحه قرار داده شده بود تا بتواند از خمیدگی میوه به خوبی پیروی کند. این صفحه الکتروودها را به سطح میوه می‌فشارد. برای اعمال فشار ثابت به الکتروودها، از فنر استفاده شده بود. این فنر در پشت صفحه‌ای که الکتروودها را به سطح میوه می‌فشارد، قرار داده شده بود. با توجه به فشار الکتروودهای پلاتینی بر سطح میوه، استفاده از این روش برای میوه‌هایی که بافت تردی دارند ممکن است سبب آسیب‌رساندن به بافت سطحی میوه شود.



شکل ۲. شماتیک دستگاه اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی میوه

پایه اصلی: این قطعه پایه اصلی دستگاه است. وظیفه اصلی این قطعه تنظیم وضعیت قرارگیری قاب در وضعیت دلخواه است و به‌گونه‌ای طراحی شده که وضعیت قرارگیری فک دستگاه روی آن (به‌صورت عمودی)، در ارتفاع‌های گوناگون، متناسب با نوع میوه تنظیم‌پذیر و تعادل لازم برای قرارگیری انواع میوه‌ها را دارد.

قاب: وظیفه این مجموعه قراردادن فک‌ها در مقابل یکدیگر به‌صورت کاملاً متقارن و هم‌راستاست. این قطعه به‌گونه‌ای طراحی شده است که هر دو فک بتوانند برای قرارگیری انواع میوه‌ها با ابعاد گوناگون، به جلو و عقب حرکت کنند. ابعاد قاب امکان قراردادن میوه‌هایی با حداکثر قطر ۲۵ سانتی‌متر را فراهم می‌سازد. محور قاب به قطر ۲۰ میلی‌متر است و با دو یاتاقان بلبرینگ به پایه اصلی متصل می‌شود. روی یک سمت قاب، مبدل نیرو نصب می‌شود. یکی از فک‌ها روی قاب پیچ شده و فک دیگر به مبدل نیرو متصل می‌شود. این فک با استفاده از دو مهره M12 به قطعه رابطی که روی مبدل نیرو بسته شده است، متصل می‌شود.

فک: این بخش برای اتصال بین میوه و الکتروود ساخته شده است. این مجموعه با فرایند تراشکاری، از جنس پلی‌اتیلن تولید شده است. فک‌ها از دو قسمت بدنه و درپوش تشکیل شده‌اند. بخش داخلی بدنه توخالی بوده و دارای جداره‌ای به ضخامت ۵ میلی‌متر است. سطح بیرونی بدنه و سطح داخلی درپوش رزوه $M140 \times 1.5$ شده‌اند تا روی یکدیگر پیچیده شوند و صفحه مسی را بین دو فک محکم نگه‌دارند. این دو قطعه تشکیل محفظه توخالی را می‌دهد. صفحه مسی بین این دو قطعه قرار



شکل ۱. دستگاه ساخته‌شده مجهز به مبدل نیرو برای اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی میوه

وسایل و قطعات اصلی به‌کاررفته در این دستگاه عبارت‌اند از: LCR متر، مبدل نیرو، نمایشگر، پایه اصلی، قاب، و فک^۱. (شکل ۲)

LCR متر: این وسیله برای اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی و ظرفیت خازنی میوه استفاده می‌شود. با اتصال الکتروودها به LCR متر، دستگاه قادر به اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی و مقاومت خازنی میوه است (Chy Firemate, 41R, Taiwan). این دستگاه قابلیت استفاده در دو بسامد 1 kHz و 12 Hz را داراست.

مبدل نیرو: این قطعه به‌منظور اندازه‌گیری نیروی وارده از سوی فک‌ها به میوه در نظر گرفته شده است. مبدل نیروی (Zemic, L6D, China) استفاده‌شده در آزمایش‌ها، از نوع مبدل نیروی تک پایه^۲ با ظرفیت کاری ۹۸ نیوتن و دقت 0.4% درصد نیوتن بود. جنس این مبدل نیرو از آلیاژ آلومینیوم است و به‌وسیله پیچ از یک سو به قاب بسته‌شده و از سوی دیگر به کمک یک قطعه رابط به یکی از فک‌ها متصل شده است. شایان ذکر است این مبدل نیرو دارای گواهی کالیبراسیون بود. همچنین برای کنترل کالیبراسیون مبدل نیرو از وزنه‌های استاندارد استفاده شد.

نمایشگر: نمایشگر -XK3190 (Shanghai Yaohua, XK3190) برای نمایش نیروی وارده به میوه به‌کار برده شده است.

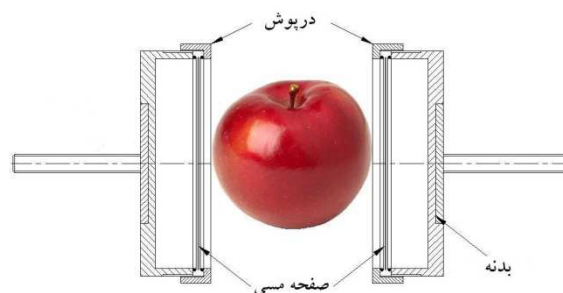
1. Probe.
2. Single Point.

تمام دوره آزمایش استفاده شد. الکترودهای بهره‌گرفته در این دستگاه، به سیم‌هایی به طول یک متر با فرایند لحیم‌کاری متصل شده بود. فک‌ها، الکترودها را با نیروی ثابت به سطح میوه می‌چسباند. با استفاده از نمایشگر و مبدل نیروی نصب‌شده روی دستگاه، نیروی واردشده به سطح میوه‌ها در تمام آزمایش‌ها در مقدار ثابت تنظیم شده بود. برای میوه سیب نیروی واردشده به میوه، به میزان $9/8$ نیوتن تنظیم شده است.

سیم‌های انتخاب‌شده از نوع سیم سرخ^۱ باغ‌های اطراف کرج بود. ۲۰ عدد سیم با میانگین وزن $196/95$ گرم در آزمایش‌ها استفاده شد. نمونه‌های سیم بلافاصله پس از برداشت برای آزمایش به آزمایشگاه منتقل شده بود. آزمایش‌ها در محیطی با دمای 22 ± 2 °C با فاصله زمانی ۱۲ ساعت در دو بسامد جریان 120 Hz و 1 kHz تا پلاسیدگی کامل میوه‌ها انجام گرفت. بسامدها بر اساس تحقیقات انجام‌شده در این زمینه انتخاب شده است (Harker and Dunlop, 1994; Bauchot *et al.*, 2000; Harker and Forbes, 1997). در اکثر این پژوهش‌ها، آزمایش‌ها در چندین بسامد، هم در بسامدهای پایین و هم در بسامدهای بالا انجام شده است. بنابراین، در این آزمایش‌ها از بسامد پایین 120 Hz و از بسامد بالا 1 kHz استفاده شده است. با توجه به این که ابعاد میوه نیز بر میزان جریان عبوری تأثیرگذار است، دو سمت میوه‌ها با استفاده از ماژیک علامت‌گذاری شد، تا راستای قرارگیری میوه در هر اندازه‌گیری، در جهت مشخص و ثابت قرار داده شود. فاصله زمانی برای انجام آزمایش‌ها در منابع بررسی‌شده متفاوت بوده (از ۱۲ ساعت تا ۵ روز) و دلیل خاصی برای آن ذکر نشده است. تغییرات وزن نمونه در طول آزمایش با ترازوی 600 گرمی (Packet Scale, 600gr, China) با دقت $0/1$ گرم اندازه‌گیری شد. رطوبت میوه در انتهای آزمایش با روش خشک‌کردن در گرمکن در دمای 70 درجه سانتی‌گراد به مدت 48 ساعت، اندازه‌گیری شد.

به کمک نرم‌افزار Excel منحنی و معادله تغییرات برای نتایج حاصل از اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی سیب تعیین شده است. معادله هر منحنی به همراه ضریب تغییرات آن بر روی هر نمودار ذکر شده است.

می‌گیرد. همچنین فضای خالی ایجادشده در بدنه به صفحه مسی این امکان را می‌دهد که به خوبی از انحناى سطح میوه پیروی کند. ابعاد انتخاب‌شده برای فک‌ها و فرم صفحه مسی این امکان را فراهم می‌سازد که الکترودها به خوبی از انحناى سطح میوه‌هایی با ابعاد گوناگون پیروی کند. ابعاد فک، انجام آزمایش بر میوه‌هایی با ابعاد بزرگ را نیز ممکن می‌سازد (شکل ۳).



شکل ۳. شماتیک قرارگیری صفحه مسی بین درپوش و بدنه

برای تنظیم وضعیت قرارگیری فک روی قاب از پیچ تنظیم استفاده شده است. این قطعه در پشت فک‌ها قرار می‌گیرد و امکان تنظیم موقعیت فک‌ها را فراهم می‌سازد. این قطعه از صفحه‌ای گرد به قطر 8 سانتی‌متر و پیچ M12 به طول 20 سانتی‌متر تشکیل شده است که با فرایند جوش کاری به یکدیگر متصل شده‌اند. این مجموعه با فشار در پشت بدنه پلی‌اتیلنی جا زده می‌شود. در ساخت این فک‌ها به منظور اندازه‌گیری غیرمخرب مقاومت الکتریکی محصول به جای الکترودهای سوزنی از صفحه مسی با ضخامت $0/03$ میلی‌متر استفاده شده است. ضخامت انتخاب‌شده برای صفحه‌های مسی هم استحکام لازم برای اعمال نیرو و هم انعطاف‌پذیری مناسب برای انطباق با انحناى سطح میوه را داراست. قطر صفحه مسی 4 میلی‌متر بزرگ‌تر از قطر داخلی درپوش در نظر گرفته شده است تا آزادی لازم برای پیروی از انحناى سطح میوه را داشته باشد.

همان‌طور که بیان شد، برای اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی در این آزمایش‌ها از دستگاه LCR متر استفاده گردید. مقاومت الکتریکی در دو بسامد جریان 120 Hz و 1 kHz اندازه‌گیری شد و از الکترودهای صفحه‌ای مسی، که در دو سمت میوه آزمایش شده بود، استفاده گردید. برای تماس الکترودها با میوه از مقدار نیروی ثابت در

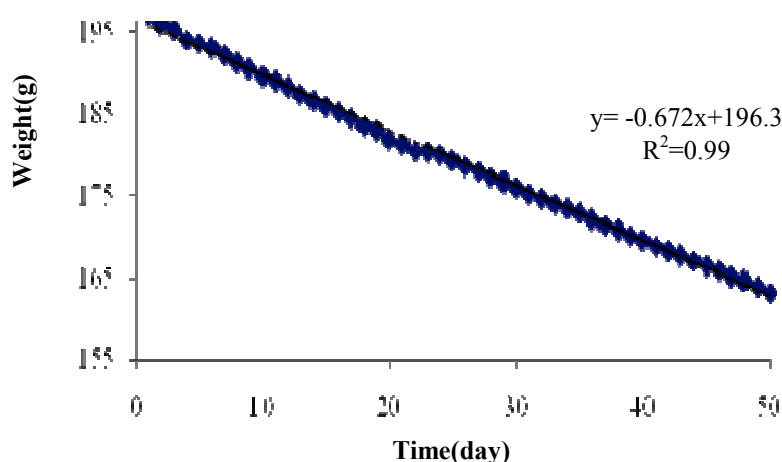
1 . Red Delicious.

نتایج و بحث

آزمایش‌ها در قالب طرح کاملاً تصادفی در ۲۰ تکرار انجام شد و تحلیل داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SAS9 انجام گرفت. نتایج تجزیه واریانس داده‌های حاصل از اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی نسبت به زمان، در هر دو بسامد، بررسی شده است (جدول ۱). با استفاده از نتایج تغییرات وزن محصول، تغییر مقدار رطوبت سیب‌ها در مدت نگهداری آنها در محیط آزمایشگاه محاسبه شده است. نتایج تغییرات وزن

سیب‌ها در شکل ۴ نشان داده شده است. مقدار رطوبت سیب بر پایه تر، در ابتدای دوره زمانی انجام آزمایش‌ها ۸۱ درصد بوده است که در انتهای دوره ۵۰ روزه به مقدار ۷۷ درصد کاهش یافته است.

نتایج حاصل از تجزیه واریانس داده‌ها در جدول ۱ نشان داده شده است. براساس نتایج این جدول، اختلاف میانگین مقاومت الکتریکی در فاصله زمانی انتخاب‌شده، در هر دو فرکانس جریان استفاده‌شده در آزمایش‌ها، در سطح ۱ درصد معنادار بود



شکل ۴. تغییرات وزن نمونه‌های سیب در طول آزمایش

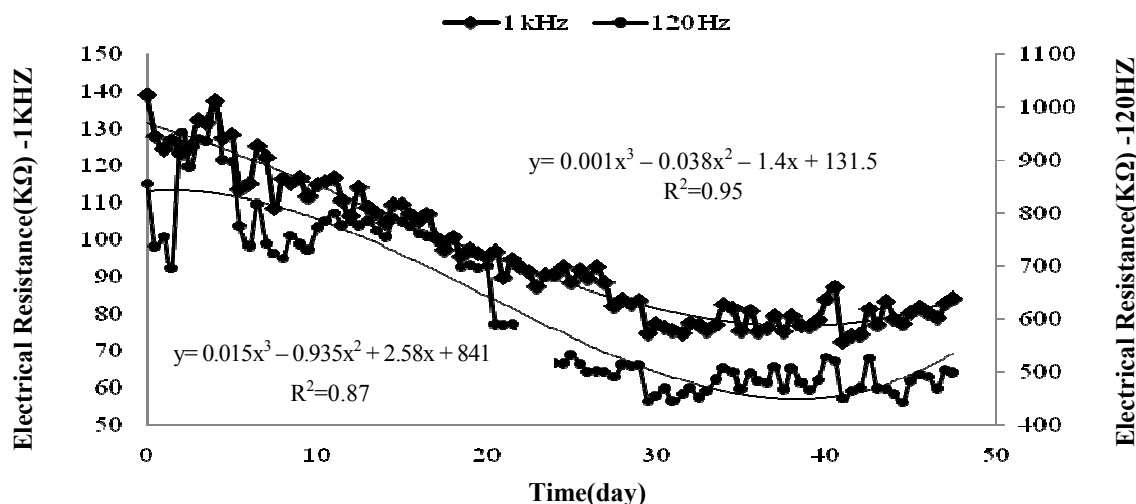
جدول ۳. نتایج تجزیه واریانس مقاومت الکتریکی در فاصله زمانی انتخاب‌شده

منبع تغییر	درجه آزادی		SSمجموع مربعات		MS میانگین مربعات		F	
	۱۲۰ Hz	۹۵ kHz	۱۲۰ Hz	۹۵ kHz	۱۲۰ Hz	۹۵ kHz	۱۲۰ Hz	۹۵ kHz
تیمار	۹۵	۹۵	۲۳۹۴۲۹۷۵/۴	۴۸۱۸۲۱/۹	۲۵۲۰۳۱/۳	۵۰۷۱/۸	۱۰/۹۷**	۲۱/۰۵**
اشتباه	۱۴۴۰	۱۳۴۴	۳۳۰۹۵۶۳۴/۷	۳۲۳۸۶۱/۴	۲۲۹۸۳/۰۸	۲۴۰/۹		
کل	۱۵۳۵	۱۴۳۹	۵۷۰۳۸۶۱۰/۱	۸۰۵۶۸۳/۴				

**در سطح ۱ درصد معنی‌دار است.

آزمایشگاه در شکل ۶ نشان داده شده است. تصویر سیب‌های آزمایش‌شده در ابتدا و انتهای دوره زمانی نگهداری میوه‌ها در محیط آزمایشگاه در شکل ۶ نشان داده شده است.

نمودار میانگین نتایج اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی سیب‌ها در دو فرکانس جریان ۱۲۰ Hz و ۱ kHz در شکل ۵ نشان داده شده است. تصویر سیب‌های آزمایش‌شده در ابتدا و انتهای دوره زمانی نگهداری میوه‌ها در محیط



شکل ۵. میانگین مقاومت الکتریکی سیب در فرکانس‌های ۱۲۰Hz و ۱kHz



شکل ۶. سیب‌ها در ابتدا و انتهای دوره‌ی زمانی انجام آزمایش

بنابراین، کاهش این مواد در میوه خود عاملی برای کاهش مقاومت الکتریکی است.

فرایند تنفس میوه موجب ازدست‌دادن رطوبت محصول و کاهش مقدار آب میوه سبب افزایش غلظت یونی در بافت میوه می‌شود. افزایش غلظت یون‌ها در الکترولیت سبب کاهش مقاومت الکتریکی ماده می‌گردد. به بیان دیگر با افزایش غلظت یونی مقاومت الکتریکی محصول کاهش می‌یابد. البته افزایش بیش از حد غلظت یون‌ها سبب تغییر این روند می‌شود. زیرا مقدار آب موجود در بافت میوه بر تحرک یون‌ها مؤثر است. با ادامه‌ی کاهش رطوبت میوه، غلظت یونی به میزان زیادی افزایش و در مقابل تحرک یونی کاهش می‌یابد. مجموع این دو عامل سبب تأثیر معکوس افزایش غلظت یونی بر مقدار مقاومت الکتریکی بافت می‌شود. بدین معنا که با ادامه‌ی کاهش آب موجود در بافت و افزایش غلظت یونی، روند تغییرات مقاومت الکتریکی معکوس می‌گردد. بنابراین،

همان‌طور که در تصاویر مشاهده می‌شود تا روز ۲۵، پلاستیسیته در نمونه‌های سیب نمود ظاهری چندانی نیافته در حالی که مقاومت الکتریکی کاهش یافته است. تغییرات مقاومت الکتریکی بافت میوه نشان‌دهنده‌ی تغییرات ساختاری بافتی میوه است.

قرارگیری سیب‌ها در دمای محیط، شرایط مناسبی برای ادامه‌ی فعالیت‌های بیولوژیکی میوه فراهم می‌کند. این امر سبب افزایش رسیدگی محصول می‌شود. در بافت میوه نارس با کاهش مقدار کلروفیل در بافت میوه، مقاومت الکتریکی افزایش می‌یابد (Liu, 2006) و گمان می‌رود نوسان‌های ابتدای نمودار تغییرات مقاومت الکتریکی با زمان، به همین دلیل بوده است. با ادامه‌ی فرایند رسیدن میوه، با افزایش رسیدگی مقدار مقاومت محصول کاهش می‌یابد.

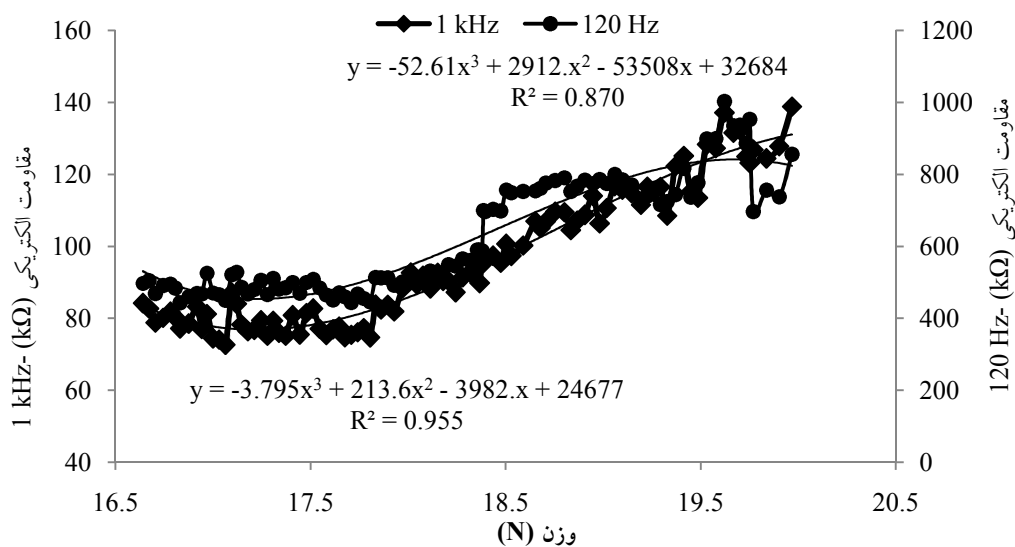
با افزایش میزان رسیدگی محصول مقدار مواد قندی در بافت میوه کاهش می‌یابد. مواد قندی در برابر عبور جریان عایق هستند (Harker and Forbes, 1997).

آورد. او با بررسی امپدانس الکتریکی خیار در طول فرایند خشک کردن نشان داد که با کاهش رطوبت محصول ابتدا امپدانس کاهش، و در ادامه روند خشک شدن میوه به طور ناگهانی افزایش می یابد.

رابطه بین کاهش وزن و مقاومت الکتریکی سیبها در دو بسامد جریان ۱۲۰ Hz و ۱ kHz در شکل ۷ نشان داده شده است.

در آزمایشهای انجام شده کاهش رطوبت محصول سبب کاهش مقاومت الکتریکی میوهها شده است

در ادامه آزمایشها مقاومت الکتریکی افزایش می یابد (Liu, 2006). بنابراین، می توان بیان کرد که تغییرات رطوبت در میوه از عوامل اصلی تغییرات مقاومت الکتریکی میوه است. نتایج به دست آمده در آزمایشهای انجام شده نیز، این مطلب را تأیید می کند. هارکر و دانلوپ (Harker and Dunlop, 1994) نتایج مشابهی برای میوه رسیده و نارس شلیل در طول دوره نگهداری در انبار به دست آوردند. همچنین، در تحقیقاتی که لیو (Liu, 2006) روی میوهها انجام داد، نتایج مشابهی در خصوص کاهش رطوبت و تغییر امپدانس میوه به دست



شکل ۷. رابطه تغییرات وزن میوه با تغییرات مقاومت الکتریکی در بسامدهای ۱۲۰ Hz و ۱ kHz

محصول در طول دوره نگهداری، نشان داد که وزن محصول در رابطه با زمان، به صورت کاملاً خطی کاهش می یابد. با توجه به نتایج حاصل از اندازه گیری مقاومت الکتریکی و اندازه گیری کاهش وزن محصول در دوره زمانی نگهداری محصول در دمای محیط، رابطه بین این پارامترها به این صورت بیان می شود که با کاهش رطوبت میوه و در نتیجه افزایش غلظت یونی، مقاومت الکتریکی میوه کاهش می یابد. با ادامه یافتن روند کاهش رطوبت، غلظت یونی بیش از حد افزایش می یابد و باعث معکوس شدن روند تغییرات مقاومت الکتریکی به دلیل کاهش تحرک یونی می شود. بدین معنا که روند تغییرات مقاومت الکتریکی میوه پس از کاهش، ثابت می شود و سپس افزایش می یابد.

نتیجه گیری

نتایج پژوهش حاضر به شرح زیر است:

با به کارگیری از الکتروود صفحه ای مسی امکان اندازه گیری مقاومت الکتریکی میوه، بدون آسیب رساندن به بافت آن فراهم شده است. استفاده از مبدل نیروی تک پایه در دستگاه ساخته شده این امکان را ایجاد کرد که تماس یکنواختی در تمام آزمایشها بین میوه و الکتروودهای صفحه ای ایجاد گردد.

نتایج آزمایشهای انجام شده بیانگر آن بود که در صورت نگهداری سیب در دمای محیط و در نتیجه ادامه یافتن فرایند رسیدن میوه، تغییرات مقاومت الکتریکی نسبت به زمان، به فرم تابع درجه سوم تغییر می یابد. نتایج آزمایشهای اندازه گیری تغییر وزن

REFERENCES

1. Bauchot, A. D., Harker, F. R., & Arnold, W. M., (2000). The use of electrical impedance spectroscopy to assess the physiological condition of kiwifruit. *Postharvest Biology and technology*, 18, 9-18.
2. Desai, M., & Liang, T., (1977). Electrical impedance as an index of macadamia nut ripeness. *Transactions of ASAE*, 77(3), 444-449.
3. Furmanski, R. J., & Buescher, R. W., (1979). Influence of chilling on electrolyte leakage and internal conductivity of peach fruits. *Hort Science*, 14, 167-168.
4. Harker, F. R., & Dulop, J., (1994). Electrical impedance studies of nectarines during coolstorage and fruit ripening. *Postharvest Biology and Technology*, 4, 125-134.
5. Harker, F. R., & Forbes, S. K., (1997). Ripening and development of chilling injury in persimmon fruit: an electrical impedance study. *New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science*, 25, 149-157.
6. Jackson, P. J., & Harker, F. R., (2000). Apple bruise detection by electrical impedance measurement. *Hort Science*, 35(1), 104-107.
7. Jha, S. N., & Matsuoka, T., (2004). Changes in electrical resistance of eggplant with gloss, weight and storage period. *Biosystems Engineering*, 87(1), 119-123.
8. Liu, X., (2006). Electrical impedance spectroscopy applied in plant physiology studies. Dissertation of Master of Engineering. RMIT University, School of Electrical and Computer Engineering Science, Engineering and Technology Portfolio.
9. Lougheed, E. C., Miller, S. R., Miller, B. D., & Cline, R. A., (1981). Electrical impedance of diaminozide and calcium-treated McIntosh apple. *Experimentia*, 37, 835-837.
10. Ohnishi, S., Shimiya, Y., Kumagai, H., & Miyawaki, O., (2004). Effect of freezing on electrical and rheological properties of food materials. *Food Science Technology Research*, 10(4), 453-459.
11. Puchalski, C., (1994). Study of electrical resistance of apple. *International Agrophysics*, 8, 439-444.
12. Puchalski, C., & Brusewitz, G. H., (2000). Apple bruise resistance determination using an electrical universal bridge. *Int. Agrophysics*, 14, 411-416.
13. Rao, M. A., Rizvi, S. S., H. & Datta, A. K., (2005). *Engineering Properties of foods*. Published in 2005 by CRC Press Taylor & Francis Group, Third edition.
14. Rotz, C.A., & Mohsenin, N. N., (1978). A note on potential applications of physical properties of bruised tissue of apples for automated sorting. *Transactions of ASAE*, 21(4), 790-792, 798.
15. Weaver, G. M., & Jackson, H. O., (1966). Electric impedance, an objective index of maturity in peach. *Canadian journal of plant science*, 46, 323-326.
16. Wu, L., Ogawa, Y., & Tagawa, A., (2008). Electrical impedance spectroscopy analysis of eggplant pulp and effects of drying and freezing-thawing treatments on its impedance characteristics. *Journal of Food Engineering*, 87, 274-280.
17. Zachariah, G., (1976). Electrical properties of fruits and vegetables for quality evaluation. Pp. 98-101 in: Quality detection in foods. Gaffney, J. J. ed. St. Joseph, Michigan, *American Society of Agricultural Engineers*.
18. Zhang, M. I. N., & Willison, J. H. M., (1992). Electrical impedance analysis in plant tissues: in vivo detection of freezing injury. *Canadian journal of botany*, 70, 2254-2258.