

طراحی و ارزیابی یک سامانه حسگر خازنی برای تعیین غیر مخرب میزان رسیدگی گوجه فرنگی

عباس رضایی اصل^{۱*}، عاطفه حاجیلری^۲، محسن آزادبخت^۳

^{۱*} دانشیار، مهندسی مکانیک بیوسیستم، علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران.

^۲ دانش آموخته کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک بیوسیستم، علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران.

^۳ استاد، مهندسی مکانیک بیوسیستم، علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران.

تاریخ ارسال: ۱۴۰۵/۰۳/۲۶ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۴/۲۳

چکیده

در این پژوهش، یک سامانه حسگر خازنی صفحات موازی برای ارزیابی غیرمخرب میزان رسیدگی گوجه فرنگی طراحی، ساخته و ارزیابی شد. هدف اصلی، بررسی قابلیت سامانه در برآورد ویژگی‌های کیفی و فیزیکی-شیمیایی میوه بر اساس تغییرات ضریب دی‌الکتریک بود. نمونه‌های گوجه فرنگی رقم PS در سه سطح قطری (کمتر از ۴، ۴ تا ۶ و بیشتر از ۶ سانتی‌متر) انتخاب و به صورت کاملاً تصادفی مورد آزمایش قرار گرفتند. ظرفیت خازنی نمونه‌ها با استفاده از مدار RC و برد آردوینو UNO اندازه‌گیری شد. همچنین ویژگی‌های فیزیکی (ابعاد و جرم)، مکانیکی (سفتی بافت) و شیمیایی (اسیدیته و مواد جامد محلول کل) در شرایط آزمایشگاهی تعیین شدند. تجزیه و تحلیل داده‌ها در قالب طرح کاملاً تصادفی و با استفاده از نرم‌افزار SAS انجام گرفت و اثر عوامل فاصله صفحات و قطر نمونه‌ها با آزمون ANOVA و مقایسه میانگین LSD در سطح ۵ درصد بررسی شد. نتایج نشان داد که قطر میوه اثر معنی‌داری بر اغلب ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی داشت، در حالی که فاصله صفحات عمدتاً بر پاسخ دی‌الکتریک تأثیرگذار بود. همچنین اثر متقابل این دو عامل بر ضریب دی‌الکتریک در سطح ۱ درصد معنی‌دار بود که نشان‌دهنده حساسیت بالای سامانه طراحی شده است. افزایش قطر میوه منجر به افزایش ضریب دی‌الکتریک و کاهش شاخص‌هایی مانند بریکس و استحکام شد. در مقابل، تغییر فاصله صفحات تأثیر مستقیمی بر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی نداشت. به طور کلی، نتایج نشان داد که سامانه خازنی طراحی شده قابلیت مناسبی برای ارزیابی غیرمخرب میزان رسیدگی گوجه فرنگی داشته و می‌تواند به عنوان روشی سریع، کم‌هزینه و دقیق در کاربردهای پس از برداشت مورد استفاده قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: گوجه فرنگی، غیرمخرب، ظرفیت خازنی اندازه‌گیری شده، خصوصیات فیزیکی و شیمیایی

مقدمه

(Azadbakht et al., 2026). بسیاری از محققان با استفاده از

روش‌های غیرمخرب، شاخص‌های کیفیت و بلوغ میوه‌هایی نظیر سیب، آووکادو، انبه، گوجه فرنگی و غیره را مطالعه کرده اند (Soltani et al., 2011a). بر اساس اصول دی‌الکتریک، وقتی که ماده‌ای درون یک میدان الکتریکی متناوب قرار گیرد، ذرات باردار مثبت و منفی آن جسم دائماً نسبت به میدان تمایل نشان می‌دهند و با توجه به اینکه

روش‌های غیرمخرب به دلیل کم‌هزینه و قابل اعتماد بودن در ارزیابی کیفیت برخط، جایگزین تکنیک‌های پرهزینه و غیر عملی شده و به موضوعی برای مطالعه و تحقیق تبدیل شده است. همچنین روش غیرمخرب به عنوان روشی ایده آل در ارزیابی محصولات کشاورزی است زیرا باعث کاهش هزینه نهایی محصولات کشاورزی می‌شود.

توسط محققان مختلف اندازه گیری شده است. خصوصیات دی الکتریک بسیاری از مواد با چندین فاکتور مختلف تغییر می کنند. مقدار آب موجود در مواد بیولوژی و کشاورزی یک فاکتور غالب در تخمین خصوصیات دی الکتریک آنها به شمار می آید (Nelson & Jr, 2000). فرکانس میدان الکتریکی، درجه حرارت ماده، چگالی، ترکیبات و ساختار ماده، چگالی حجمی و میزان هوای موجود در بین نمونه در مواد گرانوله، محتوی نمک، محتوی رطوبت و حالت رطوبت (یخ زده، آزاد، مقید) از فاکتورهای اصلی هستند که بر روی خصوصیات دی الکتریک محصولات کشاورزی و مواد بیولوژی اثر می گذارند. مطالعات زیادی بر روی تأثیر تغییر فرکانس، درجه حرارت و محتوی رطوبت بر روی خصوصیات دی الکتریک صورت گرفته است (Feng et al., 2002). خصوصیات دی الکتریک و فاکتور کاهش دی الکتریک بسیاری از میوه ها و سبزیجات تازه در فرکانس ها و درجه حرارت های مختلف توسط افراد مختلف اندازه گیری شده اند. و این تحقیقات بطور واضح اثر درجه حرارت و فرکانس را بر روی خصوصیات دی الکتریک نشان می دهد بنابراین برای اندازه گیری این خصوصیات برای مواد مختلف باید این فاکتورها را مد نظر قرار دارد (Wanget al., 2005; Jiao et al., 2011).

در گوجه فرنگی، شاخص های مختلفی برای ارزیابی میزان رسیدگی شامل رنگ پوست، سفتی بافت، مواد جامد محلول کل^۱، اسیدیته قابل تیتراسیون^۲ و نسبت TSS/TA مورد استفاده قرار می گیرند. در میان این شاخص ها، نسبت مواد جامد محلول کل به اسیدیته به عنوان یکی از معتبرترین شاخص های رسیدگی و کیفیت طعم شناخته

درون محصولات کشاورزی، حرکت کاتیون ها، آنیون ها و مولکول های قطبی در مقایسه با ذرات دیگر بیشتر است (Azadbakht et al., 2020). از این رو بیشترین مصرف انرژی را به خود اختصاص می دهند و نیاز به رطوبت بالاتری دارند. از طرفی با اعمال آسیب های مکانیکی در میوه، علاوه بر بروز تغییرات مختلف در محصول، منجر به کبودی سطح و به همراه آن کوفتگی می شود که این میزان کوفتگی، سبب کاهش رطوبت محصولات کشاورزی می شود. بنابراین با اندازه گیری مقدار ضریب ثابت دی الکتریک محصولات کشاورزی می توان به مقدار تغییرات رطوبت آن پی برد (McKeown et al., 2012; Naderi-Boldaji et al., 2015). خواص دی الکتریک غذاها و مواد تولیدی آنها ارزش بسیار برای تعیین پارامترهای مهندسی غذاها و تکنولوژی های ساخت تجهیزات آنها را دارد. از طرفی دیگر اخیرا محققین به دنبال توسعه روش های غیرمخرب هستند تا بتوانند خصوصیات کیفی مواد غذایی را بدست آورند که این امر با دانستن خصوصیات دی الکتریک بسیار راحت تر می شود (García et al., 2004; Soltani et al., 2011). خصوصیات دی الکتریک برای پیش بینی مواد جامد محلول نیز استفاده می شود. دانستن خواص دی الکتریک غذاها می تواند به طراحی سیستم های دی الکتریک کمک فراوانی کند. همچنین دانستن خواص دی الکتریک مواد و اندازه گیری آن به تهیه و ساخت بهینه آن کمک بسیاری می کند. از آنجاکه مواد کشاورزی دارای خصوصیات دی الکتریک می باشند در طی دهه های اخیر مورد توجه قرار گرفته اند (Castro-Giráldez et al., 2010; Funebo & Ohlson, 1999a). این خصوصیات برای بسیاری از محصولات کشاورزی از جمله سبزیجات، میوه های تازه و مواد غذایی مختلف

² TA¹ TSS° یا Brix

شدند. به منظور بررسی تأثیر ابعاد میوه بر پاسخ سامانه خازنی، نمونه‌ها در سه گروه قطری شامل کمتر از ۴ سانتی‌متر (d1)، بین ۴ تا ۶ سانتی‌متر (d2) و بیشتر از ۶ سانتی‌متر (d3) طبقه‌بندی شدند (شکل ۱). از هر گروه قطری ۹ نمونه انتخاب گردید و در مجموع ۲۷ نمونه مورد آزمایش قرار گرفت. انتخاب نمونه‌ها به صورت کاملاً تصادفی انجام شد و تنها میوه‌هایی مورد استفاده قرار گرفتند که فاقد هرگونه آسیب ظاهری، ترک‌خوردگی، لهیدگی و علائم بیماری بودند. پس از برداشت، نمونه‌ها در کوتاه‌ترین زمان ممکن و حداکثر ظرف مدت ۳ ساعت به آزمایشگاه فیزیک دانشکده علوم و مهندسی آب و خاک دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان منتقل شدند. تمامی آزمایش‌های مربوط به اندازه‌گیری ظرفیت خازنی، ویژگی‌های فیزیکی، مکانیکی و شیمیایی در شرایط آزمایشگاهی انجام گرفت. تمامی اندازه‌گیری‌ها در شرایط آزمایشگاهی و طی یک بازه زمانی کوتاه انجام شد تا تغییرات شرایط محیطی به حداقل برسد. همچنین دمای محیط آزمایش در حدود ۲۰°C و رطوبت نسبی در حدود ۶۸٪ حفظ شد و کلیه نمونه‌ها پیش از انجام آزمون‌ها برای رسیدن به تعادل دمایی در همین شرایط نگهداری شدند.

طراحی و ساخت سامانه اندازه‌گیری خازنی

به منظور اندازه‌گیری ظرفیت الکتریکی نمونه‌های گوجه‌فرنگی، یک سامانه حسگر خازنی صفحات موازی طراحی و ساخته شد. این سامانه از بخش‌های مختلف شامل بدنه نگهدارنده، صفحات خازنی، برد آردوینو UNO، نمایشگر LCD، ماژول رابط I2C، مقاومت، برد بورد و سیم‌های ارتباطی تشکیل شد.

می‌شود، زیرا تغییرات همزمان قندها و اسیدهای آلی را در طی فرآیند رسیدگی منعکس می‌کند. همچنین کاهش سفتی بافت و افزایش مواد جامد محلول کل از مهم‌ترین تغییرات فیزیولوژیکی میوه در طی رسیدگی محسوب می‌شوند. با توجه به اهمیت توسعه روش‌های سریع، دقیق و غیرمخرب برای ارزیابی کیفیت محصولات کشاورزی و محدودیت روش‌های متداول اندازه‌گیری، هدف از این پژوهش طراحی و ساخت یک سامانه حسگر خازنی مبتنی بر خواص دی‌الکتریک و ارزیابی قابلیت آن در تعیین غیرمخرب میزان رسیدگی گوجه‌فرنگی بود. همچنین تأثیر قطر میوه و فاصله صفحات حسگر بر پاسخ دی‌الکتریکی سامانه و ارتباط آن با برخی ویژگی‌های فیزیکی، مکانیکی و شیمیایی شامل مواد جامد محلول کل، اسیدیته و استحکام بافت مورد بررسی قرار گرفت. نوآوری این پژوهش در طراحی و ساخت یک سامانه اندازه‌گیری خازنی کم‌هزینه مبتنی بر برد Arduino UNO با صفحات حسگر دارای فاصله قابل تنظیم است که امکان ارزیابی غیرمخرب گوجه‌فرنگی را فراهم می‌کند. همچنین، اثر هم‌زمان فاصله صفحات حسگر و قطر میوه بر پاسخ سامانه و ارتباط آن با برخی شاخص‌های کیفی شامل مواد جامد محلول کل، اسیدیته و سفتی بافت مورد بررسی قرار گرفت. این ویژگی، سامانه پیشنهادی را به ابزاری مناسب برای توسعه روش‌های غیرمخرب ارزیابی کیفیت محصولات باغی تبدیل می‌کند.

مواد و روش‌ها

تهیه نمونه‌ها

در این پژوهش، از گوجه‌فرنگی رقم پی‌اس (Solanum lycopersicum) به عنوان محصول مورد مطالعه استفاده شد. نمونه‌ها در مرحله بلوغ فیزیولوژیک و در یک روز برداشت



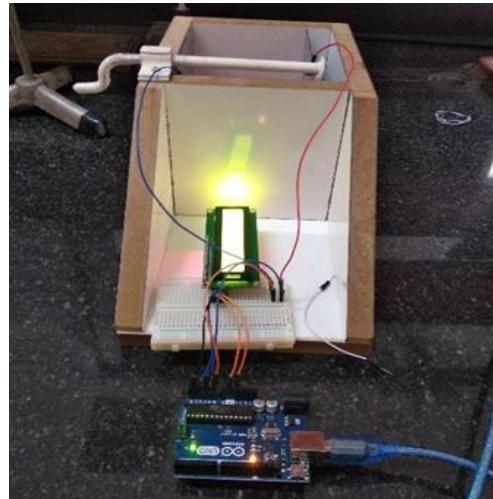
شکل ۱. نمونه های تهیه شده برای آزمایش

Fig. 1. Samples Prepared for the Experiment.

بدنه سامانه



سامانه ساخته شده



شکل پلتفرم آردوینو



شکل ۲- نمای کلی از سامانه و تجهیزات استفاده شده

Fig. 2. Schematic Overview of the Experimental System and Equipment Used

ساخت بدنه سامانه

بدنه سامانه به گونه‌ای طراحی شد که ضمن تأمین استحکام مکانیکی مناسب، کمترین تأثیر را بر میدان الکتریکی ایجاد شده بین صفحات خازنی داشته باشد. به همین منظور از ورق MDF برای ساخت بدنه استفاده شد. این ماده به دلیل چگالی مناسب، استحکام کافی، سهولت ماشین‌کاری و مقاومت نسبتاً مطلوب در برابر رطوبت، گزینه مناسبی برای ساخت سازه محسوب می‌شود. همچنین به دلیل ماهیت غیرفلزی، از ایجاد ظرفیت ناخواسته و تداخل در اندازه‌گیری‌ها جلوگیری می‌کند. بدنه اصلی از یک صفحه MDF با ابعاد $120 \times 120 \times 20$ میلی‌متر ساخته شد و اجزای مختلف سامانه بر روی آن نصب گردیدند. همچنین دو قطعه جانبی برای نگهداری صفحات حسگر و ایجاد امکان جابه‌جایی یکی از صفحات به منظور تنظیم فاصله بین صفحات در نظر گرفته شد.

طراحی حسگر خازنی

حسگر خازنی مورد استفاده از نوع صفحات موازی بود. صفحات حسگر از ورق آلومینیومی با ابعاد 120×120 میلی‌متر و ضخامت 0.2 میلی‌متر ساخته شدند. آلومینیوم به دلیل هدایت الکتریکی مناسب، مقاومت در برابر خوردگی و پایداری ابعادی برای ساخت صفحات انتخاب گردید. یکی از صفحات خازن به بدنه ثابت شد و صفحه دیگر قابلیت حرکت در راستای افقی را داشت. این طراحی امکان تنظیم فاصله بین صفحات را فراهم نمود تا اثر فاصله صفحات بر ظرفیت خازنی سامانه مورد بررسی قرار گیرد. در هنگام اندازه‌گیری، نمونه گوجه‌فرنگی در فضای بین صفحات قرار داده می‌شد و تغییرات ظرفیت خازنی ناشی از خصوصیات دی‌الکتریک میوه ثبت می‌گردید.

سامانه الکترونیکی اندازه‌گیری

کنترل سامانه و پردازش داده‌ها توسط برد آردوینو UNO مبتنی بر میکروکنترلر ATmega328P انجام شد. برد آردوینو UNO مورد استفاده مجهز به میکروکنترلر ATmega328P با فرکانس کاری 16 MHz است. این برد دارای 32 کیلوبایت حافظه Flash (که حدود 0.5 کیلوبایت آن توسط Bootloader اشغال می‌شود)، 2 کیلوبایت حافظه SRAM و 1 کیلوبایت حافظه EEPROM است. همچنین از یک مبدل آنالوگ به دیجیتال (ADC) با تفکیک‌پذیری 10 بیت و 6 ورودی آنالوگ بهره می‌برد که امکان اندازه‌گیری دقیق ولتاژ خازن در مدار RC را فراهم می‌کند. این مشخصات باعث شده است که برد آردوینو UNO گزینه‌ای مناسب برای اندازه‌گیری زمان شارژ خازن، پردازش داده‌ها و کنترل سامانه حسگر خازنی باشد.

این برد وظیفه اندازه‌گیری زمان شارژ خازن، محاسبه ظرفیت الکتریکی و نمایش نتایج را بر عهده داشت. برای نمایش مقادیر اندازه‌گیری شده از نمایشگر کاراکتری 16×2 استفاده شد که از طریق مازول رابط I2C به برد آردوینو متصل گردید. برنامه کنترل سامانه در محیط Arduino IDE توسعه داده شد. پس از برنامه‌نویسی، کدها بر روی برد بارگذاری شده و عملیات اندازه‌گیری به صورت خودکار انجام گرفت.

اصول اندازه‌گیری ظرفیت خازنی

اندازه‌گیری ظرفیت در سامانه طراحی شده بر اساس ثابت زمانی مدار RC انجام شد. در این روش، خازن از طریق یک مقاومت با مقدار معلوم شارژ شده و مدت زمان لازم برای رسیدن ولتاژ خازن به $63/2$ درصد ولتاژ نهایی اندازه‌گیری می‌شود. با توجه به رابطه بین ثابت زمانی مدار و ظرفیت خازن، ظرفیت الکتریکی از (۱) زیر محاسبه گردید:

(۱) $T_c = R \times C$ (H)، قطر عرضی (D1) و قطر طولی (D2) تعیین و ثبت گردید. ارتفاع به صورت فاصله بین محل اتصال دمگل تا انتهای میوه و قطرها در بزرگ‌ترین مقاطع عرضی و طولی اندازه‌گیری شدند. جرم نمونه‌ها توسط ترازوی دیجیتال با دقت ۰/۰۱ گرم اندازه‌گیری و ثبت شد. قبل از انجام اندازه‌گیری‌ها، ترازو کالیبره گردید تا از صحت داده‌های ثبت شده اطمینان حاصل شود.

که در آن T_c ثابت زمانی مدار (ثانیه)، R مقاومت مدار (اهم) و C ظرفیت خازن (فاراد) است.

با اندازه‌گیری ثابت زمانی و با معلوم بودن مقدار مقاومت مدار، ظرفیت خازن از رابطه (۲) محاسبه شد:

$$C = T_c / R \quad (2)$$

اندازه‌گیری ویژگی‌های مکانیکی

به منظور تعیین سفتی بافت میوه، از دستگاه آزمون یونیورسال اینسترون^۳ استفاده شد (شکل ۳). آزمون نفوذ با استفاده از یک پروب استاندارد انجام گرفت. سرعت نفوذ پروب ۱۰ میلی‌متر در دقیقه تنظیم شد و عمق نفوذ برابر ۱۰ میلی‌متر در نظر گرفته شد. نقطه نفوذ در بخش جانبی میوه و در فاصله حدود ۲ سانتی‌متری از مرکز انتخاب گردید. در طی آزمون، نمودار نیرو-تغییر شکل توسط دستگاه ثبت شد. حداکثر نیروی لازم برای نفوذ و تخریب بافت میوه به عنوان شاخص سفتی در نظر گرفته شد.

اندازه‌گیری ویژگی‌های شیمیایی

اندازه‌گیری اسیدیته قابل تیتراسیون

اسیدیته قابل تیتراسیون نمونه‌ها به روش تیتراسیون تعیین شد. برای این منظور، مقدار مشخصی از عصاره رقیق شده میوه با محلول هیدروکسید سدیم ۰/۱ نرمال تیتر گردید. تیتراسیون تا رسیدن pH محلول به محدوده ۸/۱ تا ۸/۳ ادامه یافت و حجم محلول مصرفی ثبت شد. اسیدیته قابل تیتراسیون بر اساس حجم سود مصرفی محاسبه گردید.

در این سامانه از پایه‌های آنالوگ آردوینو برای شارژ و تخلیه خازن استفاده شد. ولتاژ خازن به وسیله مبدل آنالوگ به دیجیتال ۱۰ بیتی آردوینو اندازه‌گیری گردید. در این مبدل، ولتاژ صفر تا پنج ولت به بازه عددی صفر تا ۱۰۲۳ تبدیل می‌شود. هنگامی که ولتاژ خازن به ۶۳/۲ درصد ولتاژ نهایی رسید، زمان شارژ ثبت و ظرفیت محاسبه شد. به منظور افزایش دقت اندازه‌گیری، سامانه با استفاده از یک خازن مرجع کالیبره گردید و اثر ظرفیت داخلی میکروکنترلر در محاسبات لحاظ شد.

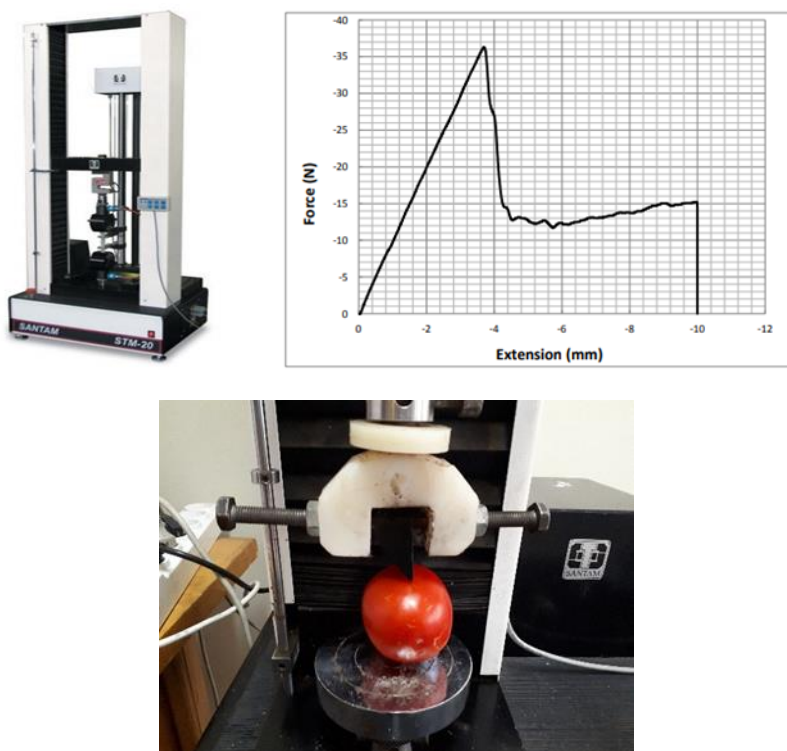
در این پژوهش، پارامتر اندازه‌گیری شده توسط سامانه، ظرفیت خازنی بود که از طریق اندازه‌گیری ثابت زمانی مدار RC محاسبه شد. با توجه به ثابت بودن ابعاد صفحات حسگر و فاصله بین آن‌ها در هر مرحله از اندازه‌گیری، تغییرات ظرفیت خازنی به عنوان شاخصی از تغییرات خواص دی‌الکتریک نمونه مورد استفاده قرار گرفت. بنابراین در ادامه مقاله، تغییرات ظرفیت خازنی بیانگر تغییرات نسبی رفتار دی‌الکتریک نمونه‌ها است.

اندازه‌گیری ویژگی‌های فیزیکی

ابعاد هندسی نمونه‌ها با استفاده از کولیس دیجیتال اندازه‌گیری شد. برای هر میوه سه بعد اصلی شامل ارتفاع

³ Santam STM-20

طراحی و ارزیابی یک سامانه حسگر خازنی برای تعیین غیرمخرب میزان رسیدگی گوجه‌فرنگی



شکل ۳- دستگاه نیرو سنج مورد استفاده و نمودار نیرو - تغییر شکل رسم شده توسط دستگاه اینسترون

Fig. 3. The Force Measuring Device Used in the Experiments and the Force-Deformation Curve Obtained from the Instron Testing Machine

طرح آزمایشی و تجزیه و تحلیل آماری

اندازه‌گیری مواد جامد محلول کل

آزمایش‌ها در قالب طرح کاملاً تصادفی انجام شد. عوامل مورد بررسی شامل قطر میوه در سه سطح (d_1 ، d_2 و d_3) و فاصله صفحات حسگر خازنی در سه سطح بود. متغیرهای پاسخ شامل ظرفیت خازنی، اسیدیته قابل تیتراسیون، مواد جامد محلول کل و سفتی بافت میوه بودند. داده‌های حاصل از آزمایش‌ها با استفاده از نرم‌افزار SAS نسخه ۹.۴ تجزیه و تحلیل شدند. برای بررسی اثر عوامل مورد مطالعه از تجزیه واریانس^۵ استفاده گردید. مقایسه میانگین‌ها در سطح احتمال ۵ درصد با استفاده از آزمون حداقل اختلاف معنی‌دار^۶ انجام شد. همچنین به منظور

مواد جامد محلول کل با استفاده از رفاکتومتر دستی اندازه‌گیری شد. پیش از هر مرحله اندازه‌گیری، دستگاه با آب مقطر کالیبره گردید. سپس چند قطره از عصاره میوه بر روی منشور دستگاه قرار داده شد و مقدار مواد جامد محلول از روی مقیاس دستگاه قرائت گردید. نتایج بر حسب درجه بریکس^۴ گزارش شدند.

با توجه به اینکه نسبت TSS/TA یکی از مهم‌ترین شاخص‌های رسیدگی گوجه‌فرنگی محسوب می‌شود، این نسبت نیز از داده‌های اندازه‌گیری شده محاسبه و برای تفسیر نتایج مورد استفاده قرار گرفت.

^۶ LSD

^۴ Brix

^۵ ANOVA

ارزیابی ارتباط بین ظرفیت خازنی و شاخص‌های رسیدگی میوه، ضرایب همبستگی بین متغیرها محاسبه و مورد بررسی قرار گرفت.

به منظور بررسی روابط بین ویژگی‌های الکتریکی، شیمیایی و مکانیکی میوه، تجزیه و تحلیل همبستگی بین متغیرها انجام گرفت. با توجه به ماهیت داده‌ها و احتمال وجود روابط غیرخطی بین صفات کیفی میوه، ضریب همبستگی رتبه‌ای اسپیرمن^۷ محاسبه شد. معنی‌داری ضرایب همبستگی در سطح احتمال ۵ درصد ارزیابی گردید. همچنین از ماتریس همبستگی به منظور تعیین میزان ارتباط بین ثابت دی‌الکتریک و شاخص‌های کیفی و مکانیکی گوجه‌فرنگی استفاده شد.

نتایج و بحث

نتایج تجزیه واریانس اثر فاصله صفحات حسگر خازنی و قطر میوه بر ویژگی‌های فیزیکی، مکانیکی و شیمیایی گوجه‌فرنگی در جدول ۱ ارائه شده است. نتایج نشان داد که اثر قطر میوه بر تمامی صفات فیزیکی شامل طول، عرض، ارتفاع و وزن در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود. این نتیجه بیانگر آن است که با افزایش قطر میوه، تغییرات قابل توجهی در ابعاد هندسی و جرم گوجه‌فرنگی ایجاد شده است. بیشترین مقدار آماره F مربوط به صفت عرض میوه (۳۷۷/۱۶) و سپس طول میوه (۳۵۳/۸۹) بود که نشان‌دهنده نقش تعیین‌کننده قطر در تغییرات ابعادی نمونه‌ها است. اثر فاصله صفحات حسگر بر صفات فیزیکی شامل طول، عرض، ارتفاع و وزن معنی‌دار نشد که نشان می‌دهد تغییر فاصله صفحات تأثیری بر ویژگی‌های هندسی و جرمی نمونه‌ها نداشته است. از سوی دیگر، اثر متقابل فاصله صفحات و قطر

میوه بر طول و وزن به ترتیب در سطوح ۵ و ۱ درصد معنی‌دار شد که بیانگر وابستگی پاسخ این صفات به ترکیب همزمان دو عامل مورد بررسی است. نتایج مربوط به ضریب دی‌الکتریک نشان داد که هر دو عامل فاصله صفحات و قطر میوه و همچنین اثر متقابل آنها در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بودند. مقدار بالای آماره F برای فاصله صفحات (۲۵۰۵/۱۸)، قطر میوه (۲۲۰۹/۹۵) و اثر متقابل آنها (۱۵۳۰/۷۹) نشان می‌دهد که ظرفیت و پاسخ دی‌الکتریکی سامانه خازنی به شدت تحت تأثیر شرایط هندسی حسگر و اندازه میوه قرار دارد. این نتیجه نشان‌دهنده حساسیت بالای سامانه طراحی‌شده در تشخیص تغییرات ویژگی‌های الکتریکی نمونه‌ها است. بررسی صفات مکانیکی نشان داد که فاصله صفحات و نه قطر میوه اثر معنی‌داری بر سفتی بافت نداشتند. همچنین اثر متقابل دو عامل نیز برای این صفت معنی‌دار نبود. با این حال، قطر میوه بر نیروی استحکام در سطح احتمال ۵ درصد تأثیر معنی‌دار نشان داد که بیانگر تفاوت مقاومت مکانیکی میوه‌ها در قطرهای مختلف است. در مقابل، فاصله صفحات و اثر متقابل آن با قطر بر نیروی استحکام تأثیر معنی‌داری نداشتند. در خصوص ویژگی‌های شیمیایی، نتایج نشان داد که قطر میوه اثر معنی‌داری بر مواد جامد محلول کل و اسیدیته قابل تیتراسیون داشت، به طوری که این اثر در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود. این موضوع نشان می‌دهد که تغییر اندازه میوه با تغییر در ترکیبات محلول و میزان اسیدهای آلی همراه بوده است. در مقابل، فاصله صفحات حسگر و اثر متقابل آن با قطر تأثیر معنی‌داری بر این صفات نشان ندادند. به طور کلی، نتایج نشان داد که قطر میوه مهم‌ترین عامل مؤثر بر ویژگی‌های

⁷ Spearman's rank correlation coefficient

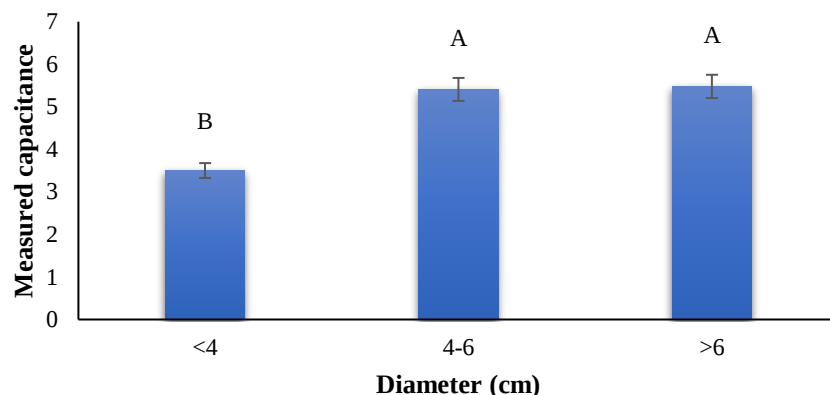
فیزیکی و شیمیایی گوجه‌فرنگی بوده است، در حالی که فاصله صفحات حسگر عمدتاً بر پاسخ دی‌الکتریک سامانه اثرگذار بوده است. معنی‌دار شدن اثر متقابل فاصله صفحات و قطر میوه بر ضریب دی‌الکتریک نیز نشان می‌دهد که انتخاب فاصله مناسب بین صفحات حسگر می‌تواند نقش مهمی در افزایش دقت سامانه خازنی برای ارزیابی غیرمخرب کیفیت و میزان رسیدگی گوجه‌فرنگی داشته باشد. با توجه به شکل ۴ کاملاً مشخص است که با افزایش سطوح مختلف قطر نمونه‌های گوجه‌فرنگی میزان ضریب ظرفیت خازنی اندازه‌گیری شده افزایش یافت. بین محدوده قطرهای کمتر از ۴ سانتی‌متر و ۴ تا ۶ سانتی‌متر برای مقدار مشخص شده از لحاظ آماری تفاوت معنی‌داری مشاهده شد. همچنین با افزایش سطوح محدوده قطر کمتر

از ۴ سانتی‌متر به بیشتر از ۶ سانتی‌متر میزان ضریب ظرفیت خازنی اندازه‌گیری شده افزوده شده و تفاوت معنی‌داری از لحاظ آماری بین این دو سطح از قطر نمونه‌ها دیده شد. مشاهده این نتیجه می‌تواند به دلیل ارتباط مستقیم قطر نمونه‌ها با میزان وزن آن‌ها باشد. به طوریکه با افزایش قطر نمونه‌ها میزان وزن نمونه‌ها افزایش یافته و در نتیجه با توجه به رابطه مستقیم وزن و ضریب ظرفیت خازنی اندازه‌گیری شده، این نتیجه گزارش شده است (Azadbakht et al., 2020). این نتیجه مطابق با یافته‌های مطالعاتی فونبو سال ۱۹۹۹ میلادی بر روی محصولاتی مانند سیب، جعفری، قارچ و توت‌فرنگی بود (Funebo & Ohlson, 1999b).

جدول ۱- آنالیز واریانس تاثیر عوامل فاصله صفحات و قطر نمونه‌ها بر خصوصیات فیزیکی، شیمیایی و مکانیکی نمونه‌های گوجه‌فرنگی
Table 1. Analysis of Variance (ANOVA) for the Effects of Plate Spacing and Sample Diameter on the Physical, Chemical, and Mechanical Properties of Tomato Samples

ظرفیت خازنی اندازه‌گیری شده Measured capacitance			سفتی Firmness		
منابع تغییر	درجه آزادی df	میانگین مربعات Mean Square	مقدار F F value	درجه آزادی df	میانگین مربعات Mean Square
فاصله صفحات Plate Spacing	۲	۱۲/۸۴	**۲۵۰۵/۱۸	۲	۱/۰۸
قطر Diameter	۲	۱۱/۳۲	**۲۲۰۹/۹۵	۲	۰/۱۵
فاصله×قطر Plate Spacing×Diameter	۴	۷/۸۴	**۱۵۳۰/۷۹	۴	۱/۰۵
بریکس Brix			اسیدیته Acidity		
فاصله صفحات Plate Spacing	۲	۱/۲۵	ns۳/۰۳	۲	۲/۴۸
قطر Diameter	۲	۶/۳۹	**۱۵/۴	۲	۲۲/۳۴
فاصله×قطر Plate Spacing×Diameter	۴	۰/۶۱	ns۱/۴۷	۴	۱/۰۶
نیروی استحکام Strength Force			انرژی Energy		
فاصله صفحات Plate Spacing	۲	۱۳/۹۰	ns۰/۶۶	۲	۲۵۸.۶
قطر Diameter	۲	۸۷/۷۸	*۴/۲۰	۲	۴۴۵۶.۳
فاصله×قطر Plate Spacing×Diameter	۴	۱۰/۳۱	ns۰/۴۹	۴	۱۲۵.۸

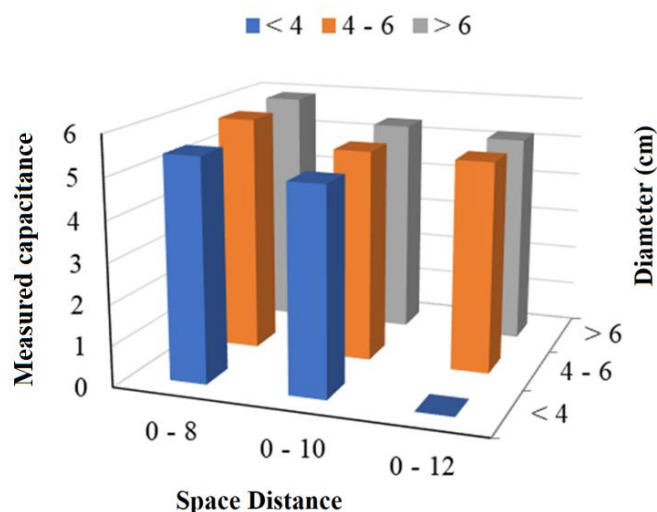
** معنی‌داری در سطح ۱ درصد، * معنی‌داری در سطح ۵ درصد و ns عدم معنی‌داری



شکل ۴- مقایسه میانگین اثر قطر نمونه بر میزان ظرفیت خازنی اندازه گیری شده نمونه های گوجه فرنگی
حروف مشابه نشان دهنده وجود عدم اختلاف معنی دار در بین سطوح مختلف می باشد.

Fig. 4. Comparison of the mean effect of sample diameter on the Measured capacitance of tomato samples.
Similar letters indicate that there is no significant difference among the different treatment levels.

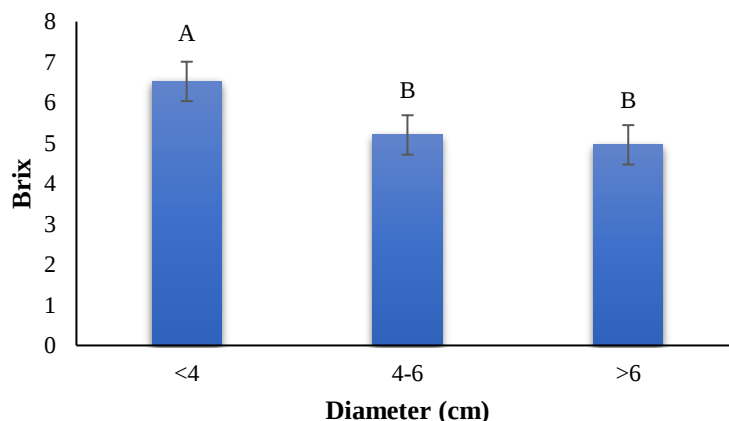
شکل ۵ اثر متقابل فاصله صفحات در قطر محصول گوجه فرنگی بر مقدار ظرفیت خازنی اندازه گیری شده را نشان می دهد. با توجه به این شکل می توان نتیجه گرفت که میزان ضریب ظرفیت خازنی اندازه گیری شده گوجه فرنگی با افزایش فاصله صفحات کاهش پیدا کرد و این برای هر سه سطح از محدوده قطر نمونه ها مشاهده شد. بین سطوح مختلف فاصله صفحات تفاوت معنی داری از لحاظ آماری مشاهده شد. همچنین محدوده قطر ۴-۶ سانتی متر و بیشتر از ۶ سانتی متر در هر سه سطح از فاصله صفحات تفاوت معنی داری مشاهده شد. در قطر کمتر از ۴ سانتی متر بین فاصله صفحه ۰-۱۲ سانتی متر معنی دار نشد، اما در فاصله صفحات ۰-۸ و ۰-۱۰ تفاوت معنی دار آماری داشته است.



شکل ۵- اثر متقابل فاصله صفحات در قطر محصول بر مقدار ظرفیت خازنی اندازه گیری شده نمونه های گوجه فرنگی

Fig. 5. Interactive effect of plate spacing and product diameter on the Measured capacitance of tomato samples.

در شکل ۶ مقایسه میانگین اثر قطر نمونه بر میزان بریکس نمونه های گوجه فرنگی نشان داده شده است. با توجه به این شکل می‌توان بیان کرد که با افزایش قطر نمونه ها، مقدار عددی شاخص بریکس کاهش یافته است. البته قابل ذکر است که بین سطوح قطر ۴-۶ و بیشتر از ۶ سانتی متر تفاوت معنی‌داری از لحاظ آماری مشاهده نشد؛ اما این دو سطح تفاوت معنی‌داری با قطر کمتر از ۴ سانتی متر داشتند. بیشترین مقدار بریکس در قطر نمونه های کمتر از ۴ سانتی متر ۶/۵۲ درصد اندازه گیری شده است. به دنبال دلایل این نتایج می‌توان اینگونه بیان کرد. در بین فاکتور قطر نمونه ها و رسیدگی محصول رابطه معکوسی وجود دارد؛ بطوریکه با افزایش قطر نمونه ها، مقدار رسیدگی محصول کاهش می‌یابد. در نهایت با در نظر گرفتن رابطه مستقیم بین رسیدگی و بریکس، می‌توان دلیل کاهش شاخص بریکس در نتیجه افزایش قطر نمونه ها را اینگونه توجیه کرد (Azadbakht *et al.*, 2019a).

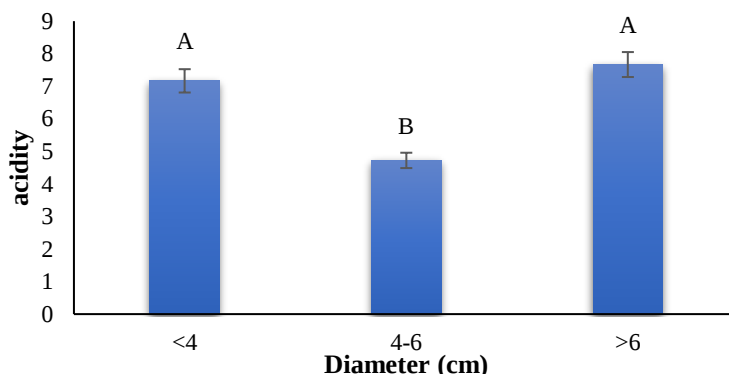


شکل ۶- مقایسه میانگین اثر قطر نمونه بر میزان بریکس نمونه های گوجه فرنگی

حروف مشابه نشان دهنده وجود عدم اختلاف معنی دار در بین سطوح مختلف می باشد.

Fig. 6. Comparison of the mean effect of sample diameter on the Brix content of tomato samples.
Similar letters indicate that there is no significant difference among the different treatment levels.

در شکل ۷ مقادیر مقایسه میانگین اثر قطر نمونه بر میزان اسیدیته نمونه های گوجه فرنگی نشان داده شده است. با توجه به این شکل کاملاً مشخص است که با افزایش سطوح مختلف قطر نمونه های گوجه فرنگی از کمتر از ۴ به بیشتر از ۶ سانتی متر، میزان اسیدیته افزایش یافت اما این افزایش معنی داری از لحاظ آماری نبود. بین محدوده قطرهای ۴-۶ سانتی متر و بیشتر از ۶ سانتی متر برای مقدار مشخص شده از لحاظ آماری تفاوت معنی‌داری مشاهده شد. بطوریکه با افزایش سطوح محدوده قطر ۴-۶ سانتی متر به بیشتر از ۶ سانتی متر میزان اسیدیته نمونه های گوجه فرنگی افزایش یافت و تفاوت معنی‌داری از لحاظ آماری بین این دو سطح از قطر نمونه ها دیده شد. این نتیجه اینگونه توجیه می‌شود. با توجه به رابطه مستقیم قطر نمونه و سطح رویه، با افزایش قطر نمونه ها، مقدار سطح رویه افزایش می‌یابد (Little & Holmes, 2000; Azadbakht, Vahedi, *et al.*, 2019).



شکل ۷- مقایسه میانگین اثر قطر نمونه بر میزان اسیدیته نمونه های گوجه فرنگی

حروف مشابه نشان دهنده وجود عدم اختلاف معنی دار در بین سطوح مختلف می باشد.

Fig. 9. Comparison of the mean effect of sample diameter on the acidity content of tomato samples.
Similar letters indicate that there is no significant difference among the different treatment levels.

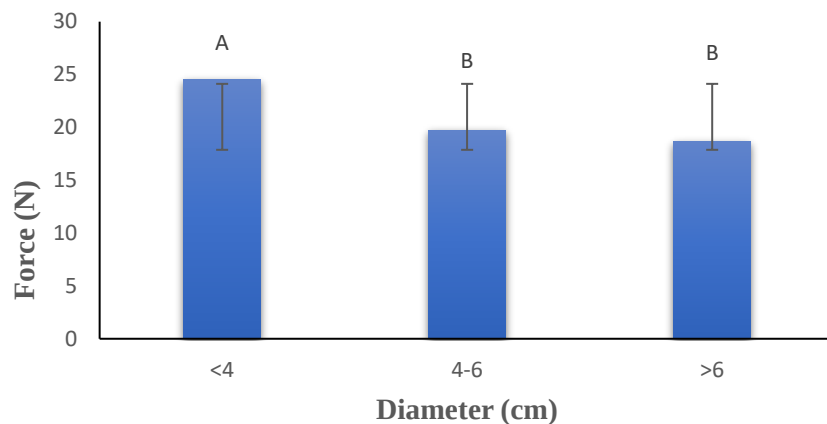
ارتباط مستقیمی با روند رسیدگی میوه دارد. نتایج این پژوهش نشان داد که با تغییر ضریب دی الکتریک، تغییرات معنی داری در شاخص های کیفی نظیر بریکس و استحکام مشاهده شد؛ بنابراین ضریب دی الکتریک می تواند به عنوان یک شاخص غیرمخرب برای پایش میزان رسیدگی مورد استفاده قرار گیرد.

شکل ۹ مقایسه میانگین اثر قطر نمونه بر میزان انرژی بارگذاری نمونه های گوجه فرنگی را نشان می دهد. با توجه به شکل ۴-۶- کاملاً مشخص است که با افزایش سطوح مختلف قطر نمونه های گوجه فرنگی میزان انرژی بارگذاری کاهش یافت. بین محدوده قطرهای ۴ تا ۶ سانتی متر و بیشتر از ۶ سانتی متر برای مقدار مشخص شده از لحاظ آماری تفاوت معنی داری مشاهده نشد. همچنین با افزایش سطوح محدوده قطر کمتر از ۴ سانتی متر به ۴-۶ سانتی متر میزان انرژی بارگذاری کاسته شده و تفاوت معنی داری از لحاظ آماری بین این دو سطح از قطر نمونه ها دیده شد.

شکل ۸ مقایسه میانگین اثر قطر نمونه بر میزان استحکام نمونه های گوجه فرنگی را نشان می دهد. با توجه به شکل ۴-۵- می توان بیان کرد که با افزایش قطر نمونه های گوجه فرنگی میزان استحکام نمونه ها کاهش می یابد؛ البته بین قطرهای کمتر از ۴-۶ سانتی متر و بیشتر از ۶ سانتی متر تفاوت معنی داری از لحاظ آماری مشاهده نشد. البته این دو سطح از قطر نمونه ها تفاوت معنی داری با قطرهای کمتر از ۴ سانتی متر داشتند. علت این است که گوجه های بزرگتر مولفه نیروی عمودی کوچکتری نسبت به گوجه با قطر کمتر تولید می کند. اگر یک خط مماس در محل اعمال نیرو رسم کنید، زاویه تشکیل شده قوس با خط مماس، هرچه قطر بیشتر باشد زاویه تشکیل شده کوچکتر و در نتیجه سینوس زاویه هم کوچکتر خواهد بود.

با توجه به اینکه افزایش میزان بریکس و کاهش سفتی بافت از مهم ترین تغییرات ناشی از فرآیند رسیدگی گوجه فرنگی هستند، می توان نتیجه گرفت که ضریب دی الکتریک اندازه گیری شده توسط سامانه طراحی شده

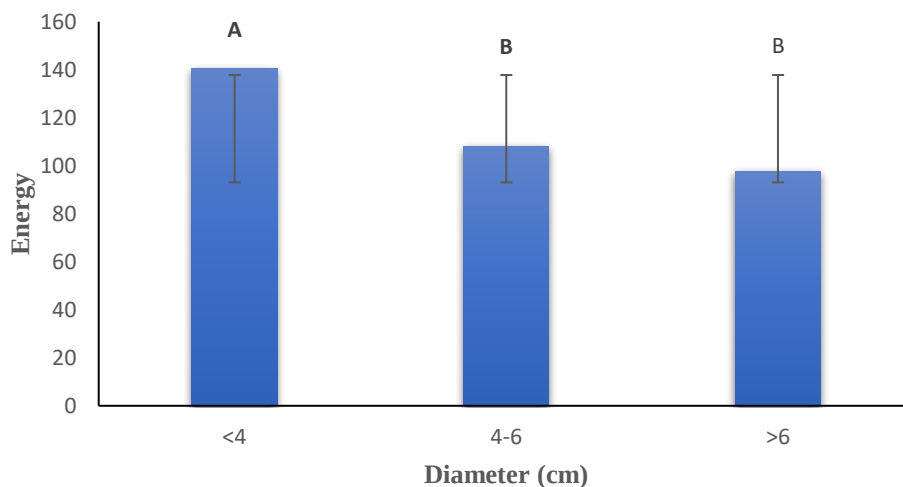
طراحی و ارزیابی یک سامانه حسگر خازنی برای تعیین غیرمخرب میزان رسیدگی گوجه‌فرنگی



شکل ۸-مقایسه میانگین اثر قطر نمونه بر میزان نیرو نمونه های گوجه فرنگی

حروف مشابه نشان دهنده وجود عدم اختلاف معنی دار در بین سطوح مختلف می باشد.

Fig. 8. Comparison of the mean effect of sample diameter on the force content of tomato samples.
Similar letters indicate that there is no significant difference among the different treatment levels.



شکل ۹-مقایسه میانگین اثر قطر نمونه بر میزان انرژی نمونه های گوجه فرنگی

حروف مشابه نشان دهنده وجود عدم اختلاف معنی دار در بین سطوح مختلف می باشد.

Fig. 9. Comparison of the mean effect of sample diameter on the energy content of tomato samples.
Similar letters indicate that there is no significant difference among the different treatment levels.

به‌منظور بررسی روابط بین ویژگی‌های الکتریکی، شکل انجام شد. نتایج نشان داد که بین برخی از صفات شیمیایی و مکانیکی میوه گوجه‌فرنگی، تجزیه‌وتحلیل اندازه‌گیری‌شده همبستگی‌های معنی‌داری وجود دارد. همبستگی اسپیرمن بین ثابت دی‌الکتریک، مواد جامد محلول، اسیدیت، نیروی شکست/فشرده‌گی و انرژی تغییر همبستگی منفی و قوی مشاهده شد ($r_s = -0.745$, $p <$

همبستگی منفی و معنی‌دار مشاهده شد. این موضوع نشان می‌دهد که اسیدیته احتمالاً ارتباط بیشتری با ویژگی‌های مکانیکی میوه نسبت به خصوصیات الکتریکی آن دارد.

به‌طور کلی، نتایج همبستگی نشان داد که بین ویژگی‌های ظرفیت خازنی اندازه‌گیری شده، ترکیب شیمیایی و خصوصیات مکانیکی گوجه‌فرنگی ارتباط قابل توجهی وجود دارد. به‌ویژه، ارتباط قوی ثابت دی‌الکتریک و انرژی تغییر شکل با مقدار مواد جامد محلول نشان می‌دهد که اندازه‌گیری خواص دی‌الکتریک می‌تواند به‌عنوان روشی غیرمخرب برای ارزیابی برخی شاخص‌های کیفی گوجه‌فرنگی مورد توجه قرار گیرد.

محدودیت‌های پژوهش

در این پژوهش، اگرچه سامانه حسگر خازنی توانست تغییرات پاسخ دی‌الکتریکی نمونه‌های گوجه‌فرنگی را با دقت مناسبی اندازه‌گیری کند، اما برخی محدودیت‌ها وجود داشت که باید در تفسیر نتایج مورد توجه قرار گیرند. نخست، دما و رطوبت نسبی محیط به‌صورت کمی و پیوسته ثبت نشدند و تنها تمامی آزمایش‌ها در یک روز و در شرایط آزمایشگاهی نسبتاً یکنواخت انجام گرفتند تا اثر تغییرات محیطی به حداقل برسد. با توجه به وابستگی خواص دی‌الکتریک مواد زیستی به شرایط محیطی، پیشنهاد می‌شود در مطالعات آینده اثر مستقل دما و رطوبت بر عملکرد سامانه بررسی شود. دوم، سامانه طراحی شده ظرفیت خازنی را بر اساس ثابت زمانی مدار RC اندازه‌گیری می‌کند و تغییرات آن به‌عنوان نماینده‌ای از تغییرات رفتار دی‌الکتریکی نمونه‌ها مورد تحلیل قرار گرفت. بنابراین اندازه‌گیری مستقیم ضریب دی‌الکتریک نسبی انجام نشد و استفاده از مدل‌های دقیق‌تر برای استخراج پارامترهای دی‌الکتریک می‌تواند موضوع

این نتیجه نشان می‌دهد که با افزایش مقدار بریکس، مقدار ثابت دی‌الکتریک کاهش یافته است. این ارتباط می‌تواند ناشی از تغییرات ترکیب شیمیایی میوه، توزیع آب آزاد و تغییرات ساختار سلولی در طی فرآیند رسیدگی باشد، زیرا تغییر در میزان مواد جامد محلول و وضعیت رطوبتی بافت می‌تواند بر رفتار دی‌الکتریک بافت گوجه‌فرنگی اثرگذار باشد.

همچنین ظرفیت خازنی اندازه‌گیری شده‌ها انرژی تغییر شکل همبستگی منفی و قوی داشت ($p = 0.0001$, $r_s = -0.828$) و با نیروی مورد نیاز برای تغییر شکل نیز رابطه منفی معنی‌داری نشان داد ($p = 0.0216$, $r_s = -0.440$). این یافته بیانگر آن است که ویژگی‌های الکتریکی میوه با خصوصیات مکانیکی آن مرتبط هستند. تغییرات ساختار بافت، میزان آب موجود در سلول‌ها و تخریب تدریجی دیواره سلولی در طی رسیدگی می‌تواند به‌طور همزمان باعث تغییر در خواص مکانیکی و دی‌الکتریک میوه شود. (جدول ۲)

قوی‌ترین همبستگی مثبت بین مواد جامد محلول و انرژی تغییر شکل مشاهده شد ($p < 0.0001$, $r_s = 0.894$). این رابطه نشان می‌دهد که نمونه‌هایی با مقدار بریکس بالاتر، انرژی بیشتری برای تغییر شکل نیاز داشتند. علاوه بر این، بین بریکس و نیروی تغییر شکل نیز همبستگی مثبت و معنی‌داری مشاهده شد ($p = 0.0167$, $r_s = 0.456$). این نتایج نشان‌دهنده ارتباط بین ترکیب شیمیایی میوه و ویژگی‌های مکانیکی آن است.

اسیدیته با ظرفیت خازنی اندازه‌گیری شده بریکس همبستگی معنی‌داری نشان نداد (به ترتیب $r_s = 0.350$, $p = 0.0739$ و $r_s = -0.353$, $p = 0.0705$). با این حال، بین اسیدیته و نیروی تغییر شکل ($r_s = -0.513$, $p = 0.0062$) و همچنین بین اسیدیته و انرژی تغییر شکل ($r_s = -0.455$, $p = 0.0170$)

پژوهش‌های آتی باشد. سوم، قطر میوه به‌عنوان یک عامل میوه به‌تنهایی شاخص رسیدگی محسوب نمی‌شود، تعمیم آزمایشی مورد بررسی قرار گرفت و نتایج نشان داد که هندسه نمونه بر پاسخ سامانه اثرگذار است. از آنجا که اندازه

جدول ۲- ضرایب همبستگی اسپیرمن بین ویژگی‌های دی‌الکتریک، فیزیکی-مکانیکی و شیمیایی میوه گوجه‌فرنگی
Table 2. Spearman Correlation Coefficients Between the Dielectric, Physicomechanical, and Chemical Properties of Tomato Fruit

انرژی	نیروی استحکام	اسیدیته	بریکس	ظرفیت خازنی اندازه گیری شده	
Energy	Strength Force	Acidity	Brix	Measured capacitance	
-0.82772	-0.44015	0.34956	-0.74523	1.00000	ظرفیت خازنی اندازه گیری شده
<.0001	0.0216	0.0739	<.0001		Measured capacitance
0.89359	0.45644	-0.35348	1.00000	-0.74523	بریکس
<.0001	0.0167	0.0705		<.0001	Brix
-0.45537	-0.51269	1.00000	-0.35348	0.34956	اسیدیته
0.0170	0.0062		0.0705	0.0739	Acidity
0.51894	1.00000	-0.51269	0.45644	-0.44015	نیروی استحکام
0.0055		0.0062	0.0167	0.0216	Strength Force
1.00000	0.51894	-0.45537	0.89359	-0.82772	انرژی
	0.0055	0.0170	<.0001	<.0001	Energy

محدودیت‌های پژوهش

آینده اثر مستقل دما و رطوبت بر عملکرد سامانه بررسی شود. دوم، سامانه طراحی‌شده ظرفیت خازنی را بر اساس ثابت زمانی مدار RC اندازه‌گیری می‌کند و تغییرات آن به‌عنوان نماینده‌ای از تغییرات رفتار دی‌الکتریکی نمونه‌ها مورد تحلیل قرار گرفت. بنابراین اندازه‌گیری مستقیم ضریب دی‌الکتریک نسبی انجام نشد و استفاده از مدل‌های دقیق‌تر برای استخراج پارامترهای دی‌الکتریک می‌تواند موضوع پژوهش‌های آتی باشد. سوم، قطر میوه به‌عنوان یک عامل آزمایشی مورد بررسی قرار گرفت و نتایج نشان داد که هندسه نمونه بر پاسخ سامانه اثرگذار است. از آنجا که اندازه

در این پژوهش، اگرچه سامانه حسگر خازنی توانست تغییرات پاسخ دی‌الکتریکی نمونه‌های گوجه‌فرنگی را با دقت مناسبی اندازه‌گیری کند، اما برخی محدودیت‌ها وجود داشت که باید در تفسیر نتایج مورد توجه قرار گیرند. نخست، دما و رطوبت نسبی محیط به‌صورت کمی و پیوسته ثبت نشدند و تنها تمامی آزمایش‌ها در یک روز و در شرایط آزمایشگاهی نسبتاً یکنواخت انجام گرفتند تا اثر تغییرات محیطی به حداقل برسد. با توجه به وابستگی خواص دی‌الکتریک مواد زیستی به شرایط محیطی، پیشنهاد می‌شود در مطالعات

میوه به تنهایی شاخص رسیدگی محسوب نمی‌شود، تعمیم نتایج به سطوح مختلف رسیدگی باید با احتیاط انجام گیرد.

نتیجه گیری

نتایج این تحقیق نشان داد که سامانه حسگر خازنی طراحی شده بر پایه مدار RC و برد آردوینو UNO قادر است تغییرات ضریب دی الکتریک گوجه فرنگی را به عنوان شاخصی از وضعیت رسیدگی به صورت غیرمخرب و با دقت مناسب اندازه گیری کند. بررسی های آماری بیانگر آن بود که قطر میوه تأثیر معنی داری بر اغلب ویژگی های فیزیکی و شیمیایی شامل بریکس، اسیدیته و استحکام داشته، در حالی که فاصله صفحات حسگر بیشتر بر پاسخ الکتریکی سامانه اثر گذار بوده است. همچنین معنی دار بودن اثر متقابل قطر و فاصله صفحات بر ضریب دی الکتریک نشان دهنده نقش مهم هندسه حسگر در بهبود دقت اندازه گیری است. کاهش بریکس و استحکام با افزایش قطر و افزایش همزمان ضریب

دی الکتریک بیانگر ارتباط مستقیم ویژگی های الکتریکی با شاخص های رسیدگی محصول می باشد. به طور کلی، سامانه پیشنهادی به دلیل سادگی ساخت، هزینه پایین، قابلیت تکرارپذیری و حساسیت مناسب، می تواند به عنوان یک ابزار کاربردی در ارزیابی غیرمخرب کیفیت و درجه رسیدگی محصولات کشاورزی مورد استفاده قرار گیرد و زمینه توسعه سیستم های هوشمند پس از برداشت را فراهم نماید.

تقدیر و تشکر

این پژوهش در قالب پایان نامه کارشناسی ارشد انجام شده و از حمایت مالی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان برخوردار بوده است.

تعارض منافع

نگارندگان این مقاله اعلام می دارند که در خصوص نگارش و چاپ مقاله، هیچ گونه تعارض منافی وجود ندارد.

منابع

- Azadbakht, M., Mahmoodi, M. J., Torshizi, M. V., & Kashi, P. A. (2020). Relationship of pears' dielectric properties and rates of pears' bruise. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, 22(1), 169–179.
- Azadbakht, M., Torshizi, M. V., Khatunabadi, A. S., & Tajari, M. (2026). Synergistic mitigation of bruising in red delicious: A non-destructive evaluation of polyamine (spermidine), chitosan coatings, and optimized packaging using CT-scan imaging and principal component analysis. *Postharvest Biology and Technology*, 236, 114241.
- Azadbakht, M., Vahedi, M., & Mahmoodi, M. J. (2019). The relation of pear volume and it's bruised volume by CT scan imaging. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 7(3). <https://doi.org/10.1007/s11694-018-00024-0>
- Azadbakht, M., Vahedi Torshizi, M., & Mahmoodi, M. J. (2019a). Determination amount of pear bruises due to wide edge pressure via CT scan method and relation them with some physical properties pear. *Journal of Food Science and Technology (Iran)*, 16(92), 153–163.
- Azadbakht, M., Vahedi Torshizi, M., & Mahmoodi, M. J. (2019b). Determination of pear bruises due to a thin edge compression load by CT scan method. *Innovative Food Technologies*, 6(3), 305–321. <https://doi.org/10.22104/jift.2018.2842.1684>
- Castro-Giráldez, M., Botella, P., Toldrá, F., & Fito, P. (2010). Low-frequency dielectric spectrum to

- determine pork meat quality. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 11(2), 376–386. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2010.01.011>
- Feng, H., Tang, J., & Cavalieri, R. P. (2002). Dielectric Properties of Dehydrated Apples as Affected by Moisture and Temperature. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 45(1), 129–135. <https://doi.org/10.13031/2013.7855>
- Funebo, T., & Ohlson, T. (1999a). Dielectric Properties of Fruits and Vegetables as a Function of Temperature and Moisture Content Dielectric Properties of Fruits and Vegetables as a Function of Temperature and Moisture Content. *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy*, 34(1), 42–54. <https://doi.org/10.1080/08327823.1999.11688387>
- Funebo, T., & Ohlson, T. (1999b). Dielectric Properties of Fruits and Vegetables as a Function of Temperature and Moisture Content Dielectric Properties of Fruits and Vegetables as a Function of Temperature and Moisture Content. *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy*, 34(1), 42–54.
- García, A., Torres, J. L., De Blas, M., De Francisco, A., & Illanes, R. (2004). Dielectric Characteristics of Grape Juice and Wine. *Biosystems Engineering*, 88(3), 343–349. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2004.04.008>
- Jiao, S., Johnson, J. A., Tang, J., Tiwari, G., 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(3), 280–291.
- Little, C. R., & Holmes, R. J. (2000). Storage technology for apples and pears. *Department of Natural Resources and Economics, Victoria*.
- McKeown, M. S., Trabelsi, S., Tollner, E. W., & Nelson, S. O. (2012). Dielectric spectroscopy measurements for moisture prediction in Vidalia onions. *Journal of Food Engineering*, 111(3), 505–510. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2012.02.034>
- Naderi-Boldaji, M., Fazeliyan-Dehkordi, M., Mireei, S. A., & Ghasemi-Varnamkhasti, M. (2015). Dielectric power spectroscopy as a potential technique for the non-destructive measurement of sugar concentration in sugarcane. *Biosystems Engineering*, 140(i), 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2015.09.003>
- Nelson, S. O., & Jr, P. G. B. (2000). MEASURING FREQUENCY- AND TEMPERATURE-DEPENDENT DIELECTRIC PROPERTIES OF FOOD MATERIALS. *American Society of Agricultural Engineers*.
- Soltani, M., Alimardani, R., & Omid, M. (2011a). Evaluating banana ripening status from measuring dielectric properties. *Journal of Food Engineering*, 105(4), 625–631. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2011.03.032>
- Wang, S., Monzon, m., Gazit, Y., tang, J., Mitcham, E. J., Armstrang, J. W. (2005). Temperaturedependent dielectric properties of selected subtropical and tropical fruits and associated insect pests. *Transactions of the ASAE*, 48(8), 1873-1881.

Original Research

Design and Evaluation of a Capacitive Sensor System for Non-Destructive Determination of Tomato Ripeness

Abbas Rezaei Asl*, Atefeh Hajilari, Mohsen Azadbakht

***Corresponding Author:** Associate Professor, Department of Biosystems Mechanical Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran.

Email: abrezaeiasl@gmail.com

Received: 16 June 2026 **Accepted:** 14 July 2026

http://doi: 10.22092/fooder.2026.373228.1465

Abstract

In this study, a parallel-plate capacitive sensor system was designed, developed, and evaluated for the non-destructive assessment of tomato ripeness. The primary objective was to investigate the system's capability to estimate the quality and physicochemical characteristics of tomatoes based on variations in their dielectric properties. Tomato samples (cv. PS) were classified into three diameter groups (less than 4 cm, 4–6 cm, and greater than 6 cm) and tested under a completely randomized design. The capacitance of the samples was measured using an RC circuit integrated with an Arduino UNO board. In addition, physical properties (dimensions and weight), mechanical properties (firmness), and chemical properties (titratable acidity, and total soluble solids) were determined under laboratory conditions. Data were analyzed using SAS software within a completely randomized design framework. The effects of plate spacing and sample diameter were evaluated through analysis of variance (ANOVA), and mean comparisons were conducted using the LSD test at the 5% significance level. The results indicated that fruit diameter had a significant effect on most physical and chemical properties, whereas plate spacing primarily influenced the samples' dielectric response. Moreover, the interaction effect of plate spacing and fruit diameter on the dielectric constant was significant at the 1% probability level, demonstrating the high sensitivity of the developed sensor system. Increasing fruit diameter increased the dielectric constant and decreased parameters such as total soluble solids (°Brix) and firmness. In contrast, variations in plate spacing did not significantly affect the physical and chemical characteristics of the samples. Overall, the findings demonstrated that the proposed capacitive sensing system is a promising tool for the non-destructive evaluation of tomato ripeness and can be applied as a rapid, cost-effective, and accurate technique in postharvest quality assessment.

Keywords: Tomato, Non-destructive Evaluation, Measured capacitance, Physical and Chemical Characteristics, Capacitive Sensor

<http://doi: 0.22092/fooder.2026.373228.1465>

Email: abrezaeiasl@gmail.com

نویسنده مسئول:



© 2026, The Author(s). Published by [Agricultural Engineering Research Institute](#). This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>). Which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.