

## مدل‌سازی سفتی خرما با استفاده از روش غیر مخرب ضربه

علیرضا حیدری<sup>۱</sup>، مرتضی صادقی<sup>۲\*</sup>، سید احمد میره‌ای<sup>۳</sup> و عبل‌س همت<sup>۴</sup>

- ۱- دانشجوی کارشناسی ارشد گروه مکانیک ماشین‌های کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان
- ۲- دانشیار گروه مکانیک ماشین‌های کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان، sadeghimor@cc.iut.ac.ir
- ۳- استادیار گروه مکانیک ماشین‌های کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان
- ۴- استاد گروه مکانیک ماشین‌های کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان

### چکیده

درجه‌بندی خرما در حال حاضر به صورت دستی در ایران انجام می‌شود. در حین انجام عملیات درجه‌بندی صدماتی به محصول وارد می‌شود که از کیفیت و بازارپسندی آن مخصوصاً برای صادرات می‌کاهد. هدف از انجام تحقیق حاضر اندازه‌گیری و مدل‌سازی سفتی خرما با استفاده از تحلیل مؤلفه‌های اولین نیم‌موج سیگنال ضربه به منظور به دست آوردن الگویی برای برآورد سفتی حاصل از آزمون غیر مخرب ضربه بود. به این منظور ابتدا یک سامانه بر خط متشکل از دو بخش مکانیکی و الکترونیکی برای ضبط سیگنال خروجی از بارسنج سامانه طی آزمون غیر مخرب بر روی رایانه طراحی و ساخته شد. نمونه‌های رقم مضافتی در ۴ مرحله متفاوت رسیدگی (کیمری، خارک، رطب و خرما) تهیه و در دو سوی متفاوت و در ۳ سرعت انتقال (۱، ۱/۵ و ۲ متر بر ثانیه) تحت آزمون قرار گرفتند. برای تعیین سفتی، نمونه‌ها به دو نیمه تقسیم و هر نیمه به صورت جداگانه طی آزمون مگنس-تیلور تحت آزمایش مخرب نفوذ قرار گرفت. بیشینه نیروی لازم برای نفوذ پروب به دورن میوه به عنوان شاخص سفتی نمونه در نظر گرفته شد. سپس مدل‌سازی سفتی از روی سیگنال ضربه با استفاده از مؤلفه‌های نیم موج اول صورت گرفت. نتایج نشان داد که بهترین ضریب تبیین در مرحله‌ی کالیبراسیون ( $R_c^2$ ) برابر با ۰/۵۰۸، ضریب تبیین در مرحله‌ی آزمون ( $R_p^2$ ) برابر با ۰/۴۱۶ و ریشه میانگین مربعات خطای پیشگویی (RMSEP) برابر با ۳/۱۲ نیوتن حاصل شد. همانگونه که انتظار می‌رفت بیشینه نیروی لازم برای نفوذ به گوشت میوه، طی مراحل مختلف رسیدگی دچار افت محسوسی شد. این تغییرات به نحوی بود که به صورت کامل معرف مرحله رسیدگی خرما بود. در نتیجه با در نظر گرفتن ملاحظات مهندسی مربوط به سیستم جداسازی و اینکه سرعت پایین‌تر خطر آسیب رساندن به محصول را کمتر می‌کند، توصیه می‌شود که از سرعت ۱ متر بر ثانیه در توسعه صنعتی سیستم استفاده گردد. با توجه به نتایج مشابه برازش مدل‌های مختلف برای هر دو پهلوی کل داده‌ها، می‌توان چنین نتیجه‌گیری کرد که نتایج مدل‌سازی مستقل از محل برخورد بوده و در نتیجه روش توسعه‌یافته قابلیت کاربرد برای درجه‌بندی محصول را دارد.

**واژه‌های کلیدی:** آزمون غیر مخرب، خرما، خواص فیزیکی، ضربه و مضافتی



## مقدمه

خرما یکی از قدیمی‌ترین درختان میوه است که قدمت پیدایش آن به دوران دوم زمین‌شناسی (میان‌زیستی<sup>۱</sup>) بازمی‌گردد. در حال حاضر حدود ۳۳ کشور در جهان، تولیدکننده خرما هستند که بر اساس گزارش سازمان خوار و بار جهانی<sup>۲</sup> (فائو) در سال ۲۰۰۹ ایران از نظر مقدار تولید با برداشت ۱۰۸۸۰۴ تن محصول پس از مصر در رده دوم و از لحاظ سطح زیر کاشت با مساحت ۲۴۴۴۲۹ مترمربع وسیع‌ترین سطح کاشت خرما را در جهان به خود اختصاص داده است.

به دلیل ارزش غذایی بالا و همچنین اهمیت صادرات خرما به عنوان یکی از منابع تحصیل ارز برای کشور، مکانیزه کردن فرآیند درجه‌بندی آن امری ضروری به نظر می‌رسد. مکانیزه کردن درجه‌بندی خرما می‌تواند با صرفه‌جویی قابل ملاحظه در استفاده از نیروی انسانی، نقش مهمی در افزایش بازدهی اقتصادی محصول و همچنین در بهینه‌سازی زمان انبارمانی و شرایط مناسب برای انتقال محصول داشته باشد. شاخص‌های کیفی متنوعی برای ارزیابی کیفیت در محصولات کشاورزی ارائه شده است. در مورد یک محصول کلایمکتریک<sup>۳</sup> مانند خرما، شاخص‌هایی از قبیل رطوبت، قند و سفتی به عنوان شاخص‌هایی مهم در تعیین کیفیت و همچنین درجه رسیدگی محصول گزارش شده‌اند (میره‌ای، ۱۳۸۹). در مورد خرما با پیشرفت در مراحل رسیدگی، همزمان با تغییرات رنگ، سفتی نمونه دچار افت محسوس می‌شود. به طوری که می‌توان این شاخص را به عنوان ملاکی برای تعیین رسیدگی محصول مورد نظر قرار داد. امروزه برآورد سفتی خرما عمدتاً توسط عامل انسانی انجام می‌شود که اولاً در برگزیده مقدار زیادی خطا بوده و ثانیاً ممکن است منجر به له‌شدگی و تغییر فرم در بافت خرما شود.

به طور کلی روش‌های ارزیابی شاخص‌های کیفی در محصولات کشاورزی را می‌توان به دو دسته روش‌های مخرب<sup>۴</sup> و غیر مخرب<sup>۵</sup> تقسیم‌بندی کرد. در روش‌های مخرب، محصول طی اندازه‌گیری ویژگی کیفی تخریب می‌شود (برای مثال بریده شده و یا سوراخ می‌شود)، در حالی که در روش‌های غیر مخرب، محصول طی اندازه‌گیری ویژگی کیفی سالم باقی می‌ماند. در روش‌های غیر مخرب یک ویژگی فیزیکی یا شیمیایی تأثیرپذیر از شاخص کیفی مورد نظر، با روشی غیر تخریبی اندازه‌گیری شده و در مرحله بعد، با انجام آزمایش‌های مخرب و تعیین دقیق شاخص کیفی مورد نظر (به عنوان روش شاهد)، مدل‌هایی استخراج و توسعه داده می‌شوند که ویژگی فیزیکی یا شیمیایی را به شاخص مورد نظر ارتباط می‌دهند.

روش تعیین سفتی در محصولات کشاورزی عمدتاً مبتنی بر آزمون نفوذ مگنس-تیلور<sup>۶</sup> (MTF) می‌باشد که روشی مخرب محسوب می‌شود. امروزه روش‌های غیر مخرب متنوعی برای برآورد سفتی در محصولات کشاورزی توسعه یافته‌اند. به عنوان مثال،

<sup>1</sup> Mesozoic

<sup>2</sup> Food and Agriculture Organization (FAO)

<sup>3</sup> Climacteric

<sup>4</sup> Destructive or Invasive Methods

<sup>5</sup> Non-destructive or Non-invasive Methods

<sup>6</sup> Magness-Taylor Firmness



از روش فراصوت برای سبب (Kim et al., 2009)، روش نوری نزدیک مادون قرمز<sup>۱</sup> برای سبب (Peris et al., 2000)، روش پاسخ صوتی ضربه برای سبب (Duprat et al., 1997) و روش پاسخ مکانیکی ضربه برای کیوی (Ragni et al., 2010) استفاده شده است.

برای توسعه مدل‌های برآورد سفتی در هر کدام از روش‌های غیر مخرب اشاره شده، از روش‌های تحلیلی و آماری متنوعی استفاده شده است. روش‌هایی مانند تحلیل مؤلفه‌های اصلی<sup>۲</sup> (PCA)، حداقل مربعات جزئی<sup>۳</sup> (PLS) و همچنین روش شبکه‌های عصبی مصنوعی<sup>۴</sup> (ANN) برای استخراج مدل‌های برآورد سفتی استفاده شده است.

با توجه مطالب ذکر شده، توسعه یک سامانه به نحوی که بتواند سفتی محصول خرما را به صورت سریع، دقیق و غیر مخرب تعیین نماید، می‌تواند نقش مهمی در توسعه سیستم‌های درجه‌بندی و بسته‌بندی این محصول ارزشمند داشته باشد. بنابراین، اهداف انجام این تحقیق عبارتند از طراحی، ساخت و توسعه یک سامانه بر خط به منظور اندازه‌گیری پاسخ محصول خرما به ضربه و اندازه‌گیری و مدل‌سازی سفتی خرما با استفاده از اطلاعات نیم موج اول سیگنال ضربه به منظور برآورد سفتی حاصل از آزمون ضربه.

## مواد و روش‌ها

### تهیه و آماده‌سازی نمونه‌ها

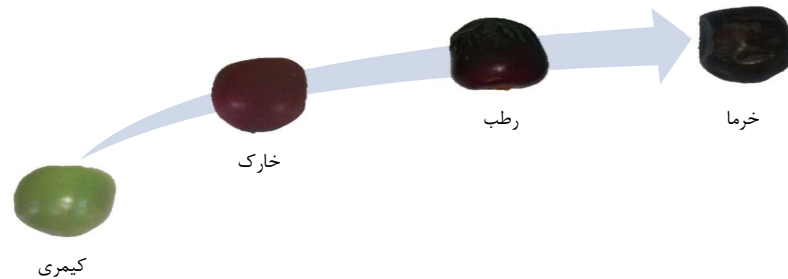
در این تحقیق از خرمای رقم مضافتی برای انجام آزمایش‌ها استفاده شد. برای تهیه نمونه‌ها از مرکز تحقیقات کشاورزی شهید مقبلی جیرفت و کهنوج واقع در شهرستان جیرفت از توابع استان کرمان استفاده شد. نمونه‌ها به صورت تازه از درخت چیده شده و در حداقل زمان ممکن به سردخانه منتقل شده و سپس در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد نگهداری شدند. نمونه‌های جمع‌آوری شده در زمان‌های مختلف فصل رشد خرما تهیه می‌شدند، به طوری که به خوبی معرف مراحل مختلف رسیدگی خرما شامل کیمیری، خارک، رطب و خرما (شکل ۱) باشند. با دریافت نمونه‌ها در زمان‌های مختلف برداشت، آزمایش‌های مورد نظر در حداقل زمان ممکن شروع شد. در مجموع، حدود ۴۰۰ عدد نمونه از زمان‌های مختلف برداشت انتخاب شد. نمونه‌ها قبل از شروع آزمایش‌ها به خوبی بررسی می‌شدند، به نحوی که فاقد هرگونه آسیب احتمالی شامل کوفتگی، آفت‌زدگی و غیره باشند. نمونه‌ها در روز آزمایش، حدود ۲ ساعت قبل از شروع آزمون از سردخانه خارج می‌شدند تا به تعادل دمایی با دمای اتاق برسند.

<sup>1</sup> Near Infrared Optic Method

<sup>2</sup> Principal Component Analysis

<sup>3</sup> Partial Least Squares

<sup>4</sup> Artificial Neural Networks



شکل ۱. نمونه‌های خرماي مضافتي در مراحل مختلف رسيدگي شامل کيمري، خارک، رطب و خرما.

به دليل آنکه آزمایش‌ها بر روی دو سطح (جهت) مختلف هر میوه انجام می‌شد، ابتدا هر نمونه شماره‌گذاری شده و سپس دو طرف آن با فاصله ۱۸۰ درجه با حروف A و B مشخص و متمایز می‌شد. ابعاد (شامل قطرهای بزرگ، متوسط و کوچک) و وزن هر نمونه نیز قبل از انجام آزمایش‌ها اندازه‌گیری و ثبت می‌گردید. بلافاصله پس از جمع‌آوری داده‌های اولیه، سیگنال ضربه هر نمونه در دو سمت مختلف آن و در سه سرعت مختلف پرتاب ۱، ۱/۵ و ۲ متر بر ثانیه اندازه‌گیری می‌شد.

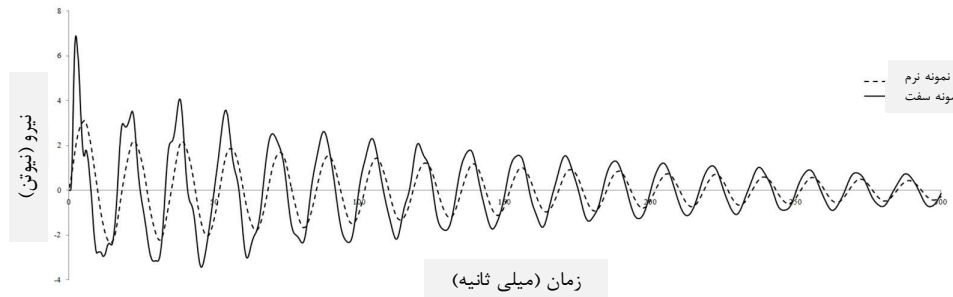
### سامانه ضبط سیگنال ضربه

قسمت‌های اصلی سامانه اندازه‌گیری سیگنال ضربه عبارت بودند از (۱) سامانه حمل و پرتاب نمونه و (۲) بارسنج و سامانه جمع‌آوری داده. سامانه حمل و پرتاب شامل یک ورق از جنس تفلون با ضخامت ۳ سانتی‌متر به عنوان پایه، پیچ‌های تنظیم ارتفاع، بدنه اصلی از جنس آلومینیوم، تسمه از جنس نوار سمباده، دو غلتک از جنس پلی‌اتیلن توخالی به ضخامت ۶ میلی‌متر، یک موتور جریان مستقیم ۲۴ ولت و ۴ آمپر به همراه یک جعبه‌دنده کاهنده ۱۴۰۰ به ۸۰۰ دور در دقیقه و اتاقک دریافت نمونه پس از ضربه برای جلوگیری از آسیب رسیدن به نمونه بود. انتخاب ارتفاع مناسب پرتاب (موقعیت سامانه حمل میوه با سطح لودسل) با مصالحه بین دو عامل شدت ضربه کافی و همچنین عدم آسیب به نمونه انتخاب شد که برابر با ۱ سانتی‌متر به دست آمد. یک افزونه نیز برای نگهداری نمونه از ابتدای حرکت تا لحظه پرتاب در حالتی مشخص و بدون تغییر مکان و یا چرخش احتمالی نمونه در حین حرکت بر روی نوار نقاله نصب شد.

بارسنج و سامانه جمع‌آوری داده شامل یک بارسنج با ظرفیت کاری ۵ کیلوگرم و نرخ نمونه‌برداری ۱۰ کیلوهرتز، یک صفحه آلومینیومی که با پیچ بر روی محل اعمال نیرو به بارسنج متصل شده بود، یک تولیدکننده جریان مستقیم با ولتاژ کاری ۲۴ ولت (برای تأمین توان مورد نیاز سامانه جمع‌آوری سیگنال ضربه)، یک کلید مینیاتوری، ماژول ورودی بارسنج، سامانه جمع‌آوری داده با ۱۶ ورودی همزمان آنالوگ و رزولوشن ۱۲ و همچنین جمع‌آوری داده تا حداکثر نرخ ۱۵۰ هزار نمونه در ثانیه به همراه یک نرم‌افزار اختصاصی برای این دستگاه بود که وظیفه آن‌ها دریافت و ثبت سیگنال ضربه ناشی از برخورد نمونه با صفحه بارسنج در



بازه زمانی اندک برخورد به صورت دقیق و معتبر می‌باشد. همان گونه که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، تفاوت در دامنه سیگنال برای دو نمونه سفت و نرم مشهود است.



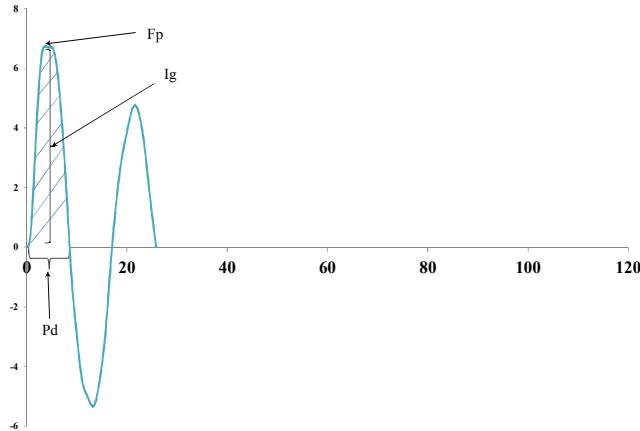
شکل ۲. سیگنال حاصل از آزمون ضربه برای دو نمونه خرمای نرم و سفت.

### آزمایش‌های اندازه‌گیری سفتی

یکی از شاخص‌های مهم رسیدگی خرما، سفتی آن می‌باشد. سفتی یک محصول یک ویژگی مکانیکی است که می‌تواند ارتباط نزدیکی با پاسخ آن به ضربه داشته باشد. در این تحقیق برای تعیین سفتی هر نمونه در دو سمت مختلف آن از دستگاه جامع آزمون کشش و فشار استفاده شد. روش آزمایش بدین صورت بود که ابتدا هر نمونه در راستای محور ساقه-دم برگ به دو قسمت مساوی بریده شده و هسته داخلی از میوه خارج می‌شد. سپس از یک پروب فلزی با قطر ۲ میلی‌متر و با انتهای مسطح که مطابق با استاندارد ASAE S368.4 DEC2000 (R2008) تهیه شده بود، برای نفوذ به هر نیمه استفاده می‌شد.

### تحلیل داده‌ها

هدف اصلی در این قسمت به دست آوردن مدلی بود که بتواند مقادیر سفتی خرما را با استفاده از سیگنال ضربه حاصل با یک دقت قابل قبول پیش‌بینی کند. روش تحلیل بدین صورت بود که ابتدا پارامترهایی مشخص از سیگنال ضربه، استخراج و سپس با تعیین این پارامترها برای کلیه سیگنال‌های ضربه، از آن‌ها برای برآورد سفتی استفاده شد. در این روش، ابتدا یک سری پارامترهای خاص از سیگنال ضربه شامل حداکثر مقدار نیرو در نیم موج اول ( $F_p$ )، مدت نیم موج اول ( $P_d$ ) و سطح زیر نمودار ضربه در نیم موج اول ( $I_g$ ) طبق شکل ۳ تعریف شدند. سپس با نوشتن یک برنامه در محیط ++C، این مشخصه‌ها برای تمامی سیگنال‌های ضربه استخراج شدند. روش توسعه مدل در این تحقیق مبتنی بر روش‌های رگرسیون تک متغیره و چند متغیره و تحلیل واریانس (ANOVA) رگرسیون بود.



شکل ۳. پارامترهای استخراجی از نیم موج اول سیگنال ضربه.

توانایی مدل‌ها در برقراری رابطه بین سفتی و داده‌های سیگنال ضربه در بین نمونه‌های استفاده‌شده در مدل رگرسیون، توسط پارامترهای آماری ضریب تبیین کالیبراسیون<sup>۱</sup> ( $R^2_c$ ) و میانگین مربعات خطای کالیبراسیون<sup>۲</sup> (RMSEC) ارزیابی شد که به ترتیب توسط معادلات ۱ و ۲ محاسبه می‌شوند:

$$R^2_c = \frac{\sum_{i=1}^n MTF_i \hat{MTF}_i}{\sum_{i=1}^n MTF_i^2 \sum_{i=1}^n \hat{MTF}_i^2} \quad (1)$$

$$RMSEC = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (MTF_i - \hat{MTF}_i)^2}{n}} \quad (2)$$

که،  $n$  تعداد نمونه‌ها در دسته کالیبراسیون،  $MTF_i$  سفتی به دست آمده در آزمایش‌های مرجع برای نمونه  $i$  ام در دسته کالیبراسیون و  $\hat{MTF}_i$  سفتی پیش‌بینی شده برای نمونه  $i$  ام در دسته کالیبراسیون می‌باشند.

### اعتبارسنجی مدل‌های رگرسیون

پس از مدل‌سازی با استفاده از روش‌های رگرسیون چند متغیره، اعتبار مدل‌های به دست آمده با استفاده از روش اعتبارسنجی آزمونی بررسی شد. در این روش، نمونه‌ها به دو دسته کاملاً مستقل تقسیم می‌شوند. دسته اول برای مدل کالیبراسیون (شامل ۸۰٪ کل داده‌ها) و دسته دیگر برای آزمون مدل کالیبراسیون (شامل ۲۰٪ کل نمونه‌ها). مدل رگرسیون با استفاده از دسته اول (کالیبراسیون) ساخته می‌شود. پس از آن هر کدام از نمونه‌های موجود در دسته آزمون در مدل کالیبراسیون قرار داده شده و خطای آن‌ها محاسبه می‌شود. به عبارت دیگر، ضریب تبیین پیش‌بینی ( $R^2_p$ ) و میانگین مربعات خطای پیش‌بینی (RMSEP) نیز

<sup>1</sup> Calibration Coefficient of Determination

<sup>2</sup> Root Mean Square Error of Calibration



به ترتیب با استفاده از معادلات ۱ و ۲ تعیین می‌گردند. در این مرحله،  $n$  تعداد نمونه‌ها در دسته آزمون،  $MTF_i$  سفتی به دست آمده در آزمایش‌های مرجع برای نمونه  $i$  ام در دسته آزمون و  $M\hat{T}F_i$  سفتی پیش‌بینی شده برای نمونه  $i$  ام در دسته آزمون می‌باشند. در جدول ۱ اطلاعات آماری نمونه‌ها شامل تعداد، حداکثر و حداقل، میانگین، انحراف استاندارد و ضریب تغییرپذیری مقادیر سفتی در هر کدام از دسته‌های کالیبراسیون و آزمون ارائه شده است. انحراف استاندارد داده‌ها نشان می‌دهد که سفتی نمونه‌ها توزیع مناسبی نسبت به میانگین دارد.

جدول ۱. مشخصه‌های آماری سفتی نمونه‌های خرمای رقم مضافتی در دو دسته کالیبراسیون و آزمون.

آماره	کالیبراسیون			آزمون		
	Side A	Side B	کل	Side A	Side B	کل
تعداد نمونه	۳۲۸	۳۲۸	۶۵۶	۸۱	۸۱	۱۶۲
حداقل (نیوتن)	۰/۳	۰/۲	۰/۲	۰/۸	۰/۲	۰/۲
حداکثر (نیوتن)	۱۶/۱	۱۵/۸	۱۶/۱	۱۴/۹	۱۶/۱	۱۶/۱
میانگین (نیوتن)	۷/۶	۷/۵	۷/۵	۷/۲	۷/۴	۷/۳
انحراف استاندارد (نیوتن)	۵/۳	۵/۱	۵/۲	۵/۱	۵/۳	۵/۲
ضریب تغییرپذیری سفتی	۰/۷	۰/۷	۰/۷	۰/۷	۰/۷	۰/۷

## نتایج و بحث

### مدل‌سازی با استفاده از پارامترهای نیم موج اول

پس از استخراج مؤلفه‌های تعریف شده از نیم موج اول سیگنال ( $I_g$  و  $P_d$ ،  $F_p$ )، یک رابطه غیرخطی برای پیش‌بینی سفتی با استفاده از این مؤلفه‌ها به دست آمد. جدول ۲ نتایج تحلیل واریانس رابطه رگرسیون با دخالت دادن سه مؤلفه نیم موج اول سیگنال ضربه شامل  $F_p$ ،  $P_d$  و  $I_g$  را برای پیش‌بینی سفتی نشان می‌دهد.



**جدول ۲.** تجزیه واریانس رگرسیون برای پیش‌بینی سفتی حاصل از آزمون مگنس-تیلور (MTF) به وسیله سه مشخصه نیم موج اول سیگنال ضربه ( $F_p$ ،  $P_d$  و  $I_g$ ) در سرعت‌های متفاوت برخورد و بر روی دو پهلوی مخالف از خرماي رقم مضافتی.

F	درجه آزادی (باقی مانده)	میانگین مربعات		$R^2$	معادله MTF (N)	محل برخورد ضربه	سرعت (m/s)
		باقی مانده	برازش				
۳۳۲/۵۰	۳۲۷	۱۴/۰۱	۴۶۵۹/۹۸	۰/۵۰۴	$2.19 F_p + 0.418 I_g - 0.00751 I_g^2 - 22.28 P_d^{0.972} - 10.16$	Side A	۱
۵۰۳/۹۴	۳۲۷	۱۰/۱۹	۵۱۳۶/۸۳	۰/۵۰۶	$0.131 F_p + 1.271 I_g - 0.01593 I_g^2 - 2.73 P_d^{0.972} + 9.08$	Side B	
۶۶۵/۵۹	۶۵۴	۱۳/۴	۸۹۲۱/۰۵	۰/۵۰۴	$1.972 F_p + 0.471 I_g - 0.00674 I_g^2 + 2.83 P_d^{-75.53} - 9.45$	کل	۱/۵
۳۳۲/۴۳	۳۲۷	۱۴/۰۱	۴۶۵۷/۷۸	۰/۵۰۴	$2.059 F_p + 0.702 I_g - 0.109 I_g^2 + 35.52 P_d^{-25.74} - 13.49$	Side A	
۳۳۸/۷	۳۲۷	۱۲/۸۵	۴۳۵۴/۱۴	۰/۵۰۸	$1.586 F_p + 0.815 I_g - 0.0111 I_g^2 + 36.41 P_d^{-25.10} - 13.98$	Side B	کل
۶۶۵/۸۹	۶۵۴	۱۳/۴۶	۸۹۶۵/۸۹	۰/۵۰۴	$1.806 F_p + 0.754 I_g - 0.109 I_g^2 + 36.01 P_d^{-25.39} - 13.64$	کل	
۲۶۶/۵۶	۳۲۷	۱۵/۵۴	۴۱۴۴/۴۵	۰/۴۴۹	$2.031 F_p + 0.417 I_g - 0.00694 I_g^2 + 37 P_d^{-17.94} - 9.19$	Side A	۲
۱۸۷/۳۸	۳۲۷	۱۶/۸۷	۳۰۱۰/۶۷	۰/۳۵۹	$1.404 F_p + 0.522 I_g - 0.00757 I_g^2 + 41.33 P_d^{-20.03} - 8.03$	Side B	
۴۳۲/۷۶	۶۵۴	۱۶/۳۱	۷۰۵۹/۵۱	۰/۳۹۷	$1.719 F_p + 0.475 I_g - 0.00739 I_g^2 + 39.15 P_d^{-18.74} - 8.66$	کل	

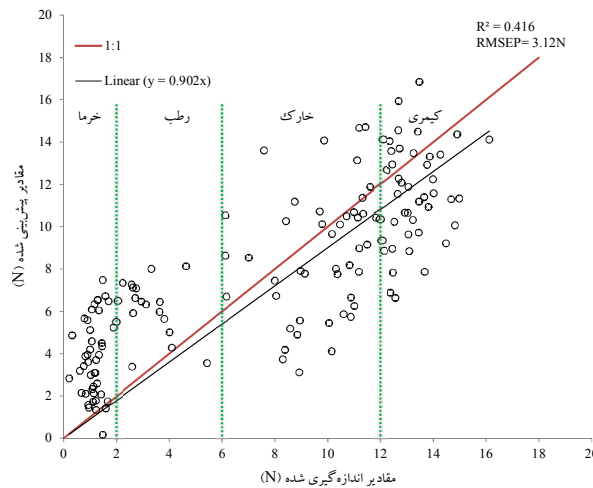
با توجه به نتایج حاصل می‌توان چنین نتیجه‌گیری کرد که در سرعت‌های ۱ و ۱/۵ متر بر ثانیه به دلیل مناسب بودن شدت ضربه، مشخصه‌های سیگنال بهتر و مناسب‌تر استخراج شده و منتج به نتایج معتبرتری در پیش‌بینی سفتی می‌شود. این موضوع با نتایج مشاهده شده توسط رانی و همکاران (۲۰۰۹) نیز همخوانی دارد که در آن در سرعت ۱/۵ متر بر ثانیه، مدل بهتری برای برآورد سفتی کیوی با استفاده از مشخصه‌های سیگنال ضربه گزارش شد. دلیل این پدیده را می‌توان این‌گونه شرح داد که در سرعت‌های بالاتر از ۱/۵ متر بر ثانیه، به دلیل کم شدن زمان برخورد نمونه با صفحه بارسنج، تأثیر عوامل مزاحم (نویز) نیز افزایش یافته و مانع از بهتر شدن سفتی پیش‌بینی شده می‌گردد. به بیان دیگر، در سرعت‌های ۱ و ۱/۵ متر بر ثانیه تعادل مناسبی بین شدت





ضربه و همچنین پایین بودن امواج مخل برقرار می‌شود و در نتیجه می‌توان توانایی بیشتری برای پیش‌بینی سفتی از مؤلفه‌های سیگنال ضربه را در این سرعت‌ها انتظار داشت. همچنین مشاهده می‌شود که ضرایب تبیین برای محل‌های مختلف برخورد و برای کل نمونه‌ها بسیار نزدیک می‌باشد که حاکی از عدم تأثیر محل برخورد بر نتایج حاصل از این روش است.

شکل ۴ مقادیر پیش‌بینی‌شده سفتی با استفاده از سه مؤلفه استخراجی از نیم موج اول سیگنال ضربه را در مقابل مقادیر اندازه‌گیری شده برای داده‌های آزمون (۲۰٪ کل داده‌ها) در سرعت ۱ متر بر ثانیه نشان می‌دهد. در آزمایش‌ها مشاهده شد که بازه سفتی نمونه متأثر از مرحله رسیدگی محصول می‌باشد. نمونه‌های کیمری سفتی بالاتر از ۱۲ نیوتن، خارک سفتی بین ۶ تا ۱۲ نیوتن، رطب سفتی از ۴ تا ۶ نیوتن و نمونه‌های خرما سفتی کمتر از ۲ نیوتن داشتند. این تقسیم‌بندی در شکل ۴ نشان داده شده است.



شکل ۴. مقادیر پیش‌بینی‌شده سفتی با استفاده از سه مؤلفه نیم موج اول سیگنال ضربه در مقابل مقادیر اندازه‌گیری شده برای داده‌های آزمون در سرعت ۱ متر بر ثانیه.

### نتیجه‌گیری

از نتایج به دست آمده در این تحقیق می‌توان چنین نتیجه‌گیری کرد:

سرعت‌های پرتاب نمونه بر سیگنال خروجی و همچنین دقت نتایج حاصل از آزمون ضربه مؤثر هستند. بهترین نتایج زمانی حاصل خواهد شد که تعادل خوبی مابین شدت ضربه و زمان کافی برخورد برقرار باشد. در این حالت موج مخل (نویز) به حداقل خود خواهد رسید. بهترین سرعت برای آزمایش‌های ضربه ۱ و ۱/۵ متر بر ثانیه بود.

همان‌گونه که انتظار می‌رفت حداکثر نیروی لازم برای نفوذ به گوشت میوه که به عنوان سفتی خرما در نظر گرفته شده بود،

با طی مراحل رسیدگی دچار افت محسوسی شد. این تغییرات به نحوی بود که به صورت کامل معرف مرحله رسیدگی خرما بود.



تأثیر مؤلفه‌های استخراج شده از سیگنال ضربه بر رابطه پیش‌بینی کننده سفتی در سطح پنج درصد معنی‌دار بود. این موضوع مبین این مطلب است که هر سه مؤلفه حداکثر نیرو، مدت زمان و سطح زیر نمودار سیگنال ضربه در نیم موج‌های ابتدایی تحت تأثیر سفتی هستند.

مشاهده شد که در تمامی تحلیل‌ها نتایج مستقل از محل برخورد ضربه بود. می‌توان استنباط نمود که نتایج پیش‌بینی سفتی خرما با استفاده از آزمون غیر مخرب ضربه متأثر از محل برخورد نیست.





## منابع

- ۱- میره‌ای، س.ا. ۱۳۸۹. ارزیابی پارامترهای مؤثر بر میزان رسیدگی خرماى مضافتى و شاهانى توسط روش غير مخرب اسپكتروسكوپى NIR، رساله دكتورى، دانشكده مهندسى و فناورى كشاورزى، دانشگاه تهران.
- 2- Duprat, F., M. Grotte, E. Pietri, and D. Loonis. 1997. The acoustic impulse response methods for measuring the overall firmness of fruit. *Journal of Agricultural Engineering Research* 66: 251-259.
- 3- Kim, K.B., S. Lee, M.S. Kim, and B.K. Cho. 2009. Determination of apple firmness by nondestructive ultrasonic measurement. *Postharvest Biology Technology* 52: 44-48.
- 4- Peirs, A., J. Lammertyn, B. Nicolaï, and J. De Baerdemaeker. 2000. Non-destructive quality measurement of apples by means of NIR-Spectroscopy. *Acta Horticulture* 517: 435-440.
- 5- Ragni, L., A. Berardinelli, and A. Guarnieri. 2010. Impact device for measuring the flesh firmness of kiwifruits. *Journal of Food Engineering* 96: 591-597.



## Date Fruit Firmness Modelling Using Nondestructive Impact Test

Alireza Heidari<sup>1</sup> Morteza Sadeghi<sup>2\*</sup> Seyed Ahmad Mireei<sup>3</sup> and Abbas Hemmat<sup>4</sup>

1- MSc Student, Department of Agricultural Machinery Engineering, Isfahan University of Technology

2- Associate Professor, Department of Agricultural Machinery Engineering, Isfahan University of Technology

sadeghimor@cc.iut.ac.ir

3- Assistant Professor, Department of Agricultural Machinery Engineering, Isfahan University of Technology

4- Professor, Department of Agricultural Machinery Engineering, Isfahan University of Technology

### Abstract

Date (*Phoenix dactylifera*) is an ancient fruit containing great source of minerals and nutritive materials. Date palm is also one of the most important trees in desert. Iran has the largest fields of planting and ranks second grade in terms of producing date. This product plays an important role in foreign exchange income. Grading of date fruit is currently done manually which causes mechanical damage to the fruit during the operation. Therefore, developing an automatic grading system in order to increase the quality of the product and reduce the labor cost is of great importance. In this research an electro-mechanical system was developed for online measuring firmness of date fruit based on nondestructive impact force. The samples of Mazzafati variety were prepared form at four different maturity stages (Kimri, Khalal, Rutab and Tamr). The nondestructive tests were performed on two sides of the samples at three different speeds (1, 1.5 and 2 m s<sup>-1</sup>). Since the firmness of date fruit is related to the maturity stage, this property was considered as the grading index. Each fruit was divided into two equal parts and the core was removed. Destructive tests were also performed on both sides separately based on Magness-Taylor (MT) test using a universal tension compression device. The maximum force of penetration was considered as the firmness index. In the analysis method, three characteristics of the signal's first half-wave were defined including peak force ( $F_p$ ), its duration ( $P_d$ ), and the area under its diagram ( $I_g$ ). The non-linear multivariate regression approach was performed on MT firmness against these properties. The obtained model could predict the firmness of the sample by a coefficient of determination ( $R^2_c$ ) of 0.508 and a root mean squares error of prediction (RMSEP) of 3.12 N. According to the similar results for both sides separately and considering all data together, it can be concluded that firmness prediction was not dependent to the orientation of fruit during the impact, hence the developed approach can be used for practical grading purposes. Overall, regarding engineering considerations related to grading system and the fact that the lower speed causes less damage to the fruit the speed of 1 m s<sup>-1</sup> is recommended for developing the commercial system.

**Keywords:** Date palm, Firmness, Impact, Nondestructive test and Rheological properties.