مقاله علمی پژوهشی/ نشریه پژوهش‌های صنایع غذایی/ جلد ۳۱ شماره ۳/ سال ۱۴۰۰/ صفحات ۶۳ تا ۸۳

DOI: 10.22034/FR.2021.39910.1740

مطالعه و مدل‌سازی حساسیت به کوفتگی میوه زردآلو تحت تأثیر ویژگی‌های ضربه و خصوصیات میوه

مهدی خدائی[*1]، سیدصادق سیدلو[2]، مرتضی صادقی[3] و سعید ظریف‌نشاط[4]

تاریخ دریافت: ۹۹/۲/۳۰ تاریخ پذیرش: ۹۹/٤/۳۰

[1] دانشجوی دوره دکتری، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

[2] دانشیار گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

[3] استاد گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

[4] دانشیار بخش تحقیقات فنی و مهندسی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی خراسان رضوی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، مشهد، ایران

[*] مسئول مکاتبه: Email: Mehdi.Khodaei@tabrizu.ac.ir

چکیده

زمینه مطالعاتی: کوفتگی شایع‌ترین نوع صدمات مکانیکی میوه‌ها در فرآیندهای پس از برداشت مانند بسته‌بندی و حمل‌ونقل می‌باشد. بررسی و پیش‌بینی دقیق و مناسب حساسیت به کوفتگی می‌تواند در انتخاب نوع محصول و مدیریت بهتر فرآیندهای پس از برداشت میوه‌ها مفید باشد. **هدف**: تحقیق حاضر با هدف بررسی حساسیت به کوفتگی میوه زردآلو و مدل‌سازی آن تحت تأثیر مشخصه‌های ضربه (انرژی ضربه و بیشینه نیروی برخورد) و مشخصه‌های فیزیکی زردآلو (شعاع انحنا و سفتی آکوستیک) و با نگرش شناسایی رقم مقاوم‌تر در برابر کوفتگی انجام شد. **روش کار**: برای انجام آزمایش‌های تجربی و اندازه‌گیری خصوصیات فیزیکی مرتبط از دو رقم زردآلوی شاهرودی و اردوباد استفاده شد. ضرباتی با سطوح مختلف انرژی اعمال و حساسیت به کوفتگی به‌صورت مدل‌ها و توابع رگرسیونی خطی و خطی چندگانه توسعه داده شدند. در این مدل‌ها، انرژی جذب شده توسط زردآلو به صورت تابعی از خصوصیات ضربه (بیشینه نیروی برخورد یا انرژی ضربه) در کنار خصوصیات میوه (شعاع انحنا و سفتی آکوستیک) پیش‌بینی شد. **نتایج**: طبق یافته‌های این مطالعه همه مشخصه‌های منتخب و بعضی از اثرات متقابل آن‌ها تأثیر معنی‌داری بر میزان کوفتگی محصول داشتند. معادله رگرسیونی خطی چندگانه بهترین مدل برای پیش‌بینی حساسیت به کوفتگی زردآلو انتخاب شد. نتایج نشان داد با افزایش مشخصه‌های شعاع انحنا و سفتی آکوستیک میوه، مقدار کوفتگی کاهش می‌یابد اما با افزایش هر دو مشخصه نیروی برخورد و انرژی ضربه، انرژی جذب شده افزایش پیدا می‌کند. **نتیجه‌گیری نهایی**: با توجه به نتایج این تحقیق، رقم اردوباد حساسیت کمتری نسبت به کوفتگی دارد و برای انتقال به مسافت‌های طولانی گزینه مناسب‌تری می‌باشد.

واژگان کلیدی: زردآلو، سفتی آکوستیک ، صدمات مکانیکی، کوفتگی، مدل‌سازی

واحدها و نشان‌ها

ممان اینرسی بازوی پاندول ($kg.m^2$)	I	انرژی جنبشی پاندول (J)	E_{kin}
زمان (s)	t	انرژی ضربه (J)	E_{impact} & E_i
سفتی آکوستیک میوه ($Hz^2.kg^{2/3}$)	S	انرژی الاستیک ضربه (J)	$E_{elastic}$
فرکانس (Hz)	f	انرژی جذب شده (J)	$E_{absorbed}$
بیشینه نیروی برخورد (N)	PF	انرژی جذب شده (J)	AE
شعاع انحنای میوه در محل ضربه (m)	R	سرعت زاویه‌ای بازوی پاندول (rad/s)	ω
ضریب کرویت زردآلو (٪)	$\emptyset$	سرعت جابجایی بازوی پاندول (m/s)	$\dot{x}$
گرانش زمین (m/s^2)	g	انرژی پتانسیل بازو (J)	U
زاویه بین بازوی پاندول و خط عمودی	α	جرم (kg)	m
فاصله عمودی بازوی پاندول از خط افقی (m)	h	طول بازوی پاندول (m)	L

مقدمه

صدمات مکانیکی میوه‌ها در هنگام برداشت، حمل‌ونقل، جداسازی، بسته‌بندی و سورتینگ آن‌ها اتفاق می‌افتد (استروپک و گولاچی ۲۰۱۵). در بین انواع صدمات مکانیکی، کوفتگی شایع‌ترین نوع آن در میوه‌های تازه می‌باشد (ژو و همکاران ۲۰۱۶). تلفات ناشی از کوفتگی می‌تواند به بیش از ۵۰ درصد برسد (سیدلو و همکاران ۱۳۹۶). تلفات عموماً کوفتگی زمانی اتفاق می‌افتد که میزان انرژی جذب شده در طی ضربه از میزان انرژی حد تحمل بافت میوه فراتر رود (جعفری و نصیری ۲۰۱۵). کوفتگی یکی از مهم‌ترین عوامل محدود کننده در حمل‌ونقل میوه‌ها و سبزیجات به‌ویژه در مسافت‌های طولانی می‌باشد (پولات و همکاران ۲۰۱۲). کوفتگی می‌تواند در نتیجه عواملی مانند طراحی ضعیف بسته‌بندی و تجهیزات پس از برداشت، تجهیزات و نحوه حمل‌ونقل نامناسب و ارتعاشات اعمالی به میوه در حین حمل‌ونقل ایجاد گردد (پولات و همکاران ۲۰۱۲).

بر اساس نتایج محققین پیشین می‌توان استنباط کرد که صدمات مکانیکی مانند کوفتگی را به‌سختی می‌توان محدود یا کنترل نمود (کومارنیچی و همکاران ۲۰۱۷)؛ اما با داشتن فهم درستی از مکانیسم ایجاد کوفتگی و پیش‌بینی مناسب کوفتگی به‌صورت تابعی از مشخصه‌های مؤثر بر آن، می‌توان عوامل مؤثر بر آن را کنترل و بروز کوفتگی را کاهش داد (ژو و همکاران ۲۰۱٦).

قابلیت کوفتگی[1] در میوه‌ها را می‌توان به‌صورت نسبت حجم کوفتگی بر انرژی ضربه یا انرژی جذب شده تعریف نمود (ون زیبروک و همکاران ۲۰۰۷a). بروز و شدت کوفتگی تحت‌الشعاع چندین عامل قبل از برداشت و پس از برداشت قرار دارد که از مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به خصوصیات میوه از قبیل بافت، مرحله رسیدگی، رقم، محتوای رطوبت، سفتی، دما، شکل و اندازه میوه اشاره نمود (اوپارا ۲۰۰۷؛ استادمن ۱۹۹۷؛ محسنین ۱۹۸٦). صرف‌نظر از تفاوت‌هایی که بین مشخصه‌های قبل از برداشت و پس از برداشت وجود دارد، میزان انرژی مکانیکی اعمال شده و جذب شده توسط میوه در هنگام ضربه، فشار و ارتعاش، عوامل اصلی تأثیرگذار بر شدت آسیب‌های مکانیکی هستند (ظریف نشاط و همکاران ۲۰۱۰؛ اوپارا ۲۰۰۷؛ بلاهوویچ و پاپرشتین ۲۰۰۵). از طرف دیگر آستانه کوفتگی با تنش شکست بافت میوه، تنش حاصل از ضربه، مدول الاستیسیته بافت میوه، جرم میوه و شعاع انحنای میوه ارتباط دارد (باریتلی و هاید ۲۰۰۱).

---

[1] *Bruising susceptibility*

یکی از روش‌های مناسب جهت اندازه‌گیری سفتی و رفتار کلی الاستیک میوه روش تحریک و پاسخ آکوستیک است. استفاده از این روش بر اساس رابطه بین مدول الاستیسیته و فرکانس‌های مختلف تشدید میوه می‌باشد. وانگ و همکاران (۲۰۰۶) گزارش دادند که در یک میوه یکسان، مدول الاستیسیته محاسبه شده از طریق پاسخ آکوستیک ارتباط خوبی با مدول الاستیسیته تجربی به‌دست‌آمده از طریق آزمون‌های فشاری دارد. همچنین دیزما و همکاران (۲۰۰۶) ارتباط مثبتی را بین سفتی آکوستیک و سفتی مگنس تیلور در میوه هلو پیدا کردند و بیان نمودند که سفتی آکوستیک با افزایش مدول الاستیسیته افزایش می‌یابد. ورساوس و اوزگون (۲۰۰۳) نیز عنوان کردند مدول الاستیسیته با افزایش زمان انبارمانی (رسیدگی بیش از حد) کاهش می‌یابد. مارتینز رومرو و همکاران (۲۰۰۲) نیز نشان دادند افزایش زمان انبارمانی در میوه زردآلو باعث کاهش سفتی و مدول الاستیسیته و درنهایت افزایش استعداد کوفتگی می‌شود.

اندازه‌گیری قابلیت کوفتگی محصولات می‌تواند منجر به بهینه‌سازی فرآیندهای حمل‌ونقل محصولات در زنجیره پس از برداشت، اصلاح عملیات بسته‌بندی و ذخیره‌سازی و در نتیجه کاهش کوفتگی در میوه‌ها شود (ژو و همکاران ۲۰۱۶). تأثیر مشخصه‌های ضربه از قبیل ارتفاع سقوط، بیشینه نیروی برخورد و یا انرژی ضربه، رسیدگی میوه و شرایط ذخیره‌سازی مانند دما، مدت زمان نگهداری و غیره بر روی حساسیت به کوفتگی، در میوه‌ها و سبزی‌های مختلفی مانند سیب (عابدی و احمدی ۲۰۱۳؛ ظریف نشاط و همکاران ۲۰۱۰؛ ون زیبروک و همکاران $۲۰۰۷a$)، گوجه‌فرنگی (ون زیبروک و همکاران ۲۰۰۶)، هلو (احمدی و همکاران ۲۰۱۰) و کیوی (احمدی ۲۰۱۲) مورد بررسی قرار گرفته‌اند. در این تحقیقات برای بیان میزان کوفتگی از مشخصه‌هایی مانند حجم کوفتگی (بلاهوویچ و پاپرشتین ۲۰۰۵) و یا میزان انرژی جذب شده (عابدی و احمدی ۲۰۱۳؛ ون زیبروک و همکاران $۲۰۰۷b$) استفاده شده است.

یکی از روش‌های کارآمد برای جلوگیری از کوفتگی محصولات، مدل‌سازی فرآیند حمل‌ونقل و انتقال محصول بر اساس متغیرهای مختلف درونی و بیرونی میوه است. به همین منظور مدل‌های رگرسیونی خطی چندگانه و غیرخطی مختلفی برای پیش‌بینی حساسیت به کوفتگی محصولات مختلفی مانند سیب، هلو، گوجه‌فرنگی و کیوی توسط محققین گزارش شده است (عابدی و احمدی ۲۰۱۳). این مدل‌ها برای ارتباط دادن خصوصیات ضربه (ارتفاع سقوط و بیشینه نیروی ضربه) با حجم کوفتگی مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این مدل‌ها در کنار خصوصیات ضربه سایر خصوصیات میوه مانند شعاع انحنا در محل ضربه، دما، رسیدگی، سفتی، رنگ (به‌عنوان شاخص رسیدگی) و غیره نیز حضور دارند. در مدل‌سازی پیش‌بینی کوفتگی، خصوصیات برخورد که تابعی از ارتفاع سقوط و یا بیشینه نیروی برخورد است، به ویژگی‌های میوه (سفتی و شعاع انحناء) که بیانگر حساسیت کوفتگی است، ارتباط داده می‌شوند. در این مدل‌ها، عموما انرژی برخورد یا بیشینه نیروی برخورد به‌عنوان متغیرهای مستقل و حجم کوفتگی و یا سطح کوفتگی به‌عنوان متغیر وابسته حضور دارند.

میوه زردآلو همانند هلو از جمله محصولات کشاورزی است که استعداد فسادپذیری بالایی دارد (کومارنیچی و همکاران ۲۰۱۶) و زردآلوهای رسیده دارای عمر قفسه‌ای نسبتاً پایینی بوده و مستعد صدمات مکانیکی هستند (میلر ۱۹۹۲). در مقایسه با سایر میوه‌ها مانند سیب، زردآلو نسبت به شرایط نامناسب در حین برداشت، حمل‌ونقل و یا بارگیری حساس است (کومارنیچی و همکاران ۲۰۱۶). همچنین برخلاف سایر میوه‌ها کوفتگی در زردآلو با تغییر رنگ کم و غیرقابل تشخیصی همراه بوده و تشخیص بافت آسیب‌دیده با چشم غیرمسلح بسیار مشکل است. به‌همین دلیل ون زیبروک و همکاران ($۲۰۰۷a$) و احمدی و همکاران (۲۰۱۲) از مشخصه "انرژی جذب شده" به‌جای"حجم کوفتگی" و یا"سطح کوفتگی" برای ارزیابی صدمات مکانیکی به ترتیب در

گوجه‌فرنگی و کیوی استفاده کردند؛ زیرا در گوجه‌فرنگی و کیوی نیز تشخیص ناحیه آسیب‌دیده، صرفاً با تکیه بر تغییر رنگ ناحیه آسیب‌دیده بسیار مشکل است. به‌طورکلی می‌توان عنوان نمود که برای یک میوه تحت آزمون کوفتگی (مثلاً زردآلو در یک حد معینی از رسیدگی و دمای معین) انرژی جذب شده بالاتر، نشان‌گر کوفتگی بالاتر است (ون زیبروک ۲۰۰۵).

مدل‌های پیش‌بینی کننده حساسیت به کوفتگی، حلقه ارتباط بین خصوصیات ذاتی میوه و عوامل مکانیکی ایجادکننده کوفتگی با حجم کوفتگی در میوه‌ها و سبزیجات می‌باشد. هم‌چنین توسعه شبیه‌سازی صحیح و دقیق صدمات مکانیکی در حین فرآیندهایی مانند حمل‌ونقل، وابسته به داشتن اطلاعات کافی از خواص مهندسی و حساسیت به کوفتگی در میوه‌هایی مانند زردآلو می‌باشد. به دلیل کمبود تحقیقات در این زمینه، اطلاعات کمی درباره حساسیت به کوفتگی میوه زردآلو و عوامل موثر بر آن به‌منظور کمینه کردن صدمات در عملیات پس از برداشت به‌ویژه در انتقال محصول به بازارهای دور دست وجود دارد. بنابراین پیش‌بینی میزان کوفتگی در رقم‌های مختلف زردآلو و شناسایی عوامل موثر بر آن از اهداف اصلی این تحقیق می‌باشد.

مواد و روش‌ها

در این مطالعه از دو رقم زردآلوی "شاهرودی" و "اردوباد" برای انجام آزمون‌های آزمایشگاهی استفاده شد که بیشترین سطح زیر کشت را به خود اختصاص داده‌اند. میوه‌های مورد نیاز در تیرماه ۱۳۹۷ از ایستگاه تحقیقات کشاورزی خلعت پوشان دانشگاه تبریز برداشت شد. به‌منظور جلوگیری و کمینه کردن هرگونه آسیب اولیه، همه زردآلوها توسط دست و با احتیاط کامل چیده شدند و پس از جمع‌آوری در داخل جعبه‌های پلاستیکی به آزمایشگاه ارتعاشات دانشگاه تبریز منتقل شدند. میوه‌های چیده شده دوباره مورد بررسی مجدد قرار گرفته و همه میوه‌های دارای آسیب اولیه از روند آزمون‌ها حذف شدند. مشخصه‌های فیزیکی از قبیل ابعاد اصلی، جرم و ضریب کرویت (درصد) برای ارقام مورد مطالعه اندازه‌گیری شد. ابعاد اصلی میوه توسط کولیس دیجیتال و جرم هر میوه توسط ترازوی دیجیتال با دقت ۰/۱ گرم اندازه‌گیری شد. برای محاسبه ضریب کرویت میوه‌ها از معادله (۱) استفاده شد (محسنین ۱۹۸۶):

$$\phi = \frac{\sqrt[3]{L.W.T}}{L} \times 100 \qquad \{۱\}$$

که در آن W، L و T به ترتیب قطر اصلی، قطر فرعی و ضخامت زردآلو می‌باشند. برای بررسی حساسیت به کوفتگی، قبل از آزمون ضربه، میوه‌ها حداقل به مدت ٤ ساعت برای رسیدن به تعادل گرمایی در محیط آزمایشگاه (۲۰ درجه) نگهداری شدند. همان‌طور که بیان شد لازمه مدل‌سازی حساسیت به کوفتگی در زردآلو اندازه‌گیری خصوصیات ضربه شامل بیشینه نیروی برخورد و انرژی برخورد و خصوصیات میوه شامل شعاع انحنا در محل برخورد و سفتی می‌باشد؛ بنابراین در ادامه نحوه اندازه‌گیری این مشخصه‌ها در تحقیق حاضر آورده شده است.

مشخصات ابزارهای اندازه‌گیری

ابزارهای مختلف اندازه‌گیری استفاده شده در تحقیق حاضر به همراه مشخصات آن‌ها در جدول ۱ بیان شده است.

اندازه‌گیری خصوصیات ضربه

در این مطالعه برای اندازه‌گیری مشخصه‌های مربوط به ضربه (نیروی ضربه، سرعت ضربه و انرژی ضربه) از یک واحد ضربه‌زن پاندولی (شکل ۱-c) استفاده شد. حسگرهای نیرو و شتاب‌سنج (جدول ۱جدول ۱) بر روی ضربه‌زن پاندولی نصب شده بودند. از یک کدکننده[1] نوری (جدول ۱) جهت اندازه‌گیری موقعیت زاویه‌ای و سرعت زاویه‌ای پاندول استفاده شد. برای تخمین اولیه از میزان انرژی ضربه، با استفاده از معادله ۲ و موقعیت زاویه‌ای بازوی پاندول (α) که توسط کدکننده نوری

[1] Encoder

اندازه‌گیری می‌شد، میزان جابجایی عمودی (h) پاندول به‌صورت تابعی از زاویه α محاسبه گردید. سپس با اندازه‌گیری میزان جرم بازو و با استفاده از معادله انرژی پتانسیل (معادله ۳)، مقدار تقریبی انرژی پتانسیل بازو تابعی از زاویه α محاسبه شد (کیت هاوی و همکاران ۲۰۱۱).

$$h = l - l * \cos(\alpha) \qquad \{۲\}$$

$$U = m.g.h \qquad \{۳\}$$

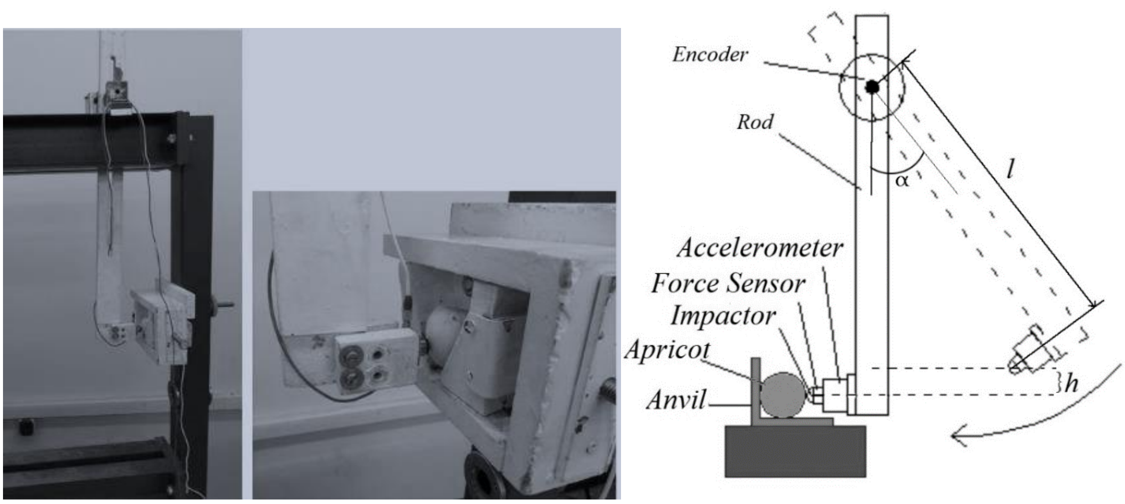
به‌منظور ایجاد ضربه با انرژی مورد نیاز، از معادلات ۲ و ۳ برای تعیین زاویه انحراف بازوی پاندول از خط عمودی استفاده شد. در حین اجرای آزمون‌های ضربه، برای جلوگیری از هرگونه ارتعاش و انحراف در طی برخورد، میوه روی قسمت سندان ضربه‌زن پاندولی به‌وسیله یک گیره چوبی ثابت نگه داشته می‌شد. از یک ضربه‌زن فلزی با شعاع ۲۵ میلی‌متر که درون بازوی پاندول جاسازی شده بود استفاده شد (شکل ۱- b). دو مشخصه جابجایی و آهنگ جابجایی ضربه‌زن پس از ثبت در سیستم ثبت داده‌ها مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. همه زردآلوها یک‌به‌یک در جایگاه مخصوص روی پلت‌فرم پاندول قرار داده شده و ضربه موردنظر با شدت معلوم براساس انحراف بازو از حالت عمودی اعمال گردید.

برای هر ضربه، مقدار بیشینه نیروی برخورد توسط حسگر نیرو و جابجایی مکانی (x) بازوی پاندول توسط کدکننده نوری ثبت گردید. سپس برای هر ضربه، منحنی نیرو-زمان با استفاده از داده‌های حسگر نیرو و کدکننده نوری رسم شد (شکل ۲). مشخصه زمان در منحنی نیرو-زمان با استفاده از داده‌های کدکننده نوری محاسبه شد. به‌طوری‌که لحظه رها شدن بازو (اولین داده کدکننده نوری) به‌عنوان لحظه صفر ($t=0$) در نظر گرفته شد و لحظه برخورد ضربه‌زن به میوه براساس ایجاد جهش ناگهانی در مقدار نیرو به‌دست آمد. محاسبه دقیق انرژی ضربه، انرژی الاستیک و انرژی جذب‌شده به‌منظور تعیین دقیق مدل کوفتگی حائز اهمیت است.

جدول ۱- مشخصات ابزارهای اندازه‌گیری استفاده شده در تحقیق

Table 1- Specifications of measuring instruments used in the research

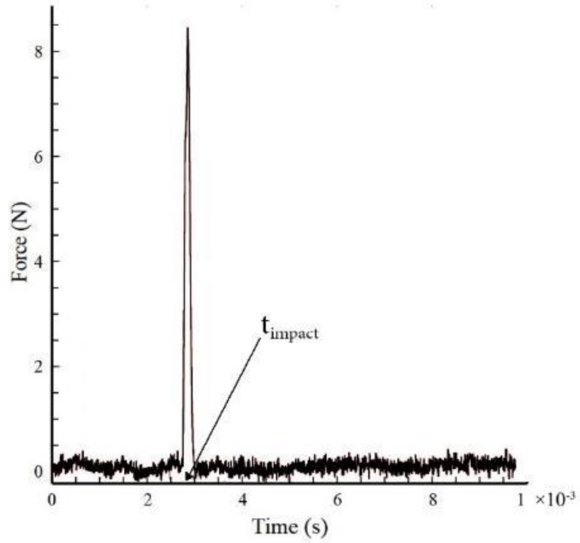
Instrument	Model	Manufacture	Features	Manufacturing Country
Pendulum Impact Device	---	---	Arm length: 49cm Arm mass: 508g	---
Force Sensor	AC20	APTech®	Sensitivity: 1.87 mV/N	Netherlands
Acceleration Sensor	A/120/V	DJB®	sensitivity: 10 mV/g	England
Optical Encoder	E50S8-2500	Autonics®	Resolution: 2500 Pulse/1Revolution (0.144°)	Turkey
Microphone	4189-H-041	Kjaer & Brüel	Frequency range: 6.3-20000 Hz sensitivity: 50mV/Pa	Denmark
Amplifier	NEXUS	Kjaer & Brüel	---	Denmark
Signal Processor	3564	Kjaer & Brüel	4 channel pulse processor	Denmark



(a) (b) (c)

شکل ۱- *a*- نحوه نصب و قرارگیری بازوی پاندول و ضربه زن، *b*- نحوه قرارگیری زردآلو در محل ضربه و وضعیت ضربه زن کروی در لحظه برخورد، *c*- نمودار شماتیک دستگاه ضربه پاندولی و اجزای آن

Figure 1- a- installing and placement of the pendulum and impact arm, b- placement of the apricot in the impact position and status of the sphere impactor at the moment of impact, c- schematic diagram of the pendulum impact device and its components



شکل ۲- نمونه‌ای از نمودار نیرو - زمان به‌دست‌آمده از داده‌های حسگر نیرو و کد کننده نوری جهت محاسبه لحظه برخورد ضربه زن

Figure 2– Sample of force–time diagram obtained from the data of the force sensor and optical encoder to calculate the moment of the impact

هرچند می‌توان انرژی ضربه و انرژی جذب شده را با استفاده از قانون انرژی پتانسیل و با اندازه‌گیری ارتفاع پاندول قبل از ضربه و ارتفاع بازو بعد از ضربه و برگشت به عقب محاسبه نمود؛ ولی در این تحقیق با توجه به مطالعه ون زیبروک (۲۰۰۵) از انرژی جنبشی بازوی پاندول به‌جای انرژی پتانسیل استفاده شد، زیرا استفاده از انرژی جنبشی به‌جای انرژی پتانسیل این مزیت را دارد که خطاهای به وجود آمده ناشی از اصطکاک در محل دوران بازو و ارتعاش بازو در این حالت حذف می‌شوند؛ بنابراین برای تعیین میزان انرژی جذب شده توسط میوه، اختلاف بین انرژی جنبشی ضربه و انرژی جنبشی بازو در موقع برگشت پس از ضربه زنی برای هر ضربه محاسبه و ثبت گردید. برای تعیین انرژی جنبشی بازوی پاندول از معادله ٤ استفاده شد (ون زیبروک ۲۰۰۵):

$$E_{kin}(t) = \frac{1}{2}\omega(t)^2 = \frac{1}{2}\frac{I\,\dot{x}(t)^2}{l^2} \qquad \{٤\}$$

که در آن $\dot{x}$، نرخ جابجایی ضربه زن می‌باشد. محاسبه نرخ جابجایی ضربه زن در لحظه iام با استفاده از موقعیت لحظه‌ای ضربه‌زن (x_i) در هنگام برخورد و به‌صورت معادله ٥ محاسبه شد (ون زیبروک ۲۰۰۵):

$$\dot{x}_i = \frac{x_{i-1} - x_{i+1}}{2dt} \qquad \{٥\}$$

در معادلـه ۵، x_{i-1} و x_{i+1} بـه ترتیـب موقعیـت مکـانی ضربه زن دقیقاً قبل و بعد از موقعیت لحظـه‌ای ضـربه‌زن (x_i) را نشان می‌دهد و d_t فاصله زمانی سـپری شـده بـین دو سیگنال متـوالی (ثبـت شـده توسـط کدکننـده نـوری) می‌باشد. موقعیت مکانی بـازو در لحظـه صـفر (t=0) بـه عنوان مبنای محاسـبه و انـدازه‌گیری موقعیـت جابجـایی پاندول (x_i) انتخاب شد. درنهایـت انـرژی ضـربه، انـرژی الاسـتیک و انـرژی جـذب شـده توسـط معـادلات ٦ تـا ٨ محاسبه شدند:

$$E_{impact} = E_{kin}(t_{i-1}) \qquad \{٦\}$$

$$E_{elastic} = E_{kin}(t_{i+1}) \qquad \{٧\}$$

$$E_{absorbed} = E_{impact} - E_{elastic} \qquad \{٨\}$$

اگر فرض شود کـه برخـورد در لحظـه $t=t_i$ انجـام گیـرد، بنابراین t_{i-1} زمان آخرین سیگنال فرستاده شـده (قبـل از برخـورد) توسـط کدکننـده نـوری و t_{i+1} زمـان اولـین سیگنال بعد از برخورد می‌باشد.

در تحقیق حاضر برای بررسی حساسیت به کـوفتگی از سه سطح مختلف انرژی ضربه اسـتفاده شـد (جـدول ۲)؛ بنابراین میوه‌های هر دو رقم زردآلو به سه گروه مختلف دسته‌بندی شدند و هر میوه تنها یک مرتبـه تحـت ضـربه قرار گرفت. در آزمون‌هـا بـرای تعیـین سـطح انـرژی در حالـت ضـربه بحرانـی زردآلـو از روش معتبـر ضـربه چندگانه ارتفاع ثابت[۱] که توسـط باجمـا و هایـد (۱۹۹۸) و ون زیبـروک و همکـاران (۲۰۰۳) بـرای میوه‌هـایی ماننـد سـیب، سـیب‌زمینی و گوجـه‌فرنگی توسـعه یافتـه اسـت، استفاده شد. بر اسـاس ایـن روش، عـدم مشـاهده تغییـر مشهود در منحنی نیرو-زمان مربوط به دو ضربه متوالی که به یک نقطه معینـی از میـوه وارد می‌شـود بـه معنـای عدم بروز کوفتگی در آن نقطه می‌باشد (شکل ۳).

جدول ۲- سطوح مختلف ضربه مورد استفاده در آزمون‌های کوفتگی

Table 2- Different impact levels used in bruising tests

Impact levels	Impact energy (J)		Impact force (N)	
	Average	SD*(٪)	Average	SD*(٪)
Level 1	0.025	2.3	16.5	17
Level 2	0.04	4.1	19.5	21
Level 3	0.1	3.5	30	13

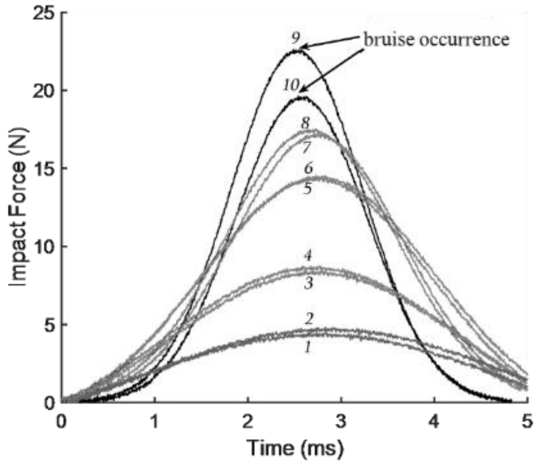
* Standard deviation

برای تعیین سطح انرژی بحرانی میـوه زردآلـو ۱۰ عـدد زردآلو برای هر رقم به‌صورت تصادفی انتخاب شـدند و سپس ضرباتی به‌صورت تکراری بـه نمونـه‌ها وارد شـد. به‌طوری‌که ضربات با انحراف بازوی پاندول بـا زوایـای کم شروع و به‌تدریج افـزایش یافت. بـرای هـر زاویـه دو ضربه به نقطه معینـی از نمونـه اعمال‌گردیـد و هم‌زمـان منحنی نیرو-زمان برای ضربه اول و دوم رسم گردیـد و سپس با هم مقایسه شد (شکل ۳). اگـر دو منحنـی رسـم شده تفاوت آشکاری نداشتند و منطبق بر هم بودند زاویه ضربه افزایش داده می‌شد. ایـن عمـل تـا زاویـه‌ای ادامـه یافت که تغییر مشـهود بـین دو منحنـی متـوالی مشـاهده گردید و زاویه ضربه بحرانی کـه منجـر بـه تغییـر شـکل پلاسـتیک در میـوه می‌شـد، بـرای هـر یـک از نمونـه‌ها مشـخص شـد. درنهایـت میـانگین آن زوایـای بحرانـی محاسبه شد. سپس سطح انرژی مرتبط با ضربه بحرانی برای هر دو رقم شاهرودی و اردوباد محاسبه شد.

بر اساس نتایج آزمون CHMI در ارقـام مـورد مطالعـه، سه سطح مختلف ضربه با مقدار انرژی مورد نظـر بـرای انجام آزمون‌های حساسیت بـه کـوفتگی انتخـاب گردیـد (جـدول ۲). سـطح ۱ انـرژی ضـربه (۰/۰۲۵ J) کمتـر از سطح بحرانی بود که میـوه زردآلـو می‌توانـد تحمـل کنـد (سطح انرژی مجاز) و سطح ۲ (۰/۰٤ J) در حدفاصل بین سطح انرژی ضربه بحرانی و سـطح انـرژی مجـاز قـرار داشت و سطح انرژی ۳ (۰/۱ J) کاملاً در ناحیـه بحرانـی

[۱] Constant Height Multiple Impact (CHMI)

قـرار داشـت و و تشـخیص آسـیب‌دیدگی میـوه در ایـن محدوده مشکل نبود.



شکل ۳- نمونه‌ای از نمودارهای منحنی زمان-نیروی به‌دست‌آمده با روش CHMI برای زردآلوی رقم شاهرودی

Figure 3- An example of the time-force diagrams obtained from the CHMI method for Shahroudi apricot cultivar

اندازه‌گیری شعاع انحنا میوه در محل برخورد

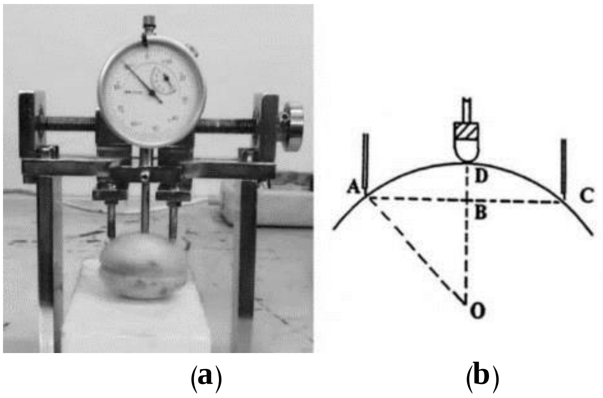
تأثیر شعاع انحنـا بـر روی میـزان انـرژی جـذب شـده و حجم کوفتگی ایجادشـده در میـوه قـبلاً توسـط محققـین مختلفی گزارش شده است (عابدی و همکـاران ۲۰۱۳؛ ون زیبروک و همکاران ۲۰۰۷a,b)؛ بنابراین از یک انحناسـنج برای اندازه‌گیری شـعاع انحنـا در محـل ضـربه اسـتفاده گردیـد. شـعاع انحنـا میوه‌هـا بـا اسـتفاده از معادلـه ۹ و مختصات شکل ٤ محاسبه شد (محسنین ۱۹۸٦)

$$RADIUS = \frac{(AC)2}{8\times(BD)} + \frac{(BD)}{2} \qquad \{۹\}$$

اندازه‌گیری سفتی آکوستیک زردآلو

برای تعیین سفتی میوه از تکنیک ضربه آکوستیک که یک آزمون غیرمخرب است اسـتفاده شـد (عابـدی و احمـدی ۲۰۱۳؛ ون زیبـروک و همکـاران ۲۰۰۷a,b). بـرای انجـام این آزمون ابتـدا میکروفـون (جـدول ۱) در یـک طـرف از نمونه با فاصله بسیار کم توسـط پایـه نگه‌دارنـده تثبیـت شد و سپس در طرف مقابل محل قرارگیـری میکروفـون، ضربه‌ای توسط میله پلاستیکی توپری به نمونه زده شـد (شکل ٥ - a,b). فرکـانس ایجـاد شـده حاصـل از ضـربه توسط میکروفون برای هر یک از نمونـه‌ها ضـبط و ثبـت گردید. از یک دستگاه آمپلی‌فایر برای تقویت سـیگنال‌های به‌دسـت‌آمده از میکروفـون اسـتفاده شـد. سـپس تبـدیل سـریع فوریـه بـر روی سـیگنال‌ها اعمـال گردیـد و فرکانس‌های تشدید برای هرکدام از نمونه‌ها به‌دست آمد. میانگین فرکانس تشدید در ارقام شاهرودی و اردوباد به ترتیـب ۱۱۲ و ۱۲۰ هرتـز محاسـبه شـد و درنهایـت مشخصـه سـفتی آکوسـتیک (S) بـا اسـتفاده از اولـین فرکانس تشدید هر نمونه و جرم آن با استفاده از معادلـه ۱۰ محاسبه شد (عابدی و احمدی ۲۰۱۳):

$$S \cong f^{\,2} m^{2/3} \qquad \{۱۰\}$$



شکل ۴- *a*- نحوه اندازه‌گیری شعاع انحنا توسط دستگاه انحنا سنج، *b*- شماتیک هندسی مشخصه‌های اندازه‌گیری شعاع انحنا

Figure 4– a- How to measure the radius of curvature by a curvilinear device, b- Geometric schematic characteristics of measuring radius of curvature

تحلیل آماری

از آنالیز واریانس بـرای بررسـی اثـرات اصـلی و اثـرات متقابل داده‌های اندازه‌گیری شده مربوط به سه مشخصه مستقل اصـلی بیشـینه نیـروی برخـورد، شـعاع انحنـا و سفتی آکوستیک بر روی انرژی جذب شده میوه، استفاده شـد. لازم بـه ذکـر اسـت در انجـام آنـالیز واریـانس از مجموع داده‌های تجربی مربوط بـه هـر دو رقـم زردآلـو

استفاده شد. برای مشخصه بیشینه نیروی برخورد از سه سطح مختلف نیرو و با توجه به مقادیر جدول ۲ استفاده شد. با توجه به اینکه داده‌های اندازه‌گیری شده برای دو مشخصه شعاع انحنا و سفتی آکوستیک از نوع پیوسته بودند، ابتدا برای هر دو مشخصه با توجه به بازه تغییرات داده‌ها چهار سطح مختلف تعریف شد و داده‌های به دست آمده برای هر دو مشخصه به چهار سطح جداگانه تقسیم شدند. جدول ۳ نحوه انجام تقسیم‌بندی مقادیر تجربی و نماینده هر گروه را نشان می‌دهد. آنالیز آماری در قالب آزمایش فاکتوریل با طرح پایه کاملا تصادفی انجام شد. در مجموع ۱٤٤ عدد داده برای انجام آنالیز واریانس مورد استفاده قرار گرفت.

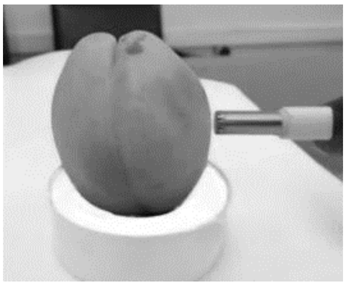
جدول ۳- نحوه تقسیم‌بندی داده‌های تجربی به بازه‌های جداگانه و مقادیر اعمال شده برای هر گروه به منظور انجام آنالیز واریانس

Table 3- How to divide experimental data into separate ranges and applied values for each group to perform analysis of variance

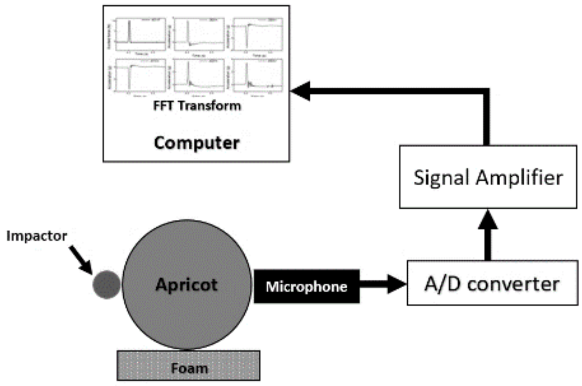
Parameter	Dara Range	Applied value
Radius (m)	≤0.019	0.019
	<0.019-0.022≤	0.022
	<0.022-0.024≤	0.024
	0.024<	0.027
Acoustic Stiffness (10^3.Hz^2.kg$^{2/3}$)	≤1.4	1.4
	<1.4-1.6≤	1.6
	<1.6 -1.8≤	1.8
	1.8<	2

مدل‌سازی حساسیت به کوفتگی

بعد از اندازه‌گیری مشخصه‌های مستقل تحقیق شامل بیشینه نیروی برخورد، انرژی برخورد، شعاع انحنا زردآلو در محل برخورد و سفتی آکوستیک زردآلو، مشخصه وابسته یعنی انرژی جذب شده توسط میوه توسط معادلات ٦ تا ۸ محاسبه گردید. سپس مدل‌سازی فرآیند جهت پیش‌بینی متغیر وابسته به‌صورت تابعی از متغیرهای مستقل مذکور انجام شد. برای مدل‌سازی رگرسیونی از داده‌های هر دو رقم زردآلو استفاده شد.



(**a**)



(**b**)

شکل ۵- *a*- نحوه قرارگیری میکروفون در کنار میوه زردآلو برای اندازه‌گیری سفتی آکوستیک، *b* - نمودار شماتیک فرآیند اندازه‌گیری مشخصه سفتی آکوستیک

Figure 5- a- How to place the microphone next to apricot fruit to measure acoustic stiffnes, b- schematic diagram of acoustic stiffness measurement procejure

در مطالعه حاضر دو مدل مختلف رگرسیونی برای پیش‌بینی کوفتگی توسعه داده شد که در مدل اول از "بیشینه نیروی برخورد" و در مدل دوم از "انرژی برخورد" به‌عنوان مشخصه مستقل به همراه سایر مشخصه‌های مستقل مربوط به خصوصیات میوه (سفتی آکوستیک و شعاع انحنای زردآلو در محل ضربه) استفاده شد. در هر دو مدل از انرژی جذب شده به‌عنوان مشخصه وابسته در مدل‌های پیش‌بینی کوفتگی استفاده گردید. برای تحلیل داده‌ها و انتخاب متغیرهای مستقل و برهمکنش‌های مؤثر بر روی متغیر وابسته و شناسایی ارتباط بین آن‌ها از روش رگرسیون گام‌به‌گام نزولی استفاده شد. با استفاده از این روش تمامی اثرات اصلی و اثرات متقابل آن‌ها که غیر معنی‌دار بودند از روند مدل‌سازی به‌صورت گام‌به‌گام حذف گردید. سطح

معنی‌داری برای همه مشخصه‌های دخیل در مدل، ۵ درصد انتخاب گردید. برای انجام آزمون‌های آماری از نرم‌افزار *SPSS* نسخه ۲۵ و نرم‌افزار *JMP Pro* نسخه ۱۳ استفاده شد.

در اکثر مقالات پیشین ارتباط بین انرژی جذب شده و یا حجم کوفتگی میوه با مشخصه‌های ضربه و خصوصیات میوه به‌صورت مدل‌های رگرسیونی خطی و خطی چندگانه، تابعی از اثرات اصلی متغیرهای مستقل بیان شده است. در این تحقیق علاوه بر اعمال اثرات اصلی در مدل‌های رگرسیون خطی و خطی چندگانه، اثرات متقابل آنها نیز در مدل‌ها اعمال شده است. همچنین از مدل‌های لگاریتمی نیز استفاد شده است. از بین مدل‌های توسعه داده شده و با استفاده از معیارهای آماری مناسب برای اعتبارسنجی مدل‌ها، بهترین مدل برای برازش داده‌های تحقیق انتخاب گردید.

ارزیابی و اعتبارسنجی مدل‌های رگرسیونی

قابلیت و صحت پیش‌بینی همه مدل‌های رگرسیونی توسعه داده شده توسط معیارهای مختلف شامل ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، ضریب تبیین (R^2) و ضریب تبیین اصلاح‌شده (R^2_{adj}) مورد ارزیابی قرار گرفت و مدل‌هایی که دارای کمترین مقدار RMSE و بالاترین مقادیر R^2 و یا R^2_{adj} بودند به‌عنوان بهترین و دقیق‌ترین مدل رگرسیونی انتخاب شدند. برای اعتبارسنجی مدل‌های رگرسیونی ۲۰ درصد از داده‌ها به‌صورت تصادفی برای اعتبارسنجی مدل کنار گذاشته شد و فرآیند توسعه مدل بر روی ۸۰ درصد داده‌های باقیمانده انجام شد. بعد از اتمام مدل‌سازی از داده‌های باقیمانده جهت اعتبارسنجی مدل‌ها استفاده گردید.

نتایج و بحث

نتایج اندازه‌گیری مشخصات فیزیکی و مکانیکی

درجدول ٤ خلاصه‌ای از نتایج به‌دست‌آمده مربوط به مشخصه‌های فیزیکی و مکانیکی زردآلو مورد بررسی در این تحقیق آورده شده است. برای مقایسه نسبت کوفتگی بین دو رقم زردآلو، نسبت انرژی جذب شده به انرژی ضربه به صورت درصدی و به شکل معادله ۱۱ ایجاد شد (ون زیبروک ۲۰۰۵):

$$\text{نسبت کوفتگی} = \left(\frac{AE}{E_i}\right) * ۱۰۰ \qquad \{۱۱\}$$

با توجه به مقادیر جدول ٤، میانگین به دست آمده برای مشخصه‌های بیشینه نیروی برخورد و انرژی ضربه در رقم شاهرودی به ترتیب ۳ و ۲۲ درصد نسبت به رقم اردوباد بیشتر است. هم‌چنین میانگین نسبت کوفتگی در رقم شاهرودی و اردوباد به ترتیب ٨٤ و ۷۹ درصد به دست آمد. این بدان معناست که در رقم شاهرودی به طور متوسط ٨٤ درصد از انرژی ضربه جذب میوه شده و در رقم اردوباد این مقدار به ۷۹ درصد رسیده است. به عبارت دیگر رقم شاهرودی به طور متوسط تقریبا ۵ درصد انرژی ضربه بیشتری را نسبت به رقم اردوباد جذب کرده است. از آن‌جایی‌که مقدار انرژی جذب شده در میوه ارتباط مستقیمی با مقدار آسیب کوفتگی در میوه دارد می‌توان چنین نتیجه‌گیری کرد که در رقم شاهرودی کوفتگی بیشتری نسبت به رقم اردوباد ایجاد شده است و رقم شاهرودی نسبت به رقم اردوباد بیشتر مستعد کوفتگی می‌باشد. احمدی (۲۰۱۲) نشان داد که افزایش بیشینه نیروی برخورد و انرژی ضربه موجب افزایش انرژی جذب شده در میوه کیوی می‌شود. همچنین بنا به گزارش ون زیبروک و همکاران (۲۰۰۷b) انرژی ضربه و بیشینه نیروی برخورد ارتباط مستقیمی با انرژی جذب شده در گوجه‌فرنگی دارد.

تحلیل آماری نتایج تجربی

جدول ۵ نتایج تجزیه واریانس داده‌های حاصل از آزمون‌های آزمایشگاهی مربوط به اثر مشخصه‌های مستقل بیشینه نیروی برخورد، شعاع انحنا و سفتی آکوستیک بر روی انرژی جذب شده در میوه زردآلو را نشان می‌دهد. در**شکل ۶** نیز نتایج مربوط به مقایسه میانگین مربوط به مشخصه‌های مستقل اصلی تحقیق نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می گردد

بیشـینه نیـروی برخـورد اثـر مسـتقیمی بـر روی میـزان انرژی جذب شده دارد ولی اثر دو مشخصه دیگر (شعاع انحنا و سفتی آکوسـتیک) بـر روی میـزان انـرژی جـذب شده منفی است. ذکر این نکته حائز اهمیت است که اعـداد مربوط به انرژی جذب شده از میـانگین آن مشخصــه در دو نوع رقم زردآلو به‌دست آمده است.

جدول ۴- خلاصه‌ای از مقادیر تجربی اندازه‌گیری شده برای مشخصه‌های مستقل و وابسته مورد بررسی

Table 4- Summary of the experimental values measured for the studied independent and dependent characteristics

	Parameter	Min. value	Max. value	Mean	Standard deviation
Shahroudi	Major diameter(mm)	48.70	59.52	53.26	2.84
	Mass (g)	35.28	61.66	44.04	3.63
	Sphericity	77.70	87.48	82.12	2.32
	Radius od curvature	0.015	0.028	0.02	0.0032
	Acoustic stiffness (10^3.Hz^2. kg$^{2/3}$)	1.34	1.98	1.60	0.144
	Peak contact force	15.98	32.65	22.65	5.52
	Impact energy	0.017	.127	0.061	0.038
	Absorbed energy	0.014	0.10	0.052	0.031
Ordubad	Major diameter(mm)	42.71	50.18	46.66	2.31
	Mass (g)	44.85	62.63	52.04	3.6
	Sphericity	91.21	99.94	96.22	2.62
	Radius od curvature	0.016	0.031	0.025	0.0031
	Acoustic stiffness (10^3.Hz^2. kg$^{2/3}$)	1.35	2.25	1.90	0.191
	Peak contact force	16.10	32.70	22.05	5.43
	Impact energy	0.014	0.123	0.059	0.035
	Absorbed energy	0.011	0.09	0.047	0.028

جدول ۵-نتایج تجزیه واریانس مربوط به اثر مشخصه‌های مستقل بر روی انرژی جذب شده در میوه زردآلو

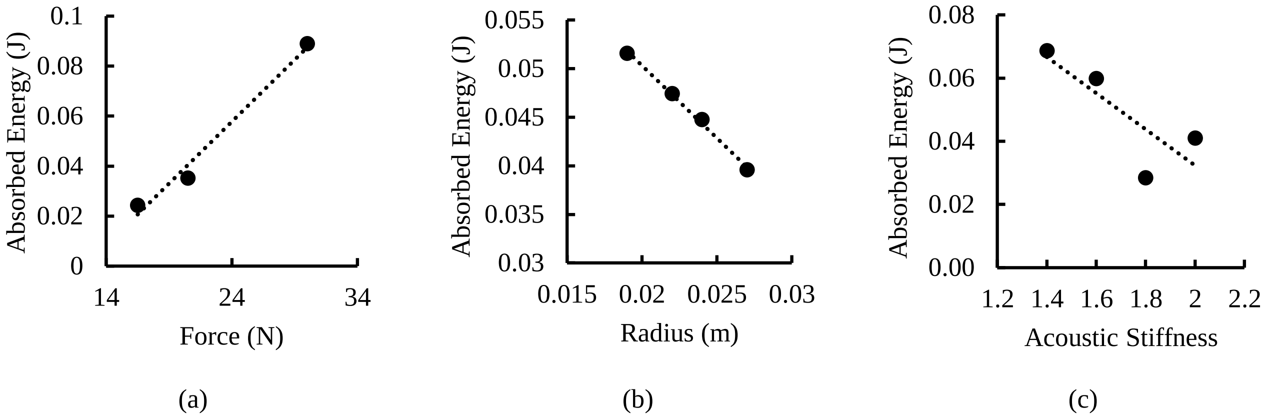
Table 5- Results of variance analysis on the effect of independent characteristics on the absorbed energy in apricot fruit

Source of variation	Degrees of freedom	Mean square
Peak contact Force (PF)	2	0.015**
Radius of curvature (R)	3	0.008**
Acoustic stiffness (S)	3	0.013**
PF × R	6	3.2×10^{-4}*
PF × S	5	1.9×10^{-4}**
R × S	9	6×10^{-5}ns
PF × R × S	5	3×10^{-5}ns
Error	86	0.007

** Indicates a significant difference in the probability level of 1%

* Indicates a significant difference in the probability level of 5%

ns No significant difference



شکل ۶- بررسی مقایسه میانگین مشخصه‌های مستقل اصلی تحقیق، شامل بیشینه نیروی برخورد (a)، شعاع انحنا (b) و سفتی آکوستیک (c) بر روی میزان انرژی جذب شده

Figure 6- Mean comparison of the main independent characteristics of the research, including the Peack contact force (a), Radius of curvature (b) and the Acoustic stiffness (c) on the absorbed energy

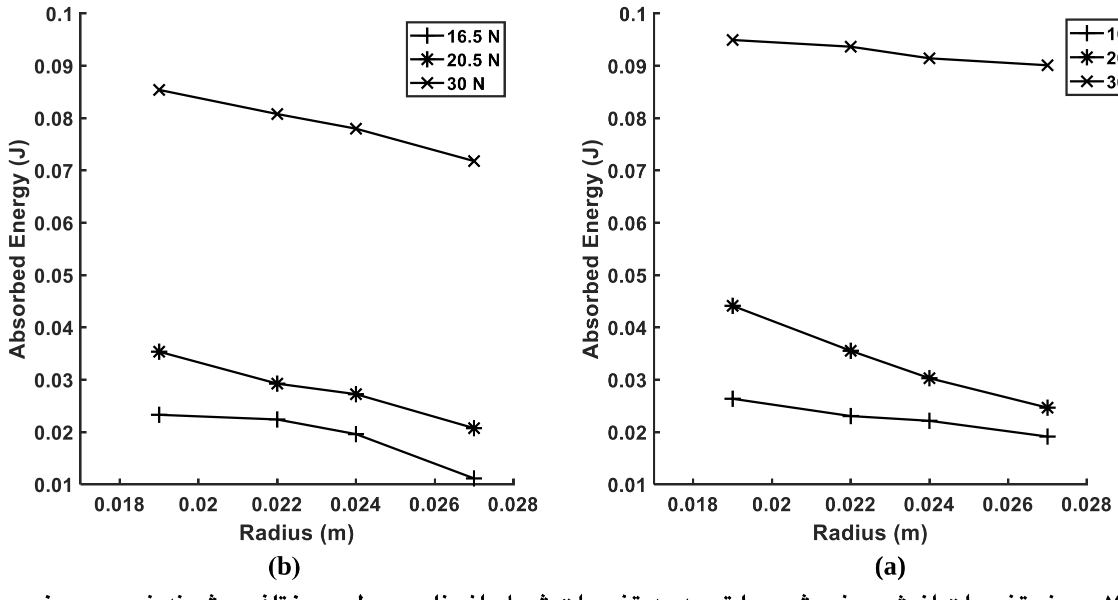
همان‌طور که در جدول ۵ مشاهده می‌شود اثر همه مشخصه مستقل اصلی مورد بررسی (بیشینه نیروی برخورد، شعاع انحنا و سفتی آکوستیک) در سطح احتمال ۱ درصد بر روی انرژی جذب شده معنی‌دار شده است. هم‌چنین اثر متقابل بیشینه نیروی برخورد در شعاع انحنا در سطح احتمال ۵ درصد و اثر متقابل بیشینه نیروی برخورد در سفتی آکوستیک در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار شده است. به عبارت دیگر هر سه متغیر مستقل تاثیر معنی داری روی انرژی جذب شده و یا میزان کوفتگی داشته اند.

تأثیر شعاع انحنا بر روی انرژی جذب شده

شکل ۷ نمودار روند تغییرات انرژی جذب شده با توجه به تغییرات شعاع انحنا را در سطوح مختلف بیشینه نیروی برخورد برای دو رقم شاهرودی (شکل ۷ – a) و اردوباد (شکل ۷ – b) نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۷، در هر دو رقم شاهرودی و اردوباد با افزایش شعاع انحنا از مقدار انرژی جذب شده توسط میوه کاسته می‌شود. هم‌چنین شکل ۷ نشان می‌دهد با افزایش بیشینه نیروی برخورد انرژی جذب شده افزایش می‌یابد. با افزایش مقدار بیشینه نیروی برخورد از ۱۶/۵ به ۳۰ نیوتن، میانگین انرژی جذب شده در رقم اردوباد ۷۱ درصد افزایش می‌یابد، درحالی‌که این مقدار در رقم شاهرودی ۷۸ درصد می‌باشد (شکل ۷). هم‌چنین اختلاف میانگین انرژی جذب شده بین دو بازه ابتدایی (۱۹ میلی‌متر) و انتهایی (۲۷ میلی‌متر) شعاع انحنا در رقم شاهرودی و اردوباد به ترتیب ۱۸ و ۲۹ درصد به‌دست آمد. می‌توان نتیجه گرفت که تأثیر افزایش شعاع انحنا بر روی کاهش انرژی جذب شده توسط میوه در رقم اردوباد نسبت به رقم شاهرودی بیشتر است. این بدان معنا است که رقم اردوباد در برابر ایجاد کوفتگی تحمل بیشتری دارد.

روند تغییرات انرژی جذب شده با توجه به تغییرات شعاع انحنا در سطوح مختلف انرژی ضربه برای دو رقم شاهرودی و اردوباد همانند نمودارهای شکل ۷ برای سطوح مختلف ضربه حاصل شده است. به‌طوری‌که با افزایش انرژی برخورد از ۰/۰۲۵ J به ۰/۱ J مقدار انرژی جذب شده نیز در هر رقم افزایش می‌یابد. تأثیر شعاع انحنا بر روی انرژی جذب شده قبلاً در مورد میوه‌هایی مانند کیوی، سیب، هلو و گوجه‌فرنگی مورد مطالعه قرار گرفته است (حسین ۲۰۱۸)، اما در مورد میوه زردآلو اطلاعات زیادی وجود ندارد. علی‌رغم نبود اطلاعات کافی در مورد تأثیر شعاع انحنا بر روی کوفتگی میوه زردآلو اما نتایج این تحقیق با نتایج سایر محققین در مورد میوه‌هایی نظیر سیب، هلو، کیوی مطابقت دارد. با توجه

به جدول ٤ می‌توان مشاهده نمود میانگین مشخصه شعاع انحنا در رقم شاهرودی ۲۰ درصد کمتر از رقم اردوباد می‌باشد. ون زیبروک و همکاران (۲۰۰۷c) اثر دوگانه‌ای را برای مشخصه شعاع انحنا در میوه سیب بیان کردند. به گزارش ایشان در سطوح ضربه پایین اثر تنش شکست بیشتر مطرح بوده و شعاع‌های انحنای کوچکتر منجر به افزایش تنش و افزایش کوفتگی در محل ضربه می‌شود اما در سطوح ضربه بالا، داشتن شعاع انحنای بزرگتر سطح تماس را افزایش داده و موجب افزایش کوفتگی به صورت سطحی می شود. بر اساس تئوری هرتز درباره اجسام الاستیک، با کاهش شعاع انحنا از مساحت ناحیه ضربه کاسته می‌شود و در مقابل تنش در ناحیه مورد ضربه افزایش می‌یابد. احمدی و همکاران (۲۰۱۰) نشان دادند میزان حجم کوفتگی در هلوهایی که شعاع انحنای کوچک‌تری دارند نسبت به هلوهایی با شعاع انحنای بزرگ‌تر بیشتر است. همچنین محققین دیگری مانند احمدی (۲۰۱۲) و ظریف نشاط و همکاران (۲۰۱۰) نیز نتایج مشابهی برای میوه‌های سیب (رقم گلدن دلیشز) و کیوی گزارش داده‌اند. با توجه به بالا بودن درصد کرویت رقم اردوباد می‌توان چنین استنباط نمود که تغییرات شعاع انحنا در این رقم در مقایسه با رقم شاهرودی که درصد کرویت پایین‌تری دارد کمتر است. دوکی شکل بودن رقم شاهرودی به دلیل بزرگ‌تر بودن قطر اصلی آن نیز منجر به ایجاد نقاطی با شعاع انحنای کوچک در قسمت سر و ته آن می‌گردد. وجود چنین نقاطی موجب تمرکز تنش در هنگام ضربه شده و مقدار صدمات کوفتگی را در فرآیندهایی مانند حمل‌ونقل افزایش می‌دهد.



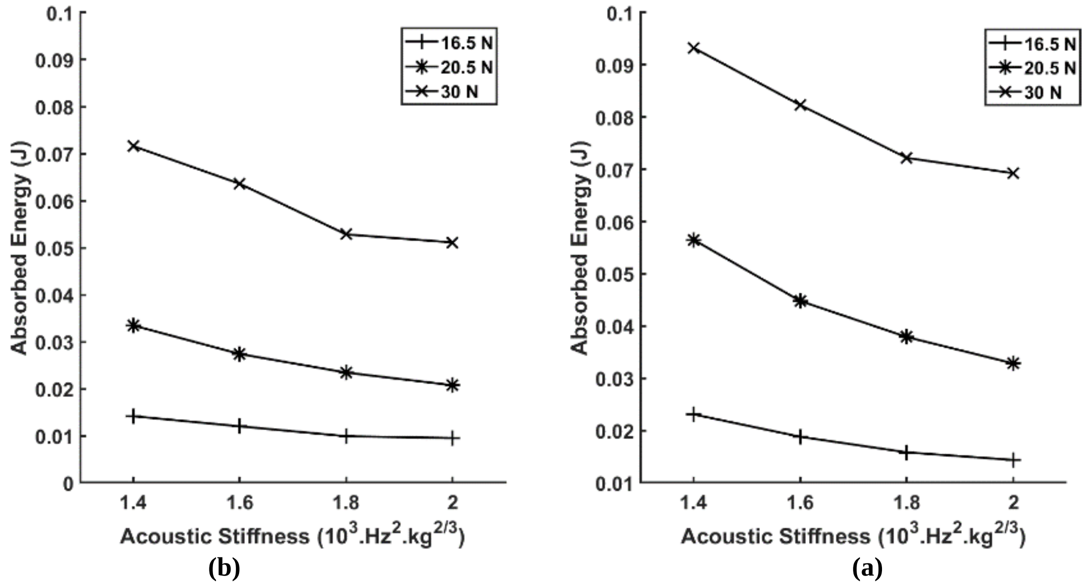
شکل ۷- روند تغییرات انرژی جذب شده با توجه به تغییرات شعاع انحنا در سطوح مختلف بیشینه نیروی برخورد در دو رقم شاهرودی (a) و اردوباد (b)

Figure 7- The absorbed energy changes compared to the radius of curvature changes at different levels of peak impact force in Shahroudi (a) and Urdoobad (b) cultivars

تأثیر سفتی آکوستیک روی انرژی جذب شده

شکل ۸ روند تغییرات انرژی جذب شده را با توجه به تغییرات مشخصه سفتی آکوستیک در سطوح مختلف بیشینه نیروی برخورد برای دو رقم شاهرودی (شکل ۸ – a) و اردوباد (شکل ۸ – b) نشان می‌دهد. بررسی نتایج نشان داد که سفتی آکوستیک نیز اثری معکوس بر روی انرژی جذب شده دارد و افزایش سفتی آکوستیک در هر

دو رقم مورد مطالعه منجر به کاهش انرژی جذب شده می‌گردد.



شکل ۸- روند تغییرات انرژی جذب شده در برابر تغییرات سفتی آکوستیک در سطوح مختلف بیشینه نیروی برخورد در دو رقم شاهرودی (a) و اردوباد (b)

Figure 8 - The absorbed energy changes compared to acoustic stiffness changes at different levels of maximum impact force in Shahroudi (a) and Ordubad(b) cultivars

با توجه به شکل ۸، در رقم شاهرودی و اردوباد میانگین انرژی جذب شده بین دو بازه ابتدایی (۱/٤×۱۰^3) و انتهایی (۲/۲×۱۰^3) مورد بررسی سفتی آکوستیک به ترتیب ۲۷ و ۳۲ درصد تغییر و کاهش یافته است. به‌عبارت‌دیگر افزایش سفتی آکوستیک میزان انرژی جذب شده در رقم شاهرودی و اردوباد را به ترتیب ۲۷ و ۳۲ درصد کاهش داده است. بنابراین برداشت محصول در محدوده‌های بالای سفتی آکوستیک، تاثیر بیشتری روی کاهش انرژی جذب شده دارد و هم‌چنین افزایش سفتی آکوستیک روی کاهش کوفتگی رقم اردوباد نسبت به رقم شاهرودی تاثیر بیشتری دارد. از این نتیجه می‌توان استنباط نمود که رقم اردوباد برای حمل‌ونقل گزینه مناسب‌تری می‌باشد.

روند تغییرات انرژی جذب شده با توجه به تغییرات سفتی آکوستیک در سطوح مختلف انرژی ضربه نیز برای دو رقم شاهرودی و اردوباد همانند تغییرات انرژی جذب شده در سطوح مختلف بیشینه نیروی برخورد می‌باشد. این نتایج با نتایج گزارش شده توسط احمدی و همکاران (۲۰۱۰) در مورد میوه هلو و گزارش ون زیبروک و همکاران (۲۰۰۷b) در مورد گوجه‌فرنگی مطابقت دارد. با توجه به بررسی‌های این مطالعه می‌توان نتیجه گرفت که تأثیر سفتی آکوستیک بر روی انرژی جذب شده (کوفتگی) در سطوح ضربه پایین بزرگ‌تر می‌باشد. چنین تأثیر مشابهی را احمدی و همکاران (۲۰۱۰) قبلا در مورد میوه هلو گزارش نموده‌اند. میانگین سفتی آکوستیک در رقم اردوباد ۱۹ درصد بیشتر از سفتی آکوستیک در رقم شاهرودی می‌باشد (جدول ٤). از پارامتر سفتی میوه می‌توان به‌عنوان روش مناسبی جهت پیش‌بینی صدمات کوفتگی در حین برداشت و فرآیندهای پس از برداشت استفاده نمود. سفتی آکوستیک ارتباط مستقیمی با سفتی مگنس تیلور (روث و همکاران ۲۰۰۵) و مدول الاستیسیته (ون زیبروک و همکاران ۲۰۰۷b) دارد. همچنین ارتباط مستقیمی بین مدول الاستیسیته و حجم کوفتگی وجود دارد که همین

موضوع نقش سفتی آکوستیک بالاتر در کاهش حجم کوفتگی را تبیین می‌کند؛ بنابراین، سفتی و یا تنش شکست بالاتر در میوه‌ها به‌معنی این است‌که آن‌ها در برابر کوفتگی مقاوم‌ترند. به‌علاوه میوه‌های دارای سفتی بالاتر در هنگام برخورد مدت زمان تماس کمتری دارند که ریسک ایجاد کوفتگی را کاهش می‌دهد (ون لیندن و همکاران ۲۰۰۶a). این بدان معنی است‌که در زردآلوهای سفت‌تر و نارس‌تر میزان آسیب‌دیدگی در حین فرآیندهای پس از برداشت (مثلاً حین حمل‌ونقل) کمتر است. با توجه به یافته‌های این تحقیق، برداشت میوه زردآلو چند روز قبل از رسیدگی کامل یعنی زمانی‌که زردآلو سفتی آکوستیک بالاتری دارد می‌تواند صدمات مکانیکی حین حمل‌ونقل را کاهش دهد.

مدل‌سازی پدیده کوفتگی

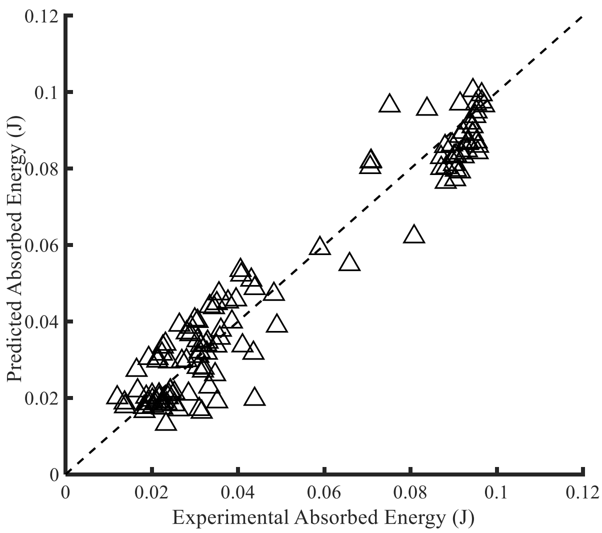
با توجه به معنی‌دار بودن تاثیر همه مشخصه‌های مستقل مورد مطالعه و برخی از اثرات متقابل آن‌ها روی میزان انرژی جذب شده و کوفتگی میوه زردآلو و هم‌چنین به‌منظور تعمیم نتایج تجربی به‌دست آمده از این تحقیق برای پیش‌بینی کوفتگی این محصول در شرایط پس از برداشت دیگر، از مدل‌سازی فرآیند کوفتگی استفاده گردید. جدول ٦ معادلات رگرسیونی مختلف توسعه داده شده (خطی، خطی چندگانه و لگاریتمی) برای برآورد انرژی جذب شده به‌صورت تابعی از مشخصه‌های بیشینه نیروی برخورد (PF)، انرژی ضربه (E_i)، شعاع انحنا در محل ضربه (R) و سفتی آکوستیک زردآلو (S) را در قالب دو مدل ۱ و ۲ نشان می‌دهد. در مدل ۱ از بیشینه نیروی برخورد (PF) و در مدل ۲ از انرژی ضربه (E_i) در کنار سایر مشخصه‌های اصلی و مستقل تحقیق برای توسعه مدل‌های رگرسیونی استفاده شد. همان‌طور که در جدول ٦ نشان داده شده است، در هر دو مدل ۱ و ۲، مدل رگرسیونی خطی چندگانه با لحاظ اثرات متقابل فاکتورها، با کسب کمترین مقادیر RMSE و بالاترین مقادیر R^2 و R^2_{adj} بهترین عملکرد را داشته و توانسته است با دقت بالاتری نسبت به دو نوع مدل دیگر داده‌های تجربی را برازش کند. به‌همین دلیل مدل رگرسیونی خطی چندگانه به‌عنوان مدل مناسب برای پیش‌بینی میزان انرژی جذب شده و کوفتگی میوه زردآلو انتخاب شد. بعد از مدل خطی چندگانه به‌ترتیب مدل‌های خطی و لگاریتمی قرار داشتند.

شکل ۹ روند تغییرات انرژی جذب شده به‌دست‌آمده از نتایج تجربی را در برابر نتایج پیش‌بینی‌شده توسط معادله رگرسیونی خطی چندگانه مربوط به مدل ۱ نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۹ نشان داده شده است مطابقت خوبی بین نتایج تجربی به‌دست آمده و نتایج پیش‌بینی‌شده توسط مدل رگرسیونی وجود دارد. مدل رگرسیونی توسعه داده شده به‌خوبی توانسته است نتایج تجربی را برارزش نماید. در مدل ۲ نیز همه پارامترهای مستقل (E_i، R و S) و بعضی از اثرات متقابل (E_i*R و E_i*S) حضور دارند (جدول ٦). شکل ۱۰ انرژی جذب شده به‌دست‌آمده از نتایج تجربی را در برابر نتایج پیش‌بینی‌شده توسط مدل رگرسیونی خطی چندگانه مربوط به مدل ۲ نشان می‌دهد. همانطور که در شکل ۹ و شکل ۱۰ ملاحظه می‌گردد مقادیر تجربی و پیش‌بینی شده در اطراف نیم‌ساز ($x=y$) قرار گرفته‌اند و میزان پراکندگی نقاط در شکل ۱۰ نسبت به شکل ۹ کمتر است. هم‌چنین مقادیر R^2 و RMSE (جدول ٦) نشان می‌دهد که مقادیر R^2 در مدل ۲ نسبت به مدل ۱ بالاتر و مقادیر RMSE مدل ۲ نسبت به مدل ۱ پایین تر است. هردو موضوع ارجحیت مدل خطی چندگانه با اثرات متقابل ۲ را نسبت به مدل ۱ بیان می‌کند.

جدول ۶- معادلات رگرسیونی خطی، خطی چندگانه و لگاریتمی ایجاد شده با استفاده از مشخصه‌های مستقل تحقیق شامل بیشینه نیروی برخورد (PF)، انرژی ضربه (E_i)، شعاع انحنا در محل ضربه (R) و سفتی آکوستیک زردآلو (S) به‌صورت دو مدل ۱ و ۲ و مقادیر محاسبه شده برای معیارهای ارزیابی معادلات توسعه داده شده

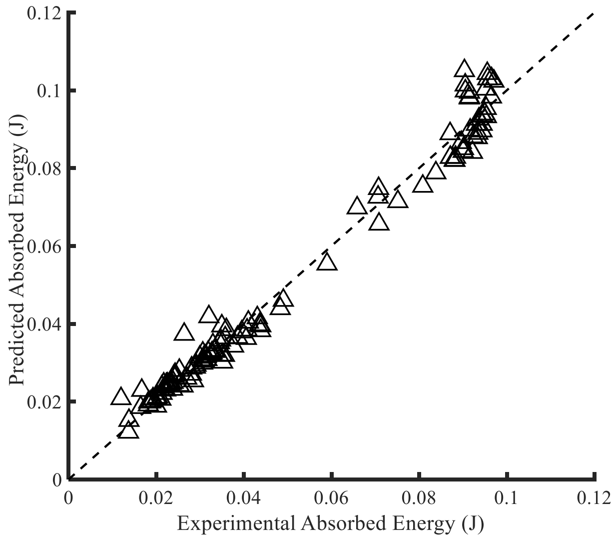
Table 6- Linear, multiple-linear and logarithmic regression equations developed using research independent parameters including maximum Peak contact force (PF), impact energy (E_i), radius of curvature(R) and apricot acoustic stiffness (S) as two Models 1 and 2, and the calculated values of the criteria for evaluating the developed models

Model	Model type	Developed Models	R^2_{adj}	R^2	RMSE
Model 1	Linear	$AE=5.154\times10^{-3}\times PF -1.152\times R -2.246\times10^{-5}\times S -1.034\times10^{-3}$	0.92	0.92	0.009
	Multiple-Linear	$AE=1.194\times10^{-2}\times PF+1.291\times R+3.378\times10^{-5}\times S -1.0932\times10^{-1}\times PF\times R -2.394\times10^{-6}\times PF\times S -1.569\times10^{-1}$	0.93	0.93	0.008
	Logarithmic	$AE=6.499\times10^{-2}\times\ln(PF\times R\times S)-3.891\times10^{-1}$	0.42	0.43	0.023
Model 2	Linear	$AE=8.041\times10^{-1}\times E_i -4.236\times10^{-1}\times R -8.081\times10^{-6}\times S+2.632\times10^{-2}$	0.97	0.98	0.0043
	Multiple-Linear	$AE=1.419\times E_i - 5.568\times10^{-1}\times R +8.918\times10^{-7}\times S-1.576\times10^{1}\times E_i\times R -1.408\times10^{-4}\times E_i\times S -1.217\times10^{-2}$	0.98	0.98	0.0039
	Logarithmic	$AE=4.413\times10^{-2}\times\ln(E_i\times R\times S)-2.093\times10^{-2}$	0.84	0.85	0.012



شکل ۹- مقادیر تجربی و پیش‌بینی‌شده انرژی جذب شده توسط مدل رگرسیونی خطی چندگانه شامل بیشینه نیروی برخورد به‌عنوان پارامتر مستقل (مدل ۱)

Figure 9 - Measured Vs absorbed energy predicted by a multiple-linear regression model involving the peak contact force as an independent parameter (Model 1)



شکل ۱۰- مقادیر تجربی و پیش‌بینی‌شده انرژی جذب شده توسط مدل رگرسیونی خطی چندگانه شامل انرژی برخورد به‌عنوان پارامتر مستقل (مدل ۲)

Figure 10- Measured Vs predicted absorbed energy by a multiple-linear regression model involving impact energy as an independent parameter (Model 2)

جمع‌بندی

در تحقیق حاضر حساسیت به کوفتگی میوه زردآلو تحت تـأثیر خصوصـیات ضـربه (بیشـینه نیـروی برخـورد و انرژی ضربه) و خصوصیات فیزیکی میوه (شعاع انحنای زردآلو در محل ضربه و سفتی آکوستیک) مورد مطالعـه قرار گرفـت و مـدل‌های رگرسـیونی مختلـف بـه منظـور پیش‌بینـی انـرژی جـذب شـده تـابعی از خـواص مـذکور توسعه داده شد. از مشخصه انرژی جذب شـده بـه‌عنوان معیاری برای اندازه‌گیری میزان کـوفتگی و آسـیب وارده به محصول و نیز به‌عنوان مشخصه وابسـته در توسـعه مـدل‌های ریاضـی اسـتفاده شـد. دو نـوع مـدل مختلـف رگرسـیونی خطـی چندگانـه شـامل دو پـارامتر مسـتقل بیشینه نیروی برخورد و انرژی ضربه ارائه شـد. در هـر دو مدل اثرات اصلی شامل شعاع انحنا در محل ضـربه و سـفتی آکوسـتیک و بعضـی از اثـرات متقابـل در سـطح احتمال ۵ درصد معنی‌دار شدند. نتـایج نشـان داد هـر دو پارامتر شعاع انحنا و سفتی آکوسـتیک اثـری معکـوس و دو مشخصه انرژی برخـورد و بیشـینه نیـروی برخـورد اثری مستقیم بر انرژی جذب شده توسـط میـوه زردآلـو دارنـد. از یافتـه‌های ایـن تحقیـق می‌تـوان بـرای کـاهش صدمات مکانیکی در فرآیندهای پس از برداشـت و بـرای اتخاذ تصمیماتی به‌منظور کمینه کردن صدمات مکـانیکی وارده به میوه زردآلو استفاده نمود. با توجه به نتایج این تحقیق توصیه می‌شـود در فرآینـدهای پـس از برداشـت ازجملـه در حـین حمل‌ونقـل بـا بـه‌کارگیری روش‌هـای مدیریتی مناسـب از وارد شـدن ضـرباتی بیشـتر از حـد مجاز تحمل زردآلو جلوگیری شـود. بـا توجـه بـه نتـایج تحقیق حاضـر رقـم زردآلـوی اردوبـاد قابلیـت کـوفتگی کمتری نسبت به رقم شاهرودی دارد و بـرای ارسـال بـه مناطق دورتر مناسب‌تر می باشد.

منابع مورد استفاده

سیدلو س ص، نعلبندی ح، کیومرثی م، ۱۳۹۷. بررسی تأثیر نوع طراحی جعبه و مشخصه‌های عملکردی روی فرآیند پیش‌سرمایش هلو در سامانه طراحی شده بر اساس هوادهی اجباری. نشریه پژوهش های صنایع غذایی. ۲۸(۲)، ۲۷-۴۰

Abedi G, Ahmadi E, 2013. Design and evaluation a pendulum device to study postharvest mechanical damage in fruits: bruise modeling of red delicious apple. Australian Journal of Crop Science 7: 962-968.

Ahmadi E, 2012. Bruise susceptibilities of kiwifruits as affected by impact and fruit properties. Research in Agricultural Engineering 58(3): 107-113.

Ahmadi E, Ghassemzadeh H, Sadeghi M, Moghaddam M, Neshat SZ, 2010. The effect of impact and fruit properties on the bruising of peach. Journal of Food Engineering 97: 110-117.

Bajema RW, Hyde GM, 1998. Instrumented pendulum for impact characterization of whole fruit and vegetable specimens. Transactions of the ASAE, 41(5): 1399-1405

Baritelle AL, Hyde GM, 2001. Commodity conditioning to reduce impact bruising. Postharvest Biology and Technology 21: 331-339.

Blahovec J, Paprštein F, 2005. Susceptibility of pear varieties to bruising. Postharvest Biology and Technology 38: 231-238.

Diezma B, Valero C, Garcia-Ramos FJ, Ruiz-Altisent M, 2006. Monitoring of firmness evolution of peaches during storage by combining acoustic and impact methods. Journal of Food Engineering 77: 926-935.

Hussein Z, Fawole OA, Opara UL, 2018. Preharvest factors influencing bruise damage of fresh fruits–a review. Scientia Horticulturae 229: 45-58.

Jafar R, Nassiri SM, 2015. Modeling Static Bruising in Apple Fruits: A Comparative Study, Part II: Finite Element Approach. Iran Agricultural Research 32(2): 11-20.

Kitthawee U, Pathaveerat S, Srirungruang T, Slaughter D, 2011. Mechanical bruising of young coconut. Biosystems Engineering 109: 211-219.

Komarnicki P, Stopa R, Kuta Ł, Szyjewicz D, 2017. Determination of apple bruise resistance based on the surface pressure and contact area measurements under impact loads. Computers and Electronics in Agriculture 142: 155-164.

Komarnicki P, Stopa R, Szyjewicz D, Mlotek M, 2016. Evaluation of bruise resistance of pears to impact load. Postharvest Biology and Technology 114: 36–44.

Martínez-Romero D, Serrano M, Carbonell A, Burgos L, Riquelme F, Valero D, 2002. Effects of postharvest putrescine treatment on extending shelf life and reducing mechanical damage in apricot. Journal of Food Science 67: 1706-1712.

Miller AR, 1992. Physiology, biochemistry and detection of bruising (mechanical stress) in fruits and vegetables. Postharvest News Information 3: 53-58.

Mohsenin NN, 1986. Physical properties of plant and animal materials. Gordon and Breach science publishers, New York.

Opara UL, 2007. Bruise susceptibilities of 'Gala' apples as affected by orchard management practices and harvest date. Postharvest Biology and Technology 43: 47-54.

Polat R, Aktas T, Ikinci A, 2012. Selected mechanical properties and bruise susceptibility of nectarine fruit. International Journal of Food Properties 15(6): 1369-1380.

Roth E, Kovacs E, Hertog M, Vanstreels E, Nicolai B, 2005. Relationship between physical and biochemical parameters in apple softening. Proceeding of the 5th International Postharvest Symposium (PS'05) ISHS: 573-578.

Stropek Z, Gołacki K, 2015. A new method for measuring impact related bruises in fruits. Postharvest Biology and Technology 110: 131-139.

Studman CJ, Brown GK, Timm EJ, Schulte NL, Vreede MJ, 1997. Bruising on blush and non-blush sides in apple-to-apple impacts. Transactions of the ASAE 40 (6): 1655-1633.

Van Linden V, De Ketelaere B, Desmet M, De Baerdemaeker J, 2006a. Determination of bruise susceptibility of tomato fruit by means of an instrumented pendulum. Postharvest Biology and Technology 40: 7–14.

Van Zeebroeck M, 2005. The discrete element method (DEM) to simulate fruit impact damage during transport and handling.

Van Zeebroeck M, Darius P, De Ketelaere B, Ramon H, Tijskens E, 2007b. The effect of fruit properties on the bruise susceptibility of tomatoes. Postharvest Biology Technology 45: 168–175.

Van Zeebroeck M, Van Linden V, Darius P, De Ketelaere B, Ramon H, Tijskens E, 2007c. The effect of fruit factors on the bruise susceptibility of apples. Postharvest Biology Technology 46: 10–19.

Van Zeebroeck M, Van linden V, Ramon H, De Baerdemaeker J, Nicola B.M, Tijskens E, 2007a. Impact damage of apples during transport and handling −A review. Postharvest Biology Technology 45: 157–167.

Van Zeebroeck M, Tijskens E, Van Liedekerke P, Deli V, De Baerdemaeker J, Ramon H, 2003. Determination of the dynamical behaviour of biological materials during impact using a pendulum device. Journal of Sound and Vibration 266: 465-480.

Vursavus K, Ozguven F, 2003. Determining the strength properties of the dixired peach variety. Turkish Journal of Agriculture and Forestry 27: 155-160

Wang J, Teng B, Yu Y, 2006. The firmness detection by excitation dynamic characteristics for peach. Food Control 17: 353–358.

Zarifneshat S, Ghassemzadeh HR, Sadeghi M, Abbaspour-Fard MH, Ahmadi E, Javadi A, Shervani-Tabar MT, 2010. Effect of impact level and fruit properties on golden delicious apple bruising. American Journal of Agricultural and Biological Sciences 5: 114–121.

Zhu Q, Guan J, Huang M, Lu R, Mendoza F, 2016. Predicting bruise susceptibility of ‘Golden Delicious’ apples using hyperspectral scattering technique. Postharvest Biology and Technology 114: 86-94.

Journal of Food Researches/vol.31 No.3 2021/pp 63-83
https://foodresearch.tabrizu.ac.ir
DOI: 10.22034/FR.2021.39910.1740

Study and modeling of apricot bruise susceptibility as affected by impact and fruit properties

M Khodaei[1*], S S Seiiedlou[2], M Sadeghi[3] and S Zarifneshat[4]

Received: May 19, 2020 Accepted: July 20, 2020
[1]PhD Student, Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran
[2]Associate Professor, Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran
[3]Professor, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Mechanic, University of Tabriz, Tabriz, Iran
[4]Associate Professor, Agricultural engineering research department, khorasan razavi agricultural and natural resources research and education center, AREEO, Mashhad, Iran
[*]Corresponding author: Email: Mehdi.Khodaei@tabrizu.ac.ir

Introduction: Fruits confort several main procedures including harvesting, sorting, packaging, storage, and transportation. During these processes, fruits could encounter either static or dynamic loadings that potentially cause mechanical damage (Polat et al., 2012). Bruising is the most common type of post-harvest mechanical injury in fruits. Around 30–40% of the agricultural products become decayed due to mechanical damage. Mechanical injuries, such as bruises are difficult to limit. However, proper understanding the mechanism of bruises occurrence allows to reduce this undesirable phenomenon (Komarnicki et al.; 2017). Susceptibility measurement of the bruising can provide useful information toimprove postharvest handling and storage operations (Zhu et al., 2016). The bruise susceptibility of fruits and vegetables is themeasurment of response to external loading. Bruise prediction models can provide useful information about the influence of fruit properties on bruise susceptibility, leading to recommendations for fruit handling (Van Zeebroeck et al., 2007b). Bruise prediction models connect the impact characteristics (drop height, contact force and impact energy) to bruise damage, taking into account some fruit properties (radius of curvature, stiffness, temperature, color, etc) that determine bruise sensitivity. Apricot is one of the most vulnerable fruits to mechanical injuries. Therefore, controlling and reducing the mechanical injuries can improve the quality of apricot and increase its export. For this reason, the aim of present study was to evaluate the apricot bruising susceptibility and developing bruise prediction models for apricot fruit.

Material and methods: In the present study, two Iranian apricot varieties "Shahroudi" and "Ordubad" were used for experimental tests. All the fruits were harvested at their traditional maturity in June 2018. In order to avoid and minimize any pre-bruising, all the apricots were carefully hand-picked. Any extremely small or large fruits were excluded from the tests. The physical and mechanical properties of apricots and main characteristics were measured. A curvature meter was used to measure the radius of curvature locally at the point of impact. The acoustic impulse technique was used to measure the fruit firmness non-destructively. Constant height multiple impact (CHMI) method was used to measure apricot critical energy level. In this study bruise susceptibility of the studied cultivars was evaluated using a pendulum impact device to measure required parameters including the impact force, impact velocity, and impact energy. All apricots were placed in the special chamber and a spherical metal impactor was used to impact the apricots. Absorbed energy criteria have been used to quantify bruise damage. In this study, three different impact levels applied in the experimental tests. To obtain the absorbed energy the difference between impact energy and rebound energy was calculated and recorded for each impact test. Different regression models (linear, multiple-linear, and logarithmic) were developed to predict bruising in apricot fruit and were evaluated by proper criteria (R^2, R_{adj}^2, and RMSE). In these models, impact characteristics (impact energy or peak contact force) along with fruit characteristics (acoustic stiffness and radius of curvature) were considered as independent variables and the absorbed energy as the dependent variable. Two separate regression models were developed. In the first model (model 1) independent variables were peak contact force (PF), the apricot radius of curvature at the location of impact (R), and apricot acoustic stiffness (S). In the second model (model 2) PF was replaced by the impact energy (E_i) and the other two variables were the same as the first model. Data analyses were performed using SPSS (version 25.0) and JMP Pro (version 13) software packages.

Results and discussion: Experimental data analysis showed both radii of curvature and acoustic stiffness had a negative effect on apricot absorbed energy in Shahroudi and Ordubad cultivars. In Shahroudi cultivar, the average radius of curvature was 20% less than the Ordubad cultivar. Also, the average acoustic stiffness in the Ordubad cultivar was 19% higher than acoustic stiffness in the Shahroudi cultivar. Therefore, the average bruising ratio in the Shahroudi cultivar was 5% higher than the Ordubad cultivar. In both cultivars, apricots with a lower radius of curvature at the contact area had high absorbed energy than those with a higher radius of curvature. By increasing the peak impact force from 16.5 to 30 N, the average absorbed energy in the Ordubad cultivar was increased by 71%. While this amount was 78% in Shahroudi. Also, the mean difference between the absorbed energy between the initial (19 mm) and final (27 mm) range of the curvature radius in Shahroudi and Ordubad cultivars was 18 and 29%, respectively. Also, the mean energy absorption difference between the initial and final acoustic stiffness ranges in Shahroudi and Ordubad cultivars was 27% and 32%, respectively. In other words, with increasing acoustic stiffness, the amount of absorbed energy in Shahroudi and Ordubad cultivars was decreased 27 and 32%, respectively. The effect of the impact energy parameter on the absorbed energy was similar to the peak contact force. Results of prediction models indicated that all of the studied independent parameters, including peak contact force, impact energy, the radius of curvature, and acoustic stiffness, and some of their interactions were significant on the absorbed energy at the 5% probability level. The results showed that increasing the two parameters of impact energy and peak contact force increases the energy absorbed in apricots.

Conclusion: This study was conducted to develop statistic models among different kinds of regressions, to estimate the apricot fruit bruising susceptibility by absorbed energy. Absorbed energy parameter is a good estimation property to quantify bruise damage in apricot. There were significant main effects and significant interactions between fruit properties (radius of curvature and acoustic stiffness) and the impact properties (peak contact force or impact energy). In both apricot cultivars, damage to the fruit decreased with the increase of acoustic stiffness. So, softer apricots developed a higher amount of absorbed energy. Also, smaller radii of curvature led to more bruise damage in both cultivars. It was concluded that Shahroudis cultivar was more susceptible to bruising rather than Ordubad cultivar. The results of this study in predictive regression models showed that a multiple-linear model was selected as the best model for fitting experimental data.

Keywords: Acoustic stiffness, Apricot fruit, Bruising, Mechanical damage, Modelling