

## پایش و مدل‌سازی چروکیدگی ورقه‌های سیب هنگام خشک شدن در هوای گرم با استفاده از ویژگی‌های بافت تصویرهای پس‌پراکنش نور لیزر

منصوره مظفری\*، اصغر محمودی و بهاره جمشیدی\*\*

\* نگارنده مسئول: گروه مهندسی بیوسیستم دانشکده کشاورزی دانشگاه تبریز و بخش تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی آذربایجان شرقی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تبریز، ایران. تلفن: ۴۴۴۳۹۱۵ (۰۴۱)، پیام‌نگار: 4mozaffari@gmail.com

\*\* به‌ترتیب: دانشجوی دکتری دانشگاه تبریز؛ دانشیار گروه مهندسی بیوسیستم دانشکده کشاورزی دانشگاه تبریز؛ و استادیار پژوهش مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران.

تاریخ دریافت: ۹۵/۵/۱۰؛ تاریخ پذیرش: ۹۵/۸/۸

### چکیده

در این مقاله، امکان استفاده از ویژگی‌های بافت تصویرهای پس‌پراکنش نور لیزر در پایش و مدل‌سازی چروکیدگی به‌هنگام خشک شدن ورقه‌های سیب با هوای گرم در سه طول موج (۶۵۰، ۷۸۰ و ۸۸۰ نانومتر) در محدوده‌ی متری و مادون قرمز نزدیک بررسی شد. ویژگی‌های مرتبط با چهار روش آنالیز بافت تصویر، شامل آماره‌های درجه اول هیستوگرام، ماتریس هم‌وقوعی، ماتریس طول گام سطح خاکستری، و تبدیل موجک استخراج و به‌صورت جداگانه برای هر روش و در ترکیب با هم در تدوین مدل‌های واسنجی به‌کار گرفته شد. مدل رگرسیون چندمتغیره خطی گام‌به‌گام برای مدل‌سازی و تعیین ویژگی‌هایی که مؤثرترین نقش را در تدوین مدل داشتند، به‌کار رفت. نتایج به‌دست آمده قابلیت ویژگی‌های مستخرج از بافت تصویرهای پس‌پراکنش نور لیزر را در ناحیه طول‌موج‌های مادون‌قرمز نزدیک در پیش‌بینی چروکیدگی محصول نشان می‌دهد، به‌طوری‌که استفاده از ویژگی همگنی ماتریس هم‌وقوعی در راستای ۹۰ درجه در ۸۸۰ نانومتر (با  $R^2p=0/95$  و  $RMSEP=5/15$ ) و ترکیب ویژگی‌های مستخرج از چهار روش آنالیز بافت در ۷۸۰ نانومتر (با  $R^2p=0/94$  و  $RMSEP=5/61$ ) توانستند مدل‌هایی با دقت بالا حاصل کنند. این پژوهش نشان می‌دهد که در فرآیند خشک کردن با هوای گرم، تصویربرداری پس‌پراکنش نور لیزر می‌تواند به‌عنوان روشی غیرمخرب، سریع، و ارزان در پیش‌بینی چروکیدگی به‌کار گرفته شود.

### واژه‌های کلیدی

آنالیز بافت تصویر، تصویربرداری پس‌پراکنش نور لیزر، چروکیدگی، خشک کردن

### مقدمه

ساختار سلولی، شکل، و بافت محصول می‌انجامد (Krokida et al., 2000; Lewicki & Lukaszuk, 2000) این تغییرات به شرایط خشک کردن بستگی دارد. پایش مداوم خواص کیفی غذا در فرآیند خشک کردن یکی از اصلی‌ترین چالش‌های علم صنایع غذایی است که به‌منظور حصول اطمینان از یکنواختی و ثبات کیفی محصول نهایی،

خشک کردن یکی از مهم‌ترین فرآیندهای پس از برداشت است که با کاهش رطوبت و فعالیت آبی محصول، از فساد آن جلوگیری و موجب افزایش زمان ماندگاری و کاهش هزینه‌های حمل‌ونقل می‌گردد. خشک کردن با هوای گرم، یکی از متداول‌ترین روش‌هاست که به تغییر در

(Mulet *et al.*, 2000; Ramos *et al.*, 2004; Fernández *et al.*, 2005; Yan *et al.*, 2008; Yadollahinia *et al.*, 2009). که در این روش، از استخراج ویژگی‌های ابعادی تصویرهای گرفته شده در ناحیه نور مرئی برای تعیین و پیش بینی چروکیدگی استفاده می‌کنند.

فن تصویربرداری پس‌پراکنش نور لیزر روش نوری غیرمخرب و جدیدی است که می‌تواند در طول موج‌های مختلف به کار برده شود و قابلیت استفاده در پیش‌بینی خواص کیفی محصول را در فرآیند خشک‌کردن دارد (Romano *et al.*, 2011, 2016; Udomkun *et al.*, 2014). این فن، همانند روش‌های چندطیفی و فراطیفی، برای پیش‌بینی خواص کیفی محصول از تحلیل فوتون‌های پراکنش یافته استفاده می‌کند (Mollazade *et al.*, 2012). پراکنش نور نتیجه انعکاس فوتون در زوایای مختلف در هر ماده است که نه تنها به اجزای شیمیایی داخل سلول بلکه به خواص فیزیکی مثل دانسیته، اندازه سلول، و ماتریس درون و بیرون سلولی بافت وابسته است (Seifert *et al.*, 2014)؛ بنابراین، پارامترهای مستخرج از تصاویر پس‌پراکنش این پتانسیل را دارد که به‌عنوان روشی غیرمستقیم در تعیین خصوصیات هیستولوژی و چروکیدگی محصول به کار رود. در این روش، از دیوده‌های لیزر به‌عنوان منابع نوری استفاده می‌شود و نیازی به اسپکترومتر نیست. از این‌رو، تجهیزات به کار گرفته شده ساده و ارزان‌اند و پیچیدگی‌هایی که در آنالیزهای طیفی دیده می‌شود، در این روش وجود ندارد (Qing *et al.*, 2007).

مطالعات در خصوص کاربرد فن تصویربرداری پس‌پراکنش لیزر، عمدتاً روی محصولات تازه متمرکز است و در تعیین خواص مکانیکی و کیفی محصولات تازه مورد بررسی قرار گرفته است؛ برای مثال کینگ و همکاران (Qing *et al.*, 2007) از این فناوری برای پیش‌بینی

انجام می‌شود. یکی از مهم‌ترین تغییرات فیزیکی در حین خشک‌کردن محصولات کشاورزی، چروکیدگی است؛ در اثر گرما و کاهش رطوبت، فشار نامتعادلی بین بخش داخلی و خارجی ماده ایجاد و این امر موجب اعمال تنش به ساختار سلولی ماده غذایی می‌شود. در این حالت، ماتریس ویسکوالاستیک ماده به درون فضاها خالی ایجادشده بر اثر تبخیر کشیده می‌شود (Aguilera, 2003) که سرانجام به انقباض و چروکیدگی ماده و ایجاد لایه سخت سطحی می‌انجامد. چروکیدگی بر خواص ترموفیزیکی ماده غذایی، پدیده انتقال حرارت، پدیده انتقال جرم و نیز بر ضریب انتشار مؤثر رطوبت تأثیر می‌گذارد. همچنین موجب کاهش قابلیت آبیگری مجدد و ترک‌خوردگی سطحی محصول می‌شود و بر بازارپسندی محصول تأثیر می‌گذارد (Mayor & Sereno, 2004).

با توجه به آنچه گفته شد، تأثیر چروکیدگی بر کیفیت محصول قابل اغماض نیست و لازم است این پارامتر در فرآیند خشک‌کردن مورد پایش و کنترل قرار گیرد. روش‌هایی که به‌طور معمول برای اندازه‌گیری چروکیدگی در فرآیند خشک‌کردن به کار گرفته می‌شوند شامل اندازه‌گیری‌های مستقیم با استفاده از میکرومتر یا اندازه‌گیری تغییرات حجم به روش جابه‌جایی حلال است. چنین روش‌هایی بسیار وقت‌گیرند و برای اندازه‌گیری‌های حین فرآیند<sup>۱</sup> مناسب نیستند. از این‌رو، امروزه برای پایش و کنترل فرآیندها، استفاده از روش‌های غیرمخرب توصیه می‌شود.

تکنیک‌های مختلفی مانند استفاده از بینایی ماشین، روش‌های نوری و غیره برای پایش تغییرات کیفی حین فعالیتهای پس از برداشت، کاربرد پیدا کرده است. هریک از این روش‌ها بر مبنای خاصیتی از محصول مثل خواص نوری، ارتعاشی و الکتریکی پایه‌ریزی شده است. عمده‌ترین روش کاربردی، استفاده از بینایی ماشین و استخراج ویژگی‌های تصاویر رنگی است

دوبعدی عمل می‌کند و علاوه بر اینکه مقادیر شدت پیکسل‌ها را در نظر می‌گیرد، ارتباط آنها را با سایر نقاط موجود در تصویر نیز تحلیل می‌کند. در سال‌های اخیر استفاده از آنالیز بافت تصاویر برای ارزیابی کیفیت مواد غذایی گسترش یافته است (Zheng et al., 2006). از آنجا که بافت و میکروساختار محصول در فرآیند خشک کردن با هوای گرم به شدت تغییر می‌کند، کاربرد فنون آنالیز بافت تصاویر پس‌پراکنش ممکن است در پیش‌بینی خواص کیفی محصول در فرآیند خشک کردن مفید باشد.

با توجه به موارد مذکور، به نظر می‌رسد که مطالعات بیشتر روی طول‌موج‌های مورد استفاده در این روش و استخراج ویژگی‌های مناسب‌تر از تصویرهای پس‌پراکنش، بتواند در افزایش قابلیت این فن در پیش‌بینی چروکیدگی محصول مؤثر باشد؛ بنابراین، هدف از این تحقیق کاربرد فن تصویربرداری پس‌پراکنش نور لیزر و استخراج ویژگی‌های بافت تصاویر حاصل به‌منظور پایش تغییرات چروکیدگی در فرآیند خشک کردن با هوای گرم است که در سه طول موج در ناحیه مرئی و مادون قرمز نزدیک و با استفاده از چهار روش آنالیز بافت اجرا شد. اهداف ویژه عبارت‌اند از: ۱- بررسی قابلیت استفاده از روش‌های مختلف آنالیز بافت برای پیش‌بینی چروکیدگی در ناحیه مرئی و مادون قرمز نزدیک و ۲- انتخاب طول موج مناسب و مؤثرترین ویژگی‌های بافت تصاویرهای پس‌پراکنش برای پیش‌بینی چروکیدگی در فرآیند خشک کردن با هوای گرم.

### مواد و روش‌ها

#### روش آماده‌سازی نمونه و خشک کردن

در این مطالعه، نمونه‌های سیب، واریته گلدن دلیشس<sup>۱</sup>، از روستای قیه بولاغی شهر مراغه خریداری و در دمای ۴ درجه سلسیوس تا زمان شروع آزمایش‌ها انبار شد. در حین اجرای آزمایش‌ها، بسته به نیاز، مقداری از نمونه‌ها به آزمایشگاه منتقل و تا رسیدن به

سفتی سیب در چهار طول موج لیزر در ناحیه مرئی و مادون قرمز نزدیک استفاده کردند. از فن تصویربرداری پس‌پراکنش نور لیزر، هاشم و همکاران (Hashim et al., 2013) در پایش اثر سرمازدگی موز، و لورنته و همکاران (Lorente et al., 2015) در تشخیص سریع پرتقال‌های فاسد استفاده کردند.

مطالعات با استفاده از این فن برای تعیین خواص کیفی محصول در فرآیند خشک کردن بسیار محدود است و در آن فقط ویژگی‌های مرتبط با شدت نور در حوزه مکان برای تدوین مدل‌های واسنجی استفاده شده است؛ برای مثال، رومانو و همکاران (Romano et al., 2008) در فرآیند خشک کردن ورقه‌های سیب و موز از ساده‌ترین نوع ویژگی یعنی مساحت ناحیه پس‌پراکنش نور، که مساوی با تعداد پیکسل‌های غیرصفر در تصاویر پس‌پراکنش است، و نیز از تابناکی نور در ناحیه نور مرئی برای ساخت مدل‌های پیش‌بینی‌کننده محتوی رطوبت و مواد جامد محلول استفاده کردند.

اودامکن و همکاران (Udomkun et al., 2014) نیز از همین ویژگی‌ها برای پیش‌بینی رطوبت، رنگ و چروکیدگی انبه در خلال خشک کردن همرفتی استفاده کردند و در پژوهش بعدی به‌منظور افزایش عملکرد مدل‌های پیش‌بینی چروکیدگی، ویژگی‌های ناحیه پس‌پراکنش و تابناکی نور را در طول موج ۶۵۰ با ویژگی‌های ابعادی مستخرج از تصاویر رنگی ترکیب و تحقیقات ثانوی را برای افزایش قابلیت پیش‌بینی چروکیدگی با استفاده از این فن، توصیه کردند (Udomkun et al., 2016).

ویژگی‌های مستخرج از تصاویر پس‌پراکنش در مطالعات فوق در ناحیه طول موج‌های مرئی و بر اساس تحلیل‌های آماری شدت پیکسل تصاویر استوار است و در آنها الگوی شدت پیکسل در هر نقطه در مقایسه با نقاط دیگر در تصاویر پس‌پراکنش دوبعدی بررسی نشده است. بافت ویژگی بسیار مهمی از تصویر است که به‌صورت

$V$  = حجم ظاهری نمونه (سانتی مترمکعب)؛  $m_1$  = جرم نمونه (گرم)؛  $m_2$  = جرم پیکنومتر حاوی حلال (گرم)؛  $m_3$  = جرم پیکنومتر حاوی نمونه و حلال (گرم)؛ و  $\rho$  = دانسیته ظاهری حلال (گرم بر سانتی مترمکعب). درصد چروکیدگی نمونه‌ها از رابطه ۲ محاسبه شد (Seiedlou *et al.*, 2010):

$$Sh = (1 - (V_t/V_0)) \times 100 \quad (2)$$

که در آن،  $Sh$  = درصد چروکیدگی در زمان‌های مختلف؛  $V_t$  = حجم ظاهری نمونه در هر مرحله نمونه‌برداری در خلال خشک‌کردن؛ و  $V_0$  = حجم ظاهری نمونه اولیه.

#### سامانه تصویربرداری پس‌پراکنش لیزر

این سامانه شامل این اجزاست: یک محفظه تصویربرداری، یک دوربین CCD مدل CNB BBB 21f (ساخت کره با محدوده دینامیکی وسیع مجهز به یک لنز بزرگنمایی آونیر<sup>۱</sup> با فاصله کانونی ۱۰۰-۵ میلی‌متر با  $f1/6$  ساخت ژاپن)، سه دیود لیزر (با مشخصات: ۶۵۰ نانومتر با توان پنج میلی‌وات، ۷۸۰ نانومتر با توان سه میلی‌وات، و ۸۸۰ نانومتر با توان هفت میلی‌وات به‌عنوان منابع نور)، سه عدد پایه برای نصب و تنظیم لیزر، یک واحد نگه‌دارنده محصول و یک کامپیوتر مجهز به کارت کپچر برای کنترل دوربین و تصویربرداری‌ها (شکل ۱- تصویر سمت چپ). دوربین بین دیودهای لیزر به‌طور عمود بر واحد نگه‌دارنده نمونه نصب شد. زاویه برخورد بیم‌ها بر اساس مشاهدات عملی سامانه تصویربرداری فعلی ۱۰ درجه تعیین شد. به‌منظور افزایش نسبت سیگنال به نویز و ممانعت از انعکاس‌های محیطی، تصویرهای پس‌پراکنش با رزولوشن  $640 \times 480$  پیکسل در شرایط کاملاً تاریک گرفته شدند. فاصله بین قسمت زیرین لنز

دمای اتاق در آنجا نگهداری شد. رطوبت اولیه نمونه‌های سیب  $5/33 \pm 0/01$  گرم آب بر گرم ماده خشک به‌دست آمد. سیب‌ها به‌طور مکانیکی به شکل استوانه‌هایی با ضخامت ۶ و قطر ۴۷ میلی‌متر برش داده شد و نمونه‌ها روی سینی خشک‌کن با هوای گرم (شکل ۱- تصویر سمت راست) چیده شدند. خشک‌کن مجهز به المنت‌های پره‌ای و تجهیزات جانبی برای تنظیم دما و سرعت جریان هوای گرم بود. دمای خشک‌کن با استفاده از کنترل‌کننده PID با دقت  $\pm 1$  درجه سلسیوس کنترل می‌شد. آزمایش‌ها در دماهای ۵۰ و ۷۰ درجه سلسیوس و سرعت هوای گرم ۱ و ۱/۴ متر بر ثانیه دنبال شد. سرعت هوا با استفاده از سرعت‌سنج نوع پره‌ای Testo 435 در قسمت خروجی محفظه خشک‌کن اندازه‌گیری شد. خشک‌کن، قبل از قرار دادن نمونه‌ها در داخل آن، در دماها و سرعت‌های هوای مورد نظر تنظیم گردید. خشک‌کردن نمونه‌ها تا آنجا ادامه یافت که مقدار رطوبت به ۰/۱۱ گرم آب بر گرم ماده خشک برسد. در هر ۳۰ دقیقه، سه نمونه آزمایشی از خشک‌کن خارج و توزین می‌شدند و تصویرهای پس‌پراکنش نمونه‌ها در سه نقطه از هر نمونه و در سه طول‌موج گرفته و درصد چروکیدگی نیز اندازه‌گیری می‌شد. تمامی آزمایش‌ها سه بار تکرار شد.

#### تعیین چروکیدگی

برای محاسبه چروکیدگی، ابتدا حجم ظاهری نمونه‌ها قبل از آزمون و نیز در هر مرحله نمونه‌برداری، با به‌کارگیری روش جابه‌جایی حلال که در این بررسی از تولوئن استفاده شد، با به‌کارگیری یک پیکنومتر شیشه‌ای و از رابطه ۱ محاسبه گردید.

$$V = (m_1 + m_2 - m_3) / \rho \quad (1)$$

که در آن،

MATLAB R2014 a و Corel video studio pro x6 به ترتیب برای برداشتن و آنالیز تصویرها استفاده شدند.

دوربین و نگه دارنده نمونه، به منظور اجتناب از اشباع شدن کامل آشکارساز CCD، به اندازه ۲۰۰ میلی متر تنظیم گردید. نرم افزارهای



شکل ۱ - تصوير خشک کن مورد استفاده (تصوير سمت راست) و سامانه تصوير برداري پس پراکنش ليزر (تصوير سمت چپ)

در مرحله بعد، ناحیه اشباع از ناحیه پس پراکنش جداسازی شد. ناحیه اشباع در تصویرهای پس پراکنش شامل فوتون هایی است که به طور مستقیم به آشکارساز دوربین برگردانده می شوند؛ بنابراین مقادیر شدت پیکسل ها در این ناحیه بالاترین مقادیر را دارد. مقدار آستانه برای حذف ناحیه اشباع، برابر ۲۴۰ تعیین شد.

### آنالیز بافت تصویر

برای آنالیز بافت تصاویر پس پراکنش از سه روش آماری شامل آماره های درجه اول هیستوگرام، ماتریس هم وقوعی، و ماتریس طول گام سطح خاکستری و نیز از یک روش طیفی تبدیل مبنا شامل تبدیل موجک استفاده شد.

### آماره های درجه اول هیستوگرام تصویر

این روش بر اساس روشنایی تک پیکسل، احتمال رخداد یک مقدار شدت را بدون در نظر گرفتن تأثیرات همسایگی پیکسل ها در تصویرهای پس پراکنش محاسبه می کند. در این روش برای استخراج ویژگی، از هیستوگرام

### پردازش تصویرها

برای پردازش و استخراج ویژگی از تصویرهای پس پراکنش، ابتدا تصویرهای گرفته شده به فضای خاکستری منتقل و پس از آن، ناحیه پس پراکنش از زمینه جداسازی شد.

انتخاب یک آستانه مناسب از سطح خاکستری برای استخراج موضوعات از زمینه آنها یکی از مهم ترین مراحل در پردازش تصویر است (Otsu, 1979) که تأثیر زیادی بر اطلاعات به دست آمده از تصویر دارد. برای جداسازی فوتون های پس پراکنش از زمینه، از روش اولین نقطه عطف هیستوگرام تصویر استفاده شد (Qing et al., 2007). نویز تصویرها در سطوح خاکستری کمتر از ۵۰ بالا بود، از این رو اولین نقطه عطف بعد از آن در هیستوگرام تصویرها برای قطعه بندی ناحیه پس پراکنش از زمینه به کار گرفته شد. با بررسی دقیق هیستوگرام تصویرها در خلال خشک کردن در طول موج های مختلف، مشاهده شد که زمینه به طور موفقیت آمیزی با مقدار آستانه استاتیک ۸۷ جداسازی می شود.

تعیین می‌کند و برای استخراج ویژگی‌های آماری مراتب بالا کاربرد دارد. هر ماتریس طول گام، یک آرایهٔ دوبعدی است که هر درایهٔ آن تعداد کل وقوع طول‌های گام  $z$  در شدت خاکستری  $i$  را در جهت انتخاب شده برمی‌گرداند. در این پژوهش، ماتریس طول گام سطح خاکستری در هر چهار جهت مذکور محاسبه و یازده ویژگی (Tang, 1998; Mollazade *et al.*, 2013) از هر ماتریس مطابق جدول ۱ و در مجموع ۴۴ ویژگی از هر تصویر استخراج شد.

### تبدیل موجک گسسته

در این روش، تصویر به شکل جدید تبدیل می‌شود به طوری که بافت در این فضای جدید راحت‌تر قابل تشخیص باشد. این روش مبتنی بر اعمال فیلتر است و با عبور دادن تصویر اولیه از فیلترهای بالاگذر سه تصویر حاصل می‌شود که هر یک تغییرات محلی (جزئیات) تصویر را در جهتی نمایش می‌دهد. مثلاً مؤلفه قطری نمایشگر تغییرات تصویر در جهت قطری است. همچنین، تصویر اصلی از فیلتر پایین‌گذر نیز عبور داده شده و زیرنمونه‌برداری می‌شود تا تصویر تقریبی حاصل شود. سپس این تصویر تقریبی مانند تصویر اصلی از فیلترهای بالاگذر و پایین‌گذر عبور داده می‌شود تا چهار تصویر کوچک‌تر به دست آید (Mallat, 1989). در این بررسی، تبدیل موجک در چهار سطح با استفاده از موجک مادر دابوچی درجه ۴ اجرا شد (Mollazade *et al.*, 2013) و چهار ویژگی: میانگین، انحراف معیار، انرژی، و آنتروپی از هر تصویر زیرنمونه‌برداری شده و در کل ۶۴ ویژگی از هر تصویر پس‌پراکنش استخراج گردید.

نرمال شده استفاده شد. از این‌رو بعد از قطعه‌بندی تصویرها، ماتریس هیستوگرام که شامل فراوانی هر یک از سطوح خاکستری تصویر است از هر تصویر استخراج و بر تعداد درایه‌های تصویر تقسیم شد. سپس با استفاده از ماتریس هیستوگرام نرمال‌شدهٔ مذکور و روابط مبتنی بر احتمال وقوع سطح خاکستری، ده ویژگی برای هر تصویر مطابق جدول ۱ استخراج شد (Bevk & Kononenko, 2002).

### ماتریس هم‌وقوعی

ماتریس هم‌وقوعی در بردارنده اطلاعاتی در زمینه ارتباط بین مقادیر پیکسل‌های مجاور در هر تصویر است. این روش کاربرد زیادی در تحلیل بافت تصویر دارد و ویژگی‌های آماری درجه دوم سطح خاکستری از این ماتریس استخراج می‌شود. ماتریس هم‌وقوعی بیانگر تعداد تکرار پیکسل‌های سطح خاکستری با شدت  $i$  و  $z$  به صورت جفتی با فاصله  $d$  و زاویه  $\theta$  است. در این پژوهش، مقدار فاصله  $d$  برابر یک پیکسل و مقدار زاویه  $\theta$  در چهار راستای صفر، ۴۵، ۹۰ و ۱۳۵ درجه در نظر گرفته شد. این انتخاب موجب می‌شود که تغییرات موجود به‌طور دقیق بررسی شود. هر یک از درایه‌های ماتریس‌های هم‌وقوعی حاصل، بر مجموع درایه‌های همان ماتریس تقسیم و نرمال‌سازی شد. سرانجام ۱۰ ویژگی از هر ماتریس هم‌وقوعی نرمال‌شده (Haralick *et al.*, 1973) مطابق جدول ۱ و در کل ۴۰ ویژگی از هر تصویر استخراج شد.

### ماتریس طول گام سطح خاکستری

ماتریس طول گام سطح خاکستری میزان ساییدگی بافت را در هر یک از جهت‌های صفر، ۴۵، ۹۰ و ۱۳۵ درجه

جدول ۱- ویژگی‌های بافت مستخرج از روش‌های آماری

ماتریس طول گام سطح خاکستری		ماتریس هم‌وقوعی		آماره‌های درجه اول هیستوگرام	
فرمول	ویژگی	فرمول	ویژگی	فرمول	ویژگی
$\frac{\sum_{i=1}^G \sum_{j=1}^{N_r} R(i,j)}{N_p}$	درصد گام	Max(C(i,j))	ماکزیمم احتمال	$\sum_{g=0}^{G-1} gH(g)$	میانگین سطح خاکستری ( $\mu$ )
$\frac{\sum_{i=1}^G (\sum_{j=1}^{N_r} R(i,j))^2}{\sum_{i=1}^G \sum_{j=1}^{N_r} R(i,j)}$	غیریکنواختی سطح خاکستری	$\sum_{i,j} (i - \mu i)^2 C(i,j)$	واریانس	$\sqrt{\sum_{g=0}^{G-1} (g - \mu)^2 H(g)}$	انحراف استاندارد ( $\sigma$ )
$\frac{\sum_{i=1}^{N_r} (\sum_{j=1}^G R(i,j))^2}{\sum_{i=1}^{N_r} \sum_{j=1}^G R(i,j)}$	غیریکنواختی طول گام	$\sum_{i,j}  i - j ^2 C(i,j)$	کنتراست	$\sum_{g=0}^{G-1} (g - \mu)^3 H(g) / \sigma$	چولگی
$\frac{\sum_{i=1}^G \sum_{j=1}^{N_r} \frac{R(i,j)}{j^2}}$	گام کوتاه	$\sum_{i,j} (i - \mu i)(j - \mu j) C(i,j) / \sigma_i \sigma_j$	همبستگی	$1 - 1/(1 + \sigma^2)$	نرمی
$\frac{\sum_{i=1}^G \sum_{j=1}^{N_r} R(i,j)}{\sum_{i=1}^G \sum_{j=1}^{N_r} j^2 R(i,j)}$	گام بلند	$\sum_{i,j} C(i,j) / (1 +  i - j )$	همگنی	$\sum_{g=0}^{G-1} H(g)^2$	انرژی
$\frac{\sum_{i=1}^G \sum_{j=1}^{N_r} \frac{R(i,j)}{i^2}}$	گام سطح خاکستری کوتاه	$\sum_{i,j} C(i,j)^2$	انرژی	$-\sum_{g=0}^{G-1} H(g) \text{Log}_2(H(g))$	آنتروپی
$\frac{\sum_{i=1}^G \sum_{j=1}^{N_r} i^2 R(i,j)}{\sum_{i=1}^G \sum_{j=1}^{N_r} R(i,j)}$	گام سطح خاکستری بلند	$-\sum_{i,j} C(i,j) \text{Log}(C(i,j))$	آنتروپی	$\sum_{g=0}^{G-1} (g - \mu)^2 H(g)$	دومین ممان
$\frac{\sum_{i=1}^G \sum_{j=1}^{N_r} \frac{R(i,j)}{i^2 \cdot j^2}}$	گام کوتاه سطح خاکستری کوچک	$\sum_{i,j}  i - j  C(i,j)$	عدم شباهت	$\sum_{g=0}^{G-1} (g - \mu)^3 H(g)$	سومین ممان
$\frac{\sum_{i=1}^G \sum_{j=1}^{N_r} R(i,j)}{\sum_{i=1}^G \sum_{j=1}^{N_r} \frac{R(i,j) \cdot i^2}{j^2}}$	گام کوتاه سطح خاکستری بزرگ	$\sum_{i,j} ((i - \mu i) + (j - \mu j))^3 C(i,j)$	سایه خوشه	$\sum_{g=0}^{G-1} (g - \mu)^4 H(g)$	چهارمین ممان
$\frac{\sum_{i=1}^G \sum_{j=1}^{N_r} \frac{R(i,j) \cdot j^2}{i^2}}$	گام بلند سطح خاکستری کوچک	$\sum_{i,j} ((i - \mu i) + (j - \mu j))^4 C(i,j)$	برجستگی خوشه	$\sigma / \mu$	ضریب تغییرات
$\frac{\sum_{i=1}^G \sum_{j=1}^{N_r} i^2 \cdot j^2 \cdot R(i,j)}{\sum_{i=1}^G \sum_{j=1}^{N_r} R(i,j)}$	گام بلند سطح خاکستری بزرگ				

H(g) ماتریس هیستوگرام نرمال شده، C(i,j) ماتریس هم‌وقوعی، R(i,j) ماتریس طول گام سطح خاکستری، G تعداد سطوح خاکستری تصویر، N<sub>r</sub> تعداد طول‌های گام و N<sub>p</sub> تعداد پیکسل‌های تصویر را نشان می‌دهند.

### پیش‌بینی چروکیدگی

استفاده گردید. داده‌ها به صورت تصادفی تقسیم‌بندی شدند. (گفتنی است که تصویرهای چند نمونه به علت داشتن نویز زیاد پردازش نشد). برای آنالیز داده‌ها و مدل‌سازی از نرم‌افزار IBM SPSS Statistics 21 استفاده شد.

برای مدل‌سازی و استخراج ویژگی‌های مؤثر در تدوین مدل، از روش رگرسیون خطی چندمتغیره گام به گام استفاده شد. ویژگی‌های مستخرج از روش‌های مختلف آنالیز بافت در هر طول‌موج به صورت جداگانه برای هر روش و در ترکیب با هم به عنوان ورودی‌های مدل رگرسیون خطی در نظر گرفته شد. برای تدوین مدل‌های واسنجی، از داده‌های ۲۶۳ نمونه (حدود ۷۵ درصد نمونه‌ها) استفاده شد و ۲۵ درصد باقیمانده (۸۸ نمونه) برای آزمون مدل واسنجی به‌دست آمده،

### ارزیابی مدل‌ها

صحت برازش مدل‌های رگرسیون خطی حاصل با داده‌های آزمایشی، با استفاده از ضریب تبیین و جذر میانگین مربعات خطای مجموعه پیش‌بینی ارزیابی گردید.

## نتایج و بحث

### تغییرات چروکیدگی ورقه‌های سیب در فرآیند خشک کردن

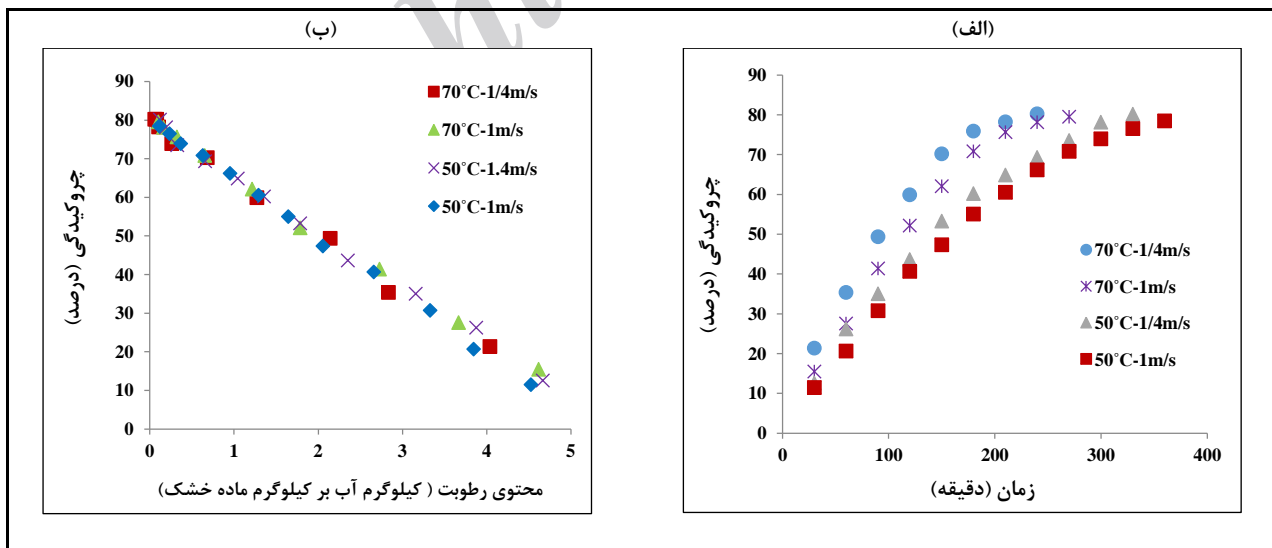
مطابق شکل ۲- الف، که تغییرات درصد چروکیدگی ورقه‌های سیب را در تیمارهای مختلف نسبت به زمان نشان می‌دهد، آهنگ چروکیدگی در مراحل اولیه خشک کردن با افزایش دما و سرعت جریان هوای گرم افزایش داشته است. این پدیده ارتباط دارد با افزایش حذف رطوبت، به علت گرادیان رطوبتی بیشتر در دما، و سرعت بالاتر هوای گرم. همچنین، میزان تغییرات چروکیدگی در هر ۴ تیمار، در مراحل اولیه خشک کردن زیاد بود اما به تدریج کاهش یافت که متناسب با تنش‌های ویسکوالاستیک در نمونه و کاهش رطوبت (خشک پایه) محصول است. بررسی تغییرات درصد چروکیدگی تیمارهای مختلف در مقابل میزان رطوبت بر پایه خشک (شکل ۲- ب) نشان می‌دهد که این دو پارامتر به شدت به

هم وابسته‌اند و نسبت به هم ارتباط خطی دارند که این روند در هر چهار تیمار مورد بررسی تقریباً یکسان است. این ارتباط خطی در محدوده دماها و سرعت‌های جریان هوای گرم مورد بررسی با رابطه ۳ و ضریب تبیین ۰/۹۹۶ به دست آمد.

$$Sh = 79.999 - 14.61MC_{d.b.} \quad (3)$$

که در آن،  $Sh$  = درصد چروکیدگی؛ و  $MC_{d.b.}$  = مقدار رطوبت محصول بر پایه خشک.

مطالعات پیشین (Moreira et al., 2000; Schultz et al., 2007; Seiedlou et al., 2014) وجود یک ارتباط خطی بین تغییر حجم و مقدار رطوبت محصول را تأیید می‌کنند؛ هرچند در برخی موارد ارتباط غیرخطی نیز مشاهده شده است (Mayor & Sereno, 2004).



شکل ۲- تغییرات درصد چروکیدگی ورقه‌های سیب در تیمارهای مختلف

(الف) نسبت به زمان و (ب) نسبت به تغییرات مقدار رطوبت بر پایه خشک





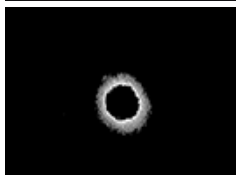

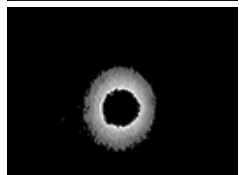
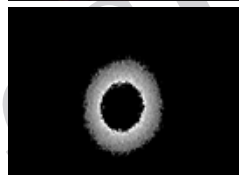


قطعه‌بندی شده را در چهار سطح چروکیدگی و مقدار رطوبت در خلال خشک‌کردن، به‌طور نمونه در طول موج ۷۸۰ نانومتر، نشان می‌دهد.

تغییرات پس‌پراکنش نور لیزر در بافت ورقه‌های سیب در خلال خشک‌کردن  
شکل ۳ تصویرهای اولیه پس‌پراکنش نور و تصویرهای

چروکیدگی (درصد)	محصول تازه (صفر درصد)	۵۴٪	۷۲٪	۷۸٪
مقدار رطوبت بر پایه خشک (گرم آب بر گرم ماده خشک)	۵/۲۵	۱/۷۸	۰/۵۶	۰/۱۱

				تصویر اولیه
				

شکل ۳- تصویرهای پس‌پراکنش اخذ شده و تصویرهای قطعه‌بندی شده آنها در چهار سطح رطوبت و چروکیدگی مختلف در خلال خشک‌کردن با هوای گرم در طول موج ۷۸۰ نانومتر

محصول، قدرت جذب نور افزایش و انعکاس دیفوزی کاهش می‌یابد (Bobelyn *et al.*, 2010). سوم اینکه با کاهش آب و ایجاد بافت متراکم و ورود هوا به فضاهایی که پیشتر از آب پر بودند، قابلیت نفوذ نور در نمونه کاهش می‌یابد و در نتیجه ناحیه پس‌پراکنش کوچک‌تر می‌شود. کونتریراس و همکاران (Contreras *et al.*, 2008) گزارش داده‌اند که تغییر نسبت هوا به آب در بافت محصول و تغییرات مواد شیمیایی محصول، بر رفتار نوری سیب و توت‌فرنگی در فرآیند خشک‌کردن اثر می‌گذارد. بنابراین، تغییرات به‌وجود آمده در تصویرهای پس‌پراکنش می‌تواند مبنایی برای پیش‌بینی خواص کیفی و چروکیدگی در فرآیند خشک‌کردن قرار گیرد.

#### پیش‌بینی چروکیدگی

چروکیدگی محصول با سختی بافت محصول در ارتباط است (Talla *et al.*, 2004)، از این‌رو به‌منظور

در شکل ۳، بخش سفید تصویرهای پس‌پراکنش شامل فوتون‌هایی است که به‌طور مستقیم به CCD دوربین برمی‌گردند و به‌علت بالا بودن شدت نور در این ناحیه سفید دیده می‌شوند. محیط اطراف این ناحیه شامل فوتون‌هایی است که پس از برخورد به بافت میوه و عبور از آن دوباره به سمت دوربین هدایت شده‌اند که همان ناحیه پس‌پراکنش نور را تشکیل می‌دهند. از تصویرها قابل تشخیص است که با پیشرفت فرآیند خشک‌کردن و کاهش رطوبت و به‌تبع آن افزایش چروکیدگی، فوتون‌ها کمتر منتقل می‌شوند و در نتیجه ناحیه پس‌پراکنش کوچک‌تر می‌شود. روند مشابهی در دو طول موج دیگر مشاهده شده است. این امر ممکن است چندین دلیل داشته باشد. اول اینکه به‌واسطه تغییرات سلولی و ساختاری و نیز تغییرات ضخامت و چروکیدگی محصول، برخی از فوتون‌ها پس از برخورد به نمونه از مسیر منحرف شوند که به کاهش ناحیه پس‌پراکنش می‌انجامد. دوم اینکه با افزایش دانسیته

مطابق جدول ۳، نسبت به ۶۵۰ نانومتر، موجب افزایش ضریب تبیین و کاهش جذر میانگین مربعات خطا گردید. در این طول موج نیز ویژگی‌های مستخرج از ماتریس هم‌وقوعی، در مقایسه با سایر روش‌های به‌کار رفته، موجب بهبود عملکرد مدل رگرسیونی شد. برخلاف طول موج ۶۵۰ نانومتر، در طول موج ۷۸۰ نانومتر ترکیب ویژگی‌های مستخرج از هر چهار روش تحلیل بافت، منجر به تدوین مدل رگرسیون خطی با بالاترین ضریب تبیین و کم‌ترین جذر میانگین مربعات خطای مجموعه پیش‌بینی شد.

ویژگی‌هایی که در این حالت، نقش اساسی در طراحی مدل رگرسیون داشتند عبارت بودند از: ممان چهارم از آماره‌های درجه اول هیستوگرام ( $X_1$ )، برجستگی خوشه ( $X_2$ )، کنتراست ( $X_3$ ) و واریانس در راستای ۱۳۵ درجه از ماتریس هم‌وقوعی ( $X_4$ ) و انرژی مؤلفه قطری در سطح سطح تجزیه چهارم ( $X_5$ )، آنتروپی مؤلفه افقی در سطح تجزیه سوم ( $X_6$ ) و انرژی مؤلفه قطری در سطح تجزیه اول ( $X_7$ ) از تبدیل موجک، که مدل رگرسیونی با رابطه ۵ را حاصل نمودند که این مدل توانست درصد چروکیدگی را با ضریب تبیین ۰/۹۳۷ و جذر میانگین مربعات خطای ۵/۶۱، در طی فرایند خشک‌کردن با هوای گرم، پیش‌بینی کند.

$$Sh = 119.709 - 0.622 \times 10^{-4} X_1 + 0.335 \times 10^{-5} X_2 + 0.697 X_3 - 0.199 X_4 - 0.272 X_5 + 44.142 X_6 - 0.811 X_7 \quad (5)$$

شکل ۵ ارتباط بین مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده با استفاده از مدل رگرسیونی فوق را برای مجموعه‌های واسنجی و پیش‌بینی در ۷۸۰ نانومتر نشان می‌دهد. مقایسه شکل‌های ۴ و ۵ نشان می‌دهد که در هر دو مجموعه واسنجی و پیش‌بینی (آزمون)،

پیش‌بینی چروکیدگی با استفاده از تغییرات به‌وجود آمده در تصویرهای پس‌پراکنش نور لیزر از ویژگی‌های بافت تصویرها استفاده شد.

در ۶۵۰ نانومتر، مطابق جدول ۲، تحلیل تصویرها با استفاده از ویژگی‌های مستخرج از ماتریس هم‌وقوعی (آماره‌های درجه دوم سطح خاکستری) توانست بالاترین ضریب تبیین و کمترین جذر میانگین مربعات خطا را در پیش‌بینی چروکیدگی به‌دست آورد. ویژگی‌هایی که مطابق آنالیز رگرسیون گام‌به‌گام، نقش اساسی در طراحی مدل پیش‌بینی در این حالت داشتند عبارت بودند از کنتراست، عدم شباهت و آنتروپی در راستای ۹۰ درجه و ماکزیمم احتمال در راستای ۱۳۵ درجه که مدل رگرسیونی پیش‌بینی‌کننده با رابطه ۴ را حاصل نمودند.

$$Sh = -10020.140 - 4.858 CO_{90} + 439.008 DI_{90} + 10144.840 MP_{135} + 713.743 EN_{90} \quad (4)$$

که در آن،

$Sh$  = درصد چروکیدگی؛  $CO_{90}$  = کنتراست در راستای ۹۰ درجه؛  $DI_{90}$  = عدم شباهت در راستای ۹۰ درجه؛  $MP_{135}$  = ماکزیمم احتمال در راستای ۱۳۵ درجه؛ و  $EN_{90}$  = آنتروپی در راستای ۹۰ درجه.

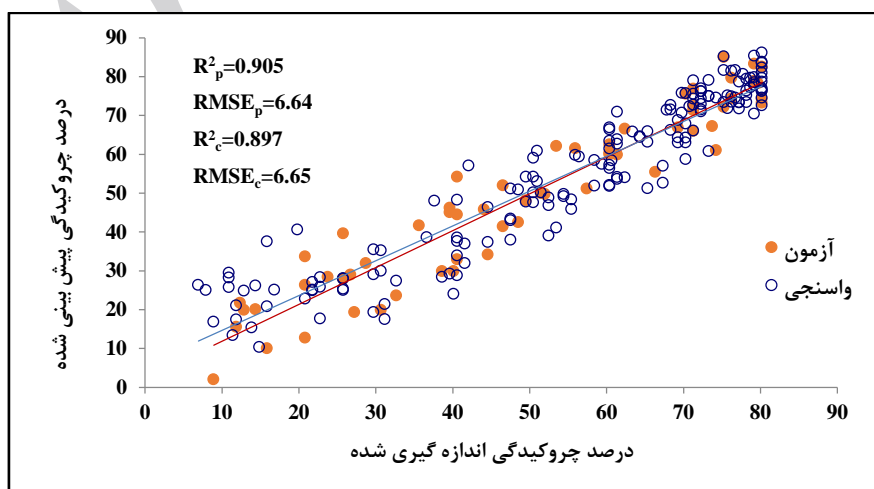
شکل ۴ ارتباط بین مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده با استفاده از رابطه فوق را برای مجموعه‌های واسنجی و پیش‌بینی نشان می‌دهد. در این طول موج، ترکیب ویژگی‌های مستخرج از تصاویر با استفاده از هر چهار روش تحلیل بافت نتوانست عملکرد مدل رگرسیونی خطی را بهبود بخشد.

استفاده از ویژگی‌های مستخرج از بافت تصویرهای پس‌پراکنش در ۷۸۰ نانومتر برای تدوین مدل پیش‌بینی

دقت مدل رگرسیون تدوین‌شده در ۷۸۰ نانومتر از بیشتر و جذر میانگین مربعات خطای آن کمتر دقت مدل رگرسیونی تدوین‌شده در ۶۵۰ نانومتر است.

جدول ۲- نتایج رگرسیون خطی چند متغیره گام‌به‌گام در ۶۵۰ نانومتر با استفاده از ویژگی‌های مستخرج از روش‌های مختلف آنالیز بافت

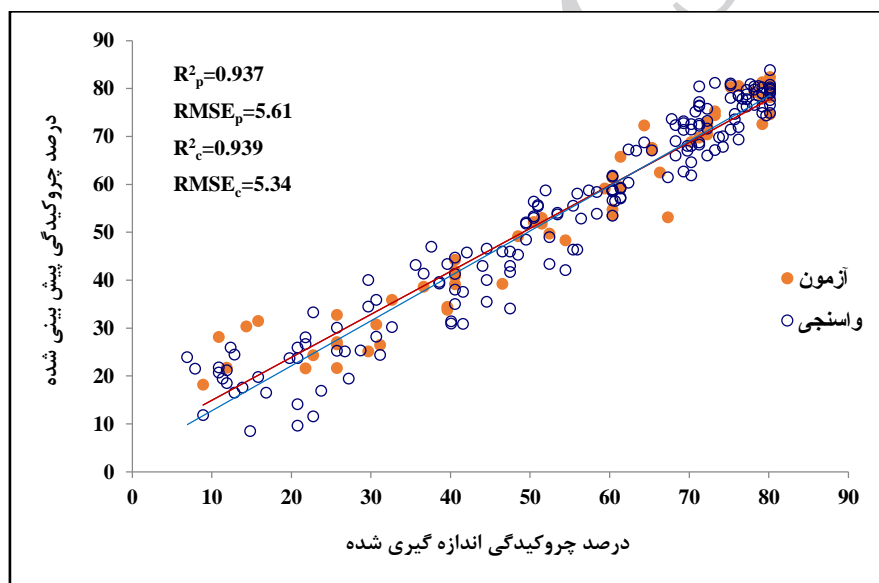
روش تحلیل بافت	مؤثرترین ویژگی‌ها در تدوین مدل	$R^2_p$	$RMSE_p$
آماره‌های درجه اول هیستوگرام	ممان چهارم	۰/۸۷۸	۷/۴۶
ماتریس هم‌وقوعی	کنتراست، عدم شباهت و آنتروپی در راستای ۹۰ درجه و ماکزیمم احتمال در راستای ۱۳۵ درجه	۰/۹۰۵	۶/۶۴
ماتریس طول گام سطح خاکستری	غیریکنواختی سطح خاکستری، گام بلند سطح خاکستری کوچک، گام بلند سطح خاکستری بزرگ و گام سطح خاکستری کوتاه در راستای ۹۰ درجه	۰/۸۹۵	۱۵/۵۲
تبدیل موجک	میانگین و انرژی در سطح تجزیه چهارم - مؤلفه عمودی، انرژی در سطح تجزیه سوم - مؤلفه افقی، انرژی در سطح تجزیه اول - مؤلفه افقی، انرژی در سطح تجزیه سوم - مؤلفه قطری، انحراف معیار سطح تجزیه اول - مؤلفه افقی، انرژی در سطح تجزیه سوم - مؤلفه قطری، انحراف معیار در سطح تجزیه دوم - مؤلفه افقی، میانگین در سطح تجزیه چهارم - مؤلفه قطری، انرژی در سطح تجزیه دوم - مؤلفه افقی، میانگین در سطح تجزیه دوم - مؤلفه افقی و آنتروپی و انرژی در سطح تجزیه اول - مؤلفه قطری آماره‌های مرتبه اول هیستوگرام (ممان چهارم) ماتریس هم‌وقوعی (کنتراست در راستای ۹۰ درجه)	۰/۸۹۷	۱۲/۷۲
ترکیب چهار روش	تبدیل موجک (انرژی در سطح تجزیه چهارم - مؤلفه عمودی، میانگین در سطح تجزیه دوم - مؤلفه افقی، انرژی در سطح تجزیه سوم - مؤلفه افقی و قطری، میانگین در سطح تجزیه چهارم - مؤلفه قطری و انحراف معیار در سطح تجزیه سوم - مؤلفه افقی)	۰/۸۹۸	۶/۸۳



شکل ۴- دقت مدل رگرسیون با استفاده از ویژگی‌های مستخرج از ماتریس هم‌وقوعی در ۶۵۰ نانومتر در مجموعه‌های واسنجی و پیش‌بینی (آزمون)

جدول ۳- نتایج رگرسیون خطی چند متغیره گام‌به‌گام در ۷۸۰ نانومتر با استفاده از ویژگی‌های مستخرج از روش‌های مختلف آنالیز بافت

روش تحلیل بافت	مؤثرترین ویژگی‌ها در تدوین مدل	$R^2_p$	$RMSE_p$
آماره‌های درجه اول هیستوگرام	ممان چهارم، نرمی و آنتروپی، انرژی و ممان دوم	۰/۹۲۶	۵/۸۸
ماتریس هم‌وقوعی	واریانس در راستای ۹۰ درجه، کنتراست وعدم شباهت در راستای ۱۳۵ درجه، وعدم شباهت در راستای صفر درجه	۰/۹۳۳	۵/۸۵
ماتریس طول گام سطح خاکستری	غیریکنواختی سطح خاکستری در راستای ۹۰ درجه، گام بلند سطح خاکستری بزرگ در راستای ۱۳۵ درجه و گام کوتاه سطح خاکستری کوچک در راستای ۴۵ درجه	۰/۹۱۳	۱۰/۷۳
تبدیل موجک	میانگین تقریب در سطح تجزیه اول، انرژی، آنتروپی و انحراف معیار در سطح تجزیه اول- مؤلفه عمودی، انرژی در سطوح تجزیه اول و چهارم- مؤلفه قطری	۰/۹۲۳	۶/۱۰
ترکیب چهار روش	آماره‌های مرتبه اول هیستوگرام (ممان چهارم) ماتریس هم‌وقوعی (برجستگی خوشه، کنتراست و واریانس در راستای ۱۳۵ درجه) تبدیل موجک (انرژی در سطح تجزیه چهارم- مؤلفه قطری، آنتروپی در سطح تجزیه سوم- مؤلفه افقی، انرژی در سطح تجزیه اول- مؤلفه قطری)	۰/۹۳۷	۵/۶۱



شکل ۵- دقت مدل رگرسیون با استفاده از ترکیب ویژگی‌های مستخرج از چهار روش آنالیز بافت در ۷۸۰ نانومتر در مجموعه‌های واسنجی و پیش‌بینی (آزمون)

چروکیدگی به‌دست آورد، اما در بین روش‌های مورد استفاده برای استخراج ویژگی‌های بافت در این طول موج نیز ماتریس هم‌وقوعی، نسبت به سه روش دیگر، برتر است. در این روش، همگنی در راستای ۹۰ درجه به‌عنوان ویژگی مؤثر در تدوین مدل رگرسیون خطی توسط نرم‌افزار انتخاب شد.

نتایج رگرسیون خطی گام‌به‌گام در ۸۸۰ نانومتر (جدول ۴) نشان می‌دهد که در هر چهار روش تحلیل بافت، ضریب تبیین مجموعه پیش‌بینی در این طول موج افزایش و جذر میانگین مربعات خطا، در مقایسه با دو طول موج دیگر، کاهش یافته است. هر چهار روش تحلیل بافت و نیز ترکیب آنها نتایج خوبی در پیش‌بینی

جدول ۴- نتایج رگرسیون خطی چند متغیره گام‌به‌گام در ۸۸۰ نانومتر با استفاده از ویژگی‌های مستخرج از روش‌های مختلف آنالیز بافت

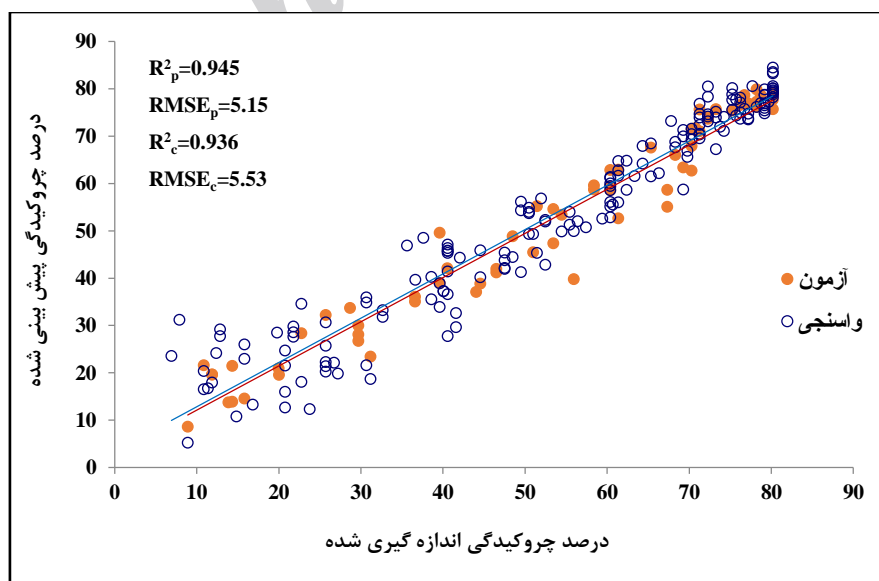
روش تحلیل بافت	مؤثرترین ویژگی‌ها در تدوین مدل	$R^2_p$	$RMSE_p$
آماره‌های درجه اول هیستوگرام	میانگین، انحراف معیار، آنتروپی	۰/۹۳۵	۵/۶۴
ماتریس هم‌وقوعی	همگنی در راستای ۹۰ درجه	۰/۹۴۵	۵/۱۵
ماتریس طول گام سطح خاکستری	غیریکنواختی سطح خاکستری در راستای ۱۳۵ درجه	۰/۹۴۴	۵/۵۹
تبدیل موجک	میانگین تقریب در سطح تجزیه اول، آنتروپی در سطح تجزیه اول - مؤلفه افقی، آنتروپی در سطح تجزیه چهارم - مؤلفه قطری، میانگین در سطوح تجزیه چهارم - مؤلفه افقی	۰/۹۳۴	۵/۵۸
ترکیب چهار روش	ماتریس هم‌وقوعی (همگنی در راستای ۹۰ درجه) تبدیل موجک (آنتروپی در سطح تجزیه چهارم - مؤلفه قطری، میانگین در سطوح تجزیه چهارم - مؤلفه افقی)	۰/۹۳۵	۵/۵۸

ویژگی به حداقل کاهش می‌یابد. مدل نهایی با رابطه ۶ به‌دست آمد که در آن،  $H_{90}$  همگنی ماتریس هم‌وقوعی در راستای ۹۰ درجه است.

$$Sh = 3760.186 + 3876.651 H_{90} \quad (۶)$$

شکل ۶ نمودار پراکندگی مقادیر چروکیدگی اندازه-گیری شده ورقه‌های سیب در فرآیند خشک کردن با هوای گرم و پیش‌بینی شده با مدل فوق را نشان می‌دهد.

مقایسه جدول‌های ۲، ۳ و ۴ نشان می‌دهد که طول موج ۸۸۰ نانومتر و ویژگی همگنی ماتریس هم‌وقوعی در راستای ۹۰ درجه می‌تواند مناسب‌ترین مدل رگرسیون خطی برای پیش‌بینی چروکیدگی در خلال خشک کردن با هوای گرم را، با ضریب تبیین مجموعه پیش‌بینی ۰/۹۴۵ و جذر میانگین مربعات خطای ۵/۱۵، تأمین کند. در این حالت، به‌دلیل اینکه در ساخت مدل واسنجی فقط از یک ویژگی استفاده می‌شود، زمان موردنیاز برای استخراج



شکل ۶- دقت مدل رگرسیون با استفاده از ویژگی‌های مستخرج از ماتریس هم‌وقوعی در ۸۸۰ نانومتر در مجموعه‌های واسنجی و پیش‌بینی (آزمون)

### نتیجه‌گیری

این تحقیق با هدف بررسی امکان استفاده از ویژگی‌های بافت تصویرهای پس‌پراکنش نور لیزر در سه طول موج در ناحیه مرئی و مادون قرمز نزدیک در پیش‌بینی چروکیدگی در فرآیند خشک کردن اجرا شد. با وجودی که روش‌های آماری آنالیز بافت و تبدیل موجک، همگی نتایج قابل قبول در پیش‌بینی چروکیدگی ارائه دادند ولی در بین آنها، ماتریس هم‌وقوعی توانست بالاترین ضریب تبیین و کمترین جذر میانگین مربعات خطا را در هر سه طول موج مورد بررسی به دست آورد. مقایسه نتایج مدل سازی در طول موج‌های مختلف نشان می‌دهد که دقت مدل‌های تدوین شده در محدوده مادون قرمز نزدیک، نسبت به ناحیه مرئی، بیشتر است. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که استفاده از ویژگی‌های بافت تصویرهای پس‌پراکنش لیزر در محدوده مادون قرمز نزدیک می‌تواند به عنوان روشی غیرمخرب و ارزان در پایش چروکیدگی در فرآیند خشک کردن با هوای گرم به کار گرفته شود. تلاش‌های دیگری در جهت استخراج ویژگی‌های دیگر و ارتقای سامانه تصویربرداری فوق، برای افزایش قدرت پیش‌بینی چروکیدگی با استفاده از این روش ضروری است.

مقایسه شکل‌های ۴ و ۶ نشان می‌دهد که مدل تدوین شده در ۸۸۰ نانومتر با استفاده از ویژگی‌های ماتریس هم‌وقوعی، که بهترین مدل تدوین شده در این طول موج بوده است، نسبت به مدل تدوین شده در ۶۵۰ با همان روش آنالیز بافت دارای ضریب تبیین بیشتر و جذر میانگین مربعات کمتری است.

نشان داده شد که در بین طول موج‌های مورد بررسی، طول موج‌های مادون قرمز نزدیک و در بین روش‌های مورد استفاده در آنالیز بافت، ماتریس هم‌وقوعی قابلیت‌های بالایی در پیش‌بینی چروکیدگی در فرآیند خشک کردن دارند. ماتریس هم‌وقوعی یکی از پرکاربردترین روش‌ها در آنالیز بافت تصاویر در حیطه علم صنایع غذایی است که در پیش‌بینی خواص شیمیایی پرتقال (Kondo *et al.*, 2000)، تعیین خواص مکانیکی مواد غذایی (Gao & Tan, 1996; Karimi *et al.*, 2012) و همچنین در درجه‌بندی سیب (Kavdir & Guyers, 2002) به کار گرفته شده است. این نکته با اهمیت است که ویژگی‌های مستخرج از این روش، بستگی زیادی دارد به مقدار فاصله  $d$  و زاویه انتخاب شده که تغییر هر یک از این پارامترها تأثیر قابل توجهی بر نتایج خواهد داشت.

### قدردانی

از جناب آقای دکتر کاوه ملازاده، عضو هیأت علمی دانشکده کشاورزی دانشگاه کردستان، برای راهنمایی‌های ارزنده و بی‌دریغشان در کلیه مراحل اجرای این پژوهش، قدردانی می‌شود.

### مراجع

- Aguilera, J. M. 2003. Drying and dried products under the microscope. *Int. J. Food Sci. Tech.* 9(3): 137-143.
- Bevk, M. and Kononenko, I. 2002. A statistical approach to texture description of medical images: a preliminary study. *Proceedings of the 15<sup>th</sup> IEEE Symposium on Computer-Based Medical Systems.* June 4-7. Maribor, Slovenia

- Bobelyn, E., Serban, A., Nicu, M., Lammertyn, J., Nicolai, B. and Saeys, W. 2010. Postharvest quality of apple predicted by NIR-spectroscopy: study of the effect of biological variability on spectra and model performance. *Postharvest Biol. Tec.* 55(3): 133-143.
- Contreras, C., Martín-Esparza, M. E., Chiralt, A. and Martínez-Navarrete, N. 2008. Influence of microwave application on convective drying: Effects on drying kinetics, and optical and mechanical properties of apple and strawberry. *J. Food Eng.* 88(1): 55-64.
- Fernández, L., Castellero, C. and Aguilera, J. M. 2005. An application of image analysis to dehydration of apple discs. *J. Food Eng.* 67(1-2): 185-193.
- Gao, X. and Tan, J. 1996. Analysis of expended-food texture by image processing part II: Mechanical properties. *J. Food Process. Eng.* 19, 445-456.
- Haralick, R. M., Shanmugam, K. and Dinstein, I. 1973. Textural features for image classification. *IEEE T. SYST. MAN CYB.* 6, 610-621.
- Hashim, N., Pflanz, M., Regen, C., Janius, R. B., Abdul Rahman, R., Osman, A., Shitan, M. and Zude, M. 2013. An approach for monitoring the chilling injury appearance in bananas by means of backscattering imaging. *J. Food Eng.* 116, 28-36.
- Karimi, M., Fathi, M., Sheykholeslam, Z., Sahraiyani, B. and Naghipoor, F. 2012. Effect of different processing parameters on quality factors and image texture features of bread. *J. Bioprocess. Biotech.* 2, 127. doi: 10.4172/2155-9821.1000127.
- Kavdir, I. and Guyer, D. E. 2002. Apple sorting using artificial neural networks and spectral imaging. *T- ASAE.* 45, 1995-2005.
- Kondo, N., Ahmad, U., Monta, M. and Murasc, H. 2000. Machine vision based quality evaluation of Iyokan orange fruit using neural networks. *Comput. Electron. Agric.* 29, 135-147.
- Krokida, M. K., Karathanos, V. T. and Maroulis, Z. B. 2000. Compression analysis of dehydrated agricultural products. *Dry. Technol.* 18(1-2): 395-408. doi: 10.1080/07373930008917711.
- Lewicki, P. P. and Lukaszuk, A. 2000. Changes of rheological properties of apple tissue undergoing convective drying. *Dry. Technol.* 18(3): 707-722. doi: 10.1080/07373930008917733.
- Lorente, D., Zude, M., Idler, C., Gomez-Sanchis, J. and Blasco, J. 2015. Laser-light backscattering imaging for early decay detection in citrus fruit using both a statistical and a physical model. *J. Food Eng.* 154, 76-85.
- Mallat, S. G. 1989. A theory for multi resolution signal decomposition: the wavelet representation. *IEEE T. PATTERN. ANAL.* (7): 674-693.
- Mayor, L. and Sereno, A. M. 2004. Modelling shrinkage during convective drying of food materials: A review. *J. Food Eng.* 61, 373-386.
- Mollazade, K., Omid, M., Akhlaghian-Tab, F. and Mohtasebi, S. S. 2012. Principles and applications of light backscattering imaging in quality evaluation of agro-food products: a review. *Food Bioprocess Tech.* 5(5): 1465-1485. doi: 10.1007/s11947-012-0821-x.
- Mollazade, K., Omid, M., Akhlaghian-Tab, F., Rezaei-Kalaj, Y. and Mohtasebi, S. S. 2013. Analysis of texture-based features for predicting mechanical properties of horticultural products by laser light backscattering imaging. *Comput. Electron. Agr.* 98, 34-45.

- Moreira, R., Figueiredo, A. and Sereno, A. 2000. Shrinkage of apple disks during drying by warm air convectional freeze drying. *Dry. Technol.* 18(1-2): 279-294.
- Mulet, A., Garcí'a-Reverter, J., Bon, J. and Berna, A. 2000. Effect of shape on potato and cauliflower shrinkage during drying. *Dry. Technol.* 18(6): 1201-1219.
- Otsu, N., 1979. A threshold selection method from gray-level histograms. *IEEE T. SYST. MAN CYB.* 9, 62-66.
- Qing, Z., Ji, B. and Zude, M. 2007. Predicting soluble solid content and firmness in apple fruit by means of laser light backscattering image analysis. *J. Food Eng.* 82, 58-67.
- Ramos, I. N., Silva, C. L. M., Sereno, A. M. and Aguilera, J. M. 2004. Quantification of microstructural changes during first stage air drying of grape tissue. *J. Food Eng.* 62(2): 159-164.
- Romano, G., Nagle, M. and Müller, J. 2016. Two-parameter Lorentzian distribution for monitoring physical parameters of golden colored fruits during drying by application of laser light in the Vis/NIR spectrum. *Innov. Food Sci. Emerg. Technol.* 33, 498-505.
- Romano, G., Baranyai, L., Gottschalk, K. and Zude, M. 2008. An approach for monitoring the moisture content changes of drying banana slices with laser light backscattering imaging. *Food Bioprocess. Technol.* 1(4): 410-414.
- Romano, G., Nagle, M., Argyropoulos, D. and Muller, J. 2011. Laser light backscattering to monitor moisture content, soluble solid content and hardness of apple tissue during drying. *J. Food Eng.* 104, 657-662.
- Schultz, E. L., Mazzuco, M. M., Machado, R. A. F., Bolzan, A., Quadri, M. B. and Quadri, M. G. N. 2007. Effect of pre-treatment on drying, density and shrinkage of apple slices. *J. Food Eng.* 78, 1103-1110.
- Seifert, B., Zude, M., Spinelli, L. and Torricelli, A. 2014. Optical properties of developing pip and stone fruit reveal underlying structural changes. *Physiol. Plantarum.* doi:10.1111/ppl.12232.
- Seiiedlou, S., Ghasemzadeh, H. R., Hamdami, N., Talati, F. and Moghaddam, M. 2010. Convective drying of apple: Mathematical modeling and determination of some quality parameters. *Int. J. Agric. Biol.* 12, 171-178.
- Seiiedlou, S. S., Nalbandi, H., Ghasemzadeh, H. R. and Hamdami, N. 2014. Modeling of apple slices shrinkage during the convectional drying to use in simulation of heat and moisture transfer. *J. Agric. Mech.* 1(2): 25-35. (in Persian)
- Talla, A., Puiggali, J. R., Jomaa, W. and Jannot, Y. 2004. Shrinkage and density evolution during drying of tropical fruits: application to banana. *J. Food Eng.* 64, 103-109.
- Tang, X. 1998. Texture information in run-length matrices. *IEEE T. Image Process.* 7, 1602-1609.
- Udomkun, P., Nagle, M., Mahayothee, B. and Müller, J. 2014. Laser-based imaging system for non-invasive monitoring of quality changes of papaya during drying. *Food Control.* 42, 225-233.
- Udomkun, P., Nagle, M., Argyropoulos, M., Mahayothee, B. and Müller, J. 2016. Multi-sensor approach to improve optical monitoring of papaya shrinkage during drying. *J. Food Eng.* doi: 10.1016/j.jfoodeng.2016.05.014
- Yadollahinia, A., Latifi, A. and Mahdavi, R. 2009. New method for determination of potato slice shrinkage during drying. *Comput. Electron. Agric.* 65(2): 268-274.



- Yan, Z., Sousa-Gallagher, M. J. and Oliveira, F. A. 2008. Shrinkage and porosity 461 of banana, pineapple and mango slices during air-drying. *J. Food Eng.* 84(3): 430-440.
- Zheng, C., Sun, D. W. and Zheng, L. 2006. Recent applications of image texture for evaluation of food qualities - a review. *Trends Food Sci. Tech.* 17, 113-128.

Archive of SID



## **Monitoring and Modeling of Apple Slices Shrinkage during Hot Air Drying Using: Texture Features of Laser Backscattering Images**

**M. Mozaffari<sup>\*</sup>, A. Mahmoudi and B. Jamshidi**

\* Corresponding Author: Ph.D student of Tabriz university and Academic member of Agricultural Engineering Research Department, East Azarbayjan Agricultural and Natural Resources Educational and Research Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Tabriz, Iran. Email: 4mozaffari@gmail.com  
Received: 31 July 2016, Accepted: 29 October 2016

The present paper investigated the feasibility of using texture-based features of laser backscattering images in monitoring and modeling of apple slices shrinkage during hot air drying. The backscattering imaging was performed at three wavelengths (650, 780 and 880 nm) in the visible and near-infrared regions. The acquired images were subjected to four texture analysis methods including first-order statistics of image histogram, co-occurrence matrix, gray level run-length matrix and wavelet transform. Stepwise multiple linear regressions was used to develop models and determine the most effective features by using individual types of feature sets and their combinations as inputs of calibration models. The results showed the capability of the texture features extracted from the laser backscattering images in the near-infrared wavelength range for prediction of apple slices shrinkage; by using homogeneity feature of co-occurrence matrix-90° at 880 nm (with  $R_p^2=0.95$ ,  $RMSE_p=5.15$ ) and fusion of the four feature sets extracted from different texture analysis methods at 780nm (with  $R_p^2=0.94$ ,  $RMSE_p=5.61$ ), could make models with high accuracy. This study showed that Laser backscattering imaging technique can be used as a non-destructive, rapid and low-cost method for prediction of the shrinkage in the process of hot air drying of apple slices.

**Keywords:** Hot Air Drying, Image Texture Analysis, Laser Backscattering Imaging, Shrinkage