

## کاربرد تصویربرداری ابرطیفی مرئی - مادون قرمز نزدیک و روش‌های آنالیز چند متغیره جهت پیشگویی رطوبت و سختی مغزهای پسته برشته شده در شرایط مختلف

تکتم محمدی مقدم<sup>۱</sup> - سیدمحمد علی رضوی<sup>۲</sup> - مسعود تقی زاده<sup>۳</sup> - آمنه سازگارنیا<sup>۴\*</sup> - بیسواجت پرادان<sup>۵</sup>

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۰۸/۳۰

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۱۱/۰۵

### چکیده

با افزایش توقعات در ارتباط با کیفیت و سلامت محصولات غذایی، روش‌های تجزیه‌ای صحیح و دقیق برای اطمینان از کیفیت، صحت و سلامت محصول ضروری است. روش‌های سنتی کنترل مواد غذایی، زمان بر، گران و نیازمند تخریب نمونه هستند. بنابراین استفاده از اتوماسیون برای اطمینان از کیفیت محصولات کشاورزی ضروری است. هدف از این تحقیق استفاده از تصویربرداری ابرطیفی، شیوه‌های مختلف پیش پردازش و روش‌های آنالیز چند متغیره (رگرسیون کمترین مربعات جزئی و شبکه عصبی مصنوعی) جهت پیشگویی رطوبت و سختی مغزهای پسته طی شرایط مختلف برشته کردن (دما، زمان و سرعت جریان هوای برشته کردن) بوده است. نتایج نشان داد تصویربرداری ابرطیفی می‌تواند به خوبی برای پیشگویی میزان رطوبت و سختی مغزهای پسته برشته شده به کار رود. بررسی‌ها نشان داد استفاده از روش‌های مختلف پیش پردازش می‌تواند باعث کاهش خطای پیشگویی و بهبود کیفیت مدل به دست آمده شود. روش شبکه عصبی مصنوعی بهتر از روش کمترین مربعات جزئی توانست برای پیشگویی میزان رطوبت و سختی مغزهای پسته برشته شده به کار رود. بهترین مدل برای پیشگویی رطوبت مغزهای پسته برشته شده با انجام پیش پردازش‌های تبدیل متغیر نرمال استاندارد، موجک و مشتق اول به دست آمد که میزان ضریب تبیین ۰/۹۰۷ و میزان خطای پیشگویی ۰/۱۷۹ بود. برای پیشگویی سختی مغزهای پسته برشته شده بهترین مدل از پیش پردازش‌های تبدیل متغیر نرمال استاندارد، موجک و مشتق دوم به دست آمد که میزان ضریب تبیین ۰/۸۷۶ و میزان خطای پیشگویی ۵/۲۱۶ به دست آمد.

واژه‌های کلیدی: آزمون فشاری، برشته کردن، پسته، تصاویر ابرطیفی

### مقدمه

(Kashaninejad *et al.* 2006). در حدود ۴۰ درصد صادرات کشاورزی و حدود ۵ درصد صادرات غیرنفتی ایران مربوط به پسته است (Pangan, 2011). بنابراین پسته نقش به‌سزایی در اقتصاد ملی اعم از کشاورزی، صنعتی و تجاری ایفا می‌کند. متأسفانه شرایط نامناسب جوی طی سال‌های اخیر، آفت‌زدگی و وجود سم آفلاتوکسین، عدم کنترل در زمینه بسته‌بندی، نگهداری و صادرات پسته باعث شده است که در شش ماه نخست امسال، پسته در میان ده محصول برتر صادرات غیرنفتی هم نباشد (Pangan, 2011; FAO, 2013) به کارگیری روش‌های نوین و مناسب جهت افزایش کیفیت پسته، بهبود زمان ماندگاری و بسته‌بندی مناسب نقش مهمی را در بالا بردن میزان صادرات پسته کشور ایفا خواهد کرد.

برشته کردن یکی از متداول‌ترین شکل‌های فرآوری دانه‌های پسته بوده و هدف از آن افزایش پذیرش کلی فرآورده است. این فرآیند باعث تغییر و بهبود معنی‌دار عطر و طعم، بافت و ظاهر دانه‌ها می‌شود. فرآورده‌های حاصل نسبت به آجیل‌های خام بسیار خوشمزه‌تر و لذیذتر می‌باشند. از طرفی برشته‌کردن باعث غیر فعال نمودن

پسته یکی از محبوب‌ترین و گران‌بهارترین آجیل‌ها در بین مردم کشورهای مختلف با ارزش غذایی و شفا بخشی بسیار عالی است. ارزش غذایی، خوشمزه‌گی، هضم راحت و کالری بالا از ویژگی‌هایی است که آن را در میان اکثر میوه‌ها برتر ساخته است. به‌علاوه انواع ویتامین‌ها و مواد معدنی در پسته به حد قابل ملاحظه‌ای وجود دارد (Maghsudi, 2010). مغز پسته منبع خوبی از چربی (۶۰٪-۵۰٪) بوده و حاوی اسیدهای چرب غیر اشباع و ضروری (اسید اولئیک، لینولئیک و لینولنیک) برای انسان می‌باشد. این محصول در صنعت شیرینی پزی، تنقلات، بستنی سازی و غیره کاربرد فراوانی دارد

۱- دانش‌آموخته دکتری مهندسی صنایع غذایی دانشگاه فردوسی مشهد

۲ و ۳- استاد و استادیار گروه علوم و صنایع غذایی دانشگاه فردوسی مشهد

۴- دانشیار گروه فیزیک پزشکی دانشگاه علوم پزشکی مشهد

\*- نویسنده مسئول: (Email: Sazgarniaa@mums.ac.ir)

5- University Putra Malaysia (UPM)

تصویربرداری ابرطیفی عبوری در دامنه ۱۰۹۰ - ۷۵۰ nm جهت پیشگویی میزان رطوبت و روغن دانه‌های ذرت استفاده کردند. این محققان از روش کمترین مربعات جزئی و آنالیز مؤلفه‌های اصلی و پیش‌پردازش‌های<sup>۱</sup> تبدیل متغیر نرمال استاندارد<sup>۲</sup>، تصحیح پخش افزایش<sup>۳</sup>، تبدیل موجک و الگوریتم ژنتیک استفاده نمودند. کمترین میزان خطای پیشگویی اعتبارسنجی متقابل برای روغن ۱/۳۸٪ و برای رطوبت ۱/۲۰٪ به دست آمد. نسبت انحراف معیار متغیرهای پاسخ به ریشه میانگین مربعات خطای پیشگویی<sup>۴</sup> (RPD) برای روغن ۱/۴۵ و برای رطوبت ۱/۴۵ بود. Mahesh *et al.*, 2008 از سیستم تصویربرداری ابرطیفی در ناحیه مادون قرمز برای طبقه‌بندی گندم‌های کانادایی استفاده کردند. این محققان ۱۰ طول موج را که در طبقه‌بندی دانه‌ها نقش داشتند انتخاب کردند. سپس از روش‌های محاسباتی تجزیه و تحلیل تفکیک درجه دوم<sup>۵</sup>، تجزیه و تحلیل تفکیک خطی<sup>۶</sup> و شبکه عصبی مصنوعی برای طبقه‌بندی دانه‌ها استفاده کردند. Williams *et al.*, 2009 از سیستم تصویربرداری ابرطیفی (۱۶۶۲ - ۹۶۰ nm و ۲۴۹۸ - ۱۰۰۰ nm) برای طبقه‌بندی دانه‌های ذرت براساس سختی استفاده کردند. این محققان دانه‌های ذرت را به دو دسته شیشه‌ای و آردی طبقه‌بندی کردند. جهت تشخیص و طبقه‌بندی دانه‌ها از روش کمترین مربعات جزئی و آنالیز مؤلفه‌های اصلی استفاده شد. میزان خطای پیشگویی در دامنه ۱۶۶۲ - ۹۶۰ nm برابر ۰/۱۸ و در دامنه ۲۴۹۸ - ۱۰۰۰ nm برابر ۰/۲۹ بود. Nakariyakul and Casasent, 2011 از تصویربرداری ابرطیفی عبوری (۱۴۰۰ - ۷۰۰ nm) برای تشخیص آسیب‌های داخلی بادام استفاده کردند. این محققان به جای استفاده از تمامی داده‌ها، مقادیر مربوط به نسبت دو طول موج مناسب را به دست آوردند که این کار باعث افزایش سرعت و دقت بیشتر و آسان‌تر شدن محاسبات شد.

بررسی منابع نشان داد تاکنون هیچ گزارشی علمی مبنی بر انجام تحقیق درباره کاربرد تصویربرداری ابرطیفی در بررسی خصوصیات کیفی پسته انتشار نیافته است. با توجه به اهمیت پسته به عنوان یک محصول مهم و لزوم اتوماسیون و استفاده از روش‌های سریع و مطمئن در بررسی کیفیت آن طی برداشت، فرآوری و نگهداری، هدف از این تحقیق استفاده از تصویربرداری ابرطیفی و روش‌های آنالیز چند متغیره جهت پیشگویی رطوبت و سختی مغزهای پسته طی شرایط مختلف برشته کردن بوده است. استفاده از روش‌های غیرمخرب باعث

آنزیم‌های مخرب مواد مغذی شده و میکروارگانیسم‌های نامطلوب و آلوده‌کننده‌های مواد غذایی را نیز از بین می‌برد. استفاده از ترکیب‌های دما - زمان نامناسب منجر به کاهش کیفیت فرآورده، کاهش زمان ماندگاری و از دست دادن عطر و طعم پسته خواهد شد (Ozdemir, 2001).

با افزایش توقعات در ارتباط با کیفیت و سلامت محصولات غذایی، روش‌های تجزیه‌ای صحیح و دقیق برای اطمینان از کیفیت، صحت و سلامت محصول ضروری است. روش‌های سنتی کنترل مواد غذایی، زمان بر، گران و نیازمند تخریب نمونه هستند. بنابراین برای افزایش عملکرد یک واحد تولیدی و کاهش خطاهای کیفیتی آن، استفاده از اتوماسیون برای اطمینان از کیفیت محصولات ضروری است (Gowen *et al.*, 2007). در دو دهه گذشته برنامه‌های قابل توجهی برای گسترش تکنیک‌های حساس جدید جهت کیفیت و سلامت محصولات کشاورزی و غذایی صورت گرفته است. این روش‌ها امکانات جدیدی را برای اندازه‌گیری، کنترل، طبقه‌بندی و درجه‌بندی محصولات غذایی به‌طور مؤثر و کارآمد در اختیار می‌گذارند. بنابراین برخی روش‌های هوشمند برای ارزیابی کیفی و ویژگی‌های وابسته به کیفیت، با استفاده از تجهیزات و تکنیک‌های پیشرفته گسترش پیدا کرده است (Sun, 2010). پیشرفت‌های جدید در مهندسی کامپیوتر باعث پیشرفت توانایی سیستم‌های تصویربرداری برای شناسایی مشکلات کیفی در خط فرآیند و با کمترین دخالت انسان شده است. این سیستم‌ها به خصوصیات شیء حساسیت دارند و در مقایسه با روش‌های تجزیه‌ای معمولی می‌توانند آنالیزهای غیرمخرب را در زمان کوتاه در اختیار گذارند (Gowen *et al.*, 2007). تصویربرداری ابرطیفی که به‌عنوان تصویربرداری شیمیایی یا طیفی نیز خوانده می‌شود؛ تکنولوژی نوینی است که ترکیبی از تصویربرداری و طیف‌سنجی است و اطلاعاتی را در ارتباط با خواص طیفی و مکانی شیء در اختیار می‌گذارد (Gowen *et al.*, 2007).

تصویربرداری ابرطیفی مجموعه اطلاعات طیفی و مکانی (تصویر) که معمولاً با روش‌های طیف‌سنجی و تصویربرداری معمولی به تنهایی به دست نمی‌آیند را در اختیار می‌گذارد. این اطلاعات شامل اندازه‌گیری شدت انعکاس نور از صفحه در یک یا چند طول موج می‌باشد. تصویربرداری ابرطیفی اطلاعات طیفی و مکانی شیء را در یک زمان در اختیار می‌گذارد (Sun, 2010). محتوای اطلاعاتی قوی و توانایی شناخت برجسته توسط تصویربرداری ابرطیفی، این روش را برای بسیاری از کاربردها مناسب می‌سازد. تحقیقات مختلفی در ارتباط با کاربرد تصویربرداری ابرطیفی در بررسی خصوصیات کیفی دانه‌ها انجام شده است که از جمله آن‌ها می‌توان به تحقیق Cogdill *et al.*, 2004; Weinstock *et al.*, 2006; Monteiro *et al.*, 2007; Zhu *et al.*, 2007; Mahesh *et al.*, 2008; Nakariyakul and Casasent, 2011 اشاره کرد. Cogdill *et al.*, 2004

- 1- Pre-processing
- 2- Standard Normal Variate transformation (SNV)
- 3- Multiplicative Scatter (MSC)
- 4- The ratio of the standard deviation of the response variable to the RMSEP (RPD)
- 5- Quadratic Discriminant Analysis (QDA)
- 6- Linear Discriminant Analysis (LDA)

افزایش بهره‌وری، صحت و دقت ارزیابی و احتمالاً کاهش قیمت تمام شده محصول می‌شود.

## مواد و روش‌ها

### ۱- آماده‌سازی پسته

مواد اولیه شامل پسته خشک واریته فندق (اوحدی) که در شهریور ۱۳۹۱ از یکی از تولیدکننده‌های خشکبار مشهد خریداری شد؛ نمک طعام خوراکی با درجه خلوص ۹۹/۹ درصد و آب بودند. نسبت وزنی مغز به دانه پسته‌ها ۶۶ g/۱۰۰g و میانگین رطوبت آنها ۲/۹ درصد بود. در ابتدا ناخالصی‌های موجود در پسته‌ها شامل دانه‌های شکسته، پوک و نارس به روش دستی حذف شده، سپس نمونه‌ها تا زمان اعمال فرآیند در یخچال نگهداری شدند. حدود یک ساعت قبل از انجام فرآیند، نمونه‌ها از یخچال خارج شده و دمای آنها به درجه حرارت محیط می‌رسید.

### ۲- برشته کردن دانه‌های پسته

برای برشته کردن نمونه‌ها ابتدا محلول ۲۰٪ نمک طعام تهیه شد. برای آماده‌سازی هر نمونه ۱ کیلوگرم پسته به مدت ۲۰ دقیقه در ۵ لیتر محلول آب نمک قرار گرفت (Goktas Seyhan, 2003). در طی این مدت نمونه‌ها به آرامی و با سرعت یکنواخت هم زده می‌شدند. در مرحله بعد، نمونه‌ها آب‌کشی شدند تا آب نمک اضافه آنها خارج شود. سپس خشک کردن پسته‌ها با فیلتر پارچه‌ای به مدت ۱۰ دقیقه انجام گرفت. برشته کردن پسته‌ها در دماهای (۹۰، ۱۲۰ و ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد)، زمان‌های (۲۰، ۳۵ و ۵۰ دقیقه) و سرعت‌های مختلف جریان هوا (۰/۵، ۱/۵ و ۲/۵ متر بر ثانیه) انجام گرفت. بنابراین ۲۷ نمونه مختلف پسته در شرایط مختلف برشته شدند. برشته کردن نمونه‌ها توسط آون (CFS400، فن آزما گستر، تهران، ایران) انجام گرفت. این آون به سیستم کنترل سرعت جریان هوا مجهز شده بود. بعد از برشته کردن، نمونه‌ها تا دمای محیط (۲۰±۲) درجه سانتی‌گراد سرد شدند. سپس در پلاستیک‌های پلی اتیلنی بسته‌بندی شده و تا زمان انجام آزمایشات نگهداری شدند.

### ۳- تعیین درصد رطوبت

برای تعیین درصد رطوبت به روش وزنی عمل شد، بدین ترتیب که ۳ گرم از نمونه در دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد در آون ساخت شرکت فن آزما گستر قرار می‌گرفت تا به وزن ثابت برسد. درصد رطوبت با استفاده از رابطه (۱) به دست آمد:

$$\text{درصد وزنی رطوبت} = 100 \times \left[ \frac{M_1 - M_2}{M_1 - M} \right] \quad (1)$$

$M_1$  وزن ظرف همراه با نمونه قبل از خشک کردن  
 $M_2$  وزن ظرف همراه با نمونه بعد از خشک کردن  
 $M$  وزن ظرف خالی

### ۴- آزمون فشاری

برای انجام آزمون فشاری و تعیین سختی (حداکثر نیرو در تغییر شکل نهایی (هدف) در منحنی نیرو - جابه‌جایی)، پروب استوانه‌ای شکل به قطر ۳۵ میلی‌متر، با سرعت ۳۰ میلی‌متر بر دقیقه و عمق نفوذ ۲ میلی‌متر مورد استفاده قرار گرفت. کلیه آزمون‌های بافتی در دمای اتاق (۲۵ درجه سانتی‌گراد) و با استفاده از دستگاه بافت سنج CNS Farnell Com., U.K. انجام گرفت.

### ۵- ثبت تصاویر ابرطیفی از دانه‌های پسته

جهت دستیابی به تصاویر ابرطیفی انعکاسی مغزهای پسته برشته شده، از دستگاه Spectrograph model: ImSpector V10, Oulu, Finland استفاده شد. این دستگاه قادر به تصویربرداری از نمونه‌ها در محدوده طول موج ۱۰۰۰ - ۴۰۰ نانومتر می‌باشد. شکل ۱ سیستم تصویربرداری ابرطیفی مورد استفاده در این تحقیق را نشان می‌دهد.

### ۶- پیش پردازش داده‌ها و مدل سازی

داده‌های به دست آمده از تصاویر ابرطیفی دارای نویزهایی می‌باشند که برای به دست آوردن مدل، کالیبراسیون دقیق و قابل اعتماد، انجام پیش‌پردازش و حذف نویزها ضروری است. برای این منظور از جدیدترین روش‌های پیش‌پردازش شامل مشتق‌گیری اول و دوم، فیلترهای میانگین<sup>۱</sup> و الگوریتم ساویتزکی - گالی<sup>۲</sup>، موجک<sup>۳</sup>، تبدیل متغیر نرمال استاندارد و تصحیح پخش افزایشده استفاده شد. مشتق‌گیری اول و دوم برای جدا کردن پیک‌های همپوشانی شده و تصحیح خطوط انتهایی به کار می‌رود. مشتق‌گیری باعث افزایش تفکیک‌پذیری طیفی و افزایش نسبت سیگنال - موج می‌شود (Williams et al., 2009). جهت حذف نویزهای اتفاقی در طیف‌ها روش‌های هموارسازی مختلفی ارائه شده‌اند که از جمله آنها می‌توان به فیلترهای میانگین و الگوریتم ساویتزکی - گالی اشاره کرد. گرچه استفاده از این روش‌های هموارسازی باعث بهبود وضعیت ظاهری طیف می‌شود اما ممکن است باعث حذف اطلاعاتی شوند که در واقع مفید و قابل استفاده هستند (Nicolai et al., 2007).

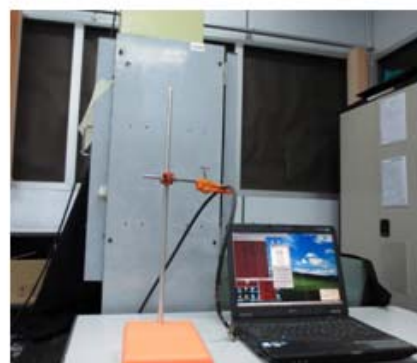
1- First derivative and second derivative  
 2- Median filter  
 3- Savitzky-Golay  
 4- Wavelet

مجموعه پیشگویی قرار گرفتند. پس از پیش‌پردازش آنالیز مؤلفه‌های اصلی انجام گرفت. با انجام آنالیز اجزای اصلی می‌توان نمونه‌های پرت را شناسایی و از مجموعه کالیبراسیون حذف کرد تا دقت مدل افزایش یابد. براساس نتایج به‌دست آمده یک نمونه نامناسب و پرت مشاهده شد که از بین داده‌ها حذف گردید. در مرحله بعد طیف‌های پیش‌پردازش شده جهت مدل‌سازی با روش شبکه عصبی مصنوعی مورد استفاده قرار گرفتند. در روش شبکه عصبی مصنوعی از nftool نرم‌افزار MATLAB استفاده شد. در این تویلاکس لایه پنهان دارای تابع سیگموئیدی و لایه خروجی دارای تابع خطی می‌باشد. الگوریتم مورد استفاده در این تویلاکس برای آموزش شبکه از نوع پس انتشار لونبرگ-مارکواریت بود. با توجه به حجم بالای داده‌های ابرطیفی، از یک نورون در لایه مخفی برای پیشگویی داده‌ها استفاده شد. در روش شبکه عصبی مصنوعی، ۷۰٪ (۱۹ نمونه) از نمونه‌ها برای آموزش، ۱۵٪ جهت اعتبارسنجی (۴ نمونه) و ۱۵٪ (۴ نمونه) جهت آزمون مورد استفاده قرار گرفت. با توجه به حجم بالای داده‌های ابرطیفی، از یک لایه مخفی برای پیشگویی داده‌ها استفاده شد. در مرحله بعد مدل کالیبراسیون برای پیشگویی خصوصیات کیفی مغزهای پسته برشته شده تدوین شد. هدف از تدوین مدل، یافتن رابطه‌ای بین میزان نور منعکس شده از پسته و خصوصیات کیفی آن بود. پس از تدوین مدل کالیبراسیون بررسی توانایی مدل در پیشگویی و ارزیابی دقت آن اهمیت زیادی دارد. یکی از پارامترهایی که در این تحقیق برای اعتبارسنجی مدل استفاده شد ریشه میانگین مربعات خطای پیشگویی می‌باشد که این مقدار از رابطه (۲) به‌دست می‌آید.

$$RMSEP = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n_p} (\hat{y}_i - y_i)^2}{n_p}} \quad (2)$$

در این رابطه  $n_p$  تعداد نمونه‌های مجموعه پیشگویی،  $\hat{y}_i$  مقدار پیشگویی شده هر پارامتر برای نمونه  $i$ ام و  $y_i$  مقدار اندازه‌گیری شده برای نمونه  $i$ ام می‌باشد. ریشه میانگین مربعات خطای پیشگویی عدم قطعیت را که برای پیشگویی نمونه‌های بعدی مورد انتظار است، نشان می‌دهد. پارامتر دیگری که برای بررسی کیفیت مدل مورد استفاده قرار گرفت ضریب تبیین  $(R^2)$  بین مقادیر اندازه‌گیری شده توسط روش‌های مخرب و پیشگویی شده توسط مدل می‌باشد. سومین پارامتر که جهت ارزیابی مدل‌های ایجاد شده استفاده شد نسبت انحراف معیار متغیرهای پاسخ به ریشه میانگین مربعات خطای پیشگویی (RPD) می‌باشد.

یک مدل مناسب باید RMSEP پایین و  $R^2$  بالایی داشته باشد.



شکل ۱- سیستم تصویربرداری ابرطیفی  
Fig.1. Hyperspectral imaging system

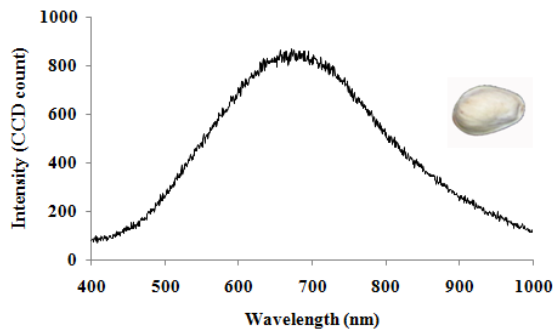
تبدیل متغیر نرمال استاندارد یک روش تصحیح پراکندگی است که وقتی فاصله مسیر مؤثر در بین مجموعه داده‌های نمونه‌ها تغییر کند، طیف‌ها را نرمالیزه می‌کند. تغییرات فاصله مسیر می‌تواند به‌علت گرانوله (دانه دانه) بودن نمونه‌ها باشد (Williams et al., 2009). هدف از روش تصحیح پخش افزاینده، حذف اثرات افزودنی جمع‌پذیر و ضربه‌پذیر در طیف‌ها برای به حداقل رساندن نوسانات طیفی است که ناشی از غلظت ماده مورد نظر نباشد (Williams et al., 2009). موجک یک روش رایج است که امروزه در علم کمومتریک و پردازش سیگنال مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این روش، سیگنال‌های خام به مجموعه‌ای از بلوک‌های سیگنال در فرکانس‌های مختلف تجزیه می‌شوند. ثابت‌های کوچک موجک نشان‌دهنده نویز و سیگنال‌های پس‌زمینه است که حذف می‌شوند (Yoon et al., 2002).

جهت ساخت مدل مناسب برای پیشگویی خصوصیات مغزهای پسته برشته شده از روش کمترین مربعات جزئی<sup>۱</sup> با تعداد فاکتور ۱ تا ۱۰ و روش شبکه عصبی مصنوعی استفاده شد. در روش رگرسیون کمترین مربعات جزئی جهت تدوین مدل مناسب، نمونه‌ها به دو دسته مجموعه کالیبراسیون و مجموعه پیشگویی تقسیم شدند. ۷۰٪ (۱۹ نمونه) از نمونه‌ها در مجموعه کالیبراسیون و ۳۰٪ (۸ نمونه) آن‌ها در

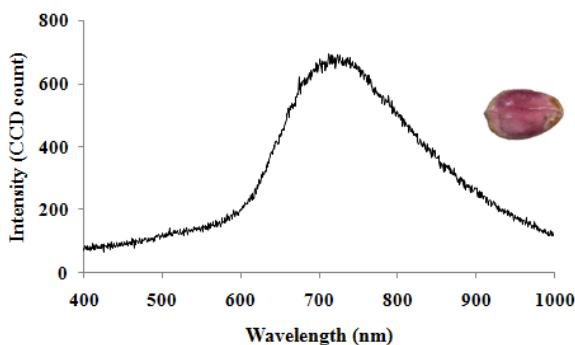
2- Coefficient of determination

1- Root Mean Square Error for Prediction

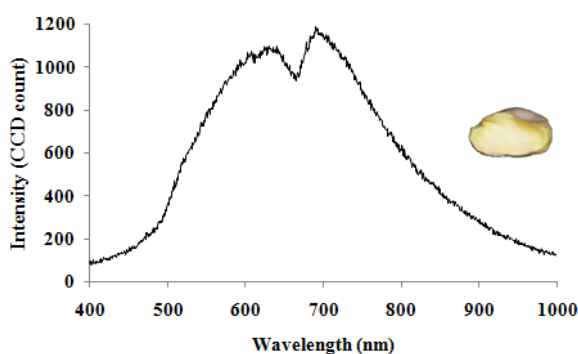
پیش‌پردازش برای رطوبت و سختی مغزهای پوسته برشته شده در شرایط مختلف در جدول‌های ۲ و ۳ آورده شده است.



شکل ۲- طیف انعکاسی پوسته چوبی پسته  
Fig.2. Reflectance spectra of pistachio shell



شکل ۳- طیف انعکاسی مغز پسته  
Fig.3. Reflectance spectra of whole pistachio kernel



شکل ۴- طیف انعکاسی قسمت داخلی مغز پسته  
Fig.4. Reflectance spectra of internal part of pistachio kernel

اگر هیچگونه پیش‌پردازشی انجام نشود ضریب تبیین برای رطوبت و سختی مقدار پایینی خواهد بود (جدول‌های ۲ و ۳). با انجام پیش‌پردازش، در برخی از مدل‌ها مقدار ضریب تبیین و RPD افزایش پیدا می‌کند و مقدار خطای پیشگویی کاهش می‌یابد. اما بررسی نتایج

علاوه بر این هر چه مقدار RPD بیشتر و تعداد فاکتورهای رگرسیون کمترین مربعات جزئی کمتر باشد مدل دارای کیفیت بهتری است. گزارش شده اگر مقدار RPD بین ۱/۵ تا ۲ باشد مدل توانایی مناسبی برای پیشگویی داده‌ها ندارد. اگر مقدار آن ۲/۵ - ۲ باشد، پیشگویی داده‌ها با مدل مورد نظر امکان‌پذیر است و اگر مقدار آن ۳ - ۲/۵ و یا بیشتر باشد مدل به‌صورت خوب و عالی توانایی پیشگویی داده‌ها را دارد (Nicolaï *et al.*, 2007; William and Sobering, 1996). در این تحقیق جهت جداسازی طیف نمونه‌های پسته از تصاویر ابرطیفی، نرم افزار ENVI به‌کار گرفته شد. برای پیش‌پردازش و مدل‌سازی داده‌ها هم از نرم‌افزارهای ParLeS و MATLAB استفاده شد.

## نتایج و بحث

### ۱- تفسیر طیف‌های ابرطیفی

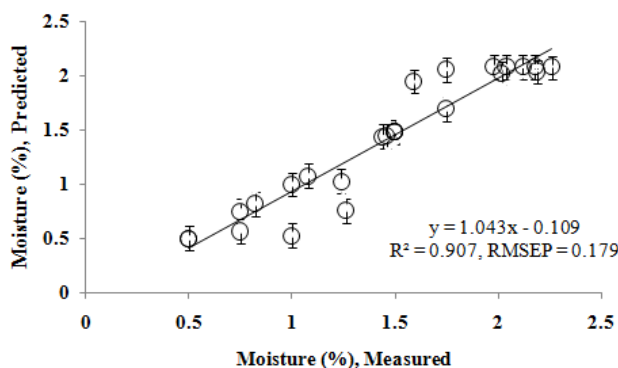
شکل‌های ۲ تا ۴ طیف مربوط به پوسته چوبی پسته، مغز پسته و قسمت داخلی مغز پسته را نشان می‌دهند. همانطور که مشاهده می‌شود شکل طیف مربوط به مغز پسته، پوسته چوبی پسته و قسمت داخلی مغز پسته متفاوت هستند. همانطور که در شکل ۴ ملاحظه می‌گردد طیف قسمت داخلی مغز پسته دارای دو قله تیز در محدوده طول موج‌های ۶۳۰ nm و ۶۹۰ nm می‌باشد؛ در حالی که طیف مربوط به مغز و پوسته چوبی پسته دارای یک نقطه بیشینه در محدوده طول موج‌های ۷۲۰ nm و ۶۷۰ nm می‌باشند و قله مربوط به مغز پسته تیزتر از پوسته چوبی می‌باشد. مشاهده می‌شود شدت انعکاس در قسمت‌های مختلف پوسته متفاوت است. بیشترین میزان شدت انعکاس مربوط به قسمت داخلی مغز پسته و کمترین مقدار آن مربوط به مغز پسته می‌باشد. همچنین مشاهده می‌شود طیف مربوط به مغز پسته در دامنه ۷۰۰ - ۵۰۰ nm نسبت به قسمت داخلی مغز و پوسته چوبی پسته دارای شیب بیشتری می‌باشد. Kim *et al.*, 2000 در تصویربرداری انعکاسی و فلورئوسانس از سیب توانستند یک قله تیز را در دامنه ۹۳۰ - ۴۳۰ nm شناسایی کنند. Weinstock *et al.*, 2006 در تصویربرداری انعکاسی دانه‌های ذرت در ۱۷۰۰ - ۹۵۰ nm سه نقطه بیشینه را در محدوده ۱۰۰۰ nm، ۱۲۰۰ nm و ۱۴۵۰ nm مورد شناسایی قرار دادند.

### ۲- اثر روش‌های مختلف پیش‌پردازش و آنالیز بر

#### پیشگویی خصوصیات مغزهای پسته برشته شده

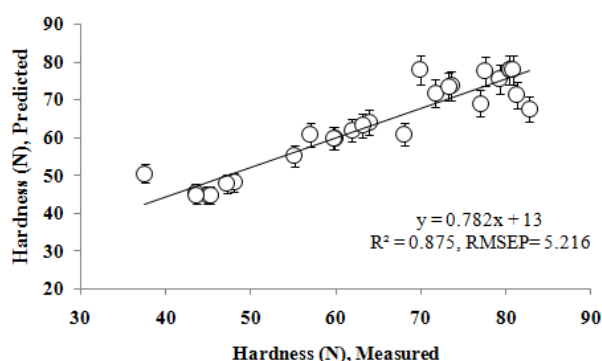
ویژگی‌های آماری مربوط به مجموعه‌های کالبراسیون و پیشگویی در جدول ۱ آورده شده است. نتایج مربوط به پیشگویی مدل‌های کمترین مربعات جزئی در ترکیب با روش‌های مختلف

نتایج مناسبی را نشان نداد. این نتایج مشابه نتایج به‌دست آمده در این تحقیق است. بهترین مدل دارای خطای اعتبار سنجی متقابل ۱/۲٪ و  $RPD = ۲/۷۴$  بود. نتایج نشان داد استفاده از تصاویر ابرطیفی در ناحیه مادون قرمز می‌تواند به‌خوبی برای پیشگویی میزان رطوبت دانه‌های ذرت به‌کار رود.



**شکل ۵-** نتایج پیشگویی رطوبت پسته‌های برشته شده با روش شبکه عصبی مصنوعی و با پیش‌پردازش‌های تبدیل متغیر نرمال استاندارد، موجک و مشتق اول

**Fig.5.** Scatter plot of measured versus predicted moisture content using SNV, Wavelet and  $D^1$



**شکل ۶-** نتایج پیشگویی سختی پسته‌های برشته شده با روش شبکه عصبی مصنوعی و با پیش‌پردازش‌های تبدیل متغیر نرمال استاندارد، موجک و مشتق دوم

**Fig.6.** Scatter plot of measured versus predicted hardness using SNV, Wavelet and  $D^2$

#### ۴- سختی

جدول ۳ نتایج استفاده از روش کمترین مربعات جزئی را جهت پیشگویی میزان سختی پسته‌های برشته شده نشان می‌دهد. بهترین مدل از ترکیب تبدیل متغیر نرمال استاندارد، موجک و مشتق اول، برای فاکتور دوم کمترین مربعات جزئی به‌دست آمد. مقدار  $RPD = ۱۰/۷۸$  و  $RMSEP = ۱/۴۸$  بود (جدول ۳).

پیشگویی شده نشان داد روش کمترین مربعات جزئی نمی‌تواند میزان رطوبت و سختی مغزهای پسته برشته شده را به‌خوبی پیشگویی کند. بنابراین جهت بررسی رطوبت و سختی مغزهای پسته برشته شده از روش شبکه عصبی مصنوعی استفاده شد. نتایج مربوط به پیشگویی شبکه عصبی مصنوعی در ترکیب با روش‌های مختلف پیش‌پردازش برای رطوبت و سختی مغزهای پسته برشته شده در شرایط مختلف در جدول‌های ۲ و ۳ آورده شده‌است. همانطور که مشاهده می‌شود نتایج به‌دست آمده در این حالت بسیار بهتر از نتایج حاصل از روش کمترین مربعات جزئی می‌باشد. در استفاده از شبکه عصبی مصنوعی هم با انجام پیش‌پردازش، در برخی از مدل‌ها مقدار ضریب تبیین افزایش پیدا کرد و مقدار خطای پیشگویی کاهش یافت. Cogdill و همکاران (۲۰۰۴) از تصویربرداری انتقالی مادون قرمز در دامنه طول موج nm  $۷۵۰ - ۱۰۹۰$  و روش‌های کمترین مربعات جزئی و رگرسیون مؤلفه‌های اصلی جهت تخمین میزان رطوبت دانه‌های ذرت استفاده کردند. نتایج به‌دست آمده از روش کمترین مربعات جزئی بهتر از روش رگرسیون مؤلفه‌های اصلی توانست برای پیشگویی رطوبت دانه‌های ذرت به‌کار رود.

#### ۳- رطوبت

جدول ۲ نتایج استفاده از روش کمترین مربعات جزئی و شبکه عصبی مصنوعی را جهت پیشگویی میزان رطوبت پسته‌های برشته شده نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود شبکه عصبی مصنوعی بهتر از روش کمترین مربعات جزئی می‌تواند برای پیشگویی میزان رطوبت پسته‌های برشته شده در شرایط مختلف به‌کار برده شود. استفاده از روش کمترین مربعات جزئی میزان RPD و ضریب تبیین پایینی را نشان داد (جدول ۲). در تمام موارد میزان RPD کمتر از ۱/۵ بود که نشان می‌دهد این روش دقت لازم برای پیشگویی رطوبت پسته‌های برشته شده را ندارد. نتایج به‌دست آمده از روش شبکه عصبی مصنوعی جهت پیشگویی میزان رطوبت پسته‌های برشته شده نشان داد بهترین مدل با انجام پیش‌پردازش‌های تبدیل متغیر نرمال استاندارد، موجک و مشتق اول به‌دست می‌آید که میزان ضریب تبیین ۰/۹۰۷ و میزان خطای پیشگویی ۰/۱۷۹ می‌باشد (جدول ۲ و شکل ۵). Cogdill و همکاران (۲۰۰۴) از تصویربرداری انتقالی مادون قرمز در دامنه طول موج nm  $۷۵۰ - ۱۰۹۰$  و روش‌های کمترین مربعات جزئی و رگرسیون مؤلفه‌های اصلی و روش‌های مختلف پیش‌پردازش شامل تبدیل متغیر نرمال استاندارد و تصحیح پخش افزاینده و تبدیل متغیر نرمال استاندارد برای پیشگویی میزان رطوبت در دانه‌های ذرت استفاده کردند. نتایج نشان داد استفاده از روش تبدیل متغیر نرمال استاندارد می‌تواند به‌خوبی برای پیشگویی میزان رطوبت به‌کار رود. اما استفاده از روش تصحیح پخش افزاینده

جدول ۱ - مشخصات آماری مجموعه های کالیبراسیون و پیشگویی در روش کمترین مربعات جزئی

Table 1- Statistics of both calibration and prediction sets for moisture content and hardness of roasted pistachio kernels

ویژگی Characteristic	Calibration set مجموعه کالیبراسیون					Prediction set مجموعه پیشگویی				
	میانگین Mean	انحراف معیار Standard deviation	میان Median	بیشینه Max	کمینه Min	میانگین Mean	انحراف معیار Standard deviation	میان Median	بیشینه Max	کمینه Min
رطوبت Moisture content (%)	1.61	0.49	1.50	2.26	0.50	1.26	0.45	1.26	1.98	0.75
سختی Hardness (N)	65.84	12.5	68.06	81.28	43.52	63.31	15.94	63.93	82.76	43.62

جدول ۲ - نتایج پیشگویی رطوبت پسته های برشته شده با استفاده از روش های مختلف پیش پردازش

Table 2- The prediction results of moisture content with different pre-processing techniques

Pre-processing پیش پردازش های اعمال شده	PLS کمترین مربعات جزئی				ANN شبکه عصبی مصنوعی	
	بهترین فاکتور No. of PLS factor	RPD	RMSEP	R <sup>2</sup>	RMSEP	R <sup>2</sup>
بدون پیش پردازش Original data	4	0.57	0.787	0.242	0.238	0.816
تبدیل متغیر نرمال استاندارد، فیلتر میانی، مشتق اول SNV, Median filter, D <sup>1</sup>	5	0.94	0.478	0.473	0.238	0.804
تصحیح پخش افزایشده، فیلتر میانی، مشتق اول MSC, Median filter, D <sup>1</sup>	5	0.98	0.459	0.478	0.219	0.824
تبدیل متغیر نرمال استاندارد، فیلتر میانی، مشتق دوم SNV, Median filter, D <sup>2</sup>	5	0.46	0.982	0.528	0.376	0.530
تصحیح پخش افزایشده، فیلتر میانی، مشتق دوم MSC, Median filter, D <sup>2</sup>	4	0.45	1.005	0.525	0.292	0.690
تبدیل متغیر نرمال استاندارد، موجک، مشتق اول SNV, Wavelet, D <sup>1</sup>	4	0.85	0.524	0.517	0.179	0.907
تصحیح پخش افزایشده، موجک، مشتق اول MSC, Wavelet, D <sup>1</sup>	1	1	0.448	0.251	0.244	0.820
تبدیل متغیر نرمال استاندارد، موجک، مشتق دوم SNV, Wavelet, D <sup>2</sup>	9	0.78	0.572	0.051	0.284	0.742
تصحیح پخش افزایشده، موجک، مشتق دوم MSC, Wavelet, D <sup>2</sup>	5	0.39	1.153	0.055	0.314	0.689
تبدیل متغیر نرمال استاندارد، ساویتزکی، مشتق اول SNV, Savitzky-Golay, D <sup>1</sup>	2	0.84	0.535	0.432	0.269	0.767
تصحیح پخش افزایشده، ساویتزکی، مشتق اول MSC, Savitzky-Golay, D <sup>1</sup>	2	0.89	0.505	0.333	0.308	0.676
تبدیل متغیر نرمال استاندارد، ساویتزکی، مشتق دوم SNV, Savitzky-Golay, D <sup>2</sup>	1	0.74	0.605	0.226	0.199	0.873
تصحیح پخش افزایشده، ساویتزکی، مشتق دوم MSC, Savitzky-Golay, D <sup>2</sup>	1	1.04	0.432	0.233	0.130	0.767

## جدول ۳- نتایج پیشگویی سختی پسته‌های برشته شده با استفاده از روش‌های مختلف پیش‌پردازش

Table 3- The prediction results of hardness with different pre-processing techniques

Pre-processing پیش‌پردازش‌های اعمال شده	PLS کمترین مربعات جزئی			ANN شبکه عصبی مصنوعی		
	بهترین فاکتور No. of PLS factor	RPD	RMSEP	R <sup>2</sup>	RMSEP	R <sup>2</sup>
بدون پیش‌پردازش Original data	4	1.49	10.700	0.514	6.567	0.820
تبدیل متغیر نرمال استاندارد، فیلتر میانی، مشتق اول SNV, Median filter, D <sup>1</sup>	2	1.33	12.090	0.454	6.737	0.774
تصحیح پخش افزایشده، فیلتر میانی، مشتق اول MSC, Median filter, D <sup>1</sup>	2	1.33	12.016	0.462	8.276	0.662
تبدیل متغیر نرمال استاندارد، فیلتر میانی، مشتق دوم SNV, Median filter, D <sup>2</sup>	7	0.31	52.089	0.353	8.563	0.630
تصحیح پخش افزایشده، فیلتر میانی، مشتق دوم MSC, Median filter, D <sup>2</sup>	7	0.30	52.938	0.362	5.260	0.860
تبدیل متغیر نرمال استاندارد، موجک، مشتق اول SNV, Wavelet, D <sup>1</sup>	2	1.48	10.780	0.643	7.246	0.742
تصحیح پخش افزایشده، موجک، مشتق اول MSC, Wavelet, D <sup>1</sup>	1	1.15	13.888	0.344	12.771	0.645
تبدیل متغیر نرمال استاندارد، موجک، مشتق دوم SNV, Wavelet, D <sup>2</sup>	2	0.47	33.878	0.003	5.216	0.876
تصحیح پخش افزایشده، موجک، مشتق دوم MSC, Wavelet, D <sup>2</sup>	4	0.27	58.558	0.536	9.943	0.518
تبدیل متغیر نرمال استاندارد، ساویتزکی، مشتق اول SNV, Savitzky-Golay, D <sup>1</sup>	1	0.94	16.970	0.434	6.190	0.821
تصحیح پخش افزایشده، ساویتزکی، مشتق اول MSC, Savitzky-Golay, D <sup>1</sup>	2	1.40	11.393	0.453	8.898	0.641
تبدیل متغیر نرمال استاندارد، ساویتزکی، مشتق دوم SNV, Savitzky-Golay, D <sup>2</sup>	1	0.90	17.710	0.455	6.562	0.787
تصحیح پخش افزایشده، ساویتزکی، مشتق دوم MSC, Savitzky-Golay, D <sup>2</sup>	1	1.13	14.051	0.361	7.700	0.735

نرمی دانه‌های ذرت استفاده کردند. میزان خطای پیشگویی در ناحیه ۱۶۶۲-۹۶۰ نانومتر ۰/۱۸ و در ناحیه ۲۴۹۸-۱۰۰۰ نانومتر ۰/۲۹ بود. نتایج نشان داد این روش به خوبی می‌تواند برای طبقه‌بندی دانه‌های ذرت براساس میزان سختی به کار رود.

## نتیجه‌گیری

در این تحقیق کاربرد تصویربرداری ابرطیفی و روش‌های آنالیز چند متغیره شامل رگرسیون کمترین مربعات جزئی و شبکه عصبی مصنوعی جهت پیشگویی میزان رطوبت و سختی مغزهای پسته برشته شده در دما، زمان و سرعت‌های مختلف جریان هوا مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد استفاده از روش‌های مختلف پیش‌پردازش می‌تواند باعث کاهش خطای پیشگویی و بهبود کیفیت

اما این مدل به علت مقدار پایین R<sup>2</sup> و RPD و مقدار بالای خطای پیشگویی نمی‌تواند میزان سختی پسته‌های برشته شده را پیش‌بینی کند. نتایج به دست آمده از روش شبکه عصبی مصنوعی جهت پیشگویی سختی پسته‌های برشته شده در جدول ۳ آورده شده است. بهترین مدل با انجام پیش‌پردازش‌های تبدیل متغیر نرمال استاندارد، موجک و مشتق دوم به دست آمد که میزان ضریب تبیین ۰/۸۷۶ و میزان خطای پیشگویی ۵/۲۱۶ بود (جدول ۳ و شکل ۶). همانطور که مشاهده می‌شود شبکه عصبی مصنوعی بهتر از روش کمترین مربعات جزئی می‌تواند برای پیشگویی سختی پسته‌های برشته شده در شرایط مختلف به کار برده شود. Williams و همکاران (۲۰۰۹) از تصویربرداری ابرطیفی در ناحیه‌های ۲۴۹۸-۱۰۰۰ و ۱۶۶۲-۹۶۰ nm و روش PLS-DA برای تشخیص میزان سختی و



مدل به‌دست آمده شود. بررسی نتایج پیشگویی شده نشان داد روش شبکه عصبی مصنوعی بهتر از روش کمترین مربعات جزئی می‌تواند برای پیشگویی میزان رطوبت و سختی مغزهای پسته برشته شده

## منابع

1. Cogdill, R. P., Jr. C. R. Hurburgh, and G. R. Rippke. 2004. Single-kernel maize analysis by near-infrared hyperspectral imaging. Transactions of the ASABE 47 (1): 311-320.
2. Food and Agriculture Organization of the United Nations. 2013. Available from: <http://www.fao.org>.
3. Goktas Seyhan, F. 2003. Effect of soaking on salting and moisture uptake of pistachio nuts (*Pistachiavera* L.) from Turkiye. GIDA 28 (4): 395-400.
4. Gowen, A. A., C. P. O'Donnell, P. J. Cullen, G. Downey, and J. M. Frias. 2007. Hyperspectral imaging – an emerging process analytical tool for food quality and safety control. Trends in Food Science & Technology 18: 590-598.
5. Kashaninejad, M., A. Mortazavi, A. Safekordi, and L. G. Tabil. 2005. Some physical properties of pistachio (*Pistachio Vera* L.) nut and its kernel. Journal of Food Engineering 72 (1): 30-38.
6. Kim, M. S., Y. R. Chen, and P. M. Mehl. 2000. Hyperspectral reflectance and fluorescence imaging system for food quality and safety. American Society of Agricultural Engineers 44 (3): 721-729.
7. Mahesh, S., A. Manickavasagan, D. S. Jayas, J. Paliwal, and N. D. G. White. 2008. Feasibility of near-infrared hyperspectral imaging to differentiate Canadian wheat classes. Biosystems engineering July: 50-57.
8. Maghsudi, Sh. 2010. Pistachio (agricultural, industry, nutrition and treatment). Iran Agricultural science Publishing Inc., Iran. (In Farsi).
9. Monteiro, S. T., Y. Minekawa, Y. Kosugi, T. Akazawa, and K. Oda. 2007. Prediction of sweetness and amino acid content in soybean crops from hyperspectral imagery. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing 62: 2-12.
10. Nakariyakul, S., and D. P. Casasent. 2011. Classification of internally damaged almond nuts using hyperspectral imagery. Journal of Food Engineering 103: 62-67.
11. Nicolaï, B. M., K. Beullens, E. Bobelyn, A. Peirs, W. Saeys, K. Theron, and J. Lammertyn. 2007. Nondestructive measurement of fruit and vegetable quality by means of NIR spectroscopy: a review. Postharvest Biology and Technology 46: 99-118.
12. Ozdemir, M. 2001. Mathematical analysis of color changes and chemical parameters of roasted hazelnuts. Ph.D Thesis.
13. Pangan. Available from: <http://pangan12.blogfa.com/post-558.aspx>. Visited: 2011.
14. Sun, D.W. 2010. Hyperspectral imaging for food quality analysis and control. Academic press is an imprint of Elsevier.
15. Weinstock, B. A., J. Janni, L. Hagen, and S. Wright. 2006. Prediction of oil and oleic acid concentrations in individual corn (*Zea mays* L.) kernels using near infrared reflectance hyperspectral imaging and multivariate analysis. Applied Spectroscopy 60 (1): 9-16.
16. William, P. C., and D. G. Sobering. 1996. How do we do it: a brief summary of the method we use in developing near infrared calibrations. In: Davies, A.M.C., Williams, P. (Eds.), Near Infrared Spectroscopy: The Future Waves. The Proceeding of the Seventh International Conference on Near Infrared Spectroscopy. Montreal, pp.185-188.
17. Williams, P., P. Geladi, G. Fox, and M. Manley. 2009. Maize kernel hardness classification by near infrared (NIR) hyperspectral imaging and multivariate data analysis. Analytica Chimica Acta 653: 121-130.
18. Yoon, J., B. Lee, and C. Han. 2002. Calibration transfer of near-infrared spectra based on compression of wavelet coefficients. Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems 64: 1-14.
19. Zhu, B., L. Jiang, F. Jin, L. Qin, A. Vogel, and Y. Tao. 2007. Sens & Instrumen. Food Quality 1: 123-131.

## Vis-NIR hyperspectral imaging and multivariate analysis for prediction of the moisture content and hardness of Pistachio kernels roasted in different conditions

T. Mohammadi Moghaddam<sup>1</sup> - S. M. A. Razavi<sup>2</sup> - M. Taghizadeh<sup>3</sup> - A. Sazgarnia<sup>4\*</sup> - B. Pradhan<sup>5</sup>

Received: 21-11-2013

Accepted: 25-01-2014

**Introduction:** Pistachio nut is one of the most delicious and nutritious nuts in the world and it is being used as a salted and roasted product or as an ingredient in snacks, ice cream, desserts, etc. (Maghsudi, 2010; Kashaninejad *et al.* 2006). Roasting is one of the most important food processes which provides useful attributes to the product. One of the objectives of nut roasting is to alter and significantly enhance the flavor, texture, color and appearance of the product (Ozdemir, 2001). In recent years, spectral imaging techniques (i.e. hyperspectral and multispectral imaging) have emerged as powerful tools for safequality inspection of various agricultural commodities (Gowen *et al.*, 2007). The objectives of this study were to apply reflectance hyperspectral imaging for non-destructive determination of moisture content and hardness of pistachio kernels roasted in different conditions.

**Materials and methods:** Dried O'hadi pistachio nuts were supplied from a local market in Mashhad. Pistachio nuts were soaked in 5L of 20% salt solution for 20min (Goktas Seyhan, 2003). For roasting process, three temperatures (90, 120 and 150°C), three times (20, 35 and 50 min) and three air velocities (0.5, 1.5 and 2.5 m s<sup>-1</sup>) were applied. The moisture content of pistachio kernels was measured in triplicate using oven drying (3 gr samples at 105 °C for 12 hours). Uniaxial compression test by a 35mm diameter plastic cylinder, was made on the pistachio kernels, which were mounted on a platform. Samples were compressed at a depth of 2mm and speed of 30 mm min<sup>-1</sup>. A hyperspectral imaging system in the Vis-NIR range (400-1000 nm) was employed. The spectral pre-processing techniques: first derivative and second derivative, median filter, Savitzkye-Golay, wavelet, multiplicative scatter correction (MSC) and standard normal variate transformation (SNV) were used. To make models at PLSR and ANN methods, ParLeS software and Matlab R2009a were used, respectively. The coefficient of determination (R<sup>2</sup>), the root mean square error of prediction (RMSEP) and the ratio of the standard deviation of the response variable to RMSEP (known as relative performance determinant (RPD)) were calculated.

### Results and discussion:

**Interpretation of hyperspectral data:** The results showed that the spectra of the shell, the whole kernel and the internal part of the kernel have different patterns. The internal part of the kernel had 2 peaks at 630 nm and 690 nm, while the shell and the whole kernel had 1 peak at 670 nm and 720 nm, respectively and the peak of the whole kernel was sharper than that of the shell. The highest and lowest intensities were for the internal part of the kernel and the whole kernel, respectively. The spectral slope of the internal part is higher than that of the shell and the whole kernel at 500-700 nm.

**The effect of different pre-processing techniques and analysis on prediction of pistachio kernels properties:** In the absence of pre-processing techniques, low correlation coefficients were observed for prediction of moisture content and hardness. However, with the use of pre-processing techniques, in some models, correlation coefficient and RPD increased and the RMSEP decreased. The results revealed that ANN models would predict moisture content and textural characteristics of roasted pistachio kernels better than PLSR models.

**Moisture content:** ANN models can predict moisture content of roasted pistachio kernels better than PLSR models. In total, PLSR models showed low RPD and R<sup>2</sup>. For all samples, RPD was lower than 1.5, indicating that the developed models do not give an accurate prediction for moisture content. The best results with ANN method were achieved using a combination of SNV, wavelet and D<sup>1</sup> for predicting moisture content with R<sup>2</sup>=0.907 and RMSEP=0.179.

**Hardness:** The results indicated that ANN models can predict the hardness better than PLSR models. The best results with PLSR models were achieved using a combination of SNV, wavelet and D1 with R<sup>2</sup>= 0.643, RMSEP=10.78, RDP= 1.48 and 2 PLSR factors. However, due to high RMSEP and low R<sup>2</sup> and RPD, it can be mentioned that prediction of

1, 2 & 3- Graduated PhD Student, Prof., and Assistant Professor respectively, Department of Food Science and Technology, Ferdowsi University of Mashhad (FUM)

4- Associate Professor, Department of Medical Physics, Faculty of Medicine, Mashhad University of Medical Sciences

5- Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University Putra Malaysia

(\*- Corresponding Author Email: Sazgarniaa@mums.ac.ir)

hardness values with ANN model was not sufficiently desirable. However it was better than the PLSR models. The best results with ANN models were achieved using a combination of SNV, wavelet and  $D^2$  with  $R^2=0.876$  and  $RMSEP=5.216$ .

**Conclusions:** The results of this study showed that employing pre-processing methods causes a decrease in prediction error and improves the quality of the models. ANN models could predict moisture content and hardness of roasted pistachio kernels better than the PLSR models.

**Keywords:** Compression test, Hyperspectral images, Pistachio, Roasting