



بررسی فرآیند خشک کردن همرفت برش های سیب: بررسی تغییرات دمایی نمونه با استفاده از ترموگرافی

مادون قرمز

آتنا پاسبان^{۱،*}، محبت محبی^{۱*}، حسن صدرنیا^۳، سید احمد شهیدی^۴

۱- گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

۲- گروه علوم تغذیه، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی خراسان شمالی، بجنورد، ایران.

۳- گروه مکانیک بیوسیستم ها، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

۴- گروه علوم و صنایع غذایی، واحد آیت الله آملی، دانشگاه آزاد اسلامی، آمل، ایران.

اطلاعات مقاله	چکیده
تاریخ های مقاله :	یکی از جنبه های مهم فناوری خشک کردن مواد غذایی، بررسی تغییرات رطوبت و دما نمونه طی فرآیند خشک کردن می باشد. بررسی تغییرات دمایی نمونه غالباً با وسایلی نظیر ترموکوپل و دماسنج صورت میگیرد. در این پژوهش ترموگرافی مادون قرمز جهت بررسی تغییرات دمایی برش های سیب طی فرآیند خشک کردن بکار گرفته شد. تغییرات دمای نمونه در طی فرآیند خشک کردن در دمای ۶۰ و ۸۰ درجه سانتی گراد با استفاده از ترموکوپل نوع T و ترموگرافی مادون قرمز اندازه گیری شد. هم چنین تغییرات محتوای رطوبت برش های سیب طی فرایند خشک کردن اندازه گیری و منحنی خشک کردن بررسی شد. نتایج حاصل از این بررسی نشان داد که ترموگرافی مادون قرمز ابزار مناسبی است که قادر است بصورت غیر مستقیم و بدون تماس با نمونه روند تغییرات دمایی نمونه را طی فرآیند خشک کردن بخوبی اندازه گیری نماید. بررسی منحنی تغییرات محتوای رطوبت در دمای ۶۰ و ۸۰ درجه سانتی گراد نشان داد که با افزایش دمای خشک کردن سرعت انتقال جرم و حرارت افزایش، و مدت زمان فرایند خشک شدن کاهش به طور قابل توجهی کاهش می یابد.
کلمات کلیدی:	
ترموگرافی مادون قرمز،	
تغییرات دمایی،	
تغییرات محتوای رطوبت،	
خشک کردن،	
سیب.	
DOI: 10.22034/FSCT.19.128.353 DOR: 20.1001.1.20088787.1401.19.128.14.9	
* مسئول مکاتبات:	
m-mohebbi@um.ac.ir	

۱- مقدمه

فرآیند خشک کردن میوه‌ها و سبزیجات بخش مهمی از صنعت غذا را تشکیل می‌دهد. خشک کردن یکی از قدیمی‌ترین روش‌های شناخته شده نگهداری ماده غذایی است که از طریق کاهش آب ماده غذایی و در نتیجه کاهش فعالیت‌های میکروبی و آنزیمی، فسادپذیری مواد غذایی را کاهش و مدت زمان ماندگاری مواد غذایی را افزایش می‌دهد. علاوه بر این خروج آب از محصول خشک شده و در نتیجه وزن و حجم کمتر محصول خشک شده نسبت به محصول تازه، سبب کاهش هزینه‌های نگهداری، بسته‌بندی، توزیع و حمل و نقل ماده غذایی می‌گردد [۱].

خشک کردن فرآیند حذف رطوبت از طریق انتقال همزمان جرم (رطوبت) و حرارت در ماده غذایی است. بنابراین بررسی تغییرات رطوبت و حرارت طی فرآیند خشک کردن، امکان بررسی و کنترل فرآیند خشک کردن و بدنبال آن بهبود سطح کیفی محصول خشک شده را فراهم می‌آورد. به طور کلی اندازه گیری دما غالباً با استفاده از ابزارهایی نظیر دماسنج، ترموکوپل، دماسنج الکترونیک صورت می‌گیرد که تنها قادرند درجه حرارت را در نقاط معینی از نمونه اندازه گیری نمایند هم چنین بسیاری از این ابزارها جهت اندازه گیری دما بایستی در تماس با ماده مورد نظر باشند. در طول زمان، محققین بدنبال فناوری های جدید، جهت بررسی خصوصیات مواد غذایی می‌باشند. ترموگرافی مادون قرمز (تصویر برداری حرارتی مادون قرمز) تکنیک جدیدی است که قادر است بدون تماس با جسم، پرتوهای مادون قرمز ساطع شده توسط یک شی را به داده های درجه حرارت تبدیل و بصورت تصویری قابل مشاهده به نام ترموگرام که توزیع دما در آن جسم را نشان می‌دهد ارائه نماید. ترموگرافی مادون قرمز را می‌توان در همه زمینه‌ها که در آن اختلاف درجه حرارت جهت ارزیابی، تشخیص، و یا تجزیه و تحلیل فرآیند و یا محصول مورد استفاده قرار می‌گیرد بکار برد. محققان در حال بررسی پتانسیل استفاده از تصویر برداری حرارتی در مراحل مختلف در کشاورزی و صنایع غذایی به دلیل مزایای متعدد آن می‌باشند. برخی از مزایای ترموگرافی مادون قرمز عبارتند از: قابلیت اندازه گیری و نمایش توزیع دمای تمامی سطح اجسام بصورت تصاویر رنگی، قابلیت

اندازه گیری تغییرات دما در یک جسم یا پدیده در طی زمان، قابلیت اندازه گیری دما برای یک جسم در حال حرکت و یا در مواردی که نزدیک شدن به جسم خطرناک باشد، قابلیت اندازه گیری دما از راه دور و بدون تماس با نمونه (جلوگیری از تخریب نمونه و رعایت مسائل بهداشتی)، حمل آسان، سرعت بالای تصویر برداری (۵۰ تا ۶۰ تصویر در ثانیه). از محدودیت ترموگرافی مادون قرمز هزینه بالای تجهیزات و نمایش تنها اطلاعات دمایی مربوط به سطح اجسام می‌باشد [۲-۵].

اساس کار ترموگرافی مادون قرمز بر این اصل می باشد که براساس قانون استفان بولتزمن تمامی اجسام در دماهای بالاتر از صفر مطلق (273°K) امواج مادون قرمز را که بخشی از امواج طیف الکترومغناطیس هستند را از خود ساطع می‌کنند. در این روش دوربین‌های دمانگار تابش فروسرخ طیف الکترومغناطیسی را دریافت کرده و از آنها دمانگاشت تهیه می‌کنند. شدت امواج مادون قرمز تابش شده از یک شیء تابعی از درجه حرارت سطح و ضریب نشر جسم است [۶].

ترموگرافی مادون قرمز بطور گسترده ای جهت بررسی تغییرات دمایی در فرآیندهای حرارتی مختلف در صنعت غذا بکار گرفته شده است.

گادکن و همکاران، ترموگرافی مادون قرمز را در محدوده طیفی ۸ تا ۱۲ میکرومتر جهت کنترل درجه حرارت سطح مواد غذایی طی پختن در مایکروویو مورد بررسی قرار دادند. این محققین با استفاده از یک سیستم تصویربرداری مادون قرمز دستگاهی طراحی کردند که می تواند درجه حرارت مواد غذایی به طور مداوم در در یک اجاق مایکروویو نمایش دهد [۷].

مانیکاواساگان و همکاران، میزان غیریکنواختی درجه حرارت سطح دانه‌ها را طی حرارت دادن در یک خشک‌کن مایکروویو صنعتی با استفاده از ترموگرافی مادون قرمز مورد بررسی قرار دادند [۸]. ویداوامبال و همکاران، ترموگرافی مادون قرمز را جهت تعیین نقاط داغ و سرد درون محفظه مایکروویو در طی فرآیند گرم کردن چاودار و جو بکار بردند [۹]. کوکورولو و همکاران، یک سیستم خشک کردن مبتنی بر مایکروویو و مجهز به دوربین مادون قرمز جهت خشک کردن برش‌های سیب طراحی نمودند [۱۰]. ترافانوشیفو و همکاران، سینتیک خشک کردن گوشت ران

نگهداری شد. فرآیند خشک کردن توسط خشک کن غیر مداوم کابینتی با جریان هوای داغ، مجهز به سیستم کنترل دما صورت پذیرفت. فرآیند خشک کردن در دماهای ۶۰ و ۸۰ درجه سانتی گراد و سرعت جریان هوای داغ ۰/۱ متر بر ثانیه انجام شد. سرعت جریان هوای داغ درون خشک کن توسط سرعت سنج هوا (Testo 425, Germany) که درون محفظه خشک کن قرار داده شده بود، اندازه گیری شد. قبل از هر بار آزمون تعداد مورد نیاز سیب از یخچال خارج شده و پس از رسیدن به دمای محیط، به قطعات مکعب مستطیل شکل با ابعاد ۲×۲×۱ سانتی متر برش داده شدند. تغییرات دمای نمونه توسط ترموکوپل نوع T (RS component, UK) با قطر پروب ۰/۳ میلی متر که در سطح نمونه قرار داده شده بود اندازه گیری شد. داده های حاصل از اندازه گیری دما توسط ترموکوپل، توسط یک داده خوان (Pico technology USB TC-08 data logger, RS component, UK) متصل به رایانه در فواصل زمانی ۱۰ ثانیه ثبت گردید. جهت اندازه گیری تغییرات رطوبت، نمونه مورد نظر بر روی ترازوی دیجیتال با دقت 0.01 g، قرار داده شده و تغییرات وزن در فواصل زمانی ۱۰ ثانیه توسط ترازوی دیجیتال اندازه گیری و در رایانه ثبت شد.

۲-۲- اندازه گیری محتوای رطوبت اولیه

محتوای رطوبت اولیه برش های سیب مطابق با استاندارد در آن با دمای ۱۰۵ درجه سانتی گراد به مدت ۲۴ ساعت اندازه گیری شد. میانگین محتوای رطوبت اولیه نمونه ۸۳/۵٪ اندازه گیری شد [۱۵].

۲-۳- بررسی تغییرات دمای نمونه طی خشک-

کردن با استفاده از ترموگرافی مادون قرمز

سیستم های تصویربرداری حرارتی مادون قرمز غالباً از دوربین های حرارتی مجهز به آشکارساز مادون قرمز، واحد پردازش سیگنال و سیستم اکتساب تصویر، که معمولاً یک کامپیوتر است، تشکیل می شوند. آشکارسازهای مادون قرمز انرژی مادون قرمز ساطع شده از جسم را جذب کرده و آن را به سیگنال الکتریکی تبدیل می کنند.

سیگنال الکتریکی در واحد پردازش سیگنال به مجموعه اطلاعاتی که یک ترموگرام را تشکیل می دهد تبدیل می شود. در انتها

خوک را توسط ترموگرافی مادون قرمز مورد مطالعه قرار دادند [۱۱].

فینو و همکاران، سیستمی جهت کنترل زمان خشک شدن سطح مرکبات با استفاده از تصویربرداری مادون قرمز مورد بررسی قرار دادند. خشک کردن سطح مرکبات یکی از مراحل مهم در کارخانجات فرآوری میوه های تازه می باشد. نتایج این پژوهش نشان داد که اندازه گیری دما با استفاده از تصاویر حاصل از ترموگرافی مادون قرمز را میتوان به عنوان یک روش مناسب و کارآمد جهت تعیین زمان خشک شدن نهایی سطح مرکبات و کنترل فرآیند خشک کردن بصورت بر خط و بهبود کیفیت و کاهش مصرف انرژی بکار گرفت [۱۲].

با توجه به شرایط اقلیمی و جغرافیایی ایران، کشور ما دارای پتانسیل بسیار بالایی برای تولید میوه سیب نسبت به سایر میوه های با بافت نرم تر می باشد. بر اساس آمار فائو در سال ۲۰۱۲، چین و آمریکا به ترتیب با تولید ۳۶ و ۵ میلیون تن در سال، دو کشور عمده تولیدکننده سیب در جهان هستند سپس ایتالیا، فرانسه و ایران با تولید حدود ۲ میلیون تن رتبه های بعدی را به خود اختصاص داده اند [۱۳]. از طرفی میزان قابل توجهی از سیب تولید شده در ایران دچار صدمه مکانیکی و غیرقابل استفاده می شود بنابراین خشک کردن این محصول با کاهش وزن و حجم آن موجب افزایش انبارمانی این محصول می شود [۱۴].

با توجه به اهمیت استفاده از ترموگرافی مادون قرمز در فرآیندهای حرارتی نظیر خشک کردن، هدف از این پژوهش بررسی تغییرات دمایی برش های سیب طی خشک کردن همرفت با استفاده از ترموگرافی مادون قرمز می باشد. جهت بررسی دقت داده های دمایی بدست آمده، تغییرات دمایی نمونه با استفاده از ترموکوپل نوع T نیز اندازه گیری شد. هم چنین تغییرات محتوای رطوبت برش های سیب طی فرآیند خشک کردن اندازه گیری و منحنی خشک کردن ارزیابی شد.

۲- مواد و روش ها

۲-۱- فرآیند خشک کردن

جهت انجام این پژوهش، سیب زرد لبنانی از بازار محلی تهیه و تا زمان آزمون در دمای ۴ درجه سانتی گراد در یخچال

از ماده‌ی آزمون بدین صورت است که یک ماده با ضریب نشر بالا در کنار نمونه مورد نظر قرار داده شده و سپس نمونه همراه با ماده آزمون در مقابل دوربین مادون قرمز قرار داده می‌شوند. سپس ضریب نشر دوربین بر روی ضریب نشر ماده‌ی آزمون تنظیم شده و دمای نمونه و دمای ماده‌ی آزمون توسط دوربین قرائت می‌شود. اگر قرائت دما متفاوت باشد، بایستی میزان ضریب نشر تغییر داده شود تا زمانی که دمای جسم نزدیک به دمای ماده‌ی آزمون قرائت شود. بدین ترتیب میزان ضریب نشر صحیح عایق سیاه که دارای ضریب نشر بالا () می‌باشد بعنوان ماده آزمون در نظر گرفته شد. در انتها ضریب نشر ۰/۹۴ بعنوان ضریب نشر برش‌های سیب در نظر گرفته شده و در دوربین تنظیم گردید [۱۷] (شکل ۲).

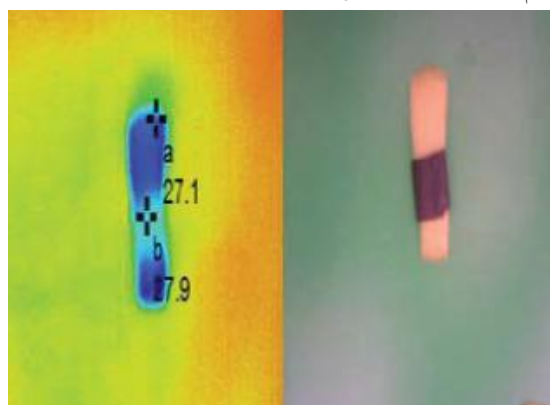


Fig 2 Evaluation the emissivity constant.

۲-۵- استخراج داده از تصاویر مادون قرمز

پس از تصویربرداری از نمونه‌ها طی فرآیند خشک کردن، تصاویر بدست آمده با استفاده از نرم افزار (InfRec Analyzer NS9500, NEC Inc, Japan) آنالیز شدند. بدین صورت که پس از انتقال تصاویر به نرم افزار، نقشه گرمایی از تصویر ایجاد می‌شود که مختصات هر نقطه آن دمای آن نقطه را شامل می‌شود. در انتها می‌توان مقدار دمای در هر نقطه از نمونه را براحتی در نرم افزار تعیین نمود. شماتیک مراحل تصویر برداری با دوربین مادون قرمز و استخراج داده‌های دمایی در شکل ۳ نشان داده شده است.

اطلاعات دمایی جسم مورد مطالعه به صورت یک نقشه حرارتی یا ترموگرام که تصویری رنگی است و هر رنگ نشان دهنده یک درجه حرارت خاص است نمایش داده می‌شود (شکل ۱) [۵ و ۷].

در این پژوهش جهت تصویر برداری با استفاده از دوربین حرارتی مادون قرمز، محفظه‌ای با قطر مشابه لنز دوربین مادون قرمز در مرکز صفحه‌ی بالای خشک‌کن ایجاد شده و دوربین در بالای خشک‌کن قرار داده شد. سپس در فواصل زمانی معین طی فرآیند خشک‌کردن از نمونه عکس‌برداری شده و تصاویر در حافظه دوربین ذخیره شدند. تصویربرداری با استفاده از دوربین مادون قرمز (NEC Avio, InfRec G100Ex, Infrared Technologies Co) با قابلیت تصویربرداری در دامنه دمایی ۴۰ تا ۱۵۰۰°C، رزولوشن ۰/۸°C در دمای ۳۰°C، ۲۴۰×۳۲۰ پیکسل گرمایی و دامنه طیفی آن ۸-۱۴ میکرومتر صورت گرفت.

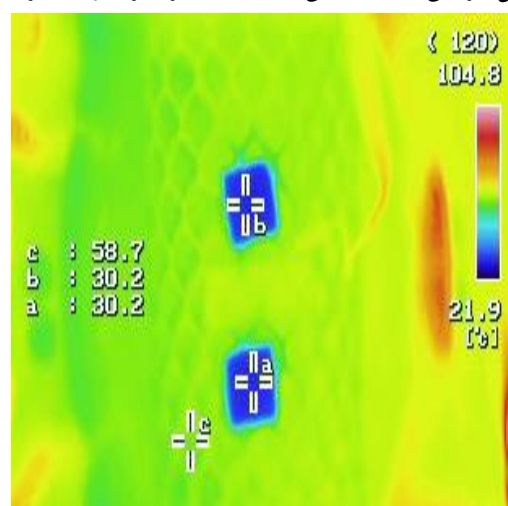


Fig 1 Thermogram of apple slices during drying process

۲-۴- تنظیم ضریب نشر دوربین مادون قرمز

از نکات مهمی که رعایت آن برای دستیابی دمای واقعی در دوربین‌های مادون قرمز اهمیت زیادی دارد تنظیم صحیح پارامتر ضریب نشر نمونه مورد بررسی است. ضریب نشر برابر است با نسبت انرژی ساطع شده از جسم به انرژی ساطع شده از یک جسم سیاه در همان دما که می‌تواند از صفر (جسم سفید) تا ۱ (جسم سیاه) تغییر کند.

در این تحقیق از روش ماده‌ی آزمون جهت تخمین ضریب نشر نمونه استفاده شد. اساس روش اندازه‌گیری ضریب نشر با استفاده

سرعت انتقال آب از مرکز نمونه به سطح کاهش و در نتیجه سرعت تبخیر و سرعت کاهش محتوای رطوبت طی زمان کاهش می‌یابد [۱۸-۲۰].

مقایسه منحنی تغییرات رطوبت در دمای ۶۰ و ۸۰ درجه سانتی گراد نشان می‌دهد با افزایش دمای خشک کن، مدت زمان خشک شدن به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد. افزایش سرعت انتقال جرم و حرارت با افزایش دمای خشک کردن از دلایل اصلی کاهش قابل توجه زمان خشک شدن می‌باشد.

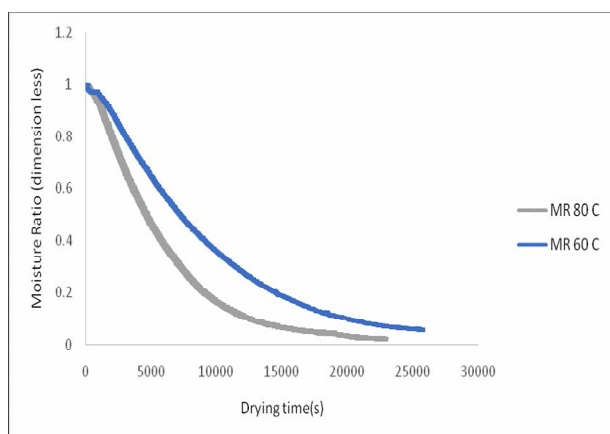


Fig 4 Drying curves for different drying air temperatures

۳-۱- بررسی تغییرات دمایی نمونه با استفاده از ترموگرافی مادون قرمز

از مسائل مهم در بررسی فرآیند خشک کردن اندازه‌گیری تغییرات دمایی نمونه طی فرآیند می‌باشد که غالباً توسط ابزارهایی نظیر ترموکوپل صورت می‌گیرد. بدین ترتیب ترموکوپل بایستی در تماس با نمونه مورد نظر باشد که سبب تخریب بافت می‌گردد هم چنین این ابزار تنها اطلاعات دمایی مربوط به یک نقطه را نمایش می‌دهد.

در این پژوهش امکان استفاده از ترموگرافی مادون قرمز جهت اندازه‌گیری تغییرات دمایی برش‌های سبب طی فرآیند خشک کردن همرفت مورد بررسی قرار گرفت. شکل (۵) مقایسه بین داده‌های دمایی بدست آمده توسط ترموگرافی مادون قرمز را با داده‌های دمایی اندازه‌گیری شده توسط ترموکوپل در دماهای خشک کردن ۶۰ و ۸۰ درجه سانتی گراد نمایش می‌دهد.

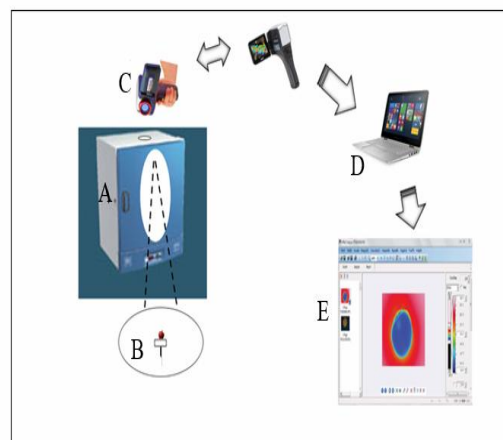


Fig 3 Schematic of drying process and infrared thermography. (A) Oven dryer (B) Sample (apple slices), (C) IR camera, (D) computer for aided thermography and ON/OFF control, (E) thermal images processing.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- بررسی تغییرات محتوای رطوبت و منحنی خشک کردن

پس از اتمام مرحله خشک کردن، به منظور بررسی تغییرات رطوبت طی زمان خشک کردن، پارامتر بدون بعد MR با استفاده از رابطه زیر، محاسبه گردید.

$$MR = (X - X_e) / (X_0 - X_e) \quad (1)$$

که در آن MR = نسبت رطوبت، X_0 = رطوبت نمونه‌ها در هر لحظه، X_e = رطوبت اولیه نمونه‌ها و X = رطوبت تعادلی نمونه‌ها می‌باشد.

شکل ۴ تغییرات نسبت رطوبت در دماهای خشک کردن ۶۰ و ۸۰ درجه سانتی گراد را در طی زمان خشک کردن نشان می‌دهد. بررسی نمودار مربوط به تغییرات نسبت رطوبت در طی زمان خشک کردن نشان می‌دهد که در ابتدای زمان خشک کردن مقدار نسبت رطوبت بطور قابل توجهی کاهش می‌یابد که این امر ناشی از تبخیر سریع آب موجود در سطح نمونه و سرعت بالای انتقال آب از درون نمونه به سطح طی فرآیند نفوذ مولکولی می‌باشد. این در حالی است که با گذشت زمان و کاهش آب سطحی نمونه و تغییرات ایجاد شده در نمونه طی خشک کردن،

هم چنین مقایسه نمودار مربوط به تغییرات دمایی در دمای ۶۰ و ۸۰ درجه سانتی گراد نشان می دهد که با افزایش دمای خشک کردن سرعت تغییرات دمایی در نمونه سیب افزایش می یابد (شیب نمودار افزایش می یابد). دلیل این امر افزایش سرعت انتقال حرارت با افزایش دمای خشک کردن می باشد. به عبارتی هر چه قدر اختلاف دمای نمونه مورد آزمون و سیال پیرامون بیشتر باشد، سرعت انتقال حرارت بیشتر و مدت زمان رسیدن نمونه به دمای تعادلی با سیال پیرامون خود کمتر خواهد بود [۲۲].

از قابلیت های ترموگرافی مادون قرمز ارائه پروفیل دمایی و بررسی اطلاعات مربوط به تمامی نقاط سطح نمونه می باشد. شکل (۶) تصاویر ترموگرافی مربوط به خشک کردن برش های سیب را طی زمان های مختلف خشک کردن نشان می دهد که در آن توزیع دمایی در تمامی نقاط سطح بصورت رنگی ارائه شده است.

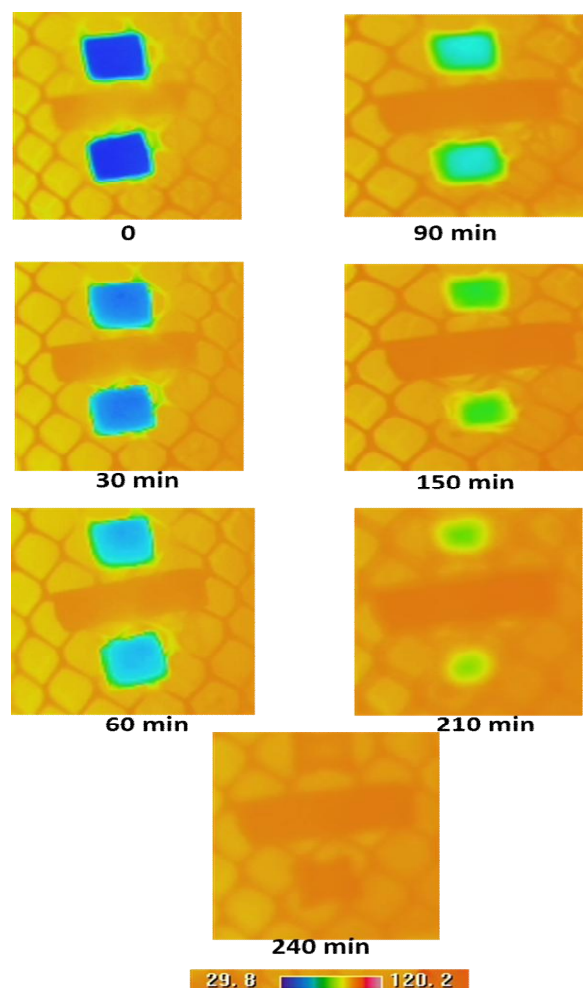


Fig 6 Thermal image of apple slices during drying process (80 °C)

همانطور که مشاهده می شود ترموگرافی مادون قرمز قادر است بخوبی روند تغییرات دمایی برش های سیب را ارائه دهد.

جهت ارزیابی دقت داده های حاصل از ترموگرافی مادون قرمز، پارامتر ضریب همبستگی R^2 از مقایسه داده های دمایی حاصل از تصاویر گرمایی با داده های دمایی حاصل از ترموکوپل محاسبه شد. مقدار ضریب همبستگی بین داده های بدست آمده توسط ترموکوپل و داده های دمایی اندازه گیری شده توسط ترموگرافی مادون قرمز برای دمای ۶۰ و ۸۰ درجه ی سانتی گراد به ترتیب ۰/۹۹۰۴ و ۰/۹۹۶ بدست آمد. ضریب همبستگی بالا بیانگر دقت بالای داده های دمایی بدست آمده از ترموگرافی مادون قرمز می باشد. لازم بذکر است که در این روش به نمونه مورد بررسی آسیبی نرسیده و قابلیت تصویر برداری در چندین تکرار وجود دارد.

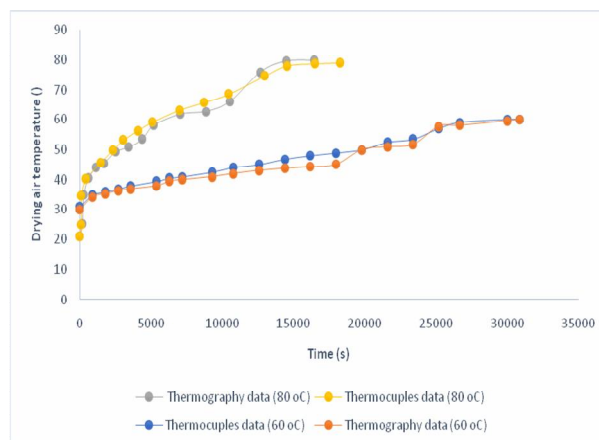


Fig 5. Evaluation the temperature change by infrared thermography and thermocouple in different drying air temperature (60 and 80 °C)

بررسی نمودارهای مربوط به تغییرات دمای نمونه طی خشک کردن نشان می دهد در مراحل ابتدایی خشک کردن، دمای نمونه های سیب به دمای تعادلی با هوای خشک کردن نمی رسد. این رفتار ناشی از اثر سرد کنندگی فرآیند تبخیر در سطح نمونه های سیب، بدلیل سرعت بالای انتقال رطوبت از درون نمونه به سطح در ابتدای فرآیند خشک کردن می باشد. رطوبت موجود در سطح نمونه نیازمند انرژی و گرما جهت تبخیر شدن می باشد که این گرما را از سطح نمونه دریافت کرده و مانع انتقال گرما بدرون نمونه های سیب می گردند. بتدریج با افزایش زمان خشک کردن و کاهش محتوای رطوبت نمونه و متعاقباً کاهش فرآیند تبخیر، دمای برش های سیب افزایش یافته و در نهایت به دمای تعادلی با دمای هوای خشک کردن می رسد [۲۱].

- [2] Ng, E. Y.-K. (2009). A review of thermography as promising non-invasive detection modality for breast tumor. *International Journal of Thermal Sciences*, 48, 849-859.
- [3] Gowen, A., Tiwari, B., Cullen, P., McDonnell, K., O'Donnell, C., 2010. Applications of thermal imaging in food quality and safety assessment. *Trends Food Sci. Technol.* 21 (4), 190-200.
- [4] Nott, K. P., & Hall, L. D. 1999, Advances in temperature validation of foods. *Trends in Food Science & Technology*, 10, 366-374.
- [5] Rahkonen, J., & Jokela, H. (2003). Infrared radiometry for measuring plant leaf temperature during thermal weed control treatment. *Biosystems Engineering*, 86(3), 257-266.
- [6] Meola, C. and G. M. Carlomagno. 2004. Recent advances in the use of infrared thermography. *Meas.Sci. Technol.* 15, 27-58.
- [7] Goedeken, D. L., Tong, C. H., & Lentz, R. R. (1991). Design and calibration of a continuous temperature measurement system in a microwave cavity by infrared imaging. *Journal of Food Processing & Preservation*, 15, 331-337.
- [8] Manickavasagan, A., Jayas, D. S., & White, N. D. G. 2006, Nonuniformity of surface temperatures of grain after microwave treatment in an industrial microwave dryer. *Drying Technology*, 24(12), 1559-1567.
- [9] Vadivambal, R., Jayas, D. S., Chelladurai, V., & White, N. D. G. 2007. Temperature distribution studies in microwave-heated grains using a thermal camera. *ASABE Annual Meeting*, Paper Number: RRV-07100, North Dakota, USA.
- [10] Cuccurullo, G., Giordano, L., Albanese, D., Cinquanta, L., Di Matteo, M., 2012. Infrared thermography assisted control for apples microwave drying. *J. Food Eng.* 112 (4), 319-325.
- [11] Traffano-Schiffo, M. V., M. Castro-Giráldez, P. J. Fito and N. Balaguer. 2014. Thermodynamic model of meat drying by infrared thermography. *J. Food Eng.* 128: 103-110.
- [12] Fito, P. J., Ortola', M. D., De los Reyes, R., Fito, P., & De los Reyes, E. (2004). Control of citrus surface drying by image analysis of

همانطور که مشاهده می‌شود تمامی نقاط سطحی نمونه دارای دمای تقریباً یکسانی می‌باشند که این امر ناشی از انتقال همزمان میزان حرارت یکسانی به سطح نمونه و افزایش دمای یکسان در تمام نقاط می‌باشد. لازم بذکر است توزیع دمایی متفاوتی در درون نمونه و از مرکز نمونه به سطح وجود دارد. همانطور که در تصویر مشاهده می‌شود در تمامی زمان‌ها دمای لبه‌ها در برش‌های سیب بالاتر از سایر نقاط میانی می‌باشد. دلیل این امر می‌تواند ناشی از خشک شدن لبه‌ها در فرآیند خشک کردن و افزایش بیشتر دما در این نقاط باشد. که این امر با پیشرفت فرآیند خشک کردن افزایش می‌یابد. از ویژگی‌های مثبت ترموگرافی مادون قرمز امکان بررسی چروکیدگی در طی فرآیند خشک کردن در نمونه می‌باشد. که در این پژوهش با توجه به ناچیز بودن این تغییرات مورد بررسی قرار نگرفت.

۴- نتیجه گیری

در این مقاله تغییرات رطوبت و دما در طی فرآیند خشک همرفت برش‌های سیب مورد بررسی قرار گرفت. تغییرات دمایی در طی فرآیند خشک کردن با استفاده از تصاویر حاصل از ترموگرافی مادون قرمز اندازه‌گیری شد. جهت بررسی دقت ترموگرافی مادون قرمز جهت اندازه‌گیری تغییرات دما، داده‌های دمایی حاصل از ترموگرافی مادون قرمز با داده‌های دمایی بدست آمده توسط ترموکوپل T مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج نشان داد که ترموگرافی مادون قرمز ابزار بسیار خوبی است که قادر است بدون تماس با نمونه، در هر لحظه از فرآیند تغییرات دمایی نمونه را بخوبی نمایش دهد. هم‌چنین با استفاده از ترموگرافی مادون قرمز قادر خواهیم بود پروفیل دما را در نقاط مختلف نمونه در هر زمان از فرآیند بدست آوریم. بررسی منحنی تغییرات رطوبت در دمای ۶۰ و ۸۰ درجه سانتی‌گراد نشان داد که با افزایش دمای خشک کردن سرعت انتقال جرم و حرارت افزایش، و مدت زمان فرایند خشک شدن کاهش به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد.

۵- منابع

- [1] Mujumdar, A.S., 2006. Book Review: Handbook of Industrial Drying, third ed. CRC Press.

- heat and moisture transfer during drying of Ataulfo mango. *J. Food Eng.* 98 (2), 198–206.
- [19] Lemus-Mondaca, R.A., Zambra, C.E., Vega-Galvez, A., Moraga, N.O., 2013. Coupled 3D heat and mass transfer model for numerical analysis of drying process in papaya slices. *J. Food Eng.* 116 (1), 109–117.
- [20] Tzempelikos, D.A., Mitrakos, D., Vouros, A.P., Bardakas, A.V., Filios, A.E., Margaritis, D.P., 2015. Numerical modelling of heat and mass transfer during convective drying of cylindrical quince slices. *J. Food Eng.* 156, 10–21.
- [21] Pasban, A., Sadrnia, H., Mohebbi, M., Shahidi, S. A. (2017). Spectral method for simulating 3D heat and mass transfer during drying of apple slices. *Journal of Food Engineering* (212) 201-212.
- [22] Tzempelikos, D.A., Mitrakos, D., Vouros, A.P., Bardakas, A.V., Filios, A.E., Margaritis, D.P., 2015. 596 Numerical modelling of heat and mass transfer during convective drying of cylindrical quince slices. 597 *J. Food Eng.* 156, 10–21.
- infrared thermography. *Journal of Food Engineering*, 61(3), 287-290.
- [13] Anonymous (2013) FAOSTAT. Food and Agricultural Organization.
- [14] Karimi, S., Khoshtaghaza, M. H.(2014). Drying of apple slice by halogen dryer. *Journal of food science and technology*, 44(11), 167-175.
- [15] AOAC, 1990. Official methods of analysis, 15th ed., Association of Official Analytical Chemists, Arlington, VA.
- [16] Bennett, G. A., & Briles, S. D. 1989, Calibration procedure developed for IR surface-temperature measurements. *IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology*, 12(4), 690-695.
- [17] Doosti Irani, O. 2015. Development of a computer vision system for a mechanical damage of apples at harvest both visible and near-infrared spectrum. MSc Thesis. Ferdowsi University of Mashhad. Faculty of Agriculture.
- [18] Villa-Corrales, L., Flores-Prieto, J.J., Xaman-Villasenor, J.P., Garcia-Hernandez, E., 2010. Numerical and experimental analysis of



Evaluation the convective drying of apple slices: Investigation of temperature changes by infrared thermography

Pasban, A.^{1,2}, Mohebbi, M.^{1*}, Sadrnia, H.³, Shahidi, S. A.⁴

1. Department of Food Science and Technology, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.
2. Department of Nutrition, School of Public Health, NorthKhorasan University of Medical Sciences, Bojnurd, Iran.
3. Department of Biosystems Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.
4. Department of Food Science and Technology, Ayatollah Amoli Branch, Islamic Azad University, Amol, Iran.

ABSTRACT

One of the important aspects of food drying technology is studying the moisture and temperature changes during the drying process. The temperature changes of the sample are often evaluated by instruments such as thermocouples and thermometers. In this research, infrared thermography was implemented for evaluating the temperature changes during drying process. Experiments were performed for drying air temperature of 60 and 80 °C and temperature changes were measured with T-type thermocouples and infrared thermography. Also, moisture content of apple slice was measured during drying process. The result shows infrared thermography is a good instrument for recording the temperature changes without contact or destroying sample. Evaluation drying curves shows, with increasing drying air temperature, heat and mass transfer process increase and drying times decreased consequently.

ARTICLE INFO

Article History:

Received 2022/ 02/ 14

Accepted 2022/ 08/ 01

Keywords:

Infrared thermography,
Temperature changes,
Drying process,
Apple.

DOI: 10.22034/FSCT.19.128.353

DOR: 20.1001.1.20088787.1401.19.128.14.9

*Corresponding Author E-Mail:
m-mohebbi@um.ac.ir