

مقایسه تاثیر امواج کوتاه و متوسط مادون قرمز بر پارامترهای خشک شدن برش های هلو در شرایط خلأ

رضا امیری چایجان^{۱*}، بهنام علائی^۲

۱- دانشیار گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه بوعلی سینا، همدان

۲- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه بوعلی سینا، همدان

(تاریخ دریافت: ۹۳/۷/۱۱ تاریخ پذیرش: ۹۴/۸/۱۹)

چکیده

امواج کوتاه و متوسط مادون قرمز به عنوان یک منبع انرژی در فرآیند خشک شدن در شرایط خلأ به کار می‌روند و تا کنون هیچ مقایسه‌ای بین این دو منبع انرژی در فرآیند خشک شدن محصولات کشاورزی انجام نشده است. در این تحقیق تاثیر تابش امواج کوتاه و متوسط مادون قرمز بر رفتار خشک کردن برش‌های هلو در شرایط خلأ بررسی و مقایسه شد. خشک کردن نمونه‌ها در فشارهای مطلق ۲۰، ۴۰ و ۶۰ کیلو پاسکال و در درجه حرارت‌های ۵۰، ۶۰ و ۷۰ درجه‌ی سلسیوس تحت هر دو منبع انرژی انجام شد. رفتار خشک شدن برش‌های هلو شامل اثر شرایط خشک کردن بر کاهش رطوبت، ضریب پخش رطوبت موثر، رنگ و چروکیدگی در خشک‌کن خلأ- مادون قرمز مورد بررسی قرار گرفت. ضریب پخش رطوبت موثر برش‌های هلو تحت تاثیر امواج متوسط مادون قرمز نسبت به امواج کوتاه در شرایط مختلف خشک کردن بین $10^{-11} \times 2/6$ تا $10^{-10} \times 1/4$ متر مربع بر ثانیه بیشتر بود. تغییرات کلی رنگ و درصد چروکیدگی برش‌های هلو تحت تاثیر امواج کوتاه مادون قرمز نسبت به امواج متوسط در شرایط مختلف خشک کردن به ترتیب بین ۶/۶ تا ۸/۷ و ۷/۸٪ تا ۹/۷٪ کمتر بود. کمترین میزان تغییرات کلی رنگ برش‌های هلو تحت امواج کوتاه و متوسط مادون قرمز به ترتیب ۸/۲ و ۱۴/۸ حاصل شد. همچنین کمترین درصد چروکیدگی برش‌های هلو تحت امواج کوتاه و متوسط مادون قرمز به ترتیب ۴۶/۳٪ و ۵۵/۹٪ به دست آمد.

کلید واژگان: امواج کوتاه مادون قرمز، امواج متوسط مادون قرمز، خشک‌کن خلأ، رنگ، چروکیدگی

* مسئول مکاتبات: amirireza@basu.ac.ir

۱- مقدمه

نزدیک در برخورد به سطح دانه به طور مستقیم تا عمق یک میلی متر در دانه نفوذ می‌کند [۷]. بیشتر اشعه مادون قرمز توسط مولکول‌های سطح دانه جذب می‌شود. این پدیده سبب گرم شدن سریع محصول می‌شود. این روش سبب کاهش تنش‌های حرارتی در محصول و در نتیجه حفظ کیفیت آن می‌گردد [۸]. برای مقابله با اثرات نامطلوب خشک کردن و به منظور بهبود کیفیت محصول با ارزش غذایی بالاتر یک روش بالقوه مفید به نام خشک کردن تحت خلأ وجود دارد. در این روش کاهش رطوبت در فشارهای پایین انجام می‌شود [۹]. در خشک‌کن‌های خلأ انتقال جرم به دلیل افزایش اختلاف فشار بخار بین داخل و خارج از محصول بسیار زیاد است [۱۰]. خشک کردن به وسیله ترکیب مادون قرمز و خلأ می‌تواند یک روش سریع و با کیفیت برای خشک کردن لایه نازک فراهم بیاورد. خشک کردن تکه‌های موز به وسیله امواج متوسط مادون قرمز در شرایط خلأ [۱۱] و همچنین خشک کردن حبه‌های انار به وسیله امواج کوتاه مادون قرمز در شرایط خلأ [۱۲] نمونه‌هایی از کاربرد این فرایند ترکیبی می‌باشند.

هدف اصلی از این مطالعه، بررسی و مقایسه اثر امواج کوتاه و متوسط مادون قرمز در دماهای هوا و فشارهای خلأ بر سینتیک خشک شدن برش‌های هلو می‌باشد. همچنین ارزیابی و مقایسه‌ی اثرهای آن‌ها بر ضریب نفوذ رطوبت موثر، رنگ و چروکیدگی برش‌های هلو در شرایط مختلف خشک شدن مورد مطالعه قرار می‌گیرد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- روش اندازه‌گیری رطوبت اولیه

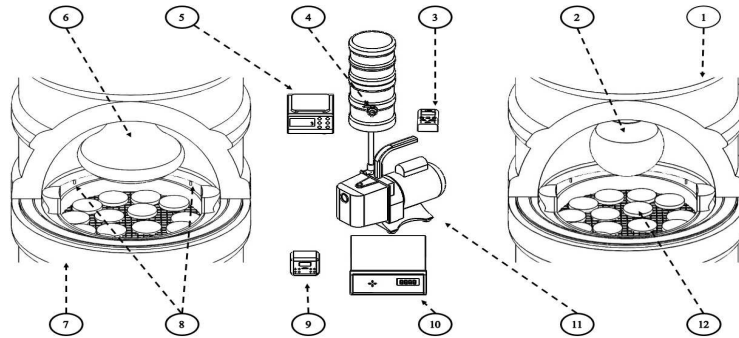
میوه هلوی تازه رقم آبرتا از شهرستان همدان تهیه شد. نمونه‌ها به منظور حفظ رطوبت در داخل پلاستیک چند لایه قرار داده شدند و در یخچال در دمای $1 \pm 3^\circ\text{C}$ نگهداری گردیدند. برای به دست آوردن مقدار رطوبت اولیه گوشت میوه هلو، نمونه‌هایی از آن در یک آون خشک‌کن در دمای $70 \pm 1^\circ\text{C}$ به مدت ۲۴ ساعت قرار داده شدند و بعد از آن هر یک ساعت یک‌بار وزن شدند و در پایان دو اندازه‌گیری متوالی که تغییرات وزن نمونه‌ها کمتر از یک درصد شد، مقدار رطوبت اولیه محاسبه گردید [۱۳]. محتوای رطوبت اولیه گوشت میوه هلو در حدود $7/43$ بر پایه خشک به دست آمد.

میوه هلو (*Prunus persica* L) در بخش‌های گسترده‌ای از ایران کشت می‌شود. فصل برداشت میوه هلو کوتاه است و به دلیل نرم و حساس بودن بافت میوه هلو در مرحله پس از برداشت و در شرایط نگهداری کنترل شده نیز بسیار آسیب پذیر است. میوه هلو را علاوه بر مصرف به شکل تازه می‌توان به شکل آب میوه، مربا و خشک شده نیز استفاده کرد [۱]. با خشک کردن محصولات کشاورزی، علاوه بر جلوگیری از فساد ماده غذایی به وسیله میکروارگانیسم‌ها و واکنش‌های شیمیایی، وزن ماده غذایی کاهش یافته و صرفه‌جویی بسیاری در هزینه‌های حمل و نقل و نگهداری آن‌ها حاصل می‌شود [۲]. میوه هلو خشک شده می‌تواند به عنوان یک میان وعده غذایی در نظر گرفته شود که منبع خوبی از ویتامین‌ها و مواد معدنی است. خشک کردن میوه هلو به وسیله تابش خورشید یک روش معمول برای کاهش رطوبت آن به شمار می‌رود. در این روش سرعت انتقال رطوبت از محصول بسیار کم است، در نتیجه خشک کردن به وسیله‌ی خورشید زمان بر می‌باشد. همچنین در طی فرآیند خشک شدن، محصول در معرض آلودگی به گرد و غبار و حمله حشرات قرار می‌گیرد و این روش بسیار وابسته به شرایط آب و هوایی است [۳]. خشک کردن به وسیله‌ی اشعه مادون قرمز به ویژه به شکل لایه نازک روش مناسبی است. در این روش حرارت در محصول بدون ایجاد تغییرات نامطلوب ایجاد می‌شود، در نتیجه کیفیت ساختاری محصول خشک شده افزایش و هزینه‌های فرآیند خشک کردن کاهش می‌یابد [۴]. یکی دیگر از مزایای استفاده از اشعه مادون قرمز به حداقل رساندن ضایعات محصول است. همچنین اشعه مادون قرمز سبب ایجاد حرارت سریع و مستقیم در محصول می‌شود که نسبت به خشک‌کن‌های همرفتی که در آن بخشی از حرارت توسط خروج هوا به هدر می‌رود، سریع‌تر است و بازده بالاتری دارد [۵].

اشعه مادون قرمز بخشی از طیف امواج الکترومغناطیس با طول موجی بین ۷۰۰ نانومتر تا ۱۰۰۰ میکرومتر می‌باشد و شامل سه بخش: امواج کوتاه (معروف به مادون قرمز نزدیک با طول موجی بین ۲۵۰۰-۷۰۰ نانومتر)، امواج متوسط (معروف به مادون قرمز متوسط با طول موجی بین ۱۰۰۰۰-۲۵۰۰ نانومتر) و امواج بلند (معروف به مادون قرمز دور با طول موجی بین ۱۰۰-۱۰ میکرومتر) می‌باشد [۶]. تشعشع امواج مادون قرمز

۲-۲- طرح خشک کن خلأ- مادون قرمز

نمای خشک کن خلأ- مادون قرمز در شکل ۱ نشان داده شده است که در گروه مهندسی بیوسیستم دانشگاه بوعلی سینا ساخته شد. محفظه خشک کن به شکل استوانه و دو تکه از جنس پلاستیک فشرده به منظور عایق حرارتی بودن ساخته



شکل ۱ نمای خشک کن آزمایشگاهی خلأ- مادون قرمز (۱-محفظه‌ی بالایی خشک کن، ۲- لامپ تنگستن، ۳- ترمومتر، ۴- سنسور فشار، ۵- ترازوی دیجیتال، ۶- لامپ کوارتز، ۷- محفظه‌ی پایینی خشک کن، ۸- سنسورهای k، ۹- ترموستات، ۱۰- سیستم کنترل فشار، ۱۱- پمپ خلأ و ۱۲- برش-های هلو)

که در آن MR نسبت رطوبت (بدون بعد)، M میزان رطوبت در هر لحظه (کیلوگرم ماده جامد/کیلوگرم آب)، M_e رطوبت تعادلی (کیلوگرم ماده جامد/کیلوگرم آب) و M_o محتوای رطوبت اولیه (کیلوگرم ماده جامد/کیلوگرم آب) می‌باشد. مقدار M_e در زمان‌های طولانی خشک کردن در مقایسه با M و M_o کوچک است، لذا معادله ۱ به صورت رابطه ۲ ساده می‌شود [۱۴].

$$MR = \frac{M}{M_o}$$

۲-۳- ضریب پخش رطوبت موثر

قانون دوم فیک برای شرایط لایه نازک در محصولات با فرض ناچیز بودن اثرات دما و مجموع گرادیان فشار می‌تواند انتقال رطوبت در مرحله نزولی فرآیند خشک کردن را توصیف کند [۱۵]. با فرض اینکه در فرآیند خشک کردن، پخش رطوبتی موثر ثابت و شعاعی است می‌توان مقدار آن را از معادله ۳ محاسبه نمود:

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left(- (2n+1)\pi^2 \frac{D_{eff} \times t}{4L^2}\right)$$

فاصله انتهای حباب لامپ‌ها و ظرف نمونه ۵ سانتی‌متر تعیین شد. دمای هوای محفظه نزدیک ظرف نمونه با سنسور نوع k به وسیله دماسنج دیجیتال (مدل Lutron TM-903، ساخت تایوان) با درجه تفکیک 0.1°C اندازه‌گیری شد. رطوبت نسبی محیط به وسیله رطوبت سنج دیجیتال (مدل Lutron TM-903، ساخت تایوان) با درجه تفکیک 0.1 درصد اندازه‌گیری شد. برای ایجاد خلأ در محفظه از پمپ خلأ دو مرحله‌ای (مدل JB-285، ساخت کشور آمریکا) با دبی ۲۸۵ لیتر بر دقیقه و حداقل فشار کاری ۲ پاسکال استفاده گردید. فشار محفظه به وسیله سنسور (مدل PSCH0001 BCII، ساخت کشور کره جنوبی) با دقت 0.001 bar اندازه‌گیری شد و به وسیله سیستم کنترل فشار تعیین و کنترل گردید. نمونه‌های آزمایشی در طول فرآیند خشک شدن به وسیله ترازوی دیجیتال (مدل AND، ساخت ژاپن) با درجه تفکیک 0.1 گرم وزن شدند. نسبت رطوبت برش‌های هلو در طول فرآیند خشک شدن با استفاده از رابطه ۱ محاسبه شد:

$$MR = \frac{M - M_e}{M_o - M_e}$$

۲-۵- چروکیدگی

در طول فرآیند خشک شدن به دلیل خروج رطوبت از مواد غذایی، پدیده چروکیدگی اتفاق می‌افتد و همین امر روی ویژگی‌های فیزیکی مواد جامد و ظاهر محصول نهایی اثر می‌گذارد. چروکیدگی برش‌های هلو به وسیله درصد چروکیدگی توسط معادله ۱۱ محاسبه شد [۱۹].

$$S_b = \left(1 - \frac{V(t)}{V_0}\right)$$

در این رابطه S_b ، V_0 و $V(t)$ به ترتیب درصد چروکیدگی، حجم اولیه و نهایی برش‌های هلو در هر آزمایش بر حسب متر مکعب می‌باشد. حجم هر برش هلو از معادله ۱۲ به دست آمد [۲۰].

$$V(t) = A(t) \times l(t)$$

در این رابطه $A(t)$ مساحت قاعده هر برش هلو می‌باشد که با تحلیل اسکن نمونه‌ها به وسیله نرم‌افزار فتوشاپ و با شمارش پیکسل‌های محدوده‌ی هر برش هلو و مقایسه با مربع واحد محاسبه شد. $l(t)$ ارتفاع هر برش هلو می‌باشد و به وسیله کولیس دیجیتال با دقت ۰/۰۱ میلی‌متر اندازه‌گیری شد.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- سینتیک خشک شدن

منحنی‌های محتوای رطوبت بر حسب زمان خشک شدن برش‌های هلو در دماهای مختلف تحت امواج کوتاه و متوسط مادون قرمز در فشارهای خلأ به ترتیب در شکل ۲ و ۳ نشان داده شده است. همان‌طور که انتظار می‌رفت، در سطح یکسانی از فشار خلأ با افزایش دمای هوا میزان کاهش رطوبت به علت بیشتر شدن انرژی جنبشی مولکول‌ها و افزایش انتقال جرم افزایش یافت. درجه حرارت بالاتر به این معنا است که نمونه‌ها مدت زمان طولانی‌تری در معرض امواج مادون قرمز قرار گرفته‌اند. نتایج مشابهی در خشک‌کردن برش‌های نارگیل [۲۱]، هویج و کدو [۲۲] و تکه‌های پیاز [۲۳] گزارش شده است.

در این رابطه n تعداد جملات خشک شدن (۱، ۲، ۳، ...)، t زمان خشک شدن (ثانیه)، L نصف ضخامت نمونه‌ها (m) و D_{eff} ضریب پخش رطوبت موثر (m^2/s) است. پس از ساده سازی با رسم لگاریتم طبیعی داده‌های به دست آمده نسبت به زمان، خطی با شیب K به دست می‌آید که از مساوی قراردادن این شیب با ضریب t ، ضریب پخش رطوبت موثر را می‌توان از رابطه‌ی ۴ به دست آورد [۱۶]:

$$K = \frac{\pi^2 \cdot D_{eff}}{4L^2}$$

۲-۴- رنگ

در صنایع غذایی، رنگ یکی از شاخص‌های مهم ارزش‌گذاری محصول تولید شده است [۱۷]. نمونه‌های آزمایشی، قبل و بعد از خشک شدن در شرایط نوری استاندارد اسکن شدند و سپس عکس‌های حاصل شده با فرمت bmp در نرم‌افزار فتوشاپ باز شدند. محدوده نمونه‌ها توسط نرم‌افزار مشخص شده و بر حسب سیستم رنگی Lab، از نمونه‌ها میانگین رنگ گرفته شد. پارامترهای Lab به دست آمده از نرم‌افزار، ارزش‌های رنگی استاندارد نیستند و به وسیله فرمول‌های ۷، ۸ و ۹ به مقادیر $L^*a^*b^*$ تبدیل شدند [۱۸].

$$L^* = \frac{Lightness}{255} \times 100$$

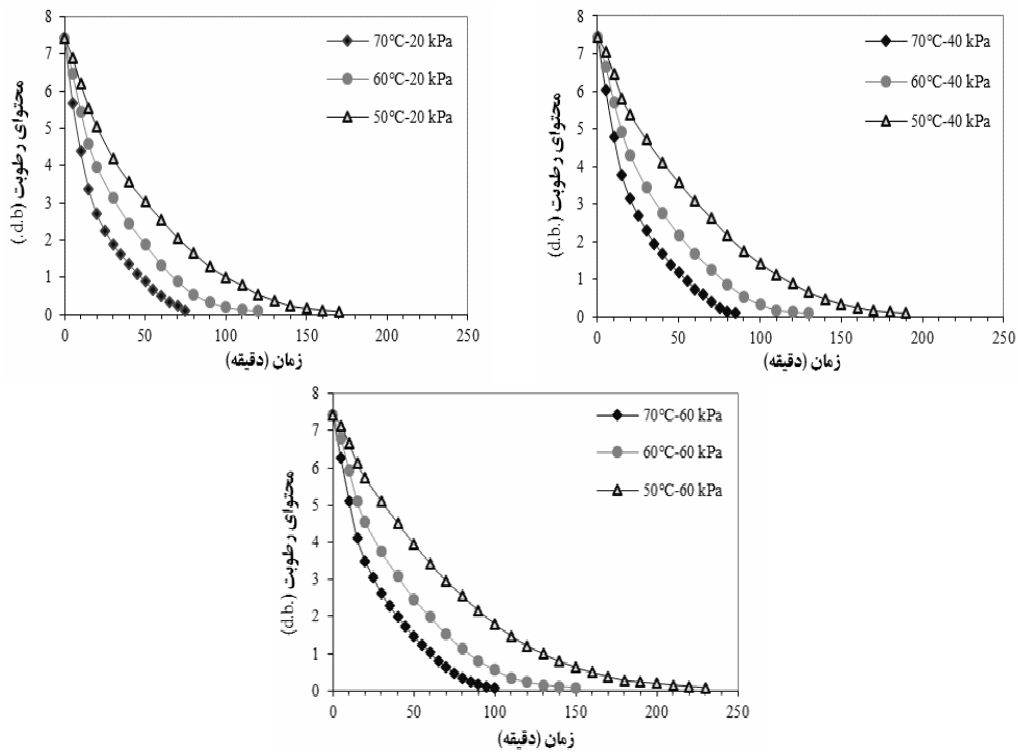
$$a^* = \frac{240a}{255} - 120$$

$$b^* = \frac{240b}{255} - 120$$

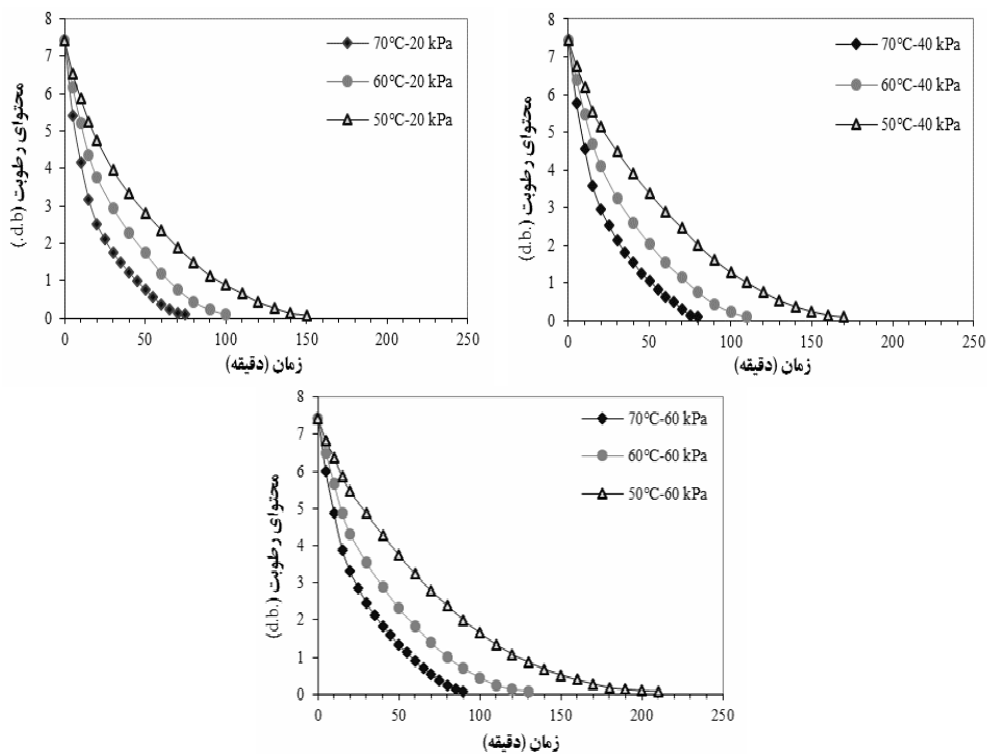
تغییرات کلی رنگ (ΔE) نمونه‌ها با استفاده از فرمول ۱۰ بر حسب پارامترهای رنگی $L^*a^*b^*$ محاسبه شد.

$$\Delta E = \sqrt{(L_0^* - L_t^*)^2 + (a_0^* - a_t^*)^2 + (b_0^* - b_t^*)^2}$$

در این فرمول L_0^* ، a_0^* ، b_0^* مقادیر اولیه پارامترهای رنگی و L_t^* ، a_t^* ، b_t^* مقادیر پارامترهای رنگی برش‌های هلو پس از خشک شدن می‌باشند.



شکل ۲ نمودار محتوای رطوبت بر حسب زمان برای شرایط مختلف خشک شدن در خشک‌کن خلأ- امواج کوتاه مادون قرمز



شکل ۳ نمودار محتوای رطوبت بر حسب زمان برای شرایط مختلف خشک شدن در خشک‌کن خلأ- امواج متوسط مادون قرمز

یافت. نتایج مشابهی در خشک‌کردن هویج [۲۴]، انگور هندی [۲۵]، قارچ [۲۶] و برش‌های موز [۲۷] گزارش شده است.

با کاهش فشار مطلق محفظه خشک‌کن، میزان کاهش رطوبت نمونه‌ها به علت پایین آمدن دمای نقطه جوش آب افزایش

نتایج حاصل از تجزیه واریانس ضریب پخش رطوبت موثر، رنگ و چروکیدگی برش‌های هلو تحت امواج کوتاه و متوسط مادون قرمز تحت شرایط خلأ در جدول ۱ ارائه شده است. نتایج برای ضریب پخش رطوبت موثر برش‌های هلو نشان داد که اثر دمای هوا، فشار مطلق و اثر متقابل دمای هوا × فشار مطلق تحت امواج کوتاه و متوسط مادون قرمز در سطح یک درصد معنی دار شدند. همچنین نتایج برای تغییرات کلی رنگ و چروکیدگی برش‌های هلو نشان داد که اثر دمای هوا و فشار مطلق تحت امواج کوتاه و متوسط مادون قرمز در سطح یک درصد معنی دار شدند.

زمان رسیدن به رطوبت نهایی در شرایط یکسان دمای هوا و فشار مطلق، با استفاده از امواج متوسط مادون قرمز نسبت به امواج کوتاه بین ۴ تا ۲۰ دقیقه کمتر بود. علت این پدیده می‌تواند اثر طول موج امواج مادون قرمز بر میزان جذب آن توسط برش‌های هلو باشد و همچنین شکل الگوی تابشی لامپ کوآرتز نسبت به لامپ تنگستن متمرکزتر است اما در سطح تابش حرارت غیریکنواخت‌تری ایجاد می‌کند.

۲-۳- نتایج تجزیه واریانس

جدول ۱ نتایج تجزیه واریانس برش‌های هلو در شرایط مختلف در خشک‌کن خلأ- مادون قرمز

منابع تغییرات		درجه آزادی	میانگین مربعات امواج کوتاه مادون قرمز		میانگین مربعات امواج متوسط مادون قرمز	
چروکیدگی	رنگ	D_{eff}	چروکیدگی	رنگ	D_{eff}	
دمای هوا A	۲	$5/436 \times 10^{-19}^{**}$	$194/94^{**}$	$90/48^{**}$	$6/074 \times 10^{-19}^{**}$	$103/33^{**}$
فشار مطلق B	۲	$4/950 \times 10^{-19}^{**}$	$15/04^{**}$	$11/76^{**}$	$6/778 \times 10^{-20}^{**}$	$26/88^{**}$
اثر متقابل (A×B)	۴	$6/250 \times 10^{-24}^{**}$	ns	ns	$3/60 \times 10^{-21}^{**}$	$0/63^{ns}$
خطا	۱۸	2×10^{-24}	1×10^{-2}	5×10^{-3}	2×10^{-24}	2×10^{-3}

ns غیر معنی دار و ** بیانگر اثرات معنی داری در سطح ۱ درصد

۳-۳- ضریب پخش رطوبت موثر

مربع بر ثانیه به دست آمد. نتایج مشابهی در فرآیند خشک‌کردن برش‌های انبه ($1/60 \times 10^{-9}$ تا $9/20 \times 10^{-9}$ متر مربع بر ثانیه) [۹] و برش‌های پیاز ($1/32 \times 10^{-10}$ تا $1/09 \times 10^{-9}$ متر مربع بر ثانیه) [۲۳] گزارش شده است. به علت بالا بودن درصد آب آزاد برش‌های هلو، کاهش فشار خلأ سبب افزایش ضریب پخش رطوبت موثر شد. میزان ضریب پخش رطوبت موثر در شرایط یکسان دمای هوا و فشار مطلق تحت امواج متوسط مادون قرمز نسبت به امواج کوتاه بیشتر بود که به علت بالاتر بودن نرخ خشک شدن برش‌های هلو تحت امواج متوسط مادون قرمز نسبت به امواج کوتاه مادون قرمز است.

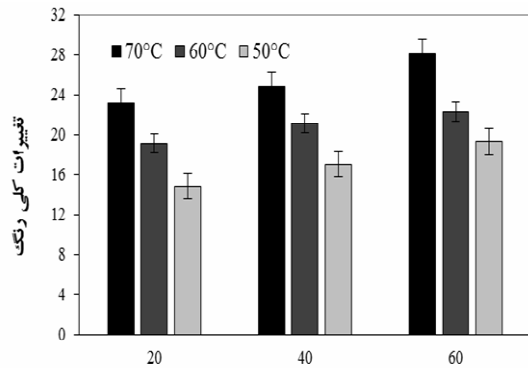
مقادیر ضریب پخش رطوبت موثر در فشارهای مختلف خشک‌کردن تحت امواج کوتاه و متوسط مادون قرمز با استفاده از معادله ۶ محاسبه شد. مقادیر برآورد شده به ترتیب در جدول‌های ۲ و ۳ ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد افزایش دمای هوا و کاهش فشار مطلق سبب افزایش مقدار ضریب پخش رطوبت موثر می‌شود. مقادیر ضریب پخش رطوبت موثر برش‌های هلو در خشک‌کن خلأ تحت امواج کوتاه مادون قرمز بین $4/76 \times 10^{-10}$ تا $1/24 \times 10^{-9}$ متر مربع بر ثانیه و تحت امواج متوسط مادون قرمز بین $5/24 \times 10^{-10}$ تا $1/38 \times 10^{-9}$ متر

جدول ۲ ضریب پخش رطوبت موثر برش‌های هلو در شرایط مختلف در خشک‌کن خلأ- امواج کوتاه مادون قرمز

دمای هوا (°C)	۲۰ کیلو پاسکال	۴۰ کیلو پاسکال	۶۰ کیلو پاسکال
	R^2	D_{eff} (m ² /s)	R^2
۵۰	۰/۹۴۳۲	$5/67 \times 10^{-10}$	۰/۹۳۶۹
۶۰	۰/۹۶۰۹	$8/54 \times 10^{-10}$	۰/۹۴۹۲
۷۰	۰/۹۴۵۴	$1/20 \times 10^{-9}$	۰/۹۲۴۱

جدول ۳ ضریب پخش رطوبت موثر برش‌های هلو در شرایط مختلف در خشک‌کن خلأ-امواج متوسط مادون قرمز

دمای هوا (°C)		۲۰ کیلو پاسکال		۴۰ کیلو پاسکال		۶۰ کیلو پاسکال	
R^2	D_{eff} (m ² /s)	R^2	D_{eff} (m ² /s)	R^2	D_{eff} (m ² /s)	R^2	D_{eff} (m ² /s)
۰/۹۴۲۶	$5/24 \times 10^{-11}$	۰/۹۴۲۱	$5/93 \times 10^{-11}$	۰/۹۱۹۳	$6/84 \times 10^{-11}$	۰/۹۳۷۰	$8/02 \times 10^{-11}$
۰/۹۳۰۸	$1/10 \times 10^{-9}$	۰/۹۲۴۰	$1/23 \times 10^{-9}$	۰/۹۴۸۴	$1/38 \times 10^{-9}$		

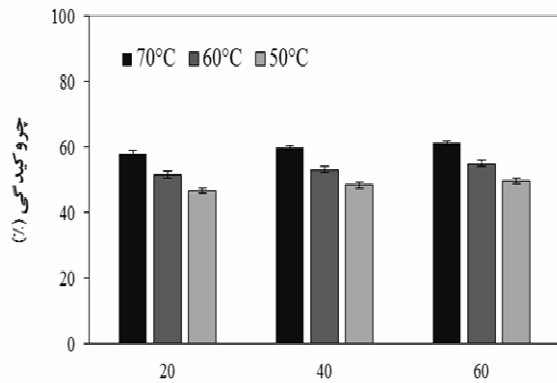


فشارهای مطلق (کیلو پاسکال)

شکل ۵ نمودار تغییرات کلی رنگ برش‌های هلو در مقابل دماهای هوا و فشارهای مطلق تحت امواج متوسط مادون قرمز

۳-۵- چروکیدگی

درصد چروکیدگی برش‌های هلو در دماهای مختلف تحت امواج کوتاه و متوسط مادون قرمز در فشارهای خلأ به ترتیب در شکل‌های ۶ و ۷ نشان داده شده است.

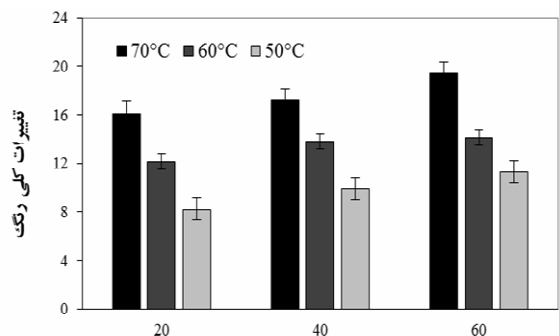


فشارهای مطلق (کیلو پاسکال)

شکل ۶ نمودار درصد چروکیدگی برش‌های هلو در مقابل دماهای هوا و فشارهای مطلق تحت امواج کوتاه مادون قرمز

۳-۴- رنگ

تغییرات کلی رنگ (ΔE) برش‌های هلو در دماهای مختلف تحت امواج کوتاه و متوسط مادون قرمز در فشارهای مختلف خلأ به ترتیب در شکل‌های ۴ و ۵ نشان داده شده است. تغییرات کلی رنگ برش‌های هلو تحت امواج کوتاه مادون قرمز بین ۸/۲ تا ۱۹/۳ و امواج متوسط مادون قرمز بین ۱۴/۸ تا ۲۸/۱ به دست آمد. با کاهش دمای هوا و فشار مطلق، تغییرات کلی رنگ نمونه‌ها کاهش یافت. در فرآیندهای حرارتی مواد غذایی، تعدادی واکنش شیمیایی رخ می‌دهد که یکی از شناخته شده‌ترین آن‌ها واکنش میلارد [۲۸] که عامل قهوه‌ای شدن غیر آنزیمی است. واکنش میلارد شامل واکنش یک آلدهید و آمین (معمولاً یک پروتئین یا آمینو اسید) می‌باشد و بسیار وابسته به دما است. میزان تغییرات کلی رنگ برش‌های هلو در شرایط یکسان دمای هوا و فشار مطلق تحت امواج کوتاه مادون قرمز نسبت به امواج متوسط بین ۶/۶ تا ۸/۷ کمتر بود. علت این کاهش تغییرات کلی رنگ می‌تواند تاثیر گرمای یکنواخت‌تر لامپ تنگستن و در نتیجه کاهش واکنش‌های میلارد در طول فرآیند خشک شدن تحت امواج کوتاه مادون قرمز باشد.



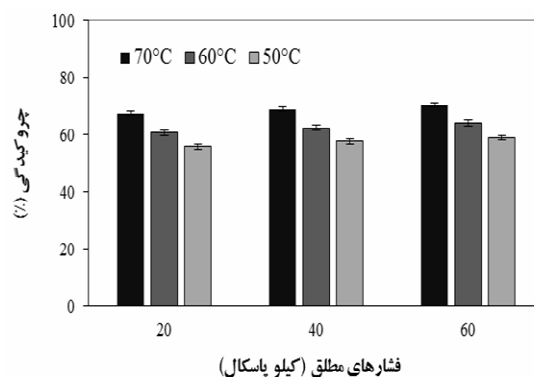
فشارهای مطلق (کیلو پاسکال)

شکل ۴ نمودار تغییرات کلی رنگ برش‌های هلو در مقابل دماهای هوا و فشارهای مطلق تحت امواج کوتاه مادون قرمز

متر مربع بر ثانیه و تحت امواج متوسط مادون قرمز بین 10^{-1} تا $5/24 \times 10^{-9}$ متر مربع بر ثانیه به دست آمد. تغییرات کلی رنگ و درصد چروکیدگی با کاهش دمای هوا و فشار خلأ کاهش می‌یابد. کمترین مقادیر تغییرات کلی رنگ برش‌های هلو تحت امواج کوتاه و متوسط مادون قرمز به ترتیب $8/2$ و $14/8$ و کمترین درصد چروکیدگی برش‌های هلو تحت امواج کوتاه و متوسط مادون قرمز به ترتیب $46/3$ ٪ و $55/9$ ٪ به دست آمد که شرایط بهینه از نظر کیفیت نهایی محصول می‌باشند و مربوط به دمای هوای 50 درجه سلسیوس و فشار مطلق 20 کیلو پاسکال بودند. تغییرات کلی رنگ و درصد چروکیدگی برش‌های هلو تحت تاثیر امواج کوتاه مادون قرمز نسبت به امواج متوسط در شرایط مختلف خشک کردن به ترتیب بین $6/6$ تا $8/7$ و $7/8$ ٪ تا $9/7$ ٪ کمتر بود.

۵- منابع

- [1] Zhu, A. and Shen, X. 2014. The model and mass transfer characteristics of convection drying of peach slices. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 72: 345-351.
- [2] Sahin, A.Z. and Dincer, I. 2002. Graphical determination of drying process and moisture transfer parameters for solids drying. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 45(16): 3267-3273.
- [3] Doymaz, I. 2008. Convective drying kinetics of strawberry. *Journal of Chemical Engineering and Processing Process Intensification*, 47(5): 914-919.
- [4] Strumillo, C. and Kudra, T. 1987. *Drying: Principles, Applications and Design*. Topics in chemical engineering Volume 3. Gordon and Breach Science Publisher. USA.
- [5] Ratti, C. and Mujumdar, A.S. 1995. Infrared drying. in mujumdar, A.S. (Ed.), *handbook of industrial drying*, vol. 1. Marcel Dekker Inc., New York, pp. 567-588. 742pp.
- [6] Reich, G. 2005. Near-infrared spectroscopy and imaging: basic principles and pharmaceutical applications. *Advanced Drug Delivery Reviews*, 57(8): 1109-1143.
- [7] Nindo, C.I, Kudo, Y. and Bekki, E. 1995. Test model for studying sun drying of rough rice using far-infrared radiation. *Drying Technology*, 13 (1- 2): 225-238.
- [8] Meeso, N., Nathakaranakule, A., Midhiyonon, T. and Soponronnarit, S. 2004. Influence of FIR irradiation on paddy



شکل ۷ نمودار درصد چروکیدگی برش‌های هلو در مقابل دماهای

هوا و فشارهای مطلق تحت امواج متوسط مادون قرمز

درصد چروکیدگی برش‌های هلو تحت امواج کوتاه مادون قرمز بین $46/3$ ٪ تا $61/2$ ٪ و امواج متوسط مادون قرمز بین $55/9$ ٪ تا $70/4$ ٪ بود. در حالی که درصد آن برای مواد غذایی با درصد بالایی از آب مانند میوه‌ها و سبزیجات در خشک‌کن‌های همرفتی بین 70 ٪ تا 90 ٪ است [۲۹]. در فرآیند خشک شدن هنگامی که آب به تدریج از مواد غذایی جدا می‌شود، عدم تعادل فشار بین درون و بیرون مواد غذایی سبب اعمال تنش بر محصول شده و منجر به انقباض، تغییر شکل و گاهی اوقات ترک خوردگی محصول می‌گردد [۱۹]. با کاهش دمای هوا و فشار مطلق میزان چروکیدگی محصول کاهش می‌یابد. میزان درصد چروکیدگی برش‌های هلو در شرایط یکسان دمای هوا و فشار مطلق تحت امواج کوتاه مادون قرمز نسبت به امواج متوسط بین $7/8$ ٪ تا $9/7$ ٪ کمتر بود. علت این کاهش درصد چروکیدگی تحت امواج کوتاه مادون قرمز می‌تواند طولانی‌تر بودن زمان خشک شدن برش‌های هلو و توزیع یکنواخت‌تر حرارت در برش‌ها باشد.

۴- نتیجه گیری

رفتار خشک شدن برش‌های هلو در خشک‌کن خلأ- مادون قرمز در شرایط مختلف خشک شدن بررسی شد و نتایج نشان داد با افزایش دمای هوا و کاهش فشار مطلق، زمان خشک شدن برش‌های هلو یافت. کمترین زمان خشک شدن مربوط به دمای هوای 70 درجه سلسیوس و فشار مطلق 20 کیلو پاسکال بود. زمان خشک شدن در شرایط مشابه تحت امواج متوسط مادون قرمز نسبت به امواج کوتاه 4 تا 20 دقیقه کمتر بود. ضریب پخش رطوبت موثر برش‌های هلو در خشک‌کن خلأ تحت امواج کوتاه مادون قرمز بین $4/76 \times 10^{-1}$ تا $1/24 \times 10^{-9}$

- [19] Mayor, L. and Sereno, A.M. 2006. Modelling shrinkage during convective drying of food materials: a review. *Journal of Food Engineering*, 61(3): 373–386.
- [20] Figiel, A. 2010. Drying kinetics and quality of beetroots dehydrated by combination of convective and vacuum-microwave methods. *Journal of Food Engineering*, 98(4): 461–470.
- [21] Jena, S. and Das, H. 2007. Modelling for vacuum drying characteristics of coconut presscake. *Journal of Food Engineering*, 79(1): 92–99.
- [22] Arevalo-Pinedo, A. and Murr, F.E.X. 2007. Influence of pre-treatments on the drying kinetics during vacuum drying of carrot and pumpkin. *Journal of Food Engineering*, 80(1): 152–156.
- [23] Mitra, J., Shrivastava, S.L. and Srinivasarao, P. 2011. Vacuum dehydration kinetics of onion slices. *Food Bioprocess*, 89(4): 1–9.
- [24] Cui, Z.W., Xu, S.Y. and Sun, D.W. 2004. Microwave-vacuum drying kinetics of carrot slices. *Journal of Food Engineering*, 65(2): 157–164.
- [25] Methakhup, S., Chiewchan, N. and Devahastin, S. 2005. Effects of drying methods and conditions on drying kinetics and quality of Indian gooseberry flake. *Food Sci. Technol*, 38(6): 579–587.
- [26] Giri, S.K. and Prasad, S. 2007. Drying kinetics and rehydration characteristics of microwave-vacuum and convective hot-air dried mushrooms. *Journal of Food Engineering*, 78(2): 512–521.
- [27] Swasdisevi, T., Devahastin, S., Sa-Adchom, P. and Soponronnarit, S. 2009. Mathematical modeling of combined far-infrared and vacuum drying banana slice. *Journal of Food Engineering*, 92(1): 100–106.
- [28] Milton, S.F. 1985. Some aspects of the chemistry of non-enzymatic browning (the maillard reaction), in chemical changes in food during processing, edited by Richardson, T, AVI Publishing Co. pp. 289-303.
- [29] May, B.K. and Pere, P. 2002. The importance of considering exchange surface area reduction to exhibit a constant drying flux period in foodstuffs. *Journal of Food Engineering*, 54(4): 271–282.
- moisture reduction and milling quality after fluidized bed drying. *Journal of Food Engineering*, 65(2): 293–301.
- [9] Jaya, S. and Das, H. 2003. A vacuum drying model for mango pulp. *Drying Technology*, 21(7): 1215–1234.
- [10] Pere, C. and Rodier, E. 2002. Microwave vacuum drying of porous media: experimental study and qualitative considerations of internal transfers. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 41(5): 427–436.
- [11] Swasdisevi, T., S. Devahastin, R. Ngamchum, and Soponronnarit. S. 2007. Optimization of a drying process using infrared-vacuum drying of Cavendish banana slices. *Songklanakarin Journal of Science and Technology*, 29(3): 809–816.
- [12] Alaei, B. and Amiri Chayjan, R. 2007. Drying characteristics of pomegranate arils under near infrared-vacuum conditions. *Journal of Food Processing and Preservation*, 1745-4549.
- [13] Motevali, A. and Minaei, S. 2012. Effects of microwave pretreatment on the energy and exergy utilization in thin-layer drying of sour pomegranate arlis. *Chemical Industry & Chemical Engineering Quarterly*, 18(1): 63-72.
- [14] Minaei, S., Motevali, A., Ahmadi, E. and Azizi, M.H. 2012. Mathematical models of drying pomegranate arlis in vacuum and microwave dryers. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 14(2): 311-325.
- [15] De Matteo, M., Cinquanta, A. L., Galiero, G. and Crescitelli, S. 2000. Effect of novel physical pretreatment process on the drying kinetics of seedless grapes. *Journal of Food Engineering*, 46(2): 83-89.
- [16] Akpınar, E., Midilli, A. and Bicer, Y. 2003. Single layer drying behavior of potato slices in a convective cyclone and mathematical modeling. *Energy Conversion and Management*, 44(7): 1689–1705.
- [17] Koca, N. Burdurlu, H.S. and Karadeniz, F. 2007. Kinetics of colour changes in dehydrated carrots. *Journal of Food Engineering*, 78(2): 449-455.
- [18] Yam, K.L. and Papadakis, S.E. 2004. A simple digital imaging method for measuring and analyzing color of food surfaces. *Journal of Food Engineering*, 61(1): 137–142.

Comparison of short and medium infrared radiation on drying parameters of peach slices under vacuum conditions

Amiri Chayjan, R. ^{1*}, Alaei, B. ²

1. Associate Professor, Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran.

2. PhD Student, Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran.

(Received: 93/7/11 Accepted: 94/8/19)

Short and medium infrared radiation implemented as an energy source in drying process under vacuum conditions. Any comparative study was not carried out between these two energy sources in drying process of agricultural products. In this study, effects of short and medium wave of infrared were evaluated and compared on drying behavior of peach slices under vacuum condition. Drying of the samples was implemented under both the energy sources at the absolute pressures of 20, 40 and 60 kPa and drying temperatures of 50, 60 and 70°C. Drying behavior of peach slices as well as the effect of drying conditions on moisture loss trend, effective diffusion coefficient, color and shrinkage of peach slices, dried in an infrared-vacuum dryer were examined. Effective diffusion coefficient of peach slices under medium wave infrared at different drying conditions was more than short wave infrared in the ranges of 2.6×10^{-11} to 1.4×10^{-10} m²/s. Total color difference and shrinkage of peach slices under short wave infrared at different drying conditions was less than medium wave infrared in the range of 6.6 to 8.7 and 7.8% to 9.7%, respectively. Minimum total color difference of peach slices under short and medium wave of infrared were obtained 8.2 and 14.8 and minimum shrinkage of peach slices under short and medium wave infrared were achieved 46.7% and 55.9% respectively.

Keywords: Short wave infrared, Medium wave infrared, Vacuum dryer, Color, Shrinkage

* Corresponding Author E-Mail Address: amirireza@basu.ac.ir