

مدل سازی و مقایسه تغییرات رنگ و چروکیدگی خشک کردن ورقه‌های نازک چغندر قرمز در خشک کن‌های مختلف

مجتبی فتح آبادی^۱، رضا طباطبایی کلور^{۲*}، علی متولی^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد فناوری پس از برداشت محصولات کشاورزی با هدف افزایش مدت زمان نگهداری می‌باشد. پژوهش حاضر به بررسی و

۲- دانشیار گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری

۳- استادیار گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری

(تاریخ دریافت: ۹۸/۰۴/۱۹ تاریخ پذیرش: ۹۸/۰۸/۱۹)

چکیده

خشک کردن یکی از مهم‌ترین فرآیندهای پس از برداشت محصولات کشاورزی با هدف افزایش مدت زمان نگهداری می‌باشد. پژوهش حاضر به بررسی و مقایسه تغییرات رنگ و چروکیدگی ورقه‌های نازک چغندر قرمز در چهار روش مختلف خشک کردن (جریان هوای گرم، مایکروویو، خلا و انجمادی) پرداخته و روند تغییرات این دو پارامتر را با برازش مدل‌های مختلف شبیه‌سازی می‌کند. آزمایش‌ها در خشک‌کن‌های جریان هوای گرم و خلا در سه سطح دمایی (۵۰، ۷۰ و ۹۰°C)، در خشک‌کن مایکروویو در سطح توان (۳۶۰، ۱۸۰، و ۶۰ W) و در خشک‌کن انجمادی با دمای ۵۰°C- انجام گردید. نتایج بدست آمده در تمامی روش‌های مختلف خشک کردن نشان داد که روند تغییرات شاخص‌های روشنایی (L) و زردی (b) نسبت به زمان صعودی و روند تغییرات شاخص قرمزی (a) نزولی بود. کمترین تغییرات پارامتر روشنایی، قرمزی و زردی به ترتیب در خشک کردن انجمادی، مایکروویو و خلا اتفاق افتاد. نتایج کلی بدست آمده نشان داد که بالاترین میزان تغییرات رنگ (ΔE) در خشک کردن با خشک‌کن مایکروویو و در توان ۱۸۰ وات به میزان ۱/۵۹ و پایین‌ترین میزان این پارامتر در خشک کردن با خشک‌کن انجمادی به میزان ۰/۷۶ بدست آمد. همچنین تغییرات چروکیدگی نمونه‌های چغندر قرمز نشان داد که استفاده از خشک‌کن انجمادی سبب کاهش میزان چروکیدگی در حدود ۱۰ تا ۲۵٪ نسبت به سه روش دیگر خشک کردن بود. همچنین، مدل‌سازی پارامترهای رنگی و چروکیدگی نشان داد که مدل‌های نمایی قابلیت بالاتری در پیش‌بینی فرآیند تغییرات رنگ و چروکیدگی دارند.

کلید واژگان: شاخص‌های رنگی، چروکیدگی، مدل‌های ریاضی، چغندر قرمز، خشک کردن

* مسئول مکاتبات: r.tabatabaei@sanru.ac.ir

۱- مقدمه

ماده غذایی اشاره کرد [۱۳]. از دیگر روش‌های خشک‌کردن، استفاده از تکنیک انجمادی می‌باشد که این روش توانایی نگهداری کیفیت محصول (رنگ، شکل، بو و ارزش تغذیه) را به صورت بسیار خوب دارا می‌باشد، اما در عین حال استفاده از این روش نیز مستلزم مصرف انرژی بالایی می‌باشد [۱۴ و ۱۵].

استفاده از روش‌های مختلف خشک‌کردن سبب تغییرات کیفی در محصول خشک‌شده می‌گردد که به شدت بر بازارپسندی و ارزش غذایی آن تاثیرگذار می‌باشد. از مهمترین خصوصیات کیفی مورد بررسی در خشک‌کردن محصولات کشاورزی تغییرات رنگ و چروکیدگی می‌باشد. فراسنج‌های رنگ شامل L^* , a^* , b^* به طور وسیعی برای تشریح تغییرات رنگ طی فرآوری حرارتی میوه‌ها و سبزی‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند. همچنین تغییرات هندسی و ساختمانی مواد غذایی در طی فرآیند خشک‌کردن، از نحوه انتقال جرم محصولات تاثیر پذیرفته که این امر به شدت تحت تاثیر نوع فرآیند خشک‌کردن می‌باشد. پدیده چروکیدگی مواد غذایی طی خشک‌کردن، موضوع مهمی است که به دلیل اعمال حرارت و خروج آب سلولی، تنش و تغییر در ساختار سلولی را در پی دارد [۱۶]. تولیدگرمای زیاد و تسریع خروج رطوبت از بافت نمونه در هنگام اعمال انرژی مایکروویو می‌تواند باعث افزایش میزان چروکیدگی و ترک خوردگی سطحی در محصول خشک شده گردد [۱۷].

پژوهش‌های فراوانی در ارتباط با خشک‌کردن محصولات مختلف کشاورزی و بررسی خصوصیات کیفی آنها در خشک‌کن‌های مختلف انجام شده است. در پژوهشی تغییرات رنگ چغندر قرمز در دماهای خشک‌شدن ۵۰ تا ۱۲۰°C مورد بررسی قرار رفت. نتایج نشان داد که تغییرات رفتار پارامتر رنگی L و b به صورت صعودی و پارامتر رنگی a به صورت نزولی بود. همچنین بررسی و مقایسه سه روش خشک‌کردن (جریان هوای گرم، انجمادی و خلا) بر رفتار رئولوژی و بافت صمغ دانه ریحان نشان داد که بیش‌ترین مقدار سفتی و قوام بافت صمغ به ترتیب به میزان ۷۵/۵ و ۸۰۳/۷ گرم در ثانیه مربوط به نمونه‌های خشک‌شده با استفاده از خشک‌کن انجمادی بود. همچنین بالاترین میزان گرانیروی مربوط به نمونه‌های خشک‌شده در خشک‌کن انجمادی بود [۱۸].

در پژوهشی دیگر به بررسی تغییرات رنگی چغندر قرمز در حین فرآیند غلیظ‌سازی با استفاده از سه روش حرارت‌دهی مایکروویو، خلا و جریان هوای گرم پرداخته شد. نتایج بدست آمده نشان داد

چغندر قرمز غنی از ترکیبات فعال با ارزش مانند کاروتنوئیدها [۱]، گلیسین بتائین و ساپونین [۲]، بتاسایانینو فولات [۳]، بتائین، فولی‌فولوز و فلاونوید بوده و مصرف چغندر می‌تواند عامل پیشگیری از سرطان باشد [۴ و ۵]. همچنین، چغندر قرمز محبوب‌ترین رنگ غذایی مبتنی بر بتالائین بوده که این ماده رنگ دانه‌های محلول در آب دارد و حاوی نیتروژن می‌باشد [۶]. چغندر قرمز را می‌توان به صورت تغلیظ شده یا پودر خشک‌شده در مواد غذایی بکار برد که این امر مستلزم پایین آوردن رطوبت این محصول می‌باشد [۷]. در کنار خصوصیات مهم چغندر قرمز، این محصول به دلیل داشتن رطوبت بالا دارای شدت فسادپذیری زیادی نیز می‌باشد که می‌توان با عملیات خشک‌کردن رطوبت آن را تا حد معینی کاهش داد تا از فساد آن جلوگیری کرد. خشک‌کردن مواد غذایی علاوه بر اینکه سبب اصلاحات آنزیمی می‌گردد مزایای دیگری نیز دارد، که از جمله آن عدم نیاز به سیستم‌های خنک‌کننده گران برای نگهداری مواد، سهولت در حمل و نقل و ذخیره مواد بخاطر کاهش ابعاد آن‌ها، زمان نگهداری طولانی مواد غذایی و داشتن محصولات متنوع با ترکیب و مزه متفاوت است [۹]. یکی از تکنیک‌های مرسوم و مقرون به صرفه در فرآیند خشک‌کردن محصولات کشاورزی، بکارگیری جریان هوای گرم برای خروج رطوبت از محصولات کشاورزی بوده که نیاز به زمان طولانی داشته و سبب اتلاف مواد مغذی ماده، کاهش کیفیت (تغییرات زیاد رنگ) و چروکیدگی زیاد می‌گردد [۱۰]. به منظور برطرف کردن این مشکلات، روش‌های دیگری برای خشک‌کردن مانند خشک‌کردن در خلا، مایکروویو و انجمادی پیشنهاد شده است. استفاده از خلا در فرآیند خشک‌کردن می‌تواند راهکار مناسبی برای افزایش کیفیت محصول باشد و ایجاد خلا یا کاهش فشار سبب کاهش دمای خشک‌کردن شده و به دنبال آن ویژگی‌های کیفی ماده غذایی در حال خشک‌شدن بهبود می‌یابد اما در عین حال باید توجه داشت که این روش مصرف انرژی بالایی دارد [۱۱]. استفاده از خشک‌کن مایکروویو روشی نسبتاً ارزان بوده و به دلیل نفوذ امواج مایکروویو به درون ماده، سبب توزیع دمایی یکنواخت‌تر در سراسر حجم محصول در حال خشک‌شدن شده و ماده سریعتر خشک می‌شود [۱۲]. در عین حال، از معایب این روش می‌توان به امکان تخریب بافت و محدودیت نفوذ امواج به داخل

داده‌های تغییرات وزن داشت. همچنین نتایج بدست آمده از برازش مدل‌های مختلف بر داده‌های تغییرات رنگ نشان داد که مدل ویبول می‌تواند به خوبی این تغییرات را پیش‌بینی نماید [۲۵].

در پژوهشی دیگر به بررسی سینتیک تغییرات رنگ لوگان در طول فرآیند خشک‌شدن با دمای بالا (۶۰ تا ۱۳۰ درجه سلسیوس) پرداخته شد. نتایج نشان داد که مدل سینتیک اصلاح شده (معادله پلی‌نومینال) بهترین برازش را بر داده‌های تجربی تغییرات رنگی بدست آمده داشت [۲۶].

تغییرات رنگ و چروکیدگی ورقه‌های برش خورده گلابی در طول فرآیند خشک‌کردن با جریان هوای گرم مورد بررسی قرار گرفت و نتایج بدست آمده نشان داد که کمترین تغییرات رنگ و چروکیدگی به ترتیب در دمای ۵۰ و ۷۰ درجه سانتیگراد و در سرعت جریان باد ۰/۵ متر بر ثانیه بدست آمد [۲۷].

سینتیک خشک‌شدن و چروکیدگی زالزالک در خشک‌کن بستر سیال ارتعاشی با کنترل رطوبت هوای ورودی در دماهای ۵۰، ۶۰ و ۷۰ درجه سلسیوس بررسی شد. نتایج نشان داد که میزان چروکیدگی میوه زالزالک در طول فرآیند خشک‌کردن تحت تاثیر دما، سرعت جابه‌جایی و رطوبت نسبی هوای ورودی بود. همچنین مناسب‌ترین مدل‌ها جهت بررسی سینتیک خشک‌شدن و چروکیدگی میوه، مدل لگاریتمی بود [۲۸].

چغندر قرمز دارای مقادیر بالایی بتالائین (رنگیزه‌های حساس به حرارت بوده) بوده و مقادیر این ماده به شدت تحت تاثیر روش خشک‌کردن است. از آنجا که استفاده از روش جریان هوای گرم برای خشک‌کردن محصولات مختلف کشاورزی بسیار مرسوم و پرکاربرد می‌باشد، اما در عین حال توانایی ایجاد تغییرات زیاد در ماده خشک‌شده را دارد. در عین حال بررسی منابع مختلف نشان داد که استفاده از روش خشک‌کردن انجمادی به خصوص در مواد یا محصولات حساس به دما می‌تواند روش مناسب برای حفظ کیفیت باشد. اما باید توجه داشت که روش خشک‌کردن جریان هوای گرم روش ارزاتری نسبت به روش خشک‌کردن انجمادی می‌باشد. در عین حال باید توجه داشت که استفاده از روش‌های دیگر خشک‌کردن مانند مایکروویو و خلا نیز می‌تواند جایگزین مناسب برای دو روش دیگر باشد. بدین منظور برای انتخاب روش مناسب‌تر خشک‌کردن لایه‌های چغندر، بررسی روش‌های مختلف خشک‌کردن و به دنبال آن بررسی تغییرات رنگ و چروکیدگی این محصول کشاورزی است و در ادامه باید

که تغییر در مقدار تغییرات کلی رنگ هم از سینتیک مرتبه یک و از مدل مرکب پیروی می‌کند [۱۹].

همچنین در پژوهشی دیگر به بررسی تغییرات و مدل‌سازی چروکیدگی ورقه‌های سیر در طول فرآیند خشک‌کردن به صورت جریان همرفتی پرداخته شد. نتایج بررسی تغییرات درصد چروکیدگی طی خشک شدن در دماهای مختلف هوا و ضخامت ورقه‌ها نشان داد که اثر دمای هوای خشک‌کردن و نیز ضخامت ورقه‌ها روی چروکیدگی محصول معنی‌دار نبود و چروکیدگی فقط تابعی از میزان رطوبت محصول بود [۲۰].

خصوصیات کیفی و میکروبی ماهی خشک‌شده با روش‌های مختلف خشک‌کردن (خشک کردن معمولی با آفتاب، جریان هوای گرم، انجمادی، خشک‌کن خورشیدی هدایتی) مورد بررسی قرار گرفت و نتایج نشان داد که نمونه‌های خشک‌شده با استفاده از روش انجمادی و خشک‌کن خورشیدی هدایتی دارای کمترین تغییرات رنگ و کمترین خصوصیات میکروبی بودند [۲۱].

سته و همکاران در پژوهشی خصوصیات فیزیکی و مکانیکی تمشک خشک‌شده را با استفاده از پیش‌تیمار اسمزی و خشک‌کردن با روش انجمادی و جریان هوای گرم بررسی کردند. نتایج نشان داد که نمونه‌های پیش‌تیمار شده نسبت به نمونه شاهد دارای بافت نرم‌تری بود. همچنین نمونه‌های پیش‌تیمار شده و خشک‌شده در خشک‌کن جریان هوای گرم بود [۲۲]. اثر روش‌های مختلف خشک کردن (انجمادی، سایه و آون) بر تغییرات رنگ فلفل قرمز مورد بررسی قرار گرفت. نتایج بدست آمده نشان داد که خشک‌کردن انجمادی به دلیل حفظ رنگدانه‌ها و میزان پایین اکسیداسیون پارامترهای رنگی را نسبت به نمونه‌های شاهد بهتر حفظ می‌نماید [۲۳].

در پژوهشی دیگر به مدل‌سازی تجربی چروکیدگی در خشک‌کردن انگور پیش‌تیمار شده با فراصوت و کربوکسی‌متیل سلولز پرداخته شد. نتایج نشان داد که تمامی پیش‌تیمارها در مقایسه با نمونه شاهد، چروکیدگی بالاتری دارند. همچنین، افزایش زمان فراصوت، چروکیدگی نمونه‌ها را در مقایسه با تیمار شاهد افزایش داد [۲۴].

بررسی و مدل‌سازی تغییرات رنگ فلفل قرمز در طول فرآیند خشک‌شدن با جریان هوای گرم در سه دمای ۶۰، ۷۰ و ۸۰ درجه سلسیوس پرداخته شد و نتایج بدست آمده نشان داد که با افزایش دما، زمان خشک‌کردن کاهش یافته و مدل ویبول برازش خوبی بر

کامپیوتر برای عکس‌برداری در طول فرآیند خشک‌کردن استفاده گردید.

۲-۱- بررسی شاخص‌های رنگ

شاخص‌های رنگ با استفاده از پارامترهای L^* (تاریکی یا روشنایی)، a^* (قرمزی، سبزی) و b^* (زردی، آبی) در هر مرحله بیان شدند. شاخص L^* ، a^* و b^* به طور مستقیم از سامانه پردازش تصویر توسط نرم افزار ImageJ محاسبه گردید. پارامترهای رنگی نمونه‌ها قبل از شروع آزمایش‌ها توسط سامانه اندازه‌گیری و ثبت گردید و در ادامه در فواصل معین نمونه‌ها از دستگاه‌های مختلف خشک‌کن خارج و پارامترهای رنگی آن‌ها ثبت گردید. به منظور توصیف تغییرات رنگ در طول خشک کردن از شاخص ΔE (اختلاف رنگ کل نمونه‌های خشک شده از نمونه‌های تازه) استفاده شد. که این شاخص به صورت رابطه (۱) تعریف می‌شود. که L^* نماینده روشنایی، b^* رنگ زرد - آبی و a^* نشان دهنده رنگ قرمز سبز می‌باشد [۲۹].

$$\Delta E = \sqrt{(L_0 - L_1)^2 + (a_0 - a_1)^2 + (b_0 - b_1)^2} \quad (1)$$

در رابطه (۱) L_0 ، a_0 ، b_0 مقادیر اولیه پارامترهای رنگی و L_1 ، a_1 ، b_1 مقادیر پارامتر رنگی پس از برداشت ورقه‌های برش خورده چغندر قرمز می‌باشد.

۲-۲- بررسی میزان چروکیدگی

آزمون چروکیدگی به منظور یافتن مقدار کاهش حجم نمونه در طول فرآیند خشک‌کردن انجام گردید. از آنجا که در طول فرآیند خشک‌کردن امکان اندازه‌گیری تغییرات حجم با استفاده از جابه‌جایی تولوئن امکان پذیر نبود، لذا نمونه‌های در حال خشک شدن در زمان‌های مشخص از محیط خشک‌کن خارج شدند. به منظور اندازه‌گیری دقیق مساحت نمونه‌ها، از سامانه پردازش تصویر ImageJ استفاده گردید. نمونه‌ها در درون سامانه قرار داده شدند و با عکس‌برداری از آنها و وارد کردن عکس‌ها درون نرم‌افزار مساحت دقیق آن‌ها تعیین گردید. همچنین به منظور اندازه‌گیری تغییرات در ضخامت نمونه‌ها با استفاده از کولیس دیجیتال ضخامت نمونه‌ها بدقت اندازه‌گیری گردید. به منظور صحت‌سنجی روند انجام اندازه‌گیری‌ها در پایان آزمایش‌ها، تغییرات حجم نمونه‌ها از طریق جابه‌جایی تولوئن نیز اندازه‌گیری

در نظر داشت که علاوه بر تغییرات پایین رنگ و چروکیدگی، مصرف انرژی پایین (هزینه‌پایین‌تر) نیز به همراه داشته باشد. بررسی پژوهش‌های مختلف نشان داد که بررسی تغییرات خصوصیات کیفی بسیاری از محصولات کشاورزی در یک و یا نهایتاً در دو روش خشک‌کردن انجام شده است و تاکنون تحقیق جامعی که به طور همزمان اثرات روش‌های مختلف خشک‌کردن را بر تغییرات رنگ و چروکیدگی ورقه‌های چغندر قرمز را بررسی نماید، انجام نشده است. هدف از پژوهش حاضر بررسی و مقایسه شاخص‌های رنگی و چروکیدگی به همراه فرآیند مدل‌سازی تغییرات رنگ و چروکیدگی در چهار خشک‌کن مختلف جریان هوای گرم، خلا، مایکروویو و انجمادی و انتخاب بهترین روش برای خشک‌کردن ورقه‌های چغندر می‌باشد.

۲-۲- مواد و روش‌ها

در پژوهش حاضر به منظور انجام آزمایش‌ها، چغندر قرمز رقم بیبی‌بیت تهیه و نمونه‌ها در کیسه‌های مشکی در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد در یخچال نگهداری شدند. برای انجام آزمایش‌ها، نمونه‌ها نیم ساعت قبل از شروع آزمایشات از یخچال خارج شده تا با دمای محیط هم‌دما گردند. به منظور تعیین رطوبت اولیه محصول چغندر قرمز قبل از فرآیند خشک کردن، چند نمونه در دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد قرار داده شد تا وزن خشک و رطوبت اولیه آن بدست آید. سپس نمونه‌ها به ضخامت ۴ میلی‌متر و مساحت ۴×۴ (میلی‌متر × میلی‌متر) برش داده شدند. آزمایش‌ها در خشک‌کن جریان هوای گرم و خلا در سه سطح دمایی (۷۰، ۵۰، ۹۰ °C) و در سرعت جریان هوا در خشک‌کن جریان هوای گرم به صورت ثابت ۰/۴ متر بر ثانیه، در خشک‌کن مایکروویو در سه سطح توان مایکروویو (۱۸۰، ۳۶۰ و ۶۰۰ W) و در خشک‌کن انجمادی با دمای ۵۰°C- انجام گردید. در این پژوهش برای انجام خشک‌کردن انجمادی از خشک‌کن آزمایشگاهی انجمادی مدل (ZIRBUS, VACO 5)، برای خشک‌کردن با مایکروویو از دستگاه مایکروویو (سولاردام ساخت کشور کره)، برای خشک‌کردن خلا از دستگاه خشک‌کن خلأی (مدل VS1202، ساخت کره جنوبی) و برای خشک‌کردن جریان هوای گرم از آون فن‌دار (مدل FG ساخت کشور ایران) استفاده گردید. همچنین به منظور اندازه‌گیری تغییرات شاخص‌های رنگ، از دستگاه کالرگرام (D600) متصل به

برای مدل‌سازی تغییرات چروکیدگی ورقه‌های برش خورده چغندر قرمز را نشان می‌دهد. داده‌های تجربی بدست آمده از پارامترهای تغییرات رنگ و چروکیدگی در محیط نرم‌افزار متلب (R2014b) وارد گردید و به دنبال آن مدل‌های رگرسیونی اشاره شده (جدول ۱ و ۲) بر داده‌های تجربی برازش داده شد. به منظور انتخاب مناسب‌ترین مدل توصیف‌کننده تغییر پارامترهای رنگی و چروکیدگی در روش‌های مختلف خشک شدن، از سه معیار ضریب تبیین (R^2) مجموع مربعات خطا (SSE) و ریشه متوسط مربعات خطا (RMSE) استفاده گردید. مقایسه بین نتایج بدست آمده در بکارگیری مدل‌های مختلف، مدلی که دارای بالاترین مقادیر R^2 و پایین‌ترین مقادیر SSE و RMSE باشد، بهتر می‌تواند تغییرات پارامترهای رنگی و چروکیدگی را توصیف کند [۳۱].

شد. نسبت حجمی و درصد چروکیدگی با استفاده از رابطه ۳ بدست آمد [۳۰].

$$V_R = \frac{V_t}{V_0} \quad (2)$$

$$Sh = 1 - \frac{V}{V_0} \quad (3)$$

در رابطه‌های بالا V_R نسبت حجمی (بدون بعد)، V_t حجم نهایی نمونه‌های خشک‌شده (m^3)، V_0 حجم اولیه نمونه‌های قبل از خشک‌شدن (m^3) و Sh میزان چروکیدگی (%) می‌باشد.

۲-۳- مدل سازی پارامترهای رنگی و تغییرات چروکیدگی

جدول ۱ مدل‌های رگرسیونی مورد استفاده برای مدل‌سازی پارامترهای رنگی و جدول ۲ مدل‌های رگرسیونی مورد استفاده

Table 1 Regression models for color parameters

Reference	Mathematical equation	Model	Model No.
[17]	$C=(a_1t+a_2)$	First order	1
[24]	$C=a_1t^2+a_2t+ a_3$	Second order	2
[15]	$C=a_1\exp(-a_2t)$	Exponential 1	3
[24]	$C=(a_1t+a_2)\exp(-a_3t)$	Exponential 2	4
[24]	$C=a_1\exp(-a_2t)+a_3$	Exponential 3	5

Table 2 Regression models for shrinkage parameters

Reference	Mathematical equation	Model	Model No.
[17]	$D_R = K_1X + K_2$	Linear	1
[24]	$D_R = K_1 + K_2X + K_3X^2 + K_4X^3$	Third order	2
[15]	$D_R = K_1(1 + X^{K_2})$	Power	3
	$D_R = (K_1t+K_2) \exp(-K_3X)^{D_1}$	Exponential 1	4
[17]	$D_R = K_1 \exp(-K_2X) + K_2X$	Exponential 1	5
[17]	$D_R = \exp(K_1X + K_2)$	Exponential 1	6

باشد. نتایج بدست آمده از تغییرات روشنایی سطح لایه‌های چغندر در حال خشک‌شدن نشان داد که در تمامی روش‌های خشک‌شدن و در تیمارهای مختلف در این روش‌ها، روند تغییرات روشنایی به صورت صعودی بود. یکی از مهمترین دلایل افزایش روشنایی، تغییرات ماده بتالائین بوده که پایداری آن در فرآیند خشک‌کردن تحت تاثیر فاکتورهای مختلفی مانند رطوبت، دما، نور، اکسیژن و pH است [۳۲]. در طول فرآیند خشک‌کردن تقریباً تمامی این فاکتورها در حال تغییر بوده و به دنبال آن مقادیر فاکتورهای بیان شده روش حرارتی (خشک‌کردن با حرارت)

۳- نتایج و بحث

۳-۱- بررسی سینتیک تغییرات رنگ طی فرایند

خشک‌کردن

۳-۱-۱- تغییرات شاخص رنگ L

چغندر دارای ترکیب فنلی به نام بتالائین بوده که این ماده به صورت محلول در دیواره سلولی بوده که می‌تواند به دو گروه بتاسیانین‌های قرمز رنگ و بتازانتین‌های زرد رنگ قرمز موجود

از آنجا که در روش استفاده از جریان هوای گرم، هم سطح و هم مدت زمان دمای اعمالی بالا بوده، لذا تخریب رنگ‌دانه‌ها در این روش بالا بوده و به دنبال آن کاهش میزان رنگدانه‌ها را در نمونه‌های چغندر به همراه خواهد داشت. نتایج بدست آمده با نتایج سایر پژوهشگران در خشک کردن چغندر قرمز [۳۴-۳۶] مطابقت دارد.

می‌تواند بالاترین تاثیر را بر میزان این ماده را داشته باشد [۳۳]. مقایسه نمودارهای بدست آمده در شکل ۱ نشان داد که بالاترین میزان روند تغییرات در پارامتر میزان روشنایی نمونه‌ها، در روش جریان هوای گرم (آون) و کمترین میزان روند تغییرات در روش انجمادی بود. یکی از مهمترین دلایل نتایج بدست آمده آن است که رنگیزه‌های بتالائین، رنگیزه‌های حساس به حرارت بوده و در اثر افزایش دما و مدتزمان حرارت‌دهی به سرعت تخریب شده و

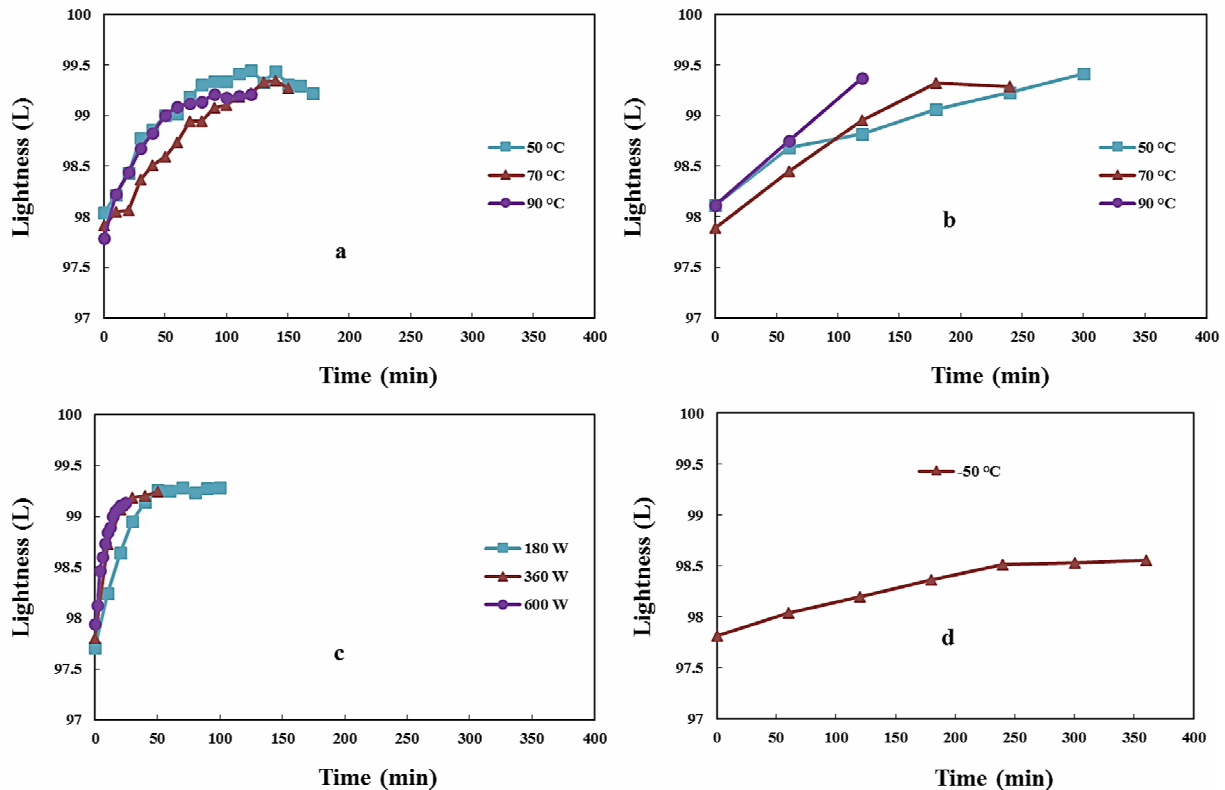


Fig 1 Brightness changes of sugarbeet samples during drying, (a) hot air, (b) vacuum (c) microwave and (d) freeze drying

۳-۱-۲- تغییرات شاخص رنگ a

تجزیه و تخریب رنگدانه‌ها و واکنش‌های قهوه‌ای شدن آنزیمی و غیرآنزیمی به دلیل تماس ماده غذایی با هوای داغ با سرعت بالاتری اتفاق می‌افتد. همچنین نتایج نشان می‌دهد که با افزایش دما میزان تغییرات پارامتر a با گذشت زمان افزایش می‌یابد که دلیل این امر این است که در دماهای کمتر افزایش دمای سطحی بعد از اتمام تخریب سطحی کمتر بوده و در نتیجه واکنش قهوه‌ای شدن در نتیجه افزایش حرارت، کمتر اتفاق می‌افتد. اما در عین حال باید توجه داشت که افزایش دمای خشک‌کردن زمان خشک‌کردن را کاهش داده و مدت زمان ماند نمونه‌ها در محیط خشک‌کن کاهش می‌یابد. استفاده از دمای خشک‌کردن پایین آهنگ تجزیه رنگدانه‌های قرمز به زرد را کاهش داده، اما در عین

شکل ۲ تغییر شاخص رنگی a* (قرمزی) را براساس زمان خشک‌شدن ورقه‌های چغندر قرمز در روش‌های مختلف خشک‌کردن نشان می‌دهد. نتایج بدست آمده از نمودارهای مختلف شکل ۲ نشان داد که با کاهش محتوای رطوبتی و افزایش زمان خشک‌شدن، روند تغییرات این پارامتر نزولی بود. بالاترین میزان تغییرات در شاخص رنگی قرمز در روش خشک‌کردن جریان هوای گرم و خلا و پایین‌ترین میزان تغییرات در روش خشک‌کردن انجمادی بود. یکی از دلایل مهم نتایج بدست آمده این است که در روش خشک‌کردن جریان هوای گرم و خلا،

از لایه‌های داخلی به سطح محصول بالا بوده و با افزایش میزان رطوبت سطحی محصول نسبت میزان بتالین‌ها رنگدانه‌های محلول در آب، به علت افزایش رطوبت سطحی، کاهش می‌یابد. استفاده از روش خشک‌کردن انجمادی به دلیل حرارتی نبودن فرآیند، از تجزیه رنگدانه‌های قرمز تا حدود زیادی جلوگیری کرده و روند تغییرات این پارامتر در نمودار d شکل ۴ نیز موید این نتیجه می‌باشد. این نتایج با نتایج سایر پژوهشگران در خشک‌کردن لایه‌های چغندر قرمز [۳۴ و ۳۵]، مطابقت دارد.

حال مدت زمان ماند نمونه‌ها در محیط خشک‌کن افزایش می‌یابد و این امر نیز تاثیر منفی بر تغییرات رنگ قرمز دارد. همچنین چغندر قرمز دارای رنگدانه‌های غذایی مبتنی بر بتالین بوده که این رنگ دانه محلول در آب می‌باشد. از آنجا که فرآیند خشک‌شدن ورقه‌های چغندر قرمز را می‌توان بر اساس پدیده نفوذ تفسیر کرد باید گفت که رطوبت محصول در حین فرآیند خشک‌شدن از سطح و داخل محصول می‌تواند بر اساس پدیده نفوذ خارج گردد. از آنجا که در مراحل اولیه خشک‌شدن، سرعت خروج رطوبت از سطح محصول بالا می‌باشد و حرکت رطوبت

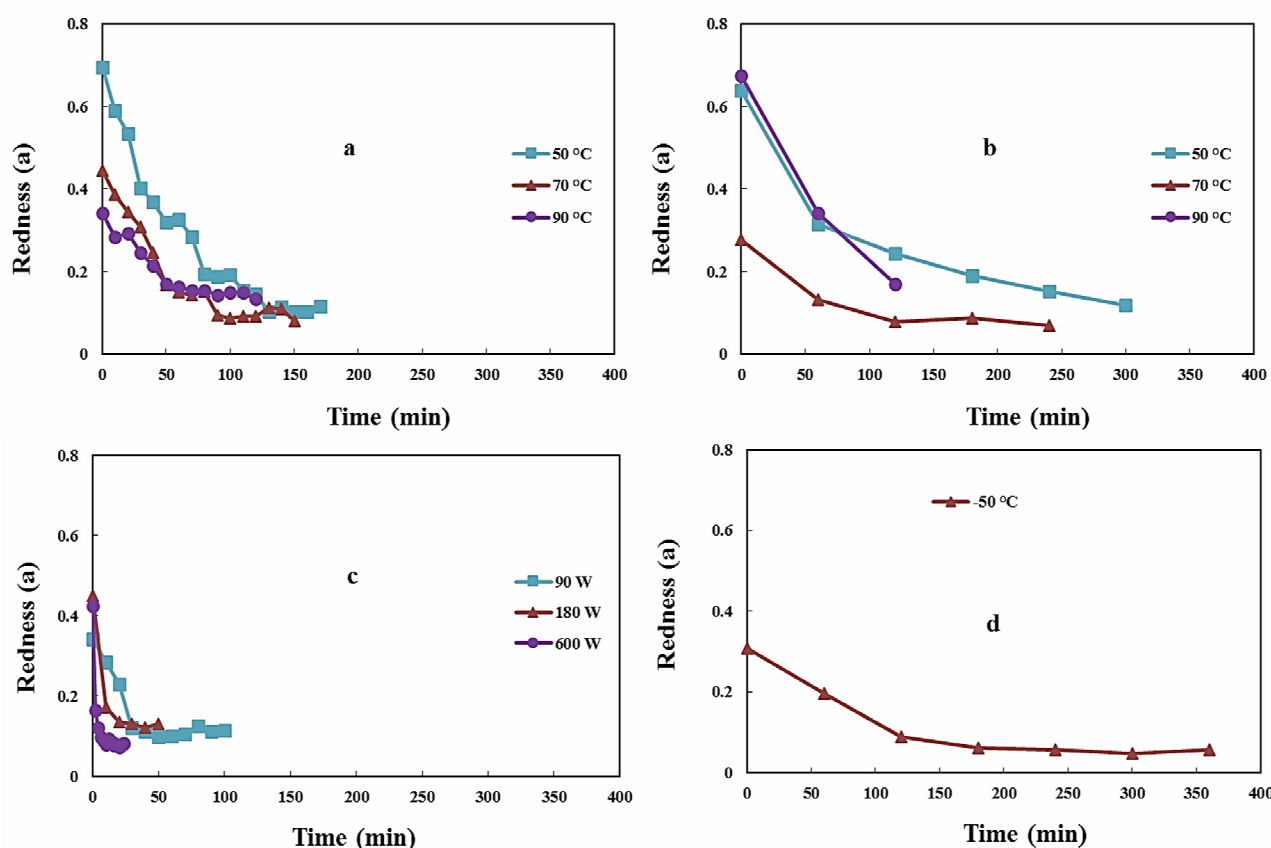


Fig 2 Redness changes of sugarbeet samples during drying, (a) hot air, (b) vacuum (c) microwave and (d) freeze drying

مهمترین دلایل افزایش زردی در طول فرآیند خشک‌شدن نمونه‌های چغندر قرمز این است که در طول عملیات حرارتی، رنگدانه‌ها از حالت قرمز بنفش در اثر حرارت به رنگدانه‌های زرد مایل به قهوه‌ای تجزیه می‌شود. همچنین نتایج بررسی [۳۵] نشان داد که رنگدانه‌های زرد در چغندر پایدارتر از رنگدانه‌های قرمز رنگ (بتالین‌ها) می‌باشد و این امر سبب غلظت بیشتر

۳-۱-۳- تغییرات رنگ شاخص b

شکل ۳ تغییرات شاخص رنگی b را براساس زمان خشک‌شدن ورقه‌های برش خورده چغندر قرمز در روش‌های مختلف خشک‌کردن نشان می‌دهد. روند تغییرات نمودارهای مختلف شکل ۳ نشان از تغییرات صعودی پارامتر زردی می‌باشد. یکی از

آمده از روند تغییرات زردی نمونه‌ها در طول فرآیند خشک‌کردن نشان داد که استفاده از روش خشک‌کردن انجمادی دارای پایین‌ترین میزان تغییرات بود که می‌توان این نتایج را به فرایند و ماهیت خشک‌کردن انجمادی ارتباط داد. در فرایند خشک‌کردن انجمادی اثرات حرارتی بر نمونه‌ها بسیار پایین بوده و بنابراین تجزیه رنگ‌دانه‌های قرمز به رنگ‌دانه‌های زرد بسیار کم بوده و در نهایت میزان زردی نمونه‌های خشک‌شده بسیار نزدیک به نمونه‌های شاهد می‌باشد.

رنگدانه‌های زرد در سطح نمونه‌های خشک‌شده نسبت به نمونه‌های قرمز می‌گردد. نتایج بررسی تغییرات پارامتر زردی در خشک‌کردن نمونه‌های چغندر در خشک‌کن جریان هوای گرم و خلا نشان داد که افزایش دما سبب کاهش میزان تغییرات در این پارامتر گردید. یکی از دلایل این نتایج می‌تواند این باشد که در دمای بالاتر نمونه‌ها مدت زمان کمتری در محیط خشک‌کن در معرض هوای گرم قرار گرفتند و تعداد کمتری از رنگدانه‌های بتالاین (قرمز رنگ) به رنگ زرد تبدیل شدند. نتایج کلی بدست

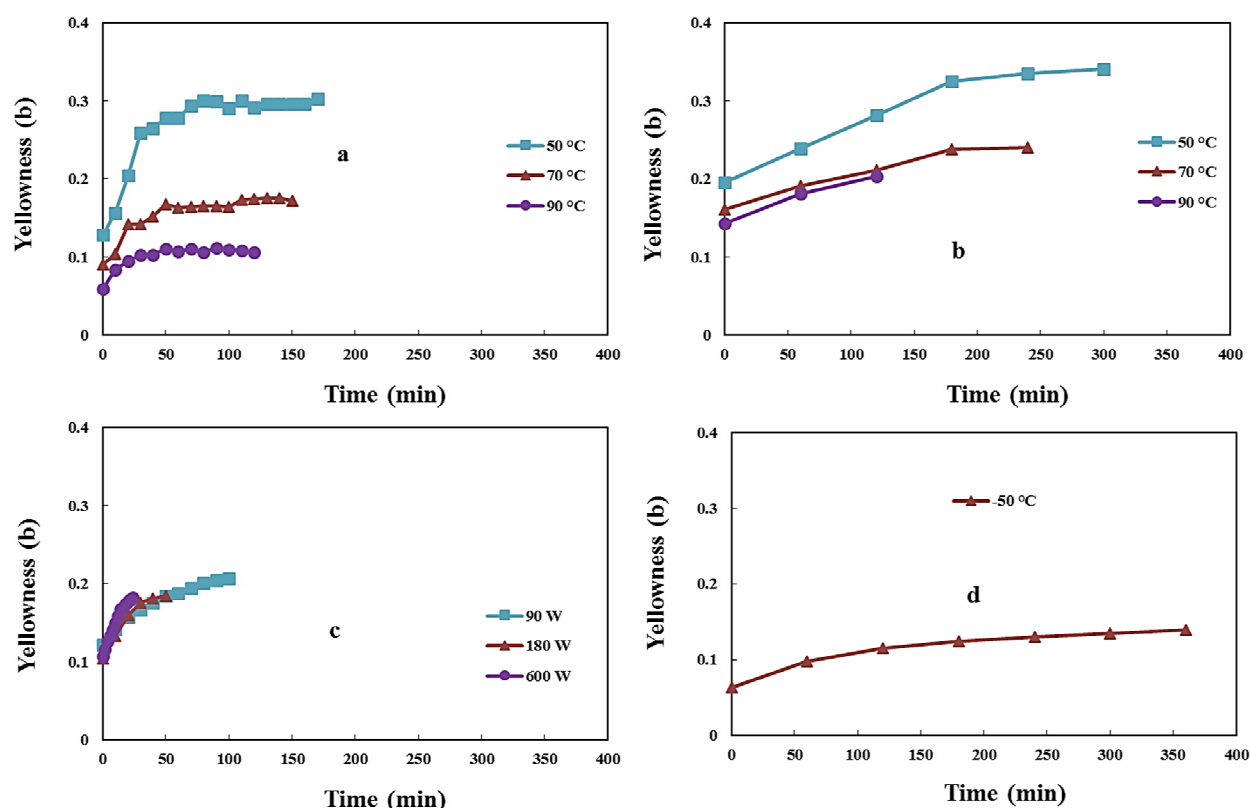


Fig 3 Yellowness changes of sugarbeet samples during drying, (a) hot air, (b) vacuum (c) microwave and (d) freeze drying

افزایش توان مایکروویو میزان تغییرات کلی رنگ کاهش یافت. همچنین میزان تغییرات رنگ در خشک‌کن انجمادی حدود ۵۰٪ کمتر از تغییرات رنگ در خشک‌کن جریان هوای گرم، خلا و مایکروویو بود. دلیل این امر می‌تواند تجزیه رنگدانه‌ها و واکنش‌های قهوه‌ای شدن آنزیمی و غیرآنزیمی باشد که این واکنش‌ها با استفاده از روش خشک‌کردن انجمادی بشدت کاهش

۳-۲- مقایسه تغییرات کلی رنگ در روش‌های

مختلف خشک‌کردن

مقایسه نتایج بدست آمده (شکل ۴) از تغییرات رنگ در روش‌های مختلف خشک‌کردن نشان داد که بالاترین و پایین‌ترین میزان تغییرات این پارامتر به ترتیب در خشک‌کن جریان مایکروویو و انجمادی اتفاق افتاد. البته لازم به ذکر است که با

۲ و ۳) و مدل‌های مختلف (جدول ۲) با استفاده از نرم افزار متلب (در محیط Curve Fitting) بر داده‌های تجربی بدست آمده برازش گردید. نتایج بدست آمده از برازش ۵ مدل انتخابی بر داده‌های آزمایشی نشان داد که مدل نمایی شماره ۳ دارای بالاترین مقادیر R^2 و پایین‌ترین مقادیر SSE و RMSE داشت و توانست سینتیک تغییرات رنگ نمونه‌های چغندر را در طول فرآیند خشک‌کردن در خشک‌کن‌های مختلف بهتر از سایر مدل‌ها پیش‌بینی کند. نتایج بررسی شاخص‌های آماری حاصل از برازش مدل‌های ریاضی بر داده‌های تجربی شاخص‌های رنگی در خشک‌کن جریان هوای گرم نشان داد که بالاترین ضرایب همبستگی مربوط به دمای 50°C بود که برای شاخص L ، a و b به ترتیب به میزان $0/989$ ، $0/987$ و $0/981$ بدست آمد. همچنین بالاترین ضرایب همبستگی در خشک‌کردن به روش خلا برای شاخص‌های L و a مربوط به دمای 70°C به ترتیب به میزان $0/990$ ، $0/992$ برای شاخص b در دمای 50°C به میزان $0/996$ بدست آمد. نتایج بدست آمده از برازش مدل‌های ریاضی بر داده‌های تجربی بدست آمده در محیط خشک‌کن مایکروویو نشان داد که استفاده از توان 600 وات بهترین برازش را بر داده‌های آزمایشگاهی داشت به طوری که ضرایب همبستگی برای شاخص‌های L ، a و b به ترتیب به میزان $0/989$ ، $0/993$ و $0/995$ بدست آمد. از آنجا که دمای آزمایشی برای خشک‌کردن انجمادی فقط یک دما بود (50°C)، برازش ۵ مدل انتخابی بر داده‌های تجربی خشک‌کردن انجمادی نشان داد که ضریب همبستگی برای شاخص‌های L ، a و b به ترتیب به میزان $0/991$ ، $0/969$ و $0/987$ بدست آمد.

مقایسه کلی چهار روش خشک‌کردن نشان داد که استفاده از روش خشک‌کردن انجمادی سبب تغییرات منظم‌تری در شاخص روشنایی (L) شده و مدل نمایی شماره ۳ با بالاترین دقت توانست بر داده‌های تجربی در این روش خشک‌کردن برازش یابد. همچنین نتایج بررسی برازش مدل نمایی شماره ۳ بر داده‌های تجربی شاخص قرمزی (a) در روش‌های مختلف خشک‌کردن نشان داد که استفاده از روش مایکروویو با توان 600 وات می‌تواند بالاترین برازش را در بین تیمارهای مختلف آزمایشی در خشک‌کن‌های مختلف داشته باشد. در نهایت بررسی برازش مدل ریاضی بر داده‌های شاخص زردی (b) در

می‌یابد و تغییرات رنگ کلی نمونه‌ها بسیار کم است. در حالت استفاده از جریان هوای گرم، تجربه رنگدانه‌ها با شدت بالایی صورت می‌گیرد. همچنین با افزایش دمای خشک‌کردن، زمان خشک‌شدن کاهش یافته و محصول در حال خشک‌شدن مدت زمان کمتری در تماس با هوای داغ می‌باشد و به دنبال آن تخریب رنگدانه‌ها در اثر تماس با هوای داغ در طول فرآیند خشک‌کردن کاهش یافته و میزان تغییرات رنگ نمونه‌های چغندر کاهش یافت. همچنین دلیل پایین بودن میزان تغییرات رنگ در نمونه‌های خشک‌شده در روش انجمادی این است که تماس سطحی محصول با اکسیژن به دلیل وجود خلا در هنگام خشک‌کردن کاهش می‌یابد. به دنبال این امر مواد کمپلکس دهنده مانند اسیدسیتریک می‌تواند با بلوکه کردن یون مس و کاهش میزان pH در نمونه‌های در حال خشک‌شدن، سبب کاهش فعالیت آنزیم‌های فنولاز گردند. از طرف دیگر با کاهش دمای خشک‌کردن در این روش، فعالیت آنزیمی کاهش بیشتری یافته و تغییرات رنگ در طول فرآیند خشک‌شدن کمتر می‌گردد.

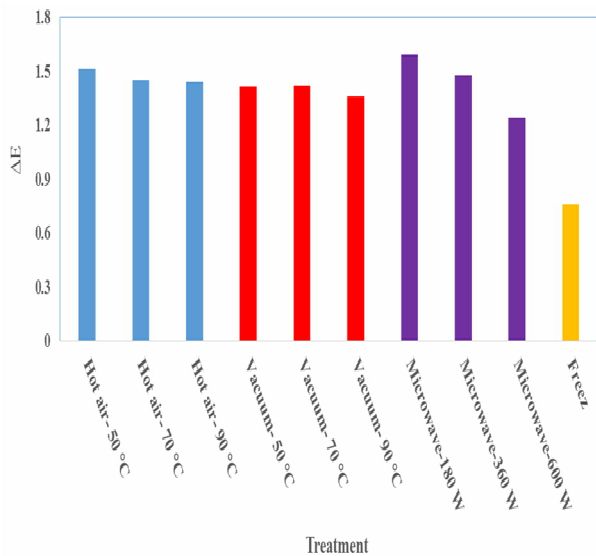


Fig 4 Total color change of sugar beet drying samples in different treatments

۳-۳- مدل‌سازی تغییرات رنگی در روش‌های

مختلف خشک‌کردن

به منظور مدل‌سازی تغییرات شاخص‌های رنگی Lab، ابتدا روند تغییرات این شاخص‌ها نسبت به زمان رسم گردید (شکل‌های ۱،

بکار گرفته شده بهتر می‌تواند چنین تغییراتی را پیشگویی و برازش کند.

خشک‌کردن به روش‌های مختلف نشان داد که استفاده از خشک‌کردن خلا در دمای 50°C می‌تواند روند تغییرات کمتری نسبت به سایر روش‌های خشک‌کردن داشته باشد و مدل ریاضی

Table 3 Coefficients and indices of the best fitted model (Exponential model, No. 3) on the color indices

	Microwave method								
	L			A			b		
	R ²	SSE	RMSE	R ²	SSE	RMSE	R ²	SSE	RMSE
W180	0.975	0.0688	0.0927	0.925	0.00543	0.02605	0.877	0.004	0.0071
W360	0.962	0.0577	0.1387	0.989	0.00442	0.00451	0.974	0.00531	0.0041
W600	0.989	0.01858	0.0432	0.993	0.000695	0.00341	0.995	0.00068	0.00211
Hot air drying method									
50 °C	0.989	0.3878	0.05081	0.987	0.000708	0.002173	0.981	0.0014	0.002685
70 °C	0.988	0.00423	0.00529	0.970	0.00689	0.02146	0.960	0.03935	0.005122
90 °C	0.984	0.03259	0.05709	0.961	0.0023	0.01519	0.971	0.02141	0.004826
Vacuum drying method									
50 °C	0.975	0.02631	0.09366	0.988	0.002141	0.00619	0.996	0.000332	0.00535
70 °C	0.990	0.01432	0.07122	0.992	0.000221	0.00105	0.974	0.002114	0.002901
90 °C	0.986	0.02513	0.08381	0.972	0.003081	0.00231	0.983	0.00221	0.004861
Freeze drying method									
-50 °C	0.991	0.000281	0.02655	0.969	0.001904	0.02182	0.987	0.00227	0.001048

رطوبت یکنواخت بوده و آهنگ تغییرات چروکیدگی کم است. اما با افزایش دمای خشک‌کردن، گرادیان حرارتی بین محصول در حال خشک‌شدن و محیط خشک‌کن افزایش یافته و این امر سبب افزایش حرکت رطوبت از لایه‌های داخلی محصول به سطح لایه برش خورده چغندر شده و این امر سبب ایجاد گرادیان رطوبتی بین لایه‌های سطحی و درونی محصول شده و سبب افزایش تنش داخلی می‌گردد. نتایج بدست آمده با نتایج بدست آمده در خشک‌کردن لایه‌های پیاز در خشک‌کن جریان هوای گرم (در چهار دمای خشک‌کردن ۶۰، ۷۰، ۸۰ و 90°C) [۳۷] و در خشک‌کردن دانه‌های انگور مشابهت دارد [۲۴] همچنین نتایج بدست آمده از استفاده روش مایکروویو مانند دو روش خشک‌کردن دیگر (جریان هوای گرم و خلا) سبب افزایش میزان چروکیدگی می‌گردد. دلیل این امر آن است که استفاده از اشعه مایکروویو در نمونه‌هایی که میزان رطوبت محصول بالا باشد (نمونه‌های چغندر در ابتدای فرآیند خشک‌کردن بالا می‌باشد)، به دلیل افزایش پدیده دو قطبی شدن مولکول‌های آب سبب می‌گردد تا بافت سلولی نمونه پف کرده و تغییر حجم ایجاد شده در دیواره سلولی نمی‌تواند در این حالت نگه داشته شده و در نهایت

۳-۴- بررسی تغییرات چروکیدگی در روش‌های

مختلف خشک‌کردن

نتایج بدست آمده حاصل از تغییرات چروکیدگی در روش‌های مختلف خشک‌کردن نشان داد که روند تغییرات این پارامتر در تمامی تیمارها صعودی بود. روند تغییرات میزان چروکیدگی نشان داد که بالاترین میزان تغییرات حجم مربوط به خشک‌کردن در روش‌های هوای گرم و خلا و پایین‌ترین میزان این تغییرات مربوط به استفاده از روش انجمادی بود. یکی از مهمترین دلایل نتایج بدست آمده این است که استفاده از روش حرارت‌دهی با گرما، سبب خروج بخش زیادی از رطوبت در زمان‌های اولیه خشک‌کردن شده و این امر سبب ایجاد استرس حرارتی در نمونه‌ها شده و به دنبال آن چروکیدگی در نمونه‌ها زیاد می‌گردد. همچنین بررسی اثرات تغییرات دما در دو روش خشک‌کردن جریان هوای گرم و خلا نشان داد که آهنگ تغییرات چروکیدگی با افزایش دمای خشک‌کردن افزایش می‌یابد. یکی از دلایل مهم این نتایج این بود که در دماهای پایین خشک‌شدن به دلیل اختلاف کم دمای نمونه با دمای محیط خشک‌کن، سرعت خروج

کردن، محصول تقریباً ساختار اولیه خود را حفظ کرده و به صورت متخلخل درآمده و شبکه جامد (نمونه‌های خشک‌شده) می‌تواند تا حدودی این ساختار متخلخل را حفظ کند. نتایج بدست آمده با نتایج [۴۰ و ۴۱] مطابقت داشت.

مقایسه کلی روش‌های بدست آمده نشان داد که فرآیند چروکیدگی لایه‌های چغندر قرمز را می‌توان در دو مرحله طبقه‌بندی کرد که مرحله ابتدایی آهنگ تغییرات چروکیدگی بالا بوده و در مرحله دوم آهنگ تغییرات چروکیدگی بسیار کم می‌باشد. یکی از مهم‌ترین دلایل ایجاد این دو مرحله تغییرات رطوبت و مکانیزم حرکت رطوبت می‌باشد. در مرحله ابتدایی رطوبت سطحی نمونه‌های چغندر در حال خشک‌شدن بالا بوده و به دنبال آن سرعت خروج رطوبت از محصول بالا می‌باشد که این امر سبب چروکیدگی بالا را به همراه خواهد داشت. در مرحله دوم خشک‌شدن به دلیل کاهش محتوای رطوبتی و تشکیل لایه سطحی سخت (برای خشک‌کردن به روش‌های جریان هوای گرم، خلا) سرعت خروج رطوبت کاهش یافته و به دنبال آن روند تغییرات چروکیدگی کاهش می‌یابد.

ساختار سلولی به حالت ابتدایی نزدیک شده اما به حالت اولیه خود برنمی‌گردد. این فعل و انفعال درونی در اثر امواج مایکروویو به محصول اعمال شده و سبب کاهش خلل و فرج در طول مرحله اول خشک‌شدن شده و تخریب کلی ساختار درونی نمونه را به دنبال خواهد داشت و میزان چروکیدگی آن افزایش می‌یابد. البته باید توجه داشت که نتایج بدست آمده در پژوهش حاضر حاکی از چروکیدگی کمتر استفاده از روش مایکروویو نسبت به روش جریان هوای گرم و خلا است. نتایج بدست آمده با نتایج حاصل از خشک‌کردن میوه خرما و خشک‌کردن جعفری مشابهت داشت [۳۸ و ۳۹]. بررسی‌های روند تغییرات چروکیدگی در روش خشک‌کردن انجمادی نشان داد که آهنگ تغییرات و میزان چروکیدگی در این روش حدود ۱۰ تا ۲۵٪ پایین‌تر از سه روش دیگر استفاده شده می‌باشد. یکی از دلایل مهم پایین بودن میزان چروکیدگی در روش انجمادی این است که به علت پایین بودن دمای خشک‌کردن، رطوبت نمونه‌ها تبدیل به کریستال‌های جامد شده و به دنبال آن با کاهش فشار در طول فرآیند خشک‌کردن تصعید کریستال‌های جامد اتفاق می‌افتد. این امر سبب می‌گردد که پس از تصعید آب در طی فرآیند خشک

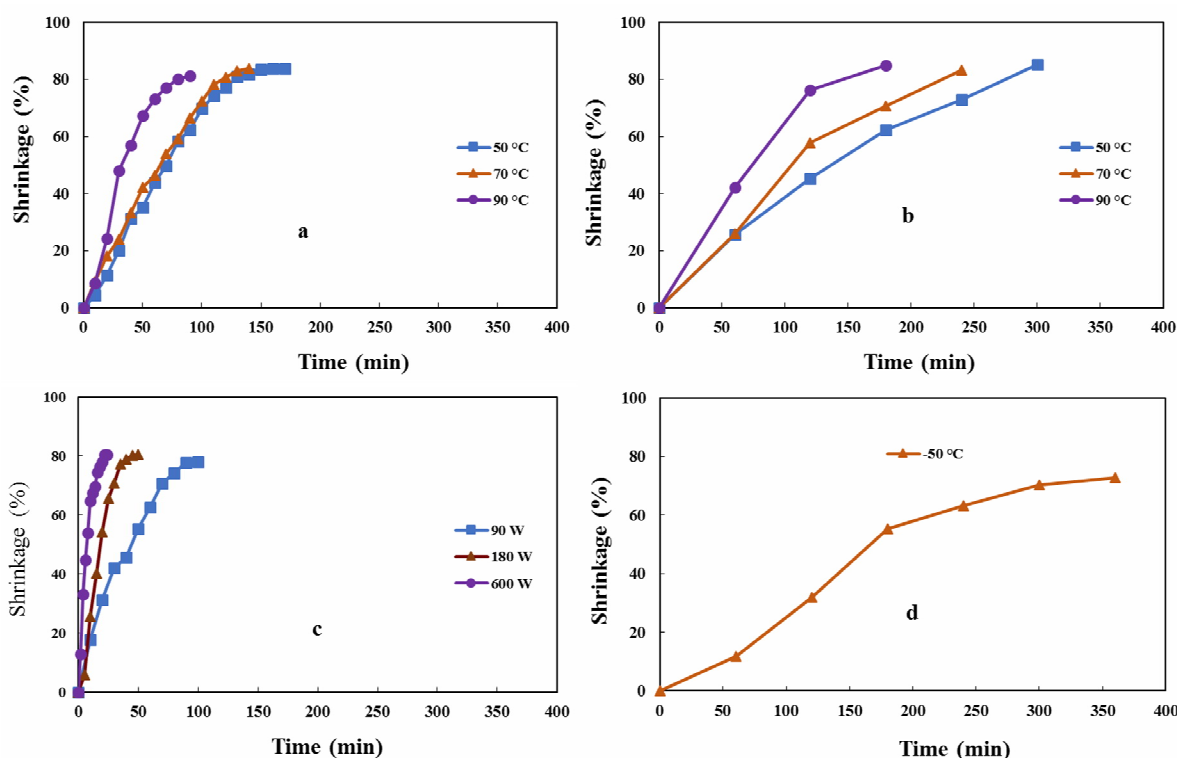


Fig 5 Shrinkage changes of sugarbeet samples during drying, (a) hot air, (b) vacuum (c) microwave and (d) freeze drying

۳-۵- مدل سازی تغییرات چروکیدگی در روش های مختلف خشک کردن

به منظور مدل سازی تغییرات چروکیدگی، ابتدا تغییرات مساحت نمونه های در حال خشک شدن در خشک کن های مختلف توسط دستگاه پردازش تصویر محاسبه گردید و همزمان با این عملیات ضخامت نمونه ها نیز با کولیس دیجیتالی اندازه گیری شد. در ادامه نمودار روند تغییرات چروکیدگی در روش های مختلف خشک کردن به زمان رسم شد (شکل ۷) و مدل های مختلف (جدول ۳) با استفاده از نرم افزار متلب (در محیط Curve Fitting) بر داده های تجربی چروکیدگی بدست آمده، برازش گردید. نتایج بدست آمده در قسمت چروکیدگی نیز مانند شاخص های رنگی از برازش ۶ مدل انتخابی بر داده های آزمایشگاهی بدست آمد که مدل نمایی شماره ۱ (جدول ۲) دارای بالاترین مقادیر R^2 و پایین ترین مقادیر SSE و RMSE داشت. نتایج بررسی شاخص های آماری حاصل از برازش

مدل های ریاضی بر داده های تجربی چروکیدگی در خشک کن جریان هوای گرم نشان داد که بالاترین ضریب همبستگی به میزان ۰/۹۸۷۱ مربوط به دمای ۵۰°C بود. نتایج بررسی مدل سازی در خشک کن جریان هوای گرم نشان داد که بالاترین ضریب همبستگی مربوط به دمای ۵۰°C به میزان ۰/۹۹۹۲ بود. همچنین نتایج بدست آمده از برازش مدل های ریاضی بر داده های تجربی بدست آمده در محیط خشک کن میکروویو نشان داد که استفاده از توان ۱۸۰ وات با ضریب همبستگی ۰/۹۹۶۵ بهترین برازش را بر داده های آزمایشگاهی داشت. نتایج بدست آمده از برازش ۶ بر داده های چروکیدگی در خشک کردن انجمادی نشان داد که مدل نمایی شماره ۱ (جدول ۲) با ضریب همبستگی ۰/۹۷۱۴ بهترین برازش را بر داده ها داشت. همچنین مقایسه کلی در چهار روش خشک کردن نشان داد که استفاده از روش خشک کردن خلا در دمای ۵۰°C سبب تغییرات منظم تری در شاخص چروکیدگی شده و مدل نمایی شماره ۱ بهتر توانست بر داده ها برازش یافته و روند تغییرات چروکیدگی را پیش بینی کند.

Table 4 Coefficients and indices of the best fitted model (Exponential model, No. 1) on the shrinkage

	L			a			b		
	R^2	SSE	RMSE	R^2	SSE	RMSE	R^2	SSE	RMSE
Microwave method									
W180	0.9965	0.000219	0.00176	0.9867	0.00031	0.00019	0.9826	0.00024	0.00099
W360	0.9894	0.01033	0.02716	0.9681	0.00384	0.01241	0.9889	0.01591	0.00981
W600	0.9878	0.00099	0.03155	0.9781	0.00318	0.01136	0.9565	0.05514	0.00993
Hot air drying method									
50 °C	0.9871	0.001893	0.03443	0.9693	0.008496	0.00634	0.9855	0.03571	0.0014
70 °C	0.9641	0.05037	0.06225	0.9794	0.008507	0.00636	0.9711	0.0091	0.0078
90 °C	0.9783	0.01809	0.04755	0.9659	0.008847	0.00724	0.9811	0.00747	0.00341
Vacuum drying method									
50 °C	0.9992	0.000326	0.01199	0.9897	0.00419	0.00446	0.9693	0.008142	0.00987
70 °C	0.9912	0.003781	0.03551	0.9905	0.00404	0.00411	0.9893	0.008701	0.00951
90 °C	0.9917	0.000481	0.02332	0.9713	0.00849	0.00634	0.9772	0.009575	0.01401
Freeze drying method									
-50 °C	0.9714	0.01323	0.00514	0.9350	0.8831	0.00645	0.9588	0.01584	0.0087

- determination of folates in raw and processed beetroots. *Food Chemistry* 80, 579-588,
- [4] Delgado-Vargas, F., Jiménez, A.R. and Paredes-López, O., 2000. Natural pigments: carotenoids, anthocyanins, and betalains—characteristics, biosynthesis, processing, and stability. *Critical reviews in food science and nutrition*, 40(3), pp.173-289.
- [5] Kapadia, G.J., Tokuda, H., Konoshima, T., Nishino, H., 1996. Chemoprevention of lung and skin cancer by *Beta vulgaris* (beet) root extract. *Cancer Letters* 100, 211–2014.
- [6] Raupp, D.D.S., Rodrigues, E., Rockenbach, I.I., Carbonar, A., Campos, P.F.D., Borsato, A.V. and Fett, R., 2011. Effect of processing on antioxidant potential and total phenolics content in beet (*Beta vulgaris* L.). *Food Science and Technology*, 31(3), pp.688-693.
- [7] Ghorbani Hasan Saraei, A., Shahidi, S.A., Mohebbi, M., Moaziyan, R. (2016). Modelling Kinetics of Thermal Colour Degradation in Production of Beetroot Juice Concentrate by Various Heating Methods. *Journal of Food Technology and Nutrition* 13 (2): 87-98.
- [8] Passos, M.L., 2000. A review of: Developments in Drying, Vol. 2, Edited by AS Mujumdar and S. Suvachittanont Kasetsart University Press, Bangkok, Thailand 2000. *Drying Technology*, 18(8), pp.1939-1940.
- [9] Ahmed, J., 2011. Drying of vegetables: principles and dryer design. In: Sinha, N.K Hui, Y.H., Ozgul Evranuz, E., Siddiq, M., J.Ahmed (Eds.), *Handbook of Vegetables and Vegetable Processing*. Wiley-Blackwell publishing, pp. 279-298.
- [10] Figiel, A. (2010). Drying kinetics and quality of beetroots dehydrated by combination of convective and vacuum-microwave methods. *Journal of Food Engineering*, 98(4), pp.461-470.
- [11] Motevali, A., Minaei, S., Khoshtaghaza, M.H. and Amirnejat, H., 2011. Comparison of energy consumption and specific energy requirements of different methods for drying mushroom slices. *Energy*, 36(11), pp.6433-6441.
- [12] Krulis, M., Kühnert, S., Leiker, M. and Rohm, H., 2005. Influence of energy input and initial moisture on physical properties of microwave-vacuum dried strawberries.

۴- نتیجه گیری

در پژوهش حاضر به بررسی شاخص‌های رنگی و تغییرات چروکیدگی در طول فرآیند خشک‌کردن نمونه‌های چغندر قرمز در چهار روش مختلف خشک‌کردن (جریان هوای گرم، خلا، مایکروویو و انجمادی) پرداخته شد. نتایج تغییرات شاخص‌های رنگی Lab در روش‌های مختلف خشک‌کردن نشان داد که کمترین تغییرات در خشک‌کردن به روش انجمادی بود به طوری مقایسه شاخص‌های کلی تغییرات رنگ (ΔE) نشان داد که استفاده از خشک‌کن انجمادی سبب بهبود کیفیت رنگی می‌گردد. همچنین روند تغییرات چروکیدگی نشان داد که بالاترین میزان تغییرات مربوط به خشک‌کردن در روش‌های هوای گرم و خلا و پایین‌ترین میزان این تغییرات مربوط به استفاده از روش انجمادی بود. آهنگ تغییرات شاخص‌های رنگی (روشنایی، قرمزی و زردی) و چروکیدگی در ابتدای فرآیند خشک‌کردن بسیار بالا بوده و در ادامه فرآیند خشک‌کردن و وارد شدن به مرحله نزولی خشک‌شدن، آهنگ تغییرات این دو پارامتر کند بود. نتایج فرآیند مدل‌سازی ریاضی پارامترهای رنگی و چروکیدگی نشان داد که مدل نمایی با دقت بالاتری نسبت به مدل‌های خطی، درجه دوم و سوم و توانی توانست فرآیند تغییرات این پارامترهای را پیش‌بینی کند. در نهایت نتایج کلی بدست آمده از تغییرات رنگ و چروکیدگی نشان داد که استفاده از روش انجمادی می‌تواند خصوصیات کیفی مانند محتوی بتالائین را به دلیل تغییرات کمتر رنگی حفظ کند و تغییرات چروکیدگی نیز دارای کمترین میزان خود برساند.

۵- منابع

- [1] Dias, M.G., Camoes, M.F.G.F.C., Oliveira, L., 2009. Carotenoids in traditional Portuguese fruits and vegetables. *Food Chemistry* 113, 808–815.
- [2] Atamanova, A., Brezhneva, T.A., Slivkin, A.I., Nikolaevskii, V.A., Selemenev, V.F Mironenko, N.V., 2005. Isolation of saponins from table beetroot and primary evaluation of their pharmacological activity. *Pharmaceutical Chemistry Journal* 39 (12): 650-652.
- [3] Jastrebova, J., Witthoft, C., Grahn, A., Svensson, U., Jagerstad, M., 2003. HPLC

- drying. Food and Bioproducts Processing, 100, pp.156-171.
- [23] Topuz, A., Hao, F., Mosbah, K. 2009. The effect of drying method and storage on color characteristics of paprika. LWT-Food Science and Technology, 41, 9117-9173.
- [24] Tahmasebi-Pour, M., Dehghannya, J., Seiedlou-Heris, S.S. 2017. Ghanbarzadeh, B. 2017. Shrinkage empirical modeling during drying of grapes pretreated with ultrasound and carboxymethyl cellulose. JFST, 65, 14: 19-23.
- [25] Yang, X.H., Deng, L.Z., Mujumdar, A.S., Xiao, H.W., Zhang, Q. and Kan, Z., 2018. Evolution and modeling of colour changes of red pepper (*Capsicum annuum* L.) during hot air drying. Journal of Food Engineering, 231, pp.101-108.
- [26] Chunthaworn, S., Achariyaviriya, S., Achariyaviriya, A. and Namsanguan, K., 2012. Color kinetics of longan flesh drying at high temperature. Procedia Engineering, 32: 104-111.
- [27] Khorshidi, Y., Kalantari, D., Asghari, A. 2017. Investigating the Influence of Drying Temperature and Air Flow Velocity on Some Qualitative Specifications of the Sliced Pear during Drying and Employment of Image Processing Technique, Research and Innovation in Food Science and Technology, 6 (1), 87-102.
- [28] Farzan E, Rahimi M R, Madadi Avargani V. 2017. Drying kinetic and shrinkage study of a Hawthorn sample in a vibro fluidized bed dryer using an adsorption system in order to control of inlet air humidity. Journal of Innovative Food Technologies 5 (1), 107-122.
- [29] Hamdami, N. 2009. Study of numerical and experimental apple drying processes associated with using convective dryers, MSc Thesis, Tabriz University, Tabriz, Iran.
- [30] Hafezi, N., Sheikhdavoodi, M.J., and Sajadieh, M.N. 2015. The effect of drying kinetic on shrinkage and color of potato slice in the vacume-infrared drying method. International Journal of Agricultural and Food Research, 4(1): 24-31.
- [31] Naghavi E, Dehghannya J, Ghanbarzadeh B, Rezaei-Mokarram R. Empirical shrinkage modeling of potato strips pretreated with ultrasound and drying during deep-fat frying. European Food Research and Technology, 221(6), pp.803-808.
- [13] Zhang, M., Tang, J., Mujumdar, A.S. and Wang, S., 2006. Trends in microwave-related drying of fruits and vegetables. Trends in Food Science & Technology, 17(10), pp.524-534.
- [14] Litvin, S., Mannheim, C.H. and Miltz, J., 1998. Dehydration of carrots by a combination of freeze drying, microwave heating and air or vacuum drying. Journal of food engineering, 36(1), pp.103-111.
- Properties. Journal of Food Engineering, 81(1), pp.88-97.
- [15] Motevali, A., Hashemi S. J. 2018. Investigating the drying parameters of Fijou fruit in a freeze dryer. Journal of Innovative Food Technologies 5 (4): 699-713.
- [16] Tsuruta, T., Tanigawa, H. and Sashi, H., 2015. Study on shrinkage deformation of food in microwave-vacuum drying. Drying technology, 33(15-16), pp.1830-1836.
- [17] Maskan, A., Kaya, S. and Maskan, M., 2002. Effect of concentration and drying processes on color change of grape juice and leather (pestil). Journal of Food Engineering, 54(1), pp.75-80.
- [18] Salehi, F., Kashaninejad, M. 2014. Effects of Drying Methods and Conditions on Rheology and Texture of Basil Seed Gum. Journal of Innovative Food Technologies, 1 (2), 39-48.
- [7] Ghorbani Hasan Saraei, A., Shahidi, S.A., Mohebbi, M., Moaziyan, R. (2016). Modelling Kinetics of Thermal Colour Degradation in Production of Beetroot Juice Concentrate by Various Heating Methods. Journal of Food Technology and Nutrition 13 (2): 87-98.
- [20] Rasouli, M., Seiedlou, S. 2012. A Study of the Shrinkage Changes and Mathematical Modeling of Garlic (*Allium sativum* L.) During Convective Drying. Journal of Agricultural machinery, 2 (1): 67-73.
- [21] Nagwekar, N., Tidke, V. and Thorat, B.N. 2017. Microbial and biochemical analysis of dried fish and comparative study using different drying methods. Drying Technology, 35(12), pp.1481-1491.
- [22] Sette, P., Salvatori, D. and Schebor, C., 2016. Physical and mechanical properties of raspberries subjected to osmotic dehydration and further dehydration by air-and freeze-

- processing of red beets. *Journal of Food Science*, 46 (6), 1715-1713.
- [37] Abbasi, S., Mousavi, S.M. and Mohebbi, M., 2011. Investigation of changes in physical properties and microstructure and mathematical modeling of shrinkage of onion during hot air drying.
- [38] Mehryar E, Sadeghi M, Razavi S J, Forghani E. Qualitative Indices of Istamaran Date Variety Affected by Various Drying Methods. *JCPP*. 2015; 5 (16): 305-313
- [39] Noori M., Kashaninejad M., Daraei Garnekhani A., M. Bolandi. 2013. Optimization of drying process of parsley using the combination of hot air and microwave methods. *Electronic journal of food process and preservation*, 4 (2), 103-122.
- [40] Krokida, M.K. and Maroulis, Z.B., 1997. Effect of drying method on shrinkage and porosity. *Drying technology*, 15(10), pp.2441-2458.
- [41] Krokida, M.K., Karathanos, V.T. and Maroulis, Z.B., 1998. Effect of freeze-drying conditions on shrinkage and porosity of dehydrated agricultural products. *Journal of Food Engineering*, 35(4), pp.369-380.
- Iranian Journal of Nutrition Sciences & Food Technology. 2013; 8 (3): 99-111.
- [32] Malekghasemi A, Sadeghi Mahoonak A, Ghorbani M, Alami M, Maghsoudlou Y. 2014. The effect of cooking method on antioxidant activity and betalain content of red beet. *Journal of Innovative Food Technologies*, 1 (4), 29-36.
- [33] Escribano, J., Gandía-Herrero, F., Caballero, N. and Pedreño, M.A., 2002. Subcellular localization and isoenzyme pattern of peroxidase and polyphenol oxidase in beet root (*Beta vulgaris* L.). *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 50(21), pp.6123-6129.
- [34] Chandran, J., Nisha, P., Singhal, R.S. and Pandit, A.B., 2014. Degradation of colour in beetroot (*Beta vulgaris* L.): a kinetics study. *Journal of food science and technology*, 51(10), 2684-2678.
- [35] Gokhale, S.V. and Lele, S.S., 2011. Dehydration of red beet root (*Beta vulgaris*) by hot air drying: process optimization and mathematical modeling. *Food Science and Biotechnology*, 20(4), p.955.
- [36] Von Elbe, J.H., Schwartz, S.J. and Hildenbrand, B.E., 1981. Loss and regeneration of betacyanin pigments during

Modeling and comparison of color changes and shrinkage of thin layer drying of red beetroot in different dryers

Fathabadi, M.¹, Tabatabaekolour, R.^{2*}, Motevali, A.³

1. MSc student, Department of Mechanics of Biosystem Engineering, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran
2. Assistant professor, Department of Mechanics of Biosystem Engineering, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran
3. Associate professor, Department of Mechanics of Biosystem Engineering, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran

(Received: 2019/07/10 Accepted:2019/11/10)

Drying is one of the most important post-harvesting processes with the aim of increasing the storage time. The present study investigates and compares color changes and shrinkage of red beetroot thin layers in four different drying methods (hot air flow, microwave, vacuum and freeze drying). The process of changing these two parameters was simulated by fitting to different models. The experiments were carried out in hot air and vacuum air dryers at three temperature levels (50, 70 and 90 °C), in microwave dryer at a power level of 180, 360 and 600 W, and in a freeze dryer at -50 °C. The results showed that the changes in the brightness index (L) and yellowness (b) relative to the time were increasing and the trend of changes in the red index (a) was decreasing. The slightest changes in the parameters of brightness, redness and yellowness occurred in freeze drying, microwave and vacuum, respectively. The overall results showed that the highest amount of color change (ΔE) was 1.59 in drying by microwave and at 180 W, and the lowest drying rate was 0.76 in freeze drying. Also, shrinkage changes in sugar beet samples showed that the use of freeze dryer reduced the amount of shrinkage by 10-25% compared to the other three methods of drying. Also, modeling of color parameters and shrinkage showed that exponential models have higher ability to predict the process of color variation and shrinkage.

Keywords: Color indices, Shrinkage, Mathematical model, Red beetroot, Drying

* Corresponding Author E-Mail Address: r.tabatabaei@sanru.ac.ir