

مدل سازی و مقایسه تغییرات رنگ و چروکیدگی خشک کردن ورقه های نازک چغندر قرمز در خشک کن های مختلف

مجتبی فتح آبادی¹، رضا طباطبایی کلور^{2*}، علی متولی³

1- دانشجوی کارشناسی ارشد فناوری پس از برداشت گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری

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

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

(تاریخ دریافت: 98/04/19 تاریخ پذیرش: 98/08/19)

چکیده

خشک کردن یکی از مهم ترین فرآیندهای پس از برداشت محصولات کشاورزی با هدف افزایش مدت زمان نگهداری می باشد. پژوهش حاضر به بررسی و مقایسه تغییرات رنگ و چروکیدگی ورقه های 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 مدل های مختلف شبیه سازی می کند. آزمایش ها در خشک کن های جریان هوای گرم و خلا در سه سطح دمایی (50، 70 و 90°C)، در خشک کن مایکروویو در سطح توان (180، 360 و 600 W) و در خشک کن انجمادی با دمای 50°C- انجام گردید. نتایج بدست آمده در تمامی روش های مختلف خشک کردن نشان داد که روند تغییرات شاخص های 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 خشک کن مایکروویو و در توان 180 وات به میزان 1/59 و پایین ترین میزان این پارامتر در خشک کردن با خشک کن انجمادی به میزان 0/76 بدست آمد. همچنین تغییرات چروکیدگی نمونه های چغندر قرمز نشان داد که استفاده از خشک کن انجمادی سبب کاهش میزان چروکیدگی در حدود 10 تا 25% نسبت به سه روش دیگر خشک کردن بود. همچنین، مدل سازی پارامترهای رنگی و چروکیدگی نشان داد که مدل های نمایی قابلیت بالاتری در پیش بینی فرآیند تغییرات رنگ و چروکیدگی دارند.

کلید واژگان: شاخص های رنگی، چروکیدگی، مدل های ریاضی، چغندر قرمز، خشک کردن

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

1- مقدمه

چغندر قرمز غنی از ترکیبات فعال با ارزش مانند کاروتنوئیدها [1]، گلیسین بتائین و ساپونین [2]، بتاسیانینو فولات [3]، بتائین، فولی فنولز و فلاونوید بوده و مصرف چغندر می تواند عامل پیشگیری از سرطان باشد [5 و 4]، همچنین، چغندر قرمز محبوب ترین رنگ غذایی مبتنی بر بتالائین بوده که این ماده رنگ دانه های محلول در آب دارد و حاوی نیتروژن می باشد [6]، چغندر قرمز را می توان به صورت تغلیظ شده یا پودر خشک شده در مواد غذایی بکار برد که این امر مستلزم پایین آوردن رطوبت این محصول می باشد [7]، در کنار خصوصیات مهم چغندر قرمز، این محصول به دلیل داشتن رطوبت بالا دارای شدت فسادپذیری زیادی نیز می باشد که می توان با عملیات خشک کردن رطوبت آن را تا حد معینی کاهش داد تا از فساد آن جلوگیری کرد. خشک کردن مواد غذایی علاوه بر اینکه سبب اصلاحات آنزیمی می گردد مزایای دیگری نیز دارد، که از جمله آن عدم نیاز به سیستم های خنک کننده گران برای نگهداری مواد، سهولت در حمل و نقل و ذخیره مواد بخاطر کاهش ابعاد آن ها، زمان نگهداری طولانی مواد غذایی و داشتن محصولات متنوع با ترکیب و مزه متفاوت است [9]، یکی از تکنیک های مرسوم و مقرون به صرفه در فرآیند خشک کردن 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 می گردد [10]، به منظور برطرف کردن این مشکلات، روش های دیگری برای خشک کردن مانند خشک کردن در خلا، مایکروویو و انجمادی پیشنهاد شده است. استفاده از خلا در فرآیند خشک کردن می تواند راهکار مناسبی برای افزایش کیفیت محصول باشد و ایجاد خلا یا کاهش فشار سبب کاهش دمای خشک کردن شده و به دنبال آن ویژگی های کیفی ماده غذایی در حال خشک شدن بهبود می یابد اما در عین حال باید توجه داشت که این روش مصرف انرژی بالایی دارد [11]، استفاده از خشک کن مایکروویو روشی نسبتاً ارزان بوده و به دلیل نفوذ امواج مایکروویو به درون ماده، سبب توزیع دمایی یکنواخت تر در سراسر حجم محصول در حال خشک شدن شده و ماده سریعتر خشک می شود [12]، در عین حال، از معایب این روش می توان به امکان تخریب بافت و محدودیت نفوذ امواج به داخل

ماده غذایی اشاره کرد [13]، از دیگر روش های خشک کردن، استفاده از تکنیک انجمادی می باشد که این روش توانایی نگهداری کیفیت محصول (رنگ، شکل، بو و ارزش تغذیه) را به صورت بسیار خوب دارا می باشد، اما در عین حال استفاده از این روش نیز مستلزم مصرف انرژی بالایی می باشد [14 و 15]، استفاده از روش های مختلف خشک کردن سبب تغییرات کیفی در محصول خشک شده می گردد که به شدت بر بازارپسندی و ارزش غذایی آن تاثیرگذار می باشد، از مهمترین خصوصیات کیفی مورد بررسی در خشک کردن محصولات کشاورزی تغییرات رنگ و چروکیدگی می باشد، فراسنج های رنگ شامل L^* ، a^* ، b^* به طور وسیعی برای تشریح تغییرات رنگ طی فرآوری حرارتی میوه ها و سبزی ها مورد استفاده قرار می گیرند، همچنین تغییرات هندسی و ساختمانی مواد غذایی در طی فرآیند خشک کردن، از نحوه انتقال جرم محصولات تاثیر پذیرفته که این امر به شدت تحت تاثیر نوع فرآیند خشک کردن می باشد، پدیده چروکیدگی مواد غذایی طی خشک کردن، موضوع مهمی است که به دلیل اعمال حرارت و خروج آب سلولی، تنش و تغییر در ساختار سلولی را در پی دارد [16]، تولید گرمای زیاد و تسریع خروج رطوبت از بافت نمونه در هنگام اعمال انرژی مایکروویو می تواند باعث افزایش میزان چروکیدگی و ترک خوردگی سطحی در محصول خشک شده گردد [17]،

پژوهش های فراوانی در ارتباط با خشک کردن محصولات مختلف کشاورزی و بررسی خصوصیات کیفی آنها در خشک کن های مختلف انجام شده است، در پژوهشی تغییرات رنگ چغندر قرمز در دماهای خشک شدن 50 تا 120°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 خشک کردن (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 75/5 و 803/7 گرم در ثانیه مربوط به نمونه های خشک شده با استفاده از خشک کن انجمادی بود، همچنین بالاترین میزان گرانیوزی مربوط به نمونه های خشک شده در خشک کن انجمادی بود [18]، در پژوهشی دیگر به بررسی تغییرات رنگی چغندر قرمز در حین فرآیند غلیظ سازی با استفاده از سه روش حرارت دهی مایکروویو، خلا و جریان هوای گرم پرداخته شد، نتایج بدست آمده نشان داد

که تغییر در مقدار تغییرات کلی رنگ هم از سینتیک مرتبه یک و از مدل مرکب پیروی می کند [19].

همچنین در پژوهشی دیگر به بررسی تغییرات و مدل سازی چروکیدگی ورقه های سیر در طول فرآیند خشک کردن به صورت جریان همرفتی پرداخته شد. نتایج بررسی تغییرات درصد چروکیدگی طی خشک شدن در دماهای مختلف هوا و ضخامت ورقه ها نشان داد که اثر دمای هوای خشک کردن و نیز ضخامت ورقه ها روی چروکیدگی محصول معنی دار نبود و چروکیدگی فقط تابعی از میزان رطوبت محصول بود [20].

خصوصیات کیفی و میکروبی ماهی خشک شده با روش های مختلف خشک کردن (خشک کردن معمولی با آفتاب، جریان هوای گرم، انجمادی، خشک کن خورشیدی هدایتی) مورد بررسی قرار گرفت و نتایج نشان داد که نمونه های خشک شده با استفاده از روش انجمادی و خشک کن خورشیدی هدایتی دارای کمترین تغییرات رنگ و کمترین خصوصیات میکروبی بودند [21].

سته و همکاران در پژوهشی خصوصیات فیزیکی و مکانیکی تمشک خشک شده را با استفاده از پیش تیمار اسمزی و خشک کردن با روش انجمادی و جریان هوای گرم بررسی کردند. نتایج نشان داد که نمونه های پیش تیمار شده نسبت به نمونه شاهد دارای بافت نرمتری بود. همچنین نمونه های پیش تیمار شده و خشک شده در خشک کن انجمادی دارای بافت نرمتری نسبت به نمونه های پیش تیمار شده و خشک شده در خشک کن جریان هوای گرم بود [22]. اثر روش های مختلف خشک کردن (انجمادی، سایه و آون) بر تغییرات رنگ فلفل قرمز مورد بررسی قرار گرفت. نتایج بدست آمده نشان داد که خشک کردن انجمادی به دلیل حفظ رنگدانه ها و میزان پایین اکسیداسیون پارامترهای رنگی را نسبت به نمونه های شاهد بهتر حفظ می نماید [23].

در پژوهشی دیگر به مدل سازی تجربی چروکیدگی در خشک کردن انگور پیش تیمار شده با فراصوت و کربوکسی متیل سلولز پرداخته شد. نتایج نشان داد که تمامی پیش تیمارها در مقایسه با نمونه شاهد، چروکیدگی بالاتری دارند. همچنین، افزایش زمان فراصوت، چروکیدگی نمونه ها را در مقایسه با تیمار شاهد افزایش داد [24].

بررسی و مدل سازی تغییرات رنگ فلفل قرمز در طول فرآیند خشک شدن با جریان هوای گرم در سه دمای 60، 70 و 80 درجه سلسیوس پرداخته شد و نتایج بدست آمده نشان داد که با افزایش دما، زمان خشک کردن کاهش یافته و مدل ویبول برازش خوبی بر

داده های تغییرات وزن داشت. همچنین نتایج بدست آمده از برازش مدل های مختلف بر داده های تغییرات رنگ نشان داد که مدل ویبول می تواند به خوبی این تغییرات را پیش بینی نماید [25].

در پژوهشی دیگر به بررسی سینتیک تغییرات رنگ لوگان در طول فرآیند خشک شدن با دمای بالا (60 تا 130 درجه سلسیوس) پرداخته شد. نتایج نشان داد که مدل سینتیکی اصلاح شده (معادله پلی نومینال) بهترین برازش را بر داده های تجربی تغییرات رنگی بدست آمده داشت [26].

تغییرات رنگ و چروکیدگی ورقه های برش خورده گلابی در طول فرآیند خشک کردن با جریان هوای گرم مورد بررسی قرار گرفت و نتایج بدست آمده نشان داد که کمترین تغییرات رنگ و چروکیدگی به ترتیب در دمای 50 و 70 درجه سانتیگراد و در سرعت جریان باد 0/5 متر بر ثانیه بدست آمد [27].

سینتیک خشک شدن و چروکیدگی زالزالک در خشک کن بستر سیال ارتعاشی با کنترل رطوبت هوای ورودی در دماهای 50، 60 و 70 درجه سلسیوس بررسی شد. نتایج نشان داد که میزان چروکیدگی میوه زالزالک در طول فرایند خشک کردن تحت تاثیر دما، سرعت جابه جایی و رطوبت نسبی هوای ورودی بود. همچنین مناسب ترین مدل ها جهت بررسی سینتیک خشک شدن و چروکیدگی میوه، مدل لگاریتمی بود [28].

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

کامپیوتر برای عکس بردای در طول فرآیند خشک کردن استفاده گردید.

2-1- بررسی شاخص های رنگ

شاخص های 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 نمونه ها قبل از شروع آزمایش ها توسط سامانه اندازه گیری و ثبت گردید و در ادامه در فواصل معین نمونه ها از دستگاه های مختلف خشک کن خارج و پارامترهای رنگی آن ها ثبت گردید. به منظور توصیف تغییرات رنگ در طول خشک کردن از شاخص ΔE (اختلاف رنگ کل نمونه های خشک شده از نمونه های تازه) استفاده شد. که این شاخص به صورت رابطه (1) تعریف می شود. که L^* نماینده روشنایی، b^* رنگ زرد - آبی و a^* نشان دهنده رنگ قرمز سبز می باشد [29].

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

در رابطه (1) L_0 ، a_0 ، b_0 مقادیر اولیه پارامترهای رنگی و L_1 ، a_1 ، b_1 مقادیر پارامتر رنگی پس از برداشت ورقه های برش خورده چغندر قرمز می باشد.

2-2- بررسی میزان چروکیدگی

آزمون چروکیدگی به منظور یافتن مقدار کاهش حجم نمونه در طول فرآیند خشک کردن انجام گردید. از آنجا که در طول فرآیند خشک کردن امکان اندازه گیری تغییرات حجم با استفاده از جابه جایی تولوئن امکان پذیر نبود، لذا نمونه های در حال خشک شدن در زمان های مشخص از محیط خشک کن خارج شدند. به منظور اندازه گیری دقیق مساحت نمونه ها، از سامانه پردازش تصویر ImageJ استفاده گردید. نمونه ها در درون سامانه قرار داده شدند و با عکس برداری از آنها و وارد کردن عکس ها درون نرم افزار مساحت دقیق آن ها تعیین گردید. همچنین به منظور اندازه گیری تغییرات در ضخامت نمونه ها با استفاده از کولیس دیجیتال ضخامت نمونه ها بدقت اندازه گیری گردید. به منظور صحت سنجی روند انجام اندازه گیری ها در پایان آزمایش ها، تغییرات حجم نمونه ها از طریق جابه جایی تولوئن نیز اندازه گیری

در نظر داشت که علاوه بر تغییرات پایین رنگ و چروکیدگی، مصرف انرژی پایین (هزینه پایین تر) نیز به همراه داشته باشد. بررسی پژوهش های مختلف نشان داد که بررسی تغییرات خصوصیات کیفی بسیاری از محصولات کشاورزی در یک و یا نهایتاً در دو روش خشک کردن انجام شده است و تاکنون تحقیق جامعی که به طور همزمان اثرات روش های مختلف خشک کردن را بر تغییرات رنگ و چروکیدگی ورقه های چغندر قرمز را بررسی نماید، انجام نشده است. هدف از پژوهش حاضر بررسی و مقایسه شاخص های رنگی و چروکیدگی به همراه فرآیند مدل سازی تغییرات رنگ و چروکیدگی در چهار خشک کن مختلف جریان هوای گرم، خلا، مایکروویو و انجمادی و انتخاب بهترین روش برای خشک کردن ورقه های چغندر می باشد.

2- مواد و روش ها

در پژوهش حاضر به منظور انجام آزمایش ها، چغندر قرمز رقم بیبی بیت تهیه و نمونه ها در کیسه های مشکی در دمای 4 درجه سانتی گراد در یخچال نگهداری شدند. برای انجام آزمایش ها، نمونه ها نیم ساعت قبل از شروع آزمایشات از یخچال خارج شده تا با دمای محیط هم دما گردند. به منظور تعیین رطوبت اولیه محصول چغندر قرمز قبل از فرآیند خشک کردن، چند نمونه در دمای 105 درجه سانتی گراد قرار داده شد تا وزن خشک و رطوبت اولیه آن بدست آید. سپس نمونه ها به ضخامت 4 میلی متر و مساحت 4×4 (میلی متر $\times$ میلی متر) برش داده شدند. آزمایش ها در خشک کن جریان هوای گرم و خلا در سه سطح دمایی (50، 70 و 90 °C) و در سرعت جریان هوا در خشک کن جریان هوای گرم به صورت ثابت 0/4 متر بر ثانیه، در خشک کن مایکروویو در سه سطح توان مایکروویو (180، 360 و 600 W) و در خشک کن انجمادی با دمای 50°C- انجام گردید. در این پژوهش برای انجام خشک کردن انجمادی از خشک کن آزمایشگاهی انجمادی مدل (ZIRBUS, VACO 5)، برای خشک کردن با مایکروویو از دستگاه مایکروویو (سولاردام ساخت کشور کره)، برای خشک کردن خلا از دستگاه خشک کن خلائی (مدل VS1202، ساخت کره جنوبی) و برای خشک کردن جریان هوای گرم از آون فن دار (مدل FG ساخت کشور ایران) استفاده گردید. همچنین به منظور اندازه گیری تغییرات شاخص های رنگ، از دستگاه کالرگرام (D600) متصل به

شد. نسبت حجمی و درصد چروکیدگی با استفاده از رابطه 3 بدست آمد [30].

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

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

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

2-3- مدل سازی پارامترهای رنگی و تغییرات

چروکیدگی

جدول 1 مدل‌های رگرسیونی مورد استفاده برای مدل‌سازی پارامترهای رنگی و جدول 2 مدل‌های رگرسیونی مورد استفاده

Table 1 Regression models for color parameters

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

Table 2 Regression models for shrinkage parameters

Reference	Mathematical equation	Model	Model No.
[17]	$D_R = K_1 X + K_2$	Linear	1
[24]	$D_R = K_1 + K_2 X + K_3 X^2 + K_4 X^3$	Third order	2
[15]	$D_R = K_1 (1 + X^{K_2})$	Power	3
	$D_R = (K_1 t + K_2) \exp(-K_3 X)^{D_1}$	Exponential 1	4
[17]	$D_R = K_1 \exp(-K_2 X) + K_2 X$	Exponential 1	5
[17]	$D_R = \exp(K_1 X + K_2)$	Exponential 1	6

باشد. نتایج بدست آمده از تغییرات روشنایی سطح لایه‌های چغندر در حال خشک شدن نشان داد که در تمامی روشهای خشک شدن 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 خشک کردن تحت تاثیر فاکتورهای مختلفی مانند رطوبت، دما، نور، اکسیژن و pH است [32]. در طول فرآیند خشک کردن تقریباً تمامی این فاکتورها در حال تغییر بوده و به دنبال آن مقادیر فاکتورهای بیان شده روش حرارتی (خشک کردن با حرارت)

3- نتایج و بحث

3-1- بررسی سینتیک تغییرات رنگ طی فرایند

خشک کردن

3-1-1- 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 رنگ دانه‌ها 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 [34-36] مطابقت دارد.

می‌تواند بالاترین تاثیر را بر میزان این ماده را داشته باشد [33]. مقایسه نمودارهای بدست آمده در شکل 1 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 رنگی‌های بتالائین، رنگی‌های حساس به حرارت بوده و در اثر افزایش دما و مدت زمان حرارت‌دهی به سرعت تخریب شده و

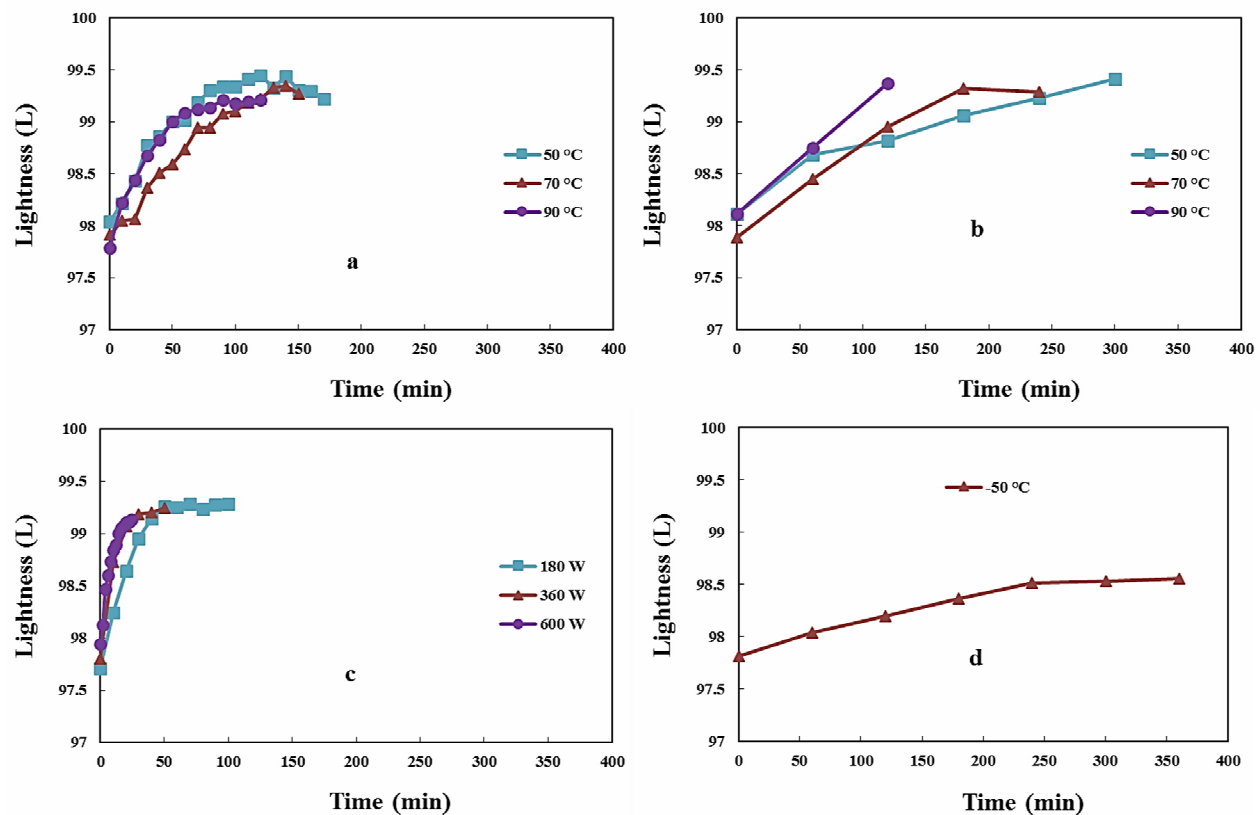


Fig 1 Brightness changes of sugarbeet samples during drying, (a) hot air, (b) vacuum (c) microwave and (d) freeze drying

3-1-2- 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 تبخیر 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 خشک کردن زمان خشک کردن را کاهش داده و مدت زمان ماند نمونه‌ها در محیط خشک‌کن کاهش می‌یابد. استفاده از دمای خشک کردن پایین آهنگ تجزیه رنگدانه‌های قرمز به زرد را کاهش داده، اما در عین

شکل 2 تغییر شاخص رنگی* a (قرمزی) را براساس زمان خشک شدن ورقه‌های چغندر قرمز در روش‌های مختلف خشک کردن نشان می‌دهد. نتایج بدست آمده از نمودارهای مختلف شکل 2 نشان داد که با کاهش محتوای رطوبتی و افزایش زمان خشک شدن، روند تغییرات این پارامتر نزولی بود. بالاترین میزان تغییرات در شاخص رنگی قرمز در روش خشک کردن جریان هوای گرم و خلا و پایین‌ترین میزان تغییرات در روش خشک کردن انجمادی بود. یکی از دلایل مهم نتایج بدست آمده این است که در روش خشک کردن 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 4 نیز موید این نتیجه می‌باشد. این نتایج با نتایج سایر پژوهشگران در خشک‌کردن لایه‌های چغندر قرمز [34 و 35]، 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

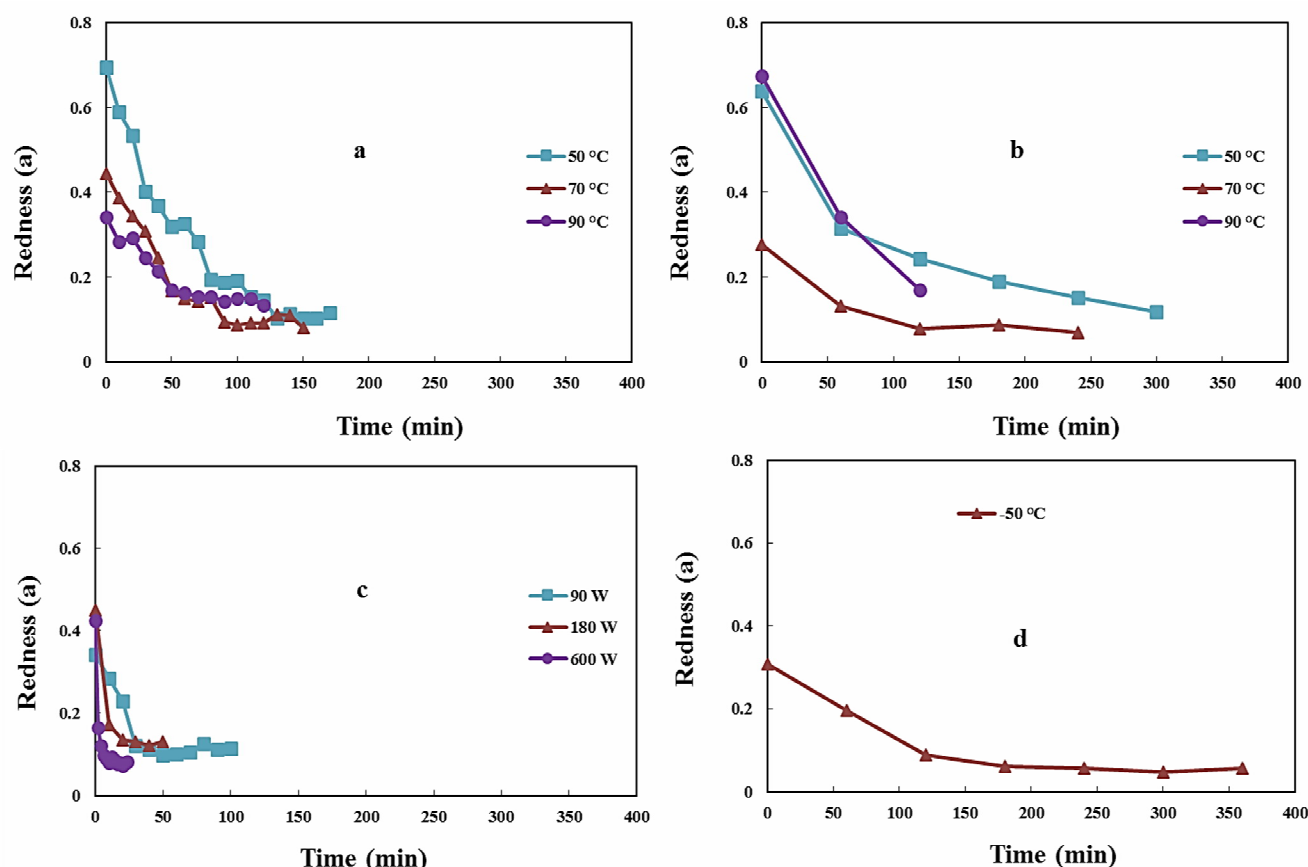


Fig 2 Redness changes of sugarbeet samples during drying, (a) hot air, (b) vacuum (c) microwave and (d) freeze drying

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 [35] نشان داد که رنگدانه‌های زرد در چغندر پایدارتر از رنگدانه‌های قرمز رنگ (بتالین‌ها) می‌باشد و این امر سبب غلظت بیشتر

3-1-3- تغییرات رنگ شاخص b

شکل 3 تغییرات شاخص رنگی b را براساس زمان خشک‌شدن ورقه‌های برش خورده چغندر قرمز در روش‌های مختلف خشک‌کردن نشان می‌دهد. روند تغییرات نمودارهای مختلف شکل 3 نشان از تغییرات صعودی پارامتر زردی می‌باشد. یکی از

آمده از روند تغییرات زردی نمونه‌ها در طول فرآیند خشک کردن نشان داد که استفاده از روش خشک کردن انجمادی دارای پایین‌ترین میزان تغییرات بود که می‌توان این نتایج را به فرایند و ماهیت خشک کردن انجمادی ارتباط داد. در فرایند خشک کردن 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 خشک شده بسیار نزدیک به نمونه‌های شاهد می‌باشد.

رنگدانه‌های زرد در سطح نمونه‌های خشک شده نسبت به نمونه‌های قرمز می‌گردد. نتایج بررسی تغییرات پارامتر زردی در خشک کردن نمونه‌های چغندر در خشک کن 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 خشک کن در معرض هوای گرم قرار گرفتند و تعداد کمتری از رنگدانه‌های بتالاین (قرمز رنگ) به رنگ زرد تبدیل شدند. نتایج کلی بدست

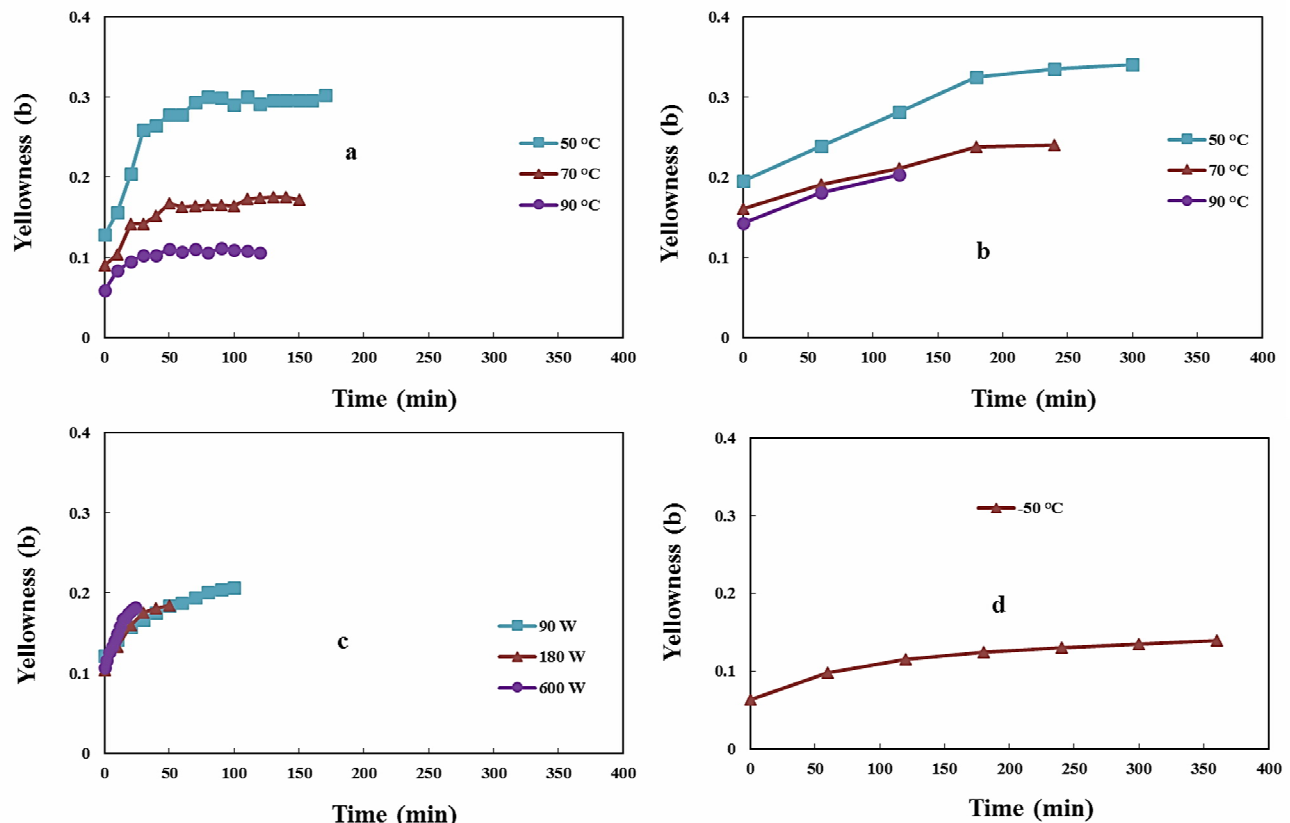


Fig 3 Yellowness changes of sugarbeet samples during drying, (a) hot air, (b) vacuum (c) microwave and (d) freeze drying

افزایش توان مایکروویو میزان تغییرات کلی رنگ کاهش یافت. همچنین میزان تغییرات رنگ در خشک کن انجمادی حدود 50% کمتر از تغییرات رنگ در خشک کن 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 خشک کردن انجمادی بشدت کاهش

2-3- مقایسه تغییرات کلی رنگ در روش‌های مختلف خشک کردن

مقایسه نتایج بدست آمده (شکل 4) از تغییرات رنگ در روش‌های مختلف خشک کردن نشان داد که بالاترین و پایین‌ترین میزان تغییرات این پارامتر به ترتیب در خشک کن جریان مایکروویو و انجمادی اتفاق افتاد. البته لازم به ذکر است که با

2 و 3) و مدل‌های مختلف (جدول 2) با استفاده از نرم افزار متلب (در محیط Curve Fitting) بر داده‌های تجربی بدست آمده برازش گردید. نتایج بدست آمده از برازش 5 مدل انتخابی بر داده‌های آزمایشی نشان داد که مدل نمایی شماره 3 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 $0/987$ ، $0/989$ 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 میکروویو 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 5 مدل انتخابی بر داده‌های تجربی خشک‌کردن انجمادی نشان داد که ضریب همبستگی برای شاخص‌های L ، a و b به ترتیب به میزان $0/991$ ، $0/987$ و $0/969$ 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 3 با بالاترین دقت توانست بر داده‌های تجربی در این روش خشک‌کردن برازش یابد. همچنین نتایج بررسی برازش مدل نمایی شماره 3 بر داده‌های تجربی شاخص قرمزی (a) در روش‌های مختلف خشک‌کردن نشان داد که استفاده از روش میکروویو 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.

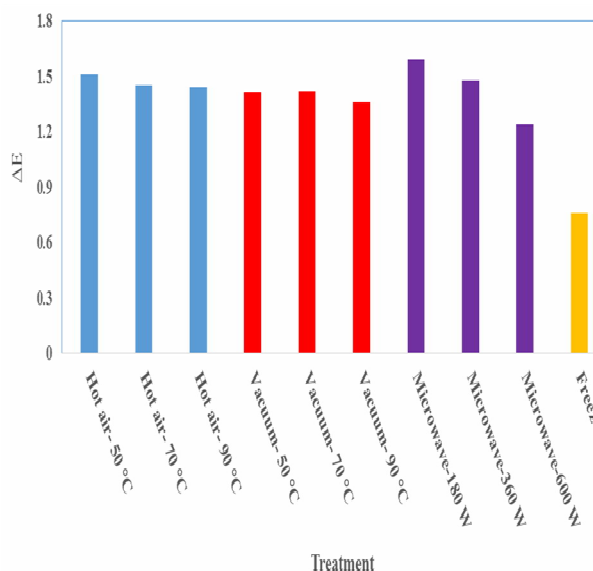


Fig 4 Total color change of sugar beet drying samples in different treatments

3-3- 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 1،

خشک کردن به روش های مختلف نشان داد که استفاده از خشک کردن خلا در دمای 50°C می تواند روند تغییرات کمتری نسبت به سایر روش های خشک کردن داشته باشد و مدل ریاضی بکار گرفته شده بهتر می تواند چنین تغییراتی را پیشگویی و برازش کند.

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

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

3-4- بررسی تغییرات چروکیدگی در روش های مختلف خشک کردن

نتایج بدست آمده حاصل از تغییرات چروکیدگی در روش های مختلف خشک کردن 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 خشک کردن در روش های هوای گرم و خلا و پایین ترین میزان این تغییرات مربوط به استفاده از روش انجمادی بود. یکی از مهمترین دلایل نتایج بدست آمده این است که استفاده از روش حرارت دهی با گرما، سبب خروج بخش زیادی از رطوبت در زمان های اولیه خشک کردن شده و این امر سبب ایجاد استرس حرارتی در نمونه ها شده و به دنبال آن چروکیدگی در نمونه ها زیاد می گردد. همچنین بررسی اثرات تغییرات دما در دو روش خشک کردن جریان هوای گرم و خلا نشان داد که آهنگ تغییرات چروکیدگی با افزایش دمای خشک کردن افزایش می یابد. یکی از دلایل مهم این نتایج این بود که در دماهای پایین خشک شدن به دلیل اختلاف کم دمای نمونه با دمای محیط خشک کن، سرعت خروج

رطوبت یکنواخت بوده و آهنگ تغییرات چروکیدگی کم است. اما با افزایش دمای خشک کردن، گرادیان حرارتی بین محصول در حال خشک شدن و محیط خشک کن افزایش یافته و این امر سبب افزایش حرکت رطوبت از لایه های داخلی محصول به سطح لایه برش خورده چغندر شده و این امر سبب ایجاد گرادیان رطوبتی بین لایه های سطحی و درونی محصول شده و سبب افزایش تنش داخلی می گردد. نتایج بدست آمده با نتایج بدست آمده در خشک کردن لایه های پیازدر خشک کن جریان هوای گرم (در چهار دمای خشک کردن 60، 70، 80 و 90 °C) [37] و در خشک کردن دانه های انگور مشابهت دارد [24] همچنین نتایج بدست آمده از استفاده روش مایکروویو مانند دو روش خشک کردن دیگر (جریان هوای گرم و خلا) سبب افزایش میزان چروکیدگی می گردد. دلیل این امر آن است که استفاده از اشعه مایکروویو در نمونه هایی که میزان رطوبت محصول بالا باشد (نمونه های چغندر در ابتدای فرآیند خشک کردن بالا می باشد)، به دلیل افزایش پدیده دو قطبی شدن مولکول های آب سبب می گردد تا بافت سلولی نمونه پف کرده و تغییر حجم ایجاد شده در دیواره سلولی نمی تواند در این حالت نگه داشته شده و در نهایت

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 [40 و 41] 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 انفعالات 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 [38 و 39]. بررسی‌های روند تغییرات چروکیدگی در روش خشک‌کردن انجمادی نشان داد که آهنگ تغییرات و میزان چروکیدگی در این روش حدود 10 تا 25% 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 فرایند خشک

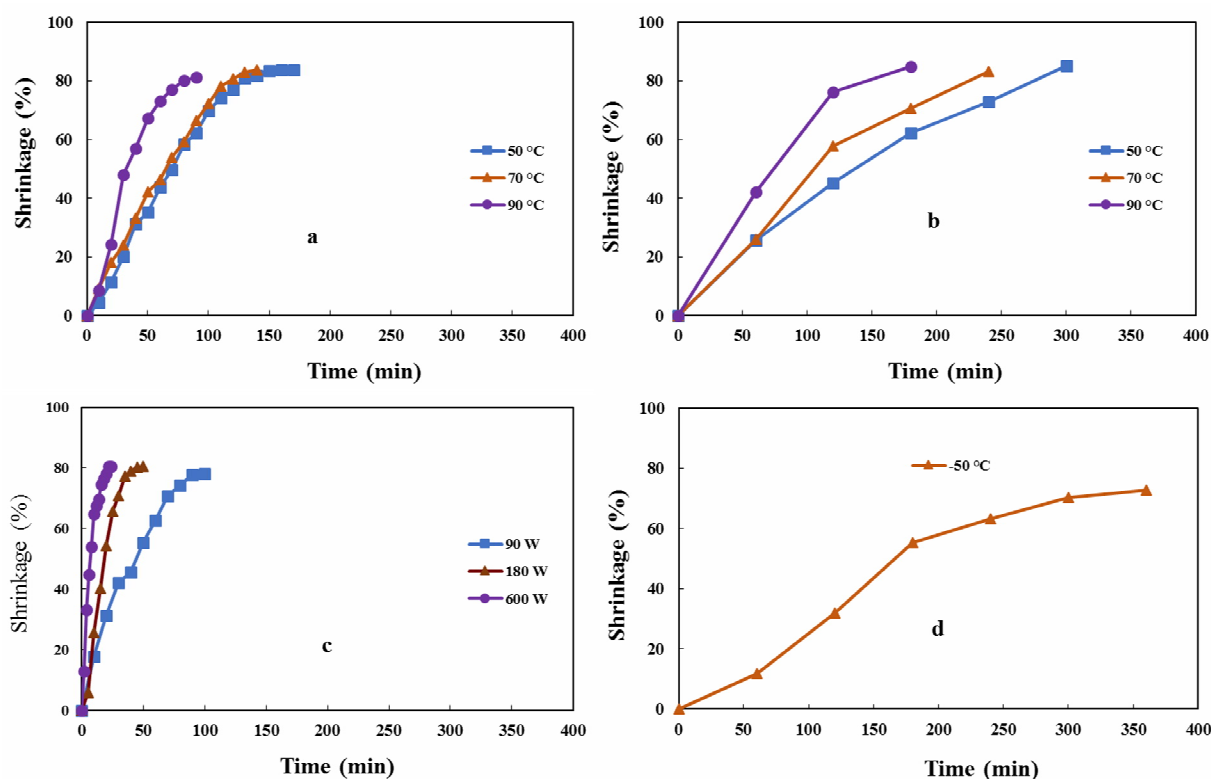


Fig 5 Shrinkage changes of sugarbeet samples during drying, (a) hot air, (b) vacuum (c) microwave and (d) freeze drying

3-5- مدل‌سازی تغییرات چروکیدگی در

روش‌های مختلف خشک‌کردن

به منظور مدل‌سازی تغییرات چروکیدگی، ابتدا تغییرات مساحت نمونه‌های در حال خشک‌شدن در خشک‌کن‌های مختلف توسط دستگاه پردازش تصویر محاسبه گردید و همزمان با این عملیات ضخامت نمونه‌ها نیز با کولیس دیجیتالی اندازه‌گیری شد. در ادامه نمودار روند تغییرات چروکیدگی در روش‌های مختلف خشک‌کردن به زمان رسم شد (شکل 7) و مدل‌های مختلف (جدول 3) با استفاده از نرم افزار متلب (در محیط Curve Fitting) بر داده‌های تجربی چروکیدگی بدست آمده، برازش گردید. نتایج بدست آمده در قسمت چروکیدگی نیز مانند شاخص‌های رنگی از برازش 6 مدل انتخابی بر داده‌های آزمایشگاهی بدست آمد که مدل نمایی شماره 1 (جدول 2) دارای بالاترین مقادیر R^2 و پایین‌ترین مقادیر SSE و RMSE داشت. نتایج بررسی شاخص‌های آماری حاصل از برازش

مدل‌های ریاضی بر داده‌های تجربی چروکیدگی در خشک‌کن جریان هوای گرم نشان داد که بالاترین ضریب همبستگی به میزان 0/9871 مربوط به دمای 50°C بود. نتایج بررسی مدل‌سازی در خشک‌کن جریان هوای گرم نشان داد که بالاترین ضریب همبستگی مربوط به دمای 50°C به میزان 0/9992 بود. همچنین نتایج بدست آمده از برازش مدل‌های ریاضی بر داده‌های تجربی بدست آمده در محیط خشک‌کن مایکروویو نشان داد که استفاده از توان 180 وات با ضریب همبستگی 0/9965 بهترین برازش را بر داده‌های آزمایشگاهی داشت. نتایج بدست آمده از برازش 6 بر داده‌های چروکیدگی در خشک‌کردن انجمادی نشان داد که مدل نمایی شماره 1 (جدول 2) با ضریب همبستگی 0/9714 بهترین برازش را بر داده‌ها داشت. همچنین مقایسه کلی در چهار روش خشک‌کردن نشان داد که استفاده از روش خشک‌کردن خلا در دمای 50°C سبب تغییرات منظم‌تری در شاخص چروکیدگی شده و مدل نمایی شماره 1 بهتر توانست بر داده‌ها برازش یافته و روند تغییرات چروکیدگی را پیش‌بینی کند.

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

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

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, 211-214.
- [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.

4- 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، میکروویو 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 محتوای بتالاین را به دلیل تغییرات کمتر رنگی حفظ کند و تغییرات چروکیدگی نیز دارای کمترین میزان خود برساند.

5- 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., Grahm, 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 vacuum-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 Istamran Date Variety Affected by Various Drying Methods. *JCPP*. 2015; 5 (16): 305-313
- [39] Noori M., Kashaninejad M., Daraei Garmehani 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, Tabatabaekoloor, 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