



مقاله پژوهشی

خشک کردن توت سیاه با پیش تیمارهای مختلف حرارتی، پالسی، شیمیایی و مکانیکی به روش ترکیبی مادون قرمز - هوای گرم

ابراهیم تقی نژاد^{۱*}، محمد کاوه^۲، ولی رسولی شریانی^۳

۱. دانشیار، گروه مهندسی و فناوری کشاورزی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی مغان، دانشگاه محقق اردبیلی
 ۲. دانشجوی دکتری، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشیار، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی
 ۳. دانشیار، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشیار، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی

(تاریخ دریافت: ۹۸/۲/۱۹، تاریخ آخرین بازنگری: ۹۸/۴/۳، تاریخ پذیرش: ۹۸/۴/۱۸)

چکیده

در این پژوهش به بررسی تأثیر پیش تیمارهای مختلف بر ضریب پخش رطوبت مؤثر، انرژی مصرفی ویژه، اختلاف رنگ کل و چروکیدگی توت سیاه در خشک کن مادون قرمز - هوای گرم پرداخته شد. آزمایش‌ها در ۳ سطح دمایی ۵۰، ۶۰ و ۷۰ °C و با ۴ پیش تیمارهای مختلف شامل پیش تیمار حرارتی با بلانچینگ با آب داغ در دمای ۷۰، ۸۰ و ۹۰ °C، پالسی با مایکروویو ۹۰، ۱۸۰ و ۳۶۰ W، شیمیایی با محلول اسید آسکوربیک ۱٪ و مکانیکی با امواج فراصوت در زمان‌های ۱۵، ۳۰ و ۴۵ min اجرا شد. نتایج نشان داد که به ترتیب بالاترین و پایین‌ترین میزان ضریب پخش رطوبت مؤثر ($10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$) و انرژی مصرفی ویژه (۵۵/۵۲ kWh/kg) با استفاده از پیش تیمار مایکروویو با توان ۳۶۰ W و دمای خشک کردن ۷۰ °C بود. همچنین کمترین و بیشترین مقدار ضریب پخش رطوبت مؤثر ($4/24 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$) و انرژی مصرفی ویژه (۲۳۹/۸۹ kWh/kg) برای نمونه شاهد با دمای خشک کردن ۵۰ °C به دست آمد. همچنین بیشترین میزان تغییرات رنگ (۳۰/۲۸) و چروکیدگی (۵۵/۶۲٪) در نمونه شاهد مشاهده شد. کمترین تغییرات رنگ (۷/۰۱) و چروکیدگی (۱۹/۲۳٪) در پیش تیمار مایکروویو با توان ۳۶۰ W و دمای خشک کردن ۷۰ °C به دست آمد. بنابراین مقدار انرژی مصرفی (۷۶/۸۶٪)، تغییرات رنگ (۷۶/۸۵٪) و چروکیدگی (۶۵/۴۳٪) نمونه‌ها با استفاده از پیش تیمارهای مختلف، به طور معنی‌داری ($p < 0.05$) کاهش یافت.

واژه‌های کلیدی: انرژی مصرفی ویژه، بلانچینگ، توت سیاه، فراصوت، مایکروویو.

۱. مقدمه

برخی میوه‌ها از منابع اصلی آنتی‌اکسیدان‌های طبیعی هستند و در میان آن‌ها توت سیاه در رده‌های بالای، غذاهای دارای آنتی‌اکسیدان قرار می‌گیرد [۱]. میوه توت سیاه دارای فعالیت آبی بالا است (نزدیک به ۹۰٪)، که این مسئله موجب فسادپذیری و حساسیت بالای توت به حمله قارچی خواهد شد. بنابراین اگر نگهداری این محصول به درستی انجام نشود حدود ۶۰٪ آن از بین خواهد رفت [۲]. به همین دلیل، کشورهای تولیدکننده، توت‌های تازه را بعد از برداشت خشک می‌کنند. استفاده از روش‌های سنتی در خشک کردن توت سیاه توسط خشک‌کن هوای گرم، موجب تخریب برخی از ترکیبات بافتی شده و به نوبه آن ارزش تجاری و کیفیت محصول کاهش چشمگیری خواهد یافت [۳].

برای تولید محصول خشک باکیفیت، علاوه بر کنترل شرایط خشک کردن، عوامل دیگری نیز وجود دارد که می‌تواند نقش تعیین‌کننده‌تری بر فاکتورهای مهم مثل دمای فرایند داشته باشد. کاربرد پیش‌ تیمارهای (حرارتی، پالسی، شیمیایی و مکانیکی) در طی فرایند خشک کردن توت سیاه از جمله این عوامل هستند. لذا پیش‌ تیمارهای مختلف علاوه بر بهبود شاخص‌های کمی (مدت زمان خشک کردن و انرژی مصرفی) بر افزایش ماندگاری و حفظ کیفیت محصول نیز تأثیر می‌گذارد [۴].

سahین و دویماز، استفاده از پیش‌ تیمارهای اسیدسیتریک و بلانچینگ را در روند خشک کردن گل کلم در یک خشک‌کن جریان هوای گرم بررسی کردند [۵]. نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که مقدار ضریب پخش رطوبت مؤثر بین 10^{-9} تا $4/09 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ می‌باشد. همچنین مقدار انرژی فعال‌سازی برای نمونه شاهد (۲۶/۳۹ kJ/mol)، پیش‌ تیمار بلانچینگ (۲۹/۰۹ kJ/mol) و اسیدسیتریک (۲۳/۴۰ kJ/mol) گزارش شد. در پژوهش دیگری کاوه و همکاران، از پیش‌ تیمار فراصوت برای خشک کردن بادام در خشک‌کن هوای گرم استفاده کرده‌اند و نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد که ضریب نفوذ مؤثر رطوبت بین 10^{-9} تا $1/81 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ تغییر یافت [۶]. مقادیر انرژی فعال‌سازی از ۲۶/۳۵ تا ۳۶/۴۴ kJ/mol گزارش شد. همچنین بیشترین تغییرات رنگ و چروکیدگی در بالاترین دما و زمان اعمال امواج فراصوت به دست آمد. تأثیر

پیش‌ تیمارهای مختلف (اتانول، اتانول+ فراصوت و آب + فراصوت) در خشک کردن سیب‌زمینی با استفاده از خشک‌کن مادون قرمز نشان داد که زمان خشک کردن تحت تأثیر پیش- تیمارهای تحت بررسی و توان مادون قرمز خشک کردن می‌باشد. بالاترین زمان خشک کردن در نمونه شاهد و پایین‌ترین زمان خشک کردن در پیش‌ تیمار اتانول+ فراصوت مشاهده گردید [۷]. بررسی تأثیر پیش‌ تیمارهای فراصوت و بلانچینگ و همچنین دما و توان میکروویو بر نسبت رطوبت، انرژی مصرفی ویژه برای خشک کردن برگ جعفری در یک خشک‌کن ترکیبی میکروویو- هوای گرم نشان داد که افزایش دما، توان میکروویو و اعمال پیش‌ تیمار تأثیر مستقیم بر زمان خشک کردن دارد [۸]. همچنین با افزایش دما، توان میکروویو و اعمال پیش‌ تیمار فراصوت کمترین انرژی مصرفی ویژه به دست آمد. نتایج نشان داد که بیشترین تغییرات رنگ در بالاترین دما و توان میکروویو و اعمال پیش‌ تیمار بلانچینگ رخ داد. در پژوهش دیگری با بررسی تأثیر پیش‌ تیمارهای مختلف بلانچینگ، فراصوت، اسمزی و انجمادی در خشک‌کن مادون قرمز بر زمان و رنگ در خشک کردن قارچ شیتاکی نشان داد که کمترین زمان خشک کردن و تغییرات رنگ در پیش‌ تیمار اسمزی به دست آمد [۹]. در تحقیقی، محققان اثر پیش‌ تیمارهای مختلف اسمزی، بلانچینگ، فراصوت، کلراید کلسیم بر نسبت رطوبت، نرخ خشک کردن، ضریب پخش رطوبت مؤثر و رنگ تکه‌های لیمو در خشک‌کن‌های مختلف هوای گرم- مادون قرمز و هوای گرم- میکروویو را مورد بررسی قرار دادند [۱۰]. در پژوهش دیگری اسماعیلی ادبی و همکاران، به بررسی اثر پیش‌ تیمارهای مختلف بر سینتیک خشک کردن توت سیاه پرداختند. نتایج پژوهش این محققین نشان داد که کمترین زمان خشک کردن مربوط به نمونه‌های پیش‌ تیمار شده با میکروویو در خشک‌کن هوای گرم- مادون قرمز می‌باشد [۱۱].

انرژی به‌عنوان یک عامل اصلی برای دستیابی به توسعه پایدار است. فرایند خشک کردن، ۱۲٪ از کل مصرف انرژی در صنعت مواد غذایی در بر می‌گیرد که در آن هزینه خشک شدن می‌تواند به ۶۰ تا ۷۰٪ کل هزینه تولید برسد [۱۲، ۱۳]. بنابراین، این مسئله برای محققان و مهندسين بسیار حیاتی است تا این‌که انرژی مصرفی را برای حداکثر جابه‌جایی رطوبت و افزایش راندمان سیستم خشک‌کن با استفاده از تحلیل

مختلف (حرارتی، پالسی، شیمیایی و مکانیکی) در سطوح متفاوت گزارش شده است. به دنبال حل این شکاف تحقیقاتی، هدف از این تحقیق، بررسی تأثیر پیش تیمار حرارتی بلانچینگ با آب داغ در دمای ۷۰، ۸۰ و ۹۰ °C، پالسی با میکروویو در توان‌های ۹۰، ۱۸۰ و ۳۶۰ W، شیمیایی با اسید آسکوربیک (۱٪ آب مقطر) و مکانیکی با امواج مافوق صوت در زمان‌های ۱۵، ۳۰ و ۴۵ min طی خشک کردن به روش ترکیبی مادون قرمز- هوای گرم در دماهای ۵۰، ۶۰ و ۷۰ °C بر زمان، ضریب پخش رطوبت مؤثر و انرژی مصرفی ویژه می‌باشد. همچنین تغییرات کیفی (رنگ و چروکیدگی) محصول طی خشک کردن مورد ارزیابی قرار گرفت.

۲. مواد و روش‌ها

۲.۱. تهیه نمونه

توت سیاه ارگانیک که در شرایط یکسان رشد کرده بودند از محوطه دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی مغان برداشت شد. به منظور حفظ محتوای رطوبت اولیه محصول در مرحله‌ی قبل از آزمایش، نمونه‌ها در یخچال با دمای $4 \pm 1^\circ\text{C}$ نگهداری شد. دو ساعت قبل از شروع آزمایش، نمونه‌ها از یخچال به محیط آزمایش منتقل گردید. برای تعیین میزان رطوبت توت، نمونه‌های ۴۰ g به مدت ۴ h در اجاق آزمایشگاهی مدل UNE 500 ممرت، ساخت کشور آلمان، دمای 105°C قرار داده شد و میزان رطوبت نمونه‌ها از رابطه (۱) معادل ۶۸٪ (w.b.) به دست آمد [۱۱].

$$MC = \frac{W_i - W_d}{W_i} \times 100 \quad (1)$$

W_i : وزن اولیه نمونه (g)، W_d : وزن ثانویه نمونه (g)، MC: محتوای رطوبت نمونه بر پایه تر (%).

۲.۲. پیش تیمارها

۲.۲.۱. فراصوت صوت

به منظور پیش تیمار، نمونه‌ها با امواج فراصوت از یک دستگاه حمام فراصوت مدل Parsonic 2600 s با ابعاد داخلی $10 \times 13 \times 24 \text{ cm}^3$ و حجم $2/6 \text{ L}$ استفاده شد. این دستگاه قادر به تولید امواج فراصوت با فرکانس ۲۸ kHz و توان ۷۰ W می‌باشد. همچنین پیش تیمار فراصوت در ۳ سطح زمانی

مهندسی کاهش دهند. مطالعات زیادی در مورد انرژی مصرفی ویژه محصولات مختلف کشاورزی طی روش‌های متفاوت خشک کردن وجود دارد [۱۷-۱۴]. ادبی و همکاران در تحقیقی، تأثیر پیش تیمارهای مختلف (میکروویو با توان ۲۰۰ W و زمان ۱۰ min، فراصوت با توان ۲۴۰ W و زمان ۱۰ min، بلانچینگ در دمای 80°C و زمان ۱۰ s و کربنات پتاسیم با غلظت ۰/۵٪) بر انرژی مصرفی ویژه و تغییرات رنگ توت سیاه تحت خشک‌کن‌های مختلف را مورد بررسی قرار داده اند و بیان کرده‌اند که کمترین انرژی مصرفی ویژه مربوط به خشک‌کن هوای گرم - مادن قرمز با پیش تیمار میکروویو می‌باشد [۱۸]. بنابراین در تحقیق حاضر فقط از خشک‌کن ترکیبی مادون قرمز- هوای گرم استفاده شد. در بیان تمایز مطالعه حاضر با گزارش‌های منتشر شده توسط دیگر محققان می‌توان بیان کرد که در تحقیق حاضر از پیش تیمارهای میکروویو، فراصوت و بلانچینگ به ترتیب در سه سطح توان، زمان و دما و برای پیش تیمار شیمیایی از محلول اسید آسکوربیک برای اندازه‌گیری زمان خشک کردن، ضریب پخش رطوبت مؤثر، انرژی مصرفی ویژه و تغییرات رنگ و چروکیدگی توت سیاه ارگانیک در خشک‌کن ترکیبی هوای گرم- مادون قرمز استفاده شد. بنابراین محققان زیادی، خشک‌کن‌های مختلفی را برای خشک کردن محصولات کشاورزی با پیش تیمارهای متفاوت مورد ارزیابی قرار داده‌اند. اما تحقیقات بسیار کمی برای خشک کردن توت سیاه با پیش تیمارهای مختلف در سطوح متفاوت تحت خشک‌کن ترکیبی هوای گرم- مادون قرمز گزارش شده است.

به طور معمول، اولین ویژگی کیفی غذا که بر روی قابلیت پذیرش آن توسط مصرف‌کننده تأثیرگذار می‌باشد، شکل ظاهری و رنگ آن است و در بسیاری از موارد حتی بر طعم و مزه اولویت داده می‌شود [۳]. رنگ به عنوان یکی از شاخص‌های مهم کیفیت مواد غذایی نشانگر ویژگی‌های شیمیایی، بیوشیمیایی و میکروبیولوژی محصول می‌باشد و می‌تواند در بازارپسندی آن نقش مؤثری داشته باشد [۱۹]. محققان زیادی اثر پارامترها و پیش تیمارهای مختلف بر تغییرات رنگ و چروکیدگی را مورد بررسی قرار داده‌اند [۲۳-۲۰].

با توجه به دانسته‌های ما و تحقیقات صورت گرفته مشخص شد که تاکنون تحقیق‌های بسیار کمی برای خشک کردن توت سیاه تحت خشک‌کن هوای گرم- مادون قرمز با پیش تیمارهای

اسید آسکوربیک با ۱٪ وزنی آب مقطر به دست آمد. برای این پیش تیمار، نمونه‌ها در محلول با دمای °C ۲۲ به مدت ۲ min غوطه‌ور شدند [۲۶، ۲۷].

۳.۲. خشک‌کردن

پس از اعمال پیش تیمارها، نمونه‌ها از آب مقطر خارج شده و سپس آب‌های سطحی توسط دستمال حوله‌ای گرفته شد. سپس نمونه‌های تیمار شده و نمونه شاهد (نمونه‌ای که تحت تأثیر پیش تیمارهای مختلف قرار نگرفت) به خشک‌کن ترکیبی هوای گرم-مادون قرمز با ۳ سطح دمای هوای گرم ۵۰، ۶۰ و °C ۷۰ و سرعت هوای ۱ m/s انتقال یافت. قابل ذکر است این خشک‌کن دارای سامانه کنترل دما (با دقت °C ±۰/۱) و دو لامپ مادون قرمز Philips model, Flemish, Belgium (هر یک ۳۰ W) (۵۰۰ W) که در بخش فوقانی اتاقک خشک‌کن به ارتفاع ۳۰ cm بود. برای ایجاد سرعت‌های هوای ورودی، از یک فن گریز از مرکز با اینورتر Vincker VSD2, ABB Co., Taipei ساخت تایوان، مورد استفاده قرار گرفت. طی انجام آزمایش‌ها دمای محیط بین ۲۰ تا °C ۲۶ و رطوبت نسبی هوا بین ۲۲ تا ۲۷٪ بود. نمونه‌ها از رطوبت اولیه ۶۸٪ (w.b.) تا سطح ۱۰٪ (w.b.) خشک شدند.

۴.۲. مدل‌سازی ریاضی

برای مدل‌سازی خشک‌کردن توت سیاه، از معادله‌ی نسبت رطوبت نمونه‌ها، طی خشک شدن مطابق رابطه (۲) استفاده شد [۲۸].

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_b - M_e} \quad (2)$$

که در آن MR رطوبت نسبی (بی‌بعد)، M_t میزان رطوبت در هر لحظه خشک‌کردن بر پایه خشک (d.b.)، M_e رطوبت تعادلی نمونه‌ها (d.b.) و M_b رطوبت اولیه نمونه‌ها (d.b.) است. همان‌طور که M_e خیلی کمتر از M_b است، بنابراین در این مطالعه مقدار M_e ، صفر در نظر گرفته شد.

مدل‌های مورد استفاده در این پژوهش در جدول (۱) نشان داده شده است. نسبت رطوبت‌های به دست آمده طی آزمایش‌های مختلف به کمک نرم‌افزار MATLAB 2017 با مدل‌های مذکور برازش داده شد و برای تعیین بهترین مدل از سه معیار

۱۵، ۳۰ و ۴۵ min با آب مقطر در دمای °C ۳۰ انجام شد. بدین منظور ارتفاع ستون آب در داخل محفظه حمام فراصوت تا خط نشانه علامت‌گذاری شده در دستگاه بود و ارتفاع آب داخل محفظه حمام فراصوت طوری بود که بالاتر از سطح آب داخل استوانه نمونه باشد تا همه نمونه‌ها به‌طور یکنواخت تحت امواج فراصوت قرار گیرند.

۲.۲.۲. مایکروویو

برای اعمال پیش تیمار مایکروویو از یک دستگاه مایکروویو خانگی مدل Sharp R-861SLM با فرکانس ۵۰ Hz و بیشترین توان حرارتی، ۹۰۰ w، که قابلیت تنظیم در توان‌های مختلف را داشت، استفاده شد. به منظور اعمال پیش تیمار مایکروویو در سطوح مختلف توانی (۹۰، ۱۸۰ و ۳۶۰ w) نمونه‌های توت درون محفظه مایکروویو قرار داده شدند و عملیات پیش تیمار در سطح توان ۹۰w به مدت ۱۰min، در سطح توان ۱۸۰w به مدت ۵min و در سطح توان ۳۶۰w به مدت ۲/۵min انجام گرفت. باید توجه داشت که شرایط اعمال پیش تیمار بر اساس میزان انرژی یکسان برای اعمال پیش تیمار می‌باشد. با اعمال این سطوح توانی و با این مدت زمان، میزان انرژی مصرفی توسط مایکروویو برای اعمال پیش تیمار برای تمامی نمونه‌ها یکسان بود [۲۴].

۳.۲.۲. بلانچینگ

برای اعمال پیش تیمار بلانچینگ، ابتدا آب داغ در سه سطح دمایی ۷۰، ۸۰ و °C ۹۰ آماده‌سازی گردید. به منظور اعمال انرژی یکسان توسط انرژی حرارتی روی توت سیاه، نمونه‌ها به مدت ۳ min در آب °C ۷۰ به مدت ۲/۵ min در آب °C ۸۰ و به مدت ۲ min در آب °C ۹۰ قرار داده شد. نمونه‌های پیش تیمار شده با آب داغ بعد از اتمام فرایند پیش تیمار به مدت ۲ min روی آبکش قرار داده شد و بعد از آن با دستمال کاغذی، رطوبت سطحی نمونه‌ها خشک گردید و به درون خشک‌کن منتقل گردید [۲۵].

۴.۲.۲. پیش تیمار شیمیایی

اعمال پیش تیمار شیمیایی توسط محلول اسید آسکوربیک بر روی نمونه‌های توت سیاه انجام شد که این محلول از انحلال

$$MR = \frac{M - M_e}{M_o - M_e} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4}{b_n^2} \exp\left(-D_{eff} \frac{b_n^2 t}{r_p^2}\right) \quad (7)$$

در رابطه (۷)، r_p قطر نمونه (بر حسب متر)، b_n تعداد عبارات در نظر گرفته شده از معادله، t زمان خشک کردن (s) و D_{eff} ضریب نفوذ مؤثر (m^2/s) می‌باشند. ضریب نفوذ مؤثر از طریق محاسبه شیب رابطه (۸) به دست می‌آید.

ضریب نفوذ به طور معمول با رسم داده‌های تجربی خشک کردن بر حسب $\ln(MR)$ نسبت به زمان تعیین می‌گردد. با رسم نمودار $\ln(MR)$ در واحد زمان، شیب خط به دست آمده را در رابطه (۹) قرار داده تا ضریب نفوذ مؤثر به دست آید. K_1 شیب خط می‌باشد [۳۲]:

$$\ln(MR) = \ln\left(\frac{4}{b_1^2}\right) + \left(-D_{eff} \frac{b_1^2}{r_p^2}\right)t \quad (8)$$

$$K_1 = D_{eff} \left(\frac{b_1^2}{r_p^2}\right) \quad (9)$$

۶.۲. انرژی مصرفی ویژه

انرژی مورد نیاز برای خارج کردن یک کیلوگرم آب توت سیاه با استفاده از خشک‌کن ترکیبی مادون قرمز - هوای گرم با پیش تیمارهای مختلف به عنوان انرژی مصرفی ویژه تعریف می‌شود. میزان انرژی ویژه مصرفی در خشک‌کن مادون قرمز - هوای گرم از سه منبع برای تأمین انرژی استفاده می‌کند. این انرژی‌ها شامل (۱) انرژی تأمین‌کننده حرارت (انرژی حرارتی)، (۲) انرژی دمنده (انرژی مکانیکی) و (۳) انرژی لامپ مادون قرمز. انرژی تأمین‌کننده حرارت از رابطه (۱۰) به دست آمد [۱۴]:

$$EU_{ter} = (Av.C_a.\rho_a.\Delta T.t).3600 \quad (10)$$

انرژی مکانیکی به دست آمده از دمنده طبق رابطه (۱۱) محاسبه شد [۳۲]:

$$EU_{mec} = \Delta P.M_{air}.t \quad (11)$$

انرژی مصرفی ویژه توت سیاه در خشک‌کن هوای گرم از رابطه (۱۲) به دست آمد:

$$SEC_{con} = \frac{EU_{(mec+ter)}}{M_w} \quad (12)$$

انرژی حرارتی در خشک‌کن مادون قرمز از رابطه زیر قابل محاسبه است.

ضریب تعیین (R^2)، مربع کای (χ^2) و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) مطابق روابط (۳)، (۴) و (۵) استفاده گردید. بهترین برازشی که می‌تواند خصوصیات خشک کردن توت سیاه را توصیف کند مدلی است که دارای بیشترین ضریب تعیین (R^2)، کمترین مربع کای (χ^2) و کمترین ریشه متوسط مربع خطای داده‌ها (RMSE) باشد [۲۹].

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N [MR_{exp,i} - MR_{pre,i}]^2}{\left[\sum_{k=1}^N \frac{MR_{pre,i}}{N} - MR_{pre,i}\right]^2} \quad (3)$$

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2}{N - z} \quad (4)$$

$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MR_{pre,i} - MR_{exp,i})^2\right]^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

N ، Z ، $MR_{pre,i}$ و $MR_{exp,i}$ به ترتیب تعداد مشاهدات، تعداد ثابت‌های خشک‌کن، نسبت رطوبت پیشگویی شده آم و نسبت رطوبت تجربی آم می‌باشد.

۵.۲. ضریب نفوذ مؤثر رطوبت

پدیده‌های انتقال رطوبت اغلب پیچیده بوده و به طور معمول بر حسب نفوذ فشاری، نفوذ اجباری و نفوذ معمولی (انتقال خالص ماده بدون حرکت سیال) طبقه‌بندی می‌شود. مطابق رابطه (۶)، می‌توان از قانون دوم فیک برای شرایط ناپایدار و انتقال رطوبت طی مرحله نزولی فرایند خشک کردن استفاده کرد [۳۰].

$$\frac{\partial M}{\partial t} = D_{eff} \frac{\partial^2 M}{\partial x^2} \quad (6)$$

که در آن X مقدار رطوبت موضعی در مبنای خشک، t زمان و x شاخص فضایی می‌باشد. مطالعه انتشار قانون دوم فیک بر نفوذ جرم طی دوره سرعت نزولی خشک کردن محصولات کشاورزی دلالت دارد. برای به کار بردن قانون فیک فرض می‌گردد که فراورده غذایی تک بعدی است، رطوبت اولیه یکنواختی دارد و دارای حرکت درونی رطوبت مانند مقاومت عمده در برابر انتقال رطوبت است. حل معادله فیک برای یک محصول استوانه‌ای به صورت رابطه (۷) می‌باشد [۳۱]:



$$SEC_{blanch} = \frac{Qt}{M_w} \quad (20)$$

در نهایت انرژی مصرفی ویژه کل خشک‌کن هوای گرم با پیش‌تیمارهای میکروویو، فراصوت و بلانچینگ از به ترتیب روابط (۲۱) به دست آمد [۳۴، ۱۴].

$$SEC_{total} = SEC_{con} + SEC_{IR} + SEC_{mic} + SEC_{ult} + SEC_{blanch} \quad (21)$$

در پیش‌تیمار اسید آسکوربیک چون منبع توان وجود ندارد بلکه این پیش‌تیمارها روی زمان خشک‌کردن تأثیر می‌گذارند. اسید آسکوربیک باعث تغییراتی در بافت محصول خواهد گذاشت که بر انرژی مصرفی خشک‌کردن مؤثر خواهد بود. برای محاسبه انرژی مصرفی ویژه این پیش‌تیمار، فقط از روش محاسبه انرژی مصرفی ویژه خشک‌کن هوای گرم استفاده شد.

۷.۲. اختلاف رنگ کل

به منظور بررسی شاخص‌های رنگی از فضای رنگی $L^*a^*b^*$ استفاده شد. شاخص رنگی L^* نشان‌دهنده میزان روشنی نمونه می‌باشد و دامنه‌ی آن از صفر، سیاه خالص، تا ۱۰۰ سفید خالص، متغیر است. مقادیر شاخص رنگی a^* بین منفی ۱۲۰ تا مثبت ۱۲۰ قرار دارد و مقادیر مثبت معادل رنگ قرمز و مقادیر منفی معادل رنگ سبز می‌باشد و مقادیر b^* نیز مانند شاخص رنگی a^* می‌باشد و مقادیر منفی معادل رنگ آبی و مقادیر مثبت معادل رنگ زرد است [۲۱]. به منظور بررسی شاخص‌های رنگی از یک دستگاه اسکنر رنگی اچ پی مدل G3110 ساخت

$$EU_{IR} = P.t.3600 \quad (13)$$

انرژی مصرفی ویژه توت سیاه در خشک‌کن مادون‌قرمز از رابطه (۱۴) به دست آمد [۱۵]:

$$SEC_{IR} = \frac{EU_{IR}}{M_w} \quad (14)$$

انرژی حرارتی در خشک‌کن میکروویو از رابطه (۱۵) استفاده شد [۱۵].

$$EU_{mic} = P.t.3600 \quad (15)$$

انرژی مصرفی ویژه در پیش‌تیمار میکروویو از رابطه (۱۶) محاسبه شد [۲۱].

$$SEC_{mic} = \frac{EU_{mic}}{M_w} \quad (16)$$

توان فراصوت و انرژی مصرفی ویژه فراصوت به ترتیب با استفاده از معادله‌های ۱۷ و ۱۸ محاسبه می‌شوند [۳۳، ۶]. که مقدار $\cos \Phi$ (ضریب توان) عدد ثابت ۰/۸ در نظر گرفته شد [۳۳].

$$UP = UI \cos \Phi \quad (17)$$

$$SEC_{ult} = \frac{UP.t}{M_w} \quad (18)$$

انرژی مصرفی برای پیش‌تیمار بلانچینگ معادل انرژی لازم برای گرم کردن آب از دمای محیط به دمای ۷۰، ۸۰ و ۹۰ °C می‌باشد. که این انرژی از رابطه ۱۹ و ۲۰ به دست آمد:

$$Q = m.c.\Delta T \quad (19)$$

جدول (۱) مدل‌های ریاضی برای پیش‌بینی فرایند خشک‌کردن.

Table 1 Mathematical models for prediction of drying process

Models	Equations	References
Newton (Lewis)	$MR = \exp(-kt)$	[31]
Henderson and Pabis	$MR = a \exp(-kt)$	[28]
Page	$MR = \exp(-kt^n)$	[20]
Logarithmic	$MR = a \exp(-kt) + c$	[62]
Approximation of diffusion	$MR = a \exp(-kt) + (1 - a) \exp(-kbt)$	[63]
Midilli et al.	$MR = a \exp(-kt^n) + bt$	[30]
Logistic	$MR = a / (1 + b \exp(kt))$	[64]
Demir et al.	$MR = a \exp(-kt)^n + b$	[32]

در پیش تیمار فراصوت در ۱۵ min اعمال توان فراصوت و دمای °C ۵۰ به مدت ۱۴۵ min به دست آمد همچنین کمترین زمان خشک کردن برای این پیش تیمار به مدت ۹۰ min در دمای °C ۷۰ و ۴۵ min اعمال توان فراصوت حاصل شد. با افزایش زمان فراصوت، مقدار زمان خشک کردن به طور معنی داری ($P < 0.05$) کاهش یافت. پیش تیمار فراصوت با اعمال پدیده کاویتاسیون درون محصول سبب انقباض و انقباض‌های شدید در محصول شده و این انقباضها و انقباضها ساختار محصول را شبیه به بافت اسفنجی می‌کند. تشکیل این بافت اسفنجی خروج سریع تر رطوبت را نسبت به حالت شاهد خواهد داشت [۴۰، ۴۱]. امواج فراصوت قادر است به طور متناوب انقباض و انقباض خیلی سریعی را به وجود آورد، شبیه به آنچه که یک اسفنج عمل می‌کند زمانی که آن بارها فشرده و رها می‌شود. نیروهای که در این مکانیسم مکانیکی دخیل می‌شوند، کانال‌های میکروسکوپی را ایجاد می‌کنند که ممکن است موجب جابجایی رطوبت گردد [۴۲، ۴۳]. بنابراین پیش تیمار فراصوت، زمان خشک کردن را به طور معنی دار ($P < 0.05$) کاهش داده و ادغام این روش با روش‌های دیگر می‌تواند راندمان خشک کردن را از لحاظ زمان خشک شدن، افزایش دهد [۶].

ب) اثر پیش تیمار مایکروویو

با مشاهده شکل‌های (۱، ۲ و ۳) متوجه خواهیم شد که کمترین زمان خشک کردن مربوط به استفاده از پیش تیمار مایکروویو است و بیشترین زمان خشک کردن مربوط به نمونه شاهد می‌باشد. همچنین نتایج نشان داد که کمترین زمان خشک کردن مربوط به توان ۳۶۰ w در پیش تیمار مایکروویو و دمای هوای ورودی (°C ۷۰) به مدت ۶۰ min بود. همچنین بیشترین زمان خشک کردن مربوط به نمونه‌های شاهد در دمای هوای ورودی (°C ۵۰) به مدت ۱۹۵ min بود. از طرف دیگر با مقایسه این سه شکل و بررسی تأثیر پیش تیمارهای متفاوت در دماهای مختلف می‌توان دریافت که پیش تیمار مایکروویو نسبت به سه پیش تیمار دیگر می‌تواند سبب کاهش معنی دار ($P < 0.05$) زمان خشک شدن گردد. دلیل این امر می‌تواند این باشد که پیش تیمار مایکروویو لایه سطحی توت سیاه را دچار تخریب کرده و این عامل سبب می‌شود که منافذ سطحی لایه توت سیاه در اثر این پیش تیمار نسبت به پیش تیمارهای دیگر و

کشور چین استفاده شد. اختلاف رنگ کل (ΔE)، برای ارزیابی کلی تفاوت رنگ بین توت سیاه تازه و خشک شده در نظر گرفته شد و از رابطه (۲۰) به دست آمد [۳۵].

$$\Delta E = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2} \quad (20)$$

۸.۲. چروکیدگی

چروکیدگی به صورت اختلاف حجم نهایی از حجم اولیه بر حجم اولیه محصول خشک شده تعریف می‌شود. میزان چروکیدگی به روش خشک کردن و درجه خشک کردن محصول بستگی دارد. چروکیدگی زمانی اتفاق می‌افتد که آب از فضای سلولی حذف شده و هوا جای آن را می‌گیرد [۳۶]. چروکیدگی نمونه‌ها به وسیله آزمایش‌های جرم مخصوص با استفاده از تولون بر اساس روش محسنین و با توجه به معادله (۲۱) تعیین شد [۳۷].

رسم نمودارها با نرم افزار Excel (2010) و تجزیه واریانس یا تحلیل آماری با نرم افزار SPSS Statistics 17.0 و مقایسه میانگین‌ها با آزمون دانکن انجام گرفت.

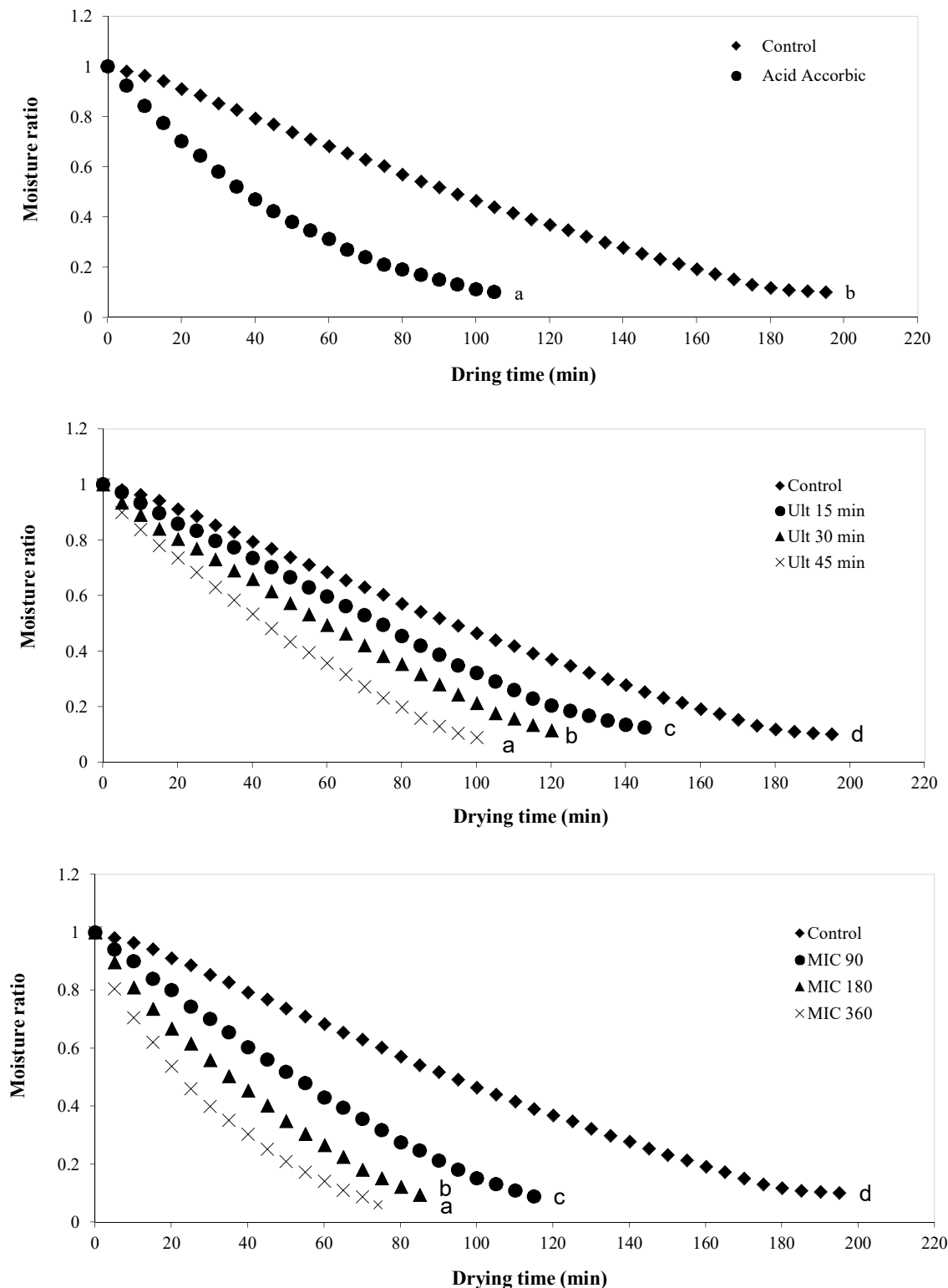
۳. نتایج و بحث

۱.۳. زمان خشک کردن

بررسی داده‌های به دست آمده در دماها (۵۰ تا °C ۷۰) و پیش تیمارهای مختلف (فراصوت، مایکروویو، بلانچینگ و اسید آسکوربیک) برای خشک کردن توت سیاه در شکل‌های ۱-۳ نشان داده شده است. مامطابق شکل‌ها، استفاده از پیش تیمار نسبت به حالت شاهد سبب کاهش زمان خشک شدن می‌گردد. زیرا در نمونه‌های پیش تیمار شده نسبت به نمونه‌های شاهد، تغییر در آهنگ انتقال رطوبت از مرکز نمونه به سطح افزایش می‌یابد [۳۸]. همچنین تراکم و یکپارچگی بافت در اثر استفاده از پیش تیمارهای مختلف نسبت به حالت شاهد کاهش یافته و رطوبت به سرعت بیشتری از لایه‌های توت سیاه خارج می‌گردد [۳۹]. همچنین با افزایش دما، سرعت انتقال رطوبت از بافت ماده به سطح محصول را زیاد شده و تبخیر افزایش یافته، در نتیجه سرعت خشک کردن در دماهای بالا افزایش می‌یابد.

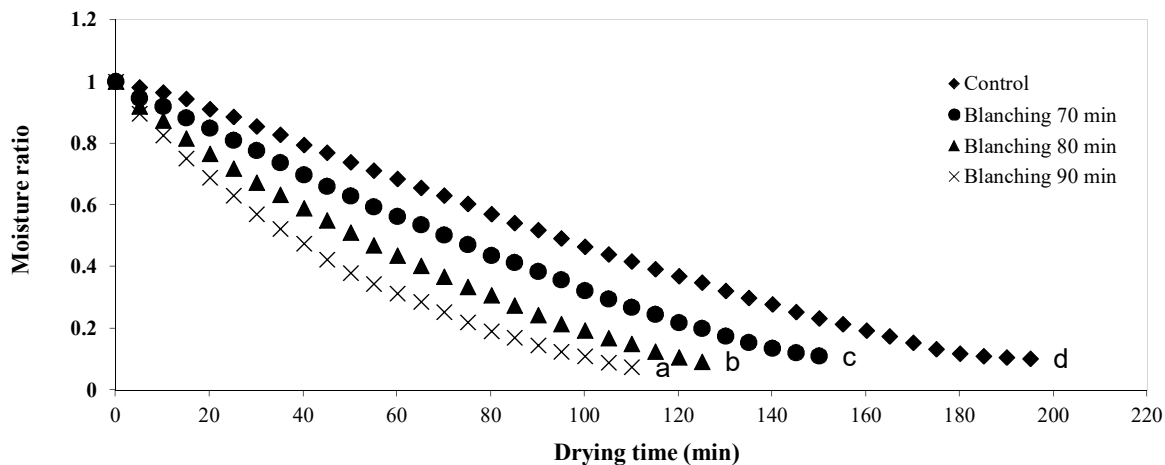
الف) اثر پیش تیمار فراصوت

با توجه به شکل‌های (۱، ۲ و ۳) بیشترین زمان خشک کردن



شکل (۱) منحنی خشک کردن توت سیاه تحت پیش تیمارهای مختلف در دمای هوای ۵۰ °C (حرف مشترک نشان می دهد که مقدار میانگین اختلاف معنی داری بر اساس آزمون دانکن ندارند)

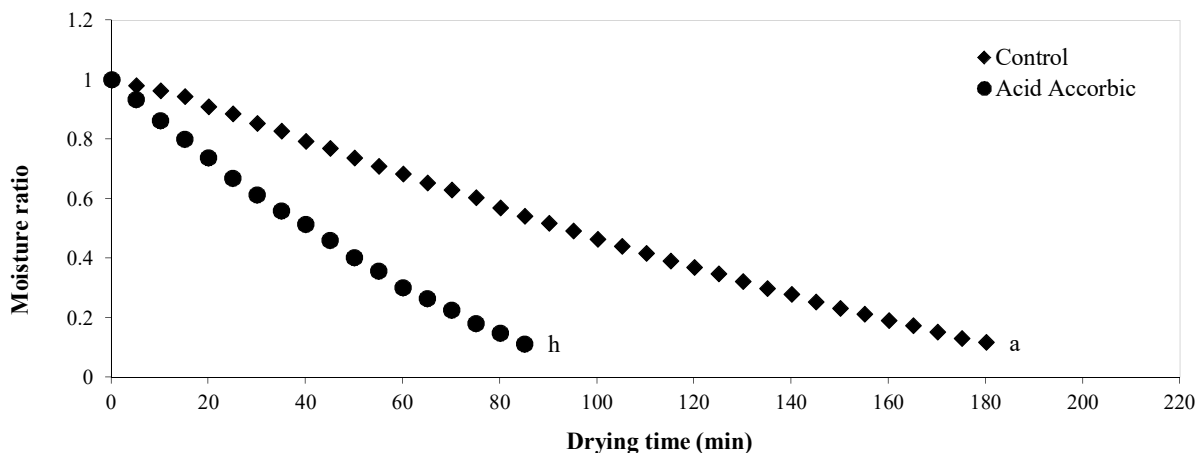
Fig. 1. Drying curves of blackberry under different pre-treatment in air temperature 50 °C (The same letter shows that the mean amount had no significant difference ($p < 0.05$) based on Duncan's test)



ادامه شکل (۱) منحنی خشک کردن توت سیاه تحت پیش تیمارهای مختلف در دمای هوای ۵۰ °C

(حرف مشترک نشان می دهد که مقدار میانگین اختلاف معنی داری بر اساس آزمون دانکن ندارند)

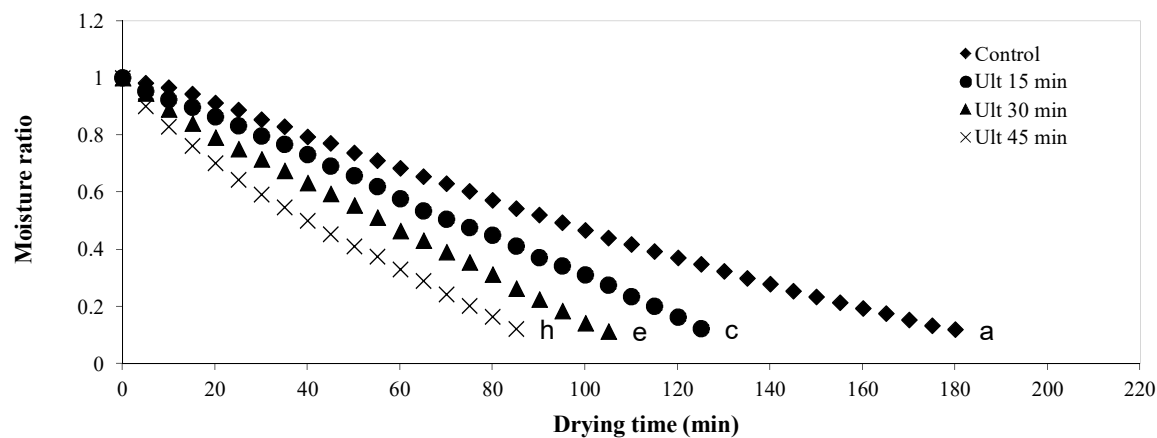
Fig. 1. Drying curves of blackberry under different pre-treatment in air temperature 50 °C
(The same letter shows that the mean amount had no significant difference ($p < 0.05$) based on Duncan's test)

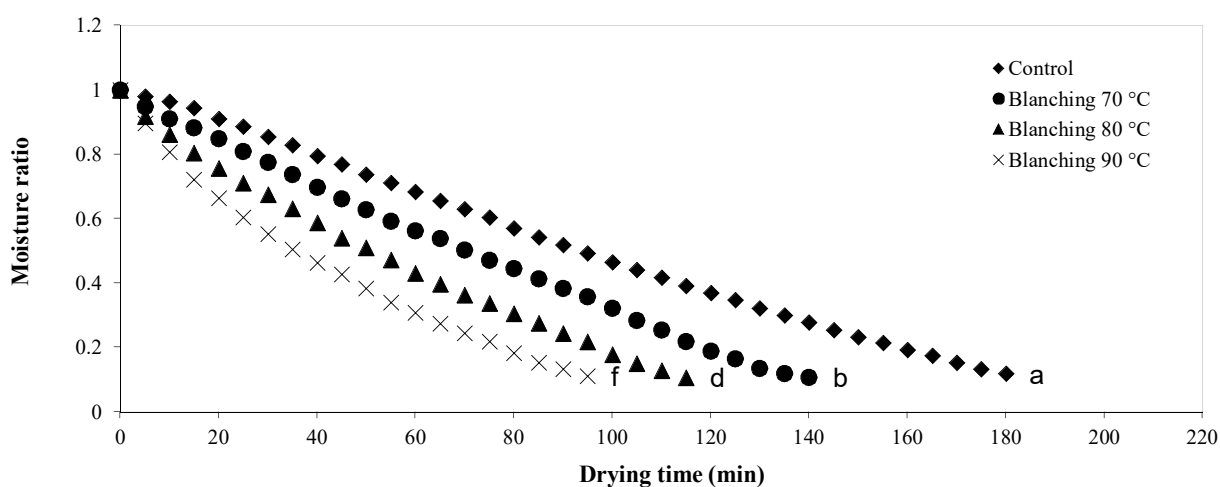
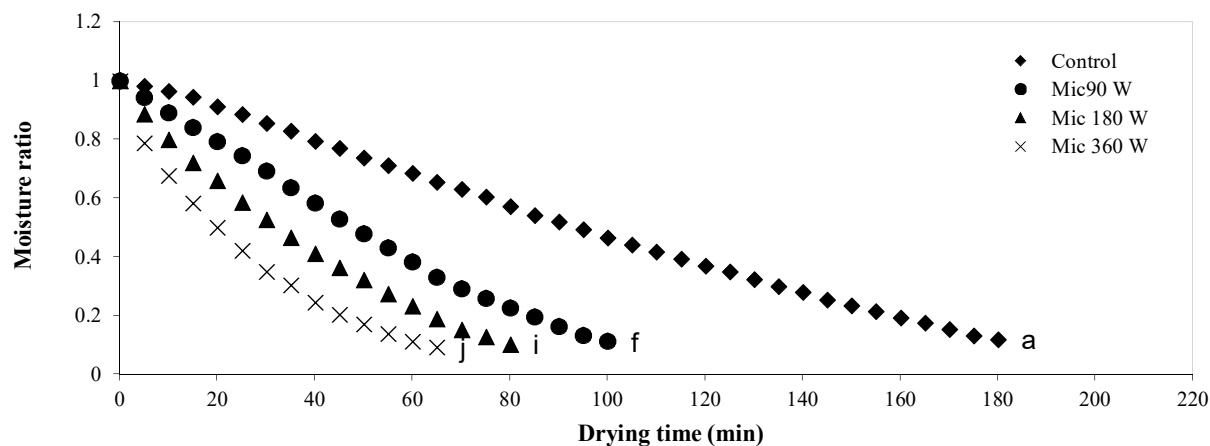


شکل (۲) منحنی خشک کردن توت سیاه تحت پیش تیمارهای مختلف در دمای هوای ۶۰ °C

(حرف مشترک نشان می دهد که مقدار میانگین اختلاف معنی داری بر اساس آزمون دانکن ندارند)

Fig. 2. Drying curves of blackberry under different pre-treatment in air temperature 60 °C
(The same letter shows that the mean amount had no significant difference ($p < 0.05$) based on Duncan's test)

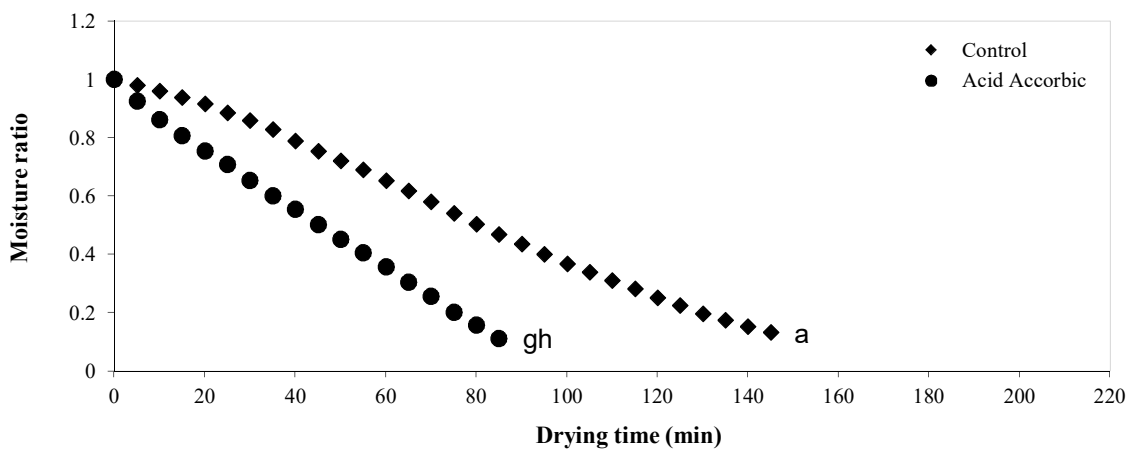




ادامه شکل (۲) منحنی خشک کردن توت سیاه تحت پیش تیمارهای مختلف در دمای هوای ۶۰ °C

(حرف مشترک نشان می دهد که مقدار میانگین اختلاف معنی داری بر اساس آزمون دانکن ندارند)

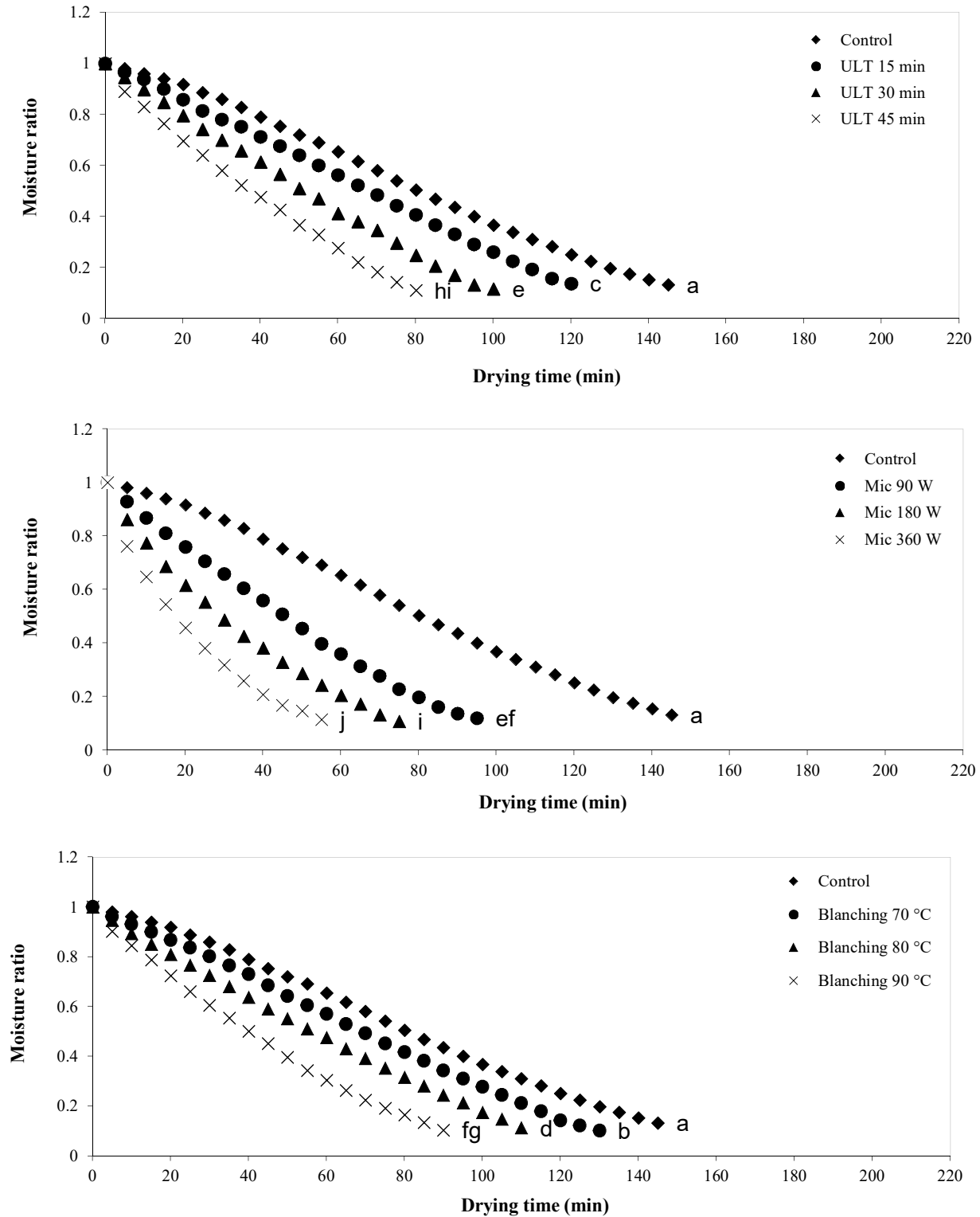
Fig. 2. Drying curves of blackberry under different pre-treatment in air temperature 60 °C
(The same letter shows that the mean amount had no significant difference ($p < 0.05$) based on Duncan's test)



شکل (۳) منحنی خشک کردن توت سیاه تحت پیش تیمارهای مختلف در دمای هوای ۷۰ °C

(حرف مشترک نشان می دهد که مقدار میانگین اختلاف معنی داری بر اساس آزمون دانکن ندارند)

Fig. 3. Drying curves of blackberry under different pre-treatment in air temperature 70 °C
(The same letter shows that the mean amount had no significant difference ($p < 0.05$) based on Duncan's test)



ادامه شکل (۳) منحنی خشک کردن توت سیاه تحت پیش تیمارهای مختلف در دمای هوای ۷۰ °C

(حرف مشترک نشان می دهد که مقدار میانگین اختلاف معنی داری بر اساس آزمون دانکن ندارند)

Fig. 3. Drying curves of blackberry under different pre-treatment in air temperature 70 °C
(The same letter shows that the mean amount had no significant difference ($p < 0.05$) based on Duncan's test)

تا ۰/۹۹۹۸، ۰/۱۲۴۵ تا ۰/۰۲۱۲۲، و ۰/۰۰۰۲۹ تا ۰/۰۰۴۳۱. متغیر هستند. با توجه به نتایج جدول (۲) تقریباً همه مدل‌ها مناسب هستند. اما مدل میدیلی و همکاران با دقت بیشتری (R^2) بالاتر، RMSE و χ^2 پایین‌تر) نسبت به سایر مدل‌ها، فرایند خشک شدن توت سیاه را در نمونه کنترل با مشخصات ($R^2=0/9996$ ، $RMSE=0/1259$ و $\chi^2=0/0035$)، برای پیش‌تیمار فراصوت با مشخصات ($R^2=0/9994$ ، $RMSE=0/1272$ ، $R^2=0/9994$)، برای پیش‌تیمار مایکروویو با مشخصات ($R^2=0/9998$ ، $RMSE=0/1245$ و $R^2=0/9998$)، برای پیش‌تیمار مایکروویو با مشخصات ($R^2=0/9993$)، برای پیش‌تیمار بلانچینگ با مشخصات ($R^2=0/9993$)، برای پیش‌تیمار اسید آسکوربیک با مشخصات ($R^2=0/9990$ ، $RMSE=0/1314$ و $R^2=0/9990$)، $\chi^2=0/0055$ پیش‌بینی کرد.

۳.۳. ضریب پخش رطوبت مؤثر

الف) اثر پیش‌تیمار فراصوت با توجه به شکل (۴) بالاترین و پایین‌ترین مقدار ضریب پخش رطوبت مؤثر در شرایط مختلف پیش‌تیمار فراصوت به ترتیب $9/64 \times 10^{-9}$ و $5/52 \times 10^{-9}$ به دست آمد. نتایج نشان می‌دهد که دمای خشک‌کردن و زمان اعمال پیش‌تیمار فراصوت اثر مستقیمی بر مقدار ضریب پخش رطوبت مؤثر دارد. به عبارت دیگر، با افزایش دمای خشک‌کردن و زمان اعمال پیش‌تیمار فراصوت، مقدار ضریب پخش رطوبت مؤثر به طور معنی‌داری ($p < 0.05$) افزایش یافت. بیشترین مقدار ضریب پخش رطوبت مؤثر در دمای 70°C و زمان اعمال پیش‌تیمار فراصوت ۴۵ min به دست آمد. بنابراین افزایش دما با افزایش جنبش مولکول سبب خروج بیشتر مولکول‌های آب از درون محصول شده و به دنبال آن زمان خشک‌شدن کاهش یافته مقدار ضریب پخش رطوبت مؤثر افزایش می‌یابد [۴۵، ۴۰]. از طرف دیگر پیش‌تیمار فراصوت سبب باز شدن مسیر لوله‌های موئین در اثر پراکنده شدن ترکیبات سطحی شده و تشکیل کانال‌های میکروسکوپی طولی‌تر در اثر تغییر شکل سلول‌ها داده و به دنبال آن لوله‌های موئین بازتری ایجاد می‌گردد [۴۶]. بنابراین اعمال پیش‌تیمار فراصوت با تغییر شکل سلول‌ها و تخریب دیواره‌ی سلولی خروج رطوبت از داخل محصول را سریع‌تر می‌کند. کاوه و همکاران، مقدار ضریب پخش رطوبت مؤثر را برای خشک‌کردن بادام با

نسبت به پیش‌تیمارهای دیگر و تیمار شاهد بزرگ‌تر بوده و رطوبت داخل ماده می‌تواند به سرعت از سطح لایه توت سیاه خارج شود [۱۰]. نتایج مشابهی در خشک‌کردن برگ جعفری [۸]، قارچ سفید [۳۸]، سیب قرمز [۴۴] و توت‌فرنگی [۲۲] گزارش شده است.

ج) اثر پیش‌تیمار بلانچینگ و اسید آسکوربیک شکل‌های ۱-۳ نشان می‌دهند که پیش‌تیمارهای بلانچینگ و اسید آسکوربیک می‌تواند تأثیر کم‌تری بر زمان خشک‌شدن داشته باشند. اما زمان خشک‌کردن در نمونه‌ها با این پیش‌تیمار، نسبت به نمونه شاهد، کاهش معنی‌داری ($p < 0.05$) داشت. تشکیل لایه سخت روی محصول در حال خشک‌شدن سبب انسداد برخی از لوله‌های موئین در لایه‌های توت سیاه می‌گردد و به دنبال آن خروج رطوبت از سطح محصول کاهش می‌یابد. این عامل سبب طولانی شدن زمان خشک‌شدن نسبت به سایر پیش‌تیمارها شده و شیب منحنی‌های خشک‌شدن کاهش می‌یابد [۲۵]. نتایج نشان می‌دهد که بیشترین زمان خشک‌شدن برای پیش‌تیمار بلانچینگ در دمای هوای ورودی 50°C و دمای بلانچینگ 70°C به دست آمد و برای پیش‌تیمار اسید آسکوربیک در دمای هوای ورودی 50°C اتفاق افتاد. در مطالعه‌ای که متولی و حیدری که بر روی سیب با پیش‌تیمارهای مختلف (فراصوت، مایکروویو، بلانچینگ و اسمزی) انجام دادند، آن‌ها بیان کرده‌اند که پیش‌تیمار بلانچینگ نسبت به سایر پیش‌تیمارها کمترین تأثیر را بر زمان خشک‌کردن داشت.

۲.۳. مدل‌سازی سینتیک خشک‌کردن

پس از به دست آوردن مقادیر نسبت رطوبت در دماهای ورودی خشک‌کن برای پیش‌تیمارهای مختلف، مدل‌های معرفی شده در جدول (۱) بر منحنی‌های خشک‌کردن حاصل از داده‌های آزمایشی برازش داده شدند. سپس مدل‌های مختلف خشک‌شدن لایه نازک با توجه به مقادیر R^2 ، RMSE و χ^2 ارزیابی شدند و مدل بهتر بر اساس مقادیر بیشتر R^2 و مقادیر کمتر RMSE و χ^2 انتخاب شد. نتایج حاصل از برازش داده‌های آزمایشگاهی با مدل‌های برازش شده در جدول (۲) نشان داده شده است. در همه موارد (جدول ۲)، برآورد پارامترهای آماری نشان داد که مقادیر R^2 ، RMSE و χ^2 از به ترتیب بین ۰/۹۹۲۹

جدول (۲) مقایسه آماری برای پیش‌بینی سینتیک خشک کردن توت سیاه

Table 2 The statistical comparison for prediction of drying kinetice of blackberry

Models	Pretreatment	R^2	RMSE	χ^2
Newton (Lewis)	Control	0.9968	0.01551	0.00088
	Blanching	0.9955	0.01671	0.00250
	Microwave	0.9969	0.01540	0.00082
	Ultrasound	0.9952	0.01711	0.00272
	Acid Ascorbic	0.9949	0.01729	0.00283
Henderson and Pabis	Control	0.9979	0.01404	0.00092
	Blanching	0.9975	0.01472	0.00119
	Microwave	0.9982	0.01375	0.00076
	Ultrasound	0.9962	0.01609	0.00202
	Acid Ascorbic	0.9957	0.01643	0.00239
Page	Control	0.9986	0.01384	0.00069
	Blanching	0.9979	0.01401	0.00084
	Microwave	0.9985	0.01390	0.00078
	Ultrasound	0.9969	0.01539	0.00144
	Acid Ascorbic	0.9972	0.01501	0.00132
Logarithmic	Control	0.9980	0.01392	0.00081
	Blanching	0.9969	0.01541	0.00146
	Microwave	0.9979	0.01399	0.00090
	Ultrasound	0.9966	0.01569	0.00177
	Acid Ascorbic	0.9964	0.01582	0.00189
Approximation of diffusion	Control	0.9941	0.01821	0.00330
	Blanching	0.9935	0.01889	0.00387
	Microwave	0.9948	0.01742	0.00301
	Ultrasound	0.9933	0.02109	0.00404
	Acid Ascorbic	0.9929	0.02122	0.00431
Midilli et al.	Control	0.9996	0.01259	0.00035
	Blanching	0.9993	0.01281	0.00046
	Microwave	0.9998	0.01245	0.00029
	Ultrasound	0.9994	0.01272	0.00042
	Acid Ascorbic	0.9990	0.01314	0.00055
Logistic	Control	0.9990	0.01312	0.00054
	Blanching	0.9988	0.01337	0.00065
	Microwave	0.9992	0.01289	0.00051
	Ultrasound	0.9984	0.01394	0.00081
	Acid Ascorbic	0.9977	0.01429	0.00096
Demir et al.	Control	0.9959	0.01637	0.00239
	Blanching	0.9961	0.01616	0.00209
	Microwave	0.9953	0.01701	0.00262
	Ultrasound	0.9940	0.01812	0.00322
	Acid Ascorbic	0.9937	0.01859	0.00349

پیش‌تیمار فراصوت را بین $1/81 \times 10^{-9}$ تا $9/70 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ در زمان‌های مختلف اعمال پیش‌تیمار به‌دست آوردند [۶]. امامی و همکاران، مقدار ضریب پخش رطوبت مؤثر برای توت‌فرنگی را بین $8/42 \times 10^{-10}$ تا $25/96 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ در زمان‌های مختلف اعمال پیش‌تیمار به‌دست آوردند [۲۲]. آن‌ها با بررسی تأثیر زمان اعمال توان فراصوت، غلظت محلول اسمزی

هوای ورودی 70°C و دمای بلانچینگ 90°C تعیین شد. همچنین کمترین مقدار ضریب پخش رطوبت مؤثر به میزان $10^{-10} \times 5/45 \text{ m}^2/\text{s}$ در دمای هوای ورودی 50°C و دمای بلانچینگ 70°C به دست آمد. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش دمای پیش تیمار بلانچینگ میزان ضریب پخش رطوبت مؤثر به طور معنی‌داری ($P < 0.05$) افزایش می‌یابد. دلیل این امر آن است که با اعمال پیش تیمار بلانچینگ مقاومت غشایی سلول در اثر درجه حرارت بالا تخریب شده و این لایه غشایی از بین رفته و رطوبت می‌تواند از قسمت داخلی محصول به سطح خارجی انتقال یافته و سرعت خروج آن افزایش یابد که این امر سبب افزایش ضریب پخش رطوبت مؤثر در توت سیاه می‌گردد [۴۹]. با افزایش میزان دمای پیش تیمار از 70°C به 90°C میزان تخریب لایه‌های غشایی افزایش یافته و بافت محصول دچار تخریب بیشتری شده و به دنبال آن خروج رطوبت بیشتری صورت گرفت. اگر، برای خشک کردن برش‌های گوجه با استفاده از خشک‌کن هوای گرم تحت پیش تیمارهای فراصوت و بلانچینگ مقدار ضریب پخش رطوبت مؤثر را به ترتیب $10^{-11} \times 4/43$ و $10^{-11} \times 6/33$ به دست آورد [۵۰]. اکنون و تورتو، مقدار ضریب پخش رطوبت مؤثر برای خشک کردن چیوت با خشک‌کن هوای گرم تحت پیش تیمار بلانچینگ $10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ به دست آورد [۴۹]. دویماز (2010)، مقدار ضریب پخش رطوبت مؤثر در پیش تیمار بلانچینگ برای خشک کردن محصول سیب سرخ با استفاده از خشک‌کن هوای گرم را در محدوده $10^{-10} \times 3/08$ تا $10^{-10} \times 4/2$ گزارش داد [۴۴].

د) اثر پیش تیمار اسید آسکوربیک

نتایج حاصل از بررسی ضریب پخش رطوبت مؤثر توت سیاه در دماهای مختلف با استفاده از پیش اسید آسکوربیک در شکل (۴) آورده شده است. نتایج نشان می‌دهد که برای پیش تیمار اسید آسکوربیک بیشترین مقدار ضریب پخش رطوبت مؤثر $10^{-9} \times 9/18 \text{ m}^2/\text{s}$ برای نمونه شاهد و کمترین مقدار آن $10^{-9} \times 8/7 \text{ m}^2/\text{s}$ به دست آمد. با افزایش دما مقدار ضریب پخش رطوبت مؤثر در حالت پیش تیمار اسید آسکوربیک نسبت به تیمار شاهد به طور معنی‌داری ($P < 0.05$) افزایش یافت. دلیل این امر آن است که دما تأثیر زیادی در ایجاد جنبش مولکولی و مکش سطحی داشته و با افزایش دما، ضریب پخش رطوبت مؤثر پیش تیمارهای مختلف روی سیب سرخ، ضریب پخش رطوبت

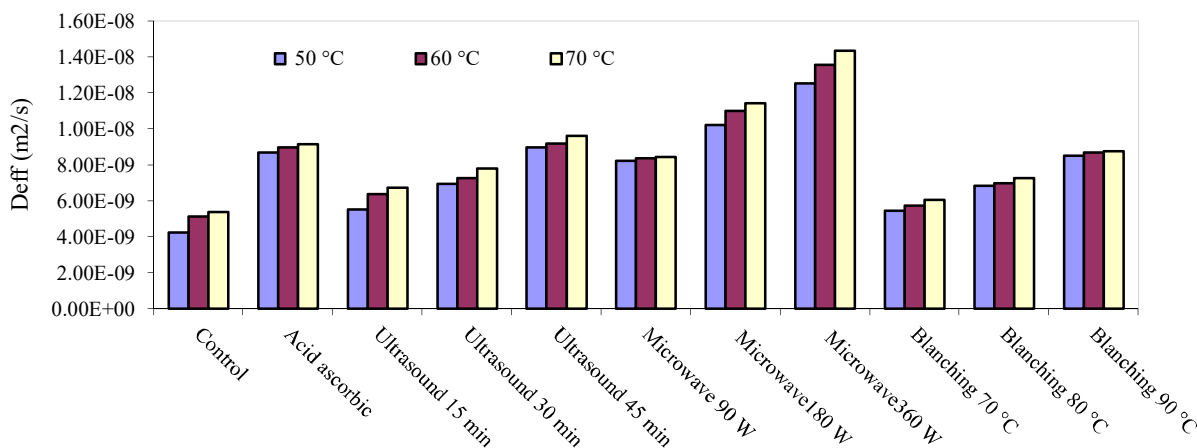
و دمای هوا در خشک کردن توت‌فرنگی نشان دادند که با افزایش دما، غلظت محلول اسمزی و زمان اعمال توان فراصوت میزان ضریب پخش رطوبت مؤثر روند افزایشی داشت. دلیل این نتایج به علت افزایش گرادیان حرارتی ایجاد شده در اثر افزایش دما و به دنبال آن افزایش تبخیر از سطح محصول می‌باشد.

ب) اثر پیش تیمار مایکروویو

همان‌طور که شکل (۴) نشان می‌دهد، بیشترین مقدار ضریب پخش رطوبت مؤثر برای توت سیاه در پیش تیمار مایکروویو $10^{-10} \times 1/43 \text{ m}^2/\text{s}$ در توان مایکروویو 360 W و دمای هوای 70°C به دست آمد. همچنین کمترین مقدار ضریب پخش رطوبت مؤثر به میزان $10^{-10} \times 8/23 \text{ m}^2/\text{s}$ مربوط به توان مایکروویو 90 W و دمای هوای 50°C می‌باشد. با بررسی اثرات پیش تیمار مایکروویو در توان‌های مختلف بر ضریب پخش رطوبت مؤثر در خشک کردن توت سیاه نشان می‌دهد که با افزایش توان مایکروویو، مقدار ضریب پخش رطوبت مؤثر به طور معنی‌داری ($P < 0.05$) افزایش می‌یابد. یکی از مهم‌ترین دلایل به دست آمدن این نتایج، تأثیر امواج مایکروویو بر بافت توت بوده که با تأثیر بر بافت توت سیاه، بافت را متخلخل کرده و سبب باز شدن لوله‌های موئین برای انتقال رطوبت شده و به دنبال آن کاهش زمان خشک کردن نسبت به شاهد می‌گردد. از طرف دیگر با افزایش توان پیش تیمار مایکروویو، گرمایش نمونه افزایش یافته که دلیل این امر افزایش شدت دوقطبی شدن مولکول‌های آب بوده و به دنبال آن گرمایش حجمی و تولید حرارت در داخل نمونه افزایش یافته و اختلاف فشار زیادی بین مرکز و سطح محصول برقرار می‌شود [۴۷]. به دنبال این امر بافت محصول در پیش تیمار با توان بالاتر دچار تخریب و واگرایی بیشتری شده و خروج رطوبت در حین خشک شدن در این تیمارها افزایش یافته و ضریب پخش رطوبت مؤثر افزایش می‌یابد [۴۸]. میرزوا و همکاران، برای خشک کردن تمشک در خشک‌کن هوای گرم تحت پیش تیمارهای مایکروویو و فراصوت مقدار ضریب پخش رطوبت مؤثر را بین $10^{-8} \times 0/17$ تا $10^{-8} \times 3/91 \text{ m}^2/\text{s}$ به دست آوردند [۲۰]. همچنین آن‌ها نشان دادند که تأثیر پیش تیمار مایکروویو بر ضریب پخش رطوبت مؤثر بیشتر از فراصوت بود.

ج) اثر پیش تیمار بلانچینگ

با توجه به شکل (۳)، برای پیش تیمار بلانچینگ، بالاترین مقدار ضریب پخش رطوبت مؤثر به میزان $10^{-9} \times 8/77 \text{ m}^2/\text{s}$ در دمای



شکل (۴) مقادیر ضریب پخش رطوبت مؤثر با استفاده از پیش تیمارهای مختلف

(حرف مشترک روی هر ستون نشان می دهد که مقدار میانگین اختلاف معنی داری بر اساس آزمون دانکن ندارند)

Fig. 4. The amounts of effective moisture diffusivity coefficient using different pre-treatment

(The same letter over column shows that the mean amount had no significant difference ($p < 0.05$) based on Duncan's test)

مؤثر نسبت به نمونه کنترل افزایش می یابد. بنابراین مقادیر افزایش می یابد [۴۴]. این محقق بیان کرد که با اعمال D_{eff} برای توت سیاه در محدوده 10^{-8} تا 10^{-12} m^2/s به دست آمد که این مقدار برای همه مواد بیولوژیکی برقرار است [۶].

۴.۳. انرژی مصرفی ویژه

مصرف انرژی به عنوان یکی از مهم ترین پارامترهای ارزیابی در طول عملیاتی مانند خشک کردن شناخته می شود. با توجه به کمبود سوخت های فسیلی و مشکلات زیست محیطی (انتشار گازهای گلخانه ای)، قیمت انرژی همچنان افزایش می یابد، که باعث می شود صنایع برای کاهش مصرف انرژی راهکارهای جدیدی را ارائه دهند [۲۰]. در شکل (۵)، انرژی مصرفی ویژه برای خشک کردن توت سیاه در نمونه شاهد و پیش تیمارهای مختلف ارائه شده است. با توجه به شکل (۵) با افزایش زمان اعمال توان فراصوت از (۱۵ به ۴۵ min)، افزایش دمای بلانچینگ (از ۷۰ تا ۹۰ °C)، افزایش توان مایکروویو (از ۹۰ تا ۳۶۰ W) و همچنین با اعمال پیش تیمار اسید آسکوربیک مقدار انرژی مصرفی ویژه نسبت به نمونه شاهد به طور معنی داری ($p < 0.05$) کاهش یافت. همان طور که در شکل (۵) نشان داده شده است پایین ترین مقدار انرژی مصرفی ویژه برای خشک کردن توت سیاه در پیش تیمار مایکروویو (۳۶۰ kW) و دمای هوای ورودی $55/52 h/kg$ ، با توان مایکروویو (۳۶۰ W) و دمای هوای ورودی $70^\circ C$ به دست آمد. بالاترین مقدار انرژی مصرفی ویژه (۵۴ kW)

در نمونه شاهد با دمای $50^\circ C$ محاسبه گردید. مایکروویو با اعمال فرایند قطبی کردن مولکول های آب سبب افزایش دما درون محصول شده و با تخریب بافت محصول و تشکیل کانال هایی با قطر بیشتر مانع تشکیل سخت شدگی سطحی طی فرایند خشک کردن شده و سبب خروج بهتر رطوبت از محصول می گردد در نتیجه میزان انرژی مصرفی ویژه کاهش پیدا می کند [۵۱]. با افزایش دمای مصرفی ویژه کاهش یافت. همان طور که انتظار می رود با افزایش دما به علت افزایش گرادیان حرارتی و خروج بیشتر و سریع تر رطوبت از محصول، زمان خشک شدن کاهش یافته و در نتیجه انرژی مصرفی ویژه کاهش پیدا می کند. به عبارت دیگر، دمای ورودی بالاتر باعث انتقال جرمی بیشتر می شود در نتیجه، زمان خشک شدن کاهش پیدا می کند، بنابراین انرژی مصرف کاهش می یابد [۵۲، ۵۳]. میرزوا و همکاران، برای خشک کردن محصول تمشک در خشک کن هوای گرم با استفاده از پیش تیمارهای مختلف، نشان داد که کمترین انرژی مصرفی ویژه در پیش تیمار مایکروویو به دست آمد [۲۰]. دیگر محققان در خشک کردن توت فرنگی با خشک کن هوای گرم تحت پیش تیمارهای مختلف (مایکروویو و فراصوت) بیان کرده اند که استفاده از پیش تیمار مایکروویو کمترین مقدار انرژی مصرفی ویژه را داشت [۵۴].

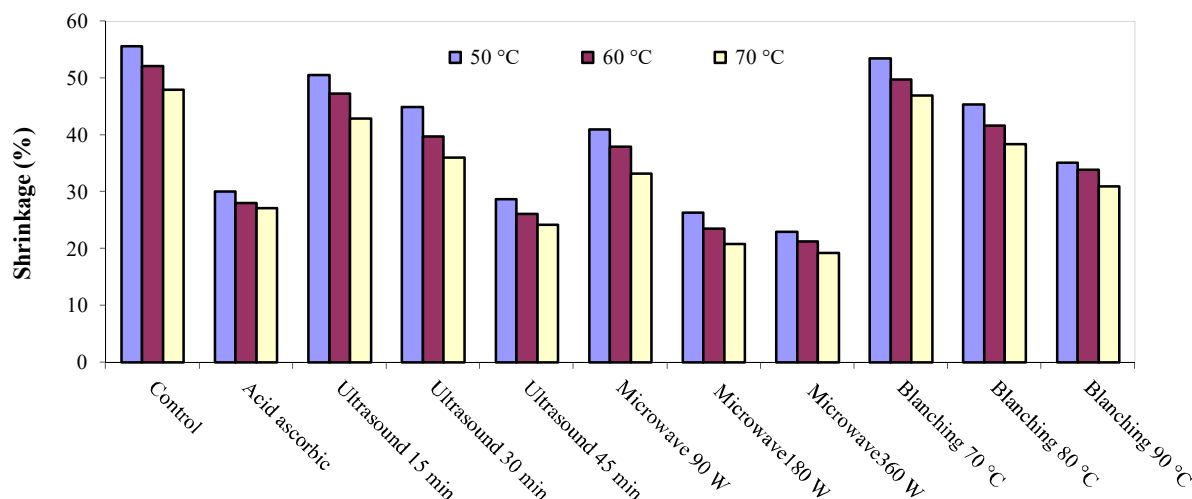
۵.۳. اختلاف رنگ کل

($p < 0.05$) در سطح پایین تری قرار داشت. که این تغییرات رنگ طی خشک شدن توت سیاه به علت عوامل مختلف مانند تخریب حرارتی کاروتنوئیدها، اکسیداسیون، واکنش‌های آنزیمی و واکنش غیر آنزیمی قهوه‌ای می‌باشد [۳۴]. این نتایج مشابه نتایج محققان دیگری برای خشک کردن توت‌فرنگی، کدو حلواپی و پیاز بود [۲۲، ۵۷، ۵۸]. در پیش تیمار بلانچینگ، تغییرات رنگ با افزایش دمای عملیات به طور معنی‌داری ($p < 0.05$) افزایش یافت. یعنی با افزایش دما تغییرات رنگ به طور معنی‌داری ($p < 0.05$) کاهش پیدا کرد. برای این پیش تیمار، بیشترین تغییرات رنگ در دمای بلانچینگ 70°C و دمای خشک‌کن 50°C به دست آمد. این می‌تواند به این دلیل باشد که درجه حرارت بالا، رنگ‌دانه‌ها را از بین می‌برد. همچنین این تغییرات می‌تواند با ایجاد رادیکال‌های آزاد و سونو شیمیایی در نتیجه کاویتاسیون، بر خواص مواد غذایی تأثیر بگذارد [۵۸]. نتیجه این تحقیق با گزارش‌های منتشر شده توسط دیگر محققان سازگار است. محققان محدوده‌ی تغییرات رنگ در خشک پاششی برای توت سیاه را بین ۷ تا ۲۴ گزارش داده‌اند [۵۹].

۶.۳. چروکیدگی

چروکیدگی بر خواص فیزیکی مانند تخلخل، تراکم و درنهایت شکل محصول، که یکی از مهم‌ترین عوامل کیفیت یک محصول است اثر می‌گذارد. بنابراین چروکیدگی با افزایش از

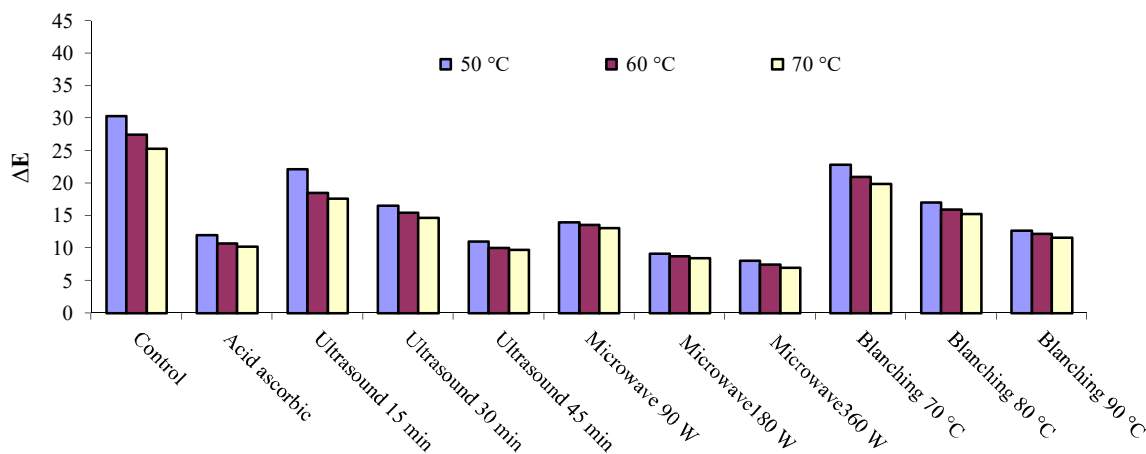
حفظ رنگ محصولات بیولوژیکی به‌عنوان یک شاخص مهم کیفی برای ارزیابی میزان خسارت ناشی از فرایند حرارتی محسوب می‌شود. در بازاریابی، ارزش رنگ، یک نگرانی عمده در مورد پذیرش محصول توسط مصرف‌کنندگان است [۵۵]. نتایج مربوط بررسی اثر دما و روش پیش تیمار بر شاخص تغییرات رنگ (ΔE) در شکل (۶) نشان داده شده است. بر اساس شکل (۶) بیشترین مقدار تغییرات رنگ ($30/28$) در نمونه شاهد اتفاق افتاد. دلیل تغییرات رنگ طی فرایند خشک شدن توت سیاه می‌تواند به دلیل تجزیه رنگ‌دانه، واکنش‌های آنزیمی و واکنش غیر آنزیمی قهوه‌ای شدن باشد [۲۱]. کمترین مقدار تغییرات رنگ در پیش تیمار مایکروویو ($7/01$) با توان 360W و دمای هوای ورودی 70°C به دست آمد. با توجه به این نکته مهم که هر چقدر شاخص تغییرات رنگ عدد کوچک‌تری باشد، بدین معناست که تیمار مربوطه در حفظ رنگ محصول به خوبی عمل کرده است، پس می‌توان گفت بهترین کیفیت رنگ توت سیاه در پیش تیمار مایکروویو با بیشترین دمای خشک‌کن به دست آمده است که علت آن را می‌توان سرعت بالای عملیات خشک کردن دانست [۵۶]. همچنین در پیش تیمار فراصوت با افزایش زمان اعمال فراصوت میزان اختلاف رنگ، کاهش معنی‌داری ($p < 0.05$) داشت. همچنین مقدار تغییرات رنگ در نمونه‌های پیش تیمار شده نسبت به نمونه‌های شاهد، به طور معنی‌دار



شکل (۵) انرژی مصرفی ویژه توت سیاه در خشک‌کن هوای گرم - مادون قرمز با پیش تیمارهای مختلف

(حرف مشترک روی هر ستون نشان می‌دهد که مقدار میانگین اختلاف معنی‌داری بر اساس آزمون دانکن)

Fig. 5. Specific energy consumption of blackberry in convective-infrared dryer with different pretreatment (The same letter over column shows that the mean amount had no significant difference ($p < 0.05$) based on Duncan's test)

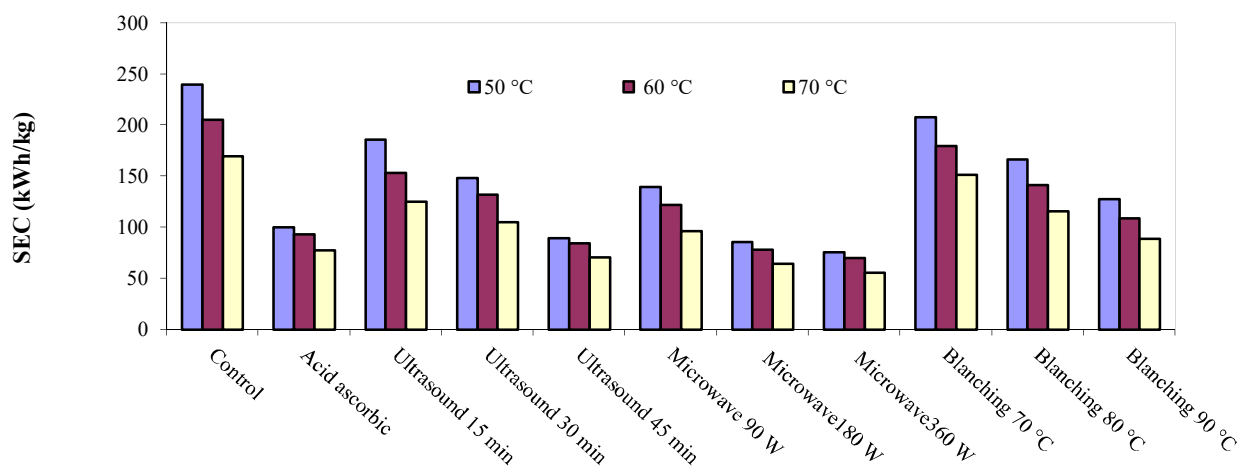


شکل (۶) تغییرات رنگ توت سیاه در خشک کن هوای گرم - مادون قرمز با پیش تیمارهای مختلف

(حرف مشترک روی هر ستون نشان می دهد که مقدار میانگین اختلاف معنی داری بر اساس آزمون دانکن ندارند)

Fig. 6. Color changes of blackberry in convective-infrared dryer with different pretreatment

(The same letter over column shows that the mean amount had no significant difference ($p < 0.05$) based on Duncan's test)



شکل (۷) چروکیدگی توت سیاه در خشک کن هوای گرم - مادون قرمز با پیش تیمارهای مختلف

(حرف مشترک روی هر ستون نشان می دهد که مقدار میانگین اختلاف معنی داری بر اساس آزمون دانکن ندارند)

Fig. 7. Shrinkage of blackberry in convective-infrared dryer with different pretreatment

(The same letter over column shows that the mean amount had no significant difference ($p < 0.05$) based on Duncan's test)

دمای $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ با درصد چروکیدگی $(.55/62)$ به دست آمد. همچنین کمترین مقدار چروکیدگی در پیش تیمار مایکروویو با توان 360 W و دمای $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ با درصد چروکیدگی $19/23\%$ محاسبه شد. زمان خشک شدن در نمونه شاهد بسیار طولانی بود، که باعث فروپاشی دیواره سلولی و افزایش چروکیدگی معنی داری ($p < 0.05$) در توت سیاه گردید. از سوی دیگر فشار بخار آب بالا در داخل توت سیاه طی خشک کردن مایکروویو موجب گسترش (انبساط) سلولها شد، که به عنوان اثر پفین

دست دادن میزان آب افزایش می یابد [۶۰]. خشک کردن توت سیاه با استفاده از پیش تیمارهای مختلف موجب چروکیدگی در محدوده $19/23\%$ تا $55/62\%$ شد (شکل ۷). با توجه به شکل (۷)، تغییرات چروکیدگی ناشی اعمال پیش تیمار اسید آسکوربیک $(27/1)$ تا $29/99\%$ ، پیش تیمار مایکروویو $19/23\%$ تا $40/98\%$ ، پیش تیمار فراصوت $24/2$ تا $50/59\%$ ، پیش تیمار بلانچینگ $(30/98)$ تا $53/48\%$ و نمونه شاهد $47/99\%$ تا $55/62\%$ بود. بیشترین مقدار چروکیدگی در نمونه شاهد با

(از $5/52 \times 10^{-9}$ تا $9/64 \times 10^{-9}$ m²/s)، توان پیش‌تیمار مایکروویو (از $8/23 \times 10^{-9}$ تا $1/43 \times 10^{-9}$ m²/s)، دمای پیش‌تیمار بلانچینگ (از $5/45 \times 10^{-9}$ تا 10^{-9} m²/s) و اعمال پیش‌تیمار اسید آسکوربیک (از 10^{-9} تا $8/77 \times 10^{-9}$ m²/s) روند افزایش معنی‌داری ($P < 0.05$) داشت. بیشترین مقدار انرژی مصرفی ویژه (kWh/kg) (۲۳۹/۹۱) در نمونه شاهد به‌دست آمد در حالی که اعمال پیش‌تیمار فراصوت (از ۱۸۵/۵۵ تا ۷۰/۵۷ kWh/kg)، پیش‌تیمار مایکروویو (از ۱۳۹/۷۶ تا ۵۵/۵۲ kWh/kg)، پیش‌تیمار بلانچینگ (از ۲۰۸/۰۷ تا ۸۸/۸۵ kWh/kg) و پیش‌تیمار اسید آسکوربیک (از ۹۹/۸۹ تا ۷۷/۴۰ kWh/kg) سبب کاهش معنی‌دار ($P < 0.05$) انرژی مصرفی ویژه شد. کمترین مقدار تغییرات رنگ و چروکیدگی در پیش‌تیمار مایکروویو با توان ۳۶۰W و دمای خشک‌کن ۷۰ °C به‌دست آمد.

تشکر و قدردانی

از دانشگاه محقق اردبیلی (حوزه معاونت پژوهشی)، در تأمین بودجه برای اجرای طرح با عنوان "تأثیر پیش‌تیمارهای مختلف بر خواص خشک‌کردن، ترمودینامیکی و گازهای گلخانه‌ای تحت خشک‌کن‌های متفاوت با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی و انفیس (مطالعه موردی: توت سیاه)" با شماره ۹۰۴ مورخ ۱۳۹۷/۵/۸ تشکر و قدردانی می‌شود.

شناخته می‌شود. بنابراین، اثر پف با حرارت مایکروویو می‌تواند چروکیدگی توت سیاه را کاهش دهد [۶۱]. با توجه به شکل (۷) با افزایش توان مایکروویو، زمان اعمال توان فراصوت، دمای اعمال پیش‌تیمار بلانچینگ و همچنین دما هوای ورودی به خشک‌کن مقدار چروکیدگی به‌طور معنی‌داری ($p < 0.05$) کاهش یافت. دیگر محققان برای خشک‌کردن تمشک [۲۰، ۵۴]، و چایوت [۴۹] با استفاده از پیش‌تیمارهای مختلف، نتایج مشابهی را ارائه کردند.

۴. نتیجه‌گیری

خشک‌کردن یکی از روش‌های مرسوم به‌منظور کاهش رطوبت محصول برای نگهداری طولانی‌مدت می‌باشد. در این پژوهش از تأثیر پیش‌تیمارهای فراصوت، مایکروویو، بلانچینگ و اسید آسکوربیک بر ویژگی‌های خشک‌کردن (زمان، ضریب پخش رطوبت مؤثر و انرژی مصرفی) و کیفی (اختلاف رنگ و چروکیدگی) توت سیاه تحت خشک‌کن ترکیبی مادون‌قرمز - هوای گرم بررسی شد. نتایج نشان داد که پس اعمال پیش‌تیمار بر نمونه‌ها، زمان خشک شدن به‌طور معنی‌داری ($P < 0.05$) نسبت به نمونه شاهد کاهش یافت. پیش‌تیمار مایکروویو بیشترین تأثیر (۶۴٪) بر زمان خشک شدن داشت. همچنین نتایج حاصل از برازش مدل‌های ریاضی بر داده‌های آزمایشگاهی برای پیش‌بینی نسبت رطوبت توت سیاه طی خشک‌کردن نشان داد که مدل میدلی و همکاران برای نمونه شاهد و هر چهار پیش‌تیمار به‌عنوان بهترین مدل بود. نتایج نشان داد که میزان ضریب پخش رطوبت مؤثر با افزایش زمان پیش‌تیمار فراصوت

منابع

- functional okra snacks: Antioxidant properties, sensory quality, and energy consumption. *LWT*, 82, 216-226.
- [4] Fan, K., Zhang, M., Mujumdar, A.S. (2017). Application of airborne ultrasound in the convective drying of fruits and vegetables: A review. *Ultrason Sonochem*, 39, 47-57.
- [5] Sahin, M., Doymaz, I. (2017). Estimation of cauliflower mass transfer parameters during convective drying. *Heat Mass Transfer*, 53, 507-517.
- [6] Kave, M., Jahanbakhshi, A., Abbaspour-Gilandeh, Y., Taghinezhad, E., Moghimi, M.B.F. (2018). The
- [1] Ferrari, C.C., Marconi Germer, S.P., Alvim, I.D., de Aguirre, J.M. (2013). Storage stability of spray-dried blackberry powder produced with maltodextrin or gum arabic. *Drying Technol.*, 31, 470-478.
- [2] Romero, C.J. Yépez, B.V. (2015). Ultrasound as pretreatment to convective drying of Andean blackberry (*Rubus glaucus* Benth). *Ultrason Sonochem*, 22, 205-210.
- [3] Jiang, N., Liu, C., Li, D., Zhang, Z., Liu, C., Wang, D., Niu, L., Zhang, M. (2017). Evaluation of freeze drying combined with microwave vacuum drying for

- processing of apple fruit: Energy conservation approach. *Energy*, 103, 679-687.
- [18] Adabi, E.M., Motevali, A., Nikbakht, A.M., Khoshtaghaza, H.M. (2013a). Investigation of some pretreatments on energy and specific energy consumption drying of black mulberry. *Chem. Ind. Chem. Eng. Q*, 19, 89-105.
- [19] Yang, X.-H., Deng, L.-Z., Mujumdar, A.S., Xiao, H.-W., Zhang, Q., Kan, Z. (2018). Evolution and modeling of colour changes of red pepper (*Capsicum annuum* L.) during hot air drying. *J. Food Eng.*, 231, 101-108.
- [20] Mierzwa, D., Szadzińska, J., Pawłowski, A., Pashminehazar, R., Kharaghani, A. (2018). Nonstationary convective drying of raspberries, assisted by microwaves and ultrasound. *Drying Technol.*, 1-14.
- [21] Wang, L., Xu, B., Wei, B., Zeng, R. (2018). Low frequency ultrasound pretreatment of carrot slices: Effect on the moisture migration and quality attributes by intermediate-wave infrared radiation drying. *Ultrason Sonochem*, 40, 619-628.
- [22] Amami, E., Khezami, W., Mezrigui, S., Badwaik, L.S., Bejar, A.K., Perez, C.T., Kechaou, N. (2017). Effect of ultrasound-assisted osmotic dehydration pretreatment on the convective drying of strawberry. *Ultrason Sonochem*, 36, 286-300.
- [23] Junqueira, J.R.d.J., Corrêa, J.L.G., Ernesto, D.B. (2017). Microwave, convective, and intermittent microwave-convective drying of pulsed vacuum osmodehydrated pumpkin slices. *J. Food Process Preserv*, 41, e13250.
- [24] Motevali, A., Zabihnia, F. (2017). Effect of the different pre-treatments thermal, pulse, chemical and mechanical on the external mass transfer coefficient changes, moisture diffusion coefficient and activation energy. *J. Res. Innov Food Sci. Technol.*, 6, 277-290.
- [25] Motevali, A., Hedayati, F. (2017). Investigation of change Drying Rate Constant coefficient in simulations models with various pretreatments on drying apple. *Innov. Food Technol.*, 4, 39-51.
- [26] Doymaz, I. (2004). Drying kinetics of white mulberry. *J. Food Eng*, 61, 341-346.
- [27] Motevali, A., Hashemi, S.J. (2018). Investigating the drying parameters of Fijou fruit in a freeze dryer. *Innov. Food Technol.*, 5, 699-713.
- [28] Beigi, M. (2019). Drying of Mint Leaves: Influence of the process temperature on dehydration parameters, quality attributes, and energy consumption. *J. Agri Sci. Technol.*, 21, 77-88.
- [29] Kumar pandey, S., Diwan, S., Soni, R. (2015). effect of ultrasound pre-treatment on quality, drying, and thermodynamic attributes of almond kernel under convective dryer using ANNs and ANFIS network. *J. Food Process Eng.*, 41, e12868.
- [7] Rojas, M.L. Augusto, P.E.D. (2018). Ethanol and ultrasound pre-treatments to improve infrared drying of potato slices. *Innov. Emerg. Sci. Food*, 49, 65-75.
- [8] Sledz, M., Wiktor, A., Rybak, K., Nowacka, M., Witrowa-Rajchert, D. (2016). The impact of ultrasound and steam blanching pre-treatments on the drying kinetics, energy consumption and selected properties of parsley leaves. *Appl. Acoust*, 103, 148-156.
- [9] Zhao, Y.-Y., Yi J.-Y., Bi, J.-F., Chen, Q.-Q., Zhou, M., Zhang, B. (2018). Improving of texture and rehydration properties by ultrasound pretreatment for infrared-dried shiitake mushroom slices. *Drying Technol.*, 1-11.
- [10] Deepika, S., Sutar, P.P. (2018). Combining osmotic-steam blanching with infrared-microwave-hot air drying: Production of dried lemon (*Citrus limon* L.) slices and enzyme inactivation. *Drying Technol.*, 36, 1719-1737.
- [11] Adabi, M.E., Nikbakht, A., Motevali, A., Seyedi, S.M. (2013). Investigation of black mulberry drying kinetics applying different pretreatments. *J. Agr. Sci. Technol*, 15, 23-34.
- [12] Sarker, M.S.H., Ibrahim, M.N., Aziz, N.A., Punan, M.S. (2015). Energy and exergy analysis of industrial fluidized bed drying of paddy. *Energy*, 84, 131-138.
- [13] Darvishi, H., Azadbakht, M., Noralahi, B. (2018). Experimental performance of mushroom fluidized-bed drying: Effect of osmotic pretreatment and air recirculation. *Renew Energy*, 120, 201-208.
- [14] Motevali, A., Koloor, R.T. (2017). A comparison between pollutants and greenhouse gas emissions from operation of different dryers based on energy consumption of power plants. *J. Clean Prod.*, 154, 445-461.
- [15] Motevali, A., Minaei, S., Banakar, A., Ghobadian, B., Khoshtaghaza, M.H. (2014). Comparison of energy parameters in various dryers. *Energy Convers Manag.*, 87, 711-725.
- [16] Nozad, M., Khojastehpour, M., Tabasizadeh, M., Azizi, M., Ashtiani, S.-H.M., Salarikia, A. (2016). Characterization of hot-air drying and infrared drying of spearmint (*Mentha spicata* L.) leaves. *Food Measure*, 10, 466-473.
- [17] Hazervazifeh, A., Nikbakht, A.M., Moghaddam, P.A. (2016). Novel hybridized drying methods for

- Ultrasound-assisted vacuum drying of nectarine. *J. Food Eng.*, 246, 119-124.
- [42] Chemat, F., Rombaut, N., Sicaire, A.-G., Meullemiestre, A., Fabiano-Tixier, A.-S., Abert-Vian, M. (2017). Ultrasound assisted extraction of food and natural products. Mechanisms, techniques, combinations, protocols and applications. A review. *Ultrason Sonochem*, 34, 540-560.
- [43] Rodríguez, Ó., Eim, V., Rosselló, C., Femenia, A., Cárcel, J.A., Simal, S. (2018). Application of power ultrasound on the convective drying of fruits and vegetables: effects on quality. *J. Sci. Food Agri.*, 98, 1660-1673.
- [44] Doymaz, İ. (2010). Effect of citric acid and blanching pre-treatments on drying and rehydration of Amasya red apples. *Food Bioprod Process*, 88, 124-132.
- [45] Bozkir, H., Ergün, A.R., Tekgül, Y., & Baysal, T. (2019). Ultrasound as pretreatment for drying garlic slices in microwave and convective dryer. *Food Sci. Biotechnol*, 28, 347-354.
- [46] Motevali, A. Zabihnia, F. (2017). Effect of the different pre-treatments thermal, pulse, chemical and mechanical on the external mass transfer coefficient changes, moisture diffusion coefficient and activation energy. *J. Res. Innov Food Sci. Technol.*, 6, 221-320 (In Farsi).
- [47] Behera, G. Sutar, P.P. (2018). Effect of convective, infrared and microwave heating on drying rates, mass transfer characteristics, milling quality and microstructure of steam gelatinized Paddy. *J. Food Process Eng.*, 41, e12900.
- [48] Horuz, E., Bozkurt, H., Karataş, H., Maskan, M. (2018). Simultaneous application of microwave energy and hot air to whole drying process of apple slices: drying kinetics, modeling, temperature profile and energy aspect. *Heat Mass Transfer*, 54, 425-436.
- [49] Akonor, P.T. Tortoe, C. (2014). Effect of blanching and osmotic pre-treatment on drying kinetics, shrinkage and rehydration of chayote (sechium edule) during convective drying. *British J. Appl Sci. Technol*, 4, 1215-1229.
- [50] Agarry, S.E. (2016). Modelling the thin-layer drying kinetics of untreated and blanch-osmotic pre-treated tomato slices. *Turkish J. Agri Food Sci. Technol*, 4, 850-858.
- [51] Toriki-Harchegani, M., Ghanbarian, D., Pirbalouti, A.G., Sadeghi, M. (2016). Dehydration behaviour, mathematical modelling, energy efficiency and essential oil yield of peppermint leaves undergoing microwave Review of mathematical modelling of thin layer drying process. *Int. J. Current Eng. Sci. Res.*, 2, 96-107.
- [30] Cuevas, M., Martínez-Cartas, M.L., Pérez-Villarejo, L., Hernández, L., García-Martín, J.F., Sánchez, S. (2019). Drying kinetics and effective water diffusivities in olive stone and olive-tree pruning. *Renew Energy*, 132, 911-920.
- [31] Mota, C.L., Luciano, C., Dias, A., Barroca, M.J., Guiné, R.P.F. (2010). Convective drying of onion: kinetics and nutritional evaluation. *Food Bioprod Process* 88, 115-123.
- [32] Rad, S.J., Kaveh, M., Sharabiani, V.R., Taghinezhad, E. (2018). Fuzzy logic, artificial neural network and mathematical model for prediction of white mulberry drying kinetics. *Heat Mass Transfer*, 54, 3361-3374.
- [33] Jafari, A. Zare, D. (2017). Ultrasound-assisted fluidized bed drying of paddy: Energy consumption and rice quality aspects. *Drying Technol.*, 35, 893-902.
- [34] Abdoli, B., Zare, D., Jafari, A., Chen, G. (2018). Evaluation of the air-borne ultrasound on fluidized bed drying of shelled corn: Effectiveness, grain quality, and energy consumption. *Drying Technol.*, 36, 1749-1766.
- [35] Önal, B., Adiletta, G., Crescitelli, A., Di Matteo, M., Russo, P. (2019). Optimization of hot air drying temperature combined with pre-treatment to improve physico-chemical and nutritional quality of 'Annurca' Apple. *Food Bioprod Process*. 115, 87-99.
- [36] Tsuruta, T., Tanigawa, H., Sashi, H. (2015). Study on shrinkage deformation of food in microwave-vacuum drying. *Drying technol*, 33, 1830-1836.[37] Mohsenin, N.N. (1986). Physical Characteristics: Physical Properties of Plant and Animal Materials, Gordon and Breach Science Publisher, New York.
- [38] Soghani, B.N., Azadbakht, M., Darvishi, H. (2018). Ohmic blanching of white mushroom and its pretreatment during microwave drying. *Heat Mass Transfer*, 54, 3715-3725.
- [39] Dibagar, N. Chayjan, A.R. (2018). Rough rice convective drying enhancement by intervention of airborne ultrasound-A response surface strategy for experimental design and optimization. *Drying Technol.*, 1-16.
- [40] Schössler, K., Jäger, H., Knorr, D. (2012). Effect of continuous and intermittent ultrasound on drying time and effective diffusivity during convective drying of apple and red bell pepper. *J. Food Eng.*, 108, 103-110.
- [41] da Silva, E.S., Brandão, S.C.R., da Silva, A.L., da Silva, J.H.F., Coêlho, A.C.D., Azoubel, P.M. (2019).

- characteristics and kinetics solar drying of Moroccan rosemary leaves. *Renew Energy*, 108, 303-310
- [64] Chayjan, R.A., Kaveh, M., Esna-Ashari, S. (2015). Thermal and physical properties modelling of terebinth fruit (*Pistacia atlantica* L.) under solar drying. *Res. Agr. Eng*, 61, 150-161.
- and hot air treatments. *Renew Sustain Energy Rev.*, 58, 407-418.
- [52] Filippin, A.P., Molina Filho, L., Fadel, V., Mauro, M.A. (2018). Thermal intermittent drying of apples and its effects on energy consumption. *Drying Technol.*, 36, 1662-1677.
- [53] Kaveh, M., Amiri Chayjan, R., Taghinezhad, E., Sharabiani, V.R., Motevali, A. (2020). Evaluation of specific energy consumption and GHG emissions for different drying methods (Case study: *Pistacia Atlantica*). *J. Clean Prod.* 120963
- [54] Szadzińska, J., Łechtańska, J., Kowalski, S.J., Stasiak, M. (2017). The effect of high power airborne ultrasound and microwaves on convective drying effectiveness and quality of green pepper. *Ultrason Sonochem*, 34, 531-539.
- [55] Aral, S. Beşe, A.V. (2016). Convective drying of hawthorn fruit (*Crataegus* spp.): Effect of experimental parameters on drying kinetics, color, shrinkage, and rehydration capacity. *Food Chem.*, 210, 577-584.
- [56] Zielinska, M., Zielinska, D., Markowski, M. (2018). The effect of microwave-vacuum pretreatment on the drying kinetics, color and the content of bioactive compounds in osmo-microwave-vacuum dried cranberries (*Vaccinium macrocarpon*). *Food Bioprocess Technol.*, 11, 585-602.
- [57] Çağlayan, D. Barutçu Mazı, I. (2018). Effects of ultrasound-assisted osmotic dehydration as a pretreatment and finish drying methods on the quality of pumpkin slices. *J. Food Process Preserv*, 42, e13679.
- [58] Ren, F., Perussello, C., Zhang, Z., Kerry, J., Tiwari, B. (2018). Impact of ultrasound and blanching on functional properties of hot-air dried and freeze dried onions. *LWT*, 87, 102-111.
- [59] Weber, F., Boch, K., Schieber, A. (2017). Influence of copigmentation on the stability of spray dried anthocyanins from blackberry. *LWT*, 75, 72-77.
- [60] Parthasarathi, S. Anandharamkrishnan, C. (2014). Modeling of shrinkage, rehydration and textural changes for food structural analysis: A review. *J. Food Process Eng.*, 37, 199-210.
- [61] Aydogdu, A., Sumnu, G., Sahin, S. (2015). Effects of microwave-infrared combination drying on quality of eggplants. *Food Bioprocess Technol.*, 8, 1198-1210.
- [62] Zhao, F., Han, F., Zhang, S., Tian, H., Yang, Y., Sun, K. (2018). Vacuum drying kinetics and energy consumption analysis of LiFePO₄ battery powder. *Energy*, 162, 669-681.
- [63] Mghazli, S., Ouhammou, M., Hidar, N., Lahnine, L., Idlimam, A., Mahrouz, M. (2017). Drying

*Research Article***Blackberry drying with various pretreatments of thermal, pulsed, chemical and mechanical using****Ebrahim Taghinejad^{2*}, Mohammad kaveh², Vali /rasooli Sharabiani²**

1. Associate professor, Department of Agricultural Engineering and Technology, Moghan College of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.
2. PhD student, Department of Biosystem Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Iran.
3. Associate professor, Department of Biosystem Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Iran.

Abstract

In this research was investigated the impact of various pre-treatments on effective moisture diffusivity coefficient (D_{eff}), specific energy consumption (SEC), total color difference and shrinkage of blackberry (*Rubus spp*) in convective – infrared dryer. Experiments were done at three temperature leveles 50, 60, 70 °C with four different pretreatments, including of blanching thermal pretreatment at 70, 80, 90 °C, pulsed pretreatment with microwaves power 90, 180, 360 W, chemical with Ascorbic acid solution at concentration of 1% and mechanical pretreatment with ultrasound in times of 15, 30, 45 min. Results shown that the highest and lowest of D_{eff} value (1.43×10^{-8} m²/s) and SEC amount (55.52 kWh/kg) was obtained using microwave pretreatment under 360 W power and 70 °C drying temperature, respectively. Also, the minimum and maximum extent of D_{eff} (4.24×10^{-9} m²/s) and SEC (239.89 kWh/kg) were in controlled sample and drying temperature of 50 °C, respectively. The highest amount of color difference (30.28) and shrinkage (55.62%) were seen in controlled sample. The lowest value of color difference (7.01) and shrinkage (19.23%) was obtained in microwave pretreatment with power of 360 W and drying temperature of 70 °C. So, the value of SEC (76.86%), color difference (76.85%) and shrinkage (65.43%) of samples reduced significantly ($p < 0.05$) using various pretreatments, respectively.

Keywords: Specific energy consumption; Blanching; Blackberry (*Rubus spp*); Ultrasound; Microwave.

* Corresponding author: e.taghinezhad@uma.ac.ir