



مقاله پژوهشی

بررسی اثر پیش تیمارهای فراصوت و روش‌های مختلف خشک کردن بر پارامترهای انتقال جرم در خشک کردن میوه به

وحید نیساری فام^۱، رضا طباطبایی کلور^۲، علی متولی^{۳*}

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری

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

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

(تاریخ دریافت: ۹۷/۱۲/۸، تاریخ آخرین بازنگری: ۹۸/۱/۱۹، تاریخ پذیرش: ۹۸/۲/۲۴)

چکیده

در پژوهش حاضر ورقه‌های برش خورده میوه به پس از اعمال دو پیش تیمار فراصوت حمام و پروب در سه سطح زمانی ۱۰، ۲۰ و ۳۰ min با سه روش جریان هوای گرم در سه سطح دما ۴۰، ۵۰ و ۶۰ °C، مایکروویو در سه سطح توان ۹۰، ۱۸۰ و ۳۶۰ W و انجمادی در دمای ۵۰ °C - خشک شدند. در تمامی تیمارها پارامترهای انتقال جرم T از جمله ضریب مؤثر پخش رطوبت، ضریب انتقال جرم همرفتی، آهنگ ثابت خشک شدن، فاکتور لاگ، ریشه اول غیرجبری و ضریب بایوت به روش دینسر و دوست محاسبه شدند. نتایج به دست آمده نشان داد که بازه تغییرات ضریب مؤثر پخش رطوبت با استفاده از پیش تیمار پروب فراصوت در خشک کردن به، روش جریان هوای گرم از ۴۴/۲۷۴E-۸ تا ۱۱/۱۱۲E-۸ m²/s تا ۱۱۰/۸۸۴E-۸، در مایکروویو از ۷۲/۳۱۷E-۸ تا ۲۰۱/۸۹۳E-۸ m²/s و در روش انجمادی از ۷/۶۶۳E-۸ تا ۱۱/۱۱۲E-۸ m²/s بود؛ در حالی که بازه تغییرات این پارامتر با استفاده از پیش تیمار حمام فراصوت در خشک کردن به روش جریان هوای گرم، از ۴۱/۶۵۲E-۸ تا ۷/۲۱۰E-۸ m²/s تا ۱۰۴/۳۶۹E-۸، در روش مایکروویو از ۵۹/۲۷۰E-۸ تا ۱۸۳/۸۱۳E-۸ m²/s و در روش انجمادی از ۷/۲۱۰E-۸ تا ۹/۸۲۹E-۸ m²/s بود. همچنین بازه تغییرات ضریب انتقال جرم همرفتی در خشک کردن جریان هوای گرم از ۴۹/۲۴۱E-۶ تا ۷/۶۳۰E-۶ m/s تا ۹۲/۲۱۶E-۶ m/s در روش مایکروویو از ۷۶/۵۴۲E-۶ تا ۱۳۴/۳۰۸E-۶ m/s در روش انجمادی از ۷/۶۳۰E-۶ تا ۱۴/۹۶۹E-۶ m/s بود. همچنین از نتایج چنین برآمد که روند تغییرات آهنگ ثابت خشک شدن با افزایش زمان پیش تیمار صعودی بوده، اما فاکتور لاگ، ریشه اول غیرجبری و ضریب بایوت دارای روند نزولی بودند. نتایج کلی حاصل از بررسی داده‌های انتقال جرم نشان داد که استفاده از پیش تیمار پروب فراصوت با مدت زمان ۳۰ min و استفاده از خشک کردن مایکروویو، می‌تواند بالاترین مقادیر انتقال جرم را در طول فرایند خشک کردن میوه به ایجاد کند.

کلیدواژه‌ها: آهنگ ثابت خشک شدن، ضریب مؤثر پخش، ضریب انتقال جرم همرفتی، پیش تیمار فراصوت، میوه به

* مسئول مقاله: a.motevali@sanru.ac.ir

۱. مقدمه

مایکروویو (خشک‌کن مایکروویو) و یا با تصعید رطوبت (خشک‌کن انجمادی) صورت پذیرد. فرایند خشک‌کردن به روش جریان هوای گرم، سبب فروپاشی سلولی در نمونه‌های در حال خشک‌شدن می‌شود که این مقدار با میزان خروج رطوبت از محصول متناسب است. به‌منظور کاهش این مشکل، روش‌های دیگر خشک‌کردن، مانند خشک‌کردن انجمادی، مایکروویو و ... پیشنهاد شده است [۷، ۸].

بررسی‌ها نشان می‌دهد که تمامی این روش‌های به‌کارگرفته شده، علی‌رغم استفاده زیاد، دارای معایبی چون مدت‌زمان طولانی خشک‌کردن و مصرف انرژی بالا نیز هستند [۹]. یکی از روش‌های مهم برای رفع این عیوب در خشک‌کن‌ها، استفاده از پیش‌تیمارهای مختلف، از جمله به‌کارگیری پیش‌تیمار فراصوت است. امواج فراصوت، امواجی با فرکانس بیش از ۱۶ KHz بوده که توسط انسان قابل شناسایی نبوده و در دو محدوده‌ی قوی فرکانس پایین: ۱۸ KHz تا ۱۰۰ و ضعیف: فرکانس‌های بالاتر از ۱۰۰ KHz طبقه‌بندی می‌شوند [۱۰]. این امواج با ایجاد بافت اسفنجی در ماده غذایی، سبب افزایش نرخ انتقال حرارت و جرم، طی خشک‌کردن می‌شوند. استفاده از انرژی فراصوت به‌صورت پیش‌تیمار و یا کاربرد مستقیم در محفظه خشک‌کن، می‌تواند بهترین نتیجه را از نظر کاهش زمان فرایند، حفظ ویژگی‌های کیفی محصول و راندمان مصرف انرژی به‌همراه داشته باشد. از طرفی، صوت دهی با امواج فراصوت، روشی ایمن، ساده و نسبتاً کم‌هزینه است که قابلیت کاربرد در مقیاس صنعتی را دارد. نتایج پژوهش‌ها نشان می‌دهد که انرژی فراصوت، به‌طور گسترده می‌تواند به‌عنوان یک پیش‌تیمار برای خشک‌کردن انواع میوه‌ها استفاده شود [۱۱].

سوکواتا و همکاران در پژوهشی به بررسی سینتیک خشک‌کردن و خصوصیات فیزیکوشیمیایی اسنک چغندر، با استفاده از دو پیش‌تیمار فراصوت حمام و پروب در محلول اسمزی و فرایند خشک‌کردن تکمیلی با استفاده از خشک‌کن جریان هوای گرم پرداخته شد. نتایج به‌دست آمده از این پژوهش نشان داد که استفاده از پیش‌تیمار پروب با زمان‌های ۵ و ۱۰ min و همچنین استفاده از پیش‌تیمار فراصوت حمام با زمان ۲۰ min، سبب کاهش ۲۲/۲٪ در زمان خشک‌کردن

به، با نام علمی *Cydonia oblonga*، از میوه‌های دانه‌دار بوده که مانند میوه سیب زردرنگ، آبدار و کمی درشت‌تر از آن است. بافت میوه به، خشک و ترد و طعمی ترش و تقریباً گس دارد و در فصل پاییز برداشت می‌شود [۱]. به، سرشار از ویتامین‌های A، B، املاح آهنی و تانن و دارای پروتید، گلوکید، لیپید و آب است. این منبع غنی از ویتامین C، به دلیل فیبر بالایی که دارد، به سلامت دستگاه گوارش کمک می‌کند [۲]. به می‌تواند به‌صورت تازه‌خوری مصرف شود و در غیر این صورت، برای نگهداری طولانی‌مدت آن باید روش‌هایی مانند نگهداری در سردخانه یا خشک‌کردن را انجام داد.

میوه به، مانند سایر میوه‌ها، به‌دلیل داشتن محتوای رطوبتی بالا بعد از فرایند برداشت، می‌بایست در دمای پایین سردخانه نگهداری شود تا فعل و انفعالات شیمیایی درونی آن کاهش یابد؛ البته می‌توان با پایین‌آوردن میزان رطوبت آن، از طریق خشک‌کردن به‌منظور تولید چیپس میوه‌ها، فرایند نگهداری را طولانی‌تر کرد. خشک‌کردن می‌تواند علاوه‌بر حفظ میوه‌های تازه، از دورریز شدن میوه‌هایی که در آستانه خرابی و گندیدگی قرار دارند، جلوگیری کرده و سبب تولید محصولی با ارزش افزوده بالاتر شود [۳]. میوه‌های چیپس‌شده ماندگاری طولانی دارند و در صورت عدم‌دسترسی به میوه تازه، می‌توانند جایگزین مناسبی برای آن‌ها باشند. میوه خشک‌شده که طعم مطلوبی دارد، میان‌وعده مفیدی برای کودکان محسوب می‌شود و جای تنقلات مضر مثل چیپس و پفک را می‌گیرد [۴].

از مزایای مهم خشک‌کردن این است که مواد خشک‌شده، طول عمر نگهداری بالاتر، حجم و وزن کمتر و هزینه حمل و نقل، بسته‌بندی و انبارداری کمتری را به‌همراه دارند. در کنار تمامی موارد ذکرشده، با انتخاب و اعمال یک روش مناسب خشک‌کردن، می‌توان امکان دستیابی به میوه‌ها و مواد غذایی باکیفیت را در تمام سال فراهم نمود [۵، ۶]. خروج رطوبت از نمونه‌های در حال خشک‌شدن، می‌تواند در شرایط کنترل شده با تبخیر رطوبت از محصول، به‌واسطه به‌کارگیری هوای گرم (خشک‌کن‌های جریان هوای گرم و خلا) یا امواج

می‌شود. همچنین در تیمارهای یادشده میزان جذب مواد جامد، آب از دست رفته و تغییرات رنگی تقریباً مشابه بودند [۱۲].

در پژوهشی اورتونو و همکاران، تأثیر به‌کارگیری امواج فراصوت را بر انتقال جرم پوست پرتقال با ضخامت 5.95 ± 0.41 mm در خشک‌کردن با هوای گرم 40°C و سرعت هوای 1 m/s بررسی نمودند. نتایج نشان داد که به کارگیری امواج فراصوت می‌تواند تا ۴۵٪ سینتیک خشک کردن پوست پرتغال را کاهش دهد [۱۳].

جامبرک و همکاران به بررسی اثر شدت‌های مختلف فراصوت بر میزان انتقال جرم و ویژگی آبگیری مجدد در خشک‌کردن نمونه‌های قارچ دکمه‌ای، کلم بروکلی و گل‌کلم پرداختند. نتایج نشان داد که در نمونه‌های پیش‌تیمارشده با فراصوت، میزان انتقال جرم و قابلیت آبگیری مجدد افزایش یافت و درعین حال چروکیدگی، آسیب بافتی و زمان خشک شدن نمونه‌ها با کاهش همراه بود [۱۴].

در پژوهش دیگری، کاوه و همکاران به بررسی خواص ترمودینامیکی خشک‌کردن لیموترش، تحت تأثیر پیش‌تیمار فراصوت شاهد، ۱۰، ۲۰، ۴۰ min در یک خشک‌کن هوای گرم، در سه سطح دمایی ۴۰، ۵۵ و 70°C پرداختند. نتایج نشان داد با افزایش دمای هوای ورودی و زمان اعمال توان فراصوت، زمان خشک‌کردن کاهش پیدا کرد. بهترین مدل برای پیش‌بینی خشک‌کردن لیموترش، مدل میدیلی و همکاران انتخاب شد. استفاده از پیش‌تیمار فراصوت در دماهای مختلف، منجر به افزایش چشمگیر مقدار ضریب پخش مؤثر رطوبت، از $5/04 \times 10^{-11}$ تا $2/00 \times 10^{-10}$ m^2/s شد [۱۵].

همچنین در پژوهشی دیگر، به بررسی تأثیر انرژی فراصوت، به‌عنوان پیش‌تیمار و خشک‌کردن تکمیلی با جریان هوای گرم، بر روی زمان خشک‌شدن و ضریب انتشار مؤثر رطوبت سیب و لعل قرمز مطالعه شد [۱۶]. نتایج نشان داد که استفاده از پیش‌تیمار فراصوت می‌تواند سبب کاهش زمان لازم برای خشک‌شدن، در اثر افزایش ضریب انتشار مؤثر رطوبت شود. علاوه بر آن، انرژی فراصوت سبب کاهش ضریب چروکیدگی و افزایش نسبت حجمی در مقایسه با تیمارشده

گردید.

رن و همکاران در پژوهشی به بررسی خشک‌کردن برگه‌های پیاز، با استفاده از دو پیش‌تیمار بلانچینگ آب داغ با دمای 70°C در مدت زمان‌های ۱، ۳ و ۵ min و فراصوت با توان ۲۰ KHz، در مدت زمان‌های ۱، ۳ و ۵ min پرداختند. نتایج نشان داد که نمونه‌های پیاز خشک‌شده با استفاده از پیش‌تیمارهای فراصوت و بلانچینگ T تغییر رنگ مشابهی داشتند. با این نتایج می‌توان گفت که پیش‌تیمار فراصوت می‌تواند جایگزین بالقوه‌ای برای پیش‌تیمار بلانچینگ باشد. همچنین دریافت شد که استفاده از پیش‌تیمار فراصوت سبب حفظ ترکیبات bioactiv، به خصوص کورستین می‌شود و به تبع آن، فعالیت آنتی‌اکسیدانی در قطعه‌های خشک‌شده پیاز نیز بهبود می‌یابد [۱۷].

در پژوهشی دیگر قطعات برش‌خورده سیر در یک خشک‌کن جریان هوای گرم مجهز به سامانه فراصوت (تماس مستقیم نمونه‌های خشک‌شونده با سامانه فراصوت) خشک شدند و نتایج نشان داد که تماس نمونه‌ها با سامانه فراصوت، به‌طور قابل‌توجهی می‌تواند زمان فرایند خشک‌کردن را کاهش دهد. همچنین بررسی‌ها نشان داد که کاهش زمان خشک‌شدن نمونه‌های پیش‌تیمارشده با انرژی فراصوت $1535/5$ W/m² در دمای 50°C با ۳۵٪، در دمای 60°C با ۴۸/۵٪ و 70°C با ۵۰٪ نسبت به نمونه‌های شاهد یا بدون پیش‌تیمار کاهش یافت [۱۸].

متولی و هدایتی در پژوهشی به بررسی تأثیر پیش‌تیمارهای مختلف آبگیری اسمزی، فراصوت، بلانچینگ و مایکروویو در سطوح مختلف خشک‌کردن لایه‌های سیب در خشک‌کن جریان هوای گرم پرداختند. نتایج حاصل از به‌کارگیری این پیش‌تیمارها در دماهای مختلف نشان داد که بیشترین زمان خشک‌شدن به میزان ۳۴۵ min و در دمای 45°C و در حالت تیمار شاهد و کمترین زمان خشک‌شدن به میزان ۷۵ min در دمای 65°C و در حالت استفاده از پیش‌تیمار مایکروویو با توان ۳۶۰ W اتفاق افتاد [۱۹].

در پژوهشی دیگر، به بررسی استفاده از امواج فراصوت در خشک‌کردن لایه‌های سیب پرداخته شد که در آن، ورقه‌های



اصفهان از بازار تهیه شد که دارای میانگین رطوبت اولیه ۸۳٪ بود و به منظور نگهداری مناسب، به یخچالی با دمای $^{\circ}\text{C}$ 4 ± 0.5 انتقال یافت. قبل از شروع آزمایش‌ها، میوه به باید از یخچال خارج و به مدت نیم‌ساعت در دمای محیط قرار داده می‌شد. بعد از هم‌دمایی، با استفاده از یک دستگاه برش‌زن دستی و قالب، میوه‌های به، با ضخامت ۴ mm و ابعاد mm ۲۵ برش داده شدند. پس از برش و آماده‌سازی میوه به در اندازه‌های یکسان، نمونه‌ها با استفاده از دو سامانه حمام فراصوت مدل KMH1-120W6501، ساخت کشور چین و پروب فراصوت مدل KS-250F، ساخت کشور چین، به منظور اعمال پیش‌تیمار به مدت زمان‌های ۱۰، ۲۰ و ۳۰، تحت تأثیر انرژی فراصوت قرار گرفتند. نمونه‌های برش یافته، داخل تانک پر از آب مقطر در دمای $^{\circ}\text{C}$ ۲۵ در پیش-تیمار حمام فراصوت و در بشر پر از آب مقطر در دمای $^{\circ}\text{C}$ ۲۵ در پیش‌تیمار پروب فراصوت قرار گرفتند. پس از اتمام عملیات پیش‌تیمار، نمونه‌های به، با استفاده از سه روش خشک‌کردن جریان هوای گرم، مایکروویو و انجمادی خشک شدند.

آزمایش‌های خشک‌کردن با مایکروویو مدل LG، ساخت کشور کره جنوبی در توان‌های ۹۰، ۱۸۰ و ۳۶۰ W انجام شد و نمونه‌ها در فاصله‌های مشخص از دستگاه خارج و توزین شد. همچنین آزمایش‌های خشک‌کردن با جریان هوای گرم در دماهای ۴۰، ۵۰ و $^{\circ}\text{C}$ ۶۰ و در سرعت جریان هوای ثابت صورت پذیرفت. آزمایش‌های خشک‌کردن انجمادی با استفاده از سامانه فریز درایر مدل ZIRBUS - VaCo 5، کشور آلمان و پمپ وکیوم مدل ILMVAC GmbH-302061 PK8D، کشور آلمان با دمای $^{\circ}\text{C}$ ۵۱- انجام شد و تمامی آزمایش‌ها، تا رسیدن به رطوبت نهایی ۱۰٪ بر پایه تر ادامه یافت.

۲.۲. مدل‌سازی ریاضی فرایند خشک‌شدن

به منظور تعیین بهترین مدل ریاضی در فرایند خشک‌کردن میوه به، نسبت رطوبت ورقه‌ها در طول فرایند خشک‌شدن، با استفاده از معادله ۱ تعیین شد.

سیب در فرکانس ۳۵ KHz و در مدت‌زمان ۱۰، ۲۰ و min ۳۰ در حمام اولتراسوند تحت تأثیر این انرژی قرار گرفتند. نتایج نشان داد که استفاده از پیش‌تیمار اولتراسوند سبب کاهش زمان خشک‌شدن به میزان ۳۱٪ نسبت به نمونه‌های شاهد و انقباض نمونه‌ها ۹ تا ۱۱٪ نسبت به نمونه‌های شاهد کمتر و تخلخل ۹ تا ۱۴٪ و تراکم ۶-۲۰٪ نسبت به نمونه‌های شاهد بیشتر بود [۲۰].

طی پژوهشی، اثر پیش‌تیمار فراصوت در توان‌های ۹/۳۸ و ۲۵/۶۳ W/L به مدت زمان‌های ۲۰ و min ۲۵ بر نمونه‌های موز مطالعه شد. نتایج به دست آمده نشان داد که میزان افزایش ضریب انتشار رطوبت ۸/۴ تا ۱۳/۷٪ و کاهش زمان خشک‌شدن ۷ تا ۹٪ بود [۲۱].

اشراقی و همکاران نیز به بررسی تأثیر استفاده از پیش-تیمار حمام فراصوت در سه سطح زمانی ۱۰، ۲۰ و min ۳۰ بر خشک‌کردن ورقه‌های کیوی پرداختند. نتایج نشان که زمان نهایی خشک‌شدن نمونه‌ها با استفاده از پیش‌تیمار فراصوت، اختلاف چندانی با نمونه‌ها شاهد نداشت؛ درحالی‌که میزان جذب آب با افزایش موج‌دهی با فراصوت افزایش نشان می‌داد [۲۲].

همچنین پژوهش‌های دیگری مانند بررسی پارامترهای انتقال جرم در خشک‌کردن زعفران [۲۳]، بررسی خصوصیات هوای خشک‌کردن بر پارامترهای انتقال جرم لایه‌های سیب [۲۴] و بررسی اثر پیش‌تیمارهای مختلف بر پارامترهای انتقال جرم در خشک‌کردن میوه فیجوا در یک خشک‌کن انجمادی [۲۵]، انجام شده است. بررسی منابع مختلف نشان داد که اکثر پژوهش‌ها به ارزیابی اثر یکی از سامانه‌های فراصوت حمام و پروب می‌پردازند. در پژوهش حاضر به بررسی و مقایسه آثار هر دو نوع سامانه پیش‌تیمار فراصوت بر فرایند خشک‌شدن و پارامترهای انتقال جرم در سه روش مختلف خشک‌کردن، شامل جریان هوای گرم، مایکروویو و انجمادی پرداخته خواهد شد.

۲. مواد و روش‌ها

۲.۱. آماده‌سازی نمونه‌ها

در این مطالعه به منظور انجام آزمایش‌ها، میوه به رقم

هستند و معمولاً در نظر گرفته نمی‌شوند.

داده‌های به‌دست آمده از تغییرات نسبت رطوبت در مقابل زمان در محیط نرم‌افزار متلب وارد شد و مدل‌های ریاضی در جدول ۱ بر این داده‌ها برازش گردید. به‌منظور ارزیابی بهترین برازش مدل ریاضی بر داده‌های نسبت رطوبت، مدلی با بالاترین ضریب تعیین R^2 و پایین‌ترین ریشه متوسط مربع خطای داده‌ها RMSE و کمترین مربع کای χ^2 انتخاب شد.

$$MR = \frac{M - M_e}{M_0 - M_e} = \sum_{n=1}^{\infty} A_n B_n \quad (1)$$

MR رطوبت نسبی: بی‌بعد، M_t میزان رطوبت در هر لحظه: kgwater/kgsolid، M_e رطوبت تعادلی kgwater/kgsolid، M_0 رطوبت اولیه kgwater/kgsolid است. با توجه به سطح بالای رطوبت اولیه ورقه‌های به، مقادیر M_e در مقایسه با مقادیر M_0 برای زمان‌های طولانی خشک‌شدن بسیار کوچک

جدول (۱) مدل‌های ریاضی به‌کار رفته برای مدل‌سازی فرایند خشک‌شدن ورقه‌های به

Table (1) Mathematical models used to modelling of quince slice drying

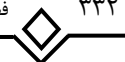
ردیف	نام مدل	رابطه ریاضی	مرجع
۱	نیوتن Newton	$MR = \exp(-kt)$	[26]
۲	پیج Page	$MR = \exp(-kt^n)$	[26]
۳	پیج اصلاح‌شده Modified Page	$MR = \exp[(-kt)^n]$	[27]
۴	هندرسون و پابیس Henderson and Pabis	$MR = a \exp(-kt)$	[27]
۵	لگاریتمی Logaritmik	$MR = a \exp(-kt) + c$	[27]
۶	لوجستیک Logestic	$MR = a / (1 + b \exp(kt))$	[26]
۷	دو قسمتی Two term	$MR = a \exp(-kt) + b \exp(-zt)$	[27]
۸	درجه دو Two term	$MR = 1 + at + bt^2$	[27]

۲.۳. محاسبه پارامترهای انتقال جرم

به‌منظور تعیین نسبت رطوبت ورقه‌های به طی فرایند خشک‌کردن، می‌توان از معادله ۱ استفاده کرد که در رابطه مذکور A_n و B_n به‌ترتیب با استفاده از روابط ۲ و ۳ به‌دست می‌آیند [۲۸].

$$\left\{ \begin{array}{l} A_n = \frac{2 \sin \mu_n}{\mu_n + \sin \mu_n \cos \mu_n} \\ 0.1 < Bi < 100 \\ A_n = \frac{2(-1)^{n+1}}{\mu_n} \\ Bi > 100 \end{array} \right. \quad (2)$$

$$B_n = \exp(-\mu_n^2 Fo) \quad (3) \\ 0.1 < Bi < 100 \text{ and } Bi > 100$$



در معادله ۸، μ_1 ریشه اول معادله را می‌توان برای مقادیر مختلف عدد بایوت محاسبه کرد [۲۴].

$$\begin{cases} \mu_1 = \tan^{-1}(0.6044Bi + 0.380397) & (10) \\ 0.1 < Bi < 100 \\ \mu_1 = \frac{\pi}{2} & Bi > 100 \end{cases}$$

با محاسبه مقادیر بالا می‌توان ضریب نفوذ رطوبت را با استفاده از معادله ۱۱ به دست آورد [۲۹].

$$D = \frac{SL^2}{\mu_1^2} \quad (11)$$

برای محاسبه پارامتر انتقال جرم با استفاده از روش دینسرو دوست، ابتدا ضریب لاگ را از معادله ۹ به دست آورده و سپس با استفاده از معادله ۷ ضریب بایوت محاسبه می‌شود. با محاسبه عدد بایوت می‌توان ضریب μ_1 را با استفاده از معادله ۱۰ محاسبه کرد و به دنبال آن، ضریب نفوذ مؤثر رطوبت را می‌توان با استفاده از معادله ۱۱ محاسبه کرد.

۳. نتایج و بحث

۳.۱. خشک کردن جریان هوای گرم

بررسی نمودارهای تغییرات نسبت رطوبت نشان داد که استفاده از هر دو پیش‌تیمار فراصوت (حمام و پروب)، می‌تواند سبب کاهش زمان خشک کردن نسبت به نمونه‌های شاهد شود. براساس این نتایج، در دمای 40°C استفاده از پیش‌تیمار حمام فراصوت با زمان‌های ۱۰، ۲۰ و ۳۰ min به ترتیب سبب کاهش ۱۴/۲، ۲۲ و ۲۹/۸٪ در زمان خشک شدن نسبت به تیمار شاهد می‌شود، درحالی‌که استفاده از پیش‌تیمار پروب فراصوت با زمان‌های ۱۰، ۲۰ و ۳۰ min در همین دما، به ترتیب سبب کاهش ۳۶/۳، ۴۴/۱ و ۵۱/۹٪ در زمان خشک شدن نسبت به تیمار شاهد شد. همچنین میزان کاهش زمان خشک شدن در دمای 50°C و در به کارگیری پیش‌تیمار حمام فراصوت با زمان‌های ۱۰، ۲۰ و ۳۰ min به ترتیب ۷/۱۴، ۱۷/۸ و ۳۲/۱٪ و در به کارگیری پیش‌تیمار پروب فراصوت با زمان‌های ۱۰، ۲۰ و ۳۰ min به ترتیب ۳۷/۵، ۴۲/۸ و ۴۶/۴٪ نسبت به تیمار شاهد بود. در نهایت میزان کاهش زمان خشک شدن در دمای 60°C و

در معادله بالا μ_n ، ریشه n ام بدون بعد، F_0 عدد فوریه و Bi عدد بایوت هستند. عدد فوریه و بایوت برای محصولات به شکل صفحه‌ای یا ورقه‌ای می‌تواند از معادلات ۴ و ۵ به دست آید:

$$Fo = \frac{Dt}{L^2} \quad (4)$$

$$Bi = \frac{kL}{D} \quad (5)$$

در رابطه بالا، D ضریب مؤثر رطوبت (m^2/s)، L نصف ضخامت محصول در حال خشک شدن (m)، k ضریب انتقال جرم (m/s) است. برای ترم‌های بالا در معادله ۵، به علت کوچک شدن عدد فوریه، این معادله را می‌توان خلاصه و به صورت معادله ۶ بیان کرد.

$$MR \cong A_1 B_1 \quad (6)$$

پارامترهای A_1 و B_1 از رابطه ۵، به منظور محاسبه نسبت رطوبت می‌توانند از روابط ۷ و ۸ تعیین شوند.

$$A_1 = G = \exp\left[\frac{0.2533Bi}{1.3 + Bi}\right] \quad (7)$$

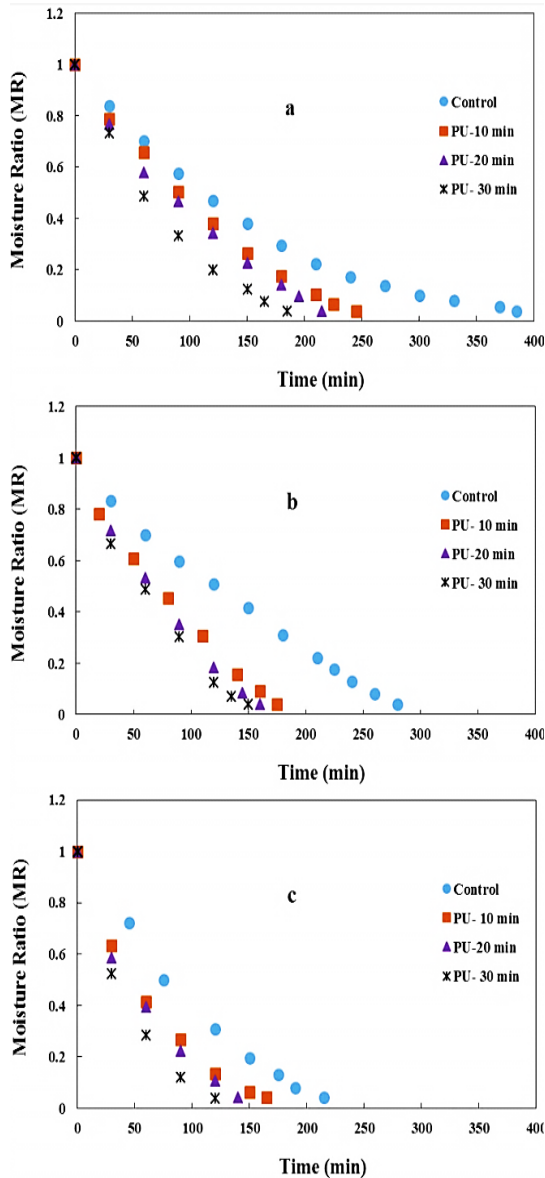
$$B_1 = \exp(\mu_1^2 Fo) \quad (8)$$

در معادله بالا G ، فاکتور لاگ بدون بعد است. فاکتور لاگ را با استفاده از تکنیک برازش معادله بر منحنی تغییرات رطوبت نسبت به زمان به دست آورد. معادله ۸، معادله برازشی بر منحنی داده‌های نسبت رطوبت نسبت به زمان است. آهنگ ثابت خشک شدن S متناسب با روند خروج رطوبت از محصول است که می‌توان با استفاده از برازش مدل‌های ریاضی بر داده‌های تجربی، این ضریب را به دست آورد. تمامی مدل‌های ریاضی دارای ضریب آهنگ ثابت خشک شدن هستند که این ضریب می‌تواند تحت تأثیر اعمال نوع پیش‌تیمار و دمای خشک کردن باشد.

$$MR = G \exp(-St) \quad (9)$$

در رابطه بالا S آهنگ ثابت خشک شدن s^{-1} است.

خواهد داشت و به دنبال آن، خروج رطوبت با سرعت بالاتری اتفاق خواهد افتاد. این عامل سبب افزایش نرخ تبخیر و شیب بیشتر در نمودارهای نسبت رطوبت در برابر زمان خواهد شد. نتایج مشابهی توسط سوکواتا و همکاران [۱۲] در تولید اسنک چغندر و تاو و همکاران [۱۸] در خشک کردن ورقه‌های سیر گزارش شد.

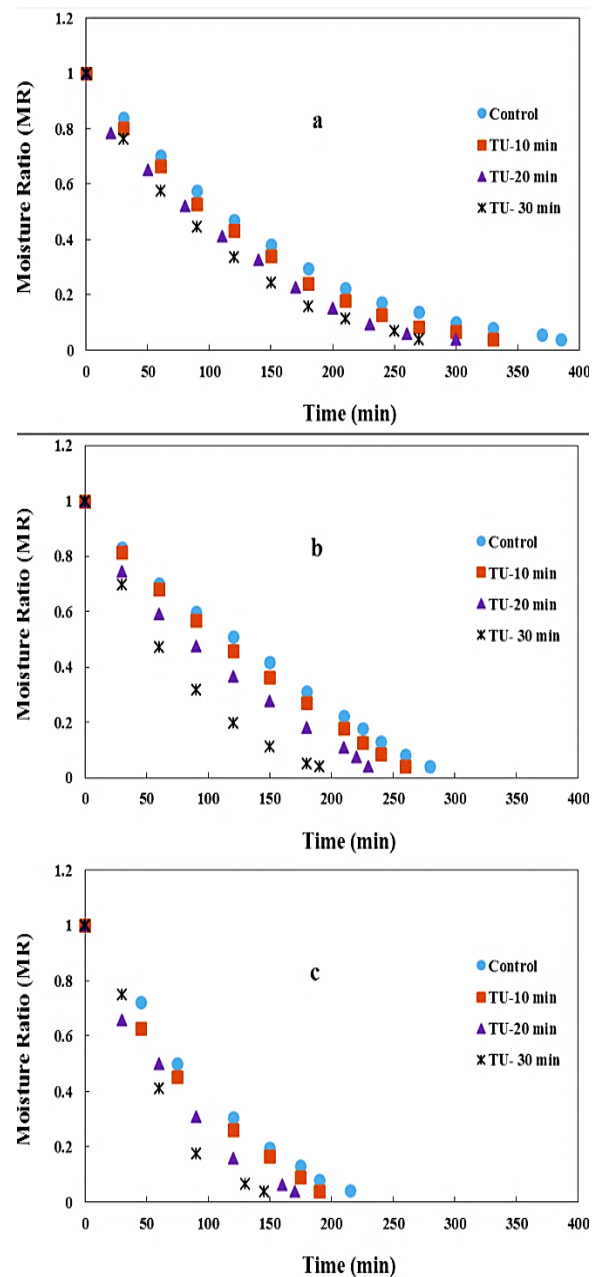


شکل (۱) تغییرات نسبت رطوبت با استفاده از پیش تیمارهای مختلف فراصوت (پروب) در دماهای (a) ۴۰، (b) ۵۰ و (c) ۶۰ °C
Fig (1) Change of the moisture ratio by using of different ultrasound pretreatment (probe) in temperatures a) 40, b) 50 and c) 60 °C

به کارگیری پیش تیمار حمام فراصوت با زمان‌های ۱۰، ۲۰ و ۳۰ min، به ترتیب ۱۱/۶، ۲۰/۹ و ۳۲/۵٪ و در به کارگیری پیش تیمار پروب فراصوت با زمان‌های ۱۰، ۲۰ و ۳۰ min، به ترتیب ۲۳/۲، ۳۴/۸ و ۴۴/۱٪ نسبت به تیمار شاهد بود. یکی از دلایل مهم این است که در خشک کردن جریان هوای گرم، فرایند خشک شدن محصول ابتدا در لایه خارجی آن صورت گرفته و در نتیجه سطح ماده خشک شده و نفوذپذیری آن کاهش می‌یابد و با ایجاد یک لایه سخت روی سطح ماده غذایی، مانع از ادامه خروج رطوبت می‌شود. این پدیده در محصولات کشاورزی با میزان قند بالا نیز تشدید شده و سخت‌شدگی سطحی افزایش می‌یابد. استفاده از امواج فراصوت به عنوان پیش تیمار، می‌تواند با اعمال پدیده کاویتاسیون سبب ایجاد انبساط و انقباض‌هایی در نمونه شود. این فرایند سبب ایجاد رفتار اسفنجی در نمونه‌ها شده و به دنبال آن، با ایجاد میکروکانال‌هایی در نمونه‌ها، سبب سهولت بیشتر در انتقال جرم یا رطوبت در طول فرایند خشک کردن می‌شود.

مقایسه نتایج به دست آمده در شکل‌های ۱ و ۲ در دمای ثابت خشک کردن نشان داد که استفاده از پیش تیمار پروب فراصوت، سبب کاهش بیشتر زمان خشک کردن، نسبت به استفاده از پیش تیمار حمام فراصوت می‌شود؛ چراکه استفاده از پیش تیمار فراصوت پروب، به دلیل تولید شدت نوسان بالا در محیط اطراف نمونه‌ها نسبت به فراصوت حمام، سبب ایجاد شدیدتر پدیده کاویتاسیون می‌شود. در این حالت، نمونه‌های تحت پیش تیمار با پروب، دچار انقباض و انبساط‌های شدیدتری شده و نمونه‌ها دارای بافت متخلخل‌تر یا اسفنجی‌تری نسبت به نمونه‌های پیش تیمار شده با حمام فراصوت شده؛ در نتیجه انتقال جرم بالاتری در این نمونه‌ها اتفاق می‌افتد. همچنین مقایسه نمودارهای خشک شدن در دما و پیش تیمار ثابت نشان داد که افزایش زمان اعمال پیش تیمار فراصوت، سبب کاهش زمان خشک شدن نمونه‌های میوه به شد؛ زیرا با افزایش زمان فراصوت، به دلیل ایجاد کانال‌های میکروسکوپی بیشتر حاصل از پدیده کاویتاسیون امواج فراصوت، نمونه به دارای بافت متخلخل‌تری نسبت به نمونه شاهد و یا پیش تیمار شده با زمان کمتر

(μ_1) و ضریب بایوت در جدول ۲ آورده شده است. نتایج حاصل از تغییرات آهنگ ثابت خشک‌شدن (ضریب خشک‌شدن) نشان داد که این پارامتر، با افزایش دما و افزایش زمان اعمال پیش‌ تیمار فراصوت دارای روند افزایشی بود. بالاترین مقدار آهنگ ثابت خشک‌شدن در دمای 60°C و در حالت استفاده از پیش‌ تیمار پروب فراصوت به میزان 0.14 s^{-1} به دست آمد؛ در حالی که پایین‌ترین میزان این پارامتر در دمای 40°C و در تیمار شاهد به میزان 0.0671 s^{-1} به دست آمد. یکی از دلایل مهم افزایش این پارامتر با افزایش دما این بود که گرادیان حرارتی در نمونه‌های در حال خشک‌شدن با افزایش دما، افزایش یافته و این امر سبب خروج سریع‌تر رطوبت از نمونه‌ها می‌شود. از آنجا که ضریب ثابت خشک‌شدن از برازش مدل ریاضی بر داده‌های آزمایشگاهی به دست می‌آید، لذا افزایش آهنگ تبخیر نمونه‌ها با افزایش دما سبب افزایش شیب در منحنی‌های نسبت رطوبت شده و این امر افزایش آهنگ ثابت خشک‌شدن را به همراه خواهد داشت. همچنین با افزایش زمان پیش‌ تیمار فراصوت در هر دو نوع آن، پروب و حمام، افزایش مقادیر آهنگ ثابت خشک‌شدن را در پی خواهد داشت؛ چرا که نمونه‌ها در مدت‌زمان طولانی در معرض امواج فراصوت قرار می‌گیرند و پدیده کاویتاسیون در مدت‌زمان طولانی‌تری در نمونه‌ها اعمال شده و نمونه‌ها دارای بافت اسفنجی‌تری می‌شوند. این امر سبب تشکیل بیشتر میکروکانال‌ها در درون نمونه‌ها شده و نفوذ مایع، پخش بخار، پخش سطحی، جریان موئینگی و جریان هیدرودینامیکی را در نمونه‌های در حال خشک‌شدن بیشتر می‌کند. همچنین بررسی ضرایب بایوت، ریشه اول غیرجبری و فاکتور لاگ نشان داد که تمامی این پارامترها با افزایش دما و افزایش زمان فراصوت دارای مقادیر نزولی بودند. از دلایل مهم این امر، رابطه معکوس بین ضریب بایوت و ضریب مؤثر رطوبت بود. از آنجا که افزایش دما و زمان اعمال پیش‌ تیمار فراصوت، سبب افزایش ضریب پخش مؤثر رطوبت شد که به دنبال آن مقادیر ضریب بایوت کاهش یافت. همچنین با توجه به معادله ۱۰، ریشه اول غیرجبری و ضریب بایوت خطی است که با افزایش ضرایب بایوت مقادیر ریشه اول غیرجبری نیز افزایش و با کاهش آن این پارامتر



شکل (۲) تغییرات نسبت رطوبت با استفاده از پیش‌ تیمارهای مختلف فراصوت (حمام) در دماهای (a) 40°C ، (b) 50°C و (c) 60°C

Fig (2) Change of the moisture ratio by using of different ultrasound pretreatment (tank) in temperatures a) 40°C , b) 50°C and c) 60°C

نتایج به دست آمده از برازش مدل ریاضی بر داده‌های نسبت رطوبت و فاکتورهای استخراجی از آن آهنگ ثابت خشک‌شدن و فاکتور لاگ و پارامترهای ریشه اول غیرجبری

نیز کاهش می‌یابد. نتایج به دست آمده مشابه نتایج ترکی هرچگانی و همکاران [۲۳] در خشک کردن زعفران و بیگی [۲۴] در خشک کردن ورقه‌های سیب است.

جدول (۲) مقادیر ضریب بایوت، فاکتور لاگ و آهنگ ثابت خشک شدن در تیمارهای مختلف خشک کردن به روش جریان هوای گرم

Table (2) The value of the Biot drying coefficient, lag factor and drying rate constant coefficient at different drying treatment with hot air methods

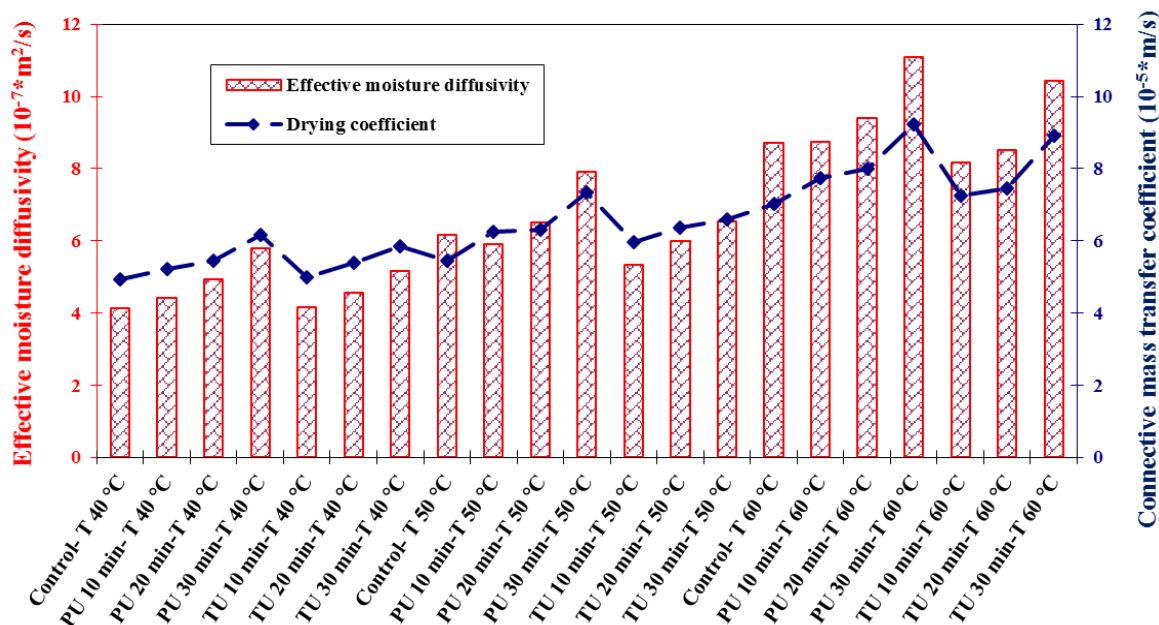
آهنگ ثابت خشک شدن (S) Drying rate constant coefficient	فاکتور لاگ (G) Lag factor	ریشه اول غیرجبری μ non-algebra first root	بایوت Bi	زمان پیش تیمار (min) Time of pretreatment (min)	دما (°C) Temperature (°C)	پیش تیمار Pretreatment
0.0067	1.2400	0.6379	0.5970	0	40	شاهد Control
0.0072	1.1850	0.6355	0.5909	10	40	پروب Probe
0.0076	1.1570	0.6209	0.5541	20		
0.0087	1.1420	0.6122	0.5323	30		
۳0.0068	1.1930	0.6393	0.6006	10	40	حمام Tank
0.0074	1.1850	0.6355	0.5909	20		
0.0081	1.1670	0.6264	0.5677	30		
0.0081	1.1400	0.5752	0.4432	0	50	شاهد Control
0.0088	1.1390	0.6103	0.5278	10	50	پروب Probe
0.0091	1.1120	0.5923	0.4838	20		
0.0108	1.1010	0.5840	0.4641	30		
0.0083	1.1610	0.6231	0.5596	10	50	حمام Tank
0.0090	1.1417	0.6120	0.5319	20		
0.0094	1.1243	0.6008	0.5046	30		
0.0108	1.1200	0.5574	0.4018	0	60	شاهد Control
0.0115	1.0897	0.5749	0.4426	10	60	پروب Probe
0.0121	1.0811	0.5675	0.4254	20		
0.0141	1.0764	0.5633	0.4156	30		
0.0108	1.0904	0.5755	0.4440	10	60	حمام Tank
0.0112	1.0869	0.5726	0.4371	20		
0.0135	1.0817	0.5681	0.4266	30		

خشک کردن، دمای سطح ورقه‌های به افزایش یافته و این امر سبب ایجاد جنبش مولکولی و مکش سطحی زیاد در ورقه-های میوه به شده و به دنبال آن حرکت مولکول‌های آب از داخل به خارج محصول با انرژی بیشتری صورت می‌گیرد. این امر سبب افزایش خروج رطوبت از سطح محصول نسبت به زمان شده و محصول رطوبت خود را سریع‌تر از دست می‌دهد که به دنبال آن ضریب انتشار رطوبت یا ضریب انتقال جرم داخلی افزایش می‌یابد. همچنین با توجه به ارتباط ضریب جرم همرفتی و ضریب نفوذ مؤثر رطوبت (رابطه ۵)، افزایش ضریب نفوذ رطوبت افزایش ضریب جرم همرفتی را به دنبال خواهد داشت. همچنین مقایسه اثر استفاده از پیش تیمارهای فراصوت حمام و پروب بر پارامترهای انتقال جرم نشان داد که استفاده از پیش تیمار پروب، سبب افزایش

بررسی تغییرات نمودارهای شکل ۳ در خشک شدن ورقه‌های به، با پیش تیمارهای مختلف فراصوت در دماهای مختلف خشک کردن، نشان داد که با افزایش دما و مدت زمان اعمال هر دو پیش تیمار فراصوت (حمام و پروب)، پارامترهای ضریب جرم همرفتی و ضریب نفوذ مؤثر رطوبت یا ضریب انتقال جرم داخلی افزایش می‌یابد. بالاترین مقادیر ضریب نفوذ مؤثر رطوبت و ضریب جرم همرفتی در دمای 60°C استفاده از پیش تیمار پروب فراصوت به ترتیب به میزان $9/22\text{E}-05\text{ m}^2/\text{s}$ و $11/09\text{E}-07\text{ m/s}$ به دست آمد، در حالی که پایین‌ترین میزان این دو پارامتر در دمای 40°C و در تیمار شاهد به میزان $4/92\text{E}-05\text{ m}^2/\text{s}$ و $4/12\text{E}-07\text{ m/s}$ به دست آمد. از دلایل مهم افزایش پارامتر ضریب نفوذ مؤثر رطوبت با افزایش دما این است که با افزایش دمای

در حال پیش‌تیمار شده و این امر سبب افزایش خروج رطوبت از نمونه‌های در حال خشک شدن می‌شود. در مجموع این فرایندها سبب افزایش ضریب انتقال جرم در نمونه‌های پیش‌تیمار شده با فراصوت نسبت به نمونه‌های شاهد می‌شود. نتایج به دست آمده با نتایج خشک کردن لیموترش [۱۵] و خشک کردن ورقه‌های سیر [۱۸] مشابهت داشت.

ضرایب پارامترهای انتقال جرم، نسبت به استفاده از پیش‌تیمار حمام فراصوت در دمای ثابت خشک کردن شد. امواج فراصوت، به خصوص امواج ساطع شده از پروب، با کاهش فشار موئینگی بین سلول‌های تشکیل دهنده به و کاهش چسبندگی این مولکول‌ها از طریق انبساط و انقباض‌های شدید، سبب توسعه میکروکانال‌هایی در نمونه‌های



شکل (۳) اثر دماها و پیش‌تیمارهای مختلف فراصوت بر پارامترهای ضریب نفوذ رطوبت و ضریب انتقال جرم همرفتی

Fig (3) The effect of different temperatures and pretreatment on effective moisture diffusivity and convective mass transfer coefficient

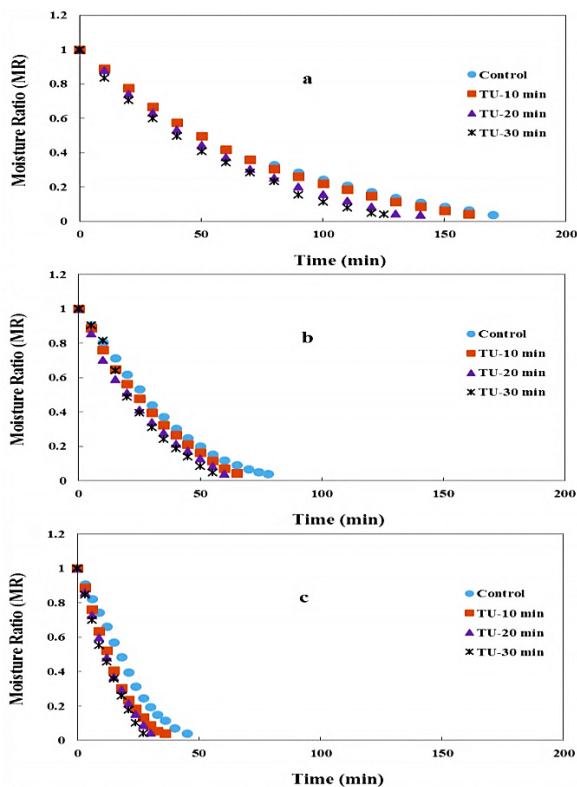
و ۳۰ min در همین دما، به ترتیب سبب کاهش ۱۴/۷، ۲۳/۵ و ۳۵/۲٪ در زمان خشک شدن نسبت به تیمار شاهد شد. همچنین میزان کاهش زمان خشک شدن در توان W ۱۸۰ و در به کارگیری پیش‌تیمار حمام فراصوت با زمان‌های ۱۰، ۲۰ و ۳۰ min به ترتیب ۱۶/۶، ۲۳ و ۲۹/۴٪ و در به کارگیری پیش‌تیمار پروب فراصوت با زمان‌های ۱۰، ۲۰ و ۳۰ min، به ترتیب ۲۳، ۳۵/۸ و ۴۲/۳٪ نسبت به تیمار شاهد بود. در نهایت میزان کاهش زمان خشک شدن در توان W ۳۶۰ و در به کارگیری پیش‌تیمار حمام فراصوت با زمان‌های ۱۰، ۲۰ و ۳۰ min، به ترتیب ۲۰، ۳۳/۳ و ۴۰٪ و در به کارگیری پیش‌تیمار پروب فراصوت با زمان‌های ۱۰، ۲۰ و

۳.۲ خشک کردن به روش مایکروویو

۳.۲.۱ سینتیک خشک شدن

نتیجه مطالعه نمودارهای تغییرات نسبت رطوبت خشک کردن ورقه‌های به در خشک کن مایکروویو نشان داد که با استفاده از پیش‌تیمار آلتراسوند پروب و حمام، تمامی تیمارهای آزمایشی، نسبت به تیمار شاهد زمان کمتری برای خشک کردن نیاز داشتند. چنین دریافت شد که در توان ۹۰W استفاده از پیش‌تیمار حمام فراصوت با زمان‌های ۱۰، ۲۰ و ۳۰ min به ترتیب سبب کاهش ۵/۸، ۱۷/۶ و ۲۶/۴٪ در زمان خشک شدن نسبت به تیمار شاهد می‌شود در حالی که استفاده از پیش‌تیمار پروب فراصوت با زمان‌های ۱۰، ۲۰ و

افزایش توان مایکروویو، میزان سرعت چرخش مولکول‌های آب زیاد شده و به دنبال آن، تعداد مولکول‌های دوقطبی شده آب در درون نمونه افزایش یافته است؛ در نتیجه، میزان اصطکاک داخلی مولکول‌ها در اثر برخورد زیاد شده و موجب افزایش دمای نمونه می‌شود. افزایش دما در نمونه‌ها سبب افزایش آهنگ تبخیر، کاهش مدت‌زمان خشک‌شدن و افزایش در شیب منحنی‌های نسبت رطوبت خشک‌شدن ورقه‌های به می‌شود.

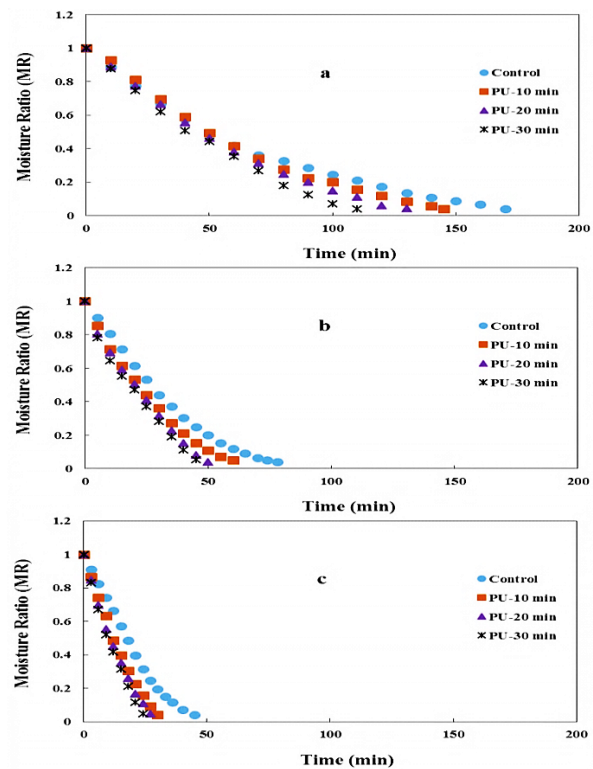


شکل (۵) تغییرات نسبت رطوبت با استفاده از پیش‌تیمارهای مختلف فراصوت (پروب) در توان‌های (a) ۹۰، (b) ۱۸۰ و (c) ۳۶۰ W

Fig (5) Change of the moisture ratio by using of different ultrasound pretreatment (tank) in powers a) 90, b) 180 and c) 360 W

ثابت‌های آن رابطه یعنی آهنگ ثابت خشک‌شدن و فاکتور لاگ استخراج گردید. نتایج به دست آمده در جدول ۳ نشان داد که افزایش توان مایکروویو و زمان پیش‌تیمار آلتراسوند تأثیری مستقیمی بر ضریب آهنگ خشک‌شدن و تأثیر معکوسی بر فاکتور لاگ، ریشه اول جبری و عدد بایوت دارد.

۳۰ min به ترتیب ۳۳/۳، ۴۰ و ۴۶/۶٪ نسبت به تیمار شاهد بود. از دلایل مهم کاهش زمان خشک‌شدن با استفاده از پیش‌تیمار فراصوت، ترکییدن غیرممتقارن حباب‌های ایجاد شده در اثر فرایند کاویتاسیون در نزدیکی سطح نمونه است. این فرایند، سبب انتقال جریان‌های تند از امواج صوتی به سطح نمونه شده و با ایجاد انقباض و انبساط‌های پی‌درپی، سبب تشکیل کانال‌های میکروسکوپی در نمونه می‌شود. این میکروکانال‌ها در طول فرایند خشک‌کردن سبب تسریع خروج رطوبت از داخل نمونه می‌شود. همچنین با افزایش توان مایکروویو نیز زمان خشک‌شدن کاهش یافت؛ زیرا با



شکل (۴) تغییرات نسبت رطوبت با استفاده از پیش‌تیمارهای مختلف فراصوت (پروب) در توان‌های (a) ۹۰، (b) ۱۸۰ و (c) ۳۶۰ W

Fig (4) Change of the moisture ratio by using of different ultrasound pretreatment (probe) in powers a) 90, b) 180 and c) 360 W

۳.۲.۲. پارامترهای انتقال جرم

نسبت رطوبت داده‌های تجربی حاصل از خشک‌کردن ورقه‌های پیش‌تیمار شده میوه به، با انرژی فراصوت با استفاده از معادله ۱ استخراج شد. مدل ریاضی معادله ۹ در محیط نرم‌افزار متلب بر داده‌های نسبت رطوبت برازش شد و



انتقال جرم در نمونه در حال خشک شدن زیاد می‌شود. همچنین نتایج به دست آمده از تأثیر پیش تیمار فراصوت بر پارامترهای انتقال جرم نشان داد که استفاده از هر دو پیش تیمار پروب و حمام فراصوت اختلاف چندانی با نمونه شاهد ایجاد نمی‌کند. یکی از دلایل مهم این نتیجه می‌تواند آن باشد که در این بازه زمانی، امواج فراصوت زمان لازم برای ایجاد و یا تکمیل میکروکانال‌ها را درون نمونه غذایی نداشتند و این فرایند تکمیل نگردید. با بررسی نتایج می‌توان دریافت که تغییر مدت زمان پیش تیمار فراصوت از ۱۰ به ۲۰ min سبب افزایش بیشتر در پارامتر ضریب آهنگ ثابت خشک شدن می‌شود؛ می‌توان گفت که در این بازه زمانی، نمونه‌ها تحت تأثیر فراصوت با ایجاد کانال‌های میکروسکوپی پایدار در نمونه، بافتی با تخلخل بالاتری ایجاد کرده و این عامل سرعت و خروج رطوبت از درون ماده را افزایش می‌دهد.

از دلایل مهم افزایش ضرایب آهنگ ثابت خشک شدن با افزایش توان میکروویو را می‌توان به نفوذ امواج میکروویو به درون نمونه در حال خشک کردن ارتباط داد.

محصولات کشاورزی و مواد غذایی دارای مولکول‌های قطبی هستند؛ چنانکه در پژوهش حاضر نیز نمونه‌های میوه به از این مولکول‌ها برخوردارند. حال با توجه به رطوبت بالای این محصول، سهم مولکول‌های قطبی آب بسیار بالاست، لذا می‌توان بیان کرد که میدان میکروویو مولکول‌هایی با جهت گیری تصادفی را به چرخش دوقطبی هدایت کرده و این چرخش مولکول‌ها و دوقطبی شدن آن‌ها، سبب ایجاد اصطکاک با محیط اطراف یا داخل نمونه می‌شود؛ در نتیجه در اثر گرمایش داخلی، گرمایش حجمی و یکنواختی در ماده اتفاق می‌افتد. بنابراین می‌توان گفت که افزایش توان خشک کردن در میکروویو سبب گرمایش بیشتر درونی در ماده شده و آهنگ تبخیر افزایش می‌یابد و به دنبال آن، نرخ

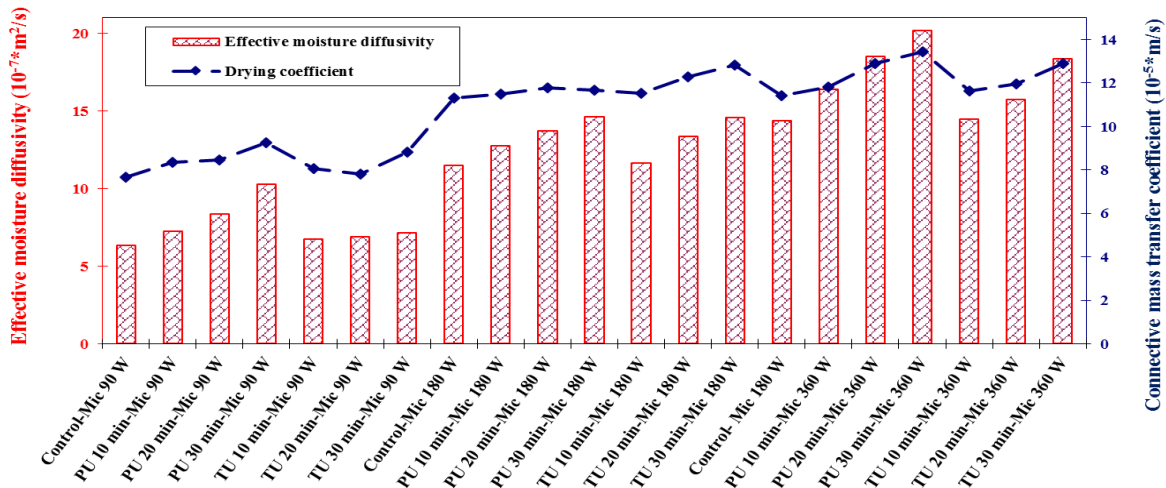
جدول (۳) مقادیر ضریب بایوت، فاکتور لاگ و آهنگ ثابت خشک شدن در تیمارهای مختلف خشک کردن به روش میکروویو
Table (3) The value of the Biot drying coefficient, lag factor and drying rate constant coefficient at different drying treatment with microwave methods

آهنگ ثابت خشک شدن (S) Drying rate constant coefficient	فاکتور لاگ (G) Lag factor	ریشه اول غیر جبری μ non-algebra first root	بایوت Bi	زمان پیش تیمار (min) Time of pretreatment (min)	دما (°C) Temperature (°C)	پیش تیمار Pretreatment
0.0104	1.196	0.6407	0.6042	0	40	شاهد Control
0.0115	1.175	0.6305	0.5783	10	40	پروب Probe
0.0121	1.125	0.6013	0.5057	20		
0.0137	1.093	0.5776	0.4490	30		
0.0110	1.191	0.6383	0.5982	10	40	حمام Tank
0.0108	1.166	0.6258	0.5664	20		
0.0119	1.206	0.6451	0.6157	30		
0.0163	1.117	0.5958	0.4924	0	50	شاهد Control
0.0171	1.094	0.5785	0.4509	10	50	پروب Probe
0.0178	1.083	0.5692	0.4293	20		
0.0181	1.069	0.5564	0.3996	30		
0.0166	1.119	0.5972	0.4958	10	50	حمام Tank
0.0171	1.099	0.5824	0.4604	20		
0.0179	1.088	0.5735	0.4393	30		
0.0177	1.068	0.5554	0.3974	0	60	شاهد Control
0.0190	1.052	0.5391	0.3603	10	60	پروب Probe
0.0211	1.047	0.5336	0.3480	20		
0.0224	1.041	0.5267	0.3326	30		
0.0180	1.070	0.5577	0.4027	10	60	حمام Tank
0.0189	1.061	0.5481	0.3807	20		
0.0210	1.048	0.5347	0.3505	30		

های ۱۰، ۲۰ و ۳۰ min به ترتیب سبب افزایش ۰/۶۳، ۹/۴۰ و ۲۷/۸۶٪ در ضریب مؤثر پخش رطوبت و افزایش ۱/۹۶، ۴/۸۰ و ۱۲/۷۵٪ در ضریب انتقال جرم همرفتی شد، در حالی که استفاده از پیش تیمار پروب فراصوت با زمان‌های ۱۰، ۲۰ و ۳۰ min در همین توان به ترتیب سبب افزایش ۱۳/۹۴، ۲۸/۸۳ و ۴۰/۴۴٪ در ضریب مؤثر پخش رطوبت و افزایش ۳/۲۹، ۱۲/۷۹ و ۱۷/۵۴٪ در ضریب انتقال جرم همرفتی شد.

نتایج نشان می‌دهد که استفاده از پیش تیمار پروب فراصوت، سبب افزایش درصد ضریب پخش رطوبت و ضریب انتقال جرم همرفتی می‌شود که دلیل آن را می‌توان به شدت بالای پدیده کاویتاسیون در این روش ارتباط داد. از آنجا که در این روش پروب به صورت شعاعی امواج خود را ساطع کرده و نمونه‌ها در محیط اطراف آن میزان و شدت بالاتری از امواج را دریافت می‌کنند؛ بنابراین نسبت روش حمام روش غیرمستقیم، روش ملایم‌تری نسبت به روش پروب محسوب شده و پدیده کاویتاسیون با شدت کمتری صورت پذیرفته و به دنبال آن، میکروکانال‌های پایدار کمتری ایجاد می‌شود. این عامل انتقال جرم را در طول فرایند خشک کردن با کندی مواجه می‌سازد و به دنبال آن، ضریب پخش رطوبت و ضریب انتقال جرم همرفتی در روش پیش تیمار شده با حمام فراصوت نسبت به روش پروب فراصوت کوچک‌تر است.

نتایج حاصل از تغییرات ضریب نفوذ مؤثر رطوبت و ضریب انتقال جرم همرفتی در پیش تیمارهای مختلف فراصوت پروب و حمام و در توان مختلف خشک کردن با سامانه مایکروویو در شکل ۶ آورده شده است. نتایج نشان داد که در توان ۹۰ W استفاده از پیش تیمار حمام فراصوت با زمان‌های ۱۰، ۲۰ و ۳۰ min به ترتیب سبب افزایش ۶/۳۴، ۸/۸۲ و ۱۳/۲۲٪ در ضریب مؤثر پخش رطوبت و افزایش ۵/۲۹، ۲/۰۲ و ۱۵/۳۸٪ در ضریب انتقال جرم همرفتی می‌شود، در حالی که استفاده از پیش تیمار پروب فراصوت با زمان‌های ۱۰، ۲۰ و ۳۰ min در همین توان، به ترتیب سبب افزایش ۱۴/۱۶، ۳۲/۰۷ و ۶۲/۳۹٪ در ضریب مؤثر پخش رطوبت و افزایش ۹/۲۶، ۱۰/۵۴ و ۲۰/۶۹٪ در ضریب انتقال جرم همرفتی شد. همچنین در توان ۱۸۰ W استفاده از پیش تیمار حمام فراصوت با زمان‌های ۱۰، ۲۰ و ۳۰ min به ترتیب سبب افزایش ۱/۲۴، ۱۶/۰۵ و ۲۶/۹۸٪ در ضریب مؤثر پخش رطوبت و افزایش ۱/۹۱، ۸/۵۱ و ۱۳/۲۸٪ در ضریب انتقال جرم همرفتی شد، در حالی که استفاده از پیش تیمار پروب فراصوت با زمان‌های ۱۰، ۲۰ و ۳۰ min در همین توان به ترتیب سبب افزایش ۱۰/۹۶، ۱۹/۴۳ و ۲۷/۰۳٪ در ضریب مؤثر پخش رطوبت و افزایش ۱/۶۲، ۴/۱۲ و ۳/۱۰٪ در ضریب انتقال جرم همرفتی شد. در نهایت در توان ۳۶۰ W استفاده از پیش تیمار حمام فراصوت با زمان-



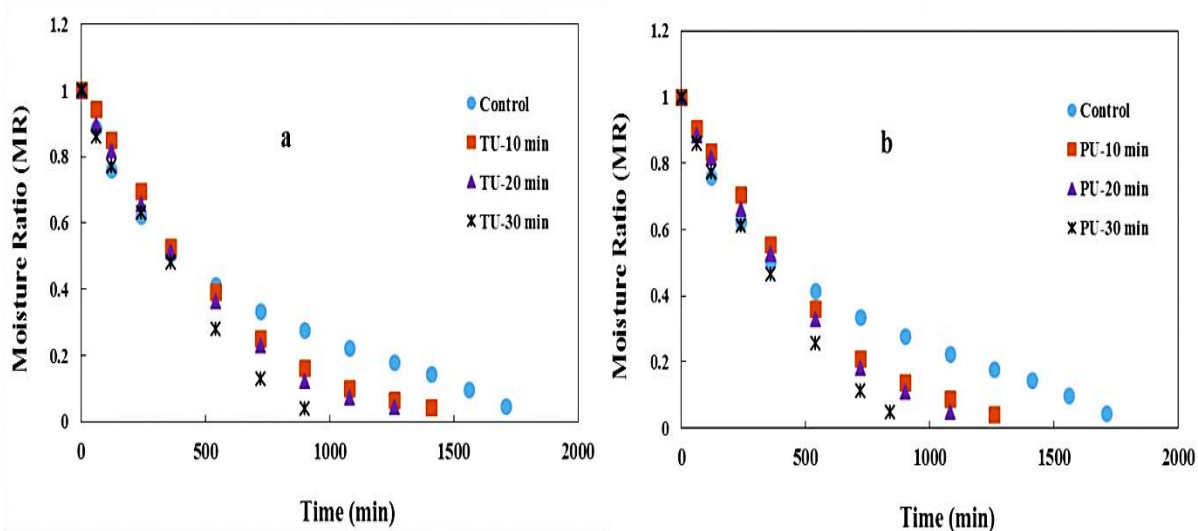
شکل (۶) اثر توان‌ها و پیش تیمارهای مختلف فراصوت بر پارامترهای ضرایب نفوذ رطوبت و انتقال جرم همرفتی

Fig (6) The effect of different powers and pretreatment on effective moisture diffusivity and convective mass transfer coefficient

۳.۳. خشک کردن انجمادی

کاهش ۱۷/۵، ۲۶/۳ و ۴۷/۳٪ در زمان خشک شدن نسبت به تیمار شاهد می‌شود در حالی که استفاده از پیش تیمار پروب فراصوت با زمان‌های ۱۰، ۲۰ و ۳۰ min در همین دما، به ترتیب سبب کاهش ۲۶/۳، ۳۶/۸ و ۵۰/۸٪ نسبت به تیمار شاهد در زمان خشک شدن شد. از دلایل مهم می‌توان به اثرات پیش تیمار فراصوت اشاره کرد که با کاهش لایه مرزی انتشار و ایجاد تنش فشاری در اثر پدیده کاویتاسیون در سطح نمونه سبب ایجاد تخلخل و تغییر شکل ماده جامد می‌شود و به دنبال آن، کانال‌های میکروسکوپی یا میکروکانال‌ها ایجاد شده و افزایش انتقال جرم نمونه در حال خشک شدن اتفاق می‌افتد. نتایج مشابهی در خشک کردن فیجوا [۲۵] گزارش شده است.

شکل ۷ تغییرات نسبت رطوبت ورقه‌های به را در دو پیش تیمار حمام و پروب فراصوت در خشک کن انجمادی نشان می‌دهد. همانطور که نتایج نشان می‌دهد استفاده از پیش تیمار فراصوت در زمان ۳۰ min به طور چشمگیری زمان خشک کردن را کاهش می‌دهد. از آنجا که خشک کن‌های انجمادی مصرف انرژی بالایی داشته و فرایند خشک کردن به این روش طولانی مدت بوده، لذا نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که استفاده از پیش تیمار فراصوت توانایی استفاده در خشک کن‌های انجمادی را دارند. براساس نتایج، در خشک کردن با دمای -50°C استفاده از پیش تیمار حمام فراصوت با زمان‌های ۱۰، ۲۰ و ۳۰ min به ترتیب سبب



شکل (۷) تغییرات نسبت رطوبت در خشک کردن انجمادی ورقه‌های میوه به، با استفاده از پیش تیمارهای مختلف (a) حمام فراصوت (b) پروب فراصوت
Fig (7) Change of the moisture ratio of quince fruit in freeze drying methods with different pretreatment a) tank ultrasound, b) probe ultrasound

کانال‌های در نمونه‌ها به می‌گردد و با انتقال این نمونه‌های پیش تیمار شده به فضای انجمادی، نمونه‌ها و رطوبت آنها منجمد شده و ساختار فیزیکی و بافت نمونه در حالت اولیه باقی می‌ماند. در ادامه با اعمال خلاء روی نمونه‌های منجمد شده در دمای پایین، فرایند تصعید اتفاق افتاده و رطوبت نمونه‌ها از فاز جامد به بخار تبدیل شده و از نمونه‌ها خارج می‌شود. نتایج مشابهی توسط متولی و هاشمی [۲۵] در خشک کردن ورقه‌های فیجوا گزارش شده است.

بررسی پارامترهای انتقال جرم در طول فرایند خشک شدن ورقه‌های به در خشک کن انجمادی نشان داد که با افزایش مدت زمان پیش تیمار فراصوت، مقادیر آهنگ ثابت خشک شدن افزایش می‌یابد. بالاترین مقدار آهنگ ثابت خشک شدن در روش انجمادی دمای -50°C در حالت استفاده از پیش تیمار پروب فراصوت به میزان ۰/۰۰۱۹ و پایین ترین میزان این پارامتر در همین دما در تیمار شاهد به میزان ۰/۰۰۰۹ به دست آمد. باید توجه داشت که پیش تیمار فراصوت با ایجاد پدیده کاویتاسیون، سبب ایجاد میکرو

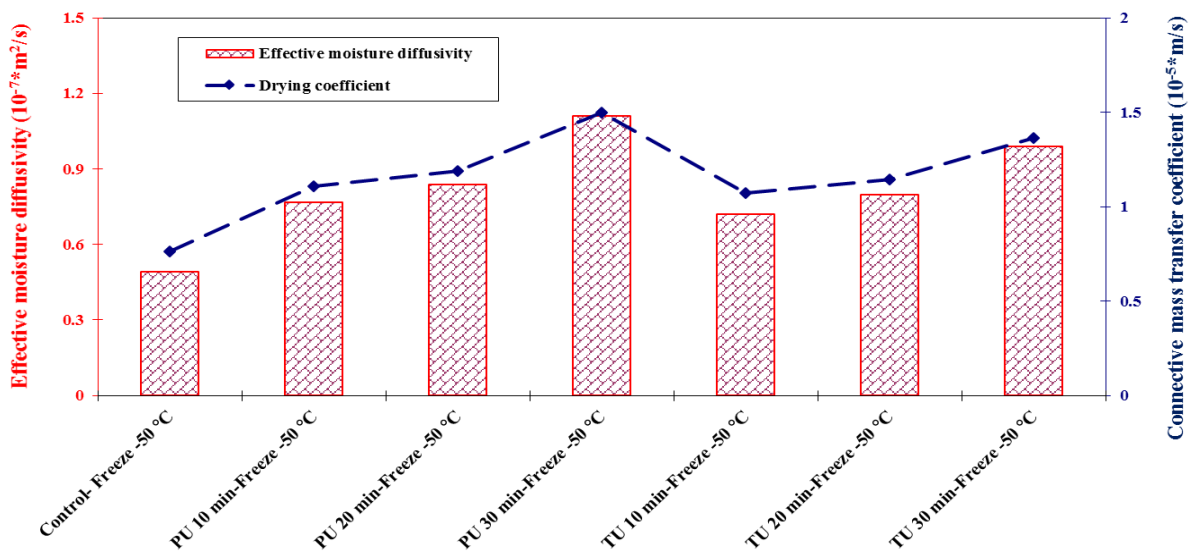
جدول (۴) مقادیر ضریب بایوت، فاکتور لاگ و آهنگ ثابت خشک شدن در تیمارهای مختلف خشک کردن به روش انجماد

Table (4) The value of the Biot drying coefficient, lag factor and drying rate constant coefficient at different drying treatment with freeze methods

پیش تیمار Pretreatment	دما (°C) Temperature (°C)	زمان پیش تیمار (min) Time of pretreatment (min)	بایوت Bi	ریشه اول غیر جبری μ non-algebra first root	فاکتور لاگ (G) Lag factor	آهنگ ثابت خشک- شدن (S) Drying rate constant coefficient
شاهد Control	-50	0	0.7788	0.7051	1.4100	0.0010
پروب Probe	-50	10	0.7241	0.6856	1.3250	0.0014
		20	0.7081	0.6799	1.3040	0.0016
		30	0.6735	0.6671	1.2630	0.0020
حمام Tank	-50	10	0.7423	0.6922	1.3510	0.0014
		20	0.7174	0.6832	1.3160	0.0015
		30	0.6893	0.6729	1.2810	0.0018

می‌شود. همچنین استفاده از پیش تیمار پروب فراصوت با زمان‌های ۱۰، ۲۰ و ۳۰ min در همین روش خشک کردن به ترتیب سبب افزایش ۵۶/۴۰، ۷۱/۳۴ و ۱۲۶/۸۲٪ در ضریب مؤثر پخش رطوبت و افزایش ۴۵/۴۲، ۵۵/۸۰ و ۹۶/۱۷٪ در ضریب انتقال جرم همرفتی، نسبت به نمونه‌های شاهد شد. از آنجا که بیشتر زمان خشک کردن ورقه‌های به در مرحله نزولی خشک شدن اتفاق می‌افتد، لذا در این مرحله انتقال رطوبت از درون نمونه تحت تأثیر پدیده انتشار بوده و انتقال آن به سطح نمونه، به کندی صورت می‌پذیرد.

بررسی ضرایب نفوذ مؤثر پخش رطوبتی و انتقال جرم همرفتی در خشک کردن انجمادی ورقه‌های به، با استفاده از پیش تیمارهای فراصوت نشان داد که استفاده از پیش تیمار فراصوت می‌تواند مقادیر این ضرایب را افزایش دهد. نتایج نشان داد که در خشک کردن انجمادی، استفاده از پیش تیمار حمام فراصوت با زمان‌های ۱۰، ۲۰ و ۳۰ min، به ترتیب سبب افزایش ۴۷/۱۶، ۶۲/۹۸ و ۱۰۱/۹۲٪ در ضریب مؤثر پخش رطوبت و افزایش ۴۰/۲۸، ۵۰/۱۴ و ۷۸/۷۳٪ در ضریب انتقال جرم همرفتی نسبت به نمونه‌های شاهد



شکل (۸) اثر پیش تیمارهای مختلف فراصوت بر پارامترهای ضرایب نفوذ رطوبت و انتقال جرم همرفتی در روش خشک کردن انجمادی

Fig (8) The effect of different pretreatment on effective moisture diffusivity and convective mass transfer coefficient in freeze drying methods



این فعل و انفعالات منجر به ایجاد بافت پف کرده می‌شود، اما باید توجه داشت که دیواره سلولی نمی‌تواند تمام تغییر حجم ایجاد شده را نگه دارد و در نهایت ساختار سلولی سعی به بازگشت به حالت ابتدایی خود دارد. در عین حال در فرایند خشک کردن با جریان هوای گرم، به دلیل هدایت حرارتی پایین و محدودیت در انتقال حرارت به قسمت‌های داخلی نمونه در حال خشک شدن و به دنبال آن خشک شدن سطحی نمونه و سخت‌شدگی رویه آن، خروج رطوبت با سختی مواجه می‌شود. این عامل، سبب کاهش میزان آهنگ تبخیر رطوبت و به دنبال آن افزایش زمان خشک شدن و کاهش مقادیر و پارامترهای انتقال جرم می‌شود. نتایج مشابهی در خشک کردن قارچ با استفاده از پیش‌ تیمار فراصوت [۱۴] گزارش شد. همچنین نتایج کلی حاصل از تغییرات پارامترهای انتقال جرم در سه روش خشک کردن نشان داد که پایین‌ترین میزان این پارامترها در خشک کردن انجام‌داتی اتفاق افتاد. نتایج حاصل از مدل‌سازی ریاضی نشان داد که مدل میدیلی، بهترین برازش را بر داده‌های آزمایشگاهی داشت. نتایج مشابهی توسط متولی و هدایتی در خشک کردن ورقه‌های سیب [۱۹] ارائه شده است. در جدول ۵ پارامترهای آماری مربوط به برازش مدل میدیلی بر داده‌های آزمایشگاهی در تمامی تیمار آورده شده است.

دامنه تغییرات ضریب مؤثر پخش رطوبت در حالت استفاده از پیش‌ تیمار پروب فراصوت از $7/66303E-08$ تا m^2/s $1/11129E-07$ و در حالت استفاده از پیش‌ تیمار حمام فراصوت از $7/21022E-08$ تا m^2/s $9/89294E-08$ بود. همچنین دامنه تغییرات ضریب انتقال جرم همرفتی در استفاده از پیش‌ تیمار پروب فراصوت، از $1/10972E-05$ تا m/s $1/49694E-05$ و در استفاده از پیش‌ تیمار حمام فراصوت، از $1/36391E-05$ تا m/s $1/07049E-05$ بود.

۳.۴. مدل‌سازی ریاضی و مقایسه نتایج کلی

بررسی و مقایسه پارامترهای انتقال جرم در روش‌های مختلف خشک کردن نمونه‌های میوه به نشان داد که استفاده از روش مایکروویو (در تمامی پیش‌ تیمارهای یکسان مورد استفاده) نسبت به روش‌های دیگر خشک کردن، مانند جریان هوای گرم و انجمادی سبب افزایش خروج رطوبت، کاهش مدت زمان خشک کردن و افزایش پارامترهای انتقال جرم (ضریب نفوذ مؤثر رطوبت، آهنگ ثابت خشک شدن و ضریب جرم همرفتی) گردید. یکی از دلایل مهم این نتایج این بود که انرژی مایکروویو در بخش‌های میانی نمونه‌ها نفوذ کرده و با فرایند دو قطبی کردن مولکول‌های آب، به سرعت به حرارت تبدیل شده و به دنبال آن، این فرایند سبب ایجاد یک فشار درونی در نمونه‌های در حال خشک شدن می‌شود. در نهایت

جدول (۵) پارامترهای آماری حاصل از برازش مدل میدیلی بر داده‌های آزمایشگاهی

Table (5) Statistical parameters derived from the fitting of the Midilli model on experimental data

خشک کردن مایکروویو				خشک کردن جریان هوای گرم			
Microwave Drying				Hot Air Drying			
تیمار Treatment	R ²	SSE	RMSE	R ²	SSE	RMSE	
MIC90 W -Control	0.9990	0.001472	0.009906	T 40 °C- Control	0.9992	0.0009375	0.009232
MIC 90 W-TU10min	0.9997	0.0004374	0.005589	T 40 °C -TU 10 min	0.9988	0.001177	0.01297
MIC 90 W-TU20min	0.9997	0.0005016	0.006465	T 40 °C -TU 20 min	0.9991	0.0008043	0.01072
MIC 90 W-TU30min	0.9992	0.0009979	0.00999	T 40 °C -TU 30 min	0.9992	0.0006559	0.01145
MIC 90 W-PU10min	0.9971	0.004353	0.0183	T 40 °C -PU 10 min	0.9977	0.002725	0.01651
MIC 90 W-PU20min	0.9988	0.001679	0.01183	T 40 °C -PU 20 min	0.9988	0.001399	0.01247
MIC 90 W-PU30min	0.9992	0.0009324	0.009207	T 40 °C -PU 30 min	0.9992	0.000933	0.01018
MIC180 W -Control	0.9974	0.004171	0.01726	T 50 °C- Control	0.9917	0.01035	0.03391
MIC180 W-TU10min	0.9996	0.0005743	0.006918	T 50 °C -TU 10 min	0.9986	0.001012	0.0159
				T 50 °C -TU 20 min	0.9957	0.003373	0.02904
MIC180 W-TU20min	0.9984	0.002134	0.01393	T 50 °C -TU 30 min	0.9992	0.0006364	0.01261
MIC180 W-TU30min	0.9978	0.003057	0.01667	T 50 °C -PU 10 min	0.9931	0.008159	0.03194
MIC180 W-PU10min	0.9986	0.0021	0.01271	T 50 °C -PU 20 min	0.9998	0.0002183	0.005585
MIC180 W-PU20min	0.9982	0.002545	0.01456				

MIC180 W-PU30min	0.9984	0.002145	0.01396	T 50 °C -PU 30 min	0.9999	0.00003954	0.002812
MIC360 W -Control	0.9931	0.01045	0.02951	T 60 °C- Control	0.9909	0.007333	0.0383
MIC360 W-TU10min	0.9961	0.005021	0.02241	T 60 °C -TU 10 min	0.9899	0.007584	0.04354
MIC360 W-TU20min	0.9985	0.001803	0.01415	T 60 °C -TU 20 min	0.9930	0.005181	0.04156
MIC360 W-TU30min	0.9957	0.00539	0.02447	T 60 °C -TU 30 min	0.9973	0.001994	0.02578
MIC360 W-PU10min	0.9972	0.003769	0.01851	T 60 °C -PU 10 min	0.9904	0.007492	0.04328
MIC360 W-PU20min	0.9935	0.009533	0.02944	T 60 °C -PU 20 min	0.9956	0.004435	0.02517
MIC360 W-PU30min	0.9987	0.00175	0.01261	T 60 °C -PU 30 min	0.9669	0.02558	0.07996

خشک کردن انجمادی

Freeze Drying

	R ²	SSE	RMSE		R ²	SSE	RMSE
Control- Freeze	0.9904	0.01109	0.0333	Control- Freeze	0.9904	0.01109	0.0333
Freeze-TU10 min	0.9978	0.002907	0.01906	Freeze-PU10 min	0.9964	0.004287	0.02475
Freeze-TU20 min	0.9990	0.001122	0.01266	Freeze-PU20 min	0.9978	0.002228	0.01927
Freeze-TU30 min	0.9982	0.001575	0.01775	Freeze-PU30 min	0.9979	0.0021	0.01871

ضریب انتقال جرم همرفتی با افزایش زمان پیش تیمار فراصوت، صعودی بود؛ البته باید گفت اختلاف چندانی بین پارامترهای ذکر شده در پیش تیمار فراصوت با زمان ۱۰ min و تیمار شاهد وجود نداشت. همچنین این برآورد حاصل شد که بالاترین مقادیر فاکتور لاگ، ریشه اول غیرجبری و ضریب بایوت در خشک کردن انجمادی و پایین ترین مقادیر این پارامترها، در خشک کردن مایکروویو اتفاق افتاد. بررسی و مقایسه روش مورد استفاده در پیش تیمار ورقه های میوه به نشان داد که استفاده از پیش تیمار پروب فراصوت به دلیل شدت بالاتر فرایند کاویتاسیون، سبب افزایش در مقادیر ضرایب انتقال جرم نسبت به پیش تیمار حمام فراصوت شد. جمع بندی کلی نتایج به دست آمده نشان داد که استفاده از فناوری نوین فراصوت می تواند به طور چشم گیری زمان خشک کردن را برای خشک کن هایی با مصرف انرژی بالا کاهش داده و راه را برای اقتصادی کردن این روش ها باز کند.

براساس داده های به دست آمده، مدل میدیلی در خشک کردن به روش مایکروویو، در توان ۹۰ W و استفاده از پیش تیمار حمام فراصوت با زمان ۲۰ min، در روش خشک کردن با جریان هوای گرم در دمای ۵۰ °C و همچنین استفاده از پیش تیمار پروب فراصوت با مدت زمان ۳۰ min و خشک کردن انجمادی با استفاده از پیش تیمار حمام فراصوت با زمان ۲۰ min، بهترین برازش را نشان می دهد.

۴. نتیجه گیری

پژوهش حاضر به بررسی پارامترهای انتقال جرم در فرایند خشک کردن میوه به، با استفاده از پیش تیمارهای پروب و حمام فراصوت و با به کارگیری روش های مختلف خشک کردن (جریان هوای گرم، مایکروویو و انجمادی) پرداخت. نتایج به دست آمده نشان داد که روند تغییرات ضریب آهنگ ثابت خشک شدن، ضریب نفوذ مؤثر رطوبت و

منابع

- [1] Silva, B.M., Andrade, P.B., Valentão, P., Ferreres, F., Seabra, R.M., & Ferreira, M.A. (2004). Quince (*Cydonia oblonga* Miller) fruit (pulp, peel, and seed) and jam: antioxidant activity. *J. Agri. Food Chem.*, 52 (15), 4705-4712.
- [2] Thomas, M., Guillemin, F., Guillon, F., & Thibault, J.F. (2003). Pectins in the fruits of Japanese quince (*Chaenomeles japonica*). *Carbohydr. Polym.*, 53(4), 361-372.
- [3] Barat, J.M., Fito, P., & Chiralt, A. (2001). Modeling of simultaneous mass transfer and structural changes in fruit tissues. *J. Food Eng.*, 49 (2-3), 77-85.
- [4] Ertekin, C., & Yaldiz, O. (2004). Drying of eggplant and selection of a suitable thin layer drying model. *J. Food Eng.*, 63(3), 349-359.
- [5] Fathi, M., Mohebbi, M., & Razavi, S.M.A. (2009) Kinetic modeling of mass transfer during Kiwifruit osmotic dehydration operation by

- Artificial Neural Network Electronic *J. Food Process. Preserv.*, 1(1): 1-12.
- [6] Bayat Tork, M., Shafafi Zenozian, M., & Vazifehdost, M. (2011) Mass transfer modeling in osmotic drying of carrots, National Conference on Food Industry, Islamic Azad University, Quchan Branch, Quchan, Iran.
- [7] Singh, U., Jain, S.K., Doshi, A., Jain, H.K., & Chahar, V.K. (2008). Effects of pretreatments on drying characteristics of button mushroom. *Int. J. Food Eng.*, 4(4) DOI:https://doi.org/10.2202/1556-3758.1179
- [8] Askari, G.R., Emam-Djomeh, Z., & Mousavi, S.M. (2006). Effects of combined coating and microwave assisted hot-air drying on the texture, microstructure and rehydration characteristics of apple slices. *Food Sci. Tech. Int.*, 12(1), 39-46.
- [9] Awad, T.S., Moharram, H.A., Shaltout, O.E., Asker, D., & Youssef, M.M. (2012). Applications of ultrasound in analysis, processing and quality control of food: A review. *Food Res. Int.*, 48(2), 410-427.
- [10] Figiel, A. (2010). Drying kinetics and quality of beetroots dehydrated by combination of convective and vacuum-microwave methods. *J. Food Eng.*, 98(4), 461-470.
- [11] Farahaninejad, Z., Fathi, M., & Shahedi, M. (2014) Using ultrasound energy directly and indirectly during fruits drying: theory and application, The first national conference on Between meals, Research Institute for Food Science and Technology, Mashhad, Iran.
- [12] Bromberger Soquetta, M., Schmaltz, S., Wesz Righes, F., Salvalaggio, R., & de Marsillac Terra, L. (2018). Effects of pretreatment ultrasound bath and ultrasonic probe, in osmotic dehydration, in the kinetics of oven drying and the physicochemical properties of beet snacks. *J. Food Process. Preserv.*, 42(1), e13393.
- [13] Ortuño, C., Pérez-Munuera, I., Puig, A., Riera, E., & Garcia-Perez, J.V. (2010). Influence of power ultrasound application on mass transport and microstructure of orange peel during hot air drying. *Phys. Procedia*, 3(1), 153-159.
- [14] Jambrak, A.R., Mason, T.J., Paniwnyk, L., & Lelas, V. (2007). Accelerated drying of button mushrooms, Brussels sprouts and cauliflower by applying power ultrasound and its rehydration properties. *J. Food Eng.*, 81(1), 88-97.
- [15] Kaveh, M., Jahanbakhshi, A., Askari Asli-Ardeh, E., & Imanian, K., 2019. Sour lemon drying by hot air drying under ultrasonic pretreatment, *J. Innov. Food Technol.*, 6 (2), 233-245. [In Persian]
- [16] 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 (1), 103-110.
- [17] Ren, F., Perussello, C.A., Zhang, Z., Kerry, J.P., & Tiwari, B.K. (2018). Impact of ultrasound and blanching on functional properties of hot-air dried and freeze dried onions. *LWT - Food Sci. Technol.*, 87, 102-111.
- [18] Tao, Y., Zhang, J., Jiang, S., Xu, Y., Show, P.L., Han, Y., Ye, X., & Ye, M. (2018). Contacting ultrasound enhanced hot-air convective drying of garlic slices: Mass transfer modeling and quality evaluation. *J. Food Eng.*, 235, 79-88.
- [19] Motevali, A., & Hedayati, F. (2017). Investigation of change Drying Rate Constant coefficient in simulations models with various pretreatments on drying apple, *J. Innov. Food Technol.* 4, (3), 39-51. [In Persian]
- [20] Nowacka, M., Wiktor, A., Śledź, M., Jurek, N., & Witrowa-Rajchert, D. (2012). Drying of ultrasound pretreated apple and its selected physical properties. *J. Food Eng.*, 113(3), 427-433.
- [21] La Fuente, C.I., & Tadini, C.C. (2018). Ultrasound pre-treatment prior to unripe banana air-drying: effect of the ultrasonic volumetric power on the kinetic parameters. *J. Food sci. Technol.*, 55(12), 5098-5105.
- [22] Eshraghi, E., Maghsoudlo, Y., Kashani Nejad, M., Beiraghi Tosi, Sh., & Aalami, M. (2012). Studying the Effect of Ultrasound Pre-treatment on drying Kiwi fruit sheets, *Iranian Food Sci. Technol. Res. J.*, 7 (4): 273-279. [In Persian]
- [23] Torki-Harchegani, M., Ghanbarian, D., Maghsoudi, V., & Moheb, A. (2017). Infrared thin layer drying of saffron (*Crocus sativus L.*) stigmas: Mass transfer parameters and quality assessment. *Chinese J. Chem. Eng.*, 25(4), 426-432.
- [24] Beigi, M. (2016). Influence of drying air

- parameters on mass transfer characteristics of apple slices. *Heat Mass Trans.*, 52 (10), 2213-2221.
- [25] Motevali, A., & Jafar Hashemi S. (2012). Investigating the drying parameters of Fijou fruit in a freeze dryer, *J. Innov. Food Technol.* 5, 699-713. [In Persian]
- [26] Sharma, G. P., Verma, R. C., & Pathare, P. B. (2005). Mathematical modeling of infrared radiation thin layer drying of onion slices. *J. Food Eng.*, 71, 282-286.
- [27] Wang, Z., Sun, J., Liao, X., Chen, F., Zhao, G., Wu, J., & Hu, X. (2007). Mathematical modeling on hot air drying of thin layer apple pomace. *Food Res. Int.* 40(1), 39-46.
- [28] Dincer, I., Hussain, M.M. (2002). Development of a new Bi-Di correlation for solids drying. *Int. J. Heat Mass Trans.*, 45(15), 3065-3069.
- [29] Sadeghi, M., Mirzabeigi Kesbi, O., & Mireei, S.A. (2013). Mass transfer characteristics during convective, microwave and combined microwave-convective drying of lemon slices. *J. Sci. Food Agric.*, 93(3), 471-478.

*Research Article***Investigation of the effect of ultrasonic pre-treatments and different drying methods on the mass transfer parameters of quince fruit drying****Vahid NeysarifAM¹, Reza Tabatabaee koloor², Ali Motevali^{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****Abstract**

In this research, the thin slices of quince fruit pre treated by ultrasonic bath and probe methods (in three levels of 10, 20 and 30 min) and then the samples were dried using three drying methods including hot air (at three levels of temperature), microwave (at three levels of power), and freeze drying. In all treatments, mass transfer parameters including effective coefficient of moisture diffusion, convective mass transfer coefficient, constant drying rate, lag factor, non-algebraic root and Biot number were calculated by Dincer and Dost method. The results showed that the variation of effective coefficient of moisture diffusion using ultrasonic probe pretreatment was from 44.274E-8 to 110.884E-8 m²/s, 72.317E-8 to 201.893E-8 m²/s and 7.663E-8 to 11.112E-8 m²/s for hot air, microwave and freeze drying methods, respectively. These values for ultrasonic bath were 41.652E-8 to 104.369 E-8 m²/s, 59.270E-8 to 183.813E-8 m²/s and 7.210E-8 to 9.829E-8 m²/s for hot air, microwave and freeze drying methods, respectively. Also the variation of the convective mass transfer coefficient in the hot air drying was from 49.241E-6 to 92.216E-6 m/s, in the microwave method from 76.542E-6 to 134.308E-6 m/s and the freezing method from 7.630E-6 to m/s 14. 969E-6. Also, the results showed that the trend of drying rate changes was increased with increasing pre-treatment time, but the lag factor, non-algebra first root and Biot number had a downward trend. The overall results from the study of mass transfer data showed that the use of 30 min ultrasonic probe pretreatment and microwave drying method could produce the highest amount of mass transfer during the drying process of the fruit.

Keywords: Drying rate constant coefficient, Moisture diffusion coefficient, Convective mass transfer coefficient, Ultrasound pretreatment, Quince fruit

* Corresponding Authors: a.motevali@sanru.ac.ir