

بررسی پارامترهای خشک‌شدن میوه فیجوا در خشک‌کن انجمادی

علی متولی^{۱*}، سید جعفر هاشمی^۲

۱. استادیار، گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده مهندسی زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری

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

(تاریخ دریافت: ۹۷/۱/۲۷، تاریخ آخرین بازنگری: ۹۷/۳/۲۷، تاریخ پذیرش: ۹۷/۴/۳)

چکیده

خشک‌کردن انجمادی یکی از بهترین روش‌ها برای خارج کردن آب در محصولات کشاورزی حساس به دما می‌باشد. در پژوهش حاضر به بررسی فرایند خشک‌کردن میوه فیجوا در یک خشک‌کن انجمادی تحت تاثیر پیش تیمارهای مختلف پرداخته و پارامترهای ضریب پخش رطوبت با استفاده از دو مدل دینسر و دوست و مدل فیک، آهنگ ثابت خشک‌شدن، ضریب انتقال جرم همرفتی، انرژی مخصوص مصرفی و نرخ تبخیر رطوبت ویژه محاسبه گردید. پیش تیمارهای مختلف اعمال شده بر نمونه‌ها عبارت بودند از اسید آسکوربیک با غلظت ۱٪ و مدت زمان ۱، ۲ و ۳ min، مایکروویو با توان ۹۰ W به مدت ۱۰ min، ۱۸۰ W به مدت ۵ min و ۳۶۰ W به مدت ۲/۵ min، بلانچینگ با آب گرم و بخار آب به مدت ۱، ۲ و ۳ min، کربنات پتاسیم با غلظت ۲/۵٪ به مدت ۱، ۲ و ۳ min، محلول اسمزی با غلظت ۴۵٪ ساکارز به مدت زمان‌های ۱۰، ۲۰ و ۳۰ min و اولتراسوند به مدت ۱۰، ۲۰ و ۳۰ min. بالاترین مقدار آهنگ ثابت خشک‌شدن و ضریب جرم همرفتی در پیش تیمار مایکروویو به ترتیب به میزان 0.0073 s^{-1} و $2/900 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ به دست آمد. بازه مقادیر ضریب نفوذ رطوبت در مدل فیک از 0.7404×10^{-8} تا $1/3996 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ و برای مدل دینسر و دوست از $4/5318 \times 10^{-7}$ تا $9/2149 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ متغیر بود. بالاترین و پایین‌ترین انرژی مخصوص مورد نیاز به میزان ۴۷/۲۳ و ۲۳/۶۱ kWh/kg به ترتیب در پیش تیمارهای اسمزی و مایکروویو مشاهده گردید. همچنین بالاترین و پایین‌ترین نرخ تبخیر رطوبت ویژه به میزان ۰/۰۴۲۳ و ۰/۰۲۱۲ kg/kWh به ترتیب در پیش تیمارهای مایکروویو و اسمزی به دست آمد.

واژه‌های کلیدی: آهنگ ثابت خشک‌شدن، انرژی مخصوص، ضریب نفوذ موثر، خشک‌کن انجمادی.

۱. مقدمه

فیجوا از راسته (Myrtales)، تیره موردیان (Myrtaceae) بوده و در مناطق مرطوب، معتدل و نیمه‌گرمسیری پرورش می‌یابد و در کشور ایران در استان‌های گیلان و مازندران کشت می‌گردد [۱]. میوه فیجوا به اندازه یک گردو و سبز رنگ می‌باشد. این میوه دارای مقادیر قابل توجه ید و ویتامین‌های پی و بی و مواد سودمندی مانند کومارین سینکو مارین و متیل بنزوات می‌باشد. میوه فیجوا به صورت خام و هم‌چنین به صورت فراوری شده مانند چیپس، مربا، شربت و کمپوت مورد استفاده قرار می‌گیرد [۲]. تولید چیپس فیجوا نیازمند خارج کردن رطوبت از میوه خشک-کردن آن می‌باشد. از آنجا که این میوه دارای مواد بسیار حساس به فرایند خشک‌کردن می‌باشد، لازم است تا روشی انتخاب گردد تا تغییر رنگ، طعم، عطر و کاهش مواد مغذی پایین باشد. خشک‌کردن انجمادی یکی از بهترین روش‌های خشک‌کردن به منظور حفظ کیفیت محصولات کشاورزی می‌باشد. مزایای اصلی روش خشک‌کردن انجمادی، بالا بودن کیفیت محصول تولیدی و حفظ ساختمان آن است [۳، ۴]. در کنار مزایای استفاده از روش خشک‌کردن انجمادی، بالا بودن مصرف انرژی برای انجماد محصول و ایجاد خلا از معایب استفاده از این روش می‌باشد. به منظور رفع این مشکل، برخی از پژوهشگران برای کاهش تاثیر انجماد بر بافت مواد غذایی و بویژه صرفه جویی در مصرف انرژی، استفاده از پیش‌تیمارهای مختلف مانند اسمز و اولتراسوند را پیشنهاد داده‌اند [۵، ۶].

متولی و هاشمی به تاثیر خشک‌کردن انجمادی با استفاده از پیش‌تیمارهای مختلف بر خصوصیات کیفی (pH، باز جذب آب، ویتامین ث، نیروی شکست نمونه‌ها و تغییرات کلی رنگ) میوه فیجوا پرداخته شد. نتایج نشان داد که بیش‌ترین و کم‌ترین مقدار pH با استفاده از پیش‌تیمار کربنات پتاسیم و اسدآسکوربیک و بیش‌ترین و کم‌ترین مقدار باز جذب آب به ترتیب در پیش‌تیمار میکروویو و تیمار شاهد اتفاق افتاد در حالی که بیش‌ترین و کم‌ترین میزان نیروی شکست به ترتیب در تیمار شاهد و پیش-تیمار میکروویو به دست آمد. بالاترین مقدار ویتامین c در نمونه شاهد و پایین‌ترین مقدار در تیمار بلانچینگ با آب داغ به دست آمد. هم‌چنین بالاترین و پایین‌ترین تغییرات رنگ به ترتیب با استفاده از پیش‌تیمار اسیدآسکوربیک و میکروویو اتفاق افتاد [۷].

در پژوهشی دیگر اکار و همکاران به بررسی فرایند خشک‌شدن زعفران در یک خشک‌کن انجمادی پرداخته شد و پارامترهای انتقال جرم و بهترین مدل ریاضی استخراج گردید. نتایج این پژوهش نشان داد که از بین ده مدل ریاضی انتخابی و برازش داده شده بر داده‌های آزمایشگاهی، مدل پیچ بهترین برازش را بر داده‌های آزمایشگاهی داشت. هم‌چنین میزان ضریب نفوذ موثر رطوبت با استفاده از مدل فیک به میزان $10^{-11} \times 1/62 \text{ m}^2/\text{s}$ به دست آمد [۸].

در پژوهش دیگر جیانگ و همکاران به ارزیابی انرژی مصرفی، خصوصیات کیفی و آنتی‌اکسیدانی بامیه در طول فرایند خشک-کردن در یک خشک‌کن ترکیبی انجمادی-میکروویو خلا پرداخته و با روش‌های دیگر خشک‌کردن از جمله خشک‌کردن از جمله جریان هوای گرم، میکروویو-خلا، انجمادی و ترکیبی جریان هوای گرم با میکروویو-خلا مقایسه شد. نتایج نشان داد که خصوصیات آنتی‌اکسیدانی و و تغییرات رنگ در دو روش خشک‌کن انجمادی و ترکیبی انجمادی-میکروویو-خلا به صورت معناداری با سایر روش‌ها اختلاف داشت. هم‌چنین مقایسه پارامترهای انرژی و زمان خشک‌شدن در دو روش خشک‌کردن انجمادی و ترکیبی انجمادی-میکروویو-خلا نشان داد که روش ترکیبی سبب کاهش هر دو پارامتر می‌گردد [۹].

پراساپو و همکاران به بررسی تاثیر پیش‌تیمار اسمزی بر خشک‌کردن توت فرنگی در خشک‌کن جریان هوای گرم و انجمادی پرداختند. نتایج به دست آمده نشان داد که استفاده از پیش‌تیمار اسمزی زمان خشک‌شدن را کاهش و خصوصیات کیفی محصول خشک‌شده را بهبود می‌بخشد [۱۰].

در پژوهش کولاچی و نورتون به بررسی خصوصیات آنتی‌اکسیدانی بادمجان خشک‌شده در یک خشک‌کن انجمادی با استفاده از پیش‌تیمار فراصوت پرداخته شد. آزمایشات در چند سطح دما، سرعت جریان هوا و توان فراصوت انجام پذیرفت. نتایج نشان داد که افزایش دما و سرعت جریان هوا سبب کاهش مقادیر آنتی‌اکسیدان در نمونه‌های خشک‌شده گردید. هم‌چنین نتایج نشان داد که در یک اندازه ثابت از نمونه‌ها، تغییرات توان پیش-تیمار فراصوت تاثیر معنی داری بر خصوصیات آنتی‌اکسیدانی نداشت [۱۱].

لنارتس و همکاران در پژوهش خود به بررسی خشک‌کردن کرم

خشک‌کن انجمادی خشک گردید. در این فرایند پارامترهای مختلفی مانند رنگ، خصوصیات میکروبی، انرژی مصرفی، محتوی فلاونوئیدها و کلروفیل‌ها مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که نمونه‌های پیش‌تیمار شده با اولتراسوند نسبت به تیمار شاهد بهبود خصوصیات رنگی و پارامترهای کیفی و کاهش مصرف انرژی در طول فرایند خشک‌شدن در خشک‌کن انجمادی شدند [۱۵].

در تحقیق کارماچی و همکاران، رفتار خشک‌شدن توت‌فرنگی در دو ضخامت مختلف ۵ و ۷ mm در خشک‌کن انجمادی بررسی شد و پارامترهای زمان خشک‌شدن و ضرایب مدل‌های ریاضی برازش داده بر داده‌های آزمایشگاهی استخراج گردید. نتایج این پژوهش نشان داد که مدل میدیلی بهترین برازش را بر داده‌های تجربی دارد. هم‌چنین مدت زمان خشک‌شدن با افزایش ضخامت نمونه به‌طور معنی‌داری افزایش یافت [۱۶].

در پژوهش دیگری سیلویرا و فریره بررسی برخی خصوصیات فیزیکی (چگالی ظاهری، چگالی حقیقی و تخلخل) و کیفی (ویتامین C، کلسیم و فسفر) میوه‌های گرمسیری (آناناس، پاپایا، انبه و گواوا) خشک‌شده در خشک‌کن انجمادی پرداخته شد. نتایج به‌دست آمده نشان داد که استفاده از خشک‌کردن انجمادی سبب تغییرات کم در خصوصیات فیزیکی و کیفی این میوه‌ها شد [۱۷].

موتوکومران و همکاران نیز سفیده تخم‌مرغ را با و بدون صمغ زانتان در خشک‌کن انجمادی خشک کردند. نتایج نشان داد که اضافه نمودن صمغ زانتان سبب کاهش زمان خشک‌شدن در کنار کیفیت بهتر محصول خشک‌شده گردید. هم‌چنین نتایج نشان داد که استفاده از صمغ زانتان سبب افزایش نرخ انتقال جرم در طول فرایند خشک‌شدن گردید [۱۸].

خشک کردن محصولات کشاورزی به مشخصات مربوط به انتقال جرم در محصولی که خشک می‌گردد، بستگی دارد. دانستن پخش رطوبت و انتقال جرم، برای طراحی فرایند، کنترل کیفی، انتخاب نوع انبار کردن مناسب و چگونگی جابه‌جایی مناسب محصولات، لازم می‌باشد. ضریب پخش یکی از مشخصات محصولات کشاورزی است و مقدار آن بستگی به شرایط درون ماده دارد. دانش پخش رطوبت موثر برای طراحی و مدل‌سازی فرایند انتقال جرم، مانند آب زدایی، جذب سطحی و دفع رطوبت در طول انبارداری، لازم است [۱۹].

خوراکی با استفاده از تکنیک خشک‌کردن انجمادی و مایکروویو پرداخته شد و خصوصیات مانند ویتامین B₁₂، پروفیل اسید چرب، پارامترهای رنگی و اکسیداسیون مورد بررسی قرار گرفت. نتایج دو روش خشک‌کردن مایکروویو و انجمادی نشان داد که پارامترهای مورد اندازه‌گیری به غیر از ویتامین B₁₂ دارای اختلاف معنی‌داری در دو روش خشک‌کردن نبودند و فقط میزان ویتامین B₁₂ در خشک‌کردن با مایکروویو نسبت به روش انجمادی کاهش یافت. هم‌چنین نتایج نشان داد که استفاده از خلا در فرایند خشک‌کردن مایکروویو مفید نبود [۱۲].

وانگ و همکاران نیز به بررسی آزمایشگاهی و عددی خشک‌کردن مواد متخلل با استفاده از روش انجمادی پرداختند و نتایج آزمایشگاهی به‌دست آمده نشان داد که استفاده از روش انجمادی می‌تواند ۳۱٪ زمان خشک‌شدن را کاهش دهد. هم‌چنین نتایج مدل عددی نشان داد که نزدیکی بالایی بین داده‌های آزمایشگاهی و شبیه‌سازی عددی در منحنی خشک‌شدن وجود دارد [۱۳].

در تحقیق رن و همکاران تاثیر پیش‌تیمارهای بلانچینگ و اولتراسوند بر خصوصیات کیفی (فنل کل، فلاونوئید کل و کورستین) پیاز خشک‌شده به دو روش خشک‌کردن جریان هوای گرم و انجمادی بررسی شد. پیش‌تیمار اولتراسوند در زمان‌های ۱، ۳ و ۵ دقیقه و پیش‌تیمار بلانچینگ با آب داغ با دمای ۷۰ °C در زمان‌های ۱، ۳ و ۵ min بر نمونه‌های پیاز اعمال گردید. نتایج نشان داد که پیش‌تیمار اولتراسوند سبب حفظ بهتر خصوصیات کیفی و آنتی‌اکسیدانی پیازهای خشک‌شده در دو روش جریان هوای گرم و انجمادی بود. هم‌چنین مقایسه دو روش خشک‌کردن انجمادی و جریان هوای گرم نشان داد که استفاده از خشک‌کن انجمادی سبب حفظ کیفیت بیش‌تر خصوصیات آنتی‌اکسیدانی و کیفی پیازهای خشک‌شده گردید [۶].

الفت و پورکان در تحقیق خود به بررسی انتقال جرم و حرارت خشک‌شدن دانه قهوه در یک خشک‌شدن انجمادی با استفاده از روش اجزا محدود پرداخته و نتایج نشان داد که روش اجزا محدود روش آسان و دقیق برای مدل‌سازی سه بعدی انتقال جرم و حرارت در دانه‌های قهوه بود [۱۴].

در پژوهشی که کاو و همکاران انجام دادند، علف جلو با استفاده از سامانه اولتراسوند در سطوح توانی ۱۰، ۳۰، ۴۵ و ۶۰ W/L به مدت ۱۰ min پیش‌تیمار گردید و بعد از آن با استفاده از



۱۰ min، ۱۸۰ W به مدت ۵ min و ۳۶۰ W به مدت ۲/۵ min پیش تیمار شدند. محلول اسمزی با غلظت ۴۵٪ ساکارز با دمای ۲۲ °C برای پیش تیمار اسمزی آماده‌سازی و نمونه‌ها درون محلول اسمزی به مدت زمان‌های ۱۰، ۲۰ و ۳۰ min و با هم‌زنی یکنواخت ۱۰۰ rpm دور بر دقیقه پیش تیمار شدند. هم‌چنین به منظور اعمال پیش تیمار اولتراسوند، مخزن سامانه تا نقطه مشخص از آب مقطر با دمای ۲۲ °C پر شد و نمونه‌ها به مدت زمان‌های ۱۰، ۲۰ و ۳۰ min تحت تاثیر امواج اولتراسوند یا فراصوت قرار گرفتند.

۲.۲. انتقال جرم

۲.۲.۱. مدل دینسر و دوست

ضریب نفوذ رطوبت (انتقال جرم داخلی) با استفاده از مدل دینسر و دوست از رابطه (۱) محاسبه می‌گردد [۲۰].

$$D = \frac{SL^2}{\mu_1^2} \quad (1)$$

در رابطه بالا D ضریب موثر رطوبت $L \text{ m}^2/\text{s}$ ، ضخمات محصول $S \text{ m}$ ، آهنگ ثابت خشک شدن $\mu_1 \text{ s}^{-1}$ و μ_1 ریشه اول معادله می‌باشد.

در معادله (۱)، μ_1 ریشه اول معادله را می‌توان با استفاده از رابطه (۲) محاسبه کرد [۲۱].

(۲)

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

در رابطه بالا Bi عدد بایوت می‌باشد. عدد بایوت با استفاده از رابطه (۳) تعیین گردید.

$$A_1 = G = \exp\left[\frac{0.2533Bi}{1.3+Bi}\right] \quad (3)$$

در این رابطه G ضریب لاگ می‌باشد. به منظور تعیین ضریب لاگ ابتدا باید نسبت رطوبت محصول را نسبت به زمان تعیین نمود. برای ترم‌های بالای فرایند خشک کردن، نسبت رطوبت می‌تواند از رابطه (۴) تعیین گردد [۲۲، ۲۳].

$$MR = \frac{M - M_e}{M_0 - M_e} = \sum_{n=1}^{\infty} A_n B_n \cong A_1 B_1 \quad (4)$$

انتقال جرم، حرارت و انرژی مصرفی از پارامترهای مهم خشک کردن است و بررسی منابع مختلف نشان داد که پژوهش جامعی برای بررسی انتقال جرم و حرارت در خشک کردن محصول فیجوا با استفاده از پیش تیمارهای مختلف در خشک کن انجامی نشده است. نوآوری پژوهش حاضر به کارگیری تیش تیمارهای مختلف (هر کدام در سه سطح مختلف) در فرایند خشک کردن فیجوا در یک خشک کن انجامی بود که با استفاده از آن پارامترهای انرژی، انتقال جرم و حرارت مورد بررسی قرار گرفت. در پژوهش از دو مدل دینسر و دوست و مدل فیک برای محاسبه ضریب انتقال جرم استفاده گردید. هم‌چنین آهنگ ثابت خشک شدن، ضریب انتقال جرم همرفتی، انرژی مخصوص مصرفی و نرخ تبخیر رطوبت ویژه در این پژوهش محاسبه گردید.

۲. مواد و روش‌ها

میوه فیجوا از باغات استان مازندران تهیه و به منظور انجام آزمایش‌ها نمونه‌ها با ضخامت و قطر به ترتیب ۱۰ و ۲۰ mm برش داده شدند و سپس پیش تیمارهای مختلف بر نمونه‌های برش شده صورت پذیرفت. در این پژوهش ۷ پیش تیمار مختلف از جمله (اسید آسکوربیک، میکروویو، اسمز، اولتراسوند، بخار داغ، آب داغ و کرنات پتاسیم) در سطوح مختلف بر نمونه‌های برش خورده میوه فیجوا اعمال گردید.

۱.۲. زمان و نحوه اعمال پیش تیمارهای مختلف

پیش تیمار بلانچینگ با بخار داغ به مدت ۱، ۲ و ۳ min بر نمونه‌ها اعمال گردید. بدین منظور نمونه‌ها به صورت یکنواخت در محفظه در بسته و اشباع از بخار، تحت تاثیر بخار آب قرار گرفتند. هم‌چنین به منظور اعمال پیش تیمار بلانچینگ با آب داغ، نمونه‌های برش خورده فیجوا درون آب داغ با دمای ۸۰ °C به مدت ۱، ۲ و ۳ min قرار گرفتند. به منظور اعمال پیش تیمار کرنات پتاسیم محلولی با غلظت ۲/۵٪ با استفاده از آب مقطر آماده سازی شد و نمونه‌ها به مدت ۱، ۲ و ۳ min در محلول آماده شده با دمای ۲۲ °C قرار گرفتند. هم‌چنین محلول اسید آسکوربیک با غلظت ۱٪ با آب مقطر تهیه و سپس نمونه‌های فیجوا در محلول آماده شده با دمای ۲۲ °C به مدت ۱، ۲ و ۳ min در محلول مورد نظر قرار گرفتند. به منظور اعمال پیش تیمار میکروویو، نمونه‌ها در ظرف شیشه‌ای قرار گرفته و با توان ۹۰ W به مدت

یکنواختی رطوبت درون جرم جرم، تعادل رطوبتی سطح نمونه با هوای اطراف آن و برابر بودن مقاومت داخلی نمونه با مقاومت سطحی آن، فرض‌های در نظر گرفته شده برای حل معادله (۷) می‌باشند [۲۵]. برای زمان‌های طولانی خشک‌کردن، تنها اولین جمله معادله (۷) برای بیان فرایند به کار می‌رود [۲۶]. معادله بالا در مدت زمان‌های طولانی خشک شدن به صورت رابطه (۸) خلاصه می‌شود:

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \exp\left(-\frac{\pi^2 Dt}{4L^2}\right) \quad (8)$$

با رسم لگاریتم طبیعی نسبت رطوبت داده‌های به دست آمده در طول آزمایش نسبت به زمان، خطی با شیب k به دست می‌آید که از مساوی قرار دادن این شیب با ضریب t در رابطه ۸، ضریب نفوذ موثر را می‌توان از رابطه (۹) محاسبه کرد [۲۱].

$$k = \frac{\pi^2 D}{4L^2} \quad (9)$$

۳.۲. پارامترهای انرژی

۳.۲.۱. نرخ تبخیر رطوبت ویژه SMER

این پارامتر به نسبت جرم رطوبت از دست رفته به انرژی مصرف شده می‌باشد [۲۷].

$$SMER = \frac{m_w}{E_t} \quad (10)$$

در رابطه بالا m_w جرم آب از دست رفته در طول فرایند خشک‌شدن kg ، و E_t کل انرژی مصرفی در فرایند خشک‌شدن kWh می‌باشد. انرژی مصرفی توسط پمپ خلا و کندانسور در طول فرایند خشک‌شدن در دستگاه خشک‌کن انجمادی با نام تجاری Zirbus، مدل VaCo5 و ساخت کشور آلمان با استفاده از دستگاه تحلیل گر توان ساخت شرکت لوترون کشور تایوان، مدل DW-6090A به دست آمد.

۳.۲.۲. انرژی مخصوص مصرفی SEC

این پارامتر انرژی به نسبت کل انرژی مصرفی در طول فرایند خشک‌شدن میوه فیجوا به مقدار آب از دست رفته در طول فرایند خشک شدن اطلاق می‌گردد و از رابطه (۱۱) محاسبه می‌گردد [۲۸].

فاکتور لاگ (بدون بعد) را با استفاده تکنیک برازش معادله بر منحنی تغییرات رطوبت نسبت به زمان به دست آورد. معادله (۴)، معادله برازشی بر منحنی داده‌های نسبت رطوبت نسبت به زمان می‌باشد.

$$MR = G \exp(-St) \quad (5)$$

در رابطه فوق S آهنگ ثابت خشک شدن s^{-1} و G ضریب لاگ بدون بعد می‌باشد.

به منظور محاسبه پارامتر انتقال جرم با استفاده از روش دینسر و دوست، ابتدا ضریب لاگ را از معادله (۵) به دست آورده و به دنبال آن با استفاده از معادله (۳) ضریب بایوت محاسبه می‌گردد. با محاسبه عدد بایوت می‌توان ضریب μ_1 را با استفاده از معادله (۲) محاسبه نمود و به دنبال آن ضریب نفوذ موثر رطوبت را می‌توان با استفاده معادله (۱) محاسبه کرد.

هم‌چنین ضریب انتقال جرم همرفتی در خشک‌کردن محصولات کشاورزی با شکل صفحه‌ای یا ورقه‌ای می‌تواند از رابطه (۶) به دست آید:

$$Bi = \frac{kL}{D} \quad (6)$$

در رابطه فوق D ضریب موثر رطوبت m^2/s ، L نصف ضخامت محصول در حال خشک شدن m ، k ضریب انتقال جرم m/s می‌باشد.

۲.۲.۲. مدل فیک

منحنی‌های خشک‌شدن محصولات کشاورزی عمدتاً در مرحله نزولی روی می‌دهد و انتشار رطوبت به وسیله پخش درونی کنترل می‌شود. ضریب نفوذ موثر رطوبتی توسط معادله (۷) محاسبه می‌شود [۲۴].

$$MR(t) = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left[-\frac{\pi^2(2n+1)^2}{4} \frac{Dt}{L^2}\right] \quad (7)$$

در این رابطه، MR نسبت رطوبت بی بعد، n تعداد عبارات در نظر گرفته شده از معادله، t زمان خشک شدن min ، D ضریب نفوذ موثر m^2/s ، L نصف ضخامت m می‌باشد.



کانال‌های میکروسکوپی در نمونه شده و با افزایش مدت زمان اعمال این انرژی (اولتراسوند) این کانال‌ها گسترش یافته و محصول دارای بافت اسفنجی می‌گردد و سهولت خروج آب از داخل محصول در طی خشک شدن از طریق کانال‌های ایجاد شده می‌شود. همچنین استفاده از پیش‌ تیمار اسمز به دلیل نفوذ محلول قندی به داخل نمونه می‌گردد. این امر سبب شده تا سطح رویی محصول و لوله‌های موئین پر از مواد قندی شده و خروج رطوبت از محصول در طول فرایند خشک شدن به سختی انجام گیرد و به دنبال آن زمان خشک شدن افزایش می‌یابد. نتایج مشابهی در خشک کردن لایه‌های سیب [۲۹] پیاز [۶] و بادمجان [۱۱] گزارش شده است.

۲.۲. آهنگ تبخیر

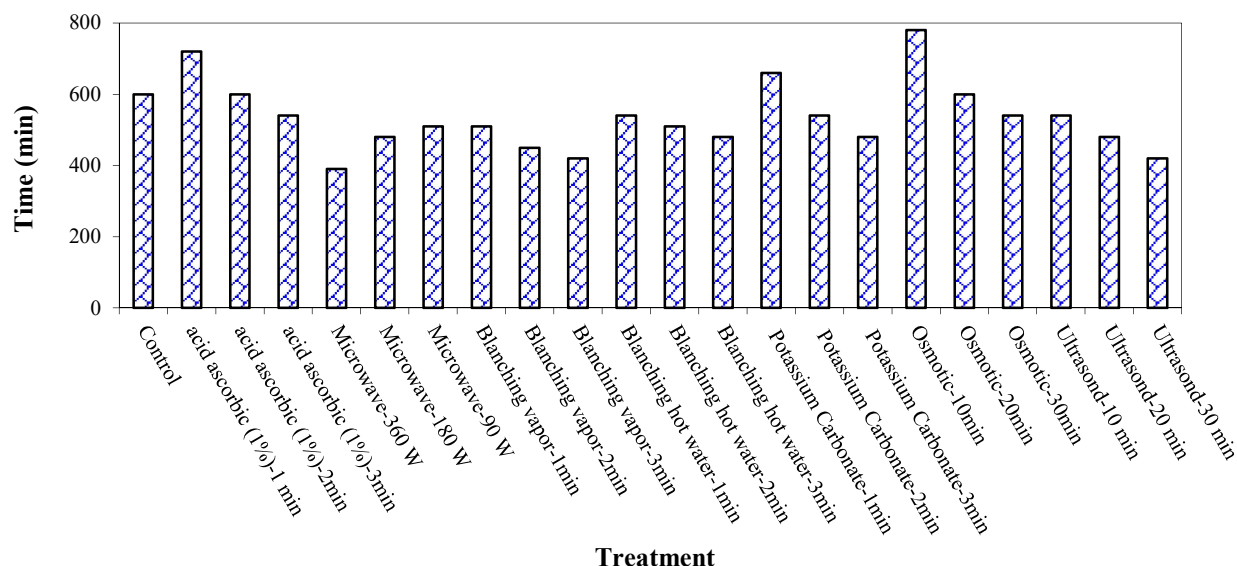
شکل (۲) روند تغییرات آهنگ خروج رطوبت از لایه‌های میوه فیجوآ در طول فرایند خشک کردن را نشان می‌دهد. همانطور که از شکل پیداست آهنگ خروج رطوبت در مراحل ابتدایی خشک شدن به صورت صعودی و در ادامه فرایند خشک شدن روند آن نزولی می‌گردد. دلیل این امر می‌تواند بالا بودن مقدار انتشار رطوبت در مراحل ابتدایی فرایند خشک کردن باشد که با گذشت زمان محتوی رطوبت محصول کاهش یافته و به دنبال آن میزان

$$SEC = \frac{E_t}{m_w} \quad (11)$$

۳. نتایج و بحث

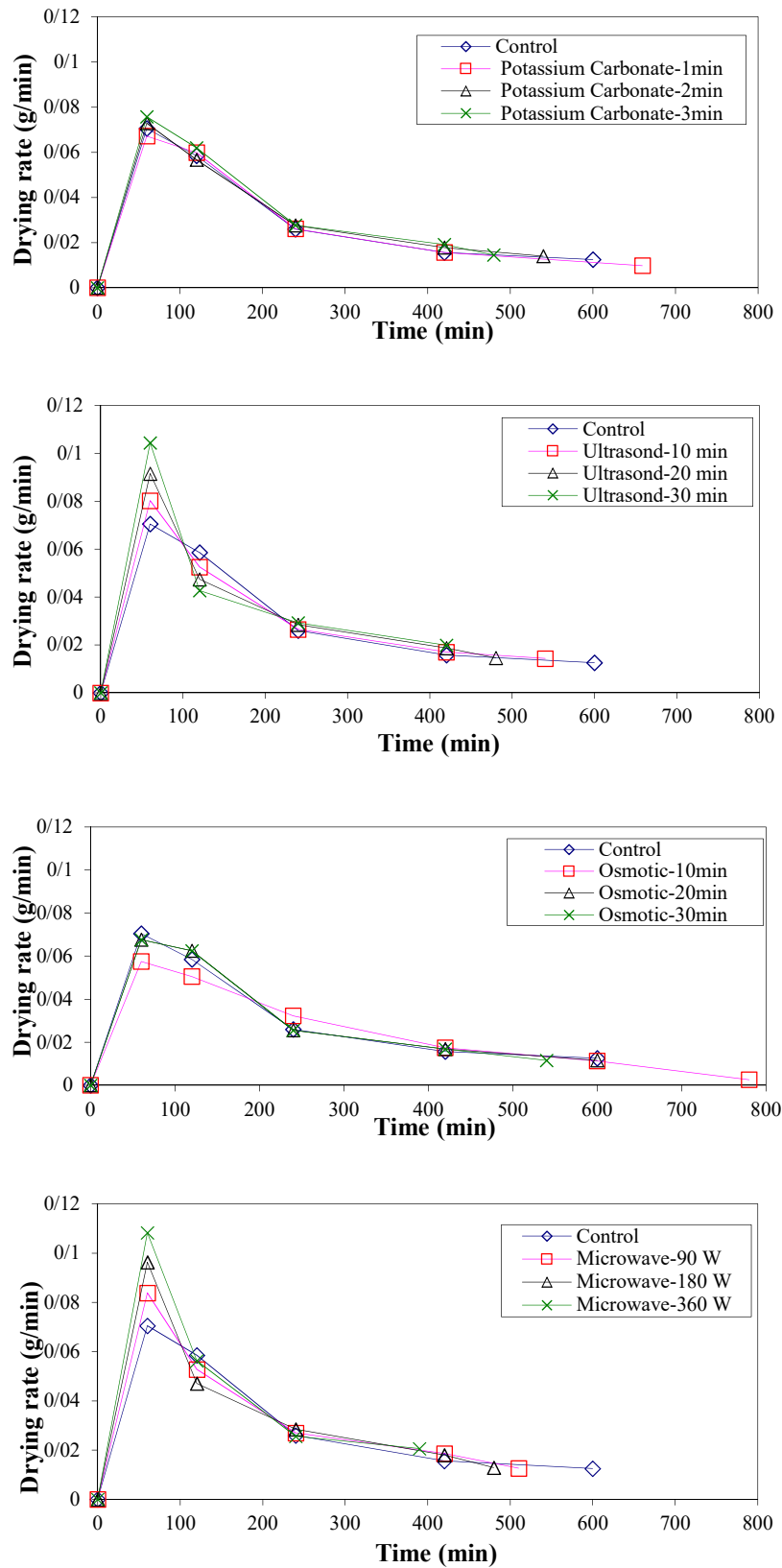
۳.۱. زمان خشک شدن

شکل (۱) اثر تیمارهای مختلف خشک کردن را بر زمان خشک شدن لایه‌های میوه فیجوآ در یک خشک کن انجمادی نشان می‌دهد. بالاترین و پایین‌ترین زمان خشک شدن به ترتیب مربوط به استفاده از پیش تیمار اسمز به مدت زمان ۱۰ min و پیش تیمار مایکروویو ۳۶۰ W به مدت ۲/۵ min به دست آمد. دلیل این امر آن است که استفاده از پیش تیمار مایکروویو سبب دوقطبی کردن مولکول‌های آب درون نمونه‌ها شده و به دنبال آن حرارت درون محصول بالا رفته و سبب افزایش فشار بخار درونی در نمونه می‌گردد. در نهایت بافت سلولی نمونه پف کرده و این عامل سبب ایجاد خلل و فرج بیشتری در نمونه‌ها می‌گردد که در ادامه فرایند، خشک کردن انجمادی نیز این بافت پف کرده را حفظ می‌نماید. همچنین پیش تیمار اولتراسوند با اعمال فرایند کایتاسیون (ترکیدن غیرممتقارن حباب‌ها) در نزدیکی سطح ماده غذایی، سبب انتقال جریان‌های سریع و فورانی از امواج صوتی به سطح شده و با ایجاد انقباض و انبساط‌های پی در پی سبب تشکیل



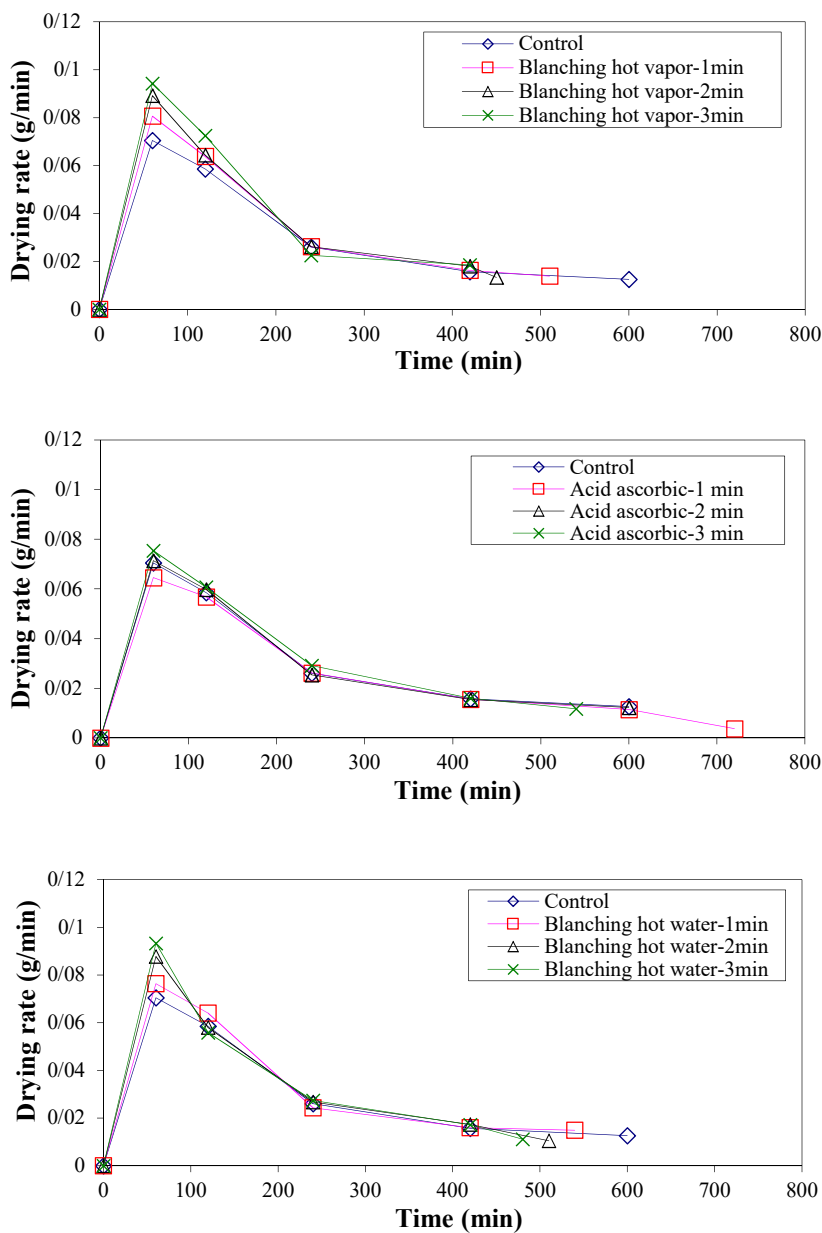
شکل (۱) اثر پیش تیمارهای مختلف بر زمان خشک شدن میوه فیجوآ.

Fig. 1 The effect of different pretreatments on drying time of Fijou fruit.



شکل (۲) تغییرات آهنگ تبخیر رطوبت در تیمارهای مختلف آزمایشی.

Fig. 2 Change of drying rate in different experimental treatments.



ادامه شکل (۲) تغییرات آهنگ تبخیر رطوبت در تیمارهای مختلف آزمایشی.

Fig. 2 Change of drying rate in different experimental treatments.

شاهد کم می‌باشد. دلیل این امر آن است که در تیمار شاهد در طول فرایند خشک‌شدن فروپاشی سلولی اتفاق افتاده و در نتیجه آن انسداد حفرات و لوله‌های موئین روی می‌دهد که این پدیده فرایند خروج رطوبت را با مشکل مواجه می‌نماید. استفاده از امواج مایکروویو و حرارت بلانچینگ سبب تخریب دیواره سلولی و امواج فراصوت سبب توسعه میکروکانال‌ها در اثر نتیجه تنش برشی حاصل از کایتاسیون در نمونه می‌گردد که با اعمال این پیش

انتشار رطوبت از محصول کاهش یافته و سرعت خشک‌شدن لایه‌های ورقه‌های میوه فیجوا کم شده و میزان آهنگ تبخیر رطوبت کاهش می‌یابد. مقایسه پیش‌تیمارهای مختلف نشان می‌دهد که نقطه اوج در نمودار خروج رطوبت در پیش‌تیمارهای اولتراسوند، مایکروویو و بلانچینگ نسبت به تیمار شاهد بالاتر بوده و دارای اختلاف محسوس‌تر بوده و در پیش‌تیمارهای اسمزی، کربنات پتاسیم و اسید آسکوربیک این اختلاف با تیمار

ثابت خشک‌شدن و ضریب جرم همرفتی روند صعودی داشت به-طوری که بالاترین مقدار این دو پارامتر در به‌کارگیری پیش‌ تیمار مایکروویو با توان ۳۶۰ W به مدت ۲/۵ min به ترتیب به میزان 0.0073 s^{-1} و $10^{-5} \times 2/900 \text{ m/s}$ اتفاق افتاد. هم‌چنین پایین-ترین مقدار این پارامتر آهنگ ثابت خشک‌شدن در به‌کارگیری پیش‌ تیمار اسمزی با مدت زمان ۱۰ min به ترتیب به میزان 0.0041 s^{-1} و ضریب جرم همرفتی در پیش‌ تیمار اسید آسکوربیک با مدت زمان ۱ min به میزان $10^{-5} \times 1/780 \text{ m/s}$ به دست آمد. دلیل بالا بودن آهنگ ثابت خشک‌شدن در برخی از پیش‌ تیمارها مانند مایکروویو، بلانچینگ و اولتراسوند را می‌توان اثرگذاری این پیش‌ تیمارها بر بافت نمونه‌های فیجوا دانست که با تخریب یا انبساط مجاری خروج رطوبت، جریان جرم خروجی (رطوبت و بخار) از نمونه را بالا برده و سبب افزایش شیب نمودار خشک‌کردن می‌گردند و به دنبال آن آهنگ ثابت خشک‌شدن افزایش می‌یابد. در مقابل اعمال پیش‌ تیمارهای مانند اسمز، کربنات پتاسیم و اسید آسکوربیک تاثیر چندانی بر بافت نمونه‌ها نگذاشته و بافت نمونه به حالت شاهد نزدیک بوده و با از دست دادن رطوبت از سطح نمونه، تجمع املاح حاصل از تبخیر رطوبت در لوله‌های مویین اتفاق افتاده و سبب سخت شدن لایه سطحی نمونه شده و عمل خروج رطوبت را دچار مشکل می‌کند. این امر سبب شیب کم‌تر در نمودارهای خشک‌شدن می‌گردد و به دنبال آن ضریب آهنگ ثابت خشک‌شدن به دنبال آن کاهش می‌یابد. نتایج مشابهی توسط سایر پژوهشگران در خشک‌کردن لایه‌های سیب [۲۹] و کیوی [۳۳] گزارش شده است.

هم‌چنین ضریب لاگ نشان دهنده قدرتی از مقاومت داخلی و خارجی یک جسم جامد به انتقال حرارت و رطوبت در طول فرایند خشک‌کردن بوده و تابعی از عدد بایوت است. در طول فرایند خشک‌کردن عدد بایوت در سه محدوده قرار می‌گیرد $Bi < 0.1$ که در این حالت مقاومت داخلی نمونه جزئی و مقاومت بالا در سطح لایه مرزی (مقاومت خارجی) است در حالی که $Bi > 100$ نشان‌دهنده این است که مقاومت داخلی نمونه بسیار بالاتر از مقاومت خارجی آن می‌باشد و در حالت $0.1 < Bi < 100$ نشان دهنده وجود هر دو مقاومت داخلی و خارجی که رایج‌ترین نوع مقاومت در خشک‌کردن محصولات کشاورزی است [20]. با توجه به جدول (۱) مقادیر مختلف عدد بایوت به دست آمده در تیمارهای مختلف آزمایشی در بازه ۰/۱۳۵۸ تا ۰/۲۲۶۸ قرار دارد

تیمارها خروج رطوبت از محصول افزایش یافته و نقطه اوج در نمودارهای آهنگ تبخیر رطوبت افزایش می‌یابد.

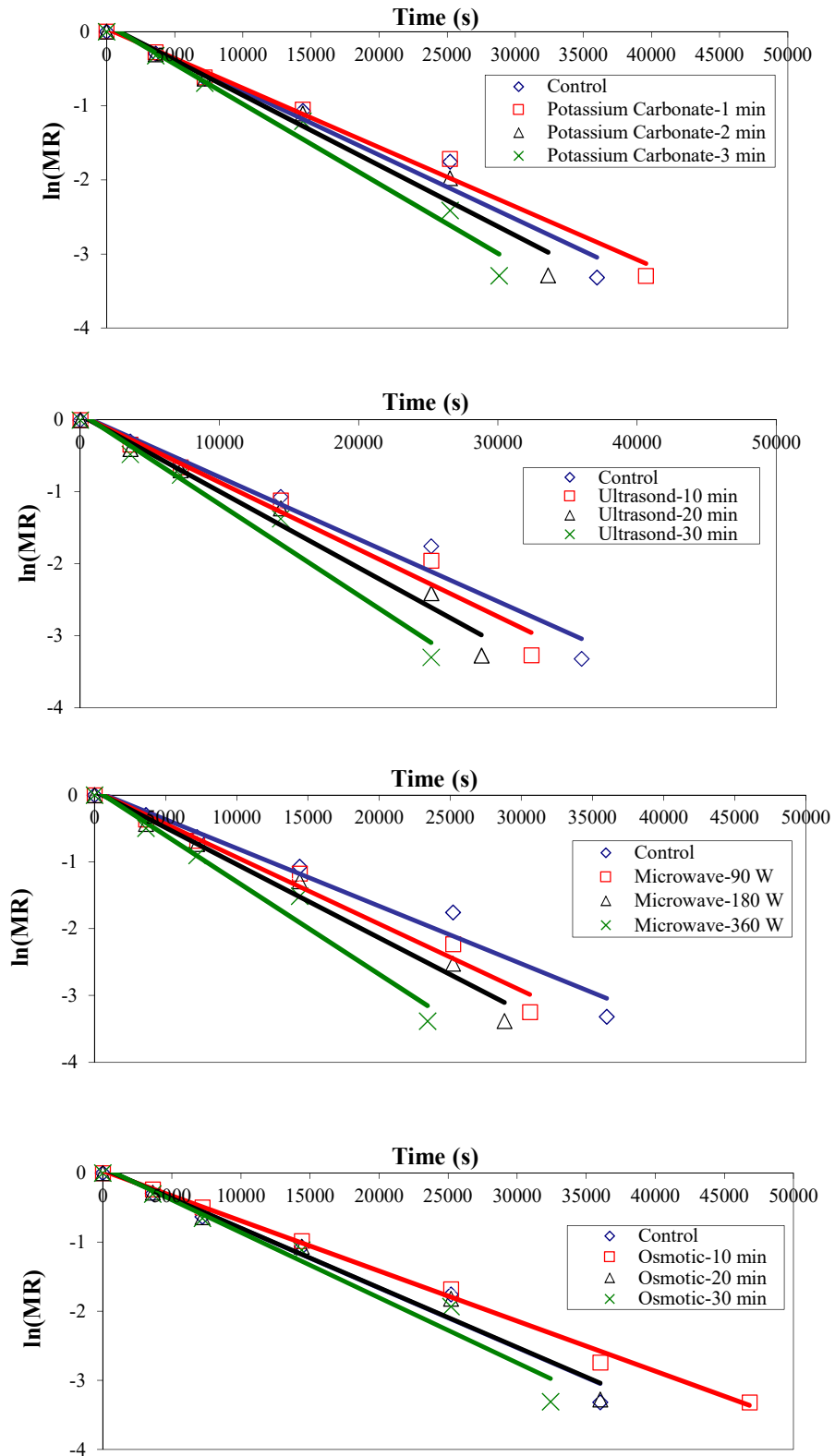
۳.۳. پدیده انتشار

۱.۳.۳. زمان خشک‌شدن

انتشار فرایند اصلی در خشک‌شدن مواد مرطوب بوده و حرکت رطوبت، مانند پخش مایع، پخش بخار و جریان هیدرودینامیکی که در مرحله‌ی نزولی خشک‌شدن صورت می‌گیرد را کنترل می‌نماید. به‌منظور موازنه جرم یک عنصر رطوبت یا آب در ماده مورد نظر در نرخ نزولی، از قانون دوم فیک که همان نظریه نفوذ است، استفاده می‌گردد. شکل (۳) تغییرات $\ln(MR)$ نسبت به زمان ثانیه را برای خشک‌کردن ورقه‌های فیجوا در یک خشک‌کن انجمادی نشان می‌دهد. مطابق با شکل شیب خطوط مختلف با آهنگ تبخیر نسبت مستقیم دارد. با مقایسه شکل ۲ و ۳ می‌توان دریافت که نمودارهایی که در شکل ۲ دارای آهنگ تبخیر بالاتری می‌باشند در شکل (۳) دارای شیب بیش‌تری می‌باشند. این امر نشان دهنده رابطه مستقیم آهنگ تبخیر رطوبت و ضریب موثر یا پخش موثر رطوبت می‌باشد. افزایش شیب نمودار در پیش- تیمارهای مایکروویو، اولتراسوند و بلانچینگ این است که این نمونه‌ها نسبت به نمونه‌های شاهد به دلیل تغییرات در بافت نمونه و کاهش تراکم و یکپارچگی بافت، حرکت رطوبت از مرکز نمونه به سطح را افزایش داده و رطوبت با سرعت بیش‌تری از لایه‌های فیجوا خارج گردید و شیب نمودار افزایش یافت. نتایج مشابهی در خشک‌کردن به روش انجمادی گزارش نشده است. در عین حال نتایج مشابهی در سایر روش‌های خشک‌کردن از جمله در خشک‌کردن لایه‌های سیب [۳۰]، کدو [۳۱] و بامیه [۳۲] گزارش گردید.

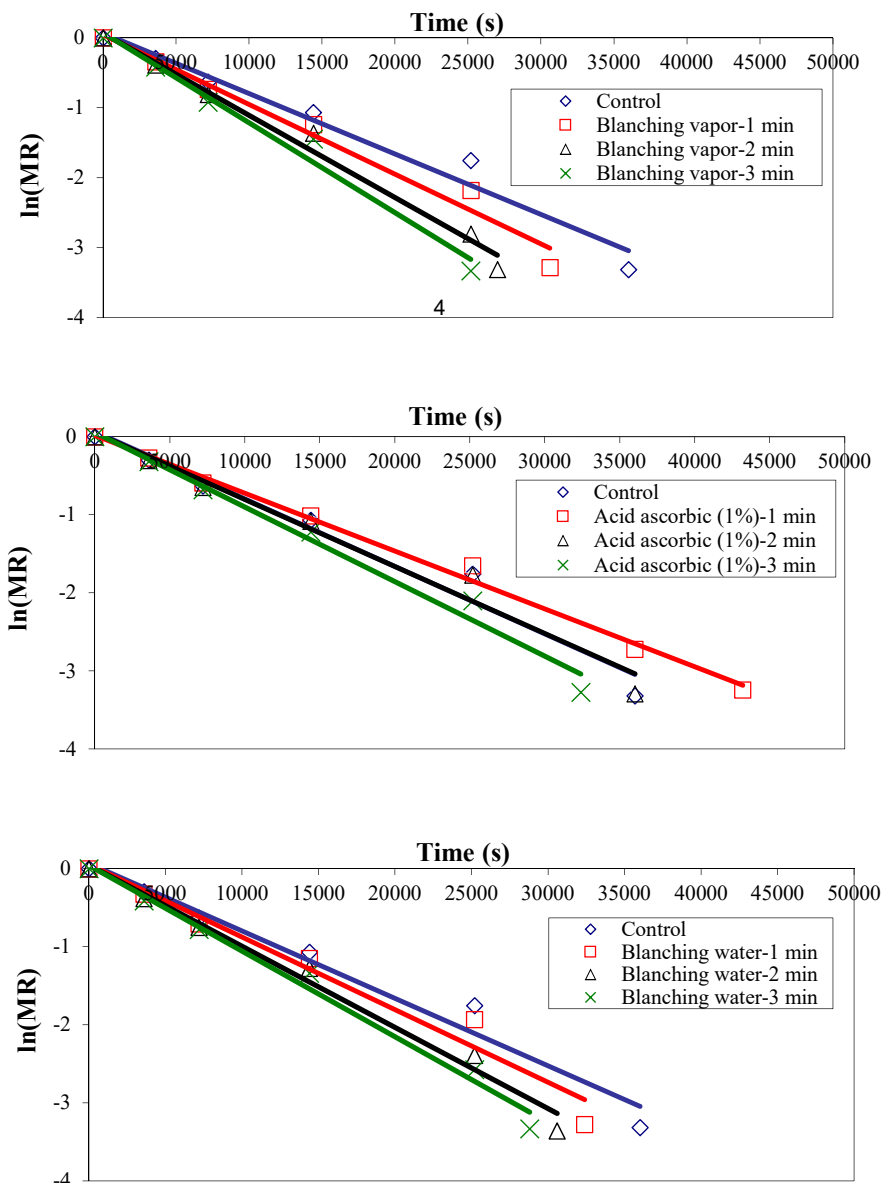
۲.۳.۳. مدل دینسر و دوست

جدول (۱) مقادیر مختلف G ضریب لاگ و S آهنگ ثابت خشک‌شدن که حاصل از برازش معادله (۵) بر داده‌های آزمایشگاهی بود را نشان می‌دهد. هم‌چنین با استفاده از معادله (۳) عدد بایوت Bi ، با استفاده از معادله (۲) ریشه اول معادله μ و با استفاده از معادله (۱) ضریب انتقال جرم همرفتی محاسبه و در جدول (۱) آورده شد. طبق این جدول با افزایش توان پیش- تیمار مایکروویو و افزایش زمان پیش‌ تیمارهای دیگر مقادیر آهنگ



شکل (۳) اثر پیش تیمارهای مختلف بر تغییرات $\ln(MR)$ نسبت به زمان خشک شدن.

Fig. 3 Effect of different pre-treatment on $\ln(MR)$ versus drying time.



ادامه شکل (۳) اثر پیش تیمارهای مختلف بر تغییرات $\ln(MR)$ نسبت به زمان خشک‌شدن.

Fig. 3 Effect of different pre-treatment on $\ln(MR)$ versus drying time.

مدل در پیش تیمار مایکروویو با توان 360 W و پایین ترین میزان این پارامتر در هر دو مدل در پیش تیمار اسمزی با زمان 10 min اتفاق افتاد. بازه مقادیر ضریب نفوذ رطوبت در مدل فیک از 0.7404×10^{-8} تا $1.3996 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ و برای مدل دینسر و دوست از 4.5318×10^{-7} تا $9.2149 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ متغیر بود. نتایج به دست آمده از شکل (۴) نشان داد که استفاده از پیش تیمارهایی با خاصیت تغییرات یا تخریب در بافت نمونه در حال خشک شدن سبب افزایش ضریب نفوذ رطوبت یا به عبارت دیگر افزایش ضریب انتقال جرم می گردد. مقادیر پیش تیمارهایی مانند

که منطبق بر فرایند خشک کردن محصولات کشاورزی است. نتایج مشابهی در خشک کردن انجمادی گزارش نشده است در عین حال نتایج به دست آمده با روش های دیگر خشک کردن از جمله خشک کردن بادمجان [۳۴] و زعفران [۲۱] مطابقت دارد.

۳.۳.۳. ضریب پخش موثر

شکل (۴) مقادیر محاسبه شده ضریب پخش رطوبت یا ضریب انتقال جرم داخلی را با استفاده از دو مدل دینسر و دوست و مدل فیک نشان می دهد. بالاترین میزان ضریب نفوذ موثر در هر دو

جدول (۱) پارامترهای به‌دست آمده در مدل دینسر و دوست برای محاسبه ضریب نفوذ موثر

Table 1 The obtained parameters in the Dincer and Dost model to calculate effective moisture diffusion coefficient

k	μ	Bi	S	G	تیمارهای آزمایشی Experimental treatments
1.902×10^{-05}	0.4472	0.1642	0.0046	1.0373	شاهد Control
1.780×10^{-05}	0.4483	0.1664	0.0043	1.0379	اسید آسکوربیک (۱٪) - ۱ دقیقه acid ascorbic (1%)-1 min
1.889×10^{-05}	0.4448	0.1592	0.0047	1.0360	اسید آسکوربیک (۱٪) - ۲ دقیقه acid ascorbic (1%)-2min
2.421×10^{-05}	0.4625	0.1956	0.0054	1.0459	اسید آسکوربیک (۱٪) - ۳ دقیقه acid ascorbic (1%)-3min
2.195×10^{-05}	0.4470	0.1638	0.0053	1.0355	مایکروویو - ۹۰ وات Microwave-90 W
2.232×10^{-05}	0.4373	0.1441	0.0059	1.0321	مایکروویو - ۱۸۰ وات Microwave-180 W
2.900×10^{-05}	0.4438	0.1574	0.0073	1.0372	مایکروویو - ۳۶۰ وات Microwave-360 W
2.270×10^{-05}	0.4615	0.1935	0.0050	1.0453	بلانچینگ بخار آب - ۱ دقیقه Blanching vapor-1min
2.889×10^{-05}	0.4617	0.1939	0.0063	1.0454	بلانچینگ بخار آب - ۲ دقیقه Blanching vapor-2min
3.128×10^{-05}	0.4607	0.1917	0.0069	1.0448	بلانچینگ بخار آب - ۳ دقیقه Blanching vapor-3min
2.108×10^{-05}	0.4476	0.1649	0.0051	1.0375	بلانچینگ آب داغ - ۱ دقیقه Blanching hot water-1min
2.404×10^{-05}	0.4483	0.1664	0.0058	1.0379	بلانچینگ آب داغ - ۲ دقیقه Blanching hot water-2min
2.503×10^{-05}	0.4465	0.1627	0.0061	1.0369	بلانچینگ آب داغ - ۳ دقیقه Blanching hot water-3min
1.863×10^{-05}	0.4485	0.1668	0.0045	1.0380	کربنات پتاسیم - ۱ دقیقه Potassium Carbonate-1min
2.214×10^{-05}	0.4599	0.1903	0.0049	1.0444	کربنات پتاسیم - ۲ دقیقه Potassium Carbonate-2min
2.686×10^{-05}	0.4727	0.2168	0.0055	1.0520	کربنات پتاسیم - ۳ دقیقه Potassium Carbonate-3min
2.055×10^{-05}	0.4775	0.2268	0.0041	1.0550	اسمز - ۱۰ دقیقه Osmotic-10min
2.047×10^{-05}	0.4563	0.1827	0.0045	1.0423	اسمز - ۲۰ دقیقه Osmotic-20min
2.206×10^{-05}	0.4586	0.1874	0.0049	1.0436	اسمز - ۳۰ دقیقه Osmotic-30min
1.942×10^{-05}	0.4406	0.1508	0.0050	1.0338	اولتراسوند - ۱۰ دقیقه Ultrasound-10 min
2.213×10^{-05}	0.4415	0.1527	0.0056	1.0343	اولتراسوند - ۲۰ دقیقه Ultrasound-20 min
2.314×10^{-05}	0.4332	0.1358	0.0064	1.0300	اولتراسوند - ۳۰ دقیقه Ultrasound-30 min

مایکروویو، اولتراسوند و بلانچینگ سبب تخریب بافت می‌شوند. مقادیر ضریب نفوذ مشابهی با استفاده از مدل فیک در خشک‌کردن زعفران در خشک‌کن انجمادی $1/62 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$ که با توجه به شکل (۳) دارای بالاترین مقادیر در ضریب نفوذ

گزارش شده است [۸].

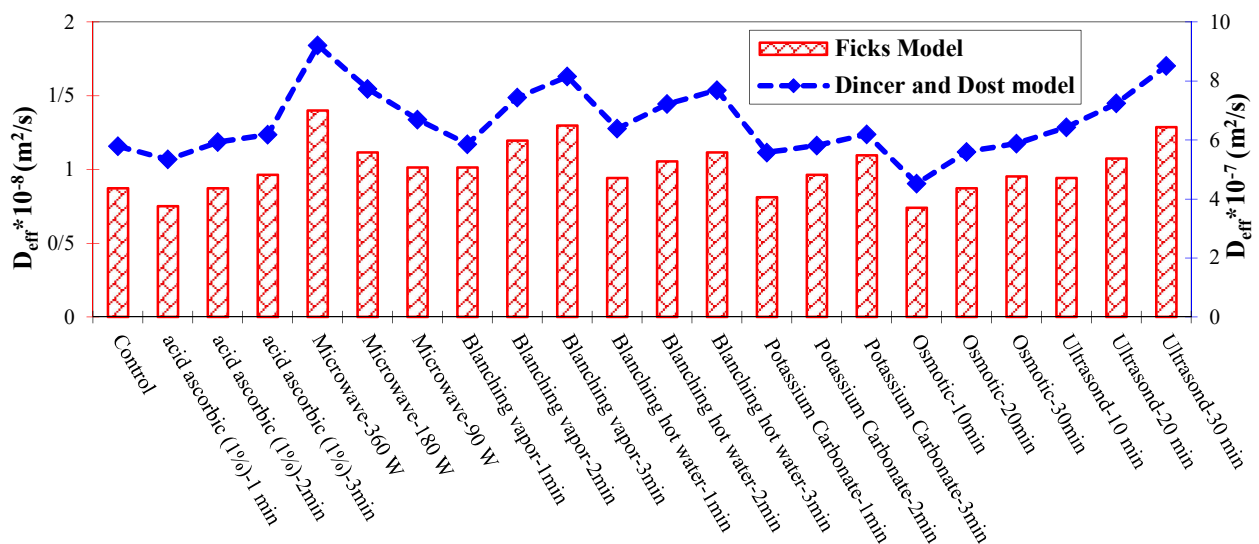
۴.۳. پارامترهای انرژی

پیش‌ تیمار فراصوت و بلانچینگ سبب تخریب بیش‌تر در بافت محصول شده و لایه سخت در طول فرایند خشک‌شدن در این محصول پیش‌ تیمار شده، تشکیل نمی‌گردد و محصول سریع‌تر خشک‌شده و به دنبال آن انرژی مصرفی توسط پمپ خلا و کنداسور در خشک‌کن انجمادی کاهش می‌یابد. نتایج به‌دست آمده نشان داد که استفاده از پیش‌ تیمار مایکروویو به اندازه ۲ برابر مصرف انرژی را در طول فرایند خشک‌کردن کاهش دهد. مقادیر انرژی مشابهی در خشک‌کردن بامیه [۹] و علف جو [۱۵] در یک خشک‌کن انجمادی گزارش شده است.

۴. نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر به بررسی فرایند خشک‌کردن میوه فیجوا تحت تاثیر پیش‌ تیمارهای مختلف در یک خشک‌کن انجمادی پرداخته شد. نتایج به‌دست آمده نشان داد که بالاترین و پایین‌ترین زمان خشک‌شدن به ترتیب مربوط به استفاده از پیش‌ تیمار اسمزی به مدت زمان ۱۰ min و پیش‌ تیمار مایکروویو با توان ۳۶۰ W به مدت ۲/۵ min به دست آمد. مقادیر ضریب لاگ با افزایش توان پیش‌ تیمار مایکروویو و افزایش زمان در پیش‌ تیمارهای دیگر روند نزولی داشت درحالی که مقادیر آهنگ ثابت خشک‌شدن و ضریب جرم همرفتی روند صعودی داشت. همچنین عدد بایوت به‌دست آمده در تیمارهای مختلف آزمایشی در بازه ۰/۱۳۵۸ تا ۰/۲۲۶۸

شکل (۵) مقادیر انرژی مخصوص مصرفی توسط پمپ خلا و کنداسور و نرخ تبخیر رطوبت ویژه را در خشک‌کردن لایه‌های فیجوا با استفاده از پیش‌ تیمارهای مختلف در یک خشک‌کن انجمادی نشان می‌دهد. نرخ تبخیر رطوبت ویژه بیانگر میزان انرژی مورد نیاز برای خارج کردن یک کیلوگرم آب از محصول می‌باشد. هر چه نرخ تبخیر رطوبت ویژه عددی بزرگ‌تری باشد بیانگر عملکرد بهتر سامانه می‌باشد. بالاترین و پایین‌ترین انرژی مخصوص مورد نیاز به میزان ۴۷/۲۳ و ۲۳/۶۱ kWh/kg به ترتیب در پیش‌ تیمارهای پیش‌ تیمار اسمزی به مدت ۱۰ min و مایکروویو با توان ۳۶۰ W و همچنین بالاترین و پایین‌ترین نرخ تبخیر رطوبت ویژه ۰/۰۴۲۳ و ۰/۰۲۱۲ kg/kWh به ترتیب در پیش‌ تیمارهای مایکروویو با توان ۳۶۰ W و اسمزی به مدت ۱۰ min به دست آمد. نتایج نشان داد که با افزایش توان مایکروویو در عملیات پیش‌ تیمار و زمان در پیش‌ تیمار اولتراسوند و بلانچینگ روند مصرف انرژی را کاهش و نرخ تبخیر رطوبت ویژه را افزایش داد. دلیل امر می‌تواند این باشد که با افزایش توان مایکروویو در عملیات پیش‌ تیمار میزان تخریب بافت محصول افزایش یافته و سرعت خروج رطوبت افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش زمان

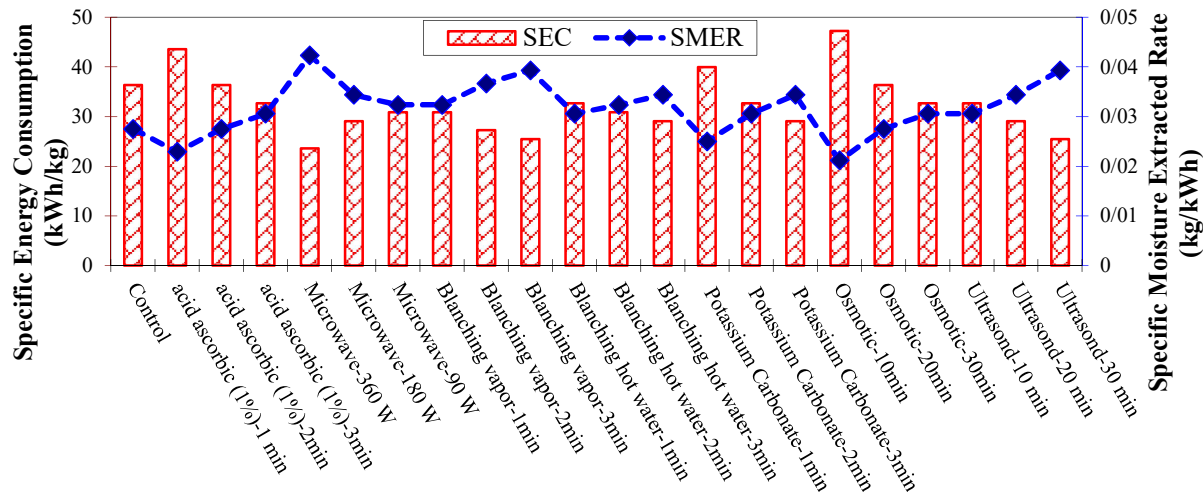


شکل (۴) مقادیر ضریب پخش موثر (ضریب انتقال جرم داخلی) رطوبت در تیمارهای مختلف آزمایشی با دو مدل پیشنهادی.

Fig. 4 The effective moisture diffusion values (internal mass transfer) in different experimental treatments with two proposed models.

به ترتیب در پیش تیمار مایکروویو با توان ۳۶۰W و پیش تیمار اسمزی به مدت ۱۰min به دست آمد. در نهایت می توان نتیجه گرفت که استفاده از پیش تیمار مایکروویو به منظور کاهش انرژی مصرفی و افزایش انتقال جرم در فرایند خشک کردن با استفاده از خشک کن پرمصرف انجمادی مناسب و قابل توصیه می باشد.

قرار داشت که منطبق بر فرایند خشک کردن محصولات کشاورزی بود. هم چنین بالاترین مقادیر ضریب نفوذ رطوبت (انتقال جرم داخلی) در هر دو مدل دینسر ودوست و مدل فیک در حالت استفاده از پیش تیمار مایکروویو و پایین ترین میزان این پارامتر در حالت استفاده از پیش تیمار اسمزی اتفاق افتاد. بالاترین و پایین ترین نرخ تبخیر رطوبت ویژه ۰/۰۴۲۳ و ۰/۰۲۱۲ kg/kWh و



شکل (۵) مقادیر انرژی مخصوص مصرفی و نرخ تبخیر رطوبت ویژه در خشک کردن لایه‌های فیجوا در خشک کن انجمادی.
Fig. 5 The values of specific energy consumption and specific moisture extraction ratio in drying of Fijoa Fruit.

منابع

- nions, *LWT-Food Sci. Technol.* doi: 10.1016/j.lwt. 2017. 08.053.
- [7] Motevali, A., Hashemi, S.J. (2017). The Effect of Different Pre-treatments on Qualitative Properties of Freeze-dried Feijoa Fruit. *Chinese J. Chem. Eng.*, <https://doi.org/10.1016/j.cjche.2017.11.011>.
- [8] Acar, B., Sadikoglu, H., I Doymaz, I. (2014). Freeze-drying kinetics and diffusion modeling of saffron (crocus sativus l.). *J. Food Process Pres.*, 39 (2), 142-149.
- [9] Jiang, N., Zhang, Z., Li, D., Liu, C., Zhang, M., Liu, C., Wang, D., Niu, L. (2017). Evaluation of freeze drying combined with microwave vacuum drying for functional okra snacks: Antioxidant properties, sensory quality, and energy consumption, *LWT - Food Sci. Technol.*, doi: 10.1016/j.lwt.2017.04.015.
- [10] Prosapio, V., Norton I. (2017). Influence of osmotic dehydration pre-treatment on oven drying and freeze drying performance. *LWT - Food Sci. Technol.* 80, 401-408.
- [1] Weston, R.Y. (2010). Bioactive products from fruit of the Feijoa (*Feijoa sellowiana*, Myrtaceae): a review. *Food Chem.*, 121, 9, 23-926.
- [2] Hardy, P.J., Michael, B.J. (1970). Volatile components of Feijoa Fruits. *Phytochem.*, 9, 1355-1357.
- [3] Talens, P., Chirlat, A., Martinez, N., Fito, P. (2002). Changes in optical and mechanical properties during osmodehydrofreezing of kiwi fruit. *Innov. Food Sci. Emerging Technol.*, 3 (2), 191-199.
- [4] Woo, M.W., Mujumdar, A.S. (2010). Effects of electric and magnetic field on freezing and possible relevance in freeze drying. *Drying Technol.*, 28 (4), 433-443.
- [5] Tregunno, N. B., Goff, H. D. (2018). Osmodehydrofreezing of apples: structural and textural effects. *Food Res. Int.* 29 (5-6), 471-479.
- [6] Ren, F., Perussello, C.A., Zhang, Z., Kerry, J.P., Tiwari, B.K. (2017). Impact of ultrasound and blanching on functional properties of hot-air dried and freeze dried

- [26] Doymaz, I. 2004. Drying kinetics of white mulberry. *J. Food Eng.*, 61: 341-346.
- [27] Chapchaimoh, K., Poomsa-ad, N., Wiset, L., Morris, J., (2016). Thermal characteristics of heat pump dryer for ginger drying. *App. Thermal Eng.*, 95, 491-498.
- [28] Aktas, M., Khanlari, A., Amini, A., Sevik, S. (2017). Performance analysis of heat pump and infrared-heat pump drying of grated carrot using energy-exergy methodology. *Energy Conv. Manag.*, 132, 327-338
- [29] 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).
- [30] 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 (3), 277-290. (In Persian)
- [31] Toyosi, Y., Tunde-Akintunde, Grace O. Ogunlakin. (2011). Influence of drying conditions on the effective moisture diffusivity and energy requirements during the drying of pretreated and untreated pumpkin. *Energy Conv. Manag.* 52, 1107-1113.
- [32] Adedeji, A. A., Gachovska, T. K., Ngadi, M. O., Raghavan, G. S. V. (2008). Effect of Pretreatments on Drying Characteristics of Okra. *Drying Technol.*, 26, 10, 1251-1256.
- [33] Darıcı, S., Şen, S. (2015). Experimental investigation of convective drying kinetics of kiwi under different conditions. *Heat Mass Trans.*, 51 (8), 1167-1176.
- [34] Liu, X., Hou, H., Chen J. (2013). Applicability of moisture transfer parameters estimated by correlation between Biot number and lag factor (Bi-G correlation) for convective drying of eggplant slices. *Heat Mass Transf.*, 49 (11), 1595-1601.
- [11] Colucci, D., Fissore, D., Rossello, C., Carcel, J. A. (2017). On the effect of ultrasound-assisted atmospheric freeze-drying on the antioxidant properties of eggplant. *Food Res. Int.* <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.01.022>.
- [12] Lenaerts, S., Van Der Borgh, M., Callens, A., Van Campenhout, L. (2018). Suitability of microwave drying for mealworms (*Tenebrio molitor*) as alternative to freeze drying: Impact on nutritional quality and colour. *Food Chem.*, 254, 129-136.
- [13] Wang, W., Yang, J., Hu, D., Pan, Y., Wang, S., Chen G. (2018). Experimental and numerical investigations on freeze-drying of porous media with prebuilt porosity. *Chem. Physics Letters*, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cplett.2018.04.008>
- [14] Alfat, S., Purqon, A. (2017). Heat and Mass Transfer Model in Freeze-Dried. *Medium J. Phys. Conf. Ser.* 877, 012061
- [15] Cao, X., Zhang, M., Mujumdar, A. S., Zhong, Q., Wang, Z. (2017). Effects of ultrasonic pretreatments on quality, energy consumption and sterilization of barley grass in freeze drying. *Ultras. Sonochem.*, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ultsonch.2017.06.014>
- [16] Kırmacı, V., Usta, H., Menlik, T. (2008). An Experimental Study on Freeze-Drying Behavior of Strawberries. *Drying Technol.*, 26, 12, 1570-1576.
- [17] Silveira, A.M., Freire, J.T. (2006). Freeze-Drying Characteristics of Tropical Fruits. *Drying Technol.*, 24, 4, 457-463.
- [18] Muthukumaran, A., Ratti, C., Raghavan, V.G.S. (2008). Foam-Mat Freeze Drying of Egg White-Mathematical Modeling Part II: Freeze Drying and Modeling. *Drying Technol.*, 26, 513-518.
- [19] Rafiee, S., Keyhani, A. and jafari, A. (2008). Modeling effective moisture diffusivity of wheat (Tajan) during air drying. *Int. J. Food Properties*, 11, 1-10.
- [20] Dincer, I. (1998). Moisture transfer analysis during drying of slab woods. *Heat Mass Trans.*, 34, 317-320.
- [21] Toriki-Harchegani, M., Ghanbarian, D., Maghsoodi, 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, 426-432.
- [22] Dincer, I., Hussain M.M. (2002). Development of a new Bi-Di correlation for solids drying. *Int. J. of Heat Mass Trans.* 45, 3065-3069.
- [23] Dincer, I., Dost S. (1995). An analytical model for moisture diffusion in solid objects during drying. *Drying Technol.* 13 (1&2), 425-435.
- [24] 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: 39-46.
- [25] Sacilic, K., Elicin, A. 2006. Mathematical modeling of solar tunnel drying of thin layer organic tomato. *J. Food Eng.*, 173: 231-238.