

## اثر پیش تیمارهای مختلف حرارتی، پالسی، شیمیایی و مکانیکی بر روند تغییرات ضریب انتقال جرم خارجی، ضریب نفوذ رطوبت و انرژی فعال سازی

علی متولی<sup>۱\*</sup>، فاطمه ذبیح‌نیا<sup>۲</sup>

۱- استادیار، مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران  
\* نویسنده مسئول (a.motevali@sanru.ac.ir)

۲- دانشجوی کارشناسی، مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۱۰/۲۲

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۳/۲۲

### واژه‌های کلیدی

اسمز  
اولتراسوند  
بلانچینگ  
ضریب انتقال جرم  
مایکروویو

### چکیده

بررسی ضریب انتقال جرم داخلی و خارجی می‌تواند یک ابزار سودمند برای کنترل بهتر شرایط فرایند خشک‌کردن مواد غذایی و محصولات کشاورزی باشد. در همین راستا در این پژوهش به بررسی تأثیر پیش تیمارهای مختلف (پیش تیمار حرارتی با عملیات بلانچینگ، پیش تیمار پالسی با اشعه مایکروویو پالسی، پیش تیمار مکانیکی با امواج اولتراسوند و پیش تیمار شیمیایی با آبگیری اسمزی) بر ضرایب انتقال جرم داخلی (ضریب نفوذ رطوبت)، ضرایب انتقال جرم خارجی و همچنین انرژی فعال‌سازی پرداخته شد. آزمایش‌ها در ۳ سطح دمایی (۴۵، ۵۵ و ۶۵ درجه سلسیوس) و در پیش تیمارهای مختلف شامل پیش تیمار حرارتی بلانچینگ با آب داغ (در دمای ۷۰، ۸۰ و ۹۰ درجه سلسیوس)، پالسی با مایکروویو (۹۰، ۱۸۰ و ۳۶۰ وات)، شیمیایی با اسمز (با غلظت ۳۰، ۵۰ و ۷۰ درصد) و مکانیکی با فراصوت (با زمان‌های ۱۵، ۳۰ و ۴۵ دقیقه) انجام گردید. نتایج نشان داد که پیش تیمار مایکروویو بیشترین تأثیر و پیش تیمار اسمز کمترین تأثیر را بر پارامترهای انتقال جرم داخلی و خارجی نسبت به تیمار شاهد داشت. بالاترین میزان ضریب انتقال جرم داخلی و خارجی با استفاده از پیش تیمار مایکروویو با توان ۳۶۰ وات و دمای خشک‌کردن ۶۵ درجه سلسیوس به ترتیب به میزان  $10^{-10} \times 36/21$  (مترمربع بر ثانیه)،  $10^{-6} \times 13/21$  (کیلوگرم بر مترمربع ثانیه) و پایین‌ترین میزان این پارامترها در تیمار شاهد و دمای خشک‌کردن ۴۵ درجه سلسیوس و به ترتیب به میزان  $10^{-10} \times 7/61$  (مترمربع بر ثانیه)،  $10^{-6} \times 3/49$  (کیلوگرم بر مترمربع ثانیه) بود. همچنین گستره تغییرات انرژی فعال‌سازی در این پژوهش با استفاده از پیش تیمار و دماهای مختلف از ۱۸/۵۲ تا ۳۲/۰۴ کیلوژول بر مول بود.

### مقدمه

انبارمانی شده یا با به کارگیری فناوری‌های خشک‌کردن، سطح رطوبت آن تا حد ایمن کاهش یابد (مصباحی و جمالیان، ۱۳۸۵). آب‌گیری یا خشک‌کردن محصولات کشاورزی سبب کاهش واکنش‌های شیمیایی و کاهش فعالیت‌های میکروارگانیسم‌ها می‌گردد و مدت زمان نگهداری این محصولات افزایش می‌یابد. خشک‌کردن محصولات

طبق آخرین گزارش سازمان جهاد کشاورزی (۱۳۹۳) کل میزان تولید سیب (آبی و دیم) در کشور ۳۳۹۷۸۵۵ تن بود (آمارنامه محصولات باغی، ۱۳۹۳) که این حجم از محصول تولیدی به صورت تازه‌خوری، کنسروی و یا به صورت محصول چیپسی باید مورد فراوری قرار گیرد. سیب به دلیل میزان رطوبت بالا، باید

به منظور 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 (احمدی چنارین، ۱۳۸۹). با استفاده از ضریب پخش مؤثر رطوبت (پدیده انتشار)، انتقال آب در محصول در حال خشک شدن قابل توصیف می‌باشد. همچنین انرژی فعال سازی نیز حداقل انرژی لازم برای شروع فرایند خشک شدن است که تحت تأثیر ضریب پخش مؤثر و دمای خشک کردن قرار دارد. این دو پارامتر (ضریب نفوذ رطوبت و انرژی فعال سازی) می‌توانند در مدل سازی‌ها و طراحی پروسه‌های خشک کردن و انتقال جرم مورد استفاده قرار گیرند.

پژوهش‌های فراوانی به‌طور پراکنده در زمینه بررسی ضریب نفوذ رطوبت و انرژی فعال سازی در خشک کردن محصولات مختلف کشاورزی و مواد غذایی انجام شده است. نتایج پژوهش Doymaz (۲۰۱۰) در خشک کردن لایه‌های سیب قرمز با استفاده از پیش تیمار اسیدسیتریک و بلانچینگ نشان داد که ضریب نفوذ مؤثر رطوبت بین  $10^{-10} \times 2/93$  تا  $10^{-10} \times 6/08$  (مترمربع بر ثانیه) تغییر می‌کند. همچنین مقادیر انرژی فعال سازی از  $14/47$  تا  $22/06$  کیلوژول بر مول در تیمارهای مختلف آزمایشی تغییر یافت (Doymaz, 2010).

در پژوهش دیگری با استفاده از پیش تیمار اولتراسونیک به بررسی خشک کردن برگ‌های توت در یک خشک کن جریان هوای گرم پرداخته شد. نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که سرعت خروج رطوبت و آهنگ تبخیر و همچنین مقادیر ضریب نفوذ رطوبت با افزایش زمان و توان پیش تیمار اولتراسوند، افزایش می‌یابد. همچنین نتایج نشان داد که استفاده از پیش تیمار اولتراسونیک سبب کاهش عدد شرووت<sup>۲</sup> و افزایش ضریب انتقال جرم خارجی می‌گردد (Tao et al., 2016).

بررسی اثر دما و سرعت جریان هوا در خشک کردن مخلوط مواد غذایی (این محصولات بر پایه غلات بودند) نشان داد که با افزایش دما و سرعت جریان هوا میزان ضریب انتقال جرم خارجی و میزان

کشاورزی و مواد غذایی عبارت است از حذف آب با استفاده از حرارت، که این حرارت می‌تواند به اشکال مختلف (گرما، اشعه فرسرخ، اشعه میکروویو، سامانه اهمی، اشعه خورشید و غیره) به محصول انتقال یابد و به دنبال آن خروج رطوبت از محصول اتفاق می‌افتد. البته لازم به ذکر است که تغییرات در حین فرایند خشک شدن در محصولاتی که محتوای قندی آنها بالاست (مانند سیب) سبب تغییرات رنگ، طعم و غیره بیشتری می‌گردد (Maskan, 2001; Krokida & Maroulis, 1997). بنابراین لازم است تا با استفاده از روش‌های مختلف از جمله با به کارگیری پیش تیمارهای مختلف این تغییرات را به کمترین میزان خود رساند.

اکثر پژوهشگران در زمینه خشک کردن محصولات کشاورزی معتقدند که خشک کردن این محصولات در نرخ نزولی اتفاق می‌افتد (Mujumdar, 2000). خشک کردن محصولات کشاورزی سبب خروج رطوبت از لایه‌های داخلی محصول شده و نرخ نزولی خشک شدن در همین زمان اتفاق می‌افتد. با عبور هوای داغ از روی محصول، حرارت به سطح آن منتقل شده و آب پس از دریافت گرمای نهان تبخیر به صورت بخار در می‌آید. بخار آب از میان یک لایه مرزی هوا به خارج نفوذ می‌کند. این پدیده سبب ایجاد ناحیه‌ای از بخار آب با فشار کم در سطح محصول می‌گردد و در نتیجه یک شیب فشار بخار از داخل ماده مرطوب تا هوای خشک به وجود می‌آید (سهرابی، ۱۳۷۷). این شیب، نیروی محرکه لازم را جهت دفع آب از ماده تأمین می‌نماید. مکانیزم دقیق انتقال رطوبت درون ماده هنوز مشخص نیست اما تئوری موجود که بیشتر از بقیه موارد مورد قبول است، نظریه نفوذ در اثر اختلاف غلظت می‌باشد. آب توسط سازوکارهای انتشار رطوبت به سطح ماده انتقال یافته و بدین ترتیب مدل نفوذ می‌تواند رفتار خشک کردن اکثر محصولات را بررسی کند (Dandamrongrak et al., 2002). انتشار فرایند اصلی در خشک شدن مواد مرطوب به حساب می‌آید که حرکت رطوبت، مانند پخش مایع، پخش بخار و جریان هیدرودینامیکی<sup>۱</sup> که در مرحله نزولی خشک شدن صورت می‌گیرد را کنترل می‌نماید.

<sup>2</sup> Sherwood number

<sup>1</sup> Hydrodynamic flow

نفوذ در تیمار شاهد مشاهده گردید (Adedeji *et al.*, 2008).

مطالعه ضریب نفوذ و انرژی فعال‌سازی فرمولاسیون‌های مختلف ترخینه در خشک‌کن جریان هوای داغ نشان داد که مدت زمان پخت گندم و دمای خشک‌کردن اثر مستقیمی بر میزان ضریب نفوذ رطوبت داشت. همچنین نتایج نشان داد که ضریب نفوذ مؤثر رطوبت بین  $10^{-1} \times 1/61$  تا  $10^{-1} \times 7/82$  (مترمربع بر ثانیه) و مقادیر انرژی فعال‌سازی از ۱۷/۹۴ تا ۳۷/۹۳ کیلوژول بر مول در تیمارهای مختلف آزمایشی تغییر یافت (طباطبایی یزدی و همکاران، ۱۳۹۳).

بررسی پژوهش‌های مختلف نشان داد که محاسبه میزان ضریب انتقال جرم خارجی، عدد شروود، ضریب نفوذ رطوبت (ضریب انتقال جرم داخلی) و انرژی فعال‌سازی به‌طور پراکنده روی محصولات مختلف با پیش‌تیمارهای متفاوت انجام شده است و تاکنون تحقیق جامع و کاملی در ارتباط با نقش انواع پیش‌تیمارها در سطوح مختلف روی محصولات کشاورزی انجام نشده است. هدف از انجام این پژوهش بررسی تأثیر انواع پیش‌تیمارها شامل پیش‌تیمار شیمیایی (اسمزی)، حرارتی (بلانچینگ)، مکانیکی (اولتراسوند) و پالسی (مایکروویو) بر ضریب انتقال جرم خارجی، عدد شروود، ضرایب نفوذ رطوبت و انرژی فعال‌سازی در طول فرایند خشک‌شدن لایه‌های سیب در خشک‌کن جریان هوای گرم می‌باشد.

### مواد و روش‌ها

به‌منظور انجام آزمایش‌های خشک‌کردن ورقه‌های سیب، سیب‌های زرد لبنانی با واریته گلدن دلیشز<sup>۳</sup> از بازار تهیه و پس از دست‌چین و جداسازی سیب‌های یک‌دست، برای نگهداری به یخچال با دمای ۴ درجه سانتی‌گراد منتقل گردید. قبل از انجام آزمایش‌ها سیب‌ها به مدت ۱ ساعت در دمای اتاق نگهداری شده و پس از آن به ورقه‌هایی با ضخامت ۵ میلی‌متر برش داده شدند. آزمایش‌ها در ۳ سطح دمایی (۴۵، ۵۵ و ۶۵ درجه سلسیوس) و سرعت جریان هوای ثابت (۵/۰

ضریب نفوذ مؤثر رطوبت روند افزایشی دارد. دلیل این نتایج به علت افزایش گرادیان حرارتی ایجادشده در اثر افزایش دما و به دنبال آن افزایش تبخیر از سطح محصول می‌باشد. همچنین با افزایش سرعت جریان هوا، فشار بخار محیط در اطراف محصول کاهش یافته و آهنگ تبخیر افزایش یافت (Jurendić & Tripalo, 2011).

بررسی پارامترهای خشک‌کردن لایه‌های سیب روی خصوصیات انتقال جرم نشان داد که افزایش دما و سرعت جریان هوا سبب افزایش ضریب انتقال جرم خارجی شده ولی عدد بایوت<sup>۱</sup> و فاکتور لاگ<sup>۲</sup> کاهش می‌یابد. همچنین ضریب نفوذ رطوبت (ضریب انتقال جرم داخلی) نیز با افزایش دما و سرعت جریان هوا روند افزایشی داشت (Beigi, 2016).

بررسی تأثیر دما و سرعت‌های مختلف جریان هوا بر ضرایب نفوذ و انرژی فعال‌سازی در خشک‌کردن زرشک در یک خشک‌کن جریان هوای گرم نشان داد که افزایش دما تأثیر مستقیم بر ضرایب نفوذ رطوبت داشته ولی افزایش سرعت جریان هوا تأثیر معکوس بر ضرایب نفوذ دارد. همچنین نتایج به‌دست‌آمده نشان داد با افزایش سرعت جریان هوا میزان انرژی فعال‌سازی کاهش می‌یابد (Aghbashlo *et al.*, 2008).

در پژوهش دیگری با بررسی تأثیر پیش‌تیمارهای مختلف بلانچینگ بر ضرایب نفوذ رطوبت و انرژی مصرفی در خشک‌کردن کدو نشان داد که با افزایش دما میزان ضریب نفوذ رطوبت افزایش و میزان انرژی مصرفی کاهش می‌یابد. از طرف دیگر بالاترین و پایین‌ترین میزان ضریب نفوذ به‌ترتیب مربوط به پیش‌تیمار بلانچینگ با آب داغ و تیمار شاهد بود (Tunde-Akintunde & Ogunlakin, 2011).

تأثیر پیش‌تیمارهای مختلف (بلانچینگ، مایکروویو و میدان الکتریکی پالسی) در خشک‌کردن بامیه نشان داد که میزان ضریب نفوذ رطوبت تحت تأثیر پیش‌تیمارهای مختلف و دمای خشک‌کردن می‌باشد. بالاترین میزان ضریب نفوذ در خشک‌کردن با استفاده از پیش‌تیمار مایکروویو و پایین‌ترین میزان ضریب

<sup>1</sup> Biot number

<sup>2</sup> Log factor

<sup>3</sup> Golden delicious

محاسبه کرد (مرتضوی و شفافی زنونیان، ۱۳۸۳؛ باقری و همکاران، ۱۳۹۳).

رابطه (۱)

$$\frac{\partial x}{\partial t} = D_{\text{eff}} \frac{\partial^2 x}{\partial z^2}$$

در رابطه (۱)  $x$ : میزان رطوبت یا غلظت سیال (کیلوگرم آب بر کیلوگرم ماده خشک)  $t$ : زمان (ثانیه)،  $D_{\text{eff}}$ : ضریب پخش مؤثر رطوبت (مترمربع بر ثانیه)،  $z$ : ضخامت (متر) محصول می‌باشد.

رابطه (۲)

$$MR(x, t) = \frac{M(x, t) - M_e}{M_0 - M_e} = \frac{4}{\pi} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{2n+1} \cos \frac{(2n+1)\pi x}{2a} \exp \left[ -\frac{\pi^2 (2n+1)^2 D_{\text{eff}} t}{4a^2} \right]$$

در رابطه (۲)  $MR$ : نسبت رطوبت،  $M_e$ : رطوبت تعادلی نمونه‌ها،  $M_0$ : رطوبت اولیه نمونه‌ها،  $a$  نصف ضخامت ورقه‌ها،  $D_{\text{eff}}$  ضریب انتشار مؤثر رطوبتی و  $n$  عدد صحیح مثبت می‌باشد. کرانک<sup>۳</sup> رابطه (۱) را برای توزیع مقدار رطوبت باتوجه به شرایط مرزی ذکر شده به صورت زیر حل کرد:

به منظور حل رابطه (۱) برای محصولات کشاورزی، فرضیاتی در نظر گرفته می‌شود که می‌توان آنها را به ترتیب زیر بیان کرد (Mujumdar, 2000):  
 ۱- انتقال رطوبت در یک جهت انجام می‌گیرد.  
 ۲- مقدار رطوبت ماده در تمام نقاط آن یکنواخت است.  
 ۳- مقاومت داخلی در مقابل انتقال رطوبت را در نظر گرفته و از مقاومت خارجی صرف نظر می‌شود.  
 ۴- انقباض در محصول در زمان خشک کردن اتفاق نمی‌افتد.  
 ۵- از اثرات انتقال حرارت داخلی و خارجی صرف نظر می‌شود.

با حل رابطه (۲) می‌توان مقادیر ضریب نفوذ رطوبت را از طریق رابطه (۳) به دست آورد.

رابطه (۳)

$$MR(t) = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp \left[ -\frac{\pi^2 (2n+1)^2 D_{\text{eff}} t}{4a^2} \right]$$

متر بر ثانیه) در پیش‌تیمارهای مختلف انجام گردید. پیش‌تیمارهای مورد استفاده در این پژوهش عبارت بودند از پیش‌تیمار میکروویو پالسی در ۳ سطح توان، پیش‌تیمار مکانیکی فراصوت در ۳ سطح زمان، پیش‌تیمار حرارتی بلانچینگ در ۳ سطح دما و پیش‌تیمار شیمیایی اسمزی با ۳ سطح غلظت و حالت بدون استفاده از پیش‌تیمار (تیمار شاهد).

پیش‌تیمار اسمزی با غلظت‌های ۳۰، ۵۰ و ۷۰ درصد (وزنی حجمی) ساکارز و گلوکز و نسبت میوه به محلول ۱ به ۱۰ در دمای ۳۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۶۰ دقیقه و با دور هم‌زنی ۱۰۰ دور بر دقیقه انجام پذیرفت. همچنین پیش‌تیمار فراصوت با فرکانس ۴۰ کیلوهرتز با توان ۱۲۰ وات و در ۳ سطح زمانی ۱۵، ۳۰ و ۴۵ دقیقه با دمای آب مقطر ۳۰ درجه سانتی‌گراد انجام شد. برای اعمال پیش‌تیمار بلانچینگ، ابتدا آب داغ در ۳ سطح دمایی ۷۰، ۸۰ و ۹۰ درجه سانتی‌گراد آماده‌سازی و نمونه‌ها به مدت ۳ دقیقه در آب ۷۰ درجه سانتی‌گراد، به مدت ۲/۵ دقیقه در آب ۸۰ درجه سانتی‌گراد و به مدت ۲ دقیقه در آب ۹۰ درجه سانتی‌گراد قرار داده شد. به‌منظور اعمال پیش‌تیمار میکروویو در سطوح مختلف توانی (۹۰، ۱۸۰ و ۳۶۰ وات) نمونه‌های سیب درون محفظه میکروویو قرار داده شدند و عملیات پیش‌تیمار در سطح توان ۹۰ وات به مدت ۱۰ دقیقه، در سطح توان ۱۸۰ وات به مدت ۵ دقیقه و در سطح توان ۳۶۰ وات به مدت ۲/۵ دقیقه انجام گردید.

به‌منظور انجام پیش‌تیمار میکروویو از دستگاه سولاردام<sup>۱</sup> (ساخت کشور کره)، انجام پیش‌تیمار فراصوت از دستگاه حمام فراصوت (Ultrasonic cleaner, KMH1 ساخت کشور چین) استفاده گردید. سازوکار اصلی جریان خشک‌شدن ماده جامد، براساس فرایند انتشار می‌باشد که در داخل ساختار ریز ماده جامد و لوله‌های مویینه، منافذ و سوراخ‌های مملو از هوا، رخ می‌دهد. بخار به طرف بیرون انتشار می‌یابد تا زمانی که از انتهای باز یک لوله مویینه، وارد هوا می‌شود. با استفاده از قانون فیک<sup>۲</sup> می‌توان ضریب انتشار مؤثر رطوبتی مواد را با استفاده از رابطه (۱)

<sup>1</sup> solardom

<sup>2</sup> Fick

<sup>3</sup> Crank

سرعت جریان هوا (متر بر ثانیه)،  $\rho_a$  چگالی هوا (کیلوگرم بر مترمکعب)،  $\mu_a$  ویسکوزیته دینامیکی هوا (پاسکال ثانیه)، SC عدد اشmitt (بدون بُعد) می باشد.

رابطه (۷)

$$sh = \frac{h_m \times L}{D_e} = 0.66 \left( \frac{L \cdot u_a \cdot \rho_a}{\mu_a} \right)^{0.5} \times SC^{1/3}$$

رابطه (۸)

$$SC = \frac{\mu_a}{\rho_a \times D_e}$$

### نتایج و بحث

بررسی داده‌های به دست آمده در دماها و پیش تیمارهای مختلف شکل‌های (۱)، (۲) و (۳) نشان می‌دهد که استفاده از پیش تیمار نسبت به حالت شاهد سبب کاهش زمان خشک شدن می‌گردد. همچنین افزایش دما در پیش تیمارهای مختلف، سرعت انتقال رطوبت را از بافت ماده به سطح محصول زیاد کرده و تبخیر افزایش یافته، در نتیجه سرعت خشک کردن در دماهای بالا افزایش می‌یابد. با توجه به این شکل‌ها بیشترین شیب خط  $\ln(MR)$  نسبت به زمان مربوط به استفاده از پیش تیمار مایکروویو است و کمترین میزان تغییرات شیب مربوط به تیمار شاهد می‌باشد. به طور کلی دلایل نتایج به دست آمده این است که در نمونه‌های پیش تیمار شده نسبت به نمونه‌های شاهد تغییر در آهنگ انتقال رطوبت از مرکز نمونه به سطح افزایش می‌یابد. 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 سیب خارج می‌گردد. همچنین بالا رفتن دما باعث افزایش در مقدار ضریب نفوذ گشته که به سبب تغییر در گرمای نهان تبخیر و افزایش آهنگ انتقال جرم با افزایش دما می‌باشد. نتایج مشابهی در خشک کردن برش‌های سیب زمینی ترشی (پورفلاح و همکاران، ۱۳۹۰)، برش‌های سیب قرمز (Doymaz, 2010)، برگ‌های توت (Tao et al., 2016)، برش‌های سیب (Beigi, 2016)، زردآلو (Bon et al., 2007) و سوسیس (Eren et al., 2008) گزارش شده است.

برای زمان‌های طولانی خشک کردن، فقط اولین جمله رابطه (۴) استفاده می‌شود (Sacilic & Elicin, 2006; Wang et al., 2007).

رابطه (۴)

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \exp\left(-\frac{\pi^2 D_{eff} t}{4a^2}\right)$$

ضریب  $k_0$  با رسم منحنی  $\ln(MR)$  در مقابل زمان مطابق معادله (۵) محاسبه می‌شود (Doymaz, 2004; Wang et al., 2007). بدین ترتیب ضریب انتشار مؤثر رطوبتی ( $D_{eff}$ ) از رابطه (۵) محاسبه می‌شود.

رابطه (۵)

$$k_0 = \frac{\pi^2 D_{eff}}{4a^2}$$

رابطه بین دما و ضریب انتشار مؤثر در رابطه (۶) نشان داده شده است (Kaya et al., 2007; Wang et al., 2007).

رابطه (۶)

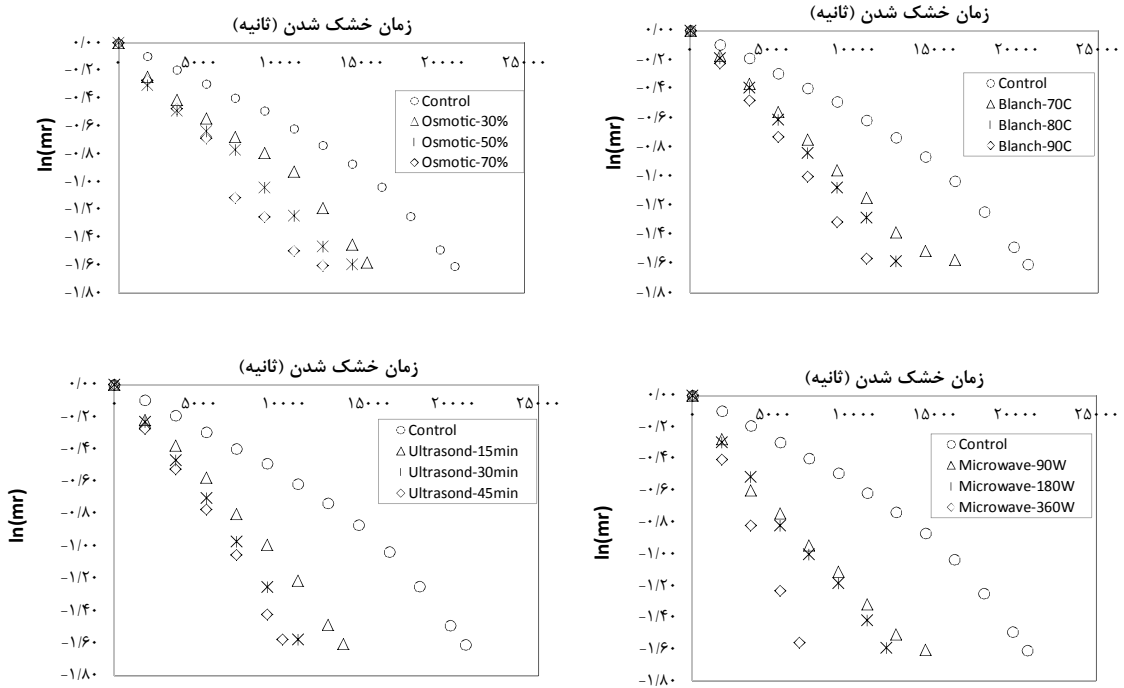
$$D_{eff} = D_0 \exp\left(-\frac{E_a}{RT_a}\right)$$

در رابطه (۶)  $D_0$ : ثابت ضریب انتشار (مترمربع بر ثانیه)،  $E_a$ : انرژی فعال سازی (کیلوژول بر مول)، R: ثابت جهانی گازها و  $T_a$ : دمای مطلق (برحسب کلون) می‌باشد.

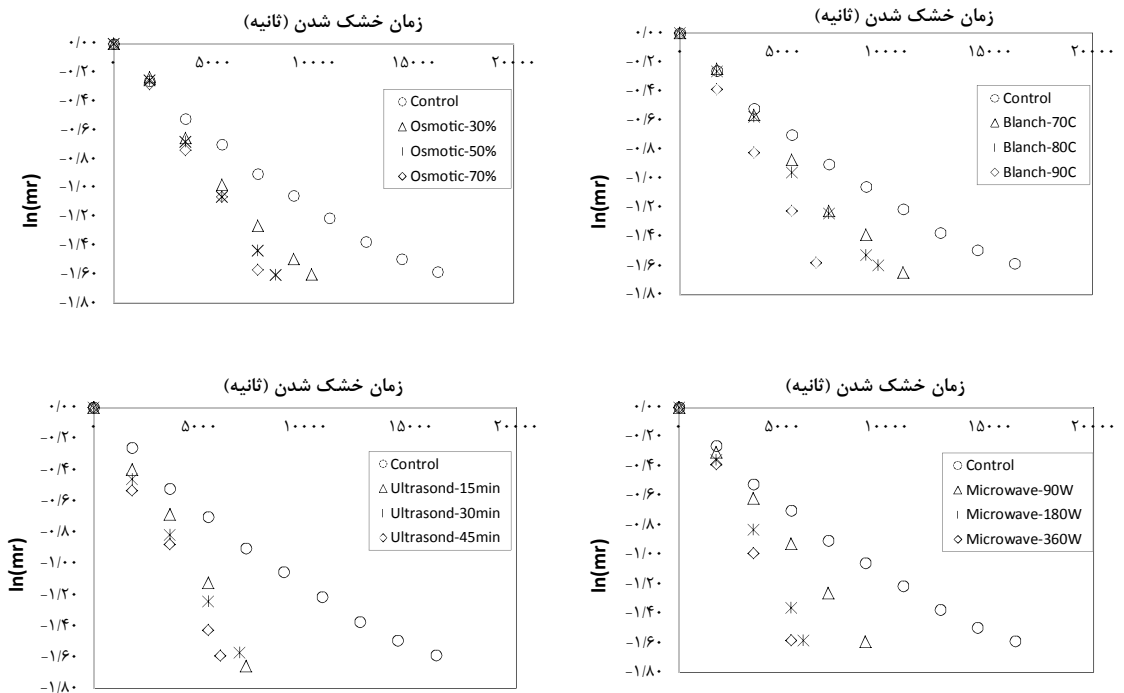
انرژی فعال سازی از طریق نمودار  $\ln(D_{eff})$  در مقابل  $1/T$  به دست می‌آید. دمای استفاده شده در رابطه (۶) دمای محصور شده در محیط خشک کردن (خشک کن) می‌باشد. بنابراین می‌باید فرض هم‌دمابودن هم در انتشار مؤثر و هم در انرژی فعال سازی مدنظر قرار گیرد.

به منظور تعیین ضریب انتقال خارجی جرم می‌توان با محاسبه عدد شروود، این ضریب را در تیمارهای مختلف محاسبه نمود. بدین منظور از رابطه (۷) برای محاسبه ضریب انتقال جرم خارجی استفاده می‌گردد (Tao et al., 2016; Lin et al., 2009).

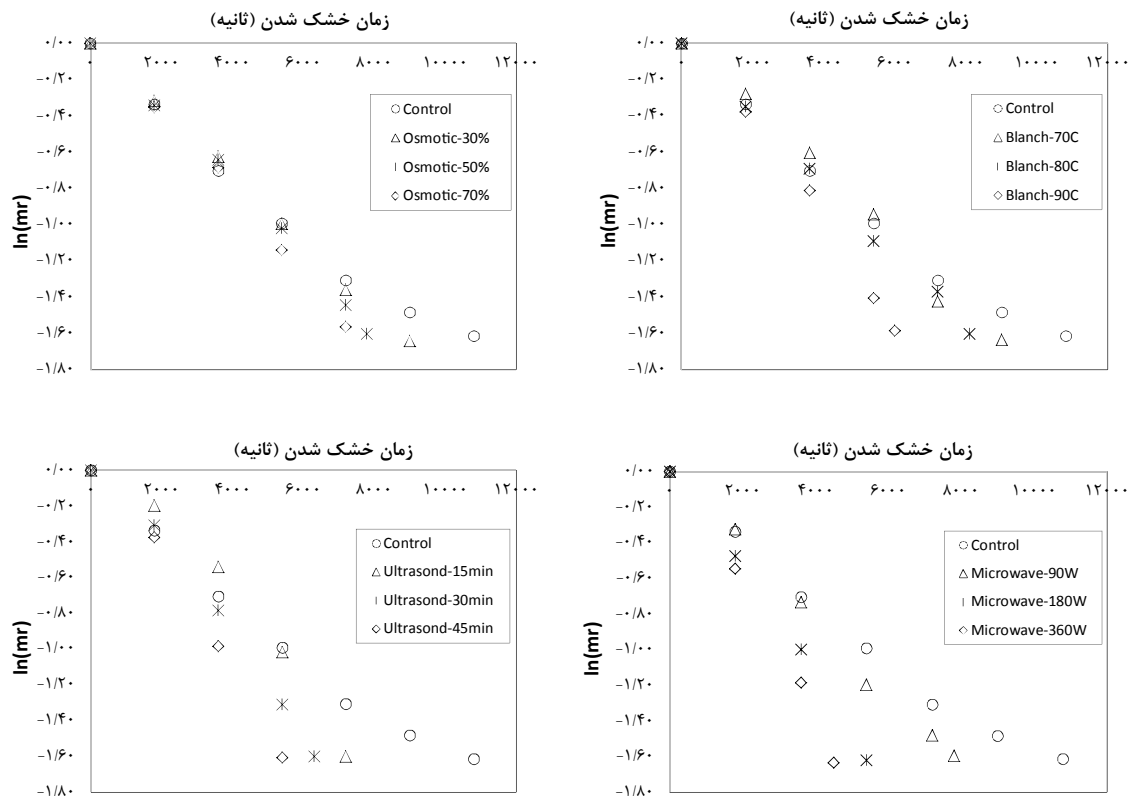
در رابطه (۷) و (۸) عدد شروود (بدون بُعد)، hm ضریب انتقال جرم خارجی (کیلوگرم آب بر مترمربع ثانیه)، L بعد مشخصه برای انتقال رطوبت (متر)،  $D_e$  ضریب نفوذ رطوبت (مترمربع بر ثانیه)،  $u_a$



شکل ۱- بررسی تأثیر پیش تیمارهای مختلف بر تغییرات  $\ln(MR)$  نسبت به زمان در دمای ۴۵ درجه سلسیوس



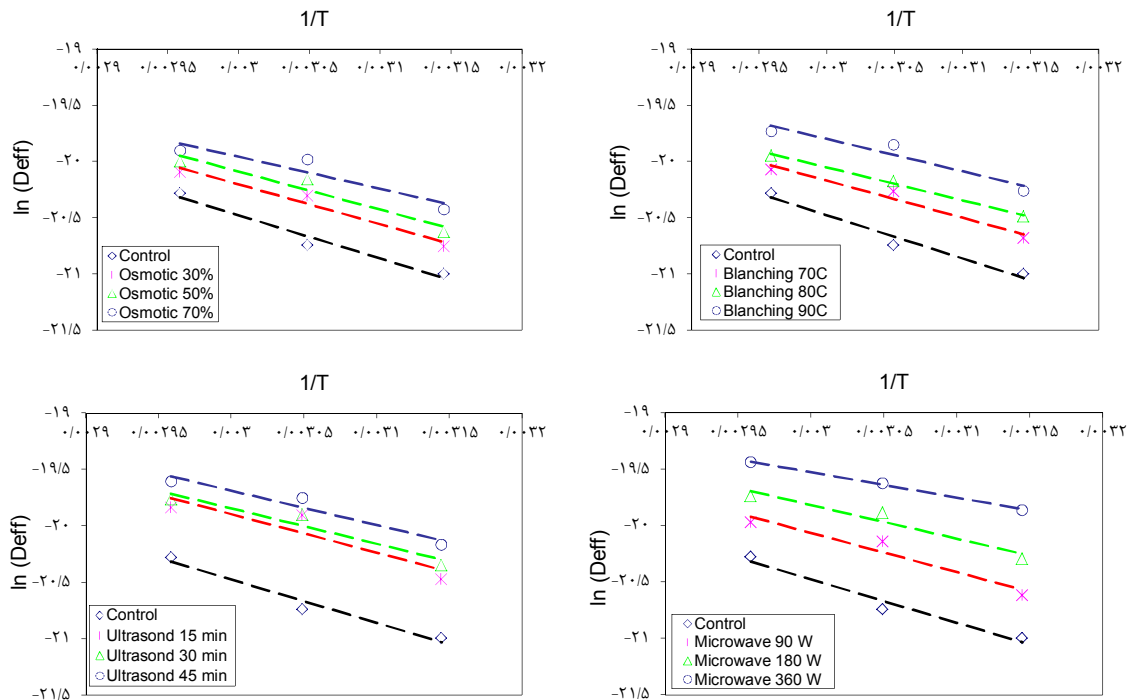
شکل ۲- بررسی تأثیر پیش تیمارهای مختلف بر تغییرات  $\ln(MR)$  نسبت به زمان در دمای ۵۵ درجه سلسیوس



شکل ۳: بررسی تأثیر پیش تیمارهای مختلف بر تغییرات  $\ln(MR)$  نسبت به زمان در دمای ۶۵ درجه سلسیوس

محصول تقریباً حالت بسته به خود گرفته و این انسداد در اثر خروج بیشتر رطوبت شدیدتر می‌گردد. این امر سبب افزایش زمان خشک‌شدن و به دنبال آن افزایش شیب نمودار  $\ln(D_{eff})$  نسبت به  $1/T$  می‌گردد. از طرف دیگر استفاده از پیش تیمار مایکروویو سبب تخریب بافت محصول شده و از سخت‌شدگی سطحی محصول در هنگام خشک‌شدن جلوگیری می‌کند که این امر سبب خروج سریع‌تر رطوبت هنگام خشک‌شدن شده و شیب نمودار  $\ln(D_{eff})$  نسبت به  $1/T$  افزایش می‌یابد.

بررسی تغییرات شیب نمودار  $\ln(D_{eff})$  نسبت به  $1/T$  (شکل ۴) در پیش تیمارهای مختلف آزمایشی نشان می‌دهد بیشترین شیب مربوط به تیمار شاهد و کمترین شیب مربوط به استفاده از پیش تیمار مایکروویو می‌باشد. همچنین نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که استفاده از پیش تیمار اولتراسوند و اسمزی نیز مانند تیمار شاهد دارای شیب تندتری نسبت به ۲ پیش تیمار دیگر مایکروویو و بلانچینگ می‌باشد. یکی از مهم‌ترین دلایل این نتایج این است که در تیمار شاهد در اثر خروج رطوبت از سطح محصول و ایجاد پدیده چروکیدگی، لوله‌های موئین موجود در سطح



شکل ۴- بررسی تغییرات  $\ln(D_{eff})$  نسبت به  $1/T$  در پیش تیمارهای مختلف آزمایشی

رطوبت در فرایند خشک شدن لایه‌های سیب است. دلیل این امر می‌تواند آن باشد که استفاده از پیش تیمار اسمری به دلیل کاهش چروکیدگی و سخت شدن سطحی ورقه‌های سیب در فرایند خشک شدن سبب افزایش مقادیر ضریب انتشار مؤثر رطوبت در حالت پیش تیمار نسبت به حالت شاهد می‌گردد. همچنین آب‌گیری اسمری سبب کاهش انسداد و جمع‌شدگی دیواره سلولی شده و به دلیل تغییرات کمتر در ساختار روزه‌های سلولی، افزایش انتشار رطوبت را به دنبال خواهد داشت. این تأثیر با افزایش میزان غلظت محلول اسمری نیز بیشتر خواهد شد و به دنبال خروج رطوبت در غلظت‌های بالای اسمری در فرایند خشک کردن بیشتر خواهد شد. نتایج به دست آمده برای ضریب انتقال جرم خارجی در حین خشک شدن لایه‌های سیب در دماهای مختلف و پیش تیمارهای مختلف اسمری با غلظت‌های مختلف نیز قابل توجه است. بالاترین میزان ضریب نفوذ و ضریب انتقال جرم خارجی در دمای ۶۵ درجه سلسیوس به ترتیب به میزان  $22/82 \times 10^{-10}$  (مترمربع بر ثانیه)،  $8/33 \times 10^{-6}$  (کیلوگرم آب بر مترمربع ثانیه) و پایین‌ترین میزان این پارامترها در دمای ۴۵ درجه

تأثیر پیش تیمار اسمری بر پارامترهای انتقال جرم و انرژی فعال سازی

نتایج حاصل از بررسی ضرایب انتقال جرم داخلی (ضریب نفوذ رطوبت) و خارجی در دماهای مختلف با استفاده از پیش تیمار اسمری در سطوح مختلف غلظت در جدول (۱) آورده شده است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش دما مقادیر ضریب انتقال جرم داخلی و خارجی در حالت پیش تیمار اسمری نسبت به تیمار شاهد افزایش می‌یابد. دلیل این امر آن است که دما تأثیر زیادی در ایجاد جنبش مولکولی و مکش سطحی داشته و با افزایش دما، ضریب انتشار رطوبت افزایش می‌یابد. همچنین میزان انرژی فعال سازی با استفاده از پیش تیمار اسمری کاهش می‌یابد. دلیل این امر آن است که استفاده از پیش تیمار اسمری به علت حفظ ساختار میکروسکوپی ماده و تغییرات کمتر در بافت محصول نیاز به انرژی کمتر برای خروج رطوبت از محصول در حال خشک کردن داشته و به دنبال آن انرژی فعال سازی کاهش می‌یابد. از طرف دیگر با افزایش میزان غلظت پیش تیمار اسمری از ۳۰ به ۷۰ درصد میزان ضریب نفوذ افزایش یافت که نشان از تأثیر مثبت این پیش تیمار بر میزان ضریب نفوذ



(اصل نژادی و پیغمبردوست، ۱۳۹۵)، لایه‌های هویچ (Singh & Gupta, 2007; Amami *et al.*, 2008) موز (شهیدی و همکاران، ۱۳۹۰) گزارش شده است. در تمامی این پژوهش‌ها میزان ضریب نفوذ با افزایش دما افزایش یافت.

سلسیوس و تیمار شاهد به ترتیب به میزان  $10^{-1} \times 7/61$  (مترمربع بر ثانیه)،  $10^{-6} \times 3/49$  (کیلوگرم آب بر مترمربع ثانیه) به دست آمد. همچنین دامنه تغییرات انرژی فعال‌سازی ۲۶/۶۹ تا ۲۹/۷۵ کیلوژول بر مول بود. استفاده از پیش تیمار اسمزی در غلظت نتایج مشابهی در خشک‌شدن قارچ خوراکی

جدول ۱- مقادیر ضریب نفوذ، ضریب انتقال جرم خارجی و انرژی فعال سازی با استفاده از پیش تیمارهای مختلف

تیمار	دما (درجه سانتی‌گراد)	ضریب نفوذ رطوبت (مترمربع بر ثانیه)	ضریب انتقال جرم خارجی (کیلوگرم آب بر مترمربع ثانیه)	انرژی فعال سازی (کیلوژول بر مول)
شاهد	۴۵	$7/61 \times 10^{-10}$	$3/49 \times 10^{-6}$	۳۲/۰۴ <sup>a</sup>
	۵۵	$9/84 \times 10^{-10}$	$3/98 \times 10^{-6}$ uv	
	۶۵	$15/62 \times 10^{-10}$	$5/70 \times 10^{-6}$ pqrs	
پیش تیمار اسمزی با غلظت ۳۰ درصد	۴۵	$9/74 \times 10^{-10}$	$4/47 \times 10^{-6}$ tuv	۲۹/۷۵ <sup>ab</sup>
	۵۵	$15/21 \times 10^{-10}$	$6/17 \times 10^{-6}$ opqr	
	۶۵	$18/86 \times 10^{-10}$	$6/88 \times 10^{-6}$ klmno	
پیش تیمار اسمزی با غلظت ۵۰ درصد	۴۵	$11/05 \times 10^{-10}$	$5/07 \times 10^{-6}$ stu	۲۸/۲۸ <sup>bc</sup>
	۵۵	$17/64 \times 10^{-10}$	$7/15 \times 10^{-6}$ lmnop	
	۶۵	$20/69 \times 10^{-10}$	$7/55 \times 10^{-6}$ jklmn	
پیش تیمار اسمزی با غلظت ۷۰ درصد	۴۵	$13/49 \times 10^{-10}$	$6/19 \times 10^{-6}$ qrs	۲۳/۶۹ <sup>ef</sup>
	۵۵	$21/09 \times 10^{-10}$	$8/25 \times 10^{-6}$ gijkl	
	۶۵	$22/82 \times 10^{-10}$	$8/33 \times 10^{-6}$ fghijk	
پیش تیمار مایکروویو با توان ۳۶۰ وات	۴۵	$10/45 \times 10^{-10}$	$4/79 \times 10^{-6}$ stu	۲۷/۶۹ <sup>bcd</sup>
	۵۵	$15/82 \times 10^{-10}$	$6/41 \times 10^{-6}$ opqr	
	۶۵	$19/27 \times 10^{-10}$	$7/03 \times 10^{-6}$ lmnop	
پیش تیمار بلانچینگ با دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد	۴۵	$12/67 \times 10^{-10}$	$5/82 \times 10^{-6}$ rst	۲۴/۲۶ <sup>ef</sup>
	۵۵	$17/34 \times 10^{-10}$	$7/03 \times 10^{-6}$ lmnopq	
	۶۵	$21/81 \times 10^{-10}$	$7/96 \times 10^{-6}$ ijklm	
پیش تیمار بلانچینگ با دمای ۹۰ درجه سانتی‌گراد	۴۵	$15/92 \times 10^{-10}$	$7/31 \times 10^{-6}$ mnopq	۲۳/۸۵ <sup>f</sup>
	۵۵	$24/04 \times 10^{-10}$	$9/74 \times 10^{-6}$ cdefgh	
	۶۵	$27/08 \times 10^{-10}$	$9/88 \times 10^{-6}$ cde	
پیش تیمار اولتراسوند با زمان ۱۵ دقیقه	۴۵	$12/88 \times 10^{-10}$	$5/91 \times 10^{-6}$ qrs	۲۸/۴۷ <sup>bc</sup>
	۵۵	$22/72 \times 10^{-10}$	$7/21 \times 10^{-6}$ jklmn	
	۶۵	$24/24 \times 10^{-10}$	$8/85 \times 10^{-6}$ efghij	
پیش تیمار اولتراسوند با زمان ۳۰ دقیقه	۴۵	$14/61 \times 10^{-10}$	$6/70 \times 10^{-6}$ opqr	۲۶/۱۹ <sup>ecd</sup>
	۵۵	$22/82 \times 10^{-10}$	$9/25 \times 10^{-6}$ defghij	
	۶۵	$26/17 \times 10^{-10}$	$9/55 \times 10^{-6}$ cdefg	
پیش تیمار اولتراسوند با زمان ۴۵ دقیقه	۴۵	$17/44 \times 10^{-10}$	$8/01 \times 10^{-6}$ klmno	۲۵/۲۷ <sup>efd</sup>
	۵۵	$26/47 \times 10^{-10}$	$10/73 \times 10^{-6}$ cd	
	۶۵	$30/63 \times 10^{-10}$	$11/18 \times 10^{-6}$ c	
پیش تیمار مایکروویو با توان ۹۰ وات	۴۵	$11/15 \times 10^{-10}$	$5/12 \times 10^{-6}$ stu	۲۹/۰۳ <sup>b</sup>
	۵۵	$17/95 \times 10^{-10}$	$7/27 \times 10^{-6}$ klmno	
	۶۵	$21/30 \times 10^{-10}$	$7/77 \times 10^{-6}$ jklmn	
پیش تیمار مایکروویو با توان ۱۸۰ وات	۴۵	$15/42 \times 10^{-10}$	$7/07 \times 10^{-6}$ nopqr	۲۴/۹۴ <sup>ef</sup>
	۵۵	$23/23 \times 10^{-10}$	$9/41 \times 10^{-6}$ defghi	
	۶۵	$26/89 \times 10^{-10}$	$9/80 \times 10^{-6}$ cdef	
پیش تیمار مایکروویو با توان ۳۶۰ وات	۴۵	$23/74 \times 10^{-10}$	$10/89 \times 10^{-6}$ cde	۱۸/۵۲ <sup>g</sup>
	۵۵	$30/12 \times 10^{-10}$	$12/21 \times 10^{-6}$ b	
	۶۵	$36/21 \times 10^{-10}$	$13/21 \times 10^{-6}$ a	

### تأثیر پیش تیمار بلانچینگ بر پارامترهای انتقال جرم و انرژی فعال سازی

اثر پیش تیمارهای مختلف بلانچینگ در دماهای مختلف خشک کردن بر پارامترهای انتقال جرم (ضریب انتقال جرم داخلی و خارجی) و انرژی فعال سازی در جدول (۱) آورده شده است. نتایج نشان می دهد که با افزایش دمای پیش تیمار بلانچینگ میزان ضریب نفوذ رطوبت (انتقال جرم داخلی) و ضریب انتقال جرم خارجی افزایش می یابد. 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 می تواند از قسمت داخلی محصول به سطح خارجی انتقال یافته و سرعت خروج آن افزایش یابد که این امر سبب افزایش ضریب انتقال جرم داخلی یا همان ضریب نفوذ در محصول می گردد. با افزایش میزان دمای پیش تیمار از ۷۰ به ۹۰ درجه سلسیوس میزان تخریب لایه های غشایی افزایش یافته و بافت محصول دچار تخریب بیشتری شده و به دنبال آن خروج رطوبت بیشتری صورت می پذیرد. استفاده از این پیش تیمار تأثیر مشابهی نیز بر ضریب انتقال جرم خارجی دارد. در این پیش تیمار بالاترین میزان ضریب انتقال جرم داخلی و خارجی در دمای ۶۵ درجه سلسیوس و استفاده از پیش تیمار بلانچینگ با دمای ۹۰ درجه سلسیوس به ترتیب به میزان  $10^{-1} \times 27/08$  (مترمربع بر ثانیه)،  $10^{-6} \times 9/88$  (کیلوگرم آب بر مترمربع ثانیه) و پایین ترین میزان این پارامترها در دمای ۴۵ درجه سلسیوس و استفاده از پیش تیمار بلانچینگ با دمای ۷۰ درجه سلسیوس به ترتیب به میزان  $10^{-1} \times 10/45$  (مترمربع بر ثانیه)،  $10^{-6} \times 4/79$  (کیلوگرم آب بر مترمربع ثانیه) بود. همچنین گستره تغییرات انرژی فعال سازی با استفاده از پیش تیمار بلانچینگ در دماهای مختلف از ۲۳/۸۵ تا ۲۷/۶۹ کیلوژول بر مول بود. نتایج مشابهی در خشک کردن ورقه های سیب (Doymaz, 2010; Lin et al., 2009) و لایه های کدو (Tunde-Akintunde & Ogunlakin, 2011)، برگ جعفری (Sledz et al., 2016) گزارش شده است.

### تأثیر پیش تیمار فراصوت بر پارامترهای انتقال جرم و انرژی فعال سازی

جدول (۱) مقادیر مختلف ضرایب انتقال جرم داخلی و خارجی و انرژی فعال سازی را با استفاده از پیش تیمار فراصوت در سطوح مختلف دمایی نشان می دهد. نتایج نشان می دهد که دمای خشک کردن و مدت زمان اعمال پیش تیمار اثر مستقیمی بر مقادیر انتقال جرم داخلی (ضریب نفوذ مؤثر) و ضریب انتقال جرم خارجی دارد. افزایش دما با افزایش جنبش مولکولی سبب خروج بیشتر مولکول های آب از درون محصول شده و به دنبال آن زمان خشک شدن کاهش یافته و شیب نمودار  $\ln(MR)$  نسبت به زمان زیادتر شده و به دنبال آن ضریب انتقال جرم داخلی افزایش می یابد. از طرف دیگر پیش تیمار فراصوت سبب باز شدن مسیر لوله های موئین در اثر پراکنده شدن ترکیبات سطحی شده و تشکیل کانال های میکروسکوپی طولی تر در اثر تغییر شکل سلول ها داده و به دنبال آن لوله های موئین بازتری ایجاد می گردد. در فرایند خشک کردن مواد مانند سیب که دارای میزان قند بالا هستند از دست دادن رطوبت سبب بسته شدن لوله های موئین با شدت بیشتری شده و این عامل سبب می گردد نمونه های شاهد در مدت زمان بیشتری خشک شوند در حالی که اعمال پیش تیمار فراصوت با تغییر شکل سلول ها و تخریب دیواره سلولی خروج رطوبت از داخل محصول را سریع تر می کند. بالاترین میزان ضریب انتقال جرم داخلی و خارجی با استفاده از پیش تیمار فراصوت به مدت ۴۵ دقیقه و دمای خشک کردن ۶۵ درجه سلسیوس به ترتیب به میزان  $10^{-1} \times 30/63$  (مترمربع بر ثانیه)،  $10^{-6} \times 11/18$  (کیلوگرم آب بر مترمربع ثانیه) و پایین ترین میزان این پارامترها با استفاده از پیش تیمار فراصوت به مدت ۱۵ دقیقه و دمای خشک کردن ۴۵ درجه سلسیوس و به ترتیب به میزان  $10^{-1} \times 12/88$  (مترمربع بر ثانیه)،  $10^{-6} \times 5/91$  (کیلوگرم آب بر مترمربع ثانیه) بود. همچنین گستره تغییرات انرژی فعال سازی با استفاده از پیش تیمار بلانچینگ در دماهای مختلف از ۲۵/۲۷ تا ۲۸/۴۷ کیلوژول بر مول بود. نتایج مشابهی در خشک کردن برگ های توت (Tao et al., 2016)، لایه های موز (شهیدی و همکاران، ۱۳۹۰) و برگ جعفری (Sledz et al., 2016) گزارش شده است.

بررسی آماری نتایج به دست آمده نشان داد که اثرات متقابل دما و نوع پیش تیمار برای پارامتر ضریب نفوذ رطوبت غیرمعنی دار و برای پارامتر ضریب انتقال جرم خارجی معنی دار بود. حروف مربوط به معنی داری اثرات متقابل نتایج برای ضریب انتقال جرم خارجی در جدول (۱) آورده شد.

#### مقایسه اثرات پیش تیمارهای مختلف بر ضرایب انتقال جرم

محصولاتی مانند سیب که دارای میزان قند بالایی هستند به مدت زمان بیشتری نسبت به سایر محصولات که دارای محتوای قندی پایینی هستند، برای رسیدن به رطوبت مشخص در روش خشک کردن با هوای گرم نیاز دارند، که ممکن است باعث صدمات به خصوصیات کیفی محصول خشک شده شوند. پایین بودن ضریب انتقال حرارت در محصولات کشاورزی و مواد غذایی در روش خشک کردن با هوای گرم، سبب می گردد تا انتقال گرما و حرارت به درون جسم به کندی صورت پذیرد و به دنبال آن ضریب انتقال جرم داخلی (ضریب نفوذ رطوبت) و ضریب انتقال جرم خارجی شده و محصول زمان زیادی را برای خشک شدن نیاز داشته باشد (نتایج به دست آمده در شکل های (۱)، (۲) و (۳)). نتایج به دست آمده از به کارگیری پیش تیمارهای مختلف نشان داد که ضرایب انتقال جرم داخلی و خارجی با استفاده از این پیش تیمارها نسبت به حالت شاهد افزایش یافت به طوری که بالاترین ضریب انتقال جرم داخلی و ۳۶۰ وات و در دمای خشک کردن ۶۵ درجه سلسیوس و پایین ترین میزان این ضرایب در استفاده از تیمار شاهد و در دمای خشک کردن ۴۵ درجه سلسیوس اتفاق افتاد. بررسی مقایسه پیش تیمارهای مختلف نشان می دهد که استفاده از مایکروویو بیشترین استفاده از پیش تیمار اسمزی کمترین تأثیر بر ضرایب انتقال جرم داخلی و خارجی داشت. یکی از مهم ترین دلایل تأثیر زیاد پیش تیمار مایکروویو بر این ضرایب این است که مایکروویو با قطبی کردن مولکول های آب سبب گرمایش حجمی و درونی داخل جسم شده و جسم حالت پف کرده پیدا می کند و با باز شدن لوله های موئین در جسم در حال خشک شدن انتقال

#### تأثیر پیش تیمار مایکروویو بر پارامترهای انتقال جرم و انرژی فعال سازی

بررسی اثرات پیش تیمار مایکروویو در توان های مختلف بر پارامترهای انتقال جرم در خشک کردن ورقه های سیب نشان می دهد که توان مایکروویو بر این ضرایب تأثیر مستقیمی داشته و مانند افزایش دمای خشک کردن سبب افزایش ضریب انتقال جرم داخلی و خارجی می گردد (جدول ۱). یکی از مهم ترین دلایل به دست آمدن این نتایج، تأثیر امواج مایکروویو بر بافت سیب بوده که با تأثیر بر بافت سیب، بافت را متخلخل کرده و با افزایش ضخامت و باد کردن محصول، سبب باز شدن لوله های موئین برای انتقال رطوبت شده و به دنبال آن زمان خشک کردن با استفاده از پیش تیمار مایکروویو نسبت به شاهد کوتاه تر می گردد. از طرف دیگر با افزایش توان پیش تیمار مایکروویو گرمایش نمونه افزایش یافته که دلیل این امر افزایش شدت دوقطبی شدن مولکول های 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 می شود. 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 ضرایب انتقال جرم داخلی و خارجی افزایش می یابد. بالاترین میزان ضریب انتقال جرم داخلی و خارجی با استفاده از پیش تیمار مایکروویو با توان ۳۶۰ وات و دمای خشک کردن ۶۵ درجه سلسیوس به ترتیب به میزان  $10^{-1} \times 36/21$  (مترمربع بر ثانیه)،  $10^{-6} \times 13/21$  (کیلوگرم آب بر مترمربع ثانیه) و پایین ترین میزان این پارامترها با استفاده از پیش تیمار مایکروویو با توان ۹۰ وات و دمای خشک کردن ۴۵ درجه سلسیوس و به ترتیب به میزان  $10^{-1} \times 11/15$  (مترمربع بر ثانیه)،  $10^{-6} \times 5/12$  (کیلوگرم آب بر مترمربع ثانیه) بود. همچنین گستره تغییرات انرژی فعال سازی با استفاده از پیش تیمار مایکروویو در دماهای مختلف از ۱۸/۵۲ تا ۲۹/۰۲ کیلوژول بر مول بود. نتایج مشابهی در خشک کردن بامیه (Adedeji *et al.*, 2008)، زغال اخته (Zielinska & Michalska, 2016)، دانه های انار (Minaei *et al.*, 2011) گزارش شده است.

داد که با افزایش غلظت پیش‌ تیمار اسمزی از ۳۰ به ۷۰ درصد میزان ضریب انتقال جرم داخلی و خارجی روند صعودی داشت در حالی که میزان انرژی فعال‌سازی روند کاهشی داشت. همچنین میزان ضریب انتقال جرم داخلی (ضریب نفوذ رطوبت) و ضریب انتقال جرم خارجی با افزایش زمان پیش‌ تیمار فراصوت، دمای پیش‌ تیمار بلانچینگ و توان پیش‌ تیمار میکروویو روند افزایشی داشت. نتایج به دست آمده نشان داد که استفاده از پیش‌ تیمارهای مختلف میزان انرژی لازم برای خروج رطوبت از لایه‌های سبب را کاهش داده و انرژی فعال‌سازی در طول فرایند خشک کردن کاهش می‌یابد. همچنین بررسی مقایسه پیش‌ تیمارهای مختلف نشان داد که استفاده از میکروویو سبب ایجاد بالاترین میزان ضریب انتقال جرم داخلی و خارجی و کمترین میزان انرژی فعال‌سازی و استفاده از پیش‌ تیمار اسمزی سبب ایجاد کمترین میزان ضرایب انتقال جرم داخلی و خارجی و بیشترین انرژی فعال‌سازی گردید.

جرم از داخل و خارج جسم با سرعت بیشتری صورت می‌پذیرد. در مقابل استفاده از پیش‌ تیمار اسمزی سبب نفوذ قند به داخل جسم شده و این عمل سبب گرفتگی لایه‌های سطحی و لوله‌های موئین در جسم در حال خشک شدن می‌گردد و به دنبال آن انتقال رطوبت و جرم از قسمت داخلی به سطح خارجی به کندی صورت می‌پذیرد. در کنار آن استفاده از دو پیش‌ تیمار دیگر مانند فراصوت و بلانچینگ سبب تخریب در بافت محصول شده و این عمل سبب خروج سریع تر رطوبت از قسمت داخلی جسم به قسمت خارجی شده و به دنبال آن ضرایب انتقال جرم داخلی و خارجی افزایش می‌یابد.

### نتیجه‌گیری

خشک کردن یکی از روش‌های مرسوم به منظور کاهش رطوبت محصول برای نگهداری طولانی مدت می‌باشد. در این پژوهش به منظور افزایش پارامترهای انتقال جرم، از پیش‌ تیمارهای حرارتی، پالسی، شیمیایی و مکانیکی با سطوح مختلف استفاده شد. نتایج نشان

### منابع

- احمدی چنارین، ح. ۱۳۸۹. پارامترهای کمی و کیفی موثر در فرآیند خشک کردن و نگهداری گیاه دارویی علف چای *Hypericum perforatum L.* به منظور کاهش ضایعات و مصرف انرژی. رساله دکتری دانشگاه آزاد واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران.
- احمدی، ک.، قلی‌زاده، ح.، عبادزاده، ح.ر.، حسین‌پور، ر.، حاتمی، ف.، عبدشاه، ه.، رضایی، م.م.، کاظمی‌فرد، ر. و فضلی استبرق، م. ۱۳۹۳. آمارنامه کشاورزی، محصولات باغی. وزارت جهاد کشاورزی، معاونت برنامه ریزی و اقتصادی، مرکز فناوری اطلاعات و ارتباطات.
- اصل‌نژادی، س. و پیغمبردوست، س. ه. ۱۳۹۵. مطالعه سینتیک خشک کردن قارچ خوراکی پیش‌ تیمار شده با آبگیری اسمزی. مهندسی بیوسیستم ایران، ۴۷ (۳): ۵۷۵-۵۶۹.
- باقری، ه.، سیدآبادی، م.م. و کاشانی نژاد، م. ۱۳۹۳. مدل سازی سینتیک خشک شدن لایه نازک کمه (کشک محلی). فصلنامه علوم و فناوری‌های نوین غذایی، ۲ (۵): ۳-۱۶.
- پورفلاح، ز.، نهاردانی، م.، سلامی‌نیا، م.، نوریان، س. و محمدی، م. ۱۳۹۰. سینتیک خشک کردن برش های سیب زمینی ترشی (*Helianthus tuberosus L.*) با روش جابه جایی هوای داغ. فصلنامه نوآوری در علوم و فناوری غذایی، ۳ (۴): ۱-۱۳.
- شهیدی، ف.، محبی، م.، نوشاد، م.، احتیاطی، ا. و فتحی، م. ۱۳۹۰. بررسی تأثیر پیش‌ تیمار اسمز و فراصوت بر برخی ویژگی های کیفی موز خشک شده به روش هوای داغ. نشریه پژوهشهای علوم و صنایع غذایی ایران، ۷ (۴): ۲۶۳-۲۷۲.
- طباطبایی یزدی، ف.، محبی، م.، مرتضوی، س.ع.، قیطران‌پور، آ. و علیزاده بهبهانی، ب. ۱۳۹۳. مطالعه ضریب نفوذ موثر، انرژی فعال‌سازی و رفتار خشک شدن فرمولاسیون‌های مختلف ترخینه در خشک‌کن هوای داغ. نشریه پژوهشهای علوم و صنایع غذایی ایران، ۱۰ (۳): ۲۱۹-۲۲۳.
- مصباحی، غ. و جمالیان، ج. ۱۳۸۵. فرمولاسیون سس سیب متناسب با ذائقه ایرانی. علوم آب و خاک (علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی)، ۱۰ (۲): ۲۰۳-۲۱۴.

- 9- Adedeji, A.A., Gachovska, T.K., Ngadi, M.O. & Raghavan, G.S.V. 2008. Effect of Pretreatments on Drying Characteristics of Okra, *Drying Technology*, 26(10): 1251-1256.
- 10-Aghbashlo, M., Kianmehr, M.H. & Samimi-Akhijahani, H. 2008. Influence of drying conditions on the effective moisture diffusivity, energy of activation and energy consumption during the thin-layer drying of berberis fruit (*Berberidaceae*). *Energy Conversion and Management*, 49(10): 2865-2871.
- 11-Amami, E., Khezami, L., Vorobiev, E. & Kechaou, N. 2008. Effect of Pulsed Electric Field and Osmotic Dehydration Pretreatment on the Convective Drying of Carrot Tissue. *Drying Technology*, 26 (2): 231-238.
- 12-Beigi, M. 2016. Influence of drying air parameters on mass transfer characteristics of apple slices. *Heat Mass Transfer*, 52(10): 2213-2221.
- 13-Bon, J., Rosselló, C., Femenia, A., Eim, V. & Simal, S. 2007. Mathematical Modeling of Drying Kinetics for Apricots: Influence of the External Resistance to Mass Transfer. *Drying Technology*, 25 (11): 1829-1835.
- 14-Doymaz, I. 2010. Effect of citric acid and blanching pre-treatments on drying and rehydration of Amasya red apples. *Food and Bioprocess Technology*, 88(2): 124-132.
- 15-Doymaz, I. 2004. Drying kinetics of white mulberry. *Journal of Food Engineering*, 61(3): 341-346.
- 16-Eren, I., Yıldız-Turp, G., Kaymak-Ertekin, F. & Serdaroglu, M. 2008. The Effect of External Mass Transfer Resistance during Drying of Fermented Sausage. *Drying Technology*, 26(12): 1543-1551.
- 17-Jurendić, T. & Tripalo, B. 2011. Biot number-lag factor (Bi-G) correlation for tunnel drying of baby food. *African Journal of Biotechnology*, 10(59): 12676-12683.
- 18-Kaya, A., Aydin, O. & Demirtas, C. 2007. Drying kinetics of red delicious apple. *Biosystem Engineering*, 96(4): 517-524.
- 19-Krokida, M.K. & Maroulis, Z.B. 1997. Effect of Drying Method on Shrinkage and Porosity. *Drying Technology*, 15(10): 2441-2458.
- 20-Lin, Y.L., Li, S.J., Zhu, Y., Bingol, G., Pan, Z. & Tara H.M. 2009. Heat and Mass Transfer Modeling of Apple Slices under Simultaneous Infrared Dry Blanching and Dehydration Process. *Drying Technology*, 27 (10): 1051-1059.
- 21-Maskan, M. 2001. Drying Shrinkage and Rehydration Characteristics of Kiwifruits during Hot Air and Microwave Drying. *Journal of Food Engineering*, 48 (2): 177-182.
- 22-Minaei, S., Motevali, A., Najafi, G. & Mousavi Seyedi, S.R. 2011. Influence of drying methods on activation energy, effective moisture diffusion and drying rate of pomegranate arils (*Punica Granatum*). *Australian Journal of Crop Science*, 6(4): 584-591.
- 23-Mujumdar, A.S. 2000, *Drying Technology in Agriculture and Food Science*. Science Publisher, Inc. 313P.
- 24-Sacicic, K. & Elicin, A. 2006. Mathematical modeling of solar tunnel drying of thin layer organic tomato. *Journal of Food Engineering*, 173(3): 231-238.
- 25-Singh, B. & Gupta, A.K. 2007. Mass transfer kinetics and determination of effective diffusivity during convective dehydration of pre-osmosed carrot cubes. *Journal of Food Engineering*, 79(2): 459-470.
- 26-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. *Applied Acoustics*, 103: 148-156.
- 27-Tao, Y., Wang, P., Wang, Y., Kadam, S.U., Han, Y., Wang, J. & Zhou, J. 2016. Power ultrasound as a pretreatment to convective drying of mulberry (*Morus alba L.*) leaves: Impact on drying kinetics and selected quality properties. *Ultrasonics Sonochemistry*, 31: 310-318.
- 28-Tunde-Akintunde, T.Y. & Ogunlakin, G.O. 2011. Influence of drying conditions on the effective moisture diffusivity and energy requirements during the drying of pretreated and untreated pumpkin. *Energy Conversion and Management*, 52(2): 1107-1113.
- 29-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 Research International*, 40(1): 39-46.
- 30-Zielinska, M. & Michalska, A. 2016. Microwave-assisted drying of blueberry (*Vaccinium corymbosum L.*) fruits: Drying kinetics, polyphenols, anthocyanins, antioxidant capacity, colour and texture. *Food Chemistry*, 212: 671-680.

## Effect of the Different Pre-Treatments Thermal, Pulse, Chemical and Mechanical on the External Mass Transfer Coefficient Changes, Moisture Diffusion Coefficient and Activation Energy

Ali Motevali<sup>1\*</sup>, Fatemeh Zabihnia<sup>2</sup>

1- Assistant Professor, Department of Mechanics of Biosystem Engineering, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran

\* Corresponding author (a.motevali@sanru.ac.ir)

2- B.S Student, Department of Mechanics of Biosystem Engineering, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran

### Abstract

Analysis of internal and external mass transfer coefficient can be a useful means to control the drying process of food and agricultural products better. Accordingly, in this study, the effects of different treatments (thermal pretreatment by blanching, pulsed pretreatment with microwave radiation, mechanical pretreatment by ultrasound waves, and chemical pretreatment by osmotic dehydration) on the internal mass transfer coefficients (effective moisture coefficient), external mass transfer coefficients and activation energy were investigated. Experiments included three temperatures (45, 55 and 65 °C) and various pretreatments including thermal blanching with hot water (at 70, 80 and 90 °C), microwave pulses (90, 180 and 360 W), chemical osmosis (at 30, 50 and 70% concentrations), and mechanical ultrasound (at 15, 30 and 45 min intervals). The results showed that microwave and osmotic pretreatments had the largest and smallest effects on internal and external mass transfers compared with the control treatment. The highest internal ( $36.21 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ ) and external ( $3.49 \times 10^{-6} \text{ kg}_{\text{water}}/\text{m}^2\text{s}$ ) mass transfer values observed under 360 W microwave pretreatment with the drying temperature of 65 °C, whereas the lowest internal ( $7.61 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ ) and external ( $3.49 \times 10^{-6} \text{ kg}_{\text{water}}/\text{m}^2\text{s}$ ) values were observed in the control treatment at the drying temperature of 45 °C. The activation energy also ranged from 18.52 to 32.04 kJ/mol under various pretreatments and temperatures.

**Keywords:** Blanching, Mass Transfer Coefficient, Microwave, Osmotic, Ultrasound