



## تغییرات ضریب نفوذ مؤثر و انرژی فعال‌سازی در خشک کردن برگه‌ی سیب توسط مایکروویو و آون هوای داغ

سید جعفر هاشمی<sup>۱\*</sup>، آزاده رنجبر ندامانی<sup>۲</sup>، نیلوفر عبدی<sup>۳</sup>

۱- دانشیار گروه مکانیک بیوسیستم- دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری- مازندران.

۲- استادیار گروه مکانیک بیوسیستم- دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری- مازندران.

۳- گروه صنایع غذایی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری- مازندران.

### چکیده

### اطلاعات مقاله

#### تاریخ‌های مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۳/۱۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۵/۰۲

#### کلمات کلیدی:

انرژی فعال‌سازی،  
ضریب پخش مؤثر،  
مایکروویو،  
خشک کردن سیب

در این تحقیق، ضریب نفوذ مؤثر و انرژی فعال‌سازی سیب با رطوبت اولیه ۸۴٪ بر پایه‌ی تر در فرآیند خشک شدن یک و دو مرحله‌ای مورد بررسی قرار گرفت. به منظور جلوگیری از واکنش قهوه‌ای شدن آنزیمی، برش تهیه شده در اسید آسکوربیک ۱٪ به مدت ۵ دقیقه غوطه‌ور شد. نمونه‌های بدون آنزیم‌بری به عنوان نمونه کنترل در نظر گرفته شدند. نمونه‌ها به چهار روش خشک کردن هوای داغ با سه سطح دمای هوای خشک‌کن یک مرحله‌ای (۷۰ °C، ۶۰ و ۵۰) و دو مرحله‌ای (۷۰-۶۰، ۵۰-۶۰) و سه سطح توان مایکروویو یک مرحله‌ای (۳۶۰ W، ۱۸۰ و ۹۰) و دو مرحله‌ای (۳۶۰ W، ۱۸۰-۳۶۰ و ۹۰-۳۶۰) تا رسیدن به رطوبت ۲۰٪ خشک شدند. نتایج نشان دادند با افزایش توان مایکروویو، نرخ خشک کردن افزایش یافته و در نتیجه ضریب نفوذ مؤثر نیز افزایش می‌یابد. خروج بهتر رطوبت در خشک کردن دو مرحله‌ای بود. اثر آنزیم‌بری در خشک‌کن با هوای گرم تأثیر بسیار اندکی بر ضریب نفوذ مؤثر رطوبت داشت. در خشک کردن دو مرحله‌ای افزایش درجه حرارت تأثیر مهمی بر ضریب نفوذ مؤثر رطوبت نداشت. با افزایش توان مایکروویو، انرژی مورد نیاز برای شروع تبخیر رطوبت از ورقه‌های سیب کاهش یافت و این همان مفهوم انرژی فعال‌سازی است. در خشک کردن دو مرحله‌ای، بدون در نظر گرفتن پارامتر آنزیم‌بری، مناسب‌ترین ترکیب توان عبارت بود از ۹۰ و سپس ۳۶۰ W. آنزیم‌بری می‌تواند سبب کاهش میزان انرژی مورد نیاز برای شروع تبخیر گردد. مقایسه انرژی فعال‌سازی در خشک کردن دو مرحله‌ای با افزایش توان در هر مرحله منجر به کاهش انرژی فعال‌سازی گردید لیکن این تغییر در نمونه‌های آنزیم‌بری و بدون آنزیم‌بری تقریباً اختلاف چندانی را نشان نمی‌دهد. بنابراین، خشک کردن دو مرحله‌ای با آون و مایکروویو، سبب خروج بهتر رطوبت و کاهش انرژی مورد نیاز برای شروع تبخیر رطوبت از ورقه‌های سیب می‌گردد.

DOI: 10.22034/FSCT.19.127.281  
DOR: 20.1001.1.20088787.1401.19.127.27.0

\* مسئول مکاتبات:

szhash@yahoo.com

## ۱- مقدمه

کاربرد تکنولوژی مایکروویو در مواد غذایی و کشاورزی، به عنوان یک روش جایگزین در فرآوری این محصولات، به دلیل کاهش مصرف انرژی بی‌رویه برای خشک کردن، اثرات زیست محیطی داشته و مصرف انرژی فرآیند صنعتی را نیز کاهش می‌دهد. از طرفی میوه سیب از جمله محصولات باغی ارزشمند از لحاظ غذایی به شمار می‌آید، تولید آن در کشور از جایگاه بالایی در زمینه اشتغال‌زایی و ارزآوری برخوردار است. از قدیمی‌ترین روش‌های نگهداری مواد غذایی خشک کردن است، هدف از خشک کردن مواد غذایی ذخیره سازی طولانی مدت مواد غذایی، حداقل کردن نیازهای انبارداری و بسته‌بندی و به حداقل رساندن هزینه‌های حمل و نقل می‌باشد. عملیات خشک کردن تأثیر زیادی بر روی کیفیت و قیمت محصول می‌گذارد. تغییرات فیزیکی و بیوشیمیایی که در طول خشک کردن رخ می‌دهد، تأثیر مستقیم بر کیفیت محصولات غذایی دارد [۱ و ۲].

ضریب نفوذ مؤثر یا قابلیت انتشار رطوبت، عامل تأثیرگذار برای محاسبات و مدل‌سازی خشک کردن مواد غذایی، جذب و دفع رطوبت طی انبار مانی است. نفوذ به دو دسته نفوذ مولکولی و نفوذ متلاطم تقسیم می‌شود. نفوذ مولکولی به دلیل انتقال جرم از یک لایه مرزی که در شبکه ماده غذایی وجود دارد، از اهمیت بیشتری برخوردار است. ضریب نفوذ ماده فرآوری شده به دمای فرآیند، رطوبت، اندازه روزنه، ساختار و توزیع آن در مواد غذایی وابسته است. لذا با افزایش تخلخل ضریب نفوذ رطوبت افزایش می‌یابد [۴-۲]. در طول فرآیند خشک کردن ماده غذایی، بین نرخ خشک کردن و ضریب نفوذ مؤثر رابطه مستقیم وجود دارد.

انرژی فعال‌سازی به کم‌ترین انرژی مورد نیاز برای شروع تبخیر رطوبت از محصول اطلاق می‌شود [۵ و ۶]. انرژی فعال‌سازی به ساختار منافذ ماده غذایی بستگی دارد که به عنوان یکی از پارامترهای ساختمانی به شمار می‌رود. این پارامتر به نوع و مقدار مواد حل شده در آب بستگی دارد. همچنین خاصیت مذکور با مقدار رطوبت نسبت عکس دارد یعنی در مواد با رطوبت بالا، انرژی فعال‌سازی پایین‌تر می‌باشد [۷]. انرژی فعال‌سازی با استفاده از معادله آرنیوس محاسبه می‌شود و میزان آن برای محصولات مختلف کشاورزی بین ۱۱۰-۱۲۷ کیلوژول بر مول گزارش شده است [۸]. در مطالعه‌ای طباطبایی و همکاران (۲۰۱۴) تأثیر دو عامل مدت زمان پخت گندم و دمای خشک

کردن را بر روند خشک شدن ترخینه در خشک‌کن‌های داغ بررسی کردند. با افزایش مدت زمان پخت گندم، ضریب نفوذ افزایش یافت و میزان انرژی فعال‌سازی نمونه‌ها بین ۱۷/۹۴ تا ۳۷/۹۳ کیلوژول بر مول بود [۹]. عظیمی نژادیان و هوشیار (۲۰۲۰) اثر استفاده از مایکروویو را بر خشک کردن سیب‌زمینی بررسی کرده و دریافتند راندمان انرژی فرآیند با افزایش توان مایکروویو و کاهش ضخامت نمونه‌ها بهبود می‌یابد [۱۰]. پورفلاح و همکاران (۲۰۱۲) اثر دمای هوا و ضخامت سیب زمینی ترشی را در یک خشک‌کن هوای داغ بررسی کردند. ضریب نفوذ مؤثر رطوبت بین  $5/13 \times 10^{-9}$  تا  $1/2 \times 10^{-8}$  متغیر بود، که با افزایش دما افزایش و با افزایش ضخامت کاهش پیدا کرد و میزان انرژی فعال‌سازی از ۲۳/۳۷ تا ۳۱/۹۳ کیلوژول بر مول بوده است [۱۱]. عباس زاده و متولی (۲۰۱۰) نیز تأثیر جریان هوای داغ با سه سطح دما و سرعت هوا بر روی میوه سنجد را بررسی کردند. افزایش دمای هوا منجر به افزایش میزان ضریب نفوذ گشت لیکن سرعت هوا تأثیر عکس داشته است. انرژی فعال‌سازی با کاهش سرعت هوا افزایش یافت [۱۲]. طاهری و همکاران (۲۰۱۰) نشان دادند در خشک کردن لایه‌های نازک ریحان، دمای خشک‌کن، سرعت هوا و رطوبت نسبی هوای ورودی تأثیر چشم‌گیری بر روی ضریب نفوذ و انرژی فعال‌سازی دارد [۱۳]. محمدی و همکاران (۲۰۰۸) نشان دادند که اثر دمای خشک‌کن و ضخامت لایه‌ها روی ضریب نفوذ و انرژی فعال‌سازی ورقه‌های نازک کیوی مؤثر می‌باشد [۱۴]. هدف از این مطالعه، بررسی اثر خشک‌کن و دمای خشک کردن بر ضریب نفوذ مؤثر و انرژی فعال‌سازی سیب می‌باشد.

## ۲- مواد و روش‌ها

## ۲-۱- آماده سازی نمونه‌ها

ابتداسیب‌های رقم گلدن دلشز (*Yellow Delicious*) از باغات حومه تهران خریداری شد. به منظور یکنواخت‌سازی نمونه‌ها، سیب‌های آسیب دیده به صورت دستی جداسازی شدند. بعد از سنجش رطوبت اولیه (بر پایه تر ۸۰٪) در یخچال در دمای  $4^{\circ}\text{C}$  نگهداری شده و نیم ساعت قبل از شروع آزمایش از یخچال خارج گردیدند. سیب‌های مورد استفاده بعد از پوست‌گیری دستی با استفاده از قالب فلزی به ضخامت ۵ میلی‌متر و قطر ۳۶ میلی‌متر به شکل دایره برش داده شدند. به

$$k_1 = \pi^2 \frac{D_{eff}}{l_0^2} \quad (3)$$

با توجه به تابعیت ضریب نفوذ به دما، برای تعیین انرژی فعال‌سازی هر تیمار از شکل اصلاح شده معادله آرنیوس (۴) استفاده شد [۱۵ و ۱۶]. در این معادله از ارتباط بین آهنگ ثابت سنتیک خشک شدن و نسبت توان خروجی مایکروویو به وزن نمونه استفاده شد.

$$D = D_0 \exp\left(-\frac{E_a m}{p}\right) \quad (4)$$

که در آن  $D$  ثابت خشک شدن که از معادله پیچ به دست می‌آید و  $D_0$  ضریب نفوذ در دمای مبنا  $E_a$ ،  $(m/s^2)$  انرژی فعال‌سازی  $p$ ،  $(w/g)$  توان خروجی مایکروویو و  $m$  وزن نمونه‌ها می‌باشد [۱۷].

برای محاسبه انرژی فعال‌سازی در آن از مدل آرنیوس طبق رابطه (۵) استفاده شد.

$$D_{eff} = D_0 \exp\left(-\frac{E_a}{R_g T}\right) \quad (5)$$

که در آن  $T$  دمای داخل محفظه خشک‌کن بر حسب کلین،  $R_g$  ثابت جهانی گازها  $(8.314 \text{ kJ/mol})$  و  $D_0$  دمای مبنا که مقدار آن ثابت می‌باشد. با لگاریتم‌گیری از رابطه (۵) به معادله (۶) دست می‌یابیم:

$$\ln D_{eff} = \ln D_0 - \frac{E_a}{R_g T} \quad (6)$$

با رسم نمودار  $\ln D_{eff}$  در مقابل  $\frac{1}{T}$  خطی با شیب  $K_2$  بدست می‌آید. لذا انرژی فعال‌سازی از رابطه (۷) محاسبه می‌شود [۱۸].

$$K_2 = \frac{E_a}{R_g} \quad (7)$$

### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- ضریب نفوذ مؤثر

مقادیر ضریب نفوذ مؤثر ( $D_{eff}$ ) در توان‌های مختلف مایکروویو یک مرحله و دو مرحله‌ای با استفاده از رابطه (۴) به دست آمده است. تغییرات ضریب نفوذ مؤثر نسبت به توان مایکروویو نمونه‌های آنزیم‌بری شده بدون آنزیم‌پریدر شکل (۱) نشان داده می‌شود. مقادیر ضریب نفوذ مؤثر رطوبت برش‌های سیب آنزیم‌بری شده

منظور جلوگیری از واکنش قهوه‌ای شدن آنزیمی، برش تهیه شده در اسید آسکوربیک ۱٪ به مدت ۵ دقیقه غوطه‌ور شد. نمونه‌های بدون آنزیم‌بری به عنوان نمونه کنترل در نظر گرفته شدند.

نمونه‌ها به چهار روش خشک کردن هوای داغ با سه سطح دمای هوای خشک‌کن یک مرحله‌ای ( $70^\circ\text{C}$ ،  $60^\circ\text{C}$  و  $50^\circ\text{C}$ ) و دو مرحله‌ای ( $70^\circ\text{C}$ – $60^\circ\text{C}$ ،  $70^\circ\text{C}$ – $50^\circ\text{C}$ ،  $60^\circ\text{C}$ – $50^\circ\text{C}$ ) و سه سطح توان مایکروویو یک مرحله‌ای ( $360\text{W}$ ،  $180$  و  $90$ ) و دو مرحله‌ای ( $360\text{W}$ – $180$ ،  $180$ – $90$  و  $90$ – $180$ ) تا رسیدن به رطوبت ۲۰٪ خشک شدند [۶]. سنجش رطوبت در خشک کردن دو مرحله‌ای به گونه‌ای است که رطوبت محصول به میزان ۵۰٪ رطوبت اولیه کاهش یافت. از دما یا توان اولیه به دما و توان در نظر گرفته شده ثانویه تغییر می‌یابد. سپس ضریب نفوذ و انرژی فعال‌سازی مورد بررسی و محاسبه قرار گرفت.

#### ۲-۲- محاسبه ضریب نفوذ و انرژی فعال‌سازی

برای محاسبه ضریب نفوذ مؤثر ( $D_{eff}$ ) از معادله فیک<sup>۱</sup> برای اجسام کروی به شرح معادله (۱) استفاده می‌شود:

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_o - M_e} = \frac{6}{\pi^2} \exp\left[-\frac{\pi^2 D_{eff} t}{l^2}\right] \quad (1)$$

در این معادله،  $MR$  نسبت رطوبت (بدون بعد)،  $D_{eff}$  ضریب نفوذ  $(m/s^2)$ ،  $t$  زمان (ثانیه)،  $M_t$  رطوبت در هر لحظه  $t$ ،  $M_e$  رطوبت تعادلی،  $M_o$  رطوبت اولیه که به صورت کیلوگرم بر کیلوگرم ماده خشک محاسبه می‌شود. همچنین  $l$  ضخامت برگه سیب است که در طول دوره خشک کردن ثابت در نظر گرفته می‌شود.

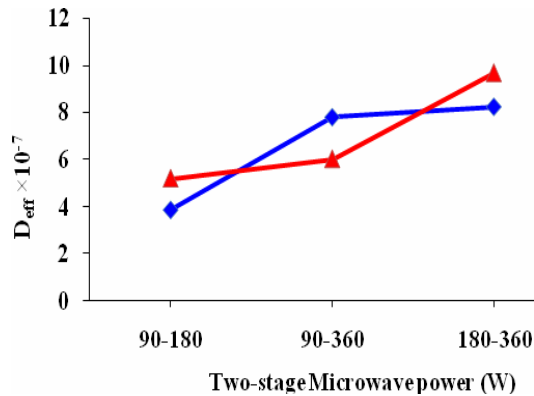
با گرفتن لگاریتم از طرفین معادله (۱) می‌توان معادله را به صورت خطی طبق معادله ۲ نوشت:

$$\ln\left(\frac{M_t - M_e}{M_o - M_e}\right) = \ln(MR) = \ln\left(\frac{6}{\pi^2}\right) - \left(\pi^2 \frac{D_{eff} t}{l^2}\right) \quad (2)$$

با رسم لگاریتم  $\ln(MR)$  از داده‌های به دست آمده در مقابل زمان، ضریب زاویه خط با شیب  $k_1$  به دست آمد و سپس ضریب نفوذ ( $D_{eff}$ ) مربوطه محاسبه گردید. از مساوی قرار دادن شیب خط با ضریب  $t$  در رابطه (۱)، ضریب نفوذ مؤثر از رابطه (۳) محاسبه می‌شود.

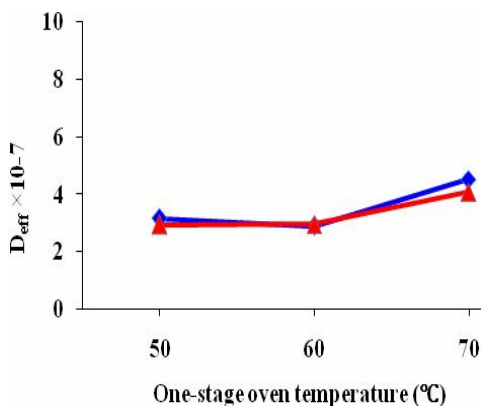
1. Fick

همکاران (۲۰۱۰)، کارازیان و دلیری (۲۰۱۶) مطابقت داشت [۱۹ و ۲۰].



**Fig 2** Changes in effective moisture diffusivity with microwave power in two-stage drying (—◆— for blanched samples and —▲— for unblanched samples)

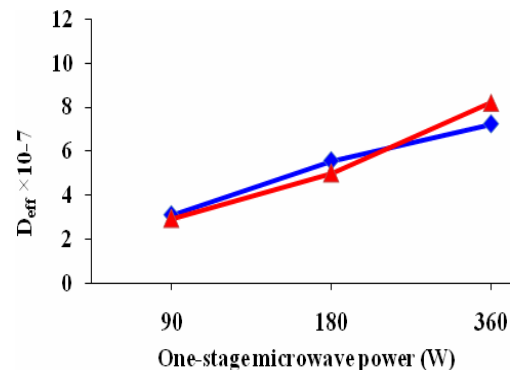
مقادیر ضریب نفوذ مؤثر ( $D_{eff}$ ) در دماهای مختلف آون یک مرحله‌ای و دو مرحله‌ای با استفاده از رابطه (۴) به دست آمده است. تغییرات ضریب نفوذ مؤثر نسبت به دمای آون را در نمونه‌های آنزیم‌بری شده و بدون آنزیم‌بری در شکل (۳) نمایش داده شد.



**Fig 3** Changes in effective moisture diffusivity with oven temperatures in one-stage drying (—◆— for blanched samples and —▲— for unblanched samples)

در فرآیند خشک کردن برش‌های سیب آنزیم‌بری شده با آون یک مرحله‌ای، با افزایش دما از  $50^{\circ}\text{C}$  تا  $60^{\circ}\text{C}$  تغییر محسوسی در ضریب نفوذ مؤثر رطوبت مشاهده نگردید. افزایش دما از  $50^{\circ}\text{C}$  به  $70^{\circ}\text{C}$ ، مقادیر ضریب نفوذ مؤثر رطوبت از  $3/18 \times 10^{-7}$  تا  $4/53 \times 10^{-7}$  تغییر کرد که این معادل افزایش ۴۲ درصدی را نشان

در فرآیند خشک کردن یک مرحله‌ای میکروویو در توان‌های  $90\text{W}$  تا  $360\text{W}$  از  $3/11 \times 10^{-7}$  تا  $7/24 \times 10^{-7}$  معادل ۱۳۰ درصد افزایش را نشان می‌دهد. همچنین در نمونه بدون آنزیم‌بری، ضریب نفوذ از  $2/94 \times 10^{-7}$  تا  $8/21 \times 10^{-7}$  تغییر کرد. مقادیر  $D_{eff}$  برای نمونه‌های آنزیم‌بری شده و کنترل به طور فزاینده‌ای با افزایش توان میکروویو افزایش یافت. مقدار ضریب نفوذ در توان‌های  $90\text{W}$  و  $180\text{W}$  برای نمونه بدون آنزیم‌بری کمتر از نمونه‌های آنزیم‌بری شده بود لیکن در توان  $360\text{W}$  نمونه بدون آنزیم‌بری بیشترین مقدار ضریب نفوذ را نشان می‌دهد. در مجموع با افزایش توان میکروویو، نرخ خشک کردن افزایش یافته و بالطبع ضریب نفوذ مؤثر نیز افزایش می‌یابد که این نتایج در خشک کردن یک مرحله‌ای با میکروویو با یافته‌های اوکوس و همکاران (۱۹۹۲) مطابقت دارد.



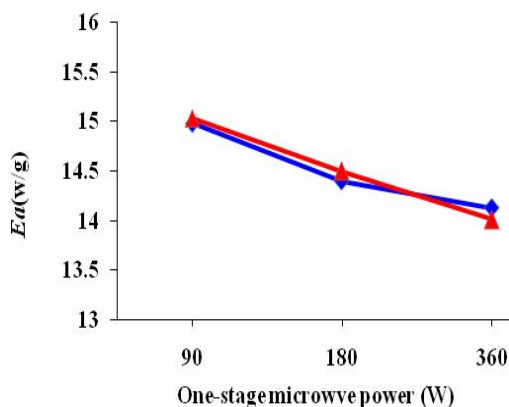
**Fig 1** Changes in effective moisture diffusivity with microwave power in one-stage drying (—◆— for blanched samples and —▲— for unblanched samples)

نتایج یافته‌های ضریب نفوذ مؤثر  $D_{eff}$  برای نمونه آنزیم‌بری شده بدون آنزیم‌بری در روش میکروویو دو مرحله‌ای در توان‌های تعیین شده در شکل (۲) نشان داده شده است. تمایل در افزایش  $D_{eff}$  در نمونه‌های آنزیم‌بری شده همانند خشک کردن یک مرحله‌ای است و میزان این تغییرات از  $3/89$  تا  $8/26$  است که معادل ۱۱۰ درصد افزایش را نشان می‌دهد. این میزان در نمونه‌های بدون آنزیم‌بری از  $5/20$  تا  $9/70$  معادل ۸۵ درصد افزایش با افزایش توان میکروویو می‌باشد.

در مقایسه توان حداکثری  $360\text{W}$  در خشک کردن دو مرحله‌ای نسبت به یک مرحله‌ای، افزایش ۲۰ درصدی در ضریب نفوذ مؤثر مشاهده گردید. این بیان‌گر خروج بهتر رطوبت در خشک کردن دو مرحله‌ای می‌باشد. نتایج به دست آمده با نتایج متولی و

### ۳-۲- انرژی فعال سازی

نتایج حاصل از مقایسه انرژی فعال سازی نمونه‌ها در توان‌های مختلف مایکروویو یک مرحله‌ای در شکل (۵) نشان داده شده است.



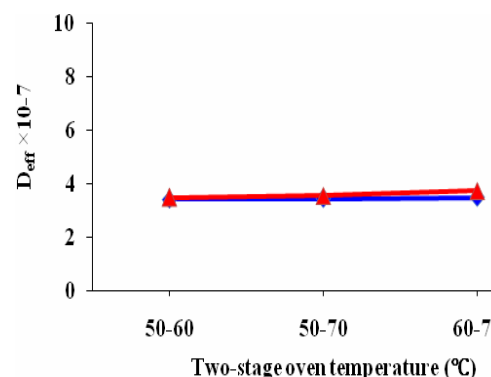
**Fig 5** Changes in activation energy ( $E_a$ ) with microwave power in one-stage drying

(—●— for blanched samples and —▲— for unblanched samples)

داده‌ها نشان می‌دهند که با افزایش توان مایکروویو مقدار انرژی فعال سازی در مایکروویو از  $14/98W$  تا  $14/13$  بر گرم در نمونه آنزیم‌بری شده و از  $15W$  تا  $14$  بر گرم در نمونه بدون آنزیم‌بری کاهش یافت. بدین معنی که با افزایش توان مایکروویو، انرژی مورد نیاز برای شروع تبخیر رطوبت از ورقه‌های سیب کاهش یافت و این همان مفهوم انرژی فعال سازی است. طبق گزارشات کاراژیان و دلیری (۲۰۱۶)، قادری و همکاران (۲۰۱۲)، کاوه و همکاران (۲۰۱۹) [۲۲] افزایش توان مایکروویو موجب کاهش انرژی فعال سازی شده است، که با نتایج این پژوهش مطابقت دارد. مقدار انرژی فعال سازی نمونه‌ها در توان‌های مختلف مایکروویو دو مرحله‌ای در شکل (۶) نشان داده شده است. مقدار انرژی فعال سازی از  $15/2$  تا  $14/5$  در نمونه آنزیم‌بری شده و  $15/7W$  تا  $14/4$  بر گرم در نمونه بدون آنزیم‌بری می‌باشد. در نمونه‌های خشک شده با توان ۹۰ و سپس  $360W$  بدون در نظر گرفتن پارامتر آنزیم‌بری، مناسب‌ترین توان برای خشک کردن دو مرحله‌ای می‌باشد که در آن پایین بودن انرژی اولیه خشک کردن و همچنین انرژی فعال سازی پایین از مزیت‌های مهم فرآیند می‌باشد.

می‌دهد. موسیگاو اولوال در سال ۲۰۰۵ برای توضیح انتقال رطوبت برگ کلم، مدل پخش فیکرا مورد استفاده قرار دادند. نتایج، نشان‌داد مقدار ضریب پخش مؤثر در نمونه‌های خشک شده در دماهای بین  $30^{\circ}C$  تا  $60$  و سرعت هوای یک متر بر ثانیه، افزایش  $2/5$  برابری را گزارش نمودند. که نشان دهنده اثر دمای هوای خشک‌کن، روی پدیده‌ی پخش می‌باشد. مقادیر  $D_{eff}$  برای نمونه‌های آنزیم‌بری شده و کنترل با افزایش دمای آن افزایش یافت. اثر آنزیم‌بری در خشک‌کن با هوای گرم تأثیر بسیار اندکی بر ضریب نفوذ مؤثر رطوبت دارد.

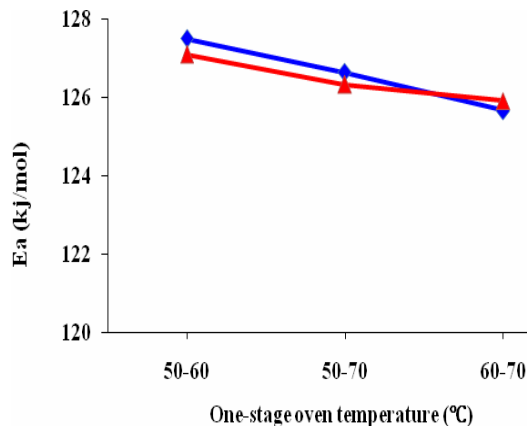
مقادیر ضریب نفوذ مؤثر رطوبت در دو مرحله‌ای در دماهای  $50-60^{\circ}C$ ،  $50-70$ ،  $60-70$  در شکل (۴) ارائه گردید. مقدار ضریب نفوذ مؤثر رطوبت از  $3/41 \times 10^{-7}$  تا  $3/72 \times 10^{-7}$  برای نمونه آنزیم‌بری شده و  $3/47 \times 10^{-7}$  تا  $3/72 \times 10^{-7}$  برای نمونه بدون آنزیم‌بری تغییر کرد. میزان نسبی این تغییرات بین ۲ تا ۷ درصد می‌باشد. در خشک کردن دو مرحله‌ای با آن هوای گرم تغییرات اندکی با تغییر در درجه حرارت مشاهده گردید که این نشان‌دهنده این است که در خشک کردن دو مرحله‌ای افزایش درجه حرارت تأثیر مهمی بر ضریب نفوذ مؤثر رطوبت ندارد [۲۱]. نتایج به دست آمده با یافته‌های طباطبایی و همکاران (۲۰۱۴)، پورفلاح و همکاران (۲۰۱۲)، طاهری و همکاران (۲۰۱۱) مطابقت داشت.



**Fig 4** Changes in effective moisture diffusivity with oven temperatures in two-stage drying (—●— for blanched samples and —▲— for unblanched samples)

مقدار انرژی فعال‌سازی از ۱۲۷/۵ تا ۱۲۵/۷ کیلوژول بر مول در نمونه آنزیم‌بری شده و ۱۲۷/۱ تا ۱۲۵/۹ کیلوژول بر مول در نمونه بدون آنزیم‌بری می‌باشد. با افزایش توان در هر مرحله منجر به کاهش انرژی فعال‌سازی گردید. لیکن این تغییر در نمونه‌های آنزیم‌بری و بدون آنزیم‌بری تقریباً اختلاف چندانی را نشان نمی‌دهد. براساس یافته‌های محمدی و همکاران (۲۰۰۸)، عباس زاده و متولی (۲۰۱۰)، افزایش دمای خشک‌کن هوای داغ موجب کاهش انرژی فعال‌سازی شده است، که با نتایج این پژوهش مطابقت دارد.

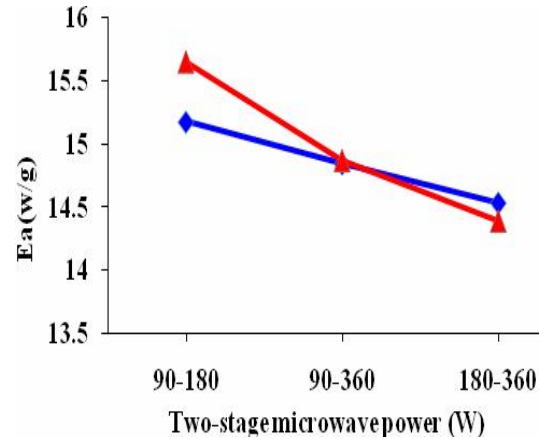
شکل (۸) نتایج حاصل از مقایسه انرژی فعال‌سازی در خشک کردن دو مرحله‌ای نمونه‌ها در آون را نشان می‌دهد.



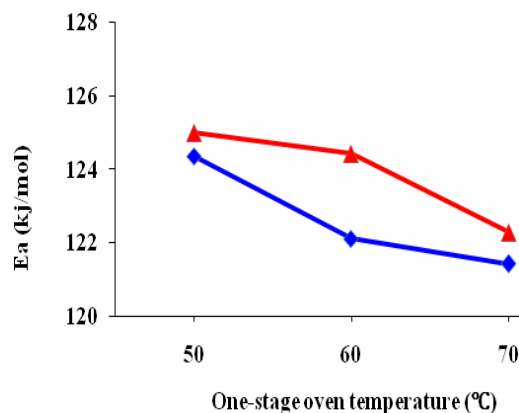
**Fig 8** Changes of activation energy (Ea) with oven temperatures in two-stage drying (—◆— for blanched samples and —▲— for unblanched samples)

#### ۴- نتیجه گیری

دمای هوای داغو توان میکروویو از عوامل مهم و تأثیرگذار در میزان ضریب نفوذ مؤثر و انرژی فعال‌سازی بودند. که در این میان افزایش دما و توان برای ضریب نفوذ مؤثر روند افزایشی داشته است و در توان ۳۶۰ W در خشک کردن دو مرحله‌ای نسبت به یک مرحله‌ای، افزایش ۲۰ درصد در ضریب نفوذ مؤثر مشاهده گردید. آنزیم‌بری در تمام تیمارهای خشک شده با میکروویو و آون سبب افزایش ضریب نفوذ مؤثر گردید. انرژی فعال‌سازی با افزایش دما و توان روند کاهشی یافت. کمترین مقدار انرژی فعال‌سازی در میکروویو یک مرحله در توان ۳۶۰ W نمونه بدون آنزیم‌بری و در دو مرحله در نمونه



**Fig 6** Changes in activation energy (Ea) with microwave power in two-stage drying (—◆— for blanched samples and —▲— for unblanched samples) شکل (۷) نتایج حاصل از مقایسه انرژی فعال‌سازی در خشک کردن نمونه‌های آنزیم‌بری شده و بدون آنزیم‌بری به صورت یک مرحله‌ای در آون را نشان می‌دهد. مقدار انرژی فعال‌سازی از ۱۲۵/۷ تا ۱۲۴/۴ کیلوژول بر مول در نمونه آنزیم‌بری شده و ۱۲۷/۱ تا ۱۲۲/۳ کیلوژول بر مول در نمونه بدون آنزیم‌بری تغییر نمود. داده‌ها نشان می‌دهد که با افزایش درجه حرارت هوای گرم میزان انرژی فعال‌سازی کاهش یافت. میزان انرژی فعال‌سازی در نمونه آنزیم‌بری شده کمتر از نمونه‌های بدون آنزیم‌بری می‌باشد و این شاخص در دمای ۶۰°C حداکثر اختلاف را نشان می‌دهد. این می‌تواند بیانگر این باشد که آنزیم‌بری می‌تواند سبب کاهش میزان انرژی مورد نیاز برای شروع تبخیر گردد.



**Fig 7** Changes in activation energy (Ea) with oven temperatures in one-stage drying (—◆— for blanched samples and —▲— for unblanched samples)



- [7] Tavakolipour (2007). Principles of food and agricultural products drying. Aeej. 100-150 (In Persian)
- [8] Chayjan, R. A., Parian, J. A., Esna-Ashari, M. (2011). Modeling of moisture diffusivity, activation energy and specific energy consumption of high moisture corn in a fixed and fluidized bed convective dryer. Spanish Journal of agricultural research, 9(1), 28-40.
- [9] Yazdi, F. T., Mohebbi, M., Mortazavi, S. A., Ghaitaranpour, A., Behbahani, B. A. (2014). Study on drying behavior, effective moisture diffusivity and activation energy of hot air-drying of different Tarkhineh formulations. Iranian Food Science and Technology Research Journal, 10(3), 219-223.
- [10] Azimi-Nejadian, H., Houshyar, E. (2020). Thermodynamic analysis of potato drying process in a microwave dryer, Food Science and Technology, 17(9), 1-12.
- [11] Poorfallah, Z., Nahardani, M., Salaminia, M., Noorian, S., Mohammadi, M. (2012). Kinetics of drying jerusalem artichoke (*Helianthus tuberosus* L.) slices by hot air convective drying. Innovations in Food Science and Technology 3 (4(10)), 1-12.
- [12] Motevali, A., Abbaszadeh, A. (2010). The effect of drying on effective moisture diffusivity and energy activation in senjed thin layer drying. The national congress of Agricultural Machinery. Shiraz university, Shiraz, Iran (in persian)
- [13] Garavand, A. T., Rafiee, S., Keyhani, A., Jafari, S. M. (2011). Effective moisture diffusivity and activation energy of basil in thin layer dryer during hot air drying. Innovations in Food Science and Technology, 2 (3(6)), 9-17.
- [14] Mohammadi, A., Rafiei, Sh., Keihani, A., Emam-jomeh, Z. (2008) Studying the drying model of kiwifruit with thin layer drying. 5<sup>th</sup> national congress of agricultural machinery. Mashhad. Iran. (In persian)
- [15] Falade, K. O., Abbo, E. S. (2007). Air-drying and rehydration characteristics of date palm (*Phoenix dactylifera* L.) fruits. Journal of Food Engineering, 79(2), 724-730.
- [16] Mujumdar, A. S. (2000). Drying technology in agriculture and food sciences: Science Publishers, Inc.

۳۶۰W-۹۰ مشاهده گردید، در آون یک مرحله‌ای کمترین مقدار در دما ۷۰°C و در دو مرحله ۵۰-۷۰ بهینه ترین حالت با در نظر گرفتن آنزیم‌بری نمونه و انرژی مصرفی می‌باشد. نهایتاً در خشک کردن با آون و مایکروویو بصورت دو مرحله‌ای، خروج رطوبت بهتر و انرژی مورد نیاز برای شروع تبخیر رطوبت از ورقه‌های سیب کاهش می‌یابد.

## ۵- منابع

- [1] Beigi, M.(2022)Influence of blanching-freezing pre-treatment on moisture removal characteristics of microwave-dried potatoes,Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy,56 (1),45-57,DOI: 10.1080/08327823.2022.2029118
- [2] Malekjani, N., Emam-Djomeh, Z., Hashemabadi, S. H., and Askari, G. R. (2018). Modeling Thin Layer Drying Kinetics, Moisture Diffusivity and Activation Energy of Hazelnuts during Microwave-Convective Drying. *International Journal of Food Engineering*, 14 (2), 2017-0100. <https://doi.org/10.1515/ijfe-2017-0100>
- [3] Okos, M. R., Campanella, O., Narsimhan, G., Singh, R. K., Weitnauer, A. (2018). Food dehydration. In Handbook of food engineering. CRC Press, 799-950.
- [4] Tepe, B., Tepe, T. K., Ekinçi, A. (2022). Drying kinetics and energy efficiency of microwave-dried lemon slices. Chemical Industry & Chemical Engineering Quarterly. <https://doi.org/10.2298/CICEQ210125004T> .Article in press.
- [5] Aghbashlo, M., 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.
- [6] Abbasi, H., Layeghiniya, N., Mohammadi, S., Karimi, S. (2022). Effect of fruit thickness on microwave drying characteristics of *Myrtus communis* L. Iranian Journal of Chemistry and Chemical Engineering (IJCCE). Article in press.

- [20] Karajian, H., Daliri, N. (2016) The effect of microwave pretreatment on mass transfer kinetics in eggplant during deep frying. *Innovation in Food Science and Technology*. 8(2), 103-110. (In Persian)
- [21] Shahidi F, Maleki, M. (2019). Evaluation of Turnip slice phenolic component increasing by osmosis treatment in Roselle extract and investigation of its hot-air drying kinetics. *FSCT*.16 (88), 231-242.
- [22] Kaveh, M., Jahanbakhshi, A., Golpour, I., Mesri Gandshmin, T., Abbaspour-Gilandeh Y., Jahedi Rad .S. (2019). *Journal of food science and technology*(Iran). 16 (88), 201-219.
- [17] Dadalı, G., Kılıç Apar, D., Özbek, B. (2007). Microwave drying kinetics of okra. *Drying Technology*, 25(5), 917-924.
- [18] Izadi NajafAbadi, L., Hamdami, N., Mohammadi, S. A. (2009) Determination of moisture penetration coefficient in Iranian white cheese. *The Science of Agricultural and Natural Resources*. 15-25. (In Persian)
- [19] Motevali, A., Minaei, S., Khoshtaghaza, M. H., Kazemi, M., Nikbakht, A. M. (2010). Drying of Pomegranate Arils: comparison of prediction from mathematical models and neural networks. *International Journal of Food Engineering*, 6(3), 15.





## Changes in Effective Moisture Diffusivity and Activation Energy During the Drying of Apple Fruit (*Yellow Delicious*) with Microwave and Oven

Hashemi, S. j. <sup>1\*</sup>, Ranjbar Nedamani, A. <sup>2</sup>, Abdi, N. <sup>3</sup>

1. Associate Prof. of Biosystem Engineering Dept. in the Sari Agricultural Sciences & Natural Resources University, Sari, Iran.
2. Assistant Prof. of Biosystem Engineering Dept. in the Sari Agricultural Sciences & Natural Resources University, Sari, Iran.
3. Food Industry Department, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran.

### ABSTRACT

In this study, the effective moisture diffusivity and activation energy of apples with 84 w.b moisture during one- and two-stage drying were investigated. The blanching was done at 5 minutes in 1% ascorbic acid to brown inhibition. The un-blanching samples were controlled. Drying ran with four methods. Two methods consist of oven drying through one stage at 50, 60, and 70 °C, two-stage at (50-60, 50-70, 60-70 °C), and microwave drying with one stage (90, 180, and 360 W) and two-stage in (90-180, 90-360, 180-360 W) treatments. The equilibrium moisture was 20%. In two-stage drying, when the moisture of samples reached 50% on initial moisture, the temperature or power changed to next. The effective moisture diffusivity and activation energy were calculated as results. Results show when the microwave power increases, the drying rate and thus the effective moisture diffusivity increase. The moisture removal is better in two-stage drying. The blanching has a lower effect on effective moisture diffusivity in hot air drying. The temperature had no significant effect on effective moisture diffusivity during two-stage drying. During drying with microwave, increasing power reduced the needed energy for removing the moisture from the apple surface which shows the activation energy. Without considering the blanching process in two-stage dried samples, the best power of microwave was 90 W and then 360 W. In this power, the low initial energy for drying and low activation energy are the important benefits of drying. Blanching can reduce the amount of needed energy for starting the evaporation of water. In two-stage drying, increasing the power leads to decreasing the activation energy, without considering the blanching process. Finally, drying of samples with oven and microwave in two stages caused better emission of moisture and reduction of the required energy for starting moisture evaporation in apple sheets.

### ARTICLE INFO

#### Article History:

Received 2022/ 06/ 01

Accepted 2022/ 07/ 24

#### Keywords:

Activation energy,  
Effective moisture diffusivity,  
Microwave,  
Apple drying

DOI: 10.22034/FSCT.19.127.281

DOR: 20.1001.1.20088787.1401.19.127.27.0

\*Corresponding Author E-Mail:  
szhash@yahoo.com