

مقاله پژوهشی

ارزیابی برخی ویژگی‌های ترمودینامیکی و فیزیکی برش‌های مختلف سیر تحت خشک‌کردن به روش مایکروویو با پیش‌ تیمار فراصوت

ابراهیم تقی نژاد^{۱*}، محمد کاوه^۲

۱. دانشیار دانشگاه محقق اردبیلی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی مغان، گروه مهندسی و فناوری کشاورزی

۲. دانشجوی دکتری، دانشگاه محقق اردبیلی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، گروه مهندسی بیوسیستم

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۱/۰۹، تاریخ آخرین بازنگری: ۱۳۹۹/۰۲/۲۸، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۳/۲۶)

چکیده

سیر دارای خواص فراوان دارویی، در صنعت غذایی است. در پژوهش حاضر، تأثیر پیش تیمار فراصوت (در سه سطح زمانی ۱۰، ۲۰ و ۳۰ min) بر برخی ویژگی‌های ترمودینامیکی و فیزیکی سیر خشک شده با استفاده از مایکروویو در توان‌های مختلف (۱۰۰ W، ۲۰۰ و ۳۰۰) و ضخامت‌های متفاوت (۲، ۴ و ۶ mm) مورد بررسی قرار گرفت. برای توصیف نسبت رطوبت طی خشک‌کردن سیر از ۱۰ مدل ریاضی استفاده شد. نتایج حاصل از این بررسی نشان داد که مقدار انرژی مصرفی ویژه با افزایش زمان فراصوت، توان مایکروویو و همچنین با کاهش ضخامت نمونه‌ها، به طور معنی‌داری ($P < 0.05$) روند کاهشی داشت. برازش مدل‌های ریاضی نرخ خشک‌کردن با داده‌های تجربی نشان داد که مدل لجستیک می‌تواند به‌طور رضایت‌بخشی منحنی نرخ خشک‌کردن سیر خشک شده را در خشک‌کن مایکروویو با پیش تیمار فراصوت در ضریب همبستگی (R^2)، ۰/۹۹۹۶، حداقل ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، ۰/۱۱۳ و چی-اسکوار (χ^2) ۰/۰۰۰۹ توصیف کند. ضریب پخش رطوبت نمونه‌های خشک‌شده بین $8/04 \times 10^{-11}$ تا $1/64 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ مشاهده شد. بالاترین و پایین‌ترین مقدار انرژی مصرفی ویژه به ترتیب ۱۱۳/۳۳ و ۹/۰۸ kWh/kg به دست آمد. نتایج نشان داد که افزایش توان مایکروویو، زمان پیش تیمار فراصوت و کاهش ضخامت نمونه‌ها منجر به کاهش معنی‌دار ($P < 0.05$) چروکیدگی گردید. با کاهش توان مایکروویو، ضخامت نمونه‌ها و همچنین افزایش زمان فراصوت مقدار ارزش رنگ به طور معنی‌داری ($P < 0.05$) روند کاهشی داشت.

واژه‌های کلیدی: انرژی مصرفی ویژه، چروکیدگی، سیر، فراصوت، مایکروویو

۱. مقدمه

توسعه خشک‌کن‌های جدید و استفاده از فن‌آوری‌های نوین به عنوان جایگزین روش‌های سنتی برای برطرف کردن نیازهای بازار و مشتری، جهت عرضه محصولات با کیفیت و همچنین کاهش مصرف انرژی انجام می‌شود [۱۱]. استفاده از امواج فراصوت به عنوان پیش تیمار در فرآیند خشک‌کردن می‌تواند موجب اصلاح ساختاری محصول شده و در نتیجه سرعت خروج رطوبت را افزایش می‌دهد [۲]. امواج فراصوت می‌توانند باعث انقباض و انبساط پی‌درپی بافت محصول گردد. نیروی حاصل از این پدیده مکانیکی در محصول می‌تواند بزرگ‌تر از نیروی کشش سطحی و نگه دارنده آب در لوله‌های موئین بافت محصول شده و بنابراین منجر به تشکیل کانال‌های میکروسکوپی و خروج آسان‌تر آب از محصول گردد. در روش استفاده از پیش تیمار فراصوت در فرآیند خشک‌کردن، محصول و یا برش‌های آن در آب قرار گرفته تا امکان موج دهی به وجود آید. از مهم‌ترین مزیت این روش می‌توان به کاربرد آن در دمای معمولی و کاهش آسیب به بافت محصول را اشاره کرد [۱۱-۱۲].

سزادزینسکا و همکاران (۲۰۱۹)، تأثیر استفاده پیش تیمار فراصوت با دو نوع خشک‌کن میکروویو و هوای گرم را بر برخی از پارامترهای خشک شدن (سینتیک، چروکیدگی، انرژی مصرفی ویژه و نسبت باز جذب) میوه تمشک مورد بررسی و بیان کرده‌اند که استفاده از پیش تیمار فراصوت، انرژی مصرفی ویژه و چروکیدگی را در هر دو نوع خشک‌کن کاهش داد [۱۳]. عباسپور و همکاران (۲۰۱۹)، سینتیک خشک شدن، انرژی مصرفی ویژه، رنگ و چروکیدگی مغز گردو را با استفاده از دو نوع خشک‌کن هوای گرم و مایکروویو با پیش تیمار فراصوت بررسی کرده‌اند. آن‌ها گزارش داده‌اند که استفاده از پیش تیمار فراصوت موجب کاهش زمان خشک‌کردن نمونه نسبت به تیمار شاهد گردید. همچنین استفاده از پیش تیمار فراصوت در هر دو نوع خشک‌کن هوای گرم و مایکروویو مقدار ضریب پخش رطوبت مؤثر را افزایش داده و انرژی مصرفی ویژه را کاهش داد [۸]. دهقانیا و همکاران (۲۰۱۹)، تأثیر استفاده از پیش تیمار فراصوت در خشک‌کردن برش‌های سیب‌زمینی در خشک‌کن مایکروویو- هوای گرم و همچنین اندازه‌گیری محتوای

سیر^۱ دارای خواص ضد سرطان، ضد قارچ، ضد میکروبی، ضد باکتری و ضدالتهاب است و به‌عنوان یک آنتی‌اکسیدان قوی عمل می‌کند [۱]. در دهه گذشته، تقاضای جهانی برای سیر خشک شده به‌طور مداوم در حال افزایش بود، زیرا سیر خشک شده می‌تواند به عنوان طعم دهنده در غذاهای پیش‌ساخته و غذاهای فوری، چپیس، سوپ، سس مایونز و سس گوجه‌فرنگی، سس سالاد، سوسیس‌ها و ترشی مورد استفاده قرار گیرد [۲]. خشک‌کردن یکی از قدیمی‌ترین روش‌های نگهداری محصولات کشاورزی است. فرآیند خشک‌کردن علاوه بر کاهش سرعت فساد ماده غذایی توسط میکروارگانیسم‌ها یا واکنش‌های شیمیایی، سبب کاهش وزن و حجم ماده غذایی می‌شود که همین امر سبب سهولت و صرفه‌جویی در بسته‌بندی، حمل‌ونقل و انبارداری می‌گردد [۳-۴].

فرآیند خشک‌کردن موجب ایجاد تغییراتی در بافت، عطر و طعم، ارزش تغذیه‌ای و رنگ نهایی محصول خشک شده می‌شود و بررسی میزان این تغییرات و سعی در کاهش اثرات نامطلوب فرآیند، از نکات قابل توجه در خشک‌کردن محصولات غذایی است [۵]. رنگ یکی دیگر از ویژگی‌های کیفی مهم در محصولات خشک شده می‌باشد. بر این اساس، رنگ به همراه طعم و بافت نقش مهمی در مقبولیت محصول توسط مصرف‌کننده بازی می‌کند [۶]. یکی از مهم‌ترین تغییرات فیزیکی که در زمان خشک شدن مواد غذایی همراه با خروج رطوبت از ماده غذایی رخ می‌دهد، کاهش حجم پوسته خارجی یا چروکیدگی می‌باشد؛ زیرا انتقال جرم و حرارت همزمان در هنگام خشک شدن مواد غذایی، تنش‌هایی در ساختار سلولی مواد غذایی ایجاد می‌کند که منجر به تغییر شکل و چروکیدگی می‌شود [۷]. در سال‌های اخیر پژوهش‌های فراوانی در ارتباط با تغییرات سینتیک، انرژی مصرفی، رنگ و چروکیدگی در محصولات مختلف کشاورزی از جمله کلم بروکلی [۴]، سیب‌زمینی [۳]، گردو [۸]، کیوی [۹]، سیب [۱۰]، تمشک [۱۱]، بادام [۱۲]، هویج [۱۳] انجام شده است.

1. *Allium sativum* L.

سیر، ۳ نمونه ۳۰ g از نمونه‌ها به صورت تصادفی از یخچال بیرون آورده و بلافاصله وزن گردید. سپس در دمای $1 \pm ^\circ\text{C}$ به مدت ۲۴ h توسط آون (ممرت مدل یوان ای ۵۰۰) خشک شد. بعد از به دست آمدن وزن نهایی، رطوبت اولیه نمونه‌های سیر بر مبنای وزن خشک از رابطه (۱) محاسبه شد. مقدار رطوبت اولیه سیر $57/68\%$ (بر پایه‌ی خشک) به دست آمد [۹].

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

از یک ترازوی دیجیتال مدل جیفورس ساخت کشور ژاپن^۲ با دقت $0.1 \pm$ گرم برای اندازه‌گیری وزن نمونه‌ها طی خشک‌کردن، از دماسنج و رطوبت‌سنج لوترون (مدل یوکی ساخت کشور تایوان)^۳ به ترتیب برای اندازه‌گیری دما و رطوبت نسبی محیط، استفاده شد.

۲.۲. خشک‌کردن

عملیات پیش‌ تیمار کردن نمونه‌ها با امواج فراصوت توسط دستگاه حمام فراصوت مدل (پارسونیک ساخت ایران)^۴، قبل از فرآیند خشک‌کردن انجام شد. این دستگاه قادر به تولید امواج فراصوت با فرکانس ۲۸kHz و توان ۷۰ W می‌باشد. برای انجام آزمایش‌ها ابتدا مخزن دستگاه حمام فراصوت با ۵ L آب مقطر پر شد سپس نمونه‌ها در سه تکرار با سه ضخامت مختلف ۲، ۴ و ۶ mm در داخل دستگاه در سه زمان ۱۰، ۲۰ و ۳۰ min تحت تأثیر تیمار فراصوت در دمای محیط قرار گرفتند. در مرحله بعد برای خشک‌کردن نمونه‌های سیر، دستگاه خشک‌کن مایکروویو خانگی مدل (مدل پاناسونیک ساخت ژاپن)^۵ به مدت نیم ساعت برای رسیدن به دمای تعادل پایدار زودتر روشن و نمونه‌های تیمار شده و شاهد در درون خشک‌کن مایکروویو با توان‌های ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ W قرار گرفتند. درصد رطوبت نمونه‌ها طی خشک شدن هر min ۲ از طریق وزن کردن به کمک ترازو تا رسیدن رطوبت به 10% (بر پایه خشک) اندازه‌گیری شدند. نسبت رطوبت سیر با استفاده از رابطه (۲) محاسبه شد [۱۰].

رطوبت، ضریب پخش رطوبت مؤثر، انرژی مصرفی ویژه، درصد باز جذب و چروکیدگی را مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها بیان کرده‌اند که اعمال امواج فراصوت سبب کاهش زمان انجام فرآیند خشک شدن شده است. همچنین نمونه‌های تحت پیش‌ تیمار فراصوت نسبت به نمونه‌ی شاهد چروکیدگی و انرژی مصرفی ویژه کم‌تر، ضریب پخش رطوبت و درصد باز جذب بیشتر برخوردار بودند [۱۴]. بوزکیر و همکاران (۲۰۱۹)، سیر را با استفاده از دو خشک‌کن هوای گرم (در یک سطح دما) و مایکروویو (در یک سطح توان مایکروویو) با پیش تیمار فراصوت (یک سطح زمان فراصوت) خشک نمودند. آن‌ها محتوای رطوبتی، ضریب پخش رطوبت مؤثر، ضریب باز جذب و تغییرات رنگ سیر را مورد مقایسه قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که استفاده از پیش تیمار فراصوت سبب بهبود خواص کیفی سیر گردید [۱۵].

با بررسی‌های صورت گرفته مشخص شد که تأثیر استفاده از پیش‌ تیمار فراصوت با سطوح مختلف زمانی قبل از خشک‌کردن به روش مایکروویو در ضخامت‌های متفاوت برای محصول سیر تاکنون گزارش نشده است. لذا هدف از مطالعه حاضر، بررسی تأثیر زمان فراصوت، توان مایکروویو و ضخامت نمونه‌ها بر فرآیند خشک‌کردن سیر می‌باشد؛ بنابراین پارامترهای ترمودینامیکی (ضریب پخش رطوبت مؤثر، انرژی مصرفی ویژه) و کیفی (رنگ و چروکیدگی) و انتخاب بهترین مدل ریاضی برای پیش‌بینی نسبت رطوبت سیر طی خشک‌کردن، در این مطالعه مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفت.

۲. مواد و روش‌ها

۱.۲. آماده‌سازی نمونه‌ها

برای انجام این پژوهش، سیر رقم گوگان از مزرعه‌ی تحقیقاتی در دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی مغان (اردبیل، ایران)، تهیه گردید. نمونه خریداری شده بلافاصله برای جلوگیری از دست دادن رطوبت اولیه و یکنواختی نمونه‌ها در نایلون‌های زیپ‌دار بسته‌بندی و به منظور کاهش تنفس و تغییرات فیزیولوژیکی و شیمیایی در یخچال با دمای $1 \pm ^\circ\text{C}$ قرار داده شدند. برای تعیین رطوبت اولیه

1. Memmert UNE 500 model
2. AND, GF-6000, Japan
3. Lutron, YK-2005RH, Taiwan
4. Parsonic, 2600s, Iran
5. Panasonic, NN-C2002W, Japan

دست آمده از آزمایش‌ها با ۱۰ مدل استاندارد خشک‌کردن لایه نازک توسط نرم‌افزار رسم منحنی^۱ (ساخت شرکت مای بایو سورس کشور آمریکا)^۲ مورد برآزش قرار گرفت (جدول ۱). برای تعیین بهترین مدل از بین مدل‌های مقایسه شده از سه معیار ضریب تعیین (R^2)، مربع کای (χ^2) و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) استفاده شد. این معیارها به ترتیب توسط روابط (۴، ۵ و ۶) محاسبه شدند [۱۷].

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N [MR_{exp,i} - MR_{pre,i}]^2}{\left[\sum_{k=1}^N \frac{\sum_{i=1}^n MR_{pre,i}}{N} - MR_{pre,i} \right]^2} \quad (4)$$

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2}{N - z} \quad (5)$$

$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MR_{pre,i} - MR_{exp,i})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

همچنین مقدار M_e برای سیر از مدل GAB و معادله (۳) به دست آمد [۱۶].

$$MR = \frac{M - M_e}{M_o - M_e} \quad (2)$$

$$M_e = \frac{X_m Cka_w}{(1 - ka_w)(1 - ka_w + Cka_w)} \quad (3)$$

مقدار M_e برای سیر با استفاده از مدل GAB به میزان ۰/۳ تعیین شد.

۳.۲. مدل‌سازی ریاضی

برای درک بهتر روند خشک شدن سیر طی خشک‌کردن به روش مایکروویو با پیش‌تیمار فراصوت در ضخامت‌های مختلف، از مدل‌سازی لایه نازک استفاده شد. به طوری که برای مدل‌سازی خشک‌کردن سیر، نسبت رطوبت به

جدول (۱) مدل‌های ریاضی برای پیش‌بینی فرایند خشک‌کردن

Table 1. Mathematical models for prediction of drying process

Models	Equations	References
Lewis	$MR = \exp(-kt)$	[۵]
Henderson and Pabis	$MR = a \exp(-kt)$	[۱۸]
Page	$MR = \exp(-kt^n)$	[۱۹]
Logarithmic	$MR = a \exp(-kt) + c$	[۲۰]
Two-term	$MR = a \exp(-k_0t) + b \exp(-k_1t)$	[۱۷]
Two-term exponential	$MR = a \exp(-kt) + (1 - a) \exp(-kat)$	[۲۱]
Wang and Singh	$MR = 1 + at + bt^2$	[۲۲]
Midilli <i>et al.</i>	$MR = a \exp(-kt^n) + bt$	[۱۱]
Logistic	$MR = a / (1 + b \exp(kt))$	[۱۲]
Demir <i>et al.</i>	$MR = a \exp(-kt)^n + b$	[۸]

1. Curve Expert

2. MyBioSource company, USA

$$SEC_{mic} = \frac{Pt}{m_{vmic}} \quad (11)$$

(۲) انرژی مصرفی ویژه برای فراصوت [۱۲]:

$$UP = UI \cos \Phi \quad (12)$$

$$SEC_{ult} = \frac{UP.t}{m_{vult}} \quad (13)$$

(۳) انرژی مصرفی کل خشک‌کن مایکروویو با پیش‌تیمار فراصوت [۱۲]:

$$SEC_{total} = SEC_{ult} + SEC_{mic} \quad (14)$$

۶.۲. رنگ

از یک رنگ‌سنج HP-200 ساخت کشور چین برای اندازه‌گیری رنگ نمونه‌ها، برای قبل و بعد از فرآیند خشک‌کردن استفاده شد. پارامتر L^* از طیف سفید تا مشکی در محدوده صفر تا ۱۰۰، a^* از طیف سبز تا قرمز در محدوده ۱۰۰- تا ۱۰۰+ و b^* از طیف آبی تا زرد در محدوده ۱۰۰- تا ۱۰۰+ توسط این دستگاه اندازه‌گیری شدند و تغییرات کلی رنگ ΔE از رابطه زیر به دست آمد [۱۱].

$$\Delta E = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2} \quad (15)$$

۷.۲. چروکیدگی

برای اندازه‌گیری چروکیدگی سیر، تغییرات حجم نمونه‌ها با استفاده از روش جابجایی مایع تعیین گردید. در این پژوهش از تولوئن استفاده شد. از مزایای تولوئن نسبت به سایر مایعات می‌توان کشش سطحی و دانسیته‌ی کم و عدم تغییر ساختار شیمیایی آن در اثر مجاورت با هوا را نام برد. درصد چروکیدگی (Sh) با تعیین حجم اولیه (μ_i) (cm^3) و حجم نهایی (μ_f) (cm^3) با استفاده از رابطه (۱۶) محاسبه شد [۱۴].

$$Sh = \frac{(\mu_i - \mu_f)}{\mu_i} \times 100 \quad (16)$$

۸.۲. آنالیز آماری

کلیه آزمایش‌ها، در قالب طرح کاملاً تصادفی به صورت فاکتوریل با خشک‌کردن به روش مایکروویو در سه سطح توان، پیش‌تیمار فراصوت در سه سطح زمان برای

۴.۲. ضریب پخش مؤثر رطوبت

برای توصیف انتقال رطوبت، طی فرآیند خشک‌کردن و کاهش رطوبت سیر، رطوبت اولیه سیر را ثابت در نظر گرفته و توزیع رطوبت طی فرآیند انتقال رطوبت (خشک‌کردن) به صورت شعاعی، یکنواخت و ثابت در نظر گرفته شد (قانون دوم فیک). برای محاسبه ضریب پخش رطوبت مؤثر (D_{eff}) از رابطه (۷) استفاده شد [۲۲].

$$MR = \frac{M - M_e}{M_o - M_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left(- (2n+1)^2 \frac{\pi^2 D_{eff} t}{4 L^2}\right) \quad (7)$$

از آنجایی که خشک‌کردن سیر در یک بازه زمانی طولانی انجام شد و انتقال جرم عدد بیو^۱ بالا بود، با توجه به توضیحات یونسی و همکاران [۲۱] معادله (۷) بدون اینکه تأثیر زیادی روی دقت محاسبات داشت باشند به معادله (۸) ساده شد.

$$MR = \left(\frac{8}{\pi^2}\right) \exp\left(- (2n+1)^2 \frac{\pi^2 D_{eff} t}{4 L^2}\right) \quad (8)$$

با \ln گیری از طرفین رابطه (۸)، رابطه (۹) به دست آمد.

$$\ln(MR) = \ln\left(\frac{8}{\pi^2}\right) - \left((2n+1)^2 \frac{\pi^2 D_{eff} t}{4 L^2}\right) \quad (9)$$

برای محاسبه ضریب پخش مؤثر رطوبت (D_{eff}) با رسم نمودار $\ln(MR)$ نسبت به زمان، خطی با شیب k به دست آمد که از مساوی قرار دادن این شیب با ضریب t در رابطه (۱۰)، رابطه زیر به دست آمد [۱۴].

$$k = \left(\frac{\pi^2 D_{eff}}{4 L^2}\right) \quad (10)$$

۵.۲. انرژی مصرفی ویژه

برای محاسبه میزان انرژی مصرفی ویژه خشک‌کردن سیر، یعنی انرژی لازم برای دفع یک کیلوگرم آب از سیر طی خشک‌کن مایکروویو با پیش‌تیمار فراصوت از روابط زیر استفاده می‌شود:

(۱) انرژی مصرفی ویژه برای مایکروویو [۱۴]:

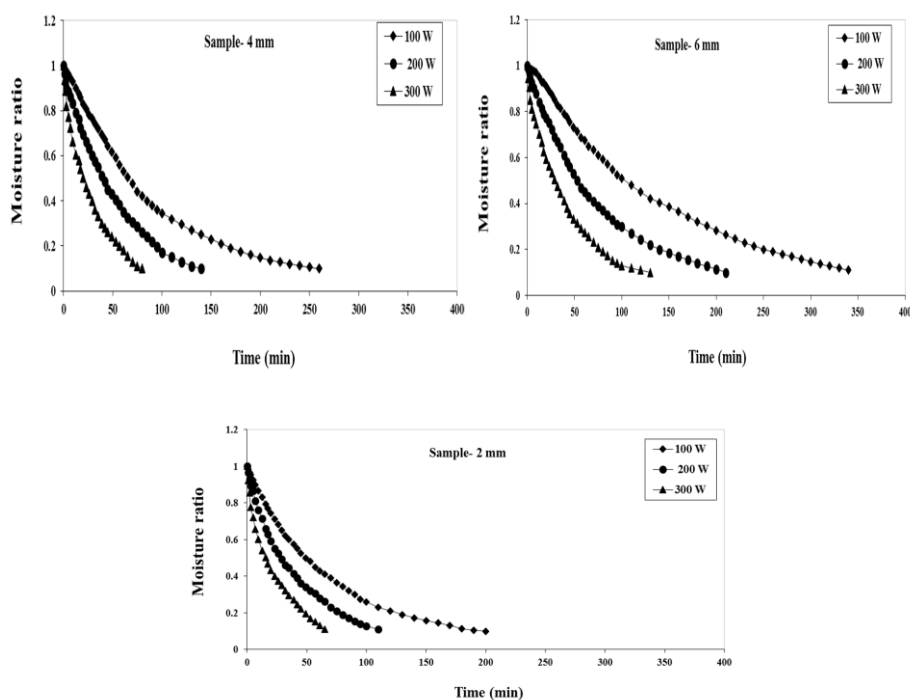
داخل محصول و در نتیجه افزایش سرعت تبخیر رطوبت باشد [۲۳]. این یافته‌ها هم‌راستا با نتایج منتشرشده برای پیاز [۲۴] و ورقه‌های سیب [۲۳] بود. با افزایش زمان فراصوت به علت ایجاد کانال‌های میکروسکوپی در قطعات سیر طی انجام پیش‌تیمار، به طوری که طی خشک‌کردن نمونه‌ها، رطوبت با سهولت بیشتری از آن‌ها خارج می‌شود و در نتیجه، محتوای رطوبت نهایی پایین‌تری را خواهند داشت و زمان خشک شدن کاهش می‌یابد [۱۲]. نتایج مشابه توسط قنبریان و همکاران (۲۰۱۹)، در مورد نعنای [۲۵] و دهقانیا و همکاران (۲۰۱۹)، در مورد سیب‌زمینی [۱۴] گزارش شده است. با افزایش ضخامت نمونه‌ها، زمان خشک شدن طولانی‌تر شد. علت این امر پدیده سخت شدن سطح برش، افزایش مقدار آب و همچنین مسیری طولانی‌تر خارج شدن بخار می‌باشد که باعث دشواری انتقال رطوبت از درون بافت جسم و در نهایت افزایش زمان خشک شدن گردید [۱۳، ۶]. در مطالعات انجام شده دیگری از جمله برای بادمجان [۱۸] و برای هویج [۶] نتایج مشابهی به دست آمد.

ضخامت‌های متفاوت نمونه (۲، ۴ و ۶) با ۳ تکرار اجرا شد. رسم نمودارها با نرم‌افزار اکسل (۲۰۱۰)^۱ و تجزیه واریانس یا تحلیل آماری با نرم‌افزار آماری اس پی اس اس ورژن ۱۷^۲ و مقایسه میانگین‌ها با آزمون دانکن انجام گرفت.

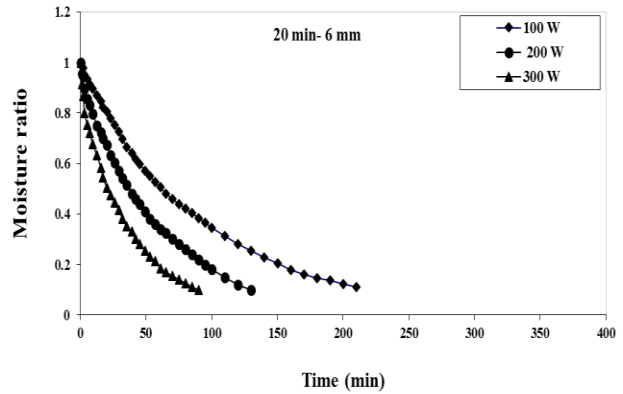
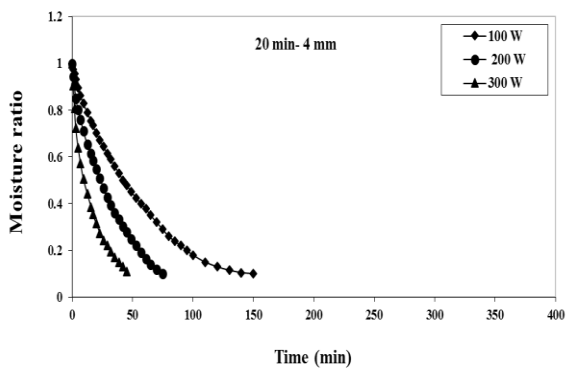
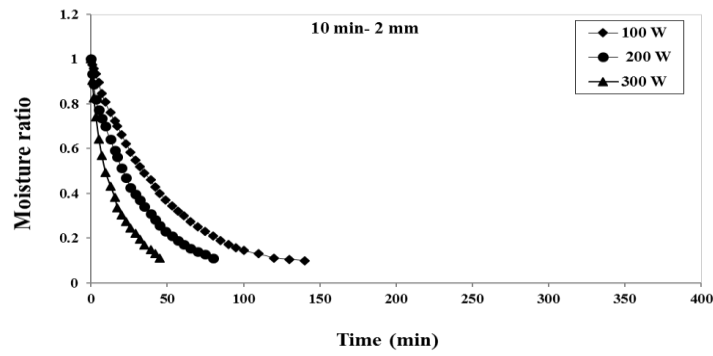
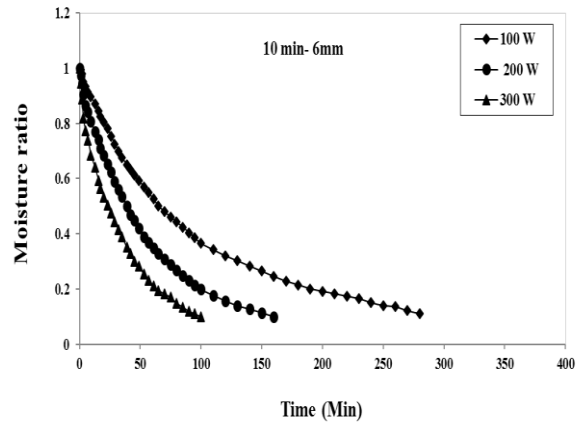
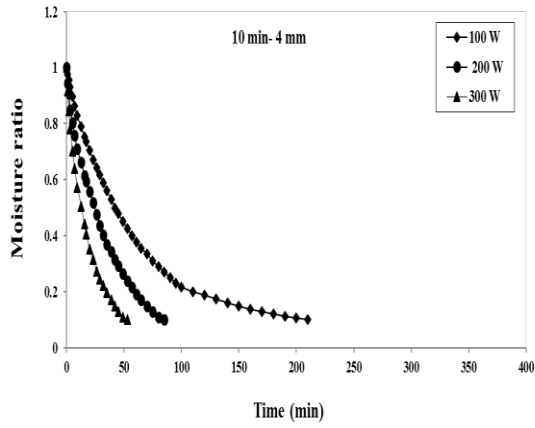
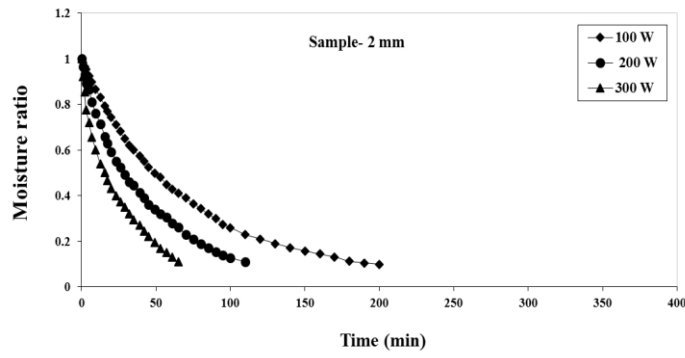
۳. نتایج و بحث

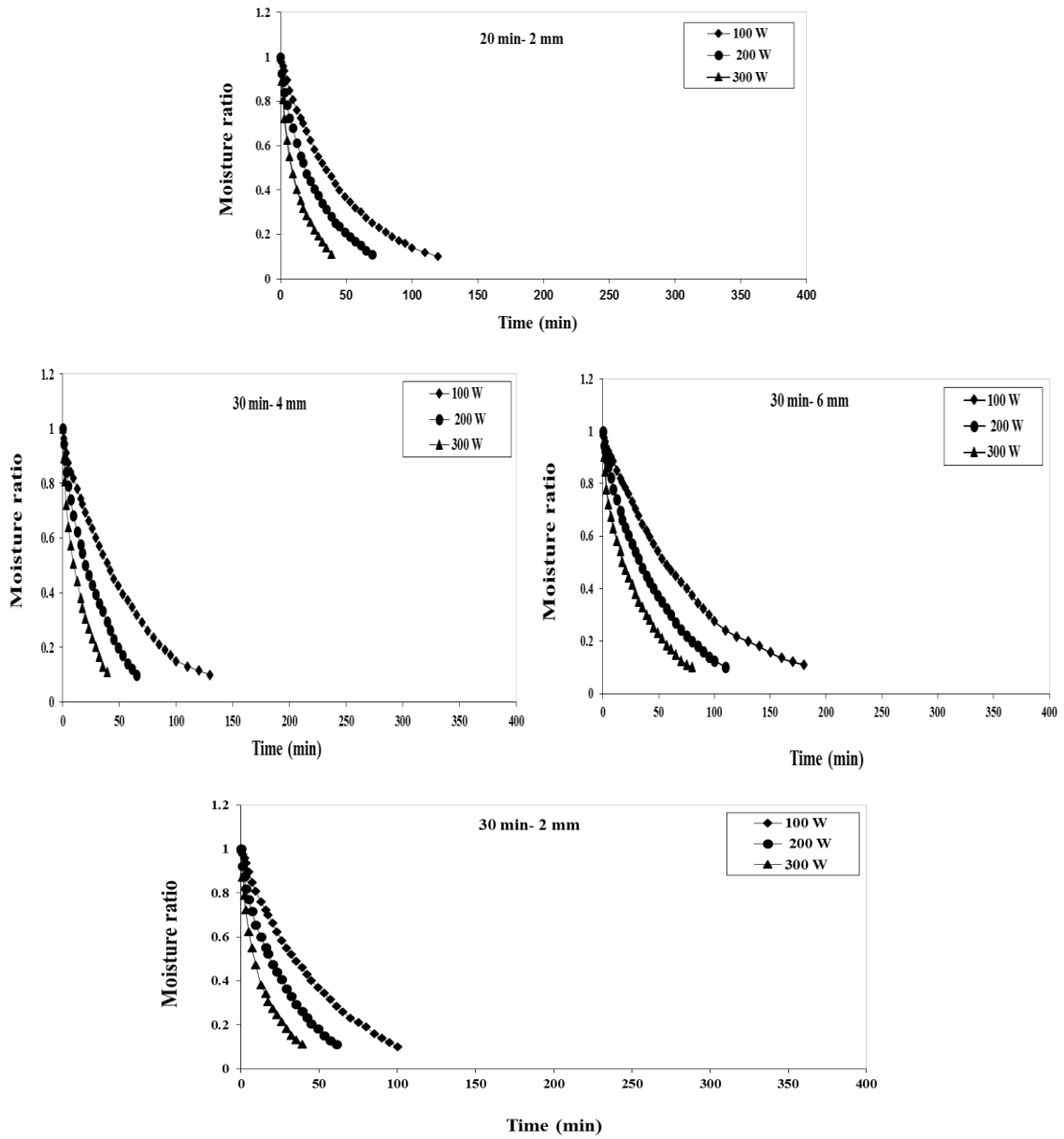
۳.۱. سینتیک خشک‌کردن

مطابق شکل (۱)، تأثیر توان مایکروویو، زمان فراصوت و ضخامت نمونه‌ها بر خشک شدن سیر را می‌توان از تغییرات نسبت رطوبت طی خشک‌کردن مورد بررسی قرار داد. در ابتدای فرآیند خشک‌کردن، رطوبت اولیه محصول زیاد بوده و نرخ کاهش رطوبت بیشتر است ولی با گذشت زمان چون محتوای رطوبت محصول کاهش می‌یابد، به طور طبیعی نرخ خشک شدن هم کاهش یافت. زمان خشک شدن محصول با توجه به زمان فراصوت، توان مایکروویو و ضخامت نمونه‌های مورد نظر در خشک‌کن مایکروویو با پیش‌تیمار فراصوت در محدوده ۳۴ تا ۳۴۰ دقیقه قرار داشت. با توجه به شکل (۲) افزایش سطح توان مایکروویو باعث کاهش زمان خشک شدن

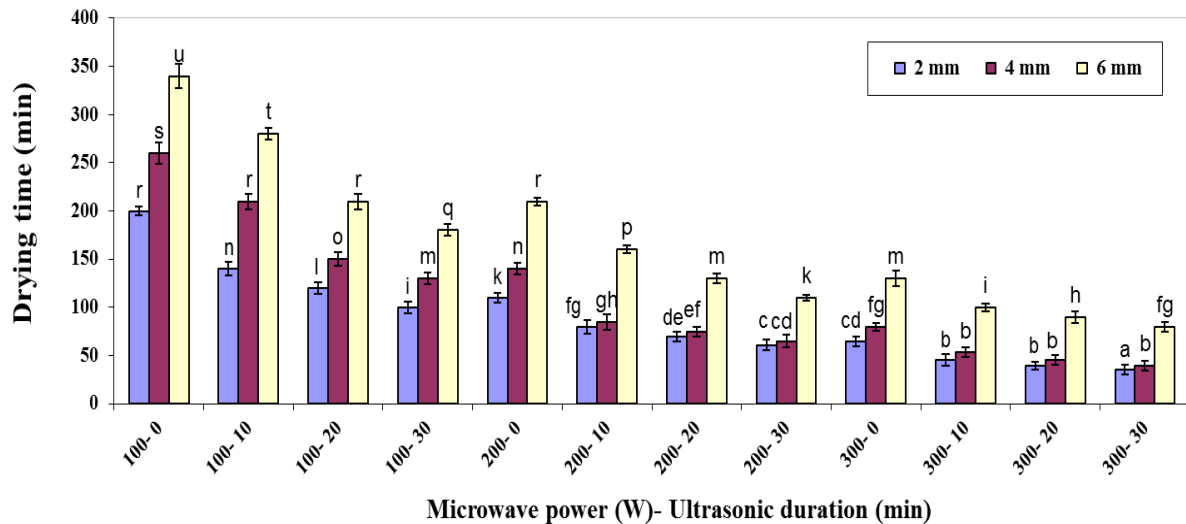


1. Excel (2010)
2. SPSS Statistics 17.0





شکل (۱) نمودار نسبت رطوبت در مقابل زمان برای شرایط مختلف خشک کردن سیر
Fig 1. Diagram of the moisture ratio versus time for drying different conditions of garlic



**حروف مختلف در هر پیش تیمار تفاوت معنی داری را نشان می دهد ($P < 0.05$)

**Different letters on each pretreatment indicate a significance difference ($P < 0.05$) difference

شکل (۲) مقادیر زمان خشک کردن در شرایط مختلف خشک کردن

Fig 2. Values of drying time in different drying conditions

می‌شود که در روش خشک کردن توسط مایکروویو با پیش تیمار فراصوت، مدل لجستیک^۱ دارای بالاترین مقدار R^2 (۰/۹۹۹۶) و کمترین χ^2 (۰/۰۰۰۹) و $RMSE$ (۰/۰۱۱۳) نسبت به سایر مدل‌ها می‌باشد.

۳.۳. مدل سازی

جدول (۲)، خطاهای آماری حاصل از برازش داده‌های تجربی آزمایش‌های خشک کردن را بر روی ۱۲ مدل لیست شده از جدول (۱) را نشان می‌دهد. با توجه به جداول مشاهده

جدول (۲) مقایسه مدل‌های ریاضی برای پیش‌بینی نسبت رطوبت سیر در خشک کن مایکروویو با پیش تیمار فراصوت

Table 2. Comparing of mathematical models for prediction of garlic moisture ratio in microwave dryer with ultrasonic pretreatment

Models	R^2	χ^2	$RMSE$
Newton (Lewis)	0.9950	0.0242	0.0633
Henderson and Pabis	0.9970	0.0142	0.0377
Page	0.9984	0.0069	0.0252
Logarithmic	0.9981	0.0083	0.0305
Two-term	0.9990	0.0041	0.0195
Two-term exponential	0.9959	0.0201	0.0519
Wang and Singh	0.9938	0.0264	0.0714
Midilli <i>et al.</i>	0.9993	0.0022	0.0157
Logistic	0.9996	0.0009	0.0113
Demir <i>et al.</i>	0.9962	0.0177	0.0449

۳.۳. ضریب پخش رطوبت مؤثر

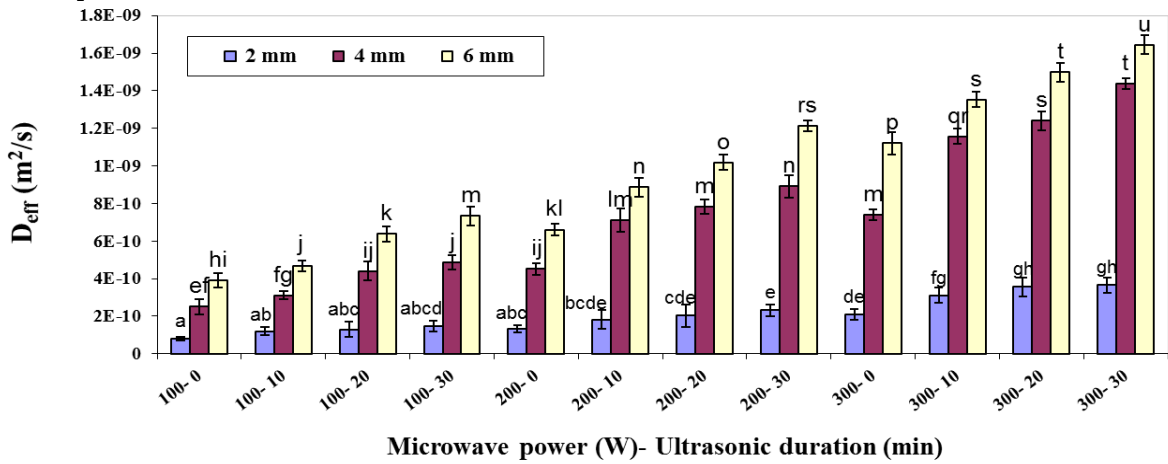
کمتر خیلی سریع‌تر نسبت به نمونه‌های ضخیم‌تر اتفاق می‌افتد درحالی‌که نرخ تبخیر رطوبت در نمونه‌ها با ضخامت کمتر خیلی بالاتر است [۲۷]. لذا سختی سطحی سریع در نمونه‌ها با ضخامت کمتر موجب محدودیت در جابجایی رطوبت نسبت به نمونه‌های ضخیم‌تر شده و در نتیجه منجر به کاهش ضریب انتشار رطوبت در نمونه‌های نازک‌تر می‌گردد [۲۸]. مشاهدات مشابهی از نظر تأثیر ضخامت بر ضریب پخش رطوبت توسط محققان دیگری از جمله دیماز و همکاران (۲۰۱۱)، عظیمی نژاد و حسینی (۲۰۱۹) و اونوود و همکاران (۲۰۱۸) گزارش شده است [۱۸، ۵، ۲۸]. مقادیر ضریب پخش رطوبت برای سیب‌زمینی در خشک‌کن ترکیبی مایکروویو- هوای گرم با پیش‌تیمار فراصوت در محدوده‌ی $1/07 \times 10^{-7}$ تا $1/283 \times 10^{-7}$ m^2/s به دست آمد [۱۴]. آیترو و همکاران (۲۰۱۵)، مقدار ضریب پخش رطوبت مؤثر را برای سیر در خشک‌کن هوای گرم و مایکروویو به ترتیب $2/21 \times 10^{-10}$ تا $3/07 \times 10^{-10}$ m^2/s و $0/76 \times 10^{-8}$ تا $2/85 \times 10^{-8}$ m^2/s به دست آوردند [۲۲]. عباسپور و همکاران (۲۰۱۹)، برای خشک‌کردن گردو در خشک‌کن هوای گرم و مایکروویو در زمان‌های مختلف پیش‌تیمار فراصوت مقدار ضریب پخش را به ترتیب $3/12 \times 10^{-9}$ تا $5/56 \times 10^{-9}$ m^2/s و $8/99 \times 10^{-9}$ تا $2/77 \times 10^{-9}$ m^2/s محاسبه کردند [۸].

۴.۳. انرژی مصرفی ویژه

با توجه به شکل (۴) کمترین مقدار انرژی مصرفی ویژه به مقدار $9/08$ kWh/kg با اختلاف معنی‌داری ($P < 0.05$) در توان مایکروویو 300 W، زمان فراصوت 30 min و ضخامت 2 mm به دست آمد. همچنین نمونه شاهد با ضخامت 6 mm و توان مایکروویو 100 W برای خشک‌کردن، به طور معنی‌داری ($P < 0.05$) دارای بیشترین مقدار انرژی مصرفی ویژه به میزان $113/33$ kWh/kg بود. با افزایش توان مایکروویو، انرژی مصرفی لامپ مگنترون در واحد زمان برای تولید امواج با توان بالا افزایش می‌یابد. ولی چون در این حالت رطوبت موجود در محصول، امواجی با توان بالا را جذب می‌کند زمان فرآیند خشک‌کردن کاهش پیدا می‌کند. لذا با افزایش توان مایکروویو، انرژی مصرفی کل کاهش می‌یابد [۲۳].

مقادیر ضریب پخش رطوبت برای خشک‌کردن سیر با ضخامت‌های مختلف در خشک‌کن مایکروویو با پیش‌تیمار فراصوت در شکل (۳) نشان داده شده است. مقادیر این ضریب در بازه $8/04 \times 10^{-11}$ تا $1/64 \times 10^{-9}$ m^2/s متغیر بود. با توجه به شکل (۳) بالاترین مقدار ضریب پخش رطوبت به میزان $1/64 \times 10^{-9}$ m^2/s در توان مایکروویو 300 W، زمان فراصوت 30 min و ضخامت 6 mm حاصل شد درحالی‌که پایین‌ترین مقدار ضریب پخش رطوبت به میزان $8/04 \times 10^{-11}$ m^2/s در توان مایکروویو 100 W، نمونه شاهد و ضخامت 2 mm به دست آمد. در خشک‌کردن سیر با خشک‌کن مایکروویو- هوای گرم، مقادیر این ضریب را در بازه $1/29 \times 10^{-10}$ تا $31/38 \times 10^{-10}$ m^2/s گزارش شد که کمتر از مقادیر این ضریب در تحقیق حاضر می‌باشد [۲۶]. همچنین یونیس و همکاران (۲۰۱۸)، مقدار ضریب نفوذ محصول سیر را $5/83 \times 10^{-11}$ تا $7/66 \times 10^{-10}$ m^2/s طی فرآیند خشک‌کردن توسط مادون‌قرمز گزارش کرده‌اند [۲۱]. بر اساس تحقیقات مقدار ضریب نفوذ رطوبت برای محصولات کشاورزی و غذایی در بازه 10^{-7} تا 10^{-12} m^2/s قرار دارد [۲۰]. لذا مقادیر محاسبه شده ضریب نفوذ در این تحقیق در بازه‌ی مذکور می‌باشد.

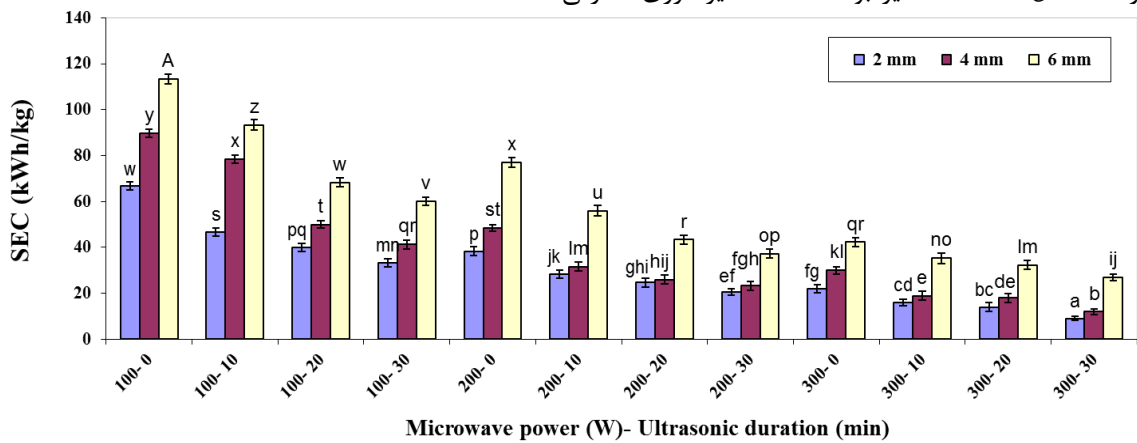
مطابق شکل (۳)، مقدار ضریب پخش رطوبت با افزایش توان مایکروویو و زمان فراصوت و ضخامت نمونه‌ها افزایش می‌یابد، زیرا با افزایش توان مایکروویو، دمای داخل محصول و فشار بخار رطوبت درون محصول افزایش پیدا کرده و نهایتاً سرعت انتقال رطوبت افزایش می‌یابد [۱۶]. از طرف دیگر پیش‌تیمار فراصوت سبب باز شدن مسیر لوله‌های موئین در اثر پراکنده شدن ترکیبات سطحی شده و تشکیل کانال‌های میکروسکوپی طولی‌تر در اثر تغییر شکل سلول‌ها داده و به دنبال آن لوله‌های موئین بازتری ایجاد می‌گردد [۸]؛ بنابراین اعمال پیش‌تیمار فراصوت با تغییر شکل سلول‌ها و تخریب دیواره‌ی سلولی خروج رطوبت از داخل محصول را سریع‌تر می‌کند [۱۲]. با افزایش ضخامت نمونه‌ها مقدار ضریب پخش رطوبت مؤثر افزایش یافت. نگوین و پرایس (۲۰۰۷)، گزارش دادند که به طور کلی سختی سطحی در نمونه‌ها با ضخامت



شکل (۳) مقادیر ضریب پخش رطوبت در شرایط مختلف خشک کردن
Fig 3. Values of effective moisture diffusion in different drying conditions
 **حروف مختلف در هر پیش تیمار تفاوت معنی داری را نشان می دهد (P < 0.05)
 **Different letters on each pretreatment indicate a significance difference (P < 0.05) difference

برای نعناع، ۶۳/۳۶ تا ۱۷۰/۸۴ MJ/kg [۲۵] و برای سیبزمینی ۲۴۴/۵۴ تا ۳۱۸/۹۰ MJ/kg [۱۴] گزارش شد. این محققان نشان دادند که با افزایش توان مایکروویو و زمان فراصوت میزان انرژی مصرفی ویژه کاهش می یابد. برای تحقیق حاضر، در بررسی تأثیر ضخامت بر انرژی مصرفی مشخص گردید که کاهش ضخامت در فرآیند خشک کردن سبیر، به دلیل افزایش گرادیان حرارتی و تسریع در خروج رطوبت از محصول، سبب کاهش زمان خشک کردن می گردد در نتیجه میزان کل انرژی مصرفی کاهش پیدا می کند.

علت این پدیده در آن است که گرادیان حرارتی سبیر در توان های بالای مایکروویو، بیشتر بوده و در نتیجه زمان خشک شدن کاهش می یابد و شیب نزولی نمودار تغییرات نسبت رطوبت با افزایش توان مایکروویو تندتر می شود [۲۹]. عباسپور و همکاران (۲۰۱۹)، مقدار انرژی مصرفی ویژه برای خشک کردن گردو در خشک کن مایکروویو با پیش تیمار فراصوت بین ۱۵/۹۰ تا ۳۶/۴۲ kWh/kg به دست آوردند. انرژی مصرفی ویژه برای خشک کردن تمشک در خشک کن های هوای گرم و مایکروویو با پیش تیمار فراصوت از ۰/۱ تا ۰/۹ MJ/g متغیر بود [۱۱].



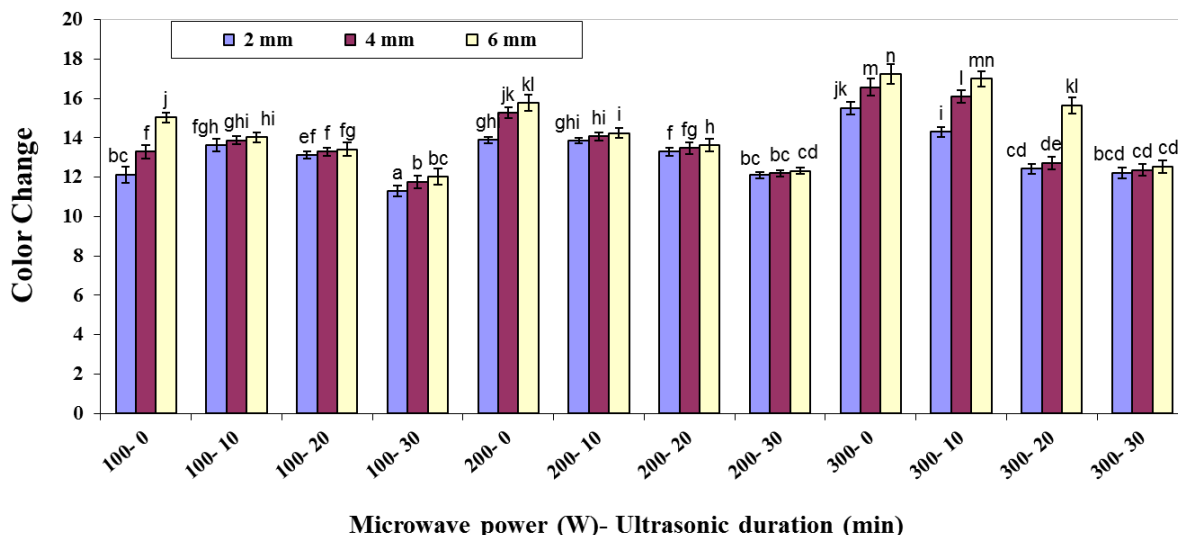
شکل (۴) تغییرات انرژی مصرفی ویژه در شرایط مختلف خشک کردن
Fig 4. Specific energy consumption changes in different drying conditions
 **حروف مختلف در هر پیش تیمار تفاوت معنی داری را نشان می دهد (P < 0.05)
 **Different letters on each pretreatment indicate a significance (p < 0.05) difference

۵.۳. رنگ

واکنش قهوه‌ای شدن به جهت افزایش اسیدیته و انجام واکنش غیرآنزیمی میلارد باشد [۳۰]. با کاهش توان مایکروویو و ضخامت نمونه‌ها و همچنین افزایش زمان فراصوت، میزان تخریب رنگ‌دانه‌ها و واکنش قهوه‌ای شدن کاهش یافته و در نتیجه تغییرات رنگ کاهش می‌یابد [۸]. کلاین سانچز و همکاران (۲۱۰۴)، در بررسی رنگ سیر تحت تأثیر روش‌های مختلف خشک‌کردن چنین نتیجه‌گیری کردند که افزایش توان مایکروویو میزان تغییرات رنگ افزایش می‌یابد [۳۱]. در تحقیقی که توسط آیت‌ر و همکاران (۲۰۱۹)، بر روی رنگ سیر خشک شده توسط خشک‌کن هوای داغ و مایکروویو انجام شد، نمونه‌های سیر خشک شده با افزایش توان مایکروویو و دمای هوای ورودی تغییرات رنگ افزایش پیدا کرده است [۲۲].

نتایج بررسی شاخص‌های رنگ نمونه‌های سیر نشان می‌دهد که کمترین میزان تغییرات رنگ در توان مایکروویو ۱۰۰ W، زمان فراصوت ۳۰ min و ضخامت ۲ mm به دست آمده و همچنین با افزایش زمان فراصوت و کاهش ضخامت و کاهش توان مایکروویو، میزان تغییرات رنگ نمونه‌ها به طور معنی‌داری ($P < 0.05$) از ۱۷/۲۲ تا ۱۱/۲۹ کاهش یافت (شکل ۵).

در توان مایکروویو بالاتر، نمونه‌ای که مورد تابش مایکروویو بیشتر قرار گرفته، باعث سوختگی سطحی و تغییر رنگ سیر می‌شود. افزایش تغییرات کلی رنگ در توان‌های بالا و زمان‌های پایین اعمال فراصوت و ضخامت بالای سیر می‌تواند به دلیل تخریب رنگ‌دانه‌های محصول، تجزیه کلروفیل و



**Different letters on each pretreatment indicate a significance ($P < 0.05$) difference

شکل (۵) تغییرات رنگ سیر در شرایط مختلف خشک‌کردن (توان، ضخامت و زمان فراصوت)

Fig 5. Garlic color variations in different drying conditions (power, thickness and sonication time)

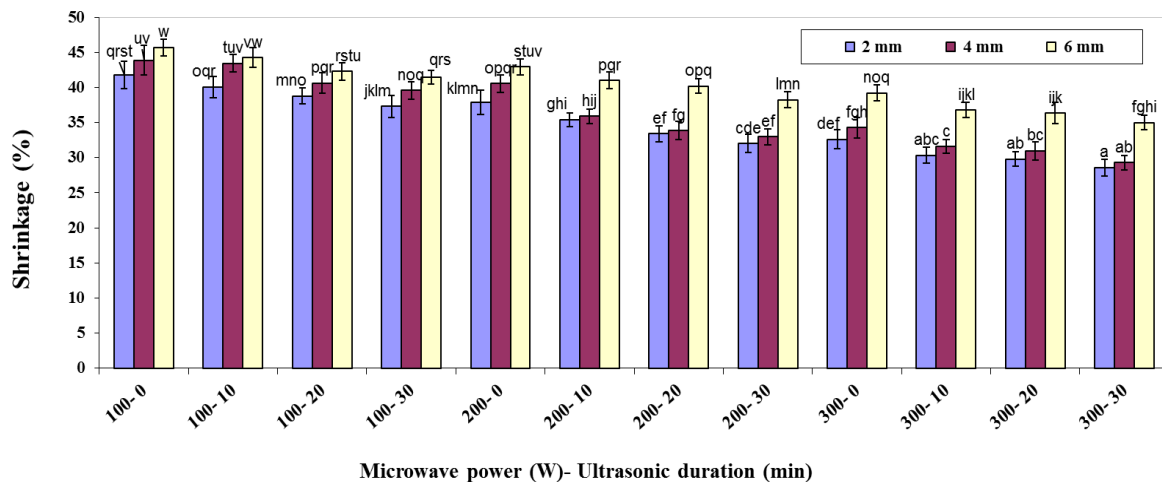
به واسطه چروکیدگی که قابل ملاحظه هم می‌باشد، تغییراتی در ساختمان اولیه آن‌ها پدید می‌آید. بدین صورت که مایع موجود در دیواره سلول فشاری بر دیواره سلول ایجاد می‌نماید و مایع در داخل سلول تحت فشار قرار می‌گیرد [۳۲]. در طی فرآیند خشک شدن، خروج آب از سلول باعث کاهش تنشی می‌گردد که از طرف مایع بر دیواره سلول اعمال گردیده است. این کاهش تنش باعث چروکیدگی بافت

۶.۳. چروکیدگی

شکل (۶) درصد تغییرات چروکیدگی در خشک‌کن مایکروویو با پیش‌تیمار فراصوت برای سیر نشان می‌دهد. نتایج بیانگر آن است که در توان‌های بالای مایکروویو، زمان فراصوت بالا و ضخامت کمتر مقدار چروکیدگی به طور معنی‌داری ($P < 0.05$) کاهش می‌یابد. همان‌طور که سیر دارای رطوبت اولیه زیاد می‌باشد لذا طی فرآیند خشک شدن

هوای گرم با پیش تیمارهای فراصوت و مایکروویو را مورد بررسی قرار دادند و نتایج نشان داد که با افزایش توان مایکروویو و دمای هوای ورودی مقدار چروکیدگی روند کاهشی داشت [۳۴]. همچنین دهقانیا و همکاران (۲۰۱۹)، برای خشک کردن تکه‌های سیب به نتایج مشابهی دست یافتند [۱۴].

تشکیل دهنده ماده می‌گردد [۳۳]. این در حالی است که توان مایکروویو، زمان فراصوت بالا و ضخامت کمتر، سرعت خروج آب را تسریع بخشیده و مجالی به تغییر شکل محصول نمی‌دهد [۳۴]. نتایج این تحقیق با نتایج دهقانیا و همکاران (۲۰۱۸)، مطابقت دارد آن‌ها تأثیر توان مایکروویو و دمای هوای ورودی را بر چروکیدگی سیب‌زمینی تحت خشک‌کن



**حروف مختلف در هر پیش تیمار تفاوت معنی داری را نشان می‌دهد ($P < 0.05$)

**Different letters on each pretreatment indicate a significance difference ($P < 0.05$)

شکل (۶) تغییرات چروکیدگی نمونه‌های سیر با استفاده از توان مایکروویو، زمان فراصوت و ضخامت‌های مختلف

Fig 6. Shrinkage variation of garlic samples using microwave power, sonication time and different thicknesses

(d) انرژی مصرفی ویژه با افزایش توان مایکروویو و زمان فراصوت و کاهش ضخامت به طور معنی‌داری ($P < 0.05$) کاهش یافت. کمترین مقدار انرژی مصرفی ویژه در توان مایکروویو ۳۰۰W، زمان فراصوت ۳۰min و ضخامت ۲mm به دست آمد.

(e) کمترین تغییرات رنگ و چروکیدگی به ترتیب ۱۱/۲۹ و ۲۸/۵۹٪ در توان ۳۰۰W مایکروویو و زمان ۳۰min فراصوت با ضخامت ۶mm حاصل شد.

تشکر و قدردانی

از دانشگاه محقق اردبیلی (حوزه معاونت پژوهشی)، در تأمین بودجه برای اجرای طرح با عنوان «تأثیر پیش تیمار فراصوت بر سینتیک خشک کردن، انرژی، اکسرژی و گازهای گلخانه‌ای سیر تحت خشک کن مایکروویو» با شماره ۳۱۸۹ مورخ ۱۳۹۸/۲/۱۷ تشکر و قدردانی می‌شود.

۴. نتیجه‌گیری

در این تحقیق، خشک‌کردن سیر با ضخامت‌های ۲، ۴ و ۶ توسط مایکروویو در توان‌های مایکروویو ۱۰۰W، ۲۰۰ و ۳۰۰ در زمان‌های فراصوت ۰ (نمونه شاهد)، ۱۰، ۲۰ و ۳۰ انجام شد. نتایج حاصل از بررسی توان مایکروویو، زمان فراصوت و ضخامت بر روی خواص ترمودینامیکی و کیفی سیر به طور خلاصه بدین شرح می‌باشد:

(a) با افزایش توان مایکروویو، زمان فراصوت و کاهش ضخامت، زمان خشک‌کردن کاهش یافت.

(b) از بین ۱۰ مدل ریاضی جهت پیش‌بینی نسبت رطوبت سیر، مدل Logistic با بالاترین مقدار $R^2 = 0.9996$ و کمترین مقدار $RMSE = 0.113$ و $r^2 = 0.1009$ به‌عنوان بهترین مدل انتخاب شد.

(c) مقدار ضریب پخش رطوبت در بازه 8.04×10^{-11} تا $1.64 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ قرار داشت.

منابع

- [1] Thuwapanichayanan, R., Prachayawarakorn, S., & Soponronarit, S. (2014). Heat and moisture transport behaviour and quality of chopped garlic undergoing different drying methods. *J Food Eng.*, *136*, 34-41.
- [2] Tao, Y., Zhang, J., Jiang, S., Xu, Y., Show, P.L., Han, Y., Ye, X., & Ye, M. (2018). Contacting ultrasound enhanced hot-air convective drying of garlic slices: Mass transfer modeling and quality evaluation. *J Food Eng.*, *235*, 79-88.
- [3] Hnin, K.K., Zhang, M., Li, Z., & Wang, B. (2019). Comparison of quality aspects and energy consumption of restructured taro and potato chips under three drying methods. *J Process Eng.*, *42*(7), e13249.
- [4] Xu, Y., Xiao, Y., Lagnika, C., Song, J., Li, D., Liu, C., Jiang, N., Zhang, M., & Duan, X. (2019). A comparative study of drying methods on physical characteristics, nutritional properties and antioxidant capacity of broccoli. *Drying Technol.* *38*(10): 1378-1388
- [5] Onwude, D.I., Hashim, N., Abdan, K., Janius, R., & Chen, G. (2018). Modelling the mid-infrared drying of sweet potato: kinetics, mass and heat transfer parameters, and energy consumption. *Heat Mass Transfer.*, *54*, 2917-2933
- [6] Doymaz, I., & Ozdemir, O. (2014). Effect of air temperature, slice thickness and pretreatment on drying and rehydration of tomato. *Int J Food Sci Technol.*, *49*, 558-564.
- [7] Wang, Y., Li, X., Chen, X., Li, B., Mao, X., Miao, J., Zhao, C., Huang, L., & Gao, W. (2018). Effects of hot air and microwave-assisted drying on drying kinetics, physicochemical properties, and energy consumption of chrysanthemum. *Chem Eng Process*, *129*, 84-94.
- [8] Abbaspour-Gilandeh, Y., Kaveh, M., & Jahanbakhshi, A. (2019). The effect of microwave and convective dryer with ultrasound pre-treatment on drying and quality properties of walnut kernel. *J Food Process Preserv.*, *43*(11), e14178.
- [9] Zhou, X., Ramaswamy, H., Qua, Y., Xua, R., & Wang, S. (2019). Combined radio frequency-vacuum and hot air drying of kiwifruits: Effect on drying uniformity, energy efficiency and product quality. *Innov. Food Sci. Emerg. Technol.*, *56*, 102182.
- [10] Shewale, S.R., Rajoriya, D., & Hebbar, H. U. (2019). Low humidity air drying of apple slices: Effect of EMR pretreatment on mass transfer parameters, energy efficiency and quality. *Innov. Food Sci. Emerg. Technol.*, *55*, 1-10.
- [11] Mierzwa, D., Szadzińska, J., Pawłowski, A., Pashminehazar R., & Kharaghani, A. (2019). Nonstationary convective drying of raspberries, assisted by microwaves and ultrasound. *Drying Technol.*, *37*(8), 988-1001.
- [12] Kaveh, M., Jahanbakhshi, A., Abbaspour-Gilandeh, Y., Taghinezhad, E., & Moghimi, M. B. F. (2018). The effect of ultrasound pre-treatment on quality, drying, and thermodynamic attributes of almond kernel under convective dryer using ANNs and ANFIS network. *J Food Process Eng.*, *41*(7), e12868.
- [13] Doymaz, I. (2017). Drying kinetics, rehydration and colour characteristics of convective hot-air drying of carrot slices. *Heat Mass Transfer.* *53* (1), 25-35.
- [14] Dehghannya, J., Kadkhodaei, S., Heshmati, M.K., & Ghanbarzadeh, B. (2019). Ultrasound-assisted intensification of a hybrid intermittent microwave - hot air drying process of potato: Quality aspects and energy consumption. *Ultrasonic.*, *96*, 104-122.
- [15] Bozkir, H., Ergun, A. R., Tekgul, Y., & Baysal, T. (2019) Ultrasound as pretreatment for drying garlic slices in microwave and convective dryer. *Food Sci Biotechnol.* *28*, 247-354
- [16] Mariz, I.F.A., Pais, L.S., Barreiro, F.F., & Silva, J.A.C. (2005). Equilibrium moisture content and heat of desorption of garlic. In: ChemPor'2005 9th International Chemical Engineering Conference.
- [17] Jafari, H., Kalantari, D., & Azadbakht, M. (2017). Semi-industrial continuous band microwave dryer for energy and exergy analyses, mathematical modeling of paddy drying and its qualitative. *Energy.*, *138*, 1016-1029
- [18] Doymaz, I., & Gol, E. (2011). Convective drying characteristics of eggplant slices. *J Food Process Eng.*, *34*, 1234-1252.
- [19] Ashtiani, S.H.M., Sturm B., & Nasirahmadi, A. (2018). Effects of hot-air and hybrid hot air-microwave drying on drying kinetics and textural quality of nectarine slices. *Heat Mass Transfer.*, *54*(4), 915-927.
- [20] Kouhila, M., Moussaoui, H., Lamsyehe, H., Tagnamas, Z., Bahammou, Y., Idlimam, A., & Lamharrar, A. (2020). Drying characteristics and kinetics solar drying of Mediterranean mussel (*mytilus galloprovincilis*) type under forced convection. *Renew Energy.*, *147*, 833-844.
- [21] Younis, M., Abdelkarim, D., & El-Abdein, A.Z. (2018). Kinetics and mathematical modeling of infrared thin-layer drying of garlic slices. *Saudi J Biolog Sci.*, *25*, 332-338.
- [22] İltir, I., Akyıl S., Devseren, E., Okut, D., Koç, M., & Ertekin, F.K. (2015). Microwave and hot air drying of garlic puree: drying kinetics and quality

- characteristics. *Heat Mass Transfer.*, 54(7), 2101-2112
- [23] Hazervazifeh, A., Nikbakht, A.M., & Moghaddam, P.A. (2016). Novel hybridized drying methods for processing of apple fruit: Energy conservation approach. *Energy.*, 103, 679-687.
- [24] Demiray, E., Seker, A., & Tulek, Y. (2016). Drying kinetics of onion (*Allium cepa* L.) slices with convective and microwave drying. *Heat Mass Transfer.* 53(5), 1817- 1827.
- [25] Ghanbarian, D., Toriki-Harchegani, M., Sadeghi, M., & Pirbalouti, A.G., (2020). Ultrasonically improved convective drying of peppermint leaves: Influence on the process time and energetic indices. *Renew Energy.*, 153, 67-73.
- [26] Sharma, G.P. Prasad, S., & Chahar, V.K. (2009). Moisture transport in garlic cloves undergoing microwave-convective drying. *Food Bioprod Process.*, 87, 11-16.
- [27] Nguyen, M.H., & Price, W.E. (2007) Air-drying of banana: influence of experimental parameters, slab thickness, banana maturity and harvesting season. *J Food Eng.*, 79, 200-207
- [28] Azimi-Nejadian, H., & Hoseini, S.S. (2019). Study the effect of microwave power and slices thickness on drying characteristics of potato. *Heat Mass Transfer.*, 55, 2921-2930
- [29] Kaveh, M., Chayjan, R.A., Taghinezhad, E., Sharabiani, V.R., & Motevali, A. (2020). Evaluation of specific energy consumption and GHG emissions for different drying methods (Case study: Pistacia Atlantica). *J Clean Produc.* 59: 120963
- [30] Aral, S., & Bese, A.V. (2016). Convective drying of hawthorn fruit (*Crataegus* spp.): Effect of experimental parameters on drying kinetics, color, shrinkage, and rehydration capacity. *Food Chem.*, 210, 577-584.
- [31] Calín-Sánchez, A., Figiel, A., Wojdyło, A., Szarycz, M., & Carbonell-Barrachina, A.A. (2014). Drying of garlic slices using convective pre-drying and vacuum-microwave finishing drying: kinetics, energy consumption, and quality studies. *Food Bioprocess Technol.*, 7(2), 398-408.
- [32] Nguyen, T. K, Mondor, M., & Ratti, C. (2018). Shrinkage of cellular food during air drying. *J Food Eng.* 230, 8-17.
- [33] Parthasarathi, S., & Anandharamakrishnan, C. (2014). Modeling of shrinkage, rehydration and textural changes for food structural analysis: a review. *J Food Process Eng.* 37(2), 199-210
- [34] Dehghannya, J., Bozorgh, S., & Heshmati, M.K. (2018). Low temperature hot air drying of potato cubes subjected to osmotic dehydration and intermittent microwave: drying kinetics, energy consumption and product quality indexes. *Heat Mass Transfer.* 54(4), 929-954.

*Research Article***Evaluation of some thermodynamic and physical properties of garlic different thickness under drying by microwave method with ultrasonic pretreatment**Ebrahim Taghinezhad ^{1*}, Mohammad Kaveh ²**1. Department of Agricultural Technology Engineering, Moghan College of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran****2. Department of Biosystems Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.****Abstract**

Garlic has many medicinal properties in the food industry. In this study was investigated the effect of ultrasonic pretreatment (10, 20 and 30 min) on some thermodynamic and physical properties of dried garlic at thicknesses (2, 4 and 6 mm) using microwave at different power (100, 200 and 300 W). 10 mathematical models were used to describe the moisture ratio during garlic drying. The obtained results from this investigation showed that specific energy consumption (SEC) decreased significantly ($P < 0.05$) with increasing ultrasonic time, microwave power as well as with decreasing the thickness of samples. Fitting the mathematical models to the moisture ratios with the experimental data showed that the Logistic model can satisfactorily satisfy the drying curve of the samples in a microwave dryer with ultrasonic pretreatment with high correlation coefficient ($R^2 = 0.9996$), minimum root mean square error (RMSE = 0.0113), and chi-square ($\chi^2 = 0.0009$) to describe. Effective moisture diffusion coefficient of the dried samples was found to be 8.04×10^{-11} to 1.64×10^{-9} m²/s. The highest and lowest SEC was 340 and 35.87 kWh/kg, respectively. The results showed that increasing the microwave power, ultrasonic time, and decreasing thickness of the samples reduced significantly ($P < 0.05$) the shrinkage. By decreasing the microwave power and thickness of the samples as well as increasing the ultrasonic time, reduced significantly ($P < 0.05$) the color value.

Keywords: Specific energy consumption; Shrinkage; Garlic; Ultrasonic; Microwave

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

Nomenclature

D_{eff}	ضریب پخش رطوبت مؤثر (m^2/s)	$RMSE$	ریشه میانگین مربعات خطا
N	تعداد مشاهدات	R^2	ضریب تعیین
M_W	کاهش وزن (kg)	Sh	چروکیدگی (%)
MR	رطوبت نسبی (بی بعد)	SEC_{mec}	انرژی مصرفی مایکروویو (Kw h/kg)
$MR_{exp,i}$	نسبت رطوبت تجربی آم	SEC_{uly}	انرژی مصرفی التراسونیک (Kw h/kg)
$MR_{pre,i}$	نسبت رطوبت پیشگویی شده آم	$\Delta L^*, \Delta b^*, \Delta a^*$	تغییرات رنگ نمونه‌های تازه و خشک شده
M_b	رطوبت تعادلی بر پایه‌ی خشک (d.b.)	ΔE	تغییرات رنگ
M_e	رطوبت اولیه (d.b.)	μ_f	حجم نهایی (cm^3)
M_t	نسبت رطوبت در زمان t	μ_i	حجم اولیه نمونه‌ها (cm^3)
k_1	شیب خط	z	تعداد ثابت‌های خشک‌کن
L	ضخامت نمونه‌ها (m)	t	زمان خشک‌کردن (s)
P	توان مایکروویو (W)	UP	توان فراصوت (KW)
		χ^2	مربع کای