

بررسی تأثیر پیش تیمارهای اتیل اولئات و فراصوت بر برخی ویژگی‌های کیفی بامیه خشک شده به روش مادون قرمز

محسن مختاریان*

۱- گروه علوم و صنایع غذایی، واحد رودهن، دانشگاه آزاد اسلامی، رودهن، ایران

تاریخ پذیرش: ۹۶/۰۵/۲۰

تاریخ دریافت: ۹۵/۰۹/۲۱

چکیده

در این مطالعه تأثیر دماهای خشک کردن (۶۵، ۵۵، و ۷۵°C) و نوع پیش تیمار (اتیل اولئات+کربنات سدیم و فراصوت) بر روی رفتار خشک کردن بامیه مورد مطالعه قرار گرفت. منحنی خشک کردن بامیه توسط مدل‌های تجربی مختلف (آغباشلو و همکاران، انتشار فیک، پلگ، پیچ، دو جمله‌ای و لویس) برازش و مناسب‌ترین مدل جهت برازش منحنی خشک کردن بامیه تعیین شد. نتایج نشان دادند که بالاترین سرعت خشک کردن بامیه با پیش تیمار اتیل اولئات+کربنات سدیم در دمای ۷۵°C بدست آمد. مدل‌های پلگ و دو جمله‌ای به عنوان مناسب‌ترین مدل‌های برازش‌کننده منحنی خشک کردن بامیه تعیین گردیدند. مقادیر ضرایب انتشار رطوبت بین $3/959 \times 10^{-7} \text{m}^2/\text{s}$ تا $7/387 \times 10^{-7} \text{m}^2/\text{s}$ بدست شد ($R^2 > 0/7586$). بیشترین میزان بازآب‌پوشی با پیش تیمار اتیل اولئات+کربنات سدیم در دمای ۶۵°C بدست آمد که بیشترین تغییرات رنگ (ΔE) را نسبت به سایر تیمارها نشان داد. به طور کلی با توجه به نتایج این پژوهش روش‌های خشک کردن با پیش تیمارهای فراصوت و اتیل اولئات+کربنات سدیم در دمای خشک کردن ۵۵°C به عنوان مناسب‌ترین تیمارها جهت خشک کردن بامیه پیشنهاد می‌گردد.

واژه‌های کلیدی: بامیه، مادون قرمز، بازآب‌پوشی، سینتیک خشک کردن، ارزیابی رنگ.

بامیه (*Abelmoschus esculentus* L.) یکی از سبزی‌هایی بوده که در مناطق گرمسیری و نیمه گرمسیری جهان پرورش می‌یابد (۱۹). کشورهای بزرگ تولیدکننده این محصول هندوستان، نیجریه، سودان، عراق، پاکستان، مصر، غنا، عربستان سعودی، ترکیه، مالزی، فیلیپین، ایالات متحده آمریکا، سنگال و کامرون می‌باشد. میزان تولید جهانی بامیه در سال ۲۰۱۲ طبق گزارشات فائو MT ۸۰۴۷۰۹۱ می‌باشد که هندوستان و نیجریه به ترتیب ۷۴/۵۶٪ و ۱۳/۶۶٪ از تولید جهانی را به خود اختصاص داده‌اند (۱۴). به دلیل داشتن ویژگی‌های سلامتی بخش قسمت‌های خوراکی بامیه (مانند برگ‌های تازه، غلاف، گل، ریشه و دانه)، به عنوان یک محصول چند منظوره شناخته شده است. بامیه به شکل‌های مختلفی مانند تازه به عنوان سبزی، سرخ شده، خشک و بخار پز شده در سالاد، سوپ و تاس کباب مصرف می‌گردد. موسیلاژ بامیه کاربردهای پزشکی فراوانی داشته و سبب کاهش کلسترول و دیابت می‌گردد (۱۵). دانه بامیه یکی از منابع مهم روغن (۲۰ تا ۴۰٪) و پروتئین (حاوی اسیدهای آمینه لیزین و تریپتوفان) بشمار می‌رود که قسمت عمده پروفایل اسیدهای چرب آن را اسید لینولئیک (۴۷/۴٪) تشکیل می‌دهد که جزو اسیدهای چرب چند غیراشباعی بوده و نقش اساسی در سلامت انسان ایفا می‌نماید. دانه‌های بامیه می‌توانند به عنوان یک ترکیب فاقد کافئین به صورت خرد و برشته شده جایگزین قهوه شود (۷). یکی از قدیمی‌ترین روش‌های نگهداری محصولات کشاورزی و مواد غذایی خشک کردن می‌باشد که به صورت‌های مختلفی مانند جابجایی هوای داغ، میکروویو، مادون قرمز، خورشیدی، آفتابی و یا روش‌های ترکیبی انجام می‌شود. خشک کردن محصولات کشاورزی تا محتوی رطوبتی ایمن باعث کاهش سرعت رشد ریزسازواره‌ها در طی دوره انبارداری آنها می‌شود. امروزه یکی از مشکلات اساسی در صنایع وابسته به کشاورزی، افزایش تلفات محصول در مرحله خشک کردن به دلیل زمان‌بری و استفاده از دماهای بالا برای خشک کردن محصول است و سالانه خسارت‌های زیادی

را در این بخش متوجه کشاورزان و بالطبع اقتصاد ملی می‌نماید. در حالی که با استفاده از روش‌های نوین خشک کردن مانند تابش مادون قرمز می‌توان علاوه بر سرعت بخشیدن به عملیات خشک کردن، تلفات ناشی از روش‌های رایج خشک کردن را به مقدار قابل توجهی کاهش داد. خشک کردن به وسیله تابش مادون قرمز به ویژه به شکل لایه نازک روش مناسبی است که سبب می‌شود که تغییرات ناشی از حرارت در حداقل ممکن باشد. در نتیجه کیفیت نهایی بالاتر و هزینه‌های فرآیند خشک شدن در مقایسه با روش‌های خشک کردن به صورت صنعتی کاهش می‌یابد. تابش مادون قرمز با سرعت بالاتری جذب پوسته محصول شده و سبب ایجاد حرارت می‌شود که نسبت به خشک‌کن‌های همرفتی، که در آن بخشی از حرارت توسط خروج هوا به هدر می‌رود، راندمان بالاتری داشته و کیفیت محصولات خشک شده با این روش در مقایسه با روش هوای داغ بهتر می‌باشد (۳). تاکنون پژوهش‌های اندکی در مورد خشک کردن بامیه انجام شده است. پندر و همکاران (۲۰۱۲) تأثیر دمای هوای خشک کردن (۵۰، ۶۰، ۷۰ و ۸۰°C) و اندازه نمونه (۱، ۲، ۳ و ۴ cm) را بر برخی از ویژگی‌های کیفی بامیه شامل پروتئین، اسید آسکوربیک و میزان فیبر بررسی کردند. نتایج بدست آمده حاکی از تأثیر معنی‌دار ($p < 0.05$) متغیرهای مستقل بر ویژگی‌های کیفی تحت بررسی بود. حداکثر حفظ پروتئین، اسید آسکوربیک و فیبر در برش‌های ۲ سانتی‌متری و دمای خشک کردن ۶۰°C مشاهده شد (۲۲). ون مانا و همکاران (۲۰۱۲) تأثیر خشک کردن با میکروویو (توان ۵۰۰ تا W ۸۰۰) را بر برخی ویژگی‌های کیفی میوه بامیه بررسی نمودند و نتایج را با روش خشک کردن با هوای داغ در دامنه دمایی ۴۰ تا ۷۰°C مقایسه نمودند. نتایج نشان دادند که نرخ تغییرات اسید آسکوربیک طی خشک کردن با هوای داغ و میکروویو از سینتیک مرتبه اول پیروی نموده و خشک کردن با روش میکروویو با توان W ۸۰۰ می‌تواند گزینه مناسبی جهت خشک کردن بامیه می‌باشد (۲۹). آددجی و همکاران (۲۰۰۸) تأثیر پیش تیمارهای مختلف شامل آنزیم‌زدایی، میکروویو و

شامل اتیل اولئات (درجه خلوص ۹۸٪) و کربنات سدیم (درجه خلوص ۹۸٪) از شرکت مرک آلمان تهیه شدند.

۲-۲- روش‌ها

۲-۲-۱- آماده‌سازی مواد اولیه

نمونه‌های تازه بامیه، به منظور کاهش فعالیت‌های تنفسی و بیولوژیکی تا زمان انجام آزمایشات در یخچال در دمای ۳ تا ۴°C نگهداری شدند. مقدار رطوبت اولیه بامیه تازه به روش آون‌گذاری در دمای ۱۰۵°C، ۸۴/۴۹٪ (بر مبنای وزن مرطوب) تعیین گردید (۴، ۹). نمونه‌ها پس از خارج شدن از یخچال پاکسازی و مواد بیگانه جداسازی گردیده و توسط کولیس ابعاد محوری و برخی از ویژگی‌های فیزیکی آنها اندازه‌گیری شد (جدول ۱). نمونه‌هایی برای فرآیند خشک کردن انتخاب شدند که اندازه آنها به یکدیگر نزدیک بود و در دامنه میانگین جامعه قرار داشتند. در محاسبه ویژگی‌های فیزیکی نمونه‌ها از روابط (۱) تا (۵) استفاده گردید (۲۰).

$$D_a = \frac{L+W+T}{3} \quad (1)$$

$$D_g = \sqrt[3]{(L+W+T)} \quad (2)$$

$$\phi = \frac{\sqrt[3]{(L+W+T)}}{L} \quad (3)$$

$$S = \pi D_g^2 \quad (4)$$

$$V = \frac{\pi W T L^2}{6(2L - \sqrt{WT})} \quad (5)$$

در این معادلات، L طول (m)، W عرض (m)، T ضخامت (m)، D_a قطر حسابی (m)، D_g قطر هندسی (m)، ϕ کرویت (%)، S سطح جانبی (m^2) و V حجم (m^3) است.

میدان الکتریکی ضربانی را روی رفتار خشک کردن بامیه مطالعه نمودند. پیش تیمارها تأثیر معنی‌داری ($p < 0.05$) روی آهنگ خشک کردن محصول داشتند و نمونه شاهد دارای کمترین ضریب انتشار رطوبت و نمونه پیش تیمار شده با میدان الکتریکی ضربانی (بیشترین انرژی خروجی ۴ kV/cm و ۴ nF ۵۰۰) بیشترین مقدار ضریب انتشار رطوبت را کسب نمود. همچنین نتایج حاکی از آن بود که ظرفیت بازآب‌پوشی نمونه‌ها تحت تأثیر نوع پیش تیمار قرار گرفت (۵). آدوم و همکاران (۱۹۹۷) اثر ترکیبی زمان خشک کردن و ضخامت برش را روی خشک کردن بامیه به روش خورشیدی مطالعه نمودند. نتایج نشان داد که ضخامت برش تأثیر معنی‌دار ($p < 0.01$) روی رطوبت، فیبر و میزان خاکستر نمونه داشت در حالی که روی میزان ویتامین C، ویسکوزیته، رنگ و بار میکروبی تأثیر چشمگیری نداشت. همچنین این محققین گزارش نمودند که تأثیر زمان خشک کردن روی کلیه پارامترهای تعیین شده معنی‌دار بود. به طور کلی این محققین اذعان داشتند که ضخامت برش ۱۰ میلی‌متر و زمان خشک کردن ۴۸ h به عنوان مناسب‌ترین متغیرها برای خشک کردن خورشیدی بامیه می‌باشند (۶). هدف از این مطالعه بررسی تأثیر پیش تیمارهای مختلف بر روی رفتار خشک کردن و برخی ویژگی‌های کیفی بامیه به روش مادون قرمز می‌باشد که بررسی مطالعات پیشین نشان داد که تاکنون مطالعه‌ای در این خصوص انجام نشده است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- مواد

در این مطالعه، بامیه تازه (*Abelmoschus esculentus* L.) از بازار محلی خریداری شد و ترکیبات شیمیایی مورد استفاده

جدول ۱- ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی بامیه تازه کامل.

میانگین	شاخص (واحد)	میانگین	شاخص (واحد)
خواص فیزیکی*			
۲/۸۵	میانگین قطر حسابی (cm)	۸۴/۴۹	رطوبت اولیه (%w.b)
۲/۰۴	میانگین قطر هندسی (cm)	۵/۳۶	طول (cm)
۶/۷۴	وزن واحد (g)	۱/۶۳	عرض (cm)
۴/۲۱	حجم (cm ³)	۱/۵۷	ضخامت (cm)
۳۸/۰۵	کرویت (%)	۱۳/۰۶	سطح جانبی (cm ²)
-	-	۱/۶۰	دانسیته ذره (g/cm ³)
خواص شیمیایی و تغذیه‌ای غلاف بامیه در هر ۱۰۰ g بخش مأكول**			
۱/۲۰	آهن (mg)	۸۸/۶	آب (%)
۱۸۵/۰۰	بتا-کاروتن (µg)	۲/۱۰	پروتئین (g)
۰/۰۸	ریبوفلاوین (mg)	۸/۲۰	کربوهیدرات (g)
۰/۰۴	تیامین (mg)	۰/۲۰	چربی (g)
۰/۶۰	نیاسین (mg)	۱/۷۰	فیبر (g)
۴۷/۰۰	اسید آسکوربیک (mg)	۸۴/۰۰	کلسیم (mg)
۱۴۴/۰۰	انرژی (kJ)***	۹۰/۰۰	فسفر (mg)

*اندازه‌گیری شده در پژوهش حاضر. **مرجع: فکادو جمده و همکاران (۱۵). ***معادل kcal ۳۵ ~ (۱ cal = ۴/۱۸ J)

محلول ۲٪ اتیل اولئات و ۵٪ کربنات سدیم (Na₂CO₃) به مدت ۱ min در دمای اتاق فروری شدند (۱۰، ۲۶).

۲-۲-۳- فرآیند خشک کردن

برش‌های بامیه پس از اعمال پیش تیمارها در سه دمای ۵۵، ۶۵ و ۷۵°C در یک خشک‌کن مادون قرمز مجهز به ترازوی دیجیتال با دقت ± 0.001 g تا رسیدن به وزن ثابت خشک شدند. قبل از انجام هر آزمایش، دستگاه خشک‌کن به مدت ۱۰ min روشن تا شرایط دمایی تعدیل و به دمای مورد نظر برسد. در هر آزمون ۳ g بامیه مورد استفاده قرار گرفت. در طی خشک شدن وزن نمونه‌ها در فواصل زمانی ۵ min ثبت گردید. در انتها به مدت ۱۵ min نمونه‌ها خنک و در کیسه‌های پلی اتیلنی بسته‌بندی شدند.

۲-۲-۲- پیش تیمار
به منظور خشک کردن بامیه، نمونه‌ها در جهت طولی به تکه‌های ۲/۵ cm × ۲/۵ cm برش داده شدند و سپس پیش تیمارهای زیر اعمال و با نمونه شاهد (فاقد پیش تیمار) مقایسه گردیدند:
فراصوت (US): برش‌های بامیه در حمام اولتراسوند (Bandelin, Sonorex, DT 102 H-RC, 480 W, 35 kHz) حاوی آب مقطر در دمای اتاق غوطه‌ور و به مدت ۲۰ min در معرض امواج فراصوت قرار گرفته و در ادامه رطوبت سطحی نمونه توسط کاغذ صافی حذف گردید (۱۶، ۳۰). تیمار شیمیایی (CT): برش‌های بامیه به طور جداگانه در

۲-۲-۴- مدلسازی منحنی خشک کردن

در این تحقیق نسبت رطوبت نمونه توسط معادله (۶) محاسبه گردید:

$$MR = \frac{(X_t - X_e)}{(X_o - X_e)} \quad (6)$$

در این معادله، X_t مقدار رطوبت در لحظه t (d.b.)، X_o مقدار رطوبت اولیه (d.b.) و X_e مقدار رطوبت تعادلی (d.b.) می‌باشد.

مدل‌های خشک کردن تک لایه‌ای بامیه براساس مدل‌های توصیه شده توسط محققانی که در این زمینه کار نموده‌اند طبق جدول ۲ انتخاب گردید (۴، ۹). در این مطالعه مدلسازی ریاضی توسط نرم افزار سیگما پلات نسخه ۱۱ شبیه‌سازی گردید. منحنی‌های خشک کردن توسط هفت مدل ریاضی مختلف که به طور گسترده‌ای برای مواد بیولوژیکی و بیشتر مواد غذایی قابلیت کاربرد دارند، برازش گردیدند (۴، ۹).

جدول ۲- مدل‌های سینتیکی تک لایه‌ای جهت پیش‌بینی رفتار خشک کردن بامیه.

نام مدل	معادله مدل
آغباشلو و همکاران	$MR = \exp(-kt/1+k_1t)$
انتشار فیک	$MR = a \exp(-c(t/L^2))$
پلگ	$MR = 1 - (t/(a+kt))$
پیچ	$MR = \exp(-kt^n)$
دو جمله‌ای	$MR = a \exp(-k_0t) + b \exp(-k_1t)$
نیوتن (لويس)	$MR = \exp(-kt)$

در این تحقیق برای انتخاب مناسب‌ترین مدل توصیف‌کننده سینتیک خشک کردن لایه‌ای نازک بامیه، ضریب تبیین (R^2)، ضریب تبیین تعدیل شده (R^2_{adj})، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، مربع کای (χ^2) و مدول انحراف نسبی میانگین (P) بین داده‌های تجربی و پیش‌بینی شده توسط هر مدل محاسبه و با سایر مدل‌ها مورد مقایسه قرار گرفت. این معیارها توسط معادلات (۷) تا (۱۰) محاسبه گردید.

(۹)

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

(۱۰)

$$P(\%) = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|MR_{pre,i} - MR_{exp,i}|}{MR_{exp,i}}$$

در این معادلات $MR_{exp,i}$ نسبت رطوبت مشاهده شده در N آمین اندازه‌گیری، $MR_{pre,i}$ نسبت رطوبت پیش‌بینی شده در N آمین اندازه‌گیری، \overline{MR} نسبت رطوبت تجربی میانگین، N تعداد مشاهدات و Z تعداد ضرایب ثابت مدل می‌باشد.

برای تعیین مناسب‌ترین مدل جهت پیش‌بینی رفتار خشک شدن بامیه معیارهای R^2 ، R^2_{adj} ، RMSE، χ^2 و P مورد ارزیابی قرار گرفتند. در نهایت مدل یا مدل‌های خشک کردن با بیشینه R^2 و R^2_{adj} و کمینه پارامترهای RMSE، χ^2 و P به عنوان مدل مناسب برای توصیف سینتیک خشک کردن بامیه انتخاب گردید (۴، ۹).

(۷)

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

(۸)

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

۲-۲-۵- ضریب انتشار رطوبت و انرژی فعالسازی

با توجه به قرار گرفتن منحنی آهنگ خشک کردن بامیه در مرحله سرعت نزولی^۱، امکان بکارگیری قانون دوم انتشار فیک^۲ برای تجزیه و تحلیل فرآیند میسر می شود. حل معادله قانون دوم فیک برای یک جسم با شکل هندسی استوانه نامحدود توسط معادله (۱۱) بیان می شود (۳۰):

$$(11) \quad MR = \frac{X_t - X_e}{X_0 - X_e} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4}{b_n^2} \exp\left(-b_n^2 \frac{D_{eff} t}{r^2}\right)$$

در این معادله، MR نسبت رطوبت (بدون بُعد)، X_0 میزان رطوبت اولیه در فاز نزولی یا رطوبت بحرانی (d.b.)، X_e میزان رطوبت تعادلی (d.b.)، X_t میزان رطوبت در هر لحظه (d.b.)، n تعداد جملات بسط (۱، ۲، ۳ و ...)، r شعاع (m)، D_{eff} ضریب نفوذ مؤثر (m²/s)، t زمان خشک کردن (s) می باشد. برای یک دوره خشک کردن طولانی مدت، جمله اول (n=1) معادله (۱۰) می تواند برای محاسبه نفوذ رطوبت در نظر گرفته شود. معادله (۱۲) با گرفتن لگاریتم از معادله (۱۰) بدست آمد:

$$(12) \quad \ln MR = \ln \frac{4}{b_n^2} - \frac{b_n^2 D_{eff}}{r^2} t$$

با ترسیم نمودار $\ln MR$ بر حسب زمان خشک کردن از طریق شیب خط (α) می توان نفوذ رطوبت را محاسبه نمود (معادله (۱۳)).

$$(13) \quad \alpha = \frac{b_n^2 D_{eff}}{r^2}$$

با بازنویسی معادله (۱۲) داریم:

$$(14) \quad \ln MR = \ln \frac{4}{b_n^2} - \alpha t$$

با توجه به تغییرات ضریب نفوذ رطوبت با دما، امکان پیش بینی آن توسط معادله آرنیوس (معادله ۱۴) فراهم می باشد. با گرفتن لگاریتم از دو طرف این معادله و ترسیم $\ln D_{eff}$ بر حسب

تابعی از T^{-1} ، انرژی فعالسازی توسط رابطه (۱۵) محاسبه می شود.

$$(15) \quad D_{eff} = D_0 \exp\left(\frac{E_a}{RT}\right)$$

در این معادله، D_0 ضریب پیش نمای آرنیوس (بدون بُعد)، E_a انرژی اکتیواسیون (kJ/mol)، T دمای مطلق (K) و R ثابت جهانی گازها (۸/۳۱۴×۱۰^{-۳} kJ/mol K) است (۱۰).

۲-۲-۶- بازآب پوشی

برای این آزمون ۱۰ g از نمونه خشک شده تحت شرایط مختلف خشک کردن، در ۱۰۰ g آب مقطر (نسبت ۱ به ۱۰) با دمای ۶۰°C برای مدت ۵۰ min غوطه ور شد. میزان بازآب پوشی توسط رابطه (۱۶) محاسبه گردید (۸):

$$(16) \quad RR = \frac{W_r}{W_d}$$

در معادله (۱۶)، RR میزان بازآب پوشی (kg/kg)، W_r وزن نمونه بعد از بازآب پوشی (kg) و W_d وزن نمونه خشک اولیه (kg) است.

۲-۲-۷- اندازه گیری رنگ

به منظور سنجش شاخص های رنگی بامیه تازه و خشک شده، از نرم افزار گرافیکی Image J استفاده شد. تجهیزات لازم برای عکس برداری شامل دوربین دیجیتال و جعبه چوبی (جداره های داخلی آن توسط رنگ سفید جهت جلوگیری از انعکاس نور و تهیه عکس با کیفیت بالا پوشیده شده است) بود. جهت تأمین نور مورد نیاز برای عکس برداری از یک عدد لامپ فلورسنت ۱۲ W (Master، ساخت چین) استفاده شد. سپس عکس ها در نرم افزار مربوطه بارگذاری و مقادیر L ، a و b تعیین گردید. در این سیستم رنگ سنجی، شاخص L میزان روشنایی در محدوده ۰ (سیاه) تا ۱۰۰ (سفید) را اندازه گیری می نماید. همچنین دو پارامتر a و b به ترتیب نشان دهنده سبزی (۱۲۰-) تا قرمزی (۱۲۰+) و آبی (۱۲۰-) تا زردی (۱۲۰+)

1 - Falling rate period (FRP)

2 - Second law of Fick's diffusion

است. تغییرات کلی رنگ بامیه خشک شده (ΔE) توسط رابطه (۱۷) محاسبه شد.

(۱۷)
$$\Delta E = \sqrt{(L - L_0)^2 + (a - a_0)^2 + (b - b_0)^2}$$

در این رابطه، اندیس‌های L_0 ، a_0 و b_0 مقادیر نمونه مرجع (بامیه تازه) می‌باشند (۲۷، ۲۸). شاخص‌های رنگی اشباعیت^۱ (که به عنوان فاصله عمودی از شاخص روشنایی تعریف می‌شود) و تک فام بودن (طول موج غالب)^۲ توسط معادلات (۱۸) و (۱۹) تعیین شد (۱۷، ۲۴):

(۱۸)
$$C^* = [a^2 + b^2]^{0.5}$$

(۱۹)
$$\begin{cases} h^* = \tan^{-1}\left[\frac{b}{a}\right], & \text{if } a > 0; \quad b > 0 \\ h^* = 180^\circ + \tan^{-1}\left[\frac{b}{a}\right], & \text{if } a < 0; \quad b > 0 \\ h^* = 270^\circ + \tan^{-1}\left[\frac{b}{a}\right], & \text{if } a < 0; \quad b < 0. \\ h^* = 360^\circ + \tan^{-1}\left[\frac{b}{a}\right], & \text{if } a > 0; \quad b < 0 \end{cases}$$

مقدار شاخص تک فام یا تک رنگ بر حسب درجه بیان شده و تغییرات آن بدین صورت است که: صفر درجه یعنی شروع روی محور a (قرمزی)، 90° برای محور b (زرده)، 180° برای محور $-a$ (سبزی) و 270° برای محور $-b$ (آبی) و 360° معادل صفر درجه (صفر درجه = 360°) می‌باشد (۲۴).

۳- نتایج و بحث

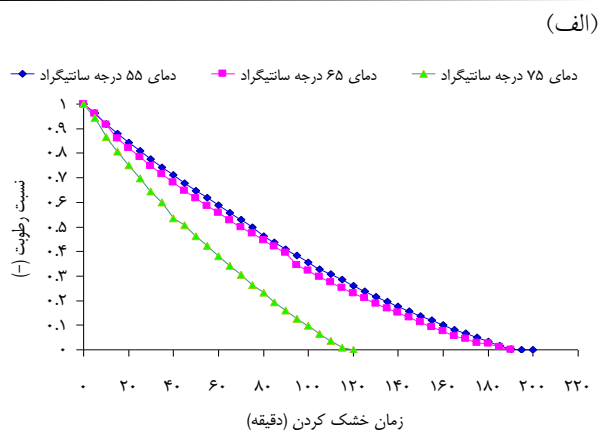
۳-۱- رفتار خشک کردن بامیه

در این پژوهش تأثیر روش‌های مختلف فرآوری بر روی رفتار خشک کردن مادون قرمز قطعات بامیه مورد مطالعه قرار گرفت. مقدار رطوبت اولیه بامیه تازه ۸۴/۴۹٪ (بر مبنای وزن مرطوب) بود که با استفاده از آون در دمای 105°C تعیین گردید. منحنی تغییرات نسبت رطوبت در برابر زمان خشک کردن در شرایط مختلف خشک کردن در شکل ۱ ارائه شده است. همانطور که ملاحظه می‌گردد، منحنی خشک کردن بامیه از یک روند نزولی تبعیت نموده و مرحله سرعت ثابت خشک کردن در آن مشاهده نگردید. پژوهشگران متعددی گزارش نمودند که مرحله سرعت ثابت خشک کردن در محصولات دارای رطوبت سطحی زیاد مشاهده می‌شود.

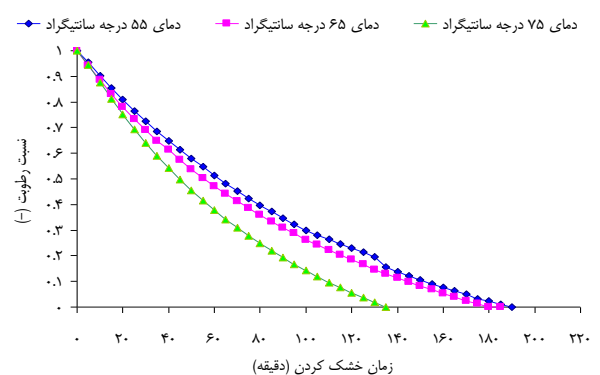
۲-۲- تجزیه و تحلیل آماری و بهینه‌سازی

جهت تجزیه تحلیل آماری داده‌ها از نرم افزار SAS نسخه ۹/۱/۳ و از طرح کاملاً تصادفی استفاده گردید. جهت مقایسه میانگین داده‌ها از آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح اطمینان ۹۵٪ استفاده شد. به علاوه برای رسم نمودارها از نرم افزار

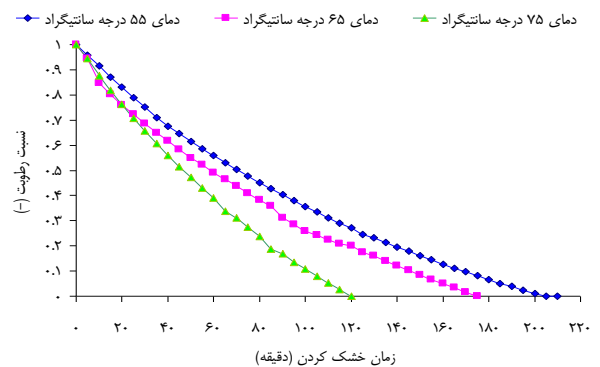
رگرسیون خطی برازش داده شد تا از طریق شیب خط حاصل، آهنگ خشک کردن در روش‌های مختلف فرآوری مقایسه گردد. مقادیر شیب خط بدست آمده جهت مقایسه بهتر تأثیر پیش فرآوری روی آهنگ خشک کردن بامیه، با روش‌های متداول آماری (آنالیز واریانس به روش حداقل اختلاف معنی‌دار یا LSD در سطح اطمینان ۹۵٪) مورد مقایسه میانگین قرار گرفت و نتایج در جدول ۳ درج شد. نتایج مقایسه میانگین نشان داد که بیشترین شیب خط (یعنی بالاترین آهنگ خشک کردن) در روش خشک کردن با اتیل اولئات+کربنات سدیم در دمای ۷۵°C مشاهده شد که اختلاف آماری معنی‌دار ($p < 0.05$) با نمونه شاهد در همان دمای خشک کردن داشت. به طور کلی بررسی شیب خطوط نشان داد که نمونه‌های پیش تیمار شده با اتیل اولئات+کربنات سدیم و فراصوت دارای شیب بیشتری نسبت به نمونه شاهد بودند. نتایج مشابه در پژوهش دویماز و پالا (۲۰۰۲) در مورد خشک کردن فلفل قرمز مشاهده شد که در پژوهش خود اذعان نمود که این حالت به علت واکنش حل‌کنندگی اتیل اولئات بوده که پوسته مومی و دیواره یاخته بامیه را در خود حل نموده و سبب کاهش زمان خشک کردن و افزایش آهنگ خشک کردن می‌گردد (۱۲). همچنین، نتایج نشان داد که نمونه‌های بامیه پیش تیمار شده با امواج فراصوت نیز سبب تسریع آهنگ خشک کردن گردید. برخی محققین بیان نمودند که، این حالت به علت فروپاشی بافت سلولی و تغییرات ریزساختاری بافت نمونه به دلیل پدیده حفره‌زایی^۱ است (۱۶).



(ب)



(ج)



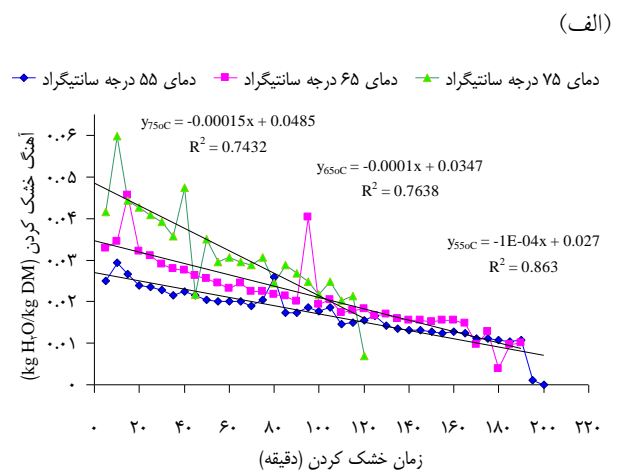
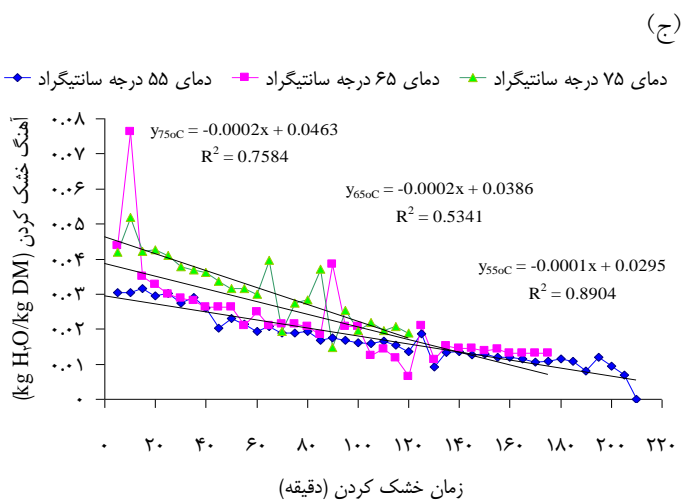
شکل ۱- تأثیر زمان خشک کردن بر روی تغییرات نسبت رطوبت بامیه: (الف) شاهد، (ب) اتیل اولئات+کربنات سدیم و (ج) فراصوت.

شکل ۲ تغییرات آهنگ خشک کردن بامیه را در شرایط مختلف فرآوری بر حسب تابعی از زمان نشان می‌دهد. جهت مشخص شدن تأثیر نوع پیش تیمار در تسریع روند خشک کردن بامیه، منحنی آهنگ خشک کردن بامیه‌ها توسط معادله

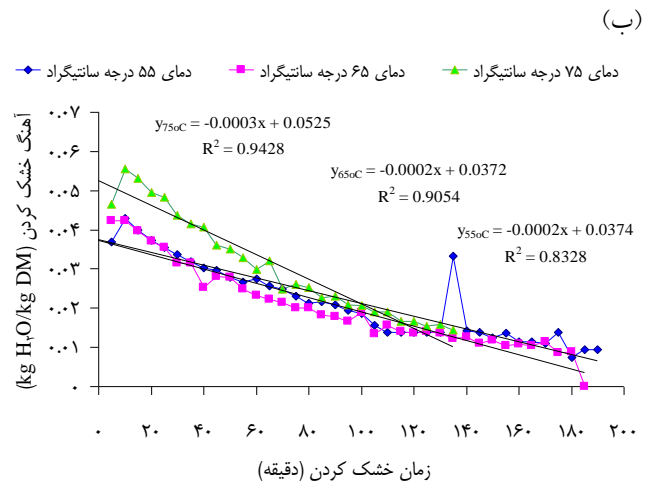
جدول ۳- مقایسه میانگین شیب خطوط رگرسیونی* جهت بررسی تأثیر پیش تیمارهای مختلف بر روند آهنگ خشک کردن بامیه.

پیش تیمار	درجه حرارت (°C)/شیب خط (°)		
	۷۵	۶۵	۵۵
شاهد	۰/۰۰۰۱۵ ^b	۰/۰۰۰۱ ^c	۰/۰۰۰۱ ^c
اتیل اولئات+کربنات سدیم	۰/۰۰۰۰۳ ^a	۰/۰۰۰۰۲ ^b	۰/۰۰۰۰۲ ^b
فراصوت	۰/۰۰۰۰۲ ^b	۰/۰۰۰۰۲ ^b	۰/۰۰۰۰۱ ^c

*بیشتر بودن شیب خط معادل بالاتر بودن آهنگ خشک کردن است.



شکل ۲- تغییرات آهنگ خشک کردن بامیه در شرایط مختلف فرآوری بر حسب زمان خشک کردن؛ (الف) شاهد، (ب) اتیل اولئات+کربنات سدیم و (ج) فراصوت.



آماري مورد آزمون شامل R^2 ، R^2_{adj} ، χ^2 و P و RMSE بودند. مقادير هر يك از اين پارامترها در جداول ۴ تا ۶ ارائه شده است. در کلیه حالات مقدار R^2 برای مدل‌های مورد برازش، بیشتر از ۰/۹۵۶۶ بدست آمد. بازه تغییرات R^2 بین

۲-۳- مدلسازی منحنی‌های خشک کردن منحنی‌های خشک کردن بامیه توسط شش مدل تجربی خشک کردن لایه‌ای نازک مورد برازش قرار گرفت. پارامترهای

پیش تیمارهای مختلف (آنزیم‌بری با آب جوش، کربنات پتاسیم و اتیل اولئات) را بر روی فرآیند آبرزدایی فلفل قرمز چیلی و روند خشک کردن آن بررسی نمودند. نتایج مدل‌سازی منحنی خشک کردن نشان داد که در بین مدل‌های مختلف مورد برازش، مدل لگاریتمی تطابق بیشتری با داده‌های تجربی داشت و به عنوان بهترین مدل جهت پیش‌بینی منحنی خشک کردن فلفل قرمز چیلی انتخاب گردید (۱، ۲).

۰/۹۵۶۶ تا ۰/۹۹۹۹، R^2_{adj} بین ۰/۹۵۶۶ تا ۰/۹۹۹۹، χ^2 بین ۰/۰۰۰۰۵ تا ۰/۰۰۳۶۵، P بین ۰/۱۲۳ تا ۵/۴۲۸ و دامنه تغییرات RMSE نیز بین ۰/۰۰۲۱ تا ۰/۰۶۳۱ قرار داشت. نتایج برازش مدل‌های سینتیکی نشان داد که مدل‌های دوجمله‌ای و پلگ به دلیل بالاترین R^2 و R^2_{adj} و کمترین χ^2 ، P و RMSE به عنوان بهترین مدل در پیش‌بینی منحنی خشک کردن بامیه انتخاب شدند. توکلی‌پور و همکاران (۱۳۹۴) در پژوهشی تأثیر

جدول ۴- پارامترهای آماری و ضرایب ثابت مدل‌های تجربی برازش‌کننده منحنی خشک کردن بامیه در دمای ۵۵°C.

R^2_{adj}	R^2	P(%)	RMSE	χ^2	نام مدل/پیش تیمار
شاهد					
۰/۹۹۸۶	۰/۹۹۸۶	۰/۹۱۳	۰/۰۱۱۳	۰/۰۰۰۱۳	آغباشلو و همکاران ($k_1 = -0.0032$ و $k = 0.0071$)
۰/۹۶۶۸	۰/۹۶۶۶	۴/۷۳۹	۰/۰۵۵۳	۰/۰۰۳۳۰	انتشار فیک ($L = -9.05/88$ و $c = 9/9 \times 10^2$, $a = 1/0.88$)
۰/۹۹۹۲	۰/۹۹۹۲	۰/۶۴۴۰	۰/۰۰۸۴۷	۰/۰۰۰۰۷۵	پلگ ($a = 119/78$ و $k = 0.3695$)
۰/۹۸۹۸	۰/۹۹۰	۲/۵۶۴	۰/۰۳۰۳	۰/۰۰۰۰۹۶	پیچ ($n = 1/397$ و $k = 0.0177$)
۰/۹۶۶۷	۰/۹۶۹۲	۴/۴۹۳	۰/۰۵۳۱	۰/۰۰۳۱۲	دو جمله‌ای ($h = 5/168$ و $b = -0.112$, $a = 1/112$, $k = 0.123$)
۰/۹۵۶۶	۰/۹۵۶۶	۵/۴۲۸	۰/۰۶۳۱	۰/۰۰۴۰۸	نیوتن (لوئیس) ($k = 0.1106$)
اتیل اولئات+کربنات سدیم					
۰/۹۹۷۲	۰/۹۹۷۳	۱/۱۹۵	۰/۰۱۵۱	۰/۰۰۰۰۲۴	آغباشلو و همکاران ($k_1 = -0.0025$ و $k = 0.0092$)
۰/۹۸۱	۰/۹۸۲	۳/۲۷۶	۰/۰۳۸۹	۰/۰۰۱۶۴	انتشار فیک ($L = 2/640$ و $c = 0.9193$, $a = 1/0.573$)
۰/۹۹۹۷	۰/۹۹۹۷	۰/۴۱۱۴	۰/۰۰۵۲	۰/۰۰۰۰۲۹	پلگ ($a = 93/436$ و $k = 0.5025$)
۰/۹۹۱۸	۰/۹۹۲	۲/۱۹۸	۰/۰۲۵۹	۰/۰۰۰۰۷۰	پیچ ($n = 1/232$ و $k = 0.043$)
۰/۹۹۹۷	۰/۹۹۹۷	۰/۳۳۳۷	۰/۰۰۵۱	۰/۰۰۰۰۰۳	دو جمله‌ای ($h = -0.0065$ و $b = -0.049$, $a = 1/0.522$, $k = 0.097$)
۰/۹۷۷۷	۰/۹۷۷۷	۳/۶۰۵	۰/۰۴۳۴	۰/۰۰۱۹۳	نیوتن (لوئیس) ($k = 0.124497$)
فراصوت					
۰/۹۹۷۰	۰/۹۹۷۰	۱/۳۱۴	۰/۰۱۵۸	۰/۰۰۰۰۲۶	آغباشلو و همکاران ($k_1 = -0.00241$ و $k = 0.00809$)
۰/۹۷۷۸	۰/۹۷۸۹	۳/۴۷۵	۰/۰۴۲۴	۰/۰۰۱۹۳	انتشار فیک ($L = 1/4785$ و $c = 0.259$, $a = 1/0.610$)
۰/۹۹۹۹	۰/۹۹۹۹	۰/۲۴۱	۰/۰۰۳۲	۰/۰۰۰۰۱۱	پلگ ($a = 106/84$ و $k = 0.4795$)
۰/۹۹۰۳	۰/۹۹۰۵	۲/۳۹۲	۰/۰۲۸۳	۰/۰۰۰۰۸۴	پیچ ($n = 1/253$ و $k = 0.034$)
۰/۹۹۹۸	۰/۹۹۹۸	۰/۲۷۵۲	۰/۰۰۳۵۹	۰/۰۰۰۰۱۴	دو جمله‌ای ($h = -0.0052$ و $b = -0.676$, $a = 1/0.67$, $k = 0.082$)
۰/۹۷۴۰	۰/۹۷۴۰	۳/۹۴۵	۰/۰۴۷۰	۰/۰۰۲۲۶	نیوتن (لوئیس) ($k = 0.1116$)

k: ثابت نرخ خشک کردن (h^{-1})

جدول ۵- پارامترهای آماری و ضرایب ثابت مدل‌های تجربی برازش‌کننده منحنی خشک کردن بامیه در دمای ۶۵°C.

R^2_{adj}	R^2	P(%)	RMSE	χ^2	نام مدل/پیش تیمار
شاهد					
۰/۹۹۷۹	۰/۹۹۷۹	۱/۱۱۰	۰/۰۱۳۴	۰/۰۰۰۱۹	آغباشلو و همکاران ($k_1 = -0/00308$ و $k = 0/00791$)
۰/۹۶۹۸	۰/۹۷۱۴	۴/۲۶۲	۰/۰۵۰۲	۰/۰۰۲۷۳	انتشار فیک ($L = -74/98$ و $c = 71/07$, $a = 1/073$)
۰/۹۹۹۲	۰/۹۹۹۲	۰/۷۳۳	۰/۰۰۸۴	۰/۰۰۰۰۷۵	پلگ ($a = 108/30$ و $k = 0/4113$)
۰/۹۸۹۳	۰/۹۸۹۶	۲/۵۷۵	۰/۰۳۰۳	۰/۰۰۰۰۹۶	پیچ ($n = 1/333$ و $k = 0/00259$)
۰/۹۷۱۲	۰/۹۷۳۵	۴/۰۷۷	۰/۰۴۸۴	۰/۰۰۲۶۱	دو جمله‌ای ($h = 5/201$ و $b = -0/095$, $a = 1/095$, $k = 0/0129$)
۰/۹۶۴۲	۰/۹۶۴۲	۴/۸۲۱	۰/۰۵۶۲	۰/۰۰۳۲۴	نیوتن (لوئیس) ($k = 0/01174$)
اتیل اولئات+کربنات سدیم					
۰/۹۹۷۱	۰/۹۹۷۲	۱/۲۷۰	۰/۰۱۵۲	۰/۰۰۰۰۲۴	آغباشلو و همکاران ($k_1 = -0/00233$ و $k = 0/01067$)
۰/۹۸۴۴	۰/۹۸۵۲	۲/۸۷۴	۰/۰۳۵۰	۰/۰۰۱۳۳	انتشار فیک ($L = -1/568$ و $c = 0/0353$, $a = 1/0450$)
۰/۹۹۹۹	۰/۹۹۹۹	۰/۱۲۳	۰/۰۰۲۱	۰/۰۰۰۰۰۵	پلگ ($a = 80/405$ و $k = 0/5547$)
۰/۹۹۲۳	۰/۹۹۲۶	۲/۰۶۰	۰/۰۲۴۹	۰/۰۰۰۰۶۵	پیچ ($n = 1/18865$ و $k = 0/00596$)
۰/۹۹۹۹	۰/۹۹۹۹	۰/۲۰۴۸	۰/۰۰۲۷	۰/۰۰۰۰۰۸	دو جمله‌ای ($h = -0/0076$ و $b = -0/034$, $a = 1/0312$, $k = 0/0112$)
۰/۹۸۲۶	۰/۹۸۲۶	۳/۱۲۳	۰/۰۳۸۰	۰/۰۰۰۱۴۸	نیوتن (لوئیس) ($k = 0/0137431$)
فراصوت					
۰/۹۹۳۲	۰/۹۹۳۴	۱/۷۶۸	۰/۰۲۲۷	۰/۰۰۰۰۵۴	آغباشلو و همکاران ($k_1 = -0/00222$ و $k = 0/01052$)
۰/۹۸۰۱	۰/۹۸۱۲	۳/۰۴۲	۰/۰۳۸۳	۰/۰۰۰۱۶۰	انتشار فیک ($L = -30195/6$ و $c = 1/25 \times 10^7$, $a = 1/0240$)
۰/۹۹۷۶	۰/۹۹۷۷	۱/۰۰۷	۰/۰۱۳۴	۰/۰۰۰۰۱۹	پلگ ($a = 83/373$ و $k = 0/5374$)
۰/۹۸۶۹	۰/۹۸۷۳	۲/۴۸۶	۰/۰۳۱۵	۰/۰۰۰۱۰۵	پیچ ($n = 1/1528$ و $k = 0/00678$)
۰/۹۹۸۲	۰/۹۹۸۴	۰/۸۵۲	۰/۰۱۱۲	۰/۰۰۰۰۱۴	دو جمله‌ای ($h = 0/0107$ و $b = 0/995$, $a = -0/019$, $k = -0/0118$)
۰/۹۸۰۴	۰/۹۸۰۴	۳/۰۵۴	۰/۰۳۹۱	۰/۰۰۰۱۵۷	نیوتن (لوئیس) ($k = 0/01335$)
k : ثابت نرخ خشک کردن (h^{-1})					

جدول ۶- پارامترهای آماری و ضرایب ثابت مدل‌های تجربی برازش‌کننده منحنی خشک کردن بامیه در دمای ۷۵°C.

R ² _{adj}	R ²	P(%)	RMSE	χ^2	نام مدل/پیش تیمار	شاهد
۰/۹۹۶۸	۰/۹۹۶۹	۱/۴۱۵	۰/۰۱۶۷	۰/۰۰۰۳۰۶		آغباشلو و همکاران ($k_1 = -0/0049$ و $k = 0/01174$)
۰/۹۶۵۹	۰/۹۶۸۷	۴/۴۴۷	۰/۰۵۳۲	۰/۰۰۳۲۱		انتشار فیک ($L = -11/829$ و $c = 2/7672$, $a = 1/073$)
۰/۹۹۹۶	۰/۹۹۹۷	۰/۴۴۳	۰/۰۰۵۵	۰/۰۰۰۰۳۳		پلگ ($a = 73/90$ و $k = 0/3717$)
۰/۹۸۷۳	۰/۹۸۷۹	۲/۷۶۲	۰/۰۳۳۱	۰/۰۰۱۱۹		پیچ ($n = 1/347$ و $k = 0/00426$)
۰/۹۹۹۶	۰/۹۹۹۶	۰/۴۵۵	۰/۰۰۵۶	۰/۰۰۰۰۳۸		دو جمله‌ای ($h = 0/0106$ و $b = 1/171$, $a = -0/1712$, $k = -0/0056$)
۰/۹۶۱۲	۰/۹۶۱۲	۵/۰۰۸	۰/۰۵۹۲	۰/۰۰۳۶۵		نیوتن (لویس) ($k = 0/01776$) اتیل اولئات+کربنات سدیم
۰/۹۹۸۵	۰/۹۹۸۶	۰/۸۷۱	۰/۰۱۱۱	۰/۰۰۰۱۳		آغباشلو و همکاران ($k_1 = -0/0036$ و $k = 0/0127$)
۰/۹۸۱۳	۰/۹۸۲۷	۳/۲۲۸	۰/۰۳۹۰	۰/۰۰۱۷۰		انتشار فیک ($L = -1/0049$ و $c = 0/1876$, $a = 1/0655$)
۰/۹۹۹۶	۰/۹۹۹۶	۰/۴۸۰	۰/۰۰۶۰	۰/۰۰۰۰۴		پلگ ($a = 67/722$ و $k = 0/4912$)
۰/۹۹۴۱	۰/۹۹۴۳	۱/۸۱۲	۰/۰۲۲۳	۰/۰۰۰۰۵۳		پیچ ($n = 1/264$ و $k = 0/00579$)
۰/۹۹۹۹	۰/۹۹۹۹	۰/۱۶۶	۰/۰۰۲۵	۰/۰۰۰۰۰۷۴		دو جمله‌ای ($h = 0/0119$ و $b = 1/187$, $a = -0/178$, $k = -0/0021$)
۰/۹۷۷۰	۰/۹۷۷۰	۳/۸۲۲	۰/۰۴۴۹	۰/۰۰۲۰۹		نیوتن (لویس) ($k = 0/01739$)
فراصوت						
۰/۹۹۸۱	۰/۹۹۸۲	۱/۰۱۴	۰/۰۱۲۸	۰/۰۰۰۱۸		آغباشلو و همکاران ($k_1 = -0/00492$ و $k = 0/01139$)
۰/۹۶۶۹	۰/۹۶۹۷	۴/۴۴۶	۰/۰۵۲۲	۰/۰۰۳۱۰		انتشار فیک ($L = 2/1187$ و $c = 0/0840$, $a = 1/0767$)
۰/۹۹۹۷	۰/۹۹۹۷	۰/۳۱۶	۰/۰۰۴۷	۰/۰۰۰۰۲۵		پلگ ($a = 76/34$ و $k = 0/3579$)
۰/۹۸۹۸	۰/۹۹۰۲	۲/۴۶۱	۰/۰۲۹۷	۰/۰۰۰۹۶		پیچ ($n = 1/364$ و $k = 0/00385$)
۰/۹۶۹۷	۰/۹۷۳۵	۴/۰۹۱	۰/۰۴۸۸	۰/۰۰۲۸۳		دو جمله‌ای ($h = 0/0193$ و $b = 1/113$, $a = -0/113$, $k = 5/216$)
۰/۹۶۱۲	۰/۹۶۱۲	۵/۰۵۴	۰/۰۵۹۰	۰/۰۰۳۶۳		نیوتن (لویس) ($k = 0/01731$)
k : ثابت نرخ خشک کردن (h^{-1})						

بیشتر است. احتمالاً این حالت را می‌توان به نفوذ آب طی پیش تیمار بامیه نسبت داد. همچنین این امکان وجود دارد که نفوذ اتیل اولئات به زیر پوسته چرمی بامیه مانع از خروج راحت تر آب از محصول شده باشد. با این حال، نتایج نشان می‌دهد که مقادیر ضرایب انتشار رطوبت در تیمار اتیل اولئات+کربنات سدیم نسبت به تیمار فراصوت بیشتر است که منطبق با فرضیه محقق است. دویماز (۲۰۰۴) سینتیک خشک

مقادیر ضرایب انتشار رطوبت بامیه خشک شده در حالت‌های مختلف فراوری در جدول ۷ ارائه شده است. بررسی نتایج نشان داد که مقادیر ضریب انتشار رطوبت در دامنه m^2/s^{-1} تا $3/959 \times 10^{-7}$ تا $7/387 \times 10^{-7}$ قرار داشت (مقادیر ضریب تبیین بیشتر از ۰/۷۵۸۶ گزارش شد). همانطور که مشاهده می‌شود، مقادیر ضرایب انتشار رطوبت بامیه تیمار شده با فراصوت و اتیل اولئات+کربنات سدیم نسبت به نمونه شاهد

پیشین در جدول ۸ ارائه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، ضرایب انتشار رطوبت مطالعه حاضر با پژوهش‌های پیشین همخوانی دارد. در کلیه پیش تیمارها، با افزایش دمای خشک کردن، مقادیر ضرایب انتشار رطوبت افزایش یافت که این حالت به دلیل نفوذ سریع‌تر رطوبت داخلی نمونه توسط لوله‌های مؤثرین به سطح و تبخیر آب می‌باشد.

کردن توت سفید را توسط پیش تیمارهای اتیل اولئات، اسید سیتریک و اسید آسکوربیک بررسی نمودند. آنها بیان داشتند که بیشترین ضریب انتشار رطوبت در هنگام بکارگیری اتیل اولئات همراه با استفاده از شوک حرارتی ($6/9 \times 10^{-1} \text{ m}^2/\text{s}$) است که نسبت به نمونه طبیعی حدوداً ۳ مرتبه بیشتر است و نتایج بدست آمده در این پژوهش را تأیید می‌نماید (۱۱). مقایسه ضرایب انتشار رطوبت مطالعه حاضر با پژوهش‌های

جدول ۷- ضرایب انتشار رطوبت بامیه در دماهای مختلف خشک کردن برای یک استوانه نامحدود.

معادله رگرسیونی	R ²	D _{eff} ($\times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$)	پیش تیمار/درجه حرارت (°C)	شاهد
$\ln \text{MR} = -0.0197 t + 0.5606$	۰/۷۵۸۶	۵/۵۲۱	۵۵	
$\ln \text{MR} = -0.019 t + 0.4489$	۰/۸۸۵۶	۴/۷۶۲	۶۵	
$\ln \text{MR} = -0.0293 t + 0.4548$	۰/۸۲۴۹	۷/۳۸۷	۷۵	
اتیل اولئات+کربنات سدیم				
$\ln \text{MR} = -0.0188 t + 0.3892$	۰/۸۹۲۳	۴/۴۳۹	۵۵	
$\ln \text{MR} = -0.0196 t + 0.341$	۰/۹۰۲۶	۴/۴۱۰	۶۵	
$\ln \text{MR} = -0.0254 t + 0.3485$	۰/۹۱۳۵	۵/۷۵۸	۷۵	
فراصوت				
$\ln \text{MR} = -0.0168 t + 0.3873$	۰/۸۷۳۷	۳/۹۵۹	۵۵	
$\ln \text{MR} = -0.0185 t + 0.2915$	۰/۹۰۱۷	۳/۹۶۱	۶۵	
$\ln \text{MR} = -0.0261 t + 0.3564$	۰/۸۹۸۸	۵/۹۶۴	۷۵	

* شعاع استوانه معادل مقدار میانگین عرض و ضخامت بامیه در نظر گرفته شد (F=۰/۸۰).

جدول ۸- مقایسه ضرایب انتشار رطوبت و مدل های تجربی انتخاب شده مطالعه حاضر با پژوهش های پیشین.

مرجع	روش خشک کردن	شکل هندسی/ابعاد (cm)	دامنه دمایی (°C)	ضریب انتشار رطوبت (m ² /s)	بهترین مدل تجربی
پژوهش حاضر	مادون قرمز	استوانه نامحدود (۲/۵×۲/۵)*	۵۵-۷۵	$۷/۳۸۷ \times 10^{-۷} - ۳/۹۵۹ \times 10^{-۷}$	پلگ-دوجمله ای
هونور و همکاران (۱۸)	جابه جایی هوای داغ	استوانه نامحدود (حالت کامل)	۶۰	$۰/۸۹۸ \times 10^{-۱۰} - ۱/۳۸ \times 10^{-۱۰}$	-
سویوکولا (۲۵)	جابه جایی هوای داغ	استوانه نامحدود	۵۰-۷۰	$۱/۱۶۵ \times 10^{-۸} - ۰/۷۱۳۱ \times 10^{-۸}$	پیچ-پیچ اصلاح شده-وانگ و سینگ
فمورا و آلوموفین (۱۳)	خشک کن کابینتی	-	۴۰-۶۰	-	پیچ اصلاح شده
دویمز (۱۰)	جابه جایی هوای داغ	کره	۵۰-۷۰	$۰/۴۲۷ \times 10^{-۹} - ۱/۳۰ \times 10^{-۹}$	پیچ

*به ترتیب طول و عرض.

فعالسازی در نمونه خشک شده با پیش تیمار اتیل اولئات+کربنات سدیم بدست آمد که با مقادیر متناظر آهنک خشک کردن و ضریب انتشار رطوبت بامیه خشک شده با این پیش تیمار همخوانی دارد (جداول ۳ و ۷). کمتر بودن مقدار انرژی فعالسازی در این پیش تیمار را می توان به نقش حل کنندگی اتیل اولئات نسبت داد.

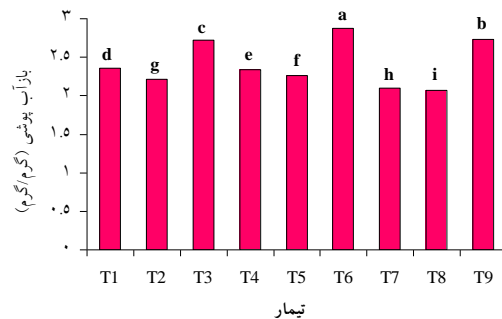
با توجه به تغییرات ضریب نفوذ رطوبت با دمای خشک کردن، ارتباط ضریب نفوذ رطوبت با دما توسط معادله آرنیوس (معادله ۱۴) پیش بینی گردید و نتایج آن در جدول ۹ درج شد. مقادیر ضریب تبیین در روش های پیش تیمار با فراصوت و اتیل اولئات+کربنات سدیم بیشتر ($R^2 > ۰/۷۱۶$) از نمونه شاهد ($R^2 = ۰/۴۱$) بدست آمد. طبق نتایج کمترین میزان انرژی

جدول ۹- پارامترهای مدل آرنیوس در پیش بینی ضریب انتشار رطوبت بامیه.

معادله رگرسیونی	R ²	E _a (kJ/mol)	پیش تیمار
$\ln D_{eff} = -1629.7 T^{-1} - 9.5396$	۰/۴۱۰	۱۳/۵۵	شاهد
$\ln D_{eff} = -1470.3 T^{-1} - 10.193$	۰/۷۱۶	۱۲/۲۲	اتیل اولئات+کربنات سدیم
$\ln D_{eff} = -2316.9 T^{-1} - 7.7496$	۰/۷۳۶	۱۹/۲۶	فراصوت

۳-۳- بازآب‌پوشی

نتایج تأثیر متقابل دما و پیش تیمار بر روی میزان بازآب‌پوشی بامیه خشک شده در شکل ۳ ارائه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود بیشترین میزان بازآب‌پوشی در تیمار T_۶ (یعنی نمونه پیش تیمار شده در اتیل اولئات+کربنات سدیم و خشک شده در دمای ۶۵°C) مشاهده شد. این حالت به دلیل توانایی حل‌کنندگی اتیل اولئات بوده که پوسته مومی و دیواره سلولی بامیه را در خود حل نموده و زمان خشک کردن را کاهش داده است. در نتیجه آسیب کمتر به پروتئین‌های (میزان پروتئین غلاف بامیه، ۲/۱۰ g در هر ۱۰۰ g بخش ماکول است) موجود در ماتریکس بامیه وارد شده و میزان بازآب‌پوشی بامیه کمتر دستخوش تغییر قرار گرفته است (۱۵). همچنین از دیگر عوامل مؤثر بر میزان بازآب‌پوشی بامیه، چروکیدگی و میزان تخریب لوله‌های موئین طی خشک کردن بوده که سبب می‌گردد که بامیه در طی فرآیند جذب مجدد آب نتواند ساختار اولیه خود را بازسازی نمایند و در نتیجه میزان بازآب‌پوشی را تحت تأثیر قرار می‌دهند (۲۶).



شکل ۳- مقایسه میانگین تأثیر متقابل دما و نوع پیش تیمار

روی بازآب‌پوشی بامیه خشک شده؛

T_۱: شاهد-۵۵°C، T_۲: فراصوت-۵۵°C، T_۳: اتیل اولئات+کربنات سدیم-۵۵°C، T_۴: شاهد-۶۵°C، T_۵: فراصوت-۶۵°C، T_۶: اتیل اولئات+کربنات سدیم-۶۵°C، T_۷: شاهد-۷۵°C، T_۸: فراصوت-۷۵°C، T_۹: اتیل اولئات+کربنات سدیم-۷۵°C

۳-۴- تغییرات رنگ

جدول ۱۰ نتایج آنالیز واریانس تأثیر دما و نوع پیش تیمار را بر روی تغییرات رنگ بامیه نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌گردد نوع پیش تیمار و دمای خشک کردن تأثیر معنی‌دار

($p < 0.05$) روی شاخص‌های رنگی بامیه داشت. نتایج نشان داد که افزایش دمای خشک کردن به طور قابل ملاحظه‌ای شاخص روشنایی بامیه (L) را کاهش داد، به طوری که این تغییرات در پیش تیمار اتیل اولئات+کربنات سدیم بیشتر بوده و شاخص روشنایی کمتری حاصل شد (جدول ۱۱ این مورد را تأیید می‌نماید). در سبزیجات برگی یکی از مهمترین شاخص‌های کیفی که ارزیابی بازاریابی محصول وجود مقدار کلروفیل می‌باشد. زمان خشک کردن، دمای خشک کردن، نور و اکسیژن از مهمترین عوامل مؤثر بر تخریب رنگدانه کلروفیل می‌باشند (۲۳). به علاوه، رودرا و همکاران (۲۰۰۸) گزارش دادند که دمای بالا می‌تواند منجر به جایگزینی یون منیزیم در حلقه تتراپیرولی کلروفیل با هیدروژن شده، و بدین ترتیب سبب بی‌رنگ شدن کلروفیل و تبدیل آن به فئوفتین شود (۲۳). در مورد کمتر بودن شاخص روشنایی در بامیه خشک شده با تیمار اتیل اولئات+کربنات می‌توان علت را چنین بیان نمود که این حالت به دلیل نفوذ اتیل اولئات به زیر پوسته چرمی بامیه می‌باشد. مقادیر تغییرات رنگ (ΔE) اندازه‌گیری شده خود گویای امر می‌باشد.

جدول ۱۰- تأثیر دما و نوع پیش تیمار روی تغییرات شاخص های رنگی فضای بامیه.

شاخص رنگی	شاهد			اتیل اولئات+کربنات سدیم			فراصوت		
	۷۵	۶۵	۵۵	۷۵	۶۵	۵۵	۷۵	۶۵	۵۵
<i>L</i>	۲۱/۵۲۴ ^f	۲۵/۶۵۴ ^c	۳۳/۷۷۸ ^b	۱۴/۹۰۰ ^g	۱۵/۰۱۶ ^g	۲۴/۸۸۶ ^d	۲۴/۷۱۲ ^d	۲۲/۷۳۹ ^e	۳۵/۲۲۱ ^a
<i>a</i>	-۱/۸۳۰ ^c	-۲/۰۷۲ ^d	-۷/۷۶۰ ^g	-۰/۸۸۴ ^a	-۱/۱۴۸ ^b	-۴/۲۸۱ ^f	-۲/۷۳۳ ^e	-۱/۹۱۷ ^{cd}	-۱۱/۵۳۸ ^g
<i>b</i>	۱۱/۲۶۹ ^{de}	۱۲/۸۵۵ ^c	۲۲/۲۲۰ ^b	۳/۶۵۳ ^g	۳/۶۵۳ ^g	۹/۱۶۵ ^f	۱۲/۰۶۱ ^{cd}	۱۰/۹۵۱ ^e	۲۳/۹۶۹ ^a
ΔE	۲۴/۳۵۷ ^b	۲۱/۰۸۳ ^d	۸/۵۹۸ ^e	۳۳/۴۴۹ ^a	۳۳/۴۴۹ ^a	۲۲/۷۸۷ ^c	۲۱/۶۴۷ ^d	۲۳/۸۳۰ ^b	۴/۳۲۴ ^f
خلوص رنگ (کروما)	۱۱/۴۱۷ ^d	۱۳/۰۲۱ ^c	۲۳/۵۳۶ ^b	۴/۰۳۹ ^f	۳/۸۳۰ ^f	۱۰/۱۱۶ ^e	۱۲/۳۶۷ ^c	۱۱/۱۱۸ ^d	۲۶/۶۰۲ ^a
زاویه رنگ یا فام (°)	۹۹/۲۹ ^e	۹۹/۱۶ ^e	۱۰۹/۲۵ ^b	۱۰۷/۶۴ ^d	۱۰۷/۴۵ ^c	۱۱۵/۰۴ ^a	۱۰۲/۷۶ ^d	۹۹/۹۲ ^e	۱۱۵/۷۰ ^a

*در هر ردیف میانگین های دارای حروف مشابه در سطح اطمینان ۹۵٪ اختلاف آماری معنی داری ندارند.

اولئات+کربنات سدیم-۵۵°C ندارد ($p > 0.05$). با توجه به جدول ۱۰ میزان زاویه رنگ برای تیمارهای مختلف خشک کردن بامیه در دامنه ۹۹/۱۶ تا ۱۱۵/۷۰ گسترده شده است که نشان می دهد رنگ در ناحیه زرد/سبز (زاویه رنگ بین ۹۰° تا ۱۸۰°) بوده و بیشتر به سبزی متمایل است بنابراین رنگ غالب در بامیه خشک شده سبز می باشد (۲۴). نتایج مشابه توسط گونی و باروکا (۲۰۱۲) در مورد خشک کردن فلفل سبز مشاهده شد که آنها مقدار زاویه رنگ را برای فلفل سبز بین ۱۰۳/۳۹° تا ۱۲۲/۰۶° گزارش نمودند (۱۷).

به منظور کنترل فرآیند خشک کردن بامیه از دو فاکتور رنگی کروما (C^*) و زاویه رنگ یا تک رنگ (h^*) نیز استفاده شد. کروما نشان دهنده درجه اشباعیت رنگ است. نتایج آنالیز واریانس نشان داد که کمترین و بیشترین خلوص رنگ (کروما) در خشک کردن به روش اتیل اولئات+کربنات سدیم-۶۵°C و فراصوت-۵۵°C مشاهده شد. همچنین نتایج نشان داد که میزان زاویه رنگ در روش خشک کردن با پیش تیمار فراصوت در دمای ۵۵°C بیشترین مقدار را دارد که تفاوت آماری معنی دار با نمونه خشک شده با تیمار اتیل

جدول ۱۱- تصاویر برش های بامیه خشک شده با پیش تیمارهای مختلف.

درجه حرارت (°C)	شاهد		فراصوت		اتیل اولئات+کربنات سدیم	
	قبل از آبدایی	بعد از آبدایی	قبل از آبدایی	بعد از آبدایی	قبل از آبدایی	بعد از آبدایی
۵۵						
۶۵						
۷۵						

۳-۵- بهینه‌سازی

جهت بهینه‌سازی فرآیند خشک کردن بامیه برخی از مهمترین شاخص‌های کیفی محصول نهایی (آهنگ خشک کردن، بازآب‌پوشی، شدت روشنایی (L) و تغییرات رنگ (ΔE)) توسط آزمون رتبه‌بندی مورد ارزیابی قرار گرفت (۲۱). شرایط بهینه برای مشخص نمودن بهترین تیمار، بیشتر بودن خصوصیات آهنگ خشک کردن، بازآب‌پوشی و شدت روشنایی و کمتر بودن تغییرات رنگ بود. حال با توجه به مفروضات در نظر گرفته شده، آزمون رتبه‌بندی تیمارها مورد

بررسی و نتایج در جدول ۱۲ ثبت گردید. بعد از آزمون رتبه‌بندی، شرایط بهینه مربوط به تیماری است که از لحاظ خصوصیات کیفی مورد مطالعه بیشترین امتیاز لازم را کسب نماید. در مجموع از بین ۹ تیمار مورد مطالعه، روش‌های خشک کردن با پیش تیمارهای فراصوت و اتیل اولئات+کربنات سدیم در دمای خشک کردن 55°C بیشترین رتبه (۱۳ رتبه) را کسب نمودند و به عنوان بهترین تیمارها جهت خشک کردن بامیه پیشنهاد شدند.

جدول ۱۲- بهینه‌سازی خشک کردن بامیه به روش رتبه‌بندی (۲۱).

جمع امتیازات	شاخص کیفی				پیش تیمار/درجه حرارت ($^{\circ}\text{C}$)
	تغییرات رنگ (ΔE)	روشنایی (L)	بازآب‌پوشی	آهنگ خشک کردن [#]	
					شاهد
۱۲	****	****	**	**	۵۵
۱۰	***	***	**	**	۶۵
۹	**	**	*	****	۷۵
					اتیل اولئات+کربنات سدیم
۱۳	***	***	****	***	۵۵
۹	*	*	****	***	۶۵
۹	*	*	***	****	۷۵
					فراصوت
۱۳	****	****	***	**	۵۵
۹	**	**	**	***	۶۵
۱۰	***	***	*	***	۷۵
۹۴	۲۳	۲۳	۲۲	۲۶	جمع امتیازات

[#]رتبه‌بندی این شاخص با توجه به شیب خط رگرسیون (جدول ۳) تعیین شد.

****؛ بالاترین امتیاز، ***؛ امتیاز متوسط، **؛ امتیاز کم، *؛ امتیاز خیلی کم، بدون ستاره؛ مردود.

۴- نتیجه گیری

نتایج بدست آمده از این پژوهش به شرح ذیل می باشد:
بیشترین آهنگ خشک کردن در روش خشک کردن با اتیل اولئات+کربنات سدیم در دمای 75°C مشاهده شد. به طور کلی نمونه های پیش تیمار شده با اتیل اولئات+کربنات سدیم و فراصوت دارای آهنگ خشک کردن بیشتری نسبت به نمونه شاهد بودند.

نتایج مدل سازی ریاضی نشان داد که مدل های پلگ و دو جمله ای به عنوان بهترین مدل ها جهت توصیف منحنی خشک کردن بامیه تعیین شد.

مقادیر ضرایب انتشار رطوبت بامیه خشک شده در حالت های مختلف فرآوری در دامنه $3/959 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ تا $7/387 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ قرار داشت (مقادیر ضریب تبیین بیشتر از $0/7586$ گزارش شد).

نتایج بازآب پوشی و تحلیل رنگ نشان داد که بیشترین میزان بازآب پوشی در روش خشک کردن با پیش تیمار اتیل اولئات+کربنات سدیم در دمای 65°C اندازه گیری شد که بیشترین تغییرات رنگ (ΔE) را نسبت به سایر تیمارها داشت. به طور کلی با توجه به نتایج این پژوهش روش های خشک کردن با پیش تیمارهای فراصوت و اتیل اولئات+کربنات سدیم در دمای خشک کردن 55°C به عنوان مناسب ترین تیمارها جهت خشک کردن بامیه توصیه می گردد.

۵- منابع

۳. صالحی، ف.، کاشانی نژاد، م.، اسدی امیرآبادی، ع.ر. ۱۳۹۴. بررسی سینتیک انتقال جرم در طی خشک کردن ترکیبی هوای داغ-مادون قرمز برش های بادمجان. فصلنامه علوم و فناوری های نوین غذایی، ۲(۷): ۶۲-۵۵.
۴. مختاریان م. کوشکی، ف. ۱۳۹۱. کاربرد شبکه عصبی مصنوعی در پیش بینی نسبت رطوبت و بررسی خصوصیات حسی و تغذیه ای گوچه فرنگی در طی خشک کردن. فصلنامه علوم و فناوری غذایی. دانشگاه آزاد اسلامی، واحد سبزوار، ۴(۳-پیاپی ۱۳): ۶۶-۵۵.
5. Adedeji, A.A., Gachovskaa, T.K., Ngadia, M.O., Raghavana, G.S.V. 2008. Effect of pretreatments on drying characteristics of okra. *Drying Technology*, 26(10): 1251-1256.
6. Adom, K.K., Dzogbefia, V.P., Ellis, W.O. 1997. Combined effect of drying time and slice thickness on the solar drying of okra. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 73(3): 315-320.
7. Calisir, S., Yildiz, M.U. 2005. A study on some physicochemical properties of Turkey okra (*Hibiscus esculenta*) seeds. *Journal of Food Engineering*, 68: 73-78.
8. Doymaz, I., Ismail, O. 2011. Drying characteristics of sweet cherry. *Journal of Food and Bioproducts Processing*, 89: 31-38.
9. Doymaz, I. 2010. Effect of citric acid and blanching pre-treatments on drying and rehydration of Amasya red apples. *Journal of Food and Bioproducts Processing*, 88: 124-132.
10. Doymaz, I. 2005. Drying characteristics and kinetics of okra. *Journal of Food Engineering*, 69: 275-279.
11. Doymaz, I. (2004). Drying kinetics of white mulberry. *J. Food Eng.*, 61, 341-346.
12. Doymaz, I., Pala, M. 2002. Hot-air drying characteristics of red pepper. *Journal of Food Engineering*, 55: 331-335.
13. Famurewa J.A.V., Olumofin, K.M. 2015. Drying kinetics and influence on the chemical characteristics of dehydrated okra (*Abelmoschus esculentus*) using cabinet dryer. *European Journal of Engineering and Technology*, 3(2): 7-19.
14. FAOSTAT. 2012. Food and Agriculture Organization.
15. Fekadu Gemede, H., Ratta, N., Hak, G.D., Beyene, F., Woldegiorgis, A.Z. 2015. Nutritional

۱. توکلی پور، ح.، مختاریان م.، زیرجانی، ل. مطالعه تاثیر پیش تیمارهای مختلف بر روی فرآیند آبردایی فلفل قرمز چیلی (*capsicum annum*) و بررسی مدل سازی سینتیک خشک کردن. ۱۳۹۴. نشریه نوآوری در علوم و صنایع غذایی، ۷(۲): ۵۷-۴۷.

۲. توکلی پور، ح. (۱۳۹۳) تاثیر روش های مختلف آبردایی بر سینتیک خشک کردن و ویژگی های کیفی فلفل قرمز. طرح پژوهشی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد سبزوار.

- cordifolia Opiz ex Fresen). *Journal of Food Engineering*, 91: 482-489.
28. Uribe, E., Marín, D., Vega-Gálvez, A., Quispe-Fuentes, I., Rodríguez, A. 2016. Assessment of vacuum-dried peppermint (*Mentha piperita* L.) as a source of natural antioxidants. *Food Chemistry*, 190(1), 559-565.
29. Van Mana, L., Orikasab, T., Muramatsuc, Y., Tagawaa, A. 2012. Impact of microwave drying on the quality attributes of okra fruit. *Journal of Food Processing and Technology*, 3(10):1-7.
30. Yağcıoğlu, A., Demir, V., Günhan, T. 2007. Effective moisture diffusivity estimation from drying data. *Tarım Makinaları Bilimi Dergisi*, 3(4): 249-256.
- quality and health benefits of okra (*Abelmoschus esculentus*): A review. *American Journal of Food Science and Nutrition*, 2(1): 1-8.
16. Fernandes, F.A.N., Rodrigues, S. (2007). Ultrasound as pre-treatment for drying of fruits: Dehydration of banana. *J. Food Eng.*, 82, 261-267.
17. Guiné, R.P.F., Barroca, M.J. 2012. Effect of drying treatments on texture and color of vegetables (pumpkin and green pepper). 90(1): 58-63.
18. Honoré, O.K., François, Z., Raguilignaba, S., Aboubacar, T., Hélène, D. 2014. Characterization of okra convective drying, influence of maturity. *Food and Nutrition Sciences*, 5: 590-597.
19. Ismail, M.A., Ibn Idriss, E.M. 2013. Mathematical modelling of thin layer solar drying of whole okra (*Abelmoschus esculentus* L. Moench) pods. *International Food Research Journal*, 20(4): 1983-1989.
20. Mohsenin, N.N. 1986. *Physical properties of plant and animal materials*. New York: Gordon and Breach Science Publishers.
21. Ormeno, E., Goldstein, A., Niinemets, Ü. 2011. Extracting and trapping biogenic volatile organic compounds stored in plant species. *Trends in Analytical Chemistry*, 30(7): 978-989.
22. Pendre, N.K., Nema, P.K., Sharma, H.P., Rathorem S.S., Kushwah, S.S. 2012. Effect of drying temperature and slice size on quality of dried okra (*Abelmoschus esculentus* L. Moench). *Journal of Food Science and Technology*, 49(3): 378-381.
23. Rudra, S.G., Singh, H., Basu, S., Shivhare, U.S., 2008. Enthalpy entropy compensation during thermal degradation of chlorophyll in mint and coriander puree. *J. Food Eng.* 86, 379-387.
24. Sahin, S., Sumnu, S.G. 2006. *Physical properties of food*. USA: Springer.
25. Sobukola, O. 2009. Effect of pre-treatment on the drying characteristics and kinetics of okra (*Abelmoschus esculentus* L. Moench) slices. *International Journal of Food Engineering*, 5(2): DOI: 10.2202/1556-3758.1191.
26. Tavakolipour, H., Mokhtarian, M. (2016). Drying of chilli pepper in various conditions. *J. Qual. Assur. Safety Crop Food*, 8(1), 87-93.
27. Therdthai, N., Zhou, W. 2009. Characterization of microwave vacuum drying and hot air drying of mint leaves (*Mentha*

