

بررسی تاثیر فرایند خشک کردن مادون قرمز بر سینتیک خشک شدن و شاخص‌های رنگی برگ اناریجه (*Froriepia subpinnata*)

محمد مهدی سیدآبادی^{۱*}، علیرضا اسدی امیرآبادی^۱، افسانه طاهری^۱، مهدی کاشانی نژاد^۲

۱. دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مواد و طراحی صنایع غذایی، دانشکده صنایع غذایی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان
۲. استاد، گروه مهندسی مواد و طراحی صنایع غذایی، دانشکده صنایع غذایی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

(تاریخ دریافت: 95/3/30، تاریخ پذیرش: 95/6/14)

چکیده

خشک کردن یکی از روش‌های مرسوم برای افزایش ماندگاری محصولات کشاورزی است. در این تحقیق، امواج مادون قرمز (IR) به صورت لامپ‌های رشته‌ای (مدادی) به عنوان یکی از منابع حرارتی جدید برای خشک کردن برگ اناریجه (*Froriepia subpinnata*)، مورد استفاده قرار گرفت. این پژوهش با هدف کاهش زمان خشک کردن و حفظ بیش تر کیفیت فرآورده خشک شده و همچنین تعیین بهترین مدل برای خشک کردن، انجام شد. برگ‌های اناریجه در سطوح شدت تابش IR به میزان 115، 202/5 و 290 وات و فاصله لامپ‌های IR تا سطح نمونه به اندازه 5، 7/5 و 10 سانتی متر خشک شدند. زمان خشک کردن برگ‌های اناریجه تا رسیدن به محتوای رطوبت ثابت اندازه گیری شد. رفتار خشک شدن اناریجه در خشک کن IR بر اساس 4 مدل ریاضی پیچ، وانگ و سینگ، پارابولیک و لگاریتمی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد افزایش توان (شدت تابش) و فاصله لامپ‌های IR تا سطح نمونه، به ترتیب موجب کاهش و افزایش زمان خشک کردن برگ‌های اناریجه می‌گردد. با افزایش توان و فاصله نمونه‌ها تا منبع تابشی، شاخص L^* نمونه‌های اناریجه به ترتیب کاهش و افزایش یافت. علاوه بر این برازش داده‌ها با 4 مدل مورد نظر نشان داد که مدل پیچ به علت داشتن بالاترین R^2 و کمترین RMSE و SSE، بهترین مدل برای پیش‌بینی رفتار خشک شدن برگ‌های اناریجه تحت شرایط مورد آزمایش می‌باشد. خشک کردن نمونه‌ها تا رسیدن به محتوای رطوبت ثابت انجام شد.

واژه‌های کلیدی: خشک کردن، IR، اناریجه، L^* ، مدل.

1- مقدمه

توجه قرار گرفته است. روش خشک کردن با سامانه مادون قرمز (IR) یکی از این روش‌ها هست. خشک کردن با سامانه IR دارای مزیت‌هایی از جمله نرخ خشک شدن بالا، کیفیت بالای محصولات خشک شده، سهولت عملیاتی و توانایی استریل کردن قوی می‌باشد. [9، 10]

خشک کردن به روش IR متفاوت از خشک شدن همرفتی است، زیرا انرژی IR به‌طور مستقیم توسط مواد جذب شده و مانند روش همرفتی نیازی به هوا برای انتقال گرما نیست. انرژی IR بدون این که محیط اطراف را گرم کند، از طریق منبع تابشی به سطح محصول منتقل می‌شود، در نتیجه اتلاف انرژی کاهش می‌یابد. از آن جا که، IR شار حرارتی ثابتی را بدون در نظر گرفتن دمای محصول فراهم می‌کند، دمای محصول توسط درجه حرارت هوای محیط اطراف محدود نمی‌شود و به راحتی می‌تواند در زمان کوتاهی، افزایش یابد [6].

پرتوهای IR با برخورد به نمونه به داخل آن نفوذ کرده و به گرمای محسوس تبدیل می‌شود؛ بنابراین خشک کردن با روش IR می‌تواند حرارت دهی یکنواخت‌تری را ایجاد کند و ممکن است گرادیان رطوبت در طول حرارت دهی و خشک کردن را کاهش دهد. در خشک کن‌های تابش IR، گرما در درون ماده تولید می‌شود و در نقاطی که رطوبت بیش‌تری دارند متمرکز می‌شود و با افزایش فشار بخار، موجب انتشار رطوبت از آن نقاط به سمت لایه‌های خارجی می‌شود؛ بنابراین، به نظر می‌رسد در این روش خشک کردن، مشکلات مربوط به خشک شدن لایه سطحی کاهش یابد [11].

خشک کن IR به‌منظور خشک کردن بسیاری از محصولات برگی، از جمله اسفناج [12]، نعنای [13]، کرفس [14] و برگه هویج [15] استفاده شده است.

مدل‌های ریاضی مورد استفاده در فرایند خشک کردن به دو گروه مدل‌های بنیادی و مدل‌های تجربی طبقه‌بندی می‌شوند. مدل‌های بنیادی از فرضیه‌ها و نظریه‌ها استنباط می‌شوند و فرضیه‌ها بر اساس درک صحیحی از فرایند پایه‌ریزی می‌شوند. در حالی که مدل‌های تجربی به‌طور معمول چگونگی اتفاق افتادن فرایند را توصیف نمی‌کنند و پارامترهای آن‌ها هیچ معنای فیزیکی ندارند؛ بنابراین نمی‌توانند دیدگاه دقیقی از فرایندهای مهم در حال وقوع را در طول خشک کردن ارائه

اناریجه با نام علمی *Froriepia subpinnata* دارای 150 گونه در اوراسیا و آفریقا، بیش از 16 گونه در اروپا و 22 گونه در ایران می‌باشد. جنس *Pimpinella affinis* یک گیاه معطر دوساله با ارتفاع 110-20 سانتی‌متر، از خانواده چتریان، با گل‌های سفید و میوه بیضی‌شکل است. در مناطق مختلف ایران، افغانستان، عراق، سوریه و اسرائیل موجود می‌باشد. این گونه به‌صورت وحشی در مرکز، غرب و شمال ایران و بیش‌تر در مناطق کوهستانی با آب‌وهوای سرد رشد می‌کند [1، 2].

در طب سنتی از این گیاه به‌عنوان ضد نفخ، اشتها آور، ضد عفونی‌کننده، ضد اسپاسم، ادرار آور، آرام‌بخش و افزایش‌دهنده ترشح شیر استفاده شده است. اناریجه دارای خواص آنتی‌اکسیدانی و ضدباکتریایی نیز می‌باشد [3، 4]. استفاده از این گیاه به‌عنوان یک عامل طعم‌دهنده در صنایع غذایی به‌دلیل خودرو بودن آن مقرون به‌صرفه می‌باشد [5]. این گیاه به‌عنوان سبزی در تهیه غذاهای معطر بومی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

خشک کردن یکی از روش‌های قدیمی و مرسوم برای افزایش ماندگاری محصولات کشاورزی است. فرایند خشک کردن به‌منظور کاهش محتوی رطوبت مواد غذایی با هدف کاهش سرعت فساد میکروبی و تغییرات شیمیایی و به‌تبع آن، افزایش ماندگاری به همراه کاهش وزن و فضای مورد نیاز، استفاده می‌شود [6]. یکی از راه‌های خشک کردن سبزی‌ها و گیاهان دارویی، خشک کردن آفتابی است. روش مذکور علاوه بر ایجاد آلودگی و فساد میکروبی حین فرایند، یک روش زمان‌بر بوده و تحت تاثیر شرایط آب و هوایی منطقه می‌باشد. خشک شدن همرفتی یکی دیگر از روش‌های معمول با نرخ خشک شدن بالا است، اما محصول خشک شده کیفیت پایینی داشته و مصرف انرژی در این روش بالاست. هدایت حرارتی کم و سخت شدن سطحی مواد از عوامل اصلی در کاهش سرعت فرایند خشک کردن با هوای داغ هستند [7]. قهوه‌ای شدن غیرآزیمی، قابلیت باز جذب آب ضعیف و کاهش ارزش تغذیه‌ای از دیگر مشکلات متداول خشک شدن همرفتی هستند [8].

در سال‌های اخیر، تکنیک‌های جدید و یا ابتکاری که افزایش نرخ خشک شدن و حفظ کیفیت محصول را در بردارد، مورد

کنند؛ ولی روند تغییرات را در طول عملیات نشان می‌دهند.

2- مواد و روش‌ها

2-1- تهیه مواد اولیه

برگ‌های اناریچه گونه (*Froriepia subpinnate*) به صورت تازه از منطقه هزار پیچ شهرستان گرگان و در اردیبهشت ماه جمع‌آوری شد و پس از پاک‌سازی، تحت تیمار خشک کردن قرار گرفت.

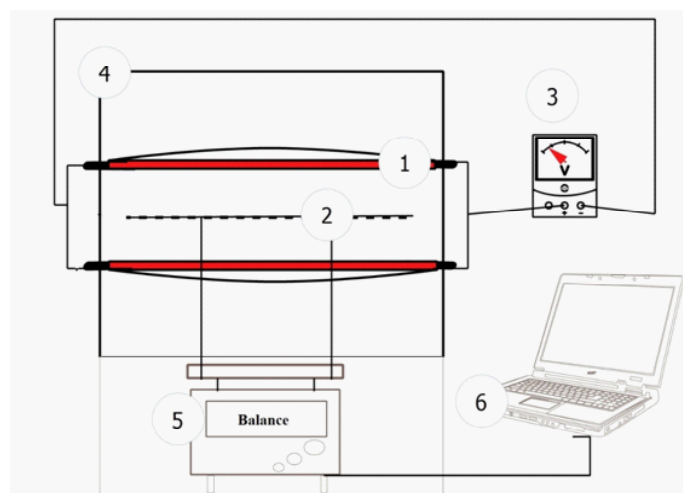
2-2- طرح کلی آزمایش‌ها

آزمایشات خشک کردن برگ اناریچه در سه سطح توان 115، 202/5 و 290 وات و سه سطح فاصله از منبع تابشی 5، 7/5 و 10 سانتی‌متر با استفاده از یک دستگاه خشک‌کن IR با سیستم تابش دوطرفه انجام شد. شکل (1) سیستم طراحی شده مادون قرمز به منظور خشک کردن برگ‌های اناریچه را نشان می‌دهد. حدود نیم ساعت قبل از شروع فرایند خشک کردن، لامپ‌های IR رشته‌ای¹ متناسب با توان مورد نیاز تنظیم شد تا دمای سطح لامپ به حالت پایدار برسد. نمونه‌ها بر روی توری که از طریق پایه‌هایی بر روی ترازو (با دقت 0/01 گرم) سوار بود، قرار داده شد. کاهش وزن نمونه‌ها در فواصل زمانی 3 ثانیه به صورت آنلاین با اتصال کابل RS232 به کامپیوتر و با استفاده از برنامه lutron 801 ثبت می‌شد. خشک کردن نمونه‌ها تا رسیدن به محتوی رطوبت ثابت انجام شد. آزمایش‌های خشک کردن به روش فاکتوریل در 9 تیمار و 2 تکرار یعنی 18 آزمایش، انجام گرفت. اندازه‌گیری محتوای رطوبت نمونه‌های اناریچه

1. double ended

به کار بردن مدل‌های بنیادی و تجزیه مسائل پیچیده به فرایندهای تشکیل‌دهنده آن به علت عدم دانش مناسب، همیشه امکان‌پذیر نیست. در این موارد، اغلب از مدل‌های تجربی استفاده می‌شود. این مدل‌ها برای اهداف طراحی در موارد پیچیده مفید هستند. مدل‌های تجربی اغلب برای بیان تغییرات متوسط رطوبت در ماده غذایی، به صورت تابعی از زمان خشک شدن به کار می‌روند [16]. مدل‌های پیچ، وانگ و سینگ، پارابولیک و لگاریتمی از جمله مدل‌های تجربی هستند که در فرایند خشک کردن لایه‌نازک مواد غذایی برای توصیف سینتیک خشک شدن به کار رفته‌اند.

با بررسی مقالات، تاکنون مطالعه‌ای بر روی خشک کردن برگ اناریچه انجام نشده است. نوری و همکاران (2012) از روش ترکیبی هوای داغ-مایکروویو برای خشک کردن جعفری که هم خانواده گیاه اناریچه است، استفاده نمودند. نتایج نشان داد که دمای خشک‌کن هوای داغ و توان مایکروویو بر سرعت خشک شدن جعفری اثر مهمی دارند و با افزایش دما و توان مایکروویو، زمان خشک شدن کاهش می‌یابد [17]. هدف از این تحقیق، مطالعه تأثیر شرایط خشک کردن به روش IR شامل توان و فاصله از منبع حرارتی بر شاخص‌های رنگی و هم‌چنین سینتیک خشک کردن برگ اناریچه و تعیین بهترین مدل پیش‌بینی کننده فرایند خشک شدن بود.



شکل (1) دستگاه خشک‌کن IR با تابش دوطرفه (1- لامپ‌های مادون قرمز، 2- محل قرارگیری نمونه، 3- واریابل، 4- محفظه خشک‌کن، 5- ترازو، 6- آزمایشگاهی، کامپیوتر)

بر اساس استاندارد AOAC (1990) انجام شد؛ به طوری که مقداری نمونه قبل و پس از انجام هر آزمایش خشک کردن، در آن با دمای $105 \pm 1^\circ\text{C}$ قرار داده شد و پس از رسیدن وزن نمونه‌ها به مقدار ثابت، مقدار رطوبت بر حسب گرم آب/گرم ماده خشک محاسبه شد [18].

از نرم‌افزار Version 7.10.0.499, MATLAB R2010a, USA استفاده شد. مدل‌ها با استفاده از شاخص‌های ضریب تبیین، R^2 ، مجموع مربعات خطا، SSE، و ریشه متوسط خطای داده‌ها، RMSE مقایسه شدند [22]. روابط ریاضی این شاخص‌ها به صورت معادلات (3)، (4) و (5) هستند:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{pre,i} - MR_{exp,i})^2}{\sum_{i=1}^N (MR_{pre,i} - \overline{MR}_{exp})^2} \quad (3)$$

$$SSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MR_{pre,i} - MR_{exp,i})^2 \quad (4)$$

$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MR_{pre,i} - MR_{exp,i})^2 \right]^{1/2} \quad (5)$$

در این رابطه‌ها $MR_{exp,i}$ نسبت رطوبت تجربی i ام، $MR_{pre,i}$ نسبت رطوبت پیشگویی شده i ام، میانگین رطوبت تجربی i ام و میانگین نسبت رطوبت پیشگویی شده i ام، N تعداد مشاهدات و m تعداد ثابت‌های خشک کردن می‌باشند.

2-5- بررسی خصوصیات رنگی

نمونه‌های اناریجه خشک شده در خشک‌کن IR به وسیله آسیاب خانگی پارس خزر، پودر شد و از الک با مش 40، گذرانده شد. مقدار 3 گرم از پودر اناریجه‌های به دست آمده را داخل پلیت ریخته و تصویر آن به کمک اسکنر (HP scanjet G2710) ثبت شد. به منظور جلوگیری از ورود

2-3- نسبت رطوبت (MR) و انرژی مصرفی

به طور معمول مدل سینتیک خشک کردن بر اساس نسبت رطوبت (MR) به دست می‌آید که علت آن کاهش پراکندگی و خوش فرم کردن داده‌ها می‌باشد [19]. نسبت رطوبت با استفاده از رابطه (1) به دست آمد:

$$MR = (M_t - M_e / M_0 - M_e) \quad (1)$$

که در آن MR نسبت رطوبت و بدون بعد، M_t میزان رطوبت در زمان‌های مشخص بر حسب گرم آب به گرم ماده خشک، M_e میزان رطوبت تعادلی (گرم آب به گرم ماده خشک)، M_0 میزان رطوبت اولیه بر پایه خشک بر حسب گرم آب به گرم ماده خشک است. M_e برابر صفر فرض می‌شود [20].

انرژی مورد نیاز برای خشک کردن اناریجه با خشک‌کن IR از رابطه (2) به دست آمد که در این رابطه E_t کل انرژی مصرفی در هر دوره خشک کردن P(W.h) توان خروجی از خشک‌کن (W) و t مدت زمان خشک شدن (h) می‌باشد [21].

$$E = P \times t \quad (2)$$

2-4- برازش بر روی مدل‌های ریاضی و انتخاب مناسب‌ترین مدل برای توصیف سینتیک خشک شدن

مدل‌های تجربی متعددی برای بررسی سینتیک خشک کردن محصولات غذایی مورد استفاده قرار گرفته است؛ اما چندین مدل

جدول (1) مدل‌های ریاضی برازش شده بر داده‌های تجربی

منبع	معادله	مدل
[27]	$MR = 1 + a \cdot t + b \cdot t^2$	وانگ و سینگ
[28]	$MR = a + bt + ct^2$	مدل پارابولیک
[29]	$\exp(-k \cdot t^n)$	پیچ
[30]	$b \cdot \exp(-a \cdot t) + c$	لگاریتمی

برای خشک کردن برگ اناریجه نشان داده شده است. در ابتدای فرایند خشک کردن، رطوبت اولیه محصول زیاد بوده و نرخ کاهش رطوبت بیش تر است ولی با گذشت زمان چون محتوای رطوبت محصول کاهش می یابد، به طور طبیعی نرخ خشک شدن هم کاهش می یابد. این روند در تحقیقات سایر محققین نیز مشاهده شده است [16]. با بررسی رفتار خشک کردن برگ اناریجه در سامانه مادون قرمز مشاهده شد که در منحنی های خشک کردن دوره سرعت ثابت وجود ندارد و فرایند خشک کردن همواره با کاهش رطوبت در واحد زمان همراه است. شرما و همکاران در مورد پیاز [24]؛ دویماز و همکاران در مورد سیب زمینی شیرین [25]؛ کو کابییک و تزر در مورد هویج [26] و ساریمثلی و یوسیر در مورد برگ اسفناج [12] به نتایج مشابهی دست یافتند.

زمان خشک شدن بسته به توان و فاصله مورد نظر در خشک کن IR، در محدوده 8/8 تا 65/2 دقیقه قرار داشت. با توجه به شکل (3) افزایش سطح توان باعث کاهش زمان خشک شدن می شود که دلیل آن می تواند افزایش گرادیان حرارتی در داخل جسم و در نتیجه افزایش سرعت تبخیر رطوبت باشد. با افزایش فاصله به علت کاهش جذب امواج IR توسط نمونه، زمان خشک شدن افزایش یافت. این یافته ها هم راستا با نتایج شرما و همکاران در مورد پیاز [24] و دویماز برای ورقه های سیب زمینی شیرین [25] بود. در صورتی که تفاوت کیفیت محصول خشک شده در توان های مختلف از نظر رنگ، بو و طعم مدنظر نباشد، با به کارگیری توان 290 به جای توان 115، می توان زمان خشک کردن را تا 7/4 برابر کاهش داد. نوری و همکاران در نتایج تحقیقات خود زمان مناسب برای خشک کردن 15 گرم جعفری که با گیاه اناریجه در یک خانواده قرا می گیرد، با خشک کن هوای داغ را 105 دقیقه اعلام کردند [17]. با مقایسه نتایج می توان گفت که خشک کن IR در توان 115 وات (با حفظ خصوصیات رنگی) می تواند سریع تر از خشک کن هوای داغ و در مدت 65 دقیقه محصول اناریجه را خشک کند. ارتکین و هیبلی نعنای را با سامانه مادون قرمز خشک کردند و خاطر نشان کردند که زمان خشک کردن در روش IR در مقایسه با روش های هوای داغ، خشک کردن انجمادی، پمپ حرارتی و خورشیدی به طور محسوسی کاهش می یابد [13]. بر طبق شکل (4) انرژی لازم برای خشک کردن

هرگونه نور جانبی، سطح اسکتر با پارچه کاملاً سیاه و ضخیم پوشانیده شد. تصاویر با وضوح 600 dpi ذخیره گردید. مختصات رنگی تصاویر حاصل در فضای رنگی $L^*a^*b^*$ با نرم افزار ImageJ (Version 1.47, NIH company, USA) استخراج شد. این فضای رنگی از سه شاخص L^* معادل روشنایی تصویر که بین صفر معادل مشکی و 100 معادل انعکاس کامل نور است. مقادیر مثبت a^* معادل رنگ قرمز و مقادیر منفی آن معادل رنگ سبز است. مقادیر مثبت b^* معادل رنگ زرد و مقادیر منفی آن معادل رنگ آبی است. فضای رنگی $L^*a^*b^*$ برخلاف فضاهای RGB و HSI متأثر از وسیله عکس برداری نیست و در اکثر پژوهش های صنایع غذایی از این فضای رنگی استفاده می شود [23].

برای توصیف تغییرات رنگ پس از خشک کردن از شاخص های کروما (C)، اختلاف کل رنگ¹ (TCD) و شاخص قهوه ای شدن (BI) استفاده شد. TCD، C و BI به ترتیب از طریق رابطه های (6)، (7) و (8) محاسبه شدند [23].

$$C = \sqrt{a^{*2} + b^{*2}} \quad (6)$$

$$TCD = \sqrt{(L_0^* - L^*)^2 + (a_0^* - a^*)^2 + (b_0^* - b^*)^2} \quad (7)$$

$$BI = \frac{[100(x - 0.31)]}{0.17} \quad (8)$$

X از طریق رابطه 9 به دست می آید.

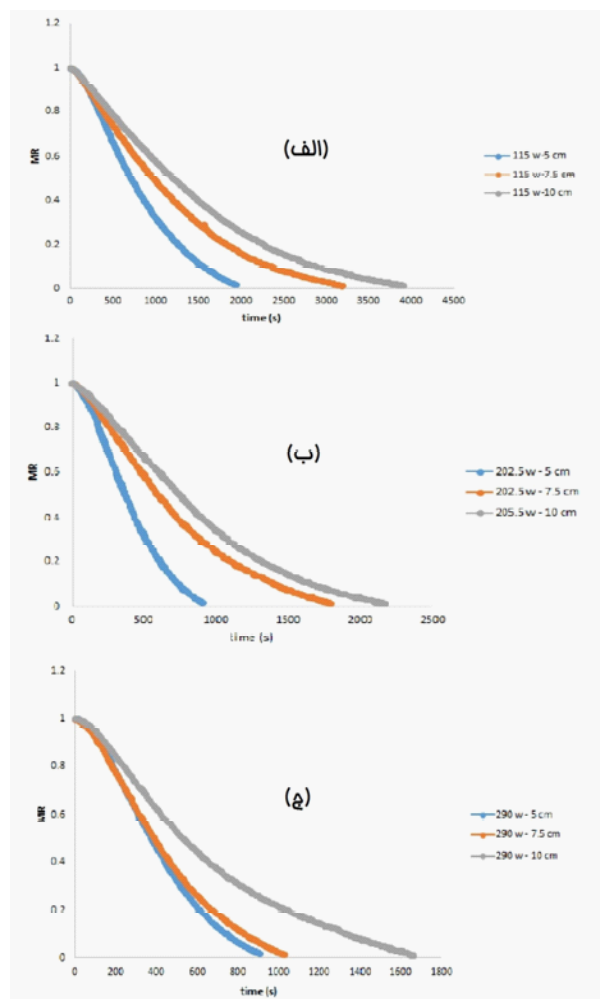
$$x = \frac{a^* + 1.75 \times L^*}{5.645L^* + a^* - 3.012b^*} \quad (9)$$

3- نتایج و بحث

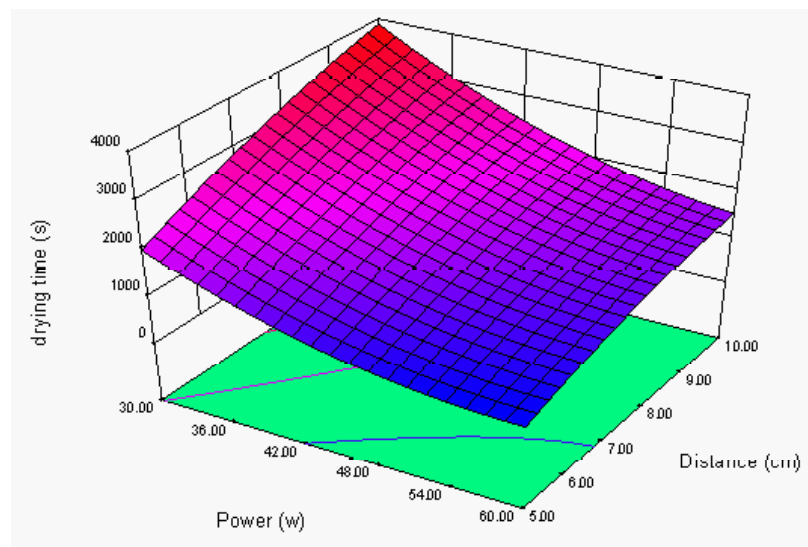
3-1- بررسی سینتیک خشک کردن

به منظور بررسی تأثیر توان و فاصله امواج فرسرخ بر خشک شدن برگ اناریجه می توان از تغییرات نسبت رطوبت در طول زمان خشک کردن استفاده کرد. در تحقیق حاضر توان های خشک کن IR معادل 115، 202/5 و 190 وات و در فواصل مختلف بودند و نمونه های مورد آزمایش 15 گرم وزن دارند. در شکل (2) تغییرات نسبت رطوبت بر پایه خشک در طول زمان

1. Total Color Difference



شکل (2) تغییرات نسبت رطوبت-زمان برای خشک کردن اناریچه در توان 115 وات (الف)، 202/5 وات (ب) و 290 وات (ج)

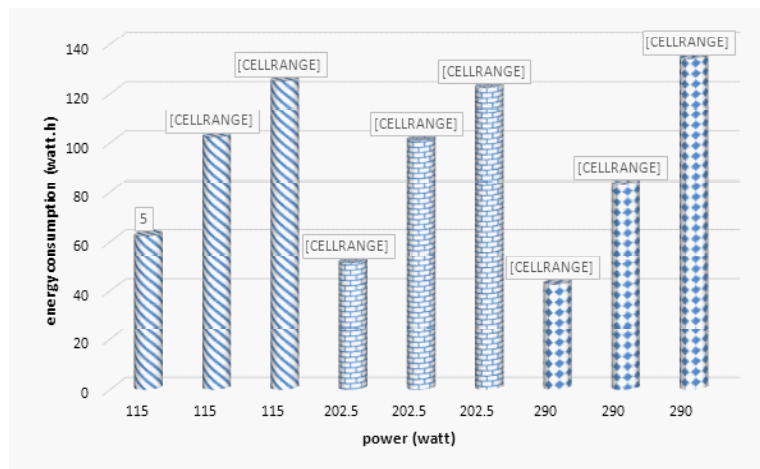


شکل (3) نمودار 3D تأثیر همزمان دما و توان بر زمان خشک شدن

15 گرم اناریجه با افزایش فاصله از منبع تابشی در توان‌های مختلف کاهش می‌یابد.

در جدول (2) پارامترهای، R^2 ، RMSE و SSE برای مدل‌های برازش شده فرایند خشک کردن برگ اناریجه در توان‌های مورد نظر ارائه شده است. مقایسه این پارامترها نشان می‌دهد که در حالت کلی تمام مدل‌ها با تقریب خوبی می‌توانند نتایج حاصل از آزمایشات تجربی را پیشگویی کنند. ولی مدل پیچ نسبت به سایر مدل‌ها به دلیل دارا بودن R^2 بالاتر و RMSE و SSE پایین‌تر، به‌عنوان بهترین مدل برای برازش انتخاب شد.

1. Linear Model
2. 2FI Model
3. Quadratic Model



شکل (4) انرژی مصرفی (W.h) برای خشک کردن اناریجه در شرایط متفاوت توان و فاصله

جدول (2) مقایسه مدل‌های برازش شده خشک کردن اناریجه در توان‌های 115، 202/5 و 290 وات

SSE	RMSE	R^2	مدل	توان
0/0541	0/0091	0/9992	پیچ	115 وات
0/1283	0/0140	0/9980	پارابولیک	
0/2359	0/0191	0/9963	لگاریتمی	
0/5446	0/0289	0/9915	وانگ و سینگ	
0/0215	0/0084	0/9993	پیچ	202/5 وات
0/1553	0/0227	0/9951	پارابولیک	
0/2032	0/0259	0/9936	لگاریتمی	
0/4631	0/0391	0/9855	وانگ و سینگ	
0/0266	0/0123	0/9986	پیچ	290 وات
0/1136	0/0255	0/9940	پارابولیک	
0/1222	0/0265	0/9935	لگاریتمی	
0/2818	0/0401	0/9851	وانگ و سینگ	

R^2 تصحیح شده¹ و R^2 پیش‌بینی شونده² مقایسه شدند.

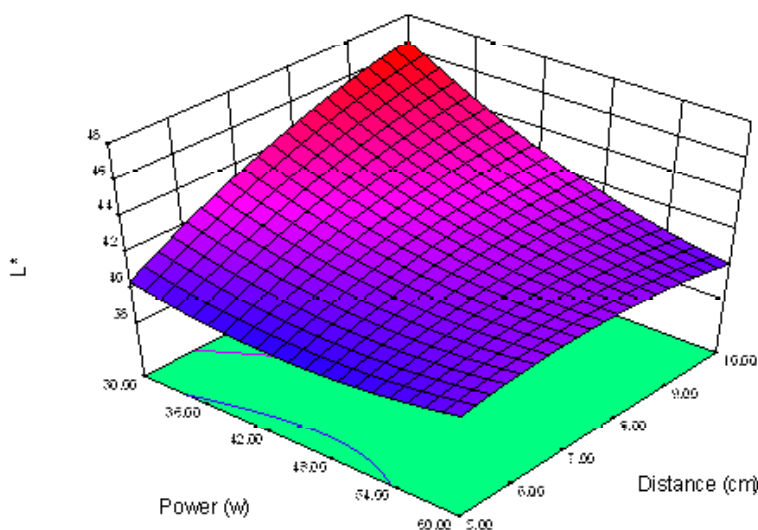
جدول (3) و (4) آورده شده است. شرایط تحت بررسی فرایند خشک کردن به طور معنی‌داری باعث تغییر روشنایی، شاخص L^* ، نمونه‌ها در مقایسه با شاهد شدند. بیش‌ترین و کم‌ترین L^* به ترتیب مربوط به تیمار با توان 115 w و فاصله 10 cm و توان 202/5 w و فاصله 5 cm بود. کین و هیبلی کاهش شاخص L^* را در طی خشک کردن برگ نعناع با سامانه مادون قرمز گزارش نمودند [13]. بر اساس نتایج به دست آمده، بیش‌ترین مقدار R^2 -pred و R^2 -adj برای

نتایج ANOVA شاخص‌های رنگی a^* ، L^* و b^* محصول خشک شده نشان داد که اثر سطوح تحت بررسی توان و فاصله منبع تابش بر میزان شاخص‌های رنگی L^* و a^* معنی‌دار و بر شاخص b^* بی‌معنی بود. آنالیز واریانس (ANOVA) داده‌های آزمایشی مربوط به تأثیر شرایط خشک کردن بر شاخص‌های رنگی L^* و a^* ، به منظور انطباق و مدل ریاضی، به ترتیب در

1. Adjusted R-Squared (R^2 -adj)
2. Predicted R-Squared (R^2 -pred)

جدول (3) آنالیز واریانس (ANOVA) مدل چندجمله‌ای درجه ساده حاصل از طرح سطح پاسخ مربوط به تأثیر شرایط خشک کردن بر شاخص L^*

منبع	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	مقدار F	P
مدل	5	41/42	8/28	6/64	0/0291
توان	1	14/79	14/79	11/85	0/0184
فاصله	1	12/10	12/10	9/70	0/0264
توان×فاصله	1	11/32	11/32	9/07	0/0297
2(توان)	1	2/40	2/40	1/93	0/2238
2(فاصله)	1	1/65	1/65	1/32	0/3026
باقی مانده	5	6/24	1/25		
فقدان برازش	3	1/09	0/36	0/14	0/9265
خطای خالص	2	5/14	2/57		
مجموع مربعات کل	10	47/66			
ضریب تغییرات (%)	2/67				



شکل (5) نمودار 3D تأثیر همزمان دما و توان بر شاخص L^*

نمونه دارد. هم‌چنین اثر خطی توان بیش‌ترین تأثیر را در افزایش شاخص a^* و به عبارتی کاهش سبزی نمونه دارد. شکل (6) اثرات متغیرهای مورد بررسی را بر شاخص a^* نشان می‌دهد. با مقایسه تغییرات شاخص‌های L^* و a^* ، می‌توان دریافت که هرچه نمونه روشن‌تر (شاخص L^* بالاتر) باشد، سبزی نمونه (شاخص a^*) بیش‌تر حفظ می‌شود.

بررسی نتایج AVONA شاخص قهوه‌ای شدن (BI) و اختلاف رنگ کل (TCD) تراوه تیمارهای خشک کردن نشان داد که اثر سطوح تحت بررسی توان و فاصله بر این دو فاکتور معنی‌دار نبود.

شاخص کروما تعیین‌کننده شدت رنگ محصول است. مقایسه میانگین‌ها نشان داد که اثر سطوح تحت بررسی توان و فاصله بر این فاکتور معنی‌دار بود. بیش‌ترین و کم‌ترین کروما، به ترتیب مربوط به تیمار با توان 115 w و فاصله 10 cm و توان 202/5 w و فاصله 5 cm بود. بر اساس نتایج به دست آمده، بیش‌ترین مقدار R^2 -adj و R^2 -pred برای مدل چندجمله‌ای درجه ساده و به ترتیب برابر 0/71 و 0/62 بود. مقدار P برای آزمون فقدان برازش، 0/9370 بود. رابطه (11) اثرات متغیرهای توان و فاصله را بر روی شاخص کروما نشان می‌دهد.

(11)

$$\text{Chroma} = +29.56504 - (0.20246 \times \text{POWER}) + (4.55690 \times \text{DISTANCE}) - (0.045492 \times \text{POWER} \times \text{DISTANCE}) + (4.89313E-003 \times \text{POWER}^2) - (0.12791 \times \text{DISTANCE}^2)$$

از این رابطه می‌توان دریافت که اثر خطی فاصله و اثر درجه دوم توان به ترتیب بیش‌ترین تأثیر را بر افزایش و کاهش مقدار کروما دارند. مطابق شکل (7) تغییرات توان در شدت‌های بالاتر و هم‌چنین تغییرات فاصله از نقطه مرکزی به بعد، باعث تغییرات بیش‌تر شاخص کروما می‌شود؛ که دلیل آن می‌تواند تغییرات زیاد در میزان روشنایی محصول (L^*) از فاصله 7/5 به 10 و هم‌چنین از توان 115 به 290 و هم‌چنین اثرات متقابل توان و فاصله باشد.

4- نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر فرایند خشک کردن برگ‌های اناریجه در

مدل چندجمله‌ای درجه ساده و به ترتیب برابر 0/71 و 0/64 بود. مقدار P برای آزمون فقدان برازش، 0/9265 بود. رابطه (9) اثرات متغیرهای مستقل توان و فاصله را بر روی شاخص L^* نشان می‌دهد.

(9)

$$L^* = +28.63168 - (0.15782 \times \text{POWER}) + (4.52156 \times \text{DISTANCE}) - (0.044863 \times \text{POWER} \times \text{DISTANCE}) + (4.32936E-003 \times \text{POWER}^2) - (0.12898 \times \text{DISTANCE}^2)$$

از این رابطه می‌توان دریافت که اثر خطی فاصله در افزایش شاخص L^* مؤثرتر از اثر خطی توان در کاهش این شاخص می‌باشد و به‌طور کلی بیش‌ترین تأثیر را بر تغییر شاخص L^* دارد. شکل (5) اثرات متغیرهای مورد بررسی را بر شاخص L^* نشان می‌دهد. تیمارهای فرایند خشک کردن به‌طور معنی‌داری باعث کاهش سبزی (شاخص a^*) اناریجه در مقایسه با شاهد شدند. در فرایند خشک کردن سبزی‌ها؛ هر چه میزان این شاخص کم‌تر باشد، نشان‌دهنده سبزی‌تر بودن نمونه خشک‌شده و کیفیت بهتر آن می‌باشد. ارتکین و هیبلی در مورد برگ نعنای به نتایج مشابهی دست یافتند [13].

افزایش فاصله سبب افزایش شاخص a^* شد. با تغییرات توان، شاخص a^* نمونه خشک‌شده رفتاری دوگانه نشان داد به‌طوری که با افزایش توان، شاخص b^* ابتدا کاهش (تا نزدیک نقطه مرکزی) و سپس افزایش یافت. کم‌ترین و بیش‌ترین a^* به ترتیب مربوط به تیمار با توان 115 w و فاصله 10 cm و توان 202/5 w و فاصله 5 cm بود. بر اساس نتایج به دست آمده، بیش‌ترین مقدار R^2 -adj و R^2 -pred برای مدل چندجمله‌ای درجه دوم و به ترتیب برابر 0/88 و 0/67 بود. مقدار P برای آزمون فقدان برازش، 0/6490 بود. رابطه (10) اثرات متغیرهای مستقل دما و فشار را بر روی شاخص a^* نشان می‌دهد.

(10)

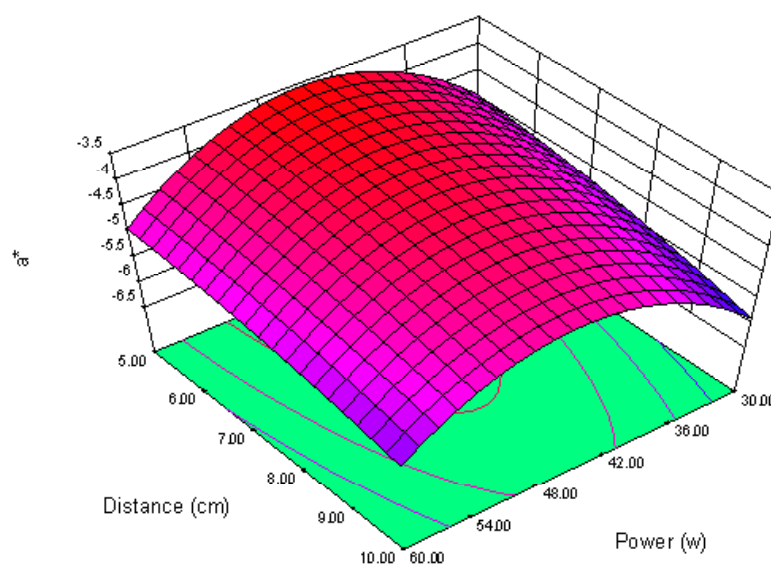
$$a^* = -15.46310 + (0.52911 \times \text{POWER}) + (0.058957 \times \text{DISTANCE}) + (2.05000E-003 \times \text{POWER} \times \text{DISTANCE}) - (5.99199E-003 \times \text{POWER}^2) - (0.021032 \times \text{DISTANCE}^2)$$

از این رابطه می‌توان دریافت که اثر توان دوم فاصله بیش‌ترین تأثیر را در کاهش شاخص a^* و به عبارتی افزایش سبزی

خشک‌کن IR با توان و فاصله‌های مورد نظر از منبع تابشی بررسی شد. نتایج نشان داد که افزایش توان و فاصله از لحاظ آماری تأثیر معنی‌دار بر زمان خشک‌شدن و کیفیت محصول نهایی دارند. بیش‌ترین و کم‌ترین L^* به ترتیب مربوط به تیمار با توان 115 w و فاصله 10 cm و توان 202/5 w و فاصله 5 cm بود. هم‌چنین کم‌ترین و بیش‌ترین a^* به ترتیب مربوط به تیمار با توان 115 w و فاصله 10 cm و توان 202/5 w و فاصله 5 cm بود. به عبارتی افزایش روشنایی نمونه هم‌راستا با حفظ شاخص سبزی بود. از بین 4 مدل استفاده‌شده در این پژوهش مدل پیچ در تمامی توان‌های تحت بررسی، بهترین برآزش را بر داده‌های تجربی نشان داد و به‌عنوان بهترین مدل پیش‌بینی کننده سینتیک خشک‌شدن برگ انار بچه تحت شرایط مورد آزمایش انتخاب شد. انرژی مصرفی به‌منظور خشک‌کردن با افزایش فاصله از منبع تابش، افزایش یافت.

جدول (4) آنالیز واریانس (ANOVA) مدل چندجمله‌ای درجه ساده حاصل از طرح سطح پاسخ مربوط به تأثیر شرایط خشک‌کردن بر شاخص a^*

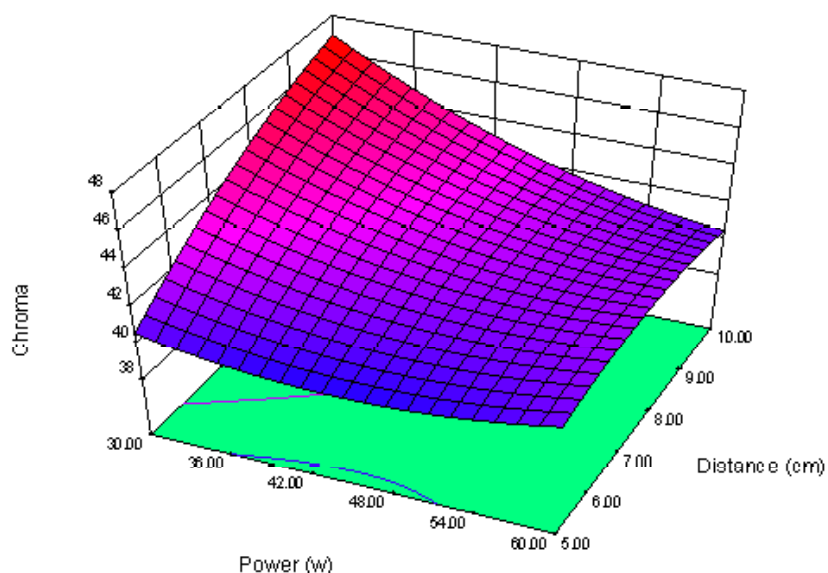
منبع	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	مقدار F	P
مدل	5	6/33	1/27	16/01	0/0043
توان	1	0/037	0/037	0/46	0/5268
فاصله	1	1/01	1/01	12/78	0/0159
توان×فاصله	1	0/024	0/024	0/30	0/6082
2(توان)	1	4/60	4/60	58/18	0/0006
2(فاصله)	1	0/044	0/044	0/55	0/4905
باقی مانده	5	0/40	0/079		
فقدان برآزش	3	0/20	0/066	0/66	0/6490
خطای خالص	2	0/20	0/099		
مجموع مربعات کل	10	6/73			
ضریب تغییرات (%)	6/06				



شکل (6) نمودار 3D تأثیر همزمان دما و توان بر شاخص a^*

جدول (5) آنالیز واریانس (ANOVA) مدل چندجمله‌ای درجه ساده حاصل از طرح سطح پاسخ مربوط به تاثیر شرایط خشک کردن بر شاخص کروما

منبع	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	مقدار F	P
مدل	5	42/9	8/58	6/92	0/0267
توان	1	14/39	14/39	11/61	0/0191
فاصله	1	13/10	13/10	10/57	0/0227
توان×فاصله	1	11/64	11/64	9/39	0/0280
2(توان)	1	3/07	3/07	2/48	0/1763
2(فاصله)	1	1/62	1/62	1/31	0/3048
باقی مانده	5	6/20	1/24		
فقدان برازش	3	0/98	0/33	0/13	0/9370
خطای خالص	2	5/22	2/61		
مجموع مربعات کل	10	49/10			
ضریب تغییرات (%)	2/64				



شکل (7) نمودار 3D تأثیر همزمان دما و توان بر میزان کروما

منابع

Nutritional Effects Associated with the Use of Garlic as a Supplement. November 15-17, 1998. Newport Beach, California, USA. Proceedings. *American Society of Nutrition Sciences*, 131(3s), 951s-1123s.

[4] Gülçin, İ., Oktay, M., Kireççi, E., Küfrevioğlu, Ö.İ. (2003). Screening of antioxidant and antimicrobial activities of anise (*Pimpinella anisum L.*) seed extracts. *Food Chem.*, 83(3), 371-382.

- [1] Jodral, M.M. (2004). *Illicium, Pimpinella and Foeniculum (Medicinal and Aromatic Plants)*. CRC Press, 13-20.
- [2] Mozaffarian, V. (2012). *Identification of Medicinal and Aromatic Plants of Iran*. Farhang Moaser Press, Tehran, Iran, 726-729.
- [3] Sivam, G.P. (2001). Recent Advances on the

- Acta.*, 81(2), 325-331.
- [15] Doymaz, İ. (2015). Infrared drying kinetics and quality characteristics of carrot slices. *J. Food Process. Preserv.*, 39(6), 2738-2745.
- [16] Bagheri, H., Seyedabadi, M.M., Kashaninejad, M. (2014). Modeling of thin-layer drying kinetics of kameh (native khashk). *Novel Food Technol.*, 2(1), 3-16.
- [17] Noori, M., Kashaninejad, M., Daraey garmakhany, a., Bolandi, M. (2012). optimization of drying process of parsley using the combination of hot air and microwave methods. *J. Food Process. Preserv.*, 4(2), 103-122.
- [18] AOAC. (1990). Official method of analysis. Washington, DC: Association of Official Analytical Chemists. (No. 934.06).
- [19] Akpınar, E.K. (2006). Mathematical modelling of thin layer drying process under open sun of some aromatic plants. *J. Food Eng.*, 77(4), 864-870.
- [20] Doymaz, İ., Tugrul, N., Pala, M. (2006). Drying characteristics of dill and parsley leaves. *J. Food Eng.*, 77(3), 559-565.
- [21] Hebbar, H.U., Vishwanathan, K., Ramesh, M. (2004). Development of combined infrared and hot air dryer for vegetables. *J. Food Eng.*, 65(4), 557-563.
- [22] Guiné, R.P., Fernandes, R.M. (2006). Analysis of the drying kinetics of chestnuts. *J. Food Eng.*, 76(3), 460-467.
- [23] Seyed Abadi, M.M., Aghajanzadeh Soorki, S., Kashani Nezhad, M., Ziyai Far, A. M. (2017). Investigation of the effect of microwave on some physico-chemical properties of sour orange juice. *J. Food Sci. Technol.*, 14(62), 29-17.
- [24] Sharma, G.P., Verma, R.C., Pathare, P.B. (2005). Thin-layer infrared radiation drying of onion slices. *J. Food Eng.*, 67(3), 361-366.
- [25] Doymaz, İ. (2012). Infrared drying of sweet potato [5] Tabanca, N., Ma, G., Pasco, D.S., Bedir, E., Kirimer, N., Baser, K., Khan, I. A., Khan, S. I. (2007). Effect of essential oils and isolated compounds from *Pimpinella* species on NF- κ B: a target for antiinflammatory therapy. *Phytother. Res.*, 21(8), 741-745.
- [6] Sui, Y., Yang, J., Ye, Q., Li, H., Wang, H. (2014). Infrared, convective, and sequential infrared and convective drying of wine grape pomace. *Drying Technol.*, 32(6), 686-694.
- [7] Gabel, M.M., Pan, Z., Amaratunga, K., Harris, L.J., Thompson, J.F. (2006). Catalytic infrared dehydration of onions. *J. Food Sci.*, 71(9), 351-357.
- [8] Mongpraneet, S., Abe, T., Tsurusaki, T. (2002). Accelerated drying of welsh onion by far infrared radiation under vacuum conditions. *J. Food Eng.*, 55(2), 147-156.
- [9] Krishnamurthy, K., et al. (2008). Infrared heating in food processing: an overview. *Compr. Rev. Food Sci. Food Saf.*, 7(1), 2-13.
- [10] Hamanaka, D., et al. (2000). The sterilization effects of infrared ray on the agricultural products spoilage microorganisms. in 2000 ASAE Annual International Meeting, Milwaukee, Wisconsin, USA, 9-12.
- [11] Afzal, T., Abe, T., Hikida, Y. (1999). Energy and quality aspects during combined FIR-convection drying of barley. *J. Food Eng.*, 42(4), 177-182.
- [12] Sarimeseli, A., Yuceer, M. (2015). Investigation Of Infrared Drying Behaviour Of Spinach Leaves Using ANN Methodology And Dried Product Quality. *Chem. Process Eng.*, 36(4), 425-436.
- [13] Ertekin, C., Heybeli, N. (2014). Thin Layer Infrared Drying of Mint Leaves. *J. Food Process. Preserv.*, 38(4), 1480-1490.
- [14] Ježek, D., Tripalo, B., Brnčić, M., Karlović, D., Rimac Brnčić, S., Vikić-Topić, D., Karlović, S. (2008). Dehydration of celery by infrared drying. *Croat. Chem.*



(*Ipomoea batatas L.*) slices. *Food Sci. Technol.* 49(6), 760-766.

[26] Kocabiyik, H., Tezer, D. (2009). Drying of carrot slices using infrared radiation. *Int. J. Food Sci. Technol.*, 44(5), 953-959.

[27] Mujić, I., Kralj, M.B., Jokić, S., Jug, T., Šubarić, D., Vidović, S., Živković, J., Jarni, K. (2014). Characterisation of volatiles in dried white varieties figs (*Ficus carica L.*). *Food Sci. Technol.*, 51(9), 1837-1846.

[28] Tunde-Akintunde, T., Ogunlakin, G. (2013). Mathematical modeling of drying of pretreated and untreated pumpkin. *Food Sci. Technol.*, 50(4), 705-713.

[29] AghbAShlo, M., Kianmehr, M.H., ArAbhoSSeiNi, A., NAzgheliChi, T. (2011). Modelling the carrot thin layer drying in a semi-industrial continuous band dryer. *Czech J. Food Sci.*, 29, 528-538.

[30] Akpinar, E.K., Bicer, Y. (2008). Mathematical modelling of thin layer drying process of long green pepper in solar dryer and under open sun. *Energy Convers. Manage.*, 49(6), 1367-1375.