



### مقاله پژوهشی

## روابط تجربی تعمیم یافته برای خشک کردن لایه نازک ولیک در خشک‌کن سینی دار

اکرم باریاب<sup>۱</sup>، کامیار موقرنژاد<sup>۲\*</sup>

۱. دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه ترموسینتیک و کاتالیست، دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل  
۲. استاد گروه ترموسینتیک و کاتالیست، دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

(تاریخ دریافت: ۹۷/۷/۵، تاریخ آخرین بازنگری: ۹۷/۹/۲۶، تاریخ پذیرش: ۹۷/۱۱/۲۸)

### چکیده

فرایند خشک کردن لایه نازک ولیک در خشک‌کن سینی‌دار آزمایشگاهی با متغیرهای دما در ۶۰، ۶۵، ۷۰ و ۷۵ °C و سرعت جریان هوا در ۰/۵، ۰/۶، ۰/۷ و ۰/۸ m/s بررسی گردیدند. نمونه‌های ولیک از متوسط محتوای رطوبت اولیه ۴۴/۳۷ درصدی تا محتوای رطوبت نهایی ۱/۶۳ درصدی (در مبنای تر) خشک شدند. داده‌های آزمایشگاهی به‌دست آمده به منظور بررسی و ارزیابی بهترین معادلات تجربی برازش شدند و روش بهینه سازی الگوریتم ژنتیکی برای تخمین مناسب‌ترین پارامترها مورد استفاده قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که مدل اصلاح شده پیچ بهترین مدل برای خشک کردن لایه نازک ولیک در خشک‌کن سینی‌دار می‌باشد. ضرایب تجربی در مدل تعمیم یافته پیچ اصلاح شده می‌تواند به عنوان تابعی از دما و جریان هوا بیان شود و بدین ترتیب روابطی تعمیم یافته برای تخمین زمان و سرعت خشک شدن در شرایط مختلف به‌دست می‌آید. درحالی‌که روابط تجربی پیشین تنها برای یک آزمایش خاص کاربرد داشتند.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم ژنتیک، خشک کردن، خشک‌کن سینی‌دار، ولیک.

## ۱. مقدمه

نتایج به دست آمده نشان دادند که مدل پیچ بهترین مدل برای توصیف خشک کردن لایه نازک برش‌های بادمجان می‌باشد. اکبای منگس و ارتکین از چندین مدل برای شبیه‌سازی داده‌های تجربی خشک کردن لایه نازک برش‌های سیب زرد در دماها و سرعت‌های متفاوت جریان هوا در خشک‌کن سینی‌دار استفاده کردند [۵]. به گزارش آن‌ها مدل میدیلی دقیق‌ترین مدل برای توصیف سینتیک خشک کردن برش‌های سیب‌های زرد بود. کینگسلی و سینگ از چهار رابطه تجربی مختلف برای توصیف داده‌های تجربی سینتیک خشک کردن دانه‌های انار در خشک‌کن سینی‌دار در دماهای مختلف سود بردند [۶]. نتایج نشان داد که مدل پیچ مناسب‌ترین رابطه را در این میان ارائه می‌دهد. وانگ و همکارانش چندین مدل برای توصیف داده‌های تجربی خشک کردن لایه نازک گوشت میوه سیب در هوای گرم برازش کردند. آن‌ها مشاهده کردند که مدل لگاریتمی دارای بهترین تطابق با داده‌های آزمایشی می‌باشد [۷]. حافظ اغلو و همکارانش خشک شدن لایه نازک برنج با محتوای رطوبت بالا را در خشک‌کن طبقه‌ای مدل‌سازی کردند [۸]. آن‌ها از چندین مدل خشک کردن برای یافتن مدل مناسب سینتیک خشک کردن شلتوک سود بردند. نتایج به دست آمده نشان داد که مدل میدیلی دقیق‌تر از دیگر روابط است. لاوها وانج و وانگ پیچت نیز مشاهده کردند که مدل پیچ بهترین مدل برای برازش داده‌های تجربی خشک کردن لایه نازک برنج در خشک‌کننده گازسوز فروسرخ بود [۹]. کاواک آکپینار خشک کردن لایه نازک توت سفید را با استفاده از چندین رابطه تجربی مدل‌سازی کرد. او مشاهده کرد که رابطه ورمای مناسب‌ترین معادله برای توصیف سینتیک خشک کردن توت سفید می‌باشد [۱۰]. همچنین وگا-گالوز و همکارانش چندین مدل ریاضی برای توصیف منحنی‌های خشک کردن قالب‌های کیک زیتونی ارائه دادند [۱۱]. آن‌ها مشاهده کردند که مدل هندرسن و پابیس مناسب‌ترین مدل برای توصیف این منحنی‌های خشک کردن است. در تحقیقی دیگر داتا و بارو خشک کردن لایه نازک چای سیاه را مطالعه کردند. به گزارش آن‌ها مدل اصلاح شده پیچ مناسب‌ترین مدل برای توصیف داده‌های تجربی‌شان بود [۱۲]. در تمام این تحقیقات و بسیاری دیگر از تحقیقات محاسبات مدل‌سازی تنها به تطابق ثابت‌های عددی به کمک داده‌های تجربی محدود می‌شود. اگر مواد خام، نوع خشک‌کننده یا هر

خشک کردن یکی از قدیمی‌ترین روش حفظ و نگهداری مواد غذایی باشد. هنوز نیز روش‌های سنتی خشک کردن مانند خشک کردن در محیط باز با نور خورشید در کشورهای کمتر توسعه یافته مورد استفاده قرار می‌گیرند. هرچند این روش‌ها از کاستی‌های فراوانی مانند غیر قابل تنظیم بودن سرعت خشک شدن، سرعت پایین خشک شدن، شرایط نامعلوم آب و هوایی، هزینه‌های بالای نیروی انسانی، نیاز به سطح زیر پوشش گسترده، احتمال ایجاد آلودگی از طریق حشرات، گردوخاک و دیگر مواد خارجی رنج می‌برند. فرایندهای خشک کردن صنعتی مدرن به عنوان پاسخی درخور برای این دشواری‌ها در نظر گرفته می‌شوند. مدل‌های ریاضی دقیق برای طراحی و اجرای روندهای صنعتی، توضیح مکانیسم‌های طراحی و آماده‌سازی و کنترل مناسب روند خشک کردن مورد نیاز هستند.

خشک کردن لایه نازک یکی از روش‌های متداول و کارآمد خشک کردن فرایندهای صنعتی است. مدل‌های خشک کردن لایه نازک می‌تواند در سه گروه نظری، نیمه تجربی و روابط تجربی دسته‌بندی می‌شوند. مدل‌های نظری به‌طور کلی بر اساس معادلات انتشار در فاز مایع برپا می‌شوند ولی کار با این مدل‌ها به‌طور معمول پیچیده و دشوار است. از سوی دیگر مدل‌های تجربی و نیمه تجربی مانند نیوتن، پیچ و لگاریتمی به شکل معادلات بسیار ساده ریاضی ارائه می‌شوند و ثوابت تجربی آن‌ها را باید برای هر آزمایش بطور جداگانه برازش کرد.

طغرل و پهلوان از چندین مدل ریاضی برای توصیف خشک کردن لایه نازک زردآلو استفاده کردند [۱]. به گزارش آن‌ها در میان این روابط ریاضی مدل لگاریتمی از دقت بالایی برای توصیف خشک کردن لایه نازک برخوردار بود. جین و پاتار داده‌های خشک کردن لایه نازک برش‌های پیاز را با ۹ رابطه تجربی متفاوت توصیف کردند [۲]. مویتیکا و اولوال تاثیر دمای هوا و ضخامت نمونه را بر سینتیک خشک کردن لایه نازک کلم مطالعه کردند [۳]. آن‌ها داده‌های آزمایشی را با چهار رابطه تجربی و نیمه تجربی متفاوت برازش کرده و گزارش دادند که مدل اصلاح شده پیچ از دقت بالایی برخوردار می‌باشد. کاواک آکپینار و بیسر از چندین رابطه ریاضی گوناگون برای شبیه سازی خشک شدن لایه نازک بادمجان در دماها و سرعت‌های جابجایی مختلف در خشک‌کن سینی‌دار استفاده کردند [۴].

سرعت هوای ورودی مورد نیاز تنظیم شد تا دمای هوای و سرعت هوای ورودی داخل خشک‌کن به حالت پایدار برسد. نمونه‌های ۲۰۰ گرمی ولیک، پس از یک ساعت تثبیت در دمای اتاق، در دو سینی مشبک خشک‌کن سینی‌دار با وزن مشابه قرار گرفت. در خشک‌کن سینی‌دار عملیات توزین کردن نمونه‌ها در وقفه‌های زمانی تعیین شده توسط ترازوی دیجیتالی که متصل به کامپیوتر بود انجام شد. توزین نمونه‌ها تا زمانی ادامه یافت که اختلاف وزنی بین دو وزن گیری متوالی مشاهده نشد. متوسط محتوای رطوبت اولیه دانه‌های ولیک برابر با ۴۴/۳۷ درصد بر پایه خشک بود. محتوای رطوبت مواد خام و نمونه‌های خشک شده با استفاده از یک رطوبت سنج دیجیتالی بر پایه خشک تعیین شد.

## ۲.۲. خشک‌کن تجربی

آزمایش‌های خشک کردن در یک خشک‌کن سینی‌دار استاندارد انجام شدند. این خشک‌کن دارای محفظه ورودی شامل فن یا دمنده و گرم‌کن‌های الکتریکی، محفظه میانی شامل قفسه‌های خشک‌کن و خطی سازهای جریان هوا، محفظه خروجی و تابلو فرمان شامل محفظه کنترل کننده دما و سرعت است. این وسیله شامل یک مجرای هوای نصب شده بر روی یک پایه می‌باشد تا ارتفاع فعالی را برای اپراتور فراهم نماید. هوا در یک خشک‌کننده توسط یک موتور به چرخش در می‌آید که با پروانه‌ها می‌کنند جریان هوا با نرخ جریان حجم سنج قابل کنترل هدایت می‌شود. در خشک‌کن سینی‌دار، سرعت هوا می‌تواند در خلال آزمایش‌های خشک کردن در هر سطح مطلوبی از ۰/۲ تا ۱/۸ m/s ثابت حفظ شود. هوای ورودی ممکن است در معرض المان‌های گرمایی قرار گیرد و دمای آن افزایش یابد. هوا از حداکثر چهار سینی مشبک عبور می‌کند که ممکن است با مواد خشک‌شونده بارگذاری شود. طبقات به یک ترازوی دیجیتالی متصل می‌باشند که در بالای مجرا نصب شده است. این آرایش به‌طور پیوسته وزن نمونه‌ها و طبقات خشک‌کن را اندازه‌گیری می‌کند، دماهای حباب مرطوب و خشک جریان هوا در خلال هر آزمایش قبل از نمونه و بعد از نمونه قابل اندازه‌گیری می‌باشد.

کدام از شرایط آزمایشگاهی تغییر کنند، رابطه تجربی پیشین هیچ نتیجه دقیقی را ارائه نمی‌دهد و ثابت‌های تجربی بایستی دوباره با داده‌های تجربی جدید برازش شوند. به همین دلیل هدف اصلی این تحقیق ارائه دستور کاری کلی برای تعمیم روابط تجربی موجود است تا قادر به پیش‌بینی فرایند خشک شدن در گستره پهناورتری باشند. این روابط کلی باید بتوانند مقادیر عددی برای هر ثابت تجربی در شرایط تجربی متفاوت ارائه دهند. میوه جنگلی ولیک، یکی از محصولات بومی مازندران و شمال کشور که خواص غذایی و دارویی پرشماری از آن در مراجع معتبر ذکر شده، به عنوان ماده خام انتخاب شده تا بهترین رابطه تجربی تعمیم یافته قادر به پیش‌بینی فرایند خشک شدن در شرایط مختلف برای آن تعیین گردد.

## ۲. مواد و روش‌ها

### ۱.۲. مواد

ولیک گیاهی از جنس زالزالک می‌باشد که عمدتاً در نیمکره شمالی و در کشورهای چین، اروپا و شمال آمریکا پراکنده بوده و بیش از ۱۰۰۰ گونه از جنس آن شرح شناسایی شده‌اند [۱۳]. از میوه ولیک برای تولید مربا، ژله، آبمیوه و نوشابه و همچنین در طب سنتی استفاده می‌شود. میوه ولیک حاوی فلاونوئیدها، ویتامین C، گلیکوزیدها، آنتوسیانین‌ها، ساپونین، تانن و آنتی‌اکسیدان‌ها می‌باشد [۱۴].

ولیک تازه از بازارهای محلی شهر بابل در شمال ایران در فصل پاییز خریداری و تا پایان آزمایش‌ها در یخچال در دمای  $4^{\circ}\text{C}$  + نگه‌داری شد. میزان رطوبت اولیه ولیک‌ها با روش خشک کردن در آون به‌دست آمد. نمونه‌های ۱۰ گرمی ولیک در آون در دمای  $105^{\circ}\text{C}$  قرار گرفته و خشک شدند، به‌طوری‌که تغییر وزنی بین دو بار توزین مشاهده نشد. حدود یک ساعت قبل از شروع هر آزمایش، جهت متعادل سازی دمای نمونه‌ها با دمای محیط نمونه‌ها از یخچال به آزمایشگاه انتقال یافت. فرایند خشک کردن نمونه‌های ولیک در چهار سطح دمایی ۶۰، ۶۵، ۷۰ و  $75^{\circ}\text{C}$  و چهار سطح سرعت هوای گرم ورودی در ۰/۵، ۰/۶، ۰/۷ و  $0/8\text{ m/s}$  با استفاده از خشک‌کن سینی‌دار ساخت انگلستان انجام شد. حدود نیم ساعت قبل از شروع فرایند خشک کردن، دستگاه خشک‌کن روشن و دمای هوای ورودی و

### ۲.۳. روابط تجربی

در این تحقیق، پنج مدل تجربی نیوتن، پیچ، اصلاح شده پیچ، هندرسن و پابیس و میدیلی و همکاران به منظور یافتن بهترین معادله برازش با یکدیگر مورد مقایسه قرار گرفتند (جدول ۱). نسبت رطوبت در این مدل‌ها از رابطه (۱) محاسبه شدند:

$$mr = \frac{x-x_e}{x_0-x_e} \quad (1)$$

در رابطه بالا  $x$  و  $x_0$  و  $x_e$  به ترتیب نمایانگر رطوبت در هر لحظه، رطوبت اولیه و رطوبت تعادلی می‌باشد. وقتی که مقدار

$x_e$  بسیار کوچک باشد، نرخ رطوبت می‌تواند به صورت  $\frac{x}{x_0}$

ساده شود. سه معیار به منظور تعیین بهترین برازش و انتخاب مناسب‌ترین مدل توصیف کننده سینتیک خشک کردن لایه نازک نمونه ولیک استفاده شدند. معمولاً ضریب همبستگی رابطه به عنوان معیاری برای انتخاب متناسب‌ترین مدل در نظر گرفته می‌شود. انحراف معیار و مربع انحراف متوسط نیز برای تعیین میزان تطابق استفاده می‌شوند. معیارهای ذکر شده توسط روابط ۲-۴ محاسبه شدند:

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n_0} (mr_{pre,i} - mr_{exp,i})^2}{n_0 - n_p} \quad (2)$$

$$e_s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n_0} (mr_{pre,i} - mr_{exp,i})^2}{n_0}} \quad (3)$$

$$r = \quad (4)$$

$$r = \frac{n_0 \sum_{i=1}^{n_0} mr_{pre,i} mr_{exp,i} - \sum_{i=1}^{n_0} mr_{pre,i} \sum_{i=1}^{n_0} mr_{exp,i}}{\sqrt{n_0 \sum_{i=1}^{n_0} (mr_{pre,i})^2 - (\sum_{i=1}^{n_0} mr_{pre,i})^2} \times \sqrt{n_0 \sum_{i=1}^{n_0} (mr_{exp,i})^2 - (\sum_{i=1}^{n_0} mr_{exp,i})^2}}$$

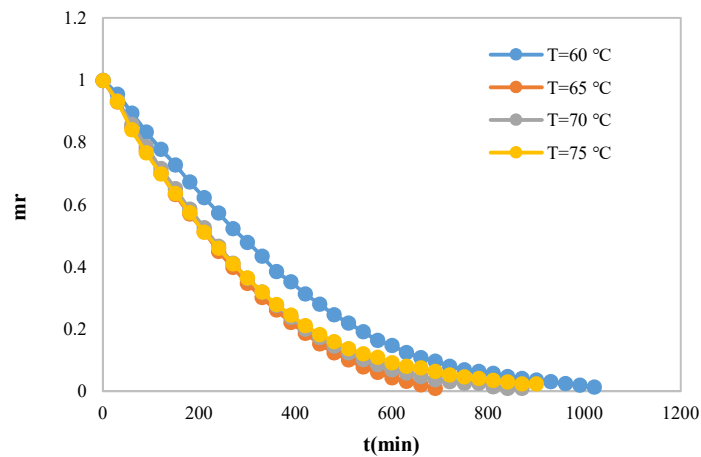
در روابط بالا،  $n_0$  نمایانگر تعداد مشاهدات،  $n_p$  تعداد پارامترها،  $m_{pre,i}$  نرخ  $i$  امین رطوبت پیش‌بینی شده توسط مدل مورد استفاده و  $mr_{exp,i}$  نرخ  $i$  امین رطوبت اندازه گیری شده به کمک داده‌های آزمایشگاهی می‌باشند. هر چه مقدار ضریب همبستگی به یک و انحراف معیار و مربع انحراف متوسط به صفر نزدیک‌تر باشند، معادله دارای دقت بالاتری در برازش داده‌های تجربی است.

جدول (۱) مدل‌های خشک کردن لایه نازک.

نام مدل	معادله مدل
Newton	$mr = \exp(-kt)$
Page	$mr = \exp(-kt^n)$
Modified Page	$mr = \exp(-(kt)^n)$
Henderson & Pabis	$mr = a \exp(-kt)$
Midili	$mr = a \exp(-kt^n) + bt$

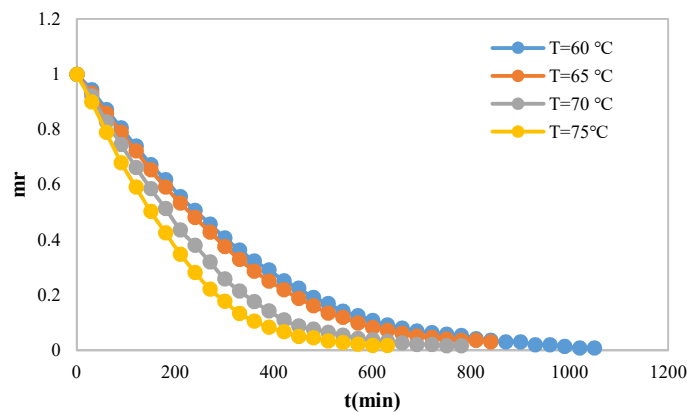
### ۲.۴. رفتار خشک شدن نمونه‌های ولیک

نمونه‌های ولیک در چهار دما ( ۶۰، ۶۵، ۷۰ و ۷۵°C ) و سرعت جریان هوای مختلف ( ۰/۵، ۰/۶، ۰/۷ و ۰/۸ m/s ) خشک شدند. در ابتدای فرایند خشک شدن بسیار سریع اتفاق افتاد و این امر موجب ایجاد شیب تند در تمامی نمودارها در ۳۰ دقیقه ابتدایی فرایند شد. این مشاهدات را می‌توان به از دست دادن رطوبت حفره‌ها و فضاهای بین سلولی که در نزدیکی سطح قرار دارند مرتبط دانست. در ادامه فرایند خشک شدن کندتر و با شیب ملایمی روی داد. علت این امر شاید خشک شدن نمونه ولیک از طریق هدایت باشد. با پیشرفت فرایند خشک شدن و رطوبت گیری، پدیده سخت شدن سطحی و چروکیدگی اتفاق افتاد که باعث افزایش زمان خشک شدن گشت. در مرحله اولیه خشک شدن، محتوای رطوبت اولیه نمونه ولیک و نرخ خشک شدن بالا بود ولی سرعت خشک شدن هنگامی که محتوای رطوبت به نزدیکی محتوای رطوبت تعادلی رسید کاهش یافت. رطوبت نمونه‌های ولیک از محتوای رطوبت اولیه ۴۴/۳۷ درصدی تا متوسط محتوای رطوبت نهایی ۱/۶۳ درصدی کاهش یافت. در ابتدای فرایند خشک کردن نمونه‌های ولیک تأثیر سرعت جریان هوا بر نرخ خشک شدن نمونه ولیک کمتر از تأثیر دمای هوای خشک شدن بود. به‌طور کلی با افزایش دما و سرعت هوا، زمان خشک شدن نمونه‌های ولیک کاهش یافت. منحنی‌های خشک شدن نمونه ولیک در سرعت ثابت و دماهای هوای متفاوت در شکل‌های ۴-۱ و در دمای ثابت و سرعت هوای مختلف در شکل‌های ۸-۵ آمده است. تأثیر دمای خشک شدن بیشتر از سرعت جریان هوای خشک شدن بود. این منحنی‌های خشک شدن نشان می‌دهند که حرکت رطوبت در مراحل اولیه خشک شدن سریع‌تر از مراحل نهایی است.



شکل (۱) منحنی خشک شدن ولیک در دماهای مختلف و سرعت ۰/۵ m/s

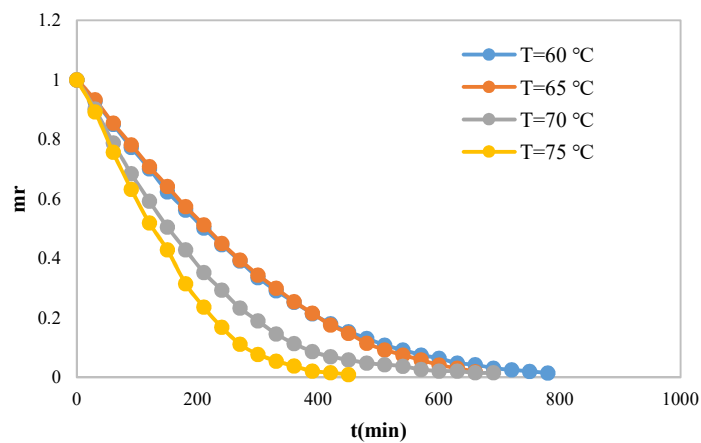
Fig. 1. Drying curve of hawthorn in air velocity of 0.5 m/s and different temperatures



شکل (۲) منحنی

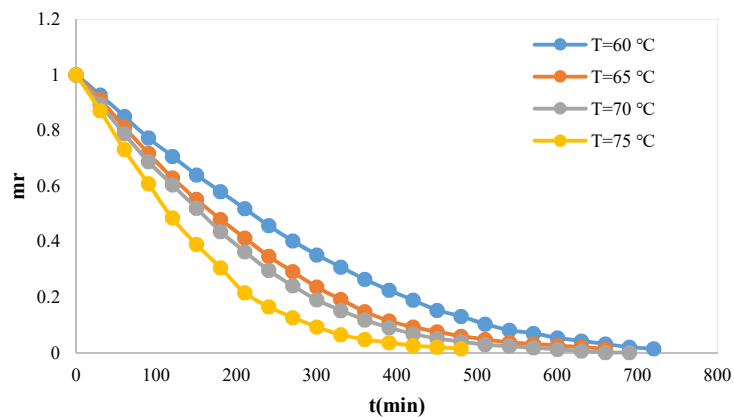
خشک شدن ولیک در دماهای مختلف و سرعت ۰/۶ m/s

Fig. 2. Drying curve of hawthorn in air velocity of 0.6 m/s and different temperatures



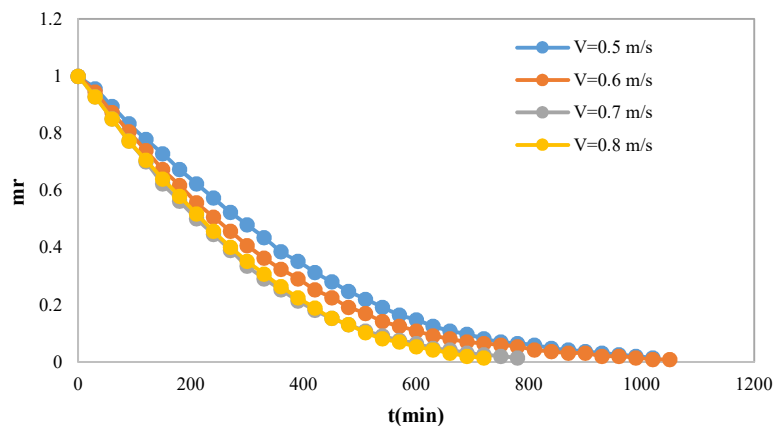
شکل (۳) منحنی خشک شدن ولیک در دماهای مختلف و سرعت ۰/۷ m/s

Fig. 3. Drying curve of hawthorn in air velocity of 0.7 m/s and different temperatures



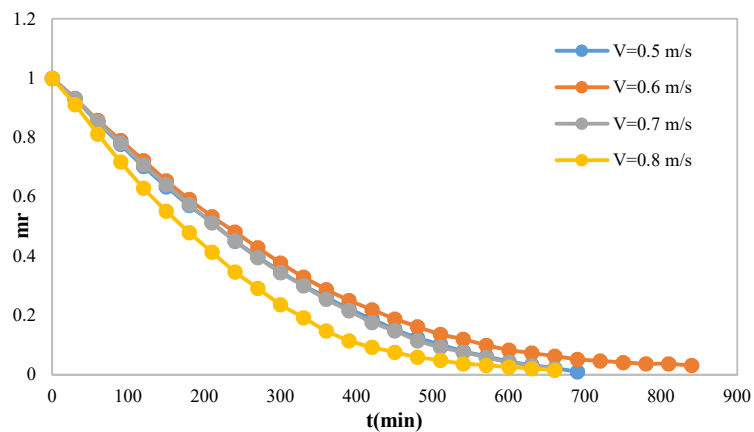
شکل (۴) منحنی خشک شدن ولیک در دماهای مختلف و سرعت ۰/۸ m/s

Fig. 4. Drying curve of hawthorn in air velocity of 0.8 m/s and different temperatures



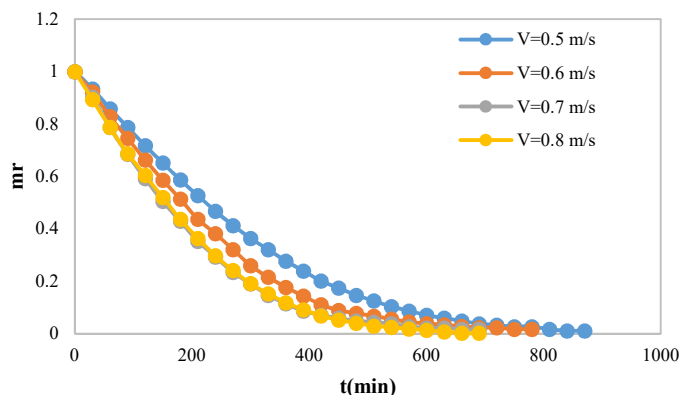
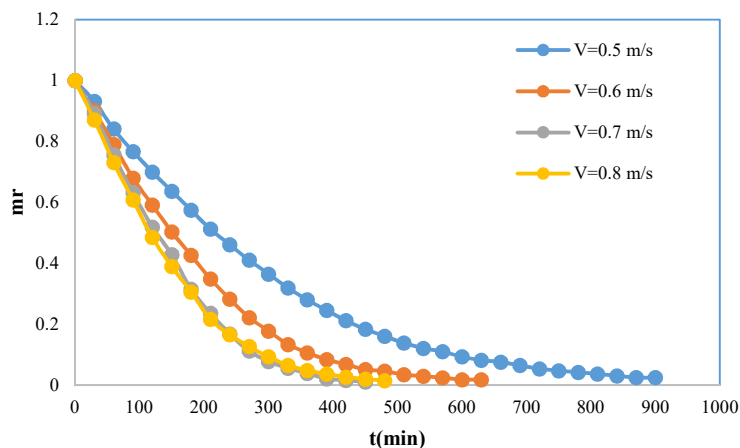
شکل (۵) منحنی خشک شدن ولیک در سرعت‌های مختلف و دمای ۶۰°C

Fig. 5. Drying curve of hawthorn in air temperature of 60°C and different air velocities



شکل (۶) منحنی خشک شدن ولیک در سرعت‌های مختلف و دمای ۶۵°C

Fig. 6. Drying curve of hawthorn in air temperature of 65°C and different air velocities

شکل (۷) منحنی خشک شدن ولیک در دمای  $70^{\circ}\text{C}$  و سرعت‌های مختلفFig. 7. Drying curve of hawthorn in air temperature of  $70^{\circ}\text{C}$  and different air velocitiesشکل (۸) منحنی خشک شدن ولیک در دمای  $75^{\circ}\text{C}$  و سرعت‌های مختلفFig. 8. Drying curve of hawthorn in air temperature of  $75^{\circ}\text{C}$  and different air velocities

تجربی خشک شدن ولیک می‌باشد. این معادله مقداری نزدیک به یک برای ضریب همبستگی برابر با  $0.9998$ ، مقدار کمیته  $e_s$  برابر با  $0.045$  و حداقل مقدار  $x^2$  برابر  $0.00031$  دارد. این نتایج نشان می‌دهند که مدل میدیلی و همکاران دارای کمترین دقت در برازش داده‌های تجربی و مدل اصلاح شده پیچ دارای بیشترین دقت در برازش داده‌های تجربی می‌باشد. در این تحقیق تلاش شد تا ثابت‌های برازش شده جداول ۲-۵ به عنوان تابعی از دما و سرعت جریان هوا به هم مرتبط شود.

#### ۲.۵. الگوریتم ژنتیک

در این مطالعه تعداد ژن‌ها ۴ و تعداد کروموزم‌ها ۲ و تعداد جمعیت اولیه ۱۵۰۰ انتخاب شد. توابع برازش در این تحقیق

نرخ رطوبت میوه ولیک به عنوان تابعی از زمان در نرخ‌های جریان هوای متفاوت و دماهای مختلف با استفاده از پنج رابطه تجربی معروف برازش شدند که در جدول (۱) آورده شده اند. ثابت‌های متناسب این روابط تجربی در جدول‌های ۲-۵ لحاظ شده‌اند. هر جدول حاوی ثابت‌های پنج مدل مختلف لایه نازک خشک کردن در دمای هوای خاصی است. ضریب همبستگی  $r$ ، خطای استاندارد  $e_s$  و متوسط مربع انحراف  $x^2$  در هر مورد نیز در این جدول‌ها آمده است. متناسب‌ترین مدل مدلی است که دارای مقادیر نزدیک به یک برای ضریب همبستگی  $r$  و مقادیر نزدیک به صفر برای خطای استاندارد  $e_s$  و مربع انحراف متوسط  $x^2$  باشد طبق نتایج به دست آمده از جداول مربوطه، مدل اصلاح شده پیچ به عنوان مناسب‌ترین مدل برای برازش داده‌های

جدول (۲) مقایسه روابط تجربی برای دمای خشک شدن ۶۰°C.

Table 2 Comparison between different empirical correlations for drying temperature of 60°C.

Model	V (m/s)	coefficients	r	es	x <sup>2</sup>
Newton	0.5	k =0.0028	0.9962	0.0451	0.0021
	0.6	k =0.0031	0.9982	0.0360	0.0013
	0.7	k =0.0038	0.9969	0.0396	0.0016
	0.8	k =0.0037	0.9953	0.0463	0.0022
Page	0.5	k =0.0023, n =1.0317	0.9969	0.0402	0.0017
	0.6	k =0.00092, n =1.2101	0.9998	0.0069	0.00005
	0.7	k =0.0047, n =0.9637	0.9957	0.0455	0.0022
	0.8	k =0.0069, n =0.8952	0.9908	0.0636	0.0044
Modified page	0.5	k =0.0026, n =1.3307	0.9998	0.0151	0.00024
	0.6	k =0.0030, n =1.2604	0.9998	0.0106	0.00011
	0.7	k =0.0035, n =1.2845	0.9998	0.0127	0.00017
	0.8	k =0.0034, n =1.3317	0.9998	0.0240	0.00062
Henderson & pabis	0.5	k =0.0031, a =1.0968	0.9937	0.0357	0.0014
	0.6	k =0.0034, a =1.0638	0.9971	0.0271	0.00077
	0.7	k =0.0039, a =1.0650	0.9959	0.0322	0.0011
	0.8	k =0.0039, a =1.0683	0.9938	0.0391	0.0017
Midilli et al	0.5	a =1.2706, b =-0.00027, k =0.0867, n =0.4123	0.9656	0.0812	0.0074
	0.6	a =1.0269, b =-0.00061, k =0.0563, n =0.3715	0.9625	0.0819	0.0075
	0.7	a =1.0602, b =-0.001, k =0.1340, n =0.1882	0.9681	0.0864	0.0069
	0.8	a =1.1066, b =-0.0008, k =0.0565, n =0.4008	0.9855	0.0521	0.0032

جدول (۳) مقایسه روابط تجربی برای دمای خشک شدن ۶۵°C.

Table 3 Comparison between different empirical correlations for drying temperature of 65°C.

Model	V (m/s)	coefficients	r	es	x <sup>2</sup>
Newton	0.5	k =0.0038	0.9956	0.00478	0.0023
	0.6	k =0.0034	0.9975	0.0376	0.0014
	0.7	k =0.0037	0.9950	0.0512	0.0026
	0.8	k =0.0046	0.9973	0.0418	0.0018
Page	0.5	k =0.0025, n =1.0662	0.9970	0.0377	0.0014
	0.6	k =0.0016, n =1.1336	0.9989	0.0188	0.00034
	0.7	k =0.00026, n =1.4580	0.9988	0.0206	0.00043
	0.8	k =0.0017, n =1.1820	0.9991	0.0170	0.00029
Modified page	0.5	k =0.0038, n =1.2651	0.9972	0.0272	0.00074
	0.6	k =0.0033, n =1.2475	0.9995	0.0089	0.00008
	0.7	k =0.0036, n =1.3390	0.9998	0.0157	0.00025
	0.8	k =0.0045, n =1.2829	0.9993	0.0108	0.00011
Henderson & pabis	0.5	k =0.0041, a =1.1059	0.9926	0.0375	0.0014
	0.6	k =0.0033, a =1.0339	0.9975	0.0345	0.0012
	0.7	k =0.0032, a =0.9833	0.9976	0.0651	0.0043
	0.8	k =0.0051, a =1.0885	0.9954	0.0318	0.0010
Midilli et al	0.5	a =1.4634, b =-0.000036, k =0.0684, n =0.5392	0.9540	0.0924	0.0088
	0.6	a =1.3657, b =-0.00045, k =0.1057, n =0.3834	0.9806	0.0569	0.0033
	0.7	a =1.3703, b =-0.000014, k =0.0388, n =0.6343	0.9616	0.0842	0.0073
	0.8	a =1.2029, b =-0.00066, k =0.0634, n =0.4614	0.9811	0.0578	0.0034

جدول (۴) مقایسه روابط تجربی برای دمای خشک شدن ۷۰°C.

Table 4 Comparison between different empirical correlations for drying temperature of 70°C.

Model	V (m/s)	coefficients	r	es	x <sup>2</sup>
Newton	0.5	k =0.0035	0.9971	0.0428	0.0018
	0.6	k =0.0045	0.9960	0.023	0.0012
	0.7	k =0.0055	0.9965	0.040	0.0016
	0.8	k =0.0051	0.9965	0.0420	0.0018
Page	0.5	k =0.00062, n =1.2968	0.9995	0.0097	0.000094
	0.6	k =0.00015, n =1.3212	0.9991	0.0160	0.00019
	0.7	k =0.0028, n =1.1105	0.9988	0.0195	0.00038
	0.8	k =0.0059, n =0.9759	0.9958	0.0459	0.0021
Modified page	0.5	k =0.0034, n =1.2997	0.9996	0.0099	0.000098
	0.6	k =0.0029, n =1.2745	0.9994	0.0045	0.000099
	0.7	k =0.0050, n =1.2388	0.9995	0.0098	0.000097
	0.8	k =0.0049, n =1.2767	0.9990	0.0132	0.000017



ادامه جدول (۴) مقایسه روابط تجربی برای دمای خشک شدن  $t=70^{\circ}\text{C}$ .

Table 4 Comparison between different empirical correlations for drying temperature of  $70^{\circ}\text{C}$ .

Model	V (m/s)	coefficients	r	es	$\chi^2$
Henderson & pabis	0.5	$k=0.0038, a=1.10882$	0.9953	0.0329	0.0011
	0.6	$k=0.0053, a=1.069$	0.9970	0.0263	0.000702
	0.7	$k=0.0049, a=1.1074$	0.9955	0.0251	0.0013
	0.8	$k=0.0055, a=1.0929$	0.9943	0.0337	0.0012
Midilli et al	0.5	$a=0.9973, b=-0.00042, k=0.0069, n=0.7827$	0.9823	0.0565	0.0033
	0.6	$a=1.1425, b=-0.00048, k=0.0069, n=0.7827$	0.9823	0.0560	0.0062
	0.7	$a=1.4262, b=-0.00001, k=0.0119, n=0.8452$	0.9939	0.0319	0.001
	0.8	$a=1.1968, b=0.000035, k=0.0150, n=0.8388$	0.9824	0.0583	0.0035

جدول (۵) مقایسه روابط تجربی برای دمای خشک شدن  $t=75^{\circ}\text{C}$ .

Table 5 Comparison between different empirical correlations for drying temperature of  $75^{\circ}\text{C}$ .

Model	V (m/s)	coefficients	r	es	$\chi^2$
Newton	0.5	$k=0.0034$	0.9988	0.0287	0.00085
	0.6	$k=0.0052$	0.9974	0.0391	0.0015
	0.7	$k=0.0065$	0.9950	0.0553	0.0031
	0.8	$k=0.0066$	0.9979	0.0369	0.0014
Page	0.5	$k=0.0060, n=0.9105$	0.9964	0.0417	0.0019
	0.6	$k=0.0018, n=1.1979$	0.9993	0.0140	0.0002
	0.7	$k=0.00062, n=1.4547$	0.9993	0.0136	0.00018
	0.8	$k=0.00062, n=1.4552$	0.9990	0.0245	0.00061
Modified page	0.5	$k=0.0034, n=1.1795$	0.9998	0.0054	0.000031
	0.6	$k=0.0050, n=1.2831$	0.9995	0.0129	0.00016
	0.7	$k=0.0062, n=1.4007$	0.9995	0.0129	0.00016
	0.8	$k=0.0063, n=1.2657$	0.9997	0.0103	0.00010
Henderson & pabis	0.5	$k=0.0037, a=1.0589$	0.9975	0.0211	0.00047
	0.6	$k=0.0056, a=1.0825$	0.9965	0.0292	0.00086
	0.7	$k=0.0074, a=1.1285$	0.9921	0.0415	0.0018
	0.8	$k=0.0072, a=1.0842$	0.9966	0.0272	0.00075
Midilli et al	0.5	$a=0.9520, b=-0.00055, k=0.0117, n=0.6463$	0.9715	0.0609	0.0057
	0.6	$a=1.1168, b=-0.00056, k=0.0358, n=0.5776$	0.9786	0.0609	0.0038
	0.7	$a=1.3342, b=0.00057, k=0.0258, n=0.8408$	0.8909	0.1586	0.0263
	0.8	$a=1.0757, b=-0.000047, k=0.0065, n=1.0113$	0.9977	0.0203	0.0043

به صورت معادلات (۵) و (۶) بیان شدند:

$$k = aT^2 + bV^2 + eTV + fT + gV + h \quad (۵)$$

$$n = a'T^2 + b'V^2 + e'TV + f'T + g'V + h' \quad (۶)$$

در معادله (۷) تعداد کروموزمها در یک نسل می باشد. پس از گزینش والد، عملکرد انتقال برای جفت والد انتخابی به کار می رود. سپس اپراتور جهش برای کروموزمهای انتخابی به کار می رود. روند هنگامی متوقف خواهد شد که مقادیر متوسط یک نسل کمتر از ۹۸ درصد حداکثر تناسب نباشد.

برای استفاده از روش الگوریتم ژنتیک کدهای کامپیوتری در نرم افزار متلب نوشته شد. روش الگوریتم GA برای کمینه سازی توابع برازش مورد استفاده واقع شد و ضرایب نامشخص در تابع برازش کسب شدند. پس از توقف روند الگوریتم، ثابت های تناسب در مدل اصلاح شده پیچ به صورت تابعی از دمای هوا و نرخ جریان هوا نوشته شدند.

$$mr = \exp(-(kt))^n \quad (۸)$$

$$(۹)$$

$$k=1.5833 \times 10^{-6}T^2 - 0.0095V^2 + 0.000476TV + 0.000388T - 0.0148V - 0.0158$$

در این تحقیق  $k$  و  $n$  توابع برازش بوده و هر دوی آنها به روش الگوریتم ژنتیک به حداقل می رسند. پس از ارزیابی تناسب کروموزمها، ویژگی های عملکرد گزینش که والدین برای ایجاد نسل بعد در جفت گیری شرکت می کنند، مورد بررسی قرار گرفت. والدین با احتمال انتخاب نسبت به مقدار تناسب وراثت انتخاب می شوند. برای هر والد گزینش می تواند به صورت معادله (۷) تعریف شدند:

$$p_i = \frac{(\text{Fitness})_i}{\sum_{j=1}^m (\text{Fitness})_j} \quad (۷)$$

جدول (۶) مقایسه داده‌های تجربی با پیش‌بینی‌های حاصل از مدل‌سازی به کمک الگوریتم ژنتیک.

Table 6 comparison between the experimental data and predictions of modeling with aid of Genetic Algorithm.

شرایط آزمایش Experimental Conditions	دمای خشک کردن: ۶۰°C Drying Temp.: 60°C	دمای خشک کردن: ۶۵°C Drying Temp.: 65°C	دمای خشک کردن: ۷۰°C Drying Temp.: 70°C	دمای خشک کردن: ۷۵°C Drying Temp.: 75°C
ثوابت معادله Formula Constants				
سرعت خشک کردن: ۰/۵m/s Drying Rate: 0.5 m/s	$r$	0.9992	-	-
	$e_s$	0.0184	-	-
	$x^2$	0.00035	-	-
سرعت خشک کردن: ۰/۶m/s Drying Rate: 0.6 m/s	$r$	0.9995	0.9991	0.9989
	$e_s$	0.0149	0.0167	0.0217
	$x^2$	0.00022	0.00028	0.00026
سرعت خشک کردن: ۰/۷m/s Drying Rate: 0.7 m/s	$r$	0.9992	0.9975	0.9990
	$e_s$	0.0188	0.0306	0.0161
	$x^2$	0.00038	0.00095	0.00026
سرعت خشک کردن: ۰/۸m/s Drying Rate: 0.8 m/s	$r$	0.9981	0.9988	0.9985
	$e_s$	0.0259	0.0224	0.0228
	$x^2$	0.00072	0.00051	0.00053

جدول (۷) نتایج اعتبار سنجی توسط الگوریتم ژنتیک.

Table 7 Validation Results with aid of Genetic Algorithm.

شرایط آزمایش Experimental Conditions	دمای خشک کردن: ۶۵ °C Drying Temp.: 65°C	دمای خشک کردن: ۷۰ °C Drying Temp.: 70°C
ثوابت معادله Formula Constants		
سرعت خشک کردن: ۰/۵m/s Drying Rate: 0.5 m/s	$r$	۰/۹۹۸۱
	$e_s$	۰/۰۲۷۰
	$x^2$	۰/۰۰۰۷۳

داده‌های تجربی در دو دمای ۶۵ °C و ۷۰ °C و سرعت هوای خشک کردن ۰/۵ m/s با داده‌های حاصل از مدل مقایسه شدند و نتایج حاصل در جدول (۷) قرار گرفتند.

طبق نتایج به دست آمده مدل اصلاح شده پیچ تعمیم یافته از دقت مناسبی برخوردار می‌باشد. این تحقیق به وضوح نشان داده که روابط تجربی تعمیم داده شده ممکن است به عنوان روش عملی و مناسب برای توصیف رفتار و روش خشک کردن محصولات کشاورزی بکار روند. بدیهی است که تعیین چنین رابطه تعمیم یافته‌ای، ممکن است به مجموعه‌ای از آزمایش‌های

$$(10) \quad n = -2.125 \times 10^{-5}T^2 - 0.7333V^2 + 0.00725TV - 0.001365T + 0.6121V + 0.9881$$

### ۳. بحث و نتیجه گیری

داده‌های تجربی نرخ رطوبت گیری با داده‌های حاصل از مدل اصلاح شده پیچ تعمیم یافته مورد مقایسه و نتایج حاصل در جدول (۶) قرار گرفتند.

برای اعتبار سنجی مدل اصلاح شده پیچ تعمیم یافته،

می‌تواند ابزار کاربردی و مفیدی برای طراحی‌های صنعتی و عملی قلمداد گردد.

خشک شدن ولیک به عنوان مطالعه موردی در این تحقیق استفاده شده است. نتایج نشان داد که مدل پیچ اصلاح شده تناسب‌های دقیق‌تری را در این مورد خاص ارائه می‌دهد. بنابراین رابطه تعمیم داده شده براساس این معادله ثبت شده است. رابطه تعمیم داده شده می‌تواند پیش‌بینی‌های معقولی را برای روش خشک شدن ولیک ارائه دهد. روند مورد استفاده در این تحقیق برای ولیک ممکن است به آسانی برای دیگر مواد خام به کار برود و نتیجه ممکن است ایجاد روابط تعمیم داده شده مشابه‌ای باشد که کاربرد فراوانی در طراحی واحدهای خشک‌کن صنعتی در شرایط متفاوت داشته باشد.

### سپاسگزاری

نویسندگان مقاله مراتب قدردانی خود را از حمایت دانشگاه صنعتی بابل از طریق اعتبار پژوهشی شماره BNUT/370675/97 اعلام می‌دارند.

خشک شدن نیاز داشته باشد ولی رابطه تعمیم داده شده می‌تواند برای شرایط عملیاتی گسترده‌ای به کار رود که می‌تواند انجام این آزمایش‌ها را توجیه کند.

این مقاله شامل مجموعه‌ای از آزمایش‌های استاندارد خشک شدن در مورد میوه بومی ولیک در خشک‌کن سینی‌دار آزمایشگاهی در شرایط متفاوت دما و سرعت هوا می‌باشد. جدای از این مورد که نتایج آزمایش‌ها بر روی میوه بومی منطقه انجام گرفته و به همین خاطر جدید و ارزشمند به شمار می‌رود، تحقیق حاضر حاوی نکات تجربی نوینی نیست و تنها موارد مشابه گزارش شده توسط پژوهشگران پیشین را تایید می‌کند. لیکن جنبه اصلی نوآوری این کار در رویکرد مدل‌سازی آن است که می‌کوشد با استفاده از آن داده‌های آزمایشی نوع جدیدی از روابط تجربی تعمیم یافته را ارائه دهد که در شرایط مختلف عملیاتی ( دما و سرعت هوای مختلف) قادر به پیش بینی رفتار خشک شدن این ماده به‌خصوص ( میوه ولیک بومی منطقه شمال ایران) باشد. بدین ترتیب کاربرد این روابط تجربی از برآزش تنها یک منحنی خشک شدن در یک دما و سرعت هوای خاص گسترش یافته و روابط تعمیم یافته ایجاد شده

### منابع

- air drying of thin layer apple pomace., *Food Res. Int.*, 40, 39-46.
- [8] Hacıhafizoglu, O., Cihan, A. & Kahveci, K. (2008). Mathematical modelling of drying of thin layer rough rice. *Food Bioprod. Process.*, 86, 268-275.
- [9] Laohavanich, J. & Wongpichet, S. (2008). Thin layer drying model for gas-fired infrared drying of paddy. *Songklanakarin J. Sci. Technol.*, 30 (3), 343-348.
- [10] Kavak Akpınar, E. (2008). Mathematical modelling and experimental investigation on sun and solar drying of white mulberry. *J. Math. Sci. Technol.*, 22, 1544-1553.
- [11] Vega-Gálvez, A., Miranda, M., Puente, L., Lorena, D., Katia, R. & Di Scala, K. (2010). Effective moisture diffusivity determination and mathematical modelling of the drying curves of the olive-waste cake. *Bioresour. Technol.*, 101, 7265-7270.
- [12] Dutta, P.P. & Baruah, D.C. (2014). Drying modelling and experimentation of Assam black tea (*Camellia sinensis*) with producer gas as a fuel. *Appl.*
- [1] Togrul, I.T. & Pehlivan, D. (2002). Mathematical modelling of solar drying of apricots in thin layers. *J. Food Eng.*, 55, 209-216.
- [2] Jain, D. & Pathare, P.B. (2004). Selection and Evaluation of Thin Layer Drying Models for Infrared Radiative and Convective Drying of Onion Slices. *Biosyst. Eng.*, 89, 289-296.
- [3] Mwithiga, G. & Olwal, J.O. (2005). The drying kinetics of kale (*Brassica oleracea*) in a convective hot air dryer. *J. Food Eng.*, 71, 373-378.
- [4] Kavak Akpınar, E. & Bicer, Y. (2005). Modelling of the drying eggplants in thin-layers. *International J. Food Sci. Technol.*, 40, 273-281.
- [5] Okyay Menges, C. & Ertekin, C. (2006). Mathematical modelling of thin layer drying of golden apples. *J. Food Eng.*, 77, 119-125
- [6] Kingsly, A.R.P. & Singh, D.B. (2007). Drying kinetics of pomegranate arils. *J. Food Eng.*, 79, 741-744.
- [7] Wang, Z., Sun, J., Liao, X., Chen, F., Zhao, G., Wu, J. & Hu, X. (2007). Mathematical modeling on hot



*Therm. Eng.*, 63, 495-502.

[13] Zhao, H.C. & Tian, B.F. (1996). China fruit-plant monograph, hawthorn flora. Beijing, China: Zhongguo Lin Ye Press.

[14] Cao, G.Y., Feng, Y.X. & Qin, X.Q. (1995). Analysis of the chemical constituents of hawthorn fruits and their quality evaluation. *Acta Pharmacol. Sin.*, 30, 138-143.

*Research Article***Generalized Empirical Correlations for Hawthorn Drying in a Tray Dryer****Akram Baryab<sup>1</sup>, Kamyar Movagharnejad<sup>2\*</sup>****1. M.Sc. Graduated, Thermo-kinetics and Catalyst Department, Faculty of Chemical Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Mazandaran, Iran.****2. Professor of Thermo-kinetics and Catalyst Department, Faculty of Chemical Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Mazandaran, Iran.****Abstract**

In this study, hawthorn fruits were dried in a tray dryer in 4 different temperatures (60, 65, 70, 75 °C) and 4 different air velocities (0.5, 0.6, 0.7, 0.8 m/s) and the change in moisture content was measured. The hawthorn samples were dried from original moisture content of 44.37% to final moisture content of 1.63%. The experimental data were fitted to different empirical correlations and the Genetic Algorithm optimization method was used to obtain the best parameters. The results showed that the modified Page model was the best model to describe the thin layer drying of hawthorn fruits in a tray dryer. The drying time decreased with increase of the temperature and velocity of drying air. The parameters of the empirical correlations may be presented as a function of temperature and velocity of the drying air.

**Keywords: Genetic Algorithm, Drying, Tray dryer, Hawthorn.**

---

\* Corresponding author: k-movaghar@nit.ac.ir