

ارائه مدل جدیدی برای مدل سازی فرایند خشک شدن گلبرگهای گل آفتابگردان (۵۵۴)

سعدی خانی^۱، جواد خزائی^۲

چکیده

در این مطالعه، مدل سازی و تعیین پارامترهای مربوط به فرآیند خشک شدن لایه نازک گلبرگهای گل آفتابگردان مورد بررسی قرار گرفت. تجربیات قبلی نشان داده اند که فرایند خشک شدن مواد شامل یک فاز اولیه با نرخ خشک شدن سریع و فاز دوم با نرخ کمتر خشک شدن می باشد. مشکل عمده همه مدل های تجربی موجود آن است که هیچ ارزیابی از نرخ خشک شدن ماده در فاز دوم ارائه نمی دهند. در این تحقیق مدل جدیدی (مدل خزائی) ارائه شده است که به خوبی قادر به تحلیل فرایند خشک شدن مواد در فاز دوم نیز می باشد. در این تحقیق، آزمایشات توسط یک خشک کن آزمایشگاهی از نوع جریان هوای داغ در سه دمای ۳۰، ۴۰ و ۵۰ درجه سانتیگراد و در دو سرعت ۰/۴ و ۰/۸ متر بر ثانیه انجام شدند. نتایج نشان دادند که در فرآیند خشک شدن گلبرگهای گل آفتابگردان نرخ ثابت خشک شدن مشاهده نشد و مهمترین فاکتور در کنترل نرخ خشک شدن گلبرگهای گل آفتابگردان، دمای هوا بود. در این تحقیق از پنج مدل ریاضی برای برآزش منحنی های خشک شدن استفاده شد. مدل پیچ و مدل نمایی با دو ترم بهترین مدلها برای بیان رفتار خشک شدن محصول بودند. مدل خزائی نیز دارای دقت کافی برای مدل سازی فرایند خشک شدن محصول بود. ضریب پخش موثر رطوبتی در محدوده دماها و سرعت های استفاده شده در این مطالعه از 10^{-13} تا $9/205 \times 10^{-13}$ متر مربع بر ثانیه متغیر بود.

کلیدواژه: خشک شدن لایه نازک، ضریب پخش موثر رطوبتی، گلبرگهای گل آفتابگردان، مدلسازی ریاضی

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مکانیک ماشین های کشاورزی، دانشگاه تهران، پردیس ابوریحان، پست الکترونیک: skhani@ut.ac.ir

۲- استادیار گروه مکانیک ماشین های کشاورزی، دانشگاه تهران، پردیس ابوریحان

۱- مقدمه

خشک شدن یکی از فرایندهای مهم پس از برداشت مواد غذایی و گیاهی می باشد. هدف از خشک کردن مواد امکان افزایش دوره نگهداری آنها، کاهش حجم مواد و فضای لازم برای بسته بندی آنها و کاهش هزینه های حمل و نقل می باشد. آفتابگردان با نام علمی *Helianthus annuus L.* یکی از محصولات صنعتی با ارزش است که اجزا مختلف آن شامل برگ ها، ریشه، دانه، و ساقه آن هر کدام مصارف دارویی و غذایی متنوعی دارند. این گیاه از خانواده آستراسه^۱ و خواستگاه اصلی آن آمریکا می باشد [۵]. یکی از بخش های مهم آفتابگردان که مصرف دارویی دارد گلبرگ های طویل واقع در اطراف تاج یا گل آفتابگردان^۲ می باشد که می توانند به رنگ های زرد، پرتغالی، خرمایی یا سایر رنگ ها باشند. خشک شده این گلبرگ ها بازار تجاری بزرگی را در دنیا به خود اختصاص داده است و به صورت چای مصرف می شود. بر همین اساس، برای طراحی مناسب سیستم خشک کن این محصول و همچنین امکان کنترل دقیق آن، ضروری است که خواص خشک شدن این محصول در دماها و سرعت های مختلف هوا مطالعه گردد. اگرچه در گذشته مطالعات زیادی در زمینه خشک کردن محصولات غذایی و کشاورزی گزارش شده است، اما هیچ تحقیقی در زمینه خشک کردن لایه نازک گلبرگ های گل آفتابگردان یافت نشد.

هدف از انجام این تحقیق عبارت بودند از: (۱) مطالعه و بررسی تاثیر دما و سرعت هوا بر خواص خشک شدن گلبرگ های گل آفتابگردان، (۲) تعیین پارامترهای خشک شدن این محصول (۳) مدل سازی فرآیند خشک شدن این محصول با بعضی مدل های تجربی ارائه شده در منابع و نیز با مدل جدید ارائه شده در این تحقیق (مدل خزائی) و (۴) بررسی امکان قابلیت برازش این مدلها و انتخاب مناسبترین مدل ریاضی

۱-۱- ملاحظات تئوری

بررسی های قبلی نشان داده اند که در طی فرآیند خشک شدن مواد غذایی، انتقال رطوبت عمدتاً از طریق فرآیند پخش صورت می گیرد، که به خوبی توسط قانون دوم فیک^۳ بیان می شود [۲]. با در نظر گرفتن اینکه گلبرگ های گل آفتابگردان تقریباً می تواند به شکل مسطح فرض شود محتوای رطوبتی در هر نقطه X در داخل ماده و در هر زمان t پس از خشک شدن می تواند به صورت معادله زیر بیان شود.

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_{eff} \frac{\partial M}{\partial x} \right) \quad (1)$$

با فرض ثابت ماندن شکل جسم در طول فرآیند خشک شدن، انتقال سریع گرما و یکنواختی پخش رطوبت در داخل محصول، معادله دیفرانسیلی^۱ را می توان به راحتی حل کرد. برای اجسامی با هندسه مسطح و با فرض اینکه انتقال رطوبت از طریق فرآیند پخش صورت می گیرد و همچنین مقدار چروکیدگی متده در اثر خشک شدن ناچیز است، حل معادله دیفرانسیلی^۱ به صورت مزیر بیان می شود [۱۰]. مهمترین ترم در این مدل، ضریب پخش موثر رطوبت است که با استفاده از این مدل و به کمک داده های آزمایشی براحتی قابل تعیین خواهد بود.

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

که در آن:

نسبت رطوبت (MR)	$M - M_e / M_o - M_e$
ضریب پخش موثر رطوبتی (متر مربع بر ثانیه)	D_{eff}
نصف ضخامت ورقه (متر)	L
عدد صحیح مثبت	N

1. Asteraceae

2. Ray floret

3. Fick

بعضی از مهمترین و عمومی ترین مدل های تجربی و نیمه تجربی که برای مدلسازی فرآیند خشک شدن محصولات کشاورزی استفاده شده اند، در جدول ۱ آورده شده است. بررسی های قبلی نشان دادند که این مدلها دقت قابل قبولی برای تحلیل فرآیند خشک شدن بسیاری از محصولات کشاورزی داشته اند [۱].

جدول ۱. مدل های تجربی استفاده شده برای مدل سازی داده های خشک کردن محصولات کشاورزی

مدل	فرمول	معادله
Page	$M_R = \exp(-Kt^n)$	(۳)
Weibull	$M_R = \exp(-(\frac{t}{\beta})^\alpha)$	(۴)
Two-term	$M_R = a \exp(-Kt) + b \exp(-K_0t)$	(۵)
Logarithmic	$M_R = A \exp(-Kt) + C$	(۶)
Peleg	$M_t = M_o - \frac{t}{K_1 + K_2t}$	(۷)

۲-۱- مدل خزایی^۱

تجربیات قبلی نشان داده اند که فرایند خشک شدن مواد شامل یک فاز اولیه با نرخ خشک شدن سریع و فاز دوم با نرخ کمتر خشک شدن می باشند. فاز دوم خشک شدن معمولاً فاز ریلکسیشن نامیده می شود. مشابه این رفتار در فرایند جذب آب مواد کشاورزی دیده شده است. مشکل عمده همه مدل های تجربی و نیمه تج بی ارائه شده در جدول ۱ آن است که هیچ ارزیابی از نرخ خشک شدن ماده در فاز دوم ارائه نمی دهند. در حقیقت ضرایب K در مدل های پیچ، نمایی با دو ترم و لگاریتمی، ضریب β در مدل ویبول و نیز ضریب $K1$ در مدل پلگ آن است که آنها تنها معیاری از نرخ خشک شدن ماده در فاز اول می باشند. ضرایب $K2$ در مدل پلگ و نیز α در مدل ویبول نیز معیاری از قابلیت جذب آب ماده می باشند. بر این اساس خزائی و دانشمندی (۲۰۰۷) و نیز خزائی و محمدی (۲۰۰۸) نشان دادند که فرایند خشک شدن و جذب آب مواد را می توان با مدل تجربی زیر بیان نمود (مدل خزائی) [۶] و [۷].

$$M_t = M_o + M_{rel}(1 - e^{-t/T_{rel}}) + k_{rel}t \quad (۸)$$

M_o : رطوبت اولیه، %

M_{rel} : مقدار رطوبت خارج شده از محصول در فاز اول خشک شدن، %

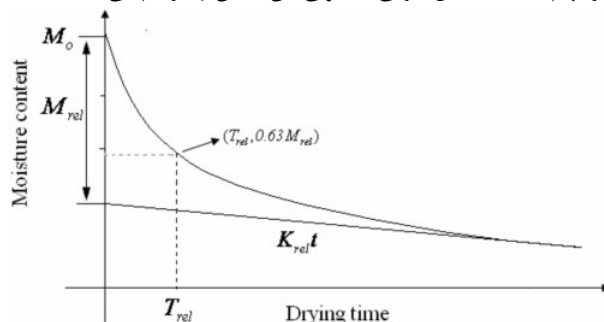
T_{rel} : زمان ریلکسیشن، دقیقه

K_{rel} : نرخ خشک شدن در فاز ریلکسیشن (دقیقه/۱)

در این مدل زمان ریلکسیشن (T_{rel})، زمان مورد نیاز برای رسیدن رطوبت نهایی محصول به $M_{rel} \cdot 0/۶۳$ می باشد. به عبارت دیگر T_{rel} نشان دهنده سرعت خشک شدن ماده در فاز اول خشک شدن می باشد. همچنین k_{rel} نرخ خشک شدن ماده در فاز دوم را نشان می دهد که از طریق تعیین شیب خط مماس بر قسمت انتهایی منحنی خشک شدن محاسبه می شود (شکل ۱). مطابق شکل ۱، از مزایای این مدل آن است که کلیه ترم های آنرا می توان مستقیماً از روی منحنی خشک کردن ماده بدست آورد. از امتیازات

^۱. Khazaei

دیگر این مدل نسبت به سایر مدل‌های تجربی و نیمه تجربی، توانایی خوب آن در تحلیل فاز دوم خشک کردن (فاز ریلکسیشن) می‌باشد. مدل‌های عمومی ارائه شده در جدول ۱ تنها قادرند رفتار خشک شدن مواد در فاز اول خشک کردن را تحلیل نمایند. در حالی که برای موادی که زمان خشک شدن آنها طولانی است و ممکن است خیلی دیر به حالت تعادل برسند، تعیین رفتار خشک شدن آنها در فاز ریلکسیشن نیز مهم است که مدل خزائی به خوبی این امکان را فراهم می‌کند.



شکل ۱. تعیین پارامترهای موجود در مدل خزائی با استفاده از منحنی خشک شدن مواد.

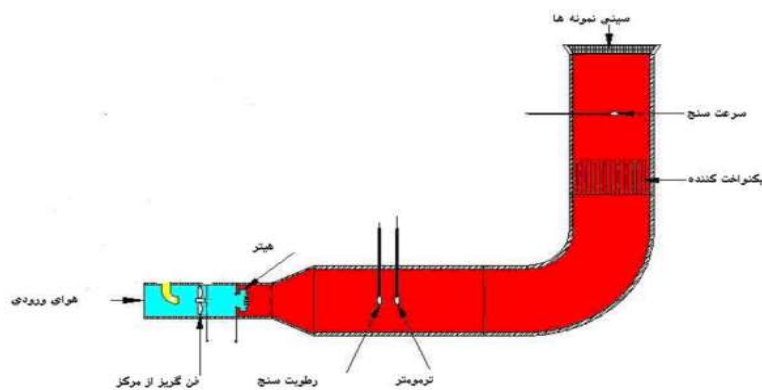
۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- روش انجام آزمایش

گلبرگ‌های گل آفتابگردان مورد استفاده در این تحقیق، از مزرعه گیاهان دارویی پردیس ابوریحان دانشگاه تهران جمع‌آوری شدند. رطوبت اولیه گلبرگ‌ها از طریق روش آون در دمای ۱۰۳ درجه سانتیگراد به مدت ۲۴ ساعت تعیین شد. در این آزمایشات برای رسیدن به یک میانگین قابل قبول، هر آزمایش ۳ مرتبه تکرار شد. رطوبت اولیه نمونه‌ها معادل ۸۱ درصد تعیین گردید.

۲-۲- دستگاه آزمایش

خشک کن مورد استفاده در این تحقیق، شامل یک فن گریز از مرکز قابل تنظیم، کانال انتقال هوای گرم، محفظه خشک کن، سینی حاوی نمونه‌ها و سیستم‌های اندازه‌گیری و کنترل دما می‌باشد (شکل ۲). در این دستگاه، سرعت هوای ورودی با تغییر دور فن و بصورت دستی انجام می‌شود. سیستم گرمادهی این دستگاه شامل یک هیتر برقی بود که در داخل کانال تعبیه شده است. دما از طریق یک سیستم کنترل که بر اساس میکروکنترلرها کار می‌کند با دقت ± 0.5 درجه سانتیگراد، کنترل می‌شود. سرعت هوا از طریق یک سرعت سنج دیجیتالی با محدوده اندازه‌گیری ۰ تا ۱۵ متر بر ثانیه، اندازه‌گیری شد. سیستم توزین مورد استفاده در این آزمایشات شامل یک ترازوی دیجیتال با دقت 0.1 گرم بود که در بیرون محفظه خشک کردن در کنار دستگاه جاسازی شده بود. این دستگاه همچنین شامل یک سیستم رطوبت ساز و سیستم کنترل مقدار رطوبت هوای ورودی بود که البته در این تحقیق مورد استفاده قرار نگرفت.



شکل ۲ شکل شماتیک خشک کن آزمایشگاهی.

۲-۳- روش انجام آزمایشات

در هر آزمایش در حدود ۱۰ گرم گلیبرگ گل آفتابگردان استفاده شد. نمونه‌ها بطور یکنواخت در داخل سبدهی که بر بالای محفظه خشک کن قرار گرفته بود پخش می شدند. آزمایشات خشک کردن در دماهای ۳۰، ۴۰ و ۵۰ درجه سانتیگراد و در دو سرعت هوای ۰/۴ و ۰/۸ متر بر ثانیه انجام شدند. برای تعیین میزان افت رطوبت نمونه‌ها، تغییرات وزن آنها در فواصل زمانی ۲ تا ۵ دقیقه برای یک ساعت اول و سپس هر ۱۵ دقیقه یکبار از طریق ترازوی دیجیتالی با دقت ۰/۰۱ گرم ثبت می شد. خشک کردن تا رسیدن رطوبت نهایی محصول به حدود ۰/۰۷۴ g H₂O/g DM ادامه یافت. از نرم افزار *sigma plot* برای تحلیل نتایج و تعیین ضرایب مدل‌های ریاضی استفاده شد.

۲-۴- مدل سازی ریاضی داده‌ها

داده‌های رطوبت محصول (بر مبنای خشک) طبق رابطه $(M-M_e)/(M_0-M_e)$ به صورت عامل بی بعد نسبت رطوبتی تبدیل شدند. البته در این تحقیق به علت نوسان پیوسته رطوبت نسبی هوا در طول فرایند خشک کردن، برای نرمالایز کردن داده‌ها از روش M/M_0 استفاده شد. سایر محققین نیز استفاده از این روش را گزارش کرده‌اند [۳]. در این آزمایشات نرخ خشک شدن گلیبرگهای گل آفتابگردان طبق رابطه زیر محاسبه گردید:

$$\text{نرخ خشک شدن} = \frac{M_{t+dt} - M_t}{dt} \quad (14)$$

برای مدل‌سازی ریاضی داده‌های خشک شدن گل آفتابگردان، مدل‌های ارائه شده در جدول ۱ و نیز مدل خزائی به داده‌های آزمایشی برازش داده شدند و بهترین مدل ریاضی که کمترین خطای برازش را داشت انتخاب گردید. ثابت‌ها و ضرایب مدل‌ها از روش رگرسیون غیر خطی با استفاده از نرم افزار *Sigma plot* تعیین شدند. ضریب تصحیح R^2 و ریشه میانگین مربعات خطا^۱ برای انتخاب بهترین مدل استفاده شدند.

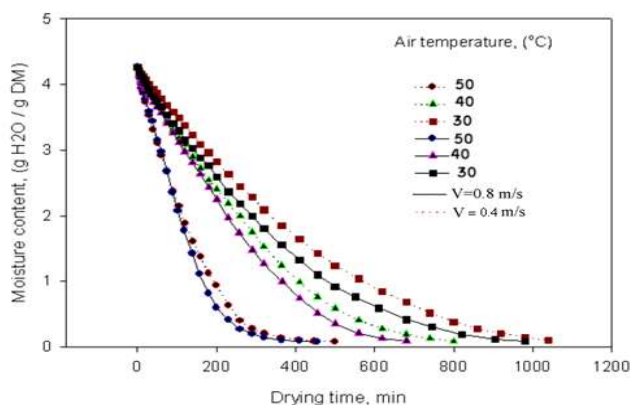
۳- نتایج و بحث

۳-۱- منحنی‌های خشک کردن

تغییرات محتوای رطوبتی (بر پایه خشک) گلیبرگهای گل آفتابگردان با زمان خشک شدن در دماها و سرعت‌های مختلف خشک شدن در شکل ۳ نشان داده شده است. همانطور که پیداست دمای هوا تاثیر معنی داری بر تغییرات محتوای رطوبتی محصول

^۱.ERMS

داشت. درحالیکه سرعت هوا اثر کمتری نشان داد. محققین زیادی نتایج مشابهی را برای سایر گیاهان دارویی گزارش کرده اند [۴].



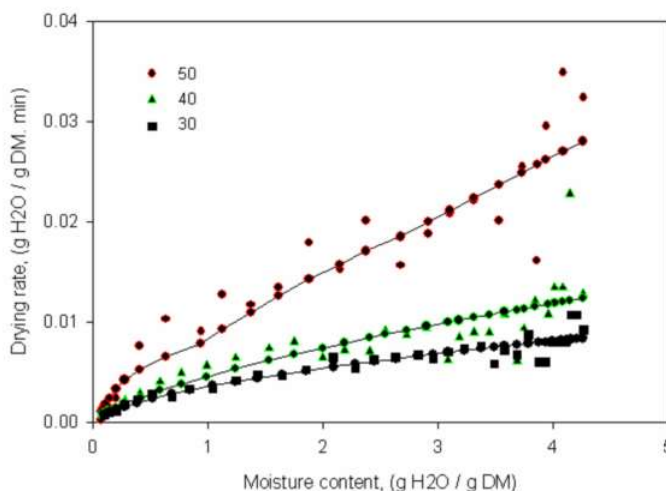
شکل ۳. محتوای رطوبتی به عنوان تابعی از زمان خشک، دمای هوای و سرعت هوا

تغییرات نرخ خشک شدن با محتوای رطوبتی و زمان خشک شدن در شکل های ۴ نشان داده شده است. نرخ خشک شدن در شروع زمان خشک شدن وقتی $t \rightarrow 0$ از طریق مدل پلگ^۱ مطابق معادله ۱۷ به دست آمد.

$$R_o = \left(\frac{M_{t+dt} - M_t}{dt} \right)_{t=0} = \frac{1}{K_1} \quad (17)$$

با دانستن ثابت k_1 در مدل پلگ (معادله ۷) در شرایط مختلف هوا، مقادیر R_o برای گلبرگهای گل آفتابگردان محاسبه شدند که در شکل ۴ گزارش شده اند. مقادیر نرخ خشک شدن محصول در سایر زمانهای خشک شدن، از طریق داده‌های آزمایش و مطابق معادله ۳ محاسبه شدند. شکل ۴ نشان می دهد که مقادیر نرخ خشک شدن بطور پیوسته باگذشت زمان و کاهش محتوای رطوبتی، کاهش می یابد. نتایج مشابهی برای سرعت ۰/۸ متر بر ثانیه بدست آمد. همانطور که از شکل ۴ پیداست، در فرآیند خشک شدن گلبرگهای گل آفتابگردان نرخ ثابت خشک شدن مشاهده نشد. این بدین معنا است که مکانیزم حاکم بر انتقال رطوبت در گلبرگ های گل آفتابگردان بر پایه انتشار رطوبت می باشد. نتایج این تحقیق تطابق خوبی با کارهای انجام شده بر روی فرآیند خشک شدن گلها و برگهای سایر محصولات داشت [۹].

^۱. Peleg



شکل ۴. تغییرات نرخ خشک شدن با محتوای رطوبتی در دماهای مختلف هوا در سرعت ۰/۴ متر بر ثانیه

۳-۲- محاسبه ضریب پخش موثر رطوبتی و انرژی فعالسازی

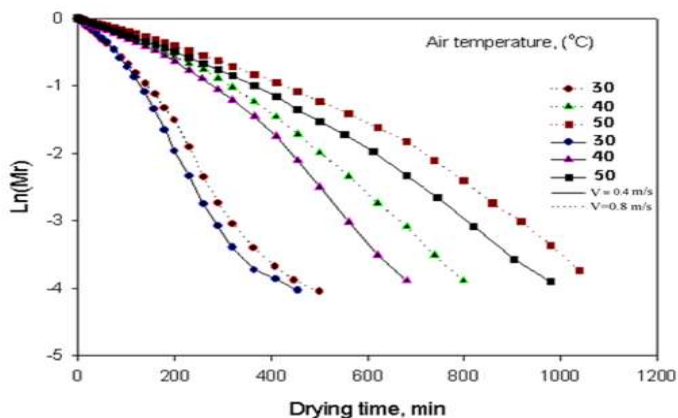
ضریب پخش رطوبتی موثر گلبرگ های گل آفتابگردان با استفاده از قانون دوم فیک (رابطه ۱) و با تعیین شیب نمودار $Ln(MR)$ در برابر زمان به دست آمد (شکل ۶). از معادله ۶ با رسم نمودار $Ln(MR)$ در برابر زمان خشک شدن خط مستقیمی با شیب $\pi^2 D_{eff} / L^2$ به دست می آید. مقادیر D_{eff} برای دماهای مختلف در جدول ۳ ارائه شده است. پیداست که دما تاثیر معنی داری بر مقادیر D_{eff} داشت در حالیکه تاثیر سرعت هوا معنی دار نبود.

جدول ۳. مقادیر ضریب پخش رطوبتی موثر به دست آمده در سرعت ها و دماهای مختلف خشک کردن (متر مربع بر ثانیه).

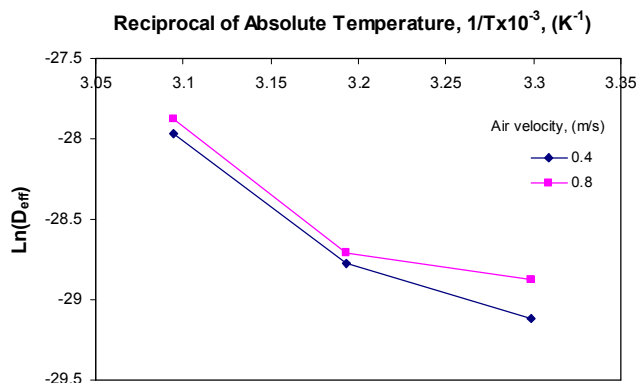
دما	ضریب پخش موثر رطوبتی در سرعت ۰/۴ متر بر ثانیه	ضریب پخش موثر رطوبتی در سرعت ۰/۸ متر بر ثانیه
۳۰	$1/434 \times 10^{-13}$	$1/362 \times 10^{-13}$
۴۰	$6/693 \times 10^{-13}$	$2/337 \times 10^{-13}$
۵۰	$9/205 \times 10^{-13}$	$9/0 \times 10^{-13}$

اثر دما بر ضریب پخش رطوبتی موثر از طریق رابطه آرنهوس (معادله ۱۸) بیان و با استفاده از آن مقدار انرژی فعال سازی گلبرگ های گل آفتابگردان محاسبه گردید. برای این منظور مقادیر $Ln(D_{eff})$ در مقابل عکس دمای مطلق رسم شد (شکل ۷). انرژی فعالسازی از طریق محاسبه شیب خط برازش شده بر داده های آزمایشی در شکل ۷ محاسبه شد، که مقادیر آن برای نمونه های خشک شده در سرعت ۰/۴ متر بر ثانیه معادل ۵۰ کیلوژول بر مول و برای نمونه های خشک شده در سرعت ۰/۸ متر بر ثانیه معادل ۴۱/۷ کیلوژول بر مول محاسبه گردید. افزایش سرعت هوا منجر به کاهش انرژی فعالسازی شد. همچنین مقادیر E_a بدست آمده در این مطالعه در محدوده ۱۵ تا ۶۰ کیلوژول بر مول بود که اغلب برای مواد غذایی گزارش شده است [۸].

$$D_{eff} = D_o \exp\left[-\frac{E_a}{T_{abs} R}\right] \quad (18)$$



شکل ۶. تغییرات $\ln(MR)$ به عنوان تابعی از زمان خشک شدن، دمای هوا و سرعت هوا.



شکل ۷ رابطه آرنهئوس برای تحلیل تاثیر دما بر ضریب پخش رطوبتی موثر گلبرگ های گل آفتابگردان.

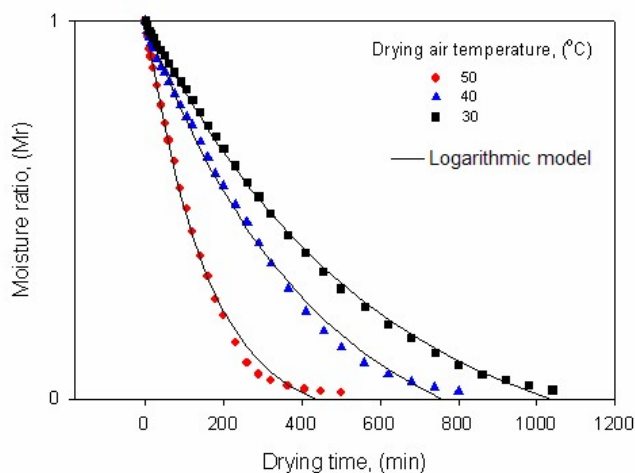
۳-۳- مدل سازی داده های خشک کردن

نتایج تحلیل رگرسیون غیر خطی برازش مدل‌های خزایی و پنج مدل ریاضی ذکر شد در جدول ۱ بر داده های آزمایشی در جدول ۴ ارائه شده است. پیداست که همه مدل‌ها غیر از مدل پلگ، برازش خوبی بر داده های آزمایشی داشتند ($R^2 > 0.981$). ولی با اینحال مدل لگاریتمی بیشترین مقادیر R^2 و کمترین مقدار $ERMS$ را نسبت به سایر مدل‌ها داشت. از اینرو مدل لگاریتمی بهترین مدل برای تحلیل فرایند خشک شدن گلبرگ های گل آفتابگردان انتخاب شد. در شکل ۸ داده های آزمایش و مقادیر پیش بینی شده بوسیله مدل لگاریتمی نشان داده شده اند. همانطور که پیداست تطابق خوبی بین داده های آزمایشی و مقادیر پیش بینی شده وجود داشت.

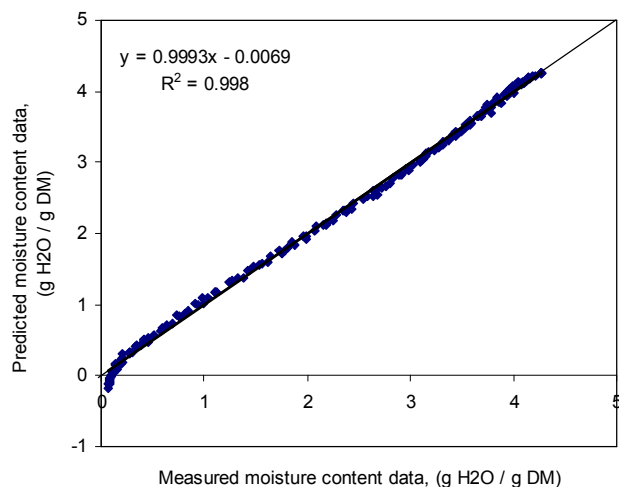
جدول ۴. ضرایب ثابت و قابلیت برازش مدل های ریاضی بر داده های خشک شدن گلبرگهای گل آفتابگردان در سرعت ۰/۴ متر بر ثانیه.

E_{MD}	E_{RMS}	R^2	مدل و مقدار ضرایب محاسبه شده	دما(درجه سانتیگراد)
۷/۳	۰/۰۳	۰/۹۹۹	Khazaei ($M_0=4.3061$, $M_{rel}=-3.1002$, $T_{rel}=384.6$, $K_{rel}=-0.0014$)	۳۰
۱۷/۶	۰/۰۳	۰/۹۹۵	Weibull ($\alpha=1.0652$, $\beta=402.8$)	
۵/۲	۰/۰۷	۰/۹۹۸	Peleg ($K1=108.4589$, $K2=0.1258$)	
۱۳/۵	۰/۰۲	۰/۹۹۷	Khazaei ($M_0=4.2526$, $M_{rel}=-3.450$, $T_{rel}=312.5$, $K_{rel}=-0.0015$)	۴۰
۲۵/۸	۰/۰۴	۰/۹۸۸	Weibull ($\alpha=1.003$, $\beta=289.9$)	
۷/۵	۰/۰۹	۰/۹۹۶	Peleg ($K1=77.9958$, $K2=0.1291$)	
۲/۳	۰/۰۶	۰/۹۹۶	Khazaei ($M_0=4.307$, $M_{rel}=-3.901$, $T_{rel}=133.3$, $K_{rel}=-0.0013$)	۵۰
۳۸/۵	۰/۰۳	۰/۹۹۵	Weibull ($\alpha=1.0598$, $\beta=131.6$)	
۹/۲۰	۰/۰۹	۰/۹۹۰	Peleg ($K1=30.8934$, $K2=0.1592$)	

همانطور که از جدول ۴ پیداست، مدل خزایی برازش بهتری نسبت به مدل پلگ بر داده های خشک شدن گلبرگهای گل آفتابگردان داشت. عملکرد این مدل در سرعت ها و دماهای مختلف خشک کردن در شکل ۹ نشان داده شده است. پیداست که داده های آزمایشی در اطراف خط مستقیم ۱:۱ متمرکز شده اند که نشانگر توانایی خوب مدل خزایی در بیان رفتار خشک شدن گلبرگ های گل آفتابگردان می باشد. ضمناً از جدول ۴ پیداست که دمای هوا اثر کاهشی بر مقادیر K_{rel} داشت. همچنین واضح است که مقادیر محتوای رطوبتی اولیه (M_0) تعیین شده توسط مدل خزایی نزدیک به مقادیر به دست آمده از طریق آزمایش است.



شکل ۸. مقایسه منحنی های خشک شدن آزمایشی و تعیین شده توسط مدل لگاریتمی برای سرعت ۰/۴ متر بر ثانیه .



شکل ۹. مقایسه داده های آزمایشی و داده های پیش بینی شده با مدل خزایی

۴- نتیجه گیری

نتایج به دست آمده در این مطالعه نشان داد که منحنی های خشک شدن گلبرگهای گل آفتابگردان بیشتر تحت تاثیر دمای هوا قرار دارند. افزایش دمای هوا، سبب کاهش معنی دار زمان خشک شدن محصول گردید. ضریب پخش رطوبتی موثر گلبرگهای گل آفتابگردان با افزایش دمای هوا افزایش یافت. مقدار انرژی فعالسازی برای نمونه های خشک شده در سرعت ۰/۴ متر بر ثانیه معادل ۵۰ کیلوژول بر مول و برای نمونه های خشک شده در سرعت ۰/۸ متر بر ثانیه معادل ۴۱/۷ کیلوژول بر مول محاسبه گردید. نتایج نشان دادند که مدل لگاریتمی برازش بهتری بر داده های خشک شدن گلبرگ های گل آفتابگردان داشت. ضمناً نتایج نشان دادند که مدل خزایی برازش بهتری نسبت به مدل پلگ بر داده های خشک شدن گلبرگهای گل آفتابگردان داشت.

۵- منابع و مراجع مورد استفاده

- [۱]. Abu-Ghannam, N., & McKenna, B. (1997). The application of Peleg's equation to model water absorption during the soaking of red kidney beans (*Phaseolus vulgaris* L.). *Journal of Food Engineering*, 32, 391-401.
- [۲]. Crank, J. (1975). *Mathematics of diffusions* (2nd ed.). London: Oxford University Press.
- [۳]. Diamente, L. M., & Munro, P. A. (1993). Mathematical modeling of the thin layer solar drying of sweet potato slices. *Solar Energy*, 51(4), 271-276.
- [۴]. Doymaz, I., Tugru, N., Pala, M. (2005). Drying characteristics of dill and parsley leaves. *Journal of Food Engineering*, 77, 559-565
- [۵]. Jonic, S., Skoric, D., Lecic, N., Molnar, I., 2000. Development of inbred lines of sunflower with various oil qualities. In: *Actes Proceedings of the 15th International Sunflower Conference*, Toulouse, France, 12-15 June 2000, pp. A43-A48.
- [۶]. Khazaei, J., & Daneshmandi, S. 2007. Modeling of thin-layer drying kinetics of sesame seeds: mathematical and neural networks modeling. *International AgroPhysics*. 21(4): 335-348.
- [۷]. Khazaei, J., & Mohammadi, N. 2008. Effect of temperature on hydration kinetics of sesame seeds (sesamum indicum L.). *Journal of Food Engineering*. In press.
- [۸]. Rizvi, S. S. H. (1986). Thermodynamic properties of foods in dehydration. In M. A. Rao & S. S. H. Rizvi (Eds.), *Engineering properties of foods*. New York: Marcel Dekker.
- Sabarez, H., & Price, W. E. (1999). A diffusion model for prune dehydration. *Journal of Food Engineering*, 42(3), 167-172.
- [۹]. Yaldiz, O., & Ertekin, C. (2001). Thin layer solar drying of some different vegetables. *Drying Technology*, 19, 586-596.
- [۱۰]. Zogzas, N. P., Maroulis, Z. B., & Marinou-Kouris, D. (1996). Moisture diffusivity data compilation in foodstuffs. *Drying Technology*, 14, 2225-2253.