



سینتیک خشک کردن لایه نازک نارگیل (coconut) با روش جابجایی هوای گرم

مصطفی مصطفایی^{۱*}، فاطمه حسینی^۱، فرانہ خدامرادی^۱

^۱ گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه رازی، کرمانشاه. b.mostafaei@razi.ac.ir

چکیده

مهم ترین هدف خشک کردن، جدا کردن آب از ماده غذایی و افزایش مدت زمان ماندگاری و جلوگیری از فساد ماده غذایی است. در این تحقیق، لایه های نازک نارگیل با ضخامت ۴، ۸ و ۱۲ میلی متر توسط یک آون در مقیاس آزمایشگاهی در دماهای ۵۵ °C، ۶۵ و ۷۵ خشک شدند. برای مدل سازی سینتیک خشک کردن از دوازده مدل مختلف استفاده گردید. این مدل ها براساس ضریب تبیین (R^2) ، میانگین نسبی درصد انحراف (MRPD)، مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE) و مربع کای (X^2) مقایسه شدند. نتایج نشان داد که مدل دوجمله ای با میانگین ۰/۹۹۹۵۲۳ برای ضریب تبیین، ۰/۰۰۸۹۵۲ برای مجذور میانگین مربعات خطا، ۰/۰۰۰۱۰۴ برای مربع کای و ۱۶/۰۸۲۲۵ برای میانگین نسبی درصد انحراف، بهترین مدل بررسی، جهت برازش داده های حاصل از خشک کردن نارگیل است. ضریب نفوذ موثر رطوبت بین $1.98E-9$ تا $2.6E-9 \text{ m}^2/\text{s}$ متغیر بود که با افزایش دما و ضخامت، افزایش پیدا کرد.

کلمات کلیدی: نارگیل، لایه نازک، سینتیک خشک کردن، ضریب نفوذ مؤثر.

Thin layer convective hot air drying kinetics of coconut

Mostafa Mostafaei^{*1}, Fatemeh Sadat Hosseini¹, Faren Khodamoradi¹

1. Mechanics of Biosystems Engineering Department, Razi University, Kermanshah.
b.mostafaei@razi.ac.ir

ABSTRACT

The main purpose of the drying process is to separate the water from the food, increase the it's shelf-life and prevent its decay. In this study, 4, 8 and 12 mm thick coconut thin films were dried on a laboratory scale oven at a temperature range of 55, 65 and 75 ° C. The various models were used for modeling kinetic drying. These models were compared based on the determination coefficient (R^2), mean relative percentage deviation (MRPD), root of mean square error (RMSE) and chi-square (X^2). The results showed that the two- term model was the best model for verification and data fitting with an average of 0.999523 for the determination coefficient, 0.008952 for the root of mean square error, 0.000104 for the chi-square and 16.2825 for the mean relative percentage deviation. The effective penetration coefficient of humidity varied between $1.98E-9$ and $2.6E-9 \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$, which increased with increasing the temperature and the thickness.

Keywords: Coconut, Thin layer, Drying kinetics, Effective penetration coefficient.

^۱ - نویسنده مسئول: مصطفی مصطفایی b.mostafaei@razi.ac.ir



درخت نارگیل گیاهی است یک پایه واز خانواده Arecaceae که نام علمی آن *Cocos nucifera L.* می باشد. تنه ای بدون انشعاب با ظاهری استوانه ای شکل دارد. تمام طول ساقه آن عاری از برگ است و فقط قسمت انتهایی ساقه است که در آن برگ های بزرگ با برگچه هایی شانه ای جلوه می کنند. برگ درخت در ابتدا پهنکی کامل دارد، ولی به تدریج در اثر افزایش چین های متعدد بریدگی های فراوان حاصل می کند [۱]. گوشت نارگیل دارای ترکیباتی است که از نظر شیمیایی شامل اسیدهای چرب اشباع مثل لوریک و میریستیک و پالمیتیک و استئاریک و غیر اشباع مثل لینولئیک و اولئیک و همچنین عناصری از جمله روی، کادمیم، کلسیم و پتاسیم، آهن و منیزیم می باشد. از طرف دیگر گوشت نارگیل در گذشته به عنوان یک داروی گیاهی در درمان بیماری هایی از قبیل دیابت، اسکوروی، سرطان، کاهش درد کمر کاربرد داشته است [۱].

در صنعت مواد غذایی تمایل فزاینده ای برای تولید محصولات غذایی با ارزش تغذیه ای و حسی بالا و با استفاده از روش های بهینه اقتصادی وجود دارد. خشک کردن یکی از روش های قدیمی و مرسوم برای نگه داری محصولات کشاورزی است [۲]. مهم ترین هدف خشک کردن، جدا کردن آب از ماده غذایی و افزایش مدت زمان ماندگاری و جلوگیری از فساد ماده غذایی است. به علاوه به هنگام خشک کردن، وزن و حجم ماده غذایی کاهش پیدا کرده و در نتیجه باعث کاهش هزینه های بسته بندی، حمل و نقل، انبارداری و پخش مواد غذایی می گردد [۳]. با توجه به ویژگی های فیزیولوژیکی، تولید محدود و همچنین قیمت بالای محصولات کشاورزی، یکی از بهترین روشها برای عرضه آن در طول سال استفاده از فرایند خشک کردن است.

کوشش بر این است تا آهنگ خشک کردن از طریق انتقال گرما و رطوبت به بیشترین مقدار ممکن رسانده شود. خشک کردن با هوای داغ به دلیل در برداشتن هزینه های کم تر از مهم ترین روش های مورد استفاده در تولید مواد گیاهی خشک می باشد. اکثر خشک کن های صنعتی از جریان هوای داغ، جهت خشک کردن استفاده می کنند. استفاده از خشک کن های جریان هوای گرم، سبب تسریع در فرآیند خشک شدن شده و امکان رعایت شرایط بهداشتی را فراهم می آورد [۴].

به علت امکان تغییرات نامطلوب در کیفیت مواد غذایی در اثر خشک شدن، کنترل این فرآیند از اهمیت ویژه ای برخوردار است. در نتیجه، برای نگه داری مطمئن مواد غذایی لازم است آن ها را به رطوبت مشخصی رساند. برای این منظور بررسی خصوصیات جذب رطوبت در محصول در حال خشک شدن دارای اهمیت می باشد [۵]. برای رسیدن به این اهداف، باید فرآیند خشک کردن محصولات مختلف کشاورزی را مدل سازی نمود تا بتوان براساس الگوی به دست آمده از مدل، روند خشک کردن محصول را پیش بینی نمود. هدف از استخراج مدل خشک کردن محصولات کشاورزی، پیش بینی نحوه ی خشک کردن محصولات می باشد [۶].

روش های مدرن طراحی تجهیزات خشک کردن، بر پایه ی مدل سازی های ریاضی که زمان خشک کردن را ارزیابی می کنند، استوار می باشد [۷]. مطالعه ی سینتیک خشک کردن میوه ها برای رسیدن به اطلاعاتی درباره ی زمان مورد نیاز برای خشک کردن و انتخاب مدل مناسب، ضروری می باشد. بررسی سینتیک خشک کردن، به وسیله ی عواملی مانند دما و رطوبت هوای محل و همچنین محتوای رطوبت میوه تحت تاثیر قرار می گیرد همچنان که دیگر خصوصیات محصول مانند رنگ و بافت نیز با تغییر برخی خصوصیات محل رشد، تغییر می کند [۸].

با توجه به مطالعات انجام شده، با تجزیه ی یک فرآیند ترکیبی مانند خشک کردن به عناصر اصلی آن به یک سیستم ساده تر تبدیل شده که می تواند مورد تجزیه و تحلیل قرار گیرد. بنابراین، اندازه گیری خصوصیات خشک کردن، مانند پارامترهای موثر در سینتیک خشک کردن لایه ی نازک می تواند در ایجاد دور نمای مناسب برای طراحی تجهیزات صنعتی خشک کردن، مورد استفاده قرار گیرد [۷].

پژوهشگران زیادی بر روی خشک کردن لایه نازک محصولات کشاورزی فعالیت داشته اند که از جمله می توان به موضوعاتی همچون لایه نازک هویج [۹]، سینتیک خشک کردن لایه ای نازک کدوی سبز با تابش ماکروویو تحت شرایط خلا [۱۰]، برش های سیب زمینی ترشی با سه روش خشک کردن متفاوت [۱۱]، مدل سازی خشک کردن لایه نازک زردآلو با خشک کن ترکیبی [۱۲]، مدل سازی خشک شدن ورقه نازک پرتقال رقم تامسون [۱۳]، خشک کردن لایه نازک کامکوات بر مبنای تابع مطلوبیت [۱۴] و... اشاره کرد.

هدف از این مقاله بررسی مدل های مختلف خشک شدن لایه های نازک نارگیل و انتخاب بهترین مدل سینتیک خشک شدن در دماهای مختلف است تا به الگویی کارآمد جهت خشک کردن این میوه با ضخامت های متفاوت دست یافت.



یازدهمین کنگره ملی مهندسی مکانیک بیوسیستم و مکانیزاسیون ایران



۲- مواد و روشها:

۲-۱- مواد:

ابتدا نارگیل تازه از شهر کرمانشاه تهیه شد و قبل از استفاده در دمای اتاق نگه داری شدند. قبلا از فرآیند آبدایی نارگیل ها به منظور حذف غبار و آلودگی های احتمالی به صورت دستی شسته شدند. آزمایش ها در آزمایشگاه گروه مکانیک ماشین های کشاورزی دانشگاه رازی انجام شد. به وسیله کاتر آزمایشگاهی و به کمک کولیس دیجیتال با دقت ۰/۰۱ میلی متر، اقدام به برش ورقه های نازک از سطح میوه شد. از ترازوی دیجیتالی Sartorius CPA423S با دقت ۰/۰۱ gr و از خشک کن آزمایشگاهی آون (Memmert 600 D 06062) برای خشک کردن ورقه نازک میوه ها استفاده شد. نارگیل ها با ضخامت ۴، ۸ و ۱۲ برش خوردند تا به صورت لایه های نازک تبدیل شوند. بلافاصله نمونه ها توزیع شدند و در داخل آون قرار گرفتند. محتوی رطوبت اولیه ی نمونه های نارگیل به وسیله ی روش جابجایی هوای گرم، در داخل دستگاه آون در دمای ۱۰۳ °C به مدت ۴۸ ساعت تعیین و مقدار میانگین آن ها به عنوان درصد رطوبت بر مبنای تر گزارش شد.

۲-۲- آزمون خشک کردن:

به وسیله کارتر آزمایشگاهی، میوه به لایه های نازک ۴، ۸، ۱۲ میلی متر، برش داده شد. با مماس کردن انتهای کولیس با سطح برش و از طریق عمق سنج آن اندازه دقیق ضخامت برش مشخص گردید. نارگیل در دماهای ۵۵، ۶۵ و ۷۵ °C و در سه ضخامت ۴، ۸ و ۱۲ میلی متر پس از رسیدن آون به شرایط پایدار، خشک شدند. برش ها به صورت لایه ی نازک در ظرف های کوچک گذاشته شده و سپس در داخل آون قرار گرفتند. توزین آنها در فواصل زمانی مشخصی بعد از خارج کردن از آون انجام شد (پس از سرد شدن نمونه به مدت ۱۰ دقیقه در دیسکاتور). هر آزمون در ۳ تکرار انجام گرفت.

۲-۳- مدل سازی ریاضی:

نسبت رطوبت (MR) و آهنگ خشک کردن (D.R) برش های نارگیل در طی خشک کردن با استفاده از معادلات (۲-۱) و (۲-۲) محاسبه شدند.

$$MR = \frac{M(t) - M(e)}{M_0 - M_e} \quad (2-1)$$

$$D.R = \left| \frac{M(t+\Delta t) - M(t)}{\Delta t} \right| \quad (2-2)$$

$M(t + \Delta t)$ ، $M(t)$ ، M_0 ، M_e به ترتیب میزان رطوبت در هر لحظه، میزان رطوبت اولیه، میزان رطوبت تعادلی و میزان رطوبت در لحظه $t + \Delta t$ بر حسب میزان رطوبت در مبنای خشک $\left(\frac{kgw}{kgdm}\right)$ و t زمان خشک کردن بر حسب دقیقه است. دوازده مدل معروف خشک کردن لایه ی نازک در جدول ۱ به منظور بررسی داده های حاصل از آزمایش برش های نارگیل، مورد آزمون قرار گرفتند و آنالیز رگرسیون غیرخطی و محاسبه ی پارامترهای R^2 ، RMSE، MRPD و X^2 با استفاده از نرم افزار MATLAB انجام گرفت. برای ارزیابی این مدل ها و انتخاب مدل برتر، بیشترین مقدار ضریب تبیین (R^2)، کمترین مقدار میانگین نسبی درصد انحراف (MRPD)، کمترین مقدار مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE) و کمترین مقدار مربع کای (X^2) در نظر گرفته شد. این پارامترها توسط معادلات (۲-۳)، (۲-۴) و (۲-۵) بیان می شوند:

$$MRPD = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|MRP - MR_E|}{MR_E} \quad (2-3)$$

$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MRP - MR_E)^2 \right]^{1/2} \quad (2-4)$$

$$X^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (MRP - MR_E)^2}{N - Z} \quad (2-5)$$

که در این روابطه MRP همان نسبت رطوبت پیش بینی شده، MR_E نیز نسبت رطوبت به دست آمده از آزمایش (نسبت رطوبت تجربی)، N معرف تعداد داده ها (مشاهدات) و Z بیانگر تعداد ضریب ثابت در هر مدل بوده است. در این پژوهش برای خشک کردن لایه نازک نارگیل، داده های بدست آمده حاصل از آزمایش خشک کردن، را پس از وارد کردن در نرم افزار



MATLAB نسخه 13b، چهار شاخص آماری R^2 ، MRPD، RMSE و X^2 برای این میوه در سه ضخامت، سه دما و سه تکرار محاسبه شد. برای تحلیل نتایج و تعیین بهترین مدل ریاضی از میانگین شاخص‌های آماری استفاده شد.

۲-۴- نفوذ موثر رطوبت

محاسبه ضریب نفوذ موثر یکی از مسائل مهم در صنایع غذایی موضوع انتقال رطوبت است. با توجه به قانون دوم فیک که معمولاً برای توصیف پدیده‌ی نفوذ توسط رطوبت در فرآیند خشک کردن محصول کاربرد دارد:

$$\frac{\partial m}{\partial t} = D_{\text{eff}} \frac{\partial^2 m}{\partial z^2} \quad (2-6)$$

که در آن m مقدار رطوبت موضعی در مبنای خشک، t زمان، z جهت انتقال رطوبت و D_{eff} ضریب نفوذ موثر (m^2/s) می باشد. قانون دوم فیک، بر انتشار جرم در طی دوره‌ی سرعت نزولی خشک کردن محصولات کشاورزی دلالت دارد. فرض بر این است که محصول یک بعدی است و این لازمه‌ی استفاده از قانون دوم فیک است. رطوبت اولیه دارای یکنواختی بوده و همچنین حرکت درونی رطوبت مانند مقاومت عمده در برابر انتقال رطوبت است. حل معادله فیک برای یک تیغه به صورت زیر می باشد:

$$MR = \frac{(X_t - X_e)}{(X_0 - X_e)} = \frac{8}{\pi^2} \exp\left(-\frac{\pi^2 D_{\text{eff}} t}{L^2}\right) \quad (2-7)$$

که در آن D_{eff} ضریب نفوذ موثر، L نیمی از ضخامت لایه (m) و t زمان خشک شدن بر حسب دقیقه می باشد. ضریب نفوذ موثر رطوبت را می توان از شیب خط راستی که از برازش دادن $\ln(MR)$ در مقابل زمان خشک کردن به دست می آید، محاسبه کرد. همچنین تابعیت دمایی ضریب نفوذ موثر رطوبت توسط رابطه‌ی آرنیوس بیان می شود:

$$D_{\text{eff}} = D_0 \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (2-9)$$

که D_0 ضریب پیش نمایی (m^2/s)، E_a انرژی فعال سازی برای نفوذ رطوبت (kJ/mol)، R ثابت جهانی گازها، T (kJ/mol.k) $3 \times 10^3 - 1.43 \times 10^4$ دمای مطلق (k) است.

Table 1: Thin layer drying models used to model the drying coconut slices.

جدول ۱ - مدل های خشک کردن لایه ی نازک مورد استفاده برای مدل سازی خشک کردن برش های نارگیل.

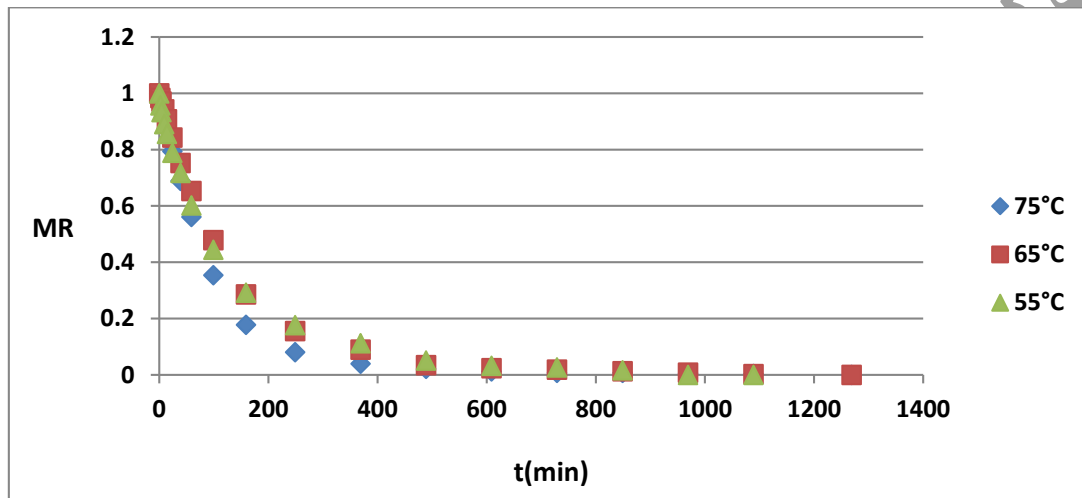
| ردیف | نام مدل | مدل |
|------|---------------------------|--|
| ۱ | نیوتون | $MR = \exp(-kt)$ |
| ۲ | پیچ | $MR = \exp(-ktn)$ |
| ۳ | پیچ اصلاح شده | $MR = \exp[-(kt)n]$ |
| ۴ | هندرسون و پابیس | $MR = a \exp(-kt)$ |
| ۵ | لگاریتمی | $MR = a \exp(-kt) + c$ |
| ۶ | دو جمله ای | $MR = a \exp(-k_0t) + b \exp(-k_1t)$ |
| ۷ | دو جمله ای نمایی | $MR = a \exp(-kt) + \exp(-mt)$ |
| ۸ | تقریب پخش | $MR = a \exp(-kt) + (1-a)\exp(-kbt)$ |
| ۹ | میدیلی | $MR = a \exp(-ktn) + ct$ |
| ۱۰ | هندرسون و پابیس اصلاح شده | $MR = a \exp(-kt) + b \exp(-gt) + c \exp(-ht)$ |
| ۱۱ | ونگ و سینگ | $MR = 1 + at + bt^2$ |
| ۱۲ | سه می وار | $MR = a + bt + ct^2$ |

MR: رطوبت (d.b.)، t: زمان (min)، a، b و c: ضرایب h، g، k و m، ثابت های مدل است.

۳-۱- منحنی خشک کردن نارگیل:

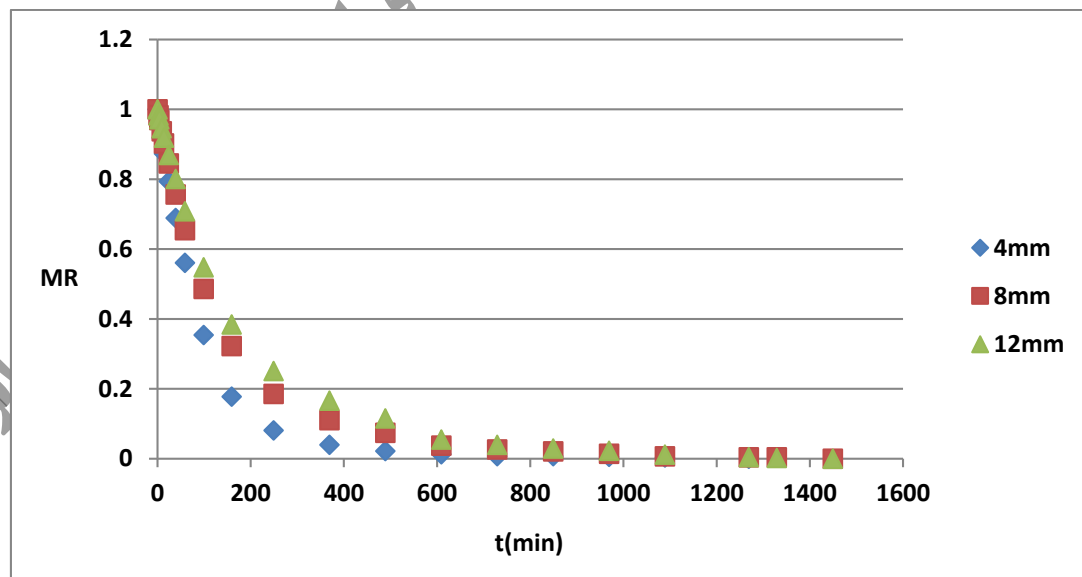
شکل (۱) نشان دهنده ی تغییرات نسبت رطوبت بر حسب تابعی از زمان خشک کردن در دماهای 55°C ، 65°C ، 75°C است. از این شکل می توان مشاهده نمود که میزان رطوبت به طور پیوسته در طی زمان خشک کردن کاهش می یابد و همان طور که انتظار می رود افزایش دمای هوا باعث کاهش زمان خشک کردن می گردد.

همین طور از شکل (۱) b تغییرات نسبت رطوبت بر حسب تابعی از زمان خشک کردن در ضخامت های مختلف 4 ، 8 و 12 میلی متر است که از این شکل می توان مشاهده نمود که میزان رطوبت به طور پیوسته در طی زمان خشک کردن کاهش می یابد و همان طور که انتظار می رود افزایش ضخامت، باعث افزایش زمان خشک کردن می گردد.



شکل (۱) a: منحنی خشک کردن در دماهای مختلف در ضخامت ثابت ۴ میلی متر.

Figure 1-a: drying curve at different temperatures in constant thickness of 4 mm.



شکل (۱) b: منحنی خشک کردن در ضخامت های مختلف در دمای ثابت 75°C درجه ی سانتی گراد

Figure 1-b: drying curve at different thicknesses in constant temperature of 75°C .



۲-۳- مدل های خشک کردن:

اطلاعات محتوی رطوبتی که از آزمایش خشک کردن به دست آمده بودند به نسبت های رطوبتی (MR) تبدیل شدند و سپس با ۱۲ مدلی که در جدول ۱ ذکر شده اند بررسی شدند .

مدل های مختلف، توسط چهار معیار ضریب تبیین (R^2)، میانگین نسبی درصد انحراف (MRPD)، مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE) و مربع کای (X^2) با یکدیگر مقایسه شدند که نتایج آن در جدول ۲، ارائه شده است . بر اساس این که کدام مدل بالاترین (R^2) و کمترین MRPD، RMSE و (X^2) را داشته باشد، بهترین مدل تشریح خشک کردن لایه ی نازک برش های نارگیل انتخاب می شود.

از جدول ۲، مشخص است که به طور متوسط، بالاترین (R^2) و کمترین RMSE، MRPD، (X^2) متعلق به مدل دوجمله ای است . بنابراین، این مدل، به عنوان مدل برتر انتخاب می شود . خشک کردن مواد غذایی و محصولات کشاورزی به نوع فرآیند مقدماتی مثل بلانچینگ (آنزیم بری) ، دامنه ی دمایی و نوع روش و روند خشک کردن وابسته است.

همچنین جدول ۳ پارامترهای خشک کردن را برای این مدل، نشان می دهد و منحنی خشک کردن برای مدل دوجمله ای (شکل ۲ (a,b)) همپوشانی مناسبی بین داده های اصلی و مدل انتخاب شده را نشان داده است .

۳-۳- ضریب نفوذ موثر رطوبت:

مقادیر ضریب نفوذ موثر (Deff) در دماهای مختلف در جدول ۴ ارائه شده اند. مقادیر ضریب نفوذ موثر رطوبت برش های نارگیل در فرآیند خشک کردن در دامنه ی دمایی $75 - 55$ °C برای ضخامت ۴ میلی متر از $2/6E-09$ تا $1/98E-09$ تغییر کرد. مقادیر Deff به طور فزاینده ای با افزایش دمای هوای خشک کن افزایش یافت و با افزایش ضخامت مقادیر Deff کاهش از خود نشان داد.

مکانیک بیوسیستم (ماشین های کشاورزی) و مکانیزاسیون ایران



یازدهمین کنگره ملی مهندسی مکانیک بیوسیستم و مکانیزاسیون ایران



انجمن متری ماشین های کوره های و مجیزه های ایران



Table 2: Statistical results obtained from different drying models at 55 °C.

جدول ۲: نتایج آماری بدست آمده از مدل های مختلف خشک کردن در دمای ۵۵ °C.

| | | | | معیار | ضخامت | 55°C | |
|---------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------|------|------|
| | | | | R2 | X2 | RMSE | MRPD |
| نیوتن | ۰/۹۹۸۰۸۶۵۱۶ | ۰/۰۰۰۸۷۳۰۴ | ۰/۰۲۸۷۱۴۷۷۳ | ۲۶/۵۷۸۵۴۹۸۵ | ۴ | | |
| | ۰/۹۹۹۳۸۷ | ۰/۰۰۰۲۴۵ | ۰/۰۱۵۳۰۵ | ۲۲/۵۶۲۹۳ | ۸ | | |
| | ۰/۹۹۹۳۴۳۸ | ۰/۰۰۰۱۸۶۳ | ۰/۰۱۳۳۴۷۵ | ۱۸/۲۸۰۷۳ | ۱۲ | | |
| پیچ | ۰/۹۹۹۳۰۸۵۸۷ | ۰/۰۰۰۱۲۱۲۹ | ۰/۰۱۰۳۸۳۳۲۳ | ۸/۳۲۷۵۱۷۵۲۶ | ۴ | | |
| | ۰/۹۹۹۳۴۳ | ۰/۰۰۰۱۲۷ | ۰/۰۱۰۷۸۲ | ۱۲/۸۱۶۵۵ | ۸ | | |
| | ۰/۹۹۹۱۹۵۳ | ۰/۰۰۰۱۶۲۴ | ۰/۰۱۲۱۷۵۸ | ۱۳/۳۱۶۲۶۲ | ۱۲ | | |
| پیچ اصلاح شده | ۰/۹۹۹۳۰۸۱۳۱ | ۰/۰۰۰۱۲۱۲۹ | ۰/۰۱۰۳۸۳۳۲۸ | ۸/۳۱۷۲۰۸۵۹۶ | ۴ | | |
| | ۰/۹۹۹۳۴۳ | ۰/۰۰۰۱۲۷ | ۰/۰۱۰۷۸۲ | ۱۲/۸۰۰۶ | ۸ | | |
| | ۰/۹۹۹۱۹۵۳ | ۰/۰۰۰۱۶۲۴ | ۰/۰۱۲۱۷۵۸ | ۱۳/۳۱۶۲۰۲ | ۱۲ | | |
| هندرسون و پابیس | ۰/۹۹۷۷۸۸۴۹۱ | ۰/۰۰۰۴۷۷۱۰۴ | ۰/۰۲۰۵۹۳۵۰۵ | ۲۲/۶۲۱۸۷۷۳۵ | ۴ | | |
| | ۰/۹۹۹۲۴۴ | ۰/۰۰۰۱۷۵ | ۰/۰۱۲۶۳۲ | ۲۰/۴۵۳۱۴ | ۸ | | |
| | ۰/۹۹۹۲۸۹۷ | ۰/۰۰۰۱۴ | ۰/۰۱۱۳۰۶۸ | ۱۶/۶۶۴۹۰۸ | ۱۲ | | |
| لگاریتمی | ۰/۹۹۸۱۱۵۲۱۵ | ۰/۰۰۰۳۳۶۶۰۴ | ۰/۰۱۶۷۴۸۲۳۳ | ۸/۳۸۸۹۸۰۳۴۷ | ۴ | | |
| | ۰/۹۹۹۴۱۲ | ۰/۰۰۰۱۰۸ | ۰/۰۰۹۶۹۹ | ۲۴/۵۵۹۹۵ | ۸ | | |
| | ۰/۹۹۹۳۴۴۷ | ۰/۰۰۰۱۲۲۲ | ۰/۰۱۰۳۰۸۹ | ۱۹/۹۰۶۱۴۱ | ۱۲ | | |
| دو جمله ای | ۰/۹۹۹۴۲۰۳۴۶ | ۰/۰۰۰۱۱۱۲۹۱ | ۰/۰۰۹۳۰۳۷۲۴ | ۵/۶۴۶۰۳۷۷۸ | ۴ | | |
| | ۰/۹۹۹۳۱۳ | ۰/۰۰۰۱۷۴ | ۰/۰۱۲۰۰۶ | ۱۹/۸۴۴۸۶ | ۸ | | |
| | ۰/۹۹۹۳۴۶۳ | ۰/۰۰۰۱۴۱۴ | ۰/۰۱۰۸۰۸۱ | ۱۶/۲۳۴۳۲۶ | ۱۲ | | |
| دو جمله ای نمایی | ۰/۹۹۹۰۹۵۰۳۶ | ۰/۰۰۰۲۳۵۳۴۵ | ۰/۰۱۴۴۶۳۶۰ | ۱۳/۶۴۵۸۳۳۵۵ | ۴ | | |
| | ۰/۹۹۹۲۹۱ | ۰/۰۰۰۱۶۱ | ۰/۰۱۲۱۴ | ۱۹/۵۳۱۳۱ | ۸ | | |
| | ۰/۹۹۹۲۵۲۳ | ۰/۰۰۰۱۶۰۵ | ۰/۰۱۲۱۰۳۷ | ۹/۴۴۲۰۳۰۶ | ۱۲ | | |
| تقریب پخش | ۰/۹۹۹۰۹۹۶۴۵ | ۰/۰۰۰۲۱۸۰۳۳ | ۰/۰۱۳۴۷۹۴۰۶ | ۷/۴۹۲۵۱۶۱۱۹ | ۴ | | |
| | ۰/۹۹۹۵۲۴ | ۰/۰۰۰۱۰۸ | ۰/۰۰۹۶۹۵ | ۱۱/۸۷۱۹۵ | ۸ | | |
| | ۰/۹۹۹۳۰۶۵ | ۰/۰۰۰۱۵۵۸ | ۰/۰۱۱۶۴۰۸ | ۱۵/۶۵۱۶۵۲ | ۱۲ | | |
| میدیلی | ۰/۹۹۹۳۴۴۷۳۹ | ۰/۰۰۰۱۲۵۷۴۳ | ۰/۰۰۹۸۸۹۳۸۳ | ۶/۹۳۳۹۲۲۱۸۵ | ۴ | | |
| | ۰/۹۹۹۴۰۲ | ۰/۰۰۰۱۱۶ | ۰/۰۰۹۸۰۹ | ۱۸/۷۸۲۸۹ | ۸ | | |
| | ۰/۹۹۹۳۱۰۴ | ۰/۰۰۰۱۳۵۸ | ۰/۰۱۰۵۹۱۸ | ۲۱/۸۲۵۲۱۸ | ۱۲ | | |
| هندرسون و پابیس اصلاح شده | ۰/۹۹۹۷۲۵۰۱۷ | ۶/۲۱۰۴۳ | ۰/۰۰۶۴۳۴۵۰۸ | ۴/۷۵۲۵۰۱۲۸۴ | ۴ | | |
| | ۰/۹۹۹۶۲۱ | ۸/۲۱ | ۰/۰۰۷۷۹۱ | ۱۲/۹۶۴۱۳ | ۸ | | |
| | ۰/۹۹۹۴۱۹۸ | ۰/۰۰۰۱۴۸۵ | ۰/۰۱۰۴۷۷۳ | ۱۷/۱۰۰۶۸۶ | ۱۲ | | |
| ونگ و سینگ | ۰/۹۲۵۲۰۹۲۲۳ | ۰/۰۲۳۳۷۹۵۵۶ | ۰/۱۴۴۱۵۹۰۳۵ | ۱۴۱/۳۷۱۰۷۵۵ | ۴ | | |
| | ۰/۹۳۰۸۵۷ | ۰/۰۱۸۵۴۳ | ۰/۱۳۰۱۱۸ | ۱۷۵/۶۹۸۴ | ۸ | | |
| | ۰/۹۳۵۹۳۱۳ | ۰/۰۱۷۰۹۲۳ | ۰/۱۲۴۹۲۳۹ | ۲۰/۱۹۱۳۷۶ | ۱۲ | | |
| سه می وار | ۰/۹۲۶۳۲۱۷۰۹ | ۰/۰۱۳۱۵۸۲۴ | ۰/۱۰۴۷۱۴۸۵۲ | ۱۰۲/۴۵۹۹۷۱۵ | ۴ | | |
| | ۰/۹۳۱۲۹۶ | ۰/۰۱۲۶۳۴ | ۰/۱۰۴۸۱۶ | ۱۴۴/۴۰۲۱ | ۸ | | |
| | ۰/۹۳۶۳۳۷۷ | ۰/۰۱۱۸۷۳۴ | ۰/۱۰۱۶۱۰۴ | ۱۷۲/۹۰۲۳۳ | ۱۲ | | |



یازدهمین کنگره ملی مهندسی مکانیک بیوسیستم و مکانیزاسیون ایران



انجمن مهندسی ماشین‌های کشاورزی و مکانیزاسیون ایران



Table 3: Statistical results obtained from different drying models at 65 °C.
جدول ۳: نتایج آماری بدست آمده از مدل های مختلف خشک کردن در دمای 65 °C.

| معیار | | | | ضخامت | 65°C | |
|----------|----------|----------|----------|-------|---------------------------|--|
| R2 | X2 | RMSE | MRPD | | | |
| ۰/۹۹۹۵۲۶ | ۰/۰۰۰۱۰۶ | ۰/۰۱۰۰۱۸ | ۲۵/۳۹۹۶۵ | ۴ | نیوتن | |
| ۰/۹۹۹۱۷۸ | ۰/۰۰۰۱۸۴ | ۰/۰۱۳۲۶۷ | ۳۱/۷۸۵۶۹ | ۸ | | |
| ۰/۹۹۹۳۱۷ | ۰/۰۰۰۱۳۸ | ۰/۰۱۱۵۰۸ | ۲۳/۳۷۱۳۱ | ۱۲ | | |
| ۰/۹۹۹۵۲ | ۰/۰۰۰۱۱۲ | ۰/۰۱۰۰۰۲ | ۲۵/۴۱۶۱۶ | ۴ | بیچ | |
| ۰/۹۹۹۱۷۳ | ۰/۰۰۰۱۸۷ | ۰/۰۱۳۰۸۱ | ۳۰/۳۳۲۰۶ | ۸ | | |
| ۰/۹۹۹۳۳۹ | ۰/۰۰۰۱۴۵ | ۰/۰۱۱۴۹۷ | ۲۴/۱۳۸۸۹ | ۱۲ | | |
| ۰/۹۹۹۵۲۹ | ۰/۰۰۰۱۱۲ | ۰/۰۱۰۰۱۶ | ۲۵/۴۸۵۹۶ | ۴ | بیچ اصلاح شده | |
| ۰/۹۹۹۱۷۵ | ۰/۰۰۰۱۸۷ | ۰/۰۱۳۰۸۱ | ۳۰/۳۵۲۳۳ | ۸ | | |
| ۰/۹۹۹۳۲۷ | ۰/۰۰۰۱۴۵ | ۰/۰۱۱۴۹۱ | ۲۳/۹۸۶۷۱ | ۱۲ | | |
| ۰/۹۹۹۵۵۱ | ۰/۰۰۰۱۱ | ۰/۰۰۹۹۱۹ | ۲۵/۵۹۷۵۲ | ۴ | هندرسون و پابیس | |
| ۰/۹۹۹۲۲۹ | ۰/۰۰۰۱۸۷ | ۰/۰۱۳۰۸ | ۳۲/۰۵۲۸۵ | ۸ | | |
| ۰/۹۹۹۳۵۶ | ۰/۰۰۰۱۳۹ | ۰/۰۱۱۲۷۳ | ۲۳/۸۵۶۰۴ | ۱۲ | | |
| ۰/۹۹۹۶۰۶ | ۷/۷۸E-05 | ۰/۰۰۸۰۹۴ | ۲۰/۱۱۳۲۶ | ۴ | لگاریتمی | |
| ۰/۹۹۹۳۲۴ | ۰/۰۰۰۱۳ | ۰/۰۱۰۶۳۹ | ۳۸/۸۸۶۰۱ | ۸ | | |
| ۰/۹۹۹۴۱ | ۰/۰۰۰۱۱۵ | ۰/۰۰۹۹۹۲ | ۱۹/۷۲۷۵۹ | ۱۲ | | |
| ۰/۹۹۹۶۶۱ | ۷/۱۶E-05 | ۰/۰۰۷۵۱۹ | ۱۱/۸۱۱۷۴ | ۴ | دو جمله ای | |
| ۰/۹۹۹۵۳۳ | ۹/۴۸E-05 | ۰/۰۰۸۸۵ | ۱۳/۹۵۶۳۱ | ۸ | | |
| ۰/۹۹۹۴۳۲ | ۰/۰۰۰۱۱۶ | ۰/۰۰۹۸۰۴ | ۱۴/۹۳۹۲۴ | ۱۲ | | |
| ۰/۹۹۹۵۴۸ | ۹/۵۴E-05 | ۰/۰۰۹۲۴ | ۱۹/۰۴۰۹۸ | ۴ | دو جمله ای نمایی | |
| ۰/۹۹۹۳۶۷ | ۰/۰۰۰۱۳۷ | ۰/۰۱۱۱۹۹ | ۲۰/۹۷۱۸۳ | ۸ | | |
| ۰/۹۹۹۳۴۱ | ۰/۰۰۰۱۳۴ | ۰/۰۱۱۰۷۸ | ۱۷/۴۵۸۴۵ | ۱۲ | | |
| ۰/۹۹۹۵۳۳ | ۰/۰۰۰۱۱۵ | ۰/۰۰۹۸۴۷ | ۲۴/۶۱۳۹۸ | ۴ | تقریب پخش | |
| ۰/۹۹۹۴۹۲ | ۰/۰۰۰۱۱۶ | ۰/۰۱۰۰۰۴ | ۱۶/۲۸۲۷۵ | ۸ | | |
| ۰/۹۹۹۳۳ | ۰/۰۰۰۱۵۱ | ۰/۰۱۱۴۶۳ | ۲۳/۰۰۰۳۶ | ۱۲ | | |
| ۰/۹۹۹۵۴۲ | ۹/۸۲E-05 | ۰/۰۰۸۸۰۶ | ۲۱/۹۸۶۸۱ | ۴ | میدیلی | |
| ۰/۹۹۹۲۴۵ | ۰/۰۰۰۱۵۵ | ۰/۰۱۱۳۰۹ | ۳۰/۲۵۰۰۷ | ۸ | | |
| ۰/۹۹۹۳۷۶ | ۰/۰۰۰۱۲۸ | ۰/۰۱۰۳۰۲ | ۲۲/۱۵۷۳۵ | ۱۲ | | |
| ۰/۹۹۹۵۹ | ۰/۰۰۰۱۳۸ | ۰/۰۰۹۷۰۳ | ۲۵/۷۷۷۲۴ | ۴ | هندرسون و پابیس اصلاح شده | |
| ۰/۹۹۹۲۶۷ | ۰/۰۰۰۲۲۷ | ۰/۰۱۲۹۴۴ | ۳۲/۳۰۹۶۱ | ۸ | | |
| ۰/۹۹۹۲۹۹ | ۰/۰۰۰۱۸۵ | ۰/۰۱۱۷۰۶ | ۲۳/۲۱۸۸۹ | ۱۲ | | |
| ۰/۹۱۱۴۰۵ | ۰/۰۲۴۶۸۴ | ۰/۱۴۸۶۱۱ | ۲۹۶/۶۴۴۱ | ۴ | ونگ و سینگ | |
| ۰/۹۱۸۴۳۵ | ۰/۰۲۱۵۱۲ | ۰/۱۴۰۱۴۶ | ۴۳۲/۱۰۱۷ | ۸ | | |
| ۰/۹۴۳۴۱۳ | ۰/۰۱۴۳۵۳ | ۰/۱۱۴۴۷۸ | ۲۸۵/۷۴۳۱ | ۱۲ | | |
| ۰/۹۱۱۸۹۴ | ۰/۰۱۷۴۱۷ | ۰/۱۲۱۱۰۸ | ۲۴۰/۸۹۴ | ۴ | سه می وار | |
| ۰/۹۱۸۸۴ | ۰/۰۱۵۶۱۸ | ۰/۱۱۶۵۳۵ | ۳۴۷/۵۷۲۷ | ۸ | | |
| ۰/۹۴۳۷۳۵ | ۰/۰۱۰۹۴۹ | ۰/۰۹۷۵۷۳ | ۲۳۷/۰۶۸۵ | ۱۲ | | |

یازدهمین کنگره ملی مهندسی مکانیک بیوسیستم و مکانیزاسیون ایران



یازدهمین کنگره ملی مهندسی مکانیک بیوسیستم و مکانیزاسیون ایران



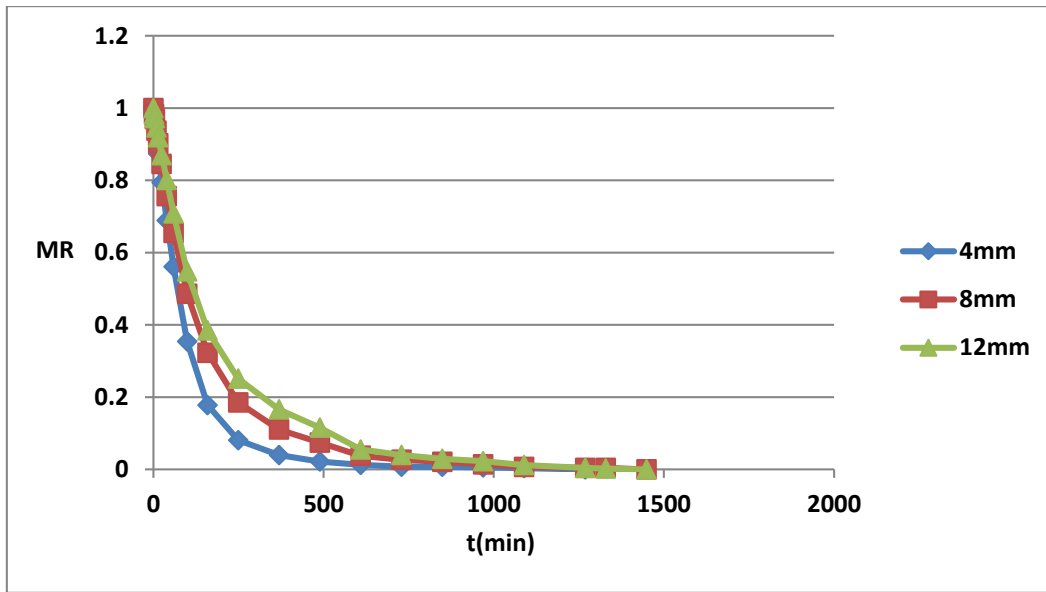
انجمن مهندسی ماشین‌های کشاورزی و مکانیزاسیون ایران



Table 4: Statistical results obtained from different drying models at 75 °C.
جدول ۴: نتایج آماری بدست آمده از مدل های مختلف خشک کردن در دمای 75 °C.

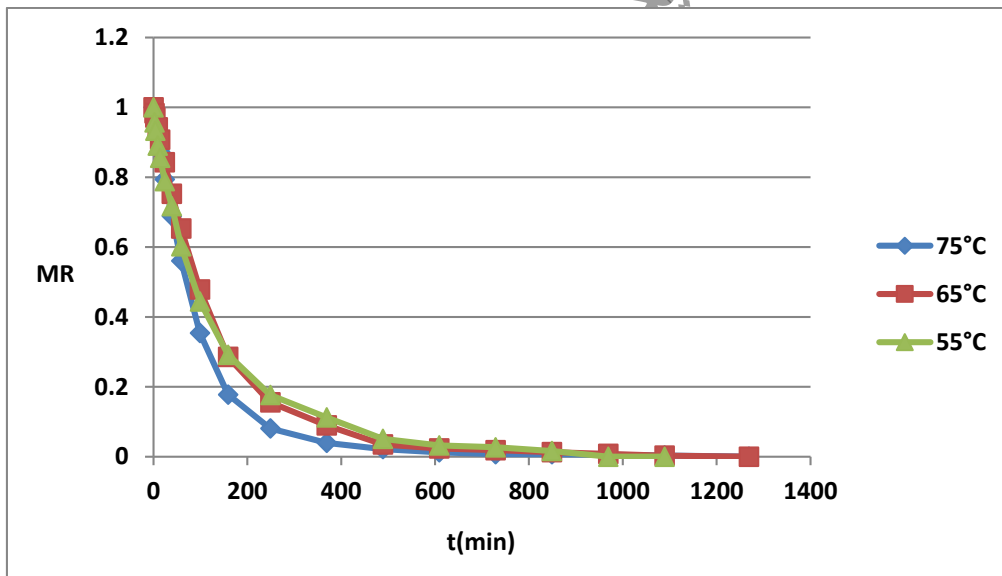
| 75°C | | | | ضخامت | معیار |
|---------------------------|----|----------|----------|----------|----------|
| | | | | R2 | X2 |
| | | | | RMSE | MRPD |
| نیوتن | ۴ | ۳۳/۳۵۹۱۷ | ۰/۰۰۹۹۳۶ | ۰/۰۰۰۱۰۴ | ۰/۹۹۹۴۹۹ |
| | ۸ | ۳۴/۹۰۹۰۱ | ۰/۰۱۵۱۹۱ | ۰/۰۰۰۲۴۲ | ۰/۹۹۹۹۲ |
| | ۱۲ | ۲۷/۹۷۳۳ | ۰/۰۱۹۰۷ | ۰/۰۰۰۳۸ | ۰/۹۹۹۸۵۴ |
| پیچ | ۴ | ۳۵/۴۵۵۹ | ۰/۰۰۸۷۹ | ۸/۶E-05 | ۰/۹۹۹۶۸ |
| | ۸ | ۲۷/۸۶۱۳ | ۰/۰۱۱۷۴ | ۰/۰۰۰۱۵ | ۰/۹۹۹۳۳ |
| | ۱۲ | ۱۳/۳۸۴۲ | ۰/۰۱۳۴ | ۰/۰۰۰۲ | ۰/۹۹۹۸۹۹ |
| پیچ اصلاح شده | ۴ | ۳۵/۴۳۳۳ | ۰/۰۰۸۷۹ | ۸/۶E-05 | ۰/۹۹۹۶۸ |
| | ۸ | ۲۷/۸۵۶۴ | ۰/۰۱۱۷۴ | ۰/۰۰۰۱۵ | ۰/۹۹۹۳۳ |
| | ۱۲ | ۱۳/۳۶۷۸ | ۰/۰۱۳۴ | ۰/۰۰۰۲ | ۰/۹۹۹۸۹۹ |
| هندرسون و پابیس | ۴ | ۳۳/۶۶۵۴ | ۰/۰۰۹۴۷ | ۰/۰۰۰۱ | ۰/۹۹۹۵۴ |
| | ۸ | ۳۴/۳۳۷ | ۰/۰۱۴۸ | ۰/۰۰۰۲۴ | ۰/۹۹۹۱۱ |
| | ۱۲ | ۲۶/۶۹۱۱ | ۰/۰۱۸۲۶ | ۰/۰۰۰۳۷ | ۰/۹۹۹۸۴ |
| لگاریتمی | ۴ | ۱۳/۷۳۲۷ | ۰/۰۰۸۴۳ | ۸/۴E-05 | ۰/۹۹۹۵۷ |
| | ۸ | ۴۳/۲۴۶۸ | ۰/۰۱۰۷۹ | ۰/۰۰۰۱۴ | ۰/۹۹۹۲۸ |
| | ۱۲ | ۶۵/۲۸۸۹ | ۰/۰۱۴۸۷ | ۰/۰۰۰۲۶ | ۰/۹۹۹۸۶۳ |
| دو جمله ای | ۴ | ۳۳/۶۱۴۱ | ۰/۰۰۹۴۷ | ۰/۰۰۰۱۱ | ۰/۹۹۹۵۴ |
| | ۸ | ۸/۵۷۱۶۸ | ۰/۰۰۴۶۴ | ۲/۷E-05 | ۰/۹۹۹۸۷ |
| | ۱۲ | ۳۰/۱۲۲ | ۰/۰۰۸۱۷ | ۸/۲E-05 | ۰/۹۹۹۵۹ |
| دو جمله ای نمایی | ۴ | ۲۶/۰۸۳۷ | ۰/۰۰۹۰۸ | ۹/۲E-05 | ۰/۹۹۹۶۶ |
| | ۸ | ۳۳/۹۸۳۲ | ۰/۰۱۴۶۴ | ۰/۰۰۰۲۴ | ۰/۹۹۹۹۱ |
| | ۱۲ | ۲۵/۵۳۷۶ | ۰/۰۱۷۸۵ | ۰/۰۰۰۳۵ | ۰/۹۹۹۸۴ |
| تقریب پخش | ۴ | ۳۴/۸۲۹۹ | ۰/۰۰۸۳۳ | ۸/۲E-05 | ۰/۹۹۹۷۲ |
| | ۸ | ۹/۱۰۷۲۹ | ۰/۰۰۴۷۷ | ۲/۷E-05 | ۰/۹۹۹۸۷ |
| | ۱۲ | ۲۰/۶۱۱۶ | ۰/۰۰۸۲۴ | ۷/۹E-05 | ۰/۹۹۹۵۹ |
| میدیلی | ۴ | ۲۱/۶۲۴۵ | ۰/۰۰۷۷۶ | ۷/۶E-05 | ۰/۹۹۹۶۵ |
| | ۸ | ۲۵/۶۳۹۹ | ۰/۰۱۰۱ | ۰/۰۰۰۱۳ | ۰/۹۹۹۳۸ |
| | ۱۲ | ۲۹/۰۶۰۱ | ۰/۰۱۲۴۱ | ۰/۰۰۰۱۹ | ۰/۹۹۹۰۵ |
| هندرسون و پابیس اصلاح شده | ۴ | ۵/۸۹۵۸۷ | ۰/۰۰۳۲۹ | ۱/۶E-05 | ۰/۹۹۹۹۳ |
| | ۸ | ۳۳/۳۱۹۴ | ۰/۰۱۵۷۶ | ۰/۰۰۰۳۵ | ۰/۹۹۹۸۲ |
| | ۱۲ | ۱۳/۴۱۲۷ | ۰/۰۲۱۸۷ | ۰/۰۰۰۶۷ | ۰/۹۹۹۲۱ |
| ونگ و سینگ | ۴ | ۵۹۰/۹۲۳ | ۰/۱۹۱۲۲ | ۰/۰۴۰۸۷ | ۰/۸۶۱۲۹ |
| | ۸ | ۳۲۱/۱۶۴ | ۰/۱۵۳۷۹ | ۰/۰۲۶۱۴ | ۰/۹۰۷۳۱ |
| | ۱۲ | ۲۴۴/۶۵۸ | ۰/۱۲۸۶۳ | ۰/۰۱۸۲۹ | ۰/۹۳۳۱۲ |
| سه می وار | ۴ | ۴۵۱/۸۰۸ | ۰/۱۵۰۸۷ | ۰/۰۲۷۰۳ | ۰/۸۶۱۸ |
| | ۸ | ۲۴۶/۶۹۸ | ۰/۱۲۲۰۸ | ۰/۰۱۷۳۹ | ۰/۹۰۷۸۶ |
| | ۱۲ | ۱۸۸/۶۳۷ | ۰/۱۰۳۵۶ | ۰/۰۱۲۵۱ | ۰/۹۳۳۶۸ |

یازدهمین کنگره ملی مهندسی مکانیک بیوسیستم و مکانیزاسیون ایران



شکل (۲) a: منحنی های خشک کردن با مدل دوجمله ای برای ضخامت های مختلف در دمای ثابت ۷۵ درجه ی سلسیوس.

Figure 2-1: The drying curves of the two-term model for different thicknesses with a constant temperature of 75 °C



شکل (۲) b: منحنی های خشک کردن با مدل دوجمله ای برای دما های مختلف در ضخامت ثابت ۴ میلی متر.

Figure 2-b: The drying curves of the two-term model for different temperatures with a constant thickness of 4 mm.



Table 4: Drying parameters for the two-term model.

جدول ۴: پارامترهای خشک کردن برای مدل دو جمله ای.

| a | b | c | d | ضخامت (mm) | دما (°C) |
|---------|----------|---------|----------|------------|----------|
| ۰/۹۹۱ | ۰/۰۱۰۲ | ۰/۰۱۴۸۲ | ۰/۰۱۰۶۱ | ۴ | ۷۵°C |
| ۰/۱۹۹۷ | ۰/۰۰۲۷۴۴ | ۰/۸۰۲۸ | ۰/۰۰۸۷۴۱ | ۸ | |
| ۰/۶۰۵۸ | ۰/۰۰۸۴۹۶ | ۰/۳۹۶۷ | ۰/۰۰۳۰۶۳ | ۱۲ | |
| ۰/۹۶۳۹ | ۰/۰۰۷۹۱۳ | ۰/۰۴۲ | ۰/۰۰۱۷۱۶ | ۴ | ۶۵°C |
| ۰/۸۹۶۶ | ۰/۰۰۶۲۹۳ | ۰/۱۱۳۹ | ۰/۰۰۱۹۶۸ | ۸ | |
| ۰/۹۷۷ | ۰/۰۰۴۶۶۱ | ۰/۰۳۰۱۹ | ۰/۰۰۰۹۴۵ | ۱۲ | |
| ۰/۵۳۵۴ | ۰/۰۱۲۶۸ | ۰/۴۴۱۴ | ۰/۰۰۴۱۶۷ | ۴ | ۵۵°C |
| ۰/۰۲۱۱۹ | ۰/۵۸۳۴ | ۰/۹۷۸۶ | ۰/۰۰۳۶۹۲ | ۸ | |
| ۰/۰۱۷۸۶ | ۰/۶۵۲۲ | ۰/۹۸۲۷ | ۰/۰۰۳۶۱۲ | ۱۲ | |

نتایج، نشان داد که در دمای ثابت بین ضخامت ۱۲ با ضخامت ۴ و ۸ میلی متر اختلاف معنی داری مشاهده شد (جدول ۴) افزایش ضخامت با کم شدن ضریب نفوذ، همراه است. این به دلیل تغییر در آهنگ انتقال رطوبت از مرکز به سطح و تراکم بافت در ضخامت های بالاتر است و در ضخامت ثابت بین دماهای مختلف در ضریب نفوذ اختلاف معنی داری مشاهده شد که بالا رفتن دما باعث افزایش در مقدار ضریب نفوذ گشته که به سبب تغییر در گرمای نهان تبخیر و افزایش آهنگ انتقال جرم با افزایش دما می باشد.

Table 5: The values of moisture diffusion coefficient (m^2/s) at different drying temperatures and thicknesses.

جدول ۵: مقادیر ضریب نفوذ رطوبت (m^2/s) در دماهای مختلف خشک کردن و ضخامت های مختلف

| دما (°C) | ضخامت | | |
|----------|-------------|----------|----------|
| | 4 | 8 | 12 |
| 55 | 1.98E-09 | 4.47E-09 | 1.00E-08 |
| 65 | 2.10676E-09 | 6.32E-09 | 1.20E-08 |
| 75 | 2.60E-09 | 7.35E-09 | 1.38E-08 |

۴- نتیجه گیری

نتایج حاصل از این تحقیق نشان دادند که در فرآیند خشک شدن نارگیل، آهنگ کاهش رطوبت در دمای بالاتر و ضخامت کمتر، از مقدار بالاتری برخوردار بود. هم چنین، مدل دو جمله ای می تواند تغییرات رطوبت نمونه را بهتر از سایر مدل های مورد مطالعه برآورد کند. براساس نتایج بدست آمده حداکثر ضریب نفوذ مربوط به بیشترین دما و ضخامت نارگیل با مقدار $10^{-8} \times 1/38$ است. نسبت رطوبت نمونه ها به طور مداوم طی فرآیند خشک کردن به صورت نمایی کاهش می یابد. براساس نمودارهای ارائه شده، افت اولیه رطوبت در نمونه ها دارای شیب بیشتری است؛ لذا حجم بالایی از رطوبت در مدت زمان کمتری از محصول خارج می شود. مقایسه مدل های مختلف برای پیش بینی سینتیک خشک شدن نارگیل نشان داد که به طور میانگین مدل دو جمله ای با معیارهای چهارگانه آماری ارائه شده در متن مقاله دارای دقت و عملکرد بالاتری است. به طوری که میانگین معیارهایی همچون ضریب تبیین، مجذور میانگین مربعات خطا، مربع کای و میانگین نسبی درصد انحراف به ترتیب برابر با ۰/۹۹۹۵۲۳، ۰/۰۰۸۹۵۲، ۰/۰۰۰۱۰۴ و ۱۶/۰۸۲۲۵ می باشد. همچنین ضریب نفوذ موثر رطوبت بین $2/6E-09$ تا $1/98E-09$ متغیر بود که با افزایش دما و ضخامت، افزایش پیدا کرد.



- [^۱] Shariati M, Modarresi M, Arabi F. The effect of coconut fruit meat on testosterone and gonadotropic hormones level and germ cells in adult male rats. *MEDICAL SCIENCES JOURNAL*. 2012;22(3):163-7.
- [^۲] Bagheri H, Seyedabadi M, Kashani nejad M. Modeling of thin-layer drying kinetics of kameh (native khashk). *Innovative Food Technologies*. 2014;2(1):3-16.
- [^۳] Mujumdar AS, Law CL. *Drying Technology: Trends and Applications in Postharvest Processing*. Food and Bioprocess Technology. 2010;3(6):843-52.
- [^۴] Farhudi Z, Darvishi H, Behroozi N. Energy and exergy analyses of continues infrared-hot air current dryer with air recycling. *Innovative Food Technologies*. 2018;5(2):253-71.
- [^۵] Akanbi CT, Adeyemi RS, Ojo A. Drying characteristics and sorption isotherm of tomato slices. *Journal of food engineering*. 2006;73(2):157-63.
- [^۶] Akanbi C, Oludemi F. Effect of processing and packaging on the lycopene content of tomato products. *International Journal of Food Properties*. 2004;7(1):139-52.
- [^۷] Márquez CA, De Michelis A, Giner SA. Drying kinetics of rose hip fruits (*Rosa eglanteria* L.). *Journal of food engineering*. 2006;77(3):566-74.
- [^۸] Bains R, Langrish T. An assessment of the mechanisms for diffusion in the drying of bananas. *Journal of food engineering*. 2008;85(2):201-1. ^۴
- [^۹] Sonmete MH, Mengeş HO, Ertekin C, Özcan MM. Mathematical modeling of thin layer drying of carrot slices by forced convection. *Journal of Food Measurement and Characterization*. 2017;11(2):629-38.
- [^{۱۰}] Chayjan RA, Dibagar N, Alaei B. Drying characteristics of zucchini slices under periodic infrared-microwave vacuum conditions. *Heat and Mass Transfer*. 2017;53(12):3473-85.
- [^{۱۱}] Antal T, Tarek M, Tarek-Tilistyák J, Kerekes B. Comparative Effects of Three Different Drying Methods on Drying Kinetics and Quality of Jerusalem Artichoke (*Helianthus tuberosus* L.). *Journal of Food Processing and Preservation*. 2017;41(3):e12971.
- [^{۱۲}] Faal S, Tavakoli T, Ghobadian B. Mathematical modelling of thin layer hot air drying of apricot with combined heat and power dryer. *Journal of food science and technology*. 2015;52(5):2950-7.
- [^{۱۳}] RAFIEI S, SHARIFI M, KEYHANI A, OMID M, JAFARI A. Thin Layer Drying Process Modeling of Orange Slice (Thompson Cultivar). 2008.
- [^{۱۴}] Pirmoradi M, Mostafaei M. Evaluation of the Best Kinetic Model in Thin Layer Drying of Kumquat Based on Desirability Function. *Agricultural Mechanization*. 2018;4(1):57-67.