

ارزیابی بهترین مدل سینتیکی در خشک کردن لایه‌ای نازک کدوی سبز به روش جابجایی با هوای داغ

رضا فهیمی^a، بیژن عسکری^{b*}، پوریا قره بگلو^c، فرهاد مختاری^d، پوریا فرزبوند^a

^a دانش آموخته کارشناسی ارشد مهندسی علوم و صنایع غذایی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد سبزوار، سبزوار، ایران

^b مدرس دانشگاه آزاد اسلامی، واحد سبزوار، گروه علوم و صنایع غذایی، سبزوار، ایران

^c مدرس دانشگاه آزاد اسلامی، واحد سراب، گروه علوم و صنایع غذایی، سراب، ایران

^d پژوهشگر مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی استان اصفهان، اصفهان، ایران

چکیده

مقدمه: در این تحقیق فرآیند خشک کردن لایه ای نازک کدوی سبز با استفاده از خشک کن آزمایشگاهی تحت جابجایی با هوای داغ، بررسی شد. هدف از این مطالعه، بررسی تاثیر دما و سینتیک خشک کردن کدو و ارائه بهترین مدل ریاضی به منظور برازش تغییرات نسبت رطوبت به زمان بود.

مواد و روش ها: تمامی آزمون‌ها در سه سطح دمایی ۶۰، ۷۰ و ۸۰°C و برش هایی با ضخامت ۱۰ میلی متر در سه تکرار انجام شد. پس از ارزیابی سینتیکی نمونه‌های خشک شده با ضخامت‌های مختلف، این ضخامت به عنوان مناسب‌ترین انتخاب شد. در این پژوهش ده مدل ریاضی سینتیکی بر داده های تجربی برازش داده شد و ارزیابی مدل ها با چهار معیار ضریب تبیین، ریشه میانگین مربعات خطا، کاهش کای اسکوئر و خطای انحراف میانگین مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. همچنین قانون دوم فیک برای ارزیابی ضریب نفوذ موثر رطوبت و معادله آرنیوس جهت تعیین انرژی فعال سازی (E_a) استفاده گردید.

یافته ها: نتایج نشان داد که مدل هایلا و کلاک نسبت به سایر مدل ها به نحو مناسب تری مراحل خشک کردن لایه ای نازک کدوی سبز را ارزیابی می نماید. مقدار انرژی فعال سازی در حد ۸۵/۴۵ kJ/mol تعیین گردید.

نتیجه گیری: بهترین مدل ریاضی در خشک کردن ورقه‌ای کدوی سبز با روش جابجایی با هوای داغ به منظور استفاده در طراحی خشک کن مدل هایلا و کلاک پیشنهاد شد.

واژه‌های کلیدی: جابجایی با هوای داغ، خشک کردن لایه ای نازک، کدوی سبز، مدل سازی سینتیکی

مقدمه

کدو با نام علمی (*Cucurbita pepo*)، یک نوع کدوی سبز تابستانی کوچک و باریک می‌باشد که شکل مشابهی با خیار دارد و معمولاً به صورت تازه، در سالاد، انواع سوپ و سایر فرمولاسیون‌های غذایی مورد استفاده قرار می‌گیرد (Neves, 2012). میزان تولید سبزی‌ها و میوه‌ها در ایران بر طبق آمار سازمان غذا و کشاورزی سازمان ملل ۱۸۵۶۶۰۰ میلیون تن تا سال ۲۰۱۰ بوده است (Faostat.org). خشک کردن مواد غذایی یکی از متداول‌ترین فرآیندهای به کار رفته در افزایش پایداری ماده غذایی می‌باشد، به صورتی که این فرآیند به طور قابل ملاحظه‌ای فعالیت میکروبیولوژیکی را کاهش داده و منجر به کاهش تغییرات فیزیکی و شیمیایی در طی نگهداری می‌شود (Barrozo et al., 2001)، همچنین باعث افزایش ماندگاری و خصوصیات حسی تقریباً مشابه با محصولات تازه می‌گردد. اطلاع از سینتیک خشک کردن و رطوبت تعادلی مواد بیولوژیکی در شرایط فرآوری، اهمیت زیادی در طراحی خشک کن و مدل سازی فرآیندهای خشک کردن دارد (Babetto, 2011). روش خشک کردن جابجایی با هوای داغ، یکی از مطلوبترین روش‌های به کار رفته جهت کاهش رطوبت میوه‌ها و سبزی‌ها می‌باشد (Figiel, 2010). سینتیک خشک کردن تا حد زیادی تحت تاثیر دمای هوا و ابعاد ماده قرار می‌گیرد، در حالی که می‌توان از سایر عوامل فرآیند از نظر عملی و فنی صرف نظر نمود (Krokida, 2003).

در بررسی Chong و همکاران (۲۰۰۸) روی سینتیک خشک کردن و کیفیت میوه چامپداک^۱ خشک شده، مشخص گردید که مدل لگاریتمی بهترین مدل در ارزیابی دماهای خشک کردن می‌باشد. مقادیر ضرایب نفوذ موثر فرآورده مذکور در دماهای ۵۰، ۶۰ و ۷۰ درجه سانتی‌گراد، به ترتیب $۳/۲۹۱ \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ ، $۴/۰۶۹ \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ و $۴/۵۳۴ \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ محاسبه شد و ثابت ضریب نفوذ موثر و انرژی فعال سازی به ترتیب $۴/۸۶۱ \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ و $۶/۸۰۳ \text{ kJ/mol}$ بود (Chong et al., 2008). در پژوهش Evin (۲۰۱۲) در خصوص مدل سازی ریاضی سینتیک خشک کردن لایه‌ای نازک *Gundelia*

tournefortii در شرایط خشک کردن ماکروویو و آفتابی، مشخص گردید که مدل میدلی در میان مدل‌های پیشنهادی رفتار خشک کردن با مایکروویو را به نحو بسیار مطلوب تری توصیف می‌نماید و مدل لگاریتمی، سینتیک خشک کردن *Gundelia tournefortii* را توسط روش آفتابی بهتر تشریح می‌نماید. در مطالعه Janjaia و همکاران (۲۰۱۱) روی خشک کردن لایه‌ای نازک لیچی پوستگیری شده (*Litchi chinensis* Sonn.) تحت شرایط دما و رطوبت کنترل شده، مشخص گردید که در میان ۸ مدل مورد بررسی، مدل پیچ بهتر می‌تواند داده‌های خشک کردن را توصیف نماید و بین مقادیر محاسباتی و آزمایشی بیشترین ارتباط وجود دارد و می‌توان از داده‌های بدست آمده در مدل سازی و بهینه سازی خشک کن مطلوب با حداکثر راندمان استفاده نمود (Janjaia et al., 2011). در بخشی از پژوهشی که Zhou و Therdthai (۲۰۰۹) روی خشک کردن برگهای نعنای با مایکروویو تحت خلاء و جابجایی با هوای داغ (۶۰ و ۷۰°C)، سه مدل سینتیکی برای توصیف داده‌های خشک کردن با روش جابجایی با هوای داغ مورد استفاده قرار گرفت، مدل پیچ به نحو بهتری داده‌های خشک کردن را توصیف کرد. ضرایب نفوذ موثر رطوبت در دماهای ۶۰ و ۷۰°C، به ترتیب m^2/s و $۰/۹۶۴۸ \times 10^{-11} \text{ m}^2/s$ و $۱/۱۹ \times 10^{-11} \text{ m}^2/s$ بدست آمد (Zhou, Therdthai & 2009). ضریب نفوذ موثر رطوبت (D_{eff}) یکی از پارامترهای مهم خشک کردن است که بیانگر تمامی مکانیسم‌های انتقال رطوبت می‌باشد. این پارامتر معمولاً از منحنی‌های تجربی خشک کردن تعیین می‌گردد. انرژی فعال سازی نیز یکی از پارامتر مهم خشک کردن بوده که نمایانگر سطح انرژی مولکول‌های آب در انتشار رطوبت و تبخیر می‌باشد. ارتباط دما با ضریب نفوذ موثر را می‌توان توسط رابطه آرنیوس نشان داد. بنابراین انرژی فعال سازی از شیب نمودار معادله آرنیوس $\ln(D_{eff})$ در برابر $1/T$ تعیین می‌گردد. معمولاً فرض عمده در تعیین تجربی D_{eff} این است که در خشک کردن، انتقال جرم محدود می‌گردد. بنابراین دما باید در کل نمونه در طی خشک کردن بطور ایزوترمال ثابت باشد. علاوه بر این دمای مورد استفاده در معادله آرنیوس برای تعیین انرژی فعال سازی، دمای محیط

^۱ میوه گرمسیری که بومی کشورهای آسیای جنوب شرقی می‌باشد: Champedak

جریان هوای خشک کردن 1 m/s استفاده شد. در این روش مدت زمان خشک کردن $90-45$ دقیقه و میزان مصرف انرژی $0.78-0.61$ kWh بود و مقادیر عددی بدست آمده با مدل پیچ مقایسه گردید (Alibas, 2007). هدف از این مطالعه، ارائه بهترین مدل نیمه تئوری و سینتیکی خشک کردن لایه‌ای نازک کدو سبز بود که با استفاده از مناسبترین مدل، فرآیند و نحوه خشک کردن فرآورده توسط جابجایی با هوای داغ پیش‌بینی گردید و ضریب نفوذ موثر رطوبت و انرژی فعال‌سازی در خشک کردن کدو سبز تعیین شد. همچنین اهداف دیگر این بررسی مطابقت نتایج آزمایشی با قانون دوم فیک و بررسی ارتباط داده‌های تجربی با مدل‌های مورد بررسی بود. بنابراین با استفاده از برازش داده‌های بدست آمده می‌توان عملیات خشک کردن کدو را در سطح صنعتی مدل سازی و پیاده نمود.

مواد و روش‌ها

نمونه‌های کدو سبز به صورت تازه از بازار محلی سبزوار تهیه و در کیسه‌های پلی اتیلنی به آزمایشگاه منتقل گردید. سپس نمونه‌ها از نظر اندازه (قطر)، وزن و رنگ درجه‌بندی شد و کلیه مواد زاید، خراب و آفت زده از نمونه‌های جداسازی گردید. به منظور کاهش میزان شدت تنفس و تغییرات شیمیایی، تمامی نمونه‌ها در یخچال با دمای 4°C نگهداری شد. نمونه‌های کدو با کمک برش‌زن اتوماتیک KUHN RIKON (ساخت کشور سوئیس)، با ضخامت 10 میلی‌متر به صورت لایه نازک در آمدند. میزان رطوبت اولیه نمونه توسط روش آون‌گذاری در سه تکرار، با میانگین $93/2$ درصد بر مبنای مرطوب تعیین گردید (Dermesonlouglou *et al.*, 2007). در این مطالعه ابتدا لایه‌های نازک کدو با ضخامت 10 میلی‌متر، در پلیت‌های شیشه‌ای قرار داده شد و سپس نمونه به آون جابجایی با هوای داغ (JEIO TECH, Type F-02G) ساخت کشور کره‌جنوبی منتقل گردید. پس از رسیدن آون به شرایط پایدار، نمونه‌ها در دماهای 50 ، 60 و 80°C خشک شد. نمونه‌ها ابتدا در فاصله‌های زمانی 10 دقیقه‌ای و سپس 20 دقیقه ای با استفاده از ترازوی دیجیتالی A&D FX-

خشک کردن است، به این صورت که دمای نمونه باید با دمای محیط خشک کردن یکسان باشد (Chen *et al.*, 2012).

در بررسی Doymaz و Ismail (2011) روی ویژگی‌های خشک کردن گیلان، اثرات امولسیون قلیایی اتیل اولئات و دمای هوا (60 ، 70 و 75 درجه سانتی‌گراد) بر خصوصیات خشک کردن گیلان با استفاده از خشک‌کن با هوای داغ با سرعت جریان هوای ثابت 2 m/s بررسی شد و 5 مدل نیمه تئوری لایه نازک جهت مدل سازی سینتیکی خشک کردن استفاده گردید که مدل پیچ نسبت به سایر مدل‌ها، خصوصیات خشک کردن را به نحو بهتری توصیف نمود. ضریب نفوذ رطوبت موثر به ترتیب برای نمونه‌های مورد آزمون و شاهد در حد $10^{-10}\text{ m}^2/\text{s}$ و $5/683 \times 10^{-9}\text{ m}^2/\text{s}$ گزارش گردید. انرژی فعال سازی برای نمونه‌های شاهد و پیش تیمار شده به ترتیب در حد $49/17\text{ kJ/mol}$ و $43/05$ تعیین شد. میزان باز آبیوشی بطور قابل ملاحظه‌ای تحت تاثیر نمونه پیش تیمار و دمای هوا قرار گرفت (Doymaz & Ismail, 2011). در بررسی Akinpar (2006) با عنوان تعیین مدل مناسب خشک کردن لایه‌های نازک بر روی برش‌های پسته، سیب و کدو در یک خشک‌کن سیکلون جابجایی، 13 مدل سینتیکی مختلف که مدل‌های نیمه تئوری و یا تجربی بودند، جهت آنالیز داده‌های آزمایشی مورد استفاده قرار گرفتند و بر مبنای ضرایب تبیین (T, χ^2) مقایسه گردیدند و مدل میدلی و کوشوک¹ به عنوان بهترین مدل بر طبق T و χ^2 انتخاب گردید (Akinpar). در پژوهش Mota و همکاران (2010)، سینتیکی و خواص تغذیه‌ای خشک کردن پیاز با جابجایی هوای داغ (دماهای 30 ، 50 و 60 درجه سانتی‌گراد) بررسی گردید و سه مدل نیمه تئوری جهت توصیف تمامی ویژگی‌های خشک کردن استفاده شد (Mota *et al.*, 2010). در بررسی Alibas (2007) روی روش‌های خشک کردن توسط میکروویو، جابجایی با هوای داغ و روش ترکیبی جابجایی با هوای داغ و میکروویو، پارامترهای خشک کردن برش‌های کدو حلوايي مورد مطالعه قرار گرفت. در روش خشک کردن توسط جابجایی با هوای داغ، دماهای 50 و 75°C و سرعت

¹ Midilli-Kucuk

ارزیابی بهترین مدل سینتیکی در خشک کردن لایه ای نازک کدوی سبز

زمان توسط نرم افزار SigmaPlot 10 برازش شد. از چهار معیار ضریب رگرسیون^۱ R^2 (رابطه ۲)، ریشه میانگین مربعات خطای داده‌ها^۲ (رابطه ۳)، کمترین کای اسکوئر^۳ χ^2 (رابطه ۴) و خطای انحراف میانگین^۴ (رابطه ۵)، برای سنجش بهترین مدل استفاده شد که برای هر مدل هرچه مقدار R^2 بیشتر و مقادیر χ^2 و RMSE و MBE کمتر باشد، مدل بهتر است (Evin, Janjaia et al., 2011). (2012).

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{pre,i} - MR_{exp,avg})^2}{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{exp,avg})^2} \quad (5)$$

$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (MR_{pre,i} - MR_{exp,i})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2}{N - n} \quad (7)$$

$$MBE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MR_{pre,i} - MR_{exp,i}) \quad (8)$$

در معادلات فوق، $MR_{exp,i}$ = نسبت رطوبت کدو مشاهده شده در i امین اندازه‌گیری، $MR_{pre,i}$ = نسبت رطوبت کدو پیش‌بینی شده در i امین اندازه‌گیری، N = تعداد مشاهدات (داده‌ها)، n = تعداد ثابت‌های به کار رفته در معادله می‌باشد.

- تعیین ضریب نفوذ موثر رطوبت

امروزه در صنایع غذایی انتقال رطوبت در مواد غذایی موضوع بسیار مهمی است. تعداد مکانیسم‌های انتقال رطوبت، گسترده و اغلب پیچیده است. پدیده‌ای انتقال معمولاً برحسب نفوذ فشاری، نفوذ اجباری و نفوذ معمولی طبقه بندی می‌شود (انتقال خالص ماده بدون حرکت سیال، نفوذ معمولی نام دارد). قانون فیک^۵ اغلب برای توصیف پدیده نفوذ رطوبت بکار می‌رود.

$$\frac{\partial X}{\partial t} = D_{eff} \frac{\partial^2 X}{\partial x^2} \quad (9)$$

300 GD با دقت ۰/۰۰۱ گرم (ساخت کشور ژاپن) تا رسیدن به رطوبت تعادلی توزین گردید. تمامی آزمون‌ها با سه تکرار انجام شد و میانگین مقادیر بدست آمده جهت مدل‌سازی مورد استفاده قرار گرفت. در این مطالعه، با استفاده از قانون بقای جرم (رابطه ۱)، میزان رطوبت بر مبنای مرطوب نمونه‌ها (رابطه ۲) در طی روند خشک کردن محاسبه شد.

$$M_0 \times X_{s0} = M_t \times X_{st} \quad (1)$$

$$1 - X_{st} = X_{wb}t \quad (2)$$

که در این رابطه:

M_0 = وزن اولیه، X_{s0} = درصد ماده جامد اولیه، M_t = وزن نمونه در زمان t ، X_{st} = درصد ماده جامد در زمان t ، $X_{wb}t$ = t با استفاده از رابطه (۳) میزان رطوبت بر مبنای خشک نمونه‌ها طی روند خشک کردن محاسبه شد.

$$X_{db} = \frac{X_{wb}}{1 - X_{wb}} \quad (3)$$

که در این رابطه: X_{db} = میزان رطوبت در مبنای خشک، X_{wb} = میزان رطوبت بر مبنای مرطوب، آهنگ خروج رطوبت نیز برای کدو از رابطه (۴) محاسبه گردید (Al-Harashsheh, 2009 ; Wong, 2001).

$$DR = \frac{MC_{t+dt} - MC_t}{\Delta t} \quad (4)$$

که در این رابطه: DR = آهنگ خروج رطوبت (گرم بر دقیقه)، MC_{t+dt} = محتوای رطوبتی در زمان $t+dt$ ، MC_t = محتوای رطوبتی در زمان t ، Δt = فاصله زمانی بین توزین نمونه‌ها

- مدل‌سازی سینتیکی فرآیند خشک کردن، تعیین ضرایب نفوذ موثر و انرژی فعال سازی

به منظور مدل‌سازی نسبت رطوبت کدوی سبز در فرآیند خشک کردن کدو از ۱۰ مدل شناخته شده در جدول ۱ ارائه شده‌اند، استفاده گردید. مدل‌های رگرسیونی تغییرات نسبت رطوبت در طی خشک کردن براساس متغیر مستقل

¹ Regression Coefficient (R^2)

² Root Mean Square Error (RMSE)

³ Reduce Chi-Square (χ^2)

⁴ Mean Bias Error (MBE)

⁵ Fick's Law

جدول ۱- مدل های مورد آزمون در خشک کردن جابجایی با هوای داغ

| منبع | معادله | نام مدل | ردیف |
|--|---|------------------------------|------|
| Liu & Bakker-Arkema, 1997 | $MR = \exp(-kt)$ | Newton | ۱ |
| Diamante & Munro, 1991 | $MR = a \exp(-c(t/t^2))$ | Fick's Diffusion | ۲ |
| Hii et al., 2009 | $MR = a \exp(-ktn) + c \exp(-gtn)$ | Hii, Law & Cloke | ۳ |
| Yaldiz et al., 2001 | $MR = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-k at)$ | Approximation of diffusion | ۴ |
| Yaldiz et al., 2001- Yagcioglu et al., 1999 | $MR = a \exp(-kt) + c$ | Logarithmic | ۵ |
| Midilli et al., 2002 | $MR = a \exp(-ktn) + bt$ | Midilli-Kucuk | ۶ |
| Karathanos, 1999 | $MR = a \times \exp(-kt) + b \times \exp(-gt) + c \times \exp(-ht)$ | Modified Henderson and pabis | ۷ |
| Diamante & Munro, 1991 | $MR = \exp(-c(t/t^2)^n)$ | Modified Page -II | ۸ |
| Sharaf-Eldeen et al., 1980 | $MR = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-kat)$ | Two-term exponential | ۹ |
| Verma et al., 1985 | $MR = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-gt)$ | Verma et al | ۱۰ |

۶۷

$$MR = \frac{m_t - m_e}{m_0 - m_e} = \frac{8}{\pi^2} \exp\left[\frac{-\pi^2 D_{eff} t}{4L^2}\right] \quad (11)$$

زمانی نمودار مقدار $\ln MR$ نسبت به زمان رسم گردد، شیب خط بدست آمده را در معادله زیر قرار داده تا ضریب نفوذ مؤثر بدست آید.

$$k_0 = \frac{\pi^2 D_{eff}}{4L^2} \quad (12)$$

که در آن m_t میزان رطوبت در زمان t ، m_0 رطوبت اولیه، m_e مقدار رطوبت تعادلی، L نصف ضخامت تیغه (برحسب متر)، D_{eff} ضریب نفوذ مؤثر رطوبت (برحسب متر مربع بر ثانیه)، t زمان (برحسب ثانیه)، MR نسبت رطوبت (بدون بُعد) و k_0 شیب خط می باشد. ضریب نفوذ معمولاً با رسم داده های تجربی خشک کردن برحسب $\ln MR$ نسبت به زمان تعیین می گردد. ضریب نفوذ مؤثر، همان شیب زاویه بخش خطی است.

که در آن X مقدار رطوبت موضعی در مبنای خشک، t زمان و X شاخص فضایی^۱ می باشد. معادله ی انتشار قانون دوم فیک بر نفوذ جرم در طی دوره ی سرعت نزولی خشک کردن محصولات کشاورزی دلالت دارد (Wong, 2001). برای بکار بردن قانون فیک فرض می گردد که فرآورده ی غذایی تک بعدی است، رطوبت اولیه یکنواختی دارد و دارای حرکت درونی رطوبت مانند مقاومت عمده در برابر انتقال رطوبت است. حل معادله ی فیک برای یک تیغه^۲ به صورت زیر می باشد: ۱۰

$$MR = \frac{m_t - m_e}{m_0 - m_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left[-(2n+1)^2 \frac{\pi^2 D_{eff} t}{4L^2}\right] \quad (10)$$

ضریب نفوذ مؤثر از طریق محاسبه شیب معادله ی زیر بدست می آید:

¹ Spatial Coordinate

² Slab

اولیه تا رطوبت نهایی ۶٪ در مبنای مرطوب برای دماهای ۶۰، ۷۰ و ۸۰ °C در ضخامت ۱۰ میلی متر در شکل ۱ مشاهده می شود.

تاثیر دمای خشک کردن کدو سبز بر سرعت خشک کردن

شکل ۲ سرعت خشک کردن کدو سبز در دامنه دمایی ۶۰، ۷۰ و ۸۰ درجه سانتی گراد در ضخامت ۱۰ میلی متر را نشان می دهد. مشاهده گردید که افزایش دما از ۶۰ به ۷۰ و از ۷۰ به ۸۰ درجه سانتی گراد، باعث افزایش آهنگ خشک کردن می شود. مقادیر سرعت خشک کردن کدو سبز در دماهای مورد بررسی در جدول ۱ نشان داده شده است.

مدل سازی سینتیک خشک کردن لایه ای نازک کدو سبز

در این مطالعه، ده مدل تئوری خشک کردن لایه ای نازک کدو سبز با ضخامت ۱۰ میلی متر در دامنه دمایی ۶۰ تا ۸۰ درجه سانتی گراد مورد برآزش قرار گرفت. پارامترهای آماری مورد آزمون، معیار ضریب تبیین، ریشه میانگین مربعات خطا، کاهش کای اسکوئر و خطای انحراف میانگین بود. مقادیر آنالیز آماری برای هر یک از این پارامترها در جدول ۲ ارائه شده است.

در تمامی حالت ها مقدار ضریب تبیین برای مدل های سینتیکی تحت بررسی بیشتر از ۰/۹۰۳ بود، همچنین حداقل مقدار کای اسکوئر، ریشه میانگین مربعات خطا و خطای انحراف میانگین نیز برای اغلب مدل های سینتیکی برآزش شده به ترتیب $10^{-5} \times 10^{-8}$ ، $10^{-6} \times 10^{-7}$ و $10^{-6} \times 10^{-3}$ بود.

محاسبه انرژی اکتیواسیون

وابستگی قابلیت نفوذ مؤثر رطوبت با دما، با معادله آرنیوس بیان می شود.

$$D^{\circ}_{\text{eff}} = D^{\circ} \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (13)$$

$$\ln D^{\circ}_{\text{eff}} = \ln D^{\circ} + \frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{T}\right) \quad (14)$$

که در آن D_0 ضریب پیش نمایی معادله ی آرنیوس E_a ، انرژی فعال سازی برای نفوذ رطوبت R ، ثابت جهانی گازهای ایده آل T ، دمای مطلق برحسب کلوین می باشد. انرژی فعال سازی را می توان با ترسیم $\ln D_{\text{eff}}$ بر حسب $1/T$ تعیین نمود.

آنالیز حساسیت مدل

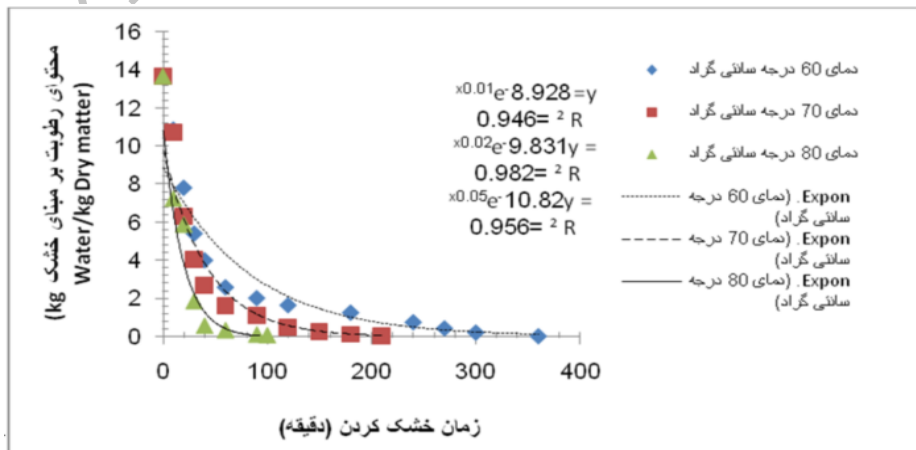
جهت تعیین میزان حساسیت مدل شبیه سازی شده توسط نرم افزار، نمودار داده های پیش بینی شده بر حسب داده های تجربی رسم گردید. بالاتر بودن مقدار شیب خط رگرسیون و ضریب تبیین نشان دهنده دقت و صحت مدل در پیش گویی فرآیند خشک کردن توسط مدل مذکور می باشد.

۶۸

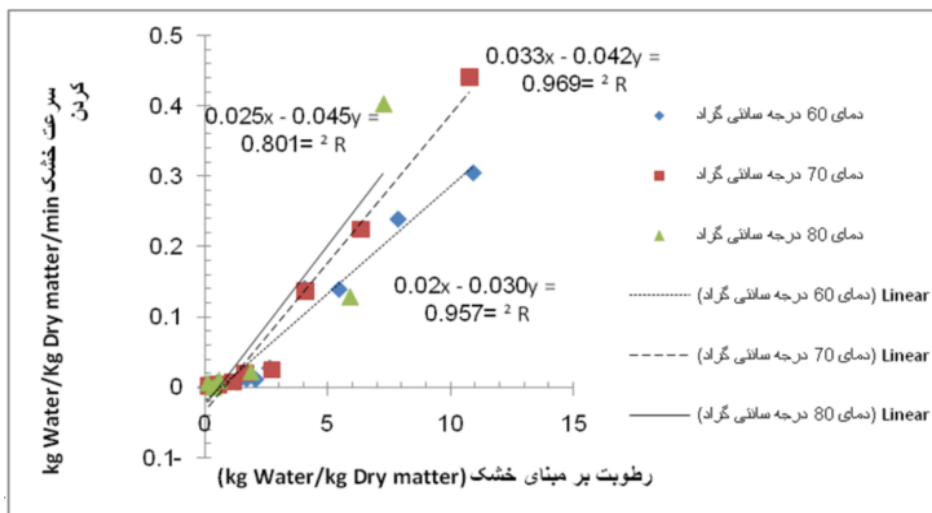
یافته ها

تاثیر دما بر زمان خشک کردن کدو سبز

میزان رطوبت پس از کاهش محتوای رطوبت کدو سبز، پس از توزین نمونه ها در فواصل زمانی مشخص ثبت گردید. زمان لازم جهت خشک کردن کدو سبز از رطوبت



شکل ۱- تاثیر دماهای مختلف بر سینتیک خشک کردن لایه ای نازک کدو سبز با ضخامت ۱۰ میلی متر



شکل ۲- سرعت خشک کردن لایه ای نازک کدو با ضخامت ۱۰ میلی متر در دماهای ۶۰، ۷۰ و ۸۰ درجه سانتی گراد

جدول ۲- نتایج داده های مدل های خشک کردن لایه ای نازک کدوی سبز در دماهای ۶۰، ۷۰ و ۸۰°C و ضخامت ۱۰ میلی متر

| ردیف | نام مدل | دما (°C) | R ² | χ ² | RMSE | MBE |
|------|------------------------------|----------|----------------|-----------------------|-------------|-------------|
| ۱ | Newton | ۶۰ | ۰/۹۷۸۷ | ۰/۰۰۲۱۹ | ۰/۰۴۴۹۶۷ | -۰/۰۲۰۳۵۲ |
| | | ۷۰ | ۰/۹۷۶۱ | ۰/۱۰۱۳۸۳ | ۰/۰۳۵۴۵۶ | -۰/۰۰۸۲۵۹ |
| | | ۸۰ | ۰/۹۳۲ | ۰/۱۴۵۶۹۹ | ۰/۳۵۷۰۴۹ | ۰/۱۳۱۰۰۶ |
| ۲ | Fick's Diffusion | ۶۰ | ۰/۹۷۴۴ | ۰/۰۰۲۶۲۸ | ۰/۰۴۴۹۶۲ | -۰/۰۲۰۴۱ |
| | | ۷۰ | ۰/۹۷۶۱ | ۰/۱۷۸۴۰۹ | ۰/۰۳۵۴۵۶ | -۰/۰۰۸۲۵۹ |
| | | ۸۰ | ۰/۸۹۸۱ | ۰/۲۱۲۰۵۳ | ۰/۳۶۴۰۵۱ | ۰/۱۳۳۳۸۹ |
| ۳ | Hii, Law & Cloke | ۶۰ | ۰/۹۹۹۲ | ۸/۲۴×۱۰ ^{-۵} | ۰/۰۰۷۱۲۰۶۶ | ۰/۰۰۰۹۵۲۸۰۹ |
| | | ۷۰ | ۰/۹۹۹۲ | ۰/۲۳۲۷۴۲ | ۰/۰۰۷۲۶۳۸۵ | ۳/۸۹۸۱۸E-۰۵ |
| | | ۸۰ | ۰/۹۸۵۳ | ۰/۰۷۱۸۱۵ | ۰/۰۵۹۳۳۵۸۳ | ۰/۰۱۴۴۰۵۴۲۵ |
| ۴ | Approximation of diffusion | ۶۰ | ۰/۹۹۱۵ | ۰/۰۰۰۸۷۳ | ۰/۰۲۵۹۲ | -۰/۰۰۱۶۴۶ |
| | | ۷۰ | ۰/۹۹۲۳ | ۰/۱۲۵۸۹ | ۰/۰۲۵۴۴۱ | -۰/۰۱۰۴۴۶ |
| | | ۸۰ | ۰/۹۰۹ | ۰/۲۰۳۵۵ | ۰/۳۵۶۶۷۹ | ۰/۱۲۳۸۸۲ |
| ۵ | Logarithmic | ۶۰ | ۰/۹۸۷۱ | ۰/۰۰۱۳۲۶ | ۰/۰۳۱۹۳۹۱۰۴ | -۱/۰۳۶۷E-۰۶ |
| | | ۷۰ | ۰/۹۸۷۳ | ۰/۱۹۷۱۹۸ | ۰/۰۳۲۷۷۶۱۷۷ | ۴/۰۲۷۲۷E-۰۶ |
| | | ۸۰ | ۰/۹۰۳ | ۰/۱۹۲۶۲۳ | ۰/۳۴۶۹۷۱۴۸۵ | ۰/۱۲۱۳۱۲۵۶۳ |
| ۶ | Midilli-Kucuk | ۶۰ | ۰/۹۸۰۹ | ۰/۰۰۱۹۶ | ۰/۰۳۶۸۵۳ | -۰/۰۰۳۶۶۲ |
| | | ۷۰ | ۰/۹۸۸۳ | ۰/۰۶۲۰۲۶ | ۰/۰۲۹۴۰۳ | -۰/۰۰۳۵۰۵ |
| | | ۸۰ | ۰/۹۹۲۱ | ۰/۰۷۱۹۷۹ | ۰/۱۸۹۷۰۹ | ۰/۰۶۴۶۵۶ |
| ۷ | Modified Henderson and Pabis | ۶۰ | ۰/۹۹۷ | ۰/۰۰۰۳۰۳ | ۰/۰۱۲۷۶۹ | -۰/۰۰۱۲۰۸ |
| | | ۷۰ | ۰/۹۹۲ | ۰/۳۲۱۹۵۷ | ۰/۰۰۶۳۲۶ | ۰/۰۰۰۸۹۵ |
| | | ۸۰ | ۰/۹۹۴۵ | ۰/۵۱۵۵۵۲ | ۰/۳۵۹۰۱ | ۰/۱۲۴۹۱۲ |
| ۸ | Modified Page-II | ۶۰ | ۰/۹۷۴۴ | ۰/۰۰۲۶۲۹ | ۰/۰۴۴۹۶۶ | -۰/۰۲۰۳۵۲ |
| | | ۷۰ | ۰/۹۸۵۱ | ۰/۱۲۶۷۲۹ | ۰/۰۳۵۴۵۶ | -۰/۰۰۸۲۵۹ |
| | | ۸۰ | ۰/۸۹۸۱ | ۰/۲۰۳۹۷۹ | ۰/۳۵۷۰۴۹ | ۰/۱۳۱۰۰۶ |
| ۹ | Two-term exponential | ۶۰ | ۰/۹۸۲۷ | ۰/۰۰۱۷۷۶ | ۰/۰۳۸۷۶۱ | -۰/۰۱۴۷۴۲ |
| | | ۷۰ | ۰/۹۸۹۶ | ۰/۱۱۲۳۲۴ | ۰/۰۳۱۵۰۱ | -۰/۰۱۳۱۴ |
| | | ۸۰ | ۰/۹۲۳۲ | ۰/۱۶۹۷۹ | ۰/۳۵۶۸۵۱ | ۰/۱۳۰۰۴۳ |
| ۱۰ | Verma et al | ۶۰ | ۰/۹۹۱۵ | ۰/۰۰۰۸۷۳ | ۰/۰۲۵۹۱۵ | -۰/۰۰۱۶۷ |
| | | ۷۰ | ۰/۹۹۲۳ | ۰/۱۲۵۸۹ | ۰/۰۲۵۴۴۱ | -۰/۰۱۰۴۴۶ |
| | | ۸۰ | ۰/۹۰۸۷ | ۰/۲۰۳۵۶۳ | ۰/۳۵۶۶۹ | ۰/۱۲۳۹۷ |

محصولات کشاورزی گزارش شده است، به طوری که مقدار انرژی فعال سازی برای میوه چامپداک، kJ/mol $6/803$ ، کیوی، kJ/mol $38/6$ ، گیلاس (تحت تیمار امولسیون قلیایی اتیل اولئات) برای نمونه های شاهد و پیش تیمار شده به ترتیب در حد kJ/mol $49/17$ و $43/05$ ، میوه به (دماهای 35 ، 45 و $55^{\circ}C$) در دامنه $33/83$ تا kJ/mol $41/52$ محاسبه گردید (Chong *et al.*, 2008; Doymaz and Ismail, 2011).

بحث

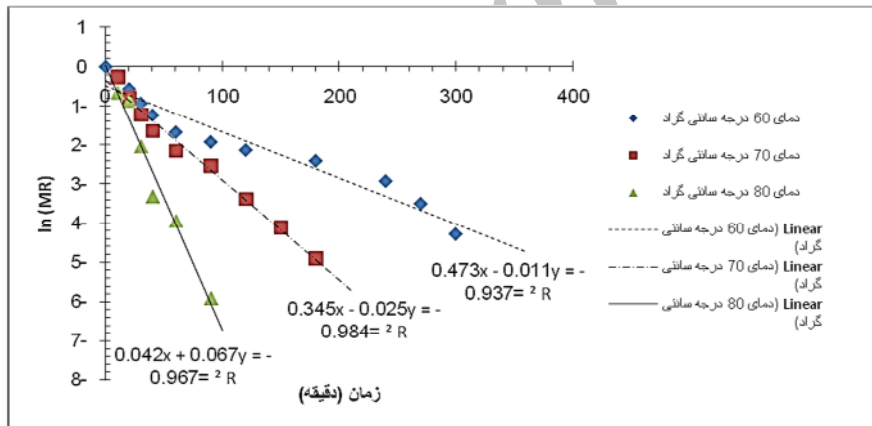
نتایج حاصل از بررسی رطوبت در دما و زمان های مختلف خشک کردن نشان داد که دمای خشک کردن اثر قابل ملاحظه ای بر زمان خشک کردن دارد، همچنین زمان لازم جهت خشک کردن کدو سبز در ضخامت 10 میلی متر در دماهای 60 ، 70 و $80^{\circ}C$ به ترتیب افزایش می یابد. نتایج مشابه توسط سایر پژوهشگران روی سبزیجات مختلف مشاهده گردید (Janjaia *et al.*, 2011; Evin, 2012).

- ضرایب نفوذ موثر رطوبت

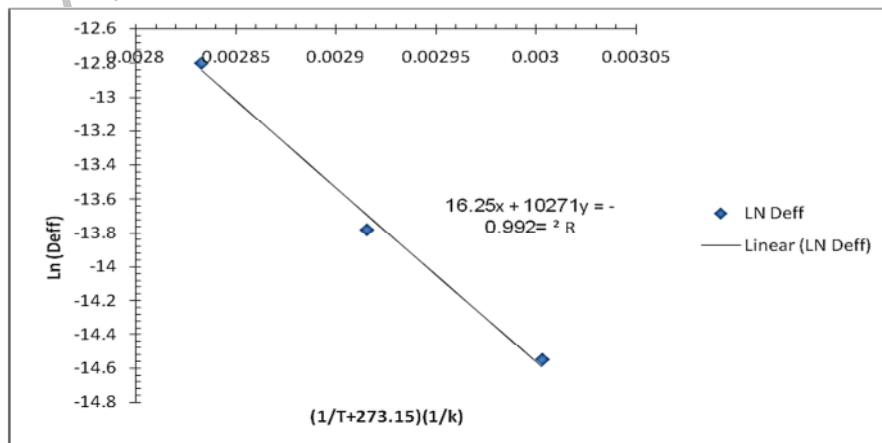
برای تعیین میزان ضرایب نفوذ موثر خشک کردن لایه ای نازک کدو سبز با روش جابجایی با هوای داغ، لگاریتم نسبت رطوبت بر مبنای زمان فرآیند در شکل ۳ ترسیم شد. در شکل ۴ ضریب نفوذ موثر رطوبت لایه های نازک کدو سبز خشک شده ارائه شده است. ضرایب نفوذ موثر خشک کردن لایه ای نازک کدو، در دمای $60^{\circ}C$ در حد $(m^2/s) \times 10^{-7}$ $4/7965$ ، دمای $70^{\circ}C$ $(m^2/s) \times 10^{-7}$ $2/03412$ و دمای $80^{\circ}C$ $(m^2/s) \times 10^{-6}$ $2/74750$ محاسبه گردید.

- انرژی فعال سازی

انرژی فعال سازی از طریق رسم منحنی $\ln D_{eff}$ در مقابل دما $(1/(T+273.15))$ بدست آمد. مقدار انرژی فعال سازی در دامنه دمایی 60 تا 80 درجه سانتی گراد با ضخامت 10 میلی متر برای لایه های نازک کدو سبز در حد (kJ/mol) $85/45$ بود. مقدار انرژی فعال سازی توسط محققین برای



شکل ۳- نمودار خطی تغییرات لگاریتم نسبت رطوبت به زمان در تعیین ضرایب نفوذ موثر



شکل ۴- رابطه نفوذ موثر رطوبت و دمای مطلق بدست آمده از معادله آرنیوس

ضرایب نفوذ رطوبت در دامنه $10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ تا $3/79 \times 10^{-12}$ تا $7/53 \times 10^{-12}$ تعیین گردید. برای گیلاس، ضریب نفوذ رطوبت موثر به ترتیب برای نمونه‌های مورد آزمایش (اتیل اولئات) و شاهد در دامنه $10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ و $5/683 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ (در $10 \times 1/544$ گزارش گردید. برای برش‌های میوه به (در دماهای ۳۵، ۴۵ و 55°C)، بین $10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ و $0/65 \times 10^{-10}$ و $6/92 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ بود (Chong et al., 2008; Therdthai & Zhou, 2009; Doymaz and Ismail, 2011).

مقدار انرژی فعال‌سازی توسط محققین برای محصولات کشاورزی گزارش شده است، به طوری که مقدار انرژی فعال‌سازی برای میوه چامپداک، $6/803 \text{ kJ/mol}$ کیوی، $38/6 \text{ kJ/mol}$ ، گیلاس (تحت تیمار امولسیون قلیایی اتیل اولئات) برای نمونه‌های شاهد و پیش تیمار شده به ترتیب در حد $49/17 \text{ kJ/mol}$ و $43/05$ ، میوه به (دماهای ۳۵، ۴۵ و 55°C) در دامنه $33/83$ تا $33/83 \text{ kJ/mol}$ (Chong et al., 2008;) محاسبه گردید (Doymaz and Ismail, 2011).

نتیجه گیری

در این بررسی، تاثیر دما بر خصوصیات خشک‌کردن لایه‌ای نازک کدو سبز مطالعه گردید. افزایش دمای خشک کردن سبب کاهش زمان و بالا رفتن سرعت خشک کردن و ضریب نفوذ موثر رطوبت موثر گردید، به طوری که کدو سبز خشک شده با دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد، در کمترین زمان، خشک گردید.

نتایج مدل‌سازی لایه نازک نشان داد که در بین مدل‌های مورد بررسی، مدل هایلا و کلاک، به دلیل دارا بودن حداکثر R^2 و حداقل χ^2 و RMSE به عنوان بهترین مدل برای خشک کردن لایه ای نازک کدو سبز محسوب گردید که می‌توان از آن در توصیف پدیده انتقال رطوبت کدو استفاده نمود. ضرایب نفوذ موثر خشک کردن لایه‌ای نازک کدو، در دمای 60°C در حد (m^2/s) $2/03412 \times 10^{-7}$ و $4/7965 \times 10^{-7}$ ، دمای 70°C ، (m^2/s) $2/03412 \times 10^{-7}$ و $4/7965 \times 10^{-7}$ ، دمای 80°C ، (m^2/s) $2/7475 \times 10^{-6}$ محاسبه گردید و میزان انرژی فعال‌سازی در حد (kJ/mol) $85/45$ تعیین شد.

منابع

Al-Harabsheh, M., Al-Muhtaseb, A. H. &

بررسی ضرایب همبستگی نمودار سرعت خشک کردن کدو سبز نشان داد که حداقل مقدار در کلیه نتایج $0/801$ می‌باشد. با توجه به این مطلب که در شروع فرآیند خشک کردن، رطوبت اولیه محصول زیاد می‌باشد، آهنگ از دست دادن رطوبت بالا خواهد بود. اما به تدریج با گذشت زمان و کاهش رطوبت کدو سبز، سرعت کاهش رطوبت نیز کاهش می‌یابد. البته با توجه به اینکه محصول بیشتر رطوبت خود را در مراحل اولیه فرآیند از دست می‌دهد، اما زمان زیادی برای از دست‌دادن رطوبت باقی‌مانده لازم دارد. نتایج مشابه توسط سایر پژوهشگران روی سبزیجات مختلف مشاهده گردید (Janjaia et al., 2011; Figiel, 2010; Evin, 2012; Chen et al., 2012).

نتایج مدل‌سازی سینتیک خشک کردن لایه‌ای نازک کدو سبز نشان داد که مدل هایلا و کلاک دارای بالاترین R^2 و کمترین χ^2 و RMSE می‌باشد. بنابراین بالا بودن مقدار ضریب تبیین و کم بودن مقدار کای اسکوئر و ریشه میانگین مربعات خطا مهمترین دلیل در انتخاب بهترین مدل مورد برازش می‌باشد. نتایج مشابه توسط سایر پژوهشگران روی سبزیجات مختلف بدست آمده است (Janjaia et al., 2011; Evin, 2012). با توجه به شاخص‌های بدست آمده در جدول (۲)، مشخص می‌شود که مدل هایلا و کلاک در دماهای مورد بررسی نسبت به مدل‌های دیگر دارای برازش بهتری می‌باشد. بنابراین می‌توان این مدل را در دماهای مذکور برای خشک کردن کدو سبز با استفاده از جابجایی با هوای داغ توصیه نمود.

نتایج ضرایب نفوذ موثر رطوبت نشان داد که با افزایش دمای خشک‌کردن، ضریب نفوذ موثر رطوبت افزایش می‌یابد، که این امر توسط حرکت یا انتقال جرم از منافذ موئینه ماده غذایی توصیف می‌گردد. همانطور که از شکل ۴ مشاهده می‌گردد، در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد بالاترین مقدار ضریب نفوذ موثر رطوبت بدست آمد. مقادیر D_{eff} به طور مشابه توسط سایر محققین برای سایر محصولات کشاورزی گزارش شده است. برای میوه چامپداک خشک شده، $4/861 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ بود. برای برگ‌های نعنای ضرایب نفوذ موثر رطوبت در دماهای 60°C و 70°C ، به ترتیب $0/9648 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$ و $1/19 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$ بدست آمد. برای کیوی با ضخامت ۱۰ میلی‌متر توسط خشک‌کردن با هوای داغ (دماهای ۴۰، ۵۰، ۶۰ و 70°C درجه سانتی‌گراد)

- Magee, T. R. A. (2009). Microwave drying kinetics of tomato pomace: Effect of osmotic dehydration. *Chemical Engineering and Processing*, 48: 524–531.
- Akpinar, E. K. (2006). Determination of suitable thin layer drying curve model for some vegetables and fruits. *Journal of Food Engineering* 73, 75–84.
- Alibas, I. (2007). Microwave, air and combined microwave–air-drying parameters of pumpkin slices. *LWT* 40: 1445–1451
- Babetto, A. C., Freire., F. B., Barrozo, M. A. S. & Freire, J. T. (2011). Drying of garlic slices: Kinetics and nonlinearity measures for selecting the best equilibrium moisture content equation. *Journal of Food Engineering* 107:347–352.
- Barrozo, M. A. S., Souza, A. M., Costa, S. M. & Murata, V. V. (2001). Simultaneous heat and mass transfer between air and soybean seeds in a concurrent moving bed. *International Journal of Food Science and Technology* 36 (4), 393–399.
- Chen, D., Zheng, Y. & Xifeng, Z. (2012). Determination of effective moisture diffusivity and drying kinetics for poplar sawdust by thermogravimetric analysis under isothermal condition. *Bioresource Technology* 107:451–455.
- Chong, C. H., Lim Law, C., Cloke, M., Lik Hii, C., Chuah Abdullah, L. & Wan Daud, W. R. (2008). Drying kinetics and product quality of dried Chempedak. *Journal of Food Engineering* 88: 522–527.
- Dermesonlouoglou, E. K., Giannakourou, M. C. & Taoukis, P. S. (2007). Kinetic modelling of the degradation of quality of osmo-dehydrofrozen tomatoes during storage. *Food Chemistry* 103: 985–993.
- Diamante, L. M. & Munro, P. A. (1991). Mathematical modelling of hot air drying of sweet potato slices. *Int J Food Sci Technol*, 26-99.
- Doymaz, I. & Ismail, O. (2011). Drying characteristics of sweet cherry. *Food and Bioproducts processing*. 89: 31–38.
- Evin, D. (2012). Thin layer drying kinetics of *Gundelia tournefortii* L. *Food and Bioproducts processing*. 90: 323–332.
- Figiel, A. (2010). Drying kinetics and quality of beetroots dehydrated by combination of convective and vacuum-microwave methods. *Journal of Food Engineering*. 98: 461–470.
- Janjaia, S., Precopped, M., Lamlerta, N., Mahayotheeb, B., Balac, B. K., Nagle, D. M. & Müller, J. (2011). Thin-layer drying of litchi (*Litchi chinensis* Sonn.). *Food and Bioproducts processing*. 89: 194–201.
- Karathanos, V. T. (1999). Determination of water content of dried fruits by drying kinetics. *Journal of Food Engineering*, 39: 337-344.
- Krokida, M. K., Karathanos, V. T., Maroulis, Z. B. & Marinou-Kouris, D. (2003). Drying kinetics of some vegetables. *Journal of Food Engineering*. 59: 391-403.
- Liu, Q. & Bakker-Arkema, F. W. (1997). Stochastic modelling of grain drying: model development. *J. Agric. Eng. Res*, 66:275-280.
- Mota, C. L., Lucianoa, C., Diasa, A., Barroca, M. J. & Guinéa, R. P. F. (2010). Convective drying of onion: Kinetics and nutritional evaluation. *Food and Bioproducts processing* 88: 115–123.
- Neves, F. I. G., Vieira, M. C. & Silva, C. L. M. (2012). Inactivation kinetics of peroxidase in zucchini (*Cucurbita pepo* L.) by heat and UV-C radiation. *Innovative Food Science and Emerging Technologies* 13: 158–162.
- Sharaf-Eldeen, Y. I., Blaisdell, J. L. & Hamdy, M. Y. (1980). A model for ear corn drying. *Trans. ASAE*, 23: 1261-1271.
- Therdthai, N. & Zhou, W. (2009). Characterization of microwave vacuum drying and hot air drying of mint leaves (*Mentha cordifolia* Opiz ex Fresen). *Journal of Food Engineering*. 91: 482–489.
- Togrul, I. T. & Pehlivan, D. (2003). Modelling of drying kinetics of single apricot. *Journal of Food Engineering*, 58: 23-32.
- Verma, L. R., Bucklin, R. A., Endan, J. B. & Wratten, F. T. (1985). Effect of drying air parameters on rice drying models. *Trans ASAE* 28:296–301.
- Wong, J. Y. (2001). *Theory of Ground vehicles*. (3rd ed). John Wiley and Sons, Inc. www.FAOSTAT.org
- Yaldiz, O., Ertekin, C. & Uzun, H. I. (2001). Mathematical modelling of thin layer solar drying of sultana grapes. *Energy – Int. J*, 26: 457-465.
- Yagcioglu, A., Degirmencioglu, A. & Cagatay, F. (1999). Drying characteristic of laurel leaves under different conditions. *Proc. 7th Int. Cong. Agric. Mechanization and Energy*, May 26-27, (Ed. A. Bastancelik). Adana, Turkey.