

فصلنامه فناوریهای نوین غذایی، سال چهارم، شماره ۱۴، صفحه۱۱۴-۱۰۱، زمستان ۱۳۹۵

مدلسازی المان محدود خشک شدن همرفتی موز با اثر چروکیدگی شعاعی به روش اویلر-لاگرانژ دلخواه

اسماعیل سیدآبادی¹، مهدی خجسته پور^{2*} ، محمد حسین عباسپور فرد³

1. دانشجوی دکتری، گروه مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد 2. دانشیار، گروه مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد 3. استاد، گروه مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد

(تاريخ دريافت: 95/7/28، تاريخ پذيرش: 95/9/14)

چکیدہ

روش المان محدود برای مدلسازی انتقال هم زمان جرم و حرارت در نمونه های استوانه ای موز مورد استفاده قرار گرفت. در مدل ارائه شده خواص ترموفیزیکی محصول به صورت تابعی از رطوبت و دمای محصول در طول فرایند در نظر گرفته شد. مدلسازی به کمک نرم افزار تجاری COMSOL نسخه 5/1 و به صورت تقارن محوری انجام شد. از روش اویلر لاگرانژ دلخواه (ALE) برای تعریف مرز متحرک جهت احتساب چروکیدگی در مدل استفاده شد. برای راستی آزمایی مدل، نمونه های موز در شرایط مختلف جریف محتوی در طول فرایند در نظر گرانژ دلخواه (ALE) برای تعریف مرز متحرک جهت احتساب چروکیدگی در مدل استفاده شد. برای راستی آزمایی مدل، نمونه های موز در شرایط مختلف خشک شدند و تغییرات دما در مرکز نمونه و میانگین محتوی رطوبت نمونه ها با مقادیر پیش بینی شده توسط مدل مقایسه شدند. نتایج نشان داد درصد میانگین خطای نسبی برای تخمین رطوبت و دما به ترتیب در محدوده / 8/83-2013 و ٪ 1/2-1/2 بود. بنابراین مدل ارائه شده قادر است محتوی رطوبت و دما به ترتیب در محدوده / 8/83-2013 و ٪ 1/2-1/2 پیش بینی کند. با توجه به اهمیت پیش بینی تغییرات دما و رطوبت، مدل ارائه شده می تواند به عنور موفقیت آمیزی کردن فراین داد خشک شدن محرو موفقیت آمیزی اود. بنابراین مدل ارائه شده قادر است محتوی رطوبت و دمای مرکز نمونه را در طول فرایند خشک شدن به طور موفقیت آمیزی دردن فرایند خشک کردن موز از نظر بازده آن وکیفیت محصول مورد استفاده قرار گیرد. انتظار می رود که مدل مذکور به راحتی کردن فرایند خشک کردن موز از نظر بازده آن وکیفیت محصول مورد استفاده قرار گیرد. انتظار می رود که مدل مذکور به راحتی کردن فرایند خشک کردن محتول های مشابه با شکل استوانه یا باشد.

واژههای کلیدی: المان محدود، چروکیدگی، خشککن همرفتی، روش اویلر لاگرانژ دلخواه، موز.

* نویسنده مسئول: mkhpour@um.ac.ir

1– مقدمه

موز بهدلیل بافت نسبتا نرم و درصد بالای رطوبت پس از برداشت ماندگاری کمی داشته و بهسرعت فاسد میشود. خشک کردن یکی از بهترین روشهای افزایش انبارمانی انواع محصولات کشاورزی است. در بین آنها، خشک کردن با هوای داغ رایجترین روش است که برای محصولات مختلف به کار گرفته شده است [1-1].

محصولات کشاورزی و از جمله موز بهدلیل محتوی رطوبت خشک کردن موز [11، 21، 22] و سایر بهنسبت بالا در هنگام خشک شدن منقبض و چروکیده لحاظ شده است اما آنها نفوذ رطوبت و می شوند. چروکیدگی زمانی اتفاق می افتد که گرادیان رطوبت را در شرایط ایزوترمال در نظر گرفته اند. ایجاد شده در محصول باعث ایجاد تنش هایی در ساختار شبکه معادلات انتقال حرارت حذف شده و فرایند ماده شده طوری که باعث به هم ریختن آن و جمع شدن با حل معادله انتقال جرم بیان شده است. محصول به سمت داخل می شود [4].

> در طول فرایند خشک شدن، چروکیدگی با کاهش سطح جانبی محصول [5] و تغییر مسیرهای انتقال آب درون محصول [8-6] تاثیر قابل توجهای بر نرخ انتقال حرارت و رطوبت دارد. همچنین چروکیدگی بر کیفیت محصول نهایی و در نتیجه بازار پسندی آن موثر است [9]. بنابراین چروکیدگی محصول نیز بایستی در مدلسازی فرایندهای خشک کردن مورد توجه قرار گیرد و به منظور پیشبینی دقیق دما و محتوی رطوبت محصول در معادلات انتقال جرم و حرارت وارد شود [10، 11].

> مدلهای تجربی و مدلهای نفوذ به وفور برای خشک کردن همرفتی موز در حالت میوه کامل [14-12] و میوه ورقه شده [17-15] به کار گرفته شدهاند. در این مدلها اثر چروکیدگی ناچیز فرض شده است. اگرچه مدلهای تجربی بهراحتی در صنعت به کار گرفته می شوند، اما استفاده از آنها محدود به شرایط خاصی است که در آن شرایط پارامترهای مدل به دست آمدهاند [18]. برخی از محققین مدلی تحلیلی برای پیش بینی دما و رطوبت موز هنگام خشک شدن در شرایط خلا و مادون قرمز ارائه کردهاند اما در مدلسازی ایشان از چروکیدگی محصول صرف نظر شده است [19].

> جهت شبیه سازی فرایند خشک شدن بایستی دو معادلات دیفرانسیل جزئی (PDE) شامل معادله فوریه و معادله فیک به تر تیب برای انتقال حرارت و انتقال جرم به صورت همزمان حل گردند. با توجه به میزان پیچیدگی، این معادلات را

میتوان با روشهای تحلیلی یا روشهای عددی حل کرد [20]. اگر خواص ترموفیزیکی محصول وابسته به دما و رطوبت در نظر گرفته شوند، معادلات مذکور غیرخطی و وابسته بههم میشوند. هم چنین با در نظر گرفتن چروکیدگی این معادلات به قدری پیچیده میشوند که در عمل با روشهای تحلیلی قابل حل نبوده و میبایستی با روشهای عددی آنها را حل کرد. چروکیدگی محصول در مطالعات برخی از محققین برای خشک کردن موز [11، 21، 22] و سایر میوهها [23، 24] لحاظ شده است اما آنها نفوذ رطوبت و فرایند خشک شدن را در شرایط ایزوترمال در نظر گرفتهاند. که در این صورت، معادلات انتقال حرارت حذف شده و فرایند خشک کردن صرفا با حل معادله انتقال جرم بیان شده است.

روش المان محدود (FEM) روشی عددی است که برای حل دقیق مسائل پیچیده مهندسی به کار گرفته می شود. مسائلی که با روشهای تحلیلی قابل حل نیستند و یا حل آنها مستلزم آزمایشهای پر هزینه است، با استفاده از این روش به حل قابل قبولی می سند [25]. با در نظر گرفتن چروکیدگی محصول در شبیه سازی خشک شدن، معادلات دیفرانسیل جزیی و غیر خطی انتقال حرارت و جرم بایستی در شرایط مرز متحرک حل شوند. این مسئله با استفاده از روش المان محدود با فرمول بندی اويلر-لاگرانژ دلخواه (ALE) قابل حل ميباشد. روش ALE بر پایه مزایای دو روش اویلری¹ و لاگرانژی² بنا نهاده شده است که در آن گرههای المانهای محاسباتی میتوانند با نقاط نظیر بر روى ماده بهصورت لاگرانژى حركت كنند يا بهصورت اويلرى ثابت باشند و یا در مسیرهای مشخص دلخواهی حرکت کنند تا با تغییر مکان نودهای نظیر مادی سازگار شوند [26]. جزئیات بیشتر درباره این روش در تحقیقات آناهید و خویی [27] و تاسیروگلو و همکاران [28] ارائه شده و در این تحقیق از روش ALE جهت اعمال چروکیدگی در مدل استفاده گردیده است. به تازگی از این روش برای شبیهسازی خشک شدن بعضی از محصولات كشاورزى استفاده شده است. بهعنوان مثال أپراجيتا و همکاران [29] مدل یک بعدی خشک شدن سیب زمینی را در خشککن همرفتی ارائه دادند. ارزیابی مدل آنها از طریق مقایسه با نتایج آزمایشگاهی صورت گرفت و مدل آنها

^{1.} Eulerian approach 2. Lagrangian approach

تایید شد. کورسیو واورسا [30] مدلی را برای تخمین میزان چروکیدگی محصول در طول خشک شدن ارائه کردند. تحقیق دیگری برای بررسی خشک شدن همرفتی آلو بخارا توسط سبارز [31] ارائه گردید. در تحقیق او میوه بهصورت ترکیب در این رابطه M_R نسبت رطوبت، M_0 M_0 و M_1 بهترتیب دو ماده با خواص مختلف (گوشت و هسته) در نظر گرفته شده محتوی رطوبت در زمان t، محتوی رطوبت اولیه و محتوی و از رویکرد اویلر لاگرانژ دلخواه برای احتساب چروکیدگی در رطوبت تعادلی میباشد. از یک خشک کن همرفتی مجهز به مدل استفاده شد.

> بررسی منابع نشان میدهد که چروکیدگی موز هنگام خشک شدن قابل توجه بوده و تاکنون مطالعهای در خصوص اعمال آن در مدلسازی فرایند خشک کردن انجام نشده است، [34] قابل مشاهده است. لذا تحقيق حاضر با هدف شبيهسازى انتقال همزمان حرارت و جرم در خشک شدن همرفتی نمونههای موز با در نظر گرفتن اثر چروکیدگی شعاعی انجام گرفت. بدین منظور از روش المان محدود با فرمول بندى اويلر لاگرانژ دلخواه (ALE) استفاده شد. همچنین مدل ارائه شده از طریق مقایسه با دادههای آزمایشگاهی راستی آزمایی شد. مدل ارائه شده قادر است تغییرات دما و رطوبت درون نمونههای موز را در شرایط مختلف خشک شدن بهطور دقیق پیش بینی کند.

2– مواد و روشها

موزهای رسیده (واریته کاوندیش) از بازار شهر مشهد خریداری شدند. نمونهها با دست پوست شده و با ابزار برش مخصوص بهصورت نمونههای استوانهای شکل با ضخامت وقطر بهترتیب 5 و30 میلیمتر برش خوردند. جهت برشها عمود بر محور طولی میوه بود. محتوی رطوبت اولیه نمونهها با روش آون در دمای 105 درجه سانتی گراد به مدت 48 ساعت تعیین شد [32]. محتوى رطوبت اوليه نمونهها 79 درصد بر پايه تر بەدست آمد.

آزمایشهای خشک کردن نمونههای موز جهت بررسی فرایند خشک شدن و روند چروکیدگی محصول صورت گرفت. رطوبت محصول جهت تعریف شبکه متحرک (moving mesh) به منظور اعتبار سنجی مدل، نتایج آزمایشگاهی دما و محتوی برای تغییرات دامنه محاسباتی در مدل المان محدود استفاده رطوبت با مقادیر پیشبینی شده توسط مدل مقایسه شدند. گردید. خشک کردن از محتوی رطوبت اولیه تا محتوی رطوبت تعادلی که در آن تغییر رطوبت با گذشت زمان مشاهده نمی شد، ادامه یافت. سپس نسبت رطوبت (بدون بعد) از رابطه (1) بهدست

$$\bar{MR} = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e}$$
(1)

سیستم کنترل کامپیوتری جهت خشک کردن نمونههای موز در دماهای 80، 90 و 100 درجه سانتی گراد استفاده شد. جزییات خشک کن مورد استفاده در گزارش نادیان و همکاران

تغییرات محتوی رطوبت نمونههای موز در طول فرایند خشک شدن با توزین پیوسته آن تعیین شد. بدین منظور از ترازوی دیجیتال A&D ساخت کشور ژاپن و با دقت 0/01 گرم استفاده شد. ترازو از طریق پورت RS232 دادههای وزن را با فاصله زمانی 3 ثانیه به کامپیوتر ارسال میکرد. همچنین به منظور تعیین دمای مرکز نمونههای موز از ترمومتر شرکت لوترون (مدل TM-947 SD) مجهز به ديتالاگر و اتصال هم زمان چهار عدد ترموکوپل نوع K استفاده شد. ترموکوپلها در مرکز هندسی نمونهها نصب شده و با فاصله زمانی 30 ثانیه تغييرات دما را ثبت ميكردند.

اندازه گیری میزان چروکیدگی محصول در طول فرایند خشک کردن با استفاده از روش پردازش تصویر انجام شد. بدين منظور دوربين ديجيتال نيكون مدل كولپيكس P510 در ارتفاع 30 سانتیمتری از سینی نمونهها نصب شده و با فاصله زمانی 30 ثانیه از نمونهها عکس برداری میکرد. برنامهای در نرم افزار MATLAB نوشته شد که بهوسیله آن عکسها فراخوانی شده و سطح نمونهها (A) اندازه گیری می شد. سپس با استفاده از رابطه (2) چروکیدگی شعاعی (R_{sh}) نمونهها تعیین شد. تغییرات چروکیدگی شعاعی به صورت تابعی از

$$%R_{Sh} = (1 - \sqrt{\frac{A_i}{A_0}}) \times 100$$
 (2)

در هنگام خشک شدن موز پدیدههای انتقال مختلفی اتفاق

میافتد که عبارتند از: انتقال رطوبت از درون محصول به سطح خارجی بهصورت نفوذ، انتقال حرارت همرفتی بین هوای) داغ و محصول، انتقال حرارت هدایتی درون محصول، تبخیر رطوبت در سطح مشترک محصول و هوا. با در نظر گرفتن از کل انرژی حرارتی که با هوای داغ به محصول منتقل را نشان میدهد.

> شکل کلی معادله انتقال حرارت در نمونه استوانهای موز با است؛ استفاده از قانون فوریه به شکل زیر قابل تعریف است؛

$$\rho C_{p} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \left\{ \frac{\partial}{\partial r} \left(kr \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(kr \frac{\partial T}{\partial z} \right) \right\}$$
(3)

صورت نفوذ رخ دهد معادله انتقال جرم با استفاده از قانون شده است [35]؛ فيک به صورت ذيل است؛

$$\rho_s \frac{\partial C}{\partial t} = \frac{1}{r} \left\{ \frac{\partial}{\partial r} \left(D_{eff} \rho_s r \frac{\partial C}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_{eff} \rho_s r \frac{\partial C}{\partial z} \right) \right\}$$
(4)

در ابتدای فرایند خشک کردن در تمام نمونه یکنواخت و و رطوبتی که با هوای داغ از سطح محصول جدا می شود قابل بەترتىب برابر T_0 و C_0 باشد؛

$$T = T_0 \quad , \quad C = C_0 \qquad \qquad t = \cdot , \, \cdot \le t \le R \tag{5}$$

در مرکز نمونه گرادیان دما و گرادیان رطوبت وجود ندارد پس می توان شرایط مرزی تقارن محوری را به این صورت تعریف کرد؛

$$\left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=0} = 0 , \quad \left. \frac{\partial C}{\partial r} \right|_{r=0} = 0 \qquad r=\star t > \star \Gamma 1$$
 برای مرز ۲۱ to the transformed of the transformed product of transformed product of the transformed product of transformed product product of transformed product product of transformed product of transformed product product of transformed product of transformed product product product product of transformed product prod

چروکیدگی هم زمان با پدیدههای مذکور سازه محصول نیز می شود بخشی از آن جهت تبخیر رطوبت در سطح محصول تغییر می کند. شکل (1) نمای شماتیک پدیدههای انتقال فوق استفاده می شود و مابقی باعث افزایش دمای نمونه می شود. پس شرط مرزی دوم برای رابطه (3) بهصورت رابطه ذیل برقرار

t>• Г3 و 23 و 73 (7) برای مرز 21 و 73
$$-k(\nabla T \ n) = h_t(T_{air} - T) - \lambda D_{eff} \rho_s(\nabla C \ .n)$$

پارامتر λ در رابطه (7) بیان کننده گرمای نهان تبخیر آب با فرض این که انتقال رطوبت در درون محصول فقط به است که به صورت تابعی از دما مطابق رابطه ذیل در مدل لحاظ

$$\lambda = 2501.05 \times 10^3 \times \left(\frac{647.3 - T}{647.3 - 273.15}\right)^{0.3298}$$
(8)

شرط مرزی دوم برای معادله انتقال جرم بر اساس تعادل بین برای تعریف شرایط اولیه فرض شده است که دما و رطوبت رطوبتی که به روش نفوذ از درون محصول به سطح آن میآید تعريف است. اين شرط مرزى براى سطوح خارجي نمونه به شکل زیر در نظر گرفته شده است؛

$$D_{eff}\rho_s \nabla C \ n = h_m(C_{air} - C)$$
 t>• $\Gamma 3 \ eff (9)$

ضریب پخش موثر (D_{eff}) با استفاده از دادههای تجربی



شکل (1) نمای شماتیک انتقال حرارت، انتقال جرم، فرایند تبخیر هم زمان با چروکیدگی نمونههای موز

ضرایب انتقال حرارت همرفت h_{t} و انتقال جرم h_{m} با استفاده از پارامترهای فرایند و شکل نمونه به صورت ذیل است [40-42]:

$$h_t = \frac{Nu \times k_a}{d_a} \tag{15}$$

$$h_m = \frac{h_l}{\rho \times c_{pa} (\alpha_a / D_w)^{2/3}}$$
(16)

که در این معادلات ا k_a ، Nu و k_a ، Nu که در این معادلات 14-14 قابل محاسبه هستند. محققین زیادی از این روش بهترتیب چگالی، گرمای ویژه هوا، نفوذ حرارتی هوا و نفوذ

معادلات ديفرانسيل جزيي (3) و (4) با در نظر گرفتن وابستگی خواص ترموفیزیکی به محتوی رطوبت و دما به شکل غیرخطی و پیچیده تبدیل می شوند که با روش های تحلیلی قابل حل نیستند و روش حل مناسب برای آنها روشهای عددی است. در تحقیق حاضر این معادلات با استفاده از روش المان محدود (FEM) در نرم افزار تجاری کامسول (COMSOL) نسخه 5/1 حل شدهاند. با توجه به شكل نمونهها مسئله به شکل تقارن محوری در نظر گرفته شد و دامنه محاسباتی به صورت یک چهارم سطح مقطع عرضی مطابق شکل 2-الف در نظر گرفته شد. بنابراین مستطیلی با طول 15 و عرض 2/5 میلیمتر به عنوان دامنه محاسباتی در محیط کامسول ایجاد شد (شکل 2–ب). در این دامنه مرزهای ۲2 و ۲3 سطح محصول را نشان میدهند در صورتی که ۲۱ و ۲4 بهترتیب خط تقارن محوری و صفحه تقارن را نشان میدهند. از 678 المان مثلثی جهت شبکه بندی دامنه استفاده شد که منجر به ایجاد که در این روابط ۰، ۲_۵، ۸ بهترتیب چگالی، گرمای ویژه و ۲۹۹۹ درجه آزادی گردید. اندازه مشها در نزدیکی مرزهای Transport of diluted species بەترتىب براى تعريف مسئله انتقال حرارت و انتقال جرم استفاده شد. علاوهبر آن با استفاده در روابط 13-11 خواص اجزای تشکیل دهنده موز به صورت از روش اویلر- لاگرانژ دلخواه (ALE) در ماژول Moving Mesh تابعی از دمای محصول در نظر گرفته شده اند به عبارت دیگر چروکیدگی در مدل لحاظ شد. شبیهسازی فرایند خشک شدن در طول فرایند خشک شدن با افزایش دما این خواص تغییر با گام زمانی 50 ثانیه و تا مدت زمان 32000 ثانیه انجام شد.

نسبت رطوبت بهدست آمده و به شکل معادله ذیل تابعی از میکنند. در جدول (1) روابط مذکور ارائه شده است. دمای هوای خشک کن در نظر گرفته شده است [36، 37]؛

$$D_{eff} = D_0 \exp\left(-\frac{E_a}{R_g T_{abs}}\right)$$
(10)

بهمنظور حل دقیق معادلات جزئی حرارت و جرم، خواص ترموفیزیکی محصول به صورت تابعی از دما و رطوبت مورد نیاز است. این خواص شامل چگالی، گرمای ویژه و هدایت حرارتی هستند که بر اساس خواص اجزای تشکیل دهنده موز (آب، D_{w} و a_{α} κ_{pa} ϕ مشخصه ρ مشخصه ρ و a_{α} κ_{pa} λ_{pa} λ_{pa} λ_{pa} λ_{pa} λ_{pa} λ_{pa} λ_{pa} برای تعیین خواص ترموفیزیکی محصولات مختلف استفاده جرمی آب در هوا میباشند. كرده اند [31، 38، 39].

$$\rho = \frac{1}{\sum_{j} \frac{X_{j}^{m}}{\rho_{j}}}$$
(11)

$$C_p = \sum_j (C_p)_j \times X_j^m \tag{12}$$

$$k = \frac{1}{2} \left(\sum_{j} k_{j} \times X_{j}^{v} + \frac{1}{\sum_{j} \frac{X_{j}^{v}}{k_{j}}} \right)$$
(13)

$$X_{j}^{v} = \frac{\frac{X_{j}^{m}}{\rho_{j}}}{\sum_{j} \frac{X_{j}^{m}}{\rho_{j}}}$$
(14)

ضریب هدایت حرارتی موز بوده و _نX^m و _نX^m بهترتیب نسبت ۲۵ و ۲3 که در معرض هوای داغ هستند، ریزتر انتخاب شد. جرمی و نسبت حجمی مولفه j- ام میباشند. در رابطه (14) در نرم افزار کامسول از ماژولهای Heat Transfer in solids و نسبت حجمی به صورت تابعی از نسبت جرمی و چگالی بیان شده است.

کیل دهنده موز به صورت تابعی از دما [35]	1) خواص ترموفیزیکی اجزای تش	جدول (
مدل	اجزاء	خواص حرارتی
<i>ρ</i> =1/3299×10 ³ -5/1840×10 ⁻¹ t	پروتئين	
<i>ρ</i> =9/2559×10 ² -4/1757×10 ⁻¹ t	چربی	
<i>ρ</i> =1/5991×10 ³ -3/6589×10 ⁻¹ t	كربوهيدرات	11#
ρ=1/3115×10 ³ -3/6589×10 ⁻¹ t	فيبر	چکالی
ρ=2/4238×10 ³ -2/8063×10 ⁻¹ t	خاكستر	
ρ =9/9718×10 ² +3/1439×10 ⁻³ t-3/7574×10 ⁻³ t ²	آب	
$C_p = 2/0082 + 1/2089 \times 10^{-3} \text{ t} - 1/3129 \times 10^{-6} \text{ t}^2$	پروتئين	
$C_p = 1/9842 + 1/4773 \times 10^{-3} \text{ t} - 4/8008 \times 10^{-7} \text{ t}^{-2}$	چربی	
C _p = 1/5488+1/9625×10 ⁻³ t-5/9399×10 ⁻⁶ t ⁻²	كربوهيدرات	
C _p = 1/8459+1/8306×10 ⁻³ t-4/6509×10 ⁻⁶ t ⁻²	فيبر	گرمای ویژه
C _p = 1/0926+1/8896×10 ⁻³ t-3/6817×10 ⁻⁶ t ⁻²	خاكستر	
$C_p = 4/1289-9/0864 \times 10^{-5} \text{ t} + 5/4731 \times 10^{-6} \text{ t}^2$	آب	
k=1/7881×10-1+1/1958×10 ⁻³ t-2/7178×10 ⁻⁶ t ⁻²	پروتئين	
k =1/8071×10-1-2/7604×10 ⁻⁴ t-1/7749×10 ⁻⁷ t ²	چربی	
k =2/0141×10-1+1/3874×10 ⁻³ t-4/3312×10 ⁻⁶ t ²	كربوهيدرات	
k =1/8331×10-1+1/2497×10 ⁻³ t-3/1683×10 ⁻⁶ t ²	فيبر	هدایت حرارتی
k =3/2962×10-1+1/4011×10 ⁻³ t-2/9069×10 ⁻⁶ t ²	خاكستر	
k =5/7109×10-1+1/7625×10 ⁻³ t-6/7036×10 ⁻⁶ t ²	آب	

106 فصلنامه فناورىهاى نوين غذايى، سال چهارم، شماره ١۴، زمستان ١٣٩۵



شکل (2) مدل تقارن محوری نمونه موز؛ الف) نمونه استوانه ای، ب) دامنه محاسباتی دو بعدی با شبکه بندی غیر یکنواخت

زمان لازم برای حل معادلات در نرم افزار حدود 12 دقیقه بود. س_س جهت راستی آزمایی مدل المان محدود، مقادیر پیشبینی پی شده دما و محتوى رطوبت با مقادير حاصل از نتايح أزمايشگاهي مقایسه شدند. برای این کار از پارامتر درصد میانگین خطای (7 نسبی (E/) مطابق رابطه ذیل استفاده شد که در آن

(الف)

(ب)

$$E(\%) = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^{n} \frac{|Exp_{value} - pred_{value}|}{Exp_{value}}$$
(17)

خشک کن در دو محدوده مشخص (نسبت رطوبت کمتر و

بیش تر از 0/4) ارائه شده است. مقادیر بالای ضریب تبیین(R²)

در این روابط بیان کننده این موضوع است که انتخاب رابطه

خطی بین پارامترهای مذکور ایده خوبی بوده است. معادلات

دلخواه (ALE) استفاده شدند. سایر محققین نیز رابطه خطی

را بین چروکیدگی محصول و محتوی رطوبت آن در مورد سیب

شکل (4) منحنیهای خشک کردن تجربی و پیشبینی شده

را برای موز با دماهای مختلف خشک کن نشان میدهد. با

توجه به شکل، خروج رطوبت در دماهای بالاتر سریع تر است که

3- نتايج و بحث

چروکیدگی (R_{th}) موز با روش پردازش تصویر تخمین شد. در شكل (3) تغييرات آن در مقابل تغييرات نسبت رطوبت برای دماهای مختلف خشک کن نشان داده شده است. با توجه به شکل می توان نتیجه گرفت که در تمام دماهای خشک کن، ارائه شده برای تعریف مرز متحرک شبکه با روش اویلر- لاگرانژ رابطه بین چروکیدگی و نسبت رطوبت تقریبا خطی است. همچنین میتوان نتیجه گرفت که خشک کردن در دماهای بالاتر منجر به چروکیدگی کمتر می شود. یافته های مذکور با زمینی [29]، هویج [47] و سیب [48] گزارش کرده اند. نتایج محققین دیگر در مورد خشک کردن سایر محصولات همخواني دارد [21، 45، 46].

جهت تعریف چروکیدگی در مدل FEM، روابط دقیقی برای یان تغییرات شعاع نمونه بر اساس تغییرات رطوبت آن مورد دلیل آن وابستگی شدید ضریب نفوذ موثر به دما است. در واقع نیاز است. در جدول (2) این روابط برای دماهای مختلف اختلاف دمای بیشتر بین نمونه و هوای داغ منجر به ایجاد شار



جدول (**2)** روابط خطی تغییرات شعاع نمونههای موز به صورت تابعی از نسبت رطوبت در مراحل اولیه و ثانویه خشک شدن

R ²	معادله	محدوده	دما
0/99	r = 2/844mr + 12/215	0/4 <mr<1< td=""><td>– 00.00</td></mr<1<>	– 00.00
0/99	r = 4/623mr + 11/498	0/04 <mr<0 4<="" td=""><td>Τ=80 °C</td></mr<0>	Τ=80 °C
0/98	r = 2/320mr + 12/74	0/4 <mr<1< td=""><td>T 00.00</td></mr<1<>	T 00.00
0/99	r = 4/248mr + 11/983	0/04 <mr<0 4<="" td=""><td>1=90°C</td></mr<0>	1=90°C
0/97	r = 2/014mr + 13/072	0/4 <mr<1< td=""><td>m 100 og</td></mr<1<>	m 100 og
0/99	r = 4/201mr + 12/302	0/04 <mr<0 4<="" td=""><td>1=100°C</td></mr<0>	1=100°C

شکل (3) درصد چروکیدگی تجربی نمونههای موز با زمان در دماهای



شکل(4) تغییرات نسبت رطوبت نمونههای موز با زمان در دماهای مختلف خشک کن (منحنیهای تجربی و پیش بینی شده با مدل المان محدود)

حرارتی قوی تر می شود که در نتیجه باعث افزایش ضریب نفوذ نشان میدهد که نقاط روی نمودار در نزدیکی خط هستند موثر مى گردد [49]. هم چنين از شكل مى توان نتيجه گرفت و بنابراين مدل المان محدود به خوبى توانسته است تغييرات که مقادیر پیشبینی شده نسبت رطوبت با مقادیر تجربی رطوبت نمونههای موز را پیشبینی کند. میانگین خطای نسبی سازگاری خوبی دارند. مقایسه آماری این منحنیها با عبور (E/) برای پیشبینی رطوبت در محدوده 8/83-4/23 درصد یک خط با معادله Hr_{pred}=A×Mr_{exp}+B بین دادههای تجربی بود که در محدوده قابل قبول (E<10/) است [50]. و پیشبینی شده انجام گرفت که در آن A و B ثابتمی باشند 🦳 در شکل (5) توزیع دما درون نمونه های موز در طول فرایند (جدول 3). مقادیر بالای ضریب تبیین (R²>0/97) خشک شدن با هوای 90 درجه نشان داده شده است. تغییر

جدول (3) ثابتهای A و B و ضریب تبیین (R²) برای رابطه خطی بین نسبت رطوبت تجربی و پیش بینی شده با مدل المان محدود (Mr_{ere}=A×Mr_{ex}+B).

1 14	دمای خشک کن		
نابت ها	T=80 °C	T=90 °C	T=100 °C
А	0/9961	1/0011	0/996
В	-0/0126	0/0188	0/0123
\mathbb{R}^2	0/978	0/982	0/975



شکل (**5)** توزیع دما درون نمونه موز هنگام خشک شدن با دمای هوای C° 90 در گامهای زمانی مختلف؛ الف) s 0، ب)s 200، ج) s 1000، د) s 5000، ه) 1000s و) 15000 s (; 15000 s () 25000 s () 2000 s ()

طول دامنه با گذشت زمان روند چروکیدگی نمونهها را نشان میدهد. با توجه به شکل واضح است که دمای سطح نمونه با دمای هوای خشک کن متفاوت است. اختلاف دماهای مذکور در مراحل اولیه خشک کردن به نسبت زیاد بوده که دلیل آن تبخیر رطوبت در سطح محصول است. در مراحل اولیه خشک نمودار مشخص شد که اختلاف جزیی در مقادیر پیش بینی کردن محتوی رطوبت نسبتا بالا در سطح نمونههای موز منجر به جذب درصد بیشتری از گرما جهت تبخیر شده و در نتیجه گرمای کمتری به درون محصول نفوذ میکند. در ادامه فرایند خشک کردن، درصد بیشتری از گرما به درون میوه منتقل شده و در نتیجه دمای آن به تدریج بالاتر می رود و به دمای هوای خشک کن نزدیکتر می شود. با مقایسه توزیعهای دما در زمانهای مختلف میتوان نتیجه گرفت که گرادیان دما درون میوه سریع کاهش یافته و تا پایان خشک شدن دمای درون محصول بهصورت يكنواخت افزايش مي يابد.



در شکل (6) تغییرات دمای مرکز میوه در طول زمان خشک شدن نشان داده شده است. با توجه به شکل می توان نتیجه گرفت که دمای پیشبینی شده با مدل المان محدود بسیار نزدیک به مقادیر اندازهگیری شده است. با بزرگ نمایی شده مربوط به مراحل ابتدایی خشک کردن (t<1000 s) است (شکل 7). دماهای اندازه گیری شده و پیش بینی شده با مدل المان محدود در مرکز نمونه با روش مذکور در مقایسه آماری نسبت رطوبتها، با هم مقایسه شدند (جدول 4). نتایج نشان داد که مدل ارائه شده قادر است بهطور موفقیت آمیزی دما را در مرکز میوه پیش بینی کند. میانگین خطای نسبی (E%) برای تخمین دما در محدوده 1/12-1/82 درصد برای شرایط مختلف خشک کردن محاسبه شد. با توجه به این که میانگین خطای نسبی تخمین دما و رطوبت در مدل ارائه شده در این



شکل(7) تغییرات دمای اندازه گیری شده و دمای تخمین شده توسط مدل در مرکز نمونه موز در شرایط مختلف خشک شدن در مراحل ابتدایی خشکشدن (t<5000 s)

شکل(6) تغییرات دمای اندازه گیری شده و دمای تخمین شده توسط مدل در مرکز نمونه موز در شرایط مختلف خشک شدن برای کل زمان خشک شدن

جدول (4) ثابتهای A و B و ضریب تبیین (R²) برای رابطه خطی بین دمای اندازه گیری شده و پیش بینی شده با مدل المان محدود در مرکز نمونه $(T_{-}=A \times T_{-}+B)$

دمای خشک کن			
T=100 °C	T=90 °C	т=80 °С	تابت ها
1/008	0/983	0/9765	А
1/6693	2/822	2/5443	В
0/994	0/981	0/985	\mathbb{R}^2

تحقيق در محدوده قابل قبول مىباشد، مىتوان نتيجه گرفت نمونه مىشود. ولى اين انتقال به دليل مقاومت انتقال جرم كه بيان خواص ترموفيزيكي محصول به صورت تابعي از رطوبت داخلي بسيار كند است [51، 52]. پس مي توان نتيجه گرفت و دماي آن ايده خوبي براي حل دقيق معادلات انتقال جرم و حرارت بوده است.

شکل (8) توزیع رطوبت درون میوه را در طول فرایند خشک صورت شدت نزولی انجام می شود. شدن نشان میدهد. در این شکل از دوران دامنه محاسباتی مدل بر روی خط تقارن محوری (مرز ٦٦ در شکل 2) جهت توانست تغییرات دما و رطوبت نمونههای موز را در شرایط نمایش فضایی نتایج استفاده شده است. در این شکل هم روند چروکیدگی محصول در طول خشک شدن نیز قابل مشاهده با توجه به این که بسیاری از پارامترهای کیفی میوهها از است. با مقایسه توزیع رطوبت در زمانهای مختلف می توان نتیجه گرفت که محتوی رطوبت با گذشت زمان به تدریج دمای محصول هستند، می توان نتیجه گرفت که مدل ارائه کاسته می شود و به دلیل تبخیر سریع در هر لحظه مقدار شده در این تحقیق می تواند جهت طراحی و بهینه سازی اندکی از رطوبت در سطح نمونه وجود دارد. گرادیان رطوبت فرایند خشک کردن موز با هدف بهبود کیفیت محصول ایجاد شده درون محصول باعث انتقال رطوبت داخلی به سطح به کار گرفته شود. چون در این تحقیق از معادلات پایه انتقال

که فرایند خشک شدن موز با نفوذ کنترل می شود وچنان که در شکل (4) نیز نشان داده شده است منحنی خشک شدن موز به

در حالت کلی، مدل المان محدود ارائه شده در این تحقیق مختلف خشک شدن بهطور موفقیت آمیزی پیش بینی کند. قبیل رنگ، طعم، بو و غیرہ تحت تاثیر تغییرات رطوبت و



شکل (8) توزیع محتوی رطوبت (بر پایه تر) درون نمونه موز هنگام خشک شدن با دمای هوای ^c 00 در گامهای زمانی مختلف؛ الف) s 0، ب) s (2000 s (ج) s (2000 s (د) s (14000 s (ه) s (14000 s (د) ز) s (23000 s (د) د) ب

خشک شدن چروکیده می شوند بسط داد.

4- نتيجه گيرى

روش المان محدود جهت حل معادلات ديفرانسيل جزئي قدرداني انتقال جرم و حرارت نمونههای موز به کار گرفته شد. از روش اویلر- لاگرانژ دلخواه برای احتساب چروکیدگی در مدل حمایت مالی دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد انجام استفاده شد. مدل ارائه شده قادر بود تغییرات دما و رطوبت شد. بدین وسیله نویسندگان مراتب تشکر و قدردانی را از را در طول خشک شدن نمونههای موز پیشبینی کند. مقایسه همکاری مالی واحد مربوطه اعلام میدارند.

مدل سازی المان محدود خشک شدن همرفتی موز ...

جرم و حرارت جهت مدلسازی استفاده شده است، میتوان آماری نشان داد که مقادیر پیشبینی شده دما و رطوبت توسط با تغییر پارامترهای ورودی مدل، آن را برای خشک کردن مدل با مقادیر اندازه گیری شده سازگاری کامل دارند. بنابراین سایر محصولات کشاورزی با شکل هندسی مشابه که در حین مدل ارائه شده میتواند در جهت طراحی و بهینه کردن فرایند خشک کردن موز در جهت رسیدن به محصول با کیفیت مطلوب مفيد واقع شود.

پژوهش حاضر در قالب طرح تحقیقاتی شماره 38200 با

نمادها

A_{o}	مساحت اوليه نمونه (° mm)
A_{t}	مساحت نمونه در زمان t، (mm²)
С	غلظت رطوبت (mol/m ³)
C_{air}	غلظت رطوبت در هوا (mol/m ³)
C_{P}	گرمای ویژه موز (J/kg.K)
$C_{_{pa}}$	گرمای ویژه هوا (J/kg.K)
d	قطر نمونه موز (m)
$D_{_{e\!f\!f}}$	ضریب موثر نفوذ (m²/s)
$D_{_W}$	ضریب پخش آب در هوا (m²/s)
$E_{_a}$	انرژی فعال سازی (kJ/mol)
$h_{_m}$	ضریب انتقال همرفت جرم (m/s)
h_{t}	ضريب انتقال همرفت حرارت (W/m ² .K)
k	ضریب هدایت حرارتی موز (W/m·K)
k _a	ضریب هدایت حرارتی هوا (W/m·K)
$M_{_O}$	محتوى رطوبت اوليه
$M_{_c}$	محتوى رطوبت بر يايه خشک
$M_{_{e}}$	محتوى رطوبت تعادلى
$M_{_R}$	نسبت رطوبت
$M_{_{t}}$	محتوى ، طويت در : مان t

n	تعداد آزمایش ها
Nu	عدد ناسلت
r	شعاع نمونه موز (m)
R_{g}	ثابت جهانی گازها (8/314 J/mol. K)
R _{sh}	چروکیدگی شعاعی (٪)
Т	دما (K)
t	زمان (s)
α	نفوذ حرارتی موز (m²/s)
α_{a}	نفوذ حرارتی هوا (m²/s)
λ	گرمای نهان تبخیر آب (J/ kg)
ν	سرعت هوا (m/s)
ρ	چگالی (kg/m³)
$ ho_a$	چگالی هوا (kg/m³)
$ ho_s$	چگالی مادہ جامد (kg/m³)

ing models including shrinkage effects. *Drying technol.* 24, 5-20.

[11] De Lima, A., Queiroz, M., Nebra, S. (2002). Simultaneous moisture transport and shrinkage during drying of solids with ellipsoidal configuration. *Chem. Eng. J.* 86, 85-93.[12] Jannot, Y., Talla, A., Nganhou, J., Puiggali, J.-R. (2004). Modeling of banana convective drying by the drying characteristic curve (DCC) method. *Drying Technol.* 22, 1949-1968.

[13] Dandamrongrak, R., Young, G., Mason, R. (2002).Evaluation of various pre-treatments for the dehydration of banana and selection of suitable drying models.*J. Food Eng.* 55, 139-146.

[14] Queiroz, M., Nebra, S. (2001). Theoretical and experimental analysis of the drying kinetics of bananas. *J. Food Eng.* 47, 127-132.

[15] Demirel, D., Turhan, M. (2003). Air-drying behavior of Dwarf Cavendish and Gros Michel banana slices.*J. Food Eng.* 59, 1-11.

[16] Chua, K., Mujumdar, A., Chou, S., Hawlader, M., Ho, J. (2000). Convective drying of banana, guava and potato pieces: Effect of cyclical variations of air temperature on drying kinetics and color change. *Drying Technol.* 18, 907-936.

[17] Boudhrioua, N., Giampaoli, P., Bonazzi, C. (2003). Changes in aromatic components of banana during ripening and air-drying. *LWT-Food Sci. Technol.* 36, 633-642.
[18] Ah-Hen, K., Zambra, C.E., Aguëro, J.E., Vega-Gálvez, A., Lemus-Mondaca, R. (2013). Moisture diffusivity coefficient and convective drying modelling of murta (Ugni molinae Turcz): Influence of temperature and vacuum on drying kinetics. *Food Bioprocess Technol.* 6, 919-930. [1] Akbudak, N., Akbudak, B. (2013). Effect of vacuum, microwave, and convective drying on selected parsley quality. *Int. J. Food Prop.* 16, 205-215.

منابع

[2] Izli, N., Isik, E. (2015). Color and microstructure properties of tomatoes dried by microwave, convective, and microwave-convective methods. *Int. J. Food Prop.* 18, 241-249.

[3] Nguyen, M.-H., Price, W.E. (2007). Air-drying of banana: influence of experimental parameters, slab thickness, banana maturity and harvesting season. *J. Food Eng.* 79, 200-207.

[4] Aguilera, J.M. (2003). Drying and dried products under the microscope. *Food Sci. Technol. Int.* 9, 137-143.
[5] May, B., Perré, P. (2002). The importance of considering exchange surface area reduction to exhibit a constant drying flux period in foodstuffs. *J. Food Eng.* 54, 271-282.

[6] Zielinska, M., Markowski, M. (2010). Air drying characteristics and moisture diffusivity of carrots. *Chem. Eng. Process. Process Intensif.* 49, 212-218.

[7] Thuwapanichayanan, R., Prachayawarakorn, S., Kunwisawa, J., Soponronnarit, S. (2011). Determination of effective moisture diffusivity and assessment of quality attributes of banana slices during drying. *LWT Food Sci. Technol.* 44, 1502-1510.

[8] Milczarek, R.R., Dai, A.A., Otoni, C.G., McHugh, T.H. (2011). Effect of shrinkage on isothermal drying behavior of 2-phase olive mill waste. *J. Food Eng.* 103, 434-441.

[9] Mayor, L., Sereno, A. (2004). Modelling shrinkage during convective drying of food materials: a review. *J. Food Eng.* 61, 373-386.

[10] Katekawa, M., Silva, M. (2006). A review of dry-

Scientia Iranica, Transaction A. Journal of Civil Engineering. 17, 141-160.

[28] Taciroglu, E., Acharya, A., Namazifard, A., Parsons, I. (2009). Arbitrary Lagrangian–Eulerian methods for analysis of regressing solid domains and interface tracking. *Computers & Structures*. 87, 355-367.

[29] Aprajeeta, J., Gopirajah, R., Anandharamakrishnan, C. (2015). Shrinkage and porosity effects on heat and mass transfer during potato drying. *J. Food Eng.* 144, 119-128.
[30] Curcio, S., Aversa, M. (2014). Influence of shrinkage on convective drying of fresh vegetables: A theoretical model. *J. Food Eng.* 123, 36-49.

[31] Sabarez, H.T. (2012). Computational modelling of the transport phenomena occurring during convective drying of prunes. *J. Food Eng.* 111, 279-288.

[32] AOAC. (1990). Official methods of analysis, 15th ed., Association of Official Analytical Chemists, Arlington, VA.

[33] Seyedabadi, E. (2015). Drying kinetics modelling of basil in microwave dryer. *Agricultural Communications*. 3, 37-44.

[34] Nadian, M.H., Abbaspour-Fard, M.H., Sadrnia, H., Golzarian, M.R., Tabasizadeh, M. (2016). Optimal pretreatment determination of kiwifruit drying via online monitoring. *J. Sci. Food Agric.* (in press),

[35] ASHRAE. (2010). chap. 19. Handbook-Refrigeration. 19.1-19.31.

[36] Da Silva, W.P., e Silva, C.M., Gomes, J.P. (2013). Drying description of cylindrical pieces of bananas in different temperatures using diffusion models. *J. Food Eng.* 117, 417-424.

[37] Rodríguez, Ó., Eim, V.S., Simal, S., Femenia, A., Rosselló, C. (2013). Validation of a difussion model using moisture profiles measured by means of TD-NMR in apples (Malus domestica). *Food Bio. Technol.* 6, 542-552. [19] Swasdisevi, T., Devahastin, S., Sa-Adchom, P., Soponronnarit, S. (2009). Mathematical modeling of combined far-infrared and vacuum drying banana slice. *J. Food Eng.* 92, 100-106.

[20] Ruiz-López, I., García-Alvarado, M. (2007). Analytical solution for food-drying kinetics considering shrinkage and variable diffusivity. *J. Food Eng.* 79, 208-216.

[21] Prachayawarakorn, S., Tia, W., Plyto, N., Soponronnarit, S. (2008). Drying kinetics and quality attributes of low-fat banana slices dried at high temperature. *J. Food Eng.* 85, 509-517.

[22] Talla, A., Puiggali, J.-R., Jomaa, W., Jannot, Y.
(2004). Shrinkage and density evolution during drying of tropical fruits: application to banana. *J. Food Eng.* 64, 103-109.

[23] Hernandez, J., Pavon, G., Garcia, M. (2000). Analytical solution of mass transfer equation considering shrinkage for modeling food-drying kinetics. *J. Food Eng.* 45, 1-10.

[24] Brasiello, A., Adiletta, G., Russo, P., Crescitelli,
S., Albanese, D., Di Matteo, M. (2013). Mathematical modeling of eggplant drying: shrinkage effect. *J. Food Eng.* 114, 99-105.

[25] Seyedabadi, E., Khojastehpour, M., Sadrnia, H.(2015). Predicting Cantaloupe Bruising Using Non-Linear Finite Element Method. *Int. J. Food Prop. Int. J. Food Prop.* 18, 2015-2025.

[26] Donea, J., Huerta, A., Ponthot, J., Rodríguez-Ferran, A. Arbitrary Lagrangian–Eulerian methods, *Encyclopedia of computational mechanics*, vol. 1. 2014, Wiley, Chichester.

[27] Anahid, M., Khoei, A. (2010). Modeling of moving boundaries in large plasticity deformations via an enriched arbitrary Lagrangian–Eulerian FE method. Therm. Eng. 62, 455-460.

[49] Tzempelikos, D.A., Mitrakos, D., Vouros, A.P., Bardakas, A.V., Filios, A.E., Margaris, D.P. (2015). Numerical modeling of heat and mass transfer during convective drying of cylindrical quince slices. J. Food Eng. 156, 10-21.

[50] Kaymak-Ertekin, F., Gedik, A. (2005). Kinetic modelling of quality deterioration in onions during drying and storage. J. Food Eng. 68, 443-453.

[51] Ateeque, M., Mishra, R.K., Chandramohan, V., Talukdar, P. (2014). Numerical modeling of convective drying of food with spatially dependent transfer coefficient in a turbulent flow field. Int. J. Therm. Sci. 78, 145-157.

[52] Mohan, V.C., Talukdar, P. (2010). Three dimensional numerical modeling of simultaneous heat and moisture transfer in a moist object subjected to convective drying. Int. J. Heat Mass Transfer. 53, 4638-4650.

netics, colour and shrinkage of air dried apples. Appl. [38] Lemus-Mondaca, R.A., Zambra, C.E., Vega-Gálvez, A., Moraga, N.O. (2013). Coupled 3D heat and mass transfer model for numerical analysis of drying process in papaya slices. J. Food Eng. 116, 109-117.

> [39] Montanuci, F.D., Perussello, C.A., de Matos Jorge, L.M., Jorge, R.M.M. (2014). Experimental analysis and finite element simulation of the hydration process of barley grains. J. Food Eng. 131, 44-49.

> [40] Singh, R.P., Heldman, D.R. (2009). Introduction to food engineering. fourth ed ed., United Kingdom: Elsevier.

> [41] Earle, R.L. (2013). Unit operations in food processing. Elsevier.

> [42] Holman, J. Heat transfer. (1986), McGraw-Hill Inc: New York. p. 621-676.

> [43] Garau, M., Simal, S., Femenia, A., Rosselló, C. (2006). Drying of orange skin: drying kinetics modelling and functional properties. J. Food Eng. 75, 288-295.

> [44] Cárcel, J., Garcia-Perez, J., Riera, E., Mulet, A. (2011). Improvement of convective drying of carrot by applying power ultrasound-Influence of mass load density. Drying Technol. 29, 174-182.

> [45] Aral, S., Beşe, A.V. (2016). Convective drying of hawthorn fruit (Crataegus spp.): Effect of experimental parameters on drying kinetics, color, shrinkage, and rehydration capacity. Food chemistry. 210, 577-584.

> [46] Horuz, E., Maskan, M. (2015). Hot air and microwave drying of pomegranate (Punica granatum L.) arils. J. Food Sci. Technol. 52, 285-293.

> [47] Hatamipour, M., Mowla, D. (2002). Shrinkage of carrots during drying in an inert medium fluidized bed. J. Food Eng. 55, 247-252.

> [48] Sturm, B., Vega, A.-M.N., Hofacker, W.C. (2014). Influence of process control strategies on drying ki-