



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

اسماعیل سیدآبادی^۱، مهدی خجسته پور^۱، محمد حسین عباسپور فرد^۳

۱. دانشجوی دکتری، گروه مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد

۲. دانشیار، گروه مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد

۳. استاد، گروه مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد

(تاریخ دریافت: 95/7/28، تاریخ پذیرش: 95/9/14)

چکیده

روش المان محدود برای مدل‌سازی انتقال هم‌زمان جرم و حرارت در نمونه‌های استوانه‌ای 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، نمونه‌های موز در شرایط مختلف خشک شدند و تغییرات دما در مرکز نمونه و میانگین محتوی رطوبت نمونه‌ها با مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل مقایسه شدند. نتایج نشان داد درصد میانگین خطای نسبی برای تخمین رطوبت و دما به ترتیب در محدوده 4/23-8/83٪ و 1/12-1/82٪ بود. بنابراین مدل ارائه شده قادر است محتوی رطوبت و دمای مرکز نمونه را در طول فرایند خشک شدن به طور موفقیت آمیزی پیش‌بینی کند. با توجه به اهمیت پیش‌بینی تغییرات دما و رطوبت، مدل ارائه شده می‌تواند به عنوان ابزار مفیدی در جهت بهینه کردن فرایند خشک کردن موز از نظر بازده آن و کیفیت محصول مورد استفاده قرار گیرد. انتظار می‌رود که مدل مذکور به راحتی قابل تعمیم برای خشک کردن محصول‌های مشابه با شکل استوانه‌ای باشد.

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

^۱ نویسنده مسئول: mkhpour@um.ac.ir

۱- مقدمه

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 به هم می‌شوند. هم‌چنین 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 صرفاً با حل معادله انتقال جرم بیان شده است.

روش المان محدود (FEM) روشی عددی است که برای حل دقیق مسائل پیچیده مهندسی به‌کار گرفته می‌شود. مسائلی که با روش‌های تحلیلی قابل حل نیستند و یا حل آن‌ها مستلزم آزمایش‌های پرهزینه است، با استفاده از این روش به حل قابل قبولی می‌رسند [25]. با در نظر گرفتن چروکیدگی محصول در شبیه‌سازی خشک شدن، معادلات دیفرانسیل جزئی و غیرخطی انتقال حرارت و جرم بایستی در شرایط مرز متحرک حل شوند. این مسئله با استفاده از روش المان محدود با فرمول بندی اویلر-لاگرانژ دلخواه (ALE) قابل حل می‌باشد. روش ALE بر پایه مزایای دو روش اویلری^۱ و لاگرانژی^۲ بنا نهاده شده است که در آن گره‌های المان‌های محاسباتی می‌توانند با نقاط نظیر بر روی ماده به‌صورت لاگرانژی حرکت کنند یا به‌صورت اویلری 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 آن‌هید 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 کشاورزی استفاده شده است. به‌عنوان مثال آپراچیتا 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

موز به‌دلیل بافت نسبتاً 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 به‌کار گرفته شده است [1-3].

محصولات کشاورزی و از جمله موز به‌دلیل محتوی رطوبت به‌نسبت بالا در هنگام خشک شدن متقبض و چروکیده می‌شوند. چروکیدگی زمانی اتفاق می‌افتد که گرادیان رطوبت ایجاد شده در محصول باعث ایجاد تنش‌هایی در ساختار شبکه ماده شده طوری که باعث به‌هم ریختن آن و جمع شدن محصول به سمت داخل می‌شود [4].

در طول فرایند خشک شدن، چروکیدگی با کاهش سطح جانبی محصول [5] و تغییر مسیرهای انتقال آب درون محصول [6-8] تاثیر قابل توجه‌ای بر نرخ انتقال حرارت و رطوبت دارد. هم‌چنین چروکیدگی بر کیفیت محصول نهایی و در نتیجه بازار پستی 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 [12-14] و میوه ورقه شده [15-17] به‌کار گرفته شده‌اند. در این مدل‌ها اثر چروکیدگی ناچیز فرض شده است. اگرچه مدل‌های تجربی به‌راحتی در صنعت به‌کار گرفته می‌شوند، اما استفاده از آن‌ها محدود به شرایط خاصی است که در آن شرایط پارامترهای مدل به‌دست آمده‌اند [18]. برخی از محققین مدلی تحلیلی برای پیش‌بینی 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 شبیه‌سازی فرایند خشک شدن بایستی دو معادلات دیفرانسیل جزئی (PDE) شامل معادله فوریه و معادله فیک به‌ترتیب برای انتقال حرارت و انتقال جرم به‌صورت هم‌زمان حل گردند. با توجه به میزان پیچیدگی، این معادلات را

1. Eulerian approach
2. Lagrangian approach

آمد [33]:

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

در این رابطه M_R نسبت رطوبت، M_t ، M_0 و M_e به ترتیب محتوی رطوبت در زمان t ، محتوی رطوبت اولیه و محتوی رطوبت تعادلی می‌باشد. از یک خشک کن همرفتی مجهز به سیستم کنترل کامپیوتری جهت خشک کردن نمونه‌های موز در دماهای 80، 90 و 100 درجه سانتی‌گراد استفاده شد. جزئیات خشک کن مورد استفاده در گزارش نادپان و همکاران [34] قابل مشاهده است.

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 دیتالاگر و اتصال هم زمان چهار عدد ترموکوپل نوع K استفاده شد. ترموکوپل‌ها در مرکز هندسی نمونه‌ها نصب شده و با فاصله زمانی 30 ثانیه تغییرات دما را ثبت می‌کردند.

اندازه‌گیری میزان چروکیدگی محصول در طول فرایند خشک کردن با استفاده از روش پردازش تصویر انجام شد. بدین منظور دوربین دیجیتال نیکون مدل کولپیکس P510 در ارتفاع 30 سانتی‌متری از سیتی نمونه‌ها نصب شده و با فاصله زمانی 30 ثانیه از نمونه‌ها عکس برداری می‌کرد. برنامه‌ای در نرم افزار MATLAB نوشته شد که به وسیله آن عکس‌ها فراخوانی شده و سطح نمونه‌ها (A_t) اندازه‌گیری می‌شد. سپس با استفاده از رابطه (2) چروکیدگی شعاعی (R_{sh}) نمونه‌ها تعیین شد. تغییرات چروکیدگی شعاعی به صورت تابعی از رطوبت محصول جهت تعریف شبکه متحرک (moving mesh) برای تغییرات دامنه محاسباتی در مدل المان محدود استفاده گردید.

$$\%R_{sh} = \left(1 - \sqrt{\frac{A_t}{A_0}}\right) \times 100 \quad (2)$$

در هنگام خشک شدن موز پدیده‌های انتقال مختلفی اتفاق

تایید شد. کورسیو و اورسا [30] مدلی را برای تخمین میزان چروکیدگی محصول در طول خشک شدن ارائه کردند. تحقیق دیگری برای بررسی خشک شدن همرفتی آلو بخارا توسط سباز [31] ارائه گردید. در تحقیق او میوه به صورت ترکیب دو ماده با خواص مختلف (گوشت و هسته) در نظر گرفته شده و از رویکرد اویلر لاگرانژ دلخواه برای احتساب چروکیدگی در 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، لذا تحقیق حاضر با هدف شبیه‌سازی 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 بندی اویلر 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 پیش‌بینی کند.

2- مواد و روش‌ها

موزهای رسیده (وارپته کاوندیش) از بازار شهر مشهد خریداری شدند. نمونه‌ها با دست پوست شده و با ابزار برش مخصوص به صورت نمونه‌های استوانه‌ای شکل با ضخامت و قطر به ترتیب 5 و 30 میلی‌متر برش خوردند. جهت برش‌ها عمود بر محور طولی میوه بود. محتوی رطوبت اولیه نمونه‌ها با روش آون در دمای 105 درجه سانتی‌گراد به مدت 48 ساعت تعیین شد [32]. محتوی رطوبت اولیه نمونه‌ها 79 درصد بر پایه تر به‌دست آمد.

آزمایش‌های خشک کردن نمونه‌های موز جهت بررسی فرایند خشک شدن و روند چروکیدگی محصول صورت گرفت. به منظور اعتبار سنجی مدل، نتایج آزمایشگاهی دما و محتوی رطوبت با مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل مقایسه شدند. خشک کردن از محتوی رطوبت اولیه تا محتوی رطوبت تعادلی که در آن تغییر رطوبت با گذشت زمان مشاهده نمی‌شد، ادامه یافت. سپس نسبت رطوبت (بدون بعد) از رابطه (1) به‌دست

$$\left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=0} = 0, \quad \left. \frac{\partial C}{\partial r} \right|_{r=0} = 0 \quad r=0 \text{ و } t > 0 \quad \Gamma 1 \quad (6)$$

از کل انرژی حرارتی که با هوای داغ به محصول منتقل می‌شود بخشی از آن جهت تبخیر رطوبت در سطح محصول استفاده می‌شود و مابقی باعث افزایش دمای نمونه می‌شود. پس شرط مرزی دوم برای رابطه (۶) به صورت ذیل برقرار است:

$$t > 0 \quad \Gamma 2 \text{ و } \Gamma 3 \quad (7)$$

$$-k(\nabla T \cdot n) = h_t(T_{air} - T) - \lambda D_{eff} \rho_s (\nabla C \cdot n)$$

پارامتر λ در رابطه (۷) بیان کننده گرمای نهان تبخیر آب است که به صورت تابعی از دما مطابق رابطه ذیل در مدل لحاظ شده است [35]:

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

شرط مرزی دوم برای معادله انتقال جرم بر اساس تعادل بین رطوبتی که به روش نفوذ از درون محصول به سطح آن می‌آید و رطوبتی که با هوای داغ از سطح محصول جدا می‌شود قابل تعریف است. این شرط مرزی برای سطوح خارجی نمونه به شکل زیر در نظر گرفته شده است:

$$D_{eff} \rho_s \nabla C \cdot n = h_m (C_{air} - C) \quad t > 0 \quad \Gamma 3 \text{ و } \Gamma 2 \quad (9)$$

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

می‌افتد که عبارتند از: انتقال رطوبت از درون محصول به سطح خارجی به صورت 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 چروکیدگی هم زمان با پدیده‌های مذکور سازه محصول نیز تغییر می‌کند. شکل (۱) نمای شماتیک پدیده‌های انتقال فوق را نشان می‌دهد.

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

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

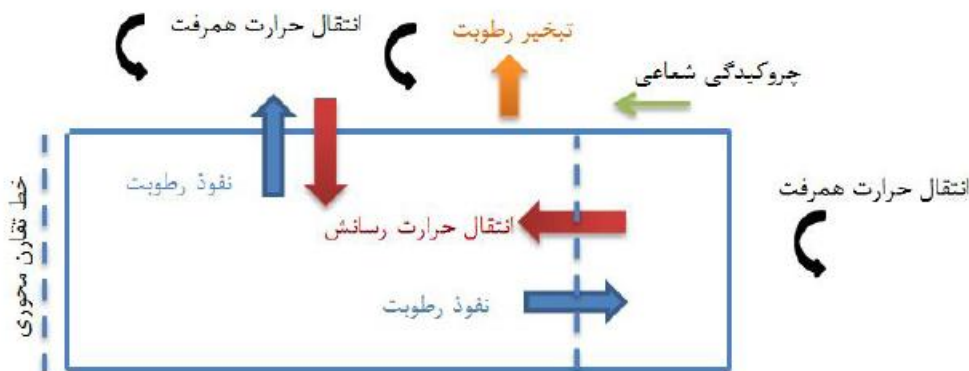
با فرض این که انتقال رطوبت در درون محصول فقط به صورت نفوذ رخ دهد معادله انتقال جرم با استفاده از قانون فیک به صورت ذیل است:

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

برای تعریف شرایط اولیه فرض شده است که دما و رطوبت در ابتدای فرایند خشک کردن در تمام نمونه یکتواخت و به ترتیب برابر T_0 و C_0 باشد:

$$T = T_0, \quad C = C_0 \quad t=0, \quad 0 \leq r \leq R \quad (5)$$

در مرکز نمونه گرادپان دما و گرادپان رطوبت وجود ندارد پس می‌توان شرایط مرزی تقارن محوری را به این صورت تعریف کرد:



شکل (۱) نمای شماتیک انتقال حرارت، انتقال جرم، فرایند تبخیر هم زمان با چروکیدگی نمونه‌های موز

می‌کنند. در جدول (1) روابط مذکور ارائه شده است. ضرایب انتقال حرارت همرفت h_c و انتقال جرم h_m با استفاده از پارامترهای فرایند و شکل نمونه به صورت ذیل است [40-42]:

$$h_c = \frac{Nu \times k_a}{d_c} \quad (15)$$

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

که در این معادلات Nu ، k_a و d_c به ترتیب عدد بدون بعد ناسلت، هدایت حرارتی هوا و طول مشخصه ρ ، c_{pa} ، a_a و D_w به ترتیب چگالی، گرمای ویژه هوا، نفوذ حرارتی هوا و نفوذ جرمی آب در هوا می‌باشند.

معادلات دیفرانسیل جزئی (3) و (4) با در نظر گرفتن وابستگی خواص ترموفیزیکی به محتوی رطوبت و دما به شکل غیرخطی و پیچیده تبدیل می‌شوند که با روش‌های 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 شکل 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 Γ_1 و Γ_2 و Γ_3 سطح محصول را نشان می‌دهند در صورتی که Γ_1 و Γ_4 به ترتیب خط تقارن محوری و صفحه تقارن را نشان می‌دهند. از 678 المان مثلثی جهت شبکه بندی دامنه استفاده شد که متجر به ایجاد 4419 درجه آزادی گردید. اندازه مش‌ها در نزدیکی مرزهای Γ_2 و Γ_3 که در معرض هوای داغ هستند، ریزتر انتخاب شد. در نرم افزار کامسول از ماژول‌های *Heat Transfer in solids* و *Transport of diluted species* به ترتیب برای تعریف مسئله انتقال حرارت و انتقال جرم استفاده شد. علاوه بر آن با استفاده از روش اویلر- لاگرانژ دلخواه (ALE) در ماژول *Moving Mesh* چروکیدگی در مدل لحاظ شد. شبیه‌سازی فرایند خشک شدن با گام زمانی 50 ثانیه و تا مدت زمان 32000 ثانیه انجام شد.

نسبت رطوبت به دست آمده و به شکل معادله ذیل تابعی از دمای هوای خشک کن در نظر گرفته شده است [36، 37]:

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

به منظور 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، کربوهیدرات، فیبر، چربی، پروتئین و خاکستر) بر اساس روابط 11-14 قابل محاسبه هستند. محققین زیادی از این روش برای تعیین خواص ترموفیزیکی محصولات مختلف استفاده کرده‌اند [31، 38، 39].

$$\rho = \frac{1}{\sum_j \frac{X_j^m}{\rho_j}} \quad (11)$$

$$C_p = \sum_j (C_p)_j \times X_j^m \quad (12)$$

$$k = \frac{1}{2} \left(\sum_j k_j \times X_j^v + \frac{1}{\sum_j \frac{X_j^v}{k_j}} \right) \quad (13)$$

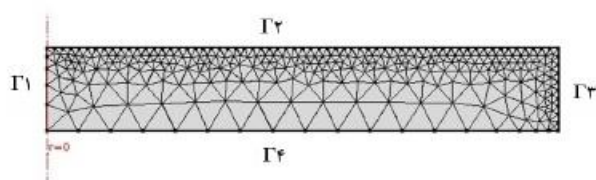
$$X_j^v = \frac{\frac{X_j^m}{\rho_j}}{\sum_j \frac{X_j^m}{\rho_j}} \quad (14)$$

که در این روابط ρ ، C_p ، k ، به ترتیب چگالی، گرمای ویژه و ضریب هدایت حرارتی موز بوده و X_j^v و X_j^m به ترتیب نسبت جرمی و نسبت حجمی مولفه j -ام می‌باشند. در رابطه (14) نسبت حجمی به صورت تابعی از نسبت جرمی و چگالی بیان شده است.

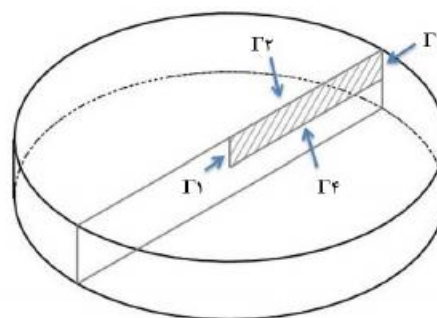
در روابط 11-13 خواص اجزای تشکیل دهنده موز به صورت تابعی از دمای محصول در نظر گرفته شده‌اند به عبارت دیگر در طول فرایند خشک شدن با افزایش دما این خواص تغییر

جدول (۱) خواص ترموفیزیکی اجزای تشکیل دهنده موز به صورت تابعی از دما [35]

خواص حرارتی	اجزاء	مدل
چگالی	پروتئین	$\rho = 1/3299 \times 10^3 - 5/11840 \times 10^{-1} t$
	چربی	$\rho = 9/2559 \times 10^2 - 4/1757 \times 10^{-1} t$
	کربوهیدرات	$\rho = 1/5991 \times 10^3 - 3/6589 \times 10^{-1} t$
	فیبر	$\rho = 1/3115 \times 10^3 - 3/6589 \times 10^{-1} t$
	خاکستر	$\rho = 2/4238 \times 10^3 - 2/8063 \times 10^{-1} t$
	آب	$\rho = 9/9718 \times 10^2 + 3/1439 \times 10^{-3} t - 3/7574 \times 10^{-3} t^2$
گرمای ویژه	پروتئین	$C_p = 2/0082 + 1/2089 \times 10^{-3} t - 1/3129 \times 10^{-6} t^2$
	چربی	$C_p = 1/9842 + 1/4773 \times 10^{-3} t - 4/8008 \times 10^{-6} t^2$
	کربوهیدرات	$C_p = 1/5488 + 1/9625 \times 10^{-3} t - 5/9399 \times 10^{-6} t^2$
	فیبر	$C_p = 1/8459 + 1/8306 \times 10^{-3} t - 4/6509 \times 10^{-6} t^2$
	خاکستر	$C_p = 1/0926 + 1/8896 \times 10^{-3} t - 3/6817 \times 10^{-6} t^2$
	آب	$C_p = 4/1289 - 9/0864 \times 10^{-5} t + 5/4731 \times 10^{-8} t^2$
هدایت حرارتی	پروتئین	$k = 1/7881 \times 10^{-1} + 1/1958 \times 10^{-3} t - 2/7178 \times 10^{-6} t^2$
	چربی	$k = 1/8071 \times 10^{-1} - 2/7604 \times 10^{-4} t - 1/7749 \times 10^{-7} t^2$
	کربوهیدرات	$k = 2/0141 \times 10^{-1} + 1/3874 \times 10^{-3} t - 4/3312 \times 10^{-6} t^2$
	فیبر	$k = 1/8331 \times 10^{-1} + 1/2497 \times 10^{-3} t - 3/1683 \times 10^{-6} t^2$
	خاکستر	$k = 3/2962 \times 10^{-1} + 1/4011 \times 10^{-3} t - 2/9069 \times 10^{-6} t^2$
	آب	$k = 5/7109 \times 10^{-1} + 1/7625 \times 10^{-3} t - 6/7036 \times 10^{-6} t^2$



(ب)



(الف)

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. جهت راستی آزمایشی مدل المان محدود، مقادیر پیش‌بینی شده دما و محتوی رطوبت با مقادیر حاصل از نتایج آزمایشگاهی مقایسه شدند. برای این کار از پارامتر درصد میانگین خطای نسبی (E) مطابق رابطه ذیل استفاده شد که در آن

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

پیش‌بینی شده توسط مدل هستند [43، 44].

3- نتایج و بحث

چروکیدگی ($R_{ش}$) موز با روش پردازش تصویر تخمین شد. در شکل (3) تغییرات آن در مقابل تغییرات نسبت رطوبت برای دماهای مختلف خشک کن نشان داده شده است. با توجه به شکل می‌توان نتیجه گرفت که در تمام دماهای خشک کن، رابطه بین چروکیدگی و نسبت رطوبت تقریباً خطی است. همچنین می‌توان نتیجه گرفت که خشک کردن در دماهای بالاتر منجر به چروکیدگی کمتر می‌شود. یافته‌های مذکور با نتایج محققین دیگر در مورد خشک کردن سایر محصولات هم‌خوانی دارد [21، 45، 46].

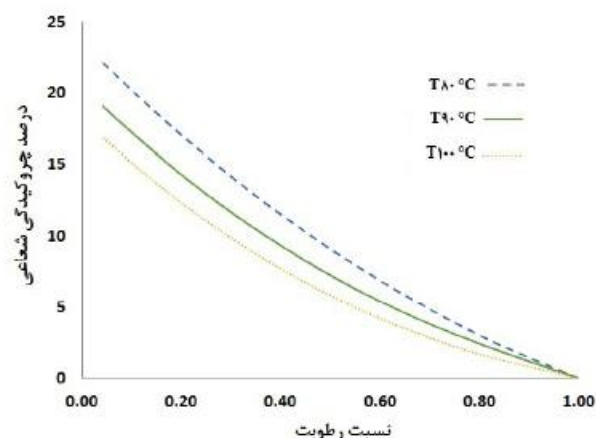
جهت تعریف چروکیدگی در مدل FEM، روابط دقیقی برای بیان تغییرات شعاع نمونه بر اساس تغییرات رطوبت آن مورد نیاز است. در جدول (2) این روابط برای دماهای مختلف

خشک کن در دو محدوده مشخص (نسبت رطوبت کمتر و بیش‌تر از 0/4) ارائه شده است. مقادیر بالای ضریب تبیین (R^2) در این روابط بیان‌کننده این موضوع است که انتخاب رابطه خطی بین پارامترهای مذکور ایده خوبی بوده است. معادلات ارائه شده برای تعریف مرز متحرک شبکه با روش اویلر-لاگرانژ دلخواه (ALE) استفاده شدند. سایر محققین نیز رابطه خطی را بین چروکیدگی محصول و محتوی رطوبت آن در مورد سیب زمینی [29]، هویج [47] و سیب [48] گزارش کرده‌اند.

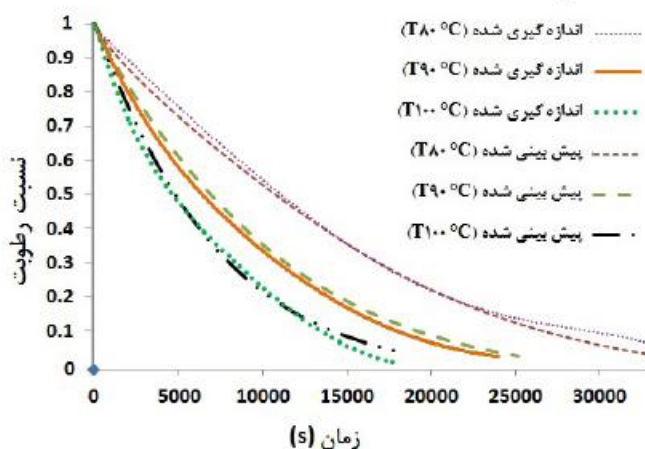
شکل (4) منحنی‌های خشک کردن تجربی و پیش‌بینی شده را برای موز با دماهای مختلف خشک کن نشان می‌دهد. با توجه به شکل، خروج رطوبت در دماهای بالاتر سریع‌تر است که دلیل آن وابستگی شدید ضریب نفوذ موثر به دما است. در واقع اختلاف دمای بیش‌تر بین نمونه و هوای داغ منجر به ایجاد شار

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

دما	محدوده	معادله	R^2
T=80 °C	0/4 < MR < 1	$R = 2/844MR + 12/215$	0/99
	0/04 < MR < 0/4	$R = 4/623MR + 11/498$	0/99
T=90 °C	0/4 < MR < 1	$R = 2/320MR + 12/74$	0/98
	0/04 < MR < 0/4	$R = 4/248MR + 11/983$	0/99
T=100 °C	0/4 < MR < 1	$R = 2/014MR + 13/072$	0/97
	0/04 < MR < 0/4	$R = 4/201MR + 12/302$	0/99



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

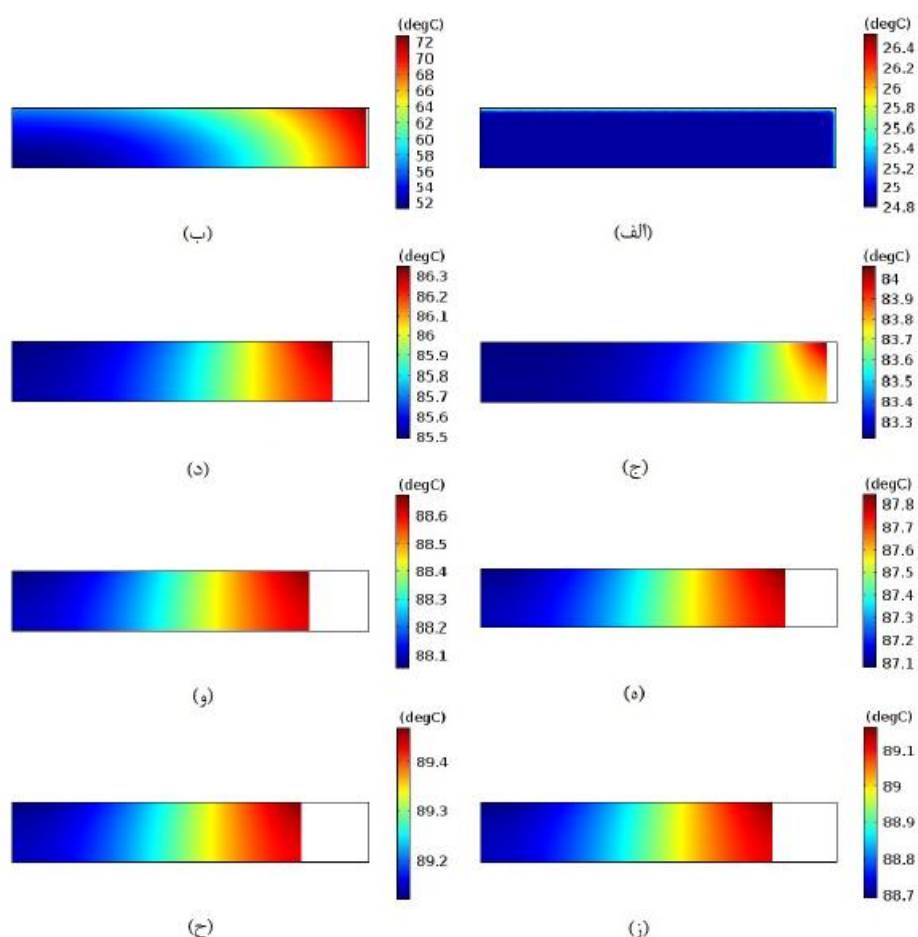


شکل (4) تغییرات نسبت رطوبت نمونه‌های موز با زمان در دماهای مختلف خشک کن (منحنی‌های تجربی و پیش‌بینی شده با مدل المان محدود)

حرارتی قوی‌تر می‌شود که در نتیجه باعث افزایش ضریب نفوذ موثر می‌گردد [49]. همچنین از شکل می‌توان نتیجه گرفت که مقادیر پیش‌بینی شده نسبت رطوبت با مقادیر تجربی سازگاری خوبی دارند. مقایسه آماری این منحنی‌ها با عبور یک خط با معادله $Mr_{pred} = A \times Mr_{exp} + B$ بین داده‌های تجربی و پیش‌بینی شده انجام گرفت که در آن A و B ثابت‌هایی باشند (جدول 3). مقادیر بالای ضریب تبیین ($R^2 > 0.97$) نشان می‌دهد که نقاط روی نمودار در نزدیکی خط هستند و بنابراین مدل المان محدود به خوبی توانسته است تغییرات رطوبت نمونه‌های موز را پیش‌بینی کند. میانگین خطای نسبی ($\%E$) برای پیش‌بینی رطوبت در محدوده 8/83-4/23 درصد بود که در محدوده قابل قبول ($\%E < 10$) است [50].

جدول (3) ثابت‌های A و B و ضریب تبیین (R^2) برای رابطه خطی بین نسبت رطوبت تجربی و پیش‌بینی شده با مدل المان محدود ($Mr_{pred} = A \times Mr_{exp} + B$)

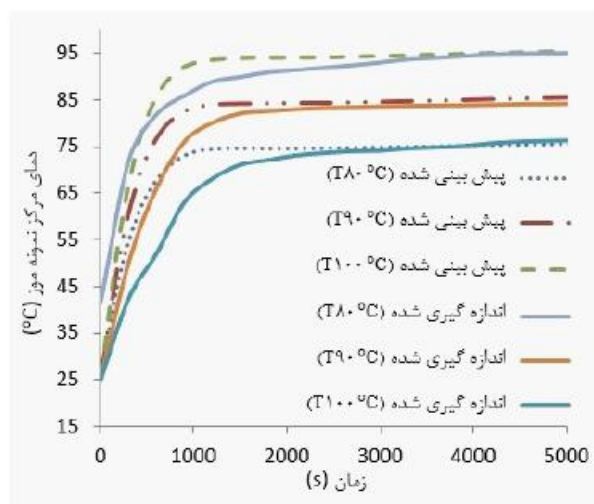
دمای خشک‌کن			ثابت‌ها
T=100 °C	T=90 °C	T=80 °C	
0/996	1/0011	0/9961	A
0/0123	0/0188	-0/0126	B
0/975	0/982	0/978	R ²



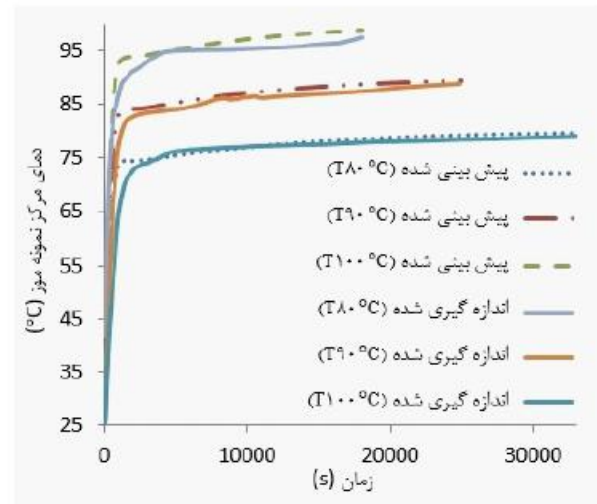
شکل (5) توزیع دما درون نمونه موز هنگام خشک شدن با دمای هوای 90 °C در گام‌های زمانی مختلف: الف) 0 s، ب) 200 s، ج) 1000 s، د) 5000 s، ه) 10000 s، و) 15000 s، ز) 20000 s، ح) 25000 s

در شکل (6) تغییرات دمای مرکز میوه در طول زمان خشک شدن نشان داده شده است. با توجه به شکل می‌توان نتیجه گرفت که دمای پیش‌بینی شده با مدل المان محدود بسیار نزدیک به مقادیر اندازه‌گیری شده است. با بزرگ‌نمایی نمودار مشخص شد که اختلاف جزئی در مقادیر پیش‌بینی شده مربوط به مراحل ابتدایی خشک کردن ($t < 1000$ s) است (شکل 7). دماهای اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی 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 موفقیت‌آمیزی دما را در مرکز میوه پیش‌بینی 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

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 کردن محتوی رطوبت نسبتاً 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 می‌رود و به دمای هوای خشک کن نزدیک‌تر می‌شود. 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 یکتواخت افزایش می‌یابد.



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



شکل (6) تغییرات دمای اندازه‌گیری 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 (R^2) برای رابطه خطی بین دمای اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده با مدل المان محدود در مرکز نمونه

$$(T_{pred} = A \times T_{exp} + B)$$

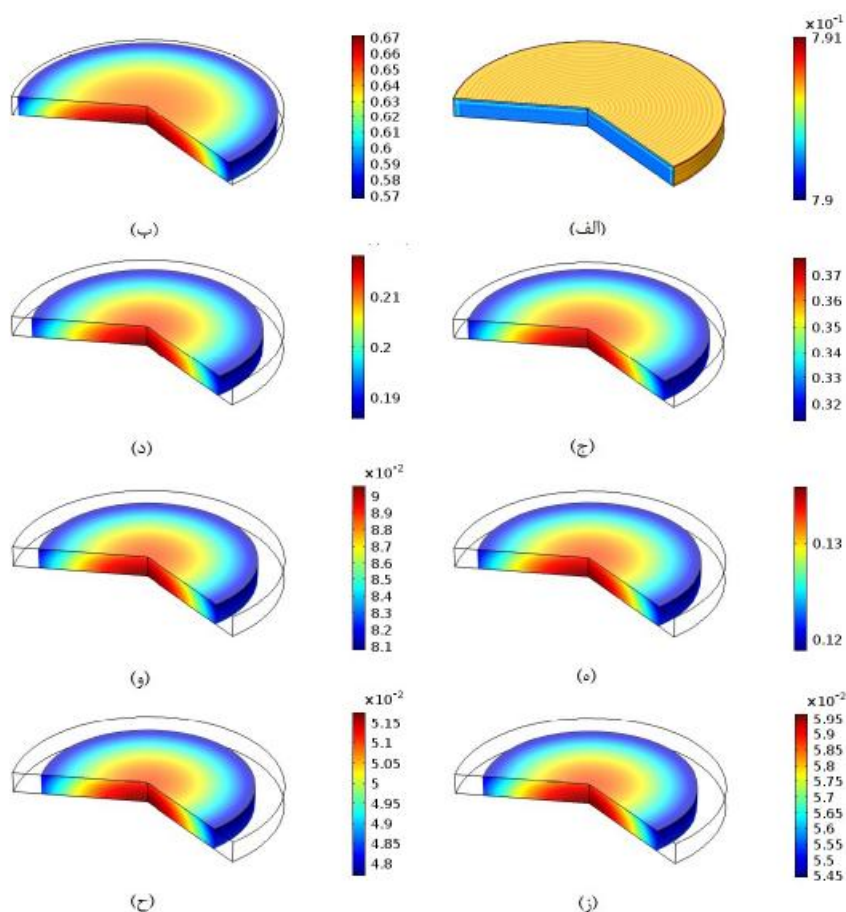
دمای خشک کن			ثابت‌ها
T=100 °C	T=90 °C	T=80 °C	
1/008	0/983	0/9765	A
1/6693	2/822	2/5443	B
0/994	0/981	0/985	R^2

نمونه می‌شود. ولی این انتقال به دلیل مقاومت انتقال جرم داخلی بسیار کند است [51، 52]. پس می‌توان نتیجه گرفت که فرایند خشک شدن موز با نفوذ کنترل می‌شود و چنان‌که در شکل (۴) نیز نشان داده شده است منحنی خشک شدن موز به صورت شدت نزولی انجام می‌شود.

در حالت کلی، مدل المان محدود ارائه شده در این تحقیق توانست تغییرات دما و رطوبت نمونه‌های موز را در شرایط مختلف خشک شدن به‌طور موفقیت آمیزی پیش‌بینی کند. با توجه به این‌که بسیاری از پارامترهای کیفی میوه‌ها از قبیل رنگ، طعم، بو و غیره تحت تاثیر تغییرات رطوبت و دمای محصول هستند، می‌توان نتیجه گرفت که مدل ارائه شده در این تحقیق می‌تواند جهت طراحی و بهینه سازی فرایند خشک کردن موز با هدف بهبود کیفیت محصول به‌کار گرفته شود. چون در این تحقیق از معادلات پایه انتقال

تحقیق در محدوده قابل قبول می‌باشد، می‌توان نتیجه گرفت که بیان خواص ترموفیزیکی محصول به صورت تابعی از رطوبت و دمای آن ایده خوبی برای حل دقیق معادلات انتقال جرم و حرارت بوده است.

شکل (۸) توزیع رطوبت درون میوه را در طول فرایند خشک شدن نشان می‌دهد. در این شکل از دوران دامنه محاسباتی مدل بر روی خط تقارن محوری (مرز Γ_1 در شکل ۲) جهت نمایش فضایی نتایج استفاده شده است. در این شکل هم روند چروکیدگی محصول در طول خشک شدن نیز قابل مشاهده است. با مقایسه توزیع رطوبت در زمان‌های مختلف می‌توان نتیجه گرفت که محتوی رطوبت با گذشت زمان به تدریج کاسته می‌شود و به دلیل تبخیر سریع در هر لحظه مقدار اندکی از رطوبت در سطح نمونه وجود دارد. گرادیان رطوبت ایجاد شده درون محصول باعث انتقال رطوبت داخلی به سطح



شکل (۸) توزیع محتوی رطوبت (بر پایه تر) درون نمونه موز هنگام خشک شدن با دمای هوای 90°C در گام‌های زمانی مختلف: الف) ۰ s، ب) ۲۰۰۰ s، ج) ۶۰۰۰ s، د) ۱۰۰۰۰ s، ه) ۱۴۰۰۰ s، و) ۱۸۰۰۰ s، ز) ۲۳۰۰۰ s، ح) ۲۵۰۰۰ s

آماری نشان داد که مقادیر پیش‌بینی شده دما و رطوبت توسط مدل با مقادیر اندازه‌گیری شده سازگاری کامل دارند. بنابراین مدل ارائه شده می‌تواند در جهت طراحی و بهینه کردن فرایند خشک کردن موز در جهت رسیدن به محصول با کیفیت مطلوب مفید واقع شود.

جرم و حرارت جهت مدل‌سازی استفاده شده است، می‌توان با تغییر پارامترهای ورودی مدل، آن را برای خشک کردن سایر محصولات کشاورزی با شکل هندسی مشابه که در حین خشک شدن چروکیده می‌شوند بسط داد.

4- نتیجه گیری

قدردانی پژوهش حاضر در قالب طرح تحقیقاتی شماره 38200 با حمایت مالی دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد انجام شد. بدین وسیله نویسندگان مراتب تشکر و قدردانی را از همکاری مالی واحد مربوطه اعلام می‌دارند.

روش المان محدود جهت حل معادلات دیفرانسیل جزئی انتقال جرم و حرارت نمونه‌های موز به کار گرفته شد. از روش اویلر- لاگرانژ دلخواه برای احتساب چروکیدگی در مدل استفاده شد. مدل ارائه شده قادر بود تغییرات دما و رطوبت را در طول خشک شدن نمونه‌های موز پیش‌بینی کند. مقایسه

نمادها

n	تعداد آزمایش‌ها	A_0	مساحت اولیه نمونه (mm^2)
Nu	عدد ناسلت	A_t	مساحت نمونه در زمان t (mm^2)
r	شعاع نمونه موز (m)	C	غلظت رطوبت (mol/m^3)
R_g	ثابت جهانی گازها ($8/314 \text{ J/mol} \cdot \text{K}$)	C_{air}	غلظت رطوبت در هوا (mol/m^3)
R_{sh}	چروکیدگی شعاعی (/)	C_p	گرمای ویژه موز ($\text{J/kg} \cdot \text{K}$)
T	دما (K)	C_{pa}	گرمای ویژه هوا ($\text{J/kg} \cdot \text{K}$)
t	زمان (s)	d	قطر نمونه موز (m)
α	نفوذ حرارتی موز (m^2/s)	D_{eff}	ضریب موثر نفوذ (m^2/s)
α_a	نفوذ حرارتی هوا (m^2/s)	D_w	ضریب پخش آب در هوا (m^2/s)
λ	گرمای نهان تبخیر آب (J/kg)	E_a	انرژی فعال‌سازی (kJ/mol)
v	سرعت هوا (m/s)	h_m	ضریب انتقال همرفت جرم (m/s)
ρ	چگالی (kg/m^3)	h_t	ضریب انتقال همرفت حرارت ($\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$)
ρ_a	چگالی هوا (kg/m^3)	k	ضریب هدایت حرارتی موز ($\text{W/m} \cdot \text{K}$)
ρ_s	چگالی ماده جامد (kg/m^3)	k_a	ضریب هدایت حرارتی هوا ($\text{W/m} \cdot \text{K}$)
		M_0	محتوی رطوبت اولیه
		M_c	محتوی رطوبت بر پایه خشک
		M_e	محتوی رطوبت تعادلی
		M_R	نسبت رطوبت
		M_t	محتوی رطوبت در زمان t

- 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., Agüero, 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.
- [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., Soponronarit, 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., Anandharamkrishnan, 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 diffusion 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.

- netics, colour and shrinkage of air dried apples. *Appl. Therm. Eng.* 62, 455-460.
- [49] Tzempelikos, D.A., Mitrakos, D., Vouros, A.P., Bardakas, A.V., Filios, A.E., Margaritis, 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.
- [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] Cárceles, 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-