



## شبیه سازی چروکیدگی ورقه‌های هویج در خشک شدن با جریان همرفتی

نگار آفاقی سردرود<sup>۱\*</sup>، اسعد مدرس مطلق<sup>۲</sup>، سید صادق سیدلو<sup>۳</sup>، علی حسن پور<sup>۴</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مکانیک ماشین‌های کشاورزی، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه ارومیه

Negarafaghi@yahoo.com

دانشیار گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه ارومیه ۳- استادیار گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه تبریز ۴- استادیار گروه مهندسی

بیوسیستم، دانشگاه ارومیه

### چکیده

چروکیدگی محصول علاوه بر این که معیاری برای کیفیت محصول خشک شده می‌باشد، سینتیک خشک شدن را نیز تحت تاثیر قرار می‌دهد. بنابراین آگاهی از مکانیزم چروکیدگی باعث درک بهتر سینتیک خشک شدن می‌شود. به منظور شبیه‌سازی چروکیدگی هویج در حین فرایند خشک شدن، معادلات انتقال جرم و حرارت با معادلات مکانیکی به طور هم‌زمان در شرایط سه بعدی و در دماهای ۶۰ و ۷۰ درجه سلسیوس با استفاده از نرم افزار comsol multiphysics استفاده گردید. با در نظر گرفتن تنش حرارتی بدست آمده، نمودارهای توزیع تنش نسبت رطوبتی ورقه‌های هویج در فرایند خشک شدن رسم شدند. نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی محتوای رطوبت، دما و چروکیدگی با داده‌های تجربی مقایسه شدند و همبستگی مناسبی ما بین آن‌ها وجود داشت و مشخص شد که درصد چروکیدگی با افت رطوبت متناسب است.

واژه های کلیدی: انتقال حرارت، انتقال جرم، تنش، چروکیدگی، هویج

### مقدمه

افزایش کیفیت مواد خشک شده یکی از مهم‌ترین دغدغه‌های صنایع تبدیلی است. و یکی از تغییرات فیزیکی مهم که در حین خشک شدن مواد غذایی اتفاق می‌افتد، کاهش در طعم خشک شدن مواد غذایی، چروکیدگی به طور پیوسته اتفاق می‌افتد که خصوصیات فیزیکی ماده و نیز خصوصیات ترموفیزیکی ماده را تحت تاثیر قرار می‌دهد. روی کیفیت تاثیر گذار است (Mayor and Sereno, 2004).



هویج یکی از پر مصرف‌ترین سبزیجات مورد استفاده برای تغذیه انسان به دلیل محتوای فیبر و ویتامین‌های بالای است. این محصول غنی از ویتامین‌های (A, B<sub>1</sub>, B<sub>2</sub>, B<sub>6</sub>, B<sub>12</sub>), شکر، نشاسته، پتاسیم، کلسیم، فسفر، آهن و سایر مواد مغذی و نمک‌های معدنی و پنج نوع اسیدهای آمینه می‌باشد (aboltins *etal.*, 2011). هویج تازه دارای محتوای رطوبتی ۹۰-۸۰ درصد است. کاهش رطوبت محصول در طی فرایند خشک شدن باعث چروکیدگی می‌شود، بنابراین بررسی چروکیدگی ورقه‌های هویج حائز اهمیت فراوانی می‌باشد.

تحقیقاتی با مدل دو بعدی برای شبیه

آن مدل انتقال جرم و حرارت به همراه معادلات کار مجازی به طور هم‌زمان حل شدند. تطابق خوبی بین نتایج تئوری و تجربی به دست آمد و مدل قادر بود تغییر شکل و ترک را پیش‌بینی کند (tsuka *etal.*, 1991; Akiyama and Hayakawa, 2000).

اگر چروکیدگی بطور یکنواخت در داخل محصول اتفاق بیافتد رفتار کرنش چروکیدگی غیر یکنواخت بوجود می‌آورد که باعث ایجاد تنش، تغییر شکل غیر یکنواخت و تاثیر منفی در بافت و جذب دوباره رطوبت محصول خشک شده می‌شود (kowalski and Rajewska, 2002).

توزیع دو بعدی تنش در فرایند خشک شدن ماکارونی با حل هم‌زمان معادلات انتقال رطوبت و ساختاری با استفاده از روش المان محدود به

محصول ایجاد می‌شود (Inazu *etal.*, 2005).

تئوری انتقال جرم و حرارت درگیر در مواد غذایی متخلخل به صورت سه بعدی با در نظر گرفتن خواص مهندسی متغییر در طی خشک شدن بررسی شد، هر چند در دو ساعت اول داده‌های تئوری با داده‌های شبیه‌سازی شده تطابق خوبی داشتند و در صد خطا از ۵٪ بیشتر نشد اما در ادامه فرایند به دلیل در نظر نگرفتن چروکیدگی، بین داده‌های تئوری و پیش‌بینی شده انحراف مشاهده شد (aversa *etal.*, 2007).

در بیش‌تر مدل‌های انتخاب شده، برای سهولت حل معادلات، از چروکیدگی صرف‌نظر کرده‌اند. در حالی که یکی از مهم‌ترین تغییرات فیزیکی که در حین خشک شدن اتفاق می‌افتد، کاهش حجم است که در بعضی از موارد همراه تغییر حجم، تغییر شکل نیز اتفاق می‌افتد (Białobrzewski *etal.*, 2008).

ترک که نیز کیفیت محصولات غذایی را تحت تاثیر قرار می

کشی به وجود آید. بنابراین از الگوی تنش می‌توان جهت گسترش ترک را پیش‌بینی کرد (Niamny *etal.*, 2008).

**مواد و روش‌ها**



در این تحقیق مدل‌های ریاضی سه بعدی برای پیش‌بینی محتوای رطوبت، حرارت، چروکیدگی و پروفیل تنش در فرایند خشک شدن هویج در خشک

حرارتی بر روی تغییر شکل اعمال شد.

فرضیات: هویج به عنوان ماده همگن فرض شد، توزیع اولیه دما و رطوبت به صورت یکنواخت در نظر گرفته شد، انتقال جرم در داخل هویج با نفوذ رطوبت صورت می

می‌افتد و رفتار کرنش و تنش از قانون هوک برای مواد الاستیک پیروی می‌کند.

## مدل سازی ریاضی در بیان معادلات انتقال حرارت و جرم

### معادلات انتقال حرارت

انتقال حرارت در داخل محصول از طریق هدایت به دلیل گرادیان دما در تمام جهات اتفاق می

محصول معادله انتقال حرارت (قانون فوریه) در حالت ناپایدار در سه بعد حل می‌شود (Mohan and Talukdar, 2010).

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) \quad (1)$$

با داشتن شرایط اولیه:  $t = 0$  ,  $T = T_0$  و شرایط مرزی:

$$k \frac{\partial T}{\partial n} = h_T (T_a - T_{surf}) - m' \cdot L_v \quad (2)$$

$$m' = -\rho \text{Deff} \frac{\partial c}{\partial n} = h_m (p_s - p_a) \quad (3)$$

$$P_a = RH \cdot p_{sat} (T_a) \quad (4)$$

$$P_s = a_w \cdot p_{sat} (T_s)$$

و با جای‌گذاری معادلات 4 در 3 معادله 5 به دست می‌آید.

$$m' = h_m (p_{sat}(T_s) \cdot a_w - p_{sat}(T_a) \cdot RH) \quad (5)$$

عبارت قسمت چپ معادله ۲ بیانگر انتقال گرما به طریق هدایت در داخل محصول است و عبارت اول قسمت راست معادله بیانگر

انتقال حرارت به طریق همرفت از هوای گرم به محصول است و عبارت دوم شامل گرمای نهان تبخیر می‌باشد

(Barati and Esfahani, 2011).

### معادلات انتقال جرم

انتقال رطوبت در داخل هویج از طریق نفوذ رطوبت اتفاق می‌افتد و از فرم سه بعدی قانون دوم فیک برای شبیه سازی انتقال جرم استفاده می‌شود (Barati and Esfahani, 2013).

$$\frac{\partial M}{\partial x} = \nabla \cdot (D \nabla M) \quad (6)$$

شرایط اولیه:  $M = M_0, t = 0$  و شرایط مرزی:

$$-D_{\text{eff}} \rho \frac{\partial M}{\partial x} = h_m (P_{\text{sat}}(T_s) * a_w - P_{\text{sat}}(T_a) * RH) \quad (7)$$

است. منظور از شرایط مرزی همان حفظ تعادل بین انتقال جرم داخل محصول و تبخیر است.

### معادلات مکانیکی

معادلات تنش: از آنجایی که توزیع رطوبت سه بعدی بود جا به جایی کل  $\{dU\}$  در هر نقطه در داخل محصول بوسیله معادله ۸ بیان می‌شود (Yang et al., 2001).

$$\{dU\} = \{dU_x, dU_y, dU_z\} \quad (8)$$

کرنش محلی

چروکیدگی هویج با تعیین کرنش کل محلی مدل سازی شد. کرنش کل مجموعی از کرنش مکانیکی  $\{d\epsilon_s\}$ ، کرنش آزاد (کرنش چروکیدگی  $\{d\epsilon_0\}$ ) و کرنش حرارتی  $\{d\epsilon_T\}$  است (Hasalani and Itaya, 2007).

$$\{d\epsilon\} = \{d\epsilon_s\} + \{d\epsilon_0\} + \{d\epsilon_T\} \quad (9)$$

۲-۳-۲ رابطه کرنش و تغییر شکل

کرنش کل تابعی از جابه‌جایی کل  $\{dU\}$  و ماتریس تغییرات کرنش  $\{A\}$  می‌باشد.

$$\{d\epsilon\} = [A]\{dU\} \quad (10)$$

که تغییر شکل کل تابعی از جابه‌جایی گره‌ها  $\{dn\}$  و تابع شکل  $[N]$  است.



$$\{dU\} = [N] \{dn\} \quad (11)$$

از ترکیب معادلات ۱۰ و ۱۱ معادله ۱۲ به دست می‌آید.

$$\{d\varepsilon\} = [A] [N] \{dn\} = [B] \{dn\} \quad (12)$$

برای تعیین کرنش چروکیدگی  $\{d\varepsilon_0\}$  فرض شده است که تغییر شکل آزاد به دلیل افت رطوبت با در نظر گرفتن ضرایب ثابتی، متناسب با محتوای رطوبت است. ضرایب ثابت از داده‌های تجربی که چروکیدگی را به محتوای رطوبت نسبت می‌داد، به دست آمده است.

تغییر در تنش تابعی از کرنش مکانیکی است.

$$\{d\sigma\} = [D] \{d\varepsilon_s\} \quad (13)$$



که  $D$  مدول یانگ محصول است.

از اصل کار مجازی برای تعیین معادلات تعادل استفاده شده است. با فرض این که هیچ نیروی خارجی (سطحی و حجمی) بر محصول وارد نمی‌شود. می‌توان نوشت:

$$\int_V \delta \{d^s\}^T \{d\sigma\} dV = 0 \quad (14)$$



$$\int [B]^T [D] [B] dv \{dn\} = \int [B]^T [D] \{d^d\} dv \quad (15)$$

با حل معادله ۱۴ جابه‌جایی گره‌ها  $\{dn\}$  به دست می‌آیند و با استفاده از معادله ۱۰ کرنش کل تعیین می‌شود.

از آن جایی که ورقه

گاه ثابت در نظر گرفته می‌شود و سه مرز دیگر شرایط آزاد دارند

( tsuka *etal.*,1991; Niamnuy *etal.*,2008; Curcio and Aversa, 2009 ) .

### ضرایب انتقال جرم و حرارت

ویژگی‌های فیزیکی و ضرایب متغییر لازم برای حل معادلات از مقالات دیگر استخراج شدند.



هدایت حرارتی (k): هدایت حرارتی از رابطه ۱۶ به دست می‌آید (Lopez et al., 2004).

$$K = 0.49 - 0.443 \exp(-.206 * M) \quad (16)$$

گرمای ویژه (c): گرمای ویژه هویج از رابطه ۱۷ محاسبه می‌شود (Mihoubi, D et al., 2009).

$$c = 837 + 4180 M / (M + 1) \quad (17)$$

ضریب موثر نفوذ رطوبت (D<sub>eff</sub>): ضریب موثر نفوذ از رابطه ۱۸ تعیین می‌شود (Białobrzewski, I et al., 2008).

$$D_{eff} = 2.779 * 10^{-4} * \exp(-.97 - (3459.8/T) + .059 * M) \quad (18)$$

ضریب انتقال گرمای سطحی (h<sub>T</sub>): ضرایب انتقال حرارت بر اساس رابطه وابستگی عدد ناسلت به عدد پرتل و رینولدز محاسبه می‌شود (Barati and Esfahani, 2012).

$$Nu = h.L / K_{air} = 0.664 * Re^{1/2} * Pr^{1/3} \quad (19)$$

L, K<sub>air</sub>, Pr, Re, Nu، به ترتیب نشان دهنده عدد ناسلت، رینولدز، پرتل، هدایت حرارتی هوا، طول محصول که موازی جریان هوا است.

ضریب انتقال جرم سطحی (h<sub>m</sub>): بین ضرایب انتقال جرم و حرارت رابطه‌ای وجود دارد بنابراین بعد از به دست آوردن ضریب انتقال حرارت سطحی به راحتی می‌توان ضریب انتقال جرم سطحی را محاسبه نمود (Barati and Esfahani, 2012).

$$h/h_m = \rho_{air} c_{air} Le^{.66} \quad (20)$$

فعالیت آبی (a<sub>w</sub>): از مدل GAB برای محاسبه فعالیت آبی استفاده شد (Mihoubi, D et al., 2009).

$$W = \frac{w_m c k a_w}{(1 - k a_w) [1 + ((c - 1) k a_w)]} \quad (21)$$

ثوابت مدل از قانون آرنوس تعیین می‌شود.

ضریب حجمی چروکیدگی (S<sub>v</sub> = v/v<sub>0</sub>): ضریب حجمی چروکیدگی که به صورت تجربی تعیین می‌شود و با محتوای رطوبت طبق فرمول زیر رابطه دارد (Rostami et al., 2013).

$$v/v_0 = 0.0103 M^2 + 0.035M + 0.098 \quad \text{در دمای } 60 \text{ درجه سانتی گراد}$$



$$v/v_0 = 0.0125M^2 + 0.027M + 0.128$$

در دمای ۷۰ درجه سانتی گراد

حل معادلات: معادلات فوق با استفاده از نرم افزار COMSOL multiphysics 4.2 به طور هم زمان حل شدند.

## نتایج و بحث

نتایج شبیه سازی محتوای رطوبت، دما و چروکیدگی با داده‌های تجربی رستمی و همکاران (۲۰۱۳) مقایسه شدند.

سینتیک خشک کردن: خشک کردن و شبیه‌سازی کردن در هوای گرم با دمای ۶۰ و ۷۰ درجه سلیسیوس، سرعت هوای گرم  $1/2 \text{ m/s}$  و محتوای رطوبت اولیه  $7/8 \text{ gr/gr}$  بر پایه خشک انجام گرفت.

وقتی ماده غذایی در معرض هوای گرم قرار می‌گیرد رطوبت سطح ماده بخار می‌شود با بخار شدن آب سطحی گرادیان فشار بخار بین سطح و داخل ماده غذایی موجب نفوذ رطوبت از نقاط داخلی به سطح و بخار شدن آن می‌گردد. کم‌تر نقاط نزدیک به سطح رطوبت بیشتری نسبت به مرکز از دست می‌دهند و رطوبت مرکز بیشتر از سطوح است و همان طور که در شکل‌های ۱ و ۲ مشاهده می‌شود به دلیل گرادیان رطوبتی بالا در ابتدای فرایند سرعت کاهش رطوبت سریع است و با افزایش زمان سرعت کاهش رطوبت کم می‌شود. در مطالعه انتقال جرم و حرارت محصولات استوانه‌ای مرطوب نیز به این نتیجه رسیدند (Hussain and Dincer, 2003).

در طی خشک شدن رطوبت از مرکز هویج به طرف سطح حرکت می‌کند.

مرزی انتقال جرم مشخص می‌شود. از مقایسه بین شکل‌های ۱ و ۲ مشاهده می‌شود کاهش رطوبت در دمای بالا، سریع‌تر است چون که تفاوت دمای بین نمونه و هوای گرم و همچنین ضریب نفوذ در دماهای بالا بیشتر بود و همبستگی بالای بین داده‌های تجربی و شبیه سازی شده مشاهده شد.

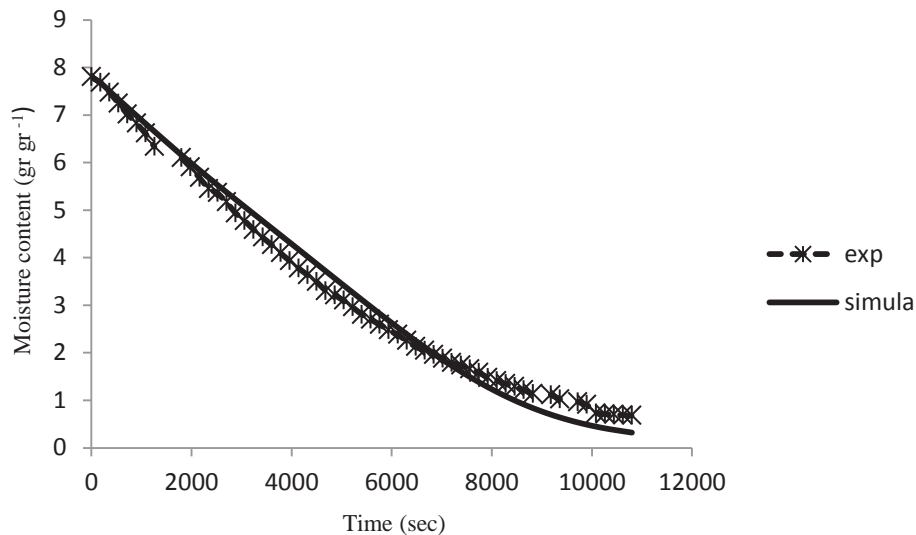
مدل ریاضی چروکیدگی، پروفیل دما، رطوبت و تنش تولید شده در اثر خشک شدن سیب زمینی با استفاده از حل هم‌زمان معادلات انتقال جرم و رطوبت با معادلات مکانیکی به دست آمد (Curcio and Aversa, 2009).

چون بیشتر پروژه‌های انجام شده در این زمینه، در حل مجموعه معادله‌های یک یا دو بعدی متمرکز بوده است و از تنش حرارتی که حین خشک شدن محصول در اثر حرارت به وجود می‌آید صرف‌نظر کرده اند، بنابراین، هدف این پروژه توسعه مدل سه بعدی است که بتواند محتوای رطوبتی، دما و تغییر شکل هویج را با در نظر گرفتن کرنش حرارتی در حین خشک شدن پیش مدل شامل حل هم‌زمان معادلات انتقال حرارت، جرم و مکانیکی است. پس از تعیین شرایط اولیه و شرایط مرزی، معادلات به دست آمده با استفاده از روش عددی المان محدود با نرم افزار COMSOL multiphysics (ورژن ۴،۲) تجزیه و تحلیل شدند. خشک کردن

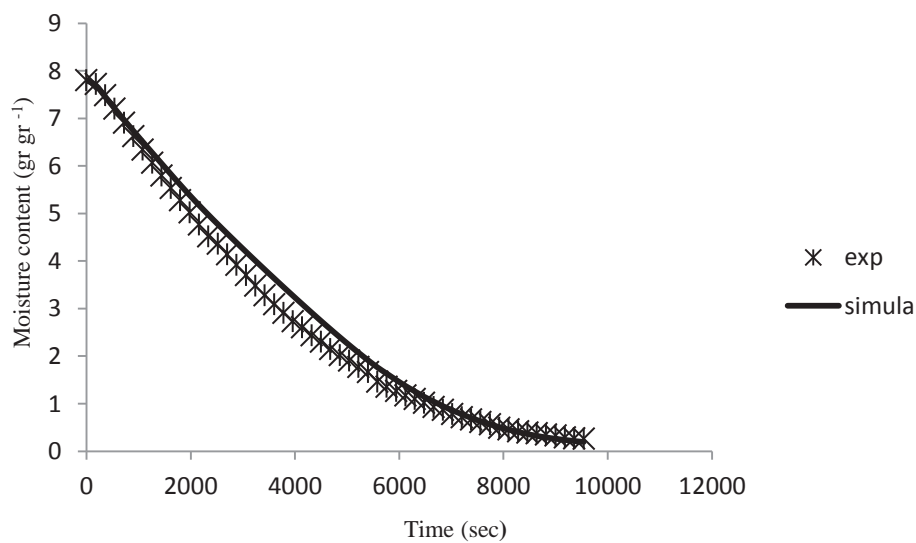




در دو دمای ۶۰ و ۷۰ درجه سلسیوس در سرعت ۱/۲ متر بر ثانیه انجام گرفت و نتایج به دست آمده با داده‌های تجربی به دست آمده مقایسه شدند.



شکل ۱- تغییرات محتوای رطوبت اندازه‌گیری شده و پیش بینی شده در ورقه های هویج در ۶۰ درجه سلسیوس.



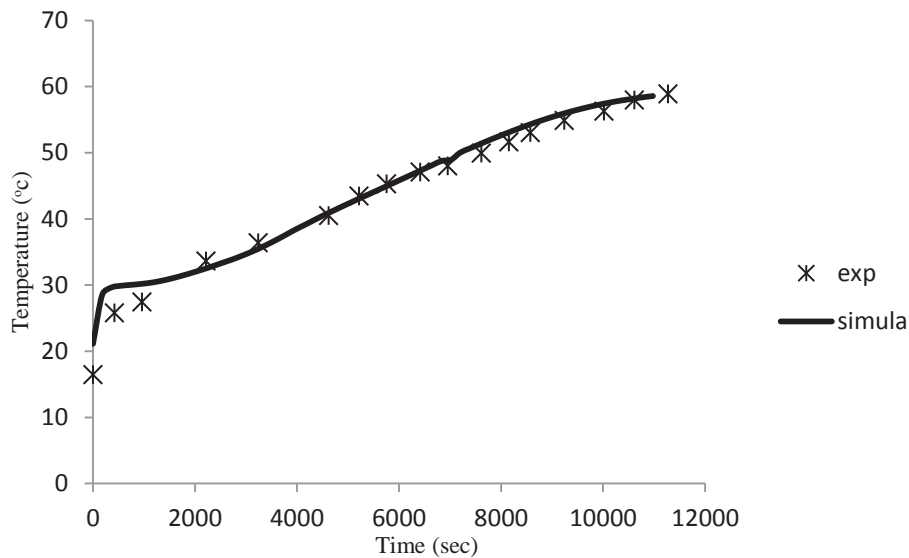
شکل ۲- تغییرات محتوای رطوبت اندازه‌گیری شده و پیش بینی شده در ورقه های هویج در ۷۰ درجه سلسیوس.

وقتی ماده غذایی در معرض هوای گرم قرار می‌گیرد حرارت به طریق همرفت از هوای گرم به داخل ماده نفوذ می‌کند و به طریق رسانش در داخل ماده جریان می‌رساند (Białobrzewski *et al.*, 2008).

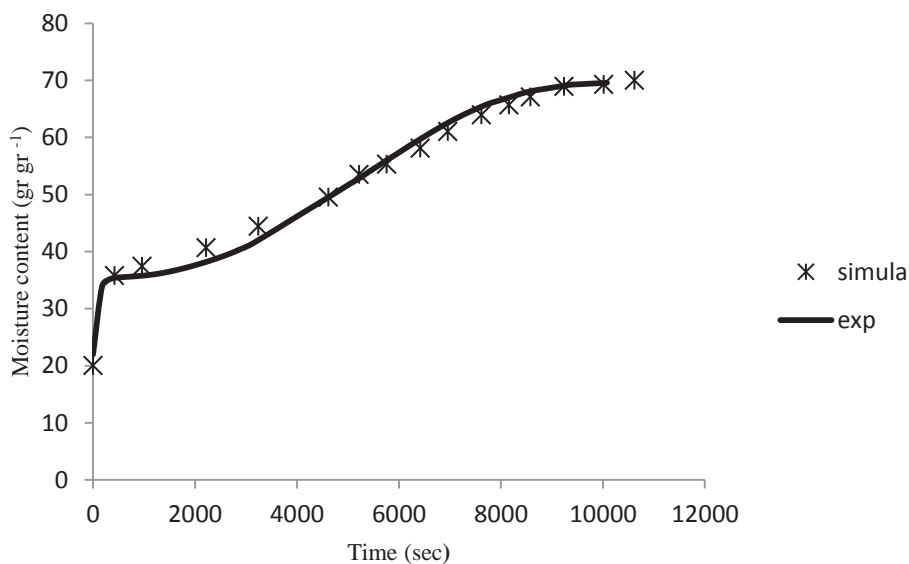




از شکل‌های ۳ و ۴ مشخص می‌شود که دمای محصول در ابتدا سریع افزایش می‌یابد سپس شیب افزایش دما کاهش می‌یابد چون که مقداری گرما صرف تبخیر رطوبت می‌شود. شبیه سازی توزیع دما نشان می‌دهد که تغییرات دما در تمام نقاط سطحی و داخلی ورقه‌های هویج با گذشت زمان خشک کردن، روند افزایشی داشته‌اند. در مطالعات انجام شده بر روی نمونه‌های مکعبی سیب نیز چنین نتیجه‌ای گزارش شده است (Bialobrozewski, 2006). از مقایسه شکل‌های ۳ و ۴ مشخص می‌شود که زمان خشک شدن در دماهای بالا سریع‌تر است چون که با توجه به رابطه بین دما و ضریب نفوذ، با افزایش دما ضریب نفوذ موثر افزایش می‌یابد. در نتیجه در دمای بالا سرعت خشک شدن افزایش و زمان خشک شدن کاهش می‌یابد (Abbasi et al., 2011).



شکل ۳- تغییرات دمای اندازه گیری شده و پیش‌بینی شده در سطح بالای ورقه‌های هویج در ۶۰ درجه سلسیوس.

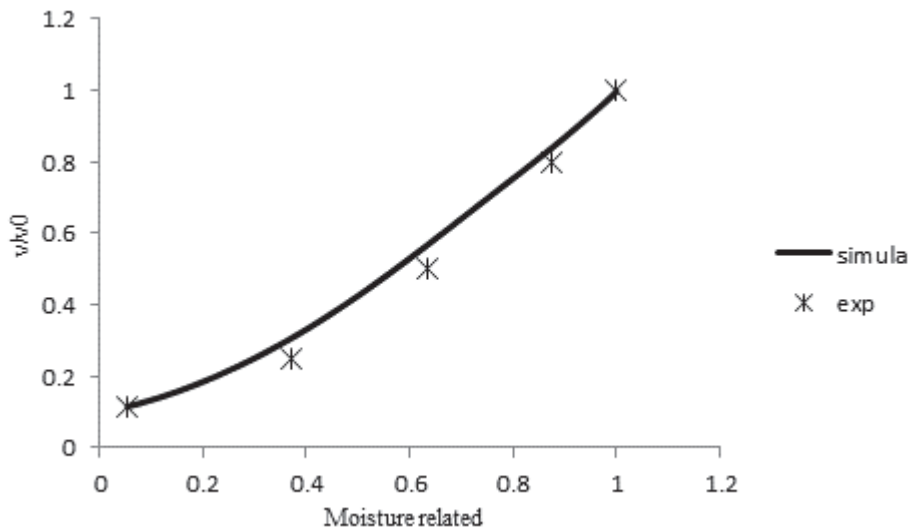


شکل ۴- تغییرات دمای اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده در سطح بالای ورقه‌های هویج در ۷۰ درجه سلسیوس.

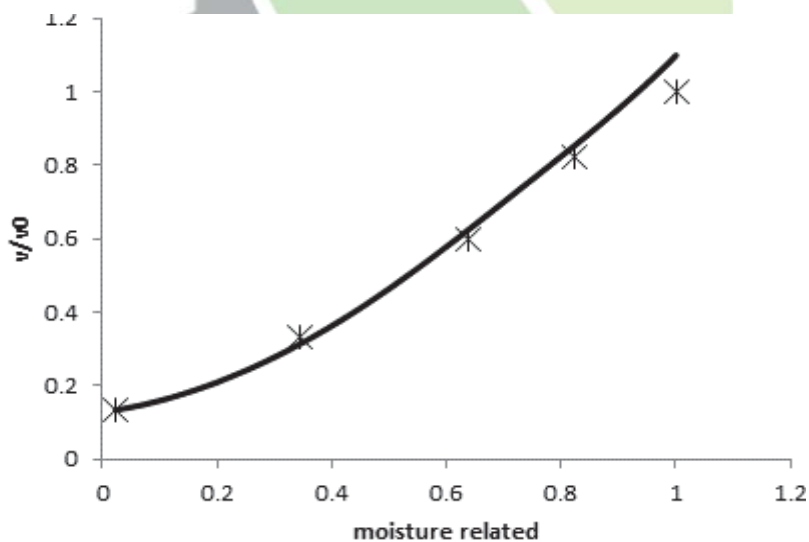


تغییرات حجم و توزیع تنش

شکل ۵ مقایسه بین چروکیدگی شبیه‌سازی شده هویج را با داده‌های تجربی نشان می‌دهد. همبستگی مناسبی ما بین آن‌ها وجود داشت. موقعی که رطوبت طی خشک شدن از داخل محصول خارج می‌شود نیروی نامتعادلی بین داخل و محیط خارجی محصول تولید می‌شود که این نیرو باعث چروکیدگی شدن محصول می‌شود.



شکل ۵- تغییرات حجم اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده بر حسب نسبت رطوبتی در دمای ۶۰ درجه سلسیوس .



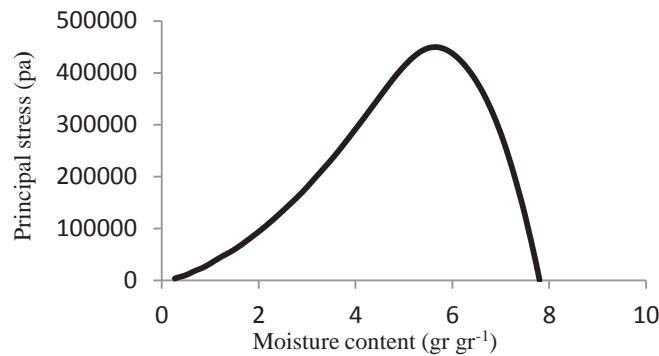
شکل ۶- تغییرات حجم اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده بر حسب نسبت رطوبتی در دمای 70 درجه سلسیوس .

همان‌طور که از شکل‌های ۵ و ۶ مشخص است چروکیدگی متناسب با خروج رطوبت است و تاثیر دما بر روی چروکیدگی ناچیز است و این نتایج در خشک کن انجمادی هویج نیز گزارش شده است. (Hatamipour and Mowla, 2002)

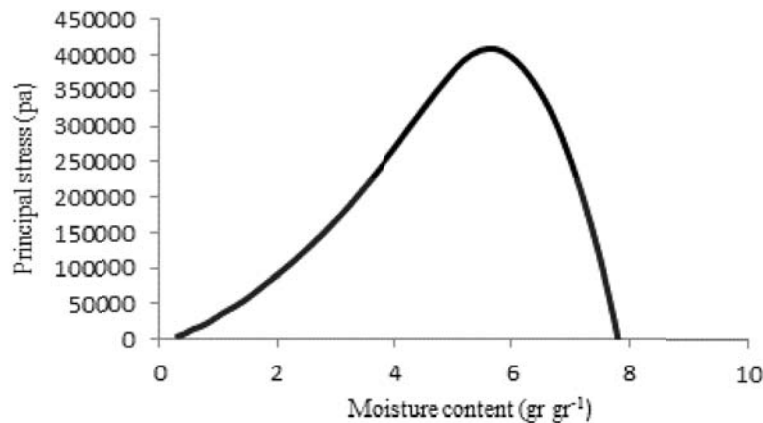
طی خشک شدن گرادیان رطوبت داخل هویج باعث چروکیدگی غیر یکنواخت می‌شود که چروکیدگی غیر یکنواخت تنش داخل محصول را تولید می‌کند. شکل‌های ۷ و ۸ تنش کششی ماکزیمم ایجاد شده در هویج را در مقابل محتوای رطوبت نشان می‌دهند.



ماکزیمم تنش کششی در ابتدای فرایند برابر صفر بود چون که محتوای رطوبت اولیه هویج یکنواخت بود، بعد مقدار با کاهش رطوبت تنش کاهش می‌یابد. روند تغییرات تنش به دلیل تغییرات گرادیان رطوبت است.



شکل ۷- تنش کششی نسبت به محتوای رطوبت در ورقه های هویج در ۶۰ درجه سانتی گراد.



شکل ۸- تنش کششی نسبت به محتوای رطوبت در ورقه های هویج در ۷۰ درجه سانتی گراد.

از مقایسه بین شکل‌های ۷ و ۸ مشاهده می‌شود که ماکزیمم تنش کششی در دمای ۶۰ درجه بیش‌تر از ۵۰ درجه سانتی گراد است. چون که در دمای کم‌تر گرادیان رطوبتی بیش‌تری وجود دارد. در تحقیقی که بر روی میگو انجام گرفته بود (Niamnuay,etal.,2008) نتایج مشابه‌ای مشاهده شد.

ترک در جهت عمود بر ماکزیمم تنش کششی به وجود می‌آید. ماکزیمم باشد و از پروفیل توزیع تنش می‌توان الگوی گسترش ترک را به‌دست آورد. از آنجایی که در هویج ماکزیمم تنش کششی در جهت محور قائم بوجود می‌آید ترک در جهت عمود بر محور قائم یعنی در جهت شعاعی محتمل‌تر است و در آزمایشات هم مشاهده شد که ترک‌ها در جهت شعاعی به‌وجود می‌آیند.

نتیجه گیری

در این مقاله پدیده‌های انتقال جرم، حرارت، چروکیدگی و تنش به طور هم‌زمان طی فرایند خشک شدن هویج در سه بعد با خواص فیزیکی و ترموفیزیکی وابسته به مقدار رطوبت و دما شبیه سازی شدند و بین داده دما و چروکیدگی همبستگی خوبی وجود داشت. ماکزیمم تنش کششی در جهت قائم به وجود می‌شعاعی می‌شود و در دمای ۶۰ درجه سانتی گراد بیش‌ترین تنش کششی به وجود می‌آید بنابراین احتمال اتفاق ترک در این دما بیش‌تر است.

### علائم و اختصارات

M: مقدار رطوبت ( کیلوگرم آب بر کیلوگرم ماده خشک)  
 T: دما (k) ، RH: رطوبت نسبی ،  $a_w$ : فعالیت آبی ، p: فشار ( pa ) ، p : دانسیته ( $\text{kg m}^{-3}$ )  
 t: زمان (sec) ، LV: گرمای نهان تبخیر ( $\text{J kg}^{-1}$ )  
 اندیس‌ها:  
 s: سطح ، a: محیط ، sat: اشباع

### منابع

- 1- Abasi, S., Mousavi.S.M., and Mohebi.M . 2011. Mathematical modeling of drying Processing in Air- Dried onion. Iranian Food Science and Technology Research Journal. 229-234
- 2-Aboltins, A and A. Upitis. 2011. Mathematical model of carrot slices drying. Engineering for rural development, 26-27.05.
- 3-Akiyama,T., and K. Hayakawa. 2000. Heat and moisture transfer and hygrophysical changes in elastoplastic hollcylinder-food during drying. Journal of food science 64:315-323.
- 4-Aversa, M.,s.curico., v.Calabro., and G. Iorio. 2007. An analysis of the transport phenomena occurring during food drying process. Journal of Food Engineering 78 : 922–932.
- 5-Barati, E., and J.A. Esfahani. 2012. Mathematical simulation of convective drying: Spatially distributed temperature and moisture in carrot slab. International Journal of Thermal Sciences 56 : 86-94.
- 6-Barati, E., and J.A. Esfahani. 2013. A novel approach to evaluate the temperature during drying of food products with negligible external resistance to mass transfer. Journal of Food Engineering 114 : 39–46.

7-Barati, E., and J.A. Esfahani. 2011. Mathematical modeling of convective drying: Lumped temperature and spatially distributed moisture in slab. Elsevier ,Energy 36: 2294-2301.

8-Białobrzewski, I., M. Zielin´ska., A. Mujumdar., and M. Markowski. 2008. Heat and mass transfer during drying of a bed of shrinking particles – Simulation for carrot cubes dried in a spout-fluidized-bed drier. International Journal of Heat and Mass Transfer 51: 4704 – 4716.

9-Bialobrzewski, I. 2006. simulation heat and mass transfer in shrinkable apple slab during drying. Drying Tchnology 27:551-559.

10-Curcio, S., and M.Aversa. 2009. Transport Phenomena and Shrinkage Modeling During Convective Drying of Vegetables. Department of Engineering Modelling- University of Calabria.

11- Hasalani, M., and Y. Itaya. 2007. Drying-Induced Strain and Stress: A Review. Drying Technology: An International Journal, 1011-1040 .

12-Hatamipour, M. S., and D. Mowla. 2002. Shrinkage of carrots during drying in an inert medium fluidized bed. Journal of Food Engineering 55: 247–252.

13-Hussain, M.M., and I. Dincer. 2003. Two-dimensional heat and moisture transfer analysis of a finite-difference approach. International Journal of Heat and Mass Transfer 46 : 4033–4039.

14-Inazu, T., K. Iwasaki., and T. Furuta. 2005. Stress and crack prediction during drying of Japanese noodle (udon) International Journal of Food Science and Technology 40: 621–630.

15-Kowalski, s., and K. Rajewska. 2002. Drying-induced stresses in elastic and viscoelastic saturated materials. Chemical Engineering Science 57: 3883 – 3892.

16-Mihobi, D., S. Timoumia., and F.Zagroubab.2009. Modelling of convective drying of carrot slices with IR heat source. Chemical Engineering and Processing 48: 808–815.

17-Mohan, v.p., and p. Talukdar. 2010. Three dimensional numerical modeling of simultaneous heat and moisture transfer in a moist object subjected to convective drying. International Journal of Heat and Mass Transfer 53 : 4638–4650.

18-Niamnuy, ch., S.Devahastin., S. Soporonnarit., and G.s. Raghavan. 2008. Modeling couple transport phenomena and mechanical deformation of shrimp during drying in a jet spouted bed dryer. Chemical Engineering science 63:5503-5512.

19-Rostami, R., S.S. seiidlou-Heris and J. Dehghannya. 2013. simulation the simultaneous heat and mass transfer in drying of preated carrot slices. Tabriz university.

20-Ruiz-lopez, I., A. cordova, G. Rodruguez-Jimens and M.Garcia\_Alvarado. 2004. Moisture and temperature evolution during food drying: effect of variable properties. Journal of Food Engineering, 63:117-124.

21-Schultz, E. L., M. M. Mazzuco, R. A. F. Machado, A. Bolzan, M. B. Quadri and M. G.N. Quadri. 2007. Effect of pre- treatment on drying , density and shrinkage of Apple slices. Journal of Food Engineering 78:1103-1110.

22-Tsukada, T., N. Sakai., and k. Hayakawa. 1991. Computerized model for strain-stress analysis of food undergoing simultaneous heat and mass transfer . Journal of food science 56,1438-1445.

23-Yang, T., N. Sakai., and M. Watanabe. 2001. Drying model with non-isotropic shrinkage deformation undergoing simultaneous heat and mass transfer. Drying technology 19(7):1441-1460.

## Simulation shrinkage during convective drying of carrot slices

Negar Afaghi Sardroud<sup>1\*</sup>, Asad Modarres Motlagh, Seied Sadegh seiedlo, Ali Hasanpour

1- MSc Student, Department of Agricultural Machinery Engineering, Urmia University.

Negarafaghi@yahoo.com

2- Associate Professor, Department of Agricultural Machinery Engineering, Urmia University

3- Associate Professor, Department of Agricultural Machinery Engineering, Tabriz University

4- Associate Professor, Department of Agricultural Machinery Engineering, Urmia University

### Abstract

Shrinkage not only affects the quality of the dehydrated product but also affected drying kinetics. Therefore to describe drying kinetics adequately, shrinkage mechanism is needed. For simulation shrinkage of carrot during drying, the couple of heat and mass transfer with the mechanical equation at the 60°C and 70°C in the three dimensions were solved with the Comsol Multiphysics software. The stress- moisture related diagram of carrot slice was plotted the thermal stress was also considered within carrots during drying. The simulated results, in terms of the carrot moisture content, temperature and shrinkage, were compared with the experimental results and good agreement between

the theoretical simulation and experimental result was observed. It was found that the shrinkage of carrot slices could be well correlated with moisture content of the sample during drying.

**Key words:** heat and mass transfer, stress, shrinkage, carrot

