

## مطالعه عددی فرآیند خشک کردن تحت خلأ جسم متخلخل

میلاذ امیری<sup>۱\*</sup>، محمد باقر آیانی<sup>۲</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، milad\_amiri1366@yahoo.com

۲- استادیار گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد

### چکیده

با توجه به اینکه خشک کردن، فرآیند هم‌زمان انتقال جرم و گرما است، بنابراین معادلات حاکم luikov برای یک نمونه سیب به طور عددی حل شده است. فشار هوای محیط اطراف نمونه ابتداء طی یک دقیقه به صورت خطی کاهش یافته و سپس ثابت می‌گردد. اگرچه در ابتدا به نظر می‌رسد که دوره‌ای که فشار به صورت خطی کاهش می‌یابد در مقایسه با کل زمان خشک شدن ناچیز است، اما مطالعه حاضر نشان می‌دهد مشخصه‌های این فاز بسیار مهم هستند. در این مطالعه، حل گذرای دو بعدی نمونه با استفاده از زبان فرترن انجام شده و تاثیر فشار بر روی خواص فیزیکی-گرمایی هوا بررسی شده و توزیع دما و رطوبت ماده مربعی شکل با توجه به کاهش فشار محفظه خلأ بدست می‌آید. اثر ضرایب انتقال حرارت و جرم که پارامترهای تعیین کننده‌ای در مدل‌سازی فرآیندهای گرمایشی می‌باشند، نیز مورد تحلیل واقع شده که مشاهده می‌شود برای ضریب انتقال حرارت بالا، درجه حرارت مرکز سیب به دلیل اینکه گرمای بیشتری از سیال به سطح سیب منتقل می‌شود سریع‌تر به دمای تعادل می‌رسد، در حالی که برای شرایط مشابه تغییر قابل توجهی در نرخ رطوبت مشاهده نمی‌شود. دما با تغییر ضریب انتقال جرم دچار تغییرات زیاد نمی‌شود در صورتی که مشاهده می‌شود تحت همان شرایط رطوبت جسم تغییر می‌کند. تغییرات کیفی زیادی که در طی فرآیند خشک شدن اتفاق می‌افتد، از جمله تغییرات چگالی که می‌تواند نیروی محرکه نفوذ مولکولی به عنوان ساز و کار انتقال جرم باشد و همچنین ظرفیت گرمایی که در نرخ و مقدار انتقال حرارت موثر است، تحلیل شده و اثر رطوبت هوا نیز برای سریع‌تر خشک شدن نمونه مورد بررسی قرار گرفته است.

**واژه های کلیدی :** حل عددی، خشک کردن، خلأ، لایکوو

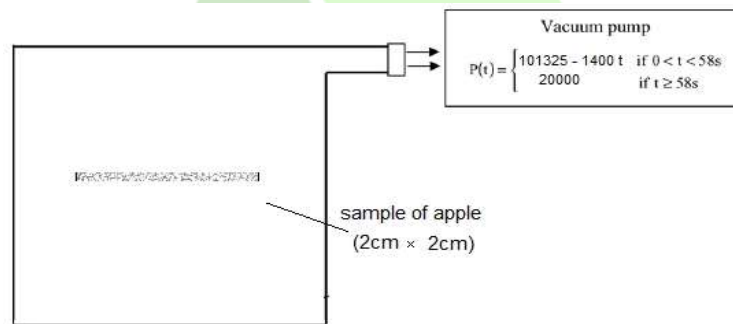
## مقدمه

فرآیند خشک کردن به روش‌های گوناگونی از جمله خشک کردن تحت خلأ (Šumić et al., 2012)، خشک کردن انجمادی (Carullo and Vallan, 2012)، خشک کردن آفتابی (Iniyan et al., 2012)، خشک کردن افشانه‌ای (Shi et al., 2012) و خشک کردن همرفت (Chandra Mohan and Talukdar, 2010) انجام می‌شود. در اصطلاح به فشارهای پایین تر از فشار اتمسفر هوا، حالت خلأ گفته می‌شود. با این وصف فشار بین فشار اتمسفر و صفر مطلق را می‌توان حوزه سیستم‌های خلأ دانست. در روش خشک کردن تحت خلأ، اغلب از خلأ به عنوان فرآیندی برای حذف بخارهای آب و دیگر حلال‌هایی که جذب سطح و حجم ماده شده است، استفاده می‌شود. به این ترتیب می‌توان مواد حساس به دماهای بالا را در مدت زمان کوتاهی به خوبی خشک کرد. علاوه بر این، خشک کردن تحت خلأ می‌تواند مانع از اکسید شدن مواد حساسی شود که در معرض هوا امکان اکسید شدن آن‌ها وجود دارد. خشک کردن تحت خلأ همچنین می‌تواند حلال‌هایی را که از ماده زدوده شده است را در صورت لزوم بازیابی کند. این روش برای موادی که در معرض دمای بالا آسیب می‌بینند، مناسب است. از مشخصه‌های این روش می‌توان نرخ بالا و دمای پایین خشک کردن و وجود اکسیژن محدود در محیط خشک کن را نام برد که موجب می‌شود که کیفیت محصول مانند: رنگ، شکل، بو، طعم و میزان مواد غذایی حفظ شود. همچنین صرفه جویی در انرژی از دیگر مزایای این روش خشک کردن می‌باشد. خشک کردن تحت خلأ به روش‌های تحلیلی، آزمایشگاهی و عددی انجام می‌شود. فور و همکاران (Fohr et al., 1995) مدلی برای خشک کن خلأ پیوسته با صفحات داغ که سطوح جسم در حال خشک شدن در بالای نقطه جوش آب نگه داشته می‌شد ارائه دادند. سووارانکوتا و همکاران (Suvarnakuta et al., 2007) و اسواسدیسوا و همکاران (Swasdisevia et al., 2009) یک مدل نفوذ مایع را برای خشک کردن در فشارهای کم ارائه دادند. قادری و همکاران (قادری و عباسی، ۱۳۸۹) برای افزایش ماندگاری ماست و افزایش قابلیت‌های کاربردی این فرآورده، ماست را خشک کرده و پودر آن را تهیه کرده‌اند. روش پیشنهاد شده توسط برنادا و همکاران (bernada et al., 2007) به این صورت است که ابتدا معادلات بقا در هر محیط حل می‌شود، سپس توسط شرایط مرزی، محیط اطراف و جسم متخلخل با هم ارتباط داده می‌شوند. به طور کلی ضریب انتقال تئوری، معنی فیزیکی مناسبی برای لایه‌های مرزی تحت شرایط خلأ را ارائه نمی‌دهند. در کار برنادا و همکاران احتیاج به استفاده از ضریب انتقال تجربی نمی‌باشد. این ضریب در معادلات بقای جرم محفظه خلأ و معادلات انتقال داخلی جسم متخلخل، توسط حجم متوسط به کار می‌رود تا بتوان جسم متخلخل را به عنوان جسم پیوسته در نظر گرفت. سپس دو محیط توسط شرایط مرزی به هم ارتباط داده می‌شوند. هدف این مطالعه بررسی اثر تغییرات فشار بر روی خواص هوا، توزیع دما و رطوبت داخل ماده مربعی شکل با توجه به کاهش فشار محفظه خلأ می‌باشد. در این مطالعه فرآیند خشک کردن تحت خلأ با استفاده از مدل عددی دو بعدی گذرا برای شبیه‌سازی انتقال جرم و گرما در سیب در یک هندسه مربعی شکل، بررسی شد. کاهش فشار تدریجی بوده و ابتدا به صورت خطی کاهش یافته و سپس ثابت نگه داشته می‌شود. نتایج نشان می‌دهد، فاز کاهش تدریجی فشار که غالباً در نظر گرفته نمی‌شود دارای اهمیت بوده و تاثیرات



قابل ملاحظه ای بر روی نتایج می‌گذارد. دما با تغییر ضریب انتقال جرم دچار تغییرات زیاد نمی‌شود در صورتی که مشاهده می‌شود تحت همان شرایط رطوبت جسم تغییر می‌کند. مشخص است که ضریب انتقال جرم با اینکه عددی کوچک است اما برای توصیف فرآیند بسیار مهم است. برای ضریب انتقال حرارت بالا، به دلیل اینکه گرمای بیشتری از سیال به سطح سیب منتقل می‌شود درجه حرارت مرکز سریع‌تر به دمای تعادل می‌رسد. در یک زمان معین، برای ضریب انتقال حرارت بالاتر، دما افزایش می‌یابد در صورتی که افزایش ضریب انتقال حرارت تقریباً هیچ تاثیری بر ویژگی‌های رطوبت ندارد. تغییرات چگالی می‌تواند نیروی محرکه نفوذ مولکولی به عنوان ساز و کار انتقال جرم باشد. انتقال جرم ناشی از این تغییرات شباهت زیادی به انتقال حرارت از نوع رسانش دارد. ملاحظه می‌گردد چگالی نمونه خشک شونده با توجه به کاهش رطوبت موجود در نمونه کاهش می‌یابد. زمان لازم برای خشک شدن نمونه، به علت حفظ طعم، رنگ، بو و... دارای اهمیت فراوانی است که پارامترهایی همچون رطوبت هوا بر روی آن تاثیر می‌گذارد که ملاحظه می‌گردد افزایش رطوبت هوا باعث می‌شود نمونه سریع‌تر خشک شود.

**تئوری تحقیق:** شکل ۱ هندسه مورد مطالعه و نحوه اعمال فشار را نشان می‌دهد:



شکل ۱. حوزه حل هندسه مورد مطالعه

معادلات به کار رفته برای حل همزمان انتقال جرم و گرما همراه با شرایط مرزی در زیر آورده شده است (Luikov, 1973):

$$\rho C_q \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (K_q + \varepsilon \lambda K_m \delta) \nabla T + \varepsilon \lambda K_m \nabla U \quad (1)$$

$$\rho C_m \frac{\partial U}{\partial t} = \nabla \cdot [K_m \delta \nabla T + K_m \nabla U] \quad (2)$$

$$K_q \frac{\partial T}{\partial n} + h_q (T - T_a) + (1 - \varepsilon) \lambda h_m^* (u - u_a) = 0 \quad \Omega \quad \text{در} \quad (3)$$

$$K_m \frac{\partial U}{\partial n} + K_m \delta \frac{\partial T}{\partial n} + h_m^* (u - u_a) = 0 \quad \Omega \quad \text{در} \quad (4)$$

$$T(x, y, t) = T_0(x, y) \quad \text{at } t = 0 \quad (5)$$

$$U(x, y, t) = U_0(x, y) \quad \text{at } t = 0 \quad (6)$$

که  $\rho$  چگالی سیب،  $C_m$  و  $C_q$  به ترتیب ظرفیت گرما و جرم،  $K_m$  و  $K_q$  به ترتیب هدایت حرارتی و جرم،  $\varepsilon$  نسبت ضریب نفوذ بخار به نفوذ کل رطوبت،  $\lambda$  گرمای نهان،  $\delta$  ضریب گرادیان حرارتی،  $T$  دما،  $U$  پتانسیل رطوبت،  $T_a$  و  $u_a$  پتانسیل رطوبت و دمای



خشک،  $t$  زمان،  $h_q$  و  $h_m^*$  به ترتیب ضرایب انتقال گرمای هدایتی و جرم،  $n$  بردار نرمال سطح،  $\Omega$  سطح مرزی برای انتقال گرما و جرم می‌باشد.

ضرایب انتقال جرم و گرما را از روابط زیر به دست می‌آید: (Incropera and Dewitt, 1990)

$$Sh = 0.664 Re^{0.5} Sc^{0.33} \quad (7)$$

$$Nu = 0.664 Re^{0.5} Pr^{0.33} \quad (8)$$

$$Re = \frac{l\rho v}{\mu_a} \quad Sc = \frac{\mu_a}{D\rho_a} \quad Nu = \frac{h_q l}{k_{qa}} \quad Sh = \frac{h_m^* l}{D} \quad Pr = \frac{C_{qa}\mu_a}{K_{qa}} \quad (9)$$

که می‌توان نوشت (Audebert et al., 1997 ; Are'valo-Pinedo et al., 2004)

$$h_m^* = \frac{h_m \rho_a}{C_n} \quad D = 2.17 \times 10^{-5} \left( \frac{101325}{p_a} \right) \left( \frac{T_a}{273.16} \right)^{1.88} \quad (10)$$

همچنین می‌توان از رابطه چیلتن\_کلبرن نیز استفاده کرد:

$$h_m = \frac{h_q Pr^{\frac{2}{3}}}{\rho_a C_{qa} Sc^{\frac{2}{3}}} = \frac{h_q}{\rho_a C_{qa} Le^{\frac{2}{3}}} \quad (11)$$

که در این صورت:

$$Le = \frac{\alpha}{D} \quad \alpha = \frac{K_{qa}}{\rho_a C_{qa}} \quad (12)$$

که  $Sh$ ,  $Pr$ ,  $Re$ ,  $Nu$ ,  $Sc$  به ترتیب اعداد اسمیت، ناسلت، رینولدز، پرانتل و شروود می‌باشد.  $L$  طول نمونه،  $v$  سرعت هوا،  $D$  ضریب پخش بخار در هوا،  $K_{qa}$ ،  $C_{qa}$  و  $\mu_a$  به ترتیب هدایت گرمایی، گرمای ویژه و ویسکوزیته هوا می‌باشند.  $Le$  عدد لوویس و  $\alpha$  نفوذ گرمایی می‌باشد.

خصوصیات ترموفیزیکی و شرایط خشک کردن در شبیه سازی در جدول ۱ آورده شده است:

جدول ۱. پارامترهای استفاده شده در مدل شبیه سازی

مقدار	پارامتر
$0.01 (l^3/M)$	ظرفیت جرم
$4184(0.05304+M) (j/kg.k)$	ظرفیت گرما
$2.2 \times 10^{-8} (kg/m.s.^0M)$	هدایت جرم
$0.3$	نسبت ضریب نفوذ بخار به نفوذ کل رطوبت
$2.5 \times 10^6 (j/kg)$	گرمای نهان
$2 (M/K)$	ضریب گرادیان حرارتی
$856 (kg/m^3)$	چگالی سیب



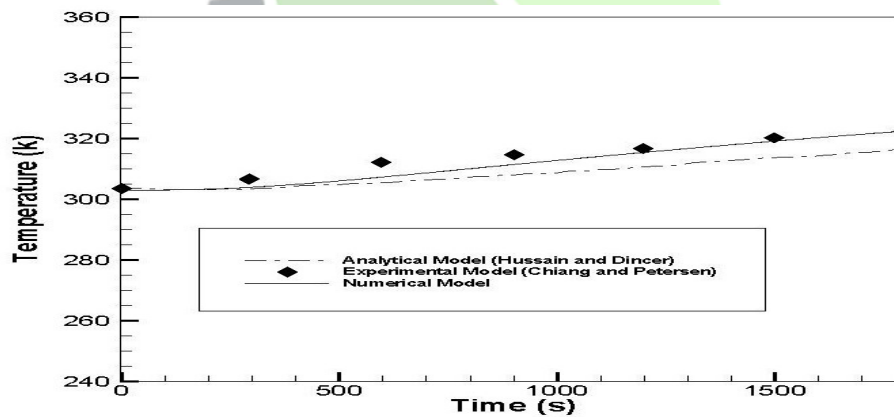
ضرایب مورد استفاده در شرایط مرزی، در جدول ۲ آورده شده است:

جدول ۲. ضرایب استفاده شده در شرایط مرزی

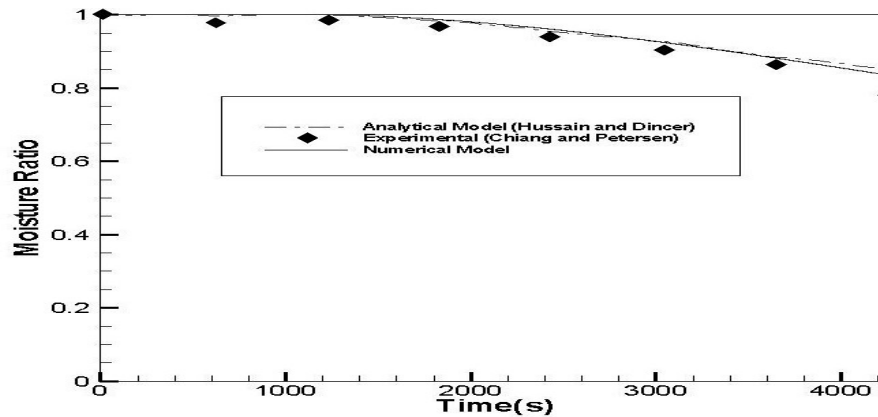
مقدار	پارامتر
$30 (^{\circ}C)$	دمای اولیه
$60 (^{\circ}C)$	دمای نهایی
$87 (M)$	پتانسیل رطوبت اولیه
$12 (M)$	پتانسیل رطوبت نهایی
معادله ۵	ضریب انتقال جرم
معادله ۵	ضریب گرمای جابجایی

## نتایج و بحث

برای اعتبار سنجی مدل، دما و رطوبت مرکز سیب را با داده‌های آزمایشگاهی و تحلیلی مقایسه کرده که به ترتیب در شکل-های ۲ و ۳ نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود تطابق قابل قبولی بین نتایج تجربی و تحلیلی و مدل عددی حاضر مشاهده می‌شود.

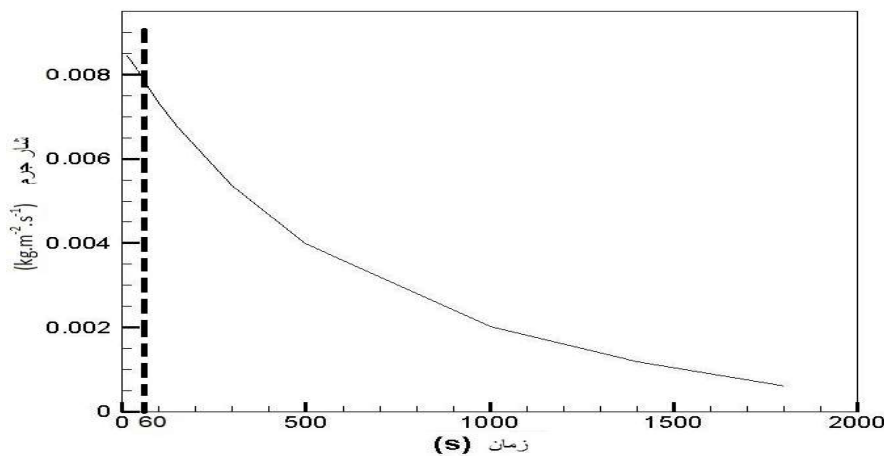


شکل ۲. دمای پیش بینی شده با نتایج آزمایشگاهی و تحلیلی

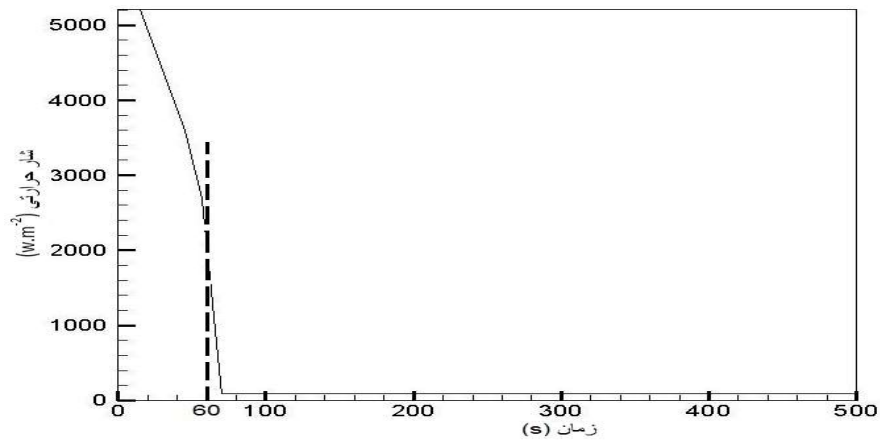


شکل ۳. رطوبت پیش بینی شده با نتایج آزمایشگاهی و تحلیلی

تغییرات شار گرمی عبوری از سطح جسم متخلخل برحسب زمان در شکل ۴ ترسیم شده است. قابل ذکر است که روند کاهش انتقال جرم از سطح، به دلیل کاهش مقدار رطوبت در سطح تماس جسم متخلخل با سیال (هوا) می‌باشد. شکل ۵ تغییرات شار حرارتی جسم متخلخل را برحسب زمان نشان می‌دهد. این روند انتقال حرارت به علت افزایش دما در سطح است که خود نتیجه‌ی از دست دادن پیوسته رطوبت (تبخیر) می‌باشد. همانطور که ملاحظه می‌شود در یک دقیقه ابتدایی، هوای داخل محفظه توسط پمپ خلأ مکش می‌شود. بنابراین جریان هوا وجود داشته و سرعت پمپ سرعت جریان هوا را مشخص می‌کند اما در فاز دوم هوای داخل محفظه توسط پمپ خلأ تخلیه شده و جریان هوا ناچیز بوده و عامل تبخیر رطوبت داخل جسم، بالاتر بودن فشار مایع داخل جسم متخلخل از فشار محفظه خلأ می‌باشد.

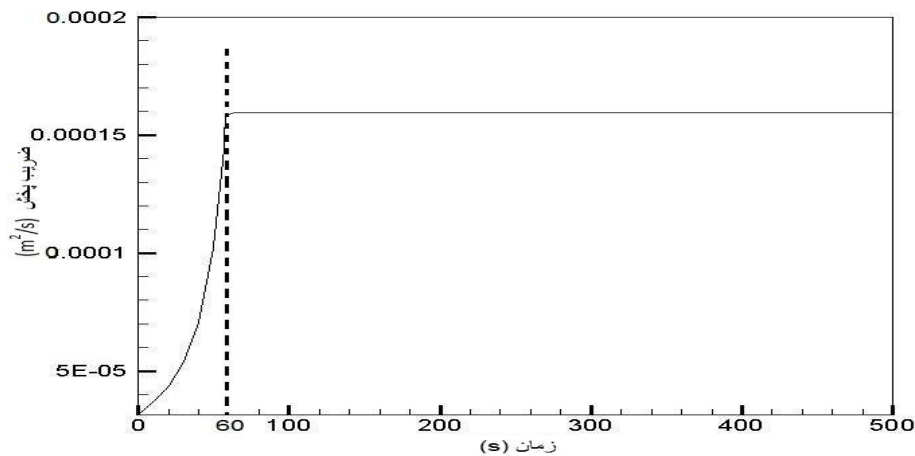


شکل ۴. شار گرمی سطح جسم متخلخل



شکل ۵. شار حرارتی سطح جسم متخلخل

یکی از ضرایب مهم که با اصلاح آن می‌توان نتایج به دست آمده را به نتایج آزمایشگاهی نزدیک کرد ضریب پخش می‌باشد که بر طبق معادله ۱۰ به فشار و دمای محیط بستگی دارد. در شکل ۶ ضریب پخش بخار در هوای  $60^{\circ}\text{C}$  نشان داده شده است که در فاز اول با توجه به کاهش فشار، این ضریب افزایش یافته و در فاز دوم ثابت باقی می‌ماند.

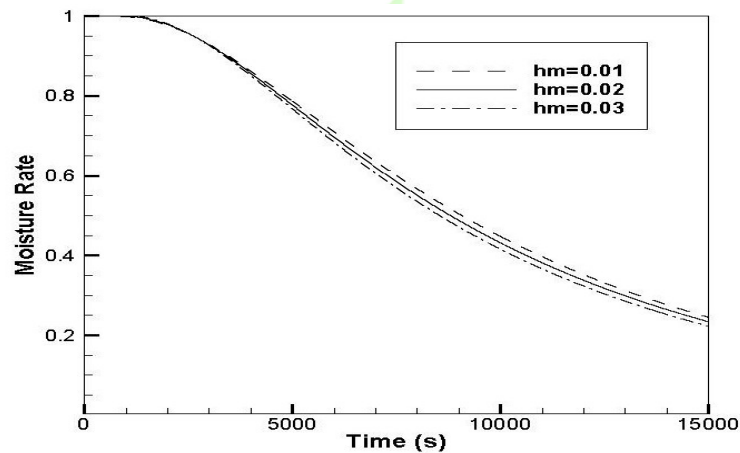


شکل ۶. ضریب پخش بخار در هوا در دمای  $60^{\circ}\text{C}$

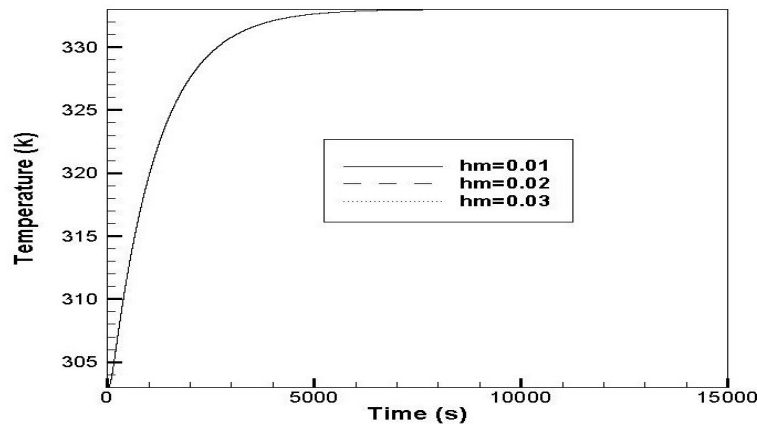
اثر ضریب انتقال جرم روی نرخ رطوبت و دمای سیب در شکل ۷ نشان داده شده است. هنگامی که رطوبت به سطح سیب منتقل می‌شود توسط انتقال حرارت همرفتی از سطح حذف شده و به هوا انتقال پیدا می‌کند. انتقال جرم به اندازه ضریب انتقال جرم و گرادیان رطوبت بستگی دارد. اگر اندازه ضریب انتقال جرم پایین باشد، حذف رطوبت از سطح پایین خواهد بود. اگر این انتقال آهسته باشد، زمان زیادی برای خشک کردن طول خواهد کشید و باعث کاهش ظرفیت تولید می‌شود. اگر انتقال خیلی سریع باشد، رطوبت سطحی سریع‌تر حذف خواهد شد. با این حال، رطوبت از داخل سیب نمی‌تواند سریع به سطح پراکنده شود که باعث اختلاف



زیاد بین رطوبت سطحی و داخلی شده که انقباض و سختی در سبب را سبب می‌شود. بنابراین حذف رطوبت از سطح دارای اثرات قابل توجهی در این روند است. تغییر حجم نمونه و یا سرعت هوا می‌تواند تحت تاثیر مقدار ضریب انتقال جرم (معادله ۹) قرار گیرد. همانطور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود، دما با تغییر ضریب انتقال جرم دچار تغییرات زیاد نمی‌شود در صورتی که مشاهده می‌شود تحت همان شرایط رطوبت جسم تغییر می‌کند. برای ضریب انتقال جرم بالاتر، انتشار گرما در داخل سبب سریع‌تر است. به عبارت دیگر، در ضریب انتقال جرم بالاتر، سرعت خشک شدن بالاتر خواهد بود. همچنین مشخص است که ضریب انتقال جرم با اینکه عددی کوچک است اما برای توصیف فرآیند بسیار مهم است.



شکل ۷. اثر ضریب انتقال جرم بر روی نرخ رطوبت در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد و فشار ۱ بار



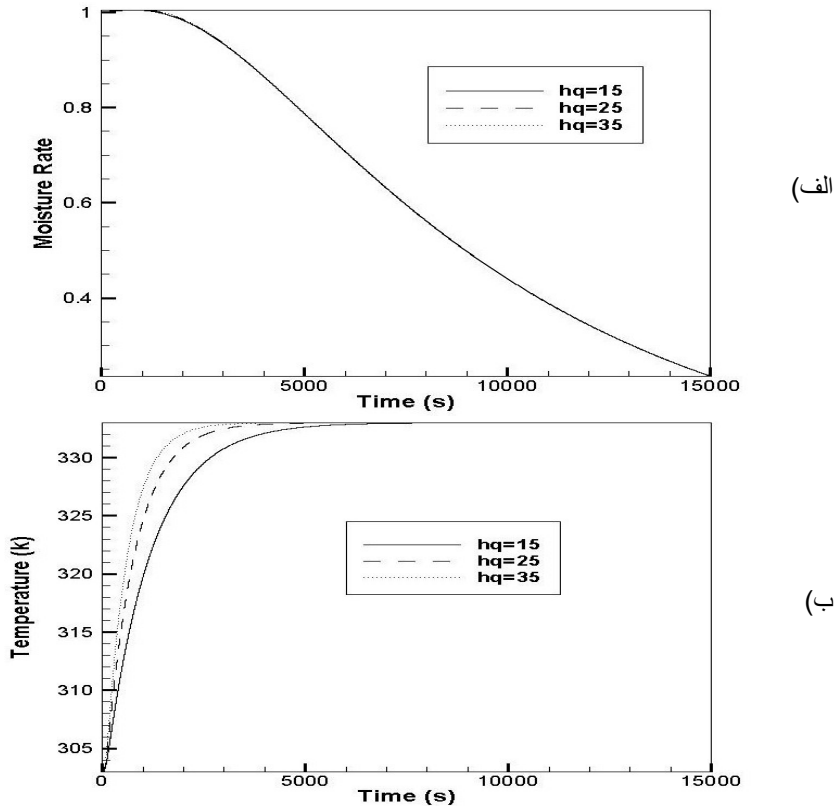
شکل ۸. اثر ضریب انتقال جرم بر روی دمای مرکز در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد و فشار ۱ بار

شکل ۹ اثر ضریب انتقال حرارت را نشان می‌دهد. در ابتدای خشک کردن به دلیل شرایط مرزی همرفتی در سطح، درجه حرارت افزایش می‌یابد. لازم به ذکر است که در اوایل دوره گرم، گرادیان دما در سطح به منظور افزایش انتقال انرژی هدایت به





طور قابل ملاحظه‌ای بالا نیست. با پیشرفت حرارت، گرادیان درجه حرارت در ناحیه بالا می‌رود که به نوبه خود تسریع انتقال انرژی هدایت از سطح به جسم جامد را به دنبال دارد. برای ضریب انتقال حرارت بالا، درجه حرارت مرکز سریع‌تر به دمای تعادل می‌رسد چراکه گرمای بیشتری از سیال به سطح سیب منتقل می‌شود. در یک زمان معین، برای ضریب انتقال حرارت بالاتر، دما افزایش می‌یابد در صورتی که افزایش ضریب انتقال حرارت تقریباً هیچ تاثیری بر ویژگی‌های رطوبت ندارد.

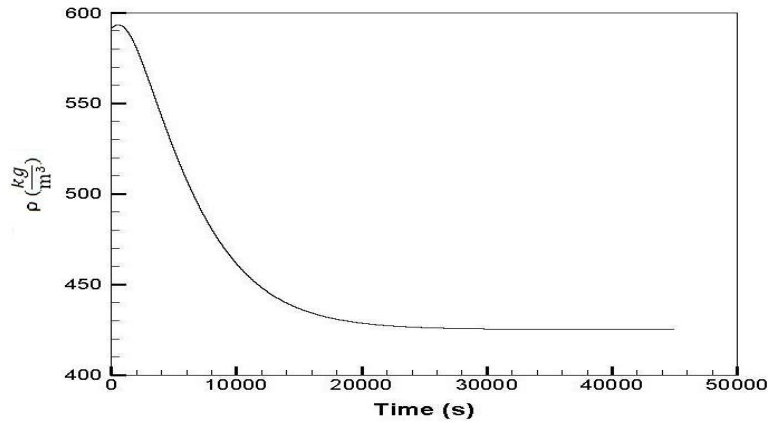


شکل ۹. اثر ضریب انتقال حرارت بر روی (الف) نرخ رطوبت و (ب) دمای مرکز در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد و فشار ۱ بار

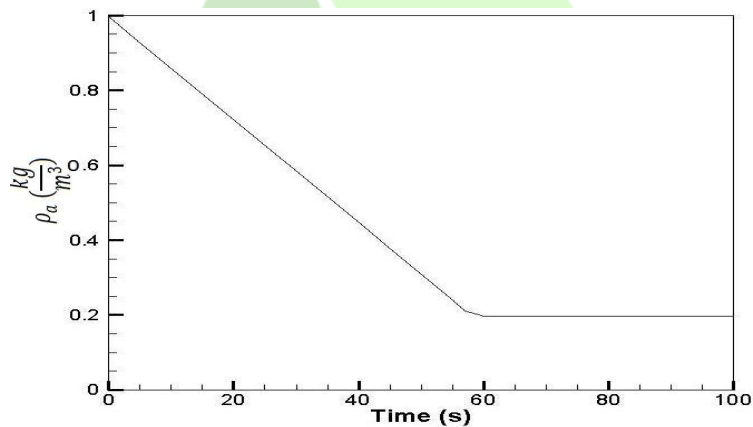
تغییرات کیفی زیادی اعم از بیوشیمیایی (تجزیه ساختمان سلولزی و مولکول‌های حیاتی، اکسیداسیون چربی و...)، شیمیایی (از دست رفتن فعالیت شیمیایی، تجزیه بعضی از اجزاء شیمیایی و ...) و فیزیکی (انقباض، کاهش چگالی، تغییر شکل، اندازه، خلل و فرج و ...) در طی فرآیند خشک شدن اتفاق می‌افتد. در این مطالعه عدم وجود انقباض و تغییر شکل جز فرضیات ساده کننده می‌باشد، ولی یکی از تغییرات فیزیکی، کاهش چگالی می‌باشد که با توجه به کاهش فشار محفظه خلأ، این تغییر را علاوه بر نمونه در هوای محفظه خلأ نیز داریم. تغییرات چگالی در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ آورده شده است. این تغییرات می‌تواند نیروی محرکه نفوذ مولکولی به عنوان ساز و کار انتقال جرم باشد. انتقال جرم ناشی از این تغییرات شباهت زیادی به انتقال حرارت از نوع رسانش دارد. همانطور که ملاحظه می‌گردد چگالی نمونه خشک شونده کاهش می‌یابد که دلیل آن ناشی از کاهش رطوبت موجود در نمونه می‌-



باشد. چگالی هوای محفظه خلأ، به دلیل ایجاد خلأ مورد نظر ابتدا به صورت خطی کاهش یافته و پس از ایجاد فشار مورد نیاز ثابت باقی می‌ماند.



شکل ۱۰. تغییرات چگالی در مرکز نمونه خشک شونده در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد و فشار ۴۰ کیلوپاسکال

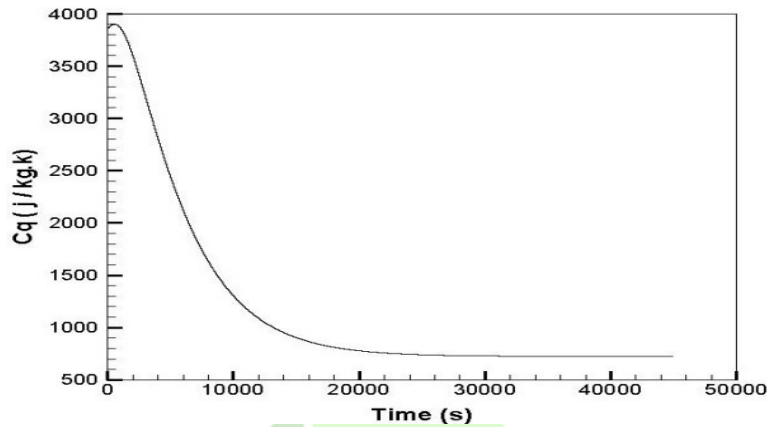


شکل ۱۱. تغییرات چگالی هوای محفظه خلأ در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد

فرآیندهای انتقال حرارت و انتقال جرم از مهمترین پدیده‌های فیزیکی هستند که در طول فرآوری و تولید مواد غذایی رخ می‌دهند. این فرآیندها سبب می‌شوند که متغیرهای کمی نظیر دما و رطوبت داخل ماده غذایی، علاوه بر موقعیت داخل سیستم غذایی به زمان نیز وابسته باشند. یکی از خاصیت‌های فیزیکی ماده که در نرخ و مقدار انتقال حرارت و جرم موثر است، ظرفیت گرمایی ماده خشک شونده می‌باشد. شکل ۱۲ تغییرات این خاصیت را در طی فرآیند خشک کردن نشان می‌دهد. همانطور که ملاحظه می‌شود در طول زمان خشک شدن، به علت اینکه نمونه خشک شونده در حال از دست دادن رطوبت خود می‌باشد، ظرفیت گرمایی

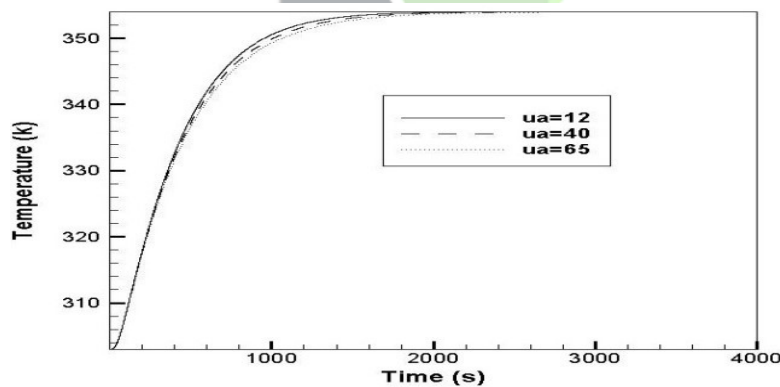


ماده نیز کاهش می‌یابد. این خاصیت حرارتی که به رطوبت ماده خشک شونده وابسته است، پس از دست دادن رطوبت ثابت می‌ماند.

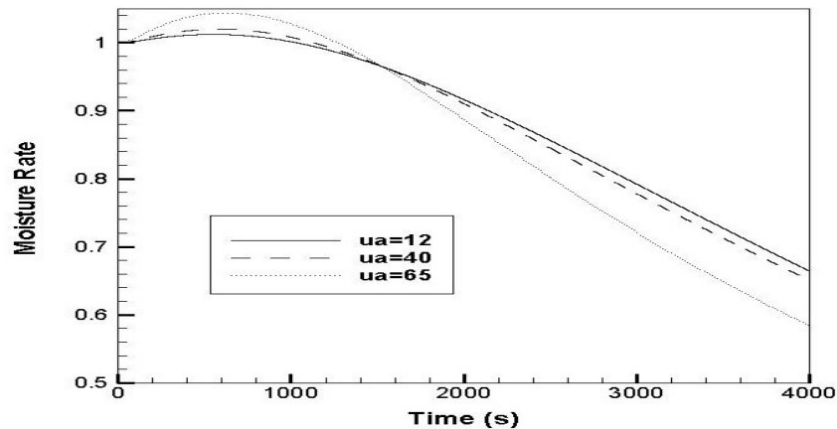


شکل ۱۲. تغییرات ظرفیت گرمایی نمونه در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد

یکی دیگر از خواص پیرامون نمونه که بر روی نرخ و مقدار انتقال حرارت و جرم تاثیر می‌گذارد رطوبت هوا می‌باشد. شکل‌های ۱۳ و ۱۴ اثر این پارامتر را بر روی دما و نرخ رطوبت نمونه نشان می‌دهد. در فاز اول خشک کردن، هوای خشک و بخار آب وجود دارد و جریان هوا توسط پمپ خلأ مکش می‌شود و در فاز دوم هوای خشک وجود ندارد و جریان هوا ناچیز است و رطوبت موجود ناشی از بخار آب می‌باشد. ملاحظه می‌گردد که تغییر رطوبت تاثیر آن‌چنانی بر روی دمای مرکز نمونه خشک شونده ندارد ولی مشاهده می‌شود که با افزایش رطوبت، می‌توان در زمان کمتری به نرخ خشک کردن بالاتری دست یافت.



شکل ۱۳. اثر رطوبت هوا بر روی دمای مرکز ماده مربعی در هوای محفظه با دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد



شکل ۱۴. اثر رطوبت هوا بر روی نرخ رطوبت مرکز ماده مربعی در هوای محفظه با دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد

### نتیجه گیری کلی

در این مطالعه، حل عددی برای توزیع دما و رطوبت در مرکز یک برگه سیب مربع شکل در محفظه خلأ ارائه شد. مشخص شد که دما به سرعت در مراحل اولیه خشک کردن افزایش می‌یابد و گرادیان رطوبت در اوایل دوره گرمایش بالا است. فرآیند خشک کردن در دو فاز فشار متغیر و فشار ثابت انجام شد و مشخص شد که در فاز کاهش تدریجی فشار که اغلب از این فاز صرف نظر می‌شود، جریان هوا وجود داشته و این جریان نقش بسزایی در شار حرارتی دارد و در فاز فشار ثابت بالاتر بودن فشار بخار مایع داخل جسم از فشار محفظه خلأ عامل تبخیر می‌باشد. همچنین به دلیل کاهش مقدار رطوبت انتقال جرم از سطح در هر دو فاز کاهش می‌یابد. اثرات دما و فشار محیط به عنوان پارامترهای موثر در ضریب پخش نیز بررسی شد و معلوم گردید که افزایش دمای محیط و کاهش فشار کمک زیادی به کاهش زمان خشک کردن می‌کند. دما با تغییر ضریب انتقال جرم دچار تغییرات زیاد نمی‌شود در صورتی که مشاهده می‌شود تحت همان شرایط رطوبت جسم تغییر می‌کند. برای ضریب انتقال حرارت بالا، به دلیل اینکه گرمای بیشتری از سیال به سطح سیب منتقل می‌شود درجه حرارت مرکز سریع‌تر به دمای تعادل می‌رسد. در یک زمان معین، برای ضریب انتقال حرارت بالاتر، دما افزایش می‌یابد در صورتی که افزایش ضریب انتقال حرارت تقریباً هیچ تاثیری بر ویژگی‌های رطوبت ندارد. ملاحظه می‌گردد چگالی نمونه خشک شونده با توجه به کاهش رطوبت موجود در نمونه کاهش می‌یابد. زمان لازم برای خشک شدن نمونه، به علت حفظ طعم، رنگ، بو و... دارای اهمیت فراوانی است که پارامترهایی همچون رطوبت هوا بر روی آن تاثیر می‌گذارد که ملاحظه می‌گردد افزایش رطوبت هوا باعث می‌شود نمونه سریع‌تر خشک شود.

## منابع:

- ۱- قادری، ع. س.، عباسی، ز. حمیدی، ۱۳۸۹. امکان تولید پودر ماست با استفاده از خشک کن مایکروویو -خلاء، نشریه پژوهش‌های علوم و صنایع غذایی ایران.
- 2- Šumić, Z., A. Tepić., S, Vidović., S Jokić., R, Malbaša., 2012. Optimization of frozen sourcherries vacuum drying process. Food Chemistry, 12, 0308-8146.
- 3- Carullo, A., A, Vallan., 2012. Measurement uncertainty issues in freeze-drying processes. Measurement, 45, 1706-1712.
- 4- Vijaya Venkata Raman, S., S, Iniyar., R, Goic., 2012. A review of solar drying technologies. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 16, 2652-2670.
- 5- Shi, A., D, Li., L, Wang., Y, Zhou., B, Adhikari., 2012. Spray drying of starch submicron particles prepared by high pressure homogenization and mini-emulsion cross-linking. Journal of Food Engineering, 113, 399-407.
- 6- Chandra Mohan, V.P., P, Talukdar., 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 (21-22), 4638-4650.
- 7- Fohr, J.P., A, Chakir. and Du Peutry, A.M.A. 1995. Vacuum drying of oak wood. Drying Technology, 13(8&9), 1675-1693.
- 8- Suvarnakuta, P., S, Devahastin. and A Mujumdar. S. 2007. A mathematical model for low-pressure superheated steam drying of a biomaterial. Chemical Engineering and Processing, 46, 675-683.
- 9- Swadisevia, T., S, Devahastin., A, Mujumdar. S. 2009. A Mathematical modeling of combined far-infrared and vacuum drying banana slice. Journal of Food Engineering 92(1), 100-106.
- 10- Erriguible, A., P. Bernada, F. Couture, M.-A. Roques., 2007. Simulation of vacuum drying by coupling models, Chemical Engineering and Processing, 46, 1274-1285.
- 11- Luikov, A., 1973. systems of differential equation of heat and mass transfer in capillary porous, International journal of Heat and Mass Transfer, 18, 1-14.
- 12- Incropera, F.P.; Dewitt, D.P., 1990. Fundamentals of Heat and Mass Transfer; John Wiley & Sons; Singapore.
- 13- Audebert, P., A. Temmar, F. Hammon, C. Basilico. 1997. vacuum Drying of oakwood: Moisture, Strain and drying process. Drying Technology. 15(9), 2281-2302.
- 14- Are´valo-Pinedo, A., F.E.X. Murr, A.D. Giraldo-Zun`iga, Z.D.S. Are´valo., 2004. Vacuum drying of carrot (*Daucus carota*): Effects of pretreatments and parameters process. Proceedings of the 14th International Drying Symposium, Saˆo Paulo, Brazil; 2021-2026.

## Numerical study of porous vacuum drying process

Milad Amiri<sup>1\*</sup> Mohammad Bagher Ayani<sup>2</sup>

1- MSc Student, Department of Mechanical Engineering, Ferdowsi University of Mashhad

Milad\_amiri1366@yahoo.com

2- Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, Ferdowsi University of Mashhad

### Abstract:

Due to the drying process which is simultaneous heat and mass transfer, therefor the governing luikov equations are solved numerically for an apple. Pressure of the surrounding air of the samples decreased linearly over a minute and then became constant. Although at first it seems that the period in which the pressure decreases linearly is minimal compared to the total drying time, but this study shows that the characteristics of this phase are very important. In this study, two-dimensional transient solutions are performed using FORTRAN and the impact of stress on physical - Thermal properties of air has been investigated and also the distribution of temperature and humidity of the square sample in accordance with pressure decrease of the vacuum chamber is obtained. Effect of heat and mass transfer coefficients, which are determining parameters in heating process modelings, have also been analyzed and shows that for high heat transfer coefficient, the temperature in the center of the apple reaches to equilibrium faster because more heat is transferred from the fluid to the surface of the apple, While under the same conditions, no significant changes have been observed in the rate of moisture. Temperature will not change much due to the change in the coefficient of mass transfer while under the same conditions, the object's humidity changes. Large qualitative changes that occur during the drying process, such as the density changes that could be the motivative force of the molecular penetration as a way for mass transfer and also the heat capacity which is effective in the rate and magnitude of heat transfer, have been investigated and the effect of humidity for faster drying of the sample is studied.

**Keywords:** drying , Luikov , numerical solution, vacuum