

## مدل سازی ترمودینامیکی خشک شدن یک ماده منفرد در شرایط محیطی ثابت

بهروز عباسی سورکی<sup>۱\*</sup>، حسین قنادزاده<sup>۱</sup>، نیما امامی<sup>۱</sup>

۱. گروه مهندسی شیمی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

مشخصات مقاله	چکیده
<b>تاریخچه مقاله:</b> دریافت: ۱ دی ۹۲ دریافت پس از اصلاح: ۱۳ بهمن ۹۳ پذیرش نهایی: ۱۶ اسفند ۹۳	روش معمول در مدل سازی فرایند خشک شدن مواد، استفاده از معادلات انتقال جرم و حرارت و پیش بینی تغییرات رطوبت ماده در حین خشک شدن است. در این مقاله فرایند خشک شدن یک ماده منفرد در هوا از منظر ترمودینامیکی مورد بررسی قرار گرفته است. مدل ترمودینامیکی پیشنهادی توسط داده‌های تجربی حاصل از خشک شدن نمونه‌های کوچک سیب زمینی کروی و برگ سبز چای مورد بررسی و اعتبار سنجی قرار گرفت. نمونه‌های کروی سیب زمینی به قطر ۲ سانتی متر در سه دمای ۴۰، ۵۰ و ۶۰°C و همچنین برگ‌های سبز چای در سه دمای ۳۵، ۴۵ و ۵۵°C در داخل یک خشک کن آزمایشگاهی خشک شدند. مدل پیشنهادی با برقراری موازنه‌های جرم، انرژی و آنتروپی، تغییرات دما و رطوبت نمونه‌ها و همچنین مقادیر آنتروپی تولیدی و اکسرژی را در حین خشک شدن پیش بینی می‌کند. نتایج نشان می‌دهند که تغییرات سرعت هوا تأثیر کمی بر نرخ خشک شدن مواد دارد. دمای سطح نمونه‌ها در ابتدا سریعاً افزایش یافته سپس به تدریج تا انتهای فرایند خشک شدن به دمای گاز می‌رسد. آنتروپی تولیدی نیز ابتدا به سرعت افزایش یافته و سپس با خشک شدن ماده سیر نزولی پیدا می‌کند. همچنین اکسرژی مانند انرژی در حین خشک شدن افزایش یافت. مقایسه نتایج مدل با داده‌های تجربی نشان دهنده اعتبار مدل پیشنهادی است. مقدار خطای نسبی داده‌های پیش بینی شده نسبت به داده‌های تجربی (MRE) برای رطوبت و دما به ترتیب برای برگ سبز چای ۳/۹ و ۳/۱ درصد و برای نمونه‌های سیب زمینی ۳ و ۳/۹ درصد محاسبه شدند.
<b>کلمات کلیدی:</b> خشک کردن مدل ترمودینامیکی ماده منفرد انرژی اکسرژی	

\* عهده دار مکاتبات

b.abbasi@guilan.ac.ir

حقوق ناشر محفوظ است.

## ۱- مقدمه

خشک کردن یکی از قدیمی‌ترین روش‌های نگهداری مواد است. در این فرایند، بخشی از رطوبت از طریق نفوذ به سطح ماده منتقل شده و پس از تبخیر سطحی از جسم خارج می‌شود و بخشی از آن در درون ماده تبخیر شده و به سطح جسم نفوذ کرده و آزاد می‌شود. سرعت خشک شدن ماده به عوامل بسیاری مانند دما، رطوبت نسبی و دبی هوا و نیز سطح خارجی جسم خشک شونده بستگی دارد. همچنین نوع دستگاه خشک کن و شرایط عملیاتی و مکانیسم انتقال حرارت (جابجایی، تشعشع و یا تماس مستقیم و هدایت) در میزان و سرعت کم شدن رطوبت ماده نقش دارد [۱].

یکی از مهم‌ترین مهارت‌ها در مطالعات خشک کردن، مدل سازی ریاضی این فرایند و شبیه سازی دستگاه‌های مربوطه می‌باشد. مدل سازی بر پایه یک سری معادلات ریاضی که عملکرد دستگاه‌ها و فرایند را توصیف می‌کنند، صورت می‌گیرد. توسط مدلسازی فرایند، می‌توان نرخ خشک کردن و بازدهی آن را پیش بینی نمود و به تبع آن با پیش بینی دقیق زمان لازم، دما و رطوبت ماده، کیفیت محصول نهایی کنترل شده و در میزان انرژی مصرفی و زمان صرفه جویی می‌شود [۲]. مدل سازی فرایند خشک کردن به سه طریق صورت می‌گیرد [۳]: ۱- بر اساس روابط تجربی که از فرایند و دستگاه‌های خاصی استخراج شده‌اند. ۲- بر اساس معادلات مربوط به پدیده‌های انتقال همزمان گرما، جرم و مومنتم. ۳- مدل سازی ترمودینامیکی فرایند.

در این مقاله مدل سازی فرایند خشک کردن توسط ترکیبی از معادلات انتقال جرم و انرژی و روابط ترمودینامیکی انجام شده است. مدل پیشنهادی تغییرات رطوبت متوسط و دمای ماده و نیز مقدار آنتروپی تولیدی و اکسرژی را در حین خشک شدن ماده پیش بینی می‌کند.

اکسرژی به صورت بیشینه مقدار کاری که می‌تواند توسط سیستم و به وسیله بخار آب، گرما یا کار برای رسیدن به تعادل با محیط انجام شود، تعریف می‌شود. در خشک کردن صنعتی هدف استفاده کمینه از انرژی برای خارج کردن بیشینه رطوبت و تولید محصول می‌باشد. بدون شک اکسرژی بر خلاف انرژی و جرم از قانون پایستاری و بقا پیروی نمی‌کند بلکه در فرایند بازگشت ناپذیر یا هر فرایند حقیقی، کمی مصرف یا تولید می‌شود [۴].

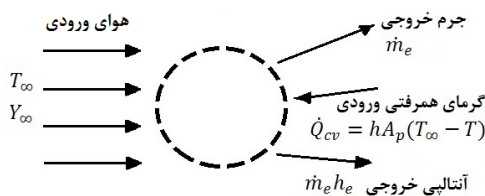
تا کنون مطالعات مختلفی بر روی مدل سازی و بررسی ترمودینامیکی خشک کن های بستر سیالی و سینی دار انجام شده است. Syahrul و همکاران در سال ۲۰۰۲ خشک کن‌های

بستر سیال را از منظر ترمودینامیکی مورد بررسی قرار دادند [۵]. ایشان با نوشتن معادلات و تحلیل انرژی و اکسرژی و بدست آوردن بهینه شرایط عملیاتی برای خشک کردن گندم، تأثیر دمای هوای ورودی، سرعت هوا، محتوای رطوبت اولیه دانه‌ها و اثر افزایش جرم اولیه مواد را بر سرعت خشک شدن ماده و بازدهی انرژی و اکسرژی بررسی کردند. ایشان در سال ۲۰۰۳ مطالعات تکمیلی را بر روی ماده ذرت نیز انجام دادند [۶]. Dincer و همکاران در سال ۲۰۰۴ خشک شدن مواد را از منظر ترمودینامیکی مورد مطالعه قرار دادند [۷]. آن‌ها در مدلسازی جدید ترمودینامیکی خود با در نظر گرفتن معادلات جرم و حرارت، بهینه شرایط عملیاتی برای عملکرد دستگاه را مشخص کردند. Nazghelichi و همکاران در سال ۲۰۱۰ فرایند خشک کردن قطعات مکعبی هویج را در یک خشک کن بستر سیالی از منظر ترمودینامیکی مدل سازی نمودند [۸]. قطعات هویج در سه دمای ۵۰، ۶۰ و ۷۰ درجه سانتیگراد خشک شدند. ایشان نتیجه گرفتند که میزان مصرف انرژی و هدر رفت اکسرژی با انتخاب مکعب‌های کوچک‌تر، بستر با عمق و دمای بیشتر افزایش می‌یابد. Akpinar و همکاران در سال ۲۰۰۴ خشک کردن فلفل قرمز را در یک خشک کن سینی دار مورد بررسی ترمودینامیکی قرار دادند [۹]. ایشان در سال ۲۰۰۶ یک خشک کن سینی دار بستر ثابت را با استفاده از قانون اول و دوم ترمودینامیک مدلسازی کردند [۱۰]. آنان با مطالعه خشک شدن کدو دریافتند که هدر رفت اکسرژی با افزایش مصرف انرژی بیشتر می‌شود و بیشتر این هدر رفت در سینی‌های اولیه اتفاق می‌افتد. Yan Jin و همکاران در سال ۲۰۱۱ خشک کردن شیر در یک خشک کن پاششی را بررسی کردند [۱۱]. آنان میزان تغییرات آنتروپی تولیدی فرایند را با تغییر در اندازه قطر قطرات، دبی و دمای هوای گرم ورودی به محفظه خشک کن مورد بررسی قرار دادند.

مطالعات انجام شده پیشین، بر روی خشک کردن مجموعه‌ای از مواد در خشک کن‌ها انجام شده است و به علت ساده سازی، کل خشک کن به عنوان حجم کنترل در نظر گرفته شده و به این صورت انتقال حرارت و جرم بین ذرات و گاز در معادلات حذف شده و مطالعه بر روی تک تک ذرات خشک شونده صورت نگرفته است. تا کنون مطالعه ترمودینامیکی بر روی خشک شدن یک ماده منفرد انجام نشده است.

در این تحقیق، فرایند خشک شدن سیب زمینی کروی و برگ سبز چای به صورت منفرد از منظر ترمودینامیکی مورد

## مدل سازی ترمودینامیکی خشک شدن یک ماده منفرد در شرایط محیطی ثابت



شکل (۱) طرحی از ماده منفرد در حال خشک شدن (حجم کنترل) و جریان‌های جرم و انرژی ورودی و خروجی از آن

رابطه (۱) بر حسب تغییرات رطوبت متوسط ماده بر مبنای خشک به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$m_s \frac{d\bar{X}}{dt} = -k_y A_p \rho_{air} (Y_e - Y_\infty) \quad (2)$$

که در رابطه فوق  $k_y$  ضریب انتقال جرم  $(\frac{m}{s})$  و  $Y_e$  و  $Y_\infty$  به ترتیب رطوبت مطلق بخار بر روی سطح ماده و در توده هوای خشک کننده و  $m_s$  جرم خشک ماده می‌باشند. رطوبت مطلق تعادلی در فاز گاز بر روی سطح نمونه جامد نیز توسط روابط تجربی به طور مستقیم و یا توسط رطوبت نسبی در سطح جامد خشک شونده ( $a_w$ ) محاسبه می‌شود [۱۵].

اگر رطوبت جامد در سطح ماده خشک شونده (در کره  $r=R$  و در تیغه  $Z=L$ ) را تعادلی ( $X = X_e$ ) در نظر بگیریم تغییرات رطوبت متوسط در ماده با حل معادله قانون دوم فیک در مختصات کروی (سیب زمینی) و صفحه (برگ چای) به دست می‌آید [۱۶]:

کره:

$$\frac{\bar{X}(t) - X_e}{X_0 - X_e} = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp\left(-n^2 \pi^2 \frac{D_e t}{R^2}\right) \quad (3)$$

تیغه نامحدود:

$$\frac{\bar{X}(t) - X_e}{X_0 - X_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left(\frac{-\pi^2 (2n+1)^2 D_e t}{4 L^2}\right) \quad (4)$$

### ۲-۲- موازنه انرژی (قانون اول ترمودینامیک)

قانون اول ترمودینامیک برای ماده خشک شونده به عنوان حجم کنترل با حذف ترم‌های کار و انرژی‌های همراه با جرم ورودی و انرژی‌های پتانسیل و جنبشی به صورت زیر نوشته می‌شود [۱۴]:

$$\frac{dE_{cv}}{dt} = \frac{d(mu)_{cv}}{dt} = \dot{Q}_{cv} - \dot{m}_e h_e \quad (5)$$

بررسی و مدل سازی قرار گرفته‌اند. با در نظر گرفتن ماده خشک شونده به عنوان حجم کنترل، معادلات انتقال جرم و انرژی بین ماده و گاز نوشته شده و نیز قوانین اول و دوم ترمودینامیک بر روی آن اعمال می‌گردد.

سیب زمینی گیاهی است که ابتدا در آمریکا مورد کاشت و استفاده قرار گرفته و در قرن شانزدهم به اروپا آورده شد و پس از آن در سراسر دنیا پخش شد [۱۲]. مواد مغذی و ترکیبات شیمیایی موجود در سیب زمینی وابسته به وضعیت آب و هوایی و شرایط کاشت آن است. هفتاد درصد ماده خشک سیب زمینی نشاسته است که منبع عمده انرژی موجود در آن می‌باشد. همچنین سیب زمینی به عنوان ماده‌ای که حاوی ویتامین ث است شناخته شده که مقدار این ویتامین در طول دوره نگه داری آن کم می‌شود. خشک کردن سیب زمینی یکی از روش‌های نگه داری آن در صنایع غذایی است. مقدار رطوبت سیب زمینی در حدود ۴ گرم بر گرم ماده خشک است [۱۲].

چای نیز مهمترین نوشیدنی پس از آب در ایران است. هر فنجان چای (۱۷۰ گرم) حدود ۴ کیلوکالری انرژی دارد. چای دم کرده نه تنها دارای طعم و بوی مطبوعی است، به دلیل وجود ترکیباتی مانند پلی فنول ها، آمینواسیدها، ویتامین‌ها، کربوهیدرات‌ها، کافئین و تیانین ها در آن، دارای اثرات فیزیولوژیکی و عملکردی فراوانی می‌باشد. چای سبز یک منبع رژیمی مهم آنتی اکسیدانی می‌باشد. مقدار رطوبت چای سبز حدود ۲ گرم بر گرم ماده خشک است [۱۳].

## ۲- تئوری

یک ماده منفرد در معرض هوایی با دمای  $T_\infty$  و رطوبت مطلق  $Y_\infty$  خشک می‌شود. با فرض ناچیز بودن تغییرات حجم ماده در حین خشک شدن، ماده را به صورت حجم کنترلی (شکل (۱)) در نظر می‌گیریم که رطوبت از منافذ روی سطح آن خارج می‌شود. مدلسازی ترمودینامیکی با اعمال موازنه‌های جرم، انرژی (قانون اول ترمودینامیک) و آنتروپی (قانون دوم ترمودینامیک) بر روی ماده خشک شونده صورت می‌گیرد.

### ۲-۱- موازنه جرم

رابطه موازنه کلی جرم برای ماده خشک شونده منفرد به صورت زیر بیان می‌گردد [۱۴]:

$$\frac{dm_{cv}}{dt} = -\dot{m}_e \quad (1)$$

مرجع  $T_0$  ضرب کرده و عبارت حاصله را از معادله انرژی (۵) کم می کنیم و با جایگذاری روابط مربوط به  $h_e$  و  $Q_{cv}$  به  $S_e$  و  $h_e$  [۱۴] و ساده سازی ساده سازی خواهیم داشت:

$$\frac{d(Ex)_{cv}}{dt} = hA_p(T_\infty - T) \left[ 1 - \frac{T_0}{T} \right] - \dot{m}_e \left[ h_e - \lambda \frac{T_0}{T} \right] - \dot{S}_{gen} T_0 \quad (10)$$

### ۲-۵- حل مدل

تغییرات رطوبت متوسط به صورت صریح و رابطه (۲)، (۳) یا (۴) بدست می آید. تغییرات دما با حل معادله دیفرانسیل (۶) به روش اختلاف محدود بدست می آید. با نوشتن گرادیانهای زمانی دما و رطوبت به صورت مرکزی حول نقطه  $i, n+1/2$  و جایگذاری آنها در معادله (۶)، معادله حاکم بر تغییرات دما به صورت زیر بدست می آید:

$$T_{n+1} = \frac{T_n \left[ 1 - \frac{1}{2} \frac{dt(m_s C_p^W \frac{\bar{x}_{n+1} - \bar{x}_n}{\Delta t} + A_p h)}{m_s (C_p^S + C_p^W \frac{\bar{x}_{n+1} + \bar{x}_n}{2})} \right] + \frac{dt(m_s \lambda \frac{\bar{x}_{n+1} - \bar{x}_n}{\Delta t} + A_p h T_a)}{m_s (C_p^S + C_p^W \frac{\bar{x}_{n+1} + \bar{x}_n}{2})}}{\left[ 1 + \frac{1}{2} \frac{dt(m_s C_p^W \frac{\bar{x}_{n+1} - \bar{x}_n}{\Delta t} + A_p h)}{m_s (C_p^S + C_p^W \frac{\bar{x}_{n+1} + \bar{x}_n}{2})} \right]} \quad (11)$$

جهت محاسبه آنتروپی تولید شده در طی فرایند خشک شدن اگر در یک بازه زمانی کوچک  $\Delta t$  مقدار جرم  $m$  و دمای  $T$  برابر با مقدار متوسط  $\bar{m}$  و  $\bar{T}$  در این بازه زمانی در نظر گرفته شوند و با استفاده از رابطه تغییرات آنتروپی در جامدات [۱۴]، معادله (۸) به صورت زیر ساده می شود:

$$S_{12 gen} = \bar{m} \bar{c} \ln \frac{T_2}{T_1} + \dot{m}_e \frac{\lambda}{\bar{T}} \Delta t - \frac{hA_p(T_\infty - \bar{T})}{\bar{T}} \Delta t \quad (12)$$

جهت محاسبه افزایش اکسرژی حجم کنترل با صرف نظر کردن از  $\frac{dm}{dt}$  در بازه زمانی کوتاه  $\Delta t$  و در نتیجه ضرب طرفین رابطه (۱۰) در  $dt$  و انتگرال گیری از آن خواهیم داشت:

$$Ex_{12} = \Delta Ex_{cv} = hA_p(T_\infty - \bar{T}) \left[ 1 - \frac{T_0}{\bar{T}} \right] \Delta t - \dot{m}_e \left[ h_e - \lambda \frac{T_0}{\bar{T}} \right] \Delta t - S_{12 gen} T_0 \quad (13)$$

که با جایگذاری روابط مربوط به انرژی درونی برای جامدات و گرمای همرفتی منتقل شده از هوا با دمای  $T_\infty$  به ماده خشک شونده با دمای متغیر  $T$  و آنتالپی بخار آب خروجی از ماده [۱۴] و نیز رابطه تجربی ظرفیت گرمایی ماده مرطوب بر حسب ظرفیت های حرارتی آب و ماده خشک [۱۵] در رابطه (۵) و ساده سازی آن خواهیم داشت:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{m_s \frac{d\bar{x}}{dt} \lambda + hA_p T_\infty}{m_s (C_p^S + \bar{x} C_p^W)} - T \frac{m_s C_p^W \frac{d\bar{x}}{dt}}{m_s (C_p^S + \bar{x} C_p^W)} \quad (6)$$

که معادله فوق معادله دیفرانسیل تغییرات دمای جسم در حین خشک شدن است. لازم به ذکر است که در روابط بالا فرض بر این است که دمای جسم در همه جای آن به صورت یکنواخت و به صورت تابعی از زمان است.

### ۲-۳- موازنه آنتروپی (قانون دوم ترمودینامیک)

قانون دوم ترمودینامیک برای ماده منفرد در حال خشک شدن به صورت زیر بیان می گردد [۱۴]:

$$\frac{dS_{cv}}{dt} = -\dot{m}_e S_e + \frac{\dot{Q}_{cv}}{T} + \dot{S}_{gen} \quad (7)$$

که در رابطه (۷) آنتروپی خروجی ( $S_e$ ) برابر آنتروپی آب تبخیر شده خروجی از ماده در حین خشک شدن است [۱۴]. با جایگذاری رابطه گرمای همرفتی [۱۴] در معادله (۷) و سپس انتگرال گیری از طرفین معادله حاصل در بازه صفر تا  $t$  ، مقدار آنتروپی تولید شده به صورت زیر بدست می آید:

$$S_{12 gen} = \int_0^t \frac{d(ms)_{cv}}{dt} dt + \int_0^t \dot{m}_e \frac{\lambda}{T} dt - \int_0^t \frac{hA_p(T_\infty - T)}{T} dt \quad (8)$$

### ۲-۴- اکسرژی

تجمع اکسرژی در یک حجم کنترل بدون کار محوری (Shaft work) یا مرزی (Boundary work) به صورت زیر بیان می گردد [۱۴]:

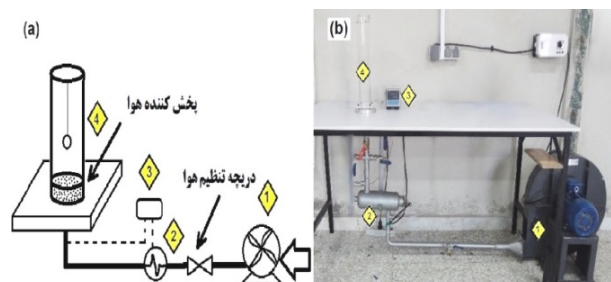
$$\frac{d(Ex)_{cv}}{dt} = \frac{dE_{cv}}{dt} - T_0 \frac{dS_{cv}}{dt} - (h_0 - T_0 S_0) \frac{dm_{cv}}{dt} \quad (9)$$

با صرف نظر کردن از تغییرات جرم حجم کنترل در یک بازه زمانی کوچک  $dt$ ، طرفین معادله آنتروپی (۷) را در دمای

### ۳- مواد و روش‌ها

جدول (۱) خواص فیزیکی و انتقالی مورد استفاده در مدل

منبع	معادله	خاصیت (واحد)
[۱۷]	$\lambda = 2501.3 - 2.3017T(^{\circ}\text{C}) - 0.001427T^2(^{\circ}\text{C})^2$	گرمای نهان تبخیر آب $\left(\frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}\right)$
[۱۸]	$C_p^{sp} = 1.6998 + 0.8499X - 0.1042X^2$	گرمای ویژه، سیب زمینی $\left(\frac{\text{KJ}}{\text{Kg.K}}\right)$
[۱۹]	$C_p^w = 4.1762 - 9.0862 * 10^{-5}T + 5.4731 * 10^{-6}T^2$	گرمای ویژه، آب $\left(\frac{\text{KJ}}{\text{Kg.K}}\right)$
[۲۰]	$\rho_{air} = \frac{101.325}{(0.287 T_{abs})}$	چگالی هوا $\left(\frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}\right)$
[۲۱]	$C_p^{st} = 1.00926 - 0.0040403T + 6.1759 * 10^{-4}T^2$	گرمای ویژه، چای $\left(\frac{\text{KJ}}{\text{Kg.K}}\right)$
[۲۲]	$x = \left( -\frac{\ln(1 - a_w)}{A} \right)^{\frac{1}{B}}$ مثلاً در $45^{\circ}$ A=0.085 B=1.069	ضریب فرار آب در سطح برگ چای
[۲۳]	مثلاً در $50^{\circ}$ A=-0.104 B=4.08 C=22	ضریب فرار آب در سطح سیب زمینی
[۲۴]	$P_{sat} = \exp \left( 53.53 - \frac{6834.27}{T_{abs}} - 5.169 \ln(T_{abs}) \right)$	فشار اشباع تعادلی آب (KPa)



شکل (۲) نمای شماتیک (a) و تصویر (b) خشک کن پیشنهادی ساخته شده جهت انجام آزمایشات (۱)-دمنده ۲- گرم کننده ۳- کنترلر دما ۴- محفظه خشک کن

خشک کردن نمونه‌های سیب زمینی با قطر ۲ سانتی متر در سه دمای ۴۰، ۵۰ و ۶۰°C انجام شد. سرعت هوای گرم ورودی به بستر نیز ۱ و ۲ متر بر ثانیه انتخاب شدند که با توجه به قطر بستر (۷/۷۸ cm)، مقدار دبی هوا در این سرعت‌ها به ترتیب  $\frac{285}{2} \frac{\text{lit}}{\text{min}}$  و  $\frac{570}{4} \frac{\text{lit}}{\text{min}}$  بوده اند.

خشک کردن نمونه‌های سیب زمینی با قطر ۲ سانتی متر در سه دمای ۴۰، ۵۰ و ۶۰°C انجام شد. سرعت هوای گرم ورودی به بستر نیز ۱ و ۲ متر بر ثانیه انتخاب شدند که با توجه به قطر بستر (۷/۷۸ cm)، مقدار دبی هوا در این سرعت‌ها به ترتیب  $\frac{285}{2} \frac{\text{lit}}{\text{min}}$  و  $\frac{570}{4} \frac{\text{lit}}{\text{min}}$  بوده اند.

در این تحقیق از سیب زمینی کروی کوچک و برگ سبز چای به عنوان مواد خشک شونده استفاده شده است. نمونه‌های سیب زمینی از فروشگاه‌های در شهر رشت خریداری شدند و بعد از پوست گیری به صورت کره‌هایی با قطر ۲ سانتی متر آماده و در داخل بسته‌های پلاستیکی به مدت ۲۴ ساعت در داخل یخچال با دمای ۴ درجه سانتی گراد نگهداری شدند تا رطوبت در همه جای نمونه‌ها همگن شود. برگ‌های سبز چای نیز از باغات چای واقع در شهرستان رودسر استان گیلان برداشت و برگ‌هایی با شکل و اندازه یکسان جهت همسانی نمونه‌ها انتخاب و سپس مانند نمونه‌های سیب زمینی در داخل یخچال نگهداری شدند. رطوبت متوسط نمونه‌های سیب زمینی و چای به ترتیب برابر ۴/۲ و ۲/۲ بر مبنای خشک بودند. خصوصیات فیزیکی سیب زمینی و چای در جدول (۱) ارائه شده‌اند.

### ۳-۲- روش انجام آزمایشات

داده‌های تجربی از خشک کردن نمونه‌های چای و سیب زمینی در دستگاه خشک کن پیشنهادی که بدین منظور ساخته شد، استخراج گردیدند. دستگاه خشک کن که نمای شماتیک و عکس آن در شکل (۲) آورده شده است از چهار قسمت اصلی تشکیل شده: ۱- دمنده که هوا را از محیط مکیده و با حداکثر سرعت  $\frac{3}{5} \frac{\text{m}}{\text{s}}$  به داخل یک گرم کن الکتریکی هدایت میکند. ۲- گرم کن الکتریکی که محفظه ای محتوی المنت های حرارتی با قدرت ۳۰۰۰ وات است. ۳- دستگاه کنترلر دمای هوا که قلب اصلی این دستگاه می‌باشد و دمای هوای ورودی بستر را با دقت ۰/۱ درجه سلسیوس در مقدار دلخواه ثابت نگه می‌دارد. ۴- محفظه خشک کن که از شیشه ای استوانه ای شکل به قطر داخلی ۷/۸ سانتی متر ساخته شده و مواد برای خشک شدن در داخل این قسمت قرار داده می‌شوند.

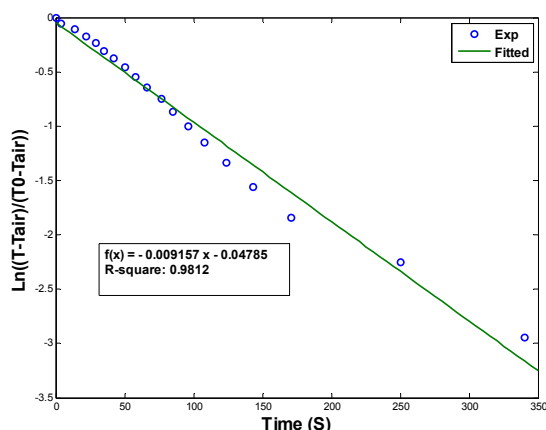
لازم به ذکر است که سرعت هوا نیز با سرعت سنج دیجیتال (Anemometer, Model: AM-4200, Taiwan) با دقت ۰/۱ متر بر ثانیه اندازه گیری شد.

نمونه‌ها پس از بیرون آورده شدن از یخچال و رسیدن به دمای محیط در داخل دستگاه خشک کن قرار داده شدند. در هر آزمایش یک نمونه از ماده به نخ‌های آویزان شد و داخل خشک کن به صورت آزاد رها شد. وزن و دمای سطح نمونه‌ها در بازه‌های زمانی متفاوت به ترتیب توسط ترازوی دیجیتال

بایوت برای کره آلومینیومی و تیغه به ترتیب برابر ۰/۰۳۲ و ۰/۰۰۹ بدست آمدند. مقادیر ضریب انتقال حرارت جابجایی برای کره به قطر ۲ سانتی متر در سرعت های هوای ۱ و ۲ متر بر ثانیه به ترتیب برابر ۲۸۹/۴ و  $\frac{w}{m^2K}$  ۳۵۰/۱ بدست آمدند. همچنین برای تیغه مسی در هوا با سرعت های ۰/۵ و ۰/۷ متر بر ثانیه مقادیر ضرایب انتقال حرارت برابر ۹۰/۵ و ۱۳۱/۴ وات بر متر مربع بر درجه کلوبین بدست آمدند. مقادیر  $h$  به همراه پارامترهای  $R^2$  و RMSE که نشان دهنده میزان دقت برازش خط حاصل است، برای کره و تیغه به ترتیب در جداول (۲) و (۳) آمده اند.



شکل (۳) (الف) نمونه تیغه مسی (ب) نمونه کروی آلومینیومی مشابه نمونه‌های اصلی برای محاسبه  $h$



شکل (۴) رسم لگاریتم دمای بی بعد بر حسب زمان برای محاسبه ضریب انتقال حرارت کره با قطر ۲ سانتی متر و سرعت ۱ m/s ( $h=289/4 W/m^2.K$ )

جدول (۲) مقادیر بدست آمده ضریب انتقال حرارت جابجایی در شرایط مختلف برای کره با قطر ۲ سانتی متر

$v_{air}(\frac{m}{s})$	۱m/s	۲m/s
$h(\frac{w}{m^2k})$	۲۸۹/۴	۳۵۰/۱
$R^2$	۰/۹۸۱	۰/۹۷۶
RMSE	۰/۱۱۴	۰/۱۶۰

برگ‌های چای نیز در سه دمای ۳۵، ۴۵ و ۵۵°C و در دو سرعت ۰/۵ و ۰/۷ متر بر ثانیه خشک شدند. دلیل عدم استفاده از سرعت های بالاتر برای برگ‌های چای، امکان سیال شدن آنها و بیرون رفتن آنها از دستگاه به دلیل وزن کم آنها بود. در هر یک از شرایط عملیاتی، آزمایش بر روی حداقل سه نمونه انجام گردید و میانگین داده‌های این سه نمونه به عنوان داده آزمایشگاهی آن شرایط در نظر گرفته شد.

### ۳-۳- ضریب انتقال حرارت جابجایی (h)

برای محاسبه ضریب انتقال حرارت جابجایی (h) در معادلات، از اندازه گیری تغییرات دمای یک کره آلومینیومی و صفحه مسی هم شکل و هم اندازه با نمونه‌های سیب زمینی و چای استفاده شد (شکل ۳). با توجه به سائز قطعات فلزی و با فرض استفاده از تحلیل ظرفیت حرارتی فشرده  $(Bi = \frac{hA}{k} < 0.1)$ ، تغییرات دمای فلزات مذکور با زمان را توسط معادله زیر محاسبه می‌شود [۲۵]:

$$\ln\left(\frac{T - T_{\infty}}{T_0 - T_{\infty}}\right) = -\left(\frac{hA}{mc_p}\right)t \quad (14)$$

که در معادله (۱۴)،  $T$  دمای جسم،  $T_{\infty}$  دمای هوای گرم ورودی،  $A$  مساحت خارجی جسم که در معرض انتقال حرارت قرار دارد و  $m$  جرم جسم می‌باشد. با رسم تغییرات  $\ln\left(\frac{T-T_{\infty}}{T_0-T_{\infty}}\right)$  بر حسب زمان یک خط راست بدست می‌آید که شیب آن برابر  $\frac{hA}{mc_p}$  می‌باشد که با استفاده از این شیب، مقدار  $h$  به دست خواهد آمد. Ghisalberti و Kondjoyan نشان دادند که این فلزها به دلیل هدایت گرمایی زیاد و ضریب نشر کم برای تعیین ضریب انتقال حرارت مناسبند [۲۶]. پس از محاسبه  $h$ ، صحت فرض یکنواختی دما در جسم فلزی ( $Bi < 0.1$ ) بررسی و تایید شد.

### ۴- نتایج و بحث

#### ۴-۱- محاسبه ضریب انتقال حرارت جابجایی (h)

مقدار  $h$  با اندازه گیری تغییرات دمای کره و تیغه هم شکل با ماده خشک شونده و رسم  $\ln\left(\frac{T-T_{\infty}}{T_0-T_{\infty}}\right)$  بر حسب زمان، طبق معادله (۱۴) بدست آمد. شکل (۴) نمونه ای از تغییرات  $\ln\left(\frac{T-T_{\infty}}{T_0-T_{\infty}}\right)$  بر حسب زمان برای محاسبه ضریب انتقال حرارت کره با قطر ۲ سانتی متر در دمای هوای ۵۰ درجه و سرعت ۱  $\frac{m}{s}$  را نشان می‌دهد. محاسبه عدد بایوت نیز فرض استفاده از تحلیل ظرفیت گرمایی فشرده ( $Bi < 0.1$ ) را تایید کرده و صحت محاسبات را نشان می‌دهد. مقدار عدد

جدول (۳) مقادیر بدست آمده ضریب انتقال حرارت جابجایی در

شرایط مختلف برای تیغه

$v_{air} \left(\frac{m}{s}\right)$	۰/۷m/s	۰/۷m/s
$h \left(\frac{w}{m^2k}\right)$	۹۰/۵	۱۳۱/۴
$R^2$	۰/۹۹۳	۰/۹۹۴
RMSE	۰/۰۲۱	۰/۰۵۰

جدول (۴) مقادیر  $D_e$  (m<sup>2</sup>/min) برای نمونه سیب زمینی به قطر

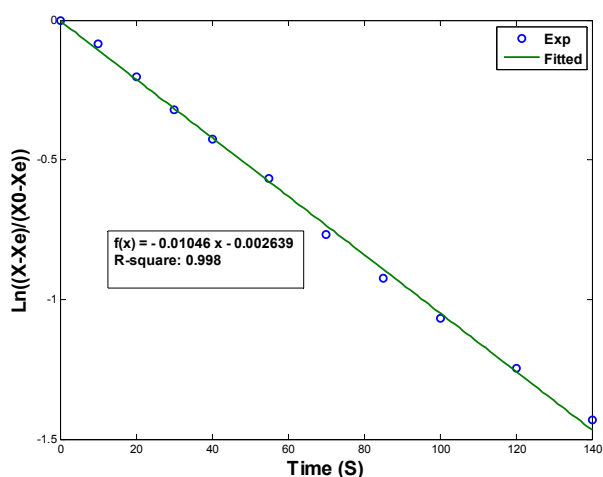
۲ سانتی متر در سه دمای هوای ورودی

T(°C)	۴۰	۵۰	۶۰
$D_e$	$1/1 \times 10^{-9}$	$1/36 \times 10^{-9}$	$1/76 \times 10^{-9}$
$R^2$	۰/۹۷	۰/۹۷	۰/۹۸
RMSE	۰/۰۴۲	۰/۰۵۷	۰/۰۵۴

جدول (۵) مقادیر  $D_e$  (m<sup>2</sup>/min) برای نمونه چای

در سه دمای هوای ورودی ( $L=0.32$  cm)

T(°C)	۳۵	۴۵	۵۵
$D_e$	$4/0.8 \times 10^{-13}$	$7/6 \times 10^{-13}$	$16/1 \times 10^{-13}$
$R^2$	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۸
RMSE	۰/۰۱۰	۰/۰۲۲	۰/۱۴۳



شکل (۵) محاسبه  $D_e$  برای برگ چای در دمای ۴۵ درجه

سلسیوس و سرعت هوای ۰/۷ m/s با رسم لگاریتم نسبت رطوبت

بی بعد بر حسب زمان ( $D_e=7/86 \times 10^{-13}$  m<sup>2</sup>/min)

و انتقال جرم می‌باشد. مقدار خطای متوسط نسبی (MRE) [۲۸] بین داده‌های تجربی و نتایج مدل، برای چای در دمای ۳۵، ۴۵ و ۵۵ درجه سانتیگراد به ترتیب برابر با ۱/۹، ۴/۷ و ۵/۲ درصد و برای سیب زمینی به قطر ۲ سانتی متر در دمای ۴۰، ۵۰ و ۶۰ درجه سانتیگراد برابر با ۲/۶، ۲/۸ و ۳/۵ درصد می‌باشند. مقادیر کم و قابل قبول خطاها نشان دهنده اعتبار و صحت مدل پیشنهادی است. افزایش میزان خطا با افزایش دمای هوای ورودی در مورد رطوبت برگ چای

۴-۲- ضریب انتقال جرم ( $k_y$ )

مقدار ضریب انتقال جرم  $k_y$  (m/s) مورد استفاده در رابطه (۳) توسط آنالوژی چیلتون - کولبورن (Chilton-Colburn) و با استفاده از مقدار ضریب انتقال حرارت جابجایی محاسبه شده، به دست می‌آید [۲۷]:

$$\frac{h_t}{k_y} = \rho_{air} C_p \left(\frac{Sc}{Pr}\right)^{2/3} \quad (15)$$

این آنالوژی پرکاربرد و شناخته شده می‌باشد و در تمام فرایندهای همراه با انتقال همزمان جرم و حرارت به کار می‌رود [۲۷].

۴-۳- محاسبه ضریب نفوذ موثر رطوبت در سیب زمینی

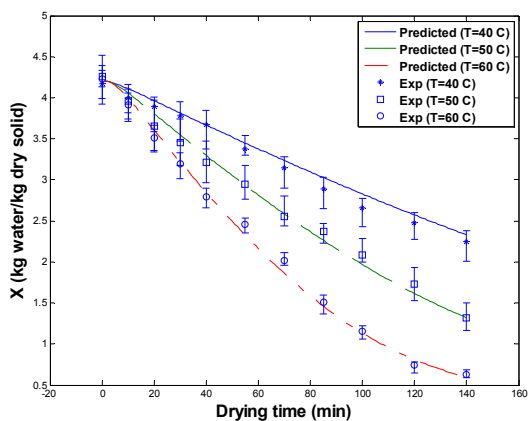
و چای

برای بدست آوردن مقدار  $D_e$  از حل معادله قانون دوم فیک در مختصات کروی (۳) و تیغه نا محدود (۴) استفاده می‌کنیم. بدین منظور با استفاده از جمله اول سری در معادلات (۳) و (۴) مقدار  $D_e$  را محاسبه می‌کنیم. اگر تغییرات  $\ln \frac{\bar{X}-X_e}{X_0-X_e}$  را بر حسب  $t$  رسم کنیم شیب خط بدست آمده برای صفحه به ضخامت  $2L$  برابر با  $D_e \frac{407.09}{L^2}$  - و برای کره با شعاع  $R$  برابر  $D_e \frac{542.79}{R^2}$  - است. شکل (۵) نشان دهنده نمونه ای از تغییرات  $\ln \frac{\bar{X}-X_e}{X_0-X_e}$  با زمان برای برگ سبز چای در دمای ۴۵ درجه سلسیوس است.

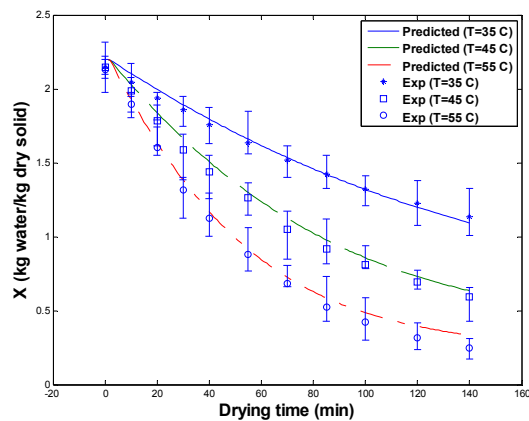
جدول (۴) و جدول (۵) نشان دهنده مقادیر ضریب نفوذ رطوبت در سیب زمینی و چای در شرایط مختلف به همراه پارامترهای  $R^2$  و RMSE مربوطه که نشان دهنده دقت برازش خطی مورد استفاده برای محاسبه آن‌هاست، می‌باشند.

۴-۴- تجزیه و تحلیل مدل و داده‌ها

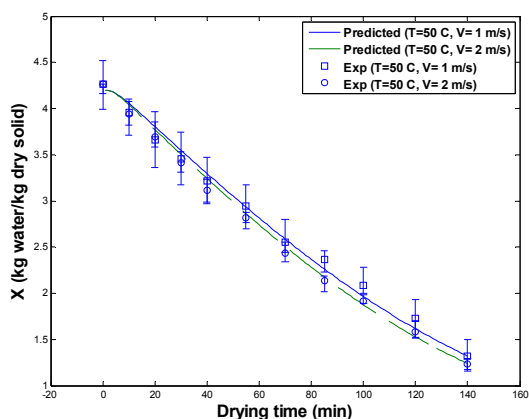
بعد از محاسبه ضرایب انتقال حرارت و جرم و ضرایب نفوذ موثر رطوبت در چای و سیب زمینی و استفاده از مقادیر بدست آمده از معادلات، نتایج حاصل از مدل پیشنهادی با داده‌های تجربی مقایسه شدند. شکل‌های (۶) و (۷) به ترتیب نشان دهنده تغییرات رطوبت چای و سیب زمینی به قطر ۲ سانتی متر با زمان است. شکل‌ها نشان دهنده تطبیق قابل قبول نتایج مدل پیشنهادی با مقادیر تجربی رطوبت و در نتیجه اعتبار مدل پیشنهادی می‌باشند. شکل‌ها نشان می‌دهند که خشک شدن چای و سیب زمینی در کل دوره خشک شدن در مرحله نزولی (Falling rate) صورت می‌گیرد که این امر نشان دهنده آن است که در خشک شدن این مواد، مکانیسم نفوذ در داخل ماده کنترل کننده نرخ خشک شدن



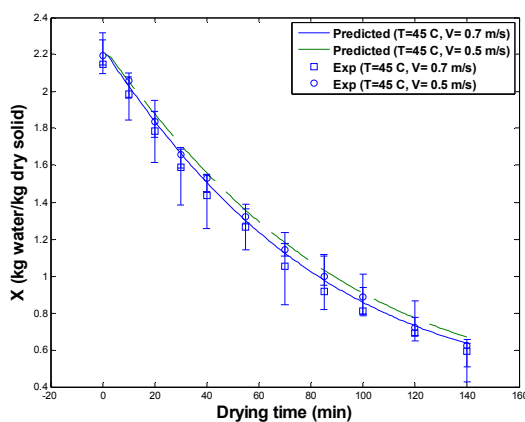
شکل (۷) تغییرات رطوبت برای نمونه کروی سیب زمینی با قطر ۲ cm در هوای با سرعت ۱ m/s و دماهای مختلف



شکل (۶) تغییرات رطوبت برگ سبز چای در هوای با سرعت ۰.۷ m/s و دماهای مختلف



شکل (۹) اثر تغییر سرعت هوا بر منحنی خشک شدن سیب زمینی به قطر ۲ سانتی متر در دمای ۵۰ درجه سلسیوس



شکل (۸) اثر تغییر سرعت هوا بر منحنی خشک شدن برگ سبز چای در دمای ۴۵ درجه سلسیوس

توسط مدل با دماهای تجربی اندازه گیری شده در سطح ماده خشک شونده می‌باشند. مقدار خطای نسبی متوسط (MRE) بین داده‌های تجربی و نتایج پیش بینی شده توسط مدل برای چای در دماهای ۳۵، ۴۵ و ۵۵ درجه سلسیوس برابر ۲/۳، ۲/۸ و ۴ درصد می‌باشند. همچنین مقدار خطا برای سیب زمینی به قطر ۲ سانتی متر در دماهای ۴۰، ۵۰ و ۶۰ درجه سلسیوس برابر با ۵/۵، ۳/۳ و ۳/۱ درصد می‌باشند. شکل‌ها نشان می‌دهند که با توجه به ضخامت برگ‌های چای، این نمونه‌ها سریع به دمای گاز می‌رسند اما در مورد نمونه‌های کروی سیب زمینی، زمان رسیدن به دمای نهایی بیشتر است. تطبیق بیشتر نتایج مدل و داده‌های تجربی برای برگ سبز چای به علت ضخامت کم چای و صحت فرض یکنواختی دما در کل ماده است. نتایج نشان می‌دهند که این مدل سازی برای تیغه و اجسام با قطر کم، دقیق‌تر است و با افزایش ضخامت و قطر، در داخل نمونه توزیع دمایی به وجود می‌آید.

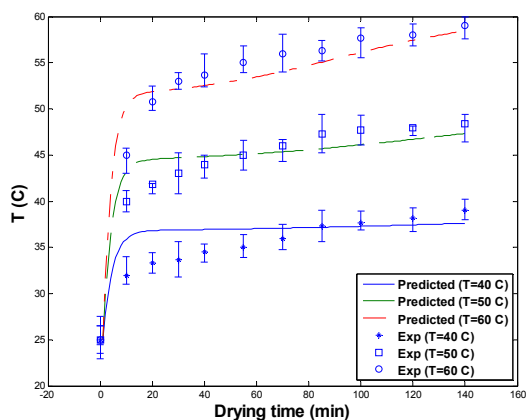
می‌تواند ناشی از تغییر شکل برگ از حالت تیغه در حین خشک شدن باشد. با افزایش ضخامت نمونه‌ها، میزان خطا افزایش یافته و از دقت پیش بینی مدل کاسته می‌شود. نتایج نشان دهنده آن است که مدل پیشنهادی برای اجسام با قطر و ضخامت کمتر دقیق‌تر است.

شکل‌های (۸) و (۹) نشان دهنده اثر سرعت (دبی) هوای خشک کننده بر سرعت خشک شدن ماده است. شکل‌ها نشان می‌دهند که اگر چه با افزایش سرعت هوا و در نتیجه با افزایش ضرایب انتقال جرم و حرارت، سرعت خشک شدن بیشتر می‌شود، اما افزایش سرعت هوا اثر قابل ملاحظه‌ای بر سرعت خشک شدن مواد ندارد. این مساله مؤید این نکته است که در خشک شدن مواد غذایی مانند چای و سیب زمینی مکانیسم کنترل کننده، نفوذ رطوبت در درون ماده است.

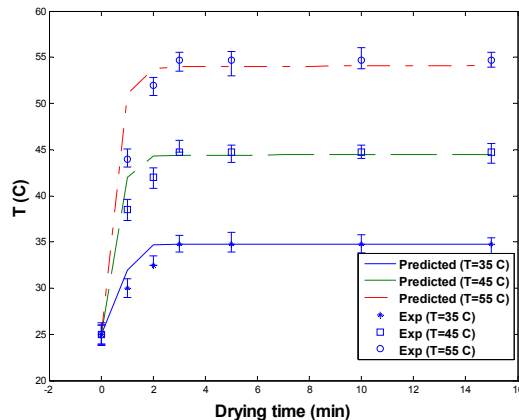
شکل‌های (۱۰) و (۱۱) به ترتیب نشان دهنده تغییرات دمای چای و سیب زمینی به قطر ۲ سانتی متر با زمان هستند. شکل‌ها نشان دهنده تطبیق دمای پیش بینی شده



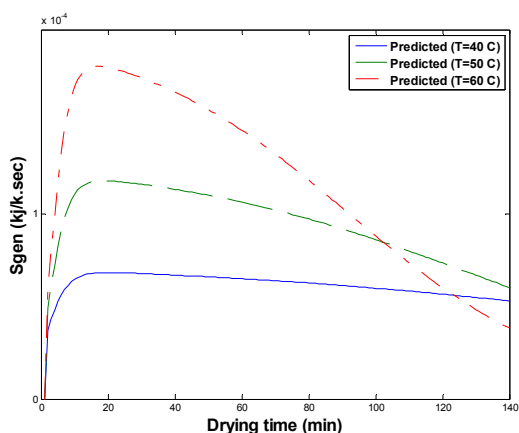
## مدل سازی ترمودینامیکی خشک شدن یک ماده منفرد در شرایط محیطی ثابت



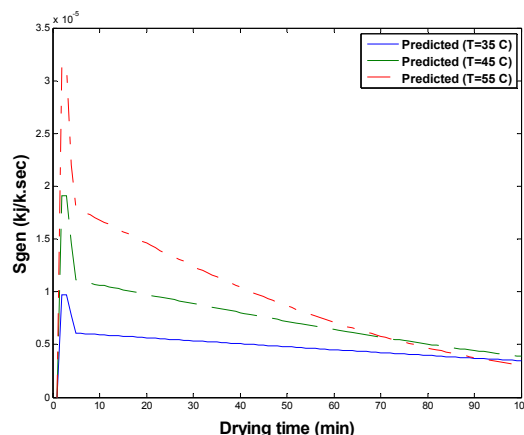
شکل (۱۱) مقایسه دمای پیش بینی شده توسط مدل با داده‌های تجربی برای خشک شدن سیب زمینی به قطر ۲ سانتی متر در هوای با سرعت ۱ m/s و دماهای مختلف



شکل (۱۰) مقایسه دمای پیش بینی شده توسط مدل با داده‌های تجربی برای خشک شدن برگ سبز چای در هوای با سرعت ۰/۷ m/s و دماهای مختلف



شکل (۱۳) تغییرات آنتروپی تولیدی نمونه سیب زمینی به قطر ۲cm در حین خشک شدن در هوای ورودی با سرعت ۱ m/s و دماهای مختلف



شکل (۱۲) تغییرات آنتروپی تولیدی در حین خشک شدن برای برگ سبز چای با زمان در هوای با سرعت ۰/۷ m/s و دماهای مختلف

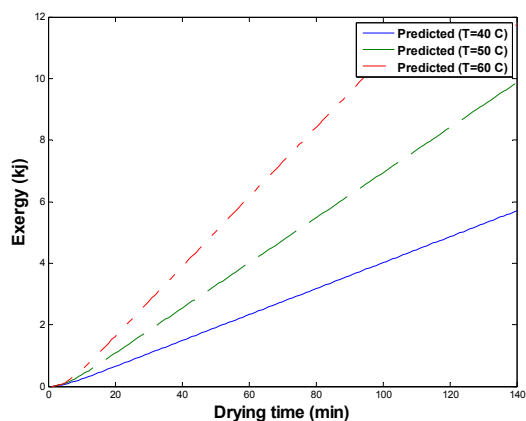
دماهای مختلف می‌باشند. مقدار اکسرژی برای مواد در ابتدا به سرعت افزایش یافته و پس از مدتی به مقدار ثابتی می‌رسد. مطالعات قبلی بر روی خشک کردن هویج نتایج مشابهی را در مورد تغییرات اکسرژی نشان می‌دهد [۸].

### ۵- نتیجه گیری

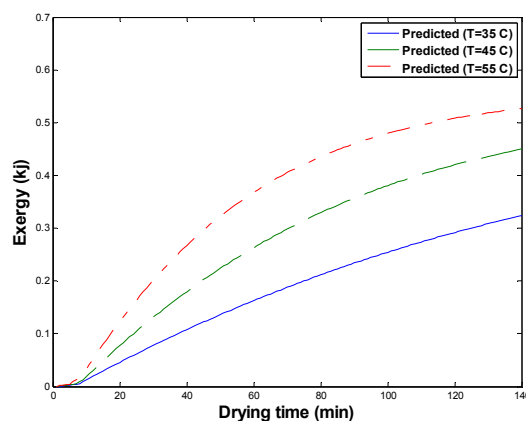
در این مقاله خشک شدن یک ماده منفرد در هوا از منظر ترمودینامیکی مدل سازی شده و نتایج حاصل از آن با داده‌های تجربی مورد مقایسه قرار گرفت. نمونه‌های کروی سیب زمینی به قطر ۲cm در سه دمای ۴۰، ۵۰ و ۶۰ درجه سانتیگراد و همچنین برگ‌های سبز چای در سه دمای ۳۵، ۴۵ و ۵۵ درجه سانتیگراد در داخل دستگاه خشک کن آزمایشگاهی پیشسازی خشک و داده‌های مربوط به محتوای رطوبت و دمای سطح نمونه‌ها استخراج گردیدند. نتایج نشان می‌دهند که مدل ترمودینامیکی مورد نظر برای اجسام با

شکل‌های (۱۲) و (۱۳) نشان دهنده تغییرات آنتروپی تولیدی برای برگ سبز چای و سیب زمینی کروی (به قطر ۲ سانتیمتر) در دماهای مختلف هوای خشک کننده می‌باشند. همانند محلول شیر که در خشک کن پاششی، به شیر خشک تبدیل می‌گردد و آنتروپی آن از مقدار بیشینه به یک مقدار کمینه می‌رسد [۱۱] در نمودارهای این تحقیق نیز تولید آنتروپی در ابتدا با توجه به افزایش دمای نمونه به مقدار قابل توجهی افزایش می‌یابد اما به تدریج با خشک شدن نمونه و کم شدن تغییرات دما، کم می‌شود. تغییرات بسیار زیاد در برگ چای به دلیل ضخامت کم آن و در نتیجه تغییرات سریع دمای آن می‌باشد. شکل‌ها نشان می‌دهند که در دمای بالاتر هوای گرم ورودی، آنتروپی تولیدی به دلیل سرعت بیشتر خشک شدن، سریع‌تر به صفر می‌رسد.

شکل‌های (۱۴) و (۱۵) نشان دهنده افزایش اکسرژی در برگ سبز چای و سیب زمینی در حین خشک شدن در



شکل (۱۵) افزایش اکسرژی در سیب زمینی به قطر ۲ سانتی متر در ۱ و دماهای مختلف m/s در هوای ورودی به سرعت



شکل (۱۴) افزایش اکسرژی در برگ سبز چای در حین خشک شدن در هوای با سرعت ۰/۷ m/s و دماهای مختلف

زیر وند ها

حجم کنترل	$cv$
ورودی	$i$
خروجی	$o$

حروف یونانی

چگالی هوا، $\frac{Kg}{m^3}$	$\rho_{air}$
چگالی نمونه، $\frac{Kg}{m^3}$	$\rho_p$
گرمای نهان آب، $\frac{Kj}{Kg}$	$\lambda$
سطح مقطع نمونه، $cm^2$	$A_p$
گرمای ویژه ماده خشک، $\frac{Kj}{Kg.K}$	$C_p^S$
گرمای ویژه آب، $\frac{Kj}{Kg.K}$	$C_p^W$
ضریب نفوذ، $m^2/min$	$D_e$
انرژی حجم کنترل، $kj$	$E_{cv}$
نرخ انتقال اکسرژی، $\frac{Kj}{s}$	$\dot{E}x$
شتاب گرانش، $\frac{m}{s^2}$	$g$
آنتالپی ویژه، $\frac{Kj}{Kg}$	$h$
آنتالپی حجم کنترل، $Kj$	$H_{ev}$
ضریب انتقال جرم، $\frac{m}{s}$	$k_y$
نصف ضخامت تیغه، $m$	$L$
جرم حجم کنترل، $Kg$	$m_{cv}$
دبی جرمی، $Kg$	$\dot{m}$
جرم ماده خشک، $Kg$	$m_s$
نرخ انتقال گرما حجم کنترل، $KW$	$\dot{Q}_{cv}$
آنتروپی حجم کنترل، $\frac{KW}{K}$	$S_{cv}$
تولید آنتروپی، $\frac{KW}{K}$	$\dot{S}_{gen}$
آنتروپی ویژه، $\frac{Kj}{Kg.K}$	$s$
دمای مبنا، $^{\circ}C$	$T_0$
دمای هوای خشک کننده، $^{\circ}C$	$T_{\infty}$

ضخامت کم هم در مورد دما و هم رطوبت پیش بینی دقیقی خواهد داشت اما در مورد اجسام ضخیم بین رطوبت پیش بینی شده و تجربی اختلاف کمی موجود است. مقدار خطای نسبی داده‌های پیش بینی شده نسبت به داده‌های تجربی (MRE) برای رطوبت برگ سبز چای در دمای هوای ورودی ۳۵، ۴۵ و ۵۵ درجه سانتیگراد به ترتیب برابر با ۱/۹، ۴/۷ و ۵/۲ درصد و برای دمای برگ سبز چای برابر با ۲/۳، ۲/۸ و ۴ درصد می‌باشند. همچنین برای نمونه‌های سیب زمینی به قطر ۲ سانتی متر در دمای هوای ورودی ۴۰، ۵۰ و ۶۰ درجه سلسیوس مقادیر خطا برای رطوبت به ترتیب برابر با ۲/۶، ۲/۸ و ۳/۵ درصد و برای دما برابر با ۵/۵، ۳/۳ و ۳/۱ درصد محاسبه شدند. طبق مشاهدات، نرخ خشک کردن به سرعت و دبی هوای گرم ورودی وابستگی چندانی ندارد. آنتروپی تولیدی نیز در ابتدا با افزایش دمای هوای ورودی افزایش یافته اما پس از خشک شدن ماده سیر نزولی دارد. افزایش اکسرژی در ماده خشک شونده در ابتدا سیر صعودی دارد و پس از گذشت زمان به مقدار ثابتی نزدیک می‌شود.

علائم اختصاری و نمادها

دمای نمونه، $^{\circ}C$	$T$
زمان، $s$	$t$
انرژی درونی حجم کنترل، $kj$	$U_{cv}$
سرعت، $\frac{m}{s}$	$v$
حجم نمونه، $m^3$	$v_p$
نرخ کار حجم کنترل، $KW$	$\dot{W}_{cv}$
رطوبت متوسط، $\frac{Kg H_2O}{Kg dry solid}$	$\bar{X}$
رطوبت مطلق سطح (تعادلی)، $\frac{Kg vapor}{Kg dry air}$	$Y_e$
رطوبت مطلق هوای ورودی، $\frac{Kg vapor}{Kg dry air}$	$Y_{\infty}$
طول (فاصله از مرکز تیغه یا صفحه)، $m$	$z$

- [15] E. Herman, G. C. Rodriguez, M. A. Garci (2001) "Mathematical modeling for fixed-bed drying consideration heat and mass transfer interfacial phenomena", *Drying technology*, 19(9), 2343–2362.
- [16] J. Crank (1975) *The Mathematics of Diffusion*, 2nd ed, Oxford University Press, Oxford, UK.
- [17] G. Thorpe, D. R. Heldman (2003), *Encyclopedia of agricultural, food and biological engineering* (pp. 1145–1147). New York: Marcel Dekker, Inc.
- [18] K. M. Waananen, J. B. Litchfield, M. R. Okos, (1993) "Classification of drying models for porous solids", *Drying Technology*, 11(1), 1–40.
- [19] Y. Choi, M. R. Okos, (1986) Effects of temperature and composition on thermal properties of foods. In M. Le Maguer & P. Jelen, *Food engineering and process applications* (Vol. 1, pp. 269–312) New York: Elsevier Applied Science Publishers.
- [20] D. Zare, S. Minaei, M. Mohamad Zadeh, M.H. Khoshtaghaza (2006) "Computer simulation of rough rice drying in a batch dryer", *Energy Conversion and Management*, 47, 3241–3254.
- [21] S. Gupta, B. Saha, A.K. Giri (2002) "Comparative anti mutagenic and anti clastogenic effects of green tea and black tea: a review", *Mutation Research*, 512, 37–65
- [22] N. Arslan, H. Togrul (2006) "The fitting of various models to water sorption isotherms of tea stored in a chamber under controlled temperature and humidity", *Journal of Stored Products Research*, 42, 112-135.
- [23] N. Wang, J. G. Brennan (1991) "Moisture Sorption Isotherm Characteristics of Potatoes at Four Temperatures", *Journal of Food Engineering*, 14, 269-287.
- [24] S. I. Anwar, G. N. Tiwari (2001) "Convective heat transfer coefficient of crops in forced convection drying-an experimental study", *Energ. Conver. Manage*, 42, 1687–1698.
- [25] J. P. Holman (2002) *Heat Transfer, Ninth edition*, McGraw-Hill Higher Education, New York.
- [26] L. Ghisalberti, A. Kondjoyan (1999) "Convective heat transfer coefficients between air flow and a short cylinder. Effect of air velocity and turbulence. Effect of body shape, dimensions and position in the flow", *Jornal of Food Engineering*. 42 ,33–44.
- [27] A. Kondjoyan, J. D. Daudin (1993) "Determination of transfer coefficients by psychrometry", *International Journal of Heat Mass Transfer*, 36 (7) ,1807–1818.
- [28] C. P. McLaughlin, T. R. A. Magee (1998) "The determination of sorption isotherm and the isosteric heats of sorption for potatoes" *Journal of Food Engineering*, 35, 267–280.
- [1] E. Akpınar, A. Midilli, Y. Bicer (2003) "Single layer drying behaviour of potato slices in a convective cyclone dryer and mathematical modeling", *Energy Conversion and Management*, 44, 1689–1705.
- [2] A. Kaleta, K. Górnicki, R. Winiczenko, A. Chojnacka (2013) "Evaluation of drying models of apple (var. Ligol) dried in a fluidized bed dryer", *Energy Conversion and Management*, 67, 179–185.
- [3] N. Wang, J. G. Brennan (1995) "A Mathematical Model of Simultaneous Heat and Moisture Transfer during Drying of Potato", *Journal of Food Engineering*, 24, 47-60.
- [4] I. Dincer (2011) "Exergy as a potential tool for sustainable drying systems", *Sustainable Cities and Society*, 1, 91-96.
- [5] S. Syahrul, F. Hamdullahpur, I. Dincer (2002) "Exergy analysis of fluidized bed drying of moist particles", *Exergy, an International Journal*, 2, 87-97.
- [6] S. Syahrul, I. Dincer, F. Hamdullahpur (2003) "Thermodynamic modeling of fluidized bed drying of moist particles", *International Journal of Thermal Sciences*, 42, 691-701,
- [7] I. Dincer, A.Z. Sahin (2004) "A new model for thermodynamic analysis of a drying process", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 47, 645-652.
- [8] T. Nazghelichi, M. H. Kianmehr, M. Aghbashlo (2010) "Thermodynamic analysis of fluidized bed drying of carrot cubes", *Energy*, 35, 4679-4684.
- [9] E. K. Akpınar (2004) "Energy and Exergy analyses of drying of red pepper slice in a convective type dryer", *Heat and mass transfer*, 31, 1165-1176.
- [10] E. K. Akpınar, A. Midilli, Y. Bicer (2006) "The first and second law analyses of thermodynamic of pumpkin drying process", *Journal of Food Engineering*, 72, 320-331.
- [11] Y. Jin, X. D. Chen (2011) "Entropy production during the drying process of milk droplets in an industrial spray dryer", *International Journal of Thermal Sciences*, 50, 615-625.
- [12] S. Youcef-Ali, H. Messaoudi, J. Y. Desmons, A. Abene, M. Le Ray (2011) "Determination of the average coefficient of internal moisture transfer during the drying of a thin bed of potato slices", *Journal of Food Engineering*, 48, 95-101.
- [13] M. P. Almajano, M. E. Delgado, M. H. Gordon (2007) "Albumin causes a synergistic increase in the antioxidant activity of green tea catechins in oil-in-water emulsions", *Food Chemistry*, 102, 1375-1382.
- [14] G. J. Van Wylen, C. Borgnakke, R. E. S. Wiley, (2013), *Fundamental of thermodynamic*; 8th edition, McGraw-Hill Higher Education, New York.

# Thermodynamic modeling of drying of a single body at constant environmental conditions

Behrooz Abbasi Souraki<sup>1\*</sup>, Hossein Ghanadzadeh<sup>1</sup>, Nima Imami<sup>1</sup>

1. Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran

## ABSTRACT

Modeling of drying process is usually carried out by using the heat and mass transfer equations for prediction of moisture variations of drying material during drying. In this paper, convective air drying of a single body has been modeled using a thermodynamic approach. The proposed model was validated by the experimental data obtained from drying of small spherical potatoes and green tea leaves in a pilot scale dryer. Drying samples were dried at temperatures between 35 and 60°C. The proposed model predicts the temperature and moisture variations and the entropy generation and exergy in the drying sample. The results showed that the air velocity didn't have a pronounced effect on the drying rate. The surface temperature of the drying material increased rapidly at first, and then reached slowly to the drying air temperature. Also the entropy generation increased at the early stages of drying and then decreased at the end of the drying. Exergy and energy increased during the drying. Comparison of the predictions of the proposed model with the experimental data showed the validity of the proposed model. The average relative error between the predictions of the proposed model and the experimental data (MRE) for humidity and temperature were between, 3.9 and 3.1% for green tea and between 3 and 3.9% for potato samples, respectively.

## ARTICLE INFO

Article history:

Received: Dec. 22, 2013

Revised: Feb. 2, 2015

Accepted: March 7, 2015

Key words:

Drying

Thermodynamic modeling

Single body

Energy

Exergy

All right reserved.

\* Corresponding author

b.abbasi@guilan.ac.ir