



## شبیه‌سازی سه بعدی فرایند انتقال جرم و حرارت طی خشک کردن فرکتانس ویندو (مطالعه موردی: پورهی موز)

آتنا شهرکی<sup>۱\*</sup>، مهدی خجسته‌پور<sup>۲</sup>

۱. کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه فردوسی مشهد (shahrakiatena@gmail.com)

۲. استاد گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه فردوسی مشهد (mkhpour@um.ac.ir)

### چکیده

مدل سازی انتقال جرم و حرارت در شرایط مختلف خشک کردن یکی از روش‌های کم هزینه برای بهینه سازی خشک کن ها است. در این مطالعه، فرایند انتقال جرم و حرارت در طول خشک کردن فرکتانس ویندو برای پورهی موز شبیه سازی شد. برای شبیه سازی این فرآیند، معادلات انتقال جرم و حرارت با کمک نرم افزار کام سول مولتی فیزیکس نسخه ۵/۶، در حالت سه بعدی به صورت هم زمان و وابسته به هم حل شدند. مدل فوق با شرایط اولیه، دمای آب ۷۰، ۸۰ و ۹۰ درجه سلسیوس و ضخامت پورهی موز سه میلی متر در نظر گرفته شد. رطوبت و دمای اولیه موز یکنواخت و دمای اولیه ی و تخلخل نمونه های تازه موز به ترتیب، ۲۵ درجه سلسیوس ۷۷ در صد است. گرما فقط توسط آب داغ از سطح پایین محصول تامین شد. نتایج حاصل از شبیه سازی نشان داد، برای کاهش رطوبت پورهی موز در طول خشک کردن در دمای آب ۷۰، ۸۰ و ۹۰ درجه سلسیوس به ترتیب ۴۰، ۵۷ و ۸۲ دقیقه زمان نیاز است. همچنین طبق نتایج حاصل از شبیه سازی، دمای محصول بعد از خشک شدن در دمای آب ۷۰، ۸۰ و ۹۰ درجه سلسیوس به ترتیب ۶۲، ۷۳ و ۸۱ درجه سلسیوس بود.

### کلمات کلیدی

دینامیک خشک کردن، انتقال حرارت، انتقال جرم، شبیه سازی، توزیع رطوبت، توزیع دما.

## شبیه‌سازی سه بعدی فرایند انتقال جرم و حرارت طی خشک کردن رفراکتانس ویندو (مطالعه موردی: پوره موز)

### مقدمه

موز یکی از میوه‌های مهم مناطق گرمسیری و نیمه گرمسیری است که ارزش غذایی بالایی دارد و به صورت خام یا فرآورده استفاده می‌شود [۱]. با وجود بافت نرم و رطوبت نسبتاً بالا موز، زمان ماندگاری کمی دارد و امکان انبار کردن آن به مدت طولانی میسر نیست. از طرف دیگر این محصول قابل انجماد نیست و تنها روش نگهداری آن خشک کردن است [۲]. خشک کردن یکی از قدیمی‌ترین روش‌های حفظ و نگهداری محصولات کشاورزی است که با کاهش میزان رطوبت محصول باعث کاهش فعالیت‌های آنزیمی و میکروبی که مستلزم وجود آب هستند می‌شود و از فاسد شدن محصول جلوگیری می‌کند [۳]. با وجود مقرون به صرفه بودن خشک کردن موز به روش سنتی در فضای باز و با استفاده از نور خورشید اما معمولاً از خشک‌کن‌های صنعتی برای این کار استفاده می‌شود زیرا خشک کردن سنتی باعث کاهش کیفیت موز به دلیل وجود حشرات و گرد و غبار، طولانی شدن زمان خشک شدن و عدم کنترل شرایط خشک کردن می‌شود [۴]. هدف نهایی از فرایند خشک کردن کاهش مقدار ضایعات و افزایش مدت ماندگاری محصول است [۵]. در اکثر روش‌های خشک کردن با اعمال حرارت رطوبت محصول به سطح آن منتقل شده و سپس تبخیر می‌شود. خشک کردن به دلیل استفاده از حرارت در دماهای بالا و زمان نسبتاً زیاد، معمولاً با مصرف زیاد انرژی همراه است. فناوری‌های خشک کردن شامل چهار نسل است. خشک‌کن‌های کابینتی و از نوع بستری، متعلق به فناوری‌های نسل اول بوده و خشک‌کن‌های افشانه‌ای و درام فناوری‌های نسل دوم هستند. خشک کردن انجمادی و اسمزی متعلق به فناوری‌های نسل سوم هستند [۶]. خشک کردن میکروویو، خشک کردن مادون قرمز و خشک کردن به روش رفراکتانس ویندو به عنوان فناوری‌های نسل جدید و چهارم در نظر گرفته می‌شوند [۷]. خشک کردن به روش رفراکتانس ویندو<sup>۱</sup> به دلیل مزیت‌های متعدد، توجه زیادی به خود جلب کرده است و یک روش غیر حرارتی جدید برای خشک کردن محصولات از جمله پوره‌های حساس به حرارت، مایعات و خلال‌های میوه‌ها و سبزیجات است [۸]. به طور کلی خشک کردن محصولات کشاورزی فرایند پیچیده‌ای شامل انتقال هم‌زمان جرم و حرارت است. در خشک کردن به روش رفراکتانس ویندو، دمای محصولات پایین نگه داشته می‌شود و خشک کردن سریع اتفاق می‌افتد، زیرا هر سه حالت انتقال حرارت در روند خشک کردن محصول حضور دارند. خشک‌کن رفراکتانس ویندو با زمان خشک کردن کوتاه و دمای نسبتاً پایین محصول در طول خشک کردن به حفظ ارزش مواد مغذی در طول خشک شدن کمک می‌کند [۹].

مطالعه‌های زیادی به منظور بررسی آزمایشگاهی خشک‌کن رفراکتانس ویندو تاکنون انجام شده است، نیندو و همکاران [۹]، تغییرات رطوبت موجود در پوره کدو در خشک‌کن رفراکتانس ویندو را بررسی کردند، رطوبت اولیه پوره کدو از ۸۰ در صد هنگام پخش شدن بر فیلم مایلار در حال حرکت بر روی آب داغ با دمای ۹۵ درجه سلسیوس و با سرعت ۲/۹۸ متر بر دقیقه در مدت زمان ۴/۵ دقیقه به ۲۰ درصد کاهش یافت. در پژوهشی به خشک کردن انبه در خشک‌کن رفراکتانس ویندو پرداخته اند. ضخامت پوره انبه (۲، ۳ و ۴ میلی‌متر) و درجه حرارت آب (۸۵، ۹۰ و ۹۵ درجه سلسیوس) متغیرهای مستقل این تحقیق بود. نتایج نشان می‌داد که خشک شدن انبه با ضخامت دو میلی‌متر کوتاه‌ترین زمان خشک شدن را دارد. نمونه بهینه انبه خشک شده با سیستم رفراکتانس ویندو، در دمای ۹۵ درجه سلسیوس با ضخامت ۲/۴۹ میلی‌متر تعیین شد [۱۰]. در پژوهشی به بررسی استفاده از خشک‌کن رفراکتانس ویندو بر روی پوره سیب زمینی به دست آمده از دو گونه سیب زمینی و اثرهای شرایط فرایند بر سرعت خشک کردن پرداخته اند. خشک کردن با در نظر گرفتن دمای آب (۷۰-۹۰ درجه سلسیوس) و زمان خشک کردن (۱۵-۶۰ دقیقه) به عنوان متغیرهای مستقل، و برخی از ویژگی‌ها، به عنوان متغیرهای وابسته بهینه شد. نتایج نشان داد که شرایط بهینه خشک کردن زمان خشک کردن برای یک گونه سیب زمینی ۲۰/۵ دقیقه و

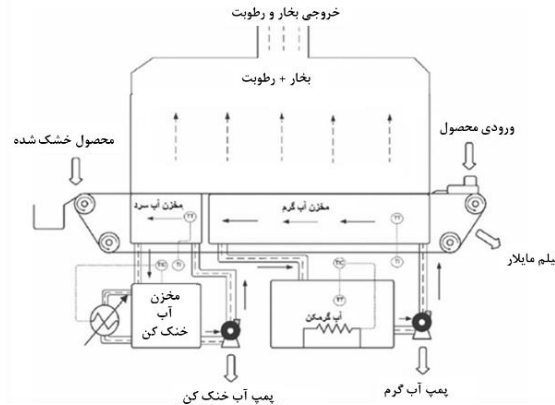
<sup>1</sup> Refractance Window (RW)

برای گونه‌ی دیگر ۱۲/۱ دقیقه و دمای آب ۹۴ درجه سلسیوس بود [۱۱]. مدل سازی ریاضی ابزار مفید قدرتمندی برای شبیه سازی و پی بردن به کارایی فرایند خشک کردن است. با این روش می توان گستره و سببی از شرایط خشک کردن را در مقیاس آزمایشگاهی شبیه سازی کرده و به نتایج قابل قبولی رسید که در عمل مستلزم صرف هزینه، انرژی و زمان خیلی زیاد است. هم چنین با این روش می توان نتیجه هرگونه تغییر در فرایند خشک کردن برای محصول را بدون انجام آزمایش عملی پیش بینی کرد [۱۲]. محقق، یک مدل ریاضی دو بعدی برای انتقال حرارت و جرم به صورت هم زمان در طول خشک کردن فرکتنس ویندو برای شیر و ماست بدون چربی اجرا کرد و دریافت مدل های ریاضی امکان مطالعه فرآیندهای مختلف در صنعت را فراهم می کند و مشکلاتی مانند مصرف بیش از حد انرژی و فرسودگی تجهیزات را به حداقل می رساند. هم چنین نتایج نشان داد خشک کن فرکتنس ویندو نسبت به سایر روش های خشک کردن، زمان خشک کردن کوتاه تر و انرژی مصرفی کمتری دارد [۱۳]. در تحقیق، یک مدل با بررسی انتقال حرارت بین فیلم مایلار و پورهی کدوتنبل در خشک کن فرکتنس ویندو شبیه سازی شد. در این تحقیق، دو لایه ی فیلم مایلار و محصول به صورت دو بعدی در نرم افزار کامسول طراحی شد و برای تعیین شرایط مرزی دمای فیلم مایلار و دمای آب گرم به صورت برابر فرض شد. شبیه سازی در سه دمای ۵۵، ۷۵ و ۹۵ درجه سلسیوس انجام شد. مطابق نتایج مدت زمان خشک شدن پورهی کدوتنبل در فیلم مایلار با دمای ۵۵، ۷۵ و ۹۵ درجه سلسیوس به ترتیب ۵۰۰، ۳۰۰ و ۱۵۰ ثانیه بود [۱۴]. به طور کلی، تحقیقات کمی در حوزه مدل سازی خشک کن فرکتنس ویندو انجام شده است. در این مطالعه با روش المان محدود و با استفاده از نرم افزار کامسول مولتی فیزیکس نسخه ۵/۶، انتقال هم زمان جرم و حرارت در پورهی موز با لحاظ کردن تغییرات خواص ترموفیزیکی محصول، به صورت سه بعدی شبیه سازی شد. این شبیه سازی جهت پیش بینی زمان خشک شدن و تعیین توزیع رطوبت و دما درون محصول انجام شد. در نهایت، جهت اعتبارسنجی، نتایج مدل با نتایج حاصل از آزمایشات تجربی در نمونه های مشابه مقایسه شد.

## مواد و روش ها

### اجزا خشک کن:

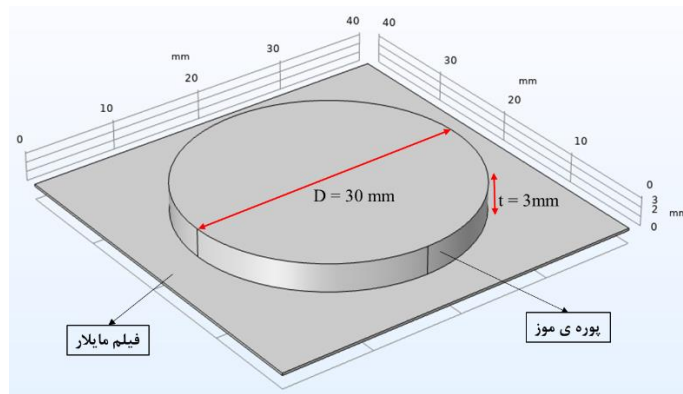
به طور کلی خشک کن فرکتنس ویندو از یک حمام حرارتی تشکیل می شود که با آب پر می شود. در این خشک کن سطح آب با ورق پلاستیکی شفاف مادون قرمز (فیلم مایلار<sup>۲</sup>) با ضخامت ۰/۲۵ میلی متر پوشیده شده است. محصول روی سطح بالایی مایلار پخش می شود [۱۵]. در این خشک کن فیلم مایلار سبب می شود تا انتقال حرارت به روش تشعشع به داخل آب بازتاب شود وقتی محصول دارای رطوبت روی فیلم مایلار قرار می گیرد. رطوبت موجود در محصول جاذب مادون قرمز است و مثل یک پنجره است که از طریق آن انتقال حرارت تشعشعی صورت می گیرد و گرما مستقیماً به مولکول های آب در محصول منتقل می شود، همان طوری که محصول رطوبت خود را از دست می دهد، پنجره ی خشک شدن بسته می شود و انرژی تشعشعی به سمت منبع آب گرم برگشت پیدا می کند و مجدد به آب بازتاب می شود [۱۶]. در پایان فرآیند خشک کردن، محصول خشک شده روی یک مخزن آب خنک حرکت می کند و محصول خنک می شوند تا از چسبندگی محصول به فیلم مایلار جلوگیری شود [۱۷]. در شکل ۱ شماتیک خشک کن فرکتنس ویندو نشان داده شده است.



شکل (۱) شماتیک خشک کن رفرکتانس ویندو [۱۱]

#### مدل هندسی:

در این مطالعه، دمای آب گرم ۷۰، ۸۰ و ۹۰ درجه سلسیوس در نظر گرفته شده است، که حرارت از سطح پایین محصول وارد شده و موجب کاهش رطوبت محصول و خشک شدن آن شده است. به منظور شبیه سازی از نرم افزار کامسول مولتی فیزیکس نسخه ۵/۶ استفاده شد. جهت شبیه سازی انتقال حرارت و جرم طی خشک کردن رفرکتانس ویندو، یک مکعب مستطیل با ضخامت ۰/۲۵ میلی متر در ابعاد ۴۰ × ۴۰ میلی متر مربع به عنوان فیلم مایلار و استوانه ای در سطح بالایی آن، با قطر ۳۰ میلی متر و ضخامت ۳ میلی متر به عنوان نمونه پوره ی موز در فضای هندسی نرم افزار کامسول ترسیم شد، که در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل (۲) مدل هندسی سه بعدی فیلم مایلار و موز

#### خواص ترموفیزیکی:

جهت شبیه سازی فرایندهای انتقال جرم و حرارت طی خشک کردن رفرکتانس ویندو، اندازه گیری خصوصیات ترموفیزیکی فیلم مایلار و موز امری ضروری است. خصوصیات ترموفیزیکی لازم در این مطالعه، شامل ظرفیت گرمایی ویژه، چگالی و هدایت حرارتی است. خصوصیات ترموفیزیکی فیلم مایلار در این مطالعه، مطابق جدول ۱ است [۱۸]. و خصوصیات ترموفیزیکی موز با استفاده از روابط بر اساس خواص ترکیب محصول (شامل: آب، کربوهیدرات، فیبر، چربی، پروتئین و خاکستر) به صورت تجربی به عنوان تابعی از دما به دست آمده که مطابق جدول ۲ است [۱۹].

جدول (۱) خصوصیات ترموفیزیکی فیلم مایلار [۱۸]

واحد	مقدار	پارامتر
کیلوگرم بر متر مکعب	۱۴۳۰	چگالی فیلم مایلار
ژول بر کیلوگرم کلوین	۱۶۰۰	ظرفیت گرمایی ویژه فیلم مایلار
وات بر متر کلوین	۰/۱۹	ضریب هدایت حرارتی فیلم مایلار

جدول (۲) خصوصیات ترموفیزیکی موز [۱۹]

مقدار (واحد)	روابط	پارامتر
۱۰۷۰-۱۵۱۰ کیلوگرم بر متر مکعب	$\rho = \frac{1}{\sum_j \frac{X_j^m}{(a_1 + a_2 T + a_3 T^2)_j}}$ $a_1, a_2, a_3$ : Constants of $j$ th component $X_j^m$ : Mass fraction of $j$ th component	چگالی
۱۷۰۰-۳۵۰۰ ژول بر کیلوگرم کلوین	$C_p = \sum_j (b_1 + b_2 T + b_3 T^2)_j \times X_j^m$ $b_1, b_2, b_3$ : Constants of $j$ th component $X_j^m$ : Mass fraction of $j$ th component	ظرفیت گرمایی ویژه
۰/۲۸-۰/۵۱ وات بر متر کلوین	$k = \frac{1}{2} \left( \sum_j k_j \times X_j^v + \frac{1}{\sum_j \frac{X_j^v}{K_j}} \right) K_j = (c_1 + c_2 T + c_3 T^2)_j X_j^v$ $c_1, c_2, c_3$ : Constants of $j$ th component $X_j^v$ : Volume fraction of $j$ th component	ضریب هدایت حرارتی

j= آب، کربوهیدرات، فیبر، چربی، پروتئین و خاکستر

### شرایط مرزی انتقال جرم و حرارت

هنگامی که محصولات غذایی در خشک‌کن رفرکتانس ویندو و روی فیلم مایلار قرار می‌گیرند به علت گرمایی که از طریق آب داغ (با دمای ۷۰، ۸۰ و ۹۰ درجه سلسیوس) به فیلم مایلار و سپس به سطح پایین محصول وارد می‌شود، مکانیسم‌های انتقال مختلفی، شامل انتقال حرارت رسانش و تشعشع و انتقال جرم رسانش و نفوذ رخ می‌دهد. مدل سازی فرایند انتقال جرم و حرارت طی خشک کردن نمونه‌های موز با استفاده از معادلات حاکم بر این پدیده (قانون نفوذ فیک و قانون فوریه) ارائه می‌شود. شرایط مرزی انتقال جرم و حرارت توسط فیزیک‌های مختلف در این نرم‌افزار برای فیلم مایلار و نمونه‌ی موز تعریف شد. انتقال جرم نفوذ که در نمونه‌های موز رخ می‌دهد، به این منظور از معادله فیک برای بررسی انتقال جرم در پوره‌ی موز استفاده شد و طبق رابطه‌ی ۱ تعریف می‌شود [۲۰]:

$$J = -D_{eff} \nabla C \quad (1)$$

که در رابطه‌ی (۱)،  $\nabla C$  گرادیان غلظت رطوبت محصول (مول بر مترمکعب)،  $D_{eff}$  ضریب موثر نفوذ رطوبت (مترمربع بر ثانیه)،  $J$  شار جرمی (مول بر متر مربع ثانیه) هستند. مقدار ضریب موثر نفوذ رطوبت معمولاً با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی و از رابطه‌ی ۲ محاسبه می‌شود [۲۱]:

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \exp \left[ \frac{-\pi^2 D_{eff} t}{D^2} \right] \quad (2)$$



که در رابطه‌ی (۲)،  $MR$ : نسبت رطوبت،  $D_{eff}$ : ضریب موثر نفوذ رطوبت (مترمربع بر ثانیه)،  $t$ : زمان (ثانیه) و  $D$ : ضخامت محصول (متر) است.

معادله کلی انتقال جرم در نرم‌افزار کامسول را می‌توان مطابق رابطه‌ی ۳ تعریف کرد [۲۰]:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \nabla \cdot J + h_m \cdot \nabla C = R \quad (3)$$

$$h_m = 5 \times 10^{-7} \text{ m/s}$$

که در رابطه‌ی (۳)،  $\partial C$ : تغییرات غلظت محصول (مول بر مترمکعب)،  $\partial t$ : تغییرات زمان (ثانیه)،  $R$ : صرف یا تولید رطوبت و  $h_m$ : ضریب انتقال جرم هم‌رفتی (متر بر ثانیه) هستند.

تبادل حرارت به روش رسانش بین فیلم مایلا و موز توسط قانون فوریه و مطابق رابطه‌ی ۴ محاسبه می‌شود [۲۰]:

$$q = -K \nabla T = K \left( \frac{\partial T}{\partial x} i + \frac{\partial T}{\partial y} j + \frac{\partial T}{\partial z} k \right) \quad (4)$$

که در رابطه (۴)،  $\nabla T$ : گرادیان دما (کلوین)،  $q$ : شار حرارتی (وات بر مترمربع) و  $K$ : ضریب هدایت حرارتی (وات متر بر کلوین) هستند.

قانون کلی برای فرایند انتقال حرارت بر اساس قانون اول ترمودینامیک ارائه می‌شود، که معادله‌ی آن در نرم‌افزار کامسول به صورت رابطه‌ی ۵ تعریف می‌شود [۲۰]:

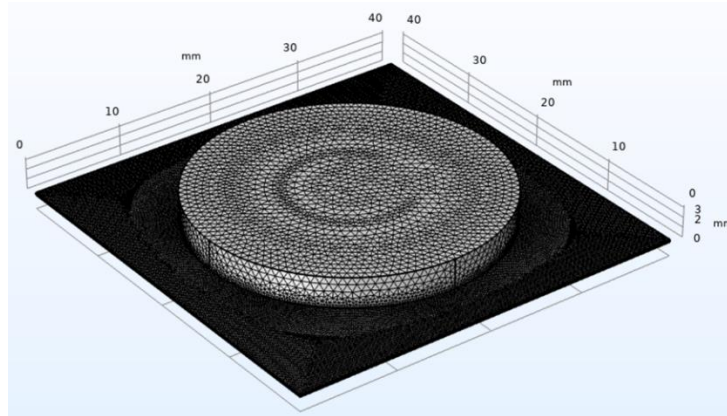
$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p u \cdot \nabla T + \nabla \cdot q = Q \quad (5)$$

$$u = 1 \times 10^{-9} \text{ m/s}$$

که در رابطه‌ی (۵)،  $\partial T$ : تغییرات دما (کلوین)،  $\partial t$ : تغییرات زمان (ثانیه)،  $C_p$ : ظرفیت گرمایی ویژه (ژول بر کیلوگرم کلوین)،  $\rho$ : چگالی (کیلوگرم بر مترمکعب)،  $Q$ : منبع حرارتی داخلی (وات بر متر)،  $q$ : شار حرارتی (وات بر مترمربع) و  $u$ : سرعت جریان (متر بر ثانیه) هستند.

#### مش بندی (شبکه بندی)

در این مرحله مدل هندسی ایجاد شده به قسمت یا المان‌های کوچک‌تر تقسیم‌بندی می‌شود. بدین منظور از المان‌های مثلثی شکل با اندازه عنصر "Extremely fine" استفاده شد، برای اطمینان از درستی مش ایجاد شده، کیفیت المان‌های مش از قسمت "Adaptive Mesh Refinement" ارزیابی شده است. مش بندی نمونه مدل سازی شده در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳) مش‌بندی نمونه مدل‌سازی

بعد از مرحله‌ی مش‌بندی، با توجه به شرایط مرزی تعیین شده که پیش‌تر بیان شد، معادلات برای یک گام زمانی حل می‌شوند. در این مطالعه، شبیه‌سازی انتقال حرارت و انتقال جرم خشک‌کن رفراکتنس ویندو یک مسئله‌ی وابسته به زمان است. به این ترتیب، دما و محتوی رطوبت آن در یک بازه زمانی ۱۰۰ دقیقه در هر ۱۰ دقیقه توسط نرم‌افزار کامسول اندازه‌گیری و ثبت شد.

### نتایج و بحث

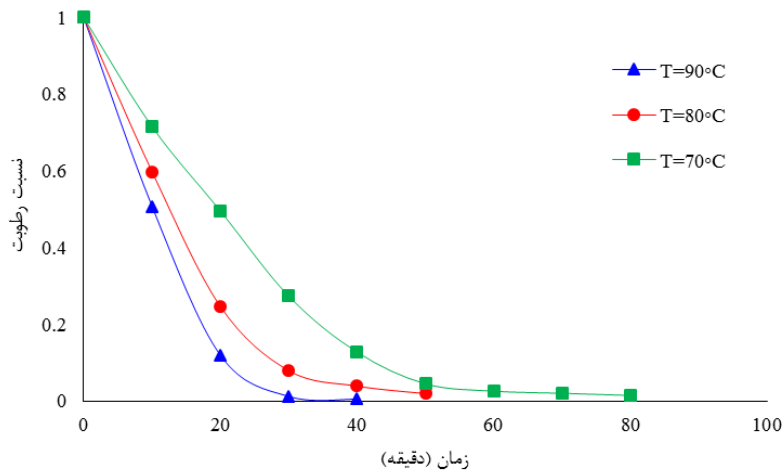
در این بخش نتایج مربوط به سینتیک خشک شدن، شبیه‌سازی المان محدود خشک شدن پوره‌ی موز و ارزیابی مدل از طریق مقایسه با نتایج مقالات دیگر ارائه شد. همان‌طور که در ابتدا بیان شد آزمایش‌های خشک‌شدن در دمای آب گرم ۷۰، ۸۰ و ۹۰ درجه سلسیوس بررسی شده است.

### محتوای رطوبت

در پژوهشی کستلندی و همکاران [۲۲]، از خشک‌کن رفراکتنس ویندو برای خشک کردن پوره‌ی گوجه‌فرنگی با رطوبت اولیه ۲۰ گرم آب بر گرم ماده خشک با ضخامت دو و سه میلی‌متر در دمای آب ۶۵، ۷۵، ۸۵ و ۹۵ درجه سلسیوس استفاده کردند. آن‌ها دریافتند برای رسیدن به رطوبت نهایی ۰/۰۹ گرم آب بر گرم ماده خشک، برای خشک کردن پوره‌ی گوجه‌فرنگی با ضخامت ۲ میلی‌متر به ترتیب ۵۰، ۴۰، ۲۵ و ۲۰ دقیقه و برای ضخامت ۳ میلی‌متر به ترتیب ۷۰، ۵۵، ۴۰ و ۳۰ دقیقه نیاز است. در پژوهشی دیگر، به بررسی اثر دما بر مدت زمان خشک شدن در خشک‌کن رفراکتنس ویندو پرداختند، مدت زمان خشک شدن پوره‌ی گوجه‌فرنگی با ضخامت ۱ تا ۱/۵ میلی‌متر در دمای آب گرم ۶۰، ۷۵ و ۹۰ درجه سلسیوس به ترتیب ۷۵، ۶۰ و ۴۰ دقیقه بود [۲۳]. هم‌چنین، راجوریا و همکاران [۲۴] دریافتند برای خشک کردن برش‌های سیب با ضخامت ۲ میلی‌متر در خشک‌کن رفراکتنس ویندو با دمای آب گرم ۶۰، ۷۰، ۸۰ و ۹۰ درجه سلسیوس زمان لام برای خشک شدن به ترتیب ۱۲۰، ۹۰، ۷۰ و ۵۰ دقیقه بود.

همان‌طور که مطالعات مشابه نشان می‌دهد هرچه آب گرم دمای بیش‌تری داشته‌باشد، محصول سریع‌تر خشک می‌شود. نتایج حاصل از شبیه‌سازی فرایند خشک‌شدن نشان داد که، زمان لازم برای کاهش ۷۰ درصدی رطوبت در پوره‌ی موز در دمای آب گرم ۷۰، ۸۰ و ۹۰ درجه سلسیوس ۴۰، ۵۷ و ۸۲ دقیقه بود. سرعت خشک‌شدن محصول هنگام شروع فرایند، بیش‌تر است. از سوی دیگر، دمای آب گرم بر سرعت خشک شدن نیز اثر می‌گذارد. هر چه دمای آب گرم بیش‌تر شده، سرعت خشک شدن نیز بیش‌تر است. زالپوری و همکاران [۲۵] اشاره کرده‌اند که سرعت شروع فرایند خشک‌شدن زیاد است. با ادامه روند خشک‌شدن، یک لایه مقاوم روی سطح محصول تشکیل می‌شود که منجر به کم شدن سرعت خشک‌شدن می‌شود. با توجه به آثار کور و همکاران [۲۶] و بیگی [۲۷]، افزایش دما باعث افزایش انتقال حرارت، سرعت تبخیر و انتقال آب از داخل محصول به سطح آن شده و در نهایت محصول سریع‌تر خشک می‌شود. این کاهش در

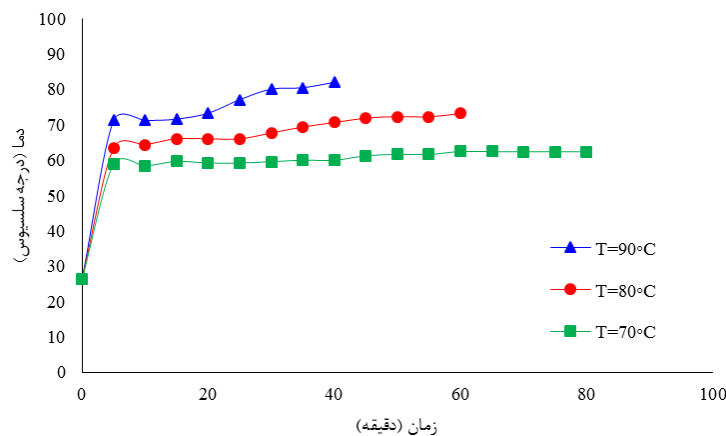
زمان خشک شدن با افزایش دمای آب را می‌توان به افزایش انرژی عرضه شده، تسهیل انتشار و حذف رطوبت از مواد با سرعت بیشتری نسبت داد. شکل ۴ نمودار سنتتیک خشک کردن پوره‌ی موز را نشان می‌دهد.



شکل ۴) نمودار سنتتیک خشک کردن پوره‌ی موز

#### دما خشک شدن

در پژوهشی با شروع فرایند خشک شدن دمای محصول افزایش زیادی داشت. دمای محصول در آب گرم با دماهای ۷۵، ۸۰، ۸۵ و ۹۰ درجه سلسیوس به ترتیب ۵۸، ۶۸، ۷۵ و ۸۳ درجه سلسیوس بود و سپس در طول فرایند خشک شدن ثابت بود [۲۰]. در پژوهشی دیگر راجوریا و همکاران [۲۴] در خشک کن رفراکتنس ویندو با دمای آب گرم ۶۰، ۷۰، ۸۰ و ۹۰ درجه سلسیوس برش‌های سیب با ضخامت دو میلی‌متر را خشک کردند و دمای محصول بعد از خشک شدن به ترتیب ۵۴، ۶۱، ۶۸ و ۷۶ درجه سلسیوس بود. در این مطالعه، دمای اولیه‌ی پوره‌ی موز ۲۵ درجه سلسیوس بود و با شروع فرایند خشک شدن دمای محصول افزایش یافت. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که، دمای محصول در آب گرم با دمای ۷۰، ۸۰ و ۹۰ درجه سلسیوس به ترتیب به ۶۲، ۷۳ و ۸۲ درجه سلسیوس افزایش می‌یابد. شکل ۵ نمودار دمای پوره‌ی موز در طی خشک کردن را نشان می‌دهد. در خشک کن رفراکتنس ویندو، هرچه دمای آب گرم بیشتر باشد، دمای محصول در طول خشک شدن نیز بیشتر خواهد شد.

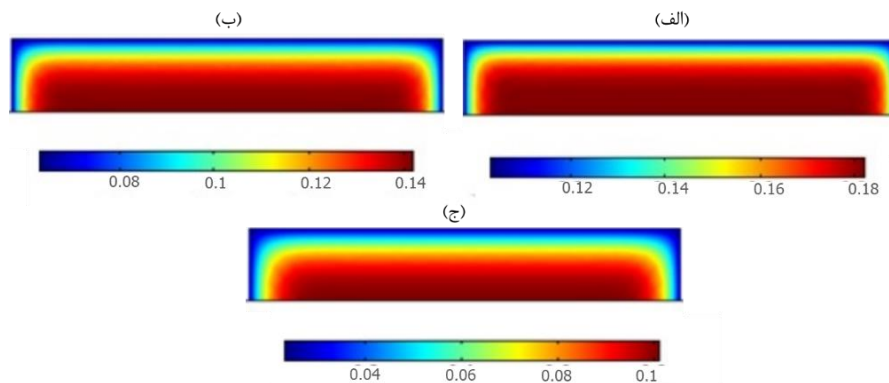


شکل ۵) نمودار دمای پوره‌ی موز در طی خشک شدن



### توزیع رطوبت

حل معادلات انتقال جرم و حرارت در مدل المان محدود منجر به تعیین توزیع رطوبت درون محصول در طول زمان خشک شدن شد. همچنین، دستیابی به این اطلاعات با روش‌های آزمایشگاهی به آسانی مقدور نیست و مستلزم استفاده از فناوری‌های پیچیده‌ای مثل تصویربرداری است. در نتیجه استفاده از نرم‌افزار شبیه‌سازی همانند کامسول نسبت به روش آزمایشگاهی توجیه اقتصادی و زمانی دارد. همان‌طور که بیان شد، نرم‌افزار کامسول می‌تواند رطوبت را در کل محصول در هر مرحله زمانی محاسبه کند. در شروع خشک کردن، میزان رطوبت در پوره‌ی موز یکنواخت بود. در شکل ۶ توزیع رطوبت سه‌بعدی پوره‌ی موز بعد از گذشت ۴۰ دقیقه نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌کنید در هر سه دمای آب گرم در حین خشک کردن پوره‌ی موز، میزان رطوبت به سمت سطح آن کاهش یافته‌است. تفاوت در میزان رطوبت در مکان‌های مختلف محصول در یک زمان مشخص به دلیل نرخ تبخیر بالاتر در سطح محصول است. در قسمت (الف) آب گرم با دمای ۷۰ درجه سلسیوس است و میزان رطوبت در سطح آن به ۰/۱۲ گرم بر مترمکعب رسید، در قسمت (ب) آب گرم با دمای ۸۰ درجه سلسیوس است و میزان رطوبت در سطح آن به ۰/۰۸ گرم بر مترمکعب رسید و در قسمت (ج) آب گرم با دمای ۹۰ درجه سلسیوس است و میزان رطوبت در سطح آن به ۰/۰۴ گرم بر مترمکعب رسید و محصول خشک شده است. به‌طور کلی، هر چه دمای آب گرم بیشتر باشد میزان رطوبت سریع‌تر کاهش می‌یابد. اختلاف رطوبت سطح پوره‌ی موز و کف آن به دلیل افزایش در انتشار رطوبت به سطح محصول و افزایش دمای سطح محصول است که باعث کاهش حجم سطح خارجی محصول می‌شود.



شکل ۶) توزیع رطوبت در پوره‌ی موز طی خشک شدن در آب گرم با دمای (الف) ۷۰، (ب) ۸۰ و (ج) ۹۰ درجه سلسیوس

با توجه به بررسی توزیع رطوبت در نرم‌افزار کامسول سرعت خشک شدن برای پوره‌ی موز با ضخامت سه میلی‌متر در آب گرم با دمای ۷۰، ۸۰ و ۹۰ درجه سلسیوس به ترتیب ۰/۰۴۶، ۰/۰۶۶ و ۰/۰۹۳ گرم آب بر دقیقه می‌باشد. از نتایج حاصل می‌توان نتیجه گرفت هرچه دمای آب گرم بالاتر باشد محصول سریع‌تر خشک می‌شود.

### نتیجه‌گیری کلی

- در این مطالعه، با استفاده از نرم‌افزار کامسول یک مدل سه بعدی برای درک اثر تغییر دمای آب گرم بر روی توزیع رطوبت در کل محصول شبیه‌سازی شد. مهم‌ترین نتایج حاصل از این مطالعه به شرح زیر است:
- هر چه دمای آب گرم در طول خشک شدن بیشتر باشد، سرعت خشک شدن افزایش یافته و در نهایت میزان رطوبت محصول سریع‌تر کاهش می‌یابد.
- در طول خشک کردن به روش رفرکنس ویندو، دما محصول در ابتدا افزایش سریعی دارد و پس از آن در طول فرآیند خشک کردن همان دما تقریباً ثابت می‌ماند و به دمای آب گرم نمی‌رسد.

#### منابع

1. Ganesapillai, M., Regupathi, I. and Murugesan, T., 2011. Modeling of thin layer drying of banana (Nendran Spp) under microwave, convective and combined microwave-convective processes. *Chemical Product and Process Modeling*, 6(1).
2. Fernandes, F.A. and Rodrigues, S., 2007. Ultrasound as pre-treatment for drying of fruits: Dehydration of banana. *Journal of Food Engineering*, 82(2), pp.261-267.
3. Rostami, H., Dehnad, D., Jafari, S.M. and Tavakoli, H.R., 2018. Evaluation of physical, rheological, microbial, and organoleptic properties of meat powder produced by Refractance Window drying. *Drying Technology*, 36(9), pp.1076-1085.
4. Sidhu, G.K., Singh, M. and Kaur, P., 2019. Effect of operational parameters on physicochemical quality and recovery of spray-dried tomato powder. *Journal of Food Processing and Preservation*, 43(10), p.e14120.
5. Franco, S., Jaques, A., Pinto, M., Fardella, M., Valencia, P., Núñez, H., Ramírez, C. and Simpson, R., 2019. Dehydration of salmon (Atlantic salmon), beef, and apple (Granny Smith) using Refractance window™: Effect on diffusion behavior, texture, and color changes. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 52, pp.8-16.
6. Vega-Mercado, H., Góngora-Nieto, M.M. and Barbosa-Cánovas, G.V., 2001. Advances in dehydration of foods. *Journal of food engineering*, 49(4), pp.271-289.
7. Chou, S.K. and Chua, K.J., 2001. New hybrid drying technologies for heat sensitive foodstuffs. *Trends in Food Science & Technology*, 12(10), pp.359-369.
8. Nindo, C.I. and Tang, J., 2007. Refractance window dehydration technology: a novel contact drying method. *Drying technology*, 25(1), pp.37-48.
9. Nindo, C.I., Feng, H., Shen, G.Q., Tang, J. and Kang, D.H., 2003. Energy utilization and microbial reduction in a new film drying system. *Journal of Food Processing and Preservation*, 27(2), pp.117-136.
10. Shende, D. and Datta, A.K., 2020. Optimization study for refractance window drying process of Langra variety mango. *Journal of food science and technology*, 57(2), pp.683-692.
11. Duarte-Correa, Y., Vargas-Carmona, M.I., Vásquez-Restrepo, A., Ruiz Rosas, I.D. and Perez Martinez, N., 2021. Native potato (Solanum phureja) powder by Refractance Window Drying: A promising way for potato processing. *Journal of Food Process Engineering*, 44(10), p.e13819.
12. Kostoglou, M., Chrysafis, N. and Andritsos, N., 2013. Modelling tomato dehydration in a tunnel dryer using geothermal energy. *Drying Technology*, 31(1), pp.5-16.
13. Herrera Ardila, P.A., *Mathematical modeling and simulation of refractance window drying of whole milk and yoghurt* (Master's thesis, Universidad de La Sabana).
14. Ortiz-Jerez, M.J., Gulati, T., Datta, A.K. and Ochoa-Martínez, C.I., 2015. Quantitative understanding of Refractance Window™ drying. *Food and Bioproducts Processing*, 95, pp.237-253.
15. Kudra, T. and Mujumdar, A.S., 2009. *Advanced drying technologies*. CRC press.
16. Shende, D., Shrivastav, A. and Datta, A.K., 2019. Effect of mango puree thickness on refractance window drying for making mango leather. *IMPACT: International Journal of Research in Engineering & Technology*, 7, pp.41-54.
17. Shende, D. and Datta, A.K., 2019. Refractance window drying of fruits and vegetables: A review. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 99(4), pp.1449-1456.



18. Ayala-Aponte, A.A., Cárdenas-Nieto, J.D. and Tirado, D.F., 2021. Aloe vera gel drying by Refractance Window®: Drying kinetics and high-quality retention. *Foods*, 10(7), p.1445.
19. Seyedabadi, E., Khojastehpour, M. and Abbaspour-Fard, M.H., 2017. Convective drying simulation of banana slabs considering non-isotropic shrinkage using FEM with the Arbitrary Lagrangian–Eulerian method. *International journal of food properties*, 20(sup1), pp.S36-S49.
20. Kumar, M., Madhumita, M., Srivastava, B. and Prabhakar, P.K., 2022. Mathematical modeling and simulation of refractance window drying of mango pulp for moisture, temperature, and heat flux distribution. *Journal of Food Process Engineering*, 45(9), p.e14090.
21. Rasouli, M., Ghasemzadeh, H.R. and Nalbandi, H., 2011. Convective drying of garlic ('Allium sativum' L.): Part I: Drying kinetics, mathematical modeling and change in color. *Australian Journal of Crop Science*, 5(13), pp.1707-1714.
22. Castoldi, M., Zotarelli, M.F., Durigon, A., Carciofi, B.A.M. and Laurindo, J.B., 2015. Production of tomato powder by refractance window drying. *Drying Technology*, 33(12), pp.1463-1473.
23. Abul-Fadl, M.M. and Ghanem, T.H., 2011. Effect of refractance-window (RW) drying method on quality criteria of produced tomato powder as compared to the convection drying method. *World Applied Sciences Journal*, 15(7), pp.953-965.
24. Rajoriya, D., Shewale, S.R., Bhavya, M.L. and Hebbar, H.U., 2020. Far infrared assisted refractance window drying of apple slices: Comparative study on flavour, nutrient retention and drying characteristics. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 66, p.102530.
25. Zalpouri, R.U.C.H.I.K.A., Kaur, P.R.E.E.T.I.N.D.E.R. and Sain, M.U.K.U.L., 2020. Refractive window drying-A better approach to preserve the visual appearance of dried products. *Pantnagar Journal of Research*, 18(1), pp.90-94.
26. Kaur, G., Saha, S., Kumari, K. and Datta, A.K., 2017. Mango pulp drying by refractance window method. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, 19(4).
27. Beigi, M., 2019. Drying of mint leaves: Influence of the process temperature on dehydration parameters, quality attributes, and energy consumption. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 21(1), pp.77-88.



15<sup>th</sup> National & 1<sup>st</sup> International Congress on  
Mechanics of Biosystems Engineering &  
Agricultural Mechanization

20-22 Sep. 2023



پانزدهمین کنگره ملی و اولین کنگره بین‌المللی  
مهندسی مکانیک بیوسیستم و مکانیزاسیون کشاورزی

۲۹ الی ۳۱ شهریور ۱۴۰۲



## 3D simulation of mass and heat transfer process during Refractance Window drying (case study: banana puree)

Atena Shahraki<sup>1\*</sup>, Mehdi Khojastehpour<sup>2</sup>

1. MSc. in Biosystems Mechanical engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran
2. Department of Biosystems Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

### Abstract

The drying process is one of the most common methods of food preservation. To investigate the drying process of food products scientifically and accurately, you can use available analytical software. Modeling mass and heat transfer in different drying conditions is one of the low-cost methods to optimize dryers. In this study, the mass and heat transfer process during refractance window drying was simulated for banana puree. To simulate this process, mass and heat transfer equations were solved simultaneously and interdependently in three-dimensional mode with the help of COMSOL Multiphysics version 5.6 software. The model was considered with initial conditions, the water temperature of 70, 80, and 90 degrees Celsius and banana puree thickness of 3 mm. The initial humidity and temperature of a single banana and the initial temperature and porosity of fresh banana samples are 25°C and 77%, respectively. The heat was provided only by hot water from the bottom surface of the product. The results showed that moisture reduction for banana puree during drying in water temperatures of 70, 80, and 90 °C took 40, 57, and 82 minutes, respectively. Also, the temperature of the product after drying in water temperatures of 70, 80, and 90 °C was 62, 73, and 81 °C respectively.

**Keywords:** Drying dynamics, Heat transfer, Mass transfer, Simulation, Moisture distribution, Temperature distribution.

\*Corresponding author: Atena Shahraki  
E-mail: shahrakiatena@gmail.com