

اثر تغییر دمای خشک‌کردن همرفتی بر کاهش مصرف انرژی و حفظ کیفیت ورقه‌های سیر

حبیبه نعلبندی*^۱ و سید صادق سیدلو^۱

تاریخ دریافت: ۹۸/۲/۲۳ تاریخ پذیرش: ۹۸/۷/۳

^۱ به ترتیب استادیار و دانشیار گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

مسئول مکاتبه: Email: habibehnalbandi@yahoo.com, h.nalbandi@tabrizu.ac.ir

چکیده

زمینه مطالعاتی: اخیراً مصرف سیر خشک به صورت ورقه‌های خشک‌شده یا پودر افزایش پیدا کرده است. هدف: در این تحقیق شرایط مختلف خشک‌شدن ورقه‌های سیر و رسیدن به کیفیت مطلوب از طریق شبیه‌سازی فرآیند خشک‌شدن بررسی شد. روش کار: ابتدا معادلات انتقال جرم و گرما در طول خشک‌شدن همرفتی سیر روی هندسه سه بعدی ورقه‌های سیر به روش اجزاء محدود به صورت هم‌زمان حل شدند. سپس شبیه‌سازی توسعه‌یافته به صورت تجربی در شرایط مختلف اعتبارسنجی شد. هم‌زمان خواص مهندسی و کیفی ورقه‌های سیر مانند ضریب نفوذ موثر رطوبت، دانسیته ظاهری و تغییرات رنگ نمونه‌ها مطالعه شد. در نهایت با استفاده از شبیه‌سازی، موضوع کاهش انرژی مصرفی از طریق کاهش زمان کل فرآیند به همراه حفظ کیفیت ظاهری محصول، بر پایه اطلاعات خروجی از شبیه‌سازی از طریق به کارگیری دمای متغیر هوای گرم در طی فرآیند و در ضخامت‌های مختلف بررسی شد. نتایج: شبیه‌سازی توسعه‌یافته با دقت بالایی توانست تغییرات نسبت رطوبت را در دماهای مختلف هوای گرم و ضخامت‌های متفاوت سیر پیش‌بینی کند. تغییر دمای هوای گرم و ضخامت نمونه‌ها تغییرات رنگ نهایی ورقه‌های سیر را تحت تاثیر قرار دادند؛ بطوری‌که کمترین تغییر رنگ کلی نمونه‌ها در دمای ۵۰ درجه سلسیوس و در ضخامت ۲ میلی‌متری ورقه‌های سیر حاصل شد. با استفاده از نرم‌افزار توسعه‌داده شده، اعمال شرایط متغیر در دمای هوای گرم مورد استفاده با حفظ خواص رنگی محصول، توانست مدت زمان انجام فرآیند را کاهش و به تبع آن راندمان عملیات خشک‌کنی را افزایش دهد. نتیجه‌گیری نهایی: برای دستیابی به محصول خشک با کیفیت بالا و رنگ شفاف‌تر و نیز کاهش انرژی مصرفی از طریق کاهش زمان خشک‌شدن، باید از ورقه‌هایی با ضخامت کمتر و هوای گرمی با دمای متغیر در طول فرآیند بر اساس الگوی خروجی مدل توسعه‌یافته استفاده شود. شبیه‌سازی توسعه‌داده شده می‌تواند با دقت بالایی موارد مذکور را پیش‌بینی نماید.

واژگان کلیدی: خشک‌کردن، رنگ، سیر، شبیه‌سازی، کاربرد دمای متغیر، کیفیت

مقدمه

و دارویی زیادی بوده و به‌طور گسترده در سراسر دنیا و از جمله ایران کشت می‌شود. قسمت اعظم سیر از آب تشکیل شده است (۶۰٪). گیاه سیر حاوی سطوح بالای

سیر با نام علمی "*Allium Sativum L.*" گیاهی است علفی تک لپه از خانواده لیلیاسه که دارای خاصیت غذایی

خشک‌کردن می‌تواند کلیدی برای انجام موفقیت‌آمیز عملیات خشک‌کردن باشد (چیو و همکاران ۲۰۰۳).

یکی از روش‌های متداول برای خشک‌کردن محصولات کشاورزی، استفاده از هوای گرم می‌باشد که در طول این فرآیند، انتقال هم‌زمان گرما و رطوبت موجب افزایش دمای محصول و کاهش محتوی رطوبت آن می‌شود. آهنگ انتقال رطوبت، به محتوی رطوبت اولیه ماده و گرادیان دمایی آن با هوای گرم بستگی دارد. این ارتباط موجب پیچیدگی پدیده‌های انتقال و رطوبت در ماده شده و آنها را به یکدیگر مرتبط می‌سازد و در نهایت کیفیت نهایی ماده خشک‌شده و نیز راندمان فرآیند خشک‌کردن را تحت تاثیر قرار می‌دهد. بنابراین برای تولید یک محصول خشک با کیفیت قابل قبول، درک صحیحی از مکانیسم‌های انتقال رطوبت و جرم در طول فرآیند خشک‌کردن ضروری است. در این میان تحلیل ریاضی یک فرآیند و مدل‌سازی آن، روشی کم هزینه برای اهداف بهینه‌سازی فرآیند خواهد بود.

مطالعات زیادی برای شبیه‌سازی و تحلیل فرآیند انتقال جرم و گرما در مواد غذایی انجام شده است (چیا و همکاران ۲۰۰۲؛ حسین و دینسر ۲۰۰۳؛ کریم و هاوولاد ۲۰۰۵؛ هاردریچ و همکاران ۲۰۰۸؛ میهوبی و بلاجی ۲۰۰۸؛ دلوی و همدی ۱۳۸۹). با این وجود اطلاعات کمی در مورد شبیه‌سازی سه بعدی انتقال ناپایای گرما و رطوبت در طول فرآیند خشک‌شدن سیر با دیدگاه حفظ کیفیت، انتخاب مشخصات ورقه‌های سیر و نیز کاهش زمان کل فرآیند در منابع علمی وجود دارد. به دلیل شکل نامنظم ورقه‌های سیر، توسعه مدل ریاضی سه بعدی برای انتقال گرما و رطوبت ضمن اینکه فرآیند مشکلی است ولی می‌تواند برای بهینه‌سازی فرآیند موثر باشد.

هدف از این مطالعه عبارتند از: (۱) توسعه معادلات حاکم بر فرآیند انتقال جرم و گرما در طول خشک‌شدن ورقه‌های سیر و حل عددی معادلات به صورت هم‌زمان برای تخمین پروفیل‌های دما و رطوبت به صورت تابعی از زمان و مکان در یک ورقه سیر؛ (۲) اعتبارسنجی مدل

سایونین و مواد فنولی، فسفر، پتاسیم، گوگرد، روی، سلنیوم و ویتامین A و C است. مسئول طعم ویژه‌ی آن، آلپسین (دی‌اللیل دی‌سولفید اکسید) است که با کمک آنزیم آلی‌ایناز در هنگام تخریب سلول‌ها از ماده‌ای به نام آلینتولید حاصل می‌شود. بنابراین اگر سیر بلافاصله مصرف نشود، بوی خود را از دست می‌دهد. سیر یک محصول نسبتاً فسادپذیر بوده و به دلیل نبود انبارهای مناسب برای نگهداری و امکانات مناسب حمل‌ونقل، سالانه حدود ۳۰ درصد از محصول تولیدی آن به دلایل مختلف مانند تنفس و فساد میکروبی در مراحل پس از برداشت از بین می‌رود (شارما و همکاران ۲۰۰۹). اخیراً سیر خشک‌شده به‌عنوان یکی از ترکیبات و افزودنی‌های غذاهای آماده و نیمه‌آماده مانند انواع سس و سوپ‌ها مصرف زیادی پیدا کرده است. تغییر الگوی مصرف از سیر تازه به سیر خشک‌شده موجب افزایش تقاضا برای این محصول شده است. بنابراین برای پاسخ به این تقاضای فزاینده، سیر باید پس از برداشت فرآوری شده و در نهایت به صورت ورقه‌های خشک‌شده و یا به صورت پودر با کمترین تغییر خواص کیفی آن نسبت به محصول تازه برداشت شده به بازار عرضه شود. ضمن اینکه هزینه‌های فرآوری از بابت انرژی مصرفی در خشک‌کردن کمینه باشد.

از آنجایی که سیر دارای ترکیب‌های عطر و طعم دهنده‌ای است که به گرما حساس می‌باشد، خشک‌کردن آن نیاز به فرآیند گرمایی ملایم، در مدت زمان کوتاه دارد تا کیفیت محصول نهایی تا حد امکان حفظ گردد. ولی خشک‌کردن با دمای پایین (انجام فرآیند گرمایی ملایم) خود منجر به طولانی‌شدن زمان فرآیند و تشدید افت ترکیبات موثره سیر می‌شود. بنابراین برای دست یافتن به محصول خشک با کیفیت بالا، باید بین این دو پارامتر یعنی دمای خشک‌کردن پایین و زمان فرآیند کوتاه‌تر تعادل ایجاد شود و یا اینکه با حفظ دمای پایین هوای همرفتی، زمان در حداقل مقدار خود حفظ شود. انتخاب روش صحیح

در طول فرآیند خشک شدن بر تغییرات خواص کیفی آنها مانند ضریب نفوذ موثر رطوبت، دانسیته واقعی و دانسیته ماده خشک و تغییرات رنگ نمونه‌ها؛ ۵) کاربرد دمای متغییر در طول فرآیند خشک کردن و مطالعه تاثیر آن بر خواص کیفی ورقه‌های سیر.

توسعه یافته و نتایج حاصل از آن از طریق انجام آزمایش‌های تجربی؛ ۳) مطالعه تاثیر ضخامت‌های مختلف ورقه‌های سیر و نیز تغییر دمای هوای گرم در طول هر فرآیند بر تغییرات دمای ورقه‌ها و زمان خشک شدن آنها؛ ۴) مطالعه تاثیر دما و ضخامت ورقه‌های سیر

فهرست علائم و اختصارات

P_s فشار بخار در سطح محصول (Pa)	P_{sat} فشار بخار اشباع (Pa)	P_{∞} فشار بخار هوای گرم (Pa)	MR نسبت رطوبت	R ثابت عمومی گازها ($8.314 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$)	R^2 ضریب تبیین	RH_a درصد رطوبت نسبی هوا	x, y, z مختصات (m)	t زمان (s)	T دما (K)	T_1 دمای رفرنس (K)	T_s دمای سطح ورقه‌های سیر (K)	v حجم نمونه‌ها (m^3)	ρ_a دانسیته هوا (kg m^{-3})	ρ_p دانسیته واقعی محصول (kg m^{-3})	ρ_s دانسیته ماده خشک محصول ($\text{kg dry mass m}^{-3}$)	Ω سطح بیرونی محصول (m^2)						
A مساحت سطح بالایی قطعه آلومینیومی (m^2)	a,b,d ضرایب مدل فعالیت آبی	aw فعالیت آبی	C محتوی رطوبت ($\text{kg water kg}^{-1} \text{ dry garlic}$)	C_p گرمای ویژه ($\text{J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$)	D_{AB} پخشندگی جرمی آب موجود در ماده در هوا ($\text{m}^2 \text{ s}^{-1}$)	D_{eff} ضریب نفوذ موثر رطوبت ($\text{m}^2 \text{ s}^{-1}$)	D_0 فاکتور پیش‌نمایی رابطه آرنیوس	E_a انرژی اکتیواسیون (J mol^{-1})	h_m ضریب انتقال گرمای سطحی ($\text{W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$)	k_p ضریب هدایت گرمایی سیر ($\text{W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$)	K_m ضریب انتقال جرم سطحی (m s^{-1})	K_g ضریب انتقال جرم سطحی (s m^{-1})	K_{aw} پارامتر نیمه تجربی در مدل GAB	L ضخامت نمونه (m)	L_v گرمای نهان تبخیر ($\text{J kg}^{-1} \text{ water}$)	M جرم (kg)	n بردار عمود بر سطح	n_x مولفه x بردار عمود بر سطح	n_y مولفه y بردار عمود بر سطح	n_z مولفه z بردار عمود بر سطح	ΔP اختلاف فشار (Pa)	P_{atm} فشار اتمسفر (Pa)
زیر نویس‌ها																						
init اولیه																						
p محصول																						
al آلومینیوم																						
a هوا																						

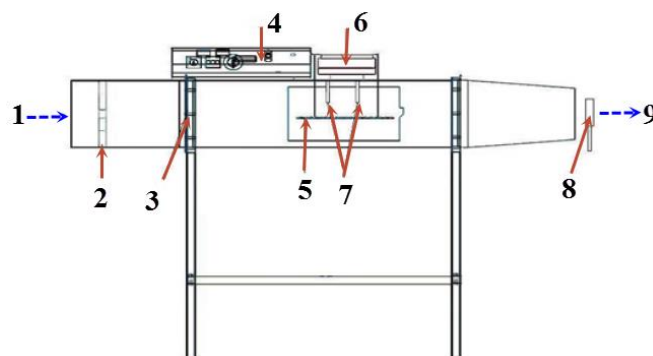
خشک‌کن قفسه‌ای آزمایشگاهی

برای انجام آزمایش‌ها، از یک دستگاه خشک‌کن آزمایشگاهی قفسه‌ای استفاده شد (شکل ۱). این خشک‌کن شامل چهار قسمت اصلی بود که عبارتند از: محفظه ورودی شامل دمنده و گرم‌کن الکتریکی، محفظه میانی شامل خطی‌سازهای جریان هوا و قفسه‌های خشک‌کن، محفظه خروجی هوا و تابلو فرمان دستگاه. یک دستگاه دمنده محوری با توان ۶۰ وات در ابتدای محفظه ورودی هوا قرار داشت که می‌توانست هوا را حداکثر با سرعت

مواد و روش‌ها

برای به دست آوردن برخی از خواص سیر در حین فرآیند خشک شدن مانند ضریب نفوذ موثر رطوبت، دانسیته ظاهری و دانسیته ماده خشک و تغییرات رنگ، آزمایش‌های مختلفی در دماهای ۵۰، ۶۰ و ۷۰ درجه سلسیوس هوای گرم انجام شد. نتایج این آزمایش‌ها در نهایت برای معتبرسازی مدل توسعه یافته استفاده شد.

یک دستگاه ترازوی دیجیتال در بالای قفسه‌ها و خارج از تونل قرار داشت به طوری که دو واحد از سینی‌ها توسط دو عدد مفتول با قطر ۵ میلی‌متر و به صورت مستقیم به این ترازو متصل شدند. سینی سوم به صورت مستقل در ارتفاع ۱۰ سانتی‌متری از کف تونل قرار داده شد (سیدلو و همکاران ۲۰۱۰).



شکل ۱- طرحواره خشک‌کن همرفتی: (۱) ورودی هوا؛ (۲) فن؛ (۳) گرم‌کن؛ (۴) کنترل‌کننده دما و سرعت هوا؛ (۵) سینی مشبک؛ (۶) ترازوی دیجیتال؛ (۷) حسگر رطوبت و دما؛ (۸) سرعت‌سنج دیجیتالی هوا؛ (۹) خروجی هوا

Figure 1- Schematic diagram of the convective drier (1) Air inlet; (2) Fan; (3) Heaters; (4) Temperature and air flow velocity controlling system; (5) Perforated trays; (6) Digital balance; (7) Relative humidity and temperature sensor; (8) Digital anemometer; (9) Air outlet

خشک‌کن روشن و بر اساس مشخصه‌های هر آزمایش، دما و سرعت هوا تنظیم می‌شد. یکی از سینی‌ها در داخل خشک‌کن روی قفسه‌ای که به‌طور مستقیم به ترازو متصل شده بود، قرار داده شده و وزن نمونه‌ها در فواصل زمانی ۱۲۰ ثانیه به وسیله یک ترازوی دیجیتال با دقت ± 0.1 گرم اندازه‌گیری و ثبت شد. سینی دوم روی قفسه‌ای که به ترازو متصل نبود قرار داده شد. خشک‌کردن نمونه‌ها با ضخامت‌های ۲، ۳ و ۴ میلی‌متر، در سرعت هوای ۱/۵ متر بر ثانیه و در دماهای ۵۰، ۶۰ و ۷۰ درجه سلسیوس تا رسیدن به محتوی رطوبت ۰/۱ (بر پایه خشک) انجام شد. رطوبت اولیه نمونه‌ها بر اساس روش ارایه شده در استاندارد AOAC در آون و در دمای 105 ± 1 درجه سلسیوس اندازه‌گیری شدند (AOAC ۲۰۱۰).

تهیه و آماده‌سازی نمونه‌ها

سیر مورد نیاز از مزرعه‌ای واقع در آذرشهر (یکی از شهرهای استان آذربایجان شرقی) تهیه گردید و تا زمان انجام آزمایش‌ها، در یخچال و در دمای ۳ درجه سلسیوس نگهداری شد. حدود ۲ تا ۳ ساعت قبل از انجام فرآیند خشک‌کردن، نمونه‌های سیر از یخچال خارج می‌شد تا به دمای محیط برسند. نمونه‌ها پس از پوست‌گیری، به وسیله دستگاه اسلایسر دوار، به ضخامت‌های مورد نظر (۲، ۳ و ۴ میلی‌متر) به صورت عرضی برش داده شدند. برای جلوگیری از تغییر رنگ و قهوه‌ای شدن، نمونه‌ها در محلول متابی‌سولفیت سدیم ۰.۴٪ ($\text{Na}_2\text{O}_5\text{S}_2$) و در دمای محیط به مدت یک دقیقه قرار داده شدند (راتی و همکاران ۲۰۰۷). سپس آب سطحی نمونه‌ها گرفته شده و روی دو عدد سینی مشبک به صورت تک لایه چیده شدند. حدود یک ساعت قبل از شروع آزمایش‌ها، دستگاه

خواص ترموفیزیکی سیر

یکی از مشخصه‌های مهم در مدل‌سازی ریاضی فرآیندهای انتقال جرم و گرما، تعیین مقدار رطوبت تعادلی محصول و به تبع آن تعیین مقدار فعالیت آبی ماده در رطوبت‌های مختلف می‌باشد. فعالیت آبی سیر با رابطه ۱ توصیف شد (پزوتی و کرایست ۱۹۹۷). ضریب هدایت گرمایی و گرمای ویژه نمونه‌ها به صورت تابعی از محتوی رطوبت با روابط ۲ و ۳ در نظر گرفته شد (رائو و ریزوی ۱۹۸۶).

$$\ln a_w = -B \left(\frac{C}{1+C} \right)^{-b} \exp \left(-d \left(\frac{C}{1+C} \right) \right) \quad [1]$$

$$B = a \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_1} \right); a = 286.5; T_1 = 478.5 \text{ K}; \quad [2]$$

$$d = 6.056$$

$$K_p = 0.148 + 0.493 \left(\frac{C}{1+C} \right) \quad [3]$$

$$C_{p_p} = 837 + 3349 \left(\frac{C}{1+C} \right) \quad [4]$$

بر اساس حل تحلیلی قانون دوم فیک در انتشار نسبت رطوبت (MR) در ورقه‌های نازک از رابطه ۵ محاسبه شد (کرنگ ۱۹۸۷). ضریب نفوذ موثر رطوبت به طور متداول با استفاده از داده‌های تجربی خشک‌کردن تعیین می‌شود. با استفاده از داده‌های تجربی در هر دما، ضریب نفوذ از طریق رسم $\ln(MR)$ به صورت تابعی از $\frac{t}{L^2}$ تعیین گردید و از روی شیب خط برازش شده روی داده‌های مذکور، مقدار ضریب نفوذ موثر رطوبت محاسبه شد (روابط ۶ و ۷) (همدمی و همکاران ۲۰۰۶).

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \exp \left(- \frac{D_{eff} \pi^2 t}{4(L)^2} \right) \quad [5]$$

$$\ln(MR) = \ln \left(\frac{8}{\pi^2} \right) - \left(\frac{D_{eff} \pi^2 t}{4(L)^2} \right) \quad [6]$$

$$\text{Slop} = \frac{D_{eff} \pi^2}{4(L)^2} \quad [7]$$

در مرحله بعدی تغییر ضریب نفوذ موثر رطوبت به صورت تابعی از دمای هوای خشک‌کن (T) با استفاده از رابطه آرینوس توصیف گردید (رابطه ۸). ضرایب مدل

مذکور از قبیل E_a و D_0 از طریق برازش منحنی در نرم-افزار متلب به دست آمد.

$$D_{eff} = D_0 \exp \left(\frac{-E_a}{R \times T} \right) \quad [8]$$

ضریب انتقال گرما و جرم سطحی

برای به دست آوردن ضریب انتقال گرما در سطح نمونه‌ها و در داخل خشک‌کن مورد استفاده، تغییرات دمای سطح و مرکز یک قطعه آلومینیومی در دماهای مختلف هوای گرم خشک‌کن اندازه‌گیری شد. ضریب انتقال حرارت در سطح با استفاده از رسم نمودار $\ln(T - T_{al})$ نسبت به زمان و شیب بخش خطی این نمودار (slope) به وسیله معادله ۹ محاسبه گردید. سپس ضریب انتقال جرم سطحی (K_g و K_m) نیز از رابطه کلبورن-شیلتون (معادله ۱۰ و ۱۱) به دست آمد (بیالوبزوسکی ۲۰۰۶؛ اوزیشیک ۱۹۸۵). روابط ۱۲ و ۱۳ نیز به ترتیب ضریب نفوذ گرما در ماده و ضریب پخشندگی بخار آب در هوا را نشان می‌دهند (سیدلو ۱۳۸۸).

$$h_m = \frac{M_{al} \cdot C_{p_{al}} \times \text{slope}}{A} \quad [9]$$

$$K_m = \frac{h_m}{\rho_a \cdot C_{p_a} \cdot \left[\frac{\alpha_a}{D_{AB}} \right]^{2/3}} \quad [10]$$

$$K_g = \rho_a \frac{M_{water}}{M_a \cdot P_{atm}} \times K_m \quad [11]$$

$$\alpha_a = 1.43818 \times 10^{-7} \times T - 2.01567 \times 10^{-5} \quad [12]$$

$$D_{AB} = 1.87 \times 10^{-15} \left(\frac{T}{P_{atm}} \right)^{2.072} \quad [13]$$

تغییرات رنگ نمونه‌ها

در هر آزمایش و در هر سطح رطوبتی معادل زمان‌های مختلف خشک‌کردن شامل رطوبت‌های ۰/۳، ۰/۶، ۰/۹، ۰/۱۳ و ۰/۱ گرم آب بر گرم ماده خشک سیر، سه نمونه سیر به صورت تصادفی از سینی دوم در داخل خشک-کن بیرون آورده شده و شاخص‌های رنگ آنها شامل L ، a و b که به ترتیب بیانگر مقدار شفافیت، قرمزی و سبزی و در نهایت زردی و آبی بودن نمونه‌ها است، توسط دستگاه اندازه‌گیری رنگ اندازه‌گیری شد. تفاوت رنگ کل

نمونه‌های خشک‌شده با نمونه‌های تازه، به‌عنوان معیاری برای بیان تغییر رنگ کلی در طی خشک‌کردن، توسط رابطه ۱۴ محاسبه شد (دمیر و همکاران ۲۰۰۶) که در آن زیرنویس‌های 0 و 1 به ترتیب بیانگر مشخصه‌های رنگ سیر تازه و سیر خشک‌شده و علامت ستاره بیانگر مشخصه‌های استاندارد شده می‌باشند.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_{\text{eff}} \left[\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \right], \quad [14]$$

$$D_{\text{eff}} = \text{fun}(T_{\text{inf}})$$

$$t > 0, \quad -D_{\text{eff}} \frac{\partial C}{\partial n} \Big|_{\Omega} = \frac{K_g}{\rho_s} \Delta P \quad [15]$$

$$-D_{\text{eff}} \frac{\partial C}{\partial n} \Big|_{\Omega} = \frac{K_g}{\rho_s} [P_s(T_s) - P_{\infty}(T)] \quad [16]$$

$$-D_{\text{eff}} \frac{\partial C}{\partial n} \Big|_{\Omega} = \frac{K_g}{\rho_s} [a_w \cdot P_{\text{sat}}(T_s) - RH_a \cdot P_{\text{sat}}(T)] \quad [17]$$

شرط اولیه برای حل معادله انتقال رطوبت به صورت رابطه ۱۸ در نظر گرفته شد.

$$t = 0, \quad C = C_{\text{init}} = \text{const} \quad [18]$$

مدل ریاضی انتقال گرما

معادله ۱۹ برای توصیف انتقال گرما در نمونه سیر در طول فرآیند خشک‌شدن استفاده شد. شرط مرزی نوع سوم (معادله ۲۰)، برای کلیه سطوح در تماس با هوای گرم در خشک‌کن استفاده شد. بطوری‌که گرادیان دمای سطح محصول و هوای گرم و نیز رطوبت خارج شده از ورقه‌های سیر در جریان خشک‌شدن عامل اصلی بالانس انرژی در معادلات لحاظ شدند. بنابراین معادله نهایی انتقال گرما به صورت رابطه ۲۱ خلاصه‌نویسی شد.

$$\rho_p C_{p_p} \frac{\partial T}{\partial t} = k_p \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad [19]$$

$$\rho_p = \text{fun}(C); C_{p_p} = \text{fun}(C); k_p = \text{fun}(C)$$

$$t > 0, \quad -k_p \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{\Omega} = h_m (T_{\text{inf}} - T_s) - \phi L_v \quad [20]$$

$$\begin{aligned} \phi &= K_g (P(T_s) - P_{\infty}(T_{\text{inf}})) \\ &= K_g (P_{\text{sat}}(T_s) a_w - RH P_{\text{sat}}(T_{\text{inf}})) \end{aligned} \quad [21]$$

شرط اولیه حاکم بر فرآیند انتقال گرما به صورت رابطه ۲۲ می‌باشد.

نمونه‌های خشک‌شده با نمونه‌های تازه، به‌عنوان معیاری برای بیان تغییر رنگ کلی در طی خشک‌کردن، توسط رابطه ۱۴ محاسبه شد (دمیر و همکاران ۲۰۰۶) که در آن زیرنویس‌های 0 و 1 به ترتیب بیانگر مشخصه‌های رنگ سیر تازه و سیر خشک‌شده و علامت ستاره بیانگر مشخصه‌های استاندارد شده می‌باشند.

$$\Delta E = \sqrt{(L_0^* - L_i^*)^2 + (a_0^* - a_i^*)^2 + (b_0^* - b_i^*)^2} \quad [14]$$

دانسیتته واقعی و دانسیته ماده خشک

به منظور بررسی تاثیر شرایط خشک‌کردن روی سایر خواص مهندسی محصول، نمونه‌های خارج شده از خشک‌کن مجدد برای اندازه‌گیری دانسیته واقعی نیز مورد استفاده قرار گرفتند. حجم آنها با استفاده از روش جابجایی تولوئن اندازه‌گیری و سپس دانسیته واقعی محاسبه شد (چاکراورتی و پل ۲۰۰۶). دانسیته ماده خشک اولیه نمونه‌ها نیز در ابتدای فرآیند بر اساس محتوی رطوبت و حجم اولیه نمونه‌ها اندازه‌گیری شد.

توسعه مدل ریاضی

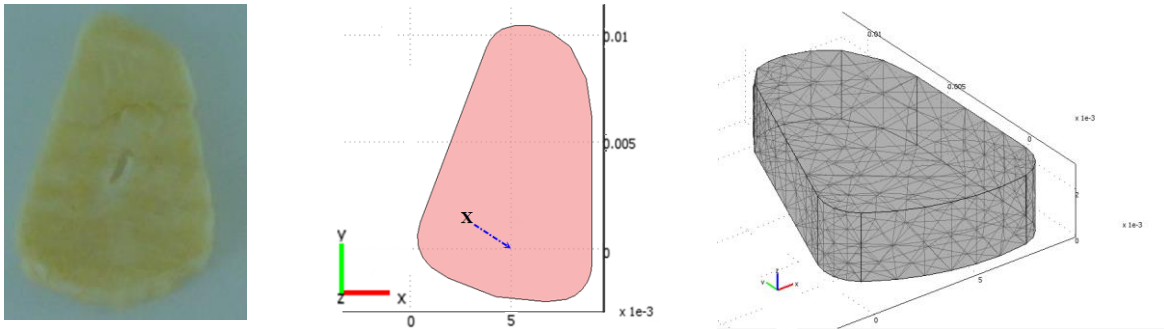
فرضیات مدل:

- فرضیات زیر برای توسعه مدل ریاضی استفاده شدند:
- انتقال گرما و رطوبت در ماده به صورت سه بعدی انجام می‌گیرد.
- توزیع هوا در داخل خشک‌کن یکنواخت است.
- توزیع رطوبت اولیه و دما در نقاط مختلف ماده یکنواخت است.
- چروکیدگی محصول در طول فرآیند خشک‌کردن ناچیز و قابل اغماض می‌باشد.
- انتقال گرما به محصول از طریق تشعشع، ناچیز است.
- انتقال گرمای هدایتی بین سینی مشبک (قسمت-های پر سینی) و محصول لحاظ نشد.

مدل ریاضی انتقال رطوبت

از قانون دوم فیک در انتشار، رابطه ۱۴، برای مدل‌سازی انتقال رطوبت در ماده استفاده شد. از شرط مرزی نوع سوم (همرفتی) برای مدل انتقال رطوبت در تمام مرزهای

استفاده شدند (شکل ۲). به‌عنوان نمونه حجم و مساحت سطح هر ورقه سیر در ضخامت ۳ میلی‌متر به ترتیب برابر $۲/۵۴۲۳۶۷ \times ۱۰^{-۷}$ متر مکعب و $۲/۷۶۲۲۸۴ \times ۱۰^{-۴}$ متر مربع محاسبه شد. هندسه مذکور به تعداد ۳۳۶۴ المان گسسته‌سازی شد که درجه آزادی مدل نیز برابر ۱۰۵۷۰ به دست آمد. در ضخامت‌های ۲ و ۴ میلی‌متر نیز، مدل‌های هندسی مشابه ایجاد شد. بر اساس نتایج پروفیل‌های دما و رطوبت در ورقه‌های سیر و نیز بر اساس اندازه‌گیری‌های انجام شده، نتایج شبیه‌سازی با اندازه‌گیری‌های تجربی معتبرسازی شد.



شکل ۲- مدل هندسی ورقه‌های سیر

Figure 2-3D model of the geometry of the garlic slice

پیش‌بینی توزیع رطوبت در ورقه‌های سیر و معتبرسازی مدل توسعه یافته

مدل ریاضی توسعه یافته به خوبی توانست رطوبت سیر را در شرایط مختلف خشک کردن پیش‌بینی کند بطوری‌که در ورقه‌هایی با ضخامت ۲ میلی‌متر، ضریب همبستگی بین داده‌های تجربی و پیش‌بینی شده در دماهای ۵۰، ۶۰ و ۷۰ درجه سلسیوس به ترتیب برابر ۰/۹۹۹، ۰/۹۹۹ و ۰/۹۹۷ محاسبه شد. نسبت رطوبت تجربی و پیش‌بینی شده در ورقه‌های سیر در دماهای مختلف هوای گرم در شکل ۳ نشان داده شده است.

میانگین خطا در تخمین نسبت رطوبت در دماهای ۵۰، ۶۰ و ۷۰ درجه سلسیوس به ترتیب برابر ۱۱٪، ۶٪ و ۳۴٪ بود. با این وجود مدل توسعه یافته نسبت به مدل‌های ارائه شده توسط محققین دیگر از دقت بالاتری در تخمین

$$t = 0, \quad T = T_{init} = \text{const} \quad [۲۲]$$

حل عددی معادلات حاکم

معادلات دیفرانسیل حاکم بر فرآیند انتقال گرما و رطوبت در طول فرآیند خشک شدن ورقه‌های سیر بر اساس روش عددی اجزای محدود در محیط نرم‌افزار COMSOL MULTIPHYSICS 3.5 و در شرایط دمایی مرزی مختلف حل شدند. روش اجزای محدود برای حل مسائلی که دارای شکل هندسی نامنظم هستند و زمانی‌که خواص ماده تابعی از متغیرهای وابسته مختلف مانند دما و محتوی رطوبت باشد، روش مناسبی می‌باشد. مدل هندسی سه بعدی ورقه‌های سیر برای شبیه‌سازی

نتایج و بحث

ضرایب مدل ریاضی توسعه یافته

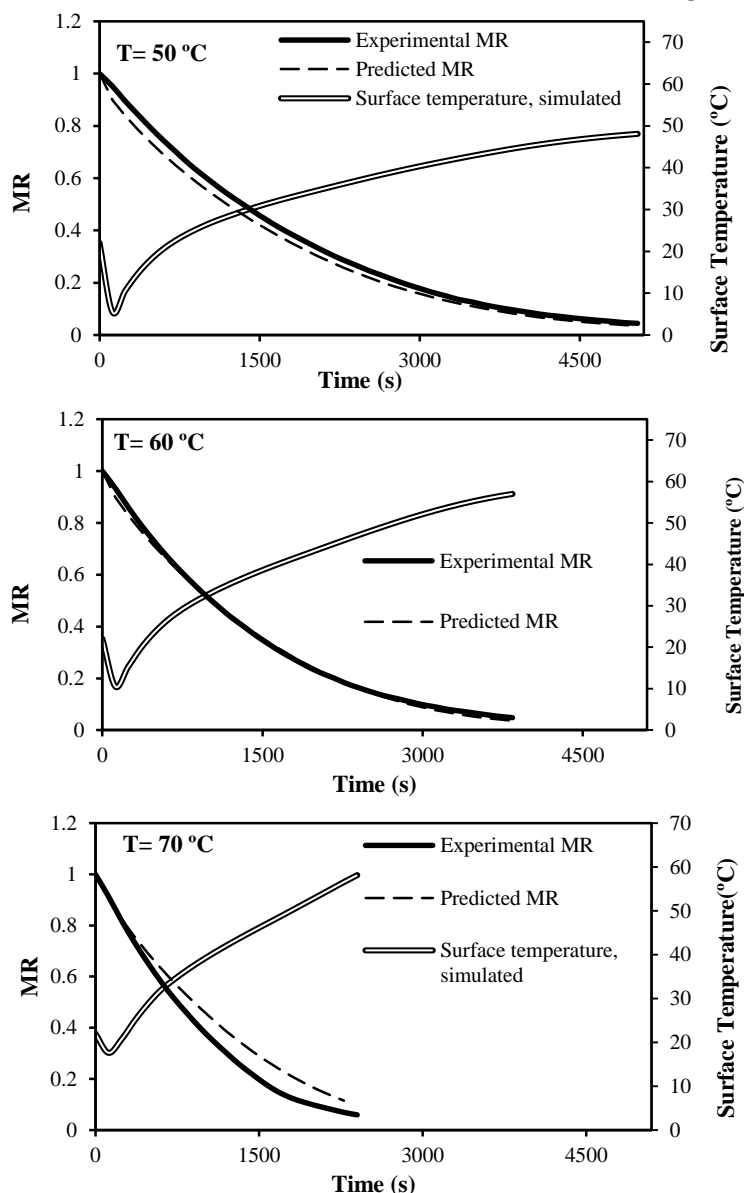
برای توسعه مدل ریاضی انتقال گرما و رطوبت در فرآیند خشک کردن ورقه‌های سیر، ضرایب مدل شامل ضریب نفوذ موثر رطوبت و دانسیته واقعی از طریق انجام آزمایش‌های تجربی و تطبیق داده‌های تجربی با مدل‌های مختلف، مدل‌های منتخب به صورت روابط ۲۳ و ۲۴ حاصل شد. مقدار دانسیته ماده خشک ورقه‌های سیر نیز در حدود ۳۱۷ کیلوگرم بر متر مکعب اندازه‌گیری شد.

$$D_{\text{eff}} = 1.1 \times 10^{-4} \exp\left(-\frac{33431.7}{R \times T}\right) \quad [۲۳]$$

$$\rho_p = 1318.8397 \times \exp(-0.0822 C) \quad [۲۴]$$

کردن به صورت دو بعدی شبیه‌سازی کردند. نتایج به دست آمده حاکی از آن بود که مدل توسعه‌یافته در ۲ ساعت اول خشک‌کردن، به خوبی پروفیل‌های دما و رطوبت را تخمین زده بود. ولی در مراحل پایانی خشک‌کردن از دقت کافی برخوردار نبود.

نسبت رطوبت برخوردار می‌باشد (بیالوبزوسکی و همکاران ۲۰۰۸). در سایر ضخامت‌های مورد مطالعه ورقه‌های سیر نیز همبستگی بالایی بین نسبت رطوبت تجربی و پیش‌بینی شده وجود داشت (۰/۹۹۶ تا ۰/۹۹۹). آورسا و همکاران (۲۰۰۷) طی تحقیقی انتقال گرما و رطوبت در ورقه‌های هویج را در طول فرآیند خشک‌



شکل ۳- نتایج نسبت رطوبت تجربی و پیش‌بینی شده و دمای سطح پیش‌بینی شده ورقه‌های سیر با ضخامت ۲ میلی‌متر در طول فرآیند خشک‌کردن

Figure 3- Experimental and predicted MR and surface predicted temperature of garlic slices with thickness of 2 mm during the drying process

ضریب نفوذ گرمایی سیر است. بنابراین می‌توان از گرادیان دمایی سطح و مرکز نمونه‌ها در طی عملیات فرآوری در ورقه‌های ۲ میلی‌متری چشم‌پوشی کرد. در سایر ضخامت‌های مورد مطالعه (۳ و ۴ میلی‌متر) نیز وضعیت مشابهی ملاحظه شد. در طول مراحل اولیه خشک‌کردن (۲ الی ۱۲ دقیقه ابتدایی) کاهش سریع دما (۱۶ درجه سلسیوس) در تمام نقاط نمونه ملاحظه شد. این افت ناگهانی دما در فرآیند اولیه، در دماهای بالاتر هوای گرم کمتر مشاهده شد بطوری‌که در دمای هوای ۶۰ و ۷۰ درجه سلسیوس این کاهش دما به ترتیب ۱۲ و ۳ درجه سلسیوس بود (شکل ۴). در مراحل اولیه خشک‌کردن بخش اعظم انرژی منتقل شده به محصول صرف تبخیر رطوبت آزاد سطحی محصول می‌شود. چنین تبخیر شدیدی موجب کاهش دمای محصول می‌گردد. اما استفاده از هوایی با دمای بالاتر، از افت شدید دمای محصول از مقدار اولیه آن جلوگیری می‌کند. نتایج مشابهی نیز توسط سیدلو (۱۳۸۸) گزارش شد.

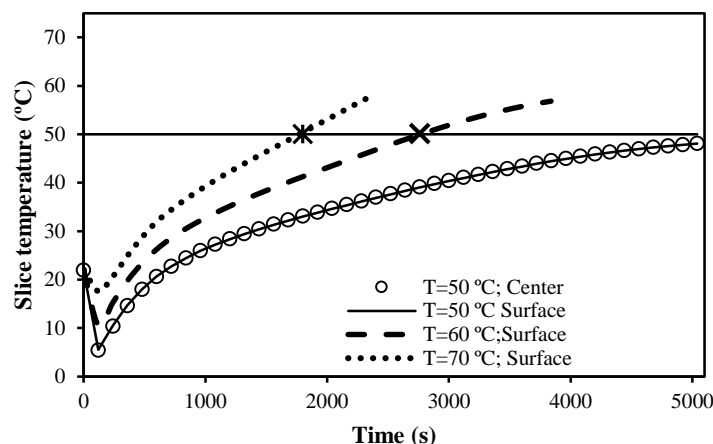
با پیشرفت فرآیند خشک‌کردن، دمای سطح نمونه‌ها به تدریج افزایش یافت و در نهایت با هوای گرم مورد استفاده تقریباً هم‌دما شد که این فرآیند هم‌دما شدن زمان قابل ملاحظه‌ای را به خود اختصاص داده بود. یکی از علل به تاخیر افتادن هم‌دما شدن دمای محصول با دمای هوای گرم می‌تواند افت رطوبت محصول و گرمای نهان تبخیر باشد. هوای گرم موجب افزایش دمای محصول می‌شود. از طرف دیگر رطوبت محصول گرمای مورد نیاز برای تبخیر را از محصول دریافت می‌کند، بنابراین دمای محصول با آهنگ کندتری افزایش می‌یابد. به تدریج با کاهش محتوی رطوبت ورقه‌های سیر، گرمای منتقل شده به وسیله هوای گرم موجب افزایش دمای محصول می‌شود. در شکل ۳ ارتباط بین دمای نمونه‌ها و نسبت رطوبت آنها نشان داده شده است که دقیقاً مرتبط با کاهش آهنگ خشک‌شدن نمونه‌ها بوده است.

آن‌ان علت کاهش دقت مدل را صرف‌نظر نمودن از چروکیدگی ورقه‌های هویج بیان داشتند زیرا در مراحل پایانی خشک‌کردن مقدار چروکیدگی افزایش می‌یابد. بیالوبزوسکی و همکاران (۲۰۰۸) با اعمال چروکیدگی در فرآیند خشک‌کردن بستر سیال قطعات هویج نشان دادند که تفاوتی در نتایج پیش‌بینی شده توسط مدل در دو حالت اعمال چروکیدگی و عدم اعمال آن در معادلات انتقال، وجود ندارد. در مطالعه حاضر ضریب نفوذ توسط رابطه ۲۳ بیان و در حل معادلات اعمال شد چنانکه سریکاتدن و روبرت (۲۰۰۸) بیان داشتند که در نظر گرفتن ضریب نفوذ موثر رطوبت به صورت تابعی از متغیرهای مورد مطالعه تاثیر بسزایی در تخمین پروفیل‌های رطوبت دارد. نیلوت و همکاران (۲۰۱۲) نیز استفاده از ضریب نفوذ به صورت تابعی از دما را برای تخمین دقیق در شبیه‌سازی ضروری دانستند. رستمی و همکاران (۱۳۹۶) فرآیند انتقال گرما و رطوبت را طی خشک‌کردن همرفتی ورقه‌های هویج مدل‌سازی کردند. شبیه‌ساز توسعه‌یافته با ضریب همبستگی ۰/۹۹۹ توانست پروفیل‌های رطوبت و دما را به خوبی پیش‌بینی کند. یکی از دلایل دقت بالای مدل ایشان در نظر گرفتن ضریب نفوذ موثر رطوبت به صورت تابعی از محتوی رطوبت هویج بود.

پروفیل دمای ورقه‌های سیر

دما عامل اصلی در تغییرات خصوصیات کیفی محصول در حین عملیات خشک‌کردن می‌باشد. بطوری‌که خصوصیات رنگ، عطر و طعم، محتوی ویتامین C و غیره تابعی از پروفیل دمای ماده در جریان خشک‌شدن می‌باشد.

بنابراین تغییرات دمای پیش‌بینی شده در مرکز و سطح نمونه‌های سیر با ضخامت ۲ میلی‌متر (شکل ۳ نقطه X) در دمای ۵۰ درجه سلسیوس در شکل ۴ نشان داده شده است. اختلاف دمای بین سطح و مرکز ورقه‌های سیر در طول زمان خشک‌شدن ناچیز و قابل اغماض بود که این امر به دلیل ضخامت کم ورقه‌های سیر و نیز بالا بودن



شکل ۴- پروفیل دمای سطح و مرکز ورقه‌های سیر با ضخامت ۲ میلی‌متر (نقطه X) در طول فرآیند خشک‌شدن
 Figure 4- Surface and central (point X) temperature of garlic slices during drying process with thickness of 2 mm at different air temperature

شدن سیر با افزایش دمای هوا و کاهش ضخامت نمونه-ها توسط محققین مختلف نیز گزارش شده است (بریویستر ۱۹۹۷؛ راتی و همکاران ۲۰۰۷؛ شارما و همکاران ۲۰۰۹؛ کریمی و همکاران ۱۳۹۱).

ذکر این نکته حائز اهمیت است که بر اساس نتایج حاصل از آزمایش‌های تجربی، استفاده از دماهای بالا برای خشک‌کردن ورقه‌های سیر و نیز طولانی‌شدن زمان خشک‌شدن به دلیل افزایش ضخامت نمونه‌ها، موجب تغییرات بیشتر در رنگ محصول نهایی خشک‌شده نسبت به رنگ اولیه سیر می‌شود و این به دلیل زوال و حساسیت رنگ دانه‌های موجود در سطح ماده در درجه حرارت‌های بالاتر می‌باشد. این امر مشتری‌پسندی محصول تولید شده را کاهش می‌دهد. در شکل ۵-b تغییرات رنگ نهایی نمونه‌های سیر به صورت تابعی از دمای هوای گرم و ضخامت ورقه‌های سیر نشان داده شده است. نتایج بیانگر آن است که اولاً در خشک‌کردن ورقه‌های سیر جهت دستیابی به کمترین مقدار شاخص تغییر رنگ کلی، در هر دمایی بایستی از ورقه‌هایی با ضخامت ۲ میلی‌متر استفاده شود. از طرف دیگر در هر ضخامتی از ورقه‌ها با افزایش دمای هوای گرم مقدار تغییرات رنگ (ΔE) افزایش یافته است. بنابراین جهت جلوگیری از تغییر رنگ کلی باید از دماهای پایین

این روند نشان‌دهنده ضرورت حل هم‌زمان معادلات انتقال گرما و جرم در طول فرآیند خشک‌کردن می‌باشد تا بتوان از شبیه‌سازی توسعه‌یافته در تحلیل‌های مرتبط با کیفیت مواد خشک مرتبط با فرآیندهای انتقال گرما و جرم و نیز در تحلیل‌های مرتبط با مسایل انرژی مصرفی در فرآیند استفاده کرد.

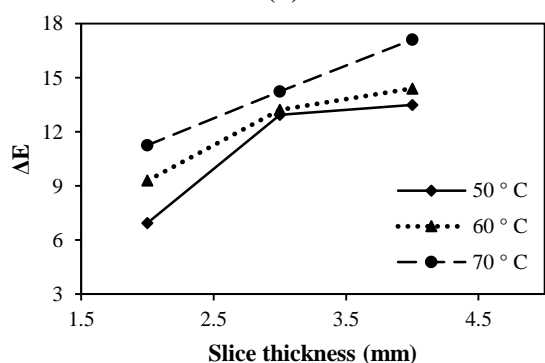
کاربرد شبیه‌سازی و آزمایش‌های تجربی در پیش-بینی زمان خشک‌شدن و تغییرات کیفی سیر

با توجه به پیش‌بینی خوب نسبت رطوبت ورقه‌های سیر توسط مدل ریاضی توسعه‌یافته و نیز دما در سطح و مرکز ورقه‌های سیر، زمان پیش‌بینی شده برای خشک‌شدن ورقه‌های سیر (زمان لازم برای رسیدن به رطوبت ۰/۱ گرم آب به ازای هر گرم ماده خشک) نیز مطابق با زمان خشک‌شدن تجربی بود. در شکل ۵-a زمان نهایی خشک‌شدن ورقه‌های سیر در شرایط مختلف مورد مطالعه ارائه شده است. همان‌طوری‌که ملاحظه می‌شود زمان خشک‌شدن ورقه‌های سیر با کاهش ضخامت نمونه‌ها از ۴ به ۲ میلی‌متر و نیز افزایش دمای هوا کاهش یافته است و این نتیجه بدیهی بود. بطوری‌که کمترین زمان خشک‌شدن برابر ۴۵ دقیقه در ورقه‌هایی با ضخامت ۲ میلی‌متر و هوای گرمی با دمای ۷۰ درجه سلسیوس به مقدار ۴۵ به دست آمد. کاهش زمان خشک-

است که در هوای گرم با دمای ۶۰ و ۷۰ درجه سلسیوس، به ترتیب بعد از ۴۴ و ۳۰ دقیقه دمای سطح ورقه‌های سیر به دمای ۵۰ درجه سلسیوس رسیده است (نقاط A و B).

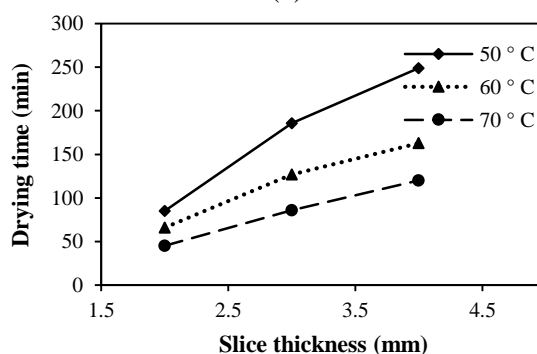
بر اساس نتایج حاصل از تحقیق، برای حفظ شفافیت ورقه‌های خشک‌شده سیر، دمای سطح آنها نباید از ۵۰ درجه سلسیوس فراتر رود. برای این منظور راهکار جدیدی مورد مطالعه قرار گرفت مبنی بر اینکه در ابتدای فرآیند خشک کردن از هوای گرم با دمای بالاتر استفاده شود و بعد از رسیدن دمای سطح ورقه‌های سیر به دمای بحرانی (۵۰ درجه سلسیوس)، دمای هوای گرم به ۵۰ درجه کاهش داده شده و فرآیند خشک کردن ادامه یابد. به این ترتیب می‌توان با استفاده از هوای گرم با دمای بالاتر قبل از نقطه بحرانی، زمان خشک شدن را کاهش داده و بعد از آن با کاهش دما به ۵۰ درجه سلسیوس از تغییر رنگ نمونه‌ها جلوگیری نموده و در نهایت محصولی با رنگ شفاف‌تر و در زمان کوتاه‌تر خشک نمود. امکان استفاده از این روش در بخش بعدی با استفاده از شبیه‌ساز توسعه یافته مورد ارزیابی قرار گرفت تا تاثیر استفاده از هوای گرم با دمای متغیر روی زمان خشک شدن بررسی شود.

(b)



استفاده شود (b-5). همچنین افزایش ضخامت نمونه‌ها در هر دمایی، موجب طولانی شدن زمان خشک کردن و افزایش تغییر رنگ کلی می‌گردد. ثانيا استفاده از دماهای پایین در ضخامت ۲ میلی‌متر ورقه‌ها، موجب افزایش زمان خشک شدن می‌شود که به عنوان نمونه کاهش دما از ۷۰ به ۵۰ درجه سلسیوس موجب افزایش ۷۵ دقیقه‌ای در زمان خشک شدن می‌شود (a-5). بنابراین کمترین تغییر رنگ نمونه‌ها با مقدار ۶/۹ در دمای هوای ۵۰ درجه سلسیوس و ورقه‌هایی با ضخامت ۲ میلی‌متر حاصل شد که در این حالت حداکثر دمای سطح نمونه‌ها به مقدار ۴۸ درجه سلسیوس رسیده است و زمان خشک شدن برابر ۴۵ دقیقه بود. از مطالب عنوان شده می‌توان نتیجه‌گیری کرد که باید تمهیداتی اندیشیده شود که ضمن جلوگیری از افزایش دمای سطح نمونه‌ها به بیش از ۵۰ درجه سلسیوس (برای جلوگیری از تغییر رنگ نمونه‌ها)، زمان خشک شدن را نیز کاهش داد تا مصرف انرژی مرتبط کمتر شود. مطالعه تغییرات دمای ورقه‌های سیر (شکل ۴) نشان می‌دهد که دمای نمونه‌ها در طول فرآیند خشک کردن به تدریج افزایش می‌یابد که در بیشتر مدت زمان خشک کردن، دمای نمونه‌ها کمتر از دمای هوای گرم می‌باشد. در شکل ۴ نشان داده شده

(a)



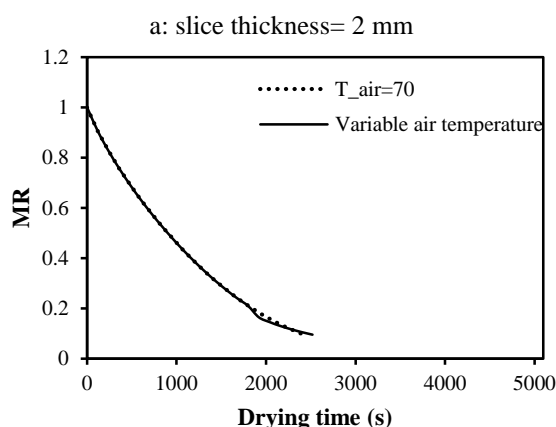
شکل ۵- زمان خشک شدن و تغییر رنگ کلی ورقه‌های سیر در دماهای مختلف هوا و ضخامت‌های مختلف نمونه‌ها

Figure 5- Drying time and change the overall color of garlic slices at different air temperatures and different sample thicknesses

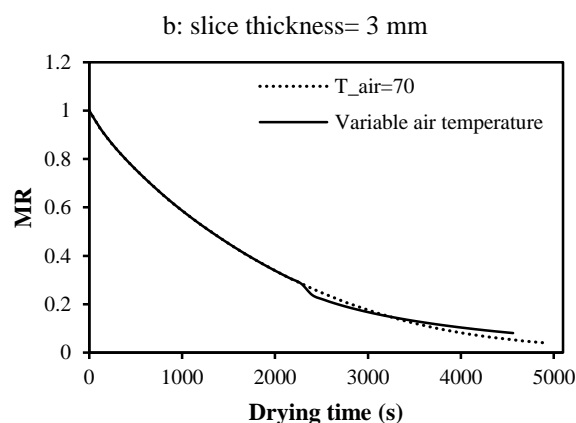
مدت زمان کوتاه‌تر، استفاده از دمای متغیر هوای گرم در طول فرآیند خشک کردن ورقه‌های سیر با ضخامت ۲ و ۳ میلی‌متر در شبیه‌ساز توسعه یافته مورد مطالعه و

کاربرد دمای متغیر هوای گرم در خشک کردن به منظور جلوگیری از افزایش دمای ورقه‌های سیر به بیش از ۵۰ درجه سلسیوس و نیز خشک شدن آنها در

کردن، از هوایی با دمای ۲۰ درجه سلسیوس کمتر استفاده شده است که می‌تواند موجب کاهش مصرف انرژی گردد. نتایج مشابهی نیز در خشک‌کردن ورقه‌های سیر با ضخامت ۳ میلی‌متر به دست آمد (شکل ۶-ب). در این ضخامت نیز با رسیدن دمای نمونه‌ها به ۵۰ درجه سلسیوس، دمای هوا از ۷۰ به ۵۰ درجه سلسیوس کاهش داده شد که این امر تنها موجب افزایش ۸ دقیقه‌ای در کل زمان خشک‌شدن ورقه‌های سیر گردید. در حالیکه در حدود ۴۷ درصد از زمان فرآیند، از هوایی با دمای کمتر استفاده شده بود. به این ترتیب استفاده از دمای متغیر هوای گرم در فرآیند خشک‌کردن ورقه‌های سیر می‌تواند راهکار مناسبی برای کاهش زمان خشک‌شدن و حفظ کیفیت محصول باشد.



ارزیابی قرار گرفت. به این ترتیب که در ابتدای فرآیند، خشک‌کردن ورقه‌های سیر با ضخامت ۲ میلی‌متر با هوای گرم با دمای ۷۰ درجه سلسیوس شروع شد و پس از رسیدن دمای سطح نمونه‌ها به حدود ۵۰ درجه سلسیوس، دمای هوا کاهش یافته و فرآیند خشک‌کردن از دقیقه ۳۰، با هوای گرم با دمای ۵۰ درجه سلسیوس ادامه یافت. تغییرات نسبت رطوبت نمونه‌ها در شکل ۶-ا برای ورقه‌هایی با ضخامت ۲ میلی‌متر نشان داده شده است. همان‌طوری‌که ملاحظه می‌شود علی‌رغم استفاده از هوای گرم با دمای متغیر، تغییرات محسوس در زمان خشک‌کردن نسبت به دمای ۷۰ درجه سلسیوس مشاهده نشد و تنها ۳ دقیقه زمان خشک‌کردن طولانی‌تر شد. این در حالیست که در ۲۵ درصد از کل زمان فرآیند خشک-



شکل ۶- فرآیند خشک‌شدن ورقه‌های سیر با ضخامت‌های مختلف با استفاده از هوای گرم با دمای ثابت و دمای متغیر

Figure 6- Drying process of garlic slices with different thicknesses using hot air with constant temperature and variable temperature

نتیجه‌گیری

در ورقه‌های سیر می‌باشد. استفاده از هوای گرم با دمای ۵۰ درجه سلسیوس و ورقه‌هایی با ضخامت ۲ میلی‌متر، موجب حفظ شفافیت نمونه‌ها شده و از تغییر رنگ نمونه‌ها را در حین خشک‌کردن جلوگیری می‌کند. با این وجود استفاده از هوای گرم با دمای کمتر، موجب طولانی‌شدن زمان خشک‌شدن می‌شود. بر این اساس با استفاده از شبیه‌ساز توسعه داده شده از هوای گرم با دمای متغیر برای خشک‌کردن ورقه‌های سیر استفاده شد. نتایج حاصل نشان داد که با استفاده از این روش

در این تحقیق معادلات انتقال جرم و گرما در طول فرآیند خشک‌شدن سیر توسعه یافتند. این معادلات با اعمال شرط مرزی نوع سوم روی هندسه سه بعدی ورقه‌های سیر به صورت هم‌زمان و به روش اجزای محدود حل شدند. همچنین خصوصیات کیفی محصول در شرایط مختلف خشک‌کردن ورقه‌های سیر اندازه‌گیری شد. نتایج تحقیق حاضر نشان داد که شبیه‌ساز توسعه‌یافته با دقت خوبی قادر به تخمین پروفیل‌های دما و محتوی رطوبت

می‌توان فرآیند خشک کردن ورقه‌های سیر را در مدت زمان کوتاه‌تری انجام داد. ضمن اینکه با جلوگیری از افزایش دمای سطح محصول در مراحل پایانی فرآیند، از تغییر رنگ نمونه‌ها نیز جلوگیری می‌شود. از طرف دیگر به دلیل استفاده از دمای متغیر هوای گرم زمان خشک شدن نسبت به دمای ۵۰ درجه سلسیوس به مدت ۴۳ دقیقه کاهش داشته است که این امر می‌تواند تاثیر بسزایی در کاهش مصرف انرژی داشته باشد.

منابع مورد استفاده

- دلوی م و همدی ن، ۱۳۸۹. مدل‌سازی عددی انتقال حرارت در پنیر سفید فرآیند شده. نشریه پژوهش‌های صنایع غذایی، ۲۰(۲)، ۴۵-۶۰.
- رستمی باروجی ر، سیدلو ص و دهقان نیا ج، ۱۳۹۶. شبیه‌سازی عددی فرآیندهای انتقال رطوبت و گرما در خشک کردن همرفتی هویج پیش‌تیمار شده با امواج اولتراسوند و مایکروویو. نشریه ماشین‌های کشاورزی، ۷(۱)، ۹۷-۱۱۳.
- سیدلو ص، ۱۳۸۸. مطالعه عددی و تجربی فرآیندهای مرتبط با خشک کردن سیب با استفاده از خشک‌کن‌های همرفتی. رساله دکتری. دانشگاه تبریز.
- کریمی ف، دهقان نیا ج، قنبرزاده ب و رفیعی ش، ۱۳۹۱. مدل‌سازی خشک کردن لایه نازک موز و بهینه‌سازی فرآیند توسط شبکه عصبی مصنوعی. نشریه پژوهش‌های صنایع غذایی، ۲۲(۳)، ۳۴۷-۳۶۰.
- AOAC, 1990. Official method of analysis. Association of Official Analytical Chemists (No. 934.06), Arlington, VA.
- Aversa M, Curcio S, Calabro V and Iorio G, 2007. An analysis of the transport phenomena occurring during food drying process. *Journal of Food Engineering* 78: 922-932.
- Bialobrzeski I, 2006. Simultaneous heat and mass transfer in shrinkable apple slab during drying. *Drying Technology* 24: 551-559.
- Bialobrzeski I, Zielinska M, Mujumdar AS and Markowski M, 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.
- Brewster JL, 1997. Onions and Garlic. In: H.C. Wine (eds). *The physiology of vegetable crops*. CAB International, Cambridge. UK.
- Chakraverty A and Poul SR, 2001. *Postharvest technology: cereals, pulses and vegetables*. Science Publishers, Inc. India. pp: 183-188.
- Chua KJ, Chou SK, Hawlader MNS, Mujumdar AS and Ho JC, 2002. Modeling the moisture and temperature distribution within an agricultural product undergoing time-varying drying schemes. *Biosystems Engineering* 81 (1): 99 – 111.
- Crank j, 1975. *The mathematics of Diffusion*. 2nd ed. Clarendon Press, Oxford.
- Cui ZW, XU SY and Sun DW, 2003. Dehydration of garlic slices by combined Microwave-Vacuum and Air Drying. *Drying Technology* 21 (7): 1173-1184.
- Demir V, Gunhan T, Yagcioglu AK and Degirmencioglu A, 2004. Mathematical modeling and the determination of some quality parameters of air-dried bay leaves. *Biosystems Engineering* 88(3): 325-335.
- Hamdami N, Monteau J-Y and Le Bail A, 2006. Moisture diffusivity and water activity of part-baked bread at above sub-freezing temperatures. *International Journal of Food Engineering* 14: 259-268.
- Hardrich B, Boudhrioua N, Kechaoa N, 2008. Drying of Tunisian sardine (*Sardinella aurita*) experimental study and three-dimensional transfer modeling of drying kinetics. *Journal of Food Engineering* 84: 92-100.
- Hussain MM and Dinner J, 2003. Two-dimensional heat and mass transfer subjected to drying: A finite – difference approach. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 46: 4033-4039.

- Karim MA and Hawlader MNA, 2005. Drying characteristics of banana: Theoretical modeling and experimental validation. *Journal of Food Engineering* 70: 35-45.
- Mihoubi D and Bellagi A, 2008. Two-dimensional heat and mass transfer during drying of deformable media. *Applied Mathematical Modelling* 32: 303-314.
- Nilnont W, Thepa S, Janjai S, Kasayapanand N, Thamrongmas C and Bala BK, 2012. Finite element simulation for coffee (*Coffea arabica*) drying. *Food and Bioproducts Processing* 90: 341-350.
- Ozisik MN, 1985. Heat transfer, a basic approach. McGraw- Hill Book Company.
- Pezzutti A and Crapiste GH, 1997. Sorptional Equilibrium and Drying Characteristics of Garlic. *Journal of Food Engineering* 31: 113-123.
- Rao MA and Rizvi SSH, 1986. Engineering properties of food. Marcel Dekker, Inc.
- Ratti C, Araya-Farias M, Mendez-Lagunas L and Makhlof J, 2007. Drying of Garlic (*Allium Sativum*) and Its Effect on Allicin Retention. *Drying Technology* 25(2): 349-356.
- Seiedlou S, Ghasemzadeh HR, Hamdami N, Talati F and Moghaddam M, 2010. Convective drying of apple: Mathematical modeling and determination of some quality parameters. *International Journal of Agriculture and Biology* 12: 171-178.
- Sharma GP, Prasad S and Chahar VK, 2009. Moisture transport in garlic cloves undergoing microwave-convective drying. *Food and bioproducts processing* 87: 11-16.
- Srikiatden J and Roberts JS, 2008. Predicting moisture profiles in potato and carrot during convective hot air drying using isothermally measured effective diffusivity. *Journal of Food Engineering* 84: 516-525.

Effect of the drying air temperature variation on the energy consumption and quality preservation of garlic slices

H Nalbandi^{1*} and S Seiedlou¹

Received: May 13, 2019 Accepted: September 25, 2019

¹Assistant Professor and Associate Professor, Department of Biosystem Engineering, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran

*Corresponding Author: Email: h.nalabndi@tabrizu.ac.ir

Introduction: Garlic "*Allium Sativum L.*" is a relatively perishable product. Approximately 30% of this product is lost annually in the post-harvest stages due to the lack of suitable storage and convenient transportation facilities. It is rich in medicinal and food nutrition and is widely cultivated throughout the world, including Iran. Recently, dried garlic has been used as one of the ingredients and additives of cooked and semi-finished foods such as sauces and soups. Changing the pattern of consumption from the fresh garlic to the dried one has increased the demand for this product. Understanding the moisture and heat transfer mechanism during the drying is crucial to enhance the quality and reduce energy consumption. The quality changes of a dried product are functions of drying condition as like; drying air temperature, drying time, and the warmth of the product surface. By applying higher drying air temperature, shorter drying time and also in parallel with it, slightly lower energy consumption is achievable; however, it will result in higher quality changes. The objective of this study was developing a simulator for drying with variable air temperature to reduce the drying time and lowering energy consumption as well as maintaining the dried product quality at its highest possible level.

Materials and methods: In the present study, the mathematical equations of mass and heat transfer during convection drying of garlic have been developed. The following assumptions were used to develop the mathematical model; 3-D transfer of heat and moisture is accrued; the air distribution is uniform inside the dryer; the distribution of initial moisture and temperature throughout the material is uniform; the product shrinkage is negligible during the drying process; heat transfer to the product through radiation is negligible and conductive heat transfer between trays and product was not included. Third type boundary condition was applied to all air-product interfaces and the equations were solved on three-dimensional geometry of garlic slices simultaneously with the Finite Element Method (FEM) using COMSOL MULTIPHYSICS 3.5 software under different drying air temperature. The temperature and moisture profiles were estimated in a garlic slice by the developed simulator. Mesh independence study was performed to establish an optimal mesh density that gives a solution with acceptable accuracy and four meshes, each containing 1430, 3364, 4362 and 12977 elements were used. The results indicated that mesh independence of numerical solution was obtained when the number of elements was above 4362. The developed simulator was validated by experimental study under different drying temperature conditions; 50, 60 and 70 °C; and different thicknesses of the samples; 2, 3 and 4 mm. At the same time, the engineering and qualitative properties associated with thermal processing of garlic slices were studied, such as the effective moisture diffusivity, apparent density and dry material density, and color changes of the samples. Eventually, by using the simulator, the issue of reducing energy consumption by reducing the total time of the drying along with preserving the apparent quality of the product was examined based on the output data from the simulator through the use of the variable temperature of hot air during the process and in different thicknesses.

Results and discussion: The developed simulator was able to accurately predict changes in the moisture ratio at different temperatures of the hot air and the different thicknesses of the garlic product. The average error in estimating the moisture content at the hot air temperature of 50, 60 and 70 °C was 11%, 6%, and 34%, respectively. Based on the experimental results, the change in hot air temperature and samples thickness did not have a significant effect on the apparent density but affected the final color of garlic slices. The surface temperature of samples had a significant influence on the quality of the dried product; furthermore, the minimum and maximum changes in the color of the samples were observed when the surface temperature of slices was 50°C and 70°C, respectively. The use of drying air at 50 °C and 2 mm thick slices maintains the lightness of the samples and prevents the color changes of the samples during drying.

However, the use of hot air at a lower temperature can prolong the drying time. Accordingly, by the developed simulator using the drying air with variable temperature for drying garlic slices was evaluated and the predicted surface temperature of sample was monitored during the drying process with the air temperature of 70°C and by the time that the surface temperature of sample was increased and reached 50°C, the hot air temperature was reduced and the drying process lasted from 30 minutes, with drying air at 50 °C. Despite the use of hot air with variable temperature, no noticeable changes were observed during drying compared to drying with an air temperature of 70 °C and drying time was prolonged only 3 minutes. At the same time, during the 25% of the total drying time the drying air with 20 °C lower than the usual has been used, which will reduce energy consumption. The results showed that by using this method, it is possible to dry the garlic slices in a shorter time. Also, by restricting the temperature rise of the product in the final stages of the process, the color change of the samples is prevented. On the other hand, due to the use of the variable temperature of the drying air, the drying time decreased about 43 minutes as compared with the drying of the sample with the air temperature of 50 °C, which had a significant effect on reducing energy consumption. Similar results were obtained in drying garlic slices with a thickness of 3 mm.

Conclusion: To achieve a high-quality dry product, more transparent color and reduced energy consumption by reducing the drying time, it was necessary to use slices with lower thickness and hot air with variable temperature during the process based on the developed output-model. The proper time to change the air temperature during the drying process was determined. The developed simulator can predict the items mentioned above, with high precision.

Keywords: Color, Drying, Garlic, Quality, Simulation, Variable air temperature