

تحلیل فرآیند خنک‌سازی با خلا در قارچ خوراکی: بررسی تأثیر عوامل مختلف بر انتقال جرم

طهورا امین پور، عباس رشیدی*

گروه مهندسی شیمی دانشکده مهندسی و فناوری دانشگاه مازندران، بابلسر، ایران

اطلاعات مقاله

چکیده



واژه‌های کلیدی:

خنک‌سازی با خلا،
اتلاف جرم،
ضریب انتقال جرم،
قارچ خوراکی

Keywords:

Vacuum cooling,
Mass loss,
Mass transfer coefficient,
Edible mushroom

دریافت: ۱۴۰۳/۰۸/۲۰

پذیرش: ۱۴۰۴/۰۱/۲۰

نوع مقاله: علمی - پژوهشی

در این تحقیق، خنک‌سازی قارچ خوراکی با استفاده از فرآیند خنک‌سازی با خلا مورد بررسی قرار گرفت. سامانه مورد استفاده متشکل از محفظه خلا، پمپ خلا، و اندازه‌گیرهای فشار و دما بود. آزمایش‌ها با سه عامل نرخ پمپاژ (در محدوده ۳ تا ۱۵ متر مکعب بر ساعت)، اندازه و رطوبت متفاوت انجام شد و سیستم آزمایش مجهز به پایش فشار محفظه و دمای محصول بود. با استفاده از نتایج آزمایش‌ها و روابط حاکم بر پدیده انتقال جرم، ضریب انتقال جرم نیز محاسبه شد. نتایج نشان داد که با کاهش فشار محفظه، دمای محصول کاهش و با افزایش نرخ پمپاژ، سرعت خنک‌سازی افزایش می‌یابد. همچنین، مشاهده شد رطوبت و اندازه محصول از عوامل مهم برای زمان خنک‌سازی است و هرچه مقدار رطوبت بیشتر و اندازه محصول بزرگتر باشد، زمان مصرفی برای خنک‌سازی بیشتر است. همچنین با استفاده از نتایج تجربی حاصل، محاسبات تعیین ضریب انتقال جرم صورت گرفت و ضریب انتقال جرم در بازه ۰/۰۲ تا ۰/۰۶ میلی‌گرم بر "میلی‌متر جیوه ثانیه" بدست آمد. ضریب انتقال جرم با دمای محصول رابطه مستقیمی نشان داد به این صورت که هرچه دمای محصول کاهش یابد، ضریب انتقال جرم نیز کاهش می‌یابد و بالعکس. ضریب انتقال جرم حجمی نیز محاسبه شد که در بازه $10^{-4} \times 1/6$ تا $10^{-4} \times 12/7$ کیلوگرم بر "متر مکعب میلی‌متر جیوه ثانیه" بدست آمد. نتایج نشان داد که میزان انتقال جرم و نیز ضریب آن در طول فرآیند خنک‌شدن به صورت تدریجی تغییر می‌کنند و از آنجائیکه انتقال جرم از کل حجم ماده صورت می‌گیرد، این نحوه تغییرات را می‌توان ناشی از انتقال جرم همگن از کل حجم تعبیر کرد؛ از طرفی، کاهش دما وابسته به این انتقال جرم است و لذا می‌توان نتیجه گرفت که تغییرات دما در نقاط مختلف در حجم ماده صورت می‌گیرد و سرد شدن بیش از حد در سطح محصول، که عیب برخی از روش‌های خنک‌سازی است، روی نمی‌دهد.

*E-mail: rashidi@umz.ac.ir

*عهده‌دار مکاتبات

رجاع: طهورا امین پور، عباس رشیدی، تحلیل فرآیند خنک‌سازی با خلا در قارچ خوراکی: بررسی تأثیر عوامل مختلف بر انتقال جرم، نشریه شیمی و مهندسی شیمی ایران، (۴۴): ۸۳ تا ۸۹ (۱۴۰۴).

مقدمه

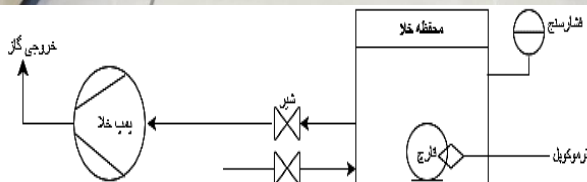
در سال‌های اخیر مصرف میوه‌جات و سبزیجات و نیز نقل و انتقال آنها در جهان افزایش یافته‌است و حفظ تازگی که عمدتاً وابسته به سرعت تنفس می‌باشد، به یک مشکل بزرگ تبدیل شده‌است. از فرایند خنک‌سازی می‌توان برای محصولاتی که قابلیت نگهداری کوتاهی دارند مانند سبزیجات و قارچ‌ها و میوه‌جات و انواع محصولات گوشتی استفاده کرد. خنک‌سازی به حذف سریع گرمای مزرعه از محصولات و میوه‌جات تازه برداشت‌شده کمک می‌کند. محصولات کشاورزی پس از برداشت به فرایندهای فیزیولوژیکی خود ادامه می‌دهند و خنک‌سازی در جهت حفظ کیفیت عمل می‌کند. همچنین خنک کردن محصولات می‌تواند به کنترل رشد میکروارگانیسم‌ها و افزایش سلامت محصولات کمک کند و سبب طولانی‌تر شدن عمر مفید محصولات شود [۱-۶]. در موضوع افزایش ماندگاری سبزیجات، کاهش میکروب‌های مؤثر در کیفیت نیز از اقدامات بسیار مهم است که تحقیقات ارزشمندی در این زمینه نیز صورت گرفته‌اند [۷].

خنک کردن با خلا برای محصولات متخلخل و دارای رطوبت و نسبت سطح به حجم بالا، بسیار مفید گزارش شده است [۸-۱۱]. از طرفی، از دست دادن رطوبت نباید اثر منفی قابل توجه بر کیفیت محصول بگذارد. ضمن اینکه از دست دادن آب، مستقیماً با ارزش پولی محصول در ارتباط است. روش‌های مختلفی برای جبران هدررفت آب پیشنهاد شده است، از جمله خیس کردن محصول قبل از خنک‌شدن و نصب آب‌پاش در داخل محفظه خلا [۱۲].

نتایج بررسی تحقیقات قبلی نشان داد که خنک‌سازی خلا برای محصولاتی مانند کاهو و کلم و سبزیجات برگ‌دار که نسبت سطح به حجم بالایی دارند [۱۳] و همچنین محصولاتی مانند قارچ‌ها که رطوبت و تخلخل فراوان دارند مناسب است [۱۰].

اوزتورک (۲۰۲۱) نشان داد که بهترین دما برای بسته‌بندی در فشارهای خلا بالا، در حدود ۵ درجه سلسیوس است و دماهای پایین‌تر سبب تخریب و یخ‌زدگی بافت کاهو می‌شود و همچنین مشاهده کرد بهترین فشار جهت خنک‌سازی خلا و رسیدن به دمای ۵ درجه سلسیوس، ۰/۷ کیلوپاسکال است و در این فشار، خنک‌سازی حدود ۱۱/۵ دقیقه سریع‌تر از حالت عادی انجام می‌شود [۱۳].

در تحقیقی دیگر تائو و همکاران (۲۰۰۶) آزمایش‌هایی جهت ارزیابی اثرهای شرایط مختلف نگهداری بر کاهش وزن و میزان تنفس و نفوذپذیری غشا و تغییر رنگ قارچ‌های سفید انجام دادند. آنها قارچ‌ها را به مدت ۱۵ روز در سه شرایط مختلف اتاق سرد و اتاق هیپوباریک و بسته‌بندی با اتمسفر اصلاح‌شده نگهداری کردند. نتایج نشان داد که حالت بسته‌بندی با اتمسفر اصلاح‌شده بهترین روش است زیرا کمترین میزان کاهش وزن (کمتر از یک درصد)، کمترین سرعت تنفس و نفوذپذیری غشا و کمترین میزان تغییر رنگ قارچ رخ داد، در حالی که در شرایط دیگر، کاهش وزن قارچ‌ها



شکل ۱- سیستم آزمایش (بالا: تصویر واقعی، پایین: شماتیک)

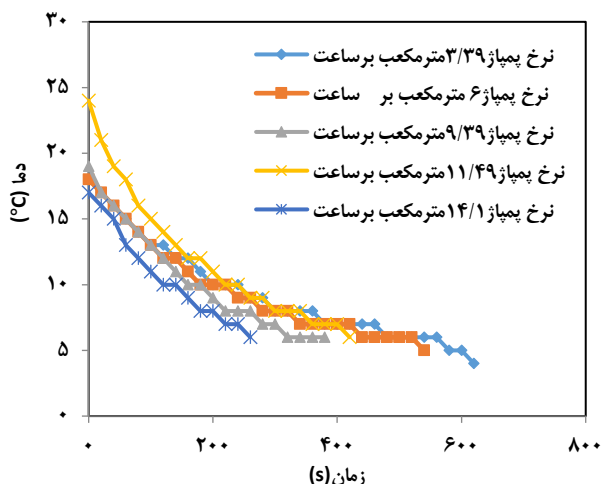
حدود ۱۰/۱۲ و ۱۴/۷۸ درصد بود. بسته‌بندی با اتمسفر اصلاح‌شده می‌تواند به طور موثری طول عمر قارچ‌ها را نسبت به بقیه روش‌ها افزایش دهد [۱۴].

هدف از این تحقیق، بررسی پارامترهای مؤثر بر خنک‌سازی قارچ تحت خلا و بررسی ضریب انتقال جرم در طی خنک‌سازی تحت خلا است.

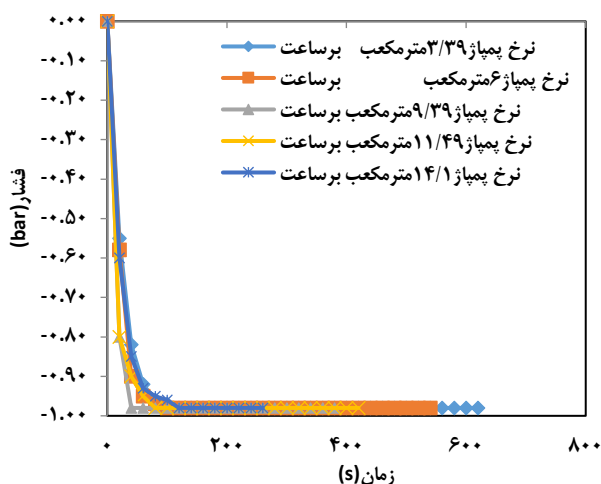
مواد و روش‌ها

مجموعه آزمایشی شامل محفظه خلا دارای بخش شفاف با قابلیت مشاهده داخل محفظه، سیستم نمایش و کنترل فشار داخل محفظه، و سیستم نمایش دمای نمونه بوده‌است. محفظه استوانه‌ای از جنس فولاد کربنی با پوشش رنگ کوره‌ای و با شعاع ۱۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۲۸ سانتی‌متر (حجم حدود ۸ لیتر) بود و نرخ پمپاژ توسط پمپ‌های خلا، در مقادیر مختلف در محدوده ۱۵-۳ مترمکعب بر ساعت مورد آزمایش قرار گرفت. دمای نمونه توسط یک ترموکوپل نوع K اندازه‌گیری شد. حسگر دما در مرکز نمونه قرار داده شد. برای جلوگیری از یخ‌زدگی نمونه، حداقل فشار محفظه، در مقدار ۶/۵ میلی‌بار (۶۰۰ پاسکال) تنظیم شد. تصویری از این سیستم در شکل ۱ ارائه شده است.

ماده تحت بررسی در این تحقیق، قارچ دکمه‌ای خوراکی بود. متوسط قطر کلاهک، قطر ساقه و ارتفاع کل نمونه‌ها به ترتیب ۱۴، ۴۱ و ۳۹ میلی‌متر بوده‌است. در بررسی تأثیر اندازه قارچ، از دو قارچ با جرم‌های ۱۰/۸۱ و ۲۶/۴۱ گرم استفاده شد. پس از جاگذاری حسگر دما در مرکز کلاهک نمونه، قارچ در محفظه استوانه‌ای قرار داده می‌شد و با شروع مکش هوا از داخل محفظه توسط پمپ خلا، فشار محفظه و دمای محصول تا رسیدن به دمای نهایی پایش می‌شد.



شکل ۲- تغییرات دمای نمونه برحسب زمان با نرخ پمپاژ متفاوت



شکل ۳- تغییرات فشار محفظه برحسب زمان با نرخ پمپاژ متفاوت

طبق نتایج شکل‌های ۲ و ۳، هرچه نرخ پمپاژ بیشتر باشد، فشار محفظه با سرعت بیشتری کاهش می‌یابد و سرعت تبخیر زیاد شده که سبب افزایش سرعت خنک‌سازی می‌شود و دمای محصول با شیب تندتری کم می‌شود و این روند تا فشار ۶۰۰ پاسکال (-۰/۹۸ بار) ادامه دارد و دمای نهایی محصول تا حدود ۵-۶ درجه سلسیوس می‌رسد. به عبارتی سرعت پمپاژ بالا، وسیله‌ای برای کاهش دمای نهایی محصول در زمان کوتاه‌تر است. کاهش فشار محفظه در حین خنک‌سازی به این صورت عمل می‌کند که در ثانیه‌های اول فشار با شیب تندی کاهش می‌یابد و سپس روند تغییرات بسیار کند می‌شود. در مرحله شیب تند، هنوز نرخ تبخیر بسیار کم است و ظرفیت پمپاژ عمدتاً صرف تخلیه هوای درون محفظه می‌شود ولی با کاهش فشار، نرخ تبخیر افزایش می‌یابد و در مرحله فشار تقریباً ثابت، بین نرخ تبخیر و نرخ پمپاژ موازنه برقرار می‌شود. تغییرات دمای محصول و فشار محفظه با زمان با اندازه متفاوت محصول در شکل‌های ۴ و ۵ نشان داده شده‌اند.

برای بررسی تأثیر مقدار رطوبت اولیه، از قارچ‌های با مشخصات یکسان استفاده شد و تنها تفاوت، در مقدار درصد وزنی آب در نمونه قبل از خنک‌کردن بود. افزایش رطوبت با قراردادن قارچ در آب به مدت ۲ ساعت انجام شد. آزمایش‌ها با دو مقدار ۸۸ و ۹۰ درصد وزنی آب انجام شدند. مقدار درصد وزنی، با تعیین اختلاف وزن، قبل و بعد از خشک‌کردن در آن به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۷۰ درجه سلسیوس مشخص گردید.

در بخش محاسبات، محاسبات مربوط به تعیین ضریب انتقال جرم، براساس روابط تشریح‌شده و با کدنویسی در نرم‌افزار متلب نسخه 2024a صورت گرفت.

تئوری و محاسبه

در این تحقیق فرض شده است:

۱- دما، فشار و رطوبت در کل محصول یکنواخت تغییر می‌کند.

۲- انتقال جرم و حرارت در محصول متقارن است.

محاسبات ضریب انتقال جرم براساس روابط زیر انجام شد [۱۵-۱۷]:

$$\left(\frac{dm_i}{dt}\right) = kS \cdot \Delta p_i \quad (1)$$

به عبارت دیگر:

$$kS = (dm/dt) / (P - P_{sat}) \quad (2)$$

که در آن پارامتر kS ضریب انتقال جرم ($\text{kg}/\text{mmHg s}$)، P فشار محفظه (mmHg) و P_{sat} فشار اشباع (mmHg) است.

عبارت dm/dt براساس تغییرات جرم در بازه زمانی معین براساس نتایج آزمایش‌ها محاسبه شد:

$$\Delta m = \frac{m \cdot c \cdot \Delta T}{\Delta H} \quad (3)$$

$$\Delta T = T_1 - T_{t+\Delta t} \quad (4)$$

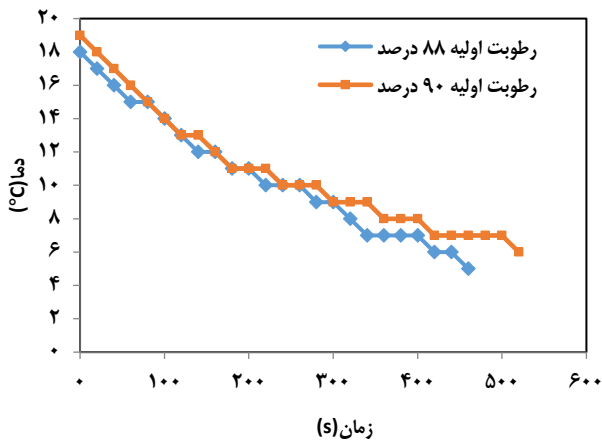
که در آن Δm جرم آب تبخیر شده (kg)، m جرم نمونه (kg)، c ظرفیت گرمایی نمونه ($\text{kJ}/\text{kg}^\circ\text{C}$)، ΔH آنتالپی تبخیر (kJ/kg) و ΔT اختلاف دما ($^\circ\text{C}$) در هر گام زمانی است.

گرمای نهان تبخیر و فشار بخار اشباع آب با دما در طول فرآیند تغییر می‌کنند و براساس روابط تجربی موجود محاسبه شدند [۱۰].

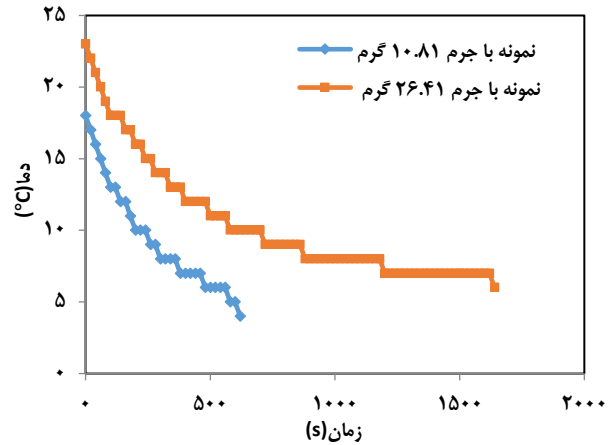
نتایج و بحث

تغییرات دمای محصول و فشار محفظه تحت تأثیر تغییر پارامترها

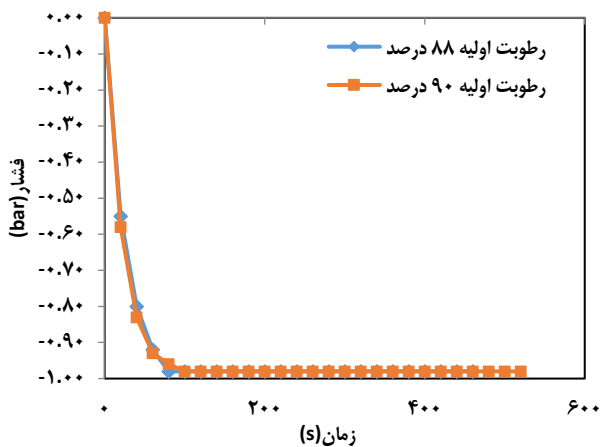
فرآیند خنک‌سازی قارچ خوراکی با بررسی سه پارامتر "نرخ پمپاژ" و "رطوبت اولیه" و "اندازه محصول" انجام شد. نمودارهای تغییرات دمای نمونه و فشار محفظه با نرخ پمپاژ متفاوت در شکل‌های ۲ و ۳ نشان داده شده‌اند.



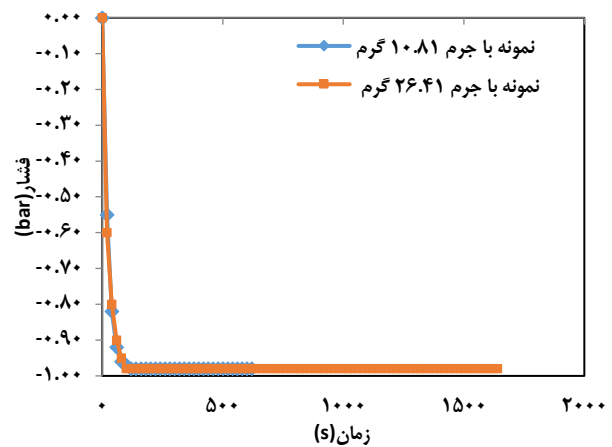
شکل ۶- تغییرات دمای نمونه بر حسب زمان در رطوبت اولیه متفاوت



شکل ۴- تغییرات دمای نمونه بر حسب زمان با تغییر اندازه قارچ



شکل ۷- تغییرات فشار محفظه بر حسب زمان در رطوبت اولیه متفاوت



شکل ۵- تغییرات فشار محفظه بر حسب زمان با تغییر اندازه قارچ

مورد اشاره، به نظر می‌رسد نسبت نرخ پمپاژ به حجم محفظه در تحقیق حاضر بیشتر از تحقیق مزبور بوده است و همین مورد نیز دلیل کندی تغییرات دما در زمان‌های اولیه تحقیق *دای* و *همکاران* نسبت به تحقیق حاضر می‌باشد. آنها در توجیه نتیجه خود اظهار داشتند در ابتدای فرآیند، دما به آرامی کاهش می‌یابد زیرا فشار در محفظه خلاء برای رسیدن به نقطه اشباع کافی نبود، که این توجیه، تاییدکننده توضیحات فوق می‌باشد.

تغییرات جرم نمونه

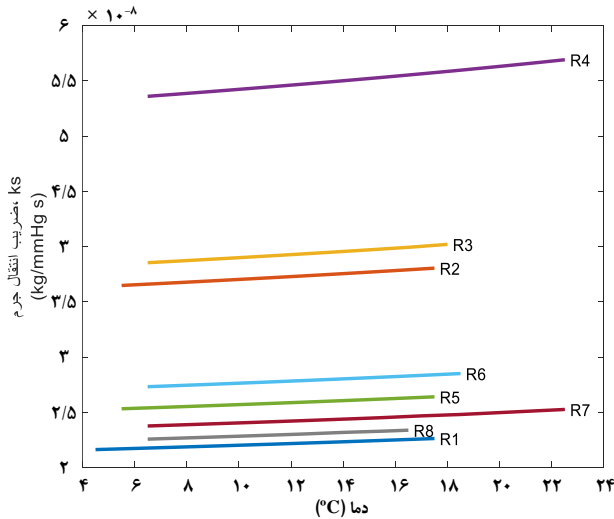
تغییرات جرم محصول در آزمایش‌های مختلف، در شکل ۸ نشان داده شده است.

خنک‌سازی تحت خلاء بر پایه اصل تبخیر است که همیشه با اتلاف جرم همراه است. طبق شکل ۸ مشاهده می‌شود هم‌زمان با کاهش دمای محصول، جرم محصول نیز کم می‌شود. هنگامی که فشار به نقطه اشباع کاهش یابد، تبخیر در نمونه رخ می‌دهد و ضمن کاهش دما، اتلاف جرم در نمونه افزایش می‌یابد. آنچه که براساس مکانیزم حاکم بر فرآیند خنک‌سازی با خلاء قابل درک است

همان‌طور که در شکل‌های ۴ و ۵ مشاهده می‌شود هرچه قارچ بزرگ‌تر باشد، فشار محفظه در زمان بیشتری کاهش می‌یابد زیرا قارچ بزرگ‌تر، سطح تماس کمتری نسبت به حجم خود دارد و تبخیر در آن کندتر صورت می‌گیرد و زمان بیشتری صرف خنک‌سازی می‌شود، ضمن اینکه برای جرم بیشتر، میزان تبخیر بیشتری برای رسیدن به دمایی مشخص، نیاز است.

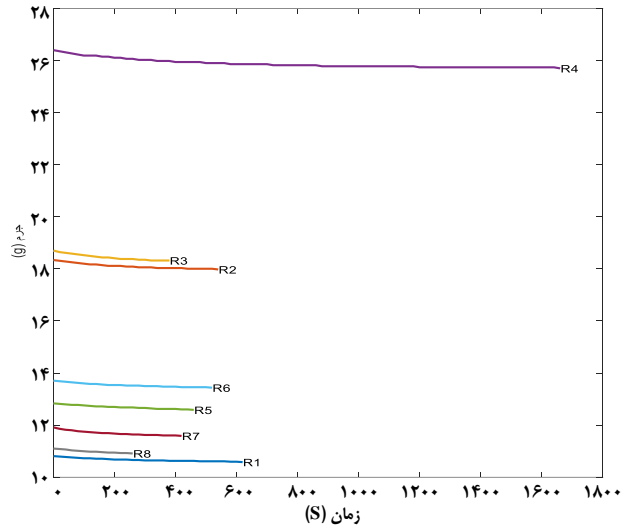
یکی دیگر از عوامل موثر در خنک‌سازی، مقدار رطوبت اولیه است. در این بررسی دو قارچ با درصد وزنی آب ۸۸ و ۹۰ مورد آزمایش قرار گرفتند و نتایج تغییرات دمای محصول و فشار محفظه با زمان در رطوبت اولیه متفاوت در شکل‌های ۶ و ۷ ارائه شده است. طبق نتایج، ممکن است در ابتدا قارچ با رطوبت بالاتر، سرعت تبخیر بیشتری داشته باشد ولی به دلیل آب اضافی، در ادامه فرآیند، تبخیر کند، و زمان بیشتری صرف خنک‌سازی می‌شود.

روند تغییرات دما و فشار در شکل‌های ۲ تا ۷ مشابه روند تغییرات در بررسی‌های *دای* و *همکاران* [۱۰] می‌باشد با این تفاوت که در آزمایش‌های تحقیق حاضر، فشار با شیب تندتری کاهش یافت که با توجه به عدم گزارش حجم محفظه و نرخ پمپاژ در تحقیق



شکل ۹- تغییرات ضریب انتقال جرم

R₁: آزمایش با نرخ پمپاژ ۳/۳۹ متر مکعب بر ساعت، R₂: آزمایش با نرخ پمپاژ ۳/۳۹ متر مکعب بر ساعت، R₃: آزمایش با نرخ پمپاژ ۹/۳۹ متر مکعب بر ساعت، R₄: آزمایش با قارچ بزرگ (۲۶/۴۱ گرم) R₅: آزمایش با رطوبت اولیه ۸۸ درصد، R₆: آزمایش با رطوبت اولیه ۹۰ درصد R₇: آزمایش با نرخ پمپاژ ۱۱/۴۹ متر مکعب بر ساعت، R₈: آزمایش با نرخ پمپاژ ۱۴/۱ متر مکعب بر ساعت



شکل ۸- تغییرات جرم نمونه

R₁: آزمایش با نرخ پمپاژ ۳/۳۹ متر مکعب بر ساعت، R₂: آزمایش با نرخ پمپاژ ۳/۳۹ متر مکعب بر ساعت، R₃: آزمایش با نرخ پمپاژ ۹/۳۹ متر مکعب بر ساعت، R₄: آزمایش با قارچ بزرگ (۲۶/۴۱ گرم) R₅: آزمایش با رطوبت اولیه ۸۸ درصد، R₆: آزمایش با رطوبت اولیه ۹۰ درصد R₇: آزمایش با نرخ پمپاژ ۱۱/۴۹ متر مکعب بر ساعت، R₈: آزمایش با نرخ پمپاژ ۱۴/۱ متر مکعب بر ساعت

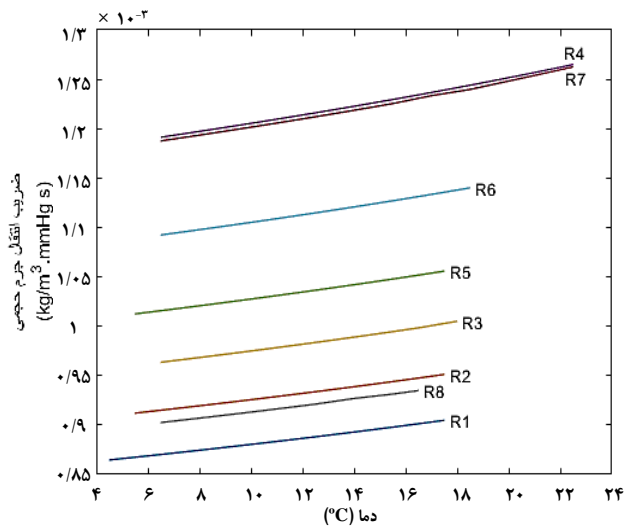
این است که برای رساندن دمای جرم معینی از قارچ به دمایی مشخص، باید مقدار معینی از آب تبخیر شود که در آزمایشات این تحقیق، طبق نتایج گزارش شده در شکل ۸، حدود ۱/۷ تا ۲/۸ درصد از جرم اولیه را شامل می‌شود. هرچه جرم قارچ و دمای اولیه بیشتر باشد، اتلاف جرم، یعنی مقدار آب تبخیر شده، بیشتر می‌شود. نرخ پمپاژ، اثر مستقیم بر زمان رسیدن به دمای نهایی دارد زیرا کاهش سریعتر فشار، نرخ تبخیر را افزایش می‌دهد، ولی به نظر نمی‌رسد بر میزان اتلاف جرم اثر داشته باشد، ادعایی که گائو و همکاران (۲۰۲۵) مطرح کرده‌اند [۱۶].

ضریب انتقال جرم

پس از انجام آزمایش‌ها، محاسبات مربوط به تعیین ضریب انتقال جرم با کدنویسی در نرم‌افزار متلب نسخه 2024a صورت گرفت. نتایج طبق شکل‌های ۹ و ۱۰ ارائه گردید.

به‌طور کلی در طول خنک‌سازی با خلا، حالت اصلی انتقال حرارت از طریق تبخیر رطوبت محصول است که با انتقال جرم همراه است. طبق شکل ۹، ضریب انتقال جرم در بازه 2×10^{-8} تا 6×10^{-8} کیلوگرم بر "میلی‌تر جیوه ثانیه" بدست‌آمد. مشاهده شد هرچه دمای محصول کاهش یابد، ضریب انتقال جرم نیز کاهش می‌یابد و همچنین مقدار ضریب انتقال جرم رابطه مستقیم با جرم نمونه نشان داد، یعنی با مقایسه شکل‌های ۸ و ۹ مشخص است که در دمای معین، هرچه جرم نمونه بیشتر باشد مقدار ضریب انتقال جرم نیز بیشتر است.

در خنک‌سازی با خلا، تبخیر آب با جابجایی اجباری صورت می‌گیرد و نرخ تبخیر به خواص مایع و شرایط محیطی مانند دما، سرعت، رطوبت و تلاطم هوا بستگی دارد؛ در این زمینه پوس و وارجو (۲۰۲۰) نشان دادند



شکل ۱۰- تغییرات ضریب انتقال جرم حجمی

R₁: آزمایش با نرخ پمپاژ ۳/۳۹ متر مکعب بر ساعت، R₂: آزمایش با نرخ پمپاژ ۳/۳۹ متر مکعب بر ساعت، R₃: آزمایش با نرخ پمپاژ ۹/۳۹ متر مکعب بر ساعت، R₄: آزمایش با قارچ بزرگ (۲۶/۴۱ گرم) R₅: آزمایش با رطوبت اولیه ۸۸ درصد، R₆: آزمایش با رطوبت اولیه ۹۰ درصد R₇: آزمایش با نرخ پمپاژ ۱۱/۴۹ متر مکعب بر ساعت، R₈: آزمایش با نرخ پمپاژ ۱۴/۱ متر مکعب بر ساعت

که در مورد آب بدون حرارت، سرعت تبخیر به‌صورت تابعی از سرعت هوا، دمای هوا، سطح تبخیر و اختلاف فشار جزئی افزایش می‌یابد و مشابه نرخ تبخیر، مقدار ضریب انتقال جرم با افزایش سرعت هوا افزایش می‌یابد [۱۷]. عدد شروود نیز به‌صورت تابعی از اعداد رینولدز و اشمیت می‌باشد. در طول فرآیند خنک‌سازی با خلا، با کاهش فشار و دما، فشار اشباع در سطح مایع کاهش می‌یابد لذا نیروی محرکه غلظتی نیز کاهش می‌یابد؛ از طرفی با کاهش ضریب نفوذ و عدد رینولدز، طبق نتایج ارائه شده در شکل ۹، ضریب انتقال جرم نیز کاهش می‌یابد. تغییرات تدریجی

تحت خنک‌سازی قرارگرفت و مشاهده شد هرچه نرخ پمپاژ بالاتر باشد، فشار نیز با سرعت بیشتری کاهش می‌یابد و زمان مصرفی برای خنک‌سازی کم‌تر است. در بررسی‌های تأثیر اندازه و رطوبت اولیه مشاهده شد هرچه اندازه نمونه بزرگ‌تر و رطوبت اولیه بیشتر باشد، زمان بیشتری صرف خنک‌سازی می‌شود. با بررسی ضریب انتقال جرم، ضریب انتقال جرم در بازه 2×10^{-8} تا 6×10^{-8} کیلوگرم بر "میلی‌مترجیوه ثانیه" بدست آمد؛ ضریب انتقال جرم با دمای محصول رابطه مستقیمی نشان داد به این صورت که هرچه دمای محصول کاهش یابد، ضریب انتقال جرم نیز کاهش می‌یابد و بالعکس. ضریب انتقال جرم حجمی نیز محاسبه شد که در بازه $8/6 \times 10^{-4}$ تا $12/7 \times 10^{-4}$ کیلوگرم بر "مترمکعب میلی‌مترجیوه ثانیه" بدست‌آمد.

ضریب انتقال جرم در طول خنک‌سازی خلاء، بیانگر همگنی پدیده انتقال جرم و در نتیجه تغییرات تدریجی دما در حجم قارچ در طول خنک‌سازی خلاء است، که به جلوگیری از سرد شدن بیش از حد سطح محصول کمک می‌کند. هم‌چنین ضریب انتقال جرم حجمی نیز محاسبه شد که در بازه $8/6 \times 10^{-4}$ تا $12/7 \times 10^{-4}$ کیلوگرم بر "مترمکعب میلی‌مترجیوه ثانیه" بدست‌آمد، این مقدار در مطالعه منتشرشده توسط دای و همکاران (۲۰۲۲) حدود $1/0 \times 10^{-4}$ کیلوگرم بر "مترمکعب میلی‌مترجیوه ثانیه" گزارش شد [۱۰].

نتیجه‌گیری

در این تحقیق به بررسی خنک‌سازی قارچ خوراکی با خلاء پرداخته شد. محصول موردنظر (قارچ خوراکی) با نرخ پمپاژ متفاوت

منابع

- [1] Huang Z., Kan A., Lu J., Li F., Wang T., [Numerical Simulation and Experimental Study of Heat and Mass Transfer in Cylinder-Like Vegetables During Vacuum Cooling](#). *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, **68**: 102607 (2021).
- [2] Gross K.C., Wang C.Y., Saltveit M.E., [The Commercial Storage of Fruits, Vegetables, and Florist and Nursery Stocks](#). United States Department of Agriculture, Agricultural Research Service (2016).
- [3] Lomeiko O., Yefimenko L., Tarasenko V., [Vacuum Cooling Technology for Pre-Cooling of Cherry Fruits](#), In: Nadykto, V. (eds) *Modern Development Paths of Agricultural Production: Trends and Innovations*. Springer. 281-288 (2019).
- [4] Ajani C.K., Zhu Z., Sun D.W., [Shrinkage During Vacuum Cooling of Porous Foods: Conjugate Mechanistic Modelling and Experimental Validation](#). *Journal of Food Engineering*, **337**: 111220 (2023).
- [5] Desmond E.M., Kenny T.A., Ward P., [The Effect of Injection Level and Cooling Method on the Quality of Cooked Ham Joints](#). *Meat Science*, **60(3)**: 271-277 (2002).
- [6] Sun D.W., Wang L., [Heat Transfer Characteristics of Cooked Meats Using Different Cooling Methods](#). *International Journal of Refrigeration*, **23(7)**: 508-516 (2000).
- [7] شعبانی، عرفان؛ شهاب لواسانی، علیرضا؛ حبیبیان، محمود؛ اسحاقی، محمدرضا؛ موحد، سارا؛ ارزیابی اثر پلاسمای سرد بر ماندگاری قارچ صدفی، *نشریه شیمی و مهندسی شیمی ایران*، **۴۲(۴)**: ۲۵۱ تا ۲۶۰ (۱۴۰۲).
- [8] Sun D.W., Zheng L., [Vacuum Cooling Technology for the Agri-Food Industry: Past, Present and Future](#). *Journal of Food Engineering*, **77(2)**: 203-214 (2006).
- [9] Burton K.S., Frost C.E., Atkey P.T., [Effect of Vacuum Cooling on Mushroom Browning](#). *International Journal of Food Science & Technology*, **22(6)**: 599-606 (1987).
- [10] Dai B., Kan A., Li F., Gao J., Yi B., Cao D., [A Cross-Regional Thermo-Hydro Transport Model for Vacuum Pre-Cooling](#). *Journal of Food Engineering*, **329**: 111066 (2022).

- [11] Pu H., Yu J., Liu Z., Paliwal J., Sun D.W., [Evaluation of the Effects of Vacuum Cooling on Moisture Contents, Colour and Texture of Mushroom \(*Agaricus Bisporus*\) Using Hyperspectral Imaging Method](#). *Microchemical Journal*, **190**: 108653 (2023).
- [12] Drummond L., Zheng L., Sun D.-W., “[Chapter 26 - Vacuum Cooling of Foods](#)”, Editor(s): Da-Wen Sun, *Emerging Technologies for Food Processing (Second Edition)*, Academic Press (2014).
- [13] Mutlu Ozturk H., [Energy and Exergy Analyses of Vacuum Cooling as Experimental Assessment: Case Study for Boiled Cauliflower \(*Brassica Oleracea* Var\)](#). *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, **145(3)**: 1335-1352 (2021).
- [14] Tao F., Zhang M., Hangqing Y., Jincai S., [Effects of Different Storage Conditions on Chemical and Physical Properties of white Mushrooms After Vacuum Cooling](#). *Journal of Food Engineering*, **77(3)**: 545-549 (2006).
- [15] Huber E., Laurindo J.B., [Determination of Mass Transfer Coefficients During the Vacuum Cooling of Pre-Cooked Meat Cuts](#). *International Journal of Food Properties*, **9(2)**: 287-298 (2006).
- [16] Gao H., Zhu Z., Sun D.-W., [Mathematical Modelling of Vacuum Cooling of Leafy Vegetables Using Bidirectional Conjugate Model Combining Heat and Mass Transfer with Leaf Structural Deformation](#). *Applied Thermal Engineering*, **258(Part C)**: 124625 (2025).
- [17] Poós T., Varju E., [Mass Transfer Coefficient for Water Evaporation by Theoretical and Empirical Correlations](#). *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **153**: 119500 (2020).