مجله علوم تغذیه و صنایع غذایی ایران
سال چهاردهم، شماره ۴، زمستان ۱۳۹۸، صفحات ۴۴-۳۷

بررسی اثر میدان الکترواستاتیک بر پارامترهای انجماد و ریزساختار قارچ دکمه‌ای (*Agaricus bisporus*)

سعیده فلاح جوشقانی[۱]، ناصر همدمی[۲]

۱- دانشجو دکترای علوم و صنایع غذایی، دانشکده مهندسی کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان، ایران

۲- نویسنده مسئول: دانشیار گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده مهندسی کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان، ایران، پست الکترونیکی: hamdami@cc.iut.ac.ir

تاریخ دریافت: ۹۷/۹/۲۱ تاریخ پذیرش: ۹۸/۱/۲۳

چکیده

سابقه و هدف: انجماد تحت میدان الکترواستاتیک یکی از روش‌های جدید انجماد به‌منظور بهبود کیفیت محصولات منجمد از طریق کنترل فرآیند هسته‌زایی است. هدف از این مطالعه بررسی اثر انجماد تحت میدان الکترواستاتیک بر پارامترهای انجماد و ریزساختار قارچ دکمه ای به منظور بهبود کیفیت قارچ پس از رفع انجماد بود.

مواد و روش‌ها: نمونه‌های قارچ در دمای ۳۰- درجه سلسیوس و تحت میدان الکترواستاتیک با ولتاژهای ۰/۰، ۴/۵، ۹/۰ و ۱۳/۵ کیلو ولت منجمد شدند و دمای مرکز نمونه‌ها طی انجماد ثبت گردید. به منظور ارزیابی ریزساختار قارچ از روش میکروسکوپ نوری استفاده گردید.

یافته‌ها: ارزیابی پارامترهای انجماد نشان داد که اعمال میدان الکتریکی طی انجماد باعث افزایش دمای هسته‌زایی و مدت زمان تغییر فاز می‌شود. دمای هسته‌زایی از ۶/۹- درجه سلسیوس در حالت بدون میدان به ترتیب به ۴/۳- و ۵/۰- درجه سلسیوس در حضور میدان الکتریکی با ولتاژ ۴/۵ و ۹/۰ کیلو ولت افزایش یافت درحالی که با افزایش بیشتر ولتاژ به ۱۳/۵ کیلو ولت دمای هسته‌زایی مجددا کاهش پیدا کرد. همچنین اعمال میدان الکتریکی منجر به کاهش آسیب به ریزساختار قارچ طی انجماد می‌شود و کوچک‌ترین کریستال‌های یخ در ولتاژهای ۴/۵ و ۹/۰ کیلو ولت تشکیل شدند.

نتیجه گیری: انجماد تحت میدان الکتریکی منجر به افزایش دمای هسته‌زایی و کاهش اندازه کریستال‌های یخ و در نتیجه بهبود ریز ساختار قارچ دکمه‌ای شد. افزایش ولتاژ یک مقدار بهینه را برای افزایش دمای هسته‌زایی و بهبود ریز ساختار قارچ نشان داد.

واژگان کلیدی: میدان الکترواستاتیک، انجماد، قارچ، ریزساختار

• مقدمه

قارچ دکمه‌ای (Agaricus bisporus) به طور گسترده‌ای در دنیا کشت می‌شود و یکی از قارچ‌های محبوب محسوب می‌شود. قارچ‌های دکمه‌ای علاوه بر طعم خوشمزه، ارزش غذایی بالایی دارند، آن‌ها حاوی مقدار قابل توجهی پروتئین، آمینواسیدهای آزاد، آمین‌ها، نوکلئیک اسیدها، اوره و کیتین هستند. قارچها پس از برداشت به سرعت فاسد می‌شوند و مخصوصا در فصول گرم ماندگاری کمی دارند (۱). پوسته خارجی نازک، سرعت تنفس بالا، مقدار رطوبت زیاد و فعالیت بالای آنزیم تیروزیناز دلایل ماندگاری کوتاه قارچها هستند (۲). زمان نگهداری قارچ‌های تازه عمدتا محدود به ۱ تا ۳ روز در دمای اتاق و ۵ تا ۷ روز در ۰ تا ۲ درجه سلسیوس است (۳). انجماد یکی از بهترین و پرکاربردترین روش‌ها برای حفظ طولانی مدت ماده غذایی است، زیرا فعالیت‌های آنزیمی و میکروبی را در ماده غذایی بدون استفاده از نگهدارنده و حرارت کاهش می‌دهد. (۴). طی انجماد آب به یخ تبدیل می‌شود که باعث حذف آن از سیستم‌های غذایی می‌شود و در نتیجه فعالیت آبی به علت کاهش آب در دسترس کاهش می‌یابد. اما کریستال‌های یخی که طی انجماد تشکیل می‌شوند می‌توانند باعث آسیب به کیفیت ماده غذایی از جمله ویژگی‌های ظاهری، حسی و بافتی و ارزش تغذیه‌ای شوند (۶، ۵).

فرآیند انجماد شامل سه مرحله اصلی است: ۱) مرحله پیش سرد کردن (stage Pre cooling) که مواد از دمای اولیه

[Downloaded from nsft.sbmu.ac.ir on 2026-11-11]

تا نقطه انجماد آن‌ها سرد می‌شوند ۲) مرحله تبدیل فاز (Phase transition stage) که گرمای نهان انجماد حذف می‌شود و ۳) مرحله سرد کردن نهایی (Sub cooling stage) که محصول به دمای نهایی محیط سردکننده می‌رسد (۸، ۷). در مرحله تغییر فاز، آب از طریق فرآیند کریستالیزاسیون تبدیل به یخ می‌شود. کریستالیزاسیون خود شامل دو مرحله هسته‌زایی و رشد کریستال است. هسته‌زایی فرآیندی است که طی آن تعداد مناسبی مولکول برای تشکیل یک توده پایدار که هسته بحرانی نامیده می‌شود و سطح مناسبی برای رشد کریستال فراهم می‌کند، در کنار هم جمع می‌شوند. مرحله رشد بلافاصله پس از مرحله هسته‌زایی با اضافه شدن مولکول‌ها به سطح هسته بحرانی انجام می‌شود (۹). هسته‌زایی به عنوان مهم‌ترین مرحله کریستالیزاسیون مطرح است چون می‌تواند بر اندازه، شکل و توزیع کریستال‌های یخ اثر بگذارد (۱۰). بنابراین در صورتی که بتوان فرآیند هسته‌زایی را به نحوی کنترل کرد که هسته‌های کوچک‌تر و به تعداد بیشتر تشکیل شوند می‌توان آسیب به بافت ماده غذایی را کاهش داد (۱۱).

مطالعات بسیاری برای یافتن بهترین روش به منظور افزایش تعداد کریستال‌های یخ یا کاهش اندازه آن‌ها انجام شده است. برخی از این روش‌های جدید شامل انجماد تحت فشار بالا (۱۲)، انجماد با کمک اولتراسوند (۱۳)، امواج رادیویی (۱۴)، امواج ماکروویو (۱۵) و میدان الکتریکی (۱۶، ۴) می‌باشد. انجماد تحت میدان الکتریکی یکی از تکنولوژی‌های جدید انجماد است که علاوه بر اینکه کیفیت ماده غذایی را از طریق کاهش اندازه کریستال‌های یخ افزایش می‌دهد، می‌تواند به سیستم‌های انجماد معمول اضافه شود و مصرف انرژی پایینی داشته و بنابراین از نظر اقتصادی نیز به صرفه می‌باشد (۱۶).

برای توصیف اثر میدان الکتریکی بر فرآیند هسته‌زایی، این فرآیند از دیدگاه ترمودینامیکی بررسی شده است. به طور کلی در سیستم مایع دائما تعدادی مولکول در کنار یکدیگر قرار می‌گیرند و تشکیل هسته‌هایی را می‌دهند اما چون انرژی آزاد هسته از انرژی آزاد سیستم بیشتر است این هسته‌ها پایدار نیستند، با کاهش دما و کاهش انتروپی (بی نظمی) سیستم امکان تشکیل هسته‌های پایدار فراهم می‌شود (۱۷). وقتی مولکول‌های آب تحت تأثیر یک میدان الکترواستاتیک قرار می‌گیرند، به علت قطبی بودن در راستای میدان الکتریکی جهت‌گیری می‌کنند. نتیجه این رفتار ضعیف شدن یا تخریب برخی اتصالات یا باندهای هیدروژنی و تشکیل باندهای هیدوژنی در جهت میدان الکتریکی است که باعث کاهش آنتروپی سیستم و انرژی آزاد گیبس تشکیل هسته می‌شود و بنابراین هسته‌زایی در حضور میدان الکتریکی در دماهای بالاتری رخ می‌دهد و شعاع بحرانی که برابر با حداقل اندازه یک کریستال یخ پایدار است، نیز کاهش می‌یابد (۱۸).

چندین مطالعه آزمایشگاهی انجام شده روی آب و محلول‌های آبی، تئوری‌های بیان شده در مورد اثر میدان الکتریکی را تأیید می‌کنند. Wei، Orlowska و Le-Bail و همکاران اثر انجماد تحت میدان الکتریکی را بر پارامتر های انجماد آب و محلول‌های الکلی مطالعه کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که با افزایش ولتاژ میدان الکتریکی دمای هسته‌زایی افزایش پیدا می‌کند و بنابراین استفاده از میدان الکتریکی با قدرت مناسب طی انجماد می‌تواند تشکیل کریستال یخ را طی انجماد کنترل کند (۲۰، ۱۹، ۱۱). در سال‌های اخیر مطالعاتی برای بررسی انجماد بافت‌های حیوانی (گوشت خوک و گوسفند) تحت میدان الکتریکی انجام شده است. نتایج تحقیقات Xanthakis و همکاران نشان داد که دمای هسته‌زایی گوشت خوک با افزایش ولتاژ میدان الکتریکی افزایش می‌یابد و همچنین اندازه کریستال‌های یخ در ریز ساختار گوشت خوک کاهش می‌یابد (۴). دلوی-اصفهان و همکاران (۲۰۱۶) نیز گزارش دادند که بافت و ریزساختار گوشت گوسفند منجمد شده تحت میدان الکتریکی با افزایش ولتاژ بهبود می‌یابد (۱۶). دلوی-اصفهان و همکاران همچنین در سال ۲۰۱۷ اثر میدان الکتریکی را بر انجماد ژل آگار بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که اندازه کریستال‌های یخ در ژل آگار نیز با اعمال میدان الکتریکی کاهش می‌یابد اما میزان کاهش آن در مقایسه با نمونه‌های گوشت کمتر بوده است که می‌تواند به میزان بالای آب در ژل آگار مربوط باشد (۲۱).

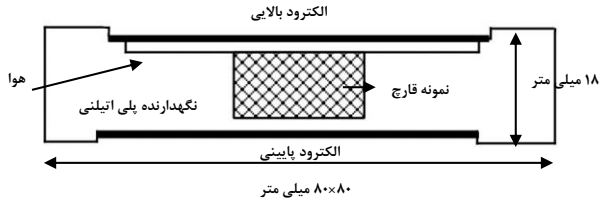
تفاوت‌های قابل توجهی بین بافت‌های حیوانی و گیاهی وجود دارد که از جمله مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به درصد رطوبت و آب آزاد بیشتر بافت‌های گیاهی و وجود دیواره سلولی، فضای بین سلولی و واکوئل در سلول‌های گیاهی اشاره کرد. این عوامل در مجموع باعث می‌شود که آسیب انجمادی در بافت‌های گیاهی شدیدتر از بافت‌های حیوانی باشد (۲۲). بنابراین اگرچه مطالعاتی در خصوص اثرات مثبت انجماد تحت میدان الکتریکی بر بافت‌های حیوانی (گوشت گوسفند و خوک) گزارش شده است، در حال حاضر اطلاعاتی در خصوص تأثیر این روش بر بافت‌های گیاهی دردسترس نیست. بنابراین هدف از این مطالعه بررسی اثر روش انجماد تحت میدان الکترواستاتیک بر پارامترهای انجماد و ریزساختار قارچ دکمه‌ای می‌باشد.

[Downloaded from nsft.sbmu.ac.ir on 2026-11-11]

• مواد و روش‌ها

مواد: قارچ دکمه‌ای (*Agaricus bisporus*) تازه از یک سوپر-مارکت محلی (اصفهان-ایران) و از یک تولیدکننده مشخص تهیه شد. قارچ‌هایی با اندازه (قطر ۷-۵ سانتی متر) و رنگ یکسان انتخاب شدند و تا زمان استفاده در یک انکوباتور یخچال‌دار با دمای ۴ درجه سلسیوس نگهداری شدند. پیش از استفاده، قارچ‌ها با آب شیر شسته شدند و سپس با استفاده از قالب نمونه‌های استوانه‌ای با قطر ۱۷ میلی‌متر و ارتفاع ۱۰ میلی‌متر از قسمت کلاهک قارچ تهیه شد. وزن متوسط نمونه-ها ۱/۶±۰/۱ گرم بود.

تجهیزات انجماد تحت میدان الکتریکی: برای اعمال میدان الکتریکی به نمونه‌های قارچ طی انجماد یک مجموعه‌ای مشابه با آنچه دلوی و همکاران (۲۰۱۶) طراحی کردند، تهیه شد (۱۶). این مجموعه شامل یک منبع DC تأمین کننده ولتاژ بالا (LS50kV-5 mA, China) تا حداکثر ۵۰kV، یک جفت الکترود و نگهدارنده نمونه، بود. نگهدارنده نمونه از جنس پلی اتیلن و با ابعاد ۱۸×۸۰×۸۰ میلی متر تهیه شد، که تصویری از آن در شکل ۱ نشان داده شده است. نگهدارنده نمونه دارای یک حفره استوانه‌ای شکل در مرکز با قطر ۲۰ میلی‌متر و ارتفاع ۱۰ میلی‌متر، برای قرارگیری نمونه قارچ بود. یک جفت صفحه مسی با ابعاد ۵۵×۵۵ و ۶۵×۶۵ میلی‌متر و ضخامت ۱ میلی‌متر به ترتیب به عنوان الکترود بالایی و پایینی استفاده شدند. بین الکترود بالایی و نمونه ۲ میلی‌متر فضای خالی درنظر گرفته شد تا از تماس نمونه با الکترود جلوگیری شود. نگهدارنده نمونه و الکترودها یک ساعت قبل از استفاده در دمای ۴ درجه سلسیوس نگهداری شدند.



شکل ۱. تصویر نگهدارنده نمونه از نمای رو به رو

انجماد تحت میدان الکتریکی و اندازه‌گیری پروفیل دمایی: پس از قرار دادن نمونه قارچ در حفره استوانه‌ای و جاگذاری الکترودهای بالایی و پایینی، نگهدارنده نمونه در فریزر جریان هوای متحرک با دمای ۳۰- درجه سلسیوس و سرعت جریان هوای ۲ متر بر ثانیه قرار داده شد. به منظور اندازه‌گیری دمای نمونه‌ها طی انجماد از یک ترمومتر فیبر نوری که به سنسور دمای فیبر نوری (FOB100 Series, 4-channel, accuracy ±0.8°C, OMEGA Engineering, Inc, Canada) متصل بود استفاده گردید. فیبر نوری از طریق مسیری که در نگهدارنده نمونه طراحی شده بود دقیقا در مرکز نمونه وارد شد و دمای مرکز نمونه هر ۰/۲ ثانیه ثبت گردید. از آنجایی که ولتاژهای بالاتر از ۱۳/۵ کیلو ولت می‌توانستند باعث تغییر در جریان مدار شوند، ولتاژهای اعمال شده به نمونه‌ها طی انجماد ۰/۰، ۴/۵، ۹/۰ و ۱۳/۵ کیلو ولت در نظر گرفته شد. اندازه‌گیری پروفیل دمایی برای هر ولتاژ حداقل سه مرتبه تکرار گردید و هر بار از یک نمونه جدید استفاده شد.

مصرف انرژی: میزان مصرف انرژی منبع DC تامین کننده ولتاژ بالا و فریزر با استفاده از یک دستگاه DW-6090A, (Lutron, Taiwan) power analyzer اندازه‌گیری شد.

ارزیابی میکروسکوپی: بلافاصله پس از پایان انجماد بررسی ریزساختار نمونه‌های قارچ با استفاده از روش میکروسکوپ نوری بر طبق دستورالعمل ارائه شده توسط Novianti انجام شد (۲۳). بلافاصله پس از انجماد نمونه‌های قارچ منجمد به منظور تثبیت بافت در محلول کارنوی (۶۰٪ الکل مطلق، ۳۰٪ کلروفرم و ۱۰٪ اسید استیک گلایسیال) غوطه‌ور شده و برای ۲۴ ساعت در دمای ۲۰- درجه سلسیوس نگهداری شدند. پس از آن نمونه‌ها برای آبگیری به محلول‌های اتانول با غلظت‌های افزایشی ۷۰٪، ۸۰٪، ۹۰٪، ۹۵٪ و ۱۰۰٪ منتقل شدند، به طوری که نمونه‌ها ۲۴ ساعت در هر کدام از محلول‌ها غوطه‌ور بودند. سپس نمونه‌ها برای دو مرحله یک ساعتی به محلول-های اتانول ۱۰۰٪ دیگری منتقل شدند. نمونه‌های آبگیری شده برای سه مرحله یک ساعتی در سه ظرف حاوی حلال زایلن قرار داده شدند و در نهایت نمونه‌ها در سه مرحله یک ساعتی در پارافین مذاب در دمای ۶۰ درجه سلسیوس غوطه‌ور شده و سپس در بلوک‌های پارافینی جاسازی شدند. با استفاده از یک دستگاه میکروتوم برش‌هایی با ضخامت ۵ میکرومتر از بافت قارچ تهیه شد. مقاطع تهیه شده را بر روی لام قرار داده و پس از حذف پارافین آن در آون با دمای ۵۶ درجه سلسیوس، با استفاده از رنگ رز بنگال رنگ آمیزی شدند. لام-های رنگ آمیزی شده توسط میکروسکوپ نوری (HP 31, China) با بزرگنمایی ۱۰۰ مشاهده شدند و با استفاده از یک دوربین دیجیتال (Canon DS126311, Taiwan) از آن‌ها عکس‌برداری شد. از نرم افزار (National image J v1.50a Institutes of Health, Bethesda, MD, USA) برای ارزیابی تصاویر تهیه شده استفاده گردید. برای هر ولتاژ حداقل سه تکرار با نمونه‌های مجزا انجام گرفت.

[Downloaded from nsft.sbmu.ac.ir on 2026-11-11]

آنالیز آماری: به منظور بررسی اثر میدان الکتریکی بر پارامترهای انجماد و ریزساختار قارچ، آزمایش‌ها در قالب طرح کاملا تصادفی با ۴ سطح میدان الکتریکی (۰/۰، ۴/۵، ۹/۰ و ۱۳/۵ کیلو ولت) در ۳ تکرار انجام شد. جهت ارزیابی آماری داده‌ها، از نرم افزار آماری SAS استفاده شد. مقایسه میانگین‌های مربوط به هر تیمار به وسیله آزمون حداقل تفاوت معنی‌دار (LSD) در سطح معنی‌دار ۵ درصد انجام گرفت.

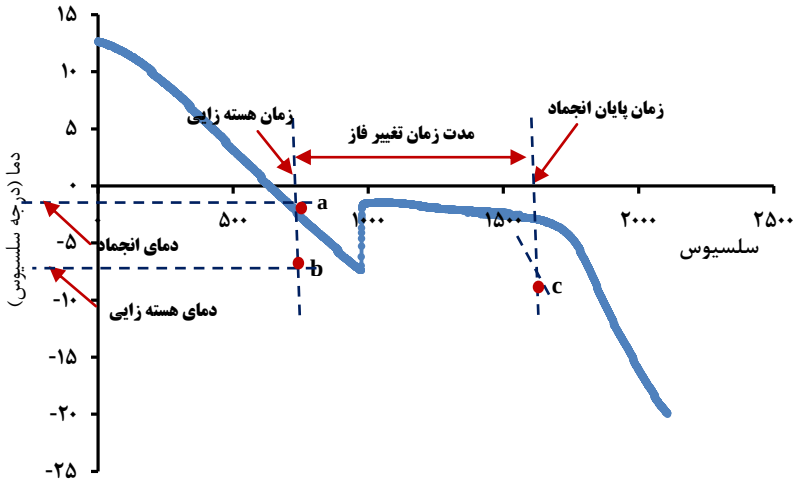
• یافته‌ها

قدرت میدان اکتریکی و مصرف انرژی: قدرت میدان الکتریکی بر اساس رابطه E=U/d محاسبه شد که در این رابطه U برابر با ولتاژ میدان الکتریکی و d برابر با فاصله بین دو الکترود می‌باشد. با توجه به اینکه فاصله بین دو الکترود برابر با ۱۴ میلی‌متر بود، قدرت میدان الکتریکی برای ولتاژهای مختلف محاسبه شده و در جدول ۱ آورده شده است. همچنین میزان مصرف انرژی منبع تامین ولتاژ برای قدرت‌های مختلف میدان الکتریکی در جدول ۱ نشان داده شده است. میزان مصرف انرژی از ۰/۴ ± ۱۱/۸ تا ۰/۲ ± ۱۴/۱ وات برای قدرت ۰/۰ تا $۹/۶\times۱۰^{۵}$ ولت بر متر میدان الکتریکی تغییر می‌کند که نشان می‌دهد ۱۱/۸ وات مقدار انرژی مصرف شده به وسیله مدار و الکترونیک منبع بدون اینکه خروجی داشته باشد است. بعلاوه میزان مصرف انرژی منبع با افزایش ولتاژ کاهش پیدا می‌کند که به دلیل کاهش جریان الکتریکی متناسب با افزایش ولتاژ خروجی می‌باشد. میزان انرژی مصرف شده به وسیله فریزر نیز با استفاده از دستگاه power analyzer اندازه‌گیری شد که برابر با ۴/۵ ± ۵۷۷/۳ وات بود. همانطور که مشخص است عمده انرژی به وسیله فریزر مصرف می‌شود و انرژی مصرف شده به وسیله منبع تامین ولتاژ در مقایسه با فریزر خیلی کم است.

جدول ۱. قدرت میدان الکتریکی و مصرف انرژی در ولتاژهای اعمال شده مختلف

ولتاژ (kV)	قدرت میدان الکتریکی (V/m)	مصرف انرژی (Watt)
۰/۰	۰/۰	۱۱/۸ ± ۰/۴
۴/۵	$۳/۲\times۱۰^{۵}$	۱۵/۸ ± ۰/۳
۹/۰	$۶/۴\times۱۰^{۵}$	۱۴/۶ ± ۰/۶
۱۳/۵	$۹/۶\times۱۰^{۵}$	۱۴/۱ ± ۰/۲

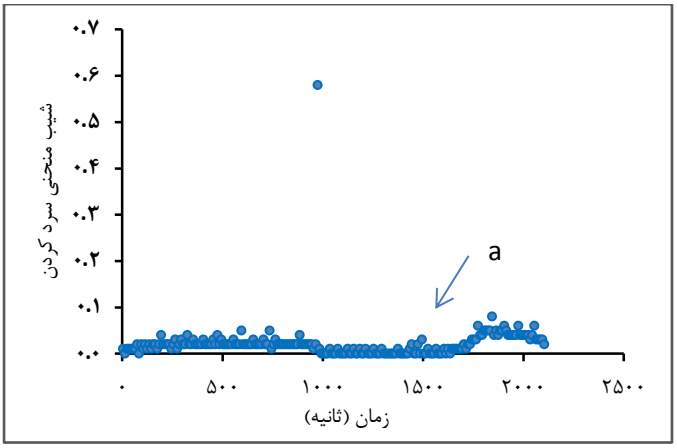
تعیین پارامترهای انجماد: شکل ۲ منحنی انجماد یک نمونه قارچ و پارامترهای انجماد ارزیابی شده را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود طی سرد کردن دمای نمونه قارچ کاهش می‌یابد تا به دمای هسته‌زایی می‌رسد، دمای هسته‌زایی پایین‌ترین دمایی است که نمونه بدون اینکه کریستال یخ تشکیل شود به آن می‌رسد (نقطه a در شکل ۲). در این لحظه که زمان هسته‌زایی نامیده می‌شود اولین هسته پایدار یخ تشکیل می‌شود و به دلیل آزاد شدن گرمای نهان انجماد، دمای نمونه به سرعت تا دمای انجماد (نقطه b در شکل ۲) افزایش می‌یابد.



شکل ۲. منحنی انجماد قارچ دکمه ای و پارامترهای انجماد محاسبه شده

[Downloaded from nsft.sbmu.ac.ir on 2026-11-11]

زمان پایان انجماد برابر با زمانی است که منحنی انجماد بعد از دوره‌ای که دما ثابت بود بالاترین شیب را پیدا می‌کند. برای مشخص کردن این زمان شیب منحنی سرد کردن محاسبه و بر حسب زمان رسم شد (شکل ۳). نقطه a در شکل ۳ متناظر با نقطه c در شکل ۲ و برابر با زمان پایان انجماد است. مدت زمان تغییر فاز با اختلاف بین زمان پایان انجماد و زمان هسته‌زایی برابر است.



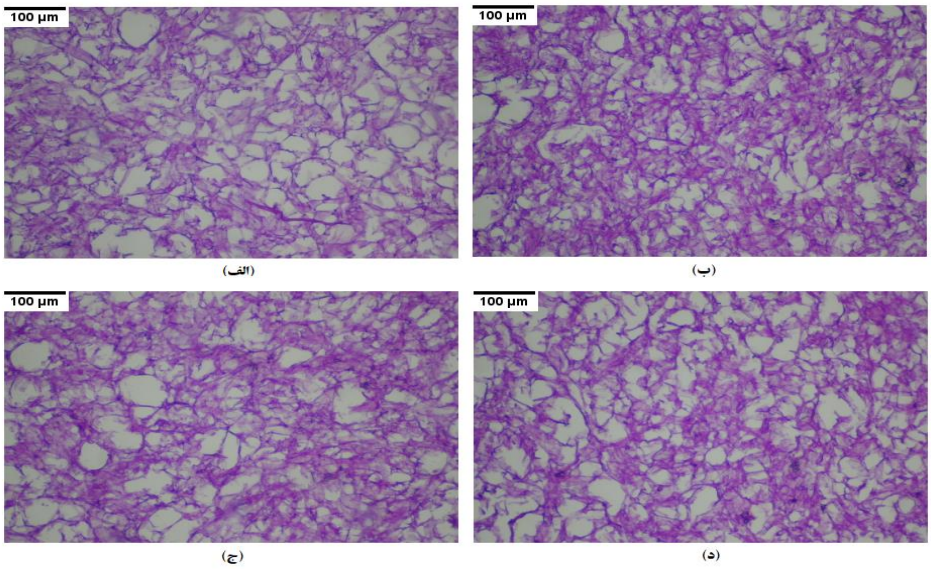
شکل ۳. شیب منحنی انجماد قارچ دکمه ای برای محاسبه زمان پایان انجماد (نقطه a)

نتایج حاصل از اندازه‌گیری پارامترهای انجماد از منحنی‌های انجماد نمونه‌های قارچ تحت ولتاژهای مختلف میدان الکتریکی در جدول ۲ خلاصه شده است. همانطور که مشخص است دمای انجماد نمونه‌های قارچ منجمد شده تحت ولتاژهای مختلف تفاوت قابل توجهی با یکدیگر ندارند و در واقع میدان الکتریکی از نظر آماری اثر معناداری بر دمای انجماد نداشته است.

مقایسه دمای هسته‌زایی نمونه‌های منجمد شده تحت ولتاژهای مختلف نشان می‌دهد که با اعمال میدان الکتریکی با ولتاژهای ۴/۵ و ۹/۰ کیلو ولت دمای هسته‌زایی به طور قابل توجهی نسبت به نمونه شاهد که بدون اعمال میدان الکتریکی منجمد شده است، افزایش یافته است به طوری که اختلاف بین دمای هسته زایی در ولتاژهای ۴/۵ و ۹/۰ کیلو ولت معنادار نبوده ولی اختلاف آن‌ها با دمای هسته زایی نمونه شاهد معنادار شده است. افزایش بیشتر ولتاژ منجر به کاهش مجدد دمای هسته‌زایی شده است و تفاوت آن با دمای هسته‌زایی در ولتاژهای ۴/۵ و ۹/۰ کیلو ولت معنادار شده است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، مدت زمان تغییر فاز از ۷۴/۶ ± ۹۶۴/۸ ثانیه در شرایط بدون اعمال میدان الکتریکی به ترتیب به ۳۹/۴±۱۰۲۸/۲ و ۳۵/۰ ±۱۰۴۲/۰ ثانیه با اعمال میدان الکتریکی به ولتاژ ۴/۵ و ۹/۰ کیلو ولت افزایش یافت در حالی که زمان پایان انجماد نمونه‌های منجمد شده تحت ولتاژهای ۴/۵ و ۹/۰ کیلو ولت کوتاه‌تر بوده است.

ریزساختار قارچ: شکل ۴ تصاویر میکروسکوپی نمونه‌های قارچ منجمد شده تحت ولتاژهای مختلف میدان الکتریکی را نشان می‌دهد. در این تصاویر بخش‌های سفید رنگ نشان دهنده فضاهایی است که به وسیله کریستال‌های یخ اشغال شده است و اندازه آن‌ها مشخص کننده اندازه کریستال‌های یخ می‌باشد و نواحی بنفش رنگ نشان دهنده سلول‌های قارچ است. همانطور که مشاهده می‌شود با اعمال میدان الکتریکی اندازه حفرات سفید رنگ کاهش یافته و در مقابل تعداد آن‌ها بیشتر شده است، در واقع با اعمال میدان الکتریکی آسیب به ریزساختار قارچ کاهش یافته است.



شکل ۳. شیب منحنی انجماد قارچ دکمه ای برای محاسبه زمان پایان انجماد (نقطه a)

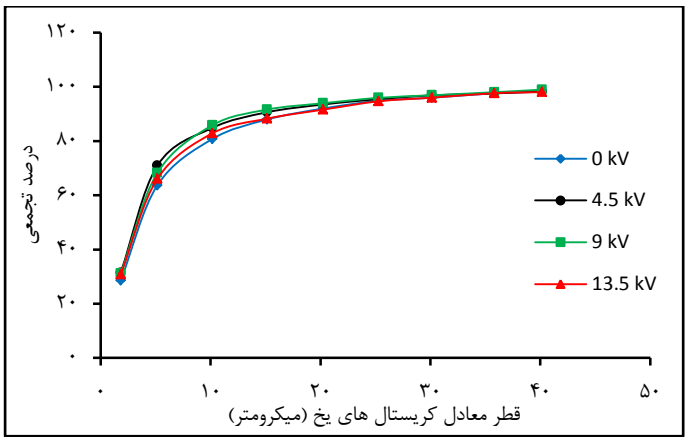
[Downloaded from nsft.sbmu.ac.ir on 2026-11-11]

جدول ۲. میانگین پارامترهای انجماد ارزیابی شده از منحنی انجماد تحت میدان الکتریکی قارچ

ولتاژ (kV)	دمای انجماد (°C)	دمای هسته زایی (°C)	زمان هسته زایی (s)	مدت زمان تغییر فاز (s)	زمان پایان انجماد (s)
۰/۰	-۱/۷ ± ۰/۱^{ab}	-۶/۹ ± ۰/۳^{b}	۱۱۰۱/۶ ± ۲۷/۳^{a}	۹۶۴/۸ ± ۷۴/۶^{b}	۲۰۵۰/۰ ± ۸۵/۸^{a}
۴/۵	-۱/۶ ± ۰/۰^{ab}	-۴/۳ ± ۰/۳^{a}	۹۴۱/۷ ± ۲۷/۲^{b}	۱۰۲۸/۲ ± ۳۹/۴^{a}	۱۹۷۰/۰ ± ۱۲/۲^{b}
۹/۰	-۱/۶ ± ۰/۱^{a}	-۵/۰ ± ۱/۶^{a}	۸۸۴/۸ ± ۷۲/۳^{c}	۱۰۴۲/۰ ± ۳۵/۰^{a}	۱۹۴۵/۰ ± ۳۲/۶^{b}
۱۳/۵	-۱/۷ ± ۰/۱^{b}	-۷/۲ ± ۰/۱^{b}	۱۰۹۶/۴ ± ۳/۶^{a}	۹۶۳/۴ ± ۷/۸^{b}	۲۰۶۰/۰ ± ۴/۰^{a}

متوسط‌های درون هر ستون با حداقل یک حرف مشابه تفاوت معنی دار ندارند.

شکل ۵ منحنی‌های توزیع تجمعی اندازه کریستال‌های یخ در نمونه‌های قارچ منجمد شده تحت ولتاژهای مختلف را نشان می‌دهد. با مشاهده شکل مشخص می‌شود که با اعمال میدان الکتریکی درصد کریستال‌های یخ با قطر کوچک‌تر افزایش یافته است. همانطور که مشاهده می‌شود بیش‌ترین تعداد کریستال‌های یخ کوچک در ولتاژ ۴/۵ و ۹/۰ کیلو ولت تشکیل شده‌اند و با افزایش بیشتر ولتاژ به ۱۳/۵ کیلو ولت از تعداد کریستال‌های یخ کوچک کاسته شده است.



شکل ۵. اثر ولتاژ میدان الکتریکی بر توزیع تجمعی اندازه کریستال‌های یخ در نمونه‌های قارچ منجمد شده تحت ولتاژهای مختلف

• بحث

در این مقاله اثر انجماد تحت میدان الکتریکی بر پارامترهای انجماد و ریزساختار قارچ دکمه‌ای بررسی شد. نتایج نشان داد که با اعمال میدان الکتریکی دمای انجماد تغییر معناداری نمی‌کند که مشابه با نتایج گزارش شده در مورد نمونه‌های ژل آگار و گوشت گوسفند است که انجماد تحت میدان الکترواستاتیک اثری بر دمای انجماد آنها نداشته است (۲۱، ۱۶). همانطور که نتایج نشان داد دمای انجماد نمونه‌های قارچ ثابت نبوده و به تدریج کاهش می‌یابد تا به نقطه پایان انجماد می‌رسد. همانطور که می‌دانیم آب موجود در قارچ آب خالص نیست و به عنوان یک حلال برای ترکیبات مختلف با وزن مولکولی کم عمل می‌کند (۲۲). زمانی که یک محلول منجمد می‌شود تنها آب خالص تبدیل به یخ می‌شود و ترکیبات حل شده در محلول وارد یخ نمی‌شوند، بنابراین غلظت ترکیبات حل شونده در فاز مایع به تدریج افزایش می‌یابد که منجر به کاهش تدریجی نقطه انجماد می‌شود.

بعلاوه مشاهده شد که با اعمال میدان الکتریکی سرعت هسته‌زایی بیشتر شده و در نتیجه دمای هسته‌زایی قارچ افزایش پیدا می‌کند. همچنین مدت زمان تغییر فاز نیز با اعمال میدان الکتریکی افزایش می‌یابد در حالیکه زمان پایان انجماد کوتاه‌تر بوده است. Wei و همکاران در سال ۲۰۰۸ و Orlowska همکاران در سال ۲۰۰۹ بیان کردند که اعمال میدان الکتریکی منجر به افزایش سرعت هسته‌زایی و افزایش مدت زمان تغییر فاز شده است. کاهش زمان هسته‌زایی تحت میدان الکترواستاتیک منجر به افزایش مدت زمان تغییر فاز می‌شود، زیرا در این حالت باید مقدار گرمای بیشتری از نمونه حذف شود (۱۹، ۱۱). همچنین Xanthakis و همکاران نیز مشاهده کردند که با افزایش ولتاژ میدان الکتریکی دمای هسته‌زایی نمونه‌های گوشت خوک افزایش می‌یابد (۴).

از دیدگاه ترمودینامیکی، با اعمال میدان الکتریکی مولکول‌های قطبی آب تمایل دارند که در جهت میدان به خط شوند که این امر منجر به کاهش انتروپی و انرژی آزاد مانع برای تشکیل کریستال می‌شود (۱۸). بنابراین سرعت هسته-زایی تحت میدان الکتریکی بیشتر می‌شود و در نتیجه دمای هسته‌زایی افزایش می‌یابد. مهمترین عاملی که بر شدت این تغییرات اثرگذار است قدرت میدان الکتریکی است. با افزایش قدرت میدان الکتریکی مولکول‌های بیشتری در راستای میدان قرار می‌گیرند و زاویه مولکول‌ها با میدان الکتریکی کمتر می-شود ولی افزایش بیش از حد قدرت میدان می‌تواند مانع حرکت آزاد مولکول‌ها برای قرارگیری آن‌ها در کنار یکدیگر شود و از تشکیل ساختار مناسب یک کریستال یخ جلوگیری کند. بنابراین به نظر می‌رسد که افزایش سرعت هسته‌زایی و در نتیجه کاهش دمای هسته‌زایی دارای یک مقدار بهینه با افزایش ولتاژ است.

همچنین بررسی ریز ساختار قارچ منجمد شده تحت ولتاژهای مختلف نشان می‌دهد که با اعمال میدان الکتریکی

[Downloaded from nsft.sbmu.ac.ir on 2026-11-11]

آسیب وارد شده به ریز ساختار قارچ کاهش می‌یابد و تعداد کریستال‌های کوچک یخ نیز افزایش می‌یابد. . این نتایج متناسب با نتایجی است که در اندازه‌گیری پارامترهای انجماد قارچ تحت میدان الکتریکی با ولتاژهای مختلف بدست آمد. به طوری که بالاترین دمای هسته‌زایی و بیشترین تعداد کریستال‌های کوچک در ولتاژ ۴/۵ و ۹/۰ کیلو ولت مشاهده شدند. مطالعات Xanthakis و دلوی-اصفهان و همکاران روی گوشت خوک و گوشت گوسفند نیز نشان داد که با افزایش قدرت میدان الکتریکی قطر کریستال‌های یخ کاهش یافته و آسیب کمتری نیز به بافت ماده غذایی منجمد وارد شده است (۱۶، ۴).

بنابراین نتایج بدست آمده در این مطالعه نشان می‌دهد که افزایش سرعت هسته‌زایی و بهبود ریزساختار قارچ با افزایش ولتاژ میدان الکتریکی دارای یک مقدار بهینه است.

• References

1. Pei F, Yang W, Shi Y, Sun W, Mariga AM, Zhao L, et al. Comparison of Freeze-Drying with Three Different Combinations of Drying Methods and Their Influence on Colour, Texture, Microstructure and Nutrient Retention of Button Mushroom (Agaricus bisporus) Slices. Food Bioprocess Technol. 2014; 7: 702–710.
2. Aday MS. Application of electrolyzed water for improving postharvest quality of mushroom. LWT - Food Sci. Tech. 2016; 68: 44-51.
3. Czapski J, Szudyga K. Frozen Mushrooms Quality as Affected by Strain, Flush, Treatment Before Freezing, and Time of Storage. J. Food Sci. 2000; 65: 722-725.
4. Xanthakis E, Havet M, Chevallier S, Abadie J, Le-Bail A. Effect of static electric field on ice crystal size reduction during freezing of pork meat. Innov. Food Sci. Emerg. 2013; 20: 115-120.
5. Delgado AE, Sun DW. Heat and mass transfer models for predicting freezing processes – a review. J. Food Eng. 2001; 47(3): 157-174.
6. Fellows PJ. 22 - Freezing. In: Fellows PJ, Editors. Food Processing Technology. 3 nd ed. Boca Raton Bostn: Woodhead Publishing; 2009: 650-686.
7. Kiani H, Sun DW. Water crystallization and its importance to freezing of foods: a review. Trends Food Sci. Tech. 2011; 22(8): 407-426.
8. Xanthakis E, Le-Bail A, Havet M. Chapter 30-Freezing combined with electrical and magnetic disturbances. In: Sun DW, Editors. Emerging Technologies for Food Processing, 2 nd ed. Academic Press, San Diego; 2014a: 563-579.
9. Russo Krauss I, Merlino A, Vergara A, Sica F. An overview of biological macromolecule crystallization. Int. J. Mol. Sci. 2013; 14 (6): 11643-11691.
10. Saclier M, Peczalski R, Andrieu J. A theoretical model for ice primary nucleation induced by acoustic cavitation. Ultrason. Sonochemistry. 2010; 17 (1): 98-105.
11. Orlowska M, Havet M, Le-Bail A. Controlled ice nucleation under high voltage DC electrostatic field conditions. Food Res. Int. 2009; 42(7): 879–884.
12. Su G, Ramaswamy HS, Zhu S, Yu Y, Hu F, Xu M. Thermal characterization and ice crystal analysis in pressure shift freezing of different muscle (shrimp and porcine liver) versus conventional freezing method. Innov. Food Sci. Emerg. 2014; 26: 40–50.
13. Islam MN, Zhang M, Adhikari B, Xinfeng C, Xu BG. The effect of ultrasound-assisted immersion freezing on selected physicochemical properties of mushrooms. Int. J. Refrigeration. 2014; 42: 121-133.
14. Hafezparast-Moadab N, Hamdami N, Dalvi-Isfahan M, Farahnaky A. Effects of radiofrequency-assisted freezing on microstructure and quality of rainbow trout (Oncorhynchus mykiss) fillet. Innov. Food Sci. Emerg. 2018; 47: 81-87.
15. Xanthakis E, Le-Bail A, Ramaswamy H. Development of an innovative microwave assisted food freezing process. Innov. Food Sci. Emerg. 2014b; 26: 176-181.
16. Dalvi-Isfahan M, Hamdami N, Le-Bail A. Effect of freezing under electrostatic field on the quality of lamb meat. Innov. Food Sci. Emerg. 2016; 37 (Part A): 68-73.
17. Mullin JW. Crystallization. 4th ed. Reed Educational and Professional Publishing Ltd. 2001.
18. Dalvi-Isfahan M, Hamdami N, Xanthakis E, Le-Bail A. Review on the control of ice nucleation by ultrasound waves, electric and magnetic fields. J. Food Eng. 2017b; 195: 222–234.
19. Wei S, Xiaobin X, Hong Z, Chuanxiang X. Effects of dipole polarization of water molecules on ice formation under an electrostatic field. Cryobiology. 2008; 56(1): 93–99.
20. Le-Bail A, Orlowska M, Havet M. Electrostatic field assisted food freezing. In: Sun DW, Editor. Handbook of Frozen Food Processing and Packaging, 2 nd ed. CRC Press; 2011: 685-692.
21. Dalvi-Isfahan M, Hamdami N, Le-Bail A. Effect of freezing under electrostatic field on selected properties of an agar gel. Innov. Food Sci. Emerg. 2017a; 42: 151-156.
22. Li, D., Zhu, Z., Sun, D.W., 2018. Effects of freezing on cell structure of fresh cellular food materials: A review. Trends Food Sci. Tech. 75, 46-55.
23. Novianti K, Sutrisno, Darmawati E. 2010. Freezing method of straw mushroom (Volvariella volvaceae) using dry ice. International Seminar on Horticulture to Support Food Security; 2010 June 22-23; Bandar Lampung, Indonesia.

[Downloaded from nsft.sbmu.ac.ir on 2026-11-11]

Effects of Statically Electric Fields on Freezing Parameters and Microstructures of Button Mushrooms (*Agaricus bisporus*)

Fallah-Joshaqani S[1], Hamdami N[2]*

1- Dept.of Food Science and Technology, College of Agriculture, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran

*2- *Corresponding author: Dept.of Food Science and Technology, College of Agriculture, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran. E-mail: hamdami@cc.iut.ac.ir*

Received 12 Dec, 2018 **Accepted 12 Apr, 2019**

Background and Objectives: Freezing under statically electric fields is one of the novel freezing methods to improve the quality of frozen products by controlling the nucleation process. The objective of this study was to investigate effects of freezing under electrostatic fields on the freezing parameters and microstructures of frozen button mushrooms.

Materials and Methods: Mushroom samples were frozen at -30 °C under electrostatic fields with voltages of 0.0, 4.5, 9.0 and 13.5 kV. Temperature of the sample center was recorded during freezing. Furthermore, microstructure of the mushrooms was analyzed using light microscopy.

Results: Assessment of the freezing parameters has shown that use of electric fields during freezing increases the nucleation temperature and phase transition time. Increased electric field voltage up to 4.5 or 9.0 kV increased the nucleation temperature, while the nucleation temperature decreased again with further increases in voltage. Furthermore, use of electric field decreased damages to mushroom microstructures during freezing and the smallest ice crystals were formed at voltages of 4.5 and 9.0 kV.

Conclusion: In conclusion, freezing under electric field increases the nucleation temperature and decreases the ice crystal size; therefore, improves the microstructure of button mushrooms. Voltage increase has shown an optimum value for the increase of nucleation temperature and preserve of mushroom microstructure.

Keywords: Electrostatic field, Freezing, Mushroom, Microstructure

[Downloaded from nsft.sbmu.ac.ir on 2026-11-11]