کاربرد میدان الکتریکی ولتاژ بالا در رفع انجماد گوشت مرغ و بررسی تاثیر آن بر روی زمان فرایند و مصرف انرژی

مهشید رهبری[۱]

۱- دکتری علوم و صنایع غذایی، گروه پژوهشی منطقه‌ای استاندارد اداره کل استاندارد استان اصفهان

خلاصه

در سال‌های اخیر فناوری میدان‌های الکتریکی ولتاژ بالا (HVEF)[۱] در صنایع غذایی مورد توجه قرار گرفته است. در این تکنیک با اعمال یک میدان الکتریکی ولتاژ بالا بین دو الکترود نقطه‌ای و صفحه‌ای و یونیزاسیون مولکول‌های هوای موجود در سطح ماده غذایی، جریان حجمی از هوا موسوم به باد کرونایی شکل می‌گیرد که با تجمع حرارت به‌صورت حجمی داخل ماده غذایی موجب افزایش انتقال حرارت در محصول می‌شود. در پژوهش حاضر تکنیک میدان الکتریکی ولتاژ بالا در رفع انجماد گوشت سینه مرغ مورد استفاده قرار گرفته و اثر متغیرهای تاثیرگذار بر فرایند شامل ولتاژ و فاصله الکترودی که قدرت میدان الکتریکی (۱/۵، ۲/۲۵ و ۳ کیلوولت بر سانتی‌متر) را نشان می‌دهند، در مقایسه با رفع انجماد تحت هوای ساکن (نمونه کنترل) بر روی زمان فرایند و مصرف انرژی بررسی و نمودارهای جریان- ولتاژ طی فرایند رفع انجماد مقایسه شده‌اند. به این منظور رفع انجماد قطعات منجمد سینه مرغ تحت میدان الکتریکی در سه ولتاژ انتخابی (بین شروع جریان کرونا و تخلیه الکتریکی) و در فواصل الکترودی معین ۳، ۴/۵ و ۶ سانتی‌متر انجام شد. نتایج نشان داد که استفاده از میدان الکتریکی ولتاژ بالا در رفع انجماد گوشت مرغ باعث کاهش حدود ۴۴ درصدی زمان رفع انجماد در بالاترین ولتاژ و کمترین فاصله الکترودی نسبت به شرایط هوای آزاد و بدون اعمال ولتاژ شد. در هر گپ با افزایش قدرت میدان الکتریکی، مصرف انرژی روند کاهشی نشان داد که دلیل این موضوع را می‌توان به کاهش تلفات انرژی مدار (کاهش جریان مصرفی مدار) با افزایش ولتاژ مرتبط دانست. از سوی دیگر، با افزایش قدرت میدان الکتریکی تا ۳ kV/cm مصرف انرژی افزایش کمی نشان داد. در هر صورت، میزان مصرف انرژی در این شرایط بسیار کمتر از روش استفاده از هوای ساکن می‌باشد. به طور کلی فناوری میدان الکتریکی ولتاژ بالا می‌تواند به عنوان یک روش سریع، کارآمد و با مصرف انرژی پایین در به منظور رفع انجماد گوشت مرغ به کار گرفته شود.

کلمات کلیدی: میدان الکتریکی ولتاژ بالا، گوشت مرغ، رفع انجماد، مصرف انرژی، زمان فرایند

۱- مقدمه

رفع انجماد از فرایندهای مهم در صنایع غذایی از جمله صنعت گوشت و فراورده‌های گوشتی می‌باشد؛ زیرا معمولا گوشت به‌صورت منجمد در سردخانه‌های زیر صفر نگه‌داری شده و هنگام اقدام به فراوری عمل رفع انجماد (دیفراست) روی آن انجام

[1] High Voltage Electric Field

می‌شود. به‌طور کلی فرایند رفع انجماد آهسته‌تر از انجماد رخ می‌دهد. بنابراین، در طول این فرایند، احتمال آسیب بیشتری به فراورده به دنبال تغییرات شیمیایی و فیزیکی وجود دارد. همچنین، با افزایش دمای سطحی، ممکن است تکثیر میکروبی آغاز شده و منجر به فساد محصول گردد (جیمز، ۲۰۰۲). در طی رفع انجماد ابتدا افزایش سریع دما به خاطر عدم وجود لایه آب در اطراف ماده غذایی رخ می‌دهد. سپس، یک دوره طولانی به وقوع می‌پیوندد که در آن دمای ماده غذایی نزدیک نقطه ذوب یخ می‌باشد. در طی این دوره، هر گونه تخریب و آسیب سلولی که توسط انجماد آهسته یا کریستالیزاسیون مجدد رخ داده است، موجب رها شدن ترکیبات سلول به شکل چکابه[1] می‌شود

با توجه به اهمیت بافت گوشت مرغ از لحاظ تردی و آبداری، همچنین مستعد بودن آن به فساد میکروبی، رفع انجماد باید بلافاصله پس از خارج شدن گوشت مرغ از سردخانه و در حداقل زمان انجام شود. به‌علاوه شرایط رفع انجماد باید به‌گونه‌ای باشد که محیط مناسب برای باکتری‌ها مهیا نگردد. زیرا در غیر این صورت، محصولات حاصل از مرغ نیز مستعد آلودگی میکروبی خواهند بود. انجام صحیح فرایند رفع انجماد کمک خواهد نمود تا از خروج مقدار زیاد مایع درون بافتی و اتلاف انرژی در طول عملیات ممانعت شود (یون و همکاران، ۲۰۰۴). امروزه در صنعت غذا به استفاده از تکنولوژی‌های نوین برای کاهش زمان فرایند رفع انجماد، به منظور حفظ کیفیت فراورده‌ها و کاهش مصرف انرژی توجه زیادی شده است.

استفاده از فناوری ایجاد میدان‌های الکتریکی با استفاده از ولتاژ بالا در چند سال اخیر در صنایع غذایی به دلیل آسیب حرارتی کم، عدم استفاده از مواد شیمیایی و هزینه پایین مورد توجه قرار گرفته است. از جمله کاربردهای این فناوری نوین می‌توان به خشک کردن الکتروهیدرودینامیک (EHD)، افزایش و بهبود زمان انبارمانی میوه‌ها و سبزیجات، انجماد و رفع انجماد اشاره کرد [۳، ۲، ۱]. اساس این فرایند بر تولید باد الکتریکی توسط تخلیه کرونایی[2] استوار است. در این تکنیک از یک میدان الکتریکی قوی در محیط یک سیال دی‌الکتریک برای ایجاد نیرو و در پی آن یک حرکت ثانویه در سیال استفاده می‌شود. این حرکت ثانویه موجب بر هم خوردن لایه مرزی حرارتی تشکیل شده بر جسم حرارت دیده شده و ضریب انتقال حرارت را افزایش می‌دهد. جریان ثانویه سیال باد یونی یا باد کرونا نام دارد. باد کرونا در واقع حرکت یون‌ها تحت اثر میدان الکتریکی اعمالی است. اعمال میدان الکتریکی قوی بین دو الکترود سیمی یا سوزنی (نقطه‌ای) و صفحه‌ای، موجب یونیزاسیون موضعی هوای اطراف الکترود نقطه‌ای می‌شود. حرکت یون‌ها به سمت الکترود مقابل و تبادل مومنتوم با مولکول‌های خنثی هوا در مسیر موجب حرکت توده سیال به سمت سطح می‌شود. برخورد توده سیال با سطح موجب اغتشاش لایه مرزی تشکیل شده بر روی سطح می‌شود و این عمل افزایش ضریب انتقال حرارت را به دنبال دارد. در این حالت، الکترود نازک تخلیه کننده الکتریکی[3] و الکترود دیگر جمع کننده الکتریکی می‌باشد. [۴].

بنابراین فرایند الکتروهیدرودینامیک از تبدیل انرژی الکتریکی به مکانیکی ناشی می‌شود و دارای ماهیت همرفتی است [۵].

رابطه بین سرعت باد الکتریکی و میدان الکتریکی از معادله ۱ حاصل می‌شود:

(۱)

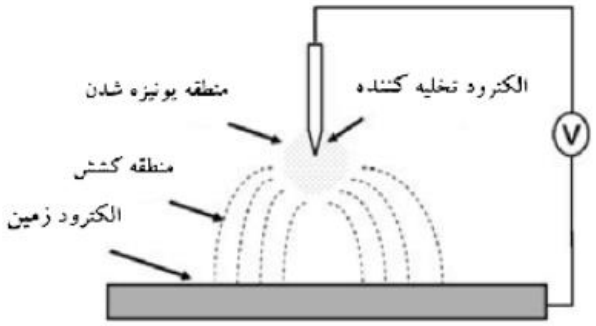
$$V = E\sqrt{\varepsilon_0/\rho}$$

در این رابطه ε_0 نفوذپذیری فضای آزاد (فاراد بر متر)، V سرعت باد کرونایی (متر بر ثانیه)، E شدت میدان الکتریکی (ولت بر متر) و ρ دانسیته محیط (کیلوگرم بر متر مکعب) می‌باشد.

[1] Drip loss
[2] Corona discharge
[3] Electrical discharge electrode

۱-۱ تخلیه الکتریکی یا تخلیه کرونایی

در اثر میدان الکتریکی، هوای نارسانا یونیزه شده و رسانا می‌شود. سیری از مولکول‌های یونیزه شده رسانا از بالا به پایین حرکت می‌کنند. بارهای الکتریکی به‌طرف هم حرکت می‌کنند و در زمان کوتاهی جریان از هوای یونیزه می‌گذرد. یونیزه کردن هوا در نوک الکترودهای نقطه‌ای صورت می‌گیرد و بار الکتریکی به‌صورت یک جریان متلاطم در یک فضای مخروطی شکل مابین نوک الکترودهای نقطه‌ای و صفحه پایینی شکل می‌گیرد (شکل ۱). طول الکترودهای نقطه‌ای با توجه به ابعاد کلی دستگاه انتخاب می‌شود [۶].



شکل ۱- شمایی از فرآیند تخلیه کرونایی

سرعت باد الکتریکی با افزایش شدت میدان الکتریکی به‌طور نامحدود افزایش نمی‌یابد، زیرا با افزایش ولتاژ به ازای یک فاصله ثابت بین دو الکترود نقطه‌ای و صفحه‌ای، با رسیدن به ولتاژ شکست، تخلیه الکتریکی صورت می‌گیرد. مقدار ولتاژ شکست به فاصله بین دو الکترود نقطه‌ای و صفحه یونیزه کننده و طبیعت ماده بین دو صفحه (ثابت دی‌الکتریک) بستگی دارد. برای سیستم صفحه و چند الکترود نقطه‌ای، ماکزیمم نرخ انتقال جرم مستقیماً زیر الکترود نقطه‌ای می‌باشد.

در زمینه کاربرد میدان الکترواستاتیک به‌عنوان یک روش جدید و فرایند غیر حرارتی در رفع انجماد مواد غذایی اخیراً پژوهش‌هایی صورت گرفته است. در کلیه پژوهش‌های انجام شده به تأثیر مثبت آن بر کاهش زمان رفع انجماد و حفظ ویژگی‌های کیفی فراورده اشاره شده است. مطابق نتایج به‌دست‌آمده مهم‌ترین پارامترهای مؤثر بر این فرایند عبارتند از: فاصله بین دو الکترود نقطه‌ای، فاصله الکترودی و میزان اختلاف پتانسیل بین دو الکترود. نرخ رفع انجماد و انرژی مصرفی با تغییر فاصله بین دو الکترود نقطه‌ای و فاصله الکترودی تغییر می‌کند. نتایج Bai, et al. [۷] نشان می‌دهد که بالاترین نرخ رفع انجماد هنگامی‌که فاصله الکترودهای نقطه‌ای و فضای الکترودی به ترتیب ۶ و ۹ سانتی‌متر است به دست می‌آید. مصرف انرژی با افزایش فاصله الکترودی و میزان ولتاژ افزایش و با افزایش فاصله بین دو الکترود نقطه‌ای کاهش می‌یابد.

با توجه به حساسیت بالای گوشت مرغ به تغییرات فیزیکی، شیمیایی و میکروبی، بررسی امکان کاربرد میدان الکتریکی ولتاژ بالا در رفع انجماد آن و تعیین شرایط بهینه عملیات دارای اهمیت فراوانی است. لذا در این پژوهش به مطالعه اثر رفع انجماد با روش الکترواستاتیک بر روی برخی پارامترهای کیفی گوشت مرغ پرداخته می‌شود.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱ مواد اولیه

گوشت تازه سینه مرغ با سن و زمان کشتار یکسان از کشتارگاه سپید گوشت ماکیان شهرستان اصفهان، پس از انجام مراحل کشتار، پوست گیری و استخوان گیری تهیه شد.

۲-۲ آماده‌سازی نمونه

برش‌های هم اندازه از گوشت با ابعاد ۲×۲×۲ سانتی متر مکعب توسط چاقوی تیز تهیه شدند. منافذی جهت تثبیت ترموکوپل فیبر نوری حین فرایند رفع انجماد در مرکز هندسی برخی قطعات تعبیه شد. سپس، قطعات گوشت با مقادیر مساوی در کیسه‌های پلی اتیلنی بسته‌بندی و توسط تونل انجماد با دمای ۳۰- درجه سانتی‌گراد و سرعت هوای ۱ متر بر ثانیه منجمد شدند. پس از انجماد کامل، نمونه‌های گوشت مرغ در فریزر معمولی با دمای ۱۸- درجه سانتی‌گراد تا زمان انجام آزمایشات نگهداری شدند.

۲-۳ آماده‌سازی سیستم رفع انجماد تحت میدان الکتریکی ولتاژ بالا

سیستم رفع انجماد تحت میدان الکتریکی ولتاژ بالا با انتخاب الکترودهای نقطه‌ای و صفحه‌ای و منبع ولتاژ قابل تنظیم بین ۵۰- تا ۵۰ کیلو ولت و بیشینه جریان خروجی ۵ میلی آمپر (Ls50KV5mA, China)، آماده شد. محفظه سیستم از جنس عایق چوب، الکترود صفحه‌ای از جنس مس، به ابعاد ۱۵×۲۰ سانتی‌متر و الکترودهای نقطه‌ای از ۱۶ عدد سوزن به قطر ۰/۴ میلی‌متر انتخاب و بر روی صفحه‌ای از جنس پلکسی‌گلاس با دو لایه ورق نازک آلومینیومی، تعبیه گردید. این الکترود توسط دو پیچ پلی اتیلنی با قابلیت تنظیم فاصله بین الکترودی به محفظه چوبی متصل شد. در نهایت کل سیستم انکوباتور با دمای ۲۰ ^{0}C (Wisecube, WIG-105, Korea) قرار گرفت. ولتاژ شروع کرونا زمانی در نظر گرفته شد که جریان خروجی دستگاه به ۰/۰۱ میلی آمپر برسد.

۲-۴ رفع انجماد گوشت مرغ

رفع انجماد قطعات منجمد مرغ تحت میدان الکتریکی در سه ولتاژ انتخابی (مابین شروع جریان کرونا و تخلیه الکتریکی) و در فواصل الکترودی معین انجام شد. ولتاژهای به کار رفته عبارتند از: ۴/۵، ۶/۷۵، ۹ کیلوولت؛ ۶/۷۵، ۹، ۱۰/۱۲۵، ۱۳/۵ کیلوولت؛ ۹، ۱۳/۵ و ۱۸ کیلوولت، به ترتیب در فواصل الکترودی ۳، ۴/۵ و ۶ سانتی‌متر. به طوری‌که قدرت‌های میدان ۱/۵، ۲/۲۵ و ۳ کیلوولت بر سانتی‌متر برای ولتاژها و فواصل الکترودی به کار رفته حاصل شد (معادله ۲).

(۲)

$$Electric\ field\ strength = \frac{Voltage}{Electrode\ gap}$$

۱۵ قطعه از نمونه‌های منجمد تهیه شده برای هر تیمار در نظر گرفته شد که تحت شرایط مختلف میدان الکتریکی رفع انجماد شدند. نمونه‌های منجمد بر روی سطح الکترود صفحه‌ای قرار گرفتند و میدان الکتریکی در فاصله بین دو الکترود برقرار شد. فاصله بین دو الکترود صفحه‌ای و سوزنی به عنوان فاصله الکترودی یا گپ در نظر گرفته شد. دمای نمونه گوشت مرغ طی فرایند رفع انجماد با نصب ترموکوپل فیبر نوری (FOB 651A, Canada) در مرکز هندسی قطعات پایش شد و تا رسیدن دمای مرکز نمونه به صفر درجه سانتی‌گراد فرایند ادامه یافت.

۲-۵ اندازه گیری پروفایل‌های دما طی رفع انجماد

با استفاده از ترموکوپل‌های قرار گرفته در مرکز هندسی هر نمونه قبل از فرایند انجماد، دمای هر نمونه طی فرایند رفع انجماد در فواصل زمانی معین ثبت و پروفایل دمایی برای مشخص کردن زمان، سرعت انجماد و تعیین نقطه پایانی رفع انجماد (دمای -1^0C) تعیین گردید. برای تعیین اختلاف دما بین مرکز و اطراف نمونه‌های گوشت از ترموکوپل‌های مخصوص نوک تیز استفاده شد.

۲-۶ تعیین زمان رفع انجماد

زمان سپری‌شده از لحظه قرار دادن نمونه منجمد با دمای ۱۸- درجه سانتی‌گراد داخل سیستم رفع انجماد تا هنگامی‌که دمای مرکز هندسی نمونه به صفر درجه سانتی‌گراد برسد، به‌عنوان زمان رفع انجماد در نظر گرفته شد. پایش دما در طی فرایند به‌طور پیوسته توسط ترموکوپل فیبر نوری ثبت شد.

۲-۷ مصرف انرژی

برای اندازه‌گیری مصرف انرژی طی فرآیند رفع انجماد از دستگاه اندازه‌گیری توان (Power analyzer)، استفاده شد. برای اندازه‌گیری توان مصرفی منبع ولتاژ (ترانس)، دستگاه اندازه‌گیری توان به ورودی ترانس متصل شد و داده‌های جریان و ولتاژ مصرفی ثبت شدند. مصرف انرژی ویژه، بر مبنای کیلوژول بر کیلوگرم وزن نمونه از روی‌داده‌های جریان و ولتاژ و با داشتن زمان فرایند رفع انجماد و وزن نمونه رفع انجماد شده، با استفاده از معادله ۳ به‌دست آمد.

$$P = \frac{VITcos\varphi}{W} \qquad (۳)$$

که در این رابطه، V ولتاژ اعمالی (ولت)، I جریان (آمپر)، T زمان رفع انجماد (ثانیه)، W وزن نمونه (کیلوگرم) و $cos\varphi$ که نشان‌دهنده کسینوس زاویه بین ولتاژ و جریان بوده که معمولاً عددی نزدیک به یک می‌باشد.

۲-۸ تجزیه و تحلیل آماری

برای آنالیز داده‌ها از تجزیه و تحلیل واریانس[1] با استفاده از نرم‌افزار SAS (نسخه ۹/۱) و با در نظر گرفتن سطح احتمال کمتر از ۵ درصد ($P\leq0.05$) انجام شد. در صورت معنی‌دار بودن اختلاف میانگین‌ها، از روش حداقل اختلاف معنی‌دار (LSD) در سطح اطمینان ۹۵ درصد استفاده شد. برای رسم نمودارها نیز از نرم‌افزار Excell (نسخه ۲۰۱۳) استفاده شد.

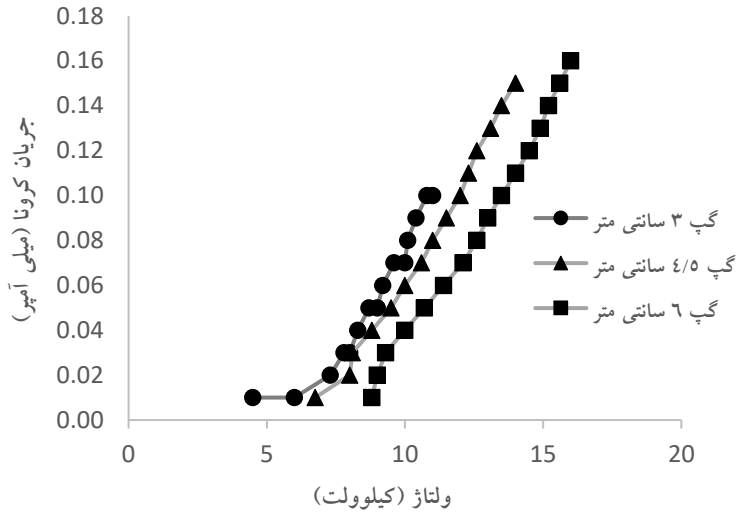
۳- نتایج و بحث

۳-۱ تغییرات جریان- ولتاژ

تغییرات جریان کرونا به‌عنوان تابعی از ولتاژ هنگام فرایند رفع انجماد گوشت سینه مرغ مورد بررسی قرار گرفت. همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، با افزایش ولتاژ، میزان جریان افزایش می‌یابد. ولی با افزایش گپ و دور کردن الکترودهای صفحه و نقطه‌ای از یکدیگر، تغییرات شدت جریان به‌عنوان تابعی از ولتاژ کمتر خواهد شد که علت این امر احتمالاً مقاومت هوای موجود در اطراف الکترودها می‌باشد که با افزایش فاصله میزان آن افزایش می‌یابد. ازآنجایی‌که هوا مقاومت بسیار بالا، در حد گیگا اهم، دارد، هوای یونیزه شده در سمت الکترود سوزنی با حجم بیشتری از هوای غیر یونیزه برخورد می‌کند، که نتیجه آن کاهش تغییرات جریان نسبت به افزایش ولتاژ است. روند افزایش ولتاژ در هر گپ تا جایی ادامه می‌یابد که به حد

[1] Analysis of variance (ANOVA)

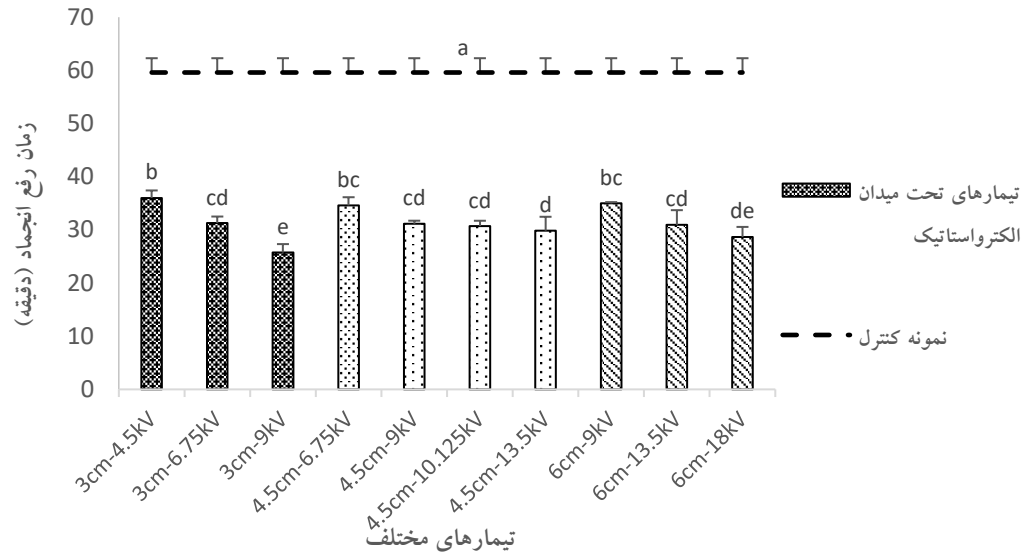
ولتاژ تخلیه رسیده و جرقه الکتریکی حاصل شود. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش گپ، ولتاژ تخلیه نیز افزایش می‌یابد، به‌طوری‌که در گپ ۳، ۴/۵ و ۶ سانتی‌متر به ترتیب ولتاژهای تخلیه ۱۱، ۱۴ و ۱۷ کیلوولت حاصل شد. با توجه به این‌که مکانیسم میدان الکتریکی ولتاژ بالا، بر مبنای تخلیه کرونایی و یونیزاسیون هوای اطراف استوار است، ولتاژهای انتخابی برای هر تیمار بین ولتاژ شروع و تخلیه الکتریکی در نظر گرفته شدند. ایجاد جرقه و بوی مخصوص از نشانه‌های رسیدن به ولتاژ تخلیه می‌باشد.



شکل ۲- تغییرات جریان- ولتاژ در فواصل الکترودی مختلف

۳-۲ زمان فرایند رفع انجماد

تأثیر ولتاژ و فواصل الکترودی مختلف در فرایند رفع انجماد تحت میدان الکترواستاتیک در شکل ۳ مشاهده می‌شود. در هر گپ، با افزایش ولتاژ زمان رفع انجماد به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد ($P\leq0.05$). از سوی دیگر، با افزایش گپ در ولتاژ ثابت (۹kV)، زمان رفع انجماد افزایش می‌یابد. زمان رفع انجماد در گپ ۳ سانتی‌متر و ولتاژ ۹ کیلوولت، ۲/۳ برابر کمتر از زمان فرایند در نمونه کنترل (تحت جریان هوای ساکن)، می‌باشد (۲۵/۷ دقیقه در مقابل ۵۹/۶ دقیقه). به‌هرحال، حتی در قدرت‌های پایین میدان الکتریکی (۱/۵ kV/cm) نیز زمان رفع انجماد به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای کمتر از زمان طی شده برای نمونه کنترل می‌باشد ($P\leq0.05$). بنابراین، می‌توان بیان کرد که رفع انجماد تحت میدان الکترواستاتیک ولتاژ بالا با کاهش قابل‌ملاحظه زمان فرایند، می‌تواند به حفظ ویژگی‌های کیفی فرآورده کمک کند، زیرا کیفیت محصول کمتر تحت تأثیر زمان قرار می‌گیرد و زمان کافی برای ایجاد تغییرات نامطلوب وجود ندارد. نتایج حاصل با نتایج سایر مطالعات در این زمینه مطابقت دارد [۸].



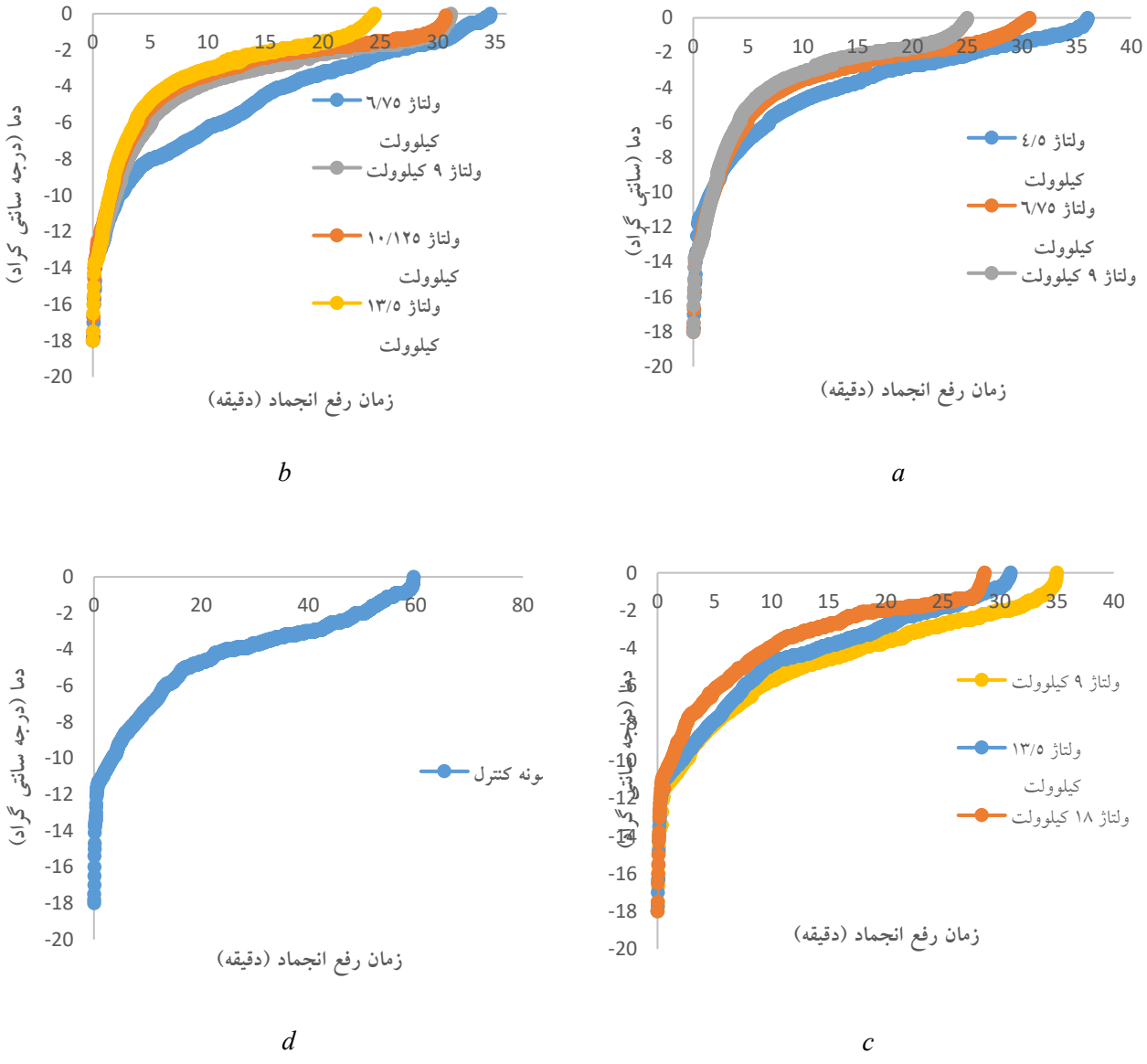
شکل۳- تأثیر ولتاژ و گپ‌های مختلف روی زمان رفع انجماد گوشت سینه مرغ منجمد

(حروف مشترک در سطح اطمینان ۵ درصد معنی‌دار نمی‌باشند).

در بیان علت کاهش زمان می‌توان به اثر قدرت میدان الکتریکی بر مولکول‌های هوای اطراف الکترودهای نقطه‌ای اشاره کرد. با ایجاد میدان الکتریکی، مولکول‌های هوای اطراف یونیزه شده و موجب شتاب و حرکت ثانویه در سیال می‌گردد، به‌طوری‌که باد یونی یا باد کرونایی ایجاد شده موجب تبادل مومنتوم با مولکول‌های خنثی هوا شده و در نتیجه آن شدت جریان کرونا افزایش می‌یابد. با افزایش جریان کرونا که حاصل افزایش شدت میدان و تعداد مولکول‌های یونیزه هوا می‌باشد، دبی حجمی و سرعت هوای برخورد کننده افزایش می‌یابد که افزایش ضریب انتقال حرارت را به دنبال دارد [۹]. بنابراین، زمان مورد نیاز برای رفع انجماد گوشت سینه مرغ کاهش می‌یابد.

۳-۳ پروفایل دمایی طی رفع انجماد

در شکل ۴ پروفایل دمایی مرکز گوشت سینه مرغ طی رفع انجماد در فواصل الکترودی و ولتاژهای مختلف و نمونه کنترل را نشان می‌دهد. در انجماد مواد غذایی دمای ۱- تا ۵- درجه سانتی‌گراد اغلب به‌عنوان منطقه حداکثر تشکیل کریستال‌های یخ محسوب می‌شود. در رفع انجماد مواد غذایی این منطقه بیشترین زمان فرایند را به خود اختصاص می‌دهد. همان‌طور که مشخص است با افزایش ولتاژ اعمالی دمای مرکز گوشت سینه مرغ زودتر به دمای پایانی رفع انجماد می‌رسد. همچنین در یک ولتاژ ثابت با کاهش فاصله الکترودی، دمای مرکز نمونه زودتر به صفر درجه سانتی‌گراد خواهد رسید. بیشترین تأثیر میدان الکتریکی در محدوده دمایی ۱- تا ۵- درجه سانتی‌گراد می‌باشد. علت این امر به خاطر افزایش ضریب انتقال حرارت در حضور میدان الکتریکی ولتاژ بالا است. با استفاده از میدان الکترواستاتیک ولتاژ بالا، حرکات ثانویه حاصل از القاء الکتریکی باعث ناپایدار شدن لایه مرزی گرمایی نزدیک به سطح انتقال گرما می‌شود، در نتیجه توده سیال متلاطم شده و سبب افزایش ضریب انتقال حرارت سطحی و میزان انتقال گرما می‌شود. همچنین افزایش فاصله الکترودی موجب کاهش اثر باد یونی گشته و کاهش انتقال حرارت را به دنبال دارد. افزایش انتقال حرارت در اثر کاهش فاصله الکترودی در یک جریان کرونای مشخص را می‌توان به مقاومت کمتر هوای اطراف نسبت داد، به‌طوری که باد یونی ایجاد شده توسط الکترودهای نقطه‌ای با وجود فاصله الکترودی کم، برخوردهای کمتری با مولکول‌های خنثی هوا داشته و با سرعت بیشتری حرکت می‌کند [۱۰].



شکل ۴- پروفایل دمایی مرکز گوشت سینه مرغ طی رفع انجماد در ولتاژهای مختلف و (*a*) گپ ثابت ۳ سانتی‌متر، (*b*) گپ ٤/٥ سانتی‌متر، (*c*) گپ ٦ سانتی‌متر، (*d*) نمونه کنترل

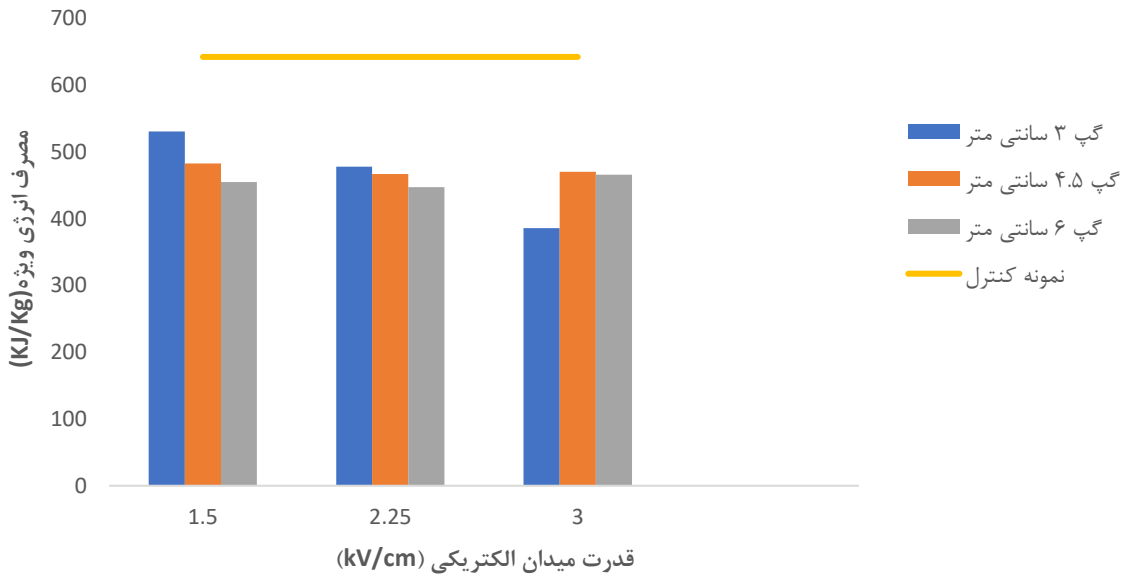
۴-۳ مصرف انرژی

شکل ۵ تغییرات مصرف انرژی ویژه فرایند رفع انجماد گوشت سینه مرغ تحت میدان الکتریکی بر حسب قدرت میدان را نشان می‌دهند. در محاسبه مصرف انرژی، ولتاژ، زمان، جریان و مقاومت پارامترهای تأثیرگذار می‌باشند (معادله ۳-۲). در فواصل الکترودی پایین، با افزایش ولتاژ اعمالی، جریان با سرعت بیشتری تغییر می‌کند، به‌طوری‌که در ولتاژ ثابت، با کاهش گپ و افزایش جریان، مصرف انرژی افزایش می‌یابد. از سوی دیگر، در گپ ۴/۵ و ۶ سانتی‌متر، با افزایش ولتاژ، مصرف انرژی ابتدا کاهش و سپس افزایش یافته است. به نظر می‌رسد که با افزایش ولتاژ، افزایش شدت جریان به اندازه کاهش زمان مؤثر

نبوده است، همچنین با افزایش ولتاژ مقاومت هوا کاهش یافته و سیر بیشتری از مولکول‌های هوا یونیزه شدند. بنابراین، مصرف انرژی کاهش یافته است. در واقع با افزایش ولتاژ، تلفات انرژی مدار (جریان مصرفی مدار) کاهش یافته است، به‌طوری که بررسی داده‌های حاصل از پایش توان توسط دستگاه پاورآنلایزر نیز گویای این مطلب می‌باشد. اما، در ادامه با افزایش بیشتر ولتاژ، مجدداً سیر نزولی در مصرف انرژی مشاهده می‌شود، هرچند میزان انرژی مصرف شده از ولتاژ اولیه کمتر است و افزایش کمی نشان می‌دهد. در بیان علت این پدیده می‌توان بیشتر شدن مجدد اثر جریان نسبت به کاهش مقاومت و کاهش زمان را بیان نمود. از سوی دیگر، در گپ ۳ سانتی‌متر، به‌طور کلی با افزایش ولتاژ، مصرف انرژی کاهش یافته است. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت در این گپ افزایش جریان در همه ولتاژها اثر کمتری نسبت به کاهش زمان یا مقاومت داشته است.

لازم به ذکر است که در محاسبه مصرف انرژی فرایند، مصرف انرژی صرف شده توسط انکوباتور نیز بایستی در نظر گرفته شود. با توجه به اینکه دمای فرایند رفع انجماد روی ^{0}C ۲۵ تنظیم شده بود، انرژی مصرفی مربوط به انکوباتور مقدار کمی داشت و به‌طورکلی، با افزایش ولتاژ در هر گپ، به دنبال کاهش زمان، میزان مصرف انرژی انکوباتور کاهش یافت.

در پژوهشی نیز در بررسی شرایط رفع انجماد گوشت خوک تحت میدان الکترواستاتیک معادله خط درجه دوم با ضریب همبستگی بالا بین مصرف انرژی و قدرت میدان به دست آورند [۱۱]. آن‌ها نشان دادند مصرف انرژی طی فرایند رفع انجماد گوشت خوک در سیستم میدان الکترواستاتیک به‌صورت چشمگیری از سایر روش‌های رفع انجماد مانند روش ماکروویو کمتر است. آن‌ها همچنین گزارش کردند که مصرف انرژی طی فرایند رفع انجماد گوشت خوک با افزایش ولتاژ، افزایش می‌یابد. در مطالعه‌ای دیگر بر روی خشک کردن برش‌های قارچ توسط سیستم الکتروهیدرودینامیک گزارش کردند که با افزایش ولتاژ، مصرف انرژی در سیستم تلفیقی آون- الکتروهیدرودینامیک کاهش می‌یابد [۱].



شکل ۵- تغییرات مصرف انرژی در قدرت‌های مختلف میدان الکتریکی ولتاژ بالا

۴ نتیجه گیری کلی

به‌کارگیری روش غیر حرارتی استفاده از میدان الکتریکی ولتاژ بالا در رفع انجماد گوشت مرغ باعث کاهش حدود ۴۴ درصدی زمان رفع انجماد در بالاترین ولتاژ و کمترین فاصله الکترودی نسبت به شرایط هوای آزاد و بدون اعمال ولتاژ شد.

یکی از مزایای بسیار خوب این روش که اخیراً تأکید زیادی بر آن شده مصرف انرژی بسیار پایین آن می‌باشد. در هر گپ با افزایش ولتاژ، مصرف انرژی روند کاهشی نشان داد که دلیل این موضوع را می‌توان به کاهش تلفات انرژی مدار (کاهش جریان مصرفی مدار) با افزایش ولتاژ مرتبط دانست. از سوی دیگر، در ولتاژ ثابت، با کاهش گپ و افزایش جریان، مصرف انرژی افزایش یافت. در هر صورت، میزان مصرف انرژی در این شرایط بسیار کمتر از سایر روش‌های رایج می‌باشد. به طور کلی می‌توان اذعان داشت فناوری میدان الکتریکی ولتاژ بالا می‌تواند به عنوان یک روش سریع و کارآمد به منظور رفع انجماد گوشت مرغ به کار گرفته شود، البته لازم است ترکیب مناسب فاصله الکترودی و ولتاژ بسته به نوع نمونه انتخاب و بهینه شوند.

۵- مراجع

1. Taghian Dinani, S., Havet, M., Hamdami, N., and Shahedi, M. (2015), Drying of mushroom slices using hot air combined with an electrohydrodynamic (EHD) drying system. Drying Technology, 32, pp 597–605.
2. Lotfi, M., Hamdami, N., Dalvi, M., Fallah, S. (2022), Effects of high voltage electric field on storage life and antioxidant capacity of whole pomegranate fruit. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 75.
3. Xanthakis, E., Havet, M., Chevallier, S., Abadie, J., and Le-Bail, A. (2013), Effect of static electric field on ice crystal size reduction during freezing of pork meat. Innovative Food Science and Emerging Technology, 20, pp 115-120.
4. Singh, A., Orsat, V., and Raghavan, V. (2012), A Comprehensive review on electrohydrodynamic drying and high-voltage electric field in the context of food and bioprocessing. Drying Technology: An International Journal, 30 (16), pp 1812-1820.
5. Rahbari, M., Hamdami, N., Mirzaei, H., Jafari, S.M., Kashaninejad, M., Khomeiri, M. (22018), Effects of high voltage electric field thawing on the characteristics of chicken breast protein. Journal of Food Engineering, 126, pp 98-120.
6. Ahmedou, S., Rouaud., and Havel, M. (2009), Asessment of the electrohydrodynamic drying process. Food Bioprocess Technology, 2, pp 240-247.
7. Bai, Y., Sun, Y., Li, Z., and Kang, D. (2011), Study the optimum parameters of high voltage electrostatic field thawing. Procedia Engineering, 16, pp 679-684.
8. Zhang, Y., Cing, C. (2020), The Study of Thawing Characteristics and Mechanism of Frozen Beef in High Voltage Electric Field. IEEE, 8, pp 134630-134639.
9. Tian, Y., Ding, C. (2023), Effect of High-Voltage Electric Field on Thawing Kinetics and Quality Characteristics of Frozen Beef,
10. Rahbari, M., Hamdami, N., Mirzaei, H., Jafari, S.M. (2020), Investigation of the histological and textural properties of chicken breast thawed by high voltage electric field, Journal of Food Process Engineering, pp 1-11
11. He, X., Liu, R., Nirasawa, S., Zheng, D., and Liu, H. (2014), Factors affecting the thawing characteristics and energy consumption of frozen pork tenderloin meat using high-voltage electrostatic field. Innovative Food Science and Emerging Technologies