

Journal Pre-proofs

Performance Evaluation of a System Based on Hybrid Thawing Methods for Meat and Meat Products

Mohsen Dalvi-Isfahan , Hamid Khafajehb, Mohammad Reza Mostaqbalc

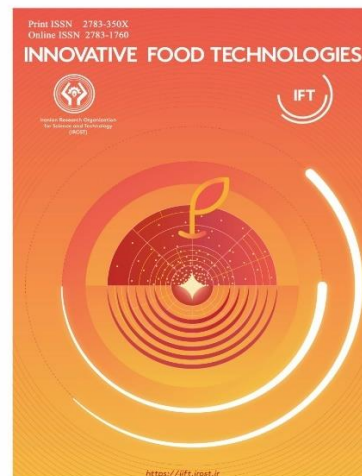
DOI: [https://doi.org/ 10.22104/ift.2026.8460.2318](https://doi.org/10.22104/ift.2026.8460.2318)

To appear in: Innovative Food Technologies (IFT)

Received Date: 1 August 2026

Revised Date: 20 October 2026

Accepted Date: 20 October 2026



Please cite this article as Mohsen Dalvi-Isfahan , Hamid Khafajehb, Mohammad Reza Mostaqbalc, Performance Evaluation of a System Based on Hybrid Thawing Methods for Meat and Meat Products, *Innovative Food Technologies* (2026), doi: [https://doi.org/ 10.22104/ift.2026.8460.2318](https://doi.org/10.22104/ift.2026.8460.2318)

This is a PDF file of an article that has undergone enhancements after acceptance, such as the addition of a cover page and metadata, and formatting for readability, but it is not yet the definitive version of record. This version will undergo additional copyediting, typesetting and review before it is published in its final form, but we are providing this version to give early visibility of the article. Please note that, during the production process, errors may be discovered which could affect the content, and all legal disclaimers that apply to the journal pertain.

© 2026 The Author(s). Published by irost.org.

ارزیابی کارایی سامانه‌ای مبتنی بر روش‌های هیبریدی رفع انجماد در گوشت و فرآورده‌های آن

محسن دلوی-اصفهان^a، حمید خفاجه^{b*}، محمدرضا مستقیل^c

^a دانشیار گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه جهرم، جهرم، ایران

^b استادیار گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه جهرم، جهرم، ایران

^c دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده فناوری کشاورزی ابوریحان، دانشگاه تهران، تهران

نویسنده مسئول: khafajeh@jahromu.ac.ir

چکیده:

فرایند متداول رفع انجماد گوشت به دلیل طولانی بودن، سبب افت کیفی و افزایش مصرف انرژی می‌شود. در این پژوهش، کارایی سامانه هیبریدی مبتنی بر همرفت هوا، میدان الکتریکی ولتاژ بالا (HV)، شدت ۷/۶ کیلوولت بر سانتی‌متر) و تابش مادون قرمز (IR)، توان ۲۵۰ وات) در رفع انجماد گوشت گوساله و سوسیس ۷۰٪ ارزیابی شد. نمونه‌های منجمد شده در دمای ۱۸- C تحت چهار تیمار AC (شاهد)، AC-IR، HV AC- و AC-IR-HV در دمای ۲۰ درجه سلسیوس و سرعت هوای ۰/۵ متر بر ثانیه بررسی شدند. نتایج نشان داد سامانه‌های هیبریدی زمان فرایند را به طور معنی‌داری کاهش دادند ($P < 0.01$). به گونه‌ای که در سوسیس ۷۰٪، زمان رفع انجماد از ۲۰ دقیقه در AC به ۸ دقیقه در AC-IR-HV (۶۰٪ کاهش) و در گوشت گوساله از ۲۴ به ۱۰ تا ۱۱ دقیقه رسید. ایجاد باد یونی در تیمار AC-HV مصرف انرژی ویژه را کاهش داد و بهترین تعادل را بین سرعت و مصرف انرژی ایجاد کرد. ارزیابی بافت‌سنجی (Hardness) نشان داد تیمارهای هیبریدی به طور معنی‌داری مانع تضعیف ساختار بافت ناشی از خروج آب‌چکان شدند ($P < 0.01$). بیشترین سختی بافت در گوشت گوساله و سوسیس مربوط به AC-IR-HV به ترتیب ۱۱/۱۴ و ۶/۶۵ نیوتن) و AC- HV (۱۰/۴۳ و ۶/۶۰ نیوتن) و کمترین آن مربوط به شاهد AC (۸/۱۲ و ۴/۴۳ نیوتن) بود. در مجموع، تیمار AC-IR-HV برای حفظ هم‌زمان کیفیت بافتی و بهره‌وری انرژی و تیمار AC-IR-HV برای کمینه‌سازی زمان فرایند پیشنهاد می‌شود.

واژگان کلیدی: رفع انجماد هیبریدی، میدان الکتریکی ولتاژ بالا، تابش مادون قرمز، بهره‌وری انرژی، فرآورده‌های گوشتی.

۱- مقدمه

انجماد یکی از مؤثرترین و متداول‌ترین روش‌های نگهداری گوشت و فرآورده‌های گوشتی در زنجیره سرد است، زیرا با کاهش فعالیت آبی، کند شدن واکنش‌های شیمیایی، محدود شدن اکسیداسیون لیپیدها و مهار رشد میکروارگانیسم‌های بیماری‌زا و فسادزا، ماندگاری محصول را افزایش می‌دهد (Leygonie et al., 2012; Wang et al., 2024). با این حال، کیفیت نهایی محصول منجمد تنها به مرحله انجماد وابسته نیست و فرایند رفع انجماد^۱ نیز نقشی تعیین‌کننده در حفظ ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و حسی ایفا می‌کند. در عمل، هرگونه کنترل‌نشده‌گی در این مرحله می‌تواند به تخریب ساختار بافت، افزایش افت چکابه^۲، کاهش

¹ Thawing

² Drip loss

ظرفیت نگهداری آب^۳ و افت کیفیت کلی محصول منجر شود (Ali et al., 2015; Wu et al., 2023). روش‌های متداول رفع انجماد، از جمله همرفت هوای ساکن یا اجباری، غوطه‌وری در آب و نگهداری در یخچال، اگرچه ساده و کم‌هزینه هستند، معمولاً با محدودیت‌هایی مانند نرخ پایین انتقال حرارت، توزیع غیریکنواخت دما در بخش‌های مختلف محصول و طولانی شدن زمان فرایند همراهاند (Leygonie et al., 2020; Wang et al., 2024). تداوم این شرایط نه تنها احتمال رشد میکروبی را افزایش می‌دهد، بلکه با ایجاد تنش حرارتی، زمینه بروز آسیب‌های ساختاری و افت ویژگی‌های عملکردی گوشت را نیز فراهم می‌سازد. از این رو، در سال‌های اخیر توجه زیادی به توسعه فناوری‌های نوظهور گرمایی و غیرگرمایی برای بهبود کارایی و کیفیت رفع انجماد معطوف شده است (Cai et al., 2019). در میان فناوری‌های نوین گرمایی، تابش مادون‌قرمز (IR) به دلیل انتقال سریع و مستقیم انرژی به سطح ماده غذایی و جذب مناسب آن توسط مولکول‌های آب، توان بالایی در تسریع فرایند رفع انجماد دارد (Çalışkan Koç et al., 2025). با این حال، محدودیت عمق نفوذ این تابش و تمرکز گرما در لایه‌های سطحی می‌تواند موجب افزایش گرادیان دمایی، داغ‌شدگی موضعی، تشدید تبخیر سطحی و در نهایت افزایش افت وزن محصول شود (Hu et al., 2022). در مقابل، میدان الکتریکی ولتاژ بالا (HV/HVEF) به عنوان یک فناوری غیرگرمایی، از طریق ایجاد باد یونی^۴ و نیروهای الکتروهایدرودینامیکی^۵ بدون افزایش محسوس دمای محصول، ضریب انتقال حرارت جابجایی را بهبود می‌بخشد (Dalvi-Isfahan et al., 2026). گزارش شده است که این فناوری می‌تواند افت ناشی از رفع انجماد را کاهش دهد، ساختار پروتئینی را بهتر حفظ کند و ظرفیت نگهداری آب را بهبود بخشد (Xu et al., 2024). با این وجود، چالش‌هایی نظیر حساسیت عملکرد به هندسه الکترودها، احتمال تشدید اکسیداسیون لیپیدی در ولتاژهای بالا و نیز سرعت کمتر آن نسبت به برخی روش‌های گرمایی مستقیم، همچنان مطرح است (Dalvi-Isfahan et al., 2016; Mousakhani-Ganjeh et al., 2016). برای غلبه بر محدودیت‌های هر فناوری به‌تنهایی، استفاده از سامانه‌های هیبریدی در سال‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته است (Peng et al., 2021; Cai et al., 2018). در چنین سامانه‌هایی، ترکیب همرفت هوا با میدان الکتریکی و/یا تابش حرارتی می‌تواند از طریق بهره‌گیری هم‌زمان از سازوکارهای مختلف انتقال حرارت و جرم، تعادلی مناسب میان سرعت فرایند و حفظ کیفیت ایجاد کند (Chen et al., 2022; Kong et al., 2023). در همین راستا، Dalvi-Isfahan et al. (۲۰۲۶) در مطالعه‌ای بر روی گوشت سینه مرغ نشان دادند که سامانه سه‌گانه AC-IR-HV سریع‌ترین رفع انجماد را فراهم می‌کند، اما ممکن است به دلیل بار حرارتی بالاتر، با افزایش افت وزن، تغییرات نامطلوب رنگ سطح و دناوراسیون بیشتر پروتئین‌ها همراه باشد. در مقابل، ترکیب AC-HV توانست توازن مناسب‌تری میان بهبود سرعت و حفظ کیفیت ساختاری محصول برقرار کند. این یافته‌ها نشان می‌دهد که در فرایند رفع انجماد، میان شتاب فرایند و حفظ ویژگی‌های کیفی نوعی رابطه تعادلی وجود دارد که بهینه‌سازی آن برای هر محصول ضروری است. افزون بر نوع فناوری، پاسخ محصول به فرایند رفع انجماد به‌شدت تحت تأثیر ساختار فیزیکی، ترکیب شیمیایی و ریزساختار ماتریکس غذایی قرار دارد (James et al., 2015).

گوشت گوساله دارای ساختار فیبری و سازمان‌یافته عضلانی است که آب در فضاها درون سلولی و بین‌فیبری آن توزیع شده است (Tornberg, 2005). در مقابل، سوسیس یک ماتریکس امولسیون بازساخته و ناهمگن متشکل از پروتئین، چربی، آب و ترکیبات محلول است که به دلیل حضور نمک و سایر مواد محلول، رفتار انجماد و رفع انجماد متفاوتی از خود نشان می‌دهد؛ به‌گونه‌ای که کاهش نقطه انجماد، جابه‌جایی ناحیه تغییر فاز به دماهای پایین‌تر و تفاوت در توان نگهداری آب، از جمله پیامدهای این ساختار متفاوت هستند (Ali et al., 2015). با وجود اهمیت این تفاوت‌های ساختاری، اکثر پژوهش‌های پیشین صرفاً بر اعمال سامانه‌های تک‌فناوری یا هیبریدی دوگانه متمرکز بوده‌اند و خلأ دانشی چشمگیری در زمینه اثرات هم‌افزا یا تقابلی تلفیق هم‌زمان میدان الکتریکی ولتاژ بالا (HV) و تابش مادون‌قرمز (IR) در بستر جریان همرفتی و نیز مقایسه مستقیم رفتار ماتریکس‌های فیبری و امولسیونی تحت این شرایط وجود دارد. از این رو، نوآوری و اهمیت پژوهش حاضر در مقایسه با تحقیقات گذشته در توسعه یک

³ Water-Holding Capacity (WHC)

⁴ Ionic wind

⁵ Electrohydrodynamics (EHD)

سامانه هیبریدی سه‌گانه نوین (AC-IR-HV) برای بهره‌گیری هم‌زمان از پدیده باد یونی و شار تابشی، بررسی پدیدارشناختی و تطبیقی وابستگی ساختار-فرایند میان دو ماتریکس کاملاً متمایز عضلانی (ناهمسانگرد) و امولسیون (همسانگرد)، و همچنین رویکرد ارزیابی جامع و چندمعیاره فرایند بر پایه ایجاد تعادل میان سینتیک رفع انجماد، شاخص‌های کیفی (افت وزن و پایداری رنگ) و کارایی مصرف انرژی ویژه (SEC) متبلور می‌گردد. بر این اساس، هدف از این پژوهش ارزیابی و مقایسه جامع کارایی چهار تیمار رفع انجماد (AC)، AC-IR، AC-HV و AC-IR-HV بر خصوصیات انتقال حرارت، پروفیل تغییرات دما، شاخص‌های کیفی و مصرف انرژی ویژه در گوشت گوساله و سوسیس ۷۰٪ به‌منظور تعیین مناسب‌ترین پیکربندی فرایندی از دیدگاه فنی و انرژی می‌باشد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- آماده‌سازی نمونه‌ها

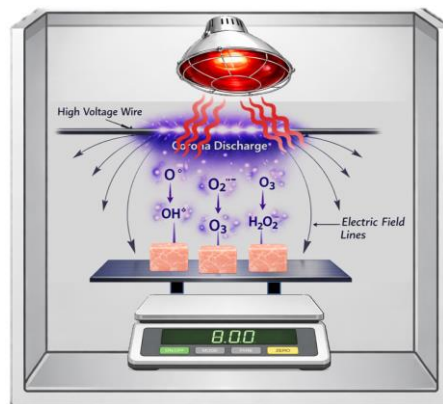
نمونه‌های گوشت تازه از عضله راسته لاشه گوساله نر (با سن تقریبی ۱۸ تا ۲۴ ماه) که از یک مرکز توزیع معتبر محصولات گوشتی در شهرستان جهرم تهیه شده بود، مورد استفاده قرار گرفتند. نمونه‌ها پس از اطمینان از رعایت زنجیره سرد و طی دوره استاندارد جمود نعشی (۲۴ ساعت پس از ذبح در دمای 4°C)، بلافاصله درون یخدان‌های عایق حاوی یخ (در دمای زیر 4°C) طی کمتر از ۲ ساعت به آزمایشگاه منتقل شدند. در بدو ورود به آزمایشگاه، بافت‌های همبند و چربی‌های سطحی به‌دقت حذف گردیدند. نمونه‌های گوشت و همچنین نمونه‌های سوسیس (با فرمولاسیون حاوی ۷۰٪ گوشت) به قطعات مکعبی کاملاً یکنواخت با ابعاد $2 \times 2 \times 2$ سانتی‌متر برش داده شدند. فرایند انجماد سریع نمونه‌ها درون یک تونل انجماد صنعتی در دمای 30°C - با سرعت جریان هوای ۱ متر بر ثانیه انجام گرفت. پس از اتمام انجماد، نمونه‌ها بلافاصله در کیسه‌های پلی‌اتیلنی تحت شرایط خلأ بسته‌بندی (وکیوم) شده و تا زمان انجام آزمون‌های عملی در دمای 18°C - نگهداری شدند. (Dalvi-Isfahan et al., 2026)

۲-۲- روش آزمایش

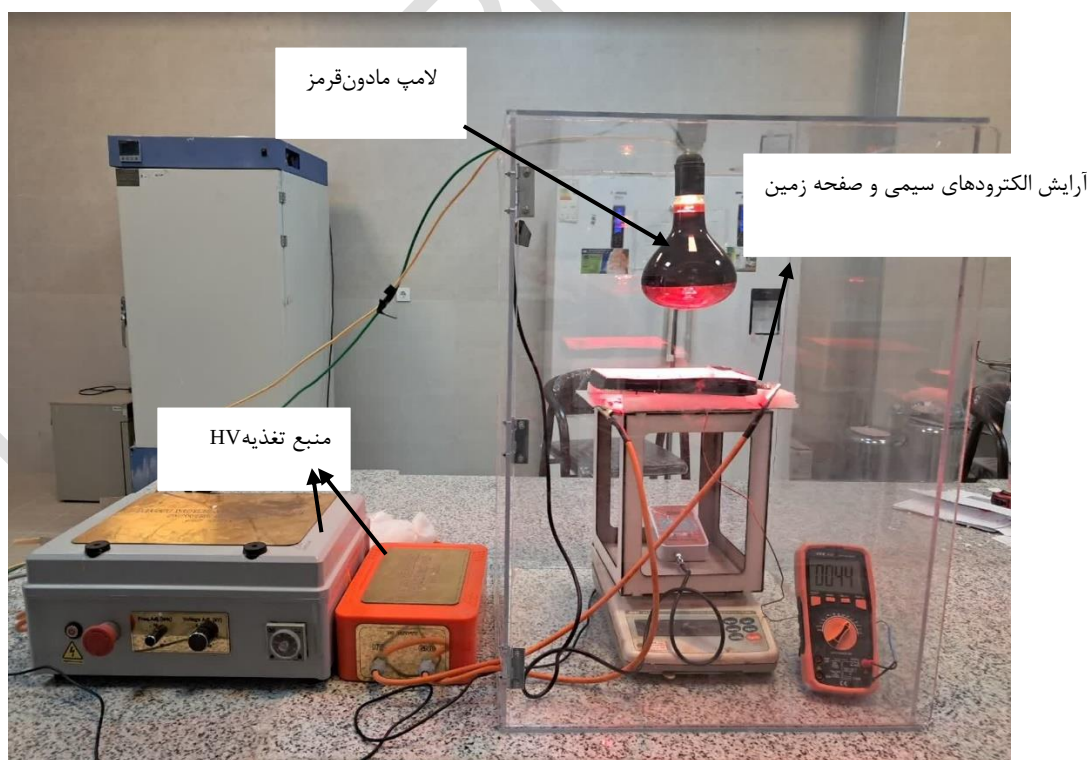
سامانه آزمایشگاهی مورد استفاده شامل یک منبع تغذیه ولتاژ بالا جریان مستقیم (DC) مجهز به کنترل‌کننده پتانسیل با قابلیت تأمین ولتاژ تا ۳۰ kV بود. فرایند اعمال تیمار الکترومغناطیسی با استفاده از آرایش الکترودی سیم به صفحه در داخل محفظه عایق انجام گرفت. الکتروود زمین از یک صفحه آلومینیومی تخت و مستطیلی با ابعاد 15×20 سانتی‌متر تشکیل شده بود، در حالی که الکتروودهای سیمی موازی متصل به قطب مثبت منبع تغذیه، در فاصله ۳ سانتی‌متر بالای صفحه مسی تعبیه شدند. این آرایش هندسی منجر به ایجاد یک میدان الکتریکی یکنواخت با شدت تقریبی $6/7 \text{ kV/cm}$ در محدوده فرآوری گردید. نمونه‌های منجمد سوسیس و گوشت گوساله جهت تیماردهی به‌طور مستقیم بر روی الکتروود زمین قرار گرفتند. برای تأمین هم‌زمان بار حرارتی تابشی، یک لامپ مادون‌قرمز صنعتی با مدل BR125 (Philips, Eindhoven, Netherlands) و توان ۲۵۰ وات بخش فوقانی مجموعه الکتروودها نصب گردید. توان ۲۵۰ وات لامپ مادون قرمز صنعتی بر اساس آزمون‌های مقدماتی و با هدف تأمین شار حرارتی بهینه برای ابعاد نمونه‌های مکعبی (هر ضلع ۲ سانتی‌متر) انتخاب شد. فاصله لامپ تا سطح نمونه ۱۵ سانتی‌متر به‌گونه‌ای تنظیم گردید که ضمن افزایش سرعت ذوب یخ سطحی، دمای سطح نمونه از حدود 5°C تجاوز نکرده و از پختگی موضعی پروتئین‌ها جلوگیری شود. علاوه بر این، به‌منظور شبیه‌سازی شرایط واقعی انجمادزایی، جریان همرفتی هوا در داخل انکوباتور با دمای کنترل‌شده 20°C و سرعت جریان $0/5 \text{ m/s}$ برقرار شد. سرعت جریان باد درون محفظه با بهره‌گیری از یک بادسنج حرارتی سیم داغ با مدل testo 405i (Testo, Germany) اندازه‌گیری و پایش گردید. طرح شماتیک و واقعی این سامانه ترکیبی در شکل ۱ و ۲ ارائه شده است.

به‌منظور ارزیابی رفتار ترمودینامیکی فرایند رفع انجماد، تغییرات دمای مرکز هندسی نمونه‌ها به‌طور مداوم پایش گردید. اندازه‌گیری دما با استفاده از ترموکوپل‌های نوع K متصل به دیتالاگر انجام پذیرفت. جهت مهار نویزهای ناشی از تداخل میدان الکتریکی ولتاژ بالا بر روی سیگنال‌های دیتالاگر، مقادیر دما در فواصل زمانی ۶۰ ثانیه‌ای ثبت گردید؛ بدین صورت که در هر نوبت

قرائت، جریان منبع تغذیه ولتاژ بالا به مدت حداکثر ۳ ثانیه به طور موقت قطع شد تا ثبت داده‌های حرارتی با بیشترین دقت ممکن انجام گیرد. پایش دما تا رسیدن دمای مرکز هندسی نمونه‌ها به دمای 5°C ادامه یافت. داده‌های ثبت شده برای تحلیل پروفیل‌های دمایی، تعیین سرعت گرمایش و ارزیابی سینتیک انتقال حرارت مورد استفاده قرار گرفتند. در این تحقیق، عملکرد چهار تیمار اصلی رفع انجماد شامل: همرفت هوا (AC)، همرفت هوا-مادون قرمز (AC-IR)، همرفت هوا-میدان الکتریکی (AC-HV) و سامانه هیبریدی همرفت هوا-میدان الکتریکی-مادون قرمز (AC-IR-HV) مورد مقایسه قرار گرفت (Dalvi-Isfahan et al., 2023).



شکل (۱). شماتیک سامانه هیبریدی رفع انجماد (ترکیب تابش مادون قرمز و میدان الکتریکی)
Figure 1. Schematic of the hybrid thawing device (combination of infrared and electric field).



شکل (۲). تصویر واقعی از سامانه ساخته شده در مقیاس آزمایشگاهی (شامل منبع تغذیه HV، لامپ مادون قرمز، محفظه جریان همرفتی، آرایش الکترودهای سیمی و صفحه زمین).

۳-۲- افت وزن

افت وزن نمونه‌ها در طی فرایند رفع انجماد بر اساس اختلاف جرم نمونه در حالت منجمد و جرم آن پس از پایان فرایند تعیین شد. برای هر تیمار، جرم اولیه نمونه پیش از رفع انجماد (M_0) و جرم نهایی آن پس از رفع انجماد (M_1) با استفاده از ترازوی دقیق اندازه‌گیری شد و درصد افت وزن مطابق رابطه (۱) محاسبه گردید:

$$\eta(\%) = \frac{M_0 - M_1}{M_0} \times 100 \quad (1)$$

که در آن، η درصد افت وزن، M_0 جرم اولیه نمونه منجمد، و M_1 جرم نمونه پس از رفع انجماد است. تمامی اندازه‌گیری‌ها در سه تکرار مستقل انجام شد و میانگین مقادیر برای تحلیل نهایی مورد استفاده قرار گرفت (Xue et al., 2025).

۴-۲- رنگ

ویژگی‌های رنگی سطح نمونه‌ها پیش از انجماد و بلافاصله پس از پایان فرایند رفع انجماد اندازه‌گیری شد. برای ثبت تصاویر، از دوربین دیجیتال Canon PowerShot A540 (Canon, Tokyo, Japan) با وضوح ۶ مگاپیکسل استفاده شد. به منظور ایجاد شرایط نوری یکنواخت و کاهش اثر تغییرات محیطی، تصویربرداری درون یک محفظه چوبی مجهز به دو لامپ شبیه‌ساز نور روز انجام گرفت. پیش از تصویربرداری، رطوبت سطحی نمونه‌ها با استفاده از کاغذ صافی حذف شد تا اثر بازتاب ناشی از آب سطحی به حداقل برسد. تصاویر ثبت شده با استفاده از نرم‌افزار ImageJ تحلیل شدند و مقادیر رنگی L^* ، a^* و b^* از فضای رنگی CIE Lab استخراج گردید. هر اندازه‌گیری در سه تکرار انجام شد و میانگین مقادیر برای تحلیل نهایی در نظر گرفته شد (Maleki-Bohlooli et al., 2025).

۵-۲- روش اندازه‌گیری و محاسبه انرژی

مصرف انرژی در هر تیمار رفع انجماد بر اساس مجموع انرژی الکتریکی مصرف شده توسط اجزای فعال سامانه در طول فرایند محاسبه شد. در تیمار همرفت هوا (AC)، تنها سامانه جریان هوای همرفتی در فرایند مشارکت داشت و توان مصرفی ۱۵ وات داشت. در تیمارهای حاوی تابش مادون قرمز، توان مصرفی لامپ مادون قرمز برابر با توان نامی آن، یعنی ۲۵۰ وات لحاظ گردید. در تیمارهای مجهز به میدان الکتریکی ولتاژ بالا نیز توان مصرفی سامانه از حاصل ضرب ولتاژ اعمالی (V) در شدت جریان عبوری (I) محاسبه شد؛ به طوری که ولتاژ اعمالی در مقدار ثابت ۲۰ kV تنظیم شده بود و شدت جریان توسط آمپر متر تعبیه شده در منبع تغذیه اندازه‌گیری شد. بر این اساس، انرژی مصرفی کل هر تیمار (E) از رابطه ۲ به دست آمد:

$$E = P \times t \quad (2)$$

که در آن، P توان مصرفی جزء یا اجزای فعال سامانه و t زمان رفع انجماد است. در تیمارهای ترکیبی، انرژی کل از مجموع انرژی مصرفی اجزای فعال شامل سامانه همرفت هوا، لامپ مادون قرمز و یا منبع ولتاژ بالا محاسبه شد و بر حسب ژول یا کیلوژول گزارش گردید. به منظور استانداردسازی نتایج و امکان مقایسه دقیق تر بین تیمارها، انرژی مصرفی ویژه (SEC) از تقسیم انرژی مصرفی کل بر جرم اولیه نمونه منجمد محاسبه شد و بر حسب کیلوژول بر گرم (kJ/g) بیان گردید:

$$SEC = \frac{E}{M_0} \quad (3)$$

که در آن، E انرژی مصرفی کل و M_0 جرم اولیه نمونه منجمد است. این شاخص به عنوان یکی از معیارهای اصلی ارزیابی کارایی انرژی در روش‌های مختلف رفع انجماد مورد استفاده قرار گرفت (Majid et al., 2023).

۶-۲- ارزیابی بافت و تردی گوشت

به منظور سنجش تغییرات سفتی بافت نمونه‌های گوشت پس از رفع انجماد نمونه، نمونه‌های تحت آنالیز بافت قرار گرفتند. آزمون‌های تحلیل پروفایل بافت (TPA) با استفاده از دستگاه آنالایزر بافت (SANTAM، ایران) مجهز به لودسل ۱ کیلوگرمی انجام شد. در تمامی آزمون‌های TPA این مطالعه، از یک پروب استوانه‌ای با قطر ۱۰ میلی‌متر استفاده گردید. نمونه در زیر پروب قرار گرفت و پروب با سرعت ثابت ۲ میلی‌متر بر ثانیه به سمت پایین حرکت کرد. نمونه‌ها دو بار تا ۳۰ درصد ضخامت اولیه خود فشرده شدند و فاصله زمانی بین دو مرحله فشرده‌سازی ۵ ثانیه بود. پارامترهای آنالیز پروفایل بافت، سختی (حداکثر نیروی مورد نیاز برای فشرده‌سازی نمونه) محاسبه شد.

۷-۲- تجزیه و تحلیل آماری

کلیه آزمایش‌ها در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار مستقل برای هر یک از ماتریس‌های غذایی (گوشت و سوسیس) اجرا شدند. برای بررسی اثر تیمارهای مختلف رفع انجماد بر متغیرهای مورد مطالعه، از تحلیل واریانس یک‌طرفه (One-way ANOVA) استفاده شد. تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SPSS نسخه ۲۷ انجام گرفت. مقایسه میانگین‌ها با استفاده از آزمون چنددامنه‌ای دانکن در سطح اطمینان ۹۹٪ ($P < 0.01$) انجام شد و نتایج به صورت میانگین $\pm$ انحراف معیار گزارش شدند.

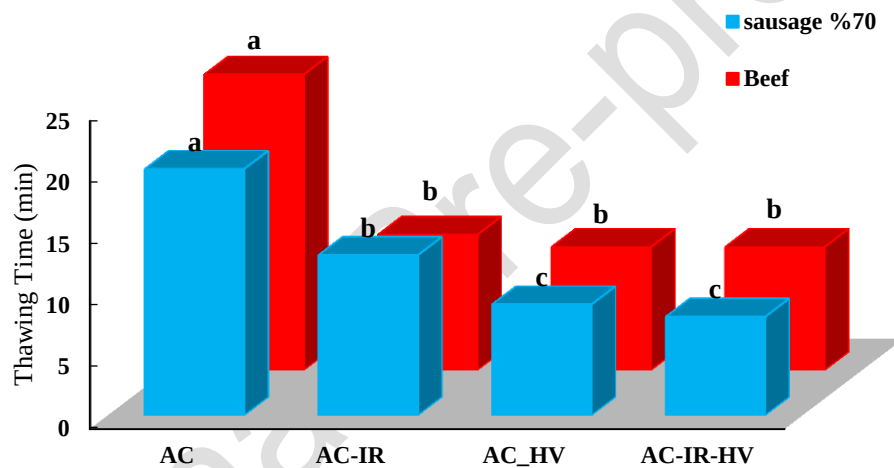
۳- نتایج و بحث

۳-۱- تحلیل کارایی روش‌های هیبریدی رفع انجماد در نمونه‌های گوشت گوساله و سوسیس

۳-۱-۱- سینتیک رفع انجماد و تغییرات دما

شکل ۳ نشان می‌دهند که روش رفع انجماد اثر معنی‌داری بر مدت زمان فرآیند در هر دو نمونه سوسیس ۷۰٪ و گوشت گوساله داشته است ($P < 0.01$). در هر دو محصول، بیشترین زمان رفع انجماد در تیمار همرفت هوای متداول (AC) مشاهده شد که به ترتیب برابر با ۲۰ دقیقه برای سوسیس و ۲۴ دقیقه برای گوشت گوساله بود. در مقابل، به کارگیری فناوری‌های کمکی موجب کاهش معنی‌دار زمان فرآیند گردید؛ به طوری که زمان رفع انجماد سوسیس ۷۰٪ در تیمارهای AC-IR و AC-HV به ترتیب به ۱۳ و ۹ دقیقه کاهش یافت و در نمونه‌های گوشت گوساله، این زمان برای تیمارهای AC-IR، AC-HV و AC-IR-HV به ترتیب به ۱۱، ۱۰ و ۱۰ دقیقه رسید که بین این سه تیمار اختلاف آماری معنی‌داری مشاهده نشد ($P > 0.01$). کوتاه‌ترین زمان فرآیند برای سوسیس ۷۰٪ در تیمار هیبریدی AC-IR-HV با مقدار ۸ دقیقه ثبت شد که در مقایسه با روش همرفت هوا، کاهش ۶۰ درصدی را نشان می‌دهد. مقایسه تیمارهای AC-HV و AC-IR در سوسیس نشان داد که میدان الکتریکی ولتاژ بالا در کاهش زمان فرآیند مؤثرتر از گرمایش مادون‌قرمز عمل کرده است؛ به گونه‌ای که زمان رفع انجماد در تیمار AC-HV حدود ۳۱٪ کمتر از AC-IR بود. این اختلاف نشان می‌دهد که بهبود انتقال حرارت جابه‌جایی نقش تعیین‌کننده‌تری نسبت به افزایش شار حرارتی سطحی در تسریع فرآیند رفع انجماد سوسیس دارد. با این حال، استفاده هم‌زمان از هر دو فناوری در تیمار AC-IR-HV برای سوسیس بیشترین کاهش زمان را به همراه داشت که حاکی از اثر مکمل و هم‌افزای این دو روش است. در مقابل، در گوشت گوساله، ترکیب هم‌زمان میدان الکتریکی ولتاژ بالا و تابش مادون‌قرمز (AC-IR-HV) مزیت زمانی بیشتری نسبت به کاربرد مستقل هر یک از این فناوری‌ها ایجاد نکرد. این رفتار متفاوت بیانگر آن است که در گوشت گوساله، پس از بهبود انتقال حرارت در سطح نمونه، سرعت کلی فرآیند عمدتاً تحت کنترل هدایت حرارتی درون بافت قرار گرفته و افزودن یک منبع انرژی دوم تأثیر محسوسی بر کاهش بیشتر زمان ندارد. این موضوع به ساختار متراکم و فیبری بافت عضلانی گوشت گوساله در مقایسه با ساختار امولسیون‌ی چندفازی سوسیس مربوط می‌شود. یافته‌های این بخش با نتایج مطالعات پیشین همسو است؛ به طوری که Li و همکاران (۲۰۲۵) کاهش زمان رفع انجماد را یکی از مهم‌ترین مزایای استفاده از میدان‌های فیزیکی کمکی، به ویژه میدان الکتریکی ولتاژ بالا، معرفی کردند.

همچنین Jiang و همکاران (۲۰۲۳) گزارش نمودند که ترکیب فناوری‌های فیزیکی در مقایسه با کاربرد منفرد آن‌ها، کارایی بیشتری در تسریع فرآیند ایجاد می‌کند و میزان این هم‌افزایی به ویژگی‌های ترموفیزیکی محصول وابسته است. علاوه بر این، نتایج با گزارش Dalvi-Isfahan و همکاران (۲۰۲۶) مطابقت دارد که در آن سامانه هیبریدی کوتاه‌ترین زمان رفع انجماد را ایجاد کرد؛ اگرچه شدت کاهش زمان در سوسیس مطالعه حاضر بیشتر بود که احتمالاً به تفاوت در ویژگی‌های ترموفیزیکی، ساختار امولسیون و ابعاد نمونه‌ها بازمی‌گردد. در مقابل، عدم تفاوت معنی‌دار میان تیمارهای نوین در گوشت گوساله با یافته‌های Dalvi-Isfahan و همکاران (۲۰۲۶) روی گوشت مرغ متفاوت بود که این مغایرت به دلیل اختلاف در ساختار ریزبافتی، ترکیب شیمیایی، ابعاد نمونه و خواص انتقال حرارت میان گوشت مرغ و گوساله است. از دیدگاه صنعتی، کاهش ۵۰ تا ۶۰ درصدی زمان رفع انجماد می‌تواند افزون بر افزایش ظرفیت عملیاتی، زمان حضور محصول در محدوده دمایی بحرانی رشد میکروارگانیسم‌ها را کاهش داده و به بهبود ایمنی و حفظ کیفیت فرآورده کمک کند.

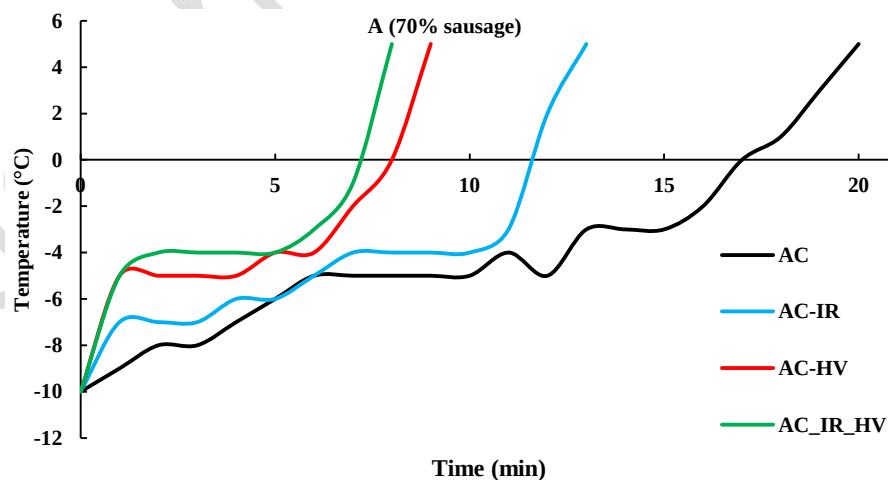


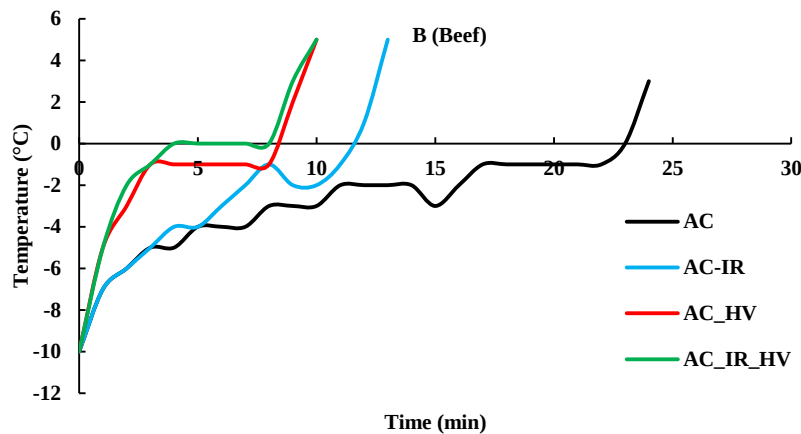
حروف کوچک غیرمشابه نشان‌دهنده اختلاف معنی‌دار بین تیمارها در هر ماتریکس است ($P < 0.01$).
 شکل (۳). اثر روش‌های مختلف رفع انجماد بر زمان فرآیند در نمونه‌های سوسیس ۷۰٪ و گوشت گوساله.

Fig 2. Effect of various thawing methods on the thawing time of 70% sausage samples, and beef samples.

شکل ۴ (A و B) پروفیل تغییرات دمای مرکز نمونه‌های سوسیس ۷۰٪ و گوشت گوساله را در طول فرآیند رفع انجماد نشان می‌دهد. در مقایسه با داده‌های مربوط به زمان کل فرآیند، این پروفیل‌ها امکان تحلیل دقیق‌تری از سینتیک انتقال حرارت، مدت حضور نمونه در ناحیه تغییر فاز و نحوه پاسخ حرارتی محصول در طی رفع انجماد را فراهم می‌کنند. در هر دو ماتریس غذایی، تیمار AC کمترین شیب افزایش دما و طولانی‌ترین زمان حضور در ناحیه تغییر فاز را نشان داد که بیانگر محدودیت در انتقال حرارت به درون نمونه و مصرف بخش عمده انرژی صرف گرمای نهان ذوب است. در مقابل، به‌کارگیری فناوری‌های نوین موجب کاهش مدت حضور در ناحیه تغییر فاز و افزایش شیب منحنی دما شد؛ موضوعی که حاکی از تسریع گذار از مرحله ذوب به مرحله افزایش دمای محسوس و در نتیجه کاهش زمان قرارگیری محصول در محدوده بحرانی تغییر فاز است. با وجود این الگوی کلی

مشابه، رفتار حرارتی دو محصول کاملاً یکسان نبود. در سوسیس ۷۰٪، تیمار AC-IR-HV کوتاه‌ترین زمان عبور از ناحیه تغییر فاز را نشان داد و پس از آن تیمار AC-HV قرار گرفت، در حالی که AC-IR رفتار حدواسطی میان این دو تیمار و شاهد داشت. بررسی منحنی‌های دمایی نشان داد که تابش مادون‌قرمز، علی‌رغم افزایش سرعت گرمایش سطحی، در مراحل ابتدایی فرآیند با ایجاد اختلاف دمای بیشتر بین سطح و مرکز نمونه، گرادیان حرارتی بالاتری را سبب شد. در مقابل، تیمار AC-HV افزایش یکنواخت‌تری در دمای مرکز ایجاد کرد که می‌تواند بیانگر نقش مؤثر این فناوری در بهبود انتقال حرارت جابه‌جایی و یکنواختی توزیع دما در داخل نمونه باشد. در این میان، بیشترین یکنواختی حرارتی در سوسیس تحت تیمار AC-IR-HV مشاهده شد؛ به‌گونه‌ای که ترکیب گرمایش سریع سطحی و انتقال مؤثر انرژی به بخش‌های داخلی، موجب کوتاه شدن مرحله تغییر فاز بدون بروز نوسانات شدید دمایی گردید. در مقابل، در گوشت گوساله، هر سه تیمار نوین موجب افزایش نرخ انتقال حرارت و تسریع عبور از ناحیه تغییر فاز شدند، اما بین تیمارهای AC-HV و AC-IR-HV تفاوت محسوسی در روند افزایش دمای مرکز مشاهده نشد. این یافته نشان می‌دهد که در گوشت گوساله، پس از کاهش مقاومت انتقال حرارت در سطح، عامل کنترل‌کننده فرآیند عمدتاً هدایت حرارتی درون بافت است؛ بنابراین، افزودن تابش مادون‌قرمز به میدان الکتریکی ولتاژ بالا، علی‌رغم افزایش شار حرارتی سطح، اثر قابل‌توجهی بر سینتیک گرمایش مرکز نمونه نداشت. این تفاوت رفتاری میان دو ماتریس غذایی را می‌توان به تفاوت در ساختار فیزیکی آن‌ها نسبت داد؛ به‌طوری‌که در سوسیس، ماهیت امولسیون و همگن محصول، بستر مناسب‌تری برای بروز اثرات هم‌افزای فناوری‌ها فراهم کرده است، در حالی که در گوشت گوساله، ساختار متراکم و فیبری بافت عضلانی، نقش هدایت حرارتی داخلی را برجسته‌تر ساخته است. این نتایج با گزارش‌های Çalışkan Koç و همکاران (۲۰۲۵)، Jiang و همکاران (۲۰۲۳) و Li و همکاران (۲۰۲۵) همخوانی دارد؛ به‌طوری‌که این پژوهش‌ها نیز کاهش مدت حضور در ناحیه تغییر فاز و بهبود یکنواختی توزیع دما را از مهم‌ترین شاخص‌های ارتقای عملکرد سامانه‌های نوین رفع انجماد معرفی کرده‌اند. در مجموع، نتایج این بخش نشان داد که اگرچه فناوری‌های نوین در هر دو محصول نسبت به روش همرفت هوای متداول، زمان رفع انجماد و مدت حضور در ناحیه تغییر فاز را به‌طور معنی‌داری کاهش می‌دهند، شدت اثر هم‌افزایی آن‌ها تابعی از ویژگی‌های ساختاری و ترموفیزیکی ماتریس غذایی است. ازاین‌رو، انتخاب روش بهینه رفع انجماد باید علاوه بر زمان فرآیند، با در نظر گرفتن یکنواختی حرارتی، کیفیت محصول و بهره‌وری انرژی انجام شود.





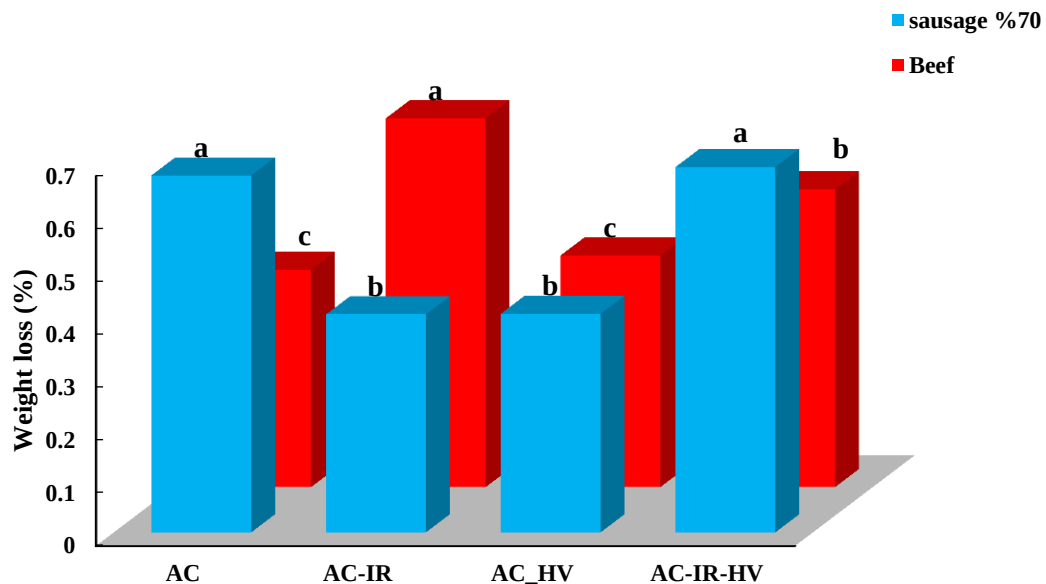
شکل (۴). پروفیل تغییرات دمای مرکز نمونه‌ها در طول فرآیند رفع انجماد: (A) نمونه سوسیس ۷۰٪ و (B) نمونه گوشت گوساله.

Fig 4. Temperature profile of the sample center during the thawing process: (A) 70% sausage samples and (B) beef samples.

۲-۱-۳- تغییرات کیفی: افت وزنی و پایداری رنگ

شکل ۵ (A و B) تغییرات افت وزن نمونه‌های سوسیس ۷۰٪ و گوشت گوساله را پس از رفع انجماد تحت تیمارهای مختلف نشان می‌دهد. نتایج تحلیل آماری نشان داد که روش رفع انجماد اثر معنی‌داری بر افت وزن هر دو محصول داشت ($P < 0.01$), اما الگوی پاسخ آن‌ها به فناوری‌های مختلف یکسان نبود. در سوسیس ۷۰٪، بیشترین افت وزن در تیمار هیبریدی AC-IR-HV مشاهده شد، در حالی که تیمارهای AC-IR و AC-HV کمترین مقادیر افت وزن را نشان دادند و اختلاف آن‌ها با تیمار شاهد از نظر آماری معنی‌دار بود ($P < 0.01$). در مقابل، در گوشت گوساله کمترین افت وزن به تیمار AC (0.412%) و پس از آن AC-HV (0.439%) اختصاص داشت، در حالی که استفاده از تابش مادون‌قرمز موجب افزایش معنی‌دار افت وزن شد؛ به‌طوری‌که بیشترین مقدار در تیمار AC-IR (0.698%) و سپس AC-IR-HV (0.563%) ثبت گردید. این نتایج نشان می‌دهد که اگرچه فناوری‌های نوین زمان رفع انجماد را کاهش می‌دهند، شدت و نحوه انتقال انرژی نقش تعیین‌کننده‌ای در حفظ رطوبت محصول دارد. افت وزن در محصولات گوشتی عمدتاً ناشی از خروج آب آزاد در اثر ذوب بلورهای یخ و کاهش ظرفیت نگهداری آب (WHC) است. در تیمار AC، طولانی بودن فرآیند رفع انجماد موجب افزایش مدت حضور نمونه در ناحیه تغییر فاز و فراهم شدن فرصت بیشتر برای مهاجرت آب از بافت به سطح شد. در مقابل، کوتاه شدن زمان فرآیند در تیمار AC-HV موجب شد رطوبت بیشتری در هر دو محصول حفظ شود؛ به‌گونه‌ای که این تیمار بدون افزایش محسوس افت وزن، زمان رفع انجماد را نیز به‌طور قابل‌توجهی کاهش داد. این رفتار نشان می‌دهد که افزایش انتقال حرارت جابه‌جایی ناشی از میدان الکتریکی ولتاژ بالا، بدون اعمال گرمایش مستقیم، ضمن تسریع فرآیند، ظرفیت نگهداری آب را نیز بهتر حفظ می‌کند. در مقابل، حضور تابش مادون‌قرمز در هر دو ماتریس غذایی با افزایش افت وزن همراه بود، هرچند شدت این اثر در سوسیس و گوشت متفاوت بود. گرمایش سریع سطحی ناشی از تابش مادون‌قرمز موجب ایجاد گرادیان دمایی و فشار بخار بیشتر بین سطح و مرکز نمونه شده و در نتیجه، مهاجرت آب آزاد به سمت سطح و تشکیل خونابه را تسهیل می‌کند. این پدیده در سوسیس، به‌ویژه در تیمار AC-IR-HV، علی‌رغم دستیابی به کوتاه‌ترین زمان رفع انجماد، با افزایش افت وزن همراه بود و نشان داد که کاهش زمان فرآیند لزوماً به معنای حفظ بهتر رطوبت نیست. در گوشت گوساله نیز تیمار AC-IR بیشترین افت وزن را ایجاد کرد، اما افزودن میدان الکتریکی ولتاژ بالا در تیمار AC-IR-HV توانست افت وزن را در مقایسه با AC-IR حدود ۱۹٪ کاهش دهد. این یافته بیانگر آن است که میدان الکتریکی ولتاژ بالا می‌تواند بخشی از اثر نامطلوب گرمایش شدید سطحی ناشی از مادون‌قرمز را تعدیل کرده و توزیع انرژی را در فرآیند متعادل‌تر سازد، اگرچه

حضور تابش مادون قرمز همچنان عامل غالب در افزایش خروج رطوبت باقی می ماند. نتایج این پژوهش با یافته های Çalıřkan Koç و همکاران (۲۰۲۵)، Jiang و همکاران (۲۰۲۳)، Li و همکاران (۲۰۲۵) و Dalvi-Isfahan و همکاران (۲۰۲۶) همخوانی دارد. این مطالعات نشان داده اند که کاهش زمان رفع انجماد معمولاً با کاهش افت وزن همراه است، اما در صورت افزایش بیش از حد شدت گرمایش و ایجاد گرادیان های حرارتی شدید، انتقال جرم و خروج رطوبت افزایش یافته و ظرفیت نگهداری آب کاهش می یابد. همچنین گزارش شده است که میدان الکتریکی ولتاژ بالا، از طریق بهبود انتقال حرارت بدون گرمایش مستقیم، می تواند ساختار بافت و رطوبت محصول را بهتر حفظ کند، در حالی که میزان هم افزایی آن با سایر فناوری ها به ویژگی های ساختاری و ترموفیزیکی محصول وابسته است. در مجموع، نتایج این بخش وجود یک رابطه مصالحه آمیز (trade-off) میان سرعت رفع انجماد و حفظ رطوبت را در هر دو محصول نشان داد. اگرچه سامانه هیبریدی AC-IR-HV بیشترین سرعت رفع انجماد را فراهم کرد، از نظر حفظ رطوبت عملکرد برتری نداشت. در مقابل، تیمار AC-HV با ایجاد تعادل مناسب میان کاهش زمان فرآیند، محدود کردن افت وزن و حفظ کیفیت محصول، متوازن ترین عملکرد را در هر دو ماتریس غذایی نشان داد و از این رو، می تواند گزینه مناسب تری برای کاربردهای صنعتی و توسعه سامانه های رفع انجماد باشد.



حروف کوچک غیرمشابه نشان دهنده اختلاف معنی دار بین تیمارها در هر ماتریکس است ($P < 0.01$).

شکل (۵). افت وزن نمونه های سوسیس ۷۰٪ و گوشت گوساله تحت روش های مختلف رفع انجماد.

Fig 5. Weight loss of 70% sausage and beef samples under various thawing methods.

تحلیل داده های رنگ سنجی به عنوان معیاری کلیدی در ارزیابی کیفیت ظاهری محصول نهایی، همبستگی با نتایج انتقال حرارت و انرژی نشان داد. نتایج جداول ۱ و ۲ نشان داد که روش رفع انجماد باعث تغییر در مختصات رنگی L^* ، a^* و b^* در هر دو ماتریس (سوسیس ۷۰٪ و گوشت گوساله) می شود، اما جهت و شدت تغییرات به نوع محصول و مکانیزم غالب انتقال انرژی وابسته است. به طور کلی، تیمارهای حاوی مادون قرمز (IR) تغییرات رنگی بیشتری ایجاد کردند که با ماهیت گرمایش سریع سطحی، ایجاد

گرادین‌های دمایی شدید، افزایش تبخیر سطحی و تشدید فرآیندهای اکسیداسیونی سازگار است؛ پدیده‌ای که در مطالعات سامانه‌های هیبریدی IR-HV نیز به‌عنوان عامل اصلی افت کیفیت ظاهری گزارش شده است (Khafajeh, & Dalvi-Isfahan, 2026؛ Dalvi-Isfahan et al., 2026؛ Jiang et al., 2023). در سوسیس ۷۰٪ (جدول ۱)، الگوی تغییرات نشان می‌دهد که تیمار AC-IR-HV پس از رفع انجماد با افزایش محسوس b^* همراه بوده است؛ افزایشی که معمولاً به زردشدگی ناشی از اکسیداسیون چربی و یا تغییرات سطحی در اثر بار حرارتی بالاتر نسبت داده می‌شود. در مقابل، تیمار AC-HV کمترین تغییر در L^* را نشان داد که می‌تواند بیانگر حفظ بهتر رطوبت سطحی و کاهش آسیب حرارتی باشد. این نتیجه با گزارش‌های پیشین همسو است که نشان می‌دهند میدان الکتریکی ولتاژ بالا (HV) از طریق تقویت جریان باد یونی حاصل از تخلیه کرونا و کاهش مقاومت لایه مرزی، انتقال حرارت را بدون اعمال گرمایش مستقیم تشدید کرده و در نتیجه احتمال بروز تغییرات نامطلوب رنگی را نسبت به روش‌های IR محور کاهش می‌دهد (Dalvi-Isfahan et al., 2026؛ Li et al., 2025). در گوشت گوساله (جدول ۲)، کاهش L^* پس از رفع انجماد در اغلب تیمارها مشاهده شد (به‌ویژه در AC و AC-HV)، که می‌تواند با کاهش بازتاب سطحی در اثر جابه‌جایی رطوبت، تغییرات ریزساختاری و دگرگونی حالت رنگ‌دانه‌های میوگلوبینی مرتبط باشد. در عین حال، تیمار AC-IR-HV در مقایسه با سایر روش‌ها روشنایی را بهتر حفظ کرده است (کاهش محدودتر L^*) که احتمالاً ناشی از کاهش زمان ماند در ناحیه تغییر فاز و محدود شدن آسیب تجمعی زمان‌وابسته است؛ با این حال، شواهد مطالعات مشابه نشان می‌دهد که قرارگیری IR در سامانه، حتی در صورت کاهش زمان، می‌تواند با افزایش ناهمگنی حرارتی و ایجاد «نقاط داغ»، ریسک تغییرات رنگی/اکسیداسیونی را بالا ببرد (Dalvi-Isfahan and Khafajeh, 2026؛ Dalvi-Isfahan et al., 2026). در مجموع، داده‌های رنگی جداول ۱ و ۲ نشان می‌دهد که IR عامل غالب در تشدید تغییرات ظاهری است، در حالی که HV می‌تواند به‌عنوان جزء تعدیل‌کننده با بهبود انتقال حرارت همرفتی و کاهش بار حرارتی موضعی عمل کند؛ بنابراین، از منظر کیفیت ظاهری، AC-HV در بسیاری از شاخص‌ها یک گزینه متوازن محسوب می‌شود، در حالی که روش‌های IR محور بیشتر مناسب شرایطی هستند که کاهش حداکثری زمان فرآیند اولویت اصلی باشد و مدیریت شدت تابش (فاصله منبع رفلکتور) برای کنترل تغییرات رنگی انجام شود (Dalvi-Isfahan and Khafajeh, 2026؛ Dalvi-Isfahan et al., 2026؛ Li et al., 2025).

جدول (۱). تأثیر فرآیند رفع انجماد بر پارامترهای رنگ (L^* , a^* , b^*) در نمونه‌های سوسیس ۷۰٪.

Table 1. Effect of the thawing process on color parameters (L^* , a^* , b^*) of 70% sausage samples.

Parameter	Treatment	Before Freezing	After Thawing
L^* (Lightness)	AC	42.61± 1.58 ^a	48.79± 1.44 ^a
L^* (Lightness)	AC-IR	37.9± 1.61 ^b	44.21± 2.14 ^b
L^* (Lightness)	AC -HV	41.42± 1.73 ^a	46.204± 1.96 ^a
L^* (Lightness)	AC-IR-HV	36.082± 1.84 ^b	47.31± 1.75 ^a
a^* (Redness)	AC	19.53± 1.03 ^c	16.46± 1.32 ^c
a^* (Redness)	AC-IR	22.58± 1.16 ^a	19.85± 1.27 ^b
a^* (Redness)	AC -HV	21.57± 1.11 ^b	17.75± 1.43 ^c
a^* (Redness)	AC-IR-HV	21.12± 0.98 ^b	21.44± 1.39 ^a
b^* (Yellowness)	AC	17.63± 1.62 ^b	17.025± 1.23 ^c
b^* (Yellowness)	AC-IR	20.83± 1.71 ^a	20.22± 1.34 ^b
b^* (Yellowness)	AC -HV	18.53± 1.79 ^b	17.93± 1.56 ^c
b^* (Yellowness)	AC-IR-HV	16.65± 1.57 ^b	23.09± 1.44 ^a

داده‌ها به صورت میانگین $\pm$ انحراف معیار (سه تکرار مستقل) گزارش شده‌اند. حروف کوچک لاتین نامشابه (a-c) در هر ستون برای هر شاخص رنگی، نشان‌دهنده وجود اختلاف معنی‌دار آماری بین تیمارها بر اساس آزمون چنددامنه‌ای دانکن در سطح اطمینان ۹۹٪ ($P < 0.01$) است. AC: همرفت اجباری هوا؛ AC-IR: همرفت اجباری-مادون قرمز؛ AC-HV: همرفت اجباری-ولتاژ بالا؛ AC-IR-HV: همرفت اجباری-مادون قرمز-ولتاژ بالا).

جدول (۲). تأثیر فرآیند رفع انجماد بر پارامترهای رنگ (L^* , a^* , b^*) در نمونه‌های گوشت گوساله.

Table 2. Effect of the thawing process on color parameters (L^* , a^* , b^*) of beef samples .

Parameter	Treatment	Before Freezing	After Thawing
L^* (Lightness)	AC	33.36 $\pm$ 1.50 ^a	16.51 $\pm$ 2.15 ^b
L^* (Lightness)	AC-IR	22.59 $\pm$ 1.76 ^c	17.29 $\pm$ 2.14 ^b
L^* (Lightness)	AC -HV	20.4 $\pm$ 1.61 ^c	12.14 $\pm$ 1.96 ^c
L^* (Lightness)	AC-IR-HV	26.6 $\pm$ 1.48 ^b	25.25 $\pm$ 1.88 ^a
a^* (Redness)	AC	27.012 $\pm$ 1.12 ^a	20.65 $\pm$ 1.36 ^a
a^* (Redness)	AC-IR	16.64 $\pm$ 1.20 ^b	16.98 $\pm$ 1.53 ^b
a^* (Redness)	AC -HV	9.067 $\pm$ 1.47 ^c	7.99 $\pm$ 1.67 ^c
a^* (Redness)	AC-IR-HV	19.057 $\pm$ 1.28 ^b	17.4 $\pm$ 1.70 ^b
b^* (Yellowness)	AC	13.54 $\pm$ 1.38 ^a	9.72 $\pm$ 1.55 ^a
b^* (Yellowness)	AC-IR	9.61 $\pm$ 1.41 ^b	7.18 $\pm$ 1.72 ^b
b^* (Yellowness)	AC -HV	5.36 $\pm$ 1.27 ^c	3.461 $\pm$ 1.69 ^c
b^* (Yellowness)	AC-IR-HV	10.297 $\pm$ 1.33 ^b	8.45 $\pm$ 1.80 ^b

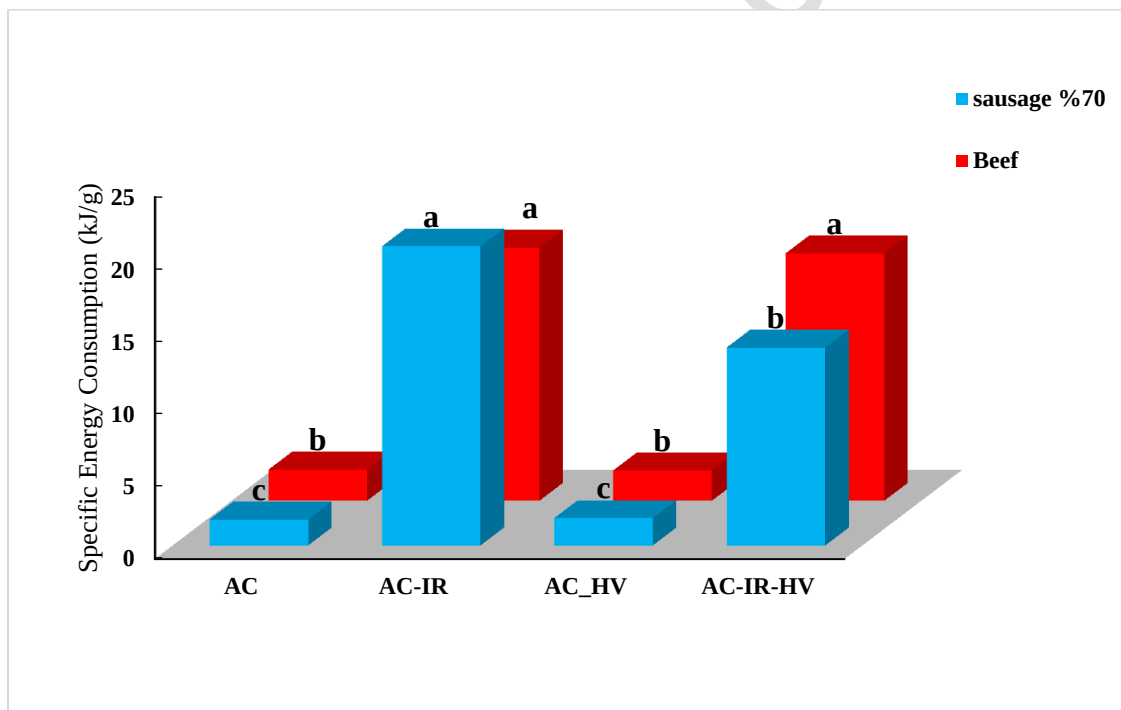
داده‌ها به صورت میانگین $\pm$ انحراف معیار (سه تکرار مستقل) گزارش شده‌اند. حروف کوچک لاتین نامشابه (a-c) در هر ستون برای هر شاخص رنگی، نشان‌دهنده وجود اختلاف معنی‌دار آماری بین تیمارها بر اساس آزمون چنددامنه‌ای دانکن در سطح اطمینان ۹۹٪ ($P < 0.01$) است. AC: همرفت اجباری هوا؛ AC-IR: همرفت اجباری-مادون قرمز؛ AC-HV: همرفت اجباری-ولتاژ بالا؛ AC-IR-HV: همرفت اجباری-مادون قرمز-ولتاژ بالا).

۳-۱-۳- کارایی انرژی سامانه‌های هیبریدی رفع انجماد

نتایج حاصل از تحلیل مصرف ویژه انرژی^۶ (SEC) در نمونه‌های سوسیس ۷۰٪ و گوشت گوساله (شکل ۶) حاکی از آن است که روش رفع انجماد اثر معنی‌داری ($P < 0.01$) بر این شاخص دارد. در هر دو ماتریس غذایی، تیمارهای مبتنی بر همرفت هوای متداول (AC) و ترکیب آن با میدان الکتریکی ولتاژ بالا (AC-HV)، کمترین میزان مصرف انرژی را ثبت کردند. در سوسیس، مقدار SEC برای تیمارهای AC و AC-HV به ترتیب ۱/۸ و ۱/۸۹ kJ g^{-1} بود، در حالی که در گوشت گوساله این مقادیر برای AC و AC-HV به ترتیب ۲/۱۶ و ۲/۱۰ kJ g^{-1} گزارش شد؛ در هر دو محصول، اختلاف آماری میان این دو تیمار معنی‌دار نبود ($P < 0.01$). این یافته‌ها نشان می‌دهد که میدان الکتریکی ولتاژ بالا (HV)، از طریق افزایش بازده انتقال حرارت همرفتی و کاهش مقاومت لایه مرزی، بدون تحمیل بار انرژی قابل توجه، کارایی فرآیند را بهبود می‌بخشد؛ نتیجه‌ای که کاملاً با گزارش‌های Li و همکاران (۲۰۲۵) و Cai و همکاران (۲۰۲۵) در زمینه کارآمدی فناوری HVEF همخوانی دارد. در مقابل، کاربرد تابش مادون قرمز (IR) منجر به

^۶ Specific Energy Consumption

افزایش چشمگیر مصرف انرژی شد؛ به طوری که بیشترین مقادیر SEC در تیمارهای AC-IR و AC-IR-HV ثبت گردید. در سوسیس، تیمار AC-IR مقدار $20/67 \text{ kJ g}^{-1}$ را نشان داد که با افزودن میدان HV به $13/68 \text{ kJ g}^{-1}$ کاهش یافت. در گوشت گوساله نیز مقادیر مشابهی مشاهده شد ($17/49 \text{ kJ g}^{-1}$ برای AC-IR و $17/10 \text{ kJ g}^{-1}$ برای AC-IR-HV). اگرچه سامانه‌های حاوی IR به دلیل ماهیت تابشی، زمان رفع انجماد را به طور قابل توجهی کاهش دادند، اما این مزیت با افزایش مصرف انرژی همراه بود. بالا بودن مقادیر SEC در این تیمارها را می‌توان به توان مصرفی بالای منابع IR و عمق نفوذ محدود انرژی نسبت داد که موجب اتلاف بخشی از انرژی در گرادیان‌های دمایی شدید سطحی می‌شود (Çalışkan Koç *et al.*, 2025; Dalvi-Isfahan *et al.*, 2026; Zhang *et al.*, 2024). نکته قابل تأمل، تفاوت در اثر هم‌افزای HV در سامانه هیبریدی سوسیس و گوشت بود. در سوسیس، افزودن میدان الکتریکی منجر به کاهش حدود ۳۴ درصدی SEC نسبت به AC-IR شد، که بیانگر نقش مثبت HV در بهینه‌سازی انرژی در ساختارهای امولسیون است. با این حال، در گوشت گوساله، تأثیر AC-IR-HV بر کاهش SEC نسبت به AC-IR محدودتر بود که نشان می‌دهد در این محصول، توان منبع مادون قرمز همچنان عامل غالب بر مصرف انرژی است. در مجموع، این نتایج بیانگر وجود یک رابطه موازنه‌ای (Trade-off) میان سرعت رفع انجماد و بهره‌وری انرژی است. اگر هدف، دستیابی به کوتاه‌ترین زمان فرآیند باشد، سامانه AC-IR-HV گزینه مناسبی است؛ اما از دیدگاه ترمودینامیکی و بهره‌وری انرژی، تیمار AC-HV بهینه‌ترین عملکرد را داراست، چرا که ضمن کاهش قابل توجه زمان رفع انجماد، مصرف انرژی را در سطحی نزدیک به روش متداول حفظ می‌کند.

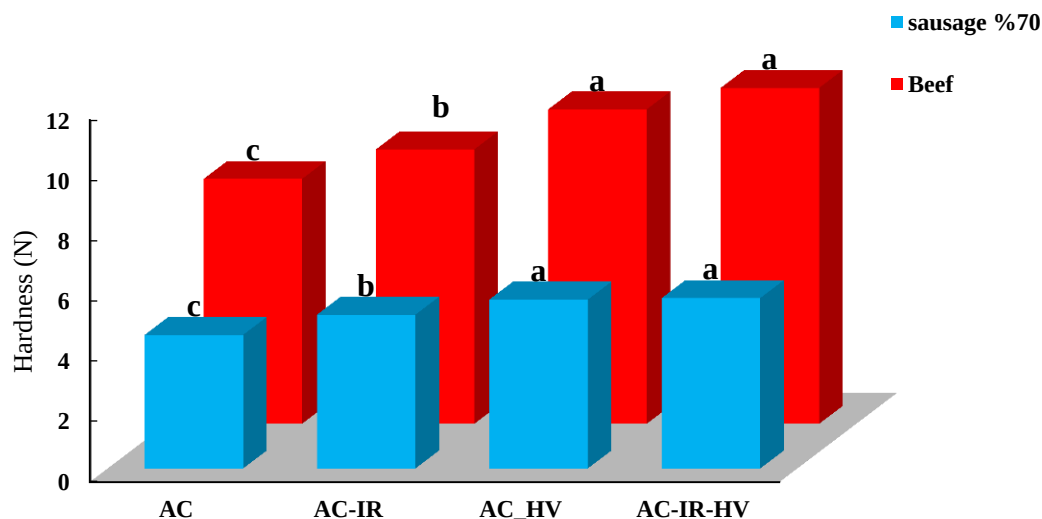


شکل (۶). مصرف ویژه انرژی (SEC) نمونه‌های سوسیس ۷۰٪ و گوشت گوساله تحت روش‌های مختلف رفع انجماد.
Figure 6. Specific energy consumption (SEC) of 70% sausage and beef samples under different thawing methods.

۳-۳-۱- تغییرات سختی بافت در اثر روش‌های مختلف رفع انجماد

نتایج حاصل از اندازه‌گیری شاخص سختی (Hardness) بر حسب نیوتن برای نمونه‌های گوشت گوساله و سوسیس ۷۰٪ تحت تأثیر روش‌های مختلف رفع انجماد در شکل ۷ نشان داده شده است. بر اساس نتایج به دست آمده، در هر دو ماتریکس غذایی، کمترین مقدار سختی در تیمار شاهد هوای گرم (AC) با مقادیر $8/12 \text{ N}$ (برای گوشت) و $4/43 \text{ N}$ (برای سوسیس) ثبت گردید. این نرمی

بیش از حد در روش AC را می‌توان به طولانی‌بودن فرآیند رفع انجماد، فعالیت طولانی‌تر آنزیم‌های پروتئولیتیک درون‌زا و پارگی و ازهم‌گسیختگی وسیع غشاهای سلولی در اثر تشکیل و رشد بلورهای درشت یخ نسبت داد که منجر به افت قوام ساختاری و شل شدن بافت گردیده است. با اعمال امواج مادون قرمز در تیمار AC-IR، سختی بافت به صورت معنی‌داری افزایش یافت و به N ۹/۱ در گوشت و N ۵/۱ در سوسیس رسید. بیشترین مقادیر سختی و قوام بافتی در تیمارهای مجهز به ولتاژ بالا یعنی AC_HV و AC-IR-HV مشاهده شد. افزایش استحکام و سفتی بافت در تیمارهای ولتاژ بالا و امواج مادون قرمز ناشی از دو سازوکار هم‌افزا است: نخست، کاهش چشمگیر زمان فرآیند و تثبیت سریع‌تر شبکه پروتئینی که مانع از آسیب آنزیمی و تخریب ساختاری فیبرهای عضلانی شده است؛ دوم، اثر میدان الکتریکی قوی و تابش سطحی مادون قرمز در پایداری پیوندهای عرضی شبکه پروتئین‌های میوفیبریلی و حفظ یکپارچگی ساختاری که مانع از متلاشی شدن و شل‌شدگی بافت پس از ذوب گردیده است. علاوه بر این، در تمامی تیمارها مقادیر سختی گوشت گوساله (۸/۱۲ تا ۱۱/۱۴) به طور معنی‌داری بالاتر از سوسیس (۴/۴۳ تا ۵۶ N) بود. این تفاوت مستقیماً ناشی از تفاوت ماتریکس ساختاری است؛



شکل (۷). مقایسه اثر روش‌های مختلف رفع انجماد بر شاخص سختی (نیوتن) نمونه‌های سوسیس ۷۰٪ و گوشت گوساله

Figure 7. Effect of various thawing methods on the hardness (N) of beef and 70% meat sausage samples.

۴- نتیجه گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که به کارگیری سامانه‌های هیبریدی مبتنی بر همرفت هوا (AC)، میدان الکتریکی ولتاژ بالا (HV) و تابش مادون قرمز (IR)، می‌تواند کارایی رفع انجماد گوشت گوساله و سوسیس ۷۰٪ را به طور معنی‌داری بهبود بخشد ($P < 0.01$). در میان تیمارهای بررسی شده، سامانه AC-IR-HV کوتاه‌ترین زمان رفع انجماد را رقم زد؛ با این حال، دستیابی به بیشینه سرعت فرآیند، لزوماً با کمترین مصرف انرژی یا مطلوب‌ترین شاخص‌های کیفی همراه نبود. از منظر حفظ کیفیت (رنگ و افت وزن)، تیمار AC-HV به عنوان کارآمدترین سامانه در هر دو ماتریکس غذایی شناخته شد؛ به طوری که این تیمار در مقایسه با سایر تیمارها،

کمترین افت وزن (۴۳۹٪) در گوشت گوساله در برابر ۶۹۸٪ برای AC-IR) و کمترین تغییرات شاخص‌های رنگی، به‌ویژه شاخص زردی (b^*) را به خود اختصاص داد. این برتری به انتقال حرارت بدون گرمایش مستقیم از طریق باد یونی و حفظ بهتر ظرفیت نگهداری آب (WHC) نسبت داده شد. در مقابل، هرچند تیمار AC-IR-HV از نظر حفظ روشنایی (L^*) گوشت گوساله برتر بود، اما به دلیل بار حرارتی تابشی بالاتر، بیشترین زردشدگی سوسیس (ناشی از اکسیداسیون چربی سطحی) و افت وزن قابل توجهی را به همراه داشت؛ چنان‌که افزودن HV به تیمار AC-IR، افت وزن را حدود ۱۹٪ کاهش داد و نقش تعدیل‌کننده میدان الکتریکی بر گرمایش سطحی تابشی را برار AC-IR، افت وزن را حدود ۱۹٪ کاهش داد و نقش تعدیل‌کننده میدان الکتریکی بر گرمایش سطحی تابشی را برجسته ساخت. یافته‌ها همچنین حاکی از آن است که پاسخ ترموفیزیکی‌های امولسیون (سوسیس ۷۰٪) رفتار حرارتی متفاوت و افت وزن بیشتری نشان دادند که این تفاوت به ماهیت ساختاری بافت‌های عضلانی و آسیب‌پذیری بیشتر آن‌ها در برابر خروج آب نسبت داده می‌شود. در مجموع، طراحی سامانه‌های رفع انجماد باید متناسب با ویژگی‌های ریزساختاری و ترموفیزیکی هر محصول صورت پذیرد، زیرا عملکرد یک فناوری واحد در تمامی فرآورده‌های گوشتی یکسان نیست. از دیدگاه کاربردی، سامانه AC-HV برای دستیابی هم‌زمان به سرعت مطلوب، حفظ کیفیت رنگ، کاهش افت وزن و مصرف انرژی بهینه پیشنهاد می‌شود؛ درحالی‌که سامانه AC-IR-HV تنها در کاربردهایی که حداقل‌سازی زمان فرآیند اولویت اصلی است، ارجحیت دارد. از سوی دیگر، این پژوهش با محدودیت‌هایی در ارزیابی جامع برخی صفات کیفی کلیدی گوشت مواجه بود؛ بر این اساس، به دلیل محدودیت‌های آزمایشگاهی در این فاز تجربی، سنجش مستقیم صفات کیفی مهم نظیر میزان بار میکروبی و تغییرات بافتی و تردی گوشت (Texture profile) به همراه ارزیابی ریزساختار، اکسیداسیون لیپیدی/پروتئینی و تحلیل امکان‌سنجی اقتصادی در مقیاس صنعتی، در قالب مطالعات آینده تکمیل و اعمال خواهد شد.

دسترسی به داده‌ها

مجموعه داده‌هایی که در طول این مطالعه تولید شده و یا مورد تحلیل قرار گرفته‌اند، در صورت درخواست از نویسنده مسئول قابل دریافت هستند.

تضاد منافع

نویسندگان اعلام می‌کنند که هیچ‌گونه منافع مالی رقابتی شناخته‌شده یا روابط شخصی که بتواند بر کار گزارش‌شده در این مقاله تأثیر گذاشته باشد، ندارند.

بیانیه تامین مالی

این تحقیق توسط بنیاد ملی علم ایران (INSF) تحت شماره گرنت ۴۰۴۵۱۷۳ پشتیبانی مالی شد.

مشارکت نویسندگان

حمید خفاجه: روش‌شناسی، تحلیل رسمی، نگارش پیش‌نویس اولیه.

محسن ذلوی اصفهان: نظارت، مدیریت پروژه، مفهوم‌پردازی، اعتبارسنجی، بازبینی و ویرایش.

محمدرضا مستقبل: گردآوری داده‌ها.

منابع

1. Ali, S., Zhang, W., Rajput, N., Khan, M. A., Li, C. B., & Zhou, G. H. (2015). Effect of multiple freeze–thaw cycles on the quality of chicken breast meat. *Food chemistry*, 173, 808-814.
2. Cai, L., Cao, M., Cao, A., Regenstein, J., Li, J., & Guan, R. (2018). Ultrasound or microwave vacuum thawing of red seabream (*Pagrus major*) fillets. *Ultrasonics Sonochemistry*, 47, 122-132.
3. Cai, L., Cao, M., Regenstein, J., & Cao, A. (2019). Recent advances in food thawing technologies. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 18(4), 953-970.

4. Çalışkan Koç, G., Özkan Karabacak, A., Süfer, Ö., Adal, S., Çelebi, Y., Delikanlı Kıyak, B., & Öztekin, S. (2025). Thawing frozen foods: A comparative review of traditional and innovative methods. *Comprehensive reviews in food science and food safety*, 24(2), e70136.
5. Chen, B., Zhang, M., Wang, Y., Devahastin, S., & Yu, D. (2022). Comparative study of conventional and novel combined modes of microwave-and infrared-assisted thawing on quality of frozen green pepper, carrot and cantaloupe. *Lwt*, 154, 112842.
6. Dalvi-Isfahan, M., Hamdami, N., Le-Bail, A., & Xanthakis, E. (2016). The principles of high voltage electric field and its application in food processing: A review. *Food Research International*, 89, 48-62.
7. Dalvi-Isfahan, M., Havet, M., Hamdami, N., & Le-Bail, A. (2023). Recent advances of high voltage electric field technology and its application in food processing: A review with a focus on corona discharge and static electric field. *Journal of Food Engineering*, 353, 111551.
8. Dalvi-Isfahan, M., Khafajeh, H., & Razazian, G. (2026). Evaluation of Hybrid Thawing Techniques on Thawing Efficiency and Quality of Chicken Breast Meat. *Journal of Food Process Engineering*, 49(4), e70463.
9. Dalvi-Isfahan, M and Khafajeh, H . (2026). Experimental Study on Chicken meat Thawing Using Hybrid High-Voltage Electric Field and Infrared Technology: Investigating the Effects of Reflector Configuration and Infrared Source Distance. *Journal of food science and technology* (Iran), 23(175), 271-284. doi: 10.48311/fsct.2026.119582.83083
10. He, R., Chen, W., Zhong, Q., Zhang, M., Pei, J., Chen, W., & Chen, H. (2024). Targeted amino acid consumption and respiratory depression to study the antibacterial mechanism of linalool against *Shigella sonnei*. *Food Control*, 155, 110058.
11. Hu, R., Zhang, M., & Mujumdar, A. S. (2022). Application of infrared and microwave heating prior to freezing of pork: Effect on frozen meat quality. *Meat Science*, 189, 108811.
12. Hu, R., Zhang, M., Liu, W., Mujumdar, A. S., & Bai, B. (2022). Novel synergistic freezing methods and technologies for enhanced food product quality: A critical review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 21(2), 1979-2001.
13. James, C., Purnell, G., & James, S. J. (2015). A review of novel and innovative food freezing technologies. *Food and bioprocess technology*, 8(8), 1616-1634.
14. Jiang, Q., Zhang, M., & Mujumdar, A. S. (2023). Application of physical field-assisted freezing and thawing to mitigate damage to frozen food. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 103(5), 2223-2238.
15. Kong, D., Quan, C., Xi, Q., Han, R., Koseki, S., Li, P., ... & Wang, J. (2022). Study on the quality and myofibrillar protein structure of chicken breasts during thawing of ultrasound-assisted slightly acidic electrolyzed water (SAEW). *Ultrasonics Sonochemistry*, 88, 106105.
16. Leygonie, C., & Hoffman, L. C. (2020). Effect of different combinations of freezing and thawing rates on the shelf-life and oxidative stability of ostrich moon steaks (*M. Femorotibialis medius*) under retail display conditions. *Foods*, 9(11), 1624.
17. Leygonie, C., Britz, T. J., & Hoffman, L. C. (2012). Impact of freezing and thawing on the quality of meat. *Meat science*, 91(2), 93-98.
18. Li, Y., Ma, F., Zhang, Y., Cao, Q., Li, X., Zhang, Q., & Liu, G. (2025). Volumetric physical-field-thawing techniques and their combination for muscle foods: applications and innovations. *Meat Science*, 228, 109883.
19. Lu, N., Ma, J., & Sun, D. W. (2022). Enhancing physical and chemical quality attributes of frozen meat and meat products: Mechanisms, techniques and applications. *Trends in Food Science & Technology*, 124, 63-85.
20. Majid, M., Fallah-Joshaqani, S., Dalvi-Isfahan, M., & Hamdami, R. (2023). Comparison of conventional and microwave-assisted extraction of pectin from watermelon rind. *Journal of Polymers and the Environment*, 31(8), 3363-3371.
21. Maleki-Bohlooli, Z., Dalvi-Isfahan, M., Elmizadeh, A., Taghipour, L., & Mohtashami, S. (2025). Comparative effects of cold plasma and high-voltage electric field on physicochemical changes in persimmon during storage. *Applied Food Research*, 101171.
22. Mousakhani-Ganjeh, A., Hamdami, N., & Soltanizadeh, N. (2015). Impact of high voltage electric field thawing on the quality of frozen tuna fish (*Thunnus albacares*). *Journal of Food engineering*, 156, 39-44.
23. Peng, Z., Zhu, M., Zhang, J., Zhao, S., He, H., Kang, Z., ... & Xu, B. (2021). Physicochemical and structural changes in myofibrillar proteins from porcine longissimus dorsi subjected to microwave combined with air convection thawing treatment. *Food Chemistry*, 343, 128412.

24. Pham, Q. T. (2014). Food freezing and thawing calculations. Springer.
25. Rahman, M. S. (2009). Food properties handbook. CRC press.
26. Tornberg, E. V. A. (2005). Effects of heat on meat proteins–Implications on structure and quality of meat products. *Meat science*, 70(3), 493-508.
27. Wu, G., Yang, C., Bruce, H. L., Roy, B. C., Li, X., & Zhang, C. (2023). Effects of alternating electric field during freezing and thawing on beef quality. *Food Chemistry*, 419, 135987.
28. Xu, Y., Leng, D., Li, X., Wang, D., Chai, X., Schroyen, M., ... & Hou, C. (2024). Effects of different electrostatic field intensities assisted controlled freezing point storage on water holding capacity of fresh meat during the early postmortem period. *Food Chemistry*, 439, 138096.
29. Xue, A., Chen, S., & Sun, Y. (2025). Study on the Effects of Different Thawing Methods on the Thawing Efficiency of Pork. *Processes*, 13(4), 1067.

Performance Evaluation of a System Based on Hybrid Thawing Methods for Meat and Meat Products

Mohsen Dalvi-Isfahan ^a, Hamid Khafajeh ^{b*}, Mohammad Reza Mostaqbal^c

^aDepartment of Food Science and Technology, Faculty of Agriculture, Jahrom University, P.O. Box 74135-111, Jahrom, Iran

^b Department of Mechanical Engineering of Biosystems, Jahrom University, P.O. Box 74135-111, Jahrom, Iran

^cM.Sc. Student, Department of Mechanical Engineering of Biosystems, College of Aburaihan, University of Tehran, Tehran, Iran.

Introduction: Freezing is a widely used preservation method for meat and meat products; however, the thawing stage largely determines the final quality of the product. Conventional thawing methods, such as air convection (AC), are often time-consuming and may lead to excessive drip loss, surface dehydration, microbial growth, and quality deterioration. To address these limitations, advanced thawing technologies such as infrared radiation (IR) and high-voltage electric field (HV) have been proposed. Infrared heating provides rapid surface energy transfer, whereas HV can enhance heat transfer through ionic wind generation and boundary-layer disruption without a substantial increase in bulk temperature. In this study, a hybrid thawing system integrating AC, IR, and HV was evaluated for beef cubes and 70% meat sausage in order to investigate thawing kinetics, energy consumption, and quality-related responses.

Materials and Methods: Beef cubes and 70% meat sausage samples were frozen at $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ and thawed under four treatments: AC (control), AC-IR, AC-HV, and AC-IR-HV. The thawing chamber was operated at an ambient temperature of $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ and an air velocity of 0.5 m/s . In the hybrid treatments, the infrared lamp power was set at 250 W, and the electric field intensity was 6.7 kV/cm . Thawing was continued until the core temperature reached the target endpoint. Specific energy consumption (SEC) was calculated based on the total electrical power used by the fan, IR source, and HV unit. Weight loss was determined by comparing sample mass before and after thawing. Color attributes were evaluated using image analysis and reported as L^* , a^* , and b^* , while total color difference was calculated as ΔE . Textural properties were assessed using a texture analyzer equipped with a standard Warner-Bratzler shear blade, where peak shear force (Hardness, N) was recorded. Statistical analysis was performed using one-way ANOVA followed by Duncan's multiple range test at $P < 0.01$.

* Department of Mechanical Engineering of Biosystems, Jahrom University, P.O. Box 74135-111, Jahrom, Iran:
khafajeh@jahromu.ac.ir (H. khafajeh)

Results and Discussion: The results showed that hybrid thawing treatments significantly reduced thawing time in both products compared with the AC control ($P < 0.01$). For 70% meat sausage, the thawing time decreased from 20 min in the AC treatment to 8 min in the AC-IR-HV treatment, corresponding to a 60% reduction. In beef, the shortest thawing time was observed in the hybrid treatments, where thawing time decreased from 24 min in the control to approximately 10–11 min, indicating a reduction of more than 50%. The thawing behavior differed between the two food matrices. Beef exhibited faster thawing kinetics than sausage, whereas the sausage samples showed a longer phase-change plateau due to their emulsion structure and the presence of salts and phosphates, which lower the freezing point and modify heat transfer behavior. Among the hybrid treatments, AC-IR-HV provided the fastest thawing performance in sausage, while AC-HV was nearly as effective as AC-IR-HV in beef, suggesting that ionic wind can efficiently disrupt the boundary layer in muscle tissue. In terms of energy performance, AC-HV showed the most favorable balance between thawing speed and energy efficiency. Although AC-IR-HV achieved the shortest thawing time, its SEC was higher because of the additional power demand of the IR lamp. Therefore, AC-HV can be considered the most energy-conscious option among the accelerated thawing methods.

Regarding quality attributes, IR-assisted treatments tended to increase weight loss and color change compared with AC-HV. The combined use of HV partially moderated the surface drying effect associated with IR by improving convective transfer. Beef samples generally showed greater weight loss than sausage, likely because post-thaw muscle tissue has lower water-holding capacity than the stabilized protein-fat-water matrix in sausage. Color stability was also better preserved in AC-HV than in the IR-containing treatments, where more pronounced changes in redness and total color difference were observed. Furthermore, texture evaluation demonstrated that hybrid thawing significantly preserved tissue firmness against structural softening caused by severe drip loss ($P < 0.01$). The highest hardness values were recorded in AC-IR-HV (11.14 N for beef and 5.65 N for sausage) and AC-HV (10.43 N and 5.60 N, respectively), whereas the AC control showed the lowest hardness values (8.12 N for beef and 4.43 N for sausage).

Conclusions: This study demonstrated that hybrid thawing systems can substantially improve the thawing efficiency of meat and meat products. The AC-IR-HV treatment was the most effective for minimizing thawing time, while AC-HV provided the best compromise among thawing speed, energy efficiency, and quality preservation (including color stability and structural firmness). The response of the thawing process depended strongly on the food matrix, with muscle-based and emulsion-based products showing different heat transfer and quality behaviors. For industrial applications requiring maximum throughput, AC-IR-HV is recommended; however, for applications emphasizing quality retention and energy savings, AC-HV appears to be the more appropriate option.

Keywords: Hybrid Thawing; High Voltage Electric Field; Infrared Radiation; Energy Efficiency; Meat Products