



مجله علوم و صنایع غذایی ایران

سایت مجله: www.fsct.modares.ac.ir

مقاله علمی-پژوهشی

مطالعه تجربی رفع انجماد گوشت مرغ با استفاده از فناوری تلفیقی میدان الکتریکی و مادون قرمز (بررسی اثر تأثیر پیکربندی بازتابنده و فاصله از منبع نوری)
محسن دلوی-اصفهان^{۱*}، حمید خفاجه^{۲*}

۱-دانشیار گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه جهرم، جهرم، ایران

۲-استادیار گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه جهرم، جهرم، ایران

اطلاعات مقاله	چکیده
تاریخ های مقاله : تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۲/۰۶ تاریخ داوری: ۱۴۰۵/۰۲/۲۳ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۲/۳۰	در این پژوهش، برای رفع محدودیت های انتقال حرارت هدایتی، کارایی یک سامانه هیبریدی شامل تابش مادون قرمز و میدان الکتریکی با شدت ۶/۷ کیلوولت بر سانتی متر در رفع انجماد فیله مرغ منجمد بررسی شد. متغیرهای مورد مطالعه شامل نوع بازتابنده (مات، براق و مشبک) و فاصله منبع تابش در سه سطح بود و تأثیر آنها بر سینتیک حرارتی، انرژی مصرفی ویژه، افت وزن و مؤلفه های رنگ ارزیابی گردید. نتایج نشان داد ویژگی های اپتیکی بازتابنده نقش مهمی در یکنواختی شار حرارتی دارند. بازتابنده مات با ایجاد بازتاب پخش، زمان رفع انجماد را به حدود ۱۲ دقیقه و مصرف انرژی را به ۱۳ کیلوژول بر گرم کاهش داد و با جلوگیری از تشکیل نقاط داغ، روشنایی سطح را حفظ کرد. در مقابل، بازتابنده مشبک به دلیل اتلاف انرژی بیشتر، زمان فرایند را به حدود ۲۲ دقیقه افزایش داد. همچنین، شدت بالاتر انتقال حرارت تابشی در بازتابنده مات موجب بیشترین افت وزن شد، در حالی که بازتابنده مشبک با گرمایش ملایم تر، کمترین افت وزن و حفظ بهتر رطوبت را نشان داد. بررسی فاصله منبع تابش نیز رفتار غیرخطی وابسته به ضریب دید را آشکار کرد. فاصله ۱۴ سانتی متر به دلیل اشباع حرارتی موجب کاهش کیفیت رنگ گردید، اما فاصله ۱۷ سانتی متر با ایجاد تعادل میان شدت تابش و نفوذ حرارت، ضمن حفظ رنگ و حداقل افت وزن، به عنوان فاصله بهینه تعیین شد. در مجموع، ترکیب بازتابنده مات و فاصله ۱۷ سانتی متر کارآمدترین شرایط اکوترمودینامیکی را فراهم نمود.
کلمات کلیدی: رفع انجماد، میدان الکتریکی، مادون قرمز، گوشت مرغ، کیفیت بافت، انرژی مصرفی ویژه.	
DOI: 10.48311/fsct.2026.119582.83083 * مسئول مکاتبات: Dalvi@jahromu.ac.ir, mohsen.Dalvi@gmail.com khafajeh@jahromu.ac.ir	

۱-مقدمه

گوشت مرغ به عنوان یکی از استراتژیک ترین و پرمصرف ترین منابع تأمین پروتئین در سبد غذایی خانوارهای سراسر جهان، نقشی حیاتی در تضمین امنیت غذایی ایفا می کند. در کشور ما نیز با توجه به آمارهای رسمی و تولید سالانه بیش از ۳ میلیون تن گوشت مرغ، این محصول سهم عمده ای از بازار فرآورده های پروتئینی را به خود اختصاص داده است [1]. مدیریت این حجم عظیم از تولید و توزیع آن در پهنه ای جغرافیایی وسیع، نیازمند زنجیره ای کارآمد از فرآیندهای نگهداری است که در رأس آن ها، انجماد قرار دارد. انجماد با کاهش دمای محصول به زیر نقطه انجماد آب و تبدیل آب آزاد به کریستال های یخ، فعالیت آبی را کاهش داده و با کند کردن واکنش های بیوشیمیایی و توقف رشد میکروارگانیسم ها، امکان ذخیره سازی طولانی مدت و تعدیل نوسانات بازار را فراهم می آورد. با این حال، کیفیت نهایی محصولی که به دست مصرف کننده می رسد یا وارد چرخه فرآوری صنعتی می شود، تنها وابسته به فرآیند انجماد نیست؛ بلکه مرحله، رفع انجماد، گلوگاه اصلی و بحرانی ترین نقطه در زنجیره ارزش گوشت منجمد محسوب می شود [2].

در طی انجماد، کریستال های یخ تشکیل می شوند و اگر شرایط کنترل نشود، کریستال های بزرگ و تیز را تشکیل می دهند. این کریستال های بزرگ، دیواره سلول های عضلانی و غشاهای پروتئینی را پاره کرده و ساختار طبیعی بافت گوشت را تخریب می کنند. نتیجه مستقیم این تخریب، عدم توانایی بافت در بازجذب آب میان بافتی پس از ذوب یخ است که به صورت پدیده چکابه^۱ نمایان می شود. خروج چکابه نه تنها به معنای کاهش وزن محصول و زیان اقتصادی هنگفت برای تولیدکنندگان است، بلکه منجر به هدررفت بخش قابل توجهی از پروتئین های محلول، ویتامین ها، املاح معدنی و ترکیبات طعم دهنده می شود که در نهایت محصولی خشک، سفت و فاقد ارزش تغذیه ای مطلوب را به همراه دارد [3].

در حال حاضر، بخش عمده ای از صنایع غذایی و مصارف خانگی همچنان به روش های سنتی رفع انجماد، نظیر استفاده از یخچال، هوای محیط و یا غوطه وری در آب متکی هستند. این روش ها عمدتاً بر پایه مکانیسم انتقال حرارت هدایتی از سطح به مرکز محصول استوارند. از آنجایی که ضریب هدایت حرارتی آب حدود ۰/۶ وات بر متر کلون تقریباً چهار برابر کمتر از یخ حدود ۲/۲ وات بر متر کلون است، با ذوب شدن لایه های سطحی گوشت، یک لایه عایق از آب مایع دور محصول شکل می گیرد که مانع انتقال سریع حرارت به هسته منجمد می شود. این پدیده فیزیکی منجر به طولانی شدن بیش از حد زمان فرآیند می گردد. طولانی شدن زمان رفع انجماد، دو پیامد خطرناک دارد: نخست، افت شدید کیفیت بافت ناشی از اکسیداسیون لیپیدها و دناتوره شدن پروتئین ها؛ و دوم که از اهمیت بهداشتی بالاتری برخوردار است، قرارگیری طولانی مدت سطح محصول در محدوده دمایی خطرناک (۵ تا ۶۰ درجه سانتی گراد). این شرایط محیطی ایده آل برای فعال شدن مجدد و رشد تصاعدی میکروارگانیسم های بیماری زا نظیر *سالمونلا*، *کامپیلوباکتر* و *شرشیاکلی* است که می تواند سلامت مصرف کننده را به خطر اندازد. علاوه بر این، روش هایی مانند غوطه وری در آب، با مصرف حجم زیادی از منابع آبی و تولید فاضلاب آلوده، چالش های زیست محیطی جدی ایجاد می کنند [4].

به منظور غلبه بر محدودیت های ذاتی روش های سنتی، در دهه های اخیر پژوهش های گسترده ای بر روی فناوری های نوین متمرکز شده است. هدف این فناوری ها کاهش زمان فرآیند، ایجاد گرمایش یکنواخت، به حداقل رساندن افت خونابه و تضمین ایمنی میکروبی است. در میان طیف وسیعی از روش های نوین شامل امواج فراصوت، مایکروویو، فرکانس رادیویی و فشار بالا، دو فناوری میدان الکتریکی با ولتاژ بالا و تابش مادون قرمز به دلیل ماهیت فیزیکی متفاوت و پتانسیل بالای صنعتی، توجه ویژه ای را به خود جلب کرده اند. فناوری میدان الکتریکی یک روش غیرحرارتی نوین

1 -Drip

است که بر پایه اعمال ولتاژ بالا (معمولاً در محدوده کیلو ولت) بین یک الکتروود تخلیه (سوزنی یا سیم) و یک الکتروود زمین ایجاد می‌شود. مکانیسم اثرگذاری این فناوری در رفع انجماد بسیار پیچیده و چندوجهی است و می‌توان آن را در دو دسته اثرات دینامیکی خارجی و اثرات مولکولی داخلی طبقه‌بندی کرد. این روش به طور موفقیت آمیزی توسط محققین مختلف برای رفع انجماد محصولات از جمله مرغ، ماهی، خوک بهره‌گیری شده است [5-7].

در کنار میدان الکتریکی، گرمایش مادون قرمز به عنوان یک روش حرارتی کارآمد مطرح است. برخلاف روش‌های همرفتی که نیازمند گرم کردن هوای واسط هستند، امواج مادون قرمز انرژی را به صورت تابشی و با سرعت نور مستقیماً به سطح محصول منتقل می‌کنند. این امواج پس از برخورد با سطح گوشت، جذب شده و باعث ارتعاش مولکولی و تولید گرما می‌شوند. مزیت اصلی مادون قرمز، نرخ بسیار بالای انتقال حرارت و سادگی تجهیزات آن است. با این حال، محدودیت عمده این روش، عمق نفوذ کم آن است؛ به طوری که انرژی عمدتاً در سطح جذب می‌شود. این ویژگی می‌تواند منجر به گرمایش بیش‌ازحد سطح (حتی پختگی موضعی) در حالی که مرکز محصول هنوز منجمد است، شود [8]. داودی و همکاران (۱۳۹۷) تاثیر روش ترکیبی مادون قرمز-هوای گرم بر خصوصیات کیفی گوشت مرغ چرخ شده را بررسی کردند. نتایج نشان داد که افزایش پارامترهای توان تابش، دمای هوا و سرعت گردش هوا موجب افزایش سرعت رفع انجماد می‌شود. با استفاده از روش سطح پاسخ، شرایط بهینه شامل توان تابش $247/73$ وات، دمای هوا $38/97$ درجه سانتی‌گراد و سرعت گردش هوا $6/75$ متر بر ثانیه به دست آمد [9].

در این مطالعه، اثر هم‌زمان میدان الکتریکی و تابش مادون قرمز بر فرآیند رفع انجماد بررسی می‌شود. در این سامانه ترکیبی، تابش مادون قرمز وظیفه تأمین انرژی حرارتی لازم برای ذوب سریع یخ را بر عهده دارد، در حالی که میدان الکتریکی نقش مکملی در بهبود انتقال حرارت ایفا می‌کند. روش مادون قرمز مبتنی بر انتقال حرارت تابشی است، در

حالی که روش مبتنی بر میدان الکتریکی عمدتاً بر انتقال حرارت همرفتی استوار است. در این روش، علاوه بر اثرات حرارتی ناشی از پدیده باد یونی، سازوکارهای غیرحرارتی نیز در فرآیند انتقال حرارت دخیل هستند که می‌توانند موجب تسریع فرآیند رفع انجماد شوند. اعمال میدان الکتریکی با ایجاد اختلال در لایه مرزی حرارتی و تقویت انتقال حرارت، به تسهیل و تسریع فرآیند یخ‌زدایی کمک می‌کند [10]. مکانیزم‌های غیرحرارتی میدان الکتریکی، از جمله میدان الکتریکی، موجب تغییر در مولکول‌های آب و شکستن پیوندهای هیدروژنی می‌شود که به کاهش اندازه کریستال‌های یخ و تسریع ذوب آنها کمک می‌کند. همچنین، تولید گونه‌های فعال اکسیژن و نیتروژن در این روش می‌تواند ساختار پروتئین‌های گوشت را تغییر داده و باعث بهبود کیفیت بافت و ظرفیت نگهداری آب در گوشت شود [11]. مطالعات جدید نیز نشان داده‌اند که نیروی الکتروکینتیک ناشی از میدان الکتریکی در ماده مرطوب، حرکت سیالات و انتقال جرم همرفتی را بهبود می‌بخشد، که این امر به یکنواخت‌سازی دما و تسریع فرآیند رفع انجماد کمک می‌کند. در نتیجه انتظار می‌رود، ترکیب میدان و مادون قرمز بتواند سرعت فرآیند یخ‌زدایی را افزایش داده و آسیب به بافت گوشت را کاهش دهد [12]. نتیجه نهایی این هم‌افزایی، دستیابی به فرآیندی است که نه تنها سرعت بسیار بالایی دارد، بلکه کیفیت بافت (ظرفیت نگهداری آب)، ویژگی‌های حسی (رنگ و طعم) و ایمنی میکروبی گوشت مرغ را در بالاترین سطح ممکن حفظ می‌کند. این رویکرد ترکیبی، افق‌های تازه‌ای را در صنعت فرآوری مواد غذایی گشوده و نویدبخش گذار از روش‌های ناکارآمد سنتی به سیستم‌های هوشمند، کم‌مصرف و باکیفیت در آینده نزدیک است. در این مطالعه با ثابت در نظر گرفتن شرایط میدان الکتریکی، به بررسی اثر متغیرهای روش مادون قرمز خواهیم پرداخت.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- آماده‌سازی نمونه‌ها

فیلدهای تازه سینه مرغ بدون پوست و استخوان به صورت روزانه تهیه شدند. نمونه‌های مرغ به صورت مکعب‌های یکنواخت (۲×۲×۲ سانتی‌متر) برش خورده و به سرعت در یک تونل انجماد با دمای ۳۰- درجه سانتی‌گراد و سرعت هوای ۱ متر بر ثانیه به مدت تقریبی ۲ ساعت منجمد شدند تا دمای مرکز آن‌ها به حدود ۸- درجه سانتی‌گراد برسد. بلافاصله پس از انجماد، نمونه‌ها در کیسه‌های پلی‌اتیلنی بسته‌بندی خلأ (وکیوم) شده و برای به حداقل رساندن تغییرات کیفی ناشی از نگهداری طولانی‌مدت، حداکثر به مدت یک هفته پیش از شروع آزمایش‌ها در دمای ۱۸- درجه سانتی‌گراد نگهداری شدند [6].

۲-۲- روش آزمایش

دستگاه آزمایش شامل یک منبع تغذیه ولتاژ بالا متصل به یک کنترل‌کننده ولتاژ بود که قابلیت تأمین ولتاژ تا ۲۰ کیلوولت را داشت. این سیستم از پیکربندی الکتروود سیم به صفحه که درون یک محفظه تیمار قرار گرفته بود، بهره می‌برد. الکتروود زمین شامل یک صفحه مسی تخت مستطیلی با ابعاد ۲۰×۱۵ سانتی‌متر بود، در حالی که چندین الکتروود سیمی موازی (متصل به قطب مثبت منبع تغذیه) در فاصله ۳ سانتی‌متری بالای صفحه معلق بودند و یک میدان الکتریکی غیر یکنواخت با میانگین شدت میدان ۶/۷ کیلوولت بر سانتی‌متر را در سراسر ناحیه تیمار ایجاد می‌کردند. نمونه‌های گوشت مرغ مستقیماً روی الکتروود زمین درون محفظه قرار گرفتند. یک لامپ مادون قرمز مدل BR125، فیلیپس، آینه‌هون، هلند با توان ۲۵۰ وات در بالای مجموعه الکتروودها نصب شد تا انرژی گرمایی هم‌زمان را تأمین کند. همچنین، به منظور بررسی اثر سطوح مختلف تابش، سه فاصله متفاوت بین منبع مادون قرمز و سطح نمونه‌ها (۱۴، ۱۷ و ۲۰ سانتی‌متر) در این پژوهش مورد آزمون قرار گرفت. علاوه بر این، برای بهبود انتقال حرارت و شبیه‌سازی بهتر شرایط واقعی رفع انجماد،

جریان همرفت هوا با دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد و سرعت جریان ۰/۴ تا ۰/۵ متر بر ثانیه در داخل انکوباتور وجود داشت. سرعت جریان هوای داخل محفظه با بادسنج سیم داغ مدل testo 405i، تستو، آلمان اندازه‌گیری شد. طرح شماتیک سامانه مورد استفاده در این پژوهش در شکل ۱ نشان داده شده است. برای بررسی سینتیک حرارتی فرآیند رفع انجماد، دمای مرکز حرارتی نمونه‌ها به صورت پیوسته پایش شد. تغییرات دما در مرکز نمونه با استفاده از ترموکوپل‌های نوع K متصل به یک دیتالاگر مدل اندازه‌گیری شد. این داده‌ها برای تحلیل پروفیل دمایی، تعیین سرعت گرمایش و بررسی تفاوت‌های سینتیکی ناشی از نوع بازتابنده و فاصله منبع تابش مورد استفاده قرار گرفتند. فرآیند رفع انجماد زمانی کامل تلقی شد که دمای سردترین نقطه نمونه (مرکز حرارتی) به مقداری اندکی بالاتر از نقطه انجماد محصول غذایی، یعنی حدود ۱+ درجه سانتی‌گراد، برسد [6]. در این تحقیق از سه نوع بازتابنده مختلف مات، براق و مشبک استفاده شد، این بازتابنده‌ها نقش الکتروود زمین را در این تحقیق ایفا می‌کنند ولی در عین حال بازتابند نور مادون قرمز هم شناخته می‌شوند و در شکل ۲ نشان داده شده‌اند. با توجه به نتایج داودی و همکاران (۱۳۹۷) که توان حدود ۲۵۰ وات را برای رفع انجماد نمونه‌های مرغ مناسب تشخیص دادند، در این پژوهش این مقدار توان به عنوان یک متغیر ثابت در نظر گرفته شد [9]. در مقابل، فاصله منبع نور تا نمونه به عنوان متغیر مورد بررسی قرار گرفت. اهمیت این متغیر در یافتن فاصله بهینه از نظر ضریب دید^۲ در انتقال حرارت به روش تابش است، که می‌تواند تأثیر چشم‌گیری در کارایی فرآیند رفع انجماد داشته باشد. ضریب دید در تعیین میزان تابش منتقل‌شده از منبع به سطح نمونه تأثیر داشته و با بهینه‌سازی فاصله تابش، می‌توان راندمان فرآیند را به‌طور قابل توجهی افزایش داد.

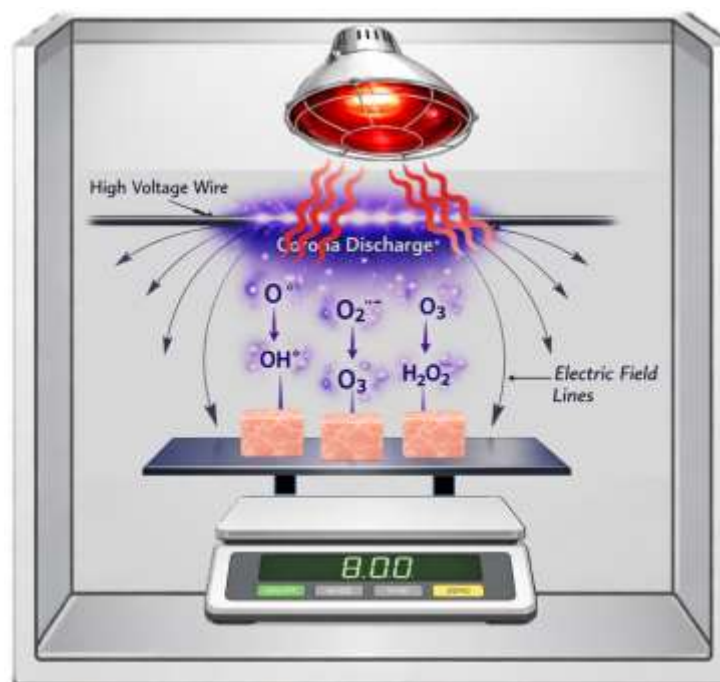


Figure 1. Schematic of the hybrid thawing device (combination of infrared and electric field).



Figure 2. Types of reflectors used in this study: (a) matte, (b) glossy, and (c) mesh.

۲-۳- افت وزن

افت وزن از طریق اندازه‌گیری تفاوت وزن بین نمونه منجمد و حالت رفع انجماد شده همان نمونه تعیین گردید. درصد افت وزن برای هر تیمار بر اساس وزن‌های اولیه و نهایی نمونه ثبت و محاسبه شد.

۲-۴- رنگ

برای ارزیابی رنگ سطح گوشت، تصویربرداری هم قبل از انجماد و هم بلافاصله پس از انجام فرآیند انجماد و رفع انجماد صورت گرفت. بدین منظور از یک دوربین دیجیتال مدل Canon PowerShot A540 (کانن، توکیو، ژاپن) با رزولوشن ۶ مگاپیکسل استفاده شد. نمونه‌ها درون یک جعبه

چوبی که با دو لامپ شبیه‌ساز نور روز روشن شده بود قرار گرفتند تا نورپردازی یکنواخت تأمین شده و تغییرات ناشی از نور محیط کاهش یابد. تصاویر به‌دست‌آمده با استفاده از نرم‌افزار ImageJ جهت کمی‌سازی پارامترهای رنگی CIE شامل L^* ، a^* و b^* مورد تحلیل قرار گرفتند [13].

۲-۵- روش اندازه‌گیری و محاسبه انرژی مصرفی ویژه

اندازه‌گیری مصرف انرژی در این سامانه بر مبنای محاسبه مجموع توان الکتریکی مصرفی توسط اجزای گرمایشی و الکتریکی در طول زمان فرآیند رفع انجماد انجام شد. بدین منظور، کل انرژی مصرفی به عنوان حاصل جمع انرژی مصرف‌شده توسط لامپ مادون قرمز و منبع تغذیه ولتاژ بالا

در نظر گرفته شد. توان مصرفی لامپ مادون قرمز برابر با توان نامی آن (۲۵۰ وات) لحاظ گردید و توان مصرفی سامانه ولتاژ بالا از حاصل ضرب ولتاژ اعمالی ثابت (۲۰ کیلوولت) در شدت جریان الکتریکی عبوری (که توسط آمپر متر تعبیه شده در منبع تغذیه پایش می شد) محاسبه شد. با ضرب مجموع این توان ها در مدت زمان دقیق فرآیند رفع انجماد، کل انرژی مصرفی بر حسب ژول یا کیلوژول به دست آمد. در نهایت، جهت استاندارد سازی نتایج و حذف اثر تفاوت های جزئی در وزن نمونه ها، شاخص انرژی مصرفی ویژه از تقسیم کل انرژی مصرفی بر جرم اولیه نمونه گوشت منجمد محاسبه و بر حسب واحد کیلوژول بر گرم گزارش گردید [14].

۲-۶- تجزیه و تحلیل آماری

آزمایش ها به صورت مرحله ای و بر اساس رویکرد تغییر یک عامل در هر زمان^۱ طراحی شدند؛ روشی که در آن در هر مرحله تنها یک متغیر تغییر می کند و سایر متغیرها ثابت نگه داشته می شوند تا اثر همان عامل به طور مستقل ارزیابی شود. مطابق این طرح، در فاز نخست سه نوع بازتابنده با ثابت نگه داشتن فاصله بررسی شد و در فاز دوم، با انتخاب یک نوع بازتابنده ثابت، اثر فاصله منبع تابش در سه سطح مختلف مورد مطالعه قرار گرفت. هر آزمایش سه بار تکرار شد و نتایج به صورت میانگین $\pm$ انحراف معیار در جداول و نمودارها گزارش شدند. تجزیه و تحلیل داده ها با استفاده از نرم افزار SPSS نسخه ۲۷ انجام گرفت. ارزیابی داده ها از طریق آزمون آنالیز واریانس یک طرفه (ANOVA) صورت پذیرفت و تفاوت میانگین تیمارها با آزمون حداقل تفاوت معنی دار (Duncan) در سطح اطمینان ۹۵ درصد ($P < 0.05$) تعیین شد.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- اثر نوع بازتابنده بر زمان رفع انجماد و پروفیل دما

شکل ۳ اثر نوع بازتابنده (رفلکتور) مورد استفاده در این روش که نقش الکتروود زمین را نیز ایفا می کند، بر زمان رفع انجماد نمونه نشان می دهد. با توجه به نتایج می توان مشاهده کرد که خواص اپتیکی و ساختار سطح بازتابنده تأثیر قابل توجهی بر نرخ انتقال حرارت و کاهش زمان فرآیند رفع انجماد دارد؛ به طوری که بازتابنده نوع A (سطح مات) با ثبت کمترین زمان (حدود $3+12$ دقیقه)، بالاترین کارایی را از خود نشان داده است ($P < 0.05$). این عملکرد برتر ناشی از ضریب گسیلندگی^۲ بالاتر و ایجاد بازتاب پخش^۳ در سطوح مات است که موجب می شود انرژی تابشی به صورت یکنواخت تر و مؤثرتری به تمام سطح ماده غذایی بازتابیده شود. در مقابل، بازتابنده نوع B (سطح براق) با زمان تقریبی ۱۸ دقیقه در رتبه دوم قرار دارد؛ زیرا سطوح صیقلی با وجود بازتاب خوب، معمولاً ضریب گسیلندگی پایین تری داشته و بازتاب آینه ای^۴ آن ها ممکن است پوشش حرارتی کمتری نسبت به حالت پخشی ایجاد کند. در نهایت، بازتابنده نوع C (حالت مشبک) با طولانی ترین زمان فرآیند (حدود ۲۲ دقیقه)، ضعیف ترین عملکرد را داشته است که علت اصلی آن کاهش سطح مؤثر بازتاب و نشت انرژی از طریق حفره های شبکه است؛ بنابراین، برای بهینه سازی و تسریع فرآیند رفع انجماد، استفاده از سطوح مات و یکپارچه نسبت به سطوح صیقلی یا مشبک ارجحیت دارد [15]. این نتایج با نتایج پژوهان و همکاران (۲۰۲۰) همراستا است، این محققین نشان دادند که سطح مات فویل آلومینیومی دارای بازتابندگی پخش شده بیشتری است که این ویژگی موجب می شود انرژی تابشی به طور یکنواخت تری بازتابیده شود. در مقابل، سطح براق فویل آلومینیومی دارای بازتابندگی منظم (آینه ای) بیشتری است که باعث می شود انرژی تابشی به طور مستقیم تر و متمرکزتر بازتابیده شود. این تفاوت ها در بازتابندگی به این معناست که سطح مات انرژی را به طور یکنواخت تری توزیع

3 -Diffuse Reflection

4 -Specular Reflection

1 -One-Factor-at-a-Time (OFAT)

2 -Emissivity

می‌کند، در حالی که سطح براق به دلیل بازتاب آینه‌ای، کارایی بهتری در متمرکز کردن نور دارد [16].

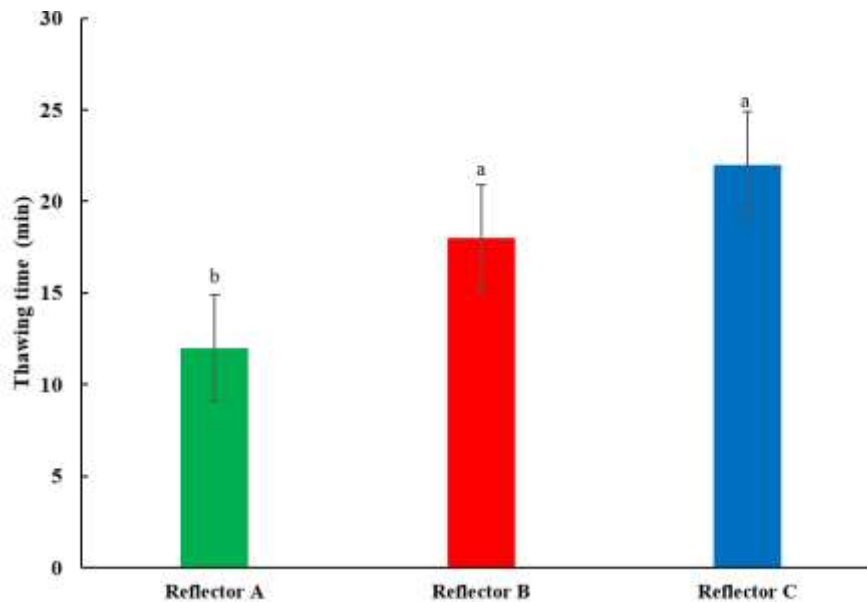


Figure 3. Thawing time of chicken meat under different reflectors.

در مقابل، بازتابنده B رفتاری میانه داشته و بازتابنده C با کمترین شیب، طولانی‌ترین زمان توقف در مرحله تغییر فاز را نشان می‌دهد. طولانی شدن این مرحله در بازتابنده مشبک (C)، که ناشی از هدررفت انرژی و کاهش سطح بازتابش است، بسیار حائز اهمیت است؛ زیرا طولانی ماندن محصول در ناحیه بین ۰- تا ۵- درجه سانتی‌گراد خطر تخریب بافت پروتئینی مرغ را افزایش می‌دهد، در حالی که بازتابنده با عبور سریع از این ناحیه، شرایط بهینه‌تری را برای حفظ کیفیت محصول فراهم کرده است [17].

بررسی پروفیل دمایی نمونه‌های مرغ طی فرآیند رفع انجماد (نمودار پروفیل دما)، تفاوت آشکار نرخ گرمایش و رفتار حرارتی را میان سه نوع بازتابنده تأیید می‌کند (شکل ۴). همان‌طور که در نمودار مشهود است، بازتابنده A دارای تندترین شیب افزایش دما است، به طوری که نمونه در کوتاه‌ترین زمان ممکن (حدود ۱۰ دقیقه) از محدوده بحرانی تغییر فاز (صفر درجه سانتی‌گراد) عبور کرده و به دمای نهایی رسیده است؛ این رفتار حاکی از انتقال حرارت تابشی بسیار مؤثر و ضریب جذب انرژی بالا به دلیل ماهیت مات سطح بازتابنده است که موجب کوتاه شدن دوره تغییر فاز می‌شود.

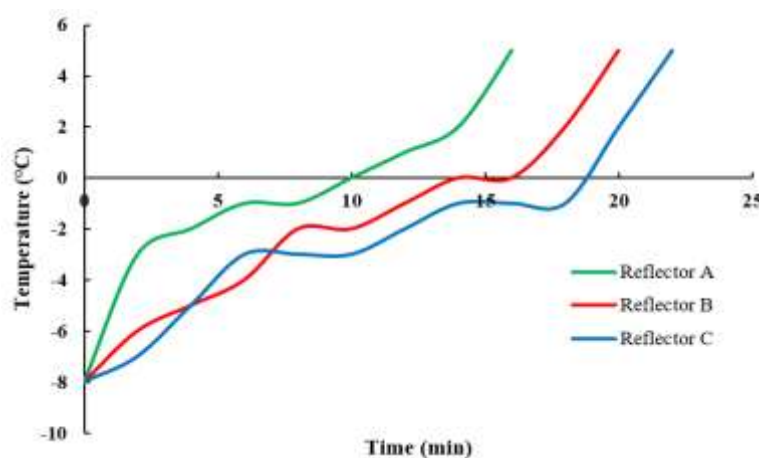


Figure 4. Temperature profile of chicken samples under different reflectors

۳-۲- اثر نوع بازتابنده بر افت وزن

تحلیل نمودار افت وزن (شکل ۵) بیانگر وجود یک نوع رابطه میان سرعت فرآیند و حفظ رطوبت بافت است؛ به طوری که بازتابنده نوع A (سطح مات) با ثبت بالاترین میزان افت وزن (حدود $2/25 \pm 0/31$ درصد)، نشان می‌دهد که شدت بالای انتقال حرارت تابشی و ضریب جذب بالا در این سطح، منجر به افزایش دمای سریع پوسته سطحی محصول^۱ و در نتیجه تشدید تبخیر رطوبت سطحی^۲ شده

است. در مقابل، بازتابنده نوع C (مشبک) با کمترین میزان افت وزن، عملکرد بهتری در حفظ جرم نمونه داشته است؛ زیرا به دلیل ساختار حفره‌دار و هدررفت انرژی، نرخ گرمایش ملایم‌تری اعمال شده و از شوک حرارتی شدید و تبخیر ناگهانی آب میان‌بافتی جلوگیری شده است، هرچند که این امر به قیمت طولانی شدن زمان فرآیند تمام شده است. بازتابنده نوع B نیز با افت وزنی در حدود $1/8 \pm 0/24$ درصد، وضعیتی بینابینی را از نظر تعادل میان انتقال حرارت و انتقال جرم نشان می‌دهد.

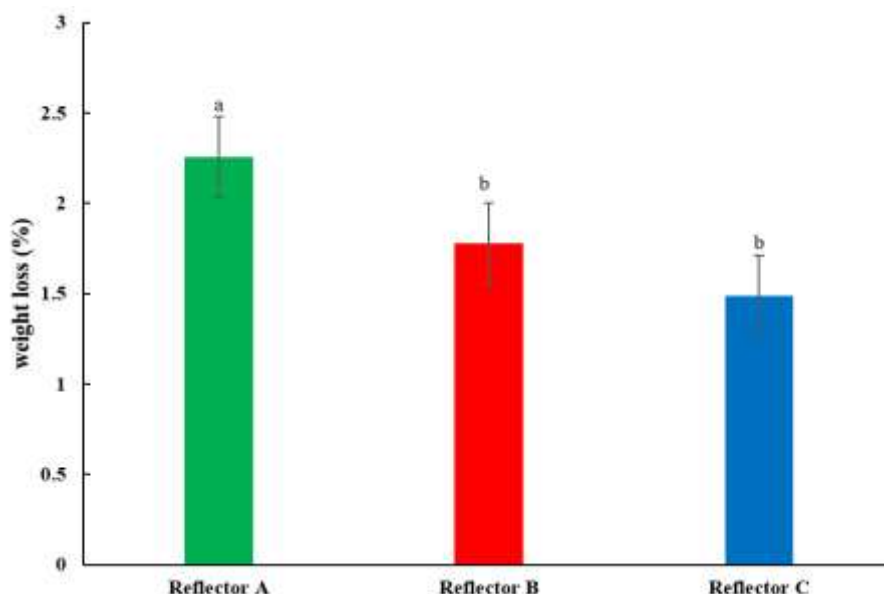


Figure 5. Weight loss in chicken meat under different reflectors

۳-۳- اثر نوع بازتابنده بر انرژی مصرفی ویژه

بررسی شاخص انرژی مصرفی ویژه نشان‌دهنده همبستگی مستقیم میان زمان فرآیند و راندمان انرژی است؛ به طوری که بازتابنده نوع A با ثبت کمترین میزان مصرف انرژی (حدود $139 \pm 2/8$ کیلوژول بر گرم)، بهینه‌ترین عملکرد را از منظر اقتصادی و ترمودینامیکی داشته است. این راندمان بالا ناشی از توانایی سطح مات در بازتابش مؤثر و یکنواخت امواج حرارتی است که با کاهش چشمگیر زمان فرآیند، از کارکرد طولانی مدت منبع تولید انرژی جلوگیری کرده است. در نقطه

مقابل، بازتابنده نوع C (مشبک) با مصرفی بیش از $24 \pm 3/1$ کیلوژول بر گرم تقریباً دو برابر نوع A، پرهزینه‌ترین گزینه محسوب می‌شود؛ چراکه ترکیب نامطلوب نشت انرژی از منافذ شبکه و طولانی شدن زمان فرآیند، موجب هدررفت شدید انرژی ورودی شده است. بازتابنده نوع B نیز با مصرفی در حدود $20 \pm 2/9$ کیلوژول بر گرم، جایگاهی میانی دارد که نشان می‌دهد بازتاب آینه‌ای نسبت به بازتاب پخشی (مات)، کارایی کمتری در تبدیل انرژی ورودی به گرمای مفید در بافت غذا دارد (شکل ۶).

Evaporative Loss^۲Surface Overheating^۱

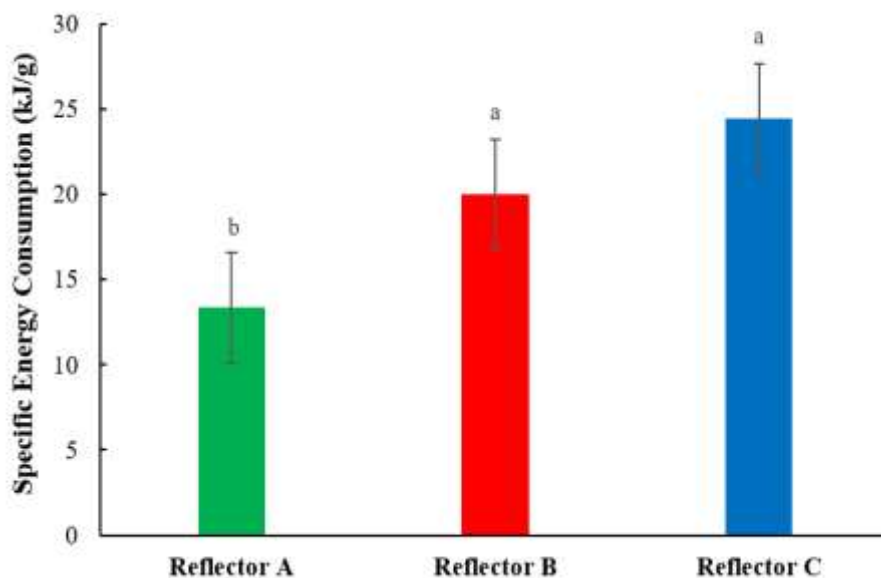


Figure 6. Specific energy consumption of chicken meat under different reflectors.

۳-۴- اثر نوع بازتابنده بر رنگ محصول

افت شدید و معنی دار شاخص قرمزی (a^*) از $16/84 \pm 1/15$ به $10/26 \pm 1/38$ شدند که این پدیده نامطلوب ناشی از ماهیت بازتاب آینه‌ای و ایجاد نقاط داغ موضعی است؛ تمرکز انرژی در این نقاط باعث تخریب ساختار شیمیایی گروه هم^۱ در میوگلوبین و یا شسته شدن رنگدانه‌های محلول در آب طی خروج خونابه گردیده که منجر به رنگ‌پریدگی و کاهش بازارپسندی محصول شده است. نهایتاً، بازتابنده مشبک با ثبت کمترین میزان روشنایی نهایی، تیره‌ترین ظاهر را ایجاد کرد که این افت کیفیت ناشی از طولانی شدن زمان فرآیند رفع انجماد و قرارگیری طولانی مدت سطح محصول در معرض هوا است که منجر به دهیدراتاسیون سطحی و تشکیل لایه خشک و تیره بر روی بافت می‌شود [18].

تحلیل داده‌های رنگ‌سنجی به عنوان معیاری کلیدی در ارزیابی کیفیت ظاهری محصول نهایی، همبستگی با نتایج انتقال حرارت و انرژی نشان داد (جدول ۱)؛ به‌طوری‌که بازتابنده مات با ایجاد الگوی بازتاب پخشی و توزیع یکنواخت شار حرارتی بر سطح نمونه، توانست شاخص روشنایی (L^*) را در محدوده $65/48 \pm 1/53$ بسیار نزدیک به مقدار اولیه $66/75$ حفظ نماید که این ثبات رنگی بیانگر حداقل میزان دنا توره شدن حرارتی پروتئین‌های میوفیبریلار و جلوگیری از اکسیداسیون رنگدانه‌های حساس میوگلوبین در سطح گوشت است. در مقابل، نمونه‌های تحت تیمار با بازتابنده براق (صیقلی) با وجود نرخ گرمایش سریع، دچار

Table 1. Color parameters of chicken samples (mean $\pm$ SD) under different reflector types.

Parameter	Reflector Type	Before Freezing	After Thawing
L^* (Lightness)	Reflector A (Matte)	66.76 ± 1.24^a	65.48 ± 1.53^a
L^* (Lightness)	Reflector B (Polished)	59.29 ± 1.85^b	58.26 ± 2.12^b
L^* (Lightness)	Reflector C (Mesh)	34.75 ± 1.60^c	53.35 ± 2.45^c
a^* (Redness)	Reflector A (Matte)	11.16 ± 0.75^b	13.84 ± 0.92^b
a^* (Redness)	Reflector B (Polished)	16.84 ± 1.15^a	10.26 ± 1.38^b
a^* (Redness)	Reflector C (Mesh)	16.78 ± 1.10^a	20.57 ± 1.65^a
b^* (Yellowness)	Reflector A (Matte)	15.76 ± 0.95^b	16.87 ± 1.18^b

b* (Yellowness)	Reflector B (Polished)	22.66 ± 1.40 ^a	18.71 ± 1.55 ^a
b* (Yellowness)	Reflector C (Mesh)	12.89 ± 0.85 ^b	13.51 ± 1.05 ^c

۳-۵- اثر فاصله لامپ مادون قرمز بر زمان رفع انجماد و

پروفیل دما

در این پژوهش، GAP به فاصله بین منبع تابش مادون قرمز (لامپ) و سطح نمونه گوشت اطلاق می شود. این فاصله به عنوان یکی از پارامترهای هندسی مؤثر بر شدت شار حرارتی دریافتی توسط نمونه در نظر گرفته شد. به منظور بررسی اثر این عامل بر فرآیند رفع انجماد و ویژگی های کیفی نمونه ها، فاصله منبع تابش در سه سطح مختلف شامل (GAP-A) ۱۴ سانتیمتر، (GAP-B) ۱۷ سانتیمتر و (GAP-C) ۲۰ سانتی متر تنظیم و در تمامی آزمایش ها به صورت کنترل شده اعمال گردید. در ادامه، اثر این فاصله بر سینتیک حرارتی، انرژی مصرفی ویژه، افت وزن و تغییرات رنگ نمونه ها مورد ارزیابی قرار گرفت. تحلیل نمودار ۷ تأثیر فاصله لامپ مادون قرمز بر زمان رفع انجماد، بیانگر وجود یک رفتار غیرخطی و رسیدن به نقطه اشباع در نرخ انتقال حرارت است؛ به طوری که تیمار GAP-C با ثبت طولانی ترین زمان فرآیند حدود ۱۴ دقیقه، تفاوت معنی داری با دو سطح دیگر نشان داد که این کاهش سرعت ناشی از افت شدید چگالی شار حرارتی و کاهش ضریب دید^۱ طبق

قانون عکس مجذور فاصله است که منجر به نرسیدن انرژی کافی به سطح جهت غلبه سریع بر گرمای نهان ذوب گردیده است [19]. ضریب دید پارامتری هندسی و بی بعد (F₁₋₂) که کسر انرژی تابشی گسیل شده از سطح منبع (لامپ) را که مستقیماً توسط سطح گیرنده (گوشت) دریافت می شود، کمی سازی می کند و توزیع فضایی آن بر روی هندسه سه بعدی نمونه، تعیین کننده میزان یکنواختی شار حرارتی جذب شده است [20]. در مقابل، همپوشانی آماری و عدم تفاوت معنی دار میان تیمارهای GAP-A و GAP-B هر دو با زمان تقریبی ۱۲ دقیقه حاکی از آن است که در فواصل نزدیک تر، عامل محدودکننده سرعت فرآیند دیگر شدت تابش منبع خارجی نیست، بلکه مقاومت هدایت حرارتی داخلی بافت گوشت است؛ بدین معنا که سطح نمونه در هر دو فاصله انرژی کافی را دریافت کرده و به اشباع حرارتی رسیده است، اما سرعت انتقال گرما از سطح به مرکز توسط ضریب نفوذ حرارتی محصول کنترل می شود، لذا GAP-B به دلیل ارائه حداکثر سرعت ممکن بدون ریسک ایجاد تنش حرارتی شدید یا سوختگی سطحی که در فاصله بسیار نزدیک GAP-A محتمل است، به عنوان نقطه بهینه عملیاتی قابل استناد است.

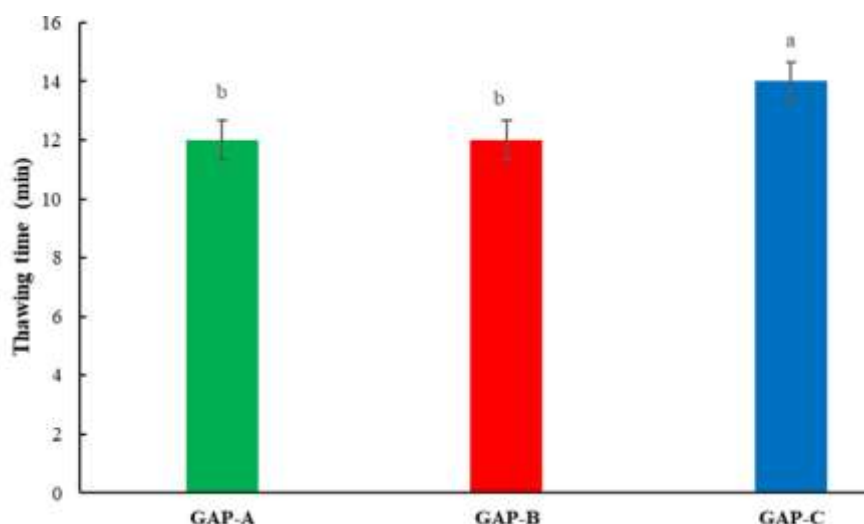


Figure 7. Thawing time of chicken meat at different distances from the infrared source

دارد که نشان‌دهنده نفوذ یکنواخت حرارت و تعادل میان انرژی تابشی و هدایت داخلی است، اما در منحنی-GAP-A، نوعی ناپایداری و افت موقت شیب دما در بازه زمانی ۶ تا ۸ دقیقه مشاهده می‌شود که این رخداد غیرخطی، تأییدکننده پدیده اشباع حرارتی سطحی و تشکیل لایه‌ای با مقاومت حرارتی بالا در فواصل بسیار نزدیک است که مانع از انتقال انرژی به مرکز هندسی شده است؛ لذا پروفیل GAP-B به عنوان پایدارترین مسیر ترمودینامیکی که سرعت بالا را بدون شوک‌های حرارتی داخلی تامین می‌کند، به عنوان شرایط بهینه معرفی می‌گردد و این نتایج با نتایج بخش قبلی (زمان رفع انجماد) همراستا است.

تحلیل دینامیک حرارتی فرآیند رفع انجماد بر اساس پروفیل دمایی ثبت‌شده (شکل ۸)، تفاوت‌های بنیادین مکانیزم انتقال حرارت را در فواصل مختلف آشکار می‌سازد؛ به‌طوری‌که تیمار GAP-C با نمایش طولانی‌ترین و کشیده‌ترین تغییر فاز در محدوده دمایی بحرانی ۵- تا صفر درجه سانتی‌گراد، بیانگر ناتوانی شار حرارتی دریافتی در غلبه سریع بر گرمای نهان ذوب یخ است که منجر به کندی فرآیند و طولانی شدن زمان تا ۱۴ دقیقه شده است. در مقابل، اگرچه تیمارهای GAP-A و GAP-B هر دو در زمانی حدود ۱۲ دقیقه به دمای نهایی رسیده‌اند، اما کیفیت مسیر گرمایش آن‌ها متفاوت است؛ پروفیل GAP-B رفتاری سیگموئیدی نرم و پیوسته

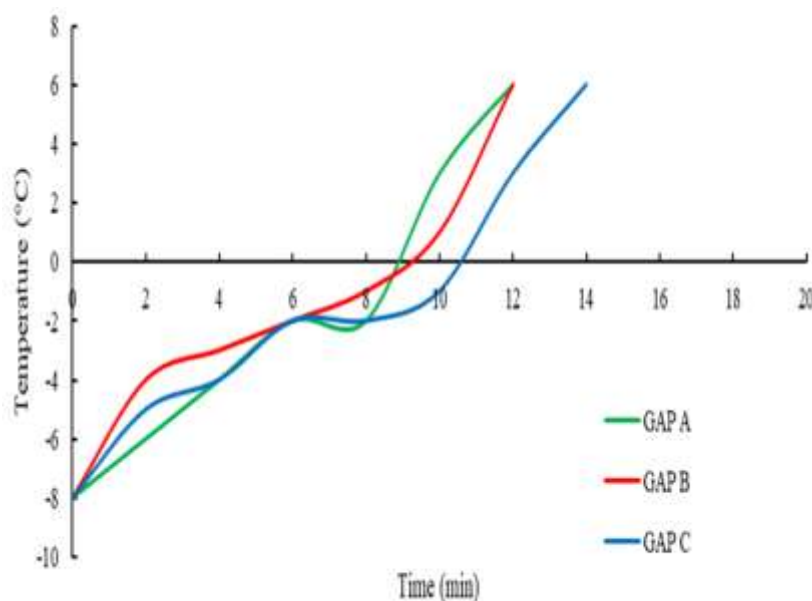


Figure 8. Temperature profile of chicken samples at different distance from infrared source

۳-۶- اثر فاصله لامپ مادون قرمز بر افت وزن

تحلیل نمودار افت وزن در فواصل مختلف منبع تابش (شکل ۹)، همبستگی معنادار و منطقی با نتایج پیشین (زمان فرآیند و پروفیل دمایی) را نشان می‌دهد و تأییدکننده مکانیسم‌های انتقال حرارت مطرح شده است؛ به‌طوری‌که تیمار GAP-C با ثبت بیشترین میزان افت وزن حدود 3 ± 0.34 درصد، بدترین عملکرد را از نظر حفظ رطوبت بافت داشته است. این پدیده از نظر فنی کاملاً با طولانی بودن زمان فرآیند (۱۴ دقیقه) و کندی عبور از مرحله تغییر فاز در این فاصله مرتبط است؛ زیرا طولانی شدن زمان تماس محصول با محیط و کندی ذوب یخ، فرصت بیشتری برای تبخیر سطحی و خروج

چکابه ناشی از آسیب ساختاری فراهم کرده است. در مقابل، تیمار GAP-A با کمترین افت وزن (کمتر از 1 ± 0.7 درصد)، نشان می‌دهد که سرعت بالای گرمایش در فاصله نزدیک، با کاهش مدت زمان کلی فرآیند، فرصت انتقال جرم را محدود کرده و رطوبت را بهتر حفظ نموده است. با این حال، تیمار GAP-B حدود 2 ± 0.2 درصد با قرارگیری در جایگاه میانی، تعادل بهینه‌ای را به نمایش می‌گذارد؛ چراکه اگرچه افت وزن آن کمی بیشتر از GAP-A است، اما با در نظر گرفتن ریسک اشباع حرارتی و سوختگی سطحی در GAP-A (که در پروفیل دما مشاهده شد)، این میزان افت وزن برای دستیابی به یک فرآیند یکنواخت و باکیفیت، قابل پذیرش و منطقی است.

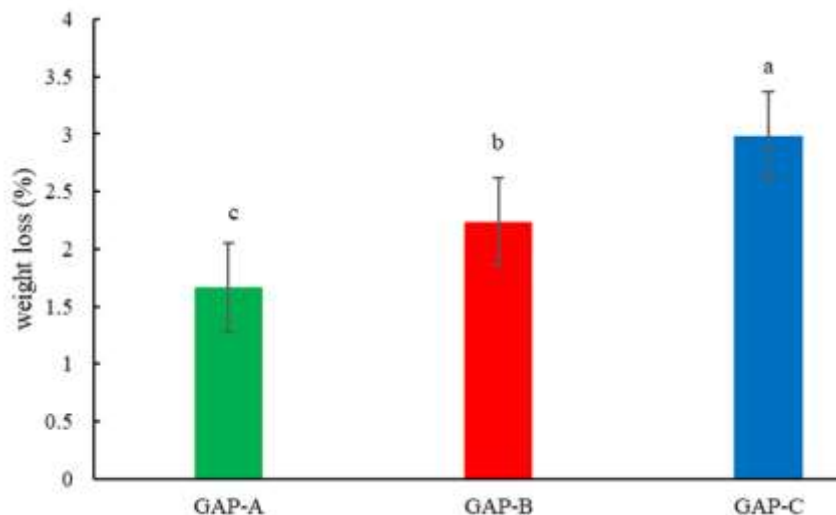


Figure 9. Weight loss in chicken meat at different distances from the infrared source.

۳-۷- اثر فاصله لامپ مادون قرمز بر انرژی مصرفی ویژه

تحلیل نمودار انرژی مصرفی ویژه (شکل ۱۰)، همبستگی مستقیم و خطی میان زمان فرآیند و بازدهی انرژی را آشکار می‌سازد و مهر تأییدی بر یافته‌های پیشین (زمان و پروفیل دمایی) می‌زند؛ به‌طوری‌که تیمار GAP-C با ثبت بالاترین میزان مصرف انرژی حدود 20 ± 2.2 کیلوژول بر گرم، کم‌بازده‌ترین عملکرد ترمودینامیکی را داشته است ($P < 0.01$). این افزایش چشمگیر هزینه انرژی، ناشی از طولانی شدن زمان فرآیند در این فاصله است؛ چراکه با کاهش ضریب دید و افت شدت تابش، سامانه مجبور به فعالیت در بازه زمانی طولانی‌تری برای تأمین آنتالپی مورد

نیاز جهت ذوب یخ شده و در نتیجه، بخش قابل توجهی از انرژی الکتریکی ورودی به صورت تلفات حرارتی هدر رفته است. در مقابل، همپوشانی آماری تیمارهای GAP-A و GAP-B هر دو در محدوده 15 ± 1.5 تا 16 ± 1.6 کیلوژول بر گرم و حرف معناداری مشترک نشان می‌دهد (b) که کاهش فاصله فراتر از ۱۷ سانتی‌متر به سمت ۱۴ سانتی‌متر، دیگر منجر به صرفه‌جویی بیشتر در انرژی نمی‌شود و سیستم به حداکثر راندمان جذب انرژی رسیده است. بنابراین، با در نظر گرفتن اینکه GAP-B همان راندمان انرژی بالای GAP-A را ارائه می‌دهد اما (طبق نتایج قبلی) فاقد ریسک‌های کیفی نظیر سوختگی سطحی و اشباع حرارتی است، فاصله ۱۷

سانتی متر به عنوان نقطه بهینه اکو-ترمودینامیکی^۱ برای دستیابی به کمترین هزینه انرژی با بالاترین کیفیت محصول تعیین می گردد [21].

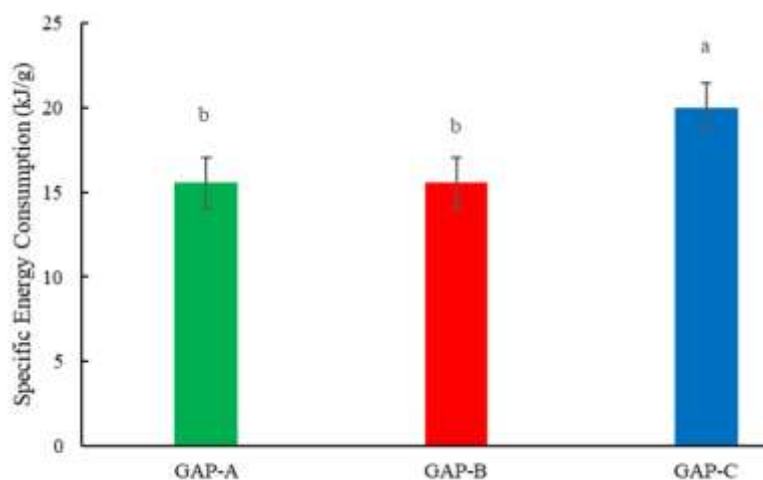


Figure 10. Specific energy consumption of chicken meat at different distances from the infrared source

دهیدراتاسیون سطحی^۲، تغلیظ رنگدانه های هم و تسریع اکسیداسیون لیپیدها شده که نمود ظاهری آن زردی و تیرگی بافت است [22]. همچنین در فاصله ۱۴ سانتی متر، کاهش شاخص روشنایی علی رغم کوتاه بودن زمان کلی فرآیند، نشان دهنده وقوع پدیده اشباع حرارتی سطح^۳ ناشی از شدت تابش بیش از حد در ناحیه میدان نزدیک است؛ جایی که تمرکز انرژی فراتر از ظرفیت هدایت حرارتی بافت، منجر به آغاز تغییرات ساختاری و سوختگی سطح شده است.

۳-۸- اثر فاصله لامپ مادون قرمز بر رنگ محصول

تحلیل جامع داده های رنگ سنجی به عنوان شواهد تکمیلی، مکانیزم های انتقال حرارت و جرم در فواصل مختلف منبع مادون قرمز را با دقت بالایی تأیید می کند (جدول ۲). در فاصله بهینه ۱۷ سانتی متر، ثبات پارامترهای روشنایی (L^*) و زردی (b^*) در کمترین انحراف نسبت به نمونه تازه، بیانگر توزیع یکنواخت شار حرارتی^۱ و نفوذ عمقی مؤثر انرژی است، این شرایط ایده آل مانع از ایجاد گرادیان حرارتی شدید بر سطح محصول شده و در نتیجه، از دناتوره شدن حرارتی پروتئین های میوفیبریلار و واکنش های مخرب میلارد یا اکسیداسیون که عامل تغییر رنگ هستند، جلوگیری کرده است. در مقابل، شدیدترین افت کیفیت در فاصله ۲۰ سانتی متر با افزایش چشمگیر شاخص زردی ($+1/80$) رخ داده است؛ این پدیده دارای همبستگی مکانیکی قوی با بیشترین نرخ افت وزن و طولانی ترین زمان فرآیند گزارش شده در این فاصله است، چراکه طولانی شدن دوره تماس با اکسیژن هوا و تبخیر سطحی گسترده، منجر به

2- Surface Dehydration

3 -Surface Thermal Saturation

1- Eco-thermodynamic

1 -Uniform Heat Flux Distribution

Table 2. Color parameters of chicken samples (mean $\pm$ SD) under different distances from the infrared source.

Parameter	Distance	Before Freezing	After Thawing
L* (Lightness)	14 cm	61.49 $\pm$ 1.85 ^b	57.30 $\pm$ 2.10 ^b
L* (Lightness)	17 cm	58.04 $\pm$ 1.60 ^c	56.33 $\pm$ 1.95 ^b
L* (Lightness)	20 cm	65.12 $\pm$ 1.90 ^a	59.15 $\pm$ 2.25 ^a
a* (Redness)	14 cm	17.82 $\pm$ 1.10 ^b	18.09 $\pm$ 1.35 ^b
a* (Redness)	17 cm	23.85 $\pm$ 1.45 ^a	22.26 $\pm$ 1.50 ^a
a* (Redness)	20 cm	13.80 $\pm$ 1.20 ^c	18.29 $\pm$ 1.60 ^b
b* (Yellowness)	14 cm	20.85 $\pm$ 1.30 ^b	22.65 $\pm$ 1.55 ^b
b* (Yellowness)	17 cm	23.61 $\pm$ 1.40 ^a	23.88 $\pm$ 1.70 ^b
b* (Yellowness)	20 cm	19.89 $\pm$ 1.25 ^b	26.48 $\pm$ 1.80 ^a

نوین، راهکاری هوشمند و صنعتی برای تضمین امنیت غذایی و کاهش ضایعات در زنجیره تأمین گوشت طیور محسوب می‌شود.

دسترسی به داده ها

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 تأمین مالی

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

مشارکت نویسندگان

محسن دلوی اصفهان: نظارت، مدیریت پروژه، مفهوم‌پردازی، اعتبارسنجی، نگارش - بازبینی و ویرایش.
حمید خفاجه: روش‌شناسی، تحلیل رسمی، گردآوری داده‌ها، نگارش - پیش‌نویس اولیه.

۵-منابع

[1] Agricultural Statistics (1403). Statistics and Information Technology Office. Ministry of Agricultural Jihad.

۴- نتیجه گیری

یافته‌های حاصل از این پژوهش، تسریع فرآیند تغییر فاز و حفظ کیفیت بافت گوشت مرغ مشروط بر آنکه پیکربندی هندسی سامانه جهت غلبه بر محدودیت‌های نفوذ حرارتی بهینه‌سازی شود، را اثبات می‌کند. تحلیل نتایج نشان داد که استفاده از بازتابنده‌های مات نسبت به سطوح صیقلی (براق) به عنوان الکتروود زمین ارجحیت دارد، زیرا بازتاب پخشی با توزیع همگن انرژی بر توپوگرافی ناهموار محصول، از تمرکز تنش‌های حرارتی که منجر به دنا توره شدن پروتئین‌ها و افت شاخص قرمزی می‌شود، جلوگیری می‌کند. همچنین، نتایج اثبات کرد که کاهش فاصله منبع تابش، لزوماً به تسریع فرآیند ختم نمی‌شود، بلکه در فاصله ۱۴ سانتی‌متر، نرخ ورود انرژی از ظرفیت هدایت حرارتی بافت فراتر رفته و منجر به اشباع حرارتی سطح و کندی انتقال گرما به مرکز حرارتی نمونه می‌گردد. در مقابل، تنظیم فاصله در ۱۷ سانتی‌متر با بهبود یکنواختی ضریب دید، تعادل ایده‌آلی میان انتقال حرارت تابشی و انتقال جرم (تبخیر سطحی) ایجاد می‌کند که نتیجه آن حداقل افت وزن و ثبات رنگی است. در نهایت، سیستم هیبریدی پیشنهادی در شرایط بهینه (بازتابنده مات/ فاصله ۱۷ سانتی‌متر)، با کاهش چشمگیر زمان فرآیند و مصرف انرژی نسبت به روش‌های سنتی و حتی چیدمان‌های غیربهینه [2] Leygonie C., Britz, T. J., & Hoffman, L. C. (2012). Impact of freezing and thawing on the quality of meat: Review. *Meat Science*, 91(2), 93-98.
[3] Dalvi-Isfahan M., Hamdami, N., Xanthakis, E., & Le-Bail, A. (2017). Review on the control of ice

- nucleation by ultrasound waves, electric and magnetic fields. *Journal of Food Engineering*, 195, 222-234.
- [4] Acheampong R., Osei Tutu, C., Akonor, P. T., Asiedu, B. K., Mahama, S., Owusu-Bempah, J., Appiadu, D., Koranteng, A. F., Kumador, D. K., Andoh-Odoom, A. H., & Kwesi Saalia, F. (2025). Effect of conventional and emerging thawing technologies on drip loss, microstructure and post-thaw quality of frozen fruits and vegetables: A review. *Applied Food Research*, 5(2), 101323.
- [5] He X., Liu, R., Nirasawa, S., Zheng, D., & Liu, H. (2013). Effect of high voltage electrostatic field treatment on thawing characteristics and post-thawing quality of frozen pork tenderloin meat. *Journal of Food Engineering*, 115(2), 245-250.
- [6] Rahbari M., Hamdami, N., Mirzaei, H., Jafari, S. M., Kashaninejad, M., & Khomeiri, M. (2018). Effects of high voltage electric field thawing on the characteristics of chicken breast protein. *Journal of Food Engineering*, 216, 98-106.
- [7] Mousakhani-Ganjeh A., Hamdami, N., & Soltanizadeh, N. (2016). Effect of high voltage electrostatic field thawing on the lipid oxidation of frozen tuna fish (*Thunnus albacares*). *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 36, 42-47.
- [8] Sheridan P., & Shilton, N. (1999). Application of far infra-red radiation to cooking of meat products. *Journal of Food Engineering*, 41(3), 203-208.
- [9] Davoudi, M.; Kashani Nejad, M.; Ziaefar, A. M.; Ghorbani, M. (2018). Optimization of the defrosting process of minced chicken meat by a combined infrared radiation-hot air method using the response surface methodology. *Iranian Journal of Food Science and Technology* 14, 4, 461-472.
- [10] 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.
- [11] Misra N. N., Martynenko, A., Chemat, F., Paniwnyk, L., Barba, F. J., & Jambrak, A. R. (2018). Thermodynamics, transport phenomena, and electrochemistry of external field-assisted nonthermal food technologies. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 58(11), 1832-1863.
- [12] Martynenko A. (2025). EHD-induced mass transfer from wet materials. *Journal of Electrostatics*, 137, 104075.
- [13] 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*, 5(2), 101171.
- [14] 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.
- [15] Xie F., Jiang, F., Niu, J., Yu, Q., & Yuan, Y. (2025). Effect of surface emissivity on the aerothermodynamics of the evacuated tube transportation. *Thermal Science and Engineering Progress*, 65, 103892.
- [16] Pozzobon V., Levasseur, W., Do, K.-V., Palpant, B., & Perré, P. (2020). Household aluminum foil matte and bright side reflectivity measurements: Application to a photobioreactor light concentrator design. *Biotechnology Reports*, 25, e00399.
- [17] Fellows P. J. (2017). 22 - Freezing. In P. J. Fellows (Ed.), *Food Processing Technology* (Fourth Edition) (pp. 885-928): Woodhead Publishing.
- [18] Zhu Y., Zhu, J., Shi, X., & Fan, M. (2025). Effects of Freezing, Frozen Storage and Thawing on the Water Status, Quality, Nutrition and Digestibility of Meat: A Review. *Food Science & Nutrition*, 13(8), e70774.
- [19] Fakayode O. A., Ojoawo, O. O., Zhou, M., Wahia, H., & Ogunlade, C. A. (2025). Revolutionizing food processing with infrared heating: New approaches to quality and efficiency. *Food Physics*, 2, 100046.
- [20] Tanaka F., Verboven, P., Scheerlinck, N., Morita, K., Iwasaki, K., & Nicolaï, B. (2007). Investigation of far infrared radiation heating as an alternative technique for surface decontamination of strawberry. *Journal of Food Engineering*, 79(2), 445-452.
- [21] Aboud S. A., Altemimi, A. B., A, R. S. A.-H., Yi-Chen, L., & Cacciola, F. (2019). A Comprehensive Review on Infrared Heating Applications in Food Processing. *Molecules*, 24(22).
- [22] Dalvi-Isfahan M., Hamdami, N., & Le-Bail, A. (2016). Effect of freezing under electrostatic field on the quality of lamb meat. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 37, 68-73.



Scientific Research

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

Mohsen Dalvi-Isfahan^{1*}, Hamid Khafajeh^{2*}

1-Department of Food Science and Technology, Faculty of Agriculture, Jahrom University, Jahrom, Iran

2-Department of Mechanical Engineering of Biosystems, Jahrom University, Jahrom, Iran

ARTICLE INFO	ABSTRACT
Article History: Received: 2026/02/25 Review: 2026/05/13 Accepted: 2026/05/20	In this study, to overcome the limitations of conductive heat transfer, the performance of a hybrid system consisting of infrared radiation and an electric field with an intensity of 6/7 kV/cm was evaluated for thawing frozen chicken fillets. The studied variables included reflector type (matte, glossy, and mesh) and the radiation source distance at three levels. Their effects on thermal kinetics, specific energy consumption, weight loss, and color parameters were assessed. The results showed that the optical properties of the reflector play a significant role in the uniformity of heat flux. The matte reflector, by producing diffuse reflection, reduced the thawing time to approximately 12 minutes and decreased energy consumption to 13 kJ/g, while preventing hot spot formation and preserving surface lightness. In contrast, the mesh reflector increased the process time to about 22 minutes due to greater energy losses. Moreover, the higher intensity of radiative heat transfer in the matte reflector resulted in the greatest weight loss, whereas the mesh reflector, with milder heating, exhibited the lowest weight loss and better moisture retention. Evaluation of the radiation source distance also revealed a nonlinear behavior dependent on the view factor. A distance of 14 cm led to thermal saturation and deterioration of color quality, while a distance of 17 cm provided a balance between radiation intensity and heat penetration, preserving color and minimizing weight loss. Overall, the combination of a matte reflector and a 17 cm distance provided the most efficient ecothermodynamic conditions.
Keywords: Thawing, Electric Field, Infrared, Chicken Meat, Tissue Quality, Specific Energy Consumption	
DOI: 10.48311/fsct.2026.119582.83083 *Corresponding Author E- Dalvi@jahromu.ac.ir, mohsen.Dalvi@gmail.com khafajeh@jahromu.ac.ir	