

Investigating the quality characteristics of beef during the thawing process by use of a hybrid infrared-air circulation system

Aghsultan Ziaifar¹, Mahdi Kashaninejad^{2*}, Yahya Maghsoudlou²,
Aman Mohamad Ziaifar²

¹ Ph.D. Graduate, Department of Food Science and Technology, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran.

² Professor, Department of Food Science and Technology, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. (*Corresponding Author's Email: kashani@gau.ac.ir)

Article Info

Article type:
Research Full Paper

Article history:

Received: 2023-05-24

Revised: 2023-09-12

Accepted: 2023-09-17

ABSTRACT

Background and objectives: Thawing food products leads to changes that can influence the quality of the final product. Traditional thawing methods are time-consuming and can negatively affect the quality of the product. In contrast, modern thawing strategies such as microwave, high pressure, ohmic, and infrared techniques have been shown to preserve higher nutritional value in the thawed product. While extensive research has been conducted on meat freezing, there is a lack of research focusing on the optimal conditions for thawing using modern methods and their impact on meat quality. Therefore, the objective of this research is to investigate the effect of using a combined infrared-air circulation system to thaw beef, specifically evaluating its impact on chemical properties such as pH, as well as physical properties consisting of thawing loss, color, and texture of the meat.

Materials and methods: First, the beef was cut into rectangular cubes with dimensions of 5x3x3 cm and weighed. Then it was frozen in a freezer at -18°C and kept there for 5 days. In order to thaw the frozen samples, a combined infrared-air circulation system was used. The thawing parameters included the power of the infrared radiation power supply (100, 200, and 300 W), air temperature (30 and 40 °C), and air circulation velocity (2.5 and 5 m/s). The effect of these parameters on the thawing time, thawing rate, thawing loss, cooking loss, water holding capacity, pH, color, and texture were evaluated.

Results: Regardless of the air velocity, increasing the infrared power increased the thawing rate of beef. This value was raised more by increasing the air temperature and its circulation velocity. The thawing loss of the infrared treatment with 100 W was significantly lower than the 0 W treatment, although increasing the infrared power and the air temperature and circulation velocity increased the thawing loss of beef ($p < 0.05$). The pH value of thawed samples in different infrared powers at different levels of air temperature and velocity parameters have a significant difference ($p < 0.05$), although the effect of infrared power itself on pH changes

Keywords:

Thawing
Infrared
air circulation
physical properties
beef

is not significant. As the air temperature and velocity increased, the pH value decreased. Applying infrared and increasing its power, as well as air circulation, decreased the expressible moisture of thawed beef and, as a result, increased the water holding capacity and reduced the cooking loss. The use of different levels of infrared power and air temperature did not cause significant changes in the color brightness of the samples and color parameter a^* ($p < 0.05$), but the color parameter b^* of the samples decreased with increasing air temperature. Meanwhile, the amount of this parameter remained almost constant with the change in infrared power levels and air circulation velocity ($p < 0.05$). Increasing infrared power without air circulation decreased the shear force of beef, but by circulating air and increasing its velocity, the shear force generally increased. Although at a higher temperature, with a further increase in the air velocity and as a result of the drying of the meat tissue, the shear force decreased.

Conclusion: The results showed that increasing the infrared power and air velocity both increase the thawing rate and water holding capacity and reduce the cooking loss of beef. No significant difference was observed between the applied treatments on color changes. The increase in air temperature and its circulation velocity decreased the pH. Increasing the infrared power and air temperature decreased the amount of shear force, but it increased with the increase of air circulation velocity.

Cite this article: Ziaiifar, A., Kashaninejad, M., Maghsoudlou, Y., Ziaiifar, A.M. 2025. Investigating the quality characteristics of beef during the thawing process by use of a hybrid infrared-air circulation system. *Food Processing and Preservation Journal*, 17(2), 23-46.



© The Author(s).

DOI: [10.22069/fppj.2023.21390.1761](https://doi.org/10.22069/fppj.2023.21390.1761)

Publisher: Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

بررسی خصوصیات کیفی گوشت گاو طی فرایند انجمادزدایی با استفاده از سامانه هیبریدی مادون قرمز-گردش هوا

آق سلطان ضیایی^۱، مهدی کاشانی نژاد^{۲*}، یحیی مقصودلو^۲، امان محمد ضیایی^۲

^۱ دانش آموخته دکتری، گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده صنایع غذایی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران

^۲ استاد، گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده صنایع غذایی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران

(^{*}رایانامه نویسنده مسئول: kashani@gau.ac.ir)

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله کامل علمی-پژوهشی	سابقه و هدف: انجمادزدایی محصولات غذایی باعث ایجاد تغییرات کیفی در محصول نهایی می‌گردد. روش‌های مرسوم انجمادزدایی از قبیل انجمادزدایی در هوای محیط یا یخچال و یا غوطه‌وری در آب، زمان زیادی لازم دارند و تأثیر نامطلوبی بر کیفیت محصول می‌گذارند. روش‌های نوین انجمادزدایی شامل انجمادزدایی با ماکروویو، فشار بالا، امپیک و مادون قرمز باعث تولید محصولی با ارزش تغذیه‌ای بالاتر می‌شود. درحالی‌که تحقیقات گسترده‌ای در زمینه انجماد گوشت صورت گرفته است، شرایط بهینه‌ی انجمادزدایی با روش‌های نوین و تأثیر آن بر کیفیت گوشت کمتر مطالعه شده است. هدف از این پژوهش، بررسی تأثیر انجمادزدایی گوشت گاو توسط سامانه هیبریدی مادون قرمز-گردش هوا بر خواص کیفی گوشت از قبیل افت انجمادزدایی، pH، افت پخت، ظرفیت نگهداری آب، رنگ و بافت می‌باشد.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۳/۰۳ تاریخ ویرایش: ۱۴۰۲/۰۶/۲۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۶/۲۶	مواد و روش‌ها: ابتدا گوشت گاو به صورت قطعات مکعب مستطیل به ابعاد ۳×۳×۵ سانتی متر برش داده شد و توزین گردید. سپس در فریزر ۱۸- درجه سانتی گراد منجمد و به مدت ۵ روز در آن نگهداری شد. به منظور انجمادزدایی نمونه‌های منجمد از سامانه هیبریدی مادون قرمز-گردش هوا استفاده شد. پارامترهای انجمادزدایی شامل توان منبع تابش مادون قرمز (۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ وات)، دمای هوا (۳۰ و ۴۰ درجه سانتی گراد) و سرعت گردش هوا (۲/۵ و ۵ متر بر ثانیه) بود. تأثیر این پارامترها بر روی زمان و سرعت فرایند انجمادزدایی، افت خونابه و افت پخت، ظرفیت نگهداری آب، pH، رنگ و بافت گوشت مورد ارزیابی قرار گرفت.
واژه‌های کلیدی: انجمادزدایی مادون قرمز گردش هوا خواص فیزیکی گوشت گاو	یافته‌ها: افزایش توان مادون قرمز به طور مستقل باعث افزایش سرعت انجمادزدایی گوشت گاو گردید. این مقدار با افزایش دمای هوا و سرعت گردش آن نسبت به نمونه کنترل (انجمادزدایی با روش مرسوم در هوای ساکن با دمای ۳۰ درجه سانتی گراد) به طور معنی داری افزایش یافت. افت انجمادزدایی تیمار مادون قرمز با توان ۱۰۰ وات به طور قابل توجهی پایین تر از تیمار صفر وات بود، هرچند افزایش توان مادون قرمز و نیز افزایش دمای هوا و سرعت گردش آن افت انجمادزدایی گوشت گاو را افزایش داد ($p < 0.05$). میزان pH نمونه‌های انجمادزدایی شده در

سطوح مختلف دما و سرعت هوا اختلاف معنی داری با هم دارند ($p < 0.05$)، ولی تأثیر توان مادون قرمز روی تغییرات pH معنی دار نیست. با افزایش دمای هوا و سرعت آن مقدار pH کاهش یافت. اعمال مادون قرمز و افزایش توان آن و نیز به گردش درآوردن هوا باعث کاهش رطوبت خروجی و در نتیجه افزایش ظرفیت نگهداری آب و کاهش افت پخت گوشت شدند. استفاده از سطوح مختلف پارامترهای توان مادون قرمز و دمای هوای گرم تغییرات معنی داری در پارامتر روشنایی (L) و پارامتر رنگی a^* ایجاد نکرد ($p > 0.05$)، ولی پارامتر رنگی b^* نمونه‌ها با افزایش دمای هوا کاهش یافت که به دلیل تأثیر دمای بالا بر ساختار پروتئینی رنگدانه غالب گوشت یعنی میوگلوبین و احتمالاً دناتوره شدن سطحی آن می‌باشد؛ این در حالی است که میزان این پارامتر با تغییر سطوح توان مادون قرمز و سرعت گردش هوا تقریباً ثابت باقی ماند ($p > 0.05$). افزایش توان مادون قرمز باعث کاهش نیروی برشی گوشت گاو گردید که می‌توان به تغییرات بافتی که در دمای بالاتر در میکروساختارهای گوشت رخ می‌دهد نسبت داد. با افزایش سرعت هوا نیروی برشی ابتدا افزایش یافت هرچند در دمای بالاتر به علت خشک شدن بافت گوشت، نیروی برشی کاهش یافت.

نتیجه‌گیری: نتایج نشان داد که با افزایش توان مادون قرمز ارتعاش مولکول‌ها بیشتر می‌شود و حرارت تابشی ایجاد شده در اثر آن افزایش می‌یابد. افزایش سرعت هوا نیز باعث افزایش ضریب انتقال حرارت کلی می‌گردد و این عوامل همگی باعث کاهش زمان انجمادزایی می‌شوند. استفاده از سیستم هیبریدی مادون قرمز-هوای گرم باعث بهبود خواص کیفی محصول از جمله افزایش ظرفیت نگهداری آب، کاهش افت پخت و نیروی برشی نسبت به نمونه کنترل گردید و تغییرات رنگ نیز تفاوت معنی داری نداشت.

استناد: ضیایی فر، آق سلطان؛ کاشانی نژاد، مهدی؛ مقصودلو، یحیی؛ ضیایی فر، امان محمد. (۱۴۰۴). بررسی خصوصیات کیفی گوشت گاو طی فرایند انجمادزایی با استفاده از سامانه هیبریدی مادون قرمز-گردش هوا. فرآوری و نگهداری مواد غذایی، ۱۷(۲)، ۲۳-۴۶.

DOI: [10.22069/fppj.2023.21390.1761](https://doi.org/10.22069/fppj.2023.21390.1761)



© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

مقدمه

گوشت به واسطه‌ی دارا بودن پروتئین‌های ارزشمند (اسیدهای آمینه‌ی ضروری)، برخی مواد معدنی مهم مانند آهن و انواع ویتامین‌ها در گروه کامل‌ترین مواد غذایی طبقه‌بندی می‌شود. انجماد مهم‌ترین روش نگهداری گوشت است که معمولاً با فرایند دیگری به نام انجمادزدایی^۱ (قبل از مصرف) همراه است. انجمادزدایی فرایندی با انتقال حرارت پیچیده است که با دربرداشتن یک سری تغییرات فیزیکی و شیمیایی بر کیفیت محصول تأثیر معنی‌داری می‌گذارد. بنابراین کیفیت مواد غذایی منجمد علاوه بر روش انجماد، به فرایند انجمادزدایی نیز بسیار وابسته است (۱). حین انجمادزدایی گوشت، تغییرات متعددی در محصول مانند کاهش وزن، اکسیداسیون رنگدانه‌های عضلانی مثل هموگلوبین و میوگلوبین و کاهش توانایی تشکیل ژل توسط پروتئین میوفیبریلی رخ می‌دهد که بر کیفیت محصول نهایی تأثیر می‌گذارد (۲). فرایند انجمادزدایی در گوشت از لحاظ دمایی دارای سه مرحله می‌باشد (۳). مرحله‌ی اول شامل افزایش دمای نمونه منجمد از دمایی که در آن نگهداری شده است تا ۵- درجه سانتی‌گراد، مرحله‌ی دوم، افزایش دما از ۵- تا ۰ درجه سانتی‌گراد و مرحله‌ی سوم، افزایش دما از ۰ تا ۱۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. مرحله‌ی دوم که مرحله تغییر فاز است بیشترین زمان را در انجمادزدایی به خود اختصاص می‌دهد. هرچه سرعت انجمادزدایی^۲ در این مرحله بیشتر باشد، افت انجمادزدایی^۳ کمتر و ارزش تغذیه‌ای محصول بیشتر حفظ می‌شود. در سال‌های اخیر، تقاضا برای روش‌های سریع انجمادزدایی که کمترین اثر را بر روی کیفیت گوشت داشته باشند، افزایش یافته است. روش‌های معمول انجمادزدایی

گوشت شامل انجمادزدایی در هوای محیط و غوطه‌وری در آب می‌باشد (۴). این روش‌ها با گرم کردن سطح بیرونی محصول کار می‌کنند که از طریق آن گرما به روش هدایتی به مرکز گوشت منتقل می‌شود. طولانی شدن زمان انجمادزدایی (۵)، افزایش بارهای میکروبی (۶) و کاهش کیفیت محصول (۷) از جمله مشکلات مرتبط با این روش‌های انجمادزدایی معمول است. انجمادزدایی با مایکروویو، انجمادزدایی با فشار بالا، حرارت‌دهی اهمیک، فرایند اولتراسوند و پرتودهی مادون قرمز به عنوان روش‌های نوین معرفی شده‌اند که برخی از آن‌ها به طور موفقیت‌آمیزی در صنعت گوشت مورد استفاده قرار گرفته‌اند (۸). در روش مایکروویو، انجمادزدایی به صورت غیریکنواخت انجام می‌شود، به طوری که بخش‌هایی از گوشت پخته می‌شوند و بخش‌های دیگر هنوز منجمد باقی می‌مانند. انجمادزدایی با فشار بالا نیاز به سرمایه‌گذاری بالا داشته و از نظر اقتصادی مقرون به صرفه نیست. در انجمادزدایی توسط سیستم‌های اهمیک و اولتراسوند کنترل فرایند بسیار مشکل است. انجمادزدایی با پرتو مادون قرمز یکی از روش‌های سریع است که اخیراً مورد توجه قرار گرفته است. مادون قرمز به عنوان یک منبع گرمایی به دلیل داشتن طول موج نسبتاً بالا به داخل بافت ماده غذایی نفوذ می‌کند. بنابراین اشعه‌ی مادون قرمز یک سیستم گرمایش کارآمد محسوب می‌شود (۹). طول موج‌های مادون قرمز که در تابش حرارتی به کار می‌روند در طیف الکترومغناطیسی ۱۰۰۰ - ۰/۱ میکرومتر قرار دارند که طول موج حدود ۱ میکرومتر در صنایع غذایی کاربرد گسترده‌ای دارد (۱۰). این طول موج‌ها توسط ماده‌ی غذایی جذب و منتقل شده و تولید گرما می‌کنند. استفاده از پرتو مادون قرمز (بین طیف مرئی و مایکروویو) در انجمادزدایی مواد غذایی دارای چندین مزیت است که شامل شار حرارتی بالا، سرعت بالای

¹ Thawing

² Thawing Rate

³ Thawing Loss

انجمادزدایی و حرارت‌دهی یکنواخت در سطح ماده غذایی می‌باشد. باین‌وجود به دلیل گرمایش بالا در این روش امکان وقوع واکنش‌های اکسیداسیون و خشک شدن سطحی وجود دارد (۹، ۱۱). برای به حداقل رساندن این تأثیرات نامطلوب، این روش معمولاً با روش‌های دیگر انجمادزدایی مانند هوا در گردش و درجه حرارت کنترل شده به‌صورت هیبریدی مورد استفاده قرار می‌گیرد. استفاده از سامانه‌های تابشی نیازی به محیط مادی برای افزایش دمای محصول ندارد. باین‌حال، در صورت استفاده از هوای در گردش سرعت انجمادزدایی بیشتر می‌شود. به‌طورکلی، انجمادزدایی در دمای بالاتر کمترین تغییرات در خصوصیات کیفی محصول را ایجاد می‌کند (۱۲). بر اساس تحقیقات هونگ و همکاران (۲۰۰۹) مدت‌زمان انجمادزدایی زمانی است که درجه حرارت مرکز ماده غذایی از ۵- به ۰ درجه سانتی‌گراد برسد (۸). وانگ و همکاران (۲۰۱۵) معتقد هستند طولانی شدن این بازه زمانی، تغییرات نامطلوبی را در محصول به همراه دارد و باعث افزایش افت پخت و افت انجمادزدایی می‌شود (۱۳). در نتیجه با اندازه‌گیری این بازه زمانی می‌توان شرایط را برای بهبود عملکرد فرایند بر محصول اصلاح نمود. سرعت انجمادزدایی تحت تأثیر عوامل مختلفی می‌باشد که مهم‌ترین آن‌ها عوامل ناشی از اجزاء تشکیل‌دهنده محصول و نوع دستگاه و روش انجمادزدایی است. اجزاء ماده‌غذایی به‌واسطه دارا بودن ضریب هدایت حرارتی متفاوت بر روی سرعت انجمادزدایی تأثیر دارند. مواد غذایی دارای تخلخل بالاتر که هوای بیشتری در ساختار خود دارند، نسبت به مواد غذایی دارای تخلخل کمتر که مقادیر بیشتری از آب یا مواد جامد دارند، سرعت انجمادزدایی کندتری خواهند داشت. شکل مواد غذایی نیز اهمیت زیادی در انتقال حرارت دارد. در صورتی‌که محصول دارای شکل

منظم‌تری باشد سرعت انجمادزدایی افزایش می‌یابد (۱۴). افت خونابه^۱ و افت پخت^۲ رایج‌ترین موارد تأثیرگذار در محصولات گوشتی بوده که تحت تأثیر ظرفیت نگهداری آب (WHC) گوشت قرار می‌گیرند (۱۵). افت خونابه هنگامی رخ می‌دهد که سرعت پایین انجمادزدایی و یا کنترل ضعیف درجه حرارت باعث انتشار ترکیبات داخل سلولی به خارج می‌گردد. خونابه^۳ مایعی است که بدون اعمال نیروی مکانیکی و تنها بر اثر وزن یک قطعه گوشت از آن خارج می‌شود و قسمت عمده آن را آب و پروتئین تشکیل می‌دهد (۱۶). تولید خونابه در طی انجمادزدایی بر پارامترهای کیفی ازجمله خواص حسی، عملکردی، ارزش تغذیه‌ای و وزن تأثیر گذاشته و باعث کاهش آبداری استیک‌های پیش منجمدشده به‌واسطه کاهش قابلیت اتصال با پروتئین می‌شود (۱۷). انگاپو و همکاران (۱۹۹۹) بیان کردند که میزان خونابه تولیدی در غذاهایی که منجمد شده و سپس انجمادزدایی شده‌اند، نسبت به غذاهای تازه بیشتر بوده و با طولانی شدن زمان انجمادزدایی افزایش می‌یابد (۱۲، ۱۸). به‌طورکلی، مقدار افت انجمادزدایی بستگی به سرعت انجماد دارد که به‌اندازه و محل کریستال‌های یخ در گوشت منجمد مربوط می‌شود (۱۲). میزان خونابه تولیدی به دو فاکتور اصلی عوامل ذاتی (از قبیل نژاد، جیره‌ی دام و نوع عضله) و عوامل فرایند (ازجمله سرعت انجماد و انجمادزدایی) بستگی دارد (۱۹). افت پخت یعنی از دست رفتن مایعات و مواد محلول در آن در طی پختن گوشت است. افت پخت بالا بر کیفیت خوراکی گوشت تأثیر منفی می‌گذارد و آبداری آن را کاهش می‌دهد (۲۰). افت پخت به کیفیت گوشت خام (ظرفیت نگهداری آب)، دمای مرکز و شیوه پخت (روش پخت، دما و زمان پخت) بستگی

¹ Drip loss

² Cooking loss

³ Drip

دارد. در طی پخت، دنا توره شدن حرارتی پروتئین های عضلانی مکانیسم اولیه ای است که منجر به کاهش ظرفیت نگهداری آب می شود (۲۱). بیشتر آب عضله در میان میوفیبریل ها، در کانال های باریک بین رشته های^۱ ضخیم و نازک واقع شده است (۲۲) و حرارت دادن باعث دنا توره اسبون میوزین و چروکیدگی میوفیبریل ها و در نتیجه آن خروج آب می شود (۲۳). توانایی گوشت قرمز در نگهداری همه یا بخشی از آب خود را ظرفیت نگهداری آب می نامند که یکی از ویژگی های کیفی مهم گوشت می باشد (۲۴). شرایط فیزیولوژیکی (میزان کاهش pH پس از کشتار، نژاد، سن، جنس و نوع عضله) شرایط پرورش (الگوهای تغذیه ای و فعالیت های قبل از کشتار) و عوامل حین کشتار و فرآوری (ریگور مورتیس، شوک الکتریکی، دمای نگهداری پس از کشتار، شرایط انجماد و خروج از انجماد و رساندن) از جمله عوامل مؤثر بر ظرفیت نگهداری آب هستند (۲۵). به طور کلی گوشت قرمز حاوی ۷۵ درصد آب است که طی عملیات واحد مختلف ذبح، انجماد، نگهداری و فرآوری به آسانی مقداری از آب خود را از دست می دهد. گزارش شده است که افت آب گوشت تازه بین ۱ تا ۳ درصد است، با این حال فرایندهایی از جمله انجماد و انجمادزدایی سبب افت بیشتر آب گوشت قرمز می شوند. رنگ گوشت یکی از مهم ترین ویژگی های ظاهری و معیارهای پذیرش مصرف کننده هاست؛ زیرا معمولاً با کیفیت و تازگی گوشت در ارتباط می باشد (۲۶). رنگ گوشت به غلظت رنگدانه ها به خصوص میوگلوبین، حالت شیمیایی میوگلوبین در سطح گوشت، pH نهایی، نوع فیبر عضله، ساختار و حالت فیزیکی پروتئین های عضله، تحریک الکتریکی، سرعت سرد کردن و نسبت چربی بین عضلانی بستگی دارد. در حین انجماد و انجمادزدایی به دلیل

خروج بخشی از میوگلوبین به همراه خونابه، رنگ گوشت افت محسوسی پیدامی کند. همچنین کالولو (۱۹۸۱) گزارش کرد که بخش گلوبین مولکول میوگلوبین در بعضی از مراحل انجماد، نگهداری در حالت انجماد و انجمادزدایی دنا توره می شود (۲۷). دنا توره اسبون منجر به افزایش حساسیت میوگلوبین به اتواکسیداسیون و پس از آن از دست دادن رنگ می شود. در سرعت انجماد خیلی بالا رنگ پریدگی در گوشت مشاهده می شود. دلیل این موضوع رشد کریستال های یخ است. کریستال های ریز که در اثر سرعت انجماد بالا ایجاد می شوند، نور بیشتری را در مقایسه با کریستال های بزرگ پراکنده می کنند و از این رو گوشتی که سریع منجمد شده باشد، دارای رنگی پریده و مات می باشد و گوشتی که به صورت کند منجمد شده باشد، نیمه مات و تیره می شود (۱۹). بین پارامترهای رنگی Lab، پارامتر a (که توسط دستگاه تعیین می شود) و رنگ قرمز بصری گوشت همبستگی بالایی وجود دارد (۲۸). با گذشت زمان به علت اکسیداسیون میوگلوبین و تشکیل مت میوگلوبین قاعداً پارامتر رنگی a* گوشت کاسته می شود. بافت عامل اصلی تعیین کننده ی کیفیت خوراکی گوشت از نظر مصرف کنندگان می باشد. عوامل مؤثر بر بافت گوشت به دودسته عوامل پیش از کشتار (سن، رژیم غذایی، استفاده از هورمون و استرس) و عوامل پس از کشتار (شوک الکتریکی، روش تعلیق لاشه و روش های انجماد، انجمادزدایی، فرآوری و پخت) تقسیم می شوند (۲۹). همچنین برخی از ویژگی های عضله از قبیل ترکیب شیمیایی، مقدار بافت پیوندی، pH، اندازه ی عضله و نیز ساختار و عملکرد آن بر مقدار تردی بافت تأثیرگذار است (۳۰). اساساً ساختار عضله تحت تأثیر دو عامل فیبرهای عضله و بافت های پیوندی خارج سلولی است که گزارش شده ساختار میوفیبریلی بیشتر از ساختار پیوندی در نیروی برشی

¹ Filaments

ویژگی کیفی مهم گوشت تلقی می‌شود (۳۴). چربی داخل عضلانی، ساختار بافت پیوندی، اندازه‌های عضله، سفتی و ظرفیت نگهداری آب ازجمله فاکتورهای اثرگذار روی مقدار نیروی برشی موردنیاز عضله هستند (۳۲). هی و همکاران (۲۰۱۳) انجمادزدایی گوشت خوک با HVEF نشان دادند که زمان فرایند در مقایسه با روش استفاده از هوای ساکن به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد همچنین موجب بازداری از رشد میکروبی، کاهش ازت فرار و افت پخت و افزایش ظرفیت نگهداری آب و ماندگاری محصول می‌گردد (۳۵). همچنین تغییر قابل‌ملاحظه‌ای در pH، رنگ و افت کلی مشاهده نکردند. کامپانون و همکاران (۲۰۱۰) تأثیر فرایند انجمادزدایی با میکروویو را بر گوشت گاو منجمد مورد ارزیابی قرار دادند. طبق بررسی‌ها به علت تفاوت در خواص دی‌الکتریک آب و یخ میزان جذب امواج مایکروویو توسط آن‌ها مختلف می‌باشد. به همین علت در طول انجمادزدایی با مایکروویو محصول دچار حرارت‌دهی بیش‌ازحد می‌شود (۳۶). فاراگ و همکاران (۲۰۰۹) استفاده از امواج رادیویی برای انجمادزدایی گوشت گاو منجمد شده را مورد بررسی قرار دادند. طی این روش افت ناشی از انجمادزدایی و زمان فرایند کاهش و ظرفیت نگهداری آب درون سلولی افزایش یافته است (۳). همچنین در این راستا فاراگ و همکاران (۲۰۱۱) میزان توزیع یکنواختی دما در هنگام انجمادزدایی از طریق امواج رادیویی در تمامی قسمت‌های قطعه گوشت گاو مورد نظر را بررسی کردند. با افزایش فرکانس امواج رادیویی می‌توان از عدم یکنواختی افزایش دما جلوگیری نمود اما پخت محصول نیز اتفاق می‌افتد همچنین پس‌ازاین روش محصول مجدد قابلیت نگهداری طولانی‌مدت به‌صورت منجمد را ندارد و باید مصرف شود (۴). هونگ و همکاران

اندازه‌گیری بافت تأثیرگذار است (۳۱). مهم‌ترین ویژگی ارگانولپتیک وابسته به بافت گوشت، مقدار نیروی برشی وارنر-براتزلر^۱ (WBSF) می‌باشد که تحت تأثیر چربی داخل عضلانی، ساختار بافت پیوندی، اندازه‌های عضله، سفتی و ظرفیت نگهداری قرار می‌گیرد (۳۲). تردی گوشت از دیدگاه WBSF، گوشت ترد دارای ۳/۵۸-۲/۲۷ کیلوگرم؛ گوشت با تردی متوسط ۵/۴-۴/۰۸ کیلوگرم و گوشت سفت ۷/۲۱-۵/۹ کیلوگرم می‌باشد (۳۳). pH از عوامل مهم تأثیرگذار در کیفیت گوشت است. پس از کشتار، ذخیره گلیکوژن عضله تمام شده و انرژی حاصل از اکسیداسیون هوازی به اتمام می‌رسد. گلیکوژن، گلوکز و گلوکز-۶ فسفات به اسیدلاکتیک تبدیل شده و pH کاهش می‌یابد. تجمع لاکتات و رهایش پروتون در نتیجه هیدرولیز آدنوزین تری فسفات (ATP) در عضله سبب کاهش pH می‌شود. سرعت و مقدار کاهش pH پس از کشتار منجر به دناتوراسیون پروتئین شده و روی رنگ، تردی و آبداری تأثیر می‌گذارد. pH بالاتر، ماندگاری گوشت را کاهش داده و روی رنگ و بافت تأثیر می‌گذارد. بعدازاینکه pH به حداقل خود می‌رسد، با گذشت زمان و رسیدن گوشت، تجزیه‌ی پروتئین‌ها، افزایش بار ناشی از جذب یون‌های پتاسیم و رهایش یون‌های کلسیم سبب افزایش فشار اسمزی و در نتیجه افزایش pH می‌شوند. این افزایش pH سبب افزایش WHC می‌گردد (۱۹). رطوبت خروجی (EM) توانایی گوشت برای حفظ آب موجود بین رشته‌های ضخیم و نازک را در هنگامی که فشار خارجی وارد می‌شود، منعکس می‌کند (۲۹). پارامتر EM حفظ ویتامین‌ها، مواد معدنی و نمک‌ها و همچنین حجم آب آزاد شده را تحت تأثیر قرار می‌دهد و چون روی ارزش تغذیه‌ای، ظاهر و دلبذیری گوشت تأثیر دارد یک

¹ Warner Bratzler Shear Force

(۲۰۰۹) برای انجمادزدایی گوشت خوک از پرتو مادون قرمز (در پنج سطح ۴۷، ۸۰، ۱۲۱، ۱۷۱ و ۲۲۹ وات) و سرعت گردش هوا (در سه سطح ۰، ۳ و ۶ متر بر ثانیه) استفاده نمودند. بررسی‌ها نشان داد با افزایش توان منبع تابش و سرعت گردش هوا، افت ناشی از انجمادزدایی کاهش و ظرفیت نگهداری آب و نیروی برشی افزایش یافته است (۸).

در سال‌های اخیر انجمادزدایی به کمک مایکروویو، اولتراسوند، میدان الکتروستاتیکی با ولتاژ بالا، فشار بالا و فرکانس رادیویی اصلی‌ترین سیستم‌های انجمادزدایی مواد غذایی مورد مطالعه بوده‌اند و محصول مورد بررسی نیز عمدتاً شامل گوشت خوک و غذاهای دریایی بوده است. تحقیقات زیادی نیز در مورد تکنولوژی‌های هیبریدی انجمادزدایی برای غلبه بر محدودیت‌ها و نیز افزایش کارایی در صنایع مختلف انجام شده است از قبیل انجمادزدایی گوشت گوسفند با روش هیبریدی اولتراسوند-آب اسیدی (۳۷)، انجمادزدایی فیله ماهی دریایی قرمز با روش هیبریدی مایکروویو با نانوذرات مغناطیسی (۳۸)، انجمادزدایی ماهی درام قرمز با روش هیبریدی اولتراسوند با مادون قرمز دور یا مایکروویو (۳۹)، انجمادزدایی گوشت خوک با روش هیبریدی مادون قرمز با گردش هوا (۸). لکن تاکنون پژوهش‌های کمی در خصوص استفاده از روش هیبریدی تشعشع مادون قرمز- هوای گرم بر انجماد زدایی صورت گرفته و از آنجایی که عملکرد تشعشع مادون قرمز در سایر فرایندهای صنایع غذایی مفید بوده است و از طرف دیگر روش‌های تجاری که در حال حاضر در صنعت استفاده می‌شوند، باعث تغییرات نامطلوبی در محصول نهایی می‌شوند استفاده از روش‌های نوین به منظور بهبود کیفیت محصولات در حین فرایند انجمادزدایی ضروری است. از این رو در این پژوهش سعی گردید فرایند

انجمادزدایی قطعات گوشت گاو توسط روش هیبریدی انجمادزدایی با تابش مادون قرمز همراه با گردش هوا در محیطی با دمای کنترل شده بررسی شده و تأثیر آن بر زمان و سرعت انجمادزدایی، خواص کیفی گوشت از قبیل افت خونابه، افت پخت، ظرفیت نگهداری آب، pH، رنگ و بافت محصول مورد بررسی قرار گیرد.

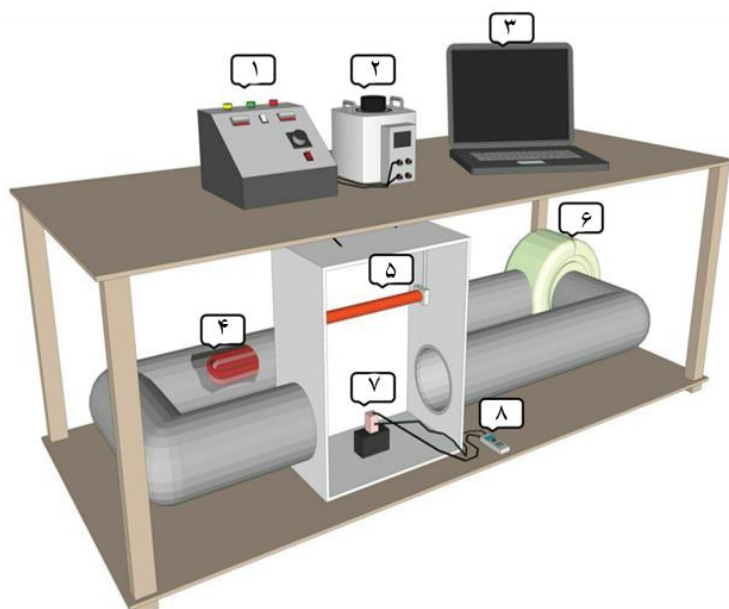
مواد و روش‌ها

تهیه، آماده‌سازی و انجماد قطعات گوشت: گوشت راسته گاو در دمای یخچال از فروشگاه معتبر محلی تهیه شد و پس از جداسازی قسمت‌های زائد و چربی قابل رؤیت، به صورت قطعات مکعب مستطیل به ابعاد ۳×۳×۵ cm برش داده شده و توزین گردید. به منظور ثبت پروفایل دما در حین انجمادزدایی، قبل از قرار دادن نمونه در فریزر ترموکوپل نوع K (ساخت تایوان) در مرکز آن تعبیه گردید. نمونه‌ها در فریزر معمولی با دمای ۱۸C- منجمد شده و به مدت ۵ روز در آن نگهداری شدند.

انجمادزدایی: به منظور انجمادزدایی نمونه‌های منجمد از سامانه هیبریدی مادون قرمز- گردش هوای گرم استفاده شد (شکل ۱). این سامانه دارای یک محفظه انجمادزدایی مجهز به یک لامپ مادون قرمز هالوژن کوارتز (مدل فیلیپس با توان کل ۱۰۰۰ وات و قطر ۱ سانتی متر) به عنوان منبع تابشی، یک فن با قابلیت تنظیم سرعت گردش هوا (۲/۵ و ۵ متر بر ثانیه) و المنت حرارتی مجهز به سیستم قطع و وصل برای کنترل دمای هوای در گردش (۳۰ و ۴۰ درجه سانتی گراد) می‌باشد. آزمایش‌ها با اعمال ولتاژهای متفاوت (توسط دستگاه تنظیم‌کننده ولتاژ) جهت ایجاد توان‌های مورد نظر لامپ مادون قرمز انجام شدند. از سه سطح مختلف توان مادون قرمز (۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ وات) در فاصله‌ی ۱۵ سانتی متری از سطح نمونه استفاده شد. از

سانتی گراد (دمایی که در آن نگهداری می شد) تا ۱۰ درجه سانتی گراد ثبت شد.

تیمار انجمادزدایی با هوای ساکن ۳۰ درجه سانتی گراد بدون تابش مادون قرمز به عنوان تیمار شاهد استفاده گردید. تغییرات دمایی مرکز نمونه از ۱۸- درجه



شکل ۱- شماتیک سامانه انجمادزدایی ترکیبی تشعشع مادون قرمز- هوای گرم. ۱) تنظیم کننده دما و سرعت گردش هوا، ۲) وات متر، ۳) کامپیوتر، ۴) المنت الکتریکی، ۵) ساطع کننده مادون قرمز، ۶) فن گردش هوا، ۷) نمونه و ۸) ثبت کننده دما

Figure 1- Schematic of hybride infrared radiation-hot air thawing system. 1) Temperature and air circulation speed regulator, 2) Watt meter, 3) Computer, 4) Electric element, 5) Infrared emitter, 6) Air circulation fan, 7) Sample, 8) Temperature recorder.

زمان رسیدن دمای مرکز نمونه به ۵- و ۰ درجه سانتی گراد است.

افت انجمادزدایی: افت انجمادزدایی (افت خونابه) به صورت درصدی از اختلاف وزن نمونه قبل از انجماد و بعد از انجمادزدایی محاسبه شد. برای محاسبه آن وزن نمونه گوشت قبل از انجماد و پس از انجمادزدایی و پاک کردن خونابه خروجی ثبت شد. سپس افت انجمادزدایی با استفاده از معادله ۲ که در آن W_1 وزن نمونه قبل از انجماد و W_2 وزن نمونه بعد از انجمادزدایی است، محاسبه گردید (۴۰):

(معادله ۲)

$$Thawing\ loss = \left(\frac{W_1 - W_2}{W_1} \right) \times 100$$

pH: pH نمونه بلافاصله بعد از انجمادزدایی

اندازه گیری گردید. بدین ترتیب که ۵ گرم از گوشت انجمادزدایی شده در هاون کوبیده شد و با ۴۵

اندازه گیری فاکتورهای انجمادزدایی و آنالیز محصول

سرعت انجمادزدایی: در طول فرایند انجمادزدایی، دمای مرکز نمونه گوشت منجمد با استفاده از ترموکوپل نوع K متصل به ترمومتر دارای ثبت کننده دما (لوترون، مدل TM- 947SD، تایوان) اندازه گیری و با فاصله زمانی یک ثانیه ثبت شد. سرعت انجمادزدایی برحسب (سانتی متر بر ساعت) برای نصف ضخامت نمونه، برحسب زمان مورد نیاز برای گذشتن از منطقه حداکثر تشکیل بلورهای یخ (۵- تا ۰ درجه سانتی گراد) با استفاده از معادله ۱ محاسبه گردید (۸):

(معادله ۱)

$$Thawing\ Rate = \frac{1}{2} * \frac{D}{((t_0 C) - (t_{-5} C))}$$

که در آن D ضخامت نمونه و $t_{-5}^{\circ}C$ و $t_0^{\circ}C$ به ترتیب

انجمادزدایی شده قبل از پخت و W2 وزن آن بعد از پخت است، محاسبه گردید (۴۰):
(معادله ۴)

$$\text{Cooking Loss (\%)} = \left(\frac{w_1 - w_2}{w_1} \right) \times 100$$

آنالیز رنگ: رنگ نمونه‌های گوشت (شاخص‌های $L^*a^*b^*$) بلافاصله پس از پایان انجمادزدایی برای هر نمونه تعیین شد. برای این کار با استفاده از یک دستگاه اسکنر رنگی (HP Scanjet G2710، آمریکا) نمونه‌ها با دقت ۶۰۰ DPI اسکن شده و تصاویر به‌دست‌آمده با فرمت JPG و در فضای رنگی RGB باکیفیت بالا ذخیره شدند. جهت ممانعت از دخالت نورهای محیطی و بازتابش نور از یک جعبه سیاه بر روی اسکنر استفاده شد. تجزیه و تحلیل رنگ در تصاویر به‌دست‌آمده، با استفاده از پلاگین تبدیل فضای رنگ توسط نرم‌افزار ImageJ (نسخه 1.6.0) انجام شد. مقادیر L^* ، a^* و b^* هر یک از تصاویر مربوط به نمونه‌ها محاسبه و میانگین آن‌ها گزارش شد (۴۳).

نیروی برشی وارنر-براتزلر: تردی قطعات گوشت با اندازه‌گیری نیروی برشی وارنر-براتزلر در گوشت پخته به‌وسیله‌ی دستگاه بافت سنج (TA-XT Plus، Stable Micro Systems Ltd., Surrey, UK) ارزیابی شد. بدین منظور قطعات گوشت انجمادزدایی‌شده با ضخامت یکنواخت به وزن تقریبی ۵۰ گرم داخل کیسه پلی‌اتیلنی قرار گرفت و در بن ماری با دمای ۸۰°C به مدت یک ساعت قرار داده شد. نمونه پخته شده بعد از خروج از بن ماری زیر شیر آب سرد شد و سپس از هریک از قطعات، نمونه‌ای به ضخامت ۲ سانتی‌متر موازی محور فیبر عضلانی تهیه گردید و برای اندازه‌گیری نیروی برشی مورد استفاده قرار گرفت. سرعت حرکت تیغه وارنر-براتزلر ۲۰۰ میلی‌متر بر دقیقه و میزان لود سل^۱ ۲۵ کیلوگرم بود.

میلی‌لیتر آب مقطر هموژن گردید. سپس توسط pH متر دیجیتالی (لاب ترون، مدل L2012، ایران) pH اندازه‌گیری شد (۴۱).

ظرفیت نگهداری آب: ظرفیت نگهداری آب توانایی گوشت در نگهداری آب خود می‌باشد. می‌توان با اندازه‌گیری رطوبت خروجی پس از سانتریفوژ آن را ارزیابی کرد (۴۲). رطوبت خروجی که با ظرفیت نگهداری آب رابطه معکوس دارد، به‌صورت درصدی از اختلاف وزن نمونه قبل و بعد از سانتریفوژ محاسبه شد. تکه‌ای از گوشت انجمادزدایی‌شده به وزن تقریبی ۱۰ گرم داخل لوله‌ی سانتریفوژ که انتهای آن دارای کاغذ صافی بود، قرار گرفت و با ۵۰۰۰ دور بر دقیقه به مدت ۱۵ دقیقه توسط سانتریفوژ یخچال‌دار سیگما (مدل 3k30، آلمان) در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد برای جلوگیری از دناتوره شدن پروتئین سانتریفوژ شد. پس از سانتریفوژ، نمونه دوباره توزین گردید. سپس رطوبت خروجی با استفاده از معادله ۳ که در آن W1 وزن نمونه انجمادزدایی‌شده قبل از سانتریفوژ و W2 وزن آن بعد از سانتریفوژ است، محاسبه گردید.
(معادله ۳)

$$\text{Expressible Moisture (\%)} = \left(\frac{w_1 - w_2}{w_1} \right) \times 100$$

افت پخت: افت پخت به‌صورت درصدی از اختلاف وزن نمونه انجمادزدایی‌شده قبل و بعد از پخت محاسبه شد. برای اندازه‌گیری آن، قطعات گوشت انجمادزدایی‌شده با ضخامت یکنواخت به وزن تقریبی ۲۵ گرم داخل کیسه‌ی پلی‌اتیلن بسته‌بندی و در بن ماری با دمای ۸۰°C به مدت یک ساعت قرار داده شد. نمونه پخته شده بعد از خروج از بن ماری زیر شیر آب، سرد شد و سپس سطح آن با دستمال حوله‌ای خشک شده و توزین گردید. درصد افت پخت با استفاده از معادله ۴ که در آن W1 وزن نمونه

¹ Load Cell

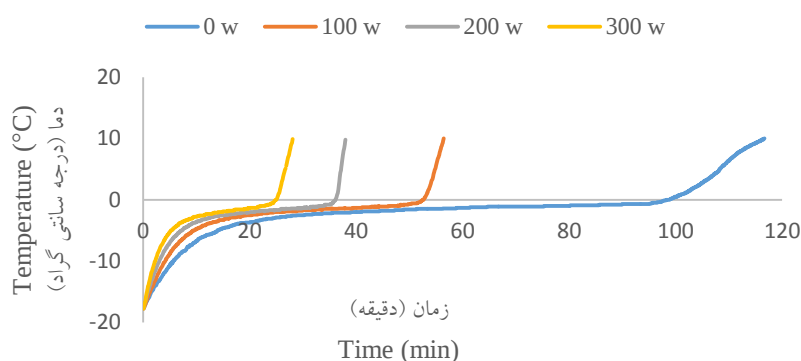
در پایان نیروی لازم برای برش نمونه برحسب نیوتن گزارش شد (۴۴).

تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها: در این پژوهش آزمایش‌ها به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی و با دو تکرار انجام شد. سپس داده‌های حاصل با استفاده از نرم‌افزار SAS مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت و مقایسه میانگین‌ها به وسیله آزمون دانکن در سطح اطمینان ۹۵ درصد ($p < 0.05$) صورت گرفت. برای رسم نمودارها نیز از برنامه (۲۰۱۵) Excel استفاده گردید.

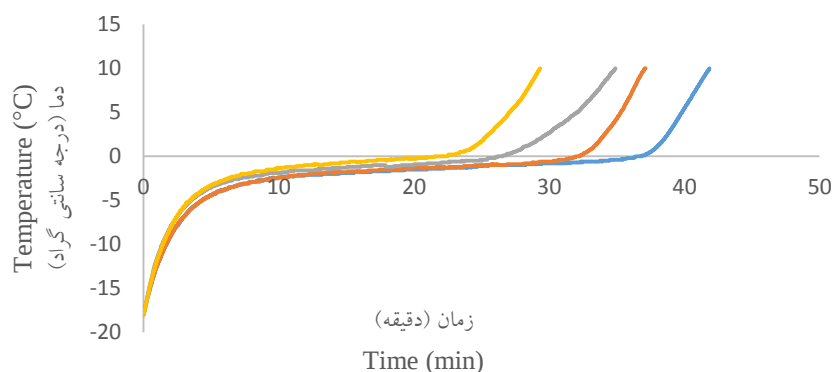
نتایج و بحث

تغییرات دما: تغییرات دمای مرکز نمونه منجمد در طی انجمادزدایی با توان‌های مختلف مادون قرمز در سرعت‌های مختلف گردش هوای ۳۰ درجه سانتی‌گراد در شکل ۲ (الف، ب، ج) نشان داده شده است. در تمامی تیمارها، دما در زمان کوتاهی از ۱۸- تا ۵- درجه سانتی‌گراد افزایش یافت و سپس زمان

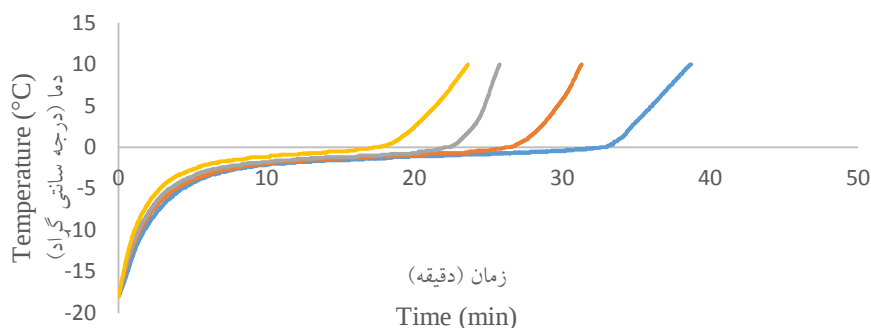
نسبتاً زیادی تا رسیدن به ۰ درجه سانتی‌گراد صرف شد. در تیمار شاهد که در آن انتقال حرارت جابه‌جایی طبیعی در سیستم برقرار بود (سرعت هوا ۰ متر بر ثانیه و توان مادون قرمز ۰ وات)، زمان انجمادزدایی حدود ۸۵ دقیقه طول کشید. با اعمال مادون قرمز به سیستم، زمان انجمادزدایی کاهش معنی‌داری پیدا کرد، به طوری که با اعمال توان‌های ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ وات، زمان انجمادزدایی به ترتیب برابر با ۴۳/۷، ۲۵/۵ و ۱۹/۵ دقیقه بود، در مقایسه با شاهد به نصف و کمتر از آن رسید. پرتو مادون قرمز بدون نیاز به محیط مادی به درون گوشت نفوذ و به مولکول‌های برخورد می‌کند و با توجه به ماهیت پیوندهای شیمیایی باعث تغییر در ارتعاش و چرخش مولکول‌ها می‌شود. حین بازگشت مولکول به حالت عادی خود، انرژی تابشی جذب شده به شکل گرما آزاد می‌شود. در نتیجه باعث بهبود تغییرات دمایی و افزایش سرعت انجمادزدایی می‌گردد.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۲- دمای مرکز گوشت منجمد در طی انجمادزدایی در توان‌های مختلف مادون‌قرمز با هوای ۳۰ درجه سانتی‌گراد در سرعت جریان هوای مختلف: الف- ۰ متر بر ثانیه، ب- ۲/۵ متر بر ثانیه، ج- ۵ متر بر ثانیه.

Figure 2-centrt temperature of frozen beef during thawing at different infrared powers at air with 30°C temperature at different air velocities: a- 0 m/s, b- 2.5 m/s, c- 5 m/s.

دادند نمونه‌های استوانه‌ای گوشت خوک به ابعاد (قطر ۸ و ارتفاع ۳ سانتی‌متر) در معرض هوا با سرعت ۳ و ۶ متر بر ثانیه به ترتیب در مدت ۴۶ و ۳۵ دقیقه انجمادزدایی شدند (در مقایسه با ۱۵۰ دقیقه برای کنترل) (۸).

به طور کلی، افزایش سرعت هوا و توان مادون‌قرمز تأثیر معنی‌داری بر زمان انجمادزدایی ($p < 0.05$) داشت که با نتایج داوودی و همکاران (۲۰۱۸) مطابقت دارد. آن‌ها انجمادزدایی گوشت مرغ چرخ‌شده را با استفاده از سامانه هیبریدی مادون‌قرمز- هوای گرم بررسی کردند و گزارش دادند که توان

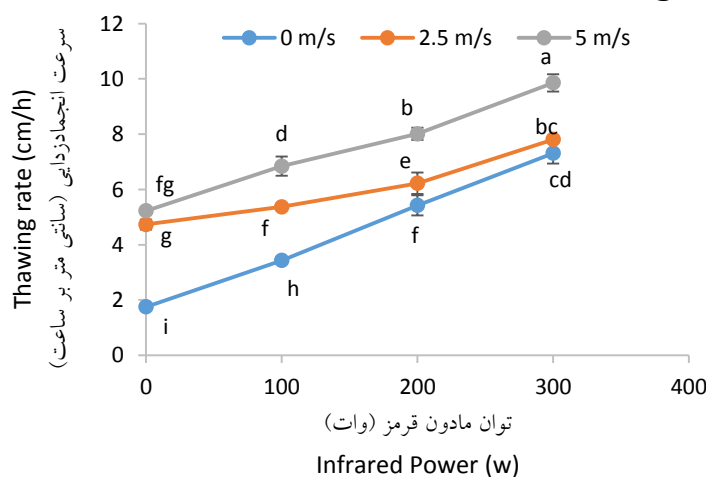
با به گردش درآوردن هوا با سرعت‌های ۲/۵ و ۵ متر بر ثانیه، این زمان به ترتیب به ۳۱/۶ و ۲۸/۷ دقیقه کاهش یافت که در مقایسه با زمان تیمار شاهد که ۸۵ دقیقه بود، زمان تقریباً به یک‌سوم تقلیل پیدا کرد. این موضوع تأثیر قابل‌توجه سرعت گردش هوا روی زمان انجمادزدایی را نشان می‌دهد. وجود سیستم گردش هوا خصوصاً با سرعت بالا باعث تغییر مکانیزم انتقال حرارت از جابه‌جایی طبیعی به اجباری شد که این امر سبب افزایش ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی و کاهش زمان انجمادزدایی گردید. این نتایج با نتایج هونگ و همکاران (۲۰۰۹) سازگار است که گزارش

مادون قرمز و سرعت هوا اثر معنی داری ($p < 0.05$) بر زمان انجمادزدایی دارد (۴۵).

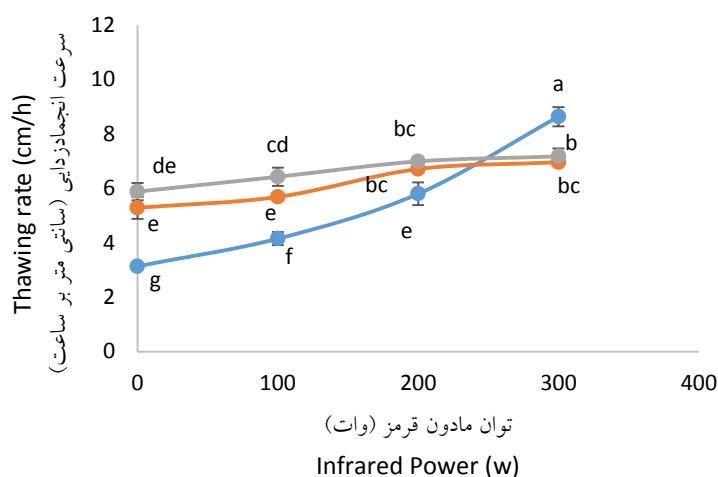
در مرحله‌ی اول انجمادزدایی، افزایش سریع درجه حرارت روی می‌دهد که به دلیل حضور یک لایه‌ی یخ در سطح ماده‌ی غذایی می‌باشد. از آنجایی که یخ دارای ضریب هدایت حرارتی بالاتری نسبت به آب است، باعث افزایش نرخ انتقال حرارت می‌گردد. در صنعت انجماد مواد غذایی، محدوده دمایی ۰ تا ۵- درجه سانتی‌گراد اغلب به‌عنوان منطقه حداکثر تشکیل کریستال یخ شناخته می‌شود (۳۵). طول‌موج لامپ‌های مادون قرمز تجاری در محدوده مادون قرمز نزدیک (۱/۴ - ۰/۷۵ میکرومتر) می‌باشد. از آنجایی که آب ضریب نشر بالایی دارد، مواد غذایی حاوی آب توانایی قابل توجهی برای جذب انرژی مادون قرمز دارند؛ آب انرژی مادون قرمز را در طول موج ۱/۴ میکرومتر به‌صورت حداکثر جذب می‌کند (۱۰ و ۸). بنابراین در محدوده دمایی ۵- تا ۰ درجه سانتی‌گراد که مقداری از یخ به آب تبدیل شده،

تیمار مادون قرمز حداکثر اثر خود را نشان می‌دهد. به‌علاوه، یخ ضریب نشر بالاتری نسبت به آب دارد (۴۶)، که باعث می‌شود مادون قرمز به‌عنوان روشی برای انجمادزدایی سریع گوشت معرفی شود.

سرعت انجمادزدایی در شرایط مختلف: نمودار سرعت انجمادزدایی در توان‌های مختلف مادون قرمز و سرعت‌های مختلف گردش هوا در دو دمای ۳۰ و ۴۰ درجه سانتی‌گراد در شکل ۳ (الف، ب) نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، افزایش توان مادون قرمز باعث افزایش سرعت انجمادزدایی گوشت گردید. با افزایش توان، دمای محیط افزایش یافته و گرادیان دمایی بین محیط انجمادزدایی و نمونه نیز افزایش یافته و انجمادزدایی با سرعت بیشتری انجام می‌گیرد که این نتیجه مطابق با قانون پلانک می‌باشد. همچنین مادون قرمز هم بر افزایش تصاعدی درجه حرارت محفظه و هم بر عبور گرما از داخل نمونه تأثیر داشت.



(الف)



(ب)

شکل ۳- سرعت انجمادزدایی در توان‌های مختلف مادون‌قرمز و سرعت‌های مختلف جریان هوا:

الف - ۳۰ درجه سانتی‌گراد، ب - ۴۰ درجه سانتی‌گراد

Figure 3- thawing rate at different infrared powers and hot air velocities: a- 30°C, b- 40°C

شده و به‌این ترتیب سرعت انجمادزدایی کاهش یافته است.

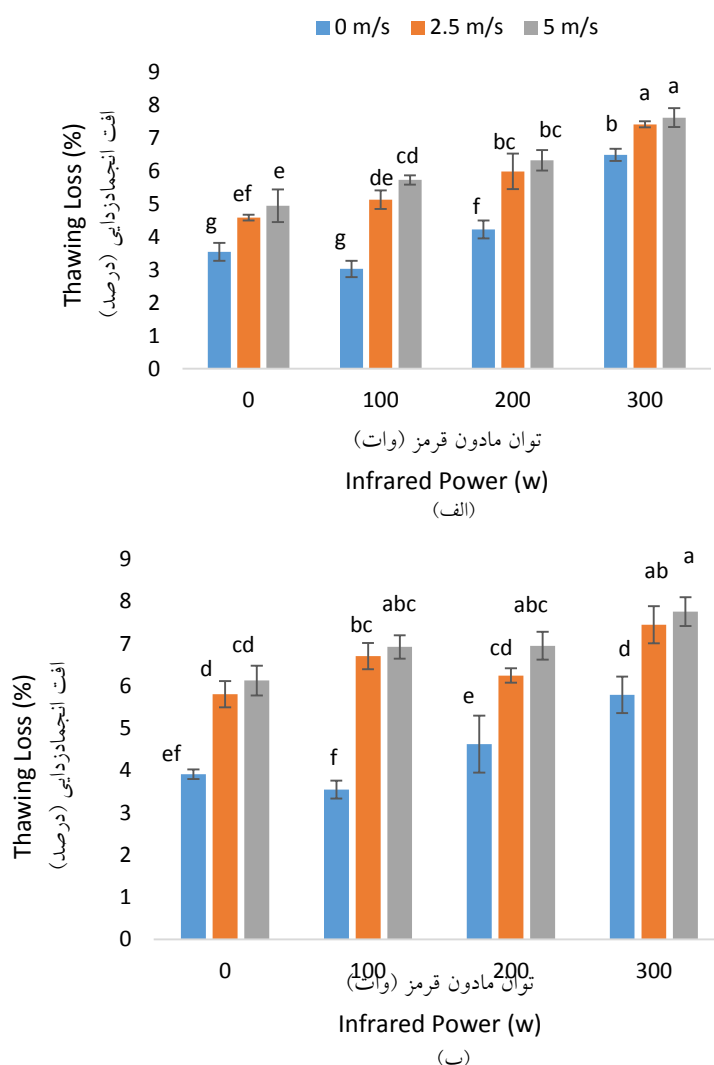
افت انجمادزدایی در شرایط مختلف: شکل ۴ (الف)، (ب) افت انجمادزدایی نمونه گوشت گاو منجمد را در توان‌های مختلف مادون‌قرمز و سرعت‌های مختلف گردش هوا در دو دمای ۳۰ و ۴۰ درجه سانتی‌گراد نشان می‌دهد. بر اساس جدول ANOVA، سطوح مختلف پارامترهای توان مادون‌قرمز، دمای هوا و سرعت هوا و همچنین تأثیرات متقابل دو به دوی توان-دمای هوا و دمای هوا-سرعت هوا تأثیر معنی‌داری بر میزان افت انجمادزدایی ندارند. تیمار شاهد یعنی تیمار بدون مادون‌قرمز در هوای ساکن با دمای ۳۰ درجه سانتی‌گراد کمترین میزان افت انجمادزدایی و شدیدترین تیمار یعنی توان ۳۰۰ وات در دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد با سرعت هوای ۵ متر بر ثانیه بیشترین افت انجمادزدایی را ایجاد کردند. به‌بیان دیگر، با اعمال مادون‌قرمز برای انجمادزدایی و با افزایش توان آن، میزان افت انجمادزدایی علیرغم انتظار افزایش یافت. زیرا انتظار می‌رفت که با اعمال

شیریدان و شیلتون (۱۹۹۹) کاربرد حرارت‌دهی با مادون‌قرمز را در فرایند پخت محصولات گوشتی مورد بررسی قرار دادند و بیان کردند که مادون‌قرمز هم یک منبع گرما بوده و هم توسط آب و دیگر بیوپلیمرها مثل پروتئین‌ها، چربی‌ها و کربوهیدرات‌ها جذب می‌شود، به داخل گوشت نفوذ می‌کند. بنابراین استفاده از اشعه مادون‌قرمز باعث ایجاد یک سیستم گرمایش کارآمد می‌شود (۹). ترکیب گردش هوا با تابش مادون‌قرمز نیز سرعت انجمادزدایی را بیشتر افزایش داد. این نتایج با یافته‌های هونگ و همکاران (۲۰۰۹) مطابقت دارد (۸). مشاهده می‌شود که در دمای ۴۰°C، در توان بالای مادون‌قرمز (۳۰۰ وات)، سرعت انجمادزدایی علی‌رغم انتظار با افزایش سرعت هوا، کاهش یافته است. در این شرایط پدیده سفت‌شدگی سطحی^۱ روی داده و پوسته‌ای سفت روی سطح محصول ایجاد می‌شود. این پوسته که بدون آب و دارای حفرات است احتمالاً به‌عنوان یک عایق حرارتی عمل کرده و مانع نفوذ حرارت به مرکز نمونه

¹ Case hardening

یافته‌های هونگ و همکاران (۲۰۰۹) می‌باشد (۸). به طور کلی می‌توان این‌گونه گفت که افزایش توان مادون قرمز و گردش مداوم هوا در طول انجمادزدایی باعث خشک شدن سطحی قابل توجهی می‌شود. در منابع علمی نظریه‌های متفاوتی درباره تأثیر زمان انجمادزدایی بر افت انجمادزدایی وجود دارد (۴۷). به‌طورکلی افت انجمادزدایی، مقدار مایع خروجی از یک‌تکه گوشت است که عمدتاً از آب و پروتئین تشکیل شده و می‌تواند بدون اعمال نیروی مکانیکی و تنها بر اثر گرانش از آن خارج شود (۱۶).

مادون قرمز و افزایش توان آن که باعث افزایش سرعت انجمادزدایی گردید، میزان افت انجمادزدایی کاهش یابد. دلیل افزایش افت انجمادزدایی را می‌توان تبخیر زیاد آب از سطح گوشت به علت اثر تشعشعی توان بالای مادون قرمز دانست. این موضوع برخلاف یافته‌های داوودی و همکاران (۲۰۱۹) می‌باشد (۴۵). در توان ثابت مادون قرمز با افزایش سرعت هوا از صفر به ۲/۵ متر بر ثانیه میزان افت انجمادزدایی افزایش چشمگیری داشت که این امر نیز باعث افزایش افت ناشی از تبخیر گردید که مطابق با



شکل ۴- افت انجمادزدایی در توان‌های مختلف مادون قرمز و سرعت‌های مختلف جریان هوا:

الف- ۳۰ درجه سانتی‌گراد، ب- ۴۰ درجه سانتی‌گراد

Figure 3- thawing loss at different infrared powers and hot air velocities: a- 30°C, b- 40°C

ارتباط داشته باشد و در انجمادزدایی آهسته، مایع آزاد شده از فیبرها نمی‌تواند دوباره جذب شود (۴۸). به‌طور مشابه، در انجمادزدایی آهسته امکان کریستالیزاسیون مجدد نیز وجود دارد که منجر به افت خونابه بالا در بیرون فیبرها می‌شود.

تغییرات pH گوشت حین انجمادزدایی: نتایج حاصل از اندازه‌گیری pH نمونه گوشت گاو منجمد بلافاصله بعد از انجمادزدایی با استفاده از سامانه هیبریدی مادون‌قرمز-هوای گرم در جدول ۱ آورده شده است. میزان pH در سطوح مختلف دما و سرعت هوا اختلاف معنی‌داری با هم دارند ($P < 0.05$)، ولی تأثیر توان مادون‌قرمز روی تغییرات pH معنی‌دار نیست. با افزایش دمای هوا و سرعت آن مقدار pH کاهش می‌یابد. از آنجایی که pH مقدار یون آزاد هیدروژن موجود در محلول را اندازه‌گیری می‌کند، کاهش pH پس از انجماد و انجمادزدایی می‌تواند ناشی از تأثیر آن‌ها بر دنا‌توراسیون پروتئین‌ها و آزاد شدن یون‌های هیدروژن باشد (۴۹). خروج خونابه از نمونه طی انجمادزدایی منجر به افزایش غلظت املاح می‌شود که می‌تواند دلیل دیگری بر کاهش pH گوشت پس از انجمادزدایی باشد.

گونزالس و همکاران (۱۹۸۵) بیان کردند که با افزایش سرعت انجمادزدایی، مقدار خونابه بیشتر می‌شود. نتایج به دست آمده از اندازه‌گیری میزان خونابه تولید شده در زمان‌های مختلف پس از انجمادزدایی و تجربیات بافت‌شناسی حاکی از آن است که تولید خونابه، نتیجه‌ی بازجذب ناقص آب خارج سلولی است (۱۸). در طی انجمادزدایی بخشی از آب حاصل از ذوب شدن یخ خارج سلولی، توسط سلول‌ها بازجذب شده و بخشی از آن نیز از گوشت خارج می‌شود که به آن افت انجمادزدایی (خونابه) گفته می‌شود. با شروع انجمادزدایی، دما افزایش می‌یابد و ذوب شدن یخ باعث افزایش فعالیت آب در فضای خارج سلول می‌گردد. در نتیجه، آب به سمت فضای داخل سلول مهاجرت کرده و توسط فیبرهای نیمه دهیدراته شده جذب می‌شود. اگر سرعت انجمادزدایی زیاد باشد، بازجذب آب توسط فیبر ناقص انجام می‌شود و باعث تجمع آب جذب نشده در فضای خارج سلول شده که در نهایت به‌صورت خونابه خارج می‌شود. در رابطه با افزایش افت خونابه در انجمادزدایی آهسته، لینارس و همکاران (۲۰۰۵) نشان دادند که این پارامتر می‌تواند با سرعت انجمادزدایی

جدول ۱- مقایسه میانگین مقادیر pH گوشت گاو در تیمارهای مختلف انجمادزدایی

Table 1- Mean comparison of pH of beef at different thawing treatments

توان مادون‌قرمز (W)				سرعت هوا	دمای هوا (°C)
Infrared power				(m/s)	Air temperature
300	200	100	0	Air velocity	
5.35±0.10 ^{Aaa}	5.42±0.16 ^{Aaa}	5.24±0.09 ^{Aaa}	5.36±0.19 ^{Aaa}	0	30
5.22±0.12 ^{Aaa}	5.1±0.00 ^{Aaa}	5.33±0.14 ^{Aaa}	5.47±0.10 ^{Aaa}	2.5	
5.22±0.06 ^{Aaβ}	5.18±0.04 ^{Aaβ}	5.07±0.04 ^{Aaβ}	5.15±0.11 ^{Aaβ}	5	
5.27±0.10 ^{Abα}	5.25±0.06 ^{Abα}	5.22±0.10 ^{Abα}	5.17±0.08 ^{Abα}	0	40
5.08±0.05 ^{Abα}	5.06±0.07 ^{Abα}	5.27±0.13 ^{Abα}	5.33±0.14 ^{Abα}	2.5	
5.08±0.00 ^{Abβ}	5.14±0.04 ^{Abβ}	5.12±0.17 ^{Abβ}	5.07±0.08 ^{Abβ}	5	

حروف لاتین بزرگ مقایسه بین توان‌های مادون‌قرمز و حروف لاتین کوچک مقایسه بین دماهای آزمون است؛ حروف یونانی مقایسه بین سرعت جریان هوا را نشان می‌دهد. حروف مشترک نشان‌دهنده عدم وجود تفاوت معنی‌دار می‌باشد، (M±SD).

Uppercase letters are comparisons between infrared power levels and lowercase letters are comparisons between temperatures; The Greek letters show the comparison between air velocities. Common letters indicate the absence of significant differences, (M±SD).

مطالعات مختلف ارتباط متناقض pH عضله و تیمار انجماد/انجمادزدایی را گزارش کرده‌اند (۵۰). لیگونی و همکاران (۲۰۱۲) گزارش کرده‌اند که گوشت انجماد/ انجمادزدایی شده به دلیل ترشح الکترولیت از بافت عضلانی، pH کمی کمتر از حالت تازه دارد (۵۱). موئلا و همکاران (۲۰۱۰) بیان کردند که pH گوشت تازه و گوشت انجماد/ انجمادزدایی شده تفاوت معنی داری ندارد (۵۲). از طرف دیگر، کیم و لی (۲۰۱۱) گزارش دادند که گوشت انجماد/ انجمادزدایی شده به دلیل دناتوراسیون جزئی پروتئین‌های عضلانی، pH بیشتری نسبت به گوشت تازه دارد (۵۳). نتایج این تحقیق با نتایج لیگونی و همکاران (۲۰۱۲) مطابقت دارد (۵۱).

ظرفیت نگهداری آب در انجمادزدایی: جدول ۲ مقادیر رطوبت خروجی گوشت گاو انجمادزدایی شده تحت تأثیر شرایط مختلف انجمادزدایی با استفاده از سامانه هیبریدی مادون قرمز-هوای گرم را نشان می‌دهد. در این مطالعه، ظرفیت نگهداری آب گوشت گاو انجمادزدایی شده با پارامتر رطوبت خروجی ارزیابی شد که مقادیر رطوبت خروجی کوچک‌تر نشان‌دهنده ظرفیت نگهداری آب بهتر است. بر اساس جدول ANOVA، سطوح مختلف توان مادون قرمز، دما و سرعت هوا و همچنین تأثیرات متقابل توان-سرعت هوا و توان -دما-سرعت هوا تأثیر معنی داری بر میزان ظرفیت نگهداری آب دارند ($p < 0.05$).

جدول ۲- مقایسه میانگین مقادیر رطوبت خروجی گوشت گاو در تیمارهای مختلف انجمادزدایی

Table 2- Mean comparison of expressed moisture of beef at different thawing treatments

توان مادون قرمز (W)				سرعت هوا	دمای هوا (°C)
Infrared power				(m/s)	Air temperature
300	200	100	0	Air velocity	
12.47±0.86 ^{Caα}	12.74±1.37 ^{BCaα}	14.71±1.50 ^{Baα}	18.24±1.02 ^{Aaα}	0	30
10.32±0.48 ^{Caγ}	10.68±1.15 ^{BCaγ}	11.82±0.22 ^{Bay}	12.06±0.38 ^{Aaγ}	2.5	
13.12±1.10 ^{Caβ}	11.39±0.32 ^{BCaβ}	13.19±1.46 ^{Baβ}	13.56±0.52 ^{Aaβ}	5	
11.00±0.99 ^{Cba}	10.47±0.04 ^{BCba}	11.70±0.41 ^{Bba}	15.11±0.90 ^{Abα}	0	40
9.90±0.44 ^{Cbγ}	9.53±0.93 ^{BCbγ}	8.37±0.36 ^{Bbγ}	11.44±1.20 ^{Abγ}	2.5	
7.80±1.43 ^{Cbβ}	11.52±1.35 ^{BCbβ}	10.99±0.63 ^{Bbβ}	13.29±0.94 ^{Abβ}	5	

حروف لاتین بزرگ مقایسه بین توان‌های مادون قرمز و حروف لاتین کوچک مقایسه بین دماهای آزمون است؛ حروف یونانی مقایسه بین سرعت جریان هوا را نشان می‌دهد. حروف مشترک نشان‌دهنده عدم وجود تفاوت معنی دار می‌باشد، (M±SD).

Uppercase letters are comparisons between infrared power levels s and lowercase letters are comparisons between temperatures; The Greek letters show the comparison between air velocities. Common letters indicate the absence of significant differences, (M±SD).

بررسی منابع علمی نشان می‌دهد که انجماد و انجمادزدایی به‌طور کلی باعث کاهش ظرفیت نگهداری آب می‌شود که ناشی از کاهش pH و تخریب ساختار فیبرهای عضلانی همچنین دناتوراسیون پروتئین‌ها به‌خصوص پروتئین‌های میوفیبریلی است (۴۲).

افت پخت گوشت انجمادزدایی شده: نتایج حاصل از تعیین افت پخت نمونه‌های انجمادزدایی شده‌ی

نمونه تیمار شده با توان ۳۰۰ وات در دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد و با سرعت هوای ۵ متر بر ثانیه کمترین مقدار رطوبت خروجی (۷/۸) را داشت که نشان‌دهنده بیشترین ظرفیت نگهداری آب و نمونه شاهد بیشترین مقدار رطوبت خروجی (۱۸/۲۴) را داشت که نشان‌دهنده کمترین ظرفیت نگهداری آب است. اعمال مادون قرمز و افزایش توان آن و نیز به گردش درآوردن هوا باعث کاهش رطوبت خروجی و در نتیجه افزایش ظرفیت نگهداری آب گوشت شدند.

گوشت گاو در جدول ۳ آمده است. تشعشع مادون قرمز و دمای هوا و سرعت گردش آن تأثیر معنی داری بر افت پخت نشان دادند ($p < 0.05$). تیمار شاهد بیشترین میزان افت پخت (۴۳/۲۳٪) و تیمار مادون قرمز با توان ۳۰۰ وات در دمای ۴۰ درجه سانتی گراد با سرعت هوای ۵ متر بر ثانیه کمترین میزان افت پخت (۳۲/۴۶٪) را ایجاد کردند. همان طور که دیده می شود با اعمال مادون قرمز برای

انجمادزدایی و به گردش درآوردن هوا میزان افت پخت کاهش یافته است که منطبق بر نتایج هونگ و همکاران (۲۰۰۹) می باشد (۸). با افزایش دمای مرکز گوشت، محتوای آب گوشت کاهش یافته و محتوای چربی و پروتئین افزایش می یابد. ذوب شدن چربی و دناتوره شدن پروتئین ها در اثر حرارت باعث رها شدن باندهای شیمیایی آب، کاهش توانایی آن ها در نگه داشتن آب و افت پخت می گردد (۴۷).

جدول ۳- مقایسه میانگین مقادیر افت پخت گوشت گاو در تیمارهای مختلف انجمادزدایی

Table 3- Mean comparison of cooking loss of beef at different thawing treatments

توان تشعشع مادون قرمز (W)				سرعت هوا (m/s)	دمای هوا (°C)
Infrared power				Air velocity	Air temperature
300	200	100	0		
37.44±1.41 ^{Baa}	39.06±1.36 ^{Baa}	39.17±0.08 ^{ABaa}	43.23±1.97 ^{Aaa}	0	30
35.55±1.99 ^{Baβ}	37.59±2.65 ^{Baβ}	37.70±1.28 ^{ABaβ}	38.98±2.61 ^{Aaβ}	2.5	
35.79±2.03 ^{Bay}	36.44±1.97 ^{Bay}	37.15±2.41 ^{ABay}	37.93±1.73 ^{Aay}	5	
37.03±2.13 ^{Bba}	37.62±1.58 ^{Bba}	37.92±2.00 ^{ABba}	41.29±2.20 ^{Abα}	0	40
35.68±0.87 ^{Bbβ}	37.24±0.46 ^{Bbβ}	37.43±2.13 ^{ABbβ}	37.08±2.63 ^{Abβ}	2.5	
32.46±1.58 ^{Bby}	33.10±0.71 ^{Bby}	33.92±0.79 ^{ABby}	32.85±1.96 ^{Abγ}	5	

حروف لاتین بزرگ مقایسه بین توان های مادون قرمز و حروف لاتین کوچک مقایسه بین دماهای آزمون است؛ حروف یونانی مقایسه بین سرعت جریان هوا را نشان می دهد. حروف مشترک نشان دهنده عدم وجود تفاوت معنی دار می باشد، (M±SD).

Uppercase letters are comparisons between infrared power levels s and lowercase letters are comparisons between temperatures; The Greek letters show the comparison between air velocities. Common letters indicate the absence of significant differences, (M±SD).

۳۰ درجه سانتی گراد، سرعت ۰ متر بر ثانیه و توان ۰ وات) و نمونه انجمادزدایی شده با هوای گرم (دمای ۴۰ درجه سانتی گراد، سرعت ۵ متر بر ثانیه و توان ۰ وات) به ترتیب دارای روشن ترین (۴۱/۷۵) و تیره ترین (۳۴/۸۵) رنگ بودند که این نتایج در تطابق با یافته های هونگ و همکاران (۲۰۰۹) می باشد (۸). کاهش شاخص روشنایی طی انجمادزدایی می تواند به دلیل خروج بخشی از میوگلوبین به همراه خونابه باشد که در نتیجه آن رنگ گوشت افت محسوسی پیدامی کند.

شرایط مختلف انجمادزدایی تأثیری بر میزان پارامتر رنگی a^* نمونه های گوشت نداشت ($p > 0.05$). با توجه به اهمیت رنگ قرمز در ایجاد ظاهری مطلوب

تغییرات رنگ در حین انجمادزدایی: جدول ۴ نتایج تغییرات خصوصیات رنگی گوشت گاو تحت تأثیر شرایط مختلف انجمادزدایی با استفاده از سامانه هیبریدی مادون قرمز-هوای گرم را نشان می دهد. آنالیز آماری نتایج به دست آمده نشان داد که استفاده از سطوح مختلف پارامترهای توان مادون قرمز و دمای هوا گرم تغییرات چشمگیری در میزان روشنایی رنگ نمونه ها ایجاد نکرد ($p > 0.05$). از طرف دیگر، با افزایش سرعت گردش هوای گرم، کاهش قابل توجهی در میزان این پارامتر رنگی مشاهده گردید ($p < 0.05$). تمامی نمونه ها مقدار L^* پایین تری نسبت به نمونه کنترل داشتند. به طور کلی، نمونه شاهد (دمای

در رنگ گوشت قرمز، این نتیجه نشانگر کارایی بالای روش‌های انجمادزدایی به‌کاربرده شده را نشان می‌دهد. پارامتر رنگی b^* نمونه‌ها با افزایش دمای هوا کاهش یافت که به دلیل تأثیر دمای بالا بر ساختار پروتئینی رنگدانه غالب گوشت یعنی میوگلوبین و احتمالاً

دنا توره شدن سطحی آن می‌باشد؛ این در حالی است که میزان این پارامتر با تغییر سطوح توان مادون قرمز و سرعت گردش هوا تقریباً ثابت باقی ماند ($p > 0.05$).

جدول ۴- مقایسه میانگین مقادیر پارامترهای رنگی گوشت گاو در تیمارهای مختلف انجمادزدایی

Table 4- Mean comparison of color parameters of beef at different thawing treatments

توان مادون قرمز (W) Infrared power				سرعت هوا (m/s) Air velocity	دمای هوا (°C) Air temperature	پارامتر رنگی Color parameter
300	200	100	0			
39.51±0.54 ^{Aaa}	39.82±2.25 ^{Aaa}	40.36±1.87 ^{Aaa}	43.54±0.37 ^{Aaa}	0		
37.74±1.02 ^{Aaβ}	38.09±1.17 ^{Aaβ}	37.12±0.66 ^{Aaβ}	37.77±0.16 ^{Aaβ}	2.5	30	
38.95±1.17 ^{Aaβ}	39.03±2.79 ^{Aaβ}	36.85±2.11 ^{Aaβ}	37.13±1.75 ^{Aaβ}	5		
37.36±1.08 ^{Abα}	38.86±2.62 ^{Abα}	39.23±2.59 ^{Abα}	40.78±2.17 ^{Abα}	0		L*
37.33±0.11 ^{Abβ}	38.70±1.52 ^{Abβ}	35.82±0.93 ^{Abβ}	35.6±2.16 ^{Abβ}	2.5	40	
37.54±2.21 ^{Abβ}	38.80±0.35 ^{Abβ}	35.42±2.93 ^{Abβ}	34.85±1.56 ^{Abβ}	5		
40.22±1.46 ^{Aaa}	39.91±0.52 ^{Aaa}	39.84±0.28 ^{Aaa}	38.78±0.66 ^{Aaa}	0		
40.94±1.92 ^{Aaa}	40.23±1.29 ^{Aaa}	40.01±0.21 ^{Aaa}	38.35±1.99 ^{Aaa}	2.5	30	
40.48±0.16 ^{Aaa}	40.81±2.38 ^{Aaa}	41.49±0.08 ^{Aaa}	40.75±2.09 ^{Aaa}	5		
39.64±1.04 ^{Aaa}	40.26±0.18 ^{Aaa}	39.87±2.38 ^{Aaa}	41.83±0.86 ^{Aaa}	0		a*
39.19±1.73 ^{Aaa}	39.70±2.40 ^{Aaa}	38.42±0.86 ^{Aaa}	41.16±2.02 ^{Aaa}	2.5	40	
39.94±1.24 ^{Aaa}	38.41±2.30 ^{Aaa}	37.32±1.46 ^{Aaa}	39.42±0.84 ^{Aaa}	5		
11.69±0.94 ^{Aaa}	9.71±1.35 ^{Baa}	9.81±1.34 ^{Baa}	10.86±0.08 ^{ABaa}	0		
10.74±1.66 ^{Aaa}	9.56±0.14 ^{Baa}	10.47±0.86 ^{Baa}	9.74±1.34 ^{ABaa}	2.5	30	
11.60±1.51 ^{Aaa}	9.05±1.8 ^{Baa}	9.71±0.57 ^{Baa}	10.32±0.96 ^{ABaa}	5		
10.17±1.17 ^{Abα}	9.25±0.98 ^{Bba}	8.53±1.80 ^{Bba}	10.95±0.62 ^{ABba}	0		b*
9.39±1.44 ^{Abα}	9.23±0.01 ^{Bba}	8.72±1.06 ^{Bba}	10.32±0.91 ^{ABba}	2.5	40	
11.15±0.98 ^{Abα}	11.02±0.78 ^{Bba}	7.51±1.05 ^{Bba}	8.25±0.61 ^{ABba}	5		

حروف لاتین بزرگ مقایسه بین توان‌های مادون قرمز و حروف لاتین کوچک مقایسه بین دماهای آزمون است؛ حروف یونانی مقایسه بین سرعت جریان هوا را نشان می‌دهد. حروف مشترک نشان‌دهنده عدم وجود تفاوت معنی‌دار می‌باشد، (M±SD).

Uppercase letters are comparisons between infrared power levels and lowercase letters are comparisons between temperatures; The Greek letters show the comparison between air velocities. Common letters indicate the absence of significant differences, (M±SD).

نیروی برشی وارنر-براتزلر: جدول ۵ نتایج تغییرات نیروی برشی گوشت گاو تحت تأثیر شرایط مختلف انجمادزدایی با استفاده از سامانه هیبریدی مادون قرمز- هوای گرم را نشان می‌دهد. آنالیز نتایج حاصل از ارزیابی بافت نمونه‌های پخته شده بعد از انجمادزدایی نشان داد که توان مادون قرمز، دما و سرعت هوا باعث

تغییر قابل توجهی در میزان نیروی برشی گوشت گاو گردید. گوشت انجمادزدایی شده در شدیدترین شرایط (بیش‌ترین توان مادون قرمز، دما و سرعت هوا) کمترین مقدار نیروی برشی را داشت. افزایش توان مادون قرمز بدون گردش هوا باعث کاهش نیروی برشی گوشت گاو گردید ولی با افزایش سرعت هوا نیروی برشی افزایش یافت. اگرچه در دمای بالاتر با

افزایش بیشتر سرعت هوا و در نتیجه خشک شدن بافت گوشت، نیروی برشی کاهش یافت. در خصوص اثر انجماد و انجمادزدایی بر بافت گوشت دو نظریه وجود دارد. بر طبق یک نظریه به دلیل تشکیل کریستال‌های یخ و آسیب ناشی از آن بر بافت گوشت، میزان سفتی کاهش می‌یابد (۵۰). در مقابل نظریه دیگر معتقد است که به دلیل خروج خونابه از گوشت در طی انجمادزدایی، رطوبت لازم برای هیدراته کردن فیبرهای عضلانی کاهش یافته و به همین دلیل نیروی برشی افزایش می‌یابد و در نتیجه بر سفتی بافت نیز افزوده می‌شود (۵۴ و ۱۱). نتایج این مطالعه تاییدکننده‌ی نظریه‌ی دوم می‌باشد.

جدول ۵- مقایسه میانگین مقادیر نیروی برشی وارنر براتزلر گوشت گاو در تیمارهای مختلف انجمادزدایی

Table 5- Mean comparison of warner-bratzler shear force values of beef at different thawing treatments

توان مادون قرمز (W)				سرعت هوا	دمای هوا (°C)
Infrared power				(m/s)	Air temperature
300	200	100	0	Air velocity	
62.15±3.56 ^{Day}	73.70±8.04 ^{Gay}	77.33±5.41 ^{Bay}	84.38±5.74 ^{Aay}	0	30
71.79±7.11 ^{Daα}	81.14±8.28 ^{Caα}	95.56±1.34 ^{Baα}	99.88±1.97 ^{Aaα}	2.5	
44.00±2.53 ^{Daβ}	102.92±4.95 ^{Caβ}	122.25±5.33 ^{Baβ}	122.26±3.69 ^{Aaβ}	5	
64.17±5.75 ^{Day}	68.11±3.96 ^{Gay}	74.00±5.27 ^{Bay}	96.01±3.33 ^{Aay}	0	40
93.48±4.82 ^{Daα}	100.59±2.86 ^{Caα}	113.03±7.11 ^{Baα}	122.31±7.39 ^{Aaα}	2.5	
42.53±0.91 ^{Daβ}	84.19±1.62 ^{Caβ}	92.93±1.67 ^{Baβ}	100.53±4.50 ^{Aaβ}	5	

حروف لاتین بزرگ مقایسه بین توان‌های مادون قرمز و حروف لاتین کوچک مقایسه بین دماهای آزمون است؛ حروف یونانی مقایسه بین سرعت جریان هوا را نشان می‌دهد. حروف مشترک نشان‌دهنده عدم وجود تفاوت معنی‌دار می‌باشد، (M±SD).

Uppercase letters are comparisons between infrared power levels s and lowercase letters are comparisons between temperatures; The Greek letters show the comparison between air velocities. Common letters indicate the absence of significant differences, (M±SD).

نتیجه‌گیری کلی

می‌دهند. علی‌رغم پیشرفت‌های صورت گرفته در فناوری‌های انجمادزدایی هیبریدی هنوز مناطقی وجود دارند که تحقیقات بیشتر را ایجاب می‌کنند. تحقیقات بیشتر باید بر روی بهینه‌سازی تکنیک‌های ترکیبی، ارزیابی تأثیر آن‌ها بر کیفیت محصول، مقیاس‌پذیری و کاوش در کاربردهای جدید در زمینه‌های مرتبط تمرکز کند. این پیشرفت‌ها این پتانسیل را دارد که فرآورده‌های انجمادزدایی را در صنایع مختلف متحول کند و به نفع کسب‌وکارها و مصرف‌کنندگان به‌طور یکسره‌شان باشد.

نتایج به‌دست‌آمده نشان داد انجمادزدایی با سامانه هیبریدی مادون قرمز-گردش هوا روش موثری برای انجمادزدایی گوشت گاو منجمد می‌باشد و باعث افزایش سرعت انجمادزدایی و صرفه‌جویی در زمان و افزایش تردی گوشت بدون تأثیر منفی بر سایر پارامترهای کیفی آن می‌گردد. تکنولوژی‌های انجمادزدایی هیبریدی اغلب از کنترل دقیق دما و توزیع یکنواخت گرما استفاده می‌کنند که در نتیجه کیفیت محصول بهبود یافته و خطر آلودگی میکروبی به حداقل می‌رسد. در نتیجه این فناوری‌ها محصولات ایمن‌تر و با کیفیت‌تری را به مصرف‌کنندگان ارائه

References

1. Li, B. and Sun, D.W. 2002. Novel methods for rapid freezing and thawing of foods—a review. Journal of food engineering. 54:3. 175-182.
2. Sakata, R., Oshida, T., Morita, H. and Nagata, Y. 1995. Physico-chemical and processing

- quality of porcine *M. longissimus dorsi* frozen at different temperatures. *Meat science*. 39:2. 277-284.
3. Farag, K.W., Duggan, E., Morgan, D.J., Cronin, D.A. and Lyng, J.G. 2009. A comparison of conventional and radio frequency defrosting of lean beef meats: Effects on water binding characteristics. *Meat science*. 83:2. 278-284.
4. Farag, K.W., Lyng, J.G., Morgan, D.J. and Cronin, D.A. 2011. A comparison of conventional and radio frequency thawing of beef meats: effects on product temperature distribution. *Food and Bioprocess Technology*. 4. 1128-1136.
5. Bailey, C., James, S.J., Kitchell, A.G. and Hudson, W.R. 1974. Air- , water- and vacuum-thawing of frozen pork legs. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 25:1. 81-97.
6. Okamoto, A., & Suzuki, A. 2002. Effects of high hydrostatic pressure-thawing on pork meat. *In Progress in biotechnology*. 9. 571-576.
7. James, S. J., & Creed, P. G. 1980. Predicting thawing time of frozen beef fore and hindquarters. *International Journal of Refrigeration*. 3: 4. 237-240.
8. Hong, G.P., Shim, K.B., Choi, M.J. and Min, S.G. 2009. Effects of air blast thawing combined with infrared radiation on physical properties of pork. *Korean Journal for Food Science of Animal Resources*. 29:3. 302-309.
9. Sheridan, P., & Shilton, N. 1999. Application of far infra-red radiation to cooking of meat products. *Journal of Food Engineering* 41:3. 203-208.
10. Nowack, D., & Levicki, P. P. 2004. Infrared drying of apple slices. *Innovative Food Sciences Emerging Technology*. 5. 353-360.
11. Hong, G. P., Min, S. G., Ko, S. H., Shim, K. B., Seo, E. J., & Choi, M. J. 2007. Effects of brine immersion and electrode contact type low voltage ohmic thawing on the physico-chemical properties of pork meat. *Food Science of Animal Resources*. 27:4. 416-423.
12. Ngapo, T. M., Babare, I. H., Reynolds, J., & Mawson, R. F. 1999a. Freezing rate and frozen storage effects on the ultrastructure of samples of pork. *Meat science*. 53: 3. 159-168.
13. Wang, H., Luo, Y., Shi, C. and Shen, H. 2015. Effect of different thawing methods and multiple freeze-thaw cycles on the quality of common carp (*Cyprinus carpio*). *Journal of aquatic food product technology*. 24: 2. 153-162.
14. Hong, G.P., Park, S.H., Kim, J.Y., Lee, S.K. and Min, S.G. 2005. Effects of time-dependent high pressure treatment on physico-chemical properties of pork. *Food Science and Biotechnology*. 14: 6. 808-812.
15. Hoffman, L.C., Mostert, A.C., Kidd, M., & Laubscher, L.L. 2009. Meat quality of kudu (*Tragelaphus strepsiceros*) and impala (*Aepyceros melampus*): Carcass yield, physical quality and chemical composition of kudu and impala *Longissimus dorsi* muscle as affected by gender and age. *Meat Science*. 83. 788-795.
16. Fischer, K. 2007. Drip loss in pork: influencing factors and relation to further meat quality traits. *Journal of Animal Breeding and Genetics*. 124. 12-18.
17. Eastridge, J. S., & Bowker, B. C. 2011. Effect of rapid thawing on the meat quality attributes of USDA select beef strip loin steaks. *Journal of food science*. 76:2. 156-162.
18. Gonzalez- Sanguinetti, S., Anon, M.C. and Calvelo, A. 1985. Effect of thawing rate on the exudate production of frozen beef. *Journal of Food Science*. 50:3. 697-700.
19. Lawrie, R.A. and Ledward, D.A. 2014. *Lawrie's meat science*. Woodhead Publishing.
20. Aaslyng, M.D., Bejerholm, C., Ertbjerg, P., Bertram, H.C. and Andersen, H.J. 2003. Cooking loss and juiciness of pork in relation to raw meat quality and cooking procedure. *Food quality and preference*. 14:4. 277-288.
21. Bell, J.W., Farkas, B.E., Hale, S.A. and Lanier, T.C. 2001. Effect of thermal treatment on moisture transport during steam cooking of Skipjack Tuna (*Katsuwonus pelamis*). *Journal of Food Science*. 66:2. 307-313.
22. Bertola, N.C., Bevilacqua, A.E. and Zaritzky, N.E. 1994. Heat treatment effect on texture changes and thermal denaturation of proteins in beef muscle. *Journal of Food processing and Preservation* 18: 1. 31-46.

23. Ofstad, R., Kidman, S., Myklebust, R. and Hermansson, A.M. 1993. Liquid holding capacity and structural changes during heating of fish muscle: Cod (*Gadus morhua* L.) and salmon (*Salmo salar*). Food structure. 12:2. 4.
24. Xiong, Z., Sun, D.W., Zeng, X.A. and Xie, A. 2014. Recent developments of hyperspectral imaging systems and their applications in detecting quality attributes of red meats: A review. Journal of food engineering. 132. 1-13.
25. Cheng, Q. and Sun, D.W. 2008. Factors affecting the water holding capacity of red meat products: A review of recent research advances. Critical reviews in food science and nutrition 48:2. 137-159.
26. Mancini, R.A. and Hunt, M. 2005. Current research in meat color. Meat science. 71:1. 100-121.
27. Calvelo, A.L.F.R.E.D.O., 1981. Recent studies on meat freezing. Developments in meat science.
28. Kadim, I.T., Al-Hosni, Y., Mahgoub, O., Al-Marzooqi, W., Khalaf, S.K., Al-Maqbaly, R.S., Al-Sinawi, S.S.H. and Al-Amri, I.S. 2009. Effect of low voltage electrical stimulation on biochemical and quality characteristics of Longissimus thoracis muscle from one-humped Camel (*Camelus dromedaries*). Meat science. 82: 1. 77-85.
29. Offer, G. 1991. Modelling of the formation of pale, soft and exudative meat: Effects of chilling regime and rate and extent of glycolysis. Meat Science. 30: 2. 157-184.
30. Juárez, M., Aldai, N., López-Campos, Ó., Dugan, M.E.R., Uttaro, B. and Aalhus, J.L. 2012. Beef texture and juiciness. Handbook of meat and meat processing. 9. 177-206.
31. PAUL, P.C., McCRAE, S.E. and HOFFERBER, L.M. 1973. Heat- induced changes in extractability of beef muscle collagen. Journal of food science. 38: 1. 66-68.
32. Asghar, A. and Pearson, A.M. 1980. Influence of ante-and postmortem treatments upon muscle composition and meat quality. In Advances in Food Research. 26. 53-213.
33. Boleman, S.J., Boleman, S.L., Miller, R.K., Taylor, J.F., Cross, H.R., Wheeler, T.L., Koohmaraie, M., Shackelford, S.D., Miller, M.F., West, R.L., Johnson, D.D., & Savell, J.W. 1997. Consumer evaluation of beef of known categories of tenderness. Journal of Animal Science. 75. 1521-1524.
34. Kadim, I.T., Mahgoub, O., Al-Marzooqi, W., Al-Zadjali, S., Annamalai, K., & Mansour, M.H. 2006. Effects of age on composition and quality of muscle Longissimus thoracis of the Omani Arabian camel (*Camelus dromedaries*). Meat Science. 73. 619-625.
35. He, X., Liu, R., Nirasawa, S., Zheng, D. and 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.
36. Campañone, L.A. and Zaritzky, N.E., 2010. Mathematical modeling and simulation of microwave thawing of large solid foods under different operating conditions. Food and Bioprocess Technology. 3: 813-825.
37. Kong, D., Han, R., Yuan, M., Xi, Q., Du, Q., Li, P., ... & Wang, J. 2023. Ultrasound combined with slightly acidic electrolyzed water thawing of mutton: Effects on physicochemical properties, oxidation and structure of myofibrillar protein. Ultrasonics Sonochemistry. 93. 106309.
38. Cao, M., Cao, A., Wang, J., Cai, L., Regenstein, J., Ruan, Y., & Li, X. 2018. Effect of magnetic nanoparticles plus microwave or far-infrared thawing on protein conformation changes and moisture migration of red seabream (*Pagrus Major*) fillets. Food Chemistry. 266. 498-507.
39. 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.
40. Min, S.G., Hong, G.P., Chun, J.Y. and Park, S.H. 2016. Pressure ohmic thawing: A feasible approach for the rapid thawing of frozen meat and its effects on quality attributes. Food and Bioprocess Technology. 9. 564-575.

41. Chan, J.T., Omana, D.A. and Betti, M., 2011. Effect of ultimate pH and freezing on the biochemical properties of proteins in turkey breast meat. *Food Chemistry*, 127(1), pp.109-117.
42. Jia, G., Liu, H., Nirasawa, S. and Liu, H. 2017. Effects of high-voltage electrostatic field treatment on the thawing rate and post-thawing quality of frozen rabbit meat. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*. 41. 348-356.
43. Sabbaghi, H., Ziaiiifar, A. M., and Kashani-Nejad, M. 2018. Fractional conversion modeling of color changes in apple during simultaneous dry-blanching and dehydration process using intermittent infrared irradiation. *Iranian Food Science and Technology Research Journal*. 14:2. 383-397.
44. Honikel, K. O. 1998. Reference methods for the assessment of physical characteristics of meat. *Meat science*. 49: 4. 447-457.
45. Davoodi, M., Kashaninejad, M., Ziaiiifar, A.M., and Ghorbani, M. 2018. Optimization of thawing of ground chicken by infrared radiation- warm air method using response surface methodology. *Iranian Food Science and Technology Research Journal*. 14:4. 461-472 (In Persian)
46. Fellows, P.J. 2009. *Food processing technology: principles and practice*. Woodhead. New York.
47. Gambuteanu, C., Borda, D. and Alexe, P. 2013. The effect of freezing and thawing on technological properties of meat. *Journal of Agroalimentary Processes and Technologies*. 19:1. 88-93.
48. Linares, C.P., Saavedra, F.F., Serrano, A.B., Silva Paz, L.E. and Tamayo Sosa, A.R. 2005. Effects of freezing temperature and defrosting. Method on pork quality characteristics. *J Anim Vet Adv*. 4. 976-979.
49. Kerth CR. 2013. *The science of meat quality*. A John Wiley & Sons, Inc., publication. Chapter 6: meat tenderness. 99-118.
50. Leygonie, C., Britz, T.J. and Hoffman, L.C. 2011. Oxidative stability of previously frozen ostrich *Muscularis iliofibularis* packaged under different modified atmospheric conditions. *International journal of food science & technology*. 46: 6. 1171-1178.
51. Leygonie, C., Britz, T.J. and Hoffman, L.C. 2012. Impact of freezing and thawing on the quality of meat. *Meat science*. 91: 2. 93-98.
52. Muela, E., Sañudo, C., Campo, M.M., Medel, I. and Beltrán, J.A. 2010. Effect of freezing method and frozen storage duration on instrumental quality of lamb throughout display. *Meat science*. 84:4. 662-669.
53. Kim, B.S., & Lee, Y.E. 2011. Effect of antioxidant on quality of ground beef during the refrigeration storage. *Korean Journal of Food and Nutrition*. 24:3. 422-433.
54. Lagerstedt, Å., Enfält, L., Johansson, L., & Lundström, K. 2008. Effect of freezing on sensory quality, shear force and water loss in beef *M. longissimus dorsi*. *Meat science*. 80: 2. 457-461.