



ULTRASON DESTEKLİ DONDURMA VE ÇÖZÜNDÜRME İŞLEMİNİN DANA NUAR ETİNİN KALİTE ÖZELLİKLERİ ÜZERİNE ETKİSİ

Hira Yüksel Sarıoğlu¹, Özgün Köprüalan Aydın¹,
Safiye Nur Dirim^{*2}, Figen Kaymak Ertekin²

¹Gıda Mühendisliği Bölümü, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ege Üniversitesi, İzmir/Türkiye

²Gıda Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Ege Üniversitesi, İzmir/Türkiye

Geliş / *Received*: 29.08.2023; Kabul / *Accepted*: 15.01.2024; Online baskı / *Published online*: 22.01.2024

Yüksel Sarıoğlu, H., Köprüalan Aydın, Ö., Dirim, S. N., Kaymak-Ertekin, F. (2024). Ultrason destekli dondurma ve çözündürme işleminin dana nuar etinin kalite özellikleri üzerine etkisi. GIDA (2024) 49 (1) 142-159 doi: 10.15237/gida.GD23097

Yüksel Sarıoğlu, H., Köprüalan Aydın, Ö., Dirim, S. N., Kaymak-Ertekin, F. (2024). Effects of ultrasound-assisted freezing and thawing on beef meat quality characteristics freezing and thawing of meats with ultrasound-assisting. GIDA (2024) 49 (1) 142-159 doi: 10.15237/gida.GD23097

ÖZ

Bu makalede, farklı genliklerde (%40, %70, %100) ultrason destekli daldırarak dondurma/çözündürme ve buzdolabında dondurma/çözündürme yöntemlerinin kuşbaşı dana nuar etinin kalite özellikleri üzerine etkileri incelenmiştir. Analizler, dondurma işlemi sırasında ultrason uygulanan örnekler için buzdolabında çözünmüş örneklerde ve buzdolabının dondurucu bölmesinde dondurulup çözündürme sırasında ultrason uygulanmış örneklerde gerçekleştirilmiştir. En yüksek ağırlık kaybı (%3.60-8.60), %100 genlikte ultrason uygulanan örneklerde görülmüştür. Çözündürme işleminde ultrason uygulanan örneklerde diğerlerine kıyasla daha düşük pışma kaybı (%34.80-38.97) değerlerine ulaşılmıştır. TBARS değerlerinde (0.16-1.05 mg malonaldehit/kg ürün), ultrason uygulamasıyla birlikte artış görülmüştür. Ultrason uygulanan örneklerin toplam renk değişimi değerleri (6.60-15.80), en az renk değişimine %40 genlikte ultrason uygulaması ile ulaşıldığını göstermiştir. Dokusal özellikler incelendiğinde, ultrason genliği arttıkça sertlik (433.81-1455.26 N) ve çignenebilirlik (140.42-558.92 N) değerlerinin azaldığı görülmüştür. Sonuç olarak, dondurma ve çözündürme işlemini hızlandırmak ve gıdaların kalitesini korumak amacıyla uygulanan ultrason işleminin, gıdaların kalite özellikleri üzerine önemli etkilerinin olduğu ancak %100 genlikte uygulamanın kalite özellikleri üzerinde önemli bir avantaj sağlamadığı görülmüştür.

Anahtar kelimeler: Çözündürme, dana nuar, dondurma, kalite özellikleri, ultrason

EFFECTS OF ULTRASOUND-ASSISTED FREEZING AND THAWING ON BEEF MEAT QUALITY CHARACTERISTICS FREEZING AND THAWING OF MEATS WITH ULTRASOUND-ASSISTING

ABSTRACT

In this paper, the effects of ultrasound-assisted immersion freezing/thawing and conventional refrigerated freezing/thawing at different amplitudes (40%, 70%, 100%) on the quality characteristics of cubed meats were investigated. Analyses were performed on samples thawed in the refrigerator

* Yazışmalardan sorumlu yazar / *Corresponding author*

✉: nur.dirim@ege.edu.tr

☎: (+90) 232 311 3032

☎: (+90) 232 342 7592

Hira Yüksel Sarıoğlu; ORCID no: 0000-0001-7110-4200

Özgün Köprüalan Aydın; ORCID no: 0000-0001-8800-7714

Safiye Nur Dirim; ORCID no: 0000-0002-0533-4275

Figen Kaymak-Ertekin; ORCID no: 0000-0001-5042-3659

for samples to which ultrasound was applied during the freezing process in the freezer compartment of the refrigerator, and on samples thawed and to which ultrasound was applied during thawing. Although weight loss (7.2.60-8.60%) increased in the samples where ultrasound was applied at 100% amplitude during the freezing and thawing process, lower cooking loss (34.80-38.97%) values were reached in the samples where ultrasound was applied with the thawing process. TBARS values (0.16-1.05 mg malonaldehyde/kg product) of the meats increased with ultrasound application. For the total colour change values (6.60-15.80) of all samples applied ultrasound, the lowest color change was obtained with ultrasound application at 40% amplitude before and after cooking. According to the textural properties of the meat, it was observed that the hardness (433.81-1455.26 N) and chewiness (140.42-558.92 N) values decreased as the ultrasound amplitude increased. Consequently, the ultrasound process applied to accelerate the freezing and thawing process and to protect the quality of foods had significant effects on the quality characteristics of foods, but the application of ultrasound at 100% amplitude did not provide a significant advantage on the quality characteristics of the samples.

Keywords: Thawing, beef meat, freezing, quality characteristics, ultrasound

GİRİŞ

Et, protein ve besin değerleri açısından zengin ve dünya genelinde popüler bir gıda kaynağıdır. Ancak, etin tazeliğini ve kalitesini korumak, pazarlama ve depolama süreçlerinde zorluklar yaratır. Dondurma işlemi, gıdaların kalite özelliklerinin daha uzun süre korunmasını sağlayan en önemli muhafaza yöntemlerinden biridir. Dondurma işleminin uzun süreli muhafaza sağlaması, diğer muhafaza yöntemlerine göre gıdanın duyu niteliklerinin ve besleyici özelliklerini koruması gıda endüstrisinde kullanımını yaygınlaştırmaktadır (Becker ve Fricke, 1999). Dondurma işlemi, gıdalarda mikroorganizmalar tarafından kullanılabilir nitelikteki suyun sıvı fazdan katı faza geçişini sağlamakta ve böylece gıdalarda bozulmaya neden olan fiziksel, biyokimyasal ve mikrobiyal değişimler yavaşlatılmaktadır. Özellikle, dondurma işlemi sırasında gıdaların sıcaklığının, mikrobiyal yaşamın ve enzimatik aktivitenin mümkün olmadığı sıcaklıklara düşürülmesi de gıdaların uzun süre muhafazasında etkili olmaktadır (Xin vd., 2015). Dondurma işlemi, ön soğutma, kristalizasyon (faz değişimi) ve son soğutma bölgesi olmak üzere üç bölgeden oluşmaktadır. Ön soğutma aşaması, ürünün başlangıç sıcaklığından dondurma başlangıç sıcaklığına gelinceye kadar olan süreyi kapsamakta ve bu evrede hissedilir ısı uzaklaşmaktadır. Kristalizasyon (faz değişimi) aşamasında, dondurulabilen suyun büyük bir kısmı buza dönüşmektedir. Son soğutma aşamasında ise, ürün saklanması için gereken son sıcaklığa

gelinceye kadar soğutulmaktadır. Kristalizasyon aşaması, dondurma işlemi sırasında ortaya çıkan, çekirdek oluşumu (çekirdeklenme) ve daha sonra çekirdeklerin spesifik bir kristal boyutuna ulaşip büyümesi olarak iki basamaktan oluşan kritik bir aşamadır. Kritik bir aşama olmasının nedeni, dondurma işlemi sırasında suyun büyük bir kısmının kristalizasyon bölgesinde kristallenmesidir (Kiani ve Sun, 2011). Bu nedenle, bu safha için geçen süreyi en aza indirmek yüksek kalitede dondurulmuş gıda ürünleri elde etmek için çok önemlidir (You vd., 2021).

Dondurulmuş gıdalar için önemli unsurlardan biri de dondurulmuş gıdaların çözündürülmesidir. Çözündürme işlemi, gıdadaki buzun eriyerek sıvı faza geçmesi işlemidir. Geleneksel çözündürme yöntemlerinde çözündürme hızı yüzey ısı transfer katsayısına ve ortam sıcaklığına bağlı olarak değişmektedir. Gıda sanayinde donmuş ürünler geleneksel olarak 20°C'deki hava, su veya vakum altında yoğunlaşan buhar yardımıyla çözündürülmektedir (Cai vd., 2019a). Dondurma işlemi sırasında gerçekleşen kristalizasyon aşamasını ve bu aşamada meydana gelen kristal boyutunu kontrol etmek ve çözündürme işlemi sırasında, sıcaklığın belirgin şekilde yükselmesini ve yiyeceklerin aşırı dehidrasyonunu önlemek için düşük sıcaklıkta hızlı çözündürme amacıyla gıda sanayinde hali hazırda kullanılan geleneksel yöntemlerin yerine kullanılabilecek; yüksek basınç uygulamaları (Shim vd., 2009), ultrason uygulamaları (Qiu vd., 2020), mikrodalga

uygulamaları (Phinney vd., 2017; Xanthakis vd., 2014), radyo frekans uygulamaları (Anese vd., 2012; Hafezparast-Moadab vd., 2018) ve elektrik alan uygulamaları (Dalvi-Isfahan vd., 2016, 2017) gibi teknolojiler önerilmektedir.

Ultrason (sonikasyon) teknolojisi bu araştırmalar içerisinde gıdaların muhafazasında uygulanan yöntemlerden biridir (Knorr vd., 2004; Sun vd., 2019a). Ultrason, uygulandığı ürüne zarar vermemesi, uygulanabilirliğinin kolay olması, çevre dostu olması, gıdaların kalitesini ve güvenilirliğini geliştirmesi gibi özelliklerinden dolayı gıda endüstrisinde gelecekte de yararlanılabilecek bir potansiyele sahip olmasıyla son yıllarda sıklıkla gündeme gelmektedir (Knorr vd., 2004). Ultrason, insan kulağının duyabileceği frekansın üzerindeki frekanslarda sıvı, katı ve gaz ortamlardan geçebilen ses dalgaları olarak tanımlanmaktadır (Ergün vd., 2013). Tipik olarak ultrason; 16 ile 100 kHz arası güç ultrasonu, 100 kHz ile 1 MHz arası yüksek frekanslı ultrason, 1 ile 10 MHz arası ise diagnostik ultrason olarak üç frekans bölgesine ayrılmaktadır (Demirdöven ve Baysal, 2009; Dolatowski vd., 2007; Jambak vd., 2010). Belirlenen frekans bölgeleri içinde 16-100 kHz aralığında kristalizasyon sürecine etkisi için oluşması istenen kavitasyon gerçekleştiğinden, gıda endüstrisinde dondurma ve çözündürme işlemlerinde güç ultrasonu daha yaygın kullanılmaktadır (Lorimer vd., 1987). Ultrason işlemi farklı yöntemlerle uygulanabilmekte ve diğer birçok gıda prosesinde olduğu gibi farklı parametreler içermektedir. Özellikle, çok güçlü ultrasonik dalgalar ortama ulaştığında, daha fazla akustik enerji ısıya dönüşmekte ve ısı ortam tarafından absorbe edilmektedir. Dondurma işlemi için bu sıcaklık artışı ihmal edilemediğinden yüksek güç avantajını kaybetmektedir (Sastray vd., 1989). Çözündürme prosesi için de bu durum gıdada istenmeyen reaksiyonlara veya mikrobiyal gelişmeye yol açabilecek bir durumla sonuçlanabilmektedir. Bu ısı oluşumu dondurma ve çözündürme prosesini olumsuz etkileyeceği için, soğutucu akışkan sıcaklığının sabit kalmasına yardımcı olmak amacıyla akışkan akış hızı artırılabilir (Zheng ve Sun, 2006). Ayrıca, ultrason ne kadar uzun süre uygulanırsa, ısı aktarım hızının o kadar yüksek olduğu da

bilinmektedir. Bir başka deyişle, örnekler ultrasona uzun süre maruz bırakıldığında, ultrasonun termal etkisi nedeniyle daha fazla ısı üretilmektedir. Bu etkiyi azaltmak amacıyla genellikle kesikli ultrason uygulaması tercih edilmektedir. Son yıllarda, farklı ultrason frekansları ve güç seviyeleri kullanılarak et örneklerinde dondurma ve çözündürme çalışmaları yapılmıştır. Dondurma işleminde ultrason uygulamalarına örnek olarak, sazan balığı (Sun vd., 2019a; Sun vd., 2019b) ve domuz eti (Zhang vd., 2020) kullanılarak yapılan çalışmalar, çözündürme işleminde ise çipura (Cai vd., 2018), sazan balığı (Li vd., 2020) ve yak eti (Guo vd., 2021) kullanılarak yapılan çalışmalar örnek olarak verilebilmektedir.

Bu çalışmanın amacı, dondurma ve çözündürme işlemini hızlandırmak ve etin kalitesini korumak amacıyla geleneksel dondurma ve çözündürme tekniklerinin yanı sıra bu yöntemlere alternatif olabilecek ultrason işleminin dana nuar etinin kalite özellikleri üzerine etkisinin incelenmesidir. Bu amaç doğrultusunda çalışma kapsamında, dana nuar eti örneklerine geleneksel dondurma yöntemi olarak buzdolabında -24°C'de statik dondurma işlemi, geleneksel çözündürme işlemi olarak +4°C'de buzdolabında statik, su altında ve oda sıcaklığında çözündürme işlemleri uygulanmıştır. Geleneksel dondurma ve çözündürme işlemine alternatif olarak uygulanan ultrason işleminin etkisinin incelenmesi amacıyla; -24°C'de buzdolabında dondurma işlemi esnasında ve +4°C'de buzdolabında çözündürme işlemi esnasında ultrason işlemleri (%40, %70 ve %100 olmak üzere 3 farklı genlikte) uygulanmıştır. Farklı koşullarda dondurma ve çözündürme uygulanan et örneklerinin pişme kalitesinin incelenmesi için, tüm örnekler 80°C'ta su banyosunda etlerin merkez noktası 75°C'a gelene kadar pişirme işlemi uygulanmıştır. Farklı koşullarda dondurma ve çözündürme işlemleri uygulanan et örnekleri için, dondurma ve çözündürme süresinin belirlenmesi, nem içeriği, su aktivitesi, renk, pH değeri, ağırlık kaybı, pişme kaybı, toplam protein, oksidasyon derecesi (TBARS değeri) ve doku analizleri gerçekleştirilmiştir.

MATERYAL VE METOT

Materyal

Çalışma kapsamında hammadde olarak kullanılan dana nuar eti Pınar Entegre Et ve Un Sanayi A.Ş.'den temin edilmiş, 2x2x2 cm boyutlarında olacak şekilde boyutlandırılmış ve dondurma-çözündürme işlemleri buzdolabı poşetlerin içerisinde gerçekleştirilmiştir. Her bir deneme için 250 g dana nuar eti kullanılmıştır. Dondurma ve çözündürme sürelerinin belirlenmesi için sıcaklık verileri yeterli sayıda ısı eş (Testo, Almanya) kullanılarak elde edilmiştir.

Metot

Dondurma İşlemi

Dana nuar eti örneklerinin farklı koşullarda dondurma işleminin uygulanması için boyutlandırılmış örnekler; kontrol grubu olarak -24°C'ta buzdolabında statik dondurma işlemi ve -24°C buzdolabında %40, %70 ve %100 olmak üzere 3 farklı genlikte ultrason işlemine tabi tutulmuştur. Ultrason uygulaması için 320 W ultrason gücüne sahip ultrasonik su banyosu (37 kHz frekans, Isolab, 621.06.006) buzdolabının (NFK37101 model, VESTEL) dondurucu bölmesine yerleştirilmiştir. Ultrason destekli dondurma işlemi sırasında (-24°C'ta), su banyosunun içerisine -24°C'de donmayan %30 (a/a) kalsiyum klorür çözeltisi eklenmiştir. Ultrason işlemi, dondurma işleminin faz değişimi aşamasında 8 dakika boyunca örneğe 30 s açık/30 s kapalı olacak şekilde uygulanmıştır. Ultrason uygulamasında kullanılan parametrelere literatür araştırmasıyla karar verilmiş olup donma sırasında ısıya neden olmaması için kesikli olarak uygulanmıştır (Zhang vd., 2018). Dondurulduktan sonra +4°C'ta buzdolabında çözündürülmüş örnekler, buzdolabı poşeti (Migros, Türkiye) içerisine yerleştirilip 80°C'ta su banyosunda etlerin merkez noktası 75°C'a gelene kadar pişirilmiştir. Denemeler 2 tekrar olarak gerçekleştirilmiştir.

Çözündürme İşlemi

Dana nuar eti örneklerinin farklı koşullarda çözündürülmesi işlemlerinin uygulanması için öncelikle sabit koşulda (-24°C'ta) buzdolabında statik dondurma işlemi uygulanmıştır. Dondurulmuş et örneklerine çözündürme işlemi olarak; 4°C'ta buzdolabında statik, oda

sıcaklığında (25°C) ve akan su altında (16°C) olmak üzere geleneksel çözündürme yöntemleri ve farklı genlik değerlerinde ultrasonik çözündürme işlemleri uygulanmıştır. Çözündürme işlemlerinde ultrason uygulaması, içerisinde su bulunan ultrasonik banyonun (37 kHz frekans, Isolab, 621.06.006) buzdolabının soğutucu bölmesine yerleştirilmesiyle gerçekleştirilmiştir. Ultrasonik çözünme işlemi dondurulmuş et örneklerine faz değişimi aşamasında kesikli olarak uygulanmıştır. Merkez noktası -24°C olan et örnekleri buzdolabının 4°C'taki soğutucu bölmesinde merkez sıcaklığı -1°C'a gelene kadar bekletilmiş ve örneklerin faz değişiminin başlaması ile birlikte 4°C'taki ultrasonik su banyosunun içerisine yerleştirilmiştir. Ultrasonik su banyosunun içerisine bulunan et örneklerine faz değişimi aşamasında 8 dakika boyunca 30 s açık/30 s kapalı olacak şekilde farklı güçlerde (%40 genlik, %70 genlik ve %100 genlik) ultrason işlemi uygulanmıştır. Ayrıca her bir çözündürme işlemi sonrasında et örneklerinin pişme işlemi sonrası kalitesinin belirlenmesi amacıyla 80°C'taki su banyosu içerisinde buzdolabı poşet içerisindeki etlerin merkez noktası 75°C'a gelene kadar pişirme işlemi uygulanmıştır. Denemeler 2 tekrar olarak gerçekleştirilmiştir.

Analizler

Yukarıda belirtilen dondurma ve çözündürme işlemleri uygulanmış örnekler için dondurma/çözündürme sürelerinin belirlenmesi; nem içeriği, su aktivitesi, renk, pH değeri, ağırlık kaybı, pişme kaybı, toplam protein, oksidasyon derecesi (TBARS değeri) değerlerinin belirlenmesi, doku analizleri ve istatistiksel analizler gerçekleştirilmiştir.

Dondurma-çözündürme süresinin tespit edilmesi

Gıdaların merkez noktalarının sıcaklık ölçümü ısı eşler (Testo, K tipi) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sıcaklık değerleri Pico (USB TC-08, Birleşik Krallık) marka veri kaydetme cihazı ile kaydedilmiş ve elde edilen veriler kullanılarak süreler tespit edilmiştir. Gıdaların merkez sıcaklığı -10°C'ye ulaştığında dondurma işlemine, 0°C'ye ulaştığında çözündürme işlemine son verilmiştir.

Nem içeriği

Örneklerin nem içeriği gravimetrik yöntemle göre etüv (Nüve EV018, Türkiye) kullanılarak belirlenmiş ve nem içeriği % (yaş baz, yb) olarak hesaplanmıştır (AOAC, 2005).

Su aktivitesi

Örneklerin su aktivitesi, ± 0.001 hassasiyete sahip su aktivitesi ölçüm cihazı (Testo AG 400, Almanya) kullanılarak $25 \pm 2^\circ\text{C}$ 'de belirlenmiştir.

pH

Et örneklerinin pH değeri pH metre (Inolab pH 7710, Türkiye) ile $25 \pm 2^\circ\text{C}$ 'de oda sıcaklığında belirlenmiştir.

Toplam protein miktarı

Örneklerin toplam protein miktarı Kjeldahl yöntemine göre % (kuru baz, kb) olarak belirlenmiştir (AOAC, 2005).

Oksidasyon derecesi (TBARS değeri)

Örneklerde yağ oksidasyon derecesi, ikincil oksidasyon ürünlerini ortaya koyan TBARS (Tiyobarbitürik asit) analizi ile belirlenmiştir. TBARS değerleri Tarladgis vd., (1960) yöntemine göre yapılmıştır. Sonuçlar, mg malonaldehit/kg ürün olarak ifade edilmiştir.

Renk analizi

Örneklerin renk değerleri, CIE L*, a* ve b* renk skalası kullanılarak Konica Minolta Chroma Meter (CR-400, Japonya) cihazı ile ölçülmüştür. Tüm ölçümler 6 paralel çalıştırılarak ortalama değerleri alınmıştır. Toplam renk değişimi (ΔE) için Eşitlik 1'de verilen formül kullanılarak hesaplama yapılmıştır (Isleroglu vd., 2015).

$$\Delta E = \sqrt{(L^* - L_0)^2 + (b^* - b_0)^2 + (a^* - a_0)^2} \quad (1)$$

Ağırlık kaybı

Örneklerin ağırlık kaybı Eşitlik 2'deki formül ile hesaplanarak % ağırlık kaybı olarak ifade edilmiştir (Choi vd., 2017).

$$\text{Ağırlık kaybı} = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100 \quad (2)$$

Burada; m_1 , örneğin başlangıç ağırlığı, m_2 , çözünmüş örneğin ağırlığıdır.

Pişirme kaybı

Çözündürülmüş örneklerin pişirme öncesi ve sonrası ağırlıkları ölçülerek pişirme kaybı Eşitlik 3'e

göre hesaplanmış ve sonuçlar % olarak verilmiştir (Isleroglu vd., 2015).

$$\text{Pişirme kaybı} = 100 - \left(\frac{\text{pişmiş örnek ağırlığı}}{\text{pişmemiş örnek ağırlığı}} \times 100 \right) \quad (3)$$

Doku (TPA) analizi

Örneklerin dokusal özellikleri, 30 kg yük hücresi ile Tekstür Profil Analizi (TPA) (TX-T Stable Micro Systems, Haslemere, UK) cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmadaki tüm TPA testleri için 36 mm çapında silindirik bir prob kullanılmıştır. Numune ölçümünde test öncesi hız 2 mm/s, test hızı 2 mm/s ve test sonrası hız 2 mm/s olarak belirlenmiştir. Örnekler orijinal kalınlıklarının %60'una kadar iki kez sıkıştırılmış ve iki sıkıştırma arasındaki zaman aralığı 5,0 s olmuştur. Her bir örnek grubu için doku analizi 5 tekrar olacak şekilde gerçekleştirilmiştir. TPA analizinde, sertlik (numuneyi sıkıştırmak için gereken maksimum kuvvet), yapışkanlık (gıdanın yüzeyi ile gıdanın temas ettiği yüzey arasındaki çekici kuvvetin üstesinden gelmek için gereken iş), esneklik (deforme edici kuvvet kaldırıldıktan sonra numunenin orijinal formunu geri kazanma yeteneği) ve çiğnenebilirlik (numuneyi çiğnemek için gereken iş) değerleri hesaplanmıştır (Isleroglu vd., 2015).

İstatistiksel Analiz

Çalışma kapsamında gerçekleştirilen analiz sonuçlarının farklılıkların önemini belirlemek için istatistiksel analiz olarak tek yönlü varyans analizi (ANOVA) ve $P < 0.05$ düzeyinde Duncan testi SPSS 22.0 (SPSS Statistical Software, Inc, Chicago, IL, USA) programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

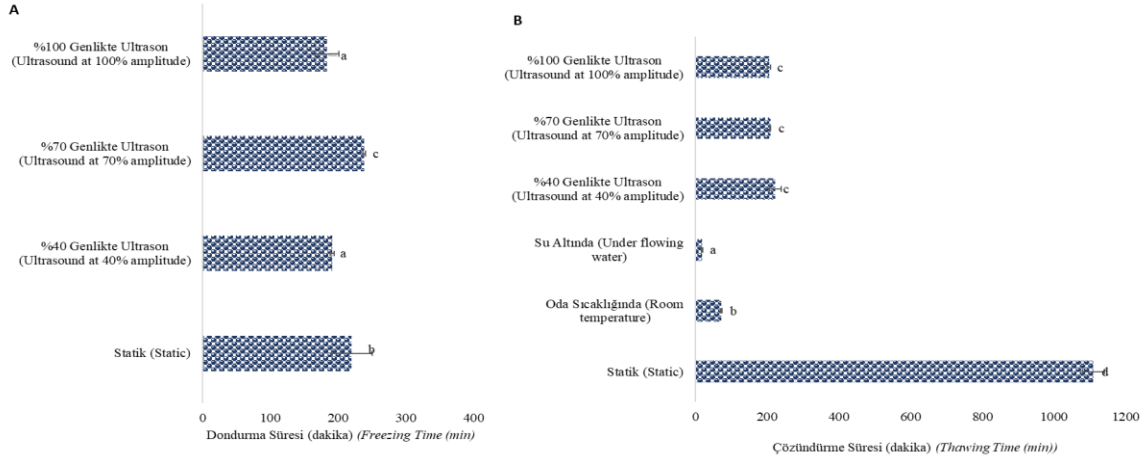
BULGULAR VE TARTIŞMA

Dondurma ve Çözündürme Süresi

Gıda işlemede dondurma ve çözündürme işlemleri için geçen süreyi en aza indirmek, yüksek kalitede dondurulmuş ve çözündürülmüş gıda ürünleri elde etmek için çok önemlidir. Dondurma işlemi esnasında dondurma hızının yüksek olması üründe küçük buz kristalleri oluşmasını sağlarken, çözündürme işlemi sonrasında da daha az kalite kayıpları oluşmasına yardımcı olmaktadır. Çözündürme işlem süresinin

azaltılması ile de hem kaliteli hem de mikrobiyolojik açıdan güvenilir gıda ürünleri elde edilmesine olanak sağlanmaktadır (Cemeroğlu, 2017). Şekil 1'de farklı yöntemler ile dondurma

işlemi uygulanmış ve farklı yöntemler ile çözündürme işlemi uygulanmış dana nuar eti örnekleri için dondurma ve çözündürme süreleri verilmiştir.



Şekil 1. Farklı yöntemler kullanılarak dondurulmuş ve çözünmüş dana nuar etinin dondurma (A) ve çözündürme (B) süreleri

Figure 1. Freezing (A) and thawing (B) times of frozen and thawed beef meat using different methods

*Veriler ortalama değer \pm SD (n=2) olarak ifade edildi. Farklı üst simge küçük harf, $P < 0.05$ 'te önemli farklılıklar göstermektedir.

*Data were expressed as mean value \pm SD (n=2). Different superscript lowercase letters indicate significant differences at $P < 0.05$.

Şekil 1 incelendiğinde, statik dondurma işlemine (219,90 dakika) kıyasla %40 (191,45 dakika) ve %100 (183,48 dakika) genlikte ultrason uygulamasının dondurma sürelerinde sırasıyla %13 ve %20 oranında azalmaya neden olduğu belirlenmiştir ($P < 0.05$). Bunun nedeni, ultrasonun meydana getirdiği kavitasyon etkisiyle oluşan kabarcıkların ısı transfer hızını arttırmasına bağlanabilmektedir (Mason vd., 1996). Ultrason, kavitasyon kabarcıklarının patlayıp çökmesinden meydana gelen güçlü kuvvetlerden dolayı buz kristallerinin daha küçük olanlara parçalanıp ince buz kristallerinin oluşumuna sağlamakta ve buz/sıvı ara yüzeyindeki ısı ve kütle transfer direncini azaltarak kristallenme başlangıcı ile buzun komple oluşması arasındaki süreyi kontrol etmekte, kısaltmakta ve böylece hüresel yapıya daha az zarar vermektedir (Knorr vd., 2004). %70 genlikte ultrason uygulamasının donma süresinin artmasına neden olması ise, kavitasyon etkisinin yanında ısı artışının donma işlem süresini uzatması olarak düşünülmüştür. %40 ve %100 genlikte ultrason uygulamasının dondurma sürelerinde

azalmaya neden olmasının diğer bir nedeni, ultrason uygulaması sırasında ısı iletim katsayısı havadan fazla olan sıvılardan yararlanılmasıdır (Qiu vd., 2022). Benzer olarak balık etinin dondurulması sırasında ultrason işlemi uygulamasının, hava ile statik dondurmaya göre dondurma süresini %83 kısalttığı tespit edilmiştir (Qiu vd., 2022).

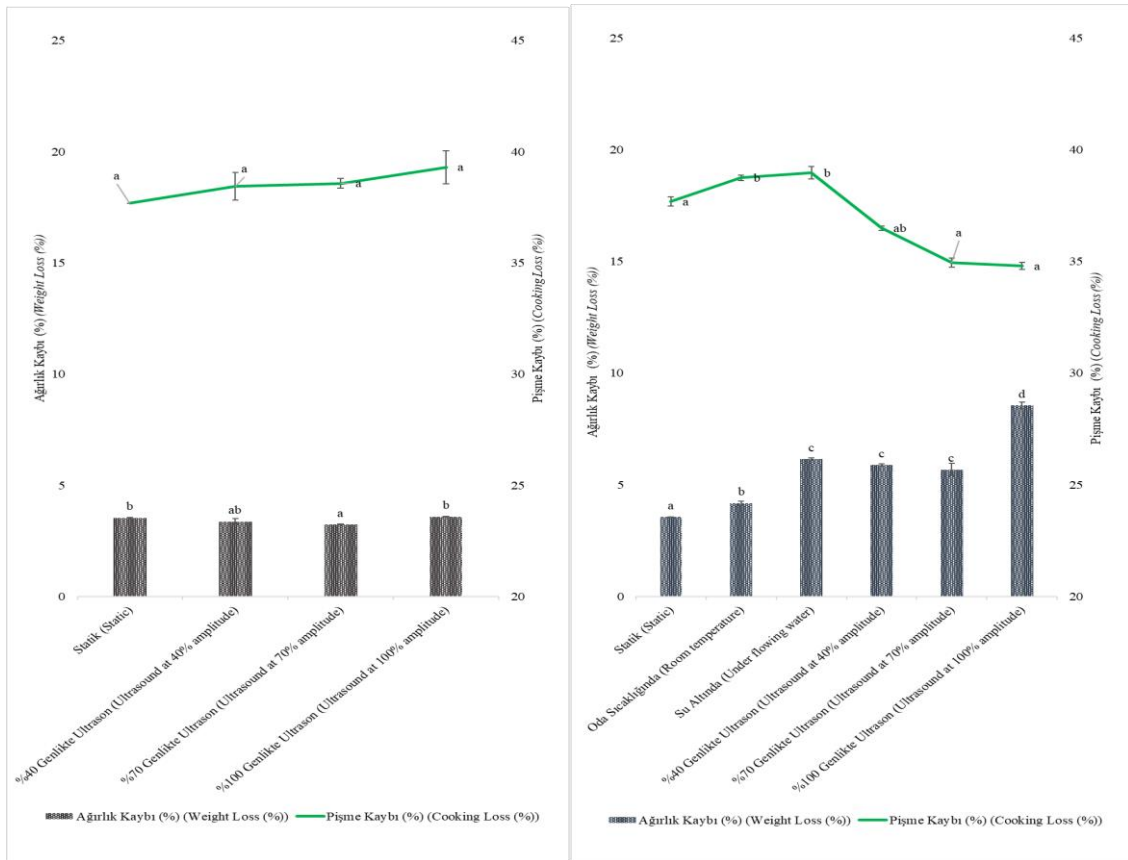
Dana nuar eti ile gerçekleştirilen çözündürme denemeleri sonucunda buzdolabında gerçekleştirilen statik çözündürme işleminin (1110 dakika), oda sıcaklığında (72.3 dakika) ve akan su altında (18 dakika) çözündürme yöntemlerine göre istatistiksel olarak önemli derecede uzun olduğu saptanmıştır ($P < 0.05$). Ultrason uygulanan örneklerde çözündürme süreleri buzdolabında statik çözündürmeye göre kısaltılmakla birlikte uygulanan genliklere bağlı olarak istatistiksel olarak anlamlı bir değişim gözlenmemiştir ($P > 0.05$).

Ultrason destekli çözündürme işleminde, enerjinin bir kısmı donmuş ette ısıya dönüşerek et yüzeyinde sıcaklık artışına neden olurken etin merkezinin sıcaklık artışı daha düşük kalır (Gambuteanu ve Alexe, 2015). Ayrıca gıdanın içindeki çözünmüş sıvı, ısı iletimine ve buz kristallerinin çözündürmesine yardımcı olan ultrason kaynaklı kavitasyon nedeniyle mikro akış da oluşturabilir. Ayrıca, ultrasonik dalgalar çözünmüş sıvı boyunca yayıldığında türbülans oluşur, bu da ısı iletim verimliliğini artırır ve çözündürme işlem süresinin kılmasına yardımcı olur (Cai vd., 2019b). Gambuteanu ve Alexe (2015), et ile yaptıkları ultrasonik çözündürme işlemi sonucunda ultrason uygulamasının çözündürme süresini önemli düzeyde azalttığını bildirmişlerdir. Sazan balığı ile yapılan bir başka

çalışmada da çözündürme işleminde ultrason uygulanmasının çözündürme süresini azalttığı bildirilmiştir (Li vd.,2020).

Ağırlık Kaybı ve Pişme Kaybı

Dondurma ve çözündürme işlemleri, et dokusundaki nemin hem miktarını hem de dağılımını değiştirmektedir. Ette bir kalite özelliği olarak nem, damlama kaybı, çözündürme kaybı, pişme kaybı, ve toplam nem içeriği dahil olmak üzere çeşitli şekillerde değerlendirilebilmektedir (Leygonie vd., 2012). Bu çalışmada gerçekleştirilen farklı dondurma ve çözündürme işlemlerine ait ağırlık kaybı ve pişme kaybının dondurma/çözündürme yöntemlerine göre değişimini gösteren veriler Şekil 2’de verilmiştir.



Şekil 2. Dana nuar etinin farklı yöntemler ile dondurulması (A) ve çözündürülmesine (B) ait ağırlık kaybı ve pişme kaybı sonuçları

Figure 2. Weight loss and cooking loss results of freezing (A) and thawing (B) of beef meat by different methods

*Veriler ortalama değer \pm SD (n=2) olarak ifade edildi. Farklı üst simge küçük harf, $P < 0.05$ 'te önemli farklılıklar göstermektedir.

*Data were expressed as mean value \pm SD (n=2). Different superscript lowercase letters indicate significant differences at $P < 0.05$.

Dondurma işlemi sırasında ultrason uygulanan her bir örneğin ağırlık kaybı değerleri incelendiğinde, %40 ve %70 genlikte ultrason uygulanan örneklerde ağırlık kaybının azaldığı gözlenmiş, ancak sadece %70 genlikte ultrason uygulamasının neden olduğu ağırlık kaybındaki azalma anlamlı bulunmuştur ($P < 0.05$). Ağırlık kaybının az olması, daha hızlı dondurma işlemiyle birlikte oluşan buz kristallerinin de boyutlarının küçük olduğunu göstermektedir. Ultrason destekli dondurma işleminin gerçekleştirildiği bir başka çalışmada, ultrason uygulanan kırmızı turp örneklerin çözündürme sonrası ağırlık kaybı değerinin hava ile dondurma işlemine göre daha az olduğu tespit edilmiştir (Sun vd., 2019a). Örneklerin çözündürme işlemi sonrası ağırlık kaybı değerleri incelendiğinde en düşük ağırlık kaybı değerinin buzdolabında çözündürme işleminde, en yüksek ağırlık kaybı değerinin ise %100 genlikte ultrason uygulanan örneklerde olduğu tespit edilmiştir ($P < 0.05$) (Şekil 2). Suyun altında çözündürme süresi kısa olmasına rağmen ağırlık kaybının fazla olduğu gözlenmiştir. Ultrason gücünün artması ile et örneklerinin miyofibril yapılarının hasar görmesi sonucu büyük miktarda su kaybına neden olduğu literatürde belirtilmiştir (Shi vd., 2020). Yapılan bir çalışmada, ultrason gücü 200- 600 W aralığında değişen oranlarda uygulanmış ve 400 W ultrason gücüne kadar çözündürülen örneklerde ağırlık kaybı azalırken, 600 W uygulanan örneğin ağırlık kaybı değeri en yüksek olarak bulgulanmıştır (Guo vd., 2021).

Pişme kaybının, esas olarak ısı kaynaklı miyofibriller dejenerasyonun neden olduğu yapısal kas hasarından kaynaklandığı ve ısıtma sırasında etten önemli miktarda sıvı ve az miktarda çözünür madde kaybına neden olduğu bilinmektedir (Sun vd., 2019a). Şekil 2'de görüldüğü gibi farklı dondurma işlemleri uygulanan örneklerin pişme kaybı değerlerinde ultrason genliklerine bağlı olarak istatistiksel olarak anlamlı fark saptanmamıştır ($P > 0.05$). Literatürde yapılan çalışmalarda, ağırlık kaybının buz kristallerinin dondurma-çözündürme hızı, dağılımı, boyutu ve kas dokusu bütünlüğü ile ilişkili olduğunu bildirilmiştir. Balık etinin dondurulması sırasında 150W-250W aralığında

ultrason işlemi uygulanan bir çalışmada, 200 W ultrason ile en az ağırlık kaybı ve pişme kaybı değerine ulaşılmıştır (Qiu vd.,2022).

Farklı çözündürme işlemi uygulanan örneklerin pişme kaybı değerleri incelendiğinde ise, en düşük pişme kaybı değerleri ultrason uygulanan örneklerde saptanmıştır. Ultrason genliğinin artmasıyla pişme kaybının %70 genliğe kadar azaldığı, %100 genlik uygulamasında ise pişme kaybında artış olduğu saptanmıştır. Benzer bir durum yak etinin farklı ultrason güçlerinde çözündürüldüğü çalışmada da gözlenmiştir (Guo vd., 2021). Et örneklerinde kas yapısının çoğunluğunu miyosin oluşturmaktadır. Ultrason uygulaması miyosinin yapısal özelliklerini iyileştirmekte ve etin su tutma kapasitesini arttırmaktadır. Bu durum da örneklerin daha az çözündürme ve pişme kaybı göstermesini sağlamaktadır (Wang vd., 2020). Buna karşın, Guo vd. (2021)'nin çalışmasında da belirtildiği üzere, ultrason gücünün artmasının et dokusunda hasara yol açmasıyla birlikte çözündürme ve pişirme sırasında su kaybına neden olmaktadır.

Fiziko-kimyasal özellikler

Farklı dondurma ve çözündürme işlemleri uygulanan dana nuar etinin bazı fiziksel ve kimyasal analiz sonuçları Çizelge 1'de verilmiştir.

Çizelge 1'de verilen sonuçlar değerlendirildiğinde, farklı dondurma işlemleri uygulanan örneklerin nem içeriği, su aktivitesi ve pH değerlerinin birbirine yakın olduğu ve aralarında istatistiksel bir fark olmadığı gözlenmektedir ($P > 0.05$). Benzer şekilde, literatürde tavuk etinin ultrason destekli olarak dondurulduğu bir çalışmada, ultrason uygulamasının pH değerini etkilemediği gözlenmiştir (Zhang vd., 2020). Başka bir çalışmada, buzdolabında statik dondurma işlemi örneklerin pH değerinin düşük olmasının, yüksek sızıntı kaybına ve kastaki hidrojen iyonu konsantrasyonundaki farklılıklara bağlı olabileceği belirtilmiştir (Leygonie vd., 2012). Farklı dondurma işlemleri uygulanan etlerde protein değerlerinin birbirine yakın olduğu ve birbirleri arasında anlamlı fark olmadığı gözlenirken ($P > 0.05$), TBARS değerleri olarak ifade edilen oksidasyon değerlerinde, ultrason uygulamasıyla

ve ultrason gücü arttıkça anlamlı bir artış gözlenmiştir ($P < 0.05$). TBARS değerinin artmasının nedeni, serbest yağ asitlerinin oluşumu ve birikmesi sırasında aldehitlere, ketonlara, asitlere ve diğer küçük moleküllere oksitlenmesine bağlanmıştır (Hansen vd., 2004). TBARS değerinin artmasıyla etin tadında acılaşıma olduğu da yapılan çalışmalarda bildirilmiştir (Bertram vd.,

2007). Literatürde, tüketilebilir et ürünleri için maksimum TBARS değeri, 2 mg malonaldehit/kg ürün olarak verilmektedir (Selani vd., 2016). Çizelge 1’de görüldüğü gibi farklı genliklerde ultrason destekli dondurulan etlerin TBARS değerlerinin tamamının, üst sınır olarak belirlenen değerin altında olduğu saptanmıştır.

Çizelge 1. Farklı yöntemler kullanılarak donmuş ve çözünmüş dana nuar etinin fiziksel ve kimyasal analiz sonuçları

Table 1. Physical and chemical analysis results of frozen and thawed beef meat using different methods

Yöntem (Method)	Nem İçeriği (%,yb) (Moisture content (%, nb))	Su aktivitesi (Water activity)	pH (pH)	Protein İçeriği (%,kb) (Protein content (%, db))	TBARS değeri (mg malonaldehit/kg ürün) (TBARS (mg malonaldehyde/ kg product))	
Taze Et (Fresh beef)	76.96±0.28	0.99±0.01	5.99±0.01	89.52±0.06	0.15±0.02	
Dondurma Yöntemleri (Freezing Methods)	Statik (Static)	75.50 ^a ±0.01	0.99 ^a ±0.01	4.98 ^a ±0.01	84.90 ^a ±0.58	0.18 ^a ±0.01
	%40 Genlikte Ultrason (Ultrasound at 40% amplitude)	75.43 ^a ±0.50	0.99 ^a ±0.02	5.51 ^a ±0.32	86.53 ^a ±1.43	0.27 ^b ±0.04
	%70 Genlikte Ultrason (Ultrasound at 70% amplitude)	74.39 ^a ±0.84	0.99 ^a ±0.01	5.22 ^a ±0.01	86.22 ^a ±0.45	0.30 ^b ±0.02
	%100 Genlikte Ultrason (Ultrasound at 100% amplitude)	74.55 ^a ±1.39	0.99 ^a ±0.01	5.54 ^a ±0.15	86.93 ^a ±0.50	0.49 ^c ±0.02
Çözündürme Yöntemleri (Thawing methods)	Statik (Static)	75.50 ^{abc} ±0.25	0.99 ^a ±0.00	4.98 ^a ±0.03	84.90 ^a ±0.15	0.16 ^b ±0.02
	Oda Sıcaklığında (Room Temperature)	74.03 ^a ±0.58	0.99 ^a ±0.00	5.65 ^b ±0.05	86.92 ^c ±0.23	0.29 ^c ±0.01
	Su altında (Under flowing water)	75.52 ^{bc} ±0.25	0.99 ^a ±0.00	5.56 ^b ±0.03	88.43 ^d ±0.10	0.08 ^a ±0.02
	%40 Genlikte Ultrason (Ultrasound at 40% amplitude)	75.72 ^c ±0.28	0.99 ^a ±0.00	5.47 ^b ±0.05	87.81 ^d ±0.31	1.05 ^f ±0.02
	%70 Genlikte Ultrason (Ultrasound at 70% amplitude)	74.88 ^{abc} ±0.53	0.99 ^a ±0.00	5.47 ^b ±0.03	86.68 ^c ±0.25	0.97 ^e ±0.01
	%100 Genlikte Ultrason (Ultrasound at 100% amplitude)	74.12 ^{ab} ±0.32	0.99 ^a ±0.00	5.51 ^{ab} ±0.26	85.65 ^b ±0.19	0.88 ^d ±0.02

*Veriler ortalama değer ± SD (n=2) olarak ifade edildi. Farklı üst simge küçük harf, $P < 0.05$ 'te önemli farklılıklar göstermektedir.

*Data were expressed as mean value ± SD (n=2). Different superscript lowercase letters indicate significant differences at $P < 0.05$.

Farklı çözündürme yöntemlerinin nem içeriği, su aktivitesi ve pH değerleri üzerinde önemli bir etkisi olmadığı ve birbirine yakın sonuçlar verdiği görülmektedir. Çözündürme işlemi sonrasında etin pH değerinde meydana gelen değişimin, ağırlık kaybının artmasıyla meydana gelen bileşen kayıplarından kaynaklı olabileceği belirtilmiştir

(Xu vd., 2020). En düşük pH değeri buzdolabında çözündürme denemesinde elde edilmiştir. Farklı çözündürme işlemleri uygulanan etlerin protein içeriği değerleri arasında istatistiksel fark saptanmıştır ($P < 0.05$). En düşük protein miktarı buzdolabında çözündürme işleminde saptanmıştır. Farklı çözündürme işlemi uygulanan

et örneklerinin oksidasyon değerleri incelendiğinde, buzdolabında ve su altında gerçekleşen çözündürme işlemlerinde daha düşük TBARS değeri saptanmıştır. Özellikle oda sıcaklığında çözündürme yöntemi ile kıyaslandığında sıcaklığın etkisi ile oksidasyon değerinin arttığı söylenebilir. Ultrason işlemi uygulanan örneklerin TBARS değeri diğer yöntemlere göre daha yüksek bulunurken, ultrason gücünün artmasıyla oksidasyon değeri düşmüştür ($P < 0.05$). Çözündürme işlemi esnasında donuk et örneklerinde buz kristallerinin parçalanması sonucunda büyük miktarda yağ asidi ağırlık kaybına neden olan suyla birlikte dışarı akar ve yağ asitleri et yüzeyine ulaştığında oksijenle reaksiyona girer. Çözündürme sürecinde, hücre zarı yırtılır ve hem olmayan demir serbest kalır, bu da süperoksit radikalinin daha aktif hidroksil radikaline dönüşmesine, yağ oksidasyonunun yoğunlaşmasına ve TBARS değerinin artmasına neden olan çok sayıda aldehit ve keton üretimine neden olur (Wang vd., 2015). Ultrason işlemi uygulanan et örneklerinde çözündürme sırasında etin yüzeyindeki sıcaklık artışı yağ asitlerinin

oksidasyonunu hızlandırır ve ultrason uygulanan örneklerin daha yüksek TBARS değerine sahip olmasına neden olur (Wang vd., 2023). Buna karşın ultrason genliğinin artması ile çözündürme süresinin kısalması ve dolayısıyla et örneklerinin ultrasona maruz kalma süresinin azalması ile TBARS değerinde bir düşüş gözlenmiştir.

Renk Değerleri

Dondurma ve çözündürme işlemleri sonrasında et örneklerinde renk değişimleri gözlenmekte ve görülen renk değişimleri miyoglobinin oksidasyonu ile ilişkilendirilmektedir. Ayrıca miyoglobinin molekülünün globin kısmının denatürasyonunun; dondurma, dondurarak depolama ve çözündürme sırasında gerçekleştiği bildirilmiştir (Masciheroni vd., 1981). Denatürasyon, miyoglobinin otoksidasyona karşı duyarlılığının artmasına ve ardından tercih edilen renk görünümünün kaybolmasına neden olmaktadır. Farklı dondurma ve çözündürme işlemleri sonrası et örneklerinin hem dondurma/çözündürme işlemleri sonrası hem de pişme işlemi sonrası ölçülen ve hesaplanan renk değerleri Çizelge 2’de verilmiştir.

Çizelge 2. Farklı yöntemler kullanılarak donmuş ve çözünmüş dana nuar etinin renk analizi sonuçları
Table 2. Color analysis results of frozen and thawed beef meat using different methods

Yöntem (Method)		Dondurma İşlemi sonrası (After freezing process)			
		L*	a*	b*	ΔE
Taze Et (Fresh beef)		45.35±1.76	17.53±2.01	15.72±0.95	-
Dondurma Yöntemleri (Freezing Methods)	Statik (Static)	30.43 ^a ±2.14	21.64 ^a ±1.48	12.31 ^a ±1.85	15.80 ^a ±0.02
	%40 Genlikte Ultrason (Ultrasound at 40% amplitude)	34.04 ^{bc} ±1.50	20.78 ^{bc} ±1.89	12.00 ^a ±1.69	10.20 ^a ±2.07
	%70 Genlikte Ultrason (Ultrasound at 70% amplitude)	35.79 ^c ±2.24	17.68 ^a ±0.69	11.21 ^a ±1.37	12.40 ^a ±1.77
	%100 Genlikte Ultrason (Ultrasound at 100% amplitude)	30.97 ^{ab} ±1.28	19.56 ^b ±1.32	11.98 ^a ±1.13	12.50 ^a ±2.75
		Çözündürme İşlemi sonrası (After thawing process)			
Çözündürme Yöntemleri (Thawing Methods)	Statik (Static)	30.44 ^a ±2.14	21.65 ^a ±1.48	12.32 ^a ±1.85	15.80 ^b ±2.00
	Oda Sıcaklığında (Room temperature)	39.64 ^b ±1.41	17.61 ^a ±2.57	12.51 ^a ±0.94	6.60 ^a ±1.54
	Su altında (Under flowing water)	36.15 ^b ±0.58	17.08 ^a ±1.91	10.25 ^a ±1.60	11.50 ^{ab} ±1.37
	%40 Genlikte Ultrason (Ultrasound at 40% amplitude)	41.08 ^b ±2.38	16.03 ^a ±3.52	9.37 ^a ±1.40	7.80 ^a ±2.86
	%70 Genlikte Ultrason (Ultrasound at 70% amplitude)	39.81 ^b ±1.01	20.11 ^a ±0.83	12.74 ^a ±0.85	6.80 ^a ±0.87
	%100 Genlikte Ultrason (Ultrasound at 100% amplitude)	39.82 ^b ±1.06	18.76 ^a ±3.35	11.79 ^a ±1.63	6.90 ^a ±1.04

Çizelge 2. devam
Table 2. continue

Yöntem (Method)		Pişirme İşlemi Sonrası (After cooking process)			
		L*	a*	b*	ΔE
Taze Et (Fresh beef)		-	-	-	-
Dondurma Yöntemleri (Freezing Methods)	Statik (Static)	43.74 ^{ab} ±1.89	7.10 ^b ±0.63	11.80 ^a ±0.01	11.8 ^a ±0.00
	%40 Genlikte Ultrason (Ultrasound at 40% amplitude)	44.00 ^{ab} ±2.81	7.21 ^b ±0.58	12.4 ^{ab} ±1.930	12.40 ^a ±1.93
	%70 Genlikte Ultrason (Ultrasound at 70% amplitude)	45.80 ^b ±2.29	5.16 ^a ±1.20	13.5 ^c ±0.28	13.50 ^a ±0.28
	%100 Genlikte Ultrason (Ultrasound at 100% amplitude)	41.63 ^a ±1.87	6.86 ^b ±0.85	13.0 ^{bc} ±0.82	13.00 ^a ±0.82
		Pişirme İşlemi Sonrası (After cooking process)			
Çözündürme Yöntemleri (Thawing Methods)	Statik (Static)	43.74 ^{ab} ±1.89	7.10 ^a ±0.63	10.35 ^a ±0.53	11.80 ^b ±1.04
	Oda Sıcaklığında (Room temperature)	45.56 ^{bc} ±1.37	7.85 ^a ±0.43	14.16 ^b ±0.48	9.80 ^b ±0.46
	Su altında (Under flowing water)	49.42 ^{bc} ±2.07	6.90 ^a ±0.51	14.13 ^b ±0.43	11.50 ^b ±0.19
	%40 Genlikte Ultrason (Ultrasound at 40% amplitude)	45.63 ^{abc} ±1.39	10.90 ^b ±0.89	12.93 ^{ab} ±1.64	7.20 ^a ±1.35
	%70 Genlikte Ultrason (Ultrasound at 70% amplitude)	41.23 ^a ±1.40	8.06 ^a ±0.35	10.043 ^a ±0.36	11.80 ^b ±0.64
	%100 Genlikte Ultrason (Ultrasound at 100% amplitude)	51.32 ^c ±1.55	8.16 ^a ±0.66	12.05 ^{ab} ±0.60	11.70 ^b ±0.07

*Veriler ortalama değer \pm SD (n=2) olarak ifade edildi. Farklı üst simge küçük harf, $P < 0.05$ 'te önemli farklılıklar göstermektedir.

*Data were expressed as mean value \pm SD (n=2). Different superscript lowercase letters indicate significant differences at $P < 0.05$.

Farklı dondurma yöntemleri uygulanan örneklerin ΔE olarak ifade edilen toplam renk değişimi değerleri incelendiğinde, en az renk değişiminin pişirme öncesi ve sonrası için %40 genlikte ultrason uygulanan örnek ile elde edildiği görülmektedir. Ayrıca L^* değerinde ultrason uygulanmasıyla artış gözlenmiştir. Bu artışın nedeni, ette miyofibriller protein bozunmasına bağlı olarak meydana gelen yapısal değişiklikler veya serbest su içeriğindeki ve/veya etteki konumundaki değişikliklerle ilişkilendirilmiştir (Balan vd., 2019). Kırmızılık/yeşillik özelliğini gösteren a^* değerlerine bakıldığında, en yüksek kırmızılık değerine pişirme öncesi ve sonrasında %40 genlikte ultrason uygulamasıyla ulaşılmıştır. Elde edilen a^* değerleri için %40 ile %100 genlik arasında anlamlı bir fark olmasa da %70 genlikte ultrason uygulaması ile kırmızılık değerinde anlamlı azalma olduğu tespit edilmiştir. Buna göre, %40 genlikte ultrason uygulamasıyla etin renk stabilitesinin bozulmadığı sonucuna varılmıştır. Ayrıca ultrason genliği fazla olduğunda a^* değerinin azalmasının nedeni, farklı dondurma işlemleri sonrası etin dokusal özellikleri

incelendiğinde, miyogloblin ve metmyogloblin renk pigmentlerinin kimyasal yapılarının ultrasonun termal ve akustik etkilerinden dolayı değişebilmesidir (Hughes vd., 2020). Başka bir deyişle, pişirme işlemiyle miyogloblinin metmyoglobline dönüşmesiyle meydana gelen kahverengileşme a^* değerinde azalmaya neden olmaktadır (Stika vd., 2007). Pişirme öncesi sarılık/mavilik değeri olarak ifade edilen b^* değerleri arasında anlamlı bir fark olmamasına rağmen ($P > 0.05$), pişirme işlemi sonrası ultrason uygulamasıyla artmış olmasının nedeninin de, yağ oksidasyonu (Çizelge 1) ve protein yapısının bozunması olduğu sonucuna varılmıştır (Farouk ve Swan, 1998).

Farklı çözündürme yöntemleri için toplam renk değişimi değerleri incelendiğinde, en az renk değişimi değeri oda sıcaklığında çözündürme ve ultrason ile çözündürme ile elde edilirken, pişirme işlemi sonrası için örnekler incelendiğinde, %40 genlikte uygulanan ultrason ile en düşük renk kaybı elde edilmiştir. Çözündürme işlemi sonrasında en düşük L^* değerinin buzdolabında

çözündürme uygulanan örneklerde olduğu saptanmıştır ($P < 0.05$). Donmuş et örneklerinin çözündürme işlemi sonrasında, ağırlık kaybına paralel olarak hücrelerdeki su örnek yüzeyine çıkmakta ve bu da et örneğinin L^* değerlerini arttırmaktadır (Gan vd., 2022). Çözündürme işlemi sonrası örneklerin a^* ve b^* değerleri arasında istatistiksel fark olmadığı saptanmıştır ($P > 0.05$). Pişme işlemi sonrası örneklerin a^* değerinin gösterdiği kırmızılık/yeşillik değeri incelendiğinde, en yüksek kırmızılık değeri %40 genlikte ultrason uygulanan örnekte saptanmıştır ($P < 0.05$). Et örneklerinde a^* değerinde değişikliklere neden olan ultrason ile çözündürme için iki potansiyel mekanizma: (1) serbest radikallerin üretimi, oksidasyonu teşvik ederek hem pigmentlerinin kararsızlığına yol açması; (2) miyogloblin ve hemogloblin renk pigmentlerinin kimyasal yapıları, ultrasonun termal ve akustik etkilerinden dolayı değişmesi olarak açıklanabilir

(Hughes vd., 2020). Li vd. (2020b) yaptıkları çalışmada, farklı çözündürme işlemlerinin balık etinin kalitesi üzerine etkisini incelemişler ve ultrason ile çözündürme işlemiyle renk değişimi (ΔE) değerinin daha düşük olduğu diğer bir deyişle et rengini daha iyi koruduğu sonucuna varmışlardır.

Dokusal Özellikler

Sertlik, yapışkanlık, çiğnenebilirlik ve esneklik et dokusunun değerlendirilmesi için kullanılan önemli parametrelerdir ancak doku özellikleri arasında sertlik, etin ticari değerini belirlediği için tüketici açısından en önemli olanıdır (Ruiz De Huidobro vd., 2005). Farklı dondurma ve çözündürme yöntemleri uygulanan et örneklerinin dondurma/çözündürme işlemleri sonrası dokusal özellikleri Çizelge 3'te ve pişme işlemleri sonrası dokusal özellikleri Çizelge 4'te verilmiştir.

Çizelge 3. Farklı yöntemler kullanılarak donmuş ve çözünmüş dana nuar etinin dondurma/çözündürme işlemleri sonrası dokusal özellikleri

Table 3. Beef meat's textural characteristics after freezing and thawing using different methods.

Yöntem (Method)		Dondurma İşlemi sonrası (After freezing process)				
		Sertlik (N) (Hardness (N))	Esneklik (Springiness)	Yapışkanlık (Cohesiveness)	Çiğnenebilirlik (N) (Chewiness (N))	Elastikiyet (Resilience)
Taze Et (Fresh beef)		800.82±22.30	0.72±0.06	0.62±0.09	321.18±11.35	0.32±0.05
Dondurma Yöntemleri (Freezing Methods)	Statik (Static)	976.83 ^a ±136.89	0.72 ^a ±0.06	0.62 ^a ±0.09	502.18 ^b ±21.35	0.32 ^a ±0.05
	%40 Genlikte Ultrason (Ultrasound at 40% amplitude)	1455.263 ^a ±107.13	0.66 ^a ±0.01	0.60 ^a ±0.02	558.92 ^b ±22.14	0.32 ^a ±0.02
	%70 Genlikte Ultrason (Ultrasound at 70% amplitude)	1186.28 ^a ±300.76	0.76 ^a ±0.01	0.61 ^a ±0.03	483.65 ^b ±23.41	0.38 ^a ±0.01
	%100 Genlikte Ultrason (Ultrasound at 100% amplitude)	811.14 ^a ±62.79	0.73 ^a ±0.05	0.61 ^a ±0.03	391.39 ^a ±11.55	0.31 ^a ±0.02
Çözündürme Yöntemleri (Thawing Methods)	Statik (Static)	976.83 ^{bc} ±136.89	0.72 ^a ±0.06	0.62 ^a ±0.09	502.18 ^c ±21.35	0.32 ^a ±0.06
	Oda Sıcaklığında (Room temperature)	796.44 ^b ±71.58	0.67 ^a ±0.01	0.59 ^a ±0.02	310.03 ^b ±12.62	0.28 ^a ±0.02
	Su altında (Under flowing water)	331.05 ^a ±36.14	0.70 ^a ±0.15	0.61 ^a ±0.02	138.60 ^a ±17.66	0.23 ^a ±0.02
	%40 Genlikte Ultrason (Ultrasound at 40% amplitude)	1135.04 ^c ±89.87	0.66 ^a ±0.03	0.64 ^a ±0.02	502.56 ^c ±62.39	0.32 ^a ±0.02
	%70 Genlikte Ultrason (Ultrasound at 70% amplitude)	734.88 ^b ±12.37	0.76 ^a ±0.02	0.61 ^a ±0.02	245.37 ^b ±12.00	0.38 ^a ±0.02
	%100 Genlikte Ultrason (Ultrasound at 100% amplitude)	433.81 ^a ±32.55	0.73 ^a ±0.05	0.61 ^a ±0.02	140.42 ^a ±6.66	0.31 ^a ±0.01

*Veriler ortalama değer \pm SD ($n=5$) olarak ifade edildi. Farklı üst simge küçük harf, $P < 0.05$ 'te önemli farklılıklar göstermektedir.

*Data were expressed as mean value \pm SD ($n=5$). Different superscript lowercase letters indicate significant differences at $P < 0.05$.

Çizelge 4. Farklı dondurma ve çözündürme yöntemleri uygulanan dana nuar eti örneklerinin pişme işlemi sonrası dokusal özellikleri

Table 4. Textural properties of beef meat samples subjected to different freezing and thawing methods after cooking process

Yöntem (Method)		Pişme İşlemi Sonrası (After cooking process)				
		Sertlik (N) (Hardness (N))	Esneklik (Springiness)	Yapışkanlık (Cohesiveness)	Çiğnenebilirlik (N) (Chewiness (N))	Elastikiyet (Resilience)
Dondurma Yöntemleri (Freezing Methods)	Statik (Static)	2457.76 ^b ±23.99	0.57 ^a ±0.02	0.63 ^a ±0.01	881.15 ^b ±52.31	0.27 ^a ±0.01
	%40 Genlikte Ultrason (Ultrasound at 40% amplitude)	3588.21 ^c ±251.34	0.56 ^a ±0.03	0.62 ^a ±0.00	1138.53 ^b ±113.87	0.27 ^a ±0.01
	%70 Genlikte Ultrason (Ultrasound at 70% amplitude)	2466.96 ^b ±122.39	0.61 ^a ±0.01	0.65 ^a ±0.02	1071.01 ^b ±147.11	0.30 ^b ±0.01
	%100 Genlikte Ultrason (Ultrasound at 100% amplitude)	1337.67 ^a ±185.09	0.47 ^a ±0.07	0.60 ^a ±0.01	387.66 ^a ±101.253	0.24 ^a ±0.00
Çözündürme Yöntemleri (Thawing Methods)	Statik (Static)	2457.76 ^d ±24.00	0.57 ^b ±0.02	0.63 ^a ±0.01	881.15 ^b ±52.31	0.27 ^{ab} ±0.01
	Oda Sıcaklığında (Room temperature)	1545.00 ^b ±108.10	0.49 ^a ±0.01	0.57 ^a ±0.01	364.56 ^a ±24.38	0.20 ^a ±0.01
	Su altında (Under flowing water)	1181.63 ^a ±144.87	0.59 ^{bc} ±0.02	0.58 ^a ±0.05	345.30 ^a ±86.65	0.26 ^{ab} ±0.03
	%40 Genlikte Ultrason (Ultrasound at 40% amplitude)	1315.17 ^{ab} ±41.30	0.56 ^b ±0.02	0.62 ^a ±0.01	438.73 ^a ±21.78	0.27 ^{ab} ±0.01
	%70 Genlikte Ultrason (Ultrasound at 70% amplitude)	1475.48 ^b ±37.22	0.61 ^c ±0.01	0.65 ^a ±0.01	500.58 ^a ±13.25	0.30 ^b ±0.00
	%100 Genlikte Ultrason (Ultrasound at 100% amplitude)	2147.09 ^c ±3.43	0.47 ^a ±0.01	0.60 ^a ±0.01	734.66 ^b ±10.50	0.24 ^{ab} ±0.01

*Veriler ortalama değer \pm SD (n=5) olarak ifade edildi. Farklı üst simge küçük harf, $P < 0.05$ 'te önemli farklılıklar göstermektedir.

*Data were expressed as mean value \pm SD (n=5). Different superscript lowercase letters indicate significant differences at $P < 0.05$.

Farklı dondurma işlemleri sonrası etin dokusal özellikleri incelendiğinde, uygulanan ultrason genliği arttıkça sertlik değerindeki azalma istatistiksel açıdan anlamlı bulunmamıştır ($P > 0.05$). İç yapının bozulmasına karşın direnci ifade eden yapışkanlık ve esneklik değerleri arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark olmadığı gözlenmektedir ($P > 0.05$). Bir katıyı yutmaya hazır hale getirmek için gerekli olan çiğneme enerjisini ifade eden çiğnenebilirlik değerinin, sertlik değerine paralel olarak ultrason genliği arttıkça azaldığı gözlenmektedir. Statik dondurma uygulanan örnekler ile %100 genlikte ultrason uygulanan örneklerin çiğnenebilirlik değerleri arasında anlamlı bir fark olduğu görülmektedir ($P < 0.05$). Çeşitli araştırmacılar, 4°C'de etin depolanmasıyla birlikte etin sertliğinin ve çiğnenebilirliğinin azalmasının, miyofibriller proteinlerin proteolizindeki artıştan ve kas bütünlüğünün değişmesinden kaynaklanabileceğini ifade etmişlerdir (Ruiz-Ramírez vd., 2006; Wang vd., 2018). %70 genlikte

ultrason işlemiyle etin elastikiyeti artmış olsa da artış istatistiksel olarak anlamlı değildir. Pişmiş örneklerde ise, ultrason uygulamasıyla ve ultrason genliği arttıkça sertliğin istatistiksel olarak önemli derecede azaldığı gözlenmiştir. Pişirme işlemiyle etin esnekliğindeki azalma istatistiksel olarak anlamlı bulunmamıştır. Yapışkanlık değerleri arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark yoktur ($P > 0.05$). Çiğnenebilirlik değerlerinin ise sertlik değerine paralel olarak, ultrason genliği arttıkça azaldığı gözlenmektedir. Özellikle, statik dondurma uygulanan örnekler ile %100 genlikte ultrason uygulanan örnekler arasında anlamlı bir fark tespit edilmiştir ($P < 0.05$). Bir başka önemli dokusal özellik olan elastikiyet değerinin %70 genlikte ultrason işlemiyle arttığı sonucuna varılmıştır ($P < 0.05$).

Dana nuar eti ile gerçekleştirilen çözündürme denemeleri sonucunda örnekler arasında sertlik değerleri incelendiğinde, buzdolabında statik çözündürme işlemi sonucu elde edilen örneklerin,

oda sıcaklığında ve su altında çözündürme yöntemlerinde elde edilenlere kıyasla daha sert olduğu, en düşük sertlik değerinin ise su altında çözündürme yöntemi ile elde edildiği saptanmıştır. Ultrason uygulaması yapılan örneklerde ise ultrason genliği arttıkça sertlik değerinde azalma gözlenmiştir. Li vd. (2020) çalışmalarında, hava ile çözündürmeye kıyasla ultrasonik çözündürme uygulanmış et örneklerinde, sertlik ve çığnenebilirlik değerlerinin azaldığını bildirmişlerdir. Sertlik ve çığnenebilirlik değerlerinin ultrason uygulaması ile azalmasının kas dokusunun tahribatından kaynaklanabileceğini bildirmişlerdir. Tüm örneklerin esneklik ve yapışkanlık değerleri arasında istatistiksel olarak önemli bir fark saptanmamıştır ($P > 0.05$). Ultrason işlemiyle etin elastikiyetinin arttığı sonucuna varılmıştır. Çözündürme işlemi sonuçlarına kıyasla pişme işlemi sonrasında sertlik değerlerinde artış gözlenmiştir. Ultrason genliği arttıkça pişmiş örneklerde sertlik değerinde azalma olduğu gözlenmiştir. Bu durumun, ultrason gücü arttıkça ve pişirme işleminde çözündürme işlemine kıyasla daha fazla ağırlık kaybı olmasından kaynaklanabileceği sonucuna varılmıştır. Yapışkanlık değerleri arasında istatistiksel fark saptanmamıştır ($P > 0.05$). Çözündürme sırasında uygulanan ultrason işlemiyle etin elastikiyetinin arttığı sonucuna varılmıştır.

SONUÇ

Besleyici değeri yüksek olan et ve et ürünlerinin sağlıklı bir diyetle yer alması gereken önemli bir gıda grubunu oluşturduğu, ancak mikrobiyolojik ve enzimatik bozulmaya karşı hassas olması nedeniyle muhafaza edilmesinin büyük bir önem taşıdığı bilinmektedir. Bu çalışmada, dondurma ve çözündürme işlemleri sırasında farklı genliklerde uygulanan ultrason işleminin dana nuarının kalite özellikleri üzerine etkileri incelenmiştir. Dondurma işlemi esnasında ultrason uygulamasının dondurma sürelerinde anlamlı azalmaya neden olduğu tespit edilirken; çözündürme sürelerinde buzdolabında çözündürmeye kıyasla kısılma sağlamakla birlikte, uygulanan genliklere bağlı olarak anlamlı bir değişim gözlenmemiştir. Dondurma işlemi sırasında ultrason uygulanan örneklerin ağırlık

kaybı değerleri incelendiğinde, %40 ve %70 genlikte ultrason uygulanan örneklerde ağırlık kaybının azaldığı gözlenmiş olup, çözündürme işlemi sırasında ise ultrason uygulanan örneklerde %100 genlikte ultrason uygulamasının en yüksek ağırlık kaybına neden olduğu saptanmıştır. Farklı dondurma işlemleri uygulanan örneklerin pişme kaybı değerlerinde ultrason genliklerine bağlı olarak önemli bir değişim olmamakla birlikte; farklı çözündürme işlemi uygulanan örneklerde en düşük pişme kaybı değerleri ultrason uygulanan örneklerde saptanmıştır. Farklı dondurma işlemleri uygulanan etlerde protein değerlerinin birbirine yakın olduğu ve birbirleri arasında anlamlı fark olmadığı gözlenirken, TBARS değerlerinde, ultrason uygulamasıyla ve ultrason gücü arttıkça anlamlı bir artış gözlenmiştir. Farklı çözündürme işlemi uygulanan et örneklerinin oksidasyon değerleri incelendiğinde, buzdolabında ve su altında çözündürülen örneklerin TBARS değerlerinin daha düşük olduğu gözlenmiştir. Dondurma ve çözündürme işlemleri sırasında ultrason uygulanan tüm örneklerin toplam renk değişimi değerleri incelendiğinde, en az renk değişiminin pişirme öncesi ve sonrası için %40 genlikte ultrason ile elde edildiği görülmüştür. Ek olarak, farklı dondurma ve çözündürme işlemleri sonrası etin dokusal özelliklerinden sertliğin ve çığnenebilirliğin ultrason genliği arttıkça azaldığı gözlenmiştir.

Sonuç olarak, dondurma ve çözündürme işlemlerinde ultrason uygulamasının statik dondurma ve çözündürme işlemlerine kıyasla, dondurma süresini %10 ve çözündürme süresini ise %80 azalttığı belirlenmiştir. Bu çalışma ile dondurma ve çözündürme işlemini hızlandırmak ve gıdaların kalitesini korumak amacıyla uygulanan ultrason işleminin, dana nuar etinin kalite özellikleri üzerine önemli etkilerinin olduğu görülmüştür. Dondurma ve çözündürme işlemleri sırasında ultrason uygulanan tüm örneklerin toplam renk değişimi değerleri 6,60-15,80 aralığında bulunmuştur. Çalışma sonuçlarına göre, dondurma ve çözündürme işlemleri için %100 genlikte ultrason uygulamasının etin kalite özellikleri üzerinde önemli bir avantajı olmadığı gibi enerji tüketimini de arttıracığından

uygulanması uygun bulunmamıştır. Ayrıca, ultrason teknolojisinin dondurma-çözündürme işlemlerine etkisinin daha iyi anlaşılabilir yorumlanabilmesi için ultrasonun farklı genlik, güç ve süreler için daha çok sayıda ve farklı gıdalara uygulanmasının uygun olacağı düşünülmektedir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma Ege Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP-24168 ve BAP-23504), TÜBİTAK-2244/119C097 ve Vestel Beyaz Eşya San. ve Tic. A.Ş. tarafından desteklenmektedir. Ayrıca çalışma kapsamında hammadde olarak kullanılan dana nuar eti Pınar Entegre Et ve Un Sanayi A.Ş. tarafından desteklenmektedir.

ÇIKAR ÇATIŞMASI BEYANI

Yazarlar arasında çıkar çatışması bulunmamaktadır.

YAZAR KATKILARI

Hıra Yüksel SARIOĞLU: Çalışmanın tasarımı, denemelerin ve analizlerin gerçekleştirilmesi, verilerin analiz edilmesi ve raporlanması, makalenin yazma – inceleme ve düzenlenmesi, Özgün KÖPRÜALAN AYDIN: Çalışmanın tasarımı, denemelerin ve analizlerin gerçekleştirilmesi, verilerin analiz edilmesi ve raporlanması, makalenin yazma – inceleme ve düzenlenmesi, Safiye Nur DİRİM: Çalışmanın tasarımı, makalenin yazma, inceleme ve düzenlenmesi, Figen KAYMAK-ERTEKİN: Çalışmanın tasarımı, makalenin yazma, inceleme ve düzenlenmesi konularında katkı sağlamıştır.

KAYNAKLAR

Anese, M., Manzocco, L., Panozzo, A., Beraldo, P., Foschia, M., Nicoli, M. C. (2012). Effect of radiofrequency assisted freezing on meat microstructure and quality. *Food Research International*, 46(1), 50–54. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2011.11.025>

AOAC. (2005). Official Methods of Analysis of AOAC International. *Association of Official Analytical Chemistry International*, February.

Balan, P., Kim, Y. H. B., Stuart, A. D., Kemp, R., Staincliffe, M., Craigie, C., Farouk, M. M. (2019).

Effect of fast freezing then thaw-aging on meat quality attributes of lamb *M. longissimus lumborum*. *Animal Science Journal*, 90(8), 1060–1069. <https://doi.org/10.1111/asj.13216>

Becker, B. R., Fricke, B. A. (1999). Food thermophysical property models. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 26(5), 627–636. [https://doi.org/10.1016/S0735-1933\(99\)00049-4](https://doi.org/10.1016/S0735-1933(99)00049-4)

Bertram, H. C., Kristensen, M., Østdal, H., Baron, C. P., Young, J. F., Andersen, H. J. (2007). Does oxidation affect the water functionality of myofibrillar proteins? *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 55(6), 2342–2348. <https://doi.org/10.1021/jf0625353>

Cai, L., Cao, M., Cao, A., Regenstein, J., Li, J., Guan, R. (2018). Ultrasound or microwave vacuum thawing of red seabream (*Pagrus major*) filets. *Ultrasonics Sonochemistry*, 47(March), 122–132. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2018.05.001>

Cai, L., Cao, M., Regenstein, J., Cao, A. (2019a). Recent Advances in Food Thawing Technologies. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 18, 953–970. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12458>

Cai, L., Zhang, W., Cao, A., Cao, M., Li, J. (2019b). Effects of ultrasonics combined with far infrared or microwave thawing on protein denaturation and moisture migration of *Sciaenops ocellatus* (red drum). *Ultrasonics Sonochemistry*, 55(March), 96–104. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2019.03.017>

Cemeroğlu, B. S. (2017). Gıda mühendisliğinde temel işlemler. AC Yayınevi.

Choi, E. J., Park, H. W., Chung, Y. B., Park, S. H., Kim, J. S., Chun, H. H. (2017). Effect of tempering methods on quality changes of pork loin frozen by cryogenic immersion. *Meat Science*, 124, 69–76. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2016.11.003>

Dalvi-Isfahan, M., Hamdami, N., Le-Bail, A. (2017). Effect of freezing under electrostatic field on selected properties of an agar gel. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 42(June),

- 151–156. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2017.06.013>
- Dalvi-Isfahan, M., Hamdami, N., Le-Bail, A., Xanthakis, E. (2016). The principles of high voltage electric field and its application in food processing: A review. *Food Research International*, 89, 48–62. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2016.09.002>
- Demirdöven, A., Baysal, T. (2009). The use of ultrasound and combined technologies in food preservation. *Food Reviews International*, 25(1), 1–11. <https://doi.org/10.1080/87559120802306157>
- Dolatowski, Z. J., Stadnik, J., Stasiak, D. (2007). Applications of ultrasound in food technology. *ACTA Scientiarum Polonorum*, 63(6), 89–99.
- Ergün, A. R., Baysal, T., Bozkır, H. (2013). Ultrases Yöntemi ile Karatenoitlerin Ekstraksiyonu. *Gıda*, 38(4), 239–246. <https://doi.org/10.5505/gida.2013.30074>
- Farouk, M. M., Swan, J. E. (1998). Effect of Muscle Condition Before Freezing and Simulated Chemical Changes During Frozen Storage on the pH and Colour of Beef. *Meat Science*, 50(2), 245–256. [https://doi.org/10.1016/S0309-1740\(98\)00036-9](https://doi.org/10.1016/S0309-1740(98)00036-9)
- Gambuteanu, C., Alexe, P. (2015). Comparison of thawing assisted by low-intensity ultrasound on technological properties of pork Longissimus dorsi muscle. *Journal of Food Science and Technology*, 52(4), 2130–2138. <https://doi.org/10.1007/s13197-013-1204-7>
- Gan, S., Zhang, M., Mujumdar, A. S., Jiang, Q. (2022). Effects of different thawing methods on quality of unfrozen meats. *International Journal of Refrigeration*, 134(December 2021), 168–175. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2021.11.030>
- Guo, Z., Ge, X., Yang, L., Ma, G., Ma, J., Yu, Q. li, Han, L. (2021). Ultrasound-assisted thawing of frozen white yak meat: Effects on thawing rate, meat quality, nutrients, and microstructure. *Ultrasonics Sonochemistry*, 70(1), 105345. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2020.105345>
- Hafezparast-Moadab, N., Hamdami, N., Dalvi-Isfahan, M., Farahnaky, A. (2018). Effects of radiofrequency-assisted freezing on microstructure and quality of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) fillet. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 47(December 2017), 81–87. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2017.12.012>
- Hansen, E., Juncher, D., Henckel, P., Karlsson, A., Bertelsen, G., Skibsted, L. H. (2004). Oxidative stability of chilled pork chops following long term freeze storage. *Meat Science*, 68(3), 479–484. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2004.05.002>
- Hughes, J. M., Clarke, F. M., Purslow, P. P., Warner, R. D. (2020). Meat color is determined not only by chromatic heme pigments but also by the physical structure and achromatic light scattering properties of the muscle. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 19(1), 44–63. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12509>
- Isleroglu, H., Kemerli, T., Kaymak-Ertekin, F. (2015). Effect of steam-assisted hybrid cooking on textural quality characteristics, cooking loss, and free moisture content of beef. *International Journal of Food Properties*, 18(2), 403–414. <https://doi.org/10.1080/10942912.2013.833219>
- Jambrak, A. R., Herceg, Z., Šubarić, D., Babić, J., Brnčić, M., Brnčić, S. R., Bosiljkov, T., Čvek, D., Tripalo, B., Gelo, J. (2010). Ultrasound effect on physical properties of corn starch. *Carbohydrate Polymers*, 79(1), 91–100. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2009.07.051>
- Kiani, H., Sun, D. W. (2011). Water crystallization and its importance to freezing of foods: A review. *Trends in Food Science and Technology*, 22(8), 407–426. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2011.04.011>
- Knorr, D., Zenker, M., Heinz, V., Lee, D. U. (2004). Applications and potential of ultrasonics in food processing. *Trends in Food Science and Technology*, 15(5), 261–266. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2003.12.001>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2012.01.013>

- Li, D., Zhao, H., Muhammad, A. I., Song, L., Guo, M., Liu, D. (2020). The comparison of ultrasound-assisted thawing, air thawing and water immersion thawing on the quality of slow/fast freezing bighead carp (*Aristichthys nobilis*) fillets. *Food Chemistry*, 320(February), 126614. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.126614>
- Lorimer, J. P., Mason, T. J., Mistry, B. P. (1987). Effect of ultrasound on the solvolysis of 2-chloro-2-methylpropane in aqueous alcoholic solvents. *Ultrasonics*, 25(1), 23–28. [https://doi.org/10.1016/0041-624X\(87\)90006-0](https://doi.org/10.1016/0041-624X(87)90006-0)
- Masciheroni, R.H.;Anon, M.C.; Calvelo, A. (1981). Basis for a method of characterisation for quick frozen beef. *Meat Science*, 5(6), 457–472.
- Mason, T. J., Paniwnyk, L., & Lorimer, J. P. (1996). The uses of ultrasound in food technology. *Ultrasonics Sonochemistry*, 3(3). [https://doi.org/10.1016/S1350-4177\(96\)00034-X](https://doi.org/10.1016/S1350-4177(96)00034-X)
- Phinney, D. M., Frelka, J. C., Wickramasinghe, A., Heldman, D. R. (2017). Effect of Freezing Rate and Microwave Thawing on Texture and Microstructural Properties of Potato (*Solanum tuberosum*). *Journal of Food Science*, 82(4), 933–938. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.13690>
- Qiu, L., Zhang, M., Chitrakar, B., Bhandari, B. (2020). Application of power ultrasound in freezing and thawing Processes: Effect on process efficiency and product quality. *Ultrasonics Sonochemistry*, 68(April). <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2020.105230>
- Qiu, S., Cui, F., Wang, J., Zhu, W., Xu, Y., Yi, S., Li, X., Li, J. (2022). Effects of ultrasound-assisted immersion freezing on the muscle quality and myofibrillar protein oxidation and denaturation in *Sciaenops ocellatus*. *Food Chemistry*, 377(October 2021), 131949. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.131949>
- Ruiz-Ramírez, J., Arnau, J., Serra, X., Gou, P. (2006). Effect of pH24, NaCl content and proteolysis index on the relationship between water content and texture parameters in biceps femoris and semimembranosus muscles in dry-cured ham. *Meat Science*, 72(2), 185–194. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2005.06.016>
- Ruiz De Huidobro, F., Miguel, E., Blázquez, B., Onega, E. (2005). A comparison between two methods (Warner-Bratzler and texture profile analysis) for testing either raw meat or cooked meat. *Meat Science*, 69(3), 527–536. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2004.09.008>
- Sastry, S. K., Shen, G. Q., Blaisdell, J. L. (1989). Effect of Ultrasonic Vibration on Fluid-to-Particle Convective Heat Transfer Coefficients. *Journal of Food Science*, 54(1), 229–230. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1989.tb08611.x>
- Selani, M. M., Shirado, G. A. N., Margiotta, G. B., Saldaña, E., Spada, F. P., Piedade, S. M. S., Contreras-Castillo, C. J., Canniatti-Brazaca, S. G. (2016). Effects of pineapple byproduct and canola oil as fat replacers on physicochemical and sensory qualities of low-fat beef burger. *Meat Science*, 112, 69–76. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2015.10.020>
- Shi, H., Zhang, X., Chen, X., Fang, R., Zou, Y., Wang, D., Xu, W. (2020). How ultrasound combined with potassium alginate marination tenderizes old chicken breast meat: Possible mechanisms from tissue to protein. *Food Chemistry*, 328(May), 127144. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.127144>
- Shim, K. B., Hong, G. P., Choi, M. J., Min, S. G. (2009). Effect of high pressure freezing and thawing process on the physical properties of pork. *Korean Journal for Food Science of Animal Resources*, 29(6), 736–742. <https://doi.org/10.5851/kosfa.2009.29.6.736>
- Stika, J. F., Xiong, Y. L., Suman, S. P., Blanchard, S. P., Moody, W. G. (2007). Frozen storage stability of antioxidant-treated raw restructured beef steaks made from mature cows. *Meat Science*, 77(4), 562–569. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2007.05.005>
- Sun, Q., Sun, F., Xia, X., Xu, H., Kong, B. (2019a). The comparison of ultrasound-assisted immersion freezing, air freezing and immersion freezing on the muscle quality and physicochemical properties of common carp

- (*Cyprinus carpio*) during freezing storage. *Ultrasonics Sonochemistry*, 51(October 2018), 281–291. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2018.10.006>
- Sun, Q., Zhao, X., Zhang, C., Xia, X., Sun, F., Kong, B. (2019b). Ultrasound-assisted immersion freezing accelerates the freezing process and improves the quality of common carp (*Cyprinus carpio*) at different power levels. *Lwt*, 108(December 2018), 106–112. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.03.042>
- Tarladgis, B. G., Watts, B. M., Younathan, M. T., Dugan, L. (1960). A distillation method for the quantitative determination of malonaldehyde in rancid foods. *Journal of the American Oil Chemists Society*, 37(1), 44–48. <https://doi.org/10.1007/BF02630824>
- Wang, A., Kang, D., Zhang, W., Zhang, C., Zou, Y., Zhou, G. (2018). Changes in calpain activity, protein degradation and microstructure of beef *M. semitendinosus* by the application of ultrasound. *Food Chemistry*, 245(November 2017), 724–730. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.12.003>
- Wang, B., Du, X., Kong, B., Liu, Q., Li, F., Pan, N., Xia, X., Zhang, D. (2020). Effect of ultrasound thawing, vacuum thawing, and microwave thawing on gelling properties of protein from porcine longissimus dorsi. *Ultrasonics Sonochemistry*, 64(November 2019), 104860. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2019.104860>
- Wang, H., Luo, Y., Shi, C., 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. <https://doi.org/10.1080/10498850.2013.763884>
- Wang, Y. Y., Wang, H., Zhou, F., Wu, Y., Ma, H., Zhao, R., He, J., Gu, Z. (2023). Effect of ultrasonic thawing temperature on the quality of quick-frozen small yellow croaker (*Larimichthys polyactis*) and its possible mechanisms. *Lwt*, 179(March), 114620. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2023.114620>
- Xanthakis, E., Le-Bail, A., Ramaswamy, H. (2014). Development of an innovative microwave assisted food freezing process. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 26, 176–181. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2014.04.003>
- Xin, Y., Zhang, M., Xu, B., Adhikari, B., Sun, J. (2015). Research trends in selected blanching pretreatments and quick freezing technologies as applied in fruits and vegetables: A review. *International Journal of Refrigeration*, 57, 11–25. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2015.04.015>
- Xu, D., Wang, Y., Jiao, N., Qiu, K., Zhang, X., Wang, L., Wang, L., Yin, J. (2020). The coordination of dietary valine and isoleucine on water holding capacity, pH value and protein solubility of fresh meat in finishing pigs. *Meat Science*, 163(November 2019), 108074. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2020.108074>
- You, Y., Kang, T., Jun, S. (2021). Control of Ice Nucleation for Subzero Food Preservation. *Food Engineering Reviews*, 13(1), 15–35. <https://doi.org/10.1007/s12393-020-09211-6>
- Zhang, M., Haili, N., Chen, Q., Xia, X., & Kong, B. (2018). Influence of ultrasound-assisted immersion freezing on the freezing rate and quality of porcine longissimus muscles. *Meat Science*, 136, 1–8.
- Zhang, C., Sun, Q., Chen, Q., Kong, B., Diao, X. (2020). Effects of ultrasound-assisted immersion freezing on the muscle quality and physicochemical properties of chicken breast. *International Journal of Refrigeration*, 117, 247–255. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2020.05.006>
- Zheng, L., Sun, D. W. (2006). Innovative applications of power ultrasound during food freezing processes - A review. *Trends in Food Science and Technology*, 17(1), 16–23. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2005.08.010>