

**TAZE SIĞIR ETLERİNİN DEĞİŞİK ORTAM SICAKLIKLARINDA
DONMA ZAMANLARININ DENEYSEL VE MATEMATİKSEL
MODELLERLE BELİRLENMESİ (1)**

Yahya TÜLEK (2)

Şahin GÜLLAPOĞLU (3)

İshak KOTCIOĞLU (4)

Hüsnü Yusuf GÖKALP (2)

ÖZET : Araştırmada, yurdumuzda pratikte uygulanan koşullara nisbeten benzer koşullarda dondurulan sonsuz dilim şekilli taze az yağlı, kemiksiz ve değişik kalınlıklardaki etlerin farklı sıcaklık deercelerindeki donma zamanlarının deneysel olarak belirlenmesi amaçlanmıştır. Belirlenen sürelerin çeşitli araştırmacılar tarafından geliştirilmiş değişik matematiksel metotlarla hesaplanan donma süreleri ile mukayesesi de yapılarak en uygun tahmin sonucunu veren eşitlik tespit edilmeye çalışılmıştır. Araştırmada 4 değişik dondurma ortam sıcaklığı (-18, -20, -22 ve -24 °C) ve her bir sıcaklık derecesinde 3 değişik et kalınlığı (2, 3 ve 4 cm) denenmiştir.

Donma denemeleri 2 blokta tekrarlanan şans blokları planına göre yürütülen faktöriyel düzenleme (4x3x2) şeklinde yapılmıştır. Donma zamanlarının matematiksel eşitliklerle tahmininde 5 değişik araştırmacı tarafından geliştirilmiş matematiksel metotlar kullanılmıştır.

Sonuçta, et örneklerinin donma zamanları üzerinde, denenen dondurma sıcaklıklarının çok önemli etki yaptığı saptanmıştır. -18 °C'lik ortamda dondurulan et örneklerinin termal merkezinde -10 °C'den daha düşük derecelere inme imkanı sağlanamamıştır. dondurma sıcaklık deercelerinde 2 °C'lik düşmenin dahi donma zamanını önemli ölçüde (2-3.5 saat) azalttığı saptanmıştır. Düşük dondurma derecelerinde yapılan donma denemelerinde, matematiksel metotlarla yapılan donma zamanı tahminlerin uygulanabilirlik şansının daha fazla olduğu belirlenmiştir. Dondurulan et dilimi kalınlığının artmasıyla matematiksel metotlarla yapılan donma zamanı tahminlerinin deneysel değerlere uygunluğunun arttığı tespit edilmiştir.

(1) Araştırmanın Belirli Bölümleri DPT (Ankara) (89K120440), TOBB (Ankara) ve Atatürk Üniv. Araştırma Fonunca (Erzurum) (89/40) Mali Yönden Desteklenmiştir.

(2) Atatürk Üni. Ziraat Fak. Gıda Bilimi ve Tek. Böl. Erzurum /Türkiye.

(3) Atatürk Üni. Mühendislik Fak. Kimya Böl. Erzurum/ Türkiye.

(4) Atatürk Üni. Meslek Yüksek Okulu Makina Bölümü, Erzurum/Türkiye.

DETERMINATION OF FREEZING TIME OF FRESH BEEF, FROZEN AT THE DIFFERENT FREEZING TEMPERATURES, BY EXPERIMENTALLY AND WITH THE MATHEMATICAL METHODS

SUMMARY : *Freezing time of infinite slab shape, fresh, deboned, low fat beef meat was tried to determine experimentally. Freezing temperatures and conditions were simulated to the ones which have been widely applied in our country. Additionally, experimentally determined freezing times were compared with the periods calculated by applying the mathematical methods which had been developed by the various researchers, and a suitable mathematical equation was tried to find out. In the experiment, 4 different freezing temperatures (-18, -20, -22 and -24 °C) and in each freezing temperatures 3 meat samples of different thickness (2, 3 and 4 cm) were experimented and frozen. Freezing experiments were set up as factorial plan of random blocks repeated in two blocks (4x3x2). For the estimation of the freezing by the mathematical equations, mathematical methods of 5 different researchers were used.*

At the end, it was determined that experimented freezing temperatures had an important effect on the freezing time of the meat samples. In the thermal center of the meat samples which had been frozen in -18°C temperature had never been dropped lower than -10 °C. In the freezing temperatures, just only two degrees dropping decreased the necessary freezing time (1 to 3.5 h) effectively. Freezing experiments carried out at the lower freezing temperatures indicated that estimated freezing time, by using the mathematical methods, had more adaptable chance than the ones obtained at the higher freezing temperatures. By the increases of the frozen meat slab thickness, it was found that the results of the estimated freezing time, by the mathematical equations, had become more closer to the results determined experimentally.

GİRİŞ

Çoğu gıda maddesi, yüksek oranda su içeriği ve fizyolojik yapısı nedeniyle, çok çabuk bozularak kalite ve besin değerini kaybetmekte veya tamamen tüketilemeyecek duruma gelebilmektedir. Bu nedenle, gıda maddelerinin üretiminden tüketimine kadar olan süreç içerisinde belirli muhafaza teknikleri uygulanarak kalite ve besin değerini kaybetmeden muhafaza edilmesi gerekmektedir (Müftügil ve Yurdagel, 1985; Cemeroğlu, 1986).

Et endüstrisinde, muhafaza edilecek taze etlerde ve et ürünlerinde günümüzde en yaygın kullanılan muhafaza metodu dondurularak muhafazadır. Ve bu dondurma işlemi, hava sirkülasyonlu ortamlarda yapılan şok dondurma veya diğer bir adıyla derin dondurma'dır (Schneider ve ark., 1982; Anon., 1986; Gökalp, 1988). Şok dondurma tekniği ile et ve et ürünlerinin muhafaza edilmesi yönteminde, termal merkezde ulaşılabilecek en yüksek sıcaklık limiti olarak, biyokimyasal olayların asgari düzeyde cereyan ettiği ve mikroorganizma gelişmesinin durduğu sınır olarak kabul edilmesi (Wirth, 1979) nedeniyle -10 °C yeterli görülmektedir (Heldman, 1983; Gökalp, 1988).

Yurdumuzda, özellikle taze et ürünleri çoğunlukla karkas halinde veya çeşitli parçalara parçalandıktan sonra dondurularak muhafazaya alınmaktadır (Gökalp, 1988). Ancak, bu dondurma işleminin standard bir yöntemi, en uygun derecesi, dondurma şekli ve ürünün donması için gerekli olan süre konusunda ülkemizde bilgi birikimi yetersizdir. Çok önemli olan bu konu üzerinde, gelişmiş teknolojilerde kendi ürünleri ve şartlarına göre, donma zamanlarının belirlenmesi hususunda yaygın şekilde araştırmalar yapılmaktadır.

Mascheroni ve Calvelo (1982) ve Hung ve Thompson (1983), Plank'ın 1913 ve 1914 yıllarında sonsuz dilim, sonsuz silindir ve küre şekilli gıda maddelerinde bir boyutlu ısı transferi ile gerçekleştirilen donma zamanı hesaplamaları için uygun bir model geliştirdiğini belirtmişlerdir. Plank'ın 1913 yılında geliştirdiği modelinde, ön soğutma ve faz değişim zamanı hesaba katılmadığı için, hesapla bulunan donma zamanları deneysel yolla belirlenenlere göre daha düşük çıkmaktadır (De Michelis ve Calvelo 1982). Bu eksiklikleri gidermek için bazı araştırmacılar tarafından modifikasyonlar ve yeni matematiksel modeller geliştirilmiştir (Cleland ve Earle, 1979; Loeffen ve ark., 1981; Cleland ve Earle 1982; De Michelis ve Calvelo, 1982; Mascheroni ve Calvelo, 1982; Pham, 1984; Succar ve Hayakawa, 1984).

Donma zamanı tahmini için geliştirilen mevcut birçok formül ve metot çeşitli araştırmacılar tarafından incelenmiştir (Bakal ve Hayakawa, 1973; Cleland ve Earle, 1977; Mascheroni ve Calvelo, 1982; Hung ve Thompson, 1983). Araştırmacılar donma sürelerinin tesbitinde, deneysel metotların diğerlerine göre daha iyi tahmin sonuçları verdiğini bildirmişlerdir.

Bu araştırmanın temel bir amacı, yurdumuz koşullarını yansıtabilen koşullarda dondurularak muhafaza edilen sonsuz dilim şekilli, taze, yağsız ve kemiksiz sığır etlerinin farklı sıcaklık dereceleri ve şartlardaki donma zamanlarını deneysel olarak belirlemektir. Ayrıca, deneysel olarak belirlenen bu sürelerin daha

önceden değişik araştırmacılar tarafından geliştirilmiş matematiksel modellerle hesaplanan, donma süreleri ile mukayesesi yapılarak, ülke şartlarımıza en iyi uyum gösteren matematiksel tahmin modelini tespit etmekte araştırmanın diğer bir amacıdır.

Diğer taraftan bu araştırma sonuçları yurdumuzda gelişmekte olan gıda sanayinin önemli bir konusuna ışık tutabileceği gibi gelecekteki araştırmalara da bazı yönleri ile öncülük edebilecektir.

MATERYAL VE METOT

Materyal

Araştırmada, 4 °C'lik dinlendirme odalarında 24 saat dinlendirilmiş, orta yaşlı sığır karkaslarının bud kısmından pratikte **nuvar** olarak adlandırılan parçadan alınan etler kullanılmıştır. Etler, Et ve Balık kurumu (EBK) Erzurum Et Kombinasyonundan alınmıştır. Dondurma işlemi -26 °C'ye kadar soğutma yapılabilen 60x250x85 cm iç boyutlarında, ± 0.5 °C hassasiyetli deep-freezerde gerçekleştirilmiştir. Sıcaklık ölçümlerinde 0.2 mm çapında, izoleli, bakır-konstant elemanlı ısı çiftleri kullanılmıştır. Sıcaklık değerleri ± 0.01 mV hassasiyetli milivoltmetre ile digital olarak mV cinsinden okunmuş, okunan değerlerin °C olarak karşılıkları ilgili tablolardan bulunmuştur (Anon., 1976).

Et örneklerinde bir boyutlu ısı transferini sağlamak için etin yan kenar yüzeylerinin izole edilmesinde, ısı iletim katsayısı $0.036 \text{ w/m } ^\circ\text{C}$ olan 5 cm kalınlığında polystyren köpükler kullanılmıştır (Kakaç, 1982). Örneklerde, dondurma esnasında süblimasyonla meydana gelebilecek su kaybını önlemek için ısı iletim katsayısı $0.302 \text{ w/m } ^\circ\text{C}$ olan polietilen torbalar (De Michelis ve Calveia, 1982) ile etlerin açık olan üst yüzeyleri kapatılmıştır.

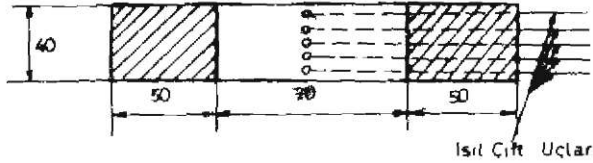
Dondurulan et örneklerine ait yüzey ısı transfer katsayısının (h) belirlenmesi için hazırlanan modelde, % 99.9 saflıkla, 2707 kg/m^3 yoğunlukta ısı iletim katsayısı $204 \text{ w/m } ^\circ\text{C}$ olan alüminyum blok kullanılmıştır (Kakaç, 1982). Alüminyum blok, Etibank, Seydişehir Alüminyum İşletmesi Tesislerinden temin edilmiştir.

Metot

Donma zamanlarının matematiksel eşitliklerle tahmininde kullanılan Yüzey Isı Transfer Katsayısının belirlenmesi için Hung ve Thompson (1983) tarafından önerildiği şekilde bir alüminyum model hazırlanmıştır (Şekil 1). Hazırlanan model, araştırmada kullanılan et bloklarının dondurulduğu ortam sıcaklık derecelerinde soğutulmaya tabi tutulmuştur. Elde edilen soğuma zamanları $\ln(T-T_f)/(T-T_i)$

boyutsuz sıcaklık değişimine karşı, yarı logaritmik kağıt üzerine grafik edilerek regresyon analizi ile grafiğin eğimi (m) bulunmuş ve yüzey ısı transfer katsayısı formül 1'e göre hesaplanmıştır.

$$h = \frac{p \cdot v \cdot C_p \cdot m}{A} \quad (1)$$

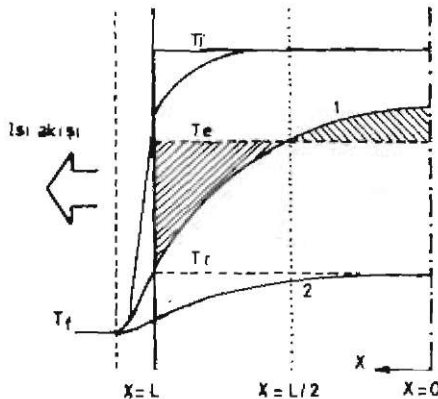


Şekil 1. Hung ve Thompson'a (1983) göre hazırlanan alüminyum model ve bu modelde ısı çiftlerinin yerleştiriliş şekli
Figure 1. Aluminum Model Prepared as Stated by Hung and Thompson (1983) and the Placement of the Thermocouple Ends

Denemeler İçin Et Modellerinin Hazırlanması

Donma işleminde bir boyutlu ısı akışının Şekil 2'de görüldüğü gibi oluşmasına imkan verecek et modeli Hung ve Thompson'a (1983) göre Şekil 3'deki gibi hazırlanmıştır.

Budun nuvar kısmından alınan etler, kalınlıkları 2, 3 ve 4 cm enleri 7 ve boyları da 8.6 cm olacak şekilde keskin bir bıçakla düzgünce kesilmiş ve yan

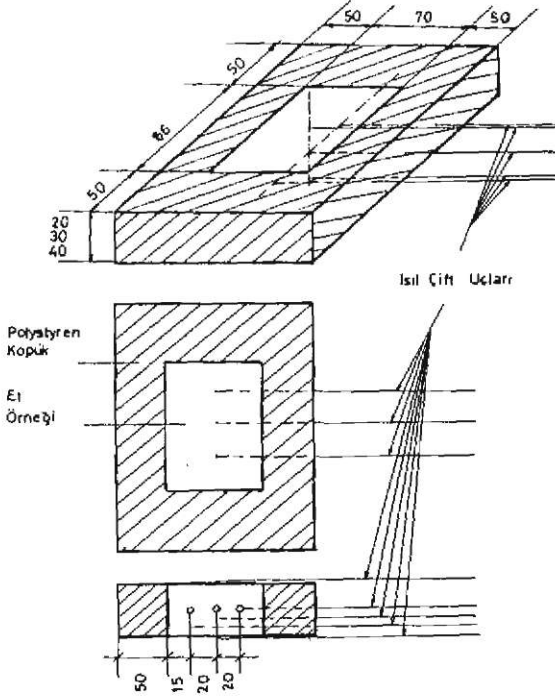


Şekil 2. 2 yüzeyden soğutulan ve ısıtılan 2L kalınlığındaki sığır eti diliminde bir boyutlu ısı akışı
Figure 2. One Dimensional Heat Transfer at the Beef Pieces of 2L Thickness Which was Warmed and Cooled Through a Single Surface

yüzeyleri 5 cm kalınlığında polystyren köpükte yalıtılmıştır. Açık olan üst yüzey de polyetilen ile kapatılmıştır.

Et örneklerinde sıcaklık ölçümlerinin gerçekleştirilebilmesi için, Şekil 3'de görüldüğü gibi örneğin paralel yüzeylerine karşılıklı 1'e adet, termal merkezine 1 adet, termal merkezinden boylamasına geçen orta eksen üzerinde, termal merkeze 2'şer cm uzaklığa 1'er adet olmak üzere toplam 5 adet ısı çifti yerleştirilmiştir. Ayrıca 1 adet ısı çifti ortam sıcaklığını kontrol etmek için, 1 adet ısı çifti de 0 °C'lik buz su referansı için kullanılmıştır. Sıcaklıklar, ısı çiftlerinin bağlandığı ± 0.01 mV hassasiyetli milivoltmetre ile mV cinsinden okunmuştur.

Dondurma işleminde, genelde ülkemiz et sanayiinde bugün uygulandığını gözlemlediğimiz 4 farklı ortam sıcaklığı (-18, -20, -22 ve -24 °C) denenmiştir. Deneyler hava sirkülasyonsuz ortamlarda yürütülmüştür.



Şekil 3. Hung ve Thompson'a (1983) göre hazırlanan et modeli ve bu modelde ısı çiftlerinin yerleştiriliş şekli

Figure 3. Experimental Meat Sample Prepared as Stated by Hung and Thompson (1983) and the Placement of the Thermocouple Ends

Dinlendirilmiş sığır karkasından alınan et örneği Şekil 3'de görüldüğü gibi hazırlanıp, buzdolabı şartlarında (+ 4 °C civarı) 24 saat bekletilerek et diliminin her yerinde sıcaklığın üniform bir hal alması sağlanmıştır. Dondurma işlemi, sıcaklığın, et örneğinin termal merkezinde -12 °C'ye inmesi ile bitirilmiştir. Donma işlemi esnasında her 10 dakikada bir milivoltmetreden değerler okunmuştur.

Geliştirilmiş Matematiksel Eşitliklerle Donma Zamanlarının Hesaplanması

Deneysel olarak bulunan donma zamanları, değişik araştırmacılar tarafından geliştirilmiş tahmin metodları ile bulunan zamanlarla mukayese edilmiştir. Bu amaçla Cleland ve Earle (1977) Hung ve Thompson (1983), Mascheroni ve Calvelo'nun (1982) eşitlikleri ve yine Mascheroni ve Calvelo (1982) tarafından belirtilmiş olan Nagoaka ve ark. (1955) ve Plank'ın (1963) donma zamanı tahmini için geliştirdikleri matematiksel eşitlikler kullanılmıştır.

Etlerde Toplam Su ve Yağ Oranlarının Tesbiti

Etin bileşimindeki toplam su ve yağ miktarı etin ısı iletim katsayısını, spesifik ısı değerini ve yoğunluğunu etkileyerek donma zamanları üzerinde önemli rol oynamaktadır (Heldman, 1983).

Etlerde , donma zamanları üzerine en fazla etki eden toplam su içeriği Ockerman'ın (1976) belirttiği yöntemle göre belirlenmiştir. Toplam yağ yüzdesi de eter ekstraksiyon yöntemi uygulanarak Gökalp'in (1986) belirttiği şekilde tayin edilmiştir.

BULGULAR VE TARTIŞMA

Et Örneklerinin Toplam Su ve Yağ Oranları

Denemede kullanılan et örneklerinde tespit edilen su oranları Tablo 1'de verilmiştir. Et örneklerinin su oranları, genelde % 74.48 ile % 77.49 arasında değişmiştir. Kurumadde de yağ oranları ise, en yüksek % 3.7, en düşük % 1.25 olarak saptanmıştır. Bulunan yağ oranlarına göre örnekler yağsız et olarak kabul edilmiştir (Gökalp, 1988).

Yüzey Isı Transfer Katsayısı Sonuçları

Yüzey ısı transfer katsayısının belirlenmesi amacıyla hazırlanan alüminyum modelin, et örneğinin dondurulduğu ortam ve sıcaklıklarda soğutulması suretiyle elde edilen soğuma zamanlarının $\ln((T_i - T_f)/(T - T_f))$ boyutsuz sıcaklık değişimine karşı

Tablo 1. Donma Denemelerinde Deney Şartları ve Deneysel Modelle Bulunan Donma Zamanları

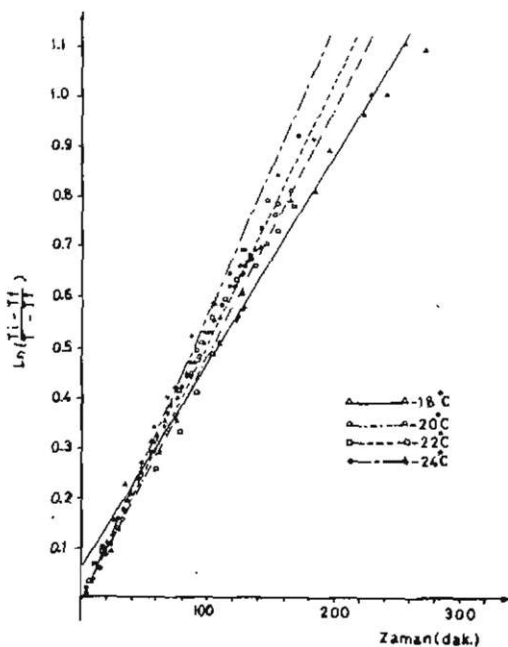
| Deney No | L (m) | Tf (°C) | Ti (°C) | h_2 (W/m ² °C) | Ma (%) | Wm (%) | t _{DZ} (Saat) |
|----------|-------|---------|---------|-----------------------------|--------|--------|------------------------|
| 1 | 0.01 | -18 | 4.9 | 7.934 | 74.48 | 65.54 | 11.91* |
| 2 | 0.01 | -18 | 5.2 | 7.934 | 75.48 | 66.46 | 12.16* |
| 3 | 0.015 | -18 | 4.7 | 7.934 | 76.83 | 67.61 | 14.66* |
| 4 | 0.015 | -18 | 3.1 | 7.934 | 76.27 | 67.11 | 15.06* |
| 5 | 0.02 | -18 | 4.9 | 7.934 | 74.93 | 65.93 | 18.86* |
| 6 | 0.02 | -18 | 2.1 | 7.934 | 75.30 | 66.26 | 19.36* |
| 7 | 0.01 | -20 | 3.4 | 7.934 | 76.86 | 67.63 | 8.78 |
| 8 | 0.01 | -20 | 2.9 | 7.934 | 77.10 | 67.84 | 8.66 |
| 9 | 0.015 | -20 | 6.5 | 7.934 | 76.13 | 66.99 | 11.36 |
| 10 | 0.015 | -20 | 3.6 | 7.934 | 76.60 | 67.40 | 10.80 |
| 11 | 0.02 | -20 | 4.9 | 7.934 | 75.94 | 66.82 | 12.46 |
| 12 | 0.02 | -20 | 2.9 | 7.934 | 75.18 | 66.15 | 12.68 |
| 13 | 0.01 | -22 | 2.1 | 7.934 | 75.96 | 66.84 | 6.81 |
| 14 | 0.01 | -22 | 3.4 | 7.934 | 75.03 | 66.02 | 6.66 |
| 15 | 0.015 | -22 | 2.4 | 7.934 | 76.28 | 67.12 | 7.75 |
| 16 | 0.015 | -22 | 2.6 | 7.934 | 75.11 | 66.09 | 8.66 |
| 17 | 0.02 | -22 | 2.9 | 7.934 | 76.18 | 67.03 | 10.70 |
| 18 | 0.02 | -22 | 2.4 | 7.934 | 76.71 | 67.50 | 10.96 |
| 19 | 0.01 | -24 | 0.8 | 7.934 | 76.93 | 67.69 | 5.41 |
| 20 | 0.01 | -24 | 2.6 | 7.934 | 77.42 | 68.12 | 5.75 |
| 21 | 0.015 | -24 | 2.9 | 7.934 | 77.21 | 67.94 | 7.00 |
| 22 | 0.015 | -24 | 2.4 | 7.934 | 77.09 | 67.83 | 7.13 |
| 23 | 0.02 | -24 | 3.4 | 7.934 | 76.49 | 67.31 | 8.41 |
| 24 | 0.02 | -24 | 2.4 | 7.934 | 75.10 | 66.08 | 8.55 |

* Et örneklerinin termal merkezinde -10°C'ye ulaşılması için Gereken sürelerdir.

grafik edilmesi (Şekil 4) sonucu elde edilen eğrilerin eğimleri regresyon analizi ile hesaplanmıştır. Eğimler birbirlerine çok yakın değerler olarak çıktığı için aritmetik ortalamaları alınarak Formül 1'de yerine koyulmuş ve yüzey ısı transfer katsayısı $7.934 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$ olarak belirlenmiştir. Soğutma ortamında hava sirkülasyonunun uygulanmaması, ortam ile gıda maddesi arasındaki sıcaklık farkının nisbeten az olması ve ısı transferinin konveksiyonla gerçekleşmesi sonucunda et diliminin yüzeyinde oluşan film tabakası kalınlığı fazlaca olmuştur. Bu nedenlerle sonuçta yüzey ısı transfer katsayısı küçük bulunmuştur. Nitekim, Hung ve Thompson (1983) tarafından benzer şartlarda tespit edilen değerlerle ($9 \text{ w/m}^2 \text{ }^\circ\text{C} - 11 \text{ w/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$), bulunan yüzey ısı transfer katsayısı değeri yakın benzerlik göstermektedir.

Deneysel Yolla Bulunan Donma Zamanı Sonuçları

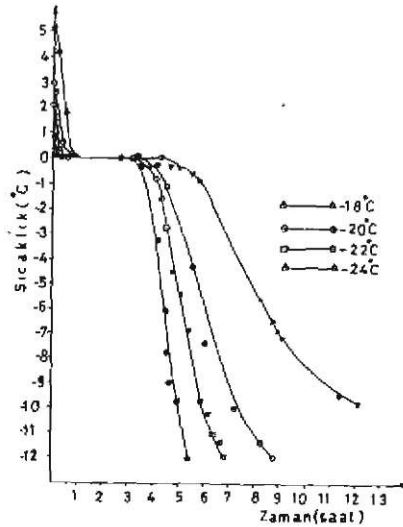
Herbir et kalınlığı ve sıcaklık derecesi için 2 defa tekrarlanan dondurma işlemine ait deneysel şartlar ve deneysel donma zamanları Tablo 1'de verilmiştir.



Şekil 4. Alüminyum modelde, değişik soğutma derecelerinde, zaman ile boyutsuz sıcaklık değişimi arasındaki ilişki

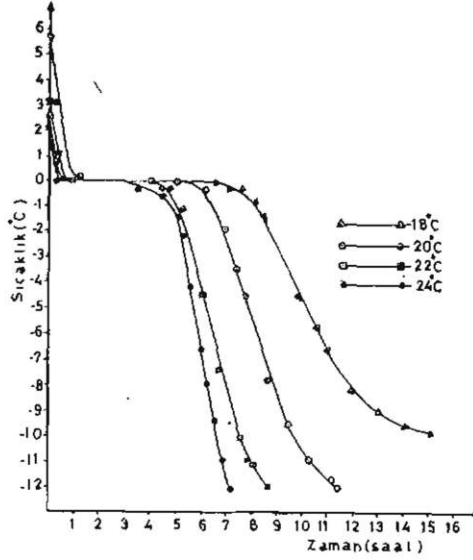
Figure 4. Relationship Between Time and Dimensionless Temperature Exchange of Alüminyum Model at Different Chilling Environment

Farklı et kalınlıklarının, et örneklerinin sahip olduğu farklı ilk sıcaklık derecelerinin ve değişik dondurma ortam sıcaklıklarının, donma zamanı üzerine olan etkilerinin daha iyi görülebilmesi için Şekil 5, 6 ve 7 çizilmiştir. Şekillerden görüldüğü gibi, aynı kalınlıktaki etler için, farklı dondurma ortam derecelerinde, farklı donma zamanı eğrileri elde edilmiştir. Yapılan denemelerde -18°C 'lik dondurma ortamında dondurulan et dilimlerinin termal merkezinde en fazla -10°C 'ye ulaşılabilmektedir. Bu sıcaklık ortamında, et örneğinin termal merkezinde -10°C 'ye ulaşıldıktan sonra dondurma işlemine devam edilmiş, 6-7 saat gibi uzunca bir zaman işlem sürdürülmesine rağmen, etin termal merkez sıcaklığı en fazla 0.1 ile 0.2°C gibi çok önemsiz değerlerde bir değişim göstermiştir. Bu nedenle, -18°C 'de yapılan dondurma işlemine, etin termal merkezinde -10°C 'ye ulaşıncaya son verilmiştir. Daha önce vurgulandığı üzere, bir gıdanın donmuş gıda olarak kabul edilebilmesi için gıdanın termal merkezinde mikrobiyolojik aktivitenin tamamen durduğu ve biyokimyasal olayların asgari seviyede cereyan ettiği -12°C 'lik sıcaklık limitine ulaşılması gerekmektedir. Bu durum dikkate alınarak, hava sirkülasyonsuz ortamlarda, -18°C 'de dondurulan et örneklerinin teknolojik anlamda donmuş gıda haline gelmediği veya donmuş gıda haline getirilmesi için günlerce dondurucu ortamda bekletilmesinin mecburi bir gereklilik olduğu sonucuna varılmıştır.

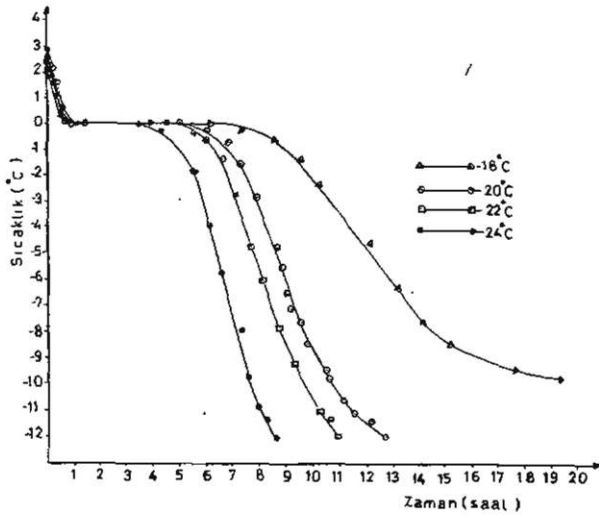


Şekil 5. 2 cm kalınlığındaki et diliminin, değişik donma sıcaklığına sahip ortamlarda dondurulması sırasında, zamana karşı elde edilen donma eğrileri

Figure 5. Freezing Curve of the Meat Sample of 2 cm Thickness, Frozen at the Different Freezing Environment



Şekil 6. 3 cm kalınlığındaki et diliminin, değişik donma sıcaklığına sahip ortamlarda dondurulması sırasında, zamana karşı elde edilen donma eğrileri
 Figure 6. Freezing Curve of the Meat Sample of 3 cm Thickness, Frozen at Different Freezing Environment



Şekil 7. 4 cm kalınlığındaki et diliminin, değişik donma sıcaklığına sahip ortamlarda dondurulması sırasında, zamana karşı elde edilen donma eğrileri
 Figure 7. Freezing Curve of the Meat Sample of 4 cm Thickness, Frozen at Different Freezing Environment

Tablo 1 ve Şekil 5, 6 ve 7'den görüldüğü üzere, dondurma ortamının sıcaklığı düştükçe, donma zamanlarında çok önemli bir azalma olmaktadır. Aynı kalınlıktaki etlerin dondurulması sırasında termal merkezde -10°C 'ye ulaşmak için gereken sürelerde, ortam sıcaklığının -18°C 'den -20°C 'ye düşmesiyle 3.5-4 saat gibi bir azalma görülürken, -20°C 'den -22°C 'ye düşmede yaklaşık 1.5 saat, -22°C 'den -24°C 'ye düşmede ise 1 saat kadar bir azalma görülmektedir. Aynı şekilde, -12°C 'lik termal merkez sıcaklığına ulaşmak için ise, ortam sıcaklığının -20°C 'den -22°C 'ye düşmesiyle donma zamanında 2 saat, -22°C 'den -24°C 'ye düşmesiyle de 1.5 saat kadar azalma olduğu saptanmıştır. Görüldüğü gibi dondurma ortam sıcaklığındaki her 2°C 'lik düşmeye karşılık, donma zamanlarında çok önemli bir düşüş olmakta ve düşüş oranı donma ortam dereceleri düştükçe nisbi olarak azalmaktadır.

Şekil 5, 6 ve 7 birbirleriyle mukayese edildiğinde et dilim kalınlığının donma zamanı üzerine etkisi açıkça görülebilmektedir. Aynı sıcaklık derecesinde dondurulan et örneklerinin kalınlığındaki 1 cm'lik artış dahi dondurulan etlerin donma zamanlarının 1.5 ile 3 saat arasında uzamasına neden olmaktadır. Bu sonuç Tablo 1'den de görülebilmektedir. Denenen et dilimlerinin kalınlığında ve dondurma ortam sıcaklığındaki düşük birim değişimlerin, donma zamanları bakımından doğurduğu büyük farklar pratikte uygulanan ve birbirlerinden farksızmış gibi görülen sıcaklık dereceleri ve parça büyüklüklerinin etlerin donma zamanlarına ne derece önemli etki yaptığını ortaya koyması açısından önem arz etmektedir.

Et dilimlerinin dondurucuya yerleştirilmeden önce sahip oldukları ilk sıcaklıklar, et sanayinde uygulanan dondurma işlemlerine benzetilmek amacıyla farklı farklı seçilmiştir. Dondurulan toplam 24 et dilimi örneğinin birbirleri arasındaki ilk sıcaklık farkları 1°C ile 3°C arasındadır. seçilen bu farklı ilk sıcaklıkların, aralarındaki sıcaklık farklarının az olması nedeniyle donma zamanını azaltıcı veya artırıcı etkisi belirlenememiştir. Bununla birlikte ilk sıcaklık değerlerinin, et diliminin dondurulmasında, ön soğutma zamanı olarak tanımlanan, faz değişiminin başladığı sıcaklık noktasına kadar olan zamanı azaltıcı veya artırıcı yönde etki ettiği tespit edilmiştir. Şekil 5, 6 ve 7 incelendiğinde, yüksek ilk sıcaklık değerlerine sahip et örneklerinin dondurulmasında ön soğutma zamanının uzadığı, düşük ilk sıcaklık değerlerine sahip et örneklerinde ise kısaldığı görülmektedir.

Matematiksel Eşitliklerle Hesaplanan Donma Zamanı Sonuçları

Matematiksel modeller ile bulunan sonuçların deneysel donma zamanları ile yapılan mukayesesi Tablo 2'de verilmiştir. Tablo 2 incelendiğinde, donma zamanı

Tablo 2. Deneysel ve Matematiksel Modellerle Bulunan Donma Zamanları ve Matematiksel Modellerle Bulunan Değerlerin Deneysel Değerlerden % Sapmaları

| Deney | t_{DZ} (Saat) | tcr_{P1} (Saat) | Sapma (%) | tcr_{Na} (Saat) | Sapma (%) | tcr_{CL} (Saat) | Sapma (%) | tcr_{Ma} (Saat) | Sapma (%) | tcr_H (Saat) | Sapma (%) |
|-------|--------------------|----------------------|--------------|----------------------|--------------|----------------------|--------------|----------------------|--------------|-------------------|--------------|
| 1 | 11.91* | 7.07 | 41.16 | 5.92 | 50.28 | 5.77 | 51.24 | 6.63 | 44.25 | 5.17 | 56.52 |
| 2 | 12.16* | 7.11 | 41.49 | 6.03 | 50.35 | 5.85 | 51.84 | 6.76 | 44.32 | 5.17 | 57.44 |
| 3 | 14.66* | 10.90 | 25.64 | 9.22 | 37.12 | 8.88 | 39.43 | 10.44 | 28.77 | 7.79 | 46.82 |
| 4 | 15.26* | 10.78 | 28.39 | 8.94 | 41.25 | 8.72 | 42.09 | 10.33 | 31.77 | 7.84 | 47.94 |
| 5 | 18.26* | 14.27 | 24.32 | 12.19 | 35.36 | 11.65 | 38.18 | 13.58 | 28.00 | 10.41 | 44.66 |
| 6 | 19.36* | 14.26 | 26.29 | 11.53 | 40.45 | 11.47 | 40.74 | 13.67 | 29.37 | 10.55 | 45.48 |
| 7 | 8.72 | 5.97 | 31.90 | 5.28 | 39.80 | 5.30 | 39.61 | 5.72 | 34.80 | 4.66 | 46.90 |
| 8 | 8.55 | 5.99 | 30.82 | 5.25 | 39.43 | 5.29 | 38.83 | 5.75 | 33.61 | 4.67 | 46.05 |
| 9 | 11.36 | 8.97 | 20.99 | 8.49 | 25.26 | 8.04 | 29.19 | 8.50 | 25.12 | 5.96 | 36.65 |
| 10 | 10.81 | 8.97 | 16.86 | 8.03 | 25.61 | 7.92 | 26.68 | 8.58 | 20.55 | 7.00 | 35.15 |
| 11 | 12.46 | 11.92 | 4.2 | 11.74 | 11.36 | 10.63 | 14.68 | 11.21 | 10.05 | 9.34 | 25.02 |
| 12 | 12.68 | 11.75 | 7.3 | 10.48 | 17.34 | 10.38 | 18.17 | 11.05 | 12.86 | 9.40 | 25.85 |
| 13 | 5.81 | 5.00 | 26.57 | 4.59 | 32.48 | 4.74 | 30.39 | 4.77 | 29.96 | 4.25 | 37.58 |
| 14 | 6.66 | 4.95 | 25.63 | 4.67 | 29.83 | 4.73 | 28.89 | 4.68 | 29.64 | 4.22 | 36.57 |
| 15 | 7.75 | 7.57 | 2.24 | 7.05 | 8.96 | 7.12 | 8.12 | 7.23 | 6.67 | 6.37 | 17.77 |
| 16 | 8.66 | 7.46 | 13.88 | 5.95 | 19.38 | 7.00 | 13.10 | 7.07 | 18.31 | 6.36 | 26.48 |
| 17 | 10.70 | 10.12 | 5.35 | 9.60 | 10.24 | 9.56 | 10.62 | 9.65 | 9.75 | 8.50 | 20.51 |
| 18 | 10.96 | 10.18 | 7.03 | 9.56 | 12.73 | 9.58 | 12.52 | 9.75 | 11.00 | 8.60 | 21.52 |
| 19 | 5.41 | 4.37 | 19.23 | 4.13 | 24.19 | 4.37 | 19.18 | 4.18 | 16.23 | 3.91 | 27.54 |
| 20 | 5.75 | 4.41 | 23.17 | 4.32 | 24.82 | 4.46 | 22.46 | 4.22 | 26.47 | 3.87 | 32.58 |
| 21 | 7.00 | 6.64 | 5.1 | 6.58 | 5.88 | 6.64 | 5.04 | 6.34 | 9.36 | 5.78 | 17.03 |
| 22 | 7.13 | 6.62 | 7.09 | 6.51 | 8.72 | 6.61 | 7.25 | 6.33 | 11.21 | 5.82 | 18.35 |
| 23 | 8.41 | 8.81 | -4.54 | 8.89 | -5.48 | 8.85 | -5.00 | 8.38 | 0.35 | 7.75 | 7.83 |
| 24 | 8.55 | 8.62 | -0.81 | 8.55 | 0 | 6.63 | -0.02 | 8.15 | 4.67 | 7.78 | 8.96 |

tahmininde; Plank (1963) eşitliği (Mascheroni ve Calvelo, 1982) denenen bütün et dilimi kalınlıklarında ve dondurma ortam sıcaklıklarında diğer araştırmacılar tarafından geliştirilen eşitliklere göre, deneysel yolla bulunan donma zamanlarına en iyi yaklaşımı vermiştir.

Yine Tablo 2 incelendiğinde, dondurma ortamının -22°C ve -24°C 'lik değerlerinde değişik eşitliklerle bulunan donma zamanları arasındaki farkların önemli ölçüde azaldığı ve hatta farkların tamamen ortadan kalktığı görülebilmektedir. Aynı tabloda, matematiksel modellerle bulunan değerlerin yine -22°C ve -24°C 'lerdeki deneysel sonuçlarla çok iyi bir uyum gösterdiği görülmektedir. Saptanan bu sonuçlar Mascheroni ve Calvelo (1982) tarafından tespit edilenlerle yakın benzerlik göstermektedir. Araştırmacılar geliştirdikleri eşitlik ile, kalınlığı 6 cm; ilk sıcaklığı 7°C olan et örneğinin, yüzey ısı transfer katsayısı $10 \text{ W/m}^2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ olacak şekilde, -25 , -30 , -35 ve -40°C 'lerde donma zamanlarını hesap etmişlerdir. -25°C 'lik dondurma ortamı için deneysel sonuçlarla, hesap ettikleri zamanlar arasında % 25'lere varan farklar buldukları halde, ortam sıcaklığının -25°C 'den -35 ve -40°C 'lere düşmesiyle buldukları zamanlar arasındaki farklar % 2-3'lere düşmüştür. Görülüyor ki hesap modelleri yüksek dondurma ortam sıcaklıklarında iyi tahmin sonuçları vermemekle birlikte, düşük sıcaklıklar için yapılan tahminler deneysel sonuçlarla ve birbirleriyle iyi bir uyum göstermektedir.

Tahmin sonuçlarının, et dilim kalınlığının artmasıyla da deneysel sonuçlarla ve birbirleriyle olan uyumları artmıştır. Örneğin; sıcaklık sabit kalmak kaydıyla 2 cm kalınlığındaki et örneği için tahmin metotları deneysel değerlerden % 25-35 seviyelerinde birbirleriyle de % 10'lar seviyesinde farklılıklar gösterirken, dilim kalınlığının 4 cm olmasıyla bu farklar \pm % 0.5 ile \pm % 8 arasında çok küçük değerlere düşmüştür.

Bütün dondurma sıcaklık derecelerinde Cleland ve Earle (1977) ve Nagoaka ve ark. (1955) eşitlikleri (Mascheroni ve Calvelo, 1982) birbirleri ile yakın sonuçlar veririrken, Plank (1963) (Mascheroni ve Calvelo; 1982) ve Mascheroni ve Calvelo (1982) eşitliklerinin sonuçları özellikle -20°C 'de birbirleriyle yakın bulunmuştur. Bununla birlikte, bütün sıcaklık derecelerinde Hung ve Thompson (1983) eşitliği ile hesaplanan donma zamanları, deneysel olarak belirlenen donma zamanlarından ve diğer araştırmacıların eşitlikleri ile hesaplanan donma zamanlarından önemli oranda (% 9-45) sapma göstermiştir.

SONUÇ VE ÖNERİLER

Yapılan dondurma çalışmalarının sonucunda, -18°C 'de dondurulan et örneklerinin termal merkezinde en fazla -10°C 'ye ulaşılabilmiştir. Özellikle, pratikte çok daba büyük et parçalarının dondurulduğu dikkate alındığında ve bir gıdanın teknolojik anlamda donmuş olarak kabul edilebilmesi için termal merkez sıcaklığının -12°C 'ye ulaşmış olmasının gerekliliği dikkate alındığında, -18°C 'lik sıcaklığın etlerin dondurulmasında kullanılmasının mümkün olamayacağı sonucu çıkarılabilir.

Et örneklerinin dondurulmasında uygulanan sıcaklık derecelerinin donma zamanları üzerine önemli etki yaptığı belirlenmiştir. Dondurma sıcaklığındaki 2°C 'lik düşüşe karşılık, donma zamanlarında belirgin bir düşme (1-3.5 saat arası) tespit edilmiş fakat -18°C 'den -24°C 'ye gidildikçe bu düşüşün oranında azalma görülmüştür.

Yüksek dondurma dereceleri için matematiksel eşitliklerle hesaplanan donma zamanları, deneysel olarak tespit edilen zamanlardan büyük sapmalar (% 35-40) gösterdiği halde, düşük dondurma derecelerinde bu sapmaların ortalama % 13'lere düştüğü tespit edilmiştir. Yine, matematiksel metotlarla hesaplanan sonuçlar; düşük sıcaklık dereceleri için yapılan hesaplamalarda, yüksek dereceler için yapılan hesaplamalara göre birbirleriyle daha iyi uyum göstermiştir.

Denemede kullanılan et diliminin kalınlığı arttıkça tahmin metotlarının birbirleri ile olan uyumları ve deneysel değerlere yakınlıklarının arttığı da tespit edilmiştir. Denemenin bütün et dilim kalınlıkları ve dondurma ortam sıcaklıkları için tespit edilen deneysel donma zamanlarına, tahmin metotları ile bulunan zamanlar içerisinde en iyi yaklaşımı Plank (1963) eşitliği (Mascheroni ve Calvelo, 1982) vermiştir.

İleride, bu konuda yapılacak araştırmalarda, et teknolojisi açısından gelişmiş pek çok ülkede, etlerin teknolojik kurallara uygun olarak dondurulmasında uygulanan ve bu araştırma sonuçlarının da gösterdiği üzere yurdumuzda da kullanılması gereken -30 , -35 , -40 , -45°C 'ler gibi daha düşük sıcaklık derecelerinde etlerin donma zamanlarının araştırılmasına ihtiyaç vardır. Ayrıca, ileride yapılacak araştırmalarda kullanılacak et örneklerinin, pratikte pazarlanan et parçaları kalınlıklarında ve daha değişik geometrik şekillerde seçilmesi, hem deneysel olarak ve hem de matematiksel formüllerle yapılacak donma zamanları hesaplamalarında daha gerçekçi sonuçlar verebilecektir. Bu hususlarında araştırılmasına ihtiyaç vardır.

KISALTMALAR VE SİMGELER

| Simge | Açıklama |
|-------------------|--|
| A | : Dondurulan et örneğinin yüzey alanı (m^2) |
| Cp | : Görünür spesifik ısı ($J/kg \text{ } ^\circ C$) |
| h | : Yüzey ısı transfer katsayısı ($W/m^2 \text{ } ^\circ C$) |
| L | : Et diliminin yarı kalınlığı (m) |
| m | : Eğim |
| Ma | : Toplam suyun kütle fraksiyonu (%) |
| T | : Sıcaklık ($^\circ C$) |
| Te | : Etin donma noktası sıcaklığı ($^\circ C$) |
| Tf | : Dondurma işleminin yapıldığı ortam sıcaklığı ($^\circ C$) |
| Ti | : Dondurulan gıdanın sahip olduğu ilk sıcaklık ($^\circ C$) |
| Tr | : Et örneğinin termal merkezinde ulaşılan son sıcaklık |
| t | : Donma zamanı (saat) |
| t _{DZ} | : Termal merkezde $-12 \text{ } ^\circ C$ 'ye ulaşmak için deneysel olarak bulunan donma zamanı (Saat) |
| t _{cr} | : Termal merkezde $-12 \text{ } ^\circ C$ 'ye ulaşmak için hesap yolu ile bulunan donma zamanı (saat) |
| t _{crCl} | : Cleland ve Earle (1977) modelinde hesap edilen donma zamanı (saat) |
| t _{crH} | : Hung ve Thompson (1983) modelinden hesap edilen donma zamanı (saat) |
| t _{crMa} | : Mascheroni ve Cavelo (1982) modelinden hesap edilen donma zamanı (saat) |
| t _{crNa} | : Nagoaka et al. (1955) modelinden hesap edilen donma zamanı (saat) |
| t _{crPL} | : Plank (1963) modelinden hesap edilen donma zamanı (saat) |
| V | : Dondurulan et örneğinin hacmi (m^3) |
| Wm | : Buz muhtevasının kütle fraksiyonu (%) |
| ρ | : Yoğunluk (kg/m^3) |

KAYNAKLAR

- Anonymous, 1976. *Handbook of Chemistry and Physics*, CRC Press, 57th Edition, Cleveland, Ohio, USA.
- Anonymous, 1986. Refrigeration Systems and Application, *ASHRAE Handbook I-P Edition*, Atlanta, USA.
- Bakal, A., Hayakawa, K.I., 1973. Heat Transfer During Freezing and Thawing Foods, *Adv. Food Res.*, 20, 217.
- Cemeroğlu, B., 1986. *Meyve Sebze İşleme Teknolojisi*. Gıda Teknolojisi Derneği Yayını, Yayın No: 6, Ankara, 508.
- Cleland, A.C., Earle, R.L., 1977. A Comparison of Analytical and Numerical Methods of Predicting Freezing Times of Foods, *J. Food Sci.*, 42, 1390.
- Cleland, A.C., Earle, R.L., 1979. Predicting of Freezing Times for Foods in Rectangular Packages, *J. Food Sci.*, 44, 964.
- Cleland, A.C., Earle, R.L., 1982. Freezing Time Prediction for Foods-A Simplified Procedure, *Int.J.Refriger.*, 5, 134.
- De Michelis, A., Calvelo, A., 1982. Freezing Time Prediction for Brick and Cylindrical-Shaped Foods, *J.Food Sci.*, 48, 909.
- Gökalp, H.Y., 1986. Turkish Style (Soudjouk) Manufactured by Adding Different Starter Cultures and Using Different Ripening Temperatures, I. Ripening Period, Some Chemical Analysis, pH Values, Weight Loss, Color Values and Organoleptic Evaluations, *Fleischwirtsch.*, 66, 573.
- Gökalp, H.Y., 1988. *Et ve Su Ürünleri İşleme Teknolojisi Ders Rotosu*, Atatürk Üniv. Ziraat Fak., Gıda Bilimi ve Teknolojisi Bölümü, Erzurum.
- Heldman, D.R., 1983. Factors Influencing Food Freezing Rates, *Food Technol.*, 37, 103.
- Hung, Y.C., Thompson, D.R., 1983. Freezing Time Prediction for Slab Shape Foodstuff by an Improved Analytical Method, *J.Food Sci.*, 48, 555.
- Kakaç, S., 1982. *Isı Transferine Giriş I. Isı İletimi*, O.D.T.Ü. Mühendislik Fak. Yayını, No:52, Ankara, 315.
- Loeffen, M.P.F., Earle, R.L., Cleland, A.C., 1981. Two Simple Methods for Conditions, Predicting Food Freezing Times With Time Variable Boundary. *J. Food Sci.*, 46, 1032.

- Mascheroni, R.H., Calvelo, A., 1982. A Simplified Model for Freezing Time Calculations in Foods, *J. Food Sci.*, 47, 1201.
- Müftügil, N., Yurdagel, Ü., 1985. Farklı Dondurma Koşullarında Sebzelerin Donma Süre ve Hızları, *Gıda*, 10, 311.
- Ockerman, H.W., 1976. *Quality of Post Mortem Muscle Tissue*, Vol. 1, The Ohio State Üniv., Columbus, OH., USA.
- Pham, Q.T., 1984. An Extension to Plank's Equation for Predicting Freezing Times of Foodstuffs of Simple Shapes, *Int. J. Refrig.*, 7, 377.
- Schneider, K.C., Sweat, V.E., Arcre, J.A., 1982. Factors Affecting Beef Carcass Chilling Rates, *Trans. ASAE*, 25, 498.
- Succar, J., Hayakawa, K.I., 1984. Parametric Analysis for Predicting Freezing Time of Infinite Slab-Shaped Food, *J. Food Sci.*, 49, 468.
- Wirth, F., 1979. Chilling, Freezing, Storage and Thawing of Meat : Present State of Our Knowledge, *Fleischwirtsch.*, 59, 1659.