



GIDALARIN DONMA VE ÇÖZÜLME ZAMANLARININ BELİRLENMESİNDE KULLANILAN TAHMİN METOTLARI I. BASİT EŞİTLİKLER

Yahya TÜLEK, Hüsnü Yusuf GÖKALP, Sami Gökhan ÖZKAL

Pamukkale Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Gıda Mühendisliği Bölümü, Çamlık/DENİZLİ

ÖZET

Gıda maddelerinin muhafazası için uygulanan en etkin metotlardan birisi, dondurarak muhafaza etmektir. Dondurma, dondurulmuş ürünün depolanması ve çözülmesi işlemlerinin uygun bir şekilde yapılması durumunda, gıda maddesi orijinal haldeki özelliklerinin hemen hemen tamamını uzun bir süre koruyabilmektedir. Donma ve çözülme zamanlarının bilinmesi, hem dondurulmuş ürünün kalitesi hem de proses verimliliği ve ekonomisi açısından çok önemlidir. Donma ve çözülme zamanlarının hesaplama yöntemi ile belirlenmesi için kullanılacak olan bir metotta; basit çözüm, yüksek doğruluk oranı, az miktarda proses ve fiziksel özellik verilerine ihtiyaç duyması gibi nitelikler aranmaktadır. Ancak, bu özelliklerin tamamının aynı anda tek bir tahmin metodunda bulunması çok zordur. Bu nedenle, çok farklı donma ve çözülme zamanı tahmin metotları geliştirilmiş ve araştırmalar yapılmaktadır.

Anahtar Kelimeler : Donma zamanı, Çözülme zamanı

FREEZING AND THAWING TIME PREDICTION METHODS OF FOODS SIMPLE EQUATIONS

ABSTRACT

Freezing is one of the excellent methods for the preservation of foods. If freezing and thawing processes and frozen storage method are carried out correctly, the original characteristics of the foods can remain almost unchanged over an extended periods of time. It is very important to determine the freezing and thawing time period of the foods, as they strongly influence the both quality of food material and process productivity and the economy. For developing a simple and effectively usable mathematical model, less amount of process parameters and physical properties should be enrolled in calculations. But it is a difficult to have all of these in one prediction method. For this reason, various freezing and thawing time prediction methods were proposed in literature and research studies have been going on.

Key Words : Freezing time, Thawing time

1. GİRİŞ

Gıda maddelerinin üretiminden tüketimine kadar geçen süreç içerisinde, değişik safhalarda, belirli süreler muhafaza edilmesi zorunludur. Gıda muhafaza işlemi; gerek üretimi bol olan veya gerekse üretimi sınırlı olan gıda maddelerinin

tüketiciye, miktar ve kalitede oluşacak en az kayıplarla ulaştırılmasına imkan vermektedir.

Dünyada, bugünün teknolojisinde, gıdaların muhafazasında kullanılan temel yöntemler; yüksek ve düşük sıcaklık uygulaması, kurutma, çeşitli mekanik işlem uygulamaları, değişik kimyasal

maddeler ilavesi, fermantasyon ve irradiasyon uygulanarak muhafaza edilmesi şeklinde sıralanabilir. Sıralanan bu yöntemlerden, her birinin etkin ve yaygın olarak kullanılabilirdiği gıda sanayii sektörleri var olmakla birlikte, “düşük sıcaklık uygulaması” olarak adlandırılan muhafaza yöntemi içine giren “soğutarak ve dondurarak muhafaza” günümüzde, gıda sanayiinin hemen hemen bütün dallarında, hatta pazarlama safhasında, evlerde ve diğer tüketim yerlerinde, gıdanın tüketimi öncesinde en yaygın ve en pratik olarak kullanılan gıda muhafaza yöntemidir. Özellikle son 50 yıl içerisinde, bu yöntemin önemi ve uygulanma alanı önemli artış göstermiştir.

Gıdaların dondurulması ve çözülmesi uluslararası gıda iletim zincirinin önemli bir parçasını oluşturmaktadır. Dondurma ve çözme işlemlerinin maliyet açısından etkin bir şekilde gerçekleştirilebilmesi için, kullanılan cihazların optimum tasarımı gerekmektedir. Bu tasarım işlemlerinin önemli bir kısmını gıda maddelerinin donma ve çözülme zamanlarının tahmini oluşturmaktadır.

Gıdaların soğukta ve dondurarak muhafazasında dikkate alınması gereken pek çok teknolojik husus mevcuttur. Bunların en önemlilerinden birisi, enerji girdisidir. Enerji girdisi açısından, soğukta ve dondurarak muhafaza yönteminin maliyeti, diğer muhafaza yöntemlerinin çoğunun maliyetine kıyasla daha düşüktür. Diğer taraftan, pek çok gıdanın, işletmede diğer yöntemlerle muhafazasını takiben, bunların tüketiciye ulaştırılması için, nakil ve pazarlama aşamasında da soğuk zincirin uygulanması gerekmektedir.

Donma ve çözülme prosesi kompleks bir olaydır. Donma işlemi tek bir faz değişim sıcaklığında gerçekleşmemekte, işlem bir sıcaklık aralığında olmaktadır. Gıda maddesi içerisinde bulunan su uygulanan dondurma sıcaklıklarında tamamen donmamakta, ancak termal merkez sıcaklığı -18°C 'e düşürülen gıdaların çoğunluğunun içerisinde bulunan toplam suyun büyük bir kısmı donabilmektedir. Hedeflenen termal merkez sıcaklıkları -18 ile -20°C arasında değişik sıcaklıklar olabilmektedir. Termal merkezde ulaşılan sıcaklık, ürünün raf ömrünü etkileyen biyokimyasal ve oksidatif bozulmalar ile fire değerlerinin minimuma indirilmesi açısından önem taşımaktadır (Hossain et al., 1992a).

Dondurma işleminde hangi yöntem uygulanır ise uygulansın, gıda maddesinin termal merkezinde ulaşılmaması istenilen donma derecesine varmak için gerekli zamanın bilinmesi, teknolojik ve ekonomik

açıdan büyük önem arz etmektedir. Bu sürenin bilinmesi; enerji sarfiyatının minimuma indirilmesi, soğuk depo kapasitesinin etkin şekilde kullanımı, ürün kalitesi, ekonomik değerlendirmeler ve işletmecilik açısından önem arz etmektedir. İşlenecek veya tüketiciye ulaştırılacak donmuş ürünün çözülme zamanının belirlenmesi ise; ürün kalitesinin korunması, çözme ekipman ve yerinin optimum kullanımı, kontrol ve işletmecilik açılarından önemlidir. Ayrıca, donma veya çözülme zamanlarının belirlenmesi sayesinde, dondurma ve çözme amacı ile kullanılan depo ve ekipmanların planlanması ve projelendirilmesi, optimizasyonun sağlanması projelendirme aşamasında da önem arz etmektedir.

Yiğit ve ark., (1982) ve Gökçalp ve Tülek'in (1992) belirttiklerine göre, gıda sanayiinde dondurarak muhafaza yöntemi; gıdanın taze haldeki niteliklerini en iyi şekilde koruyan ve soğukta muhafaza tekniği ile beraber kullanıldığında, zamanın, depo kapasitesinin ve enerjinin en efektif kullanımı nedeni ile maliyeti en düşük yöntem olarak bilinmektedir. Örneğin, et sanayiinde; büyükbaş ve küçükbaş hayvan karkaslarının, standart toptancı ve perakendeci parçaların, sakatların ve değişik et ürünlerinin muhafazasında şok dondurma ve takiben de donmuş muhafaza tekniği dünyada olduğu gibi, Türkiye'de de en yaygın kullanılan yöntemdir. Gerçekte, Türkiye'de et ve et ürünlerinin dondurma işlemi, işletmeden işletmeye farklılık göstermekle beraber, genelde -18°C ile -40°C 'ler arasında çalışan dondurma tünellerinde, donmuş ürünlerin muhafazası ise -18°C civarındaki soğuk depolarda gerçekleştirilmektedir (Gökçalp ve ark., 1994; Gökçalp ve Tülek, 1992).

İşlenecek veya tüketiciye ulaştırılacak donmuş ürünün çözülme işleminin tamamlanması için ise ürün termal merkez sıcaklığının 0°C 'ye çıkarılması gerekmektedir. Ancak bu sıcaklıkta ürün içerisindeki suyun tamamı çözülebilmektedir (Hossain et al., 1992 a). Donmuş ürünlerin çözülmesi 23°C veya daha yüksek sıcaklığa sahip hava sirkülasyonlu ortamlarda yapılabileceği gibi (Succar, 1977; Nonino ve Hayakawa, 1986), 35°C ile 45°C 'ler arasındaki su içinde de gerçekleştirilebilmektedir (Cleland et al., 1986). Bununla birlikte, teknolojiye, çözülmüş ürünün çeşitli kalitatif özelliklerinin korunması açısından, çözme işleminin 10°C veya daha düşük 4 ile -7°C 'lerdeki soğuk depolarda yapılması gerektiği de belirtilmektedir (Anon., 1972; Gökçalp ark., 1994).

“Donma zamanı” terimi literatürde değişik şekillerde tanımlanmaktadır. Uluslararası Soğutma Enstitüsü (IIR) tarafından iki değişik tanımlanmıştır

(Anon., 1972). Bunlar; “nominal donma zamanı” ve “efektif donma zamanı” dır. Ancak, donma zamanlarının belirlenmesine yönelik çalışmaların hemen tümünde efektif donma zamanı üzerinde durulmaktadır (Hung ve Thompson, 1983). Bu zaman, gıdanın donma noktası üzerinde sahip olduğu ilk sıcaklıktan, termal merkezinde istenilen donma sıcaklığına ulaşmak için ihtiyaç duyulan süredir. Çözülme zamanı da, gıda maddesinin termal merkezinde başlangıçta sahip olduğu donma noktası altındaki herhangi bir sıcaklık derecesinden, 0 °C'ye ulaşmak için gerekli zaman olarak tanımlanmaktadır (Cleland, 1985).

Gıda maddesinin donma ve çözülme zamanları; donma ve çözülme hızına bağlıdır. Donma ve çözülme hızı da, maddenin; boyut, şekil, fizikokimyasal özellikleri, ambalajlama materyalinin boyut, şekil ve termal özellikleri, gıda maddesi ile dondurma ve çözme ortamı arasındaki sıcaklık farkı ve ısı enerjisinin transfer şekli (kondüksiyon, konveksiyon veya radyasyon) gibi faktörlerden etkilenmektedir (Müftügil ve Yurdagel, 1985; Tülek, 1989).

Gıda maddesinin dondurulması veya çözülmesi sürecinde sıcaklığın değişimi üç bölgede incelenmiştir (Lacroix ve Castaigne, 1987; Succar, 1989). Çözme işleminin tersi olmak üzere, donma işleminde oluşan bu üç faz sırası ile aşağıdaki gibidir.

1. 1. Ön Soğutma (Precooling) Periyodu

Gıda maddesinin başlangıçta sahip olduğu ilk sıcaklık derecesinden, donma noktası anına kadar soğutulduğu ve faz değişiminin oluşmadığı devredir. Bu devrede uzaklaştırılan ısı, gıdanın sıcaklığında düşüş şeklinde kendisini gösterdiğinden, “hissedilir ısı” olarak adlandırılmaktadır.

1. 2. Donma (Freezing) Periyodu

Gıdanın içerdiği serbest suyun buz haline dönüştüğü devredir. Bu devrede uzaklaştırılan ısı gıdada sıcaklık düşüşüne neden olmadığı için “latent ısı (gizli ısı)” olarak adlandırılmaktadır.

1. 3. Tempering (Post Cooling) Periyodu

Gıda içerisindeki suyun çoğunluğu donduktan sonra sıcaklığın düşürülmeye devam edildiği devredir. Bu devre başladığı zaman, gıdadan uzaklaştırılan latent ısının miktarı, hissedilir ısının yanında ihmal edilebilecek kadar azalmıştır. Hissedilebilir ısının uzaklaştırılması, gıdanın termal merkezinde istenilen

sıcaklığa ulaşıncaya kadar sürekli bir şekilde devam eder.

Et, et ürünleri ve değişik gıda maddesinin donma ve çözülme zamanlarının belirlenmesine yönelik en gerçekçi sonucu deneysel araştırmaların verdiği bildirilmiştir (Bakal ve Hayakawa, 1973; Cleland ve Earle, 1977). Bununla birlikte, her çeşit ve her türdeki gıda maddesinin veya değişik büyüklük ve geometrik şekillerdeki çok değişik bileşenleri ihtiva eden birçok gıda maddesinin her birinin donma ve çözülme zamanlarının deneysel olarak belirlenebilmesi, en başta zaman açısından imkansız gibidir. Bu nedenle, deneysel sonuçlara en iyi yaklaşımı verecek bir çok matematiksel tahmin yöntemi geliştirilerek, donma ve çözülme zamanlarının bu yöntemler ile tahmin edilebilmesine yönelik araştırmalara dünyada hız verilmektedir.

Donma ve çözülme zamanlarının belirlenmesinde matematiksel modellerin kullanımı, gıda maddesi içindeki değişimlerin ve buna bağlı olarak gıdanın özelliklerindeki değişimlerin etkisi nedeni ile oldukça karmaşıktır. Gıda maddesi izotropik olmayan bir maddedir. Bu nedenle, gıdanın donması, saf maddedeki bir fazlı değişimden oldukça farklılık arz eder. Kompleks sulu çözeltilerin suyunun buz oluşumuna benzer bir seyir takip eder (Calvelo, 1981; Heldman, 1982). Gıdanın ilk donma noktasının hemen altındaki, ilk donma noktasına yakın sıcaklıklarda su kristalize olmaya başlar. Bu durum, çözeltili haldeki gıda suyu içerisinde çözünmüş bileşenlerin konsantrasyonunun artmasına ve donma noktasında düşüşe neden olmaktadır. Bu nedenle latent ısının uzaklaştırıldığı son nokta kesin olarak belirlenmemektedir (Calvelo, 1981). Gıda maddesinin donma ve çözülme zamanlarının tahmininde kullanılacak termodinamik özellik değerlerinin seçimi, bu özelliklerin sıcaklığa bağlı olarak devamlı suretle değişimi nedeni ile çok güçtür. Tahmin yöntemleri ile yapılacak donma ve çözülme zamanlarının belirlenmesindeki doğruluk, önemli oranda, gıdaya ait termodinamik özellik değerlerinin doğru bir şekilde tayin edilip, kullanımlarına bağlıdır.

Hung (1990), donma ve çözülme zamanı tahmin yöntemlerini “basit eşitlikler ve sayısal yöntemler” olarak iki grupta sınıflandırmıştır. Aynı araştırmacı, basit eşitlikler yöntemini; analitik yöntemler ve boyutsuz değişkenler yöntemi olarak iki gruba ayırmıştır. Analitik yöntemler, bazı kısıtlayıcı kabullenmeler ile teorik temellerden türetilmiştir. Bu yöntemler, anlaşılabilirlikteki kolaylık, basitlik, yaygın olarak bulunabilme ve temel veri ihtiyaçlarındaki azlık gibi avantajlara sahiptir (Cleland, 1986). Sayısal yöntemler ise, sonlu farklar yöntemi, sonlu elemanlar yöntemi ve grafiksel

yöntemler olarak üç grupta ele alınmıştır (Heldman ve Singh, 1980; Kakaç, 1982; Özışık, 1987; Hung, 1990). Sonlu farklar yöntemi ile yapılan çözümler; açık sonlu farklar planı ve tam ve kesin sonlu farklar planı olarak iki gruba ayrılmaktadır (Holman, 1985; Özışık, 1987; Succar 1989).

Sayısal yöntemler, kompleks ısı transfer problemlerinin birer matematiksel ifadesidir. Bunların çözümü bilgisayarlar ile doğru ve kolay bir şekilde mümkün olabilmektedir. Sayısal yöntemler, donma ve çözülme zamanı tahmininde analitik yöntemlerden daha doğru sonuçlar verebilmekte ve işlemin tamamına ait, sıcaklık - zaman ilişkisini ortaya koyabilmektedir. Bununla birlikte, sayısal yöntemler, analitik yöntemlerden çok daha karmaşıktır, çözümlenmeleri daha zordur ve daha fazla proses bilgisine gereksinim duymaktadır (Bonacina ve Comini, 1973; Ramaswamy ve Tung, 1983; Hung, 1990).

Yukarıda verilen sınıflandırmalar dikkate alınarak, donma ve çözülme zamanının tahmini için kullanılabilen değişik yöntemler ve bu yöntemler ile yapılan araştırmalar aşağıda ayrı ayrı özetlenmiştir.

1. 2. Basit Eşitlikler Yöntemi

Basit eşitlikler yöntemi, analitik yöntemler ve boyutsuz değişkenler yöntemi olarak iki grupta ele alınmıştır.

1. 2. 1. Analitik Yöntemler

Donma ve çözülme zamanlarının tahminine yönelik analitik ifadelerden ilki ve en basit olanı Plank (1913) tarafından türetilmiş olan eşitliktir (1) (Hung, 1990).

$$t_f = \frac{\rho L}{(T_f - T_a)} \left(P \frac{a}{h} + r \frac{a^2}{k} \right) \quad (1)$$

Burada; t_f , donma zamanını; L, Suyun donma gizli ısısını; ρ , gıda maddesi yoğunluğunu; T_f , ilk donma sıcaklığını; T_a , dondurucu ortam sıcaklığını; a, karakteristik boyutu; h, yüzey ısı transfer katsayısını; k, ısıl iletkenliği temsil etmektedirler. P ve R değerleri de geometrik faktörler olup sırasıyla, sonlu levha için 1/2 ve 1/8, sonlu silindir için 1/4 ve 1/16 ve küre için 1/6 ve 1/24'ü ifade etmektedirler.

Plank'ın 1941'de yayınlamış olduğu bu eşitlikte tahmin hatasını artıran çok fazla kabullenmeler

bulunmaktadır (De Michelis ve Calvelo, 1983; Hung, 1990). Bu kabullenmeler:

- Donma noktası sıcaklığının işlem süresince sabit kaldığı,
- Gıda içindeki suyun tamamının ilk donma noktasında buz haline dönüştüğü, dolayısıyla latent ısının tamamının bu sıcaklıkta uzaklaştırıldığı,
- Gıdanın termofiziksel özelliklerinin sadece faz değişimi ile değiştiği, sıcaklık ile değişmediği,
- Gıda maddesinin donmuş tabakasında ısı transferinin kararlı rejimde gerçekleşmesi için donma işleminin yeterince yavaş olduğu,
- Donma işlemi boyunca yoğunluğun değişmediği,
- Dondurucu ortam koşullarının sabit kaldığı,
- Bütün köşe etkilerinin ihmal edilebilir olduğu,
- Gıdanın yüzey ısı transfer katsayısı bilindiği takdirde dondurucu tipinin önemli olmadığı varsayımlarıdır.

Değişik araştırmacılar tarafından Plank eşitliklerindeki eksiklikleri gidermek için bu eşitlikleri temel alan değişik modifikasyonlar yapılmıştır. Tanaka ve Nishimoto (1964) ve Covell (1967) tarafından yapılan ilk modifikasyonlar, diğer araştırmacılara yol gösterici nitelikte olmuştur. Cleland ve Earle (1976, 1977, 1979 a, 1979 b) ve Hung ve Thompson (1983) Plank eşitliğindeki P ve R geometrik faktörlerin hesabı için boyutsuz değişkenleri kullanmıştır. Farklı şekillerdeki gıda maddesinin donma zamanının hesaplanması için temel şekillerin birinin yerine uygulanması amacıyla bir global faktörün belirlenip, eşitliğe dahil edilmesi (Cleland ve Earle, 1982) veya Plank eşitliğinde karakteristik boyut yerine "ortalama iletim yolunun" kullanılması gerektiğini (Cleland, 1985; Pham, 1985) tavsiye eden yaklaşımlar da mevcuttur. Farklı kenarlarında değişik yüzey ısı transfer katsayıları oluşan ürünlerde değişken ısı transferini hesaplayabilmek için Teider (1963) eşit kalınlıklar (equivalent thickness) kavramını geliştirerek kullanmıştır.

Cleland ve Earle (1977), gıda maddesinden uzaklaştırılan latent ısıyı belirlemede, ilk donma noktası ile -10 °C arasındaki entalpi farkını kullanmışlardır. Matsuda (1971), Mellor (1976) ve Lacroix ve Castaigne (1987 ve 1988) gibi araştırmacılar, Plank eşitliğindeki latent ısının yerine kullanmak üzere, uzaklaştırılan toplam ısının hesaplanmasını sağlayacak formüller ortaya koymuşlardır. Pham (1985 ve 1986) toplam entalpi değişim hesabında, gıda maddesinin dondurulması ve çözülmesi devrelerinde var olan ön soğutma, donma ve donmanın gelişimi devrelerindeki entalpi değişimlerinin hesaplanmasını tavsiye etmiştir.

Cheong ve Kong (1988), sirkülasyonlu veya daldırmalı tip dondurucularda, donma zamanlarının belirlenmesi için modifiye Plank eşitliğini kullanmışlardır.

Diğer temel donma zamanı tahmin yöntemlerinden birisi Carslaw ve Jaeger (1959) tarafından ortaya konulmuş olup, bu yöntem, Neuman (1960) tarafından önerilmiştir (Ramaswamy ve Tung, 1983). Yöntem, donma işleminin tek boyutlu, kararsız hal ısı transfer şartlarında yürüdüğünü kabul etmektedir. Bununla birlikte, yöntemdeki asıl sınırlamalardan birisi, yüzey ısı transfer katsayısının sonsuz olarak kabul edilmiş olmasıdır (Ramaswamy ve Tung, 1983). Charm (1971) bu sınırlamayı gidermek için, ürün kalınlıkları ile beraberce artan, yüzey ısı transfer direncini ortaya koymuştur. Schwartzberg (1976 ve 1977), Fourier serisi çözümlerinin ilk terimini temel alan bir donma zamanı tahmin eşitliği sunmuştur. Araştırmacı, bu eşitlikte, kararsız hal enerji dengesi eşitliği yerine, efektif ısı kapasitesini kullanmıştır.

Donma ve çözülme zamanı tahmini için diğer analitik yaklaşımlar Bakal ve Hayakawa (1973) tarafından önerilmiştir. Bu yaklaşımlar, sonsuz bir dilim için, geniş bir sıcaklık aralığında faz değişiminin oluştuğu dikkate alınarak, kondüksiyon ısı transferi üzerine temellendirilmiştir. Araştırmacılar, donma işlemlerini ön soğutma, ilk faz değişimi, ana faz değişimi, ikinci faz değişimi ve temperleme periyotlarına bölmüşlerdir. Ilıcalı ve Sağlam (1987) ve Ilıcalı (1989), donma ve çözülme esnasında alınan veya verilen latent ısıyı “efektif difüzyon” teriminin içerisine dahil ederek, basitleştirilmiş bir model önermişlerdir.

Analitik yöntemlerin hemen tümü, düzenli geometrik şekilli gıda maddelerinin donma ve çözülme zamanlarının tespiti için türetilmiştir. Bununla birlikte, düzenli ve düzensiz çok boyutlu geometrik şekilli gıda maddelerinin donma ve çözülme zamanlarının tahmininde kullanılabilen değişik yaklaşım türü literatürde tanımlanmıştır. Bu yaklaşımların birisinde, temel geometrik şekillerden birisinin (sonsuz dilim, sonsuz silindir, küre vb.) donma ve çözülme zamanlarının belirlenmesinde kullanılmak üzere bir global çarpım faktörü “(EHTD = equivalent heat transfer dimensionality = eşdeğer ısı transfer boyutu)” bulunmaktadır (Cleland ve Earle, 1982; Cleland, 1985; Cleland et al., 1987a, 1987b). İkinci yaklaşımda ise, düzensiz geometrileri ve iç direnç etkisini açıklamada “ortalama iletim yolu (mean conducting path)” terimi kullanılmıştır (Cleland, 1985; Pham, 1985, Pham, 1986; Cleland et al., 1987a, 1987b). Bu iki yaklaşımın olumsuz bir tarafı geometrik faktörlerin

ampirik olarak elde edilmeleridir (Hossain et al., 1992a). Diğer bir yaklaşımda ise düzensiz geometrideki gıda maddelerinin donma sürelerinin belirlenmesinde kullanılmak üzere eşdeğer çap eşitliği ortaya konulmuştur (Ilıcalı ve Hocalar, 1989).

Pham (1991), elips ve elipsoitler için yeni bir şekil faktörü tanımlamıştır. Ancak, bu eşitlik, sabit faz değişim sıcaklığı, ısı iletkenlik katsayılarının sabit alınması ve hissedilir ısının ihmal edilmesi gibi gerçekçi olmayan varsayımlar yapılarak elde edilmiştir. Ilıcalı et al., (1996), eşdeğer çap kavramını iki boyutlu elipsler için modifiye ederek kullanmışlardır.

Chung and Merritt (1991), donma zamanını, ön soğutma, faz değişimi, ve temperleme zamanları şeklinde üçe ayırarak Plank (1941) eşitliğinde modifikasyonlar yapmış ve küçük sonlu silindirik şekilli gıdaların donma zamanı hesaplaması için bir model ortaya koymuşlardır. Başlangıç sıcaklığı ve dondurucu ortam sıcaklıkları ile ısı transfer katsayılarının etkilerini azaltmak amacıyla Plank eşitliğindeki P terimi içerisine bir doğrulama faktörü ilave edilmiştir.

Salvadori and Mascheroni (1991), yüksek su içerikli gıdaların donma ve çözülme zamanlarının belirlenmesi için analitik bir metot önermişlerdir. Metot, düzgün şekilli gıdalar için geliştirilmiş olup, ürün ısı merkezinin sıcaklığını boyutsuz bir değişkene dayandıran bir eşitliği temel almaktadır.

Hossain et al., (1992a), düzenli çok boyutlu gıdaların donma ve çözülme zamanlarının belirlenmesi için kullanılan geometrik faktörlerin ampirik olarak elde edilmesinin güçlüklerine neden olduğunu belirterek, bu faktörlerin analitik olarak belirlenmesi için çalışmalar yürütmüşlerdir. Analitik olarak geometrik faktör ifadesi türeten araştırmacılar, bu formülün ampirik formülden daha doğru sonuç verdiğini ifade etmişlerdir. Ayrıca, iki ve üç boyutlu düzensiz şekilli gıdaların donma ve çözülme zamanlarının belirlenmesinde kullanılmak üzere yarı analitik geometrik faktörler de türetilmiştir (Hossain et al., 1992b,c).

Hossain (1995), dikdörtgen ve sonlu silindirik şekilli gıdaların donma zamanlarının daha hızlı tahmini için yeni bir metot ortaya koymuştur. Metot, gıda maddesinin şeklinin donma zamanına etkisini hesaplamak için faz değişimli ısı transfer problemlerinin asimtotik çözümlerinden faydalanmaktadır. Araştırmacı, metodun literatürde belirtilen metotların büyük çoğunluğunun sağladığı doğruluk oranında sonuçlar verdiğini belirtmiştir.

1. 3. Boyutsuz Değişkenler Yöntemi

Boyutsuz değişkenler (eşitlikler), karışık ve çözümü güç olan matematiksel eşitlikleri çözümlemede yaygın olarak kullanılmıştır. Bu yöntemde, bazı deneysel donma zamanı formülleri; Fourier (Fo), Biot (Bi) ve Kossovitch (Ko) sayısı gibi boyutsuz değişkenler üzerine temellendirilmiştir (Kinder ve Lamb, 1974).

Khatchaturov (1958), boyutsuz değişkenleri dondurucu içinde asılı bulunan, tüm bir balığın donma zamanını belirlemede kullanmıştır (Hung ve Thomson, 1980; Hung, 1990). Mott (1964), diğer boyutsuz parametrelere, Plank eşitliğindeki ilk sıcaklık ve şeklin sınırlamalarını azaltmak için, donma sayısı (F) boyutsuz değişkenini dahil etmiştir (Ramaswamy ve Tung, 1983). Cowell (1967), ön soğutma ve donma zamanı toplamını, basitleştirilmiş boyutsuz değişkenler eşitliği ile hesaplayarak, toplam donma zamanı olarak kullanmıştır. Riley et al. (1974) silindir ve küre şekilli ürünler için donmanın başlangıcına kadar ihtiyaç olan süreyi belirlemede Tao (1967) tarafından önerilen eşitlikteki boyutsuz değişkeni kullanmıştır. Hayakawa et al. (1983), donma zamanı ve boyutsuz parametreler arasında bir ilişki kurmak için regrasyon tekniğinin kullanımını tavsiye etmişlerdir.

Succar ve Hayakawa (1984) tarafından, sonsuz dilim şekilli gıda maddelerinin donma zamanlarını belirlemek için termofiziksel özelliklerin sıcaklığa bağlı olduğu düşünülerek bir matematiksel model geliştirilmiştir. Bu modelde donma derecesi üzerine etkili olan bütün boyutsuz parametreler dahil edilmiştir. Araştırmacılar, hesapla bulunan donma zamanlarının, deneysel değerlere % -6 ve % 10 hata sınırları içinde kalacak şekilde iyi bir uyum gösterdiğini belirtmişlerdir. Bu sapmaların asıl nedeni olarak, termofiziksel özelliklerin tam doğru tahmin edilememesi gösterilmiştir.

Sheen ve Hayakawa (1991) küresel ve sonsuz silindirik şekilli gıda maddelerinin donma zamanları üzerine, donma anındaki hacimsel büyümenin etkisini dikkate alarak, yedi farklı boyutsuz parametreyi (Biot sayısı, şekil faktörü, vb.) kullanarak regrasyon eşitliklerini ortaya koymuşlardır. Regrasyon eşitliklerinden geliştirdikleri matematiksel modelleri çözümlemede bilgisayar programı oluşturmuşlardır. Sonuçta, donma esnasında meydana gelen hacimsel büyümenin, donma zamanı üzerindeki etkisi önemsiz (% 2'den az) bulunmuştur. Donma

zamanını etkileyen en önemli faktörün yüzey ısı transfer katsayısı olduğu saptanmıştır.

2. KAYNAKLAR

Anon., 1972. Recommendation for the Processing and Handling of Frozen Foods. International Institute of Refrigeration, Paris.

Bakal, A. and Hayakawa, K. I. 1973. Heat transfer during freezing and thawing foods. Adv. Food Res., 20, 217.

Bonacina, C. and Comini, G. 1973. On the Solution of Non-Linear Heat Conduction Equation by Numerical Methods. Int. J. Heat Mass Transfer, 16, 581.

Calvelo, A. 1981. Recent Studies on Meat Freezing. Developments in Meat Science - 2. (Ed. R. Lawrie). Applied Science Publishers Ltd, London, UK., p. 125 - 158.

Charm, S. E. 1971. Fundamentals of Food Engineering. AVI Publishing Co., Inc., Westport, Conn.

Cheong, J. W. and Kong, V. C. 1988. Studies on the Freezing Time Prediction of Foodstuffs Using Plank's Equation or Modification. Korean J. Food Sci. Technol., 20, 280.

Chung, S. L. and Merritt, J. H. 1991. Freezing Time Modelling for Small Finite Cylindrical Shaped Foodstuff. J. Food Sc., 56 (4),1072-1075.

Cleland, A. C. 1986. A Review of Methods for Predicting the Duration of Freezing Processes. Food Engineering and Process Applications. 1. Elsevier Applied Science Publishers, New York, USA,

Cleland, A. C. and Earle, R. L. 1976. A Comparison of Freezing Including Modification to take Into Account Initial Superheat. Bulletin of IIR, Annexe-1, 369.

Cleland, A. C. and Earle, R. L. 1977. A Comparison of Analytical and Numerical Method of Predicting the Freezing Times of Foods. J. Food Sci., 42, 1390.

Cleland, A. C. and Earle, R. L. 1979a. A Comparison of Methods for Predicting the Freezing Times of Cylindrical and Spherical Foodstuffs. J. Food Sci., 44, 958.

Cleland, A. C. and Earle, R. L. 1979b. Prediction of Freezing Times for Foods in Rectangular Packages. J. Food Sci., 44, 964.

- Cleland, A. C. and Earle, R. L. 1982. Freezing Time Predictions for Foods - A Simplified Procedure. *Int. J. Refrig.*, 5, 134.
- Cleland, D. J. 1985. Prediction of Freezing and Thawing Times for Foods. Ph.D. Thesis. Massey Univ., Palmerston North, New Zealand.
- Cleland, D. J., Cleland, A. C. and Earle, R. L., 1987a. Prediction of Freezing and Thawing Times for Multi-Dimensional Shapes by Simple Formulae. Part 1: Regular Shapes. *Int. J. Refrig.*, 10, 156.
- Cleland, D. J., Cleland, A. C. and Earle, R. L. 1987b. Prediction of Freezing and Thawing Times for Multi-Dimensional Shapes by Simple Formulae. Part 2: Irregular Shapes. *Int. J. Refrig.*, 10, 234.
- Cleland, D. J., Cleland, A. C., Earle, R. L. and Byrne, S. J. 1986. Prediction of Thawing Times for Foods of Simple Shape. *Int. J. Refrig.*, 9, 220.
- Covell, N. D. 1967. "The Calculation of Food Freezing Times". **Proceedings 12th Int. Congr. Refrig.**, 2, 667, Madrid.
- De Michelis, A. and Calvelo, A. 1983. Freezing Time Predictions for Brick and Cylindrical Shaped Foods. *J. Food Sci.*, 48, 909.
- Gökalp, H. Y. 1992. Kesimhane Ürünleri İşleme Teknolojisi Ders Notu. Pamukkale Üniv. Mühendislik Fak. Gıda Mühendisliği Bölümü, Denizli,
- Gökalp, H.Y., Kaya, M. ve Zorba, Ö. 1994. Et Ürünleri İşleme Mühendisliği. Atatürk Üniv. Yayın No: 786, Ziraat Fakültesi Yayın No:320, Ders Kitapları Serisi No: 70, Atatürk Üniv., Ziraat Fakültesi Ofset Tesisi, Erzurum, s. 561.
- Gökalp, H.Y. ve Tülek, Y., 1992, "Et Endüstrisinde Soğutma ve Dondurma Teknolojisinin Temel Prensipleri, Uygulamada Karşılaşılan Problemler ve Öneriler". **2. Ulusal Soğutma ve İklimlendirme Kongresi ve Uluslararası Soğutma Kolokyumunu**, s. 299-308, 6-8 Mayıs, Adana.
- Hayakawa, K. I., Nonino, C. and Succar, J. 1983. Two Dimensional Heat Conducting in Food Undergoing Freezing: Predicting Freezing Time of Rectangular Or Finitely Cylindrical Food. *J. Food Sci.*, 48, 1941.
- Heldman, D. R. 1982. Food Properties During Freezing. *Food Technol.*, 2, 92-96.
- Heldman, D. R. and Singh, R. P. 1980. Food Process Engineering (2nd Edition). The AVI Publishing Co., Inc., E. Lansing, Michigan, p. 401.
- Holman, J. P. 1985. Heat Transfer (Fourth Edition). McGraw-Hill Book Co. Inc., Southern Methodist, p. 528.
- Hossain, M. M. 1995. A Simle Method of Freezing Time Calculation for Foodstuffs of Various Shapes. *Food Australia*, 47(3), 109-112.
- Hossain, M. M., Cleland, D. J. and Cleland, A. C. 1992a. Prediction of Freezing and Thawing Times for Foods of Regular Multi-Dimensional Shape by Using an Analytically Derived Geometric Factor. *Int. J. Refrig.*, 15 (4), 227-234.
- Hossain, M. M., Cleland, D. J. and Cleland, A. C. 1992b. Prediction of Freezing and Thawing Times for Foods of Two-Dimensional Irregular Shape by Using a Semi-Analytical Geometric Gactor. *Int. J. Refrig.*, 15 (4), 235-240.
- Hossain, M. M., Cleland, D. J. and Cleland, A. C. 1992c. Prediction of Freezing and Thawing Times for Foods of Three-Dimensional Irregular Shape by Using a Semi-Analytical Geometric Factor. *Int. J. Refrig.*, 15 (4), 242-246.
- Hung, Y. C. 1990. Prediction of Cooling and Freezing Times. *Food Technol.*, 44, 137.
- Hung, Y. C. and Thompson, D. R. 1980. Freezing Time Prediction a review. *Amer. Soc. Agr. Eng. Tech.*, Paper 80 - 6501.
- Hung, Y. C. and Thompson, D. R. 1983. Freezing Time Prediction for Slab Shape Foodstuffs by an Improved Analytical Method. *J. Food Sci.*, 48, 555.
- İlçalı, C. 1989. A Simplified Analytical Model for Thawing Time Calculation in Foods. *J. Food Sci.*, 54, 1031.
- İlçalı, C., Çetin, M. and Çetin, S. 1996. Methods for the Freezing time of Ellipses. *J. Food Eng.*, 28, 361-372.
- İlçalı, C. and Hocalar, M. 1989. "A Simplified Approach for Predicting Freezing the Times o Foodstuffs of Anomalous Shape". **5th Int. Congr. On Engineering And Food, Cologne**, May 1989. Published as *Engineering and Food*, Vol. 2; Preservation Processes and Related Techniques, Ed. W. E. L. Spices and H. Schubert. Elsevier Applied Science, London, 1990. pp. 418-425.
- İlçalı, C. and Sağlam, N., 1987, A simplified analytical model for freezing time calculation in foods. *J. Food Proc. Eng.*, 9, 299.
- Kakaç, S. 1982. Isı Transferine Giriş I: Isı İletimi (2. Baskı). O. D. T. Ü. Mühendislik Fak., Yayınları, Yayın No: 52, Ankara, s. 315.

Kinder, E. and Lamb, J., 1974, "The Prediction of Freezing times of Foodstuffs". **Meat Research Institute Symposium**, 3, 17.1., Bristol, UK.

Lacroix, C. and Castaigne, F. 1987. Simple Method for Freezing time Calculations for Infinite Flat Slabs, Infinite Cylinders and Spheres. *J. Can. Inst. Food Sci. Technol.*, 20, 251.

Lacroix, C. and Castaigne, F. 1988. Freezing Time Calculation for Products With Simple Geometrical Shapes. *J. Food Proc. Eng.*, 10, 81.

Matsuda, Y. 1971. "Determination of Times Required for Freezing and Vacuum Freeze-Drying of "Surimi" as a Food Model". **Proc. 13th Int. Congr. of Refrig.**, 2, 357, Washington.

Mellor, J. D. 1976. Cited by Cleland, A. C. 1977. Heat Transfer During Freezing of Foods and Prediction of Freezing Times. Ph. D. Thesis, Massey Univ., New Zealand.

Müftügil, N. ve Yurdagel, Ü. 1985. Dondurma İşleminin Bazı Gıdalarda Yapı Üzerine Etkileri ve Donma Süresinin Tayini. *Gıda*, 9, 3.

Nonino, C. and Hayakawa, K. I. 1986. Thawing Time of Frozen food of Rectangular or Finitely Cylindrical Shape. *J. Food Sci.*, 51, 116.

Özışık, M. N. 1987. Heat Transfer A Basic Approach (2nd Edition). McGraw-Hill Book Co. Inc., North Carolina, USA, p. 780.

Pham, Q. T. 1985. Analytical Method for Predicting Freezing Times of Rectangular Blocks of Foodstuffs. *Int. J. Refrig.*, 8, 43.

Pham, Q. T. 1986. Simplified Equation for Predicting the Freezing time of Foodstuffs. *J. Food Technol.*, 21, 209.

Pham, Q. T. 1991. Shape Factors for freezing Time of Ellipses and Ellipsoids. *J. Food Eng.*, 13 (3), 159-170.

Ramaswamy, H. S. and Tung, M. A. 1983. A review on Predicting Freezing Times of Foods. *J. Food Proc. Eng.*, 7, 169.

Riley, D. S., Smith, F. and Poots, G. 1974. The Inward Solidification of Spheres and Circular Cylinders. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 17, 294.

Salvadori, V. O. and Mascheroni, R. H. 1991. Prediction of Freezing and Thawing Times of

foods by Means of a Simplified Analytical Method: *Int. J. Food Eng.*, 13 (1), 67-78.

Schwartzberg, H. G. 1976. Effect Heat Capacities for the Freezing and Thawing of Foods. *J. Food Sci.*, 41, 152.

Schwartzberg, H. G. 1977. Effect Heat Capacities for the Freezing and Thawing of Foods. *Int. Institute of Refrig. Commissions (C1 And C2)*, Karlsruhe, Germany, Annexe, 1, 303.

Sheen, S. and Hayakawa, K.I., 1991, Parametric Analysis for the Freezing of Spheroidal of Finitely Cylindrical Objects With Volumetric Changes. *J. Food Sci.*, 56, 543.

Succar, J. 1977. Air thawing of beef quarters. *J. Sci. Food Agric.*, 20, 1109.

Succar, J. 1989. Heat Transfer During Freezing and Thawing of Foods. *Developments in Food Preservation-5* (Edited by Thorne, S.). Elsevier Applied Sci., Ltd, England, p. 253-303.

Succar, J. and Hayakawa, K. I. 1984. Parametric Analysis for Predicting Freezing Time of Infinitely Slab-Shaped food. *J. Food Sci.*, 49, 468.

Tanaka, K. and Nishimoto, J. I. 1964. Determination of the Time Required for Contact Freezing of Whole Meat. *J. Tokyo Univ. of Fisheries*, 50, 49.

Tao, L. C. 1967. Generalised Numerical Solutions of Freezing a Saturated Liquid in Cylinders and Spheres. *American Institute of Chem. Eng. J.*, 13, 165.

Teider, V. A. 1963. Determination of the Freezing Time With Different Conditions of Heat Exchange at the Body Surface. *Proc. In Refrig. and Sci. Technol.*, 2, 953.

Tülek, Y. 1989. Taze Sığır Etlerinin Bir Boyutlu Isı Transferi Uygulanarak Değişik Ortam Sıcaklıklarında Donma ve Çözülme Zamanlarının Deneysel ve Matematiksel Modellerle Belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniv. Fen Bilimleri Enstitüsü, Gıda Bilimi ve Teknolojisi Anabilim Dalı, Erzurum.

Yiğit, V., Evranuz, Ö., Özırmak, N. ve Yaşar, Y. 1982. "Gıdaların Dondurarak Muhafaza Tekniği ve Türkiye İçin Önemi". **Türkiye 3. Gıda Kongresi**, 14-16 Nisan, Ankara.