



GIDALARIN DONMA VE ÇÖZÜLME ZAMANLARININ BELİRLENMESİNDE KULLANILAN TAHMİN METOTLARI II. SAYISAL YÖNTEMLER

Geliş Tarihi : 23.10.1999

Yahya TÜLEK, Hüsnü Yusuf GÖKALP, Sami Gökhan ÖZKAL

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

1. GİRİŞ

Gıda maddelerinin donma ve çözülme zamanlarının öngörülmesi, proses ekipmanlarının ve zamanın efektif kullanımına olanak sağlamakta, işletmecilik ve ekonomik açılarından önem arz etmektedir. Bu nedenle, donma ve çözülme zamanlarının öngörülmesine ilişkin birçok tahmin yöntemi geliştirilmiştir. Bu noktada, yöntemlerin birbirlerine göre avantaj ve dezavantajlarının olduğunun bilinmesi, mümkün olduğunca gerçek şartları en iyi temsil edebilecek, en doğru sonucu verebilecek yöntemin seçilmesi gerekmektedir.

Bu makale, donma ve çözülme zamanlarının öngörülmesinde kullanılan yöntemlerin incelendiği, daha önce tarafımızdan hazırlanan makalenin devamı niteliğindeki ikinci makaledir. İlk makalede, donma ve çözülme zamanlarının öngörülmesinde kullanılan "basit eşitlikler yöntemi" incelenmiş, bu yöntemin kapsadığı analitik ve boyutsuz değişkenler yöntemleri ile yapılan araştırmalardan bahsedilmiştir. Bu ikinci makalede, donma ve çözülme zamanlarının öngörülmesinde, özellikle son yıllarda daha fazla kullanılan sayısal yöntemlerden bahsedilecektir.

1. 1. Sayısal Yöntemler :

Analitik yöntemler ve boyutsuz değişkenler yöntemi ile özellikle düzgün geometrik şekilli nesnelerin ısı iletim problemleri bazı kabullenmeler altında çözülebilmektedir. Ancak, pratikte karşılaşılan problemlerde, katı cismin şekli ve sınır şartları karmaşık olabilmektedir. Bu gibi durumlar analitik ve boyutsuz değişkenler yönteminin, problemin çözümünde uygulanabilme şansını ve başarısını önemli ölçüde azaltmaktadır. Oysa, sayısal yöntemleri kullanarak, düzenli veya düzensiz geometriye sahip gıda maddelerinin kararlı ve kararsız rejimde, ısıtma ve soğutma işlemlerinde

karşılaşılabilecek ısı transfer problemleri başarı ile çözülebilmektedir.

Fiziksel olayları tanımlayan matematiksel ifadelerin çözümlerinin yapılmasını sağlayan sayısal yöntemler, gıdanın donma ve çözülme işlemleri sırasındaki ısı transferinin modellenmesi için popüler olarak kullanılmaktadır (Reinick, 1986; Bhattacharya, 1987; Chen, 1987). Gıdanın izotropik bir madde olmaması, heterojen bir yapıya sahip olması, geniş bir sıcaklık aralığında faz değişiminin oluşması ve dondurma - çözülme sırasında termal özelliklerinde değişim göstermesi gibi gıdaların dondurulması ve çözülmesi ile ilgili karakteristikleri basit eşitlikler ile gösterilememektedir. Bu karakteristikler, büyük oranda tahmin hatasına sebebiyet verebilmektedir. Sayısal analizler ile bu karakteristikler daha doğru gösterilebilmekte ve böylece donma ve çözülme zamanlarının tahmini çok daha gerçekçi bir şekilde yapılabilmektedir (Comini ve Bonacina, 1974; Comini et al., 1974). Grafikselsel yöntemler, sayısal çözümlerinin özel bir sınıfıdır. Bu yöntemde, matematiksel eşitlikler, grafikselsel işlemlere dönüştürülmüştür. Grafikselsel yöntemler genellikle bir boyutlu ısı transfer problemlerinin çözümlenmesinde kullanılabilmektedir (Kakaç, 1982; Özışık, 1987; Saccar; 1989).

Hung (1990) tarafından belirtildiğine göre, Keller ve Ballard (1956) bir sıvının dondurulması esnasında oluşan sıcaklık değişimini belirlemek için Schmidt'in (1942) genel grafik yöntemini modifiye ederek kullanmışlardır. Aynı araştırmacının ifade ettiği üzere, Longwell'de (1958) küresel ve silindirik koordinatlarda hissedilir ve gizli ısının (latent ısı) uzaklaştırılma zamanlarını belirlemek için Schmidt'in (1942) grafik yöntemini kullanmıştır. Tao (1967 ve 1975) Fourier'in ısı iletimi eşitliklerini sayısal yöntemle çözerek, donma zamanının belirlenmesine ilişkin bir cetvel hazırlamıştır. Selim ve Seagrave (1973a ve 1973b)

hareketli sınır problemlerinin çözümünde sonlu integral dönüşümünün uygulanmasını göstermiştir.

Sokulski (1972), dilim veya küresel şekilli gıda maddelerinin donma zamanlarını; kalınlığın, termal özelliklerin ve çevre sıcaklığının fonksiyonu olarak belirlemede çok karışık bir grafiksel işlem önermiştir. Bu yöntemle, yeterli doğrulukta tahminin yapılabilmesi için büyük bir skalanın çizilmesi gerektiği belirtilmiştir.

Salvadori et al., (1987), düzgün geometrik şekilli gıda maddelerinin donma zamanlarını tahminde etkili olan bütün boyutsal ve prosese ait parametrelerde oluşan değişimleri hesaba katmak için; bağımsız, karakteristik bir değişken kullanımını önermişlerdir. Araştırmacıların ortaya koyduğu grafik yöntemi ile, gıdanın termal merkezinin donma zamanı ve farklı son sıcaklıklara ulaşma zamanı belirlenebilmektedir.

Salvadori ve Mashcheroni (1989), basit şekilli ve yüksek su içerikli gıdalar için grafiksel bir metod ortaya koymuşlardır. Herhangi bir son ürün sıcaklığı için çözülme zamanı, gıdanın ısı merkezinin zaman- sıcaklık grafiğinden hesaplanabilmektedir.

Cleland ve Earle (1979) sayısal yöntemleri, gıdaya ait termofiziksel özelliklerin kullanımı durumlarına göre ikiye ayırmışlardır. Birinci grupta; yöntem sadece tek bir donma noktasının varlığını kabul ederken, diğer grupta görünür spesifik ısı ve ısı iletim katsayısının işlem süresince değiştiği varsayılmaktadır. Her iki yöntem ile yapılan çözümler birbirlerine yakinen benzemektedir. Ancak, faz değişiminin nasıl olduğunun belirlenmesi, yöntemlerde farklı farklıdır (Lazaridus, 1970; Charm et al., 1972; Padmanabham ve Raju, 1975; Riley ve Duck, 1977). Hung (1990), birinci gruba giren yöntemlerin fiziksel olarak doğru olmadığını ve gıda geometrisi içindeki düğümler ile donmuş bölgenin pozisyonu arasında sadece bir yaklaşımın (tahminin) yapılabileceğini iddia etmektedir. Araştırmacı, ikinci grup yöntemler ile, sıcaklığa bağlı olarak değişen termal özelliklerin kullanımı ile faz değişiminin nasıl olduğunun bulunabileceğini, ancak, bu çözümlerlerin son derece karmaşık olduğunu bildirmektedir.

Cleland et al., (1987) ve Succar (1989) matematiksel eşitlikleri çözmeye kullanılan sayısal yöntemleri; sonlu farklar yöntemi ve sonlu elemanlar yöntemi olarak iki grupta incelemişlerdir. Bu iki yöntem, çok boyutlu geometrik şekilli gıda maddelerinin donma ve çözülme zamanlarını belirlemede tartışılmış ve kullanılmıştır.

Donma ve çözülme işlemine ait matematiksel eşitlikleri çözmeye kullanılan sayısal yöntemlerden en yaygın kullanılanı, "sonlu farklar yöntemidir". Bu yöntemde, esas differansiyel eşitlikteki türevler yaklaşık olarak elde edilmiş, yer ve zaman türevlerinin yerine, sonlu fark açılımları ikame edilmiştir. Oluşan sıcaklık dağılımları, her bir zaman seviyesinde, bir grup cebirsel eşitliğin çözümü ile elde edilmektedir (Polivka ve Wilson, 1976; Özışık, 1987).

Holman (1985), Özışık (1987) ve Succar (1989) sonlu farklar yöntemini; açık sonlu farklar planı ve tam ve kesin sonlu farklar planı olarak ikiye ayırmışlardır. Açık sonlu farklar planı ile donma ve çözülme işlemlerine ait matematiksel eşitliklerin çözümü ve böylelikle donma-çözülme zamanı tahminleri literatürde sıkça bulunabilmektedir (Cullwick ve Earle, 1971; Bailey et al., 1974; Tarnawski, 1976; Mannapperuma ve Singh, 1988, 1989). Özışık'ın (1987) belirttiğine göre, tam ve kesin sonlu farklar planının temelini Crank ve Nikolson (1947) tarafından geliştirilen yaklaşım oluşturmuştur. Cleland (1977) ve Hung (1990) donma ve çözülme zamanı tahmininde, tam ve kesin farklar planının açık sonlu farklar planından daha doğru sonuç verdiğini belirtmektedirler. Shamsundar ve Sparrow (1975), Saitoh (1977 ve 1978) ve Talmon ve Davis (1981) gibi birçok araştırmacı tarafından da bu yöntem kullanılmıştır.

Mannapperuma ve Singh (1989), altı farklı düzgün geometrik şekle sahip gıda maddesinin donma ve çözülme zamanlarının simülasyonu için gerekli olan matematiksel modelde, kademeli faz değişimli ısı iletimine ait entalpi formülasyonunu temel alan, açık sonlu farklar planı ile bir yöntem geliştirip kullanmışlardır. Entalpi formülasyonu için gerekli olan termofiziksel özelliklerin belirlenmesi için, ayrı ayrı modeller geliştirilmiş ve bir bilgisayar programında birleştirilerek birlikte çalıştırılmıştır. Termofiziksel özelliklerin program ile tahmininde, iki veri tabanı giriş seçeneği olarak kullanılmıştır. Bunlardan ilk veri tabanını; donmamış gıdanın yoğunluğu, ısı iletim katsayısı ve spesifik ısı oluşturmuştur. Diğerini; gıdanın su, protein, yağ, karbonhidrat, kül içeriği ve porozite gibi özellikleri oluşturmuştur.

Ilıcalı et al., (1996), iki boyutlu kararsız hal ısı iletim denklemlerinin eğri yüzeylerde sonlu farklar metoduyla çözümü için bir bilgisayar programı oluşturmuşlar ve iki boyutlu elipsoidler için modifiye edilmiş eşdeğer çap tanımı ortaya koymuşlardır. Her iki yöntemle elde edilen sonuçları literatür değerleri ile karşılaştıran araştırmacılar, sonlu farklar metodu ile iki boyutlu elipslerin donma zamanlarının

belirlenebileceğini ve iki boyutlu elipsler geliştirilen eşdeğer çap kavramının kullanımının iyi sonuçlar verdiğini belirtmişlerdir.

Mascheroni (1982), endüstriyel şartlarda dondurulmuş et örneklerinin çözülme zamanlarını belirlemede, açık sonlu farklar planı ile tam ve kesin farklar planını kullanmıştır. Her iki sonlu fark yöntemi ile bulunan sonuçlar, deneysel çözülme zamanı ile mukayese edilerek, tam ve kesin sonlu farklar planı ile yapılan çözümlerinin daha iyi tahmin sonucu verdiğini göstermiştir. Araştırmacı, deneysel olarak yürüttüğü çözme işlemini, vakum şartlarda, su buharı ile ve değişik atmosfer basınçlı çözme tünellerinde gerçekleştirmiştir. Sonlu farklar yöntemleri ile yapılan çözümlerinde kullanılan parametreler ve sınır şartları, deneysel şartları temsil edecek şekilde seçilmiştir.

Hayakawa et al., (1983a) ve Hayakawa et al., (1983b), iki boyutlu donma işlemine tabi tutulan gıdaların donma zamanlarını, konvektif yüzey ısı transfer katsayısının, konvektif nem transfer katsayısının ve radyoaktif ısı değişimi nedeni ile emissivitenin etkisini dahil ederek geliştirdikleri bir bilgisayar programı ile belirlemişlerdir. Bilgisayar modelinin geliştirilmesinde, gıdanın termofiziksel özellikleri belirlenirken, modifiye Schwartzberg (1977) deneysel eşitliği kullanılmıştır. Bu yöntemle, dilim şekilli, yağsız sığır eti ve sonlu silindirik şekilli Tylos'un (Karlsruhe Test Maddesi = Metil Selüloz Jel) termal merkez sıcaklıkları zamana karşı belirlenmiştir. Bu zamanlar üzerinde, bir çok boyutsuz parametrenin etkisi de araştırılmıştır.

Steffe (1981) ve Heldman ve Steffe (1985) gıdaların donma zamanlarını tahminde bilgisayar modellerinin kullanımı üzerine yaptıkları derleme çalışmada; kullanılan bilgisayar programlarında, doğruluğu etkileyen parametrelerin neler olduğunu, mevcut bir bilgisayar programının tanıtılmasını, hangi geometrik şekiller için, hangi sayısal yöntemin kullanımının uygun olabileceğini göstermişlerdir. Bu araştırmacılara göre, hesaplama sonuçlarını etkileyen gıdaya ait önemli parametreler; donma esnasında değişen donma noktası sıcaklığı, görünür spesifik ısı, ısı iletim katsayısı ve entalpi değerleridir. Ayrıca, gıdanın ilk ve son sıcaklığının, konvektif yüzey ısı transfer katsayısının, gıdanın şeklinin ve boyutunun doğru olarak seçilip, kullanılması gerektiğini belirtmektedirler. Sonsuz dilim, sonsuz silindir ve küresel şekilli gıdalar için, sonlu farklar yöntemine göre oluşturulmuş bilgisayar programının kullanımını tavsiye etmişlerdir.

Thorne (1989), katı gıda maddelerinin ısıtma ve soğutma işlemleri sırasında, sıcaklıkların zamana

göre simülasyonunu yapmak için geliştirdiği bilgisayar paket programının ayrıntılı bir şekilde çalıştırılmasını izah ederek, bu programın sonsuz dilim ve sonsuz silindirik geometriye sahip gıda maddeleri için "RM Basic" dilinde yazılmış açık halinin bir bölümünü göstermiştir. Bu programda, katı gıda maddesinin homojen ve izotropik olduğu, fiziksel ve termal özelliklerin sıcaklık ile değişmediği varsayılmıştır. Bu kabullenmelere rağmen, kullanılan bu program, ısıtma ve soğutma işlemlerini simüle etmede, faz değişim bölgesi oluşmadığı için, fazla tahmin hatasına sebebiyet vermemiştir.

Comini et al., (1974 ve 1978) faz değişimi için özel referanslı, lineer olmayan ısı iletim problemlerini sonlu elemanlar metodu ile çözerek, sonuçları analitik yöntemle karşılaştırmışlardır. Ayrıca, sonlu elemanlar yönteminin soğutma mühendisliğindeki önemi ve uygulamaları gösterilmiştir.

Rebellato et al., (1978), Purwadaria ve Heldman (1982) ve Arce et al., (1983) düzensiz geometrik şekilli (elipsoid ve trapezoid şekiller) gıda maddelerinin ve karkasın soğutulmasında ve donma zamanlarının belirlenmesinde sonlu elemanlar yöntemini kullanmışlardır. Araştırmacılar, bu yöntemle modellemenin nasıl yapılacağını, formülasyon ve çözümlenmeyi göstererek, değişik sınır şartları altında elde ettikleri sonuçları, deneysel değerler ile mukayese etmişler ve tahmin doğruluğunun tatminkar olduğunu bulmuşlardır. Arce et al., (1983) yaptıkları modellemeye uygun formülasyonu, fortran programlama dilinde yazarak çözümlenmeyi yapmışlardır.

Miki et al., (1980 ve 1982) düzensiz altıgen şekilli, değişik gıda maddelerinin ve deniz ürünlerinin donma ve çözülme zamanlarını üç boyutlu geometrik sistemlerde tahmini için, sonlu elemanlar yöntemi ile formülasyon ve çözümlenmeleri göstermişlerdir. Değişik ilk sıcaklıklara sahip bazı gıda maddelerinin ve balıkların, referans alınan bölgelerindeki sıcaklıkların zamana göre grafikleri sonlu elemanlar yöntemi ve analitik yöntemler ile oluşturularak mukayesesi yapılmıştır. Sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilen grafiklerin birbirlerinden çok az sapmalar göstermesine karşılık, analitik yöntemlerde bu sapmaların yüksek olduğu görülmüştür.

Cleland et al., (1984) düzensiz geometrik şekilli gıda maddelerinin donma ve çözülme zamanlarının sonlu elemanlar yöntemi ile belirlenebilmesi için bir bilgisayar programı geliştirmişler ve önermişlerdir. Programda, termal özelliklerin sıcaklığa bağımlı olduğu kabul edilmiştir. Bilgisayar programını kullanarak değişik gıdalar için yaptıkları

hesaplamaların, literatürdeki sonuçlar ile mukayeselerini yapmışlar ve sonuçların, analitik çözümlerden % 2, deneysel sonuçlardan da % 15 içerisinde kalan sapmalar verdiğini belirtmişlerdir.

Suzuki ve Singh (1985) gıdaların çözülme zamanlarını hesaplamak ve zamana karşı çözülme grafiklerini elde etmek için, matematiksel bir model oluşturmuşlardır. Modelin geliştirilmesinde; gıda örneği sonlu büyüklükte küçük dilimlere ayrılmış, çözülme işlemi donma noktası altı ve donma noktası üzeri olarak iki devrede ele alınarak, çözülme işlemi süresince gıdanın termofiziksel özelliklerindeki değişim hesaba katılmıştır. Oluşturulan tahmin modeli ile yapılan hesaplamaların deneysel değerlere çok iyi bir uyum gösterdiği belirlenmiştir.

Pham (1986 a) faz değişimli lineer ısı iletim problemlerinin sonlu elemanlar yöntemi ile çözümüne “toplanmış kapasitans (lumped capacitance)” kavramını dahil etmiştir. Bu yöntemin, daha önce geliştirilmiş sonlu elemanlar yöntemine göre, çözümünün daha doğru olması, basit olması ve hesaplamaların hızlı bir şekilde yapılabilmesi gibi avantajlara sahip olduğu ileri sürülmüştür.

Literatürde belirtilen metotların çoğunluğu ürünün ısı özelliklerine ve ürün ile soğutucu ortam arasındaki ısı transfer katsayısına gereksinim duymaktadır. Mihori and Wanatabe (1994a, b), dondurulmakta olan gıda maddesinin ısı özelliklerine ihtiyaç duymayan bir metot ortaya koymuşlardır. Donma zamanı belirlenmesi için soğutma işleminin ilk anlarında toplanan zaman sıcaklık verilerinin analizi yapılarak, ısı iletimi ile ilgili sistem parametreleri belirlenmekte ve dondurma işleminin sonraki basamaklarının zaman sıcaklık profili bu sistem parametreleri kullanılarak elde edilmektedir. Bu metotla elde edilen nominal donma zamanlarının %10'luk hata ile deneysel verilere uygunluk gösterdiği belirtilmiştir.

Cleland et al.,(1987) çok boyutlu geometrik yapıya sahip gıda maddelerinin çözülme zamanlarını belirlemede sonlu elemanlar yöntemini kullanmışlar ve bu yöntem ile yapılacak modellemede dikkat edilmesi gereken kuralları şöyle sıralamışlardır:

- Isı dengesi eşitlikleri çok küçük zaman artmalarına tatbik edilmelidir.
- Gıda maddesinin termal merkezi ile yüzeyi arasında kalan mesafe en az 5 elemana bölünmelidir.
- Gıda maddesinin termal merkezi doğru bir şekilde tespit edilmeli ve hacim elemanlarının yerleri ona uygun olmalıdır. Araştırmacılar,

sıraladıkları bu kuralların, özellikle ilk ikisinin, tahmin doğruluğu üzerine etkisinin önemli olduğunu vurgulamışlardır.

Kinder ve Lamb (1974), donma ve çözülme zamanlarının belirlenmesine yönelik rutin uygulamalar için grafiksel yöntemlerin sıkıcı ve yorucu olduğunu ifade etmişlerdir. Analitik yöntemlerin, uygulamadaki ve anlaşılmasındaki kolaylık, gerekli termal veri ihtiyaçlarındaki azlık gibi avantajlarına rağmen, işlemleri kolaylaştırmada gerçekçi olmayan bir takım yaklaşımların kullanımı nedeni ile tahmin doğruluklarının düşük olduğu bildirilmiştir (Cleland, 1986). Analitik yöntemle sadece düzgün geometrik şekilli, tek boyutlu gıda maddelerinin donma ve çözülme zamanlarının belirlenebildiği, bu yöntem ile düzensiz şekilli ve çok boyutlu gıda maddelerinin donma ve çözülme zamanlarının belirlenemeyeceği belirtilmiştir (Heldman ve Singh, 1980).

Kompleks ısı transfer problemlerinin matematiksel ifadeleri olan sayısal yöntemlerde çözümler, hızlı bilgisayarların kullanımı ile kolayca yapılabilmektedir. Sayısal yöntemlerde, az sayıda ve çok daha doğru kabullenmelere yer verildiğinden, analitik yöntemlere göre doğrulukları çok daha yüksektir. Yapılan dondurma ve çözme işleminin tamamına ait sıcaklık-zaman bilgisini verebilirler. Bununla birlikte, sayısal yöntemler ile formülasyon ve çözümler analitik yöntemlere göre çok daha karmaşıktır, gıda ve işlem şartları ile ilgili yeterli doğrulukta elde edilmiş çok daha fazla bilgiye ihtiyaç duyulmaktadır (Bonacina ve Comini, 1973; Ramaswamy ve Tung, 1983; Hung, 1990).

Hung (1990), birçok popüler analitik yöntemden bazılarının (Cleland ve Earle, 1982; De Michelis ve Calvelo, 1983; Hung ve Thompson, 1983) son zamanlarda geliştirilen, doğruluğu artırılmış analitik yöntemler ile (Cleland ve Earle, 1984 a; Pham, 1985, 1986 b; Cleland, 1986; Ilıcalı ve Sağlam, 1987; Lacroix ve Castaigne, 1987, 1988) karşılaştırmasını yapmıştır. Bu eşitliklerin tümü ile belirlenen donma ve çözülme zamanlarının, Plank eşitlikleri ile belirlenenlerle iyi bir uyum sağladığı ve mantıklı bir şekilde tahmin edilebildiği tespit edilmiştir. Bununla birlikte, donma ve çözülme zamanlarına ait verilerde deneysel hatalar bulunabileceği göz önüne alınarak, yalnız tek bir tahmin yönteminin önerilmesinin mümkün olmadığı anlaşılmıştır.

Comini ve Bonacina (1974), Segerlind (1976), Cleland ve Earle (1984b) ve Özışık (1987) sayısal yöntemlerin tahmin doğruluklarının belirlenmesi üzerine yaptıkları karşılaştırmalarda, düzensiz geometrik şekilli gıdaların donma ve çözülme

zamanlarının sonlu elemanlar yöntemi ile sonlu farklar yöntemine göre daha doğru tahmin edilebileceğini belirtmişlerdir. Bununla birlikte, araştırmacılar, düzenli geometrik sistemler için sonlu farklar yönteminin tahmin doğruluğunun daha iyi olduğunu ortaya koymuşlardır. Sonlu farklar yönteminden olan, açık sonlu farklar planının, tam ve kesin sonlu farklar planına göre doğruluğunun daha düşük olduğu ifade edilmiştir.

Sonlu elemanlar metodu diferansiyel eşitliklerin çözümünde minimizasyon prosedürünü kullanmaktadır. Sonlu elemanlar metodunun bazı avantajlı yanları komşu elemanların özelliklerinin aynı olmasının gerekmemesi, düzensiz şekilli sınırların yaklaşık olarak alınabilmeleri, eleman boyutunun değişebilirliği ve karışmış sınır şartlarının kolaylıkla çözülebilmeleridir (Hung, 1990). Bununla birlikte sonlu elemanlar metodu sonlu farklar metoduna göre matematiksel olarak çok daha karmaşıktır. Sonlu elemanlar sayısal olarak daha yoğundur ve bu nedenle aynı problemi çözmek için sonlu farklar metoduna göre daha fazla CPU zamanı ve depolama amacıyla boş bellek gerektirmektedirler (Ilıcalı et al., 1996).

Sonuç olarak, gıda maddelerinin çok değişik şekillerde olmaları ve izotropik olmayan karmaşık yapılaraya sahip olmaları nedeniyle donma ve çözülme zamanlarının modelleşmesi çok güç bir olaydır. Bu nedenlerden dolayı çok farklı donma ve çözülme tahmin metotları geliştirilmiştir. Bu metotların seçiminde ve kullanımında gösterilecek titizlik tahmin sonuçlarını etkileyebilecektir.

2. KAYNAKLAR

- Arce, J. A., Potluri, P. L., Scheneider, K. C., Sweat, V. E. and Dutton, T. R. 1983. Modelling Beef Carcass Cooling Using a Finite Element Technique. *Trans. ASAE*, 26, 950.
- Bailey, C., James, S. J., Kitchell, A. G. and Hudson, W. R. 1974. Air Water and Vacuum-thawing of Frozen Pork Legs. *J. of the Science of Food and Agriculture*, 25, 81.
- Bhattacharya, M. 1987. Modelling Meat Freezing. Ph.D. Thesis. Univ. of Nebraska, Lincoln.
- 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.
- Charm, S. E., Brand, D. H. and Baker, D. W. 1972. A Simple Method for Estimating Freezing and Thawing Time of cylinders and slab. *ASHRAE J.*, 14, 39.
- Chen, P. 1987. Cited by Hung, Y. C., 1990, *Mathematical Modelling of Drying and Freezing Process in the Food Industry*. Ph.D. Thesis. Univ. of Waterloo, Canada.
- Cleland, A. C. 1977. Heat Transfer During Freezing of Foods and Prediction of Freezing Times. Ph.D. Thesis. Massey Univ., New Zealand.
- 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. 1979. 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. 1982. Freezing Time Predictions for Foods - A simplified Procedure. *Int. J. Refrig.*, 5, 134.
- Cleland, A. C. and Earle, R. L. 1984a, Assessment of Freezing time Prediction Methods. *J. Food Sci.*, 49, 1034.
- Cleland, A. C. and Earle, R. L. 1984b, Freezing Time Predictions for Different Final Product Temperatures. *J. Food Sci.*, 49, 1230.
- Cleland, D. J., Cleland, A. C., Earle, R. L. and Byrne, S. J. 1984. Prediction of rates of Freezing, Thawing or Cooling in Solids of Arbitrary Shape Using the Finite Element Method. *Int. J. Refrig.*, 7, 6.
- Cleland, D. J., Cleland, A. C., Earle, R. L. and Byrne, S. J. 1987. Prediction of Freezing and Thawing Times for Multi-dimensional Shapes by Numerical Methods. *Int. J. Refrig.*, 10, 32.
- Comini, G. and Bonacina, C. 1974. Application of Computer Codes to Phase-Change Problems in Food Engineering. *Int. Institute of Refrig.*, Annexe-3, 15, Commissions B1-C1 and C2, Brossanone.
- Comini, G., Del Giudice, S., Lewis, R. W. and Zienkiewicz, O. C. 1974. Finite Element Solution of Non-linear Heat Conduction Problems With Special Reference to Phase Change. *Int. J. for Numerical Methods in Engineering*, 8, 613.
- Comini, G., Del Giudice, S., Strada, M. and Rebellato, L. 1978. The Finite Element Method in Refrigeration Engineering. *Int. J. Refrig.*, 1, 113.
- Cullwick, T. D. C. and Earle, R. L. 1971. "Prediction of Freezing Times of Meat in Plate Freezers". *Proceedings 13th. Int. Congr. Refrig.*, 2, 397, Washington.

- De Michelis, A. and Calvelo, A. 1983. Freezing Time Predictions for Brick and Cylindrical Shaped Foods. *J. Food Sci.*, 48, 909.
- 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.
- Hayakawa, K. I., Nonino, C., Succar, J., Comini, G. and Del Guidice, S. 1983. Two Dimensional Heat Conduction in Food Undergoing Freezing: Development of Computerized Model. *J. Food Sci.*, 48, 1849.
- Heldman, D. R. and Singh, R. P. 1980. Food Process Engineering (2nd Edition). The AVI Publishing Co., Inc., E. Lansing, Michigan, p. 401.
- Heldman, D. R. and Steffe, J. F. 1985. Educational Use of Computer Models for Food Freezing Processes. *Food Technol.*, 39, 87, 89-91.
- Holman, J. P. 1985. Heat Transfer (Fourth Edition). McGraw-Hill Book Co. Inc., Southern Methodist, p. 528.
- Hung, Y. C. 1990. Prediction of Cooling and Freezing Times. *Food Technol.*, 44, 137.
- 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.
- Ilıcalı, C., Çetin, M. and Çetin, S. 1996. Methods for the Freezing Time of Ellipses. *J. Food Eng.*, 28,361-372.
- Ilıcalı, 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.
- Lazaridus, A. 1970. A Numerical Solution of the Multidimensional Solidification (or melting) Problem. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 13, 1459.
- Mannapperuma, J. D. and Singh, R. P. 1988. Prediction of Freezing and Thawing Times of Foods Using a Numerical Method Based on Enthalpy Formulation. *J. Food Sci.*, 53, 626.
- Mannapperuma, J. D. and Singh, R. P. 1989. A Computer-aided Method for the Prediction of Properties and Freezing/thawing Times of foods. *J. Food Eng.*, 9, 275.
- Mascheroni, R. H. 1982. The Utilisation of Numerical Methods for the Solution of the Heat Balance During the Thawing of Meat Blocks Under Industrial Conditions. *Lat. Am. J. Heat Mass Transfer*, 6, 13.
- Mihori, T. and Wanatabe, H. 1994a. A Two Stage Model for Online Estimation of Freezing Time of Food Materials: a One Dimensional Mathematical Model Which Has Analytical Solutions. *J. Food Eng.*, 23(1), 69-89.
- Mihori, T. and Wanatabe, H. 1994b., An Online Method for Predicting Freezing Time Using Time/temperature Data Collected in Early Stages of Freezing. *J. Food Eng.*, 23(3), 357-373.
- Miki, H., Kikukawa, H. and Nishimoto, J. I. 1980. An application of Three- Dimensional Finite Element Method to Thawing Processes in Foodstuffs. *Mem. Fac. Fish. Kagoshima Univ.*, 29, 11.
- Miki, H., Kikukawa, H. and Nishimoto, J. I. 1982. Numerical Calculation of Three-dimensional Heat Conduction on Freezing Process of Marine Foodstuffs. *Bulletin of the Japanese Society of Scientific Fisheries*, 48, 775.
- Özışık, M. N. 1987. Heat Transfer A Basic Approach (2nd Edition). McGraw-Hill Book Co. Inc., North Carolina, USA, p. 780.
- Padmanabham, T. V. and Raju, K. S. 1975. Numerical Solution of Heat Conduction Problem With Freezing. *Indian J. of Food Technol.*, 13, 477.
- Pham, Q. T. 1985. Analytical Method for Predicting Freezing Times of Rectangular Blocks of Foodstuffs. *Int. J. Refrig.*, 8, 43.
- Pham, Q. T. 1986a, Simplified Equation for Predicting the Freezing Time of Foodstuffs. *J. Food Technol.*, 21, 209.
- Pham, Q. T. 1986b, The use of Lumped Capacitance in the Finite-element Solution of Heat Conduction Problems With Phase Change. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 29, 285.
- Polivka, R. M. and Wilson, E. L. 1976. Finite Element Analysis of Non-linear Heat Transfer

- Problems. Report no. UC SESM 76-2. California Univ., Berkeley, California.
- Purwadaria, H. K. and Heldman, D. R. 1982. A Finite Element Model for Prediction of Freezing Rates in Food Products With Anomalous Shapes. Trans. ASAE, 25, 827.
- Ramaswamy, H. S. and Tung, M. A. 1983. A Review on Predicting Freezing Times of Foods. J. Food Proc. Eng., 7, 169.
- Rebellato, L., Del Guidice, S. and Comini, G. 1978. Finite Element Analysis of Freezing Processes in Foodstuffs. J. Food Sci., 43, 239.
- Reinick, A. C. 1986. Mathematical Modelling on Freezing and Thawing. Ph. D. Thesis. Massachusetts Univ., Boston.
- Riley, D. S. and Duck, P. W. 1977. Application of the Heat-balance Integral Method to the Freezing of a Cuboid. Int. J. Heat Mass Transfer, 20, 294.
- Saitoh, T. 1977. A Numerical Method for the two-Dimensional Navier-Stokes Equation by Multi-point Finite Differences. Int. J. for Numerical Methods in Eng., 11, 1439.
- Saitoh, T. 1978. A Numerical Method for Multi-Dimensional Freezing Problems in Arbitrary Domains. J. Heat Transfer, 100 C, 294.
- Salvadori, V.O. and Mascheroni, R. H. 1989. Thawing time Prediction for Simple Shaped Foods Using a Generalised Graphical Method: Int. J. Refrig., 12(4), 232-236.
- Salvadori, V.O., Reynoso, R.O., De Michelis, A. and Mascheroni, R. H. 1987. Freezing Time Predictions for Regular Shaped Foods : A Simplified Graphical Method. Int. J. Refrig., 10, 357.
- 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.
- Segerlind, L. J. 1976. Applied Finite Element Analysis. John Wiley and Sons, New York, USA.
- Selim, M. S., and Seagrave, R. C. 1973a. Solution of Moving-boundary Transport Problems in Finite Media by Integral Transforms. I. Problems With a Plane Moving Boundary. Ind. and Eng. Chem. Fundamentals, 12, 1.
- Selim, M. S., and Seagrave, R. C. 1973b. Solution of Moving-boundary Transport Problems in Finite Media by Integral Transforms. II. Problems With a Cylindrical or Spherical Moving Boundary. Ind. and Eng. Chem Fundamentals, 12, 9.
- Shamsundar, N. and Sparrow, E. M. 1975. Analysis of Multi-dimensional Conduction Phase Change Via the Enthalpy Model. J. Heat Transfer, 97 C, 333.
- Sokulski, M. B. 1972. A Graphic Method of Temperature Determination in Freezing and Defrosting Processes. Int. Institute of Refrig., Annexe, 2, 355, Comissions C2 and D1, Warsaw, Poland.
- Steffe, J. F. 1981. Computers in Undergraduate Food Science Education-A survey. Food Technol., 35, 98.
- 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.
- Suzuki, K. and Singh, R. P. 1985. A Computer-aided Calculation of Temperature History During Thawing of Foods. Trans. ASAE, 28, 1330.
- Talmon, Y. and Davis, H. T. 1981. Analysis of Propagation of Freezing and Thawing Fronts. J. Food Sci., 46, 1478.
- Tao, L. C. 1967. Generalised Numerical Solutions of Freezing a Saturated Liquid in Cylinders and Spheres. American Institute of Chem. Eng. J., 13, 165.
- Tao, L. C. 1975. Effect of Linear Approximation of Enthalpy-temperature Curve in Simulating Heat Transfer During Freezing. J. Food Sci., 40, 1099.
- Tarnawski, W. 1976. Mathematical Model of Frozen Consumption Products. Int. J. Heat Mass Transfer, 19, 15.
- Thorne, S. 1989. Computer Prediction of Temperatures in Solid Foods During Heating or Cooling. Developments in Food Preservation-5 (Edited by Thorne, S.). Elsevier Applied Sci. Ltd, England, p. 305-324.