

GIDALARIN DONMA SÜRELERİNİN HESABI

Hüseyin GÜNERHAN

ÖZET

Bu çalışmada, önce gıdaları soğutmanın ve dondurmanın önemi üzerinde durulmuş sonra gıdaların donma sürelerinin hesabı için bir hesaplama yöntemi verilmiş ve bu yöntem örnek bir uygulama ile desteklenmiştir. Örnek gıda maddesi olarak çilek meyvesi alınmış ve bir akışkan yataklı dondurucu içinde bulunan çileklerin donma süresine ait yaklaşık bir hesaplama, çileğin başlangıç sıcaklığı, nem içeriği, küre kabulü ile çapı, istenen son merkez sıcaklığı, akışkan yataklı dondurucudaki hava sıcaklığı, ısı taşınım katsayısı, yoğunluğu, özgül ısı ve ısı iletim katsayısı giriş bilgileri altında yapılmıştır. Çileğin istenen donma sıcaklığına getirilinceye kadar geçecek süre, örnek sayısal veriler eşliğinde, ortalama donma sıcaklığı, hacimsel entalpi değişimi, erime gizli ısı ve Biot sayısı bilgileri kullanılarak adım-adım hesaplanmıştır.

1. GİRİŞ

Gıdaların dondurulması, gıda sanayinde yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Bezelye, çilek, doğranmış havuç ve yeşil fasulye gibi birçok meyve ve sebze, akışkan yataklı dondurucularda dondurulabilmektedir. Akışkan yataklı dondurucularda, ürünün üzerine doğrudan derin dondurma sıcaklığındaki hava gönderilmekte ve böylece belli bir süre içinde ürünün donması sağlanmaktadır. Donma işlemi sırasında gıdalar içinde bulunan suyun faz değiştirip katı duruma gelmesi gerekmektedir. Meydana gelen faz değişimi nedeni ile donma süresinin hesaplanmasında kullanılacak ısı transferi hesapları zorlaşmaktadır. Bu zorluğu aşmak için çeşitli hesaplama yöntemleri geliştirilmiştir, [1].

Bu çalışmada, bir akışkan yataklı dondurucu içinde dondurulacak çileklerin donma süresi yaklaşık olarak adım-adım hesaplanmıştır.

2. GIDALARDAKİ MİKROORGANİZMALARIN KONTROLÜ

Bakteriler, mayalar, küfler ve virüsler gibi mikroorganizmalara, havada, suda, canlı organizmalarda ve ham yiyeceklerde çokça rastlanır ve bu mikroorganizmalar, istenmeyen tadlara, kokulara, yüzeyde bakteri birikimlerine ve sonunda besinin bozulmasına neden olur. Çabuk bozulabilen besinlerin yüksek sıcaklıklarda tutulması bozulmanın başlıca nedenidir ve besinlerin bozulmasının ve besinin mikroorganizmalar nedeniyle zamanından önce kalitesini kaybetmesinin önüne geçilmesi, soğutmanın geniş bir uygulama alanıdır. Mikroorganizmaları kontrol etmenin ilk adımı olarak, yayılmalarını, büyümelerini ve yok edilmelerini etkileyen etkenler bilinmelidir.

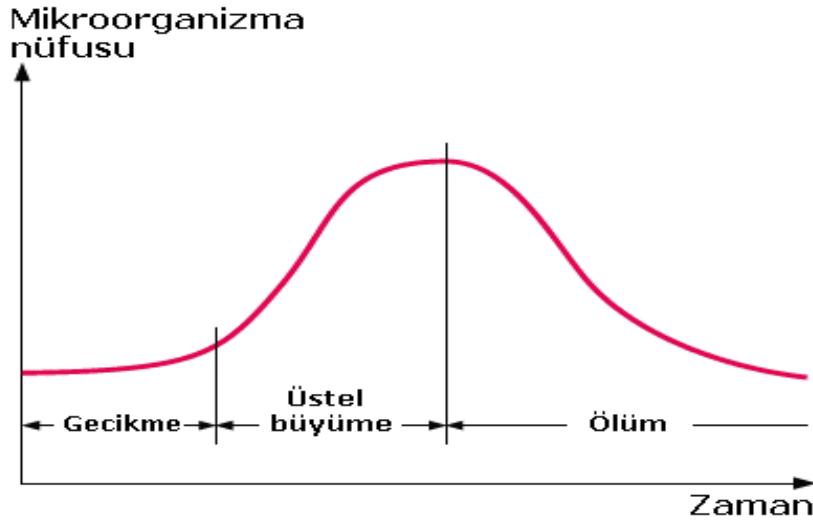
Birçok mikroorganizma türü içinde yer alan bakteriler, özellikle nemli besinlerin bozulmalarına neden olurlar. Kuru ve asidik besinler, bakteriler için uygun fakat küfler ve mayalar için uygun olmayan bir ortam oluştururlar. Küfler ayrıca nemli yüzeylerde, peynirde ve bozulmuş besinlerde görülür.

Özel virüslere insanlar ve belli bir takım hayvanlarda rastlanır ve pişmiş besinlerin pişmemiş olanlarıyla aynı ortamda korunması ve el temizliğine özen gösterilmemesi gibi yetersiz sağlık önlemleri besin ürünlerinin kirlenmesine neden olur.

Kirlenme meydana geldiğinde, mikroorganizmalar yeni ortam koşullarına alışmaya başlar. Başlangıçtaki bu yavaş veya sıfır büyüme dönemine gecikme evresi adı verilir ve bir besinin raf ömrü bu dönem ile doğru orantılıdır, (Şekil 1). Alışma dönemini üstel büyüme dönemi izler. Bu dönemde mikroorganizmaların bir saatteki artma sayısı, uygun ortamda ve hijyenik önlemler alınmadığı durumlarda, iki katına veya daha fazla sayıya yükselebilir. Besinlerin tükenmesi ve toksinlerin birikimi büyümeyi yavaşlatır ve ölüm dönemini başlatır.

Bir besinin içinde mikroorganizmaların büyüme oranı besinin kendisine ait özelliklere, örneğin kimyasal yapısına, pH değerine, engelleyicilerin (inhibitor) ve engelleyiciler ile yarışan mikroorganizmaların varlığına, sudaki etkinliğine ve aynı zamanda da sıcaklık, bağıl nem ve hava hareketi gibi çevresel koşullara bağlıdır.

Mikroorganizmalar büyümek ve çoğalmak için gıdaya gereksinim duyarlar ve beslenmelerini gıdada bulunan karbohidratlar, proteinler, mineraller ve vitaminler ile kolayca karşılayabilirler. Değişik mikroorganizmaların değişik beslenme gereksinimleri vardır ve bir gıdadaki besin türleri, üzerinde bulunan mikroorganizmaların türünü belirler. Gıdaya eklenen koruyucu maddeler bazı mikroorganizmaların büyümesini engeller. Var olan farklı bir takım mikroorganizmalar aynı gıda kaynağı için mücadele eder ve böylece bir besindeki herhangi bir andaki mikroorganizma yapısı mikroorganizmaların başlangıçtaki toplanma şekline bağlı olarak gelişir.



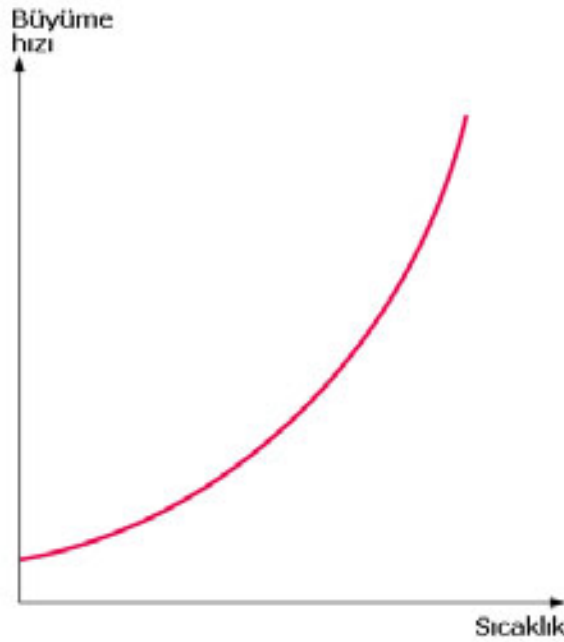
Şekil 1. Mikroorganizmaların türüne göre değişen büyüme eğrisi, [2]

Tüm canlı organizmalar büyümek için suya gereksinim duyar ve nemli olmayan gıdalarda büyüyemezler. Taze meyveler, sebzeler ve etler gibi dondurulmuş gıdalardaki mikrobiyolojik büyüme, kirlenmenin en kolay olduğu açık yüzeylerde meydana gelir. Bilindiği gibi bir paket içinde oda sıcaklığına bırakılan taze et hızla bozulabilmektedir. Öte yandan kontrollü bir ortamda asılı bulunan et, dış yüzeyinden su kaybetmesi sayesinde mikrobiyolojik büyümenin engellenmesiyle sağlıklı bir şekilde taze kalır ve korunur.

Bir gıdadaki mikroorganizma büyümesi gıdanın özeliği ve çevresel etkenlerin birlikte etkileri ile yönetilir. Gıdanın özeliği genelde değiştirilemezken çevre koşulları, ısıtma, soğutma, havalandırma, nemlendirme, nem alma ve oksijen miktarının kontrolü işlemleri ile istenilen değerlere getirilebilmektedir. Mikroorganizmaların bir gıdadaki büyüme hızı sıcaklığın bir fonksiyonudur ve büyüme hızını kontrol edebilmenin tek ve en verimli yolu sıcaklık kontrolüdür. Mikroorganizmalar en iyi "ılık" sıcaklıklarda büyümektedir.

Bu sıcaklıklar 20°C ile 60°C civarlarındadır. Büyüme hızı yüksek sıcaklıklarda azalır ve daha yüksek sıcaklıklarda (çoğu organizma için genellikle 70°C değerinin üzerinde) ölüm meydana gelmektedir. Soğutma mikroorganizmaların büyümesini azaltan ve böylece kolay bozulan gıdaların raf ömrünü uzatan basit ve etkili bir yoldur. 4°C ve altındaki sıcaklıklar emniyetli soğutma sıcaklıkları olarak kabul edilir. Bazı durumlarda sıcaklıktaki küçük bir artış, büyüme hızında büyük bir artışa ve böylece raf ömründe de gözle görülür bir azalmaya neden olabilmektedir, (Şekil 2). Bazı mikroorganizmaların büyüme hızı sıcaklığın her 3°C artışı ile iki katına çıkabilmektedir.

Mikrobiyolojik büyüme ve yayılmayı etkileyen bir başka faktör çevrenin bağıl nemidir. Bağıl nem havanın su içeriğinin bir ölçüsüdür. Soğuk odalarda yüksek nemliliklerden kaçınılmalıdır çünkü duvarlar ve tavanlarda meydana gelen yoğuşma küf büyümesi ve gelişmesi için uygun bir ortam oluşturmaktadır. Kirlenmiş yoğuşma suyunun gıda maddeleri üzerine damlaması sağlık açısından tehlikeler oluşturabilmektedir.



Şekil 2. Mikroorganizmaların gelişme hızı, [2]

Değişik mikroorganizmalar ortamda oksijen bulunmasına karşı değişik tepkimeler gösterebilmektedir. Küfler gibi bazı mikroorganizmalar büyümek için oksijene gerek duyarken bazıları da oksijenin varlığında büyümemektedir. Bazıları düşük oksijenli ortamlarda büyüebilirken, bazılarının büyümesinin ortamdaki oksijen ile ilgisi yoktur. Dolayısıyla ortamdaki oksijen miktarının kontrolü ile bazı mikroorganizmaların büyümeleri kontrol altına alınabilir. Örneğin vakumlu paketlenme işlemi, büyümek için oksijene ihtiyaç duyan mikroorganizmaların büyümelerini engelleyebilmektedir. Bunun yanında bazı meyvelerin depolama ömürleri, depolama ortamındaki oksijen miktarının azaltılması ile uzatılabilir. Gıda maddelerindeki mikroorganizmalar (1) sıkı hijyenik önlemler ile kirlenmenin önlenmesi, (2) çevre koşulları değiştirilerek büyümenin engellenmesi ve (3) organizmaların ısı işlem veya kimyasallar ile yok edilmesi ile kontrol edilebilir. Gıda işleme alanlarında kirlenmeyi önlemenin en iyi yolu havalandırma sistemlerinde havadaki bakterileri taşıyan toz parçalarını tutan kaliteli hava filtrelerinin kullanılmasıdır. Filtreler de, mikroorganizmalar ıslak ortamlarda büyüebileceği için kuru tutulmalıdır. Bunun yanında havalandırma sistemlerinde, hava kaynaklı kirleticilerin hava akımı yolu ile sisteme girmemesi için gıda işleme ortamında bir pozitif basınç oluşturulmalıdır. Sistemin duvarları ve tavanındaki yoğuşmanın engellenmesi ve soğutma sistemlerinin yoğuşma tavalarındaki yoğuşan suyun tesisat ile drenaj sistemlerine yönlendirilmesi de kirlenmeye karşı alınabilecek diğer iki önlemdir. Damlama sistemleri, içlerinde oluşabilecek mikrobiyolojik büyümenin engellenmesi için düzenli olarak temizlenmelidir. Ayrıca çiğ ve pişmiş gıdalar arasındaki temas en aza indirilmeli ve pişmiş gıdalar pozitif sıcaklıklarda tutulan odalarda korunmalıdır. Dondurulmuş gıdalar -18°C veya altındaki sıcaklıklarda korunmalı ve gıdalar dondurulduktan sonra, paketlenme sırasında kirlenmenin önlenmesi için özen gösterilmelidir.

Mikroorganizmaların büyümelerinin kontrolü en iyi, ortamın sıcaklık ve bağıl nem değerlerinin istenilen aralıklarda tutulması ile gerçekleşebilir. Örneğin, bağıl nemin %60 değerinin altında tutulması yüzeylerdeki tüm mikroorganizmaların büyümesini engellemektedir. Mikroorganizmalar, gıdanın yüksek sıcaklıklara (genellikle 70°C sıcaklığın üzerine) kadar ısıtılması, kimyasal işlem veya gıdanın ultraviyole ışık veya güneş ışınımı etkisine bırakılması ile yok edilebilir.

Mikroorganizmaların yaşamları ile büyümeleri arasındaki ayırım yapılmalıdır. Belli bir düşük sıcaklıkta büyüemeyen belli bir mikroorganizma, aynı sıcaklıkta uzun bir süre yaşayabilmektedir. Dolayısıyla dondurma mikroorganizmaları öldürmek için etkili bir yol değildir. Gerçekte, bazı mikroorganizma kültürleri çok düşük sıcaklıklarda dondurularak korunabilmektedir. Bazı mikroorganizmalar, düşük soğutma hızlarında düşük sıcaklıklara alışabildiklerinden ve o sıcaklıklarda büyüebildiklerinden dolayı gıdaların soğutulmasında dondurma hızı da önemli bir nokta olarak ele alınmalıdır, [2].

3. GIDALARIN SOĞUTULMASI VE DONDURULMASI

Et, balık, sebze ve meyve gibi çabuk bozulabilen taze gıdaların raf ömürleri, ürünleri donma sıcaklıklarının biraz üzerinde, genellikle 1 ile 4°C arasında depolayarak birkaç gün uzatılabilmektedir. Gıdaların depolama ömürleri, ürünleri dondurarak ve donma sıcaklıklarının altında sıcaklıklarda (gıda tipine bağlı olarak genellikle -18 ile -35°C arasında) korunarak birkaç ay uzatılabilmektedir.

Soğutma, gıdalardaki kimyasal ve biyolojik işlemleri, besinlerin bozulma ve kaliteden düşme oranlarını yavaşlatır. Örneğin tatlı mısır 21°C sıcaklıkta bir gün boyunca içerdiği şekerin yarısını kaybedebilirken 0°C sıcaklıkta %5 kadarını kaybeder. Taze kuşkonmaz 20°C sıcaklıkta bir gün boyunca içerdiği vitaminin yarısını kaybedebilirken, aynı oranda vitamini 0°C sıcaklıkta 12 günde kaybedilmektedir. Soğutma ayrıca ürünlerin raf ömürlerini uzatmaktadır. Örneğin brokolinin göze hoş görünmeyen sarı rengi almasının ilk gözlenmesi soğutma ile 2 veya 3 gün geciktirilebilmektedir.

Gıdaların dondurulması ile ilgili geçmişteki çalışmalar, ortaya çıkan büyük boyutlardaki buz kristalleri nedeniyle zayıf kalitedeki ürünler ile sonuçlanmıştır. Donma hızının, buz kristallerinin boyutları, gıdanın kalite, doku, besinsel ve duyu özellikleri üzerinde büyük etkisi olduğu görülmüştür. Yavaş donma sırasında buz kristalleri daha büyük boyutlara büyümekte iken hızlı donma sırasında çok sayıda buz kristali bir anda ve küçük sayılarda oluşmaktadır. Büyük buz kristalleri istenmeyen durumlardır çünkü hücrelerin duvarlarına zarar vererek dokuyu kalitesizleştirip çözülme sırasında ortaya çıkan doğal suyun kaybına yol açmaktadırlar. Ürün kalitesi, depolama ortamındaki sıcaklık dalgalanmalarından olumsuz olarak etkilenebilir. Gıdaların normal soğutulması herhangi bir faz değişimi olmadan sadece soğutmaktan oluşmaktadır. Diğer taraftan gıdaların dondurulması 3 kademedir oluşur: donma noktasına kadar soğutma (duyulur ısıyı uzaklaştırmak), dondurma (gizli ısıyı uzaklaştırmak) ve istenilen noktaya kadar bir miktar daha (donmuş gıdanın duyulur ısını uzaklaştırmak) soğutmaktır (Şekil 3), [2].

4. DONMA SÜRECİ

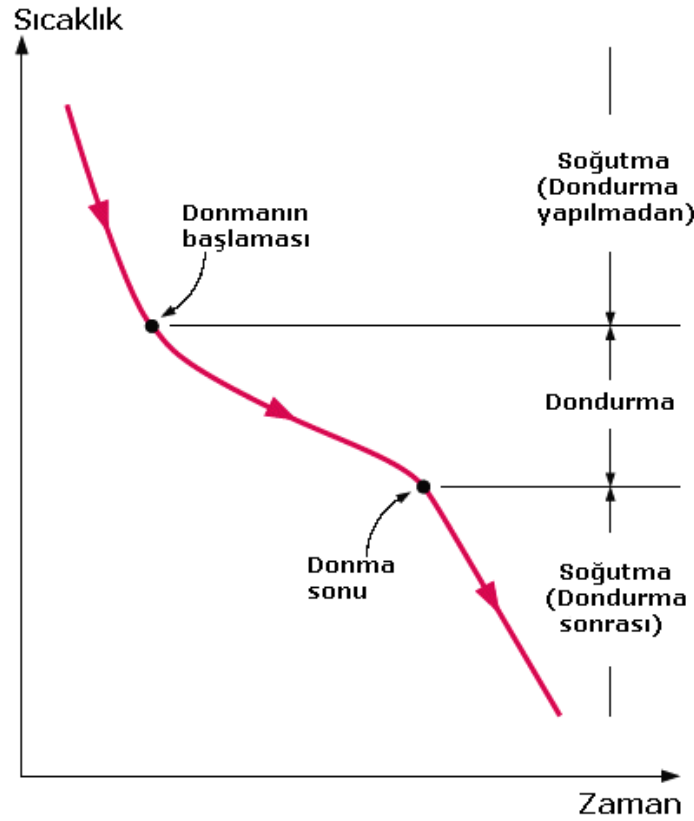
Gıda sanayinde gıdanın dondurulması, gıdalarda fiziksel, biyokimyasal ve mikrobiyolojik değişiklikleri en aza indirmek için kullanılan yöntemdir. Bu koruyucu etki, dondurulan gıdaların yeterli derecede soğuk bir ortamda tutulmasıyla sağlanır. %50 ile %95 arasında nem (su) içeriği olan gıdalar için donma süreci 3 aşamada incelenebilir:

- (i) **Ön soğutma aşaması:** Bu aşamada ürünün başlangıç sıcaklığından donma başlayıncaya yani faz değişimi başlangıcına kadar soğutma yapılır. Isı, faz değişimi etkisi olmaksızın düşük sıcaklıktaki ürüne transfer edilir ve bu duyulur ısı olarak adlandırılır.

(ii) **Faz değişimi aşaması:** Bu aşama üründe buz oluşumunu kapsar. Dondurulabilen suyun büyük bir kısmı buza dönüştürülür. Saf maddelerde bu aşama, üründen ısı çekilmesinden ve faz değişiminden dolayı gizli ısı olarak adlandırılır.

(iii) **Tavlama aşaması:** Bu aşama, ürünün saklanması için istenen son sıcaklığa kadar soğutulmasıdır ve gizli ısı, duyulur ısıya göre ihmal edilebildiğinde başlar. Bu aşama sıcaklık değişiklikleri oranlarında artış olarak tanımlanabilir. Dondurulmuş ürün, dondurucuyu terk ettiğinde düzenli olmayan bir sıcaklık dağılımına sahiptir. Merkezinde ılık, yüzeyinde ise en düşük sıcaklıktadır. Genelde, ürünün denge sıcaklığı olan -18°C ya da daha düşük sıcaklıklara kadar soğutulması önerilir. Suyun ve sulu çözeltilerin donma eğrisi Şekil 4 ile şematik olarak gösterilmiştir.

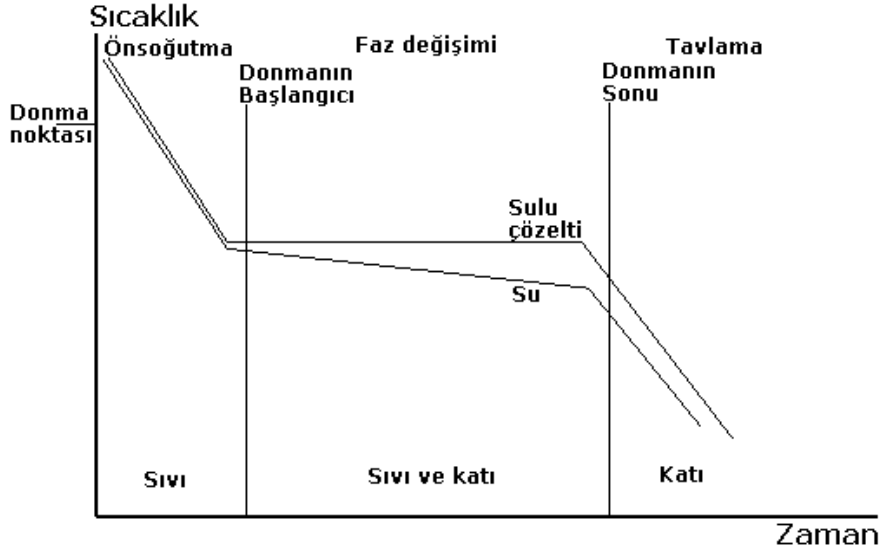
Şekil 5 ile verilen adımlarda meyveler ve sebzelerin donma süreçleri genel olarak gösterilmiştir. Ürüne ve şartlara bağlı olarak bu adımlar değişiklik gösterebilir. Aslında, her türlü üretim değişik yöntemler gerektirir. Ön işleme yöntemleri, son ürün kalitesini etkiler. Farklı sebze ve meyve türleri yüksek kalitede donmuş ürün elde etmek için farklı ön işleme yöntemleri gerektirir. En iyi saklama koşulları sıcaklık ve havanın akış hızı cinsinden sağlanmalıdır.



Şekil 3. Gıdaların türlerine göre değişen donma eğrisi, [2]

Donma işlemi gıdada mikrobiyolojik ve enzimatik değişikliklerin gelişimini en aza indirmek için mümkün olduğunca hızlı gerçekleştirilmelidir. Geçmişte dondurulmuş gıdaların çok hızlı dondurulmalarının, ürünlerin kalitelerini çok fazla şekilde etkilediği düşünülürdü. Ancak, donma hızı birçok dondurulmuş gıdanın kalitesini etkilememektedir. Bu, donma hızının kalite üzerinde hiç etkisinin olmadığı anlamına gelmemelidir. Birçok gıda oldukça yavaş donduruluyorken, sınırlı sayıda gıda son derece hızlı dondurulur. Balık ve kümes hayvanları diğer gıdalara göre daha hassas olduklarından dondurma işlemi çok yavaş gerçekleştirilir. Et de ise oldukça yavaştır. Çilek ve fasulye daha iyi bir dokuya ve su tutma özelliğine sahip olduğundan dolayı son derece hızlı bir şekilde dondurulabilir. Oysa yüksek nişasta içeren meyve ve sebzeler örneğin bezelye, donma hızına duyarlı değildir. Ticari gıda dondurma uygulamalarında, ortalama donma hızı 0.5×10^{-6} m/s ile 300×10^{-6} m/s arasındadır.

Gıdalarda donma noktası değerleri, ürünlere göre yapılan deneylere bağlı olarak, donmaya kadar gerçekleşen yavaşça soğutma ile bulunur. Isılıft gibi hassas ölçüm cihazlarının ürünün içerisine yerleştirilmesi ile yapılan ölçümlerde, buz oluşumundan dolayı sıcaklıktaki ani yükselme, donmanın başladığını gösteren noktadır. Sebzeler ve meyveler için donmadan dolayı zarar görebilecekleri en yüksek donma noktası dikkate alınır. Diğer gıdalar için genellikle ortalama donma sıcaklığı kullanılır. Gıdaların donma noktası sıcaklıkları bileşimlerine göre değişmektedir. Örneğin, çok sayıda elma aynı sıcaklıkta donmaz, [1].



Şekil 4. Su ve sulu çözeltinin donma eğrisi, [1]

5. HESAPLAMA YÖNTEMİ

Hesaplama yöntemi olarak, yüksek nem içeriğine sahip (nem içeriği %55 değerinden yüksek olan) gıdaların donma süreleri hesabı için yararlı bir yöntem olan Pham yöntemi kullanılacaktır [3, 4].

Pham yönteminde aşağıda verilen kabuller altında hesaplama yapılır:

- Dondurucu içinde kullanılan hava akışkanının sıcaklığı sabittir.
- Ürünün başlangıç sıcaklığı sabittir.
- Son sıcaklık sabit bir değerde alınır.
- Gıdanın yüzeyi ile hava arasında oluşan ısı taşınımına ait ısı taşınım katsayısı, Newton Soğuma Kanunu ile tanımlanmıştır.

Pham yönteminde, bir başlangıç sıcaklığından istenen son sıcaklığa kadar olan donma sırasındaki toplam ısı çekimi işlemi, iki bileşene ayrılarak hesaplanır. Şekil 6 ile verildiği gibi ısı çekimi, merkez sıcaklık çizgisine göre ortalama donma sıcaklığı T_m kullanılarak iki parçaya ayrılmıştır. Bu eğrinin ilk parçası ön soğutmadaki ısı çekimini ve ürünün donmaya başlayacağı başlangıç faz değişimini göstermektedir. İkinci parça ise, faz değişimi sırasında kalan ısı çekimini ve istenen son sıcaklığa ulaşmak için gerekli ek soğutmayı göstermektedir.

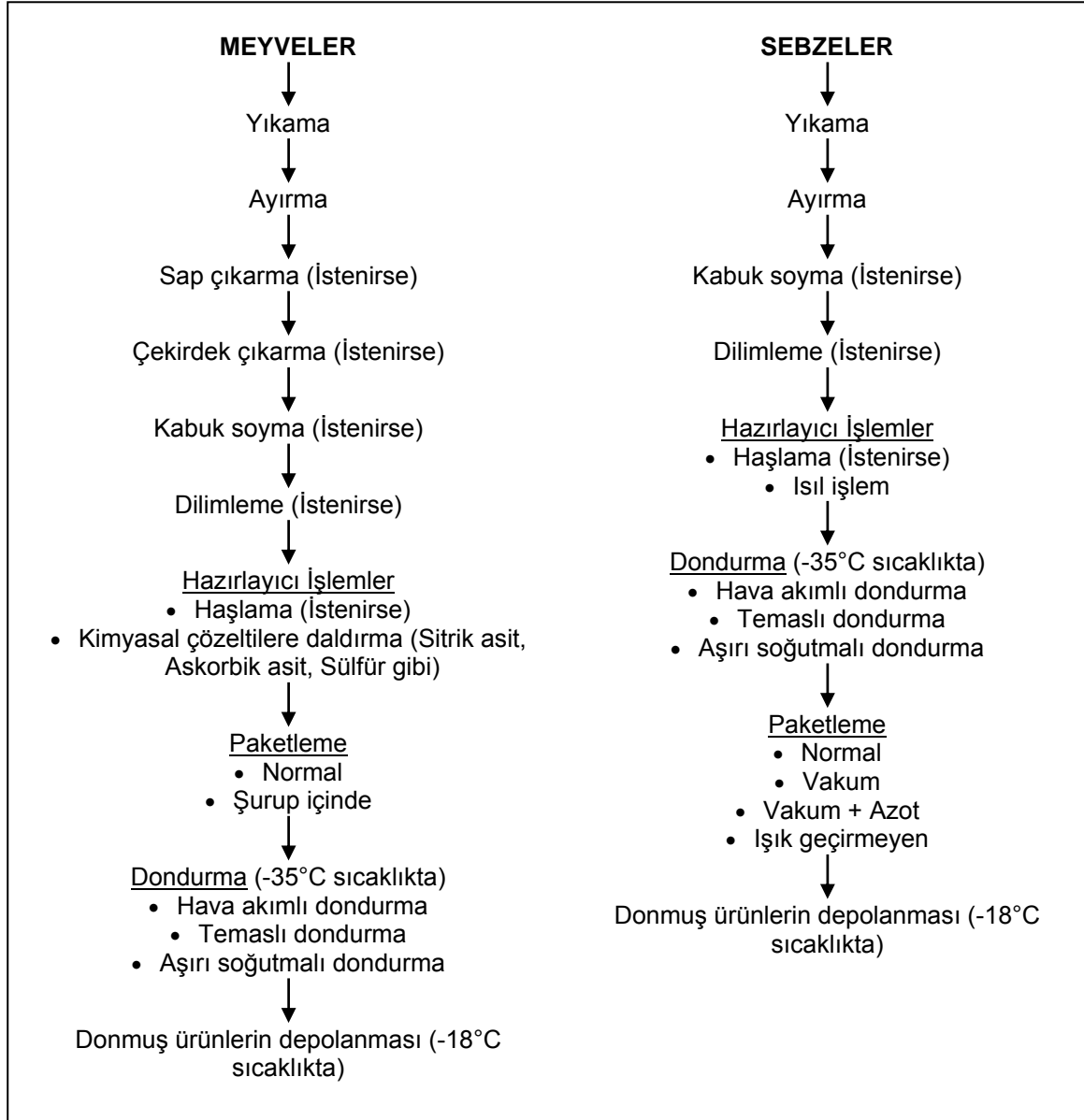
Ortalama donma sıcaklığı T_m , Denklem (1) ile verilmiştir. Denklem (1), nem içeriği %55 değerinden fazla olan gıdalar için deneysel çalışmalar sonucu bulunmuş bir eşitliktir, [3, 4].

$$T_m = 1.8 + 0.263T_c + 0.105T_a \quad (^\circ\text{C}) \quad (1)$$

Denklem (1) ile verilen T_c ($^{\circ}\text{C}$), ürünün son merkez sıcaklığı ve T_a ($^{\circ}\text{C}$) ise, donma işleminde kullanılan hava akışkanının sıcaklığıdır.

Ürünün, T_i ($^{\circ}\text{C}$) başlangıç sıcaklığından T_c ($^{\circ}\text{C}$) son sıcaklığına kadar olan donma süresi, Denklem (2) ile hesaplanabilir.

$$t = \frac{d}{Eh} \left(\frac{\Delta H_1}{\Delta T_1} + \frac{\Delta H_2}{\Delta T_2} \right) \left(1 + \frac{Bi}{2} \right) \quad (s) \quad (2)$$



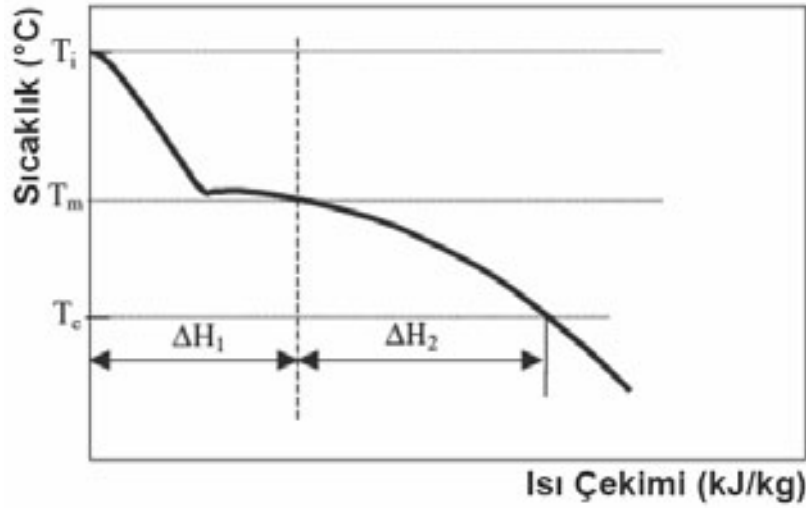
Şekil 5. Meyve ve sebzeler için akış çizelgesi, [1]

Denklem (2) ile verilen d (m); yüzeyden merkeze doğru olan en kısa uzunluğu gösteren karakteristik boyut (küre için karakteristik boyut yarıçaptır), h ($\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$); ısı taşınım katsayısı ve E (-); boyutsal şekil çarpanıdır (sonsuz levha için 1, sonsuz silindir için 2 ve küre için 3 alınabilir).

Denklem (3) ile verilen ΔH_1 (Jm^{-3}) terimi, faz değişiminin başlangıç dönemi ve ön soğutma için hacimsel entalpideki değişimi göstermektedir.

$$\Delta H_1 = \rho_u c_u (T_i - T_m) \quad (\text{J}/\text{m}^3) \quad (3)$$

Denklem (3) ile verilen ρ_u (kgm^{-3}); donmamış maddenin yoğunluğu, c_u ($\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$); donmamış maddenin özgül ısı ve T_i ($^{\circ}\text{C}$); ürünün başlangıç sıcaklığıdır.



Şekil 6. Gıdaların donması sırasındaki ısı çekimine karşı ürünün merkezindeki sıcaklığın değişimi [3]

Denklem (4) ile verilen ΔH_2 (Jm^{-3}) terimi, kalan faz değişimini de kapsayan, ürünün son merkez sıcaklığına ulaşıncaya kadar hacimsel entalpide olan değişimi göstermektedir.

$$\Delta H_2 = \rho_f [L_f + c_f (T_m - T_c)] \quad (\text{J}/\text{m}^3) \quad (4)$$

Denklem (4) ile verilen ρ_f (kgm^{-3}); donmuş ürünün yoğunluğu, c_f ($\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$); donmuş ürünün özgül ısı ve L_f ($\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$); donmakta olan ürünün erime gizli ısısıdır.

Biot sayısı ise Denklem (5) ile tanımlanmıştır. Denklemde yer alan h ($\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$), ısı taşınım katsayısı, d (m); karakteristik boyut ve k_f ($\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$); donmuş maddenin ısı iletkenliğidir.

$$\text{Bi} = \frac{hd}{k_f} \quad (-) \quad (5)$$

Sıcaklık değişimi ΔT_1 ($^{\circ}\text{C}$) Denklem (6), ΔT_2 ($^{\circ}\text{C}$) ise Denklem (7) ile verilmiştir.

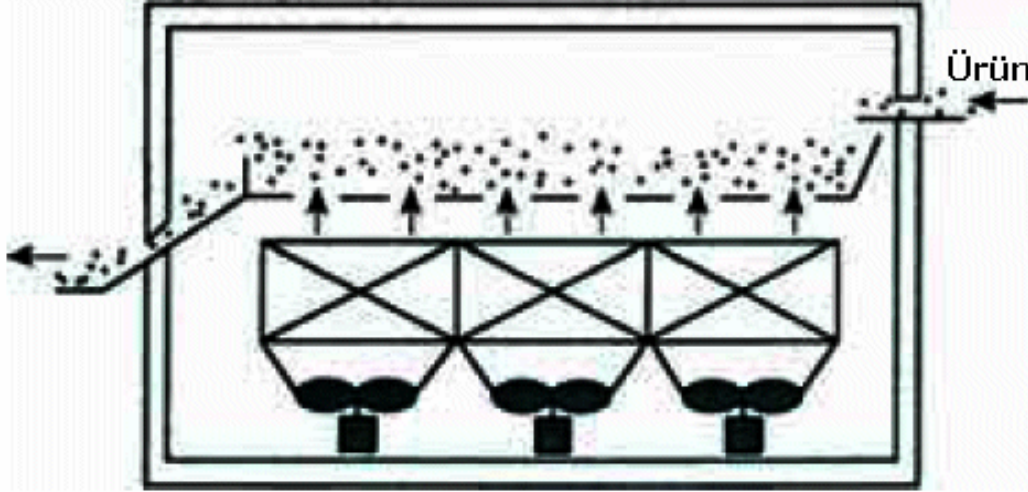
$$\Delta T_1 = \frac{T_i + T_m}{2} - T_a \quad (^{\circ}\text{C}) \quad (6)$$

$$\Delta T_2 = T_m - T_a \quad (^{\circ}\text{C}) \quad (7)$$

Denklem (6 ve 7) ile verilen T_i ($^{\circ}\text{C}$); başlangıç sıcaklığı, T_a ($^{\circ}\text{C}$); hava akışkanının sıcaklığı ve T_m ($^{\circ}\text{C}$); Denklem (1) ile tanımlanan ortalama sıcaklıktır.

6. ÖRNEK UYGULAMA

Bu çalışmada örnek gıda maddesi olarak çilek meyvesi alınmıştır. Bölüm 5 ile verilen hesaplama yöntemi, Şekil 7 ile şematik gösterimi verilen çileğin bir akışkan yataklı dondurucu içindeki donma süresinin tahmini için kullanılmıştır.



Şekil 7. Akışkan yataklı dondurucunun şematik gösterimi, [5]

Çileğin ve akışkan yataklı dondurucu içindeki ortamın termofiziksel özellikleri ile çilek ile hava arasındaki ısı taşınımına ait ısı taşınım katsayısı Tablo 1 ile verilmiştir.

Tablo 1. Verilen özellik ve değerler, [3, 4]

Çileğin başlangıç sıcaklığı	$T_i = 15^\circ\text{C}$
Çileğin nem içeriği	%75
Çileğin çapı	$D = 2.5 \text{ cm}$
Çileğin istenen son merkez sıcaklığı	$T_c = -18^\circ\text{C}$
Akışkan yataklı dondurucu içindeki hava sıcaklığı	$T_a = -40^\circ\text{C}$
Isı taşınım katsayısı	$h = 80 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$
Donmamış çileğin yoğunluğu	$\rho_u = 1130 \text{ kg}/\text{m}^3$
Donmuş çileğin yoğunluğu	$\rho_f = 950 \text{ kg}/\text{m}^3$
Donmamış çileğin özgül ısısı	$c_u = 3.55 \text{ kJ}/(\text{kg}^\circ\text{C})$
Donmuş çileğin özgül ısısı	$c_f = 1.5 \text{ kJ}/(\text{kg}^\circ\text{C})$
Donmuş çileğin ısı iletim katsayısı	$k_f = 1.5 \text{ W}/(\text{mK})$

Tablo 1 ile verilen özellik ve değerler kullanılarak, çileğin istenen son merkez sıcaklığına gelmesi için geçen süre hesabı, aşağıda verildiği gibi hesaplanabilir:

1. Denklemler (1) yardımıyla ortalama donma sıcaklığı (T_m) hesabı:

$$T_m = 1.8 + 0.263(-18^\circ\text{C}) + 0.105(-40^\circ\text{C}) = -7.134^\circ\text{C}$$

2. Denklem (3) kullanılarak hacimsel entalpi değişimi (ΔH_1) hesabı:

$$\Delta H_1 = (1130 \text{ kg/m}^3)[3550 \text{ J/(kgK)}][15 - (-7.134)]^\circ\text{C} = 88790541 \text{ J/m}^3$$

3. Çileğin erime gizli ısı, suyun erime gizli ısı (333.2 kJ/kg) ile çileğin nem içeriğinin çarpımı ile bulunur:

$$L_f = (75/100)(333200 \text{ J/kg}) = 249900 \text{ J/kg}$$

4. Denklem (4) kullanılarak hacimsel entalpi değişimi (ΔH_2) hesabı:

$$\Delta H_2 = (950 \text{ kg/m}^3)\{(249900 \text{ J/kg}) + [1500 \text{ J/(kgK)}][-7.134 - (-18)]\} = 252889050 \text{ J/m}^3$$

5. Denklem (6) yardımıyla sıcaklık değişimi (ΔT_1) hesabı:

$$\Delta T_1 = \frac{15 + (-7.134)}{2} - (-40) = 43.933^\circ\text{C}$$

6. Denklem (7) yardımıyla sıcaklık değişimi (ΔT_2) hesabı:

$$\Delta T_2 = [-7.134 - (-40)] = 32.866^\circ\text{C}$$

7. Denklem (5) kullanılarak Biot sayısı hesaplanabilir:

$$Bi = \frac{[80 \text{ W/(m}^2\text{K)}](0.025/2) \text{ m}}{1.5 \text{ W/(mK)}} = 0.6\bar{6}$$

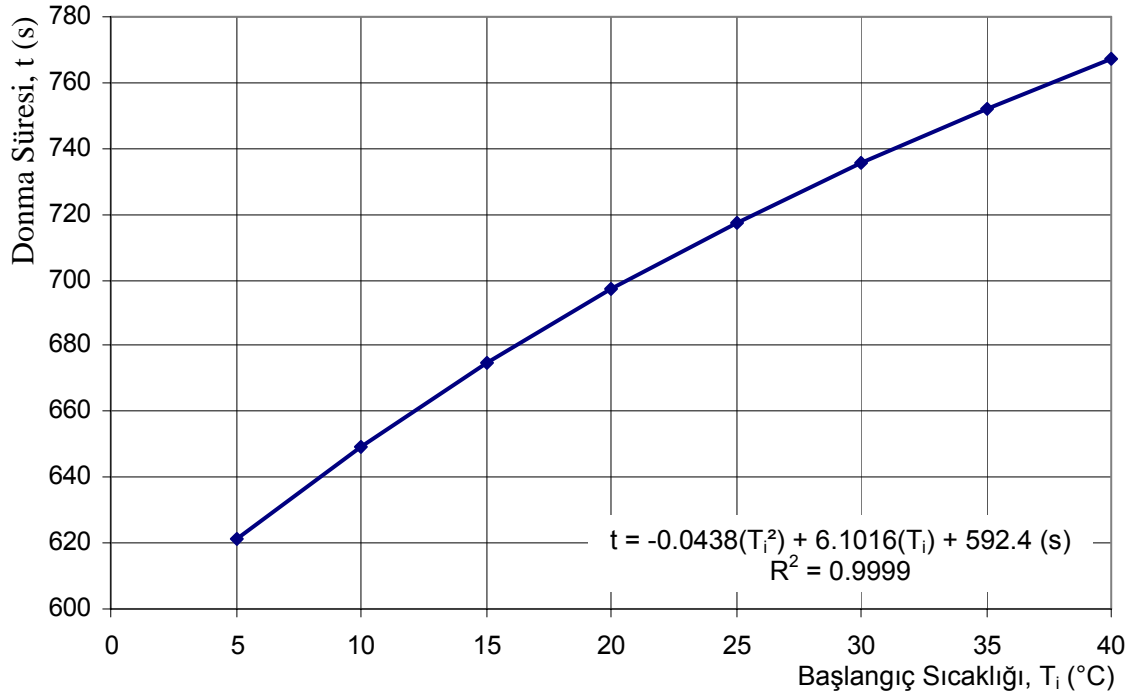
8. Boyutsal şekil çarpanı $E = 3$ alınarak, 1 adımdan 7. adıma kadar hesaplanan değerler yardımıyla tahmini donma zamanı Denklem (2) kullanılarak hesaplanabilir:

$$t = \frac{(0.025/2) \text{ m}}{(3)[80 \text{ W/(m}^2\text{K)}]} \left(\frac{88790541 \text{ J/m}^3}{43.933^\circ\text{C}} + \frac{252889050 \text{ J/m}^3}{32.866^\circ\text{C}} \right) \left(1 + \frac{0.6\bar{6}}{2} \right) = 674.694 \text{ s}$$

Tablo 1 ile verilen veriler göz önüne alındığında birbirine yakın geometrik ölçülerde ve bir akışkan yataklı dondurucu içinde bulunan çilekler yaklaşık 675 s (11.25 dakika veya 0.19 saat) sonra istenen son merkez sıcaklığına gelecektir. Tablo 1 ile verilen veriler değiştirilerek yaklaşık donma zamanı yukarıda verilen 8 adım tekrar edilerek hesaplanabilir.

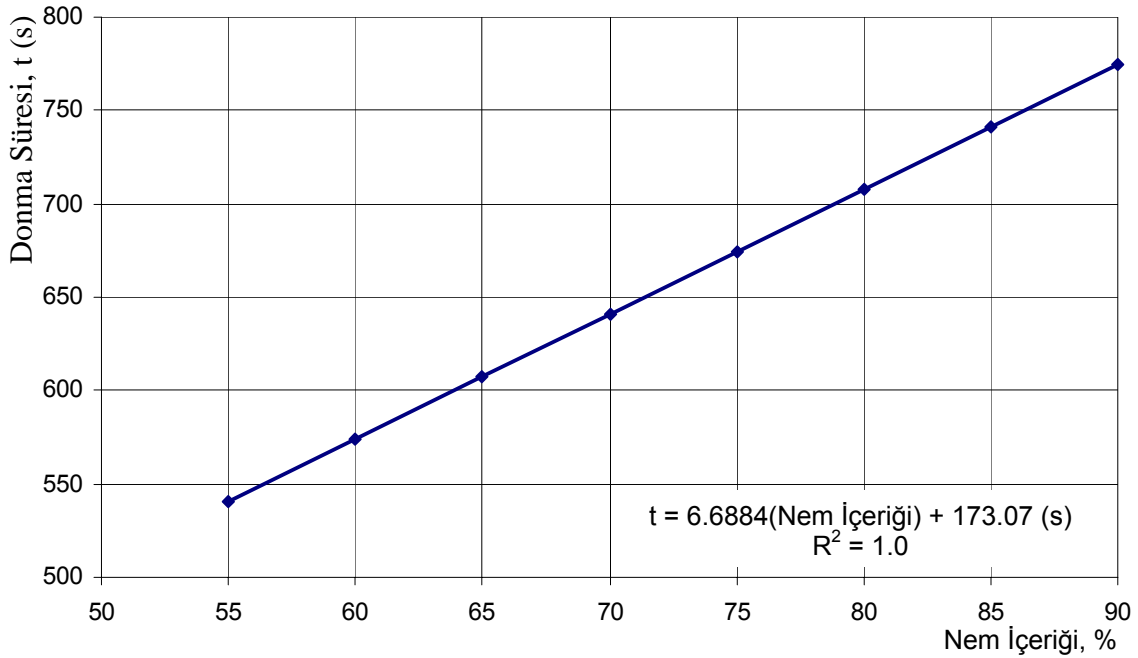
7. ÖZELİKLERİN VE DEĞERLERİN DONMA SÜRESİNE ETKİSİ

Tablo 1 ile verilen veriler içinde çileğin başlangıç sıcaklığı 5°C ile 40°C arasında değiştirip, diğer veriler sabit tutulduğunda Şekil 8 verilen grafik elde edilebilir.



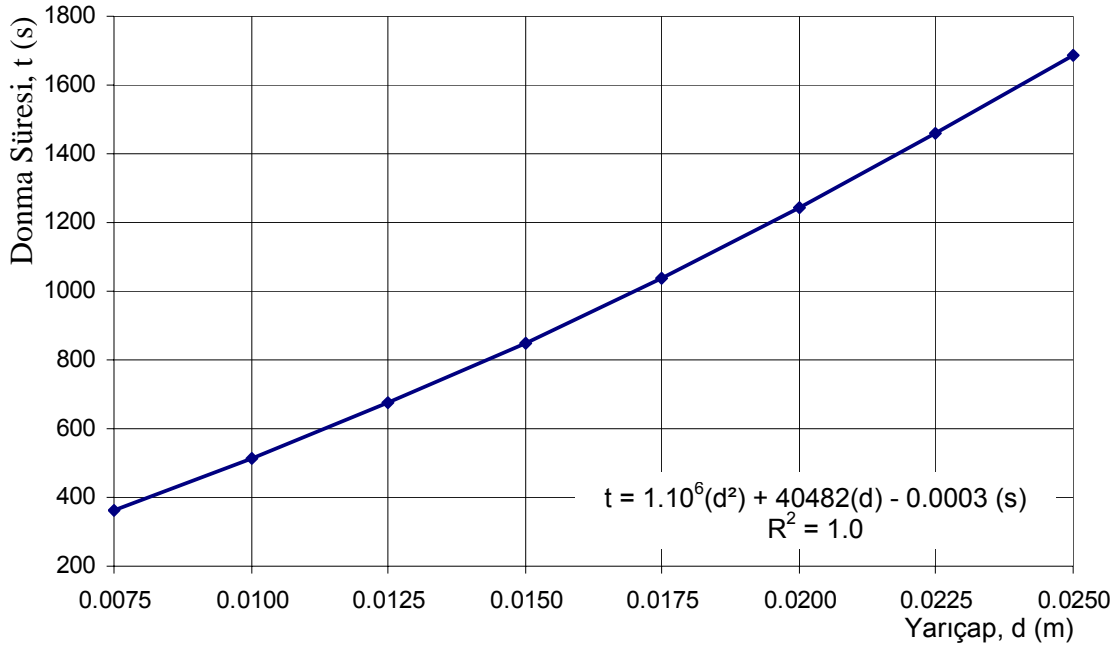
Şekil 8. Çileğin başlangıç sıcaklığı-donma süresi değişimi

Tablo 1 ile verilen veriler içinde çileğin nem içeriği %55 ile %90 arasında değiştirip, diğer veriler sabit tutulduğunda Şekil 9 verilen grafik elde edilebilir.



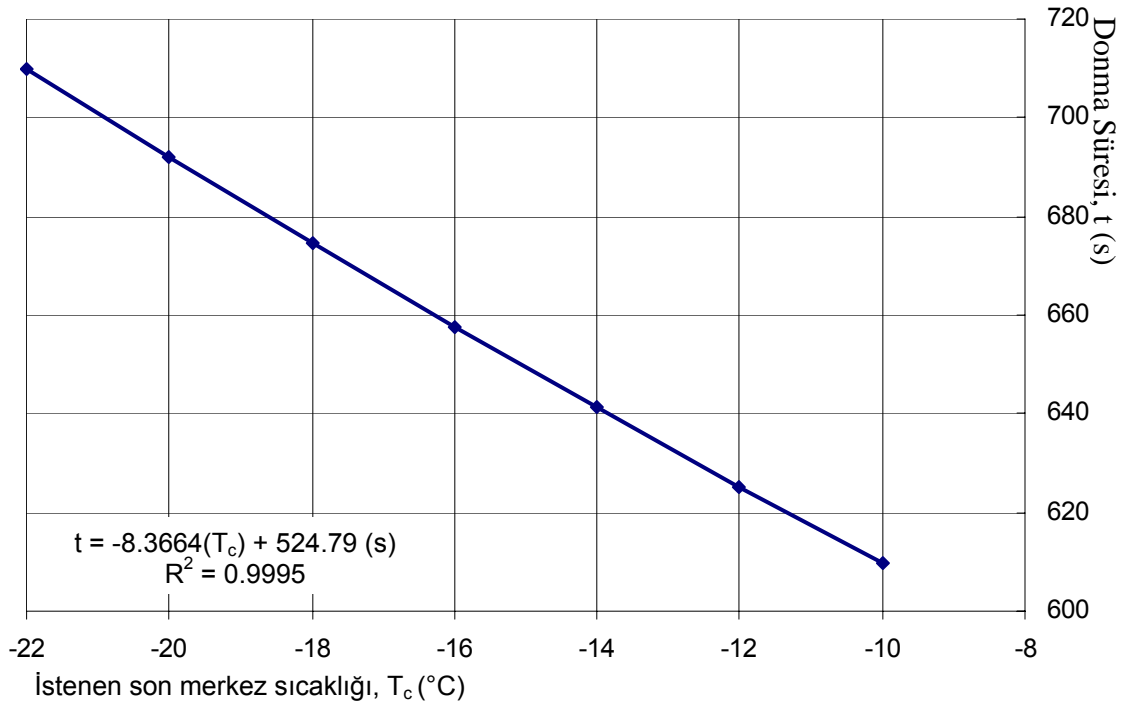
Şekil 9. Çileğin nem içeriği-donma süresi değişimi

Tablo 1 ile verilen veriler içinde küre kabulü altında çileğin yarıçapı 0.0075 m ile 0.025 m arasında değiştirip, diğer veriler sabit tutulduğunda Şekil 10 verilen grafik elde edilebilir.



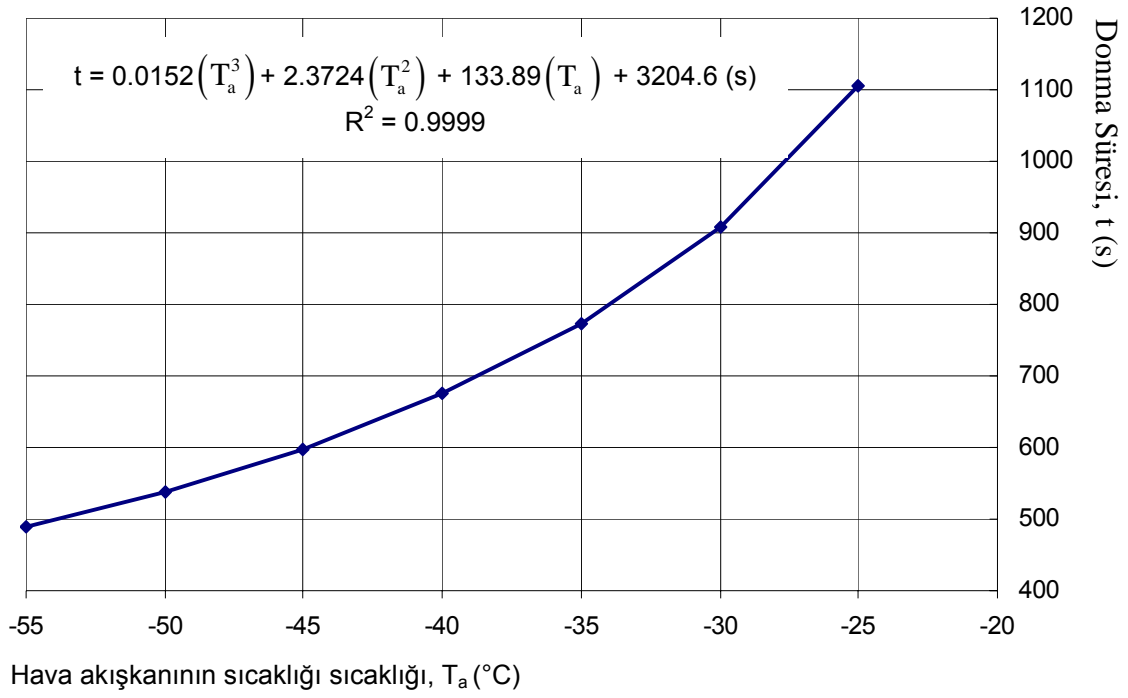
Şekil 10. Çileğin yarıçapı-donma süresi değişimi

Tablo 1 ile verilen veriler içinde çileğin istenen son merkez sıcaklığı -22°C ile -10°C arasında değiştirip, diğer veriler sabit tutulduğunda Şekil 11 verilen grafik elde edilebilir.



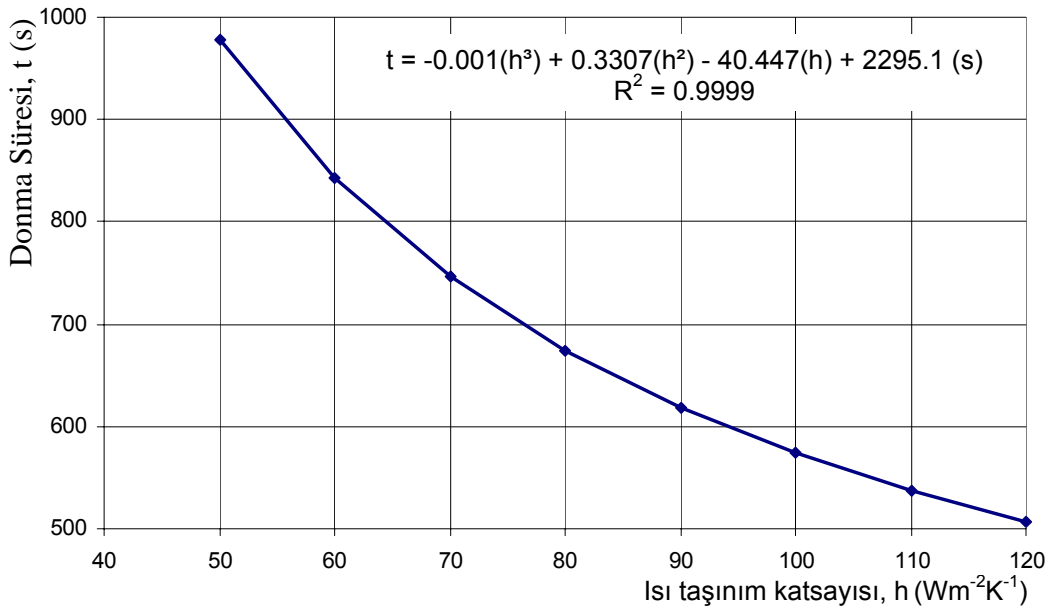
Şekil 11. Çileğin istenen son merkez sıcaklığı-donma süresi değişimi

Tablo 1 ile verilen veriler içinde akışkan yataklı dondurucudaki hava sıcaklığı -55° ile -25° arasında değiştirip, diğer veriler sabit tutulduğunda Şekil 12 verilen grafik elde edilebilir.



Şekil 12. Çileğin istenen son merkez sıcaklığı-donma süresi değişimi

Tablo 1 ile verilen veriler içinde çilek ile hava arasındaki ısı taşınımına ait ısı taşınım katsayısı 50 W/(m²K) ile 120 W/(m²K) arasında değiştirip, diğer veriler sabit tutulduğunda Şekil 13 verilen grafik elde edilebilir.



Şekil 13. Isı taşınım katsayısı-donma süresi değişimi

SONUÇ

Tablo 1 verileri göz önüne alınarak yapılan örnek hesaplama sonucu istenen son merkez sıcaklığına 675 s sonra ulaşılabilceği gösterilmiştir. Şekil 8 ile 13 arasındaki grafikler incelendiğinde ise donma süresinin başlangıç sıcaklığına, nem içeriğine, çileklerin yarıçapına, istenen son merkez sıcaklığına, hava akışkanının sıcaklığına ve ısı taşınım katsayısına bağlı olarak değiştiği görülmüştür. Başlangıç sıcaklığının, nem içeriğinin, çileğin yarıçapının ve hava akışkanının sıcaklığının artması ile donma süresinin arttığı ve istenen son merkez sıcaklığı ile ısı taşınım katsayısının azalması ile azaldığı görülmüştür. Gıdaların özellikleri ile başlangıç koşulları dikkate alınarak ve ısı ekonomisine de dikkat ederek istenen son merkez sıcaklığına göre bir ön hesaplama yapılarak uygun bir tasarım geliştirilmelidir.

KAYNAKLAR

- [1] Dinçer İ, Heat Transfer in Food Cooling Applications, ISBN 1-56032-580-1, Taylor & Francis, 1997.
- [2] Çengel YA, Heat and Mass Transfer A Practical Approach, Third Edition, ISBN 007-125739-X, McGraw-Hill, 2006.
- [3] Pham QT, "Simplified equation for predicting the freezing time of foodstuffs", Journal of Food Technology, Vol. 21, pp. 209-219, 1986.
- [4] Singh RP, "Estimating freezing time of foods", Chapter 36, Heat Transfer Calculations, Editor: M. Kutz, ISBN 0-07-141041-4, McGraw-Hill, 2006.
- [5] Barbosa-Canovas GV, Altunakar, B, Mejia-Lorio DJ, "Freezing of fruits and vegetables: An agribusiness alternative for rural and semi-rural areas", FAO Agricultural Services Bulletin 158, ISSN 1010-1365, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, 2005.

ÖZGEÇMİŞ

Hüseyin GÜNERHAN

Hüseyin GÜNERHAN, 1983 yılında İzmir Atatürk Lisesini bitirdi. Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümünü 31.01.1990 tarihinde, Ege Üniversitesi Güneş Enerjisi Enstitüsü Enerji Teknolojisi Anabilim Dalında yaptığı yüksek lisans öğrenimini 03.08.1992 tarihinde ve Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Güneş Enerjisi Anabilim Dalında yaptığı doktora öğrenimini 11.01.1999 tarihinde tamamladı. 23.01.1991-21.08.2001 tarihleri arasında, Ege Üniversitesi Güneş Enerjisi Enstitüsü Enerji Teknolojisi Anabilim Dalında öğretim elemanı görevi ve araştırma görevlisi ünvanı ile çalıştı. 01.12.1999-21.11.2000 tarihleri arasında, Milli Savunma Bakanlığı Teknik Hizmetler Dairesi Başkanlığında (Ankara) proje subayı olarak görev yaptı. 15.03.2001 tarihinden beri Ege Üniversitesi Bilim-Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi (EBİLTEM)-Enerji Verimliliği ve Yönetimi Ar-Ge Biriminde (EVYAB) kurucu üye olarak, 22.08.2001 tarihinden beri, Ege Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü Termodinamik Anabilim Dalında öğretim üyesi görevi ve yardımcı doçent doktor ünvanı ile çalışmaktadır. 20.08.2004 tarihinde, Ege Üniversitesi Çevre Sorunları Uygulama ve Araştırma Merkezine (ÇEVMER) müdür yardımcısı olarak atanmıştır. TMMOB Makina Mühendisleri Odası İzmir Şubesi Tesisat Mühendisliği Komisyonu üyesidir. Çalışma alanlarını, Isı ve Kütle Transferi, Termodinamik, Sayısal Analiz, Isıl Enerji Depolama, Toprak Kaynaklı Isı Pompaları ve Yeni Enerji Kaynakları oluşturmaktadır. (huseyingunerhan@gmail.com)