



**Bu bir MMO
yayıdır**

MMO bu yayındaki ifadelerden, fikirlerden, toplantıda çıkan sonuçlardan, teknik bilgi ve basım hatalarından sorumlu değildir.

KRİYOJENİK VE MEKANİK DONDURMA SİSTEMLERİNDE DONMA SÜRELERİNİN GIDA TÜRÜNE BAĞLI KARŞILAŞTIRMALI İNCELENMESİ

**NAZMİ YILMAZ
ENVER YALÇIN
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ**

**M. ZİYA SÖĞÜT
ANADOLU ÜNİVERSİTESİ**

KRİYOJENİK VE MEKANİK DONDURMA SİSTEMLERİNDE DONMA SÜRELERİNİN GIDA TÜRÜNE BAĞLI KARŞILAŞTIRMALI İNCELENMESİ

Enver YALÇIN
Nazmi YILMAZ
M. Ziya SÖĞÜT

ÖZET

Başta gıda endüstrisi olmak üzere yaygınlığı hızla artan derin dondurma teknolojileri; ürünlerin yapısına bağlı olarak ürünün uzun süreli muhafazası veya yapısal özelliklerinin korunması için hızlı veya yavaş dondurma amacıyla kullanılan teknolojilerdir. Dondurma işleminin hızı hem gıda kalitesini hem de sistem kapasitesini doğrudan etkilediği gibi dondurma süreçlerinde doğrudan enerji tüketimini de etkiler. Ürünlerin dondurulma ve muhafaza süreçleri de dikkate alındığında geleneksel teknolojilere göre kriyojenik soğutma uygulamaları enerji performansı yönüyle öne çıkmaktadır. Bu çalışmada donma hızı referans alınarak; klasik ve kriyojenik dondurma yöntemlerinin soğutma yüküne bağlı enerji performans değerlendirmeleri yapılmıştır. Hesaplamalarda dört farklı ürün kullanılmış ve ürünlerin geometrik şekilleri de göz önünde bulundurulmuştur. İncelenen dört ürün için; kriyojenik dondurma yöntemi ile dondurma işleminin, geleneksel mekanik soğutma yöntemine göre %5 ile %15 gibi çok daha kısa sürelerde gerçekleştiği görülmüştür. Özellikle hava soğutmalı uygulamalarda yüksek enerji tüketimi düşünüldüğünde bu önemli bir sonuçtur. Çalışmada kriyojenik soğutmanın ürün üzerindeki etkileri de değerlendirilerek soğutma zinciri konusunda önerilerde bulunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Soğutma, donma hızı, kriyojenik soğutma, donmuş gıda, enerji verimliliği.

ABSTRACT

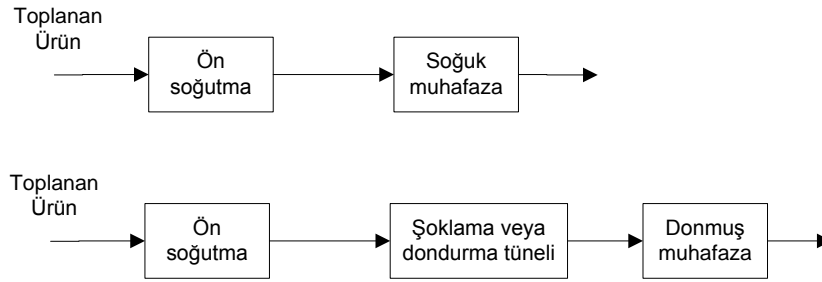
Deep-freezing technologies are becoming prevalent with great pace especially for food industry. Deep-freezing technologies are used for long time conservation of products based on their structures or protecting their structural specialties with both fast and slow freezing options. Rate (pace) of freezing affects both the quality of food and system capacity and also have impacts on energy consumption rates of freezing process. Cryogenic cooling systems have energy performance advantages in freezing of products and in preservation processes when it's compared with traditional technologies. In this study, energy performances of traditional and cryogenic cooling methods based on cooling load are researched referencing freezing rates. Four different products were used in calculations also considering geometrical shapes of products. It is proved that four different products were frozen faster with a range of %5 and %15 with cryogenic cooling systems. This result shows great importance when high energy consumption rates of air-cooling systems are considered. Additionally, possible effects of cryogenic cooling methods were examined and some advices were made about cooling chain.

Keywords: Cooling, freezing rate, cryogenic cooling, frozen food, energy efficiency.

1. GİRİŞ

Donmuş gıda talebinin hızla geliştiği günümüzde, sürdürülebilir enerji yönetimi ve enerjinin verimli kullanımı yönüyle üretimde enerji girdisinin maliyet etkilerini azaltmak önemlidir. Ayrıca günümüzde yaygın kullanılan R404A, R134a gibi hidrokarbon özellikli soğutucu akışkanların özellikle yüksek küresel ısınma etkileri (GWP) nedeniyle problemlili akışkanlar olmaları, daha çevreci soğutucu akışkan tercihlerini öne çıkartmıştır. Maliyet etkileri de değerlendirildiğinde soğuk zincir uygulamalarında klasik yöntemle soğutma uygulamalarının neden olduğu etkiler de göz önüne alındığında, kriyojenik soğutma uygulamaları gibi etkin çözümler üzerinde çalışmalar geliştirilmiştir.

Gıdalar soğutma uygulamalarında, özelliklerine ve muhafaza sürelerine göre soğuk veya donmuş muhafaza olarak korunur. Ürünler $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ile $+15\text{ }^{\circ}\text{C}$ aralığında soğuk muhafaza yapılırken, ürünün özelliğine göre donmuş muhafaza -12 ile $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ aralığında yapılır. Ürünlerin muhafazasına ilişkin süreç Şekil 1'de verilmiştir [1].

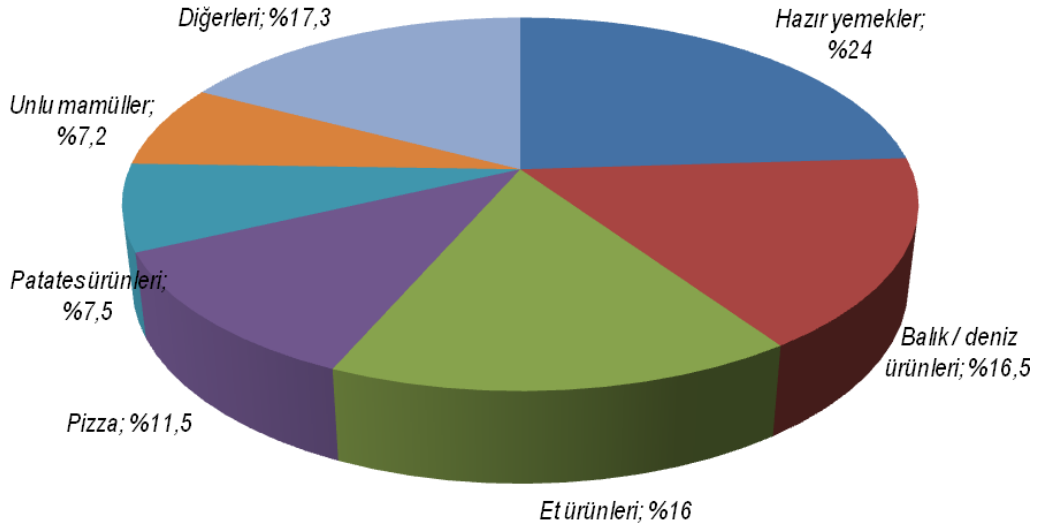


Şekil 1. Soğuk ve donmuş muhafaza zinciri [1].

Dondurma işlemlerinde ürün tanımı sıcaklık değerlerine göre değişmektedir. Gıdaların -10 ve $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklıklarda bulunması dondurulmuş ürün tanımına girerken, $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklık ve altındaki sıcaklık derecelerinde bulundurulması derin dondurulmuş ürün tanımına girer. Dondurma işlemi prosesin özelliğine göre soğuk hava ile dondurma, hava akımında dondurma, dolaylı temas yöntemiyle dondurma, direkt daldırma yöntemiyle dondurma ve kriyojenik dondurma gibi çeşitli yöntemlerle yapılabilir. Dondurma yöntemleri arasında kriyojenik dondurma, özellikle kriyojenik gazların toksik özellikte olmaması, dondurulmak istenen madde ile kriyojenik gazın bir reaksiyona girmemesi (inert olması), ve süreçte havanın yerini alarak oluşabilecek çok sayıda oksidatif reaksiyonları önlemesi yönüyle önemlidir [2]. Bu çalışmada özellikle gıdaların dondurulma süreçlerinde kriyojenik sistemlerin kullanılması incelenmiştir. Çalışmada klasik dondurma süreçleri ile kriyojenik dondurma süreçleri arasında enerji verimliliği yönüyle bir değerlendirme yapılmış ve sistem performansları referans alınan ürünlere göre incelenmiştir.

2. DONMUŞ GIDA SEKTÖRÜ

Son on yıldır olduğu gibi dondurulmuş gıda için küresel talep, artarak büyümeye devam etmektedir. Bu talep Marketline tarafından Eylül 2013'de yayınlanan Küresel Dondurulmuş Gıda Sanayi Profili Raporuna göre 2017'ye kadar yıllık % 3,7 oranında büyümeye devam edecektir. Şekil 2'deki küresel dondurulmuş gıda pazarı ürün kategorileri incelendiğinde; hazır yemekler kategorisinin % 24 ile toplam dondurulmuş gıda pazarında en büyük paya sahip olduğu, dondurulmuş balık / deniz ürünleri kategorisinin % 16,5'lik oranla onu takip ettiği, dondurulmuş et ürünleri, pizza, meyve ve sebze, unlu mamuller, patates ve diğer ürünlerin de büyümeye desteklemeye devam ettiği görülmektedir. Rapora göre küresel dondurulmuş gıdalar pazarı 2012 yılında 118 milyar \$ gibi yüksek bir değerde gerçekleşmiştir [3].



Şekil 2. Küresel dondurulmuş gıda pazarı ürün oranları [3].

Son yıllarda gıda endüstrisinde özellikle donmuş gıda talebinin artışı ile birlikte dondurulan gıdaların kalitesi de önemli bir parametre haline gelmiştir. Gıdaların son tüketiciye bozulmadan, taze ve hijyenik bir biçimde sunulabilmesi için öncelikle ürünün çok iyi bir şekilde muhafaza edilmesi gerekir. Gıdalarda bu tür olumsuz durumların ortaya çıkmasının temel nedenleri su kaybı, kimyasal ve mikrobiyolojik değişiklikler olarak ifade edilebilir. Ürünün su kaybetmesi; kurumasına ve şeklinin bozulmasına neden olacağı gibi ürün içerisinde bulunan serbest su; mikroorganizma, maya ve küf gibi bozulmaya neden olan oluşumların ortaya çıkması ve aktivitelerinin devam etmesi için uygun ortamı yaratmaktadır. Bu nedenle hem ürün içerisindeki suyun muhafaza edilmesi hem de zararlı oluşumların ortaya çıkmasının önüne geçilmesi gerekmektedir.

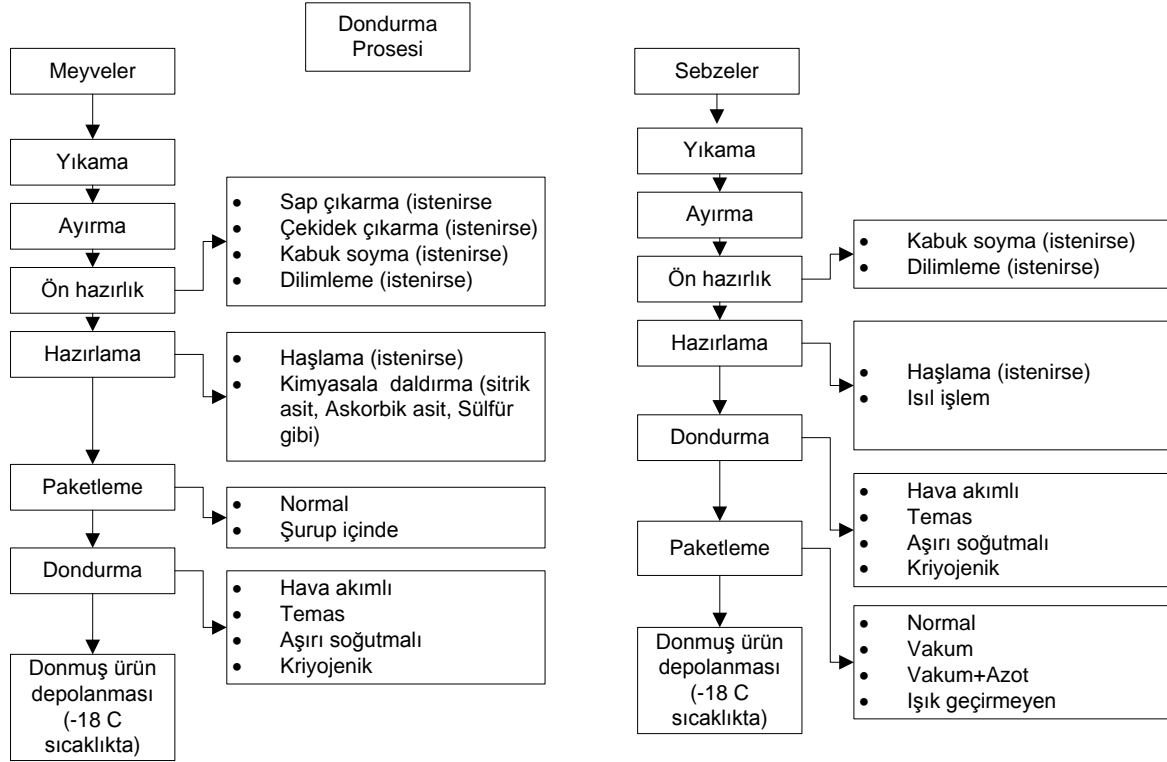
Çabuk ve kolay hazırlanıyor olması, dolapta fazla yer kaplamaması, besin değerini koruması, hijyenik olması gibi etkenlerin yanında ev kadınlarının çalışma hayatına daha fazla dahil olması ve çalışma sürelerinin uzun olması gibi etkenler dondurulmuş gıda tüketiminde önemli artışlar sağlayan hususlardan bazılarıdır. Türkiye’de dondurulmuş gıda tüketim miktarlarının, artma eğilimi göstermekle beraber gelişmiş dünya ülkeleri ile kıyaslandığında oldukça düşük olduğu Tablo 1’de görülmektedir [4].

Tablo 1. Çeşitli ülkelerin kişi başı dondurulmuş gıda tüketimi [4].

Ülkeler	Dondurulmuş Gıda Tüketimi (kg/yıl)	Ülkeler	Dondurulmuş Gıda Tüketimi (kg/yıl)
ABD	50	Almanya	31
Danimarka	45	İspanya	29
İsveç	45	Yunanistan	15
Norveç	43	İtalya	14
İngiltere	45	Türkiye	1

Dondurulmuş gıda ürünlerine olan küresel ihtiyacın artmasına karşılık olarak; daha güvenilir ve verimli derin dondurma tedarik zinciri ihtiyacı, aşılması gereken bir sorun haline gelmiştir. Derin dondurucu tedarik zinciri, donmuş ürünleri 0°C altında belirli bir düşük sıcaklık aralığında tutan, aralıksız bir depolama ve dağıtım faaliyetleri zinciridir.

Dondurma ve soğuk muhafaza koşullarında ürünün merkezi için istenilen donmanın sağlanması bir süreç alır. Bu her bir ürün için donma süresi olarak tanımlanır ve bu süre ürünün özelliğine göre değişir. Sebze ve meyveler için ürünün soğutma süreci ve depolanması evresine kadar olan süreç Şekil 3’de verilmiştir.

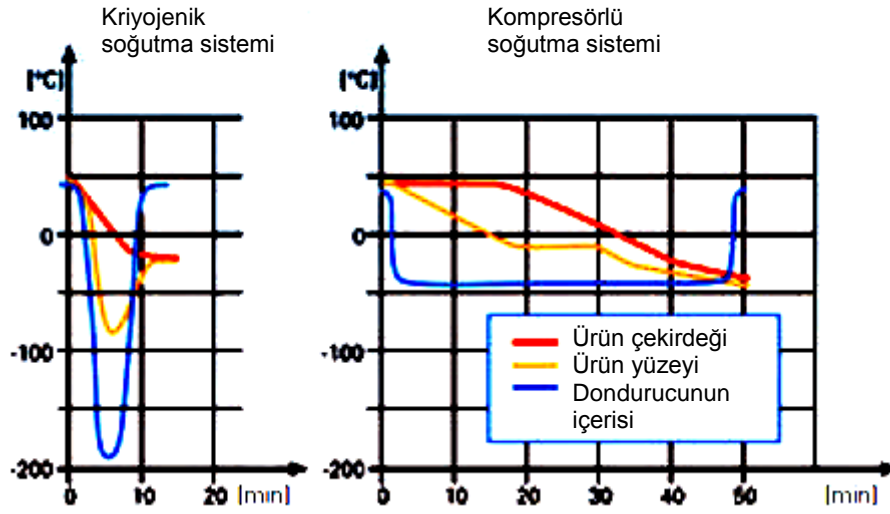


Şekil 3. Meyve ve sebze için soğuk zincir.

3. GIDALARIN DONDURULMASI

Sıcaklık mikroorganizmaların gelişimini etkileyen en önemli parametrelerden biridir [3]. Gıdalarda bozulmaya neden olan mikroorganizmalar -5 ile -8 °C'ye kadar, mayalar -10 ile -12 °C'ye kadar ve küfler -12 ile -18 °C'ye kadar biyolojik aktivitelerini sürdürebilirler. Bu sıcaklıklardan daha düşük sıcaklıklarda tüm kimyasal-biyokimyasal ve enzimatik reaksiyonlar ya tamamen durur ya da etkinlikleri yok denecek kadar azalır. Düşük sıcaklıklarda ve hızlı şekilde yapılan bir dondurma işlemi ile gıdalardaki su aktivitesi azaltılarak hem zararlı oluşumların üremesi önlenir hem de ürünün su kaybetmesinin önüne geçilebilir [2].

Dondurma işlemlerinde en sık kullanılan soğuk hava ile dondurma yönteminde, sadece doğal hava sirkülasyonu vardır ve bu nedenle de dondurma hızı yavaştır. Bu yöntemle genellikle dondurma sıcaklığı -23 °C ile -29 °C arasında değişir. Hava akımında dondurma, indirekt temas yöntemiyle dondurma, direkt daldırma yöntemiyle dondurma ve kriyojenik dondurma yöntemiyle gıdalar hızlı bir şekilde dondurulabilir. Hava akımında dondurmada -30 °C ile -45 °C deki hava $10-15$ m/s hızla ürün üzerine üflenir. İndirekt temas yöntemiyle dondurma da ise ambalajlanmış gıdanın merkezindeki sıcaklık; -45 °C'ye soğutulmuş plakalar arasında -18 °C'ye kadar düşürülür. Direkt daldırma yöntemi ambalajlanmış veya ambalajsız ürünün soğutulmuş sıvı içersine daldırılması şeklinde uygulanır. Bu amaçla soğutucu sıvılar olarak tuz çözeltisi, şeker şurubu veya gliserol kullanılabilir. Tuz ve şeker çözeltileriyle en fazla -21 °C'ye inilebilir. Kriyojenik dondurma yöntemiyle kaynama noktaları çok düşük olan sıvılaştırılmış gazlarla gıdaların çok hızlı bir şekilde dondurulması mümkündür. Nitekim yapılan araştırmalarda bu tip sistemler ile sağlanan soğutma hızları, mekanik soğutma sistemlerine göre yaklaşık %60 arttırılmıştır. Şekil 4'de kriyojenik soğutma ile mekanik soğutma uygulamalarında ürün soğutma hızlarındaki değişim verilmiştir.



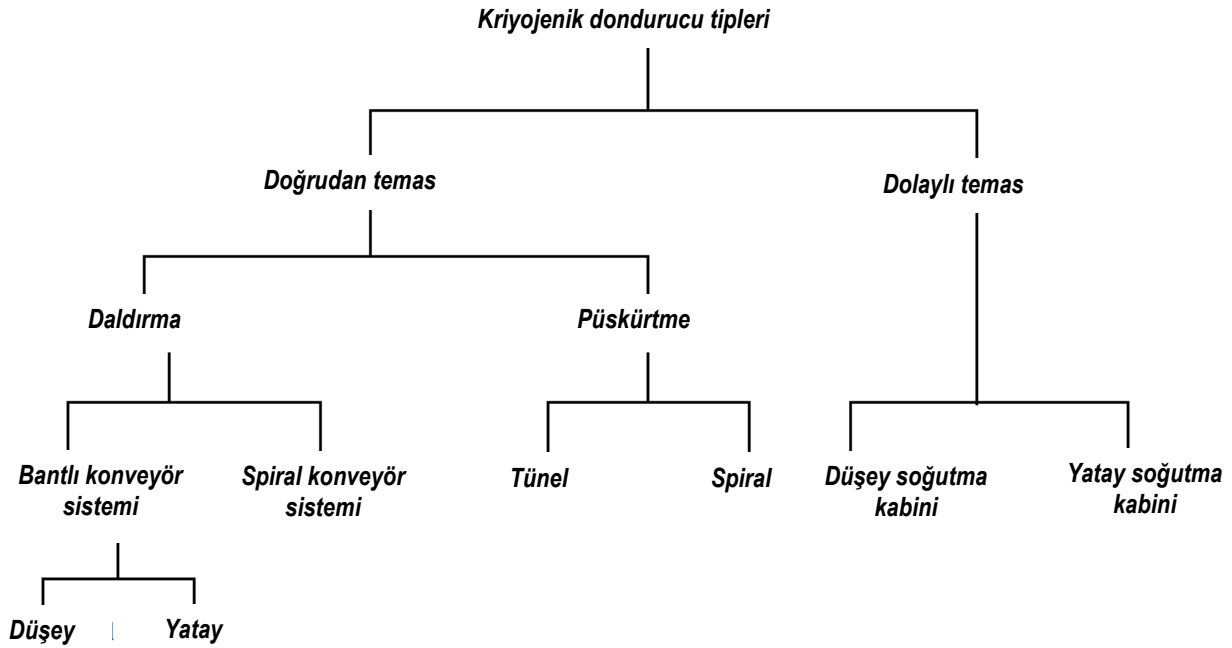
Şekil 4. Kriyojenik soğutma ve mekanik soğutmada donma hızları [5].

Kriyojenik soğutmada kullanılan gazların termodinamik özelliklerinin etkileri önemlidir. Kriyojenik gazlar olarak; metan, oksijen, argon, hidrojen, helyum, sıvı azot ve karbondioksit sayılabilir. Kriyojenik dondurmada; zehirleyici özelliğinin bulunmaması ve gıda maddesinin hiçbir ögesi ile reaksiyona girmemesi (inert olması), aksine havanın yerini alarak birçok oksidatif reaksiyonların önüne geçmesinden dolayı son yıllarda sıvı azot (LN_2) kullanımı öne çıkmaktadır. Literatürde de bu konuda çalışmalar göze çarpmaktadır. Khadatkar, R. M. Ve arkadaşları çalışmalarında kriyojenik dondurucuların tarihini, ekonomikliğini, son gelişmeleri ve gıda teknolojisindeki potansiyel uygulamalarını incelemişlerdir [6]. Goswami yaptığı çalışmada LN_2 'nin kriyojenik soğutucu ve gaz olarak kullanımını incelemiş, LN_2 'nin bireysel hızlı dondurma sistemlerinde soğutucu olarak kullanılabileceğini, dondurma işlemini çok hızlı gerçekleştirmesi nedeniyle küçük buz kristalleri ile dondurmaya sağladığını ve ürünün kalitesinin korunarak ağırlık kaybının önlenmesine yardımcı olduğunu ortaya koymuştur [7]. LN_2 ile birlikte; kullanılan diğer kriyojenik akışkanlar ve karakteristik sıcaklıkları Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Kriyojenik akışkanların karakteristik sıcaklıkları (°C) [8].

Kriyojen	Üçlü nokta	Normal kaynama noktası	Kritik nokta
Metan	-182,45	-161,55	-82,65
Oksijen	-218,75	-182,95	-118,55
Argon	-189,35	-185,85	-122,25
Azot	-210,05	-195,85	-146,95
Neon	-248,55	-246,05	-228,75
Hidrojen	-259,35	-252,75	-239,95
Helyum	-270,95	-268,95	-267,95
Karbondioksit	-56,60	-78,50	31,10

Dondurma işlemi ürünün sıvı azota daldırılması, ürün üzerine sıvı azot püskürtülmesi veya ürün üzerinden sıvı azot geçirilmesi gibi çeşitli yöntemler şeklinde uygulanabilir. Genel olarak piyasada kullanılan kriyojenik dondurucular Şekil 5'deki gibi sınıflandırılabilir.



Şekil 5. Kriyojenik dondurucuların sınıflandırılması [6].

4. DONDURMA HIZI

Dondurma hızı, donmuş gıda üretiminde sistem performansını etkileyen önemli bir parametredir. Gıdaların dondurulmadan önceki kalitesi, donma hızı, ambalaj durumu, dondurma ve çözündürme sayısı, uygunsuz dondurma ve çözündürme işlemleri, depolama sıcaklığı, sıcaklık dalgalanmaları ve sürekliliği ürün kalitesini belirleyen temel niteliklerdir. Kalitenin korunmasında ana kural dondurma işleminin mümkün olan en kısa sürede gerçekleştirilmesidir. Dondurma hızı; seçilen dondurma yöntemi, sıcaklık, hava ve soğutucu sirkülasyon hızı, dondurulacak gıdanın çeşidi, parça büyüklüğü veya ambalajın şekli ve büyüklüğü gibi faktörlere bağlı olarak değişir.

Gıdalardaki mikroorganizmaların ölüm oranını, gıdanın fiziksel kalitesini ve sistem kapasitesini etkileyen en önemli faktörlerden birisi dondurma hızıdır. Donma hızının çeşitli tanımları yapılmakla beraber genellikle kabul gören tanım gıdanın merkezinden (sıcak nokta veya arzu edilen donma sıcaklığına en geç ulaşan nokta) yüzeyine olan mesafenin, merkez sıcaklığının 0 °C'den -15 °C'ye düşmesi için gerekli olan süreye oranıdır. Bu tanıma göre gerekli donma hızı 5 cm/h'ten yüksekse çok hızlı dondurma, 1-5 cm/h arasında ise hızlı dondurma, 0.2-1 cm/h ise yavaş dondurma ve 0.2 cm/h'in altında ise çok yavaş dondurma olarak kabul edilir. Donma hızı (V) aşağıdaki basit eşitlik yardımıyla hesaplanabilir.

$$V = D / t \text{ (cm/h)} \quad (1)$$

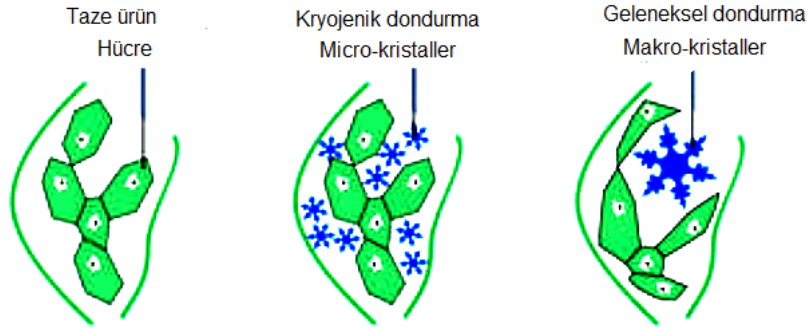
Burada; D (cm) dondurulan maddenin merkez noktasının, dondurmanın uygulandığı yüzeye olan en kısa uzaklığı, t (h) ise dondurulan maddenin merkez noktasının 0 °C den -15 °C'ye düşmesi için geçen süredir.

Örneğin ortalama -15 °C'de çilek soğutma (çileğin çapı 3.8 cm ise) için 0 °C'den itibaren 16 dakika geçtiği tespit edilen bir proseste donma hızı;

$V = 1.9 / 0,26 = 7.3 \text{ cm / h}$ ile çok hızlı dondurma olarak bulunur. Ancak bu hesaplama yönteminde iraksama oldukça yüksektir ve sonuçlar yanıltıcı olabilir.

Dondurma hızını temel alan pek çok çalışma yapılmıştır. Örneğin Bengtsson ve arkadaşları 1 cm kalınlığa sahip dilimlenmiş çiğ et ile deneyler yapmıştır. Örnekler 4 °C'den -25 °C'ye paketlenmeden LN₂ için -196 °C ve hava akımı ile dondurma için -35 °C çevre sıcaklığında 5-6 m/s'lik bir hava hızında dondurulmuştur. LN₂ için 20 cm / h ve hava üfleli sistem için ise 1,4 cm / h'lik bir donma hızı gözlenmiştir. Donma süresi hava üfleli dondurma için 50 dakika ve LN₂ püskürterek dondurma için 3,5 dakika olarak hesaplanmıştır [9].

Buz kristallerinin boyutu ve sayısı, dondurulmuş gıda maddesinin kalitesi üzerinde büyük bir etkiye sahiptir [7]. Dondurma işleminde oluşan buz kristallerinin büyüklüğü dondurma hızına bağlıdır. Dondurma hızı yavaşladıkça hücrede su kaybı ve dehidratasyon artar. Bu olay hücre sitoplazmasında konsantrasyon artmasına sonuçta sitoplazmada geriye dönüşü mümkün olmayan değişikliklere neden olur. Bu olay mikroorganizmalar üzerinde letal etkinin artmasına neden olur. Yavaş dondurmada daha iri buz kristalleri oluşurken hızlı dondurmada küçük buz kristalleri oluşur. Taze ürünün hücre yapısı, kriyojenik dondurma esnasında ve konvensiyonel dondurma esnasında buz kristallerinin oluşumu Şekil 6'da gösterilmiştir. İri buz kristallerinin gerek mikrobiyal hücreler ve gerekse doku hücreleri üzerinde yarattığı fiziksel zarar daha fazladır ve gıdanın tekstürel yapısının bozulmasına neden olur. Bu nedenle de yavaş dondurmada daha fazla mikroorganizma ölür. Buna karşın yavaş dondurulmuş bir gıdada doku hücrelerinin daha fazla fiziksel zarar görmüş olmaları nedeniyle gıdanın çözünmesi sırasında hücre öz suyu kaybı daha yüksek olur. Ancak dondurma işleminde asıl amaç mikroorganizmaları öldürmek olmadığı için gıdanın kalitesi açısından hızlı dondurma tercih edilmelidir. Hızlı dondurmanın diğer bir avantajı ise mikrobiyal aktivitenin durduğu sıcaklıklara daha kısa sürede ulaşıldığı için dondurmada işlemi sırasında mikrobiyal aktivite sonucu gıdanın kalitesinde meydana gelebilecek olumsuzlukların önlenmesidir.



Şekil 6. Hızlı ve yavaş dondurma sürecinde buz kristali oluşumu ve hücre üzerindeki etkisi [5].

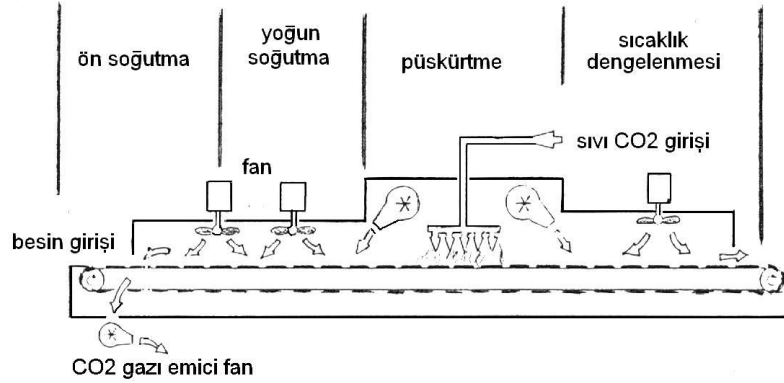
Kristalleştirme, çekirdek oluşumu ve kristal büyümesi olarak ifade edilen iki aşamalı bir süreçtir. Çekirdek oluşumu, buz kristallerinin oluşturulması için ilk adımdır ve çekirdek büyümesi için kritik bir boyuttan daha büyük olmalıdır. Çekirdek oluşuktan sonra sıcaklık azaldıkça kristal büyüme hızı artar. Çekirdeklenme sürecinin buz kristallerinin boyutu üzerinde doğrudan bir etkisi vardır. Ürün sıcaklığı 0 °C'ye yakın ve ısı transfer hızı yavaş ise, çok az sayıda ve büyük boyutlarda çekirdek oluşacaktır. Isı transfer hızı yüksek ve soğutma sıcaklığı oldukça düşük ise çok sayıda ve küçük boyutta çekirdek oluşacaktır [6].

5. KRİYOJENİK DONDURMA UYGULAMALARI

Gıda endüstrisinin en önemli zorluklarından biri bakteriyel faaliyetlerin önüne geçebilmektir. Bakterilere karşı en etkili yöntemlerden biri de dondurmadır. Geleneksel dondurma işlemlerinde dondurulacak gıdaların hücre zarları parçalanır ve bu parçalanma sonucunda hücre zarı içerisindeki stoplazma hücre dışına çıkarak ağırlık kaybına, besin değerinin azalmasına ve ürün kalitesinin bozulmasına yol açar. Kriyojenik dondurmada ise hızlı dondurma özelliği sayesinde su kaybı en aza indirilirken ağırlık

kayıbı da önlenmiş olur. Gıdalarda enzim faaliyeti, oksidasyon ve vitamin değerleri korunurken gıdanın görüntüsünde ve tadında bozulmalar olmaz.

Kriyojenik dondurma uygulamalarında proses akışı şöyle çalışır: kaynayan azot ya da sublimleşen karbondioksit doğrudan bir dondurucu içine püskürtülür. Gıda ürünleri bir kaç dakika içerisinde ısılarını azot veya karbondioksite aktararak dondurulur. Üstün ısı transferi özellikleri sebebiyle kriyojenik dondurmada genellikle sıvı azot veya sıvı karbondioksit kullanılır. Bu gazlar gıda sektöründe kırmızı ve beyaz et, balık, unlu mamuller, sütü gıdalar, sebze ve meyvelerin dondurulması ve soğutulmasına ilişkin tüm proses aşamalarında kullanılmaktadırlar. Şekil 7’de bir tünel tip kriyojenik soğutma prosesinin akış şeması görülmektedir.



Şekil 7. Tünel tip kriyojenik soğutma prosesi [10].

Sıcaklık donma noktasının altına düşürüldüğünde, mikroorganizmaların büyümesi hızla azalır. Bu sadece ürünün sıcaklığı azaldığı için değil, ayrıca serbest sıvı su faaliyetinin azalmasına da bağlı olarak gerçekleşir. Böylece mikroorganizmalar ihtiyaç duydukları sudan mahrum bırakılır.

Bir gıda ürününü soğutmak bakteriyel gelişim riskini azaltırken ürünü çok çabuk soğutmak (flaş dondurma veya kriyojenik dondurma) bu riski en aza indirir. Kriyojenik dondurma aynı zamanda gıdanın doğal kalitesini de korur. Bir ürün dondurulduğunda buz kristalleri oluşur. Kristaller ne kadar küçük ve eşit biçimde dağılmış olursa ürünün kalite ve tadı da o kadar iyi olacaktır. Gıda ürününde küçük kristallerin hem hücre içinde hem de dışında düzgün bir biçimde oluşmasını sağlamanın tek yolu gıdayı kriyojenik yöntemlerle çok çabuk dondurmaktır.

Kriyojenik dondurmanın geleneksel mekanik dondurmaya göre avantajları şunlardır:

- Kriyojenik dondurma, kriyojenik gazların etkili dondurma özelliği sayesinde, mekanik dondurmaya göre 2-4 kat daha hızlıdır.
- Dondurma esnasında daha küçük ve homojen dağılmış buz kristalleri oluşur.
- Gıda ürünlerindeki su kaybı dolayısıyla meydana gelen ağırlık kaybı en aza indirilir.
- Kriyojenik ekipmanlar, geleneksel ekipmanların aksine yatırım maliyeti gerektirmez, yer değişiklikleri kolaydır.
- Su kayıpları konvansiyonel sistemlerde yüzde beş iken kriyojenik dondurma ile yüzde birden azdır.
- Kriyojenik olarak dondurulan gıdalar defrost sonrası görsel olarak çekici ve iştah açıcıdır.
- Kriyojenik dondurucuların yüksek dondurma hızı zaman ve yer kazandırır.
- Kriyojenik derin dondurucu sistemleri genellikle sıvı azot yada sıvı karbondioksit ile işletilirler. Her iki gaz da havanın doğal bileşenleridir ve AB’de gıda gazları olarak kabul edilmiştir. Ayrıca konvansiyonel sistemlerde kullanılan akışkanlar gibi atmosfere zararları yoktur.
- Çoğu durumda, geleneksel dondurucu sistemlerinin dondurma kapasitesi sadece belli bir işlev için tasarlanmıştır. Diğer yandan kriyojenik dondurma sistemlerinin geniş bir fonksiyon yelpazesi bulunmaktadır.
- Nispeten ucuzdurlar ve mevcut üretim hatlarında kullanımında esneklik sunarlar.
- Aynı kapasitedeki konvansiyonel sistemlere göre çok daha küçüktürler. Özel yapısal tedbirler gerekli değildir.

6. BULGULAR VE DEĞERLENDİRMELER

Sebze ve meyvelerin klasik soğutma uygulamalarında tek çevrimli bir yapıyla istenilen soğutmanın sağlanması oldukça zordur. Çoğunlukla çift kademeli sistemlerin tercih edildiği uygulamalarda yüksek kapasiteli soğutucu akışkan tüketimleri dikkat çekmektedir. Bu yönüyle soğutma yapılması düşünülen ürünler için öncelikle bir soğutma yük analizi yapılmalıdır. Ancak soğutma yük analizleri öncelikle ürünün özelliğine göre şekillendirilir. Özellikle dondurulmuş ürünlerde ürünün şekli donma süresini doğrudan etkiler bu yönüyle öncelikle ürünün donma şekli ve buna bağlı donma süresi değerlendirilmelidir.

Bu bölümde gıda ürünlerinin soğutma, dondurma ve muhafaza aşamalarında, klasik uygulama ile kriyojenik uygulama süreçlerinin soğutma süresi yönüyle incelenmeleri esas alınmıştır. Bu yönüyle meyve (çilek), et (sığır eti), balık (somon) ve kutulu meyve suyu (portakal) için geometriler göz önüne alınarak gerekli soğutma süreleri incelenmiş ve bunların klasik ve kriyojenik soğutma şartlarında zaman farkları ortaya konmuştur. Hesaplamalarda “Eşdeğer ısı transferi boyutsallığı yöntemi” kullanılmıştır [11]. Tüm ürünlerde dondurma işlemi sonu ürün çekirdek sıcaklığı -10 °C alınmıştır.

Soğutma süresi (faz değişimi yok, ön soğutma);

$$\theta = \frac{3\rho cL^2}{\omega^2 kE} \ln\left(\frac{J}{Y}\right) \quad (2)$$

Burada ρ yoğunluğu, c gıda maddesinin özgül ısısını, L ürün merkezi ile dış kabuk arası mesafeyi, ω transandantal fonksiyonun birinci kökünü, k ürünün ısı iletim katsayısını, E eşdeğer ısı transferi boyutsallığını, J kütleli ortalama sıcaklık için gecikme faktörünü ve Y tamamlanmamış sıcaklık farkını ifade etmektedir.

Donma süresi (faz değişimi ve aşırı soğutma var);

Plank eşitliği;

$$\theta = \frac{\Delta H_{10}}{\Delta T} \left(P \frac{D}{h} + R \frac{D^2}{k_s} \right) \quad (3)$$

Burada; ΔH_{10} ürünün ilk donma sıcaklığı ile -10 °C çekirdek sıcaklıklarına karşılık gelen entalpi farkını, ΔT ilk donma sıcaklığı ile soğutma havası sıcaklık farkını, P ve R geometrik parametreleri, D ürün et kalınlığı ya da çapını, h yüzey taşınım katsayısını ve k_s tam donmuş ürünün ısı iletim katsayısını ifade etmektedir. Çalışmada dondurma sürecine sahip ürünlerde geometrik yapı donma süresini ve gerekli enerji miktarını doğrudan etkiler. P ve R geometrik parametrelerin belirlenmesinde kullanılan eşitlikler Tablo 3’de verilmiştir.

$$\text{Biot sayısı; } Bi = \frac{h \cdot D}{k} \quad (4)$$

$$\text{Plank sayısı; } Pk = \frac{c_1 \cdot (T_1 - T_f)}{\Delta H} \quad (5)$$

$$\text{Stefan sayısı; } Ste = \frac{c_s \cdot (T_f - T_m)}{\Delta H} \quad (6)$$

Tablo 3. Geometrik parametreler [11].

Geometri	P ve R geometrik parametre eşitlikleri
Sonsuz yassı dilim	$P = 0.5072 + 0.2018Pk + Ste\left(0.3224Pk + \frac{0.0105}{Bi} + 0.0681\right)$ $R = 0.1684 + Ste(0.2740Pk - 0.0135)$
Sonsuz silindir	$P = 0.3751 + 0.0999Pk + Ste\left(0.4008Pk + \frac{0.0710}{Bi} + 0.5865\right)$ $R = 0.0133 + Ste(0.0415Pk - 0.3957)$
Küre	$P = 0.1084 + 0.0924Pk + Ste\left(0.231Pk + \frac{0.3114}{Bi} + 0.6739\right)$ $R = 0.0784 + Ste(0.0386Pk - 0.1694)$
Tuğla	<p>Burada;</p> $P = P_2 + P_1 + [0.1136 + Ste(5.766P_1 - 1.242)]$ $R = R_2 + R_1 [0.7344 + Ste(49.89R_1 - 2.9)]$ $P_2 = P_1 \left[1.026 + 0.5808Pk + Ste\left(0.2296Pk + \frac{0.0182}{Bi} + 0.1050\right) \right]$ $R_2 = R_1 [1.202 + Ste(3.41Pk + 0.7336)]$ $P_1 = \frac{\beta_1 \beta_2}{2(\beta_1 \beta_2 + \beta_1 + \beta_2)}$ $R_1 = \frac{Q}{2} \left[(r-1)(\beta_1 - r)(\beta_2 - r) \ln\left(\frac{r}{r-1}\right) - (s-1)(\beta_1 - s)(\beta_2 - s) \ln\left(\frac{s}{s-1}\right) \right] + \frac{1}{72} (2\beta_1 + 2\beta_2 - 1)$ $Q = 1/4 \left[(\beta_1 \beta_2)(\beta_1 - 1) + (\beta_2 - 1)^2 \right]^{1/2}$ $r = \frac{1}{3} \left\{ \beta_1 + \beta_2 + 1 + [(\beta_1 - \beta_2)(\beta_1 - 1) + (\beta_2 - 1)^2]^{1/2} \right\}$ $s = \frac{1}{3} \left\{ \beta_1 + \beta_2 + 1 - [(\beta_1 - \beta_2)(\beta_1 - 1) + (\beta_2 - 1)^2]^{1/2} \right\}$ $\beta_1 = \frac{\text{ürünün ikinci en kus boyutu}}{\text{ürünün en kus boyutu}}$ $\beta_2 = \frac{\text{ürünün en uzun boyutu}}{\text{ürünün en kus boyutu}}$

Çalışmada referans alınan ürünlerin şekil yapılarına bağlı ön soğutma ve donma süreleri birim kütle için adyabatik şartlar göz önüne alınarak kriyojenik soğutma ve klasik soğutma için ayrı ayrı bulunmuş ve sonuçlar Tablo 4’de verilmiştir.

Tablo 4. Çeşitli gıda ürünlerinin termofiziksel özellikleri, ön soğutma ve donma süreleri*.

Ürün	Yoğunluk Kg/m ³	Özgü Entalpi kJ/kg	Özgü ısı kJ/(kg K)	Isıl iletkenlik W/(m K)	Gizli ısı kJ/kg	Ön soğutma		Dondurma ve aşırı soğutma		
						Saniye	kJ/kg	Saniye	kJ/kg	
Meyve (Çilek) Ø25 mm	Tam donma sıcaklığı -40 °C	1047,24	1,84	1,1	300,2	1340	100	1645	318,6	
	İlk donma sıcaklığı -0,8 °C	1042,53	4	0,6		Kriyojenik soğutma (-195,8 °C sıvı azot)	-	-	247	318,6
	Çekirdek sıcaklığı -10 °C	1041,3	1,84	-			-	-	-	-
Sığır eti (kemiksiz- dilimlenmiş) 50x100x200 mm	Tam donma sıcaklığı -40 °C	1073,7	2,11	1,7	237	13287	94	8990	251	
	İlk donma sıcaklığı -1,7 °C	1064,6	3,53	0,5		Kriyojenik soğutma (-195,8 °C sıvı azot)	-	-	1316	251
	Çekirdek sıcaklığı -10 °C	1066,6	2,11	1,4			-	-	-	-
Balık (somon) 100x250 mm	Tam donma sıcaklığı -40 °C	1092,7	2,17	1,24	255	25537	92	6174	272	
	İlk donma sıcaklığı -2,2 °C	1088,3	3,68	0,531		Kriyojenik soğutma (-195,8 °C sıvı azot)	-	-	887	272
	Çekirdek sıcaklığı -10 °C	1088,3	2,17	1,13			-	-	-	-
Meyve suyu (portakal) 100x130 mm metal kutu	Tam donma sıcaklığı -40 °C	970	1,76	2,19	297	-	-	-	-	
	İlk donma sıcaklığı -0,4 °C	1038	3,89	0,435		Kriyojenik soğutma (-195,8 °C sıvı azot)	-	-	12213	396
	Çekirdek sıcaklığı -10 °C	992	1,76	-			-	-	1936	396

*Ürün ilk sıcaklığı= 25 °C, dondurma prosesi sonu çekirdek sıcaklığı -10 °C, ön soğutma prosesinde hava sıcaklığı -1 °C, mekanik dondurma prosesinde hava sıcaklığı -30 °C alınmıştır.

Görüldüğü gibi birim kg ağırlığındaki her bir ürün için hacim değerleri, ön soğutma ve donma süreleri çok geniş bir aralıkta değişmektedir. Ürün merkez noktası ile dış cidar arasındaki mesafe artışı donma süresini olumsuz etkilemektedir. Çalışmada referans alınan tüm ürünlerin donma süreçlerine bağlı olarak hem mekanik hem de kriyojenik soğutma için soğutma süreleri ayrı ayrı hesaplanmıştır. Bu süreçte her bir ürünün donma sonrası entalpi değeri, donma noktası sıcaklığı ve sahip olduğu kütle önemlidir. Çalışmada standart bir değer sağlamak için her bir ürün için birim kütle esas alınmıştır.

SONUÇ

Dondurulmuş gıda maddelerinde her zaman dondurulamayan su bulunur. Gıda maddelerinin su fazı, içinde çözülmüş katı maddelerin bulunduğu sulu çözelti olarak düşünülürse, donma sırasında suyun bir kısmı buz kristallerine dönüştüğü için kalan çözeltinin konsantrasyonu artar, su aktivitesi düşer. -10 °C çekirdek sıcaklığına ulaşıldığı durumda bile çilek, sığır eti, balık ve meyve suyunda sırasıyla %0, %11, %10 ve %15 oranında donmamış su bulunur.

Dondurma işleminin hızı gıda maddesinin kalitesini ve kapasiteyi doğrudan etkiler. Dondurulmuş ürünlerde buz kristallerinin küçük olması ve buz kristallerinin, ürün dokusundaki hücreleri parçalamaması önemlidir. Kristal iriliği ile soğutma hızı arasında bir ilişki vardır. Yavaş soğutma az sayıda fakat iri buz kristalleri oluşumuna neden olur. Bu da hücre parçalanmasına neden olur. Çözülme durumunda da kararma ve yumuşama sebebidir. Sıvı sızma oranı artar.

Hızlı soğutma çok sayıda küçük buz kristalleri oluşumuna neden olur. Küçük buz kristalleri elde etmek için ürünün çok hızlı bir şekilde dondurulması gerekir. Küçük buz kristali hücrelerin parçalanmasına sebep olmadığından doku parçalanmaz ve orjinal yapısını muhafaza eder ve depolama süresi artar. Şoklama işleminden sonra ürün donmuş muhafaza deposunda rejim değerine soğutulur. Dağıtım, pazarlama ve tüketime kadar geçen sürede ürün -18°C'nin altındaki sıcaklıklarda saklanmalıdır.

Mekanik dondurma süresi ile kriyojenik dondurma süreleri arasında, ürün cinsine göre, 6.30 ile 6.96 kat arasında fark olduğu hesaplanmıştır. Kalitenin korunması ve uzun depolama süresinin çok önemli bir parametre olduğu düşünüldüğünde, kriyojenik dondurma işlemi öne çıkmaktadır. Yatırım ve işletme maliyetleri ayrı bir çalışma konusudur.

Dondurma süreci belirlenirken, ürün bazlı çalışma yapılması çok önemlidir. Her bir ürün ayrı ayrı değerlendirilerek prosesin belirlenmesi geri dönülmez hataların meydana gelmesini engelleyecektir.

KAYNAKLAR

- [1] Atilla Kantarman, Soğuk depoculuk ve soğutma. Türk Tesisat Mühendisleri Derneği, Temel bilgiler uygulama ve tasarım eki, 75 sayı Eylül, Ekim 2011.
- [2] http://www.food.hacettepe.edu.tr/turkish/ouyeleri/gmu428/meyve_ve_sebzelerin_dondurularak_muhafazasi.pdf (Erişim tarihi: 02.08.2014).
- [3] Kaale L, Eikevik T, Rustad T, Kolsaker K., "Superchilling of food: A review", Journal Of Food Engineering [serial online]. n.d.;107(2):141-146.
- [4] Gündüz O. ve Emir M., "Dondurulmuş Gıda Tüketimini Etkileyen Faktörlerin Analizi: Samsun İli Örneği", Harran Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi, 14(3), s. 15-24, 2010.
- [5] http://www.messergroup.com/de/Info_Download/Fachbroschueren/Food/Schnelle_Kaelte_en.pdf (Erişim tarihi: 27.07.2014).
- [6] Khadatkar, R., Kumar, S., & Pattanayak, S. (n.d)., "Cryofreezing and cryofreezer", Cryogenics, 44(9), 661-678.
- [7] Goswami T., "Role of cryogenics in food processing and preservation", International Journal Of Food Engineering [serial online]. January 1, 2010;6(1).



- [8] Ph. Lebrun, “An Introduction to Cryogenics”, Commission A1 “Cryophysics and Cryoengineering” of the IIR, Accelerator Technology Department, CERN, Geneva, Switzerland.
- [9] Bengston, N.E., and Jakobsson, B., I.I.R. Commissions IV and V, 165 – 169, 1969.
- [10] Hüseyin Bulgurcu, iklimlendirme ve soğutma programları için ticari soğutma sistemleri, Balıkesir-2003, www.yapihavalandirma.com/FileUpload/ks146066/File/ticari03.doc.
- [11] Ashrae Handbook – Refrigeration, 2006.

ÖZGEÇMİŞ

Enver YALÇIN

1968 Polatlı doğumludur. 1985-1989 arasında Uludağ Üniversitesi Balıkesir Mühendislik Fakültesi’nde lisans, 1989-1992 arasında Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü’nde Yüksek Lisans, 1992-1998 arasında Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü’nde Doktora eğitimini tamamlamıştır. 1990-1998 yılları arasında araştırma görevlisi olarak görev yapmıştır. 2001-2004 tarihleri arasında Edremit Meslek Yüksekokulu Müdürlüğü, 2007-2011 yılları arasında MMF Dekan yardımcılığı görevini yürütmüştür. 1999 yılından bu yana BA. Ü. Mühendislik Mimarlık Fakültesi Makine Bölümü Termodinamik Anabilim Dalı’nda Yrd. Doç. Dr. olarak öğretim üyesi görevini sürdürmektedir. Isı tekniği alanında çeşitli çalışmaları mevcuttur. Evli ve iki çocuk babasıdır.

Nazmi YILMAZ

1985 Cide doğumludur. 2002-2006 arasında Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Sıhhi Tesisat Öğretmenliği Anabilim Dalı’nda lisans eğitimini tamamlamıştır. Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Bölümünde yüksek lisans eğitimine devam etmektedir. 2006 yılından bu yana Kara Kuvvetleri Astsubay Meslek Yüksek Okulu İnşaat Bölümü Yapı Tesisat Teknolojisi Grubunda öğretim görevlisi olarak çalışmaktadır.

M. Ziya SÖĞÜT

1964 Mardin doğumludur. 1984-2006 yıllarında Türk Silahlı Kuvvetlerinde Öğretmen Subay olarak görev yapmıştır. 2005 yılında Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünden Makine Mühendisliği yüksek lisans programını, 2009 yılında aynı enstitünün Makine Mühendisliği doktora programını tamamlayıp doktor unvanını almış, 2009 yılında yardımcı doçentlik kadrosuna atanmış ve 2013 yılında Makine Mühendisliği Enerji Teknolojileri dalında doçentlik unvanını almıştır. Halen Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde, Piri Reis Üniversitesi Denizcilik Fakültesinde Misafir Öğretim elemanı olarak Lisans, Yüksek Lisans ve Doktora dersleri vermektedir. Ayrıca Sertifikalı Bina enerji yöneticisi, Enerji Verimliliği Derneği Bursa Şubesi Yönetim Kurulu Üyesi, Ulusal ve uluslararası bilimsel dergilerde hakemlik görevlerine devam etmektedir. Enerji, ekserji, eksergoekonomik analizler ve optimizasyon, ısı geri kazanımı, yenilenebilir enerjiler ve uygulamaları, enerji yönetimi, soğutma teknolojileri ve uygulamaları, çevre teknolojileri ve analizleri konularında proje ve çalışmaları vardır.

