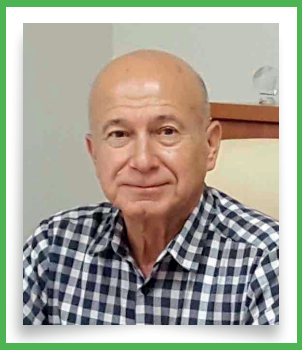
soğutma dünyası



Prof. Dr. Ali GÜNGÖR
Soğutma Dünyası
Editörü

Turan ERKAN
Soğutma Dünyası
Yayın Kurulu Üyesi

SEBZE VE MEYVELERİN HASAT SONRASI ÖNSOĞUTULMASI YÖNTEMLERİ VE HESAPLAMA PRENSİPLERİ

METHODS AND CALCULATION PRINCIPLES OF PRECOOLING FOR VEGETABLES AND FRUITS POSTHARVEST

ÖZET

Önsoğutma(Precooling), meyve ve sebzelerin hasat sonrası tarla sıcaklığının düşürülmesi için ürün çeşitliliğine uygun metotlar kullanılarak ısısının kütlesinden hızla uzaklaştırılması işlemidir.

Önsoğutma, hasat sonrası çürümeye neden olan mikroorganizmaların çoğalmasını engeller, enzimatik ve solunum aktivitesini ve nem kaybını azaltır.

Bu nedenle uygun Önsoğutma, ürünün kalite kaybını yavaşlatarak raf ömrünü uzatır.

Önsoğutma, ürünleri sabit bir sıcaklıkta tutan soğuk depolara göre daha büyük soğutma kapasitesi ve özel soğutma metodu gerektirir. Önsoğutma, ürünün hasat sonrası muamelesi (boylama, paketleme v.b.) sürecinde uygulanan süresi tanımlı operasyonel soğutmadır.

Bu nedenle Önsoğutma, tipik olarak soğuk depolarda uygulanan teknolojiden ayrı, farklı bir işlemdir ve özel olarak tasarlanmış ekipman gerektirir. Önsoğutma işlemi, hava ile soğutma, vakum etkisi ile soğutma, soğuk su ile soğutma ve buzla temas dahil olmak üzere çeşitli yöntemlerle yapılabilir. Bu yöntemler ürünün kütlesinden ısıyı, su, hava veya buz gibi bir soğutma ortamına hızla aktarır. Bu bildiride sebze ve meyvelerin ön soğutulması projelendirme ilkeleri, yöntemleri ve tasarımda kullanılabilecek tasarım eşitlikleri verilip tartışılacaktır.

Anahtar Kelimeler: önsoğutma, önsoğutma yöntemleri, önsoğutmanın tasarım prensipleri.

ABSTRACT

Precooling is the process of rapidly removing the heat from the mass of fruits and vegetables by using methods suitable for the product variety in order to reduce the field temperature after harvest.

Precooling prevents the growth of microorganisms causing decay after harvest, reduces enzymatic and respiratory activity and moisture loss.

Therefore, proper precooling slows down the loss of product quality and extends the shelf life.

Precooling requires a larger cooling capacity and special cooling method than cold storages that keep products at a constant temperature. Precooling is operational cooling with a defined duration applied during the post-harvest treatment (sorting, packaging etc.) process of the product.

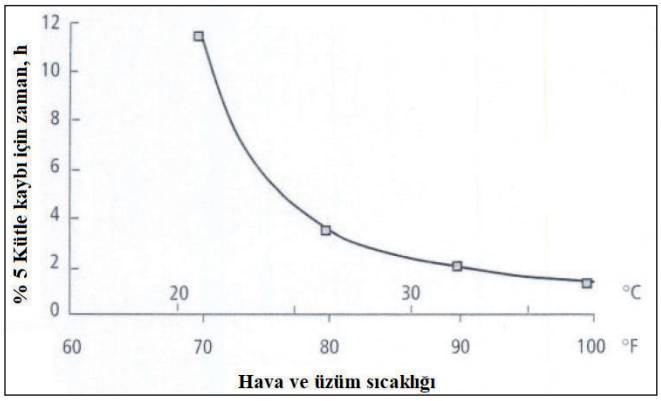
Precooling is therefore a separate process from the technology typically applied in cold stores, and requires specially designed equipment. Precooling can be done by a variety of methods, including air cooling, vacuum cooling, hydro-cooling, and ice contact. These methods quickly transfer heat from the mass of the product to a cooling medium such as water, air or ice. In this paper, precooling of vegetables and fruits will be given and discussed the design principles, methods and design equations that can be used in design.

Key Words: Precooling, precooling methods, design principles of precooling.

1. GİRİŞ

Ürün sıcaklığını kontrol etmek ve ürünün optimalin altındaki sıcaklıklarda kaldığı süreyi azaltmak, bozulabilir maddelerdeki kalite kaybını yavaşlatmanın en önemli yöntemleridir.

Hasat sonrası sıcaklık yönetimi, hasat ve hasat sonrası işlemlerinin planlanmasıyla başlar. Bazı ürünler sıcaklığa karşı o kadar hassastır ki, sıcaklıklar çok yüksek olduğunda hasat edilmemelidir. Örneğin, sofralık üzümler, yaklaşık %2 kütle kaybında sap buruşma belirtileri gösterir ve sap kalitesi tüketici düzeyinde muhafaza edilecekse, meyve, hasat ile soğumanın başlangıcı arasında yaklaşık % 0,5'ten fazla kütle kaybına maruz bırakılmamalıdır. Üzümler soğumadan önce 20°C'de 8 saatten fazla tutulabilse de, 30°C'de toplamadan sonra soğutmaya 2,5 saat içinde başlanmalıdır (Şekil 1.). Bazı üreticiler, hasattan sonra aşırı sıcağa maruz kalmamak için geceleri hasat yapar ve güneş doğduktan sonra 1 saat içinde hasat işlemi sonlandırılır.



Şekil 1. Hasatta sofralık üzüm sıcaklığının, meyvelerin hasat kütlesinin % 0,5'ini kaybetmesi için gereken süreye etkisi [6].

Ürünü sıcaklığın neden olduğu hasardan korumanın diğer yöntemleri:

- Hasat bölgesinde, hasat edilen ürünlerin bekletilmesine fırsat vermeden soğutmanın yapılacağı tesise sık sık taşımalar yapılması.
- Ürünlerin açık renkli kaplara konulması.
- Doğrudan güneşe maruz bırakılırsa kapların üzeri uygun bir kapakla kapatılmalıdır.
- Geçici alan depolaması yapılması gerekiyor ise gölgeli bir alan kullanılmalıdır. Örneğin, bir ağaç gölgesi kullanılmak isteniyor ise, gölgenin gün boyunca güneşle birlikte hareketine dikkat edilmelidir.
- Kısa menzilli taşımalarda, üstü kapalı küçük kamyonlar kullanılmalıdır. Uzun menzilli taşımalarda soğutmalı (frigorifik) kamyonlara gereksinim vardır.
- Ürün soğutma tesisine geldikten sonra mümkün olan en kısa sürede soğutmaya başlanmalıdır.

Bazı ürünler, hasat ve önsoğutmaya alınması arasında oldukça uzun bir süreye dayanabilir. Örneğin, kontrollü atmosfer depolamaya konulan elmalar, genellikle hasattan sonraki birkaç güne kadar optimum depolama sıcaklığına ulaşmaz; ihraç edilen Kaliforniya portakalları, denizde birkaç gün geçene kadar en iyi saklama sıcaklığına ulaşamayabilir. Hızlı soğutma gerektirmeyen ürünler genellikle yavaş solunum hızlarına, düşük nem kaybı (buhar ve terleme) oranlarına sahiptir ve genellikle ılıman sıcaklıkların olduğu iklimlerde yetiştirilir.

Tarım ürünlerinin optimum depolama sıcaklıklarına yakın olan önsoğutma yöntemleri, oda soğutması, zorlanmış hava akımlı soğutma, soğuk su ile soğutma, paket buzlama ve vakumla soğutma gibi çeşitli soğutma yöntemleriyle yapılabilir. İleriki bölümlerde ayrıntılarıyla verilecektir. Gemilerde veya soğutulmuş deniz konteynerlerinde mekanik soğutma, nakliye sırasında birbiriyle uyumlu ürünlerin soğutulması için kullanılır.

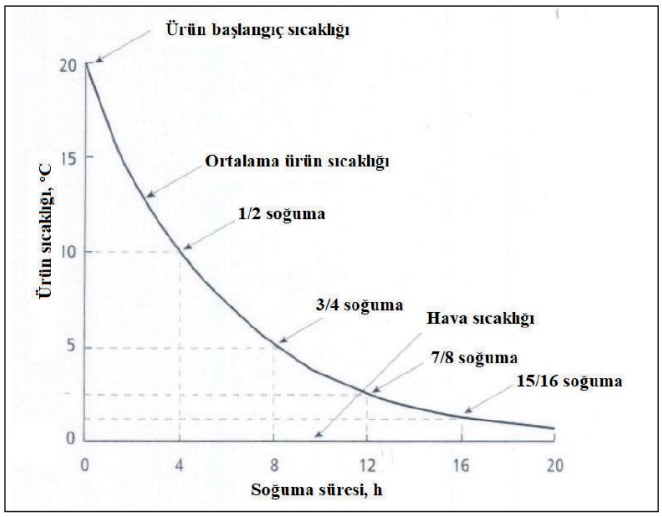
Hızlı soğutma yapılması özelliklerine sahip en çok kullanılan soğutma yöntemleri (örneğin, Zorlanmış Hava Akımlı Soğutma, Soğuk Su ile Soğutma ve Vakumla Soğutma) geniş bir ürün yelpazesi için kullanılmaktadır.

Bazı ürünler birkaç yöntemle soğutulabilir, ancak çoğu ürün bir veya iki soğutma yöntemine en iyi şekilde yanıt verir. Değişik ürünler için ön soğutma yöntemi seçimi, 3.7. bölümde tartışılmıştır.

Çoğu kullanıcı "soğutmayı tamamlama" zamanıyla ilgilenir ve bu genellikle depolamaya veya nakliyeye geçmeden önce istenen sıcaklığa ulaşma süresi anlamına gelir. Yine de soğutma süreleri genellikle "yarı soğuma (1/2 soğuma)" veya "sekizde yedi soğuma (7/8 soğuma)" süreleri olarak rapor edilir. Yarı soğuma süresi, ürünün başlangıç sıcaklığından soğutma ortamının sıcaklığı farkının yarısına kadar soğutulması için geçen süredir. Sekizde yedi soğuma süresi, yarı soğumadan üç kat daha uzundur ve ürün sıcaklığının, başlangıç ürün sıcaklığı ile soğutma ortamının sıcaklığı arasındaki farkın sekizde yedisi kadar düşmesi için gereken süredir.

Bu soğutma sürelerinin her ikisi de, belirli bir soğutma sisteminde belirli bir paket tipi için sabit değerlerdir ve değişen başlangıç ürün sıcaklıklarından veya değişen soğutma ortamı sıcaklığından etkilenmez.

Bağ bahçe ürünleri soğudukça, soğutma ilerledikçe sıcaklık düşüş oranları yavaşlar. Örneğin, başlangıç posası sıcaklığı 20°C olan şeftaliler için, Zorlanmış Hava Akımlı Soğutma ile 0°C oda sıcaklığında yarı soğutmak (yani, 10°C'ye soğutmak) 4 saat sürer. Bunları 5°C'ye soğutmak 4 saat daha sürer ve sekizde yedi soğutmaya (yaklaşık 2.5°C) ulaşmak için 4 saat daha gerekir (Şekil 2.). Sekizde yedi soğutma veya üç yarı soğuma süreleri (bu örnekte 12 saat) genellikle referans soğuma süresi olarak kullanılır.



Şekil 2. Bozulabilir ürünler için tipik soğuma eğrisi. Orta miktarda hava akışına maruz kalan şeftali gibi büyük meyveler için soğuma süreleri tipiktir [6].

Hem ilk ürün sıcaklığı hem de soğutkan (soğutucu akışkan) sıcaklığı bir ürünün soğuma süresini etkiler. Yukarıda belirtilen örnekteki şeftaliler sabah hasat edilebilir, ancak öğleden sonra sıcak bir Kaliforniya gününde, 40°C civarında posa sıcaklıklarına sahip olabilirler, bu durumda 0°C soğutma ile sabah hasat edilen aynı 25°C posa sıcaklıklarına ulaşmak için ek bir 4 saatlik yarı soğuma süresi (16 saat toplam süre) gerekecektir. Soğutma havası sıcaklığı 1.2°C olsaydı, başlangıç sıcaklığı 20°C olan şeftalileri soğutmak da 4 yarı soğuma periyodu veya 16 saat gerektirirdi. Oda içinde ve basınçlı hava etkili soğutucularla, soğuk havaya en yakın ürün, soğuk havadan en uzaktaki ürüne göre fark edilir derecede daha hızlı soğur. Soğutucuların, önsoğutma işlemi durdurulmadan önce en sıcak ürünün kabul edilebilir düşük sıcaklıklara ulaşması kontrol edilerek çalışmaları sağlanmalıdır.

Hasat Sonrası Bozulmanın Nedenleri

Meyveler, sebzeler ve çiçekler, bitkilerle ilişkili tüm fizyolojik ve patolojik süreçlerden geçen canlı organizmalardır. Hasattan sonra temel kimyasal ve fizyolojik faaliyetleri sürdürmek için bitkiler, depolanan gıda rezervlerinden enerji alırlar.

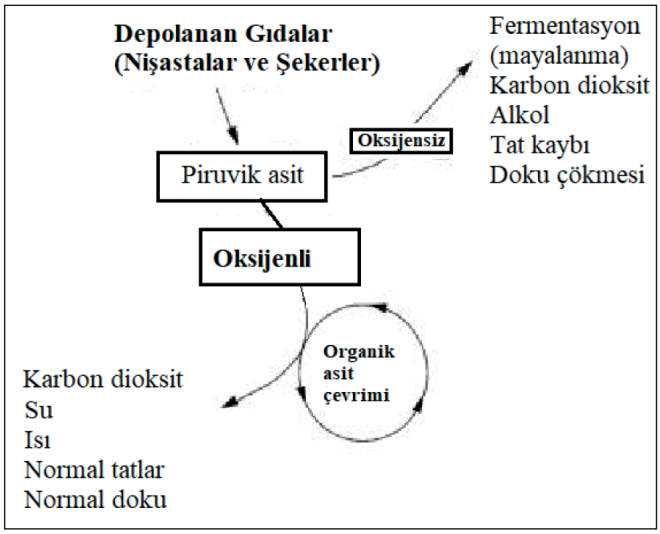
Toplandıktan sonra sürekli bozuldukları için, yavaşlatılan bozulma süreçleri başarılı pazarlama için yeterli zaman sağlar, yaygınlaşması ile global fire ve kayıplar azaltılmış olur.

Fizyolojik bozulma, doku nem kaybında fiziksel yaralanma veya mikroorganizma tarafından

istila, ürün hasarına neden olabilir. Taze ürünlere saldıran çürümeye neden olan mantarlar ve bakteriler de canlı organizmalardır ve hasat sonrası kayıplara büyük katkıda bulunurlar. Bazı çürüme organizmaları, sağlıklı dokuya doğrudan nüfuz edebilir; diğerleri ancak ürün zayıflatıldıktan veya yaralandıktan sonra girer. Bozulabilir her ürün, bitki dokusu ve mikroorganizmalardan oluşan karmaşık bir canlı sistemdir ve tatmin edici ürün yönetimi, mikroorganizmaların büyümesini ve yayılmasını engellerken, ürünün korunmasını gerektirir.

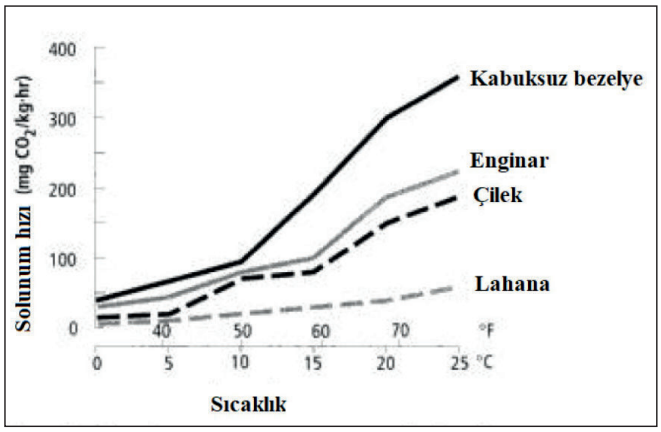
Yukarıdaki faktörlerin tümü birbiriyle ilişkili olabilir ve tümü sıcaklıktan etkilenir. Bu nedenle, ürün uygun şekilde korunacaksa, soğutmanın bozulmanın nedenleri ve etkileri ile ilişkisini anlamak çok önemlidir.

Diğer tüm canlı organizmalar gibi, taze meyve ve sebzeler de karmaşık bir dizi kimyasal reaksiyonla nefes alır. Basitçe ifade edersek, dokularında depolanan nişastalar ve şekerler karbondioksit ve suya dönüştürülür. İşlem (Şekil 3.), depolanan gıda rezervlerinden gelen enerjiyi ve çevredeki havadan oksijeni kullanır. Oksijen emilimi engellenirse, normal solunum devam edemez ve fermantasyon, ürünü hızla yok eder.



Şekil 3. Bitki terlemesinin basit açıklaması için [6].

Solunum süreçlerinin bir sonucu olarak açığa çıkan ısı, fotosentez sırasında bitkide orijinal olarak depolanan enerjinin bir kısmını temsil eder. Üretilen ısı miktarı ürüne göre ve hatta çeşitler arasında büyük ölçüde değişiklik gösterir (Şekil 4.). Bazı üzüm ve elma türleri gibi uzun depolama ömürleri ile dikkat çeken meyveler tipik olarak düşük solunum hızlarına sahiptir ve nispeten az ısı açığa çıkarır.



Şekil 4. Bazı ürünlerin solunum hızı üzerine ürün sıcaklığının etkisi [6].

Brokoli ve kuşkonmaz gibi bazı sebzeler yüksek solunum hızlarına sahiptir ve büyük miktarda ısı açığa çıkarır. Çilek gibi çabuk bozulan meyveler, ara miktarlarda ısı açığa çıkarır.

Bozulmayı sağlayan nedenler, yüksek ürün sıcaklıklarında daha etkendir. Sıcaklık yönetiminin bozulmanın nedenleri ve etkileri ile olan ilişkisini anlamak, ürünü uygun şekilde korumak için çok önemlidir.

Ürün Nem Kaybının Hesaplanması

Nem kaybı oranı, bir ürün ile onu çevreleyen hava arasındaki buhar basıncı farkı hesaplanarak ve bu basınç farkını ürünün terleme katsayısı ile çarpılarak tahmin edilebilir. Örneğin, 0°C'deki havuçlar 0°C, yüzde 90 bağıl nemde hareketli havaya maruz kalırsa, buhar basıncı farkı şöyle olur:

Havuçta buhar basıncı:

$$P_{v,havuç} = \frac{0.00380 \times 0.101}{0.622} = 0.000617\ MPa$$

0,00380 kg_w/kg_a, 0°C ve yüzde 100 bağıl nemdeki hava için özgül nem değeridir; ve havadaki buhar basıncı:

$$P_{v,hava} = \frac{0.00340 \times 0.101}{0.622} = 0.000552\ MPa$$

0,00340 kg_w/kg_a, 0°C ve yüzde 90 bağıl nemde hava için özgül nemdir. Bu nedenle özgül nem kaybı oranı:

$$\dot{m}_w = \left(P_{v,havuç} - P_{v,hava}\right) \times C_{terleme}$$

$$\dot{m}_w = (0.000617 - 0.000552)MPa \times 1{,}207\ mg \cdot kg^{-1} \cdot s^{-1} \cdot MPa^{-1} = 0.0785\ mg \cdot kg^{-1} \cdot s^{-1}$$

burada 1,207 $mg.kg^{-1}.s^{-1}.MPa^{-1}$, Tablo 1.'deki değerlerden, havuçların terleme katsayısıdır.

Tablo 1. Seçilmiş meyve ve sebzeler için terleme katsayısı [6].

Ürün	Terleme katsayısı, $C_{terleme}$ $mg.kg^{-1}.s^{-1}.MPa^{-1}$	Literatürde belirtilen terleme katsayısı aralığı, $mg.kg^{-1}.s^{-1}.MPa^{-1}$
Elma	42	16-100
Patates	44	2-171
Soğan	60	13-123
Greyfurt	81	29-167
Portakal	117	25-227
Erik	136	110-221
Domates	140	71-365
Limon	186	139-229
Lahana	223	40-667
Şalgam	469	-
Şeftali	572	142-2,089
Pırasa	790	530-1,042
Havuç	1,207	106-3,250
Kereviz	1,760	104-3,313
Yaban havucu	1,939	1,094-2,771
Brüksel lahanası	6,150	3,250-9,770
Marul	7,400	680-8,750

Bu oran günde yüzde 0.68 kilo kaybına denk gelmektedir. Bu su kaybı oranı, hava akımı önünden geçen korumasız bir ürün için meydana gelir. Çoğu durumda ürünler, çevrelerindeki havanın nemini artıran ve nem kaybını önemli ölçüde azaltan bir torba veya kap içine yerleştirilir. Bu durumlarda, ürün nem kaybı oranı, ürünün yüzeyindeki kayıp oranıyla değil, ambalajdaki nem kaybı oranıyla kontrol edilir.

ÖNSOĞUTMA(Precooling), nakliye, depolama veya işlemeden önce hasat edilmiş meyve ve sebzelerden tarla ısısının hızla uzaklaştırılması işlemidir. Önsoğutma, çürümeye neden olan mikroorganizmaların büyümesini engeller, enzimatik ve solunum aktivitesini azaltır, etilen hasarına duyarlılığı azaltır ve nem kaybını azaltır. Böylece uygun önsoğutma uygulaması, bozulmayı azaltır ve ürünün hasat öncesi özelliklerinden kalite kaybını geciktirir (Becker ve Fricke 2002).

Önsoğutma, ürünü sabit bir sıcaklıkta tutan depolama odalarından farklı olarak, daha fazla soğutma kapasitesi ve soğutma etkisi gerektirir. Bu nedenle, önsoğutma tipik olarak soğuk depolamadan ayrı bir işlemdir ve özel olarak tasarlanmış ekipman gerektirir (Fricke ve Becker 2003).

Önsoğutma, hava ile soğutma, su ile soğutma, vakumla soğutma ve temaslı buzlama ile olmak üzere çeşitli yöntemlerle yapılabilir. Bu yöntemler, ısıyı üründen hava, su veya buz gibi bir soğutma ortamına hızla aktarır. Birkaç dakikadan 24 saate kadar soğutma süreleri gerekebilir. Özelliklerinin geliştirilmesi ve buna bağlı olarak da sistem verimlerinin arttırılması amacıyla birçok bilimsel çalışma yapılmış ve yapılmaya devam edilmektedir.

Hasat sonrası işleme ve depolama sırasında, taze meyve ve sebzeler buhar ve terleme yoluyla yüzeylerinden nem kaybederler. Nem kaybı yüksekse,

büzülme veya bozulmuş tat gibi ürün bozulmaları ortaya çıkabilir. Buhar ve terleme yoluyla oluşan kayıpları en aza indirmek ve pazar kalitesini ve raf ömrünü artırmak için, ürünler düşük sıcaklıkta, yüksek nemli bir ortamda saklanmalıdır.

Ambalaj sırasında terlemeyi önemli ölçüde azaltmak ve saklama ömrünü uzatmak için çeşitli ürün yüzey kaplamaları ve nem geçirmez filmler de kullanılabilir (Becker ve Fricke 1996).

Taze meyve ve sebzelerde metabolik aktivite hasattan sonra kısa bir süre devam eder. Bu aktiviteyi sürdürmek için gereken enerji, şekerlerin oksidasyonunu içeren solunumdan gelir ve bu işlemle karbondioksit, su ve ısı açığa çıkar. Bir ürünün saklama ömrü, solunum aktivitesinden etkilenir. Bir ürünün depolanması sıcaklık yönetimi ile birlikte kullanılabilir, solunumu yavaşlatılır ve yaşlanma gecikir, böylece depolama ömrü uzar.

Bir ürünü çevreleyen oksijen ve karbon dioksit konsantrasyonlarının uygun kontrolü, solunum hızını yavaşlatmak için sıcaklık yönetimi ile birlikte kullanılabilir (Becker ve Fricke 1996).

Hasat olgunluğu ve çevre ile ilgili ürün fizyolojisi hasat zamanındaki sıcaklık, büyük ölçüde önsoğutma gereksinimlerini ve yöntemlerini belirler.

Bazı ürünler son derece çabuk bozulur ve hasattan sonra mümkün olan en kısa sürede soğumaya başlamalıdır; Örnekler arasında kuşkonmaz, taze fasulye, brokoli, karnabahar, tatlı mısır, kavun, yaz kabağı, olgunlaştırılmış domates, yapraklı sebzeler, enginar, brüksel lahanası, lahana, kereviz, havuç, sultani bezelye ve turp yer alır.

Beyaz patates, tatlı patates, kış kabağı, balkabağı ve olgun yeşil domates gibi daha az çabuk bozulan ürünlerin daha yüksek bir sıcaklıkta sertleştirilmesi gerekebilir. Bu ürünlerin soğutulması o kadar önemli değil; bununla birlikte, hasat sırasında ortam sıcaklığı yüksekse, biraz soğutma gereklidir.

Hemen önsoğutmaya ihtiyaç duyan ticari açıdan önemli meyveler arasında kayısılar; avokado; kızılcık hariç tüm meyveler; turta kirazları; şeftali ve nektarin; erik; guava, mango, papaya ve ananas gibi tropikal ve subtropikal meyveler yer alır.

Bu grubun tropikal ve subtropikal meyveleri soğuktan zarar görmeye yatkındır ve bu nedenle bireysel sıcaklık gereksinimlerine göre soğutulmaları gerekir. Tatlı kirazlar, üzümler, armutlar ve turunçgillerin hasat sonrası ömrü daha uzundur, ancak bekletme sırasında yüksek kaliteyi sürdürmek için hızlı soğutma şarttır. Muzlar yeşil rengiyle hasat edilir ve uygun sıcaklıkta soğuk depolanır, pazara gidecek muzlar depodan çıkarıldıktan sonra özel olgunlaştırma işlemine tabi tutulur, bu işlem sonucunda muz sarı rengini alır ve olgunlaştırılmış muzların ömrü çok kısa olduğu için birkaç gün içinde tüketilmelidir. Bu nedenle olgunlaştırılmış muzlar daha uzun dayanması için buzdolabına koyarak soğutulmamalıdır. *"Ashrae Fundamentals Handbook 2018",* Bölüm 21'de, birçok ürün için önerilen saklama sıcaklıkları verilmiştir [1].

2.HESAPLAMA YÖNTEMLERİ

2.1. Isı yükü

Önsoğutma için gereken soğutma kapasitesi, bir ürünü sabit bir sıcaklıkta tutmak veya yavaş soğutma için gereken soğutma kapasitesinden çok daha fazladır. Etkili önsoğutma için yeterli soğutma kapasitesine sahip olmak zorunlu olmakla birlikte, normalde gerekenden daha fazla kapasitelere sahip olmak ekonomik değildir. Bu nedenle, bir önsoğutma sistemindeki ısı yükü mümkün olduğunca doğru bir şekilde belirlenmelidir.

Toplam ısı yükü üründen, çevreden, hava infiltrasyonundan ürün ve taşıma kaplarından ve motorlar, ışıklar, fanlar ve pompalar gibi ısı üreten cihazlardan gelir. Ürün ısısı, toplam ısı yükünün büyük bir kısmını oluşturur ve ürün sıcaklığına, soğutma hızına, belirli bir sürede soğutulan ürün miktarına ve ürünün özgül ısısına bağlıdır.

Solunumdan gelen ısı, ürünün ısı yükünün bir parçasıdır, ancak genellikle küçüktür. *"Ashrae Fundamentals Handbook 2018",* Bölüm 24, soğutma yükünün nasıl hesaplanacağını daha ayrıntılı olarak tartışmaktadır.

Isı yükünü doğru hesaplamak için ürün sıcaklığının doğru belirlenmesi gerekir. Hızlı ısı transferi sırasında üründe bir sıcaklık gradyanı oluşur ve daha hızlı soğutma daha büyük gradyanlara neden olur. Bu gradyan, ürün özelliklerinin, yüzey ısı transfer parametrelerinin ve soğutma hızının bir fonksiyonudur. Başlangıçta, örneğin, soğuk su ile

soğutma, bir ürünün dış tarafının sıcaklığını hızla düşürür, ancak merkez sıcaklığını hiç değiştirmeyebilir. Ürün kütlesinin çoğu dış kısımdadır. Bu nedenle, merkez sıcaklığına dayalı hesaplamalar çok az ısı giderimi gösterecektir, ancak aslında önemli miktarda ısı çıkarılmıştır. Bu nedenle, ürün ısı yükü hesaplamaları için ürün kütle ortalama sıcaklığı kullanılmalıdır (Smith ve Bennett 1965).

Ürün soğutma yükü daha sonra şu şekilde hesaplanabilir:

$$Q = mc_p(T_i - T_{mü}) \quad (1)$$

burada m soğutulan ürün kütlesi, c_p ürünün özgül ısısı, T_i ürünün başlangıç sıcaklığı ve $T_{mü}$ ürünün son kütle ortalama sıcaklığıdır. Çeşitli meyve ve sebzelerin özgül ısıları *"Ashrae Fundamentals Handbook 2018"*, Bölüm 19'da bulunabilir.

2.2 Önsoğutma Süresi Tahmin Yöntemleri

Verimli önsoğutma işlemi şunları içerir:

(1) Sabit bir soğutma ortamı sıcaklığını korumak için soğutma ekipmanının uygun boyutlandırılması, (2) soğutma ortamının yeterli akışı ve (3) soğutma ortamında uygun ürün kalma süresi. Bu nedenle, bir ön soğutucuyu düzgün bir şekilde tasarlamak için, malların başlangıç sıcaklıklarından (genellikle hasattaki ortam sıcaklığı) son sıcaklığa kadar, nakliye ve/veya depolamadan hemen önce soğutulması için gereken süreyi tahmin etmek gerekir. Belirli bir soğutma ortamı sıcaklığı ve akış hızı için, bu soğutma süresi, düzgün soğutma için gerekli olan önsoğutma sürecinde kalma süresini belirler (Fricke ve Becker 2003).

Önsoğutma sürelerinin doğru tahminleri, sonlu elemanlar veya sonlu farklar bilgisayar programları kullanılarak elde edilebilir, ancak gereken çaba bunu tasarım veya proses mühendisi için kullanışsız hale getirir.

Ek olarak, iki ve üç boyutlu simülasyonlar, zaman alan veri hazırlığı ve önemli hesaplama süresi gerektirir.

Bugüne kadar yapılan araştırmaların çoğu, basitleştirici varsayımlar kullanan, ancak yine de doğru sonuçlar üreten yarı analitik/deneysel önsoğutma süresi tahmin yöntemlerinin geliştirilmesinde olmuştur.

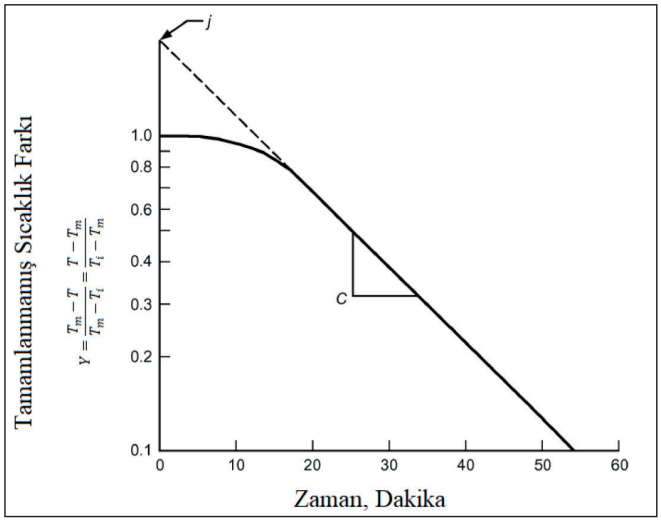
2.3 Kesirli Tamamlanmamış Sıcaklık Farkı

Tüm soğutma işlemleri benzer davranış sergiler. İlk gecikmeden sonra, yiyeceğin termal merkezindeki sıcaklık katlanarak azalır.

Şekil 5'de gösterildiği gibi, bu davranışı tasvir eden bir soğuma eğrisi, yarı-logaritmik eksenler üzerinde, zamana göre kesirli tamamlanmamış sıcaklık farkı Y [Denklem (2)] (Stoecker 1998) çizilerek elde edilebilir.

$$Y = \frac{T_m - T}{T_m - T_i} = \frac{T - T_m}{T_i - T_m} \quad (2)$$

burada T_m, soğutma ortamı sıcaklığıdır, T_i ilk ürün sıcaklığıdır ve T, ürün son kütle ortalama sıcaklığıdır. Bu yarı-logaritmik sıcaklık değişimi eğrisi, bir başlangıç eğrisel bölümden ve ardından doğrusal bir bölümden oluşur. Meyve ve sebzelerin soğuma süresini tahmin etmek için bu soğutma davranışını modelleyen, yarı soğuma süresi ve soğutma katsayısı gibi basit ampirik formüller önerilmiştir.



Şekil 5. Tipik bir ürün soğuma eğrisi [1].

Yarı Soğuma Süresi

Soğutma sürecini karakterize etmek için kullanılan yaygın bir kavram, ürün ile soğutma ortamı arasındaki sıcaklık farkını yarı yarıya azaltmak için gereken süre olan yarı soğuma süresidir (Becker ve Fricke 2002). Bu, tamamlanmamış kısmi sıcaklık farkını Y, yarıya indirmek için gereken süreye de eşdeğerdir. Yarı soğuma süresi başlangıç sıcaklığından bağımsızdır ve soğutma ortamı sıcaklığı sabit kaldığı sürece soğutma süresi boyunca sabit kalır (Becker ve Fricke 2002).

Bu nedenle, belirli bir ürün için yarı soğuma süresi belirlendikten sonra, ürünün başlangıç sıcaklığı veya soğutma ortamı sıcaklığından bağımsız olarak soğutma süresi tahmin edilebilir. Yarı soğuma süreleri ile birlikte kullanıldığında meyve ve sebzeler için soğuma sürelerinin tahminlerini sağlayabilen ürüne özel nomograflar geliştirilmiştir (Stewart ve Couey 1963).

Buna ek olarak, yarı soğuma sürelerine dayalı olarak ürünlerin soğuk su ile soğutma sürelerini hesaplamak için genel bir nomograf (Şekil 6.) oluşturulmuştur (Stewart ve Couey 1963).

Şekil 6.'da, ürün sıcaklığı, yatay eksen boyunca yarı soğuma periyotlarında ölçülen zamana karşı dikey eksen boyunca çizilmiştir.

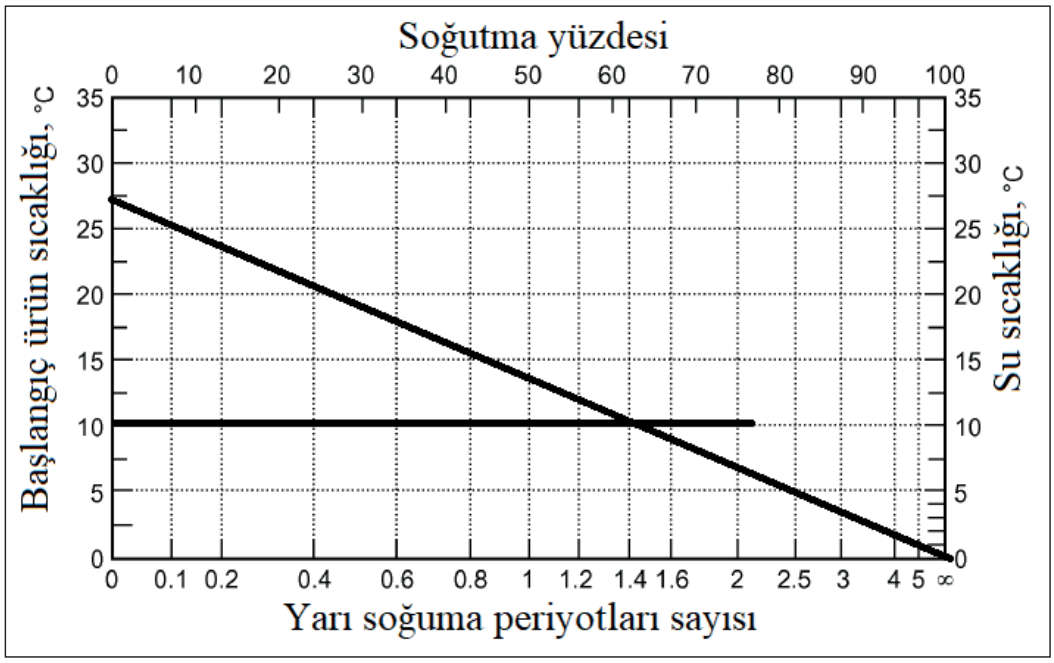
Sıfır zamanda, ürün sıcaklığı başlangıçtaki ürün sıcaklığıdır; sonsuz zamanda, ürün sıcaklığı su sıcaklığına eşittir.

Şekil 6.'yı kullanmak için, sıfır zamandaki (sol eksen) ilk ürün sıcaklığından sonsuz zamandaki ürün sıcaklığına [yani su sıcaklığı (sağ eksen)] düz bir çizgi çizin. Ardından, nihai ürün sıcaklığında (sol ve sağ eksenler) yatay bir çizgi çizin. Bu iki çizginin kesişimi, gereken yarı soğuma periyotlarının sayısını belirler (alt eksen). Soğuk su ile soğutma süresini elde etmek için, belirli bir malın yarı soğuma süresini yarı soğuma periyotlarının sayısıyla çarpın.

Aşağıdaki örnek, soğuk su ile soğuma süresini belirlemek için genel nomografın kullanımını göstermektedir.

Örnek 1. 2.2 dakikalık yarı soğuma süresine sahip tepesi doldurulmuş turpların 0°C su kullanılarak soğuk sulu soğutulmaktadır. Turpları 27°C'den 10°C'ye soğuk su ile soğutmak ne kadar sürer?

Çözüm: Şekil 6'daki genel nomografı kullanarak, solda 27°C'den sağda 0°C'ye kadar düz bir çizgi çizin. Ardından, son ürün sıcaklığı olan 10°C'den yatay bir çizgi çizin. Bu çizgiler 1.4 yarı soğuma periyotlarında kesişir. Bu değeri yarı soğuma süresi (2,2 dakika) ile çarparak 3.1 dakikalık toplam soğuk su ile soğutma süresini elde edilir.



Şekil 6. Ürünlerin soğuk sulu soğutulmasında yarı soğuma periyotları sayısı için genelleştirilmiş nomograf. Örnek 1. Çözümü uygulanmıştır.

Bununla birlikte, nomograf kullanmak zaman alıcı ve külfetli olabilir. Meyve ve sebzelerin soğuma süresi θ, yarım soğutma süresi Z kullanılarak nomograflar kullanılmadan belirlenebilir:

$$\theta = \frac{-Zln(Y)}{\ln(2)} \tag{3}$$

Örnek 1.'in çözümü için uygulanırsa:

$$\theta = \frac{-Zln(Y)}{\ln(2)} = \frac{-2.2\ln(\frac{10-0}{27-0})}{\ln(2)} = 3.15\ dakika$$ hesaplanır.

Soğutma Katsayısı, C

Soğuma süresi, C soğutma katsayısı kullanılarak da tahmin edilebilir. Şekil 3'de gösterildiği gibi, soğutma katsayısı, zaman ve sıcaklık deneysel gözlemlerinden yarı logaritmik bir eksen üzerinde oluşturulan ln(Y)'ye karşı zaman eğrisinin eksi işaretli eğimidir (Becker ve Fricke 2002). Soğutma katsayısı, birim soğutma süresi başına tamamlanmamış kısmi sıcaklık farkındaki değişimi gösterir (Dinçer ve Genceli 1994). Soğutma katsayısı, ürünün özgül ısısına ve çevreye olan ısıl iletkenliğine bağlıdır (Guillou 1958).

Belirli bir soğutma işlemi için soğutma katsayısını kullanarak, soğutma süresi θ, şu şekilde tahmin edilebilir:

$$\theta = -\frac{1}{C} ln\left(\frac{Y}{j}\right) \tag{4}$$

Gecikme faktörü *j*, soğutmanın başlangıcı ile ln(*Y*) ve θ eğrisinin eğiminin sabit hale geldiği nokta arasındaki sürenin bir ölçüsüdür [yani, ln(*Y*) ile θ eğrisinin doğrusal olması için gereken süre]. Gecikme faktörü *j*, yarı logaritmik soğutma eğrisinin doğrusal kısmının ln(*Y*) eksenine uzatılmasıyla bulunabilir; kesişme, gecikme faktörü *j* 'dir.

Y = 0,5'i yarı soğuma süresine karşılık gelen denklem (4)'te yerine konulmasıyla, soğutma katsayısı *C*, yarı soğuma süresi *Z* ile aşağıdaki gibi ilişkilendirilebilir:

$$Z = \frac{\ln(2j)}{C} \tag{5}$$

Soğutma katsayıları Dincer(1995, 1996), Dincer ve Genceli (1994, 1995), Henry ve Bennett (1973) ve Henry ve ark. (1976) tarafından yapılan araştırma bulguları, soğuk su ile soğutma ve soğuk sulu-havalı soğutmada(bu yöntemlerin tartışılması için Soğutma Yöntemleri bölümüne bakın), çeşitli ürünler için, Tablo 2 ila 5'te özetlenmiştir [1].

Tablo 2. Çeşitli ürünleri soğuk su ile soğutmak için Yarı soğuma Süreleri [1].
Kaynak: Stewart and Couey (1963).

Ürün	Ürün Boyutu	Taşıma Kabı	Yarı soğuma süresi, dakika
Enginar		Yok (tamamen açıkta) Sandık, kapak kapalı, kağıt astar	8 12
Kuşkonmaz	Orta	Yok (tamamen açıkta) Kapaklı piramit sandık, Saplar dik	1.1 2.2
Brokoli		Yok (tamamen açıkta) Kağıt astarlı kasa, kapağı kapalı Astarsız kasa, kapağı kapalı	2.1 2.2 3.1
Lahana		Tamamen açık Karton, kapak açık Karmakarışık yığın,dört katman	69 81 81
Havuç	Geniş	Tamamen açık 23 kg file torba	3.4 4.4
Karnabahar, kırpılmış		Tamamen açık	7.2
Kereviz	2 Düzine	Tamamen açık Kasa, kapaklı, kağıt astar	5.8 9.1
Şeker mısır, Kabuğu soyulmamış	5 Düzine	Tamamen açık Tel örgülü mısır sandığı, kapaklı	20 28
Bezelye, kabuğunda		Tamamen açıkta (su taşırmalı) 35 L sepet, kapak kapalı (su taşırmalı) 35 L sepet, kapaklı (daldırma)	1.9 2.8 3.5
Turplar Yapraklı		Tamamen açıkta Kasa, kapak kapalı, üç kat demet, 230 mm derinlik Karton, kapak açık, üç kat demet, 230 mm derinlik Tamamen açıkta Karmakarışık yığın, 230 mm derinliğinde	1.1 1.9 1.4 1.6 2.2
Domates		Tamamen açık Karmakarışık yığın, beş katman, 255 mm derinliğinde	10 11

Tablo 3. Çeşitli meyve ve sebzeleri soğuk su ile soğutmak için gecikme faktörleri, soğutma katsayıları ve yarı soğuma süreleri (Dincer, Genceli, 1994,1995,1996)[1].

Ürün ve boyutu	Sıcaklık, °C Başlangıç	Sıcaklık, °C Son	Su Akış hızı, mm/s	Kasa Yükü, kg	Gecikme faktörü, j	Soğutma katsayısı, C, s^{-1}	Yarı soğuma zamanı Z, s
Salatalık	22	4	50	5	1.291	0.001 601	546.6
$l = 0.16$ m				10	1.177	0.001 567	592.3
$d = 0.038$ m				15	1.210	0.001 385	638.2
				20	1.251	0.001 243	737.6
		0.5	50	5	1.037	0.001 684	432.9
				10	1.228	0.001 675	536.4
				15	1.222	0.001 629	548.5
				20	1.237	0.001 480	612.1
Patlıcan	21.5		50	5	1.077	0.000 822	933.9
$l = 0.142$ m				10	1.109	0.000 794	1003
$d = 0.045$ m				15	1.195	0.000 870	1011
				20	1.206	0.000 770	1143
Şeftali	21	4	50	5	1.067	0.001	585
$d = 0.056$ m				20	1.113	0.001 201	
Armut	22.5	4	1.0 50	5	1.119	0.001 434	561.6
$d = 0.06$ m 10					1.157	0.001 419	591.0
				15	1.078	0.001 296	592.8
				20	1.366	0.001 151	873.1
		2	50	5	1.076	0.001 352	
				20	1.366	0.001 151	
Erik	22	2	0	5	1.122	0.003 017	
$d = 0.037$ m				20	1.171	0.002 279	
Kabak	21.5	0.5	50	5	1.172	0.001 272	669.6
$l = 0.155$ m				10	1.202	0.001 186	739.8
$d = 0.046$ m				15	1.193	0.001 087	799.9
				20	1.227	0.001 036	866.6
Domates	21	0.5	50	5	1.209	0.001 020	865.4
$d = 0.07$ m				10	1.310	0.000 907	1062
				15	1.330	0.000 800	1222
				20	1.322	0.000 728	1336
		4	50	5	1.266	0.000 953	
				20	1.335	0.000 710	

Tablo 4. Su ve hava ile birlikte soğutulan (hydroaircooling) şeker mısırı ve kereviz için soğutma katsayıları ve yarı soğuma süreleri (Henry ve Bennet 1976) [1].

Ürün	Kafesli sandık tipi	Püskürtme Nozul tipi	Su debisi m^3/s	Hava debisi, m^3/s	Soğutma katsayısı C, s^{-1}	Yarı soğuma zamanı, Z, s
Şeker mısırı	Tel dikişli	Kaba	0.340	0	0.000 347	
			1973 0.340	0	0.000 444	
			0.208	0	0.000 642	
			0.378	0	0.000 336	
		Orta	0.303	0	0.000 406	
			0.190	0	0.000 406	
			0.190	—	0.000 414	
			0.378	0	0.000 492	
			0.378	—	0.000 542	
			0.378	28	0.000 447	
			0.378	45	0.000 486	
			0.378	78	0.000 564	
		Taşkın tavası	0.946	0	0.000 464	
			1.513	0	0.000 567	
		Orta	0.378	0		2170
		Orta	0.303	0		1730
			0.378	28		1570
			0.378	45		1440
			0.378	78		1220
		Taşkın tavası	0.151	0		1290
Kereviz	Vakum soğutma		0.173	57		3710
			0.173	119		2360
			0.173	183		2310
	Hidro soğutma		0.173	51		1890
			0.173	99		1790
			0.173	142		1390
	İyi havalandırılmış		0.173	51		2170
			0.173	113		1490
			0.173	145		1050

Tablo 5. Soğuk su ile soğutulan şeftaliler için soğutma katsayıları [1].

Hidro soğutma Metodu	Su debisi	Su sıcaklığı, °C	Meyve sıcaklığı, °C İlk	Meyve sıcaklığı, °C Son	Soğutma Katsayısı, s^{-1}
Taşma, şeftali 26.5 L sepette	12.2 $m^3/(h \cdot m^2)$	1.67	31.1	8.22	0.001 05
	24.4 $m^3/(h \cdot m^2)$	1.67	29.4	6.44	0.001 11
		4.44	27.8	9.28	0.001 941
		7.22	27.8	9.50	0.000 44
	36.7 $m^3/(h \cdot m^2)$	1.67	32.5	4.11	0.001 83
		7.22	31.7	10.5	0.001 74
		12.8	31.2	14.4	0.001 39
Daldırma	4.54 m^3/h	1.67	29.4	6.39	0.001 23
	9.09 m^3/h	1.67	29.4	5.56	0.001 37
	4.54 m^3/h	7.22	31.2	9.67	0.001 68
	9.09 m^3/h	7.22	30.0	9.33	0.001 72
	13.6 m^3/h	7.22	30.0	10.4	0.001 30

Kaynak: Bennett (1963).

Diğer Yarı Analitik / Ampirik Önsoğutma Süresi Tahmin Yöntemleri

Ashrae Elkitabı 2018, Bölüm 20, düzenli ve düzensiz şekilli gıdaların soğuma sürelerini tahmin etmek için çeşitli yarı analitik/deneysel yöntemleri tartışmaktadır. Bu soğutma süresi tahmin yöntemleri iki ana kategoriye ayrılır: (1) *f* ve *j* faktörlerine(normal veya düzensiz şekiller için) ve (2) eşdeğer ısı transferi boyutuna dayalı olanlar.

Sayısal Teknikler

Becker ve Fricke (1996b, 2001) ve Becker ve diğerleri (1996a, 1996b), meyve ve sebzelerin toplu soğutulmasının neden olduğu soğutma hızlarının yanı sıra gizli ve duyulur ısı yüklerini belirlemek için sayısal bir teknik geliştirmiştir. Bu bilgisayar modeli, birleşik terleme, solunum, hava akışı ve konvektif ısı ve kütle transferi proseslerini modellemek için gözenekli bir ortam yaklaşımı kullanarak, soğutulmuş depolama sırasında ürün nem kaybını ve soğutulmuş ürün içindeki sıcaklık dağılımını tahmin edebilmektedir.

Bu sayısal modeli kullanarak, Becker ve ark. (1996b), artan hava akışının soğutma süresini azaltarak nem kaybını azalttığını, bu da ürün ile çevredeki hava arasındaki buhar basıncı farkını hızla düşürdüğünü ve böylece terleme oranını düşürdüğünü bulmuştur. Ayrıca, yığın kütlesinin ve hava akış hızının soğutma süresi için birincil öneme sahip olduğunu, buna karşın bağıl nemin soğutma süresi üzerinde çok az etkisinin olduğunu bulmuşlardır.▪

▪ *Yazının devamı bir sonraki sayıda yayımlanacaktır.*