



TAHİL SİLOLARINDA ISI YÜKLERİNİN HESAPLANMASI

Calculation of Heat Loads in Grain Silos

Hüseyin Bulgurcu
Önder Şavkay

ÖZET

Tahıl silolarında ürün solunum ısısından ve dış ısı kazançlarından kaynaklanan ısı ve nem artışları ürünlerde böceklenmeye ve küf oluşumuna neden olmaktadır. Bu nedenle dünya genelinde yıllık %10'lara yakın bir ürün kaybı oluşabilmektedir. Bu kayıpları ılıman iklimlerde mekanik havalandırma ile azaltmak mümkün olabilir. Ancak tropik iklimlerde mekanik havalandırma yanında havayı soğutmak da gerekmektedir. Ayrıca kış aylarında nemli tahılın donarak topaklaşmasını önlemek için havalandırma işlemine ısıtma da eklemek gerekmektedir. Bundan dolayı tahıl silolarının yapısına, kurulduğu yerin atmosferik şartlarına, depolanan tahılın cinsine ve depolama süresine göre ısı yüklerinin hesaplanması gerekmektedir. Bu hesaplara göre mekanik havalandırma, soğutma ve ısıtma yüklerine uygun tahıl soğutucu/ısıtıcı cihazları seçilebilir. Bu çalışmada silolardaki ısı yükleri; silonun yapısına, coğrafi konumuna, tahıl cinsine bağlı olarak güneşlenme etkileri de dikkate alınarak hesaplama yöntemleri açıklanmış olup bu hesaplamalara kolaylık sağlayabilmek için Excel sayfası oluşturulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Tahıl silosu, Silo ısıtma yükü, Silo soğutma yükü, Silo havalandırma

ABSTRACT

Heat and humidity increase in grain silos caused by product respiration heat and external heat gains cause insect infestation and mold formation in the products. For this reason, around 10% of annual product loss may occur worldwide. It may be possible to reduce these losses with mechanical ventilation in temperate climates. However, in tropical climates, it is necessary to cool the air in addition to mechanical ventilation. In addition, it is necessary to add heating to the ventilation process to prevent the moist grain from freezing and clumping during the winter months. Therefore, it is necessary to calculate the heat loads according to the structure of the grain silos, the atmospheric conditions of the place where they are installed, the type of grain stored and the storage period. According to these calculations, grain cooler/heater devices suitable for mechanical ventilation, cooling and heating loads can be selected. In this study, the heat loads in the silos; Calculation methods have been explained by considering the sunbathing effects depending on the silo's structure, geographical location and grain type, and an Excel sheet has been created to facilitate these calculations.

Key Words: Grain silo, Silo heating load, Silo cooling load, Silo ventilation load

1. GİRİŞ

Tahıllar yılın belli bir döneminde hasat edildiği ve tüm yıl boyu insan ve hayvan beslenmesinde kullanıldıkları için, bozulmadan iyi bir şekilde depolanmaları önemli bir konudur. Çeşitli ürünlerin mevcut miktar ve kalitesini en iyi koruyacak şartlarda belli bir süre muhafaza edilmesi, depolama

olarak tanımlanmaktadır. Bu kapsamda da tahılların miktarını ve biyolojik, teknolojik, besinsel ve ekonomik kalitesini koruyacak şartlarda muhafaza etme işlemi, tahıl depolama olarak tanımlanmaktadır [1].

Dünya genelinde çoğunlukla tahıl tarımı, sıcaklık ve nem değerleri bakımından depolama için uygun olmayan iklim bölgelerinde yapılmaktadır. Yüksek sıcaklık ve nispi nem şartlarında depolanan tahıllarda da bozulmalar oluşmaktadır. Bu bozulmalar nedeniyle tahılın miktar ve kalitesinde oluşan kayıpların yanı sıra, tüketici sağlığı açısından da önemli riskler oluşmaktadır. Ayrıca bozuk tahılların hayvan beslenmesinde kullanılmaları, yine dolaylı olarak insan sağlığı üzerinde riskler oluşturmaktadır [2].

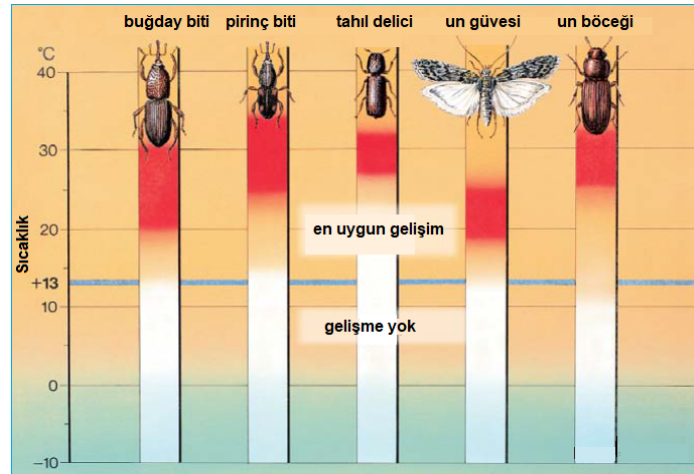
İyi bir tahıl depolama ve depolamanın devamlılığı için tanelerin yeterince olgun, zedelenmemiş-sağlam; tane suyu içeriğinin %14'ten, yığın sıcaklığının 15°C'den ve depo atmosfer nispi nem oranının da %65'ten düşük olması gerekir.

Tahıllarda depolama zararları ve kayıplar, ülkelerin gelişmişliklerine göre değişiklik göstermekle birlikte Türkiye'de ve Dünya'da yıllık yaklaşık %10 civarındadır (Ekmekçi ve Ferizli, 2000; Işıkber ve ark., 2005; Dizlek ve ark., 2008; Tunç ve Eler 2008; FAO, 2011). Bazı durumlarda kötü depolama sonucu küflenme ile bozulan tahıllar, yıkama ve kabuk soyma gibi işlemlerden geçirdikten sonra işlenerek piyasaya verilebilmektedir. Tahıl bazlı ürünlerin tüm toplum tarafından yaygın olarak tüketilmesi nedeniyle de bu ürünlerin içerdikleri aflatoksin ve okratoksin gibi kanserojen mikotoksinler, toplum sağlığı üzerinde son derece önemli bir risk oluşturmakta ve tehlikeli maruziyetlere neden olmaktadır [3].

2. TAHILLARIN BOZULMASI

2.1 Böceklenme

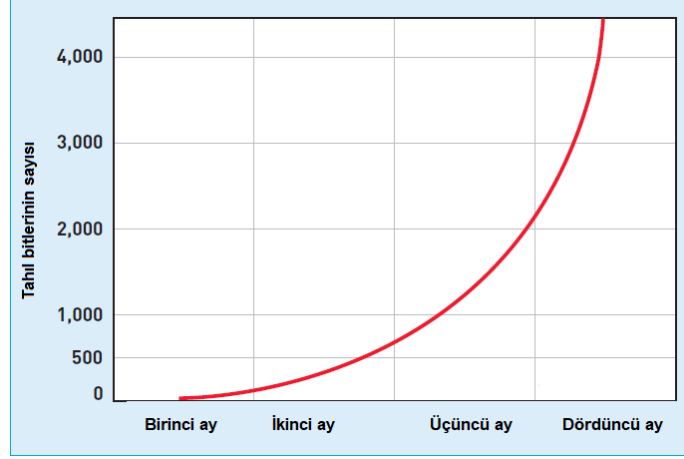
Başlangıçta, koruma soğutması, kurutmadan önce nemli tahılın korunması için geliştirilmiştir. Bununla birlikte, günümüzde, beslenmeye ve çoğalan böceklerle karşı korumak için nemli olandan daha fazla kuru tahıl soğutulmaktadır. Şekil 1, en yaygın böcek zararlılarının bazı türlerini ve bunların optimal yaşam ve gelişme koşullarını göstermektedir. Bazı zararlılar ılıman iklim bölgelerini tercih ederken, diğerleri tropik bölgelerde ideal koşulları bulur [4].



Şekil 1. Sıcaklığa bağlı ilgili böcek türlerinin üreme hızları [4]

Böcek beslenmesinden kaynaklanan kayıplar, hasat edilen mahsulün 13 °C'nin altındaki sıcaklıklara soğutulmasıyla etkili bir şekilde durdurulabilir. Sıcaklık yeterince düşükse, böcekler beklemeye, kış uykusuna girer ve depolanan ürüne zarar veremez.

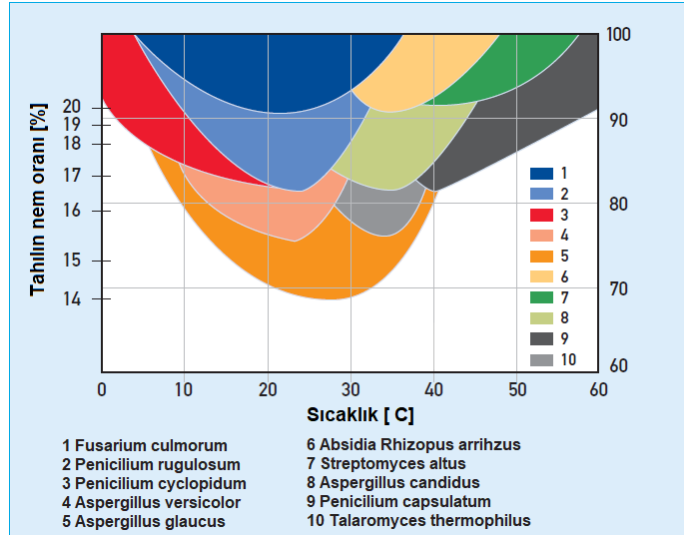
Ancak böcekler en uygun sıcaklık ve nem koşullarını bulursa, beslenme ve dışıkları nedeniyle büyük kayıplar meydana gelir. Böcekler optimal koşullarda dramatik bir şekilde ürediğinden problem büyük ölçüde yoğunlaşır (Şekil 2). Çoğu böcek çeşidinin oldukça kısa bir gelişim süresi vardır. İdeal koşullarda, tahıl bitinin üretim döngüsü 25 gün sonra zaten tamamlanmıştır [4].



Şekil 2. Tahıl bitinin optimal koşullarda zamana bağlı olarak çoğalması [5]

2.2 Küf Oluşumu

İklim, hava koşulları ve bitkilerin rotasyonuna bağlı olarak, büyüyen bitkiler üzerinde fusaria mantarlarına yönelik bir saldırı bölgesel olarak değişen yoğunlukta ortaya çıkabilir [6]. Önemli mali kayıpların yanı sıra mikotoksin oluşumu riski de vardır. Mikotoksinlerin insanlar ve hayvanlar üzerinde toksik etkisi vardır. Küf ve mikotoksinlerinin gelişimi, örneğin aflatoksin, diğer şeylerin yanı sıra ısı ile desteklenir. Tahılın soğutulması bu gelişmeyi önler (Şekil 3).



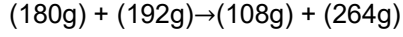
Şekil 3. Nem ve sıcaklığa bağlı çeşitli organizmaların üretimi [7]

2.3 Tahıl Olgunlaşma Isısı

Tahıl geliştirme süreci hasat zamanında en yüksek olgunluğa ulaşır. Ancak hasattan sonra tahıl yaşamaya devam eder; nefes alır. Hücresel solunumda oksijen emilir ve karbonhidratlar daha sonra

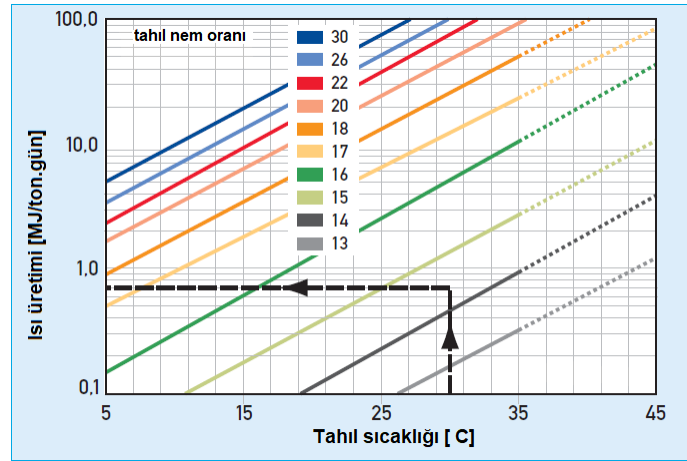
karbondioksite, suya ve ısıya dönüştürülür. Sonuç kuru madde kaybıdır. Kimyasal işlemin molar toplamı aşağıda gösterilmiştir.

Tahıl solunumu: kimyasal işlemin toplam denkliği:



karbonhidrat + oksijen → karbondioksit + su + ısı enerjisi

Şekil 4, tahılın sıcaklık ve nem içeriğine bağlı olarak ısı üretimini göstermektedir. Uygulamada, bu, depolanan mahsulün kuru madde kaybını belirlemek için kullanılabilir.



Şekil 4. Tahıl depolaması sırasında ısı üretimi (Jouin'e göre düzenlendi) [8]

Isı Üretiminin Hesaplanması: Üretilen ısı, tasarım neminin bir fonksiyonu olarak tahmin edilmelidir. Üretilen ısı şu şekilde hesaplanabilir:

$$\log(CO_2) = A M_w - B \quad (2)$$

Burada:

A ve B : Tahıla ve EMC değerlerine bağlı katsayılar (Tablo 1)

M_w : Tahılın nem denge oranı (EMC: Equilibrium Moisture Content)

Tablo 1. Bazı yaygın tahıl taneleri için bozulma oranı (A,B) sabitleri (CO₂ üretimini hesaplamak için)

EMC	A		B	
	%10-13,2	%13,3-17	%10-13,2	%13,3-17
Mısır, sarı dişli	0,17	0,27	2,00	3,33
Süperge darısı	0,125	0,32	1,65	4,19
Pirinç	0,21	0,44	3,04	6,08
EMC	%10-14	%14-17	%10-14	%14-17
Buğday, yumuşak	0,090	0,36	1,35	5,14

Örnek: Denge nem içeriği %15 olan 1 ton pirinç için günlük olgunlaşma ısını hesaplayınız.

$A=0,44$ ve $B=6,08$ (Tablo 1'den)

$$\log(CO_2) = 0,44x 15 - 6,08 = 0,52$$

$$CO_2 = 3,311 \text{ mg/100 g kuru madde}$$

$$CO_2 = 33,11 \text{ g/ton kuru madde}$$

%15 nem içerikli kaba pirinç için: Kuru madde=100-15=%85=0,85

1 ton kuru madde 33,11 g CO₂ üretirse



0,85 ton kuru madde $0,85 \times 33,11 = 28,1435$ g CO₂ üretir.

264 g CO₂ 2800 kJ ısıya eşdeğer ise;
28,1435 g CO₂ 298,4917 kJ ısı üretir.

3. TAHIL KORUMA YÖNTEMLERİ

Hasat sonrası silolarda kısa/uzun süre depolanan tahılları korumak için sıcak hava ile kurutma, atmosfer havası ile kurutma, soğuk hava ile soğutma ve kimyasal arıtma (sanitasyon) olarak özetlenebilir.

3.1 Ortam Havası ile Havalandırma

Havalandırma, depolama sırasında tahılın içinden havanın geçirilmesi işlemidir. Tahılın havalandırılmasının birkaç amacı vardır. Tipik olarak bunlar:

- Tane durumunu iyileştirmek
- Taze hasat edilmiş tahılın nem içeriğini soğutmak ve dengelemek
- Tahılı kurutmak
- Tahıl kurutucuda kurutulduktan sonra tahılı soğutmak
- Tahıl durumunu uzun süre korumak
- Sıcaklığı ortalama ortam koşullarının altına düşürmek
- Böcek ve küf aktivitesini azaltmak

Sıcaklığın düşürülmesi için havalandırma, depolanan tahılın güvenliğini sağlamanın önemli bir yoludur. Silodaki havalandırma ve sıcaklık düşürme sistemi, sıcaklık farkını ortadan kaldırabilir, tahıl sıcaklığını dengeleyebilir ve depolanan tahılın kararlılığını artırabilir. Sıcaklığın düşürülmesi için havalandırma, tahılın silolar arasında dolaştırılmasından daha ekonomik ve etkilidir. Günümüzde silolarda havalandırmanın üç şekli vardır, dikey havalandırma daha az maliyet, basit kullanım ve iyi verim sağlar.. Ancak dikey havalandırmanın direnci büyüktür, fan seçerken buna dikkat edilmelidir. Havalandırma sisteminin tasarımı ve yönetimi yapılırken “güvenli, etkili, ekonomik” kuralına uyulmalıdır.

Depolanan en iyi tahıl yönetimi, tahılı depoda temiz ve serin tutmaktır. Nem içeriği ne olursa olsun, tahıl düşük sıcaklıklarda daha iyi saklanır. Bu nedenle, ortalama sıcaklığı düşürmek ve sıcaklık farklarını minimumda tutmak için kontrollü havalandırma kullanılarak, nem içeriği ne olursa olsun, havalandırma altındaki tahılın daha güvenli ve daha uzun süre saklanacağı söylenebilir.

Buğday eşdeğeri %12 ila %15 EMC'den az tahıllar için standart havalandırma kullanılmalıdır (2l/s/ton). Taze hasat edilmiş ürün depoya konulduğunda hasat sıcaklığı ortam sıcaklığına düşene kadar sürekli olarak havalandırın. Bu genellikle en az 24 saattir.

Tahıllar %15 ila %18 EMC değerinde ise çift havalandırma kullanılır (4 l/s/ton). Bu ıslak tahıl, depolama sırasında hızlı ısınmaya ve bozulmaya tabidir. Bir kurutucuda kuruyana kadar çift havalandırma altında bir süre saklanabilir. Herhangi bir sorun olması durumunda durumu üzerinde sürekli kontroller yapılmalıdır. “Güvenli saklama süresi” yoktur.

%18'den fazla tahıllar için üçlü havalandırma kullanılır (6 l/s/ton). Bu ıslak tahıl depolanamaz ve ısınmaya eğilimlidir ve depolandıktan sonraki saatler içinde bozulur. Tahılın durumunu her gün kontrol edin. Tahıl kurutucuda tahıl kuruyana kadar sürekli olarak havalandırın ve en az %15'in altına indirin, ardından yukarıdaki önerileri kullanın.

4.2 Soğutulmuş Hava ile Soğutma

Mümkün olduğu kadar soğutmak için depolanan tahıldan kontrollü küçük miktarlarda soğuk ortam havası geçirilir. Tipik hava akış hızları, ton başına saniyede 2 ila 3 litredir [9].

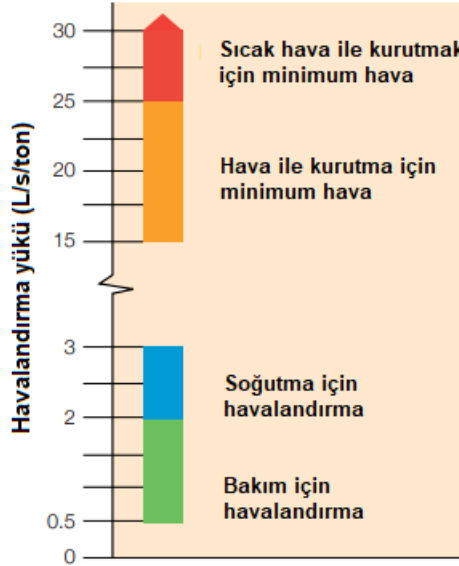
Havalandırılmalı soğutma, tahıl depolanırken iyi durumda tutulması içindir. Tahıl iyi durumda ise:

- Serin
- Düşük nem
- Düşük böcek aktivitesi
- Düşük küf aktivitesi

Tahılı serin tutmak

- Böcek aktivitesini azaltır
- Küf büyümesini azaltır
- Daha yüksek neme izin verir
- Eşit çıkış sıcaklığı sağlar
- Eşit nem dağılımı sağlar

Havalandırma ile serinletme genellikle soğutma havalandırmasında olduğu gibi yapay olarak soğutulan hava değil, doğal olarak mevcut olan havanın kullanılması anlamına gelir.



Şekil 6. Tahıl silolarında kurutma ve soğutma için tipik havalandırma yükleri [9]

4.3 Sıcak Hava ile Kurutma

Kurutma, bir malzemedan suyu uzaklaştırmak için kontrollü koşullar altında termal enerjinin eklenmesidir. Birçok yöntem, malzemedan nemi uzaklaştırmak için büyük miktarlarda hava kullanır.

Tahılın çevresinde her zaman hava vardır. Depolanan tahıl yığını, tahılların etrafındaki boşlukta tahıl ve hava içerir. 100 tonluk bir siloda 50'si hava ve 80'i tahıl olmak üzere toplam yaklaşık 130 metreküplük bir hacim vardır. Hava hareketi oluşmazsa, bu hapsolmuş hava saatler içinde doğal olarak tahıl nemi ile dengede bir nem durumuna ulaşacaktır.

Tahıl mükemmel bir yalıtıcıdır. İyi bir yalıtıcı olmak, tahılın ısınmasının veya soğumasının zor olduğu anlamına gelir. Tahıl dökme olarak depolandığında, bu özellik, yığının bazı bölümlerinin, yığının diğer bölümlerinden tamamen farklı bir sıcaklıkta olabileceği anlamına gelir. Bu durum



gözetimsiz bırakılırsa, muhtemelen zamanla daha da kötüleşecektir. Sıcak noktalar daha sıcak hale gelir ve tahıl tamamen bozar ve sonunda tutuşacak kadar ısınabilir.

Dökme tahılın yalıtım özelliği, tahıl güvenli bir seviyeye soğutulursa bir fayda olarak kullanılabilir çünkü sıcaklık bir kez düşürüldüğünde uzun süre bu seviyede kalacaktır. Düzgün kontrollü havalandırma soğutması, bu önemli dökme tahıl özelliğinden yararlanır.

Sıcak hava, soğuk yüzeylerle temas ettiğinde su salar. Banyo aynasında oluşan etki budur. Nemli sıcak havanın soğuk ayna yüzeyiyle buluştuğu yerde, havada buhar halinde bulunan su yoğuşarak sıvı suya dönüşür. Benzer şekilde, bir tahıl yığınının içindeki hava, suyu tahıldan yoğunlaşacağı soğuk bir yüzeye taşıyacaktır. Geceleri silo duvarları ve sundurma çatılar bu etkiyi gösterir. Tahılı düşük ve eşit sıcaklıklarda tutmak, bu istenmeyen etkileri önemli ölçüde azaltacaktır.

Tahıl kurutma, coğrafi konuma, kurutma sisteminin türüne ve tahılın türüne göre çok özeldir. Dikkatli bir değerlendirmeye dayalı olarak alternatiflerden optimal sistem seçilmelidir.

Tahılın (örneğin kolza tohumu) yağ içeriği ne kadar yüksekse, depolama nemi o kadar düşük olmalıdır.

Tahıl, güvenli depolama için %10-15 nem içeriğine kadar kurutulmalıdır. Arpada kısa süreli depolama (6 aydan az) için %14 ve uzun süreli depolama (6 aydan fazla) için %12 nem içeriği önermiştir. Çekirdekleri hasar görmüş tahılın %1-2 daha düşük nem içeriğinde depolanması gerekir. Depolama sıcaklıkları düşük olduğunda tahıl daha yüksek bir nem içeriğinde depolanabilir.

Kurutma sırasında tahıldan nemin uzaklaştırılması, nem büzülmesi olarak adlandırılan tane ağırlığında önemli bir azalmaya neden olur. Örneğin, %20 nemdeki 1 ton arpa, 200 kg veya 200 L su içerir. Bunu %12 neme düşürmek için her bir ton arpadan yaklaşık 90 kg su alınması gerekecektir.

Tahılın hasatta düşük nem seviyesi, toplam kurutma süresini ve gereken enerjiyi etkilediği için enerji yönetimi süreci için önemlidir. Bu kalite açısından önemlidir çünkü tahıl %25'in üzerindeki nem seviyelerinde hasat edildiğinde tane hasarı hızla artar.

Silolarda, nemi dolaylı olarak elektriksel iletkenlik veya kapasitans ile ölçen nem ölçerler bulunur. Bu sayaçların doğruluğu genellikle yaklaşık + %0,5 nem içeriğidir. Sonuçlar, doğrudan yöntemler olan laboratuvar nem ölçümleriyle karşılaştırılabilir.

Silo çalışanlarının kurutulmuş tahılın nem içeriğini izlemesi önerilir. Kurutma işleminden hemen sonraki nem sonuçları hatalı olabilir, bu nedenle kurutmadan 12 saat sonra yeniden kontrol edilmesi önerilir. Bir tahıl partisinin çeşitli numunelerinin nem içeriği ölçülmelidir.

4.4 Denge Nem İçeriği (EMC)

Tahıl, çevresindeki hava alanıyla sürekli etkileşim halindedir. Tahılın iç nem içeriği, çevreleyen havadaki nem seviyesi ile dengede olacak şekilde değişir. Bu nem seviyesi, denge nem içeriği (EMC) olarak bilinir. Tahılın EMC'si havanın hem nemine hem de sıcaklığına bağlıdır.

Bir ürüne veya üründen nem geçişi, atmosfer ile ürün arasındaki buhar basıncı farkına bağlıdır. Atmosferik buhar basıncı tahıl buhar basıncından büyükse, tahıl atmosferden nemi çeker.

Mekanik bir kurutma sisteminde kurutma havası, nemi buharlaştırmak için gerekli enerjiyi tahıla taşır ve buharlaşan suyu tahıl kütlelerinin dışına taşır. Kurutma için kullanılan havanın nemi düşük olmalıdır.

4.5 Kurutmanın Etkileri

Tahılın aşırı ısınması veya uzun süreli ısınması ile, tahıl taneleri kurutma işlemi sırasında çatlaklar oluşturabilir (tahılın stres çatlaması). Bu, çimlenme ve öğütme özelliklerini etkileyecektir. Çatlaklar, küf, mantar ve böceklerin saldırıları için olası noktalardır. Gerilme çatlaması, daha yüksek kurutma sıcaklıkları ve hızlı soğuma hızları ile artacaktır. Bir tahıl çekirdeğinin nem içeriği ne kadar düşükse, çatlamaya ve hasara karşı o kadar hassastır. Tahıl, kuruduktan sonra taşıma sırasında, kurutma

öncesine göre daha fazla zarar görme eğilimindedir. Hızla soğutulan tahıl ayrıca daha kırılğan olma ve hasara eğilimli olma eğilimindedir. Tahılın stres çatlamasını önlemek için, tahıl sıcaklıklarını kurutucunun kullanım kılavuzuna göre izlemek önemlidir.

Tahılın kurutulması üç aşamada gerçekleşir:

1. Tane çekirdeğinin içindeki nem, tahılın yüzeyine hareket etmelidir. Nem seviyesi ne kadar yüksek olursa, su yüzeye o kadar serbestçe hareket edebilir. Bu genellikle kurutma işleminin en yavaş kısmıdır.
2. Nem yüzeyden çevreye buharlaşmalıdır.
3. Hava akışı, nemi tahıl kütesinden dışarı taşımak için yeterli olmalıdır.

4.6 Kimyasal Arıtma

Depolamadan önce depo içerisinde iyi bir şekilde temizlenmesi, depodaki haşere girişlerine neden olabilecek açıklıkların kapatılması ve depoya alınacak tahılın eleme, çekme ve üfleme gibi işlemler ile bir ön temizlemeden geçirilmesi, iyi bir depolama için yapılması gereken sanitasyon uygulamalarıdır [10].

Tahılın kimyasal arıtımı bugün zaten önemli resmi düzenlemelere tabidir. Gazlaştırma, kullanılan kimyasal maddeler ve karmaşık ve pahalı prosedür nedeniyle yüksek maliyetleri içerir. Ayrıca, birçok ülkede gazlama için sıkça kullanılan metil bromürün 2005 yılında yasaklandığına dikkat edilmelidir.

5. TAHIL SİLOSU ISI YÜKLERİ

5.1 Isı Kaybı Hesabı

Silolardaki ısı kayıplarını hesaplamak için silonun kurulduğu ilin kış dönemindeki ortalama minimal (gündüz + gece) dış sıcaklığı, silo cidar özellikleri, cidar yüzey alanı, silo dış yüzeyindeki hava (rüzgâr) hızı ve havalandırma nedeniyle oluşan ısı yükü etkili olmaktadır. Özellikle dış sıcaklık ortalamasının -5 °C'ten düşük olduğu ortamlar için silo dış cidarında yoğunlaşma ve donma (topaklaşma) riski vardır. 0 °C'nin altındaki sıcaklıklarda tahıllar solunum ısısı üretemezler. Bu durumda silo içerisine ısıtılmış hava gönderilmelidir.

5.1.1 Transmisyon Isı Kaybı:

$$\dot{Q}_T = K_u \cdot A \cdot (12 - t_{ko}) / 1000 \quad [\text{kW}] \quad (1)$$

Burada;

K_u : Silo dış yüzeyi (kabuk) ısı geçirgenlik değeri ($W/m^2 \text{ } ^\circ C$).

Yan cidarlar için $K_u = 23,3 W/m^2 C$, taban alanı için $K_u = 17,1 W/m^2 C$ kabul edilebilir [11].

A : Kabuk dış yüzeyi (m^2)

t_{ko} : Kışın dışı hava ortalama sıcaklığı ($^\circ C$)

Kış mevsiminde farklı illerin dış ortalama ve minimal sıcaklıkları Tablo 2'den alınabilir. Özellikle dış sıcaklık ortalamasının -5 °C'ten düşük olduğu ortamlar için silo dış cidarında yoğunlaşma ve donma (topaklaşma) riski vardır. Bu durumda silo içerisine ısıtılmış hava gönderilmelidir.

Tahıl silolarında emniyetli iç sıcaklık yaz ve kış 12°C olarak kabul edilir.

Tablo 2. Türkiye'deki illere ait iklim değerleri

İLLER	Rakım	Yaz Ort..	Kış Ort..	Yaz Ort.	Yaz maks.	Yaz Ort.	Kış Ort.	Kış Min.	Kış Ort.	Yaz	Kış	Yaz	Kış	Yaz Yaş
		Hava yoğ.	Hava yoğ.	Nem	Sıcak.	Sıcaklık	Nem	Sıcak.	Sıcak.	Yağış	Yağış	Güneş saati	Güneş saati	Term.
ADANA	29	1,1705	1,2472	70	33,4	27,4	68	4,7	8,9	14	111	10,7	7,16	27,60
ADİYAMAN	675	1,0781	1,1788	33,3	36,1	28,9	68	-1,1	3,1	1,33	108	12,8	5,9	19,81
AFYON	1026	1,0633	1,1397	55	28,3	20,4	75	-3,5	0,7	20,33	51,33	12,1	5	18,67
AĞRI	1643	0,9914	1,0790	53,3	27,8	18,8	71	-10,5	-4,9	36,33	47,66	12,33	6	18,95
AKSARAY	971	1,0664	1,1428	48	29,5	21,5	67	-3	1,8	8,66	42,66	12,5	6,93	18,29
AMASYA	395	1,1422	1,2249	54,7	30,4	21,7	72,33	-1,7	1,8	24	54,33	9,57	5,7	21,30
ANKARA	874	1,0804	1,1605	50,7	29,1	21,1	72	-3,1	0,8	16,67	53,33	12,5	5,77	18,70
ANTALYA	57	1,1689	1,2444	59,7	32,9	26,8	71	4,6	8,6	3	192,33	12,67	6,33	23,74
ARDAHAN	1807	0,9847	1,0665	69	22,9	14,9	75	-12,6	-7,2	95	46	8,73	5,27	17,29
ARTVİN	366	1,1532	1,2409	69	25,4	19,9	72	-5,4	-0,8	231	151,33	5,56	5,77	20,27
AYDIN	60	1,1685	1,2449	52	35	26,8	72	3,7	8,4	6,33	120	12,7	6,6	23,72
BALIKESİR	133	1,1721	1,2470	61,7	30,5	23,3	79	1,9	5,5	18,33	80,33	11,2	5,06	23,72
BARTIN	13	1,1994	1,2658	78,3	27,5	20,7	80	1,9	5,3	50,67	85,67	11,03	5,67	24,29
BATMAN	573	1,0881	1,1876	23,67	36,63	29,83	68,67	0,47	4,43	2,33	97,33	12,9	5,57	14,73
BAYBURT	1583	1,0036	1,0894	55,3	25,8	17,4	74	-10,6	-5,5	28,33	48,67	9,93	4,83	18,40
BİLECİK	514	1,1287	1,2049	59,33	27,5	21	77	-1,9	2,4	25	63	10,53	5,37	21,19
BİNGÖL	1131	1,0343	1,1411	39	32,8	24,8	75	-7,3	-3,1	13	122	12,83	5,3	18,93
BİTLİS	1536	0,9974	1,0860	53	28,8	20,9	75	-6,4	-3,1	16,67	121	12,73	5,36	16,11
BOLU	734	1,1071	1,1855	72,3	26,7	18,9	82	-4,3	-0,4	70,67	96,67	9,53	5,2	19,66
BURDUR	951	1,0657	1,1431	47,7	30,7	22,4	78	-0,9	2,4	16	73,33	12,4	4,97	18,90
BURSA	257	1,1608	1,2371	59,7	30	21,8	81	0,1	3,6	38,33	99,67	11	5,33	21,36
ÇANAKKALE	12	1,1879	1,2569	70,7	29,7	23,6	78	4,5	7,3	16,67	91	11,93	4,93	23,03
ÇANKIRI	763	1,0954	1,1757	59,7	29,8	21	69	-3	0,9	21,33	48	12,37	5,87	19,67
ÇORUM	818	1,0941	1,1671	62,3	28,1	19,4	72	-2,7	1,1	28,33	58	11,17	5,7	20,22
DENİZLİ	405	1,1271	1,2059	49	33,4	25,3	69	1,3	5,8	8,33	68,67	12,67	6,27	20,46
DIYARBAKIR	668	1,0826	1,1773	32,3	36,7	27,9	69	-0,4	3,7	4	93	12,87	6,33	20,44
DUZCE	146	1,1802	1,2572	71,7	28,4	20,8	82	-1,3	2,8	72,33	105,33	9,17	5,23	21,88
EDİRNE	72	1,1822	1,2619	58,7	30,9	22,9	77	0,2	4,2	29	55,67	12,3	5,13	22,69
ELAZIĞ	1078	1,0427	1,1297	38,3	32,7	24,3	75	-1,7	1,4	6	76,33	12,87	5,1	19,16
ERZİNCAN	1203	1,0357	1,1345	51,7	30,2	21,8	75	-8	-3,9	37,67	66	10,73	4,9	19,50
ERZURUM	1923	0,9637	1,0490	54,7	25,1	17	73	-11,8	-6,6	52	44,67	10,27	4,83	16,52
ESKİŞEHİR	796	1,0940	1,1706	58,7	28,1	20,2	75	-3,2	1	20	49,67	11,17	5,43	20,22
GAZİANTEP	844	1,0645	1,1509	49	33,8	26,6	71	0,1	4,1	3	77,67	12,6	6	22,44
GİRESUN	88	1,1860	1,2546	78,3	25,4	21,4	74	2,2	5,3	103	123,33	8,13	6,1	21,04
GÜMÜŞHANE	1227	1,0440	1,1388	64	27,3	18,6	78	-9,5	-5,7	92,67	61,33	6,7	4,97	17,40
HAKKARİ	1707	0,9710	1,0709	40	29,3	22,6	68	-9,6	-5	8,33	142	12,67	5,63	14,87
HATAY	89	1,1676	1,2375	65,3	31,4	26	75	5,3	9,1	6	107,33	10,5	6,03	25,96
IĞDIR	861	1,1009	1,1713	44,3	31,9	16,1	65	-7,4	-1,3	32,33	35,67	12,7	7,67	21,64
ISPARTA	1046	1,0582	1,1333	51	29,1	21,1	78	-1,9	1,6	16,67	103,67	12,37	4,73	18,50
İSTANBUL	55	1,1870	1,2523	71,7	26,1	22,3	78	4,6	6,9	28,33	90	11,36	5,27	22,58
İZMİR	142	1,1630	1,2363	52,7	32,3	25,3	78	3,6	7,6	8	111	12,6	6,13	24,21
K.MARAŞ	679	1,0877	1,1770	54	34,4	26,1	70	-0,6	3,4	3	101,33	12,1	5,67	22,57
KARABÜK	259	1,1578	1,2481	59,3	31,3	22,5	79	-3,1	1,1	70	94	9,23	5,36	20,68
KARAMAN	1036	1,0580	1,1318	48	29,9	21,5	70	-2	2,3	7,33	46	12,46	6,2	18,32
KARS	1756	0,9858	1,0701	71	24,3	16,4	72	-12,2	-6,4	27,66	43	10,33	5,5	18,28
KASTAMONU	784	1,1005	1,1745	61,7	26,9	18,9	74	-3,1	0,5	40,67	60	10,63	5,27	19,54
KAYSERİ	1057	1,0614	1,1430	54	29,5	19,8	73	-5,5	-1,1	22,67	51,67	11,93	6,17	18,17
KIRIKKALE	746	1,0947	1,1739	55	29,9	21,8	70	-2,1	1,9	14,67	46,67	12,57	6,07	19,37
KIRKLARELİ	243	1,1600	1,2378	62,3	29,7	22,5	79	0,4	3,9	33,67	67,67	12,03	4,53	22,11
KİRŞEHİR	992	1,0666	1,1432	54,7	28,7	20,7	69	-3,1	1	16,67	47,33	12,3	6,43	18,16
KİLİS	695	1,0831	1,1633	49	35,1	26,8	69	1,5	6,1	2	68,67	12,17	6,07	24,47
KOCAELİ	78	1,1826	1,2560	71	28,9	22,6	83	1,6	5,3	57,33	104	9,7	5,03	23,41
KONYA	1029	1,0600	1,1364	44,3	29	21,2	69	-3,1	1,4	11,67	39,33	12,5	6,5	18,13
KÜTAHYA	944	1,0779	1,1520	56,7	27,2	19,3	75	-3,4	0,5	28	57	11,37	5	18,99
MALATYA	951	1,0550	1,1443	37	32,4	25,4	66	-1,5	2,1	9	87,33	12,77	5,83	19,14
MANİSA	76	1,1682	1,2541	46,7	33,9	26,3	78	1,8	5,8	8,67	112	12,53	5,73	22,81
MARDİN	884	1,0523	1,1437	31	33,4	28,6	69	-0,2	4,5	1	70,33	12,8	6,6	20,13
MERSİN	18	1,1759	1,2555	77	30,1	26,4	68	3,5	7,4	7,33	32,67	11,5	7,1	24,21
MUĞLA	652	1,0953	1,1749	51	32,1	25	76	1	4,8	19,67	153,33	12,57	5,9	20,26
MUŞ	1319	1,0211	1,1190	44,3	31,2	21,8	76	-7,4	-4	21	124	12,77	5,43	16,50
NEVŞEHİR	1235	1,0426	1,1152	52,3	27,2	18,7	69	-5,3	-0,3	15	45,67	12,23	6,77	17,47
NİĞDE	1244	1,0365	1,1193	50,3	28,2	20,1	71	-5,3	-1,6	22,67	49,67	12	6,53	16,03
ORDU	11	1,1952	1,2693	72	26,1	21,8	71	1,1	4,6	91	110	8,43	6,1	20,95
OSMANIYE	128	1,1599	1,2353	63	33	26,6	73	4,1	8,3	15,67	106,67	10,47	6,63	25,99
RİZE	28	1,1936	1,2658	78,3	25,3	21,6	75	1,6	4,8	183,67	128,67	7,5	6,37	20,37
SAKARYA	32	1,1911	1,2634	73,3	28,8	22,1	82	1,1	5,2	53,66	100	9,33	5,23	23,76
SAMSUN	36	1,1933	1,2619	75	25,7	21,4	76	2,3	5,4	50	86,67	9,63	5,97	21,82
ŞİRT	886	1,0528	1,1500	32	35,4	28,4	69	-2	2,9	2,33	115,67	12,9	6,46	20,03

SİNOP	26	1,1947	1,2625	76,3	25,1	21,4	79	2,3	5,6	22,67	82,33	11,9	5,8	22,11
SİVAS	1288	1,0369	1,1199	53,3	25,3	18,4	74	-7,3	-3,2	14,67	47,33	10,87	6	18,34
ŞANLIURFA	543	1,0928	1,1874	37	37,2	29,6	72	1,3	5,5	2,67	82	12,8	6,2	21,26
ŞIRNAK	1408	0,9982	1,0883	50,7	32	25,3	65	-4,8	0,6	1,67	128	12,8	6,43	17,40
TEKİRDAĞ	32	1,1923	1,2616	72,7	27,2	21,8	79	2,6	5,6	23,33	70	12,13	5	22,53
TOKAT	604	1,1170	1,2073	59	28,6	20,9	75	-5,7	-1,1	31,67	70,67	8,93	6	19,87
TRABZON	38	1,1926	1,2712	76	25,2	21,5	73	-0,3	3,3	147	115,33	7,5	6,2	20,37
TUNCELİ	933	1,0605	1,1672	42,3	33,5	24,5	74	-7	-2,7	4,33	92	12,87	5,3	18,10
UŞAK	914	1,0738	1,1494	53,3	29,1	21,5	71	-2,1	2,1	14,33	66,33	12,5	5,93	18,39
VAN	1689	0,9828	1,0666	44,3	26,9	19,7	74	-8,3	-3,3	10	43,67	12,73	5,33	16,57
YALOVA	9	1,1963	1,2614	72	27,6	21,6	79	3,3	6,4	32,67	92,67	11,3	5,4	23,36
YOZGAT	1300	1,0372	1,1084	62	24,9	17,9	71	-4,9	-0,8	20,67	52,67	11,97	6,17	18,04
ZONGULDAK	9	1,1984	1,2709	73	24,5	21,1	78	1,3	4,3	62,66	98	11,2	5,9	21,03

Tablo 3. Bazı tahıl ürünlerine ait yığın yoğunluğu ve özgül ısı değerleri

Tahıl	Yoğ. (ton/m ³)	Özgül Isı, Cp (kJ/kg.K)
Arpa	0,6	1,245
Ayçiçek	0,42	1,25
Buğday	0,77	1,265
Kanola	0,69	1,75
Mısır	0,72	1,785
Pirinç	0,6	1,314
Soya	0,75	1,66
Fındık	0,425	1,65
İç fındık	0,5	1,78

5.1.2 Havalandırma Isı Kaybı

0°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda havalandırma yükü dikkate alınmamalıdır, çünkü tahıldaki solunum ısıları mevcuttur.

$$\dot{Q}_h = \dot{q} \cdot M \cdot \rho_h \cdot C_{ph} \cdot (12 - t_{ko}) / 1000 \quad [\text{kW}] \quad (2)$$

\dot{q} : Havalandırma yükü [L/s.ton]

M : Silo tahıl kütlesi (ton)

ρ_h : Hava yoğunluğu (kg/m³) (Tablo 2'den)

C_{ph} : Havanın özgül ısı (1,002 kJ/kg°C)

t_{ko} : Dış hava kış ortalama sıcaklığı

5.1.3 Tahıl Isıtma Kaybı

Tahılların kışın çevre ortalama sıcaklığından +12 °C'ye kadar ısıtılması gerekecektir. Ancak bu büyük kütlelerin kaç günde ısıtılacağına karar verilmesi gerekir. Bu 3-5 gün aralığında seçilebilir. Çok kısa seçilmesi ısıtma kapasitesini çok arttıracaktır.

$$\dot{Q}_m = M \times 1000 \cdot C_p \cdot (12 - t_{ko}) / (86400 \times \text{gün sayısı}) \quad [\text{kW}] \quad (3)$$

Burada:

M : Silo tahıl kütlesi (ton)

C_p : Tahılın özgül ısı (Tablo 3'ten)

5.1.3 Toplam ısı kaybı:

$$\dot{Q}_{\text{Top}} = \dot{Q}_T + \dot{Q}_h + \dot{Q}_m \quad [\text{kW}] \quad (4)$$



Örnek 1: Sivas il merkezinde kurulacak olan 1500 tonluk düz tabanlı silindirik çelik buğday silosunun yüksekliği 25 m, çapı 9,965 m, havalandırma yükü $\dot{q} = 2$ (L/s.ton) alınacaktır. Isıtma işlemi 3 günde gerçekleştirilecektir. Isı kaybını hesaplayınız.

Çözüm:

Sivas için kış sıcaklık ortalaması (gece ve gündüz): $-3,2$ °C (Tablo 2)

Silindirik deponun yan ve üst alanı: $A_y = \pi DL + 0,785 D^2 = \pi \times 9,965 \times 25 + 0,785 \times 9,965^2 = 860,2$ m²

Döşeme alanı: $A_d = 0,785 D^2 = 0,785 \times 9,965^2 = 77,95$ m²

Yan ve üst yüzeyden transmisyon ısı kazancı:

$$\dot{Q}_{Ty} = K_u A \Delta T / 1000 = 23,3 \times 860,2 \times [12 - (-3,2)] / 1000 = 304,64 \text{ kW}$$

$$\dot{Q}_{Td} = K_u A \Delta T / 1000 = 7,1 \times 77,95 \times [12 - (-3,2)] / 1000 = 20,26 \text{ kW}$$

$$\text{Toplam transmisyon ısı kaybı: } \dot{Q}_T = \dot{Q}_{Ty} + \dot{Q}_{Td} = 304,64 + 20,26 = 324,9 \text{ kW}$$

Havalandırma ısı kaybı:

$$\dot{Q}_h = \dot{V} \rho M C_{ph} \Delta T / 1000 = 2 \times 1,1199 \times 1500 \times 1,002 \times [12 - (-3,2)] / 1000 = 51,16 \text{ kW}$$

Tahıl ısı kaybı:

$$\dot{Q}_m = M \times 1000 \cdot C_p \cdot (12 - t_{ko}) / (86400 \times \text{gün sayısı}) = 1500 \times 1000 \times 1,265 \times [12 - (-3,2)] / (86400 \times 3) = 111,27 \text{ kW}$$

Toplam ısı kaybı:

$$\dot{Q}_{Top} = \dot{Q}_T + \dot{Q}_h + \dot{Q}_m = 324,9 + 45,69 + 111,27 = 481,86 \text{ kW}$$

5.2 Isı Kazancı Hesabı

Isı kazancı hesabında dış yüzeylerden oluşan transmisyon ısı kazancı, depolanan tahılın solunum ısı ve güneş ışınımı ile oluşan ısı kazancı dikkate alınır. Özellikle sıcak bölgelere kurulacak tahıl silolarında sadece havalandırma ile yapılacak serinletme yeterli olmayabilir. Ayrıca mekanik soğutmalı sistemler kullanmak gerekli olabilir.

5.2.1 Transmisyon Isı Kazancı

$$\dot{Q}_T = K_u A (t_{yo} - 12) / 1000 \quad [\text{kW}] \quad (5)$$

Burada;

K_u : Silo dış yüzeyi (kabuk) ısı geçirgenlik değeri ($W/m^2 \text{ } ^\circ C$).

Yan cidarlar için $K_u = 23,3 W/m^2 C$, taban alanı için $K_u = 17,1 W/m^2 C$ kabul edilebilir [11]

A : Kabuk dış yüzeyi (m^2)

t_{yo} : Yazın dış hava ortalama sıcaklığı (Tablo 2) ($^\circ C$)

5.2.2 Tahıl Isı Kazancı

Silolarda depolanan tahılın dış ortalama sıcaklıktan 12 °C'ye kadar düşürülmesi gerekir.

$$\dot{Q}_m = M \times 1000 \cdot C_p \cdot (t_{yo} - 12) / (86400 \times \text{gün sayısı}) \quad [\text{kW}] \quad (6)$$

5.2.3 Tahıl Solunum Isı Kazancı

$$\dot{Q}_s = \dot{q}_t M / 86400 \quad [\text{kW}] \quad (7)$$

\dot{q}_t : Tahıl solunum ısı (kJ/ton.gün)

M : Tahıl kütlesi

5.2.4 Havalandırma Isı Kazancı

Siloların hava ile soğutulabilmesi için öncelikle dış havanın gece-gündüz ortalama sıcaklığından 12 °C'ye kadar soğutulması gerekecektir.

$$\dot{Q}_h = \dot{q} \cdot M \cdot \rho_h \cdot C_{ph} \cdot (t_{yo} - 12)/1000 \quad [\text{kW}] \quad (8)$$

\dot{q} : Havalandırma yükü [L/s.ton] (Soğutma için 10-12 L/s.ton seçilebilir.)

M : Silo tahıl kütlesi (ton)

ρ_h : Hava yoğunluğu (kg/m³) (Tablo 2'den)

C_{ph} : Havanın özgül ısı (1,002 kJ/kg°C)

t_{yo} : Yaz dış hava ortalama sıcaklığı

5.2.5 Güneş Işınım Kazancı

Yaz iklim tesislerinde binaların ısı kazancı hesaplanırken, güneş tesirinin ısı kazancına etkisini bulmak için güneş-hava sıcaklığı tanımından yararlanılır. Güneş hava sıcaklığı bir dış sıcaklık tanımı olup bu sıcaklık ile yüzeyin dış sıcaklığı arasında, taşınım ile iletilen ısının miktarı; duvar yüzeyine vuran toplam ışınımın bütün bileşenlerini kapsayan gökyüzü ve diğer dış çevredeki cisimler ile yüzey arasında olan ışınım ile ısı alışverişi ile, dış havadan taşınım ile olan ısı alışverişi neticesinde duvar yüzeyine geçen ısıların toplamına eşittir [12].

Güneş vuran bir yüzeydeki ısı akısı güneş gören yüzeydeki enerji dengesinden şu şekilde ifade edilir.

$$\frac{q}{A} = \alpha \cdot I_t + h_0 \cdot (T_0 - T_s) - \varepsilon \cdot \Delta R \quad (9)$$

Burada:

α : Yüzeyin güneş ışınımı yutma katsayısı,

I_t : Yüzey üzerine düşen toplam güneş ışınımı (W/m²)

h_0 : Dış yüzeydeki taşınım ve uzun dalga ışınımı ile olan ısı geçiş katsayısı (W/m²K)

T_0 : Dış hava sıcaklığı (°C)

T_s : Yüzey sıcaklığı (°C)

ε : Yüzeyin yarı küresel ışınım yayma katsayısı

ΔR : Gökyüzü ve çevredeki cisimlerden yüzey üzerine düşen uzun dalga ışınımı ile dış hava sıcaklığındaki siyah cismin yaydığı ısı ışınımı arasındaki fark (W/m²)

Isı geçiş miktarı, güneş-hava sıcaklığı terimi (T_e) ile ifade edilecek olursa;

$$\frac{q}{A} = h_0 (T_e - T_s) \quad (10)$$

Eşitlik (9) ve (10)'den;

$$T_e = T_0 + \frac{\alpha \cdot I_t}{h_0} - \frac{\varepsilon \cdot \Delta R}{h_0} \quad (11)$$

İfadesi elde edilir.

Gökyüzünden uzun dalga boylu ışınım alan yatay yüzeyler için ΔR 'nin uygun değeri yaklaşık 63 W/m² olup eğer $\varepsilon=1$ ve $h \approx 17$ W/m²K alınırsa uzun dalga boyu düzeltme terimi $\frac{\varepsilon \cdot \Delta R}{h_0} = -3,9^\circ\text{C}$ olur [12].

Düşey yüzeyler ise gökyüzünden olduğu kadar topraktan ve çevredeki cisimlerden gelen ışınları aldığından, kesin ΔR değerlerinin tespit edilmesi zordur. Güneş ışınım akısı değeri büyükse, cisimlerin yüzeyleri genellikle dış havadan daha yüksek bir sıcaklığa ulaşır. Böylece yüzeylere gelen ışınım gökyüzünün düşük emisyonuna katkıda bulunur. Bu yüzden, düşey yüzeyler için $\Delta R=0$ almak yaygın bir uygulamadır [12].

Güneş-hava sıcaklıkları, yatay düzlemler için $\frac{\varepsilon \Delta R}{h_0} = -3,9^\circ\text{C}$ ve düşey düzlemler için 0°C baz alınarak hesaplanmıştır. Güneş-hava sıcaklığı değerleri $\frac{\alpha}{h_0}$ parametresinin iki ayrı değeri için verilmiştir. $\frac{\alpha}{h_0} = 0,026$ değeri açık renkli yüzeyler için, $\frac{\alpha}{h_0} = 0,052$ değeri ise koyu renkli yüzeyler için ifade edilmiştir.

Tablo 4 sütun 2'de verilen saatlik hava sıcaklıkları, 21 Temmuz ve 40° kuzey enlemi için 35°C tasarım sıcaklığı ve $11,7^\circ\text{C}$ sıcaklık aralığı için geçerlidir. Diğer bölge ve şartlar için uygun sıcaklıkların hesaplanması için uygun tasarım sıcaklığı ve günlük sıcaklık aralığı seçilir. Her bir saat için Tablo 5'te verilen günlük sıcaklık aralığı yüzdesi ile günlük sıcaklık aralığı çarpılır ve tasarım sıcaklığından çıkarılarak hesaplanır [13].

Tablo 4. 21 Temmuz ve 40° kuzey enlemi için güneş-hava sıcaklıkları, açık renkli yüzeyler ($\alpha/h_0 = 0,026$) [13]

Saat	Çarpım Faktörü	Hava Sıcak. T_0 ($^\circ\text{C}$)	K	KD	D	GD	G	GB	B	KB	YATAY
07:00	0,93	23,9	28,4	39,6	43	36,2	25,9	28,8	25,8	25,8	29
08:00	0,84	25	27,9	40,2	45,8	40,7	28,3	27,6	27,6	27,6	35,1
09:00	0,71	26,7	29,9	38,9	46	43,7	33,4	29,8	29,8	29,8	41,2
10:00	0,56	28,3	31,9	36,4	44	44,7	38	31,9	31,9	31,9	46,2
11:00	0,39	30,6	34,4	34,6	41,2	44,6	42,2	35,3	34,4	34,4	50,7
12:00	0,23	32,2	36,1	36,1	36,4	41,8	44,6	42,5	37	36,1	53,2
13:00	0,11	33,9	37,7	37,7	37,7	39,7	45,8	47,1	43,4	37,9	54,3
14:00	0,03	34,4	38,1	38,1	38,1	38,2	44,6	50,2	49,2	41,5	52,9
15:00	0	35	38,4	38,2	38,2	38,2	42,4	51,8	53,7	46,4	50,3
16:00	0,03	34,4	37,4	37,2	37,2	37,2	38,4	50,4	55,2	49,2	45,5
17:00	0,1	33,9	38,1	36	36	36	36,1	46,9	53,7	49,8	40
18:00	0,21	32,8	37,5	34	34	34	34	40,5	46,9	45,5	33,6
19:00	0,34	30,6	31	30,6	30,6	30,6	30,6	31	31,5	31,5	26,8
20:00	0,47	29,4	29,4	29,4	29,4	29,4	29,4	29,4	29,4	29,4	25,6
21:00	0,58	28,3	28,3	28,8	28,3	28,3	28,3	28,3	28,3	28,3	24,4
Ortalama	0,37	30,63	33,63	35,72	37,73	37,55	36,13	38,10	38,52	36,34	40,59

Tablo 5. 21 Temmuz ve 40° kuzey enlemi için güneş-hava sıcaklıkları, açık renkli yüzeyler ($\alpha/h_0 = 0,052$)[13]

Saat	Çarpım Faktörü	Hava Sıcak. T_0 ($^\circ\text{C}$)	K	KD	D	GD	G	GB	B	KB	YATAY
07:00	0,93	23,9	32,9	55,4	62,1	48,5	28	27,8	27,8	27,8	29
08:00	0,84	25	30,7	55,4	66,6	56,4	31,5	30,2	30,2	30,2	35,1
09:00	0,71	26,7	33,2	51,1	65,4	60,7	40,2	33	33	33	41,2
10:00	0,56	28,3	35,4	44,4	69,7	61,1	47,7	35,6	35,4	35,4	46,2
11:00	0,39	30,6	38,2	38,7	51,8	58,7	53,8	40,2	38,2	38,2	50,7
12:00	0,23	32,2	40	40	40,6	51,3	57	53,1	41,9	40	53,2
13:00	0,11	33,9	41,5	41,5	41,5	45,5	57,7	60,8	52,8	42	54,3
14:00	0,03	34,4	41,7	41,7	41,7	42	54,8	66,6	63,9	48,6	52,9
15:00	0	35	41,7	41,5	41,5	41,5	49,8	69,1	72,5	57,8	50,3
16:00	0,03	34,4	40,4	39,9	39,9	39,9	42,4	66,8	75,9	63,9	45,5
17:00	0,1	33,9	42,2	38,1	38,1	38,1	38,4	60,2	73,5	65,7	40
18:00	0,21	32,8	42,3	35,2	35,2	35,2	35,2	48,4	60,9	58,3	33,6
19:00	0,34	30,6	31,5	30,7	30,7	30,7	30,7	30,5	32,5	32,5	26,8
20:00	0,47	29,4	29,4	29,4	29,4	29,4	29,4	29,4	29,4	29,4	25,6
21:00	0,58	28,3	28,3	28,3	28,3	28,3	28,3	28,3	28,3	28,3	24,4
Ortalama	0,37	30,63	36,63	40,75	45,50	44,49	41,66	45,33	46,41	42,07	40,59

5.2.5 Toplam Isı Kazancı

$$\dot{Q}_{\text{Top}} = \dot{Q}_T + \dot{Q}_m + \dot{Q}_s + \dot{Q}_h + \dot{Q}_R \quad [\text{kW}] \quad (12)$$



Örnek 2. Urfa'da yerleşik bir buğday silosunun yüksekliği 20 m, çapı 14 m, üst konik kısım yüksekliği 3 m, havalandırma yükü 8 L/s.ton ve soğutma süresi 3 gün, silo doluluk oranı %90 olarak kabul edilirse soğutma yükünü (ısı kazancı) hesaplayınız (Buğday EMC değeri %15).

Çözüm:

$$\text{Yan yüzeyler: } A_y = \pi \cdot D \cdot h = 3,14 \times 14 \times 20 = 879,2 \text{ m}^2$$

$$\text{Taban yüzeyi: } A_{ta} = 0,785 \cdot D^2 = 0,785 \times 14^2 = 153,86 \text{ m}^2$$

$$\text{Konik kısmın yanal boyu: } s = \sqrt{R^2 + H^2} = \sqrt{7^2 + 3^2} = 7,48 \text{ m}$$

$$\text{Konik kısmın yüzey alanı: } A_k = \pi \cdot R \cdot s = 3,14 \times 7 \times 7,48 = 164,41 \text{ m}^2$$

$$\text{Silo hacmi: } V_s = \pi \cdot R^2 \cdot H + \frac{1}{3} \pi R^2 h = 3,14 \times 7^2 \times 20 + \frac{1}{3} \times 3,14 \times 7^2 \times 3 = 3539 \text{ m}^3$$

$$\text{Silo tahıl yükü: } M = 0,90 \cdot V_s \cdot \rho_b = 0,9 \times 3539 \times 0,77 = 2452,53 \text{ ton}$$

Transmisyon ısı kazancı:

$$\dot{Q}_{T1} = K_u A (t_{yo} - 12) / 1000 = 23,3 \times 789,2 \times (29,6 - 12) / 1000 = 323,63 \text{ kW}$$

$$\dot{Q}_{T2} = K_u A (t_{yo} - 12) / 1000 = 17,1 \times (153,86 + 164,41) \times (29,6 - 12) / 1000 = 94,42 \text{ kW}$$

$$\text{Toplam transmisyon ısı kazancı: } \dot{Q}_T = \dot{Q}_{T1} + \dot{Q}_{T2} = 323,63 + 94,42 = 418,05 \text{ kW}$$

Tahıl ısı kazancı: $\dot{Q}_m = M \times 1000 \cdot C_p \cdot (t_{yo} - 12) / (86400 \times \text{gün sayısı})$

$$\dot{Q}_m = 2452,53 \times 1000 \times 1,265 \times (26,9 - 12) / (86400 \times 3) = 214,25 \text{ kW}$$

Tahıl solunum ısı kazancı:

A=0,36 ve B=5,14 (Tablo 1'den)

$$\log(\text{CO}_2) = A M_w - B$$

$$\log(\text{CO}_2) = 0,36 \times 15 - 5,14 = 0,26$$

$$\text{CO}_2 = 1,8197 \text{ mg/100 g kuru madde}$$

$$\text{CO}_2 = 18,197 \text{ g/ton kuru madde}$$

%15 nem içerikli buğday için: Kuru madde=100-15=%85=0,85

1 ton kuru madde 18,197 g CO₂ üretirse

0,85 ton kuru madde 0,85x18,197 = 15,46745 g CO₂ üretir.

264 g CO₂ 2800 kJ ısıya eşdeğer ise;

$$15,46745 \text{ g CO}_2 \quad 164,0487 \text{ kJ ısı üretir.}$$

$$\dot{Q}_s = \dot{q}_t M / 86400 = 164,0487 \times 2452,53 / 86400 = 4,65 \text{ kW}$$

Havalandırma ısı kazancı:

$$\dot{Q}_h = \dot{q} \cdot M \cdot \rho_h \cdot C_{ph} \cdot \frac{t_{yo} - 12}{1000} = 8 \times 2452,53 \times 1,0928 \times 1,002 \times (26,9 - 12) / 1000 = 384,56 \text{ kW}$$

Güneş ışınım kazancı: Tablo4'ten dış hava ortalama sıcaklığına en yakın değer;

Saat	Çarpım Faktörü	Hava Sıcak. T ₀ (°C)	K	KD	D	GD	G	GB	B	KB	YATAY
11:00	0,39	30,6	34,4	34,6	41,2	44,6	42,2	35,3	34,4	34,4	50,7

$$\text{Dikey yüzeyler için } T_{ed} = (34,4 + 34,6 + 41,2 + 44,6 + 42,2 + 35,3 + 34,4 + 34,4) / 8 = 37,6375 \text{ °C}$$

$$\text{Yatay yüzey için: } T_{ey} = 50,7 \text{ °C}$$

$$\text{Işınım ısı kazancı: } \dot{Q}_R = \zeta F(\%) \cdot [A_y \cdot K_u (T_{ed} - T_0) + A_c \cdot K_u (T_{ey} - T_0)] / 1000$$

$$\dot{Q}_R = 0,39 \times [879,2 \times 23,3 \times (37,6375 - 30,6) + 164,41 \times 17,1 \times (50,7 - 30,6)] / 1000 = 78,26 \text{ kW}$$

Toplam ısı kazancı:

$$\dot{Q}_{Top} = \dot{Q}_T + \dot{Q}_m + \dot{Q}_s + \dot{Q}_h + \dot{Q}_R = 418,05 + 214,25 + 4,65 + 384,56 + 78,26 = 1099,77 \text{ kW}$$

6. SİLO ISI YÜKÜ İÇİN YAZILIM GELİŞTİRİLMESİ

Yukarıda açıklanan ve örnekleri verilen ısı yükü hesaplamaları oldukça karmaşık ve zaman alıcı olduğu için bu hesapları kolaylaştırmak için Excel hesaplama yazılımı “SilolsıYüküHesabı-3.0” geliştirilmiştir. Bu yazılımın veri kaynaklarında ülkemizin tüm il ve ilçeleri için iklim verileri mevcuttur. Şekil 7’de ana sayfası gösterilen yazılımın sol tarafında hesaplama için gerekli girdiler, sağ tarafında ise hesaplama sonuçlarının verildiği “çıkıntılar” gösterilmiştir.

“Girdiler” kısmında yerleşim yeri, silo çapı, silo yüksekliği, silo doluluk oranı, depolanan tahıl tipi, tahıl denge nem içeriği (EMC), havalandırma yükü, silo dış yüzey rengi ve ürün ısıtma-soğutma süresi verilmiştir.

“Çıkıntılar” kısmında ise yaz ortalama, kış ortalama, yaz maksimal, kış minimal sıcaklıkları, yaz ve kış ortalama bağıl nem değerleri, yaz ve kış hava yoğunlukları, tahıl yoğunluğu, depolanan tahıl kütlesi, havalandırma debisi, ısıtma ve soğutma yükleri bulunmaktadır.

SİLO ISI YÜKÜ HESABI			
GİRDİLER		ÇIKTILAR	
Yerleşim Yeri	Erfelek/Sinop	Yaz Ortalama Sıcaklık (T_y)	21,36 [°C]
Silo Çapı (D)	20 [m]	Yaz Bağıl Nem (Φ_y)	70 [%]
Silo Yüksekliği	18 [m]	Yaz Hava Yoğunluğu (ρ_y)	1,1725 [kg/m ³]
Silo Doluluk Oranı	80 [%]	Kış Ortalama Sıcaklık (T_k)	3,93 [°C]
Depolanan Tahıl Tipi	Buğday	Kış Minimal Sıcaklık (T_{KM})	0 [°C]
Tahılın Denge Nem İçeriği	15 [%]	Kış Bağıl Nem (Φ_k)	79 [%]
Havalandırma Yükü (q)	2 [L/s.ton]	Kış Hava Yoğunluğu (ρ_k)	1,2463 [kg/m ³]
NOT: Isıtma için 4-6, soğutma için 10-12 L/s.ton seçilmesi tavsiye edilir.		Tahıl Yoğunluğu (ρ_t)	0,77 [ton/m ³]
Silo Dış Yüzey Rengi	Açık	Depolanan Tahıl Kütlesi (M)	3482 [ton]
Ürün Isıtma-Soğutma Süresi	4 [gün]	Havalandırma Debisi (V_h)	25068 [m ³ /h]
		ISITMA YÜKÜ	590 [kW]
		SOĞUTMA YÜKÜ	1277 [kW]

Şekil 7. Silo ısı yüklerini hesaplamak için geliştirilmiş “SilolsıYükü-3.0” yazılımı ana sayfası

7. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Tahıl depolama sistemlerinde oluşan böceklenme, bozulma, topaklaşma, çimlenme gibi sorunlardan dolayı çok %10’ları aşan kayıplar oluşturulduğu göz önüne alınırsa silolardaki uygun muhafaza ortamının sağlanmasında ısıtma-soğutma sistemlerinin önemi açıkça ortaya çıkmaktadır. Tarımsal üretimin yoğun olduğu ABD, Avustralya gibi ülkelerde silolarda depolanan ürünlerin sağlıklı koşullarda muhafaza edilmesi için yaygın olarak ısıtma, havalandırma ve soğutma yöntemlerinden yararlanılmakta, silo içindeki tüm noktaların nem (EMC) ve sıcaklık koşulları merkezi bir kayıt sistemi ile sürekli izlenmektedir. Ülkemizde de son 10 yıldır bu tür uygulamalar yaygınlaşmaktadır.

Bu çalışmada tahıl depolama silolarında gerekli olan ısıtma-soğutma işlemlerinin önemi açıklanmış ve bu sistemlerinin kapasite seçimlerine katkı yapacak hesaplama yöntemleri açıklanmıştır. Bu hesaplama konusunda kolaylık sağlamak üzere bir hesaplama yazılımı geliştirilmiştir.

Bu konuda yapılacak yeni çalışmalarda verimli bir silo yönetimi için uygulanacak senaryolar ve saha deneyimleri üzerinde durulabilir.

KAYNAKLAR

- [1] TS 4294 ISO 6322-2, Tahıllar ve baklagillerin depolanması- Bölüm 2: Uygulama önerileri, 17.04.2002..
- [2] Brooker D.B., F.B. Arkema, C.W. Hall, 1992, Drying and Storage of Grains and Oilseeds. An AVI Book, Published by Van Nostrand Reinhold, ISBN 0-442- 20515-5, New York.
- [3] Kolb, Ralph E., "Treatment of grains through conservation cooling with the GRANIFRIGOR™"
- [4] Kolb RE (2001) Kühle Getreidelagerung, Mühle + Mischfutter, Heft 17, Verlag Moritz Schäfer, Detmold
- [5] Anonymus (2002) Gefahr erhöhter Mykotoxinbildung im Getreide, Mühle + Mischfutter, Heft 19, Verlag Moritz Schäfer, Detmold
- [6] Lacey J, Hill ST, Edwards MA (1980) Microorganisms in stored grains; their enumeration and significance, Tropish stored product information 39.
- [7] Jouin C (1964) Grundlegende Kalkulationen für die Belüftung des Getreides, Getreide und Mehl, Band 14, Heft 6, Beilage der Zeitschrift „Die Mühle“, Verlag Moritz Schäfer, Detmold
- [8] Zhang Lailin et all. "The system for decreasing temperature by ventilation in grain silo" Proceedings of the 7th Int. Working Conference on Stored-product Protection - Volume 2.
- [9] <https://www.cbh.com.au/media-releases> (18.04.2022 tarihinde erişildi)
- [10] Elgün, A. ve Ertugay, Z. 2002 Tahıl İşleme Teknolojisi Atatürk Ü. Zir. Fak, Yayın No: 97, (4.Baskı), Erzurum
- [11] Kaden Plewe ve ark. "Transient Thermal Performance of High-Temperature Particle Storage Bins", AIP Conference Proceedings 2445, 160013 (2022).
- [12] Genceli, O.F. (Editör), 1998. ASHRAE Temel El Kitabı, Konut Dışı Yapılarda İklimlendirme, Soğutma ve Isıtma Yükleri, Türk Tesisat Mühendisleri Derneği, Teknik Yayın No:2, Bölüm 26, Cem Ofset, İstanbul.
- [13] ASHRAE Fundamentals Handbook, 2001. Nonresidential Cooling and Heating Load Calculation Procedures, American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers, Inc. Chapter 29, pp. 29.1-29.40, Atlanta.

ÖZGEÇMİŞLER

Hüseyin BULGURCU

1962 yılında İzmir Kınık Poyracık'ta doğdu. 1984 yılında Yıldız Üniversitesi Kocaeli Mühendislik Fakültesi Makine Enerji dalından lisans, 1989 yılında M.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsünden Yüksek Lisans, 1994 yılında aynı Enstitüden Doktora dereceleri aldı. 1995 yılında Y. Doçent, 2013 yılında Doçent oldu. 1986-1989 yılları arasında Kartal Teknik Lisesinde, 1989-1995 yılları arasında Çankırı Meslek Yüksekokulunda öğretim elemanı olarak çalıştı. 1994 yılında YÖK-D.B. projesi kapsamında İngiltere'de Manchester College'de mesleki araştırmalarda bulundu. 1995-2012 yılları arasında Balıkesir Meslek Yüksekokulu İklimlendirme ve Soğutma Programında çalıştı. Ağustos 2012 ila Eylül 2016 tarihleri arasında Balıkesir Mühendislik Mimarlık Fakültesi'nde çalıştı. Mart 2017'de emekli oldu. Sektör firmalarında danışmanlık yapmakta, akademik çalışmalarına devam etmektedir.

Önder ŞAVKAY

1981 yılında Bursa'da doğdu. Yüksek öğrenimini 2001-2003 yılları arasında Balıkesir Üniversitesi Balıkesir MYO İklimlendirme ve soğutma programında tamamladı. 2000-2006 yılı itibari ile ortağı olduğu Çubuksan Ltd. olarak endüstriyel aspiratör-vantilatör ve filtrasyon sistemleri sektöründe çalışma hayatına başladı. 2006 ve günümüz itibari ile kendi firması olan ÖNDERFAN havalandırma ve toz toplama sistemleri Ltd. Şti. firmasında Yönetim Kurulu başkanlığı yapmaktadır. Evli ve 1 çocuk babasıdır. Sektörün kurumsal lokomotif firmalarına endüstriyel aspiratör ve endüstriyel filtreleme konularında proje – anahtar teslim sistem kurulumu – CFD analiz ve arge desteği olarak çözümler



sunmaktadır. Ayrıca akademik olarak Havelsan ve Uludağ Üniversitesi gibi kamu kuruluşlarına rüzgâr tünelleri ve CFD analiz ve inovasyon desteği sunmaktadır.