

## Tarımsal Ürün Silolarında Yapısal Sorunlar

Hakan KİBAR<sup>1</sup>

Turgut ÖZTÜRK<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Iğdır Üniversitesi Ziraat Fakültesi Tarımsal Yapılar ve Sulama Bölümü, Iğdır

<sup>2</sup>Ondokuz Mayıs Üniversitesi Ziraat Fakültesi Tarımsal Yapılar ve Sulama Bölümü, Samsun

**Özet:** Tarımsal ürünlerin hasat sonrası bozulmadan ve herhangi bir zarara uğramadan tüketime sunulana kadar muhafazası amacıyla depolama yapılarına gereksinim vardır. Bu amaçla farklı kesit, yükseklik ve geometrik özellikler taşıyabilen depolama yapıları tasarlanmaktadır. Tasarımı yapılan depolama yapılarından birisi de silolardır. Hatalı tasarım, kullanım ve bakım nedeniyle silolarda sorunlar gözlenmektedir. Silolarda gözlenen en yaygın sorunlar deformasyon, burkulma, çatlama ve çökmedir. Uygun tasarım, inşa, kullanım ve bakım daha uzun hizmet süresi sağlayabilir. Bu çalışma kapsamında tarımsal ürün silolarında gözlemlenen yapısal başarısızlıklar üzerinde durulmuş ve konuya yönelik bazı öneriler getirilmiştir.

**Anahtar kelimeler:** Tarımsal ürün, silo, yapısal başarısızlık

### The Structural Failures in The Agricultural Crop Silos

**Abstract:** Storage structures are needed for agricultural products until they are served to markets without any spoilage, damage and lose. For this aim, the storage structures have different cross-section, elevation, and geometric features are designed. One of designed the storage structures is also the silos. Failures are observed in silos due to improper design, operation and maintenance. Deformation, buckling, cracks and collapse are the most common failures observed in silos. Proper design, construction, operation and maintenance can provide longer service lives. In this study, it is emphasized on structural failures observed in agricultural crop silos and some suggestions have been made to the subject.

**Key words:** Agricultural crop, silo, structural failures

#### 1. Giriş

Silo kohezyonsuz malzemelerin (hububat, kömür, cevher vb.) depolandığı ve korunduğu modern yapıların genel adıdır. Siloların karmaşık yapısı uzun zaman boyunca gerek mühendisler, gerekse araştırmacıların ilgi alanını oluşturmuştur. Yıllardır silolarda gözlemlenen akış problemleri matematiksel modellemeler yoluyla basit olarak açıklanmaya çalışılmış, gerçeğe uygun olarak simüle edilmiş ve silolar üzerinde deneysel testler uygulanmıştır. Modern siloların inşası 19. yüzyıldan sonra tarım teknolojilerinde yaşanan gelişmelere bağlı olarak tarımsal ürün üretimindeki artış ve özellikle demiryolu ulaşımının yaygınlaştırılması ve bu alandaki yatırımların yoğunlaşmasıyla birlikte ortaya çıkmıştır (Ayuga et al., 2005). Siloların tasarım ve yapımı ile ilgili basınçları hesaplamak için yapılan ilk testler 15 m yüksekliğindeki dikdörtgen bir silo üzerinde 1882 yılında Roberts tarafından başlatılmıştır. Silo tasarımındaki büyük ilerlemeler 1895 yılında

Janssen'in silolardaki basınç hesabıyla ilgili teorisile elde edilmiştir (Janssen, 1895). Janssen teorisinde, yatay basıncın düşey basınca oranı olarak kabul edilen basınç oranının malzemenin her noktasında sabit olduğunu belirlemiştir. Bu teori, silo tasarımına yaklaşımı önemli oranda kolaylaştırmış ve siloların projelendirme hesaplamalarında yaygın olarak kullanılır hale gelmiştir (Molenda and Horabik, 2005).

1961 yılında ise Jenike, taneli ürünlerde akışkanlığın tahmininde zemin mekaniğinde çok iyi bilinen direkt kesme yöntemini kullanarak elde ettiği test sonuçlarını yayınlamıştır. Bu yöntem günümüzde hala pratik olarak uygulanmaktadır. Jenike tarafından silolardaki akış karakteristiklerini belirlemeye yönelik olarak yapılan çalışmaları takiben Watson ve Rotter konu ile ilgili çeşitli araştırmalar yapmış ve günümüzde projelene silolarda kabul gören kütle akışı ve humi akış koşullarını incelemeye çalışmıştır (Jenike,

1964; Takashashi and Yanai, 1973; Watson and Rotter, 1996; Waters and Drescher, 2000).

Silo tasarımı için kullanılabilen farklı standartlar ve kuralların her biri teorik ve ampirik yöntemlere dayalıdır. Hemen hemen her standart denklemleri silo cidarları ile temas halinde depolanmış malzemenin yatay bir bölümüne dayalı önerilen Janssen (1895) teorisini kullanır. Bu teoride yapı üzerine etkiyen depolanmış ürünün etkileri silo hidrolik yarıçapı, ürün birim ağırlığı, ürün içsel sürtünme açısı, cidar sürtünme katsayısı ve basınç oranına bağlıdır. Bu alanda farklı ülkelerde farklı standartlar (DIN 1055; ACI 313; AS 3774; EN 1991-4 vb.) geliştirilmiştir. Son olarak geliştirilen Eurocode 1, Bölüm 4 standardı dahil olmak üzere bütün ülkelerin ve kurumların standartlarına dayanmaktadır (Eurocode 1, 2003).

Bu çalışmada tarımsal ürün silolarında ortaya çıkan yapısal sorunlar (projelendirme, yapım, kullanım, akış koşulları ve bakım) literatür çalışması kapsamında gözden geçirilerek bu sorunların silolar üzerinde oluşturacağı olası etkiler üzerinde durulmuştur.

## 2. Silolarda Görülen Yapısal Bozulmalar

Silolarda görülen yapısal bozulmalar diğer endüstriyel yapılara oranla daha sıklıkla karşılaşılan bir durumdur. Bu bozulmalar bazen silonun tamamen yıkılması şeklinde kendini gösterirken, bazen de betonarme gövdede çatlak ya da çelik gövdede oluşan çentik veya deformasyon şeklinde kendini gösterebilir. İkinci kategorideki başarısızlıklar fark edilmediğinde genellikle operasyonel veya güvenlikle ilgili sorun oluşturmazlar. Çünkü ortada tespit edilmiş bir sorun bulunmamaktadır. Bu gruptaki hasarlar her ne kadar mevcut halleriyle ciddi sorunlara neden olmasa da silolar için potansiyel tehdit olasılığı oldukça yüksektir. Silolardaki yapısal bozulmalar çeşitli sorunlara yol açabilir. Bu sorunlar şöyle sıralanabilir;

- Sistemin kesintiye uğraması veya durması nedeniyle ekonomik zararlara,
- Taşıyıcı sistemin zarar görmesi nedeniyle statik zararlara,

- Mekanik ve elektronik sistemlerin zarar görmesi gibi devresel zararlara,

- Çalışan personelin zarar görmesi nedeniyle yaşamsal ve hukuki sorunlara yol açabilmektedir. Silolarda ortaya çıkan yapısal başarısızlıklar;

- Projelendirme aşamasındaki eksiklik veya yanlışlıklar,

- İnşa aşamasındaki eksiklik veya yanlışlıklar,

- Kullanım ve bakım yetersizliğine bağlı başarısızlıklar olarak sıralanabilir (Jenkyn and Goodwill, 1987; Carson, 2000; Özel, 2007).

### 2.1. Projelendirme Hataları

Silo tasarımı özel bir mühendislik bilgisi gerektirir. Öncelikle proje mühendisi silo malzeme özellikleri kadar depolanacak tarımsal ürünün mühendislik özellikleri hakkında da bilgi sahibi olmalıdır. Bununla birlikte, imalat ve kullanım konularında da tecrübeli olması çok önemlidir. Siloda depolanacak ürünün akış özellikleri bağlamında; akış kanalı geometrisi, statik ve dinamik basınç dağılımı, kanallanma ve kemerleşme oluşumu, siloda kendiliğinden oluşan vibrasyon ve dinamik etkiler konusunda da bilgi ve tecrübe sahibi olunmalıdır. Ayrıca uniform olmayan yükler, ısısal yükler, sismik yükler ve elemanların üretiminden kaynaklanan detayların da projelendirmede gözönüne alınması gerekmektedir (Jenike, 1964; Carson, 2000).

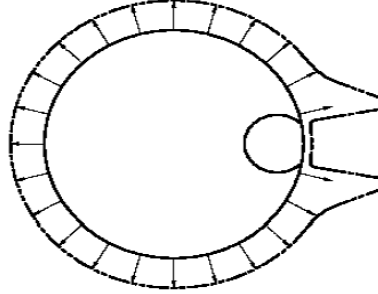
Projelendirme aşamasında silo kapasitesi ve silo yapılacak yerle ilgili iklimsel tasarım kriterleri belirlendikten sonra ürünlerin oluşturacağı yük kombinasyonları, yüklerin zemine aktarımı, silo yapı elemanlardaki gerilmeler hakkında tasarımcının yeterli düzeyde bilgi birikiminin olması gerekir (Carson and Jenkyn, 1993; Özel, 2007).

Tarımsal ürün silolarında karşılaşılan projelendirme hataları; eksantrik boşaltmadan dolayı oluşan eğilme etkileri, depolanmış ürün özellikleri ile akış koşullarının ihmal edilmesi betonarme silolarla ilgili özel durumlar, termal genleşme ve silo içi nem taşınımı ve yükler ile ilgili tahminler olarak sıralanabilir.

### 2.1.1. Eksantrik Boşaltmadan Dolayı Oluşan Eğilme Etkileri

Genellikle yapılan kabullerde bu etkiler ihmal edilmektedir. Silonun boşaltıldığı noktanın silo simetri eksenine çakışmadığı durumlarda eğilme etkileri oluşmaktadır. Ayrıca, silonun birden fazla boşaltma hunisi olduğu durumlarda ve işletme sırasında siloların

simetrik kuvvet oluşumunu sağlayacak şekilde çalıştırılmadığı durumlarda bu tür etkiler oluşmaktadır. Silo içerisinde oluşan akış kanalının silo cidarı ile çakıştığı durumlarda silo çevresinde üniform olmayan dolayısıyla yatay ve düşey eğilme momentleri oluşumuna neden olan etkiler oluşur (Şekil 1).



Şekil 1. Eksantrik boşaltma sırasında üniform olmayan basınç dağılımı (Carson, 2000).

Siloların kullanımı sırasında eksantrik boşaltmadan dolayı oluşan eğilme etkileriyle karşılaşmamak için tasarım aşamasında aşağıda belirtilen etmenlerin gözönüne alınması gerekir (Gaylord and Gaylord, 1984; Blight, 1990; Özel, 2007).

- Silolar olanaklar ölçüsünde merkezi doldurma ve boşaltmaya göre tasarlanmalıdır,
- Silonun eksantrik yüklemeye maruz kalma olasılığı varsa sistem üniform olmayan yüklenme koşullarına göre analiz edilmelidir,
- Uygunsuz tasarlanmış konveyör ya da kısmen açılan sürgülü kapak kullanılması durumunda eksantrik boşaltmaya dayalı silolarda eğilme durumu ortaya çıkabilir,
- Siloda birden çok huni olması durumunda bu hunilerle ilgili eksantrik boşaltma gözönüne alınmalıdır.

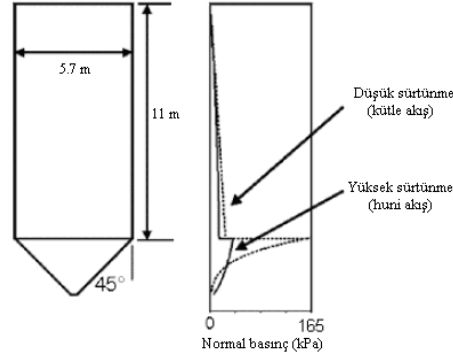
### 2.1.2. Akış Türlerinin ve Ürün Özelliklerinin İhmal Edilmesi

Huni akışına göre tasarlanmış silonun içerisinde bazı durumlarda kütleli akış oluşmaktadır (Şekil 2). Bazı koşullarda depolanmış katı yığının özelliklerinin göz ardı edilmesi hatalı kabul edilen akış türlerinden daha kötü olabilir. Silolanacak ürünün

mühendislik özellikleri tam olarak bilinmeden rastgele bir içsel sürtünme açısı ve sürtünme katsayısı seçilmemelidir. Bu özellikler ürünün nem kapsamına bağlı olarak; ürün şekilsel özellikleri ile silo elemanının yüzey yapısına bağlı olarak değişebilmektedir. Silodaki akım koşullarına uygun bir tasarım yapılmamışsa malzeme yüzeyleri aşınmaya uğrayabilmektedir. Eğer silolanacak malzemenin özelliklerinin değişme olasılığı varsa projelendirmenin en olumsuz koşulları kapsayacak şekilde yapılması gerekmektedir (Carson and Jenkyn, 1993).

### 2.1.3. Betonarme Silolarla İlgili Özel Durumlar

Betonarme silolar farklı problemlere sahiptir. Betonun basınca karşı dayanımı fazla fakat çekmeye karşı dayanımı azdır. Bu nedenle çekme gerilmelerinin çelik tarafından karşılanılmasının sağlanması amacıyla çelik çubuklar (donatı) kullanılmaktadır. Bir siloda tek sıra donatı yerleştirilmesi söz konusu çekme gerilmelerini karşılamada yeterli olsa bile eksantrik kanal oluşumuyla ortaya çıkacak eğilme momentlerini karşılamada yetersiz kalacak ve bu durum silonun çatlamasına neden



Şekil 2. Kütlesel ve huni akış nedeniyle oluşan normal basınç dağılımının karşılaştırılması (Carson, 2000).

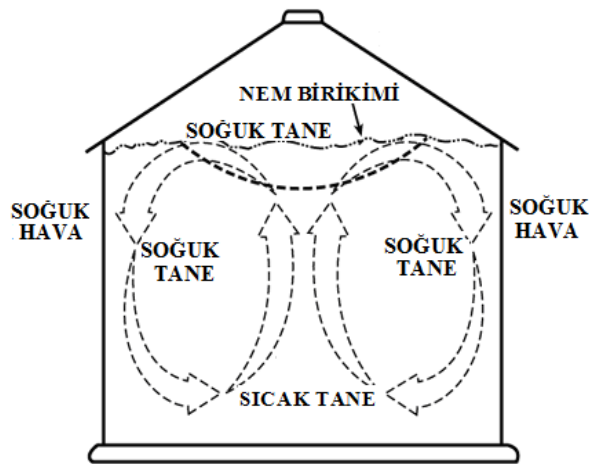
olacaktır. Silo cidarının iç yüzeyleri eğilmeden dolayı oluşabilecek en yüksek çekme gerilmelerinin olduğu yerlerdir. Bu durumun silonun içerisine girilmeden belirlenmesi olanaksızdır. Bu nedenle silonun yıkılma tehlikesi, dışarıdan gözle görülen belirtiler ortaya çıkınca anlaşılmaktadır (Themer, 1969; Peschl, 1977; Carson, 2000).

#### 2.1.4. Termal Genleşme ve Silo İçi Nem Taşınımı

Çelik siloların dış cidarları gün içerisinde genleşip hava soğuduğu zamanlarda büzülme eğilimindedir. Silo içerisinde boşaltma olmaması durumunda gündüz genleşmeden dolayı depolanan kohezyonsuz ürün serbest akışla siloya yerleşecektir. Ancak yerleşen ürün

tekrar eski haline dönemeyeceğinden, sıkışma ve buna bağlı olarak silo cidarlarında ilave gerilmeler oluşacaktır. Bu olayın hergün tekrarlanması sonucunda termal genleşme oluşmaktadır.

Başka bir durum da silolanan üründe oluşabilecek nemin taneler arasında taşınması sonucunda oluşmaktadır (Şekil 3). Özellikle kütle akışın oluşmadığı dolayısıyla bir miktar ürünün sürekli silo içerisinde kaldığı durumlarda nemlenme ya da bozulma sonucu oluşan genleşmenin taneler arasında taşınarak genleşmeye neden olması yaygın bir durumdur. Bu nedenle genleşen ürün silo içerisinde yukarıya yükselemeyeceğinden cidarda ek yanal basınçların oluşmasına neden olmaktadır (Blight, 1992; Özel, 2007).



Şekil 3. Silo içi nem taşınımı

### 2.1.5. Yük Tahminleri

**Silolanmış ürün yükleri:** Silolarda depolanan ürünlerin yapısı yük tahminlerini çok daha karmaşık hale getirmektedir. Silo cidarları ve depolanan ürün arasındaki sürtünme, cidarın radyal ve aksenal yükleme kombinasyonunu oluşturur. Depolanmış ürünlerde (nem, şişme vb.) veya cidar yüzeyindeki pürüzlülükte oluşan küçük değişimler yükleri önemli ölçüde değiştirebilmektedir (Gorenc et al., 1986). Geometrik hatalar veya korozyondan oluşan durumlar başlangıçta tasarlanan yüklerden farklı yüklerin ortaya çıkmasına yol açabilir.

**Rüzgar ve sismik yükler:** Bir silonun projelendirilmesi bir takım tahminler dizisi olarak nitelendirilebilir. Silo üzerinde etkin yükler silo projesi bitinceye kadar tam olarak önceden kestirilemez. Rüzgar ve sismik yüklerin silolarda yaratacağı olası durumlar modellemelerle ortaya konulduğundan, gerçek yükler sadece yaklaşık tahminler ile elde edilebilmektedir. Sınırlı yapı geometrileri için geçerli olabilen bu yaklaşımlar silolar için

yanıltıcı olabilmektedir. Bu nedenle sınır koşulları içeren yaklaşımlara dayalı hesaplamalar özenle yapılmalı, elde edilen sonuçlar dikkatli bir şekilde incelenmeli ve yorumlanmalıdır (Trahair, 1983; Greiner, 1985; Gorenc et al., 1986). Rüzgar, özellikle silonun boş olduğu durumlarda burkulmaya neden olmaktadır (Şekil 4). Silolarda gövde plakası ile destek kuşaklardaki şekilsel değişiklikler (yırtilma veya malzemenin dışarı sarkması) rüzgar veya sismik etkiyle burkulmanın önemli belirtilerindendir (Khazra, 1989; Rotter, 2001; Rotter, 2009).

**Çatı yükleri:** Silonun çatı aksamına yerleştirilmiş doldurma ve boşaltma sistem ekipmanlarından kaynaklanan konstantre yükler, genellikle silo cidarındaki düşey takviye profilleri tarafından zemine iletilirler. Projelendirme aşamasında, aksama bağlı konsantre yüklerin silo üzerindeki etkinliği göz ardı edilmemeli ve proje hesap yüklerine çatı aksamına yerleştirilmiş ekipman kaynaklı yükler de ilave edilmelidir (Pircher, 2000).



Şekil 4. Rüzgar ve sismik yüklerin silolarda neden olduğu burkulmalar

## 2.2. Yapım Hatalarından Kaynaklanan Sorunlar

Yapım hataları silolarda sıklıkla karşılaşılan durumlardan birisidir. Özellikle kötü işçilik, yanlış malzeme kullanımı, yapım sırasında işin hızlandırılması veya maliyetin düşürülmesi için projede yapılan bilinçsiz değişikliklerin yarattığı sonuçlar yapım hatası olarak sıralanabilir (Carson, 2000). Bunun yanında donatı yetersizliği, temelde kısmi oturma, huniye geçiş sırasında burkulma ve akma, silo düşey cidarındaki eğilme, içsel basınç burkulması ve eksenel sıkışmaya bağlı

burkulmalar da bu duruma örnek olarak gösterilebilir (Şekil 5).

### 2.2.1. Silo İnşasında Yanlış Malzeme Kullanımı

Tasarımda öngörülen malzemenin uygulaması çok önemlidir. Kullanılan cıvataların çapı, boyu, dayanımı, donatı çapı, aralığı, cidar kalınlığı ve malzemesinin kontrol altında tutulması büyük önem taşımaktadır. Bu nedenlerle silo tasarımının ve yapımının tecrübeli mühendislerce ve kurumlarca yapılması gerekmektedir (Carson, 2000; Özel, 2007).



Şekil 5. Silo yapım hataları (Carson, 2008; Rotter, 2008).

### 2.2.2. Kısmi Temel Oturması

Siloların temel projelendirmesi diğer yapılarla hemen hemen aynıdır. Silo temelinde kısmi oturma çok görülen durum değildir. Böyle bir durumun olması halinde sonuç çok tehlikeli olmakta ve silonun çökmesine neden olabilmektedir. Bu nedenle temel projelendirmesinin uzman ve tecrübeli mühendislerce zemin koşullarına bağlı olarak ayrıntılı bir biçimde yapılması çok önemlidir (Carson, 2000; Özel, 2007).

### 2.2.3. Eksenel Basınç Nedeniyle Oluşan Sorunlar

Eksenel basınç; burkulma ve cıvata kesmesi gibi iki zarara neden olur. Cıvata kesme problemi basit olarak belirlenebilir. Çünkü cıvata kesmesi yaygın olarak siloya yakın yerdedir. Kesilmiş cıvatalar birbirine bağlı silo cidarının bölümlerinde yer değiştirmeye yol açabilir. Genellikle cidardaki sürtünme kuvveti güvenli bir yapı ortaya çıkarmak için silo içerisindeki ürüne yeniden dağıtılabilir. Böyle zamanlarda silonun boşaltılması başladığında, bu yükün ürüne transferi kaybolabilir ve sonuç olarak tehlikeli durumlar ortaya çıkabilir. Bu durumda acilen uzman yardımı ve önlemler alınmalıdır.

İnce cidarlı metal silolarda en yaygın olarak ortaya çıkan yapısal sorun olası eksenel basınç burkulmasıdır. Burkulmalar kısmen lokalize ve küçük yerel bir çentik görünümüne sahiptir. Burkulmanın tipik boyutu ya yatay ve çevresel yönlerde yaklaşık olarak aynı ya da çevresel yönde yataydan daha uzundur veya  $2\sqrt{rt}$  ile  $5\sqrt{rt}$  arasında değişir (r:silo yarıçapı, t:silo cidar kalınlığı). Eksenel basınç burkulmaları genellikle çok tehlikelidir. Yapıda büyük ve sık çökmelere yol açmaktadır. Silodan ürün boşaltıldıktan sonra destek kaybı ortadan kalktığı için daha ciddi burkulma ve çökmeler oluşabilir. Burkulma genellikle silonun bir

tarafında oluşur, ancak bu mutlaka gerilmelerin simetrik olmadığı anlamına gelmez. Eğer eksenel basınç burkulmaları silo çevresinde uniform ise genellikle burkulma çentikte veya plaka kalınlığının azaldığı yerlerde oluşmaktadır.

Eksenel basınç burkulmasına neden olan faktör silo cidarındaki yüksek simetrik olmayan eksenel gerilmelerin yol açtığı asimetrik eksenel basınçlardır. Simetrik olmayan akışın herhangi bir çeşidi buna neden olabilir. Bu sorunlara neden olan hem ürün akış problemleri hemde kabuk burkulması gibi nedenler uzman ve deneyimli mühendisler tarafından araştırılarak yeterince önlem alınması zorunludur (Rotter, 2001).

### 2.2.4. Eksantrik Boşaltma Nedeniyle Oluşan Sorunlar

Eksantrik boşaltma planlı olmadığından sık sık oluşabilir. Doldurma metodundaki çok farklı olaylar depolama ve boşaltmada üründeki farklı akış karakteristiklerine sebep olabilir. Eksantrik boşaltma meydana geldiğinde sorunlar genellikle eksenel basınç altındaki burkulmadan, silonun tepesi ve orta bölüm arasında veya sadece orta bölümde oluşmaktadır. Burkulmalar bazen yüksek yerel eksenel basınca sebep olarak kısa bir yükseklikte geniş burkulmaya neden olabilir. Ancak bazı zamanlarda silo yüksekliği ve genişliğinde yaklaşık olarak eşittir ve birçok burkulma birbirine bitişik olabilir (Rotter, 2001).

### 2.2.5. Konik Hunide Oluşan Sorunlar

Hunideki sorunlar;

- Huniye geçişteki kopma,
- Huni üzerinde plastik çökme,
- Simetrik olmayan veya düşey yük nedeniyle oluşan burkulmalardır (Şekil 6).

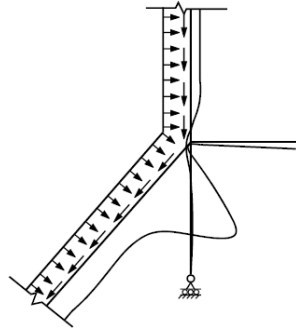


Şekil 6. Konik hunide oluşan kopma hataları (Rotter, 2009).

Huniye geçişte kopmanın neden olduğu sorun çok ciddidir. Tek bir noktada ortaya çıkar ve kolayca silo çevresine yayılır, çünkü hata modu sünek değildir. Bu moda zayıf detaylandırma, zayıf destek ve takviyeler nedeniyle yapıdaki simetrik olmayan membran gerilmelerinin yetersiz analizi neden olabilmektedir (Rotter, 2009).

Hunideki plastik çökme sorunu, huniye geçiş hata modu kadar önemlidir. Huniye aşırı yük uygulanmasına veya yüksek iç basıncın varlığıyla huni üzerinde düşey yüklere neden olur. Plastik çökme nedeniyle silo hunisinin

tepesine yakın kısımda asimetrik şişmeler oluşur (Şekil 7). Plastik çökme, huni geometrisinde lokal olarak veya ürün üzerindeki akış nedeniyle önemli sorunlar çıkarabilir. Simetrik olmayan veya düşey yük nedeniyle oluşan burkulmalar huninin tepesine doğru olabilir. Sorun giderilmediği durumlarda silo içerisindeki ürünlerin akışına engel olabilir (Li, 1994; Rotter, 2009). Huni sorunu silo ile ilgili diğer sorunların ön belirtileridir. Bu sorunla karşılaşılması durumunda uzman teknik elemanlardan yardım alınmalıdır.



Şekil 7. Konik hunide oluşan plastik çökme (Rotter, 2008).



### 2.2.6. Yatay Kuşak ve Düşey Desteklerde Deformasyon

Yatay kuşak ve düşey desteklerdeki deformasyon, silo içerisindeki yükün simetrik olmayan dağılımı veya huniye geçiş ile ilişkilidir. Kuşak problemi, kabuk plakalarındaki sorundan daha az kaynaklanmakla birlikte, bu problem silo cidarının iç yüzeyinin içeriye doğru basit bir artışının sonucudur. Ancak sorun ürünlerin akışı ile karışabilmesi ve çok daha ciddi sorunlara yol açmasıdır. Kuşak dayanımı yaygın olarak asimetrik hesaplamada kullanılırsa da hatalar asimetrik olma eğilimindedir (Rotter, 2001; Zhao, 2001).

### 2.2.7. Eğilme Momenti Altındaki Çatlama

Silo içerisindeki kiriş ve ters huni gibi simetriyi bozan elemanların olması durumunda silo içerisinde asimetrik basınç dağılımı ve buna bağlı olarak eğilme momentleri oluşur. Beton silolar için ana problemler; silo içerisinde oluşan düşük basınç, cidara doğru olan eğilmeler, silo iç yüzeyindeki çatlamlar (dikkatli inceleme olmaksızın görünmesi olanaksız), simetrik olmayan basınçların neden olduğu eğilme momentleri altındaki çatlamlardır. Bu tür çatlamları önlemek için tüm beton silo cidarları bazı önemli eğilme gerilmeleri ile tasarlanmalı ve simetrik olmayan yükleri desteklemek için tasarımda iç ve dış yüzeyler betonarme malzeme kullanılarak tasarlanmalıdır (Rotter, 2008).

Beton silolarda oluşan çatlaklar, silo cidarındaki gerilmenin durumu ile ilgili iyi bir göstergedir. Silolarda dış yüzeyin izlenebilir olması, çatlakların çekme veya eğilme etkisiyle silo cidarlarında yüzeysel çekmeye sebep olup olmayacağını belirlebilmesine olanak tanır. Örneğin diyagonal çatlaklar silo iç boyutlarının genişlemesine neden olarak akış kanalı (kanallanma) oluşturabilirler (Rotter, 2008).

### 2.3. Kullanım Nedeniyle Oluşan Sorunlar

Normal koşullarda; iyi projelendirilmiş ve inşa edilmiş siloların ekonomik ömrünün uzun olması beklenebilir. Ancak genel durum böyle olmamaktadır. Silolanan malzemenin akış

özelliklerinin değişmesi, aşınmadan dolayı silo duvar malzemesinin özelliklerinin değişmesi bu sorunların temel nedenlerini oluşturmaktadır. Siloya, tasarıma esas olan üründen farklı bir ürünün doldurulması silo içerisindeki yük dağılımını ve akış durumunu değiştireceğinden kemerleşme ve kanallaşma gibi sorunlara neden olabilmektedir. Bunun yanında silo çıkış geometrisindeki değişiklikler silodaki yük dağılımını ciddi bir şekilde değiştirebilir. Silodan ürünün boşaltıldığı huni çıkışında değişiklik yapılması veya sonradan siloya yapılan ilavelerin mutlaka uzman görüşü alınarak gerçekleştirilmesi gerekmektedir (Carson, 2000).

Silolarda kendiliğinden oluşan vibrasyonlar da (titreşimler) önemli ölçüde dinamik yüklerin oluşmasına neden olmaktadır. Bu bağlamda muhtemel bir patlamaya neden olabilecek (dinamik yüklerin neden olduğu) toz veya alev alabilir gazların ortamdaki uzak tutulması önemlidir (Prutyen et al., 1994).

### 2.4. Ürünün Akışına Bağlı Sorunlar

Taneli ürünlerin depolanmasına yönelik konik çıkış ağızlı (hopper) siloların tasarımının ürün akış koşulları gözlemlenmeden yapılması durumunda bazı sorunlarla karşı karşıya kalınmaktadır. En çok gözlemlenen sorunlar akış tipine bağlı olarak kemerlenme, kanallanma ve ayrışmadır. Ürünün özelliklerinin değişmesi veya silo iç cidarının cilalanması, aşınması gibi durumlarda yapısal olarak huni akışına göre tasarlanmış silolarda kütle akışı oluşabilir. Bu durumda özellikle huninin üst kısmında öngörülenden aşırı basınç oluşur ve tehlikeli olabilir. Tersisi durumun oluşması da muhtemel olmakla birlikte çoğu zaman kritik yükler oluşturmaz. Bu durumları önceden görebilmek ve gerekli önlemleri alabilmek için silo iç yüzeyinin düzenli aralıklarla incelenmesi gereklidir. Cıvatalı bağlantılar varsa, özellikle huninin üst bölümünde cıvata etrafında dalgalanma, vidalar arasındaki bölümde çentik ya da yırtılma, vida deliklerinde büyüme olup olmadığı ya da yüzeyde sürtünmeden dolayı oluşabilecek

aşınmalarla ilgili belirtiler gözlenmelidir (Carson, 2000; Özel, 2007; Kibar ve ark., 2008).

### 2.5. Bakım Hataları

Silolardaki bakım kullanıcı tarafından veya silo sahibi tarafından yapılabilmektedir. Silolarda bakım hatası olarak periyodik bakımların ihmal edilmesi ile korozyon ve aşınmaya bağlı olarak ortaya çıkan hatalar görülebilmektedir.

#### 2.5.1. Silo Elemanlarında Yetersiz Periyodik Bakım

Silolarda düzenli yapılacak incelemeler olası hasarın önceden tahminine ve gerekli tedbirlerin zamanında alınmasına olanak sağlar ve oluşacak hasarın boyutunu küçültür. Periyodik olarak yapılması gereken işlemler; silo duvarlarındaki olası değişikliklerin gözlenmesi, akımı kolaylaştıran astarın bakımı, yenilenmesi, çatı girişi, boşaltıcı, doldurucu bakımı vb. çalışmalardır. Bunun dışında enerji

açıya çıkmasının sağlandığı ve zorlanmaların deformasyonla yok edildiği noktaların gözlenmesidir. Çentik, çatlak, deformasyon, silonun eğilmesi vb. durumların gözlenerek gerekli önlemlerin alınması önemlidir. Tehlike fark edildiğinde hemen uzman mühendislerden gerekli bilgiler alınarak çözüme ulaşılmaya çalışılmalıdır.

#### 2.5.2. Paslanma (Korozyon) ve Aşınma

Bu sorun özellikle aşındırıcı malzeme depolanması durumunda ve karbon çeliğinin nemli veya aşınmaya uygun atmosfer koşullarında kullanılması durumunda gözlemlenmektedir. Bazen korozyon ve aşınma ikisi bir arada etki gösterebilir ve bu durum silo cidarlarının kolaylıkla incelmelerini sağlar (Şekil 8). Bu sorunla karşılaşmamak için gövde materyalinin galvanizli çelik malzeme olması ve bu kaplamanın ömrünü artırmak içinde üzerine mangan kaplama yapılması uygun olabilmektedir.



Şekil 8. Silolarda oluşan paslanma ve aşınma durumları

### 3. Sonuç ve Öneriler

Silo tasarımı, mühendislik alanı içerisinde tasarımı en zor yapılan konulardan birisidir. Silo sorunları ile ilgili olarak en sık karşılaşılan durumlar; deformasyon, patlama, çatlak ve çökmelerdir. Tarımsal ürün silolarının güvenli bir şekilde uzun yıllar hizmet verebilmesi mühendislik hizmetlerinin (tasarım, inşa ve kullanım) ciddi bir şekilde ele alınmasıyla

olasıdır. Bu bağlamda tarımsal ürün silolarında ki yapısal sorunları en aza indirmek için;

- Silo tabanında aşırı yük nedeniyle olası çökmeleri önlemeye yönelik proje aşamasında temel zeminine sondaj etütleri yapılmalı ve silo temel inşasında gerekli önlemler alınmalıdır.

- Silo üzerinde etkin dinamik yükler (rüzgar, deprem ve eksantrik yükler) projelene aşamasında mutlaka gözönüne alınmalıdır.

- Silo içerisinde ürüne yönelik akış koşulları gözönüne alınmalı, özellikle ürünün silodan boşaltılması sırasında kanallanma, kemerleşme, ayrışma gibi problemlere neden olmayacak optimum akış açısı belirlenmelidir.

- Silolanacak ürün dolayısıyla silo içerisinde oluşacak statik ve dinamik basınçların hesaplanmasında uygun eşitlikler kullanılmalıdır. Bu kapsamda silolanan ürüne yönelik mühendislik özellikler (birim ağırlık, içsel sürtünme açısı, sürtünme katsayısı, poisson oranı, basınç oranı) önemli olduğundan, hesaplamalarda ürüne ilişkin tür ve yersel özellikler gözetilerek saptanmış parametrik değerler kullanılmalıdır.

- Silo cidar kalınlıkları silo kesit geometrisine bağlı olarak silodaki aktif ve pasif basınçlar gözetilerek saptanmalıdır.

- Çelik silolar üniform olmayan yanal basınçlar nedeniyle kolayca deforme olabildiğinden projelendirme aşamasında bu basınçlar da dikkate alınmalıdır.

- Silo tasarımında yaygın olarak kullanılan ANSYS, ABAQUS ve SAP200 gibi sonlu eleman yazılım programları ile silonun prototip modeli üzerinde statik, dinamik, lineer, non-lineer, modal ve burkulma analizleri yapılarak model üzerinde gözlemlenen sorunlara yönelik çözüm olanakları geliştirildikten sonra projelendirme yapılmalıdır. Ayrıca farklı ürünlerin depolanmasına yönelik değişik malzeme kullanımıyla çeşitli bölgeler için silo tip projeleri hazırlanmalıdır.

### Teşekkür

Bu çalışmada silolarda yapısal sorunlara yönelik olarak arşivindeki görsel materyallerini bizimle paylaşan Prof. Dr. J. Michael Rotter'e teşekkürlerimizi sunarız.

### Kaynaklar

ACI 313., 1977. Recommended Practice for Design and Construction Bins, Silos, and Bunkers for Storing Granular. American Concrete Institute.  
AS 3774, 1996. Loads on Bulk Solids Containers. Standards Association of Australia, Homebush, NSW 2140.

Ayuga, F., Aguado, P., Gallego, E., Ramirez, Á., 2005. New Steps Towards The Knowledge of Silos Behaviour. *International Agrophysics*, 19, 7-17.  
Blight, G.E., 1990. Defects in Accepted Methods of Estimating Design Loadings for Silos. *Proceedings Institution Circle Engineers*, 88, Part I, pp.1015-1036.  
Blight, G.E., 1992. Temperature-Induced Loadings on Silo Walls. *Structural Engineering Review*, 1, 61-71.  
Carson, J.W., Jenkyn, R.T., 1993. Load Development and Structural Considerations in Silo Design. Presented at *Reliable Flow of Particulate Solid II*, Oslo, Norway.  
Carson, J.W., 2000. Silo Failures: Case Histories and Lessons Learned. *Third Israeli Conference for Conveying and Handling of Particulate Solids*, Dead Sea Israel.  
Carson, J.W., 2008. Hopper/Bin Design. In: *Bulk Solids Handling, Equipment Selection and Operation* (ed. McGlinchey D.), pp.68-98, Blackwell Publishing, Oxford.  
DIN 1055, 1964. Design Loads for Buildings: Loads in Silos. *Germany Standards*.  
Eurocode 1, 2003. Basis of Design and Actions on Structures (EN 1991-4), Part 4: Actions in Silo and Tanks. *European Committee for Standardisation*, Brussels.  
Gaylord, E.H., Gaylord, C.N., 1984. *Design of Steel Bins for Storage of Bulk Solids*. Prentice-Hall.  
Gorenc, B.E., T.J., Hogan and J.M. Rotter, 1986. *Guidelines For the Assessment of Loads on Bulk Solids Containers*. The Institution of Engineers, Australia.  
Greiner, R., Derler, P., 1985. Effect of Imperfections on Wind-Loaded Cylindrical Shells. *Thin-Walled Structures*, 23, 271-281.  
Janssen, H.A., 1895. Versuche über Getreidedruck in Silozellen (Experiments about Pressure of Grain in silos). *Zeitschrift Vereines Deutscher Ingenieure*, 39, 1045-1049.  
Jenike, A.W., 1964. Storage and Flow of Solids. *University of Utah Engineering, Experiment Station, Bulletin 123*.  
Jenkyn, R.T., Goodwill, D., 1987. Silo Failures: Lessons to be Learned. *Engineering Digest*.  
Khazra, A., 1989. Stress and Buckling Analysis of Grain Silos Under Snow or Wind Loads. *Civil Engineering, University of Illinois at Urbana-Champaign*, Ph.D. Thesis, 602p.  
Kibar H., Öztürk T., Esen, B., 2008. Taneli Tarımsal Ürünler İçin Akış Profilleri ve Silolamada Karşılaşılan Sorunlar. *Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Ziraat Fakültesi Dergisi*. 25: 61-67.  
Li, H.Y., 1994. Analysis of Steel Silo Structures on Discrete Supports. *Department of Civil Engineering & Building Science, The University of Edinburgh*, Ph.D. Thesis, 244p.

## Tarımsal Ürün Silolarında Yapısal Sorunlar

- Molenda, M., Horabik, J., 2005. Mechanical Properties of Granular Agro-Materials and Food Powders for Industrial Practice. Part-I Characterization of Mechanical Properties of Particulate Solids for Storage and Handling, Lublin.
- Özel, K., 2007. Çelik Hububat Silolarının Tasarım Esasları. Yüksek Lisan Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- Peschl, A.S.Z., 1977. Construction of Concrete Silos, Silo failures-an analysis of the reasons. Norwegian Society of Chartered Engineers.
- Pircher, M., 2000. The Effects of Weld-Induced Imperfections on the Stability of Axially Loaded Steel Silos. University of Western Sydney, Ph.D. Thesis, 204p.
- Purutyan, H., Bengston, K.E., Carson, J.W., 1994. Identifying and Controlling Silo Vibration Mechanism: Part I. Powder and Bulk Engineering, 8, 58-65.
- Rotter, J.M., 2001. Guide for The Economic Design of Circular Metal Silos. Taylor & Francis Routledge.
- Rotter, J.M., 2008. Silo and Hopper Design for Strength. In: Bulk Solids Handling, Equipment Selection and Operation (ed. McGlinchey D.), pp.105-134. Blackwell Publishing, Oxford.
- Rotter, J.M., 2009. Silos and Tanks in Research and Practice: State of The Art and Current Challenges. Proceedings of the International Association for Shell and Spatial Structures (IASS) Symposium, Evolution and Trends in Design, Analysis and Construction of Shell and Spatial Structures, 28 September–2 October 2009, Universidad Politecnica de Valencia, Spain.
- Takahashi, H., Yanai, H., 1973. Flow Profile and Void Fraction of Granular Solids in a Moving Bed. Powder Technology, 7, 205-214.
- Themer, D.F., 1969. Failures of Reinforced Concrete Grain Silos. Transactions of the ASME, Journal of Engineering for Industry, 460-477.
- Trahair, N.S., Abel, A., Ansourian, P., Irvine, H.M., Rotter, J.M., 1983. Structural Design of Steel Bins for Bulk Solids, Australian Institute of Steel Construction LTD, Sydney.
- Zhao, Y., 2001. Stability and Strength of Steel Silo Transition Junctions. Department of Civil and Structural Engineering, The Hong Kong Polytechnic University, Ph.D. Thesis, 439p.
- Waters, A.J., Drescher, A., 2000. Modeling Plug Flow in Bins/Hoppers. Powder Technology, 113: 168-175.
- Watson, G.R., Rotter, J.M., 1996. A Finite Element Kinematic Analysis of Planar Granular Solids Flow. Chemical Engineering Science, 51, 3967-3978.