



T.C.  
NECMETTİN ERBAKAN  
ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



**DİKDÖRTGEN ÇELİK TAHİL SİLOLARIN  
SONLU ELEMANLAR ANALİZİ**

**Abdullah Safa ACAR**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Ocak-2023  
KONYA  
Her Hakkı Saklıdır**

## ÖZET

### YÜKSEK LİSANS TEZİ

## DİKDÖRTGEN ÇELİK TAHİL SİLOLARIN SONLU ELEMANLAR ANALİZİ

Abdullah Safa ACAR

Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü  
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Yunus DERE

2023, 144 Sayfa

Jüri

Prof.Dr. Hasan Hüsnü KORKMAZ

Dr. Öğr. Üyesi Yunus DERE

Dr.Öğr.Üyesi Süleyman Kamil AKIN

Hızlı imalatı ve kurulumu nedeniyle çelik silolar, betonarme silolardan çok daha fazla tercih edilmektedir. Son yıllarda dikdörtgen gövdeli silolar, silindir gövdeli silolara göre belirli avantajlarından dolayı popüler hale gelmiştir. Gövdenin düzlem çelik levhalardan meydana gelmesi, grup halinde inşa edildiklerinde, dairesel silo gruplarındaki inşaat alanı kaybı olmaması vb. etkenler tercih edilmelerinin başlıca sebepleri arasında yer almaktadır. Bu çalışmada, öncelikle silo tanımı ve çeşitleri hakkında genel bir bilgilendirme yapıldıktan sonra çelik silo yapım esasları, dikdörtgen ve silindir silo duvarlarına ve hunisine etkiyen doldurma ve boşaltma yükleri detaylı bir şekilde incelenmiştir.

Eurocode-1991-4'e göre etki değerlendirme sınıfı 2 olan, oldukça yüksek depolama kapasiteli bir dikdörtgen çelik silo modellenmiştir. Dikdörtgen silo performansının daha iyi anlaşılabilmesi için aynı yükseklik ve kapasiteye sahip bir silindir çelik silo modeli de incelenmiştir. Dikdörtgen silo modelinin dikey duvarı için çeşitli model denemeleri sonucu çift katmanlı, ara kutu profil, çelik sac duvar paneli tercih edilmiştir. Silindir silo modelinde ise tek katmanlı düz çelik sac levha kullanılmıştır. Dikdörtgen ve silindir çelik buğday silosu örnekleri için Eurocode-1991-4'e göre doldurma, boşaltma ve ek yük de dahil olmak üzere detaylı yük hesabı yapılmıştır. Üç boyutlu sonlu eleman modeli ve analizleri için ABAQUS programı kullanılmıştır. Dikdörtgen ve silindir çelik buğday silosu örneklerinin doğrusal elastik analizleri yanısıra modal analizleri de yapılmıştır.

Çift duvarlı dikdörtgen çelik silo modelinin bilgisayar ortamında oluşturulması, benzer kapasite ve yükseklikte bir silindir silo modelinin oluşturulmasına nazaran oldukça zor ve zaman alıcı bir işlemdir. Dikdörtgen çelik silo analiz sonuçları, en uygun silo gövdesinin silindir şeklinde olması gerektiğini göstermiştir. Dikdörtgen çelik silolarda depolanan malzemenin kaynaklı basınç etkisi, silo duvarlarında meydana getirdiği deformasyon etkisi ile silo kesitini dikdörtgenden daireye dönüştürmeye çalışmaktadır. Çift duvarlı dikdörtgen çelik silo ile aynı kapasiteye sahip silindir çelik silo modelleri karşılaştırıldığında, silindir çelik silonun çok daha az gerilme ve deformasyona maruz kaldığı, ayrıca imalatı için çok daha az yapı malzemesine ihtiyaç duyduğu görülmüştür. Ayrıca; silindir silo imalatının mümkün olmadığı hallerde, silo kesitinin dikdörtgen yerine kare seçilmesinin, tüm silo dikey duvarlarının benzer davranışa sahip olmasını sağlayacağı ve böylece daha ekonomik bir çözüm olacağı beklenmektedir.

**Anahtar Kelimeler:** ABAQUS, boşaltma yükleri, dikdörtgen silo, doldurma yükleri, silindir silo, sonlu elemanlar.

## ABSTRACT

### MS THESIS

## FINITE ELEMENT ANALYSIS OF RECTANGULAR STEEL GRAIN SILOS

**Abdullah Safa ACAR**

**THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF  
NECMETTİN ERBAKAN UNIVERSITY  
THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE  
IN CIVIL ENGINEERING**

**Advisor: Dr. Yunus DERE**

**2023, 144 Pages**

**Jury**

**Prof.Dr. Hasan Hüsnü KORKMAZ**

**Asst.Prof.Dr. Yunus DERE**

**Asst.Prof.Dr. Süleyman Kamil AKIN**

Steel silos are much more preferred than reinforced concrete silos due to their fast production and installation. In recent years, rectangular silos have become popular due to certain advantages over cylindrical silos. The fact that the body is made of flat steel plates, there is no loss of construction area when they are built in groups as in circular silo groups, etc. factors are among the main reasons for their preference. In this study, firstly, after giving a general information about the definition and types of silo, steel silo construction principles, filling and unloading loads acting on rectangular and cylindrical silo walls and hopper are examined in detail.

A rectangular steel silo with very high storage capacity, impact class 2 according to Eurocode-1991-4, is modeled. In order to better understand the rectangular silo performance, a cylindrical steel silo model with the same height and capacity was also examined. For the vertical wall of the rectangular silo model, a double-layered, intermediate box profile, steel sheet wall panel was preferred as a result of various model trials. In the cylinder silo model, a single layer flat steel sheet plate is used. For rectangular and cylindrical steel wheat silo samples, detailed load calculations including filling, unloading and additional load were made according to Eurocode-1991-4. The ABAQUS program was used for the three-dimensional finite element modelling and analysis. In addition to linear elastic analyzes of rectangular and cylindrical steel wheat silo samples, modal analyzes were also performed.

Creating a double-walled rectangular steel silo model in the computer environment is a very difficult and time-consuming process compared to creating a cylinder silo model of similar capacity and height. The rectangular steel silo analysis results showed that the most suitable silo body should be cylindrical. The pressure effect caused by the material stored in rectangular steel silos and the deformation effect it creates on the silo walls tries to transform the silo cross-section from rectangular to circular. When the double-walled rectangular steel silo is compared with the cylindrical steel silo models with the same capacity, it is seen that the cylindrical steel silo is subject to much less stress and deformation, and it also requires much less construction material for its manufacture. Moreover; In cases where it is not possible to manufacture a cylindrical silo, it is expected that choosing a square cross-section instead of a rectangular silo will ensure that all silo vertical walls have similar behavior and thus will be a more economical solution.

**Keywords:** ABAQUS, cylinder silo, discharging loads, finite element, filling loads, rectangle silo

## ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasının gerçekleştirilmesi için bana yardım eden değerli bilgi ve deneyimleri ile bana yön veren danışman hocam; Dr. Öğr. Üyesi Yunus Dere'ye içten teşekkürlerimi sunarım.

Hayatım boyunca benim için hiçbir fedakarlıktan kaçınmayan sevgili annem Döndü ACAR ve babam Servet ACAR'a, hayatta bana güç veren, beni cesaretlendiren, ufkumu açan abim Semih ACAR'a, ablam Semiha YAMAN'a, ikizim Sümeyye Merve BİLGİLİ'ye ve sevgileri ile çalışma azmimi tazeleyen yeğenlerime sonsuz teşekkür ederim.

Abdullah Safa ACAR  
KONYA-2023

## İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ .....	vi
İÇİNDEKİLER .....	vii
ŞEKİLLER LİSTESİ .....	x
ÇİZELGELER LİSTESİ .....	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiv
<b>1. GİRİŞ.....</b>	<b>1</b>
<b>2. KAYNAK ARAŞTIRMASI .....</b>	<b>3</b>
<b>3. MATERYAL VE YÖNTEM.....</b>	<b>7</b>
3.1. Giriş .....	7
3.2. Silo Tanımı .....	7
3.3. Silonun Kısımları.....	7
3.4. Depo Malzemesi Türleri .....	9
3.5. Depo Malzemesinin Silolarda Oluşturduğu Etkiler.....	9
3.5.1. Mekanik etkiler.....	9
3.5.2. Kimyasal etkiler.....	10
3.5.3. Sıcaklık etkisi.....	10
3.5.4. Patlama etkisi.....	10
3.6. Siloların Sınıflandırılması .....	10
3.6.1. Enkesit şekillerine göre sınıflandırma.....	12
3.6.2. Yüksekliklerine göre sınıflandırma.....	13
3.6.3. İmalat malzemesine göre sınıflandırma .....	13
3.7. Silolarda Aranılan Özellikler.....	14
3.8. Çelik Silo Fabrika Yapısı.....	14
3.9. Siloların Doldurulması ve Boşaltılması.....	15
3.9.1. Rotoflow makinesi ile özel boşaltma .....	15
3.9.2. Özel doldurma .....	16
3.10. Silolarda Akış Türleri .....	16
3.10.1. Kütle akışı.....	17
3.10.2. Baca akışı.....	18
3.11. Akışkanlığa Tesir Eden Değişkenler ve Akışı Etkileyen Parametreler .....	20
3.12. Silolarda Yapılan Hatalar .....	21
3.12.1. Tasarım/Projelendirme hataları.....	22
3.12.2. Yapım hataları.....	22
3.12.3. Kullanım hataları .....	23
3.12.4. Bakım hataları.....	23
<b>4. ÇELİK SİLO YAPIM ESASLARI .....</b>	<b>24</b>

4.1. Kapsam ve Sınırlamalar .....	24
4.2. Silolarda Tanımlar .....	25
4.3. Silolardaki Yük Tesirleri.....	26
4.4. Silolardaki Tesirlerin Sınıflandırılması.....	27
4.5. Tasarım Esasları .....	28
4.5.1. Siloda depolanacak ürünlerin oluşturduğu etkiler .....	29
4.5.2. Silolarda depolanan ürün özelliklerine bağlı etkiler .....	30
4.5.3. Basitleştirilmiş yaklaşım .....	32
4.6. Siloların Dikey Duvarlarına Tesir Eden Yükler.....	33
4.6.1. Narin silolar .....	34
4.6.2. Küçük eğimli ve orta narinlikteki silolar.....	42
4.7. Silo Hunisi ve Silo Tabanındaki Yükler .....	44
4.7.1. Düz tabanlı huniler.....	47
4.7.2. Büyük eğimli huniler.....	48
4.7.3. Küçük eğimli huniler.....	49
<b>5. LİMİT DURUM TASARIM İLKELERİ .....</b>	<b>51</b>
5.1. Genel Bilgi .....	51
5.2. Tasarım Durumları.....	51
5.3. Nihai Sınır Durumları .....	51
5.3.1. Kısmi faktörler, $\gamma$ .....	52
5.3.2. Kombinasyon faktörleri, $\Psi$ .....	52
5.3.3. Azaltma katsayısı, $\xi$ .....	52
5.3.4. Tesir kombinasyonları.....	52
5.3.5. EDS 2 ve 3 için tasarım durumları ve etki kombinasyonları.....	52
5.4. Servis Verilebilirlik Sınır Durumları .....	53
5.5. Sınır Durumunun Tasarımı .....	53
5.6. Dirençler İçin Kısmi Faktörler .....	54
5.7. Tasarım Gerilmesi Sonuçlarının Değerlendirilmesi .....	55
5.7.1. Plastik limit durumu.....	55
5.7.2. Dikdörtgen ve silindirik duvarlardaki boşluklar için detaylandırma .....	55
5.7.3. Deplasmanlarla ilgili durumlar .....	56
<b>6. ÇELİK BUĞDAY SİLOSU SONLU ELEMANLAR ANALİZİ .....</b>	<b>57</b>
6.1. Silo Hakkında Genel Bilgi .....	57
6.2. Örnek Dikdörtgen Buğday Silo Tasarımları .....	57
6.3. Dikdörtgen Silonun Dikey Silo Duvarına Etkiyen Yükler .....	61
6.3.1. Doldurma yükleri.....	61
6.3.2. Boşaltma yükleri.....	63
6.4. Dikdörtgen Silo Hunisine Etkiyen Yükler .....	64
6.4.1. Doldurma yükleri.....	65
6.4.2. Boşaltma yükleri.....	65
6.5. Silindir Buğday Silosunun Tasarım ve Analizi.....	66
6.6. Silindir Silonun Dikey Silo Duvarına Etkiyen Yükler .....	68
6.6.1. Doldurma yükleri.....	68
6.6.2. Boşaltma yükleri.....	71
6.7. Silindir Silo Hunisine Etkiyen Yükler .....	72
6.7.1. Doldurma yükleri.....	72
6.7.2. Boşaltma yükleri.....	73

6.8. Dikdörtgen Buğday Silosunun ABAQUS İle Modellenmesi.....	74
6.9. Dikdörtgen Buğday Silosunun Modal Analizi .....	98
6.10. Silindir Buğday Silosunun ABAQUS İle Modellenmesi.....	101
6.11. Silindir Buğday Silosunun Modal Analizi .....	121
<b>7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....</b>	<b>124</b>
<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>126</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>	<b>129</b>



## ŞEKİLLER LİSTESİ

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 3.1 Silo yapısı (Altınbilek makine ürün kataloğu) .....	8
Şekil 3.2 Dört çıkışlı çelik silo render görüntüsü.....	11
Şekil 3.3 Tek çıkışlı çelik silo render görüntüsü.....	11
Şekil 3.4 Rotoflow makine enkesit ve model hali.....	12
Şekil 3.5 Geometrik yapılarına göre silolar (Özel, 2011).....	12
Şekil 3.6 Çeşitli silo grubu düzenleri (Durmuş,2013).....	13
Şekil 3.7 Farklı malzemeler kullanılarak imal edilmiş silolar (Kibar, 2011) .....	14
Şekil 3.8 Çelik silo fabrika render görüntüsü .....	15
Şekil 3.9 Silo altında Rotoflow makinesi .....	16
Şekil 3.10 Siloya ürün depolama sistemi üst görünümü .....	16
Şekil 3.11 Silo içi malzemelerin kütle akışı şekli (Özel, 2007).....	17
Şekil 3.12 Akış köprüsü ve kritik çap (Özel, 2007).....	18
Şekil 3.13 Silo içi malzemelerin bir kısmının hareket halinde olduğu baca akışı düzeni (Özel, 2007) .....	19
Şekil 4.1 Silo kesitlerinin tasarımında kullanılan parametre ve ifadeler (EN 1991-4, Şekil 1.1).....	25
Şekil 4.2 Dik duvarlı bölümde simetrik doldurma basınçları (EN 1991-4, Şekil 5.1).....	35
Şekil 4.3 Dairesel silolar: doldurma ek yükü için plan ve kesit görünüşleri (EN 1991-4, Şekil 5.2).....	36
Şekil 4.4 Dairesel olmayan silolar: doldurma ek yükü için plan ve kesit görünüşleri (EN 1991-4:2006, Şekil 5.3) .....	37
Şekil 4.5 Dik duvarlı bölümde simetrik boşaltma basınçları (EN 1991-4, Şekil 5.1).....	39
Şekil 4.6 Dairesel silolar: boşaltma ek yükü için plan ve kesit görünüşleri (EN 1991-4, Şekil 5.4).....	40
Şekil 4.7 Dairesel olmayan silolar: boşaltma ek yükü için plan ve kesit görünüşleri (EN 1991-4, Şekil 5.3).....	40
Şekil 4.8 Küçük eğimli ve orta narinlikteki silolarda doldurma basıncı (EN 1991-4, Şekil 5.6).....	43
Şekil 4.9 Büyük ve küçük eğimli hunilerin ayrımı (EN 1991-4, Şekil 6.1) .....	45
Şekil 4.10 Büyük ve küçük eğimli hunilerde doldurma basınç dağılımları (EN 1991-4, Şekil 6.2).....	46
Şekil 4.11 Küçük eğimli ve orta narinlikteki silo tabanında basınç (EN 1991-4, Şekil 6.3).....	48
Şekil 6.1 Tasarlanan silo modelleri .....	58
Şekil 6.2 Buğday silosu boyutları .....	59
Şekil 6.3 Örnek silindir buğday silosu boyutları.....	67
Şekil 6.4 Dikdörtgen silo duvarı için oluşturulan part'lar .....	75
Şekil 6.5 Partlar birleştirildikten sonraki Assembly.....	75
Şekil 6.6 Dikdörtgen silonun sonlu eleman ağı (mesh).....	76
Şekil 6.7 Dikdörtgen silo sonlu eleman ağı (perspektif görünüm) .....	76
Şekil 6.8 Contact ile sürtünme tanımı .....	77
Şekil 6.9 Dikdörtgen silo Phf yük tanımı .....	78
Şekil 6.10 Dikdörtgen silo Pwf yük tanımı .....	78
Şekil 6.11 Dikdörtgen silo Pv yük tanımı .....	79
Şekil 6.12 Zati ağırlık tanımı .....	79

Şekil 6.13 Phf yükünün silo iç duvarına uygulanması.....	80
Şekil 6.14 Silo duvarına Phf basınç yüklemesi.....	80
Şekil 6.15 Dikdörtgen silo doldurma durumunda Pwf yükünün silo duvarına aktarılması.....	81
Şekil 6.16 Silo duvarına Pwf sürtünme yüklemesi.....	81
Şekil 6.17 Doldurma ek yükünün, Ppf, n , silo duvarına uygulanması.....	82
Şekil 6.18 Dikdörtgen siloda ek yükleme.....	82
Şekil 6.19 Silo duvarına boşaltma yüklerinin uygulanması (a) Basınç yükü, Phe (b) Sürtünme yükü, Pwe.....	83
Şekil 6.20 Dikdörtgen silo boşaltma durumunda ek yük Ppe, n yükünün silo duvarına aktarılması.....	83
Şekil 6.21 (a) Dikdörtgen silo hunisine (a) Pnf yüklemesi (b) Ptf yüklemesi.....	84
Şekil 6.22 Dikdörtgen silo hunisine Pnf basınç yüklemesi.....	84
Şekil 6.23 Dikdörtgen silo hunisine Ptf sürtünme yüklemesi.....	85
Şekil 6.24 Dikdörtgen silo hunisine boşaltma durumunda (a) Pne basınç yüklemesi (b) Pte sürtünme yüklemesi.....	85
Şekil 6.25 Silo iç duvarı için S,Mises gerilme durumu.....	87
Şekil 6.26 Silo dış duvarı için S,Mises gerilme durumu.....	87
Şekil 6.27 Duvar arası kutu profiller için S,Mises gerilme durumu.....	88
Şekil 6.28 Silo kolonları için S,Mises gerilme durumu.....	88
Şekil 6.29 Silo hunisi için S,Mises gerilme durumu.....	89
Şekil 6.30 Silo kapağı için S,Mises gerilme durumu.....	90
Şekil 6.31 İç duvar için X yönü deplasmanları.....	92
Şekil 6.32 Dış duvar için X yönü deplasmanları.....	92
Şekil 6.33 İç duvar için Y yönü deplasmanları.....	93
Şekil 6.34 Dış duvar için Y yönü deplasmanları.....	93
Şekil 6.35 Duvar arası kutu profiller için X ve Y yönündeki deplasmanlar.....	94
Şekil 6.36 Kolonlar için X ve Y yönündeki deplasmanlar.....	94
Şekil 6.37 Silo hunisi için X yönündeki deplasmanlar.....	95
Şekil 6.38 Silo hunisi için Y yönündeki deplasmanlar.....	95
Şekil 6.39 Silo hunisi için Z yönündeki deplasmanlar.....	95
Şekil 6.40 Silo kapağı toplam deplasmanlar.....	96
Şekil 6.41 Silo mesnetlenme durumu (şasi üzerine bağlanacak bölge).....	97
Şekil 6.42 Mesnet reaksiyonları X ve Y yönü.....	97
Şekil 6.43 Mesnet reaksiyonları Z yönü.....	98
Şekil 6.44 Dikdörtgen silo mod şekilleri: 1. ve 2. modlar.....	99
Şekil 6.45 Dikdörtgen silo mod şekilleri: 3. ve 4. modlar.....	100
Şekil 6.46 Dikdörtgen silo mod şekilleri: 5. ve 6. modlar.....	100
Şekil 6.47 Dikdörtgen silo mod şekilleri: 10. mod.....	101
Şekil 6.48 Silindir silo part'lar.....	102
Şekil 6.49 Silindir silo Assembly görüntüleri (Kesit renkleri: Kırmızı: 5 mm, Krem: 4 mm, Yeşil: 3 mm).....	103
Şekil 6.50 Silindir silonun mesh edilmiş perspektif görünümü.....	103
Şekil 6.51 Silindir silonun mesh edilmiş ön görünümü.....	104
Şekil 6.52 Silindir silo Phf yük tanımı.....	105
Şekil 6.53 Silindir silo Pwf yük tanımı.....	105
Şekil 6.54 Silindir silo Pv yük tanımı.....	106
Şekil 6.55 Silindir silo ek yük için PhfCosθ yük tanımı.....	106
Şekil 6.56 (a) Phf yükünün silo iç duvarına uygulanması (b) Silo duvarına Phf basınç yüklemesi.....	107

Şekil 6.57 (a) Silindir silo Pwf yükünün uygulanması (b) Silo duvarında Pwf sürtünme yüklemesi.....	108
Şekil 6.58 Doldurma ek yükünün Ppf, n silo duvarına uygulanması.....	109
Şekil 6.59 Silindir silo doldurma ek yüklemesi.....	109
Şekil 6.60 Silo duvarına boşaltma yüklerinin uygulanması (a) Basınç yükü, Phe (b) Sürtünme yükü Pwe .....	110
Şekil 6.61 Silindir silo boşaltma durumunda ek yük Ppe, n yükünün silo duvarına aktarılması.....	110
Şekil 6.62 Silindir silo doldurma durumunda Pnf yükünün huni kısmına aktarılması.....	111
Şekil 6.63 Silindir silo hunisine Pnf basınç yüklemesi.....	111
Şekil 6.64 Silindir silo hunisine Ptf sürtünme yüklemesi .....	111
Şekil 6.65 Silindir silo hunisine boşaltma durumunda (a) Pne basınç yüklemesi (b) Pte sürtünme yüklemesi.....	112
Şekil 6.66 Silindir silo çene dahil durum için S, Mises gerilme durumu.....	113
Şekil 6.67 Silindir silo çene hariç durum için S, Mises gerilme durumu.....	113
Şekil 6.68 Silindir silo X yönü deplasmanlar .....	115
Şekil 6.69 Silindir silo Y yönü deplasmanlar .....	116
Şekil 6.70 Silindir silo Z yönü deplasmanlar.....	117
Şekil 6.71 Silindir silo huni kısmında oluşan toplam deplasmanlar .....	118
Şekil 6.72 Silindir silo kapak kısmında oluşan toplam deplasmanlar.....	119
Şekil 6.73 Silindir silo kritik kombinasyon-2 için X yönündeki mesnet reaksiyonu....	120
Şekil 6.74 Silindir silo kritik kombinasyon-2 için Y yönündeki mesnet reaksiyonu....	120
Şekil 6.75 Silindir silo kritik kombinasyon-2 için Z yönündeki mesnet reaksiyonu ....	120
Şekil 6.76 Silindir silo mod şekilleri: 1. ve 3. modlar.....	122
Şekil 6.77 Silindir silo mod şekilleri: 4. ve 5. Modlar .....	122
Şekil 6.78 Silindir silo mod şekilleri: 8. ve 9. modlar.....	123
Şekil 6.79 Silindir silo mod şekilleri: 10. ve 11. modlar.....	123

## ÇİZELGELER LİSTESİ

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
Çizelge 3.1 Silolarda kütle ve huni akışın avantaj ve dezavantajları.....	19
Çizelge 4.1 Etki değerlendirme sınıfları (EDS) (TS EN 1991-4, Çizelge 2.1).....	28
Çizelge 4.2 Dikey silo duvar yük hesabında kullanılacak malzeme karakteristik değerleri (TS EN 1991-4, Çizelge 3.1).....	30
Çizelge 4.3 Huni duvar yük hesabında kullanılacak malzeme karakteristik değerleri (TS EN 1991-4, Çizelge 3.1).....	30
Çizelge 4.4 Duvar sürtünme sınıflandırması (TS EN 1991-4, Çizelge 4.1).....	33
Çizelge 4.5 Malzeme özellikleri (TS EN 1991-4, Ek-4).....	33
Çizelge 5.1 Tasarım durumları ve etki kombinasyonları (TS EN 1991-4, Çizelge A.2).....	54
Çizelge 5.2 Etki tasarım durumu (EN 1990, Table.A2.4(B)).....	54
Çizelge 5.3 Direnç kısmi faktörleri (EN 1993.4-1, Tablo 2.2).....	55
Çizelge 5.4 Önerilen kısmi direnç faktörleri .....	55
Çizelge 6.1 Abaqus programında seçilen birim sistemi .....	57
Çizelge 6.2 Çelik malzeme özellikleri .....	57
Çizelge 6.3 Buğday malzemesinin karakteristik alt, üst ve ortalama değerleri.....	60
Çizelge 6.4 Doldurma durumunda duvara dik basınç değişimi.....	61
Çizelge 6.5 Doldurma durumunda sürtünme çekmesi değişimi .....	62
Çizelge 6.6 Doldurma durumunda düşey basınç değişimi .....	63
Çizelge 6.7 Boşaltma durumunda dik basınç ve sürtünme çekmesi değişimi.....	64
Çizelge 6.8 Silo hunisinde doldurma durumunda oluşan yükler .....	65
Çizelge 6.9 Silo hunisinde boşaltma durumunda oluşan yükler .....	66
Çizelge 6.10 Doldurma durumunda dik basınç değişimi .....	69
Çizelge 6.11 Doldurma durumunda sürtünme çekmesi değişimi .....	69
Çizelge 6.12 Doldurma durumunda sürtünme çekmesi değişimi .....	70
Çizelge 6.13 Boşaltma durumunda dik basınç ve sürtünme çekmesi değişimi .....	71
Çizelge 6.14 Silo hunisinde doldurma durumunda oluşan yükler .....	73
Çizelge 6.15 Silo hunisinde boşaltma durumunda oluşan yükler .....	73
Çizelge 6.16 Dikdörtgen buğday silosu modal analiz sonuçları.....	99
Çizelge 6.17 Silindirik buğday silosu modal analiz sonuçları.....	121

## SİMGELER VE KISALTMALAR

### Simgeler

$A$	silo kesit alanı
$C_o$	bütün katılar için sabit olan boşaltma faktörü
$C_s$	narınlik ayar faktörü
$C_{op}$	ek yük malzeme referans faktörü
$C_b$	taban yük büyütme katsayısı, dik duvarlı bölümden huniye (veya tabana) gelebilecek ek yükleri dikkate alan katsayı
$C_h$	yatay basınç için boşaltma faktörü
$C_{pe}$	boşaltma ek yük faktörü
$C_{pf}$	doldurma ek yük faktörü
$C_w$	duvar sürtünmesi için boşaltma faktörü
$E$	akış kanalı eksantrikliğinin silo yarıçapına oranı
$F$	karakteristik huni basınç oranı
$F_e$	boşaltma esnasındaki huni basınç oranı
$F_f$	doldurmadan sonra huni basınç oranı
$F_{pe}$	ince duvarlı silo duvarında boşaltma ek yükünden dolayı oluşan yatay kuvvet
$F_{pf}$	ince duvarlı silo duvarında doldurma ek yükünden dolayı oluşan yatay kuvvet
$K$	yanal basınç oranı karakteristik değeri
$K_u$	yanal basınç oranı üst değeri
$K_l$	yanal basınç oranı alt değeri
$K_m$	yanal basınç oranı ortalama değeri
$S$	huni şekil katsayısı
$U$	silo iç çevresi
$Y_j$	Janssen basınç derinlik değişim faktörü
$Y_R$	küçük eğimli silo basınç derinlik değişim faktörü

### Küçük Harf Simgeler

$a$	ortalama değerleri üst ve alt karakteristik değerlere dönüştürme katsayısı, veya dikdörtgen kesitli silo uzun kenar boyu
$a_K$	yanal basınç oranı değiştirme sabiti
$a_\mu$	duvar sürtünme katsayısı değiştirme sabiti
$b$	dikdörtgen silo kısa kenarı, huni basıncı için deneysel sabit
$d_c$	silo kesiti iç karakteristik boyutu
$e_f$	doldurma esnasında yığın yüzeyinin maksimum eksantrisitesi
$e_i$	doldurma durumunda oluşan eksantrisitesi
$e_o$	boşaltma kapağı eksantrisitesi
$e_t$	dolumdan sonra üst yığın maksimum eksantrisitesi
$h_0$	üst yığın tabanından eşdeğer yüzey altındaki derinlik
$h_b$	çıkış apexinden eşdeğer yüzeye olan mesafe
$h_c$	geçiş ile eşdeğer yüzey arasındaki düşey mesafe
$h_n$	geçiş bölgesi ile apex arasındaki huni yüksekliği
$h_{tp}$	üst yığının toplam yüksekliği
$n$	huni basınç denklem üssü
$p_h$	dikey silo duvarına etkiyen yatay basınç
$p_n$	huni duvarına etkiyen normal basınç
$p_w$	dikey duvarına etkiyen teğet sürtünme çekmesi

$p_t$	huni duvarına etkiyen teğet sürtünme çekmesi
$p_v$	silolanan malzemeye etkiyen dikey basınç
$p_{he}$	boşaltma durumundaki yatay basınç
$p_{hf}$	dolumdan sonraki yatay basınç
$p_{ne}$	huni duvarına boşaltma esnasında dik olarak etkiyen basınç
$p_{nf}$	huni duvarına doldurmadan sonra etkiyen basınç
$p_p$	ek basınç
$p_{pe}$	boşaltma durumundaki ek basınç
$p_{pf}$	doldurmadan sonraki durumundaki ek basınç
$p_{pfs}$	çevresel koordinat $\theta$ açısına göre doldurma durumundaki ek basınç
$p_{pes}$	çevresel koordinat $\theta$ açısına göre boşaltma durumundaki ek basınç
$p_{te}$	boşaltma esnasında sürtünme çekmesi
$p_{tf}$	doldurmadan sonraki durumundaki sürtünme çekmesi
$p_{vf}$	doldurmadan sonraki durumundaki dikey basınç
$p_{vft}$	geçiş bölgesinde doldurmadan sonraki durumda oluşan dikey basınç
$p_{we}$	boşaltma esnasında dikey duvara etkiyen teğet sürtünme çekmesi
$p_{wf}$	doldurmadan sonraki durumda sürtünme çekmesi
$p_{vt}$	geçişte dolumdan sonra ortalama dikey gerilme
$r$	siloların yarıçapı
$s$	ek yükün etki ettiği bölge boyutu
$t$	siloların duvar et kalınlığı
$x$	apexden yukarıya doğru ölçülen dikey koordinat
$z$	dolu durumda eşdeğer yüzey altındaki derinlik
$z_0$	Janssen karakteristik derinliği
$z_v$	küçük eğimli siloların dikey gerilme değerlendirilmesinde kullanılan derinlik
$z_p$	ince duvarlı silolarda eşdeğer yüzeyin altındaki derinlik

### Yunan Alfabeti Simgeleri

$\alpha$	huni için yatayla yapılan açı
$\beta$	huni zirve yarı açısı
$\gamma$	silolanan malzeme birim ağırlığı
$\gamma_l$	silolanan malzeme birim ağırlığının alt değeri
$\gamma_m$	silolanan malzeme birim ağırlığının ortalama değeri
$\gamma_u$	silolanan malzeme birim ağırlığının üst değeri
$\theta$	çevre açısal koordinatı
$\mu$	duvar sürtünme katsayısı
$\mu_l$	silolanan malzeme ile silo duvarı arasındaki sürtünme katsayısının alt değeri
$\mu_m$	silolanan malzeme ile silo duvarı arasındaki ortalama sürtünme katsayısı
$\mu_u$	silolanan malzeme ile silo duvarı arasındaki sürtünme katsayısının üst değeri
$\mu_{heff}$	hareket sürtünmesi
$\varphi_r$	silolanan malzeme şev açısı
$\varphi_{wh}$	huni duvar sürtünme açısı
$\emptyset_i$	iç sürtünme açısı
$\xi$	azaltma katsayısı
$\Psi$	kombinasyon katsayısı
$\delta$	deplasman faktörü

## 1. GİRİŞ

Günümüzde insan nüfusunun artmasıyla birlikte her türlü malzemeye olan talep artmıştır. Bu talebi karşılamak ve ürünleri depolamak amacıyla özel tesisler inşa edilmektedir. Bu tesisler, malzemenin doldurulması ve boşaltılması işleminin kolaylıkla yapılabilmesi için farklı geometriye sahip silo adı verilen depolar ile oluşturulmaktadır. Silolar un, buğday, tav ve kepek gibi birçok malzeme depolanmasına olanak verir. Silolar ilk olarak ahşap malzemesi kullanılarak basit ve minimal depolama boyutlarında yapılmaktaydı. Zamanla betonarmenin kullanılması ile devasa silolar yapılmaya başlandı. Günümüzde ise çelik yapıların daha iyi anlaşılması ile artık belli depolama kapasitesine sahip silolar sadece çelik malzemesi kullanılarak yapılabilmektedir. Bu özel yapılar, insan nüfusunun sürekli artmasıyla depolama ihtiyacı olan her alanda kendine yer bulmaktadır. Üretim yoğunluğu bakımından değirmen makineleri yapan firmalar fabrikalarında silo kullanımı konusunda zirvede yer almaktadır. Değirmen makinesi yapan yerli firmalar, yurt içi ve dışında fabrika tasarımları yaparak müşterilerine hizmet vermektedir. Bu firmalar, müşterilerin istekleri doğrultusunda üretim kapasitesini belirler. Üretime bağlı depolama ihtiyaçları için silo adet ve kapasiteleri belirlenir. Müşteri taleplerine göre fabrika yapısı tasarlanır. Burada kullanılacak makineler belirlenir ve yerleşimi yapılır. Tasarımı yapılan fabrikalar, betonarme veya çelik konstrüksiyon olarak yapılmaktadır. Betonarme siloların yapımında kalıp, işçilik, inşaat süresi ve maliyet gibi etkenler, bu tür siloların tercih edilmemesine sebep olmaktadır. Söz konusu fabrikaların yapımında hem imalat hızı, hem de montaj kolaylığı açısından çelik konstrüksiyon, betonarmeye göre tercih edilmektedir.

Çelik silolar müşterinin isteğine bağlı olarak bazen fabrika içine bazen de fabrika dışına yapılmaktadır. Fabrika içine yapılan silolar da bilindiği gibi kar ve rüzgâr yükü ihmal edilmektedir. Lakin hava değişimine bağlı sıcaklık etkisi göz önünde bulundurulmaktadır. Fabrika tasarımı yapılırken gözönünde bulundurulması gereken en önemli hususlardan birisi malzeme sevkiyatıdır. Bu kriter maliyeti önemli ölçüde etkilemektedir. Bu sebeple fabrika inşaatı, istif yapılacak malzemelerin yakınına veya alımının kolay olduğu raylı sistem ile taşınabileceği bölgeye yapılır. Böylelikle malzeme fabrika önüne geldiğinde, tren altındaki konveyörler ile fabrika içine taşınır. Devamında gerekli işlemler sonunda oluşan ürün, benzer yöntemle hızlı bir şekilde sevk edilebilir duruma gelir.

Silolar, karmaşık ve kendine özgü yükleme durumları olan spesifik yapılardır. Ülkemizde, bu tür yapıların imalatı üzerine yazılmış yeterli miktarda kaynak bulunmamaktadır. Yapılmış çalışmaların çoğunda betonarme silolar incelenmiştir. Ülkemizde betonarme silolar için TS6989-Betonarme Siloların Hesap, Yapım ve Kullanım Kuralları adlı şartnamemiz mevcuttur. Betonarme siloların yapımının beraberinde getirdiği kalıp zorluğu, inşaat süresinin uzunluğu gibi olumsuz etkenler, teknolojinin gelişmesi ile birlikte bu tür siloların yerini çelik silolara bırakmasına neden olmuştur. Çelik yapılarda imalat hatası oranı çok daha azdır. Her türlü kesim, delik açma, imalat vb. işlemlerde uzunluk ölçüsü birimi olarak milimetre kullanılır. Hata toleransı yapıdan yapıya değişik gösterse de, genelde en çok 2 mm olarak kabul edilir. Çelik yapılar kolay bir şekilde sökülüp takılmaları, istenilen her yere kolayca sevkedilebilmeleri, hafif olmaları ve betonarmeye göre daha hızlı bir şekilde montajlarının yapılabilmesi nedenleriyle tercih edilmektedirler.

Silolara malzeme doldurulması ve boşaltılması işlemleri özel makineler ile yapılmaktadır. Silo içine yerleştirilen sensörler sayesinde anlık depo kapasitesi takip edilebilmektedir. Bilgisayar ortamında oluşturulan fabrika içi akış şeması doğrultusunda, makinelerin ve siloların üç boyutlu çizimi yapılarak modellenmektedir.

Bu çalışmada, dikdörtgen çelik siloların sonlu eleman analizi sırasında dikkate alınacak yükleme durumları, çelik silolar için hazırlanmış “Eurocode-1: Actions on structures- Part 4:Silos and tanks” yönetmeliği esas alınarak belirlenmiştir. Çalışmada bulon ve kaynakların tasarımına değinilmeyecektir. Sayısal analizlerin daha anlaşılır olması için, fabrika içine konumlanmış gerçekçi boyut ve kapasitede bir dikdörtgen çelik tahıl silosu tasarlanacak, yükleri şartnameye göre belirlenecek ve ABAQUS sonlu eleman analizi programı ile simülasyonu yapılacaktır. Analiz sonucu, silolarda en çok zorlanan kritik bölgeler belirlenecektir. Bu çalışmanın en önemli amaçlarından biri de, çelik silo imalatı yapan firmaların başvurabilecekleri bir yardımcı kaynak eser niteliğinde hazırlanmasıdır.

## 2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Özel (2007), çalışmasında çelik siloların yapımında kullanılacak yerli yönetmeliğimizin olmamasına dikkat çekmiştir. Bu eksikliğin giderilmesi için yaptığı çalışmada “Eurocode 1: Actions on structures- Part 4: Silos and tanks” yönetmeliğindeki tasarım esaslarını kullanarak hareketlere öncelik veren ve hareketleri hesaplara döken kuramsal ve deneye dayalı verilere bakılarak çelik silo tasarımını anlatmıştır. Konunun daha iyi anlaşılması için çelik hububat silolarının tasarımında SAP2000 programını kullanarak örnek silo modeli üzerinden yapısal çözümlemenin nasıl yapılacağına dair veriler sunmuştur.

Yerli (2013), çalışmasında ülkemizde ardgermeli çimento siloların yaygın olarak kullanıldığını tespit etmiştir. Betonun çekme gerilmelerine karşı güçlendirilmesi amacıyla ardgerme uygulamasını dikkate almış ve Azerbaycan içinde kurulan bir çimento silosunun incelemesine yer vermiştir. Mevcut çimento silosunu sadece betonarme kullanarak tekrar dizayn etmiş ve iki farklı uygulama için maliyet analizi yapmıştır. İki farklı tasarım durumuna göre de bir analiz raporu sunmuştur. Bu raporda, kullanılan malzemeler kıyaslanmıştır. Ardgermeli siloda kullanılacak malzeme ve işçiliklerin toplam maliyetine oranının %26 daha ucuz olduğu sayısal veriler ile gösterilmiştir. Ayrıca ardgermeli bir silonun, işçilik bakımından betonarme bir siloya göre daha kolay yapılabildiği vurgulanmıştır.

Durmuş (2013), çalışmasında silolar için deprem durumunu göz önünde bulundurarak oluşturduğu farklı modeller üzerinden dinamik etkilerin silo davranışlarına etkilerini irdelemiştir. Oluşturduğu modellerdeki davranışları pratik olarak kullanması için uygulamacıya sunmuştur. Siloların deprem davranışında etkili olduğunu varsaydığı silo duvarlarının elastik ve stabilize durumu, çeşitli silo narinlik oranları ve silo yapılacak zeminin parametrelerini incelemiştir. Siloların deprem davranışı analizleri sonucunda, narinlik, temel yapılacak zemine ait parametreler, silo duvarının kalınlığı ve elastiklik durumun dinamik davranışa önemli etkileri olduğunu tespit etmiştir.

Özel (2011), çalışmasında betonarme bir silo cidarında oluşan yatay basınçları incelemiştir. Silo cidarına etkiyen yatay basınçlar için sükûnet durumundaki depolanan ürünleri esas alarak ANSYS yazılımı ile sonlu elemanlar yöntemini kullanarak analiz yapmıştır. Mevcut analiz sonuçlarını Eurocode yönetmeliği ve Reimbert Teorisi ile karşılaştırmıştır. Sayısal çözümleme ve analitik hesaplamalarla kıyaslandığında derin ve küçük eğimli silolarda yatay basınçların benzer olduğunu ispatlamıştır.

Kibar ve Özel (2013), çalışmalarında yapı malzemesi olarak çeliği dikkate almış ve fındık depolayacak bir silo tasarımı yapmıştır. Sonlu eleman yöntemi ile modal analizlerini gerçekleştirmiştir. Silo cidar kalınlığının artırılması ile frekans değerlerindeki değişimi incelemişlerdir. Farklı boyutlardaki 3 tip silonun ANSYS programı ile modal analizi yapılmıştır. Sonuç olarak silolarda duvar kalınlığının artırılması ile yüklerin tesir ettiği yüzeylerde oluşacak deformasyonların ve gerilmelerin azaldığını tespit edilmiştir. Ayrıca, silo tasarımı sırasında ortam ve depolanacak ürünlerin oluşturacağı yük durumları için simülasyonlar yapılmasının, olası aksaklıkların öngörülmesi ve düzeltilmesi açısından önemli olduğu tespit edilmiştir.

Hüner (2006), çalışmasında bir çimento silosunun statik ve dinamik analizini SAP2000 programını kullanarak gerçekleştirmiştir. Silo yüklerinin neler olduğu ve yüklerin hesaplanma şekillerine değindiği çalışmasında, silo boyutlarına bağlı olarak yüksekliği 25 m'den fazla olan siloların modal analizinin yapılması gerektiğini vurgulamıştır. Sıcaklık farklarından doğan yükleri de dikkate alarak siloya ait gerilmeler ve momentler hesaplanarak donatı hesabı sunulmuştur.

Durmuş (2007), çalışmasında malzeme depolaması için kullanılan siloların yapılarını incelemiştir. Özellikle kapasiteye bağlı olarak değişen etki değerlendirme sınıfları için önemli kavramları irdeleyerek silo sınıflarına göre verilen hesap yöntemlerini tek elde toplamak için, aynı simgeleri kullanmıştır. Söz konusu yöntemin uygulanabilmesi için tablolar oluşturmuştur. Silolarda sükunet durumundaki malzeme basınçlarının hesabının yapılmasında kullanılan, tanınmış ve bilinen teorileri irdelemiş ve karşılaştırmıştır. Türkiye, Amerika ve Almanya silo yönetmeliklerine bağlı olarak, silolara etki eden doldurma ve boşaltma basınç hesaplarına değinmiştir.

Kibar ve Öztürk (2011) çalışmalarında, tarımsal ürün silolarında karşılaşılan yapısal hataları incelemişlerdir. Söz konusu hataların analizi üzerinde durmuş ve incelemeler sonucu oluşması muhtemel hataların azaltılması için bazı öneriler hazırlamışlardır. Projelendirme hataları, yapım hatalarından kaynaklı sorunlar, kullanıma bağlı sorunlar, ürünün akışına bağlı sorunlar ve bakım hataları olmak üzere beş ana başlık üzerinden detaylı olarak karşılaşılabilecek sorunlar ile hatalara yer verilmiştir. Bu problemlerin giderilmesi ve önceden değerlendirilebilmesi için SAP2000, ABAQUS ve ANSYS tarzında sonlu elemanlar analizi yapabilen programlar kullanılarak silo modellenmesi gerektiğini tespit etmişlerdir. Oluşturulan modeller için istinai durumlar haricinde statik, dinamik ve modal analiz durumları incelenerek simüle edilen model üzerinden sorun teşkil eden bölgeler dikkate alınarak projelendirilme yapılması

gerektiğini vurgulamışlardır. Ayrıca silolara etki eden rüzgar, deprem ve ek yük durumlarının, projelendirme safhasında göz önünde bulundurulması gerektiği vurgulanmıştır.

Kurşunel (2001) çalışmasında, değirmen fabrikalarında üretilen unun niteliğinin fazla suyun taneden ayrıştırılması yöntemiyle, yani tavlama yapılarak değiştiğini vurgulamıştır. Konya'daki bazı tesislerde siloların depolama durumları araştırılmış, işlemlerden geçen malzemenin daha nitelikli ürüne dönüşebilmesi için tav siloların adedi ve malzeme karışım yüzdeleri üzerinden sayısal ilişki kurmuştur. Böylece mevcut tesislerin değerlendirilerek yeterli olup olmadığı tespit edilmektedir. Söz konusu sayısal veriler kullanılarak farklı tipteki buğdayların tavlama geçireceği süreler ve buğday çeşitlerine göre birleşim oranları sunulmuştur. Söz konusu durumlar değerlendirilirken fabrika yapısı ihtiyaç duyulan silo adedine sahip değilse, işlem sürelerini azaltmak ve birleşim oranına ulaşmak için tavlama ısısının artırılması gerektiği sonucuna varılmıştır.

Yaldıran (2018) çalışmasında, bir buğday silosu tasarlamış ve tasarladığı buğday silosuna tesir eden yüklere göre oluşan etkileri incelemiştir. Bu silolara etki eden ısı, nem, basınç, titreşim gibi parametrelerin oluşturacağı deformasyonları ANYSS programı yardımıyla statik, modal, harmonik, rastgele titreşim ve tepki spektrum analizi yöntemlerini kullanarak çözümlenmiştir. Statik analizde tasarlanan siloya etki ettirilen yüke bağlı olarak silo deplasman durumlarını tespit etmiştir. Modal analiz ile silonun doğal frekansı belirlenmiş ve rezonansa maruz kalma durumu değerlendirilmiştir.

Kibar (2017) çalışmasında, farklı standartlara göre silo yüzeyine etki eden dış basınç katsayılarını belirlemeyi amaçlamıştır. Araştırmasında silo dış basınç katsayıları için Avrupa, Avustralya ve İngiliz yönetmeliklerini tercih etmiştir. Söz konusu yönetmelikler arasından Avrupa ve Avustralya yönetmeliklerine göre hesaplamalar yapılarak İngiliz yönetmeliğinde verilen tablolar ile kıyaslama yapılmıştır. Kıyaslama neticesinde yöntemler arasındaki ilişki incelenerek değişkenlikler ve benzerlikler ortaya konulmuştur. Silo tasarımında rüzgar yükünün silonun boş olduğu durumlarda kritik önem kazandığı ve rüzgar yüküne etki eden faktörlerden dış basınç katsayısına dikkat edilmesi gerektiği vurgulanmıştır.

Aydın (2013) çalışmasında, silo yan sac direkleri geometrisini ve mukavemete etkisini incelemiştir. Silolarda doldurma ve boşaltma işlemi genellikle merkezi olarak yapılmaktadır. Analizler, silolarda ekstantrite oluşmadığı varsayılarak hesaplanmaktadır. Kullanıcı hatasına bağlı yapılacak olası eksantrik boşaltma durumlarında ekstra statik ve maliyet değerlendirilmesi yapılması gerekmektedir.

Çalışmada, malzeme çıkışı için yan kısımların kullanılması durumunda silo yan direklerinin %17 oranında ilave dayanıma ulaştığı, böylece kullanıcı hatalarının bir kısmını tolere edebilir olduğu tespit edilmiştir.

Öztürk (2011) çalışmasında tombul fındık depolamasında kullanılabilen silindirik gövdeli silo tasarımı için optimum silo geometrisini araştırmıştır. Mevcut durumda, silolarda stoklanacak ürünlerin doldurulması ve boşaltılması esnasında meydana gelecek gerilmeler ve şekil değiştirmeler, Avrupa ve İngiliz yönetmelikleri esas alınarak ANSYS bilgisayar programı yardımıyla analiz edilmiştir. Depolama kapasiteleri ve silo duvarı et kalınlıkları bakımından üç çeşit silo yapısının incelenmesi sonucu, silo duvarı et kalınlığının artmasıyla silo duvarında oluşacak deplasmanlar ve gerilmelerin azaldığını tespit etmiştir. Çalışmanın sonunda fındık depolanması için yapılacak silolar için önerilerde bulunmuştur.

Kibar ve Öztürk (2016) çalışmalarında, malzeme depolanması için üretilen siloların tasarımında kullanılan farklı yöntemleri ele almışlardır. İncelenen yöntemlerde silo cidarında malzemenin neden olduğu basınçların hesaplanması kritik bir öneme sahiptir. Bu basınçların hesabı için yanal basınç oranı, içsel sürtünme açısı ve sürtünme katsayısı gibi değişkenlerin ilk etapta elde edilmesi gerektiğini tespit etmiştir. Gerekli değişkenlerin ABAQUS, FELASH, ANSYS ve diğer CAD yazılımları ile oluşturulacak modeller üzerinde analiz edilmesi gerektiğini önermiştir.

Çelik ve Köse (2020) çalışmalarında, çelik tahıl depolama silolarının deprem analizini incelemişlerdir. Siloların sismik tasarımında hala eksiklikler olduğuna dikkat çekilmiştir. Deprem analizini birden fazla değişken kullanılarak sonlu elemanlar yöntemi ile beraber ayırık elemanlar yönteminin de uygulanması gerektiği sonucuna varılmıştır. Böylece ayırık elemanlar yöntemi kullanılarak dökme malzeme biçiminde tasarlanan tahıl malzemesinin tanecikler arasındaki boşluklar daha doğru tespit edilerek dinamik şartlar altında gerçekçi simülasyonların yapılabileceği belirlenmiştir.

### 3. MATERYAL VE YÖNTEM

#### 3.1. Giriş

Ülkemizde çelik silo imalatı çok yaygındır ve tasarım ve analizler “Eurocode 1 (EN 1991-4): Actions on structures- Part 4: Silos and tanks” standardının Türkçe’ye çevrilmiş hali olan “TS EN 1991-4: 2006-07” standardına dayanmaktadır. Bu çalışmada çelik silo tasarımı için gerekli yüklemeler ve şartlar için Eurocode 1 (EN 1991-4) esas alınacaktır. Çelik silolar çok ayrıntılı yük hesabı gerektiren ve özellikli yapılardır. Bir siloya etkiyebilecek muhtemel tüm yük tesirlerinin nasıl hesaplanacağı detaylı şekilde belirlenmiştir ve yönetmelikte verilmiştir. Bu kadar çeşitli yükleme durumlarının dikkate alınması kafa karışıklığına sebep olmaktadır. Silolar tasarım sırasında kapasitelerine bağlı olarak sınıflandırılmaktadır ve genellikle etki değerlendirme sınıfı olarak birinci derece sınıfa dahildirler. Bu tip siloların yük hesabında basitleştirilmiş yöntemler kullanılır. Doldurma ve boşaltma ek yükleri ihmal edilir ve malzeme özellikleri için ortalama değerler kullanılır. Bu çalışmada detaylı yük hesabının nasıl yapılacağını açıklamak için, etki değerlendirme sınıfı 2 olan örnek bir çelik silo seçilmiştir. Literatürdeki Türkçe kaynaklara bakıldığında, çoğunluğunda betonarme siloların analiz ve imalat safhalarının incelendiği, ayrıca genel olarak silolarda karşılaşılan imalat hatalarına da yer verildiği görülecektir. Yüklerin hesaplanması konusunun kapsamlı ve detaylı olması nedeniyle, dikkate alınan şartlar kısaca açıklanacaktır. Hesapların daha iyi anlaşılabilmesi için, örnek bir dikdörtgen çelik tahıl silosu tasarlanarak ABAQUS sonlu elemanlar programı yardımı ile analiz edilecek ve yapılan simülasyondan elde edilen sonuçlar yorumlanacaktır.

#### 3.2. Silo Tanımı

Özellikli yapılardan olan silolar, birçok malzemenin korunmasını ve depolanmasını sağlayan yapı elemanları olarak bilinmektedir. Depolanan malzemelerin uygunluk şartları; depolama süresi, malzeme cinsi, sıcaklık ve nem durumu, doldurma ve boşaltma şekli, depo yapısının geometrisi, silo yapı malzemesinin özellikleri gibi birçok değişkene bağlıdır.

#### 3.3. Silonun Kısımları

1-) Silo Çatısı: Siloların üstünü kapatarak dış etkilere maruz kalmasını engelleyen kısımlardır. Kar, rüzgâr, sıcaklık, yağmur, toz gibi birçok etkilere dayanıklı olarak üretilen çatılar uygun eğimlerde yapılarak siloları koruyan yapılardır.

2-) Silo Tavan Döşemesi: Silolara dolunun yapılabilmesi için gerekli boyutlarda açılan boşluklara kapakların yerleştirildiği bölümdür.

3-) Silo Dikey Duvarları: Silolarda kritik öneme sahip kısımlardır. Silo içindeki malzemenin oluşturacağı sürtünme ve yanal basınç kuvvetlerine dayanıklı, özel boyalar ile korozyon ve paslanmaya karşı dayanıklı hale getirilen bölümdür.

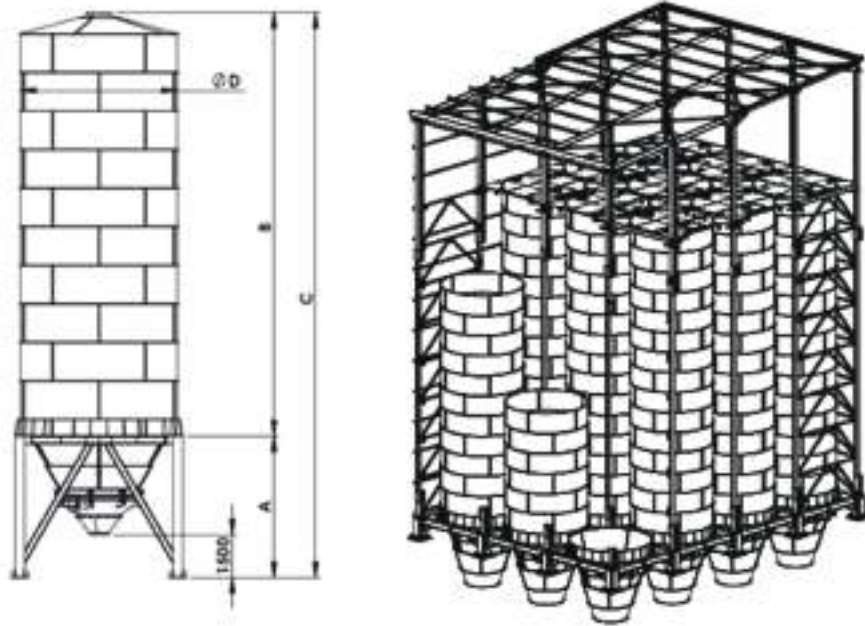
4-) Silo Hunisi: Silolarda depolanan malzemenin boşaltıldığı kısımdır. Huniler genellikle makinelere bağlanır. Malzeme akış şemasının sürekli olması gerektiği için malzemenin hareketine izin verecek eğimlerde üretilen, olası eksantrisitelere, korozyon ve paslanmaya dayanıklı bölümdür.

5-) Kolonlar: Zemin kat temelinde mesnetlenerek üzerindeki yükü temele aktaran, bu yükler karşısında burkulmayan, çekme ve basınç kuvvetlerini karşılayabilen dikey elemanlardır.

6-) Kiriş: Kolonları birbirine bağlayan aynı zamanda siloların çenelerin oturduğu bağlantı elemanlarıdır.

7-) Çapraz: Silo kapasitesini arttırabilmek için silo yüksekliği fazla olmaktadır. Silo yapısının stabilitesini sağlayabilmek için etrafı çaprazlar ile desteklenmektedir.

6-) Temel: Zemin durumuna göre temel tipi seçilmektedir. Zemin koşullarına bağlı olarak sınırlı alanlarda radye temel yapılmaktadır. Ancak sağlam tabakaların derinlerde olması kazık temellerin kullanılmasını gerektirir.



Şekil 3.1 Silo yapısı (Altınbilek makine ürün kataloğu)

### 3.4. Depo Malzemesi Türleri

Depo malzemesi, silo içinde doldurulması ve boşaltmasını kendi cazibesıyla yapılabilen, bağımsız biçimde muhafaza edilebilen, istenildiği şekilde aktarılan malzemelere verilen isimdir. Söz konusu malzemeler aşağıda verildiği gibi dört ana başlık altında gruplandırılmaktadır.

#### 1.) Üretim sürecinden geçmemiş malzemeler

- Tahıl
- Bakliyat
- Yağlı malzemeler

#### 2.) Üretim sürecinden geçmiş malzemeler

- Tahıl unu
- Yem
- Şeker

#### 3.) Organik olmayan malzemeler

- Kum
- Kil
- Çakıl
- Kömür

#### 4.) Endüstriyel ürünler

- Çimento
- Kül
- Kömür tozu
- Gübreler

### 3.5. Depo Malzemesinin Silolarda Oluşturduğu Etkiler

#### 3.5.1. Mekanik etkiler

Depo malzemelerinin sınıflandırılması göz önüne alındığında her malzemenin farklı karakterlerde olduğu görülmektedir. Bu sebeple her malzemenin davranışı farklı olmaktadır. Genel anlamda malzemeleri birim hacim ağırlığı, içsel sürtünme açısı ve depo malzemesi ile silo dikey duvarı arasındaki sürtünme katsayısına göre silo boyutlandırılması yapılmaktadır.

-Toz malzeme: Dane çapı  $< 0.1$  mm (Çimento, kül, tahıl unları gibi)

-Taneli malzeme: Dane çapı  $< 30$  mm (Tahıl, kum, çakıl)

-Parçalı malzeme: Dane çapı > 30 mm (Kalker, kömür)

Toz malzemelerde içsel sürtünme açılarına ek olarak kohezyon mevcutken, taneli ve parçalı malzemelerde kohezyon etkisi olmadığından yalnızca içsel sürtünme açısı mevcuttur (Durmuş, 2007).

Taneli malzemelerde, tane dış kılıfının ayrılması ve yapışık bir iç hazneye sahip olması, taneler arasında topaklanmalara neden olarak, tanelerin kendi içlerinde bütünleşmesini ve daha iri taneler halini alarak oluşturduğu topaklanma etkisine neden olabildiği gözlemlenmiştir. Söz konusu hususta, malzemenin boşaltılması sırasında taneli malzemenin viskozitesi düşeceği için gerekli tedbirlerin alınması zorunlu olmaktadır (Turan, 1986).

### **3.5.2. Kimyasal etkiler**

Silolarda depolanan birçok malzeme tuz, yağ, asit ve kükürt gibi silo yapısına olumsuz etki eden maddeler içerir. Bu tesirler dikkate alınarak silo iç duvarları özel boyalar ile kaplanmaktadır. Böylelikle aşınma ve korozyonun etkisi minimuma indirilir.

### **3.5.3. Sıcaklık etkisi**

Kükürt, tahıl, kömür için işletme tedbirleri alınmaktadır. Çünkü suyun oluşturduğu nem ile maddeler kendiliğinden ısınarak tutuşabilmektedir. Bu tehlike için siloların zaman zaman boşaltılması ya da başka silolara yönlendirilmesi tercih edilebilir. Silo tasarımında her türlü durum göz önünde bulundurulduğu için sıcaklık etkisi de dikkate alınmalıdır.

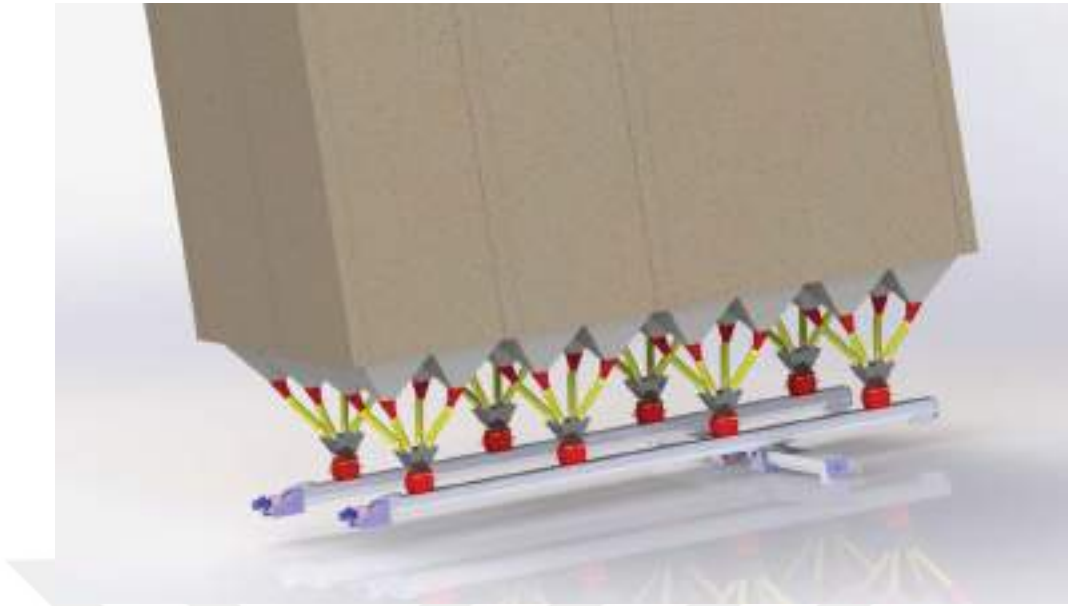
### **3.5.4. Patlama etkisi**

Toz oluşturan kömür tozu, şeker, un gibi ürünler dış ortam ile ilişkiye girdiklerinde, serbest haldeki toz, zaman zaman küçük alev alarak patlama oluşturmaktadır. İnfalاک etme olasılığı için boşlukların azaltılması gerekmektedir.

## **3.6. Siloların Sınıflandırılması**

Genel olarak tav, buğday, kepek ve un siloları yapılmaktadır. Bu silolar arasında temel farklılığı çıkış ağız sayısı oluşturur. Çoğunlukla buğday ve kepek siloları dört çıkışlı olurken un ve tav siloları tek çıkışlı olmaktadır.

Un üretimi, hali hazırda, eski taşlı değirmenler ve günümüzde gelişen valsli makineler vasıtasıyla yapılmaktadır. (Kurşunel, 2001).

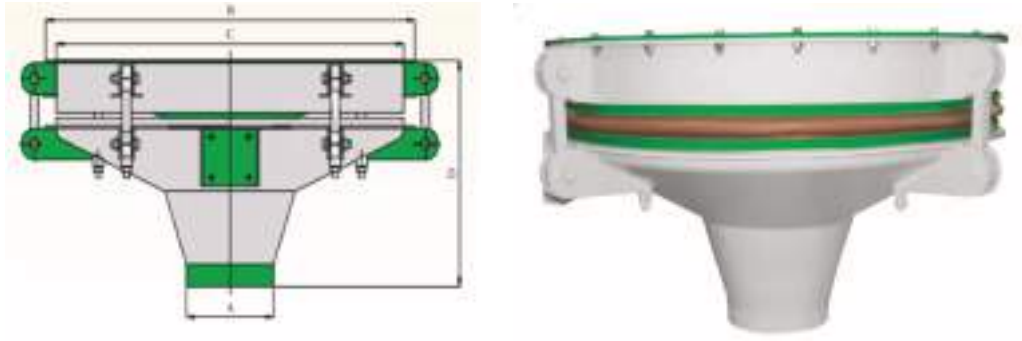


Şekil 3.2 Dört çıkışlı çelik silo render görüntüsü



Şekil 3.3 Tek çıkışlı çelik silo render görüntüsü

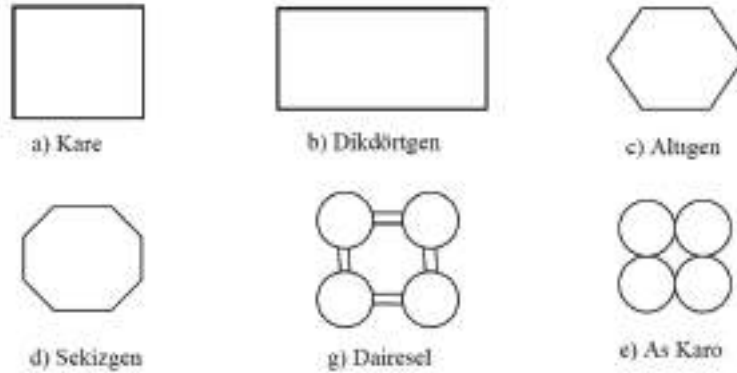
Silo türlerine göre, silo altına tek veya çoklu çıkışlar yapılmaktadır. Mevcut çıkışlardan silolanan malzemenin birikme yapmadan, düzgün bir şekilde aktarılması için, rotoflow adı verilen makineler yerleştirilir. Bu makineler titreşim oluşturarak silolanan malzemenin hareket etmesini sağlar.



Şekil 3.4 Rotoflow makine enkesit ve model hali

### 3.6.1. Enkesit şekillerine göre sınıflandırma

Geometrik boyutlar göz önünde bulundurularak silolar kare, dikdörtgen ve çokgen olarak sınıflandırılması Şekil 3.5’ de gösterilmektedir.



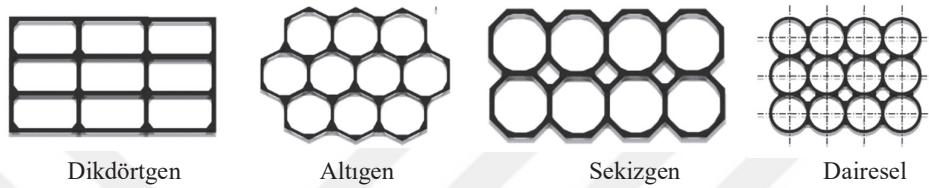
Şekil 3.5 Geometrik yapılarına göre silolar (Özel, 2011)

Kare ve dikdörtgen geometriye bağlı silolar, alan bakımından farklılık göstermektedir. Belli bir alanda yapılacak silolarda dikdörtgen ve kare silolarda alan zayıyatı oluşmamaktadır.

Silo yapılacak mevcut arazi yapısında alan zayıyatının oluşması istenilmeyen bir durumdur. Silindir şeklindeki silolar özellikle grup şeklinde dizayn edildiğinde büyük bir alan kaybına sebep olmaktadır. Buna rağmen, yüksek ve daha fazla kapasiteye sahip silolarda gerilme ve şekil değiştirmeler dikdörtgen silolara göre daha az olmaktadır. Maliyet bakımından, imalat kolaylığı ve işçiliğin az olması, silindir siloların daha ekonomik olmasını sağlamaktadır (Karaca, 2000).

Askaro geometrisine sahip silolar mevcut arazinin zayıtsız şekilde uygulanmasına olanak sağlarlar da analizlerin karışık yapısı çözümlenmeleri ve maliyeti artırmaktadır (Durmuş, 2007).

Genel olarak kullanılan dikdörtgen, kare veya silindir geometriye sahip silolar kapasite olarak 200 ila 3000 tonluk ayrı ayrı kurulabildiği gibi, tek veya grup olarak da tasarlanıp ve inşaatı yapılabilir (Poukhonto, 2003). Silindir grup silolar, tekli yapıdaki silolara göre hem ekonomik hem de daha dayanıklı olmaktadır (Yüksel, Arıkan, 2007).



Şekil 3.6 Çeşitli silo grubu düzenleri (Durmuş,2013)

Genel yapı incelendiğinde, çokgenlerde silindir şekline yaklaşan her çokgen, yükleri yayarak daha stabil çalışmaktadır (Şekil 3.6) (Kumbasar; Aydoğan; Altan, 1992).

### 3.6.2. Yüksekliklerine göre sınıflandırma

Siloları yüksekliklerine göre sınıflara ayırmak için depo malzeme özelliklerinden içsel sürtünme açısı ve silo duvarı ile depo malzemesinin birbirleri ile teması gözönünde bulundurulur. A, silo kesitinin alanını ve H, silonun depolama yüksekliğini gösterirse;

- $H > 1.5 \sqrt{A}$  (Derin Silo)
- $H < 1.5 \sqrt{A}$  (Küçük eğimli Silo)

formülleri ile siloların yükseklik sınıfı bulunur. Yükseklik değişkenine bağlı sınıf seçiminde, silo içinde bulunan malzeme şev açısının, silo tepe noktasının altında bulunup bulunmadığı tespit edildikten sonra tercih yapılmalıdır (Karaca, 2000; Durmuş 2007).

### 3.6.3. İmalat malzemesine göre sınıflandırma

Silo imalat malzemesi olarak çelik, ahşap veya beton tercih edilebilmektedir.



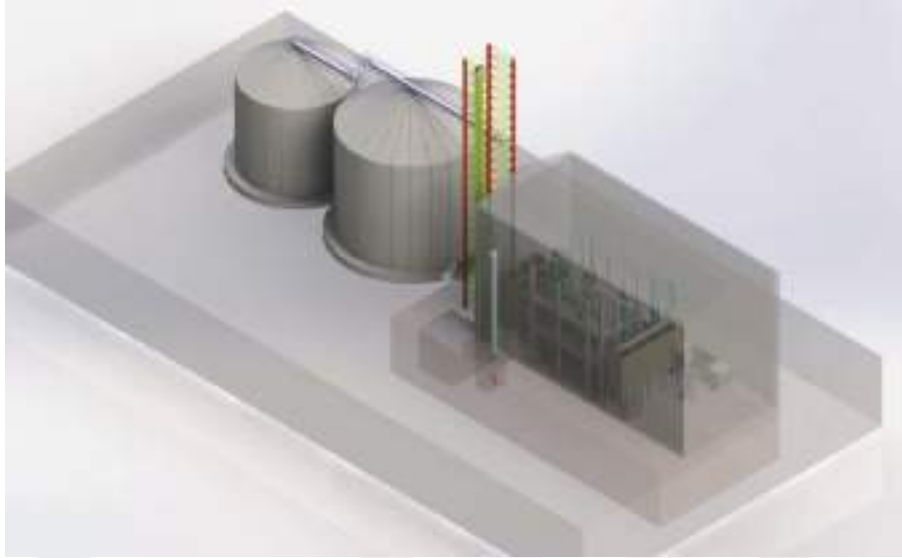
Şekil 3.7 Farklı malzemeler kullanılarak imal edilmiş silolar (Kibar, 2011)

### 3.7. Silolarda Aranılan Özellikler

- İstenilen kapasiteyi karşılamalı,
- Malzeme durumunu anlık takip edebilmek için özel tartım yapan basküller bulunmalı,
- Malzemelerin istenilen hale getirilmesi için yıkama, temizleme, eleme gibi sistemler bulunmalı,
- Nemli olan malzemelerin kurutulması için gerekli ekipmanlar bulundurulmalı,
- Toz patlaması riskini ortadan kaldırmak için havalandırma sistemleri bulundurulmalı,
- Malzeme çıkış kısmı her türlü araca uygun olacak şekilde tasarlanmalı,
- Limanlarda bulunan silolar için gemiye yük aktarımı ve istifleme için trimleme cihazı bulundurulmalı,
- Silo için gerekli iletişimi sağlayacak telsiz ve telefon gibi teknolojik alt yapı olmalı,
- Araç trafiği göz önüne alınarak demir ve karayollarına geçişin olduğu lokasyonlar tercih edilmeli,
- Periyodik bakım yapılacak zamanlarda silo faaliyetinin devam etmesini sağlayan tesisat bulundurulmalı,
- Silo içi sıcaklık, nem ve rutubet durumlarının anlık takibi için özel ölçüm aygıtları bulundurulmalıdır.

### 3.8. Çelik Silo Fabrika Yapısı

Genelde yurt dışına yapılan fabrikalar liman kentlerine yakın ya da raylı sistemlerin kenarlarına yapılmaktadır. Raylı sistemin altına malzeme aktarımını sağlamak için çukurlar açılıp tremi ile malzeme direkt ve hızlı bir şekilde alınabilmektedir.



**Şekil 3.8** Çelik silo fabrika render görüntüsü

Değirmen makinesi yapan firmalar, müşteri isteğine göre fabrikalarını öğütme, temizleme ve paketleme bölümlerinden oluşturabilir. Tabi ki burada paketleme bölümü her zaman bulundurulma zorunluluğuna sahip değildir. Malzeme belirli aşamalardan geçerek istenilen duruma getirilir. Müşteri isteği bölümleri ve fabrika için ürün kapasitesini belirledikten sonra yetkili firmaya teklif projesi çizilmesi için onay verir. Bunun için değirmen makinesi yapan firmalar, öncelikle makine yerleşimi yapar. Makine altlarına gelen delik yerleri işaretlenir. Çelik taşıyıcı yapı bu verilen delik projesine göre tasarlanır.

### **3.9. Siloların Doldurulması ve Boşaltılması**

#### **3.9.1. Rotoflow makinesi ile özel boşaltma**

Üretimi yapılan malzemeler çelik silolarda depolanır. Bu depolanan malzemelerin doldurma ve boşaltma işlemleri özel olarak gerçekleştirilir. Boşaltma yapılırken siloların altına rotoflow makinesi yerleştirilebilir. Bu makine titreşimler ile silo içindeki ürünün tam boşaltılmasını sağlar.

Silo içindeki malzemeyi boşaltmak için titreşim verilir. Silodan alınan malzeme titreşim ile makine içine gelir. Burada makine içi özel boya ile kapatılmıştır. Özel boşaltma makinesi, her türlü silo altına uyum sağlayacak şekilde üretilebilir ve montaj yapılabilir haldedir. Sessiz olarak çalışır. Olası durumlarda makineye müdahale edilebilmesi için silo dolu olduğu halde bile onarım ve değişim olanağı bulunmaktadır.



Şekil 3.9 Silo altında Rotoflow makinesi

### 3.9.2. Özel doldurma

Gerekli işlemlerden geçen ürün, depolanmak için silo üzerine gelir ve Şekil 3.10'da görüldüğü gibi depolanması merkezli olarak yapılır. Böylece eksantrisite oluşmamaktadır.



Şekil 3.10 Siloya ürün depolama sistemi üst görünümü

### 3.10. Silolarda Akış Türleri

Doğru silo tasarımı yaparak, akış sorunlarının oluşması engellenebilir. Tercih edilen durum ilave bir dış etki olmaksızın malzemenin kendi cazibesi ile akış oluşturmasıdır. Malzemenin kendi cazibesi ile hareket etmesi maliyet açısından önemlidir. Bunun için silo dikey duvarlarından sonra malzemenin boşaltılabilmesi

amacıyla geçiş kısmına huni yapılmaktadır. Yapılan huni sayesinde üst kısımdaki malzemenin aşağıya doğru yönelmesini sağlar. Ancak dikkat edilmesi gereken en önemli nokta, hunide oluşan düzgün olmayan akışlardır. Düzenli olmayan akışlarda, malzemelerde parçalanma, silo bağlantı noktalarında ve silo iç kısmında malzemenin birikmesi, biriken malzemenin çürümesi, üst üste gelen birikintiler sonucu ani dinamik etkilerde, birden akışın oluşması ya da siloda depolanan malzemenin herhangi bir yer değişikliği yapmadan kalması önemli sorunlar olarak karşımıza gelmektedir. Karşılaşılan sorunlar zamanla deneme-yanılma yöntemi, ya da alanında uzman kişilerin tecrübelerine bağlı görüş ve önerileri ile çözüme kavuşturulabilmektedir. Gelişen teknoloji ile kullanılan depo malzemesinin davranışı, karakteristik özelliklerinin anlaşılması bu sorunları ortadan kaldırabilir. Tercih edilen akış türü, bu sorunların olma ihtimalini önemli ölçüde değiştirir. Silolarda kütle akışı ve huni akışı olmak üzere iki tip akış tarzı bulunmaktadır (Özel, 2007).

### 3.10.1. Kütle akışı

Bu akış türünde silo içerisinde depolanan ürünler, boşaltım esnasında hep birlikte hareket eder. Hareket tek bir kütle olarak sağlanır. Bu durumun sağlanması için Şekil 3.11’de verilen keskin geçiş bölgelerinin oluşmadığı ve silo hunisinin yeteri kadar dik olduğu durumlarda oluşur. Kütle akışı özellikleri aşağıda sunulmuştur.

- Depolama alanına ilk gelen, depolama alanından ilk gider (first in-first out),
- Ayrışma minimum düzeyde olur,
- Silo boşaltma hızının yavaş olmasıyla, sabit bir akış ile kontrol edilebilir,
- Silo içinde depolanan ürünlerde oluşması muhtemel bozulma, çürüme, cidarlara yapışma gibi durumlar az görülür,
- Bazı malzemelerde aşınma etkisi silolara zarar verebilir. Ancak akışın yavaş olması herhangi bir sorun oluşturmaz.



Şekil 3.11 Silo içi malzemelerin kütle akışı şekli (Özel, 2007)

### 3.10.1.1. Kütle akışı tasarımı

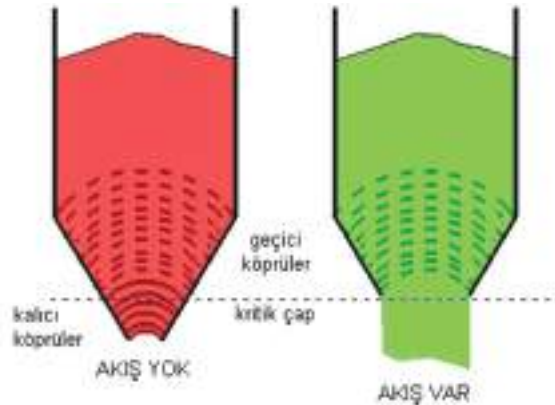
Kütle akışı oluşması için, huni tasarım yöntemi aşağıda sunulduğu şekilde olmalıdır:

1. Depolanacak malzemenin içsel sürtünme açısı ölçülür,
2. Silo duvarı ile depolanacak malzeme arasındaki sürtünme katsayısı ölçülür,
3. Belirlenen bu bilgilere göre, doğru huni tipine karar verilir ve çizelgelere bakılarak kütle akışı açısı bulunur.

Üçüncü madde sonunda pratik bir çözüm bulunamazsa; kaplama, yüzey astarlama ya da düşük sürtünme katsayısı olan değişik bir malzeme seçilerek çözüme devam edilebilir (Özel, 2007).

### 3.10.1.2. Akış köprüsü

Silo içerisinde malzemeler üst üste depolanır. Bu sebeple bir üstteki malzeme alttaki malzemeyi sıkıştırır. Alttaki malzeme basınç altında kalır. Malzemeler kendi cazibesi ile hareket edip serbest olarak akabilir. Bu durumda akış köprüsü oluşmaz. Ancak çoğu malzeme kohezyonlu olduğu için taneler birbirine yapışır ve serbest olarak akmaz. Depolanan ürünlerin akışını sağlamak için huni çapı ve derinliği önemlidir. Şekilde gösterildiği gibi kritik çap malzeme akışını oluşup oluşmamasında belirleyici olmaktadır.



Şekil 3.12 Akış köprüsü ve kritik çap (Özel, 2007)

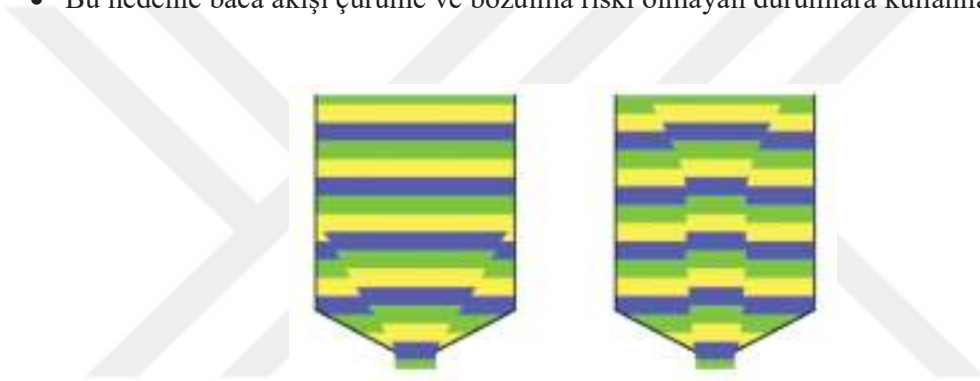
### 3.10.2. Baca akışı

Baca akışı türünde, depolanan malzeme, silo geometrisine göre kesitin merkez bölgesinden akışa geçer ve kenar kısımlarında kullanılmayan alanlar meydana getirir. Silo duvar açısı dikkate alındığında huni akış siloları geometrik tasarım bakımından kütle

akışı silolarına kıyasla yassı ve kısa olmaktadır. Bu durumda silo içinde oluşan ve kullanılmayan ölü bölgeler depolanan malzeme yüzeyine kadar devam edebilir (Çağlı, 2005; Özel, 2007; Öztürk ve ark. 2008).

Baca akışı türüne özgü özellikler şöyledir;

- Depolama alanına ilk gelen, depolama alanından en son gider (first in-last out),
- Akış hızı düzenli olmaz,
- Silo içerisine yeni malzeme depolanması, mevcut malzemelerin çürümesine ve bozulmasına neden olur,
- Hareketsiz bölgeler oluşur. Bu bölgelerin ani olarak yıkılması dinamik kuvvetler oluşmasına neden olur,
- Bu nedenle baca akışı çürüme ve bozulma riski olmayan durumlara kullanılabilir.



Şekil 3.13 Silo içi malzemelerin bir kısmının hareket halinde olduğu baca akışı düzeni (Özel, 2007)

Çizelge 3.1 Silolarda kütle ve huni akışın avantaj ve dezavantajları

Kütle Akış	Baca akışı
❖ Olumlu	❖ Olumlu
<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Akış nispeten düzenli ve düzgündür,</li> <li>○ Radyal ayrışım azdır,</li> <li>○ Silo duvar basınçları varsayılabılır,</li> <li>○ Silo geometrisine göre kesit alanı verimli olarak kullanılır,</li> <li>○ İlk giren ilk çıkar,</li> <li>○ Ölü bölgeler yoktur.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Silo duvarların üzerinde aşınma fazla olmadığından kullanım ömrü uzundur,</li> <li>○ Silo duvarlarına yakın kısımlarda malzeme hızları düşük olduğundan malzemelerin yıpranması ve duvar aşınması azdır,</li> <li>○ Hizmet verebilme süresince farklı malzemeleri depolamada kullanılabilir.</li> </ul>
❖ Olumsuz	❖ Olumsuz
<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Silo duvar üzerinde aşınma fazladır,</li> <li>○ Akış olduğu durumlarda silo duvarlarında büyük gerilmeler meydana gelir,</li> <li>○ Malzeme türüne veya aynı grup malzemelere mahsus olması maliyeti arttırmaktadır.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Malzeme akış sırasında ayrışım olur,</li> <li>○ Ölü bölgeler vardır,</li> <li>○ İlk giren son çıkar akış sisteminin malzeme kalitesi üzerine olumsuz etkisi olabilir,</li> <li>○ Silo duvarlarındaki düzensiz dağılımı patlamalara neden olabilir,</li> <li>○ Kemerleşme, kanallanma ve köprülenme olasıdır.</li> </ul>

Silolarda kütle akışı ve baca akışı türüne göre olumlu ve olumsuz yönler Çizelge 3.1’de verilmiştir. Çizelge 3.1’de madde madde verilen olumlu ve olumsuz yönler, silo akış türlerinin kapsamlı özelliklerini göstermektedir (Çağlı, 2005; Chase, 2006).

### 3.11. Akışkanlığa Tesir Eden Değişkenler ve Akışı Etkileyen Parametreler

Parçalı malzemelerin akışkan olma durumları önemlidir. Akış davranışı depo alanlarında farklı biçimlerde olabilmektedir. Fiziksel nitelikler de akışı etkilemektedir. Akışkan olmayı sağlayan birçok husus bulunmaktadır. Ortam etkisi, malzemenin işlemden geçmesi ve depolamayı sağlayan çeşitli makinelerin davranışları akışkanlığı etkiler. (Prescott, 2000). Bu etmenler de dikkate alındığında malzemenin akışkan yapısının tek bir bağımsız değişkene bağlı olmadığı ifade edilebilir. Akışkanlığa tesir eden değişkenlere; parçalı malzemenin nem muhtevası, bağıl nem, termal durumu, basınç, yağ durumu, parça yapısı örnek verilebilir.

**Nem Muhtevası:** Silolarda malzeme stoğu yapılırken nem durumu dikkat edilmesi gereken özelliklerdendir. Silo içinde mikropların sebep olduğu değişimler tüm yapıyı etkiler. Parçalı malzemelerin tabiatta nem çekme özelliğinde olmaları, bu malzemelerin bağıl nemle etkileşime girmeleri ile nem seviyeleri artar ya da azalır. Parçalı malzemelerde nem muhtevası yükseldiğinde adezyon (Craik, 1958) ve kohezyon (Moreyra, 1981) da yükselerek malzeme de kemerleşme meydana getirir. Nem muhtevası malzemenin karakteristik değerlerini, en önemlisi de sürtünme özelliklerini değiştirmektedir.

**Bağıl Nem:** Silolarda depolanan malzemelerin fiziksel özellikleri bağıl neme tesir etmektedir. Parçalı malzemelerin nem çekme özelliği, bağıl nem ilişkisi parçaların nem muhtevalarını yükselten faktörlerdendir. Nem muhtevası bu durumlarda artarak parça dayanımları ile kayma açısını artırır (Kibar, 2011). Kayma açısının artması, malzeme akışkan yapısını etkileyerek akışkanlığı azaltmaktadır. Nem durumunu konu alan çalışmalar, yüksek bağıl nemin parçalı malzemelerde kohezyonu ve akışkanlık yapısını etkilediğini açıklamıştır (Craik, 1958; Fitzpatrick, 2004).

**Termal Durum:** Parçalı malzemelerin akışkan yapısı termal etkiler üzerinde büyük tesirler oluşturmaktadır. Termal durumlardan kaynaklı malzemelerin içinde ve yüzeyinde mevcut olan nemi donabilmektedir. İlaveten silo iç ve dış kısımlarında depolaması yapılan malzemeler ile silo duvarları arasındaki sürtünme açıları termal faktörlere bağlı değişim gösterir (Kibar, 2011).

**Basınç:** Basınç parametresi, parçalı malzemelerin akışkan yapısını oldukça etkiler. Parçaların akışında ya da doldurma durumunda meydana gelen titreşimler, silolarda sıkışmaya neden olur. Basıncın yükselmesine bağlı akışkanlığın değişimi iki çeşit olmaktadır (Kibar, 2011):

- Parçaların kenetlenmesi, kendi aralarında adezyonun artmasına sebep olur.
- Hassas kemerleşme seviyelerinde önemli birikmeler, sıkışmada büyük artmalara sebep olur.

**Yağ Durumu:** Silolarda depolanan malzemelerin akışkan yapısı ile yağ durumu arasındaki ilişki, pek fazla araştırma konusu olmamıştır. Bu sebeple bu parametre daha çok tecrübe ve deneme yanılma yoluyla ilişkilendirilir. Yağ durumunun, malzemenin akışkan yapısının büyük oranda değiştirdiği düşünülmektedir (Ganesan, 2008).

**Parça Yapısı:** Parça yapısı ve şekli akışkanlığı etkileyen faktörlerdendir. Malzemenin karakteristik parametrelerinden birim hacim ağırlığı, içsel sürtünme açısı ve sıkışma durumu parça yapısına bağlı değişim göstermektedir (Fitzpatrick, 2004).

### 3.12. Silolarda Yapılan Hatalar

Genel olarak siloların tasarımında yapılan hatalar, endüstriyel yapılarda yapılanlara oranla daha çoktur. Bu hatalar, silo tasarımına bağlı da olmayabilir. Çoğu hata, silonun çökmesine neden olarak depolanan malzemenin kullanılamaz hale gelmesine sebep olur. Depolama sürecinde betonarme duvarlarda çatlakların görülmesi, veya çelik duvarlarda deformasyonların oluşması ile karşılaşmaktadır. Çatlak, çentik ve deformasyonlar kimi zaman fark edilemeyen, ihmal edilebilir boyutlarda ve yerlerde olabilmektedir. Ama zamanla, en küçük bir hata onarılmadığı takdirde geri dönüşü olmayan bir çöküş sürecini başlatabilir. Bu yüzden sorunların zaman içinde düzeltilmesi elzemdir. Sadece yapılan silo tasarımına bağlı oluşan çökmelerde tasarımcıya, işveren, çalışan ve mevcut durumdan etkilenen tüm kişilere bağlı hukuki ve ekonomik yaptırımlar vardır. Hukuki açıdan tasarımcı, imalatçı ve işveren arasında karşılıklı büyük sorumluluklar vardır (Carson, 2008; Özel, 2007).

Silolarda ortaya çıkan hatalar gözlemlendiğinde 4 başlık altında değerlendirme yapılabilmektedir. Bunlar:

1. Tasarım/Projelendirme
2. Yapım
3. Kullanım
4. Bakım

şeklinde sıralanmaktadır.

### 3.12.1. Tasarım/Projelendirme hataları

Silolar hassas ve karmaşık bir yapıya sahip oldukları için tasarım yapılırken proje mühendisinin eğitim ve tecrübesi önem arz etmektedir. Sadece tasarım konusunda değil, uygulama ve montaj konusunda da bilgi sahibi olunmalıdır. Çünkü, tasarımın imal edilebilirliği ve montaj durumu siloların hizmet verilebilirliğini önemli ölçüde etkiler. İlk başta depolanacak ürünün akış özellikleri bilinmelidir. Akış özelliği dışında akışın geometrik şekli, statik ve dinamik durumlara göre silolarda oluşan basınç durumları, kanallanma ve kemerleşme oluşumu, siloda oluşabilecek titreşimler ve dinamik tesirler hakkında belirli bir bilgi ve tecrübeye sahip olmak gerekir. Doğrusal olmayan tesirler, termal tesirler, depremsel tesirler ve malzemelerin işlenmesi aşamalarında karşılaşılan sorunlara karşı dikkatli olunmalıdır. (Blight, 1985; 1987; 1990a; 1990b; 1992a).

Tasarımcıdan yapılması istenilen siloya her türlü etkileri göz önünde alacak bir analiz yapabilmesi istenmektedir. Bu başlıca, statik ve dinamik yüklemelerin hesaplanıp kombine edilmesiyle silonun analiz edilmesidir. (Carson, John W., Jenkyn, R.T., 1993). Tasarım aşamasında çokça karşılaşılan ve dikkat edilmesi gereken parametreler maddeler halinde sunulmuştur.

- Simetrik olmayan boşaltma ile oluşan ek basınçlar,
- Silo içerisindeki karmaşıklıklara bağlı meydana gelen ani ve simetrik olmayan basınçlar,
- Akış çeşitleri ve malzeme yapısının dikkate alınmaması,
- Çelik silolarda bulon kullanılan bağlantılar ve betonarme siloların özel durumları
- Termal durum ve nem muhtevası,
- Yük tesirleri hesabı (Carson ve Jenkyn, 1993; Özel, 2007).

### 3.12.2. Yapım hataları

Silo tasarımı projelendirilirken silonun imalatı ve montajı esnasında yapılan yapım hataları ile sürekli karşılaşmaktadır. Yapım hatalarında işçiliğin istenildiği düzeyde olmaması, hatalı ve ucuz ürün seçimi, betonarme silolarda projeye uygun adette donatının yerleştirilmemesi, temelde oluşan oturmalar, planlanan imalat ve montaj süresinin öne çekilmek istenmesiyle, yoğun çalışma şartlarına bağlı dikkatsizliklerden kaynaklı hatalar, silo dikey duvarından huniye geçiş kısmında burkulmaların oluşması,

silo dikey duvarlarında burkulmaların olması yapım hatalarındandır. (Zhao, 2001; Carson, 2008; Rotter, 2001; 2009).

### **3.12.3. Kullanım hataları**

Dikkatli ve bilinçli bir şekilde tasarlanan ve tasarıma göre imal edilen siloların kurallara uygun bir şekilde montajı tamamlanırsa, bunların uzun yıllar hizmet vermesi beklenir. Ancak bu her zaman mümkün olmamaktadır. Burada unutulmaması gereken bir husus da kullanım şeklidir. Silo içerisinde depolanan malzemenin zamanla akış özellikleri değişebilmekte, aşınma ile silo cidarına hasar verebilmektedir. Tasarıma uygun olmayan malzeme kullanılmasının da silo yapısını olumsuz olarak etkileyeceği düşünülmektedir.

Silo içine depolanan malzeme ile tasarım sırasında dikkate alınan malzemenin aynı olmaması, silonun tüm yapısını, yükleri ve akış durumlarını değiştirir. Huni kısmı için verilen çıkış eğimi ve geometrisi projeden farklı imal edilirse bu hem akışı hem de yük durumunu değiştirir. Yapılacak her türlü revizyon için onay alınmalıdır. (Carson, 2000).

### **3.12.4. Bakım hataları**

Siloların periyodik kontrolleri uzman kişilerce ya da silo mülkiyetine sahip kişilerce yapılabilir. Silo periyodik kontrollerinde başlıca iki önemli kontrol aşaması vardır. Bunlardan ilki silo duvarlarında oluşabilecek farklılıkların incelenmesi ve ihtiyaç halinde onarımının yapılması, silo iç kısmında yapılan özel boyama işleminin durumunun kontrol edilerek gerektiği durumlarda boya onarımının yapılması, çatı taşıyıcı yapısının kontrolü, doldurma-boşaltma işlemi yapan makinelerin periyodik kontrollerinin yapılması gibi aşamaları kapsar. İkinci kontrol aşamasında ise oluşan deplasmanlar dikkate alınır ve gerilmeler gözlemlenir. Silonun iç ve dış yapısında herhangi bir çentik veya çatlak bulunup bulunmaması incelenerek ilgili kişilere raporla sunulur (Kibar, 2011).

## 4. ÇELİK SİLO YAPIM ESASLARI

Çelik siloların yapım esasları için “EN 1991-4 Eurocode 1: Yapıların Projelendirme ve Etki Esasları, Bölüm: 4 Silo ve Hazne Etkileri” esas alınacaktır. Araştırmanın içeriğine bağlı olarak bu tarz silolar için inceleme yapılacaktır.

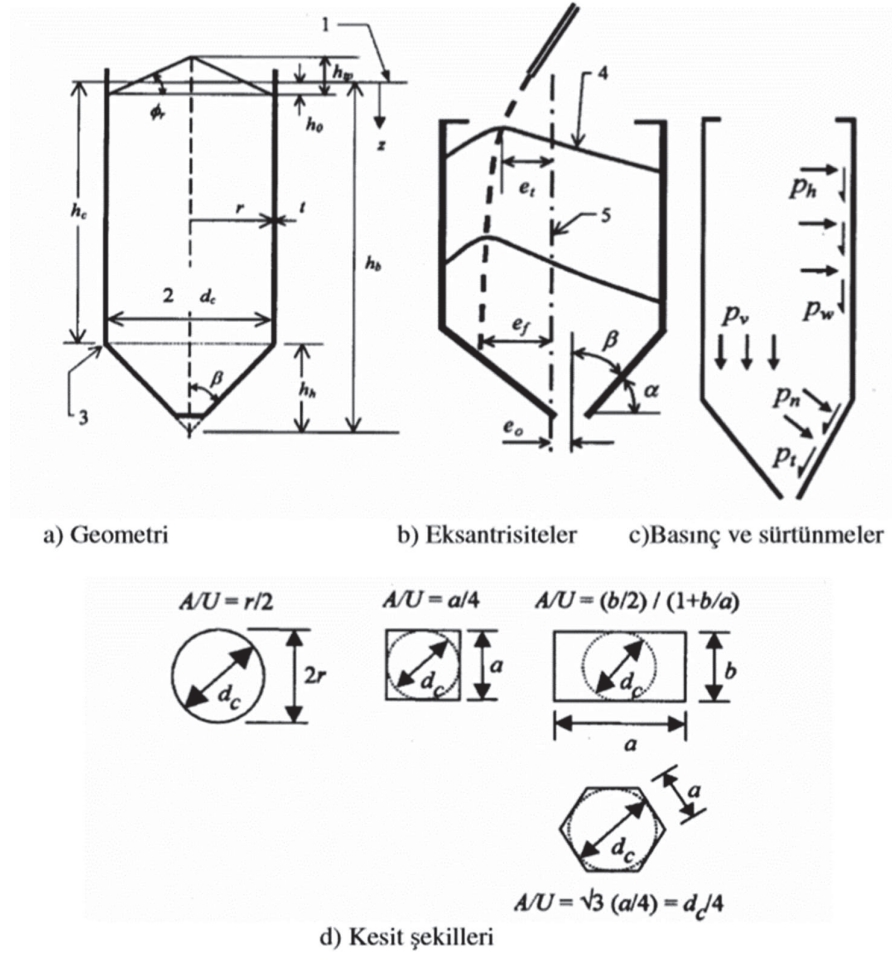
### 4.1. Kapsam ve Sınırlamalar

“EN 1991-4 Eurocode 1: Actions on structures-Part 4: Silos and tanks” yönetmeliğinde bulunan sınırlamalara göre belirlenen silo tasarımına uygun olanlar değerlendirmeleri ile birlikte sunulacaktır.

Silo geometrisi daire, kare, dikdörtgen ve düzgün çokgen olarak seçilebildiği gibi bu geometrilerde belli başlı revizeler yapılarak da yüklerin hesaplanması ve aktarımı yapılabilmektedir.

Huni ucu ile eşdeğer yüzey arasındaki yükseklik,  $h_b$  ve silo kesiti iç karakteristik boyutu,  $d_c$ , (Şekil 4.1a) olmak üzere aşağıdaki şartlar sağlanmalıdır;

- ✓  $h_b/d_c < 10$
- ✓  $h_b < 100$  m
- ✓  $d_c < 60$  m
- ✓ Silo huni kısmındaki hayali geçiş düzlemi yatay bir düzlemde devam etmelidir.
- ✓ Silo iç kısmında payanda, kiriş, karışım tüpleri gibi başka bir yapı olmadan tasarlanmalıdır.
- ✓ Mevcut siloların tasarımı, belirli değerlerdeki depo malzemesi özelliklerine göre yapılmalıdır.
- ✓ Depolanacak malzeme, mevcut cazibesi ile hareket haline geçebilmelidir.
- ✓ Silo içinde depolanacak ürünün tane çapları  $0,03d_c$  değerinden fazla olmayacak şekilde tasarlanmalıdır.
- ✓ Depolanacak ürünü doldurulurken oluşması muhtemel darbe yükü dikkate alınmalıdır. Bu değerler ihmal edilebilir seviyelerde olmalıdır.
- ✓ Boşaltma araçlarının kullanıldığı hallerde malzemenin düzgün ve merkezi bir şekilde akışlarının sağlanması gerekir.



Şekil 4.1 Silo kesitlerinin tasarımında kullanılan parametre ve ifadeler (EN 1991-4, Şekil 1.1)

Şekil 4.1’de gösterilen rakamların açıklamaları kısaca şöyledir:

1. Ortalama doldurma düzlemi (eşdeğer yüzey)
2. İç ölçü
3. Geçiş
4. Dolu durum için yüzey profili
5. Silo ekseni

#### 4.2. Silolarda Tanımlar

Silolara ait bilinmesi gereken belli başlı terimler işleyişin daha iyi kavranabilmesi için aşağıda sunulmuştur.

**Kohezyon:** Silolanan katının yıkım eksenindeki normal gerilmenin sıfır olduğu durumdaki kesme mukavemetidir (Yaldıran, 2018).

**Silindir silo çapı:** Silindir silonun iç çapı.

Eksantrik doldurma: Malzemenin silo içerisine dolumu yapılırken malzemenin üst yığınının tepe noktasının silo merkez çizgisiyle çakışmaması hali.

Ortalama doldurma düzlemi (eşdeğer yüzey): Siloda depolanan malzemenin üst yığın ortalaması ile aynı hacmi veren hayali düzlem.

Akış şekli: Silo içinde depolanan malzemenin tamamen dolu halindeki akış şeklini ifade eder.

Baca akışı: Huni ağzı üzerinde kanal şeklinde akan taneli malzemenin oluşturduğu formun adıdır. Akış kanalının huninin dik duvarlı bölümüyle kesişmesi sonucunda oluşan akışa karma akış, taneli malzemenin üstüne kadar çıkmasına da boru akışı denir (Özel,2007).

Kütle akışı: Depolanan malzemenin boşaltılması sırasında tüm malzemenin birlikte yer değiştirmesidir.

Tam dolu durum: Silonun hizmet verebilirlik süresince silonun mevcut tüm hacminin kullanılmasıdır.

Huni: Koni biçiminde eğimli duvarı olan silo alt kısmı.

Küçük eğimli huni: Nispeten yüksekliği az olan silonun malzeme dolumu sonrası duvar sürtünmesini yenemediği huni.

Narin silo:  $h_c/d_c \geq 2.0$  şartı sağlayan silo tarzı.

Küçük eğimli silo:  $0.4 < h_c/d_c < 1.0$  şartını sağlayan silo tarzı. Veya  $h_c/d_c < 0.4$  şartı sağlanıyor ve huni varsa küçük eğimli; yoksa düz tabanlı silodur.

Ek yük: Dikey silo duvarının belirli bir bölgesine etkileyen lokal yük.

İnce duvarlı dairesel silo: Çap/duvar kalınlığı oranı ( $d_c/t$ ) 200'den büyük olan dairesel silo.

Çekme: Sırasıyla silo dikey duvarı ve huni duvarına paralel olarak birim alana etkileyen dikey ve eğimli kuvvet.

Basınç: Dikey veya eğimli silo duvarında birim alana etkileyen kuvvet.

### 4.3. Silolardaki Yük Tesirleri

Temel kabuller şöyledir:

- Silolara etki eden yükler silonun geometrisine, saklanacak ürünün karakteristik malzeme değerlerine ve doldurma/boşaltma tipine bağlıdır.
- Depolanacak malzeme doldurulurken ve boşaltılırken giriş-çıkış eksenini, silo geometrisi ile çakışmalıdır. Aksi halde eksantrisite oluşacaktır. Bu durum da ek yükler dikkate alınacaktır.

- Siloya depolanacak ürünün doldurulmasında ve boşaltılmasında meydana gelecek yükler dikey silo duvarına tesir eden simetrik yük, minimal eksantrisitelerden dolayı oluşan yükler, ek yük olarak gösterilecektir. Silo yapısında eksantrisine değeri fazla olması farklı basınç dağılımları oluşturacaktır..

Siloya tesir eden yükler :

- dikey silo duvarına etkiyen yatay basınç,  $p_h$
- eğimli huni duvarına etkiyen normal basınç,  $p_n$
- dikey huni duvarına etkiyen teğet sürtünme kuvveti (çekmesi),  $p_w$  ve  $p_t$
- eğimli huni duvarına etkiyen teğet sürtünme kuvveti (çekmesi),  $p_t$
- silolanan malzemeye etkiyen dikey basınç,  $p_v$

olarak ifade edilecektir.

Doldurma ve boşaltmadaki minimal eksantrisitelerden dolayı meydana gelecek simetrik olmayan tesirler, dikey silo iç duvarına tesir eden lokal ek yük olarak gösterilecek ve silo iç yüzeyine tesir eden yatay basınç  $p_h$  ve duvar sürtünmesi  $p_w$  cinsinden ifade edilecektir.

Doldurma ve/veya boşaltmadaki makro eksantrisitelerden dolayı meydana gelecek simetrik olmayan tesirler silo hunisine tesiri simetrik olmayan yatay basınç  $p_n$  ve duvar sürtünmesi  $p_t$  cinsinden ifade edilecektir.

Muhtemel olumsuz ek yükler göz önünde bulundurulacaksa duvar yük artırma katsayısı C kullanılarak tesir yükleri artırılabilir.

Çizelge 4.1'de gösterilen etki değerlendirme sınıfları 2 ve 3 olan silolarda C katsayısı sadece boşaltmadan dolayı oluşan olumsuz ek yükler için kullanılır. Etki değerlendirme sınıfı 2 olan silolarda asimetrik ek yükler hesaplanacaksa simetrik yüklerin artırılması da bulunabilir.

EDS-1 olan silolarda, C katsayısı hem boşaltmadan dolayı oluşan olumsuz ek yükler için hem de depolanan malzemenin özelliklerindeki değişikliklerin dikkate alınması adına yapılır. Simetrik etkilerin C katsayısıyla büyütülmesi şeklinde uygulamada dikkate alınır (Özel, 2007).

#### 4.4. Silolardaki Tesirlerin Sınıflandırılması

Güncel sınıflandırma En 1991-4:2006 deki açıklamalar esas alınarak Çizelge 4.1'de gösterimi yapılmıştır. Etki değerlendirme sınıfları (EDS) çizelge 4.1'de gösterilen

kriterlere bağılı olarak farklı silo yapılarının eşit riskleri kapsayacak formda tasarlanması ve göçme riskini azaltan ilgili yöntemlerin tanımlanmasını sağlamaktadır. Buna ek olarak tanımlanan sınıflandırmadan farklı olarak özel durumlar için yüksek güvenlik düzeyi oluşturmak amacıyla başka sınıflandırmaların yapılması ve gereken durumlarda kullanılacak şekilde oluşturulması mümkündür.

Temel kabuller:

- Siloda depolanacak malzemenin tesiriyle oluşan yükleri sınıflandırırken, değişken etki olarak sınıflandırması yapılır.
- Silolara tesir edecek simetrik yüklerin sınıflandırması değişken sabit etki olarak yapılır.
- Silolarda belirlenen ürünün dolumu ve boşaltımı esnasında ortaya çıkan ek yüklerin sınıflandırılması değişken serbest etki olarak yapılır.
- Silolarda belirlenen ürünün dolumu ve boşaltımı esnasında ortaya çıkan eksantrik yüklerin sınıflandırılması değişken sabit etki olarak yapılır.
- Basitleştirilmiş taşıma sistemlerinde karşılaşılan gaz basıncı sınıflandırılması değişken sabit etki olarak yapılır.

Etki değerlendirme sınıfı 1 (EDS-1) olan siloların analizi için basitleştirilmiş hesap yöntemleri kullanılabilir.

Çizelge 4.1 Etki değerlendirme sınıfları (EDS) (TS EN 1991-4, Çizelge 2.1)

Etki değerlendirme sınıfı	Tanım
Etki Değerlendirme Sınıfı 3	10000 tondan fazla kapasiteli silolar Aşağıdaki tasarım durumlarının herhangi birinin meydana geldiği 1000 tondan fazla kapasiteli silolar: a) $e_1/d_1 > 0,25$ olan dış merkezli boşaltma (Şekil 1.1b'ye bakılmalıdır) b) Üst yüzey dış merkezliği $e_1/d_1 > 0,25$ olan alçak silolar
Etki Değerlendirme Sınıfı 2	Bu standart kapsamında olan ve bir başka sınıfta yer almayan tüm silolar
Etki Değerlendirme Sınıfı 1	100 tonun altında kapasiteli silolar

#### 4.5. Tasarım Esasları

Silo tasarım aşamaları aşağıda sunulan maddelere göre yapılabilmektedir.

1. Siloda depolanacak ürünlerin mukavemet ve akış özellikleri tayin edilmelidir.

2. Tayin edilen tüm kritik yükler için yük kombinasyonları değerlendirilmelidir. Tahmini silo kapasitesine göre yaklaşık olarak silo boyutları belirlenmelidir.
3. Silolarda depolanması planlanan ürünün özelliklerine bağlı olarak, siloda oluşturması muhtemel kuvvetler hesaplanmalıdır. Diğer kar, rüzgar ve termal tesirler göz önünde bulundurulmalı ve oluşturacağı yükler hesaplanmalıdır.

Öncelikli olarak mevcut depolama kapasitesine bağlı olarak silonun yapılacağı arazinin temel, kar, rüzgar, sıcaklık vb. birçok parametre durumları belirlenmelidir. Geometrik şekline ve boyutlarına karar verilen silo, sonlu eleman analiz programlarında değerlendirilir ve uygun görüldüğü takdirde üretim aşamasına geçilir.

#### 4.5.1. Siloda depolanacak ürünlerin oluşturduğu etkiler

Temel esaslar şöyle verilmiştir:

1. Siloda depolanan ürünün oluşturduğu yükleri hesaplarken “dolu durum” esas alınır.
2. Siloya ürünün dolun ve boşaltımında oluşan yükler taşıma gücü kullanılabilirlik sınır durumuna göre tayin edilmelidir.

Dolum ve boşaltımda başlıca yükler yapı için farklı sınır durumlarına göre belirlenmelidir:

- Dikey silo duvarındaki maksimum basınç
- Dikey silo duvarındaki maksimum sürtünme çekmesi
- Silo tabanındaki maksimum dikey basınç
- Hunideki maksimum yük

Yapılacak tüm yükleme durumlarında, malzeme birim hacim ağırlığının  $\gamma$  üst karakteristik değeri seçilerek hesaplama yapılmalıdır.

Yüklerin her biri, sadece bir siloda depolanan katı malzemeye tekâbül edecek şekilde, birbiriyle uyumlu malzeme değerleri seçilerek ( $\mu$ ,  $K$ ,  $\varphi_i$ ) her bir sınır durum sadece siloda depolanan katı malzemeye karşılık gelecek şekilde hesaplama yapılmalıdır.

Çizelge 4.2 ve 4.3’de sırasıyla dikey silo duvarı ve huni için siloda depolanan malzeme yüklerinin bulunmasında, kritik ve maksimum etki oluşturacak karakteristik değer takımları ifade edilmiştir.

**Çizelge 4.2** Dikey silo duvar yük hesabında kullanılacak malzeme karakteristik değerleri (TS EN 1991-4, Çizelge 3.1)

Hedef:	Seçilecek karakteristik değer		
	Duvar sürtünme katsayısı ( $\mu$ )	Yanal basınç oranı (K)	İçsel sürtünme açısı ( $\phi$ )
<b>Düsey duvar veya varil için</b>			
Düsey duvar üzerindeki en büyük normal basınç	Alt	Üst	Alt
Düsey duvar üzerindeki sürtünme yoluyla oluşan en büyük çekme kuvveti	Üst	Üst	Alt
Huni veya silo tabanı üzerindeki en büyük düşey yük	Alt	Alt	Üst

**Çizelge 4.3** Huni duvar yük hesabında kullanılacak malzeme karakteristik değerleri (TS EN 1991-4, Çizelge 3.1)

Hedef:	Duvar sürtünme katsayısı ( $\mu$ )	Yanal basınç oranı (K)	İçsel sürtünme açısı ( $\phi$ )
<b>Huni duvarı için</b>			
Doldurma için en büyük huni basınçları	Huni için alt değer	Alt	Alt
Boşaltma için en büyük huni basınçları	Huni için alt değer	Üst	Üst

Silonun huni kısmında normal basınç tesirlerine bakıldığında, çoğunlukla sürtünmenin alt karakteristik değeri seçildiğinde en büyük etki bulunmuş olur.

EDS-1 olan silolar için yapılacak hesaplarda, sadece ortalama değerler olan  $\mu_m$ ,  $K_m$ ,  $\phi_{im}$  kullanması yeterli olacaktır.

Tasarımı yapılan silonun bütün sınır durumlarına karşı yapısal olarak dayanıklı olması gerektiği gözardı edilmeyecektir.

#### 4.5.2. Silolarda depolanan ürün özelliklerine bağlı etkiler

Temel esaslar şöyle verilmiştir:

Yük tesirleri aşağıdaki maddelere bağlı olarak hesaplanmalıdır.

1. Siloda depolanacak ürüne bağlı olarak malzemenin alt ve üst karakteristik değerleri hesaplanmalıdır.
2. Silo içinde duvar sürtünme karakteristik değeri kullanılan malzemeye göre seçilmelidir.
3. Silonun geometrik ölçüleri belirlenmelidir.
4. Siloda depolanan malzemenin doldurulma ve boşaltılma durumları dikkate alınmalıdır.

Yukarıdaki esaslara bağılı yapılacak analizler dışında silonun kullanımı esnasında çıkabilecek muhtemel deformasyonların oluşturacağı yükler ihmal edilebilmektedir.

Genel kurallar:

1. rn zellikleri daha önce yapılmış deneylere göre oluşturulan çizelgelerden alınabilir.
2. Her türlü durum için yüklerin hesaplanmasında, silo imalatında kullanılan ve depolanan malzeme özellikleri dikkatli bir şekilde değerlendirilmelidir. Bu kısımda aşağıda verilen maddeler de incelenmelidir.
  - ✓ Test yapıldıktan sonra malzeme özellikleri belirlenir. Ancak test yapılırken sabit durumlar değerlendirilir. Silo içinde ise düşünülmeyen, ihmal edilen birçok veri olduğu için bu değerler değişkenlik gösterebilir.
  - ✓ Zamanla oluşan varyasyonlar
  - ✓ Silo içinde mevcut nem durumu
  - ✓ Siloya etkiyen dinamik tesirler
  - ✓ Test numunesinin kalitesi
  - ✓ Test aparatına ve siloya ürünün koyulma tarzı
3. Silo duvar sürtünmesine tesir edecek faktörler de aşağıda belirtildiği gibi olabilmektedir.
  - rn tanecikleri ile silo duvarı ve nem etkisine bağlı meydana gelebilecek korozyon veya kimyasal reaksiyon
  - Silo duvar sürtünmesini etkileyen aşınma ve sürtünme durumları
  - Silo duvarın parlatılması, cilalanması
4. Malzeme zelliklerinin deneysel tespiti sırasında, test edilen numunenin siloda depolanacak malzeme özelliklerini birebir yansıtacak şekilde olması, test yöntemi, yöntemin güvenilirliği, deneyin diğer test sonuçlarıyla korelasyonu ve silonun hizmet verebileceği süre zarfında depolanabilecek malzemelere ilişkin değerlerin kesin olarak bilinmesi ve değerlendirilmesi gerekmektedir.
5. Silonun bölümlerine ve yük durumuna göre yapılacak hesaplamalarda, alt ve st karakteristik değerleri; laboratuvar deneyleri ile deneyim kriterlerini birlikte dşnerek elde edilen muteber değerler kullanılmalıdır.

6. Silo tasarımında kullanılacak malzeme özelliklerine bağlı değerler kullanılırken üretim yöntemi, parça büyüklüğü, nem oranı gibi etkenler dikkate alınmalıdır.

Ortalama değerlere bağlı olarak alt ve üst karakteristik değerlerin nasıl hesaplanacağı, denklem 4.1-4.6.'da verilen "a" çevirme faktörlerinin kullanılması ile gösterilmiştir. Tablodan seçilen "a" çevirme faktörünün ortalama değer ile çarpılması ile üst değere, ortalama değer "a" çevirme faktörüne bölünmesi ile alt değere ulaşılabilmektedir.

$$\text{Yanal basınç oranı üst karakteristik değeri, } K_u = a_K K_m \quad (4.1)$$

$$\text{Yanal basınç oranı alt karakteristik değeri, } K_l = K_m / a_K \quad (4.2)$$

$$\text{Duvar sürtünme katsayısı üst karakteristik değeri, } \mu_u = a_\mu \mu_m \quad (4.3)$$

$$\text{Duvar sürtünme katsayısı alt karakteristik değeri, } \mu_l = \mu_m / a_\mu \quad (4.4)$$

$$\text{İç sürtünme açısı üst karakteristik değeri, } \varphi_{iu} = a_\varphi \varphi_{im} \quad (4.5)$$

$$\text{İç sürtünme açısı alt karakteristik değeri, } \varphi_{il} = \varphi_{im} / a_\varphi \quad (4.6)$$

Silo kapasitesine bağlı olarak EDS-1 sınıfına giren siloların yük hesabında basitleştirilmiş yöntemlerin kullanılması adına sadece ortalama değerler seçilerek yükleme değerleri bulunabilir.

#### 4.5.3. Basitleştirilmiş yaklaşım

Bu yöntemle yapılan hesaplamalar da veriler şartnamede mevcut tablolar yardımıyla seçilir, gerekli formüllere empoze edilerek silo bölümüne bağlı oluşacak yükler bulunur.

Bu kapsamda duvar sürtünme sınıflandırılması Çizelge 4.4'te verilmiştir. Bu açıklamalar seçilen malzemeye bağlı olarak silo duvar yapısının içerde depolanacak malzemeyle olan sürtünme ilişkisini yansıtmaktadır.

Çizelge 4.5'deki değerler uygulamada daha çok kullanılan ve karşılaşılan malzemeleri kapsamaktadır. Çizelgenin yetersiz kalması durumunda daha detaylı çizelge EN 1991-4:2006 da bulunabilir.

Çizelge 4.4 Duvar sürtünme sınıflandırması (TS EN 1991-4, Çizelge 4.1)

Kategori	Açıklayıcı başlık	Tipik duvar malzemeleri
D1	"Kaygan" olarak sınıflandırılan düşük sürtünme	Soğuk haddelenmiş paslanmaz çelik Cilalı paslanmaz çelik Düşük sürtünme için tasarlanan kaplamalı yüzey Cilalı alüminyum Ultra yüksek moleküler ağırlıklı polietilen <sup>a</sup>
D2	"Cilalı" olarak sınıflandırılan orta sürtünme	Cilalı hafif karbon çelik (kaynaklı veya dövülmüş yapımlı) İşlenmiş yüzeyli paslanmaz çelik Galvanizli karbon çelik Oksitlenmiş alüminyum Korozyon direnci veya yıpranma payı için tasarlanan kaplamalı yüzey
D3	"Pürüzlü" olarak sınıflandırılan yüksek sürtünme	Şekilsiz beton, yüzeyi çelik ile kaplanan beton veya yıpranmış beton Yaşlanmış (korozyona uğramış) karbon çeliği Yıpranmaya dayanıklı çelik Seramik fayanslar
D4	Düzensiz	Yatay katmanlı duvarlar Yatay dışlara sahip profil kaplama Büyük sapmalara sahip standart olmayan duvarlar

Çizelge 4.5 Malzeme özellikleri (TS EN 1991-4, Ek-4)

Tanecikli katının tipi <sup>4a</sup>	Birim ağırlık <sup>b</sup>		Yığın açısı <sup>c</sup>		İçsel sürtünme açısı <sup>d</sup>		Yanal basınç oranı <sup>e</sup>		Duvar sürtünme katsayısı <sup>f</sup>				İlave yük kat referans faktörü <sup>g</sup>
	$\gamma$	$\gamma_u$	$\phi$	$\phi_m$	$\phi_d$	$K_{0s}$	$\alpha_K$	$\mu$ ( $\mu = \tan \phi_w$ )					
	Ort.	Faktör	Ort.	Faktör	Ort.	Faktör	Duvar tipi D1	Duvar tipi D2	Duvar tipi D3	$\alpha_p$			
Varsayılan malzeme <sup>2</sup>	6,0	22,0	40	36	1,3	0,50	1,50	0,32	0,39	0,50	1,40	1,0	
Agrega	17,0	18,0	36	31	1,18	0,52	1,15	0,39	0,49	0,59	1,12	0,4	
Alümin	10,0	12,0	36	30	1,22	0,54	1,20	0,41	0,46	0,51	1,07	0,5	
Arpa <sup>3</sup>	7,0	8,0	31	28	1,14	0,59	1,11	0,24	0,33	0,48	1,16	0,5	
Çimento	13,0	18,0	36	30	1,22	0,54	1,20	0,41	0,46	0,51	1,07	0,5	
Çimento kırkırı <sup>3</sup>	15,0	18,0	47	40	1,20	0,36	1,31	0,46	0,56	0,62	1,07	0,7	
Kök kömürü	6,5	8,0	36	31	1,15	0,52	1,15	0,49	0,64	0,59	1,12	0,6	
Un <sup>3</sup>	8,5	7,0	45	42	1,08	0,38	1,11	0,24	0,33	0,48	1,16	0,8	
Bölmüş kireç	6,0	8,0	34	27	1,29	0,58	1,20	0,36	0,41	0,51	1,07	0,8	

#### 4.6. Siloların Dikey Duvarlarına Tesir Eden Yükler

Temel esaslar şöyle verilmiştir:

1. Bu kısımda aşağıdaki silo türleri için öngörülen doldurma ve boşaltma yüklerinin karakteristik değerleri kullanılacaktır:

✓ ince silolar;

- ✓ orta narinlik siloları;
  - ✓ küçük eğimli silolar;
  - ✓ istinat siloları;
  - ✓ sürüklenen hava ile katı içeren silolar.
2. Silo dikey duvarlarındaki yükler, aşağıdaki sınıflara göre belirlenen silonun inceliğine göre değerlendirilecektir.
- ✓ Narin silolar,  $h_c/d_c \geq 2,0$
  - ✓ Orta derecede narin silolar  $1,0 < h_c/d_c < 2,0$
  - ✓ Küçük eğimli silolar,  $0,4 < h_c/d_c \leq 1,0$
  - ✓ İstinat siloları, düz tabanlı ve  $h_c/d_c \leq 0,4$  olduğu varsayılır.
3. Havalandırılmalı bir tabana sahip bir silo, narinliği  $h_c/d_c$  'den bağımsız olarak ince bir silo olarak ele alınmalıdır.
4. Dikey duvarlardaki yük, simetrik yük olarak adlandırılan sabit bir yükten ve aynı anda hareket edecek olan düzeltme yükü olarak adlandırılan serbest bir yükten oluşur.
5. Her silo yapısı için EN 1991-4:2006 Bölüm 5.2, 5.3 ve 5.4'teki doldurma ve boşaltma yüklerinin hesaplanması için ayrıntılı kurallar verilmiştir.
6. Özel şartlara sahip silolar için aşağıdaki gibi ek yük durumları dikkate alınmalıdır:
- ✓ Depolanan malzeme ile silo yapısı arasında sıcaklık farklarının gelişebileceği yerlerde bkz. EN 1991-4:2006 bölüm 5.6;
  - ✓ Silonun dikdörtgen bir planı olduğu yerlerde, bkz. EN 1991-4:2006 bölüm 5.7.
7. Doldurma veya boşaltma sırasında büyük eksantrisiteler özel farklı yük durumları tanımlanır. Bunlar simetrik ve düzeltme yükleri ile birlikte dikkate alınmayacaktır, ancak her biri ayrı bir yük durumunu temsil edecektir.
8. İç boru akışının garanti edilebileceği durumlarda (bkz. EN 1991-4:2006 bölüm 3.3 (3)), doldurma yama yükü de dahil olmak üzere, tasarım yalnız doldurma yüklerine dayandırılabilir.

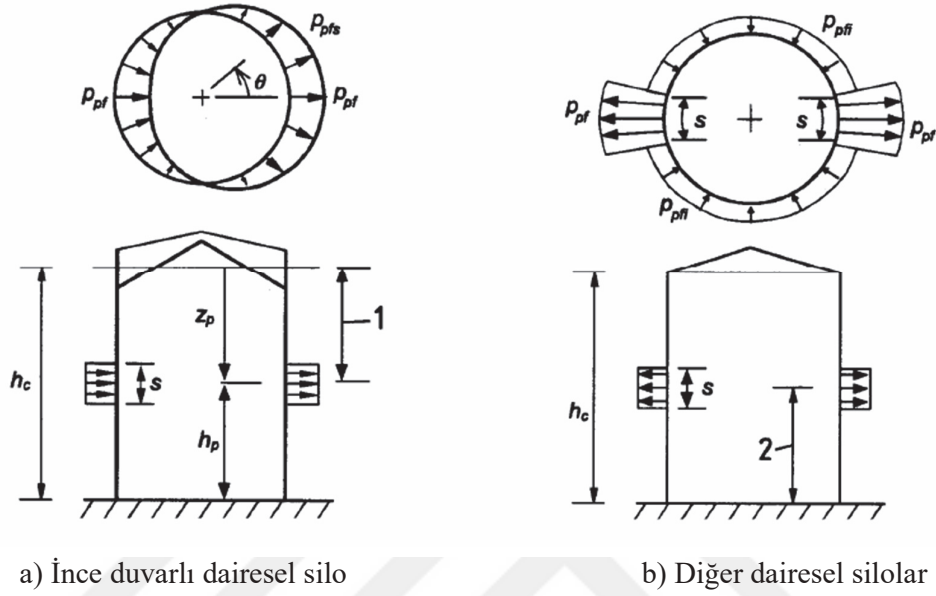
#### 4.6.1. Narin silolar

##### 4.6.1.1. Dikey duvarlardaki dolun yükleri

Dikey duvarlardaki dolun yükleri, simetrik dolun yükü ve doldurma ek yükü olmak üzere iki temel gruba ayrılır.



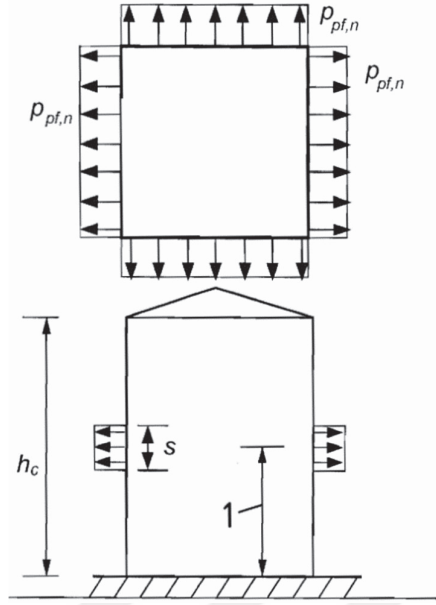
dikkate alınarak, doldurma ek yükü hesabı aşağıda sunulan maddelerdeki formüllere göre yapılmalıdır. EDS-1 olan silolarda doldurma ek yükü hesaplanmayabilir. Doldurma durumunda dışarı yönlü oluşan ek basıncın bulunması için Şekil 4.1'deki maksimum eksantrisite  $e_f$  bulunarak değerlendirilir.



Şekil 4.3 Dairesel silolar: doldurma ek yükü için plan ve kesit görünüşleri (EN 1991-4, Şekil 5.2)

Şekil 4.3 için açıklamalar:

1. EDS 2 olan kaynaklı birleşimli silo:  $z_0$  ve  $h_c/2$ 'den büyük olanı
1. EDS 2 ve 3 olan diğer ince duvarlı silolar: herhangi bir yer
2. Herhangi bir yer



Şekil 4.4 Dairesel olmayan silolar: doldurma ek yükü için plan ve kesit görünüşleri (EN 1991-4:2006, Şekil 5.3)

Şekil 4.4'te 1 yüksekliği herhangi bir yerden alınabilir. Şekil 4.3'deki durumda dairesel silolar dikkate alınarak doldurma ek basıncı referans büyüklüğü:

$$p_{pf} = C_{pf} p_{hf} \quad (4.13)$$

Burada;

$$C_{pf} = 0,21 C_{0p} [1 + 2E^2] (1 - e^{-1,5 \left[ \left( \frac{h_c}{d_c} \right) - 1 \right]}) \quad (4.14)$$

$$E = 2e_f / d_c \quad (4.15)$$

$C_{pf}$  değeri sıfırdan küçük olamaz.

$e_f$ , doldurma esnasında yığın yüzeyinin maksimum eksantrisitesi (Şekil 4.1)

$p_{hf}$ , ek yükün uygulandığı yükseklikteki doldurma basıncının değeri

$e$ ,  $e_f$  ve  $e_o$ 'den büyük olan eksantrisite

$e_f$ , doldurma esnasındaki ekstanrisite

$e_o$ , boşaltma ağzının eksantrisitesi

$C_{0p}$ , ek yük malzeme referans faktörü (Çizelge 4.5)

Ek yükün uygulandığı bölgenin  $s$  yüksekliği (Şekil 4.3):

$$s = \pi d_c / 16 \approx 0,2 d_c \quad (4.16)$$

Ek yük değeri bulunurken sadece normal basınç değeri düzeltilir. Ek yükten dolayı oluşan normal kuvvet sürtünme kuvvetlerini bağlamaz. Diğer silolar için Şekil 4.3'deki durum dikkate alınarak doldurma ek basıncı içeri doğru olan referans büyüklüğü ( $p_{pfi}$ ):

$$p_{pfi} = p_{pf} / 7 \quad (4.17)$$

Ek yükler geometrik olarak daire kesitli silolar için duvar malzemesinin et kalınlığına göre (betonarme ya da çelik) ve dairesel olmayan silolar için farklı yöntemler kullanılarak hesaplama yapılır. Burada yalnızca ince duvarlı dairesel silolar için ek yükün bulunması üzerinde durulacaktır. Diğer silolarla detaylı bilgiler Eurocode 1, Bölüm:4'de sunulmuştur.

İnce duvarlı silolarda ( $d_c/t > 200$ ) doldurma ek yükü: Şekil 4.3a'da görüldüğü üzere doldurma ek yükü formülü yukarıda verilen (Denklemler 4.16)  $s$  yüksekliği boyunca şekilde gösterildiği gibi silodan dışa ve içe doğru olacak biçimde yüklenir ve maksimum değeri  $p_{pf}$  olan, çevresel değişimi açısına bağlı olarak aşağıdaki gibi hesaplaması yapılır.

$$p_{pfs} = p_{pf} \cos \theta \quad (4.18)$$

Burada;  $\theta$ , çevresel koordinattır (Şekil 4.3).  $p_{pf}$  Denklem 4.13 ile hesaplanabilir.

Toplam yatay yük ise (ince duvarlı siloda doldurma ek yükü):

$$F_{pfs} = \frac{\pi}{2} s d_c p_{pf} \quad (4.19)$$

EDS-2 olan silolarda kaynaklı birleşim kullanılırsa ek yük eşdeğer yüzeyin  $z_p$  kadar aşağısından etki ettirilir. Bu yükseklik  $z_p$ ,  $z_o$  ve  $0,5 h_c$  değerlerine bakılarak kritik olan en küçük değer seçilerek hesaplanır.  $h_c$  silonun huni kısmındaki geçiş düzlemi ile üst zirvedeki ortalama malzeme yüksekliği arasındaki mesafedir. Bulon kullanılarak tasarlanan silolarda ek yük istenilen yükseklikten etki ettirilebilir (Özel,2007).

Şekil 4.4'deki durumda, dairesel olmayan silolar dikkate alınarak, doldurma ek basıncı referans büyüklüğü:

$$p_{pf,nc} = 0,36 p_{pf} \quad (4.20)$$

olarak hesaplanacaktır.

#### 4.6.1.2. Dikey silo duvarında oluşan boşaltma yükü

Dikey silo duvarına etkiyen boşaltma yükleri, simetrik boşaltma yükü ve boşaltma ek yükü olmak üzere iki grupta incelenmektedir.

**Simetrik boşaltma yükü** için temel esaslar şöyledir: Şekil 4.5'deki durum dikkate alınarak aşağıdaki formüller kullanılarak hesaplamalar yapılır. Tüm etki değerlendirme sınıfındaki silolar için kullanılacak simetrik boşaltma basınçları:

$$p_{he} = C_h p_{hf} \quad (4.21)$$

$$p_{we} = C_w p_{wf} \quad (4.22)$$

şeklinde hesaplanır.

Burada,

$C_h$  yatay basınç için boşaltma faktörü

$C_w$  duvar sürtünmesi için boşaltma faktörüdür.

Yukarıdan boşaltılan (depolanan malzeme içerisinde akış olmayan) silolarda;

$C_h = C_w = 1,0$  alınabilir.

EDS 2 ve 3 olan narin silolarda;

$C_h = C_o = 1,15$  alınır. Burada  $C_o$  bütün katlar için boşaltma faktörü olup 1,15 sabit değerindedir. Ayrıca,  $C_w = 1,10$  olarak alınır (Özel, 2007).

Tasarım sırasında EDS-1 olan silolar için  $K$  ve  $\mu$ 'nün ortalama değerinin kullanıldığı narin silolarda boşaltma faktörleri:

$$C_h = 1,15 + 1,5(1+0,4 e/d_c) C_{op} \quad (4.23)$$

$$C_w = 1,4(1+0,4 e/d_c) \quad (4.24)$$

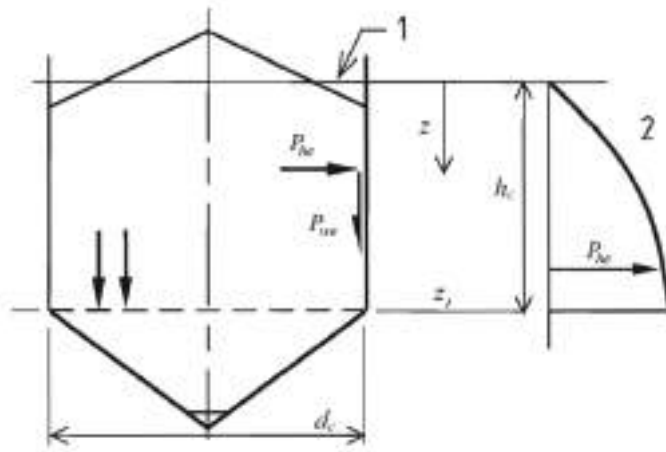
$$e = \text{maks}(e_f, e_o) \quad (4.25)$$

Burada;

$e_f$ , dolum esnasında yüzey yığınının maksimum eksantrisitesi

$e_o$ , boşaltma kapağı eksantrisitesi

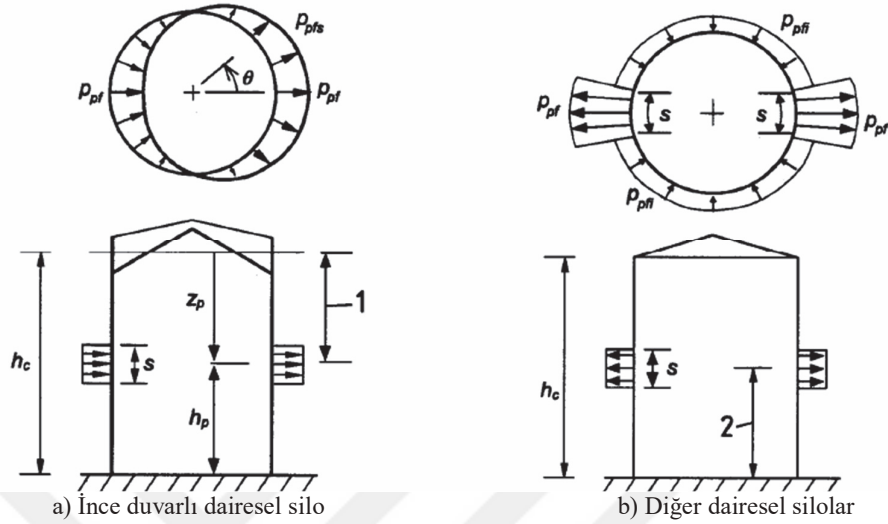
$C_{op}$ , Çizelge 4.5'de verilen ek yük malzeme referans faktörü



Şekil 4.5 Dik duvarlı bölümde simetrik boşaltma basınçları (EN 1991-4, Şekil 5.1)

**Boşaltma ek yükü** için temel esaslar şöyledir: Malzemenin boşaltıldığı durumlarda rastgele oluşacak ya da silo içerisindeki malzemenin boşaltılma şekline bağlı oluşacak eksantrisitelerin dikkate alınarak boşaltma ek yükü hesabı aşağıda sunulan maddelerdeki formüllere göre yapılmalıdır. EDS-1 olan silolar için boşaltma ek yükü

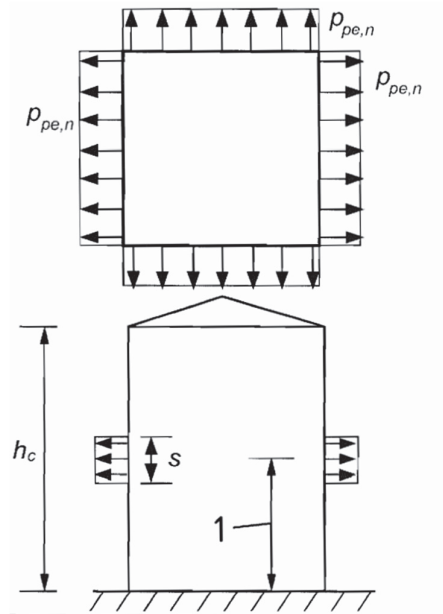
ihmal edilebilir. EDS 2 ve 3 olan silolar için burada verilen yöntem esas alınarak hesap yapılmalıdır.



Şekil 4.6 Dairesel silolar: boşaltma ek yükü için plan ve kesit görünüşleri (EN 1991-4, Şekil 5.4)

Şekil 4.6 için açıklamalar:

1. EDS-2 olan kaynaklı silo:  $z_0$  ve  $h_c/2$ 'den büyük olanı
1. EDS 2 ve 3 olan diğer ince duvarlı silolar: herhangi bir yer
2. Herhangi bir yer



Şekil 4.7 Dairesel olmayan silolar: boşaltma ek yükü için plan ve kesit görünüşleri (EN 1991-4, Şekil 5.3)

Şekil 4.6'daki durum dikkate alınarak dışa doğru olan boşaltma ek yükü referans değeri:

$$p_{pe} = C_{pe} p_{he} \quad (4.26)$$

Burada;

$(h_c/d_c) > 1,2$  olması durumunda:

$$C_{pe} = 0,42 C_{op} [1 + 2E^2] (1 - \exp\{-1,5[(h_c/d_c) - 1]\}) \quad (4.27)$$

$h_c/d_c \leq 1,2$  olması durumunda:

Denklem 4.27, 4.28 ve 4.29'dan en büyük  $C_{pe}$  değeri veren dikkate alınır.

$$C_{pe} = 0,272 C_{op} \{(h_c/d_c) - 1 + E\} \quad (4.28)$$

$$C_{pe} = 0 \quad (4.29)$$

$$E = 2 e/d_c \quad (4.30)$$

$$e = \max(e_f, e_o) \quad (4.31)$$

$e_f$ , dolum esnasında yüzey yığınının maksimum eksantrisitesi

$e_o$ , boşaltma kapağı eksantrisitesi

$C_{op}$ , Çizelge 4.4'de verilen ek yük katı referans faktörü

$p_{he}$ , ek yükün uygulandığı noktadaki lokal boşaltma basıncı

Ek yük değeri bulunurken sadece normal basınç değeri düzeltilir. Ek yükten dolayı oluşan normal kuvvet, sürtünme kuvvetlerini bağlamaz.

Diğer silolar için Şekil 4.6'daki durum dikkate alınarak boşaltma ek basıncı içeri doğru olan referans büyüklüğü  $p_{pei}$ :

$$p_{pei} = p_{pe} / 7 \quad (4.32)$$

**İnce duvarlı silolarda ( $d_c/t > 200$ ) boşaltma ek yükü:** Şekil 4.6a'da görüldüğü üzere boşaltma ek yükü formülü yukarıda verilen (Denklem 4.16)  $s$  yüksekliği boyunca Şekil 4.6'da gösterildiği gibi silodan dışa ve içe doğru olacak biçimde yüklenir ve maksimum değeri  $p_{pes}$  olan, çevresel değişimi  $\theta$  açısına bağlı olarak aşağıdaki gibi hesaplaması yapılır.

$$p_{pes} = p_{pe} \cos\theta \quad (4.33)$$

Burada,

$p_{pe}$  dışa doğru ek basınç ( denklem 4.26)

$\theta$  çevresel koordinattır ( şekil 4.6a)

Toplam yatay yük ise:

$$F_{pe} = \frac{\pi}{2} s d_c p_{pe} \quad (4.34)$$

EDS-2 olan kaynaklı silolarda hesaplanacak ek yük değeri, eşdeğer yüzeyin  $z_p$  kadar derinlikten tesir ettiği kabul edilir. Burada  $z_p$  değeri için  $z_o$  ve  $0,5h_c$ 'nin değerlerinden en küçük olan alınır.  $h_c$ , dikey duvarlı silo bölümünün yüksekliğidir.

EDS-2 olan bulonlu ve perçinli silolarda ek yükün herhangi bir seviyeden etkiyebileceği düşünülür. Ek yükün tüm silo yüksekliği boyunca normal basıncı aynı yüzde değeriyle artırdığı kabul edilir. EDS-1 olan silolarda hesaplanmayabilir (Özel, 2007).

Şekil 4.7'deki durum dairesel olmayan silolar dikkate alınarak boşaltma ek basıncı referans büyüklüğü:

$$p_{pe,nc} = 0,36 p_{pe} \quad (4.35)$$

olarak hesaplanacaktır.

#### 4.6.2. Küçük eğimli ve orta narinlikteki silolar

##### 4.6.2.1. Dikey duvarlardaki dolun yükleri

Dikey duvarlardaki dolun yükleri, doldurma simetrik yükü ve doldurma ek yükü olmak üzere iki grupta incelenir.

**Doldurma simetrik yükü** hesabı şöyle yapılır:  $z$  değerine bağlı dolundan sonra oluşacak yatay basınç ve duvar sürtünme çekmesi aşağıda verilen formüllere göre bulunur:

$$p_{hf} = p_{h0} Y_R \quad (4.36)$$

$$p_{wf} = \mu p_{h0} Y_R \quad (4.37)$$

Burada;

$$p_{h0} = \gamma K z_0 \quad (4.38)$$

$$z_0 = \frac{1}{K\mu} \frac{A}{U} \quad (4.39)$$

$$Y_R = \left(1 - \left\{\left(\frac{z-h_0}{z_0-h_0}\right) + 1\right\}^n\right) \quad (4.40)$$

$$n = -(1 + \tan\varphi_r)(1 - h_0/z_0) \quad (4.41)$$

$h_0$ , Şekil 4.1'de verilen en yüksek malzeme duvar temas noktasındaki  $z$  değeridir.

Doldurma işlemi simetrik yapılan  $r$  yarıçaplı dairesel silo için  $h_0$ ;

$$h_0 = \frac{r}{3} \tan\varphi_r \quad (4.42)$$

$\varphi_r$  malzeme şev açısı değeri olup Çizelge 4.5'ten alınabilir.

Doldurma durumunda dikey basınç  $p_{vf}$ ,

$$p_{vf} = \gamma z_v \quad (4.43)$$



**Simetrik boşaltma yükü** için temel esaslar şöyle verilmiştir: Silolarda malzemenin boşaltılması esnasında oluşacak geçici basınç artışlarını önlemek için boşaltma yükü simetrik olarak arttırılır.

Küçük eğimli silolarda simetrik boşaltma yükü hesaplanırken, doldurma yük hesabında olduğu gibi birbirine eşit olarak alınarak formülüze edilebilir. Orta narinlikteki silolar için simetrik boşaltma durumunda oluşacak normal basınç ve sürtünme çekmeleri  $p_{he}$  ve  $p_{we}$ ,

$$p_{he} = C_h p_{hf} \quad (4.45)$$

$$p_{we} = C_w p_{hf} \quad (4.46)$$

Burada üstten boşaltılan bütün etki değerlendirme sınıfındaki silolar için

$$C_w = C_h = 1,0$$

Etki değerlendirme sınıfı 2 ve 3 olan orta narinlikteki silolarda ise:

$$C_h = C_0 = 1,15 \quad (4.47)$$

$$C_w = 1,0 \quad (4.48)$$

Tasarım sırasında EDS-1 olan orta narinlikteki silolar için boşaltma faktörleri:

$$C_h = 1,0 + \{0,15 + 1,5(1 + 0,4e/d_c) C_{op}\} \quad (4.49)$$

$$C_w = 1,0 + 0,4(1 + 1,4 e/d_c) \quad (4.50)$$

$$e = \text{maks}(e_f, e_0) \quad (4.51)$$

Boşaltma ek yükü için temel esaslar şöyledir: Ek yükün yeri ve büyüklüğü “Bölüm 4.6.1.2 Dikey silo duvarında oluşan boşaltma yükü”ndeki kurallara göre hesaplanır. EDS-1 olan, narinlik bakımından küçük eğimli ve orta narinlikteki silolarda boşaltma ek yükü ihmal edilebilir.

#### 4.7. Silo Hunisi ve Silo Tabanındaki Yükler

Temel esaslar şöyle belirlenmiştir:

Farklı kriterlere sahip silo tabanları için, doldurma ve boşaltma yükleri hesabında gerekli karakteristik değerler seçilerek hesaplama yapılacaktır. Bunlar; a) Düz tabanlı, b) Büyük eğimli hunili, c) Küçük eğimli hunili, silolardır.

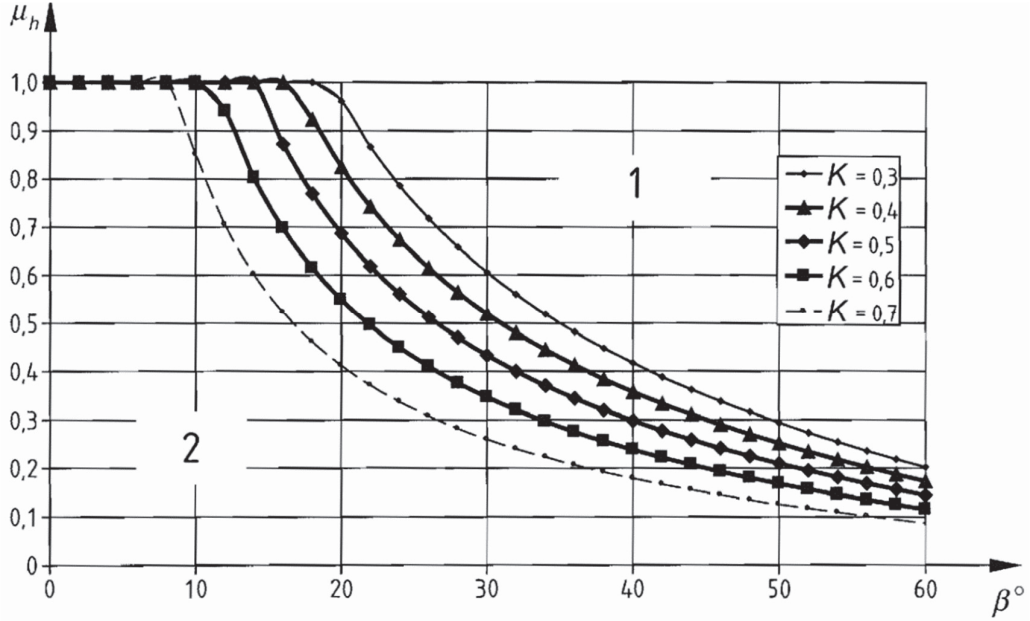
Silo hunisine tesir eden yüklerin hesabı, huninin sahip olduğu eğime bağlıdır. Mevcut huni dikliğine göre farklı tiplerde silo sınıflandırmaları mevcuttur. Bunlar; a) Düz tabanlı silo yatayla eğim açısı  $5^\circ$  den küçük olan hunilerdir. b) Büyük eğimli huniler,  $\tan\beta < (1-K)/(2\mu_l)$  şartı sağlayan hunilerdir. c) Küçük eğimli huniler, dik ya da düz tabanlı olmayan hunilerdir.

Bu tanımlardaki sembollerden;

K: dikey duvarlardaki yanal basınç oranının alt karakteristik değerini,

$\beta$ : huni zirve yarı açısını,

$\mu_f$ :hunideki duvar sürtünme katsayısının alt karakteristik değerini göstermektedir.



Şekil 4.9 Büyük ve küçük eğimli hunilerin ayrımı (EN 1991-4, Şekil 6.1)

Şekil 4.9 için açıklamalar:

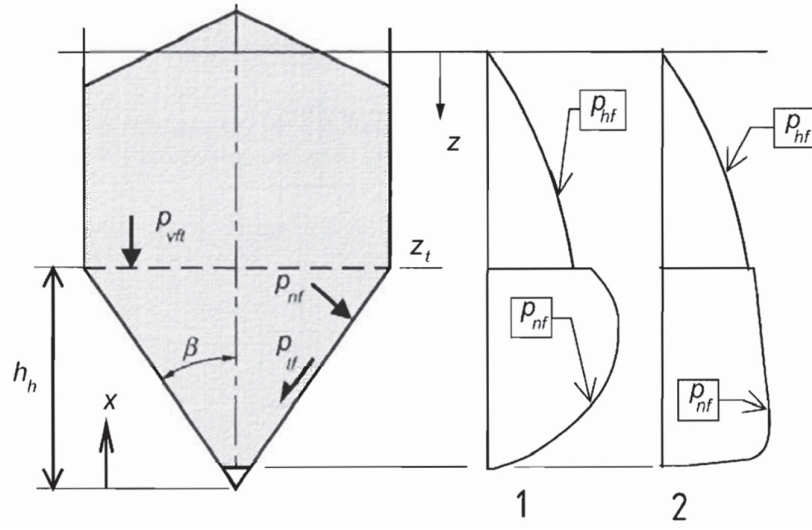
1. Küçük eğimli

2. Büyük eğimli

$\beta$  : Huni tepe noktası yarı açısı ( $^{\circ}$ )

$\mu_f$ :Huni duvar sürtünme katsayısı alt karakteristik değeri

K: Dik duvarlardaki yanal basınç oranı alt karakteristik değeri



Şekil 4.10 Büyük ve küçük eğimli hunilerde doldurma basınç dağılımları (EN 1991-4, Şekil 6.2)

Şekil 4.10'da 1 nolu diyagram büyük eğimli, 2 nolu diyagram ise küçük eğimli durum içindir.

Geçişteki ortalama basınç:

$$P_{vft} = C_b p_{vf} \quad (4.52)$$

Burada;

$p_{vf}$ : Silo narınlığına göre, Denklem 4.9'dan maksimum huni yükü oluşturacak malzeme özellikleri dikkate alınarak geçiş için hesaplanan ( $z=h_c$ ) dikey basınç

$C_b$ : Taban yük büyütme katsayısı, dik duvarlı bölümden huniye (veya tabana) gelebilecek ek yükleri dikkate alan katsayı

EDS 2 ve 3 için  $C_b = 1,0$  alınabilir. EDS-1 olan ve tasarımında ortalama değerlerin kullanıldığı silolarda taban yük büyütme katsayısı  $C_b = 1,3$  alınmalıdır.

Hunideki bütün esaslar göz önüne alındığında, huni ağzı tepe noktasının  $x$  mesafesi kadar üstünde, malzeme içerisindeki ortalama dikey gerilme aşağıdaki gibi bulunmaktadır.

$$p_v = \left(\frac{\gamma h_h}{n-1}\right) \left\{ \left(\frac{x}{h_h}\right) - \left(\frac{x}{h_h}\right)^n \right\} + p_{vft} \left(\frac{x}{h_h}\right)^n \quad (4.53)$$

Burada;

$$n = S(F\mu_{heff} \cot\beta + F) - 2 \quad (4.54)$$

$S=2$ , konik ve kare piramit huniler için

$S=1$ , kama şeklindeki huniler için

$\gamma$ : birim ağırlık üst karakteristik değeri

- $h_h$ :huni apexi ile geçiş arasındaki dikey mesafe  
 $x$ : tepe noktasından yukarıya doğru ölçülen dikey koordinat  
 $\mu_{heff}$ :huni için etkin karakteristik duvar sürtünme katsayısı  
 $S$ :huni şekil katsayısı  
 $F$ :karakteristik huni basınç oranı  
 $\beta$ : Huni tepe noktası yarı açısı ( $=90^\circ-\alpha$ )  
 $p_{vt}$ :geçişte dolulardan sonra ortalama dikey gerilme  
 $a$ :dikdörtgenin boyu (Şekil 4.1)  
 $b$ :dikdörtgenin eni

$F$  ve  $\mu_{heff}$  değerleri bulunurken, huninin büyük ya da küçük eğimli olmasına bakılır. Tipine göre bulunan değerler büyük ve küçük eğimli hunili siloların hesabının açıklandığı kısımlarda sunulmuştur.

#### 4.7.1. Düz tabanlı huniler

##### 4.7.1.1. Düz tabanlı narin silolarda dikey basınçlar

Narin silolarda düz tabana ( $\alpha \leq 5$ ) etkiyen dikey basınç üniform olarak alınabilir. Geçişteki ortalama basınç  $p_{vft}$ , Denklem 4.52 ile hesaplanmalıdır. Boşaltma esnasında düz tabana etkiyen dikey basınç  $p_v$  dolulardan sonraki dikey basınca eşit alınabilir.

##### 4.7.1.2. Düz tabanlı orta narinlikte ve küçük eğimli silolarda dikey basınçlar

Düz tabanlı orta narinlikte ve küçük eğimli siloların tabanındaki dikey basınç

$$p_{vsq} = p_{vb} + \Delta p_{sq} \left( \frac{z - h_c/d_c}{2 - h_{tp}/d_c} \right) \quad (4.55)$$

Burada;

$$\Delta p_{sq} = p_{vtp} - p_{vh0} \quad (4.56)$$

$$p_{vtp} = \gamma h_{tp} \quad (4.57)$$

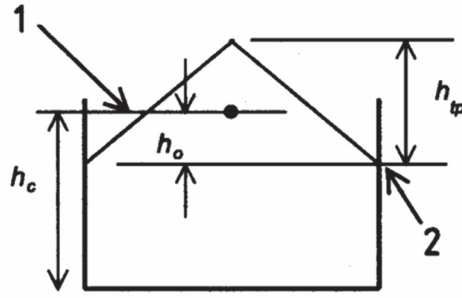
$p_{vb}$ , Denklem 4.51'den elde edilecek dikey basıncın üniform bileşenidir. Burada  $z = h_0$  alınmalı, malzeme karakteristik değerleri, hunide maksimum yükleme meydana getirecek şekilde seçilmelidir (Çizelge 4.5).

$p_{vh0}$ , Denklem 4.42'de  $z = h_0$  için elde edilen Janssen üst yığının altındaki basınç,

$h_0$ , üst yığın tabanında eşdeğer yüzeyin altındaki derinlik, (Şekil 4.1d).

$h_{tp}$ , üst yığının toplam yüksekliği,

$h_c$ , eşdeğer yüzey ile silo tabanı arasındaki derinliktir.



Şekil 4.11 Küçük eğimli ve orta narinlikteki silo tabanında basınç (EN 1991-4, Şekil 6.3)

Şekil 4.11’de 1 okuyla eşdeğer yüzey ve 2 okuyla katıyla temas etmeyen en düşük nokta gösterilmektedir.

#### 4.7.2. Büyük eğimli huniler

##### 4.7.2.1. Hareket sürtünmesi

Siloda depolanacak malzemenin doldurulma ve boşaltılma durumunda etkin duvar sürtünme katsayısı  $\mu_{heff} = \mu_l$  seçilerek değerlendirilmelidir. Burada  $\mu_l$  silo hunisindeki duvar sürtünme katsayısının karakteristik alt sınır değeridir.

##### 4.7.2.2. Doldurma yükleri

Büyük eğimli hunide siloda depolanacak malzemenin doldurulması esnasında malzeme içerisinde herhangi bir düzeydeki ortalama dikey gerilme Denklem 4.53 ve 4.54’de F yerine  $F_f$  konularak bulunabilir.

$$F_f = 1 - \frac{b}{(1 + \frac{\tan \beta}{\mu_l})} \quad (4.58)$$

Denklem 4.54’deki  $n = S(1-b)\mu_l \cot \beta$  ve  $b = 0,2$  (deneysel değer).

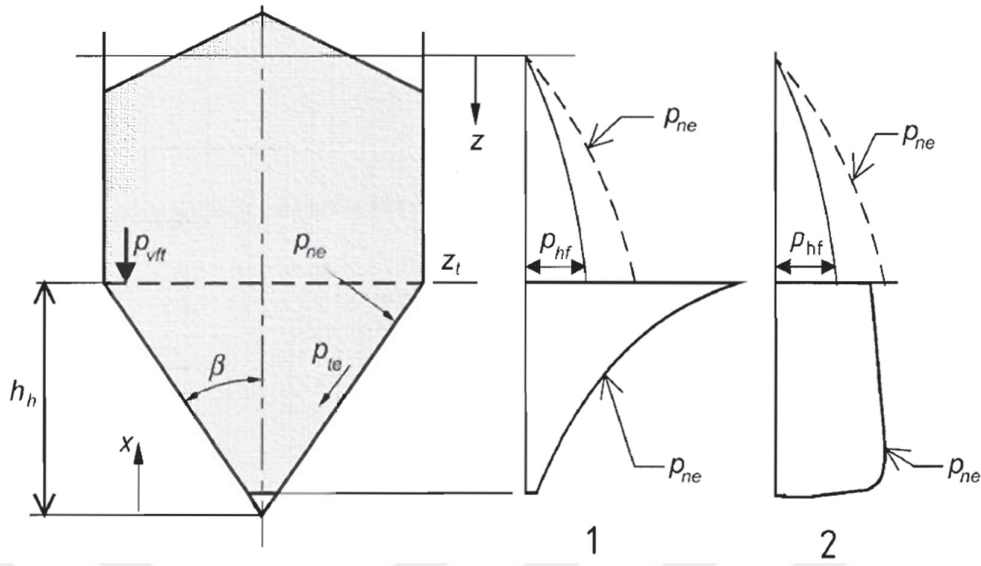
Siloya malzemeyi doldurduktan sonra büyük eğimli huni duvarının herhangi bir noktasında oluşan normal basınç  $p_{nf}$  ve sürtünme çekmesi  $p_{tf}$  aşağıdaki gibi hesaplanmalıdır.

$$P_{nf} = F_f p_v \quad (4.59)$$

$$p_{tf} = \mu_l F_f p_v \quad (4.60)$$

##### 4.7.2.3. Boşaltma yükleri

Büyük eğimli hunide siloda depolanacak malzemenin boşaltılması esnasında, malzeme içerisinde herhangi bir seviyedeki ortalama dikey gerilme, Denklem 4.53 ve 4.54’de F yerine  $F_e$  konularak bulunabilir.



Şekil 4.12 Büyük ve küçük eğimli hunilerde boşaltma basınç dağılımları (EN 1991-4, Şekil 6.4)

Şekil 4.12’de 1 nolu diyagram büyük eğimli hunili, 2 nolu diyagram ise küçük eğimli hunili durum içindir.

$$F_e = \frac{1 + \sin \varphi_i \cos \varepsilon}{1 - \sin \varphi_i \cos(2\beta + \varepsilon)} \quad (4.61)$$

Burada;

$$\varepsilon = \varphi_{wh} + \sin^{-1} \left\{ \frac{\sin \varphi_{wh}}{\sin \varphi_i} \right\} \quad (4.62)$$

$$\varphi_{wh} = \tan^{-1} \mu_l \quad (4.63)$$

$\mu_l$ : hunideki duvar sürtünme katsayısının alt karakteristik değeri,

$\varphi_i$ : silolanan malzemenin iç sürtünme açısıdır, daima  $\varphi_{wh} \leq \varphi_i$  olduğu unutulmamalıdır.

Siloda depolanan malzemenin boşaltılması esnasında büyük eğimli huni duvarının herhangi bir noktasında oluşan normal basınç  $p_{ne}$  ve sürtünme çekmesi  $p_{te}$  aşağıdaki gibi hesaplanmalıdır.

$$P_{ne} = F_e p_v \quad (4.64)$$

$$p_{te} = \mu_l F_e p_v \quad (4.65)$$

### 4.7.3. Küçük eğimli huniler

#### 4.7.3.1. Hareket sürtünmesi

Küçük eğimli hunilerde sürtünme etkisi yenilemediğinden dolayı etkin duvar sürtünme katsayısı aşağıda verilen formül esas alınarak hesaplanabilir.

$$\mu_{heff} = (1 - K_l) / 2 \tan \beta \quad (4.66)$$

Burada;

$K_l$ , dik duvar için yanal basınç oranının alt karakteristik değeri,  
 $\beta$ , huninin yarım açısıdır.

#### 4.7.3.2. Doldurma yükleri

Küçük eğimli hunide siloda depolanacak malzemenin doldurulması esnasında malzeme içerisinde herhangi bir düzeydeki ortalama dikey gerilme denklem 4.53 ve 4.54'de  $F$  yerine  $F_f$  empoze edilerek bulunabilir.

$$F_f = 1 - \left\{ \frac{b}{1 + \tan \beta / \mu_{\text{heff}}} \right\} \quad (4.67)$$

$n = S(1-b) \mu_{\text{heff}} \text{Cot } \beta$  ve  $b=0,2$  (deneysel değer)

Büyük eğimli hunili sistemlerde olduğu gibi küçük eğimli hunilerde de siloda depolanan malzemenin doldurulması esnasında duvarının herhangi bir noktasında oluşan normal basınç  $p_{nf}$  ve  $p_{tf}$  sürtünme çekmesi aşağıdaki gibi hesaplanmalıdır.

$$p_{nf} = F_f p_v \quad (4.68)$$

$$p_{tf} = \mu_l F_f p_v \quad (4.69)$$

#### 4.7.3.3. Boşaltma yükleri

Küçük eğimli silolarda depolanan malzemenin boşaltılması durumunda meydana gelecek huni duvarına tesir eden normal basınç ve sürtünme çekmesi doldurmadaki duruma eşit alınabilir.

## 5. LİMİT DURUM TASARIM İLKELERİ

### 5.1. Genel Bilgi

Nihai sınır durumları ile hizmet verebilirlik sınır durumları arasında bir ayırım yapılmalıdır. İki sınır durum kategorisinden birinin seçiminde kritik olan alınabilir. Tasarım durumları kalıcı, geçici veya tesadüfi olarak sınıflandırılmalıdır. Zamana bağlı etkilerle (ör. yorgunluk) ilgili sınır durumların doğrulanması, inşaatın tasarım çalışma ömrü ile ilgilidir.

### 5.2. Tasarım Durumları

1. Yapının işlevini yerine getirmesi için gerekli olan ilgili tasarım durumları, verilen koşullar dikkate alınarak seçilecektir.
2. Tasarım durumları aşağıda verildiği gibi sınıflandırılır:
  - a. Normal kullanım koşullarına atıfta bulunan kalıcı tasarım durumları,
  - b. Geçici koşullara atıfta bulunan geçici tasarım durumları; örneğin yürütme veya onarım esnasındaki durumlar.
  - c. İstisnai koşullara atıfta bulunan tesadüfi tasarım durumları; örneğin yangın, patlama, çarpma durumları.
  - d. Sismik tasarım durumları; örneğin deprem durumu.
3. Seçilen tasarım durumları, tüm unsurları kapsayacak şekilde yeterince önemli ve farklı olacaktır.

### 5.3. Nihai Sınır Durumları

İnsanların güvenliği ve/veya yapının güvenliği nihai sınır durumları olarak sınıflandırılmaktadır. Yapısal göçme önceki durumlar, basitlik açısından kabul edilir. Göçmenin kendisi, nihai sınır durumu olarak ele alınabilir. Aşağıdaki nihai sınır durumları, ilgili oldukları yerlerde tahkik edilecektir:

- Rijit cisim olarak kabul edilen yapının veya herhangi bir bölümünün denge kaybı;
- Aşırı deformasyon, yapının veya herhangi bir parçasının aşırı deformasyona uğraması dahil olmak üzere yapının veya herhangi bir parçasının kopması, stabilite kaybı,
- Yorgunluk veya zamana bağlı diğer etkilerden kaynaklanan problem.

Avrupa yönetmeliğinde duruma göre, göçme kontrolü (STR) veya zemin göçme kontrolü (GEO) seçilmelidir. Yapının göçmeye karşı emniyetli olup olmadığına bakılmalıdır. Aşağıdaki nihai sınır durumlarına bağlı olarak kombinasyonlar hazırlanacaktır.

STR: Yapının veya temeller, kazıklar, bodrum duvarları vb. yapısal elemanların iç hasarı veya aşırı deformasyonu;

GEO: Zemin veya kaya kuvvetlerinin direnç sağlamada önemli olduğu yerlerde, zemin gerilmelerinin aşılması veya aşırı deformasyonu;

### 5.3.1. Kısmi faktörler, $\gamma$

Silo ve haznelerin tasarımında EN 1990, A.1'de verilen değerler kullanılabilir.

### 5.3.2. Kombinasyon faktörleri, $\Psi$

Silo ve hazne yükleri için kombinasyon faktörleri ve diğer etkilerle ilgili kombinasyon faktörleri için, EN 1991-4 A.4'de verilen maddelere bağlı olarak verilen değerler kullanılabilir.

### 5.3.3. Azaltma katsayısı, $\xi$

Aynı anda yüklerin birlikte meydana gelme ihtimaline karşı yapılacak azaltmada kullanılacak katsayıdır. EN 1991-4 A.2'de verilen çizelge esas alınarak değeri seçilecektir.

### 5.3.4. Tesir kombinasyonları

Kırılma sınır durumunda aşağıdaki etkiler kullanılmalıdır.

- Silolada depolanan malzemenin doldurma ve depolanması
- Uygulanan dış yükler
- Kar yükü
- Silo boş veya dolu durumda iken rüzgar etkisi
- Sıcaklık etkisi
- Toz patlaması yükleri

### 5.3.5. EDS 2 ve 3 için tasarım durumları ve etki kombinasyonları

Baskın etki ve kalıcı etki, her yük durumunda tam değerlerinde alınmalıdır, ancak eşlik eden etkiler, EN 1990'a göre eş zamanlı meydana gelme olasılığının azalmasını hesaba katmak için kombinasyon faktörü  $\Psi$  ile azaltılabilir. Kombinasyonlar EN 1990 kurallarına uygun olarak seçilmelidir.

#### 5.4. Servis Verilebilirlik Sınır Durumları

Mevcut yapı ve çevresindeki yapıların rahatlıkla ve sorunsuz olarak kullanılmasını sağlayan deplasman durumunu esas alan sınır durumudur. Yapının veya yapısal elemanların normal kullanım altında işleyişi, insanların rahatlığı servis verilebilirlik sınır durumu olarak sınıflandırılacaktır. Geri döndürülebilir ve geri döndürülemez hizmet verilebilirlik sınır durumları arasında bir ayırım yapılacaktır.

Servis verilebilirlik sınır durumununların doğrulanması, aşağıdaki hususları içeren kriterlere dayandırılmalıdır:

1. Deformasyonlar:
  - a. Görüntü
  - b. Kullanıcıların rahatlığı
  - c. Yapının işleyişi
2. Titreşimler:
  - a. İnsanları rahatsız etmesi
  - b. Yapının işlevsel etkinliğini sınırlaması
3. Olumsuz etkilemesi muhtemel hasar:
  - a. Görüntü
  - b. Dayanıklılık
  - c. Yapının işleyişi

#### 5.5. Sınır Durumunun Tasarımı

Limit durumlar için tasarım, ilgili limit durumlar için yapısal ve yük modellerinin kullanımına dayalı olacaktır. İlgili tasarım değerleri için sınır durumunun aşılmadığı doğrulanmalıdır. Hareketler, yapı malzemesi özellikleri veya depolanan ürün özellikleri, coğrafi veriler bu modellerde yer almaktadır. İlgili tüm tasarım durumları ve yük durumları için doğrulamalar yapılacaktır. Alternatif olarak, doğrudan olasılıksal yöntemlere dayalı bir tasarım kullanılabilir. Seçilen tasarım durumları dikkate alınacak ve kritik yük durumları belirlenecektir.

Belirli bir doğrulama için, uyumlu yükü tanımlayan yük durumları seçilmelidir. Sabit, değişken etkiler ve kalıcı etkilerle eşzamanlı olarak düzenlemelerin, deformasyonların dikkate alınması gerekmektedir. Etkilerin varsayılan yönlerinden veya konumlarından dolayı olası sapmalar dikkate alınacaktır. Yapısal ve yük modelleri; fiziksel modeller veya matematiksel modellerle oluşturulabilir.

Çizelge 5.1 Tasarım durumları ve etki kombinasyonları (TS EN 1991-4, Çizelge A.2)

Kısa gösterim	Tasarım durumu / Hakim değişken etki	Kalıcı etkiler		Hakim değişken etki (Sonnstige, "andere")	Eşlik eden değişken etki 1 (ana)		Eşlik eden değişken etki 2		Eşlik eden değişken etki 3, 4 vb.	
		Tarif	$\psi_1$		Tarif	$\psi_{1,1}$	Tarif	$\psi_{1,2}$	Tarif	$\psi_{1,3}$ vb.
D	Kab boşaltma	Zati ağırlık	0,9		Kab boşaltma	1,0	Temel oturması	0,7	Kar, rüzgâr, ısı	0,6
									Oluşan yükler, oluşan şekil değişimi	0,7
I	Oluşan şekil değişimi	Zati ağırlık	0,9		Kab doldurma	1,0	Oluşan şekil değişimi	0,7	Kar, rüzgâr, ısı	0,6
									Oluşan yükler	0,7
S	Kar	Zati ağırlık	0,9		Kab doldurma dolu silo	1,0	Kar	0,6	Oluşan yükler	0,7
WF	Rüzgâr ve dolu silo	Zati ağırlık	0,9		Kablar, boş silo	1,0	Rüzgâr	0,6	Oluşan yükler	0,7
WE	Rüzgâr ve boş silo	Zati ağırlık	0,9		Kab yok (boş)	0,0	Rüzgâr	0,6	Oluşan yükler	0,7
T	Isıl etkiler	Zati ağırlık	0,9		Kab doldurma	1,0	Isıl	0,6	Oluşan yükler	0,7

Not – Çizelge A.2, EN 1990 Madde 6.4.3.2'deki Bağını (6.10a) ve Bağını (6.10b) ile kullanılmalıdır.

Çizelge 5.2 Etki tasarım durumu (EN 1990, Table.A2.4(B))

Kalıcı ve geçici tasarım durumları	Kalıcı etkiler		Ön baskı	Hakim değişken	Eşlik eden etki	
	Elverişsiz	Elverişli			Asıl	Diğer
Denklem 6.10a	$Y_{Gj.sup} \cdot G_{kj.sup}$	$Y_{Gj.inf} \cdot G_{kj.inf}$	$Y_p P$		$Y_{Q,1} \Psi_{Q,1} Q_{k,1}$	$Y_{Q,i} \Psi_{Q,i} Q_{k,i}$
Denklem 6.10b	$\xi Y_{Gj.sup} \cdot G_{kj.sup}$	$\xi Y_{Gj.inf} \cdot G_{kj.inf}$	$Y_p P$	$Y_{Q,1} Q_{k,1}$		$Y_{Q,i} \Psi_{Q,i} Q_{k,i}$

Değişkenler EN 1991-4:2006, Tablo A.2 kullanılarak seçilecektir.  
 $Y_{G.sup} = 1,35$     $Y_{G.inf} = 1,35$     $Y_Q = 1,50$

Çizelge 5.2 dikkate alındığında aşağıda verilen kombinasyonlar oluşturularak analiz yapılacaktır.

Kombinasyon-1 (doldurma durumunda);

$$1,35G+1,5Q= 1,35\text{Ölü yük}+ 1,5P_{hf}+ 1,5P_{wf}+ 1,5P_{nf}+ 1,5P_{tf}+ 1,5P_{pfn}$$

Kombinasyon-2 (boşaltma durumunda);

$$1,35G+1,5Q= 1,35\text{Ölü yük}+ 1,5P_{he}+ 1,5P_{we}+ 1,5P_{ne}+ 1,5P_{te}+ 1,5P_{pfe}$$

### 5.6. Dirençler İçin Kısmi Faktörler

Yapısal özelliklerin test edilerek belirlendiği durumlarda, EN 1990 yönetmeliğindeki esas ve prosedürleri dikkate alınmalıdır. Yorulma durumlarında EN 1993-1-6'nın 9. Bölümüne bakılmalıdır.

Farklı sınır durumları için kısmi katsayılar  $\gamma$  için Çizelge 5.3’de verilen değerler dikkate alınmalıdır. Çizelge 5.3, Çizelge 5.4’te verilen değerler ile kullanılabilir.

**Çizelge 5.3** Direnç kısmi faktörleri (EN 1993-4-1, Tablo 2.2)

Direnç durumları	$\gamma$
Kaynaklı veya bulonlu duvarların plastik sınır durum direnci	$\gamma_{M0}$
Duvarların stabiliteye direnci	$\gamma_{M1}$
Kaynaklı veya bulonlu duvarların yırtılma durumuna karşı direnç	$\gamma_{M2}$
Kabuk duvarının dögüsel plastisiteye direnci	$\gamma_{M4}$
Bağlantıların direnci	$\gamma_{M5}$
Kabuk duvarların yorulmaya karşı direnci	$\gamma_{M6}$

**Çizelge 5.4** Önerilen kısmi direnç faktörleri

$\gamma_{M0}=1,00$	$\gamma_{M1}=1,10$	$\gamma_{M2}=1,25$
$\gamma_{M4}=1,00$	$\gamma_{M5}=1,25$	$\gamma_{M6}=1,10$

### 5.7. Tasarım Gerilmesi Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Tüm tasarım yükleri altında, tasarım gerilmesi, iç basınçtaki değişim kullanılarak silo duvarının her noktasında belirlenmelidir. Von Mises eşdeğer tasarım gerilmesi EN 1993-4-1 yönetmeliğinde, Denklem 5.4’de verildiği gibi hesaplanır.

#### 5.7.1. Plastik limit durumu

Membran gerilme sonuçları açısından plakalardaki tasarım direnci, hem kaynaklı hem de bulonlu yapılar için “eşdeğer gerilme direnci” olarak değerlendirilmelidir. Bu değer  $f_{e,RD} = f_y / \gamma_{M0}$  şeklinde hesaplanır.

#### 5.7.2. Dikdörtgen ve silindirik duvarlardaki boşluklar için detaylandırma

Dikdörtgen bir boşluğun etrafındaki dikey berkitme plakalarının kesit alanı, duvarın kaybolan kesit alanından daha az olmayacak ve bu değer iki katından fazla olmayacak şekilde boyutlandırılmalıdır.

Yatay berkitme plakalarının kesit alanı, kaybolan duvarın kesit alanından daha az olmayacak şekilde boyutlandırılmalıdır.

Membran gerilme bileşkesinin yönüne dik olan berkitmelerin eğilme rijitliği öyle seçilmelidir ki; boşluğun merkez hattı üzerinde oluşan ve boşluğun varlığından kaynaklanan gerilme bileşkesi yönündeki, kabuk duvarının göreceli deplasmanı  $\delta$ , EN 1993-4-1 yönetmeliği, Denklem 5.89’da verilen  $\delta_{maks}$  değerinden büyük olamaz.

### 5.7.3. Deplasmanlarla ilgili durumlar

Çelik silo silindirik kaplamalı duvarlar için servis verilebilirlik sınır durumları aşağıdaki gibi alınmalıdır:

- Yapının etkin kullanımını olumsuz yönde etkileyen deformasyonlar veya sapsmalar;
- Hem yapısal hem de yapısal olmayan elemanlarda hasara neden olan deformasyonlar, sehimler, titreşim veya salınımlar.

Deformasyonlar, sapsmalar ve titreşimler yukarıdaki kriterleri karşılayacak şekilde sınırlandırılmalıdır.

Kullanım amacına uygun spesifik sınırlayıcı değerler, kullanım amacı ve depolanacak katıların niteliği dikkate alınarak tasarımcı, müşteri ve ilgili makam arasında mutabık kalınmalıdır.

Silindir silolarda; silonun global yatay deformasyonunun temelden tepe noktasına kadar ölçülen yüksekliğinin %2'sini geçmemesi gereklidir. (EN 1993-4-1 Denklem 5.90). Lokal deformasyon, yarıçapının %5'ini ve en ince silo duvarı kalınlığının 20 katını geçmemelidir (EN 1993-4-1 Denklem 5.91 ve 5.92).

Dikdörtgen silolarda; silonun global yatay deformasyonunun temelden tepe noktasına kadar ölçülen yüksekliğinin %2'sini ve en ince silo duvar kalınlığının 10 katını geçmemelidir (EN 1993-4-1 Denklem 9.8 ve 9.9). Herhangi bir panel kesitinin kenarlarına göre rölatif deplasmanının maksimum değeri, dikdörtgen plakanın kısa uzunluğunun %5'ini geçmemelidir (EN 1993-4-1 Denklem 9.10).

## 6. ÇELİK BUĞDAY SİLOSU SONLU ELEMANLAR ANALİZİ

### 6.1. Silo Hakkında Genel Bilgi

Bir dikdörtgen buğday silosunun analizinin amaçlandığı bu bölümde, piyasada uygulanan silo yapıları göz önünde bulundurularak çeşitli model denemeleri yapılmıştır. Oluşturulan deneme modellerinin tamamının sonlu eleman analizi yapılmayacaktır. Bu bölümde şekilsel gösterimi yapılan buğday silosunun kapasitesine bağlı olarak yük tesirleri hesaplanacaktır. Ardından, bulunan yükler ABAQUS sonlu eleman analiz programı yardımıyla oluşturulan model üzerine uygulanacaktır. Dikdörtgen silonun performansının daha iyi anlaşılması için “aynı kapasite ve yükseklikte” eşdeğer bir silindirik buğday silosunun da modeli oluşturularak analizi yapılacaktır. Dikdörtgen ve silindirik silo için ayrı ayrı, yönetmeliğe göre yük hesabı yapılacaktır. Tasarım yükleri altında gerçekleştirilen sonlu eleman analiz sonuçları karşılaştırılacaktır.

Çizelge 6.1 Abaqus programında seçilen birim sistemi

	Birim
Uzunluk	mm
Kuvvet	N
Kütle	kg
Zaman	s
Gerilme	MPa(N/mm <sup>2</sup> )
Kütle yoğunluğu	kg/mm <sup>3</sup>

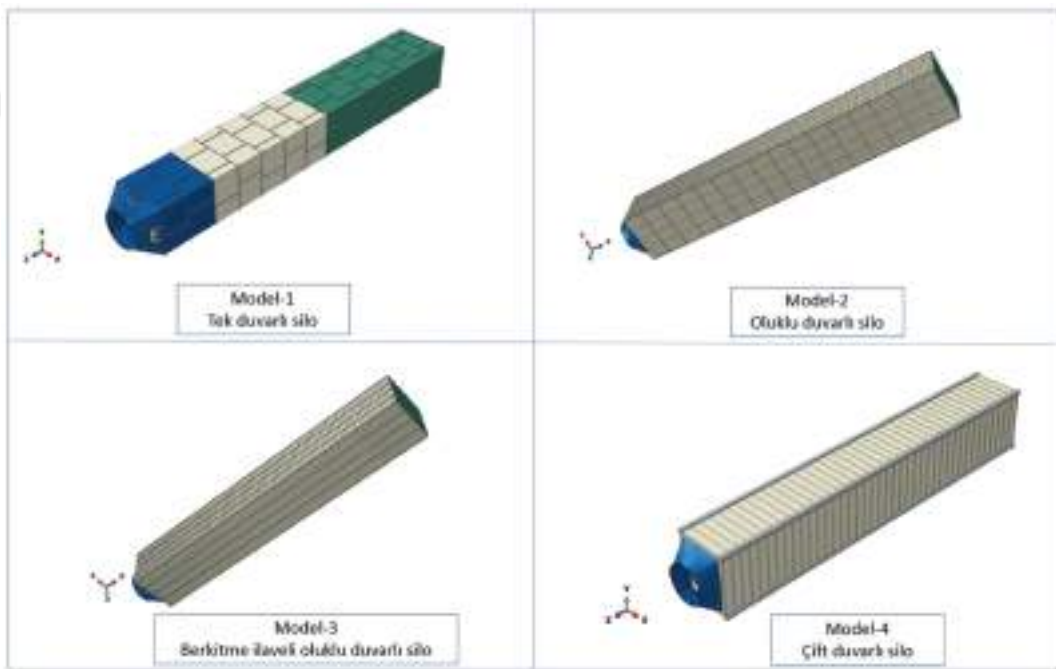
Çizelge 6.2 Çelik malzeme özellikleri

	Birim (mm)	$F_y$ MPa	$F_u$ MPa	E MPa	W kg/m <sup>3</sup>
S235(ST37)	Mm	235	360	200.000	7850
S275(St44)	Mm	275	430	200.000	7850
$F_y$ =Karakteristik akma gerilmesi					
$F_u$ =Karakteristik çekme gerilmesi					
E=Elastisite modülü					
W=Birim hacim ağırlık					

### 6.2. Örnek Dikdörtgen Buğday Silo Tasarımları

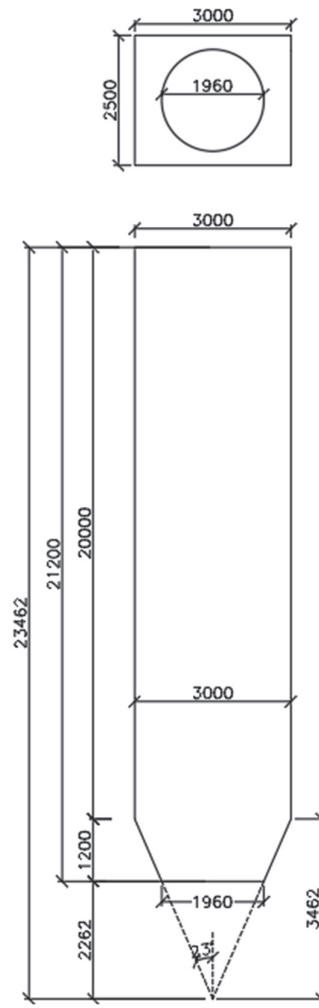
Uygulamada farklı silo tasarımları kullanılmaktadır. Bunlardan hangisinin daha uygun olacağına karar verebilmek için Şekil 6.1’de gösterilen modeller ABAQUS ile tasarlanmıştır. Model-1’de silo duvarı tek katmanlı sactan oluşmaktadır. Silo duvarı belirli yükseklikte, taşınabilir boyutlarda panellerden teşkil edilmiştir. Bu paneller dört

tarafından bulolarla birleşmeye uygun bir şekilde katlanmış uçlara sahiptir. Bu katlamalar aynı zamanda berkitme vazifesi de görmektedirler. Modeldeki farklı renkler farklı duvar kalınlıklarını temsil etmektedir. Model-2’de duvara yatay doğrultuda oluklar (kıvrımlar) vasıtasıyla rijitlik kazandırılmıştır. Model-3’te ise Model-2’deki duruma ilave berkitmeler teşkil edilerek deplasman ve gerilmelerin azaltılması amaçlanmıştır. Model-4’te yine dikdörtgen silo tasarımı için uygulamada çok karşılaşılan ve deplasman ve gerilmelere karşı oldukça dayanımı yüksek olan çift duvarlı paneller ile silo duvarı teşkil edilmiştir.



Şekil 6.1 Tasarlanan silo modelleri

Bu çalışmada örnek olarak yüksek doldurma kapasiteli bir silo modellenerek yönetmelikteki yük hesaplarının daha detaylı gösterilmesi amaçlanmıştır. Depolama malzemesi olarak buğday seçilmiştir. Yüksek kapasiteli silolar için Model-1, Model-2 ve Model-3 tasarımlarının ABAQUS ile ön analizleri sonucu büyük gerilme ve deplasmanlar gözlemlendiği için bu modellere yer verilmeyecektir. Model-4 tasarımının daha uygulanabilir bir model olduğu düşünülerek, detaylı incelenecek örnek model olarak tercih edilmiştir. Şekil 6.2’de örnek silo modelinin ölçüleri verilmiştir.



Şekil 6.2 Buğday silosu boyutları

Silo kapasitesini hesaplamak için silo dikdörtgen ve huni kısımlarının hacmi belirlenmelidir. Silo dikdörtgen bölge için,

$$V_d = a.b.h$$

$$V_d = 2,5 \times 3 \times 20 = 150 \text{ m}^3$$

Silo huni kısmı için,

$$V_h = \frac{a.b.h}{3} - \frac{1}{3} \pi r^2 h$$

$$V_h = \frac{(2,5) \cdot (3) \cdot (3,462)}{3} - \frac{1}{3} \pi \left(\frac{1,96}{2}\right)^2 (2,262) = 6,38 \text{ m}^3$$

$$V_{net} = 150 + 6,38 = 156,38 \text{ m}^3$$

Buğday ortalama birim hacim ağırlığı,

$\gamma = 8.25 \text{ kN/m}^3$  olarak EN 1991-4:2006 Tablo E.1 (Çizelge 4.5)'den alınmıştır.

Buğday silosunun kapasitesi,

$W_k = V_{net} \cdot \gamma = 156,38.8,25.0,1 = 129$  tonf olduğu için EN 1991-4:2006 Tablo 2.1'e göre silo tipimiz EDS-2 olarak dikkate alınacak ve bu nedenle doldurma ve boşaltma ek yük hesabı yapılacaktır. Ayrıca, kullanılacak parametrelerin alt, üst ve ortalama değerleri kullanılacaktır.

Silonun geometrik koşulları:

$$h_b/d_c < 10 = (20+2,262+1,2)/2,5 = 9,38 \text{ m} \quad \checkmark$$

$$h_b < 100 \text{ m} = 23,462 < 100 \text{ m} \quad \checkmark$$

$$d_c < 60 \text{ m} = 2,5 < 60 \text{ m} \quad \checkmark$$

Silonun narinlik sınıfı:

$$h_c/d_c = 20/2,5 = 8 \geq 2,0 \text{ olduğu için narin silo olarak değerlendirilecektir.}$$

Silo kapasitesine göre etki değerlendirme sınıfı belirlenecektir.

Buğday silo kapasitesi 100 tonf 'in üzerinde olduğu için EDS-2 olarak hesaplama yapılacaktır.

**Çizelge 6.3** Buğday malzemesinin karakteristik alt, üst ve ortalama değerleri

KARAKTERİSTİK DEĞERLER								
Duvar sürtünme katsayısı ( $\mu$ )			Yanal basınç oranı (K)			İç sürtünme açısı ( $\varphi_i$ )		
$\mu_l$	$\mu_m$	$\mu_u$	$K_l$	$K_m$	$K_u$	$\varphi_{il}$	$\varphi_{im}$	$\varphi_{iu}$
0,33	0,38	0,44	0,49	0,54	0,60	26,8	30	33,6

Silo hunisinin dikliği aşağıda verilen şartlara göre değerlendirilmelidir.

$\tan\beta < (1-K)/(2\mu_l)$  şartı sağlayan huniler büyük eğimli hunidir.

$$\tan 23^\circ < (1-0,54)/(2)(0,33)$$

$0,43 < 0,70$  olduğu için silo hunisi dik olarak kabul edilecektir.

Buğday için Çizelge 4.6'dan aşağıdaki değerler alınmıştır.

- $\varnothing_r = 34^\circ$ , şev açısı,
- $\varphi_{im} = 30^\circ$ , ortalama iç sürtünme açısı,
- $a_\varphi = 1,12$  katsayısı,
- $K_m = 0,54$  ortalama yanıl basınç oranı,
- $a_K = 1,11$  katsayısı,
- $\mu = \tan \varphi_w$  Duvar sürtünme katsayısı,
- $a_\mu = 1,16$  katsayısı,
- $C_{op} = 0,5$  ek yük katı referans katsayısı,

- Bu silo için duvar malzemesi (Çizelge 4.4) galvaniz kaplı karbon çeliği olarak (D2) olarak seçilmiştir. D2 için  $\mu = 0,38$

### 6.3. Dikdörtgen Silonun Dikey Silo Duvarına Etkiyen Yükler

#### 6.3.1. Doldurma yükleri

Öncelikle, **simetrik doldurma yükleri** hesabı, Bölüm 4.6.1.1’de açıklandığı gibi yapılacaktır. Şekil 4.2’de hesap edilen yüklerin silo duvarına ne şekilde tesir ettikleri görülebilir.

Doldurma durumunda duvara dik basınç,  $p_{hf}(z)$ :

$$z_0 = \frac{1}{K\mu} \frac{A}{U}$$

$$\frac{A}{U} = \frac{\left(\frac{b}{2}\right)}{\left(1 + \frac{b}{a}\right)} = \frac{\left(\frac{2,5}{2}\right)}{\left(1 + \frac{2,5}{3}\right)} = 0,68$$

$$z_0 = \frac{1}{K\mu} \frac{A}{U} = \frac{1}{(0,49)(0,33)} \cdot 0,68 = 4,21 \text{ m}$$

$$p_{h0} = \gamma K z_0 = (9)(0,49)(4,21) = 18,55 \text{ kN/m}^2$$

$$Y_f(z) = 1 - e^{-z/z_0} \text{ olacaktır. } Y_f(z=20) = 1 - e^{-20/4,21} = 0,99$$

$$p_{hf}(z) = p_{h0} Y_f(z) \text{ olduğundan, } p_{hf}(z=20) = p_{h0} Y_f(z=20) = 18,55 \cdot 0,99 = 18,39 \text{ kN/m}^2$$

Doldurma durumunda duvara dik basınç değişimi Çizelge 6.4’de gösterilmiştir.

**Çizelge 6.4** Doldurma durumunda duvara dik basınç değişimi

z	$Y_f(z) = 1 - e^{-z/z_0}$	$p_{hf}(z) = p_{h0} \cdot Y_f(z)$ (kN/m <sup>2</sup> )
0	0,00	0,00
1	0,21	3,92
2	0,38	7,02
3	0,51	9,46
4	0,61	11,38
5	0,70	12,90
6	0,76	14,09
7	0,81	15,04
8	0,85	15,78
9	0,88	16,36
10	0,91	16,83
11	0,93	17,19
12	0,94	17,48
13	0,95	17,70
14	0,96	17,88
15	0,97	18,02
16	0,98	18,13
17	0,98	18,22
18	0,99	18,29
19	0,99	18,34
20	0,99	18,39

Doldurma durumunda sürtünme çekmesi,  $p_{wf}(z)$ :

$$p_{wf}(z=20) = \mu p_{h0} Y_f(z=20) = (0,33)(18,55)(0,99) = 6,07 \text{ kN/m}^2$$

Doldurma durumunda sürtünme çekmesi değişimi Çizelge 6.5’de gösterilmiştir.

Çizelge 6.5 Doldurma durumunda sürtünme çekmesi değişimi

z	$Y_f(z)=1-e^{-(z/z_0)}$	$p_{wf}=\mu p_{h0} Y_f(z)$ (kN/m <sup>2</sup> )
0	0,00	0,00
1	0,21	1,30
2	0,38	2,32
3	0,51	3,12
4	0,61	3,76
5	0,70	4,26
6	0,76	4,65
7	0,81	4,96
8	0,85	5,21
9	0,88	5,40
10	0,91	5,55
11	0,93	5,67
12	0,94	5,77
13	0,95	5,84
14	0,96	5,90
15	0,97	5,95
16	0,98	5,98
17	0,98	6,01
18	0,99	6,04
19	0,99	6,05
20	0,99	6,07

Doldurma durumunda düşey basınç,  $p_{vf}(z)$ :

$$p_{vf}(z=20) = (p_{h0}/K) Y_f(z=20) = 18,55/0,49 = 37,52 \text{ kN/m}^2$$

Doldurma durumunda düşey basınç değişimi Çizelge 6.6’da gösterilmiştir.

Simetrik dolum yüküne ek olarak **doldurma ek yükleri** hesabı, Bölüm 4.6.1.1’de açıklandığı gibi yapılacaktır. Dairesel olmayan silolarda doldurma ek basıncı referans büyüklüğü Denklem 4.20’ye göre hesaplanacaktır. Doldurma ek basıncı referans büyüklüğü  $p_{pf}$  Denklem 4.13’te verilmiştir.  $e_f$ , doldurma esnasında yığın yüzeyinin maksimum eksantrisitesi sıfır olarak alındığından  $E=0$  olacaktır. Denklem 4.14’e göre;

$$C_{pf} = 0,21 \cdot 0,5 [1 + 2(0)^2] (1 - e^{\{-1,5[(\frac{20}{2,5})^{-1}]\}}) = 0,1$$

$$p_{pf} = 0,1 \cdot 18,39 = 1,839 \text{ kN/m}^2 \text{ (Denklem 4.13’den)}$$

$$p_{pf,nc} = 0,36 \cdot 1,839 = 0,66 \text{ kN/m}^2 \text{ (Denklem 4.20’den)}$$

Ek yükün uygulandığı bölgenin  $s$  yüksekliği (Şekil 4.3):

$$s = \pi d_c / 16 \approx 0,2 d_c$$

$$s = \pi d_c / 16 \approx 0,2 \cdot 2,5 = 0,5 \text{ m}$$

Çizelge 6.6 Doldurma durumunda düşey basınç değişimi

z	$Y(z)=1-e^{-(z/10)}$	$P_vf=(P_0/K)*Y(z)$ (kN/m <sup>2</sup> )
0	0,00	0,00
1	0,21	8,01
2	0,38	14,32
3	0,51	19,30
4	0,61	23,23
5	0,70	26,32
6	0,76	28,76
7	0,81	30,68
8	0,85	32,20
9	0,88	33,40
10	0,91	34,34
11	0,93	35,08
12	0,94	35,67
13	0,95	36,13
14	0,96	36,49
15	0,97	36,78
16	0,98	37,01
17	0,98	37,18
18	0,99	37,32
19	0,99	37,43
20	0,99	37,52

### 6.3.2. Boşaltma yükleri

Öncelikle **simetrik boşaltma yükleri** Bölüm 4.6.1.2’de açıklandığı gibi hesaplanacaktır. Simetrik boşaltma basıncı  $p_{he}$  ve duvar sürtünmesi  $p_{we}$  Denklem 4.21 ve 4.22’de verildiği gibi hesaplanır. Burada, EDS-2 olan örnek silo için, yatay basınç için boşaltma faktörü  $C_h$ , 1,15 ve duvar sürtünmesi için boşaltma faktörü  $C_w$ , 1,0 olarak alınacaktır. Doldurma ve boşaltma işlemi merkezi olarak yapıldığı varsayılarak, eksantrisite sıfır alınacaktır.

En kritik değer için boşaltma durumundaki dik basınç:

$$p_{he}=C_h p_{hf}=(1,15)(18,39)=21,14 \text{ kN/m}^2$$

En kritik değer için boşaltma durumundaki sürtünme çekmesi:

$$p_{we}=C_w p_{wf}=(1,0)(6,07)=6,07 \text{ kN/m}^2$$

Boşaltma durumunda dik basınç ve sürtünme çekmesinin değişimi Çizelge 6.7’de gösterilmiştir.

**Boşaltma ek yükleri** de Bölüm 4.6.1.2’de açıklandığı gibi hesaplanacaktır. Boşaltma ek yükü referans değeri  $p_{pe}$ , Denklem 4.26’da verilmiştir. Burada  $[h_c/d_c=8]>1,2$  olduğundan, Denklem 4.27 kullanılacaktır.  $C_{op}$ , Çizelge 4.4’de verilen ek yük katı referans faktörü 0.5 olarak alınmıştır.

Çizelge 6.7 Boşaltma durumunda dik basınç ve sürtünme çekmesi değişimi

z	$Y(z)=1-e^{-z/z_0}$ -	$P_{he}(z)=Ch.P_{hf}$ (kN/m <sup>2</sup> )	$P_{we}=Cw.p_{wf}$ (kN/m <sup>2</sup> )
0	0,00	0,00	0,00
1	0,21	4,51	1,30
2	0,38	8,07	2,32
3	0,51	10,88	3,12
4	0,61	13,09	3,76
5	0,70	14,83	4,26
6	0,76	16,21	4,65
7	0,81	17,29	4,96
8	0,85	18,14	5,21
9	0,88	18,82	5,40
10	0,91	19,35	5,55
11	0,93	19,77	5,67
12	0,94	20,10	5,77
13	0,95	20,36	5,84
14	0,96	20,56	5,90
15	0,97	20,72	5,95
16	0,98	20,85	5,98
17	0,98	20,95	6,01
18	0,99	21,03	6,04
19	0,99	21,09	6,05
20	0,99	21,14	6,07

$$C_{pe}=0,42.(0,5) [1+2(0)^2](1-\exp\{-1,5[(20/2,5)-1]\})$$

$$C_{pe}=0,21$$

$$p_{pe}=0,21.(21,14)= 4,44 \text{ kN/m}^2 \text{ (Denklem 4.26'dan)}$$

Örnek silo dikdörtgen kesitli olduğundan, dairesel olmayan silolar için boşaltma ek basıncı referans büyüklüğü  $p_{pe,nc}$ , Denklem 4.35'e göre;

$$p_{pe,nc}=0,36(4,44)= 0,16 \text{ kN/m}^2$$

Ek yükün uygulandığı bölgenin  $s$  yüksekliği (Şekil 4.6):

$$s=\pi d_c/16 \approx 0,2d_c$$

$$s=\pi d_c/16 \approx 0,2.2,5= 0,5 \text{ m}$$

#### 6.4. Dikdörtgen Silo Hunisine Etkiyen Yükler

Daha önce silo kriterlerini incelerken yapılan tahkikle örnek silo hunisinin dik olduğu tespit edilmiştir. Bölüm 4.7.2'de büyük eğimli huniler incelenmiştir ve bu bölümde anlatıldığı gibi hesaplama yapılacaktır. Hareket sürtünmesi için,  $\mu_{heff}=\mu_1=0,33$  alınacaktır.

#### 6.4.1. Doldurma yükleri

Silo hunisi için doldurma yükü hesabı Bölüm 4.7.2.2’de açıklanmıştır. Büyük eğimli hunide siloda depolanacak malzemenin doldurulması esnasında ortalama dikey gerilmesi Denklem 4.58’e göre hesaplanacaktır.

$$F_f = 1 - \frac{b}{(1 + \frac{\tan\beta}{\mu_l})} = 1 - \frac{0,2}{(1 + \frac{\tan 23}{0,33})} = 0,91$$

Denklem 4.53’de;

$$n = S(1-b)\mu_l \cot\beta \text{ ve } b=0,2 \text{ (deneysel değer).}$$

Siloya malzemeyi doldurduktan sonra büyük eğimli huni duvarının herhangi bir noktasında oluşan normal basınç  $p_{nf}$  ve sürtünme çekmesi  $p_{tf}$  Denklem 4.59 ve 4.60’ta verildiği gibi hesaplanmalıdır (Şekil 4.10).

Huni ağzı tepe noktasının x mesafesi kadar üstünde malzeme içerisindeki ortalama dikey gerilme Denklem 4.53’te verildiği gibi hesaplanabilir. Geçişteki ortalama basınç hesabı Denklem 4.52’de verilmiştir. EDS 2 için  $C_b = 1,0$  alınacaktır.

$$n = 2(0,8)0,33 \cot 23 = 1,24$$

$$p_v = \left(\frac{9 \cdot 3,462}{0,24}\right) \left\{ \left(\frac{3,462}{3,462}\right) - \left(\frac{3,462}{3,462}\right)^{1,24} \right\} + p_{vft} \left(\frac{3,462}{3,462}\right)^{1,24}$$

$$p_v = p_{vft}$$

$$p_v = 37,53 \text{ kN/m}^2$$

$$P_{nf} = 0,91 \cdot 37,52 = 34,15 \text{ kN/m}^2 \text{ (Denklem 4.59’den)}$$

$$p_{tf} = 0,33 \cdot 34,15 = 11,27 \text{ kN/m}^2 \text{ (Denklem 4.60’den)}$$

Silo hunisinde doldurma durumunda oluşan yükler Çizelge 6.8’de gösterilmiştir.

Çizelge 6.8 Silo hunisinde doldurma durumunda oluşan yükler

x	$P_v$ (kN/m <sup>2</sup> )	$P_{nf} = F_f P_v$ (kN/m <sup>2</sup> )	$P_{tf} = \mu_l F_f P_v$ (kN/m <sup>2</sup> )
2,262	29,26	26,62	8,79
2,862	33,79	30,75	10,15
3,462	37,52	34,15	11,27

#### 6.4.2. Boşaltma yükleri

Büyük eğimli hunide oluşacak boşaltma yükleri hesabı Bölüm 4.7.1.3’te açıklanmıştır. Siloda depolanacak malzemenin boşaltılması esnasında malzeme içerisindeki herhangi bir düzeydeki ortalama dikey gerilme Denklem 4.61 yardımıyla hesaplanacaktır.

$$\varphi_{wh} = \tan^{-1}\mu_l = \tan^{-1}0,33 = 18,26 \text{ (Denklem 4.63'den)}$$

$$\varepsilon = \varphi_{wh} + \sin^{-1}\left\{\frac{\sin\varphi_i}{\sin\varphi_i}\right\} = 18,26 + \sin^{-1}\left\{\frac{\sin 18,26}{\sin 30}\right\} = 57,06 \text{ (Denklem 4.62'den)}$$

$$F_e = \frac{1 + \sin\varphi_i \cos \varepsilon}{1 - \sin\varphi_i \cos(2\beta + \varepsilon)} = \frac{1 + \sin 30 \cdot \cos 57,06}{1 - \sin 30 \cdot \cos(2(23) + 57,06)} = 1,14 \text{ (Denklem 4.61'den)}$$

Siloda depolanan malzemenin boşaltılması esnasında büyük eğimli huni duvarının herhangi bir noktasında oluşan normal basınç  $p_{ne}$  ve sürtünme çekmesi  $p_{te}$  Denklem 4.64 ve 4.65 yardımıyla hesaplanmalıdır. Silo hunisinde boşaltma durumunda oluşan yükler Çizelge 6.9'da gösterilmiştir.

**Çizelge 6.9** Silo hunisinde boşaltma durumunda oluşan yükler

x	Pv (kN/m <sup>2</sup> )	Pne=Fe.Pv (kN/m <sup>2</sup> )	Pte=μl.Fe.Pv (kN/m <sup>2</sup> )
2,262	29,26	33,35	11,01
2,862	33,79	38,53	12,71
3,462	37,52	42,78	14,12

### 6.5. Silindir Buğday Silosunun Tasarım ve Analizi

Dikdörtgen buğday silosuna eşdeğer kapasiteye sahip bir silindir buğday silosu ile karşılaştırmak için silindir silo modeli oluşturulacak ve yük hesabı yapılacaktır. Silo kapasitesini bulmak için silonun silindir ve huni kısmının hacmi belirlenmelidir. Buğday ortalama birim hacim ağırlığı ise  $\gamma = 8,25 \text{ kN/m}^3$  olarak EN 1991-4:2006 Tablo E.1 (Çizelge 4.5)' den alınmıştır.

Dikdörtgen silo bölgesi için,

$$A = a \cdot b = 2,5 \cdot 3 = 7,5 \text{ m}^2$$

Aynı alana sahip silindir silo yarıçapı,

$$A = \pi r^2 = 7,5 \text{ m}^2$$

$$r = 1,545 \text{ m}$$

$$V_d = \pi r^2 h = \pi 1,545^2 \cdot 20 = 150 \text{ m}^3$$

Silindir silo huni kısmı için,

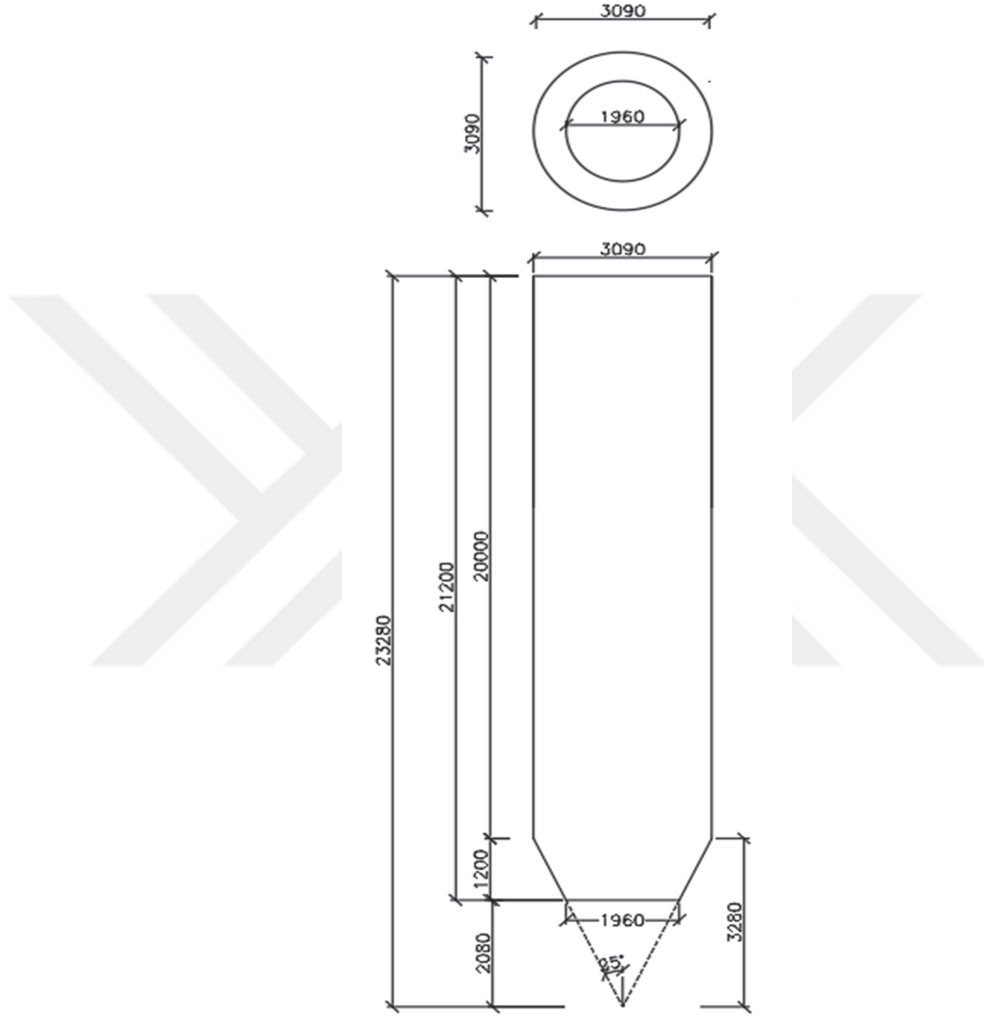
$$V_h = \frac{1}{3} \pi r^2 h$$

$$V_h = \frac{1}{3} \pi \{(1,545)^2 (3,280) - (0,98)^2 (2,080)\} = 6,11 \text{ m}^3$$

$$V_{net} = 150 + 6,11 = 156,11 \text{ m}^3$$

Buğday silosunun kapasitesi,

$W_k = V_{net} \cdot \gamma = 156,11.8,25.0,1 = 128,8$  tonf (yaklaşık dikdörtgen silonun kapasitesine eşit) olduğu için EN 1991-4:2006 Tablo 2.1'den EDS-2 olarak hesaplama yapılacaktır. Doldurma ve boşaltma ek yük hesabı yapılacaktır. Parametrelerin alt, üst ve ortalama değerleri kullanılacaktır.



Şekil 6.3 Örnek silindir buğday silosu boyutları

Geometrik koşullar:

$$h_b/d_c < 10 = (20+2,080+1,2)/3,09 = 7,53 \text{ m} \quad \checkmark$$

$$h_b < 100 \text{ m} = 23,280 < 100 \text{ m} \quad \checkmark$$

$$d_c < 60 \text{ m} = 3,09 < 60 \text{ m} \quad \checkmark$$

Silonun narinliği:

$$h_c/d_c = 20/3,09 = 6,47 \geq 2,0 \text{ olduğu için narin silo olarak değerlendirilecektir.}$$

Silo kapasitesine göre etki değerlendirme sınıfı belirlenecektir.

Buğday silo kapasitesi 100tonf üzerinde olduğu için EDS-2 olarak hesaplama yapılacaktır.

Silo hunisinin dikliği:

$\tan\beta < (1-K)/(2\mu_l)$  ise büyük eğimli hunidir.

$\tan 25^\circ < (1-0,54)/(2)(0,33)$

$0,47 < 0,70$  olduğu için silo hunisi dik olarak kabul edilecektir.

Buğday için Çizelge 4.6'dan aşağıdaki değerler alınmıştır.

- $\theta_r=34^\circ$ , şev açısı,
- $\varphi_{im}=30^\circ$ , ortalama iç sürtünme açısı,
- $a_\varphi=1,12$  katsayısı,
- $K_m=0,54$  ortalama yanal basınç oranı,
- $a_K=1,11$  katsayısı,
- $\mu = \tan \varphi_w$  Duvar sürtünme katsayısı,
- $a_\mu=1,16$  katsayısı,
- $C_{op}=0,5$  ek yük katı referans katsayısı,
- Bu silo için duvar malzemesi (Çizelge 4.4) galvaniz kaplı karbon çeliği olarak (D2) olarak seçilmiştir. D2 için  $\mu =0,38$

## 6.6. Silindir Silonun Dikey Silo Duvarına Etkiyen Yükler

### 6.6.1. Doldurma yükleri

Öncelikle, simetrik doldurma yükleri hesabı, Bölüm 4.6.1.1'de açıklandığı gibi yapılacaktır. Şekil 4.2'de hesap edilen yüklerin silo duvarına ne şekilde tesir ettikleri görülebilir.

Doldurma durumunda dik basınç,  $p_{hf}(z)$ :

$$\frac{A}{U} = \frac{r}{2} = \frac{1,545}{2} = 0,77$$

$$z_0 = \frac{1}{K\mu} \frac{A}{U} = \frac{1}{(0,49)(0,33)} \cdot 0,77 = 4,76 \text{ m}$$

$$p_{h0} = \gamma K z_0 = (9)(0,49)(4,76) = 21 \text{ kN/m}^2$$

$$Y_J(z=20) = 1 - e^{-z/z_0} = 1 - e^{-20/4,76} = 0,99$$

$$p_{hf}(z=20) = p_{h0} Y_J(z=20) = 21 \cdot 0,99 = 20,69 \text{ kN/m}^2$$

Doldurma durumunda duvara dik basınç değişimi Çizelge 6.10'da gösterilmiştir.

Doldurma durumunda sürtünme çekmesi,  $p_{wf}(z)$ :

$$p_{wf}(z=20) = \mu p_{h0} Y_J(z=20) = (0,33)(21)(0,99) = 6,83 \text{ kN/m}^2$$

Doldurma durumunda sürtünme çekmesi değişimi Çizelge 6.11’de gösterilmiştir.

Çizelge 6.10 Doldurma durumunda dik basınç değişimi

z	$Y(z)=1-e^{-z/z_0}$	$ph(z)=Ph_0.Y(z)$ (kN/m <sup>2</sup> )
0	0,00	0,00
1	0,19	3,98
2	0,34	7,20
3	0,47	9,82
4	0,57	11,93
5	0,65	13,65
6	0,72	15,04
7	0,77	16,17
8	0,81	17,09
9	0,85	17,83
10	0,88	18,43
11	0,90	18,92
12	0,92	19,31
13	0,93	19,63
14	0,95	19,89
15	0,96	20,10
16	0,97	20,27
17	0,97	20,41
18	0,98	20,52
19	0,98	20,61
20	0,99	20,69

Çizelge 6.11 Doldurma durumunda sürtünme çekmesi değişimi

z	$Y(z)=1-e^{-z/z_0}$	$pwf= \mu.ph_0.Y(z)$ (kN/m <sup>2</sup> )
0	0,00	0,00
1	0,19	1,31
2	0,34	2,38
3	0,47	3,24
4	0,57	3,94
5	0,65	4,50
6	0,72	4,96
7	0,77	5,34
8	0,81	5,64
9	0,85	5,88
10	0,88	6,08
11	0,90	6,24
12	0,92	6,37
13	0,93	6,48
14	0,95	6,56
15	0,96	6,63
16	0,97	6,69
17	0,97	6,73
18	0,98	6,77
19	0,98	6,80
20	0,99	6,83

Doldurma durumunda düşey basınç,  $p_{vf}(z=20) = (p_{h0}/K)Y_f(z=20) = 20,69/0,49 = 42,21$   $\text{kN/m}^2$  Doldurma durumunda düşey basınç değişimi Çizelge 6.12’de gösterilmiştir.

Çizelge 6.12 Doldurma durumunda sürtünme çekmesi değişimi

z	$Y_f(z)=1-e^{-(z/20)}$	$P_{vf}=(P_{h0}/K)Y_f(z)$ ( $\text{kN/m}^2$ )
0	0,00	0,00
1	0,19	8,12
2	0,34	14,70
3	0,47	20,03
4	0,57	24,36
5	0,65	27,86
6	0,72	30,70
7	0,77	33,00
8	0,81	34,87
9	0,85	36,38
10	0,88	37,61
11	0,90	38,60
12	0,92	39,41
13	0,93	40,06
14	0,95	40,59
15	0,96	41,02
16	0,97	41,37
17	0,97	41,65
18	0,98	41,88
19	0,98	42,06
20	0,99	42,21

Simetrik dolunm yüküne ek olarak doldurma ek yükleri hesabı, Bölüm 4.6.1.1’de açıklanmış gibi yapılacaktır. İnce duvarlı silolarda ( $d_c/t > 200$ ) doldurma ek yükü hesabında  $p_{pfs}$  Denklem 4.18’de verildiği gibi hesaplanacaktır. Doldurma ek basıncı referans büyüklüğü  $p_{pf}$  Denklem 4.13’te verilmiştir. Denklem 4.14’ten  $C_{pf}$  hesaplanacak olursa;

$$C_{pf} = 0,21 \cdot 0,5 [1 + 2(0)^2] (1 - e^{-1,5 \left[ \left( \frac{20}{3,09} \right) - 1 \right]}) = 0,1 \quad (\text{Denklem 4.14'ten})$$

$$p_{pfs} = 0,1 \cdot 20,69 = 2,069 \text{ kN/m}^2 \quad (\text{Denklem 4.13'ten})$$

$p_{pfs}$  Şekil 4.3’te gösterilen  $\theta$  açısına göre değişim göstermektedir. Yükleme, bu açiya bağlı olarak ek yükün uygulandığı bölge boyunca yapılacaktır.

Ek yükün uygulandığı bölgenin  $s$  yüksekliği (Şekil 4.3):

$$s = \pi d_c / 16 \approx 0,2 d_c$$

$$s = \pi d_c / 16 \approx 0,2 \cdot 3,09 = 0,6 \text{ m}$$

### 6.6.2. Boşaltma yükleri

Öncelikle **simetrik boşaltma yükleri** Bölüm 4.6.1.2’de açıklandığı gibi hesaplanacaktır. Simetrik boşaltma basıncı  $p_{he}$  ve duvar sürtünmesi  $p_{we}$  Denklem 4.21 ve 4.22’de verildiği gibi hesaplanır. Burada, EDS-2 olan örnek silo için, yatay basınç için boşaltma faktörü  $C_h$ , 1,15 ve duvar sürtünmesi için boşaltma faktörü  $C_w$ , 1,0 olarak alınacaktır. Doldurma ve boşaltma işlemi merkezi olarak yapıldığı varsayılarak, eksantrite sıfır alınacaktır.

En kritik değer için boşaltma durumundaki dik basınç:

$$p_{he} = C_h p_{hf} = (1,15)(20,69) = 23,79 \text{ kN/m}^2$$

En kritik değer için boşaltma durumundaki sürtünme çekmesi:

$$p_{we} = C_w p_{wf} = (1,0)(6,83) = 6,83 \text{ kN/m}^2$$

Boşaltma durumunda dik basınç ve sürtünme çekmesinin değişimi Çizelge 6.13’de gösterilmiştir.

**Çizelge 6.13** Boşaltma durumunda dik basınç ve sürtünme çekmesi değişimi

$z$	$\gamma(z) = 1 - e^{-(z/z_0)}$	$P_{he}(z) = C_h \cdot P_{hf}$ (kN/m <sup>2</sup> )	$P_{we} = C_w \cdot p_{wf}$ (kN/m <sup>2</sup> )
0	0,00	0,00	0,00
1	0,19	4,57	1,31
2	0,34	8,28	2,38
3	0,47	11,29	3,24
4	0,57	13,72	3,94
5	0,65	15,70	4,50
6	0,72	17,30	4,96
7	0,77	18,60	5,34
8	0,81	19,65	5,64
9	0,85	20,50	5,88
10	0,88	21,19	6,08
11	0,90	21,75	6,24
12	0,92	22,21	6,37
13	0,93	22,57	6,48
14	0,95	22,87	6,56
15	0,96	23,12	6,63
16	0,97	23,31	6,69
17	0,97	23,47	6,73
18	0,98	23,60	6,77
19	0,98	23,70	6,80
20	0,99	23,79	6,83

**Boşaltma ek yükleri** de Bölüm 4.6.1.2’de açıklandığı gibi hesaplanacaktır. Şekil 4.6’da gösterildiği gibi silodan dışa ve içe doğru olacak biçimde  $s$  yüksekliği boyunca yüklenecektir. İnce duvarlı silolarda ( $d_c/t > 200$ ), maksimum değeri  $p_{pes}$  olan bu ek yük, çevresel değişimi  $\theta$  açısına bağlı olarak Denklem 4.33’teki gibi hesaplanır. Boşaltma ek

yükü referans değeri  $p_{pe}$ 'nin hesabı Denklem 4.26'da verilmiştir. Burada  $[h_c/d_c=(6,47)]>1,2$  olduğundan  $C_{pe}$  Denklem 4.27'den hesaplanacaktır;

$$C_{pe}=0,42.(0,5) [1+2(0)^2](1-\exp\{-1,5[(20/3,09)-1]\}) \quad (\text{Denklem 4.27'den})$$

$$C_{pe}=0,21$$

$$p_{pe} = 0,21.(23,79) = 5 \text{ kN/m}^2 \quad (\text{Denklem 4.26'dan})$$

Ek yükün uygulandığı bölgenin  $s$  yüksekliği (Şekil 4.6):

$$s=\pi d_c/16 \approx 0,2d_c$$

$$s=\pi d_c/16 \approx 0,2.3,09 = 0,6 \text{ m}$$

### 6.7. Silindir Silo Hunisine Etkiyen Yükler

Bölüm 4.7.2'de büyük eğimli huniler için yapılan açıklamalar bu bölüm için de geçerlidir. Hesaplamalar bu doğrultuda gerçekleştirilecektir. Hareket sürtünmesi için,  $\mu_{heff}=\mu_l=0,33$  alınacaktır.

#### 6.7.1. Doldurma yükleri

Silo hunisi için doldurma yükü hesabı Bölüm 4.7.2.2'de açıklanmıştır. Büyük eğimli hunide siloda depolanacak malzemenin doldurulması esnasında ortalama dikey gerilmesi Denklem 4.58'e göre hesaplanacaktır. Bölüm 6.4.1'deki dikdörtgen silodan farklı olarak silo eğim açısı  $23^\circ$  yerine  $25^\circ$  alınarak hesaplar tekrarlanacaktır.

$$F_f = 1 - \frac{b}{(1 + \frac{\tan\beta}{\mu_l})} = 1 - \frac{0,2}{(1 + \frac{\tan 25^\circ}{0,33})} = 0,91$$

Denklem 4.53'de;

$$n = S(1-b)\mu_l \cot\beta \text{ ve } b=0,2 \text{ (deneysel değer).}$$

Siloya malzemeyi doldurduktan sonra büyük eğimli huni duvarının herhangi bir noktasında oluşan normal basınç  $p_{nf}$  ve sürtünme çekmesi  $p_{tf}$  Denklem 4.59 ve 4.60'ta verildiği gibi hesaplanmalıdır (Şekil 4.10).

Huni ağzı tepe noktasının  $x$  mesafesi kadar üstünde malzeme içerisindeki ortalama dikey gerilme Denklem 4.53'te verildiği gibi hesaplanabilir. Geçişteki ortalama basınç hesabı Denklem 4.52'de verilmiştir. EDS 2 için  $C_b = 1,0$  alınacaktır.

$$n = 2(0,8)0,33 \cot 25^\circ = 1,13$$

$$p_v = \left(\frac{9 \cdot 3,280}{0,13}\right) \left\{ \left(\frac{x}{3,280}\right) - \left(\frac{x}{3,280}\right)^{1,13} \right\} + p_{vft} \left(\frac{x}{3,280}\right)^{1,13}$$

$x = 3280 \text{ mm}$  için  $p_v$ ,

$$p_v = \left(\frac{9 \cdot 3,280}{0,13}\right) \left\{ \left(\frac{3,280}{3,280}\right) - \left(\frac{3,280}{3,280}\right)^{1,13} \right\} + 42,21 \left(\frac{3,280}{3,280}\right)^{1,13}$$

$$p_v=42,21 \text{ kN/m}^2$$

Doldurma durumunda huni ağzında ( $x=3280 \text{ mm}$ ) oluşacak maksimum normal basınç  $P_{nf}$  ve maksimum sürtünme çekmesi  $P_{tf}$  şu şekilde bulunur:

$$P_{nf} = 0,91.42,21 = 38,42 \text{ kN/m}^2 \text{ (Denklem 4.59'dan)}$$

$$p_{tf} = 0,33.0,91.42,21 = 12,68 \text{ kN/m}^2 \text{ (Denklem 4.60'dan)}$$

Silo hunisinde doldurma durumunda oluşan yükler Çizelge 6.14'de gösterilmiştir.

Çizelge 6.14 Silo hunisinde doldurma durumunda oluşan yükler

x	$P_v$ (kN/m <sup>2</sup> )	$P_{nf}=F_f.P_v$ (kN/m <sup>2</sup> )	$P_{tf}=\mu.L.F_f.P_v$ (kN/m <sup>2</sup> )
2,08	33,51	30,49	10,06
2,68	38,41	34,95	11,53
3,28	42,21	38,42	12,68

### 6.7.2. Boşaltma yükleri

Büyük eğimli hunide oluşacak boşaltma yükleri hesabı Bölüm 4.7.1.3'te açıklanmıştır. Siloda depolanacak malzemenin boşaltılması esnasında malzeme içerisindeki herhangi bir düzeydeki ortalama dikey gerilme Denklem 4.61 yardımıyla hesaplanacaktır. Bölüm 4.2'de hesaplanan  $\varphi_{wh}$  ve  $\varepsilon$  değerleri burada da aynen kullanılacaktır.

$$F_e = \frac{1 + \sin \varphi_i \cos \varepsilon}{1 - \sin \varphi_i \cos(2\beta + \varepsilon)} = \frac{1 + \sin 30 \cdot \cos 57,06}{1 - \sin 30 \cdot \cos(2(25) + 57,06)} = 1,31 \text{ (Denklem 4.61'den)}$$

Siloda depolanan malzemenin boşaltılması esnasında büyük eğimli huni duvarının herhangi bir noktasında oluşan normal basınç  $p_{ne}$  ve sürtünme çekmesi  $p_{te}$  Denklem 4.64 ve 6.65 yardımıyla hesaplanmalıdır. Boşaltma durumunda huni ağzında ( $x=3280 \text{ mm}$ ) oluşacak maksimum normal basınç  $P_{ne}$  ve maksimum sürtünme çekmesi  $P_{te}$ ,

$$P_{ne} = 1,31.42,21 = 55,30 \text{ kN/m}^2 \text{ (Denklem 4.64'den)}$$

$$p_{te} = 0,33.1,31.42,21 = 18,25 \text{ kN/m}^2 \text{ (Denklem 4.65'den)}$$

Silo hunisinde boşaltma durumunda oluşan yükler Çizelge 6.15'de gösterilmiştir.

Çizelge 6.15 Silo hunisinde boşaltma durumunda oluşan yükler

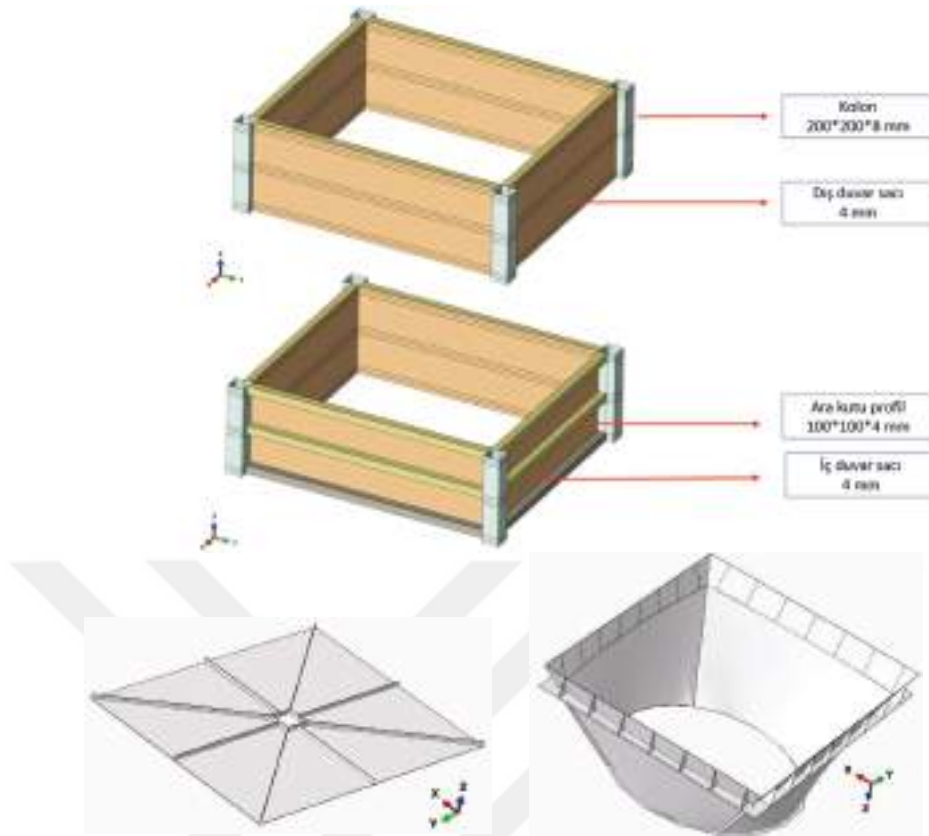
x	$P_v$ (kN/m <sup>2</sup> )	$P_{ne}=F_e.P_v$ (kN/m <sup>2</sup> )	$P_{te}=\mu.L.F_e.P_v$ (kN/m <sup>2</sup> )
2,08	33,51	43,90	14,49
2,68	38,41	50,31	16,60
3,28	42,21	55,30	18,25

### 6.8. Dikdörtgen Buğday Silosunun ABAQUS İle Modellenmesi

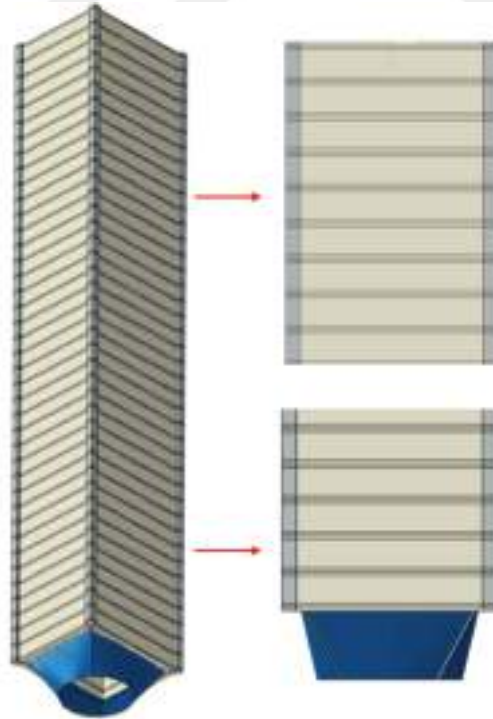
Bu bölümde Bölüm 6.2’de ölçüleri belirlenen ve Bölüm 6.3 ve 6.4’de yükleri hesaplanan dikdörtgen buğday silosunun ABAQUS programında sonlu eleman modellenmesi yapılacaktır. Şekil 6.2’de silonun ölçüleri verilmiştir. Buna göre silo gövdesi 2,5m x 3m x 20m ölçülerindedir. Silo hunisi 1,2m yükseklikte olup boşaltma ağız çapı 1,96m dir. Silonun en üstünde bir kapak ve kapak ortasında 0,25m x 0,25m boyutlarında bir doldurma boşluğu bulunmaktadır. Kapak bölgesindeki deplasmanları sınırlandırmak için kapakta berkitmeler teşkil edilmiştir (Şekil 6.4). Silo hunisinin, 4 parça çelik levhanın katlanmış kenarlarının kaynakla birleştirilmesiyle teşkil edildiği varsayılmıştır. (Şekil 6.4). Bu kenarlar aynı zamanda berkitme görevi görerek huni deplasman ve gerilmelerini sınırlandırılmaktadır Huninin duvarla birleştiği üst kotuna üçgen çelik levhalardan 5mm kalınlıkta berkitmeler teşkil edilmiştir (Şekil 6.4). Silo iç ve dış duvar sacları 4mm, ara kutu profil 4mm, kolon 8mm, huni 5mm, kapak 3mm, berkitmeler 8mm kalınlıkta teşkil edilmiştir. Silo duvarı 1m yüksekliğinde, iç ve dış sacı olan ve içinde metrede 3 adet 100mm x 100mm x 4mm kutu profili bulunan modüller şeklindedir.

Programda öncelikle geometrik model oluşturulur. Part sekmesinde silo duvarı, silo hunisi ve kapak için part oluşturulur (Şekil 6.4). Materials sekmesinde S275 kalitesindeki çeliğin özellikleri tanımlanır. Bu malzeme kullanılarak farklı kalınlıklarda kabuk kesitleri Section modülü vasıtasıyla oluşturulur. Assembly sekmesinde part’lar için instance’lar oluşturulur ve instance’lar çoğaltılarak silo modeli tamamen oluşturulur (Şekil 6.5). Tüm instance’lar seçilerek merge operasyonu ile birleştirilerek tek bir silo instance’ı ve part’ı oluşturulmuş olur. Bütünleşik part üzerinde kesit atama ve sonlu eleman ağı (mesh) işlemleri yapılır (Şekil 6.6 ve 6.7). Sonlu eleman tipi olarak kabuk (shell) elemanlar kullanılacaktır. Kabuk elemanlardan oluşturulan sonlu eleman ağında, 128301 adet eleman ve 122392 adet düğüm noktası bulunmaktadır. Silonun tamamının çelik zati ağırlığı 24,34 tonf olarak hesaplanmıştır. Silo duvarları altında taşıyıcı çelik şase modellenmemiş sadece bu bölgede mesnet tanımı yapılmıştır.

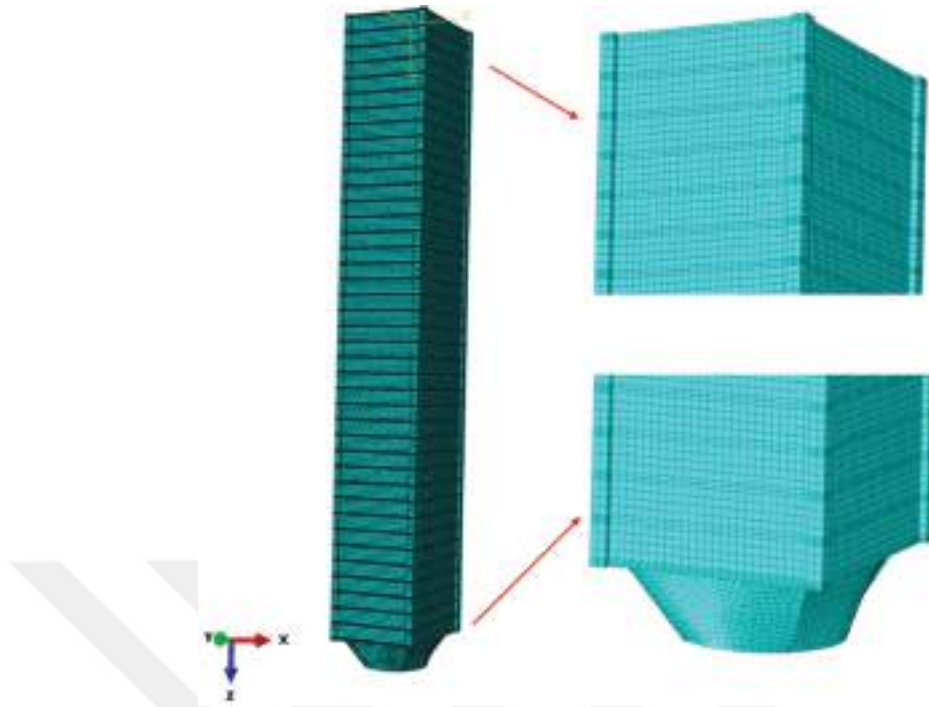
Dikdörtgen buğday silosu duvarı çift duvarlı olarak planlanmıştır. İki duvar arasına kutu profiller yerleştirilmektedir (Şekil 6.4). Bu profiller sadece düşey taşıyıcı kolon profillere kaynak ile birleştirilmektedir.



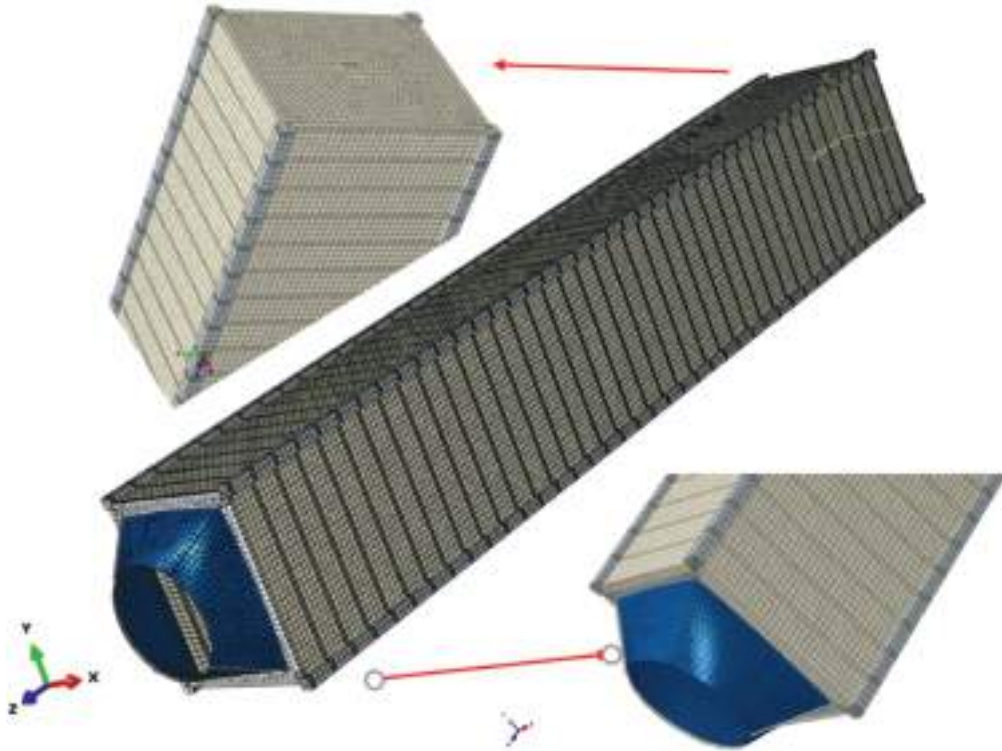
Şekil 6.4 Dikdörtgen silo duvarı için oluşturulan part'lar



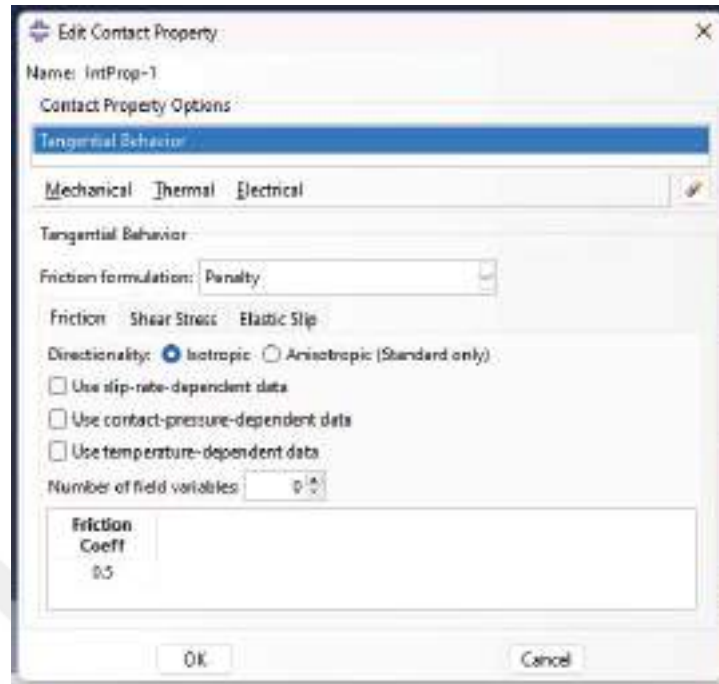
Şekil 6.5 Partlar birleştirildikten sonraki Assembly



Şekil 6.6 Dikdörtgen silonun sonlu eleman ağı (mesh)



Şekil 6.7 Dikdörtgen silo sonlu eleman ağı (perspektif görünüm)

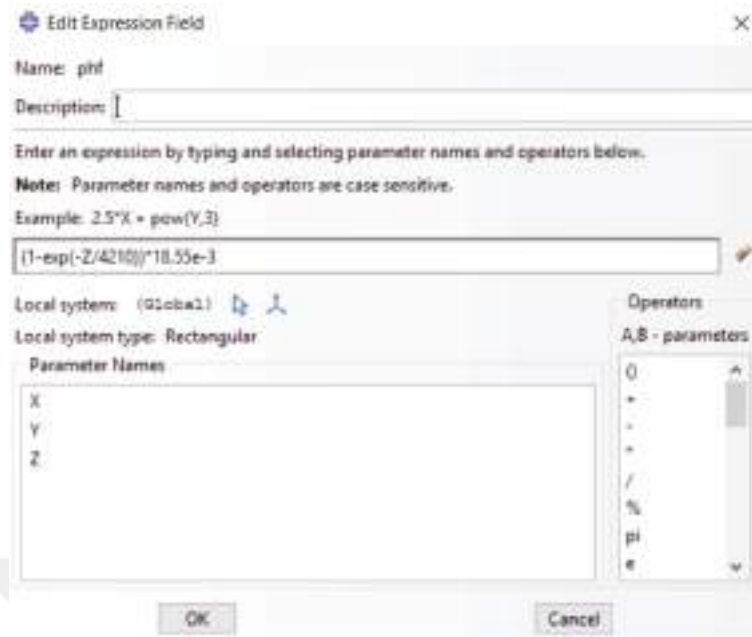


Şekil 6.8 Contact ile sürtünme tanımı

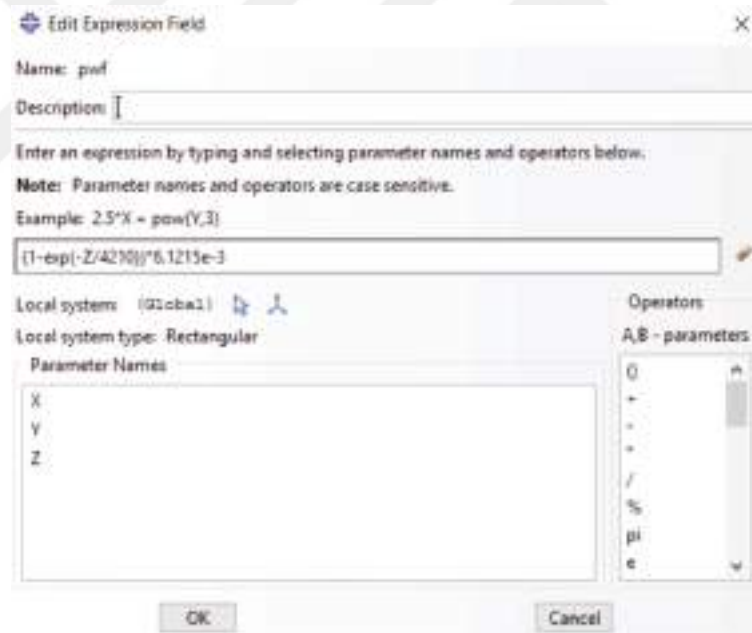
Silonun iç ve dış duvarı ile bu profil arasındaki yük aktarımı ineteraction modülündeki contact tanımı ile yapılmıştır. Contact tanımında yüzeyler arasındaki sürtünme katsayısı 0,5 olarak alınmıştır (Şekil 6.8).

Analiz için Step tanımı yapılırken genelde Static, General seçilir ancak bu çalışmada farklı yük kombinasyonlarını hızlı bir şekilde yapabilmek için Static,Linear perturbation analiz Step türü seçilmiştir.

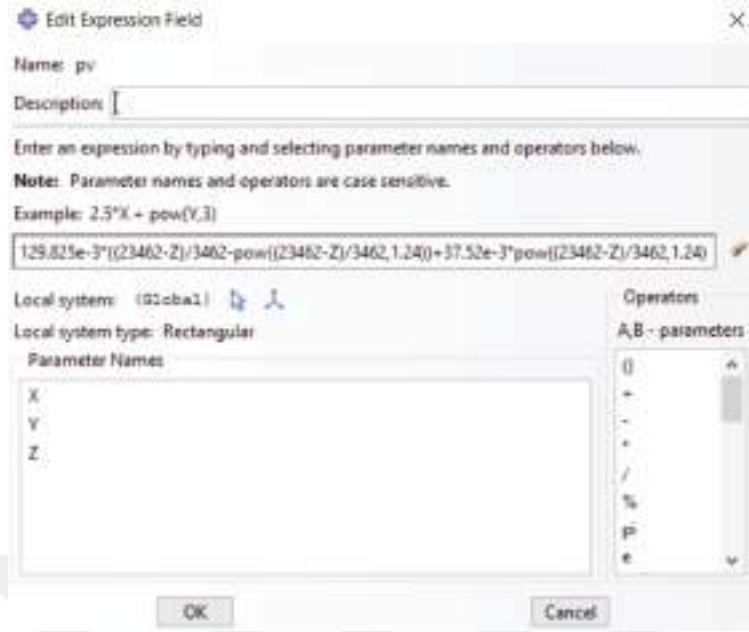
Load modülü ile yükler tanımlanmaktadır. Ancak bu modüle geçmeden önce, silo duvarına yüksekliğe bağlı değişken yayılı yükleme yapabilmek için öncelikle Analytical Field modülünden gerekli Field tanımlarının yapılması ve yükleme denklemlerinin yazılması gereklidir.  $P_{hf}$ ,  $P_{wf}$  ve  $P_v$  yükleri için üç farklı Analytical Field tanımı yapılacaktır (Şekil 6.9, 6.10, 6.11). Diğer yükler bu esas yüklerin katsayılar kullanılarak değiştirilmesi ile etki ettirilecektir.



Şekil 6.9 Dikdörtgen silo  $P_{hf}$  yük tanımı

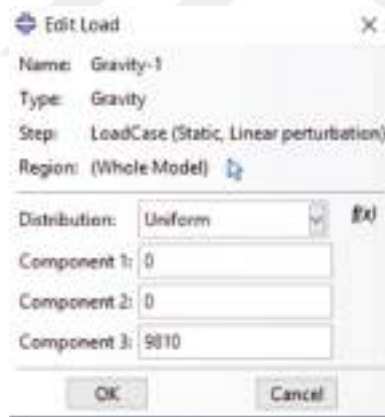


Şekil 6.10 Dikdörtgen silo  $P_{wf}$  yük tanımı



Şekil 6.11 Dikdörtgen silo  $P_v$  yük tanımı

Load modülünde, silo yapısının zati ağırlığı, yerçekimi ivmesinin  $9810 \text{ mm/s}^2$  olarak düşey ekseninde uygulanmasıyla Gravity yük olarak tanımlanır (Şekil 6.12).

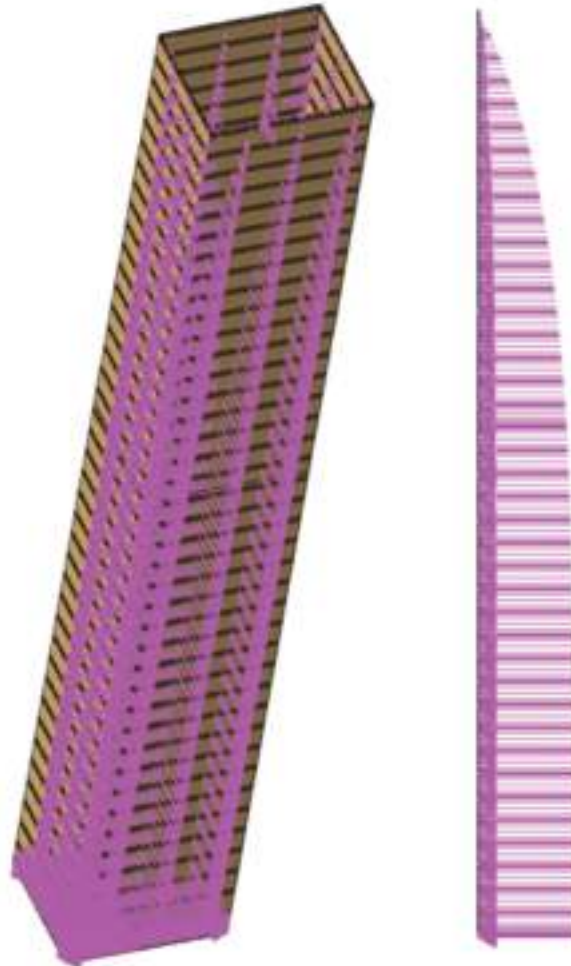


Şekil 6.12 Zati ağırlık tanımı

Doldurma ve boşaltma durumunda hesaplanan duvar yükleri silo iç duvar yüzeyine uygulanacaktır. Doldurma durumunda silo iç duvarına  $P_{hf}$  yükü Şekil 6.13’de gösterildiği üzere basınç yükü (Pressure) olarak yüklenmiştir.



Şekil 6.13  $P_{hf}$  yükünün silo iç duvarına uygulanması

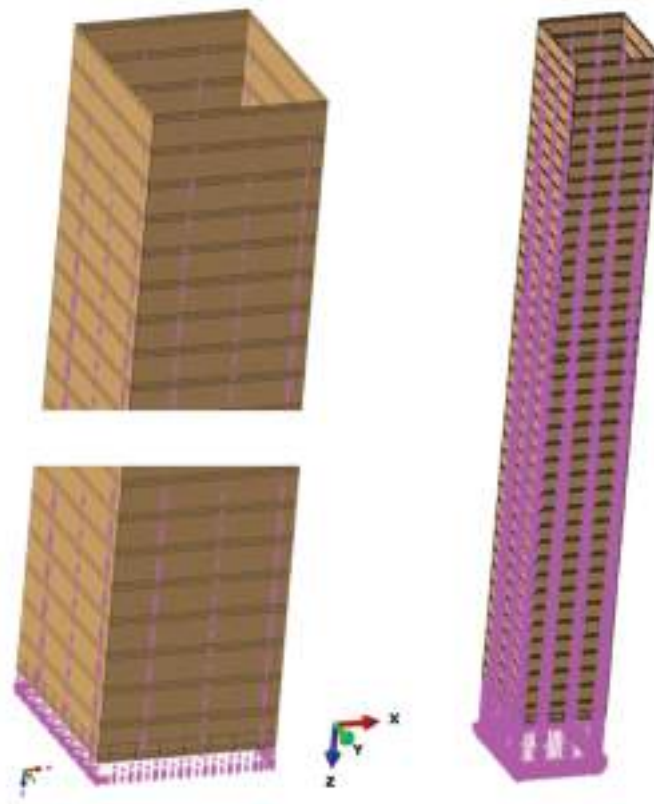


Şekil 6.14 Silo duvarına  $P_{hf}$  basınç yüklemesi

Silo iç duvarına sürtünme yükü  $P_{wf}$ , Surface Traction olarak Şekil 6.15’de gösterildiği gibi yüklenecektir. Yükleme doğrultusu vektörel olarak Global Z yönünde tanımlanmıştır.



Şekil 6.15 Dikdörtgen silo doldurma durumunda  $P_{wf}$  yükünün silo duvarına aktarılması

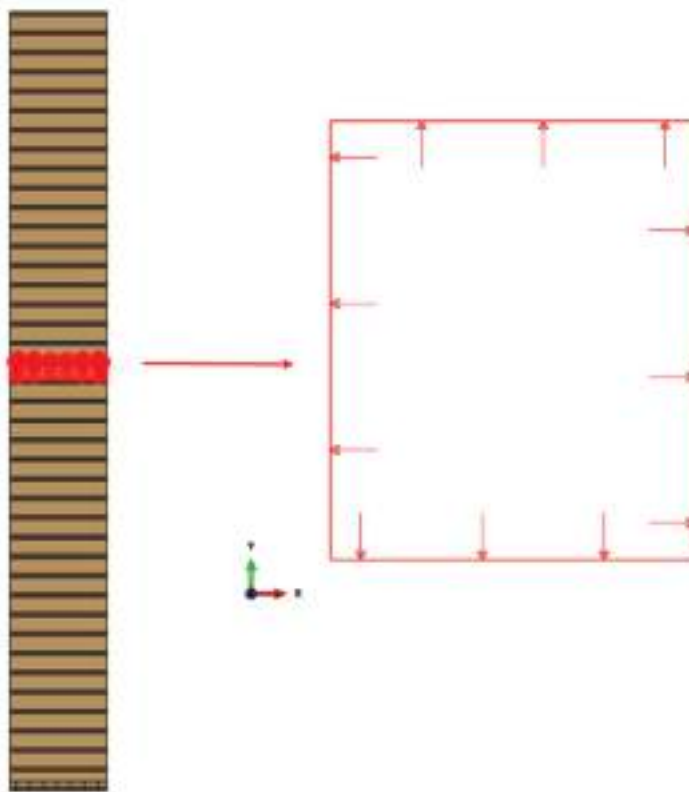


Şekil 6.16 Silo duvarına  $P_{wf}$  sürtünme yüklemesi

Doldurma ek yükü  $P_{pf,n}$  yükü Şekil 6.17’de gösterildiği üzere Pressure olarak yüklenmiştir. Magnitude değeri Denklem 4.20’ye göre hesaplanarak 0.036 olarak girilmiştir.

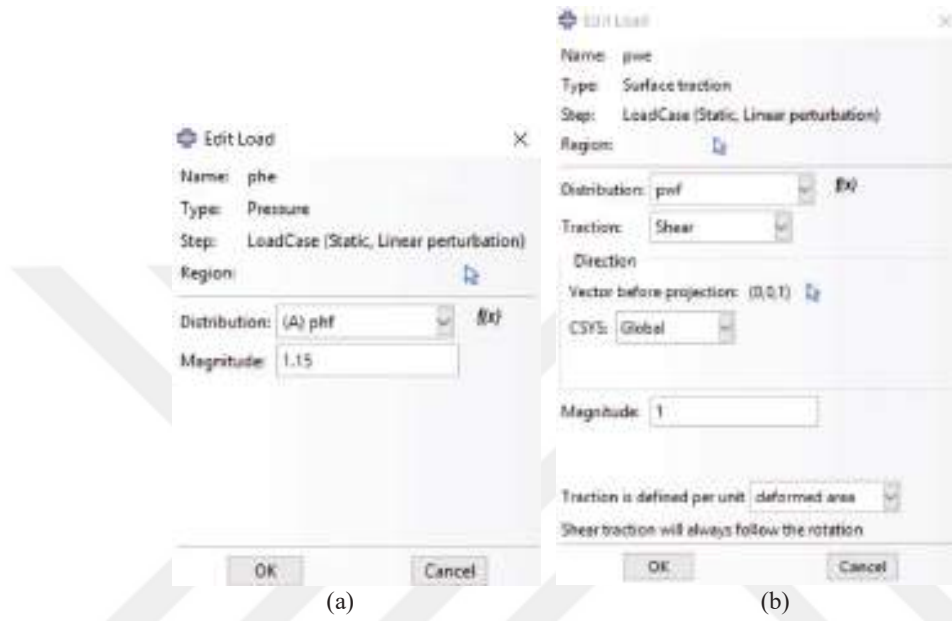


Şekil 6.17 Doldurma ek yükünün,  $P_{pf,n}$ , silo duvarına uygulanması



Şekil 6.18 Dikdörtgen siloda ek yükleme

Boşaltma durumunda silo iç duvarına,  $P_{he}$ , basınç yükü Şekil 6.19a’da gösterildiği üzere basınç yükü Pressure olarak yüklenmiştir. Magnitude değerine boşaltma katsayısı 1,15 olarak girilmiştir. Boşaltma durumunda silo iç duvarına  $P_{we}$  sürtünme yükü Şekil 6.19b’de gösterildiği gibi Surface traction olarak Global Z ekseninde yüklenmiştir. Magnitude değeri boşaltma katsayısına bağlı olarak 1,0 girilmiştir.



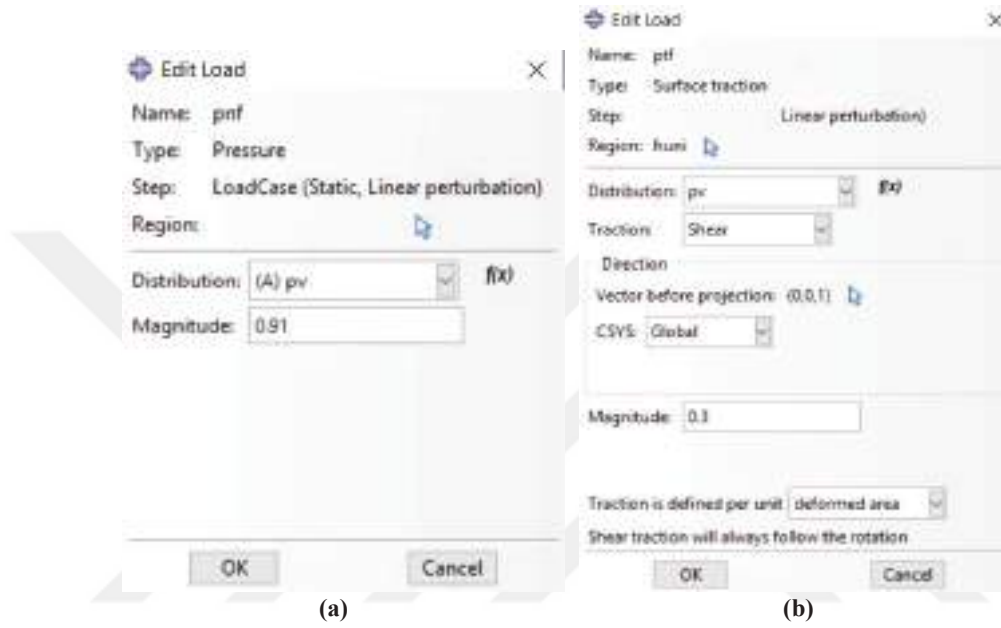
Şekil 6.19 Silo duvarına boşaltma yüklerinin uygulanması (a) Basınç yükü,  $P_{he}$  (b) Sürtünme yükü,  $P_{we}$

Boşaltma durumunda silo iç duvarına  $P_{pe,n}$  ek basınç yükü Şekil 6.20’de gösterildiği gibi Pressure olarak yüklenmiştir. Magnitude değeri Denklem 4.26’dan hesaplanarak 0,08694 olarak girilmiştir.

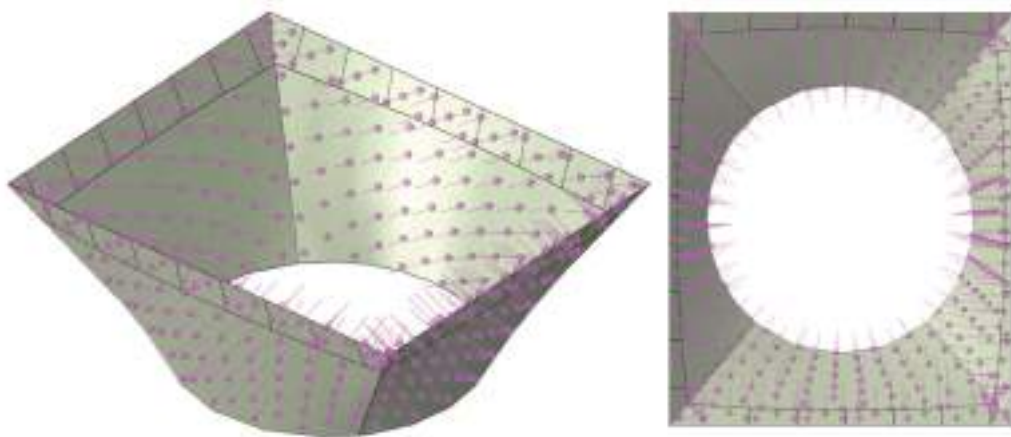


Şekil 6.20 Dikdörtgen silo boşaltma durumunda ek yük  $P_{pe,n}$  yükünün silo duvarına aktarılması

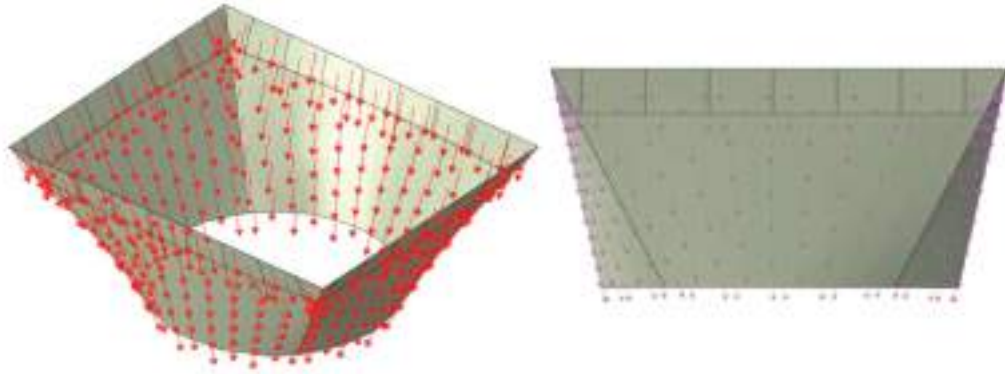
Doldurma durumunda silo hunisine  $P_{nf}$  basınç yükü, Şekil 6.21a'da gösterildiği gibi Pressure olarak yüklenmiştir. Magnitude değeri denklem 4.58'den  $F_f$  katsayısı hesaplanarak 0,91 olarak girilmiştir. Doldurma durumunda silo hunisine  $P_{tf}$  sürtünme yükü Şekil 6.21b'de gösterildiği gibi Surface traction olarak yüklenmiştir. Magnitude değeri Denklem 4.60'dan  $F_f \mu_l$  katsayısı hesaplanarak 0,3 olarak girilmiştir.



Şekil 6.21 (a) Dikdörtgen silo hunisine (a)  $P_{nf}$  yüklemesi (b)  $P_{tf}$  yüklemesi

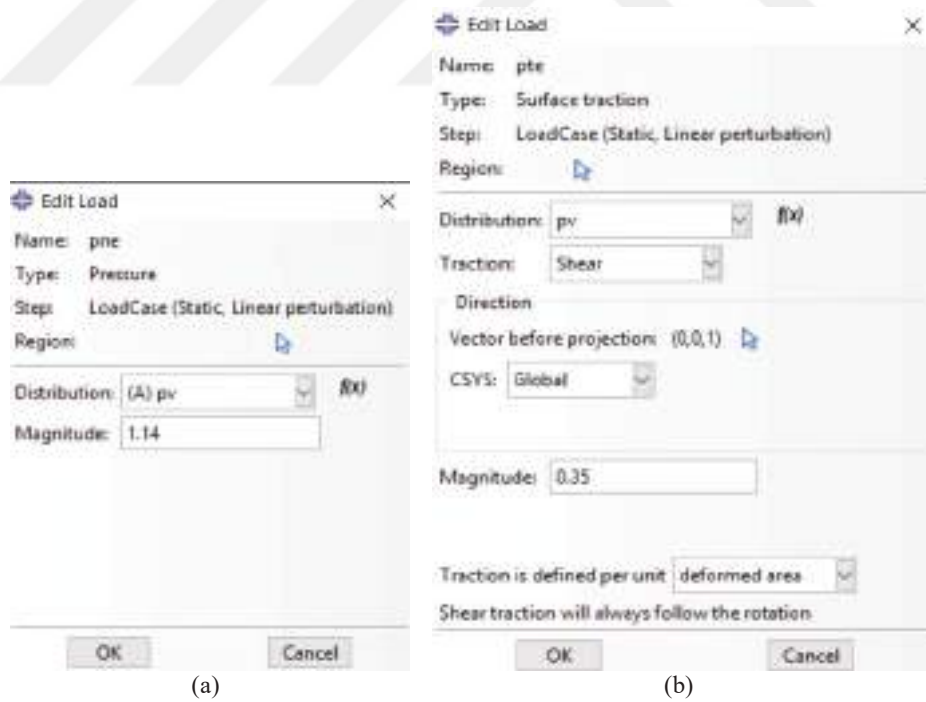


Şekil 6.22 Dikdörtgen silo hunisine  $P_{nf}$  basınç yüklemesi



Şekil 6.23 Dikdörtgen silo hunisine  $P_{te}$  sürtünme yüklemesi

Boşaltma durumunda silo hunisine  $P_{ne}$  yükü Şekil 6.24a'da gösterildiği gibi Pressure olarak yüklenmiştir. Magnitude değeri Denklem 4.61'den  $F_e$  katsayısı hesaplanarak 1,14 olarak girilmiştir. Silo hunisine  $P_{te}$  boşaltma sürtünme yükü, Şekil 6.24b'de gösterildiği gibi Surface traction olarak yüklenmiştir. Magnitude değeri Denklem 4.65'den  $F_e \mu_l$  katsayısı hesaplanarak 0,35 olarak girilmiştir.



Şekil 6.24 Dikdörtgen silo hunisine boşaltma durumunda (a)  $P_{ne}$  basınç yüklemesi (b)  $P_{te}$  sürtünme yüklemesi

Bu çalışmada siloların Eurocode-1 yönetmeliğine göre tüm kıstaslara uyarak bir tasarımından ziyade sonlu eleman modeli oluşturulması, siloda depolanan malzemeden kaynaklı yüklerinin nasıl hesaplanacağı ve yükleneceği konularına odaklanılmıştır. Bu nedenle, siloya etki edecek deprem, rüzgar, kar ve sıcaklık yüklemesi gibi yüklerin hesabına girilmemiştir. Dolayısıyla, analiz sırasında oluşturulacak kombinasyonlar da oldukça sınırlandırılmış olmaktadır.

Mevcut malzeme yükleri kullanılarak, doldurma ve boşaltma durumu için yük kombinasyonları oluşturulacaktır. ABAQUS programında yük kombinasyonu tanımlayabilmek için analiz adımında (Step) analiz tipi Static, Linear Perturbation seçilmiştir. Load modülünde, Load Case sekmesinde aşağıda verilen kombinasyonlar tanımlanmıştır.

Kombinasyon-1 (doldurma durumunda);

$$1,35G+1,5Q= 1,35\text{Ölü yük}+ 1,5P_{hf}+ 1,5P_{wf}+ 1,5P_{nf}+ 1,5P_{tf}+ 1,5P_{pfn}$$

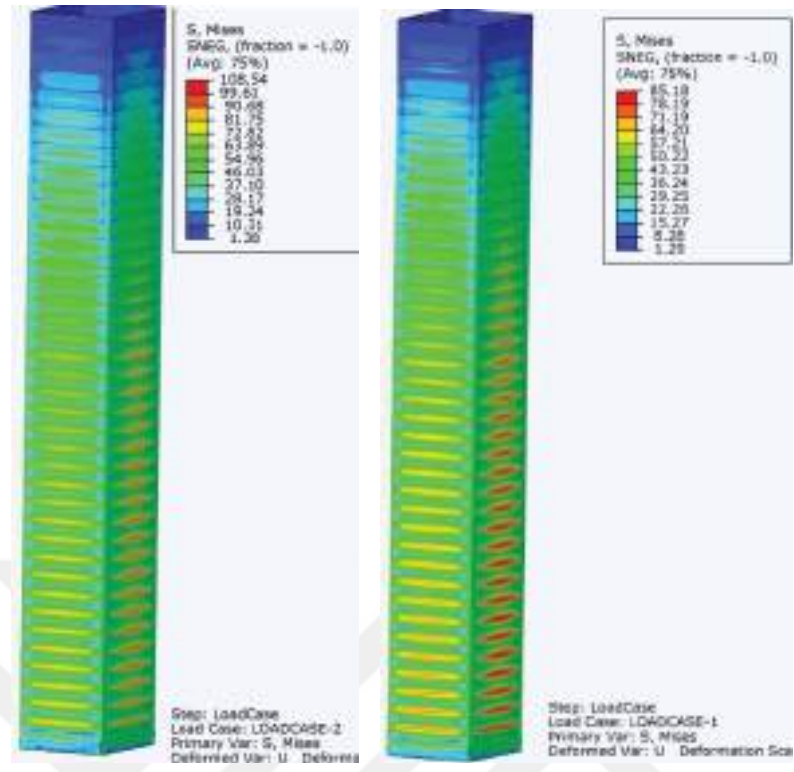
Kombinasyon-2 (boşaltma durumunda);

$$1,35G+1,5Q= 1,35\text{Ölü yük}+ 1,5P_{he}+ 1,5P_{we}+ 1,5P_{ne}+ 1,5P_{te}+ 1,5P_{pfe}$$

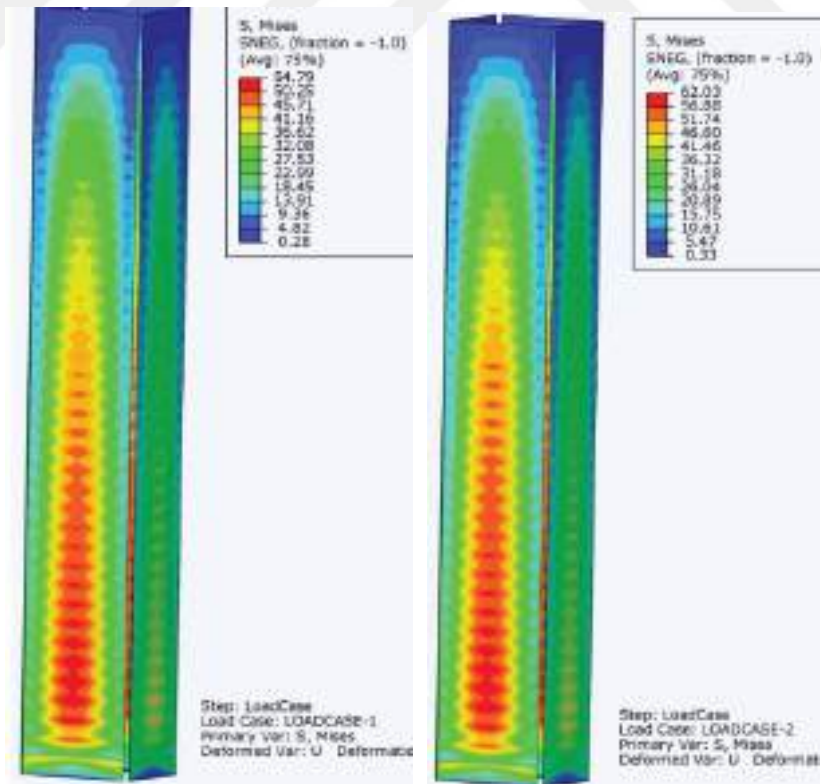
Burada doğrusal elastik bir analiz yapılmakta olduğundan, Linear Perturbation tipi analiz step tanımı bir sorun teşkil etmemektedir. Her ne kadar contact tanımı yapılmış olsa da, Linear Perturbation tipi analizde birbirine dokunan yüzeyler ilk durumdaki yapışık durumundan farklı bir duruma geçemez, ayrılamaz. Özünde doğrusal olmayan bir davranış gerektiren contact tanımı davranışı kısıtlanmış olmaktadır.

Söz konusu kombinasyonlara (loadcase) göre analizler gerçekleştirildikten sonra, her bir loadcase durumu için deplasman ve gerilme dağılımları grafiksel olarak incelenecektir. Maksimum gerilmenin tasarımsal olarak sınır değeri Bölüm 5'deki limit durumlar gözönüne alınarak  $f_{e,RD} = f_y / \gamma_{M0}$  bağıntısı ile belirlenecektir. Çizelge 5.3'de kaynaklı birleşim için  $\gamma_{M0}$  kısmi faktörü seçilmiştir. Çizelge 5.4'de ise  $\gamma_{M0}=1,0$  olarak alınmıştır. Dikdörtgen silo için yapı malzemesi olarak S275 kalitesindeki çelik seçildiğinden, akma gerilmesi  $f_y$  değeri 275MPa olarak alınacaktır.

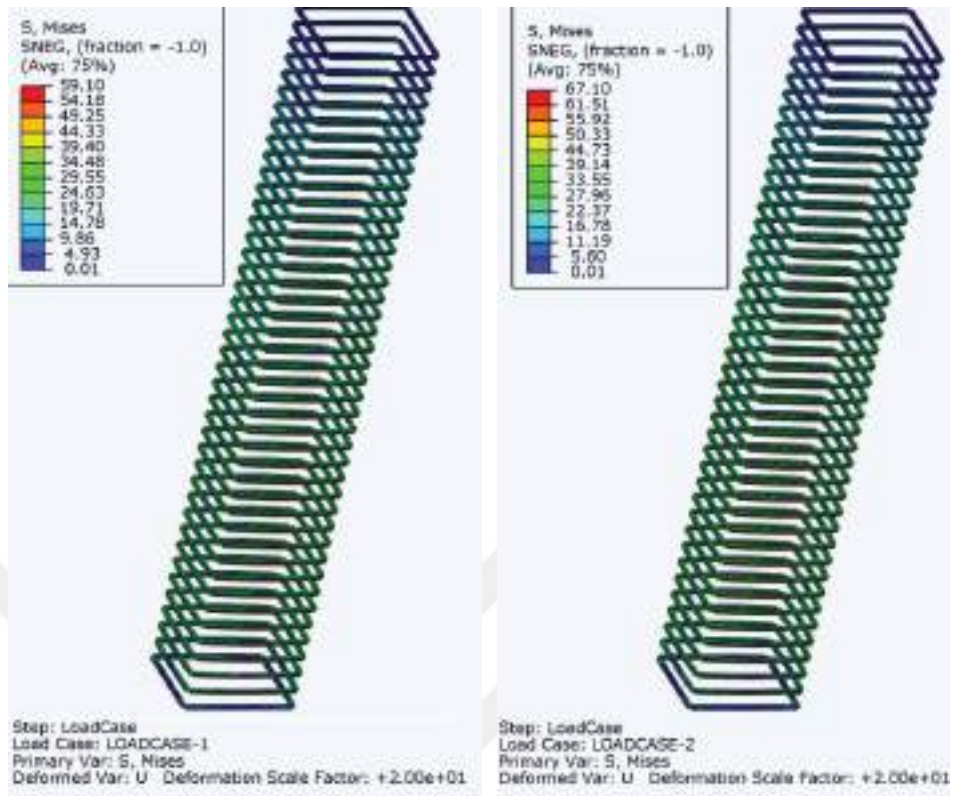
Silo modelinde kullanılan kabuk elemanlardaki gerilmeler incelenirken, Von Mises gerilme değerlerine bakılması en doğrusu olmaktadır. Çünkü bu gerilme 3D gerilme durumunda akma durumunun belirlenmesi için sünek malzemeler için geliştirilmiş en yaygın kullanılan gerilmedir. Von Mises gerilmesinin sistemde herhangi bir noktadaki maksimum değeri, tasarım sınır değeri olarak belirlenen 275 MPa değerinden küçük olmalıdır.



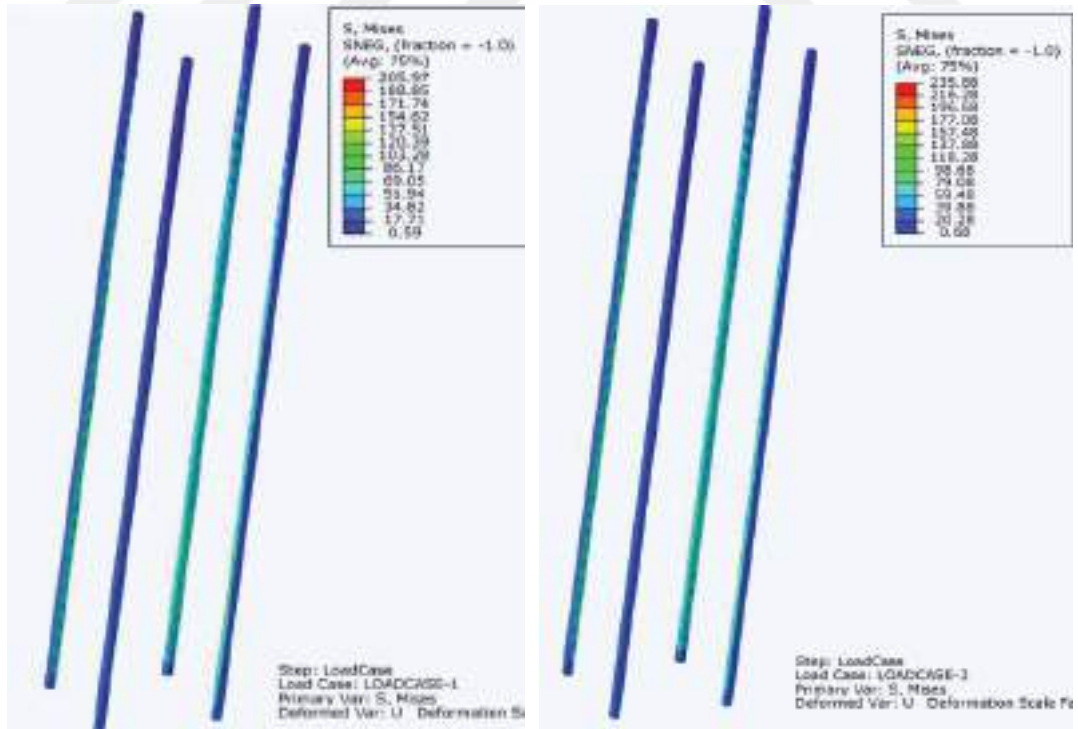
Şekil 6.25 Silo iç duvarı için S,Mises gerilme durumu



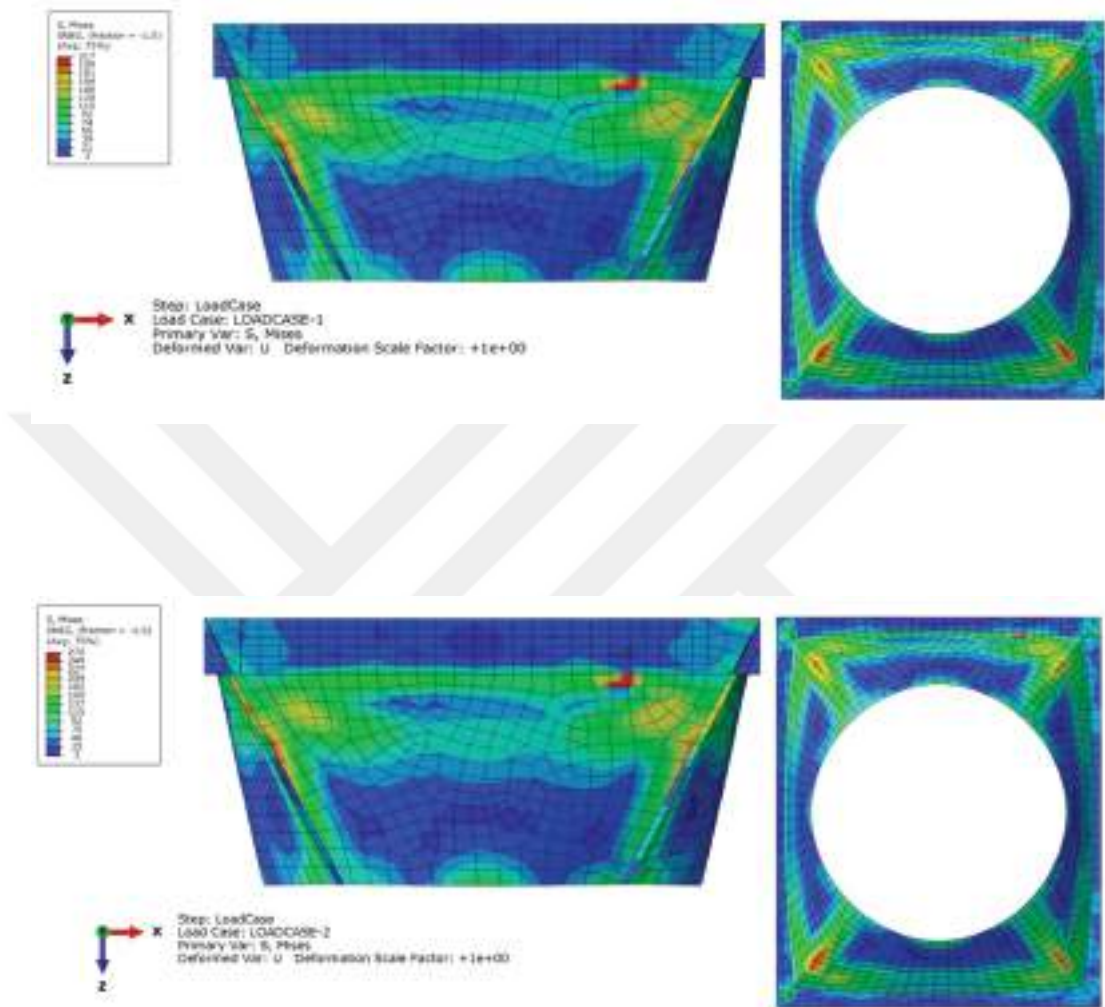
Şekil 6.26 Silo dış duvarı için S,Mises gerilme durumu



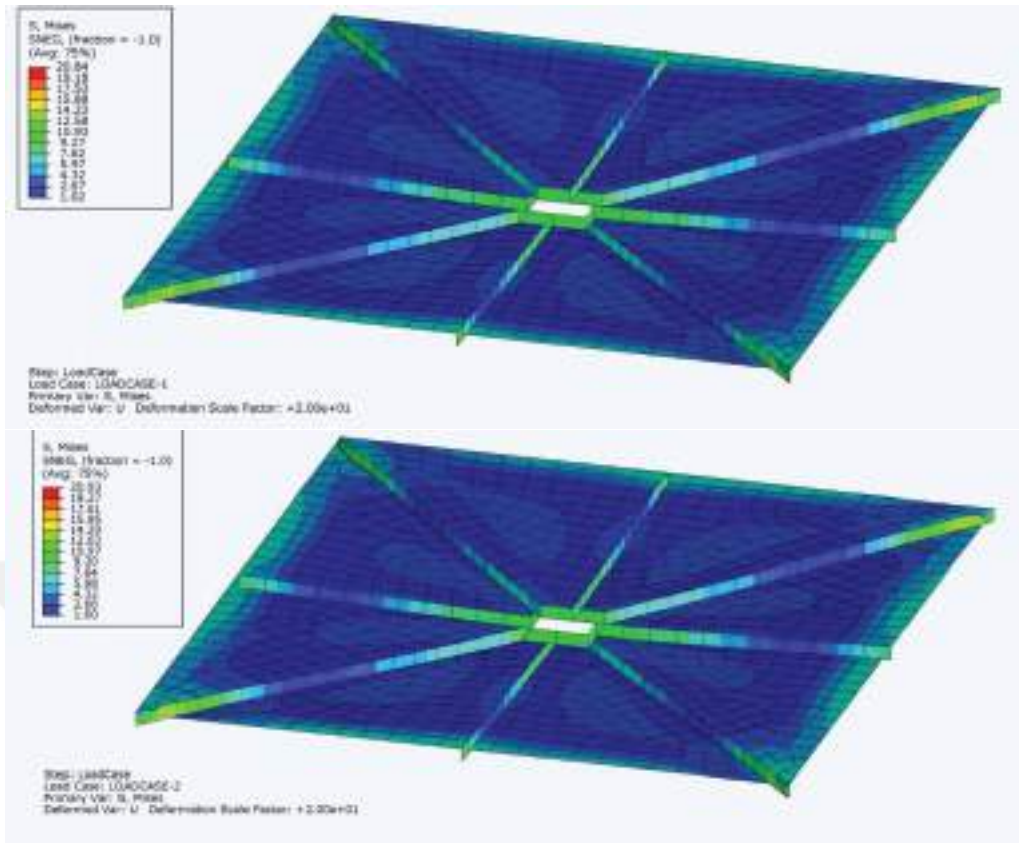
Şekil 6.27 Duvar arası kutu profiller için S,Mises gerilme durumu



Şekil 6.28 Silo kolonları için S,Mises gerilme durumu



Şekil 6.29 Silo hunisi için S,Mises gerilme durumu



Şekil 6.30 Silo kapağı için S,Mises gerilme durumu

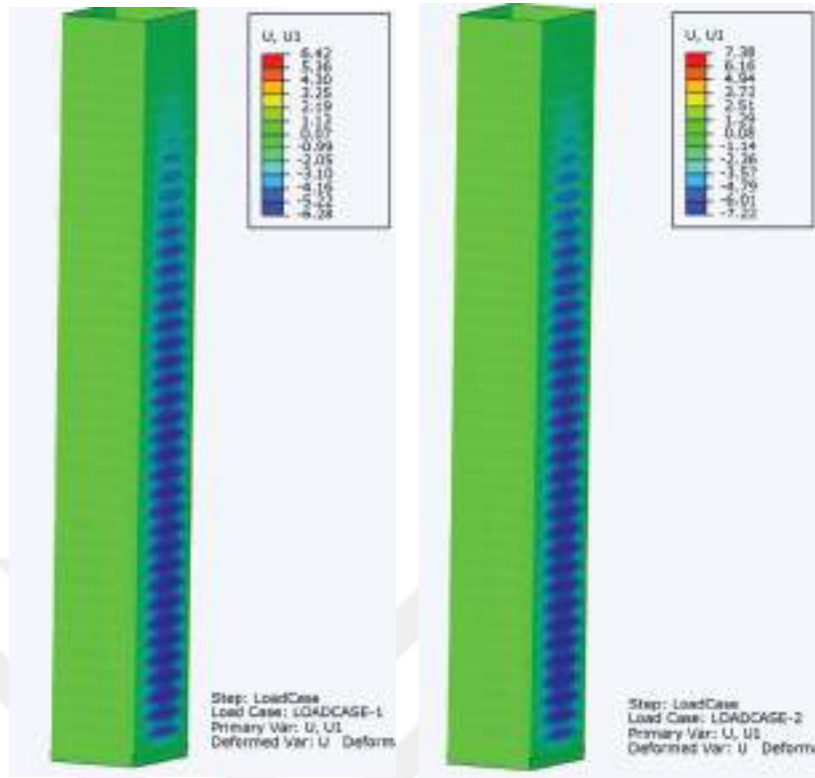
Dikdörtgen silonun çeşitli bölümleri için gerilme grafikleri ayrı ayrı verilmiştir (Şekil 6.25-6.30). Silo maksimum gerilmeleri; iç duvarlarda 108,54 MPa, dış duvarlarda 62 MPa, duvarlar arası kutu profillerinde 67,10 MPa, kolonlarda 235,88 MPa, silo hunisinde 272 MPa ve silo kapağında 20,93 MPa olarak elde edilmiştir.

Silo hunisinde çok sınırlı ve lokal bölgelerde yüksek gerilmeler oluşabilmektedir. Buradaki gerilmeleri azaltmak için sac kalınlığı artırılması veya ilave berkitmeler yerleştirilmesi düşünülebilir. Ancak hali hazırda 5mm olan kalınlığın artırılması huni imalatını zorlaştıracığından, ilave berkitmeler yerleştirilmesi daha uygun olacaktır.

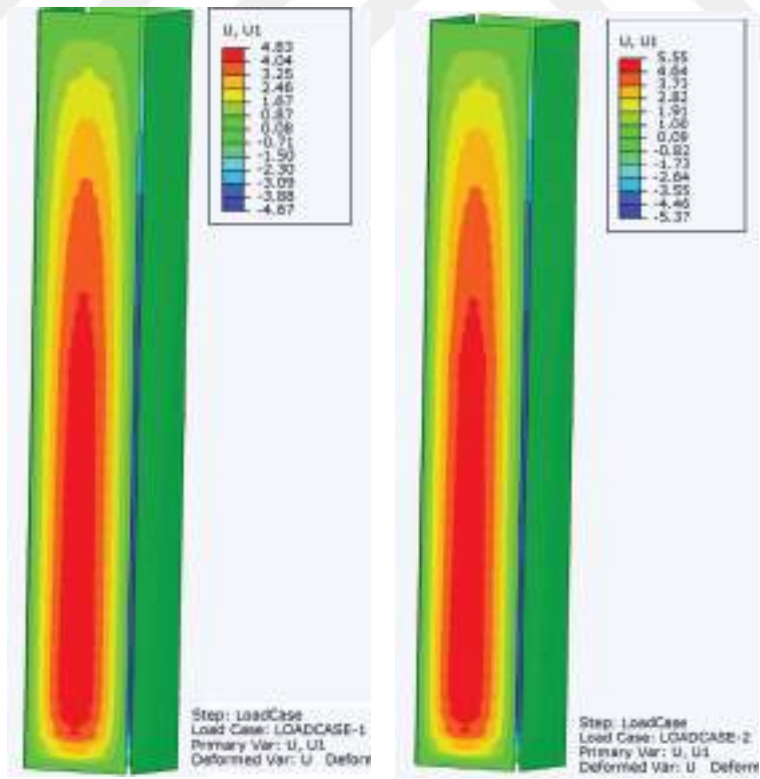
Silo iç duvarlarında dış duvarlardan daha büyük gerilmeler meydana gelmektedir. Gerilme dağılımına bakıldığında, gerilmelerin silo duvarının orta bölgelerinde yoğunlaştığı ve silo tabanına doğru yükseklik boyunca artış gösterdiği, silonun uzun kenar yüzünde oluşan gerilmelerin kısa kenar yüzündeki gerilmelerden çok daha fazla olduğu, silo duvarları ve kolonlarının oturduğu şasi bölgesinde (mesnet bölgesi) gerilmelerin oldukça azaldığı görülmüştür. Silo duvarı içine yerleştirilen kutu profillerin etriye vazifesi görerek duvardaki gerilmeleri karşıladıkları anlaşılmaktadır.

Silo kolonlarında gerilmelerin 130 MPa ve altında olduğu ancak çok küçük noktalarda maksimum 205,88 MPa değerine ulaştığı görülmüştür. Sonlu eleman ağında istenmeyen çok küçük ve/veya şekli bozuk (distorted) elemanların oluşabildiği ve bu elemanlarda oluşan gerilme değerlerinin gerçeği yansıtmadığı anlaşılmaktadır.

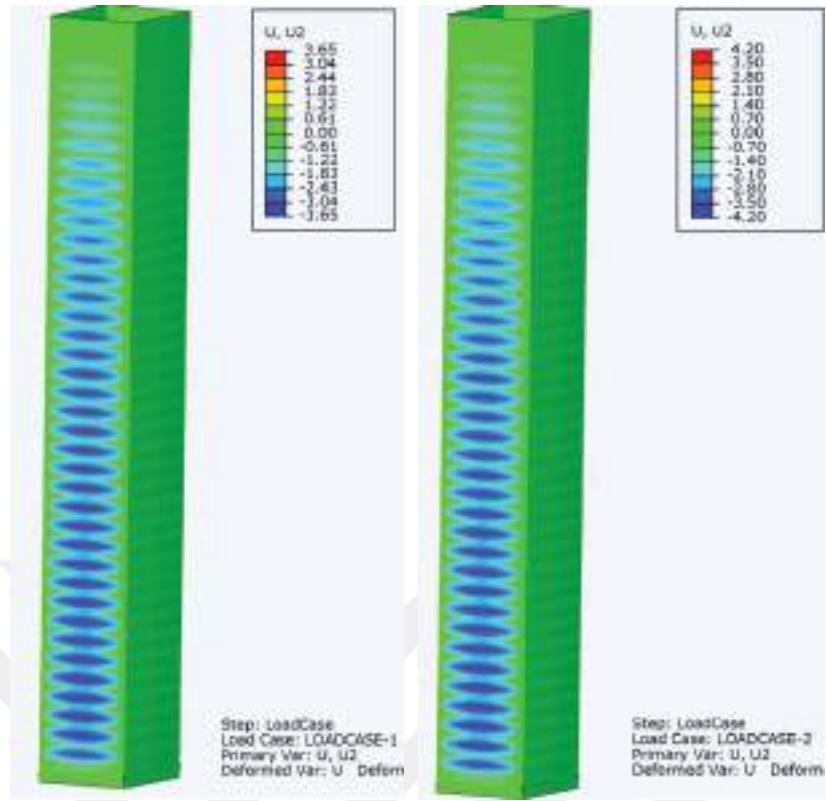




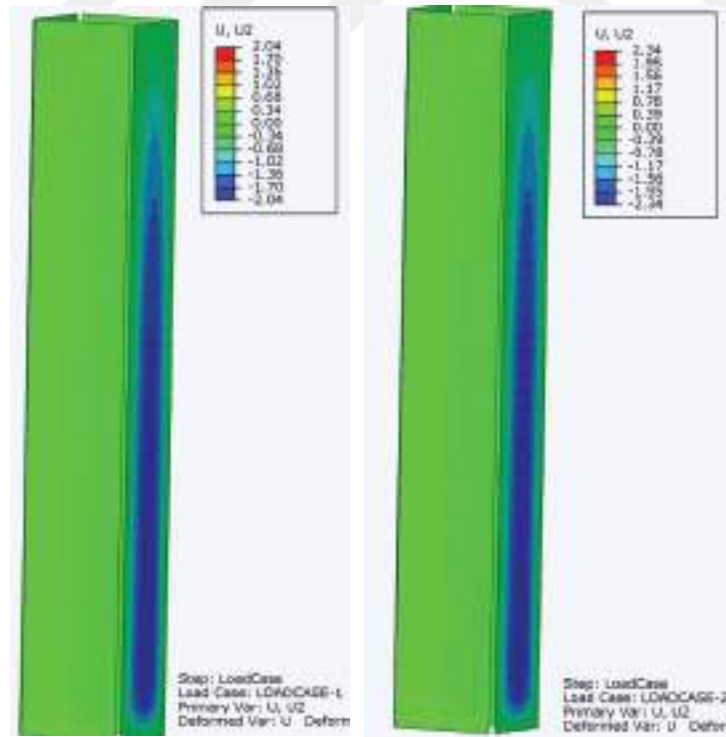
Şekil 6.31 İç duvar için X yönü deplasmanları



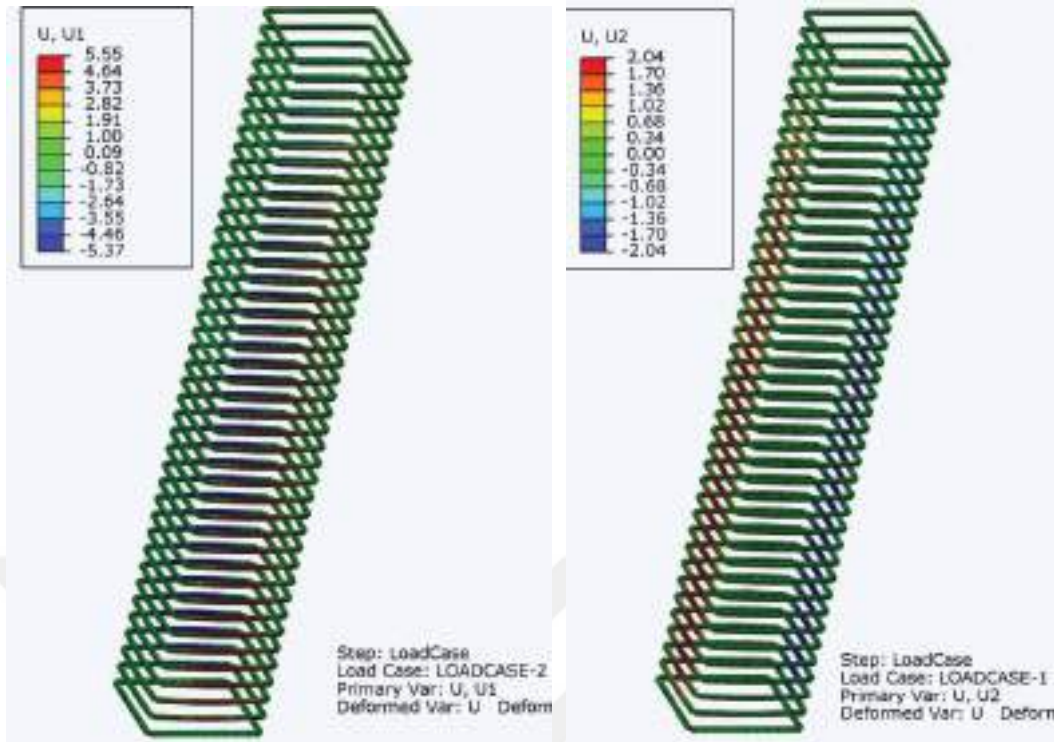
Şekil 6.32 Dış duvar için X yönü deplasmanları



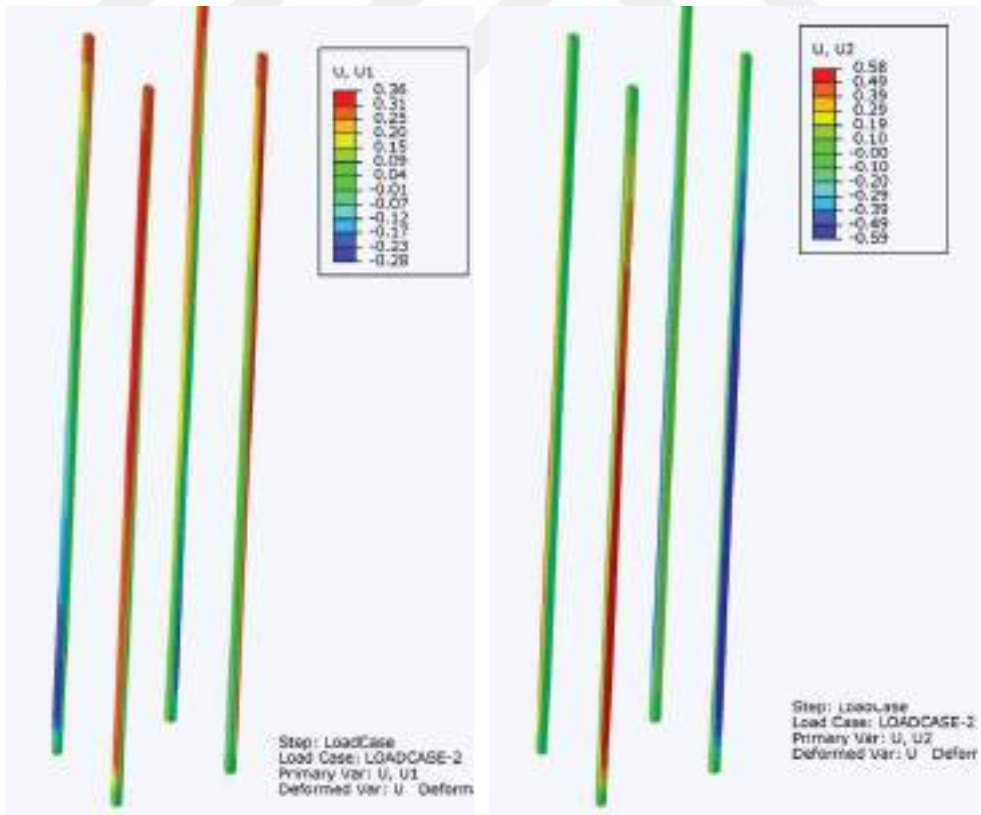
Şekil 6.33 İç duvar için Y yönü deplasmanları



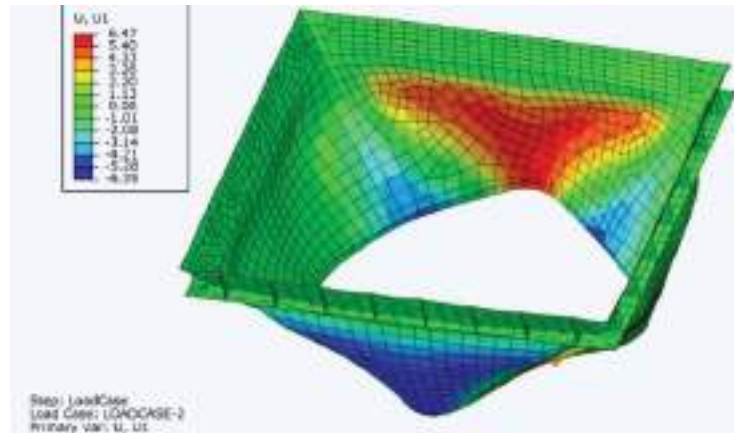
Şekil 6.34 Dış duvar için Y yönü deplasmanları



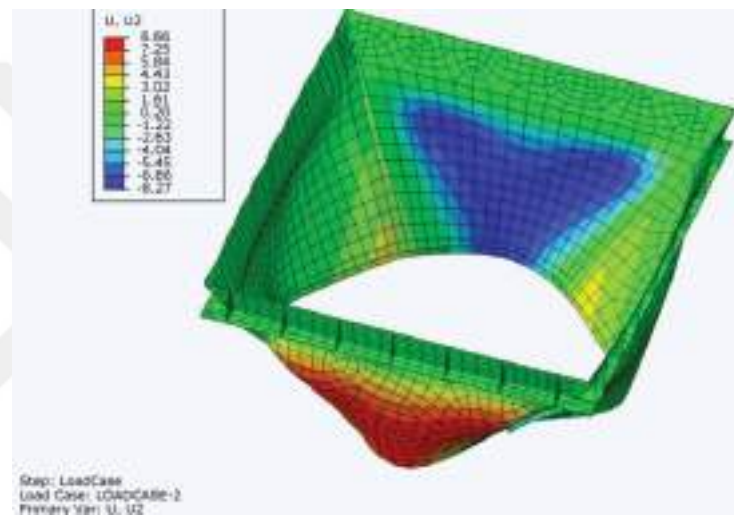
Şekil 6.35 Duvar arası kutu profiller için X ve Y yönündeki deplasmanlar



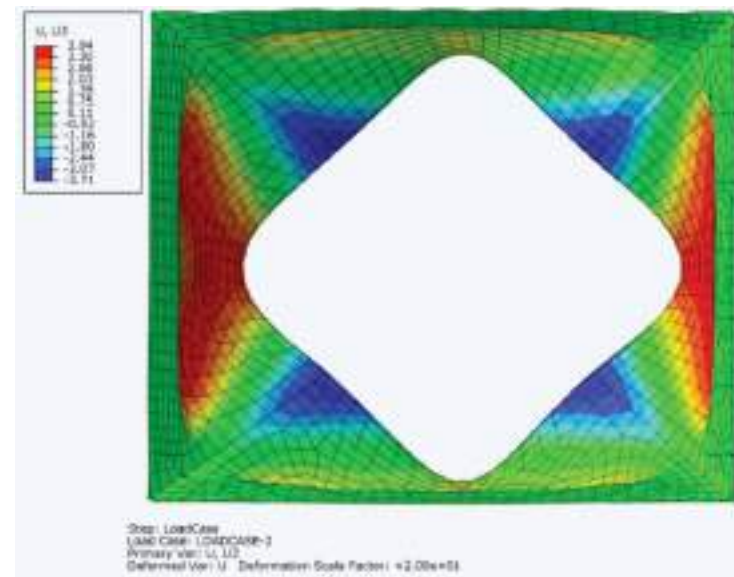
Şekil 6.36 Kolonlar için X ve Y yönündeki deplasmanlar



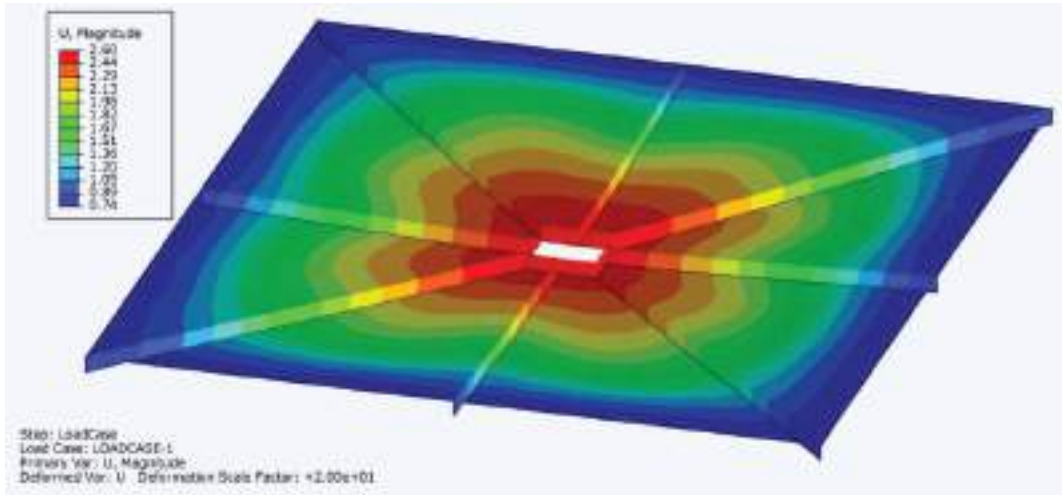
Şekil 6.37 Silo hunisi için X yönündeki deplasmanlar



Şekil 6.38 Silo hunisi için Y yönündeki deplasmanlar



Şekil 6.39 Silo hunisi için Z yönündeki deplasmanlar

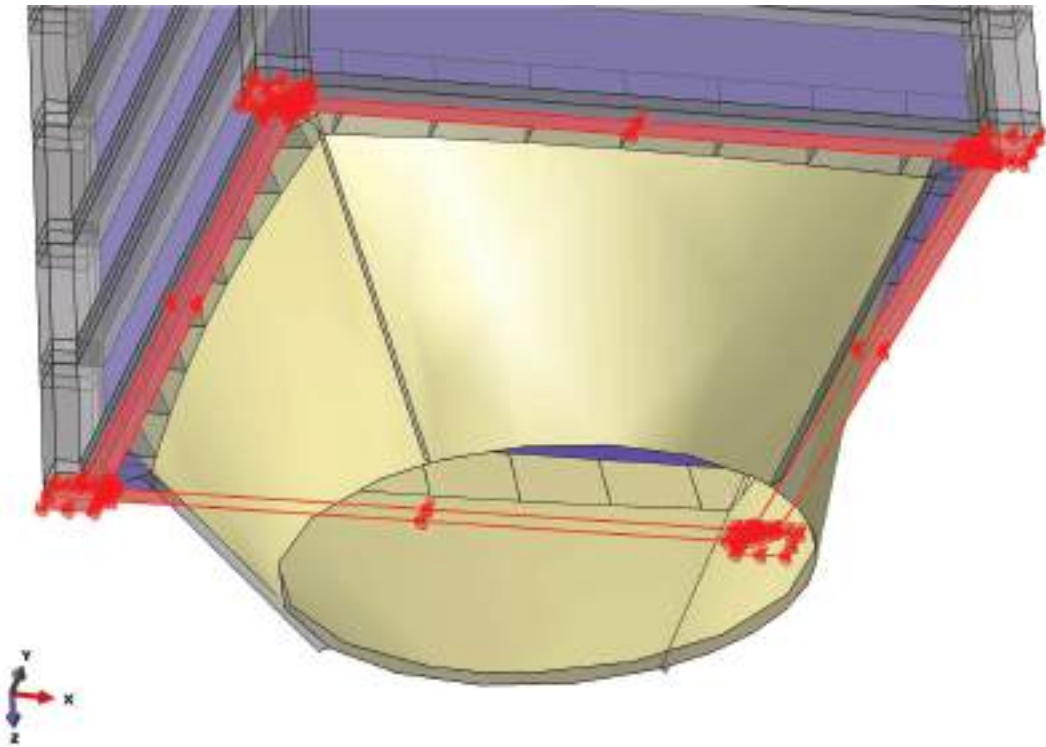


Şekil 6.40 Silo kapağı toplam deplasmanlar

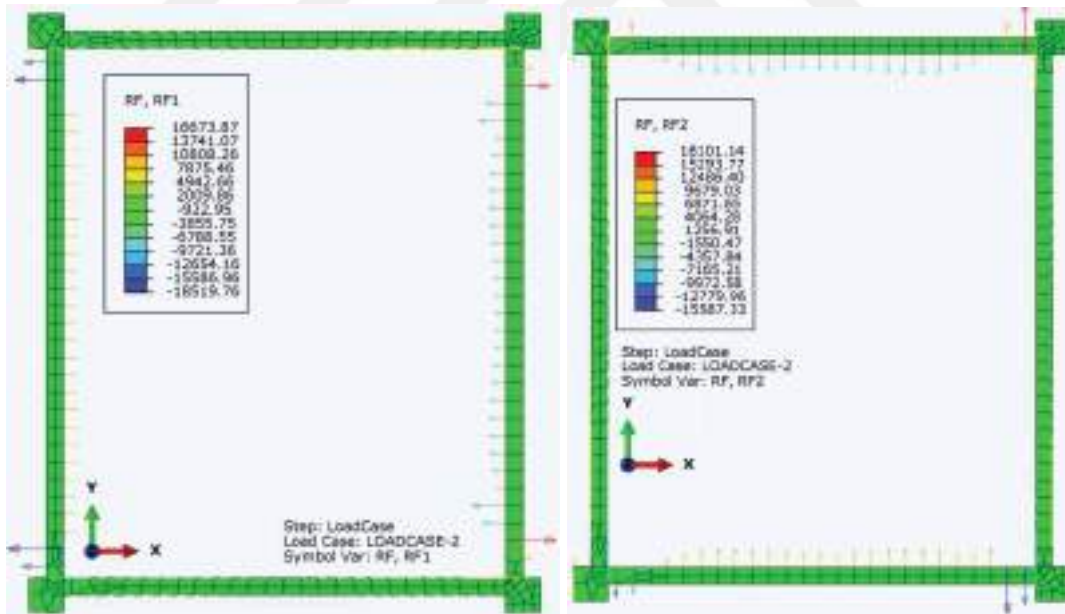
Siloda oluşan deplasmanlar ve dağılımları grafikler halinde gösterilmiştir (Şekil 6.31-6.40). Siloda gövdesinde X-Y plan düzleminde meydana gelen deplasmanlar oldukça önemlidir. Yüksek deformasyon/deplasmanlar silonun etkin bir şekilde kullanımına engel olacaktır. Eurocode EN 1993-4-1:2006 deplasman sınırlarına bakıldığında, global yanal deplasman ve panel kesitinin kenarlarına göre deplasmanı için iki farklı sınırlamadan söz edilmektedir. Panelden kasıt dikdörtgen silo gövdesini oluşturan parçalardan herbiridir. Panel kısa kenarının %5'i olarak belirlenecek bir deformasyon sınırı oldukça büyüktür. Bu nedenle deplasman sınırlaması olarak kesin bir tolerans değerinden bahsetmek oldukça zordur. Örneğin silo kenar uzunluğunun 400'de biri olarak bir deplasman sınırı belirlenmiş olsa, 3m uzunluktaki silo kenarı için deplasman sınırı  $3000\text{mm}/400=7,5\text{mm}$  elde edilirdi. Bu sınır oldukça makul gözükmele birlikte yönetmelikte böyle bir sınırlama yeralmamaktadır.

Dikdörtgen silonun maksimum düzlemsel (X-Y) deplasmanlarını grafiklerden okuduğumuzda, iç duvarda 7,38mm, dış duvarda 5,55mm, ara kutu profillerde 5,55mm, kolonlarda 0,59mm, silo hunisinde 8,66mm deplasman meydana geldiği görülmektedir. Silo hunisinde meydana gelen deplasmanları sınırlamak için ilave berkitmeler konulması uygun olacaktır.

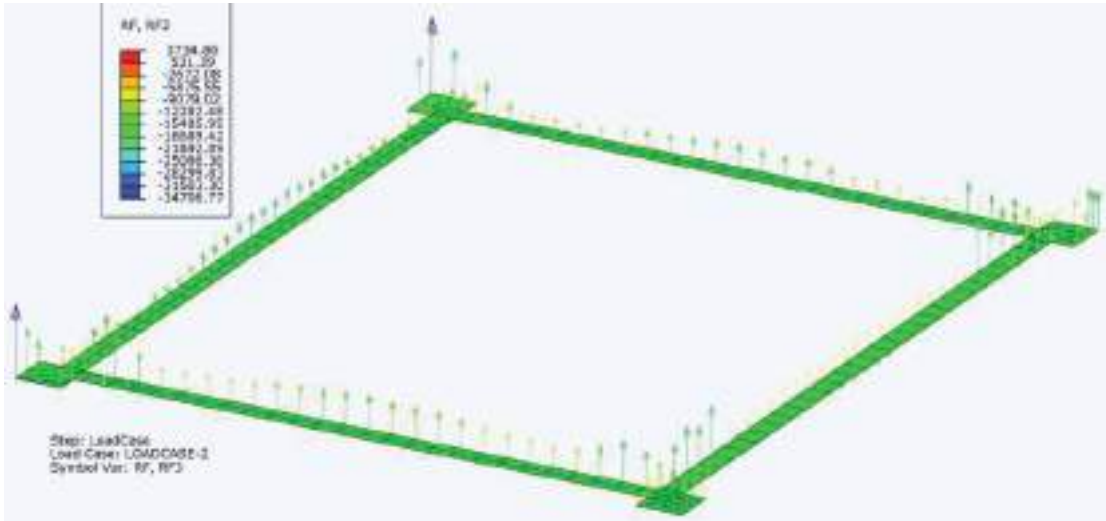
Dikdörtgen siloların içindeki malzeme yükünden dolayı düzlemsel olarak yanlara doğru açılarak siloyu dikdörtgen gövde şeklinden silindirik gövde şekline dönüştürmeye çalıştığı söylenebilir. Buradan da anlaşılmaktadır ki, silo tipi yapılar için en uygun geometrinin silindir geometrisidir. Silindir bir silo, çok efektif bir biçimde içindeki basınç etkisine karşı çember biçimde üniform bir reaksiyonla karşılık verecektir.



Şekil 6.41 Silo mesnetlenme durumu (şasi üzerine bağlanacak bölge)



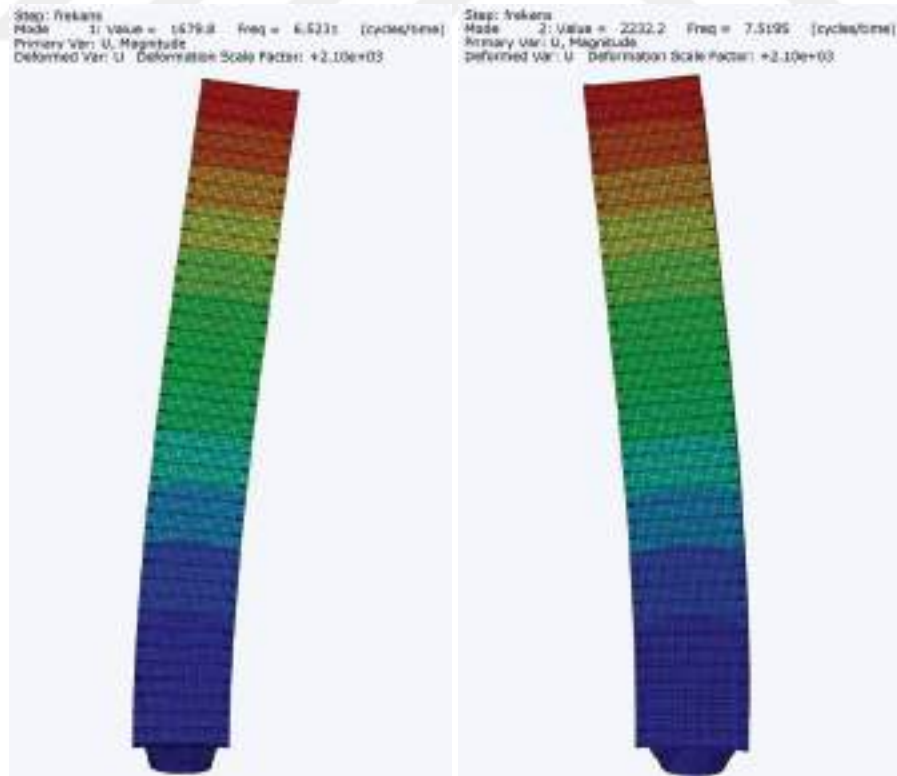
Şekil 6.42 Mesnet reaksiyonları X ve Y yönü



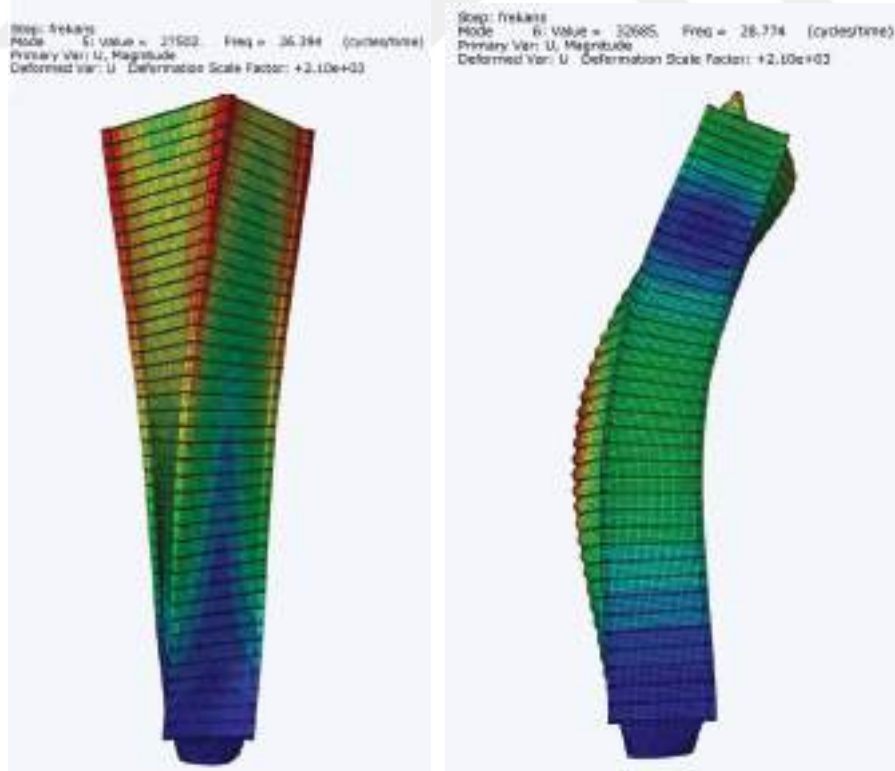
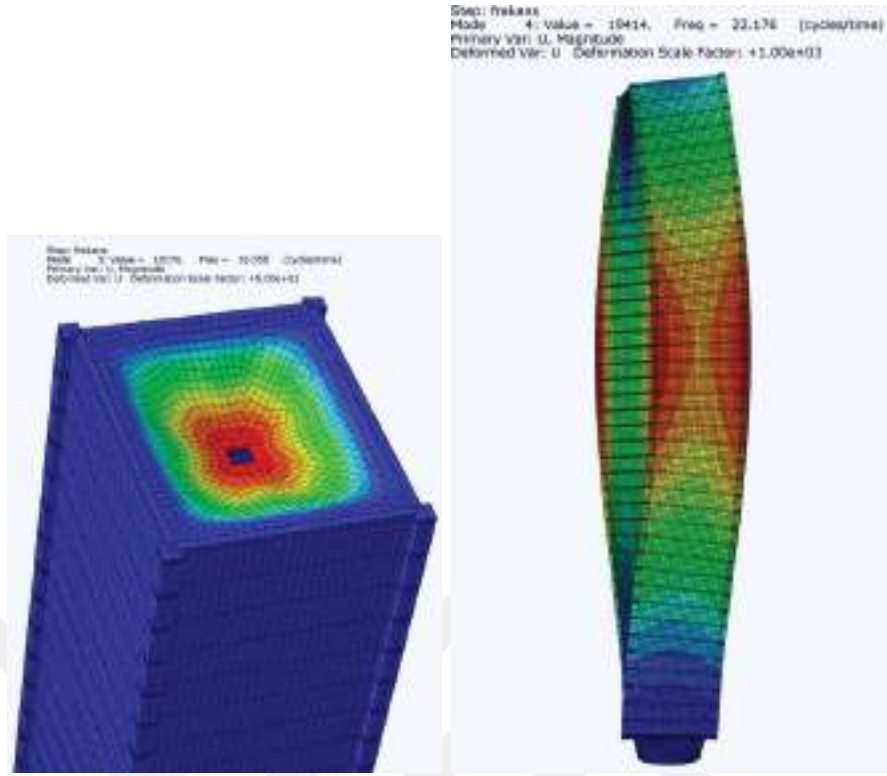
sisteminin tasarımsal hataları vs. modal analiz ile kolayca tespit edilebilir. ABAQUS ile hesaplanan ilk 10 doğal frekans değeri ve bu frekans değerlerine karşılık gelen periyot değerleri Çizelge 6.16'da listelenmiştir. Mod şekillerinin incelenmesinden 7., 8. ve 9. modların kapaktaki önemsiz lokal modlar olduğu görüldüğünden mod şekilleri gösterilmemiştir. Diğer modlar için mod şekilleri çizilerek Şekil 6.44-6.47'de gösterilmiştir.

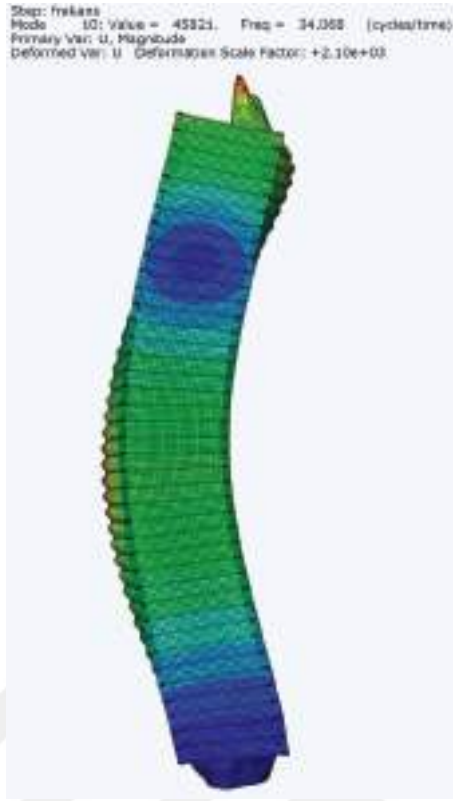
**Çizelge 6.16** Dikdörtgen buğday silosu modal analiz sonuçları

Mod	Frekans (Hz)	Periyot (s)
1	6.5231	0.153
2	7.5195	0.133
3	16.055	0.062
4	22.176	0.045
5	26.394	0.038
6	28.774	0.035
7	30.586	0.033
8	30.845	0.032
9	31.426	0.032
10	34.068	0.029



**Şekil 6.44** Dikdörtgen silo mod şekilleri: 1. ve 2. modlar





Şekil 6.47 Dikdörtgen silo mod şekilleri: 10. mod

### 6.10. Silindir Buğday Silosunun ABAQUS İle Modellenmesi

Dikdörtgen silo modeli ile silindir silo modeli oluşturulması, yük tanımlarının yapılması vs. aşamalarında farklılıkları görebilmek ve aynı kapasiteye sahip iki farklı geometrideki silo modeline ait analiz sonuçlarını karşılaştırabilmek için silindir silo simülasyonu gerçekleştirilecektir.

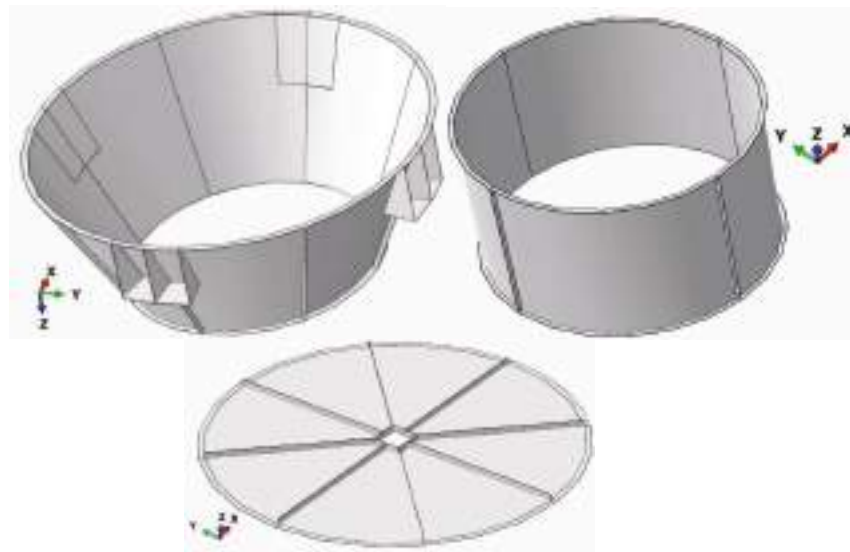
Bu bölümde Bölüm 6.5’de ölçüleri belirlenen ve Bölüm 6.6 ve 6.7’de yükleri hesaplanan silindir buğday silosunun, ABAQUS programında sonlu eleman modellenmesi yapılacaktır. Şekil 6.3’de silindir silonun ölçüleri verilmiştir. Buna göre silindir silo gövde çapı 3,09m ve silindir yüksekliği 20m’dir. Silo hunisi 1,2m yükseklikte olup boşaltma ağzı çapı 1,96m dir. Silonun en üstünde dairesel bir kapak ve kapak ortasında 0,25m x 0,25m boyutlarında bir doldurma boşluğu bulunmaktadır. Kapak bölgesindeki deplasmanları sınırlandırmak için kapakta berkitmeler teşkil edilmiştir (Şekil 6.4).

Silo hunisinin üst tarafından eşit aralıklarla 10mm kalınlığında dört adet çene yapısı teşkil edilmiştir (Şekil 6.48). Huni çeneler vasıtasıyla çelik taşıyıcı şasi üzerine yerleştirilecektir. Bu nedenle çenelerin altında mesnet tanımı yapılmıştır. Silo hunisinin,

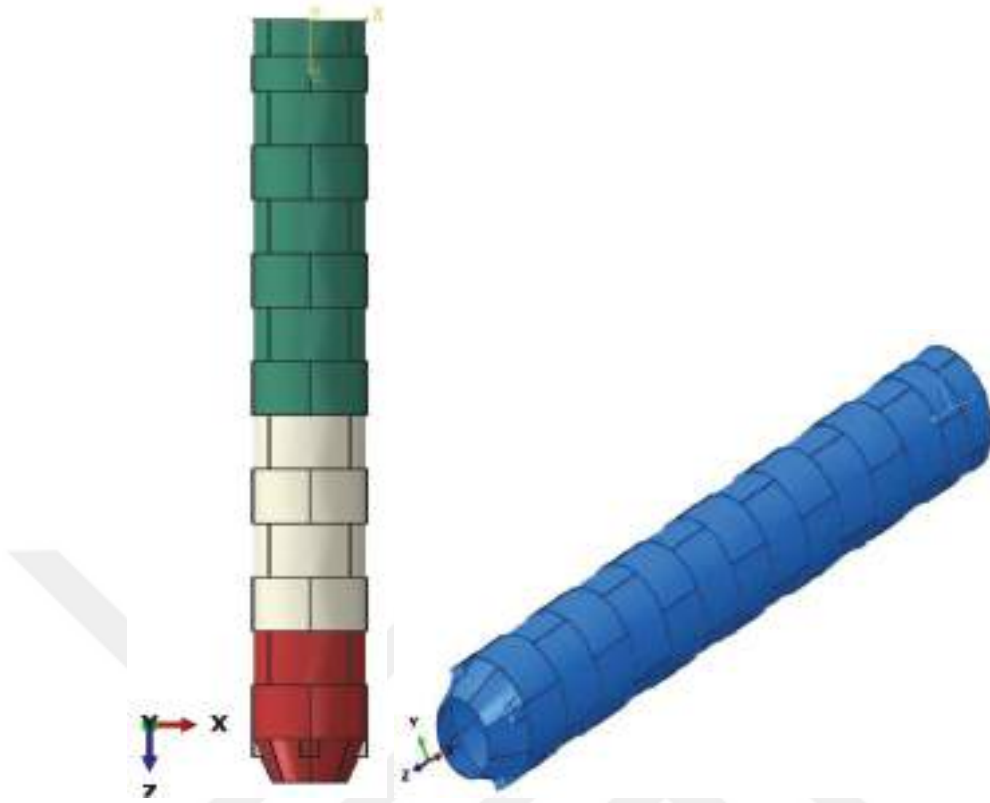
8 parça çelik levhanın katlanmış kenarlarının kaynaklı birleşiminden oluştuğu varsayılmıştır. Bu kenarlar aynı zamanda berkitme görevi görerek huni deplasman ve gerilmelerini sınırlandırılmaktadır (Şekil 6.48).

Silindir silo dikey duvarı çelik sacı yükseklik boyunca 3 farklı et kalınlığında ve her seviyede 4 panelin birleşimi olarak tasarlanmıştır (Şekil 6.49). Panel yükseklikleri alttan üste doğru olmak üzere, 18 adet 1,5m ve 2 adet 1 m olarak düzenlenmiştir. Panellerin birleştirilmesi için, panelin dört tarafı boyunca teşkil edilen katlanmış kenarlar berkitme vazifesi görmektedir. Silo hunisi 5mm kalınlıkta teşkil edilmiştir.

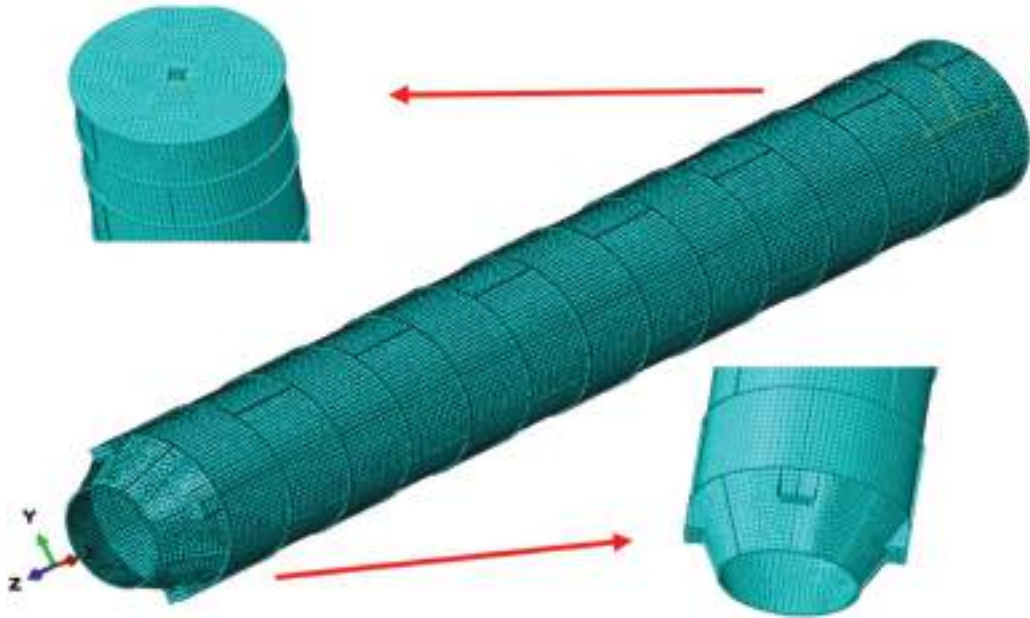
Programdaki modelleme aşamaları Bölüm 6.8’de anlatıldığı gibidir. Part sekmesinde tek katmanlı silindir silo duvarı, hunisi ve berkitmeler için part’lar oluşturulur (Şekil 6.48). Materials sekmesinde S235 kalitesindeki çeliğin özellikleri tanımlanır. Bu malzeme kullanılarak farklı kalınlıklarda kabuk kesitleri Section modülü vasıtasıyla oluşturulur. Assembly sekmesinde part’lar için instance’lar oluşturulur ve instance’lar çoğaltılarak silo modeli tamamen oluşturulur (Şekil 6.49). Tüm instance’lar seçilerek merge operasyonu ile birleştirilerek tek bir silo instance’ı ve part’ı oluşturulmuş olur. Bütünleşik part üzerinde kesit atama ve sonlu eleman ağı (mesh) işlemleri yapılır (Şekil 6.50 ve 6.51). Sonlu eleman tipi olarak kabuk (shell) elemanlar kullanılacaktır. Kabuk elemanlardan oluşturulan sonlu eleman ağında, 24467 adet eleman ve 24354 adet düğüm noktası bulunmaktadır. Silonun tamamının çelik zati ağırlığı 7,8 tonf olarak hesaplanmıştır. Silo hunisi çeneleri altında taşıyıcı çelik şase modellenmemiş sadece bu bölgede mesnet tanımlı yapılmıştır.



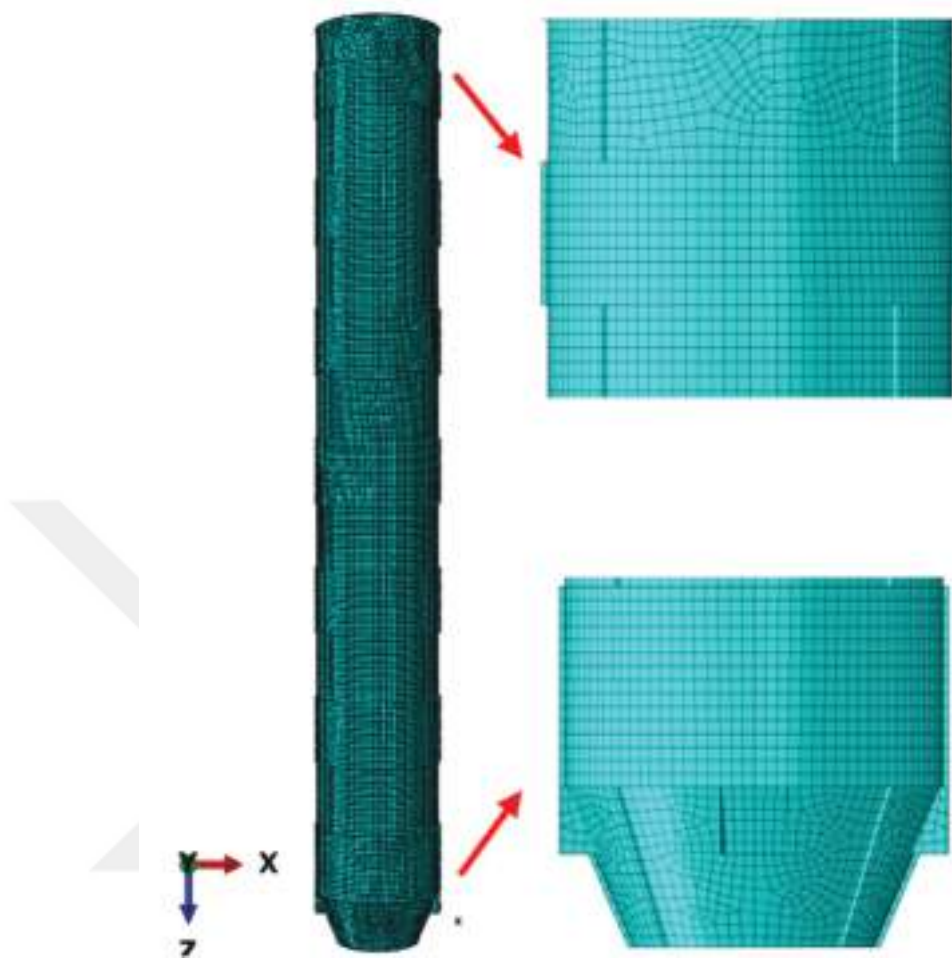
Şekil 6.48 Silindir silo part’lar



Şekil 6.49 Silindir silo Assembly görüntüleri (Kesit renkleri: Kırmızı: 5 mm, Krem: 4 mm, Yeşil: 3 mm)



Şekil 6.50 Silindir silonun mesh edilmiş perspektif görünümü



Şekil 6.51 Silindir silonun mesh edilmiş ön görünümü

Silo duvarına yüksekliğe bağlı değişken yayılı yükleme yapabilmek için öncelikle Analytical Field modülünden gerekli Field tanımlarının yapılması ve yükleme denklemlerinin yazılması gereklidir.  $P_{hf}$ ,  $P_{wf}$ ,  $P_v$  ve  $P_{hf}\cos\theta$  yükleri için dört farklı Analytical Field tanımı yapılacaktır (Şekil 6.52, 6.53, 6.54, 6.55). Diğer yükler bu esas yüklerin katsayılar kullanılarak değiştirilmesi ile etki ettirilecektir.

Edit Expression Field

Name: phf

Description: [ ]

Enter an expression by typing and selecting parameter names and operators below.

**Note:** Parameter names and operators are case sensitive.

Example: 2.5\*X + pow(Y,3)

(1-exp(-Z/4760))\*21e-3

Local system: (Global) [ ] [ ]

Local system type: Rectangular

Parameter Names

X  
Y  
Z

Operators

A,B - parameters

()  
+  
-  
\*  
/  
%  
pi  
e

OK Cancel

Şekil 6.52 Silindir silo  $P_{hf}$  yük tanımı

Edit Expression Field

Name: pwf

Description: [ ]

Enter an expression by typing and selecting parameter names and operators below.

**Note:** Parameter names and operators are case sensitive.

Example: 2.5\*X + pow(Y,3)

(1-exp(-Z/4760))\*6.93e-3

Local system: (Global) [ ] [ ]

Local system type: Rectangular

Parameter Names

X  
Y  
Z

Operators

A,B - parameters

()  
+  
-  
\*  
/  
%  
pi  
e

OK Cancel

Şekil 6.53 Silindir silo  $P_{wf}$  yük tanımı

**Edit Expression Field**

Name: pv



Description: [ ]

Enter an expression by typing and selecting parameter names and operators below.

**Note:** Parameter names and operators are case sensitive.

Example: 2.5\*X + pow(Y,3)

$227.08e-3*((23280-Z)/3280-pow((23280-Z)/3280,1.13))+42.21e-3*pow((23280-Z)/3280,1.13)$

Local system: (Global)  

Local system type: Rectangular

Parameter Names

X  
Y  
Z

Operators

A,B - parameters

()  
+  
-  
\*  
/  
%  
pi  
e

OK Cancel

Şekil 6.54 Silindir silo  $P_v$  yük tanımı

**Edit Expression Field**

Name: phf-doldurmaek



Description: [ ]

Enter an expression by typing and selecting parameter names and operators below.

**Note:** Parameter names and operators are case sensitive.

Example: 2.5\*X + pow(Y,3)

$(1-exp(-Z/4760))^2*21e-3*X/sqrt(X*X+Y*Y)$

Local system: (Global)  

Local system type: Rectangular

Parameter Names

X  
Y  
Z

Operators

A,B - parameters

()  
+  
-  
\*  
/  
%  
pi  
e

OK Cancel

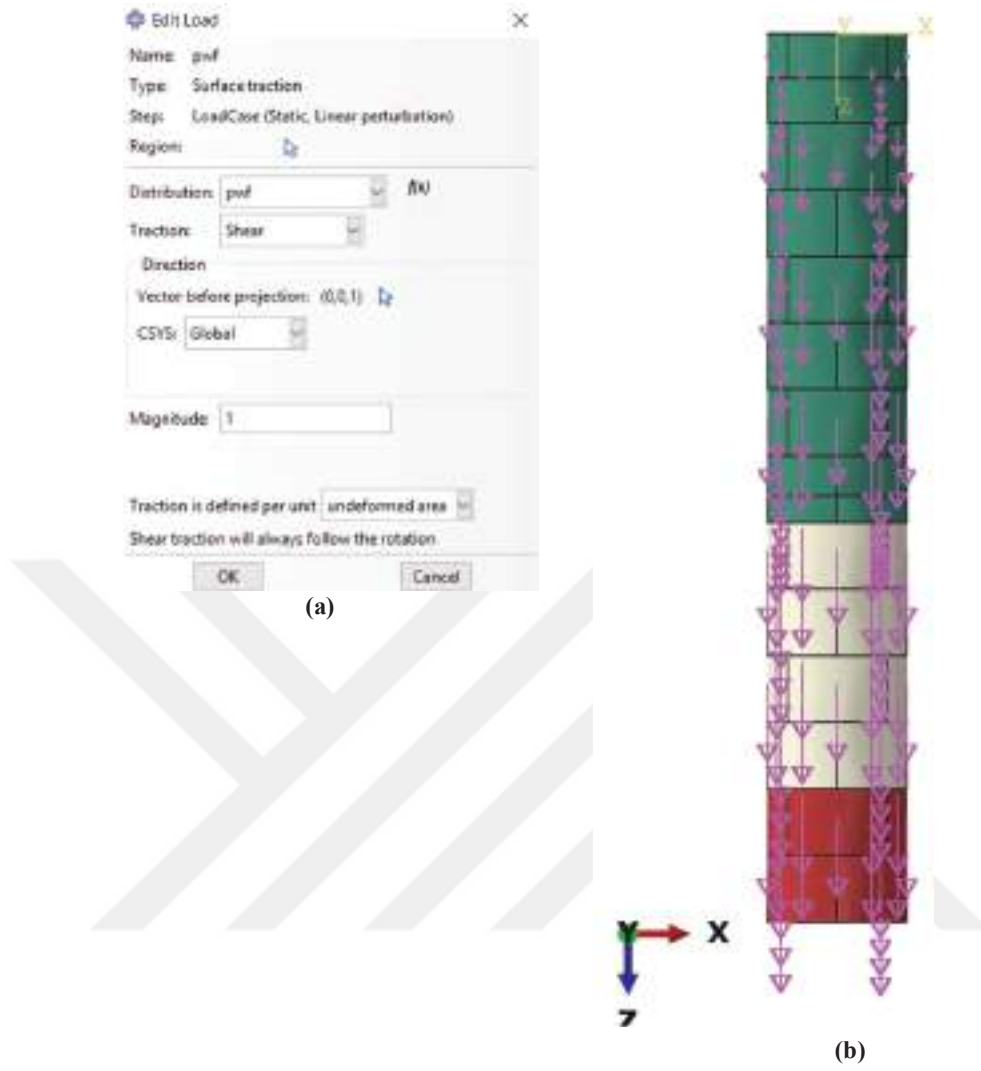
Şekil 6.55 Silindir silo ek yük için  $P_{hf} \cos\theta$  yük tanımı

Load modülünde, silo yapısının zati ağırlığı Gravity yük olarak tanımlanır (Şekil 6.12). Doldurma ve boşaltma durumunda hesaplanan duvar yükleri silo duvarı iç yüzeyine uygulanacaktır. Doldurma durumunda silo duvarına  $P_{hf}$  yükü Şekil 6.56'da gösterildiği üzere basınç yükü (Pressure) olarak yüklenmiştir.



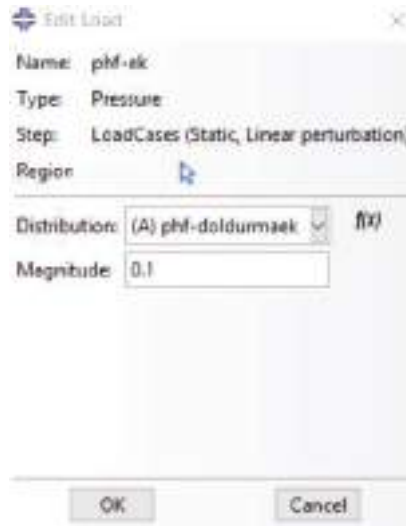
Şekil 6.56 (a)  $P_{hf}$  yükünün silo iç duvarına uygulanması (b) Silo duvarına  $P_{hf}$  basınç yüklemesi

Silo iç duvarına sürtünme yükü  $P_{wf}$ , Surface Traction olarak yükü Şekil 6.57'da gösterildiği gibi yüklenecektir. Yükleme doğrultusu vektörel olarak Global Z yönünde tanımlanmıştır.

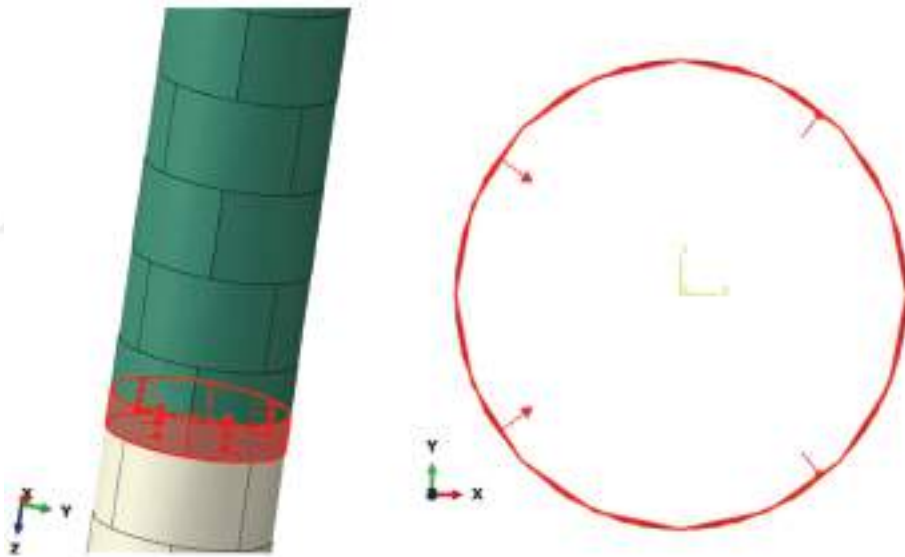


Şekil 6.57 (a) Silindir silo  $P_{wf}$  yükünün uygulanması (b) Silo duvarında  $P_{wf}$  sürtünme yüklemesi

Doldurma ek yükü  $P_{pf,n}$  yükü Şekil 6.58'de gösterildiği üzere Pressure olarak yüklenmiştir. Magnitude değeri Denklem 4.20'ye göre hesaplanarak 0,1 olarak girilmiştir.

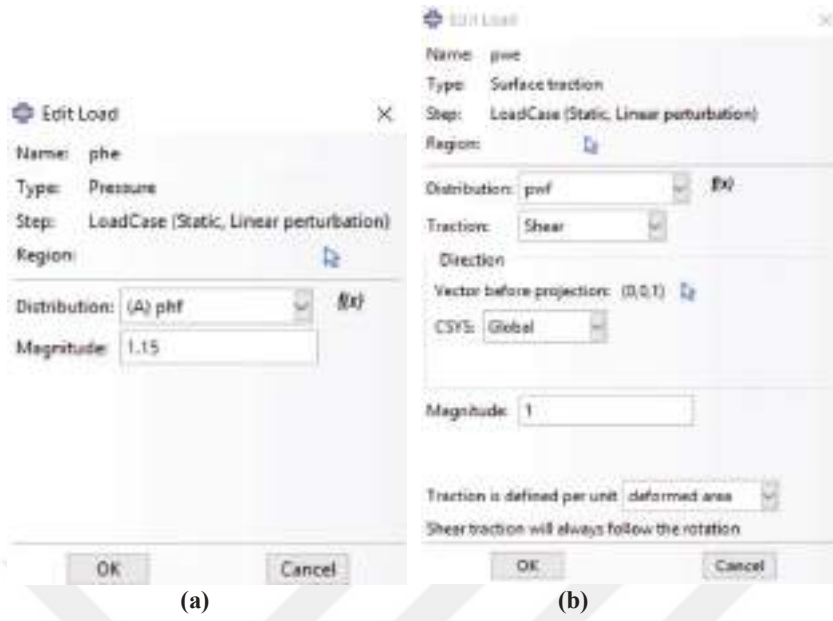


Şekil 6.58 Doldurma ek yükünün  $P_{pf,n}$  silo duvarına uygulanması



Şekil 6.59 Silindir silo doldurma ek yüklemesi

Boşaltma durumunda silo iç duvarına,  $P_{he}$  basınç yükü Şekil 6.60a'da gösterildiği üzere basınç yükü Pressure olarak yüklenmiştir. Magnitude alanına hesaplanan boşaltma katsayına olarak 1,15 girilmiştir. Boşaltma durumunda silo iç duvarına  $P_{we}$  sürtünme yükü Şekil 6.60b'de gösterildiği gibi Surface traction olarak Global Z ekseninde yüklenmiştir. Magnitude değeri boşaltma katsayına bağlı olarak 1,0 girilmiştir.



Şekil 6.60 Silo duvarına boşaltma yüklerinin uygulanması (a) Basınç yükü,  $P_{he}$  (b) Sürtünme yükü  $P_{we}$

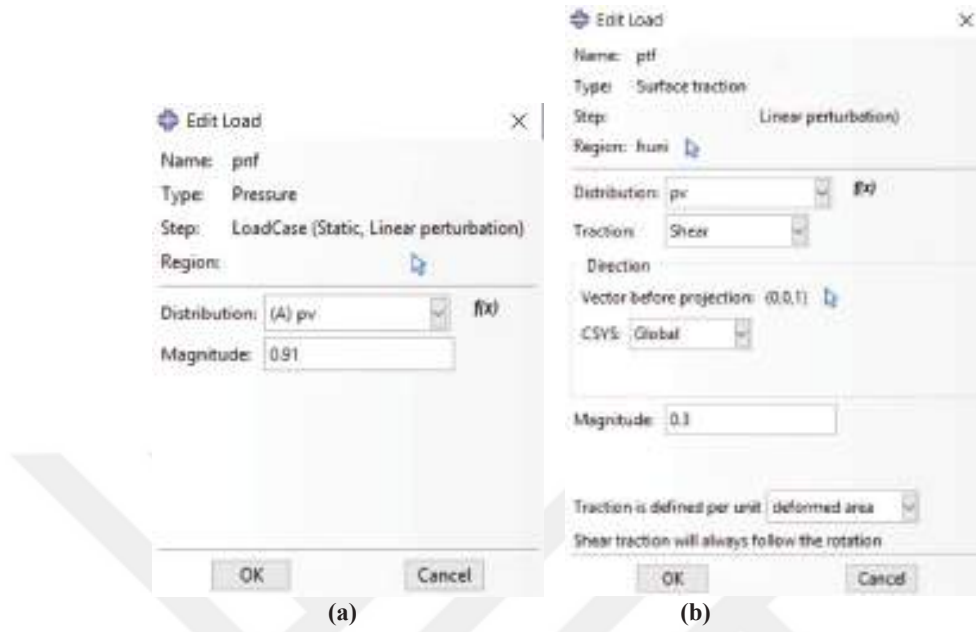
Boşaltma durumunda silo iç duvarına  $P_{pe,n}$  ek basınç yükü Şekil 6.61’de gösterildiği gibi Pressure olarak yüklenmiştir. Magnitude değeri Denklem 4.26’dan hesaplanarak 0,2415 olarak girilmiştir.



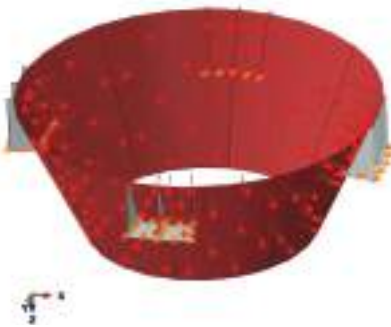
Şekil 6.61 Silindir silo boşaltma durumunda ek yük  $P_{pe,n}$  yükünün silo duvarına aktarılması

Doldurma durumunda silo hunisine  $P_{nf}$  basınç yükü, Şekil 6.62a’da gösterildiği gibi Pressure olarak yüklenmiştir. Magnitude değeri Denklem 4.58’de  $F_f$  katsayısı hesaplanarak 0,91 olarak girilmiştir. Doldurma durumunda silo hunisine  $P_{tf}$  yükü Şekil

6.62b’de gösterildiği gibi Surface traction olarak yüklenmiştir. Magnitude değeri Denklem 4.60’de  $F_f \mu_l$  katsayısı hesaplanarak 0,3 olarak girilmiştir.



Şekil 6.62 Silindir silo doldurma durumunda  $P_{nf}$  yükünün huni kısmına aktarılması

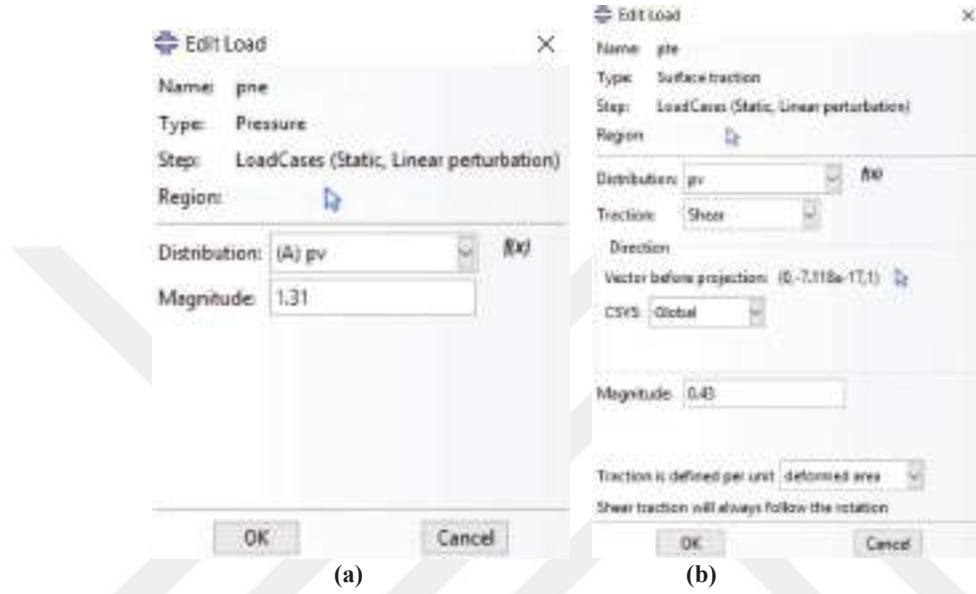


Şekil 6.63 Silindir silo hunisine  $P_{nf}$  basınç yüklemesi



Şekil 6.64 Silindir silo hunisine  $P_{tf}$  sürtünme yüklemesi

Boşaltma durumunda silo hunisine  $P_{ne}$  yükü Şekil 6.65a'da gösterildiği gibi Pressure olarak yüklenmiştir. Magnitude değeri Denklem 4.61 de  $F_e$  katsayısı hesaplanarak 1,31 olarak girilmiştir. Silo hunisine  $P_{te}$  boşaltma sürtünme yükü, Şekil 6.65b'de gösterildiği gibi Surface traction olarak yüklenmiştir. Magnitude değeri Denklem 4.65'de  $F_e \mu_l$  katsayısı hesaplanarak 0,43 olarak girilmiştir.

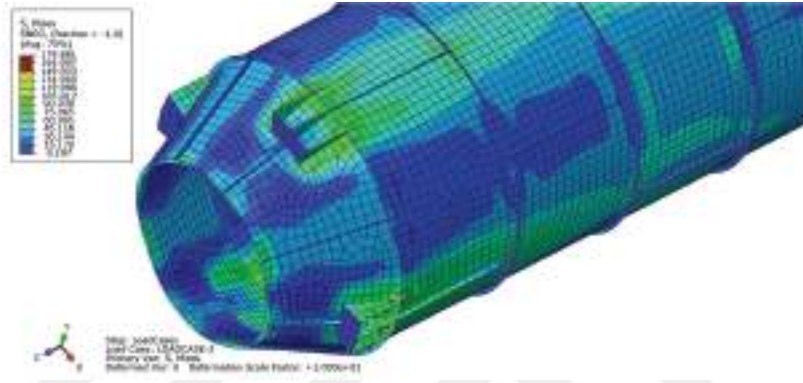
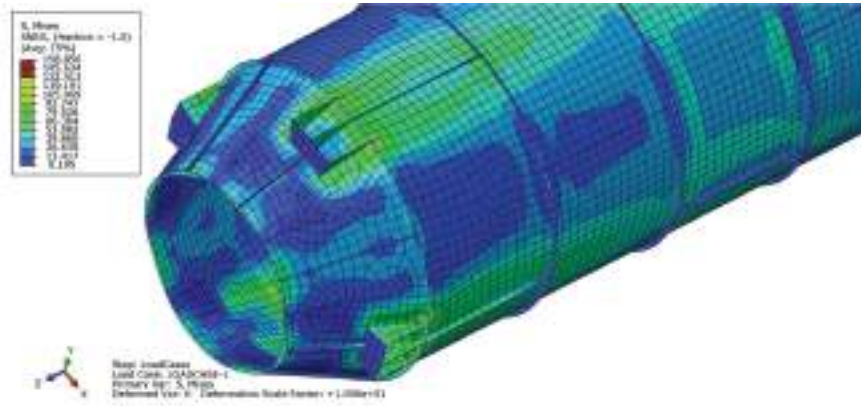


Şekil 6.65 Silindir silo hunisine boşaltma durumunda (a)  $P_{ne}$  basınç yüklemesi (b)  $P_{te}$  sürtünme yüklemesi

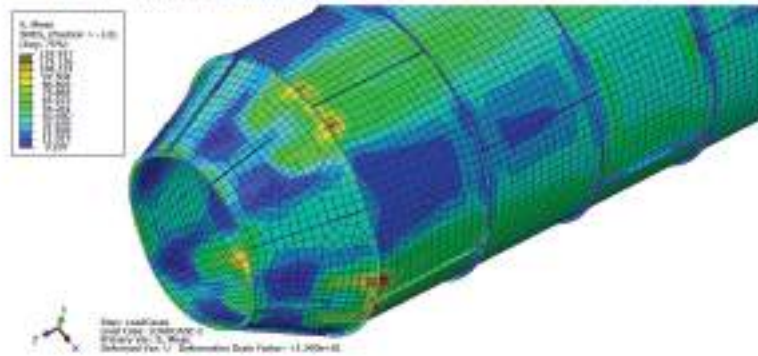
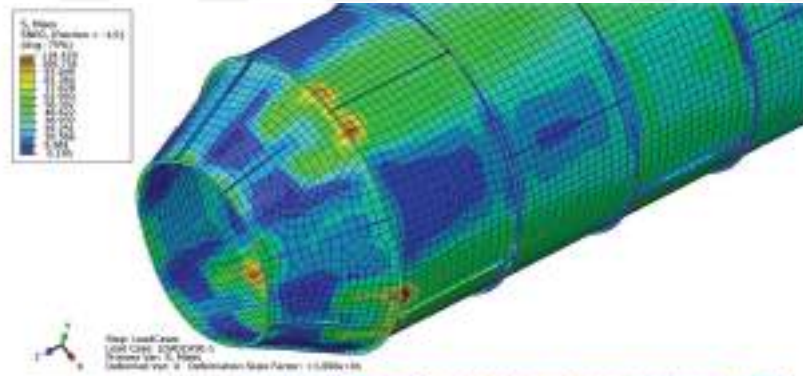
ABAQUS programında yük kombinasyonu tanımlayabilmek için analiz adımında (Step) analiz tipi Static, Linear Perturbation seçilmiştir. Load modülünde, Load Case sekmesinde örnek dikdörtgen silo için oluşturulan iki kombinasyon tanımlanmıştır.

Söz konusu kombinasyonlara (loadcase) göre analizler gerçekleştirildikten sonra, her bir loadcase durumu için deplasman ve gerilme dağılımları grafişel olarak incelenecektir. Maksimum gerilmenin tasarımsal sınır değeri Bölüm 5'deki limit durumlar gözönüne alınarak  $f_{e,RD} = f_y / \gamma_{M0}$  bağıntısı ile belirlenecektir. Çizelge 5.3'de kaynaklı durum için  $\gamma_{M0}$  kısmi faktörü seçilmiştir. Çizelge 5.4'de ise  $\gamma_{M0}=1,0$  olarak alınmıştır. Silindir silo için kullanılan malzeme S235 kalitesindeki çelik seçildiğinden, akma gerilmesi  $f_y$  değeri 235MPa olarak alınacaktır.

Silo modelinde kullanılan kabuk elemanlardaki gerilmeler incelenirken, Von Mises gerilmesinin sistemde herhangi bir noktadaki maksimum değeri, tasarım sınır değeri olarak belirlenen 235 MPa değerinden küçük olmalıdır.

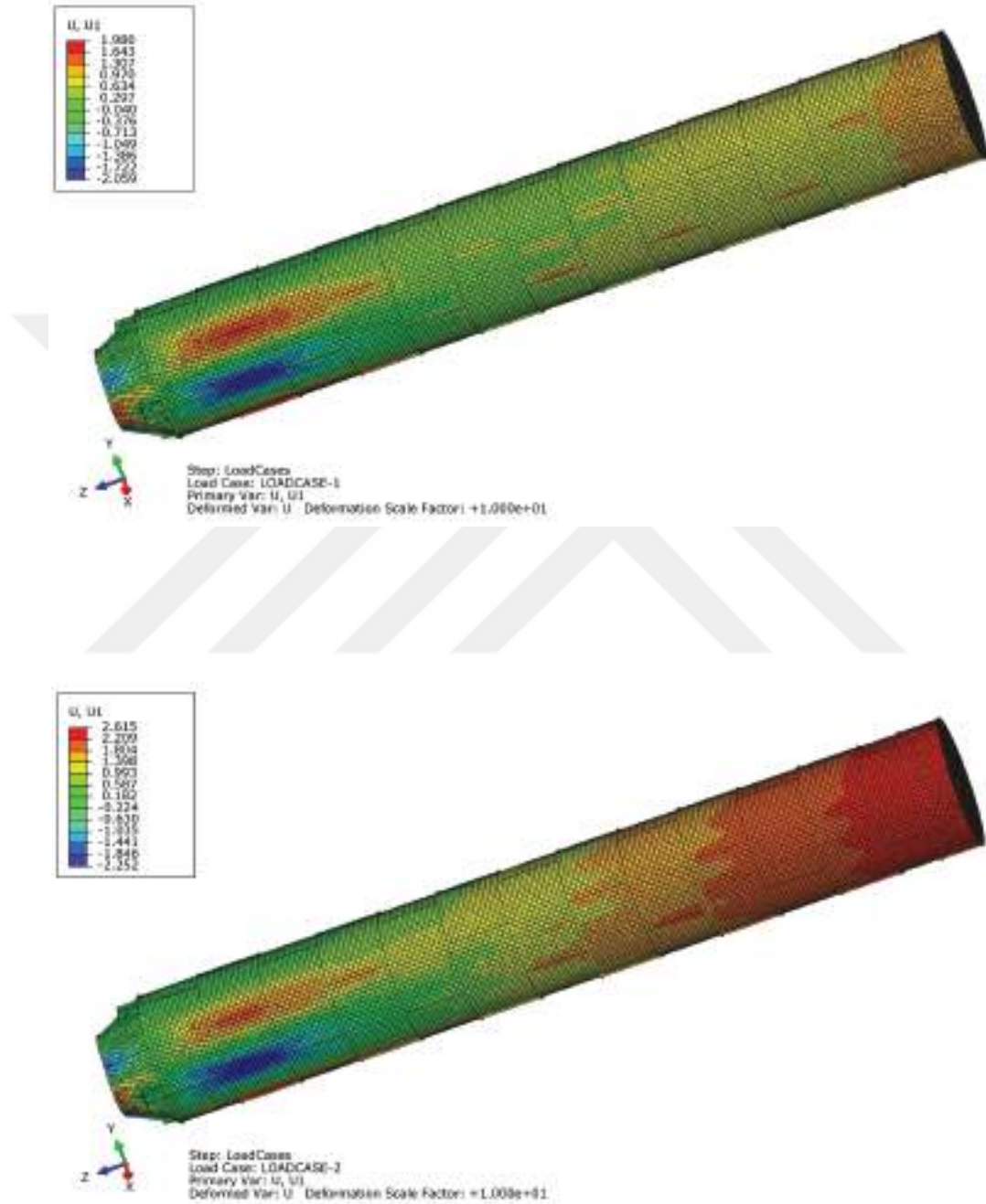


Şekil 6.66 Silindir silo çene dahil durum için S, Mises gerilme durumu

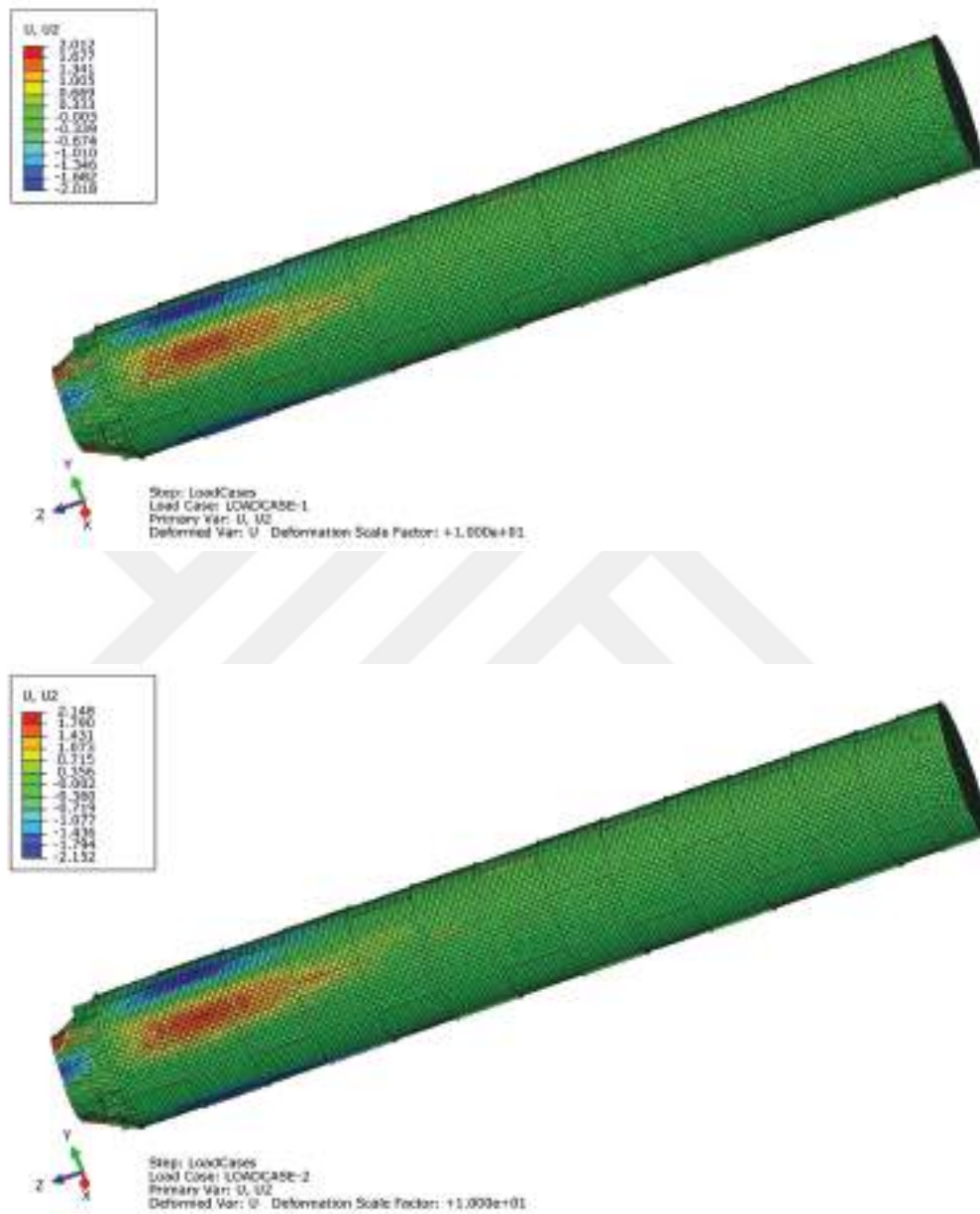


Şekil 6.67 Silindir silo çene hariç durum için S, Mises gerilme durumu

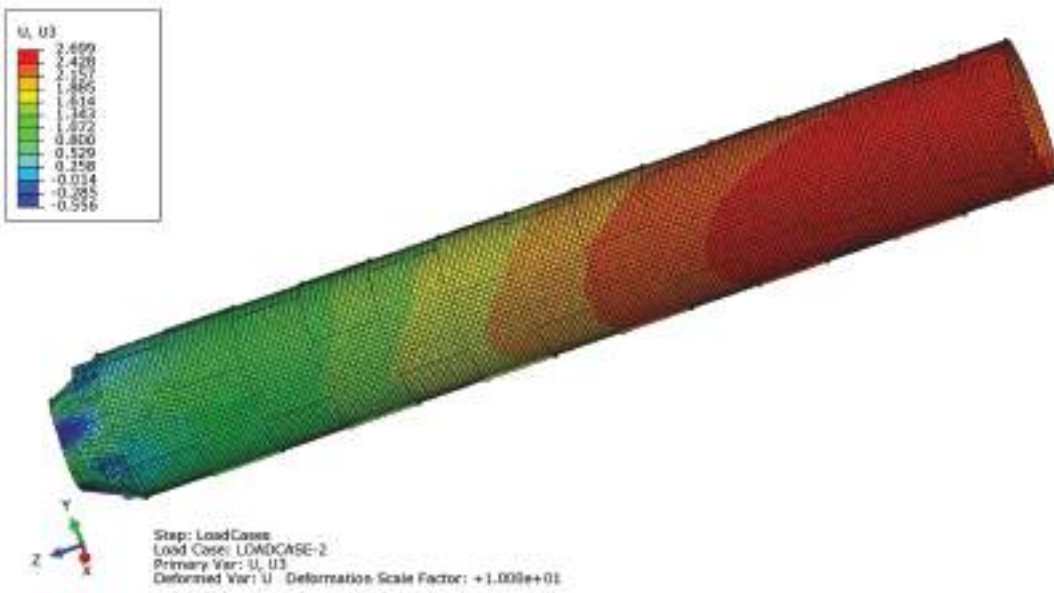
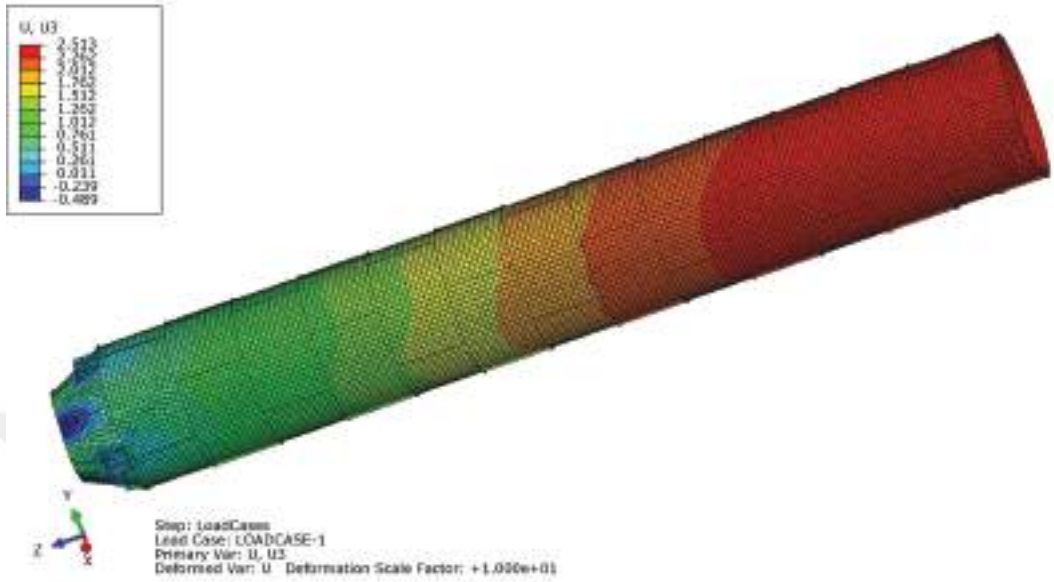
Silindir silonun gerilme grafikleri çene dahil ve hariç olmak üzere iki farklı yük kombinasyonu için ayrı ayrı verilmiştir (Şekil 6.66 ve 6.67). Çene bölgesinin modelden çıkarılmasıyla çizilen gerilme dağılımı silo duvarındaki gerilmeleri daha ayrıntılı yansıtmaktadır. Silo maksimum gerilmeleri çene dahil ve hariç durumlarda sırasıyla 179,88MPa ve 129,94MPa olarak elde edilmiştir. Kombinasyon-2'nin daha etkin olduğu anlaşılmaktadır. Mesnet bölgesi olan çenede beklendiği gibi gerilme yığılması nedeniyle gerilme 179,88 MPa'ya ulaşmıştır. Oluşan gerilmeler sınır gerilmenin oldukça altındadır. Bu nedenle kullanılan kesitlerde azaltmaya gidilebilir. Ancak unutulmamalıdır ki; bu çalışmada deprem, rüzgar, kar ve sıcaklık yüklemesi gibi yükler ve bu yükler ile ilgili kombinasyonlar hesaba katılmamıştır. Ayrıca silindir siloda, özellikle de ince sac kullanılan silolarda, burkulma hesabı yapılması gereklidir.



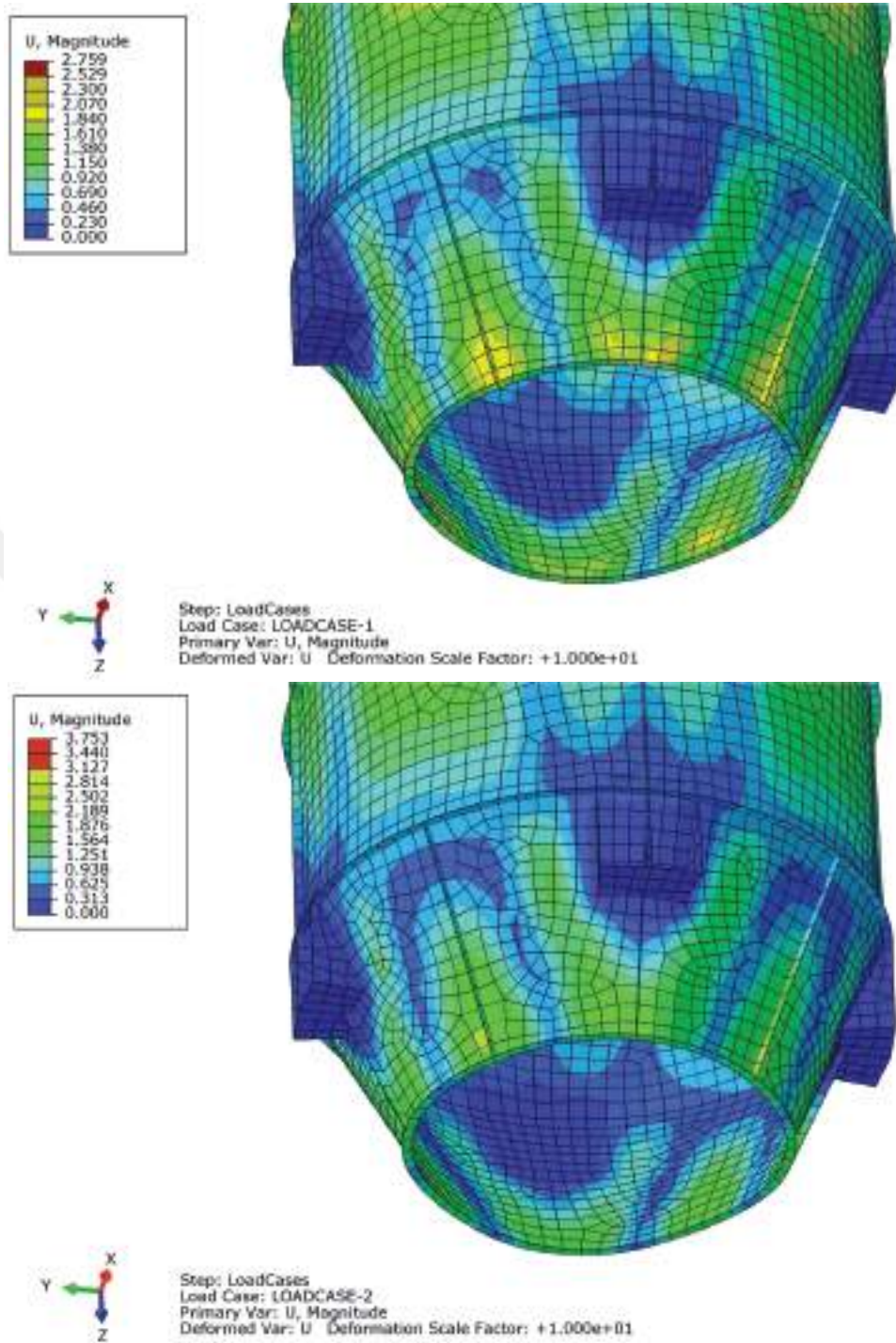
Şekil 6.68 Silindir silo X yönü deplasmanlar



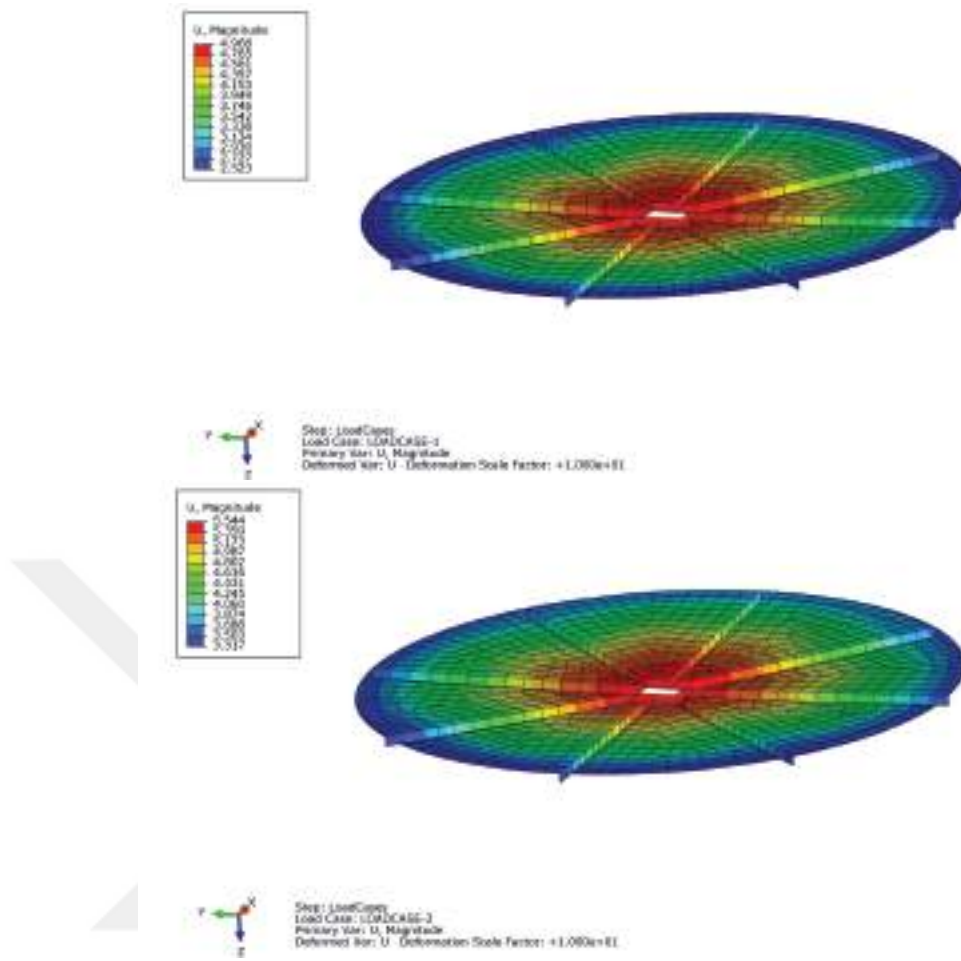
Şekil 6.69 Silindir silo Y yönü deplasmanlar



Şekil 6.70 Silindir silo Z yönü deplasmanlar



Şekil 6.71 Silindir silo huni kısmında oluşan toplam deplasmanlar



Şekil 6.72 Silindir silo kapak kısmında oluşan toplam deplasmanlar

Silindir siloda oluşan deplasmanlar ve dağılımları grafikler halinde gösterilmiştir (Şekil 6.68-6.72). Silindir silo gövdesinde X-Y plan düzleminde meydana gelen deplasmanlar oldukça önemlidir. Silonun maksimum düzlemsel (X-Y) deplasmanlarını grafiklerden okuduğumuzda, dikey duvarda 2,62mm, silo hunisinde 3,75mm ve kapakta 5,54mm deplasman meydana geldiği görülmektedir. Kapaktaki deplasman miktarı önemsiz olmakla birlikte ilave berkitmeler ile azaltılabilir.

Silindir silolar için Eurocode EN 1993-4-1 lokal deformasyon sınırı en ince silo duvar kalınlığının 10 katı olduğuna göre,  $3\text{mm} \times 10 = 30\text{mm}$  elde edilir ki; bu sınır oldukça yüksektir. Tasarımcının daha makul bir üst sınır arayışında olması gereklidir. Örnek silindir silo duvarında meydana gelen 2,62 mm deplasman oldukça kabul edilebilir bir deplasmandır.



Siloların çelik taşıyıcılara bağlandığı çenelere gelen yükler önem arz etmektedir. Çünkü çelik şase tasarımı yapılırken silonun aktaracağı yükler göz önüne alınarak tasarım yapılır. Bu tez çalışmasında sadece silo analizi yapılmıştır. Silo taşıyıcı şase tasarımına değinilmeyecektir.

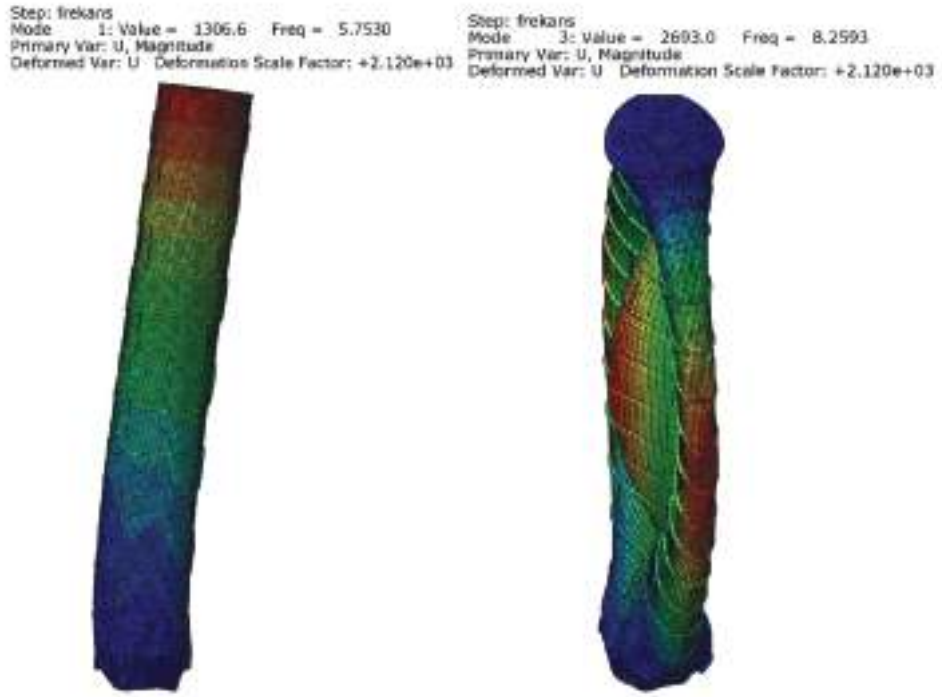
Silonun çeneleri çelik taşıyıcı şasiye bağlıdır ve bu bölge mesnetlenme bölgesidir. Çene bağlantı yüzeyinde hesaplanan mesnet reaksiyonları çelik şasinin tasarımında dış yük olarak dikkate alınacaktır. Şekil 6.73, 6.74 ve 6.75’de RF1, RF2 ve RF3 (1,2 ve 3 doğrultuları sırasıyla Global X, Y ve Z doğrultularına karşılık gelmektedir) reaksiyon kuvvetleri gösterilmiştir. Moment reaksiyonları gösterilmemiştir.

### 6.11. Silindir Buğday Silosunun Modal Analizi

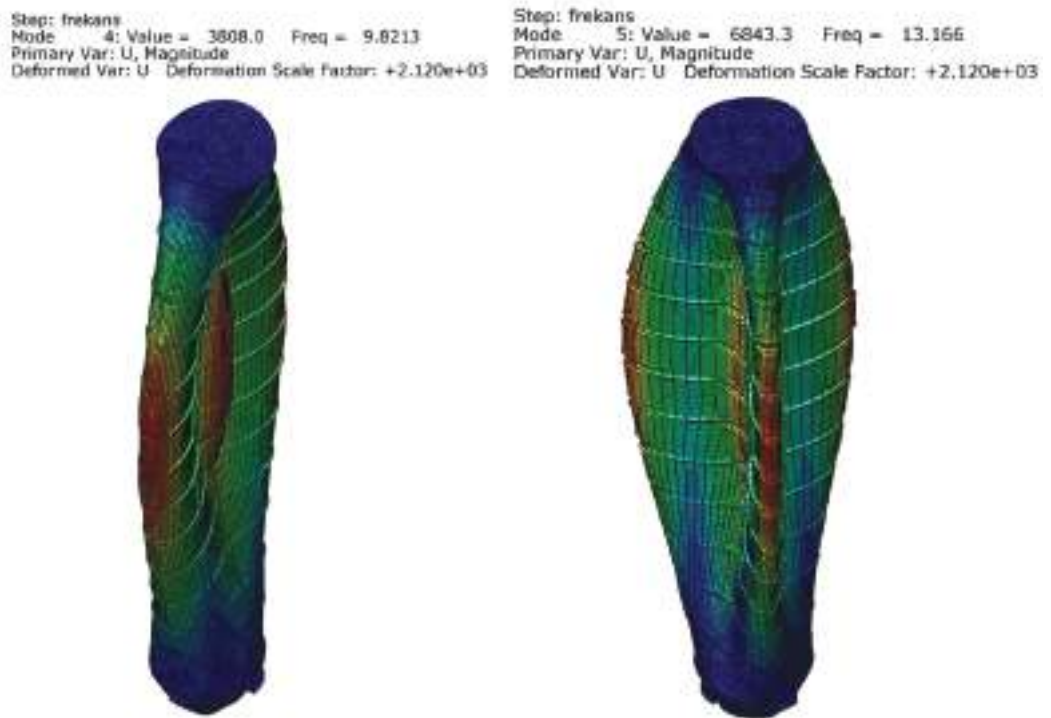
Bölüm 6.9’da dikdörtgen buğday silosunun modal analizi için yapılan açıklamalar, silindir silolar için de geçerlidir. ABAQUS ile hesaplanan ilk 11 doğal frekans değeri ve bu frekans değerlerine karşılık gelen periyot değerleri Çizelge 6.17’de listelenmiştir. Mod şekillerinin incelenmesinden simetriden dolayı tekrarlı modlar ve önemsiz modlar için mod şekilleri gösterilmemiştir. Diğer modlar için mod şekilleri çizilerek Şekil 6.76-6.79’de gösterilmiştir.

**Çizelge 6.17** Silindir buğday silosu modal analiz sonuçları

Mod	Frekans (Hz)	Periyot (s)
1	5.7530	0.174
3	8.2593	0.121
4	9.8213	0.101
5	13.166	0.076
8	17.562	0.056
9	17.563	0.056
10	22.689	0.044
11	23.505	0.042

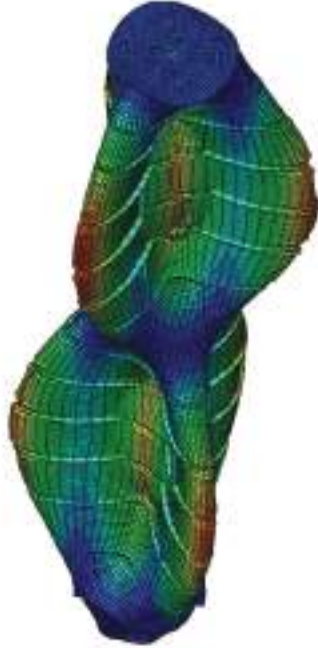


Şekil 6.76 Silindir silo mod şekilleri: 1. ve 3. modlar

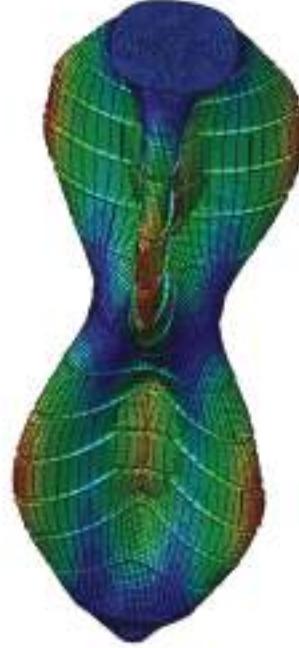


Şekil 6.77 Silindir silo mod şekilleri: 4. ve 5. Modlar

Step: frekans  
 Mode 8: Value = 12176, Freq = 17.562  
 Primary Var: U, Magnitude  
 Deformed Var: U - Deformation Scale Factor: +2.120e+03



Step: frekans  
 Mode 9: Value = 12178, Freq = 17.563  
 Primary Var: U, Magnitude  
 Deformed Var: U - Deformation Scale Factor: +2.120e+03



Şekil 6.78 Silindir silo mod şekilleri: 8. ve 9. modlar

Step: frekans  
 Mode 10: Value = 20323, Freq = 22.689  
 Primary Var: U, Magnitude  
 Deformed Var: U - Deformation Scale Factor: +2.120e+03



Step: frekans  
 Mode 11: Value = 21812, Freq = 23.505  
 Primary Var: U, Magnitude  
 Deformed Var: U - Deformation Scale Factor: +2.120e+03



Şekil 6.79 Silindir silo mod şekilleri: 10. ve 11. modlar

## 7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Hızlı imalatı ve kurulumu nedeniyle çelik silolar, betonarme silolardan çok daha fazla tercih edilmektedir. Son yıllarda dikdörtgen gövdeli silolar, silindir gövdeli silolara göre belirli avantajlarından dolayı popüler hale gelmiştir. Gövdenin düzlem çelik levhalardan meydana gelmesi, grup halinde inşa edildiklerinde, dairesel silo gruplarındakine benzer inşaat alanında kayıp olmaması vb. etkenler tercih edilmelerinin başlıca sebepleri arasında yer almaktadır. Bu nedenle, bu tez çalışmasında, dikdörtgen çelik tahıl silolarının sonlu eleman analizi konu edilmiştir.

Çelik silo tasarım ve analizi için Avrupa’da yürürlükte bulunan Eurocode 1, (EN 1991-4) ve Türkçe’ye çevrilmiş hali olan TS EN 1991-4:2006-07 yönetmeliğini kullanarak örnek bir dikdörtgen silo modeline ait tasarım kriterlerine ve yüklerine karar verilmiştir. Günümüzde siloların tasarım ve analizlerinin bilgisayar ortamında gerçekleştirilmesi kaçınılmazdır. Bilgisayarda sonlu eleman analizlerinde, oldukça kullanıcı dostu ve gelişmiş modelleme seçenekleri bulunan ABAQUS programı tercih edilmiştir. Çelik silo tasarım ve imalatında görev alan mühendislere yol göstermek ve örnek teşkil etmesi amacıyla, bu tez çalışmasında, uygulamada karşılaşılabilecek ölçü ve özelliklerde örnek bir dikdörtgen buğday silosu modeli oluşturulmuştur. Silo depo malzemesinden dolayı meydana gelebilecek tüm yüklemeler detaylı bir şekilde hesaplanmış ve sonlu eleman modeline nasıl uygulanması gerektiği adım adım açıklanmıştır. Dikdörtgen çelik silolarda uygulamada tercih edilen, tek çelik duvarlı, oluklu çelik duvarlı, berkitmelerle rijitliği artırılmış çelik duvarlı ve son olarak çift çelik duvarlı ve arasında destek profili bulunan silolar tek tek modellenmiş ve meydana gelen gerilme ve deplasmanlara bakılarak çift çelik duvarlı modelde karar kılınmıştır.

Bu çalışmada örnek olarak tasarlanan silo kapasitesinin çok fazla olmasından dolayı tek duvarlı dikdörtgen çelik siloda büyük deformasyonlar meydana gelmiş ve kullanılması mümkün olmamıştır. Tek duvarlı dikdörtgen silolar, genellikle EDS-1 sınıfına giren ve 10-12 m arası yükseklik için tercih edilmektedirler. Oluklu duvarlı dikdörtgen çelik silo tasarımında, her ne kadar tek duvarlı olana göre daha düşük gerilme ve deformasyon meydana gelse de, EDS-2 sınıfındaki ve yüksek kapasiteli silo örneği için kabul edilebilir bir model olamamıştır.

Çift duvarlı dikdörtgen çelik silo modelinin bilgisayar ortamında oluşturulması, benzer ölçülerde bir silindir silo modelinin oluşturulmasına nazaran oldukça zor ve zaman alıcı bir işlemdir. Her ne kadar bu tez çalışmasının başında silindir silo modeli

amaçlanmasa da, dikdörtgen çelik silo analiz sonuçları, en uygun silo gövdesinin silindir şeklinde olması gerektiğini göstermiştir. Dikdörtgen çelik silolarda depolanan malzemeden kaynaklı basınç etkisi, silo duvarlarında meydana getirdiği deformasyon etkisi ile silo kesitini dikdörtgenden daireye dönüştürmeye çalışmaktadır. Bu nedenle, dikdörtgen çelik silo modeli yanında, aynı yükseklik ve kapasiteye sahip bir silindir silo modeli oluşturulmuş ve elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Çift duvarlı dikdörtgen çelik silo ile aynı kapasiteye sahip silindir çelik silo modelleri karşılaştırıldığında, silindir çelik silonun çok daha az gerilme ve deformasyona maruz kaldığı, ayrıca imalatı için çok daha az yapı malzemesine ihtiyaç duyduğu görülmüştür. Ayrıca; silindir silo imalatının kesinlikle istenmediği hallerde, mümkünse silo kesitinin dikdörtgen yerine kare seçilmesi, tüm silo dikey duvarlarının benzer deformasyon davranışına sahip olmasını sağlayacak ve daha ekonomik bir çözüme ulaşılacaktır.

Bu tez çalışması, uygulamada dikdörtgen ve silindir çelik silo tasarımı ve sonlu eleman analizi yapan mühendisler için önemli bir yardımcı kaynak olacaktır. Dikdörtgen çelik silo modeline girişen mühendislerin, silindir çelik silo seçeneğini mutlaka değerlendirmeleri ve daha az malzeme - işçilik gerektiren hangisi ise onu tercih etmeleri akıllıca olacaktır.

Bu çalışmanın daha ileri bir aşamaya taşınması için, burada dikkate alınmayan deprem, rüzgar, kar ve sıcaklık yüklemesi gibi yüklerin hesaplanması ve analizlerde dikkate alınması önerilmektedir. Ayrıca özellikle silindir silolarda hasara yolaçabilecek burkulma davranışının da dikkate alınarak incelenmesi önem arz etmektedir. Gelecekte yapılacak araştırmalarda, tekli silo modeli yerine grup siloların modellenmesi ve analizi konusu incelenebilir.

## KAYNAKLAR

- Aydın, E., 2013, Silo yan sacı direğinin (stiffener) geometrisinin ve mukavemetinin optimizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Afyon.
- Arıkan, S., 2006, Dörtlü grup siloların iç basınç tesirleri altında sonlu elemanlar yöntemi ile incelenmesi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya.
- Blight, G.E., 1985. Temperature changes effect pressures in steel bins, *International Journal Bulk Solids Storage in Silos*, 1 (3), 1-7.
- Blight, G.E., 1987. Measurements on full size silo Part 1: Temperatures and Strains, *Bulk Handling*, 7 (6), 781-786.
- Blight, G.E., 1990a. Defects in accepted methods of estimating design loadings for silos, *Proc. Institution Civ. Engrs.* 88 (1), 1015-1036.
- Blight, G.E., 1990b. Temperature surcharge pressures in reinforced concrete silos, *Powder Handling and Processing*, 2 (4), 303-305.
- Blight, G.E., 1992a. Temperature-induced loadings on silo walls, *Structural Engineering Review*, 1, 61-71.
- Blight, G.E., 1992b. Design implications of measured pressures and strains in silos, *Journal of Structural Engineering*, 118(10), 2729-2742.
- Carson J.W, Jenkyn R.T.,1993, Load Development and Structural Considerations in Silo Design, *Present at Reliable Flow of Particulate Solids 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. Bulk Solids Handling, *Equipment Selection and Operation* , 68-98, Blackwell Publishing, Oxford.
- Craik, D.J. and Miller, B.F. ,The flow properties of powders under humid condition, *Journal of Pharmacology*, (10), 136-144.
- Chase, G.G., 2006. Solids notes, *The Department of Chemical Engineering*, ABD.
- Ceyhan, C., 2010, Betonarme siloların projelendirilmesinde kullanılan yönetmeliklerin karşılaştırılması, Yüksek Lisans Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.
- Çağlı, S., 2005. Katı yığınların akış özelliklerinin belirlenmesi ve silo tasarımı, Yüksek Lisans Tezi , *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.

- Çelik.,A.İ., Köse, M.M., 2020, Çelik tahıl depolama silolarının sismik analizi üzerine genel bir değerlendirme ve yeni analiz yaklaşımları, *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 8 (2),501-520.
- ÇYTHYE (2018), Çelik yapıların tasarım, hesap ve yapımına dair esaslar. Ankara.
- Durmuş, A., 2007, Silolar konusunda bazı teoriler ve stok yapılarının tasarımına ilişkin genel bit yaklaşım, Yüksek Lisans Tezi, *Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Trabzon.
- Durmuş, A., 2013, Betonarme silindirik siloların stok malzemesi-yapı-zemin etkileşimleri dikkate alınarak deprem davranışlarının incelenmesi, Doktora Tezi, *Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Trabzon.
- Eurocode 0, (EN 1990), 2002, Basic of structural design, european committee for standardisation, Brussels.
- Eurocode 1, (EN 1991-4), 2006, Basis of design and actions on structures part 4:actions in silo and tanks, European Committee for Standardisation, Brussels.
- Eurocode 3, (EN 1993-1-6), 2006, Design of steel structures part 4-1: silos, European Committee for Standardisation, Brussels.
- Fitzpatrick, J.J., Iqbal, T., Delaney, C., Twomey, T. and Keogh, M.K., 2004, Effect of powder properties and storage conditions on the flowability of milk powders with different fat content, *Journal of Food Engineering*, (64), 435-444.
- Ganesan, V., Rosentrater, K.A. and Muthukumarappan, K., 2008, Flowability and handling characteristics of bulk solids and powders - a review with implications for DDGS, *Biosystems Engineering*, 425-435.
- Hüner, İ., 2006, Çimento silosunun statik ve dinamik analizleri, Yüksek Lisans Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.
- Kibar, H., Öztürk, T., 2011, Tarımsal ürün silolarında yapısal sorunlar , *GOÜ Ziraat Fakültesi Dergisi*, 28 (2), 85-96.
- Kibar, H., 2011, Tombul fındık depolamasında tane özelliklerine bağlı olarak anyss programıyla optimum silo tasarımı, Doktora Tezi, *Ondokuz Mayıs Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Samsun.
- Kibar, H., Öztürk, T., 2016, Depolama yapılarında duvar basınçlarının belirlenmesinde kuramsal yaklaşımlar , *Iğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 6 (4), 51-63.
- Kibar, H., Öztürk, T., 2013, Çelik konstrüksiyonlu tombul fındık silosunun sonlu eleman yöntemi ile modal analizi, *Ege Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 50 (3), 267-276.

- Kibar, H., 2017, Farklı standartlara göre silo yüzeyindeki dış basınç katsayılarının belirlenmesi, *Iğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 7 (2), 107-114.
- Kurşunel, A.L., 2016, Un fabrikalarında tavlama ve tav siloları üzerine yapılan bir araştırma, *Selçuk Teknik Online Dergisi*, 1 (3), 1-8.
- Moreyra, R. and Peleg, M., Effect of equilibrium water activity on the bulk properties of selected food powder, *Journal of Food Science*, 46 (6), 1918-1922.
- Özel, K., 2007, Çelik hububat silolarının tasarım esasları, Yüksek Lisans Tezi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya.
- Özel, E., 2011, Betonarme silolarda cidar-malzeme etkileşimi dikkate alınarak elde edilen yatay basınçların analitik ve sayısal yöntemlerle karşılaştırılması, Yüksek Lisans Tezi, *Ondokuz Mayıs Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Samsun.
- Öztürk, T., Kibar, H., Esen, B., 2008, Taneli tarımsal ürünler için akış profilleri ve silolamada karşılaşılan sorunlar, *Gaziosmanpaşa Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 25 (2), 61-67.
- Prescott, J.K. and Barnum, R.A., 2000, On powder flowability, *Pharmaceutical Technology*, 60-84.
- Rotter, J.M., 2001, Guide for the Economic Design of Circular Metal Silos, *Spon Press*, 235.
- 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*, 65-76.
- Yaldıran, F., 2018, Bir buğday silosunun ansys programı kullanılarak analizi, Yüksek Lisans Tezi, *Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Karabük.
- TS EN 1991-4:2006-07, 2006, Yapılar üzerindeki etkiler - bölüm 4: silolar ve tanklar (Eurocode 1), Türk Standardları Enstitüsü, Ankara.
- Turhan, M.C., 1986, Betonarme ve öngerilmeli beton siloların projelendirme esasları, Yüksek Lisans Tezi, *Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Trabzon.
- Zhao, Y., 2001. Stability and strength of steel silo transition junctions, Ph.D. Thesis, *The Hong Kong Polytechnic University Department of Civil and Structural Engineering*, Hong Kong, 439.