

T.C.
KASTAMONU ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI



ÇELİK SİLO TASARIMI VE OPTİMİZASYONU

GÜLŞAH ERDOĞAN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

DOÇ. DR. HÜSEYİN GÜRAN ÜNAL

EYLÜL - 2024

KASTAMONU

TEZ ONAYI

GÜLŞAH ERDOĞAN tarafından hazırlanan “**ÇELİK SİLO TASARIMI VE OPTİMİZASYONU**” adlı tez çalışmasının savunma sınavı **27.09.2024** tarihinde yapılmış olup aşağıda verilen jüri tarafından oy birliği / oy çokluğu ile Kastamonu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı Yüksek Lisans Tezi** olarak kabul edilmiştir.

Danışman	Doç. Dr. Hüseyin Güran ÜNAL Kastamonu Üniversitesi	
Jüri Üyesi	Prof. Dr. Serkan ISLAK Kastamonu Üniversitesi	
Jüri Üyesi	Prof. Dr. Kamil SAÇILIK Ankara Üniversitesi	

Jüri üyeleri tarafından kabul edilmiş olan bu tez Kastamonu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunca onanmıştır.

Enstitü Müdürü	Doç. Dr. Selçuk MEMİŞ	
----------------	-----------------------	-------

TAAHHÜTNAME

Bu tezin tasarımı, hazırlanması, yürütülmesi, araştırmalarının yapılması ve bulgularının analizlerinde bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu; ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını, bilimsel etiğe uygun olarak kaynak gösterildiğini bildirir ve taahhüt ederim.

Gülşah ERDOĞAN

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ÇELİK SİLO TASARIMI VE OPTİMİZASYONU

GÜLŞAH ERDOĞAN

KASTAMONU ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

DANIŞMAN: DOÇ. DR. HÜSEYİN GÜRAN ÜNAL

Silolar, tarım ve endüstriyel alanlarda kullanılan, tahıl, yem, çimento ve diğer dökme malzemelerin depolanması amacıyla tasarlanmış büyük ve dikey yapılar olarak tanımlanır. Silolar, genellikle silindirik şekilli olup, içerdikleri malzemelerin dış etkenlerden korunmasını ve uzun süreli muhafaza edilmesini sağlarlar.

Çelik, beton veya ahşap gibi farklı malzemelerden yapılabilirler ve bu malzemelerin seçiminde maliyet, dayanıklılık ve kullanım ömrü gibi kriterler dikkate alınır. Çelik silolar, yüksek mukavemet ve dayanıklılık özellikleri nedeniyle yaygın olarak tercih edilir. Siloların mühendislik tasarımında, malzeme bilimi, yapısal analiz, termodinamik ve akışkanlar mekaniği gibi disiplinlerden faydalanılır.

Silo tasarımı ve optimizasyonu, mühendislik biliminin birçok dalını kapsayan karmaşık ve çok yönlü bir süreçtir. Yapısal dayanıklılık, malzeme seçimi ve ekonomik verimlilik gibi faktörlerin dikkatle değerlendirilmesi, siloların güvenli ve verimli bir şekilde çalışmasını sağlar.

Bu çalışmanın temel amacı, optimum koşullarda çelik tahıl silosu tasarlamak ve bu tasarımların analizlerini gerçekleştirmektir. Bu çalışmada izlenen yöntem, ilk olarak literatür de yer alan bilgiler ve endüstri standartları doğrultusunda çelik tahıl silolarının genel özellikleri ve tasarım kriterleri incelenmiştir. Bu incelemelerin ardından, SolidWorks 2024 yazılımı kullanılarak, farklı sac kalınlıklarına sahip çeşitli silo modelleri oluşturulmuştur. Bu modeller için uygun malzeme seçimi yapılmış ve emniyet faktörleri hesaplanmıştır. Silonun stabilitesini artırmak ve olası yapısal sorunları minimize etmek amacıyla, destek elemanları tasarıma dahil edilmiştir. Çelik siloların maliyetinin büyük kısmını oluşturan yapı malzemesi, tavsiye edilen emniyet gerilmesi değerinin üzerine çıkmadan hafifletilmeye çalışılmıştır.

Bu çalışmada, tahıl depolaması amacıyla farklı sac kalınlıkları ve destek elemanlarına sahip 85 adet silo modeli oluşturulmuştur. Silo boyutları, 1500x3000 mm sac levhalar kesilmeksizin kullanılarak çapı 4,77 metre ve yüksekliği (çatı hariç) 10,5 metre olarak belirlenmiş ve araştırma süresince sabit tutulmuştur. Oluşturulan modeller için kaynaklanabilirlik, işlenebilirlik ve maliyet yönünden uygun malzeme olarak St44 yapı çeliği seçilmiştir.

Sonraki aşamada, oluşturulan silo modellerinin yapısal analizleri ANSYS sonlu elemanlar yazılımı ile gerçekleştirilmiştir. ANSYS yazılımı kullanılarak yapılan analizlerde, her bir silo modeli için statik yükleme koşulları altında oluşan toplam deformasyon, gerinim ve gerilme değerleri hesaplanmıştır. Ayrıca, her bir tasarımın toplam ağırlığı da değerlendirilmiştir. Bu analizler sonucunda elde edilen veriler karşılaştırılarak, en uygun performans ve maliyet dengesini sağlayan optimum silo tasarımı belirlenmiştir.

Sonuç olarak, bu tez çalışması kapsamında, çelik tahıl silolarının tasarımında kullanılacak sac kalınlığı, malzeme seçimi ve destek elemanlarının etkisi detaylı bir şekilde incelenmiş ve analiz edilmiştir. Yapılan analizler neticesinde, çeşitli tasarım parametreleri dikkate alınarak, güvenli ve ekonomik bir çelik tahıl silosu tasarımı önerilmiştir. Sadece sac levhaların kullanımı yerine, uygun bölgelere aynı malzemeden NPU ve Lama destek elemanı konularak gerekli emniyet değerinin sağlanabildiği ve toplam silo gövdesi ağırlığının büyük ölçüde hafifletilebildiği gözlemlenmiştir. Sabit kalınlıkta gerekli emniyeti sağlayan silo modeli yerine değişken sac kalınlıklı ve destek elemanı takviyeli bir tasarım ile referans silo ağırlığının %58 azaltılabildiği sonucuna varılmıştır. Bu çalışma, endüstride çelik tahıl silolarının tasarımı ve analizi konusunda önemli bir kaynak teşkil etmekte olup, gelecekte yapılacak benzer çalışmalar için yol gösterici nitelikte bilgiler sunmaktadır.

ANAHTAR KELİMELEER: Çelik silo, ağırlık optimizasyonu, solidworks, ansys, tasarım, statik analiz

ABSTRACT

MSC THESIS

STEEL SILO DESIGN AND OPTIMIZATION

GÜLŞAH ERDOĞAN

KASTAMONU UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE

DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING

SUPERVISOR: ASSOC. PROF. DR. HÜSEYİN GÜRAN ÜNAL

Silos are defined as large, vertical structures designed for the storage of grain, feed, cement and other bulk materials used in agricultural and industrial areas. Silos are usually cylindrical in shape and provide long-term storage and protection of the materials they contain from external factors.

They can be made of different materials such as steel, concrete or wood, and criteria such as cost, durability and lifetime are taken into account when choosing these materials. Steel silos are widely preferred due to their high strength and durability. The engineering design of silos utilizes disciplines such as materials science, structural analysis, thermodynamics and fluid mechanics.

Silo design and optimization is a complex and multifaceted process involving many branches of engineering science. Careful consideration of factors such as structural durability, material selection and economic efficiency ensure that silos operate safely and efficiently.

The primary objective of this study is to design a steel grain silo under optimal conditions and to conduct analyses of these designs. The methodology employed in this study initially involves examining the general features and design criteria of steel grain silos based on information available in the literature and industry standards. Following this examination, various silo models with different sheet thicknesses were created using SolidWorks 2024 software. For these models, suitable materials were selected, and safety factors were calculated. To enhance the stability of the silo and minimize potential structural issues, support elements were incorporated into the design. The structural material, which constitutes a large part of the cost of steel silos, was tried to be lightened without exceeding the recommended safety stress value.

In this study, 85 silo models with different sheet thicknesses and support elements were created for grain storage. The dimensions of the silo were determined as 4.77 meters in diameter and 10.5 meters in height (excluding the roof) using 1500x3000 mm sheet metal without cutting and were kept constant throughout the research. St44 structural steel was chosen as the material due to its weldability, machinability and cost effectiveness.

In the next phase, the structural analyses of the created silo models were performed using ANSYS finite element software. In the analyses conducted with ANSYS software, the total deformation, strain, and stress values under static loading conditions were calculated for

each silo model. Additionally, the total weight of each design was evaluated. The data obtained from these analyses were compared to determine the optimal silo design that provides the best balance of performance and cost.

As a result of this thesis study, the effects of sheet thickness, material selection, and support elements used in the design of steel grain silos were thoroughly examined and analyzed. Based on the analyses conducted, a safe and economical steel grain silo design was proposed, taking into account various design parameters. It was observed that instead of using only steel plates, the necessary safety values could be achieved by placing NPU and flat bar support elements made of the same material in appropriate regions, significantly reducing the overall weight of the silo body. It was concluded that, compared to a model using uniform sheet thickness to ensure safety, a design with variable sheet thickness and reinforced support elements could reduce the reference silo weight by 58%. This study serves as an important resource for the design and analysis of steel grain silos in the industry and provides valuable guidance for future similar studies.



KEYWORDS: Steel silo, weight optimization, solidworks, ansys, design, static analysis

September 2024, 118 Page

TEŞEKKÜR

Bu tezin hazırlanma süresince desteğini, yardımını, bilgi ve deneyimini esirgemeyen tez danışmanım Sayın hocam Doç. Dr. Hüseyin Güran Ünal'a, değerli katkıları ve rehberliği için sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca, çalışma süresince bana motivasyon sağlayan sevgili aileme ve arkadaşlarıma çok teşekkür ederim.

GÜLŞAH ERDOĞAN

Kastamonu, 2024

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
TEZ ONAYI	ii
TAAHHÜTNAME	iii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT	vi
TEŞEKKÜR	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	xii
TABLolar DİZİNİ	xv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xvi
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Çelik Silolar Hakkında Yapılmış Çalışmalar.....	3
2. GENEL BİLGİLER	6
2.1 Silo Nedir?	6
2.2 Siloların Sınıflandırılması.....	6
2.2.1 Kesit Şekillerine Göre Sınıflandırma.....	6
2.2.2 Yapımlarında Kullanılan Malzemeye Göre Sınıflandırma	9
2.3 Silo Bileşenleri.....	10
2.3.1 Silo Çatısı.....	11
2.3.2 Silo Tavan Döşemesi	11
2.3.3 Silo Gövdesi.....	12
2.3.4 Silo Hunisi (Bunker).....	13
2.3.5 Silo Tabanı.....	13
2.3.6 Düşey Taşıyıcılar	14
2.3.7 Silo Temeli.....	15
2.4 Silo Dolumu ve Boşaltımı.....	16
2.4.1 Silo Doldurma İşlemi.....	16
2.4.1.1 Mekanik dolum işlemi.....	16
2.4.1.2 Pnömatik dolum işlemi.....	16
2.4.2 Silo Boşaltma İşlemi	17
2.4.2.1 Doğrudan boşaltım işlemi.....	17
2.4.2.2 Mekanik boşaltım işlemi	17
2.4.2.3 Pnömatik boşaltım işlemi	17
2.5 Siloların Çalışma Prensibi.....	17
2.6 Silo Akış Modelleri.....	18
2.6.1 Kütle Akış	19
2.6.1.1 Kütlesel akış modeli	20
2.6.2 Huni Akış.....	21
2.6.3 Ürünlerin Akışkanlığını Etkileyen Faktörler	22
2.6.3.1 Nem içeriği	23
2.6.3.2 Bağıl nem.....	23
2.6.3.3 Sıcaklık	24
2.6.3.4 Basınç	24
2.6.3.5 Yağ içeriği	24
2.6.3.6 Tane şekli.....	25

2.6.4	Silo Yığınlarında Akış Sorunları	25
2.6.4.1	Kemerlenme	25
2.6.4.2	Kanallanma.....	27
2.6.4.3	Ayrışma	27
2.6.4.4	Düzensiz akış.....	28
2.6.5	Silodaki Akışı Etkileyen Parametreler.....	29
2.7	Silolara Etkiyebilecek Yükler	29
2.7.1	Sabit Yükler	30
2.7.2	Siloda Oluşan Malzeme Basınçları ve Buna Bağlı Yükler.....	30
2.7.3	Sıcaklık Farkından Doğan Yükler	31
2.7.4	Kar Yükü.....	31
2.7.5	Rüzgar Yükü	32
2.7.6	Deprem Yükü.....	32
2.8	Silolarda Görülen Hatalar	33
2.8.1	Projelendirme Hataları	33
2.8.2	Yapım Hatalarından Kaynaklanan Sorunlar	34
2.8.3	Kullanım Hataları	35
2.8.4	Bakım Hataları	36
2.8.4.1	Silo elemanlarında yetersiz periyodik bakım	36
2.8.4.2	Paslanma (korozyon) ve aşınma	36
2.9	Silolarda Aranılan En Önemli Özellikler	37
2.10	Siloların İşletilmesi İçin Gerekli Tesisler	37
2.11	Silo Kullanım Alanları.....	38
3.	TASARIM VE ANALİZ	40
3.1	Maliyet	40
3.1.1	Malzeme Maliyeti	41
3.1.2	Kaynak İşçiliği.....	41
3.1.3	Kıvrırma ve Şekillendirme İşçiliği.....	41
3.1.4	Montaj ve Kurulum.....	41
3.1.5	Bakım ve Onarım.....	41
3.2	Maliyet Azaltma Stratejileri.....	42
3.2.1	Ağırlık Azaltımı	42
3.2.2	Üretim Süreçlerinin Optimizasyonu	42
3.2.3	Malzeme Temini	42
3.3	Silo Tasarımı.....	42
3.4	SolidWorks Programı ile Silo Modelleme.....	44
3.4.1	Destek Elemanları.....	44
3.5	ANSYS Programı ile Silo Analizi	46
3.5.1	Mesh (Ağ Yapısı).....	47
4.	STATİK ANALİZ	49
4.1	Von Mises Gerilmeleri ve Mühendislikte Kullanımı.....	49
4.1.1	Von Mises Gerilmesi	49
4.1.2	Von Mises Kriteri	50
4.1.3	Matematiksel Formülasyon.....	50
4.1.4	Von Mises Gerilmesinin Uygulamaları	50
4.1.4.1	Mühendislikte kullanım alanları.....	50
4.1.4.2	Çelik silo tasarımında von mises gerilmesi	50
4.1.5	Von Mises Gerilmesinin Hesaplanması.....	51
4.1.5.1	Analitik yöntemler.....	51

4.1.5.2	Nümerik yöntemler	51
4.1.5.3	Simölasyon ve yazılımlar	51
4.2	Kuvvet.....	51
4.3	ANSYS Programında Silo Statik Analizi	52
4.3.1	Toplam Deformasyon	53
4.3.2	Gerinim	54
4.3.3	Gerilme	55
4.4	Farklı Kalınlıklarda Tasarlanan Silolar ve Analiz Sonuçları	56
4.4.1	Sac Kalınlığı 5 mm ile Başlayan Silolar	57
4.4.2	Sac Kalınlığı 4 mm ile Başlayan Silolar	58
4.4.3	Sac Kalınlığı 3 mm ile Başlayan Silolar	67
4.4.3.1	Silo 3.3 gövde kalınlıkları için yeni silo modelleri	74
4.4.3.1.1	Birinci model	74
4.4.3.1.2	İkinci model	78
4.5	Siloların Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması	81
5.	SONUÇ VE ÖNERİLER	84
KAYNAKLAR		86
EKLER		91
EK A.	Sac Kalınlığı 5 mm ile Başlayan Siloların ANSYS Görselleri	92
EK B.	Sac Kalınlığı 4 mm ile Başlayan Siloların ANSYS Görselleri	93
EK C.	Sac Kalınlığı 3 mm ile Başlayan Siloların ANSYS Görselleri	107
ÖZGEÇMİŞ		118

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1 Siloların kesit şekilleri	7
Şekil 2.2 Silindirik silo grupları	8
Şekil 2.3 Dörtgen ve çokgen kesitli silo grupları	9
Şekil 2.4 Farklı malzemelerden yapılmış silo örnekleri	10
Şekil 2.5 Silo ana bileşenleri	10
Şekil 2.6 Farklı silo çatısı çeşitleri	11
Şekil 2.7 Silo cidarında kullanımı tercih edilen guseler	12
Şekil 2.8 Siloların taban şekillerine örnekler	13
Şekil 2.9 Silolarda dikey taşıyıcı kesitlerine örnek	14
Şekil 2.10 Temele oturan siloların şematik örnekleri	14
Şekil 2.11 Hücre içinde hacim içeren silo kesitleri	15
Şekil 2.12 Bir ürünün çıkış koşullarına göre çeşitli silo tipleri	15
Şekil 2.13 Örnek tahıl depolama yöntemi ve malzemeleri	16
Şekil 2.14 Çelik siloların çalışma akışının şeması	18
Şekil 2.15 Silo akış modelleri	19
Şekil 2.16 Kütle akışına izin veren silo kesit geometrileri: a) konik akış, b) dikdörtgen, düzlem akış, c) asimetrik düzlem akış, d) asimetrik konik akış	20
Şekil 2.17 Huni akış silolarında kullanılan kesit geometrileri	21
Şekil 2.18 Silo çıkışında kemer oluşumu	26
Şekil 2.19 Silo kanal oluşması	27
Şekil 2.20 Tanelerin ayrışması	28
Şekil 2.21 Düzensiz akış	28
Şekil 2.22 Silo yapım hataları	35
Şekil 2.23 Silolarda oluşan paslanma ve aşınma durumları	36
Şekil 2.24 Siloların işletilmesine ilişkin tipik bir kesit	37
Şekil 2.25 Kule tipi silo yapıları, genel görünüm a) Kule tipi beton silo b) Kule tipi çelik silo	39
Şekil 2.26 Konik tabanlı çelik silo	39
Şekil 3.1 Silo modeli	44
Şekil 3.2 NPU profil kullanılarak tasarlanan silo modeli	45
Şekil 3.3 Lama demiri kullanılarak tasarlanan silo modeli	46
Şekil 3.4 Silo gövdesinin mesh işlemi	48
Şekil 3.5 Destek elemanları ve gövdenin mesh işlemi	48
Şekil 4.1 Siloya uygulanan kuvvet	52
Şekil 4.2 Silo 5 toplam deformasyon değeri	54
Şekil 4.3 Silo 5 gerinim değeri	55
Şekil 4.4 Silo 5 gerilme değeri	56
Şekil 4.5 Silo 4.1-4 numaralı silo toplam deformasyon değeri	60
Şekil 4.6 Silo 4.1-4 numaralı silo gerinim ve gerilme değerleri	60
Şekil 4.7 Silo 4.2-5 numaralı silo toplam deformasyon değeri	62
Şekil 4.8 Silo 4.2-5 numaralı silo gerinim ve gerilme değerleri	62
Şekil 4.9 Silo 4.3-5 numaralı silo toplam deformasyon değeri	64
Şekil 4.10 Silo 4.3-5 numaralı silo gerinim ve gerilme değerleri	64

Şekil 4.11 Silo 4.4-5 numaralı silo toplam deformasyon değeri.....	66
Şekil 4.12 Silo 4.4-5 numaralı silo gerinim ve gerilme değerleri	66
Şekil 4.13 Silo 3.1-5 numaralı silo toplam deformasyon değeri.....	69
Şekil 4.14 Silo 3.1-5 numaralı silo gerinim ve gerilme değerleri	69
Şekil 4.15 Silo 3.2-4 numaralı silo toplam deformasyon değeri.....	71
Şekil 4.16 Silo 3.2-4 numaralı silo gerinim ve gerilme değerleri	71
Şekil 4.17 Silo 3.3-5 numaralı silo toplam deformasyon değeri.....	73
Şekil 4.18 Silo 3.3-5 numaralı silo gerinim ve gerilme değerleri	73
Şekil 4.19 Silo 3.3-11 numaralı silo modeli.....	74
Şekil 4.20 Silo 3.3-11 numaralı silo toplam deformasyon değeri.....	76
Şekil 4.21 Silo 3.3-11 numaralı silo gerinim ve gerilme değerleri	77
Şekil 4.22 Silo 3.3-12 numaralı silo modeli.....	78
Şekil 4.23 Silo 3.3-12 numaralı silo toplam deformasyon değeri.....	80
Şekil 4.24 Silo 3.3-12 numaralı silo gerinim ve gerilme değerleri	80
Şekil A.1 Silo 5.1 statik analiz sonuçları	92
Şekil A.2 Silo 5.2 statik analiz sonuçları	92
Şekil A.3 Silo 5.3 statik analiz sonuçları	92
Şekil B.1 Silo 4 statik analiz sonuçları	93
Şekil B.2 Silo 4.1 statik analiz sonuçları	93
Şekil B.3 Silo 4.1-1 statik analiz sonuçları	93
Şekil B.4 Silo 4.1-2 statik analiz sonuçları	94
Şekil B.5 Silo 4.1-3 statik analiz sonuçları	94
Şekil B.6 Silo 4.1-5 statik analiz sonuçları	94
Şekil B.7 Silo 4.1-6 statik analiz sonuçları	95
Şekil B.8 Silo 4.1-7 statik analiz sonuçları	95
Şekil B.9 Silo 4.1-8 statik analiz sonuçları	95
Şekil B.10 Silo 4.1-9 statik analiz sonuçları	96
Şekil B.11 Silo 4.1-10 statik analiz sonuçları	96
Şekil B.12 Silo 4.2 statik analiz sonuçları.....	96
Şekil B.13 Silo 4.2-1 statik analiz sonuçları	97
Şekil B.14 Silo 4.2-2 statik analiz sonuçları	97
Şekil B.15 Silo 4.2-3 statik analiz sonuçları	97
Şekil B.16 Silo 4.2-4 statik analiz sonuçları	98
Şekil B.17 Silo 4.2-6 statik analiz sonuçları	98
Şekil B.18 Silo 4.2-7 statik analiz sonuçları	98
Şekil B.19 Silo 4.2-8 statik analiz sonuçları	99
Şekil B.20 Silo 4.2-9 statik analiz sonuçları	99
Şekil B.21 Silo 4.2-10 statik analiz sonuçları	99
Şekil B.22 Silo 4.3 statik analiz sonuçları.....	100
Şekil B.23 Silo 4.3-1 statik analiz sonuçları	100
Şekil B.24 Silo 4.3-2 statik analiz sonuçları	100
Şekil B.25 Silo 4.3-3 statik analiz sonuçları	101
Şekil B.26 Silo 4.3-4 statik analiz sonuçları	101
Şekil B.27 Silo 4.3-6 statik analiz sonuçları	101
Şekil B.28 Silo 4.3-7 statik analiz sonuçları	102
Şekil B.29 Silo 4.3-8 statik analiz sonuçları	102
Şekil B.30 Silo 4.3-9 statik analiz sonuçları	102
Şekil B.31 Silo 4.3-10 statik analiz sonuçları	103
Şekil B.32 Silo 4.4 statik analiz sonuçları.....	103

Şekil B.33 Silo 4.4-1 statik analiz sonuçları	103
Şekil B.34 Silo 4.4-2 statik analiz sonuçları	104
Şekil B.35 Silo 4.4-3 statik analiz sonuçları	104
Şekil B.36 Silo 4.4-4 statik analiz sonuçları	104
Şekil B.37 Silo 4.4-6 statik analiz sonuçları	105
Şekil B.38 Silo 4.4-7 statik analiz sonuçları	105
Şekil B.39 Silo 4.4-8 statik analiz sonuçları	105
Şekil B.40 Silo 4.4-9 statik analiz sonuçları	106
Şekil B.41 Silo 4.4-10 statik analiz sonuçları	106
Şekil C.1 Silo 3 statik analiz sonuçları	107
Şekil C.2 Silo 3.1 statik analiz sonuçları	107
Şekil C.3 Silo 3.1-1 statik analiz sonuçları	107
Şekil C.4 Silo 3.1-2 statik analiz sonuçları	108
Şekil C.5 Silo 3.1-3 statik analiz sonuçları	108
Şekil C.6 Silo 3.1-4 statik analiz sonuçları	108
Şekil C.7 Silo 3.1-6 statik analiz sonuçları	109
Şekil C.8 Silo 3.1-7 statik analiz sonuçları	109
Şekil C.9 Silo 3.1-8 statik analiz sonuçları	109
Şekil C.10 Silo 3.1-9 statik analiz sonuçları	110
Şekil C.11 Silo 3.1-10 statik analiz sonuçları	110
Şekil C.12 Silo 3.1-10 statik analiz sonuçları	110
Şekil C.13 Silo 3.2-1 statik analiz sonuçları	111
Şekil C.14 Silo 3.2-2 statik analiz sonuçları	111
Şekil C.15 Silo 3.2-3 statik analiz sonuçları	111
Şekil C.16 Silo 3.2-5 statik analiz sonuçları	112
Şekil C.17 Silo 3.2-6 statik analiz sonuçları	112
Şekil C.18 Silo 3.2-7 statik analiz sonuçları	112
Şekil C.19 Silo 3.2-8 statik analiz sonuçları	113
Şekil C.20 Silo 3.2-9 statik analiz sonuçları	113
Şekil C.21 Silo 3.2-10 statik analiz sonuçları	113
Şekil C.22 Silo 3.3 statik analiz sonuçları.....	114
Şekil C.23 Silo 3.3-1 statik analiz sonuçları	114
Şekil C.24 Silo 3.3-2 statik analiz sonuçları	114
Şekil C.25 Silo 3.3-3 statik analiz sonuçları	115
Şekil C.26 Silo 3.3-4 statik analiz sonuçları	115
Şekil C.27 Silo 3.3-6 statik analiz sonuçları	115
Şekil C.28 Silo 3.3-7 statik analiz sonuçları	116
Şekil C.29 Silo 3.3-8 statik analiz sonuçları	116
Şekil C.30 Silo 3.3-9 statik analiz sonuçları	116
Şekil C.31 Silo 3.3-10 statik analiz sonuçları	117

TABLÖLAR DİZİNİ

Sayfa

Tablo 2.1 Silolarda kütle ve huni akışın avantaj ve dezavantajları.....	22
Tablo 3.1 Silo özellikleri.....	43
Tablo 3.2 Malzeme özellikleri	43
Tablo 3.3 Destek elemanları ve adetleri.....	45
Tablo 4.1 Silo 5 statik analiz sonuçları	53
Tablo 4.2 Silo 5.1 statik analiz sonuçları	57
Tablo 4.3 Silo 5.2 statik analiz sonuçları	57
Tablo 4.4 Silo 5.3 statik analiz sonuçları	58
Tablo 4.5 Silo 4 statik analiz sonuçları	58
Tablo 4.6 Silo 4.1 statik analiz sonuçları	59
Tablo 4.7 Silo 4.2 statik analiz sonuçları	61
Tablo 4.8 Silo 4.3 statik analiz sonuçları	63
Tablo 4.9 Silo 4.4 statik analiz sonuçları	65
Tablo 4.10 Silo 3 statik analiz sonuçları	67
Tablo 4.11 Silo 3.1 statik analiz sonuçları	68
Tablo 4.12 Silo 3.2 statik analiz sonuçları	70
Tablo 4.13 Silo 3.3 statik analiz sonuçları	72
Tablo 4.14 Silo 3.3-11 numaralı silonun statik analiz sonuçları.....	75
Tablo 4.15 Silo 3.3-12 numaralı silo statik analiz sonuçları.....	79
Tablo 4.16 Tasarlanan siloların statik analiz sonuçları.....	81

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

%	: Yüzde
σ	: Normal gerilme
τ	: Kayma gerilmesi

Kısaltmalar

ACI	: American Concrete Institute
AS	: Standards Australia
CAD	: Computer Aided Design
cm	: Santimetre
DIN	: Deutsches Institut für Normung
EN	: European Norm
FEM	: Sonlu Elemanlar Yöntemi
g	: Gram
kg	: Kilogram
m	: Metre
mm	: Milimetre
MPa	: Megapascal
N	: Newton
NPU	: Normal Profil U
TS	: Türk Standardı

1. GİRİŞ

Silolar, hububat, kömür, cevher gibi kohezyonsuz malzemelerin depolandığı ve korunduğu modern yapıların genel adıdır. En yaygın kullanılanları hububat silolarıdır. Hasat mevsiminde elde edilen ürünlerin yıl boyunca kullanılma ihtiyacı ve üretim ile tüketim miktarlarının yıllar içinde değişkenlik göstermesi, hububatın depolanmasını zorunlu kılmaktadır. Malzemenin doldurulması ve boşaltılması sırasında farklı doluluk oranlarına maruz kalan yüklerin dikkate alınması ve içerisinde depolanan gıda maddesinin uygun koşullarda muhafaza edilmesi için tasarım aşamasında büyük bir titizlik gerekmektedir. Tasarım sürecinde göz önünde bulundurulması gereken tüm faktörler tespit edilerek, etkin kullanım ve depolama şartlarının sağlanabildiği bir yapı oluşturulmalıdır (Özel, 2007).

Silo dizaynı için kullanılabilen farklı standartlar ve kurallar, hem teorik ve hem de ampirik yöntemlere dayanmaktadır. Neredeyse her standart, silo duvarları ile temas halinde olan depolanmış malzemenin yatay bir kesitine dayanarak Janssen (1895) teorisini kullanmaktadır. Bu teori, yapı üzerine etki eden depolanan malzemenin etkilerini silo hidrolik yarıçapı, ürün birim ağırlığı, ürün içsel sürtünme açısı, cidar sürtünme katsayısı ve basınç oranına bağlı olarak hesaplar. Farklı ülkelerde bu alanda çeşitli standartlar geliştirilmiştir. Bunlar arasında Almanya'nın DIN 1055, Amerika'nın ACI 313, Avustralya'nın AS 3774 ve Avrupa'nın EN 1991-4 standartları bulunmaktadır. Son olarak geliştirilen Eurocode 1, Bölüm 4 standardı, farklı ülkelerin ve kurumların standartlarına dayanarak evrensel bir yaklaşım sunmaktadır. Bu standartlar, silo tasarımında güvenliği ve etkinliği sağlamak için kapsamlı kurallar ve yöntemler içermektedir (Eurocode 1, 2003).

Silolar genellikle radye temel üzerine inşa edilen çembersel çelik veya betonarme yapılardır. Diğer durumlarda, profil veya betonarme kolonlarla desteklenerek yükseltilebilirler. Siloların dizaynı, depolanacak materyalin özelliklerine odaklanır. Silolarda etkiyen yükler ve taşıyıcı sistem diğer yapı türlerinden farklıdır çünkü depolanan yığın katıların yoğunlukları, akışkanlıkları ve sürtünme gibi özellikleri

depolanan materyale göre çok fazla değişkenlik gösterir. Bu nedenle silolar özel olarak tasarlanır ve değerlendirilir (Efe, 2020).

Silolar günümüzde genellikle çelik konstrüksiyonlu olarak inşa edilmektedir. Ancak, betonarme, ahşap, alüminyum ve diğer malzemelerden yapılan silolara da rastlanmaktadır. Ekonomik nedenlerle siloların kesitleri çoğunlukla dairesel olarak tasarlanır. Bununla birlikte, yapım kolaylığı gibi çeşitli sebeplerle dikdörtgen veya çokgen kesitli siloların inşası da mümkündür. Bu çeşitlilik, farklı depolama ihtiyaçlarına ve yapım koşullarına uygun çözümler sunmak amacıyla tercih edilmektedir.

Tekil veya grup silolar çeşitli boyut ve geometrilerde yapılabilir. Gerilme dağılımlarına dayalı olarak, çelik silolarda çekme gerilmelerine yönelik çembersel geometriler genellikle tercih edilmektedir. Bu tasarım, malzemenin depolanması sırasında ortaya çıkan çekme gerilmelerinin en etkin şekilde yönetilmesini sağlar. Bununla birlikte, belirli durumlarda ve ihtiyaçlara bağlı olarak farklı geometriler de kullanılabilir. Bu çeşitlilik, silo tasarımının esnekliğini ve çeşitli depolama gereksinimlerine uyum sağlama kapasitesini artırır (Rotter, 2001).

Depolama için kullanılan silolar, endüstriyel, tarımsal ve sanayi alanlarında kullanıldığından, üretim ve ulaşım önceliklidir. Üretim alanlarına yakınlık, hammaddelerin kolayca depolanmasını sağlarken, ulaşım ağlarına yakınlık ise depolanan malzemelerin etkin bir şekilde taşınmasını ve dağıtılmasını kolaylaştırır. Bu faktörler, silo yerleşimlerinin planlanmasında ve tasarımında önemli rol oynar. Siloların stratejik bir şekilde konumlandırılması, operasyonel verimliliği artırarak, hem zaman hem de maliyet tasarrufu sağlar (Kıvrak, 1987).

Çeşitli tarım, hayvancılık ve endüstriyel üretim aşamaları, ince cidarlı metal siloların kullanımını diğer depolama yöntemleriyle birleştirmiştir. Beton silo yapılarına kıyasla çelik silolar daha hafiftir. Bu nedenle, ürünü hızlı ve kolay bir şekilde boşaltabilen, çeşitli yapısal mekanizmalar kullanarak yüklerini taşıyabilen, asimetrik yükler altında kolayca deforme olabilen ve eski şekline dönebilen elastik özelliklere sahiptir. Bu nedenle, çelik silolar uzun süreli veya kısa süreli olarak büyük

miktarlarda ürünün depolanması için kullanılır. Son zamanlarda, madencilik, kimya, tarım ve gıda işleme gibi birçok sanayi sektörü tarafından da kullanılmaktadır. Taneli ürünlerin çelik silolarda güvenli ve ekonomik bir şekilde depolanması, ürünün mekaniksel özelliklerine göre hesaplanan gerilmelerle yapılır (Juan vd., 2006).

1.1 Çelik Silolar Hakkında Yapılmış Çalışmalar

Kibar, tıbbul fındık depolaması için en uygun silindirik gövdeli, konik çıkış ağızlı çelik silonun boyutlarını belirlemeyi amaçlamaktadır. Üç farklı silo modeli farklı cidar kalınlıklarıyla analiz edilmiştir. Eurocode 1 ve Avustralya standartlarına göre basınç yükleri hesaplanmış ve ANSYS yazılımıyla gerilmeler değerlendirilmiştir (Kibar, 2011).

Zhao ve arkadaşları, büyük çelik siloların rüzgar basıncına maruz kaldığında nasıl burkulma davranışı gösterdiğini incelemiştir. Çalışmada, Eurocode standartlarına göre farklı yük durumları (boş ve dolu silo) için burkulma analizleri yapılmış, özellikle geometrik kusurların burkulma direnci üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir (Zhao vd., 2013).

Tang ve arkadaşları, ince metal silindir şeklindeki siloların kompresif duvar sürtünme kuvvetlerinden kaynaklanan burkulma göçmesine karşı yapısal analizlerini yapmıştır. Abaqus sonlu elemanlar analizi kullanılarak, silindirik duvarlı ve profil çelik destekli iki tür çelik silo incelenmiştir (Tang vd., 2015).

Xie, dalgalı galvanizli çelik levhalardan oluşan bir silo yapısının yapısal davranışını ve tahıl yükü altındaki yatay kaymasını belirlemeyi ele almıştır. Hem deneysel testler hem de sonlu eleman analizleri kullanılarak yapılan bu çalışmada, silo yapısının optimize edilmesi için bir sonlu eleman modeli geliştirilmiş ve Janssen Denklemi'nin saha ölçekli bir silo yapısı ile doğruluğu test edilmiştir (Xie, 2015).

Sondej ve arkadaşları, yatay dalgalı levhalardan oluşan ve dikey ince duvarlı kolon profilleri ile güçlendirilmiş bir çelik silonun yarı-statik stabilite analizini yapmıştır. Analizler, hem doğrusal hem de doğrusal olmayan burkulma davranışlarını değerlendirerek, eksenel ve eksenel olmayan yüklerin etkilerini incelemiştir. Ayrıca, çeşitli sayısal modeller kullanılarak yapılan sonlu elemanlar simülasyonları ve saha

ölçümleriyle elde edilen başlangıç kusurları dikkate alınarak silo boyutlandırması için öneriler geliştirilmiştir (Sondej vd., 2016).

Zaccari ve Cudemo, bir termal enerji santralinde kullanılan çelik siloların eksantrik boşaltma nedeniyle yaşadığı burkulma göçmesini incelemeyi amaçlamıştır. Eksantrik boşaltma nedeniyle oluşan asimetrik basınçların Avrupa Standardı EN 1991-4'e göre karakterize edilmesi sağlanmış ve bu basınçların yapısal burkulma üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Çalışma, bu tür arızaları en aza indirmek için yapı güçlendirme tasarımlarını ve Avrupa Standardı EN 1993-1-6'ya dayalı öneriler sunmaktadır (Zaccari ve Cudemo, 2016).

Yaldıran, genel amaçlı bir buğday silosunun tasarımını gerçekleştirmiş ve bu siloya etki eden olumsuz kuvvetler ile bu kuvvetlere karşı silonun gösterdiği tepkileri incelemiştir. Oluşabilecek deformasyonları Statik Analiz, Modal Analiz, Harmonik Analiz, Titreşim Analizi ve Tepki Spektrumu Analizi yöntemleri ile analiz etmiştir (Yaldıran, 2018).

Çelik ve Köse, tahıl depolama silolarının sismik analizlerini ele alarak, bu tür yapıların depoladıkları malzemelerle birlikte sismik olaylar sırasında nasıl davrandığını incelemektedir. Özellikle ince cidarlı siloların sismik basınçlar altında kritik burkulma ve patlama riski taşıdığı vurgulanmıştır. Çalışma, silo içindeki tahılların dinamik basınçlarının doğru şekilde simüle edilmesi gerektiğini belirterek, sonlu elemanlar metodu ve ayırık elemanlar metodunun bir arada kullanılmasıyla daha gerçekçi analizler yapılmasını önermektedir (Çelik ve Köse, 2020).

Efe ve Çelik, farklı çaplara sahip silindirik çelik sıvı depolama silolarının yapısal performansını incelemişlerdir. Silo yüksekliği sabit tutulurken, üç farklı çapta silolar için rijitlik levhaları kullanılarak sayısal modeller oluşturulmuştur. Statik yük koşulları altında yapılan analizler, levha etkinliklerinin silo çapına göre nasıl değiştiğini ortaya koyan bir çalışmayı ele almışlardır (Efe ve Çelik, 2020).

Kibar, farklı cidar kalınlıklarına sahip iki çelik silo modelinin yapısal performansını ve yük etkilerini incelemektedir. ANSYS simülasyonları ile farklı cidar kalınlıklarının güvenli depolamada kullanılabilirliğini araştırmıştır (Kibar, 2020).

Fawzy ve arkadaşları, buğday silosunun tasarım güvenlik faktörlerini değerlendirerek yeterli olup olmadığını belirlemek üzerine bir çalışma yapmışlardır. Sızıntı nedeniyle yaşanan çökme olayı üzerinden yapılan sayısal analizle, güvenlik faktörlerinin her çelik halka için normalize edilerek, tasarımın dayanıklılığı incelenmiştir (Fawzy vd., 2021).

Gandia ve arkadaşları, silolarda maksimum normal basınçları değerlendirmek için sonlu elemanlar yöntemi (FEM) kullanmıştır. Çalışmada, farklı duvar sürtünme katsayıları ve özgül ağırlıklar dikkate alınarak 3D FEM modelleri oluşturulmuştur (Gandia vd., 2021).

Anil ve Lakshmi, çeşitli endüstrilerde kullanılan çelik siloların statik ve dinamik analizini incelemişlerdir. Çelik siloların, güçlendirilmiş ve güçlendirilmemiş yapılarını değerlendirerek, depolama koşullarında maruz kaldıkları statik ve dinamik yükleme etkileri analiz edilmiştir. Analiz, siloların geometri, malzeme ve sınır koşullarının idealize edilerek yapılmıştır. Özellikle rüzgar ve deprem gibi yüklerin silo stabilitesini nasıl etkilediği değerlendirilmiştir (Anil ve Lakshmi, 2022).

Rehman ve Wang, çeşitli yükleme koşullarına sahip özel bir çelik silonun tasarımını ve analizini ele almışlardır. İnceledikleri silolar Hindistan standartlarına uygun olarak tasarlanmıştır. Silonun levha gerilmesini, kontur çizgilerini, kritik destekleri, kiriş uç kuvvetlerini ve çelik malzeme ihtiyaçlarını belirlemeyi amaçlamışlardır (Rehman ve Wang, 2023).

Abdelbarr ve arkadaşları, kare ve dikdörtgen siloların tasarımında duvar esnekliğini dikkate alacak şekilde mevcut tasarım yaklaşımını değiştirmiştir. Duvar genişliği-kalınlık oranı ve silo boyutlarının duvar-dolum basıncına etkisi incelenmiş, mevcut rijit duvar varsayımlarının geçerliliği sorgulanmış ve yarı rijit ile esnek duvarlar için daha doğru basınç tahminleri yapabilen yeni bir Janssen tekniği ayarlaması önerilmiştir. Bu yeni yaklaşımın doğruluğu, çeşitli sonlu elemanlar modelleri ile test edilmiştir (Abdelbarr vd., 2024).

Warayth, çelik siloların güçlendirmesi konulu bir çalışma yapmıştır. Bu çalışmada çelik siloyu GFRP malzemesi ile güçlendirilip, sonlu elemanlar metodu (SEM) kullanarak dinamik analizi incelemiştir (Warayth, 2024).

2. GENEL BİLGİLER

2.1 Silo Nedir?

Silolar, taneli malzemelerin çeşitli ihtiyaçlar doğrultusunda depolandığı özel mühendislik yapılarıdır. Bu yapılar genellikle dairesel, dörtgen veya çokgen kesitli olabilirler. Siloların temel amacı, malzemelerin düzenli bir şekilde depolanmasını, sürekli bir erişimin sağlanmasını ve farklı iklim koşullarında veya ilerleyen zamanlarda kullanılabilecek kadar saklanmasını sağlamaktır.

Silolar, tarımsal ürünlerin hasat zamanlarında depolanması, sanayi üretim süreçlerinde malzeme akışının yönetilmesi veya endüstriyel faaliyetlerde kullanılan hammadde veya ürünlerin stoklanması için kullanılır. Bu yapılar, malzemelerin kalitesini korumak, kayıpları minimize etmek ve üretim süreçlerinde sürekliliği sağlamak amacıyla tasarlanır ve inşa edilir.

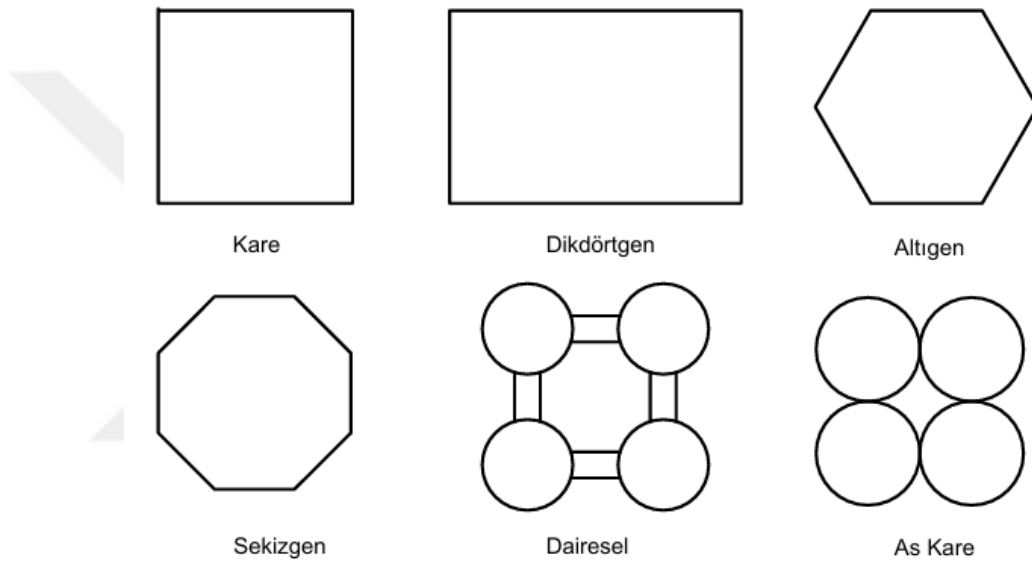
2.2 Siloların Sınıflandırılması

Silolar, mühendislik yapıları olarak türlü ölçütlere göre sınıflandırılabilirler. Bu sınıflandırma genellikle kesit biçimlerine ve kullanılan yapı malzemelerine göre yapılmaktadır. Siloların farklı kesit şekillerine göre sınıflandırılması, depolama ihtiyacına ve malzeme akışının yönetimine yönelik önemli ipuçları sunar. Dairesel, dikdörtgen, oval veya çokgen kesitli silolar gibi çeşitli kesit şekilleri, depolanan malzemenin taşınması ve depolanmasında etkinliği artırmak amacıyla seçilir (Karaca, 2000).

2.2.1 Kesit Şekillerine Göre Sınıflandırma

Kare ve dikdörtgen kesitli silolar, arsa kaybı olmaksızın belli bir konum üzerine inşa edilebilen yapılar olarak öne çıkar. Bu tip siloların taşıyıcı kolonlarının hesaplanması ve inşası genellikle daha basittir. Ancak, cidarlarının moment etkisine maruz kalmaları nedeniyle inşaat maliyetleri genellikle silindirik silolara kıyasla daha yüksek olabilir. Öte yandan, silindirik olan silolar yer kaybına sebep olmalarına

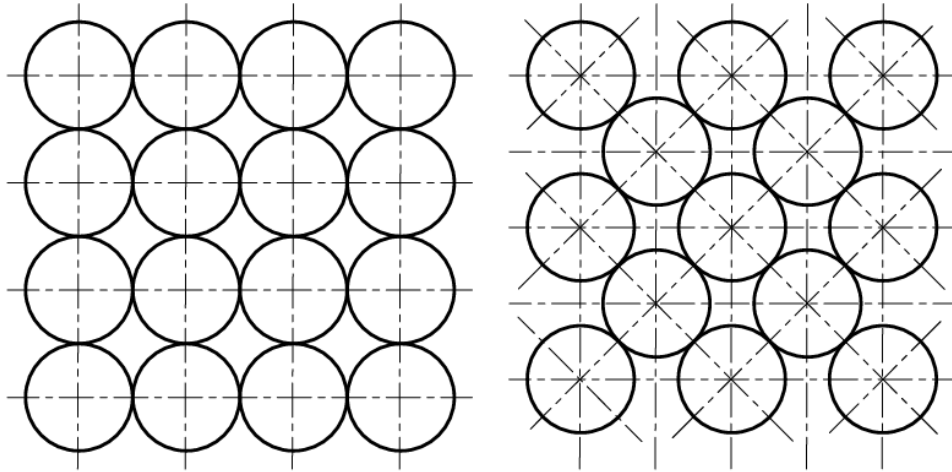
rağmen, çekme kuvvetleri ve eğilme momenti açısından genellikle daha avantajlıdır ve dolayısıyla toplam maliyetleri dörtgen kesitli silolardan daha düşük olabilir. Altıgen veya sekizgen gibi çokgen kesitli silolar ise genellikle bu iki model silo arasında bir denge sağlar. Bu şekiller, özel depolama ihtiyaçlarını karşılamak üzere tasarlanabilir ve inşa edilebilir. Her bir silo tipinin seçimi, depolanacak malzemenin özelliklerine, inşa edilecek alanın geometrisine ve maliyet faktörlerine bağlı olarak yapılır. Optimal depolama çözümleri için bu faktörlerin dikkatlice değerlendirilmesi önem taşır (Durmuş, 2007; Karaca, 2000).



Şekil 2.1 Siloların kesit şekilleri

Silolar, tek hücreli veya çok hücreli olarak inşa edilebilirler. Çok hücreli siloların yerleştirilmesinde bir dizi faktör rol oynar. Bu faktörler arasında kullanılabilir alanın optimizasyonu, teknolojik ekipmanların seçimi, depolama kapasitesi, tercih edilen yapı malzemeleri, statik hesaplamalar ve yapısal özellikler bulunur. Tek hücreli silolar genellikle belirli bir depolama ihtiyacını karşılamak için tek başına inşa edilirken, çok hücreli silolar daha büyük kapasiteleri yönetmek ve depolama verimliliğini artırmak amacıyla tasarlanır. Bu tür silolar, endüstriyel tesislerden tarım uygulamalarına kadar çeşitli alanlarda kullanılır ve depolanan malzemelerin yönetimini kolaylaştırır (Kibar, 2011).

Dairesel kesitli silolar, yan yana dizilerek birbirlerine değecek şekilde veya dama taşı şeklinde inşa edilebilirler. Şekil 2.2' de ki gibi yan yana dizilmiş siloların veya dama taşı düzeninin kullanılması, depolama alanının optimize edilmesine ve kullanım verimliliğinin artırılmasına yardımcı olur. Her iki düzenlemede de, siloların birbirlerini etkilemelerini önlemek için hücreler genellikle bağımsız olarak tasarlanır ve aralarına derz eklenir. Bu yaklaşım, eğilme momenti oluşumunu minimize eder ve yapısal bütünlüğü sağlar. Özellikle birincil hücrelerin arasında kalan ikincil hücrelerin kullanılmaması tercih edilir, bu şekilde her hücre bağımsız olarak çalışabilir ve optimize edilmiş bir depolama kapasitesi sunar. Bu düzenlemeler, siloların tasarımında ve inşasında yapısal stabiliteyi ve depolama verimliliğini artırmak için önemli bir rol oynar (Kıbar, 2011).

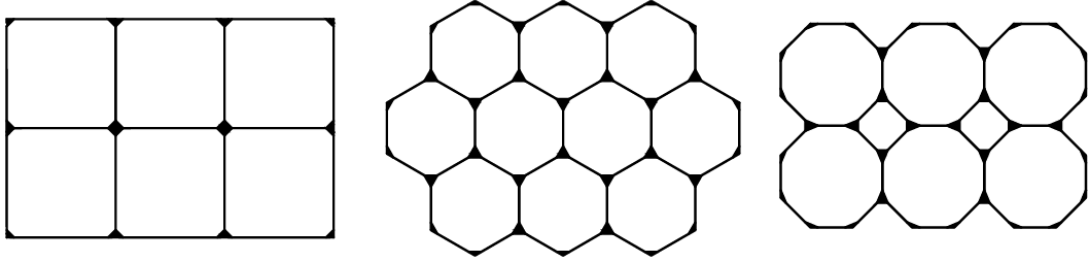


Şekil 2.2 Silindirik silo grupları

Dikdörtgen veya poligon kesitli silolarda hücreler genellikle birbirine temas etmekte ve bu tür ayrıık şekiller, hem statik hem de malzeme açısından genellikle tercih edilmez. Bunun yerine, düzgün çokgenlerle oluşturulan silolar, kenar sayısı arttıkça kesitlerinin daireye daha yakın olmasını sağlar ve eğilme etkisini azaltır (Durmuş, 2007).

Özellikle sekizgen hücreli silolarda, oluşan kare hücreler hem kaldırma ekipmanlarının yerleştirilmesi için kullanılabilir hem de depolama işlevi görebilirler. Bu düzenleme, siloların daha etkin bir şekilde kullanılmasını sağlar ve depolama kapasitesini artırır.

Çokgen kesitli silolar, özellikle belirli depolama ihtiyaçlarına ve yapısal stabilite gereksinimlerine uygun olarak tasarlanabilir. Bu tasarım yaklaşımı, hem mühendislik hem de kullanım açısından optimize edilmiş bir çözüm sunar (Durmuş, 2007).



Şekil 2.3 Dörtgen ve çokgen kesitli silo grupları

2.2.2 Yapımlarında Kullanılan Malzemeye Göre Sınıflandırma

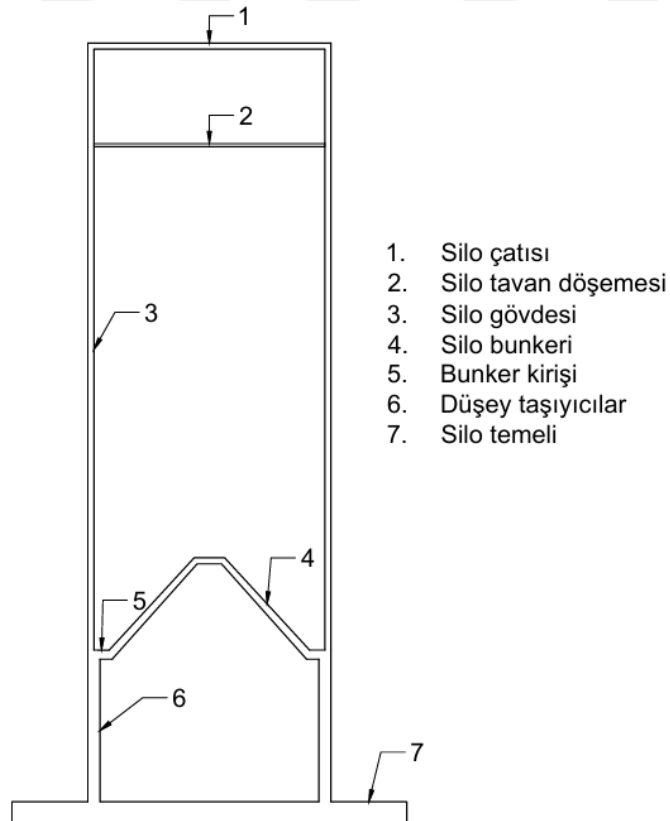
Silolar, farklı yapı malzemeleri kullanılarak inşa edilebilir. Bu malzemeler arasında ahşap, çelik, betonarme ve ön gerilmeli beton bulunur. Günümüzde ahşap silo yapımına çok öncelik verilmese de, hacmi küçük olan silolar genellikle çelikten, hacmi orta ve büyük silolar ise betonarmeden yapılmaktadır. Çelik siloların duvarlarının ince kesitli olması, basınç gerilmeleri altında burkulma riskini artırabilir. Bu yüzden, çoğunlukla eğilme etkisi az olan kesiti dairesel olan silolar tercih edilir. Dairesel kesitli silolar, bu yapısal özellikleri sayesinde çelik malzemeyle daha güvenli bir şekilde kullanılabilirler. Betonarme ve ön gerilmeli beton silolar ise genellikle büyük hacimli depolama ihtiyaçlarını karşılamak üzere tasarlanır. Bu tür silolar, dayanıklılıkları ve uzun ömürlülükleri ile bilinirler ve geniş çaplı endüstriyel kullanımlar için idealdirler. Her bir yapı malzemesi, silonun özellikle dayanıklılık, taşıma kapasitesi, bakım gereksinimleri ve maliyet açısından değerlendirilmesi gereken faktörlerdir. Optimal silo tasarımı, depolama gereksinimleri ve çevresel koşullar göz önünde bulundurularak yapılır (Ciesielski vd., 1967; Durmuş, 2007; Noberhaus, 1965).



Şekil 2.4 Farklı malzemelerden yapılmış silo örnekleri

2.3 Silo Bileşenleri

Bir silo, düşey taşıyıcılar, temel, bunker kirişi, bunker, tavan döşemesi, gövde ve çatıdan oluşur. Silonun toplamda yedi ana bileşeni bulunur.

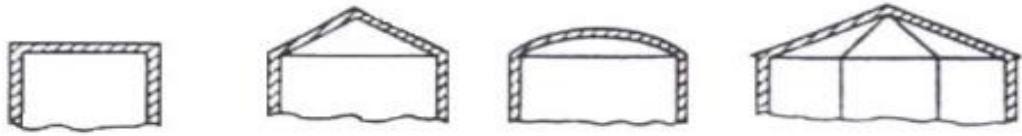


Şekil 2.5 Silo ana bileşenleri

2.3.1 Silo Çatısı

Enkesit tipi çatı sistemini belirler. Silo tavanı çatı görevini de üstlenmektedir. Yatay yönlü kuvvetlere karşı küçük yer değiştirme kapasitesine sahip silo cidarlarına yerleştirilir. Bu yer değiştirme, betonun uzaması ve kışalması durumunda ilave yüklere maruz kalmayacağı için önemlidir. Çatı malzemesi olarak çelik kiriş de kullanılabilir. Kar yükü, çatı kaplaması ve öz ağırlığı hesaplamalarda kullanılır. Kesit ölçülerine göre çelik veya beton döşeme tercih edilir (Kibar, 2011).

Silo hücreleri genellikle üstten doldurulur. Silolanacak malzemeyi silolara taşıma sırasında hava koşullarından korumak için tavan döşemesi üzerinde tek bir çatı veya prefabrike bir çatı yapılır. Çatının tek parça halinde yapılması, duvarlarla rijit bir bağlantı oluşturur ve silo için hacimsel rijitlik sağlar. Bu özellik, derzlerle ayrılmış silolarda ve farklı oturmalarla izin vermeyen zemin koşullarında büyük önem taşır. Bu tür siloların çatıları kubbe, dairesel, çokgen, düz plaka ve konik kabuk gibi daha karmaşık şekillerde de olabilmektedir (Durmuş, 2007).



Şekil 2.6 Farklı silo çatısı çeşitleri (Durmuş, 2007)

2.3.2 Silo Tavan Döşemesi

Silo tavanı, enine kesit boyutlarına göre çeşitli döşeme türlerinden birini kullanır. Yük taşıma, plak, dişli, kaset döşeme ya da çelik kirişlerin üstüne yerleştirilen sac levhaları silo duvarlarına tutturarak gerçekleştirilir. Silo duvarlarına tutturulan çelik kirişler, silo tavanlarında makine ve diğer hareketli yükleri yayılı yük olarak aktarır. Taneli ürün, döşemedeki boşluk aracılığıyla bunkerlere boşaltılır. Delik alanı özel olarak hazırlanmalıdır (Kibar, 2011).

Silo tavan döşemesi için 6 metrelik açıklıklara kadar, ortasında bir boşluk olan betonarme plak yeterli olacaktır. Bu boşluğun etrafında döşeme daha kalın veya daha

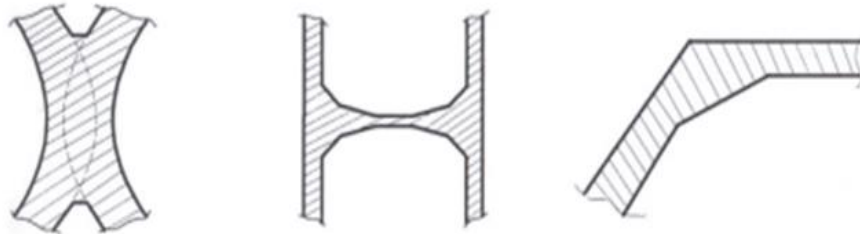
fazla donatılıdır. Daha büyük açıklıklar için kaset veya nervürlü döşeme yapılmalıdır (Durmuş, 2007; Uğural, 1987).

2.3.3 Silo Gövdesi

Silonun en kritik bileşenidir. Taneli malzemenin yan basıncı ve silo gövdesinin ağırlığı, onu etkileyen faktörlerdendir. Silo gövde kalınlıkları değişebilir. Dairesel kesitli siloların gövdelerinde önemli çember gerilmeleri vardır. Bu durumda, çekme gerilmesi göz ardı edilir ve donatıyla gerilmeler dengelenmektedir (Kibar, 2011).

Stok malzemesini çevreleyen dikey silindirik kabuk veya plaklardan oluşur. Narin silindirik silolarda duvar kalınlığı değişkendir, ancak geniş silindirik silolarda genellikle sabittir (Çetmeli, 1970).

Askaro tipi silo hücrelerinin birleşim noktalarında guseler bulunmaktadır. Bu guseler, sekizgen enkesite sahip silolarda tek veya çift eğime sahip olabilir (Durmuş, 2007).



Şekil 2.7 Silo cidarında kullanımı tercih edilen guseler (Durmuş, 2007)

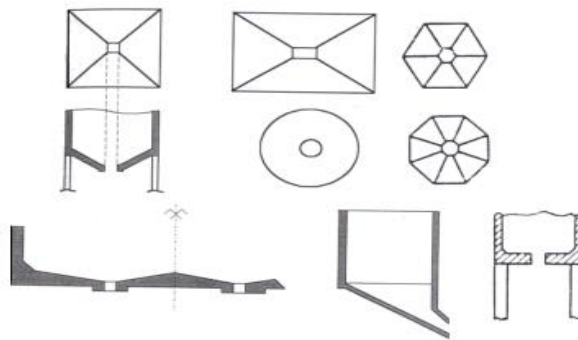
Karma sistem siloları, enine kesitleri kare, dikdörtgen veya çokgen şeklinde olabilir. Bu silolar, yerinde dökülmüş kolonlardan bir tarafta ve diğer tarafta yatay korniyer şeklindeki prefabrike parçalardan oluşan kırık cidarlara sahip olabilir. Enkesiti dairesel olan silolarda gövde boyunca çember doğrultusunda çekme gerilmeleri vardır ve donatı bu gerilmeleri karşılar. Çokgen enkesitli silolarda bileşik eğilme olduğundan, donatı buna göre hesaplanır. Silikon reçineli suya dayanıklı boyaların silo gövdelerini sudan koruduğu bilinmektedir (Durmuş, 2007; Guerrin, 1969).

2.3.4 Silo Hunisi (Bunker)

Bu bölüm malzemelerin boşaltılma yeridir. Huni genellikle kullanılır. Huninin sürtünme durumu ve akış özellikleri eğimini belirler. Huni olmadığı durumlarda döşeme üstüne eğimli dolgu betonu uygulanır. Diğer mühendislik yapılarından farklı olarak, silolarda hareketli yüklerin sabit yüklere oranı oldukça yüksektir. Silo uzun süre dolduktan sonra boşaltıldığında, beton sünmesi perdelerde yatay çatlaklar oluşturur. Yatay yüklerden gelen etkiler önemli değilse, bu çatlakları azaltmak için boyuna donatı oranı düşük tutulmaktadır. Yatay yüklerden kaynaklanan etkilerin büyük olması halinde, perde boyutları büyütülmelidir. Bu, düşük boyuna donatı oranını elde etmek için yapılır (Kibar, 2011).

2.3.5 Silo Tabanı

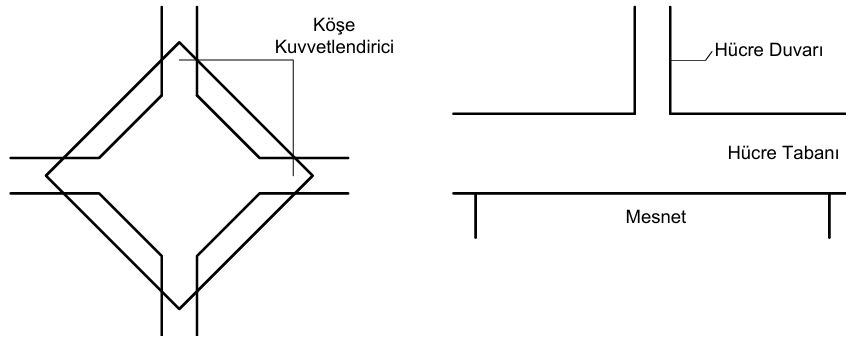
Silo tabanı genellikle düz bir plak veya huni şeklinde bir yapıya sahiptir. Huni yapılmadığı durumlarda döşeme üstüne eğimli bir dolgu betonu uygulanır. Silo hücrelerinin boşaltılmasını sağlayan huniler, prizmatik bir huni veya kesik koni şeklinde bir parçadır ve hacimsel şekillerini silo gövdelerinin şekline uyarlamak için malzeme alma boşluklarını veya boşluklarını içerir. Bunların simetrik veya antisimetrik olması mümkündür. Stok malzemesinin sürtünme durumu ve akış özellikleri, tiremin eğimini etkiler. Dişli plak şeklinde olan silo tabanları, kesit ölçülerine göre kaset döşeme veya dişli olarak inşa edilebilir. Bu tabanlar, silo cidarlarına asılabilir veya kolonlara oturtularak silo duvarlarıyla aynı temele veya farklı bir temele taşınabilir (Ayazoğlu, 1987; Durmuş, 2007; Kıvrak, 1987; Kumbasar, 1992).



Şekil 2.8 Siloların taban şekillerine örnekler (Durmuş, 2007)

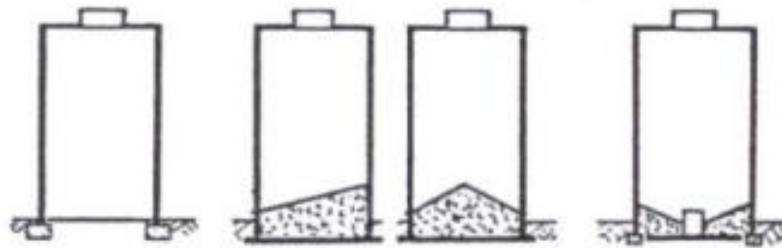
2.3.6 Düşey Taşıyıcılar

Silo düşey taşıyıcıları için malzeme seçimi çok önemlidir. Silonun kendi ağırlığı ve depolanan malzemenin ağırlığından kaynaklanan düşey ve rüzgar yükleri, bu elemanlara zarar verebilir. Bu yüklere göre ayak adedi ve boyutları belirlenir (Durmuş, 2007).



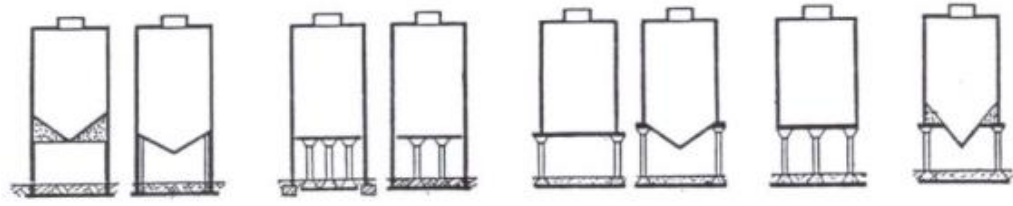
Şekil 2.9 Silolarda dikey taşıyıcı kesitlerine örnek (Durmuş, 2007)

Şekil 2.10'da, temele oturtulmuş nadir olarak inşa edilmiş bir silo tipinin çeşitli özelliklerini göstermektedir. Bu tür silolarda malzemenin alınması daha zor olduğundan, işlem pnömatik ya da yan duvarlardaki ağızlardan doğrudan gerçekleştirilir (Durmuş, 2007).



Şekil 2.10 Temele oturan siloların şematik örnekleri (Durmuş, 2007)

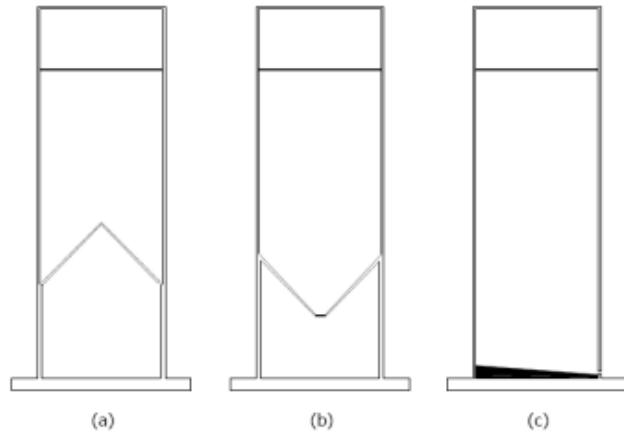
Genel olarak, silonun altında bulunan bir hacim vardır ve gövde bu hacmin cidarlarına veya betonarme kolonlar üzerine mesnetlenir ve malzemeyi bu hacimden çıkarmak için kullanılır (Durmuş, 2007).



Şekil 2.11 Hücre içinde hacim içeren silo kesitleri (Durmuş, 2007)

2.3.7 Silo Temeli

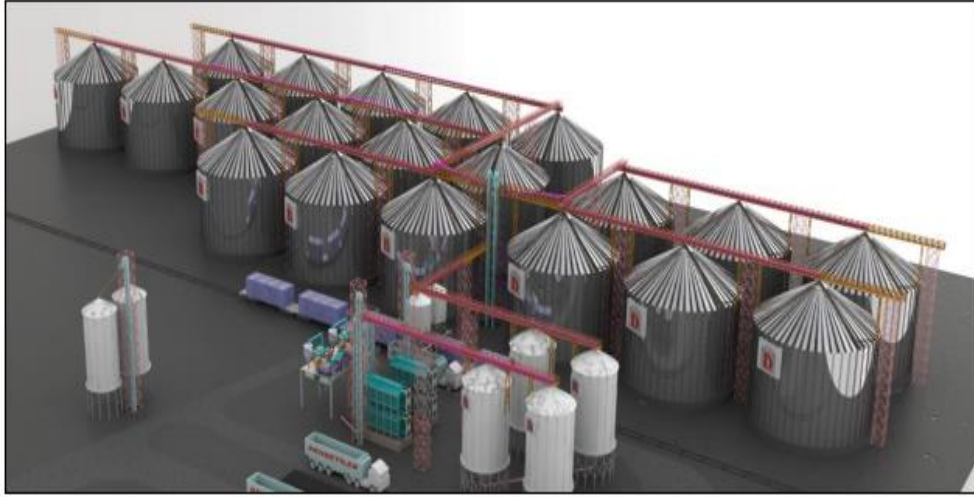
Küçük temel alanına sahip yüksek silolarda, orantısız hareketli yükler genellikle dolum ve salınma süreçlerine bağlı olarak zemin basıncı şeklinde yayılır. Bu nedenle, temellere özellikle dikkat edilmesi gerekir, böylece istenmeyen oturmalar ve üst yapıda çatlaklar oluşmaz (Hüner, 2006).



- a) Radye temele oturan silo (ters huni silo perdesine ankastre edilmiş)
- b) Huni ankastre olduğu silo cidarı kalınlaştırılmış
- c) Taban eğimli demirsiz dolgu betonu. (malzeme yandan alınmaktadır)

Şekil 2.12 Bir ürünün çıkış koşullarına göre çeşitli silo tipleri (Hüner, 2006)

Temel tipi, kolon sayısı ve zemin taşıma kapasitesi gibi faktörlere bağlı olarak seçilir. Uygun zemin koşullarında, tek bir temel kurmanın ekonomik ve uygun olduğu sıkça görülür. Ancak, silo grupları için genellikle zemin alanının kısıtlı olması nedeniyle betonarme sürekli temeller, kirişli veya kirişsiz betonarme radye temeller gerekebilir. Radye temeller yetersiz olduğunda veya sağlam zemin tabakaları derindeyse, kazıklı temeller en uygun seçenek olabilir (Durmuş, 2007).



Şekil 2.13 Örnek tahıl depolama yöntemi ve malzemeleri (Aydın, 2013)

2.4 Silo Dolumu ve Boşaltımı

2.4.1 Silo Doldurma İşlemi

Silo yapısı nedeniyle, malzeme üstten doldurulur. Siloların doldurulması mekanik veya pnömatik olarak gerçekleştirilebilir (Hüner, 2006; Rotter, 1998).

2.4.1.1 Mekanik dolum işlemi

Silolanacak malzeme, elevatör veya dikey taşıma bandı ile silo üst yüzeyinde yer alan düzenlenmiş yatay iletim bandına aktarılır. Bu bant aracılığıyla malzeme, helezon veya taşıma çarkına dökülür. Silo hücresinin üst kısmındaki açıklıktan içeriye doğru malzeme doldurulur. Yatay bandın, bütün silo hücrelerine erişebilmesi gerekir (Kibar, 2011).

2.4.1.2 Pnömatik dolum işlemi

Pnömatik taşıma, tozu doldurmak amacıyla kullanılmaktadır. Malzeme, hava yoluyla iletim borusu içinde taşınır. Pnömatik iletim, malzemeyi taşıma bandı üzerinde hareket ettirmezken, mekanik taşıma, malzemeyi taşıma bandı üzerinde hareket ettirir (Kibar, 2011).

2.4.2 Silo Boşaltma İşlemi

Depo malzemesinin boşaltılması, genellikle silo tabanında ya da gövdenin alt kısmında oluşturulan boşluklar aracılığıyla gerçekleştirilir (Hüner, 2006; Rotter, 1998).

2.4.2.1 Doğrudan boşaltım işlemi

Malzeme alınıp kapağı, kolayca akabilen malzemelerde yeterlidir. Malzeme, silo tabanında oluşturulan iletim mekanizmasına boşalırken kendi ağırlığı etkisinde aşağıya doğru hareket eder (Kibar, 2011).

2.4.2.2 Mekanik boşaltım işlemi

Kohezyonsuz taneli malzemenin boşaltılması sırasında silo altında delikler oluşur. Bu deliklerin fazlalığı, silo malzemesinin çökmesini sağlar. Eğer hiçbir artık malzeme kalmaması isteniyorsa, tabanda eğimli yüzeyler yapılır ya da yan yüzeyler boyanır. Kohezyonlu malzemelerde içi boşluklu köprüler oluşur. Bu nedenle malzemenin akışı engellenir. Malzemenin çıkıştan önce parçalanması için silo hücrelerine alt bölgelerde özel şekiller verilir. Gerekli olması halinde, malzemenin kalanını temizlemek için özel kepçeler kullanılır (Kibar, 2011).

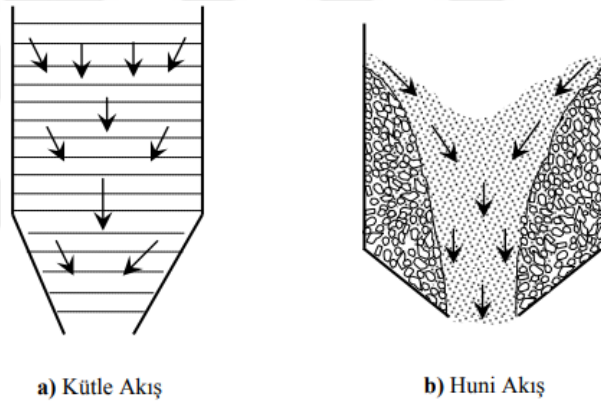
2.4.2.3 Pnömatik boşaltım işlemi

Toz malzemesinin boşaltılması için tabanda çok sayıda delik yapılır. Bu tür malzemelerin akış özelliklerinin iyileştirilmesi için akım bölgesine hava üflenir. Malzeme ve hava karışımı sıvı olarak dışarıya atılır (Kibar, 2011).

2.5 Siloların Çalışma Prensipleri

Kamyon veya traktör römorklarıyla taşınan hububat, tane çapı, nem oranı ve diğer gerekli testlerin tamamlanmasının ardından tartılır. Ağırlığı belirlenen malzeme, huni bölümüne getirilir ve ardından huniye boşaltılır. Bu durumda, araç kaldırıcı kullanılarak kaldırılan araçtaki malzeme, huni ile alt konveyörlere aktarılır ve alt

gerçekleştirilebilir. Altta bulunan huni şekli silonun içinden malzeme alınırken, malzemenin huni ağzına doğru hareket etmesi ve yaklaşması sağlanır. Bu durum, hunilerin çok sayıda sorununun nedenidir. Bunlardan bazıları, düzensiz akış, ayrışma, silo içerisinde kalma, malzemenin bozulması ve çürümesi, ani akış nedeniyle oluşan sarsıntılar ve titreşimler veya malzemenin hiç akmaması olabilir. Silo davranışına hakim uzmanlar genellikle bu tür sorunları çözmek için deneme-yanılma tekniklerini kullanırlar. Elbette, tasarım, depolanacak malzemenin ölçülebilir özellikleri kullanılarak yapılırsa bu tür sorunları önleyebilir. Bu sorunlar göz önüne alındığında, basit bir silo tasarımının gerçekleştirilemediği ve tipik bir silo fikrinin olmadığı ifade edilebilir. Malzemenin akış şekli, akışla ilgili herhangi bir sorunun olup olmadığını belirler. Silolar da iki ana akış şekli görülür. Bunlar; kütle akış ve huni akıştır (Özel, 2007).



Şekil 2.15 Silo akış modelleri (Woodcock, C.R. ve Mason, J.S.m., 1987)

2.6.1 Kütle Akış

Boşaltma sırasında, silodaki malzemenin tamamı kütle akışta hareket eder. Silonun konik kısmı yeteri kadar dik ve düz olduğunda, bu akış modeli sağlanmış olur. Siloda etkili geçiş alanları ve konik bölümde akış olmayan alanların olmadığı görülmektedir. Siloda çıkış sırasında tüm alan kullanılır. Bu akış çeşidinin özellikleri aşağıda verildiği gibidir:

- İlk giren ilk çıkar,
- Hiçbir kanallanma, tıkanma, dalgalanma ve taşma yoktur,
- Depolanan malzeme çok az parçalanır,

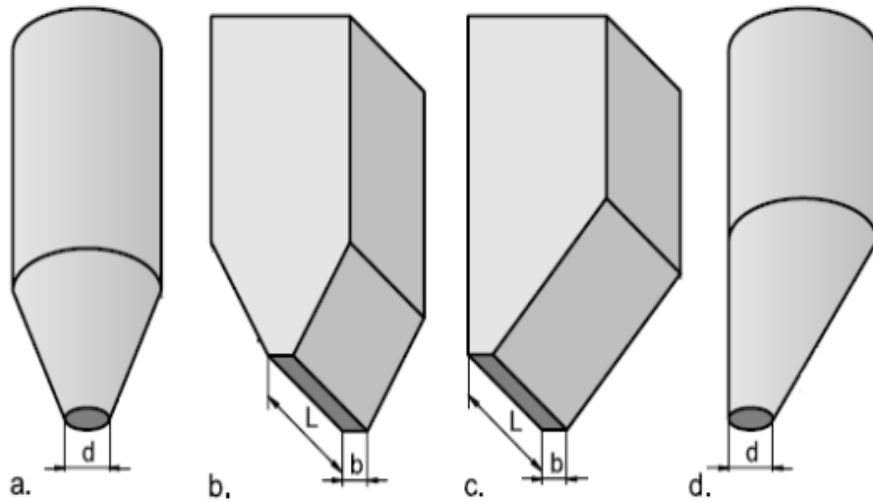
- Silodaki hızın kontrolü sayesinde sabit akım ve iyi yönetilebilir boşaltma kapasitesi sağlanabilir,
- Depolanan ürünlerde bozulma, çürüme ve tanelerin cidarlara yapışıp kalması neredeyse yoktur,
- Depolanan ürün, silo içinde benzer bir basınç alanı oluşturarak homojen bir konsolidasyon sağlar (Chase, 2006; Çağlı 2005; Kibar, 2011; Kobiak ve Shalouf 1999; Marinelli, 2001; Öztürk vd., 2008; Schulze, 2008).

2.6.1.1 Kütlesel akış modeli

Huni tasarımı, kütlesel akış oluşturmak için aşağıdakileri içermelidir:

- Malzemenin içsel sürtünme açısı hesaplanır,
- Depolanan malzemenin duvarlarla temasında kullanılan sürtünme katsayısı dikkate alınır,
- Bu bilgilere göre, uygun huni şekli belirlenir ve kütle akış açısı hesaplanır.

Eğer uygun bir çözüm bulunamazsa, kaplama, yüzey astarlama veya düşük sürtünme katsayısına sahip başka bir malzeme kullanarak soruna çözüm bulunabilir. Bu mümkün değilse vibrasyon uygulanır, havalandırma yapılır veya huni yapılmaz (Özel, 2007).



Şekil 2.16 Kütlesel akışa izin veren silo kesit geometrileri: a) konik akış, b) dikdörtgen, düzlem akış, c) asimetrik düzlem akış, d) asimetrik konik akış (Schulze, 2008)

2.6.2 Huni Akış

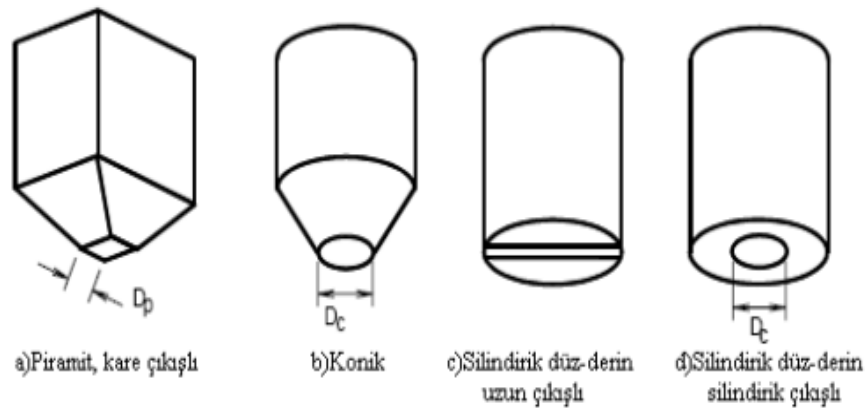
Huni akış modelinde depolaması yapılan taneli ürün silo kesitinin ortasından akar ve kenar kısımlarda hareketsiz bölgeler meydana gelir. Duvar açıları dikkate alındığında, huni akış siloları geometrik olarak daha düz ve kısa olduğundan, kütle akış silolarına göre daha yassıdır. Bu durumda, silo içindeki hareketsiz bölgeler yığın yüzeyine kadar ulaşabilir (Çağlı, 2005; Kibar, 2011; Özel, 2007; Öztürk vd., 2008).

Bu akış tipinin özellikleri şu şekilde sıralanabilir;

- İlk giren son çıkar,
- Akış hızı düzenli değildir,
- Depolanan ürünün düzenli akış hızı nedeniyle farklılaşır,
- Aniden hareketsiz bölgelerin yıkılması, kontrolsüz akım ve silo içinde önemli dinamik kuvvetler yaratabilir.

Huni akış siloları, iri taneli ve serbest akışa izin veren, özgül ağırlığı yüksek ve aşındırıcı özellikleri nedeniyle uzun süre silo içerisinde kalsa bile çürüme ve bozulma riskini azaltır. Buna ek olarak, huni akışta silo duvarları hareketsiz ürün üzerinden aktığı için daha az aşınır (Çağlı, 2005; Farnish, 2002; Kibar, 2011; Roberts, 1992).

Şekil 2.17, taneli tarımsal ürünlerin depolandığı silolar için huni akışına uygun olarak tasarlanmış silo kesit geometrilerini göstermektedir (Chase, 2006).



Şekil 2.17 Huni akış silolarında kullanılan kesit geometrileri (Çağlı, 2005).

Tablo 2.1, iki akış modeli kullanılarak silolarda sağlanabilecek avantaj ve dezavantajları göstermektedir. Tablo 2.1'de görüldüğü gibi verilen avantajlar ve dezavantajlar, bu iki akış modelinin genel özellikleridir (Chase, 2006; Çağlı, 2005 Jacob, 2000)

Tablo 2.1 Silolarda kütle ve huni akışın avantaj ve dezavantajları (Kibar,2011)

Kütle Akış	Huni Akış
Avantajlar • Akış son derece istikrarlı ve homojendir, • Radyal ayrışma minimaldir, • Duvar basınçları öngörülebilir, • Silonun bütün kesit alanı etkin bir biçimde kullanılabilir, • İlk giren ilk çıkar, • Ölü bölgeler oluşmaz.	Avantajlar • Duvarlarda aşınma az olduğundan kullanım ömrü uzun olur, • Duvarlara yakın bölgelerdeki tane hızları düşük olduğu için tanelerin yıpranması ve duvar aşınması az olur, • Servis ömrü süresince çeşitli ürünleri depolamak için kullanılabilir.
Dezavantajlar • Duvar yüzeylerinin aşınması oldukça yoğundur, • Akış esnasında duvarlarda büyük gerilmeler oluşur, • Bir ürün çeşidine veya benzer grup ürünlere özgü olduğundan maliyeti yüksektir.	Dezavantajlar • Üründe akış sırasında ayrışmalar görülür, • Ölü bölgeler oluşur, • İlk giren son çıkar akış sisteminin ürün kalitesi üzerine olumsuz bir etkisi olabilir, • Silo duvarlarındaki gerilmelerin dengesiz dağılımı patlamalara yol açabilir, • Kemerlenme, kanallanma ve köprülenme olasıdır.

2.6.3 Ürünlerin Akışkanlığını Etkileyen Faktörler

Taneli ürünlerin akışkanlık özellikleri, depo ortamlarında ürünlerin nasıl hareket ettiğini ve işlendiğini belirleyen kritik faktörlerden biridir. Akışkanlık, ürünün fiziksel özelliklerinin yanı sıra çevresel koşullar ve kullanılan ekipman gibi faktörlere bağlı olarak değişkenlik gösterebilir. Taneli ürünlerin akışkanlık özellikleri, öncelikle ürünün partikül boyutu, şekli ve yoğunluğu gibi fiziksel özelliklerine dayanır. Partikül boyutu büyüdükçe ve şekil düzensizleştikçe, genellikle akışkanlık azalır ve tıkanma riski artar. Yoğunluk ise ürünün birim hacimdeki kütlesini belirler ve dolayısıyla ürünün hareketini ve yer değiştirmesini etkiler. Depo ortamındaki çevresel koşullar da akışkanlık üzerinde belirleyici olabilir. Örneğin, sıcaklık değişimleri ve nem seviyeleri, ürünlerin viskozitesini ve akışkanlık

özelliklerini doğrudan etkileyebilir. Ayrıca, depolama sürecinde kullanılan ekipmanın tasarımı ve performansı da ürün akışkanlığını etkileyen önemli bir faktördür. Doğru ekipman seçimi, ürünlerin düzgün bir şekilde akışını sağlamak için kritik öneme sahiptir (Prescott ve Barnum, 2000).

Taneli ürünlerin akışkanlığı, sadece nicel bir özellik değil, aynı zamanda çeşitli faktörlerin karmaşık etkileşimi sonucunda belirlenen önemli bir özelliktir. Bu faktörler, ürünlerin depolama, taşıma ve işleme süreçlerindeki performansını doğrudan etkiler (Kibar, 2011).

2.6.3.1 Nem içeriği

Taneli ürünlerin akışkanlığını etkileyen başlıca faktörlerden biri nem içeriğidir. Ürünlerin nem oranı arttıkça, taneler arasındaki sürtünme artabilir ve bu da akışkanlığı olumsuz yönde etkileyebilir. Aynı şekilde, bağıl nem seviyeleri de taneli ürünlerin akışkanlığı üzerinde belirleyici bir faktördür. Yüksek bağıl nem, ürünlerin yapışmasına ve akışını engelleyen ciddi problemlere yol açabilir (Johanson, 1978). Sonuç olarak taneli ürünlerde nem içeriği arttıkça, kemerlenme riski artar ve ürünlerin akışkanlığı olumsuz yönde etkilenebilir (Craik ve Miller, 1958; Moreyra ve Peleg, 1981).

2.6.3.2 Bağıl nem

Bağıl nem, taneli ürünlerin depolama ve işleme süreçlerinde önemli bir rol oynayan bir faktördür. Çoğu taneli ürün higroskopik olduğundan, depolama sürecinde ortamın bağıl nem düzeyi, ürünlerin nem içeriğini doğrudan etkiler. Bu durum, ürünlerin fiziksel özelliklerini ve akışkanlık davranışını önemli ölçüde etkileyebilir (Marinelli ve Carson, 1992). Taneli bir ürünün akışkanlığı, ürünün kayma açısındaki değişikliklerle doğrudan ilişkilidir. Kayma açısı, yüzeyler arasındaki sürtünmeyi ve yapışmayı tanımlayan bir parametredir ve bu, taneli ürünlerin akışkanlık davranışını büyük ölçüde etkiler (Craik ve Miller, 1958; Fitzpatrick vd., 2004).

2.6.3.3 Sıcaklık

Sıcaklık, taneli ürünlerin akışkanlığını önemli ölçüde etkiler. Özellikle taneli ürünlerin içinde veya yüzeyindeki nemin donması sürecinde sıcaklık çok önemlidir. Düşük sıcaklıklar, nemin donmasına ve dolayısıyla tanelerin bir arada yapışmasına neden olabilir, bu da akışkanlığı azaltabilir. Ayrıca, sıcaklık sadece ürünün içinde değil, aynı zamanda silo veya depo konstrüksiyon malzemesi üzerinde de önemli bir etkiye sahiptir. Örneğin, düşük sıcaklıklar metal veya beton gibi malzemelerin malzeme özelliklerini değiştirebilir, bu da taneli ürünlerin akışkanlığını etkileyebilir. Sıcaklık aynı zamanda silo duvarları ile taneler arasındaki sürtünme açısını da etkiler. Yüksek veya düşük sıcaklıklar, duvar yüzeylerinde oluşan sürtünme katsayılarını değiştirerek taneler için akışkanlık davranışını doğrudan etkileyebilir (Marinelli ve Carson, 1992).

2.6.3.4 Basınç

Taneli ürünlerin akış özelliklerini belirleyen kritik etmenlerden biri, sıkışma basıncıdır. Bir tane akarken veya içsel yüklemeler sırasında titreşimler nedeniyle herhangi bir akış şeklinde sıkışma oluşabilir. Bu durumda, sıkışma basıncı taneler arasındaki adhezyonu artırarak taneler arasında kenetlenmeye yol açabilir. Basınç artışının taneli ürünlerin akışkanlığı üzerindeki etkileri genellikle iki şekilde gözlenir. İlk olarak, taneler arasındaki adhezyonun artması, sıkışma basıncının artmasına neden olabilir. Taneler arasındaki bu yapışma, akışkanlığı azaltabilir ve tanelerin serbest hareketini kısıtlayabilir. İkinci olarak, kritik kemerlenme boyutlarında önemli bir artış olabilir ve bu da sıkışma basıncının artmasına yol açabilir. Kemerlenme, taneli ürünlerin yığılma eğilimi gösterdiği ve akışkanlığın önemli ölçüde azaldığı bir durumu ifade eder (Johanson, 1978).

2.6.3.5 Yağ içeriği

Ürün yüzeyindeki yağ içeriğinin, taneli ürünlerin akışkanlığı üzerinde potansiyel bir etkisi olduğu düşünülmekte ancak bu konuda yeterli düzeyde araştırma yapılmamıştır. Yağ içeriğinin, tanelerin yüzey özelliklerini ve dolayısıyla akışkanlık davranışını nasıl etkilediği tam olarak anlaşılamamıştır. Bu konuda yapılan bazı

gözlemler ve sınırlı çalışmalar, yağ içeriğinin taneler arasındaki sürtünmeyi azaltabileceğini veya artırabileceğini öne sürmektedir. Ancak bu etkinin genel akışkanlık üzerindeki net etkisi ve mekanizması net değildir (Ganesan vd., 2008).

2.6.3.6 Tane şekli

Tanelerin şekilleri ve dağılımları, hem akışkanlık hem de birim ağırlıkta, içsel sürtünme açısı ve tanelerin sıkışabilirliği gibi faktörlerde önemli bir etkiye sahiptir. Tane şekli, tanelerin birbirleriyle ve depolama veya taşıma ekipmanlarıyla etkileşimini doğrudan etkiler (Fitzpatrick vd., 2004).

2.6.4 Silo Yığınlarında Akış Sorunları

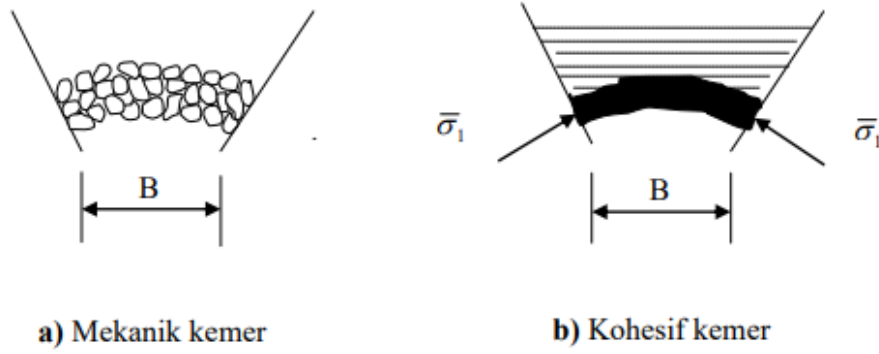
2.6.4.1 Kemerlenme

Bir silonun çıkışında belli bir kemer oluşuyorsa, oluşan kemer, üzerindeki malzemenin ağırlığını destekleyecek yeterince kuvvete sahip demektir ve bu durumda akış yoktur. Akışın yeniden gerçekleşmesi için kemer uygun bir yöntemle kırılmalıdır. Genellikle vibratör, balyoz, vs. gibi ekipmanlar kemeri kırmak için kullanılırlar. Vibratörler kemeri daha da güçlendirme eğilimindedirler, çünkü birçok durumda kemerin sıkılaşmasına yardım ederler (Jenike, 1964).

Bir katı yığının bir çıkış açıklığı boyunca sabit bir kemer oluşturma eğiliminin ana nedenleri; katıda çok ince taneciklerin bulunması ve katının nem miktarıdır. Her ikisi de katı taneciklerinin birbirlerine yapışma eğilimini artırırlar. Depolama esnasındaki sıkışma da katının kuvvetini artırır ve sonucunda akış durumu kötüleşir (Çağlı, 2005).

Bir açıklıkta iki tip sabit kemer oluşumu söz konusudur. Bunlardan bir tanesi çıkış açıklığına göre büyük boyuttaki taneciklerin kenetlenmesi sonucunda oluşan “mekanik kemer” dir (Şekil 2.18a). Mekanik bir kemerin oluşumunu engellemek için çıkış boyutu maksimum tanecik boyutunun en az 10 katı olmalıdır. “Kohesif kemer” (Şekil 2.18b) oluşumu ise çok ince tanecik boyutuna sahip malzemelerde gözlenir ve malzemenin konsolidasyonu sonucu meydana geldiğinden tahmin etmek daha

zordur. Serbest akışlı malzemelerin (kuru kum, vb.) sınırlanmamış akma gerilmesi sıfırdır, o yüzden bu malzemelerle kohesif bir kemer oluşmaz. Kohesif kemer oluşumu da kütle akış silolarında çıkış boyutunun yeterince büyük olması sağlanarak engellenebilir (Çağlı, 2005).

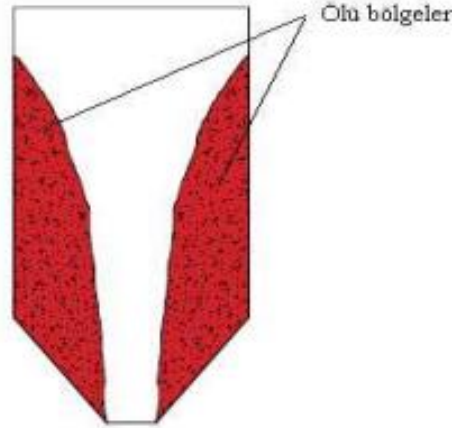


Şekil 2.18 Silo çıkışında kemer oluşumu (Çağlı, 2005)

Silo içerisinde depolanan ürünlerin silo dışına akabilmesi için, tanelerin tutuculuğundan kaynaklanan direncin aşılması gerekir. Kapalı bir silo durumunda, oluşan kemerlenmenin mukavemeti, silo ağzı açıldığında oluşan yerçekimi kuvvetinden daha düşük olduğunda, kalıcı kemerlenmeler oluşmaz ve ürün akışı kesintisiz devam eder. Silo içinde kalıcı akım köprülerinin oluşup oluşmaması, çeşitli faktörlere bağlıdır. Öncelikle, depolanan taneli ürünün fiziksel özellikleri belirleyicidir. Tanelerin nem içeriği, yoğunluğu, tane şekli ve boyutu gibi faktörler, akım köprülerinin oluşma potansiyelini etkiler. Higroskopik özellik gösteren ürünlerde, yüksek nem ortamlarında taneler arasında yapışma artabilir, bu da kalıcı akım köprülerinin oluşmasına neden olabilir. Ayrıca, silo içindeki depolama şartları da önemlidir. Nem, sıcaklık ve basınç gibi faktörler, tanelerin akışkanlığını etkileyerek akım köprülerinin oluşumunu etkileyebilir. Düşük nem ve uygun sıcaklık koşulları, akım köprülerinin azalmasına ve ürün akımının daha verimli olmasına yardımcı olabilir. Silo tasarımı ve geometrisi de kritik öneme sahiptir. Silonun yüksekliği, eğimi, yükleme ve boşaltma noktaları, tanelerin serbestçe akabilmesi için belirleyici faktörlerdir. Düzgün bir tasarım, ürünlerin silo içinde homojen bir şekilde dağılmasını ve akışını teşvik ederken, köprüleşmeyi önleyebilir (Anonymous, 2006; Özel, 2007).

2.6.4.2 Kanallanma

Eğer silo içinde ürünün bir kısmı merkezden akarken diğer kısmı silo duvarları boyunca hareketsiz kalıyorsa, bu durumda silo duvarları boyunca ölü bölgelerin oluşması mümkündür (Şekil 2.19). Bu durum genellikle huni akışı sırasında gözlemlenir ve yığının sınırlanmamış akma sınırı kuvvetiyle ilişkilidir. Eğer depolanan ürün uzun süre sıkışmaya maruz kalıyorsa, siloda kanallanma riski artabilir. Huni akışlı bir silo, ürünün düzenli olarak tamamen boşaltılmadığı durumlarda ve ürünün siloda uzun süre bekletildiği durumlarda özellikle kanallanma riski taşır. Konsolidasyon süreci, ürünlerin alt kısımlarında yoğunlaşmasına ve üst kısımlarında gevşek kalmasına neden olabilir. Bu durumda, silo içindeki ürünün homojen bir şekilde akışını sağlamak zorlaşabilir ve kanallar oluşabilir. Bu nedenle, silo tasarımı ve işletimi sırasında ürünün konsolidasyon süreci ve depolama süresi dikkate alınmalıdır. Uzun süre depolanan ve konsolide olan ürünlerde kanallanma riski artabilir, bu da ürün akışını ve silo verimliliğini olumsuz yönde etkileyebilir. İyi planlanmış ve düzenli olarak bakımı yapılan silolar, bu tür problemleri minimize etmek için önlemler alabilir (Çağlı, 2005; Schulze, 1998).



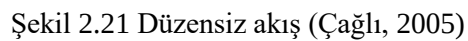
Şekil 2.19 Silo kanal oluşması (Anonymous, 2006)

2.6.4.3 Ayırışma

Siloya dolum esnasında, ürünlerin tane boyutları ve yoğunluklarına bağlı olarak ayırışma eğilimleri gözlemlenir. Boyutu büyük olan taneler genellikle silo duvarlarına yakın bölgelerde birikirken, küçük boyutlu taneler ise silonun merkezine doğru

Şekil 2.20 Tanelerin ayrışması (Schulze, 1998)

Kemerlerin ve kanalların sıra ile oluşumu ve çökmeleriyle düzenli olmayan bir akış meydana gelir. Bu durum, silonun bütünlüğünü bozacak şekilde sarsılmalara ve hasarlara sebebiyet verir, yapısal hatalara ve muhtemel sakatlanma ve ölümlere yol açar (Çağlı, 2005).



2.6.5 Silodaki Akışı Etkileyen Parametreler

Silodaki akış, çeşitli parametrelerin etkisi altında değişiklik gösterir. Bu parametreler arasında huninin eğim açısı, silo cidarı ile malzeme arasındaki sürtünme katsayısı, huninin şekli ve malzemenin içsel sürtünme açısı yer alır. Genel olarak, silo tasarımındaki bu faktörlerin optimize edilmesi, kütleli akışın sağlanmasına yardımcı olur. Huninin eğim açısı önemli bir parametredir çünkü bu açı, yerçekimi etkisi altında malzemenin akışını belirler. Eğimi yüksek olan huniler, malzemenin daha hızlı ve düzenli bir şekilde boşalmasını sağlayabilir. Aynı şekilde, huninin şekli de akışı etkiler. Kanal şeklindeki huni ağızları, dikdörtgen veya yuvarlak ağızlarına göre daha az dirençle akışı teşvik edebilir. Silo duvarlarının düzgün (pürüzsüz) olması ve köşelerin yuvarlatılmış olması da akışın düzenli olmasına katkı sağlar. Pürüzlü yüzeyler veya keskin köşeler, malzemenin sürtünmesini artırarak akışı zorlaştırabilir. Bu nedenle, silo duvarlarının bakımı düzenli olarak yapılmalı ve gerekirse pürüzsüzlüğü sağlayacak önlemler alınmalıdır (Özel, 2007).

2.7 Silolara Etkiyebilecek Yükler

Siloların tasarımında işlevsel ve yapısal yönlerin göz önünde bulundurulması gerekir. İşlevsel tasarım, silonun uygun bir hacme sahip olmasını, malzemenin etkili bir şekilde korunmasını ve dolum-boşaltma işlemlerinin kolayca gerçekleştirilmesini sağlamayı amaçlar. Yapısal tasarım ise silonun stabilitesini, dayanımını, yer değiştirmesini ve çatlak genişliklerini kontrol etmek için gerekli önlemleri içerir. Tasarım sürecinde göz önünde bulundurulması gereken yükler şunlardır:

- Sabit yükler
- Silolanan malzeme basınçlarından doğan yükler
- Farklı sıcaklık değişiminden doğan yükler
- Kar yükü
- Rüzgar yükü
- Deprem yükü (Durmuş, 2007)

Bu yükler, silonun güvenliği ve dayanıklılığı için tasarım sürecinde hesaba katılmalıdır. Mühendisler, bu yüklerin etkilerini değerlendirerek uygun malzeme

seçimi, duvar kalınlığı, destek yapıları ve diğer tasarım detaylarını belirlerler. Bu şekilde, siloların hem işlevsel hem de yapısal gereksinimleri karşılaması sağlanır ve güvenli bir depolama ortamı oluşturulur.

2.7.1 Sabit Yükler

Silo tasarımında, yapının öz ağırlığı ve siloya monte edilmiş ekipmanların ağırlığı gibi sabit yükler önemli bir rol oynar. Bu yükler, siloların düşey doğrultuda merkezi normal kuvvet oluşturmaya yol açar. Bu merkezi normal kuvvet, silo duvarları üzerindeki sürtünme kuvveti ile dengelenmelidir. Özellikle, silo duvarları üzerindeki sürtünme kuvveti, yapısal dengeyi sağlamak için önemlidir. Bu kuvvetlerin hesaplanması, silonun stabilitesini ve dayanıklılığını belirler. Ayrıca, silo içerisinde bulunan ve üzerindeki yükleri taşıyan kolonlar üzerinde titreşim yükleri de dikkate alınmalıdır. Bu yükler, silo yapısının tüm elemanları arasındaki dengeyi ve güvenliğini sağlamak için titizlikle hesaplanmalıdır. Tasarım sürecinde, sabit yüklerin etkileri detaylı bir şekilde incelenmeli ve silo yapısının gereksinimlerine uygun olarak uygun malzeme seçimi, duvar kalınlıkları, destek yapıları ve diğer detaylar belirlenmelidir. Bu sayede, siloların uzun ömürlü, güvenli ve verimli bir şekilde kullanılması sağlanabilir (Durmuş, 2007).

2.7.2 Siloda Oluşan Malzeme Basınçları ve Buna Bağlı Yükler

Silo tasarımında, depolanan malzemenin oluşturduğu basınçlar önemli bir rol oynar. Bu basınçlar, silo gövdesindeki dikey kuvvetlerle birlikte, silo cidarlarında sürtünme kuvvetleri ve yatay kuvvetler şeklinde ortaya çıkar. Bu kuvvetlerin miktarı, içsel sürtünme açısı ve silo duvarlarının sürtünme açısına bağlıdır. Taneli malzemeler için, bu özellikler malzemenin hareketlilik durumuna ve dolum-boşaltma süreçlerine göre değişebilir. Tasarım sürecinde, silo gövdesinde oluşan düşey kuvvet ve sürtünme kuvveti ile bu kuvvetlerin en elverişsiz duruma göre hesaplanması önemlidir. Gerçekte sürtünme açıları, malzemenin basıncına bağlı olarak değişebilir; ancak bu değişimleri sürekli olarak hesaba katmak zordur. Bu nedenle, tasarımda genellikle itibari bir değer kullanılır. Bu itibari değerler, silonun güvenliği ve performansı için kritik öneme sahiptir. Doğru sürtünme açılarının ve diğer tasarım parametrelerinin

belirlenmesi, silo yapılarının dayanıklılığını ve uzun ömürlülüğünü sağlamak için gereklidir. Mühendisler, bu faktörleri detaylı bir şekilde değerlendirerek silo tasarımını optimize etmelidirler (Durmuş, 2007).

2.7.3 Sıcaklık Farkından Doğan Yükler

Silo tasarımlarında önemli bir faktör, silolanan malzemenin sıcaklığına bağlı olarak oluşan yüklerdir. Özellikle uzun süreli depolama yapılarında, bu yüklerin önemi artmaktadır. Silolar, iç ve dış sıcaklık farkları sebebiyle önemli gerilmelere maruz kalabilirler. Bu etkiler, silo biçimi ve yüksekliği gibi faktörlere bağlı olarak hesaplanmalıdır. Silo içindeki sıcaklık değişimi, malzemenin sıcak olarak doldurulması, sonradan ısıtılması veya iç tepkimelerden kaynaklanabilir. Dış sıcaklık değişimleri ise güneş ışınlarının etkisiyle yüksek sıcaklık artışına veya yağmur, rüzgar gibi faktörlere bağlı ani sıcaklık düşüşlerine neden olabilir. Bu sıcaklık farklarından kaynaklanan yükler, yapıya derzlerle bloklara ayırma yöntemiyle önemli ölçüde azaltılabilir. Bu yöntem, yapıdaki termal genleşmeye ve streslere karşı koruma sağlar ve silonun dayanıklılığını artırır. Tasarım sürecinde, silo içinde ve dışında oluşabilecek sıcaklık değişimlerinin etkileri detaylı bir şekilde değerlendirilmeli ve uygun tekniklerle bu etkiler minimize edilmelidir. Bu sayede, silo yapılarının uzun süreli ve güvenli bir şekilde kullanılması sağlanabilir (Durmuş, 2007).

2.7.4 Kar Yükü

Silo tasarımlarında kar yükü, silonun coğrafi konumuna, meteorolojik koşullara, yapı şekline ve rüzgar etkisine bağlı olarak değişiklik gösterir. TS 498 (1987) standardına göre, siloların kar yükü diğer mühendislik yapılarındaki hesaplama yöntemlerine benzer biçimde hesaplanır. Kar yükü, bölgenin kar yoğunluğu ve rüzgar etkisinin yanı sıra silonun konik yapısı, çatı eğimi ve diğer geometrik özellikleri dikkate alınarak belirlenir. Özellikle kar birikmesi, silo çatısının dayanıklılığı ve yapısal bütünlüğü için önemli bir tasarım parametresidir. Tasarım sürecinde, silonun bulunduğu coğrafi konuma göre uygun kar yükü hesaplamaları yapılmalıdır. Bu hesaplamalar, silonun güvenliği ve dayanıklılığı için kritik öneme sahiptir.

Mühendisler, TS 498 standardındaki yönergeleri takip ederek ve yerel meteorolojik verileri dikkate alarak doğru kar yükü değerlerini belirlerler. Bu şekilde, silo yapılarının kar yüküne karşı dayanıklılığı sağlanır ve uzun ömürlü bir şekilde kullanılmaları mümkün olur (Durmuş, 2007).

2.7.5 Rüzgar Yükü

Rüzgar, öncelikle boş durumda olan yüksek siloların stabilitesini etkileyebilir. Bu durumda, silonun kolonlarında ve temellerinde oluşan gerilmeler, dolu durumundakilerden daha büyük olabilir. Özellikle silindirik siloların boşken maruz kaldığı rüzgar etkileri, silonun ovalleşmesine neden olabilecek etkileri içerebilir ve bu durumun dikkatle denetlenmesi gereklidir. Siloların rüzgar etkilerine karşı dayanıklılığı, TS 498 (1987) ulusal yönetmeliğinde belirtilen genel yöntemlerle hesaplanır. Bu yöntemler, silonun coğrafi konumu, rüzgar hızı, silo geometrisi ve diğer faktörleri dikkate alarak rüzgar yükünü belirlemeyi amaçlar. Rüzgar etkisi altında oluşabilecek maksimum gerilmelerin ve deformasyonların belirlenmesi, silonun yapısal güvenliği için kritik öneme sahiptir (Durmuş, 2007).

2.7.6 Deprem Yükü

Silo dizaynlarında, özellikle aktif deprem hattında yer alan bölgelerde, deprem yüklerinin hesaplanması zorunlu bir gerekliliktir. Silolara etkiyen deprem yükleri genellikle silonun dolu durumda olduğu ve cidaralarının rijit olduğu kabulleriyle belirlenir. Ancak bu kabuller, gerçek hayatta silo-malzeme etkileşimini ve zemin etkisini tam olarak yansıtmayabilir. Bu nedenle, yapısal analizlerde silo cidarı malzeme ve zemin etkileşimlerinin detaylı bir şekilde değerlendirilmesi gerekmektedir. Gerçek bir deprem etkisi altında silo yapılarının davranışını anlamak ve güvenliğini sağlamak için sonlu elemanlar yöntemi gibi sayısal yöntemler kullanılmaktadır. Bu yöntemlerde Westergaard'ın eklenmiş kütle yaklaşımı, Euler ve Lagrange tipi yaklaşımlar gibi çeşitli teknikler kullanılarak silo-malzeme etkileşimi simüle edilir. Deprem etkilerine karşı siloların güvenliğini sağlamak için yapılan bu analizler, silo tasarımında kullanılan malzemelerin ve yapısal özelliklerin optimize

edilmesinde önemli bir rol oynar. Böylece, siloların deprem koşullarında bile güvenli ve dayanıklı olması sağlanabilir (Durmuş, 2007).

2.8 Silolarda Görülen Hatalar

Silolarda görülen yapısal bozulmalar, diğer endüstriyel yapılara kıyasla daha sık karşılaşılan bir durumdur. Bu bozulmalar, bazen silonun tamamen yıkılmasıyla sonuçlanabilirken, bazen de betonarme gövdede çatlaklar veya çelik gövdede deformasyonlar şeklinde ortaya çıkabilir. İkinci kategorideki başarısızlıklar genellikle fark edilmediğinde operasyonel veya güvenlikle ilgili sorunlar yaratmazlar çünkü belirlenmiş bir sorun yoktur. Ancak, bu tür hasarlar potansiyel tehditler oluşturabilir çünkü yapısal bütünlükleri zayıflatabilir ve gelecekte ciddi sorunlara yol açabilirler. Silolardaki yapısal bozulmalar çeşitli sorunlara neden olabilir. Örnekler şunları içerebilir;

- Sistemin kesintiye uğraması veya durması sonucunda ekonomik kayıplar meydana gelebilir,
- Taşıyıcı sistemin zarar görmesi, statik hasarlara neden olabilir,
- Mekanik ve elektronik sistemlerin zarar görmesi gibi devresel hasarlar meydana gelebilir,
- Çalışan personelin zarar görmesi, yaşamsal ve hukuki sorunlara neden olabilir. Silolarda meydana gelen yapısal başarısızlıklar, bu tür riskleri beraberinde getirebilir,
- Projelendirme aşamasındaki eksiklikler veya yanlışlıklar, potansiyel olarak yapısal başarısızlıklara yol açabilir,
- İnşa aşamasındaki eksiklikler veya yanlışlıklar, yapısal başarısızlıklara neden olabilir,
- Kullanım ve bakım yetersizliğine bağlı başarısızlıklar, yapısal sorunların ortaya çıkmasına neden olabilir (Carson, 2000; Jenkyn ve Goodwill, 1987; Kibar ve Öztürk, 2011; Özel, 2007).

2.8.1 Projelendirme Hataları

Silo tasarımı, özel bir mühendislik bilgisini gerektirir. Başlangıçta, proje mühendisi, silo malzeme özelliklerinin yanı sıra depolanacak tarımsal ürünün mühendislik

özellikleri hakkında da bilgi sahibi olmalıdır. Bununla yanında, imalat ve kullanım konularında da deneyimli olması son derece önemlidir. Siloda depolanacak ürünün akış özelliklerine bağlı olarak, akış kanalı geometrisi, statik ve dinamik basınç dağılımı, kanallanma ve kemerleşme oluşumu, siloda kendiliğinden oluşan titreşimler ve dinamik etkiler hakkında da bilgi ve deneyime sahip olunması gerekmektedir. Ayrıca, homojen olmayan yükler, ısısal yükler, sismik yükler ve elemanların üretiminden kaynaklanan detayların da projelendirmede göz önünde bulundurulması gerekmektedir (Carson, 2000; Jenike, 1964; Kibar ve Öztürk, 2011).

Silo projelendirme aşamalarında silo kapasitesi ve silo yapılacak bölgeyle ilgili iklimsel tasarım kriterleri belirlendikten sonra ürünlerin oluşturacağı yük kombinasyonları, yüklerin zemine aktarımı ve silo yapı elemanlardaki gerilmeler hakkında tasarımcının yeterli düzeyde bilgisinin olması gerekmektedir (Carson ve Jenkyn, 1993; Kibar ve Öztürk, 2011; Özel, 2007).

Tarımsal ürün silolarında karşılaşılan projelendirme hataları arasında şunlar öne çıkar: eksantrik boşaltma nedeniyle oluşan eğilme etkileri, depolanan ürün özellikleri ile akış koşullarının göz ardı edilmesi, betonarme silolarla ilgili özel durumların ihmal edilmesi, termal genleşme ve silo içi nem taşınımının dikkate alınmaması ve yüklerle ilgili tahminlerin hatalı yapılması (Kibar ve Öztürk, 2011).

2.8.2 Yapım Hatalarından Kaynaklanan Sorunlar

Yapım hataları silolarda sıkça rastlanan durumlardan birisidir. Özellikle kötü işçilik, yanlış malzeme kullanımı, yapım sırasında işin hızlandırılması ya da maliyetin düşürülmesi için projede yapılan bilinçsiz değişikliklerin yarattığı sonuçlar yapım hatası olarak sıralanabilir (Carson, 2000). Bununla birlikte donatı yetersizliği, temelde kısmi oturma, huniye geçiş sırasında burkulma ve akma, silo düşey cidarındaki eğilme, içsel basınç burkulması ve eksenel sıkışmaya bağlı burkulmalar da bu duruma örnek olarak gösterilebilir (Kibar ve Öztürk, 2011).



Şekil 2.22 Silo yapım hataları (Carson, 2008; Rotter, 2008)

2.8.3 Kullanım Hataları

Normal koşullarda, iyi bir şekilde tasarlanmış ve kaliteli bir şekilde yapılmış siloların uzun bir ekonomik ömre sahip olması beklenmektedir. Fakat her zaman bu durum gerçekleşmeyebilir. Silo yapılarında bazı sorunlar ortaya çıkabilir ve bu sorunlar silonun performansını olumsuz etkileyebilir. Silolanan ürünün akış özelliklerinde meydana gelen değişiklikler, silo cidar malzemesinin aşınması veya içerisinde patlama gibi durumlar, silo yapılarının uzun ömürlülüğünü etkileyen temel nedenler arasında yer alır. Ayrıca, siloya tasarlandığı üründen farklı bir ürün konulması, silo içindeki yük dağılımını ve akışını değiştirerek kemerlenme ve kanallaşma gibi sorunlara yol açabilir. Silo çıkış geometrisinde yapılan değişiklikler de silo içindeki yük dağılımını önemli ölçüde etkileyebilir. Bu nedenle, silodan ürün alınan huni ağzında veya sonradan yapılan eklemelerde herhangi bir değişiklik yapılacaksa, mutlaka konuyla ilgili uzman görüşü alınmalı ve işlem doğru bir şekilde gerçekleştirilmelidir (Carson, 2000; Kibar, 2011).

2.8.4 Bakım Hataları

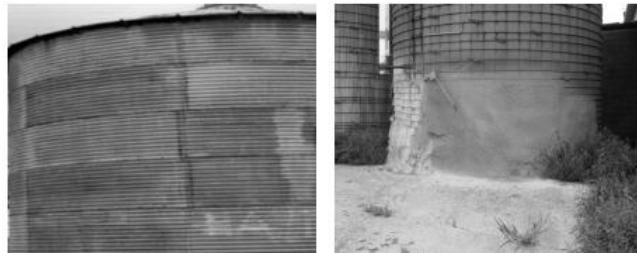
Silolardaki bakım, kullanıcı veya silo sahibi tarafından gerçekleştirilebilir. Periyodik bakımların ihmal edilmesi, korozyon ve aşınma gibi nedenlere bağlı olarak ortaya çıkan hatalar bakım hatası olarak nitelendirilebilir (Kibar ve Öztürk, 2011).

2.8.4.1 Silo elemanlarında yetersiz periyodik bakım

Silolarda düzenli yapılacak incelemeler olası hasarın önceden tahminine ve gerekli tedbirlerin zamanında alınmasına olanak sağlar ve oluşacak hasarın boyutunu küçültür. Periyodik olarak yapılması gereken işlemler; silo duvarlarındaki olası değişikliklerin gözlenmesi, akımı kolaylaştıran astarın bakımı, yenilenmesi, çatı girişi, boşaltıcı, doldurucu bakımı vb. çalışmalardır. Bunun dışında enerji açığa çıkmasının sağlandığı ve zorlanmaların deformasyonla yok edildiği noktaların gözlenmesidir. Çentik, çatlak, deformasyon, silonun eğilmesi vb. durumların gözlenerek gerekli önlemlerin alınması önemlidir. Tehlike fark edildiğinde hemen uzman mühendislerden gerekli bilgiler alınarak çözüme ulaşılmaya çalışılmalıdır (Kibar ve Öztürk, 2011).

2.8.4.2 Paslanma (korozyon) ve aşınma

Bu sorun özellikle aşındırıcı malzeme depolanması durumunda ve karbon çeliğinin nemli ya da aşınmaya uygun atmosfer koşullarında kullanılması durumunda gözlemlenir. Bazen korozyon ve aşınma bir arada etki gösterebilir ve bu durum silo cidarlarının kolaylıkla incelmesine yol açabilir. Bu sorunla karşılaşmamak için gövde materyalinin galvanizli çelik olması ve bu kaplamanın ömrünü artırmak için üzerine mangan kaplama yapılması uygun olabilir (Kibar ve Öztürk, 2011).



Şekil 2.23 Silolarda oluşan paslanma ve aşınma durumları (Kibar ve Öztürk, 2011)

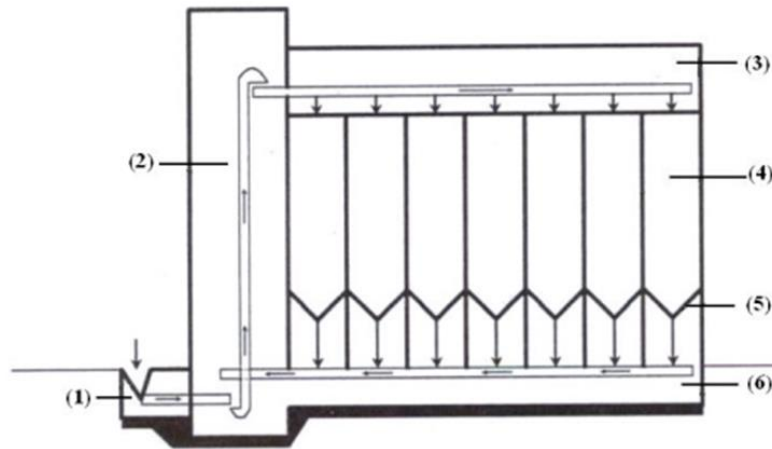
2.9 Silolarda Aranılan En Önemli Özellikler

- Siloya giriş ve çıkış kapasiteleri yeterli olmalıdır,
- Malzeme giriş ve çıkışlarında ölçüm yapılabilen basküller bulunmalıdır,
- Malzemenin istenen özelliklere sahip olması için temizleme ve eleme sistemleri bulunmalıdır,
- Girişte nemi yüksek malzemeyi kurutabilen tertibatlar bulunmalıdır,
- Toz patlamasını önleyebilecek kapasitede havalandırma sistemleri olmalıdır,
- Her çeşit araca yükleme yapabilecek çıkışlar mevcut olmalıdır,
- Liman silolarında malzeme gemiye yüklenirken derleme yapabilecek yerleşim aygıtları bulunmalıdır,
- Dampersiz kamyon boşaltmaya uygun kamyon kaldırma aygıtı olmalıdır,
- Periyodik bakım süresince faaliyetini sürdürebilecek tertibata sahip olmalıdır,
- Hücrelerde sıcaklık, rutubet ve malzeme miktarlarını izleyen cihazlar olmalıdır (Durmuş, 2007).

Bu şekilde her bir gereksinim, silonun etkin ve güvenli bir şekilde işletilmesi için önemli bir rol oynar.

2.10 Siloların İşletilmesi İçin Gerekli Tesisler

Şekil 2.24, siloların işletilmesine ilişkin tipik bir özeti göstermektedir. Bu şekilde, her bir bölümün görevi aşağıda gösterilmektedir.



Şekil 2.24 Siloların işletilmesine ilişkin tipik bir kesit

(1) Kabul kuyusu olarak bilinen bölüm, siloya ilk dolum yapıldığında malzemenin döküldüğü ve silo içinde havalandırma veya bakım gerektiğinde geçici olarak bekletildiği alan olarak tanımlanır. Burası, siloya giriş yapan malzemenin ilk aşamada kabul edildiği ve buradan silo içine yönlendirildiği önemli bir noktadır. Ayrıca, silo içindeki işlemler sırasında malzemenin havalandırılması veya temizlenmesi gerektiğinde kullanılır.

(2) Elevatörlü işletme kuyusu olarak adlandırılan bölüm, silolanacak malzemenin silo hücrelerine iletilmek üzere silo üst seviyesine çıkarılmasını sağlayan alanı ifade eder. Bu bölümde bulunan elevatör, mekanik veya pnömatik olabilir ve malzemenin yükseklik farkını aşarak silo içine taşınmasını sağlar.

(3) Yatay dağıtım tavan katı olarak adlandırılan bölüm, malzemeyi yatay doğrultuda istenilen noktaya iletmek amacıyla yatay bir doldurma bandı bulunduran alandır. Bu bölüm, malzemenin silo içinde yatay olarak dağıtılmasını sağlar ve doldurma bandı aracılığıyla malzemenin istenilen bölgelere taşınmasını kolaylaştırır.

(4) Silo hücresi olarak adlandırılan bölüm, malzemenin sürekli olarak stok edildiği alandır. Bu bölüm, genellikle silo içinde belirli bir hacimde malzemenin depolandığı ve korunduğu ana bölümdür.

(5) Tiremi olarak adlandırılan bölüm, silo içinde malzemenin boşaltılmasını sağlayan kısımdır. Bu bölüm, genellikle silo tabanında yer alır ve malzemenin tahliyesi için tasarlanmıştır.

(6) Yatay boşaltım zemin katı olarak adlandırılan bölüm, tiremilerden boşalan malzemenin taşıma aracına veya havalandırma amacıyla kabul kuyusuna iletilmesini sağlayan bir boşaltma bandı bulunduran alandır. Bu bölüm, silo içinde malzemenin tahliye edildiği ve taşıma veya depolama için uygun hale getirildiği kısımdır (Durmuş, 2007).

2.11 Silo Kullanım Alanları

Endüstriyel alanlarda sıklıkla yer bulan silo tipi yapılar akışkan ve kuru malzemeler için depolama amaçlı olarak kullanılmaktadır. Bu yapıların sahip olduğu taşıyıcı

sistem tipi ve geometrisi depoladığı malzeme tipine ve özelliklerine bağlı olmak üzere değişkenlik gösterebilmektedir. Endüstri, enerji sektörü ve sanayide genellikle yakıt depolamasında kullanımı mevcuttur (Efe, 2020).



(a) Kule Tipi Beton Silo (1980)



(b) Kule Tipi Çelik Silo (2015)

Şekil 2.25 Kule tipi silo yapıları, genel görünüm a) Kule tipi beton silo b) Kule tipi çelik silo (Efe, 2020)

Yer üstü beton silolar, ülkemizde en çok kullanılan silo tipi olarak kayıtlara geçmektedir. Toprak üstü silolar, bütçe açısından uygun olan silolar olmakla beraber basit bir depolama imkanı sağlamaktadırlar. Konik tabanlı silolar, silolarda dolum ve boşaltım sık olduğu durumlarda tercih edilmektedir (Efe, 2020).



Şekil 2.26 Konik tabanlı çelik silo

3. TASARIM VE ANALİZ

Bu çalışmanın temel amacı, çelik stok yapıları olan siloların tasarımında optimum sonuçlar elde etmektir. Bu kapsamda, farklı sac kalınlıkları kullanılarak SolidWorks 2024 programında tasarımlar gerçekleştirilecek ve ANSYS sonlu elemanlar yazılımında analizler yapılarak emniyetli sac kalınlıkları belirlenecektir. Herhangi bir yapısal soruna neden olmayacak optimum sac kalınlığı, depolama kapasitesi, silonun toplam ağırlığı ve maksimum von Mises gerilmeleri dikkate alınarak belirlenecektir.

İlk olarak, SolidWorks 2024 yazılımı kullanılarak farklı sac kalınlıklarına sahip çeşitli silo modelleri oluşturulacaktır. Tasarlanan silo modelleri için uygun malzeme seçimi yapılacak ve emniyet faktörleri hesaplanacaktır. Silonun stabilitesini artırmak ve olası yapısal sorunları minimize etmek amacıyla destek elemanları tasarıma dahil edilecektir.

Oluşturulan silo modellerinin yapısal analizleri ANSYS sonlu elemanlar yazılımı kullanılarak gerçekleştirilecektir. Bu analizlerde, her bir silo modeli için statik yükleme koşulları altında oluşan toplam deformasyon, gerinim ve gerilme değerleri hesaplanacaktır. Ayrıca, her bir tasarımın toplam ağırlığı değerlendirilecektir.

Silo tasarımının çelik malzemeden, silindirik gövdeli ve tahıl depolamasında kullanılabilecek, mühendislik açısından en uygun özellikleri ortaya koyabilecek şekilde yapılması planlanmaktadır.

3.1 Maliyet

Çelik siloların maliyetleri, birçok faktörden etkilenir ve bu maliyet kalemlerinin başında malzeme, işçilik ve üretim süreçleri gelir. Çelik siloların maliyet analizi yapılırken, sac, kaynak ve kıvrırma işçiliği gibi unsurların yanı sıra montaj ve bakım maliyetleri de dikkate alınmalıdır.

3.1.1 Malzeme Maliyeti

Çelik siloların en büyük maliyet kalemi, kullanılan çelik saclardır. Çelik sacların kalınlığı ve kalitesi, maliyeti doğrudan etkiler. Yüksek mukavemetli çeliklerin tercih edilmesi, daha ince sac kullanılarak ağırlığın ve dolayısıyla maliyetin azaltılmasına yardımcı olabilir. Malzeme maliyetleri genellikle toplam maliyetin en büyük kısmını oluşturur.

3.1.2 Kaynak İşçiliği

Kaynak işlemi, silonun yapısal bütünlüğünü sağlamak için kritik öneme sahiptir. Kaynak işçiliği maliyetleri, kaynak yöntemine ve işin karmaşıklığına bağlı olarak değişir. Kalifiye işçilerin çalıştırılması, kaynak kalitesini artırırken maliyetleri de yükseltir.

3.1.3 Kıvrırma ve Şekillendirme İşçiliği

Çelik sacların silindirik veya konik şekillere getirilmesi için kıvrırma ve şekillendirme işlemleri gereklidir. Bu işlemler, özel makineler ve yetenekli işçiler tarafından yapılır. Kıvrırma ve şekillendirme işçiliği, özellikle büyük çaplı ve kalın sacların kullanıldığı silolarda önemli bir maliyet kalemidir.

3.1.4 Montaj ve Kurulum

Siloların montajı ve kurulumu, genellikle sahada yapılan bir işlemdir ve bu süreçte kullanılan ekipman ve işçilik maliyetleri de göz önünde bulundurulmalıdır.

3.1.5 Bakım ve Onarım

Çelik siloların uzun ömürlü ve güvenli bir şekilde kullanılması için düzenli bakım ve onarım gereklidir. Korozyon önleyici kaplamalar, boya ve galvanizleme gibi işlemler, bakım maliyetlerini artıran unsurlardır.

3.2 Maliyet Azaltma Stratejileri

3.2.1 Ağırlık Azaltımı

Çelik silolarda ağırlık azaltımı, maliyetleri düşürmenin etkili bir yoludur. Yüksek mukavemetli çeliklerin kullanılması, daha ince saclarla aynı dayanıklılığın sağlanmasına olanak tanır. Bu sayede, malzeme maliyetlerinde önemli ölçüde tasarruf sağlanabilir. Ayrıca, daha hafif malzemelerin kullanılması, nakliye ve montaj maliyetlerini de azaltır.

3.2.2 Üretim Süreçlerinin Optimizasyonu

İşçilik maliyetlerini azaltmak için üretim süreçlerinin optimize edilmesi önemlidir. Daha büyük boyutlarda sac levhalar kullanmak üretim sürecinde kaynak işçilik maliyetlerini düşürmekte yardımcı olmaktadır.

3.2.3 Malzeme Temini

Çelik sac ve diğer malzemelerin toplu alımları, birim maliyetlerin düşürülmesine yardımcı olabilir. Piyasada yaygın olarak kullanılan malzemelerin seçilmesi de süreci kolaylaştırabilmektedir.

3.3 Silo Tasarımı

Bu çalışmada, tahıl depolaması amaçlanan çelik silolar tasarlanacaktır. Silo tasarımları SolidWorks 2024 programı kullanılarak yapılmıştır. Silo boyutları araştırma süresince sabit tutulacaktır. Silo boyutları için belirlenen ölçüler ve depolanacak olan tahıl yoğunluğu Tablo 3.1 'de verilmiştir.

Taşınabilir sac ölçüsünün 1500x3000 mm olarak seçildiği bu tasarımda, sacların zayıt vermeden optimum düzeyde kullanımı sağlanmıştır. Bu boyutlarda, her sırada 5 sac levha kullanılarak silonun çapı ve yüksekliği hesaplanmıştır. Sacların her sırada 5 levha olarak kullanılması sonucunda silonun çapı 4,77 metre olarak hesaplanmıştır.

Silo yüksekliği, her bir sac levhanın 1500 mm yüksekliğinde olduğu ve toplamda 7 kat kullanıldığı göz önünde bulundurularak hesaplanmıştır. Bu hesaplamalar sonucunda 4,77 metre çapında ve çatı hariç 10,5 metre yüksekliğinde bir silo tasarlanmıştır. Bu tasarım, sacların en verimli şekilde kullanılması ve minimum malzeme zayiatı ilkeleri doğrultusunda gerçekleştirilmiştir.

Tablo 3.1 Silo özellikleri

Silo gövde yüksekliği	10,5 m
Silo apı	4,77 m
Silo kapasitesi	187 m ³
Tahıl yoğunluğu	720 kg/m ³
Depolanacak tahıl miktarı	134.640 kg

elik silo üretiminde kullanım yerine ve ortam koşullarına göre kullanılan farklı elik türleri vardır. Silo malzemesi olarak, piyasada kolaylıkla bulunabilen, yaygın olarak kullanılan ve TS EN 1993-1-1 standardına uygun olan St44 yapı çeliği kullanılacaktır. Malzemenin kimyasal özellikleri, akma-çekme dayanımlarını, kaynak edilebilirliği, kaynak işçiliğini ve malzemenin işlenebilirliğini etkilemektedir. Malzeme seçiminde; akma-çekme dayanımları, kaynak edilebilirlik, korozyon direnci ve fiyat dikkate alınmıştır. Seçilen malzemenin özellikleri Tablo 3.2’ de verilmiştir.

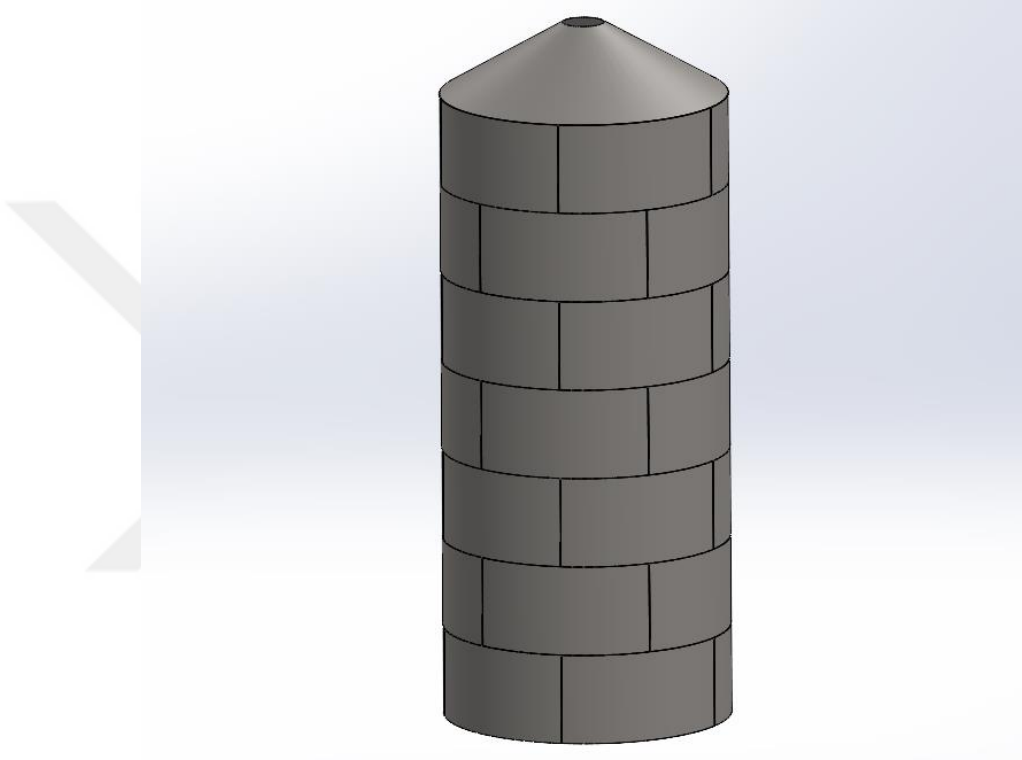
Tablo 3.2 Malzeme özellikleri

Malzeme	Akma Dayanımı (MPa)	ekme Dayanımı (MPa)	% Uzama	Yoğunluk (g/cm ³)
St44	275	430-580	23	7,85

Mühendislik tasarımlarında malzemelerin maksimum izin verilen gerilmelerini belirlemek için emniyet katsayısına karar verilmelidir. St44 eliği için emniyet katsayısı 1,5 ile 2,5 arasında uygulamaya ve tasarım kriterlerine göre değişmektedir. Yapılacak olan çalışmada St44 eliğinin kopma dayanımı göz önünde bulundurularak, emniyet katsayısı 2,5 olarak belirlenmiş ve emniyet gerilmesi 17-18 MPa olarak kabul edilmiştir.

3.4 SolidWorks Programı ile Silo Modelleme

Silo tasarımı için kullanılacak boyutlar ve malzeme belirlendikten sonra, SolidWorks yazılımında modelleme gerçekleştirilmiştir. İlk modelleme aşamasında, tüm katlar için 5 mm kalınlığında sac levhalar kullanılmıştır. Kullanılan sac levhaların boyutları 1500x3000 mm olup, silo 7 kattan oluşmaktadır.



Şekil 3.1 Silo modeli

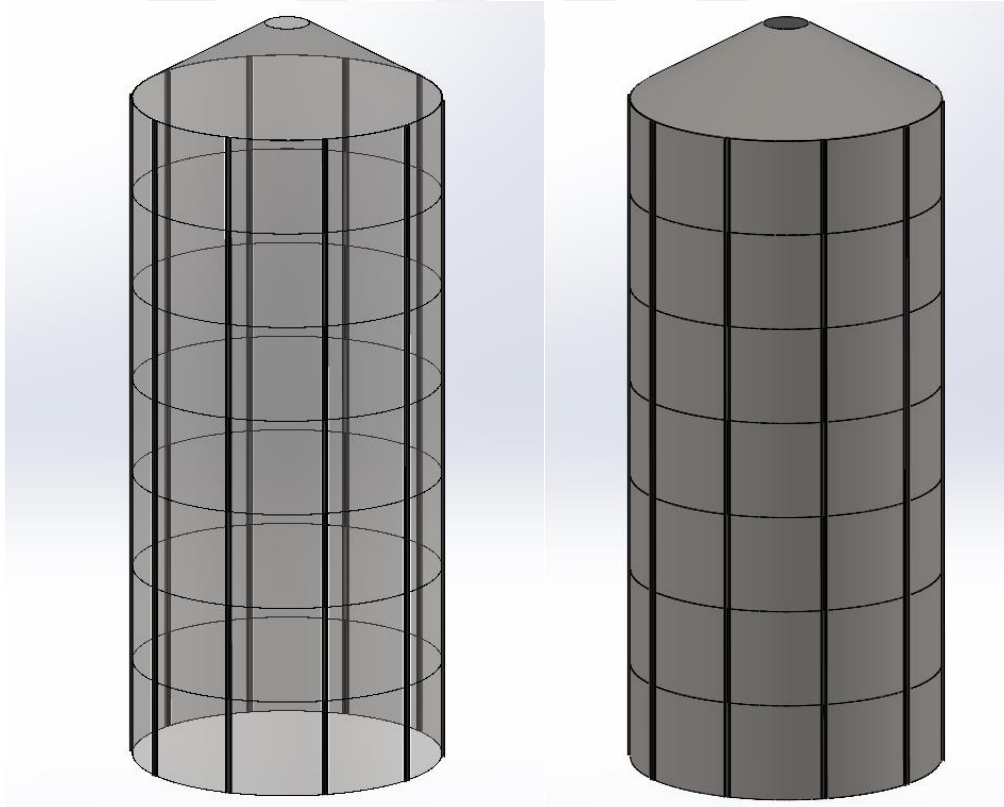
3.4.1 Destek Elemanları

Tasarlanacak olan farklı silo modellerinde gövde kalınlıkları değiştirilecektir. Emniyeti sağlamak ve optimum sonuçları elde etmek için destek elemanları kullanılması planlanmaktadır. Destek elemanlarının adetlerine karar verilirken, gövdede kullanılan sacların kaynak yerleri dikkate alınmıştır. Kullanılacak olan destek elemanları ve adetleri aşağıdaki tabloda verilmiştir.

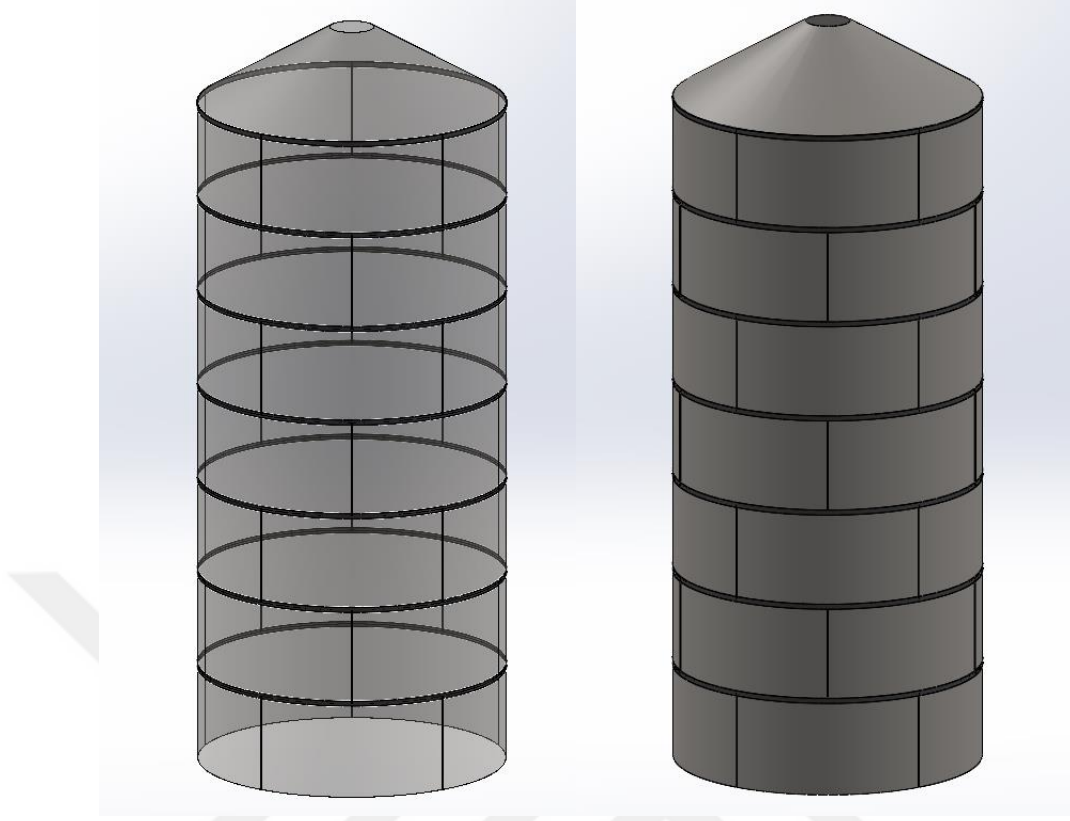
Tablo 3.3 Destek elemanları ve adetleri

Destek Elemanı	Adet
NPU 50 NPU 30	5
	10
	15
Lama Demiri 6x80 mm	7
Lama Demiri 5x50 mm	14

Destek elemanları iki ana grupta kullanılmıştır. İlk grup, NPU profillerden oluşmaktadır ve bu profiller silonun yüksekliği boyunca sırasıyla 5, 10 ve 15 adet dikine yerleştirilmiştir. İkinci grup ise lama demirlerinden oluşmaktadır; bu demirler, silo çapı etrafında yatay eksende bükülürölerek sarılmıştır ve 7 ile 14 adet olmak üzere iki farklı dizilimde uygulanmıştır. Destek elemanları kullanılarak modellenen silo örnekleri aşağıdaki şekillerde verildiği gibidir.



Şekil 3.2 NPU profil kullanılarak tasarlanan silo modeli



Şekil 3.3 Lama demiri kullanılarak tasarlanan silo modeli

3.5 ANSYS Programı ile Silo Analizi

Yapılarda, sistem elemanlarının geleneksel yöntemlere dayalı çözümlerinde, rijit olarak kabul edildiği bilinmektedir. Bu yaklaşım, yapı sistemindeki yer değiştirmeleri hakkında detaylı bilgi sağlamamaktadır. Ancak sonlu elemanlar metodu, rijit cisim sınırlamasını aşmayı ve bu tür karmaşık problemleri çözmeyi mümkün kılar. Bu nedenle ANSYS, ABAQUS, SAP 65 ve SAP 2000 gibi sonlu elemanlar programlarının kullanımı giderek yaygınlaşmaktadır. Bu programlar, yapısal analizlerde daha doğru sonuçlar elde etmek ve yapı davranışını daha detaylı şekilde incelemek için önemli araçlar sunmaktadır (Gallego vd., 2004; Özel, 2007).

ANSYS, ürünlerin prototip üretimi yapılmadan önce sanal ortamda test edilmesine fırsat tanır. Bu sayede, daha maliyetli ve zaman alıcı bir süreç olan prototip üretimi yerine, simülasyon tabanlı analizler gerçekleştirilebilir. Dolayısıyla günümüzde bilgisayar destekli mühendislik yöntemi tercih edilmektedir. Sanal ortamda yapılan 3 boyutlu simülasyonlar sayesinde, yapıların zayıf noktaları tespit edilebilir ve

iyileştirmeler yapılabilir. Ayrıca kullanım ömrü hesaplamaları yapılarak olası problemler önceden öngörülebilir. Bu yöntem, yapıların tasarım sürecinde daha verimli ve güvenilir kararlar alınmasına yardımcı olur (Kibar, 2011).

ANSYS programında analiz yapmak için bazı temel adımları uygulamak gerekmektedir. Bunlar, model oluşturmak veya CAD programlarında çizilmiş olan verileri almak, modelleri basitleştirmek, hataları gidermek, kaliteli mesh oluşturmak, malzeme özelliklerini tanımlamak, sınır şartlarını belirlemek, uygulanacak olan yüklemeleri tanımlamak, çözüm parametrelerini belirlemek, sonuçları incelemek ve yorumlamaktır.

Çalışmada kullanılan yapı çeliği, ANSYS'in hazır malzeme kütüphanesinden seçilmiştir. Bu kütüphane, yapı çeliği gibi yaygın olarak kullanılan malzemeler için doğrulanmış ve standart özellikler sunmaktadır. Bu özellikler arasında malzemenin elastisite modülü, Poisson oranı, akma dayanımı ve yoğunluk gibi parametreler yer alır. Analizlerde başka parametreler dikkate alınmamıştır.

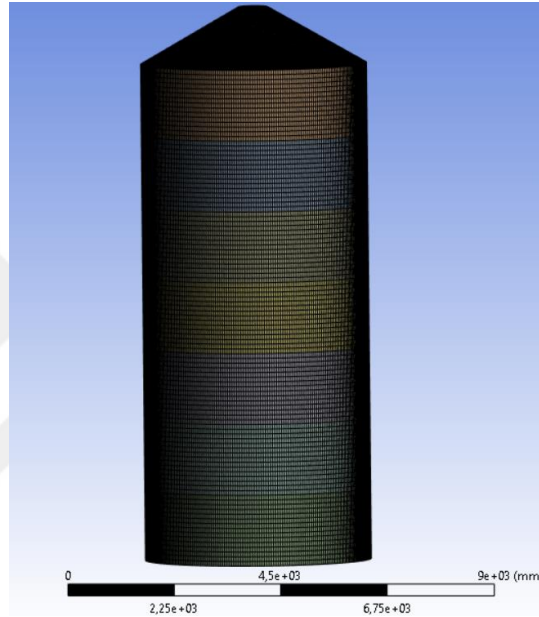
3.5.1 Mesh (Ağ Yapısı)

Mesh, bir yapının veya yüzeyin belirli aralıklarla bölümlere ayrılmış halidir. Analiz sonucuna ulaşabilmek ve diferansiyel denklemin çözümünü sağlamak için mesh işleminin doğru yapılması çok önemlidir. Analiz öncesinde tasarımı yapılan siloların mesh işlemleri ANSYS programında gerçekleştirilmiştir.

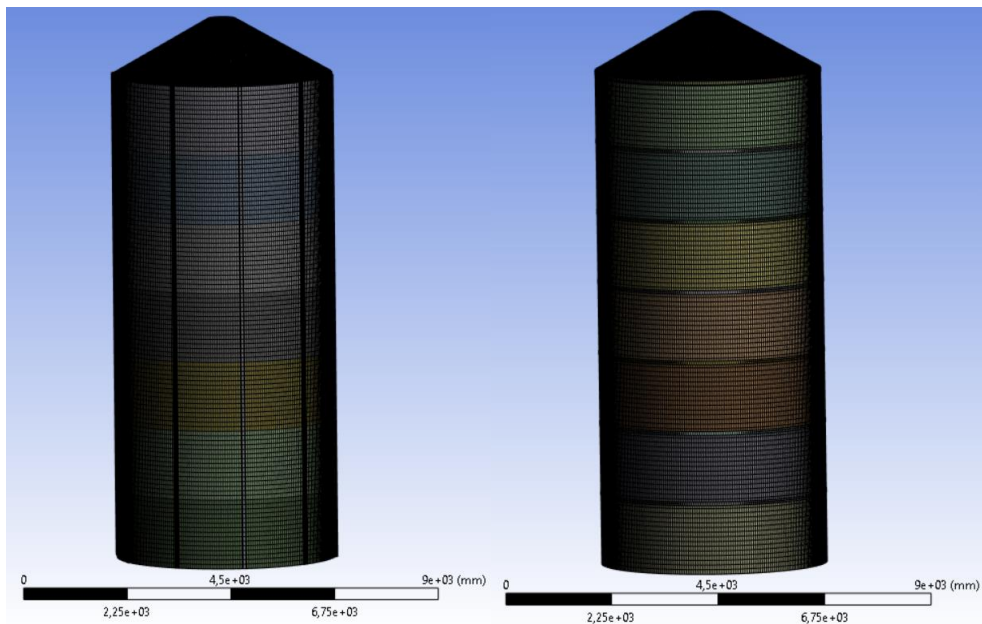
Mesh, analiz edilen yapının geometrisine uygun olarak düzgün bir şekilde dağıtılmalıdır. Çok yoğun bir mesh, çözüm süresini önemli ölçüde artırırken, çok seyrek bir mesh de çözümün doğruluğunu düşürebilir. Kaliteli bir mesh, bu iki faktörü dengeleyerek doğru sonuçlar elde etmeye olanak sağlar.

Analizin doğruluğu ve verimliliği için farklı mesh boyutları ve tipleri denenerek optimum mesh bulunmuştur. Farklı mesh yoğunluklarıyla yapılan analizler sonucunda çözümün değişmediği bir noktada mesh boyutu sabitlenmiştir. Aynı geometri üzerinde farklı yoğunluklarda mesh oluşturularak analiz tekrarlanmıştır. Mesh boyutu küçüldükçe çözüm daha hassas hale gelir, ancak bir noktadan sonra

Çözümde önemli bir değışiklik olmaz. Bu noktaya ulaşıldığında en uygun mesh boyutu seçilmiştir. Farklı eleman tipleri (dörtgen, tetrahedral, hexahedral) kullanılarak çözüm doğruluğu ve çözüm süresi açısından karşılaştırma yapılmıştır. Mesh yoğunluğu ve tipi açısından yapılan bu çalışmalar sonucunda, çözümün doğruluğunu fazla etkilemeyen ama hesaplama süresini minimize eden optimum mesh yapısı belirlenmiştir. Yapılan analizlerde malzemenin her üç boyutu da önemli olduğu ve sac kalınlıkları dikkate alındığı için Solid elemanlar kullanılmıştır.



Şekil 3.4 Silo gövdesinin mesh işlemi



Şekil 3.5 Destek elemanları ve gövdenin mesh işlemi

4. STATİK ANALİZ

Sonlu elemanlarda statik analiz, analiz edilen parçanın üzerine uygulanan yüklerin ve kısıtlamaların, lineer olarak tanımlanmış malzeme özellikleri ile oluşturduğu anlık çözümleri içerir. Statik analizde, parçanın üzerindeki gerilmeler ve deformasyonlar, yüklerin sabit ve değişmeyen olduğu bir durumda hesaplanır. Bu yöntem, dinamik analizde olduğu gibi zaman bağımlı analizler yapmaz; yani sonuçlar, belirli bir zamandaki durumu yansıtan anlık sonuçlardır (Meseli, 2010).

Statik analiz, bir yapı üzerindeki sabit veya zamanla değişmeyen yüklerin etkisini incelemek için kullanılan bir yöntemdir. Silolar, genellikle uzun süreler boyunca sabit bir şekilde dolu veya boş kaldığından, bu tür yüklerin analizi önemli hale gelir. Silo içindeki malzemenin ağırlığı gibi sabit yükler, silo yapısında gerilme, deformasyon ve stabilite üzerinde belirleyici etkilere sahiptir. Statik analiz, silo duvarlarında ve temelinde oluşan gerilme ve deformasyonları hesaplayarak, malzemenin mukavemet sınırlarını aşabilecek kritik bölgeleri tespit etmeye olanak sağlar. Böylece bu bölgelerde daha fazla inceleme yapılabilir veya gerektiğinde güçlendirme çalışmaları planlanabilir. Ayrıca statik analiz, sabit yük durumlarına odaklandığı için dinamik etkileri göz ardı eder ve silo tasarımının güvenli bir şekilde yapılmasına, tehlikeli gerilme bölgelerinin tespitine ve yapısal stabilitenin değerlendirilmesine olanak tanır.

4.1 Von Mises Gerilmeleri ve Mühendislikte Kullanımı

4.1.1 Von Mises Gerilmesi

Von Mises gerilmesi, bir malzemenin akma noktasına ulaşma eğilimini belirlemek için kullanılır. Von Mises akma kriteri, enerji teorisine dayanır ve genellikle şekil değiştirme enerjisi olarak adlandırılır (Budynas ve Nisbett, 2015; Hibbeler, 2017).

4.1.2 Von Mises Kriteri

Von Mises kriteri, enerji bazlı bir akma kriteridir ve genellikle aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$\sigma_v = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \quad (4.1)$$

Burada, σ_1 , σ_2 ve σ_3 ana gerilmelerdir (Hibbeler, 2017).

4.1.3 Matematiksel Formülasyon

Von Mises gerilmesinin türetilmesi, üç eksenli gerilme durumları için yapılır. Genel bir gerilme durumunda, von Mises gerilmesi şu şekilde hesaplanır:

$$\sigma_v = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + (\sigma_{yy} - \sigma_{zz})^2 + (\sigma_{zz} - \sigma_{xx})^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)]} \quad (4.2)$$

Bu formül, üç eksenli gerilme durumlarındaki bileşenler arasındaki ilişkiyi gösterir (Budynas ve Nisbett, 2015; Dieter, 2000).

4.1.4 Von Mises Gerilmesinin Uygulamaları

4.1.4.1 Mühendislikte kullanım alanları

Von Mises gerilmesi, makine mühendisliği, inşaat mühendisliği ve diğer disiplinlerde yaygın olarak kullanılır. Özellikle çelik yapıların tasarımında ve plastik deformasyon analizlerinde kritik bir rol oynar (Hibbeler, 2017).

4.1.4.2 Çelik silo tasarımında von mises gerilmesi

Çelik siloların tasarımında, von Mises gerilmesi, yapının güvenliğini ve dayanıklılığını sağlamak için önemli bir kriterdir. Silo duvarlarının, tabanının ve destek elemanlarının von Mises gerilmesi hesaplanarak, yapının kritik noktaları belirlenir (Budynas ve Nisbett, 2015).

4.1.5 Von Mises Gerilmesinin Hesaplanması

4.1.5.1 Analitik yöntemler

Analitik yöntemler, genellikle basit geometriye sahip yapılar için uygundur. El hesaplamaları ile von Mises gerilmesi, yukarıda verilen formüller kullanılarak hesaplanabilir (Hibbeler, 2017).

4.1.5.2 Numerik yöntemler

Sonlu elemanlar yöntemi (FEM), karmaşık yapılar için von Mises gerilmesinin hesaplanmasında yaygın olarak kullanılır. FEM, yapıların davranışını detaylı bir şekilde analiz etmeyi sağlar (ABAQUS, 2024; ANSYS Inc., 2024).

4.1.5.3 Simülasyon ve yazılımlar

Von Mises gerilmesinin hesaplanması için ANSYS, Abaqus ve SolidWorks gibi yazılımlar kullanılır. Bu yazılımlar, yapıların gerilme dağılımlarını görselleştirerek, mühendislerin daha doğru kararlar almasını sağlar (ABAQUS, 2024; ANSYS Inc., 2024; SolidWorks Corporation, 2024).

4.2 Kuvvet

Kuvvet, bir cismi harekete geçiren, durduran, hızını değiştiren ya da şekil değişikliğine sebep olan etkidir. Kuvvetin şiddeti ve yönü vardır, bu nedenle kuvvet, yalnızca büyüklüğü olan skaler bir nicelik değil, aynı zamanda belirli bir doğrultu ve yönü olan vektörel bir büyüklüktür. Kuvvetin şiddeti, kuvvetin ne kadar güçlü olduğunu ifade ederken, yönü ise kuvvetin hangi doğrultuda etki ettiğini belirtir.

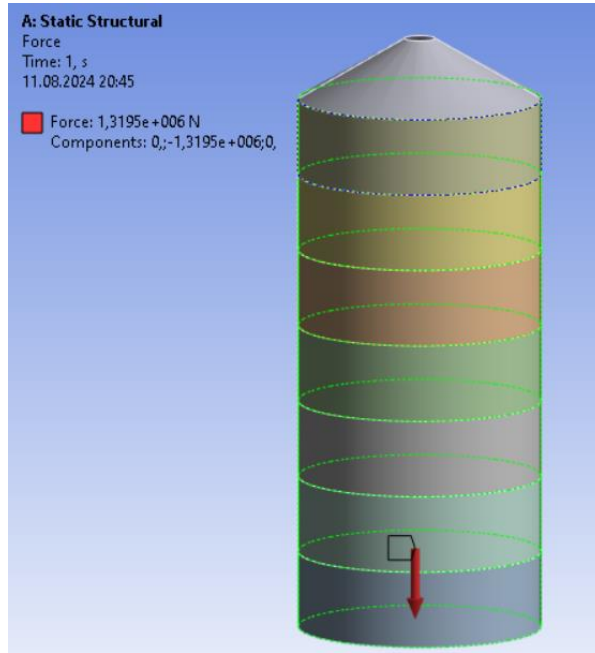
Silo tasarımlarında kuvvetlerin uygulanması, silo yapısının mukavemetini ve stabilitesini değerlendirmek için kritik bir süreçtir. Kuvvetler genellikle tahılın ağırlığı, rüzgar yükleri, deprem yükleri ve diğer dış etkenler gibi çeşitli kaynaklardan gelir.

Silo içindeki tahılın ağırlığı en önemli statik kuvvetlerden biridir. Bu kuvvet, tahılın yoğunluğu ve silo yüksekliği ile orantılıdır. Tahılın ağırlığı, silonun tabanına ve duvarlarına eşit olarak dağılır. Silonun kendisi de önemli bir ağırlık oluşturur. Bu ağırlık, silo malzemesinin yoğunluğuna ve yapının boyutlarına bağlıdır.

Silo tasarımı yapılırken silonun altı sac levhayla kapatılmıştır ve silo tabanının zemine oturduğu bölgeye sabit destek (fixed support) uygulanmıştır. Böylece yapının zeminle tamamen sabit olduğu varsayılmıştır. Silo içerisindeki malzeme, yapı üzerinde önemli yükler oluşturur. Silo içindeki malzemenin ağırlığı düşey yönlü bir kuvvet (Force) olarak uygulanmıştır.

4.3 ANSYS Programında Silo Statik Analizi

Tasarımı yapılan, tüm gövdesinde sac kalınlığı 5 mm olan silonun ANSYS programında statik analizi yapılmıştır. Analiz kapsamında silo ağırlığı, toplam deformasyon, gerinim ve gerilme değerleri karşılaştırılmıştır. Silo, toplam 134.640 kg tahıl depolama kapasitesine sahiptir. Uygulanan yükler silonun iç hacminin tahıl ile doldurulması durumunda elde edilen ağırlık olarak kabul edilmiştir. Statik analiz sırasında siloya düşey yönde 1.319.472 N kuvvet uygulanmıştır. Kar yükü, rüzgar yükü ve deprem yükü gibi kuvvetler bu çalışma sırasında hesaba katılmamıştır.



Şekil 4.1 Siloya uygulanan kuvvet

Belirlenen dış boyutlarda tüm katları 5 milimetrelik sac levhalardan imal edilen bir silo tasarlanmış ve analiz edilmiştir. Yapılan analizde maksimum gerilme değeri 17,47 MPa bulunmuştur. Toplam silo ağırlığı ise 6.182,05 kg olarak hesaplanmıştır. Silolar, ilk katmanlarındaki başlangıç sac kalınlıklarından yardım alınarak kodlanmıştır. Bu silo modeli Silo 5 olarak adlandırılmıştır.

Tablo 4.1 Silo 5 statik analiz sonuçları

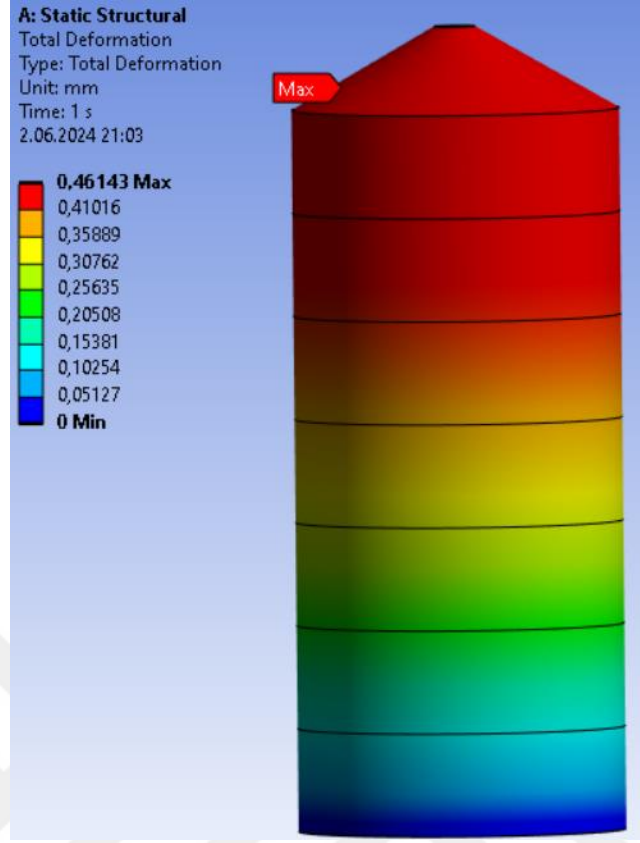
	Kalınlık (mm)	Sac Ağırlıkları (kg)	Silo Gövdesi Ağırlık (kg)	Toplam Deformasyon (mm)	Gerinim (mm/mm)	Gerilme (MPa)
Silo 5	5,0	883,15	6.182,05	0,46143	0,000087	17,47
	5,0	883,15				
	5,0	883,15				
	5,0	883,15				
	5,0	883,15				
	5,0	883,15				
	5,0	883,15				

Optimum silo tasarımını bulmak için Silo 5 referans alınacaktır. Emniyetli gerilme ile uyumu sebebiyle bu silo referans olarak kabul edilmiştir. Tasarlanan diğer silo modelleri Silo 5 ile karşılaştırılacaktır. Tasarlanan silonun emniyet gerilmesi 17-18 MPa aralığında belirlenmiştir. Bu emniyet değerini aşmadan ağırlık azaltımını hedefleyen çeşitli denemeler yapılmıştır.

4.3.1 Toplam Deformasyon

Toplam deformasyon, malzemelerin veya yapıların uygulanan yük ya da kuvvetler altında şeklin boyutlarındaki değişim miktarını ifade eder.

Tasarlanan Silo 5 adlı modelin statik analizi sonucunda elde edilen toplam deformasyon değerleri incelendiğinde, maksimum deformasyonun 0,46143 mm ve minimumun ise 0 mm olduğu belirlenmiştir. Bu sonuçlar, silonun belirli yük koşulları altında nasıl davrandığını ve şekil değişikliklerinin ne kadar olduğunu göstermektedir.

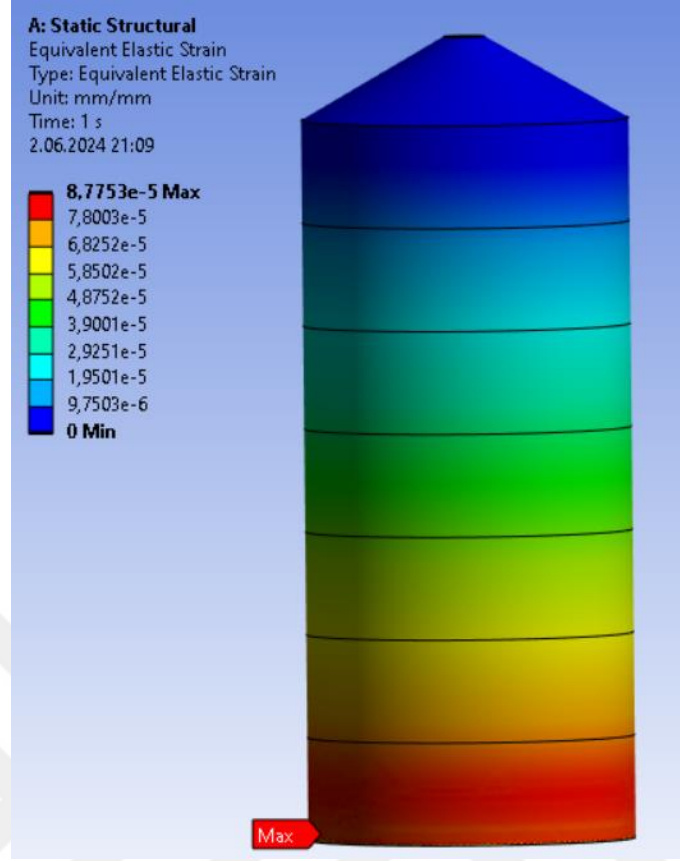


Şekil 4.2 Silo 5 toplam deformasyon değeri

4.3.2 Gerinim

Bir malzemeye uygulanan yük veya gerilim altında malzemenin geçici deformasyon miktarını ifade eder. Gerinim, bir malzemenin birim boyutundaki değişimdir. Malzemelerin yük taşıma kapasitelerini ve deformasyon miktarını anlamak için önemlidir.

Yapılan statik analiz sonucunda, tasarlanan Silo 5 adlı modelde elde edilen gerinim değerleri incelendiğinde, maksimum gerinim değerinin 0,00008775 mm/mm ve minimumun ise 0 olduğu tespit edilmiştir. Bu sonuçlar, silo malzemesinin uygulanan yük altında ne kadar şekil değişikliği gösterdiğini ve malzemenin elastik sınırları içinde kaldığını göstermektedir.



Şekil 4.3 Silo 5 gerinim değeri

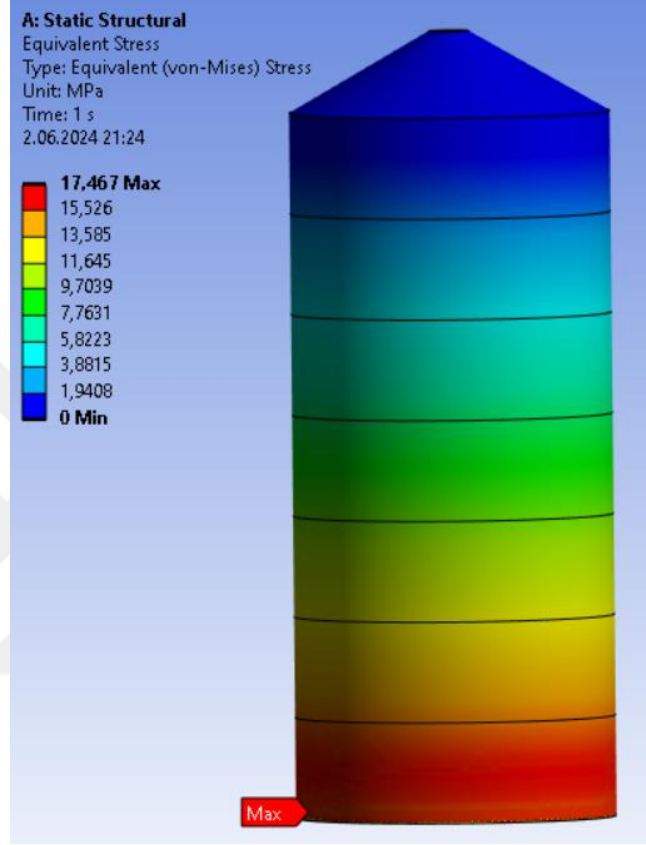
4.3.3 Gerilme

Von mises gerilmesi, malzemenin akma sınırına ne zaman ulaşacağını belirlemek için kullanılır. Gerilme analizi ile malzemelerin aşırı yükler altında nasıl davranacağını anlamak ve emniyeti sağlamak mümkün olur.

Tasarlanan Silo 5 adlı model üzerinde yapılan analizler sonucunda elde edilen gerilme değerleri, malzemenin belirli noktalarda uygulanan kuvvetlere nasıl tepki verdiğini ve içinde bulunduğu durumu ifade etmektedir. Gerilme, bir malzemenin birim alan başına düşen kuvvet miktarını ölçer ve malzemenin mukavemetini değerlendirmede önemli bir parametre olarak kabul edilir.

Statik analiz sonuçlarına göre, tasarlanan siloda maksimum gerilme değeri 17,47 MPa ve minimum gerilme değeri ise 0 olarak belirlenmiştir. Bu sonuçlar, silo malzemesinin belirli yük koşulları altında hangi bölgelerde en yüksek gerilmeyi yaşadığını ve hangi bölgelerde gerilmenin daha düşük olduğunu göstermektedir.

Maksimum gerilme değeri, malzeme dayanımının sınırlarını zorladığı noktayı ifade ederken, minimum gerilme değeri ise o bölgede kuvvetlerin daha az olduğunu veya hiç olmadığını gösterir. Bu analiz sonuçları, silo tasarımının malzeme seçimi ve yapısal güvenlik açısından değerlendirilmesinde önemli bir rol oynamaktadır.



Şekil 4.4 Silo 5 gerilme değeri

4.4 Farklı Kalınlıklarda Tasarlanan Silolar ve Analiz Sonuçları

ANSYS sonlu eleman yazılım programında modellenen Silo 5, tüm gövdesinde 5 mm kalınlığında sac levhalar kullanılarak yapılan analizler sonucunda güvenli bulunmuştur. Ancak silonun toplam ağırlığının fazla olması, yapılan analizlerin sonuçlarını etkileyen önemli bir faktördür. Analiz sonuçları incelendiğinde, silonun her katında aynı kalınlıkta sac kullanılmasının gerekli olmadığı görülmüştür.

Bu nedenle, silonun ağırlığını azaltmak amacıyla farklı sac kalınlıklarında yeni tasarımlar yapılacak ve bu tasarımların detaylı analizleri yapılacaktır. Yeni tasarımlar, güvenlik standartlarına uygun olarak hafifletilmiş siloları içerecek ve bu

siloların statik analizleri, ANSYS yazılımı kullanılarak gerçekleştirilecektir. Bu süreç, silo tasarımının maliyet-etkinliğini artırmayı ve yapısal performansını optimize etmeyi hedeflemektedir.

Sonuç olarak, yapılan ilk analizler doğrultusunda elde edilen veriler, silo tasarımında kullanılan malzeme ve kalınlık seçimlerinin gözden geçirilmesi gerektiğini ortaya koymuştur. Yeni tasarımların başarıyla tamamlanmasıyla, silonun hem güvenlik hem de ekonomik açıdan daha uygun hale getirilmesi planlanmaktadır.

4.4.1 Sac Kalınlığı 5 mm ile Başlayan Silolar

Silo gövdesinde bulunan katlarda farklı kalınlıklar kullanılarak modellenen ve analizleri yapılan siloların, analiz sonuçları aşağıdaki tablolarda verilmiştir. Analiz sonuçlarından sac kalınlıkları değiştirildiğinde de emniyetli silolar elde edilebildiği anlaşılmaktadır.

Tablo 4.2 Silo 5.1 statik analiz sonuçları

	Kalınlık (mm)	Sac Ağırlıkları (kg)	Silo Gövdesi Ağırlık (kg)	Toplam Deformasyon (mm)	Gerinim (mm/mm)	Gerilme (MPa)
Silo 5.1	2,0	353,25	4.327,35	0,59660	0,000088	17,47
	2,5	441,55				
	3,0	529,90				
	3,5	618,20				
	4,0	706,50				
	4,5	794,80				
	5,0	883,15				

Tablo 4.3 Silo 5.2 statik analiz sonuçları

	Kalınlık (mm)	Sac Ağırlıkları (kg)	Silo Gövdesi Ağırlık (kg)	Toplam Deformasyon (mm)	Gerinim (mm/mm)	Gerilme (MPa)
Silo 5.2	1,5	264,95	3.974,10	0,64995	0,000088	17,47
	2,0	353,25				
	2,5	441,55				
	3,0	529,90				
	4,0	706,50				
	4,5	794,80				
	5,0	883,15				

Tablo 4.4 Silo 5.3 statik analiz sonuçları

	Kalınlık (mm)	Sac Ağırlıkları (kg)	Silo Gövdesi Ağırlık (kg)	Toplam Deformasyon (mm)	Gerinim (mm/mm)	Gerilme (MPa)
Silo 5.3	1,5	264,95	3.797,50	0,68873	0,000088	17,60
	1,5	264,95				
	2,5	441,55				
	3,0	529,90				
	3,5	618,20				
	4,5	794,80				
	5,0	883,15				

4.4.2 Sac Kalınlığı 4 mm ile Başlayan Silolar

Silonun ilk katında kullanılan sac kalınlığı 4 mm'ye indirilmiş ve bu yeni tasarımlar ANSYS programı kullanılarak detaylı bir şekilde analiz edilmiştir. Yapılan analizlerde, sac levha kalınlıkları üst katmanlara doğru kademeli olarak inceltildiği için siloların gerilme değerleri referans değer 17,47 MPa'nın üzerine çıkmış ve bu durum üst katmanlarda gerilme ve deformasyon değerlerinin artmasına sebep olmuştur.

Bu sonuçlar üzerine, emniyet değerini korumak amacıyla silolara destek elemanları eklenmiştir. Destek elemanları kullanılarak yapılan düzenlemeler sayesinde, gerilme değerleri emniyetli seviyelere çekilmiş ve siloların güvenliği sağlanmıştır. Yapılan düzenlemelerin ardından, analiz sonuçları aşağıdaki tablolarda detaylı olarak sunulmuştur.

Bu süreç, silo tasarımında yapısal güvenlik açısından kritik olan gerilme değerlerinin kontrol altına alınmasını ve uygun güvenlik önlemlerinin alınmasını sağlamıştır.

Tablo 4.5 Silo 4 statik analiz sonuçları

	Kalınlık (mm)	Sac Ağırlıkları (kg)	Silo Gövdesi Ağırlık (kg)	Toplam Deformasyon (mm)	Gerinim (mm/mm)	Gerilme (MPa)
Silo 4	4,0	706,50	4.945,50	0,58683	0,000109	21,78
	4,0	706,50				
	4,0	706,50				
	4,0	706,50				
	4,0	706,50				
	4,0	706,50				
	4,0	706,50				

Tüm gövdesi 4 mm sac levhalardan oluşan Silo 4 adlı modelin analizleri yapıldığında istenen silo ağırlığı hedefine ulaşılammıştır. Bu yüzden destek elemanları eklenip emniyetli hale getirmek yerine silo gövdesinde ki katlarda sac kalınlıkları azaltılarak yeni silolar tasarlanmış ve analizleri yapılmıştır.

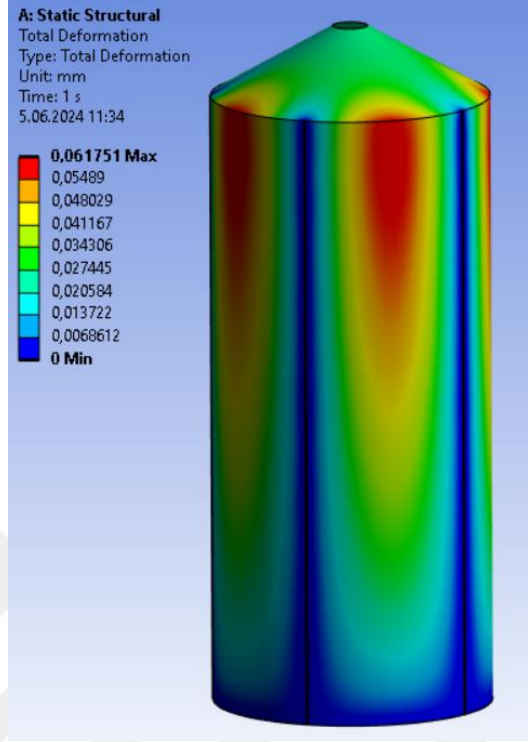
Tasarlanan yeni silo modelleri aşağıdaki tablolarda sunulmuştur.

Tablo 4.6 Silo 4.1 statik analiz sonuçları

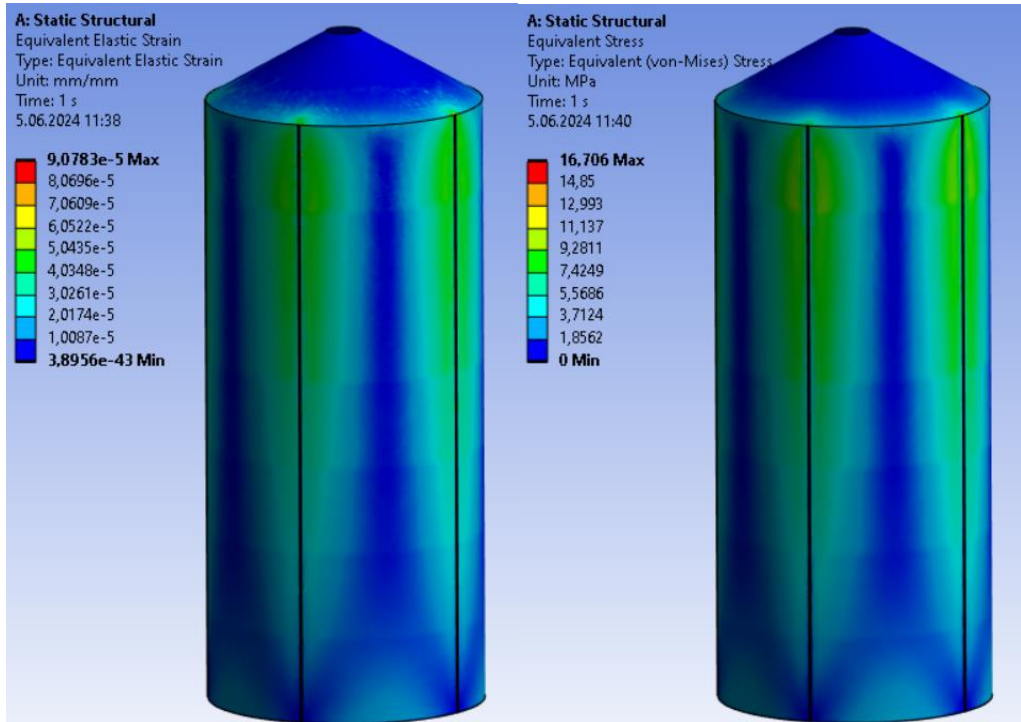
Silo 4.1	Kalınlık (mm)	Sac Ağırlıkları (kg)		Silo Gövdesi Ağırlık (kg)	Toplam Deformasyon (mm)	Gerinim (mm/mm)	Gerilme (MPa)
	1,5	264,95		3.267,60	0,79413	0,000109	21,77
	2,0	353,25					
	2,0	353,25					
	2,5	441,55					
	3,0	529,90					
	3,5	618,20					
	4,0	706,50					
Silo No	Destek Elemanı	Adet	Kg	Toplam Silo Ağırlık (kg)	Toplam Deformasyon (mm)	Gerinim (mm/mm)	Gerilme (MPa)
1	NPU 50	5	202,65	3.470,25	0,06014	0,000094	15,87
2	NPU 50	10	405,30	3.672,90	0,01359	0,000037	6,46
3	NPU 50	15	607,95	3.875,55	0,00517	0,000024	4,70
4	NPU 30	5	91,35	3.358,95	0,06175	0,000091	16,71
5	NPU 30	10	182,70	3.450,30	0,01416	0,000044	8,39
6	NPU 30	15	274,05	3.541,65	0,00526	0,000035	6,95
7	Lama 6x80 mm	7	394,17	3.661,77	0,00531	0,000014	2,86
8	Lama 6x80 mm	14	788,34	4.055,94	0,00111	0,000006	1,21
9	Lama 5x50 mm	7	205,31	3.472,91	0,00570	0,000015	2,93
10	Lama 5x50 mm	14	410,62	3.678,22	0,00124	0,000007	1,27

Tasarlanan Silo 4.1 adlı modeller arasında yapılan değerlendirmeler sonucunda, optimum silo tasarımının 4 numaralı silo olduğu belirlenmiştir. Bu silo tasarımında (Silo 4.1-4) , gövde için 5 adet NPU 30 profil kullanılmış ve silonun toplam ağırlığı

3.358,95 kg olarak hesaplanmıştır. Destek elemanları kullanıldığında yapılan statik analizler sonucunda, silonun güvenli olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 4.5 Silo 4.1-4 numaralı silo toplam deformasyon değeri

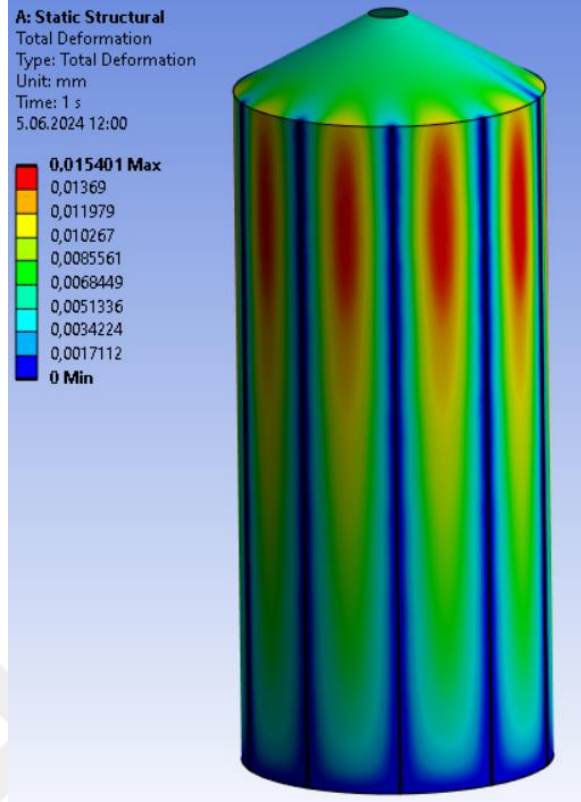


Şekil 4.6 Silo 4.1-4 numaralı silo gerinim ve gerilme değerleri

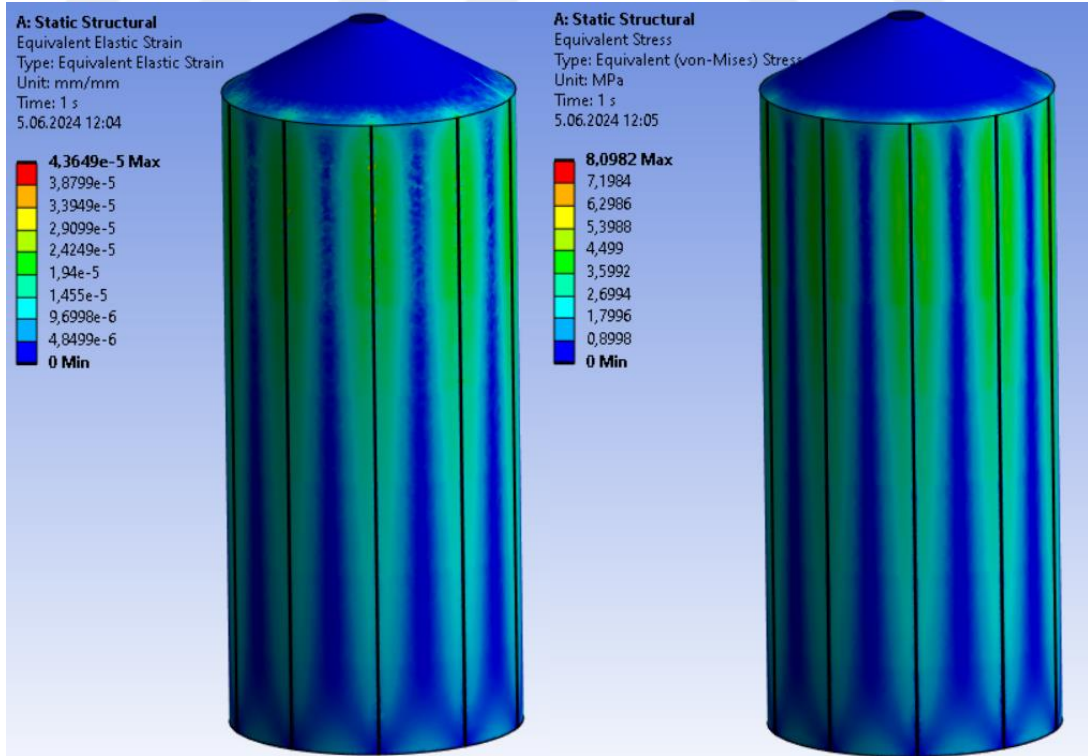
Tablo 4.7 Silo 4.2 statik analiz sonuçları

Silo 4.2	Kalınlık (mm)	Sac Ağırlıkları (kg)		Silo Gövdesi Ağırlık (kg)	Toplam Deformasyon (mm)	Gerinim (mm/mm)	Gerilme (MPa)
	1,5	264,95		3.179,30	0,81993	0,000125	25
	1,5	264,95					
	2,0	353,25					
	2,5	441,55					
	3,0	529,90					
	3,5	618,20					
	4,0	706,50					
Silo No	Destek Elemanı	Adet	Kg	Toplam Silo Ağırlık (kg)	Toplam Deformasyon (mm)	Gerinim (mm/mm)	Gerilme (MPa)
1	NPU 50	5	202,65	3.381,95	0,07820	0,000085	14,39
2	NPU 50	10	405,30	3.584,6	0,01512	0,000043	7,69
3	NPU 50	15	607,95	3.787,25	0,00907	0,000032	4,43
4	NPU 30	5	91,35	3.270,65	0,07902	0,000121	21,05
5	NPU 30	10	182,70	3.362,00	0,01540	0,000045	8,10
6	NPU 30	15	274,05	3.453,35	0,00934	0,000032	4,78
7	Lama 6x80 mm	7	394,17	3.573,47	0,00565	0,000015	2,93
8	Lama 6x80 mm	14	788,34	3.967,64	0,00114	0,000006	1,15
9	Lama 5x50 mm	7	205,31	3.384,61	0,00593	0,000016	2,96
10	Lama 5x50 mm	14	410,62	3.589,92	0,00127	0,000007	1,27

Tasarlanan Silo 4.2 adlı modeller arasında yapılan değerlendirme sonucunda, optimum silo tasarımının 5 numaralı silo olduğu belirlenmiştir. Bu silo tasarımında (Silo 4.2-5), gövde için 10 adet NPU 30 profil kullanılmış ve silonun toplam ağırlığı 3.362 kg olarak hesaplanmıştır. Destek elemanları kullanıldığında yapılan statik analizler sonucunda, silonun güvenli olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 4.7 Silo 4.2-5 numaralı silo toplam deformasyon değeri

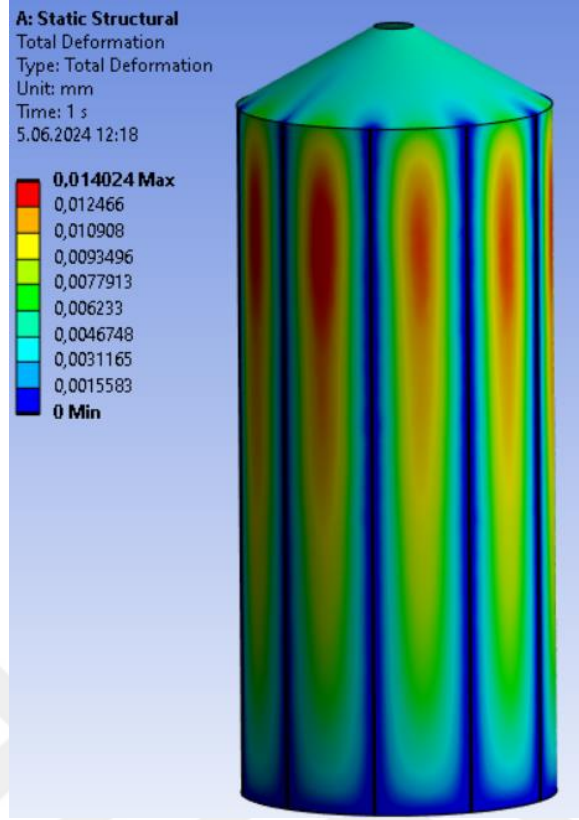


Şekil 4.8 Silo 4.2-5 numaralı silo gerinim ve gerilme değerleri

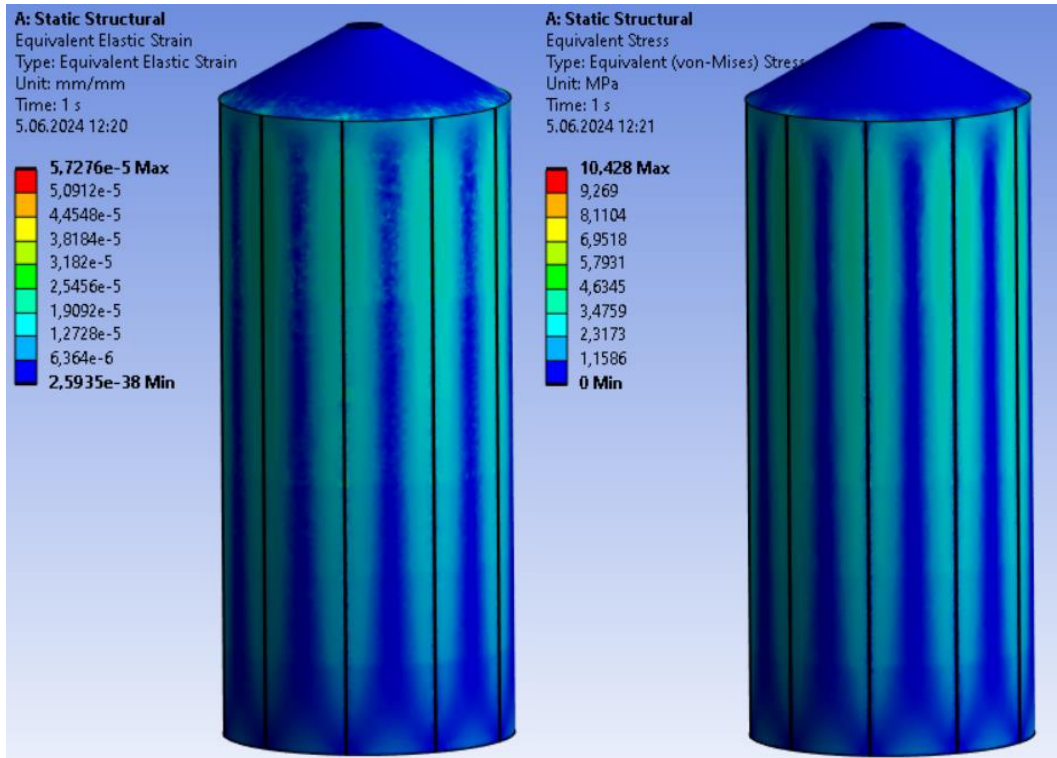
Tablo 4.8 Silo 4.3 statik analiz sonuçları

Silo 4.3	Kalınlık (mm)	Sac Ağırlıkları (kg)		Silo Gövdesi Ağırlık (kg)	Toplam Deformasyon (mm)	Gerinim (mm/mm)	Gerilme (MPa)
	1,5	264,95		2.914,35	0,90387	0,000124	24,76
	1,5	264,95					
	2,0	353,25					
	2,0	353,25					
	2,5	441,55					
	3,0	529,90					
	4,0	706,50					
Silo No	Destek Elemanı	Adet	Kg	Toplam Silo Ağırlık (kg)	Toplam Deformasyon (mm)	Gerinim (mm/mm)	Gerilme (MPa)
1	NPU 50	5	202,65	3.117,00	0,06505	0,000086	15,73
2	NPU 50	10	405,30	3.319,65	0,01516	0,000040	7,48
3	NPU 50	15	607,95	3.522,30	0,00609	0,000021	3,66
4	NPU 30	5	91,35	3.005,70	0,06678	0,000089	17,63
5	NPU 30	10	182,70	3.097,05	0,01402	0,000057	10,43
6	NPU 30	15	274,05	3.188,40	0,00680	0,000031	5,46
7	Lama 6x80 mm	7	394,17	3.308,52	0,00570	0,000014	2,94
8	Lama 6x80 mm	14	788,34	3.702,69	0,00116	0,000006	1,16
9	Lama 5x50 mm	7	205,31	3.119,66	0,00059	0,000015	2,98
10	Lama 5x50 mm	14	410,62	3.324,97	0,00127	0,000006	1,22

Tasarlanan Silo 4.3 adlı modeller arasında yapılan değerlendirme sonucunda, optimum silo tasarımının 5 numaralı silo olduğu belirlenmiştir. Bu silo tasarımında (Silo 4.3-5), gövde için 10 adet NPU 30 profil kullanılmış ve silonun toplam ağırlığı 3.097,05 kg olarak hesaplanmıştır. Destek elemanları kullanıldığında yapılan statik analizler sonucunda, silonun güvenli olduğu sonucuna ulaşılmıştır.



Şekil 4.9 Silo 4.3-5 numaralı silo toplam deformasyon değeri

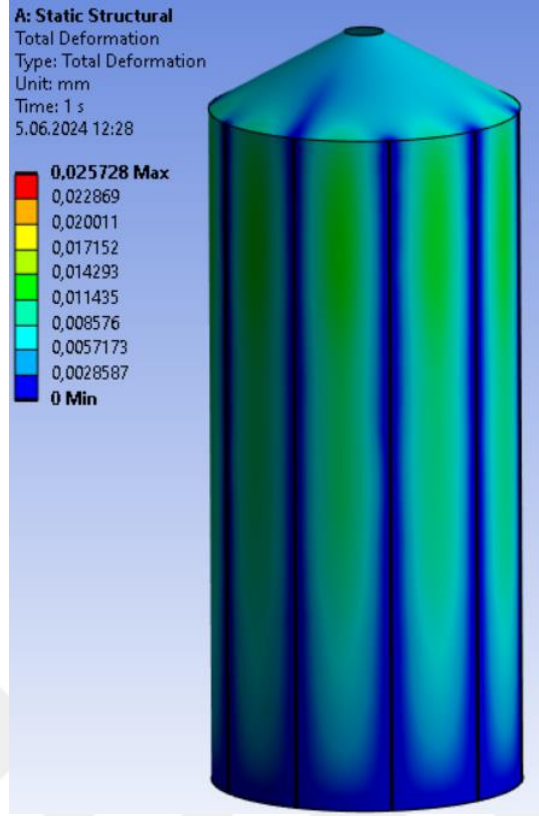


Şekil 4.10 Silo 4.3-5 numaralı silo gerinim ve gerilme değerleri

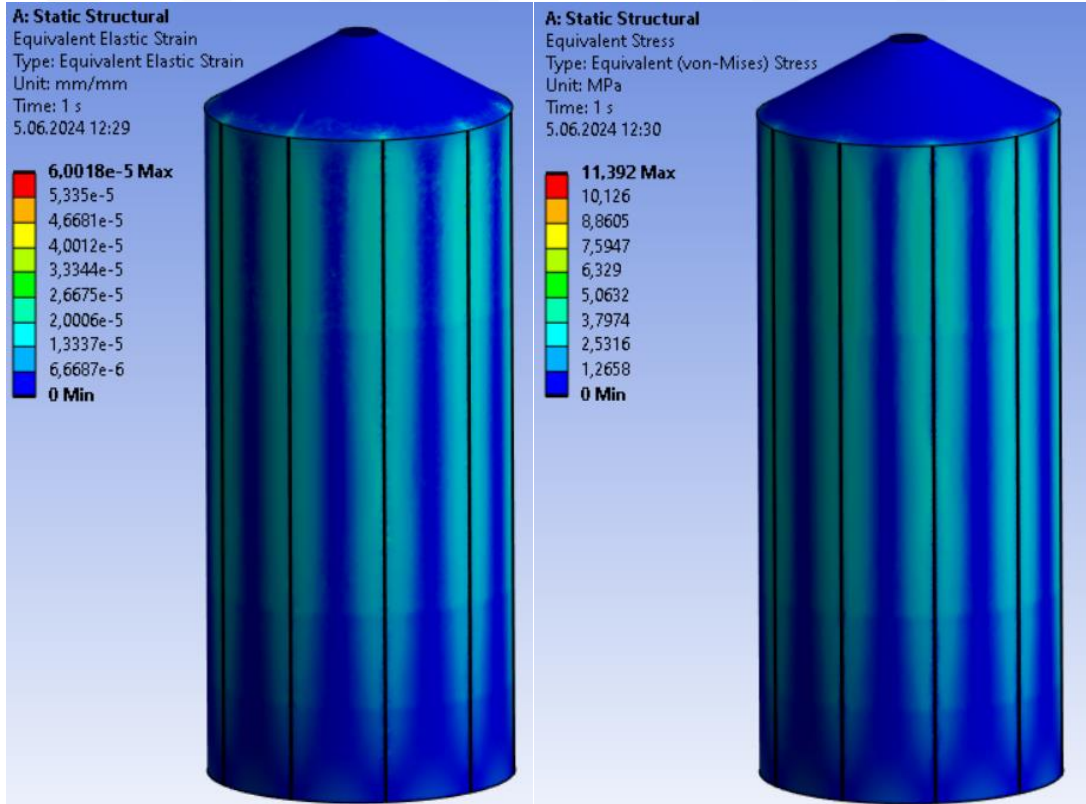
Tablo 4.9 Silo 4.4 statik analiz sonuçları

Silo 4.4	Kalınlık (mm)	Sac Ağırlıkları (kg)		Silo Gövdesi Ağırlık (kg)	Toplam Deformasyon (mm)	Gerinim (mm/mm)	Gerilme (MPa)
	1,5	264,95		2.826,05	0,94631	0,000153	30,56
	1,5	264,95					
	2,0	353,25					
	2,0	353,25					
	2,0	353,25					
	3,0	529,90					
4,0	706,50						
Silo No	Destek Elemanı	Adet	Kg	Toplam Silo Ağırlık (kg)	Toplam Deformasyon (mm)	Gerinim (mm/mm)	Gerilme (MPa)
1	NPU 50	5	202,65	3.028,7	0,06539	0,000094	17,79
2	NPU 50	10	405,30	3.231,35	0,01509	0,000039	7,43
3	NPU 50	15	607,95	3.434,00	0,00676	0,000023	4,18
4	NPU 30	5	91,35	2.917,40	0,00669	0,000094	18,46
5	NPU 30	10	182,70	3.008,75	0,02572	0,000060	11,39
6	NPU 30	15	274,05	3.100,10	0,00662	0,000030	4,72
7	Lama 6x80 mm	7	394,17	3.220,22	0,00570	0,000015	2,92
8	Lama 6x80 mm	14	788,34	3.614,39	0,00114	0,000006	1,12
9	Lama 5x50 mm	7	205,31	3.031,36	0,00591	0,000015	2,98
10	Lama 5x50 mm	14	410,62	3.236,67	0,00131	0,000007	1,30

Tasarlanan Silo 4.4 adlı modeller arasında yapılan değerlendirme sonucunda, optimum silo tasarımının 5 numaralı silo olduğu belirlenmiştir. Bu silo tasarımında (Silo 4.4-5), gövde için 10 adet NPU 30 profil kullanılmış ve silonun toplam ağırlığı 3.008,75 kg olarak hesaplanmıştır. Destek elemanları kullanıldığında yapılan statik analizler sonucunda, silonun güvenli olduğu doğrulanmıştır. Referans emniyetli gerilmenin (17-18 MPa) altında 11,39 MPa değeri ile bu grubun en hafif silosu tasarlanmıştır.



Şekil 4.11 Silo 4.4-5 numaralı silo toplam deformasyon değeri



Şekil 4.12 Silo 4.4-5 numaralı silo gerinim ve gerilme değerleri

4.4.3 Sac Kalınlığı 3 mm ile Başlayan Silolar

Bu çalışmanın hedeflerinden biri, silo tasarımında kullanılan malzemelerin optimize edilmesi ve toplam silo ağırlığının minimum seviyeye indirilmesidir. Bu doğrultuda, tasarlanan silonun ilk katında bulunan sac kalınlığı 3 mm'ye düşürülmüş ve bu yeni tasarımlar ANSYS programı kullanılarak detaylı bir şekilde analiz edilmiştir. Yapılan analizlerde, bazı siloların gerilme değerlerinin 17-18 MPa'nın üzerine çıktığı ve bu durumun güvenlik açısından kabul edilemez olduğu belirlenmiştir.

Bu tespit üzerine, güvenlik önlemlerini artırmak amacıyla silolara destek elemanları eklenmiştir. Destek elemanları kullanılarak yapılan düzenlemeler sayesinde, gerilme değerleri emniyetli seviyelere çekilmiş ve siloların güvenliği sağlanmıştır. Yapılan analizlerin sonuçları, yeni tasarımın güvenlik standartlarını karşılayacak şekilde optimize edildiğini ve yapısal dayanıklılığının artırıldığını göstermektedir.

Tasarlanan yeni silo modellerinin statik analiz sonuçları aşağıdaki tablolarda verilmiştir.

Tablo 4.10 Silo 3 statik analiz sonuçları

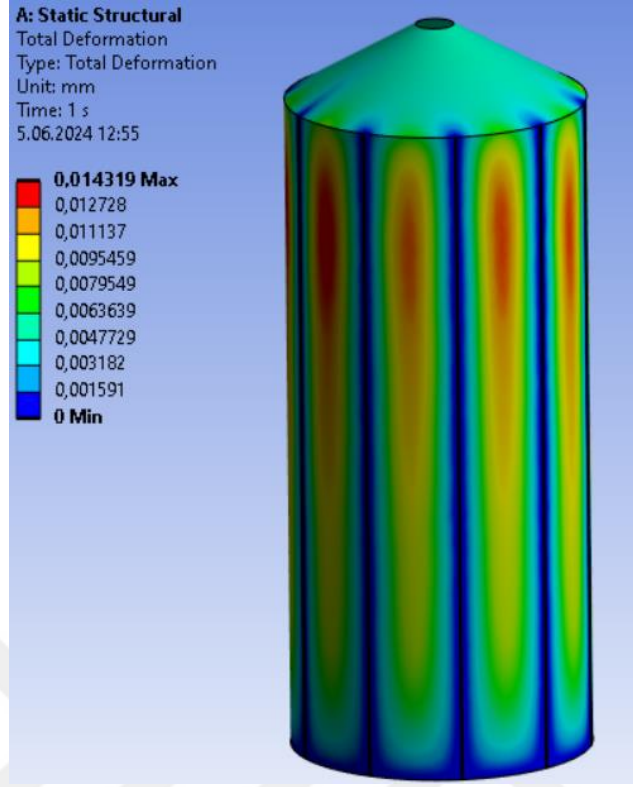
	Kalınlık (mm)	Sac Ağırlıkları (kg)	Silo Gövdesi Ağırlık (kg)	Toplam Deformasyon (mm)	Gerinim (mm/mm)	Gerilme (MPa)
Silo 3	3,0	529,90	3.709,30	0,76766	0,000141	28,22
	3,0	529,90				
	3,0	529,90				
	3,0	529,90				
	3,0	529,90				
	3,0	529,90				
	3,0	529,90				

Tasarlanan Silo 3 adlı modelin tüm gövdesinin 3 mm kalınlığında sac levhadan yapıldığı ve yapılan analizler sonucunda belirlenen silo ağırlığı hedefine ulaşamadığı tespit edilmiştir. Bu sebeple, destek elemanları eklemek yerine silonun katlarında kullanılan sac kalınlıklarını azaltarak yeni tasarımlar yapılmış ve bu yeni tasarımların analizleri gerçekleştirilmiştir. Yeni tasarımlarda kullanılan daha ince sac kalınlıkları, silonun toplam ağırlığını istenen hedef değerlere yaklaştırmayı mümkün kılmıştır.

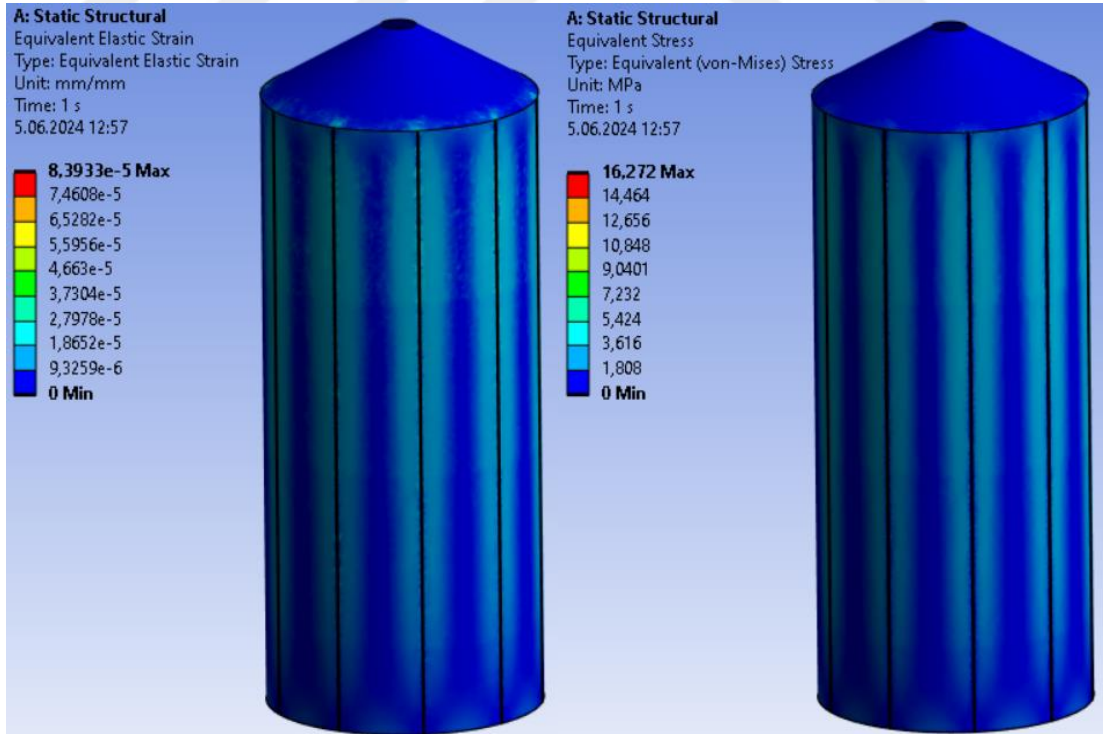
Tablo 4.11 Silo 3.1 statik analiz sonuçları

Silo 3.1	Kalınlık (mm)	Sac Ağırlıkları (kg)		Silo Gövdesi Ağırlık (kg)	Toplam Deformasyon (mm)	Gerinim (mm/mm)	Gerilme (MPa)
	1,5	265,95		2.649,40	0,98776	0,000151	30,11
	1,5	265,95					
	2,0	353,25					
	2,0	353,25					
	2,5	441,55					
	2,5	441,55					
3,0	529,90						
Silo No	Destek Elemanı	Adet	Kg	Toplam Silo Ağırlık (kg)	Toplam Deformasyon (mm)	Gerinim (mm/mm)	Gerilme (MPa)
1	NPU 50	5	202,65	2.852,05	0,06557	0,000104	20,18
2	NPU 50	10	405,30	3.054,70	0,01289	0,000047	8,35
3	NPU 50	15	607,95	3.257,35	0,00894	0,000030	4,34
4	NPU 30	5	91,35	2.740,75	0,07964	0,000162	26,66
5	NPU 30	10	182,70	2.832,10	0,01431	0,000084	16,27
6	NPU 30	15	274,05	2.923,45	0,00572	0,000027	5,47
7	Lama 6x80 mm	7	394,17	3.043,57	0,00570	0,000015	2,92
8	Lama 6x80 mm	14	788,34	3.437,74	0,00114	0,000006	1,12
9	Lama 5x50 mm	7	205,31	2.854,71	0,00591	0,000015	2,98
10	Lama 5x50 mm	14	410,62	3.060,02	0,00129	0,000007	1,30

Tasarlanan Silo 3.1 adlı modeller arasında yapılan değerlendirme sonucunda, optimum silo tasarımının 5 numaralı silo olduğu belirlenmiştir. Bu silo tasarımında (Silo 3.1-5), gövde için 10 adet NPU 30 profil kullanılmış ve silonun toplam ağırlığı 2.832,1 kg olarak hesaplanmıştır. Destek elemanları kullanıldığında yapılan statik analizler sonucunda, silonun güvenli olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 4.13 Silo 3.1-5 numaralı silo toplam deformasyon değeri

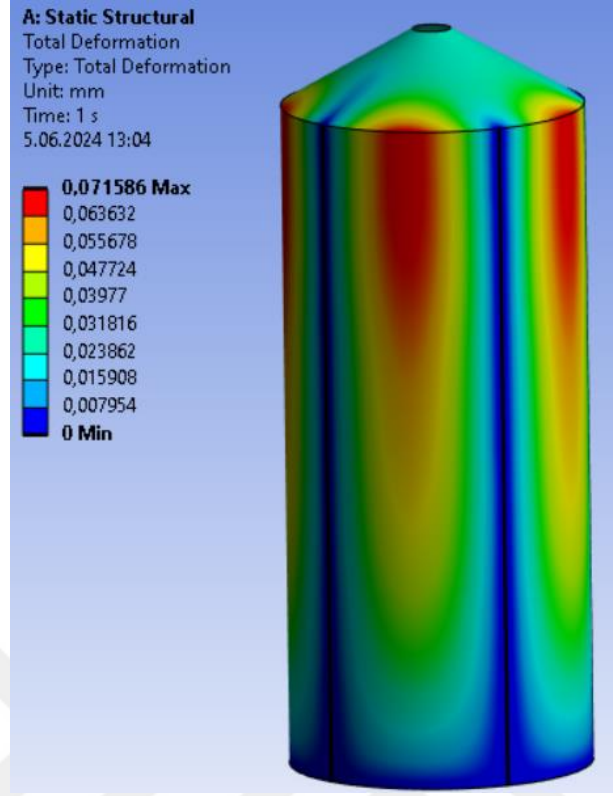


Şekil 4.14 Silo 3.1-5 numaralı silo gerinim ve gerilme değerleri

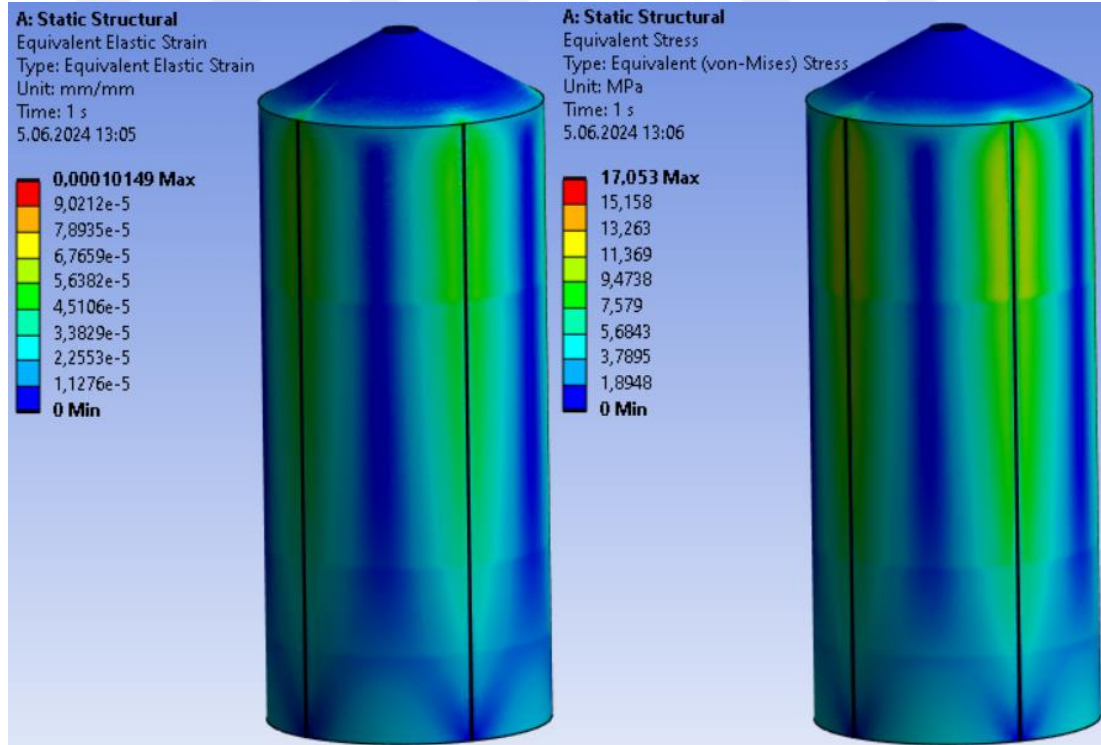
Tablo 4.12 Silo 3.2 statik analiz sonuçları

Silo 3.2	Kalınlık (mm)	Sac Ağırlıkları (kg)		Silo Gövdesi Ağırlık (kg)	Toplam Deformasyon (mm)	Gerinim (mm/mm)	Gerilme (MPa)
	1,5	265,95		2.561,10	1,03020	0,000154	30,86
	1,5	265,95					
	2,0	353,25					
	2,0	353,25					
	2,0	353,25					
	2,5	441,55					
3,0	529,90						
Silo No	Destek Elemanı	Adet	Kg	Toplam Silo Ağırlık (kg)	Toplam Deformasyon (mm)	Gerinim (mm/mm)	Gerilme (MPa)
1	NPU 50	5	202,65	2.763,75	0,07672	0,000081	16,15
2	NPU 50	10	405,30	2.966,40	0,01938	0,000034	6,53
3	NPU 50	15	607,95	3.169,05	0,00679	0,000023	4,17
4	NPU 30	5	91,35	2.652,45	0,07158	0,000101	17,05
5	NPU 30	10	182,70	2.743,80	0,01669	0,000045	8,92
6	NPU 30	15	274,05	2.835,15	0,00813	0,000023	4,27
7	Lama 6x80 mm	7	394,17	2.955,27	0,00635	0,000017	3,39
8	Lama 6x80 mm	14	788,34	3.349,44	0,00133	0,000007	1,50
9	Lama 5x50 mm	7	205,31	2.766,41	0,00658	0,000017	3,46
10	Lama 5x50 mm	14	410,62	2.971,72	0,00146	0,000008	1,53

Tasarlanan Silo 3.2 adlı modeller arasında yapılan değerlendirme sonucunda, optimum silo tasarımının 4 numaralı silo olduğu belirlenmiştir. Bu silo tasarımında (Silo 3.2-4), gövde için 5 adet NPU 30 profil kullanılmış ve silonun toplam ağırlığı 2.652,45 kg olarak hesaplanmıştır. Destek elemanları kullanıldığında yapılan statik analizler sonucunda, silonun güvenli olduğu sonucuna ulaşılmıştır.



Şekil 4.15 Silo 3.2-4 numaralı silo toplam deformasyon değeri

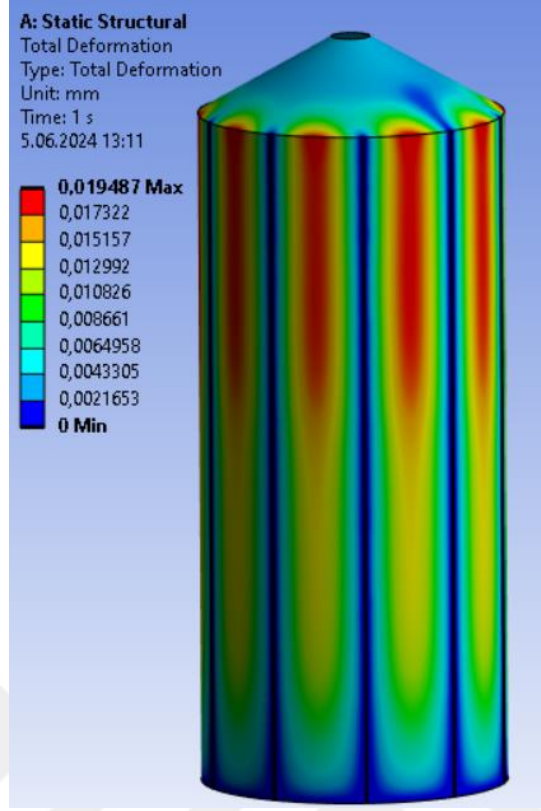


Şekil 4.16 Silo 3.2-4 numaralı silo gerinim ve gerilme değerleri

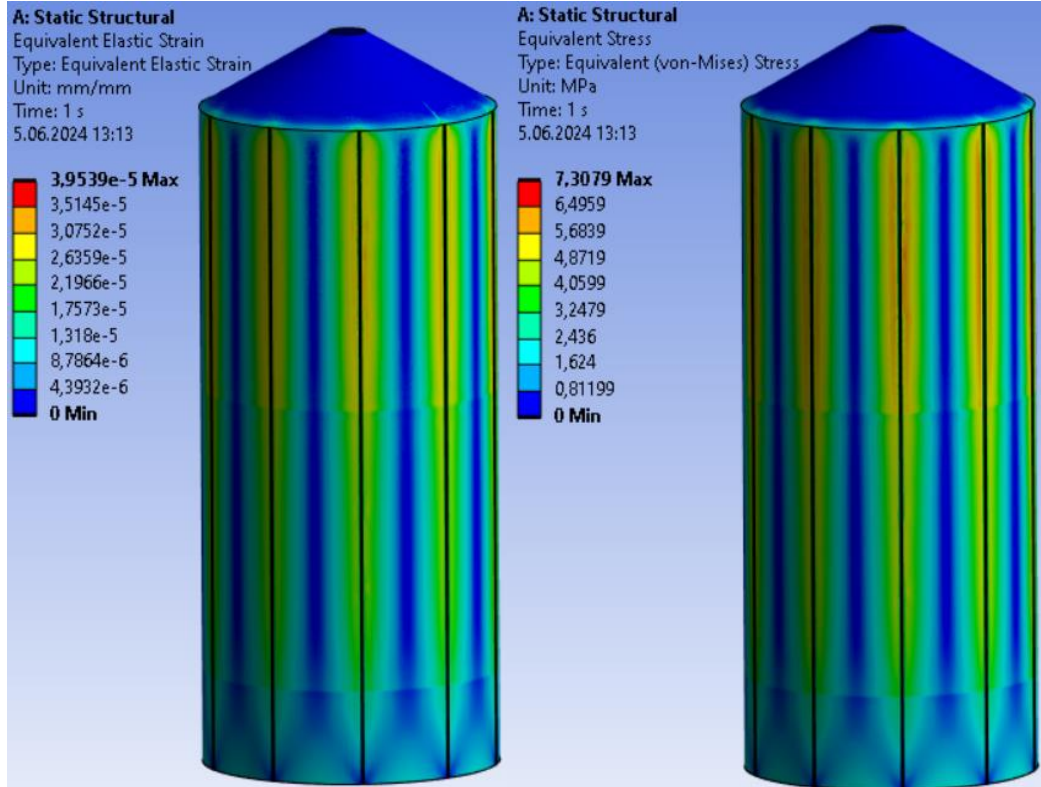
Tablo 4.13 Silo 3.3 statik analiz sonuçları

Silo 3.3	Kalınlık (mm)	Sac Ağırlıkları (kg)		Silo Gövdesi Ağırlık (kg)	Toplam Deformasyon (mm)	Gerinim (mm/mm)	Gerilme (MPa)
	1,5	265,95		2.384,50	1,12140	0,000185	36,97
	1,5	265,95					
	1,5	265,95					
	2,0	353,25					
	2,0	353,25					
	2,0	353,25					
3,0	529,90						
Silo No	Destek Elemanı	Adet	Kg	Toplam Silo Ağırlık (kg)	Toplam Deformasyon (mm)	Gerinim (mm/mm)	Gerilme (MPa)
1	NPU 50	5	202,65	2.587,15	0,07864	0,000083	16,67
2	NPU 50	10	405,30	2.789,80	0,01939	0,000033	6,56
3	NPU 50	15	607,95	2.992,45	0,00663	0,000021	3,32
4	NPU 30	5	91,35	2.475,85	0,07912	0,000093	18,02
5	NPU 30	10	182,70	2.567,20	0,01948	0,000040	7,31
6	NPU 30	15	274,05	2.658,55	0,00803	0,000023	4,26
7	Lama 6x80 mm	7	394,17	2.778,67	0,00635	0,000017	3,42
8	Lama 6x80 mm	14	788,34	3.172,84	0,00132	0,000007	1,45
9	Lama 5x50 mm	7	205,31	2.589,81	0,00659	0,000017	3,48
10	Lama 5x50 mm	14	410,62	2.795,12	0,00146	0,000008	1,57

Tasarlanan Silo 3.3 adlı modeller arasında yapılan değerlendirme sonucunda, optimum silo tasarımının 5 numaralı silo olduğu belirlenmiştir. Bu silo tasarımında (Silo 3.3-5), gövde için 10 adet NPU 30 profil kullanılmış ve silonun toplam ağırlığı 2.567,2 kg olarak hesaplanmıştır. Destek elemanları kullanıldığında yapılan statik analizler sonucunda, silonun güvenli olduğu doğrulanmıştır.



Şekil 4.17 Silo 3.3-5 numaralı silo toplam deformasyon değeri

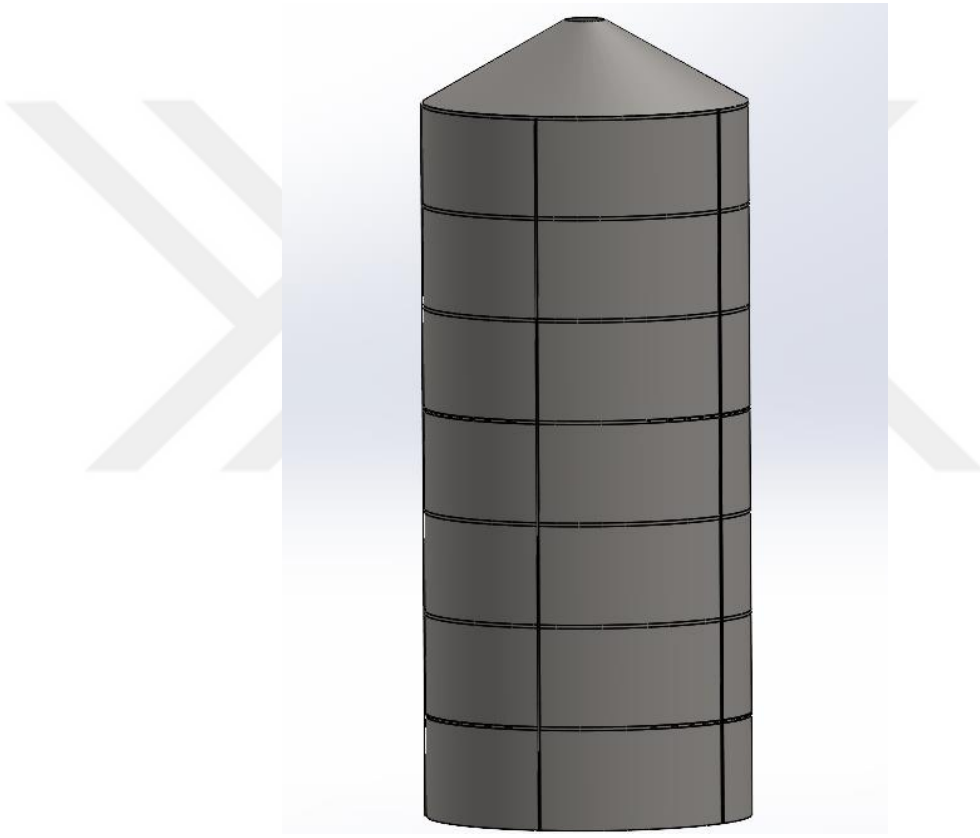


Şekil 4.18 Silo 3.3-5 numaralı silo gerinim ve gerilme değerleri

4.4.3.1 Silo 3.3 gövde kalınlıkları için yeni silo modelleri

4.4.3.1.1 Birinci model

Silo 3.3'ün gövde kalınlıkları için yeni bir tasarım geliştirilmiştir. Bu tasarım sürecinde, silo gövdesine ek destek sağlamak amacıyla 7 adet 5x50 mm lama demiri ve 5 adet NPU 30 profil kullanılmıştır. Tasarım, SolidWorks programı kullanılarak detaylı bir şekilde modellenmiştir. Modellenen silo, Şekil 4.19' da gösterilmiştir.



Şekil 4.19 Silo 3.3-11 numaralı silo modeli

Bu yeni tasarım, önceki versiyonlardan farklı olarak, NPU 30 profil ve 5x50 mm lama demiri aynı anda kullanılarak güçlendirilmiştir. SolidWorks modellemesi sayesinde, tasarımın detaylı geometrisi ve bileşenler arası etkileşimleri görsel olarak açıkça anlaşılabilir hale getirilmiştir. Bu çalışma, silo tasarımında yapısal güvenlik ve performansın artırılması için önemli bir adım olarak değerlendirilebilir.

Silo 3.3 gövde kalınlıklarına sahip ve 11 numaralı silo olarak adlandırılan tasarımın statik analiz sonuçları ve silo toplam ağırlıkları Tablo 4.14’de verilmiştir.

Tablo 4.14 Silo 3.3-11 numaralı silonun statik analiz sonuçları

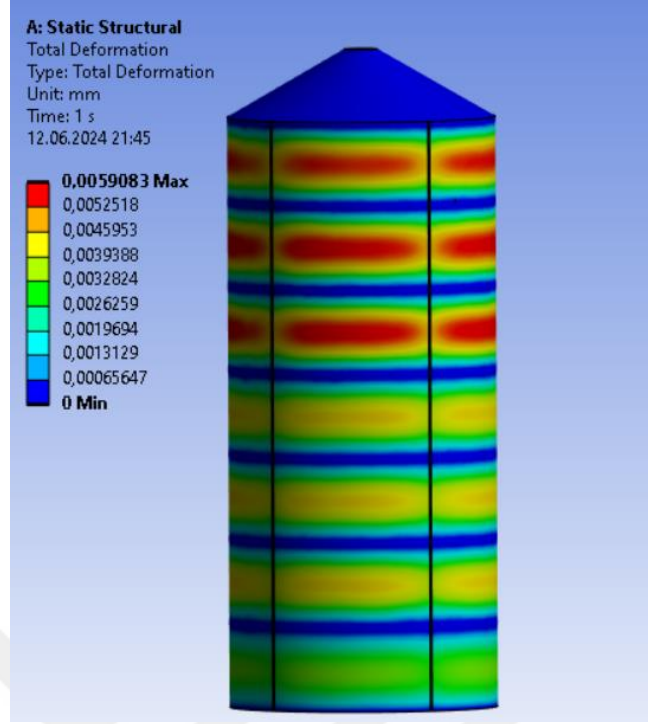
Silo 3.3	Kalınlık (mm)	Sac Ağırlıkları (kg)		Silo Gövdesi Ağırlık (kg)	Toplam Deformasyon (mm)	Gerinim (mm/mm)	Gerilme (MPa)
	1,5	265,95		2.384,50	1,12140	0,000185	36,97
	1,5	265,95					
	1,5	265,95					
	2,0	353,25					
	2,0	353,25					
	2,0	353,25					
	3,0	529,90					
Silo No	Destek Elemanı	Adet	Kg	Toplam Silo Ağırlık (kg)	Toplam Deformasyon (mm)	Gerinim (mm/mm)	Gerilme (MPa)
11	NPU 30	5	91,35	2.681,16	0,00591	0,000014	2,93
	Lama 5x50 mm	7	205,31				

Bu tablo, Silo 3.3 ve 11 numaralı silo için statik analiz sonuçlarını sunmaktadır. İki silo yapısının ağırlık, deformasyon, gerinim ve gerilme (MPa) değerleri karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir.

Silo 3.3'ün toplam deformasyonu ve gerilmesi oldukça yüksek görünmektedir. Bu, yapının uygulanan kuvvet altında ciddi gerilimlere maruz kaldığını göstermektedir.

11 numaralı silo, Silo 3.3 ile karşılaştırıldığında, çok daha düşük bir deformasyon ve gerilme değerine sahiptir. Bu, kullanılan destek elemanlarının etkinliğini ve yapının daha dayanıklı olduğunu göstermektedir.

Şekil 4.20, 11 numaralı silo modeli için yapılan statik analiz sonuçlarını göstermektedir. Görselde, toplam deformasyonun renk skalası ile ifade edildiği görülmektedir. Görseldeki değerler ve tablo ile karşılaştırıldığında aşağıdaki gözlemler yapılabilir:



Şekil 4.20 Silo 3.3-11 numaralı silo toplam deformasyon değeri

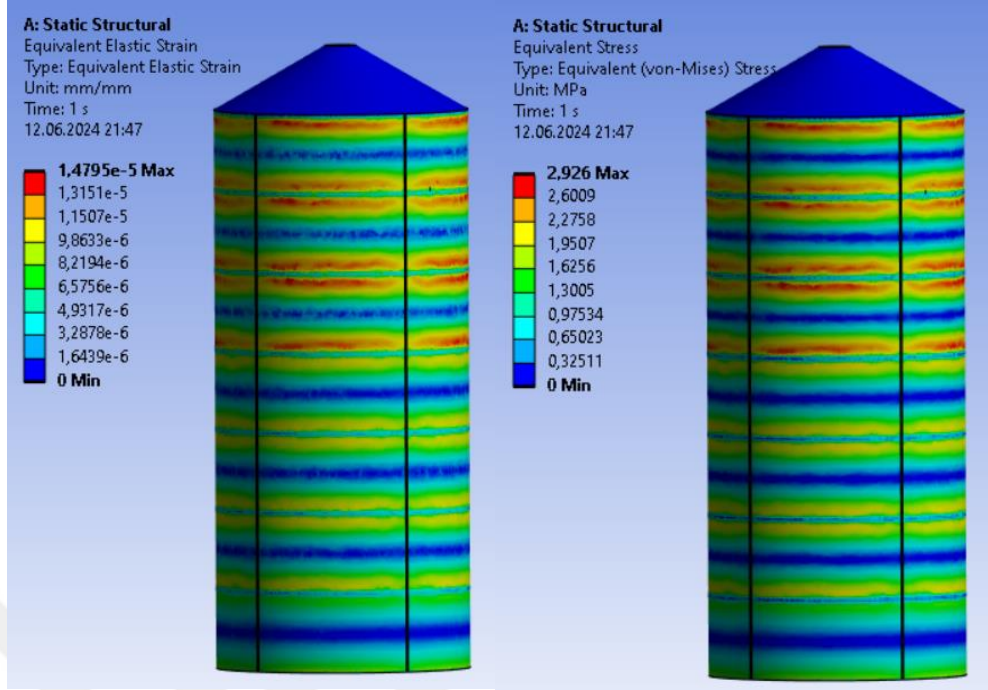
Görselde maksimum toplam deformasyonun 0,0059083 mm olduğu belirtilmiştir. Görselde kırmızı renk ile gösterilen bölgeler maksimum deformasyon bölgeleridir.

Görselde minimum deformasyonun 0 mm olduğu belirtilmiştir. Bu, mavi renk ile gösterilen bölgelerdir ve en az deformasyon yaşanan bölgeleri ifade eder.

Toplam deformasyon dağılımı, silo yapısının yük altında nasıl davrandığını açıkça göstermektedir. Maksimum deformasyonun belirli bölgelerde yoğunlaştığı ve bu bölgelerin kırmızı renk ile gösterildiği anlaşılmaktadır. Bu, yapının belirli kısımlarında daha fazla gerilme ve deformasyon yaşandığını gösterir.

Tablodaki değerler ve görsel sonuçlar birlikte değerlendirildiğinde, 11 numaralı silonun genel olarak düşük deformasyon seviyelerine sahip olduğu ve yapısal olarak dayanıklı olduğu söylenebilir. ANSYS analiz sonuçları, tablodaki verilerle uyumludur ve destek elemanlarının etkinliğini doğrulamaktadır.

Bu analiz, 11 numaralı silonun yapısal bütünlüğünü koruduğunu ve yük altında beklenenden daha düşük deformasyon gösterdiğini ortaya koymaktadır. Bu da silo tasarımının güvenilir ve dayanıklı olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.21 Silo 3.3-11 numaralı silo gerinim ve gerilme değerleri

Şekil 4.21’de, von Mises eşdeğer gerilme ve eşdeğer elastik gerinim dağılımları gösterilmektedir. Görselde maksimum gerilme değeri 2,926 MPa olarak belirtilmiştir. Gerilme dağılımı incelendiğinde, silo yapısının belirli bölgelerinde yüksek gerilme yoğunlaşmaları olduğu görülmektedir. Bu, bölgelerin yük altında daha fazla gerilme yaşadığını göstermektedir.

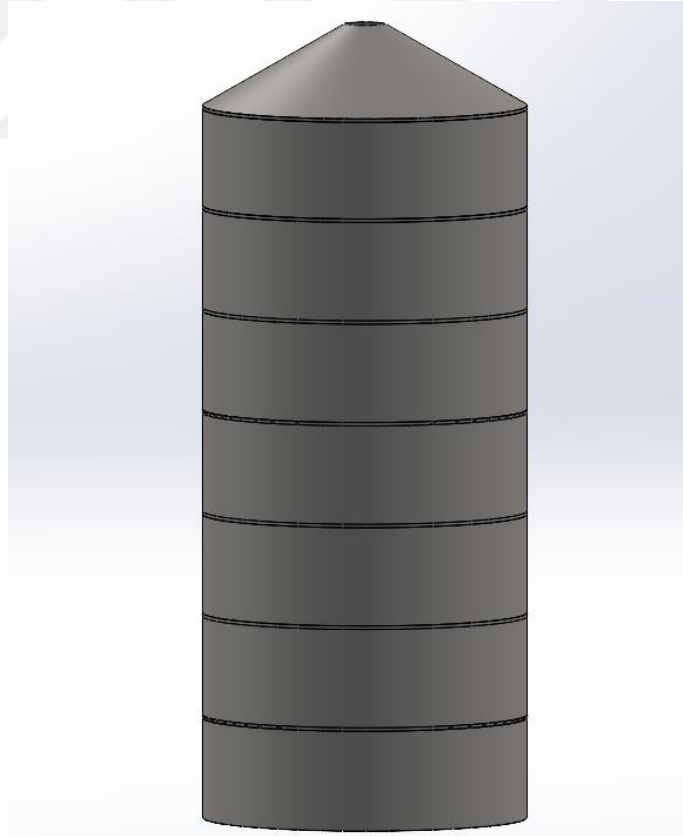
Görselde maksimum gerinim değeri $1,4795e^{-5}$ mm/mm olarak belirtilmiştir. Gerinim dağılımı, gerilme dağılımı ile tutarlıdır ve benzer bölgelerde yüksek yoğunlaşmalar göstermektedir. Bu, yapının belirli alanlarında hem yüksek gerilme hem de yüksek gerinim olduğunu işaret eder.

Tablodaki değerler ve ANSYS görselleri birlikte değerlendirildiğinde, 11 numaralı silonun yük altında nasıl bir davranış sergilediği hakkında detaylı bir anlayış kazanılmıştır. Maksimum gerilme ve gerinim değerleri, yapının belirli bölgelerinde yoğunlaşmakta olup, bu bölgelerin tasarımda özel dikkat gerektirdiğini göstermektedir. 11 numaralı silonun genel olarak düşük deformasyon seviyelerine sahip olması, yapısal olarak dayanıklı olduğunu ve destek elemanlarının etkinliğini göstermektedir.

4.4.3.1.2 İkinci model

Silo 3.3'ün gövde kalınlıkları için yeni bir tasarım geliştirilmiştir. Bu tasarım sürecinde, silo gövdesine ek destek sağlamak amacıyla lama demirleri kullanılmıştır. Tasarımın diğer silo modellerinden farkı, silo gövdesinde bulunan katlarda yukarı doğru çıkıldıkça lama demirlerinin kalınlığının azaltılması ve genişliğinin sabit tutulmasıdır. SolidWorks programı kullanılarak detaylı bir şekilde modellemesi yapılan silo, Şekil 4.22'de gösterilmiştir.

Bu yeni tasarım, yapısal sağlamlığı artırmak, siloyu hafifletmek ve tasarımın maliyet etkinliğini optimize etmek amacıyla geliştirilmiştir. Lama demirlerinin stratejik yerleşimi ve boyutlandırılması, silonun dayanıklılığını ve performansını artırmayı hedeflemektedir. Bu çalışma, silo tasarımında yapısal iyileştirmelerin nasıl sağlanabileceğine dair bir örnek sunmaktadır.



Şekil 4.22 Silo 3.3-12 numaralı silo modeli

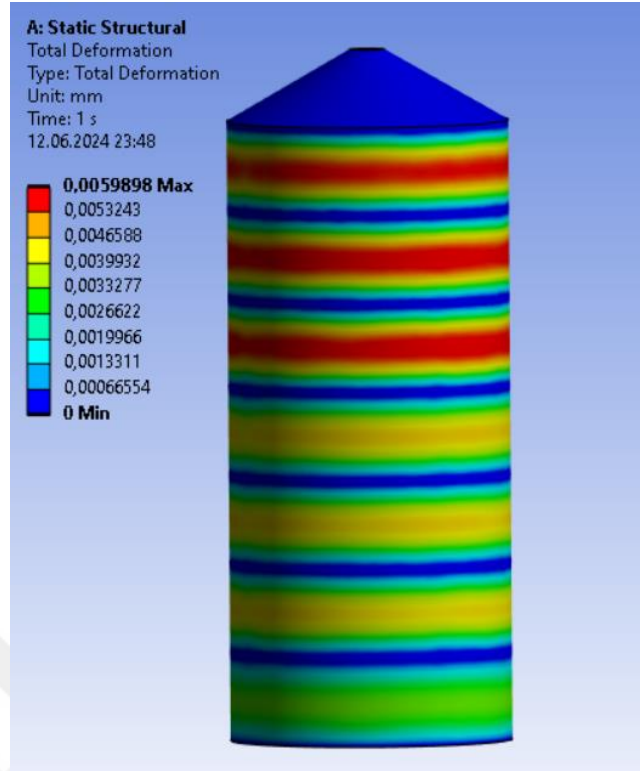
Tablo 4.15 Silo 3.3-12 numaralı silo statik analiz sonuçları

Silo 3.3	Kalınlık (mm)	Sac Ağırlıkları (kg)		Silo Gövdesi Ağırlık (kg)	Toplam Deformasyon (mm)	Gerinim (mm/mm)	Gerilme (MPa)
	1,5	265,95		2.384,50	1,12140	0,000185	36,97
	1,5	265,95					
	1,5	265,95					
	2,0	353,25					
	2,0	353,25					
	2,0	353,25					
	3,0	529,90					
Silo No	Destek Elemanı	Adet	Kg	Toplam Silo Ağırlık (kg)	Toplam Deformasyon (mm)	Gerinim (mm/mm)	Gerilme (MPa)
12	Lama 5x50 mm	2	58,66	2.542,88	0,00599	0,000016	3,01
	Lama 4x50 mm	2	46,92				
	Lama 3x50 mm	3	52,80				

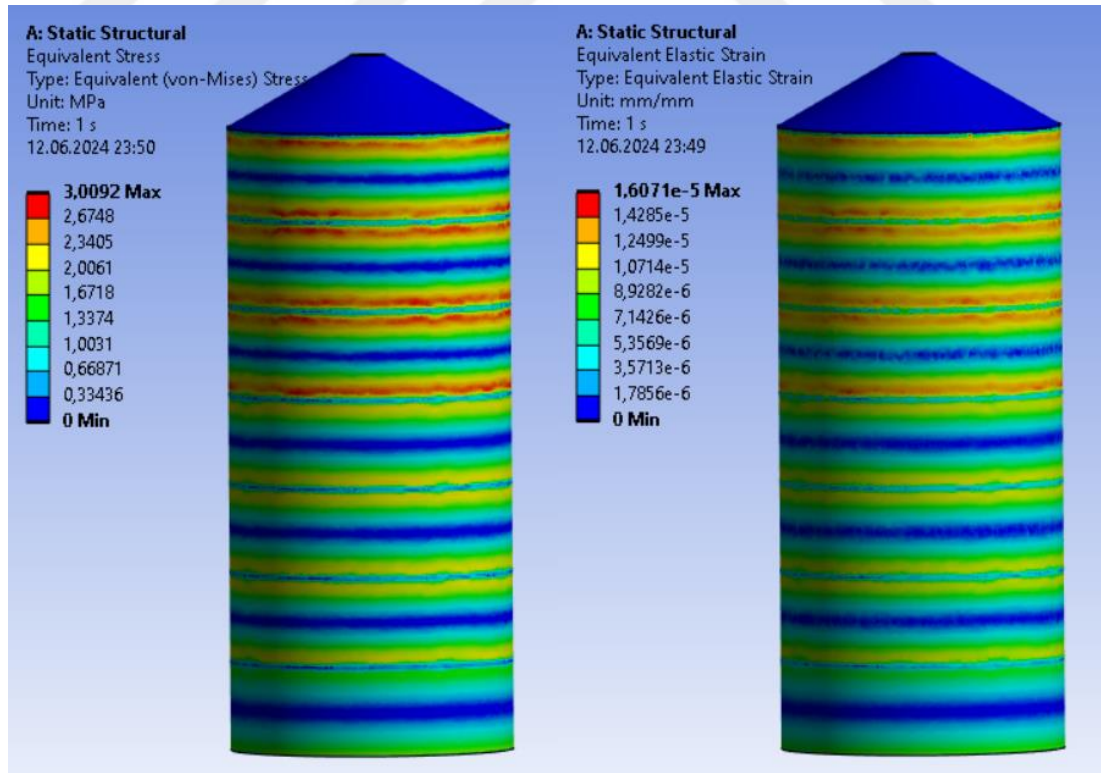
Tablo 4.15'e bakıldığında, Silo 3.3'ün daha düşük kalınlıklarda sac levhaların kullanımı nedeniyle yüksek gerilme ve deformasyon değerlerine sahip olduğu görülmektedir. Bu durum, destek elemanlarının kullanıldığı Silo 12'ye kıyasla, Silo 3.3'ün yapısal dayanıklılığının daha düşük olduğunu göstermektedir.

Bununla birlikte, Silo 12'nin destek elemanları ile güçlendirilmiş olması, deformasyon ve gerinim değerlerini minimumda tutarak daha sağlam bir yapıya sahip olmasını sağlamaktadır. Gerilme değerlerinin düşüklüğü de bu yapısal desteklerin etkili olduğunu ortaya koymaktadır.

Sonuç olarak, yapılan yeni tasarımda lama demiri kalınlıkları azaltılarak tasarlanan modelde diğer emniyetli silolara göre daha hafif bir model geliştirilmiştir. Statik analiz sonucunda elde edilen veriler doğrultusunda, tasarlanan yeni silonun emniyetli bir silo modeli olduğu sonucuna ulaşılmıştır.



Şekil 4.23 Silo 3.3-12 numaralı silo toplam deformasyon değeri



Şekil 4.24 Silo 3.3-12 numaralı silo gerinim ve gerilme değerleri

4.5 Siloların Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması

Tablo 4.16 Tasarlanan siloların statik analiz sonuçları

Silo No	Toplam Ağırlık (kg)	Toplam Deformasyon (mm)	Gerinim (mm/mm)	Gerilme (MPa)	Silo Hafifleme (%)
Silo 5	6.182,05	0,46143	0,000087	17,47	Referans
Silo 5.1	4.327,25	0,5966	0,000088	17,47	30,00
Silo 5.2	3.974,10	0,64995	0,000088	17,47	35,72
Silo 5.3	3.797,50	0,68873	0,000088	17,60	38,57
Silo 4	4.945,50	0,58683	0,000109	21,78	20,00
Silo 4.1	3.267,60	0,79413	0,000109	21,77	47,14
Silo 4.1-1	3.470,25	0,06014	0,000094	15,87	43,87
Silo 4.1-2	3.672,90	0,01359	0,000037	6,46	40,59
Silo 4.1-3	3.875,55	0,00517	0,000024	4,70	37,31
Silo 4.1-4	3.358,95	0,06175	0,000091	16,71	45,67
Silo 4.1-5	3.450,30	0,01416	0,000044	8,39	44,19
Silo 4.1-6	3.541,65	0,00526	0,000035	6,95	42,71
Silo 4.1-7	3.661,77	0,00531	0,000014	2,86	40,77
Silo 4.1-8	4.055,94	0,00111	0,000006	1,21	34,39
Silo 4.1-9	3.472,91	0,00570	0,000015	2,93	43,82
Silo 4.1-10	3.678,22	0,00124	0,000007	1,27	40,50
Silo 4.2	3.179,30	0,81993	0,000125	25,00	48,57
Silo 4.2-1	3.381,95	0,07820	0,000085	14,39	45,29
Silo 4.2-2	3.584,60	0,01512	0,000043	7,69	42,02
Silo 4.2-3	3.787,25	0,00907	0,000032	4,43	38,74
Silo 4.2-4	3.270,65	0,07902	0,000121	21,05	47,09
Silo 4.2-5	3.362,00	0,01540	0,000045	8,10	45,62
Silo 4.2-6	3.453,35	0,00934	0,000032	4,78	44,14
Silo 4.2-7	3.573,47	0,00565	0,000015	2,93	42,20
Silo 4.2-8	3.967,64	0,00114	0,000006	1,15	35,82
Silo 4.2-9	3.384,61	0,00593	0,000016	2,96	45,25
Silo 4.2-10	3.589,92	0,00127	0,000007	1,27	41,93
Silo 4.3	2.914,35	0,90387	0,000124	24,76	52,86
Silo 4.3-1	3.117,00	0,06505	0,000086	15,73	49,58
Silo 4.3-2	3.319,65	0,01516	0,000040	7,48	46,30
Silo 4.3-3	3.522,30	0,00609	0,000021	3,66	43,02
Silo 4.3-4	3.005,70	0,06678	0,000089	17,63	51,38
Silo 4.3-5	3.097,05	0,01402	0,000057	10,43	49,90
Silo 4.3-6	3.188,40	0,00680	0,000031	5,46	48,42
Silo 4.3-7	3.308,52	0,00570	0,000014	2,94	46,48
Silo 4.3-8	3.702,69	0,00116	0,000006	1,16	40,11
Silo 4.3-9	3.119,66	0,00059	0,000015	2,98	49,54
Silo 4.3-10	3.324,97	0,00127	0,000006	1,22	46,22
Silo 4.4	2.826,05	0,94631	0,000153	30,56	54,29
Silo 4.4-1	3.028,70	0,06539	0,000094	17,79	51,01
Silo 4.4-2	3.231,35	0,01509	0,000039	7,43	47,73
Silo 4.4-3	3.434,00	0,00676	0,000023	4,18	44,45

Tablo 4.16'nın devamı

Silo 4.4-4	2.917,40	0,00669	0,000094	18,46	52,81
Silo 4.4-5	3.008,75	0,02572	0,000060	11,39	51,33
Silo 4.4-6	3.100,10	0,00662	0,000030	4,72	49,85
Silo 4.4-7	3.220,22	0,00570	0,000015	2,92	47,91
Silo 4.4-8	3.614,39	0,00114	0,000006	1,12	41,53
Silo 4.4-9	3.031,36	0,00591	0,000015	2,98	50,97
Silo 4.4-10	3.236,67	0,00131	0,000007	1,30	47,64
Silo 3	3.709,30	0,76766	0,000141	28,22	40,00
Silo 3.1	2.649,40	0,98776	0,000151	30,11	57,14
Silo 3.1-1	2.852,05	0,00131	0,000104	20,18	53,87
Silo 3.1-2	3.054,70	0,01289	0,000047	8,35	50,59
Silo 3.1-3	3.257,35	0,00894	0,000030	4,34	47,31
Silo 3.1-4	2.740,75	0,07964	0,000162	26,66	55,67
Silo 3.1-5	2.832,10	0,01431	0,000084	16,27	54,19
Silo 3.1-6	2.923,45	0,00572	0,000027	5,47	52,71
Silo 3.1-7	3.043,57	0,00570	0,000015	2,92	50,77
Silo 3.1-8	3.437,74	0,00114	0,000006	1,12	44,39
Silo 3.1-9	2.854,71	0,00591	0,000015	2,98	53,82
Silo 3.1-10	3.060,02	0,00129	0,000007	1,30	50,50
Silo 3.2	2.561,10	1,03020	0,000154	30,86	58,57
Silo 3.2-1	2.763,75	0,07672	0,000081	16,15	55,29
Silo 3.2-2	2.966,40	0,01938	0,000034	6,53	52,02
Silo 3.2-3	3.169,05	0,00679	0,000023	4,17	48,74
Silo 3.2-4	2.652,45	0,07158	0,000101	17,05	57,09
Silo 3.2-5	2.743,80	0,01669	0,000045	8,92	55,62
Silo 3.2-6	2.835,15	0,00813	0,000023	4,27	54,14
Silo 3.2-7	2.955,27	0,00635	0,000017	3,39	52,20
Silo 3.2-8	3.349,44	0,00133	0,000007	1,50	45,82
Silo 3.2-9	2.766,41	0,00658	0,000017	3,46	55,25
Silo 3.2-10	2.971,72	0,00146	0,000008	1,53	51,93
Silo 3.3	2.384,50	1,12140	0,000185	36,97	61,43
Silo 3.3-1	2.587,15	0,07864	0,000083	16,67	58,15
Silo 3.3-2	2.789,80	0,01939	0,000033	6,56	54,87
Silo 3.3-3	2.992,45	0,00663	0,000021	3,32	51,59
Silo 3.3-4	2.475,85	0,07912	0,000093	18,02	59,95
Silo 3.3-5	2.567,20	0,01948	0,000040	7,31	58,47
Silo 3.3-6	2.658,55	0,00803	0,000023	4,26	57,00
Silo 3.3-7	2.778,67	0,00635	0,000017	3,42	55,05
Silo 3.3-8	3.172,84	0,00132	0,000007	1,45	48,68
Silo 3.3-9	2.589,81	0,00659	0,000017	3,48	58,11
Silo 3.3-10	2.795,12	0,00146	0,000008	1,57	54,79
Silo 3.3-11	2.681,16	0,00591	0,000014	2,93	56,63
Silo 3.3-12	2.542,88	0,00599	0,000016	3,01	58,87

Tablo 4.16'da tasarımı ve analizleri gerçekleştirilmiş 85 adet silo sunulmuştur. Bu silolar, referans olarak belirlenen Silo 5 ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonuçları doğrultusunda, en optimum silo seçimi yapılacaktır.

Silo tasarımında referans emniyet değerlerinde kalabilmek için, destek elemanlarının daha ince kesitlerle hafifletilmesi önerilebilir. Bu yaklaşım, yapısal bütünlüğü koruyarak malzeme tasarrufu sağlamayı amaçlar. Destek elemanlarının kesitlerinin inceltilmesi, genellikle yapının ağırlığını azaltarak toplam kütlenin hafifletilmesine olanak tanır. Ancak, bu hafifletme işlemi, elemanların yük taşıma kapasitelerinin ve emniyet faktörlerinin dikkatlice değerlendirilmesini gerektirir.

Bununla birlikte, U demirleri gibi belirli profil türlerinde bu tür bir hafifletme işlemi sınırlı olabilir. U demirlerinin kesitlerinin inceltilmesi, yapısal performanslarını olumsuz etkileyebilir ve emniyet faktörlerini tehlikeye atabilir. U demirlerinin yapısal özellikleri, belirli yükler altında deformasyon ve yer değiştirme risklerini artırabilir, bu da emniyet değerlerini karşılamakta zorluk yaşanmasına neden olabilir.

Bu bağlamda, U demirlerinin daha ince kesitlerle hafifletilmesi, bu profillerin taşıma kapasiteleri ve stabiliteleri göz önüne alındığında genellikle önerilmemektedir. Bunun yerine, alternatif tasarım yaklaşımları ve malzeme seçimleri ile emniyet değerlerine uyum sağlamak daha uygun olmaktadır.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Çelik silo tasarımlarının tahıl depolaması için optimize edilmesi amacıyla gerçekleştirilen bu çalışmada, çeşitli malzeme ve boyut seçenekleri değerlendirilmiştir. Silo tasarımları, SolidWorks 2024 yazılımı kullanılarak modellenmiş ve sonrasında ANSYS sonlu elemanlar yazılımı ile statik analizler yapılmıştır. Bu analizlerde toplam deformasyon, gerinim ve gerilme değerleri dikkate alınarak emniyetli silo tasarımları belirlenmiştir. Analiz sonuçlarına göre, emniyetli çıkan silolar arasından toplam ağırlık, toplam deformasyon, gerinim, gerilme değerleri ve maliyet gibi kriterler göz önünde bulundurularak optimum silo seçimi yapılmıştır.

Bu çalışmada, silo malzemesi olarak St44 yapı çeliği seçilmiştir. Bu çelik için belirlenen emniyet katsayısı ($s=2,5$) doğrultusunda, maksimum izin verilen gerilme miktarı 17-18 MPa olarak kabul edilmiştir. Statik analizde, siloda toplam depolanan tahıl miktarını temsilen düşey yönde 1.319.472 N kuvvet uygulanmıştır. Uygulanan bu kuvvet sonucunda, gerilme miktarı 17-18 MPa'nın altında kalan silolar emniyetli olarak kabul edilmiştir.

ANSYS sonlu elemanlar yazılımı ile statik analizleri yapılan tüm silolar arasından seçim kriterleri değerlendirildiğinde modellenen Silo 3.3 adlı tasarımdan 12 numaralı silonun optimum silo olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Seçilen silonun toplam ağırlığı 2.542 kg'dır. Referans olarak alınan Silo 5'e göre %58,87 hafifletilmiş ve emniyet gerilmesi de düşürülmüştür. Silo gövdesinde emniyeti sağlamak için çeşitli boyutlarda lama demirleri kullanılmıştır. Bu destek elemanları sayesinde silo toplam deformasyon değeri 0,00599 mm, gerinim değeri 0,000016 mm/mm ve gerilme (stres) değeri 3,01 MPa olarak hesaplanmıştır. Bu değerler, Silo 12'nin tahıl depolama amacıyla kullanılacak çelik silolar arasında hem emniyetli hem de ekonomik bir seçenek olduğunu göstermektedir. Silo 12'nin düşük deformasyon ve gerinim değerleri, yapının sağlamlığını ve uzun ömürlülüğünü artırırken, düşük gerilme değerleri de yapının güvenli bir şekilde kullanılabileceğini teyit etmektedir.

Özetle, tasarlanan bu yapılar, mukavemet, dayanıklılık ve işlevsellik açısından optimize edilmiştir. NPU profilleri ve lama demirlerin kullanımı, yapının yük taşıma kapasitesini artırırken, sac kalınlıklarının uygun seçimi, malzeme tasarrufu ve yeterli yapısal dayanıklılığı sağlamaktadır. Yapının genel tasarımı, içeriğin güvenli ve etkili bir şekilde depolanması için uygun bir mühendislik çözümüdür.

Bu süreçte elde edilen veriler, silo tasarımında kullanılan malzeme kalınlıklarının ve destek elemanlarının kritik önemde olduğunu vurgulamaktadır. Optimum tasarımın belirlenmesi, mühendislik uygulamalarında yapısal güvenliğin ve performansın sağlanması için gereklidir. Düz tabanlı silolar, dolum ve boşaltım sırasında içindeki malzemenin ağırlığı ile desteklenen yapılar olduğundan, statik yükler (malzeme ağırlığı) analizde öncelikli olarak değerlendirilmiştir. Düz tabanlı silolarda, dolum sırasında malzeme genellikle duvarlara eşit şekilde dağılır. Bu yüzden dolum ve boşaltım sırasındaki dinamik yüklerin etkisi, başlangıç aşamasında ihmal edilmiştir ve dolum sırasındaki etkiler daha az kritik olarak değerlendirilmiştir.

Sonuç olarak, yapılan analizler ve alınan önlemler, silo tasarımının güvenliğini artırmak ve toplam ağırlığı minimuma indirerek verimliliği maksimize etmek adına önemli bir adım oluşturmaktadır. Optimizasyon çalışmasında en önemli maliyetin silo malzemesi olması sebebiyle ağırlık azaltma üzerinde durulmuştur fakat eklenecek destek elemanlarının bir miktar işçilik masraflarını artıracığı da unutulmamalıdır. Analiz kapsamında statik yüklere ve malzeme ağırlığına odaklanılmıştır. Dış yükler bu aşamada göz ardı edilmiştir. Yapılacak yeni çalışmalarda kar yükü, rüzgar yükü ve deprem yükü gibi dış kuvvetlerin etkisinin de beraber incelenmesi yerinde olacaktır. İlerleyen aşamalarda bu dış yüklerin etkileri incelenmesi gerekiyorsa, ek analizler yapılabilir. Bu çalışma ile silo üreticilerinin daha hafif ve daha düşük maliyetle çelik silo üretebilmeleri için gerekli bazı yapısal yenilikçi çözümler ortaya konmuş, sektöre yeni tasarımlar için ışık tutulmuştur.

KAYNAKLAR

ABAQUS. (2024). *ABAQUS Analysis User's Manual*.

Abdelbarr, M. H., Ramadan, O. M., Hilal, A., Sanad, A. M., & Abdalla, H. A. (2024). Current design of rectangular steel silos: limitations and improvement. *Journal of Engineering and Applied Science*, 71(1), 77.

Anil, N. E., & Lakshmi, P. (2022). Comparative study of finite element analysis of steel silos with rectangular and Istiffeners. *Sustainability, Agri, Food and Environmental Research*, 10, 1-9.

Anonymous. (2006). *Silo Design*. Bulk Solids Engineering. Retrieved from <http://www.bulksolids.nl/uk/7silodesi.html>.

ANSYS Inc. (2024). *ANSYS Mechanical User's Guide*.

Ayazoğlu, Ü. (1987). *Betonarme Siloların Projelendirilmesinde Kullanılan Yöntem ve Yönetmeliklerin Karşılaştırılması* (Yüksek Lisans Tezi). K.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.

Aydın, E. (2013). *Silo Yan Sacı Direğinin (Stiffener) Geometrisinin ve Mukavemetinin Optimizasyonu* (Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi). Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyon.

Budynas, R. G., & Nisbett, J. K. (2015). *Shigley's Mechanical Engineering Design*. McGraw-Hill.

Carson, J.W., & Jenkyn, R.T. (1993). *Load Development and Structural Considerations in Silo Design*. Presented at Reliable Flow of Particulate Solid II, Oslo, Norway.

Carson, J.W. (2000). *Silo Failures: Case Histories and Lessons Learned*. Third Israeli Conference for Conveying and Handling of Particulate Solids, Dead Sea Israel.

Chase, G.G. (2006). *Solids Notes*. The University of Akron.

Ciesielski, M.S., & Suwalski, Z. (1967). *Bunker, Silos*. In Schornsteine, Fernsehtürme und Freileitungsmaste (pp. x-x). Verlag Von Wilhwlm Ernst & Sohn, Berlin, München, Düsseldorf.

Craik, D.J., & Miller, B.F. (1958). The flow properties of powders under humid conditions. *Journal of Pharmacology*, 10, 136-144.

- Çağlı, S. (2005). *Katı yığınların akış özelliklerinin belirlenmesi ve silo tasarımı* (Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 204s.
- Çelik, A. İ., & Kose, M. M. (2020). ÇELİK TAHİL DEPOLAMA SİLOLARININ SİSMİK ANALİZİ ÜZERİNE GENEL BİR DEĞERLENDİRME VE YENİ ANALİZ YAKLAŞIMLARI. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 8(2), 501-520.
- Çetmeli, E. (1970). *Çubuk Sistemler, Plaklar ve Kabukların Hesabı İçin Tablolar*. Birsen Kitabevi, İstanbul.
- Dieter, G. E. (2000). *Mechanical Metallurgy*. McGraw-Hill.
- Durmuş, A. (2007). *Silolar Konusunda Bazı Teoriler ve Stok Yapılarının Tasarımına İlişkin Genel Bir Yaklaşım* (Yüksek Lisans Tezi). Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Trabzon.
- Efe, M. E. (2020). *Hidrodinamik Etki Altındaki Silo Tipi Çelik Yapıların Sıvı Çalkantısına Bağlı Yapısal Davranışın İncelenmesi* (Yüksek Lisans Tezi). Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği.
- Efe, M. E., & Çelik, D. (2020). Rijitleştirme Levhaları ile Güçlendirilmiş Silindirik Çelik Siloların Yapısal Davranışının İncelenmesi. *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 7(2), 1124-1139.
- Eurocode 1. (2003). *Basis of Design and Actions on Structures (EN 1991-4), Part 4: Actions in Silo and Tanks*. European Committee for Standardisation, Brussels.
- Farnish, R. (2002). Perfecting powder storage & discharge. Retrieved from <http://www.chemicalprocessing.com/articles/2002/214.html>.
- Fawzy, M. A., Adel, A., & Shawky, M. M. (2021, August). Case Study: Numerical Analysis of Collapsed Steel Tower Silo to Quantify the Design Safety Factors. In *The International Undergraduate Research Conference* (Vol. 5, No. 5, pp. 219-227). The Military Technical College.
- Fitzpatrick, J.J., Iqbal, T., Delaney, C., Twomey, T., & Keogh, M.K. (2004). Effect of powder properties and storage conditions on the flowability of milk powders with different fat contents. *Journal of Food Engineering*, 64, 435-444.
- Gallego, E., Goodey, R. J., Ayuga, F., & Brown, C. J. (2004). *Some practical features in modelling silos with finite elements*. ASABE Meeting Presentation Paper No. 044150.

- Gandia, R. M., Gomes, F. C., de Paula, W. C., & Aguado, P. J. R. (2021). Influence of specific weight and wall friction coefficient on normal pressures in silos using the Finite Element Method. *Revista Engenharia na Agricultura-REVENG*, 29(Continua), 192-203.
- Ganesan, V., Rosentrater, K.A., & Muthukumarappan, K. (2008). Flowability and handling characteristics of bulk solids and powders - a review with implications for DDGS. *Biosystems Engineering*, 425-435.
- Guerrin, A. (1969). *Traite de Bétonarme, Constructions Diverses*, Tome XI, Paris.
- Hibbeler, R. C. (2017). *Mechanics of Materials*. Pearson.
- Hüner, İ. (2006). *Çimento silosunun statik ve dinamik analizleri* (Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi). Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Jacob, K. (2000). Bin and hopper design. The Dow Chemical Company Solids Processing. Retrieved from <http://chemical.uakron.edu/fclty/chase/Solids/Bin%20and%20Hopper%20Design%20Lecture.ppt>.
- Jenike, A.W. (1964, November). *Storage and Flow of Solids*. Bulletin No. 123, Utah Engineering Experiment Station, University of Utah, Salt Lake City-Utah.
- Jenkyn, R.T., & Goodwill, D. (1987). Silo Failures: Lessons to be Learned. *Engineering Digest*.
- Johanson, J.R. (1978). Know your material-how to predict and use the properties of bulk solids. *Chemical Engineering*, 9-17.
- Juan, A., Moran, J.M., Guerra, M.I., Couto, A., Ayuga, F., & Aguado, P.J. (2006). Establishing stress state of cylindrical metal silos using finite element method: Comparison with ENV 1993. *Thin-Walled Structures*, 44, 1192-1200.
- Karaca, Z. (2000). *Betonarme silindirik siloların deprem etkisindeki davranışlarının analitik ve sayısal yöntemlerle karşılaştırmalı olarak incelenmesi* (Yayınlanmamış Doktora Tezi). Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Kıvrak, K. (1987). *Betonarme Siloların Hesap Esasları, Yönetmeliklere Göre Malzeme Basınçlarının Karşılaştırılması Ve Uygulamalar*. (Basım Yeri Bilinmiyor: İTÜ).

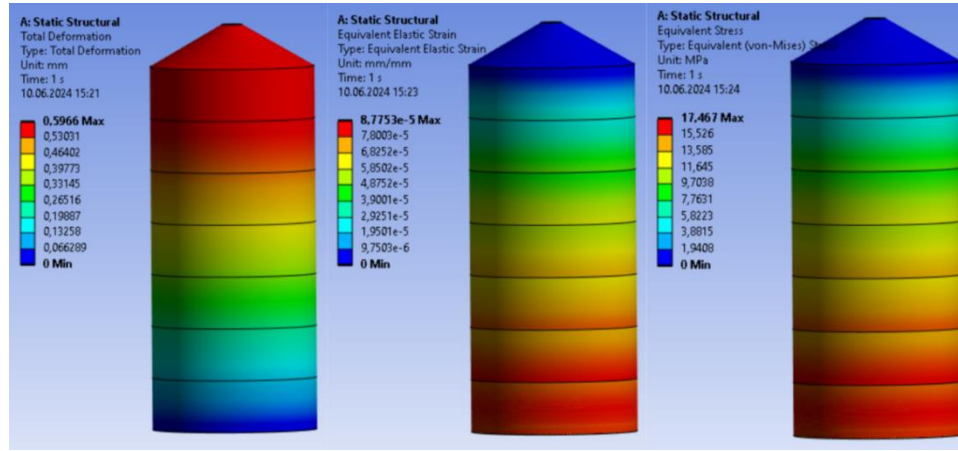
- Kibar, H. (2011). *Tombul fındık depolamasında tane özelliklerine bağlı olarak ANSYS programıyla optimum silo tasarımı* (Yayınlanmamış Doktora Tezi). Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Samsun.
- Kibar, H., & Öztürk, T. (2011). Tarımsal ürün silolarında yapısal sorunlar. *Gaziosmanpaşa Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 2011(2), 85-96.
- Kibar, H. (2020). Farklı Cidar Kalınlıklarına Sahip Buğday Silosunda Doldurma ve Boşaltma Koşullarına Bağlı Olarak Gerilme Dağılımının Simülasyonu. *Uluslararası Tarım ve Yaban Hayatı Bilimleri Dergisi*, 6(3), 517-537.
- Kobiela, S., & Shalouf, F.F. (1999). Application of discharge tubes in the grain silos. *International Agrophysics*, 13, 401-403.
- Kumbasar, N., Aydoğan, M., & Altan, M. (1992). *Betonarme Silo ve Bunkerler*. İTÜ İnşaat Fakültesi Matbaası, İstanbul.
- Marinelli, J., & Carson, J. W. (1992). Solve solids flow problems in bins, hoppers and feeders. *Chemical Engineering Progress*, 88(5).
- Marinelli, J. (2001). Mass flow design considerations? (Archiving-Part 1). Retrieved from http://www.solidshandlingtech.com/ask_joe_articles/archiving_part_one.html.
- Meseli, İ. (2010). Lineer Statik Analiz. Retrieved from www.ilkaymeseli.com/2010/12/lineer-statikanaliz.
- Moreyra, R., & Peleg, M. (1981). Effect of equilibrium water activity on the bulk properties of selected food powders. *Journal of Food Science*, 46, 1918-1922.
- Nobberhaus, E.P. (1965). Structural designs of bins. *Chemical Engineering*, 183-186.
- Özel, K. (2007). *Çelik Hububat Silolarının Tasarım Esasları* (Yüksek Lisans Tezi). Konya Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- 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., & Barnum, R.A. (2000). On powder flowability. *Pharmaceutical Technology*, 60-84.

- Rehman, K. U., & Wang, K. (2023). Analysis and Design of Steel Silo using STAAD. ProV8i. *Babylonian Journal of Mechanical Engineering*, 2023, 20-28.
- Roberts, A.W. (1992). Basic principles of bulk solids storage, flow and handling. *The Institute for Bulk Materials Handling Research*, Callaghan NSW Australia.
- Rotter, J.M. (1998). Effects of silo loads. In C.J. Brown & J. Nielsen (Eds.), *Silos: Fundamentals of Theory, Behaviour, and Design* (pp. 337-345). Spon Press.
- Rotter, J.M. (2001). *Guide for the Economic Design of Circular Metal Silos*. Spon Press.
- Schulze, D. (2008). *Powder and Bulk Solids; Behavior Characterization, Storage and Flow*. Springer Science, Berlin.
- SolidWorks Corporation. (2024). *SolidWorks Simulation User's Guide*.
- Sondej, M., Iwicki, P., Wójcik, M., & Tejchman, J. (2016). Stability analyses of a cylindrical steel silo with corrugated sheets and columns. *Steel and Composite Structures*, 20(1), 147-166.
- Tang, Z., Zhou, D., Peng, C., & Wu, W. (2015). The structural analysis of steel silos with cylindrical-wall bearing and profile-steel bearing. *Stavební obzor-Civil Engineering Journal*, 24(2).
- Uğural, A. C. (1981). *Stresses in Plates and Shells*. McGraw Hill, New York.
- Warayth, M. O. M. (2024). *Çelik siloların GFRP ile güçlendirilmesinin sonlu elemanlar metodu kullanarak incelenmesi* (Yüksek Lisans Tezi). Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı.
- Woodcock, C.R., & Mason, J.S. (1987). *Bulk Solids Handling*. Chapman & Hall, London.
- Xie, Y. (2015). Structural Behavior of Grain Bin Steel Silo.
- Yaldıran, F. (2018). *Bir buğday silosunun ANSYS programı kullanılarak analizi* (Yüksek Lisans Tezi). Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı.
- Zaccari, N., & Cudemo, M. (2016). Steel silo failure and reinforcement proposal. *Engineering failure analysis*, 63, 1-11.
- Zhao, Y., Cao, Q. S., & Su, L. (2013). Buckling design of large circular steel silos subject to wind pressure. *Thin-Walled Structures*, 73, 337-349.

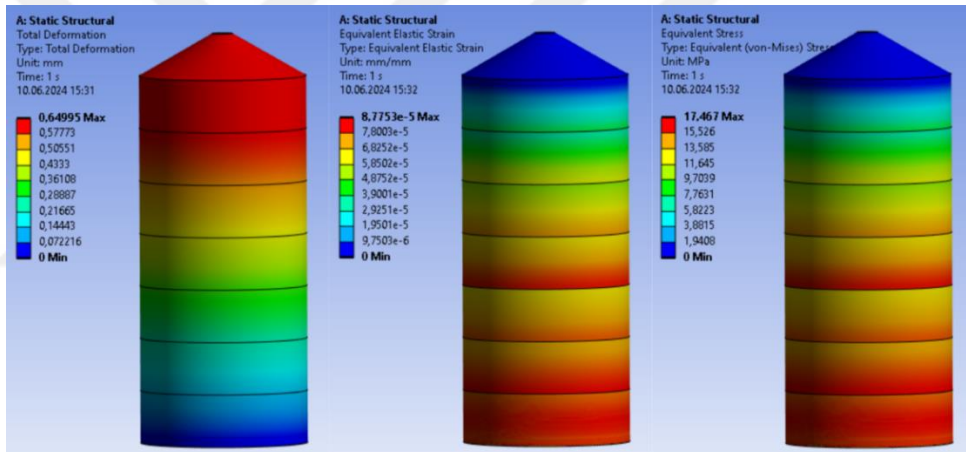


EKLER

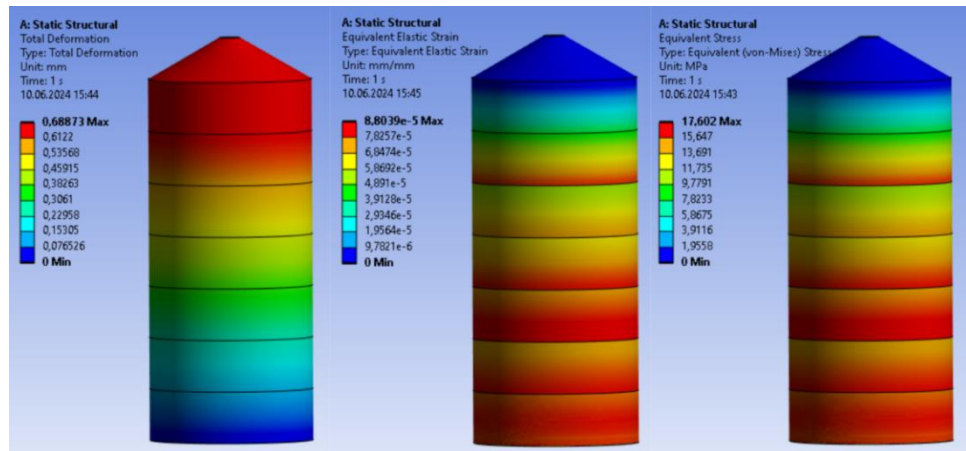
EK A. Sac Kalınlığı 5 mm ile Başlayan Siloların ANSYS Görselleri



Şekil A.1 Silo 5.1 statik analiz sonuçları

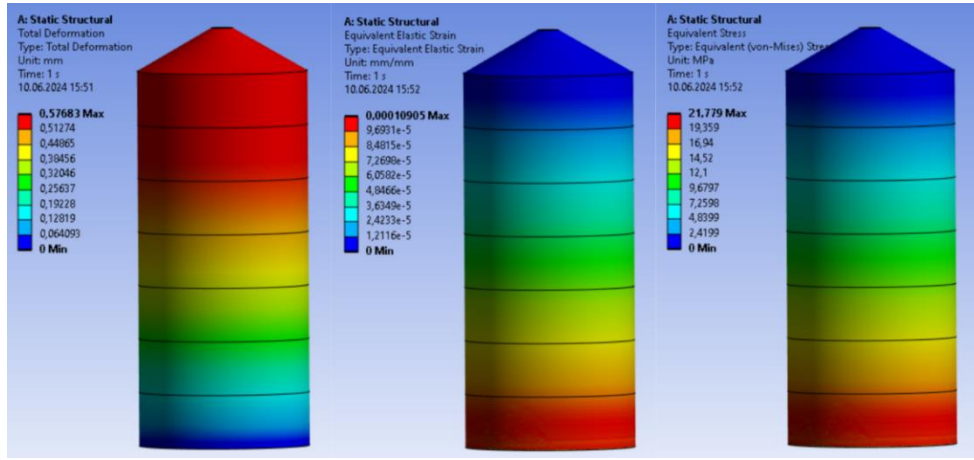


Şekil A.2 Silo 5.2 statik analiz sonuçları

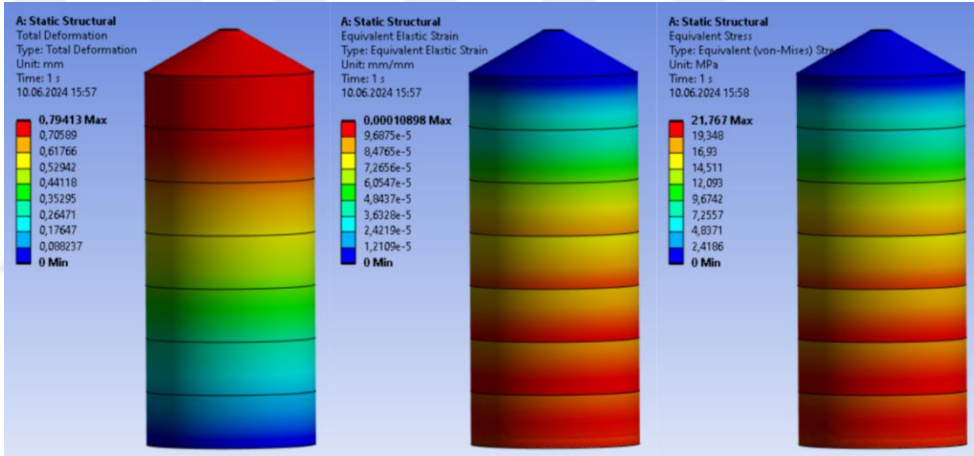


Şekil A.3 Silo 5.3 statik analiz sonuçları

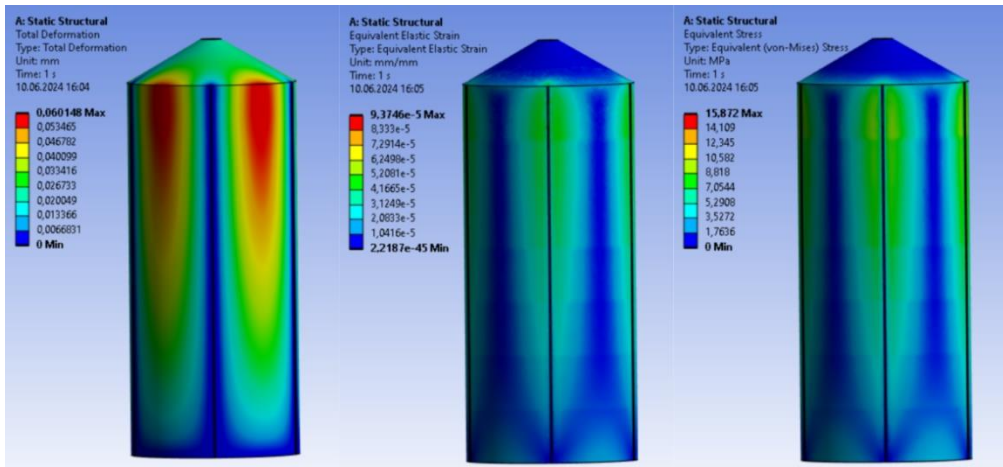
EK B. Sac Kalınlığı 4 mm ile Başlayan Siloların ANSYS Görselleri



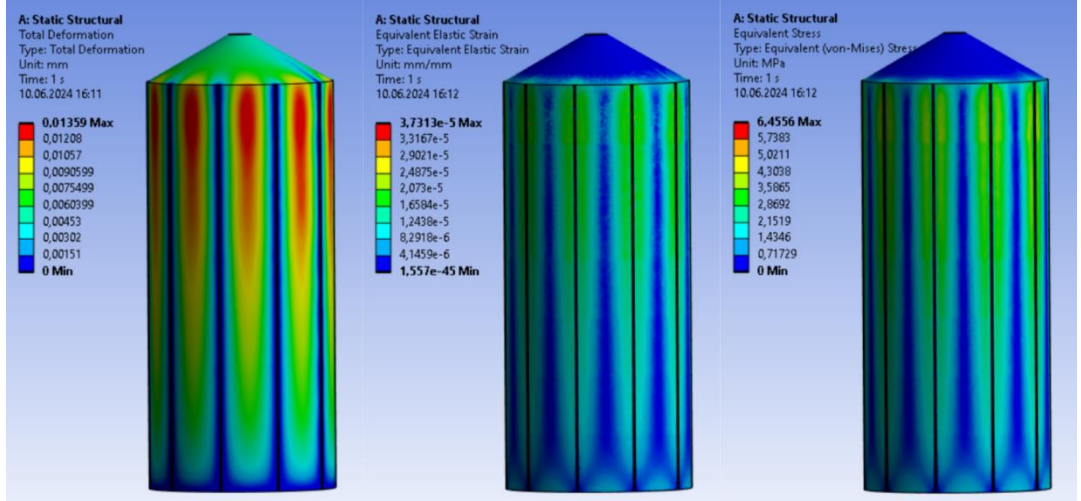
Şekil B.1 Silo 4 statik analiz sonuçları



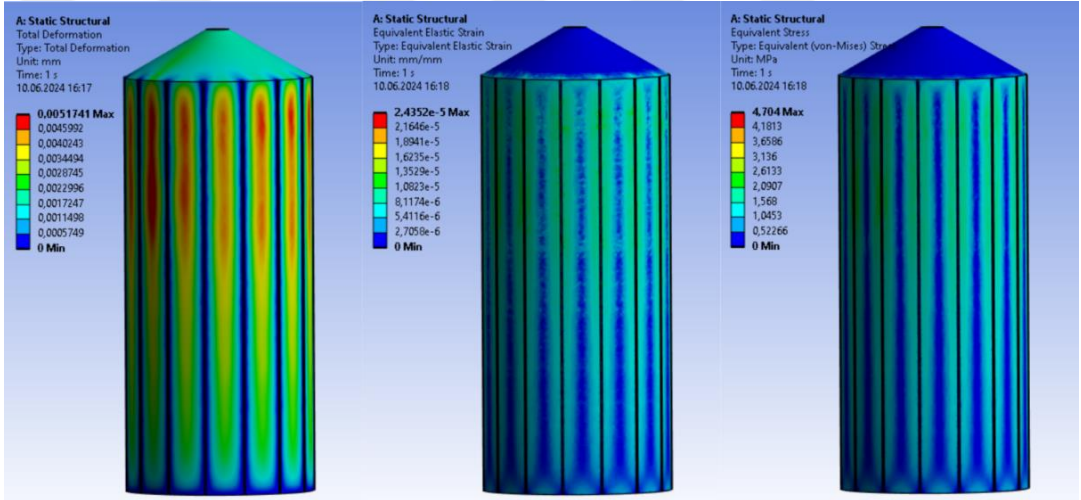
Şekil B.2 Silo 4.1 statik analiz sonuçları



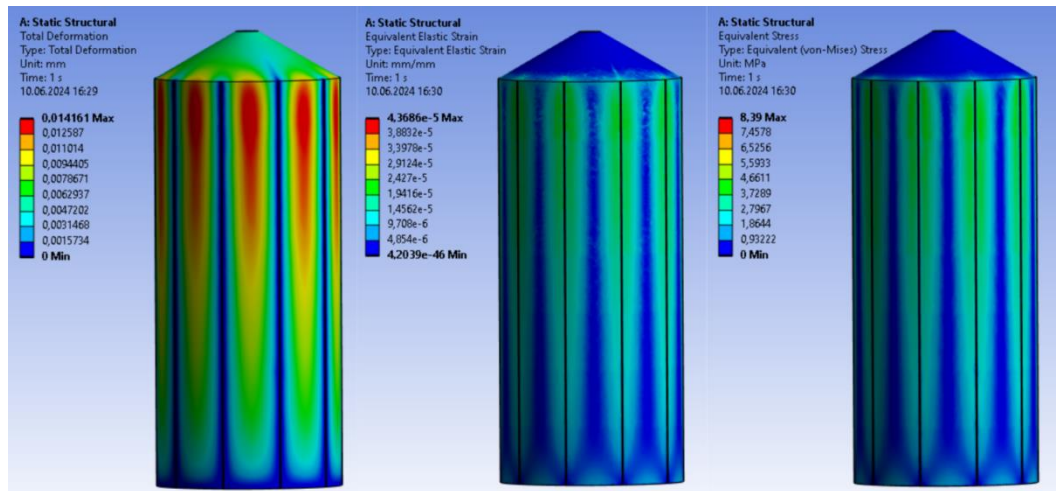
Şekil B.3 Silo 4.1-1 statik analiz sonuçları



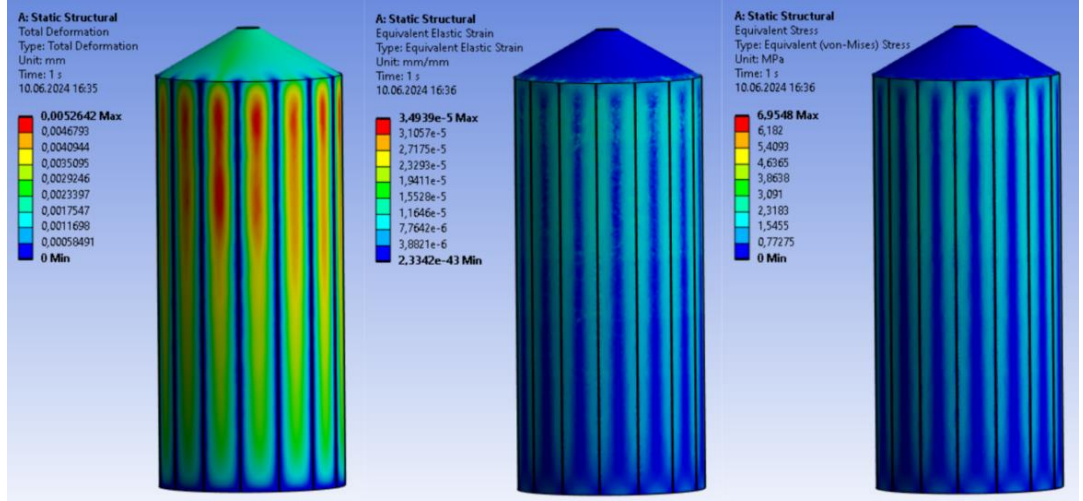
Şekil B.4 Silo 4.1-2 statik analiz sonuçları



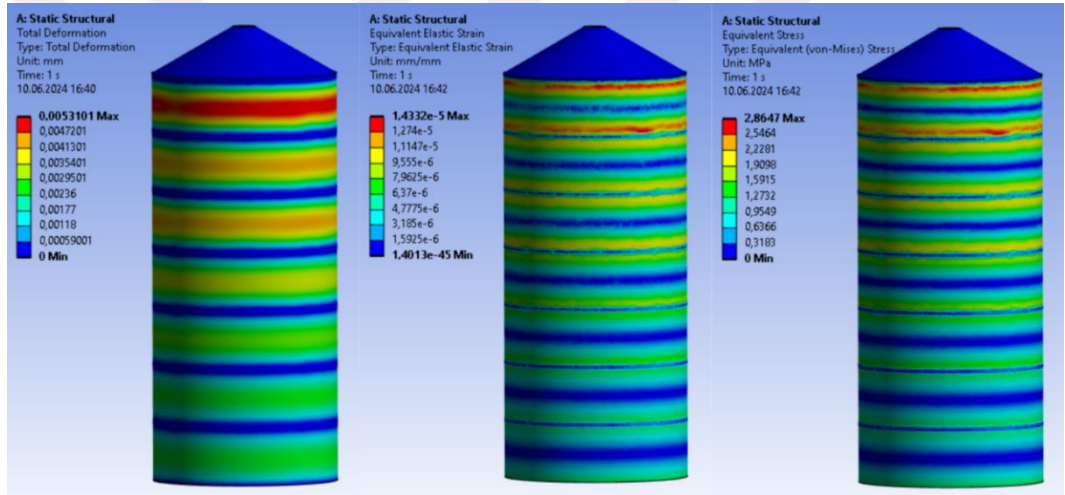
Şekil B.5 Silo 4.1-3 statik analiz sonuçları



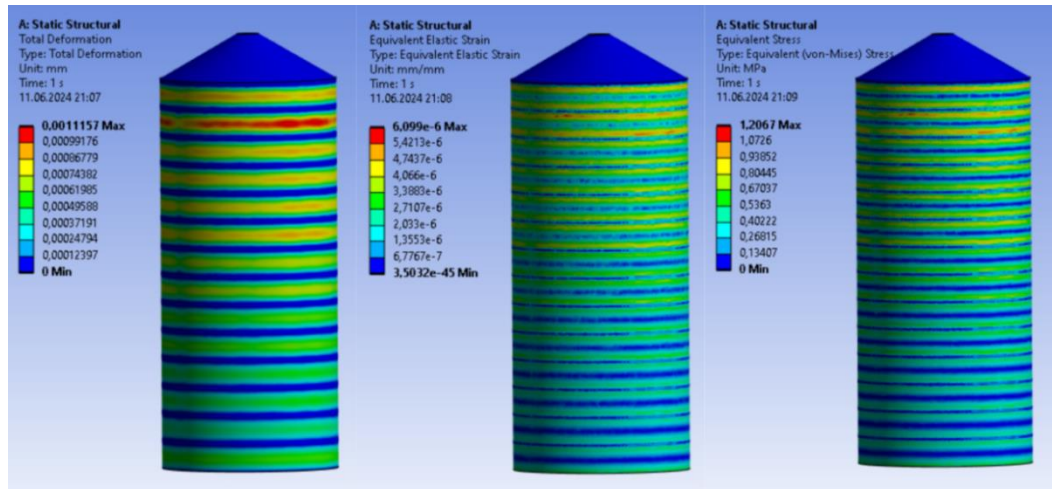
Şekil B.6 Silo 4.1-5 statik analiz sonuçları



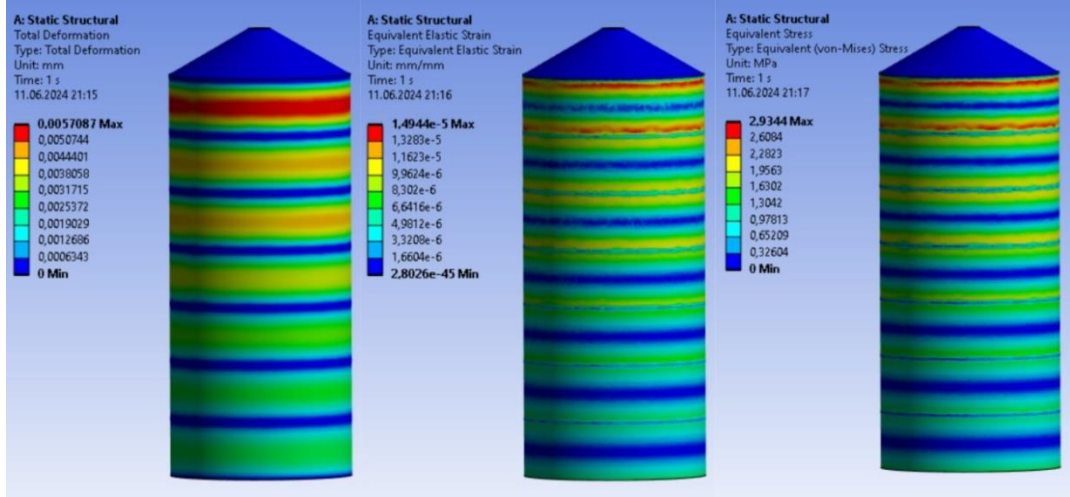
Şekil B.7 Silo 4.1-6 statik analiz sonuçları



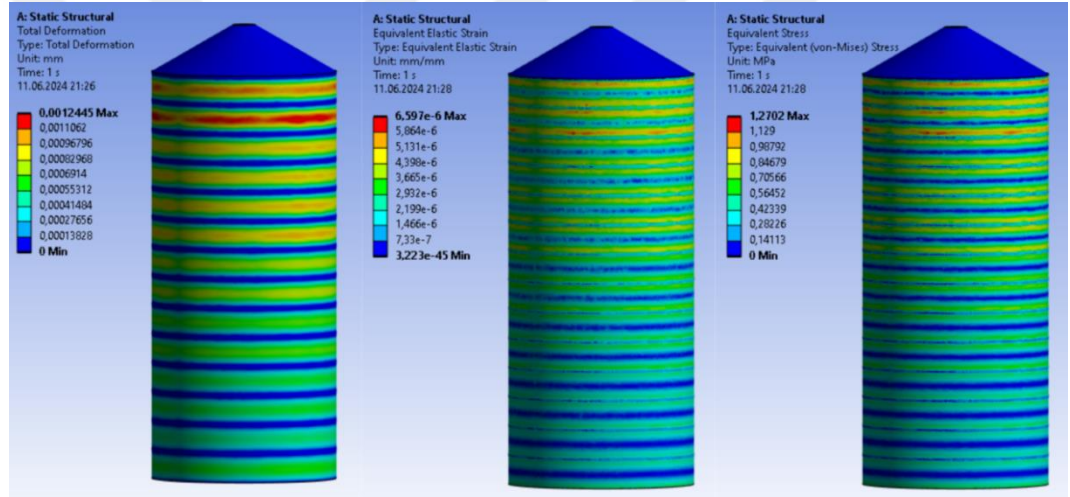
Şekil B.8 Silo 4.1-7 statik analiz sonuçları



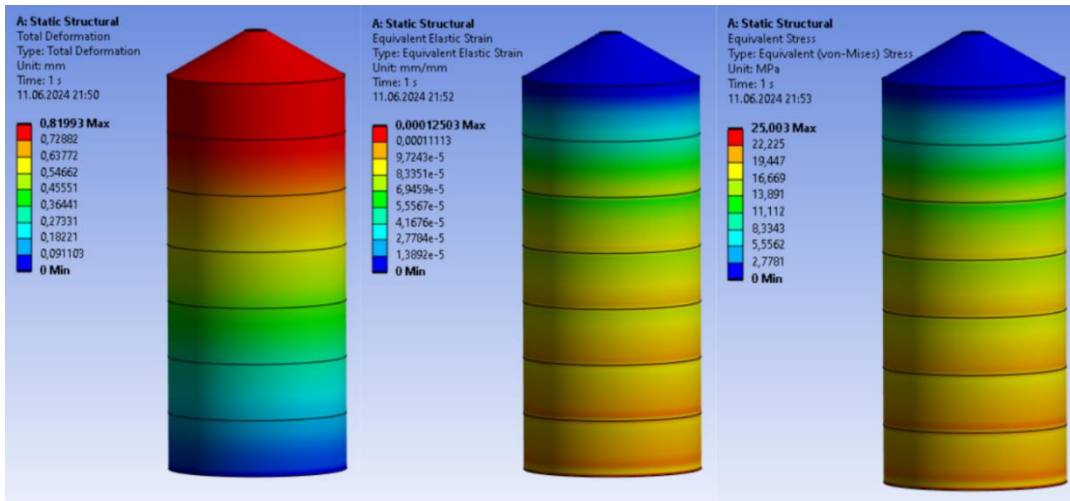
Şekil B.9 Silo 4.1-8 statik analiz sonuçları



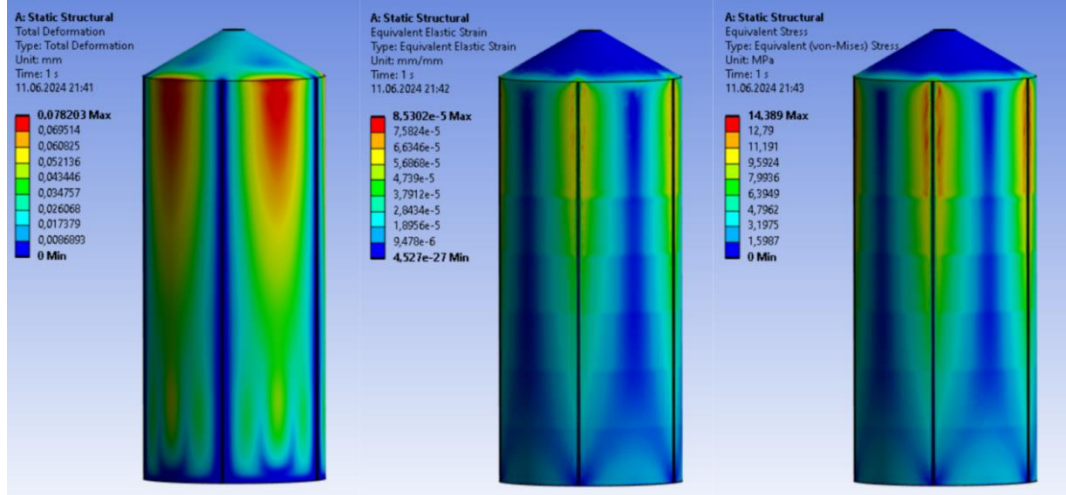
Şekil B.10 Silo 4.1-9 statik analiz sonuçları



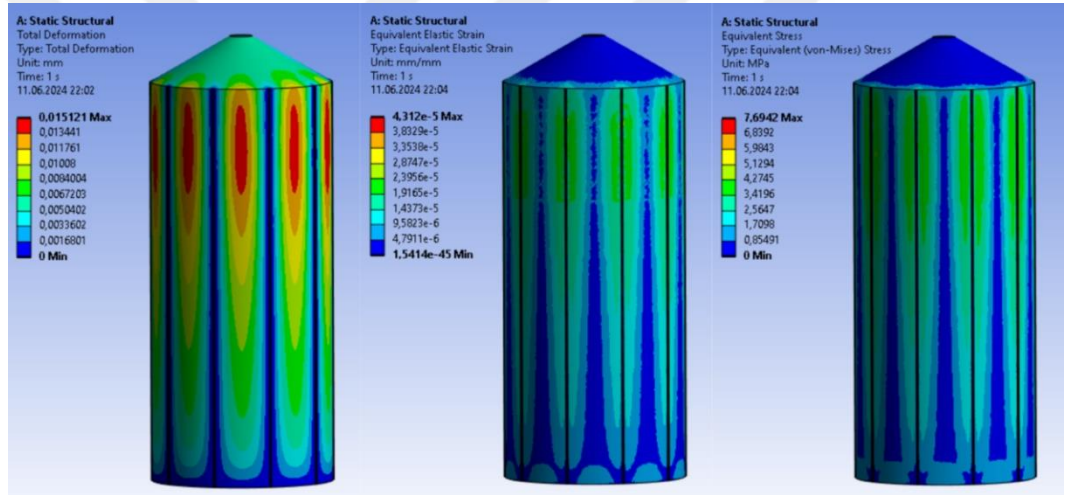
Şekil B.11 Silo 4.1-10 statik analiz sonuçları



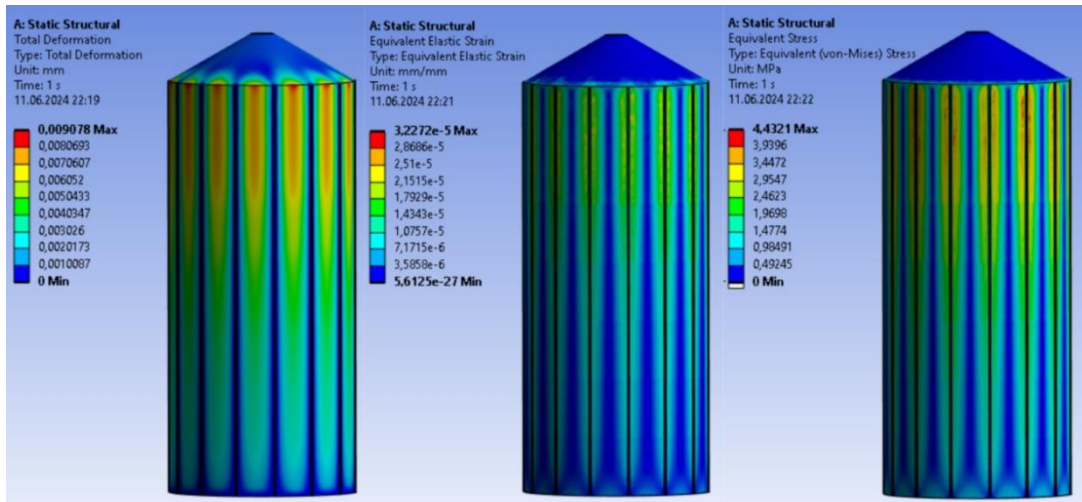
Şekil B.12 Silo 4.2 statik analiz sonuçları



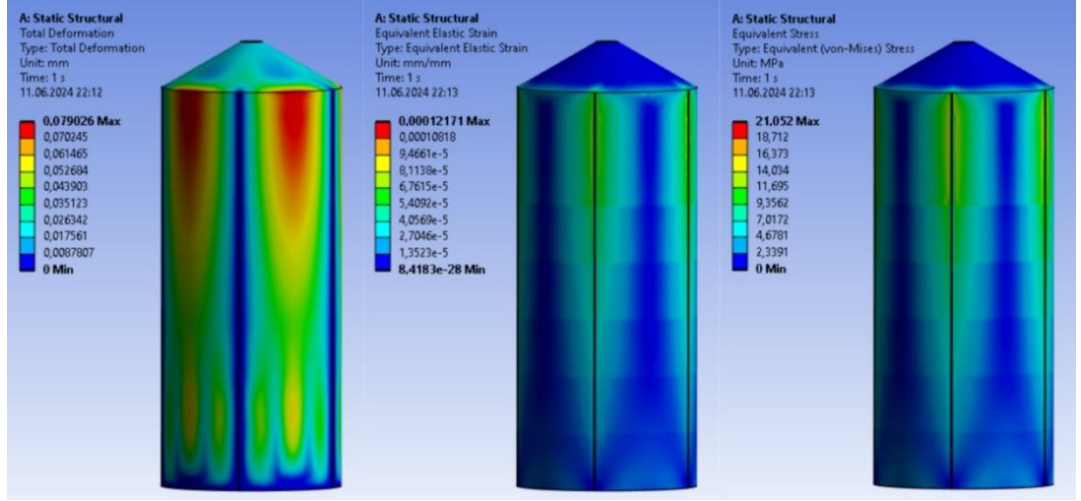
Şekil B.13 Silo 4.2-1 statik analiz sonuçları



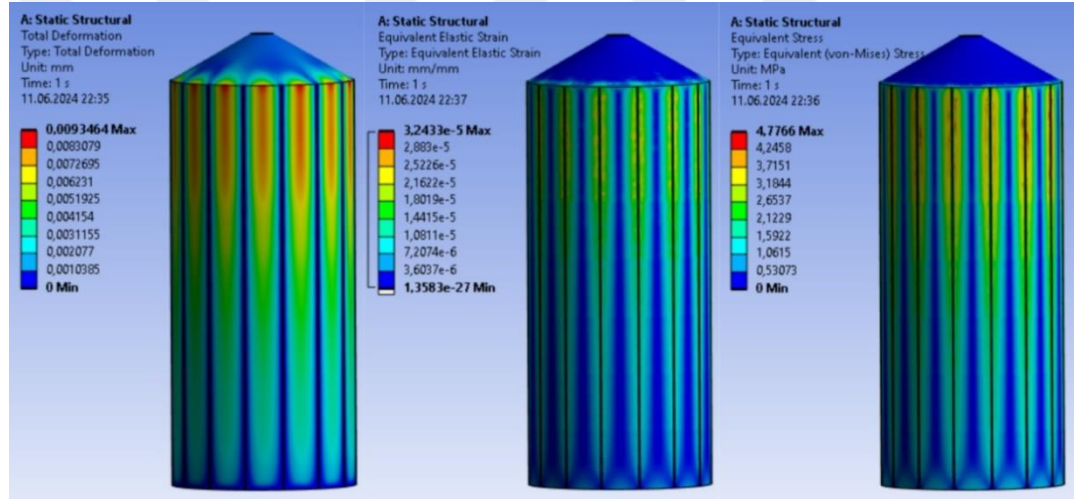
Şekil B.14 Silo 4.2-2 statik analiz sonuçları



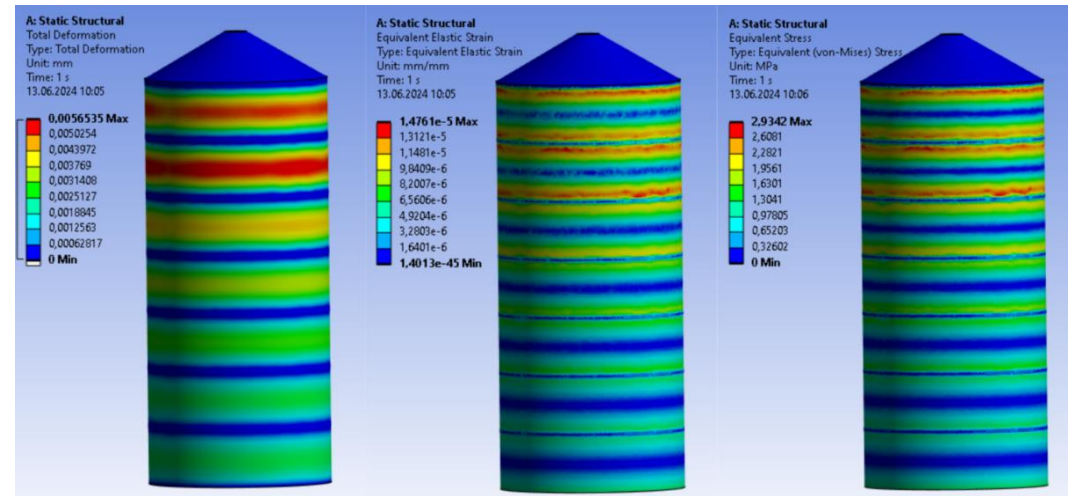
Şekil B.15 Silo 4.2-3 statik analiz sonuçları



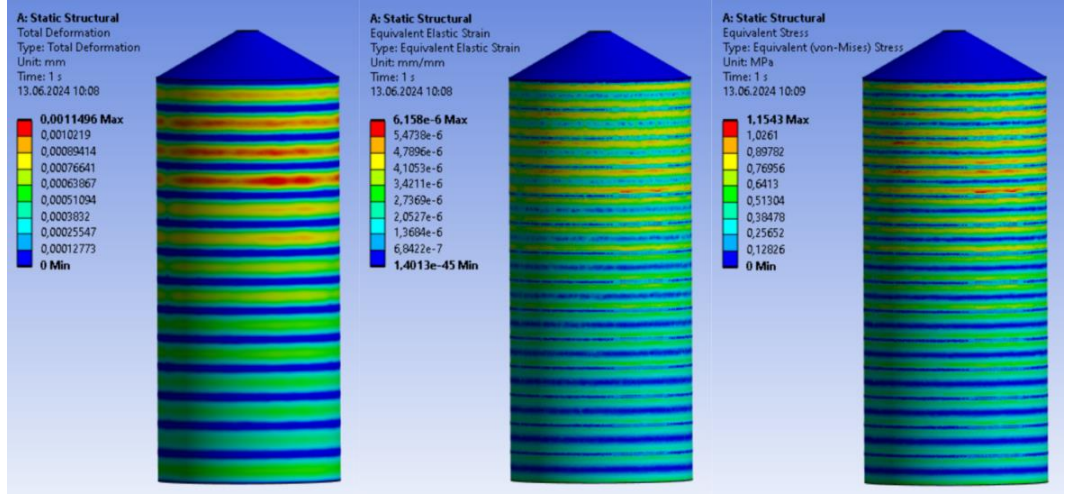
Şekil B.16 Silo 4.2-4 statik analiz sonuçları



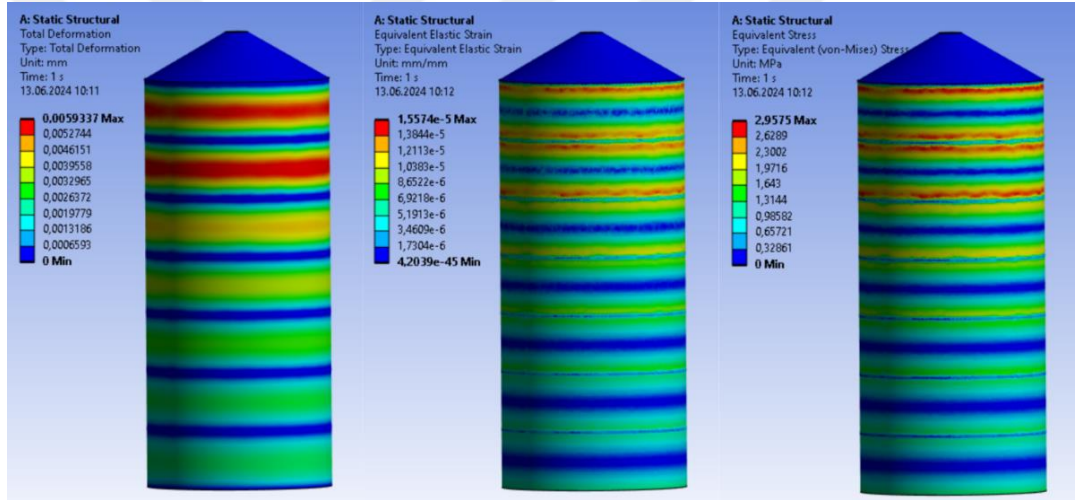
Şekil B.17 Silo 4.2-6 statik analiz sonuçları



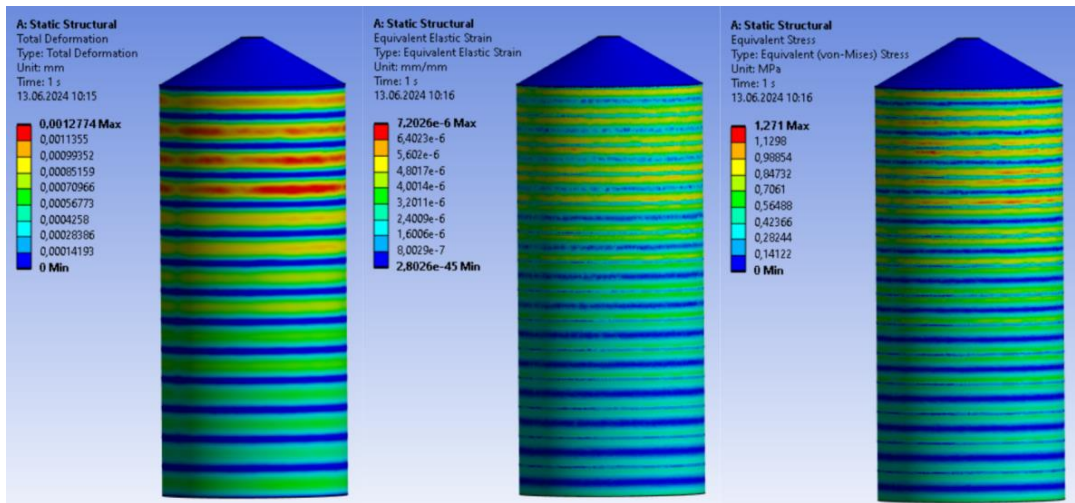
Şekil B.18 Silo 4.2-7 statik analiz sonuçları



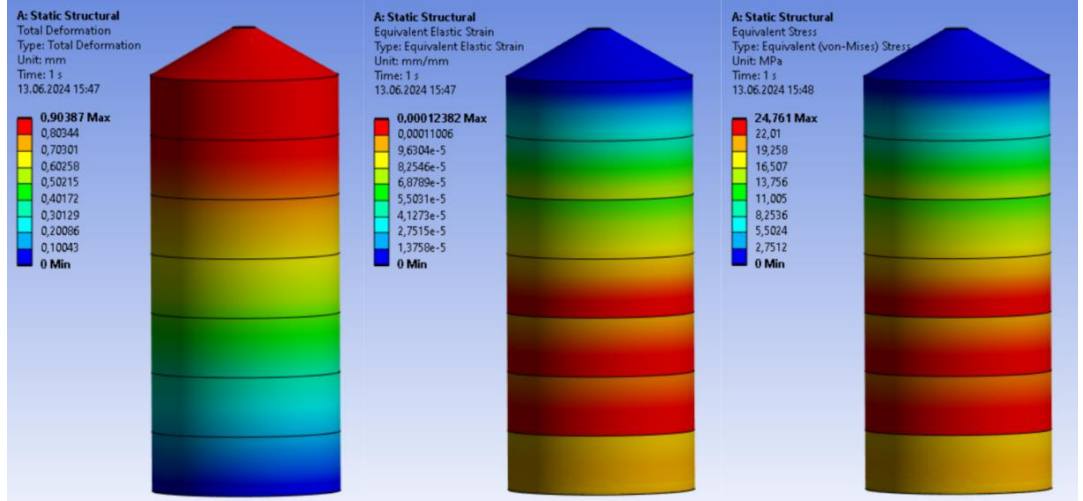
Şekil B.19 Silo 4.2-8 statik analiz sonuçları



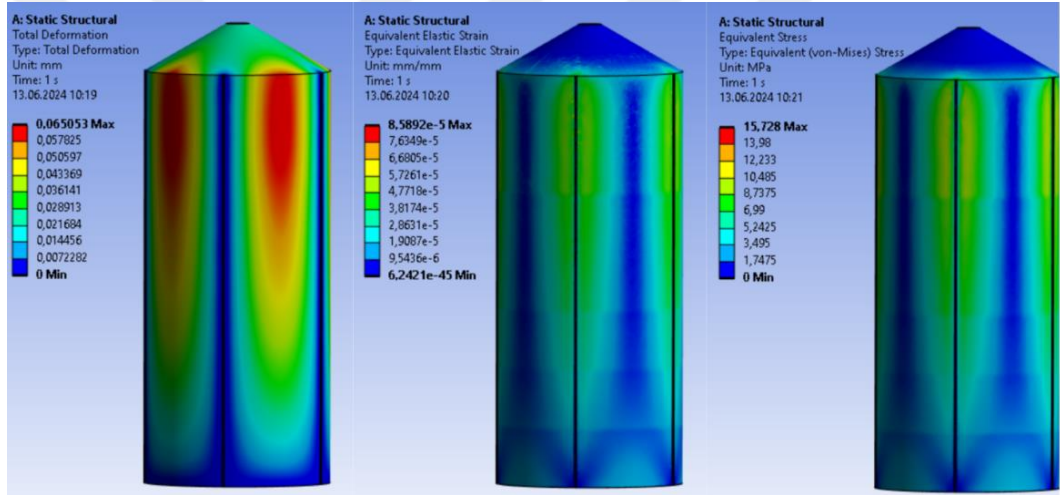
Şekil B.20 Silo 4.2-9 statik analiz sonuçları



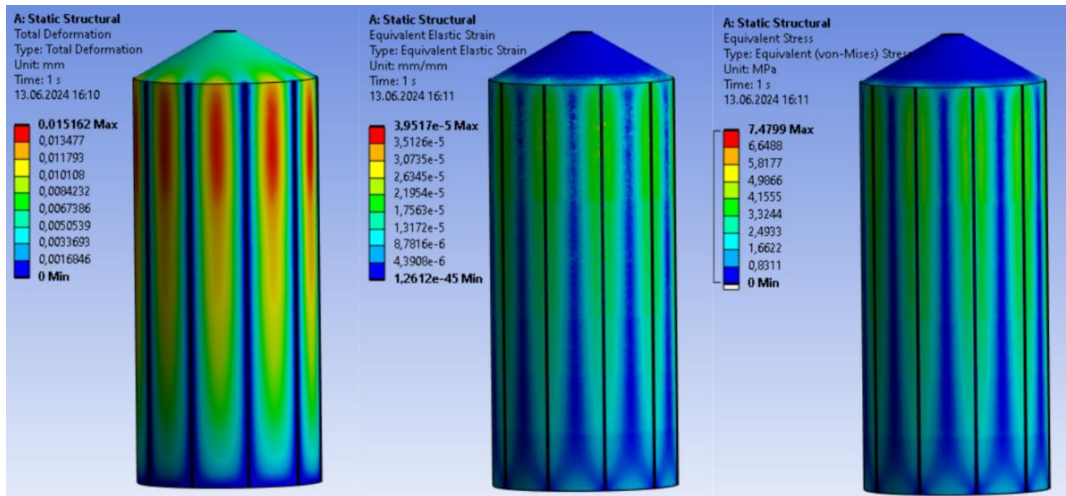
Şekil B.21 Silo 4.2-10 statik analiz sonuçları



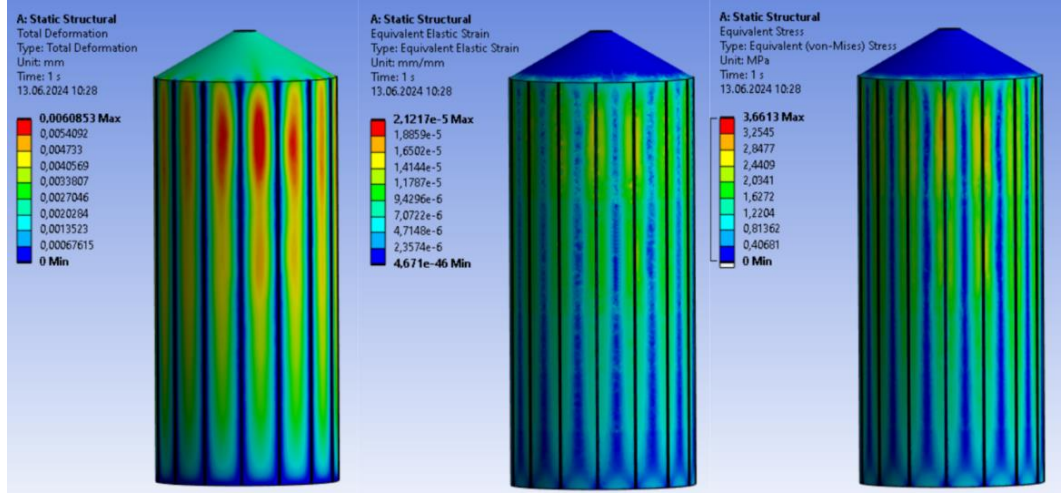
Şekil B.22 Silo 4.3 statik analiz sonuçları



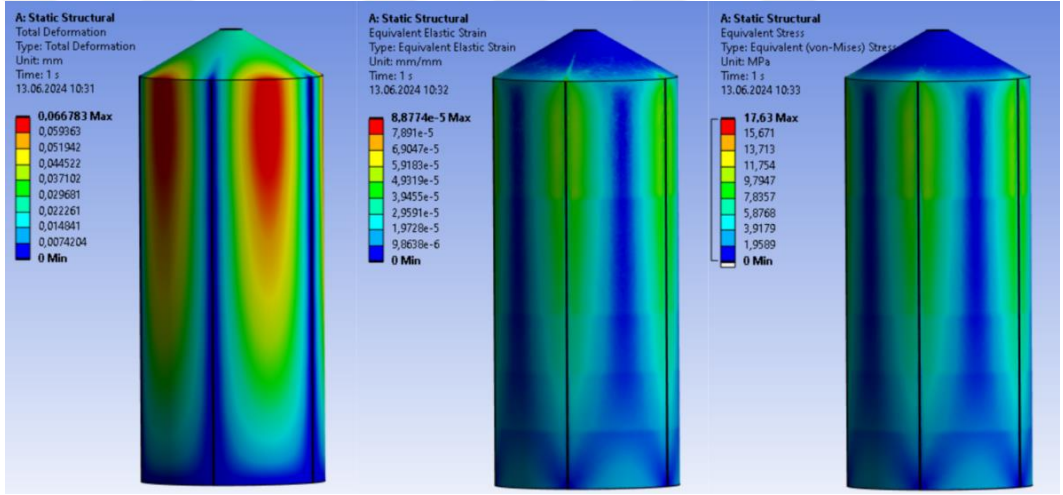
Şekil B.23 Silo 4.3-1 statik analiz sonuçları



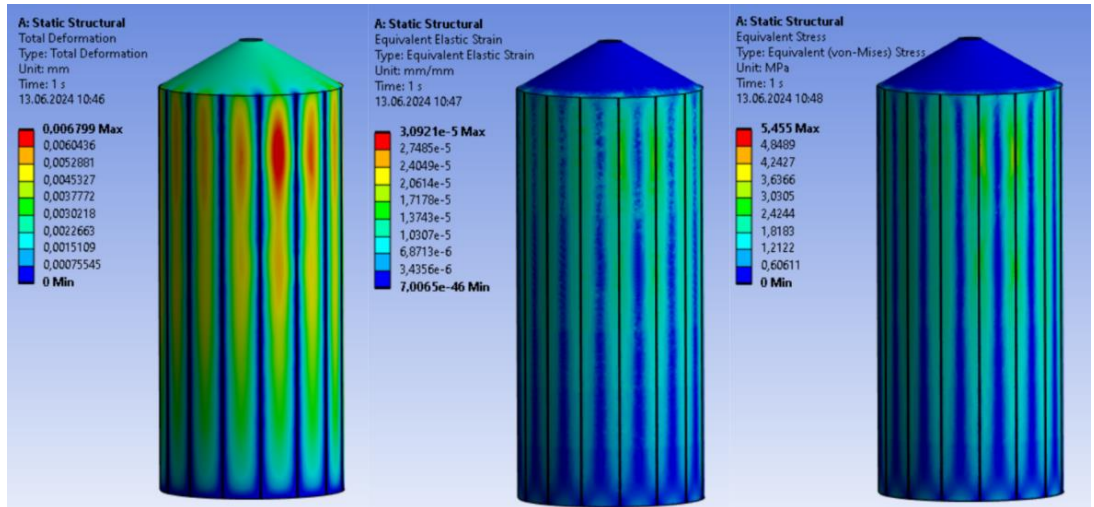
Şekil B.24 Silo 4.3-2 statik analiz sonuçları



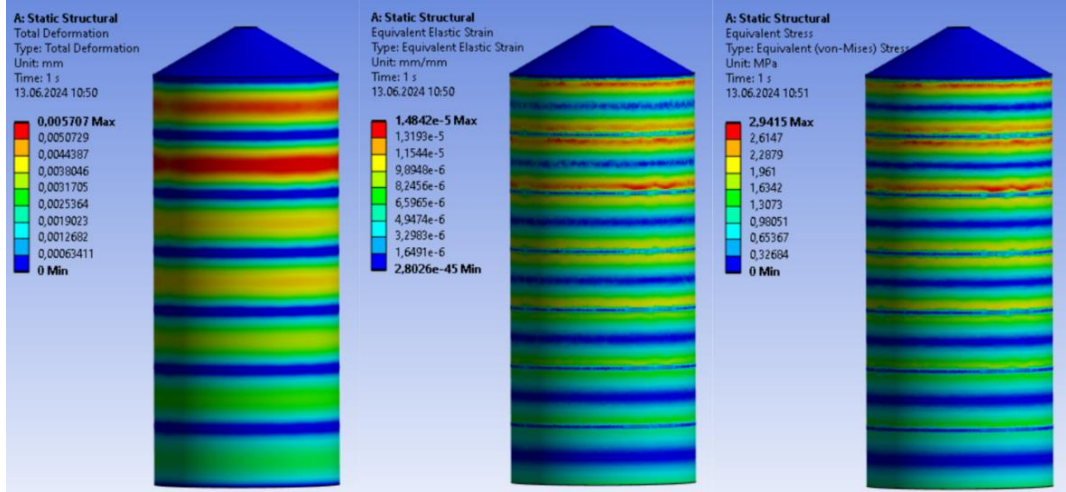
Şekil B.25 Silo 4.3-3 statik analiz sonuçları



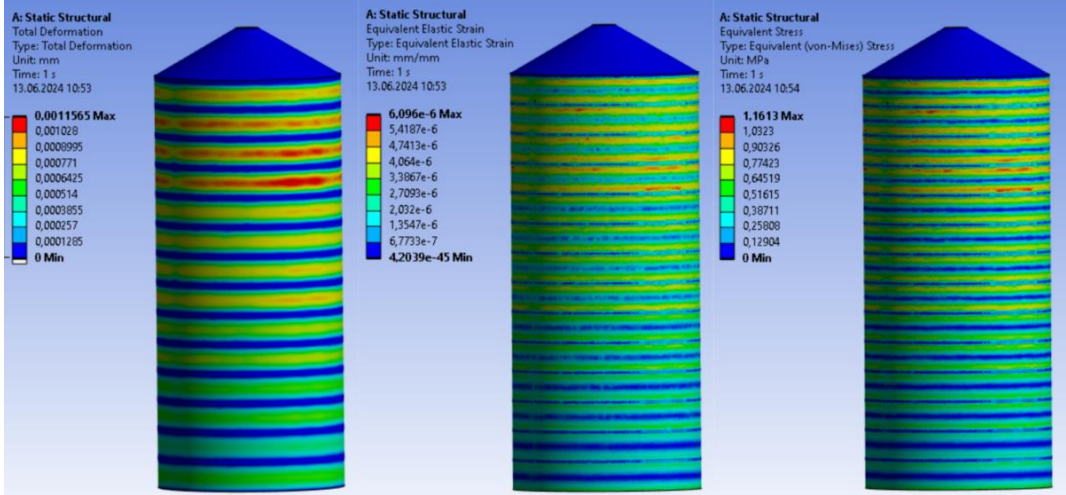
Şekil B.26 Silo 4.3-4 statik analiz sonuçları



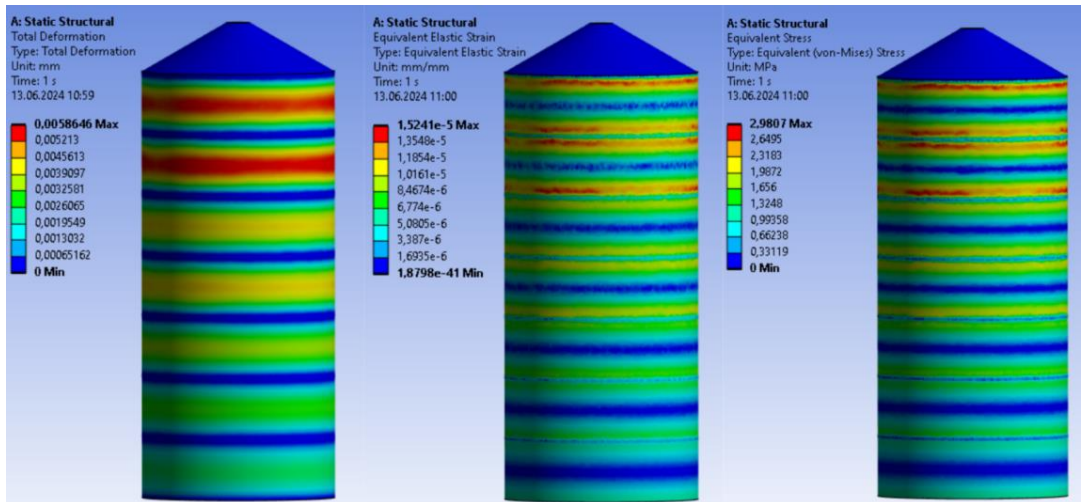
Şekil B.27 Silo 4.3-6 statik analiz sonuçları



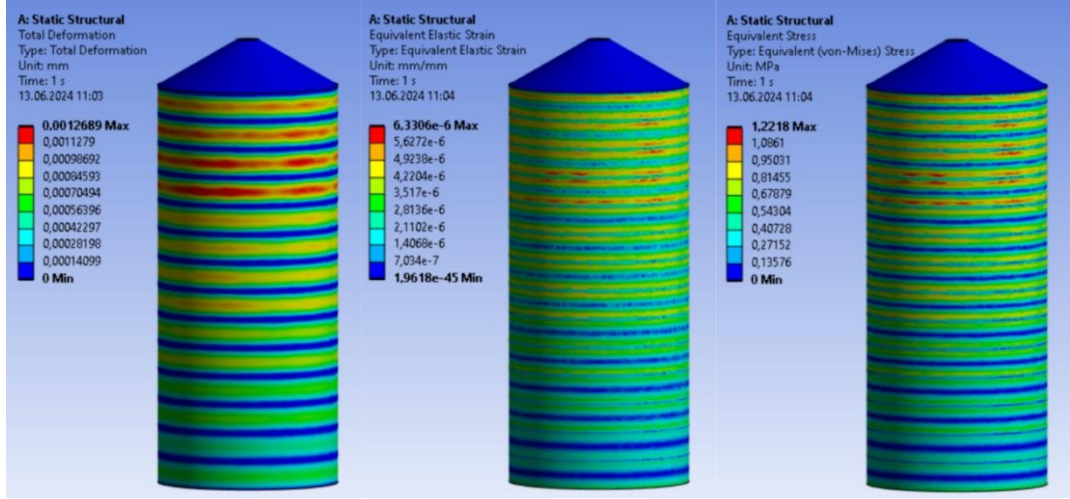
Şekil B.28 Silo 4.3-7 statik analiz sonuçları



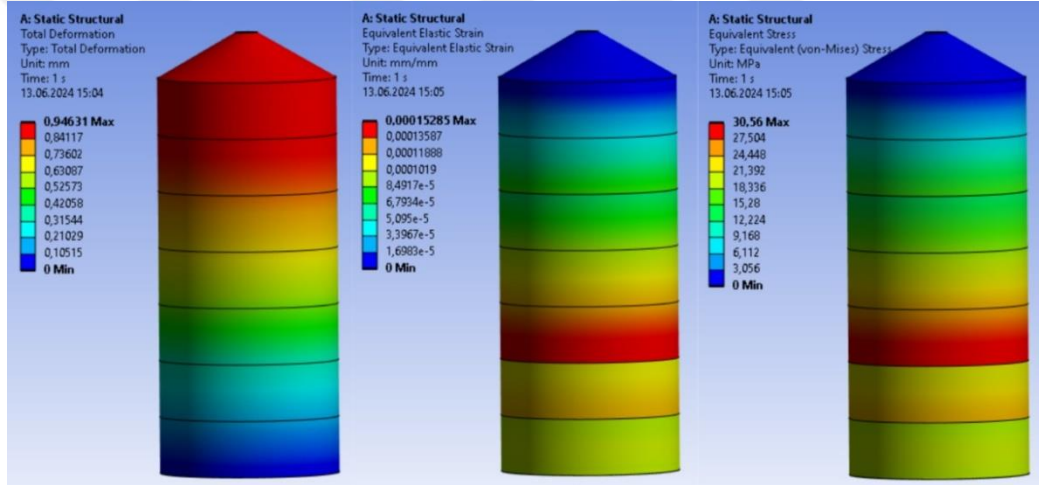
Şekil B.29 Silo 4.3-8 statik analiz sonuçları



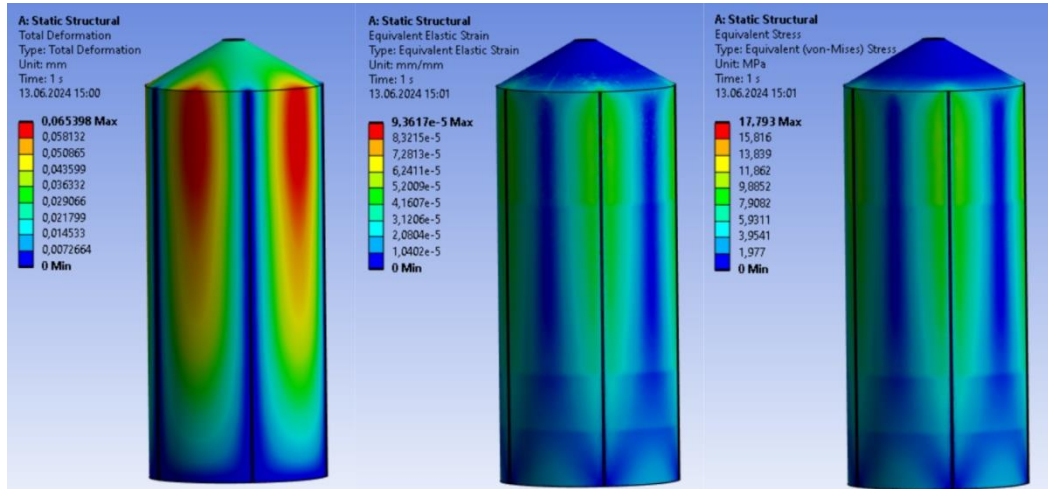
Şekil B.30 Silo 4.3-9 statik analiz sonuçları



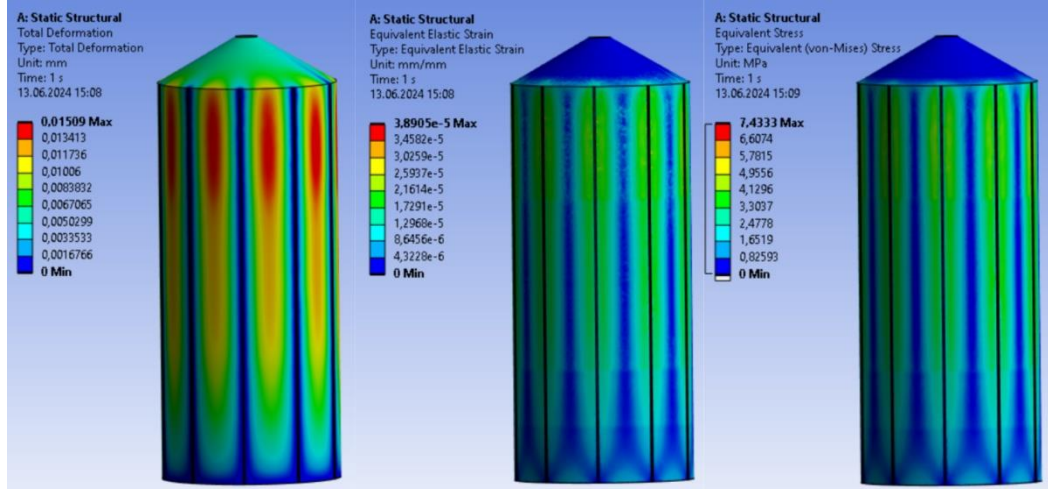
Şekil B.31 Silo 4.3-10 statik analiz sonuçları



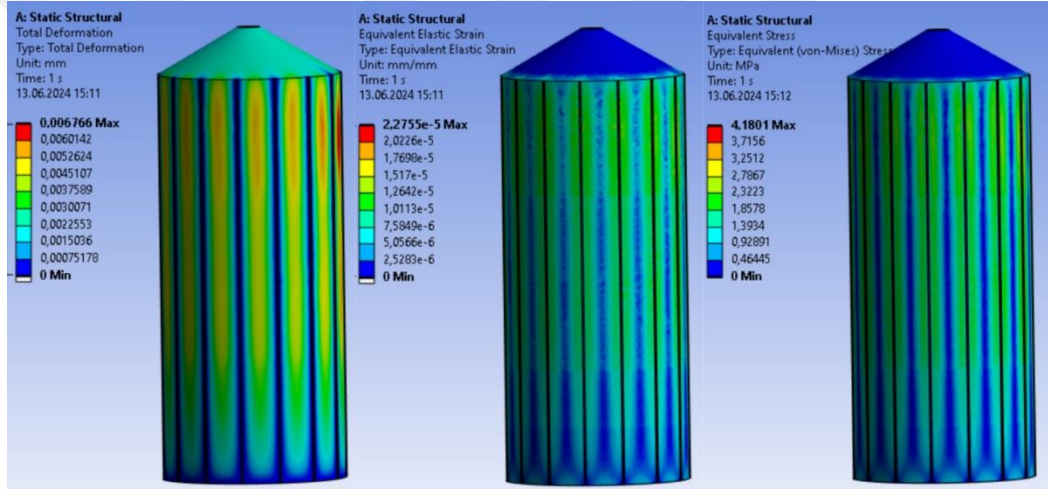
Şekil B.32 Silo 4.4 statik analiz sonuçları



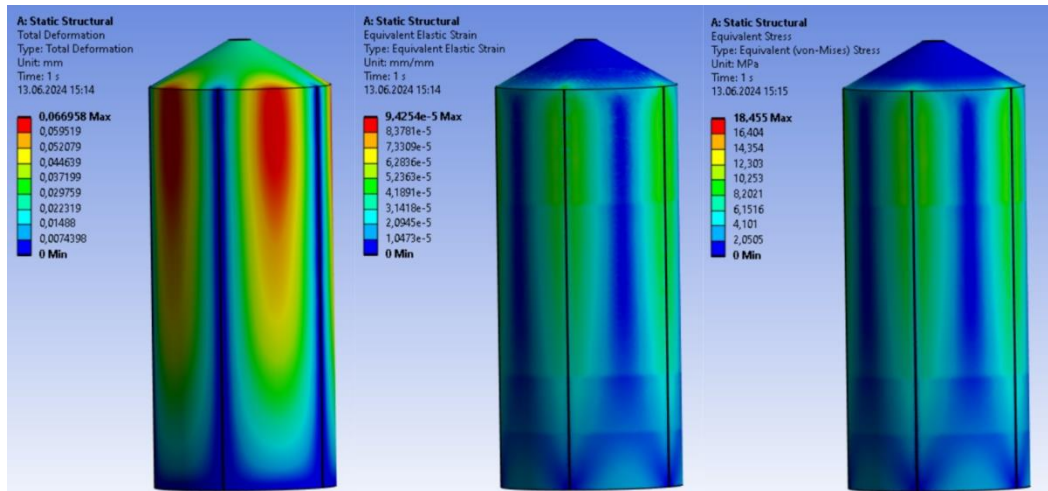
Şekil B.33 Silo 4.4-1 statik analiz sonuçları



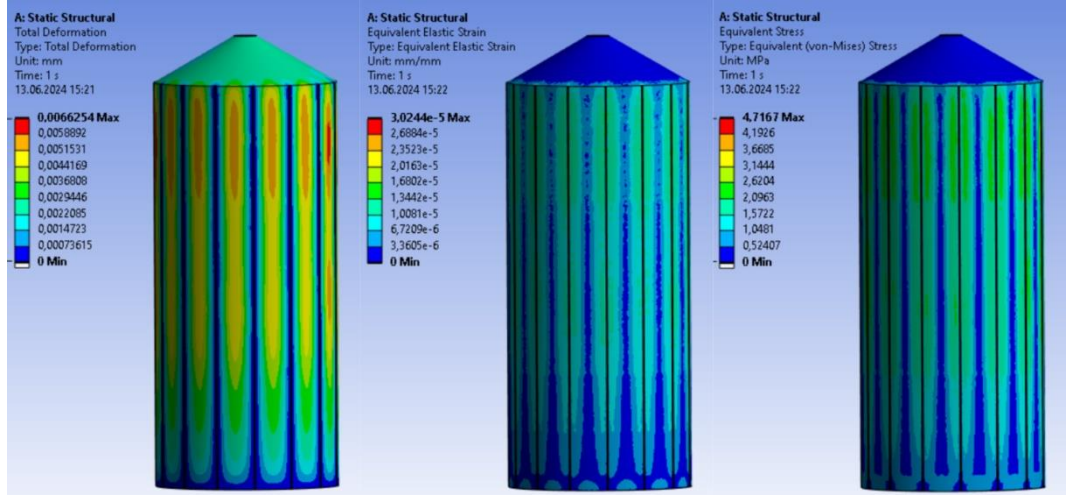
Şekil B.34 Silo 4.4-2 statik analiz sonuçları



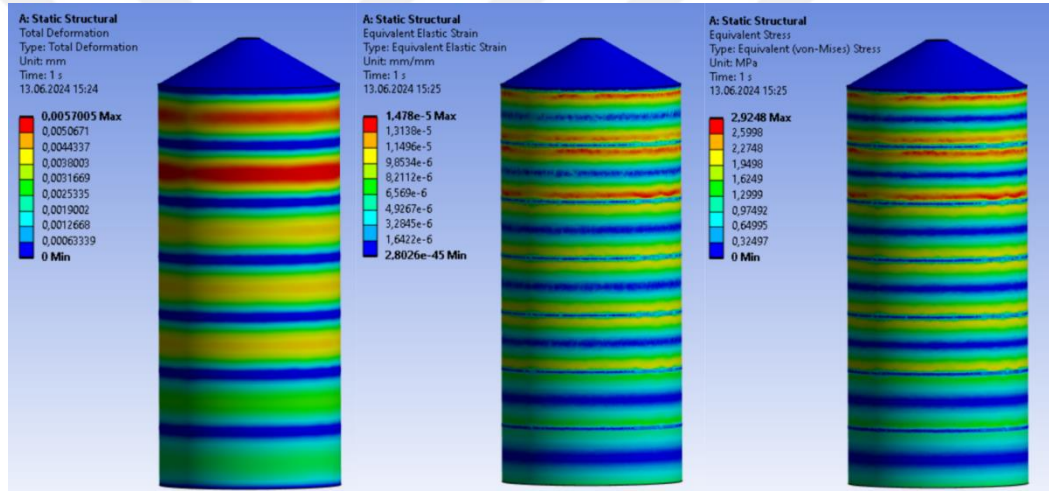
Şekil B.35 Silo 4.4-3 statik analiz sonuçları



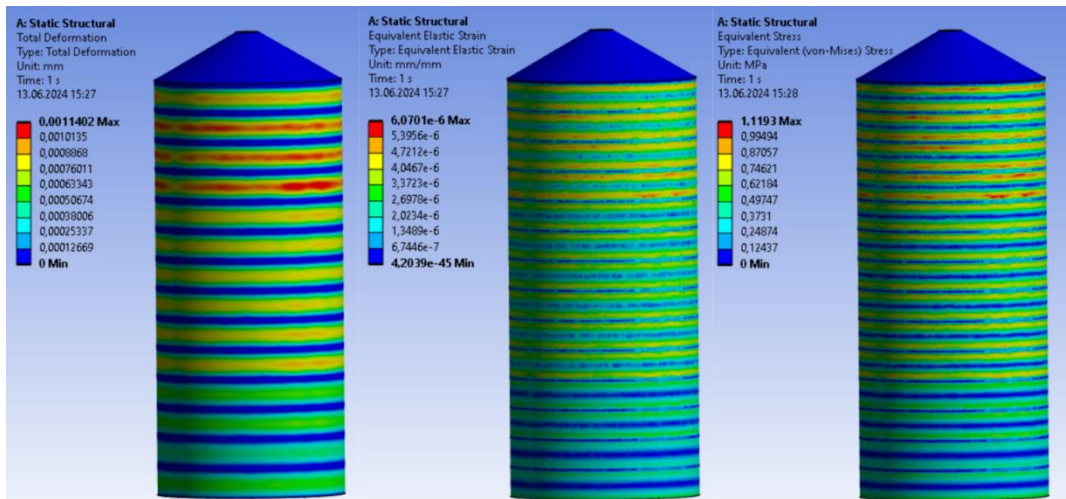
Şekil B.36 Silo 4.4-4 statik analiz sonuçları



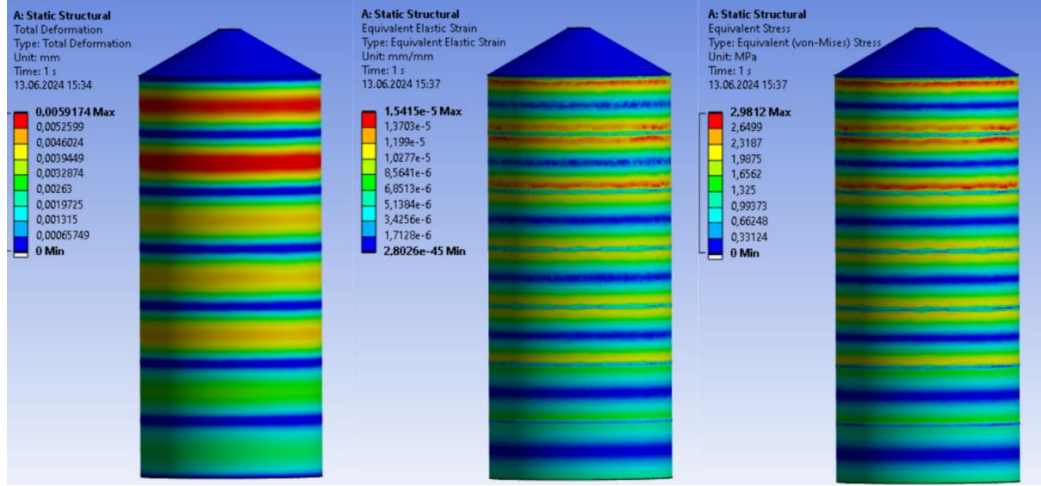
Şekil B.37 Silo 4.4-6 statik analiz sonuçları



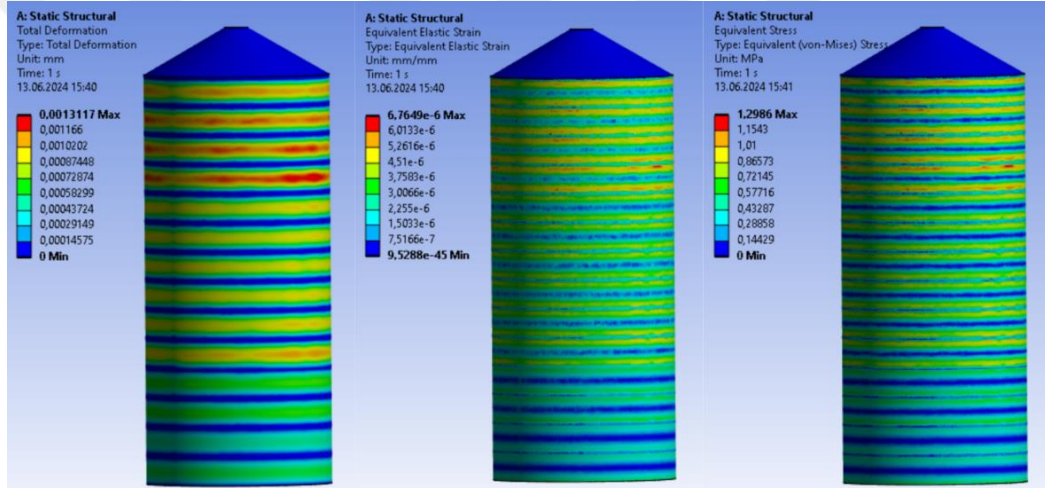
Şekil B.38 Silo 4.4-7 statik analiz sonuçları



Şekil B.39 Silo 4.4-8 statik analiz sonuçları

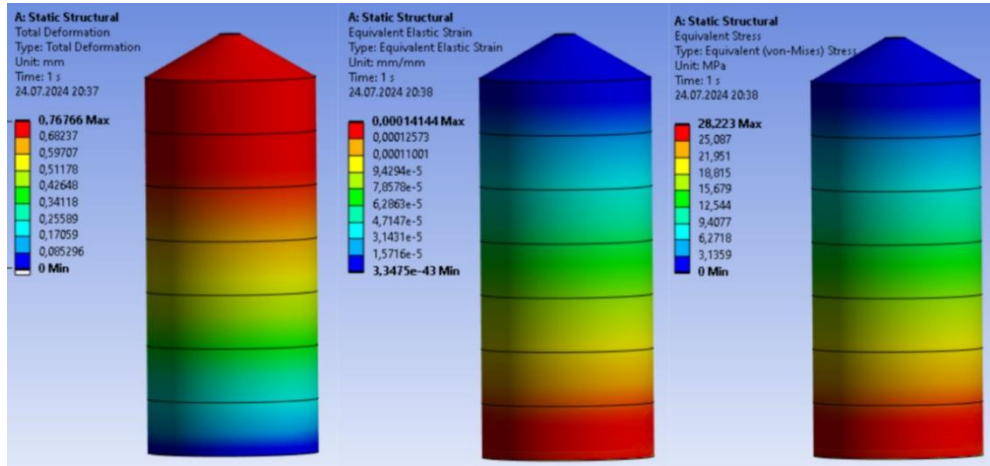


Şekil B.40 Silo 4.4-9 statik analiz sonuçları

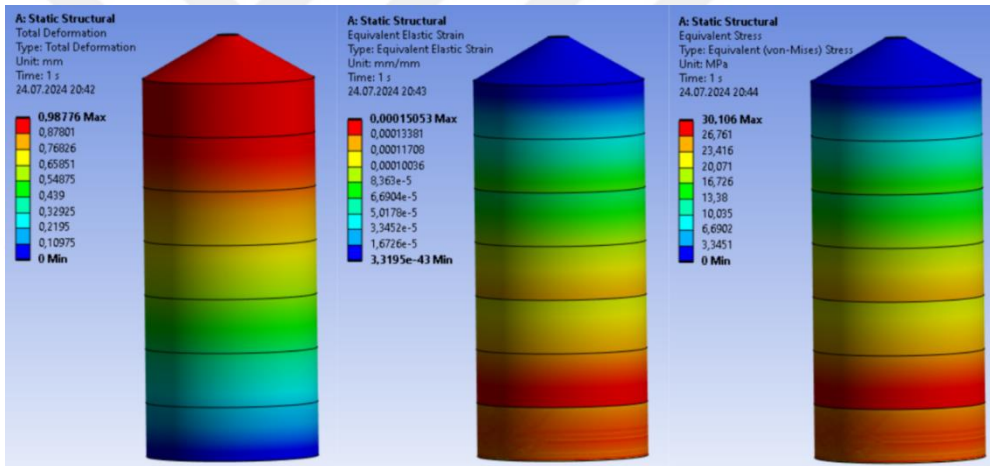


Şekil B.41 Silo 4.4-10 statik analiz sonuçları

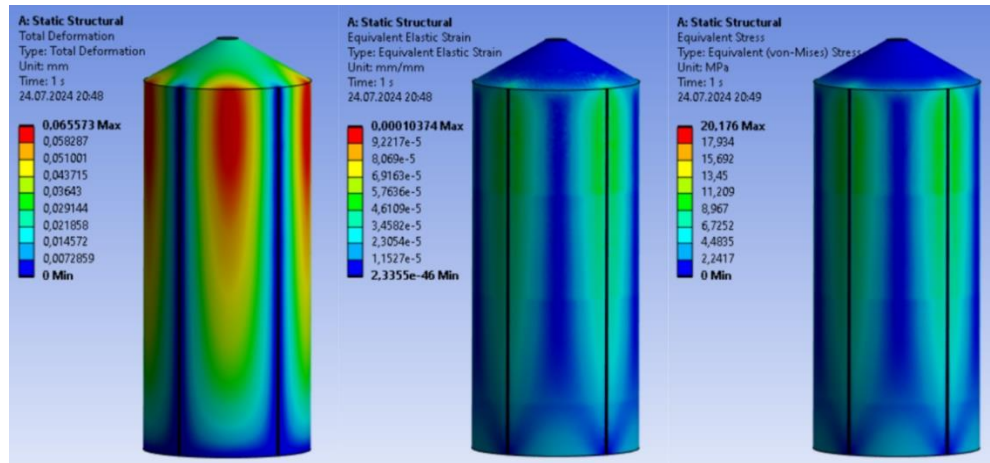
EK C. Sac Kalınlığı 3 mm ile Başlayan Siloların ANSYS Görselleri



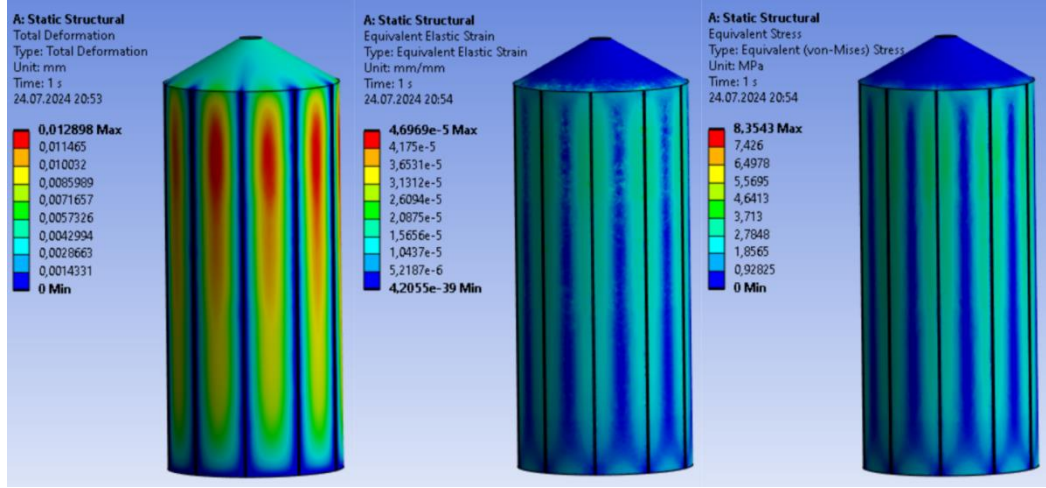
Şekil C.1 Silo 3 statik analiz sonuçları



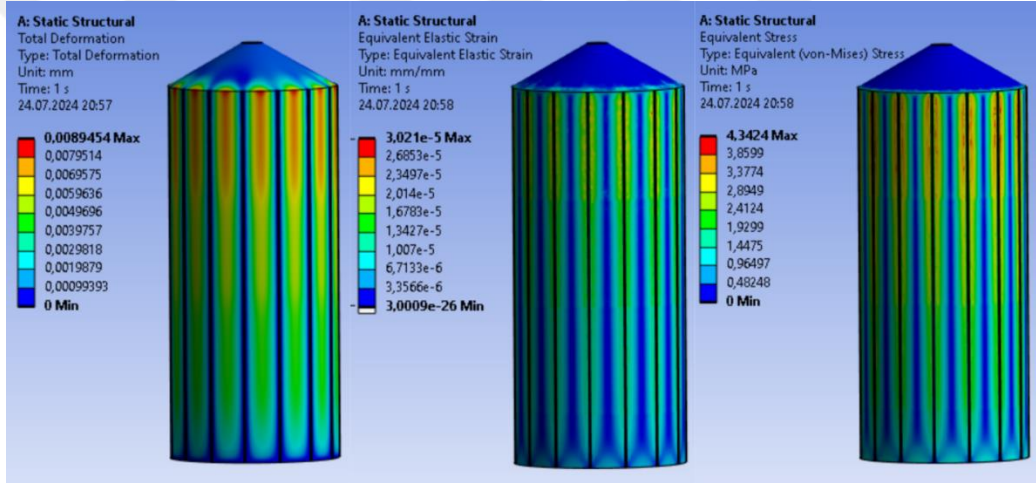
Şekil C.2 Silo 3.1 statik analiz sonuçları



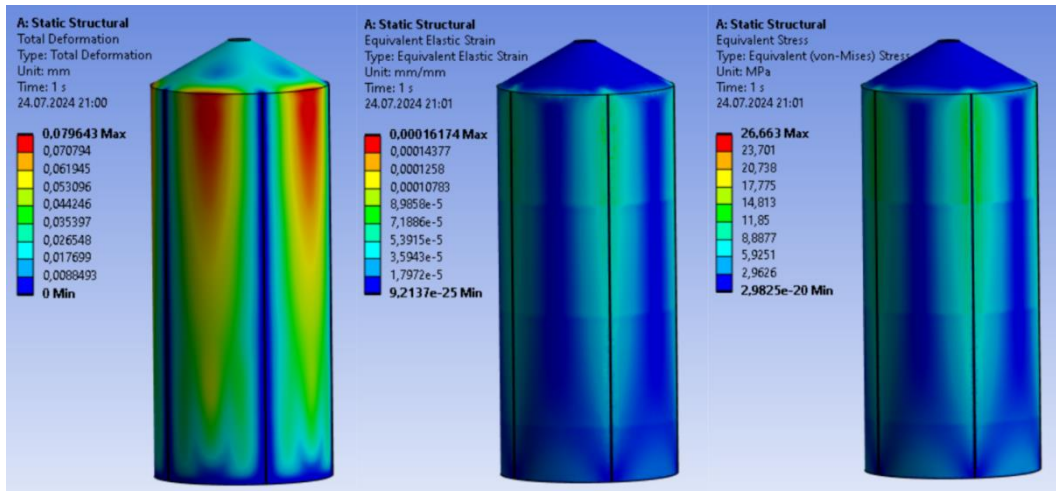
Şekil C.3 Silo 3.1-1 statik analiz sonuçları



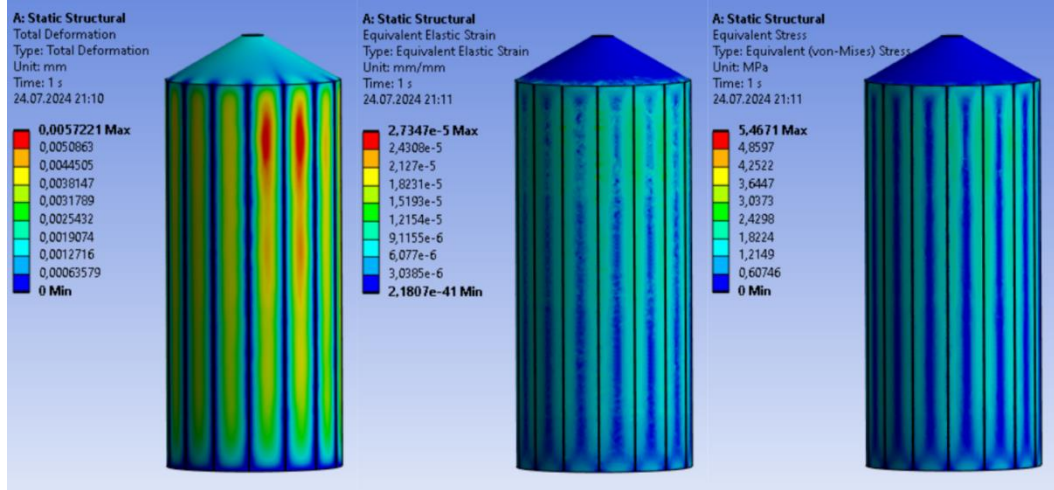
Şekil C.4 Silo 3.1-2 statik analiz sonuçları



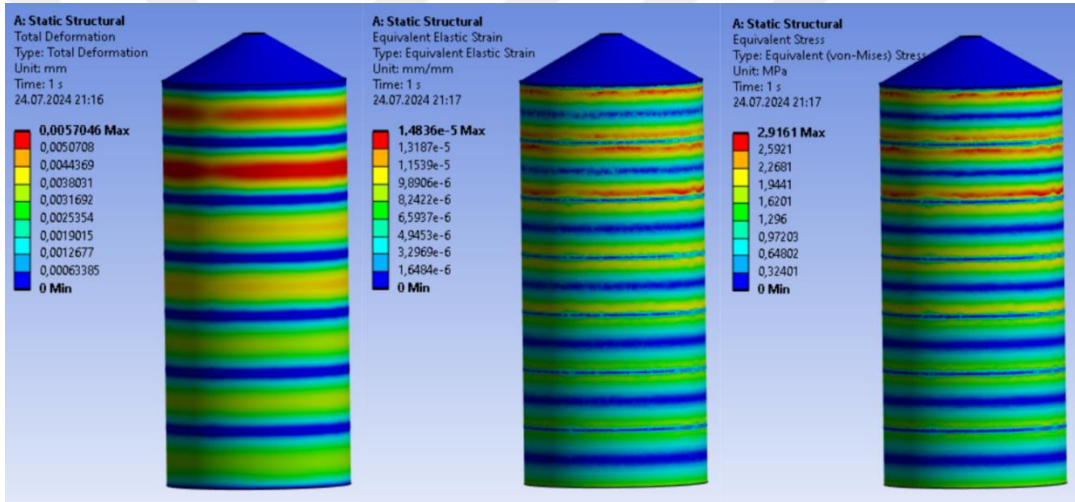
Şekil C.5 Silo 3.1-3 statik analiz sonuçları



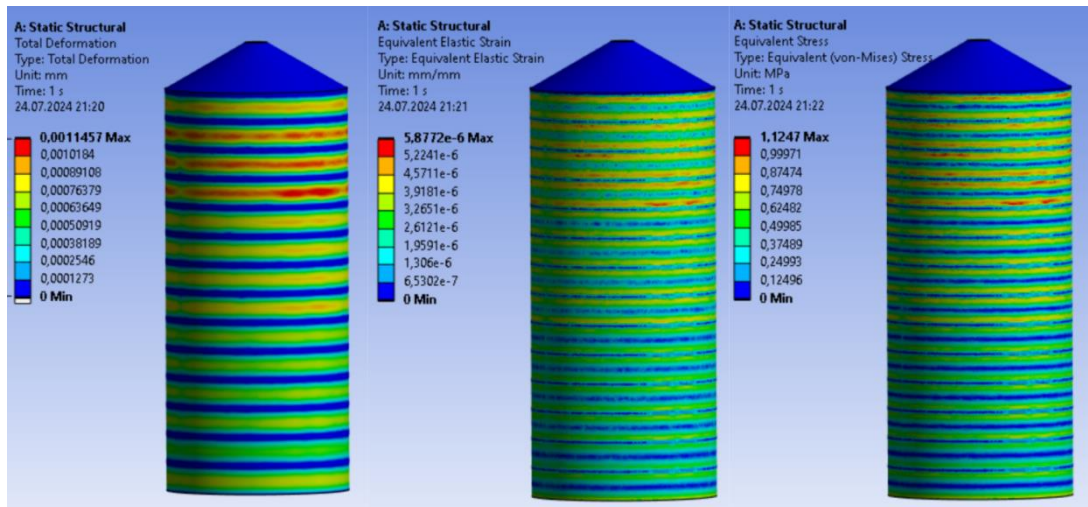
Şekil C.6 Silo 3.1-4 statik analiz sonuçları



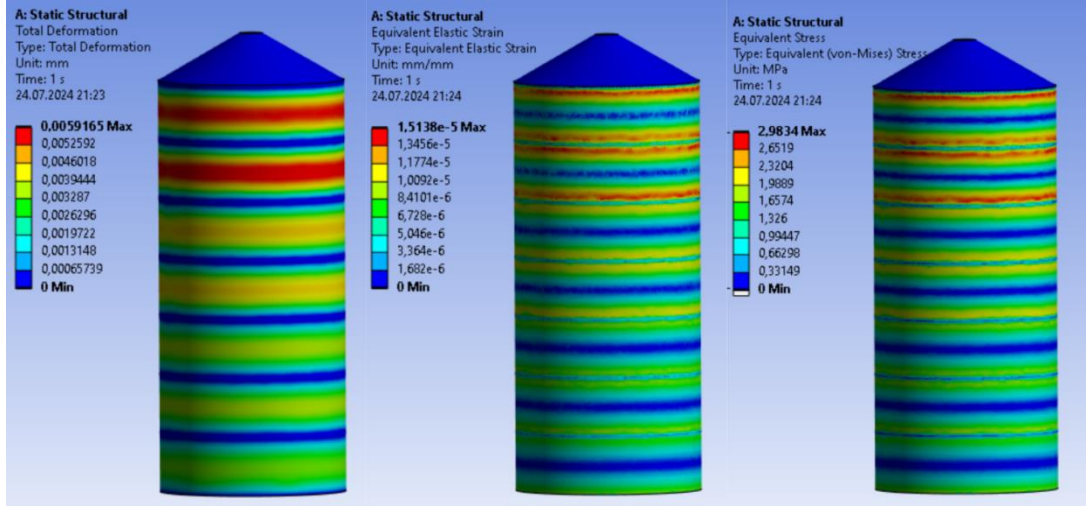
Şekil C.7 Silo 3.1-6 statik analiz sonuçları



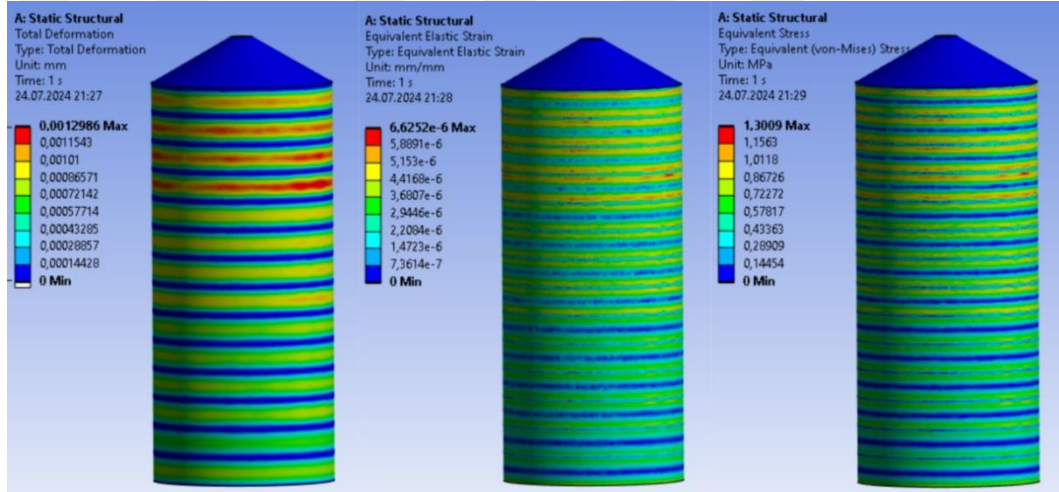
Şekil C.8 Silo 3.1-7 statik analiz sonuçları



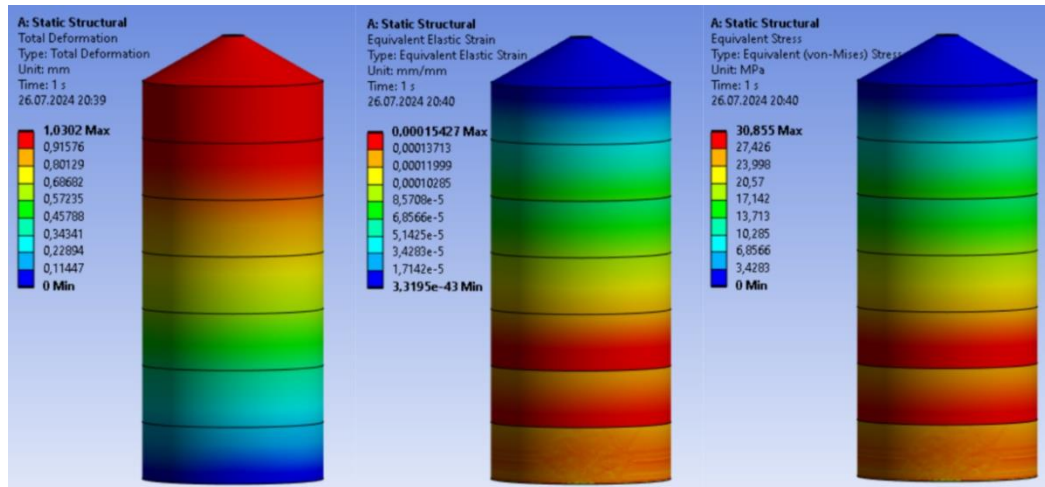
Şekil C.9 Silo 3.1-8 statik analiz sonuçları



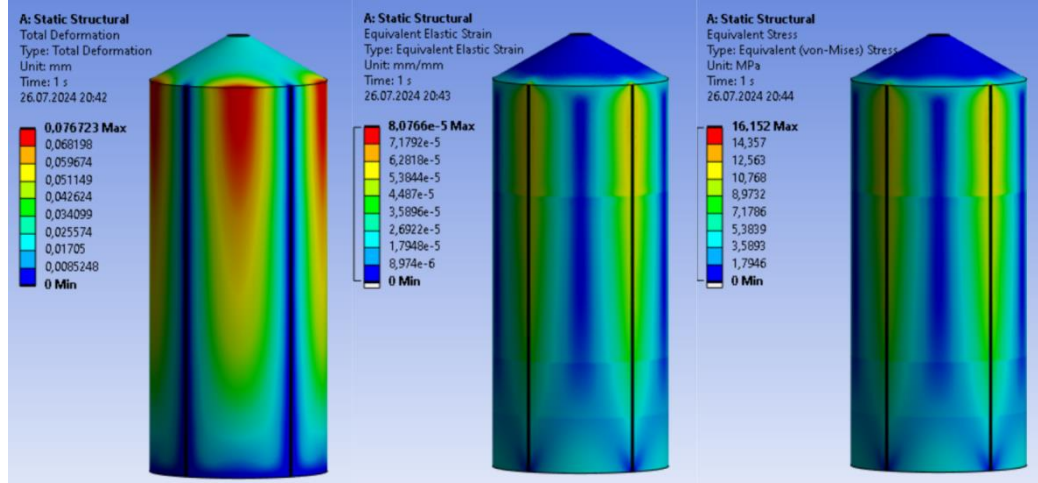
Şekil C.10 Silo 3.1-9 statik analiz sonuçları



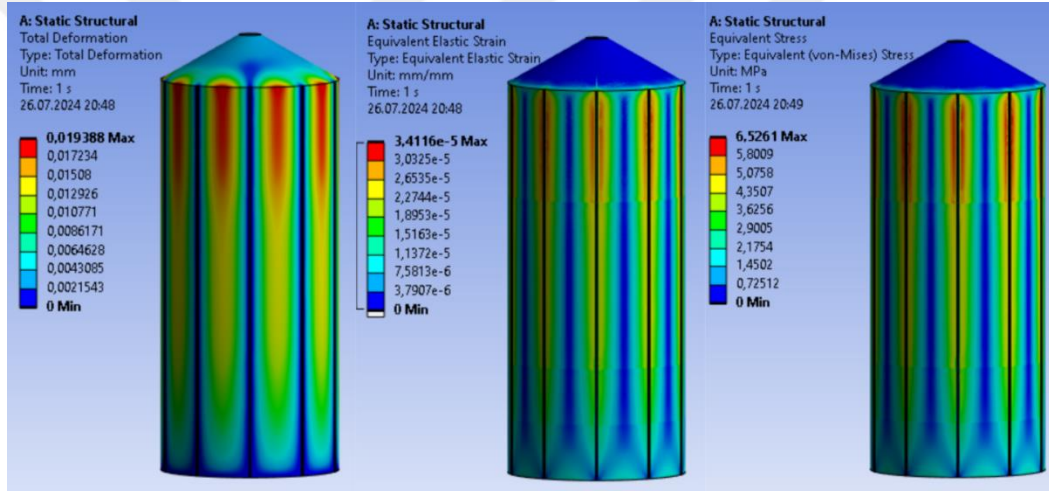
Şekil C.11 Silo 3.1-10 statik analiz sonuçları



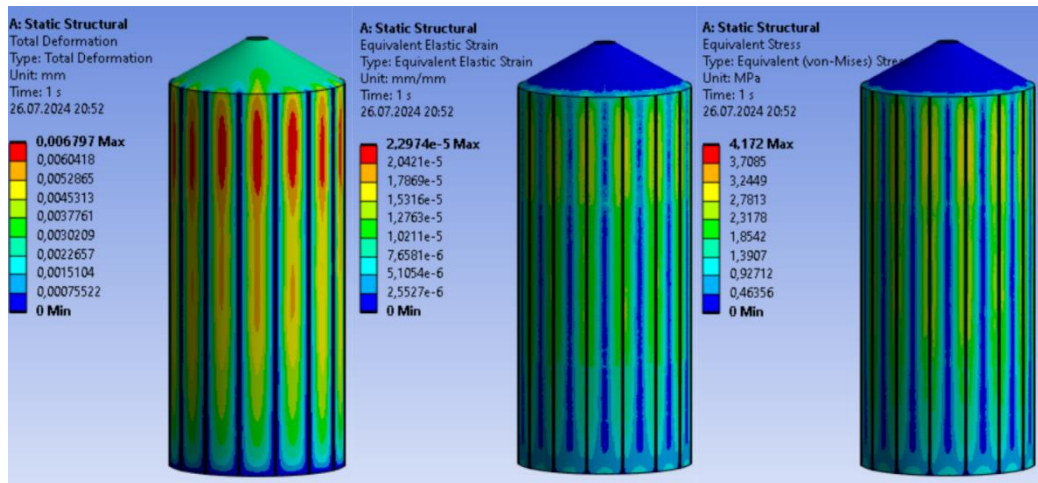
Şekil C.12 Silo 3.1-10 statik analiz sonuçları



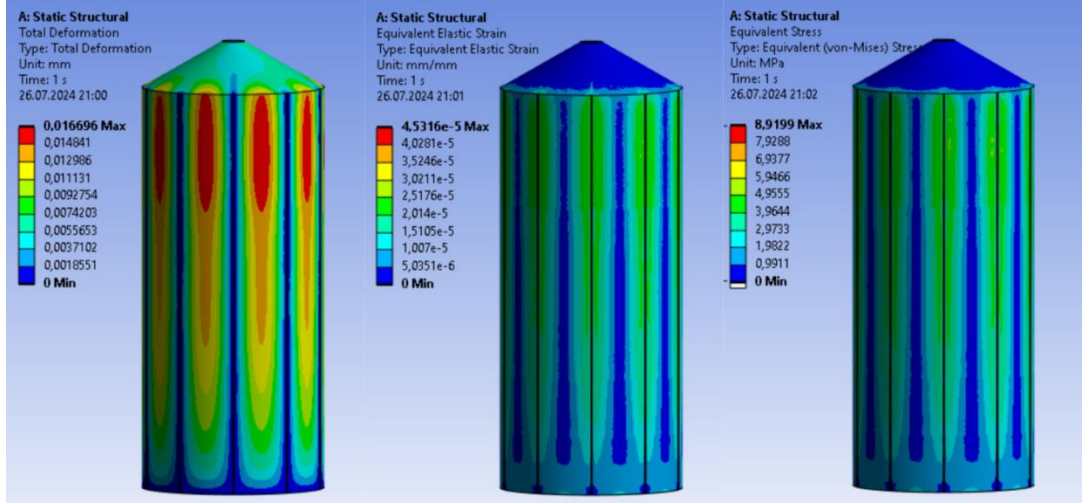
Şekil C.13 Silo 3.2-1 statik analiz sonuçları



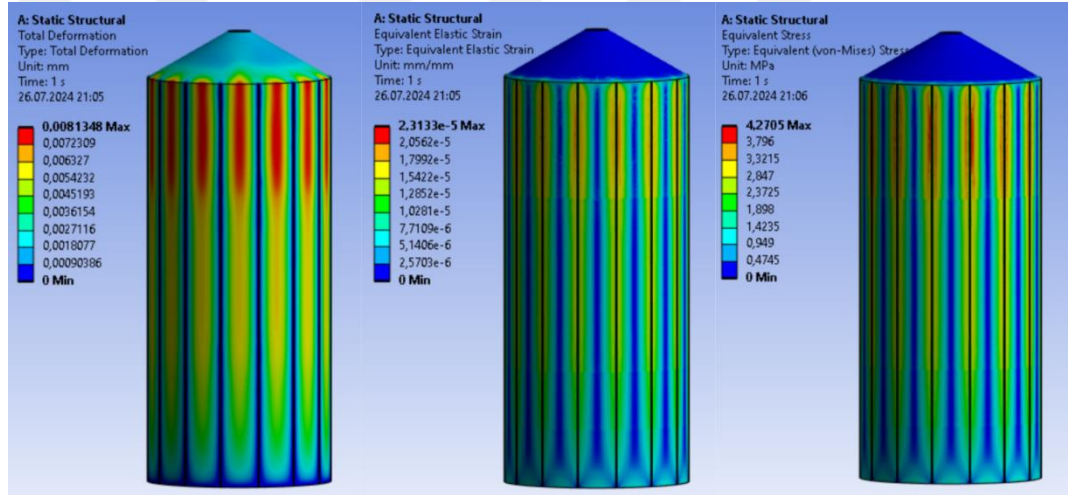
Şekil C.14 Silo 3.2-2 statik analiz sonuçları



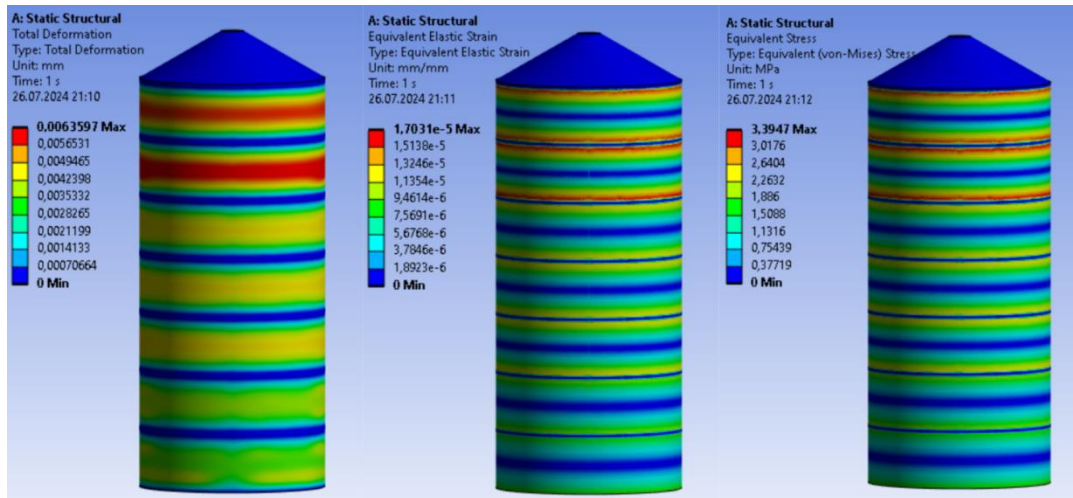
Şekil C.15 Silo 3.2-3 statik analiz sonuçları



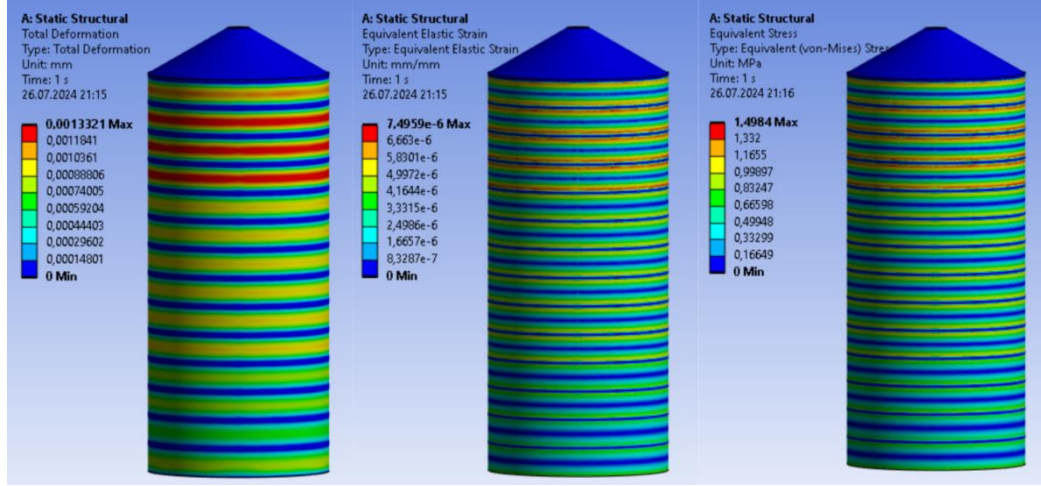
Şekil C.16 Silo 3.2-5 statik analiz sonuçları



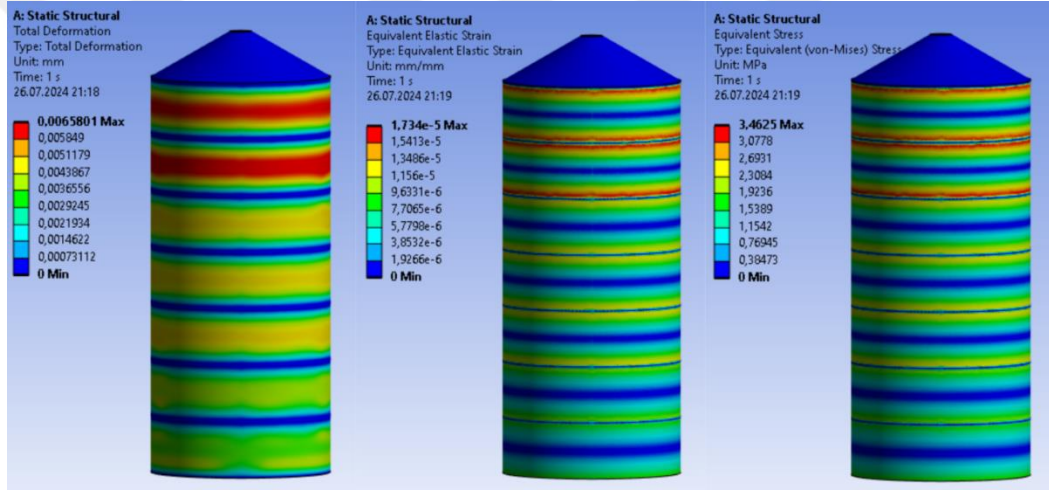
Şekil C.17 Silo 3.2-6 statik analiz sonuçları



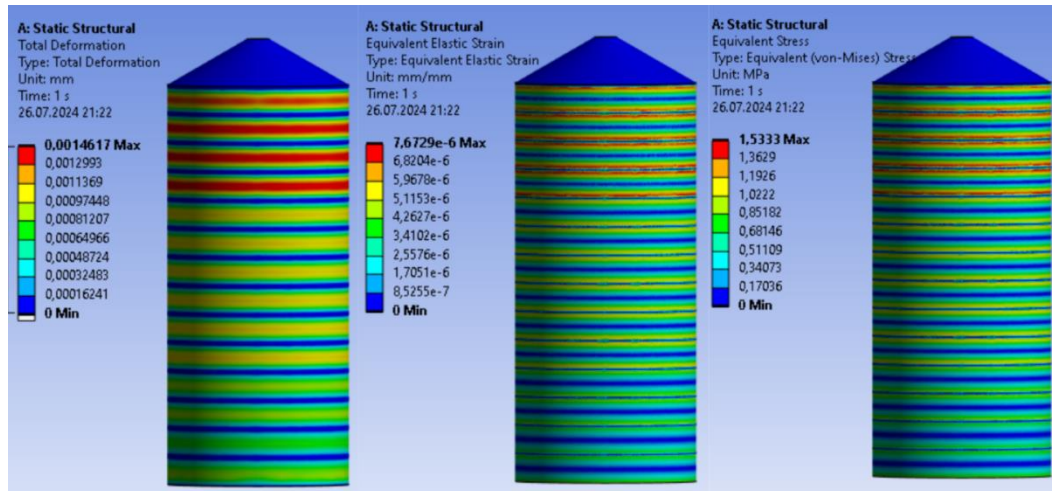
Şekil C.18 Silo 3.2-7 statik analiz sonuçları



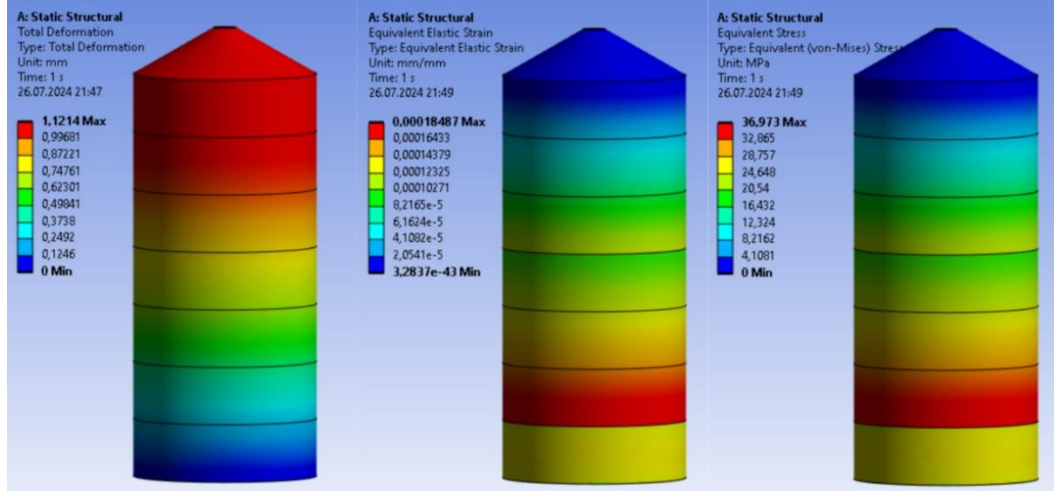
Şekil C.19 Silo 3.2-8 statik analiz sonuçları



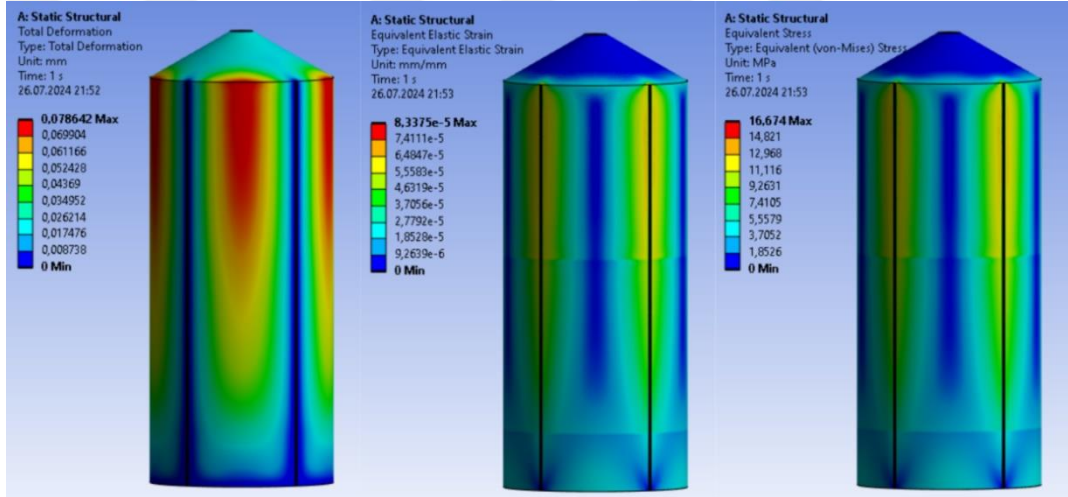
Şekil C.20 Silo 3.2-9 statik analiz sonuçları



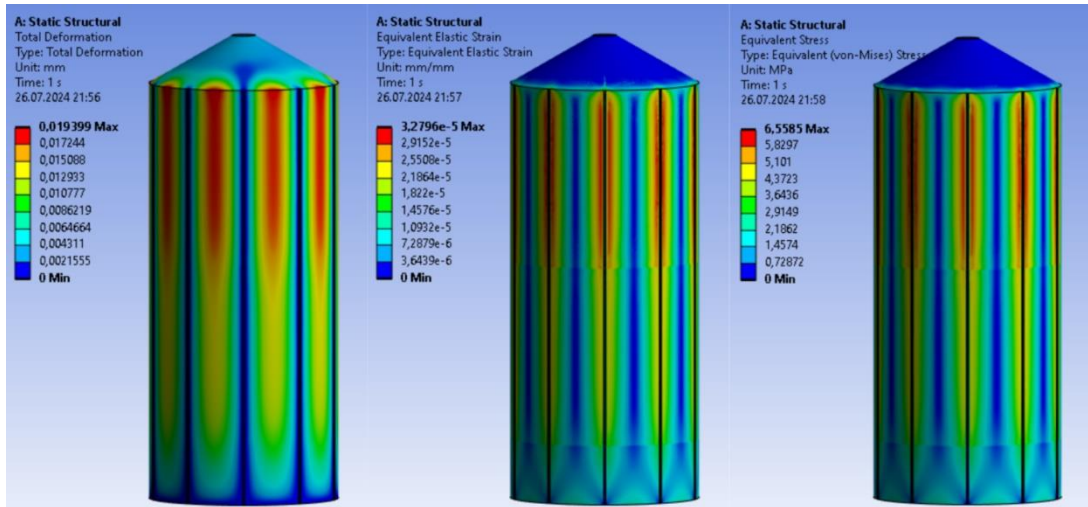
Şekil C.21 Silo 3.2-10 statik analiz sonuçları



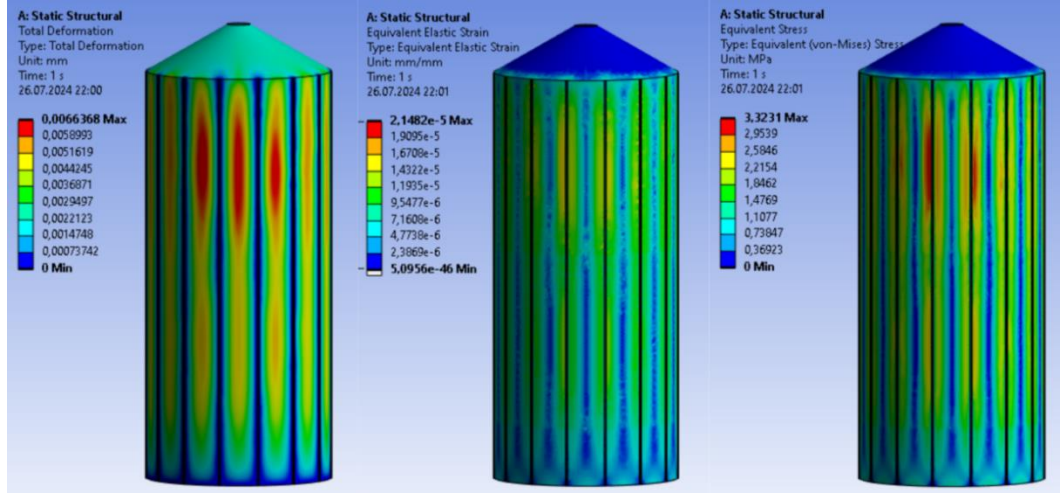
Şekil C.22 Silo 3.3 statik analiz sonuçları



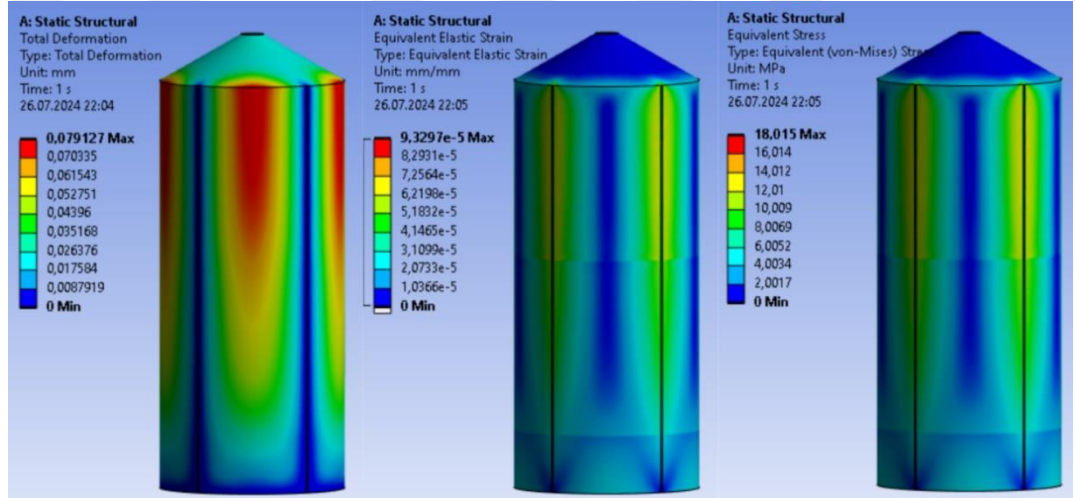
Şekil C.23 Silo 3.3-1 statik analiz sonuçları



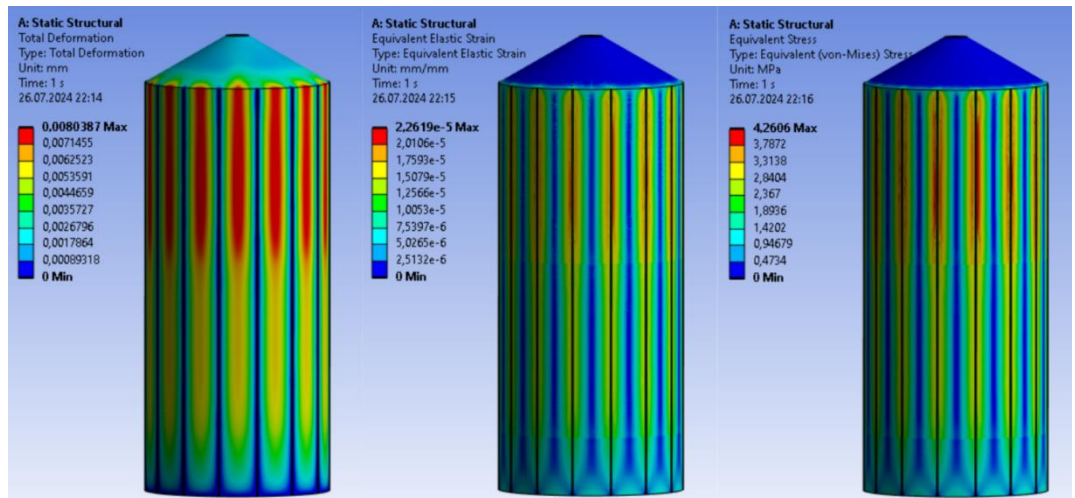
Şekil C.24 Silo 3.3-2 statik analiz sonuçları



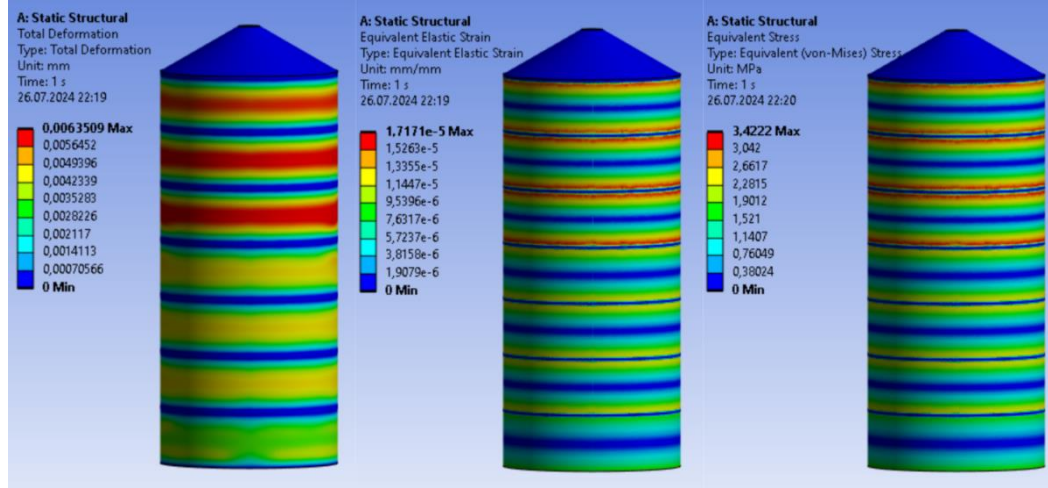
Şekil C.25 Silo 3.3-3 statik analiz sonuçları



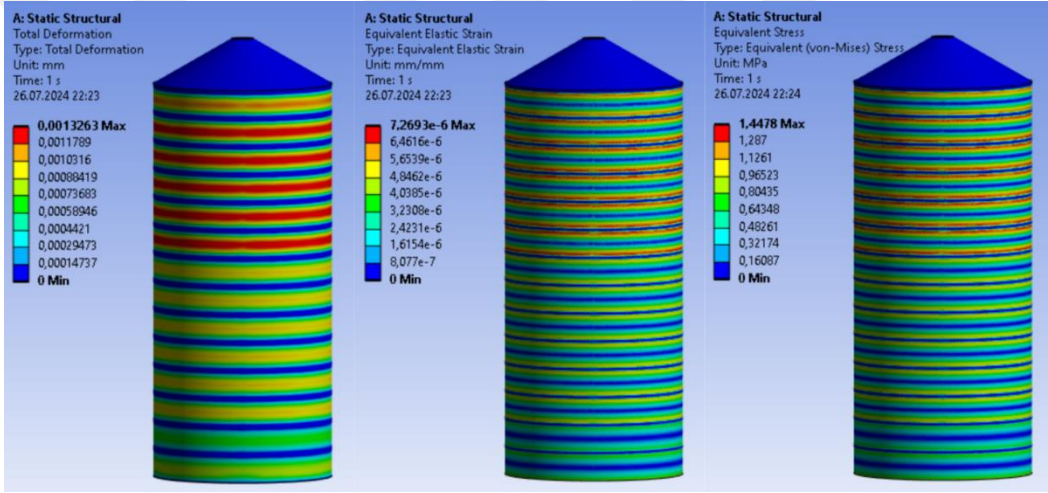
Şekil C.26 Silo 3.3-4 statik analiz sonuçları



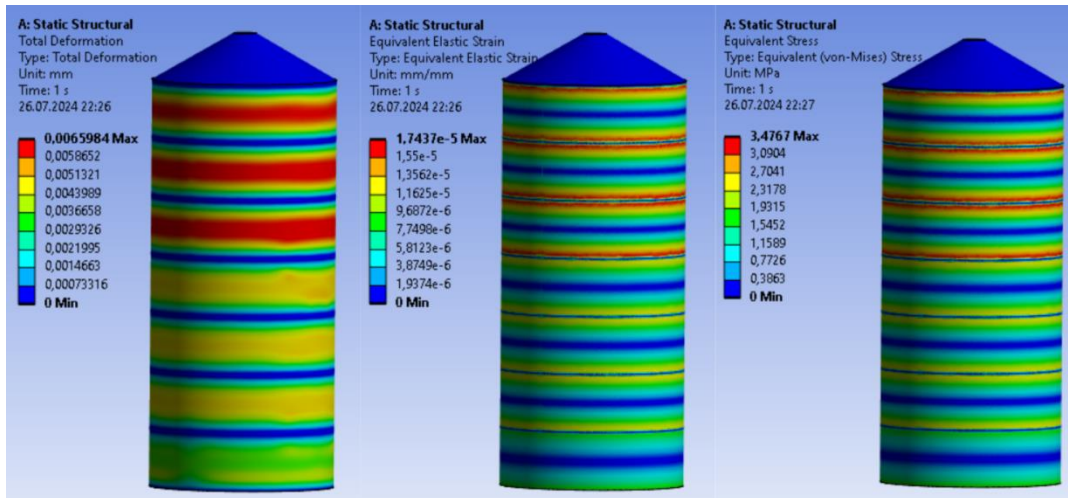
Şekil C.27 Silo 3.3-6 statik analiz sonuçları



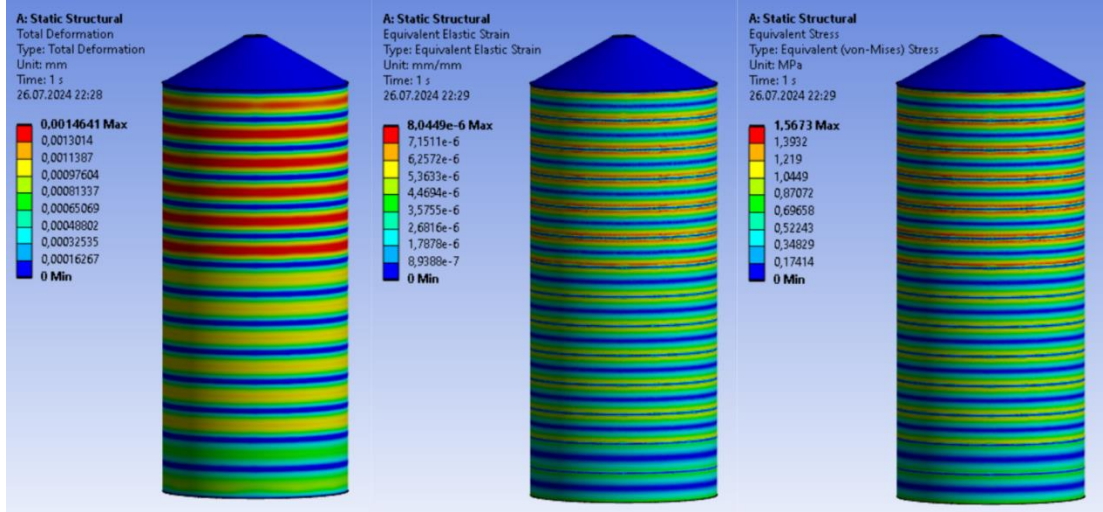
Şekil C.28 Silo 3.3-7 statik analiz sonuçları



Şekil C.29 Silo 3.3-8 statik analiz sonuçları



Şekil C.30 Silo 3.3-9 statik analiz sonuçları



Şekil C.31 Silo 3.3-10 statik analiz sonuçları