

DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK KAPASİTELİ DÜŞEY DEPOLAMA
TANKLARININ TASARIMI



Emre ÇABUK

Eylül, 2019

İZMİR

YÜKSEK KAPASİTELİ DÜŞEY DEPOLAMA TANKLARININ TASARIMI

Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Yüksek Lisans Tezi

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, Mekanik Programı

Emre ÇABUK

Eylül, 2019

İZMİR

YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU

EMRE ÇABUK, tarafından DOÇ. DR. YUSUF ARMAN yönetiminde hazırlanan
“YÜKSEK KAPASİTELİ DÜŞEY DEPOLAMA TANKLARININ TASARIMI”
başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir Yüksek Lisans
tezi olarak kabul edilmiştir.



Doç. Dr. Yusuf ARMAN

Yönetici



Dr. Öğr. Üyesi Okan ÖZDEMİR

Jüri Üyesi



Dr. Öğr. Üyesi İbrahim Fadıl SOYKOÇ

Jüri Üyesi



Prof. Dr. Kadriye ERTEKİN

Müdür

Fen Bilimleri Enstitüsü

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tezimin uygulanması ve tamamlanması süresince faydalı bilgilerini ve deneyimlerini benimle paylaştığı için hocam saygıdeğer Doç. Dr. Yusuf ARMAN'a sonsuz teşekkür ederim.

Çalışmam boyunca benden yardımlarını esirgemeyen arkadaşım Halis KANDAŞ'a teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Ayrıca, tez çalışmam süresince bir yıl boyunca piyasa ve sektörel bilgi kazanma şansını sağlayan Protank Makine Ve Ekipmanları Sanayi Tic. Ltd. Şti. teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak, hayatımın her döneminde her zaman maddi ve manevi destekleriyle yanımda olan aileme teşekkürlerimi ve sonsuz sevgilerimi sunarım.

Emre ÇABUK

YÜKSEK KAPASİTELİ DÜŞEY DEPOLAMA TANKLARININ TASARIMI

ÖZ

Bu çalışma kapsamında her alanda yaygınlaşan kompozit malzeme teknolojilerinden yararlanılarak, özellikle büyük kapasiteli tanklarda hedeflenen iç basınç ve dış basınç (vakumlama basıncı) değerlerini emniyetle karşılayacak tank üretimi için analizler yapılacaktır. Bu amaçla, yüksek kapasiteli depolama tankının tasarım parametrelerinin anlatıldığı 4 bölümden ve analizlerin yer aldığı 5. bölümden oluşmuştur.

Birinci bölümde, yüksek kapasiteli depolama tankları hakkında genel bilgilere ve sınıflandırılmasına yer verilmiştir. Depolama tankına etkiyen yüklerin tanımlanması ve yükler karşısında oluşan gerilmeler anlatılmıştır. İç basınç altındaki kaplarda genel gerilme analizi yapılarak kapalı kaptaki genel gerilme formülleri ortaya konulmuştur.

İkinci bölümde, depolama tankı tasarım standartlarına ve depolama tankı malzemesi ve seçimine yer verilmiştir. API 650 'ye göre yüksek kapasiteli düşey depolama tankı tasarım kurallarına yer vererek, tank kabuk kalınlığının hesap yöntemleri ortaya konulmuştur.

Üçüncü bölümde, silindirik depolama tanklarının deprem tasarım parametreleriyle sismik yük hesaplanması verilmiştir.

Dördüncü bölümde, dış basınca neden olan rüzgâr yükünün, yapının her yükseklikteki kuvvet ve momentlerinin tasarımı verilmiştir.

Beşinci bölümde, proste kullanılan tank model alınarak kuşak sarımı yapılmadan iç ve dış basınç analizleri yapılacaktır. Daha sonra tank çevresi çelik kuşak ile sarılarak kuşak kalınlığı, genişliği değiştirilerek farklar ortaya konulacaktır. En son olarak, kuşak için kompozit malzemedan (karbon/epoksi) sarımlar yapılacaktır. Kompozit

kuşak genişliği, kuşak kalınlığı ve kuşak sayısı veya kuşaklar arası mesafenin dış basınçtan kaynaklanan burkulma yüküne etkisi araştırılacaktır.

Ek 1’de 14 metre yüksekliğinde ve 4,8 metre çapında 250 m³ hacminde ebatlarında paslanmaz çelik tankın tasarım parametreleriyle kabuk kalınlığı seçimi ek 2’de sismik kapasitesi ek 3’te rüzgâr yüküne karşı tasarımı yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Kompozit, burkulma yükü, depolama tankı, güçlendirme halkası



DESIGN OF HIGH CAPACITY VERTICAL STORAGE TANKS

ABSTRACT

Within the scope of this study, by making use of composite material technologies which are widespread in every field, especially for large capacity tanks, analyzes will be made for the production of tanks which will meet the targeted internal pressure and external pressure (vacuum pressure) values safely. For this purpose, the design parameters of the high capacity storage tank are explained in 4 sections and the analysis consists of section 5.

In the first part, general information and classification of high capacity storage tanks are given. Description of the loads acting on the storage tank and stresses caused by the loads are explained. The general stress formulas in closed containers were made by analyzing the general stress in the vessels under internal pressure.

In the second section, storage tank design standards and storage tank material and selection are given. According to API 650, high capacity vertical storage tank design rules have been introduced and calculation methods of tank shell thickness have been put forward.

In the third chapter, the seismic load calculation of the cylindrical storage tanks with earthquake design parameters is given.

In the fourth part, the design of the forces and moments of the wind load, which causes the external pressure, at every height of the structure is given.

In the fifth section, internal and external pressure analyzes will be performed without belt winding taking the tank model used in the process. Afterwards, the tank circumference will be wrapped with steel belt and the differences will be revealed by changing the belt thickness and width. Finally, windings of composite material (carbon/epoxy) will be made for the belt. The effect of composite belt width, belt

thickness and number of belts or distance between belts on the buckling load caused by external pressure will be investigated.

In Annex-1, the thickness of the stainless steel tank, which is 14 meters in height and 4.8 meters in diameter and 250 m³ in volume, was selected with the design parameters of the shell thickness and the seismic capacity in Annex -2 and the wind load in Annex -3.

Keywords: Composite, buckling load, storage tank, stiffener ring



İÇİNDEKİLER

	Sayfa
YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
ÖZ	iv
ABSTRACT.....	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ	xii
TABLolar LİSTESİ.....	xiv

BÖLÜM BİR – GİRİŞ 1

1.1 Depolama Tankları Hakkında Genel Bilgi.....	1
1.2 Yüksek Kapasiteli Sabit Tavanlı Tanklar.....	2
1.3 Depolama Kaplarına Etkiyen Yükler	4
1.4 İnce Cidarlı Kaplarda İç Basınç	5
1.4.1 Birincil Genel Gerilme	6
1.4.2 İkincil Gerilme.....	7
1.4.3 Pik Gerilme.....	7
1.5 İç Basınç Altındaki Kaplarda Genel Gerilme Analizi.....	8
1.5.1 Silindirik Geometrik Formda Gerilme Analizi.....	11
1.5.2 Koniksel Geometrik Formda Gerilme Analizi	12
1.5.3 Küresel Geometrik Formda Gerilme Analizi	13

BÖLÜM İKİ – API 650 ‘YE GÖRE YÜKSEK KAPASİTELİ DÜŞEY DEPOLAMA TANKI TASARIMI..... 14

2.1 Tasarım.....	14
2.2 Malzemeler.....	15
2.3 Kabuk Dizaynı.....	19
2.4 Kabuk Kalınlığının Hesaplanması.....	22
2.4.1 Adım Metodu.....	22

2.4.2 Değişken Tasarım Noktası Metodu	24
2.5 Çatılar	28
2.5.1 Kendinden Destekli Koni Çatıları	28

BÖLÜM ÜÇ – YER ÜSTÜ, DİKEY, SİLİNDİRİK DEPOLAMA TANKLARININ DEPREM TASARIMLARI..... 30

3.1 Sismik Analiz için Yaylı Kütle Modeli	32
3.2 Zemin Destekli Tank	33
3.2.1 Ürünün Etkili Kütlesi.....	34
3.2.2 Etkili Yanal Kuvvetler İçin Etki Merkezi.....	35
3.2.2.1 Gövde Duvarı Döndürme Momenti İçin Etki Merkezi.....	35
3.2.2.2 Taban Plaka Devrilme Moment İçin Etki Merkezi.....	35
3.4 Yer Üstü Depolama Tankları İçin Sismik Yük	37
3.4.1 Modifiye Sismik Katsayısı Analizi.....	37
3.4.2 Deprem Yüklerinin Belirlenmesi İçin Faktörler.....	38
3.4.2.1 Spektral Tepki.....	38
3.4.2.2 Önem Faktörü	40
3.4.2.3 Sismik Bölge Faktörü	41
3.4.3 Yapı Karakteristik Katsayısı.....	41
3.4.4 Tank Tabanını (Bottom Plate) Ve Tank Taban-Zemin Bağlantı Elemanını Deforme Eden Depolama Tankı Doğal Periyod	43
3.4.4.1 Tank Tabanı-Zemin Bağlantı Elemanı İle Sabitlenmemiş İse Yay Sabiti	43
3.4.4.2 Tank Tabanı-Zemin Bağlantı Elemanı İle Sabitlenmiş İse Yay Sabiti	45
3.4.5 Silindirik Tanktaki Serbest Sıvı Yüzey (Konvektif Kütle) Çalkalanma İnci Doğal Periyodu	47
3.5 Burkulmaya Karşı Silindirik Kabuğun Dizaynı	47
3.5.1 Uzun Süreli Yüklemeye Karşı İzin Verilebilir Gerilme	48
3.5.2 Sismik Yüklemeye Karşı İzin Verilebilir Gerilme	51
3.6 Deprem Kapasitesinin Değerlendirilmesi	53

3.6.1 Tüm Tankın Sismik Kapasitesinin Kontrol Edilmesi.....	53
3.6.2 Depo için Deprem Kapasitesinin Kontrol Edilmesi	54
3.6.2.1 Kesme Kuvveti Tasarımı	54
3.6.2.2 Dizayn Akma Kesme Kuvveti:	55
3.7 Taban Momenti	55
3.8 Hidrodinamik Basınç.....	56
3.8.1 İmpulsif Hidrodinamik Basınç	56
3.8.2 Konvektif Hidrodinamik Basınç.....	58

BÖLÜM DÖRT – YER ÜSTÜ, DİKEY, SİLİNDİRİK DEPOLAMA TANKLARININ RÜZGÂR TASARIMLARI..... 59

4.1 Rüzgâr Etkilerinin Modellenmesi	59
4.2 Rüzgâr Kuvveti Tasarımı	60
4.2.1 Z Yüksekliğinde Hız Basıncı.....	61
4.2.2 Esnek Veya Dinamik Duvarlı Yapılar İçin Rüzgâr Etki Faktörü	64
4.2.2.1 Z Yükseklikte Türbülans Yoğunluğu;	64
4.2.2.2 Arka plan yanıtı.....	65
4.2.2.3 Rezonans tepki faktörü (R)	66
4.3 Tabanda Devrilme Momenti	67

BÖLÜM BEŞ – İÇTEN VE DIŞTAN BASINCA MARUZ TANKIN MODELLENMESİ VE GERİLME ANALİZİ 69

5.1 İçten Hidrostatik Basınca Maruz Tankın Modellenmesi Ve Gerilme Analizi 69	
5.1.1 Sınır Şartlarının Ve Etki Eden Yüklerin Belirlenmesi	72
5.1.2 Mesh Ve Çözüm	74
5.2 Silindirik Kabukların Dış Basınç Altında Burkulması.....	79
5.2.1 Literatür Taraması	81
5.3 Burkulma Analizi	94
5.3.1 Çevresi Çelik Kuşak İle Sarılarak Güçlendirilmiş Tank	97
5.3.2 Çevresi Kompozit Kuşak İle Sarılarak Güçlendirilmiş Tank	109
5.3.2.1 Kompozit Tabakanın Mikro-Mekanik Analizi	110

5.3.2.2 Teorik Hesaplamalar	112
5.2.3.3 Malzeme Tanımlama	115
BÖLÜM ALTI – SONUÇ	119
KAYNAKLAR	122
EKLER.....	126
EK 1: Tank Kabuk Kalınlığının Hesaplanması	126
EK 2: Tank Deprem Kapasitesinin Hesaplanması	130
EK 3: Tank Rüzgâr Tasarım Hesabı.....	134

ŞEKİLLER LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 1.1 Hammadde ürün ilişkilerinde kullanılan tanklar	1
Şekil 1.2 Dikey depolama tanklarında havalandırma	3
Şekil 1.3 Sabit çatı formları	4
Şekil 1.4 İnce cidarlı tanklarda yükleme tipleri	4
Şekil 1.5 İnce cidarlı kaplarda gerilim	8
Şekil 1.6 Elemanın a-b kenarı	9
Şekil 1.7 Elemanın a-e kenarı	9
Şekil 1.8 Gerilme elemanı.....	10
Şekil 1.9 Eksenel gerilme, yatay düzleme etkiyen kuvvet	10
Şekil 1.10 Doğru parçaların konum dönüşü ile kabuk şekillerin oluşumu	11
Şekil 1.11 İnce cidarlı konik şekilli kap gerilmesi	12
Şekil 2.1 Farklı tabaka kalınlıktaki depolama tankı.....	25
Şekil 2.2 Tank konik çatı	29
Şekil 3.1 Silindirik tanklarının bükülme modları ve geometri parametreleri	31
Şekil 3.2 a) Fil ayak çıkıntı tipi, tank duvarının bükülmesi b) Tank duvarının elmas desen burkulması	31
Şekil 3.3 Tank duvarı ve tabanı üzerindeki hidrodinamik basınç dağılımının nitel tanımlaması	33
Şekil 3.4 İmpulsif ve konvektif kütle ve konvektif yay sertliği.....	34
Şekil 3.5 İmpulsif ve konvektif kütlelerin yükseklikleri	36
Şekil 3.6 Türkiye deprem bölgeleri haritası	41
Şekil 3.7 Tankın alt köşesi	42
Şekil 3.8 Taban plakası deformasyonu	44
Şekil 3.9 Dairesel tankın geometrisi	57
Şekil 3.10 Duvardaki impulsif basınç katsayısı, q_{iw}	57
Şekil 4.1 Dikey tank etki eden rüzgâr yükü	67
Şekil 5.1 Modellenecek tankın cidar kalınlık dizayn diyagramı.....	69
Şekil 5.2 Sınır şartlarının belirlenmesi.....	72
Şekil 5.3 Hidrostatik basınç ayarlaması.....	73

Şekil 5.4 Eleman boyutu	74
Şekil 5.5 Eleman tipi	75
Şekil 5.6 Mesh oluşturma.....	76
Şekil 5.7 Maksimum gerilme	77
Şekil 5.8 Von Misess gerilmesi.....	78
Şekil 5.9 Maksimum yer değiştirme	79
Şekil 5.10 Deney düzeneği	81
Şekil 5.11 Dış basınç altındaki silindirik tüp	84
Şekil 5.12 k değerine bağlı olarak teorik çökme basıncı	86
Şekil 5.13 Kritik uzunlukla ilgili denklemler ve deney verilerin karşılaştırılması ...	87
Şekil 5.14 Radyal ve eksenel basınç uygulaması.....	88
Şekil 5.15 Üniform dış basınç altında silindirde oluşan loblar	90
Şekil 5.16 Toplam dış basınç altında ya da sadece kabuk yüzeyinde dış basınç altında farklı sınır koşullarına sahip kısa silindirler için kısma basıncı qcr.	91
Şekil 5.17 Dış basınç altında orta uzunlukta silindirik kabuklarda sınır şartlarının etkisi.	92
Şekil 5.18 40 m çapında ve farklı yükseklikteki silindirik tankların burkulma davranışları (çelik sınıfı s 235).....	92
Şekil 5.19 Kademeli duvar kalınlığına ve bir halka güçlendiriciye sahip silindirin burkma davranışı	93
Şekil 5.20 Tank güçlendirici halka.....	93
Şekil 5.21 Güçlendirme halkasının konumu	97
Şekil 5.22 Halka kalınlığına-genişliğine bağlı kritik burkulma yükü	99
Şekil 5.23 Kompozit lamina (tabaka) ve açıları.....	110
Şekil A.1 Tank duvarına etki eden sıvı basıncı ve tabaka dizilişi.....	126

TABLÖLAR LİSTESİ

Sayfa

Tablo 1.1 Sabit tavan tanklarının basınç ve vakum için tasarım değerleri	3
Tablo 2.1 Yabancı ülkelerin malzeme, kod, standart ve spektler karşılıkları	16
Tablo 2.2 Malzeme grupları	17
Tablo 2.3 Tasarım metal sıcaklığı için lineer denklem	19
Tablo 2.4 İzin verilebilir plaka malzemesi ve gerilmesi	21
Tablo 2.5 Tank çapına göre plaka kalınlığı.....	22
Tablo 3.1 Kritik periyod t_g (s)	39
Tablo 3.2 1. mod çalkalanma için sönümleme oranı	40
Tablo 3.3 α değeri.....	40
Tablo 3.4 Önem faktörü I	41
Tablo 4.1 Önem faktörü	62
Tablo 4.2 Yapı kategorisi	62
Tablo 4.3 Arazi kategorisi	63
Tablo 4.4 Hız basınca maruz kalma katsayısı k_z	63
Tablo 4.5 Katsayılar, faktörler	65
Tablo 4.6 Efektif çap, D_e^*	65
Tablo 5.1 Hidrostatik basınca maruz tankın analiz özellikleri.....	70
Tablo 5.2 Kabukların tanktaki konumları, kalınlıkları, ağırlıkları ve mekanik, fiziksel özellikleri	71
Tablo 5.3 Temas özellikleri.....	72
Tablo 5.4 Mesh parametreleri	75
Tablo 5.5 Düğüm ve eleman sayısı	76
Tablo 5.6 Tüplerin çapları, çökme basınçları, çökme durumları	82
Tablo 5.7 Analiz özellikleri.....	94
Tablo 5.8 Mesh bilgisi	95
Tablo 5.9 Etüt sonuçları	95
Tablo 5.10 Farklı halka genişliklerinde halka kalınlığının değişimine bağlı burkulma değerleri(kN/m^2).....	98

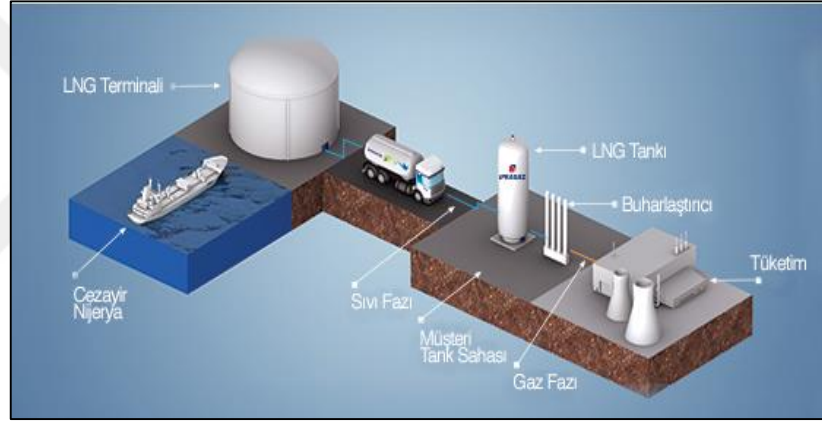
Tablo 5.11 Farklı halka kalınlıklarında halka genişliğinin değişimine bağlı burkulma değerleri(kN/m^2).....	98
Tablo 5.12 Halka kalınlığına bağlı burkulma yükü ve mod şekli	102
Tablo 5.13 Halka genişliğine bağlı burkulma yükü ve mod şekli.....	104
Tablo 5.14 İki halka ile güçlendirilmiş tank	107
Tablo 5.15 Farklı konumlandırılmış iki halkalı güçlendirilmiş tank	108
Tablo 5.16 Üç halka ile güçlendirilmiş tank	109
Tablo 5.17 Takviye tipik özellikleri	113
Tablo 5.18 Matriks tipik özellikleri	113
Tablo 5.19 Kompozit malzemelerin özellikleri	115
Tablo 5.20 Tank kabuk malzeme ve kuşak malzeme özellikleri	115
Tablo 5.21 Halka konumu, lamina açıları ve fiziksel özellikleri	116
Tablo 5.22 Kompozit güçlendirme halkalı tank.....	117
Tablo 5.23 Üç halka ile güçlendirilmiş tank	118
Tablo A.1 Tank kabuk kalınlığının hesaplanması.....	127
Tablo A.2 Tank kabuk kalınlığının kontrolü.....	129
Tablo A.3 Tank deprem kapasitesinin hesaplanması.....	130
Tablo A.4 Hidrodinamik basınç hesaplanması	133
Tablo A.5 Tank rüzgâr tasarım hesabı	134

BÖLÜM BİR

GİRİŞ

1.1 Depolama Tankları Hakkında Genel Bilgi

Ürünler arasındaki hammadde-ürün ilişkileri, azot, petrokimya sanayi tesisleri, kimya ve gıda maddeleri üretimi yapan tesisler geliştikçe, sıvı ve sıvılaştırılmış hammadde-ürün için kapalı kaplara olan ihtiyaç artmaktadır. Kapalı kaplar sanayide akışkan maddelere proses işlemlerinin uygulanmasında, depolanmasında ve ulaştırılmasında kullanılır. Şekil 1.1’de sıvı doğal gazın (lng) sanayide transferi, depolanması ve servis aşamalarındaki kapalı tanklar görülmektedir.



Şekil 1.1 Hammadde ürün ilişkilerinde kullanılan tanklar (İpragaz, b.t.)

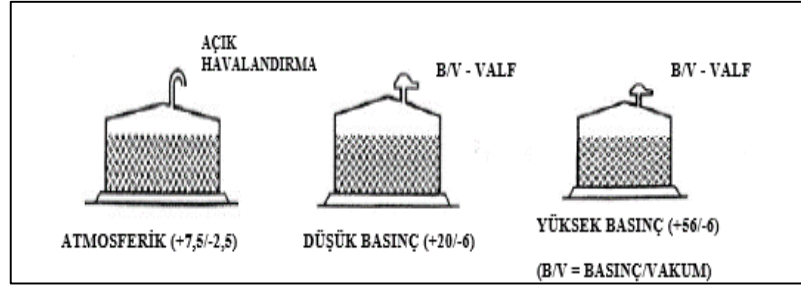
Kapalı kaplar, endüstriyel sıvı ve gaz akışkanının (hammadde, ara ürün ve ürününün) taşınması, üretilmesi ya da depolanması üzerine tasarlanan ya da geliştirilen küre, silindir ve koni gibi geometrik formlarının birleştirilmesiyle oluşan hacimlerin, atmosferik veya atmosfere kapalı, sabit ya da hareketli kapları ifade etmektedir. Farklı endüstrilerin istek ve talepleri, işletme koşulları, depo edilecek ürününün kimyasal yapısı, depolama alanındaki iklimsel yapı, depolama türü ve depolamanın dinamik veya statik olması gibi durumlar nedeniyle sanayideki depolama tankları çeşitli yapıda ve inşa koşullarında yapılır. Bu koşullar (yer üstü ve yer altı, basınçlı, basınçsız vb.) aynı zamanda depolama tankın inşa parametrelerini oluşturur.

Aşağıda depolama tanklarının sınıflandırılması gösterilmiştir.

- 1) Üstü açık tanklar
- 2) Dikey Sabit tavan tankları
 - Atmosfere açık tanklar (havalandırılmalı),
 - Düşük basınç tankları
 - Yüksek basınç tankları
- 3) Dış yüzer tavan tankı
 - Şamandıra türü yüzer tavanlar
 - Çift Güverteli yüzer tavanlar
 - Özel şamandıra tipi ve merkezden çevreye doğru güçlendirilmiş tavanlar
- 4) Yer üstü yatay depolama tankları (atmosferik)
- 5) Yatay depolama tankları (basınçlı)
- 6) Diğer depolama tankları
 - Küre depolar
 - Gömülü depolama tankı
 - Çift cidarlı tankları
 - Soğutulmuş depolama tankları
 - Yer altı depolama tankları

1.2 Yüksek Kapasiteli Sabit Tavanlı Tanklar

Yüksek kapasiteli düşey depolama tankları, işletme koşulları ve depolanan ürünün yapısına bağlı olarak yüksek basınçlı, düşük basınçlı ve atmosferik olarak üretilmektedir. 2 kPa kadar iç basınca ve 0,6 kPa kadar vakum basınca dayanıklı tanklar alçak basınçlı tanklar olarak tanımlanır. 5,6 kPa kadar iç basınca ve 0,6 kPa kadar vakum basıncına dayanıklı sabit tavanlı tanklar ise yüksek basınçlı tank olarak tanımlanır. Bu tankalarda basınç, vakum boşaltım vanaları bulunur. 0,75 kPa kadar iç basınç ve 0,25 kPa vakum basıncına dayanıklı tanklar ise atmosferik tank olarak tanımlanır. Atmosferik tank havalandırma açık durumdadır ve atmosfer basıncında depolama yapılır. Şekil 1.2’de dikey depolama tanklarında havalandırma sistemlerin uygulamaları görülmektedir (Avrupa Komisyonu Entegre Kirlilik Önlenme ve Kontrolü Bürosu [IPPC], 2006).



Şekil 1.2 Dikey depolama tanklarında havalandırma (Kuan, 2009)

Atmosferik tankta, tanktan ürün çıkışında, vakum basıncının oluşmaması için sabit çatı ile ürün arasındaki boşalan hacim, azalan ürün miktarı kadar hava ile doldurulmalıdır. Diğer taraftan tanka ürün girişi olduğunda, ürün miktarı artıktıkça tank duvarı, çatı ve ürün arasında pozitif basınç oluşmaması için artan ürün miktarı kadar hava hacminin tanktan boşaltılması gerekir. Sabit tavanlı depolarda ürün çıkışı ve girişinde tankta basınç oluşmaması için hava giriş ve çıkışları (vent) olması gerekir. Ayrıca depolanan ürünün depolama sıcaklığı, atmosferik sıcaklık ve ürünün buhar basıncından dolayı oluşan buharın oluşturacağı pozitif basıncı önlemek için buhar dışarı atılmalıdır (Beşergil, 2016). Sabit çatılı depolama tanklarında hava çıkışlarının bulunmasının bir diğer nedeni ise tankta bulunan sıvı üründe sıcaklık farkından dolayı oluşan enerji akışı ile meydana gelen basıncın önlenmesidir. Sıcaklıktan dolayı yüksek enerjili ürün, ürüne göre daha az sıcaklığa sahip az enerjili dış ortama doğru yönelerek oluşturduğu vakum basıncının önlenmesi için hava çıkışları gereklidir. Tablo 1.1’de sabit tavan tanklarının basınç ve vakum için tasarım değerleri gösterilmektedir.

Tablo 1.1 Sabit tavan tanklarının basınç ve vakum için tasarım değerleri (Avrupa Komisyonu Entegre Kirlilik Önleme ve Kontrolü Bürosu [IPPC], 2006)

Sabit Tavanlı Tank Türü	Basınç Ve Vakum İçin Tasarım Derecelendirmesi
Atmosferik	+ 7,5 mbar - 2,5 mbar Bu tanklar genellikle açık havalandırılmalı tanklardır
Alçak Basınç	+ 20 mbar - 6 mbar
Yüksek Basınç	+ 56 mbar - 6 mbar

Yüksek kapasiteli depolama tankları deprem, rüzgâr gibi yüklerin oluşturduğu dış basınç veya iç basınçtan kaynaklanan taban kalkma veya kayma durumlarına karşı ankraj sistemleri ile donatılmalıdır.

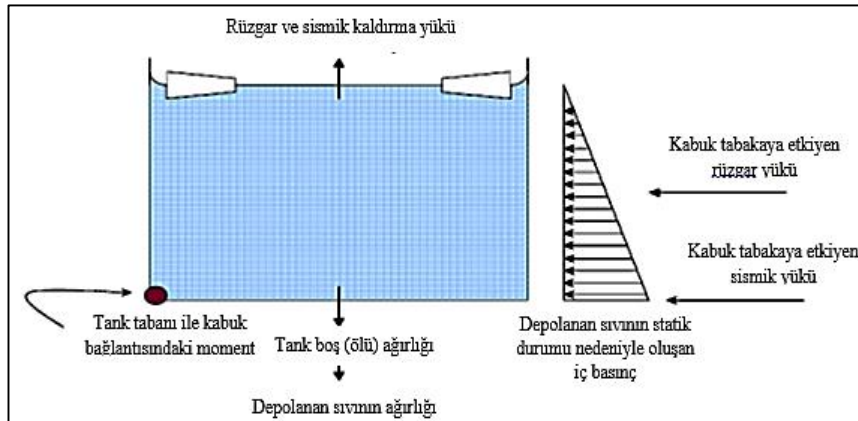
Atmosferik depolama tankının en yaygın tipi sabit koni çatı tankıdır. Şekil 1.3'te Sabit çatı formları görülmektedir. Sabit koni tavanlı tanklar genellikle 91,5 m çapa ve 19,5 m (64 ft) yüksekliğe kadar olabilir. Bu çatılar normal olarak iç yapısal kirişler, kirişler ve kolonlar tarafından desteklenmektedir, ancak daha küçük çaplarda 18,3 m (60 ft) çap veya daha az kendinden destekli olabilirler (American Petroleum Institute [API 575], 2013).



Şekil 1.3 Sabit çatı formları (Leslie, 2015)

1.3 Depolama Kaplarına Etkiyen Yükler

Bir basınçlı kabın tasarımına geçilmeden, kaba etkiyen tüm kuvvetler belirlenmeli ve hesaplanmalıdır. Kuvvetler belirlendikten sonra, bu yüklerin sisteme olan etkileri incelenmelidir. Bir basınçlı kaba etkiyen ve tasarım sırasında göz önünde bulundurulması gereken yükleme tipleri şekil 1.4'te görülmektedir.



Şekil 1.4 İnce cidarlı tanklarda yükleme tipleri (Kuan, 2009)

Yükleme tipleri şunlardır:

Basınç yüklemesi: İç ya da dış basınç (Dizayn, çalışma, hidrostatik test basınçları örnek olarak gösterilebilir.)

Moment yüklemesi: Rüzgâr, sismik, yükseklikten, taşımacılıktan kaynaklanan yükler.

Çeki-Bası yüklemesi: Boş ağırlıktan, bakım ekipmanlarından, merdivenden, platformdan, borulardan ve kap içindekilerinden kaynaklanan yükler.

Termal yükleme: Sıcaklık direkt bir tasarım yükü olmayıp daha çok çevre şartlarının sisteme etkilerinin analizinde dikkate alınması gereken bir özelliktir. Yüksek sıcaklıkta çalışan basınçlı kaplarda sıcaklık farkı ısıl gerilmelerin oluşmasına neden olur. Bu etkiyi azaltmak için termal genleşmesi düşük olan malzemeler seçilir (Moss, 2004).

1.4 İnce Cidarlı Kaplarda İç Basınç

İnce cidarlı kap geometrisi genellikle küre, silindir, konik, elips, yarımküre, pervaz (tori) veya bu geometrilerin kompozisyonundan oluşan formları alır. Kabin kalınlığı diğer büyüklüklerle karşılaştırıldığında çok küçük ($R_m/t > 10$ Burada; R_m = ortalama tank yarıçapı, t =tank cidar kalınlığı) olduğunda, kap membran (zar) olarak adlandırılır. Basınç kaynaklı oluşan gerilmelere de membran gerilmeler denir. Bu membran gerilmeler ortalama çeki veya bası gerilmelerdir. Bu gerilmeler tank duvarı yüzeyi genişliğinde düzgün ve teğetsel olarak etki ettiği kabul edilir. Tank duvarının veya mebranın eğilme mukavemeti olmadığı kabul edilir. Eğilme mukavemeti olduğu kabul edilirse membran gerilmeye eklenmesi gerekir (Moss, 2004).

Kab formunun karışık olması durumunda iç basınç altında kapta membran gerilme yeterli gelmez. Kabin çatı ve taban kısmının formu, kap destekleri, kap kalınlığındaki ve alanındaki değişim, ayar ve numune girişleri, dış bağlantılar ve tankın ağırlığı, rüzgâr, sismik yük nedeniyle oluşan eğilme kapta gerilme dağılımını değiştirir. Kap duvarı için eğilme ve direk kaptaki noktadan noktaya farklı yüklemeye nedeniyle membran formunda sapma ileri gelir. İç ve dış basınçtan dolayı ince cidarlı kap duvarında üç eksenli gerilme meydana gelir. Bunlar; σ_1 =Teğetsel gerilme,

σ_2 =Eksenel gerilme, σ_r = Radyal gerilmedir. Ek olarak eğilme ve kesme gerilmesi olabilir. Radyal gerilme kap duvarına direkt etki eden basınç sonucudur. İnce cidarlı kapta radyal gerilme, membran gerilmelerin (teğetsel gerilme, eksenel gerilme) yanında çok küçük olduğu için ihmal edilir. Bu yüzden ince cidarlı kapta gerilmeyi iki eksenli gerilme olarak kabul edeceğiz. Kalın cidarlı ($R_m/t < 10$) kapta ise radyal gerilme ihmal edilmez. Gerilmeyi oluşturan yüklemenin ve kaplarda tanımlanan tehlikenin tipleri tarafından gerilmenin sınıflandırılması tanımlanır. Gerilmenin sınıflandırılması aşağıdaki gibidir (Moss, 2004).

1. Birincil Gerilme

a) Genel

- Birincil genel membran gerilme
- Birincil genel eğilme gerilme

b) Birincil lokal gerilme

2. İkincil Gerilme

a) İkincil membran gerilme

b) İkincil eğilme gerilmesi

3. Pik gerilme,

1.4.1 Birincil Genel Gerilme

Bu gerilmeler kabın tüm alanına etki eder. Mekanik yükleme ile meydana gelir ve tüm gerilmelerin en tehlikelisiidir. Birincil gerilmenin basit karakteri kendini sınırlamamasıdır. Bu gerilme genellikle iç, dış basınçtır ya da dış kuvvet ve momente maruz kalınması durumunda meydana gelir. Termal gerilme asla birincil gerilme olarak sınıflandırılmaz. Birincil genel gerilme eğilme ve membran gerilmesi olarak ikiye ayrılır. Birincil gerilme malzemenin akma gerilmesini geçmesi durumunda tankın çökmesine neden olur. Birincil genel membran gerilmeye örnek aşağıdaki gibidir Bunlar; (Moss, 2004).

- Basıncıtan dolayı teğetsel ve eksenel gerilmesi
- Rüzgârdan dolayı bası ve çeki gerilmesi

- Boğuk kap başının merkezi içinde membran gerilme
- Ağırlık nedeniyle eksenel gerilme

1.4.2 İkincil Gerilme

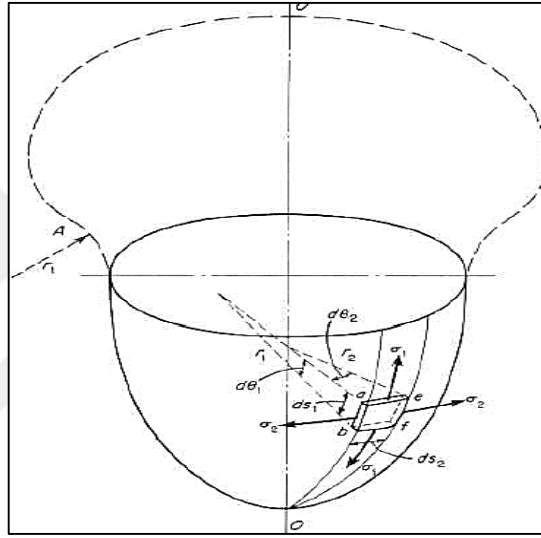
İkincil gerilmenin basit karakteri kendini sınırlamasıdır. Bunun anlamı gerilme nedeniyle lokal akma ve küçük çöküntülerin meydana gelmesidir. İkincil gerilmenin uygulanması ile yapıdaki parçaların bağlantıların baskısı yüzünden yapıda çöküntü meydana gelmez. İkincil gerilme büyük parçaların birleşim yerlerinde gelişir. Bu gerilme iç ve dış basınç dışında sürekli yükleme durumunda meydana gelir. Nozul üzerindeki radyal yükleme, nozulun kabukla birleşim yerinde ikincil gerilme meydana gelir. İkincil gerilme membran ve eğilme olmak üzere iki gruba ayrılır. Flanşın merkezi ve flanşın birleşim yerindeki eksenel gerilme, termal gerilme, eliptik şekle sahip kapta boğum kısmındaki membran gerilme ikincil membran gerilmeye örnektir. Destek çemberindeki süreksizlik gerilmesi, iç basınç nedeniyle kalın cidarlı ($R_m/t < 10$) kapta radyal gerilme, tüm yapı süreksizliğinde eğilme gerilmesi, iç basınç nedeniyle kalın cidarlı ($R_m/t < 10$) kap içerisinde gerilimin düzensiz dağılması ikincil eğilme gerilmesine örnektir (Moss, 2004).

1.4.3 Pik Gerilme

Pik gerilmeler son derece lokalize bir alanda gerilme yoğunlaşması nedeniyle fazladan gerilmeleridir. Bu ek gerilmeler hem sürekli yükleme hem de kendini sınırlayan yükleme uygular. Pik gerilmeler sadece yorulma durumu ve gevrek malzeme kullanılan tanklarda önemlidir. Pik gerilmeler birincil ve gerilim yoğunlaşması noktasında ikincil gerilmenin eklenmesidir. Yüzeydeki sıcaklığın ani değişimi ile tank duvarındaki termal gerilme, çentik etkisi nedeniyle gerilme, pik gerilmeye örnektir (Moss, 2004).

1.5 İç Basınç Altındaki Kaplarda Genel Gerilme Analizi

Bir eksen etrafında doğru ya da eğri döndürülmesi ile kabuk şekil süpürdüğü formu alır. Birçok kap prosesi kabuk formunun değişimi ile yapılır. Oluşan kabuk formları şekil 1.10’da gösterildiği gibi; Silindirik, konik, elips, yarımküre şeklini alır. İç basınç ile iç kısmı uyarılmış dönen kabuklar membran (zar) gerilim analizi, kabuk kaplar için gerekli minimum kalınlığı basit olarak verir. Birim alanda kabuğun sabit çeperi etrafında simetrik dönen yükleme altında kabuğun genel şekil 1.5’te gösterilmiştir.



Şekil 1.5 İnce cidarlı kaplarda gerilim (Harvey, 1985)

Şekil 1.5’i incelersek elemana etkiyen toplam kuvvet $\sigma_1 t ds_2$ ve $\sigma_2 t ds_1$ ’dir. Şekildeki ince kaptan bir eleman çıkarıp statik analizi yapılırsa:

Burada;

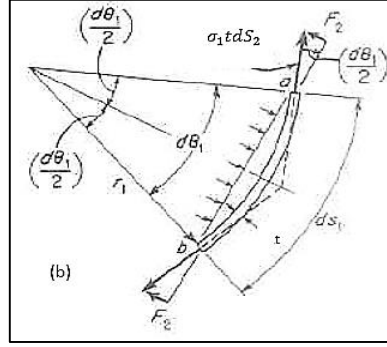
σ_1, σ_2 =Eksenel gerilme, teğetsel gerilme

ds_1, ds_2 =Eksenel eleman büyüklüğü, teğetsel eleman büyüklüğü

r_1, r_2 =Eksenel eğrilik yarı çapı, teğetsel doğrultudaki elemanın eğrilik yarı çapı

p = Basınç

t =Kalınlık

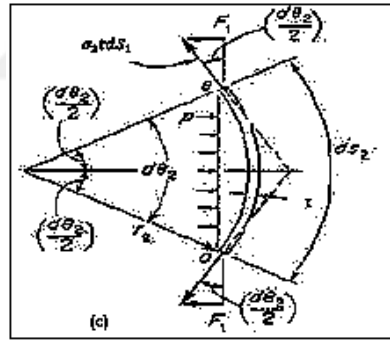


Şekil 1.6 Elemanın a-b kenarı (Harvey, 1985)

Şekil 1.6'da $\sigma_1 t ds_2$ kuvveti elemanın kuvvet bileşeni olduğundan

$$2F_2 = 2\sigma_1 t ds_2 \sin\left(\frac{d\theta_1}{2}\right) \quad (1.1)$$

Aynı şekilde 1.7'de $\sigma_2 t ds_1$ kuvveti elemanın normal bileşeni olduğundan;



Şekil 1.7 Elemanın a-e kenarı (Harvey, 1985)

$$2F_1 = 2\sigma_2 t ds_1 \sin\left(\frac{d\theta_2}{2}\right) \quad (1.2)$$

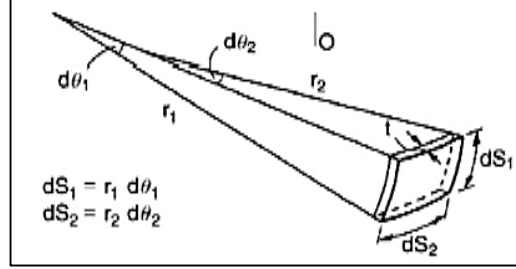
Eleman üzerindeki normal basınç kuvveti;

$$P = p \left[2r_1 \sin\left(\frac{d\theta_1}{2}\right) \right] \left[2r_2 \sin\left(\frac{d\theta_2}{2}\right) \right] \quad (1.3)$$

Statik analizi sonucu normal bileşke kuvvetler basınç kuvvetine eşitlenirse;

$$2\sigma_2 t ds_1 \sin\left(\frac{d\theta_2}{2}\right) + 2\sigma_1 t ds_2 \sin\left(\frac{d\theta_1}{2}\right) = p \left[2r_1 \sin\left(\frac{d\theta_1}{2}\right) \right] \left[2r_2 \sin\left(\frac{d\theta_2}{2}\right) \right] \quad (1.4)$$

Şekil 1.8'deki gerilme elemanındaki trigonometrik değişiklikler yapılırsa;



Şekil 1.8 Gerilme elemanı (Harvey, 1985)

$$\sin\left(\frac{d\theta_1}{2}\right) = \frac{ds_1}{2r_1} \quad \text{ve} \quad \sin\left(\frac{d\theta_2}{2}\right) = \frac{ds_2}{2r_2} \quad (1.5)$$

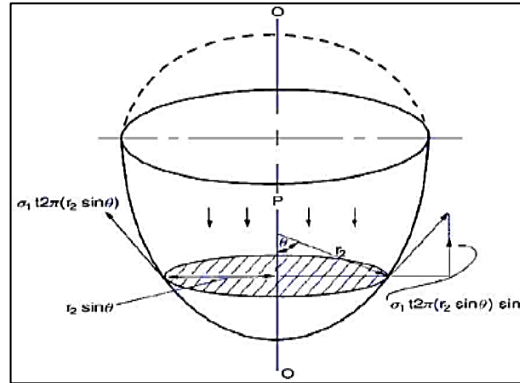
(1.4) numaralı denkleme uygulanırsa;

Birinci genel denklem

$$\frac{\sigma_1}{r_1} + \frac{\sigma_2}{r_2} = \frac{p}{t} \quad (1.6)$$

elde edilir.

Basınç kuvvetinin dikey bileşkesi ; $P\pi(r_2 \sin\theta)^2$



Şekil 1.9 Eksenel gerilme, yatay düzleme etkiyen kuvvet (Harvey, 1985)

İç basınç ile birlikte aksenal gerilme olarak tanımlanan σ_1 çemberi halkasından etki eder. Şekil 1.9'da görüldüğü gibi tepki kuvveti, çember alanı ile σ_1 gerilmesinin dikey bileşeninin çarpımına eşittir. Burada tepki kuvveti; $2\sigma_1 t \pi (r_2 \sin \theta) \sin \theta$

Kuvvet eşitliği oluşturulur ise denklem aşağıdaki gibi olur:

$$P \pi (r_2 \sin \theta)^2 = 2\sigma_1 t \pi (r_2 \sin \theta) \sin \theta \quad (1.7)$$

İkinci genel denklem

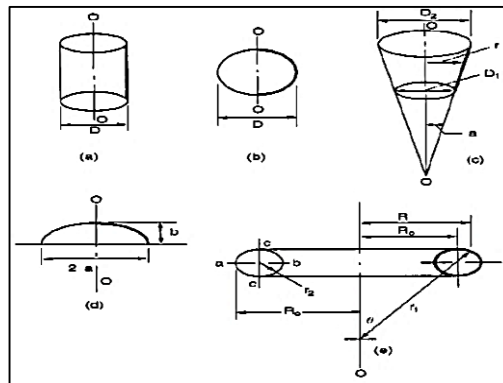
$$\sigma_1 = \frac{p r_2}{2t} \quad (1.8)$$

elde edilir.

1.5.1 Silindirik Geometrik Formda Gerilme Analizi

Şekil 1.10'da dönen eksene paralel doğru ve eğriler ile oluşturulan kabuk formları görülmektedir. Doğrunun dönmesiyle oluşan silindir için yarıçaplar;

$$r_1 = \infty, r_2 = \frac{D}{2} \quad (1.9)$$



Şekil 1.10 Doğru parçaların konum dönüşü ile kabuk şekillerin oluşumu (Harvey, 1985)

Birinci ve ikinci genel denklem (1.6) ve (1.8) uygularsak;

$$\frac{\sigma_1}{\infty} + \frac{\sigma_2}{r_2} = \frac{p}{t} \quad \text{ve} \quad \sigma_1 = \frac{pr_2}{2t} \quad (1.10)$$

elde edilir.

Buradan teğetsel ve eksenel gerilme;

$$\text{Teğetsel gerilme} \quad \sigma_2 = \frac{PD}{2t} \quad (1.11)$$

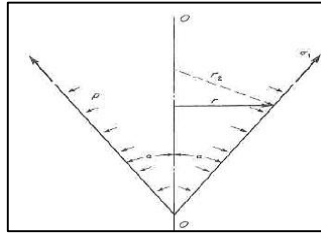
$$\text{Eksenel gerilme} \quad \sigma_1 = \frac{PD}{4t} \quad (1.12)$$

elde edilir.

1.5.2 Koniksel Geometrik Formda Gerilme Analizi

Şekil 1.11’de ince cidarlı konik şekilli kap gerilmesinde konik kenarın eksenle yaptığı α ve yarı çaplar:

$$r_1 = \infty \quad r_2 = \frac{r}{\cos \alpha} \quad \text{ve} \quad r = \frac{D_2}{2} \quad (1.13)$$



Şekil 1.11 İnce cidarlı konik şekilli kap gerilmesi (Harvey, 1985)

Denklem (1.13)’deki yarıçaplar genel denklem (1.6) ve (1.8) uygulanırsa;

$$\sigma_1 = \frac{Pr}{2t \cos \alpha} \quad (1.14)$$

$$\sigma_2 = \frac{Pr}{t \cos \alpha} \quad (1.15)$$

1.5.3 Küresel Geometrik Formda Gerilme Analizi

Küresel geometrik formun yarıçapları;

$$r_1 = r_2 = \frac{D}{2} \quad (1.16)$$

Denklem (1.16)'daki yarıçaplar genel denklem (1.6) ve (1.8) uygulanırsa;

$$\sigma_1 = \sigma_2 = \frac{PD}{4t} \quad (1.17)$$

elde edilir.

BÖLÜM İKİ

API 650 ‘YE GÖRE YÜKSEK KAPASİTELİ DÜŞEY DEPOLAMA TANKI TASARIMI

2.1 Tasarım

Depolama tanklarının kullanım alanındaki insan faktörü, endüstri hammadde-ürünün ekonomik değeri üretilecek tankların tasarımının amacına uygun ulusal ve uluslararası standartlarda olmasını gerektirir. Günümüzde Avrupa, ABD, Rusya gibi endüstrisi gelişmiş ülkelerde değişik tasarım kuralı uygulanmaktadır. Kurallar arasındaki temel fark, kullanılan malzeme için öngörülen tasarım gerilmelerinden doğmaktadır. Aşağıda uluslararası kanun, standart ve kurallara bazı örnekler verilmiştir.

Uluslararası Kanunlar:

1. Yerüstü Depolama:

EN 14015, API 650, API 652, DIN 4119, BS 2654, EEMUA 180, EEMUA 183, EMC 1980, CODRES 1991, CPR 9-2/3.

2. Yer altı depolama:

API 1615, ASTM D4021-92, DIN 6600, DIN EN 976, BS EN 976, AFNOR NF EN 976, CPR 9-1.

3. Basınçlı Depolama:

ASME Bölüm II, ASME Kanunu vakaları: BPV, BS PD 5500, PD 6497, EEMUA 190, CODAP 95.

4. Soğutulmuş depolama:

EN 14620, API 620, NFPA 57, NFPA 59, BS 7777, EEMUA 147

Depolamanın çevreyi kirletme potansiyeli veya doğada yaşayan canlılara zarar verme olasılığı, depolama kabı ve depolanan maddelerin fiziksel-kimyasal özelliklerine bağlıdır. Depolama kabı ve depolanan maddelerin malzemesinin kimyasalının özünden kaynaklanan tehlikelerin insanlara ve çevreye zarar verme olasılığının farkında olmak önemlidir. Bu noktada insan sağlığı ve can güvenliğinden

dolayı üretilecek tankların tasarımının amacına uygun ulusal ve uluslararası standartlarda olmasının yanı sıra analizinin doğru yapıp emniyetli kullanım şartlarının oluşturulması gerekir. Bunun sağlanması için tank üzerindeki yüklerin doğru olarak belirlenip analizler yapılmalıdır. Basınç tanklarının tasarımı yapılacağı zaman aşağıdaki tasarım ölçütlerinin belirlenmesi gerekir.

- Tasarımda kullanılacak standart, kanun, yönetmelikler vb.
- İşletme sıcaklığı ve basıncı
- Tank malzemesi ve tasarım geriliminin seçilmesi,
- Servis korozyon aşınma payı
- Tanka gövde ve çatısındaki parçaların ve tank içindeki parçaların belirlenmesi,
- Takviye hesaplarının yapılması,
 - Tanka kaynatılacak nozul iç çapı,
 - Nominal nozul et kalınlığı,
 - Pekiştirme için gerekli alan hesaplar ve karşılaştırmalar,
 - Takviye plakası kalınlığı,
- Boru bağlantı ağız boyutları ve basınç sınıfı
- İklim koşulları (rüzgâr, kar vb.)
- Zemin özelliği (deprem, toprak yapısı vb.)

2.2 Malzemeler

Tanklar, malzemenin bulunabilirliği ve maliyeti, imalat kolaylığı, korozyona karşı direnç, depolanan sıvı ile uyumluluğa bağlı olarak bir dizi farklı malzemeden üretilmiştir. Tanklarının yapımında kullanılan malzeme de üretim ve güvenlik açısından son derece önem arz etmektedir. Bu tanklarda kullanılacak malzemenin seçiminde işletme sıcaklığı, basıncı ve tank içinde depolanacak akışkanın özellikleri göz önünde bulundurulmalıdır.

Kapalı kapların yapımında karbonlu çelik en çok kullanılan malzemedir (Beşergil, 2016). Bu malzeme kolaylıkla temin edilebilir ve imal edildiği, işlendiği, oluşturulduğu ve kaynaklandığı kolaylık nedeniyle genel maliyetleri düşürür. Çelik konusundaki önemli standartlar aşağıdaki kurumlar tarafından yayınlanmıştır. Bunlar;

TSE	: Türk Standartlar Enstitüsü
EURONORM (EN)	: Avrupa standartları
DIN	: Alman standartları enstitüsü
AISI	: Amerikan Demir Çelik Enstitüsü standartları
SAE	: Otomotiv mühendisleri topluluğu standartlar
ASTM	: Amerikan malzeme deneme topluluğu standartları
CSA	: Kanada standart birliği
AFNOR	: Fransız standartları enstitüsü
JIS	: Japon standartları enstitüsü
BS	: İngiliz standartları
ISO	: Uluslararası standartlar organizasyonu

Kurumlar tarafında yayınlanan standartlardaki malzemeler ve kodlar arasındaki geçişler tablo 2.1’de yer almaktadır.

Tablo 2.1 Yabancı ülkelerin malzeme, kod, standart ve spektler karşılıkları (Megyesy, 1973)

AMERİKA BİRLEŞİK DEVLETLERİ	AVRUPA STANDARDI	ALMANYA	BİRLEŞİK KRALLIK (İNGİLTERE)	JAPONYA
SA 285 Gr. B	P 235 GH	H I	161 Gr 400	SB 410
SA 515 Gr 60	P 265 GH	H II	161 Gr 430	SB 480
SA 515 Gr 70	P 295 GH	17 Mn 4	224 Gr 340	SPV 315
SA 299	P 355 GH	19 Mn 6	225 Gr 490	SPV 356
SA 204 Gr A	16 Mo 3	15 Mo 3	—	SB 480 M
SA 387 Gr 12 Class 2	13 Cr Mo 4-5	13 Cr Mo 44	630 Gr 27	SCMV2 Div. 2
SA 387 Gr 22 Class 2	10 Cr Mo 9-10	10 Cr Mo 910	620 Gr 31	SCMV4 Div. 4
SA 516 Gr 60	P 275 NH	WStE 285	164 Gr 400, Lt 20	SGV 450
SA 516 Gr 70	P 355 NH	WStE 355	225 Gr 490, Lt. 20	—
SA 572 Gr 65	P 460 NH	WStE 460	—	—
SA 240 - 410 S	X6 Cr 13	1.4000	403 S 17	410 S
SA 240 - 405	X6 Cr Al 13	1.4002	405 S 17	405
SA 240 - 304	X5 Cr Ni 18-10	1.4301	304 S 31	304
SA 240 - 304 L	X2 Cr Ni 19-11	1.4306	304 S 11	304 L
SA 240 - 316	X5 Cr Ni Mo 17-12-2	1.4401	316 S 31	316
SA 240 - 316 L	X2 Cr Ni Mo 17-12-2	1.4404	316 S 11	316 L
SA 240 - 317 L	X2 Cr Ni Mo 18-15-4	1.4438	—	317 L
KODLAR, STANDARTLAR, SPEKTLER				
ASME Code II.	EN 10028-2,	DIN 17 102,	BS 1501, 4360,	JIS G 3103, 3115, 4109,
	10028-3, 10088	17155, 17440	970, 1449	3118, 4304 sus

Malzeme seçiminin ilkeleri, deneyim, kod gereksinimleri, gevrek kırılma ve korozyon gibi mühendislik hususlarında alt bölümlere ayrılmıştır. Tank tasarımlarını yöneten kod gereksinimleri, genellikle çok özel malzeme seçimi gereklilikleri ve sınırlamalara sahiptir. Çoğu modern kodlar, gevrek kırılmayı önlemek için servis koşullarında yeterli tokluğa sahip malzemeleri temin eden malzeme seçim kriterlerindeki hükümleri içerir. API'ye göre malzeme grupların yer alan malzemeler tablo 2.2'de yer almaktadır.

Tablo 2.2 Malzeme grupları (American Petroleum Institute [API 650], 2007)

Grup I Haddelenmiş, Oksijeni Yarı Giderilmiş		Grup II Haddelenmiş, Oksijeni Yarı Yada Tam Giderilmiş		Grup III Haddelenmiş, Oksijeni Tam Giderilmiş İnce Taneli uygulama		Grup IIIA Normalize edilmiş, Oksijeni Tam Giderilmiş İnce Taneli Uygulama	
Malzeme	Not	Malzeme	Not	Malzeme	Not	Malzeme	Not
A 283M C	2	A 131M B	6	A 573M-400		A 573M-400	9
A 285M C	2	A 36M	2, 5	A 516M-380		A 516M-380	9
A 131M A	2	G40.21-260W		A 516M-415		A 516M-415	9
A 36M	2, 3	Grade 250	7	G40.21-260W	8	G40.21-260W	8, 9
Grade 235	3			Grade 250	8	Grade 250	8, 9
Grade 250	5						

Grup IV Haddelenmiş, Oksijeni Tam Giderilmiş İnce Taneli uygulama		Grup IVA Haddelenmiş, Oksijeni Tam Giderilmiş İnce Taneli uygulama		Grup V Normalize Edilmiş, Oksijeni Tam Giderilmiş İnce Taneli Uygulama		Grup VI Normalize Edilmiş Yada Su Verilmiş Ve Menevişlenmiş (Temperlenmiş), Oksijeni Tam Giderilmiş İnce Taneli Uygulama Karbonu Azaltılmış	
Malzeme	Not	Malzeme	Not	Malzeme	Not	Malzeme	Not
A 573M-450		A 662M C		A 573M-485	9	A 131M EH 36	
A 573M-485		A 573M-485	10	A 516M-450	9	A 633M C	
A 516M-450		G40.21-300W	8, 10	A 516M-485	9	A 633M D	
A 516M-485		G40.21-350W	8, 10	G40.21-300W	8, 9	A 537M Class 1	
A 662M B		E 275 D		G40.21-350W	8, 9	A 537M Class 2	12
G40.21-300W	8	E 355 D				A 678M A	
G40.21-350W	8	S 275 J2	8			A 678M B	12
E 275 C	8	S 355 (J2 or K2)	8			A 737M B	
E 355 C	8					A 841M, Grade A, Class 1	11, 12, 13
S 275 J0	8					A 841M, Grade B, Class 2	11, 12, 13
S 355 J0	8						
Grade 275	4, 8						

Tabloda yer alan notlar aşağıda yer almaktadır:

1. Listelenen malzeme spesifikasyonlarının büyük çoğunluğu ASTM spesifikasyonlarına (Sınıf veya kalite dahil) yöneliktir. Ancak, bazı istisnalar vardır: G40.21 (kalite dahil) bir CSA spesifikasyonu; E 275 ve E 355 (Kalite de dahil) ISO 630'da yer almaktadır; S 275 ve S 355 kalite (kalite de dahil olmak üzere) EN 10025'te bulunur; ve Grade 235, Grade 250 ve Grade 275 ulusal standartlarla ilgilidir.
2. Oksijeni yarı ya da tam giderilmiş olmalı.
3. Kalınlık ≤ 20 mm
4. İptal
5. Mangan içeriği, 20 mm'den büyük kalınlıklar için ısı analizi ile % 0,80 - % 1,2 olacaktır; bunun dışında, belirtilen karbon maksimumunun % 0,01 altında her azaltılması için, Belirtilen maksimum seviyenin üzerinde % 0,06 oranında bir manganez artışına % 1,35'e kadar izin verilecektir. Kalınlıklar 20 mm, ısı analizi ile % 0,80 - % 1,2 arasında bir mangan içeriğine sahip olacaktır.
6. Kalınlık ≤ 25 mm
7. Oksijeni tam giderilmiş olmalı
8. Oksijeni tam giderilmiş olmalı ve ince taneli uygulama yapılmalı.
9. Normalize edilmeli.
10. Maksimum karbon içeriği % 0,20 ve maksimum manganez içeriği % 1,60 olacak şekilde değiştirilmiş kimyaya (ısıya) sahip olmalıdır.
11. Termo-mekanik kontrol süreci (TMCP) ile üretilir.
12. İptal
13. Darbe testi gerekliliklerini karşılamalıdır (haddelenmiş olarak test edilmiş her bir levha).

Tasarım metal sıcaklığının seçilmesi, servis koşullarında gevrek kırıkları önleyecek kadar sağlam olan malzemelerin seçilmesinde önemlidir. Gövde plakalarının, gövde takviye plakalarının, gövdeye kaynaklanmış alt plakaların, menhol ve ağızlık boyunları için kullanılan plakaların, plaka halka gövde başlığı flanşlarının, kör flanşların, ve menhol kapağı tablo 2.3'e uygun olarak minimum tasarım sıcaklığında olmalıdır.

Tablo 2.3 Tasarım metal sıcaklığı için lineer denklem (American Petroleum Institute [API 650], 2007)

API Malzeme Grubu	Kalınlık Aralığı	Denklem
I	$6 \leq x < 13$	$Y = 0.714X - 16.286$
I	$13 \leq x \leq 25$	$Y = 1.417X - 25.417$
II	$6 \leq x < 13$	$Y = 0.634X - 31.81$
II	$13 \leq x \leq 40$	$Y = 1.243X - 39.72$
IIA	$10 \leq x < 13$	$Y = 2.667X - 55.667$
IIA	$13 \leq x \leq 19$	$Y = 2X - 47$
IIA	$19 \leq x \leq 40$	$Y = 0.905X - 26.19$
III	$6 \leq x < 13$	$Y = -40$
III	$13 \leq x < 40$	$Y = 1.222X - 55.89$
IIIA	$6 \leq x \leq 40$	$Y = -40$
IV	$6 \leq x \leq 40$	$Y = 0.7059X - 18.235$
IVA	$6 \leq x \leq 40$	$Y = 0.7353X - 23.412$
V	$6 \leq x \leq 40$	$Y = 0.6176X - 31.71$
VI, VIA	$6 \leq x \leq 40$	$Y = 0.4112X - 40.471$

Y= Tasarım Metal Sıcaklığı (°C)
X= Aşınma Payı İçeren Kalınlık (mm)

Tablo 2.3'te hesaplanan tasarım metal sıcaklığında veya üzerinde, 40 mm'den daha az veya eşit plakalar, darbe testi yapılmaksızın kullanılabilir. Kabuk açıklıklarını ve takma plakalarını takviye etmek için kullanılan plaka, takılı olduğu gövde plakası ile aynı malzemeyle veya tablo 2.2'de listelenen uygun herhangi bir malzemeden olmalıdır.

2.3 Kabuk Dizaynı

Depolama tanklarında tasarım parametreleri (depolanacak ürünün belirlenmesi, işletme sıcaklığı ve basıncı, tankın malzeme ve tasarım geriliminin seçilmesi, iklim koşulları vb.) belirlendikten sonra tank kabuk cidar kalınlığı analizine geçilir. Tank kabuk dizaynı iç basınca bağlı membran (zar) gerilime analizi ile kapalı kaplar için gerekli minimum kalınlığı basit olarak verir. Cidar kalınlığı belirlenen tank için, belirlenen kalınlığa bağlı olarak deprem, rüzgâr, kar gibi tanka etkiyen yüklere göre

cidar kalınlığı kontrol edilir. API 650 'ye göre tanka tasarımında kullanılan yükler aşağıda yer almaktadır.

- Ölü yük (D_L): Tankın veya tankı oluşturan parçaların ağırlığı
- Dizayn dış basınç (P_e)
- Dizayn iç basınç (P_i): 18 kPa'yi geçmemelidir
- Hidrostatik test (H_t): Deponun su ile tasarım sıvı seviyesine doldurulması nedeniyle yük.
- İç yüzer çatı yükü
- Minimum çatı aktif yükü (L_r): 1,0 kPa, çatıya ait yatay yansıtılan alanda. Minimum tavan canlı yükü, ASCE 7 uyarınca alternatif olarak belirlenebilir, ancak 0,72 kPa'dan düşük olmamalıdır
- Deprem yükü (E)
- Kar yükü (S): 1. Dengeli tasarımlı kar yükü (S_b), toplam kar yükünün 0,84 katı olacaktır.
- 2. Eğim 10° veya daha düşük koni çatıları için dengesiz tasarım kar yükü (S_u), dengeli kar yüküne eşit olmalıdır. Diğer bütün çatılar için dengeli olmayan kara yükü (S_u) dengeli tasarım kar yükünün 1,5 katına eşit olacaktır.
- Depolanan sıvı (F)
- Test basıncı (P_t):
- Rüzgâr yükü (W): Tasarım rüzgâr hızı (V) 190 km / saat (120 mil / saat) olacaktır.

Depolama tankının minimum plaka kalınlığı 5 mm olmalıdır. Plaka genişliği minimum 1800 mm olmalıdır. Gerekli kabuk kalınlığı, aşınma payını içeren yada hidrostatik test sonucu belirlenen dizayn kabuk kalınlığından büyük olmalıdır. Ancak tablo 2.5'te belirlenen parametrelerdeki kabuk kalınlığından küçük olmamalıdır. Her kabuk tabakası (plaka genişliği) için hesaplanan gerilme, kabuk tabakası için kullanılan malzemenin izin verilen gerilmesinden yüksek olmamalıdır (American Petroleum Institute [API 650], 2007).

Tablo 2.4 İzin verilebilir plaka malzemesi ve gerilmesi (American Petroleum Institute [API 650], 2007)

Plaka özellikleri	Teknik Kalite	Nominal Plaka Kalınlığı t mm	Minimum Akma Gerilmesi MPa	Minimum Çeki Gerilmesi MPa	Ürün Dizayn Gerilmesi Sd MPa	Hidrostatik Test Gerilmesi St MPa
ASTM Specifications						
A 283M	C		205	380	137	154
A 285M	C		205	380	137	154
A 131M	A, B		235	400	157	171
A 36M	—		250	400	160	171
A 131M	EH 36		360	490 ^a	196	210
A 573M	400		220	400	147	165
A 573M	450		240	450	160	180
A 573M	485		290	485 ^a	193	208
A 516M	380		205	380	137	154
A 516M	415		220	415	147	165
A 516M	450		240	450	160	180
A 516M	485		260	485	173	195
A 662M	B		275	450	180	193
A 662M	C		295	485 ^a	194	208
A 537M	1	t ≤ 65	345	485 ^a	194	208
		65 < t ≤ 100	310	450 ^b	180	193
A 537M	2	t ≤ 65	415	550 ^a	220	236
		65 < t ≤ 100	380	515 ^b	206	221
A 633M	C, D	t ≤ 65	345	485 ^a	194	208
		65 < t ≤ 100	315	450 ^b	180	193
A 678M	A		345	485 ^a	194	208
A 678M	B		415	550 ^a	220	236
A 737M	B		345	485 ^a	194	208
A 841M	Class 1		345	485 ^a	194	208
A 841M	Class 2		415	550 ^a	220	236
CSA Specifications						
G40.21M	260W		260	410	164	176
G40.21M	260 WT		260	410	164	176
G40.21M	300W		300	450	180	193
G40.21M	300WT		300	450	180	193
G40.21M	350W		350	450	180	193
G40.21M	350WT	t ≤ 65	350	480 ^a	192	206
		65 < t ≤ 100	320	480 ^a	192	206
National Standards						
			235	365	137	154
			250	400	157	171
			275	430	167	184
ISO Specifications						
ISO 630	E 355C, D	t ≤ 16	275	410	164	176
		16 < t ≤ 40	265	410	164	176
	E 355, D	t ≤ 16	355	490 ^a	196	210
		16 < t ≤ 40	345	490 ^a	196	210
		40 < t ≤ 50	335	490 ^a	196	210
EN Specifications						
EN 10025	S 355J0, J2	t ≤ 16	275	410	164	176
		16 < t ≤ 1 1/2	265	410	164	176
	S355J0, J2, K2	t ≤ 16	355	470 ^a	188	201
		16 < t ≤ 40	345	470 ^a	188	201
		40 < t ≤ 50	335	470 ^a	188	201

^a Müşteri ile üretici arasında yapılan anlaşma ile ASTM A 537M, Class 2, A 678M, teknik kalite B ve A 841 M, Class 2 malzemelerin çekme mukavemeti, minimum 585 MPa ve maksimum 690 MPa arttırılabilir. Listelenen diğer malzemelerin çeki gerilmeleri en az 515 MPa ve en fazla 620 MPa arttırılabilir.

^b Müşteri ile üretici arasında yapılan anlaşma ile, ASTM A 537M, Class 2 malzemelerin çeki gerilme mukavemeti minimum 550 MPa ve maksimum 690 MPa arttırılabilir. Listelenen diğer malzemelerin çekme gerilmesi en az 485 MPa ve maksimum 620 MPa arttırılabilir.

Tablo 2.5 Tank çapına göre plaka kalınlığı (American Petroleum Institute [API 650], 2007)

Nominal Tank apı (m)	Nominal Plaka Kalınlığı (mm)
$d < 15$	5
$15 \leq d < 36$	6
$36 \leq d \leq 60$	8
$d > 60$	10

Tank malzemesi için maksimum izin verilebilir dizayn gerilmesi (S_d) tablo 2.4'te gösterilmiştir. Depolama tankını oluşturan kabuk plakanın, aşınma payı içermeyen kalınlığının (corroded plate thicknesses) hesaplanmasında kullanılan gerilme değeridir. Dizayn gerilmesinin (S_d) temeli ya akma gerilmesinin üçte ikisi ya da çeki gerilmesinin beşte ikisinin en az olanın seçilmesine dayanır. Maximum izin verilebilir hidrostatik test gerilmesi (S_t) tablo 2.4'te gösterilmiştir. Depolama tankını oluşturan kabuk plakanın nominal kalınlığının hesaplanmasında kullanılan gerilme değeridir. Hidrostatik test gerilmesi (S_t) temeli akma gerilmesinin ya dörde  ya da çeki gerilmesinin yedide nden en az olanın seçilmesine dayanır (API 650, 2007).

Küçük kapasiteli tanklarda kabuk dizaynında izin verilebilir gerilme sabit 145 MPa ve bağlantı verim faktörü 0,85 ya da 0,70 alınmasına müsaade edilebilir. Bu dizayn kriteri sadece kabuk kalınlığı 13 mm eşit veya az durumunda kullanılır (API 650, 2007).

2.4 Kabuk Kalınlığının Hesaplanması

2.4.1 Adım Metodu

Kalınlık hesaplanmasında adım metodu, her kabuk tabakasının alt noktasından 0,3 m üstte tasarım noktası gerekir. Küçük kapasiteli depolama tankları sadece adım metodu ile dizayn edilir. Bu metodu 61 metre çapından bk tanklar için kullanılmaz (API 650, 2007). Kabuk plakasının minimum kalınlık şu formül ile hesaplanır:

$$t_d = \frac{4,9D(H - 0,3)G}{S_d} + CA \quad (2.1)$$

$$t_t = \frac{4,9D(H - 0,3)G}{S_t} \quad (2.2)$$

Burada;

t_d = Dizayn kabuk kalınlığı (mm)

t_t = Hidrostatik test kabuk kalınlığı (mm)

D = Nominal tank çapı (m)

H = Dizayn sıvı yüksekliği (m)

G = Dizayn spesifik depolanan sıvının yoğunluğu

CA= Aşınma payı (mm)

S_d = İzin verilebilir tasarım gerilmesi (MPa)

S_t = İzin verilebilir hidrostatik test gerilmesi (MPa)

E: Bağlantı verim faktörü

NOT: İzin verilebilir tasarım gerilmesi ve İzin verilebilir hidrostatik test gerilmesi küçük kapasiteli tanklarda ve paslanmaz çelik plaka malzemeden yapılan yapılarda bağlantı verim faktörü ile çarpılır.

$$t_d = \frac{4,9D(H - 0,3)G}{(S_d)E} + CA \quad (2.3)$$

$$t_t = \frac{4,9D(H - 0,3)G}{(S_t)E} \quad (2.4)$$

Atmosferik kaplarda oluşan gerilmeler; sıvı basıncından ve tankın ağırlığından dolayı oluşan gerilmelerdir. Tank içerisinde yer alan sıvıdan dolayı oluşan hidrostatik basınç silindirik kap cidarında teğetsel gerilmeye neden olurken, sıvı basıncı silindirik kabın atmosferik kap olması nedeniyle eksenel yönde gerilmeye ise sebep olmamaktadır. Tank ağırlığından oluşan yük ise cidarda bası gerilmesine neden olmaktadır. Silindirik kaptaki maksimum oluşan gerilmenin, sıvı basıncının en yüksek değere tankın en alt noktada oluşacaktır.

Yukarıda belirtilen (2.1) ve (2.2) formülü; iç basınç altında silindirik kabuk için bölüm 1’de silindirik kaptan elde edilen teğetsel gerilme denkleminin (1.11) kalınlık değerinin çekilmesi ile çıkarılmıştır. Teğetsel gerilmeye yer alan parametrelerin açılımını yaparsak;

Burada parametrelerin açılımları şunlardır;

D = Tank çapı

P = Sıvı basıncı ($P = GgH$)

g = Yerçekimi ivmesi ($9,81 \text{ m/s}^2$)

H = Dizayn sıvı yüksekliği (m) ($H-0,3$)

G = Dizayn spesifik depolanan sıvının yoğunluğu

$S_d = \sigma_2$ İzin verilebilir dizayn gerilmesi (MPa)

$$\sigma_2 = \frac{PD}{2t} \rightarrow \sigma_2 = S_d = \frac{GgHD}{2t} \rightarrow S_d = \frac{9,81HDG}{2t} \rightarrow S_d = \frac{4,9D(H-0,3)G}{t}$$

Buradan kalınlığı çekilerek tasarım kalınlığını elde ederiz.

$$\rightarrow t_d = \frac{4,9D(H-0,3)G}{S_d}$$

2.4.2 Değişken Tasarım Noktası Metodu

Değişken tasarım noktası yöntemiyle hesaplanan gerilmeler, gerçek teğetsel kabuk gerilmelerine nispeten yakın olmasına neden olan tasarım noktalarında kabuk kalınlıkları verir. Bu metodu adım metodu kullanılmadığında ve aşağıdaki denklemi sağladığında kullanılır:

$$\frac{L}{H} \leq \frac{1000}{6} \quad (2.5)$$

Burada;

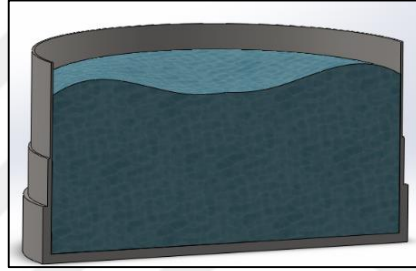
$$L = (500Dt)^{0,5} \quad (\text{mm})$$

$$D = \text{Tank } \text{çapı} \quad (\text{m})$$

$$t = \text{Taban kabuk tabakanın aşınma payı içermeyen kalınlığı} \quad (\text{mm})$$

$$H = \text{Maximum dizayn sıvı yüksekliği} \quad (\text{m})$$

Hem dizayn durumu hem de hidrostatik test durumu için minimum plaka kalınlığı ana hatları ile denklem (2.1) ve (2.2) hesaplanır. Daha sonra dizayn ve hidrostatik test durumları için tankın tüm plaka tabakaları için bağımsız hesaplama yapılır. Şekil 2.1 farklı tabaka kalınlıktaki depolama tankı gösterilmektedir.



Şekil 2.1 Farklı tabaka kalınlıktaki depolama tankı

Bir kabuk tabakası için en büyük kalınlık kullanıldığında, en büyük kalınlığa sahip tabakanın üstündeki tabakanın kalınlığının hesaplanması için kullanılabilir. Tabandaki kabuk tabakası kalınlığını hesaplamak için ilk olarak dizayn ve hidrostatik test durumu için (2.1) ve (2.2)'de verilen denklemler ile t_{pd} ve t_{pt} değerleri hesaplanmalıdır. Daha sonra dizayn ve hidrostatik test durumu için tabandaki kabuk tabakası kalınlığı t_{1d} ve t_{1t} aşağıdaki şu formül ile hesaplanmalı:

$$t_{1d} = \left(1,06 - \frac{0,0696D}{H} \sqrt{\frac{HG}{S_d}} \right) \left(\frac{4,9HDG}{S_d} \right) + CA \quad (2.6)$$

Not: Dizayn durumu için t_{1d} , t_{pd} 'den küçük olması gerekir.

$$t_{1t} = \left(1,06 - \frac{0,0696D}{H} \sqrt{\frac{H}{S_t}} \right) \left(\frac{4,9HD}{S_t} \right) \quad (2.7)$$

Not: Hidrostatik test durumu için t_{1d} , t_{pt} 'den küçük olması gerekir.

Hem dizayn hem de hidrostatik test için ikinci tabaka kalınlığını hesaplamak için, aşağıdaki oranın değeri taban tabaka için hesaplanmalıdır.

$$\frac{h_1}{(rt_1)^{0,5}} \quad (2.8)$$

Burada;

h_1 = taban kabuk tabakanın yüksekliği (mm)

r = nominal tank yarıçapı (mm)

$t_1 = t_2$ (dizayn) hesaplamak için kullanılan hesaplanmış aşınma payı içermeyen taban kabuk tabakanın kalınlığı (mm), taban kabuk tabakanın hesaplanmış hidrostatik kalınlığı, t_2 'yi hesaplamak için kullanılacaktır. (hidrostatik test).

$$\text{Eğer oran değeri} \quad 1,375 \geq \frac{h_1}{(rt_1)^{0,5}} \quad \text{ise} \quad t_2 = t_1 \quad (2.9)$$

$$\text{Eğer oran değeri} \quad 2,625 \leq \frac{h_1}{(rt_1)^{0,5}} \quad \text{ise} \quad t_2 = t_{2a} \quad (2.10)$$

$$\text{Eğer oran değeri} \quad 2,625 > \frac{h_1}{(rt_1)^{0,5}} > 1,375 \quad \text{ise}$$

$$t_2 = t_{2a} + (t_1 - t_{2a}) \left[2,1 - \frac{h_1}{(rt_1)^{0,5}} \right] \quad (2.11)$$

Burada;

t_2 =ikinci kabuk tabakanın minimum dizayn kalınlığı (mm)

t_{2a} = ikinci kabuk tabakanın aşınma payı içermeyen kalınlığı (mm). Üstteki kabuk tabaka için hesap aşağıda madde 1 ve madde 2'de tanımlanmıştır. Dizayn durumu ve

hidrostatik test durum için ikinci kabuk tabaka kalınlığı (t_2) hesabı içinde t_{2a} ve t_1 değerleri kullanılır. t_2 için önceki formül, tabandaki ve ikinci kabuk tabakanın tasarımı için hesaplanan izin verilebilir gerilmeyle aynı temele dayanır. Tanklarda oranın değeri 2,625 eşit veya yüksekliği için, ikinci tabaka için izin verilebilir gerilme madde 1 ve madde 2’de tanımlanan metod kullanıldığında taban tabaka için izin verilebilir gerilmeden daha az olmalı.

İkinci kabuk tabakanın aşınma payı içermeyen kalınlığı (t_{2a}) bulmak için;

Madde 1:

Hem dizayn hem de hidrostatik test durumu için üstteki tabaka kalınlığı hesaplamak için, üst tabaka aşınma payı içermeyen kalınlığı için başlangıç değeri (t_u) denklem (2.1) ve (2.2) kullanılarak hesaplanır. Daha sonra tabandaki tabakadan değişken tasarım noktası x mesafesi aşağıdaki denklemlerden en küçük değeri sağlayan denklem kullanılarak hesaplanır:

$$x_1 = 0,61(rt_u)^{0,5} + 320CH \quad (2.12)$$

$$x_2 = 1000CH \quad (2.13)$$

$$x_3 = 1,22(rt_u)^{0,5} \quad (2.14)$$

Burada;

t_U = Tabakalar arasındaki kaynak bağlantısında üstteki tabakanın aşınma payı içermeyen kalınlığı (mm)

$$C = \left[K^{0,5}(K-1) \right] / (1 + K^{1,5})$$

$$K = t_L / t_u$$

t_L = Tabakalar arasındaki kaynak bağlantısında alttaki tabakanın aşınma payı içermeyen kalınlığı (mm)

H = dizayn sıvı yüksekliği (m)

Madde 2:

Denklem (2.12), (2.13) ve (2.14)'den sağlanan minimum x değeri kullanılarak hem dizayn durumu için (t_{dx}) hem de hidrostatik test durumu için (t_{tx}) üstteki kabuk tabakanın minimum kalınlık değeri t_x hesaplanır.

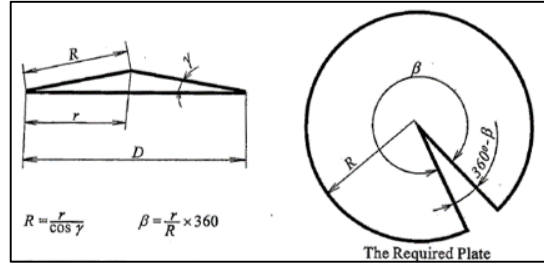
$$t_{dx} = \frac{4,9D \left(H - \frac{x}{1000} \right) G}{S_d} + CA \quad (2.15)$$

$$t_{tx} = \frac{4,9D \left(H - \frac{x}{1000} \right)}{S_t} \quad (2.16)$$

Madde 1 ve madde 2'de tanımlanan adımlar küçük farklar arasında t_x değerinin başarı içinde hesaplanana kadar tu gibi hesaplanmış t_x 'in değeri kullanılarak tekrar edilmeli. Bu düşünce altında tekrar eden adımlar tabaka için tasarım noktasının konumunu çok doğru sağlar. Sonuç olarak çok daha doğru kabuk kalınlığı sağlanır. Ek 1'de 250 m³ atmosferik bir tankın kabuk kalınlığı hesabı yer almaktadır.

2.5 Çatılar**2.5.1 Kendinden Destekli Koni Çatıları**

Kendinden destekli koni çatılar, çatı plakalarının tank yan kabukları ile kaynaklanarak çatı plakasının stabilitesi sağlanarak ek destek elemanına gereksinim duymaz. Çatı plakalarının nominal kalınlığı 4,8 mm'den az olmamalıdır (API 650, 2007).



Şekil 2.2 Tank konik çatı (Megyesy, 1973)

Kendiliğinden desteklenen koni çatıları $9,5 \leq \gamma \leq 37$ derece arasında olmalıdır. Şekil 2.2’de konik çatı ve konik çatı için gerekli plaka açılımı görülmektedir. Konik oluşumu için tabanla eğik düzlem arasındaki açığa bağlı olarak gerekli plaka yarıçapı denklem 2.15’teki gibi hesaplanır.

$$R = \frac{r}{\cos \gamma} \quad (2.17)$$

Konik oluşumu için gerekli boşluk miktarı açısı şu şekilde hesaplanır:

$$360^\circ - \left[\frac{r}{R} \times 360 \right] \quad (2.18)$$

BÖLÜM ÜÇ

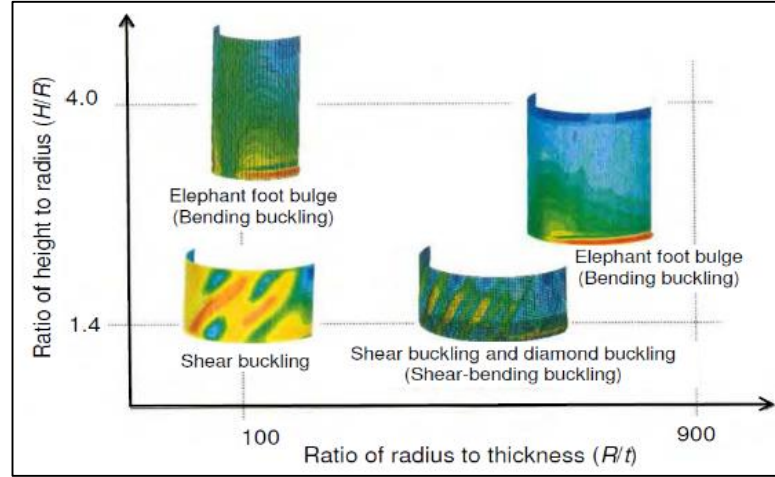
YER ÜSTÜ, DİKEY, SİLİNDİRİK DEPOLAMA TANKLARININ DEPREM TASARIMLARI

Petrol, soğutulmuş akışkan gaz, içme suyunu depolamak için çelik, paslanmaz çelik ya da kompozit yer üstü silindirik depolama tankları; kok, kömür, tahıl için çelik veya beton silolar; yüksek basınçlı akışkan gazların depolanması için küresel tanklar gibi sıvı ve gaz maddenin depolanması ve işlenmesi için tankların birçok çeşitleri vardır. Son yıllarda ürün hammadde ve işlenmiş ürünlerin depolanmasında yüksek kapasiteli depolama tankları kullanılmakta olup bu tankların tüm sosyal hayat içerisinde sismik dizaynı çevre ve güvenlik için büyük önem arz etmektedir. Bu bölüm, sismik zemin hareketine maruz kalabilecek kaynaklı çelik depolama tanklarının tasarımı için minimum şartları anlatmaktadır.

Silindirik sıvı depolama tanklarının sismik hasar biçimleri şunlardır:

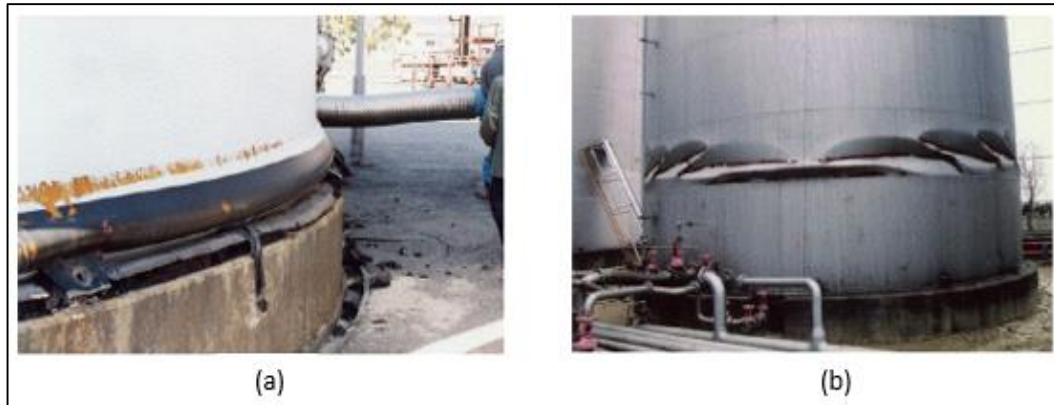
1. Yan duvarlarda bükülme
2. Depo çatılarının ve yan kabuk birleşimlerinin hasarlanması
3. Tankın kayması ve tank tabanının kalkması
4. Tankların tabanındaki lokal burkulma
5. Ankraj cıvatalarının zarar görmesi
6. Ana plakanın halka şeklindeki parçalarının çatlamasıdır (Maekawa, 2012).

Tankların yan duvarlarındaki burkulma biçimleri kayma burkulması ve eğilme burkulmasını içerir. Eğilme burkulması; elmas burkulması ve fil ayak çıkıntılarını içerir. Bu deformasyon biçimleri, tankların yükseklik / yarıçap oranı ve yarıçap kalınlığı oranı gibi geometri parametreleriyle ilişkilendirilir. Şekil 3.1’de, burkulma biçimleri ve geometri parametreleri arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Kayma burkulması, yükseklik ile yarıçap arasındaki küçük oranlarda oluşur. Eğilme burkulması ise büyük oranlarda ağırlıklı olarak oluşur. Kayma burkulması, kesme kuvvetinden kaynaklanır ve bir tank yan duvarının ortasında birçok büyük diyagonal kırışıklık meydana getirir (Maekawa, 2012).



Şekil 3.1 Silindirik tanklarının bükülme modları ve geometri parametreleri (Maekawa, 2012)

Elmas burkulmaya ait tipik bir örnek Şekil 3.2b’de gösterilmektedir. Elmas burkulma, eğilme momentinin neden olduğu eğilme burkulma biçimlerinden biridir ve bir tankın tabanında oluşur. Burkulma oluştuğunda, burkulma bölgesindeki kesit içe doğru bükülür ve kırılmaya neden olur. Deformasyon şiddetli olduğu için tankların yapısal kuvveti aniden azalır. 1980 Greenville-Mt Diablo depreminde birçok şarap depolama tankında elmas tokluğu yaygın şekilde bilinmeye başlanmıştır. Fil ayak çıkıntısı başka bir eğilme burkulma biçimidir (Maekawa, 2012).



Şekil 3.2 a) Fil ayak çıkıntı tipi, tank duvarının bükülmesi b) Tank duvarının elmas desen burkulması (The Architectural Institute Of Japan[AIJ], 2010)

Fil ayak çıkıntısının tipik bir örneği Şekil 3.2a’da gösterilmektedir. Elmas burkulma ve fil ayak çıkıntısının oluşma durumu, tanklardaki iç basınca bağlı teğetsel gerilmesi nedeniyle oluşur (Akiyama ve diğer., 1989).

3.1 Sismik Analiz için Yaylı Kütle Modeli

Silindirik sıvı depolama tanklarının titreşim özelliklerine ve sismik direncine ilişkin daha önceki çalışmalarda deprem yükü karşında oluşan hidrodinamik basınca neden olan sıvı kütleleri impulsif ve konvektif kütle olarak modellendi. Sıvı kütlelerinin dinamik yapısı konvektif kütle ve tankla ivmelenen kütlesi ise impulsif kütle olarak tanımlandı. Bu modelde tank rijit olarak kabul edildi. Tank kabuğunun esnekliğinin de hesaba katıldığı sıvı kütleleri konvektif kütle, impulsif kütle ve rijit kütle olmak üzere üç parça olarak modellendi. Tank tabanında bulunan ve tankla hareket eden sıvı kütlesi rijit kütle, tankla aynı yönde hareket eden rijit kütlelerin üstünde impulsif kütle ve tank üzerinde çalkalanan sıvı kütlesi konvektif kütle olarak tanımlandı. Daha sonraki yapılan deneyler ve nümerik çalışmalar sonucu hidrodinamik basıncı neden olan sıvı kütleleri impulsif kütle ve konvektif kütlelerin birinci mod davranışlarının deprem yükünün etkilerinin hesaplanmasında yeterli olacağı bulunmuştur (Yazıcı ve Çılı, 2005).

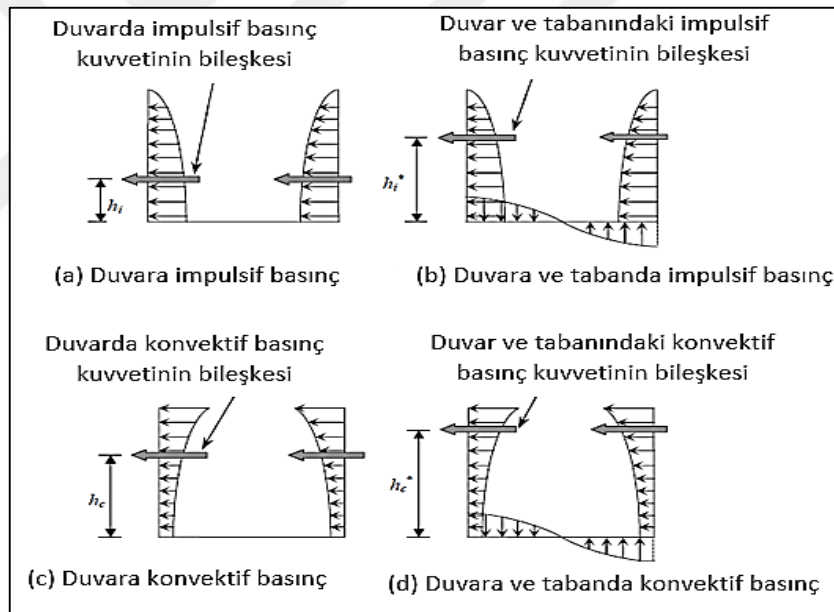
Serbest yüzeye sahip bir sıvı içeren bir tank yatay deprem hareketi yaparsa tank duvarı ve sıvısı yatay ivmeye tabi tutulur. Deponun alt bölgesindeki sıvı, tank duvarı ile sıkı sıkıya bağlı bir kütle gibi davranır. Bu kütle, duvara doğru ivme kazandıran ve tank duvarı üzerinde ve benzer şekilde tabanda impulsif hidrodinamik basınç uyandıran itici sıvı kütlesi olarak adlandırılır. Deponun üst bölgesindeki sıvı kütlesi çalkantılı hareket eder. Bu kütle, konvektif sıvı kütlesi olarak adlandırılır ve tank duvarı ve tabanı üzerinde konvektif hidrodinamik basınç uygular. Böylece, toplam sıvı kütlesi iki kısma ayrılır. Bunlar impulsif kütle ve konvektif kütlelerdir. Tank-sıvı sisteminin yay kütle modelinde bu iki sıvı kütlesi uygun şekilde temsil edilmektedir. Deponun duvarı ve tabanındaki impulsif ve konvektif hidrodinamik basınç dağılımının nitel bir tanımlaması Şekil 3.3'te verilmiştir.

Deprem yükünün meydana getirdiği hidrodinamik basınca neden olan konvektif kütle tank çatısında ve tank üst duvarlarında hasara sebep olmaktadır. Hidrodinamik basınca neden olan impulsif kütle ise tankta temel makaslaması, temelin kalkması,

tankın kayması, ankrajlı veya kısmen ankrajlı tanklarda, dikey yer değiştirmeler ve gerilmeler nedeniyle plaka-taban kırılmalarına sebep olur.

3.2 Zemin Destekli Tank

Zemin destekli depo için yaylı kütle modeli Housner'in çalışmasına dayanır. Tankın kütle yay modelinde, (h_i) yükseklik olan duvardaki impulsif hidrodinamik basıncın sonucunun deponun dibinin tabanından geldiği görülmektedir. Öte yandan, (h_i^*), duvar ve taban üzerindeki itici basıncın sonucunun depo duvarının dibinden geldiğini gösterir. Dolayısıyla taban basıncının etkisi dikkate alınmazsa, impulsif sıvı kütlesi (h_i) yükseklikte hareket edecek ve taban basıncının etkisi göz önüne alınırsa, (h_i^*) olarak hareket edecektir (Jain ve Jaiswal, 2007).

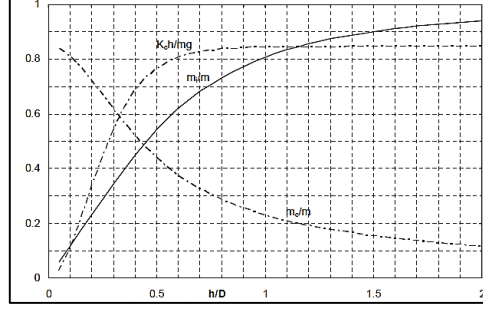


Şekil 3.3 Tank duvarı ve tabanı üzerindeki hidrodinamik basınç dağılımının nitel tanımlaması (Jain ve Jaiswal, 2007)

Yükseklikler (h_i) ve (h_i^*) şematik olarak Şekil 3.3a ve 3.3b'de tarif edilmiştir. Benzer şekilde (h_c), duvardaki konveksiyonel basıncın tank duvarı tabanından geldiği yüksekliktir. (h_c^*) duvar ve tabandaki konvektif basıncın oluştuğu yüksekliktir. Yükseklikler (h_c) ve (h_c^*) Şekil 3.3c ve 3.3d'de tarif edilmiştir (Jain ve Jaiswal, 2007).

3.2.1 Ürünün Etkili Kütlesi

Etkili kütleler ve toplam ürün kütlesi m 'yi, sırasıyla (m_i/m) ve (m_c/m) oranlarına çarparak belirleyeceğiz.



Şekil 3.4 İmpulsif ve konvektif kütle ve konvektif yay sertliği (Jain ve Jaiswal, 2007)

İmpulsif kütle (m_i) :

$$D/h \geq 1,333 \quad \text{ise} \quad \frac{m_i}{m} = \frac{\tanh\left(0,866\frac{D}{h}\right)}{0,866\frac{D}{h}} \quad (3.1)$$

İmpulsif kütle (m_i) :

$$D/h < 1,333 \quad \text{ise} \quad \frac{m_i}{m} = \left[1 - 0,218\frac{D}{h}\right] \quad (3.2)$$

Etkin konvektif kütle (m_c),

$$\frac{m_c}{m} = 0,23 \frac{\tanh\left(3,68\frac{h}{D}\right)}{\frac{h}{D}} \quad (3.3)$$

Burada:

D = Nominal tank çapı, (m)

h = Maksimum tasarım ürünü seviyesi, (m)

m = Toplam ürün kütlesi (kg)

3.2.2 Etkili Yanal Kuvvetler İçin Etki Merkezi

Tankın tabanından sıvı merkezine eşdeğer yanal kuvvetler için etki merkezi olan moment kolu denklemler (3.4) ile (3.9) ile tanımlanır. Depo kabuğu ve çatıya yönelik itici yanal kuvvetler için etki merkezi bileşeninin ağırlık merkezi üzerinden etki eder.

3.2.2.1 Gövde Duvarı Döndürme Momenti İçin Etki Merkezi

Gövde duvarı momenti, M_{rw} , toplam devrilme momentinin tank kabuğu çevre bölgesinin tabanında görev yapan kısmıdır. Bu moment, bir halka duvar temelinde, tank ankraj kuvvetlerinde ve uzunlamasına kabuk sıkıştırmasını kontrol etmek için yükleri belirlemek için kullanılır. Tank kabuğunun tabanından (m_i) ve (m_c) 'ye uygulanan yanal sismik kuvvetlerin etki merkezine kadar olan yükseklikler, (h_i) ve (h_c), denklem (3.4) ile (3.6) kullanılarak D/h oranı için elde edilir.

İmpulsif sıvı kütlesi yüksekliği (h_i)

$$D/h \geq 1,333 \quad \text{ise} \quad \frac{h_i}{h} = 0,375 \quad (3.4)$$

$$D/h < 1,333 \quad \text{ise} \quad \frac{h_i}{h} = 0,5 - \frac{0,09375}{h/D} \quad (3.5)$$

Konvektif sıvı kütlesi yüksekliği (h_c)

$$\frac{h_c}{h} = 1 - \frac{\cosh\left(3,68 \frac{h}{D}\right) - 1,0}{3,68 \frac{h}{D} \sinh\left(3,68 \frac{h}{D}\right)} \quad (3.6)$$

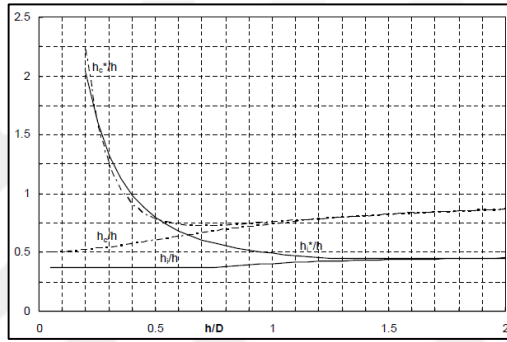
3.3.2.2 Taban Plaka Devrilme Moment İçin Etki Merkezi

"Taban plaka" momenti, m_s , toplam tank taban kesiti boyunca etki eden devrilme momentidir. Duvar ve taban üzerindeki itici basıncın sonucunun depo duvarının

dibinden (h_i^*) yüksekliktir. Taban basıncının etkisi göz önüne alındığında implusif sıvı kütlesi yüksekliği (h_i^*):

$$D/h \geq 1,333 \quad \text{ise} \quad \frac{h_i^*}{h} = 0,375 \left[1 + 1,33 \left(\frac{0,866 \frac{D}{h}}{\tanh\left(0,866 \frac{D}{h}\right)} - 1 \right) \right] \quad (3.7)$$

$$D/h < 1,333 \quad \text{ise} \quad \frac{h_i^*}{h} = \left(0,5 + 0,06 \frac{D}{h} \right) \quad (3.8)$$



Şekil 3.5 İmpulsif ve konvektif kütlelerin yükseklikleri (Jain ve Jaiswal, 2007)

Taban basıncının etkisi göz önüne alındığında konvektif sıvı kütlesi yüksekliği (h_c^*):

$$\frac{h_c^*}{h} = 1 - \frac{\cosh\left(3,68 \frac{h}{D}\right) - 2,01}{3,68 \frac{h}{D} \sinh\left(3,68 \frac{h}{D}\right)} \quad (3.9)$$

Bazı D/h oranlarının değerleri için, implusif kütle (m_i) ve konvektif kütle (m_c) toplamı, sıvının toplam kütlesine (m) eşit olmayacağı da belirtilebilir; Ancak, fark genellikle küçüktür (% 2 ila % 3). Bu fark, bu miktarların türetilmesinde yapılan varsayımlara ve şekil 3.5'te görüldüğü gibi yaklaşık değerlere atfedilir. Sığ tanklar için, hidrodinamik basıncın taban üzerine baskı katkısı nedeniyle, h_i^* ve h_c^* değerleri h 'den büyük olabilir (Jain ve Jaiswal, 2007).

3.4 Yer Üstü Depolama Tankları İçin Sismik Yük

Zemin üstü depolama tankları için tasarım sismik yükleri aşağıdaki yöntemlerden herhangi biri ile hesaplanmalıdır (The Architectural Institute Of Japan[AIJ], 2010):

- Modifiye Sismik Katsayı Yöntemi veya
- Modal Analiz

Tank temellerinin sismik yüklerinin tasarımında “Modifiye Sismik Katsayı Yöntemi” kullanılmalıdır.

3.4.1 Modifiye Sismik Katsayısı Analizi

Tasarım akma kesme kuvveti, Q_d denklemler (3.10) ve (3.11) veya (3.12) kullanılarak hesaplanmalıdır.

$$Q_d = Cmg \quad (3.10)$$

$$C_i = Z_s ID_s \frac{S_{a1}}{g} \quad (3.11)$$

$$C_c = Z_s I \frac{S_{v1}}{g} \quad (3.12)$$

Burada:

$$C_i \geq 0,3Z_s I$$

Q_d = Kesme kuvveti (N)

C= Yatay sismik katsayı tasarımı, (C_c), (C_i) (N)

C_c = Konvektif kütle için yatay sismik katsayı tasarımı (N),

C_i = İmpulsif kütle için yatay sismik katsayı tasarımı (N),

m= Tasarım kütlesi (kg)

S_{a1} =1. Doğal periyoda bağlı spektral tepki ivmesi (m/s^2)

S_{v1} =1. Doğal periyoda bağlı spektral tepki hızı (m/s)

g = Yerçekimi İvmesi (m/s^2)

Z_s =Sismik bölge Faktörü

I =Önem Faktörü

D_s = Yapı karakteristik katsayısı

$$D_s = D_h D_\eta$$

D_h = Yapının sönümlenmesiyle belirlenen katsayıdır

D_η = Yapının süneklik tarafından belirlenen katsayısıdır

m_c =Konvektif kütle (kg)

m_t = Efektif kütle = implusif kütle (m_i)+ tank tavan plakasının kütlesi (tank çatısı)(m_r)+ tank yan duvar plakalarının kütlesi (m_w)

İmplusif kütle için sismik yük tasarımı Q_{dw} ;

$$Q_{dw} = C_i m_t g \quad (3.13)$$

Konvektif kütle için birinci periyoduna bağlı spektral tepki hızının (S_{v1}) tasarımının geçerli olduğu konvektif kütle için sismik yük tasarımı Q_{dc} ;

$$Q_{dc} = C_c m_c g \quad (3.14)$$

Depolanan içerik sıvı olduğunda, konvektif kütle için tasarım sismik yükleri, konvektif kütle için ilk doğal periyoduna karşılık gelen tasarım hızı tepki spektrumu S_{v1} 'den elde edilmelidir.

3.4.2 Deprem Yüklerinin Belirlenmesi İçin Faktörler

3.4.2.1 Spektral Tepki

Spektral tepki hızı (S_{v1}) ve spektral tepki ivmesi (S_{a1}) hesaplanması;

Eğer

$$T_j < T_G$$

$$S_{vj} = 1,56 T_j$$

$$S_{aj} = 9,8$$

Eğer

$$T_j \geq T_G$$

$$S_{Vj} = 1,56 T_G$$

$$S_{aj} = 9,8 T_G / T_j$$

Tanımlama:

$T_j = j$ 'inci yapı doğal periyodu (s)

T_G = Zemin sınıflandırmasına bağlı hesaplanmış kritik periyod (tablo 3.1)

Tablo 3.1 Kritik periyod T_G (s) (The Architectural Institute Of Japan[AIJ], 2010)

Zemin Sınıfı	Zemin Durumu Tanımı	T_G (s)
TİP 1	3. Jeolojik zamanından önce oluşmuş zemin Diluvyumlar Temel kayaya kalınlığı 10m den az alüvyon tabaka	0,64
TİP 2	Temel kayaya kalınlığı 25m den az alüvyon tabaka ve yumuşak tabakanın kalınlığı 5 m'den az olan alüvyon	0,94
TİP 3	Özellikleri bilinmeyen zemin	1,28

Birinci konvektif modu için hız tepki spektrumu, sönümlleme oranı % 0,5 olduğunda, eşitlik (3.15) ve (3.16) 'dan elde edilir.

$$1,28s \leq T \leq 11s \quad \text{ise} \quad IS_V = 2 \left(\frac{m}{s} \right) \quad (3.15)$$

$$11s \leq T \quad \text{ise} \quad IS_V = \frac{22}{T} \left(\frac{m}{s} \right) \quad (3.16)$$

Burada:

T = Doğal periyod (s)

Sönümlleme oranının % 0,5'in altında olması durumunda,

$$IS_V = 2 \frac{1,10}{1 + 3h + 1,2\sqrt{h}} \left(\frac{m}{s} \right) \quad (3.17)$$

Denklem (3.15) ve (3.16)'da gösterilen hız cevabı spektrumu, 1,28 saniyeden daha uzun periyotlar için kullanılmalıdır. Bu spektrum tablo 3.2'de gösterilen çalkalanma

tepkisinin sönümleme oranına bağlıdır. Sönüm oranı % 0,5'in üzerinde olan durumlarda hız tepkisi sönümleme oranına göre değişir. Bununla birlikte, yüksek modun çalkalanma tepkisi, denklem 3.16'dan yüksek ise, daha büyük sönüm oranına göre daha düşük hız elde edilmiş olsa bile, hız cevabı için en az 2 m / s kullanılmalıdır. Bu hız tepkisi bir önem faktörü I içerir ve bu nedenle IS_v anlamına gelir (AIJ, 2010).

Tablo 3.2 1. Mod çalkalanma için sönümleme oranı (AIJ, 2010)

Çatı Durumu	Sönüm Oranı
Sabit çatı	0,1%
Tek güverte tipli yüzer çatı	0,5%
Çift güverte tipli yüzer çatı	1%

Denklem (3.18), yumuşak zemin üzerine inşa edilmiş büyük ölçekli silindirik yağ depolama tankları gibi düz tanklar için geçerlidir. Düz olmayan tanklar için sönüm oranı daha düşüktür.

$$h = \frac{7a_h M}{A_0 T} \cdot 10^{-6} \quad (3.18)$$

M =Yapının kütlesi (kg)

A_0 = Tank taban alanı (m^2)

Tablo 3.3 a_h değeri (AIJ, 2010)

Zemin Sınıfı	a_h Değeri
Tip 1	0,6
Tip 2	0,75
Tip 3	1

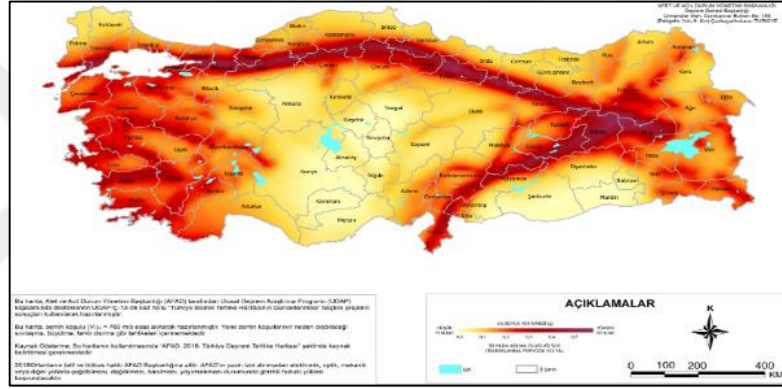
3.4.2.2 Önem Faktörü

Çevresel sebep ve depremin oluşturacağı tehlikenin önemi düşünülerek sismik sınıflandırma tablo 3.4'te sismik önem faktörü verildi.

Tablo 3.4 Önem faktörü I (AIJ, 2010)

Sismik Dizaynın Sınıflandırması	Tanımlama	Önem Faktörü I
I	Küçük kapasiteli depolama tankı ve tehlikeli madde içermeyen	0,6
II	Orta ve büyük kapasiteye sahip depolama tankı, tehlikeli madde içermeyen	0,8
III	Deprem hasarının öneminin ortak kullanım binalarına eşdeğer olduğu depolama tankları	1
IV	Tehlikeli madde içeren depolama tankı ve ikincil derece felakete neden olacak tank	1,2

3.4.2.3 Sismik Bölge Faktörü



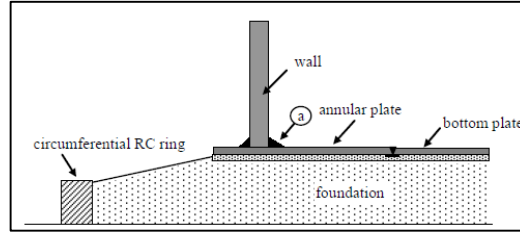
Şekil 3.6 Türkiye deprem bölgeleri haritası (T.C. İçişleri Bakanlığı Afet Ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı (AFAD), 2018)

Türkiye deprem bölgeleri, ivme değerlerine göre aşağıdaki şekilde derecelendirilmiştir ((AFAD), 2018). (g: yer çekimi 981 cm/s^2)

- 1. Derece deprem bölgesi:** ivme değeri 0,40 g 'den büyük
- 2. Derece deprem bölgesi:** ivme değeri 0,40 g ile 0,30 g arasında
- 3. Derece deprem bölgesi:** ivme değeri 0,30 g ile 0,20 g arasında
- 4. Derece deprem bölgesi:** ivme değeri 0,20 g ile 0,10 g arasında
- 5. Derece deprem bölgesi:** ivme değeri 0,10 g 'den az

3.4.3 Yapı Karakteristik Katsayısı

a) Tank tabanı zemine sabitlenmemiş ise yapı karakteristik katsayısı;



Şekil 3.7 Tankın alt köşesi (AIJ, 2010)

Tank taban plakasının (annular plate) akma gerilmesinin çeki gerilmesine oranı $Y_r < 0,8$ ((Y_r) 0,8 değerinden küçük) ise;

$$D_s = \frac{1,42}{1 + 3h + 1,2\sqrt{h}} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + 84\left(\frac{T_1}{T_e}\right)^2}} \quad (3.19)$$

Tank taban plakasının (annular plate) akma gerilmesinin çeki gerilmesine oranı $Y_r > 0,8$ ((Y_r) 0,8 değerinden büyük) ise;

$$D_s = \frac{1,42}{1 + 3h + 1,2\sqrt{h}} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + 24\left(\frac{T_1}{T_e}\right)^2}} \quad (3.20)$$

b) Tank tabanı zemine sabitlenmiş ise yapı karakteristik katsayısı;

$$D_s = \frac{1,42}{1 + 3h + 1,2\sqrt{h}} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{3,3t\sigma_y^2}{l_a p_a \sigma_y} \left(\frac{T_1}{T_e}\right)^2}} \quad (3.21)$$

c) Tank duvarındaki burkulmayı hesaplamak için yapı karakteristik katsayısı;

$$D_s = \frac{1,42}{1 + 3h + 1,2\sqrt{h}} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + 3\left(\frac{T_f}{T_e}\right)^2}} \quad (3.22)$$

Tanımlama:

h = sönüm oranı

T_1 = Tank tabanını (bottom plate) ve tank taban-zemin bağlantı elemanını deforme eden depolama tankı doğal periyod (s)

T_e = Tank tabanı ve bağlantı elemanının yanı sıra tank duvarını da deforme eden modifiye edilmiş depolama tankı doğal periyodu (s)

σ_y = Tank taban plakasının akma gerilmesi (N/mm²)

$a\sigma_y$ = Tank taban-zemin bağlantı elemanını akma gerilmesi (N/mm²)

l_a = Tank taban-zemin bağlantı elemanının efektif boyu (mm)

t = Tank taban plakasının kalınlığı (mm)

p = Tank taban plakasına etki eden statik basınç (N/mm²)

Y_r = Tank taban plakasının (annular plate) akma gerilmesinin çeki gerilmesine oranı

T_f = Tank tabanının kalkmaksızın tank duvarının deformasyonuna bağlı doğal periyodu

3.4.4 Tank Tabanını (Bottom Plate) Ve Tank Taban-Zemin Bağlantı Elemanını Deforme Eden Depolama Tankı Doğal Periyod

$$T_1 = 2\pi \sqrt{\frac{m_t}{K_1}} \quad (3.23)$$

Burada:

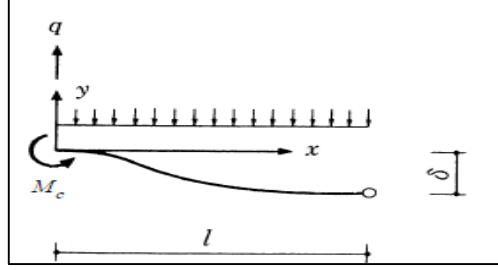
m_t = Efektif kütle = implusif kütle (m_i) + tank tavan plakasının kütlesi (tank çatısı)(m_r) + tank yan duvar plakalarının kütlesi (m_w)

K_1 = Tankın yatay doğrultudaki hareketin tanımlandığı bir serbestlik dereceli sistemin yay sabiti

3.4.4.1 Tank Tabanı-Zemin Bağlantı Elemanı İle Sabitlenmemiş İse Yay Sabiti:

Alt plakanın akma kuvveti(q_y):

$$q_y = \frac{2t\sqrt{1,5p\sigma_y}}{3} \quad (3.24)$$



Şekil 3.8 Taban plakası deformasyonu(AIJ, 2010)

Akma kuvveti için yükseltici deformasyon (δ_y):

$$\delta_y = \frac{3t\sigma_y^2}{8Ep} \quad (3.25)$$

Depolama tankı yukarı kaldırma direnci için birim dairesel çevre uzunluğunun yay sabiti

$$k_1 = \frac{q_y}{\delta_y} = \frac{16pE}{9\sigma_y} \sqrt{\frac{1,5p}{\sigma_y}} \quad (3.30)$$

Devrilme momenti salınım açısının fonksiyonu olarak tanımlanırsa;

$$M = \int_0^{2\pi} k_1 r \theta (1 + \cos\varphi) r (1 + \cos\varphi) r d\varphi = K_M \theta$$

$$K_M = 3 \int_0^{2\pi} k_1 r^2 \sin^2\varphi r d\varphi = 3k_1 \pi r^3$$

Burada:

K_M tankın salınım hareketinde tanımlanan yay sabiti

Bir serbestlik dereceli sistemin yay sabiti devrilme momentinin salınım açısına bölünmesi ile bulunur:

$$K_1 = M / (0,44 H_1)^2 \theta = 48,7 r^3 k_1 / H_1^2 \quad (3.31)$$

Burada:

H_1 = Depolama yüksekliği

$0,44 H_1$ = İmpulsif kütlenin ağırlık merkezi yüksekliği

3.4.4.2 Tank Tabanı-Zemin Bağlantı Elemanı İle Sabitlenmiş İse Yay Sabiti:

Birim çevresel uzunluk için tank taban bağlantı elemanlarının akma kuvveti denklemi a_{qy}

$$a^{qy} = \frac{A_a a^{\sigma y} - \pi r^2 p_i}{2\pi} \quad (3.32)$$

Burada:

$a^{\sigma y}$ = Tank taban-zemin bağlantı elemanını akma gerilmesi (N/mm²)

p_i = Tank iç basınç

A_a = Bağlantı elemanlarının kesit alanı

Hook kanundan tank taban- zemin bağlantı elemanı deformasyonu

$$a^{\delta y} = l_a \cdot a^{\sigma y} / E \quad (3.33)$$

Birim çevresel uzunluk için bağlantı bantlarının yay sabiti, a_{k1} ,

$$a^{k1} = \frac{a^{qy}}{a^{\delta y}} \frac{E \cdot e^{Aa}}{2\pi l_a} \quad (3.34)$$

Burada:

l_q = Tank taban-zemin bağlantı elemanının efektif boyu (mm)

$$e^{Aa} = A_a (1 - \pi^2 P_i / A_a \cdot a^{\sigma})$$

Tank tabanı sabitlenmiş tankın yatay doğrultudaki hareketin tanımlandığı bir serbestlik dereceli sistemin yay sabiti:

$$K_1 = 48,7 r^3 a^{k_1} / H_l^2 \quad (3.35)$$

bulunur.

Tank tabanı ve bağlantı elemanının yanı sıra tank duvarını da deforme eden modifiye edilmiş depolama tankı doğal periyodu (s)

$$T_e = \sqrt{T_f^2 + T_1^2} \quad (3.36)$$

Tank tabanının kalkmaksızın tank duvarının deformasyonuna bağlı doğal periyodu

$$T_f = \frac{2}{\lambda} \sqrt{m_o / \pi E t_{1/3}} \quad (3.37)$$

Burada:

$t_{1/3}$ = Tank içerisinde depolanan ürününün üçte bir yüksekliğindeki ($H_l/3$) tank duvarının kalınlığı

m_o = Tank toplam kütlesi (m_l =ürün kütlesi + tank tavan plakasının kütlesi (tank çatısı)(m_r)+ tank yan duvar plakalarının kütlesi (m_w))

$$\lambda = 0,067(H_l/D)^2 - 0,30(H_l/D) + 0,46$$

3.4.5 Silindirik Tanktaki Serbest Sıvı Yüzey (Konvektif Kütle) Çalkalanma İ İnci Doğal Periyodu

$$T_i = \frac{2\pi\sqrt{D}}{\sqrt{2g\varepsilon_i \tanh\left(2\varepsilon_i \frac{H_l}{D}\right)}} \quad (3.38)$$

Burada:

T_i = i inci çalkalanma doğal periyodu (s)

D = Silindirik tankın çapı (m), g = Yerçekimi ivmesi (m/s^2)

ε_i = i inci denklemin pozitif kökü, $J_1(\varepsilon_i) = 0$

J_1 = Birinci tür Bessel işlevi. $\varepsilon_1=1,841$, $\varepsilon_2=5,33$, $\varepsilon_3= 8,54$

3.5 Burkulmaya Karşı Silindirik Kabuğun Dizaynı

Dizayn kriteri;

$$\frac{\sigma_c}{c^{fcr}} + \frac{\sigma_b}{b^{fcr}} \leq 1 \quad (3.40)$$

$$\frac{\tau}{s^{fcr}} \leq 1 \quad (3.41)$$

Burada:

σ_c = Ortalama aksenal gerilme = W/A (N/mm^2)

σ_b = Devrilme momentinden (overturning moment) dolayı oluşan Maksimum aksenal gerilme = M/Z (N/mm^2)

τ = Yanal kesme kuvvetinden dolayı maximum kesme gerilmesi = $2Q/A$ (N/mm^2)

W = Aksenal bası kuvveti (N)

M = Devrilme Momenti (Nmm)

Q = Yanal kesme kuvveti (N)

A = Kesit alanı (mm^2)

Z = Kesit elastik modülü (mm^3)

c^{fcr} = İzin verilebilir eksenel bası gerilmesi (N/mm²)

b^{fcr} = İzin verilebilir eksenel eğilme gerilmesi (N/mm²)

s^{fcr} = İzin verilebilir kesme gerilmesi (N/mm²)

İzin verilebilir gerilme tanımı üç aşamada incelenir. Bunlar sismik yüklemeye özel uzun süreli yükleme, kısa süreli yükleme ve sismik yüklemeye karşı izin verilebilir gerilmedir.

3.5.1 Uzun Süreli Yükleme Karşı İzin Verilebilir Gerilme

Uzun süreli eksenel bası gerilmesi kuvveti, devrilme momenti ve yanal kesme kuvvetine karşı izin verilebilir gerilme, iki orana bağlı olarak hesaplanır. Bunlar:

$\frac{\sigma_h}{F}$: İç basınçtan kaynaklanan teğetsel gerilmenin (σ_h) akma dayanımına (F) oranı
ve

$\frac{r}{t}$: Silindirik kabın iç yarıçapının (r) silindirik kap duvar kalınlığına (t) oranı

Uzun Süreli Dikey Yükleme Karşı İzin Verilebilir Eksenel Bası Gerilme c^{fcr}

$$0 \leq \frac{\sigma_h}{F} \leq 0,3 \quad \text{ise} \quad c^{fcr} = \overline{c^{fcr}} + \frac{0,7 f_{cro} - \overline{c^{fcr}}}{0,3} \left(\frac{\sigma_h}{F} \right) \quad (3.42)$$

$$\frac{\sigma_h}{F} \geq 0,3 \quad \text{ise} \quad c^{fcr} = f_{cro} \left(1 - \frac{\sigma_h}{F} \right) \quad (3.43)$$

Burada:

σ_h = İç basınçtan kaynaklanan teğetsel gerilme (N/mm²)

F = Akma dayanımı (N/mm²)

$\overline{c^{fcr}}$ = İç basınç hariç uzun süreli yüklemeye karşı izin verilebilir eksenel bası gerilmesi

f_{cro} = Filin ayak tümseği tipi burkulma dayanımı hesaplanması için basit değer (N/mm²)

Silindirik kabın iç yarıçapının (r) silindirik kap duvar kalınlığı (t) oranına bağlı olarak f_{cro} değeri

$$\frac{r}{t} \leq 0,069 \frac{E}{F} \quad \text{ise} \quad f_{cro} = \frac{F}{1,5} \quad (3.44)$$

$$0,069 \frac{E}{F} \leq \frac{r}{t} \leq 0,807 \frac{E}{F} \quad \text{ise} \quad f_{cro} = 0,267F + 0,4F \left[\frac{0,807 - \frac{r}{t} \frac{F}{E}}{0,738} \right] \quad (3.45)$$

$$0,807 \frac{E}{F} \leq \frac{r}{t} \quad \text{ise} \quad f_{cro} = \frac{1}{2,25} \sigma_{cro,e} \quad (3.46)$$

Burada:

r = Silindirik kabın iç yarıçapı (mm)

t = Silindirik kap duvar kalınlığı (mm)

E= Elaste modülü (N/mm²)

F= Akma gerilmesi (N/mm²)

$\sigma_{cro,e}$ = Eksenel simetri elastik burkulma gerilmesi (N/mm²)

$\sigma_{cro,e}$ değerini veren eşitlik;

$$\sigma_{cro,e} = \frac{0,8}{\sqrt{3(1-\nu^2)}} E \frac{t}{r} \quad (3.47)$$

Silindirik kabın iç yarıçapının (r) silindirik kap duvar kalınlığı (t) oranına bağlı olarak $\overline{c^{fcr}}$ değeri

$$\frac{r}{t} \leq 0,377 \left(\frac{E}{F} \right)^{0,72} \quad \text{ise} \quad \overline{c^{fcr}} = \frac{F}{1,5} \quad (3.48)$$

$$0,377 \left(\frac{E}{F} \right)^{0,72} \leq \frac{r}{t} \leq 2,567 \left(\frac{E}{F} \right)^{0,72} \quad \text{ise} \quad \overline{c^{fcr}} = 0,267F + 0,4F \left[\frac{2,567 - \frac{r}{t} \left(\frac{F}{E} \right)^{0,72}}{2,190} \right] \quad (3.49)$$

$$2,567 \left(\frac{E}{F} \right)^{0,72} \leq \frac{r}{t} \quad \text{ise} \quad \overline{c^{fcr}} = \frac{1}{2,25} c^{\sigma_{cr,e}} \quad (3.50)$$

Burada:

$c^{\sigma_{cr,e}}$ = NASA tarafından sınırlandırılmış, eksenel simetri elastik burkulma gerilmesi

$$c^{\sigma_{cr,e}} = 0,6E \frac{t}{r} \left\{ 1 - 0,901 \left[1 - \exp \left[- \frac{1}{16} \left(\frac{r}{t} \right)^{1/2} \right] \right] \right\} \quad (3.51)$$

Uzun Süreli Devrilme Momentine Karşı İzin Verilebilir Eğilme Gerilmesi b^{fcr}

$$0 \leq \frac{\sigma_h}{F} \leq 0,3 \quad \text{ise} \quad b^{fcr} = \overline{b^{fcr}} + \frac{0,7 f_{cro} - \overline{b^{fcr}}}{0,3} \left(\frac{\sigma_h}{F} \right) \quad (3.52)$$

$$\frac{\sigma_h}{F} \geq 0,3 \quad \text{ise} \quad b^{fcr} = f_{cro} \left(1 - \frac{\sigma_h}{F} \right) \quad (3.53)$$

Burada:

$\overline{b^{fcr}}$ = İç basınç hariç uzun süreli devrilme momente karşı izin verilebilir eğilme gerilmesi

f_{cro} = Denklem (9.44), (9.45) ve (9.46)'da verilen değerlerdir.

Silindirik kabın iç yarıçapının (r) silindirik kap duvar kalınlığı (t) oranına bağlı olarak $\overline{b^{fcr}}$ değeri

$$\frac{r}{t} \leq 0,274 \left(\frac{E}{F} \right)^{0,78} \quad \text{ise} \quad \overline{b^{fcr}} = \frac{F}{1,5} \quad (3.54)$$

$$0,274\left(\frac{E}{F}\right)^{0,78} \leq \frac{r}{t} \leq 2,106\left(\frac{E}{F}\right)^{0,78} \quad \text{ise} \quad \overline{b^{fcr}} = 0,267F + 0,4F \left[\frac{2,106 - \frac{r}{t} \left(\frac{F}{E}\right)^{0,78}}{1,832} \right] \quad (3.55)$$

$$2,106\left(\frac{E}{F}\right)^{0,78} \leq \frac{r}{t} \quad \text{ise} \quad \overline{b^{fcr}} = \frac{1}{2,25} b^{\sigma_{cr,e}} \quad (3.56)$$

Burada:

$b^{\sigma_{cr,e}}$ = NASA tarafından sınırlandırılmış, elastik eğilme burkulma gerilmesi

$$b^{\sigma_{cr,e}} = 0,6E \frac{t}{r} \left\{ 1 - 0,731 \left[1 - \exp \left[-\frac{1}{16} \left(\frac{r}{t} \right)^{1/2} \right] \right] \right\} \quad (3.57)$$

Sismik yük hariç kısa vadeli yüklere karşı izin verilen gerilimler, bölüm 3.5.1'de gösterilen uzun vadeli yüke karşı izin verilen gerilmelerle 1,5 çarpılarak verilen değerler olmalıdır.

3.5.2 Sismik Yüklemeye Karşı İzin Verilebilir Gerilme

Sismik Yüklemeye Karşı İzin Verilebilir Eksenel Bası Gerilme c^{fcr}

$$0 \leq \frac{\sigma_h}{F} \leq 0,3 \quad \text{ise} \quad c^{fcr} = \overline{c^{fcr}} + \frac{0,7 f_{crs} - \overline{c^{fcr}}}{0,3} \left(\frac{\sigma_h}{F} \right) \quad (3.58)$$

$$\frac{\sigma_h}{F} \geq 0,3 \quad \text{ise} \quad c^{fcr} = f_{crs} \left(1 - \frac{\sigma_h}{F} \right) \quad (3.59)$$

Burada:

$\overline{c^{fcr}}$ = İç basınç hariç sismik yüklemeye karşı izin verilebilir eksenel bası gerilmesi (N/mm²)

f_{crs} = fil ayağı burkulması dayanımı hesaplanması için basit değer (N/mm²)

Silindirik kabın iç yarıçapının (r) silindirik kap duvar kalınlığı (t) oranına bağlı olarak f_{crs} değeri

$$\frac{r}{t} \leq 0,069 \frac{E}{F} \quad \text{ise} \quad f_{crs} = F \quad (3.60)$$

$$0,069 \frac{E}{F} \leq \frac{r}{t} \leq 0,807 \frac{E}{F} \quad \text{ise} \quad f_{crs} = 0,6F + 0,4F \left[\frac{0,807 - \frac{r}{t} \frac{E}{F}}{0,738} \right] \quad (3.61)$$

$$0,807 \frac{E}{F} \leq \frac{r}{t} \quad \text{ise} \quad f_{crs} = \sigma_{cro,e} \quad (3.62)$$

Silindirik kabın iç yarıçapının (r) silindirik kap duvar kalınlığı (t) oranına bağlı olarak $\overline{c^{fcr}}$ değeri

$$\frac{r}{t} \leq 0,377 \left(\frac{E}{F} \right)^{0,72} \quad \text{ise} \quad \overline{c^{fcr}} = F \quad (3.63)$$

$$0,377 \left(\frac{E}{F} \right)^{0,72} \leq \frac{r}{t} \leq 2,567 \left(\frac{E}{F} \right)^{0,72} \quad \text{ise} \quad \overline{c^{fcr}} = 0,6F + 0,4F \left[\frac{2,567 - \frac{r}{t} \left(\frac{E}{F} \right)^{0,72}}{2,190} \right] \quad (3.64)$$

$$2,567 \left(\frac{E}{F} \right)^{0,72} \leq \frac{r}{t} \quad \text{ise} \quad \overline{c^{fcr}} = c^{\sigma_{cr,e}} \quad (3.65)$$

Sismik devrilme momentine karşı izin verilebilir eğilme gerilmesi b^{fcr}

$$0 \leq \frac{\sigma_h}{F} \leq 0,3 \quad \text{ise} \quad b^{fcr} = \overline{b^{fcr}} + \frac{0,7 f_{crs} - \overline{b^{fcr}}}{0,3} \left(\frac{\sigma_h}{F} \right) \quad (3.66)$$

$$\frac{\sigma_h}{F} \geq 0,3 \quad \text{ise} \quad b^{fcr} = f_{crs} \left(1 - \frac{\sigma_h}{F} \right) \quad (3.67)$$

Burada:

$\overline{b^{fcr}}$ = İç basınç hariç sismik devrilme momente karşı izin verilebilir eğilme gerilmesi

f_{crs} = Denklem (3.60), (3.61) ve (3.62) verilen değerdir.

Silindirik kabın iç yarıçapının (r) silindirik kap duvar kalınlığı (t) oranına bağlı olarak $\overline{b^{fcr}}$ değeri

$$\frac{r}{t} \leq 0,274 \left(\frac{E}{F} \right)^{0,78} \quad \text{ise} \quad \overline{b^{fcr}} = F \quad (3.68)$$

$$0,274 \left(\frac{E}{F} \right)^{0,78} \leq \frac{r}{t} \leq 2,106 \left(\frac{E}{F} \right)^{0,78} \quad \text{ise} \quad \overline{b^{fcr}} = 0,6F + 0,4F \left[\frac{2,106 - \frac{r}{t} \left(\frac{F}{E} \right)^{0,78}}{1,832} \right] \quad (3.69)$$

$$2,106 \left(\frac{E}{F} \right)^{0,78} \leq \frac{r}{t} \quad \text{ise} \quad \overline{b^{fcr}} = b^{\alpha_{cr,e}} \quad (3.70)$$

3.6 Deprem Kapasitesinin Değerlendirilmesi

3.6.1 Tüm Tankın Sismik Kapasitesinin Kontrol Edilmesi

İmpulsif kütle titreşiminin kesilme kuvveti denklemi (3.71) karşılamalıdır.

$$e^{Q_y} \geq Q_{dw} \quad (3.71)$$

Konvektif kütleli titreşimin tasarım kesme kuvveti denklemi (3.72) karşılamalıdır.

$$s^{Q_y} \geq Q_{ds} \quad (3.72)$$

Burada;

e^{Q_y} = Depo tankının impulsif kütle titreşimindeki akma kesme kuvveti (kN)

s^{Q_y} = Konvektif kütle titreşiminde depolama tankının akma kesme kuvveti (kN)

Q_{dw} = İmpulsif kütle titreşiminin kesilme kuvveti tasarımı (kN)

Q_{ds} = Konvektif kütle titreşiminin kesilme kuvveti tasarımı (kN)

3.6.2 Depo için Deprem Kapasitesinin Kontrol Edilmesi

Deponun sismik kapasitesinin kontrol edilmesi, çalışma gerilmelerinin ve izin verilen değerler ile depolama tankındaki ilgili parçalarda gerinme karşılaştırılmasıyla yapılmalıdır. Çalışma gerilmeleri ve gerinmeler sismik yük ile normal çalışma yükü birleştirilerek elde edilmelidir.

3.6.2.1 Kesme Kuvveti Tasarımı

İmpulsif kütle titreşimi Q_{dw} 'nin tasarım kesme kuvveti denklem;

$$Q_{dw} = D_s Z_s I S_{al} m_t \quad (3.73)$$

Tank tabanındaki tank duvarının kursunun teğetsel gerilmesi;

$$Q^{ohd} = \frac{Q_{dw}}{2,5 H_1 t_o} + \frac{m_l g}{\pi t_o} \quad (3.74)$$

Burada;

t_o = Tank tabanındaki tank duvarının kalınlığı

Konvektif kütle titreşimi Q_{ds} 'nin tasarım kesme kuvveti;

$$Q_{ds} = Z_s I S_{al} m_c \quad (3.75)$$

Konvektif kütle titreşiminde depolama tankının akma kesme kuvveti;

$$s^{Q_y} = 0,44 f^{Q_y} \quad (3.76)$$

3.6.2.2 Dizayn Akma Kesme Kuvveti:

Depolama tankının akma kesme kuvveti ;

$$Q_y = 2\pi r^2 q_y / 0,44 H_l \quad (3.77)$$

Filin ayak tümseği tipi burkulma hesaplatıldığında formül aşağıdaki gibi değiştirilir.

$$e^{Q_y} = \pi r^2 e^{\sigma_{cr}} t_o / 0,44 H_l \quad (3.78)$$

Burada:

$e^{\sigma_{cr}}$ = Filin ayak tümseği tipi burkulma için kritik gerilme

Tank - taban bağlantı elemanın akma hesaplatıldığında formül aşağıdaki gibi değiştirilir.

$$a^{Q_y} = \pi r^2 a^{q_y} t_o / 0,44 H_l \quad (3.79)$$

3.7 Taban Momenti

İmpulsif modda, duvarın altındaki eğilme momenti;

$$M_i = (C_i)(m_i h_i + m_w h_w + m_r h_r)g \quad (3.80)$$

Konvektif modda eğilme momenti;

$$M_c = (C_c)m_c h_c g \quad (3.81)$$

Burada;

h_w = Duvar kütlesi ağırlık merkezi yüksekliği

h_r = Çatı kütlesinin ağırlık merkezinin yüksekliği

Taban döşeme/plakanın altındaki tank kararlılığını kontrol etmek için kullanılacak impulsif modda devrilme momenti,

$$M_i^* = (C_i) \left[m_i (h_i^* + t_b) + m_w (h_w + t_b) + m_r (h_r + t_b) + m_b t_b / 2 \right] g \quad (3.82)$$

Konvektif modda devrilme momenti;

$$M_c^* = C_c m_c (h_c^* + t_b) g \quad (3.83)$$

Burada;

m_b = Tabanın plakası kütlesi

t_b = Tabanın plakası kalınlığı

Toplam moment, impulsif ve konvektif moddaki momenti Kare Toplamı Karesi (SRSS) ile birleştirerek elde edilecek ve aşağıdaki şekilde verilecektir.

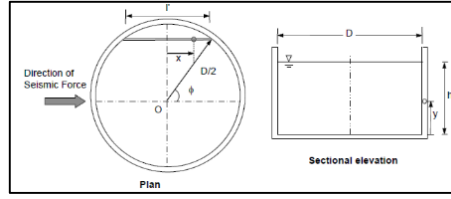
$$M = \sqrt{M_i^2 + M_c^2} \quad (3.84)$$

$$M^* = \sqrt{M_i^{*2} + M_c^{*2}} \quad (3.85)$$

3.8 Hidrodinamik Basınç

3.8.1 İmpulsif Hidrodinamik Basınç

Sıvı tarafından tank duvarı ve tabanına uygulanan impulsif hidrodinamik basıncın matematiksel modeli, şekil 3.9’da gösterildiği gibidir.



Şekil 3.9 Dairesel tankın geometrisi (Jain ve Jaiswal, 2007)

Duvar üzerindeki yanal hidrodinamik impulsif basınç, P_{iw} , aşağıdaki denklem ile ede edilir.

$$P_{iw} = Q_{iw(y)}(C_i) \rho g h \cos \phi \quad (3.86)$$

$$Q_{iw(y)} = 0,866 \left[1 - \left(\frac{y}{h} \right)^2 \right] \tanh \left(0,866 \frac{D}{h} \right) \quad (3.87)$$

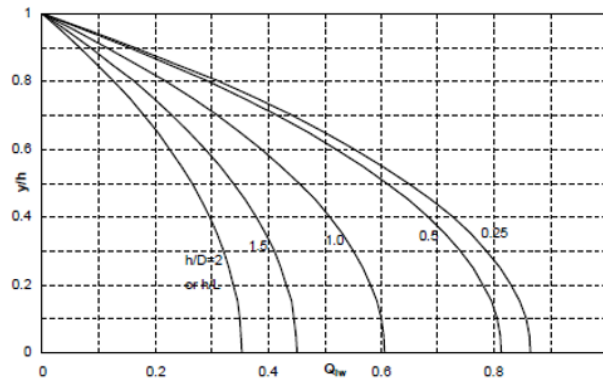
Burada;

P = Sıvının kütle yoğunluğu,

ϕ = Çevresel açı,

y = Tank duvarındaki bir noktanın, tank duvarı tabanından dikey mesafesi,

Duvar üzerindeki impulsif hidrodinamik basınç katsayısı, $Q_{iw}(y)$ şekil 3.10'dan da elde edilebilir.



Şekil 3.10 Duvardaki impulsif basınç katsayısı, Q_{iw} (Jain ve Jaiswal, 2007)

Dikey doğrultudaki impulsif kuvveti, taban plakasında ($y = 0$) uzunluk şeritte l'

$$P_{ib} = 0,866C_i \rho g h \frac{\sinh\left(1,732\frac{x}{h}\right)}{\cosh\left(0,866\frac{I'}{h}\right)} \quad (3.88)$$

Burada;

x = Deponun tabanındaki bir noktanın deprem merkezinden itibaren sismik kuvvet yönündeki yatay mesafesi.

3.8.2 Konvektif Hidrodinamik Basınç

Titreşimli sıvı tarafından tank duvarı ve tabanına uygulanan konvektif basınç aşağıdaki şekilde hesaplanacaktır:

$$P_{cw} = Q_{cw(y)} C_C \rho g D \left[1 - \frac{1}{3} \cos^2 \phi \right] \cos \phi \quad (3.89)$$

$$Q_{cw(y)} = 0,5625 \frac{\cosh\left(3,674\frac{y}{D}\right)}{\cosh\left(3,674\frac{h}{D}\right)} \quad (3.90)$$

Taban döşemesinde ($y = 0$) dikey yöndeki konvektif basınç

$$P_{cb} = Q_{cb(x)} C_C \rho g D \quad (3.91)$$

$$Q_{cb(x)} = 1,125 \left[\frac{x}{D} - \frac{4}{3} \left(\frac{x}{D} \right)^3 \right] \operatorname{sech} \left(3,674 \frac{h}{D} \right) \quad (3.92)$$

Ek 2’de 250 m³ atmosferik bir tankın deprem kapasitesi hesabı yer almaktadır.

BÖLÜM DÖRT

YER ÜSTÜ, DİKEY, SİLİNDİRİK DEPOLAMA TANKLARININ RÜZGÂR TASARIMLARI

Rüzgâr yükü: Farklı hızlarda gerçekleşen türbülanslı bir akıştır. Yönü yatay (yer yüzeyine paralel) olarak kabul edilir. Rüzgâr hızı yer yüzeyi sürtünmesinden etkilenir ve yüksekliklere çıktıkça artar.

Tank rüzgâr tasarımı; iç basınca bağlı olarak hesaplanan kabuk kalınlıklarının, rüzgâr yükünün oluşturduğu dış basınca dayanımının kontrolünü ve her yükseklikteki kuvvet ve momentleri belirlemek için kullanılır. Ayrıca rüzgâr yükünün veya sismik yükün neden olduğu dış basıncın oluşturduğu tabandaki devrilme momenti tüm ankraj ve destek detaylarını belirlemek için kullanılır. Taban momentleri, tank ankraj cıvatalarının sayısını ve boyutunu, eteğin kalınlığını, bacakların boyutunu ve taban plakalarının kalınlığının tasarım parametrelerinden birisini oluşturur. Rüzgâr yükü sabit yükleme olduğu için depremde farklıdır. Sismik yük kısa süreli ve değişken yapıdadır. Bir tank kabuğunun dış basınca karşı dayanımı için en kötü rüzgâr yükü veya sismik yük durumu için tasarlanmalıdır, her ikisi için aynı anda tasarlanmasına gerek yoktur (Moss, 2004).

Genellikle sismik tasarım için en kötü durum, tank dolu (maksimum ağırlık) iken, rüzgâr için en kötü tasarım durumu tank boş halidir. Rüzgâr kuvvetleri, her yüksekliğin alanı içindeki her elemanın yansıtılan alanını, o yükseklik bölgesi için temel rüzgâr basıncı ile çarpılarak ve o eleman için şekil faktörü ile elde edilir. Tankın toplam kuvveti, tüm elemanlar üzerindeki kuvvetlerin toplamıdır. Kuvvetler, öngörülen alanın merkezine uygulanır.

4.1 Rüzgâr Etkilerinin Modellenmesi

Rüzgârın yapı üzerindeki etkisi yapının boyutuna, şekline ve dinamik özelliklerine bağlıdır. Bu dokümandaki hesaplamalar, rüzgâr yönündeki türbülansın, rüzgâr

yönündeki sabit işaretli temel eğilme modu titreşimleriyle örtüşmesinin neden olduğu dinamik tepkileri kapsar.

Yapı tepkisi, doğal yapısı korunmuş rüzgâr alanındaki referans yükseklikte meydana gelen tepe hız kaynaklı rüzgâr basıncı q_z , kuvvet ve basınç katsayıları c_f ve yapısal katsayı kullanılarak hesaplanmalıdır. q_z değeri, rüzgârın özelliklerine, arazinin engebeliğine, topoğrafi özelliklere (k_z) ve referans yüksekliğe bağlıdır. q_z değeri, kısa süreli basınç değişimlerinin ile ortalama hız kaynaklı rüzgâr basıncının toplamına eşittir. Buradaki rüzgâr tasarım prosedürü ASCE (American Society of Civil Engineers) standardına göre yapılmıştır.

4.2 Rüzgâr Kuvveti Tasarımı

Tankın geometrik parametreleri ile belirlenen tankın rüzgâr etki faktörünün değerini belirlemek için tankın rijid veya esnek olup olmadığını belirlenmeli

1. $\frac{h}{D} < 4$, $T < 1s$ ya da $f > 1H_z$ ise tank rijit olduğu düşünülür.

2. $\frac{h}{D} > 4$, $T > 1s$ ya da $f < 1H_z$ ise tank esnek olduğu düşünülür.

Rüzgâr kuvveti tasarımı, tankı esnek ya da rijitliği belirlendikten sonra tanka etki eden rüzgâr kuvveti şu şekilde hesaplanır:

Depolama tankı rijid ise;

$$F = q_z G C_f A_f \quad (4.1)$$

Depolama tankı esnek ise;

$$F = q_z G_f C_f A_f \quad (4.2)$$

Burada;

G = Rüzgâr etki faktörü, Kategori A ve B = 0,8 Kategori C ve D = 0,85

G_f = Esnek tanklar için rüzgâr etki faktörü

C_f = Kuvvet katsayısı, şekil faktörü 0,7 ila 0,9

A_f = Yansıtılan alan, m^2

q_z = Z yüksekliğinde hız basıncı, N/m^2

f = Temel doğal frekans, $1/T$, saniyedeki döngüler, Hz

Silindirik depolama tankı için temel doğal frekans, $(1/T)$ şu şekilde hesaplanır;

$$T = 0.00000765 \left(\frac{H}{D} \right)^2 \sqrt{\frac{wD}{t}} \quad (4.3)$$

Burada;

T = Periyod (sn)

w = Ağırlık, (her ft'deki ağırlık)

H = Yükseklik, ft

D = Kabuk çapı, ft

t = Kabuk kalınlığı, ft

4.2.1 Z Yüksekliğinde Hız Basıncı

Yükseklik z 'de değerlendirilen hız basıncı q_z , aşağıdaki denklemle hesaplanır:

$$q_z = 0,613 K_z K_{zt} V^2 I \quad (4.4)$$

Burada;

V = Temel rüzgâr hızı, m/s

I = Önem faktörü, bakınız Tablo 4.1

K_z = Tablo 4.4'ten gelen hız basınca maruz kalma boyutsuz katsayısı,

K_{zt} = Topografik faktör,

API 650'ye göre temel rüzgâr hızı (V) 190 km/saat (120 mil / saat) olacaktır. Önem faktörünün (I) belirlenmesi için öncelikle tablo 4.2'den yapı kategorisi belirlemelidir. Tablo 4.2'ye göre "yapı kategorisi", çoğu tankın Kategorisi III olacağı düşünülmektedir. Yapı kategorisi belirlendikten sonra tablo 4.1'den önem faktörü (I) belirlenir.

Tablo 4.1 Önem faktörü (Moss, 2004)

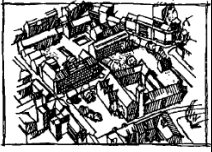
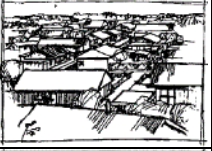
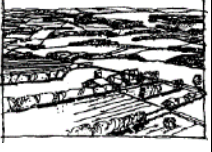
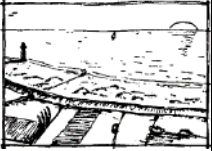
Yapı Kategorisi	Önem Faktörü (I)
I	0,87
II	1,00
III	1,15
IV	1,15

Tablo 4.2 Yapı kategorisi (Moss, 2004)

Yapı Kategorisi	
Arıza durumunda insan hayatı için düşük tehlike oluşturan bina ve yapılar	Kategori I
Diğer 3 kategoride olmayan tüm binalar	Kategori II
Binalar ve serbest bırakıldığında halka zarar verebilecek kadar miktarda toksik veya patlayıcı madde içeren diğer yapılar.	Kategori III
Asıl doluluk oranının 300'den fazla insanın bir alanda toplandığı bina veya yapılar	Kategori III
Okullar, acil olmayan sağlık kurumları, hapishaneler, zorunlu olmayan elektrik santralleri	Kategori III
Temel tesisler	Kategori IV

Hız basınca maruz kalma katsayısı (Kz), zemin pürüzlülüğüne maruz kalma kategorilerine bağlı olarak tanımlanır. Tablo 4.3'te arazi kategorileri verilmiştir. Tankın zeminden yüksekliğine ve arazi kategorisinin bir fonksiyonu olarak tanımlanan Kz katsayısı tablo 4.4 gösterilmiştir. Topografik faktör (Kzt) için tank yakınında veya izole edilmiş tepelerde bulunmadıkça 1,0 kullanılabilir. Belirli gereksinimler için ASCE'ye bakılmalıdır (Moss, 2004).

Tablo 4.3 Arazi kategorisi (Moss, 2004)

Arazi A	Büyük şehirlerin merkezleri	
Arazi B	Kentsel ve banliyö alanları, kasaba, şehir dışı, ormanlık alanlar veya diğer arazilerde, tek ailenin veya daha büyük ebadı olan yakın mesafeli engeller.	
Arazi C	Genellikle 9,1 m'dan daha aşağıda yüksekliklere sahip dağınık engeller bulunan arazi.	
Arazi D	Açık su üzerinden üflenene rüzgâra doğrudan maruz kalmış düz, engelsiz kıyı alanları; 455 m kıyı şeridinden veya yapı yüksekliğinden 10 kat uzaktaki yapılar için geçerlidir.	

Tablo 4.4 Hız basınca maruz kalma katsayısı K_z (Moss, 2004)

<u>Yerden Yüksekliği, z</u>		<u>Arazi Kategorisi</u>			
<u>ft</u>	<u>m</u>	<u>A</u>	<u>B</u>	<u>C</u>	<u>D</u>
0-15	(0-4.6)	0.32	0.57	0.85	1.03
20	(6.1)	0.36	0.62	0.90	1.08
25	(7.6)	0.39	0.66	0.94	1.12
30	(9.1)	0.42	0.70	0.98	1.16
40	(12.2)	0.47	0.76	1.04	1.22
50	(15.2)	0.52	0.81	1.09	1.27
60	(18.0)	0.55	0.85	1.13	1.31
70	(21.3)	0.59	0.89	1.17	1.34
80	(24.4)	0.62	0.93	1.21	1.38
90	(27.4)	0.65	0.96	1.24	1.40
100	(30.5)	0.68	0.99	1.26	1.43
120	(36.6)	0.73	1.04	1.31	1.48
140	(42.7)	0.78	1.09	1.36	1.52
160	(48.8)	0.82	1.13	1.39	1.55
180	(54.9)	0.86	1.17	1.43	1.58
200	(61.0)	0.90	1.20	1.46	1.61
250	(76.2)	0.98	1.28	1.53	1.68
300	(91.4)	1.05	1.35	1.59	1.73
350	(106.7)	1.12	1.41	1.64	1.78
400	(121.9)	1.18	1.47	1.69	1.82
450	(137.2)	1.24	1.52	1.73	1.86
500	(152.4)	1.29	1.56	1.77	1.89

4.2.2 Esnek Veya Dinamik Duvarlı Yapılar İçin Rüzgâr Etki Faktörü

Tank yüksekliğinin tank çapının oranına ya da doğal frekansına bağlı olarak ($\frac{h}{D} > 4$, $T > 1s$ ya da $f < 1H_z$) tanımlanan esnek veya dinamik hassas yapılar için, rüzgâr etki faktörü şu şekilde hesaplanır;

$$G_f = 0,925 \left(\frac{1 + 1,7 I_{\bar{z}} \sqrt{g_Q^2 Q^2 + g_R^2 R^2}}{1 + 1,7 g_v I_{\bar{z}}} \right) \quad (4.5)$$

g_Q ve g_v 3,4 olarak alınacak ve g_R aşağıdaki formülle verilecektir:

$$g_R = \sqrt{2 \ln(3600f)} + \frac{0,577}{\sqrt{2 \ln(3600f)}} \quad (4.6)$$

Burada;

Q = Arka plan yanıtı

R = Rezonans tepki faktörü

$I_{\bar{z}}$ = Z yükseklikte türbülans yoğunluğu

f= Temel doğal frekans, 1/T, saniyedeki döngüler, Hz

4.2.2.1 Z Yükseklikte Türbülans Yoğunluğu;

Arazi kategorisine bağlı olarak elde edilen katsayı ile eşdeğer yüksekliğin fonksiyonu olarak tanımlanır.

$$I_{\bar{z}} = c \left(\frac{33}{z} \right)^{1/6} \quad (4.7)$$

Burada;

Z= Eşdeğer yükseklik

$$Z = 0,6h \quad (4.8)$$

$Z = (0,6 h)$ olarak tanımlanan yapının eşdeğer yüksekliği, ancak tablo 4.5'ten elde edilen Z_{min} 'den az olmamalı. Her iki değerden hangisi büyük ise o kullanılmalıdır.

h = Tank yüksekliği, (m)

c = Katsayı tablo 4.5

Aşağıda arazi kategorisine bağlı olarak a , b , c , l , e katsayılar, faktörler, oranlar ve minimum tasarım yüksekliğinin (Z_{min}) yer aldığı tablo 4.5 bulunmaktadır.

Tablo 4.5 Katsayılar, faktörler (Moss, 2004)

Arazi Kategorisi	a	b	c	l(ft)	e	Z_{min} (ft)
A	1/3	0,3	0,45	180	1/2	60
B	1/4	0,45	0,30	320	1/3	30
C	1/6.5	0,65	0,20	500	1/5	15
D	1/9	0,80	0,15	650	1/8	7
Z_{min} = minimum yükseklik sağlamak için kullanılan eşdeğer yükseklik $\bar{Z}$ için $0.6 * h$ veya Z_{min} 'den büyük olan değer						

4.2.2.2 Arka plan yanıtı

$$Q^2 = \frac{1}{1 + 0,63 \left(\frac{D_e + h}{L_{\bar{Z}}} \right)^{0,63}} \quad (4.9)$$

Burada;

D_e = Tank etkili çapı, tablo 4.6

Tablo 4.6 Efektif çap, D_e^* (Moss, 2004)

D (Tank Çapı + 2 x İzolasyon Kalınlığı)	Borulama İle Yada Merdivensiz D_e	Boru, Merdiven Ve Platformla D_e
$\leq 4 \text{ ft} - 0 \text{ in}$	$D_e = 1,6 D$	$D_e = 2,0 D$
$4 \text{ ft} - 0 \text{ in.} - 8 \text{ ft} - 0 \text{ in.}$	$D_e = 1,4 D$	$D_e = 1,6 D$
$> 8 \text{ ft} - 0 \text{ in.}$	$D_e = 1,2 D$	$D_e = 1,4 D$

$L_{\bar{z}}$ = Türbülansa eşdeğer yükseklikte integral uzunluk ölçęęi

$$L_{\bar{z}} = l \left(\frac{z}{33} \right)^\epsilon \quad (4.10)$$

4.2.2.3 Rezonans tepki faktörü (R)

$$R^2 = \frac{R_a R_h R_b (0,53 + 0,47 R_d)}{\beta} \quad (4.11)$$

Burada;

β = Yapı, sönüm katsayısı, kritik sönümlemenin % 1'i

Kaya veya kazık temel: 0,005

Sıkıştırılmış toprak: 0,01

Tank yapısı veya yumuşak topraklarda damar: 0,015

R_a, R_h, R_b, R_d = Hesaplama faktörleri

4.2.2.3.1 Hesaplama faktörleri (R_a, R_h, R_b, R_d)

$$R_a = \frac{7,465 N_i}{(1 + 10,302 N_i)^{5/3}} \quad R_h = \frac{1}{N_h} - \frac{1}{2 N_h^2} (1 - e^{-2 N_h}) \quad (4.12)$$

$$R_b = \frac{1}{N_b} - \frac{1}{2 N_b^2} (1 - e^{-2 N_b}) \quad R_d = \frac{1}{N_d} - \frac{1}{2 N_d^2} (1 - e^{-2 N_d}) \quad (4.13)$$

Burada;

N_i, N_{hr}, N_b, N_d = Hesaplama faktörleri

4.2.2.3.2 Hesaplama faktörleri (N_i, N_{hr}, N_b, N_d)

$$N_i = \frac{f L_{\bar{z}}}{V_z}, \quad N_h = \frac{4,6 f h}{V_z}, \quad N_b = \frac{4,6 f D_e}{V_z}, \quad N_d = \frac{15,4 f D_e}{V_z} \quad (4.14)$$

Burada;

V_z = Yükseklikteki ortalama saatlik rüzgâr hızı

$$V_z = b \left(\frac{z}{33} \right)^a (V_{ref})$$

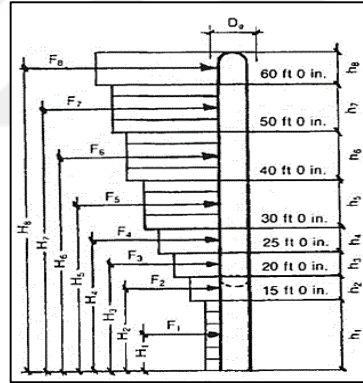
V_{ref} = Çevrilen temel rüzgâr hızı

$$V_{ref} = 1,467V$$

V = Temel rüzgâr hızı,

4.3 Tabanda Devrilme Momenti

Tabanda devrilme momenti için her yükseklikteki kuvveti ve momentleri taban seviyesine indirilmelidir. Her yükseklikteki kesme kuvvetleri F_x , yüksekliğe (h_x) bağlı projeksiyon alanının merkezine olan uzaklığına (H_x) çarpımı ile hesaplanmalıdır.



Şekil 4.1 Dikey tank etki eden rüzgâr yükü (Moss, 2004)

Dikey tank için yüksekliğe bağlı etki eden rüzgâr yükünün etki alanı ve etki yüksekliği Şekil 4.1’de görülmektedir. Projeksiyon alanı, her yüksekliğin alanı içindeki her elemanın alanını kapsamaktadır. Her yükseklik için projeksiyon alanı, tablo 4.6’dan elde edilen efektif çap ile o yükseklikle çarpımı ile elde edilir. aşağıda projeksiyon alanının hesabı yer almaktadır.

$$A_f = h_x D_e \quad (4.15)$$

Burada;

A_f = projeksiyon alanı, m²

Kuvvetler, öngörülen alanın merkezine uygulanır. Yüksekliğe bağlı rüzgâr kuvvetleri; her yükseklikteki elemanın projeksiyon alanı, rüzgâr basıncı ve şekil faktörünün çarpımı ile elde edilir. Denklem 4.16’de yüksekliğe bağlı rüzgâr kuvveti hesabı yer almaktadır.

$$F_x = A_f C_f G_f q_z \quad (4.16)$$

Tankın toplam kuvveti, tüm elemanlar üzerindeki kuvvetlerin toplamıdır. Tabanda devrilme momenti ise tüm elemanların üzerindeki kuvvetlerin tabana uzaklığı elde edilen moment değerlerinin toplamına eşittir. Denklem 4.17’de toplam moment hesabı yer almaktadır.

$$M_O = \sum H_x F_x \quad (4.17)$$

Depolama tankı devrilme momentine bağlı olarak taban plakası ankraj cıvataları kontrol edilmelidir. Ayrıca tank kabuğu, dizayn edilen rüzgâr hızından dolayı oluşan burkulmaya karşı kararlılığı (stabilitesi) kontrol edilmelidir. Eğer kararlılık için gerekli ise kabuk kalınlığı artırılmalı yada kabuk güçlendirici halka ile desteklenmelidir. Ek 3’te 250 m³ atmosferik bir tankın rüzgâr tasarım hesabı yer almaktadır.

kabın atmosferik kap olması nedeniyle eksenel yönde gerilmeye ise sebep olmamaktadır. Tank ağırlığından oluşan yük ise cidarda bası gerilmesine neden olmaktadır. Silindirik kaptaki maksimum oluşan gerilmenin, sıvı basıncının en yüksek değere tankın en alt noktada oluşacaktır. Bu nedenlerden dolayı depolama tankları kademeli olarak inşa edilir. Tankın en alt kabuğu daha kalın inşa edilirken üst bölümü cidar kalınlığı daha az olabilmektedir.

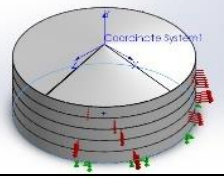
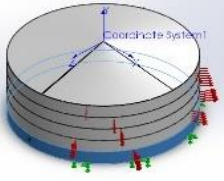
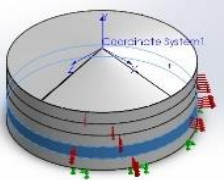
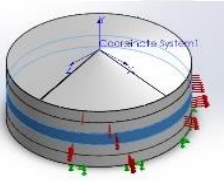
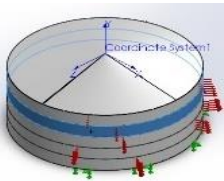
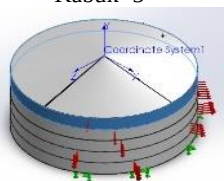
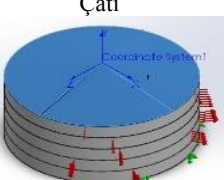
Tablo 5.1 Hidrostatik basınca maruz tankın analiz özellikleri

Study name	CL1
Analysis type	Static
Mesh type	Shell Mesh Using Surfaces
Thermal Effect:	On
Thermal option	Include temperature loads
Zero strain temperature	298 Kelvin
Include fluid pressure effects from SolidWorks Flow Simulation	Off
Solver type	FFEPlus
Inplane Effect:	Off
Soft Spring:	Off
Inertial Relief:	Off
Incompatible bonding options	Automatic
Large displacement	Off
Compute free body forces	On
Friction	Off
Use Adaptive Method:	Off
Result folder	SolidWorks document (G:\çalışma\yeniden)

Modellenen depolama tankı her kalınlık için 2,416 m yüksekliğinde tasarlanmış olup ince cidarlı bir yapıdır. Bu yapının Solidworks programında tanımlanması için analiz unsur ağacında kabuk (Shell) olarak her kalınlık tanımlanmıştır. Tablo 5.2’de kabuk olarak konumları, kalınlıkları, ağırlıkları ve mekanik, fiziksel özellikleri yer almaktadır. İçten hidrostatik basınca maruz tankın gerilme analizi için statik analiz yapılacaktır. Analiz özellikleri tablo 5.1’de yer almaktadır. Depolama tankının malzeme girdisi için yeni malzeme tanımlanmıştır. Yeni malzeme olarak çelik malzemenin özellikleri aşağıdaki gibi seçilmiştir;

- Elastisite Modülü: $E=206 \text{ GPa}$ Akma Gerilmesi $=350 \text{ MPa}$
- Poisson Oranı (ν) $=0,3$ Öz kütle (ρ) $= 7850 \text{ kg/m}^3$

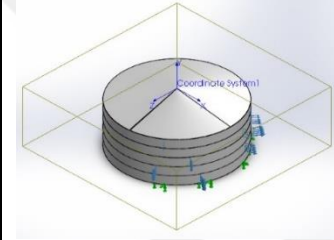
Tablo 5.2 Kabukların tanktaki konumları, kalınlıkları, ağırlıkları ve mekanik, fiziksel özellikleri

	Kabuk Tipi	Kalınlık mm	Ağırlık N	Hacim m ³	Özkütle kg/m ³	Elastisite Modülü GPa
Taban 	İnce cidarlı	12,7	712885	9,2666	7850	206
Kabuk -1 	İnce cidarlı	12,7	226869	2,9490	7850	206
Kabuk -2 	İnce cidarlı	9,5	169076	2,1977	7850	206
Kabuk -3 	İnce cidarlı	7,9	140600	1,8276	7850	206
Kabuk -4 	İnce cidarlı	7,9	140600	1,8276	7850	206
Kabuk -5 	İnce cidarlı	7,9	140600	1,8276	7850	206
Çatı 	İnce cidarlı	12,7	720993	9,3720	7850	206

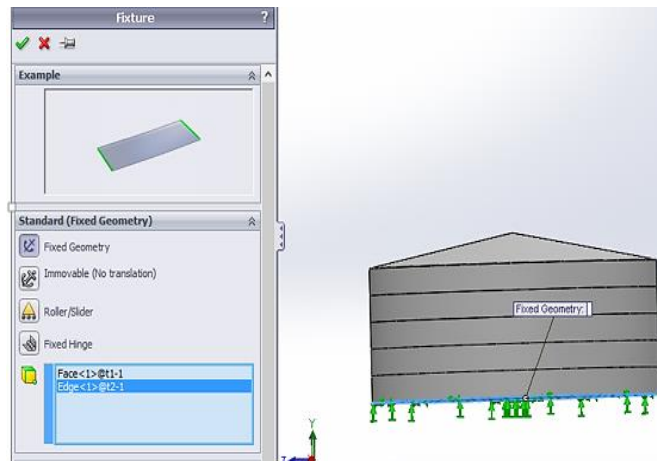
5.1.1 Sınır Şartlarının Ve Etki Eden Yüklerin Belirlenmesi

Farklı kalınlıklardaki kabuk yapılar ayrı olarak oluşturulup, montajla tankın bütünü oluşturulmuştur. Ayrı olarak oluşturulan tank kabukları solid-works simulation temas girdisi olarak “birleşmiş” (bonded) tipi girildi. Tablo 5.3’te temas özellikleri görülmektedir. Bu temas tipi kabukların birleşik gibi davranması sağlar. Kabuklar bu temas tipi ile kaynaklı davranarak tankın bütünü oluşturur. Tank birçok kabuk parçadan oluştuğu için global temas seçilerek her kabuk arası “birleşmiş temas” özelliği atanmıştır.

Tablo 5.3 Temas özellikleri

	Temas tipi: Birleşmiş
	Bileşenler: Kabuklar
	Bileşen teması: Global temas
	Opsiyon: Meshle uyumlu

Temas tipi ve malzeme tanımlandıktan sonra tank üzerindeki serbestlik sınırlamaları (Restrains) tanımlanır. Sınır şartları tipleri, tüm serbestlik dereceleri (ux, uy, uz, rotx, roty ve rotz) sınırlandıracak şekilde (fixed) olacak şekilde tank taban yüzeyine uygulanır. Şekil 5.2’de sınır şartları seçimi görülmektedir.



Şekil 5.2 Sınır şartlarının belirlenmesi

Depolanan ürünün tank kabuğuna olan etkisinin yani analizi yapılacak modelin, çalışma şartlarındaki koşulları oluşturmak için model üzerine etki eden yüklemeler tanımlanmalıdır. Bu çalışmada ele alınan depolama tankına yüzeyden hidrostatik basınç yüklemesi uygulanacaktır. Uygulanan non-uniform (düzgün olmayan dağılımlı) basınç yüklemesidir. Düzgün olmayan basınç dağılımları belirli bir eksen takımına ait koordinatların fonksiyonu cinsinden ifade edilebilir. Aşağıda eşit olmayan basınç dağılımının tanımlanma biçimi gösterilmiştir.

Hidrostatik basınç: $\rho g h$

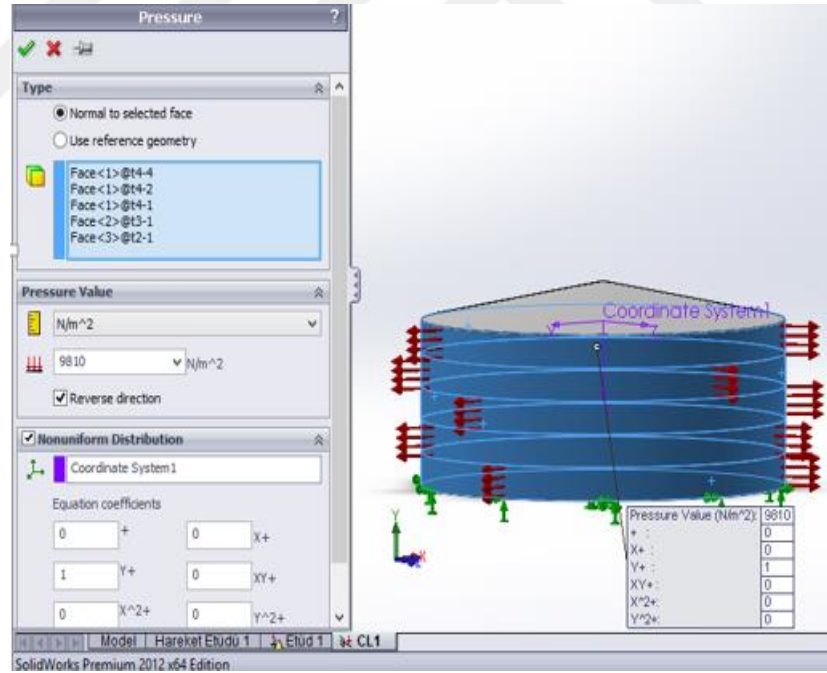
Su yoğunluğu (ρ) : 1000 kg/m^3

Yerçekimi ivmesi (g) : $9,81 \text{ m/s}^2$

Yükseklik (h) : metre

Buradan hidrostatik basıncı yüksekliğin fonksiyonu olarak yazarsak

$$\begin{aligned} \text{Hidrostatik basınç} &= 1000 \text{ kg/m}^3 * 9,81 \text{ m/s}^2 * h(\text{m}) \\ &= 9810 \text{ N/m}^3 * h(\text{m}) \end{aligned}$$



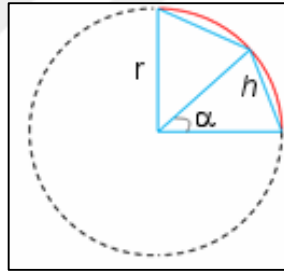
Şekil 5.3 Hidrostatik basınç ayarlaması

Yükseklığe bağlı fonksiyon tanımı yapılmış olur. Burada dikkat edilmesi gereken unsur birimlerin doğru girilmesidir. Basınç olarak 9810 N/m^2 ve yükseklik metre cinsinden olmalıdır. Programın yüksekliği metre cinsinden alması için analiz

başlangıcında program sistemini MKS birim sisteminde ayarlanmalı. Uniform basınç yüklemede, basınç uygulanan yüzey bir düzlem yüzey ise uygulanmış olan toplam kuvvet Basınç x Alan kadardır. Yükleme ana menüden ya da unsur ağaçlarından external load komutundan yapılabilir. Şekil 5.3'te hidrostatik basınç yüklemesi görülmektedir.

5.1.2 Mesh Ve Çözüm

Geometrik modelin oluşturulup, sınır şartları ve analizi yapılmak istenen olguların yani yüklerin girilmesiyle model, düğümlerle birbirine bağlı küçük parçalara (elemanlar) ayrılır. Bu küçük parçalar modelin tamamını oluşturan birbirine bağlı elemanlar ağı (mesh) oluşturur. Bu elemanlar ağının her elemanından elde edilen bilgiler bir araya getirilerek modelin tamamının davranışı tahmin edilir. Bu çalışmada modele eğrilik tabanlı mesh uygulanmıştır. Bu meshin özelliği, eğri alanlara daha fazla elemanı otomatik olarak sağlamasıdır (Solidworks, 2016).



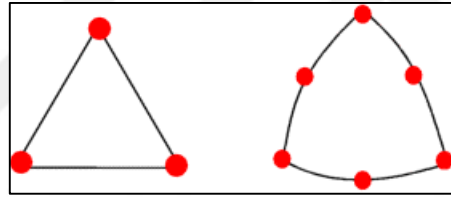
Şekil 5.4 Eleman boyutu (Solidworks, 2016)

Bu mesh için, eleman boyutunu daire modeli ile anlatırsak, bir daireye sığan minimum eleman sayısına göre matematiksel olarak belirleyebiliriz. Şekilde 5.4'te görülen çemberin tamamı modelin kendisini temsil ederken, çeyrek yay ise modelin 1/4'nü temsil etmektedir. Modelin tamamının minimum eleman sayısı 8 olarak ayarlanırsa, çeyrek kısımda kırmızı yayda eleman sayısı 2 olur. Çeyrek yaydaki elemanın h uzunluğu, $h \sim r\alpha$ olarak hesaplanır. Uzunluk h değeri solidworks mesh kısmında belirlenen minimum eleman boyutu (h_{min}) ile maksimum eleman boyutu (h_{maks}) arasında ($h_{min} < h < h_{maks}$) bir değer alır. Tablo 5.4'te çalışma kapsamında seçilen minimum ve maksimum eleman boyutu görülmektedir (Solidworks, 2016).

Tablo 5.4 Mesh parametreleri

Mesh type	Shell Mesh Using Surfaces
Mesher Used:	Curvature based mesh
Jacobian check for shell	On
Maximum element size	0,219609 m
Minimum element size	0,0836597 m
Mesh Quality	High

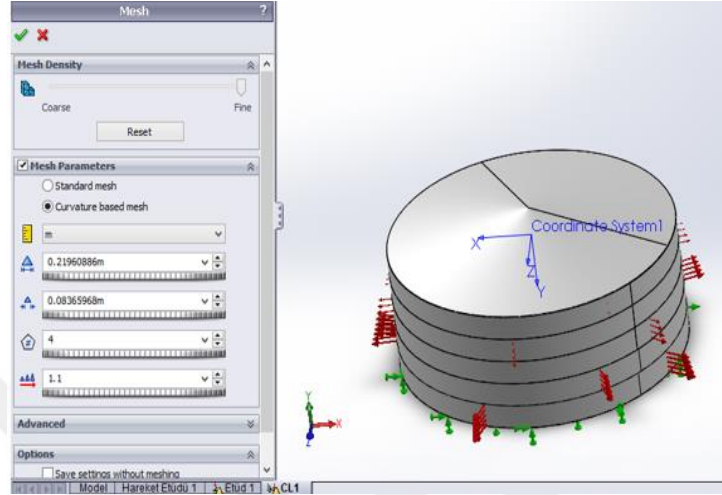
Çalışmada mesh tipi olarak kabuk mesh uygulanmıştır. Kabuk mesh eleman olarak doğrusal üçgensel kabuk elemanı veya parabolik üçgensel elemanı kullanılmaktadır. Doğrusal kabuk elemanında, üç düz kenarla birbirine bağlı üç köşe düğümü tarafından tanımlanır. Parabolik üçgensel eleman ise üç orta taraf ve üç köşe düğümü ve üç parabolik kenar tarafından tanımlanır. Kabuk elemanları, membran ve bükme yüklerine dayanıklı 2B elemanlardır (Solidworks, 2016). Şekil 5.5'te doğrusal ve parabolik elemanlar görülmektedir.



Şekil 5.5 Eleman tipi (Solidworks, 2016)

Bu çalışmada yüksek kaliteli mesh ile parabolik üçgensel kabuk eleman seçilmiştir. Parabolik elemanlar doğrusal elemanlara göre eğri yapıları daha iyi haritalayabilir. Ancak parabolik elemanların orta taraftaki düğümleri model üzerine yerleştirilir. Keskin ve eğri kısımlarda, orta düğümlerin model geometrisine yerleştirilmesinden dolayı elemanların kenarları birbirine girmesine veya bozuk olmasına neden olur. Bozuk elemanların jacobian noktası negatif olur. Doğrusal denklemin çözümü için negatif Jacobian noktalı eleman hata verir ve program sonlanır. İterasyon devamı için yazılımda Jacobian denetimi açılmalıdır. Yazılım, tüm elemanların Jacobian denetiminden geçmesi sağlamak için bozuk elemanların orta taraf düğümlerinin konumlarını otomatik olarak ayarlar. Yüksek dereceden kabuklar için Jacobian denetimi, düğümlerde bulunan 6 noktayı kullanır (Solidworks, 2016).

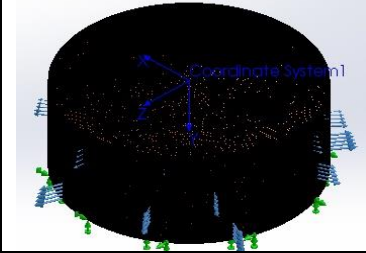
Mesh işlemi mesh unsur ağcından maksimum ve minimum eleman boyu, daire içindeki minimum eleman sayısı, eleman boyutu büyüme oranı gibi parametreler girilerek mesh oluşturulur (Şekil 5.6).



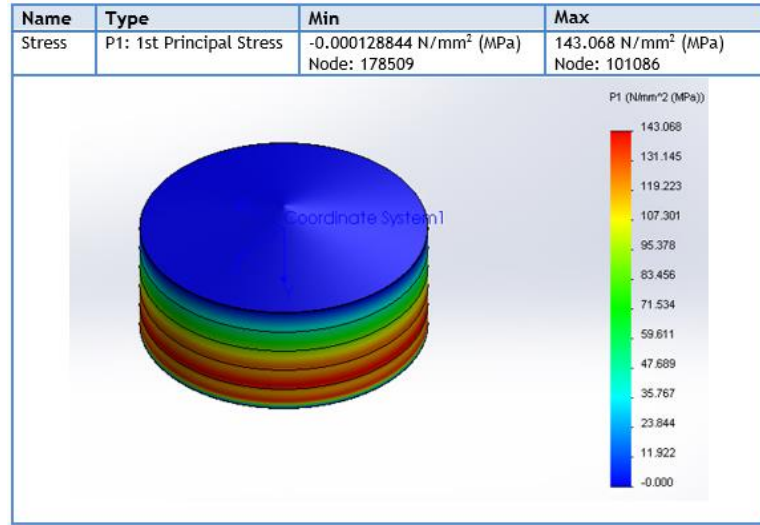
Şekil 5.6 Mesh oluşturma

Tablo 5.5'te görüldüğü üzere çalışma kapsamında meshleme sonucu 258018 düğüm noktası ve 128198 eleman oluşturulmuştur.

Tablo 5.5 Düğüm ve eleman sayısı

	Toplam Düğüm Sayısı: 258018
	Toplam Eleman Sayısı: 128198

Modelin malzeme tanımları, temas özellikleri, sınır şartları, etki eden yükleri girildikten sonra oluşturulan küçük elemanlar ağı (mesh) ile birlikte çözüm yapılır. Her elemandaki çözümler bir araya getirilerek bütünün davranışı gözlemlenir. Çalışma kapsamında hidrostatik etkinin depolama tankının cidarında meydana getirdiği etkiler bulunmuştur. Analiz öncesi 1. ana gerilimin (en büyük gerilim) tankın kademeli inşa edilmesine rağmen en alt kısmında basıncın en yüksek olduğu noktada olacağı öngörülmüştür. Analiz sonucunda 1. ana gerilim (P1), sünek malzeme hasar kriteri Von Misses gerilim değeri ve yer değiştirme bulunmuştur.



Şekil 5.7 Maksimum gerilme

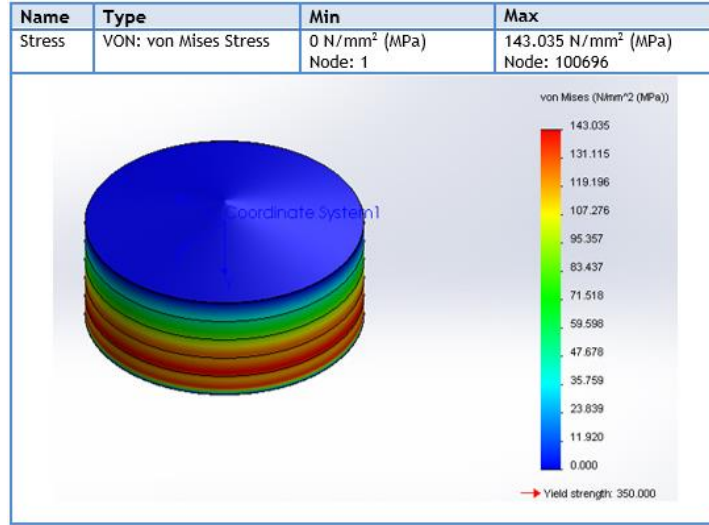
Birincil maksimum gerilme öngörüldüğü gibi kademeli inşa edilen tankta, hidrostatik basıncın maksimum olduğu tabanın da meydana gelmiştir. Atmosferik tank olmasından dolayı sınır şartı olarak sadece tabanı sabitlendiğinden membran gerilme olarak sadece tank cidarında teğetsel gerilme meydana gelecektir. Analitik olarak hesaplandığında bölüm 1 de yer alan denklem 1.11 den teğetsel gerilme; $\sigma_2 = \frac{PD}{2t}$

Analizde yük parametresini girerken hidrostatik basıncı yüksekliğin fonksiyonu olarak yazmıştık; $P = 9810 \text{ N/m}^3 * h \text{ (m)}$

Tankın en alt noktasının yüksekliği 12,080 metredir. Buradan basınç değeri, tank çapı ve kabuk kalınlığı formülde yerine yazılırsa;

$$\sigma_2 = \frac{PD}{2t} = \frac{9810 \times 12,080 \times 30,48}{2 \times 0,0127} = 142205760 \text{ N/m}^2 = 142,205760 \text{ N/mm}^2$$

Sayısal yöntem sonucu elde edilen maksimum birincil gerilme ile analitik yolla elde edilen maksimum gerilme birbirine yakın çıkmıştır. Şekil 5.8’de sünek malzemeler için hasar kriteri olan Von Mises gerilmesi analiz sonucu görülmektedir.



Şekil 5.8 Von Mises gerilmesi

Analiz sonucu Von Mises gerilmesi birincil gerilme ile aynı çıktı. Bu gerilmelerin aynı çıkmasının nedeni kabuk yapıların teorisine göre ince cidarlı kaplarda iç basınçtan dolayı membran gerilmeler, radyal gerilmeler oluşmaktadır. Radyal gerilme membran gerilmelere göre çok küçük olduğundan ihmal edilir. Membran gerilmeler teğetsel gerilme ve eksenel gerilmelerden oluşmaktadır. Analiz parametreleri oluşturulurken sınır şartları tankın atmosfere açık olduğundan dolayı tankın tabanına uygulanmıştır. Sınır şartlarından dolayı eksenel gerilmeler oluşmamaktadır. Bu noktada Von Mises formülü incelendiğinde altı gerilim bileşeninden oluşur.

$$VON = \left\{ 0,5 \left[(SX - SY)^2 + (SX - SZ)^2 + (SY - SZ)^2 \right] + 3(TXY^2 + TXZ^2 + TYZ^2) \right\}^{1/2} \quad (5.1)$$

Burada;

SX: X normal gerilimi

SY: Y normal gerilimi

SZ: Z normal gerilimi

TXY: YZ düzleminde Y yönünde yırtılma

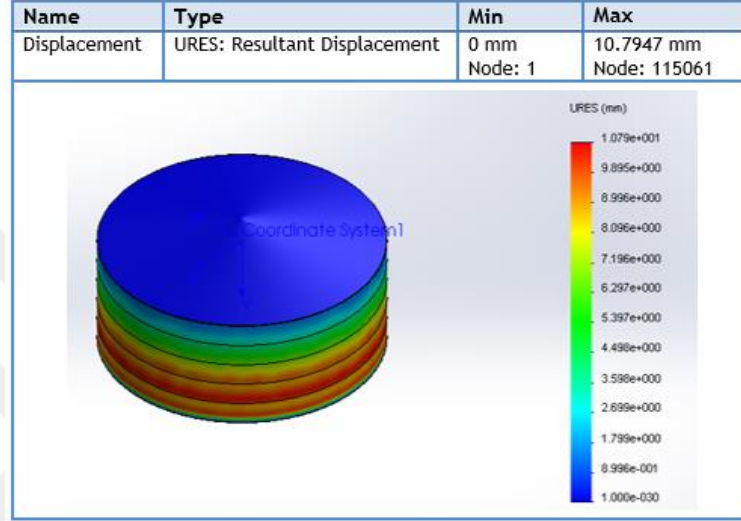
TXZ: YZ düzleminde Z yönünde yırtılma

TYZ: XZ düzleminde Z yönünde yırtılma

Eksenel gerilme (y yönündeki), radyal gerilme (z yönündeki) oluşmadığından ve ince cidarlı kaptan dolayı kayma gerilmeleri ihmal edildiğinde Von Mises gerilmesi;

$$VON = \{0,5[(SX - 0)^2 + (SX - 0)^2 + (0 - 0)^2] + 3(0^2 + 0^2 + 0^2)\}^{1/2} = SX$$

Teğetsel gerilme(x yönündeki) birincil gerilmeye ve Von Mises gerilmesine eşit olmaktadır. Şekil 5.9'da gerilme sonucu oluşan maksimum yer değiştirme görülmektedir.



Şekil 5.9 Maksimum yer değiştirme

5.2 Silindirik Kabukların Dış Basıncı Altında Burkulması

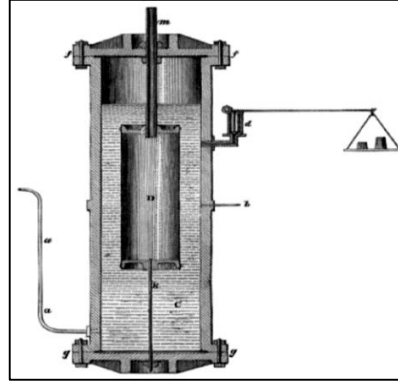
Sanayi devriminin en önemli gelişmelerinden birisi buharlı makinenin bulunuşudur. Bu makinenin gelişim biçimi, makine çağının aynı zaman da kabukların stabilite çalışmalarının gerçek başlangıç noktasını oluşturur.

Buhar makinesi, buharın içinde var olan ısı enerjisini, mekanik enerjiye dönüştüren dıştan yanmalı bir motordur. İlk buhar makinesinin çalışma prensibi şöyledir; ısı enerjisini alan su, buharlaşması sonucu genişleyerek bir odacığa aktarılır. Odacık soğutulunca, sıvı hale gelen buhar bir vakum oluşturarak mekanizmaların hareket alması ile işe yani mekanik enerjiye dönüşür. Bu ilk buhar makinesi yakıt ve enerji kaybı bakımından verimsizdi. Yapılan çalışmalar ile buhar dolu silindire soğuk su basmak yerine, silindir başka bir küçük silindire bağlandı. Buhar pistonu ittikten sonra, valf yardımıyla buharı ikinci silindire alıp sıvılaştırıyordu. Piston geri çekildiği anda

taze buhar silindire girip pistonu tekrar itiyordu. Böylece ana silindir her zaman sıcak kalıyor, küçük silindir ise soğuk oluyordu (Akbulut, 2011). Buhar makinelerinde oluşan vakum ve buhar basıncı buhar kazan ve sistemlerinde zorlamalara neden olmaktaydı.

Sanayi devrimi ile ekonominin güçlenmesi, buhar gücü uygulamasının genişlemesi ve buharın genişleyici ilkesini kullanma eğiliminin artması sonucu olarak, çalışma basıncının 10 lbs. inç. kare'den 50 lbs. inç. kare ve hatta bazı durumlarda 150 lbs. inç. kare kadar artışa neden olmuştur. Ancak tasarım prensipleri konusundaki bilgilerimiz, ekonomi yapma isteğimize ve buhar makinelerinin değişime ayak uyduramadı. Basınç artımıyla orantılı olarak kazan patlamalarından kaynaklanan tehlikeli ölümcül kazalar arttı. Patlamaların artmasının sebebi; buharın gücünün, kazan ve buhar akışındaki boruların elastik yapısına etkisi hakkındaki bilgilerimizin eksikliğinden kaynaklanmıştı. Bu gibi güçlü bir kuvvete karşı en iyi hesaplanmış yapı formlarını bulmak; kazanların üretici güçlerini arttırmak, malzeme ekonomisi ile yer kazanmak ve bir yandan güvenliği sağlamak amacıyla kazan ve borularının çaplarının, uzunluklarının ve kalınlıklarının yeterince bilinmediği ortaya çıkmıştı (Fairbairn, 1858).

Ampirik veriler üzerine inşa edilmiş, buhar gücünün uygulandığı kazan ve buhar akışkanındaki boruların oranlarının daha doğru bir şekilde uygulanabilecek pratik uygulamalara ihtiyaç duyulmaktaydı. Dış kuvvete maruz kalan silindirik kapların gücünü yöneten yasaları ve güçlü yapı formları belirlemek için Kraliyet Cemiyeti ve İngiliz Bilim İlerleme Derneği'nin ortak isteği üzerine 1858'de Fairbairn yaklaşık yirmi beş tüpün çöküşü ile ilgili deneyleri yaptı. Tüplerin çökmesi çalışmasında yer alan problem, tüpün boyutları ve malzemenin elastik özellikleri bilindiğinde, belirli bir tüpün çökme basıncının hesaplanabileceği bir denklem bulmaktır. Bunun en büyük sebebi buhar kazanlarının tasarımında bu tür bir bilgiye ihtiyaç duyulmasıydı. Fairbairn tüplerin çökme deneyleri için deney düzeneği oluşturmuştur (Fairbairn, 1858). Fairbairn'ın oluşturduğu deney düzeneği şekil 5.10'de görülmektedir.



Şekil 5.10 Deney düzeneği (Fairbairn, 1858)

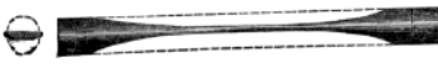
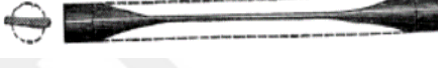
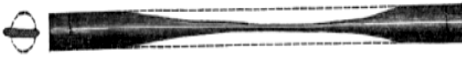
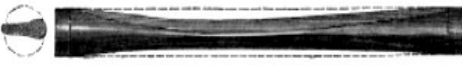
Deney düzeneğinde; üst ve alt kapaklar f ve g, silindir ile aynı dayanıma sahip 3 inç arayla yerleştirilmiş, 1 inç cıvatalarla sabitlenmiştir. Alt kapakta (g), üzerinde deney yapılacak D tüpünü destekleyen çubuğu ve vida somununu (k) almak için bir delik açılmıştır. Üst kısımda, tüp D'nin dökme demir ucuna yerleştirilmiş 2 1/2 inçlik bir boru (m) yerleştirilmiş. Bu borunun ucunda, borunun etrafındaki açıklığı kapatacak ve su sızdırmaz hale getirecek şekilde silindirin kapağında lastik bir rondela ve üzerine vidalanan büyük bir somun vardı. Bu borunun amacı, boru D'nin içindeki havanın çökme sırasında kaçmasına izin vermek ve böylece bir kazanın baca ile aynı koşullar altında mümkün olduğu kadar yerleştirilmesini sağlamaktır. Deneylerin tümü, hidrolik pompa vasıtasıyla suyun boru (a-a) içinden silindir C'ye zorlanarak gerçekleştirildi (Fairbairn, 1858).

5.2.1 Literatür Taraması

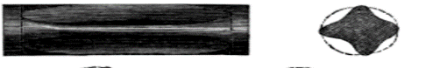
1858'de Fairbairn borunun boyutları ve malzemenin elastik özellikleri bilindiğinde, verilen tüpün çökme basıncının hesaplanabileceği bir denklem bulmuştur. 1858'de Fairbairn, yaklaşık yirmi beş tüpün çöküşü ile ilgili deneyleri anlatan bir makale yayınladı. Tüpler istenen forma bükülmüş tek bir ince demir plakadan oluşmuş, perçinlenmiş ve içeriye sızmayı önlemek için lehimlenmiştir. Uçlar demir diskler veya tapalar ile kapatılmış ve tüp, hidrolik basınca maruz kaldığı büyük bir demir silindir içine yerleştirilmiştir. Test edilen tüpün iç kısmı, üst uçtaki atmosfere bağlanmıştır. Basınç, bir hidrolik pompa ile üretilmiş ve normal buhar göstergeleri ile ölçülmüştür. Çöken tüplerin çapları 4, 6, 8, 9, 10 ve 12 inçti; uzunlukları 19 ila 60 inç arasında

değişmekteydi ve et kalınlığı her tüp için 0,043 inç idi (Carman, 1917). Fairbairn, yaptığı deneylerde kullanılan tüplerin çapları, çökme basınçları, çökme durumları tablo 5.6’da gösterilmektedir (Fairbairn, 1858).

Tablo 5.6 Tüplerin çapları, çökme basınçları, çökme durumları (Fairbairn, 1858)

No	Diameter inches	Length inches	Thickness of plates inches	Pressure of collapse lbs. Per sq. İn.	
1	4	19	0,043	170	
2	4	19	0,043	137	
3	4	40	0,043	65	
4	4	38	0,043	65	
5	4	60	0,043	43	
6	4	60	0,043	140	
7	6	30	0,043	48	
8	6	29	0,043	47	
9	6	59	0,043	32	
10	6	30	0,043	52	
11	6	30	0,043	65	
12	6	30	0,043	85	
13	8	30	0,043	39	

Tablo 5.6 devamı

14	8	39	0,043	32	
15	8	40	0,043	31	
16	10	50	0,043	19	
17	10	30	0,043	33	
18	12,2	58 1/2	0,043	11	  
19	12	60	0,043	12,5	
20	12	30	0,043	22	

Fairbairn, deneyler sayesinde, uzunluklarının 1,5 feet'ten küçük ve 10 feet'ten büyük olmaması şartıyla, belirtilen sınırlar dahilinde dış basınca maruz kalmış dövme demir boruların mukavemetini hesaplamak için genel formülü özetledi:

$$P = 9675600 \frac{t^{2,19}}{ld} \quad (5.2)$$

Bu formülde;

P = Çökme basıncı (inç kare başına pound (psi))

t = Duvar kalınlığı (inç)

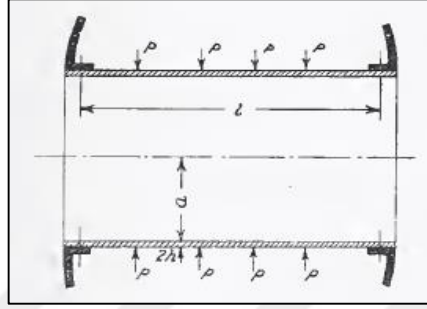
l = Tüp uzunluğu (inç)

d =Tüp çapı (inç)

1859'da Bresse, Euler burkulma teorisine oldukça benzeyen, hidrostatik olarak yüklenmiş, sonsuz uzun silindirik bir kabuğun çökme basıncı için ilk teorik ifadeyi geliştirdi. Kabukların çöküşte oluşturduğu çevresel dalgaların sayısını da ihmal etti (Aktaran Mises, 1914).

$$P = \frac{2E}{(1 - \nu^2)} (h/a)^3 \quad (5.3)$$

Şekil 5.11’de dış basınç altında silindirik tüpte görüldüğü gibi formüldeki geometrik yapı ve ifadeler şunlardır: a iç yarıçapı gösterdiği, borunun kabuk kalınlığının 2h olduğu, E elastisite modülü ve ν Poisson oranı ile verilir.



Şekil 5.11 Dış basınç altındaki silindirik tüp (Mises, 1914)

1888’da G.H. Bryant, şekil değiştirme enerjisi kriterini kullanarak aşağıdaki formülü geliştirdi (Bryant, 1888).

$$P = 2E \frac{m^2}{m^2 - 1} (t/d)^3 \quad (5.4)$$

Burada;

t= Duvarın kalınlığı, d= Ortalama çap, $1 / m$ = Poisson oranıdır.

1905’te A.P. Carman, Fairbairn’den sonra tüplerin çökmesiyle ilgili ilk deneyleri yayınlandı. Bu deneyler küçük dikışsız pirinç tüplerle yapıldı. Carman bu yayında çökme basıncının sabit olduğu her tüp için minimum bir uzunluk olduğunu gösterdi. Bu kritik minimum uzunluktan daha az uzunluklar için, çökme basıncının hızla arttığını açıkladı. Çökme basıncı, kritik uzunluktan daha kısa uzunluklar için uzunlukla ters orantı olarak değiştiğini belirtir. Fairbairn’in tüplerinin hepsinin kritik uzunluktan daha az olduğunu söyler. Küçük pirinç borulardaki bu deneyler, Fairbairn tipi formüllerin yetersiz olduğunu ve bunun yeterli uzunluktaki tüpler için Bryan

tarafından önerilen tipte bir formülün daha doğru olduğunu göstermiştir (Carman, 1917).

1906'da tüplerin çöküşü üzerine iki bildiri yayınladı. Bunlardan biri Profesör R. W. Stewart tarafından, diğeri ise Carman ve Carr tarafından bindirme kaynaklı çelik ve pirinç borular üzerinde çok sayıda deneyin sonucunu üzerine yapılmıştır. Bu deneylerin tümü "kritik uzunluktan" daha uzun tüpler üzerinde yapıldı ve çelik tüp için aşağıdaki formülü verdi (Carman, 1917).

$$P = 5020000(t/d)^3 \quad (5.5)$$

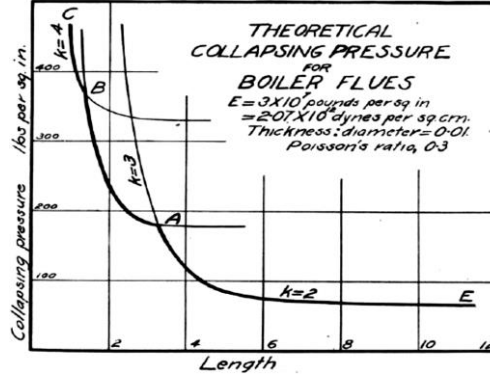
Carman ve Carr tarafından elde edilen sonuçları şöyle yorumladı: Hidrolik basınç altında çökmeden etkilenen kısmı uzun borunun genellikle çapın on iki katından fazla değildir; daha büyük uzunluklar için, çökme basıncı uzunluktan bağımsızdır. Çökme basıncının uzunlukla ters orantılı olarak değiştiği kural yalnızca çok kısa borular için geçerlidir. Kısa boru olarak *kritik uzunluktan* daha kısa boru kastedilmektedir. Kritik uzunluk çoğu durumda çapın dört ila altı katıdır (Carman, 1917).

Araştırmacıların bu noktadan sonra ilgileri kritik uzunluğun yakınında ve altındaki kısa ince boruların çöküş yasasıyla ve su aniden kazara tahliye edildiğinde iç basınç sıfıra düştüğü zaman, çelik kanalların atmosferik basınçla çöküşüyle alakalıydı. Ocak 1913'te R.V. Southwell'in şekil değiştirme enerjisi metoduyla çok önemli matematiksel araştırmalarıyla teorik çalışması önem arz etmektedir. "Elastik Stabilité Genel Teorisi Üzerine" başlıklı makalesinde sonlu uzunlukta radyal olarak yüklenmiş silindirik kabuğun çökme basıncı için aşağıdaki formülü geliştirdi (Southwell, 1913).

$$P = \frac{1}{3}(k^2 - 1) \frac{2E}{1 - \nu^2} (t/d)^3 + \frac{2E(t/d)}{(k^2 - 1)k^4 \left(\frac{2l}{\pi D}\right)^4} \quad (5.6)$$

Burada; P= çökme basıncı, E= elastite modülü, (1 / m)= Poisson oranıdır, l, d ve t, uzunluk, çap ve et kalınlığıdır ve k= tüpün içine çöktüğü lob sayısını temsil eder. R.V.

Southwell çökme sırasında kabuklarda oluşan çevresel dalgaların sayısını tanıttı. Bu formül, k için 2, 3 ve 4 değerlerine karşılık gelen eğri ailesini temsil eder.



Şekil 5.12 K değerine bağlı olarak teorik çökme basıncı (Southwell, 1913)

Southwell'in formülü, Bryan'ın önceki formülünden farklıdır ve kritik uzunluktan daha kısa uzunluklar için çökme basınçları için bir ifade verir. “Kritik uzunluk” için bir ifade ortaya çıkarır (Southwell, 1913).

$$L = k \sqrt{\frac{d^3}{t}} \quad (5.7)$$

Burada;

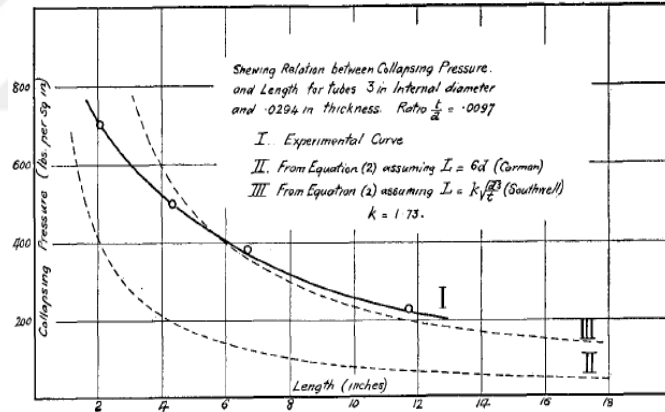
k= Son sınır şartlarına tipine bağlı olarak bir miktar sabittir.

Kritik uzunluk terimini A.P. Carman “Bir tüpün çökmeye karşı direncinin uzunluktan bağımsız olduğu asgari uzunluk” olarak tanımlar. Carman, Fairbairn'in ilk deneylerinden ve kendi yaptığı diğer deneylerden daha fazla sonuç çıkardı ve kritik uzunluktan daha kısa olan uzunluklar için çökme basıncının, uzunlukla ters orantılı olarak değiştiğini belirtir. Kritik uzunluk için bir formülü ilk ortaya koyan Southwell'dir. Carman ve Stewart'ın deneyleri kritik uzunluk olarak çapın altı katı ($L_c = 6D$) uzunluğunu belirtir. Ancak bu değer, kalınlıktan bağımsız olduğundan yetersizdir (Cook, 1914).

Kritik uzunlukla ilgili diğer çalışma 1914'te Gilbert Cook tarafından kısa tüplerin gücünü belirlemek ve araştırmanın bir parçası olarak "kritik uzunluğu" belirlemek için otuz dokuz çelik borudan numuneler ile yapılmış deneylerdir. Deneylerde üç inç iç çaptan, 0,0097 ve 0,0206 arasında değişen t / d değerlerinden ve 2,08 inç ila 12,71 inç arasındaki uzunluklardan oluşan çelik boruların çöküşlerinin sonuçlarını verir. Cook tarafından yapılan deneysel testler, Southwell'in formülünün ifade şeklini doğruladı ve çelik boruları için $k = 1,73$ verdi (Cook, 1914).

$$L = 1,73 \sqrt{\frac{d^3}{t}} \quad (5.8)$$

Gilbert Cook tarafından deneysel olarak elde verilerle oluşturulan eğri ile Carman ve Southwell'in denklemleriyle elde edilen kritik uzunluklarıyla ilgili çökme basıncı eğrilerini karşılaştırdı (Şekil 5.13).



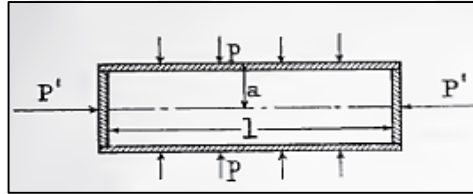
Şekil 5.13 Kritik uzunlukla ilgili denklemler ve deney verilerin karşılaştırılması (Cook, 1914)

Cook'un deneyleri ışığında, kritik uzunluk için Carman ve Stewart'ın kritik uzunluk için önerdiği denklemin yetersiz olduğunu ve yalnızca çapın değil, borunun kalınlığının da girmesi gereken bir faktör olduğunu gösterir (Cook, 1914). Cook'un çalışması konusundaki tartışmalarında Southwell "kritik uzunluk" için şunları belirtir; "Hem teori hem de deneysel çalışmalar, bir tüpün uzunluğunun (özellikle kısa tüpler söz konusu olduğunda) tüpün dış basınca karşı direncini duyarlı bir şekilde etkilediğini göstermektedir. Bu görüşler kabul edilirse, belirli bir tüp ebadı için kritik uzunluk, tahminlerle yapılan deneylerle belirlenebilir" (Southwell, 1915, s. 5).

Kritik uzunluktan daha uzun olan herhangi bir tüpün çökme basıncı, uzunluktaki artıştan bağımsız olduğundan sonsuz uzunlukta bir t p olarak kabul edilebilir. 1914 yılında Von Mises, radyal olarak yüklenmiş basit bir şekilde desteklenen sonlu uzunlukta silindirik kabuğın çökme basıncı için klasik çözümünü geliştirdi (Mises, 1914).

$$P = \frac{n^2}{3} \left[1 + \frac{2}{n^2 \left(\frac{2l}{\pi d} \right)^2 - 1} \right] \frac{2E}{1-\nu^2} (t/d)^3 + \frac{2E(t/d)}{n^2 \left[n^2 \left(\frac{2l}{\pi d} \right)^2 + 1 \right]^2} \quad (5.9)$$

Burada ifade edilen d, t, l sırasıyla çap, duvar kalınlığı ve t p uzunluğunu belirtir. E ve n ifadeleri ise elastikiyet modülü ve lob sayısını v ise poisson oranını ifade eder.  oğ  durumda, formül yeterince doğru olarak kabul edilir. Uzunluğın yarıçapa eşit veya daha büyük olan modeller için iyi sonuçlar verir. Daha kısa modeller için, formül oldukça fazla yüksek değerler verir (Windenburg ve Trilling, 1934).



şekil 5.14 Radyal ve eksenel basınç uygulaması (Mises, 1929)

Von Mises çalışmalarına devam ederek 14 yıl sonra 1929 yılında makalesinde uçlarından perdeler vasıtasıyla kapalı olan dairesel bir silindir suya batırıldığında, yaklaşık olarak denizaltılarda olduğu gibi her taraftan basın a maruz kaldığında, farklı bir problem ortaya çıktığını belirtmiştir (şekil 5.14) (Mises, 1929).

Von Mises'in ilk çalışmaları, sonlu uzunlukta yalnızca radyal basınç etkisi altındaki silindirik kabukların burkulmasıyla ilgiliydi. 1929 yılında Von Mises çalışmasına eksenel yükü de ekleyerek hidrostatik basıncı tam anlamıyla modelleyerek genişletti (Mises, 1929). Aşağıda Von Mises'in eksenel ve radyal olarak yüke maruz kabuk için burkulma basınç formülü yer almaktadır.

$$P = \left\{ \frac{1}{3} \left[n^2 + \left(\frac{\pi d}{2l} \right)^2 \right]^2 \frac{2E}{1-\nu^2} (t/d)^3 + \frac{2E(t/d)}{\left[n^2 \left(\frac{2l}{\pi d} \right)^2 + 1 \right]^2} \right\} \frac{1}{n^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{\pi d}{2l} \right)^2} \quad (5.10)$$

Von Mises'in formülüne göre burkulma basıncı silindirin çevresi boyunca oluşacak burkulma dalgası sayısına (n) bağlıdır. Eksenel yükün eklenmesinden kaynaklanan teoride meydana gelen değişiklikler çok geniş değildir ancak değişen sayısal oranlar, özellikle çok sayıda dalga veya çıkıntı ile ilgili olarak silindirin çevresi üzerinde görünür hale gelir (Mises, 1929).

Tokugawa 1929 halka sertleştiricilerin, silindirik kabukların çökme basıncı çözümüne etkilerini ilk ekleyen kişiydi. Tokugawa tarafından geliştirilen formül Von Mises'in formülü ile pratik olarak aynıdır ve iki formül tarafından verilen çökme basınçlarındaki en büyük fark sadece yüzde 1,5'tir (Windenburg ve Trilling, 1934).

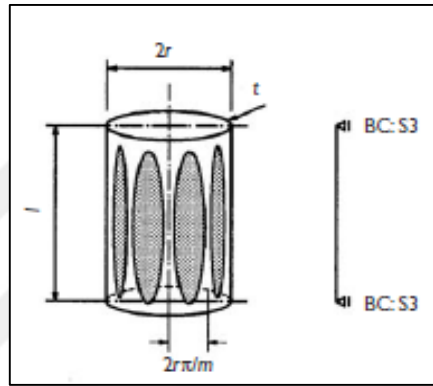
1934 yılında Widenburg ve Trilling ise çalışmalarında kritik uzunluktan daha uzun sonsuz uzunluktaki silindirin çökme basıncını veren G.H. Bryant ve Bresse formüllerini vererek, sonlu uzunluktaki silindirlerin çökme basıncını veren Von Mises, Tokugawa, Southwell formüllerini karşılaştırdı. Çökme sırasında kabuklarda oluşan çevresel dalgaların sayısının (n) bulunduğu formüllerde, çökme basıncını (p) minimum yapan n'nin integral değerinin kullanılması gerektiği belirterek kritik n değeri verdiler (Windenburg ve Trilling, 1934).

$$n = \sqrt[4]{\frac{\frac{3}{4} \pi^2 (1 - \mu^2)^{1/2}}{(L/D)^2 (t/D)}} \quad (5.11)$$

Kritik n değerini basitleştirerek minimum burkulma basıncını tank çevresinde oluşan lob sayısına (n) bağlı olmaksızın ifade etmişlerdir. Buna göre D.F. Widenburg ve C. Trilling burkulma lob sayısına bağlı olmayan bu formülü şu şekilde vermişlerdir (Windenburg ve Trilling, 1934).

$$P = \frac{2,42E}{(1-\mu^2)^{3/4}} \left[\frac{\left(\frac{t}{d}\right)^{5/2}}{\left(\frac{l}{d}\right) - 0,45\left(\frac{t}{d}\right)^{1/2}} \right] \quad (5.12)$$

Bu formül, tam dış basınç altında (uç plakalardaki basınç dahil) kısa ve orta uzunlukta silindirler için iyi sonuçlar verir. Üniform bir dış basınç altındaki silindirlerin, kabuğun bütün uzunluğu boyunca uzanan büyük loblar oluşturur (Şekil 5.15) (Greiner, 2004).



Şekil 5.15 Üniform dış basınç altında silindirde oluşan loblar (Greiner, 2004)

Kabuğun tüm uzunluğu boyunca uzanan büyük lobların oluşum şekillerinde ve kritik çökme basıncı üzerinde, silindir sınırlarındaki sınırlama koşullarının etkisi vardır. Aynı zamanda, daha kalın olan kabuk tabaka daha ince kabuk tabaka üzerine sınırlama koşulları uyguladığından, değişken (kademeli) duvar kalınlığının etkileri için de geçerlidir. Sınır şartlarının etkisini 1976 yılında R. Greiner kabukların sınır şartlarını membran (zar) ve eğilme koşulu olarak ikiye ayırmıştır. Aşağıda beş sınır koşulunun gösterimi belirtilmiştir. C3 ve C4 “ankastre”, S3 ve S4 “basit mesnetli” ve F “serbest” anlamına gelir. İlk iki koşul membran kısmını ve ikinci iki koşul eğilme kısmını ifade eder (Greiner, 2004):

$$\begin{aligned} C_3 &= n_x = v = w = w' = 0 \\ C_4 &= u = v = w = w' = 0 \\ S_3 &= n_x = v = w = m_x = 0 \\ S_4 &= u = v = w = m_x = 0 \\ F &= n_x = n_{xy} = q_x = m_x = 0 \end{aligned}$$

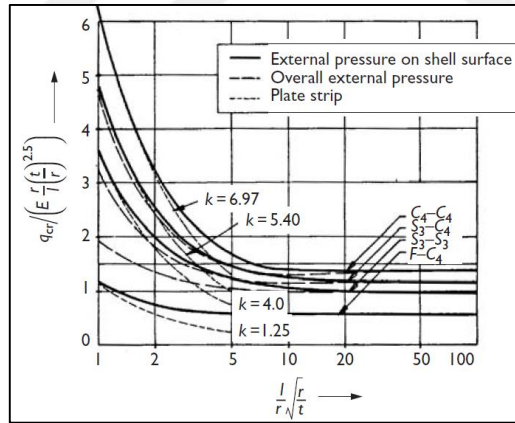
Belirli sınır koşullarının etkileri, kabuğun uzunluğuna bağlıdır. Orta silindir uzunluğu aralığında sadece “membran koşulları” geçerlidir. Uzunluğun azalması ile, “eğilme koşullarının” etkisi, çok kısa silindirlere kadar kademeli olarak artar. Uzun silindirlerde sınır koşullarının etkisi geçerli değildir. R. Greiner kısa silindirlere için sınır şartlarını kapsayacak kritik burkulma basıncı formülünü vermiştir (Greiner, 2004).

$$P = E \left(\frac{r}{l} \right) \left(\frac{t}{r} \right)^{1,5} \left[\frac{0,904k}{(l/r)\sqrt{r/t}} \right] \quad (5.13)$$

Burada;

k = Plakanın eğilme katsayısıdır.

Plaka davranışı sadece eğilme koşullarına bağlıdır. Genel yükleme için $k = 2$ olan eğilme katsayısı, tamamen çevresel yükleme için $k = 4$ olarak değişir. Katsayılar, Şekil 5.16’da daha ayrıntılı olarak gösterilmektedir.



Şekil 5.16 Toplam dış basınç altında ya da sadece kabuk yüzeyinde dış basınç altında farklı sınır koşullarına sahip kısa silindirlere için kısmi basıncı q_{cr} (Greiner, 2004)

Greiner tarafından basitleştirilmiş bir mühendislik yaklaşımı verilmiş ve orta ve uzun silindir için sınır şartlarını kapsayacak kritik burkulma basıncı formülünü kompakt olarak vermiştir (Greiner, 2004).

$$P = C_M \frac{0,272}{(1-\mu^2)^{0,75}} E \left(\frac{r}{l} \right) \left(\frac{t}{r} \right)^{1,5} = C_{BC} \cdot 0,92 E \frac{r}{l} \left(\frac{t}{r} \right)^{1,5} \quad (5.14)$$

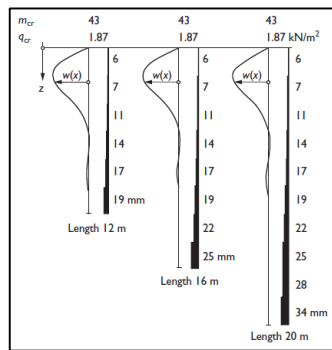
C_M , C_{BC} , membran sınır şartlarının etkisini temsil eden bir katsayıdır. Şekil 5.17’de hayali kiriş için sınır koşulları ve katsayılar yer almaktadır (Greiner, 2004).

$w = 0$ means lateral support, $u = 0$ means clamped ends,
 $n_x = 0$ means free end-rotation, $m_x = q_x = 0$ means free end.

	$w = n_x = 0$	$w = n_x = 0$	$w = u = 0$	$n_x = q_x = 0$
C_M	π	3.93	4.73	1.875
C_{BC}	1.0	1.25	1.50	0.60

Şekil 5.17 Dış basınç altında orta uzunlukta silindirik kabuklarda sınır şartlarının etkisi (Greiner, 2004)

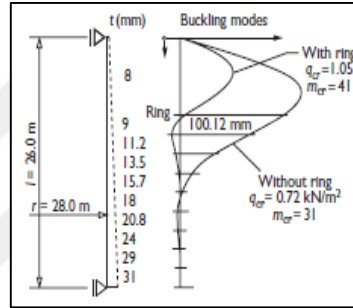
Katsayılar fiziksel olarak yarı-membran teorisi ile açıklanmaktadır. Sınır koşulları söz konusu olduğunda, üniform dış basınç altındaki orta uzunlukta silindirik kabuğun hayali kirişin titreşim davranışına benzer şekilde davrandığı düşünülebilir. Değişken cidar kalınlığına sahip kabukların burkulma davranışına ince üst sıralar hakimdir. Alt taraflar ise daha kalın olanlar üst sıralar üzerinde bir sınırlayıcı etki yaparlar. Silindirik kabuklar, Şekil 5.18’de gösterilen şekilde davranır. Her üç silindir de aynı bükülme direncine sahiptir, bu gibi durumlarda tasarım temeli olarak ortalama duvar kalınlığının kullanımının tamamen yanlış olabileceğini açıkça göstermektedir (Greiner, 2004).



Şekil 5.18 40 m çapında ve farklı yükseklikteki silindirik tankların burkulma davranışları (çelik sınıfı S 235) (Greiner, 2004)

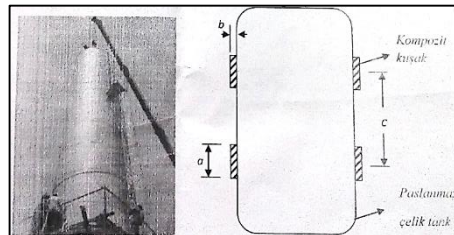
Üst cidar kalınlığına sahip birçok depolama tankı için, hem çevresel hem de eksenel baskıları taşımak için bu bölgenin burkulma direncini arttırmak için bir halka ile güçlendirilmesi gerekir. Dış basınca karşı kademeli depolama tanklarının tasarlanmasında halka ile güçlendirme göz önünde bulundurulması gerekir.

Greiner, 56 m çapında ve 26 m uzunluğunda bir silindirin tavanından 8 m altında çok küçük boyutlu bir halka ile güçlendirilmesi sonucu (halka şeklindeki plaka: 100 x 12 mm), güçlendirilmemiş durumdaki silindirin burkulma direncini yaklaşık % 50 artırmıştır (şekil 5.19) (Greiner, 2004).



Şekil 5.19 Kademeli duvar kalınlığına ve bir halka güçlendiriciye sahip silindirin burkulma davranışı

Sabit duvar kalınlığındaki kabuklar için farklı durumlarda çok sayıda çözüm mevcuttur. Değişken, yani kademeli duvar kalınlığı ve güçlendirici halkalarla sınırlandırılmış silindirler için, çözümler doğrusal burkulma denklemleri temelinde sayısal olarak türetilmiştir (Ventsel ve Krauthammer, 2001). Çalışma kapsamında sayısal analiz yöntemi olan sonlu elemanlar yöntemi ile kademeli depolama tankında güçlendirme halkasının kuşak kalınlığı ve genişliği değiştirilerek kritik burkulma yükündeki farkları ortaya konulmuştur. En son olarak halka kompozit malzemeden tasarlanarak çelik halka ile karşılaştırılmıştır (şekil 5.20).



Şekil 5.20 Tank güçlendirici halka

5.3 Burkulma Analizi

Yapılar, modeller farklı yük değerlerinde farklı şekillerde burkulabilir. Modelin burkulma sırasında aldığı şekle, burkulma mod şekli denir. Yükleme sonucu burkulma başlangıç yüküne de kritik yük veya burkulma yükü denir. Burkulma analizinde, modelin deforme olmaya başladığı için genellikle en düşük kritik yük veya modla (mod 1) ilgilenilir. Burkulmanın kritik tasarım faktörü olduğu durumlarda, birden çok burkulma modunun hesaplanması modelin zayıf alanlarının konumlandırılmasına yardımcı olur. Mod şekilleri; modeli ya da destek sistemini belirli bir mod da burkulmayı önleyecek şekilde değiştirmenize yardımcı olabilir.

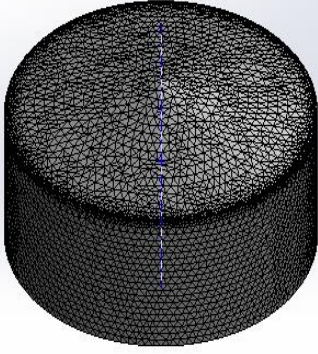
Bölüm başında yapılan iç basınç analizindeki model için burkulma analizi yapılacaktır. Bu analiz için başlangıçta yapacağımız model oluşturma, yeni malzeme girişi, sınır şartlarının oluşturulması gibi adımlar yukarıdaki analiz ile aynı olacaktır. Bu yüzden burkulma analizinde bu aşamalar anlatılmayacaktır. Tank içerisinde oluşturulan yüksek vakum veya dış basınç sonucu oluşabilecek burkulmalar için analiz tipi olarak burkulma analizi kullanılacaktır. Tablo 5.7’de analiz özellikleri görülmektedir.

Tablo 5.7 Analiz özellikleri

Analiz tipi	Burkulma
Mesh tipi	Yüzey kabuk mesh
Mod sayısı	5
Çözücü tipi	FFEPlus
Uyumsuz bağlantı seçenekleri	Otomatik
Termal efekt:	Evet
Termal opsiyon	Sıcaklık yükleri dahil
Sıfır gerilme sıcaklığı	298 Kelvin

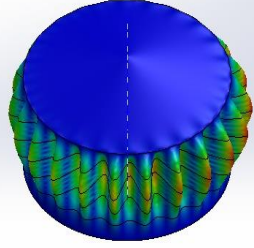
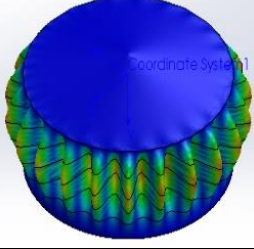
Tablo 5.8’de modelde minimum eleman boyutu 0,21 m ve maksimum eleman boyutu 0,83 m olan 15176 küçük elemanlar ağı oluşturulduğu görülür. Mesh tipi olarak kabuk mesh olup eğri tabanlıdır. Yüksek kalite mesh yapılarak jakobien denetim yapılmıştır.

Tablo 5.8 Mesh bilgisi

	Mesh tipi:	Yüzey kabuk mesh
	Kullanılan meshleyici:	Eğri tabanlı
	Jakobian kabuk kontrolü:	Evet
	Maksimum eleman boyutu:	0,831971 m
	Minimum eleman boyutu:	0,2119118 m
	Mesh kalitesi:	Yüksek
	Toplam düğüm:	30354
	Toplam eleman:	15176

Yük olarak tankın yan dış kabuk yüzeylerine 1 N/m² basınç yüklemesi uygulanmıştır. Sınır şartı olarak tank tabanı tüm serbestlik yönleri sabitlenmiştir. Tablo 5.9’da etüt sonucu oluşan yük faktörü mod şekli ve yer değiştirme görülmektedir.

Tablo 5.9 Etüt sonuçları

MODE NUMBER	MODE FIGURE	LOAD FACTOR	DİSPLACEMENT
1		2249,4	13,5791 mm
2		2252,7	13,66 mm

Kritik burkulma yükü, modelin plastik şekil değiştirmesine neden olan en küçük yük değeridir. Modelin kritik burkulma yükünü bulmak için ile modele uygulanan tüm yüklerin analiz sonucu bulunan yük faktörü çarpımı ile bulunur. Örneğin, modele 500 Newton’luk bir kuvvet uyguladığımızı varsayalım. Mod 1’in burkulma yük faktörünün 2,3 olarak hesaplandığını varsayarsak, mod 1’de burkulma; $500 \times 2,3 = 1150$

Newton'luk bir kuvvette meydana gelir. Bu durumda bulduğumuz burkulma kritik yükü bulmak için;

- Mod 1 için; burkulma kritik yük = uygulanan basınç x yük faktörü
 $= 1 \text{ N/m}^2 \times 2249,4 = 2249,4 \text{ N/m}^2 = 2,25 \text{ kN/m}^2$
- Mod 2 için; burkulma kritik yük = uygulanan basınç x yük faktörü
 $= 1 \text{ N/m}^2 \times 2252,7 = 2252,7 \text{ N/m}^2 = 2,25 \text{ kN/m}^2$

Kademeli tank modeli ilk olarak halkasız olarak analizi yapılmıştır. Analiz sonucu kritik yük $2,25 \text{ kN/m}^2$ bulunmuştur. Tank modeli incelendiğinde hakim kabuk kalınlığının $0,0079$ metre kalınlığının olduğu görülür. Tankın $7,250$ metre yüksekliğe sahip $0,0079$ kabuk kalınlığı mod şekilleri incelendiğinde burkulma yükünde de hakim olduğu görülür. Bu noktada burkulma sonucu oluşan çevresel dalgaların sayısı için Widenburg ve Trilling verdiği denklem 5.11'den n değeri bulunur ve radyal olarak yüklenmiş sonlu uzunlukta silindirik kabuğun çökme basıncı için Von Mises'in verdiği denklem 5.9'a tankın $0,0079$ kalınlığının kısmı için uygulayalım.

$$n = \sqrt[4]{\frac{\frac{3}{4} \pi^2 (1 - 0,3^2)^{1/2}}{(7,25/30,48)^2 (0,0079/30,48)}} = 26,34$$

$$P = \frac{26^2}{3} \left[1 + \frac{2}{26^2 \left(\frac{2 \cdot 7,250}{\pi \cdot 30,48} \right)^2 - 1} \right] \frac{2 \cdot 206 \cdot 10^9}{1 - 0,3^2} (0,0079/30,48)^3 +$$

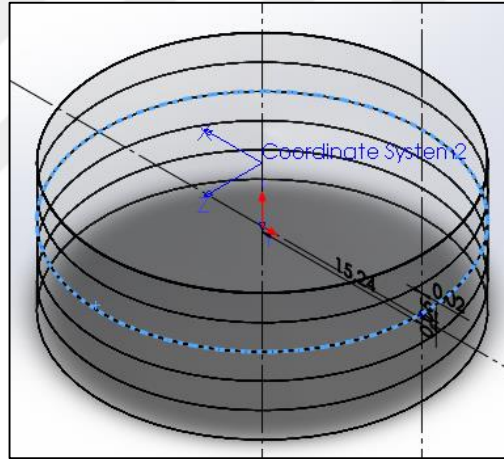
$$+ \frac{2 \cdot 206 \cdot 10^9 \cdot (0,0079/30,48)}{26^2 \left[26^2 \left(\frac{2 \cdot 7250}{\pi \cdot 30,48} \right)^2 + 1 \right]^2} = 2022037 \text{ N/m}^2 = 2,02 \text{ kN/m}^2$$

Denklem sonucu bulunan kritik yük $2,02 \text{ kN/m}^2$ bulunmuştur. Analiz sonucu ile karşılaştırıldığında $0,23 \text{ kN/m}^2$ fark oluşmuştur. Bu farkın kademedan dolayı tankın

alt kısmını oluşturan kabuk kalınlıkların daha kalın olması ve tankın üst kısmına sınırlayıcı etki yapmasından dolayı olabileceği düşünülmektedir.

5.3.1 Çevresi Çelik Kuşak İle Sarılarak Güçlendirilmiş Tank

Dış basınç durumunda, tankın bütünlüğünü korumak ve dayanımı artırmak için tank çevresi çelik kuşak ile sarılmıştır. Tank şekli dikkate alındığında en ince kısım olan üst kısımda burkulma sonucu dengesizliğin ve yer değiştirmenin daha fazla olduğu tablo 5.9’da görülecektir. Takviye halkası tabandan 7,250 m yükseklikte tankın kabuk kalınlığı 0,0079 m olan kısmında kaynak yerine yerleştirilmiş olup tank malzemesi ile aynı malzeme kullanılarak, kuşak kalınlığı, genişliği değiştirilerek farklar ortaya konulacaktır.



Şekil 5.21 Güçlendirme halkasının konumu

Tablo 5.10 ve tablo 11’de güçlendirme halkasının kalınlığa ve genişliğe bağlı burkulma kritik yükleri görülmektedir. Tablonun dikey kısmında güçlendirme halkasının kalınlığı yer alırken, yatay kısmında güçlendirme halkasının genişliği yer almaktadır.

Analizi yapılan model depolama tankı çevresi, tankın malzemesi ile aynı malzemeden sarılarak, farklı kalınlık ve genişlikte, aynı mesh ve sınır şartları ile iki yüz yirmi (220) analiz yapılarak tablo 5.10 ve tablo 5.11 oluşturuldu. Oluşturulan

tablolarda kalınlıkla kastedilen güçlendirme halkasının (veya tankın) radyal yönündeki artırımı kastedilirken, genişlikle halkanın eksenî yönündeki artırımı kastedilmektedir.

Tablo 5.10 Farklı halka genişliklerinde halka kalınlığının değişimine bağlı burkulma değerleri(kN/m²)

Güçlendirme Halkası Kalınlığı (m)	Güçlendirme Halkası Genişliği (m)									
	0,05	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4	0,45	0,5
0,01	2,47	2,62	2,73	2,82	2,90	2,96	3,01	3,05	3,09	3,13
0,011	2,51	2,69	2,82	2,93	3,01	3,09	3,14	3,19	3,24	3,29
0,012	2,56	2,77	2,92	3,04	3,14	3,22	3,29	3,35	3,41	3,46
0,013	2,62	2,85	3,02	3,16	3,27	3,37	3,44	3,51	3,58	3,64
0,014	2,68	2,94	3,13	3,28	3,41	3,52	3,60	3,68	3,76	3,84
0,015	2,75	3,03	3,25	3,42	3,56	3,69	3,78	3,86	3,95	4,04
0,016	2,82	3,14	3,38	3,57	3,72	3,86	3,96	4,06	4,17	4,26
0,017	2,89	3,25	3,52	3,72	3,89	4,03	4,15	4,26	4,36	4,47
0,018	2,96	3,35	3,64	3,86	4,05	4,21	4,33	4,45	4,57	4,68
0,019	3,04	3,47	3,78	4,02	4,22	4,39	4,52	4,65	4,78	4,91
0,02	3,12	3,59	3,93	4,18	4,40	4,58	4,72	4,86	4,99	5,06

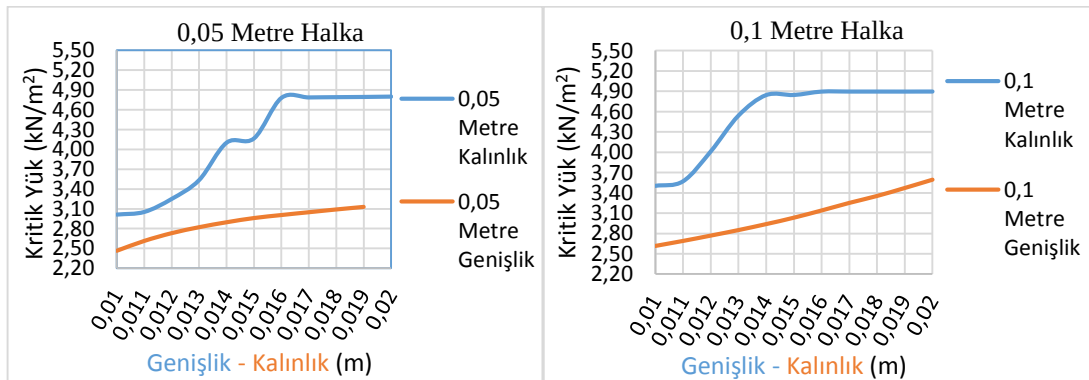
Tablo 5.11 Farklı halka kalınlıklarında halka genişliğinin değişimine bağlı burkulma değerleri(kN/m²)

Güçlendirme Halkası Kalınlığı (m)	Güçlendirme Halkası Genişliği (m)										
	0,01	0,011	0,012	0,013	0,014	0,015	0,016	0,017	0,018	0,019	0,02
0,05	3,02	3,05	3,25	3,54	4,10	4,17	4,78	4,79	4,79	4,79	4,80
0,1	3,50	3,57	4,01	4,54	4,85	4,85	4,90	4,90	4,90	4,90	4,90
0,15	3,68	3,69	4,13	4,86	4,89	4,89	4,92	4,92	4,92	4,92	4,92
0,2	3,74	3,73	4,19	4,88	4,91	4,91	4,93	4,93	4,92	4,92	4,92
0,25	3,76	3,74	4,22	4,89	4,92	4,92	4,93	4,93	4,93	4,93	4,93
0,3	3,78	3,75	4,25	4,89	4,93	4,93	4,94	4,94	4,94	4,94	4,94
0,35	3,78	3,76	4,27	4,90	4,94	4,93	4,94	4,94	4,94	4,94	4,94
0,4	3,79	3,76	4,29	4,91	4,94	4,94	4,95	4,95	4,95	4,95	4,95
0,45	3,80	3,77	4,30	4,91	4,95	4,95	4,95	4,95	4,95	4,95	4,95
0,5	3,80	3,77	4,32	4,92	4,96	4,95	4,96	4,96	4,96	4,96	4,96

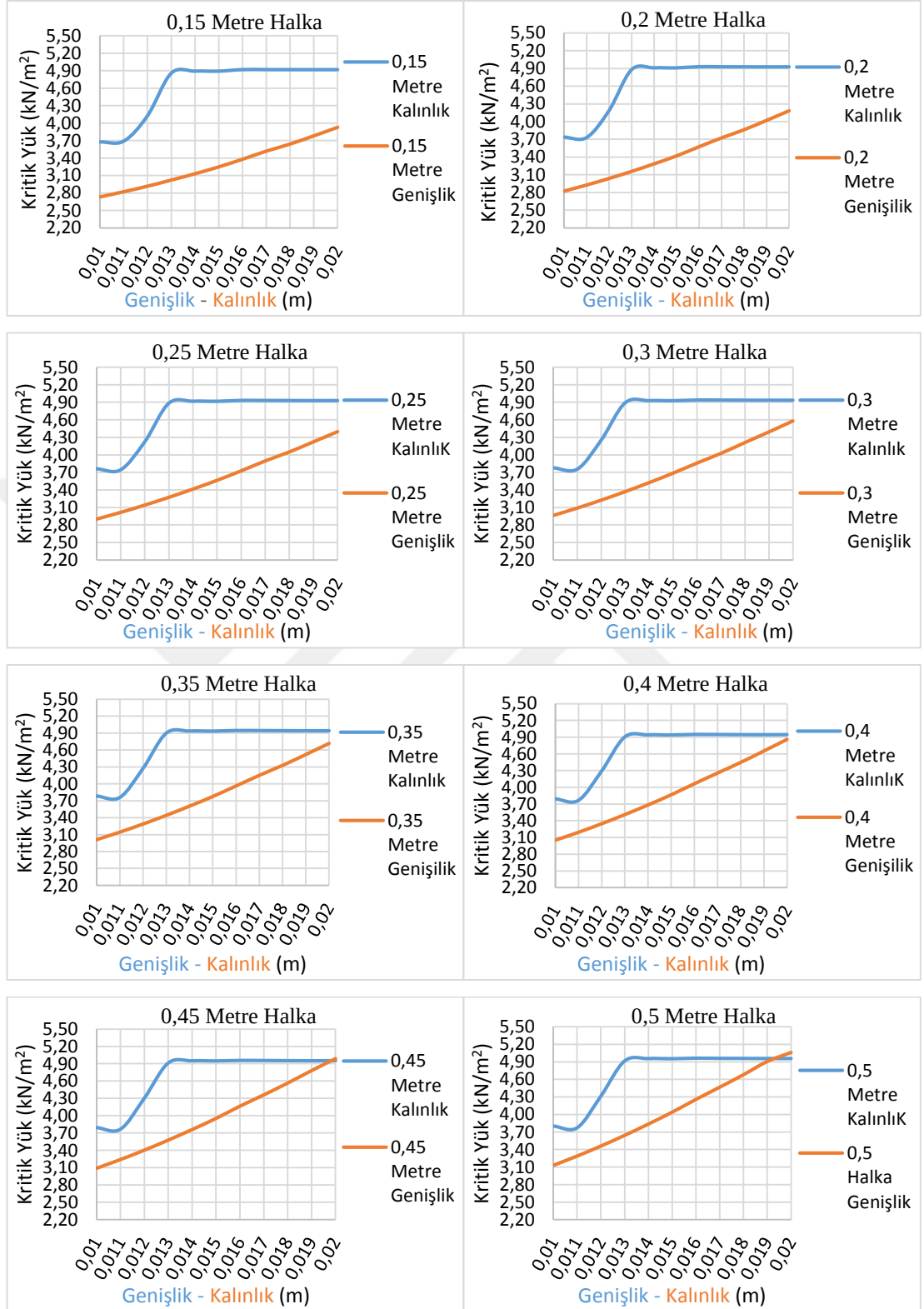
Tablo 5.10 oluşturulurken farklı halka genişliklerinde halka genişliği sabit tutularak, halka kalınlıklarının küçük artırımlarla (1 mm artırım ile) artırılması sonucu, halka kalınlığının burkulma yüküne etkisi gözlemlenmiştir. Tablo 5.11 oluşturulurken

ise farklı halka kalınlıklarında halka kalınlığı sabit tutularak, halka genişliklerinin küçük artırımlarla (1 mm artırım ile) artırılması sonucu, halka genişliğinin burkulma yüküne etkisi belirtilmiştir.

Tablolar birlikte incelendiğinde güçlendirme halkası geometrik olarak halka kalınlık- genişlik olarak karşılaştırılabilir. Örneğin halka genişliği 0,5 metre iken halka kalınlığının 0,01 metre olduğu halka modelinde kritik yük 2,47 iken, genişlik 0,01 kalınlık 0,5 metre olduğunda kritik yük 3,02 olmaktadır. Halkanın tablolardaki diğer modellerde de geometrik olarak karşılaştırılması yapıldığında aynı etkilerin olduğu görülecektir. Buradan halkanın geometrik olarak kalınlık artırımının kritik yükte etkisinin genişliğe göre daha fazla olduğunu söyleyebiliriz. Tablolardaki modellerin burkulma yükündeki kalınlık- genişlik etkisini daha iyi görmek için iki tablonun birlikte verildiği grafiklerin oluşturulduğu şekil 5.22 aşağıdadır. Bu grafiklerde yatay eksen, halkanın sabit tutulan genişliğine veya kalınlığına bağlı olarak halkanın genişlik veya kalınlığı yer alırken, dikey sütunda ise halka modellerinin geometrisine (halka kalınlık- genişlik) bağlı burkulma kritik yükü bulunmaktadır. Grafikte mavi renkle oluşturulan çizim tablo 5.11 bağlı olarak kalınlıkların sabit tutulup, yatay eksende halka genişliğine bağlı dikey eksende kritik burkulma yükünün belirlenmesi ile çizilmiştir. Aynı şekilde grafikte turuncu olarak yer alan çizim tablo 5.10 bağlı olarak genişliklerin sabit tutulup, yatay eksende halka kalınlığına bağlı kritik burkulma yükünün belirlenmesi ile çizilmiştir. Sabit tutulan genişlik veya kalınlıklar grafik başlığı olarak yer almaktadır.



Şekil 5.22 Halka kalınlığına- genişliğine bağlı kritik burkulma yükü



Şekil 5.22 devamı

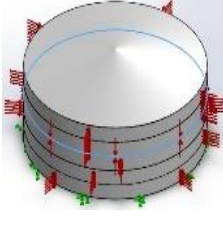
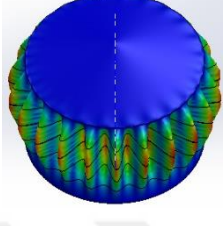
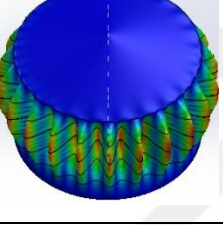
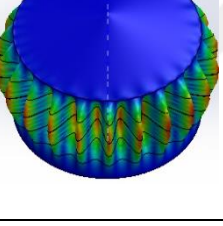
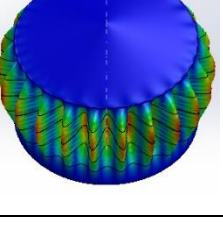
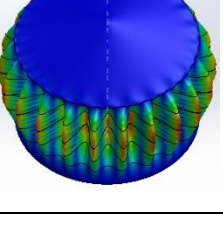
Tablo 5.11'e göre çizilmiş kalınlığın sabit tutulup genişliğin değişimine bağlı olarak çizilen kritik yük grafikleri incelendiğinde, üç bölümden oluştuğu görülmüştür. İlk

bölümde her kalınlık grafiğinde 0,011 metre genişliğe kadar sabit olarak kalırken, ikinci bölümde 0,011 metre 0,013 metre arasında hızlı artış olmakta, üçüncü bölümde 0,013 metre genişlikten sonra kritik yük sabit kalmaktadır. Bu durumun istisna olduğu durum 0,05 metre kalınlığa sahip halka modelinde yaşanmaktadır. 0,05 kalınlığa sahip halka modelinde 0,014 metre genişliğe kadar lineer artış gösterirken sonra sabit kalıp 0,016 metre genişliğe kadar tekrar lineer artış gösterip daha sonra tekrar sabit ilerlemiştir. Tablo 5.11'e göre oluşturulan grafiklerde halka genişliğinin belli bir noktadan sonra (farklı kalınlıklarda halka genişliğinin artışına rağmen kritik yükün sabit kalmasından dolayı) kritik yüke etkisinin olmadığı görülür.

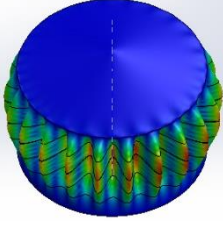
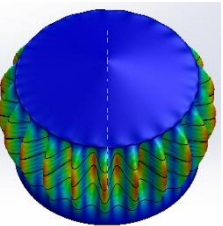
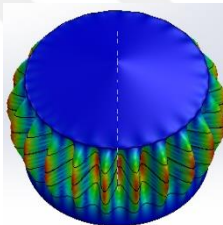
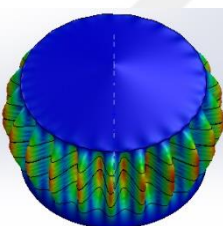
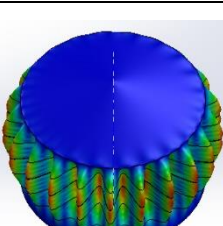
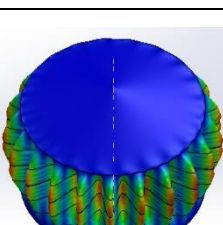
Tablo 5.10'a göre çizilmiş genişliğin sabit tutulup kalınlık değişimine bağlı olarak çizilen kritik yük grafikleri incelendiğinde, kalınlığa bağlı olarak kritik yükün sürekli olarak lineer artış gösterdiği söylenebilir. Ancak bu artış miktarı küçük miktarda kalmıştır. Grafiklerde geometrik olarak kalınlık miktarının artışının genişliğe göre kritik yükte etkisinin yüksek olduğu görülebilir. Örneğin; 0,05 metre kalınlık ve 0,01 metre genişlikte kritik yük 3,02 iken 0,05 metre genişlik ve 0,01 metre kalınlıktaki modelde kritik yük 2,47 çıkmaktadır. Bu durumun eşitlendiği nokta ise 0,5 metre genişlik veya kalınlığa sahip modelin 0,019 metre kalınlık ve genişliğe sahip durumudur.

Grafikler bütün olarak incelendiğinde, kritik yükün bir noktadan sonra sabit kaldığı görülmektedir. Bu noktada güçlendirme halkası için en optimize geometriyi belirleyebiliriz. Grafiklerde halka için genişlik veya kalınlık olarak 0,05 metre sabit tutulan modeli ele almak en doğrusudur. Aşağıda tablo 5.12'de 0,05 metre genişliğinde, tablo 5.13'te ise 0,05 metre kalınlığında sabit, farklı (0,01 m-0,02 mm) kalınlıklarda veya genişliklerde güçlendirilmiş halkanın kullanıldığı tank modelinin mod şekilleri gösterilmiştir. Güçlendirme halkasının kalınlığı, genişliği, ağırlığı, burkulma kritik yükü ve maksimum yer değiştirme görülmektedir.

Tablo 5.12 Halka kalınlığına bağlı burkulma yükü ve mod şekli

	Halka Genişlik m	Halka Kalınlık m	Halka Ağırlık N	Halka Hacim m ³	Özkütle kg/m ³	Kritik Yük kN/m ²	Maximum Yer Değiştirme mm
	0,05	0,01	3685,1	0,0478	7850	2,47	11,99
	0,05	0,011	4053,6	0,0526	7850	2,51	11,87
	0,05	0,012	4422,2	0,0574	7850	2,56	11,86
	0,05	0,013	4790,7	0,0622	7850	2,62	11,93
	0,05	0,014	5159,2	0,0669	7850	2,68	12,14

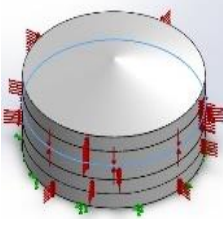
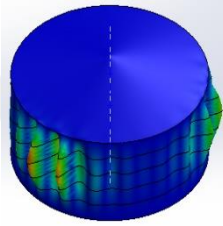
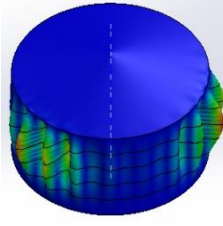
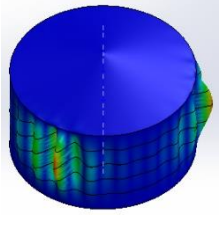
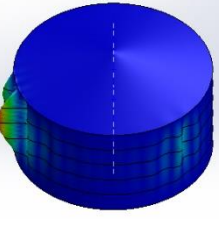
Tablo 5.12 devamı

	0,05	0,015	5527,7	0,0717	7850	2,75	14,92
	0,05	0,016	5896,2	0,0765	7850	2,82	12,04
	0,05	0,017	6264,7	0,0813	7850	2,89	11,85
	0,05	0,018	6633,2	0,0861	7850	2,96	12,14
	0,05	0,019	7001,8	0,0909	7850	3,04	12,03
	0,05	0,020	7370,3	0,0957	7850	3,12	11,94

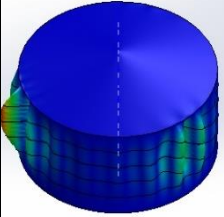
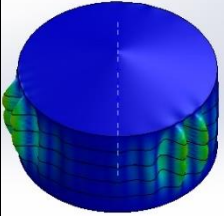
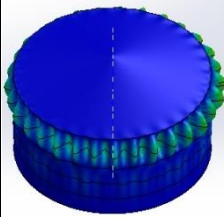
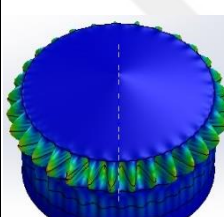
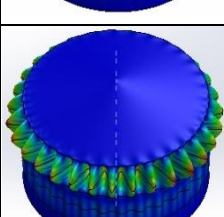
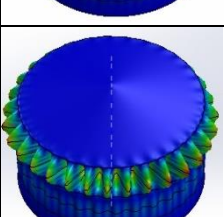
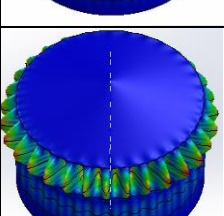
Tablo 5.12 incelendiğinde mod şekillerinde bir farklılık olmadığı görülür. Kritik yükte ise güçlendirme halkasının kalınlığı ile birlikte kritik yükün arttığı

görülmektedir. Aşağıda tablo 5.13'te halka genişliğine bağlı burkulma yükü ve mod şekli gösterilmektedir.

Tablo 5.13 Halka genişliğine bağlı burkulma yükü ve mod şekli

	Halka Genişlik m	Halka Kalınlık m	Halka Ağırlık N	Halka Hacim m ³	Özkütle kg/m ³	Kritik Yük kN/m ²	Maximum Yer Değiştirme mm
	0,01	0,05	3685,1	0,0478	7850	3,02	31,2
	0,011	0,05	4053,6	0,0526	7850	3,05	28,38
	0,012	0,05	4422,2	0,0574	7850	3,25	33,63
	0,013	0,05	4790,7	0,0622	7850	3,54	44,38

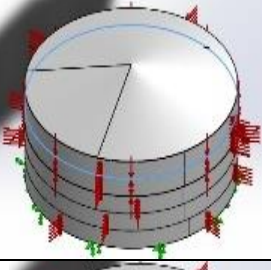
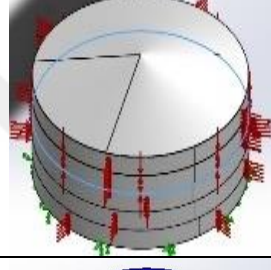
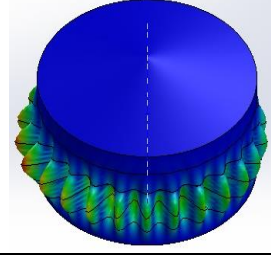
Tablo 5.13 devamı

	0,014	0,05	5159,2	0,0669	7850	4,10	37,72
	0,015	0,05	5527,7	0,0717	7850	4,17	32,01
	0,016	0,05	5896,2	0,0765	7850	4,78	20,17
	0,017	0,05	6264,7	0,0813	7850	4,79	15,56
	0,018	0,05	6633,2	0,0861	7850	4,79	14,74
	0,019	0,05	7001,8	0,0909	7850	4,79	15,38
	0,020	0,05	7370,3	0,0957	7850	4,80	14,16

Tablo 5.13'te mod şekilleri incelendiğinde, güçlendirme halkası genişliği 0,016 m'ye kadar tank kabuğu ile birlikte hareket ettiği ve kabuk ile burkulduğu görülür. Güçlendirme halkası genişliği 0,016 metre ve üstünde olduğunda halkanın satabil kaldığı görüldü. Güçlendirme halkasının stabil kaldığı durumda tankın en zayıf noktasının yani kalınlığın en düşük (7,9 mm) olduğu noktanın en fazla yer değiştirme olduğu görüldü. Güçlendirme halkasının 0,013 metre kalınlığında analizler arasında yer değiştirmenin maksimum noktaya ulaştığı ancak mod şekli incelendiğinde bunun lokal bir yer değişme olduğu görüldü. Güçlendirme halkasının 0,010 m'den 0,015 m'ye kadar artışında yer değiştirme miktarı artmaktadır. Bunun nedeninin halkanın kalınlığı ile kabukta enerji birikmesi ile ani boşalmadan kaynaklandığı düşünülmektedir. Halka kalınlığı 0,016 m'den 0,020 m'ye kadar olan bölgede halka stabilitesini koruyarak burkulmanın tankın en zayıf bölgede meydana gelmesine neden olarak maksimum yer değiştirmenin minimum olduğu halka kalınlığı 0,020 m'de gerçekleşmiştir. Tablo 5.12 ile 5.13 birlikte incelendiğinde halka geometrisine bağlı olarak ağırlıkları aynı olmasına rağmen diğer özelliklerin (0,016 m kalık 0,05 m genişlik ile 0,016 m genişlik 0,05 m kalınlık arasındaki mod şekli, kritik yük, maksimum yer değiştirme) birbirinden farklı olmuştur.

Güçlendirme halkasının stabil kaldığı durumlarda yer değiştirmenin maksimum olduğu noktanın, 7,9 mm kabuk kalınlığı olan bölge olduğu görülür. Tablo 5.14'te bu bölgeye güçlendirme halkasının yerleştirildiği analiz yer almaktadır. Halka tank tabanından 9,665 m yüksekliğe kabuk kalınlığının 7,9 mm olduğu ve kaynak yerinin olduğu bölgeye yerleştirilmiştir. İlk olarak yerleştirilen halka ise sabit yerinde yani tank tabanından 7,25 m yükseklikte tutulmuştur. Halka geometrisinde yapılan analizlerde görüldüğü üzere kritik yükün halka genişliğinin 0,016 metrede ciddi bir artış olduğu görülür. Bu yüzden iki halka 0,016 m genişlikte ve 0,05 m kalınlıkta oluşturulmuştur.

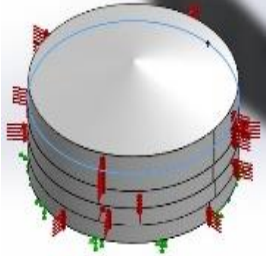
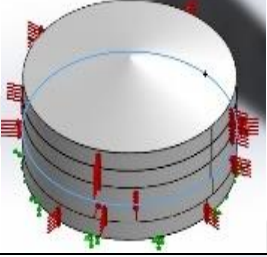
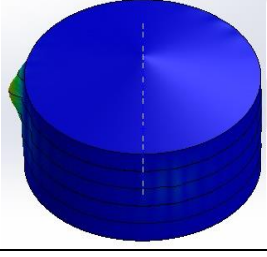
Tablo 5.14 İki halka ile güçlendirilmiş tank

	Halka Genişliği m	Halka Kalınlık m	Halka Ağırlık N	Halka Hacim m ³	Kritik Yük kN/m ²	Max. Yer Değiştirme mm
	0,016	0,05	5896,21	0,0765		
	0,016	0,05	5896,21	0,0765		
					5,38	18,15

Mod şekli incelendiğinde güçlendirme halkalarının stabil kaldığı görülür. Burkulmanın ise güçlendirme halkaların altında tank kabuk kalınlığının 12,7 ve 9,5 mm olduğu bölgede olduğu görülür. Bir halkanın kullanıldığı ve halka genişliği 0,016 m olan analizde burkulma kritik yükün yaklaşık 0,6 kN/m² fazla olduğu görüldü.

Tablo 5.15'te iki halkanın farklı konumlandırılması yer almaktadır. İlk halka tabandan 4,832 m yüksekliğe tank kabuk kalınlığı 9,5 mm olan bölgenin kaynak yerine yerleştirilmiştir. İkinci halka ise tank tabanının 9,66 m yüksekliğe tank kabuk kalınlığı 7,9 mm olan bölgenin kaynak yerine yerleştirilmiştir. Her iki halkanın genişliği 0,016 m ve kalınlığı 0,05 m olarak alınmıştır.

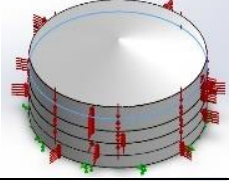
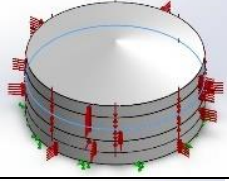
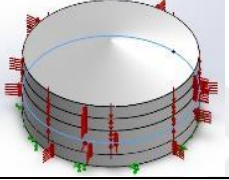
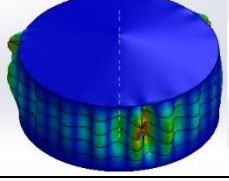
Tablo 5.15 Farklı konumlandırılmış iki halkalı güçlendirilmiş tank

	Halka Genişliği m	Halka Kalınlık m	Halka Ağırlık N	Halka Hacim m ³	Kritik Yük kN/m ²	Max. Yer Değiştirme mm
	0,016	0,05	5896,21	0,0765		
	0,016	0,05	5896,21	0,0765		
					4,39	42,1186

Farklı konumlandırılan güçlendirme halkaların yer aldığı analizde, tank mod şeklinde maksimum yer değiştirmelerinin lokal olarak meydana geldiği görülür. Kritik yük için ilk olarak oluşturulan ikili halka ile elde edilen yükten 1 kN/m² daha düşük çıkmıştır. Maksimum yer değiştirme ilk oluşturulan ikili halkaya göre hayli yüksek çıkmıştır.

Tablo 5.16’da üç halkanın konumlandırılması gösterilmiştir. İlk halka tabandan 4,832 m yüksekliğe tank kabuk kalınlığı 9,5 mm olan bölgenin kaynak yerine yerleştirilmiştir. İkinci ve üçüncü halka ise tank tabanın 7,250 m ve 9,66 m yüksekliğe, tank kabuk kalınlığı 7,9 mm olan bölgenin kaynak yerine yerleştirilmiştir. Her üç halkanın genişliği 0,016 m ve kalınlığı 0,05 mm olarak alınmıştır.

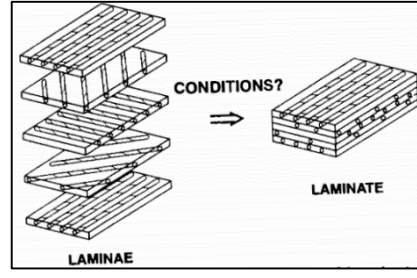
Tablo 5.16 Üç halka ile güçlendirilmiş tank

	Halka Genişliği m	Halka Kalınlık m	Halka Ağırlık N	Halka Hacim m ³	Kritik Yük kN/m ²	Max. Yer Değiştirme mm
	0,016	0,05	5896,21	0,0765		
	0,016	0,05	5896,21	0,0765		
	0,016	0,05	5896,21	0,0765		
					7,15	25,3481

Üç halkanın kullanıldığı tank modelinde yapılan analizde mod şekli incelendiğinde güçlendirme halkalarının tank kabuğu ile hareket ettiği görüldü. Burkulma yükü incelendiğinde güçlendirme halkanın kullanılmadığı tank modelinin yaklaşık üç katı burkulma yükü elde edilmiştir. Yer değiştirme olarak 25,35 mm olarak yüksek bir değere ulaşmıştır. Bunun nedenin biriken enerjinin ani boşalması olarak değerlendirilmektedir.

5.3.2 Çevresi Kompozit Kuşak İle Sarılarak Güçlendirilmiş Tank

Kompozitler, fark edilebilir değişik özelliklere sahip iki veya daha fazla malzemeden oluşan ve birbiri içinde çözünmeyen heterojen yapıdaki birleşimlerdir. Malzemelerden biri karbon, cam fiber, silika parçacıklar gibi takviye bileşeni, diğeri takviye bileşeninin yayıldığı epoksi, vinil ester gibi matris bileşendir (Solidworks, 2016).



Şekil 5.23 Kompozit lamina (Tabaka) ve açıları (Jones, 1999)

Kompozit laminat, çeşitli ortotropik malzeme katmanlarından oluşan tek bir yüzey olarak modellenen özel bir ortotropik malzemedir (Solidworks, 2016). Şekil 5.23'te farklı açılarda yönlendirilmiş takviye elemanların oluşturduğu ortotropik malzeme özellikleri içeren kompozit laminaların bir araya gelerek kompozit laminatı oluşturduğu görülür.

Laminatlar, farklı yönlerdeki yük taşıma kapasitesini optimize etmeniz gereken durumlarda tabaka katlarının farklı açılarda yönlendirilerek karmaşık yük durumlarında mukavemeti artırılır. Laminatlar karmaşık dış yük koşullarına maruz kaldığı için bu tip bir yığmaya gerek duyulur. Tek yönlü laminalar genellikle sadece bir yöndeki yüklerin taşınması için uygundur. Bunlar genellikle kat oryantasyonunun enlemesine yönünde zayıftır (Solidworks, 2016).

5.3.2.1 Kompozit Tabakanın Mikro-Mekanik Analizi

Oluşturulacak kompozit ürünün özelliklerini deney yapmadan teorik hesaplamalarla belirleyebiliriz. Bunun için kompozit ürünü oluşturacak takviye ve matris malzemelerinin mekanik ve fiziksel özelliklerini bilmemiz gerekir. Tek yönlü (UD) bir tabakadan bir “temsili hacim elemanı” çıkarılarak, temel mukavemet yaklaşımı ile takviye ve matris malzemelerinin mekanik ve fiziksel özelliklerini kullanarak bağıntılar çıkarılmaktadır. Çıkarılan formüller ve tanımlar şunlardır:

v_f, v_m, v_b, v_k : fiber hacmi, matriks hacmi, boşluk hacmi, kompozit malzeme hacmi

ρ_f, ρ_m, ρ_k : fiber yoğunluğu, matriks yoğunluğu, kompozit malzeme yoğunluğu

w_f, w_m, w_k : fiber kütlesi, matriks kütlesi, kompozit malzeme kütlesi

V_f, V_m, V_b : fiber hacimsel oranı, matriks hacimsel oranı, boşluk hacimsel oranı

W_f, W_m : fiber kütle oranı, matriks kütle oranı

Kompozit bir malzemede fiber ve matriks hacimsel oranları şu şekilde ifade edilmektedir;

$$V_f = \frac{v_f}{v_k}, \quad V_m = \frac{v_m}{v_k}, \quad \text{ve} \quad V_f + V_m = \frac{v_f}{v_k} + \frac{v_m}{v_k} = 1 \quad (5.15)$$

Kütle oranları için benzer şekilde;

$$W_f = \frac{w_f}{w_k}, \quad W_m = \frac{w_m}{w_k}, \quad W_f + W_m = \frac{w_f}{w_k} + \frac{w_m}{w_k} = 1 \quad (5.16)$$

Fiber, matriks ve kompozit malzemenin kütlesi, hacim ve yoğunluk cinsinden şu şekildedir.

$$w_f = \rho_f v_f, \quad w_m = \rho_m v_m, \quad w_k = \rho_k v_k = \rho_f v_f + \rho_m v_m$$

$$v_k = v_f + v_m = \frac{w_f}{\rho_f} + \frac{w_m}{\rho_m} = \frac{1}{\rho_k} \quad (5.17)$$

Fiber ve matriks için hacimsel ve kütle oranları arasındaki ifade şu şekilde elde edilebilir:

$$W_f = \frac{w_f}{w_k} = \frac{\rho_f}{\rho_f v_f + \rho_m v_m} V_f \quad (5.18)$$

Matriks malzeme için de benzer bir ifade çıkarılabilir. Yani;

$$W_m = \frac{\rho_m}{\rho_k} V_m = \frac{\rho_m}{\rho_f v_f + \rho_m v_m} V_m \quad W_f + W_m = 1 \quad (5.19)$$

5.3.2.1.1 Mühendislik Sabitleri. Lif yönündeki Elastisite Modülü; E_1

$$E_1 = E_f V_f + E_m V_m \quad (5.20)$$

Liflere dik yöndeki Elastisite Modülü: E_2

$$\frac{1}{E_2} = \frac{V_f}{E_f} + \frac{V_m}{E_m} \quad (5.21)$$

Poisson Oranının (V_{12})

$$v_{12} = v_k = v_f \frac{h_f}{h_k} + v_m \frac{h_m}{h_k} = v_f V_f + v_m V_m \quad (5.22)$$

Kayma Modülünün (G_{12})

$$G_f = \frac{E_f}{2 \times (1 + v_f)} \quad G_m = \frac{E_m}{2 \times (1 + v_m)} \quad \frac{1}{G_{12}} = \frac{V_f}{G_f} + \frac{V_m}{G_m} \quad (5.23)$$

5.3.2.2 Teorik Hesaplamalar

Takviye ve matris elemanlarının mekanik ve fiziksel özellikleri kullanılarak yukarıdaki denklemlerle kompozit malzemenin mekanik ve fiziksel özellikleri teorik olarak hesaplanabilir. Aşağıda tablo 5.17’de takviye elemanın özellikleri ve 5.18’de matris elemanın özellikleri yer almaktadır. Karbon epoksi kompozit malzeme için hesaplamalar yapılmıştır.

Tablo 5.17 Takviye tipik özellikleri (Kaw, 2006)

Property	Units	Graphite	Glass	Aramid
Axial modulus	GPa	230	85	124
Transverse modulus	GPa	22	85	8
Axial Poisson's ratio	—	0.30	0.20	0.36
Transverse Poisson's ratio	—	0.35	0.20	0.37
Axial shear modulus	GPa	22	35.42	3
Axial coefficient of thermal expansion	$\mu\text{m}/\text{m}/^\circ\text{C}$	-1.3	5	-5.0
Transverse coefficient of thermal expansion	$\mu\text{m}/\text{m}/^\circ\text{C}$	7.0	5	4.1
Axial tensile strength	MPa	2067	1550	1379
Axial compressive strength	MPa	1999	1550	276
Transverse tensile strength	MPa	77	1550	7
Transverse compressive strength	MPa	42	1550	7
Shear strength	MPa	36	35	21
Specific gravity	—	1.8	2.5	1.4

Tablo 5.18 Matriks tipik özellikleri (Kaw, 2006)

Property	Units	Epoxy	Aluminum	Polyamide
Axial modulus	GPa	3.4	71	3.5
Transverse modulus	GPa	3.4	71	3.5
Axial Poisson's ratio	—	0.30	0.30	0.35
Transverse Poisson's ratio	—	0.30	0.30	0.35
Axial shear modulus	GPa	1.308	27	1.3
Coefficient of thermal expansion	$\mu\text{m}/\text{m}/^\circ\text{C}$	63	23	90
Coefficient of moisture expansion	$\text{m}/\text{m}/\text{kg}/\text{kg}$	0.33	0.00	0.33
Axial tensile strength	MPa	72	276	54
Axial compressive strength	MPa	102	276	108
Transverse tensile strength	MPa	72	276	54
Transverse compressive strength	MPa	102	276	108
Shear strength	MPa	34	138	54
Specific gravity	—	1.2	2.7	1.2

Karbon / epoksi için fiber tipine dayanan kütle oran değerleri % 55-67 fiberdir.

Tablo 5.17 ve 5.18'den fiber ve matriks için öz kütle değerleri alınır;

$$W_f = 0,65, \quad W_m = 0,35, \quad \rho_f = 1,8 \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3} = 1800 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}, \quad \rho_m = 1,2 \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3} = 1200 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Kompozit malzeme yoğunluğu denklem 5.17'den hesaplanır;

$$\rho_k = \frac{1}{\frac{W_f}{\rho_f} + \frac{W_m}{\rho_m}} = \frac{1}{\frac{0,65}{1800} + \frac{0,35}{1200}} = 1532,1 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Kompozit malzeme matriks hacimsel oranı denklem 5.19'dan çekilerek hesaplanır;

$$V_m = \frac{W_m \cdot \rho_k}{\rho_m}$$

$$V_m = \frac{0,35 \cdot 15321}{1200} = 0,446$$

Fiber hacimsel oran denklem 5.15'ten hesaplanır;

$$V_f = 1 - V_m$$

$$V_f = 1 - 0,446 = 0,55$$

Lif yönündeki elastisite modülü (E_1) tablo 5.17 ve 5.18 'den fiber ve matriks değerleri alınarak, denklem 5.20'e uygulanarak hesaplanır;

$$E_1 = E_f V_f + E_m V_m \longrightarrow 230 \times 0,55 + 3,4 \times 0,45 = 128,03 GPa$$

Liflere dik yöndeki elastisite modülü (E_2) tablo 5.17 ve 5.18 'den fiber ve matriks elastisite modülü değerleri alınarak, denklem 5.21'e uygulanarak hesaplanır;

$$\frac{1}{E_2} = \frac{V_f}{E_f} + \frac{V_m}{E_m} \longrightarrow \frac{1}{E_2} = \frac{0,55}{22} + \frac{0,45}{3,4} = 0,157 \longrightarrow E_2 = 6,36 GPa$$

Poisson Oranının (V_{12}) tablo 5.17 ve 5.18 'den fiber ve matriks poisson değerleri alınarak, denklem 5.22'e uygulanarak hesaplanır;

$$v_{12} = v_k = v_f V_f + v_m V_m \longrightarrow 0,35 \times 0,55 + 0,30 \times 0,45 = 0,3275$$

Kayma Modülünün (G_{12}) tablo 5.17 ve 5.18 'den fiber ve matriks 'den fiber ve matriks elastisite modülü ve poisson değerleri alınarak, denklem 5.23'e uygulanarak hesaplanır;

$$G_f = \frac{E_f}{2 \times (1 + v_f)}$$

$$G_f = \frac{230}{2 \times (1 + 0,30)} = 88,461 GPa$$

$$G_m = \frac{E_m}{2 \times (1 + \nu_m)} \quad G_m = \frac{3,4}{2 \times (1 + 0,30)} = 1,308 GPa$$

$$\frac{1}{G_{12}} = \frac{V_f}{G_f} + \frac{V_m}{G_m} \quad \frac{1}{G_{12}} = \frac{0,55}{88,46} + \frac{0,45}{1,308} = 0,350 \quad G_{12} = 2,85 GPa$$

Aşağıda hesaplanan kompozit malzemelerin özellikleri tablo 5.19’da gösterilmektedir.

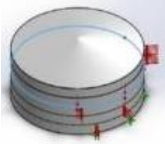
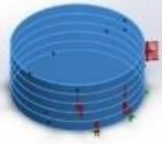
Tablo 5.19 Kompozit malzemelerin özellikleri

	Karbon -Epoksi
Fiber Hacimsel Oranı (V_f)	0,55
Yoğunluk (kg/m^3)	1530
Lif yönündeki Elastisite Modülü; E_1 (GPa)	128
Liflere dik yöndeki Elastisite Modülü: E_2 (GPa)	6,35
Poisson Oranının (ν_{12})	0,33
Kayma Modülünün G_{12} (GPa)	2,85

5.2.3.3 Malzeme Tanımlama

Tank ana yapısı daha önce yapılan analizlerdeki gibi izotropik malzeme olan çelik özelliklerinde tanımlanırken, güçlendirici halka bölüm 5.3.2.2’de teorik hesaplamalarla elde edilen ortotropik kompozit malzeme (karbon/epoksi) özelliklerinde tanımlandı. Kompozit sarımlarla oluşturulan kuşakla hibrit bir model oluşturuldu. Aşağıda tablo 5.20’de tank kabuk malzeme ve kuşak malzeme özellikleri görülmektedir.

Tablo 5.20 Tank kabuk malzeme ve kuşak malzeme özellikleri

		
	Karbon -Epoksi	Tank Kabuk Malzeme
Fiber Hacimsel Oranı (V_f)	0,55	
Yoğunluk (kg/m^3)	1530	7850

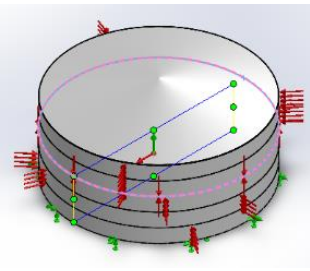
Tablo 5.20 devamı

Lif yönündeki Elastisite Modülü; E_1 (GPa)	128	206
Liflere dik yöndeki Elastisite Modülü: E_2 (GPa)	6,35	206
Poisson Oranının (ν_{12})	0,33	0,3
Kayma Modülünün G_{12} (GPa)	2,85	
Varsayılan başarısızlık kriteri:	Max Normal Stress	Max von Mises
Model tipi	Linear Elastic Orthotropic	Linear Elastic Isotropic

Çelik güçlendirici halka ile karşılaştırabilmek için geometrik olarak aynı model kullanıldı. Çelik halka için 0,016 m genişlik ve 0,050 m kalınlık geometrisinin en optimize yapı olduğu görülmüştü. Kompozit halka için 0,016 m genişlik veya kalınlık ve 0,050 m kalınlık veya genişlik modelleri farklı lamina açılarındaki oluşturularak karşılaştırılmıştır.

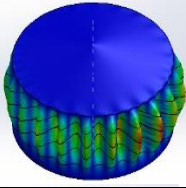
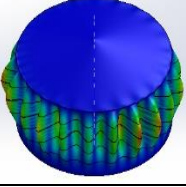
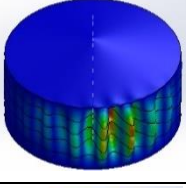
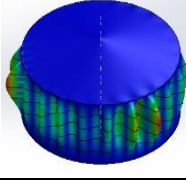
0,001 metre kalınlıkta 0 derece kat açılı tek yönlü laminadan (tabakadan) oluşturulan 16 adet laminanın oluşturduğu laminat tank çevresine sarılmıştır. Takviye laminat tankın tabandan 7,250 m yükseklikte tankın kabuk kalınlığı 0,0079 m olan kısmında kaynak yerine yerleştirilmiş olup tank malzemesi ilk başta oluşturulan izotropik malzeme olarak tanımlanırken, güçlendirme halkası 16 tabakalı karbon-epoksi ototropik malzeme ile kompozit yapıda oluşturulmuştur. Tablo 5.21’de halka konumu, lamina açıları ve fiziksel özellikleri görülmektedir

Tablo 5.21 halka konumu, lamina açıları ve fiziksel özellikleri

Halka Konumu	Kalınlık(mm)	Açı	Malzeme	Fiziksel Özellikler
	1 mm	0°	Karbon-epoksi	Kalınlık:16 mm Genişlik:50mm Ağırlık:1149,2N Hacim:0,076565 m ³ Kütle:117,144 kg Yoğunluk:1530 kg/m ³
	1 mm	0°	Karbon-epoksi	
	1 mm	0°	Karbon-epoksi	
	1 mm	0°	Karbon-epoksi	
	1 mm	0°	Karbon-epoksi	
	1 mm	0°	Karbon-epoksi	
	1 mm	0°	Karbon-epoksi	
	1 mm	0°	Karbon-epoksi	
	1 mm	0°	Karbon-epoksi	
	1 mm	0°	Karbon-epoksi	
	1 mm	0°	Karbon-epoksi	
	1 mm	0°	Karbon-epoksi	
	1 mm	0°	Karbon-epoksi	
	1 mm	0°	Karbon-epoksi	
	1 mm	0°	Karbon-epoksi	
	1 mm	0°	Karbon-epoksi	

Lamina açısı olarak 90° ve 0° derece olarak ve 0,016 metre genişlik veya kalınlık ile 0,05 metre kalınlık veya genişlik ile kompozit halkalı modellerin analiz sonuçları tablo 5.22’de yer almaktadır.

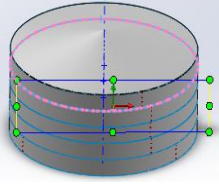
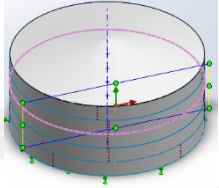
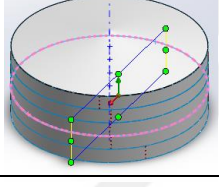
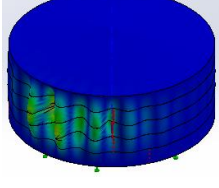
Tablo 5.22 Kompozit güçlendirme halkalı tank

Mod Şekli	Halka Genişliği m	Halka Kalınlığı m	Tabaka Açıları	Kompozit Halka Ağırlığı N	Tank Burkulma Kritik Yük kN/m ²	Maximum Yer Değiştirme mm
	0,05	0,016	0°	1149,2	2,68	22,16
	0,05	0,016	90°	1149,2	2,39	17,54
	0,016	0,05	0°	1149,2	4,37	35,38
	0,016	0,05	90°	1149,2	2,93	22,33

Kompozit malzeme ile modellenen güçlendirme halkasında maksimum kritik yükü, tabaka açısı 0° yani fiber yönünün tank çevresi boyunca uzanan modelde, halkanın tankın radyal yönündeki boyutunun 0,05 metre olduğu modelde meydana gelmiştir. Bu modelde kritik yük 4,37 kN/m² elde edilmiştir. Aynı geometrideki çelik halkalı model ise 4,78 kN/m²’dir. Aynı boyutlu çelik halka ile yakın kritik yük elde edilmiştir.

Çelik güçlendirme halkası ile yapılan analizlerde en yüksek burkulma kritik yük üç noktada halka ile güçlendirilen modeldir. Bu model ile kompozit güçlendirmenin farkları için aşağıda aynı şartlarda kompozit güçlendirmeli model sonuçları yer almaktadır.

Tablo 5.23 Üç halka ile güçlendirilmiş tank

	Halka Genişliği m	Halka Kalınlık m	Halka Ağırlık N	Halka Hacim m ³	Kritik Yük kN/m ²	Max. Yer Değiştirme mm
	0,016	0,05	1149,2	0,0765		
	0,016	0,05	1149,2	0,0765		
	0,016	0,05	1149,2	0,0765		
					5,99	51,11

Çelik güçlendirme halkası ile üç noktada güçlendirilen model ile aynı geometri ve konumda 0° fiber yönünde oluşturulan kompozit güçlendirmeli modelde kritik yük 5,99 kN/m² 'dir. Çelik halkalı modelde ise 7,15 kN/m² 'dir. Kritik yükte çelik halkalı model daha iyi sonuç vermiştir ancak halka ağırlıkları karşılaştırıldığında kompozit model yaklaşık 5 kat daha hafif olmaktadır.

BÖLÜM ALTI

SONUÇ

Bu tez çalışmasında büyük kapasiteli tankların tasarım kurallarına yer vererek, güçlendirici halkalarla sınırlandırılmış kademeli kabuk kalınlığındaki tanklar için dış basınç analizleri yapılmıştır. Kademeli depolama tankında çelik ve kompozit güçlendirme halkasının kuşak kalınlığı ve genişliği değiştirilerek kritik burkulma yükündeki farklar sonlu elemanlar yöntemi ile ortaya konulmuştur.

Kademeli tank modeli ilk olarak halkasız olarak analizi yapılmıştır. Analiz sonucu kritik yük, literatürde yer alan hesaplama yöntemlerinden analitik hesaplama karşılaştırıldığında farklar oluşmuştur. Bu farkın kademedan dolayı tankın alt kısmını oluşturan kabuk kalınlıkların daha kalın olması ve tankın üst kısmına sınırlayıcı etkisinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

Dış basınca karşı tank stabilitesini korumak ve dayanımını artırmak için çelik halka ile güçlendirilen modeller oluşturulmuştur. Tek halka ile güçlendirilmiş (halka şeklindeki plaka: 16 x 50 mm) tankta kritik yük, halkasız modelin kritik yükünün yaklaşık iki katı kadar bir değer elde edilmiştir.

Yapılan analizler sonucu güçlendirme halkalarında, halka kalınlığının (güçlendirme halkasının veya tankın radyal yönündeki artırımı) halka genişliğine (güçlendirme halkasının veya tankın eksenel yönündeki artırımı) göre kritik yüke etkisinin daha fazla olduğu görüldü. Şekil 5.22’de grafikler incelendiğinde, güçlendirme halkasının genişliğinin belli bir noktadan sonra kritik yüke etkisinin olmadığı görüldü. Bu genişliğin ilk grafik hariç diğer grafiklerde 0,013 metreden sonra (ilk grafikte 0,016 metreden sonra) kritik yüke etkisinin olmadığı ve burkulma kritik yükün sabit kaldığı görüldü. Bu sonucun A.P. Carman deneyleri sonucu vardığı “çökme basıncının sabit olduğu her tüp için minimum bir uzunluk olduğunu belirten ve kritik minimum uzunluktan daha az uzunluklar için, çökme basıncının hızla arttığını açıkladığı” yargının doğruluğunu göstermektedir.

Farklı halka kalınlık ve genişlikteki halka ile güçlendirilmiş modellerin analizinin yer aldığı tablolar ve grafikler incelendiğinde, modeller için burkulma kritik yük açısından en optimum halka geometrisi 0,05 metre kalınlığı ve 0,016 metre genişliğidir. Bu modelin mod şekli incelendiğinde, halka stabilitesini koruyarak tankın en zayıf noktasının burkulduğu görüldü. Bu boyutlarda halkanın tam bir sınırlayıcı eleman gibi davrandığı görüldü. Aynı boyutlarda ancak halka genişliğinin 0,05 metre, kalınlığının 0,016 metre olduğu durumda kritik yükün halkasız modele göre fazla artmadığı ve yer değiştirmeye tankın bütününe katılarak, halkanın tank için sınırlayıcı etkisinin az olduğu görüldü. Bu durum güçlendirme halkasının tankın radyal yönündeki boyutlarının, eksenine göre burkulma yüküne etkisinin daha fazla olduğunu gösterdi.

En optimum halka ile (0,05 metre kalınlık ve 0,016 genişlik) iki ve üç halkalı güçlendirilmiş tank modelleri oluşturulmuştur. Yapılan modellerde kritik yükün en yüksek çıktığı model üç halkalı modeldir. Üç halkanın kullanıldığı tank modelinde yapılan analizde burkulma yükü halkasız tank modelinin yaklaşık üç katı burkulma yükü elde edilmiştir.

Kompozit tabakanın mikro-mekanik analizi yapılarak kompozit halka modelinin malzeme özellikleri bulunmuştur. Çevresi kompozit kuşak ile sarılarak güçlendirilmiş tank modeli, çelik halka modelinin en optimum çözümü olan 0,05 metre kalınlık - 0,016 metre genişlik geometrisinde halkanın fiber yönü 0° olarak oluşturulan modelde en yüksek burkulma kritik yük değeri elde edilmiştir. Bu model ile aynı geometrideki çelik halka modeli, kritik burkulma yükü yönünden birbirine yakın değerler çıkmıştır. Ancak kompozit halka ile oluşturulan tank modeli ile çelik model ağırlık olarak karşılaştırıldığında, kompozit halkanın ağırlığı çelik halkanın ağırlığının beşte biridir.

Tez kapsamında kompozit halka ile kademeli üretilecek depolama tankları ile daha hafif ve dayanımı yüksek tanklar üretilebileceği görüldü. Kompozit malzeme ile oluşturulan güçlendirme halkalı tank modelin, çelik modele göre farklı yönlerdeki yükleri karşılama ve ağırlık yönünden en uygun çözüm olarak önerilmektedir. Sismik zemin hareketine maruz yüksek kapasiteli depolama tanklarında oluşan konvektif ve

implusif yükler tank kabuğunda farklı yönlerde yüklere neden olmaktadır. Analizlerle dış basınca karşı güçlendirme halkaların etkili bir çözüm olduğu görüldüğünden, dış basınca neden olan farklı yönlerdeki sismik yüklere karşı kompozit güçlendirme halkaları önerilmektedir.

Malzeme maliyeti, nakliye, üretim, tank ağırlığı, iç basınç vb. sebeplerden dolayı yüksek kapasiteli depolama tankları kademeli olarak üretilmektedir. Bu tez kapsamında yapılan çalışmalar ile kademeli olarak üretilen depolama tanklarının dış basınca karşı dayanımını artırmak için mutlaka güçlendirme halkalarının düşünülmesi gerektiği önerilmektedir. Yapılan analizler göstermektedir ki güçlendirme halkalarının geometrisinin burkulma yüküne etkisi yüksektir. Güçlendirme halkalarının radyal yöndeki boyutunun burkulma yüküne etkisinin yüksek olduğundan, halka tasarımında halkanın radyal yönündeki boyutunun dikkate alınması önerilmektedir. Her tank geometrisi (farklı kademeli tanklar) için optimum güçlendirme halkası geometrisinin analizlerle belirlenmesi tavsiye edilir.

KAYNAKLAR

- A. Burgos, C., Batista Abreu, J. C., Calabro, H., Jaca, R., ve Godoy, L.(2015). Buckling estimates for oil storage tanks: Effect of simplified modeling of the roof and wind girder. *Thin-Walled Structures*, 91 (1), 29-37.
- Akbulut, U. (2011). *Düdüklü tencereden buhar makinesine*. 15 Mayıs 2019, <http://www.uralakbulut.com.tr/wp-content/uploads/2009/11/D%C3%9CD%C3%9CKL%C3%9C-TENCEREDEN-BUHAR-MAK%C4%B0NES%C4%B0NE.doc> MAYIS-2011.pdf
- American Petroleum Institute [API 575]. (2013). *Inspection practices for atmospheric and low-pressure storage tanks draft*. Washington, D.C. : API Publishing Services
- American Petroleum Institute [API 650]. (2007). *API Standard 650: Welded steel tanks for oil storage* (11. Baskı.). Washington, D.C. : API Publishing Services
- Avrupa komisyonu Entegre Kirlilik Önlenme ve Kontrolü Bürosu [IPPC]. (2006). *Depolamadan kaynaklanan emisyonlar konusunda mevcut en uygun tekniklere ilişkin referans belge*. 15 Kasım 2018, <http://www.cygm.gov.tr/CYGM/Files/Guncelbelgeler/HYD/Depolamadan%20kaynaklanan%20emisyonlara%20ili%C5%9Fkin%20mevcut%20en%20iyi%20te.pdf>
- Beşergil, B. (2016). *Akışkanların depolanması ve sanayideki kaplar*. 11 Haziran 2018, http://besergil.cbu.edu.tr/8_akiskanlarin_depolanmasi.pdf.
- Bryant, G. (1888). Application of the energy test to the collapse of long thin pipe under external pressure. *Proceeding of Cambridge Philosophical Society*, 6, 287-292.
- Carman, A. P. (1917). The collapse of short thin tubes. *University of Illinois. Engineering Experiment Station Bulletin No:99*, 14 (41), 5-37

- Cook, G. (1914). VII. The collapse of short tubes by external pressure. *Philosophical Magazine Series 6*, 28 (163), 51-56.
- Fairbairn, W. (1858). On the resistance of tubes to collapse. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 148 (1), 389-413.
- Greiner, R. (1975). Beulberechnung von Kreiszyinderschalen unter Außendruck. *Sonderheft der DFVLR, Schalenbeultagung in Braunschweig 1975* (106-133).
- Greiner, R. (2004). Cylindrical shells under uniform external pressure. J. Teng ve J. Rotter (Ed), *Buckling of thin metal shells* (1. Baskı) içinde (154-174). London: Spon Press.
- Harvey, J. F. (1985). General theory of membrane stresses in vessels under internal pressure. *Theory of design of pressure vessels* (1. Baskı) içinde (42-49). New York: Van Nostrand Reinhold Company Inc.
- Jain, S. K., ve Jaiswal, O. R. (2007). *Indian Institute of Technology Kanpur [IITK]-Gujarat State Disaster Management Authority [GSDMA] Guidelies for Seismic Design of Liquid Storage Tanks, Provisions with Commentary and Explanatory Examples*. Indian: National Information Center of Earthquake Engineering [NICEE].
- Jones, R. M. (1999). *Mechanics of composite materials* (2. Baskı). Philadelphia, USA: Taylor ve Francis, Inc.
- Kaw, A. K. (2006). *Mechanics of composite materials* (2. Baskı). New York: Taylor ve Francis Group.
- Kuan, S. Y. (2009). *Design, construction and operation of the floating roof tank*. Araştırma projesi, University of Southern Queensland Faculty of Engineering and Surveying, Mechanical Engineering, Australia.

- Leslie, S. D. (2015). *Alternative construction details for extended life of welded steel storage tank roofs*. Awwa Ca-Nv Section Fall Conference. Las Vegas. 20 Ocak 2017, [https://ca-nv-awwa.org/CANV/downloads/2015/AFC15presentations/Tank Roofs.pdf](https://ca-nv-awwa.org/CANV/downloads/2015/AFC15presentations/Tank%20Roofs.pdf).
- Maekawa, A. (2012). Recent Advances in Seismic Response Analysis of Cylindrical Liquid Storage Tanks. A. Moustafa (Ed.), *Earthquake-Resistant Structures - Design, Assessment and Rehabilitation* içinde (308-310). Shanghai: InTech.
- Megyesy, E. F. (1973). *Pressure vessel handbook* (10 baskı). Oklahoma: Pressure vessel publishing, inc.
- Mises, R. V. (1914). The critical external pressure of cylindrical tubes. *Vereiniger Deutscher Ingenieur Zeitschrift*, 58 (19), 750-755.
- Mises, R. V. (1914). The critical external pressure of cylindrical tubes. *Zeltschrlft des Vereines Deutscher Ingenieurs* 58 (19), 750. (D. F. Windenburg, Çev.) Washington, D.C. : U.S. Experimental Model Basin, Navy Yard.
- Mises, R. V. (1929). The critical external pressure for cylindrical tubes. *Stodola's Festschrift*, 58 (19), 418-430.
- Moss, D. R. (2004). *Pressure vessel pressure vessel: Illustrated procedures for solving major pressure major pressure problems* (3. Baskı). Oxford, UK: Elsevier.
- Nasıl temin edilir?, (b.t.). 31 Aralık 2018, <http://www.ipragaz.com.tr/lng-nasil-temin-edilir.asp>.
- Resinger, F. ve Greiner, R. (1974). Zum Beulverhalten von Kreiszyinderschalen mit abge stufter Wanddicke unter Manteldruck. *Stahlbau*, 43, 182-187.

Solidworks. (2017). *Kabuk meshine genel bakış*. 13 Mart 2018, http://help.solidworks.com/2017/turkish/SolidWorks/cworks/c_Shell_Mesh.htm

Southwell, R. V. (1913). V. On the general theory of elastic stability. *Royal Society*, 213, 497-508.

Southwell, R.V. (1915). LX. On the collapse of tubes by external pressure- III. *Philosophical Magazine Series* 6, 29 (169), 67-77.

T.C. İçişleri Bakanlığı Afet Ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı (AFAD). (2018). *Yeni deprem tehlike haritası yayımlandı*. 19 Şubat 2019, <https://www.afad.gov.tr/tr/26539/Yeni-Deprem-Tehlike-Haritasi-Yayimlandi>

The Architectural Institute Of Japan [AIJ]. (2010). *Design recommendation for storage tanks and their supports with emphasis on seismic design*. Japan: The Architectural Institute Of Japan.

Ventsel, E. ve Krauthammer, T. (2001). *Thin plates and shells theory, analysis, and applications*. New York, Basel: Marcel Dekker Inc.

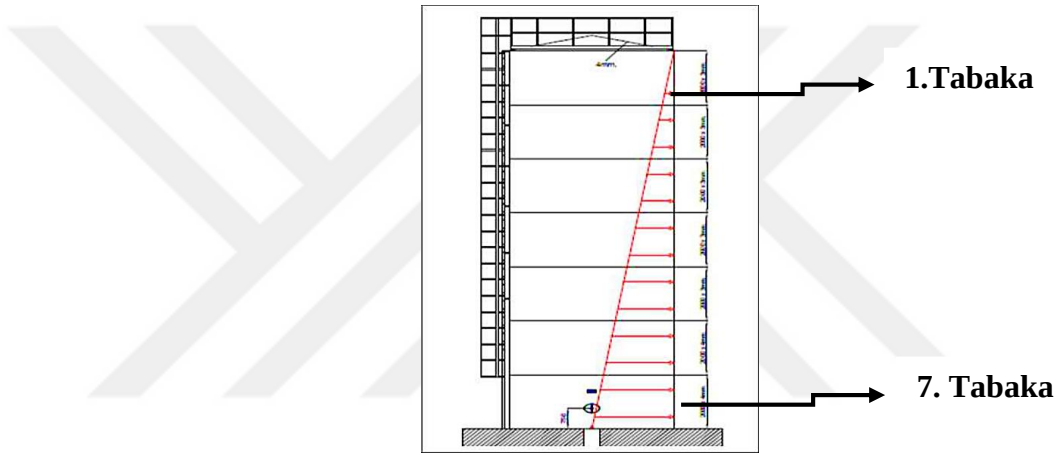
Windenburg, D. F., ve Trilling, C. (1934). Collapse by instability of thin cylindrical shells under external pressure. *Transactions of the America Society Mechanical Engineers*, 56(11), 1-7.

Yazıcı, G., ve Çılı, F. (2005). Silindirik depolarının sismik yalıtım yöntemiyle depremden korunması. *Deprem sempozyumu*, 23-25.

EKLER

EK 1: Tank Kabuk Kalınlığının Hesaplanması

Silindirik kaplarda oluşan gerilmeler; su basıncından ve tankın ağırlığından dolayı oluşan gerilmelerdir. Tank içerisinde yer alan sudan dolayı oluşan hidrostatik basınç silindirik kap cidarında teğetsel gerilmeye neden olurken, su basıncı silindirik kabın atmosferik kap olması nedeniyle eksenel yönde gerilmeye ise sebep olmamaktadır. Tank ağırlığından oluşan yük ise cidarda bası gerilmesine neden olmaktadır.



Şekil A.1 Tank duvarına etki eden sıvı basıncı ve tabaka dizilişi

Kapalı kaplarda analizi başlamadan önce tasarım bölüm 2.1’de yer alan tasarım parametreleri belirlenmelidir. Tasarım parametreleri belirlendikten sonra bölüm 1.5 ve 2.4 bağlı olarak iç basınca bağlı kabuk kalınlıkları belirlenmelidir. Belirlenen ve seçimi yapılan kabuk kalınlıklarının bölüm 1.5 göre doğrulanması yapılmalıdır. Kabuk kalınlıkları belirlendikten sonra dış basınca neden olan deprem ve rüzgâr yüklerinin bölüm 3 ve 4’e göre kontrolü yapılmalıdır.

Aşağıda 250 m³ hacminde su depolama tankının tasarımı gösterilmektedir. 14 metre yüksekliğinde ve 4,8 metre çapında ebatlarındaki paslanmaz çelik tankın tasarım parametreleri ve kabuk kalınlığı seçimi aşağıda yer almaktadır.

Tablo A.1 Tank kabuk kalınlığının hesaplanması

DEPOLAMA TANKI TASARIM HESAPLAMASI				
1.0 TASARIM KODU VE ÖZELLİKLERİ				
TASARIM KODU				
1.1 TANK				
Ürün numarası				
Çatı (Açık / Kapalı)		Kapalı		
Çatı tipi (Koni-çatı / Kubbe-çatı / Düz çatı)		Konik		
Konik çatının eğim açısı (tank duvarı ile yaptığı açı)		13		derece
1.2 TASARIM VERİLERİ				
A-) ÜRÜN				Birim
Çalışma sıvısının özgül ağırlığı (Gerçek),		1		
Çalışma sıvısının özgül ağırlığı (Tasarım),		1		
γ = İçerilen sıvının yoğunluğu		1000		kg/m^3
Hl = Depolanan sıvının derinliği		14		m
Wl= Depolanan içeriğin ağırlığı		2483986,176		N
p = Alt plakaya uygulanan statik basınç		137340		N/m^2
g = Yerçekimi ivmesi = 9.8 (m/s^2)		9,81		m/s^2
B-)TANK GEOMETRİĞİ				Birim
D = Silindirik tankın çapı		4,8		m
H =Yapının yüksekliği (m)		15,5		m
V=Nominal kapasite		253,2096		m^3
1.3 BASINÇ VE SICAKLIK				
Tasarım basıncı : Üst, Pu		Atmosferik		
: Alt, Pl				
Tasarım sıcaklığı : Üst, Tu (cantigrad oC)		40		Derece
: Alt, Tl				
1.4 MALZEME VE MEKANİK ÖZELLİKLER				
Malzeme		304l		
E = Tank alt plakası ve duvar plakası elastisite modülü		1,94E+11		Pa
ν = Poisson oranı		0,3		
$\gamma \sigma$ = Alt plakanın ve duvar plakasının akma dayanımı		170000000		Pa
Çekme gerilmesi		485000000		Pa
Sy= Akma gerilmesi (Tablo 2.4)		170000000		Pa
St =Hidrostatik test koşulu için izin verilen stres (Tablo 2.4)		155000000		Pa
Sd=Maksimum tasarım sıcaklığı aşılmaması için izin verilen gerilme (Tablo 2.4)		145000000		Pa
γm = Malzemenin yoğunluğu		7900		kg/m^3
Konik Çatı	Çap	=	4806	Çevre
	Konik açısı	=	13	Çap
	Yarı çap	=	28,0	Yarı çap
	Etek payı	=	10	Sac kalınlığı
	Konik açılımı	=		4983
Alt plaka	Çap	=	4810	Çevre
	Konik açısı	=	0	Çap
	Yarı çap	=	30,0	Yarı çap
	Etek payı	=	10	Sac kalınlığı
	Konik açılımı	=		4864
mb = Taban plaka kütlesi		734,0160343		kg
mr = Çatı kütlesi		462,2002269		kg
mw = Tank duvarı plaka kütlesi		6671,03808		kg
M = Toplam tank kütlesi		7967,254341		kg

Tablo A.1 devamı

2 KABUK TASARIMI						
Adım Metodu ile Kalınlık Hesabı						
Alt kabuk kalınlıklarının hesaplanması					Birim	
D = Tankın nominal çapı				4,8		m
H= Dizayn sıvı seviyesi				14		m
G= Depolanacak sıvının özgül ağırlığı				1		
E = Bağlantı verimliliği, 1.0, 0.85 veya 0.70				1		
CA = Alıcı tarafından belirlendiği şekilde korozyon payı (mm)				2		mm
Sd = Tasarım koşulu için izin verilen gerilme (bkz. Tablo 2.4)				145		MPa
St = Hidrostatik test koşulu için izin verilen gerilme (bkz. Tablo 2.4)				155		MPa
td = Tasarım kabuk kalınlığı				4,222234483		mm
th = Hidrostatik test kabuk kalınlığı				2,078864516		mm
BS (BRITISH STANDARD) 2654 ile Kalınlık Hesabı						
					Birim	
D = Tankın nominal çapı				4,8		m
S = Tasarım gerilmesi				145		MPa
w = Depolanacak sıvının yoğunluğu, [g / ml], (w 1.0'dan küçük olmamalıdır)				1		
H= Dizayn Sıvı Seviyesi				14		m
p = Tasarım basıncı				0		mbar
c = Korozyon payı				2		mm
t =Minimum kabuk kalınlığı				4,222234483		mm
Kabuk Kalınlığının Hesaplanması						
Alt kabuk kalınlıkları					Birim	
t1d= Tasarım koşulu için alt tabaka kalınlıkları				4,390311984		mm
t1h =Hidrostatik test koşulu için alt tabaka kalınlıkları				2,236614908		mm
Elastik Analiz ile Kurs Kalınlığının Hesaplanması						
	Yükseklik	Birim	Basınc	Birim	Kalınlık	Birim
1. Kabuk tabaka	2	m	19620	pa	0,000324745	m
2. Kabuk tabaka	4	m	39240	pa	0,00064949	m
3. Kabuk tabaka	6	m	58860	pa	0,000974234	m
4. Kabuk tabaka	8	m	78480	pa	0,001298979	m
5. Kabuk tabaka	10	m	98100	pa	0,001623724	m
6. Kabuk tabaka	12	m	117720	pa	0,001948469	m
7. Kabuk tabaka	14	m	137340	pa	0,002273214	m
Kalınlık Secimi						
t0 = Alt kabuk					0,005	m
t1/3 = Tabandan yüksekliğin üçte biri kadar yukarıdaki kabuğun kalınlığı					0,005	m
t=Alt taban plakanın kalınlığı					0,005	m

Tank cidar kalınlığı yukarıda yapılan hesaplamalar göz önüne alındığında tabandaki saç kalınlığı 0,005 m olarak imal edilmiştir. Tank tabanından üstte doğru saca etkiyen basıncın azalmasından dolayı sacda oluşan gerilme değerinde de azalma olacaktır. Bu nedenle üst kısımlarda 0,003 m kalınlığında imal edilebileceği öngörülmüştür. Bu öngörüye bağlı olarak aşağıda tüm aşamalardaki gerilme değerleri verilmiştir.

Tablo A.2 Tank Kabuk kalınlığının kontrolü

Elastik Analizle Alt Plakasının Teğetsel Gerilmesinin Hesaplanması		
Elastik Analiz		Birim
γ = İçerdiği sıvının yoğunluğu	1000	kg/m ³
g = Yerçekimi ivmesi	9,81	m/s ²
Hl = Depolanan sıvının derinliği	14	m
$\rho g h$ = Hidrostatik basınç	137340	N
σ_2 = Teğetsel gerilme	65923200	N/m ²
Sd =Tasarım koşulu için izin verilen gerilme (Tablo2.4)	145000000	N/m ²

Elastik Analizle Kabuk Tabakalarının Teğetsel Gerilmesinin Hesaplanması									
	Kalınlık	Birim	Yükseklik	Ağırlık	Birim	Basınç	Birim	Teğetsel gerilme	Birim
1. Kabuk tabaka	0,003	m	2	714,75408	kg	19620	Pa	15696000	Pa
2. Kabuk tabaka	0,003	m	4	714,75408	kg	39240	Pa	31392000	Pa
3. Kabuk tabaka	0,003	m	6	714,75408	kg	58860	Pa	47088000	Pa
4. Kabuk tabaka	0,004	m	8	953,00544	kg	78480	Pa	47088000	Pa
5. Kabuk tabaka	0,005	m	10	1191,2568	kg	98100	Pa	47088000	Pa
6. Kabuk tabaka	0,005	m	12	1191,2568	kg	117720	Pa	56505600	Pa
7. Kabuk tabaka	0,005	m	14	1191,2568	kg	137340	Pa	65923200	Pa

Tank Ağırlığı (Ölü Yük) Nedeniyle Oluşan Bası Gerilmesinin Hesaplanması		
Tank Ağırlığının Oluşturduğu Yük (Ölü Yük)		Birim
M =Yapının kütlesi	7967,254341	kg
W = Tankın veya tank bileşeninin ağırlığı	78158,76509	N
A = Kesit alanı	0,0754385	m ²
σ_b = Ölü yük nedeniyle oluşan bası gerilmesi	-1036059,374	N/m ²
	-1,036059374	MPa

Maksimum Kayma Gerilmesi Kriteri		
σ_a = Su basıncı nedeniyle oluşan teğetsel gerilme (σ_2)	65,9232	MPa
σ_b = Ölü yük nedeniyle oluşan bası gerilmesi	-1,036059374	MPa
σ_y = Kayma gerilmesi	145	MPa
$(\sigma_a - \sigma_b)/2$	33,47962969	
Güvenlik oranı	2,165495875	
Su Basıncı ve Ölü Yüke Bağlı Maksimum Kesme Ölçütüne Göre, Bu Depolama Tankı Güvenlidir		

EK 2: Tank Deprem Kapasitesinin Hesaplanması

Aşağıda ek 1’de kabuk kalınlıkları belirlenen 250 m³ kapasiteli depolama tankının deprem kapasitesi hesabı yer almaktadır.

Tablo A.3 Tank deprem kapasitesinin hesaplanması

3 SİLİNDİRİK DEPOLAMA TANKLARININ DEPREM TASARIMLARI		
3.1 Tank Boyutu		
Tank kütlesi		Birim
$m_t = \text{Efektif k\u00fctle (} m_r + m_w + m_f \text{)}$	241417,2293	kg
$m_f = \text{İmpulsif k\u00fctle}$	234283,991	kg
$m_s = \text{Konvektif k\u00fctle}$	19967,38558	kg
$m_l = \text{İ\u00e7erdi\u011fi sıvının toplam k\u00fctlesi}$	253209,6	kg
$m_0 = \text{Tankın toplam k\u00fctlesi (} m_l + m_w + m_r \text{)}$	260342,8383	kg
$A_0 = \text{Yapının alt alanı}$	18,0864	m ²
Tank Ankraj Sistemi		Ankraj=1
Ankraj		Birim
$\sigma = \text{Ankraj elemanın akma gerilmesi}$	225000000	Pa
$P_i = \text{Tankın i\u00e7 basıncı}$	137340	N/m ²
$l_a = \text{Ankraj civatasının veya ankraj elemanın etkin uzunlu\u011fu}$	1	m
$E = \text{Elastisite mod\u00fcl\u00fc}$	2,1E+11	pa
$d = \text{Ankraj elemanın \u00e7apı}$	0,03	m
$N = \text{Ankraj elemanın sayısı}$	20	
$A_a = \text{Ankraj elemanın kesit alanı}$	0,01413	m ²
$e A_a$	0,011830013	m ²
3.2 Tasarım \u00d6zellikleri		
		Birim
$Y_r = \text{Tank taban plakasının (annular plate) akma gerilmesinin \u00e7eki gerilmesine oranı}$	2,852941176	
$Z_s = \text{Sismik B\u00f6lge Fakt\u00f6r\u00fc (\u00e7ekil 3.6)}$	0,4	1.degree
$Z_{\text{Zemin sınıfı (Tablo 3.1)}}$	3	
$\alpha_h = \text{a_h de\u011feri (Tablo 3.3)}$	1	
$I = \text{\u00d6nem fakt\u00f6r\u00fc I (Tablo 3.4)}$	1,2	
$T_G = \text{Kritik periyod (Tablo 3.1)}$	1,28	
$S_v = \text{Hız tepki spektrumu}$	0,19042127	
$S_{a1} = 1. \text{Do\u011fal periyoda ba\u011flı spektral tepki ivmesi (m/s^2)}$	9,8	
$S_B = \text{maksimum taban kaldırma deformasyonu}$	1135626,647	
$S_{sv} = \text{\u00c7alkalanma i\u00e7in hız tepki spektrumu}$	2,113459473	m/s
$I S_{a1}$	5,797619397	

Tablo A.3 devamı

3.3 İmpulsif Kütlenin Titreşimi İçin Sismik Yük Dizaynı		
(i) Modifiye Sismik Katsayısı Yöntemi		Birim
a_{qy} = Birim çevresel uzunluk için tank taban bağlantı elemanlarının akma kuvveti	46129,5	
$a_y \delta$ = Hook kanundan tank taban- zemin bağlantı elemanı deformasyonu	0,001071429	
a_{kl} = Birim çevresel uzunluk için bağlantı bantlarının yay sabiti	43054200	N/m ²
K_1 = Tankın yatay doğrultudaki hareketin tanımlandığı bir serbestlik dereceli sistemin yay sabiti	147884323,5	
T_1 = Tank tabanını ve tank taban-zemin bağlantı elemanını deforme eden tank doğal periyod	0,025734955	s
λ_{is}	0,154965278	s
T_f = Tank tabanının kalkmaksızın tank duvarının deformasyonuna bağlı doğal periyodu	0,11932123	s
T_e = Tank tabanı, bağlantı elemanı ve tank duvarını deforme eden modifiye edilmiş doğal periyod	0,122064917	s
T_s = Çalkalanmaya karşılık doğal periyod	2,289306107	s
h = Sönüm oranı	0,025261767	
D_s = Yapı karakteristik katsayısı	0,570179036	
İmpulsif kütlenin titreşimi için sismik yük dizaynı Q_{dw}	647510,5062	N
3.3.1 Burkulmaya Karşı Silindirik Kabuğun Dizaynı		
Kısa Süreli Yükleme Karşı İzin Verilebilir Gerilme		
(1) Sismik yüke karşı izin verilebilir eksenel bası gerilmesi		Birim
σ_h = İç basınçtan kaynaklanan teğetsel gerilme	69623260,04	N/m ²
F = Akma dayanımı	170000000	N/m ²
E/F	1235,294118	
σ_h/F = İç basınçtan kaynaklanan teğetsel gerilmenin (σ_h) akma dayanımına (F) oranı ve	0,409548588	
r/t = Silindirik kabın iç yarıçapının (r) silindirik kap duvar kalınlığa (t) oranı	480	
l/r		
c_{fcr} = İzin verilebilir eksenel bası gerilmesi	82990540,41	N/m ²
f_{cr0} = Filin ayak tümseği tipi burkulma dayanımı hesaplanması için basit değer	140554394,1	N/m ²
ϕ_{fcr} = İç basınç hariç kısa süreli yükleme karşı izin verilebilir eksenel bası gerilmesi	86128727,49	N/m ²
$\sigma_{cr,e}$ = Eksenel simetri elastik burkulma gerilmesi	195690235,6	N/m ²
$c \sigma_{cr,e}$ = NASA tarafından sınırlandırılmış, eksenel simetri elastik burkulma gerilmesi	86128727,49	N/m ²
(2) Sismik devrilme momentine karşı izin verilen eğilme gerilimi		
$\phi_b f_{cr}$ = İç basınç hariç uzun süreli devrilme momente karşı izin verilebilir eğilme gerilmesi	111107568,1	N/m ²
$b \sigma_{cr,e}$ = NASA tarafından sınırlandırılmış, elastik eğilme burkulma gerilmesi	119406326,1	N/m ²
b_{fcr} = İzin verilebilir eksenel eğilme gerilmesi	82990540,41	N/m ²
Uzun Süreli Yükleme Karşı İzin Verilebilir Gerilme		
(1) Sismik yüke karşı izin verilebilir eksenel bası gerilmesi		
c_{fcr} = İzin verilebilir eksenel bası gerilmesi	49565086	N/m ²
f_{cr0} = Filin ayak tümseği tipi burkulma dayanımı hesaplanması için basit değer	83944394,12	N/m ²
ϕ_{fcr} = İç basınç dışındaki uzun süreli yüke karşı izin verilen eksenel basınç	38279434,44	N/m ²
(2) Sismik devrilme momentine karşı izin verilen eğilme gerilimi		
$\phi_b f_{cr}$ = İç basınç hariç sismik devrilme momente karşı izin verilebilir eğilme gerilmesi	54599568,07	N/m ²
$b \sigma_{cr,e}$ = NASA tarafından sınırlandırılmış, elastik eğilme burkulma gerilmesi	119406326,1	N/m ²
b_{fcr} = İzin verilebilir eksenel eğilme gerilmesi	49565086	N/m ²

Tablo A.3 devamı

Deprem Kapasitesinin Değerlendirilmesi		
$e Q_y =$ Depo tankının implusif kütle titreşimindeki akma kesme kuvveti	1218344,245	N
$Q_{dw} < e Q_y$	DOĞRU	
$e Q_y > Q_{dw}$ Olduğu İçin Taban Kalkmaya Karşı GÜVENLİDİR.		
Ankraj Sistem Kapasitesinin Kontrolü		
Ankrajlı tanklar için yapı karakteristik katsayısı (Ds)	0,220431714	
$Q_{dw} =$ İmpusif kütle titreşiminin kesilme kuvveti tasarımı	250328,1287	N
$a Q_y =$ ankraj sistemine göre modifiye edilmiş akma kesme kuvveti	270882,0094	N
$Q_{dw} < a Q_y$	DOĞRU	
$a Q_y > Q_{dw}$ Olduğu İçin Tank Ankraj Sistemi GÜVENLİDİR.		
Konvektif Kütlenin Kontrolü		
$Q_{ds} =$ Konvektif kütle titreşiminin kesilme kuvveti tasarımı	46305,32078	N
Burkulma için akma kesme kuvveti tasarımı , $s Q_{y1}$	536071,4679	
Taban kalkma için akma kesme kuvveti tasarımı, $s Q_{y2}$	119188,0841	
$Q_{ds} < s Q_{y1}$	DOĞRU	
$Q_{ds} < s Q_{y2}$	DOĞRU	
$s Q_{y1} > Q_{ds}$ Olduğu İçin Burkulmaya Karşı GÜVENLİDİR.		
$s Q_{y2} > Q_{ds}$ Olduğu İçin Taban Kaldırmaya Karşı GÜVENLİDİR.		
Toplam taban kesme V		
	254574,851	N
3.4 Taban Moment		
$a h_i =$ İmpulsif mod için yatay sismik katsayının tasarımı	0,105699366	
$a h_c =$ Konvektif mod için yatay sismik katsayının tasarımı	0,236396306	
h/d	2,916666667	
$h_c =$ Konvektif sıvı kütlesi yüksekliği (şekil 3.3)	12,69570906	m
$h_i =$ İmpulsif sıvı kütlesi yüksekliği (şekil 3.3)	6,55	m
$h_c' =$ duvar ve tabandaki konvektif basıncın olduğu yükseklik (şekil 3.3)	12,69576651	m
$h_i' =$ duvar ve tabandaki impulsif basıncın olduğu yükseklik (şekil 3.3)	6,3	
h_s Yapısal iskele (ayak) yüksekliği, temelin üstünden tank duvarının tabanına ölçülen	0,5	
$h_r =$ Çatı kütlelerinin ağırlık merkezinin yüksekliği	14	m
$h_w =$ Duvar kütlesi ağırlık merkezi yüksekliği	7	m
$h_{cg} =$ tank boş iken iskele tabanından ağırlık merkezine uzaklığına ölçülen yükseklik	7	
$M_c =$ Konvektif modda duvarında en alt bölgedeki eğilme momenti	587878,8805	Nm
$M_c' =$ Konvektif modda devrilme momenti	588113,0675	Nm
$M_i =$ İmpulsif modda, duvarında en alt bölgedeki eğilme momenti	1646332,505	Nm
$M_i' =$ İmpulsif modda devrilme momenti	1646332,505	Nm
$M =$ Tank duvarının tabanındaki toplam eğilme momenti	1748145,387	Nm
$M^* =$ Tabandaki toplam devirme momenti	1748224,155	Nm
Maksimum Kayma Gerilmesi Kriteri		
$\sigma_a =$ Su basıncı nedeniyle oluşan teğetsel gerilme (σ_2)	65,9232	MPa
$\sigma_b =$ Maksimum devrilme momentine bağlı tank taban kabuğunda oluşana eğilme gerilmesi	-19,39156312	MPa
$\sigma_y =$ Akma gerilmesi	145	MPa
$(\sigma_a - \sigma_b)/2$	42,65738156	
Güvenlik oranı	1,699588614	
Maksimum Kayma Gerilmesine Ölçütüne Göre, Devrilme Momentine Ve Su Basıncına Bağlı Olarak Bu Depolama Tankı GÜVENLİDİR.		

Tablo A.4 Hidrodinamik basınç hesaplanması

3.5 Hidrodinamik Basınç		
İmpulsif Hidrodinamik Basınç		Birim
ϕ = Çevresel açı	0	degress
y = Tank duvarındaki bir noktanın, tank duvarı tabanından dikey mesafesi	0	
$Q_{iw}(y)$ = Duvar üzerindeki impulsif hidrodinamik basınç katsayısı	0,249829075	
Duvar tabanında impulsif basınç ($Y = 0$)		
P_{iw} = Duvar üzerindeki yanal hidrodinamik impulsif basınç	3626,706468	N
Tabandaki impulsif hidrodinamik basınç ($Y = 0$)		
x = Deponun tabanındaki bir noktanın deprem merkezinden itibaren sismik kuvvet yönündeki yatay mesafesi	2,4	
taban plakasında ($y = 0$) uzunluk şeritte l'	4,8	
P_{ib} = Dikey doğrultudaki impulsif kuvveti	1631,742782	Pa
$\Phi = 0$ 'da maksimum basınç oluşacaktır. Duvarın tabanında $y = 0$;		
$Q_{cw}(y)$ = Duvar üzerindeki konvektif hidrodinamik basınç katsayısı	7,91956E-06	
Duvar tabanında konvektif basınç		
P_{cw} = Titreşimli sıvı tarafından tank duvarı ve tabanına uygulanan konvektif basınç	0,058770658	Pa
Taban plakasında konvektif hidrodinamik basınç ($y = 0$)		
$Q_{cb}(x)$	1,66452E-05	
P_{cb} = Taban döşemesinde ($y = 0$) dikey yöndeki konvektif basınç	0,185284543	Pa
Duvar Ataletinden Kaynaklanan Basınç		
p_{ww}	40,95797599	Pa
Dikey Uyarmalara Bağlı Basınç		
Düşey zemin ivmesi nedeniyle tank duvarındaki hidrodinamik basınç, $= p_v$	9668,156156	
Maksimum Hidrodinamik Basınç		
	10340,45482	Pa

EK 3: Tank Rüzgâr Tasarım Hesabı

Aşağıda ek 1’de kabuk kalınlıkları, ek 2’de deprem kapasitesi belirlenen 250 m³ kapasiteli depolama tankının rüzgâr tasarım hesabı yer almaktadır.

Tablo A.5 Tank rüzgâr tasarım hesabı

4 Asce Göre Rüzgar Tasarımının Hesaplanması							Birim	
Yapı kategorisi (Tablo 4.2)				2				
Arazi kategorisi (Tablo 4.3)				d				
V=Temel rüzgar hızı, m/s				45		m/s		
Efektif çap, De (Tablo 4.6)				6,72		m		
Cf = Kuvvet katsayısı, şekil faktörü 0,7 ila 0,9				0,7				
Önem faktörü I (Tablo 4.1)				1				
β =Yapı, sönümlleme katsayısı, kritik sönümün% 1'i				0,01				
a. If h/D < 4, T < 1 saniye, yada f > 1 Hz,				3,229166667				
f = Temel doğal frekans, 1/T, saniyedeki döngüler, Hz				8,192362113				
T = Titreşim süresi, sn				0,122064917		sn		
w=ağırlık,(her ft’ deki ağırlık)				3800		kg/m		
t = Kabuk kalınlığı				0,005		m		
D = Kabuk çapı, ft				4,8		m		
I = Kabuk bölgesinin atalet momenti				25,16228398				
K = 1.79 Temel titreşim dönemi için				1,79				
g = 32.2 ft başına sec2 = yerçekimi				9,81		m/s^2		
Katsayılar, faktörler (Tablo 4.5)			a	b	c	l	E	Zmin
			0,111	0,8	0,15	650	0,125	7
gv,gq = 3.5 tank için				3,5				
h = Tank yüksekliği, , ft				15,5		m		
Iz = Z yüksekliğinde türbülans yoğunluğu				0,151972702				
z = Eşdeğer yükseklik, ft				9,3		m		
zmin = Minimum tasarım yüksekliği, ft, (Tablo 5.4)				2,1336		m		
Lz								
Q^2 = Arka plan yanıtı				0,862264446				
Vref = Dönüştürülen temel rüzgar hızı ft/sec				66,015		m/s		
Vz = Z yükseklikte ortalama saatlik rüzgar hızı, ft/sec				52,35398338		m/s		
N1,Nh,Nb,Nd = Hesaplama faktörleri			N1	Nh	Nb	Nd		
			45,1	16,3848873	7,10364148	23,78175626		
Rn,Rh,Rd = Hesaplama faktörleri			Rn	Rh	Rb	Rd		
			0,01	0,05916941	0,130864376	0,041164978		
R^2 = Rezonans cevap faktörü					0,005120967			
gr					4,141672189			
G = Rüzgar etki faktörü, Kategori A ve B = 0,8 Kategori C ve D = 0,85					0,893630246			
Gf= Esnek tanklar için rüzgar etki faktörü					0,895322713			
Hız basınca maruz kalma katsayısı Kz (Tablo 4.4)								
Kzt = Topografik faktör, izole edilmiş tepelerin üzerine veya yanına verleştirilmedikçe 1.0 kullanın. Özel gereksinimler için ASCE'ye bakınız.					1			
qz = Z yüksekliğinde hız basıncı, PSF = 0.00256 KzKztV^2*I								
Af= projeksiyon alanı, sq ft								
F = Tasarım rüzgar kuvveti, lb								
M =Temelde devirme momenti, ft-lb								

Tablo A.5 devamı

Tanktaki rüzgar kuvvetini belirleme											
Elevation		qz	Gf	Cf	hz(ft)	Af(ft²)	Af(m²)	F(lb)	F(N)	M(ft-lb)	M(Nm)
0-15	0-4,6	26,64914328	0,89363025	0,7	15	330,7	30,9	5512,9585	24533	41347,1885	56425,13
15-20	6,1	27,94279101	0,89363025	0,7	5	110,2	33,1	1926,8593	8574,5	33720,0372	45873,7
20-25	7,6	28,97770919	0,89363025	0,7	5	110,2	33,1	1998,2244	8892,1	44960,0496	60910,88
25-30	9,1	30,01262738	0,89363025	0,7	5	110,2	33,1	2069,5896	9209,7	56913,7136	76900,78
30-35	10,7	30,78881602	0,89363025	0,7	5	110,2	33,1	2123,1135	9447,9	69001,1873	93061,37
35-40	12,2	31,56500466	0,89363025	0,7	5	110,2	33,1	2176,6373	9686	81623,8997	109936,5
40-46	14	32,21182852	0,89363025	0,7	5	110,2	44,1	2221,2405	9884,5	94402,7233	129487,2
				0,7	45	992,1	240	18028,623	80227	421968,799	572595,6

Maksimum Kayma Gerilmesi Kriteri		
σ_a = Su basıncı nedeniyle oluşan teğetsel gerilme (σ_2)	65,9232	MPa
σ_b = Rüzgar nedeniyle duvarın alt noktasındaki maksimum dönme momentine bağlı eğilme	-6,35160178	MPa
σ_y = Akma gerilmesi	145	MPa
$(\sigma_a - \sigma_b)/2$	36,13740089	
Güveklilik Oranı	2,006231722	
Maksimum Kesme Ölçütüne Göre, Su Basıncı Ve Rüzgar Yüküne Bağlı Olarak Bu Depolama Tankı GÜVENLİDİR.		