

**T.C.
SÜLEYMAN DEMİREL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**HİDRODİNAMİK ETKİ ALTINDAKİ SİLO TİPİ ÇELİK YAPILARIN
SIVI ÇALKANTISINA BAĞLI YAPISAL DAVRANIŞIN İNCELENMESİ**

Mehmet Erkan EFE

**Danışman
Dr. Öğr. Üyesi İlyas Devran ÇELİK**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ISPARTA - 2020**



©2020 [Mehmet Erkan EFE]

TEZ ONAYI

Mehmet Erkan EFE tarafından hazırlanan "Hidrodinamik Etki Altındaki Silo Tipi Çelik Yapıların Sıvı Çalkantısına Bağlı Yapısal Davranışın İncelenmesi" adlı tez çalışması aşağıdaki jüri üyeleri önünde Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak başarı ile savunulmuştur.

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi İlyas Devran ÇELİK
Süleyman Demirel Üniversitesi

Jüri Üyesi

Dr. Öğr. Üyesi Mustafa SİVRİ
Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi

Jüri Üyesi

Dr. Öğr. Üyesi Hakan DİLMAÇ
Süleyman Demirel Üniversitesi

Enstitü Müdürü

Doç. Dr. Şule Sultan UĞUR

TAAHHÜTNAME

Bu tezin akademik ve etik kurallara uygun olarak yazıldığını ve kullanılan tüm literatür bilgilerinin referans gösterilerek tezde yer aldığını beyan ederim.

Mehmet Erkan EFE



İÇİNDEKİLER

	Sayfa
İÇİNDEKİLER.....	i
ÖZET.....	ii
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR.....	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ	v
ÇİZELGELER DİZİNİ	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	viii
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Silonun Kullanım Alanları	7
2. KAYNAK ÖZETLERİ.....	9
3. MATERYAL VE YÖNTEM	44
4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA.....	54
4.1. Sayısal Modellerin Sonuçlarının Değerlendirilmesi.....	58
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	72
KAYNAKLAR	75
ÖZGEÇMİŞ.....	78

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

HİDRODİNAMİK ETKİ ALTINDAKİ SİLO TİPİ ÇELİK YAPILARIN SIVI ÇALKANTISINA BAĞLI YAPISAL DAVRANIŞIN İNCELENMESİ

Mehmet Erkan EFE

Süleyman Demirel Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi İlyas Devran ÇELİK

Silolar dışarıdan veya içeriden gelebilecek her türlü etkiye karşı, doluluk oranlarına göre farklı reaksiyonlar gösterebilen ince kesitli narin yapılardır. Silo yapıları farklı depolama ihtiyaçları için farklı malzemelerden ve büyüklüklerde üretilebilmektedirler.

Büyük çaplı silolarda yapının ağırlığının büyük kısmı depolanan materyal olmaktadır. Taşıyıcı sistem ağırlığına kıyasla boyutları ile öne çıkmaktadır. Büyük çaplı silolarda boyutsal parametreler göz önüne alındığında dış etkenlerden başlıca rüzgâr gibi çevresel etkenler yapıya büyük bir yük etkitemektedir. Öte yandan depolanan materyalin tipi ve karakteristik özellikleri, içsel etkileri tümüyle başka bir boyuta sürüklemektedir. Bu durumlardan, başlıca sorun teşkil eden bir tanesi sıvı depolanmasında meydana gelebilecek dinamik bir yük olan çalkantı durumudur.

Bu tez çalışması kapsamında silindirik çelik sıvı depolama siloları ele alınmıştır. Üç farklı çap boyutunda aynı sıvı miktarı ve silo yüksekliği için oluşturulan farklı kombinasyonlarda levhalara sahip on dört sayısal model oluşturulup dinamik ve statik yükler altında analizleri yapılmıştır. Analiz sonuçları karşılaştırmalı olarak incelenmiş olup levha etkinliklerinin kombinasyonlar arasında ve çap farklılıklarına göre değişimi yorumlanmıştır. Bu tez çalışması kapsamında sayısal modellerin yanı sıra bir deneysel model oluşturularak sayısal modellerin davranışının doğrulanması amaçlanmıştır. Deneysel modelden farklı su seviyeleri için dinamik etki altında okumalar alınmıştır. Deneysel sonuçlar silo modeli davranışı için incelenmiştir ve farklı su seviyeleri için karşılaştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Silo Yapıları, Silolarda Deprem ve Rüzgâr yükleri, Silolarda Doluluk Oranının Taşıma Gücüne etkisi, Doğrusal Olmayan Analiz, Sonlu Elemanlar Modeli ile Analiz

2020, 77 sayfa

ABSTRACT

M.S. Thesis

INVESTIGATION OF STRUCTURAL BEHAVIOR OF CYLINDRICAL STEEL SILO STRUCTURES UNDER HYDRODYNAMIC EXCITATION DUE TO LIQUID SLOSHING

Mehmet Erkan EFE

**Süleyman Demirel University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Civil Engineering**

Supervisor: Asst. Prof. Dr. İlyas Devran ÇELİK

Silos are slender structures with thin sections that can react differently according to the fullness ratios against any impact that may come from inside or outside. Silo structures can be manufactured in a variety of materials and sizes for different storage needs.

In large diameter silos, most of the weight of the structure is the stored material. The load carrying system stands out with its dimensions rather than its weight. Considering the dimensional parameters of large diameter silos, external factors such as wind affects the structure highly. On the other hand, the type and characteristics of the stored material changes the internal loading conditions drastically. One of the main problems of these situations is the sloshing, which is a dynamic load that can occur in fluid storage.

In this thesis, cylindrical steel liquid storage silos are discussed. Fourteen numerical models with different plate combinations created for three different diameter sizes are created with the consideration of same amount of stored liquid and silo height for all models. Created models are analyzed under dynamic and static loads. The results of the analysis are examined comparatively, and the variation of plate efficiency between combinations and diameter differences are interpreted. Within the scope of this thesis, in order to verify the behavior of numerical models, an experimental model is created in addition to numerical models. Dynamic experiments are carried out for different water levels for the experimental model. Experimental results are examined for silo model behavior and compared for different water levels.

Keywords: Silo Structures, Wind and Quake Loads in Silos, Effects of Fullness Ratio of Silo Structures on load Carrying Efficiency, Nonlinear Analysis, Finite Element Model Analysis

2020, 77 pages

TEŞEKKÜR

Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Yapı programında Yüksek Lisans Tezi olarak hazırlanan bu çalışmanın gerçekleştirilmesinde katkılarını esirgemeyerek kendi zamanından paylaşan danışman hocam Sn. Dr. Öğr. Üyesi İlyas Devran ÇELİK'e teşekkürlerimi sunarım.

Sayısal modellerin hazırlanmasında Öğr. Gör. Yusuf Öztürk, hocama teşekkür ederim.

Tezin hazırlanmasında yardımlarını esirgemeyen değerli Kılıç Yasin ARSLAN, Tefik Burak KOCAMAN, Yılmaz Can DİBET, Gözde UZUN ve Adem BARLAS arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Tezimin her aşamasında yanımda bulunan olan ve her türlü desteği veren aileme sonsuz sevgilerimi sunarım.

Mehmet Erkan EFE
ISPARTA, 2020

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 1.1. Silo üst kısmında oluşan akış problemlerinden kaynaklanan hasar	6
Şekil 1.2. 2500 ton kapasiteli silonun göçmesi sonucu bitişik ambarlara hasar vermesi.....	6
Şekil 1.3. Çakışma bölgesinde uniform olmayan yerleşme durumu	7
Şekil 1.4. Zemin probleminden kaynaklanan gömülme: (a) gömülmeden öncesi; (b)gömülme sonrası	7
Şekil 1.5. Kule tipi silo yapıları, genel görünüm a) Kule tipi beton silo b) Kule tipi çelik silo	8
Şekil 1.6. Konik Tabanlı Çelik Silo	8
Şekil 2.1. Sıvı dolu tankın tek derece serbestlikli sistem modeli	9
Şekil 2.2. Deneysel Model	11
Şekil 2.3. Silonun Geometrisi.....	12
Şekil 2.4. Hesaplanan güçlendirme alanları	13
Şekil 2.5. Silonun modellemiş oldukları etab modeli.....	14
Şekil 2.6. Sonlu elemanlar analizinden orta büyüklükte, kum ile doldurulmuş bir silo için hesaplanan yerdeğiştirme: a) Eurocode da verilen yüklerin tesiri ve b) hipoplastik ana model ile açıklanan katı ile doldurulmuş model.....	16
Şekil 2.7. Baraj kırılma düzeneği ve basınç ve su seviyesi ölçüm yerleri.....	18
Şekil 2.8. Baraj kırılma akışı simülasyonundan 0.5 saniye aralıklarla alınmış olan görüntüler	19
Şekil 2.9. Bölge tanımlamaları (a ve b) 3D bölge tanımlaması ve analiz başlangıç durumu (c) 750.000 çokyüzlü elemente sahip mesh.....	19
Şekil 2.10. Buhar jeneratörleri arasında akış sıkışması ve ivmelenmesi.....	20
Şekil 2.11 İki buhar jeneratörü arasındaki ince baffle	21
Şekil 2.12. Dalganın altüst olması ve bafflein diğer tarafındaki suya sıçramasının görüntüleri.....	21
Şekil 2.13. Sarsma levhası üzerinde 1 numaralı tank.....	23
Şekil 2.14. Serbest taban durumunda 1 numaralı tankın almış olduğu hasar	24
Şekil 2.15. Sıvı depolama tanklarında çalkantı etkisini temsil eden mekanik model	25
Şekil 2.16. Deforme olabilir yatay silindirik tanklarda sloshing etkisini temsil eden mekanik model.....	26
Şekil 2.17. Yükseltilmiş Küresel tank tasarım örneği	26
Şekil 2.18. Özdeş sıvı depolama yapıları.....	28
Şekil 2.19. Modeller a) sonlu eleman modeli b) mekanik model c) basit model d) maksimum deplasman değer için yükseklik boyunca yanal deplasman dağılımı	29
Şekil 2.20. Sonlu eleman modeline ait 2 farklı bağımsız burkulma durumu a) birinci durum b) ikinci durum	31
Şekil 2.21. Doğrusal olmayan analiz sonuçları a) birinci sonuç b) ikinci sonuç..	31
Şekil 2.22. Sonlu eleman Modeli	33
Şekil 2.23. Deney düzeneği	33
Şekil 2.24. Deneysel düzenek yerleşimi	34
Şekil 2.25. Yatay yüklemenin uygulanışı Yukarıdan görünüş(Sol) Önden görünüş(Sağ).....	34

Şekil 2.26. Silo modeli ve taneli malzemenin sonlu eleman görünümü	36
Şekil 2.27. Rüzgar, kısmi vakum ve deprem etkisi altında oluşmuş tank hasarları a) rüzgar burkulması b) kısmi vakum hasarı c) tankın temelden ayrılması d) sismik etki sonucu fil ayağı oluşumu	37
Şekil 2.28. Eksenel basınç altında metal silo burkulma hasar durumları a) düzgün sıkışma b) asimetrik sıkışma c) eksantrik boşaltım d) eksantrik boşaltım kaynaklı burkulma	38
Şekil 2.29. Çalışmanın genel görünümü a) teorik çalışma b) titreşim testleri c) sismik tasarım	39
Şekil 2.30. Zemine oturtulmuş tankların sismik davranışı.....	40
Şekil 2.31. Tank temel sisteminde hidrodinamik yüklerin görünümü	41
Şekil 2.32. Silindirik çelik sıvı depolama tankı dinamik modeli.....	43
Şekil 3.1. Rijitleştirme levhalarının boyutsal parametreleri.....	44
Şekil 3.2. Deneysel modelin genel görünümü.....	46
Şekil 3.3. Gerinim pullarının yerleşim düzeni	47
Şekil 3.4. S4 numaralı gerinim pulu okumaları.....	48
Şekil 3.5. Dinamik ve statik su basıncının etkimesi a) hidrostatik basınç durumu b) hidrodinamik basınç durumu	50
Şekil 3.6. Dinamik ve statik yük yukarıdan görünüm a) statik dağılım b) dinamik dağılım.....	51
Şekil 3.7. Devrilme etkisi a) duvar basıncı etkisi b) taban basıncı etkisi.....	51
Şekil 3.8 Sıvı içinde konvektif ve impulsif ivmesel hareketler a) konvektif hareket b) impulsif hareket	52
Şekil 3.9 Taban basınçları a) sıvının statik etkisi b) sıvının dinamik etkisi.....	52
Şekil 3.10. Deneysel model genel görünüm.....	53
Şekil 4.1. S1 serisine ait deformasyon durumları	55
Şekil 4.2. S2 serisi deformasyon görüntüleri.....	57
Şekil 4.3. S3 serisi deformasyon görüntüleri.....	57
Şekil 4.4. 12.5 m çap modelleri için grafikler a) duvar gerilmeleri b) levha gerilmeleri c) deformasyon değerleri	59
Şekil 4.5. 17.5 m çap modelleri grafikleri a) duvar gerilmeleri b) levha gerilmeleri c) deformasyon değerleri	62
Şekil 4.6. 25 m çap modelleri için grafikler a) duvar gerilmeleri b) levha gerilmeleri c) deformasyon değerleri	64
Şekil 4.7. S12, S22, S32 modellerine ait grafikler a) duvar gerilmeleri, b) levha gerilmeleri, c) deformasyon değerleri.....	66
Şekil 4.8. S13, S23, S33 modellerine ait grafikler a) duvar gerilmeleri, b) levha gerilmeleri, c) deformasyon değerleri.....	68
Şekil 4.9. S15, S25, S35 modellerine ait grafikler a) duvar gerilmeleri, b) levha gerilmeleri, c) deformasyon değerleri.....	69
Şekil 4.10. S16, S26, S36 modellerine ait grafikler a) duvar gerilmeleri, b) levha gerilmeleri, c) deformasyon değerleri.....	70

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 3.1. Model parametreleri.....	45
Çizelge 3.2. Yapı çeliği malzeme özellikleri	53
Çizelge 4.1. Doğal titreşim periyotları	55



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

A	Birim uzunluk başına gelen alan
C_D	Sürüklenme katsayısı
C_M	Atalet katsayısı
cm	Santimetre
Dk	Duvar kalınlığı
DLg	Düşey levha genişliği
DLk	Düşey levha kalınlığı
F	Eleman boyuna eksenine normal olarak etki eden birim uzunluk başına gelen hidrodinamik kuvvet
F_D	Birim uzunluk başına çekme kuvvetidir
F_I	Birim uzunluk başına atalet kuvvetidir
g	Yerçekim ivmesi
h	Yükseklik
Hz	Hertz
km	Kilometre
m	Metre
mm	Milimetre
MPa	Mega pascal
P	Suyun özgül ağırlığı
sn	Saniye
U	Elemanın eksenine normal etki eden su parçacık hızı bileşeni
V	Birim uzunluk başına yer değiştirme hacmi
YLg	Yatay levha genişliği
YLk	Yatay levha kalınlığı

1. GİRİŞ

Sıvı depolama tankları hayatın ve endüstriyel alanlarda önemli bir yer tutmaktadırlar. Kentsel su depolaması ve yangın karşıtı sistemlerde kritik bir öneme sahiptirler. Pek çok endüstriyel alanda kimyasalların ve diğer sıvıların depolanmasında yer almaktadırlar. Depolama tanklarının deprem etkisi altındaki davranışının incelenmesinde dikkat edilmesi gereken üç konu yapı, zemin, depolanan malzeme ve bunların birbirleri ile olan etkileşimleridir. Sismik tasarımın temel performans hedefi tankta oluşabilecek devasa göçmeleri önlemek ve yaşamın korunmasıdır (API-650, 2016).

Silolar 19.yüzyılın ikinci yarısında Avrupa'da genellikle zeminde kuyu açılması ile oluşturularak kullanılmaya başlanmıştır. Daha sonraları yerüstü depolamalarına ve çeşitli şekillerde geometrilere sahip tanklarda silo depolamalarına yer verilmiştir (Mysilo, 2001).

Silolar farklı tip boyut ve geometrilere tekil veya grup halinde inşa edilebilmektedirler. Çelik silolarda gerilme dağılımlarına dayalı olarak genellikle çekme gerilmelerine yönelik çembersel geometriler tercih edilmektedir. (Rotter, 2001)

Silolar endüstriyel, tarımsal ve sanayi alanlarında depolama amaçlı kullanılmaktadır, bu sebeple siloların yerleşimlerinde üretim ve ulaşım faktörleri ön plana çıkmaktadır (Kıvrak, 1987).

Endüstriyel alanda sıkça yer bulmakta olan silo tipi yapılar sıvı ve katı materyal depolanmasında kullanılmaktadır. Bu yapıların geometrileri ve taşıyıcı sistem tasarımları depolanması planlanan materyale göre değişiklik gösterebilmektedir.

Silo içerisinde depolanan ürünlerin çelik malzeme olan silo duvarı üzerinde aşındırıcı etkileri bulunabilmektedir. Bu gibi durumların zaman içerisinde silo yapısına vereceği zarardan korunmak için siloda kullanılan çelik malzeme kaplanabilmektedir (Ozel, 2007)

Depolanan materyal yapıda yatay, dikey ve hidrostatik basınç etkileri oluşturmaktadır. Tank içerisinde meydana gelebilecek etkilerin en önemlilerinden biri sıvı çalkantısıdır. Sıvı çalkantısı, hava veya deniz taşıtlarındaki yakıt veya sıvı tankları, dinamik etki altındaki sıvı depolama tankları gibi çeşitli dinamik sistemlerde mühendislik problemleri oluşturabilmektedir. Bu sistemlerin dinamik davranışı genellikle sıvı serbest yüzeyinin dinamiğine bağlı olmaktadır. Bu sebeple, bu tür sistemlerin güvenliği insan hayatı, çevre ve taşımacılık açısından önem taşımaktadır. Tam dolu olmayan tanklarda, tankın hareket periyodu tankın doğal titreşim periyoduna yaklaştığında, çalkalanma etkisi başlamaktadır. Bu sebeple, çalkalanma hareketinin başlayacağı periyot değerlerinin belirlenmesi önemlidir. Depolama tanklarında çalkantı hareketinin periyotlarında büyük yapısal yükler meydana gelebilmektedir. Çalkantı hareketi serbest sıvı yüzeyinin bulunduğu her tankta meydana gelebilir. Tankın şekli ve dağılıma bağlı olarak serbest sıvı yüzeyi; simetrik, asimetrik, rasgele çarpışmalar, yarı periyodik ve kaotik gibi birçok şekli alabilir. Çalkantı hareketinin genliği tank hareketinin frekansına ve genliğine, sıvı derinliğine, sıvının mekanik özelliklerine ve tank geometrisine göre değişkenlik gösterebilmektedir (Akyildiz, vd., 2012)

Özel (2007), Silolarda doluluk oranı burkulmada önemli bir etken olmakla beraber doluluk arttıkça dolu gövde etkisi artmakta ve içeri doğru olan burkulmalara karşı silo dayanıklılık kazanmaktadır. Çelik silolar malzeme özelliklerinden kaynaklı olarak gün içindeki sıcaklık farklılıkları sebebi ile genişip büzüşebilir. Bu durum, kohezyonsuz malzeme depolanması durumunda duvarlarda ek gerilmeye yol açabilmektedir. Bu durumun tekrarlı oluşumu "termal genişleme" olarak adlandırılan bir probleme dönüşebilmektedir. Kohezyona sahip olan sıvı depolamalarında bu problemin önemi azalmaktadır.

Tank içerisindeki sıvı hareketinin sonsuz sayıda doğal frekansı bulunmaktadır ama birkaç tank hareketinin mod frekansları sıvının bu doğal frekansına

ulaşması için yeterlidir. Ancak non-lineer etkiler doğal frekanstan farklı değerlerde oluşmakta ve hareketin genliğine bağlıdır. Meydana gelen zorlamanın frekans ve şekli, sıvı serbest yüzeyinin dinamik davranışını etkilemektedir. Bu kapsamda tank hareketinin periyodunun, sıvı doğal çalkantı periyoduna yaklaştığı durumlarda büyük çalkantı genlikleri beklenebilmektedir. Bu durumda bu iki periyot birbirlerine yeterince yaklaşırlarsa çalkantı hareketi başlayacaktır. Serbest sallanma hareketi altında, serbest sıvı yüzeyinin hareketi viskozite kuvvetlerince bozulmaktadır. Sönüm oranı esasen; sıvı yüksekliğine, sıvının kinematik viskozitesine ve tank boyutlarına bağlı olabilmektedir (Akyildiz ve Unal, 2014; Biswal, vd., 2006; Raouf, 2005).

Bu tür yapılar için gerçekleştirilen deneyler; tank içindeki çalkantı hareketinin tank hareketinin, sıvı derinliği ve yoğunluğunun, tank şeklinin bir fonksiyonuna bağlı olduğunu göstermiştir. Ayrıca tank içindeki çalkantı hareketi son yıllarda birçok çalışmada merak konusu olmuştur (Brar ve Singh, 2014; Akyildiz ve Unal, 2005; Sanapala, vd., 2018; Akyildiz ve Unal, 2006; Armenio ve La Rocca, 1996).

Ayrıca, perdeler ile çalkantı hareketinin kontrolü son yıllarda ilgilenilen konulardan biridir. Problemin non-lineer olan doğası analitik ve sayısal bir çözüm üretilmesi konusunda zorluklar çıkartmaktadır. Bu sebeple bazı varsayımlarda bulunmak gerekmektedir. Bu durum ise elde edilen verileri gerçek durum ve sonuçlardan biraz uzaklaştırmaktadır. Bu sebepten dolayı deneysel çözümler çalkantı hareketinin incelenmesinde büyük bir rol oynamaktadır. Bu şartlar altında bazı araştırmacılar deneysel çalışmalar ve özellikler sunmuşlardır (Akyildiz, vd., 2012).

Dogangun, vd. (2009) çalışmalarında siloların hasar ve göçme durumlarını incelemiştir. Bu kapsamda silolar, alışılmışın dışında birçok farklı yükleme koşullarına maruz kalan ve bunun sonucunda sıra dışı göçme modlarının gözlenebildiği özel yapılardır.

Silolarda meydana gelebilecek hasarın yol açabilecekleri; saklama yapısının kaybı, saklanan materyalin kirlenmesi, saklanan materyalin kaybı, temizleme ve

yenileme maliyetleri, çevreye gelebilecek zararlar ve olası can kaybı ve yaralanmalar gibi sonuçlar olmak üzere yüksek maliyetlere sahiptir.

Makalelerinde dünyanın farklı bölgelerindeki silolarda meydana gelmiş hasar ve göçmeler, fotoğraflarla sunulmuştur. Ayrıca yazılarında, meydana gelen yaygın hasar türleri ve bazı şaşırtıcı hasar ve göçme durumları incelenmiş ve tartışılmıştır. Bunlardan bazıları; patlama ve aniden açılma durumları, yükleme ve boşaltma aşamalarında meydana gelen asimetric yüklerden kaynaklanan, silo metalinin korozyona uğraması, büyük ve üniform olmayan toprak basıncı, betonarme siloların silaj asidine maruz kalarak bozulması, ısınma-soğuma döngüsünün etkileridir. Deprem kaynaklı oluşan hasar ve göçme durumlarını da ayrıca sunmuşlardır.

Silo tipi yapılar; kullanım çeşitliliği ve geometrilerine göre farklılaşmaktadır ve genellikle yığın katıların depolanmasında kullanılırlar. Kullanım şekli ve Geometrilerine bağlı isimlendirmeleri değişebilmektedir. Uzun, silindirik ve genellikle tahıl veya çimento depolanması için kullanılan yapılar, silo olarak adlandırılmaktadır. Yazılarında kimya, madencilik, elektrik santralleri, tarım ve yiyecek işleme tesisleri gibi yerlerde kullanılan silolarda meydana gelen hasar ve göçme durumları incelenmiştir.

Silolar genellikle çelik veya betonarme kullanılarak, radye temel üzerine yapılan çembersel yapılardır. Bazı durumlarda yükseltip profil veya betonarme kolonlarla desteklenerek de inşa edilebilirler. Siloların dizaynında başlıca depolanacak materyalin özellikleri ele alınmaktadır. Depolanan yığın katıların yoğunlukları, akışkanlıkları ve sürtünme gibi özellikleri depolanan materyale göre çok fazla değişkenlik göstermesi sebebi ile silolar için, etkiyen yükler ve taşıyıcı sistem diğer yapı tiplerine göre farklı olmaktadır. Bunun sonucunda silolar, özel yapılar olarak dizayn edilir ve değerlendirilir.

Duvar yüksekliği boyunca oluşan basınç ve kesme kuvvetlerinin büyüklükleri ve dağılımları, depolanan materyalin özelliklerine ve silonun doldurulma aşamasında veya boşaltım aşamasında olmasına bağlıdır. Ayrıca tasarım aşamasında deprem, rüzgâr, silo yüzeyi ve depolanan malzeme arasındaki

sıcaklık farkı, depolanan içeriğin potansiyel şişmesi gibi durumlardan kaynaklanabilecek gerilmelere karşı dikkat edilmelidir.

Silolarda hasar, yükler ve göçme durumları ayrıyeten incelenmiştir. Hasar ve göçme durumlarına, silolarda diğer yapı tiplerine göre daha çok karşılaşılmaktadır. İstatistiği elimizde bulunmamasına rağmen, biliniyor ki endüstriyel veya çiftlik alanlarda kullanılan yüzlerce silo tipi yapılarda, her yıl küçük veya büyük dereceli bir hasar meydana gelmektedir. Silolarda meydana gelen göçme durumları ve oluşan hasarların başlıca sebepleri literatürde incelenmiştir.

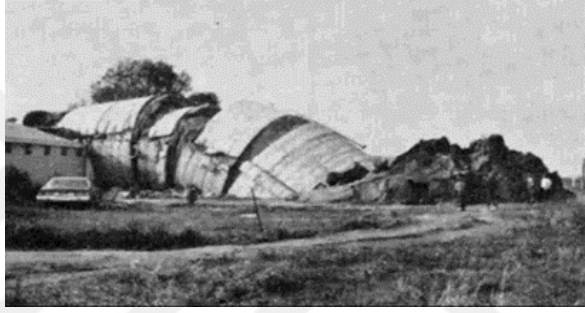
Silolarda depolama koşulları göz önünde bulundurularak, patlama ve açılma durumları incelenmiştir. İçsel patlamalar veya açılma durumları en çok silo tipi yapılarda görülmektedir. Bazı silolar, depolanan otsu materyalin fermantasyonu sonucu oluşan metan patlamalarına maruz kalmaktadır. Açılma ve patlama durumları en çok silolarda görünmesine rağmen oldukça nadir gerçekleşmektedirler

Boşaltım veya doldurma esnasında oluşan fare deliklerinin oluşturduğu asimetric akış, tercihsel akış kanalları veya asimetric yükleme şekilleri, silolarda; yamukluk, burkulma ve hatta göçmeye dahi sebep olabilir. Şekil 1.1 de görüldüğü üzere fare deliklerinin ve köprü tipi yığılmaların göçmesi de siloları kullanılamaz hale getirebilmektedir (Marinelli 2004).



Şekil 1.1. Silo üst kısmında oluşan akış problemlerinden kaynaklanan hasar (Dogangun vd. 2009).

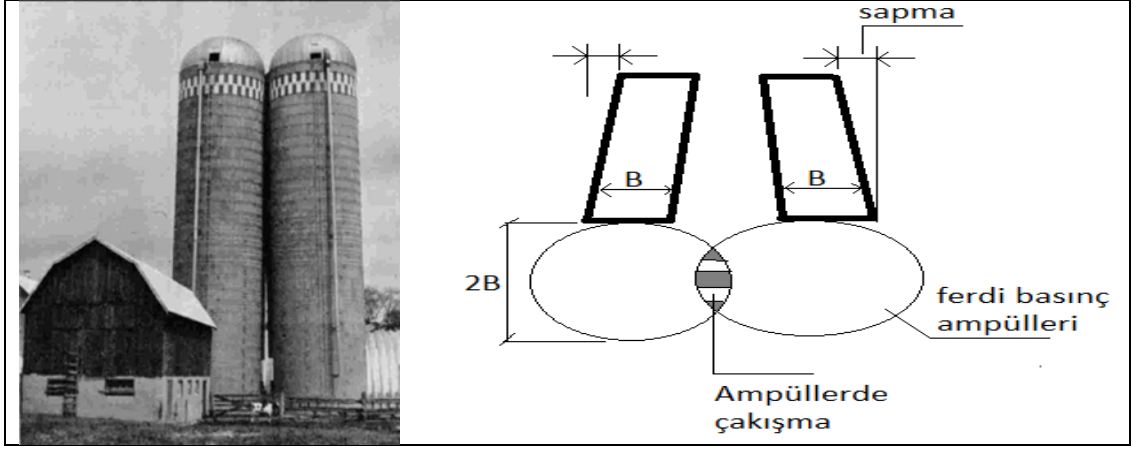
Bu kapsamda bütün yapı tipleri için büyük önem taşıyan zemin durumları silolar için de literatürde incelenmiştir. Taban alanı veya çapı yüksekliği ile kıyaslandığında siloların göreceli olarak ince bir yapıya sahip oldukları söylenebilir. Silolarda yapının tabanında, yapının ve depolanan materyalin ağırlığından kaynaklanan, oldukça büyük bir aksenal gerilme meydana gelmektedir. Kil zeminlerde göçme durumları en çok, silonun ilk kez hızla yüklenmesi esnasında meydana gelmektedir (Şekil 1.2).



Şekil 1.2. 2500 ton kapasiteli silonun göçmesi sonucu bitişik ambarlara hasar vermesi (Bozozuk 1976, ASCE)(Dogangun vd. 2009)

Kanada Red River Vadisinde bulunan bitişik tahıl silolarının üzerine konumlandırıldığı zemin, etkiyen yerçekimi yüklerine karşı yeterli dayanımı gösterememesi sonucu gömülme meydana gelmiştir (Şekil 1.3 ve Şekil 1.4).

Hüresel olarak tasarlanıp grup olarak inşa edilen silolarda, siloların altındaki münferit basınç soğanlarının, zemin içinde çakışması durumu oluşabilmektedir. Sonuç olarak, silo yapısının altında kalan zemin daha yüksek gerilmelere maruz kalacaktır.



Şekil 1.3. Çakışma bölgesinde uniform olmayan yerleşme durumu (Bozozuk 1976, ASCE). (Dogangun vd.2009)



(a)



(b)

Şekil 1.4. Zemin probleminden kaynaklanan gömülme: (a) gömülmeden öncesi; (b)gömülme sonrası (Clerkin 2004) (Dogangun vd. 2009)

1.1 Silonun Kullanım Alanları

Endüstriyel alanlarda sıklıkla yer bulan silo tipi yapılar akışkan ve kuru malzemeler için depolama amaçlı olarak kullanılmaktadır. Bu yapıların sahip olduğu taşıyıcı sistem tipi ve geometrisi depoladığı malzeme tipine ve özelliklerine bağlı olmak üzere değişkenlik gösterebilmektedir. Endüstri, enerji sektörü ve sanayide genellikle yakıt depolamasında kullanımı mevcuttur (2001).

Kule tipi beton veya çelik silolar, yapı malzemesi olarak beton, geçirimsiz taş ve çelik de kullanılabilir (2001). Şekil 1.5'te kule tipi silolardan örnekler sunulmuştur.



(a) Kule Tipi Beton Silo (1980)



(b) Kule Tipi Çelik Silo (2015)

Şekil 1.5. Kule tipi silo yapıları, genel görünüm a) Kule tipi beton silo b) Kule tipi çelik silo

Yer üstü beton silolar, ülkemizde en çok kullanılan silo tipi olarak kayıtlara geçmektedir. Toprak üstü silolar, bütçe açısından uygun olan silolar olmakla beraber basit bir depolama imkânı sağlamaktadırlar. Konik tabanlı silolar (2001) silolarda dolun ve boşaltım sık olduğu durumlarda tercih edilmektedir (Şekil 1.6).

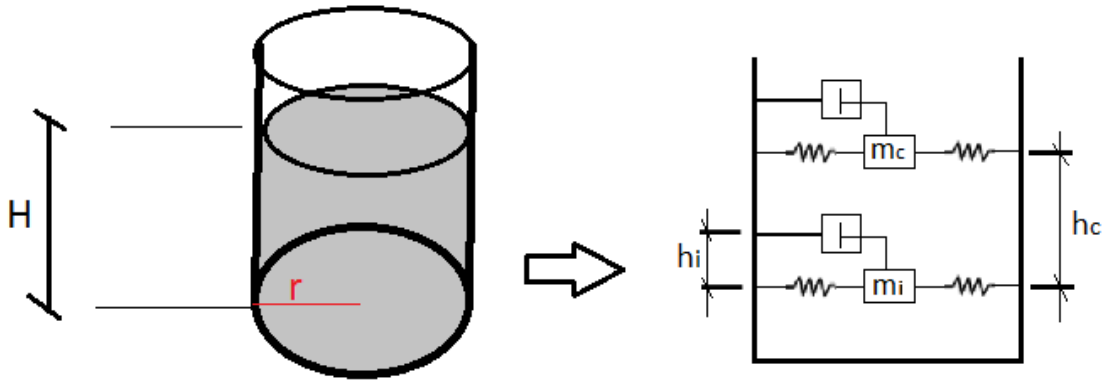


Şekil 1.6. Konik Tabanlı Çelik Silo (2018)

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Literatürde sayısal ve deneysel olarak birçok çalışma yer almakta olup; konuyla ilgili yapılan çalışmalardan bir kısmı aşağıda verilmiştir.

Altun (2013), çalışmasında, yapılan araştırmalarda depolanan sıvının taban tarafında yapı ile birlikte hareketini gerçekleştirdiği, sıvı serbest yüzey tarafında ise periyodu yüksek bir hareket ile çalkalanmaya maruz kaldığından bahsedildiğine değinmiştir. Bu tür sistemlerin sismik indüksiyona bağlı davranışlarının farklı olacağı ve diğer yapı tiplerine kıyasla farklı sebeplerden hasara maruz kalabilecekleri göz önünde bulundurulmalıdır. Malhotra (2000), sunduğu dinamik modelde (Şekil 2.1), sıvı dolu tank için tek serbestlik dereceli sistemi örneklemiştir.



Şekil 2.1. Sıvı dolu tankın tek derece serbestlikli sistem modeli

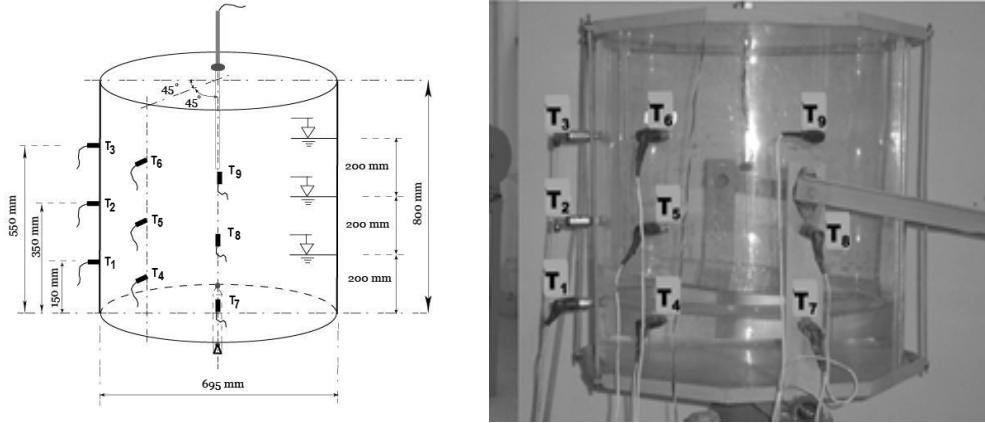
Serbest sıvı yüzeyinde görülen çalkantı problemi zorunlu salınım hareketine maruz kalmaktadır. Çalkantı probleminin anlaşılması tank modellemesi kısmında mühim bir konudur. Şiddetli çalkantı durumu çatı veya duvarlarda, lokal, yüksek darbeli yükler oluşturabilmektedir. İncelemiş olduğu çalışmalara dayanarak aynı sismik indüksiyon altındaki esnek bir tankta meydana gelebilecek sismik etkilerin rijit olan bir tanka göre daha büyük olabileceğinden bahsetmiştir. Altun elde etmiş olduğu grafiklere dayanarak impulsif bileşenin etkilerinin tank tabanına yakın bölgelerde arttığını ve konvektif bileşen olan çalkantının ise tankın üst kısımlarında arttığını belirtmiştir. Çalışmasında yer verdiği grafiklerden ayrıca impulsif bileşenin etkisinin konvektif bileşenin

etkisine göre daha yüksek olduğunu ve bu durumun olası bir deprem etkisi altında tank duvarında fil ayağı burkulması oluşumuna olanak sağlayabileceğinden bahsetmiştir.

Akyıldız vd. (2012), çalışmalarında silindirik bir tank içindeki sıvı çalkantısından dolayı oluşan basınç ve serbest su yüzeyi değişimleri deneysel olarak incelenmiştir. Çalışmalarının ana amacı dönme etkisiyle silindirik tanklarda oluşan çalkantı problemini incelemek ve tankın içinde bulunan çeşitli noktalardaki basınç değişimlerini ölçmektir.

Çalkantı sorununun lineer olmamasından dolayı tankın tam doğal periyodunda sıvı çalkantısı oluşmamaktadır ancak meydana geldiği periyot bu değere çok yakındır. Perde düzenlemeleri, farklı tank hareketleri ve sıvı yoğunluklarının sıvı çalkantısının oluştuğu tankın doğal periyoduna yakın çalkantı periyodlarını değiştirebileceğine çalışmaları sonucunda ulaşmışlardır. Akyıldız vd. çalışmalarında, kısmi dolu silindirik bir tankta sıvı çalkantısının doğrusal olmayan davranışını ve sönümlenme karakteristiğini ortaya koyacak bir deney düzeneği tasarlamışlardır. Bu deney düzeneğinde hem perdesiz hem de çeşitli sönümleyici perde tasarımları test etmişlerdir.

Yapmış oldukları deneylerde, tank doluluk oranı, dönme periyodu ve dönme açısı sistematik olarak değiştirilerek bunun hidrodinamik yükler üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Deneysel ve sayısal olarak yaptıkları bu çalışmada, modeller şu şekildedir: deneylerde kullanılan silindirik tanka sadece dönme hareketi verilmiştir. Çok sayıda fiziksel model araştırması ortaya konmuştur. Bu amaçla, 1.0 cm kalınlığında pleksiglas silindirik bir tank inşa edilmiştir. Tankın boyu 800 mm ve çapı ise 695 mm'dir. Dokuz adet basınç ölçer çeşitli noktalardaki basınç değişimlerini ölçmek amacıyla tanka yerleştirilmiştir. Taban perdesi için 7 cm yüksekliğinde 1 cm kalınlığında ve iç çap boyunda olan bir pleksiglas parça kullanılmıştır. Gövde perdesi olarak da 5 cm genişliğinde ve yine 1 cm kalınlığında bir halka kullanılmıştır. Şekil 2.2'de çalışmalarında kullanılan deneysel modelden bir görünüm verilmiştir.



Tank Geometrisi ve Basınç Ölçerlerin Konumu

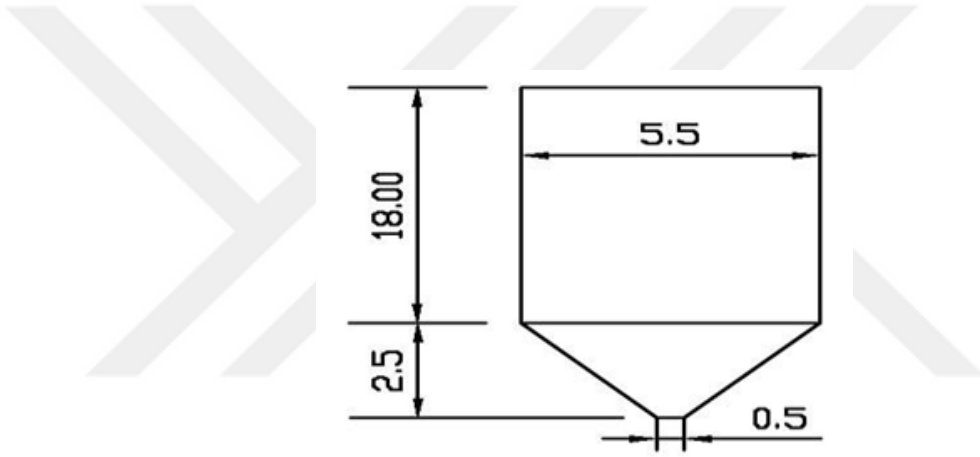
Şekil 2.2. Deneysel Model (Akyildiz vd, 2012)

Şekilde verilen bu düzeneği çalkantı deneyleri için tasarlamışlardır. Bu sayede, tank merkezinden enine olarak geçen eksen etrafında serbestçe dönebilmektedir. Taban iskeletine bağlı olan tank platformuna dönme sınırları vermişlerdir. 10 farklı tank konfigürasyonu ve 164 test olmak üzere toplam 20 deney dizisi gerçekleştirmişlerdir. Her bir deney dizisi için, birkaç adet periyot değeri için çalışmalar yürütmüşlerdir.

Yaptıkları analizler sonucunda: Tanklardaki serbest su yüzeyinin, çeşitli araçlarda sıvı çalkantısı, stabilite ve yapısal hasar gibi bazı problemler oluşturması açısından büyük öneme sahip olduğu sonucuna ulaşmışlardır. Çeşitli doluluk oranlarında ve perde durumlarında bir model ölçeğindeki silindirik bir tanktaki çalkantıyı deneysel olarak incelemişlerdir. Zorlama parametreleri, çalkantı yüklerinin hassasiyetini incelemek için sistematik bir şekilde değiştirilmiştir ve basınç-zaman grafikleri çizilmiştir. Yapılan deneyler sonucunda, kullanılan perde düzenlemelerinin sıvı hareketini belirgin bir biçimde azalttığı gözlemlenmiştir. Perdesiz durumda, T4 konumundaki basınç değişimlerine baktığımızda, basınç değeri her %25'lik doluluk oranı artışı için doğrusal olarak artmıştır. Basınç değişimleri ve doluluk oranındaki değişim arasında doğrusal bir ilişkinin var olduğu ve bunun atalet kuvvetlerinin etkisini temsil ettiği sonucuna varılmıştır.

Deneysel çalışmaları sonucunda, en önemli parametrelerin dönme periyodu ve açısı olduğu düşüncesine ulaşmışlardır. Bununla birlikte, perde düzenlemeleri göz önüne alındığında, düşey perde durumunun ve gövde perdeli durumun basınç değerlerini düşürmekte daha etkili olduğu tespit edilmiştir. Gövde perdeli durumun ise tüm doluluk oranlarında diğer durumlara göre daha etkili olduğu sonucuna varılmıştır.

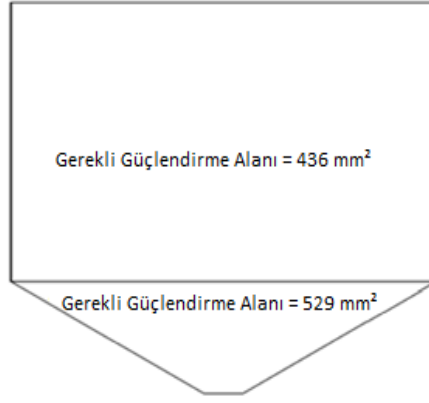
Mali vd. (2015) bu çalışmalarında, Etabs programı ile modellemeler, statik ve dinamik analizler yapılmıştır. Aşağıda bulunan Şekil 2.3'te modellenen konik silonun boyutları sunulmuştur. Belirtilen konik bölge, literatürde "Hopper" elemanı olarak geçmektedir.



Şekil 2.3. Silonun Geometrisi (Mali vd. 2015)

Modeldeki çevresel kabuk C-25 beton sınıfı kullanılarak 150mm kalınlığında oluşturmuşlardır. Oluşturdukları modelin analiz edilmesi sonucu, gerilmeler ve basınç değerleri hesaplamışlardır.

Basınç ve çevresel halka gerilmeleri, Hopper elemanının tasarımında öne çıkmaktadır. Tamamlanan analiz sonuçlarına göre gereken güçlendirme alanı Hopper elemanı için 529mm² olarak belirlenmiştir. Şekil 2.4'te hesaplanmış olan, gereken güçlendirme alanları verilmiştir.

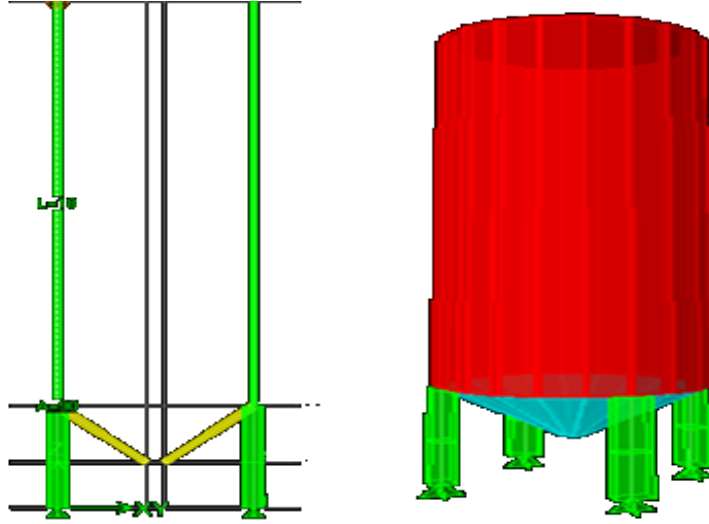


Şekil 2.4. Hesaplanan güçlendirme alanları (Mali vd. 2015)

Yığın malzemelerin idaresi, tarımda tahıl üretiminin önemli bir parçasıdır. Depolama sürecinde, tahılın saklandığı durumun korunmasının yanı sıra doğal veya doğal olmayan sebeplerden oluşabilecek durumlarda, tasarımın yapının güvenli kalması sağlanacak şekilde yapılması muhakkak büyük önem taşımaktadır.

Geçtiğimiz son 3 yılda yığma katların idaresinin teorik ve pratik araştırmasında büyük ilerlemeler kaydedildi. Bu çalışmada yapının farklı koşullar altındaki dayanıklılığının ölçülmesi için analiz yöntemi geliştirildi. Statik dizayn için geleneksel metot kullanıldı. Kullanılan geleneksel metot meridyonel ve çevresel momentleri hesaplamada başarısız oldu. Sonlu elemanlar analizi ile çembersel siloların kritik bölgelerinin gerilmeleri kolayca belirlenebilmektedir. Bu analiz ve tasarımın yüksek rüzgâr yükleri ve şiddetli depremlere karşı daha çok güvenlik sağlamakta olduğunu düşünmektedirler. Çalışmalarındaki analizlerde kullanılan farklı yük kombinasyonları kullanmışlardır.

Silonun rüzgâr ve deprem analizi için ellerindeki verileri kullanarak, Etabs programında bir silo modeli oluşturmuşlardır. Modellerinde rüzgâr ve deprem faktörleri model üzerine etkilmiş olup yükleme kombinasyonları tanımlamışlardır. Şekil 2.5'te modellemiş oldukları Etabs modeli sunulmuştur.

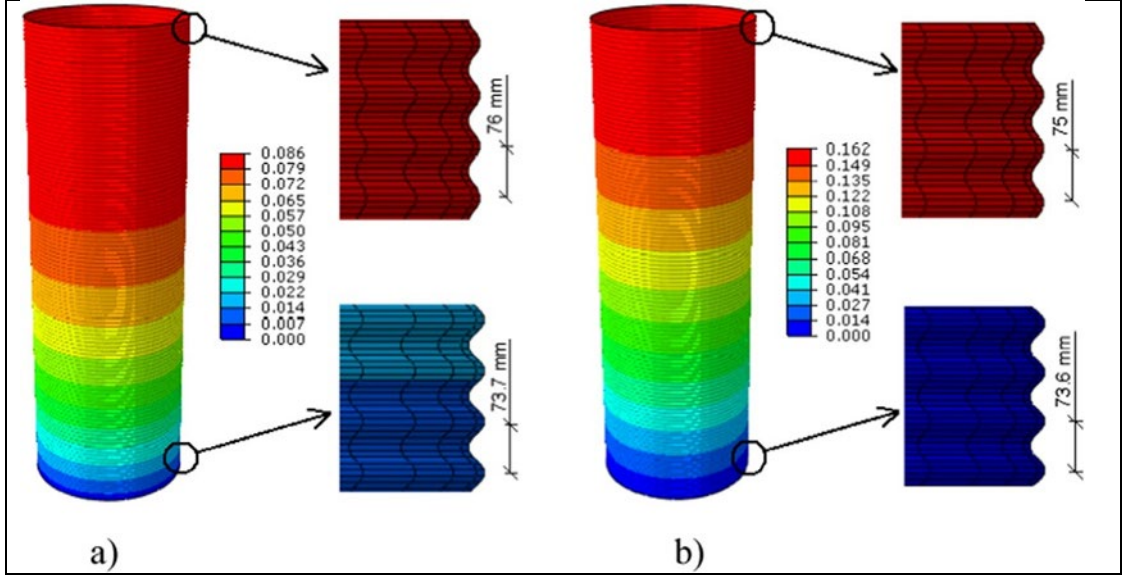


Şekil 2.5. Silonun modellemiş oldukları etab modeli (Mali vd.2015)

Duvar kalınlığı 150mm olup 8 m yükseklikteki silo, 4 kolon ile desteklenmektedir. Dolu durumu için, buğdayın yaptığı basınç, silonun duvar basıncının hesaplanmasında dikkate alınmıştır. Modellerinde, depolanan tahıldan kaynaklanan basınca dayanması için silo duvarında %2.81 çelik oranını sağlaması gerektiğine değinmişlerdir. Sonlu elemanlar analizi sonucunda; hopper elemanında maksimum kesme etkisi 22 kN/m² tespit edilmiştir ve hopper elemanında moment sıfır veya sıfıra yakın gelmekte olduğundan bahsetmişlerdir. Bu araştırmada silo yapılarının deprem ve rüzgâr yükleri altında göstermiş oldukları davranış incelenmiştir. Karakteristik bir silo modeli bu araştırma kapsamında statik ve dinamik tasarım açısından kontrol edilmiştir. Bu analiz ve tasarımda beton silindirik silo ele almışlardır ve bu konunun beton dikdörtgen silolar ve çelik silolar içinde araştırılabilir olduğuna değinmişlerdir.

Kuczyńska, vd. (2015) yaptıkları çalışmada bahsetmişlerdir ki, doldurma esnasında yığın katıların sisteme etkilerini ve olası katkılarını araştırmışlardır. İnce oluklu duvarlı silindirik metal silolar yığın katıların depolanması amacı ile endüstride sıkça kullanılmaktadır. Genellikle, silo çevresine uniform olarak yerleştirilen dikey rijitleştiriciler ile güçlendirilirler. Bu tip silolarda yatay oluklu duvarlar, yatay duvar sürtünmelerinden oluşan çekme kuvvetlerini taşımaktayken, dikey kolonlar, yığın katıların sürtünme çekişi sonucu dikeyde oluşturduğu basınç kuvvetlerini taşımaktadır. Burkulma sorunları dikey duvar yüklerinden kaynaklanmaktadır. İnce duvarlı silindirik silolar, duvar burkulmasını önleyen, rüzgar ve deprem kuvvetlerine karşı rijitlik sağlayan dikey rijitleştiriciler olmadan nadiren kullanılmaktadır.

Karlsruhe Üniversitesinde hipoplastik ana modeller geliştirmişlerdir. Bu hipoplastik modeller tanecikli materyallerin bazı dikkat çekici özelliklerini açıklama kabiliyetindedirler. Hipoplastik bir model monoton deformasyona karşı iyi performans göstermekte iken küçük genlikli deformasyonlarda eksiklikleri belirginleşmektedir. Makalelerinde, doldurma esnasında yığın katı materyalin; rijitleştirici kullanılmamış, oluklu duvarlı, metal silindirik silo yapısının dayanımı ve stabilitesi üzerine etkisinin 3D sayısal analiz sonuçları sunulmuştur. İki yığın katının(Kuru kum ve Buğday) davranışı hipoplastik ana model ile açıklamışlardır (Şekil 2.6). Aynı zamanda geometrik ve materyal olarak doğrusal olmayan modelin doğrusal olmayan sonlu elemanlı analizlerini gerçekleştirmişlerdir. Sayısal sonuçları Eurocode formülü ile karşılaştırmışlardır. Depolanan katının güçlendirme etkisi, duvar kalınlığı, katı taneciklerin sertliği, katı ve duvar arasındaki sürtünme açısının başlangıç boşluk oranının burkulma dayanımı üzerine etkisini incelemişlerdir.



Şekil 2.6. Sonlu elemanlar analizinden orta büyüklükte, kum ile doldurulmuş bir silo için hesaplanan yerdeğiştirme: a) Eurocode da verilen yüklerin tesiri ve b) hipoplastik ana model ile açıklanan katı ile doldurulmuş model (Kuczyńska vd. 2015)

Analiz sonuçlarına dayanarak bahsetmişlerdir ki, rijitleştirici kullanılmamış orta derece büyüklükteki kum veya buğday depolanan silolarda, yığın katı, dolum esnasında silonun burkulma dayanımını, eurocode 1 ile olağan şekilde yüklenmiş silolara göre kayda değer bir miktarda yükseltmektedir. Burkulma dayanımdaki artışın etkisi duvar kalınlığıyla direkt olarak bağlantılı olduğu saptanmıştır. Açıklamaya örnek olarak duvar kalınlığı daha ince iken etki daha büyük olmaktadır.

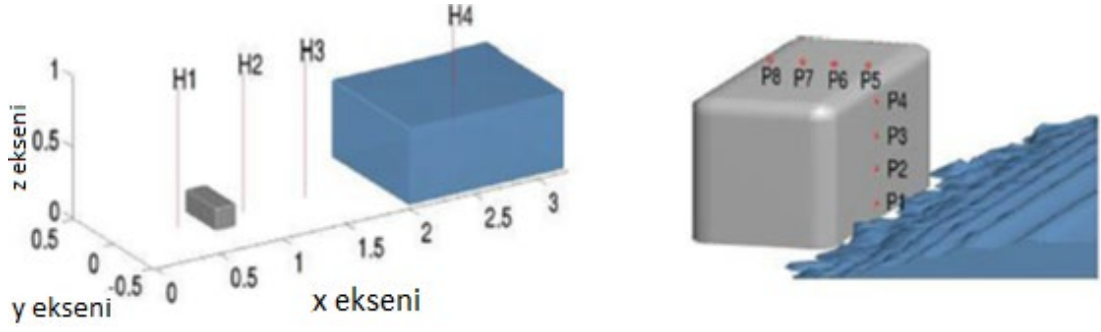
Shrimali ve Jangid, (2002) yazılarında kayar sistemli izolatör kullanılan sıvı depolama tankının iki yatay eleman ve gerçek deprem hareketi altında davranışını incelemişlerdir. Depremler sonucu hasar görmüş olan bazı sıvı depolama tanklarında görülen hasar çeşitlerinden bazıları basınç gerilmesi birikimi sonucu silo cidarının burkulması, desteklerin göçmesi ve tabanda meydana gelen hasar olarak gözlemlenmişlerdir. Çalışmalarında kayar sistemlerin taban kesmesini ve impulsif yer değiştirmeye karşı etkili olduğunu buna karşın çalkantı yerdeğiştirmelerinde çok bir etkisinin olmadığını belirtmişlerdir. Çalışmalarında sürtünme kuvvetlerinin çok yönlü etkileşiminin izolatörlü tankların davranışında büyük etkileri olduğunu, bu etkilerin ihmal

edilmesi durumunun kayma yerdeştirmelerini küçümseyeceğini ve bu durumun tasarım açısından mühim olduğuna değinmişlerdir. Tanklardaki izolatör sistemlerin etkinliğinin kayar sistemlerin esnekliği ile arttığını ayrıca yazılarında belirtmişlerdir.

Jeltsov vd. (2018) ve arkadaşları çalışmalarında belirtmişlerdir ki çalkantı (sloshing) kaynaklı mekanik yüklerde meydana gelebilecek bir artış yapıyı plastik deformasyona ve göçme durumuna sürükleyebilir. alışmalarında şiddetli çalkantının oluşturabileceğini düşündükleri sorunlardan bir başkası ise mekanik hasarın yanı sıra gaz-sıvı etkileşiminde meydana gelebilecek gaz sıkışması durumudur. alışmalarında çalkantı (sloshing) kavramının anlayışının geliştirilmesini hedeflemişlerdir. alışmalarında Star-CCM+ ticari CFD programını kullanarak LFR tipi reaktörlerde sismik çalkantı (sloshing) durumunu çalışmışlardır. CFD modelin geometrisi ile ilgili belirtmişlerdir ki sadece sıvı bölgesini içermekte olup modelin içerdeği bütün yapılar rijit kabul edilmiştir. Sıvı kurşunun çalkantı aşamasındaki türbölanslı akışını modellemek için bazı denklemler yardımı ile yaklaşım sergilemişlerdir.

Serbest yüzey modelini, gaz-sıvı arayüzünün dağılımı ve hareketinin oluşturmuşlardır. Çalıştıkları alanda kurşun çalkantısının veya reaktör için deneysel veriler bulunmadığından dolayı modelin alakalı olguyu karşılayacak doğrulukta olması ve çözüm yönteminin doğrulanmış olmasının büyük önem taşıdığını belirtmişlerdir.

Analizlerinde 2D baraj-kırılma testi yapmışlardır. Başlangıç durumu ve ölçüm noktalarını şekilde vermişlerdir (şekil 2.7).



Şekil 2.7. Baraj kırılma düzeneği ve basınç ve su seviyesi ölçüm yerleri (Jeltsov vd. 2018)

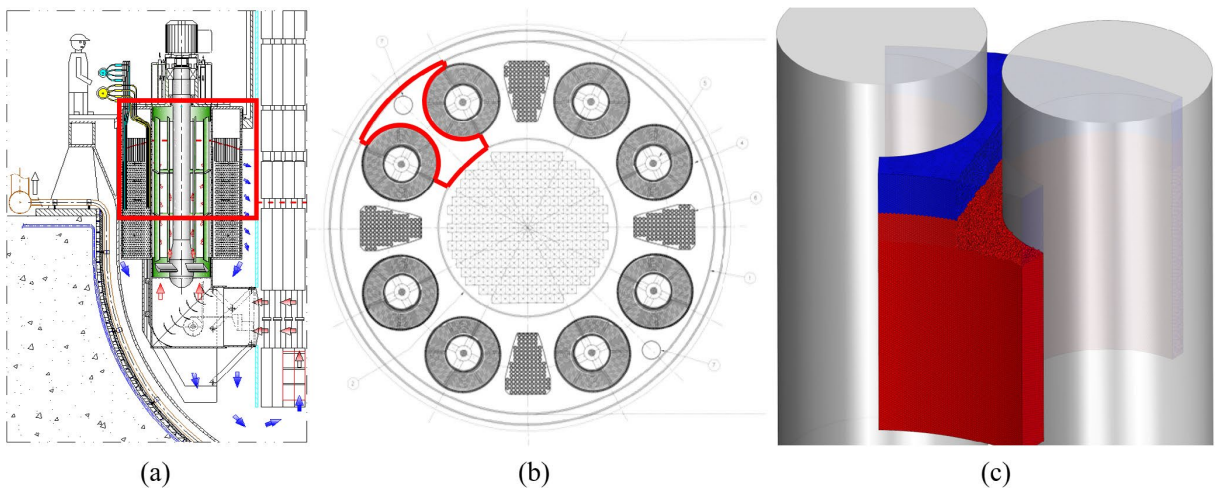
Çalkantı hareketinin sürekli olmayan bir olgu olmasından dolayı kararsız hesaplar için zaman-adım boyutlarının seçilmesinde bağlantı koşullarının kararsız karakteristiklerinin ve model gerekliliklerinin göz önünde bulundurulmasını önermektedirler. Şekil 2.8’de baraj kırılma akışı çözümünü 0.5 saniye aralıklarla göstermişlerdir.

Sıvının serbest bırakılmasından sonra 0.4 saniye civarında kutuya temas etmesini karmaşık bir akış düzeniyle beraber ağır deformasyona uğramış ve parçalanmış arayüz takip etmektedir. Dalga daha sonra sağa dönmekte ve kutuyu geçerek (2. saniye civarı) sağ taraftaki duvardan geri sekmekte (4. Saniye civarı) ve arkasından kutuya sağ tarafından 4.6 saniye civarında ikinci kez çarpmaktadır. Grafiğini vermiş oldukları P1 ölçüm noktasındaki basınç değişimi bahsedilen dalga hareketiyle örtüştüğü de görülmektedir. Dalgaların kutuya sağ taraftan vururken sergiledikleri büyüklükleri ve zamanlamaları yeterli bir seviyede yakalandıklarını da belirtmişlerdir.



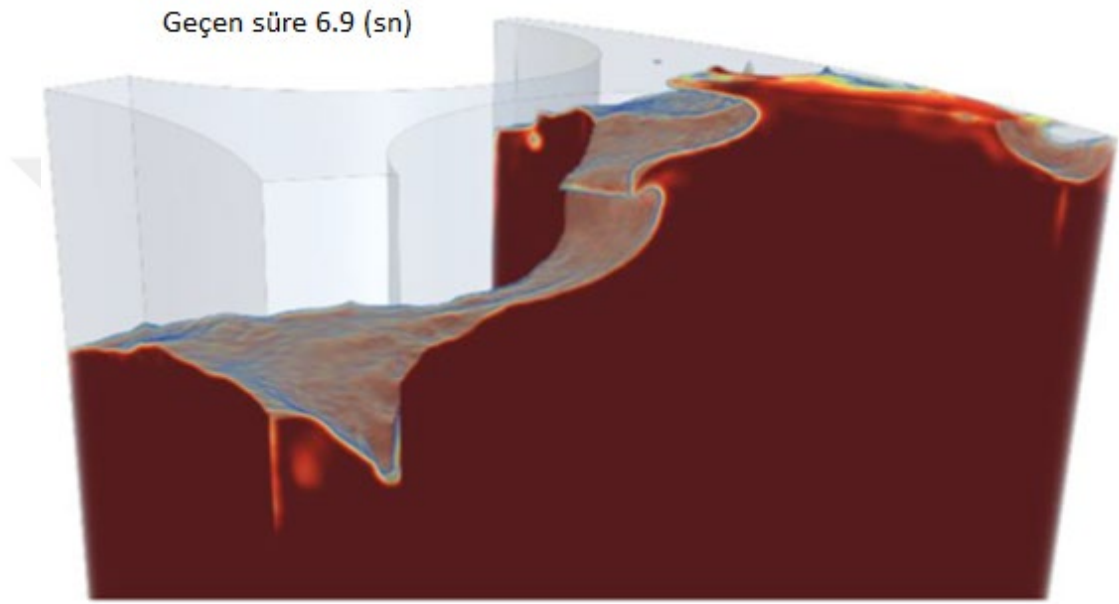
Şekil 2.8. Baraj kırılma akışı simülasyonundan 0.5 saniye aralıklarla alınmış olan görüntüler (Jeltsov vd. 2018)

2D analiz sonrasında yapmış oldukları 3D analiz için 750.000 çokyüzlü elemana sahip buhar jeneratörleri arasında bir bölge tanımlamışlardır (Şekil 2.9).



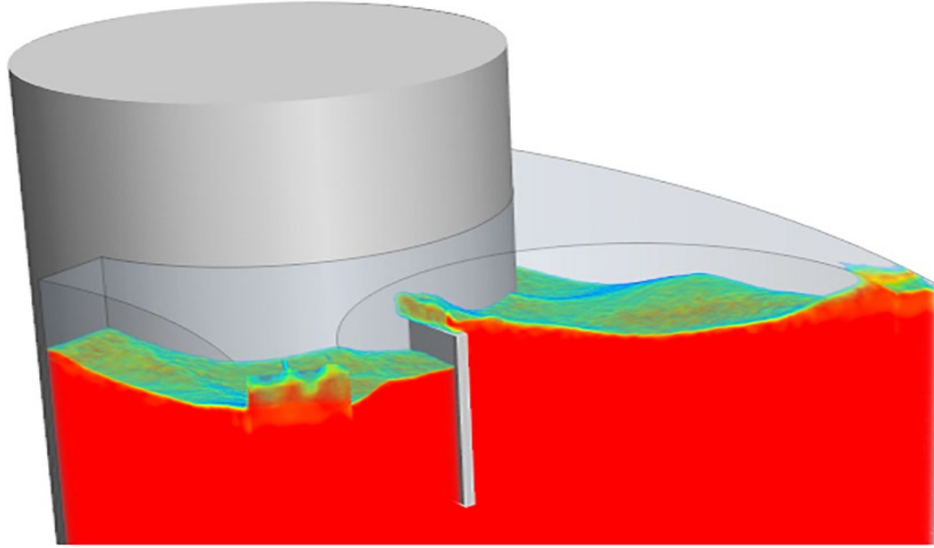
Şekil 2.9. Bölge tanımlamaları (a ve b) 3D bölge tanımlaması ve analiz başlangıç durumu (c) 750.000 çokyüzlü elemente sahip mesh (Jeltsov vd. 2018)

3D simülasyonda fark ettikleri ilk etki buhar jeneratörleri arasındaki sıkışıklıkta akışın ivmelenmesi olmuştur. Bu durum buhar jeneratörlerinde yanal kuvvetleri artırmış ve iç ve dış kapların normaline çarpma etkileri oluşturmuştur (Şekil 2.10). Sismik Hareketlenmenin asimetrik olması ve buhar jeneratörlerinin iki tarafında da kuvvetler dengesi olmaması, yerdeğiştirmelere ve dolayısı ile Jeneratörlerden çekirdek variline bağlanan borularda gerilmeler oluşturmaya sebep olabileceğini belirtmişlerdir.



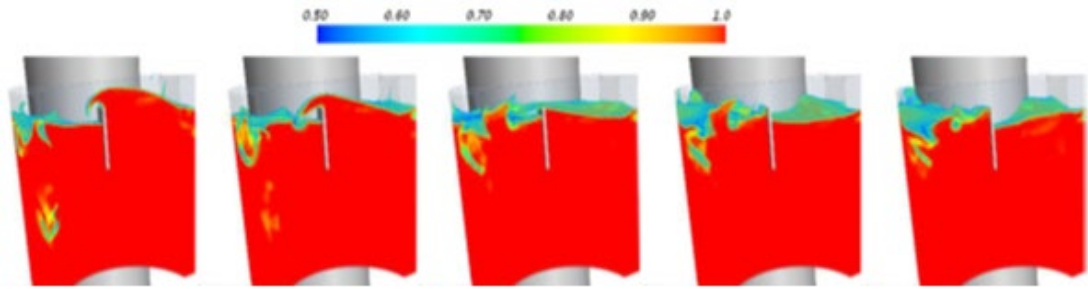
Şekil 2.10. Buhar jeneratörleri arasında akış sıkışması ve ivmelenmesi (Jeltsov vd. 2018)

3D analiz sonucunda yapıda gözlenen çarpma sonucu oluşan yüksek dinamik yüklemenin etkilerini azaltmak için bir önlem alınması gerektiğini düşünmüşler ve bir yaklaşım olarak jeneratörler arasına akış bölgesini bölmek için bir engel koymuşlardır. Sıvılaştırılmış doğal gazların kargo tanklarında yaygın olarak kullanılan bir yöntem olmakla beraber bu durum akışkana ivmelenmesi için daha az bir bölge ve zaman tanımakta olup daha küçük yükler iletmesine olanak sağlamaktadır. Engel, Şekil 2.11’de vermiş oldukları gri tabakadır ve levhayı analizde rijit kabul etmişlerdir.



Şekil 2.11 İki buhar jeneratörü arasındaki ince baffle (Jeltsov vd. 2018)

Çalışmalarında LF Reaktörlerde sismik çalkantıyı CFD olarak çalışmış olup daha çok sismik izolasyon üzerinde durmuşlardır. Çok fazlı bu problemi modelleme metotları kullanarak gaz-sıvı arayüzünü sayısal yeterlilikte yakalayabilmek için bazı kombinasyonlar yardımı ile modelleyip simülasyonunu yapmışlardır. Çalışmalarında sismik izolasyonun depremlerde sağladığı olumlu etki olan sismik hareketlenmenin magnitudünü düşürmesi durumunun, olumsuz etkisi olan hareketlenme frekansını sıvının doğal frekansına yaklaştırması durumundan daha baskın gelmekte olduğunu gözlemlemişlerdir. Çalışmalarında jeneratörler arasındaki sıvı serbest yüzeyine eklemiş oldukları engel potansiyel bir önlem olarak eklenmiştir ve sisteme pozitif bir katkısının olduğunu sistemlerde çalkantı yüklerinin azalması ile onaylamışlardır. Dalga hareketinin levhanın üstünden sıçraması (Şekil 2.12).



Şekil 2.12. Dalganın altüst olması ve baffleın diğer tarafındaki suya sıçramasının görüntüleri (Jeltsov vd. 2018)

Wing Kam LIU, (1981) çalışmasında yapı-sıvı etkileşimleri için sonlu elemanlar prosedürlerinden ve sıvı depolama tanklarına uygulanışından bahsetmiştir. Yazısında bahsettiği üzere, büyük tankların şiddetli depremler sonrasında uğradığı hasarın çoğunluğunun sismik hareket kaynaklı sıvı ataleti ve yüzeyde oluşan çalkantı dalgalarının oluşturduğu devrilme momentlerinin bir sonucu olduğu şüphelenilmektedir.

Çalışmalarında, tankların sıvı ile beraber sergiledikleri dinamikler ve burkulma dahil olmak üzere yapısal davranışını karşılayacak doğrusal olmayan bir sonlu elemanlar yöntemini formülasyon ve bilgisayarda uygulanmış özellikleri ile beraber sunmuşlardır. Fiziksel öneme sahip burkulma ve dinamik analizleri incelemişlerdir. Yaptıkları çalışmada sunmuş buldukları doğrusal olmayan sonlu elemanlar yönteminin ileride geliştirilebilecek çeşitli geçici harekete maruz kalan tam veya kısmi batık gibi yapı-sıvı etkileşimi olgularında kullanılabileceğini önermişlerdir. Sonlu elemanlar yöntemiyle yapı-sıvı etkileşimi problemi için dinamik ve burkulma analizleri geliştirmişlerdir. Doğrusal olmayan metodolojiler ve bilgisayar uygulamalarını tartışmışlardır. İncelemelerinin sonucunda ayrı bir raporda tartışmak üzere sonlu elemanlar bilgisayar kodu geliştirmişlerdir ve bu kodu kullanarak tanklar için burkulma ve dinamik analizler gerçekleştirmişlerdir.

NIWA ve CLOUGH (1982), yazılarında silindirik depolama tanklarının deprem yükü altında burkulmasını incelemiş olup, 24 Ocak 1980'de Greenville'de meydana gelen deprem sonrasında yaklaşık 100 tankın burkulmaya maruz kaldığı Mt. Diablo depremindeki tankların durumuna ve meydana geldiği koşullara değinmişlerdir. Yazılarında tankların bulunduğu meydana gelmiş olan depremin merkezine yaklaşık 13 km mesafede bulunmakta olduğunu, deprem anında tamamen dolu durumda olduklarını ve kaldırma(uplift) meydana gelebilmesi için müsait bir durumda olduklarını belirtmektedirler. Geniş olan boy/çap oranı yaklaşık 1 olan tanklarda en yaygın meydana gelen hasar tipinin fil ayağı burkulma tipi olduğunu ve boy/çap oranı yaklaşık 2 olan uzun tanklarda yaygın olarak elmas şekilli burkulma tipinin meydana geldiğini gözlemlemişlerdir.

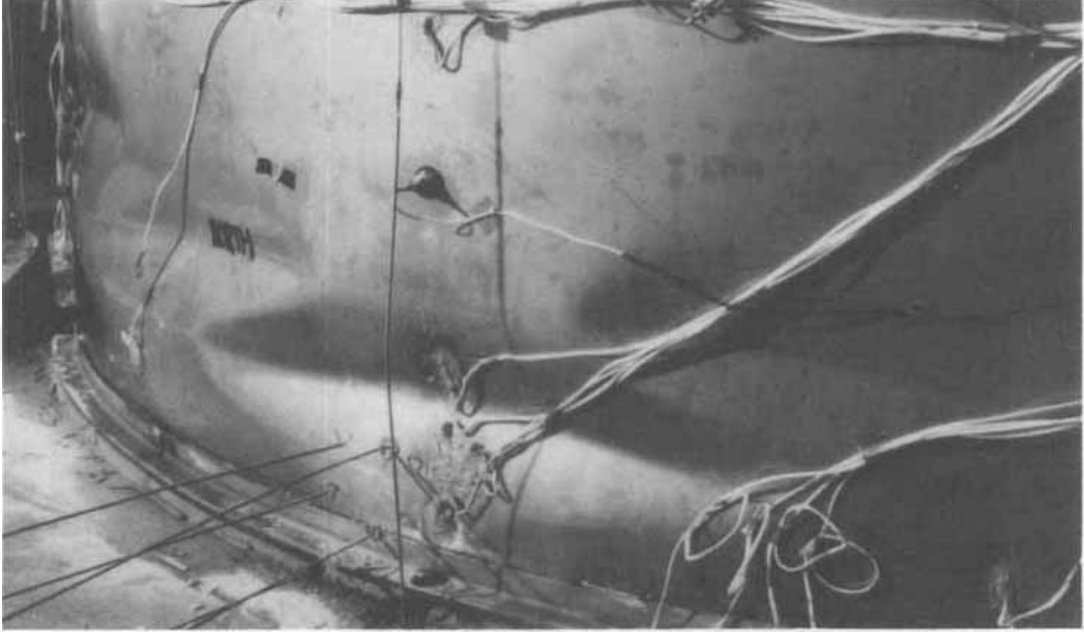
Hasar meydana gelen tankların çoğunluğunda yırtılma meydana gelmediğini gözlemlemiş olup meydana gelen burkulma hasarlarının, tankların devrilme mekanizması sebebiyle meydana gelen aşırı eksenel gerilme yığılımları sebebiyle oluştuğunu düşünmekte olmakla beraber, hasar mekanizmasını doğrulayabilecek veriye sahip olmadıklarını da belirtmişlerdir. Bu tecrübelerle dayanarak deney yapılmak üzere Kaliforniya üniversitesi deprem mühendisliği araştırma merkezinden istendiği üzere sarsma testleri yapılmak üzere yaklaşık 3 metre çaplı ve 7 metre yüksekliğe sahip 2 tank modeli oluşturdular. 1 numaralı tank (Şekil 2.13).



Şekil 2.13. Sarsma levhası üzerinde 1 numaralı tank (NIWA ve CLOUGH 1982)

Bunlardan bir numaralı tank depremde hasar gören tanklara benzer özellikte, iki numaralı tank ise diğerine göre daha kalın bir levhaya ve daha güçlü ankrajlar ile yapılmış bulunmaktaydı. Çalışmalarının amacı depremde meydana gelen koşulları tekrarlayıp hasar durumlarını gözlemek ve modeller arasındaki farklılıkları incelemektir. Deneyleri sonucunda hidrodinamik basınç

ve hidrodinamik etkilerin sonucu olarak meydana gelen devrilme momentlerinin tank taban bağlantısının koşullarına açıkça bağlı olduğunu belirtmişlerdir. Bir numaralı tankın hasar durumunu gözlemlemişlerdir (Şekil 2.14).

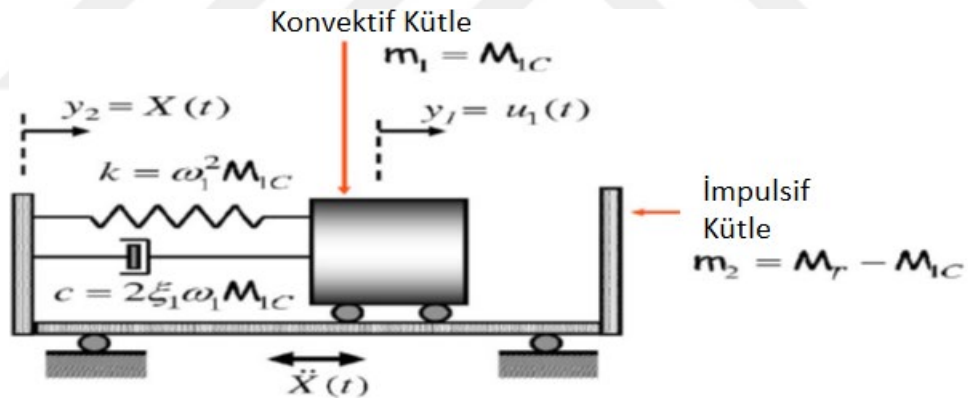


Şekil 2.14. Serbest taban durumunda 1 numaralı tankın almış olduğu hasar (NIWA ve CLOUGH 1982)

Çalışmalarında bahsetmişlerdir ki, aşırı sarsma hareketinin serbest taban koşulunda levhalar üzerinde dar bağlantı noktalarında aşırı aksel basınç gerilmelerine yol açtığı ve bu döngüsel dinamik gerilmelerin elmas şekilli hasara yol açtığı ve bu sonucun deprem esnasındaki duruma yakın olduğudur. Elmas şekilli hasar modelinin gerçekleşmesi esnasında gözlenmiş olan meydana gelen kritik gerilmenin teoride düşünülen gerilmenin %60'ı kadar olduğunu gözlemlemişlerdir. Tank serbest tabanında aksel basınç gerilmelerinin yoğunlaştığı bölgede önemli miktarda çember çekme gerilmeleri gözlemişlerdir. Gözlemlenen çember çekme gerilmelerinin materyal çekme dayanımını %60 oranında aşmış olduğunu ve bu bölgede bu durumla bağdaştırılan bir çıkıntı oluştuğunu belirtmişlerdir. Taban levhasında meydana gelen kaldırma davranışının temelde meydana gelen zıplama miktarının tabak şekilli taban levhasında oluşan zincir eğrisi gerilmesinden dolayı büyük bir miktarda arttığını önermişlerdir. Çalışmalarında membran gerilmesi mekanizmasını

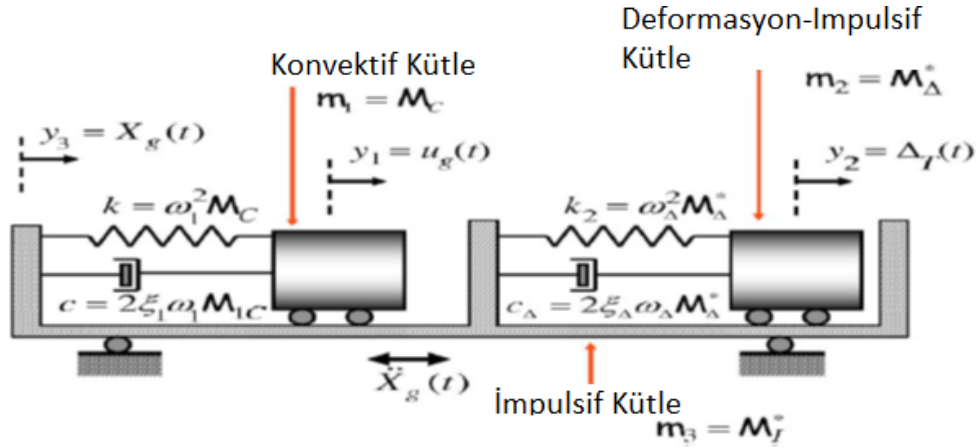
görmezden gelen tipik tasarım hesaplarının kaldırma (uplift) rijitliğini büyük bir miktarda küçümsediklerini düşünmektedirler ve serbest tabanlı tanklarda kaldırma (uplift) kinematiklerinin araştırmalarının daha ileri götürülmesi gerektiğini önermektedirler.

Karamanos, vd. (2006) çalışmalarında yatay silindirik ve küresel endüstriyel tankların sismik tasarımını araştırmışlardır. Silindirik ve küresel tanklar veya basınç kapları endüstriyel alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır ve bu yapılarda depreme bağlı oluşan maksimum çalkantı (sloshing) kuvvetinin hesaplanması yapı bütünlüğünün deprem yükleri altında korunması için can alıcı bir öneme sahip olduğuna değinmişlerdir. Çalışmalarında çalkantı (sloshing) etkisini tanımlamak için potansiyel sıvı hız fonksiyonu açısından doğrusal bir problem olarak kabul etmiştirler. Yazılarında, sıvı depolama tanklarında çalkantı etkisini gösteren mekanik modeller sunmuşlardır. Sıvı depolama tankları için çalkantı etkisini gösteren mekanik model (Şekil 2.15).



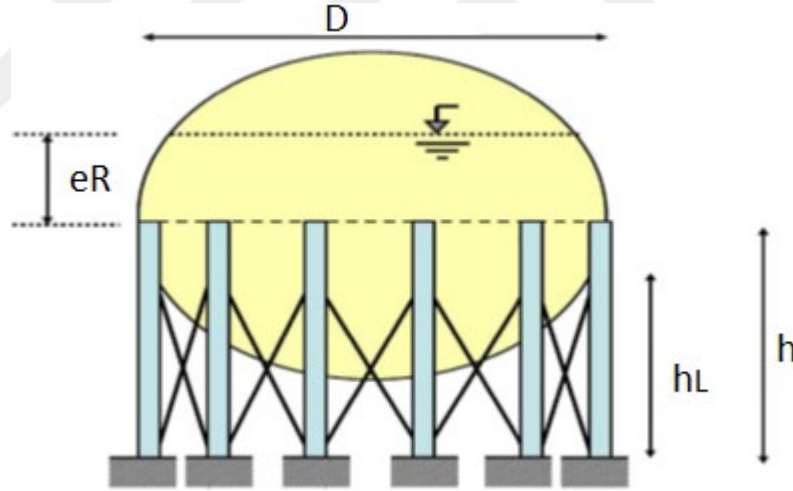
Şekil 2.15. Sıvı depolama tanklarında çalkantı etkisini temsil eden mekanik model (Karamanos, vd. 2006)

Deformasyona müsait yatay silindirik tanklar için oluşturmuş oldukları mekanik model (Şekil 2.16).



Şekil 2.16. Deforme olabilir yatay silindirik tanklarda sloshing etkisini temsil eden mekanik model (Karamanos, vd. 2006)

Yükseltilmiş küresel tankları temsil eden mekanik model (Şekil 2.17).



Şekil 2.17. Yükseltilmiş Küresel tank tasarım örneği (Karamanos, vd. 2006)

Çalışmalarında, çoğu mühendislik uygulamalarında çalkantı frekansına ek olarak çalkantı dolayısı ile oluşan hidrodinamik basınçlar ve kuvvetlerin hesaplanmasının da gerekliliğini belirtmişlerdir. Çalışmalarında yatay-silindirik ve küresel tanklarda toplam yatay sismik kuvvetin hesaplanması için bir metodoloji sunmuşlardır. Önerdikleri metodoloji, sıvı tankının hareketinin konvektif-impulsif bozuluma ve yazarlar tarafından daha önceki yazılarında yayınlanmış olan bozuluma uğramayan konteynırlarda çalkantı (sloshing)

etkisinin çözümüne dayandırılmıştır. Yaptıkları çalışmada bütün modellerde sıvı depolama sisteminin tepkisini temsilen eşdeğer mekanik modeller önermişlerdir. Çalışmalarında, yatay silindirler ve kürelerde birincil konvektif kütlelerin, yüksek mod kütlelerine oranla çok daha büyük olması sebebiyle konvektif kuvvetlerin birincil konvektif çalkantı mod kullanımı ile belirlenebileceğine değinmişlerdir. Sunmuş oldukları metodoloji yatay-silindirik ve küresel depolarda sismik yüklerin hesaplanması için basit ve etkili bir yöntem sunmakta olduğunu ve halihazırda bulunan yatay sıvı depolama tanklarının özelliklerine uyumlu olmasıyla birlikte endüstriyel depoların tasarımı için önermektedirler.

Wood, (1997) yazısında son 20 yılda kullanılmış olan tasarım yönetmeliklerinden ve silolarda meydana gelen hasarların bazı yönetmeliklerde sebebiyet verdiği güncellemelere değinmiştir. Ayrıca yazılarında belirtmişlerdir ki değerlendirilmesi yapılan hasar görmüş 60'ın üzerindeki silolardan öğrenilenler diğer yapı türlerine de uygulanabilir. Yapının kullanım ve performansının tasarım kabullerine uygunluğunun düzenli kontrolü, her küçük arıza ve servis probleminin sonuna kadar araştırılması ve potansiyel daha büyük problemlere yol açmadan önce teşhis edilmesi ve önlenmesi gibi önerilerde bulunmuşlardır. Son olarak bahsetmişlerdir ki yönetmelik komitelerinden ideal davranışın teorik ve analitik çalışmalarına verilen önem kadar oluşan hasarların analizine de önem verilmesini tavsiye etmektedirler.

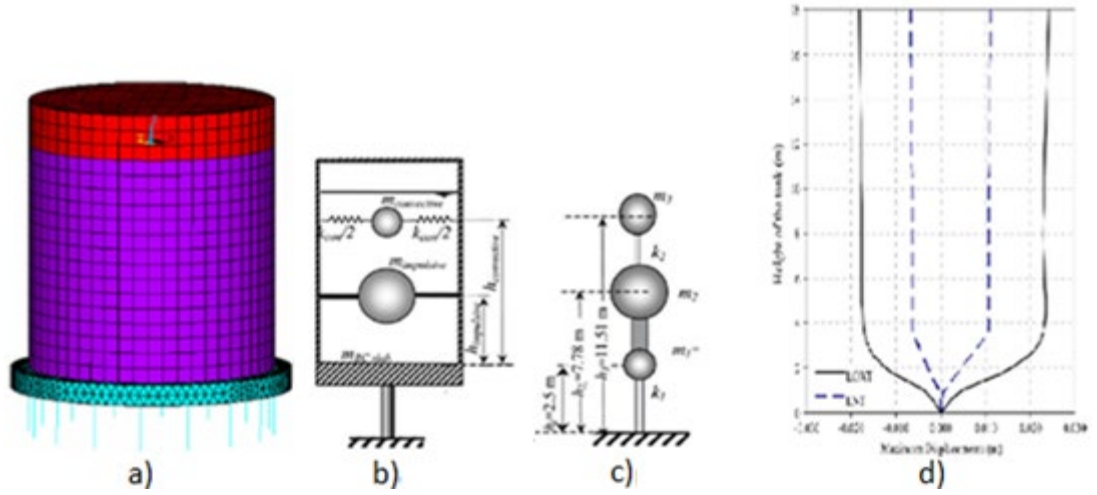
Sezen vd. (2008) çalışmalarında deprem etkisi altında iki tanesi göçme moduna ulaşmış üçüncüsü ise nerdeyse hiç hasar almamış olan özdeş üç sıvı depolama yapısının performans değerlendirmesini yapmışlardır. Hasar durumlarına göre tanklar arasındaki tek fark tankların içindeki depolanmış olan sıvılaştırılmış gaz miktarları olduğunu belirtmişlerdir. Yazılarında dinamik tepkide meydana gelen artışın yanında sıvılaştırılmış gaz çalkantısı ve yapı-sıvı etkileşimini de araştırmışlardır. Yazılarının temel amacı depolama tanklarının sismik performansının değerlendirilmesi ve dinamik davranışı etkileyen parametrelerin araştırılması olduğundan bahsetmişlerdir. Çalışmalarında sıvılaştırılmış gaz-yapı etkileşimini içeren ve yerdeğıştirmeye dayalı bir

yaklaşım benimsemişlerdir. Neredeyse tam dolu olan sıvılaştırılmış oksijen tankları ve çeyrek miktarda dolu olan sıvı nitrojen tankında, dinamik tepkiyi öngörebilmek için kaydedilmiş temsili zemin hareketi altında analiz gerçekleştirmişlerdir. İki tank modeli arasındaki tek fark içlerinde buldukları sıvılaştırılmış gazın tipi ve miktarıdır. Deprem etkisi altında göçme moduna gelen özdeş sıvı depolama yapıları (Şekil 2.18).



Şekil 2.18. Özdeş sıvı depolama yapıları (Sezen vd. (Sezen, et al., 2008))

Sıvılaştırılmış gaz-yapı etkileşimi düşünülerek yapının genel davranışını çalkantı, tank içinde sıvının yer değiştirmesi, çatı seviyesinde ve rijit tank taban levhasının altındaki yanal yerdeğıştirmeler ve kolon iç kuvvetleri üzerinden araştırmışlardır. Şekil 2.19'da basitleştirilmiş model, dinamik modeller ve yanal yerdeğıştirme (deplasman) dağılımları verilmiştir. Basit iki kütle yığılımına sahip modeller bu çalışmada da olduğu gibi yükseltilmiş tank modellerinde sıkça kullanılmaktadır. Bu modellerde genellikle boş kap, taşıyıcı yapı ve impulsif sıvı kütesinin bir kütle yığılımı ve konvektif sıvı kütesinin ise ikinci bir kütle yığılımı olarak kabul edildiğinden bahsetmişlerdir. Şekil 2.19 (d) maksimum yerdeğıştirme değeri, için yanal yerdeğıştirmelerin tank yüksekliği boyunca dağılımını göstermektedir. Yerdeğıştirme dağılımı göstermektedir ki neredeyse tüm yanal deformasyonlar 2.5m yüksekliğe sahip kolonlarda meydana gelmekte ve göreceli olarak rijit kalan kapta devrilme etkilerinin yanal yerdeğıştirmeye çok katkıda bulunmadığına değinmişlerdir.



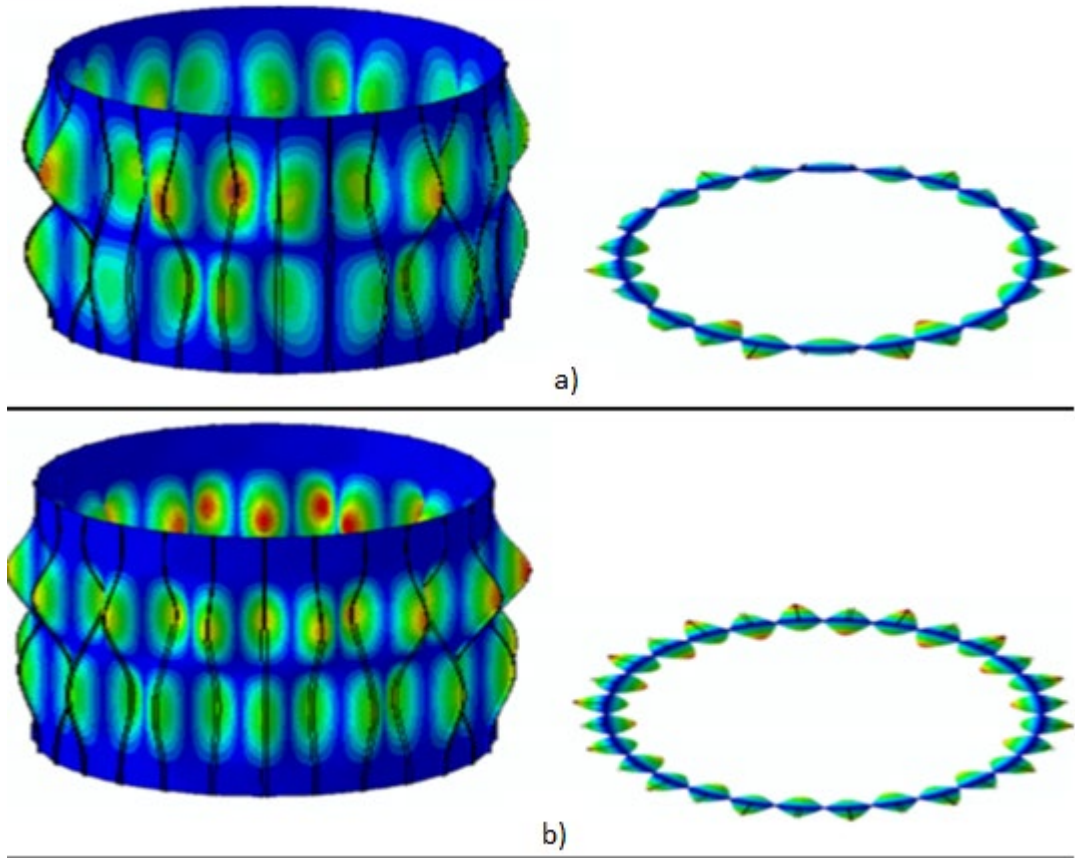
Şekil 2.19. Modeller a) sonlu eleman modeli b) mekanik model c) basit model d) maksimum deplasman değer için yükseklik boyunca yanal deplasman dağılımı (Sezen vd. (2008))

Tankların analiz sonuçlarında neredeyse tüm yanal deformasyonların 2.5 metre yüksekliğe sahip kolonlarda meydana gelmekte ve tankın kendisi göreceli olarak rijit durumda kalmakta olduğuna değinmişlerdir. Sismik bir bölgede istenen yükseltilmiş bir tank için dayanıklılık ve deformasyon kapasitesi veya kolon uzunluğu artırılmalı veya alternatif bir taşıyıcı yapı kullanılması gerektiğini tavsiye etmişlerdir.

Maksimum yerdeğiştirme taleplerinin ve deformasyon kapasitelerinin karşılaştırarak görmüşlerdir ki oksijen tanklarını taşıyan kolonlarda maksimum potansiyel aksenal yük altında yeterli deformasyon kapasitesi bulunmamaktaydı.

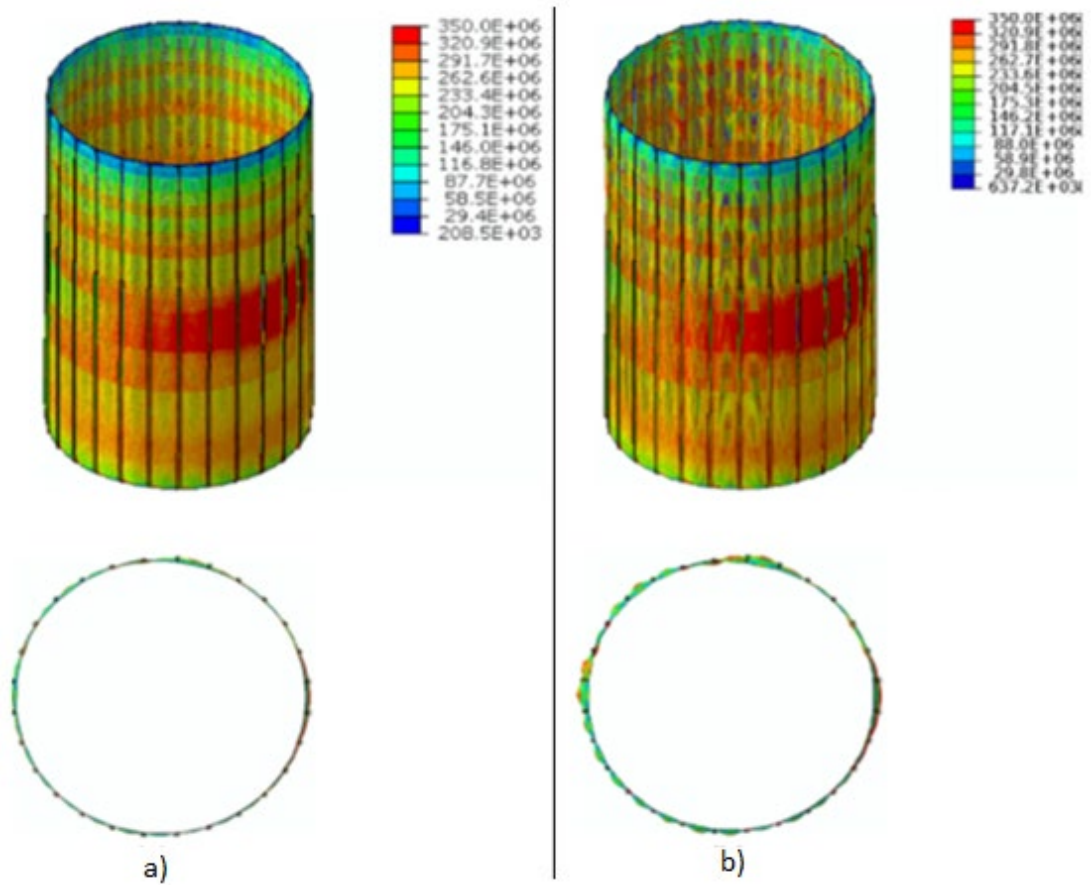
Öngördükleri maksimum dinamik yük talebinin, aksenal yük, kesme yükleri ve momentler dahil olmak üzere göçmüş olan sıvı oksijen tankını taşıyan kolonlarda, boş durumdaki haline göre ve sıvı nitrojen tankına kıyasla neredeyse iki kat daha büyük olduğunu gözlemlemişlerdir. Öngördükleri kesme kapasitelerinin boş tank ve nitrojen tanklarını taşıyan kolonlardaki maksimum dinamik kesme kuvvetlerinden büyük olduğunu, kolon kesme dayanımlarının sıvı nitrojen tanklarındaki maksimum kesme taleplerinden daha düşük olduğunu ve bu durumun gözlemlenmiş olan kolon göçmelerinin aynı zamanda yetersiz kesme dayanımından meydana geldiğini belirtmişlerdir.

Iwicki, vd. (2011) yapmış oldukları çalışmada silindirik çelik siloların göçme nedenlerini tartışmışlardır. Lineer burkulma ve lineer olmayan geometrik ve doğrusal olmayan materyal ile analiz yürütmüş olup kusurlu ve kusursuz silo kabuğu ile birlikte yığın katı kaynaklı axisimetrik ve axisimetrik olmayan yükleri de hesaba dahil etmişlerdir. İnce silindirik metal silo kabukları sıkışmaya yönelik duvar sürtünme kuvvetlerinden kaynaklanan, özellikle ekzantrik boşaltım esnasında burkulma durumlarına karşı zayıf olduğunu belirtmişlerdir. Uniform olmayan yatay duvar yüklerinin simetrik olmayan bir dikey duvar yükü dağılımı oluşturduğuna ve kabuğun burkulma dayanımının birçok etkene bağlı olduğuna değinmişlerdir. Bunlardan bazıları: başlangıç geometrik bozukluklarının şekli ve genliği, yükleme ve materyal bozuklukları, bağlantı tipleri, mesnet sınır koşulları, iç basıncın ve depolanmış malzemenin iç basıncı ve rijitliğidir. Basitleştirilmiş lineer burkulma analizi sonuçları Şekil 2.20'de verilmiştir (analizlerinde sadece aksel simetrik duvar sürtünme yüklerini almışlardır).



Şekil 2.20. Sonlu eleman modeline ait 2 farklı bağımsız burkulma durumu
a) birinci durum b) ikinci durum Iwicki, vd. (2011)
Metal silolarda genellikle ince yatay oluklu eğik levhalar ve güçlendirme için kullanılan ve silo çevresi boyunca uniform dağıtılan dikey rijitleştiriciler kullanılmaktadır.

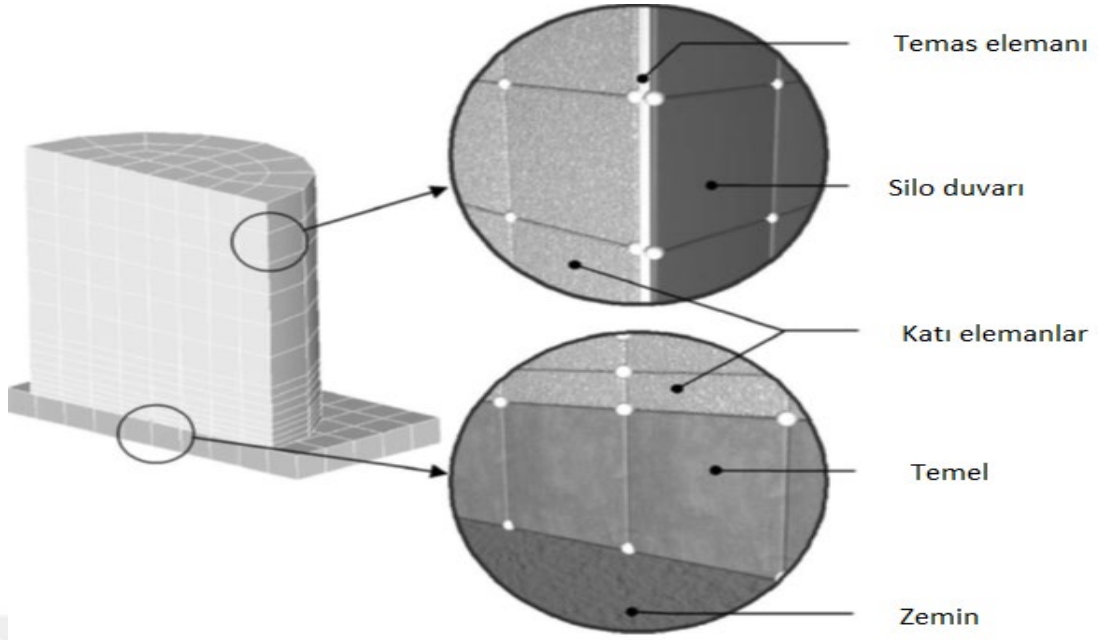
Çalışmalarında abaqus programı kullanarak çalışmalarında silindirik deponun tümü için 3D hesaplamalar gerçekleştirmişlerdir. Araştırmaları sonucunda üç tane güçlendirme methodu önermişlerdir bunlar silo çevresi boyunca çevresel ve yatay rijitleştirme halkaları eklenmesi, halihazırda bulunan rijitleştirici profil alanlarının artırılması (burkulma dayanımı için), halihazırda bulunan rijitleştiricilerin aralarına ekstra dikey rijitleştiriciler eklenmesidir. Lineer olmayan dinamik analiz sonuçlarını yatay yerdeğişirmeler için figür Şekil 2.21’de vermişlerdir.



Şekil 2.21. Doğrusal olmayan analiz sonuçları a) birinci sonuç b) ikinci sonuç (Iwicki, vd. (2011))

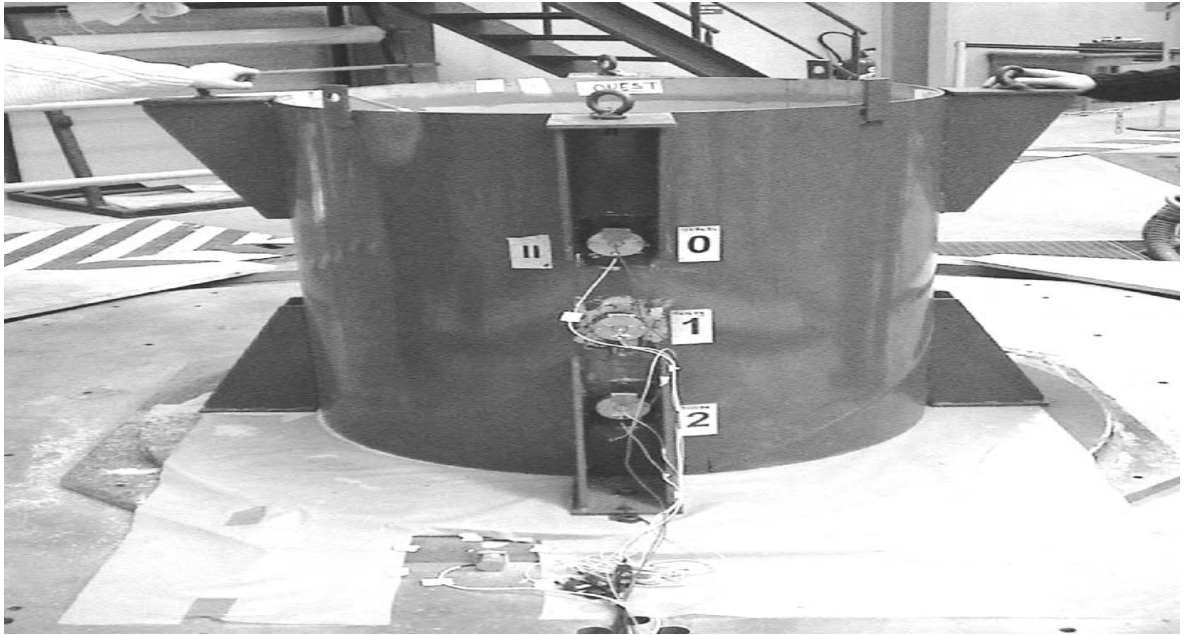
Çalışmalarındaki silindirik metal silolarda meydana gelmiş olan hasar durumlarının dikey rijitleştiricilerin burkulmasından kaynaklandığını ve rijitleştiricilerin burkulma dayanımının Eurocode 3'te izin verilen miktardan 2-4 kat daha düşük bulmuşlardır. Başlangıç durumlarındaki bozuklukların bariz bir şekilde silo için en zarar verebilecek etken olduğunu belirtmişlerdir. Duyarlılık analizi ile çevresel rijitleştiricilerin veya kolon profillerinin burkulma dikey kuvveti üzerindeki etkisinin ifade edilebileceğinden ve bu durumun kolon tasarımı ve rijitleştiricilerin etkili yerleştirilmesi için yardımcı olabilmesinden bahsetmişlerdir. Dikey rijitleştiricilerin eğilme rijitliğinin esas olarak silo yüksekliği boyuna 5 ve 9m arasında 2-3 kat güçlendirilmesinin silo burkulma direncini tasarım seviyesine çıkarabileceğini önermişlerdir.

Holler, vd. (2006), yazılarında sismik hareket altındaki granül materyal silolarının davranışıyla başa çıkılması ile ilgili araştırmalarının sonuçlarını sunmuşlardır. Dinamik silo davranışını açıklamak için bir sayısal model sunmuşlardır. Şiddetli deprem durumlarında granül materyal silolarının yapısal bütünlüğünün korunması popülasyonun ihtiyaçlarının karşılanmasında gerekli bir rol oynamakta ve silolarda birçok etkenin beraber düşünülmesi gerektiğinden dolayı genel olarak sismik davranışlarının karmaşık bir yapıda olduğuna değinmişlerdir. Bu duruma ek olarak dolu silonun büyük kütesinin sıklıkla yapı-zemin etkileşimlerine yol açtığına da değinmişlerdir. Çalışmalarında sismik hareket, doğrusal olmayan materyal özellikleri ve yapı-zemin etkileşimi içerecek şekilde bir sayısal model tanımlamışlardır ve analiz için ANSYS 2003 sonlu eleman program paketini kullanmışlardır. Silo duvarları 8-düğümlü ve ikinci dereceden lineer davranışa sahip şekil fonksiyonları ile ve granüler materyali ise 20-düğümlü katı eleman olarak modellemişlerdir. Şekil 2.22'de sonlu eleman modeli görülebilmektedir.

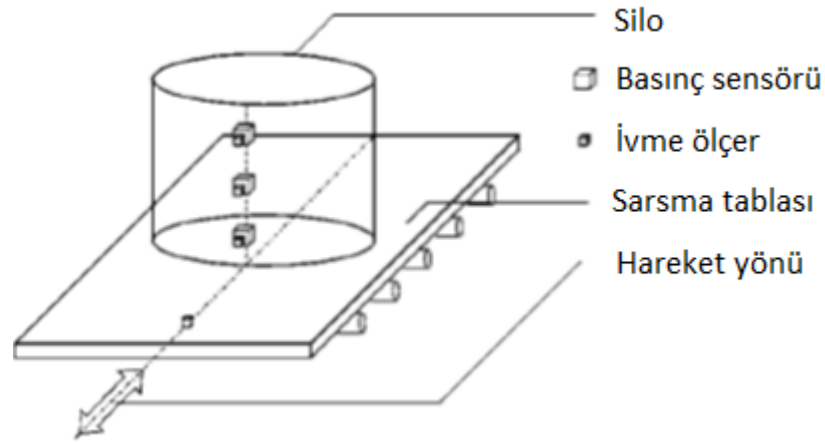


Şekil 2.22. Sonlu eleman Modeli (Holler, vd. (2006))

Tamamlanmış deney düzeneğinde sarsma tablası, çelik silo modeli, ek ivme ölçerler yerleştirmişlerdir. Şekil 2.23 ve 2.24'te verildiği üzere silo modelini hareket ettirilebilen bir tabana oturtarak keyfi yönlerde dinamik yüklerin ölçümüne olanak sağlamışlardır.

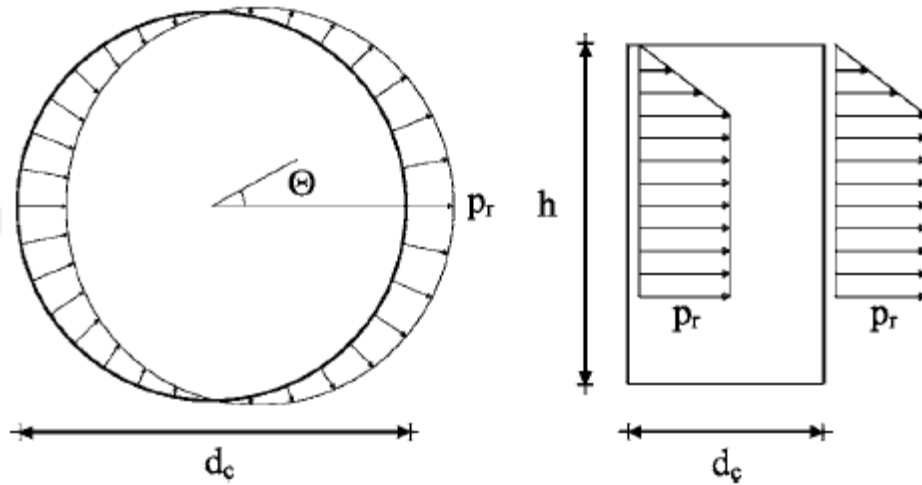


Şekil 2.23. Deney düzeneği (Holler, vd. (2006))



Şekil 2.24. Deneysel düzenek yerleşimi (Holler, vd. (2006))

Dağıtılmış yatay yüklemeyi radyal olarak silo duvarına kütle x yatay ivmelendirme olarak etkitmişlerdir (Şekil 2.25).

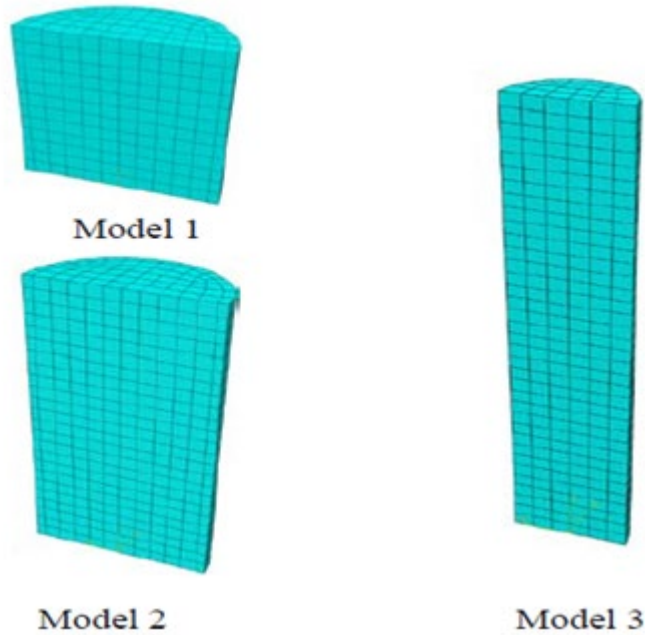


Şekil 2.25. Yatay yüklemenin uygulanışı Yukarıdan görünüş(Sol) Önden görünüş(Sağ) (Holler, vd. (2006))

Eşdeğer statik basınç yaklaşımı sonuçlarının maksimum dinamik ve statik yükleri veren doğrusal olmayan zaman-tanım analizi sonuçları ile karşılaştırmasını her seviye için gerçekleştirmişlerdir. Granül materyal silolarının deneysel kanıta dayalı davranışının incelenmesi ve sayısal analizler ile avrupa standartlarınca yapılmış olan yük kabullerinin doğrulanması ile ilgili uğraşmışlardır. Silo duvarını elastik kabuk elemanları ile modellemiş olup sürtünme yüklerini aktaran bir arayüz bağlantı elemanı tanımlamışlardır. Dinamik analizden elde edilen sonuçların doğrulanması için farklı dinamik

testlerin farklı zaman-tanımlar ile sonuçlarını kıyaslamışlardır. Ayrıca belirtmişlerdir ki silo içerisinde nem etkisinin hesaba katılması ve çok-fazlı model ile değişebilen su içeriklerinin göz önünde bulundurulabileceğini önermişlerdir.

Nateghi ve Yakchalian (2012), yazılarında farklı çap-yükseklik oranına sahip çelik siloların sismik etki altındaki davranışlarını granüler materyal-yapı etkileşimini hesaba katarak incelemişlerdir. Siloların, deprem bölgelerinde depreme dayanıklı inşa edilmesini tavsiye etmişlerdir. Deprem esnasında silo duvarlarının ekstra yüklere maruz kaldığını ve sonuç olarak simetrik olmayan basınç dağılımlarının silo boyunca gerçekleştiğini belirtmişlerdir. Siloda meydana gelen dinamik yüklerin yanı sıra meydana gelen dinamik yükler sonucunda silo içindeki granüler materyalde sıkışmalar da meydana geldiğine değinmişlerdir. Çalışmalarında 3 farklı çap-yükseklik oranına sahip model incelemişlerdir. Sonlu eleman modellemesi için ABAQUS sonlu elemanlar paketi kullanmışlardır. Silo sonlu eleman modeline ait silo duvar ve granül materyale ait mesh görüntülerini Şekil 2.26'da vermişlerdir. Silo içindeki granül materyali ABAQUS tarafından sağlanan bağlantı çifti algoritması ile modellediklerini belirtmişlerdir.

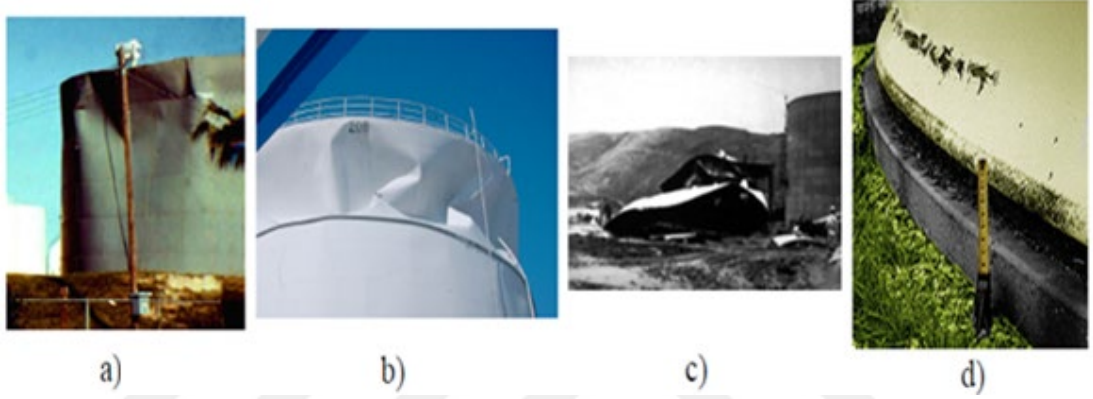


Şekil 2.26. Silo modeli ve taneli malzemenin sonlu eleman görünümü (Nateghi ve Yakchalian (2012))

Analizlerini iki adım halinde birincisinde yerçekimi yüklerini statik olarak ekleyerek ve ikincisinde deprem hareketinin siloya uygulanması ile gerçekleştirmişlerdir. İnce uzun silo olan yükseklik-çap oranı 5 olan modelde bütün metotlardan elde edilen frekans değerlerini birbirine yakın bulmuşlardır. Ancak bu değerden daha düşük yükseklik-çap oranına sahip silolarda elde edilen frekans değerlerinde farklı metotlardan elde edilen değerler arasındaki farkın oldukça büyük olduğuna değinmişlerdir. Düşük yükseklik-çap oranına sahip modellerde granül materyalin silo içindeki titreşiminin yüzeye yakın kısımlardaki etkisinin tepki frekansında büyük bir rol oynamakta olduğunu belirtmişlerdir. Yükseklik-çap oranının 1 olduğu modelde hesaplamış oldukları Eurocode basınç dağılımı yaklaşık olarak güvenli kalmakta olduğunu ve bu oranın 1 den 2 ye çıkarılması sonucunda dinamik basınç zarf eğrileri için silonun üst yarısında bazı noktalarda ucu ucuna Eurocode basınç değerlerini geçtiğine değinmişlerdir. Silo yükseklik-çap oranı 5 e yükseldiğinde zarf eğrilerinin silo üst yarısında dinamik basınç değerleri için Eurocode basınç değerlerini gözle görülebilir bir miktarda aştığını belirtmişlerdir.

Haroun ve Housner (1981), çalışmalarında deforme olabilir silindirik sıvı depolama tanklarının deprem tepkisi analizi için bir metot sunmuşlardır. Sınır çözüm tekniği ve sonlu eleman yaklaşımı ile elde edilmiş yanal titreşim modlarının süperpozisyonuna bağlı bir metot sunmuşlardır. Bu modların doğruluğunun tam-ölçekli titreşim testleri ile onaylandığını belirtmişlerdir. Deprem tepki probleminin diğer dinamik yükleme durumları ile karşılaştırıldığında ayırıcı özelliğinin hareketlenmenin dış yüklerden ziyade taşıyıcı hareketine bağlı bir oluşum olduğunu ve çalışmalarının asıl konusunun taşıyıcı hareketi durumunda tank duvarında etkin dış yük geçişini tanımlayabilecek metodun tartışması olduğunu belirtmişlerdir. Çalışmalarında deprem altında sayısal analiz yapmış olup sarsma tablası test sonuçları ile karşılaştırmalar vermişlerdir. Sonuç olarak rijit bir tabana ankrajlanan duvarların esnekliğinin sistemin deprem tepkisi üzerinde hem geniş hem de uzun tanklarda büyük bir etkisi olabileceği sonucunu çıkarmışlardır.

Rotter (2009), yazısında rüzgar ve kısmi vakum altında burkulmadan bahsetmişler ve tanklarda en yaygın hasar durumunun rüzgar altında göçme (Şekil 2.27 a) veya hızlı boşaltım sonucu oluşan kısmi vakum sonucu olduğuna (Şekil 2.27 b) veya sıvı üzerinde kalan havadaki ısı değişimlerinin neden olabildiğine değinmiştir. Duvar tabanında deformasyona müsait kabuğun büyük lokal yüklere maruz kaldığı yerde çekme dayanımının yetersiz kalmasının yapıyı fil ayağı durumuna getirebileceğine değinmiştir (Şekil 2.27 c).

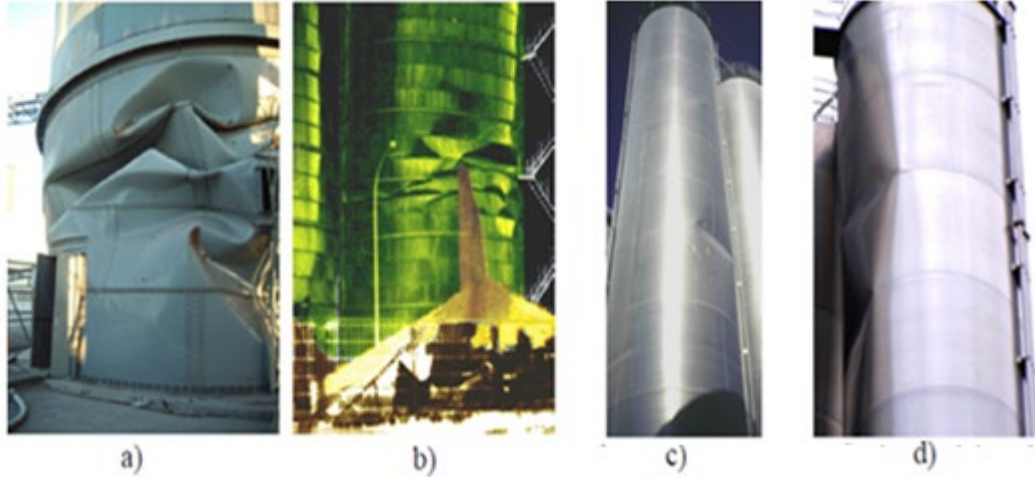


Şekil 2.27. Rüzgar, kısmi vakum ve deprem etkisi altında oluşmuş tank hasarları
a) rüzgar burkulması b) kısmi vakum hasarı c) tankın temelden ayrılması d) sismik etki sonucu fil ayağı oluşumu (Rotter (2009))

Zemine oturtulmuş tankların özellikle sismik yüklenme sırasında depolanan sıvıda meydana gelebilecek çalkantı hareketi sebebiyle hasara açık duruma gelmekte olduğunu belirtmiştir. En yaygın hasar tipinin fil ayağı burkulma modu (Şekil 2.27 d) olduğuna ve yüksek basınçlar altında plastik kararsızlık içerdiğini belirtmiştir. Bu modun doğru tahkikini, etkiyen basınçların dikkatlice değerlendirilmesine bağlamaktadır.

Metal silindirik silolarda görünen en yaygın hasar modunun aksenal basınç altında burkulma olduğunu ve bu hasar modunun yüksek hasarlı olaylara yol açabilecek göreceli simetrik bir yükleme durumu olduğundan bahsetmiştir. Simetrik olmayan basınçlar, özellikle ekzantrik boşaltım esnasında meydana gelebilecek olan basınçların yeteri uzunlukta olan silolar için ciddi ve büyük

çaplı hasar durumlarına yol açabileceğine değinmiştir. Bu tip için örnekler sunmuştur (Şekil 2.28).



Şekil 2.28. Eksenel basınç altında metal silo burkulma hasar durumları a) düzgün sıkışma b) asimetrik sıkışma c) eksantrik boşaltım d) eksantrik boşaltım kaynaklı burkulma (Rotter (2009))

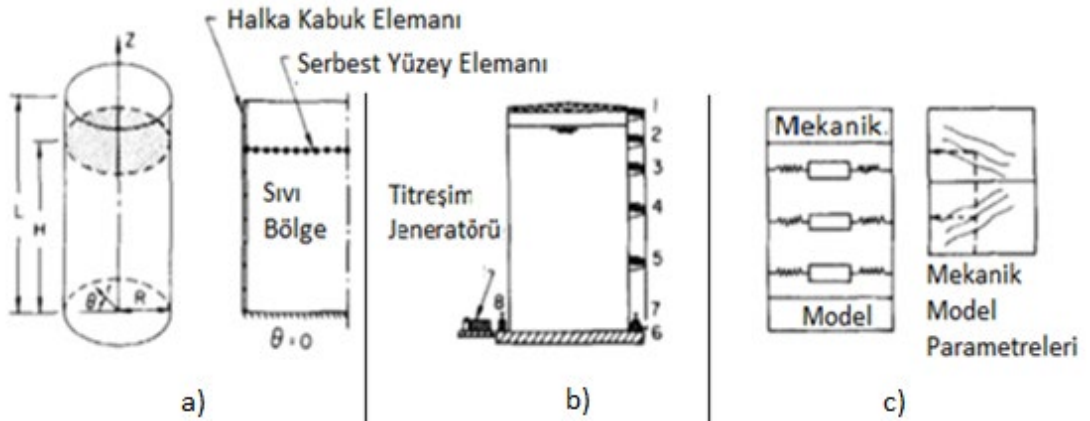
Zemine oturtulmuş olan silo tipi depolama yapılarının zeminde meydana gelebilecek farklı oturmalar sonucunda oluşabilecek burkulma durumlarına karşı sergileyebileceği yatkınlıktan bahsetmiştir. Bu tür problemler yapıların alakadar olan oturma alanı içinde kalan kısımlarda daha önceden uzun dönem bulunmuş olan benzer yapı tiplerinin bulunmuş olması veya bitişiğine bir zaman sonra çok yakına başka bir silonun inşa edilmesi ve lokal oturmalara yol açması gibi durumlarda oluşabileceğine değinmiştir. Sonuç itibariyle bu durumu takiben metal silolarda oluşabilen yumrular göreceli olarak endişe vermemekle beraber, betonarme silolarda bu durumu takiben oluşabilecek çatlakların beton silolarda depolanan materyalin hasarına veya sıvı sızıntısına sebep olabileceğini belirtmiştir.

Zemine oturtulmuş siloların sismik etkiler altında tanklara göre daha az hasara yatkın olduğunu bunun sebebinin depolanan katının yatay ivmelenmeler sonucu oluşan kuvvetlerin büyük bir kısmının direk zemine transferinden kaynaklandığına değinmiştir. Bu durumun granül katıların statik sürtünme davranışının bir faydası olarak nitelendirmiştir. Bu durum içinde en yaygın olan hasar durumunun fil ayağı burkulma modu (Şekil 2.27 d) olduğunu belirtmiştir. Birçok silo ve tank yapılarının yaygın olarak pek çok kompleks yükleme

durumlarına maruz kaldığını ve doğrusal olmayan bir modelleme ile her koşul için iyi öngörüler elde edilebileceğinin mümkün olduğuna değinmiştir.

Haroun, (1983) çalışmasında zemine oturtulmuş deforme olabilir silindirik sıvı depolama tanklarının dinamik davranışının teorik ve deneysel incelenmesi üzerinde durmuştur. Statik halka gerilmelerinin duvar titreşimleri üzerindeki etkisini incelemek, sıvı çalkantı modları ve kabul titreşim modları üzerinde birleştirmenin etkisini incelemek, temel zemininde esneklik etkisini ve çatı rijitliğini incelemek için analiz uygulamıştır. Yapmış olduğu araştırmanın ikinci adımı tam ölçekli tanklarda titreşim testlerini içermektedir ve temelleri farklı 3 su depolama tankının titreşimlerini ölçmüş olup bunları hesaplamış olduğu mod şekilleri ve frekanslar ile kıyaslayarak deneysel sonuçlarla iyi bir eşleşme yakaladığını ve gerçekleştirmiş bulunduğu teorik analizin doğruluğunun onaylandığını belirtmiştir.

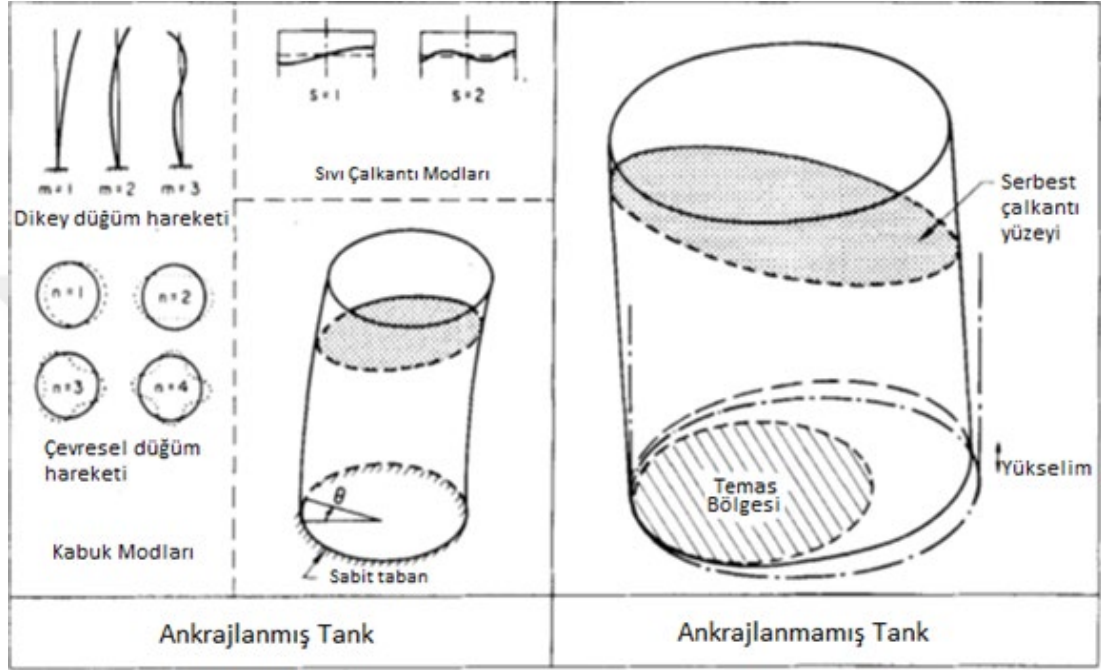
Çalışmasında tank duvarının deformasyonunu hesaba katan bir mekanik model geliştirmiştir ve çalışmanın genel görünümü Şekil 2.29'da görülebilmektedir.



Şekil 2.29. Çalışmanın genel görünümü a) teorik çalışma b) titreşim testleri c) sismik tasarım (Haroun (1983))

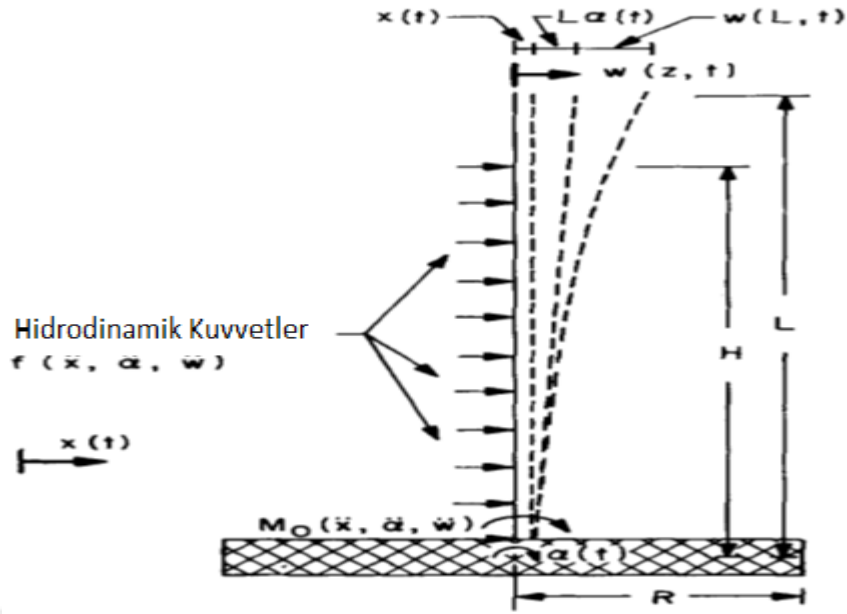
Zemine oturtulmuş tankların mesnet koşullarına göre iki kategoriye ayrılmış olduğunu ve bunların ankrajlı tanklar ve ankrajsız tanklar olduğuna değinmiştir. Ankrajsız tanklarda, tankların güçlü bir sarsmaya tepki olarak temelden kalkabileceğini ve bu yüzden sismik davranışının öngörülmesi için doğrusal olmayan analize ihtiyaç duyulduğuna değinmiştir. Ankrajlı tanklarda ise zemin

seviyesindeki kabuğun yatay hareketi engellenmiş olduğu için sismik davranışının doğal titreşim modlarının değerlendirilmesi ve onların düzgün süperpozisyonları ile elde edilebileceğinden bahsetmiştir. Şekil 2.30'da bu modların çevresel ve yatay düğüm desenleri ek olarak da kabuk titreşim modları ve sıvının düşük frekanslı çalkantı modları görülebilmektedir.



Şekil 2.30. Zemine oturtulmuş tankların sismik davranışı (Haroun (1983))

Sallantı hareketinin genellikle yükseklik-yarıçap oranı 2 ye 1 olan tanklarda görülmekte olduğunu ve bunun sonucu olarak yapı-zemin etkileşimi sorunlarına yol açtığına değinmiştir. Sistemi zeminin esnekliğini ve sönümünü temsil edecek şekilde yay amortisörü ile desteklenen dikey konsol bir kiriş (Şekil 2.31) olarak modellemiştir.



Şekil 2.31. Tank temel sisteminde hidrodinamik yüklerin görünümü (Haroun (1983))

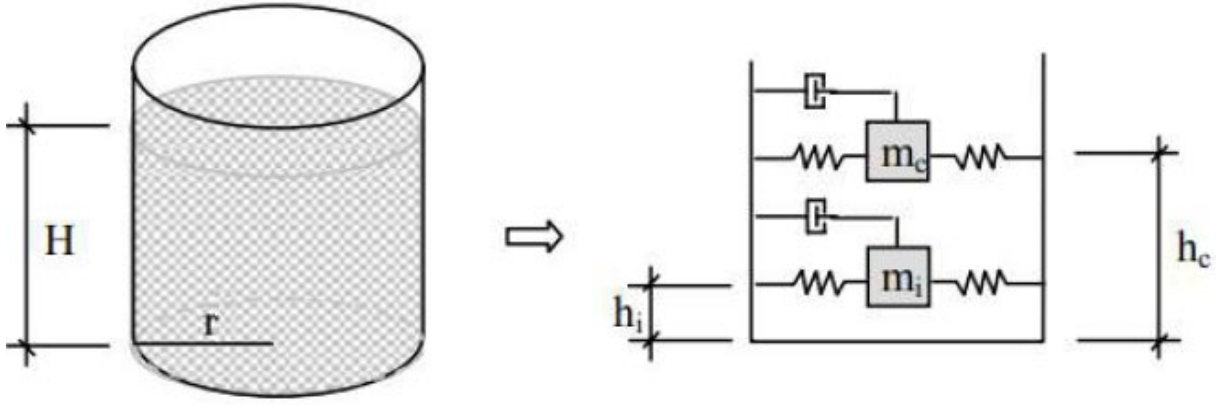
Çalışmasında ankrajlı zemine oturtulmuş silindirik sıvı depolama tanklarının dinamik karakteristiklerinin hesaplanması için basit ve efektif olarak hesaplanabilir bir metot sunmuştur. Elastik kabuğu sonlu elemanlar ile ve sıvı bölgeyi sınır çözüm tekniği ile modellemiştir. Zemine sabitlenen silindirik sıvı depolama tankları için basit ve hesaplanabilirlik açısından etkili bir metot sunduklarından bahsetmişlerdir. Ayrıca elastik kabuğun sonlu elemanlar kullanılarak ve sıvı bölgenin sınır çözüm teknikleri ile ele alındığına değinmişlerdir. Sıvı çalkantı modları ve kabuk titreşim modları arasındaki birleşimin zayıf olduğu ve sonuç olarak konvektif basıncın, tank duvarının rijit olduğu kabulü yapılarak yeterli bir doğrulukta değerlendirilebileceğine değinmiştir.

Çelik vd. (2018), çalışmalarında sonlu elemanlar metodu kullanarak modellemiş oldukları tankın sismik yük altındaki doğrusal-elastik olmayan davranışını incelemişlerdir. Çalışmalarında silindirik çelik tankların kullanım alanları ve yapıya etkileyen yüklerden bahsetmiş, sıvı-yapı etkileşiminden kaynaklanabilecek farklı basınçların silindirik çelik su tanklarında sismik analizin karmaşık olduğuna değinmişlerdir.

Çalışmalarında geçmişte gerçekleşmiş olan depremler ve bunları takiben meydana gelmiş olan genellikle ağır hasarlarla sonuçlanmış bazı hasar durumlarından örneklere yer vermiş ve bu tür hasar durumlarının oluşturduğu potansiyel güvenlik tehlikesine değinmişlerdir. Normal yapılardan farklı olarak depolanan sıvının kendi yükünün yanı sıra çalkalanmaya bağlı olarak meydana gelebilecek hasar ve göçme tiplerinin genellikle aşırı basınç gerilmesi etkisi altında tank duvarında meydana gelebilecek burkulma, ankrajların göçmesi ve taban plağında plastik deformasyon şeklinde görülebildiğinden bahsetmiştir. Deprem sonucunda sıvı depolama tanklarında sıklıkla görülebilen bazı bozulmaları listelemişlerdir.

- Fil ayağı burkulması
- Elmas şekli burkulması
- Tank tavanının çökmesi
- Bağlantı hasarı
- Elastik burkulma(tank üst tarafında)
- Tankın kayması
- Tankın temele oturması

Tank içindeki sıvı hareketini tankın alt tarafında, tankla birlikte hareket eden impulsif kütle ve tankın üst tarafında tank ile ters yönde çalkalanma hareketinden elde edilen konvektif kütle olarak tek serbestlik dereceli model olarak Şekil 2.32'de görülebilmektedir. Çalışmalarında hidrostatik ve hidrodinamik basınç etkileri altında silindirik çelik su tanklarının tasarımını teorik olarak özetlemişlerdir. Sıvı yüksekliği ile doğru orantılı ve ayrıca sıvı yoğunluğuna bağlı olan hidrostatik basıncı modellemişlerdir.



Şekil 2.32. Silindirik çelik sıvı depolama tankı dinamik modeli (Çelik vd. (2018))

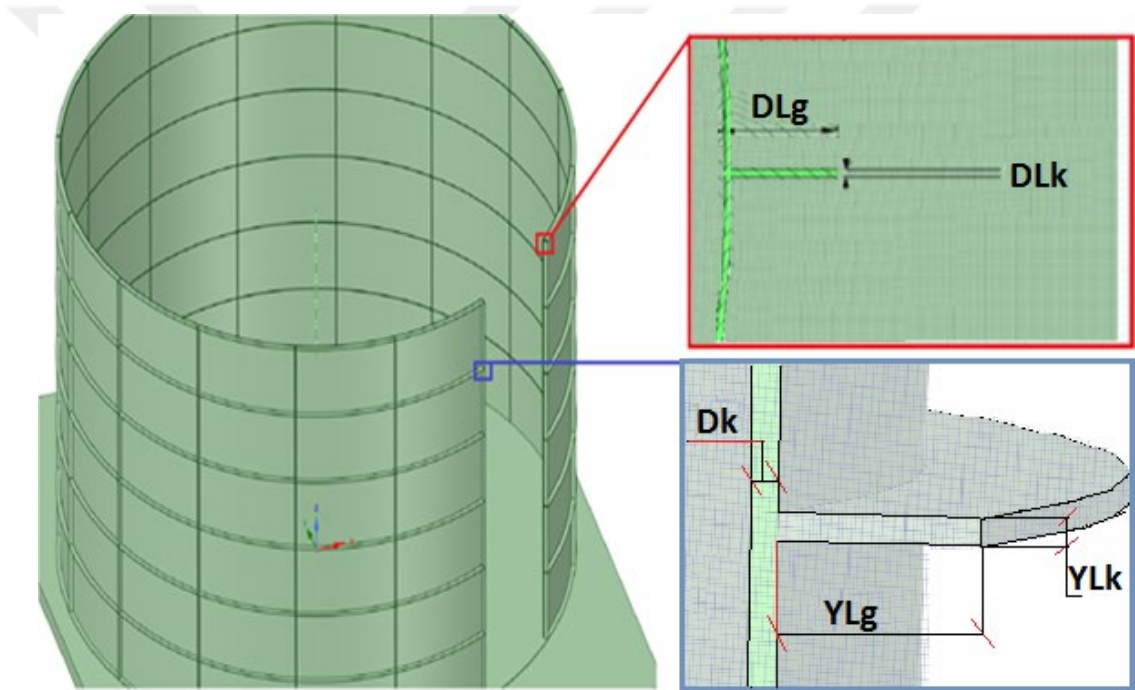
Hidrodinamik basıncın duvar üzerindeki devrilme etkisine ek olarak taban üzerinde eşit olmayan basınç, devrilmeye neden olabilir. Tank tabanında ve duvarında meydana gelen devrilme etkisine değinmişlerdir. Çelik vd. yapmış oldukları araştırmada Ansys Workbench programını kullanarak sonlu eleman modeli oluşturmuşlardır ve sismik analizini yaptıklarını belirtmişlerdir. Yapı doğal titreşim periyotları ve mod şekillerinin önemine değinerek çalışmalarında öncelikle modal analiz gerçekleştirmişlerdir.

Analiz sonrasında 1940 El Centro (6.9 büyüklüğü) depreminin verileri ile zaman-tanım alanında analiz gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalarında en yüksek deformasyonu konik modelde ve en düşük deformasyonu kubbeli modelde yakalamışlardır.

Önemli mühendislik yapıları olan bu tankların kullanımlarının ülkemizde ve dünyada yaygınlaşmasından ve ülkemizde kullanılan tiplerden konik çatının yaygın olduğunu ve yaptıkları analiz sonucunda maksimum gerilmenin konik kapatılan yapılarda olduğunu ve kubbe şeklinde kapatıldığında deprem anında hasar görme ihtimalinin daha düşük olduğundan bahsetmişlerdir. Yaptıkları çalışmada sonlu elemanlar metodu ile gerçekleştirdikleri bu sismik analizin çelik tank üreticileri için bir referans olabileceği tavsiyesinde bulunmuşlardır.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Sayısal ve deneysel olarak yapılan bu çalışmada; dinamik etki altındaki silo tipi çelik yapıların sıvı çalkantısına bağlı yapısal davranışın incelenmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla üç farklı çap değeri için sabit yükseklik altında sayısal modeller oluşturulmuştur. Ansys Workbench sonlu elemanlar programı kullanılarak oluşturulan sayısal modellerde, silo cidarı, yatay ve düşey yönde rijitleştirme halkaları kullanılarak desteklenmiştir. Şekil 3.1'de kullanılan rijitleştirme levhalarının boyutsal parametrelerini ifade eden bir genel görünüm verilmiştir.



Şekil 3.1. Rijitleştirme levhalarının boyutsal parametreleri

Dinamik etki altındaki meydana gelen dalga kuvvetinin silo cidarında daha güvenli bir şekilde sönmülmesini sağlamak amacı ile kullanılan rijitleştirme halkalarının yapısal davranışa etkisini inceleyebilmek için yerleşim düzeni bakımından farklı kombinasyonlar oluşturulmuştur. Çalışmada kullanılan tüm sayısal modellerde silo cidarı 20mm alınmış ve bu değer sabit tutulmuştur. Rijitleştirme halkaları için kullanılan levha genişlikleri hem düşey hem de yatay levhalar için $DLg/ YLg=150\text{mm}$, levha kalınlıkları ise $DLk/YLk=20\text{mm}$ olarak

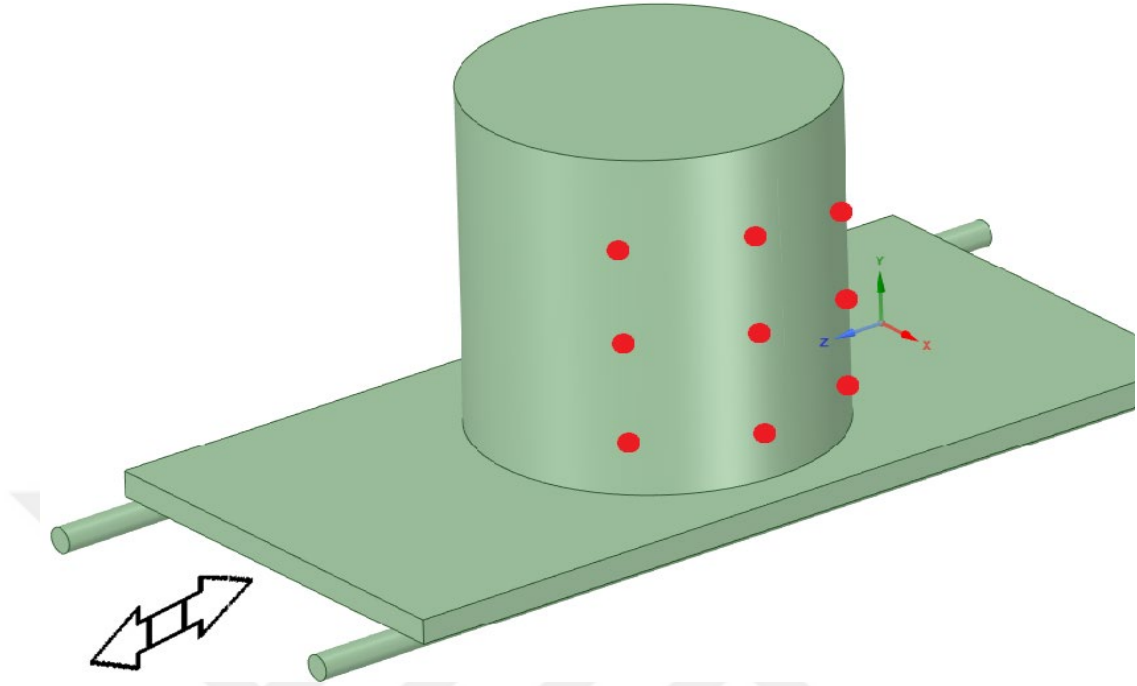
modellenmiştir (DL: Düşey levha, YL: Yatay levha, D: Duvar). Düşey levha ve yatay levhaların davranışça farklılıkları ortaya koyabilmek için yerleşim şekilleri şu şekilde düzenlenmiştir. Yatay levha yerleşim şekli sabit 12m yükseklik için 2m ve 1m aralıkla 6 ve 12 adet kullanılmıştır. Düşey levha yerleşim düzeni ise dairesel planda 8 ve 16 adet kullanılarak tasarlanmıştır. Farklı çap durumu, sabit yükseklik için levha yerleşim sayıları kendi içlerinde kombinasyon oluşturularak toplamda 14 model oluşturulmuştur. Çizelge 3.1’de çalışmada kullanılan sayısal modellerin boyutsal parametreleri ve isimlendirmeleri gösterilmiştir.

Çizelge 3.1. Model parametreleri

Model No.	Düşey Levha Sayısı(adet)	Yatay Levha Sayısı(adet)	DLg (mm)	YLg (mm)	Su Seviyesi (mm)	YLk (mm)	DLk (mm)	Dk (mm)	Çap (mm)	Yükseklik (mm)
S11	8	-	150	-	7000	20	20	20	12500	12000
S12	-	6	-	150	7000	20	20	20	12500	12000
S13	8	6	150	150	7000	20	20	20	12500	12000
S14	16	6	150	150	7000	20	20	20	12500	12000
S15	8	12	150	150	7000	20	20	20	12500	12000
S16	16	12	150	150	7000	20	20	20	12500	12000
S22	-	6	-	150	7000	20	20	20	17500	12000
S23	8	6	150	150	7000	20	20	20	17500	12000
S25	8	12	150	150	7000	20	20	20	17500	12000
S26	16	12	150	150	7000	20	20	20	17500	12000
S32	-	6	-	150	7000	20	20	20	25000	12000
S33	8	6	150	150	7000	20	20	20	25000	12000
S35	8	12	150	150	7000	20	20	20	25000	12000
S36	16	12	150	150	7000	20	20	20	25000	12000

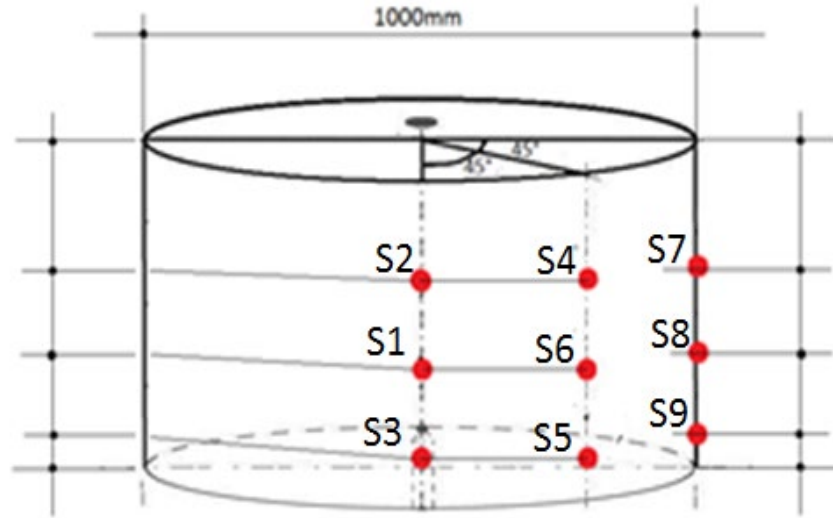
Dinamik etki altına meydana gelecek olan sıvı çalkantısının silo davranışına etkisinin incelendiği bu çalışmada dalga kuvvetinin yapısal davranış için etkin durumları dikkate alınmıştır. Bu durumu belirleyebilmek için deneysel bir model oluşturulmuştur. Yapılan deneysel çalışmada kullanılan model boyutları 400mm yükseklik, 1000mm çap ve 0,5mm cidar kalınlığındaki S235 çelik

sınıfına sahip uniform saç malzemeden tasarlanmıştır. Şekil 3.2'de oluşturulan deneysel modelin genel görünümü verilmiştir.



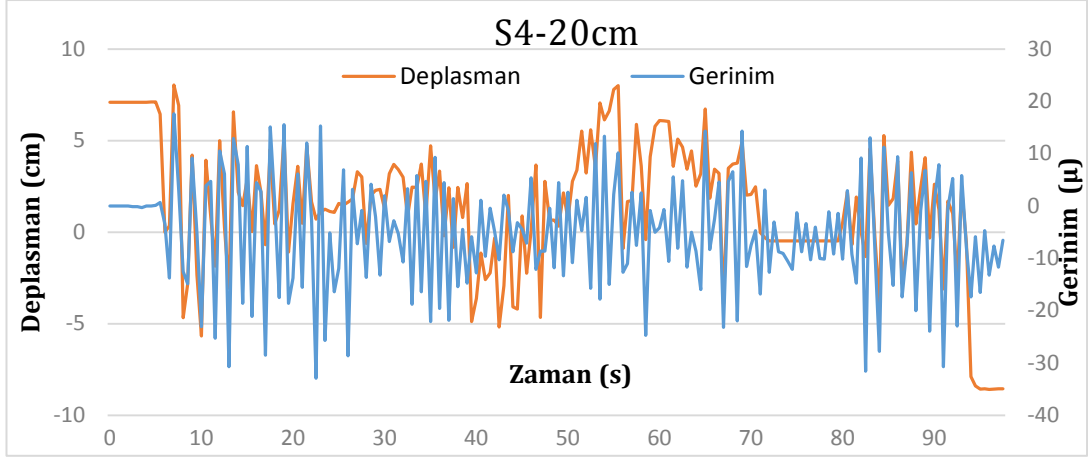
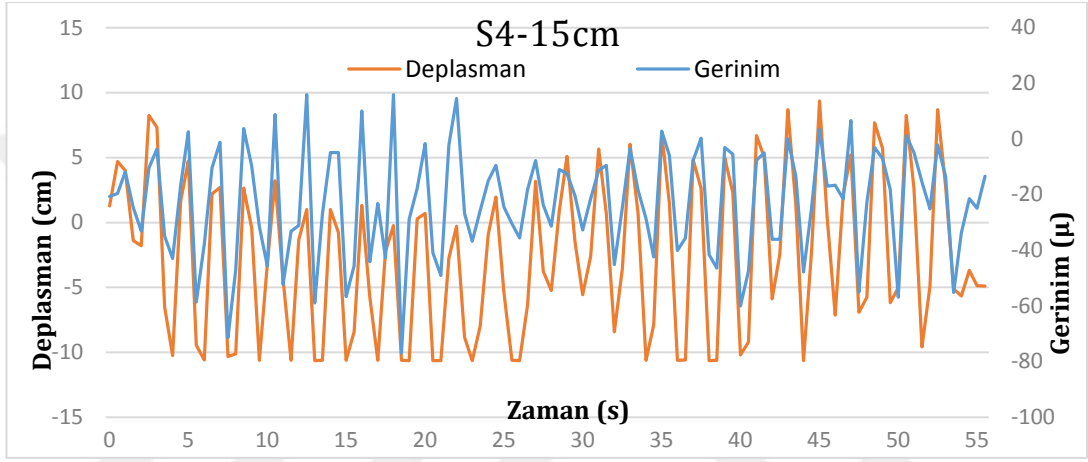
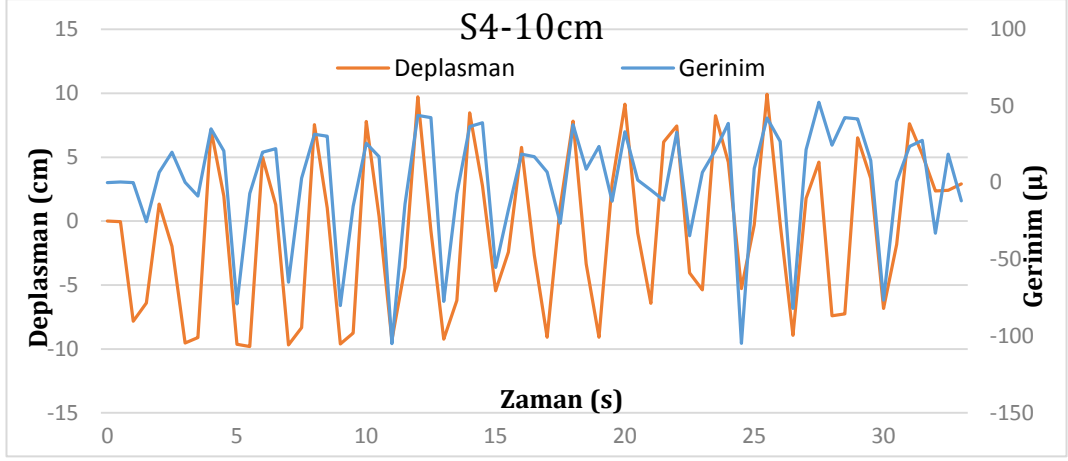
Şekil 3.2. Deneysel modelin genel görünümü

Silo tipi bir yapıda su seviyesine bağlı dalga /yapı etkileşimi için en olumsuz durumların ortaya konulabilmesi için oluşturulan deneysel analizde; farklı su seviyeleri için sarsma tablası kullanılarak, dalga kuvveti üretilmiştir. Yapının dalga kuvveti altındaki davranışını belirleyebilmek için model dış yüzeyine gerinim ölçer pullar yapıştırılarak, etkiyen dalga yükü altında silo cidarındaki şekil değiştirmeler tespit edilmiştir. Şekil 3.3'de gerinim ölçer pullarının yerleşim düzeni verilmiştir.



Şekil 3.3. Gerinim pullarının yerleşim düzeni

Dalga kuvveti altında silo cidarındaki şekil değiştirmeyi temsil etmek için dokuz farklı gerinim ölçer 3 farklı eksen üzerinde maksimum şekil değiştirmenin beklendiği yön ve durum dikkate alınarak yerleştirilmiştir. Deneysel analizde dalga kuvveti yerdeğiştirme kontrollü olarak manuel bir şekilde uygulanmıştır. Bu kapsamda sarsma protokolleri farklı su seviyeleri için, düşük ve yüksek frekanslı hareket meydana getirecek şekilde oluşturulmuştur. Yükleme protokollerinde su seviyeleri sırasıyla %15 lik artışla 50mm, 100mm, 150mm, 200mm ve 250mm olarak belirlenmiş ve dalga yükü elde edilmiştir. Yapılan dalga analizi sonucunda farklı su seviyeleri için cidarda meydana gelen şekil değiştirmeler verilmiştir. Grafikler sarsma tablası yerdeğiştirme (deplasman) değerine karşılık silo cidarındaki şekil değiştirmeyi temsil etmektedir. Şekil 3.4’de yapılan ölçümler içinde x ekseninde yer alan S4 No’lu gerinim pulu için ölçülen değerler verilmiştir. Burada 10 cm, 15 cm ve 20 cm’lik değerler su seviyesini belirtmektedir.



Şekil 3.4. S4 numaralı gerinim pulu okumaları

Şekilde verilen değerler incelendiğinde; sarsma tablası için kullanılan yerdeğiştirme (deplasman) genliğinin ± 10 cm aralığında değerler aldığı görülmektedir. Uygulanan yerdeğiştirme koşulları için maksimum şekil değiştirme S4 no'lu gerinim pulu için okunmuştur. Aynı yerdeğiştirme koşulu farklı su sevipleri için elde edilen değerler incelendiğinde 100 mm su seviyesi için

100 mikron(μ), 150 mm su seviyesi için 80 mikron(μ), 200 mm için 30 mikron(μ) şekil değiştirme tespit edilmiştir. Su seviyesindeki artış, hidrostatik basınç ve dalga yüksekliğinde artış meydana getirirken, silo rijitliği üzerine pozitif katkı sağlaması sebebi ile şekil değiştirmeleri sınırlandırmaktadır. Deneysel çalışmada uygulanan yükleme protokolleri için deneysel modelin silo cidarında tespit edilen şekil değiştirme sonuçları değerlendirildiğinde en olumsuz durumun yani en büyük yer ve şekil değiştirmelerin silo yüksekliği boyunca %30-60 aralığında elde edildiği görülmüştür. Bu seviyeden sonra su yüksekliğine bağlı artan yapısal rijitlik ile dalga yükünden dolayı oluşan deformasyon talebinin sönmüldüğü tespit edilmiştir.

Deneysel çalışmada elde edilen veriler üzerinden, sayısal analizlerde kullanılacak olan su seviyesi %60'lık doluluk (Yükseklikçe) oranını temsilen 7000mm alınmıştır. Bu seviyenin belirlenmesinde, oluşan dalga yüksekliği, silonun bu etkiye olan tepkisi ve siloya uygulanacak sismik yükleme için su kütlesinin etkin bir değer aralığında olması belirleyici olmuştur.

Sayısal analizlerde %60 doluluk için sismik yük altında hesaplanan dalga kuvveti, statik olarak silo cidarına uygulanmıştır. Statik olarak uygulanan dalga yükünün hesabında aşağıda tanımlanan dalga yükü denklemi kullanılmıştır.

$$F = F_D + F_I = C_D \frac{\omega}{2g} AU|U| + C_M \frac{\omega}{2g} V \frac{dU}{dt} \quad (3.1)$$

F: Eleman boyuna eksenine normal olarak etki eden birim uzunluk başına gelen hidrodinamik kuvvet

F_D : Birim uzunluk başına çekme kuvvetidir;

F_I : Birim uzunluk başına atalet kuvvetidir;

C_D ve C_M : Sırasıyla sürüklenme ve atalet katsayılarıdır;

P: Suyun özgül ağırlığı

g : Yerçekim ivmesi

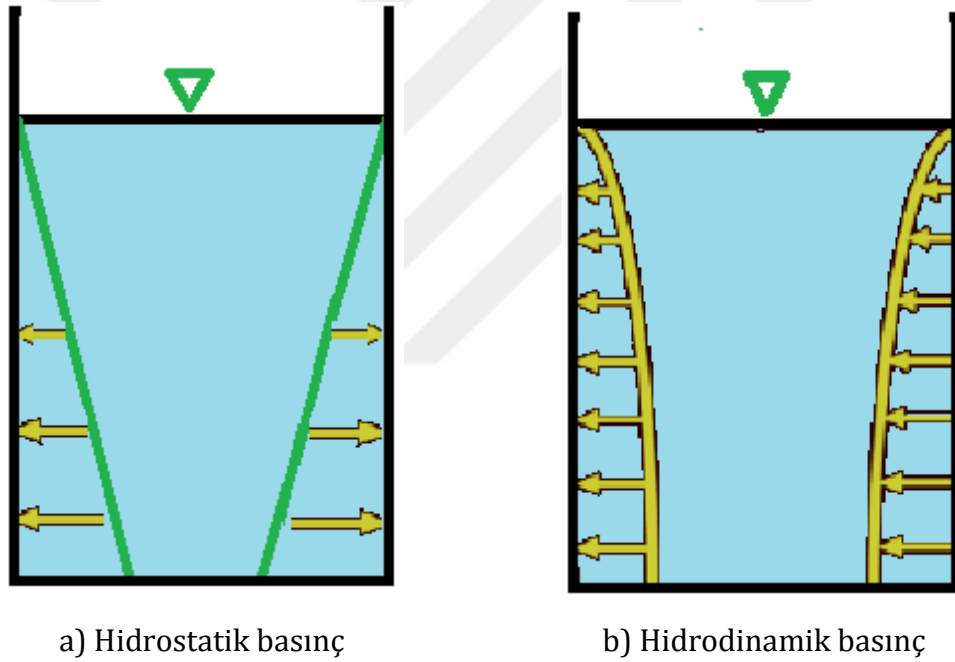
A: Birim uzunluk başına gelen alan

V: Birim uzunluk başına yer değiştirme hacmi

U: Elemanın eksenine normal etki eden su parçacık hızı bileşeni (CSI, 2019).

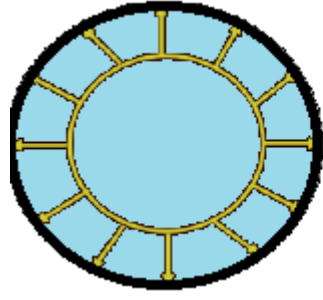
Morison denklemleri kullanılarak hesaplanan dalga yüksekliği için elde edilen yük değerleri silo cidarına statik olarak uygulanmıştır. Yük değerlerinin uygulama şeklinde Hidrostatik ve hidrodinamik basınç etkisi altındaki silindirik çelik su tanklarının tasarım teorisi dikkate alınmıştır.

Hidrostatik su basıncı, sıvı yüksekliğince artarak değişen basınç gerilmesi olarak etkir ve Şekil 3.5'de görüldüğü üzere sıvının üstünden herhangi bir noktaya olan yüksekliğe ve yoğunluğa bağlı olarak artan bir dağılımda etkimektedir. Ancak taban hareketine bağlı olan hidrodinamik basınç etkisi ise eğrisel bir dağılım ile silo yüzeyine etkimektedir.

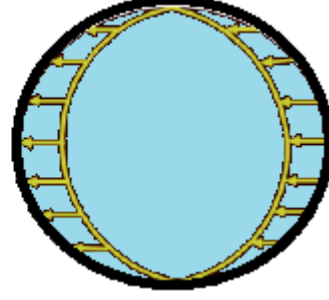


Şekil 3.5. Dinamik ve statik su basıncının etkimesi a) hidrostatik basınç durumu
b) hidrodinamik basınç durumu

Dairesel kesitli siloya etkiyen hidrodinamik ve hidrostatik basınç dağılımı Şekil 3.6 a ve b'de tanımlanmıştır. Hidrostatik etki tüm silo cidarına eşit ve merkezden dışa doğru dağıldığından toplam kuvvet sıfırdır. Ancak hidrodinamik etkide, hareket yönüne bağlı olarak bir yönde itme, bir yönde emme etkisi altında oluşan gerilmeler yapı davranışı için toplam kuvvet olarak bir yönde yatay yerdeğiştirme talebi meydana getirmektedir.



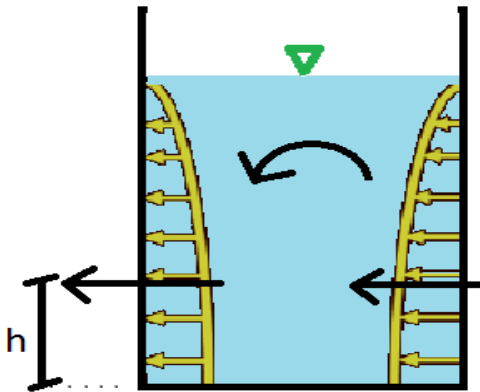
a) Statik dağılım



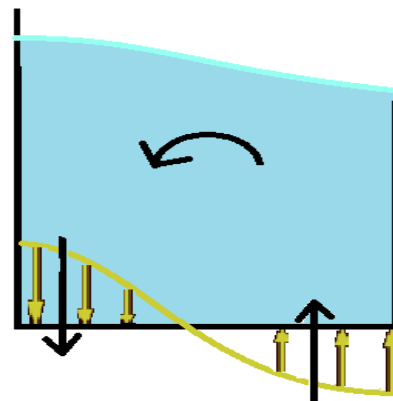
b) Dinamik dağılım

Şekil 3.6. Dinamik ve statik yük yukarıdan görünüm a) statik dağılım b) dinamik dağılım

Silo içerisinde sıvı kütlesinin statik tasarımca etkisinde hidrostatik basınç göz önünde bulundurulur. Hidrostatik basınç silo cidarında eksenden dışa doğru etkiyen basınç dağılımlarını meydana getirir. Bu durum silo cidar kalınlıklarına göre etkinliği değişen eğilme momentlerini tetikler. Hidrodinamik basınç kuvveti ise silo cidarında meydana getirdiği itme ve çekme etkisine bağlı olarak cidar basıncı oluşturmakta ve silo cidarı eğilme momentlerine ilaveten yapı temelinde devrilme momentlerini tetiklemektedir (Şekil 3.7). Bu sebeple sismik tasarımda ise hidrodinamik basınç göz önünde bulundurulur. Hidrodinamik basınç kaynaklı ortaya çıkan hidrodinamik kuvvetin sıfırdan farklı olma durumu yapısal bütünlükte devrilmeye sebep olduğundan silo tasarımlarında, hidrodinamik etki dikkate alınmaktadır. Hidrodinamik basınç ve kuvvet prosedürü Housner (1963)'ın klasik çalışmasına dayanır.



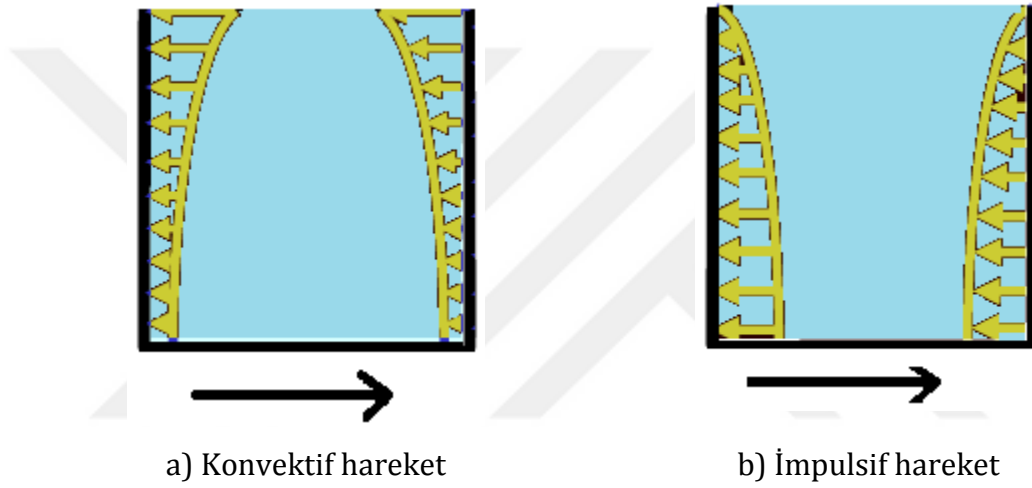
a) Duvar basıncı ile devrilme etkisi



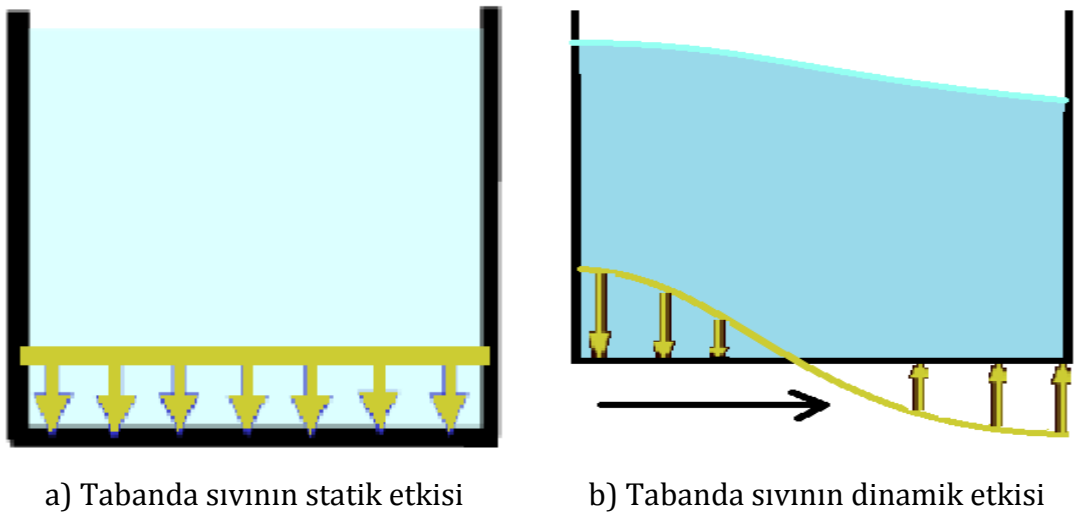
b) Taban basıncı ile devrilme etkisi

Şekil 3.7. Devrilme etkisi a) duvar basıncı etkisi b) taban basıncı etkisi

Housner'in çalışmasına göre ivmeli yer hareketine maruz kalan bir tankın alt kısmındaki sıvı duvar ile birlikte hareket ederken, üst kısımdaki sıvı çalkalanır ve duvara göre ters yönde hareket eder. Bu durum impulsif (tepkisel) kütle ve konvektif (iletimsel) kütle olarak tanımlanmıştır. Taban ok yönünde hareketlenmektedir. İmpulsif kütle sıvı duvar ile birlikte hareket eder; rijit olarak bağlanmış duvar ile aynı ivmelenmeyi yapar. İmpulsif kütle Şekil 3.8 (a) da görüldüğü gibi tabana doğru artan bir yay şeklinde hareket ederken, 3.9 (b) de konvektif kütle tankın üst tarafında çalkalanma etkisi ile farklı bir ivmelenme ile hareket etmektedir.



Şekil 3.8 Sıvı içinde konvektif ve impulsif ivmesel hareketler a) konvektif hareket b) impulsif hareket



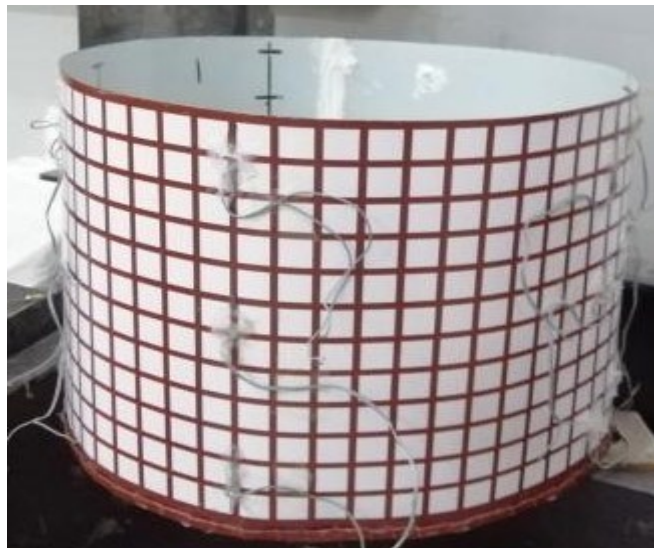
Şekil 3.9 Taban basınçları a) sıvının statik etkisi b) sıvının dinamik etkisi

Statik yük olarak analizlerde kullanılan dalga yükleri silindirik çelik su tanklarının tasarım teorisi baz alınarak etkilmiş ve analiz edilmiştir. Analizlerde Ansys WorkBench sonlu elemanları programı kullanılmıştır. Modellerde malzeme özellikleri Çizelge 3.2 'de tanımlanan malzeme özellikleri kullanılmıştır.

Çizelge 3.2. Yapı çeliği malzeme özellikleri

Çelik Sınıfı	Karakteristik Kalınlık t (mm)			
	t≤40mm		40<t≤80mm	
	F _y (N/mm ²)	F _u (N/mm ²)	F _y (N/mm ²)	F _u (N/mm ²)
S235	235	360	215	360

Sayısal modellerde silo cidarları ve tabanı solid olarak modellenmiştir. Uygulamada silo cidarını ve rijitleştirme levhalarının bağlantıları tam penetrasyonlu kaynak dikişi olarak inşa edildiği için katı modelleme tekniği kullanılmıştır. Bağlantı noktaları bir bütün olarak ele alınmış, ayrıca bağlantı elemanı tanımlanmamıştır. Tüm modellerde, otomatik mesh kullanılmış olup sonlu eleman sayısı 18.000 aralığında, düğüm noktası sayısı 140.000 aralığında tasarlanmıştır. Sıvı derinliğine bağlı değişen hidrostatik basınç ve sismik etki kaynaklı hidrodinamik etki gerilme dağılımı olarak silo cidarına uygulanmıştır. Deneysel modelin görünümü Şekil 3.10'da verilmiştir.



Şekil 3.10. Deneysel model genel görünüm

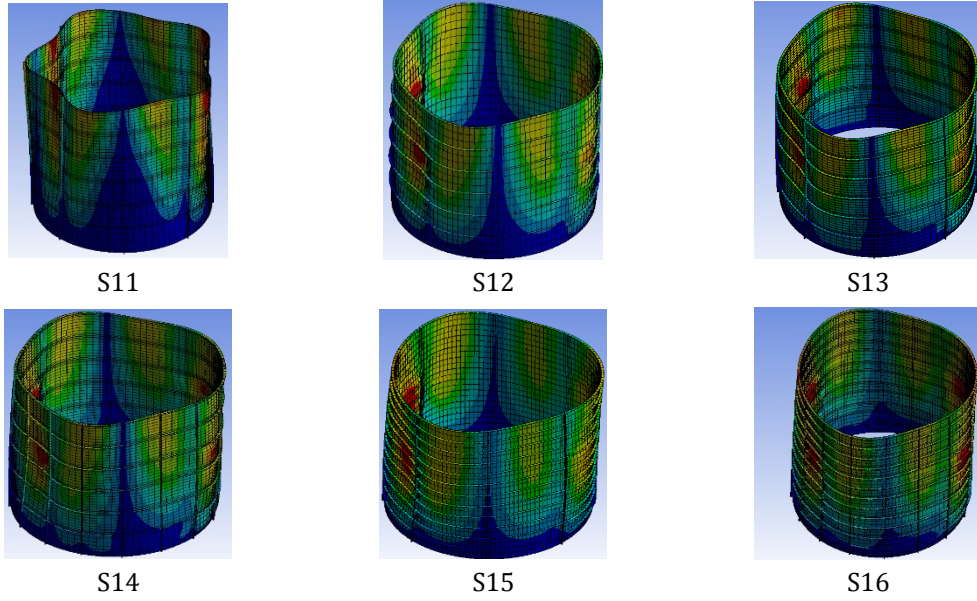
4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Dalga yükü etkisi altındaki silo tipi su tankının yapısal davranışının incelendiği bu çalışmada silo cidarındaki rijitliği artırmak ve deformasyonları kontrol altına almak için düşey ve yatay yönde rijitleştirme levhaları kullanılmıştır. Kullanılan rijitleştirme levhalarının yatay ve düşeyde yerleşim düzeninde olmasının yapısal davranışça farklarını ortaya koyabilmek için sayı ve yerleşim şekline farklı kombinasyonları modellenerek analiz edilmiştir. Yapılan analizleri aynı referans yük değerinde olabilmesi için tüm modellerde silo içindeki sıvı yüksekliği sabit alınmıştır.

Analizlerde su kütlesi etkisi altında oluşan dalga kuvvetleri hidrodinamik olarak hesaplanmış ancak sisteme statik olarak etkilmiştir. Hesaplanan dalga kuvvetleri dalga yönündeki silo iç çeperine basınç, diğer yöndeki iç yüzeye emme yükü yüzey basınç olarak tanımlanmıştır.

Rijitleştirme levhaların yerleşim şekli ve sayısına göre yapısal davranışların irdelenebilmesi için, tüm modellere ait deforme olmuş durumlar, yükler, cidardaki yerdeğiştirmeler ve cidar gerilme değerleri hesaplanmıştır.

Bu kapsamda 12,5m çap, 12m yüksekliğe sahip S1 serisine ait deforme olmuş durumlarına ait görseller Şekil 4.1'de verilmiştir. Şekil incelendiğinde sadece düşey rijitleştirme levhalarının kullanıldığı S11 modelinde silo cidarının literatürde "M" tipi deformasyon olarak tanımlanan şekil değiştirme durumun en belirgin şekilde meydana geldiği görülmektedir. Bu durum, silo cidarının içe ve dışa doğru deforme olduğu pik noktalarında gerilme yığılmalarına sebep olmaktadır. Meydana gelen gerilme yığılmalarının tekrarlı yükler ile birlikte düşünüldüğünde yapısal güvenlik için sorun teşkil etmektedir. Düşey rijitleştirme levhası olmadan sadece yatay kuşaklamanın yapıldığı S12 modelindeki deformasyon durumunda "M" tipi davranışın daha geniş bir genlikte meydana geldiği görülmektedir. Ancak etkili sonuçların düşey ve yatay levhaların birlikte kullanıldığı S13-S16 model aralığında alındığı görülmektedir.



Şekil 4.1. S1 serisine ait deformasyon durumları

S13 modelinde 8 düşey 6 yatay kuşak, S14'de 16 düşey 6 yatay, S15 8 düşey 12 yatay, S16'da ise en maksimum durum olan 16 düşey 12 yatay kuşak kullanılmıştır. S16'ya ait deforme olmuş hal değerleri ile karşılaştırıldığında en rijit durum olduğu açıkça görülmektedir.

Bu durum sayısal modeller için hesaplanan doğal titreşim periyotları değerlerince de teyit edilmektedir. Çizelge 4.1'de tüm modeller için yapılan modal analiz sonucunda elde edilen doğal titreşim periyotlarına ait ilk üç durum örneklendirilmiştir.

Çizelge 4.1. Doğal titreşim periyotları (sn)

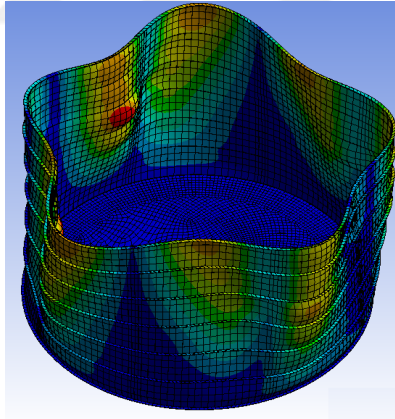
S11	S12	S13	S14	S15	S16
0,217547	0,105982	0,102467	0,097656	0,088472	0,084459
0,207495	0,105696	0,100576	0,096367	0,086222	0,084331
0,176134	0,089638	0,088464	0,086889	0,085778	0,082912

Çizelge 4.1 incelendiğinde sadece düşey levhalarını kullanıldığı S11'de periyot değerinin 0,21'den S16 modeline doğru 0,084 seviyesine düştüğüdür. Periyottaki belirgin düşüş yatay kuşağın tek başına kullanıldığı S12 modeli ile başlamaktadır. Sisteme eklenen her düşey durum sistem rijitliğine katkı

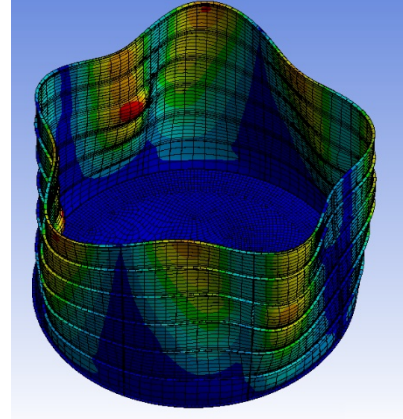
sağlamaktadır. En optimum durum 8 düşey 12 yatay levhali durum olan S15’de yakalanmıştır.

S16, 16 düşey 12 yataylı modelde periyot değeri S15’e göre çok değişmemiştir. Buradan anlaşıldığı üzere tek başına kullanılan düşey levha sistem davranışını bozmakta olup bu durumda yapı doğal titreşim periyot değerinin artmasına sebep olmaktadır. Başka bir ifade ile sisteme deformasyon kontrolü için eklenen düşey kuşak yapının deformasyon rijitliğine zarar vermektedir. Bu durumun tam tersi olan ve tek başına kullanılan yatay kuşak için yapılan analizlerde, silo cidarındaki deformasyon davranışı ideale yaklaşmasına rağmen, optimum değer düşeyle birlikte olduğu kombinasyonlarda elde edilmiştir.

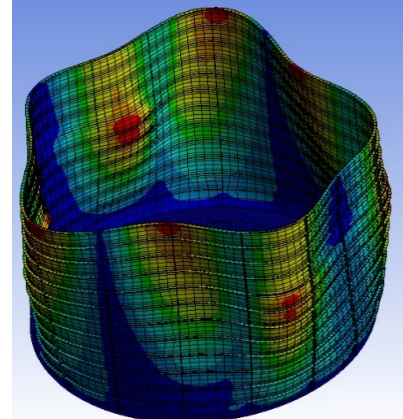
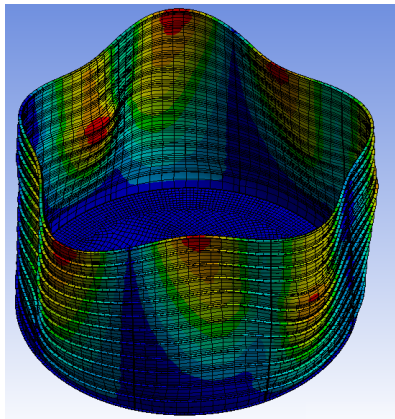
Çalışmada ikinci model olan 17,5m çap 12m yüksekliğindeki S2 serisi deforme olmuş duruma ait görünüm Şekil 4.2’de verilmiştir. Sadece düşey rijitleştirme levhasının kullanıldığı durumda sistemde istenmeyen deformasyon durumu sebebi ile S2 serisinde bu durum dikkate alınmamıştır. Oluşturulan düşey/yatay levha yerleşim kombinasyonları optimizasyon yapılmaya çalışılmıştır.



S22

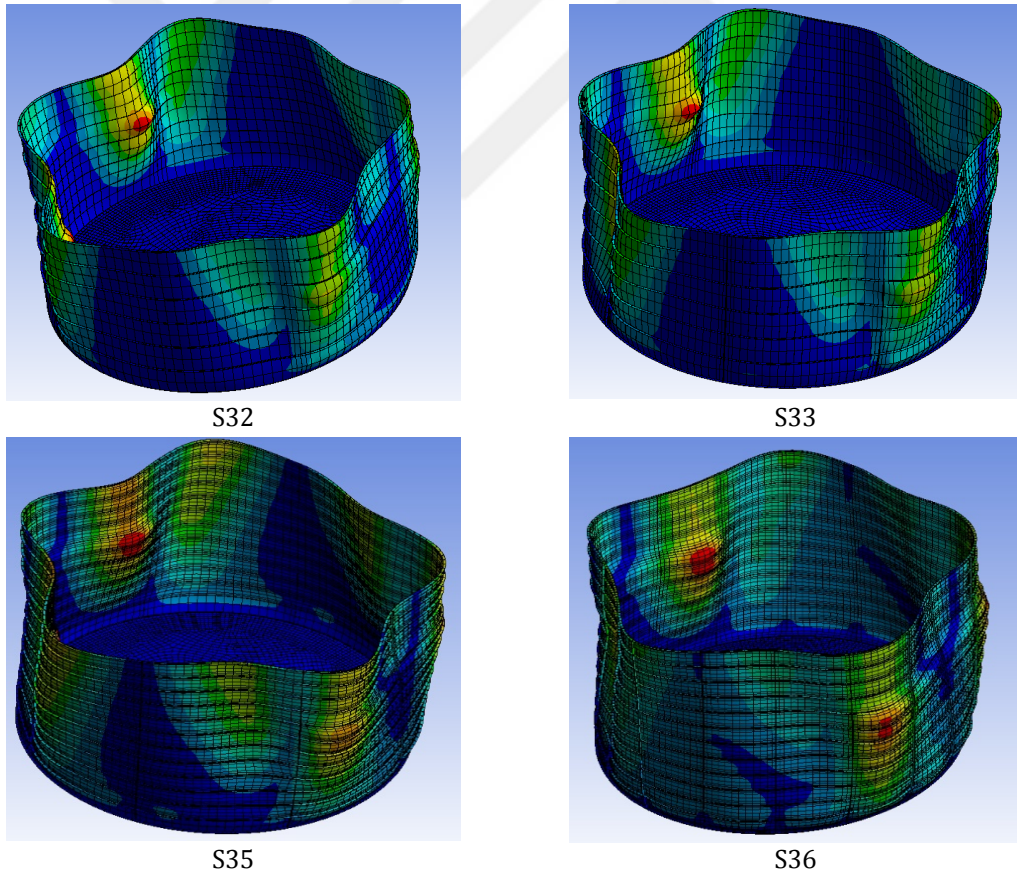


S23



Şekil 4.2. S2 serisi deformasyon görüntüleri
S2 serisi için elde edilen deformasyon durumları incelendiğinde e S1 'de olduğu gibi düşey ve yatay levha yerleşimin birlikte kullanıldığı kombinasyonlardan en etkili deformasyon davranışları elde edilmiştir. Ancak burada sadece yatay kullanıldığı durum S12 modeli kadar "M" tipi davranışın genliğini azaltamamıştır. Bu sebeple sadece yatay durum olan S22 modelinde "M" tipi deformasyon hali açıkça görülmektedir. Bu durum çapın büyüdüğü durumlarda düşey levhalarında kullanımın avantaj sağladığını göstermektedir.

Çalışmanın çapça en büyük sayısal modeli olan S3 serisinde çap değeri 25 m, yükseklik 12 m'dir. Bu durum için elde edilen deformasyon haline ait görüntüler Şekil 4.3'te verilmiştir.

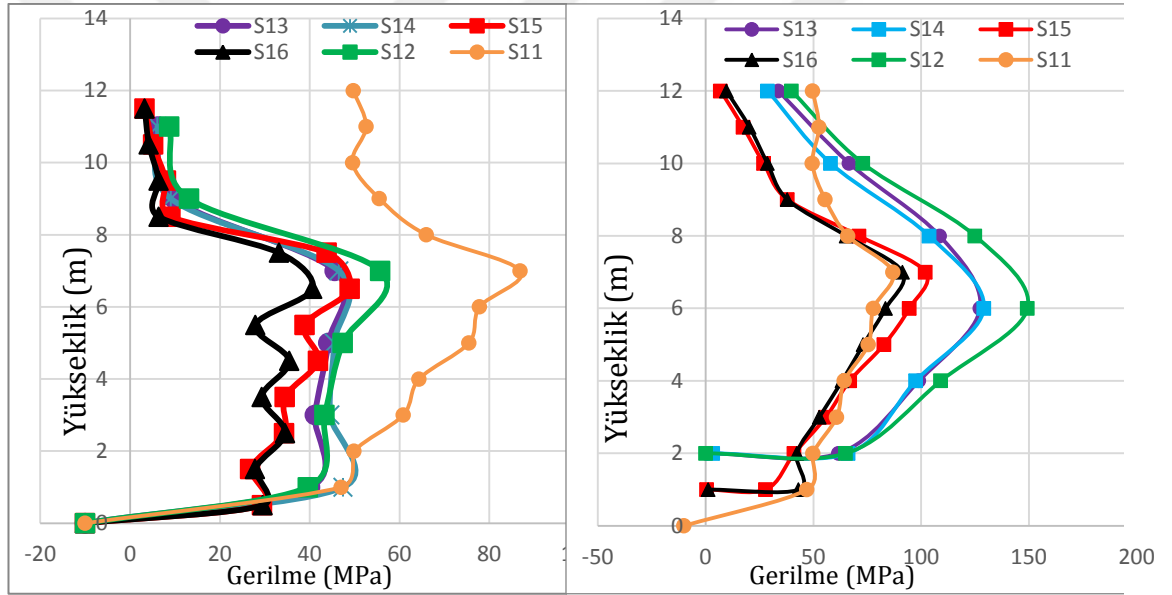


Şekil 4.3. S3 serisi deformasyon görüntüleri

Şekil incelendiğinde de çap büyüdükçe sadece yatay durumun tek başına yeterli olmadığı, yatay ve düşeyin birlikte kombine edilmesinin silo cidarındaki deformasyonların sönümlenmesinde daha efektif olacağı görülmektedir.

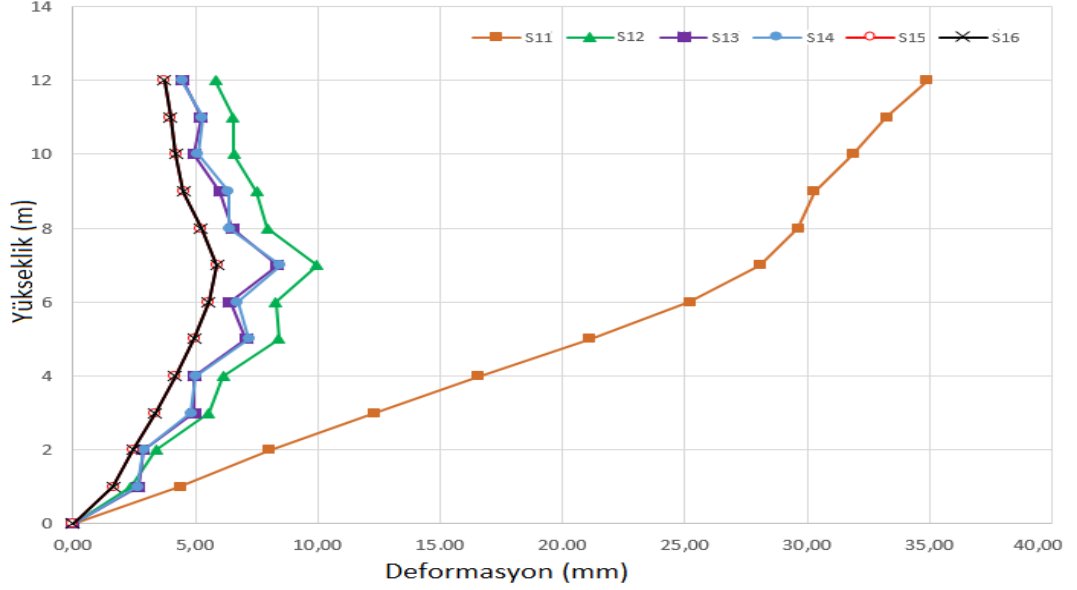
4.1. Sayısal Modellerin Sonuçlarının Değerlendirilmesi

S1 serisi sayısal modellerin dalga yükü altında hesaplanan, gerilme ve yatay yerdeğiştirme değerleri Şekil 4.4'te verilmiştir. Gerilme grafikleri silo cidarı üzerinde duvar olarak tanımlanan ve rijitleştirme levhaları üzerinde her bir metrede okuma alınmıştır. Tüm modellerde su kütlesi 7 m, dalga yüksekliği 1 m olarak alınmıştır. Bu kapsamda sıvı çalkantısı ile ilişkili bölüm zemin kotundan 8 m'dir. Bu kapsamda şekilde verilen grafikler incelendiğinde;



a) 12.5 m çap modeller için duvar gerilmeleri

b) 12.5 m çap modeller için levha gerilmeleri



c) 12.5 m çap modelleri için deformasyon grafikleri

Şekil 4.4. 12.5 m çap modelleri için grafikler a) duvar gerilmeleri b) levha gerilmeleri c) deformasyon değerleri

S1 serisi silo cidarında meydana gelen gerilme davranışını irdeleyebilmek için şekillerde gerilmeler duvar ve levha olmak üzere iki kısımda ele alınmıştır. Şekil 4.4c incelendiğinde sadece düşey levhanın kullanıldığı durumda elde edilen gerilme değerlerinin düşey ve yatay levha kombinasyonlarının bir arada değerlendirildiği sonuçlara göre ayrıştığı açıkça görülmektedir. Bu durumun temel sebebi silo cidarındaki (duvarındaki) levhaların bulunmadığı bölümde dalga etkisinden kaynaklanan M tipi davranış sebebi ile silo çeperinde elde edilen gerilmelerin zikzaklı bir eğri çizmesi ve gerilme yığılmalarının meydana gelmesi sonucu çıkarılabilir.

Levhalar üzerindeki gerilme dağılımları değerlendirildiğinde en büyük gerilme değerinin S12 değerinde, yani sadece yatay kuşağın kullanıldığı durumda tespit edilmiştir. Bu kısımdaki okumalar sadece levha üzerinden yapılmıştır, başka bir ifade ile okunan değerler levha üzerindeki gerilme dağılımlarıdır. Bu kapsamda, sadece yatay levhaların kullanıldığı durumda levha üzerindeki gerilme dağılımı ile yatay ve düşeyin bir arada kullanıldığı levha üzerindeki gerilme dağılımı göreceli olarak birbirinden farklıdır. Sisteme düşey levha eklendiği her durumda, yatay levhalar üzerindeki gerilmeler düşey levhalarca da karşılandığı için levhalar üzerindeki gerilme yığılmaları düşey levhalarca sönmüldüğü kabulü yapılabilir. Bu durum tekrarlı yüklemeye maruz kalan bir silo yapısı için

yapı güvenliği açısından avantajlı bir sonuç elde edilmesine olanak sağlamaktadır.

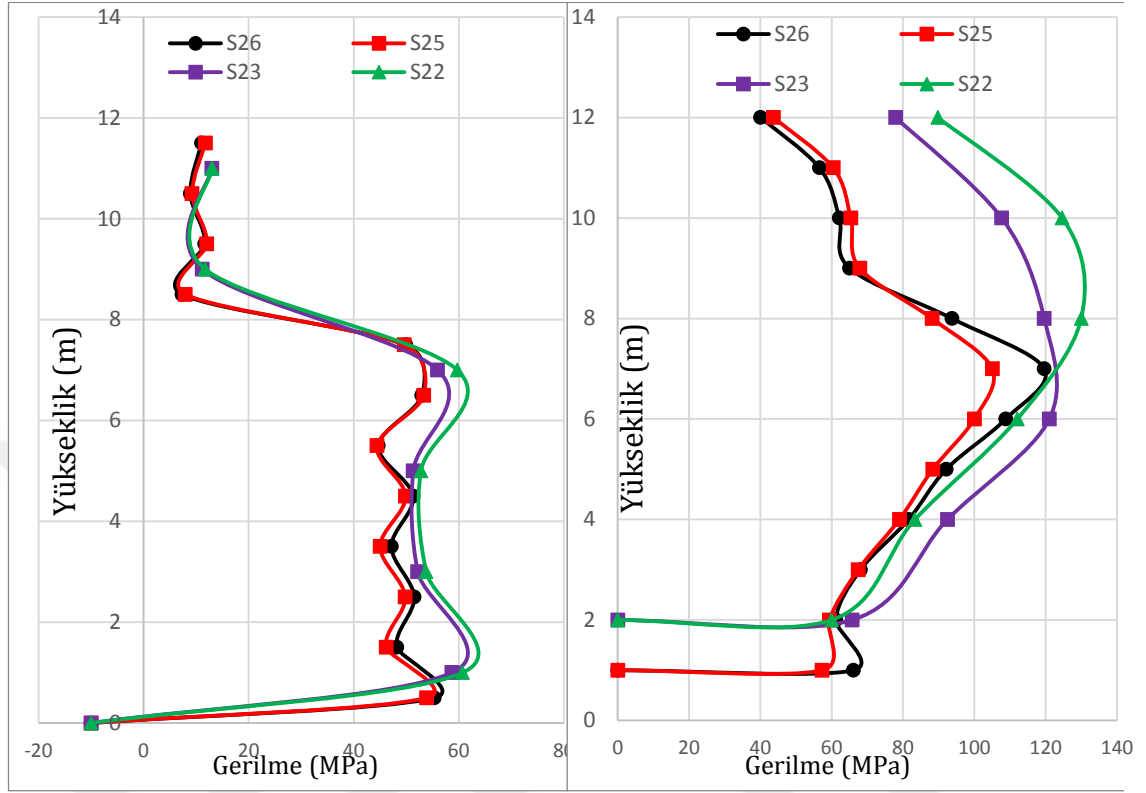
S1 serisi için yükseklikçe değişen gerilme dağılımlarında gerilme değerleri zemin kotunda deformasyonun mesnet ile sönümlenmesi sebebi ile negatif ile başlayıp bir metre kotunda pozitif olmaktadır. Tüm modellerde, sıvı ile silo etkileşim bölgesi olan 0-8 metre aralığında gerilme değerleri aynı veri aralığında sabit kalma eğilimindedir. Dalga kuvvetinin etkin olduğu 8 metreden sonra gerilmeler sönümlenmeye başlayarak tekrar minimum değere yaklaşmıştır. Sistem üzerindeki gerilme dağılımın bu şekilde sonuç vermesindeki temel sebep yedi metre su yüksekliğine sahip silo çeperindeki hidrostatik baskı ayrıca bir metre dalga yüksekliği için hidrodinamik basınç etkisi altında elde edilen kuvvetlerin dalga temas noktası ve sonrasında sönümlenmesi ile alakalıdır.

Bu durumda 12 metre yüksekliğe sahip silo yapısının dalga ile etkileşim dahilinde olan bölümleri bu yük etkisi altında basınç gerilmesine maruz kalmış ve rijitleştirme levhalarının konumlarına göre de silo duvarında yani silo çeperinde zikzaklı bir dağılım sergilemiştir.

Rijitleştirme levhaları üzerindeki okuma değerleri silo duvarına göre lineer bir artış göstermiş, maksimum değerini su kotu ve altı metrede kazanmıştır. Bu yüksekliğin devamında gerilmeler sönümlenmiştir. Duvar ve levha üzerindeki gerilme dağılımlarını kendi içinde kıyaslamak istediğimizde duvar üzerindeki gerilmeler etkileşim bölgesinden sonra ani bir şekilde düşmektedir. Levha üzerindeki gerilmeler yükselme eğrisi ve düşme eğrisi dikkate alındığında lineer bir şekilde gerilimin arttığı ve sönümlendiği görülmektedir. Sistem bu şekilde değerlendirildiğinde levhaların silo çeperinde meydana gelen gerilmeleri daha düzgün bir dağılımla geniş bir alanda karşılaşmasına katkı sağlamaktadır. Bu durum tekrarlı yüklere maruz kalan bir silo yapısının yorulma davranışına pozitif yönde katkı sağlayacaktır.

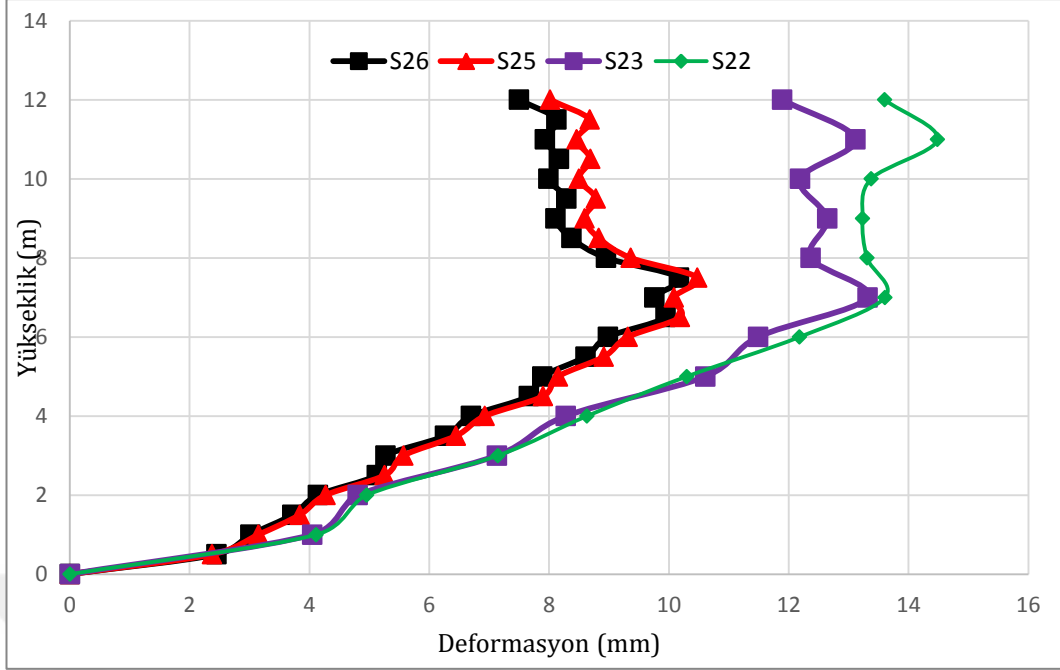
S11 model serisi için elde edilen dalga yükü yatay yerdeğiştirme değerlerinin yer aldığı grafik incelendiğinde bu grafikteki sadece düşey versiyonun

kullanıldığı S11 modelindeki deformasyon değerlerinin, düşey ve yatay levhaların bir arada kullanıldığı sonuçlara göre yaklaşık yedi kat daha büyük deformasyonlar değerleri hesaplanmıştır. Bu durumu tetikleyen temel sebep



sisteme eklenen düşey levhaların hareket yönüne dik yönde atalet kazandırması ve bu kazanımın silo çeperinde yeterli sayıda olmaması sebebi ile silo çeperinin M tipi davranışa yönelmesidir. Ayrıca bu duruma diğer bir sebep M tipi salınımın periyot değerinin düşük olması yani tekrar sayısının fazla olması sebep gösterilebilir. Deformasyon değerleri düşey ve yatay levhaların bir arada olduğu deformasyon değerleri düşünüldüğünde en iyi sonucun, S16 modelinde elde edildiği yani 16 düşey, 12 yatay levhanın bir arada kullanıldığı durumdur.

a) 17.5 m çap modeller için duvar gerilmeleri b) 17.5 m çap modeller için levha gerilmeleri



c) 17.5 m çap modeller için deformasyon grafikleri

Çalışmanın 17,5 m çap genişliğine sahip ikinci kombinasyonu olan S2 serisine ait gerilme ve deformasyon değerleri Şekil 4.5'te tanımlanmıştır.

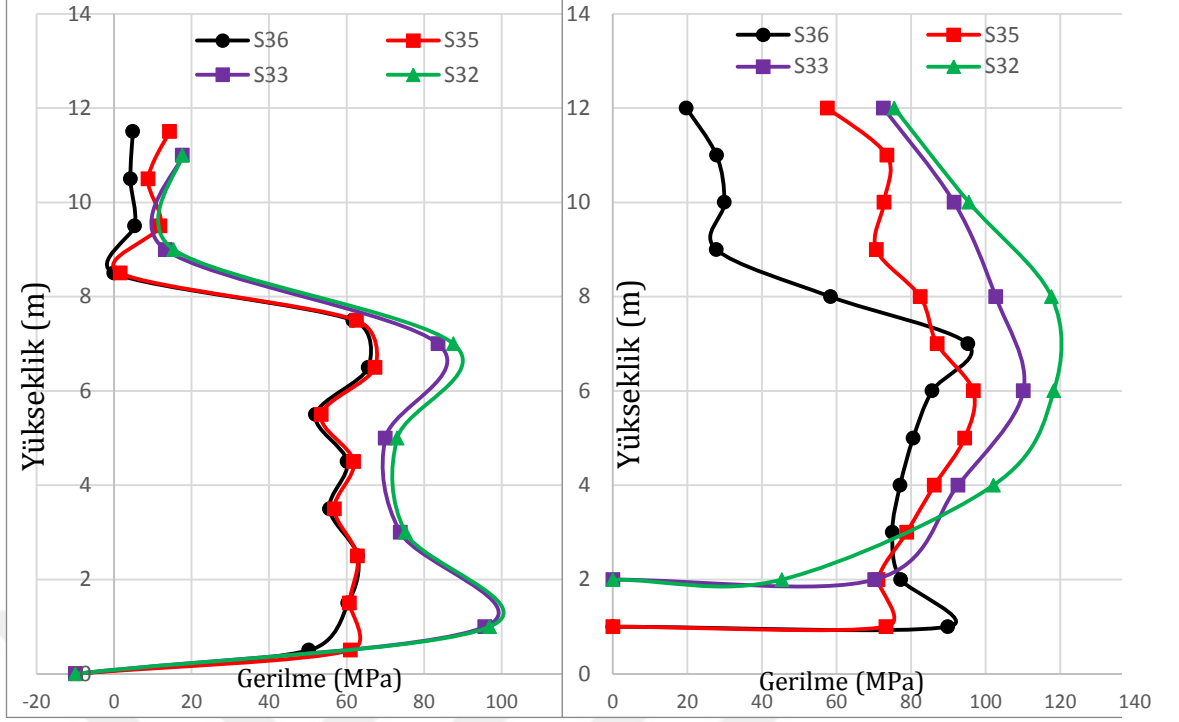
Şekil 4.5. 17.5 m çap modelleri grafikleri a) duvar gerilmeleri b) levha gerilmeleri c) deformasyon değerleri

S2 serisindeki çap S1 serisine göre beş metre büyütülmüş ve 17.5 metre olarak modellenmiştir. Yükseklik durumu S1 ile aynı kabul edilmiş ve 12 metre modellenmiştir. Bu kapsamda su kotu yüksekliği S1 serisinde olduğu gibi 7 metre alınmış dalga yüksekliği bu modelde de 1 metre tanımlanmıştır. Elde edilen gerilme değerleri incelendiğinde davranışça S1 serisi modeline benzemektedir. Duvar yüzeyinde meydana gelen gerilmeler bu modelde de ortalama 1 metre yükseklikten sonra 50 Mpa civarında değerler almış, su etkileşim noktasını takiben ani bir düşüş ile 5 Mpa civarında dağılım göstermiştir. Bu durum duvar üzerindeki gerilme miktarları 1 ile 8 metre aralığı için maksimum aralık, 8 ila 12 aralığı ise minimum aralık olarak görülmektedir. Bu modelde kullanılan düşey ve yatay levha kombinasyonlarında sadece düşeyin dikkate alındığı durum modellenmemiştir.

S2 serisi düşey ve yatayın birlikte değerlendirildiği kombinasyonlarında duvarda meydana gelen gerilmeler, özellikle maksimum gerilmenin yer aldığı

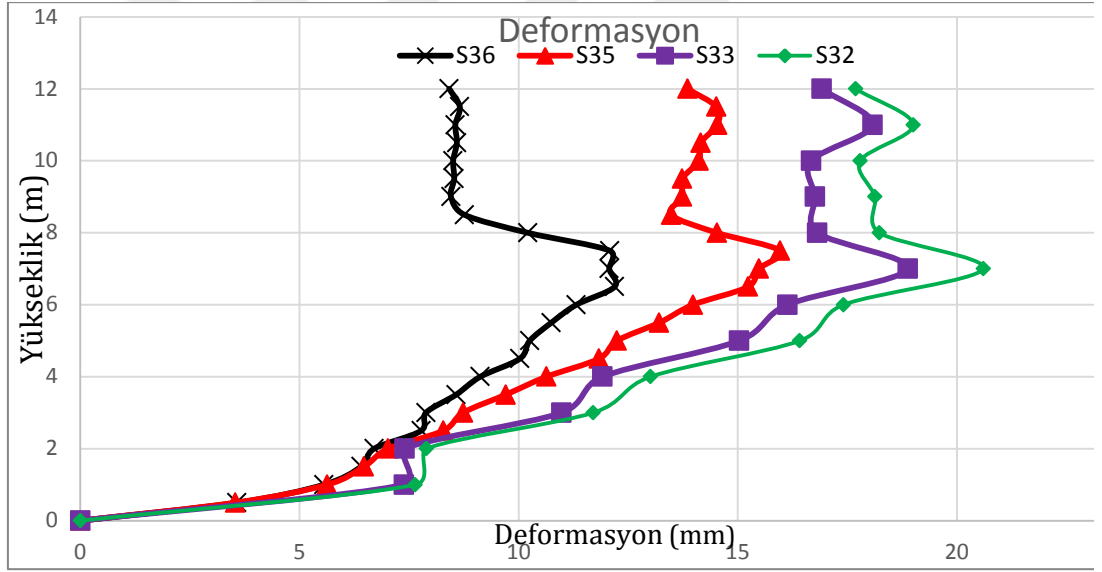
aralık olan yani su ile etkileşim aralığında 1-8 metre aralığında S25 ve S26 modellerinde yani yatay levha kullanımının maksimal olduğu aralıkta zikzaklı bir dağılım göstermiş, yatay levhaların 6 adet kullanıldığı S22 ve S23 modellerinde ise daha yumuşak geçişler görülmüştür. Levha üzerindeki gerilmeler incelendiğinde yine S1 serisinde olduğu gibi artış ve azalış eğilimlerinin lineer bir çizgide olduğu, zikzaklı bir dağılım göstermediği görülmektedir. Burada gerilme azalma eğilimi dalga yüksekliğinin su kotunu takiben silo üst kotuna doğru devam etmiştir. Duvar gerilmeleri ve levha gerilmeleri sistem üzerinde kalan gerilme birikimleri açısından incelendiğinde sahip oldukları rijitlikler bakımından levha üzerinde yaklaşık 40 Mpa civarında silo üst kotunda gerilme kalırken duvar üzerinde etkileşim bölgesinin bitimini takiben gerilme değerleri 5 Mpa civarına düşmektedir. S2 serisi deformasyon değerleri incelendiğinde en etkin sonucun düşey ve yatay levhaların maksimum sayıda kullanıldığı S26 modelinde elde edildiği görülmektedir. Deformasyon değerleri incelendiğinde sistemde çap değerindeki artış ile rijitliğindeki kayba rağmen elde edilen yerdeğiştirmeler S1 serisi ile benzer niteliktedir. Düşey levhaların kullanıldığı durumlarda, düşey ve yatay levhaların beraber kullanıldığı durumlarda çaptaki büyümeye bağlı rijitlik kaybının tolere edilebildiği görülmektedir.

Yapılan bu çalışmada kullanılan en büyük çaplı modeller olan 25 metrelik çap ve 12 metrelik yüksekliğe sahip sayısal modeller olan S3 serisi için dalga yükü yapı etkileşimini değerlendirmek amacı ile gerilme ve deformasyon değerleri Şekil 4.6'da gösterilmiştir.



a) 25 m çap modeller için duvar gerilmeleri

b) 25 m çap modeller için levha gerilmeleri



c) 25 m çap için deformasyon değerleri

Şekil 4.6. 25 m çap modelleri için grafikler a) duvar gerilmeleri b) levha gerilmeleri c) deformasyon değerleri

Bu modelde gerilme değerleri duvar ve levha olmak üzere iki kısımda ele alınmıştır. Elde edilen sonuçlar irdelendiğinde özellikle duvar kısmında hesaplanan gerilme değerleri S1 ve S2 serileri ile örtüşmektedir.

Bu serinin diğerlerinden ayrıştığı en belirgin nokta ise çapın büyümesinden kaynaklanan su ile etkileşim bölgesinin üzerinde kalan kısımdaki biriken

gerilmelerin nerdeyse sıfırlandığı görülmektedir. Su ile etkileşim içerisinde olan bölümdeki gerilme dağılımları ise S2 serisi ile uyusmaktadır. Düşey ve yatay levhaların birlikte kullanıldığı S35 ve S36 numaralı kombinasyonlarda gerilmeler yaklaşık aynı değerlerde sonuçlar sergilerken zikzaklı bir dağılım göstermiş. S32 ve S33 modelleri ise daha yumuşak geçişler ile bu aralıkta dağılım göstermiştir.

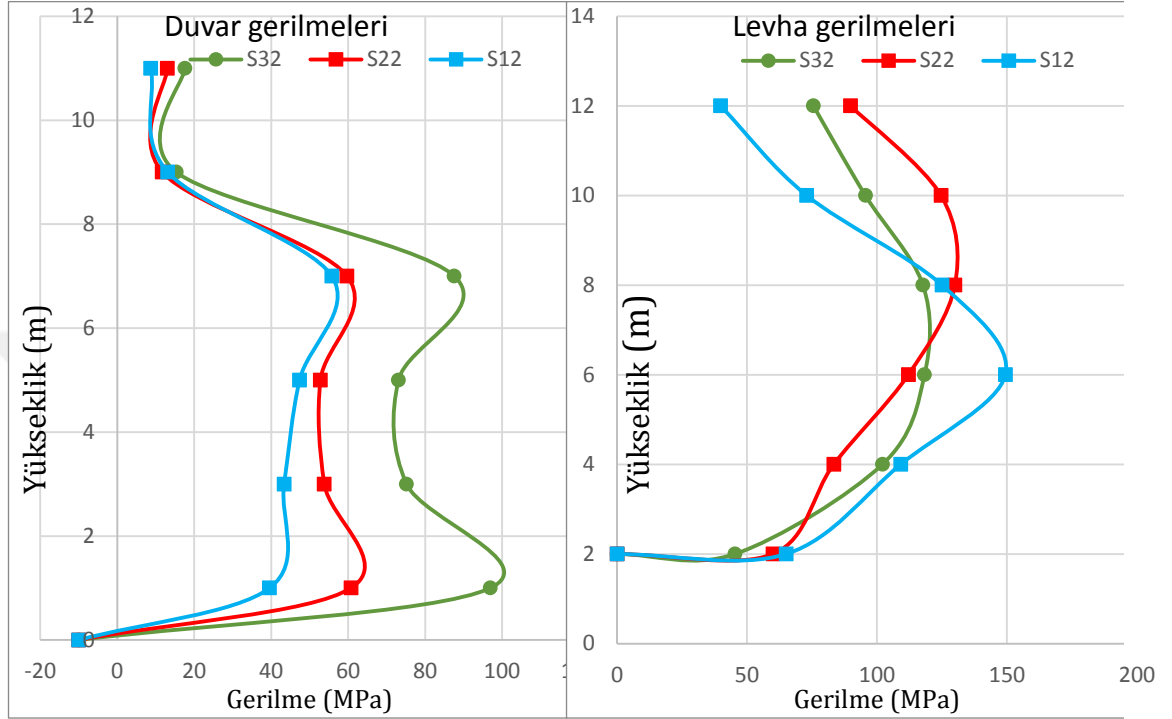
Gerilme değerlerini kıyasladığımızda en efektif gerilme sonuçları tüm modellerde olduğu gibi bu grupta da düşey ve yatay levhaların maksimal kullanıldığı S35 ve S36 modellerinde elde edilmiştir.

Levha üzerindeki dağılımları irdelediğimizde, bu modelde düşey ve yatay levhaların en yoğun kullanıldığı S35 ve S36 modellerindeki gerilme dağılımları bir önceki gruplara göre lineer dağılımdan ziyade zikzaklı bir dağılım göstermiştir. Bu durum kullanılan levha genişliğinin ve cidarının hizmet ettiği levha çapına göre göreceli olarak küçük kaldığının işaretidir. Sadece yatay levhaların kullanıldığı S32 ve S33 modellerine bakıldığında yine lineer bir dağılım görülmektedir.

S3 serisi deformasyon grafikleri incelendiğinde en etkin sonuç, yani deformasyonların en iyi sönümlendiği sonuç bu seride de düşey ve yatay levha kombinasyonlarından levhaların en sık kullanıldığı S36 modelinde tespit edilmiştir. En büyük deformasyon durumu ise sadece yatay kuşakların kullanıldığı S32 modelidir. Bütün kombinasyonlarda dalga ile etkileşim bittikten sonra silo cidarındaki deformasyonlar sabit kalmış ve silo üst kotuna kadar aynı çizgide devam etmiştir. Silo cidarındaki su ile etkileşimde olmayan bölgedeki deformasyonların sabit kalması durumu yine düşey ve yatay levhaların en yoğun olarak kullanıldığı S36 modelindedir.

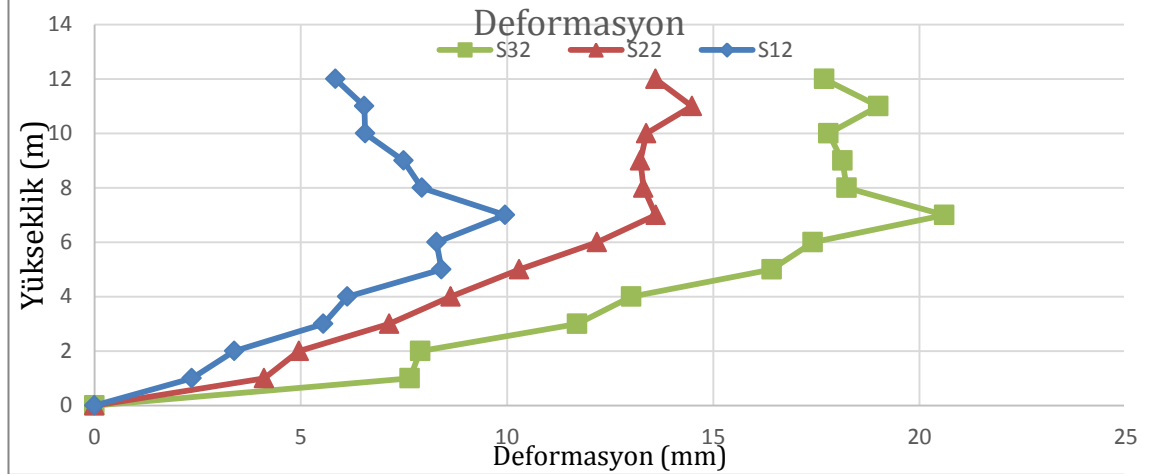
Çalışmada kullanılan düşey ve yatay levhaların sistem davranışına etkisini artan çap değerlerinde yorumlayabilmek için her üç seride birbirini karşılayacak tasarım durumları aşağıdaki şekillerde karşılaştırılmalı olarak verilmiştir.

Tüm çap durumları için benzer kombinasyonları temsil eden modeller gerilme ve deformasyon durumlarınınca şekiller ile gösterilmiştir. Şekil 4.7’de tüm çap durumları için sadece yatay levha kullanımlarının olduğu modeller sunulmuştur.



a) 2 no'lu kombinasyon için duvar gerilmeleri

b) 2 no'lu kombinasyon için levha gerilmeleri



c) 2 no'lu kombinasyon için deformasyon değerleri

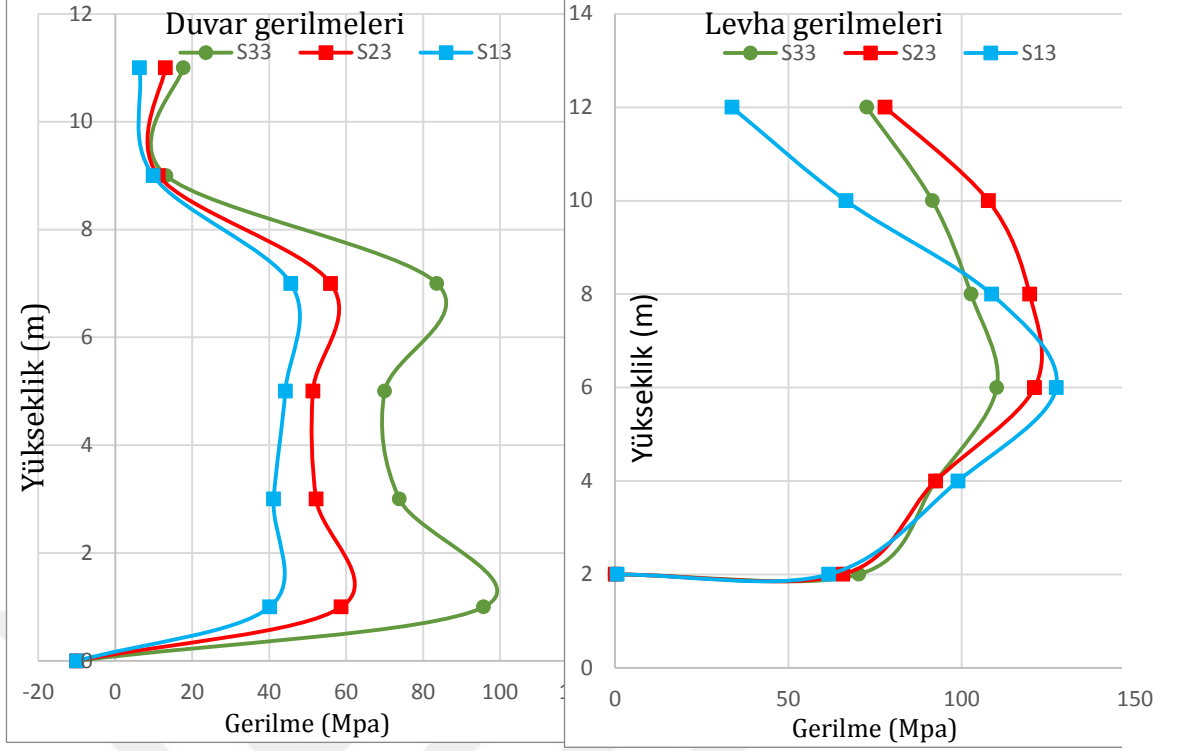
Şekil 4.7. S12, S22, S32 modellerine ait grafikler a) duvar gerilmeleri, b) levha gerilmeleri, c) deformasyon değerleri

Bu durumda elde edilen deformasyon değerleri incelendiğinde en az deformasyon beklendiği üzere en küçük çap olan S12, takiben S22 ve S32 modelinde görülmektedir.

Deformasyonların silo yüksekliği zerince dağılımları incelendiğinde silo çapındaki artış silo cidarı kaynaklı kazanılan atalet momentindeki azalıma sebep olması ile sadece yatay kuşak kullanımının deformasyon sönümünü tam olarak karşılayamadığı deformasyon grafiklerinin zikzaklı bir dağılım göstermesinden anlaşılabilmektedir.

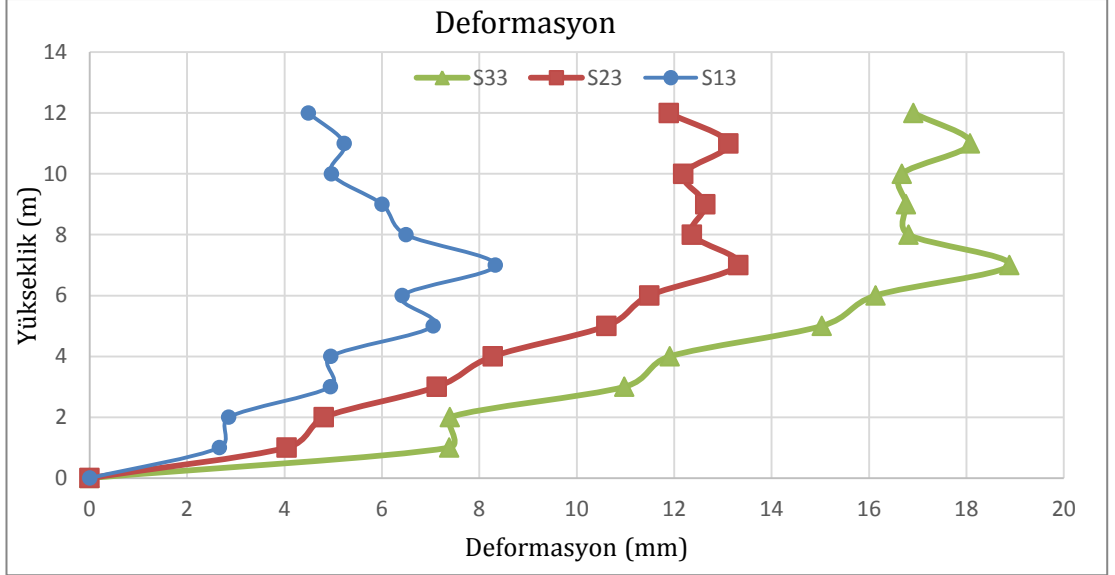
Grafiklerdeki zikzak, kullanılan yatay kuşağın kullanıldığı bölümlerde sağladığı sargı etkisi sebebi ile oluşmaktadır. Aynı durum gerilme dağılımlarının silo cidarındaki sonuçlarına da yansımıştır, ancak levhaların üzerindeki gerilme değerleri dikkate alındığında levhaların gerilme değerlerinin çaptan bağımsız olduğu görülmektedir. Bu durum levha üzerindeki gerilmenin sahip olduğu atalet değerleri ile orantılı olarak karşılanması ile yorumlanabilir, yani tüm modellerde levha boyutları aynı kullanılmasına rağmen çap değerleri değişmiştir. Bu durum tüm modellerde çap boyutlarında artış olmasına rağmen levha boyutlarını yani bu boyutlara karşılık elde edilen ataletlerin aynı olması sebebi ile açıklanabilir.

Yapılan bu çalışmada kullanılan üç farklı çapa sahip modeller için 3 numaralı kombinasyona sahip sayısal modeller olan S13, S23 ve S33 modelleri için dalga yükü yapı etkileşimini değerlendirmek amacı ile gerilme ve deformasyon değerleri Şekil 4.8'de gösterilmiştir.



a) 3 no'lu kombinasyon için duvar gerilmeleri

b) 3 no'lu kombinasyon için levha gerilmeleri

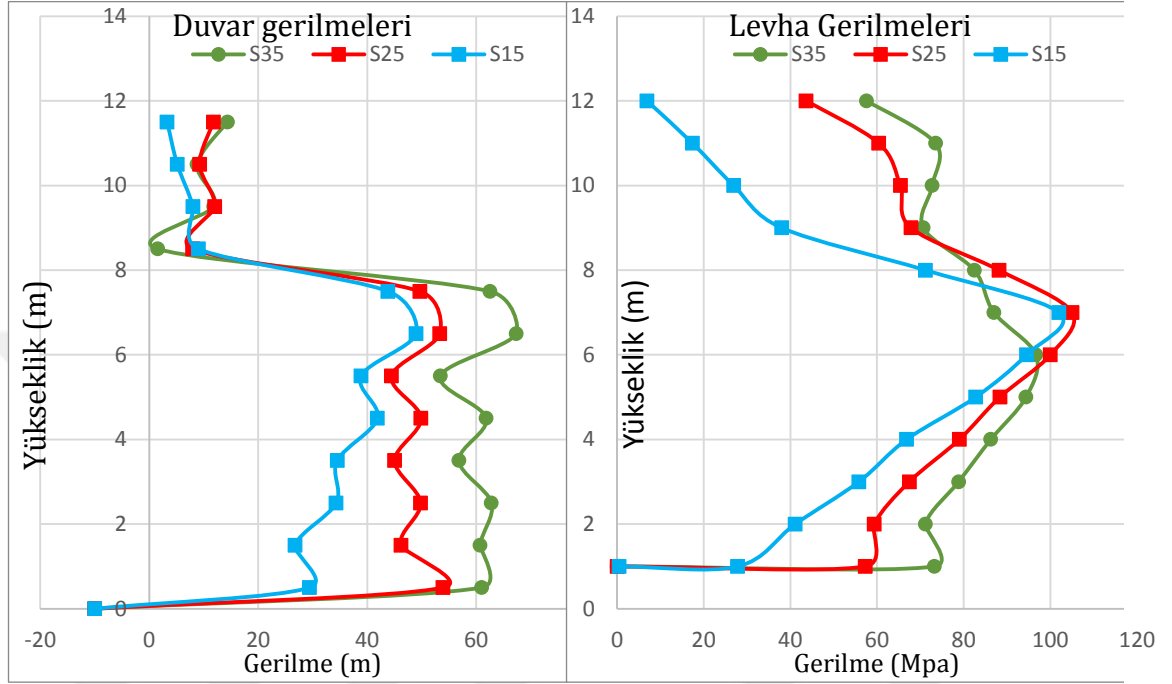


c) 3 no'lu kombinasyon için deformasyon değerleri

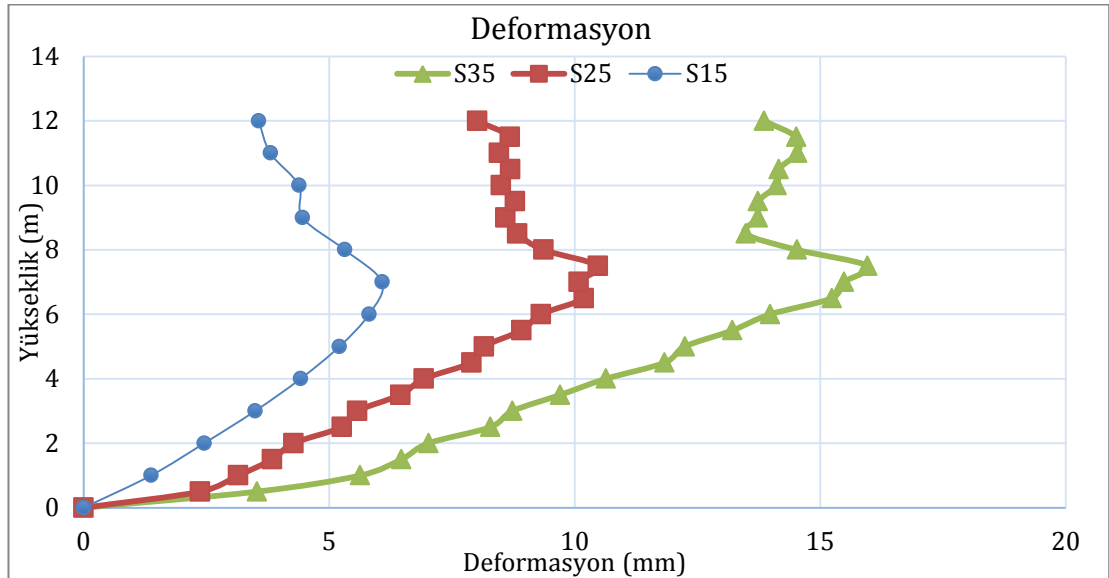
Şekil 4.8. S13, S23, S33 modellerine ait grafikler a) duvar gerilmeleri, b) levha gerilmeleri, c) deformasyon değerleri

Şekil 4.9'da 16 düşey levha 6 yatay levhalı kombinasyonlar için her üç çap durumunda elde edilen deformasyon ve gerilme dağılımlarına ait grafikler verilmiştir. Grafikler incelendiğinde deformasyonca elde edilen verilerin çapa göre değiştiği yani çap büyüdükçe yapının deformasyon kabiliyetinin arttığı bu sebeple grafiklerin birbirlerinden ayrıştığıdır. Ancak bir önceki durumda olduğu

gibi bu durumda da levha üzerinde meydana gelen gerilmeler çap değerleri değişmesine rağmen özdeş ve aynı çizgidedir. Bundaki sebep açıklandığı gibi çap değerlerinin değişmesine rağmen levha boyutlarının sabit kalması ile açıklanabilir.



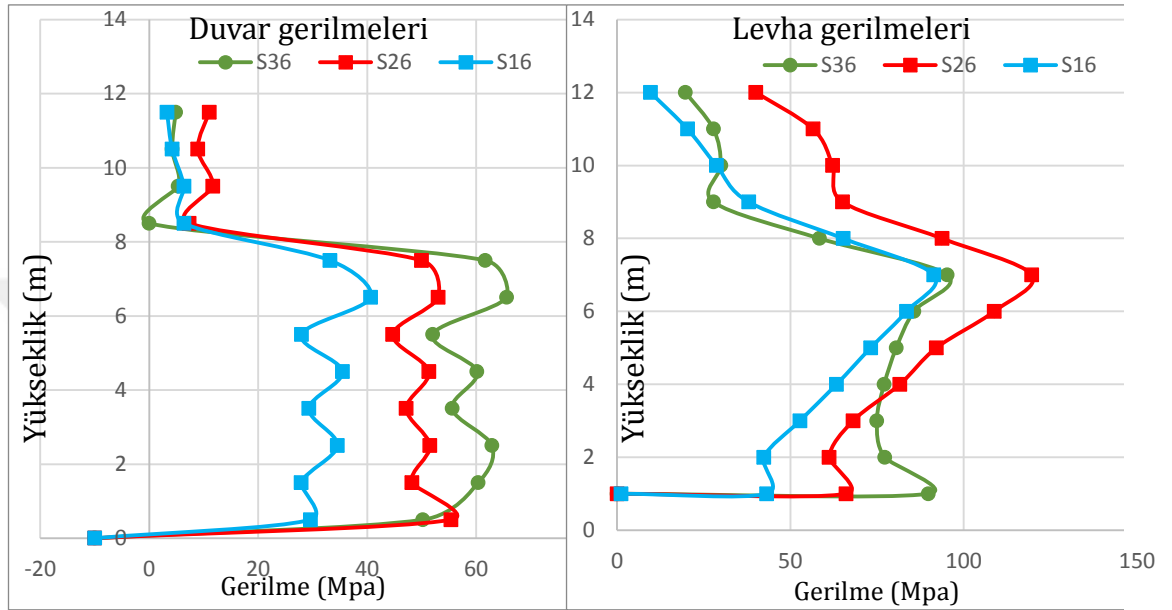
a) 5 no'lu kombinasyon için duvar gerilmeleri b) 5 no'lu kombinasyon için levha gerilmeleri



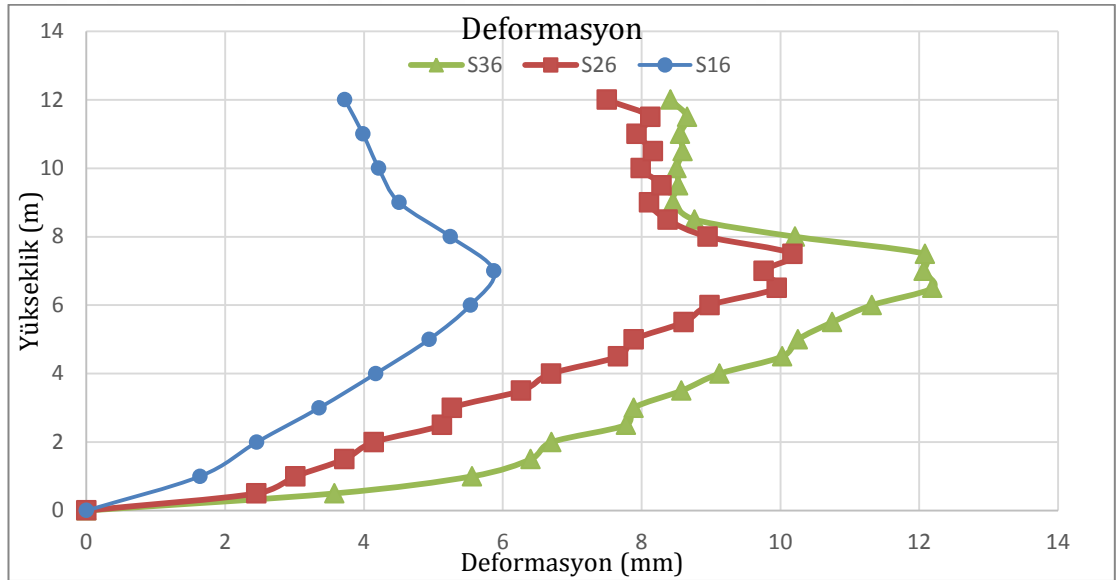
c) 5 no'lu kombinasyon için deformasyon değerleri

Şekil 4.9. S15, S25, S35 modellerine ait grafikler a) duvar gerilmeleri, b) levha gerilmeleri, c) deformasyon değerleri

Çalışmada düşey ve levhaların en yoğun olarak kullanıldığı 16 düşey 6 yatay ve 16 düşey 12 yataylık kombinasyonların irdelendiği Şekil 4.9 ve Şekil 4.10'da deformasyon değerleri incelendiğinde Şekil 4.10'da elde edilen deformasyon değerlerinin birbirinden ayrıştığı ve en az deformasyonun beklediği üzere en küçük çaplı seride gerçekleştiği görülmüştür.



a) 6 no'lu kombinasyon için duvar gerilmeleri b) 6 no'lu kombinasyon için levha gerilmeleri



c) 6 no'lu kombinasyon için deformasyon değerleri

Şekil 4.10. S16, S26, S36 modellerine ait grafikler a) duvar gerilmeleri, b) levha gerilmeleri, c) deformasyon değerleri

Şekil 4.10'da yani en büyük çaplı duruma ait deformasyon verileri incelendiğinde yine en küçük çaplı durum olan S1 serisinin en az yerdeğiştirme değerini alarak S26 ve S36 dan ayrıştığı görülmüştür. S26 ve S36'nın birbirleri ile benzer sonuçlar verdiği görülmüştür. Bu durumdaki temel sebep daha önceden yorumlandığı gibi çap büyümesine karşın kullanılan levhaların boyutsal parametrelerinin aynı kalması olarak açıklanabilir. Bu sebeple düşey levha ve yatay levhalar kullanılarak rijitleştirilen silo cidarlarında çap değerlerinin artışı ile orantılı olarak levha boyutlarının da büyütülmesi gerektiği görülmektedir. Gerilme dağılımları için elde edilen sonuçlar incelendiğinde her iki durumda da bütün modellerde olduğu gibi dalga ile etkileşimde olan duvar çeperleri aynı çizgide dağılım göstermiş ve çapça en küçük olanlar minimum değerleri almıştır. Levha üzerindeki gerilme dağılımları incelendiğinde, çap büyüdükçe levha üzerindeki gerilmelerin zikzaklı bir çizgide değiştiği ve lineer sönümlemenin kaybolduğu görülmüştür.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Silo çapı farklılaşan yüksekliği sabit tutulan, aynı su seviyesi ve sabit dalga boyu için farklı kombinasyonların kullanıldığı modellerin sayısal analizlerin yapıldığı bu çalışmada, sistem düşey ve yatay yönde rijitleştirme levhaları ile güçlendirilmiştir. Sistem rijitliğini artırmak için kullanılan rijitleştirme levhalarının davranışa katkısının incelenmesi için düşey ve yatay elemanların(levhaların) yerleşim şekli ve sayısı değişken kabul edilerek 6 farklı kombinasyon için üç farklı silo çapı için 14 sayısal model ile analizler yapılmış şu sonuçlar elde edilmiştir;

Yapılan analizler neticesinde sadece düşey elemanların kullanıldığı durumlarda yapının doğal titreşim periyodunun arttığı ve yapısal davranışın M tipi bir deformasyona yöneldiği görülmektedir. Yatay levhaların eklendiği durumlarda periyot belirli oranda azalmış ve yapısal davranış ideal davranışa yaklaşmıştır.

Sayısal modellerde doğal titreşim periyotlarının en küçük olduğu yani en büyük yapısal rijitliklerin elde edildiği sonuçlar düşey ve yatay levhaların birlikte kullanıldığı modellerdir.

Gerilme dağılımları bakımından değerlendirildiğinde yüksek sayıda yatay ve düşey levhanın kombine edildiği modeller genel olarak daha az gerilmeye maruz kalmıştır. Bu kapsamda S11 modelinde görüldüğü üzere düşey rijitleştirme levhalarının tek başlarına kullanılmasının yapısal formu bozduğu ve davranışça avantaj sağlamadığı görülmüştür. Yatay levhalar düşey levhalar ile birlikte kullanıldığında formdaki bozulmalar kısmi olarak sönümlenmiş ve gerilmeler daha geniş bir alana yayılmıştır. Yatay ve düşey levhaların beraber kullanılması durumlarında deformasyon ve gerilme değerlerinin sadece yatay ve sadece düşey kullanılan durumlardan çok daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür.

Yatay ve düşey levhaların S13 modeli ile başlayarak birlikte kullanılmaya başlandığı modeller içinde 5 ve 6 no'lu kombinasyonlar üç farklı çapa ait modellerin tümünde 3 no'lu kombinasyon karşılaştırıldığında belirgin bir fark görülmektedir. Bu durum yatay ve düşey levhaların sıklaştığı durumların etkinliğini göstermektedir. Levha sayısındaki artış deformasyonu belirgin bir şekilde kontrol altına almış ve gerilmeler için olumlu bir katkı sağlamıştır. S11 modeli ile kıyaslanan modellerin gerilme grafiklerinde S5 ve S6 modellerinin hem duvar hem levha gerilmeleri S11 yani sadece düşey kullanılan modeldeki gerilme miktarlarının altında kalarak yapının genel stabilitesine olumlu bir katkı sağlamaktadır. Bu durum tekrarlı yüklemeye maruz kalabilecek bir silo yapısı için yorulma davranışını olumlu yönde etkileyecektir. Levha miktarlarındaki artışın sonuçları aynı şekilde 17.5m ve 25m çaplarına sahip modellerin grafiklerinde de karşılaşılmıştır. Bu durumda yatay levhali sistemlerin düşey levhalar ile birlikte kullanıldığı takdirde daha ekonomik çözümler üretilebileceği düşünülmektedir.

Farklı silo çaplarındaki eşdeğer kombinasyonların karşılaştırılması irdelenerek küçük çaptaki modellerin büyük çaptaki versiyonlarına kıyasla daha rijit kaldıkları ve deformasyonlarının sınırlandırıldığı görülmüştür. Levha boyutlarının silo çapları değişmesine rağmen modeller arasında farklılaşmamasından kaynaklı olarak deformasyon grafiklerindeki bu durum daha net görülebilmektedir. Kullanılan levha genişliğinin ve cidarının hizmet ettiği levha çapına göre göreceli olarak küçük kaldığı, başka bir ifade ile ataletçe yetersiz kaldığı sonucu çıkarılabilir.

Çap küçüldükçe silo cidarındaki deformasyonlar daha lineer bir çizgide hareket etmekte, çap artışı görüldükçe silo cidarındaki deformasyonların zikzaklı bir dağılım gösterdiği grafiklerde görülmektedir. Silo cidarındaki zikzaklı dağılımın önüne geçebilmek için levha genişliğinin çap değişimine göre hesaplanan uygun bir orantıda artırılması önerilmektedir. Bundan dolayıdır ki eğer bu tip düşey ve yatay levhalar ile sistem güçlendirilmesi yapılmak istenirse çap değerindeki artış ile orantılı olarak levha geometrik boyutlarında da artışa gidilmesi gerekmektedir.

Levha kombinasyonlarının birlikte karşılaştırılması durumunda silo iskeletinin gelişimi siloyu olumlu etkilemekte olduğu görülmüştür. Bu durum silo çapının artması durumunda da değişmemektedir. Ancak silo çapındaki artıştan kaynaklanan modellerin rijitlik değerlerindeki kayıp 17.5m ve 25m lik modellerde, boyutları ve özellikleri tüm modeller için aynı olan levhaların etkinliğinin yetkinliğini kaybetmesine sebebiyet vermektedir. Bu durum göz önüne alındığında silo çapının değiştiği durumlarda rijitleştirme levhalarının boyutlarında da bir değişikliğe gidilip silo boyutlarına göre optimize edilmesi ekonomi ve levha etkinliği yönünden daha olumlu sonuçlar alınmasına olanak sağlayacaktır. Ancak levhaların beraber kullanıldığı durumlarda sağlamış olduğu fayda levha boyutlarının yanı sıra levha sayısı ile de değiştirilebildiği için levha sayısı ve boyutlarındaki değişimlerin birlikte yapılması durumunun daha avantajlı olacağı düşünülmektedir. Yapılan bu çalışmada su/yapı etkileşimi statik olarak analiz edilmiştir. Bundan sonraki çalışmalarda, etkinin dinamik olarak analiz edilmesinin yapı davranışının yapı güvenliği açısından değerlendirilmesi için daha verimli sonuçların elde edileceği düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

- Akyildiz, H., Ünal, N.E., Taylan, B., 2012. Rijit Silindirik Bir Tankta Sıvı Çalkantısının Deneysel İncelenmesi. İMO Teknik Dergi, 6089-6112.
- Altun, A.H., 2013. Seismic Analysis Of Steel Liquid Storage Tanks By API-650. Istanbul, Turkey: Diss. M. Sc. Thesis, Department Of Civil Engineering, Structural Engineering Programme, İTÜ.
- API-650, 2016. Welded Tanks For Oil Storage 12th Edition. Washington, D.C., API Publishing Services.
- Bozozuk, M. 1., 2008. CBD-177 Tower Silo Foundations. Canadian.
- Carson, J.W., Holmes, T., 2003. Silo Failures: Why Do They Happen. Task Quarterly.
- Clerkin, P., 2008. "Transcona Silo, Winnipeg" Archiseek, Online Architecture Resources,
- CSI, Sep 2019.
- Çelik, A.İ., Akgül, T., Apay, A.C., Yurtsever, A., 2018. Silindirik Çelik Su Tanklarının Sismik Analizinin FEM İle Gerçekleştirilmesi. Sakarya, Turkey, Ishad2018 Academic Platform.
- Dogangun, A., Karaca, Z., Durmus, A., Sezen, H., 2009. Cause Of Damage And Failures İn Silo Structures. Journal Of Performance Of Constructed Facilities, 23(2), 65-71.
- HAROUN, M.A., 1983. Vibration Studies And Tests Of Liquid Storage Tanks. Earthquake Engineering And Structural Dynamics, 11, 179-206.
- Haroun, M.A., Housner, G.W., 1981. Earthquake Response Of Deformable Liquid Storage Tanks. Journal Of Applied Mechanics, 48.
- Holler, S., Meskouris, K., ASCE, M., 2006. Granular Material Silos Under Dynamic Excitation: Numerical Simulation And Experimental Validation. Journal Of Structural Engineering, 132(10), 1573-1579.
- Iwicki, P., Wojcik, M., Tejchman, J., 2011. Failure Of Cylindrical Steel Silos Composed Of Corrugated Sheets And Columns And Repair Methods Using A Sensitivity Analysis. Engineering Failure Analysis.
- Jeltsov, M., Villanueva, W., Kudinov, P., 2018. Seismic Sloshing Effects İn Lead-Cooled Fast Reactors. Nuclear Engineering And Design, 332, 99-110.

- Karamanos, S.A., Patkas, L.A., Platyrrachos, M.A., 2006. Sloshing Effects On The Seismic Design Of Horizontal-Cylindrical And Spherical Industrial Vessels. *Journal Of Pressure Vessel Technology*, 128.
- Karmod Plastik, 2018. Karmod Plastik. Erişim Tarihi: 03.08.2019.
<https://www.karmodplastik.com>
- Kıvrak, K., 1987. Betonarme Siloların Hesap Esasları, Yönetmeliklere Göre Malzeme Basınçlarının Karşılaştırılması Ve Uygulamalar. Basım Yeri Bilinmiyor:İTÜ.
- Kuczyńska, N., Wójcik, M., Tejchman, J., 2015. Effect Of Bulk Solid On Strength Of Cylindrical Corrugated Silos During Filling. *Journal Of Constructional Steel Research*, 115, 1-17.
- LIU, W.K., 1981. Finite Element Procedures For Fluid-Structure Interactions And Application To Liquid Storage Tanks. *Nuclear Engineering And Design*, 65, 221-238.
- Makina, D., 2018. DG Makina Konik Tabanlı Silo. Erişim Tarihi: 25.07.2019.
<https://Goo.gl/images/6oxwtz>
- Makineleri, Y. İ. M. Y. İ., 2015. Yapıcı İnşaat. Erişim Tarihi: 25.07.2019.
<https://Goo.gl/images/Si2mfS>
- Mali, M.Z., Patil, S.J., Talikoti, D.R.S., 2015. Effect Of Earthquake And Wind On Silo. *International Journal Of Civil And Structural Engineering Research*, 3(1), 376-383.
- Marinelli, J., 2008. "When Things Go Wrong: How To Address A Solids" Solids Handling Technologies,
<http://Www.SolidsHandlingtech.com/articles.Htm>:
- Mysilo, 2001. Erişim Tarihi: 22.11.2018. <https://www.Mysilo.com>
- Nateghi, F., Yakhchalian, M., 2012. Seismic Behavior Of Silos With Different Height To Diameter Ratios Considering Graunlar Material Structure Interaction. *International Journal Of Engineering*, 25(1).
- Niwa, A., Clough, R.W., 1982. Buckling Of Cylindrical Liquid-Storage Tanks Under Earthquake Loading. *Earthquake Engineering And Structural Dynamics*, 10, 107-122.
- Ozel, K., 2007. Çelik Hububat Silolarının Tasarım Esasları. Konya: Konya Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Rotter, J., 1990. Structural Design Of Light-Gauge Silo Hoppers. *Journal Of Structural Engineering*.

- Rotter, J.M., 2001. Guide For The Economic Design Of Circular Metal Silos. CRC Press.
- Rotter, J.M., 2009. Silos And Tanks In Research And Practice: State Of The Art And Current Challenges. Valencia, International Association For Shell And Spatial Structures Symposium 2009.
- Sezen, H., Livaoglu, R., Dogangun, A., 2008. Dynamic Analysis And Seismic Performane Evaluation Of Above-Ground Liquid-Containing Tanks. Engineering Structures, 30, 794-803.
- Shrimali, M.K., Jangid, R.S., 2002. Seismic Response Of Liquid Storage Tanks Isolated By Sliding Bearings. Engineering Structures, 24, 909-921.
- Uckan, E., Akbas, B., Shen, J., Wen, R., Turandar, K., Erdik, M., 2011. Seismic Performance Of Elevated Steel Silos During Van Earthquake,. Springer Science.
- Wl-Portland, 1980. Wl-Port Land.Com. Erişim Tarihi: 03.08.2019.
[Http://Www.Wlport-Land.Com/Indsilos.Xml](http://Www.Wlport-Land.Com/Indsilos.Xml)
- Wood, J.G.M., 1997. Silos: Evolution By Failure. Structural Engineering International, 7(2), 116-117.
- Zgrmakina, 2015. Erişim Tarihi: 02.08.2019. [Http://Zgrmakina.Com/Konik-Tabanli-Silolar/Konik-Tabanli-Celik-Yem-Silosu-Galvaniz-2/](http://Zgrmakina.Com/Konik-Tabanli-Silolar/Konik-Tabanli-Celik-Yem-Silosu-Galvaniz-2/)
[Https://Goo.Gl/Images/Sdlnpcp](https://Goo.Gl/Images/Sdlnpcp)

ÖZGEÇMİŞ

İsim: Mehmet Erkan Efe

Doğum Yeri ve Yılı : Isparta, 1995

Medeni Hali : Bekar

Yabancı Dili : İngilizce

E-posta : Mefe3234@gmail.com

Ehliyet : B sınıfı

ÖĞRENİM DURUMU

2013-2018	Lisans	Süleyman Demirel Üniversitesi Mühendislik Fakültesi (Isparta)	İnşaat Mühendisliği Bölümü
2018- 2020	Yüksek Lisans	Süleyman Demirel Üniversitesi Mühendislik Fakültesi (Isparta)	Yapı Ana Bilim Dalı

-Lisans Mezuniyet Puanı : 2.54/4

-Yüksek Lisans Mezuniyet Puanı : 3.88/4