

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**BETONARME SİLİNDİRİK SİLOLARIN STOK MALZEMESİ-YAPI-ZEMİN**  
**ETKİLEŞİMLERİ DİKKATE ALINARAK DEPREM DAVRANIŞLARININ**  
**İNCELENMESİ**

**İnş. Yük. Müh. Ayşegül DURMUŞ**

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde**  
**“DOKTOR (İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ)”**  
**Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 28.06.2013**  
**Tezin Savunma Tarihi : 27.08.2013**

**Tez Danışmanı: Prof. Dr. Metin HÜSEM**  
**İkinci Danışman: Doç. Dr. Ramazan LİVAOĞLU**

**Trabzon 2013**

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**

**İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalında**

**Ayşegül Durmuş Tarafından Hazırlanan**

**BETONARME SİLİNDİRİK SİLOLARIN STOK MALZEMESİ-YAPI-ZEMİN  
ETKİLEŞİMLERİ DİKKATE ALINARAK DEPREM DAVRANIŞLARININ  
İNCELENMESİ**

**başlıklı bu çalışma, Enstitü Yönetim Kurulunun 09.07.2013 gün ve 1513 sayılı  
kararıyla oluşturulan jüri tarafından yapılan sınavda**

**DOKTORA TEZİ**

**olarak kabul edilmiştir.**

**Jüri Üyeleri**

**Başkan : Prof. Dr. Metin HÜSEM .....**

**Üye : Prof. Dr. Burhan ÇUHADAROĞLU .....**

**Üye : Prof. Dr. Adem DOĞANGÜN .....**

**Üye : Doç. Dr. Selim PUL .....**

**Üye : Doç. Dr. Şevket ATEŞ .....**

**Prof. Dr. Sadettin KORKMAZ**

**Enstitü Müdürü**

## ÖNSÖZ

‘‘Betonarme Silindirik Siloların Stok Malzemesi-Yapı-Zemin Etkileşimleri Dikkate Alınarak Deprem Davranışlarının İncelenmesi’’ konulu bu çalışma; Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı’nda Doktora Tezi olarak gerçekleştirilmiştir.

Bu çalışma süresince, moral destek yanında bana bilgi ve tecrübelerinden yararlanma imkânı tanıyan değerli danışman hocam Prof. Dr. Sayın Metin Hüsem’e minnet ve şükranlarımı sunmayı önemli bir görev sayarım.

Tezimi başlangıcından yazımına kadar büyük bir özveriyle takip edip, çalışmamın her aşamasında bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım, moral desteğini esirgemeyen ikinci danışman hocam Doç. Dr. Sayın Ramazan LİVAOĞLU’na minnettar olduğumu belirtmeyi zevkli bir görev sayarım.

Değerli vakitlerini harcıyıp tez çalışmamı inceleyerek bilgi ve deneyimlerini benimle paylaşan, tez izleme komitesi üyeleri Prof. Dr. Sayın Burhan Çuhadaroğlu ve Doç. Dr. Sayın Selim PUL’a ayrı ayrı teşekkür ederim.

Jüri üyeliği gibi önemli bir görevi üstlenen ve tezimi titizlikle inceleyen değerli hocalarım Prof. Dr. Adem DOĞANGÜN ve Doç. Dr. Şevket ATEŞ’e minnettar olduğumu belirtmek isterim.

Tezimin hazırlanmasında dara düştüğümde danıştığım, bilgi birikiminden, deneyiminden yararlandığım, moral destek ve teşviklerini aldığım hocamız Prof. Dr. Ing. Sayın Ahmet DURMUŞ’a çok şey borçlu olduğumu ifade etmek isterim.

Bana Yurtiçi Doktora Bursu vererek ödüllendiren ve bu suretle çalışmalarımı destekleyen TÜBİTAK Bilim İnsanı Destekleme Daire Başkanlığı yöneticilerine teşekkürlerimi sunarım.

Burada öğrenim hayatım boyunca bana emeği geçen hocalarımın tümünü saygı ve minnetle anarken, çalışmam süresince beni sabır ve şefkatle destekleyen, aynı sıkıntı ve sevinçleri benimle birlikte yaşayan, haklarını asla ödeyemeyeceğim ailemin tüm fertlerine, özellikle de yetişmemde hiçbir fedakârlıktan kaçınmayan anne ve babama bir kez daha müteşekkir olduğumu belirtir, çalışmamın Ülkemize ve insanlığa faydalı olmasını içtenlikle dilerim.

Ayşegül DURMUŞ  
Trabzon,2013

## TEZ BEYANNAMESİ

Doktora Tezi olarak sunduğum “Betonaarme Silindirik Siloların Stok Malzemesi-Yapı-Zemin Etkileşimleri Dikkate Alınarak Deprem Davranışlarının İncelenmesi” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanlarım olan Prof. Dr. Metin HÜSEM ve Doç. Dr. Ramazan LİVAOĞLU’un sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarında yaptığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim 15/06/2013.

Ayşegül DURMUŞ

## İÇİNDEKİLER

### Sayfa No

ÖNSÖZ.....	III
TEZ BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET.....	VIII
SUMMARY.....	IX
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	X
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	XX
SİMGELER DİZİNİ.....	XXIII
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Siloları Tanımlayan Bazı Parametreler .....	4
1.3. Siloların Sınıflandırılması .....	6
1.4. Stok Malzemesi ve Davranış Karakteri.....	9
1.5. Silolara Etkiyebilecek Yükler .....	12
1.5.1. Stok Malzemesinden Doğan Basınçlar .....	12
1.5.1.1. Statik Durumdaki Malzeme Basınçlarının Hesabı İçin Bazı Teoriler.....	17
1.5.2. Sıcaklık.....	22
1.5.3. Farklı Oturmalar .....	23
1.5.4. İnfilak .....	27
1.5.5. Deprem .....	28
1.5.5.1. Kocaeli ve Düzce Depremlerindeki Silo Hasarları .....	29
1.5.5.2. Zemmouri, Cezayir, Depremindeki Silo Hasarları.....	31
1.5.6. Silo Hasarına Neden Olan Özel Durumlar .....	31
1.5.6.1. Korozyon.....	32
1.5.6.2. İç Yapı Çökmesi.....	33
1.5.6.3. Silaj Asitinden Doğan Bozulma.....	34
1.6. Silolar Konusunda Daha Önce Gerçekleştirilen Bazı Çalışmalar .....	34
1.6.1. Silolarda Doldurma ve Boşaltma Durumlarıyla İlgili Bazı Çalışmalar .....	38
1.6.2. Siloların Deprem Davranışı ile İlgili Bazı Çalışmalar .....	46

1.7.	Çalışmanın Amacı ve Kapsamı .....	53
2.	YAPILAN ÇALIŞMALAR .....	55
2.1.	Silolarda Depreme Göre Hesap İçin Analitik Yaklaşımlar .....	585
2.1.1.	Yönetmeliklerdeki Hesap Yöntemleri.....	587
2.1.1.1.	DIN 4149-1 .....	58
2.1.1.2.	EN1998-4 .....	59
2.1.1.3.	ACI 313-97.....	63
2.1.1.4.	Yönetmeliklerin Karşılaştırmalı Olarak Değerlendirilmesi .....	63
2.1.2.	Veletsos-Younan Yaklaşımı.....	64
2.1.2.1.	Rijit Çözüm .....	66
2.1.2.2.	Esnek Çözüm.....	75
2.1.3.	Stok Malzemesi-Silo Sistemi İçin Önerilen Analitik Model (ÖM) .....	81
2.1.4.	Stok Malzemesi-Silo-Temel/Zemin Sistemi İçin Önerilen Analitik Model (ÖMZ ve ÖMZG) .....	87
2.2.	Silolarda Depreme Göre Hesap İçin Sayısal Yaklaşımlar .....	100
2.2.1.	Stok Malzemesi-Silo Sistemi Sonlu Elemanlar Modeli (SM) .....	102
2.2.2.	Stok Malzemesi-Silo-Temel/Zemin Sistemi Sonlu Elemanlar Modeli (SMZ ve SMZG) .....	106
3.	BULGULAR VE İRDELEME.....	115
3.1.	Önerilen Modellerin İrdelenmesi .....	118
3.1.1.	Stok Malzemesi-Silo Sistemi İçin Önerilen Analitik ve Sayısal Modellerin İrdelenmesi .....	119
3.1.2.	Önerilen Analitik Modelin EN1998-4 ve Veletsos-Younan Modelleriyle Karşılaştırılması .....	134
3.1.3.	Stok Malzemesi-Silo-Temel/Zemin Sistemi İçin Önerilen Analitik ve Sayısal Modellerin İrdelenmesi.....	137
3.1.3.1.	Temelin Gömülü Olmadığı Durum İçin Önerilen Analitik ve Sayısal Modeller Açısından İrdelenmeler.....	138
3.1.3.2.	Temelin Gömülü Olduğu Durum İçin Önerilen Analitik ve Sayısal Modeller Açısından İrdelenmeler.....	164
3.2.	Duvar Rijitliğinin Yapı Davranışı Üzerindeki Etkisi.....	179
3.3.	Silo Narinlik Oranının Yapı Davranışı Üzerindeki Etkisi .....	188
3.3.1.	Dinamik Malzeme Basınçlarının Silo Narinlik Oranı Açısından Değerlendirilmesi .....	189
3.3.2.	Yatay Yerdeğiştirmelerin Silo Narinlik Oranı Açısından Değerlendirilmesi .....	191
3.4.	Silo-Temel/Zemin Etkileşiminin Yapı Davranışı Üzerindeki Etkisi .....	193

3.4.1.	Silo-Temel/Zemin Etkileşiminin Dinamik Malzeme Basınçları Üzerindeki Etkisi.....	194
3.4.2.	Silo-Temel/Zemin Etkileşiminin Yatay Yerdeğiştirme Tepkisi Üzerindeki Etkisi.....	197
3.5.	Temel Gömülme Oranının Silo Davranışı Üzerindeki Etkisi .....	204
3.5.1.	Temel Gömülme Oranının Dinamik Malzeme Basıncı ve Eşdeğer Taban Kesme Kuvveti Tepkileri Üzerindeki Etkisi .....	204
3.5.2.	Temel Gömülme Oranının Yatay Yerdeğiştirme Tepkisi Üzerindeki Etkisi.....	210
3.6.	Silo-Temel/Zemin Etkileşiminin Gerilmeler Üzerindeki Etkisi .....	214
4.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....	221
5.	KAYNAKLAR.....	233
6.	EKLER .....	248

## ÖZGEÇMİŞ

Doktora Tezi

ÖZET

BETONARME SİLİNDİRİK SİLOLARIN STOK MALZEMESİ-YAPI-ZEMİN  
ETKİLEŞİMLERİ DİKKATE ALINARAK DEPREM DAVRANIŞLARININ  
İNCELENMESİ

Ayşegül DURMUŞ

Karadeniz Teknik Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı  
Danışman: Prof. Dr. Metin HÜSEM  
2013, 247 Sayfa, 19 Ek Sayfa

Özel mühendislik yapılarından biri olan silolar, geleneksel birçok yapı sisteminden farklı olarak, stok malzemesi ve zeminle olan etkileşim nedeniyle oldukça karmaşık bir deprem davranışına sahiptir. Teknik literatürde, siloların deprem davranışlarını konu eden çalışmaların azlığı ve deprem yükleri altında her iki etkileşimin tepkiler üzerinde etkisini belirlemeye yönelik eksiklikler, önemli bir boşluk olarak durmaktadır.

Bu çalışmanın temel amacı, teknik literatürde siloların deprem hesabı için kullanılan yaklaşımların etkinliklerini irdelemek, sözkonusu etkileşimleri dikkate alan modeller geliştirerek siloların deprem davranışlarını incelemek ve bu modellerin pratik olarak kullanımlarını uygulamacıya sunmaktan ibarettir.

Bu amaçla gerçekleştirilen çalışma dört asıl ve bir ek bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde, silolar hakkında genel bilgiler verilmekte, ikinci bölümde stok malzemesi-yapı ve yapı-zemin etkileşim problemleri için geliştirilen analitik ve sayısal modeller üzerinde durulmakta, üçüncü bölümde bu modellerin silolar için uygulanabilirlikleri çeşitli parametreler açısından değerlendirilmektedir. Dördüncü bölüm sonuç ve önerilere ayrılmış olup bu son bölümü kaynaklar listesi, ekler bölümü ve yazarın özgeçmişi izlemektedir.

Elde edilen bulguların irdelenmesiyle bu çalışmada; stok malzemesi ve zeminin, çeşitli parametreler açısından silonun deprem davranışı üzerindeki etkileri belirlenmiş, etkileşimler için geliştirilen bazı analitik yaklaşımların, sayısal yaklaşımlar kadar gerçekçi bulgular üretebildikleri ortaya konulmuştur.

**Anahtar Kelimeler:** Silindirik Silolar, Deprem Davranışı, Stok Malzemesi-Yapı-Zemin Etkileşimi, Narinlik Oranı, Koni Modeli, Sanal Sınırlar, EN1998-4



PhD. Thesis

SUMMARY

INVESTIGATION OF SEISMIC BEHAVIOR OF REINFORCED CONCRETE  
CYLINDRICAL SILOS CONSIDERING BULK MATERIAL- STRUCTURE- SOIL  
INTERACTION

Ayşegül DURMUŞ

Karadeniz Technical University  
The Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Civil Engineering Graduate Program  
Supervisor: Prof. Dr. Metin HÜSEM  
2013, 247 Pages, 19 Appendix Pages

The silos which is a special structural system interacting with both bulk material and soil/foundation system have a notably complex behaviour, opposed to many other structural systems. The lack of studies about seismic behavior of silos and the effects of above mentioned interactions on the seismic responses of silos is an important gap in the technical literature.

The main purpose of this study is to evaluate the effectiveness of the approaches used for the seismic design of silos in technical literature, to investigate the seismic response of the silos by developing models which are taking into these interactions and to present how these interactions can be considered practically.

This study, carried out for this purpose, consists of four main chapters and one appendix. General information related to silos is given in Chapter 1. Developed basic approaches for bulk material-structure and soil-structure interaction problems are introduced in Chapter 2 and applicability of these approaches to silos are evaluating according to several parameters in Chapter 3. Conclusions and recommendations for future studies are presented in Chapter 4. This chapter is followed by the list of references, an appendix and the author's biography.

Finally, in this study, effects of bulk material and soil interaction on the seismic behavior of silos according to several parameters were determined; it was shown that some analytical methods developed for the interaction problems can produce similar results with numerical methods.

**Key Words:** Silos, Seismic Behavior, Bulk Material-Structure-Soil Interaction, Slenderness Ratio, Cone Model, Artificial Boundaries, EN1998-4

## ŞEKİLLER DİZİNİ

### Sayfa No

Şekil 1.1.	Farklı kültürler için silo örnekleri .....	2
Şekil 1.2.	Farklı türde silolar .....	3
Şekil 1.3.	Düz tabanlı ve tiremili silo kesit ve boyutları .....	5
Şekil 1.4.	Stok malzemesinin kırılma düzlemine göre siloların sınıflandırılması (Safarian ve Harris, 1974) .....	7
Şekil 1.5.	Yaygın kullanılan silo tipleri için en kesit ve boy kesit örnekleri :(a) yer seviyesinde düz tabana sahip sürekli temelli silo (b), eğimli bir beton ya da granüler bir dolgu zemin üzerine oturan ayırık taban doşemesine sahip silo, (c), cidara bağlı kolonlar üzerine oturan ayırık tiremiye sahip, radye temelli silo (d) güçlendirilmiş alt cidar üzerine dolgu kullanılarak oluşturulan tiremiye sahip silo (e), ana silo gövdesi, üst uçlarında yatayda rijitleştirici elemanlara sahip kolonlar üzerine oturtulmuş birden fazla boşaltma ağızı bulunan silo (f) silo ana gövdesinden bağımsız kiriş ve kolon sistemine mesnetlenmiş tiremiye sahip radye temelli silo .....	8
Şekil 1.6.	Çeşitli silo grubu düzenleri .....	8
Şekil 1.7.	Stok malzemesinden doğan basınç ve sürtünme kuvvetleri (a) ile doldurma boşaltma durumuna bağlı dışmerkezliklerin gösterimi (b) .....	14
Şekil 1.8.	Akış profilleri ve farklı akış profilleri için statik ve boşaltma durumunda yaklaşık simetrik cidar basınçları.....	16
Şekil 1.9.	Dairesel ve dairesel olmayan silolarda doldurma ve boşaltma ek yüklerinin en ve boy kesitleri .....	16
Şekil 1.10.	Janssen teorisindeki bağıntıların çıkartılmasına ilişkin şema .....	17
Şekil 1.11.	Reimbert'in deneylerine göre $1/K$ 'nın derinlikle değişimi .....	21
Şekil 1.12.	Isıl etkiler nedeniyle göçme: silonun göçmeden önceki (a) ve göçmeden sonraki (b) durumlarına ilişkin birer görünüm (Carson,2000).....	23
Şekil 1.13.	Farklı oturma etkileri (a) düz tabanlı silo, (b) ayaklı silo (c) zemin dönmesinden dolayı ayaklı siloda meydana gelen çarpılma .....	24
Şekil 1.14.	Kazık temel problemleri.....	25
Şekil 1.15.	Komşu yapıya da hasar veren 2500 t kapasiteli silonun göçmesinden bir görüntü (Bozozuk 1976, ASCE) .....	26
Şekil 1.16.	Çakışan basınç soğanları bölgesinde düzgün olmayan oturmadan dolayı çarpışan ikiz silolardan bir görünüm (Bozozuk 1976, ASCE).....	26

Şekil 1.17.	Tahıl silosunun düşey (a) ve yan yatmış hallerine (b) ilişkin birer görünüm (Clerkin 2004).....	27
Şekil 1.18.	Fransa da bir silonun patlama öncesi (a) ve patlama sonrası (b) görünümleri (Mavrot vd. 2003).....	28
Şekil 1.19.	1999 Düzce depreminde yıkılan silolar (a), (b) (Xiao ve Yaprak 1999, GESS 1999).....	30
Şekil 1.20.	1999 Kocaeli depreminde SEKA kağıt fabrikasındaki hasarsız (a) ve hasarlı(b) silolardan birer görünüm (Sezen vd. 2000).....	30
Şekil 1.21.	2003 Zemmouri, Cezayir depreminde Corso silosunun genel görünüşü (a) ve hasar durumuna ilişkin bir görünüm (b) (Bechtoula and Ousalem 2005).....	31
Şekil 1.22.	Korozyon nedeniyle göçen silolardan bir görünüm (Hertlein,2007) .....	33
Şekil 1.23.	MEA kömür silosunun dış hasarından bir görünüm (Kazas 2001).....	33
Şekil 1.24.	Silaj asidi etkisiyle oluşan hasarlara bir örnek (Doğangün vd., 2009).....	34
Şekil 2.1.	Ek yükler ve mod şekilleri (DIN4149-1, 1981) .....	58
Şekil 2.2.	EN1998-4 (2006)'e göre ek dinamik basınç hesabı için ilgili terimlerin gösterimi.....	61
Şekil 2.3.	Veletsos-Younan yaklaşımı için dikkate alınan sistem.....	65
Şekil 2.4.	Stok malzemesi-silo sistemi için önerilen matematik model .....	82
Şekil 2.5.	Farklı narinlik oranları için yükün frekansına bağlı olarak modal katkı çarpanı değişimi .....	84
Şekil 2.6.	Önerilen analitik modele göre yükseklik boyunca ek dinamik malzeme basınçlarının elde edilişi ve dağılımı.....	87
Şekil 2.7.	Eylemsizliğe bağlı etkileşim için yatayda ötelenme ve dönme serbestliklerini içeren basitleştirilmiş bir mekanik model (Livaoğlu 2005).....	89
Şekil 2.8.	Boussinesq teorisine göre elastik bir ortam (Poisson oranı $\nu = 1/3$ ) üzerinde statik olarak yüklü bir diskin ortamda oluşturduğu yerdeğiştirmelerin yüzeydeki yerdeğiştirmeye göre derinliğe bağlı değişimleri.....	90
Şekil 2.9.	Çeşitli serbestlik dereceleri için kabul edilen koni modelleri, bu modellere ait tepe açısı şekilleri, serbestlik dereceleri için dalga yayılma doğrultuları ve zeminde oluşan gerilme şekilleri (Wolf, 1994). .....	90
Şekil 2.10.	Tek kütleli sisteme ait dönme ve yatay ötelenme serbestlik derecelerini içeren alt sistem yaklaşımı modeli (Wolf 1994). .....	92
Şekil 2.11.	Homojen bir zemin sistemi üzerindeki silolar için yatay ve dönme serbestliklerinin dikkate alındığı alt sistem yaklaşımı .....	93
Şekil 2.12.	Yatay ötelenme ve dönme serbestlikleri için çift koni modelleri.....	96
Şekil 2.13.	Homojen bir zemin sistemi üzerindeki gömülü silo-temel sistemine için yatay ötelenme ve dönme serbestliklerinin dikkate alındığı alt sistem yaklaşımı .....	97

Şekil 2.14.	Sayısal çözümlemede kullanılan elemanlar .....	104
Şekil 2.15.	Yayıma durumunu ifade etmek için kullanılan birim küpe etkileyen kuvvetler.....	111
Şekil 2.16.	Sonlu eleman ağında sanal sınırın uygulaması ( Livaoğlu 2005 ) .....	112
Şekil 2.17.	Çalışmada önerilen SMZ ve SMZG stok malzemesi-silo-temel/zemin modelleri için örnekler .....	114
Şekil 3.1.	Çalışmaya konu olan silo model ve boyutları .....	115
Şekil 3.2.	17 Ağustos 1999 Kocaeli depremi Yarımca ivme kaydı Kuzey-Güney bileşeni .....	116
Şekil 3.3.	ÖM ve SM'e göre sol ve sağ cidarlardaki en büyük dinamik malzeme basınçlarının altı farklı silo için karşılaştırılması .....	121
Şekil 3.4.	Çalışmaya konu edilen altı farklı silo için ÖM ve SM'e göre sol ve sağ cidarlarda yükseklik boyunca dinamik malzeme basınçlarının değişimleri.....	123
Şekil 3.5.	ÖM_10 ve SM_10'a göre deprem doğrultusunda karşılıklı cidarlarda yatay yerdeğiştirmelerin zamanla değişimi.....	126
Şekil 3.6.	ÖM_20 ve SM_20'ye göre deprem doğrultusunda karşılıklı cidarlarda yatay yerdeğiştirmelerin zamanla değişimi.....	126
Şekil 3.7.	ÖM_25 ve SM_25'e göre deprem doğrultusunda karşılıklı cidarlarda yatay yerdeğiştirmelerin zamanla değişimi.....	127
Şekil 3.8.	ÖM_40 ve SM_40'a göre deprem doğrultusunda karşılıklı cidarlarda yatay yerdeğiştirmelerin zamanla değişimi.....	127
Şekil 3.9.	ÖM ve SM'e göre çalışmaya konu edilen 6 farklı silo için sol ve sağ cidarlarda hesaplanan yerdeğiştirmelerin yükseklik boyunca karşılaştırılması .....	128
Şekil 3.10.	ÖM ve SM'e göre sağ ve sol cidarlardaki en büyük eşdeğer taban kesme kuvvetlerinin altı farklı silo için karşılaştırılması .....	130
Şekil 3.11.	Narinlik oranı 1,5 olan silo için ÖM ve SM'e göre deprem doğrultusunda karşılıklı cidarlarda eşdeğer taban kesme kuvvetlerinin zamanla değişimi.....	131
Şekil 3.12.	Narinlik oranı 2,5 olan silo için ÖM ve SM'e göre deprem doğrultusunda karşılıklı cidarlarda eşdeğer taban kesme kuvvetlerinin zamanla değişimi.....	132
Şekil 3.13.	Narinlik oranı 3,0 olan silo için ÖM ve SM'e göre deprem doğrultusunda karşılıklı cidarlarda eşdeğer taban kesme kuvvetlerinin zamanla değişimi.....	132
Şekil 3.14.	ÖM ve SM'e göre altı farklı silo için deprem doğrultusunda karşılıklı cidarlardaki en büyük eşdeğer eğilme momentleri .....	133
Şekil 3.15.	ÖM, EC ve VY modellerine göre altı farklı silo için deprem doğrultusunda karşılıklı cidarlardaki en büyük dinamik malzeme basınçları .....	136

Şekil 3.16.	Altı narınlık oranı için ÖM, EC ve VY Modeline göre silo yüksekliği boyunca dinamik malzeme basınçları .....	137
Şekil 3.17.	Farklı zemin sistemlerindeki 10 m'lik ( $H/d_c=1,0$ ) silo için ÖMZ ve SMZ'e göre karşılıklı cidarlardaki en büyük dinamik malzeme basınçlarının değişimleri .....	140
Şekil 3.18.	Farklı zemin sistemlerindeki 10 m'lik ( $H/d_c=1,0$ ) silo için ÖMZ ve SMZ'e göre dinamik malzeme basınçlarının yükseklik boyunca değişimleri.....	141
Şekil 3.19.	Farklı zemin sistemlerindeki 15 m'lik ( $H/d_c=1,5$ ) silo için ÖMZ ve SMZ'e göre karşılıklı cidarlardaki en büyük dinamik malzeme basınçlarının değişimleri .....	142
Şekil 3.20.	Farklı zemin sistemlerindeki 15 m'lik ( $H/d_c=1,5$ ) silo için ÖMZ ve SMZ'e göre dinamik malzeme basınçlarının yükseklik boyunca değişimleri.....	143
Şekil 3.21.	Farklı zemin sistemlerindeki 20 m'lik ( $H/d_c=2,0$ ) silo için ÖMZ ve SMZ'e göre karşılıklı cidarlardaki en büyük dinamik malzeme basınçlarının değişimleri .....	144
Şekil 3.22.	Farklı zemin sistemlerindeki 20 m'lik ( $H/d_c=2,0$ ) silo için ÖMZ ve SMZ'e göre dinamik malzeme basınçlarının yükseklik boyunca değişimleri.....	145
Şekil 3.23.	Farklı zemin sistemlerindeki 25 m'lik ( $H/d_c=2,5$ ) silo için ÖMZ ve SMZ'e göre karşılıklı cidarlardaki en büyük dinamik malzeme basınçlarının değişimleri .....	145
Şekil 3.24.	Farklı zemin sistemlerindeki 30 m'lik ( $H/d_c=3,0$ ) silo için ÖMZ ve SMZ'e göre karşılıklı cidarlardaki en büyük dinamik malzeme basınçlarının değişimleri .....	146
Şekil 3.25.	Farklı zemin sistemlerindeki 40 m'lik ( $H/d_c=4,0$ ) silo için ÖMZ ve SMZ'e göre karşılıklı cidarlardaki en büyük dinamik malzeme basınçlarının değişimleri .....	146
Şekil 3.26.	Farklı zemin sistemlerindeki 25 m'lik ( $H/d_c=2,5$ ) silo için ÖMZ ve SMZ'e göre dinamik malzeme basınçlarının yükseklik boyunca değişimleri.....	147
Şekil 3.27.	Farklı zemin sistemlerindeki 30 m'lik ( $H/d_c=3,0$ ) silo için ÖMZ ve SMZ'e göre dinamik malzeme basınçlarının yükseklik boyunca değişimleri.....	148
Şekil 3.28.	Farklı zemin sistemlerindeki 40 m'lik ( $H/d_c=4,0$ ) silo için ÖMZ ve SMZ'e göre dinamik malzeme basınçlarının yükseklik boyunca değişimleri.....	148
Şekil 3.29.	Farklı zemin sistemlerindeki 10 m'lik ( $H/d_c=1,0$ ) silo için ÖMZ ve SMZ'e göre karşılıklı cidarlardaki en büyük yatay yerdeğiştirmelerin değişimleri.....	150

Şekil 3.30.	Farklı zemin sistemlerindeki 15 m'lik ( $H/d_c=1,5$ ) silo için ÖMZ ve SMZ'e göre karşılıklı cidarlardaki en büyük yatay yerdeğiştirmelerin değişimleri.....	150
Şekil 3.31.	Farklı zemin sistemlerindeki 20 m'lik ( $H/d_c=2,0$ ) silo için ÖMZ ve SMZ'e göre karşılıklı cidarlardaki en büyük yatay yerdeğiştirmelerin değişimleri.....	151
Şekil 3.32.	Farklı zemin sistemlerindeki 25 m'lik ( $H/d_c=2,5$ ) silo için ÖMZ ve SMZ'e göre karşılıklı cidarlardaki en büyük yatay yerdeğiştirmelerin değişimleri.....	152
Şekil 3.33.	Farklı zemin sistemlerindeki 30 m'lik ( $H/d_c=3,0$ ) silo için ÖMZ ve SMZ'e göre karşılıklı cidarlardaki en büyük yatay yerdeğiştirmelerin değişimleri.....	152
Şekil 3.34.	Farklı zemin sistemlerindeki 40 m'lik ( $H/d_c=4,0$ ) silo için ÖMZ ve SMZ'e göre karşılıklı cidarlardaki en büyük yatay yerdeğiştirmelerin değişimleri.....	153
Şekil 3.35.	Farklı zemin sistemlerindeki 10 m'lik ( $H/d_c=1,0$ ) silo için en büyük yatay yerdeğiştirmelerin yükseklik boyunca değişimleri.....	154
Şekil 3.36.	Farklı zemin sistemlerindeki 20 m'lik ( $H/d_c=2,0$ ) silo için en büyük yatay yerdeğiştirmelerin yükseklik boyunca değişimleri.....	154
Şekil 3.37.	Farklı zemin sistemlerindeki 25 m'lik ( $H/d_c=2,5$ ) silo için en büyük yatay yerdeğiştirmelerin yükseklik boyunca değişimleri.....	154
Şekil 3.38.	Farklı zemin sistemlerindeki 40 m'lik ( $H/d_c=4,0$ ) silo için en büyük yatay yerdeğiştirmelerin yükseklik boyunca değişimleri.....	155
Şekil 3.39.	Farklı zemin sistemlerindeki 10 m'lik ( $H/d_c=1,0$ ) silo için en büyük eşdeğer taban kesme kuvvetlerinin zemin sınıflarına göre değişimleri .....	157
Şekil 3.40.	ÖMZ ve SMZ'e göre 10m'lik ( $H/d_c=1,0$ ) siloda S1 zemin sistemi için karşılıklı cidarlardaki eşdeğer taban kesme kuvvetinin zamanla değişimi ..	157
Şekil 3.41.	ÖMZ ve SMZ'e göre 10m'lik ( $H/d_c=1,0$ ) siloda S4 zemin sistemi için karşılıklı cidarlardaki eşdeğer taban kesme kuvvetinin zamanla değişimi ..	158
Şekil 3.42.	Farklı zemin sistemlerindeki 30 m'lik ( $H/d_c=3,0$ ) silo için en büyük eşdeğer taban kesme kuvvetlerinin zemin sınıflarına göre değişimleri .....	158
Şekil 3.43.	ÖMZ ve SMZ'e göre 30m'lik ( $H/d_c=3,0$ ) siloda S1 zemin sistemi için karşılıklı cidarlardaki eşdeğer taban kesme kuvvetinin zamanla değişimi ..	159
Şekil 3.44.	ÖMZ ve SMZ'e göre 30m'lik ( $H/d_c=3,0$ ) siloda S4 zemin sistemi için karşılıklı cidarlardaki eşdeğer taban kesme kuvvetinin zamanla değişimi ..	159
Şekil 3.45.	Farklı zemin sistemlerindeki 40 m'lik ( $H/d_c=4,0$ ) silo için en büyük eşdeğer taban kesme kuvvetlerinin zemin sınıflarına göre değişimleri .....	160
Şekil 3.46.	ÖMZ ve SMZ'e göre 40m'lik ( $H/d_c=4,0$ ) siloda S1 zemin sistemi için karşılıklı cidarlardaki eşdeğer taban kesme kuvvetinin zamanla değişimi ..	160
Şekil 3.47.	ÖMZ ve SMZ'e göre 40m'lik ( $H/d_c=4,0$ ) siloda S2 zemin sistemi için karşılıklı cidarlardaki eşdeğer taban kesme kuvvetinin zamanla değişimi ..	161

Şekil 3.48.	ÖMZ ve SMZ'e göre 40m'lik ( $H/d_c=4,0$ ) siloda S3 zemin sistemi için karşılıklı cidarlardaki eşdeğer taban kesme kuvvetinin zamanla değişimi ..	161
Şekil 3.49.	ÖMZ ve SMZ'e göre 40m'lik ( $H/d_c=4,0$ ) siloda S4 zemin sistemi için karşılıklı cidarlardaki eşdeğer taban kesme kuvvetinin zamanla değişimi ..	161
Şekil 3.50.	Narinlik oranı 1,0 olan silo için ÖMZ ve SMZ'e göre deprem doğrultusunda karşılıklı cidarlardaki en büyük eşdeğer eğilme momentleri .....	163
Şekil 3.51.	Narinlik oranı 2,5 olan silo için ÖMZ ve SMZ'e göre deprem doğrultusunda karşılıklı cidarlardaki en büyük eşdeğer eğilme momentleri .....	163
Şekil 3.52.	Narinlik oranı 4,0 olan silo için ÖMZ ve SMZ'e göre deprem doğrultusunda karşılıklı cidarlardaki en büyük eşdeğer eğilme momentleri .....	163
Şekil 3.53.	Farklı zemin sistemlerindeki 10m'lik ( $H/d_c=1,0$ ) silo için ÖMZG ve SMZG'e göre karşılıklı cidarlarda en büyük dinamik malzeme basınçları .....	166
Şekil 3.54.	Farklı zemin sistemlerindeki 10 m'lik ( $H/d_c=1,0$ ) silo için ÖMZG ve SMZG'ye göre dinamik malzeme basınçlarının yükseklik boyunca değişimleri.....	167
Şekil 3.55.	Farklı zemin sistemlerindeki 15m'lik ( $H/d_c=1,5$ ) silo için ÖMZG ve SMZG'e göre karşılıklı cidarlarda en büyük dinamik malzeme basınçları .....	168
Şekil 3.56.	Farklı zemin sistemlerindeki 15 m'lik ( $H/d_c=1,5$ ) silo için ÖMZG ve SMZG'ye göre dinamik malzeme basınçlarının yükseklik boyunca değişimleri.....	168
Şekil 3.57.	Farklı zemin sistemlerindeki 20m'lik ( $H/d_c=2,0$ ) silo için ÖMZG ve SMZG'e göre karşılıklı cidarlarda en büyük dinamik malzeme basınçları .....	169
Şekil 3.58.	Farklı zemin sistemlerindeki 20 m'lik ( $H/d_c=2,0$ ) silo için ÖMZG ve SMZG'ye göre dinamik malzeme basınçlarının yükseklik boyunca değişimleri.....	170
Şekil 3.59.	Farklı zemin sistemlerindeki 25m'lik ( $H/d_c=2,5$ ) silo için ÖMZG ve SMZG'e göre karşılıklı cidarlarda en büyük dinamik malzeme basınçları .....	171
Şekil 3.60.	Farklı zemin sistemlerindeki 30m'lik ( $H/d_c=3,0$ ) silo için ÖMZG ve SMZG'e göre karşılıklı cidarlarda en büyük dinamik malzeme basınçları .....	171
Şekil 3.61.	Farklı zemin sistemlerindeki 40m'lik ( $H/d_c=4,0$ ) silo için ÖMZG ve SMZG'e göre karşılıklı cidarlarda en büyük dinamik malzeme basınçları .....	171
Şekil 3.62.	Farklı zemin sistemlerindeki 25 m'lik ( $H/d_c=2,5$ ) silo için ÖMZG ve SMZG'ye göre dinamik malzeme basınçlarının yükseklik boyunca değişimleri.....	172

Şekil 3.63.	Farklı zemin sistemlerindeki 30 m'lik ( $H/d_c=3,0$ ) silo için ÖMZG ve SMZG'ye göre dinamik malzeme basınçlarının yükseklik boyunca değişimleri.....	173
Şekil 3.64.	Farklı zemin sistemlerindeki 40 m'lik ( $H/d_c=4,0$ ) silo için ÖMZG ve SMZG'ye göre dinamik malzeme basınçlarının yükseklik boyunca değişimleri.....	173
Şekil 3.65.	Narinlik oranı 1,0 olan silo için ÖMZG ve SMZG'e göre deprem doğrultusunda karşılıklı cidarlardaki en büyük eşdeğer taban kesme kuvvetleri.....	175
Şekil 3.66.	Narinlik oranı 1,0 olan siloda S1 zemini için ÖMZG ve SMZG'ye göre karşılıklı cidarlardaki eşdeğer kesme kuvvetinin zamanla değişimi.....	176
Şekil 3.67.	Narinlik oranı 1,0 olan siloda S4 zemini için ÖMZG ve SMZG'ye göre karşılıklı cidarlardaki eşdeğer kesme kuvvetinin zamanla değişimi.....	176
Şekil 3.68.	Narinlik oranı 3,0 olan silo için ÖMZG ve SMZG'e göre deprem doğrultusunda karşılıklı cidarlardaki en büyük eşdeğer taban kesme kuvvetleri.....	177
Şekil 3.69.	Narinlik oranı 3,0 olan siloda S1 zemini için ÖMZG ve SMZG'ye göre karşılıklı cidarlardaki eşdeğer kesme kuvvetinin zamanla değişimi.....	177
Şekil 3.70.	Narinlik oranı 3,0 olan siloda S4 zemini için ÖMZG ve SMZG'ye göre karşılıklı cidarlardaki eşdeğer kesme kuvvetinin zamanla değişimi.....	177
Şekil 3.71.	Narinlik oranı 4,0 olan silo için ÖMZG ve SMZG'e göre karşılıklı cidarlardaki en büyük eşdeğer taban kesme kuvvetleri.....	178
Şekil 3.72.	SME ve SMR'e göre altı farklı silo için deprem doğrultusunda karşılıklı cidarlardaki en büyük dinamik malzeme basıncı değişimleri.....	181
Şekil 3.73.	SMR ve SME'e göre altı farklı silo için rijit ve esnek durumda yükseklik boyunca dinamik malzeme basıncı dağılımları.....	182
Şekil 3.74.	SMR ve SME'ye göre altı farklı silo için rijit ve esnek durumda deprem doğrultusunda karşılıklı cidarlardaki en büyük eşdeğer taban kesme kuvvetleri.....	184
Şekil 3.75.	SMR ve SME'e göre narinlik oranı 1,0 olan siloda rijit ve esnek durum için eşdeğer taban kesme kuvvetlerinin zamanla değişimi.....	185
Şekil 3.76.	SMR ve SME'e göre narinlik oranı 3,0 olan siloda rijit ve esnek durum için eşdeğer taban kesme kuvvetlerinin zamanla değişimi.....	185
Şekil 3.77.	SMR ve SME'e göre narinlik oranı 4,0 olan siloda rijit ve esnek durum için eşdeğer taban kesme kuvvetlerinin zamanla değişimi.....	186
Şekil 3.78.	Altı farklı narinlik oranı için SME ve SMR'e göre deprem doğrultusunda.....	187
Şekil 3.79.	karşılıklı cidarlardaki en büyük eşdeğer eğilme momentleri.....	187
Şekil 3.80.	Narinlik oranı 1,0 olan silo için SMR ve SME'e göre rijit ve esnek durum için eşdeğer eğilme momentlerinin zamanla değişimi.....	188



Şekil 3.81.	Narinlik oranı 4,0 olan silo için SMR ve SME'e göre rijit ve esnek durum için eşdeğer eğilme momentlerinin zamanla değişimi.....	188
Şekil 3.82.	Altı farklı narinlik oranı için SM'e göre deprem doğrultusunda karşılıklı cidarlarda yükseklik boyunca dinamik malzeme basınçlarının (a)normal ve (b)boyutsuz koordinatlarda karşılaştırılması .....	190
Şekil 3.83.	Altı farklı narinlik oranı için SM'e göre yatay yerdeğiştirmelerin zamanla değişimi.....	192
Şekil 3.84.	2,5 ve 4,0 narinlik oranları için SM'e göre yatay yerdeğiştirmelerin zamanla değişimi.....	192
Şekil 3.85.	Altı farklı narinlik oranı için SM'e göre deprem doğrultusundaki karşılıklı cidarlarda yükseklik boyunca yatay yerdeğiştirmelerin (a) normal (b) boyutsuz koordinatlarda karşılaştırılması.....	193
Şekil 3.86.	Altı farklı narinlik oranı için SM ve SMZ'e göre ankastre durum ve dört farklı zemin sınıfı için deprem doğrultusunda karşılıklı cidarlardaki en büyük dinamik malzeme basınçları.....	195
Şekil 3.87.	SM ve SMZ'e göre ankastre durum ve dört farklı zemin sınıfı için deprem doğrultusunda karşılıklı cidarlarda yükseklik boyunca dinamik malzeme basınçlarının değişimleri.....	196
Şekil 3.88.	Altı narinlik oranı için SM ve SMZ'e göre ankastre durum ve dört farklı zemin sınıfı için deprem doğrultusunda karşılıklı cidarlardaki en büyük yatay yerdeğiştirmeler .....	198
Şekil 3.89.	Altı narinlik oranı için SM ve SMZ'e göre ankastre durum ve dört farklı zemin sınıfı için deprem doğrultusunda karşılıklı cidarlarda yükseklik boyunca yatay yerdeğiştirmeler .....	199
Şekil 3.90.	Altı farklı narinlik oranında S1 ve S4 zemin sınıfları için SMZ'e göre sağ cidar tepe noktasında en büyük yerdeğiştirme olduğu anda karşılıklı cidarlarda yükseklik boyunca yatay yerdeğiştirmeler.....	201
Şekil 3.91.	1,0 narinlik oranına sahip siloda ankastre durum ve 4 farklı zemin sınıfı için etkileşimli durumda zamanla yerdeğiştirme .....	202
Şekil 3.92.	2,5 narinlik oranına sahip siloda ankastre durum ve 4 farklı zemin sınıfı için etkileşimli durumda zamanla yerdeğiştirme .....	203
Şekil 3.93.	4,0 narinlik oranına sahip siloda ankastre durum ve 4 farklı zemin sınıfı için etkileşimli durumda zamanla yerdeğiştirme .....	203
Şekil 3.94.	1,0 narinlik oranına sahip siloda SMZ ve SMZG'e göre dört farklı zemin sınıfı için deprem doğrultusunda karşılıklı cidarlardaki en büyük eşdeğer taban kesme kuvvetleri.....	205
Şekil 3.95.	1,0 narinlik oranına sahip siloda SMZ ve SMZG'e göre dört farklı zemin sınıfı için deprem doğrultusunda karşılıklı cidarlarda yükseklik boyunca dinamik malzeme basınçları .....	205
Şekil 3.96.	1,5 narinlik oranına sahip siloda SMZ ve SMZG'e göre dört farklı zemin sınıfı için deprem doğrultusunda karşılıklı cidarlardaki en büyük eşdeğer taban kesme kuvvetleri.....	206

Şekil 3.97.	1,5 narinlik oranına sahip siloda SMZ ve SMZG'e göre dört farklı zemin sınıfı için deprem doğrultusunda karşılıklı cidarlarda yükseklik boyunca dinamik malzeme basınçları .....	206
Şekil 3.98.	2,0 narinlik oranına sahip siloda SMZ ve SMZG'e göre dört farklı zemin sınıfı için deprem doğrultusunda karşılıklı cidarlardaki en büyük eşdeğer taban kesme kuvvetleri.....	207
Şekil 3.99.	2,0 narinlik oranına sahip siloda SMZ ve SMZG'e göre dört farklı zemin sınıfı için deprem doğrultusunda karşılıklı cidarlarda yükseklik boyunca dinamik malzeme basınçları .....	207
Şekil 3.100.	2,5 narinlik oranına sahip siloda SMZ ve SMZG'e göre dört farklı zemin sınıfı için deprem doğrultusunda karşılıklı cidarlardaki en büyük eşdeğer taban kesme kuvvetleri.....	208
Şekil 3.101.	2,5 narinlik oranına sahip siloda SMZ ve SMZG'e göre dört farklı zemin sınıfı için deprem doğrultusunda karşılıklı cidarlarda yükseklik boyunca dinamik malzeme basınçları .....	208
Şekil 3.102.	3,0 narinlik oranına sahip siloda SMZ ve SMZG'e göre dört farklı zemin sınıfı için deprem doğrultusunda karşılıklı cidarlardaki en büyük eşdeğer taban kesme kuvvetleri.....	209
Şekil 3.103.	3,0 narinlik oranına sahip siloda SMZ ve SMZG'e göre dört farklı zemin sınıfı için deprem doğrultusunda karşılıklı cidarlarda yükseklik boyunca dinamik malzeme basınçları .....	209
Şekil 3.104.	4,0 narinlik oranına sahip siloda SMZ ve SMZG'e göre dört farklı zemin sınıfı için deprem doğrultusunda karşılıklı cidarlardaki en büyük eşdeğer taban kesme kuvvetleri.....	210
Şekil 3.105.	4,0 narinlik oranına sahip siloda SMZ ve SMZG'e göre dört farklı zemin sınıfı için deprem doğrultusunda karşılıklı cidarlarda yükseklik boyunca dinamik malzeme basınçları .....	210
Şekil 3.106.	1,0 narinlik oranına sahip siloda SMZ ve SMZG'e göre dört farklı zemin sınıfı için deprem doğrultusunda karşılıklı cidarlardaki en büyük yatay yerdeğıştirmeler .....	211
Şekil 3.107.	1,0 narinlik oranına sahip siloda SMZ ve SMZG'e göre dört farklı zemin sınıfı için deprem doğrultusunda karşılıklı cidarlarda yükseklik boyunca yatay yerdeğıştirmeler .....	211
Şekil 3.108.	1,5 narinlik oranına sahip siloda SMZ ve SMZG'e göre dört farklı zemin sınıfı için deprem doğrultusunda karşılıklı cidarlardaki en büyük yatay yerdeğıştirmeler .....	212
Şekil 3.109.	1,5 narinlik oranına sahip siloda SMZ ve SMZG'e göre dört farklı zemin sınıfı için deprem doğrultusunda karşılıklı cidarlarda yükseklik boyunca yatay yerdeğıştirmeler .....	212
Şekil 3.110.	3,0 narinlik oranına sahip siloda SMZ ve SMZG'e göre dört farklı zemin sınıfı için deprem doğrultusunda karşılıklı cidarlardaki en büyük yatay yerdeğıştirmeler .....	213

Şekil 3.111.	3,0 narinlik oranına sahip siloda SMZ ve SMZG'e göre dört farklı zemin sınıfı için deprem doğrultusunda karşılıklı cidarlarda yükseklik boyunca yatay yerdeğiştirmeler .....	213
Şekil 3.112.	4,0 narinlik oranına sahip siloda SMZ ve SMZG'e göre dört farklı zemin sınıfı için deprem doğrultusunda karşılıklı cidarlardaki en büyük yatay yerdeğiştirmeler .....	214
Şekil 3.113.	4,0 narinlik oranına sahip siloda SMZ ve SMZG'e göre dört farklı zemin sınıfı için deprem doğrultusunda karşılıklı cidarlarda yükseklik boyunca yatay yerdeğiştirmeler .....	214
Şekil 3.114.	Altı farklı narinlik oranı için SM ve SMZG'ye göre ankastre ve gömülmenin olduğu durumda dört farklı zemin sınıfı için deprem doğrultusunda karşılıklı cidarlarda en büyük Von Mises gerilmeleri .....	216
Şekil 3.115.	Altı farklı narinlik oranı için SM ve SMZ'ye göre ankastre durum ve gömülmenin olmadığı durumda dört farklı zemin sınıfı için deprem doğrultusunda karşılıklı cidarlarda en büyük Von Mises gerilmeleri .....	218
Şekil 3.116.	1,0 narinlik oranı için SM ve SMZ'e göre ankastre durum ve dört farklı zemin sınıfı için deprem doğrultusunda karşılıklı cidarlarda zamanla Von Mises gerilmeleri .....	219
Şekil 3.117.	2,5 narinlik oranı için SM ve SMZ'e göre ankastre durum ve dört farklı zemin sınıfı için deprem doğrultusunda karşılıklı cidarlarda zamanla Von Mises gerilmeleri .....	219
Şekil 3.118.	4,0 narinlik oranı için SM ve SMZ'e göre ankastre durum ve dört farklı zemin sınıfı için deprem doğrultusunda karşılıklı cidarlarda zamanla Von Mises gerilmeleri .....	219

## ÇİZELGELER DİZİNİ

### Sayfa No

Çizelge 1.1. Silolarda çeşitli enkesit şekilleri için hidrolik yarıçap ve $h_0$ ifadeleri.....	5
Çizelge 1.2. Çeşitli yaklaşımlara göre silo sınıfları.....	6
Çizelge 2.1. Koni modeli ile elde edilmiş temel-zemin sisteminin özellikleri (Wolf, 1994).....	91
Çizelge 2.2. Koni ( $z_0/r_0$ ) oranının Poisson oranına göre değişimi (Wolf, 1994).....	91
Çizelge 2.3. Rijit dairesel temel-zemin sistemlerinin, yüzeysel, gömülü olma durumları ve rijit bir tabaka üzerindeki zemin sistemleri için karşılaştırmalı statik rijitlikleri (Livaoğlu ve Doğangün, 2004) .....	91
Çizelge 3.1. Uygulamaya konu olan zemin sistemlerine ait mekanik özellikler.....	117
Çizelge 3.2. SM ve ÖM'e göre altı farklı silo için en büyük dinamik malzeme basınçları, gerçekleşme zaman ve yükseklikleri .....	120
Çizelge 3.3. SM ve ÖM'e göre altı farklı silo için en büyük yerdeğiştirmeler ve gerçekleşme zamanları .....	125
Çizelge 3.4. SM ve ÖM'e göre altı farklı silo için en büyük eşdeğer taban kesme kuvvetleri ve gerçekleşme zamanları .....	129
Çizelge 3.5. SM ve ÖM'e göre altı farklı silo için en büyük eşdeğer eğilme momenti tepkileri ve gerçekleşme zamanları .....	133
Çizelge 3.6. EC, VY ve ÖM'e göre en büyük dinamik malzeme basınçları, gerçekleşme zamanları ve yükseklikleri .....	135
Çizelge 3.7. Çalışmaya konu edilen silolarda dört farklı zemin sistemi için SMZ ve ÖMZ'e göre en büyük dinamik malzeme basınçları, gerçekleşme zaman ve yükseklikleri .....	139
Çizelge 3.8. Çalışmaya konu edilen silolarda dört farklı zemin sınıfı için SMZ ve ÖMZ'e göre en büyük yatay yerdeğiştirmeler ve gerçekleşme zamanları... ..	149
Çizelge 3.9. SMZ ve ÖMZ ile altı farklı siloda dört zemin sınıfı için elde edilen en büyük eşdeğer taban kesme kuvvetleri ve gerçekleşme zamanları .....	156
Çizelge 3.10. SMZ ve ÖMZ'e göre gömülü olmayan temel sistemi için altı farklı siloda dört farklı zemin sistemine göre en büyük eşdeğer eğilme momentleri ve gerçekleşme zamanları .....	162
Çizelge 3.11. SMZG ve ÖMZG'e göre gömülü temel sistemi için altı farklı siloda dört farklı zemin sistemine göre en büyük dinamik malzeme basınçları, gerçekleşme zaman ve yükseklikleri.....	165
Çizelge 3.12. Gömülmenin dikkate alındığı sistemler için, SMZG ve ÖMZG'e göre en büyük eşdeğer kesme kuvvetleri ve gerçekleşme zamanları .....	174

Çizelge 3.13. Önerilen sayısal modele göre rijit ve esnek durum için altı farklı siloda en büyük dinamik malzeme basınçları, gerçekleşme zaman ve yükseklikleri .....	179
Çizelge 3.14. SMR ve SME'e göre altı farklı siloda rijit ve esnek durum için karşılıklı cidarlarda en büyük eşdeğer taban kesme kuvvetleri ve gerçekleşme zamanları .....	183
Çizelge 3.15. SMR ve SME'e göre altı farklı silo için rijit ve esnek durumda karşılıklı cidarlarda en büyük eşdeğer eğilme momentleri ve gerçekleşme zamanları .....	186
Çizelge 3.16. Gömülmenin olduğu durumda Von-Mises gerilmelerinin altı farklı narinlik oranı için dört farklı zemin sistemine ve ankastre duruma göre en büyük değerleri ile bunların gerçekleşme zamanları.....	215
Çizelge 3.17. Gömülmenin olmadığı durumda Von-Mises gerilmelerinin altı farklı narinlik oranı için dört farklı zemin sistemine ve ankastre duruma göre en büyük değerleri ile bunların gerçekleşme zamanları.....	217

## SİMGELER DİZİNİ

$a$	: Dörtgen ve çokgen silo enkesitinin kenar uzunluğu
$a_0$	: Boyutsuz frekans
$A$	: Silo enkesit alanı, Temas parçasının alanı
$A_0$	: Temel sistemi eşdeğer alanı
$A_n, A_{t1}, A_{t2}$	: Viskoz sönümleyicilerin kullanıldığı sınırdaki elemanın alanları
$A_n, B_n$	: İntegrasyon sabitleri
$A'_n, B'_n$	: İntegrasyon sabitleri
$b$	: Dikdörtgen silo enkesitinin uzun kenar uzunluğu
$c$	: Stok malzemesinin kohezyonu
$C$	: Sistemin sönüm matrisi
$C^*$	: Sisteme ait özel sönüm matrisi
$C_n, C_{t1}, C_{t2}$	: Viskoz sönümleyicilerin kullanıldığı sınırdaki elemanın sönüm değerleri
$C'_n, D'_n$	: İntegrasyon sabitleri
$d_c$	: Silo enkesitinin karakteristik iç boyutu ya da sismik hareketin yatay bileşenine paralel silo iç boyutunu
$d_h$	: Zeminden dolayı kazık temele gelen yatay basınç
$d_w$	: Cidar esnekliğinin boyutsuz ölçüsü
$e$	: Temel gömülme derinliği
$e_f$	: Doldurma işleminde malzeme yığını yüzeyinin en büyük dışmerkezliği
$E_m, E_w$	: Sırasıyla stok malzemesinin ve silo cidarının elastisite modülü
$e_o$	: Boşaltma ağzının dışmerkezliği
$e_t$	: Silo tam doluyken en üstteki malzeme yığınının dışmerkezliği
$F_c$	: Stok malzemesi tarafından cidara uygulanan kuvvet
$F_i$	: Cidar eylemsizlik kuvveti
$F_s$	: Cidarın kaymaya direnci
$f_s$	: Ceza faktörü
$FKN$	: Temas rijitlik faktörü
$f_1^*$	: ÖM için dikkate alınan sistemin frekansı

$g$	: Yerçekimi ivmesi, Temas aralığı
$G, G_w$	: Sırasıyla stok malzemesi ve silo cidarı kayma modülü
$G^*, G_w^*$	: Sırasıyla stok malzemesi ve silo cidarı için sönüme bağlı kompleks kayma modülü
$G_j$	: Sistemin sabit yükü
$g_n, h_n$	: Boyutsuz parametreler
$H$	: Silonun, geçiş düzleminde eşdeğer doldurma düzlemine kadar olan, düşey cidar yüksekliği
$h_b$	: Tiremi tepesinden eşdeğer doldurma düzlemine kadar olan tüm silo yüksekliği
$H_{E,i,j}$	: DIN4149-1(1981)'e göre depremden kaynaklanan eşdeğer statik ek yük
$h_h$	: Tiremi tepesinden geçiş düzlemine kadar olan tiremi yüksekliği
$h_o$	: Eşdeğer doldurma yüzeyinden cidarın stok malzemesiyle temasta olmadığı en alt noktaya olan derinlik
$H_o$	: En büyük dinamik malzeme basınçlarının tabandan itibaren gerçekleşme yüksekliği
$h_{tp}$	: Stok malzemesinin üstte oluşan yığın yüksekliği
$H_w$	: Düşey silo cidarının yüksekliği
$h_n^*$	: n. moda ait etkin yükseklik
$h_1^*$	: ÖM için dikkate alınan sistemin etkili yüksekliği
$I_m, I_w$	: Sırasıyla stok malzemesinin ve silo cidarının eylemsizlik momenti
$I_0$	: Birinci tür ve sıfırıncı dereceden değiştirilmiş Bessel fonksiyonu, statik eylemsizlik momenti
$I_1, K_1$	: Birinci dereceden, sırasıyla birinci ve ikinci türden değiştirilmiş Bessel fonksiyonu
$k$	: Temas rijitliği
$K$	: Yanal basınç oranı
$K_H$	: Temel zemin sistemi statik yatay rijitliği
$k_s$	: Stok malzemesi-silo sisteminin yatay rijitliği
$K_T$	: Temel zemin sistemi statik burulma rijitliği
$K_V$	: Temel zemin sistemi statik düşey rijitliği
$K_\theta$	: Temel zemin sistemi statik dönme rijitliği
$K_\infty, C_\infty$	: Temel/zemin sistemine ait rijitlik ve sönüm ifadeleri

- $k(a_0), c(a_0)$  : Ötelenme için dinamik rijitlik ve sönüm katsayıları
- $K_H(a_0), c_H(a_0)$  : Yatay serbestlik derecesi için frekans bağımlı yatayda dinamik rijitlik ve sönüm katsayıları
- $k_\theta(a_0), c_\theta(a_0)$  : Dönme ve burulma serbestlik derecelerini içeren dönme durumu için dinamik rijitlik ve sönüm katsayıları
- $k_{\theta\theta}(a_0), c_{\theta\theta}(a_0)$  : Dönme dinamik rijitlik ve sönüm katsayıları
- $K_H^*, K_V^*$  : Gömülmenin olduğu temel zemin sistemi için yatay ve düşey ötelenme statik rijitlikleri
- $K_\theta^*, K_T^*$  : Gömülmenin olduğu temel zemin sistemi için dönme ve burulma statik rijitlikleri
- $k_{\theta\zeta_g}(a_0), c_{\theta\zeta_g}(a_0)$  : Dönme serbestlik derecesi için zemine ait malzeme sönümünün de dikkate alındığı frekans bağımlı rijitlik ve sönüm
- $k_{H\zeta_g}(a_0), c_{H\zeta_g}(a_0)$  : Yatay ötelenme serbestlik derecesi için zemine ait malzeme sönümünün de dikkate alındığı frekans bağımlı rijitlik ve sönüm
- $K$  : Sistemin rijitlik matrisi
- $m$  : Stok malzemesinin toplam kütlesi
- $M$  : Sistemin kütle matrisi
- $M_b, V_b$  : Devirici taban momenti ve taban kesme kuvveti genliği
- $m_j$  : j. modun kütlesi
- $m_w$  : Silo cidarının kütlesini
- $M_n^*$  : n. moda ait etkin kütle
- $M_b(\omega)$  : Tabanda meydana gelen eğilme momentini frekansla değişimi
- $m_1^*$  : ÖM için dikkate alınan sistem kütlesini
- $M_b^w$  : Cidarın ataletinin neden olduğu taban eğilme momenti
- $N_n, N_{t1}, N_{t2}$  : Viskoz sönümleyicilerin kullanıldığı sınırdaki elemandaki normal kuvvetler
- $n, t$  : Sanal sınırdaki doğrultuları ifade eden indisler
- ÖM : Ankastr durum için önerilen analitik model
- ÖMZ : Yapı - zemin etkileşiminin dikkate alındığı temelin gömülü olmadığı ( $e/r_0=0$ ) durum için önerilen analitik model
- ÖMZG : Yapı - zemin etkileşiminin dikkate alındığı temelin gömülü olduğu ( $e/r_0=1$ ) durum için önerilen analitik model
- $p_h$  : Stok malzemesinden kaynaklanan yatay basınç
- $p_{hs}$  : Sismik hareketin yatay bileşenine stok malzemesinin cidar üzerindeki tepkisi olan normal basınç



$p_{hso}$	: EN1998-4(2006)'ya göre referans basıncı
$P_j$	: Sistemin hareketli yükü
$p_n$	: Stok malzemesinden kaynaklanan tiremi cidarındaki normal basınç
$p_{pe}, p_{pf}$	: Sırasıyla boşaltma sırasında ve doldurmadan sonra oluşan ek bölgesel yükler
$p_{pei}, p_{pfi}$	: Sırasıyla boşaltma sırasında ve doldurmadan sonra oluşan ters tamamlayıcı ek bölgesel yükler
$p_{pe, nc}, p_{pf, nc}$	: Dairesel olmayan silolarda sırasıyla boşaltma sırasında ve doldurmadan sonra ek bölgesel yük etkilerini temsil eden eşit yayılı basınç
$p_{pes}, p_{pfs}$	: Sırasıyla boşaltma sırasında ve doldurmadan sonra dairesel koordinatta oluşan ek bölgesel yükler (ince cidarlı dairesel silolarda)
$p_t$	: Tiremide birim alandaki sürtünmeden doğan kesme etkisi
$p_v$	: Stok malzemesindeki düşey gerilme
$p_w$	: Düşey cidarda birim alandaki sürtünmeden doğan kesme etkisi
$P_n, S_n$	: Potansiyel fonksiyonlar
$P_0(t)$	: Yapıya temel/zemin sistemi yoluyla uygulanacak zamanla değişen bir kuvvet
$R$	: Silindirik silolar için yarıçap
$r_h$	: Hidrolik yarıçap
$r_0$	: Dairesel temel yarıçapı
$R_n$	: Azaltma faktörü
$r_s^*$	: $\min(H, d_c / 2)$ ile belirlenen geometrik bir nicelik
$s$	: Ek bölgesel yük tarafından etkilenen bölge boyutu ( $s = \pi d_c / 16 \cong 0,2d_c$ )
$S_{bb}$	: Zemin sistemine ait dinamik rijitlik
$S_{Hc_g}(a_0)$	: Ötelenmeye bağlı zemin sönümünü de içeren frekans bağımlı dinamik rijitlik
$SM$	: Ankastre durum için önerilen sayısal model
$SMZ$	: Yapı - zemin etkileşiminin dikkate alındığı temelin gömülü olmadığı ( $e/r_0=0$ ) durum için önerilen sayısal model
$SMZG$	: Yapı-zemin etkileşiminin dikkate alındığı temelin gömülü olduğu ( $e/r_0=1$ ) durum için önerilen sayısal model
$ss, sb, bb$	: Sırasıyla yapıya, yapı-temel ara yüzeyine ve temel/zemin sistemine ait özellikler belirten indisler
$S(t-\tau)$	: Temel/zemin sistemi dinamik rijitliğinin frekansla değişimlerinin zaman ortamındaki dönüşümü

$S_{\theta_{cg}}(a_0)$	: Dönmeyle ilgili zemin sönümünü de içeren frekans bağımlı dinamik rijitlik
$S(\omega)$	: Dinamik rijitlik matrisi
$t_w$	: Silo cidar kalınlığı
$u, v$	: Boyutsuz konum koordinatları $\xi = r/R$ ve $\eta = z/H$ ile tanımlanan stok malzemesinin herhangi bir noktasının taban hareketine göre rölatif yerdeğiştirmesinin sırasıyla radyal ve çevresel bileşeni
$U$	: Silo enkesitinin çevre uzunluğu
$u_1(t)$	: Sistemin kütle seviyesinde oluşan yerdeğiştirmenin zamanla değişimleri
$\dot{u}_1(t)$	: Sistemin kütle seviyesinde oluşan hızın zamanla değişimleri
$\ddot{u}_1(t)$	: Sistemin kütle seviyesinde oluşan ivmenin zamanla değişimleri
$u_g$	: Yer hareketine ait yerdeğiştirme
$u_f$	: Kinematik etkileşime ait yerdeğiştirme
$u_w$	: Cidarın herhangi bir noktasının uyarım yönünde tabana göre rölatif yer değiştirmesi
$\ddot{u}_g(t)$	: Herhangi bir t anındaki yer hareketi ivmesi
$\ddot{U}_g$	: En büyük yer hareketi ivmesi
$\{R(t)\}$	: Zamana bağlı yük vektörü
$x$	: Silo cidarındaki bir noktaya düz bir tabandan veya konik ya da piramit şeklindeki bir tremi tepesinden düşey uzaklık
$x^c$	: Temas düğüm noktasının konumu
$x^t$	: Hedef düğüm noktasının konumu
$V_b$	: Taban kesme kuvveti genliği
$v_p$	: Boyuna (p) dalga hızı
$v_s$	: Kayma (s) dalgası hızı
$V_b(\omega)$	: Tabanda meydana gelen kesme kuvvetinin frekansla değişimi
$V_b^w(\omega)$	: Cidarın ataletinin neden olduğu taban kesme kuvvetinin frekansla değişimi
$z$	: Eşdeğer doldurma yüzeyinden itibaren derinlik
$z_0$	: Janssen karakteristik derinliği, koni modeli için tepe yüksekliği
$z_0/r_0$	: Koni modeli için tepe oranı
$\alpha$	: Tiremi cidarının yatay eksenden ölçülen ortalama eğim açısı
$\alpha_i$	: Depreme göre tasarımda DIN4149(1981)'e göre dikkate alınması gereken parametreler

$\alpha_n, \beta_n$	: Boyutsuz faktörler
$\alpha(z)$	: Stok malzemesinin eşdeğer yüzeyinden z düşey uzaklığında silo tepki ivmesinin yerçekimi ivmesine oranı
$\beta$	: Tiremi cidarının düşey eksenden ölçülen eğim açısı, ya da kare ya da dikdörtgen piramit tireminin en dik cidarının eğim açısı
$\beta(T_i)$	: DIN4149(1981)'e göre %5 sönüm oranı ve titreşim periyoduna ( $T_i$ ) bağlı i. mod şeklinin sönüm etkisi
$\gamma$	: Birim hacim ağırlığı
$\gamma_k$	: Temas elemanının hacim modülü
$\gamma_u$	: Stok malzemesinin birim ağırlığının en üst karakteristik değeri
$\delta$	: Stok malzemesi sönüm faktörü
$\delta_w$	: Silo cidarı sönüm faktörü
$\Delta M, \Delta M_\theta$	: Ötelenme ve dönme için ek kütleler
$\Delta t$	: Zaman artımı
$\zeta$	: Sistemin sönüm oranı
$\zeta_g$	: Zemin sistemin sönüm oranı
$\zeta_h(a_0)$	: Yatay ötelenme serbestlik derecesi için radyasyonel sönümüm boyutsuz frekansla değişimi
$\zeta_\theta(a_0)$	: Dönme serbestlik derecesi için radyasyonel sönümüm boyutsuz frekansla değişimi
$\eta = z/H$	: Boyutsuz düşey konum koordinatları
$\theta$	: Cidardaki ilgili noktaya çizilen radyal çizgi ile sismik hareketin yatay bileşeni doğrultusu arasındaki açı ( $0^\circ \leq \theta < 360^\circ$ ), Temel zemin sistemindeki dönme
$\kappa$	: DIN4149(1981)'e göre yapı-zemin sistemiyle ilgili bir katsayı
$\mu$	: Stok malzemesi ile düşey silo cidarı arasındaki sürtünme açısı
$\mu_u, \mu_\theta$	: Sırasıyla ötelenme ve dönme ek kütleleri için katsayılar
$\xi = r/R$	: Boyutsuz radyal konum koordinatı
$\rho$	: Stok malzemesinin kütle yoğunluğu
$\rho_w$	: Silo cidarının kütle yoğunluğu
$\sigma_r$	: Silo cidarında radyal normal dinamik gerilme bileşeni
$(\sigma_r)_n$	: $\sigma(\eta)$ 'nin bileşenlerinin kompleks değerli genlikleri

$\sigma(\eta)$	: $\eta$ koordinatının fonksiyonu olan kompleks değerli normal basınç genliği
$\sigma_\theta$	: Silo cidarında çevresel normal gerilme bileşeni
$\tau_{r\theta}$	: Silo cidarında kayma gerilmesi bileşeni
$\tau_{zr}$	: Stok malzemesinden çıkartılan birim elemanın üst ve alt yüzeylerindeki kayma gerilmelerinin radyal bileşeni
$\tau_{zx}$	: Taban hareketi doğrultusundaki yatay kayma gerilmesi
$\tau_{z\theta}$	: Stok malzemesinden çıkartılan birim elemanın üst ve alt yüzeylerindeki kayma gerilmelerinin çevresel bileşeni
$\tau(\eta)$	: $\eta$ koordinatının fonksiyonu olan kompleks değerli kayma gerilmesi genliği
$(\tau_{r\theta})_n$	: $\tau(\eta)$ 'nin bileşenlerinin kompleks değerli genlikleri
$\nu$	: Poisson oranı
$\phi$	: Stok malzemesinin içsel sürtünme açısı
$\phi_r$	: Stok malzemesinin şev açısı
$\phi_n$	: Hareketin açısal frekansının stok malzemesinin n. açısal frekansına oranı
$\psi_{j,i}$	: DIN4149(1981)'e göre yapının i. modunda j. kütle noktasının salınımı
$\omega$	: Hareketin açısal frekansı
$\omega_n$	: Düşeyde sınırlandırılmamış stok malzemesinin, serbest, konsol kayma kirişi olarak davrandığı kabulüyle, n. açısal frekansı
$\Omega$	: Modal katkı çarpanı

## 1. GENEL BİLGİLER

### 1.1. Giriş

Özel mühendislik yapılarından biri olan siloların tahıl, bakliyat, yağ tohumları gibi işlenmemiş; un, yem, şeker gibi işlenmiş yiyecek ya da çimento, gübre, maden cevheri, kömür, kum, çakıl gibi endüstri malzemelerinin saklanması gibi birçok nedenle inşa edildikleri bilinmektedir. İhtiyaçların zamanla artması ve kullanılan malzeme çeşitlerinin çoğalması silo inşaatlarının giderek yaygınlaşmasını gerektirmektedir.

Tarih öncesi çağlardan bugüne kadar, insanoğlu ihtiyacı olan malzemeleri stoklama ve zamanı geldiğinde ise kullanma eğilimindedir. Bu stoklama ihtiyacı özellikle uzun süre dayanabilen tarımsal ürünler için zor kış şartları gibi olumsuz koşulların hâkim olduğu coğrafyalar düşünüldüğünde, insanoğlu için hayati bir önem arz etmektedir. Dünya üzerinde farklı coğrafyalar ve farklı kültürler için bu eğilimleri aynı amaca hizmet eder şekilde görmek mümkündür. Aynı amaca hizmet etmekle birlikte insanoğlu farklı coğrafyalarda, kullanılacak malzeme olanaklarını, topografya, kültürel ve çevresel etmenleri de dikkate alarak taşıyıcı sistem ve estetik açıdan birçok farklı yapı tarzı geliştirmişlerdir. Yakın geçmiş düşünüldüğünde ülkemizde birçok bölgede insanların özellikle zor kış şartlarında kullanmak üzere birçok malzemeyi stoklama ihtiyacına bağlı olarak çeşitli yapı tarzları geliştirdikleri de herkes tarafından bilinmektedir (Şekil 1.1). Bu ihtiyaç günümüz koşullarında nitelik ve nicelik olarak değişmiş olsa da, gelişen endüstriyel olanaklar sayesinde halen varlığını korumaktadır. İnsan ihtiyaçlarına bağlı olarak zorunlu bir şekilde ortaya çıkmış olan ve halen örneklerini gözlemlediğimiz saklama gereği, çağımızda ticari kaygılar ve stok gereksinimlerine paralel olarak özel yapı tarzlarının geliştirilmesini gerektirmiştir (Şekil 1.2).



Şekil 1.1. Farklı kültürler için silo örnekleri

Ülkemizde de 18.yy'ın sonlarından itibaren kullanılmaya başlanan silo türü yapılar halen endüstrinin birçok kolunda hizmet vermeye devam etmektedir. Şehirleşmenin artması ve kırsal bölgelerden insanların şehirlere göç etmeleri metropollerin oluşmasına neden olmuştur. Böylesine büyük nüfus yoğunlukları, büyük kitlelerin ihtiyacına cevap verebilmek amacıyla, endüstrinin stoklama ihtiyacını daha da arttırmıştır. Uluslararası ticaret bu ürünlerin limanlarda saklanması gerektirmekteydi fakat madencilikteki artış ve sanayileşmedeki gelişmeler ülkelerin çeşitli yerlerinde de silo gereksinimini doğurmuştur. Bununla birlikte ulaşım olanaklarının artması, malzemelerin belirli bölgelerde toplanması yoluyla işlenmeleri ve sevk edilebilmelerine imkân sağlamış, bu durum da yine daha büyük kapasitelerde malzemenin stoklanmasını zorunlu hale getirmiştir. Durum böyle olunca, yapı malzeme ve teknolojilerindeki gelişmelere bağlı olarak, artan stoklama ihtiyacını karşılama amacı daha cüretkâr yapı tarzları ve taşıyıcı sistemlerinin geliştirilmesinin önünü açmıştır.



Şekil 1.2. Farklı türde silolar

Gelişen ve değişen yapı tarzları ve stoklanan malzemenin niteliklerindeki ve hacminde değişimler, bu tür yapıların maruz kaldığı yüklerin de değişimine neden olmuştur. Bu yapı tarzının deprem bölgelerinde de kullanılma gereksinimi ise deprem yüklerine karşı nasıl davranacağı sorusunu ortaya çıkarmıştır. Deprem bölgelerinde bu tür yapıların inşa edilmeye başlanması ile davranışın tam olarak anlaşılmadığı tecrübe edilen hasarlarla gün yüzüne çıkmıştır.

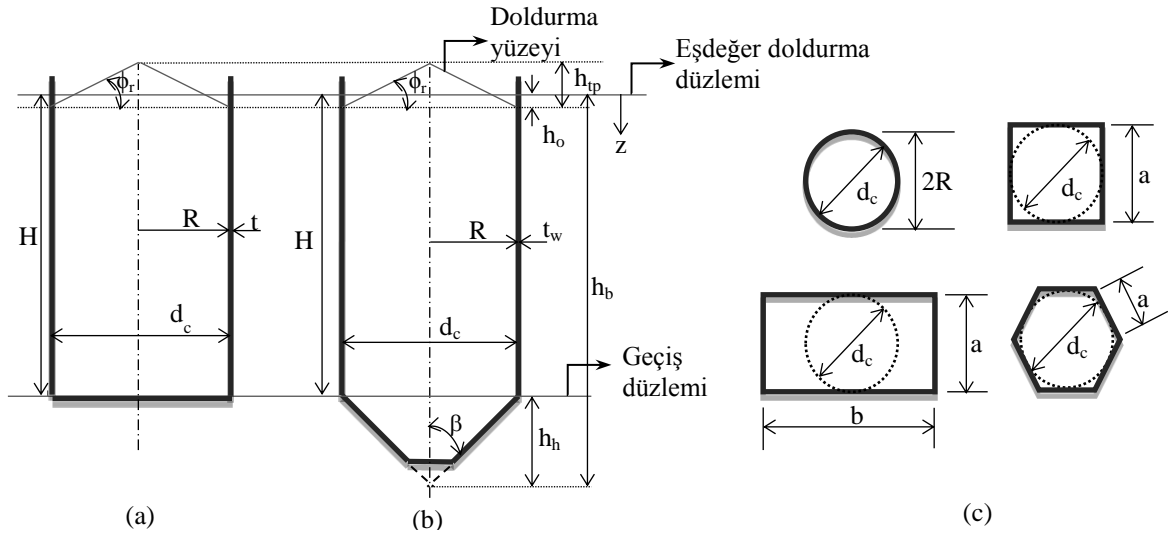
Silo tasarımı bilim adamlarının 19. yüzyılın sonundan bu yana araştırdıkları bir konu olmasına karşın, bu dönemde silolar çoğunlukla ahşaptan yapıldığından bu tip siloların tasarımları çok basit olarak gerçekleştirilmekteydi. Bu tasarımlarda stoklanan tahılın sıvı

gibi davrandığı düşünülmemekte ve bilinmesi gereken tek önemli hayati mekanik özelliğın malzemenin özgül ağırlığı olduğuna inanılmaktayken, bu dönemde tahıl ve silonun cidarları arasındaki etkileşimden kaynaklanan fiziksel olay anlaşılammıştır. Bu konuda stoklanan malzeme davranışının zemin gibi düşünülmesi konusunda ilk adımlar atılmıştır. 19. yüzyılda zemin mekaniğinde önemli gelişmelerle birlikte içsel sürtünme açısı, stok malzemesi ve silo cidarı arasındaki sürtünme vb. kavramların yaygın olarak kullanılmaya başlanması, buna paralel olarak sayısal yöntemlerdeki ve bilgisayar teknolojisindeki gelişmeler silo tasarımında büyük ilerlemelerin ancak 20. yüzyılın son çeyreğinde oluşmasına imkân tanımıştır. Bu yolla malzeme davranışının daha gerçekçi bir şekilde temsil edilebilmesinin önü açılmıştır. Oysaki 20. yüzyılın başlarında, dünyanın hemen her yerindeki siloların modern güvenilir bir malzeme olan betonarmeden yapılmaya başlanmış olması bu tasarımlarda yüklerin ve malzemenin davranışının doğru anlaşıldığı anlamına gelmemektedir. Bu dönemde, tuğla, çelik gibi diğer malzemeler de ancak sıvı depolarındaki inşa tekniklerinin kopyalanarak kullanılmasından ibaret olmuştur. Stoklanan malzemenin türüne bağlı olarak, infilak gibi hasarların yanı sıra, doldurma boşaltmaya bağlı gelişen ya da depremlerle tecrübe edilen hasarlar; davranışın daha iyi yorumlanması ve anlaşılması gerektiğini her defasında ortaya koymuştur.

## **1.2. Siloları Tanımlayan Bazı Parametreler**

Etkiyen yüklerin karmaşıklığı ve siloların işlevsel olma gerekliliğı, silo tasarımını karmaşıklaştıran etmenlerdir. Durum böyle olunca konuyla ilgili tasarımcılar ve birçok farklı alandaki araştırmacılar halen çözümlenilmesi ve anlaşılması gereken çok sayıda problemle karşı karşıya bulunmaktadır. Bununla birlikte, mühendislik bakış açısıyla değerlendirildiğinde, geometrik özelliklerin gerek yapı, gerekse de malzeme davranışı üzerindeki etkilerinin oldukça önemli bir hal aldığı bilinen bir gerçektir. Öncelikle siloların geometrik özelliklerinin ve siloları tanımlayan bazı parametrelerin sınıflandırmalara geçmeden önce bilinmesi gerekmektedir. Bu nedenle Şekil 1.3'de tipik bir silo için kesitler, bunlara ilişkin boyutlar ve bazı silo terimleri örnek olarak verilmektedir.





Şekil 1.3. Düz tabanlı ve tiremili silo kesit ve boyutları

Silonun enkesit şeklini tanımlayan temel parametre,  $A$  silonun enkesit alanını,  $U$  bu kesitin çevre uzunluğunu göstermek üzere,  $r_h = A/U$  şeklinde ifade edilen hidrolik yarıçaptır. Stok malzemesini üstten sınırlayan yüzey doldurma yüzeyi olarak adlandırılmakta ve bu yüzey yerine eşdeğer bir yüzey tanımlanmaktadır. Stok malzemesiyle temasta bulunmayan en alt cidar seviyesi ile eşdeğer yüzey arasındaki derinlik  $h_o$ , doldurma yüzeyinin yatay düzlemle yaptığı şev açısı  $\phi_r$  ile gösterilmekte ve bu iki parametre stok malzemesinin yüzey şeklini tanımlamaktadırlar. Silonun düşey cidarlarının tiremi ile birleştiği düzlem, geçiş düzlemi olarak ifade edilmektedir. Bu kısım düz tabanlı silolarda silonun tabanından (Şekil 1.3.a), tiremili silolarda tiremi başlangıcından geçen yatay bir kesitten ibaret olmaktadır (Şekil 1.3.b). Aşağıda Çizelge 1.1.'de çeşitli enkesitler için  $r_h$  ve  $h_o$  arasında öngörülen ilişkiler verilmektedir (TS6989, 1989; EN1991-4, 2006).

Çizelge 1.1. Silolarda çeşitli enkesit şekilleri için hidrolik yarıçap ve  $h_o$  ifadeleri

Enkesit Şekli	Hidrolik Yarıçap ( $r_h$ )	$h_o$
Daire Kesitler	$R/2 = d_c/4$	$h_o = \frac{2}{3} \cdot r_h \cdot \tan \phi_r$
Düzgün Çokgen Kesitler	$d_c/4$	
Dikdörtgen Kesitler ( $b > a$ olması durumunda)	$\frac{a \cdot b}{2(a+b)}$	$h_o = \frac{a}{12} \cdot \left(3 - \frac{a}{b}\right) \cdot \tan \phi_r$

### 1.3. Siloların Sınıflandırılması

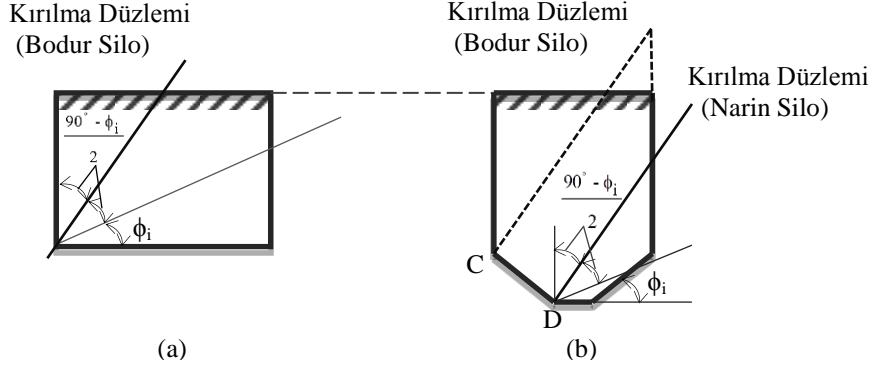
Yapı sistemlerinin temel boyutları ile yükseklikleri arasındaki ilişkinin, yapı deprem davranışları üzerinde önemli derecede etkileri olduğu bilinmektedir. Silo türü yapıların muhafaza ettikleri malzemelerin, silo geometrisine bağlı olarak, silo ile etkileşimleri bu orana göre önemli davranış farklılıkları gösterebilmektedir. Bu nedenle, siloları narin (derin) ve bodur (sığ, geniş, bunker) olmak üzere başlıca iki sınıfta incelemek mümkündür. Temelde narinlik etkisi stok malzemesinin davranışını etkilemektedir. Bu davranış silo hücrelerinin geometrisinden ve stok malzemesinin özelliklerinden etkilenebilmektedir. Silo cidarlarındaki ve tabanındaki malzeme basınçları da narinlik etkisine bağlı olarak önemli değişimler gösterebilmektedir. Bu temel ayrıma ek olarak bazı yönetmeliklerde bu sınıflandırma daha da genişletilmekte ve Eurocode'da dört sınıf silo tanımlanmaktadır. Bu sınıflandırmaya ilişkin ayrımlar Çizelge 1.2'de verilmektedir (Safarian ve Harris, 1974; Killion, 1985; EN1991-4, 2006).

Çizelge 1.2. Çeşitli yaklaşımlara göre silo sınıfları

Silo Sınıfı	Dishinger (Fischer, 1966)	Sovyet Yönetmeliği (Safarian ve Harris, 1974)		Eurocode (EN1991-4, 2006)
	Kesit Tipi			
Narin Silo	Tüm	Dairesel	Dikdörtgen	Tüm
	$H > 1,5 \cdot \sqrt{A}$	$H > 1,5 \cdot d_c$	$H > 1,5 \cdot a$	$2 \leq H/d_c$
Bodur Silo	$H < 1,5 \cdot \sqrt{A}$	$H < 1,5 \cdot d_c$	$H < 1,5 \cdot a$	$0,4 < H/d_c \leq 1,0$
Orta Narin Silo	-	-	-	$1,0 < H/d_c < 2,0$
İstinat Silosu (düz tabanlı)	-	-	-	$H/d_c \leq 0,4$

Stok malzemesinin Coulomb teorisine göre belirlenen kırılma düzleminin konumuna göre de silolar sınıflandırılabilir. Cidardaki sürtünme ihmal edilirse ve stok malzemesi yüzeyi yatay ise kırılma düzlemi aşağıda Şekil 1.4'de gösterildiği gibi belirlenmektedir. Bu düzlem stok malzemesinin üst yüzeyini kesiyorsa silo bodur, aksi halde narin olarak sınıflandırılmaktadır (Şekil 1.4a). Fakat tiremeli silolarda bu düzlemin

başlangıç noktası için Şekil 1.4b’de gösterildiği gibi farklı görüşler olduğundan bu yöntemle kesin bir sınıflandırma yapılamamaktadır (Safarian ve Harris, 1974).

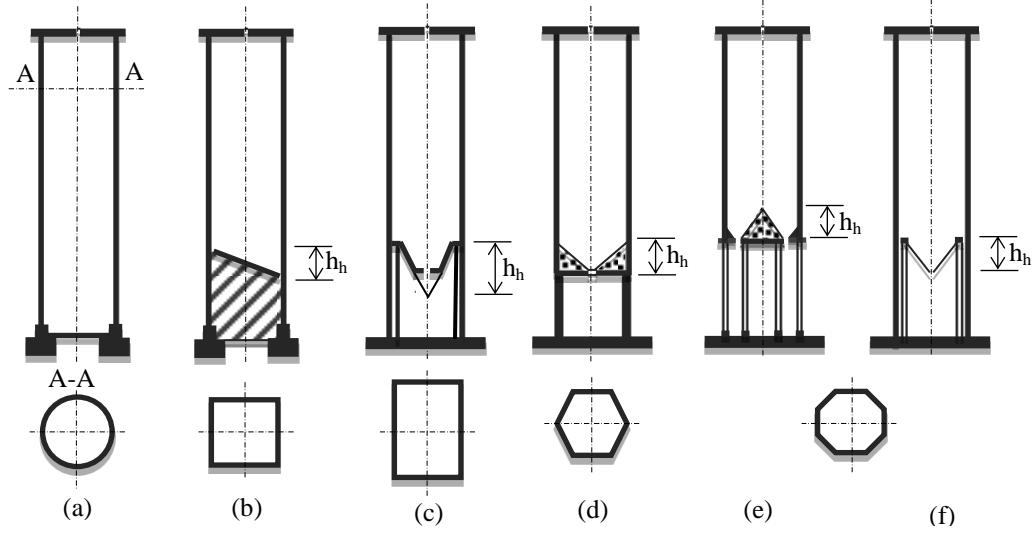


Şekil 1.4. Stok malzemesinin kırılma düzlemine göre siloların sınıflandırılması (Safarian ve Harris, 1974)

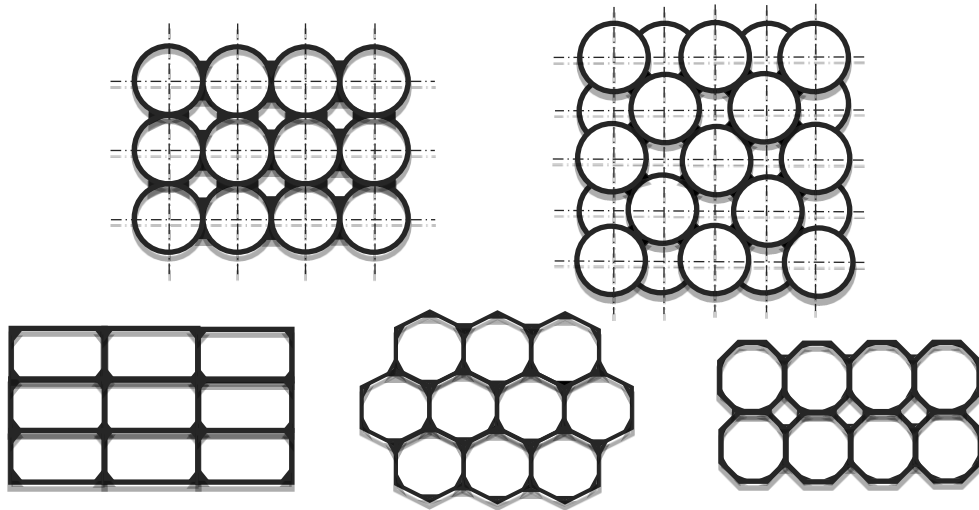
Silo türü yapılarda yaygın olarak kullanılan bir diğer sınıflandırma şekli de kesit geometrisidir. Farklı tipte silolar için gerek düşey, gerekse yatay düzlemde farklı geometrik biçimler kullanılabilir. En yaygın kullanılan enkesitler, daire, dikdörtgen ve çokgen biçimlerindedir. Boşaltma şekline göre boykesitler de çeşitli şekiller alabilmektedirler. Bunlardan başlıcaları, tipik en kesit ve boy kesitler için Şekil 1.5’de verilmektedir. Geometrik olarak farklı şekiller alan silolar, tekil kullanılabildikleri gibi farklı grup düzenleri ile de tasarlanabilmektedir. Grup silolara ilişkin sıklıkla karşılaşılan düzenler Şekil 1.6’da verilmektedir.

Diğer birçok yapı türünde olduğu gibi yukarıda ifade edilmeye çalışılan sınıflandırmalara ek olarak yapı malzemesi bakımından da sınıflandırma yapmak mümkündür. Bu durumda, ahşap, çelik, betonarme ve öngerilmeli beton gibi birçok malzeme yapı taşıyıcı sisteminde kullanılmaktadır. Bunlardan ahşap silolar günümüzde tercih edilmemekle beraber, diğer yapı malzemeleri silo boyutlarına bağlı olarak tercih edilmektedir. Durum böyle olunca, küçük hacimli silolar genellikle çelik, orta ve büyük hacimli silolar ise betonarme ve öngerilmeli beton olarak tasarlanmaktadır. Kullanılan bu yapı malzemelerinin üstünlükleri yanında, silo geometrisi nedeniyle ortaya çıkan durumlar tasarımları zorlaştırmaktadır. Örneğin çelik silolarda cidarların ince kesitli olması nedeniyle basınç gerilmeleri altında burkulma sorunu ortaya çıkabilmektedir. Bu nedenle çeliğin genellikle eğilme etkisinin az olduğu dairesel kesitli siloların inşasında kullanımı

tercih edilmektedir. Betonarmenin ise bakımının kolay olması, burkulmaya karşı daha emniyetli olması, silolanan malzemenin korunumu gibi birçok nedenden dolayı diğer yapı malzemelerine göre üstünlüklerinin bulunması tercih edilmesinin gerekçesi olarak gösterilebilmektedir (Safarian ve Harris, 1974; Eren, 1995, Durmuş, 2007).



Şekil 1.5. Yaygın kullanılan silo tipleri için en kesit ve boy kesit örnekleri :(a) yer seviyesinde düz tabana sahip sürekli temelli silo (b), eğimli bir beton ya da granüler bir dolgu zemin üzerine oturan ayırık taban doşemesine sahip silo, (c), cidara bağlı kolonlar üzerine oturan ayırık tiremiye sahip, radye temelli silo (d) güçlendirilmiş alt cidar üzerine dolgu kullanılarak oluşturulan tiremiye sahip silo (e), ana silo gövdesi, üst uçlarında yatayda rijitleştirici elemanlara sahip kolonlar üzerine oturtulmuş birden fazla boşaltma ağzı bulunan silo (f) silo ana gövdesinden bağımsız kiriş ve kolon sistemine mesnetlenmiş tiremiye sahip radye temelli silo



Şekil 1.6. Çeşitli silo grubu düzenleri

#### 1.4. Stok Malzemesi ve Davranış Karakteri

Genel anlamda, stok malzemesini silolarda kolaylıkla doldurma ve boşaltmaya izin verebilecek şekilde serbest olarak silolanabilen ya da kolaylıkla aktarılabilen malzeme olarak ifade etmek mümkündür. Tanımdan da anlaşılacağı üzere silo içerisinde stoklanan malzeme türü için kesin bir ayırım yapmak mümkün olmamakla birlikte, sözkonusu malzemeler işlenmemiş (tahıl, bakliyat, yağ tohumu gibi) ve işlenmiş (tahıl unu, yem, şeker, vb.) tarımsal ürünler gibi iki ana grup ile bunlara ek olarak, anorganik hammaddeler (kum, çakıl, maden cevheri, kömür, vb.) ve endüstriyel ürünler (çimento, kül, kömür tozu, vb.) olmak üzere dört grupta toplanabilmektedir. Sınıflandırmadan da anlaşılacağı üzere silolanması olası bu malzemeler çok farklı karakterde davranışların ortaya çıkmasına neden olabilmektedirler. Buradan hareketle, en genel manada bu malzemelerin üç temel özelliğinin; (1) birim ağırlık ( $\gamma$ ), (2) içsel sürtünme açısı ( $\phi$ ) ve (3) stok malzemesi ile düşey cidarı arasındaki sürtünme katsayısı ( $\mu$ ) olduğu ve bu tasarım parametrelerinin deneysel olarak belirlenmesi gerektiği bilinmektedir.

Genellikle silolarda stoklanan tahıl gibi malzemeler kohezyonsuz, diğer bir deyişle ayrık taneli bir ortam oluşturmaktadır. Ancak, bu tür malzemelerin mekanik ve fiziksel özellikleri ortam koşullarına bağlı olarak önemli farklılıklar gösterebilmektedir. Bu nedenle söz konusu malzemenin davranış modelleri için oldukça fazla sayıda yaklaşımdan söz etmek mümkün olmaktadır. Genel bir değerlendirme yapıldığında, denge kuralları henüz iyi tanımlanamamakla birlikte, bazı bilim adamları tarafından elastik, homojen, izotrop ve sonsuz bir ortamın denge teorisi yardımıyla davranış temsil edilmeye çalışılmıştır. Bu çözüm için literatürdeki genel eğilim, deneysel gözlemlere dayalı bir dönüşümle ayrık taneli ortam için çözümü genelleştirmektir. Maalesef bu varsayımların hiçbiri ayrık taneli ortam için tam anlamıyla geçerli olmamaktadır. Diğer taraftan bu dönüşüm dikkate alınması gereken çok sayıda etmenin büyük bir kısmını da ihmal etmektedir. Basınçların belirlenmesinde kullanılan tasarım parametreleri sıcaklık, rutubet gibi çevre koşullarının yanında zamana, tanelerin şekil, boyut ve granülometrisine, sıkıştırılma derecesine, malzemenin sıkışabilirliğine, doldurma hızına, oranına ve doldurma esnasında malzemelerin düşüş yüksekliği gibi birçok bağımlı ve bağımsız etmenlerle ilişkili olarak da değişmektedir. Bu durumların bir veya birkaçının aynı anda gerçekleşmesi silolanın ayrık taneli bir kütleli dengesinin temsilini yukarıda ifade edilen genel hale göre oldukça değiştirebilmektedir. Bununla birlikte silolanın bu kütleli ortaya

koyduğu dinamik davranış oldukça karmaşık bir hal almakta ve bu durum da elastisite teorisinde dikkate alınan bakış açısıyla bu tür özel durumların temsilini güçleştirmektedir. Durum böyle olunca, tam bir çözüm için stok malzemesine ilişkin özelliklerin en elverişsiz sınır değerlerinin deneysel olarak belirlenmesi gerektiği açıktır (Reimbert, 1962; 1977; EN1991-4,2006; ACI 313R-97,1997).

Stok malzemesi özellikleri basınçla doğrudan ilgili olmaktadır. Bu özelliklerin ve malzemenin mekanik karakterinin değişimi ise önemli basınç değişikliklerine neden olduğundan, silo boyutları ve boşaltma sistemi söz konusu özelliklere göre belirlenmektedir. Görüldüğü üzere basınç ile malzeme özellikleri arasında önemli bir bağımlı ilişkiden bahsedilebilmektedir. Bununla birlikte stok malzemesi, silo içinde kuru, nemli, doymun hale dönüşebilmekte ve bu değişime bağlı olarak malzeme özellikleri de değişmektedir (Safarian and Harris, 1974; Kıvrak, 1987). Bu nedenle sözkonusu malzemenin zamanla ne tür çevresel etkilere maruz kalabileceği, silolandıkları andaki mevcut durumları gibi unsurlar çözümlenmeye konu edilecek mekanik özelliklerin tespitini zorlaştırmaktadır. Buna ek olarak aynı silonun dönem dönem farklı türde malzemelerin silolanması için de kullanılabilirdiği dikkate alınır, silo tasarımının hangi malzeme ve ne tür çevre koşulları için gerçekleştirileceği soruları tasarımı daha da karmaşık bir hale getirmektedir. Mühendislik bakış açısıyla elbetteki bu sorunun en iyi cevabı en elverişsiz durumun tespiti olmaktadır. Ancak durum deprem tepkisi açısından değerlendirildiğinde, statik etkinin tersine elverişsiz durum her zaman belirli bir noktadan ibaret olmadığından, yapılan değerlendirmeye yapı statikçe güvenli hale getirilebilecek olmasına karşın dinamik açıdan elverişsiz bir duruma getirilmiş olabilmektedir.

Silolarla ilgili olarak, stok malzemesinin genel özellikleri (FEM 2582, 1991), ekipman tasarımı, işletim ve üretimde kullanılan belirli özellikleri (FEM 2581, 1991), boşaltma özellikleri gibi silolarda saklama sürecinde uygulanabilecek belirli özellikleri (FEM 2381, 1986), stok malzemesi karakteristiklerinin siloların tasarım ve boyutlandırılmasına etkileri (FEM 2321, 1989) gibi birçok farklı alandaki ilgili standartlar FEM (The European Material Handling Federation) tarafından yayınlanmıştır. Etkileyen parametre sayısı oldukça fazla olduğundan günümüze kadar taneli malzeme özellikleri için oluşturulmuş yeterli bir veri tabanı mevcut değildir. Buna karşın belirli sektörlerle ilgili yapılan özel çalışmaların ürünü olarak bazı veri tabanları oluşturulmuştur. Örneğin; çimento sektöründe gerçekleştirilen bir çalışma akış özelliklerini belirlemede 30'dan fazla parametrenin etkili olduğunu ortaya koymuştur. Ancak bireysel sanayi ya da bilimsel

kaynaklarda varolan veriler kullanılarak derlenen böylesi bir veri tabanının çok yararlı olmayacağı açıktır (Wilms ve Kühnemund, 2009).

Siloların tasarımı için bazı stok malzemesi özellikleri uluslararası standartlar ve literatürdeki bazı kaynaklarda verilmektedir (ACI313-97, EN1991-4,2006, Guerrin, 1969; Reimbert, 1977; TS6989, 1989). Ancak daha önce de ifade edildiği üzere, silolanan malzemelerin özelliğine bağlı olarak mekanik ve fiziksel davranışlar çok farklı olabilmekte ve bu nedenle bu özelliklerin standartlaştırılması oldukça zorlaşmaktadır. Örneğin siloların tasarımında kullanılan stok malzemesi yoğunluğu %40 oranında değişiklik göstermektedir (Wilms vd.,1995). Yalnızca bu durum bile, mevcut verilerden oluşturulan veri tabanlarının kullanımının sorgulanabilirliğini göstermektedir. Bu nedenle, sözkonusu veriler genellikle kalite kontrolü dışında farklı uygulamalar için kullanılamamaktadır (Wilms ve Kühnemund, 2009). Nem içeriği ve tane boyutu gibi taneli malzeme davranışını etkileyen parametreler nedeniyle basınçların geniş bir dağılım göstermesinin doğal olduğunun farkında olunmalı ve siloların tasarımı esnasında bu durum dikkate alınmalıdır. Aynı referans model için farklı tasarım standartlarının oldukça farklı basınçlar vermesi de bu gerçeği vurgulamaktadır (Eibl, 2009).

Daha önce de belirtilmeye çalışıldığı gibi stok yapılarının boyutlandırılmasına etki eden başlıca etmenler; stok malzemesinin birim ağırlığı, içsel sürtünme açısı ve cidar üzerindeki sürtünme açısıdır. Ancak bazı özel durumlarda anılan malzemelerde oluşan iç kohezyonun da dikkate alınması gerekmektedir. Bu özelliklerin stok malzemelerinin tane çapına ve malzeme türüne bağlı olduğu bilinmektedir. Teknik literatürde genel anlamda malzemeler tane çapına göre; tane çapı  $< 0,1\text{mm}$  ise toz malzeme (Çimento, kül, tahıl unu vb.), tane çapı  $< 30\text{mm}$  ise taneli malzeme (tahıl, kum, çakıl vb.) ve tane çapı  $> 30\text{mm}$  ise parçalı malzeme (maden cevheri, kömür, kok, kalker vb.) olarak üç sınıfa ayrılmaktadır (Kumbasar vd., 1992). Özel bir durum olarak silolanan bazı malzemelerin niteliğine göre, tanenin kabuğunun parçalanması ve yapışkan bir sıvı ya da yağ açığa çıkması gibi durumlarda taneler arasında kohezyon oluşmakta ve bu suretle taneler birbirine kenetleşerek büyük parçalar meydana getirmektedir. Bu ve benzeri malzeme niteliği ile ilişkili durumların da yapılacak çözümlerinde dikkate alınması gerekebilmektedir. Sözkonusu mekanik etkilerin yanı sıra, stok malzemelerinin birçoğu tuz, asit, yağ gibi yapıya zarar veren maddeler içerdiğinden, yapının bu kimyasal etkilerden ya geçirimsizliğinin sağlanması ya da iç cidarlarının kaplanması gibi önlemlerle bozulmalara karşı korunması gerekliliği açıktır.

## **1.5. Silolara Etkiyebilecek Yükler**

Genel anlamda birçok yapı türü benzer yüklerle ve bunların birleşimlerine maruz kalmakla birlikte silolar işlevsel olarak standart yapı türlerinden farklı birçok yüke maruz kalabilmektedir. Bu yapı tarzı ile amaçlanan taneli malzeme özelliğine sahip bir hacmin uygun şekilde silolanmasıdır. Bu nedenle, büyük ölçüde hacme sahip bu malzemelerin uygun şekilde saklanmasına ve bunun yine elverişli olarak boşaltılması ve doldurulması işlemlerinin kolaylıkla yapılmasına olanak sağlayacak bir yapı tasarımına ihtiyaç duyulmaktadır. Durum böyle olunca, yapı geometrisi genel olarak bu çalışmada da irdelendiği üzere silindirik olarak tasarlanmaktadır. Yapı mekaniği temel ilkeleri düşünüldüğünde, bu geometriye sahip taşıyıcı sistemlerin olası yüklerin uygun şekilde karşılanmasında kolaylık sağladığı bilinmektedir. Bu tür yapılarda stoklanan önemli miktardaki kütleden dolayı, yapının gerek doldurma, gerek boşaltma gerekse de saklama işlemleri süresince birçok farklı yükle karşı karşıya kalması kaçınılmaz olmaktadır.

Silolar, alışılmamış göçme biçimleriyle sonuçlanan, birçok farklı yükleme durumu etkisinde kalabilen özel yapılardır. Bir silonun göçmesi stok malzemesinin kaybı, çevresel hasar ve olası yaralanma ya da hayat kaybı gibi olaylara neden olabilmektedir. Dünyanın çeşitli bölgelerinde meydana gelen silo hasar ve göçmelerine ilişkin fotoğraflar bu görüşü doğrulamaktadır. Bu hasar ve göçmelerin temel nedenleri, doldurma ve boşaltma sırasında oluşturulan asimetrik yükler, ısıl çevrim etkileri, büyük ve düzgün yayılı olmayan zemin basınçları, infilak, deprem, metal siloların korozyonu, betonarme siloların silaj asitleriyle bozulması ve içyapısal çökme şeklinde sıralanabilmektedir. Burada özellikle çeşitli depremlerden kaynaklanan silo hasar ve göçmeleri üzerinde durulmaktadır. Bu amaçla çalışmada daha çok stok malzemesinin saklanması esnasında doğabilecek en kritik yüklerin başında gelen deprem yüklemesi ve bunun doğuracağı etkiler konu edilecek olmasına karşın olası diğer yüklemeler ve bunlardan kaynaklanacak etkiler de aşağıda başlıklar halinde ifade edilmeye çalışılmaktadır.

### **1.5.1. Stok Malzemesinden Doğan Basınçlar**

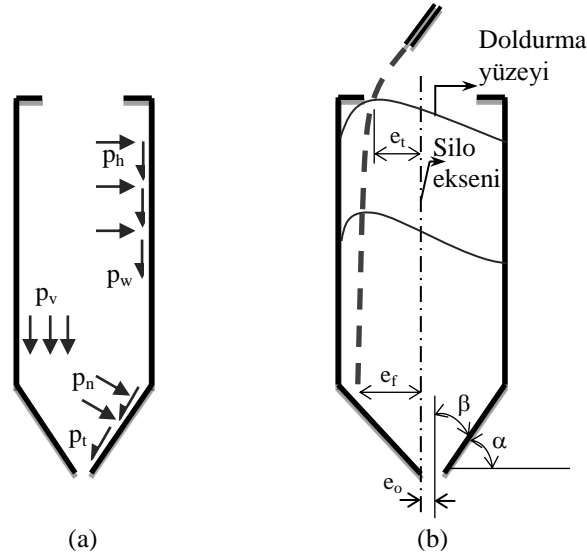
Stok malzemesi silo etkileşiminden dolayı, birçok farklı nedenle malzeme basınçları meydana gelebilmektedir. Bunları temelde üç ana başlıkta toplamak mümkün olmaktadır. Bunlardan ilki malzeme statik basınçlarıdır ki, bu basınç hali genel olarak değişken bir



parametre olan malzeme yoğunluğu ile ilişkilidir. Bu durumda varsa kimyasal tepkimeler nedeniyle sözkonusu basınçların değişkenlik göstermesi de mümkün olabilmektedir. Diğer taraftan, işlevleri gereği bu tür yapılarda sürekli olarak önemli miktarda kütlelerin doldurma ve boşaltma işlemleri gerçekleştirildiğinden, bu işlemler sırasında da önemli basınç değişimleri oluşabilmektedir. Bunların dışında üçüncül olarak ise güçlü yer hareketleri sırasında meydana gelecek basınç değişimleri sayılabilmektedir. İlk olarak bahsedilen basınçlar genel anlamda statik karaktere sahip ve kolaylıkla tahmin edilebilir nitelikteyken, diğer basınç türleri birçok yapısal ve reolojik parametrelere bağlı olarak değişkenlik gösterebilmektedir.

Stok malzemesi statik durum, doldurma boşaltma ve dinamik yükler etkisinde farklı karakterde davranış sergilemektedir. Bu durumda malzeme, silo tabanında düşey basınç, silo cidarlarında yatay basınç ve sürtünme yoluyla düşey kuvvet ve eğimli yüzeylerde ise hem normal basınç hem de sürtünme kuvvetleri oluşturmaktadır. En genel şekilde sözkonusu etkilerin gösterimi Şekil 1.7a'da verilmektedir. Doldurma ve boşaltma durumunda Şekil 1.7b'de gösterilen dışmerkezlilikler mevcut ise ek yükler meydana gelmektedir.

Stok malzemesi tarafından siloya uygulanan statik basınçlar yanında, yükleme ya da boşaltma, ısıl etkiler ve deprem ya da rüzgâr yüklerinden kaynaklanan dinamik basınçlar da meydana gelebilmektedir. Siloların hesap ve tasarımında kullanılacak yük birleşimleri için Hätfield ve Bartali (1988) dinamik etkinin yük birleşimine statik basıncın bir büyütme faktörü ile çarpılması suretiyle katılabileceğini belirtmiş ve bu ACI 313-97 (1997), DIN 1055 (1987) ve EN1991-4 (2006) gibi birçok silo tasarım standardında uygulanmıştır (Abdel-Fattah vd., 2006b). Bu nedenle, halen geçerli olan birçok yönetmelik ve standartta da statik eşdeğer basınç yaklaşımının kullanılması statik basınçların daha iyi anlaşılmasını zorunlu kılmaktadır. Bu başlık altında yalnızca statik ve doldurma boşaltma kaynaklı basınçlar irdelenmektedir. Dinamik etkilere ilişkin değerlendirme takip eden başlıklarda verilecektir.



Şekil 1.7. Stok malzemesinden doğan basınç ve sürtünme kuvvetleri (a) ile doldurma boşaltma durumuna bağlı dışmerkezliklerin gösterimi (b)

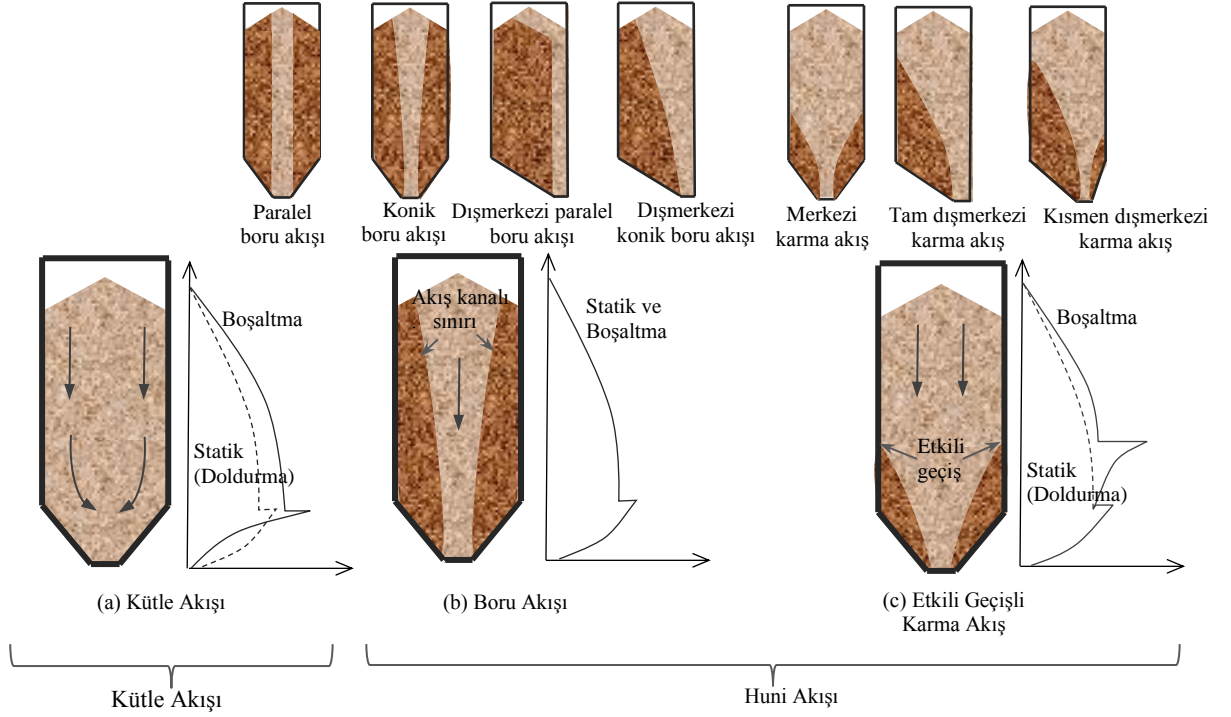
Silo cidarı ve tiremilere etkileyen malzeme basınçlarını doldurma, saklama ve boşaltma durumlarında etkileyen başlıca parametreler silo geometrisi, stok malzemesi özellikleri ve akış şekli olarak sıralanabilmektedir. Stok malzemesinin fiziksel özellikleri ve silonun geometrik özellikleri hesaplanan dinamik basınçları da doğrudan etkilemektedir. Bu parametrelerden başlıcaları, daha önce de ifade edildiği gibi, birim ağırlık, içsel sürtünme açısı ve cidar üzerindeki sürtünme açısıdır. Diğer taraftan, silonun hidrolik yarıçapı ve silo yüksekliği gibi geometrik özellikleri de davranış üzerinde önemli derecede etkiye sahiptir. Malzeme basınçlarının boşaltma durumunda, statik durum için hesaplanan değerlerden büyük olduğu genel kabul görmüş bir olgudur. Bu konuda Avrupa ve ABD’de çeşitli araştırmalar yapılmış ve boşaltma durumundaki basınçların siloların tasarımında kritik yükler olarak dikkate alınması gerekliliği ortaya konulmuştur. Söz konusu durumların davranış üzerindeki etkileri, diğer bir ifadeyle basınçların büyük ölçüde akış şekillerinden etkilendiğinden hareketle, tremi geometrileri ve akış şekilleri önemli sayıda çalışmaya konu edilmiştir. Silolardaki akış şekilleriyle ilgili ilk kapsamlı çalışma Jenike ve ekibi tarafından 1960’lı yıllarda gerçekleştirilmiştir (Jenike, 1964). Jenike, akış şekillerini kütle ve huni akışı olarak iki sınıfa ayırmıştır. Boşaltma sırasında silodaki tüm malzemenin hareketini kütle akışı, malzemenin bir kısmının hareketsiz kalması durumunu ise huni akışı olarak tanımlamaktadır. Huni akışı daha sonradan boru ve karma akış olmak üzere iki sınıfa ayrılmıştır (Rotter, 2001, Härtl, 2008, EN 1991-4, 2006). Huni ve kütle

akışı etkilerini dikkate almak için ön doldurma basınçlarını ve aşırı yük faktörleri kullanarak tasarımların gerçekleştirilmesi yoluna gidilmiştir. Burada temel hedef tasarımcının doldurma ve boşaltmadan kaynaklanacak ek basınçları belirli bir yaklaşıklıkla dikkate almasını sağlamaktır. Bu akış şekillerinin dışında duraylı kemer oluşumu da yapı tasarımında dikkate alınması gereken bir diğer parametredir. Kaldı ki büyük duraylı kemerlerin çökmesi ile siloda yapısal hasara neden olabilen şiddetli darbe yükleri oluşabilmektedir. Bu durumda silo tasarımında kemerlenmeyi engellemek amacıyla tremi ve silo boyutları ile geometrisinin seçimi önem arz etmektedir. Gerçekte malzeme akış şekilleri sınırsız ve tahmin edilmeleri oldukça zor olmaktadır. Fakat tasarımda tipik akış şekilleri simetrik ya da asimetrik olarak farzedilmektedir.

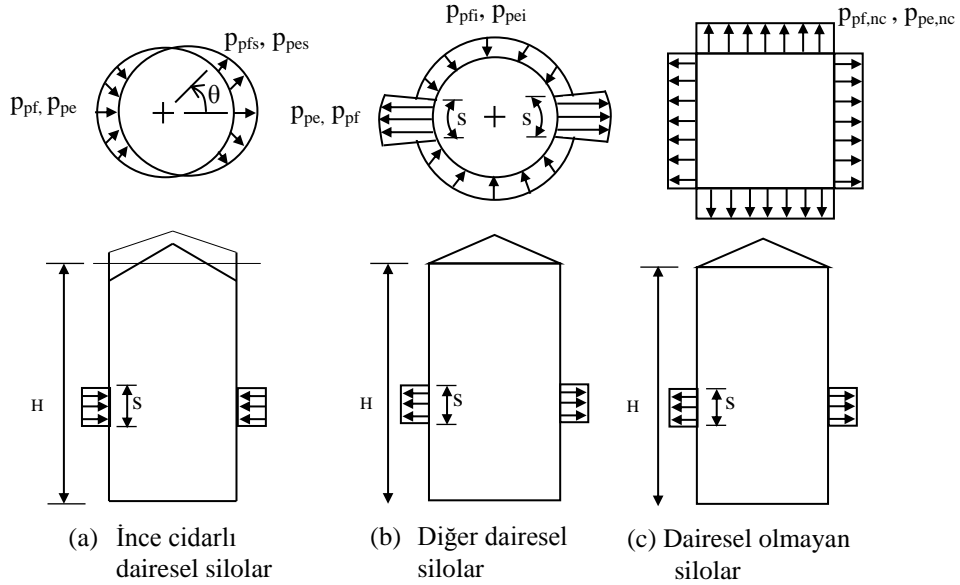
Şekil 1.8'de farklı akış şekilleri için saklama ve boşaltma durumlarına ilişkin simetrik cidar basınçlarının tipik şekilleri gösterilmektedir. Kütle akışlı silolarda boşaltma durumunda malzemenin cidar üzerinde hareketinden dolayı basınçta büyük dalgalanmalar oluşmaktadır. Bu durumda yapı taşıyıcı sistemi farklı basınç etkilerine maruz kalmaktadır. Araştırmalar göstermiştir ki genellikle en büyük basınçlar, silo gövdesi ile tremi geçişinde meydana gelmektedir (Branspy ve Blair-Fish, 1974). Boru akışlı silolarda cidarda boşaltma boyunca malzemenin dolay kesme oluşmadığı için daha yumuşak bir karakter gözlenmekte iken saklama ve boşaltma basınçları arasında neredeyse hiç fark oluşmamaktadır (Ding, 2005). Karma akışlı silolarda en büyük basınçlar etkili geçiş olarak adlandırılan akış kanalı sınırı ile silo cidarının birleştiği yerde meydana gelmektedir (Ooi vd., 1990). Bu bölgesel yüksek basıncın kütle akışındaki göre büyüklüğü ve temas noktası eğimi değişken olduğundan öngörülmesi oldukça zor olmakta ve bu basınç çevre boyunca asimetrik olabilmektedir. Bu da silodaki akış şeklinin, cidarlardaki gerilmelerin güvenilir bir şekilde belirlenebilmesi için, bilinmesi gerektiğini göstermektedir (Härtl, 2008).

Stok malzemesinden dolayı asimetrik basınçların oluşma olasılığı nedeniyle silonun herhangi bir kısmında ek bir yükün hesaplarda dikkate alınması gerekebilmektedir (Şekil 1.9). Bu yaklaşım uygulamadaki bazı yönetmelikler tarafından kullanılmıştır (DIN1055,1987; EN1991-4, 2006). Bazı durumlarda asimetrik basınçlar, aksel simetrik bir siloda merkezi doldurma gerçekleştirilmiş olsa bile meydana gelebilmektedir. Bu basınçlar cidardaki geometrik kusurlar ve taneli malzeme özelliklerinin olası değişimleri sonucu olarak da ortaya çıkabilmektedir. Briassoulis, (2000) ve Ooi vd. (1990) tarafından

gerçekleştirilen deneyler boşaltmada olduğu gibi doldurma ve saklama sırasında da oldukça büyük asimetrik basınçların oluşabileceğini ortaya koymuştur.



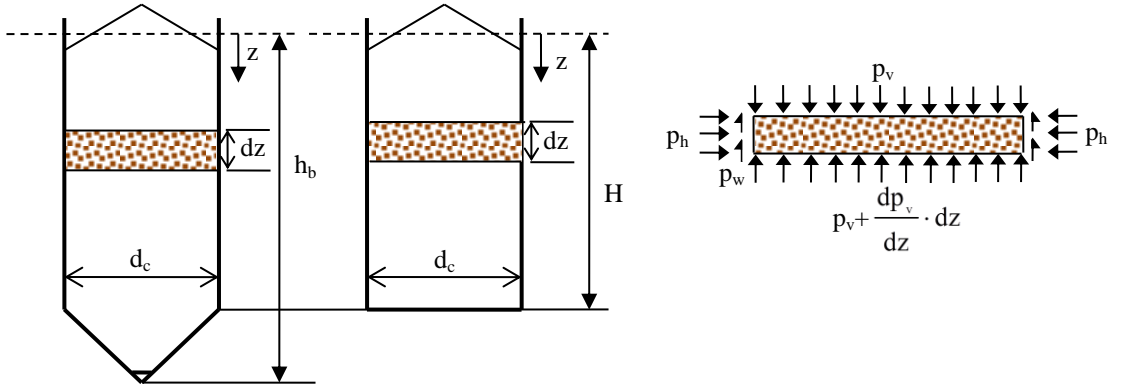
Şekil 1.8. Akış profilleri ve farklı akış profilleri için statik ve boşaltma durumunda yaklaşık simetrik cidar basınçları



Şekil 1.9. Dairesel ve dairesel olmayan silolarda doldurma ve boşaltma ek yüklerinin en ve boy kesitleri

### 1.5.1.1. Statik Durumdaki Malzeme Basınçlarının Hesabı İçin Bazı Teoriler

Teknik literatürde silo cidarının maruz kaldığı basınçların hesabı için pek çok yöntem mevcuttur. İlk tasarımcılar stok malzemelerinin oluşturduğu basıncı, taneli malzemenin sıvı gibi davrandığını varsayarak, hidrostatik basınca benzetmişlerdir. Bu kabulde sürtünme kuvvetleri dikkate alınmamakta ve malzeme ağırlığının tamamının silo tabanı tarafından taşındığı düşünülmekteydi. Roberts 1882 yılında stok malzemesinden kaynaklanan statik yatay ve düşey basınçları belirlemek amacıyla modeller ve birebir ölçekte silolar üzerinde ilk deneyleri gerçekleştirmiştir (Li, 1994). Bu deneylerin sonuçlarında silo çapının iki katı kadar bir derinlikte sabitleşen en büyük basınç değerlerinin oluştuğu gözlemlenmiştir. Ayrıca stok malzemesi ağırlığının bir kısmı sürtünme yoluyla cidarlara iletiildiğinden silo tasarımı için hidrostatik teorisinin doğru olmadığını ve malzemedeki yatay ve düşey basınçların eşit olmadığını işaret etmiştir. Janssen, Roberts'ın sonucunu doğrulayarak, 1895 yılında silo düşey cidarlarındaki basınçlar için farklı bir teori ortaya koymuştur. Janssen bağıntısı narin siloların tasarımında cidar basınçlarının dağılımı için o tarihten bu yana kullanılmaktadır. Bu bağıntı, stok malzemesinin yatay bir parçası çıkarılarak bu parça için yazılan düşey dengenin diferansiyel bağıntısına dayanmaktadır (Şekil 1.10).



Şekil 1.10. Janssen teorisindeki bağıntıların çıkartılmasına ilişkin şema

Janssen'in orijinal çözümünde cidardaki yatay basıncın stok malzemesindeki ortalama düşey gerilmeye oranı olan ve genellikle yanal basınç oranı olarak adlandırılan K parametresi, malzeme yüzeyinden itibaren derinlikle değişen bir çarpan olarak dikkate

alınmaktadır. Bu yaklaşımda, düşey basınçlar herhangi bir yatay kesitte, yatay basınçların ise yatay kesitin çevresi boyunca düzgün yayılı oluştukları varsayılmaktadır. Diğer taraftan cidarlardaki kayma gerilmelerinin ise yatay basıncın doğrusal fonksiyonu olduğu kabul edilmektedir. Bu kabuller ışığında, halen kullanılmakta olan Janssen yöntemi ile basınç dağılımı için,  $r_h$  hidrolik yarıçapı,  $\mu$  ise düşey cidardaki sürtünme katsayısını göstermek üzere aşağıdaki bağıntılar yardımıyla, yatay basınç ( $p_h$ ), düşey basınç ( $p_v$ ) ve düşey cidarda birim alandaki sürtünmeden doğan kesme etkisi ( $p_w$ ) elde edilebilmektedir.

Burada  $z_0 = r_h / \mu K$  olmak üzere;

$$p_h = \frac{\gamma r_h}{\mu} \left[ 1 - e^{-z/z_0} \right] \quad (1.1)$$

$$p_v = \frac{\gamma \cdot r_h}{K \cdot \mu} \cdot \left( 1 - e^{-z/z_0} \right) \quad (1.2)$$

$$p_w = \gamma \cdot r_h \cdot \left( 1 - e^{-z/z_0} \right) \quad (1.3)$$

şeklinde ifade edilmektedirler.

Bağıntılardan da anlaşılacağı üzere basınçların tespiti için ortalama düşey gerilme ile yanal basınçlar arasındaki ilişkiyi belirleyen katsayı olan  $K$ 'nin belirlenmesi gerekmektedir. Janssen'in orijinal çözümünde sabit kabul edilen yanal basınç oranı  $K$  için çeşitli araştırmacılar (Koenen,1895; Jaky, 1948; Pieper ve Wenzel, 1963; Walker, 1966; Homes, 1972; Walters, 1973; Jenike vd., 1973; Haaker ve Scott, 1983; Hartlen vd., 1984; Arnold vd, 1978; Rotter, 1988) farklı değerler önermişlerdir.

Koenen;  $\phi$  malzemenin etkili içsel sürtünme açısını göstermek üzere  $K$  değeri için Rankine'in aktif basınç oranını önermiştir.

$$K = (1 - \sin \phi) / (1 + \sin \phi) \quad (1.4)$$

Pieper ve Wenzel (1.4) bağıntısının gerçekten çok küçük bir değer verdiğini belirterek aşağıdaki  $K$  değeri ile Janssen teorisinin daha iyi sonuç vereceğini ifade etmişlerdir.

$$K = (1 - \sin \phi) \quad (1.5)$$

Walker, Rankine'in aktif durumu yerine pasif durum dikkate alındığında, cidara bitişik stok malzemesinin gerekli kayma gerilmesini taşıyamadığını belirtmekte ve cidara bitişik stok malzemesinin aşağıya doğru kaymakta ve göçme durumunda olduğunu varsayarak K değeri için aşağıdaki bağıntıyı belirlemiştir.

$$K = \frac{1 + \sin^2 \phi - 2\sqrt{\sin^2 \phi - \mu^2 \cos^2 \phi}}{\cos^2 \phi + 4\mu^2} \quad (1.6)$$

Bu durumda cidar pürüzsüzken K, bağıntı (1.4)'deki değere eşit olmakta, cidar çok pürüzlü ve parçacıklar kendi üzerlerinden kayıyor ise bağıntı aşağıdaki hale gelmektedir.

$$K = \frac{1 - \sin^2 \phi}{1 + \sin^2 \phi} \quad (1.7)$$

Walters bu çözümü tüm kütlenin plastik kırılma durumunda olduğunu varsayarak, büyük bir derinlikte stok malzemesi yatay parçası üzerindeki düşey gerilmelerin düzgün yayılı olmamasına izin verecek şekilde genişletmiştir. Bu durumda K değeri için (1.4) ve (1.7) bağıntıları arasında değerler veren aşağıdaki bağıntıyı önermiştir.

$$K = \frac{1 - \sin^2 \phi}{1 + \sin^2 \phi + 4 \cos \phi \left[ \tan^3 \phi - (\tan^2 \phi - \mu^2)^{3/2} \right] / (3\mu^2)} \quad (1.8)$$

K katsayısı ile ilgili teknik literatürde verilen tüm bu varsayımların yanısıra, çok sayıda malzeme için silo tasarımında bu katsayının Jenike vd. K=0,40 olarak ve Homes K=0,45 olarak dikkate alınmasını önermişlerdir (Ooi ve Rotter, 1990).

Basitleştirilmiş bu yaklaşımlar bodur silolara uygulandığında önemli bir dezavantaj ortaya çıkmaktadır. Bu durumda stok malzemesinin üst kısmında oluşan konik yığın yüzey sınır durumunu değiştirmekte, Janssen yöntemi kabulleri sözkonusu olduğunda ise bu durum tam anlamıyla temsil edilememektedir. Stok malzemesinin üstünde oluşan konik yığın, konik yığının cidara ilk temas ettiği noktalarda ortalama belirli bir düşey gerilmeye neden olmaktadır. Diğer taraftan, bu noktalarda cidarın normali doğrultusundaki basıncın sıfır olması gerektiğinden, diğer bir ifadeyle K=0 olmasını gerektirdiğinden, sabit K yanal

basınç oranı ile davranış temsil edilememektedir. Bu durum, konik yığının ve bunun derinlikteki basınçlara etkisinin çok küçük olduğu narin (derin) silolarda ihmal edilebilecek düzeyde bir etkiye sahip olmasına karşın, bodur silolarda sözkonusu etki ihmal edilemez bir hal almaktadır. Bu nedenle Janssen teorisi bodur silolara uygulandığında, koordinatların merkezi koninin geometrik merkezi yüksekliğinin 1/3 den başlatılmaktadır. Bu kabul ilk cidar temasında önemli basınçların hesaplanmasına neden olmaktadır. Bu olumsuzluğu ortadan kaldırmak için Reimbert ve Reimbert (1977) K değerinin yüzeyde sıfır olacak şekilde derinlikle değiştiğini kabul etmişlerdir. Bu çözüm;

$$z_0 = \frac{r_h}{\mu K} - \frac{h_{tp}}{3} \quad (1.9)$$

olmak üzere, yatay basınç için aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir.

$$p_h = \frac{\gamma r_h}{\mu} \left[ 1 - \left( \frac{z}{z_0} + 1 \right)^{-2} \right] \quad (1.10)$$

Bu bağıntı, stok malzemesi yüzeyi yakınlarında (1.1) ve (1.4) bağıntılarına göre daha büyük basınç değerleri vermektedir. Janssen teorisinde olduğu gibi Reimbert teorisinde de deneyler belli bir derinlikten sonra basıncın sabit bir değere asimtotik olarak yaklaştığını göstermesine karşın, Janssen teorisi ekponansiyel, Reimbert ise hiperbolik biçimde bir değişimi yöntemlerinde esas olarak kabul etmişlerdir.

Teknik literatürde, genel olarak narin silolardaki araştırmaların çok, bodur silolardakilerin ise az olması bodur silolardaki stok malzemesi davranışlarının, dayanma yapılarındaki zemin davranışlarına benzer şekilde yorumlanmasına neden olmuştur. Bu nedenle bazı çalışmalar bodur silolardaki basınç için Rankine teorisinin kullanılmasını önermektedir (Lambert, 1968). Cidardaki basınç için sonuç genel bağıntı;  $\phi_r$  konik yığının şev açısı olmak üzere aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir.

$$p_h = \gamma z \cos \phi_r \left[ \frac{\cos \phi_r - \sqrt{\cos^2 \phi_r - \cos^2 \phi}}{\cos \phi_r + \sqrt{\cos^2 \phi_r - \cos^2 \phi}} \right] \quad (1.11)$$

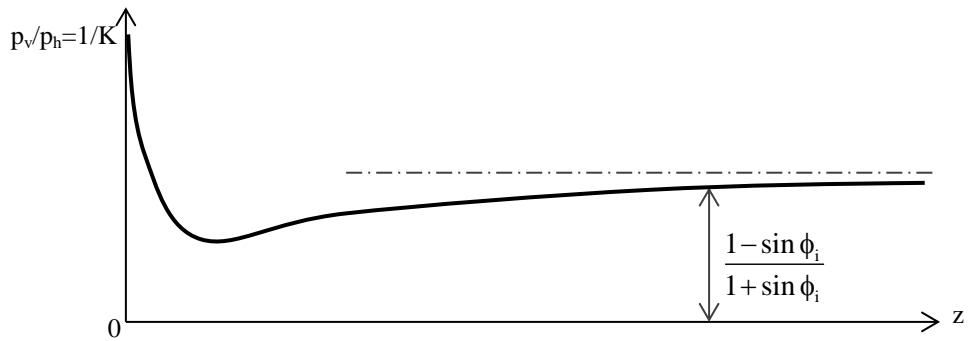


Rankine teorisinden elde edilen cidar basınçları her zaman konik yığının eğimine paralel doğrultuda etkimekte ve cidar sürtünmesi ihmal edilmektedir. Steward (1972) bu sınırlamayı önlemek için Coulomb teorisini önererek,  $\theta$  yatay düzlemle cidar arasında stok malzemesine doğru ölçülen açı ve  $\phi_w = \tan^{-1} \mu$  olmak üzere yatay basınç için aşağıdaki bağıntıyı vermiştir.

$$p_h = \frac{\gamma z \sin^2(\theta - \phi_i)}{\sin^2 \theta \sin(\theta + \phi_w) \left[ 1 + \left( \frac{\sin(\phi_i + \phi_w) \sin(\phi_i - \phi_r)}{\sin(\theta + \phi_w) \sin(\theta - \phi_r)} \right)^{1/2} \right]^2} \quad (1.12)$$

Rankine ve Coulomb teorileri bodur silolar için önerilmekte fakat bu iki teori sadece düz cidarlara uygulanmakta olup silolarda sıklıkla kullanılan eğrisel cidarlar için uygun değildir.

Janssen ve Reimbert teorilerinde  $K = p_h/p_v = (1 - \sin \phi_i)/(1 + \sin \phi_i)$  oranının sabit olduğu kabul edilmektedir. Burada tek farklılık Reimbert teorisinde koordinat takımının başladığı üst yüzeyde bu katsayının 0 kabul edilmesidir. Oysa bunun sabit olmadığı aksine derinlik ( $z$ ) ve hücre şekline bağlı olarak değiştiği ve ancak deneysel çalışmalarla büyük  $z$  değerleri için sabit bir değere asimtotik olarak yaklaştığı belirlenmiş bulunmaktadır. Reimbert'in deneylerine göre  $1/K$ 'nin derinlikle değişimi Şekil 1.11'de verilmektedir.



Şekil 1.11. Reimbert'in deneylerine göre  $1/K$ 'nin derinlikle değişimi

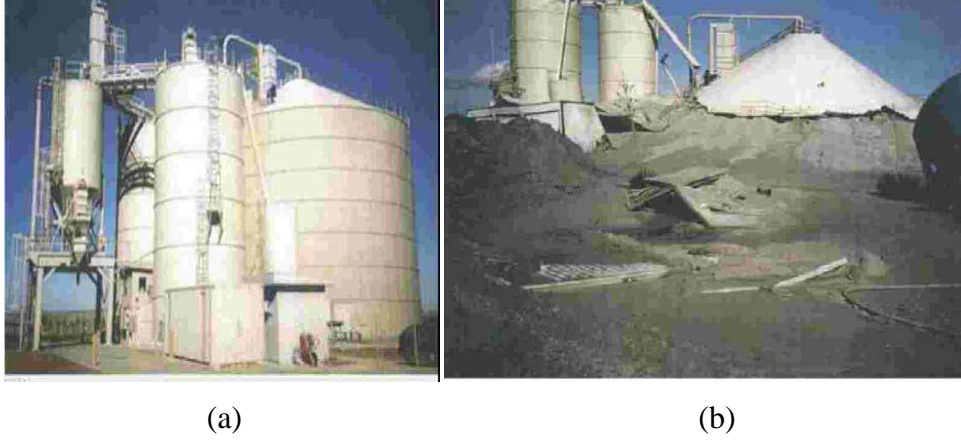
Reimbert'in deneylerinden önce de bu oranın sabit olmadığı Magnel, Lossier, Buisson ve Janssen tarafından gösterilmiştir (Guerrin, 1969). Janssen, Airy ve Prante

gerçekleştirdikleri deneylerde; stok malzemesinin üst seviyesinden itibaren belirli bir derinlikten sonra yanal basınçların sabitleştiği ve böylece hidrostatik basınç dağılımının geçersiz kaldığı, cidarlar üzerindeki yatay basıncın düşey basınca oranının 0,3'ten 0,5'e kadar değiştiği ve silo derinliği, hücre kenarı veya çapının 3 katına vardığında yatay basıncın çok az arttığı sonuçlarına varmışlardır (Guerrin, 1969). Diğer taraftan Buisson deneylerinde hidrostatik basınç ve Janssen' in teorik eğrisini karşılaştırmış, bunun için silonun içine düşey ve yatay konumda monometrik kapsüller yerleştirerek yatay ve düşey basınç eğrilerini elde etmiştir. Buradan tiremi seviyesinde düşey basınçların Janssen teorisinin verdiği değerlerden önemli ölçüde küçük olduğu ve bunun kemerleşme etkisinden kaynaklandığı ve bazı hallerde Janssen teorisinin verdiği değerlerin yarısı olabileceği, yatay basıncın ise Janssen basıncına yakın ya da ondan çok küçük olabileceği kanısına varmıştır (Guerrin, 1969).

### 1.5.2. Sıcaklık

Çimento gibi bazı malzemeler kimyasal işlem sonucunda silolandıklarında sıcaklıkları yüksek olabilmektedir. Örneğin çimento genellikle silolara yaklaşık 100 °C'de doldurulmaktadır. Diğer taraftan kükürt, tahıl, kömür gibi bazı malzemeler de suyla temasa geçtiklerinde ısınabilmekte ve hatta alev alabilmektedir. Ayrıca ortam koşullarında meydana gelen sıcaklık farklılıkları, her yapıda olduğu gibi bu yapılarda da büzülme etkilerinin, dolayısıyla da kesitte öngörülme gerilmelerin, oluşmasına neden olabilmektedir. Bu tür çevresel etkiler malzeme içerisinde de değişimlere neden olabilmekte, ek olarak yapısal değişiklikler nedeniyle stok malzemesine doğru büzülme oluşabilmektedir. Bu nedenlerle söz konusu yapıların tasarım ve kullanım aşamalarında bu gibi sıcaklık etkilerinin de dikkate alınması kaçınılmaz olmaktadır. Söz konusu etkinin yapı davranışı üzerinde ne derece etkili olabildiğini iyi bir şekilde gösteren bir örnek Şekil 1.12'de verilmektedir. Şekilde verilen silo, 1996 yılında Amerika Birleşik Devletlerinin güneybatısında göçmüştür. Söz konusu hasar gece saatlerinde, doldurma ve boşaltma yapılmayan bir sırada meydana gelmiştir. Jenike ve Johanson tarafından gerçekleştirilen adli inceleme, silonun tasarımında ısı etkilerinin dikkate alınmadığını ortaya koymuştur. Metal silo cidarları gün boyu genleşmiş ve gece sıcaklık düştüğünde büzülmüştür. Bu olay kısaca şu şekilde özetlenebilmektedir. Önemli sıcaklık farklılıklarının olduğu durumda eğer boşaltma meydana gelmiyorsa ve silo içindeki malzeme serbest hareket ediyorsa, bu

malzeme silo genişlediğinde yeniden yerleşebilmektedir. Ancak, silo cidarı büzülürken bu hareket geri dönmemektedir. Dolayısıyla bu durumda anılan malzeme büzülme direnç göstermekte ve cidarlardaki gerilmelerin artmasına sebep olmaktadır. Bu etki gün boyu tekrarlanarak, sonunda cidarın hasarına hatta göçmesine neden olabilmektedir (Carson,2000).



Şekil 1.12. Isıl etkiler nedeniyle göçme: silonun göçmeden önceki (a) ve göçmeden sonraki (b) durumlarına ilişkin birer görünüm (Carson,2000)

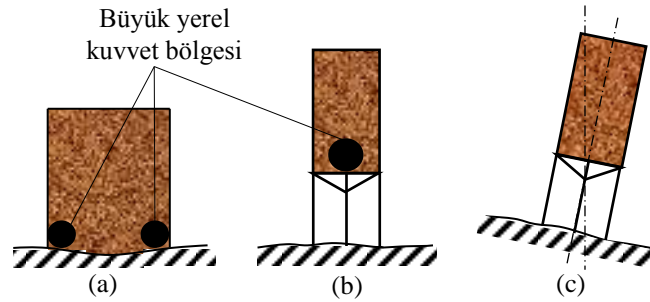
### 1.5.3. Farklı Oturmalar

Yüksekliklerine oranla küçük bir taban ya da çapa sahip olan silolar, silo tabanında stok malzemesinin ve yapının ağırlığından dolayı oldukça büyük merkezi yüklere ve bu yüklerden doğan gerilmelere maruz kalmaktadır. Zemin, uygulanan bu yerçekiminden doğan yüklerden dolayı genellikle eşit yayılı ya da zemin ve temel sistemine bağlı olarak eşit olmayan gerilme dağılımları etkisinde kalmaktadır. Hemen her yapı türünde olduğu gibi, silolar için de oturmalar yapı sisteminin emniyeti ve stabilitesi için önemli bir risk oluşturmaktadır. Anlaşılacağı üzere, doldurma-boşaltma esnasında ve stok malzemesinin silo içerisinde alabileceği özel durumlara göre sabit ve hareketli yükleri ve bunların rüzgâr, deprem ve temele etkileyen diğer yükler etkisi altında temel sisteminde neden olabilecekleri yüklem birleşimlerini tahmin etmek oldukça karmaşık bir hal alabilmektedir. Diğer taraftan elverişsiz bir yüklem birleşiminde temel sisteminin maruz kalacağı farklı yüklemeler de farklı oturmalara neden olabilmektedir. Silolanan malzemenin ağırlığından doğan düşey yük dış merkezli olduğu zaman silonun tabanındaki basınç soğanı da çarpılmaktadır. Depremler ya da güçlü rüzgârlardan doğan yatay yükler de aynı etkileri

yapabilmektedir. Bunlardan dolayı temelin altındaki zeminde oluşan bölgesel gerilme yığılmaları silolarda devrilme, farklı oturma ve hatta göçmeye neden olabilmektedir.

Silo gruplarında oturma, tamamen dolu ve bazı hücrelerin dolu bazılarının boş olduğu durumlar için de hesaba katılması gereken bir husustur. Temeldeki herhangi bir düşey şekil değiştirme bu yapı sistemlerinde önemli hasarlara neden olmaktadır. Oturma bileşenleri yapıyı çok farklı şekillerde etkilemesi nedeniyle, söz konusu etki eşit yayılı, doğrusal ve yerel olarak gerçekleşebilmektedir. Bu nedenle tekil siloların ve özellikle büyük hacimli silo gruplarının altında büyük zemin basınçları oluşmakta ve bunlar genellikle önemli şekil değiştirmelere neden olmaktadır. Özellikle silo gruplarında bu çeşit şekil değiştirmelerden kaynaklanan büyük membran kuvvetleri oluşmaktadır.

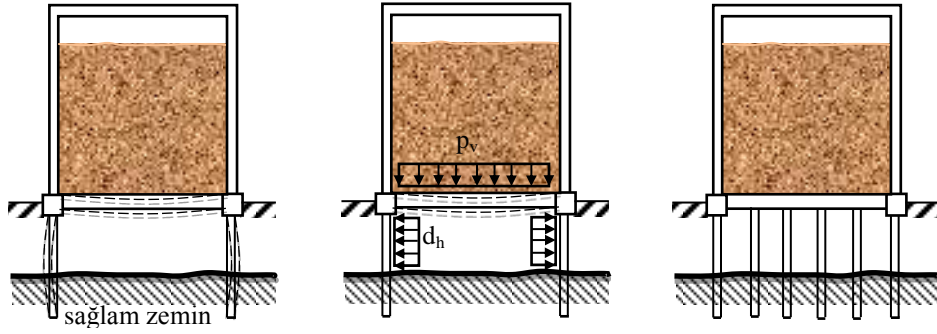
Silo temel oturmaları siloya bağlı yapıları da etkilemektedir, bu nedenle sistem tümüyle dikkate alınmalıdır. Devrilme meydana gelebilmekte ve bu membran ve kesme kuvvetlerine neden olabilmektedir (Şekil 1.13), (Resinger ve Greiner, 1984). Diğer taraftan kolonlar vasıtasıyla yükseltilmiş siloların kolonlarının hemen altında meydana gelen farklı oturmalar siloda büyük yerel kuvvetlere neden olabilmektedir (Şekil 1.13b). Küçük bir farklı oturma dahi kolonlardaki eksenel kuvvetleri önemli derecede değiştirebilmektedir (Resinger ve Greiner, 1984).



Şekil 1.13. Farklı oturma etkileri (a) düz tabanlı silo, (b) ayaklı silo (c) zemin dönmesinden dolayı ayaklı siloda meydana gelen çarpılma

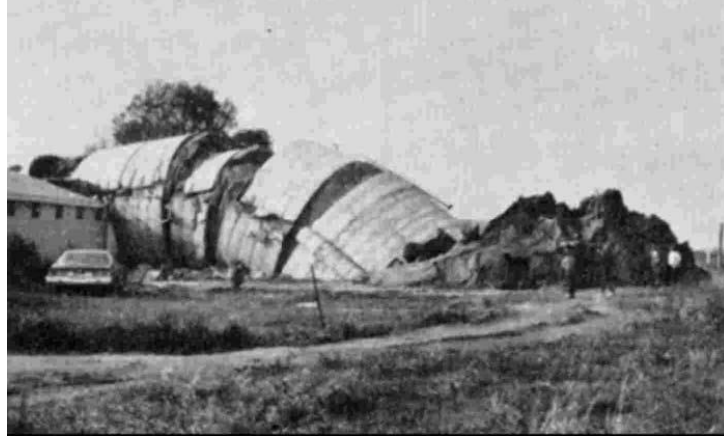
Grup silo tasarımında, zeminin rijitlik durumuna bağlı olarak yapıda eşit yayılı olmayan basınçlar oluşabilmektedir. Bu basınçlar büyük kesme kuvvetleri ve eğilme momentlerine neden olmaktadır. Bu tür bir yapı zemin etkileşimi probleminde büyük çaplı bitişik silo hücrelerinde ayırık temel sistemi tasarımının daha uygun bir çözüm olacağı açıktır (Eibl, 2009).

Kazık temel kullanımı durumunda kazık başlıklarıyla güçlü bir bağlantı olması durumunda taban döşemesindeki eğilme (Şekil 1.14a) ya da zeminin yeterli taşıma gücüne sahip olmaması durumunda kazık-zemin etkileşimi değişmekte ve kazıklara etkiyen ek yanal kuvvetler nedeniyle (Şekil 1.14b) stok malzemesinden kaynaklanan ek yükler davranışı değiştirmektedir. Bu nedenle söz konusu bu etkilerin tasarımda dikkate alınması gerekmektedir. Taban döşemesi altına grup kazık uygulaması ile uygun düzen oluşturulmasının bu etkileri azaltmaya yardımcı olacağı ifade edilebilmektedir (Şekil 1.14c).

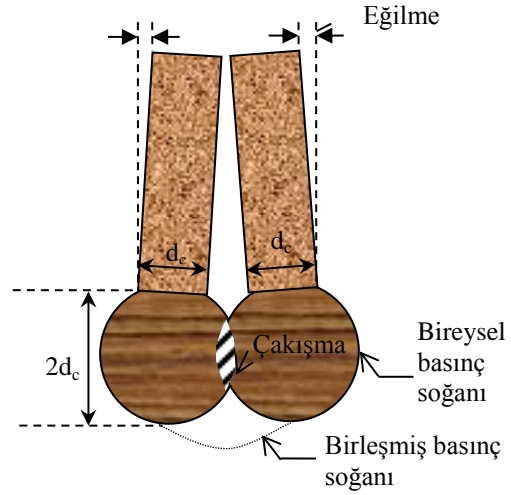


Şekil 1.14. Kazık temel problemleri

Killi zeminlerde çoğu temele bağlı hasarlar genellikle silonun bir seferde çok hızlı olarak doldurulmasından meydana gelmektedir (Şekil 1.15). Benzer bir diğer zemin kaynaklı hasar ise Kanada'daki Red River Vadisinde inşa edilen bitişik nizam iki tahıl silosunun temelindeki zeminin uygulanan düşey yükleri karşılayacak yeterli dayanıma sahip olmamasıyla meydana gelmiştir (Şekil 1.16). Bozozuk (1972,1976) bu siloların genç bir alüvyon üzerine inşa edildiğini ve siloların birbirlerine çok yakın olmaları nedeniyle de temellerin altındaki basınç soğanlarının çakışması sonucu taşıma gücü yetersizliğinin meydana geldiğini belirtmektedir. Bu durumda silo temelleri altında çakışma bölgesinde yerel büyük gerilmeler oluşmakta dolayısıyla da oturmalar meydana gelmektedir. Sonuç olarak silolarda devrilme, çarpışma, hasar ve göçme meydana getirebilmektedir.

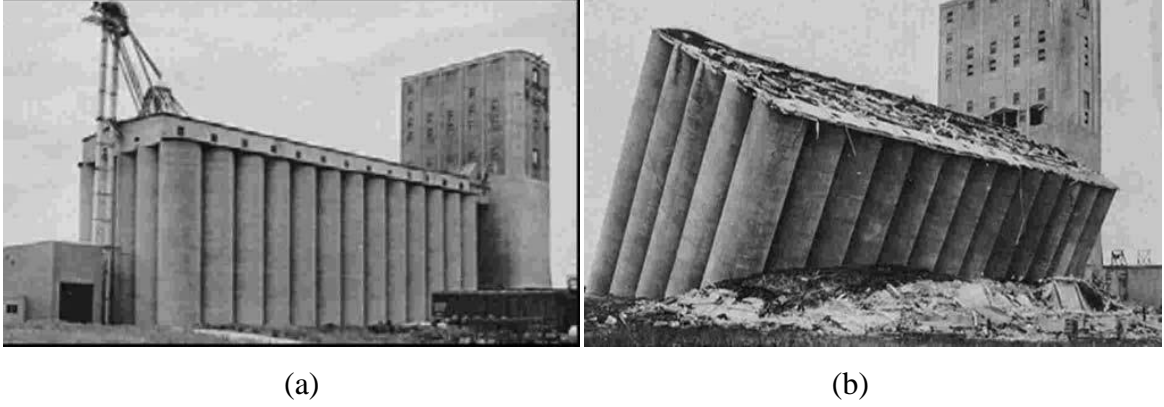


Şekil 1.15. Komşu yapıya da hasar veren 2500 t kapasiteli silonun göçmesinden bir görüntü (Bozozuk 1976, ASCE)



Şekil 1.16. Çakışan basınç soğanları bölgesinde düzgün olmayan oturmadan dolayı çarpışan ikiz silolardan bir görünüm (Bozozuk 1976, ASCE)

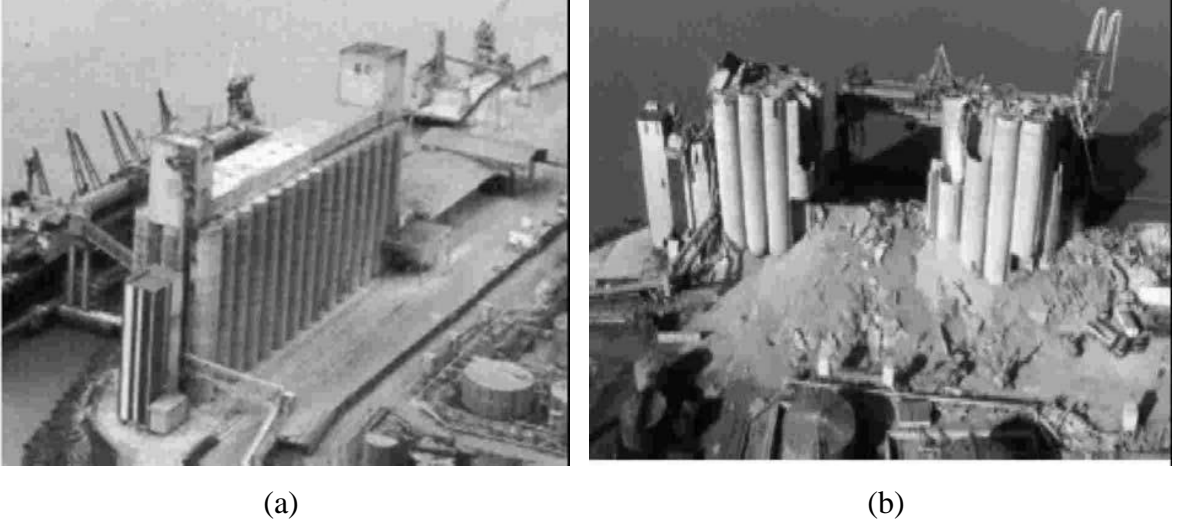
Şekil 1.17’de görülen 65 hücreli tahıl silosu 1913 yılında yan yatmaya başlamış ve yeni inşa edilmiş bu silo buğdayla doldurulduğunda ise 12 saat boyunca düşeyle açısı  $30^\circ$  oluncaya kadar yan yatmaya devam etmiştir. Düşey konuma geri getirilmesi için hücrelerindeki buğday boşaltılarak silonun altından tünel açılmak suretiyle yeni temeller asıl kaya üzerine oturtulmaya çalışılmıştır. Tüm bu çalışmalar sonrasında silo şimdi ki düşey konumuna getirilmiştir. Bu silo günümüzde hala kullanılmaktadır (Clerkin 2004).



Şekil 1.17. Tahıl silosunun düşey (a) ve yan yatmış hallerine (b) ilişkin birer görünüm (Clerkin 2004)

#### 1.5.4. İnfilak

Un, şeker, kömür tozu gibi toz halindeki bazı stok malzemeleri belirli bir oranda hava ile temas ettiklerinde bazen bir kıvılcım ile dahi infilak edebilmektedirler. Diğer birçok yapı tarzından farklı olarak bu tür hasarlar ve buna bağlı göçmeler genellikle silo türü yapı sistemlerinde meydana gelmektedir. Buna ek olarak, siloların geometrisinden kaynaklanan benzer olumsuzluklardan bahsetmek de mümkündür. Akış esnasında malzemenin bazı bölgelerde sınırlanmasının bu bölgelerde çok yüksek basınçların oluşmasına neden olduğu ve bu basınçların ise siloların cidarlarında patlama hasarlarına neden olduğu bilinmektedir (Li, 1994). Diğer taraftan bazı kimyasal tepkimelerin de silolarda önemli hasarlara neden olduğu birçok defa görülmüştür. Örneğin stoklanan arpa ya da samanın fermantasyonu sonucu açığa çıkan metan gazının infilakı neticesinde bu tür hasarlara sıklıkla rastlanmaktadır. Kieselbach (1997) tarafından silonun çiftlik hayvanlarının yemi yerine sebze ile doldurulup kötüye kullanımından ve silonun aşırı yüklenmesinden dolayı önemli çevresel hasar ve ekonomik kayıplara neden olan bir silonun göçmesi de rapor edilmiştir. Şekil 1.18'de 1997 yılında Fransa'da çok hücreli betonarme buğday silosunun patlama öncesi ve patlamadan sonraki görüntüleri verilmektedir.



Şekil 1.18. Fransa da bir silonun patlama öncesi (a) ve patlama sonrası (b) görünüşleri (Mavrot vd. 2003)

Buradan da anlaşılacağı gibi bu etki, yapı için önemli derecede bir risk unsurudur. Bu göçme sırasında 11 kişinin ölmesi de insan hayatına da mal olabileceğini göstermektedir (Mason and Lechaudel 1998). Bu tür riskler patlama nedeni olan gazların boşaltılmasını sağlayacak ya da patlama anında etkiyi azaltacak boşlukların silo ön tasarımında dikkate alınması ile önlenmektedir.

### 1.5.5. Deprem

Genel anlamda, deprem etkisinde kalan siloda doğal olarak stok malzemesi-silo etkileşimi ön plana çıkmaktadır. Silolanan malzemenin fiziksel ve mekanik özelliklerinin yanında silonun geometrik özelliklerine bağlı olarak da doğacak dinamik etkiler şekil ve büyüklük olarak statik etkilerden oldukça farklı bir karakter sergilemektedirler. Bunun yanında önemli miktarda malzeme kütesinin silo yapısal sistemi nedeniyle yükseklik boyunca silolanıyor olması, bu tür yapı sistemlerinin deprem davranışları için olumsuz kabul edilebilecek niteliklerdir ki, silo tasarımının oldukça karmaşık etkilere karşı koyabilecek şekilde yapılmasını gerektirmektedir. Güçlü yer hareketinin teorik olarak kütle merkezine etkiğinden hareketle, artan silo yüksekliği ile yatay yük için moment kolu ve buna bağlı olarak tabandaki eğilme momenti etkileri de artmaktadır. Eğilme momentindeki bu artış, silo tabanında ifade edilen diğer yüklerin neden olduğu iç kuvvet etkilerinden



önemli ölçüde şiddetli, eşit yayılı olmayan bir karaktere neden olmakta ve silonun üst kısmında dahi ciddi hasarlara neden olabilmektedir.

Genel yapı dinamik davranışının, silo cidarının rijitliği, boyutları, yapı malzemesinin, stok malzemesinin ve zeminin mekanik özelliklerine göre oldukça farklı olacağı rahatlıkla söylenebilmektedir. Diğer taraftan silolarda narinliğin davranışa etkisinin de söz konusu etmenler ile doğrudan ilintili olması silo davranışının rijit ya da esnek olarak kabul edilmesi durumunu da değiştirebilmektedir. Deprem etkisinde kalan rijit silolarda cidarın önemli bir yaklaşıklıkla yer hareketini taklit edeceği, esnek silolarda ise yapı sisteminin hareketinin yer hareketinden farklı olacağından dolayı stok malzemesi-silo etkileşiminin incelenmesinde cidar rijitlik ya da esnekliğinin dikkate alınması gerekliliği açıktır. Tüm bu gerekçeler ışığında, her yapı sisteminde olduğu gibi, çalışma konusu silolar için de en kritik yük ve/veya yükler güçlü yer hareketi nedeniyle meydana gelmektedir. Son yüzyılda dünya genelinde meydana gelen depremlerde ciddi hasar görmüş ya da tamamıyla göçmüş çeşitli silo örnekleri buna en iyi kanıt olarak verilebilmektedir. Söz konusu depremlerde genellikle silolarda önemli maddi kayıplar yanında, can kayıpları da birçok örnekte görülmüştür. Örneğin, 2001 El Salvador depreminde bir silonun göçmesiyle 3 kişinin hayatını kaybetmiş olması örnek olarak gösterilebilmektedir (Mendez, 2001). Bu tür örneklerin sayısını arttırmak mümkündür. Ancak takip eden alt başlıklarda örnek olması amacıyla, ülkemizden ve dünyadan inceleme konusu silolarda deprem kaynaklı hasarlara ve bunların nedenlerine yönelik birer örnek verilmektedir.

#### **1.5.5.1. Kocaeli ve Düzce Depremlerindeki Silo Hasarları**

Bilindiği üzere Türkiye, 17 Ağustos 1999 tarihinde 7,4 büyüklüğünde Kocaeli ve hemen takiben 12 Kasım 1999 tarihinde 7,2 büyüklüğündeki Düzce depremlerini üç ay içinde ardı sıra yaşamıştır. Türkiye'nin kuzeybatısında meydana gelen, insan ve endüstrinin oldukça yoğun olduğu yerleşim alanlarını etkileyen bu iki yıkıcı deprem önemli can ve mal kayıplarına neden olmuştur. Düzce gibi bölgedeki birçok il her iki depremden de etkilenmiştir. Örneğin, Şekil 1.19 (a) ve Şekil 1.19 (b)'de gösterilen çimento siloları ilk depremde ayakta kalmış olmakla birlikte bunlar 12 Kasım Düzce depreminde göçmüşlerdir. Rapor edilmemiş olsa bile 17 Ağustos depreminin önceden bazı hasarlara neden olmuş olması olasıdır. Siloların anayol inşaat sahası yakınında ikinci deprem

sırasında kırılan fay hattına çok kısa bir mesafede ve depremin merkez üstünden 5 km uzaklıkta olduklarını belirtmekte yarar bulunmaktadır.



(a)

(b)

Şekil 1.19. 1999 Düzce depreminde yıkılan silolar (a), (b) (Xiao ve Yaprak 1999, GESS 1999)

Devlete ait kağıt fabrikasındaki (SEKA), üç betonarme silo 1999 Kocaeli depremi sırasında göçmüştür. Kağıt fabrikası, depremin merkez üstüne yaklaşık 20 km mesafede bulunmaktaydı. Şekil 1.20’de iki hasarsız ve bir çökmüş silonun fotoğrafları görülmektedir. Siloların çapı 6m civarındadır. Çöken bu siloların, minimum boyuna donatılı, sünek olmayan 6 küçük kare kesitli kolon üzerine mesnetlenmiş olması, taşıyıcılarının deprem sırasında göçmesine neden olmuştur. Şekil 1.20’deki hasarsız silolar ise göçen silolarinkinden daha güçlü kolonlara oturmaktaydılar.



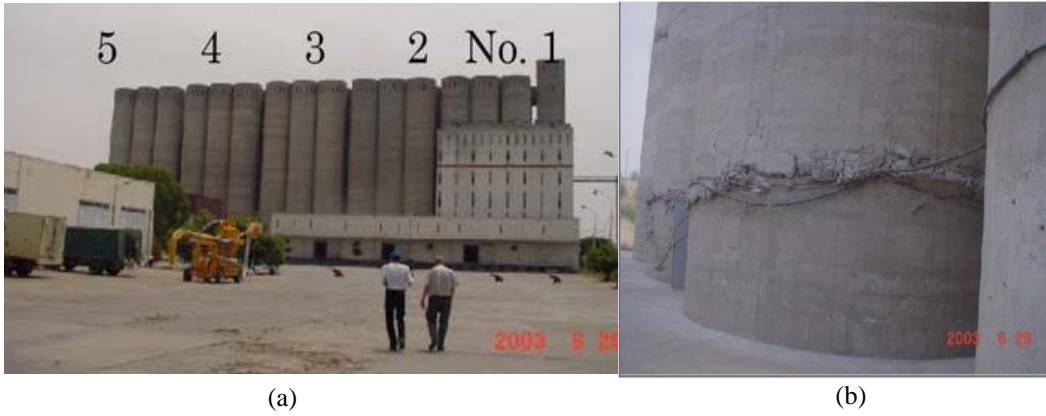
(a)

(b)

Şekil 1.20. 1999 Kocaeli depreminde SEKA kağıt fabrikasındaki hasarsız (a) ve hasarlı(b) silolardan birer görünüm (Sezen vd. 2000)

### 1.5.5.2. Zemmouri, Cezayir, Depremindeki Silo Hasarları

21 Mayıs 2003 tarihinde, büyüklüğü 6,8 ve merkez derinliği 10 km olan bu deprem, Avrasya ve Afrika levhası arasındaki sınır bölgede meydana gelmiştir. Bu depremde birçok maddi kayıp yanında 2266 kişi hayatını kaybetmiş ve 10261 kişi yaralanmıştır (USGS 2003). Deprem bazı silolama tesislerinde ve ekipmanlarında hasara sebep olmuştur. Corso silolarında oluşan en büyük hasar, silonun tabanına yakın cidarlarda yoğunlaşmıştır (Şekil 1.21). Silo tesisi, 1970'lerde Boumerdes şehri yakınlarında inşa edilmiş, 24 metre uzunluğundaki kazıklar üzerine kurulan beş silo grubundan oluşmaktadır. En önemli hasarlar beş numaralı grupta meydana gelmiştir. Deprem esnasında, diğer gruplar yarı dolu ya da boş iken beşinci grubun tahıl ile tam dolu olması hasarın nedenini ortaya koymaktadır. Bu silo grubunda deprem etkisiyle beton ezilmesi, donatı yetersizliği, çelik çubukların kopması-burkulması, ve dış beton kabuğun kısmen hasara uğradığı gözlemlenmektedir (Bechtoula ve Ousalem 2005).



Şekil 1.21. 2003 Zemmouri, Cezayir depreminde Corso silosunun genel görünüşü (a) ve hasar durumuna ilişkin bir görünüm (b) (Bechtoula and Ousalem 2005)

### 1.5.6. Silo Hasarına Neden Olan Özel Durumlar

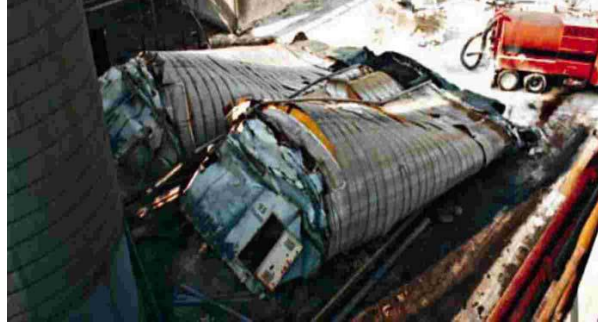
Silolar, diğer endüstri yapılarının göçme oranından çok daha büyük bir sıklıkla göçmekte ve hasara uğramaktadır. Yüzlerce endüstriyel ve tarım silosu her yıl belli bir derece hasar görmektedir (Carson, 2000). Bir silo göçtüğünde, içerdiği malzemenin kirlenmesi, malzeme kaybı, temizleme, yerine koyma maliyetleri ve daha da önemlisi muhtemel yaralanma ya da can kaybı gibi birden fazla kayba neden olabilmektedir

(Lewis,2006). Kısaca siloların göçmesiyle meydana gelen kayıplar azımsanmayacak kadar büyük olmaktadır. Silolara etkiyebilecek yükler başlığındaki yüklere paralel olarak, anlatılan hasarlardan farklı nedenlerle de bu yapı sistemlerinde hasarlar meydana gelebilmektedir. Bunlar, özetle silolanan malzemenin infilakı, doldurma ve boşaltma işlemleri sırasındaki yük değişimleri, eşit yayılı olmayan ya da büyük zemin basınçları ve zemin koşulları, ısı etkileri ve depremler başlıklarında verilenler dışındaki hasarları ifade etmektedir. Söz konusu bu nedenler dışında kalan hasarlar nispeten daha az sıklıkla yaşanmasına karşın silo tasarımında yine de önemli birer etmen olarak dikkate alınmaları gerekmektedir.

Silolardaki infilak olayını silolanan malzemedan dolayı oluşan iç basınçları ve gazları denetim altında tutmak suretiyle önlemek mümkün olabilmektedir. Benzer şekilde borulanma ya da tercih edilen akış kanallarından kaynaklanan asimetrik akış şekilleri, ya da silolanan malzemenin doldurulması veya boşaltılmasıyla oluşan asimetrik yükleme şekillerinin etkilerinin tasarım sürecinde dikkate alınması halinde silolarda büyük bir ihtimalle hasar ve göçmeler önlenebilmektedir. Diğer taraftan betonarme kolonlardaki ya da betonarme silo cidarlarındaki yetersiz ve kötü detaylandırılmış donatı, hasarı önemli ölçüde arttırabilmekte ve göçmeye neden olabilmektedir. Bunlara ek olarak silolarda yaşanan diğer önemli hasar nedenleri ve etkilerinden başlıcaları, takip eden başlıklarda özetlenmeye çalışılmaktadır.

#### **1.5.6.1. Korozyon**

Bilindiği gibi, önlem alınmazsa, korozyon siloların metal bileşenlerinde de bozulmalara neden olmaktadır. Çelik ve betonarme silolar, korozyon ve bunu takiben oluşan hasarların artmasıyla göçebilmektedirler. Aşağıdaki Şekil 1.22’de korozyon sonucu hasar gören ve göçen iki çelik silo görülmektedir. Bu göçme, metal siloların yapısal bütünlüğü için öne çıkan konulardan olsa da, betonarme silolar için de sık ve düzenli denetimlerin gerçekleştirilmesini zorunlu kılmaktadır.



Şekil 1.22. Korozyon nedeniyle göçen silolardan bir görünüm (Hertlein,2007)

### 1.5.6.2. İç Yapı Çökmesi

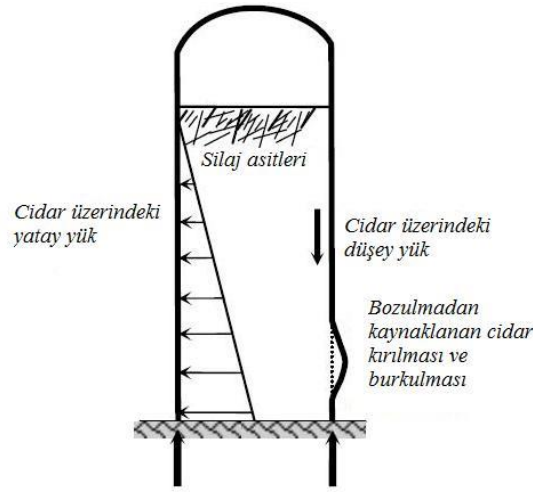
Silo sistemleri, işlevleri gereğince taşıyıcı sisteminden bağımsız bazı iç yapılara ihtiyaç duyabilmektedir. Bu iç yapılar, genel olarak silolanan malzemenin silo içerisinden taşınması ya da ayrı hacimlerde silolanması gibi amaçlarla inşa edilmektedir. Bu türden, çapı 18 m olan bir silonun 2001 yılında gördüğü hasar nedeniyle ana taşıyıcısının kararsız hale geldiği ve bu sırada bir görevlinin, silo içerisindeki bir yapının kısmen göçmesi nedeniyle, hayatını kaybettiği Kazas (2001) tarafından rapor edilmektedir (Şekil 1.23). Söz konusu bu silonun üst kısmı ( $\sim 2/3H$ ) 1400 t kömür silolayacak şekilde tasarlanmışken, geri kalan alt kısmında ise bu kömürü fabrikanın kazanına göndermeden önce ezme ve harmanlama işlemlerini gerçekleştirecek ekipmanlar için bir mekan tasarlanmıştır. Görevlinin, içeride bulunan bu ekipmanların mesnetlendiği yapının çökmesi sonucu hayatını kaybettiği rapor edilmiştir (Kazas 2001).



Şekil 1.23. MEA kömür silosunun dış hasarından bir görünüm (Kazas 2001)

### 1.5.6.3. Silaj Asitinden Doğan Bozulma

Betonarme silolar, uygun bir şekilde korunmadıkları durumlarda, silolanan malzeme özellikleri ve çevre koşulları etkisinde bazı hasarlara maruz kalabilmektedir (Şekil 1.24). Bu bozulmaların en sık karşılaşılan nedeninin silaj asitleri olduğu söylenebilmektedir. Hasarın oranı, silo boyutu, stok malzemesinin nem içeriği, beton üzerinde sağlanan koruma miktarı gibi birçok etmene bağlı bulunmaktadır. Büyük hacimli silolar, artan yatay basınca bağlı olarak, küçük hacimli silolara göre silaj asitlerinden daha fazla etkilenmektedirler. Nemli hayvan yemleri silo içine konulduğunda laktik ve asetik olarak adlandırılan silaj asitlerini üreten bir süreçten geçmektedir. Bu asitler, silo cidarlarıyla temasa geçince agregaları bir arada tutan çimentoyla tepkimeye girmekte ve zamanla derinlikle artan dayanım azalmalarına neden olmaktadır. Bu etkilerin betonun hasara uğramasını hızlandıracağı açıktır (Bellman 1996).



Şekil 1.24. Silaj asidi etkisiyle oluşan hasarlara bir örnek (Doğangün vd., 2009)

### 1.6. Silolar Konusunda Daha Önce Gerçekleştirilen Bazı Çalışmalar

19. yüzyılda zemin mekaniğindeki önemli gelişmeler ve içsel sürtünme, cidarlarla sürtünme gibi kavramların daha iyi anlaşılması, silo tasarımında da önemli gelişmelerin önünü açmıştır. Bu ilerlemeler, ancak 1985 yılında Janssen'in çalışmalarıyla ortaya atılan silolarda basınçları tahmin etmeye ilişkin silo tasarımı teorisi ile genel kabul görmüştür.

Yüzyılın üzerinde bir pratik tecrübenin sonucunda ortaya çıkan bu teori, silo tasarımı için çok basitleştirilmiş bir yaklaşımdır ve bu nedenle yıllar boyunca düzeltmelere uğramıştır. Özgün teori, stok malzemesi ve silo cidarı arasındaki sürtünmeyi tanımlamakta, düşey basınçların ve böylece yatay basınçların elde edilebildiği iki boyutlu basit bir yöntem önermektedir. Taneli malzemelerde gerilmelerin tespit edilmesi ise Rankine tarafından gerçekleştirilen basitleştirmelerin kullanılması ile başlamıştır. Gerçekte Janssen teorisi (1895) o güne kadar silo davranışı için öngörülen davranış kabullerinin düşünülenden çok farklı olduğunu göstermektedir. Bu nedenle kısa zamanda bütün siloların tasarımı bu çalışmadan esinlenerek gerçekleştirilmeye başlanmış ve bu çalışma halen birçok yönteme de temel teşkil etmektedir.

20. yüzyılın başlarında, dünyanın her yerindeki silolar modern ve güvenilir bir yapı malzemesi olan betonarmeden yapılmaya başlanmıştır. Tuğla, çelik ve ahşap gibi diğer malzemelerin de ancak su depolarındaki inşa teknikleri kopyalanarak kullanıldığı daha önce ifade edilmişti. Ancak, birkaç büyük kaza Janssen teorisinin son şeklinin düzenlenmesi fikrini hızlandırmış, 1940'larda ise küçük silo modelleriyle deneyler yapılmaya başlanmıştır. Bu konudaki öncüler zemin mekaniği konusunda çalışan Reimbert kardeşlerdir. Bu mühendisler, Janssen teorisinin eksikliklerini vurgulamış ve benzer temellere dayalı bir bağıntı önermişlerdir. İki bağıntı basınçların en büyük ve en küçük olduğu yerler bakımından birbirinden biraz farklılık göstermesine rağmen sonuç bağıntılar oldukça benzerdir. Bununla beraber, bu yazarlar ilk kez yatay basınçların boşaltma esnasında arttığını göstermiştir. Bu olayı açıklayamamış olmalarına karşın, bunun birçok silo kazasının sebebi olabileceğini ileri sürmüşlerdir. O zamandan itibaren siloların boşaltılması uluslararası silo araştırmalarında önemli bir konu olmuştur.

Reimbert kardeşlerin bağıntısı 1970'lere kadar Janssen'in bağıntısının yanında var olmuştur. Bu sırada Fransa, Almanya ve Rusya'da hem model hem de gerçek silolar üzerinde çeşitli deneyler yapılmıştır. Bu deneylerin temel amacı, boşaltma durumu için güvenlik katsayısı değerlerini belirlemektir. Bununla beraber, Jenike ve Johanson (1968), ABD'de ilk kez boşaltma sırasındaki aşırı basınçlar için bir teori önermiştir. Bu teoriye göre, stok malzemesi hareket bölgesinde Rankine dengesindeki değişiklikten ve statik ile dinamik durumdaki stok malzemesi arasındaki geçiş bölgesindeki aşırı basınç dalgasından kaynaklı basınç artmaktadır. Geniş ölçüde kabul görmesine rağmen Jenike ve Johanson teorisinin (1968) karmaşıklığından dolayı silo tasarımında pratik etkisi az olmuştur.

Jenike ve Johanson (1968), stok malzemesinin boşaltma sırasında değişik şekillerde hareket edebileceğini ve değişik akış şekilleri oluşabileceğini açıklamıştır. Bu özellikler de silo kullanımı konusunda büyük önem verilen bir araştırma konusu haline gelmiştir.

Birkaç yıl sonra Reimbert kardeşler ve Reimbert bağıntısının matematiksel zayıflığını gösteren Yunan araştırmacı Briassoulis (1991) arasında bilimsel bir tartışma meydana gelmiştir. Bunun sonucu olarak Reimbert teorisinin kullanımından vazgeçilmeye başlanmış ve mühendisler Janssen bağıntısının kullanımına geri dönmüştür.

1970'li yıllarda sonlu elemanlar yöntemi silo araştırmalarında ilk kez Kanadalı araştırmacılar Jofriet vd. (1977) tarafından kullanılmıştır. Bu çalışma alanı, bilgisayar teknolojilerindeki gelişmeler ve ayrıntılı ticari sonlu eleman programlarının ortaya çıkması ile hızla genişlemiştir. Bu süreç, araştırmacıların genellikle çok basit olan klasik yöntemlere ilişkin temel hipotezlerin dışına çıkmalarına izin vermiştir. Doğal olarak bu yöntemlerin kullanımı, silo cidarı ile stok malzemesi arasında oluşan sürtünme biçiminin modellenmesinin gelişmesine paralel olarak, stok malzemesi davranışının modellenmesine de izin verecektir. Bu, silolanan malzemenin fiziksel özelliklerinin araştırılması alanını da genişletmiştir. ABD'de Bucklin vd. (1996), Thompson ve Ross (1983) ve Puri (2002) tarafından gerçekleştirilen çalışmalar bu konuda belirleyici olmuştur.

Sonlu elemanlar yöntemi, stok malzemesinden kaynaklanan yüklerin belirlenmesinin yanı sıra silo cidarlarının yapısal davranışının incelenmesine de izin vermektedir. Diğer birçok silo problemi konusunda çalışmalarına rağmen Rotter vd.'nin (1998) bu alandaki çalışması öne çıkmıştır. Böylece üç boyutlu, elastik, elastoplastik gibi stok malzemesinin davranış modellerinin kullanımına izin veren çok ayrıntılı tasarım işlemleri ortaya çıkmıştır. Bu modeller geçici bir etki olarak boşaltmayı da dikkate almaktadır. Eibl ve arkadaşları (1982) ve Rombach (1995) gibi onun çalışmasını takip eden diğer araştırmacılar bu konuda çalışmalar gerçekleştirmişlerdir.

1970'ler ve 1980'ler boyunca küçük ölçekli silo modellerinin kullanımı farklı etkilerin araştırılması için kullanılmıştır. Nielsen'in (1977) makalesi gibi, bu konuda çalışılmış ilginç makaleler vardır. 1980'lerde de Askegaard ve Brown, 1995, ve daha sonra Munch-Andersen ve Nielsen, 1986; Enstad, 1983; Rotter vd., 1989; Kmita, 1991 ve diğer araştırmacılar tarafından gerçek silolar üzerinde önemli deneyler gerçekleştirilmiştir.

1990'ların başında siloların boşaltılması konusunda yeni bir bilgi ortaya çıkmıştır. Zhang (1993), Smith ve Lohnes (1983)'in fikirlerini temel alarak, aşırı basınçların oluşmasında düşey doğrultudaki yerdeğiştirmede, stok malzemesinin genişlemesinin



anahtar etken olarak dikkate alınmasını önererek bu konuda bir teori geliştirmiştir. 1990'lar boyunca ayırık eleman yönteminin silo araştırmalarında kullanılması üzerinde durulmuştur. Jofriet (1997) ve Rotter (1989)'ın ekipleri bu alanın öncüleri olmuştur. Bu yöntemle stok malzemesi, doldurma ve boşaltma çözümlerinin birçok basitleştirme yapılmadan gerçekleştirilmesine imkân veren, kendine özgü hareket kabiliyetine sahip bir eleman haline gelmiştir.

Silolarda doldurma ve boşaltmadan kaynaklanan dinamik yüklerin yanı sıra rüzgâr ve deprem yükleri gibi dinamik yükler konusunda da çeşitli çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Silo gibi silindirik yapılarıdaki rüzgâr basıncında etkili olan birçok faktörün kapsamlı irdelemesi Esslinger (1971), Kwok (1985) ve Macdonald vd. (1988) tarafından gerçekleştirilmiştir. Johns (1983) dairesel kabukların kararlı rüzgar yükü altında statik göçmesi üzerine bir çalışma geliştirmiştir. Greiner and Derler (1995) ve Pircher (2004a,b) gibi araştırmacılar rüzgâr yüklemesi durumunda siloların burkulmasında farklı kusur şekillerinin etkisini incelemişlerdir. Pircher vd. (2001) rüzgâr yüklemesi ve taban oturması durumunda elastik olarak mesnetlenmiş silindirik kabuklarıdaki gerilmeleri araştırmışlardır. Briassoulis ve Pecknold D.A. (1986), Schneider ve Zahlten (2004) çelik ve Patra vd. (2010) ise betonarme ayaklı silonun rüzgar yüklerine karşı davranışını incelemişlerdir.

Silolardaki ısıl etkiler de çeşitli çalışmalara konu olmuştur. Bunlardan başlıcaları Blight (1992), Li vd. (1991), Zhang vd. (1993), Pruisel (1998), Lapko ve Prusiel (2001), Lapko vd. (2003) ve Mora' n vd. (2006) şeklinde sıralanabilmektedir.

Son zamanlarda önceden dikkate alınmayan boşaltma sırasında oluşan titreşimler ve gürültüden kaynaklanan sorunlar gibi diğer konular üzerinde çalışılmaktadır. Tejchman (1993) ve Wensrich (2002)'ın bu konudaki çalışmaları öne çıkmaktadır. Bir diğer ilginç fakat çok az dikkate alınan konu, tozdan kaynaklı patlamalardır. Silo kazalarının büyük bir bölümü toz patlamalarından kaynaklanmaktadır. Eibl vd. (1982)'nin bu konudaki çalışmaları, bu alandaki önemli çalışmalardandır.

Ayrıca siloların ince silindirik kabuk cidarlarında en sık rastlanan hasar biçimlerinden biri burkulmadır. Bu nedenle bu konuyla ilgili de literatürde pek çok çalışma mevcuttur. Bunlardan başlıcaları Pircher ve Bridge (2001), Khelil (2002), Croll (2006), Sadowski ve Rotter (2011) olarak sıralanabilmektedir.

### 1.6.1. Silolarda Doldurma ve Boşaltma Durumlarıyla İlgili Bazı Çalışmalar

Silolar konusunda daha önce gerçekleştirilen bazı çalışmalar genel başlığında konuyla ilgili çalışmaların tarihsel gelişimi özetlenmeye çalışılmıştır. Bunu takip eden başlıklarda ise silolar ile ilgili doldurma-boşaltma ve deprem davranışları hakkında gerçekleştirilmiş bazı çalışmalar ayrı ayrı irdelenmektedir.

Tanaka vd. (1989) kuru kil yatağına inşa edilen bir beton tahıl silosunun ilk doldurmada çökmesi üzerine zemin incelemesi gerçekleştirerek çökmeye neden olan etkenler, yerinde ve laboratuvarında gerçekleştirdikleri deneyler ve zemin yatağının dayanım parametrelerini dikkate alan taşıma gücü çözümlmelerine ilişkin bilgiler vermişlerdir.

Ooi ve Rotter (1990); başlangıç doldurma durumu için cidar sürtünme karakteristiklerini içeren silo cidarlarında taneli malzemeden kaynaklanan basınçları modelleyebilen basit sonlu eleman teknikleri sunmuşlardır. Başlangıç doldurma durumu gibi bazı cidar basıncı tahminlerinde, malzemenin doğrusal olmayan karakteristiklerinin gerekli olmadığını göstermişlerdir. Bodur dairesel silolarda ve esnek cidarlı silolarda basınç dağılımlarını incelenmiş ve yapılan sonlu elemanlar çözümlmesi, derin-rijit cidarlı silolarda başlangıç doldurması basınçları için mevcut olan yöntemlerle karşılaştırılmıştır. Bu basınçlar üzerinde cidar esnekliğinin etkisini göstermişlerdir.

Teng ve Rotter (1991); stok malzemesi basınç dağılımından dolayı, kaynaklı çelik siloların çökme davranışını Walker tarafından 1966 yılında geliştirilen teori ile sunmuşlardır. Muhtemel göçme modlarını belirleyerek, kaynaklı tiremilerde ve geçiş bağlantılarında çökme için farklı basınç dağılımlarının etkisini incelemiş ve mevcut ölçütlerle karşılaştırmıştır. Çoğu pratik kaynaklı çelik silo tiremeleri için, tireminin göçmesinin, tiremidaki basınç dağılımından bağımsız olduğu ve doldurma basınçlarının akış basınçlarından çok daha kritik olduğunu belirtmişlerdir.

Carson ve Jenky (1993); başarılı buldukları silo tasarım yöntemini tanımlayarak, özellikle çeşitli boşaltma durumları ve akış şekilleri için silo yük hesaplamaları, kuvvet bileşkeleri ve tasarım gereksinimlerini açıklamışlardır.

Tejchman ve Gudehus (1993); silonun boşaltılması sırasında, stok malzemesinde dinamik etkilerin, yani titreşimlerin ve darbelerin meydana geldiğini belirterek, bu dinamik olayları araştırmak için narin silindir bir laboratuvar modeli ve gerçek bir silo üzerinde deneyler gerçekleştirmişlerdir. Silo titreşimleri kuru kum ile gözlenmiş ve silo darbeleri kohezyon özelliği az olan kum ile temsil edilmiştir. Tam ölçek deneyler Polonya'da kolza

tohumuyla doldurulmuş bir siloda gerçekleştirilmiştir. Kuru kumla yapılan deneyler atalet kuvvetleri dikkate alınarak ve elastoplastik bir yaklaşımla sonlu elemanlar yöntemi yardımıyla modellenmiştir. Hesaplamalar hız kontrollü kütle akışı ve serbest akış ile gerçekleştirilmiştir. Sayısal hesaplamalar ve deneysel bulgular arasındaki karşılaştırmanın uyum gösterdiği belirtilmiştir.

Lapko (1996); silo-stok malzemesi etkileşimini dikkate alarak silindirik silo cidar kuvvetlerini ve eğilme momentlerini hesaplamak için bir yaklaşım sunmuştur. Hücre çevresi boyunca statik düzgün yayılı olmayan tahıl basıncına maruz gerçek ölçekli betonarme bir silo örneği seçilerek, analitik ve sayısal çözüm gerçekleştirilmiştir. Silo cidarı tasarımında tahıl esnekliğinin içsel kuvvetlerin ve eğilme momentlerinin yeniden dağılımını etkilediğini belirterek, meridyen etkiler için silo-stok malzemesi etkileşiminin belirgin biçimde elverişsiz olduğunu ve bölgesel düzgün yayılı olmayan tahıl basınçlarına maruz silo hücrelerin yapısal çözümlemesinde dikkate alınması gerektiğini ifade etmişlerdir.

Lu vd. (1997); siloların boşaltılması sırasında taneli malzeme için gerilme ve hız alanını belirlemek amacıyla sonlu elemanlar ve ayrık elemanlar yöntemine dayanan hibrit bir model geliştirmişlerdir. Sonlu elemanlar modeli, taneli malzemeyi sürekli (continuum) olarak modellemede kullanılmıştır. Tireminin alt kısımlarındaki boşaltma ağzına yakın yerler gibi taneli malzemenin daha fazla sürekli davranmadığı ve düşey cidar ile tiremi cidarı arakesiti gibi büyük kayma şekil değiştirmelerinin olduğu yerlerde, ayrık elemanlar yönteminin kullanımı tercih edilmiştir.

Negi vd. (1997); taneli malzeme silolarındaki akışı modellemek için sonlu elemanlar ve ayrık elemanlar yöntemlerine dayanan hibrit bir model kullanmışlardır. Soya fasulyesinin, boy-en oranı 3 olan paralel cidarlı bir silodan yerçekimi altındaki akışını temsil eden laboratuvar deneyleri, değişik boşaltma ağız genişlikleri için gerçekleştirilmiştir. En büyük cidar basınçlarının, tiremin üst kısmında oluştuğunu gözlemlemişlerdir. Dinamik basıncın statik basınca oranının, geçiş seviyesinde boşaltma ağız genişliğine bağlı olarak 2,5 ila 3,6 arasında değiştiğini göstermişlerdir.

Jofriet vd. (1997); silolardaki taneli malzeme akışı için gerçekleştirdikleri hibrit sayısal model ile simetrik ve asimetric dikdörtgen hücreler üzerinde parametrik bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Simetrik silolarda cidar sürtünmesi, tiremi eğimi ve boşaltma ağızı, asimetric silolarda ise sadece cidar sürtünmesi, değişken alınarak çeşitli çözümler gerçekleştirmişlerdir.

Ooi ve She (1997); deneysel gözlemler ile betonarme silo cidarlarında eğilmeye, çelik silolarda yüksek membran gerilmelerine neden olan, hem meridyen, hem de çevresel gerilmelerde Janssen değerlerine göre farklar bulunduğunu belirtmişlerdir. Silo cidarlarındaki geometrik kusurların varlığının, bu basınç farklılıklarının muhtemel nedeni olduğunu ileri sürerek, silindirik bir silonun cidarlarına etkiyen basınçlara, bölgesel aksenal simetrik cidar kusurlarının etkileri için bir sonlu elemanlar çalışması sunmuşlardır. Kusur yüksekliği ve kusur geometrisinin cidar basınçlarına etkisini de incelemişlerdir.

Karlsson vd. (1998); silolardaki kohezyonsuz taneli malzemenin akışı için bir sonlu elemanlar modeli üretmişlerdir. Kullanılan kurucu model Euler biçiminde bir sıvı modelidir. Çözüm kararlı duruma yaklaştığında, geliştirilen akış şekli kütle ya da huni akışı durumunu temsil etmektedir. Gerilme alanı için sayısal örnekler verilmiş ve gelişmiş silo geometrilerinde akış biçimleri çalışılmıştır.

Rotter vd. (1998); silolardaki taneli malzemenin davranışı için, ayrık ve sonlu eleman hesaplamalarının tahmin kapasitesi konusunda bir çalışma sunmuşlardır. Basit silo uygulamaları için, farklı araştırma gruplarının bilgisayar modelleri kullanılarak, genel kabul görmüş teorik bir çözüm elde etmek amaçlanmıştır. Burada bir silonun doldurma, düz tabanlı ve konik tiremili siloların boşaltma durumu olmak üzere üç tip problem çalışılmıştır. Her iki sayısal yöntemin de bu zor uygulamalar için önemli eksiklikler gösterdiğini ve farklı araştırma gruplarının oldukça farklı tahminler yaptıklarını belirtmişlerdir.

Briassoulis (2000); saklama ve boşaltma durumlarındaki gerçek asimetrik basınç dağılımları altında silindirik silo kabuklarının davranışı ve bunlardaki gerilme durumu gelişiminin çözümlemesini gerçekleştirmiştir. Stok malzemesinden kaynaklanan gerçek basınçların asimetrik özelliklerinin bu tip yapıların tasarımında göz ardı edilmemesi gerektiğini vurgulamıştır.

Masson ve Martinez (2000); tane mekanik parametrelerinin çeşitli değerleriyle düzlem dikdörtgen bir silonun doldurma ve boşaltma durumunu bir grup ayrık eleman modeli ile çözümleyerek, cidar basınçlarını analitik ve sonlu elemanlar yöntemleri ile karşılaştırmışlardır. Sürtünme ve temas rijitliği parametrelerinin akış kinematığında ve doldurma-boşaltma işlemlerindeki gerilme alanında önemli bir rolü olduğunu ifade etmişlerdir.

Sanad vd. (2000); uluslararası ortak bir çalışmada bir silonun doldurulması için tanımlanan teorik problemin dünyanın çeşitli yerlerinden katılan 25 araştırma grubu

tarafından çözümlendiğini ifade ederek, silonun boşaltılması konusundaki ayırık eleman ve sonlu eleman tahminlerini araştıran ortak çalışmanın ikinci kısmı olarak sunmuşlardır. Düz tabanlı ve dik tremi tabanlı bir silodaki merkezi boşaltma durumu incelenmiş, sonlu eleman ve ayırık eleman çözümlenmeleri için makul ve pratikte tam ölçek silolara uygun yönetmelik düzenlenirken büyük önem gösterildiği belirtilmiştir. Avrupa ve Amerika'daki 12 araştırma grubundan toplamda 21 hesaplama alındığı ve sunulan her hesaplamanın benzer tarzda yapıldığı, böylece farklı tahminler arasında etkili bir karşılaştırma yapılabildiği ifade edilmiştir.

Ayuga vd. (2001); eksenel simetrik siloların çözümlemesinde, tahılın ve yapının davranışını aynı anda dikkate alan, statik ve dinamik durumların her ikisi için de farklı sonlu eleman modelleri önermişlerdir. Her iki durumda da değişik parametrelerin etkisi tartışılmış ve boşaltma basınçlarının belirlenmesi için yeni bir yöntem önerilmiştir.

Ayuga vd. (2001); dışmerkezli boşaltma ağızlı, tahıl silolarında boşaltma ve statik durum için basınç dağılımlarını sonlu elemanlar yöntemine dayanan ANSYS programını kullanarak hesaplamışlardır. Silonun boşaltılması ve boşaltma ağzının dışmerkezliğinin etkisini çözümlmek için yöntemler önermişlerdir. Boşaltma modeli hem genleşme ve hem de boşaltma tipinin etkilerini dikkate almaktadır. Boşaltma ağzının dışmerkezliğini çözümlmek için üç boyutlu modeller gerçekleştirilmiş ve bulgular önceki çalışma verileri ve yönetmeliklerle karşılaştırılmıştır.

Chen vd. (2001); birebir ölçek bir silo deneyinde demir cevheri tanelerinin doldurma durumunda cidarlara uyguladığı basınçlar için ABAQUS sonlu elemanlar programı ile doğrusal olmayan bir çözümlme gerçekleştirmişlerdir. Silo cidarının dışındaki halka rijitleştiricinin eksenel simetrik küçük geometrik kusurlara neden olduğu gösterilmiş ve bunların basınç tahminleri üzerindeki etkisi, seçilen silolanan malzeme modeline duyarlılığı ile birlikte araştırılmıştır.

Guines vd. (2001); doğrusal olmayan davranışı dikkat alan sonlu elemanlar yöntemini kullanarak esnek cidarlı kare çelik bir silonun doldurma ve boşaltma aşamaları için üç boyutlu bir model sunmuşlardır. Kare ya da dikdörtgen kesitli silolarda, düşey ya da yatay rijitleştiricilerden kaynaklanan cidardaki rijitlik değişiminin önceki eksenel simetrik iki boyutlu modellerde dikkate alınmayan düzgün yayılı olmayan cidar şekildeğiştirmeleri oluşturduğunu ifade etmişlerdir. Silolanan malzemenin davranışı elasto-plastik alınmış, arayüzey elemanlarında, cidar ve stok malzemesi arasındaki etkileşim için Mohr-Coulomb ölçütü kullanılmış ve silo esnekliği kiriş ve kabuk elemanlarla modellenmiştir.

Çözümlemelerde en büyük basıncın yerinin belirlenmesinin, cidar şekildeğiştirmesine çok duyarlı olduğu ve deneysel ölçümler ile uygun olduğu gözlemlenmiştir.

Keiter ve Rombach (2001); taneli akışın sonlu elemanlar modellemesiyle ilgili sayısal yaklaşımlar sunarak, boşaltma sırasında kütle akışlı bir silonun düşey ve eğimli kısmının birleşiminde oluşan gerilme piki (switch) olayını incelemiştir. Siloların şeklinin değiştiği yerlerde cidar basıncı piklerine sayısal köşe tekillikleri neden olabileceğinden, siloların sonlu elemanlar modelinin ve basitleştirilmiş sistemlerin büyük bir dikkatle ele alınması gerektiğini kanıtlamışlardır.

Gillie vd. (2002); küçük siloların genellikle kabukların kenarlarına bağlı yerel dirsekli kolonlar üzerine mesnetlendiğini, kırılmanın uygulanan yüklerden oluşan membran ve eğilme gerilmeleri birleşimini kapsayan gerilme durumu altında burkulma ve akma arasındaki etkileşimle meydana geldiğini ifade etmişlerdir. Gerçekleştirdikleri sonlu elemanlar çözümleri ile malzemesel ve geometrik doğrusal olmamanın ayrı mesnetlenmiş siloların davranışında önemli rol oynadığını göstererek, dirsek dışmerkezliği derecesinin kırılma mekanizması ve ilgili silo dayanımının hesaplanmasında önemli bir etken olduğunu da belirlemişlerdir.

Martinez vd. (2002); silindirik çelik siloların boşaltma durumunun sonlu elemanlar yöntemi ile dinamik sürekli modellenmesi problemlerinde ortaya çıkan büyük yerdeğiştirmeler ve ilgili ağ bozulmalarını yaklaşık olarak dikkate almak için kullanılan yeniden ağ oluşturma algoritmalarını tartışarak, taneli malzeme-silo cidarı etkileşimini incelemiştir. Silo titreşim (quaking) olayından kaynaklanan etkileri dikkate alan bir dinamik yapısal çözümleme ile aşırı basınç faktörünü hesaplayarak elde edilen bulguları Avrupa (Eurocode ENV 1991-4), Fransız (AFNOR P22 630), Alman (DIN 1055) ve Amerikan (ACI 313-97, R313-97) yönetmelikleriyle karşılaştırmışlardır.

Wensrich (2002); yüksek silolardaki titreşim davranışını deneysel olarak incelemiştir. Stok malzemesi ivmesi silonun çeşitli derinliklerinde ölçülerek sadece titreşimlerin genliğinin değişimi değil, dalgaların yayılması da gözlemlenmiştir. Titreşimin genliğinin siloda yükseklikle eksponansiyel olarak büyüdüğünün ifade etmiştir.

Althapp vd. (2003); silolarda boşaltma durumu için taneli malzeme ve elastik silo cidarları arasındaki etkileşimi kapsayan sayısal model oluşturmuşlardır. Boşaltma işlemi doğrusal olmayan diferansiyel bağıntılar sistemi ile tanımlanarak Euler yaklaşımına dayanan sonlu elemanlar yöntemiyle şekil değiştirme oranı, hız alanı, boşluk sayısı ve

gerilme dağılımını sonlu eleman ağı için yeniden ağ oluşturmaya gerek kalmadan hesaplamışlardır.

Goodey vd. (2003); esnek cidarlara sahip çelik kare bir silonun doldurmada basınç dağılımı için ABAQUS programı yardımıyla sonlu eleman modeli geliştirmişlerdir. Cidarların esnekliğinin basınçlar üzerinde önemli bir etkisi olduğunu belirterek taneli malzemedeki gerilme durumu ve cidarlara uygulanan basınçları incelemişlerdir. Silo cidarlarının ortasına nazaran, köşelerinde büyük basınçlar oluştuğunu gözlemleyerek doldurma sonrası herhangi bir derinlikte yatay basınç dağılımının düzgün yayılı olmadığını ifade etmişlerdir. Esnek cidarlı dikdörtgen silolardaki cidar basınçlarının taneli malzemenin rijitliğinden oldukça etkilendiğini de belirtmişlerdir.

Guaita vd. (2003); dışmerkezi tiremeli ve rijit cidarlı silindirik silolarda boşaltma esnasındaki cidar basınçlarını hesaplamak amacıyla tahıl için elasto-plastik Drucker-Prager kriterini kullanarak ANSYS programı yardımıyla sayısal bir model uygulamışlardır. Bu modelde, dışmerkezliğe bağlı olarak plastik alanların dağılımını gözlemlemişlerdir. Statik basınçlar üzerinde değişken tiremi dışmerkezliği ile içsel sürtünme açısının etkisini inceleyerek elde edilen bulguları elastik davranışla karşılaştırmışlardır.

Wensrich (2003); kütle akışlı yüksek silolarda titreşimin endüstride karşılaşılan önemli bir problem olduğuna dayanarak, bu problemi bir boyutlu basit bir sistem olarak ele almıştır. Yüksek silolardaki darbeyi, modelin bir boyutlu versiyonuna göre, Janssen bağıntısının dinamik uyarlamasının kullanılmasıyla incelemiştir. Bu modeli her titreşim döngüsünün başlangıcında varolan seyreltme dalgalarının hareketini incelemek için kullanmıştır. Silo yüksekliği ile titreşimlerin genliğinin eksponansiyel büyümesinin deneysel gözlemlerle aynı olduğunu ve modelden titreşim sürecindeki cidar sürtünmesinin rolünün de anlaşılabilirliğini ifade etmiştir.

Wojcik vd. (2003); merkezi ve dışmerkez tiremeye sahip silindirik çelik silolarda boşaltma durumundaki cidar basınçları ve gerilmelerini taneli malzeme için Drucker-Prager kriterini kullanarak ABAQUS programı yardımıyla sonlu eleman modelleri oluşturarak incelemişlerdir. Dışmerkezi tiremide güçlü eğilme etkileri ortaya çıktığını ve bunların tiremi-silindir gövde birleşimindeki rijitliği etkilediğini belirtmişlerdir.

Goda ve Ebert (2005); üç boyutlu taneli malzeme davranışını dikkate alarak doldurma işleminin sonunda (statik durum) ve boşaltma işleminde akışın başladığı anda (dinamik durum) oluşan normal cidar kuvveti ve basınç dağılımlarını ayrık eleman

yöntemini kullanarak incelemişlerdir. Ayrık eleman yapısal çözümlemesi için bir tiremi, bir tiremi tabanlı silo bir de düztabanlı silo seçmişlerdir.

Rombach vd. (2005); çeşitli sonlu elemanlar yazılım paketleri arasında büyük farklılıklar gözlemlenebildiğini belirterek, genel amaçlı bir yazılım olan ANSYS ve özel doğrusal olmayan dinamik bir program olan SILO gibi iki farklı sonlu elemanlar programı ile çelik düz tabanlı kare silolarda taneli malzeme akışını modelleyerek karşılaştırmışlardır. Doldurma ve boşaltma için taneli malzemedeki gerilmeleri, boşaltma ağzının dışmerkezliğini içeren, 2 ve 3 boyutlu modeller ile hesaplamışlardır.

Vidal vd. (2005); düz tabanlı ve tiremili silindirik narin silolarda dinamik boşaltma basınçları için Drucker-Prager plastisite modelini kullanarak dinamik bir model oluşturmuşlardır. Model karma akışlı ve kütle akışlı rijit cidarlı silolardaki boşaltmayı cidar sürtünmesi ve boşaltma ağzı çapı etkilerini de dikkate alarak incelemek için kullanılmıştır. Boşaltma için aşırı basınç katsayılarını hesaplamış ve düztabanlı silolarda aşırı basınçların silonun alt kısımlarında oluştuğunu ve elde edilen aşırı basınç değerlerinin kütle akışlı tiremili silolardakinden daha küçük olduğunu belirtmişlerdir.

Abdel-Fattah vd. (2006a), suya doygun taneli malzeme içeren zemine oturan düz tabanlı beton siloların doldurma sürecini modellemek için PLAXIS programı yardımıyla sonlu elemanlar çözümü gerçekleştirmişlerdir. Taneli malzeme ve siloyu temsil etmek için elasto-plastik eksenel simetrik bir sonlu eleman modeli ve iki malzeme arasındaki etkileşim için rölatif harekete izin veren arayüzey elemanları kullanmışlardır. Doldurma sürecini hem drenajlı hem de drenajsız durumları temsil edebilen çok aşamalı sayısal bir teknik yoluyla modellemişlerdir. Silolanan malzemenin drenaj özelliklerine dayanarak doldurma süreci etkisinin zamana dayalı olabileceğini, doldurma sürecinden kaynaklanan aşırı boşluk suyu basıncının cidarda çevresel gerilmelerde önemli artışlara sebep olabileceğini ve tahmin edilen iç kuvvetlerin temel rijitliğinden etkilenebileceğini, fakat cidarın en üstündeki sınır koşullarından etkilenmeyeceğini belirtmişlerdir.

Abdel-Fattah vd. (2006b), suya doygun taneli malzeme içeren ayaklı beton siloların doldurma sürecini modellemek için PLAXIS programı yardımıyla sonlu elemanlar çözümü gerçekleştirmişlerdir. Aynı silo elemanının tasarım kritik kesitlerinin, farklı katı yığımlı durumlarına (drenajsız ya da drenajlı) karşılık gelebildiğini ve pratik olarak halka giriş rijitliğinin sadece cidar-tiremi kesişimindeki silo elemanlarındaki çember basınçlarını etkilediğini belirtmişlerdir.



Goodey vd. (2006); esnek cidarlı çelik kare siloların tasarım kurallarının geliştirilmesi için yeni bilgiler elde etmek amacıyla, daha önce doğruladıkları sonlu elemanlar modeli ile parametrik çalışmalar gerçekleştirmişlerdir. Kum, çakıl ve buğday gibi üç farklı malzeme için farklı en-boy oranına sahip silolar için doldurma sonrası cidar basınçlarını incelemişlerdir.

Juan vd. (2006); dairesel düztabanlı metal silolarda statik durumda taneli malzemeden kaynaklanan gerilme durumu için ANSYS programı yardımıyla sonlu elemanlar modelleri oluşturmuşlardır. Taneli malzeme davranışı için elastik, yapı davranışı için, çelik gibi metalik malzemeler için tipik olan, klasik elasto-plastik davranış seçilmiştir. Cidarın yüksekliği ve kalınlığı olmak üzere iki geometrik parametreyi incelemişlerdir. Sayısal yöntemden elde edilen bulguları (çember, meridyenel ya da düşey, normal ve kayma gerilmeleri) ENV 1993-1-6 yönetmeliği ile karşılaştırmışlardır.

Vidal vd. (2006); silindirik rijit cidarlı kütle akışlı silolarda stok malzemesinin davranışı için Drucker-Prager plastisite modelini dikkate alarak, silonun boşaltılmasında tiremi dışmerkezliliğinin etkisini incelemek amacıyla ANSYS sonlu elemanlar programı ile 3 boyutlu bir model oluşturmuşlardır.

Doğangün vd. (2008); taneli malzemeleri içeren silo tipi stok yapılarına ilişkin genel bir yaklaşımın temel ilkeleri ve bu yaklaşımın Türkiye Silo Yönetmeliğiyle ilgisini inceleyerek, bu yöntemin uygulanmasını kolaylaştıracak birtakım abak ve çizelgeler vermişlerdir.

Vidal vd. (2008); dışmerkezi tiremiye sahip silindirik çelik siloların doldurma durumunu farklı sınır koşulları için ANSYS sonlu elemanlar programını kullanarak üç boyutlu modeller yardımıyla incelemişlerdir. Tüm sınır koşulları için ve esnek cidar için elde edilen basınçları, rijit cidar basınçları ile karşılaştırmışlardır. Silo cidarı ve takviye elemanlarındaki membran gerilmeleri, meridyen ve çevresel eğilme momentlerini değerlendirmişlerdir.

Jianbao vd. (2010); geniş çaplı silolarda ADINA programı yardımıyla üç boyutlu sonlu elemanlar yöntemi ile statik ve doldurma sonrasındaki cidar basınçlarını belirlemiş ve sözkonusu basınçlara taneli malzemenin mekanik özelliklerinin etkisini incelemişlerdir. Silo ölçeğinin cidar basınçlarına önemli etkisi olduğunu göstermiş, geniş çaplı silolarda doldurma sonrasında tabana yakın yerdeki cidar basınçlarının statik cidar basınçlarından oldukça büyük olduğunu ifade etmişlerdir.

### 1.6.2. Siloların Deprem Davranışı ile İlgili Bazı Çalışmalar

Shimamoto vd. (1982); kömür silolarının sismik tepkisini değerlendirmek için sarsma tablasında küçük ölçekli PVC ve çelik silo modelleri üzerinde zorlanmış titreşim deneyleri gerçekleştirmiş ve bu modellerin dinamik davranışını bilgisayar programı yardımıyla modelleyerek deneysel ve sayısal modelden elde edilen bulgular arasında uyum olduğunu belirtmişlerdir. Birinci mod şeklinde silo ve stok malzemesinin titreştiğini fakat ikinci modda sadece stok malzemesinin titreştiğini ifade etmişlerdir.

Suzuki vd. (1983); betonarme silo grubunun birçok konsol tipi silindirik kabuk ve bu kabuklar arasındaki birleştirme duvarlarından oluştuğunu dikkate almışlardır. Bu sistemin deprem yükleri altında statik ve dinamik davranışlarını “rijit çubuklu kiriş modeli” olarak adlandırılan basit mekanik bir model üzerinde elastik bölgede sayısal olarak çözümlenmişlerdir. Hücre sayısı, bağlantı duvarının rijitliği ve yükseklik/çap oranının davranışa etkisini incelemişlerdir. Bu basit mekanik modeli silo grubunun tüm mekanik özelliklerini kavramak amacıyla geliştirmişlerdir. Rijit çubuklar hücre ile bağlantı duvarını birleştirmek amacıyla kullanılmıştır. Her kiriş elemanın eğilme ve kesme şekil değiştirmelerine izin verdiğini ancak hücrenin oval şekil değiştirmesini temsil etmediğini, bununla beraber bu modelin az serbestlik dereceli silo grubunun genel davranışlarını kavramakta kullanılabileceğini belirtmişlerdir.

Harris ve von Nad (1985); siloların sismik tasarımında kullanılmak üzere stok malzemesinin etkili ağırlığını deneysel olarak belirlemişlerdir. Bunun için kum ya da buğdayla dolu ya da boş iki rijit çelik silo üzerinde sarsma deneyleri gerçekleştirmişlerdir. İtici kuvvet ve yerdeğiştirmeleri kaydeden grafikleri, yapısal tasarımda kullanılan yatay sismik kuvveti hesaplarken dikkate alınması gereken stok malzemesi toplam ağırlık yüzdesini analitik olarak belirlemede veri olarak kullanmışlardır. Deneysel verilerden hesapladıkları etkili ağırlık katsayısının ACI 313-77 yönetmeliğinde önerilen %80 değerini doğruladığını belirtmişlerdir.

Nikolayenko vd. (1985); dinamik etki altındaki betonarme silindirik siloların üç boyutlu salınımlarını incelemişlerdir. Bunun için tekil ve iki hücreli silo modelleri seçerek bu yapılar için statik ve dinamik tasarım modelleri önermişlerdir. Yapının dinamik modeli elastik ve elastik olmayan gergilere sahip rijit kütleler sistemiyle temsil edilmiştir. Üç boyutlu salınımların doğrusal çözümlenmesi kapalı biçimde verilmiştir. Statik tasarım modelleri detaylı olup, elastisite teorisinin üç boyutlu problemini sonlu elemanlar yöntemi

ile çözümlenmişlerdir. Sonuç olarak yapının dinamik karakteristiklerini elde ederek serbest ve zorlanmış salınımlara ilişkin örnek bir problem çözmüşlerdir. Elemanlardaki iç kuvvetleri, atalet kuvvetlerine bağlı olarak tanımlamışlardır. Doğrusal olmayan üç boyutlu salınımları istatistik doğrusallaştırma yöntemi ile incelemişlerdir. Tasarım modellerinin hareket modu üzerinde doğrusal olmamanın etkisini dikkate almış, bir esas salınım doğrultusundan diğerine enerji aktarma mekanizmasını da açıklamışlardır.

Sasaki vd. (1986); beton fiçı (stave) siloların silindirik olarak birleştirilen prefabrik beton elemanların dış ard-gerilmeli çelik çemberlerle bir arada tutulan süreksiz cidarlı yapılar olduğunu belirterek, bu siloların dinamik tepkilerini belirlemek için, 1/6 ölçekli bir silo modeli üzerinde bir dizi sarsma tablası deneyi yapmışlardır. Bu çalışmada en büyük tabla ivmesinin kademeli olarak arttırıldığı bir deprem simülasyon deneyi gerçekleştirilmiştir. Deneysel bulgulara dayanarak bu siloların titreşim özelliklerinin silolanan malzeme doldurulurken önemli derecede değiştiğini; genel olarak, frekanslarının küçüldüğü, bununla beraber, silolanan malzeme etkisinin, silolanan malzeme çeşitlerine bağlı olarak önemli derecede farklı olduğunu ifade etmişlerdir. Cidarı çevreleyen öngerilmeli çelik çemberlerin şekil değiştirmelerinin, ivmeden daha çok, çembere ilişkin mod şekilleri, özellikle de oval mod şekilleri ile ilişkili olduğunu görmüşlerdir. Dolu siloların doğrusal olmayan davranış gösterdiklerini, diğer bir deyişle sarsma tablası ivmesi artarken ivme tepki oranının azaldığını belirtmişlerdir. Bu deneyde, elemanların yatay birleşme yerlerinde birçok mikro çatlak oluşmakla birlikte öngerilmeli çelik çemberlerin kopması ve cidarın çökmesi gibi kritik hasarlar oluşmadığını ifade etmişlerdir. Bu bulgunun bu tür siloların deprem dayanımının oldukça yüksek olduğunu gösterdiği kanısına varmışlardır.

Zhiming ve Shujiang (1987); enerji tüketen ek elemanlara sahip betonarme siloların kuvvetli taban hareketine tepkisini kapsayan analitik bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Betonarme kolonlara oturan aksenel simetrik bir silo modeli seçilerek kolonların burkulma boyunu azaltan ek elemanların konumu, rölatif doğrusal rijitlik ve donatı oranı gibi parametrelerin deprem davranışına etkisini incelemişlerdir. Buna göre ek elemanların; istenilen elemanlarda plastik mafsal oluşmasını sağlamak, iç kuvvetlerin tüketilmesini ve dolayısıyla da sünekliği arttırmak gibi faydalarının olduğunu sayısal örnek bulgularının tartışılması suretiyle göstermişlerdir. Sonuç olarak deprem enerjisini tüketmek için bu ek elemanları kolonlara göre daha zayıf eleman olarak tasarlamayı siloların sünekliğini arttırmak için önermişlerdir.

Rotter ve Hull (1989); zemine oturan geniş (bodur/sığ) çelik siloların deprem davranışını incelemişlerdir. Ayrık taneli malzeme içeren silindirik bir siloyu, eksenel simetrik geometriye sahip silolar için elastik sonlu elemanlarla modellemiş ve deprem yüklemesini kısmen-statik yatay kütle kuvvetleri ile temsil etmişlerdir. Silo cidarlarında oluşan kritik gerilme durumlarını ve konumlarını belirleyerek bu kritik gerilmelerin silo yüksekliğinin yarıçapına oranı, yarıçapın cidar kalınlığına oranı ve elastik modüler oran ile ilişkisini ortaya koymak için parametrik bir çalışma sunmuşlardır. Elde edilen en büyük gerilmeleri boyutsuz düzende yorumlayarak silo tasarımı için boyutsuz bir yöntem önermişlerdir. Silo için olası kırılma modlarını tanımlamış ve stok malzemesinin kesme kırılması olasılığını incelemişlerdir.

Van Wijk (1991); elastik davranışın iki durumunu ele almıştır. İlk bölümde bir Avrupa silosundaki statik ölçümlerin bazı ön sonuçlarını göstermiş, ikinci kısımda ise Avrupa silolarının deprem etkisi altındaki davranışını ele almıştır. Bu örnekler, ideal plastisitenin sınırlarını göstermiştir. Düşük gerilmelerin bulunduğu problemlerde ve özellikle bazı periyodik karakterli olanlarda, elastisitenin önemli bir rol oynadığını belirtmiştir. Ayrık taneli malzemelerin elasto-plastik davranışı çok karmaşık olduğu halde bunun uygulanabilirliğinin araştırılması gerektiğini önermiştir.

Sasaki ve Yoshimura (1992); beton fiçı (stave) siloları, silindirik olarak bir araya getirilen prefabrike beton elemanlar ve dış ard-gerilmeli çelik çemberlerle bir arada tutulan parçasal silo yapıları olarak tanımlayarak, böyle yapısal süreksizliği olan beton fiçı siloların dinamik çözümlemesi için "fiçı silo elemanı" adı verilen analitik bir model geliştirmişlerdir. Fiçı silo elemanlarındaki yay rijitliğini belirlemek için bir yöntem de önermişlerdir. Bu elemanların geçerliliğini ve eşdeğer rijitlik ile bunun azaltma çarpanına ilişkin yöntemi doğrulamak için indirgenmiş ölçek fiçı silo modelinin sismik tepki çözümlemelerini gerçekleştirerek, deneysel bulgular ile karşılaştırmışlardır. Ayrıca, deprem tasarımında önemli olan, silolanan malzemenin deprem sırasında etkin kütle katsayısını deneysel bulgulara dayanarak elde etmişlerdir.

Younan ve Veletsos (1998); düzgün viskoelastik malzemeyle dolu düşey, rijit, silindirik depoların yatay taban sarsıntısına tepkileri için bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Yapısal çözümleme yöntemi tanımlandıktan sonra, sistemin tepkisini izah eden etkileri ve çeşitli parametrelerin rölatif önemini içeren sayısal veriler sunmuşlardır. Yer hareketinin karakteristiklerine ek olarak depo yüksekliğinin, çapına oranı ve stok malzemesinin fiziksel özelliklerini içeren parametreleri incelemişlerdir. Harmonik ve deprem kaynaklı yer

hareketlerinin her ikisini de dikkate almışlardır. İncelenen tepki nicelikleri, dinamik cidar basınçları, depo duvarındaki kritik kuvvetler ve temel üzerine uygulanan kuvvetlerdir.

Veletsos ve Younan (1998); önceki çalışmalarındaki katı içeren rijit depoların yatay taban sarsıntısına tepkisinin yapısal çözümlenmesini esnek depolar için genişletmişlerdir. Kritik tepkiler için basit, yaklaşık bağıntılar çıkarmış ve çok sayıda parametrenin içerildiği cidar esnekliği etkilerini izah eden kapsamlı sayısal veriler sunmuşlardır. İncelenen tepki nicelikleri, cidarlardaki gerilmeleri, en büyük cidar kuvvetlerini ve temele iletilen kuvvetleri içermektedir. Uzun periyoda ek olarak, etkili statik uyarımlar, keyfi frekansların harmonik hareketleri ve gerçek deprem yer hareketini dikkate almışlardır. Ayrıca katı içeren depoların ve aynı kütle yoğunluklu sıvı içeren depoların kritik tepkileri arasındaki ilişkiyi de kısaca sunmuşlardır.

Issaev (2002); bir silonun deprem etkisi altında doğrusal olmayan çözümlenmesini gerçekleştirmişlerdir. Siloyu önce boşken titreşim aygıtlarıyla deneye tabi tutmuş ve bu deneyin bulgularını silonun çözümlenmesi için kullanmıştır. Gerçekleştirilen çözümlenmelerde silonun buğday ile tamamen dolu olduğunu ve plastik mafsallar sayesinde doğrusal olmama durumunu dikkate almıştır. Silo değişken ağırlıklı bir yapı olduğundan, bu etmenin silonun davranışına önemli derecede etki edebileceğini, boş silo üzerinde yapılan deneyden elde edilen bulguların çözümlenme için uygun olmayacağını belirtmiştir.

Wagner vd. (2002); deprem etkisi altında taneli malzemeyle dolu siloların hasar durumunu incelemişlerdir. Silonun dinamik davranışını tanımlamak için taneli malzeme, taneli malzeme-silo cidarı arasındaki temas yüzeyi ve silo cidarı gibi doğrusal olmayan üç bileşenden oluşan sayısal bir model sunmuşlardır. Taneli malzeme davranışı için taneler arası şekil değiştirme yaklaşımını kullanmış ve silo cidarını çok katmanlı bir kabuk eleman ile temsil etmişlerdir. Siloların doğrusal olmayan davranışını tanımlayabilen bu sayısal modelin deprem etkisi altında çelik ve betonarme siloların dinamik davranışı değerlendirmede kullanılabileceğini belirtmişlerdir.

Holler ve Meskouris (2006); yürürlükteki Avrupa Standartlarında verilen yük kabullerini doğrulamak için deneysel bulgulara ve sayısal modellere dayanarak, çelik siloların dinamik davranışını incelemişlerdir. Taneli malzemeyi, silo cidarını ve arayüzeyi temsil eden üç bileşenden oluşan bir sayısal model kullanmışlardır. Buna ek olarak yapı-zemin etkileşimini de dikkate almışlardır. Silolanan malzeme davranışı için hipoplastisite teorisine göre taneler arası şekil değiştirme yaklaşımını kullanmışlardır. Bu sayısal modellerde elde edilen bulgular ile sarsma tablasından elde edilen ölçüm bulgularını karşılaştırmış, bu

deneylerde statik basınç değişimi ölçülebilir olmadığı halde bulguların oldukça iyi uyum gösterdiğini belirtmişlerdir. İkinci bir adımda birebir ölçekli bir geniş (bodur) ve bir narin siloyu, hem Avrupa standartlarında tanımlandığı gibi, hem de doğrusal olmayan etkileri dikkate almak suretiyle, sayısal olarak incelemişlerdir. Buna göre Eurocode koşullarının narin silolar için oldukça uygun olduğunu ve geniş silolar için ise kabul edilen aktif kütlede bir azaltma yapılabileceğini belirtmişlerdir.

Silvestri vd. (2008); tahıl gibi taneli malzemeleri içeren düz tabanlı siloların sismik tasarımı için bir yöntem önermişlerdir. Burada deprem hareketini sabit düşey ve yatay ivme olarak dikkate almışlardır. Gerçekleştirilen çözümlerinde stok malzemesi-silo etkileşimine dayanarak stok malzemesinin üç farklı bölüme ayrıldığını, bunlardan ikisinin silo cidarlarına etki ettiğini üçüncüsünün ise etki etmediğini belirterek siloların belirli bir yükseklik/çap narinlik oranıyla tanımlanmasıyla silo cidarı ile etkileşen tahıl kütesinin toplam tahıl kütesine göre önemli ölçüde azaldığını ifade etmişlerdir.

Singh vd. (2008); tiremili betonarme silindirik siloların deprem davranışlarını incelemişlerdir. Silo yüksekliği, çapı, silolanan malzeme özellikleri (yoğunluk ve içsel sürtünme açısı), beton sınıfı, donatı sınıfı ve mesnet sayısı gibi çeşitli parametrelere göre silo bileşenlerini tasarlamışlardır. Tasarım bileşenleri (cidar kalınlığı, halka kiriş boyutları, kolon enkesiti) için silonun yükseklik ve çapına bağlı olarak kütle ve etki katsayısı matrisi oluşturmuşlardır. İlk üç moddaki temel doğal frekans ve diğer frekansları silonun dolu ve boş olması durumları için hesaplamışlardır. Ayrıca ilk üç moda ait normalleştirilmiş özdeğerleri hesaplamışlardır. Matris İterasyon Yöntemini kullanarak hesaplanan normalleştirilmiş mod şekli değerleri ile birlikte doğal frekans değerleri ve temel matrisleri dinamik çözümlerinin gerçekleştirilmesinde kullanmışlardır. En Büyük Mutlak Tepki (MAR), Karelerin Toplamının Karekökü (SRSS) ve Tam Karesel Birleşim (CQC) yöntemleriyle modların birleştirilmesinden elde edilen dinamik yanal kuvvet değerlerini belirlemişlerdir. Silo yüksekliğinin çapına oranı arttıkça temel frekansların azaldığını, bunların mesnet sayısından çok etkilenmediğini, bu yapıların tasarımında ilk üç modu dikkate almanın yeterli olduğunu belirtmişlerdir. Birinci mod için statik yatay kuvvetlerin dinamikten daha büyük olduğunu, SRSS ve CQC yöntemlerinden elde edilen yatay kuvvetlerin oldukça yakın olduğunu, MAR yönteminin ise gerçekçi olmayan bulgular verdiği için tercih edilmediğini ifade etmişlerdir.

Tatko ve Kobiak (2008); dış dinamik yüklere maruz, kumla dolu düz tabanlı çelik bir silo üzerinde laboratuvar deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Modeli, zemini temsil eden

yay sistemi üzerine yerleştirmişlerdir. Yatay itki şeklindeki yükleri silonun taban plakasına uygulamışlardır. Yatay basınç-zaman dağılımlarını, bu basınçlardaki dağılım değişiklikleri üzerinde zemin titreşimlerinin etkisini irdelemek için kullanmışlardır. Zemin titreşimlerinin yatay basınçlarda iki tip değişikliğe neden olduğunu; bunların modelin titreşimi sona erdiğinde gözlemlenen kararlı değişimler ve kısa süreli döngüsel değişimler olduğunu ifade etmişlerdir. Zemin titreşimlerinin titreşim öncesine göre basınçlarda ya kararlı bir artış ya kararlı bir azalma oluşturduğunu ya da herhangi bir önemli kararlı değişim oluşturmadığını gözlemlemişlerdir. Yatay basınçlardaki döngüsel dinamik değişimlerin silo cidarı yerdeğıştirmelerinin yönüne bağlı olduğunu ve bu yerdeğıştirme değerlerinin fonksiyonu olduğunu belirtmişlerdir.

Doğangün vd. (2009); dünyanın çeşitli bölgelerinde meydana gelen silo hasar ve göçmelerini açıklayıcı fotoğraflar ve nedenleriyle birlikte sunmuşlardır. İnfilak ve patlamadan, doldurma ve boşaltma sırasında oluşturulan asimetrik yüklerden, büyük ve düzgün yayılı olmayan zemin basınçlarından, metal siloların korozyonundan, betonarme siloların silaj asitleriyle bozulmasından, içyapısal çökmeden ve termal yorulma bozunumundan (artma ya da azalma), depremlerden kaynaklanan yaygın veya şaşırtıcı silo hasar ve göçmelerini gözden geçirerek irdelenmişlerdir.

Azadi ve Soltani (2010); üç hücreli betonarme bir çimento silosunun dinamik davranışı üzerinde temel-zemin-yapı etkileşiminin etkisini araştırmışlardır. Zemin tipinin etkisini incelemek amacıyla İran Sismik Tasarım Yönetmeliğine göre dört farklı zemin grubu dikkate alarak parametrik bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Yakın ve uzak alan zemin etkilerinin her ikisini de dikkate almışlardır. Özellikle yumuşak zemine (IV) mesnetlenen silonun taban kesme ve devrilme tepkisinde olmak üzere, yapı-zemin etkileşiminin siloların dinamik tepkisinde önemli olduğunu göstermişlerdir. Ayrıca tip IV gibi yumuşak bir zeminin tabandaki en büyük devirici momenti azaltırken ivme tepkisini arttırabildiğini, bununla birlikte taban kesme tepkisi üzerindeki etkinin deprem kaydı ve sismik dalga doğrultusuna bağlı olarak kısmen karışık olduğunu gözlemlemişlerdir. Yapı-zemin-yapı etkisinin de en büyük devirici moment ve en büyük yerdeğıştirmeleri azaltırken en büyük taban kesme tepkisini arttırabileceğini belirtmişlerdir.

Nateghi ve Yakhchalian (2010); betonarme bir silonun sismik güvenlik değerlendirmesini gerçekleştirmişlerdir. Silo cidarı için beton hasarlı plastisite modeli, stok malzemesi için ise hipoplastisite teorisini kullanmışlardır. Stok malzemesi-silo etkileşimini

dikkate alarak iki farklı deprem kaydı için sonlu elemanlar çözümlerini gerçekleştirmişlerdir.

Elia ve Rouainia (2011); kil yatağı üzerine inşa edilmiş sığ temele sahip bir şeker silosunun sismik davranışını incelemiştir. Sayısal modellerde killerdeki bozunma (destruction) süreci için bir modeli sonlu elemanlar yöntemine uygulayarak çözümlerinde kullanmışlardır. O bölgeye özgü iki farklı deprem hareketi için elde edilen silonun dinamik tepkisi, sismik yükleme sırasında ve sonrasında sinyal yükseltimi, kalıcı aşırı boşluk suyu basıncı ve yığılımlı yerdeğiştirmeler cinsinden ifade edilmiştir.

Nateghi ve Yakhchalian (2011); betonarme siloların sismik davranışını incelemiştir. ABAQUS sonlu elemanlar paket programı ile betonarme silo cidarını kabuk elemanlarla modelleyerek doğrusal olmayan davranış için beton hasarlı plastisite modelini dikkate almışlardır. Taneli malzemenin davranışının düşük şekil değiştirmelerde bile adım adım doğrusal olmayan davranış olduğunu, hipoplastisite teorisinin gerilme oranını; gerilme, şekil değiştirme oranı ve boşluk oranının fonksiyonu olarak tanımladığını ve taneli malzemenin doğrusal olmayan ve elastik olmayan davranışını oran-tipi formülasyonu sayesinde modelleyebildiğini belirtmişlerdir. Taneli malzemeyi katı elemanlarla modellemiş ve doğrusal olmayan davranış için hipoplastik kurucu model kullanmışlardır. Silo cidarı ve taneli malzeme arasındaki etkileşim için Coulomb sürtünme kuralı ile yüzeyden yüzeye temas dikkate almışlardır. Betonarme silonun deprem uyarımı altında davranışını modelledikten sonra taneli malzeme-yapı etkileşimini dikkate almayan bir modelle karşılaştırmışlardır. Taneli malzemenin etkin kütlelerini toplam kütlelerinin %80'i olarak almanın, silo cidarlarında daha şiddetli çekme hasarlarına neden olduğunu belirtmişlerdir. İki modelde de simetri ekseninin yakınında cidarın alt kısımlarında eğilme çatlaklarının oluştuğunu, çevre boyunca ilerledikçe bu çatlakların kesme çatlaklarına dönüştüğünü ifade etmişlerdir. Stok malzemesi-silo etkileşiminin dikkate alınmadığı ikinci modelde kesme çatlaklarının yükseklik boyunca meydana geldiğini gözlemlemişlerdir.

Silvestri vd. (2012), deprem esnasında silolarda taneli malzemedeki kaynaklanan yatay kuvvetleri analitik olarak değerlendirmişlerdir. Analitik çözümlerinde Eurocode 8'deki tüm temel varsayımları ve bunlara ek olarak tahıllar arasındaki kesme kuvvetlerini dikkate almışlardır. Depremi sabit yatay ve düşey ivme ile temsil etmiş ve çözümlerini tahıldaki belirli etkileri dikkate alan basit dinamik denge bağıntıları ile gerçekleştirmişlerdir. Bodur silolarda cidara etki eden tahıl kütlelerinin toplam tahıl



kütlesinden ve Eurocode 8’de ifade edilen etkili kütleden belirgin ölçüde küçük olduğunu ifade etmişlerdir.

### 1.7. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Tahıl teknolojisindeki gelişmelerden dolayı, tahıl hasatının bol olması çağdaş silo tasarımlarının 19. yüzyılın ikinci yarısından itibaren daha da gelişmesine ve iyileşmesine neden olmuştur. Uluslararası ticaret, bu ürünlerin limanlarda saklanması gereksinimini, madencilikteki artış ve sanayileşmedeki gelişmeler ise ülkelerin çeşitli yerlerinde silo yapılması gereksinimini doğurmuştur. Ayrıca, uzun mesafelerde tahıl taşımacılığında demiryollarını kullanma imkânı, yeni stok tesislerinin inşa edilmesini gerektirmiştir.

19. yüzyılın başlarında silolar ahşaptan yapılmakta ve bu tip siloların tasarımları çok basit bir şekilde gerçekleştirilmekteydi. Stok malzemesinin sıvı gibi davrandığı düşünülmekte ve bilinmesi gereken tek önemli mekanik özelliğin malzemenin özgül ağırlığı olduğuna inanılmaktaydı. Kısa bir süre sonra stok malzemesinin davranışının zemin gibi düşünülmesi konusunda ilk adımlar atılmıştır. Gelişen bilgisayar teknolojisinin de yardımıyla bu yaklaşım halen kullanılmaktadır.

Yukarıda verilen literatür taramasından da görülebileceği üzere, teknik literatürde, silolara ilişkin çalışmalar özellikle doldurma ve boşaltma üzerine yoğunlaşmış bulunmaktadır. Statik ve betonarme hesaplarıyla, önerilmeli betonarme siloların hesap ve inşa teknikleri için de bir takım çalışmalar vardır. Dolayısıyla teknik literatürde siloların statik hesaplarıyla ilgili önemli bir eksiklik görülmemektedir. Ancak söz konusu yapılar nadiren de olsa statik ve/veya diğer farklı etkiler nedeniyle önemli hasarlar görebilmekte ve yıkılabilmektedir. Bunlarla ilgili örnekler genel bilgi olarak ilgili başlıkta verilmektedir.

Siloların depremlerde hasar görmelerinin yanında depremden sonra işlevlerini yerine getirebilmesi de son derece önemlidir. Zira 3 Ekim 1974 Lima (Peru), 2 Mart 1987 Edgecumbe (Yeni Zelanda), 7 Aralık 1998 Spitak (Ermenistan), 1999 Chi-Chi (Tayvan) 17 Ağustos 1999 Kocaeli, 12 Kasım 1999 Düzce ve 2001 El Salvador depreminde önemli silo hasarları örnekleri teknik literatürden görülmektedir (Doğangün vd., 2009). Bu tür örnekleri hemen her yıkıcı depremden sonra görmek mümkün olmaktadır. Dolayısıyla, deprem bölgesinde bulunan silolarda, deprem kaynaklı olarak, diğer tüm hasar türlerine göre daha ağır hasarlarla karşılaşmak ihtimali oldukça yüksektir. Dolayısıyla hayati öneme sahip bu tür yapıların depreme dayanıklı olarak tasarlanması gerektiği açıktır. Silolanan

malzemelerin türünün oldukça farklı olabilmesi, sözkonusu malzeme türüne göre dinamik davranışın önemli ölçüde farklılıklar göstermesi, aynı malzeme için dahi olsa farklı ortam koşullarında statik karakterin dahi değişmesine neden olabilmesi olayı oldukça karmaşık hale getirmektedir. Bu ve buna benzer birçok durum için stok malzemesi-silo etkileşimi birbirlerinden tamamen farklı davranış gösterebilmektedir. Durum böyle olunca, çalışmalar malzeme davranışından daha ziyade, doldurma boşaltma ve kısmen dinamik davranış üzerinde yoğunlaşmış bulunmaktadır.

Hızlı kentleşme ve endüstrileşme sürecine girmiş bulunan Türkiye’de silo ve benzeri yapılara duyulan ihtiyacın giderek arttığı da bir gerçektir. Diğer taraftan siloların dinamik davranışlarını belirlemeye yönelik çalışmaların yok denecek kadar az olması, yönetmeliklerde verilen yöntemlerin de halen 1800 lerin sonlarında üretilen yaklaşımları kullanılıyor olması durumu ortaya koymaktadır. Sözkonusu yöntemlerin deprem davranışının temsili konusunda, günümüz bilgi birikimi ve çözüm teknolojileri açısından yeterli olmamaları ve bunun gibi birçok nedenden ötürü ilgili literatürde genel olarak bir eksikliğin var olduğu kolaylıkla söylenebilmektedir. Ancak bu konuların hepsini incelemek ve sonuçlandırmak, çalışmanın kapsamını aşırı derecede artıracığından esas olarak, stok malzemesi-silo-zemin etkileşiminin silonun dinamik davranışları üzerindeki etkilerini inceleme üzerine yoğunlaşmıştır. Durum böyle olunca; siloların deprem davranışlarının stok malzemesi-silo-zemin etkileşiminin gerek analitik, gerekse de sayısal yöntemler aracılığıyla gerçekçi olarak dikkate alındığı çalışmalara ihtiyaç duyulduğu yapılan teknik literatür araştırmasından ortaya çıkan bir gerçektir.

Bu çalışmada, teknik literatürdeki genel stok malzemesi ve zemin etkileşimlerini dikkate almada kullanılan yaklaşımlardan da yararlanılarak bu yöntemlerin silo davranışını belirlemedeki etkinliklerini irdelemek, bunların siloların dinamik davranışları üzerindeki etkilerini dikkate alınan modeller yardımıyla incelemek ve söz konusu modellerin pratik olarak nasıl kullanılabileceğini uygulamaya sunmak amaçlanmaktadır. Bu nedenle geliştirilen modellerin çözümlenmeleri zaman ve frekans ortamında çeşitli analitik yöntemler ve sayısal yöntemlerden sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmektedir.

## 2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

Yapı sistemlerinin çözümlenmesinde genel olarak sabit, hareketli ve dinamik yüklerin dikkate alınması ve tasarımların öngörülen birleşimlere göre gerçekleştirilmesi her tür yapı için alışıl gelmiştir. Halen uygulanmakta olan birçok yönetmelikte sıcaklık, zemin itkileri, sıvı vb., etkilerin veya benzeri özel durumların da hesaplara nasıl katılacağı konusunda birçok yük birleşimi öngörülmektedir. Bu çalışmaya konu olan silolar için ise bu özel durumların nasıl değerlendirileceği ve tasarımın bu etkilere karşı nasıl yapılacağı konusu halen yapıya gelen araştırmalarla gelişen bir alan olarak önemini korumaktadır. Durum böyle olunca, stok malzemesi-silo-zemin etkileşimleri özel bir durum olarak bu tür yapı sistemleri için söz konusu olduğundan, bu etkileşimlerin birlikte değerlendirildiği çalışmalara ihtiyaç duyulmaktadır. Daha önce sunulan teknik literatür araştırmasından da görülebileceği gibi silolarla ilgili olarak statik ve doldurma boşaltma durumlarıyla ilgili nicelik ve nitelik olarak önemli çalışmalar yapılmıştır. Ancak deprem davranışı açısından durum böyle değildir. Bu nedenle tez kapsamında gerçekleştirilen bu çalışmada siloların deprem davranışlarının incelenmesi üzerine odaklanılmıştır.

Bu bölümde teknik literatürde yapı-zemin ve yapı-malzeme etkileşimi için önerilen temel yaklaşımlardan yararlanılarak bunların silolara uyarlanması sunulmaktadır. Bununla birlikte; bu çalışma kapsamında gerek stok malzemesi-silo etkileşiminin dikkate alınabileceği, gerekse de stok malzemesi-silo-temel/zemin sisteminin tepkisinin hesaplanabileceği analitik ve sayısal yaklaşımlar önerilmektedir. Önerilen bu yaklaşımların her ikisi de teknik literatürde yaygın olarak kullanılagelen yöntemlerle karşılaştırmalı olarak irdelenmekte ve tartışılmaktadır. Bu amaçla takip eden başlıklarda ilk olarak mevcut yaklaşımlar irdelenmekte, daha sonra kullanılan ve önerilen yöntemler farklı zemin türleri ve narinlik oranı değişken silo sistemleri için parametrik olarak irdelenmektedir.

### 2.1. Silolarda Depreme Göre Hesap İçin Analitik Yaklaşımlar

Statik etkilerin yanında, deprem bölgelerinde bulunan yapı sistemleri üzerinde yıkıcı etkilerin çoğunlukla deprem kaynaklı olduğu bilinmektedir. Son yüzyılda dünya genelinde ve ülkemizde defalarca meydana geldiği üzere, yapı sistemlerindeki söz konusu bu

hasarları önleyebilmek için depremleri ve neden olduğu tepkileri anlayabilme ve hesaplarda daha gerçekçi olarak dikkate alabilme üzerine araştırmalar yoğun bir şekilde gerçekleştirilmektedir. Bilgisayar teknolojisinde ne kadar önemli gelişme olursa olsun, tasarımcı ve araştırmacıların basit yaklaşımlara ve bulguların derece olarak yaklaşık değerlerini belirlemeye yönelik gereksinimleri hiç azalmamıştır. Silolar için bu durum daha da önemli olmaktadır. Çünkü yerine getirdiği işlev nedeniyle çok karmaşık bir sisteme ve yükleme durumlarına sahiptir. Dolayısıyla yaklaşık sonuçlar da verse basit yaklaşımlara ihtiyaç duyulmaktadır. Bu durumda deprem kaynaklı olarak meydana gelen dinamik basınçlar, siloların projelendirilmesinde dikkate alınması gereken en önemli etkilerden biri olarak karşımıza çıkmaktadır. Söz konusu basınçlar için yönetmelikler tarafından önerilen basit analitik yaklaşımlara ek olarak teknik literatürde kullanılan analitik yaklaşımlar bu çalışma kapsamında irdelenmektedir.

Deprem etkisinde kalan bir silonun cidarlarında stok malzemesi etkileşimi nedeniyle meydana gelen basınç etkileri; stok malzemesi karakteristikleri, silo geometrisi, yer hareketinin karakteristiği gibi birçok parametreye bağlı olarak farklı karakter sergileyebilmektedir. Söz konusu basınçların değişimi, statik basınç değişimleriyle karşılaştırıldığında, oldukça farklı davranış şekilleri karşımıza çıkmaktadır.

Siloların sismik davranışlarının belirlenebilmesi, stok malzemesinin doğrusal olmayan davranışı, stok malzemesi-silo cidarı arasındaki temas durumu değişkenliği ve tam dolu bir silonun kütlesinin neden olabileceği ihmal edilemez seviyedeki yapı-zemin etkileşimi gibi birçok etkinin birlikte dikkate alınmasını gerektirmektedir. Dolayısıyla belirlenmesi gereken husus oldukça karmaşık bir hal almaktadır. Bu nedenle her mühendislik probleminde olduğu gibi birtakım kabuller yardımıyla bu karmaşık olayı basitleştirerek yaklaşık bir çözüm arayan analitik yöntemler üretilmiştir. Çeşitli lkeler, bu analitik yöntemlerden yararlanarak, yönetmeliklerinde mühendislerin kolayca uygulamasına yönelik hesap yöntemleri önermişlerdir. Aşağıda yönetmeliklerde de kullanılan genel yaklaşımlar özetlenerek belli başlı yönetmelikler için birtakım uygulama örnekleri irdelenmektedir.

### 2.1.1. Yönetmeliklerdeki Hesap Yöntemleri

Yönetmeliklerde verilen hesap yöntemleri ile hedeflenen, o güne kadar gerçekleştirilen çalışmalar ışığında, tasarımcının kullanabilmesi için gerçekçi en basit bir yaklaşımı önermektir. Söz konusu yaklaşımlarda genellikle davranışı etkilemesi muhtemel tüm parametreler belirli bir oranda hesaba katılmak istenmektedir. Parametrelerin nasıl dikkate alınacağı ile ilgili olarak, teknik literatürde yapılmış olan birçok deneysel ve sayısal çalışmanın sonuçlarından yararlanılmaktadır. Genel yapı davranışı için durum daha kolay olmakla birlikte, depolar, silolar, dayanma yapıları, rezervuar yapıları gibi özel yapı türleri için standartlaştırma veya diğer bir ifadeyle basite indirgeme oldukça zor bir hal almaktadır. Bu durum önemli hataları da beraberinde getirebilmektedir. Genel yapı türlerinden farklı olarak söz konusu hatalar, bu tür özel yapı sistemleri için yapının kendi malzeme özelliklerinden oldukça farklı özelliklere sahip başka bir malzeme ile birlikte ortak davranış göstermesinden kaynaklanmaktadır. Zira içerdiği ve etkileşime girdiği bu farklı malzeme nedeniyle ortaya çıkan durumu gerçekçi olarak modelleyebilmek ve davranışı ortaya koyabilmek oldukça zor olmaktadır.

Yönetmelikler genel olarak tüm yapı sistemlerinde olduğu gibi, inceleme konusu silolar için de dinamik kuvvetler sistemini, statik eşdeğer olarak dikkate alma eğilimindedirler. Hâlbuki deprem yükü etkisindeki siloların boyutlandırılması; hemen her yapı tarzında mevcut bulunan parametrelere ek olarak stok malzemesi-silo etkileşiminden kaynaklı etkileri de hesaba katacak bir takım parametrelerin dikkate alınmasını zorunlu kılmaktadır. Bu amaçla silo cidarına etkileyen eşdeğer statik kuvvetler sistemi belirlenerek, dinamik kuvvetler dikkate alınmaya çalışılmaktadır. Bu şekilde taban kesme kuvveti ve devirici moment gibi tabana etkileyen etkileri hesaplamak mümkün olmaktadır. Durum böyle olunca yönetmelikler; sismik, geoteknik ve yapısal karakteristikleri temsil eden ve tepki üzerindeki katkılarını içeren bazı parametrelere ihtiyaç duymaktadır. Bu durum özetle, aşağıdaki bağıntıda olduğu gibi ifade edilebilmektedir.

$$F_t = \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_3 \cdot \alpha_4 \cdot \alpha_5 \cdot \alpha_6 \cdot \alpha_7 \cdot \ddot{U}_g \cdot M \quad (2.1)$$

Burada;  $\alpha_i$  dikkate alınması gereken parametrelerin hemen hemen hepsini temsil etmektedir. Bunlar, deprem bölgesi ( $\alpha_1$ ), taşıyıcı sistem-zemin etkileşiminden kaynaklanan

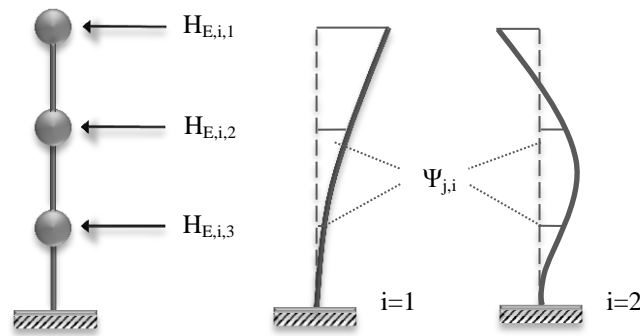
büyütme( $\alpha_2$ ), zemine özgü tepki( $\alpha_3$ ), sönüm etkisi( $\alpha_4$ ), yapısal sistemin süneklik etkisi ( $\alpha_5$ ); risk ( $\alpha_6$ ); önem( $\alpha_7$ ) faktörleridir. En büyük yer ivmesi ( $\ddot{U}_g$ ) olarak gösterilmektedir. Yönetmeliklerin hemen hemen hepsi sismik bir olay ile silo cidarına ya da herhangi bir yapının taşıyıcı sistemine etkiyen eşdeğer statik yanal kuvvetleri belirlemek için bütün bu faktörlerin etkisini sistemin kütlesi (M) ile orantılı bir şekilde dikkate almayı önermektedirler.

Aşağıdaki başlıklar altında bu genel ifadeden hareketle; yönetmeliklerdeki depreme göre hesap yöntemleri açıklanmaktadır.

### 2.1.1.1. DIN 4149-1

DIN1055-6 (1987) silolardaki yükler ve DIN 4149-1 (1981) deprem etkisinde oluşan ek kuvvetlerle ilgili olan eski Alman tasarım yönetmeliklerine göre yapı ve içindeki stok malzemesinin toplam kütesinin dikkate alınması gerekmektedir.

Bu yaklaşıma göre silo konsol bir kiriş olarak düşünülmekte ve düzgün yayılı kütlesi yüksekliği boyunca çeşitli seviyelerde toplanmış kütleler olarak dikkate alınmaktadır (Şekil 2.1). Bu eşdeğer sistemin sismik tepkisi, modal çözümlene yöntemi kullanılarak belirlenmektedir.



Şekil 2.1. Ek yükler ve mod şekilleri (DIN4149-1, 1981)

Sistemin bu şekilde dikkate alınmasından kaynaklanan eşdeğer statik kuvvetler aşağıdaki bağıntı ile ifade edilmektedir.

$$H_{E,i,j} = \frac{G_j + P_j}{g} \cdot \beta(T_i) \cdot \psi_{j,i} \cdot \frac{\sum_{i=1}^n m_j \cdot \psi_{j,i}}{\sum_{i=1}^n m_j \cdot \psi_{j,i}^2} \cdot a_0 \cdot \kappa \cdot \alpha_s \quad (2.2)$$

Burada;  $i$  yapının mod şekli,  $j$  kütle numarasını,  $G_j + P_j$  sabit ve hareketli yüklerin toplamını,  $g$  yerçekimi ivmesini,  $a_0$  yatay ivmeyi,  $\psi_{j,i}$  yapının  $i$ . modunda  $j$ . kütle noktasının salınımını,  $\kappa$  yapı-zemin sistemiyle ilgili bir katsayıyı,  $\alpha_s$  sismik bölge ve taşıyıcı sistemden kaynaklanan azaltma faktörünü ve  $\beta(T_i)$  %5 sönüm oranı ve titreşim periyoduna ( $T_i$ ) bağlı  $i$ . mod şeklinin sönüm etkisini göstermektedir. Sönüm etkisine ait bu değer düşük sönüm oranları için %30 arttırılmaktadır.

#### 2.1.1.2. EN1998-4

Ülkemizde de yakın dönemde uyum sürecinde uyarlanması sağlanmaya çalışılan Avrupa Birliği yönetmeliklerinden biridir. Siloların tasarımında EN1991-4 (2006) kullanılmasına karşın, EN1998-4 (2006)'de söz konusu siloların deprem tepkilerinin nasıl dikkate alınacağı ifade edilmektedir. EN1998-4 (2006)'e göre; zemine ya da temele doğrudan mesnetlenen silolar ve zemine uzanan bir kabuk ve/veya bir seri kolon üzerine mesnetlenmiş gergili ya da gergili olmayan ayaklı silolar ayrı ayrı değerlendirilmektedir. Zemine oturan silolarda deprem hareketinin temel etkisi, stok malzemesinin tepkisinden dolayı cidarda oluşan gerilmeler üzerinde yoğunlaşırken, ayaklı siloların depreme göre tasarımında mesnet yapısı, bunun sünekliği ve enerji yutma kapasitesine etkisi üzerinde durulmaktadır.

Stok malzemesinin birim ağırlığını ( $\gamma$ ) da içeren, stok malzemesine ait birçok özelliğin belirlenmesi için EN1991-4 (2006)'den faydalanılabilmektedir. Burada  $\gamma$  için önerilen değer  $\gamma_u$  ile gösterilen birim ağırlığın en üst karakteristik değeri olarak dikkate alınmaktadır. Sismik etkiler altında, cidarlarda, tiremide ve tabanda taneli malzemedan dolayı oluşan basınçlar herhangi bir sismik hareket olmadığı duruma kıyasla daha üst bir değere çıkabilmektedir. Tasarım amacı için bu artan basıncın sadece sismik hareketten kaynaklanan, stok malzemesine etki eden, atalet kuvvetlerinden oluşacağı kabulüyle modeller kurulmaktadır. Burada daha kesin bir değerlendirme dikkate alınmadıkça genel sismik tepki ve mesnetteki sismik etkilerin hesaplanmasında taneli malzemenin silo

cidarıyla birlikte hareket ettiği varsayılmış ve ağırlık merkezlerine toplanmış etkili kütleleri ve buna bağlı rotasyonel ataletleri ile modellenmeleri gerektiği belirtilmiştir. Burada daha kesin bir değerlendirme dikkate alınmadıkça silo içeriğinin toplam kütlelerinin %80'i kadar bir kütle, etkili kütle olarak dikkate alınmaktadır. Sonlu elemanlar yöntemiyle veya benzer bir sayısal modelle stok malzemesi davranışı dikkate alınmadığı müddetçe, sismik hareketin yatay bileşenine stok malzemesinin cidar üzerindeki tepkisi olan normal basınç,  $p_{hs}$ , olarak temsil edilmekte ve bu ek basınç stok malzemesiyle temasta bulunan cidar kısmı üzerinde uygulanmaktadır. Dairesel silolarda (ya da silo bölümlerinde) cidardaki ek normal basınç:

$$p_{hs} = p_{hso} \cos \theta \quad (2.3)$$

bağıntısıyla hesaplanmaktadır. Burada;  $p_{hso}$  referans basıncı,  $\theta$  cidardaki ilgili noktaya çizilen radyal çizgi ile sismik hareketin yatay bileşeni doğrultusu arasındaki açıyı,  $(0^\circ \leq \theta < 360^\circ)$  göstermektedir. Dikdörtgen silolarda (ya da silo bölümlerinde) ise silo cidarına paralel ya da normal olan sismik hareketin yatay bileşeninden kaynaklanan cidardaki ek normal basınç, sismik hareketin yatay bileşenine normal olan alt cidarda;

$$p_{hs} = p_{hso} \quad (2.4)$$

Sismik hareketin yatay bileşenine normal olan üst cidarda;

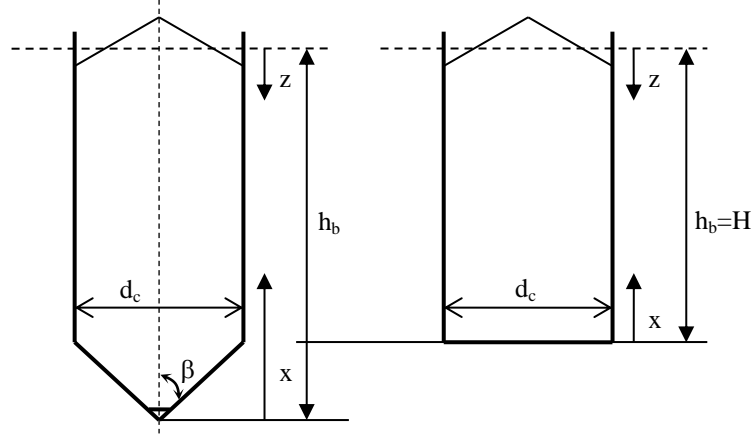
$$p_{hs} = -p_{hso} \quad (2.5)$$

Sismik hareketin yatay bileşenine paralel olan duvarlarda;

$$p_{hs} = 0 \quad (2.6)$$

olarak alınmaktadır. Buradaki ek dinamik basınçların hesaplanmasında dikkate alınan terimler ve yönleri Şekil 2.2' de verilmektedir.





Şekil 2.2. EN1998-4 (2006)'e göre ek dinamik basınç hesabı için ilgili terimlerin gösterimi

Düz bir tabandan veya konik ya da piramit şeklindeki bir treme tepesinden  $x$  düşey uzaklığındaki silo cidarı üzerindeki noktalarda referans basıncı  $p_{hso}$ ,

$$p_{hso} = \alpha(z) \cdot \gamma \cdot \min(r_s^*; 3x) \quad (2.7)$$

olarak hesaplanabilmektedir. Burada;  $\alpha(z)$  stok malzemesinin eşdeğer yüzeyinden  $z$  düşey uzaklığında silo tepki ivmesinin yerçekimi ivmesine oranını,  $\gamma$  sismik tasarım durumunda taneli malzemenin yığın birim hacim ağırlığını göstermekte ve  $r_s^*$  ise aşağıda verilen bağıntı yardımıyla belirlenen bir mesafe değerini göstermektedir.

$$r_s^* = \min(h_b, d_c / 2) \quad (2.8)$$

Burada;  $h_b$  düz tabandan ya da treme çıkışından stok içeriğinin eşdeğer yüzeyine kadar tüm silo yüksekliğini,  $d_c$  ise sismik hareketin yatay bileşenine paralel silo iç boyutunu (dairesel silo ya da silo bölümlerinde silo iç çapı  $d_c$ , dikdörtgen silolarda sismik hareketin yatay bileşenine paralel iç yatay boyutu  $a$  veya  $b$ ) göstermektedir (Şekil 2.2).

(2.7) bağıntısı düşey silo cidarları için uygulanmaktadır. Treme yüksekliği boyunca referans basıncı ise aşağıdaki bağıntı ile,  $\beta$  düşeyden ölçülen treme cidarının eğim açısı ya da piramit şeklindeki treme cidarının düşeyine en dik eğim açısını göstermek üzere;

$$p_{hso} = \alpha(z) \cdot \gamma \cdot \min(r_s^*; 3x) / \cos \beta \quad (2.9)$$

bağıntısıyla belirlenebilmektedir.

Burada  $\alpha(z)$ 'nin göz önüne alınan deprem etkisinin sistem içerisinde meydana getirdiği yer hareketi tepkisinin yer çekimine oranının yükseklikle değişimini gösterdiği daha önce ifade edilmişti. Ancak, yönetmelikte yalnızca taneli malzemenin ağırlık merkezindeki tepki ivmesi değerinin bilinmesi durumunda bu değer tüm yükseklik boyunca ilgili tepki ivmesinin yerçekimi ivmesine oranı  $\alpha(z)$  olarak dikkate alınabileceği belirtilmektedir.

Siloların depreme göre tasarımında EN1998-4 (2006)'ya göre ayrıca sağlanması gereken diğer koşullar ise ; (1) silo cidarının herhangi bir noktasında taneli malzemenin cidardaki statik basıncı ve sismik hareket etkisi,  $p_{hs}$  , toplamının sıfırdan az olamayacağı, (2) silo cidarının herhangi bir yerindeki, ek normal basınç  $p_{hs}$  ve stok malzemesinin cidardaki statik basıncının toplamının negatif olması durumunda ise cidara bir çekme uygulanacağı şeklinde ifade edilmektedir. Bu durumda, aynı düzlem üzerinde aynı kuvvet sonucu yukarıda verilen  $p_{hs}$  değerleri sağlanarak, cidardaki ek normal basıncın,  $p_{hs}$  , taneli malzeme statik basıncıyla toplamının hiçbir yerde negatif olmayacak şekilde yeniden dağıtılması gerektiği şeklinde sıralanabilmektedir.

Yukarıda verilen koşullara ek olarak söz konusu yönetmelik, ayrıca silo cidarının ve mesnet yapısının elastik davranışı dikkate alınarak çözümlenmeyi önermekle birlikte, özel durumlarda doğrusal olmayan çözümlenme gerçekleştirilmesi gerektiğini belirtmektedir. Ayrıca siloların yapısal çözümlenmesinde, depremden kaynaklanan tepkileri belirlemek amacıyla kullanılacak modelin, yapının rijitlik, kütle ve geometrik özelliklerini doğru olarak temsil edebilmesi, stok malzemesinin tepkisini ve temel zeminiyle herhangi bir etkileşimin meydana getirdiği üst yapı tepkisi üzerindeki değişimleri içermesi gerektiğini belirtmektedir. Ancak her iki özel durum için de doğrusal olmayan çözümlenmenin nasıl yapılabileceğine ya da silo-temel/zemin etkileşiminin nasıl dikkate alınabileceğine ilişkin herhangi bir hesap şekli tarif etmemektedir.

### 2.1.1.3. ACI 313-97

Bu yönetmelikte, deprem bölgelerindeki siloların Uniform Building Code kurallarına göre hesaplanan deprem kuvvetlerine karşı koyacak şekilde tasarlanması ve inşa edilmesi gerektiği belirtilmektedir. Söz konusu yönetmelikte sismik etkilerin nasıl dikkate alınacağı ifade edilmektedir. Stok malzemesinin etkili ağırlığını, gerçek ağırlığının %80 i olarak dikkate almakta ve etkili ağırlığın merkezinin, gerçek hacmin merkeziyle çakışması gerektiğini vurgulamaktadır. Ayrıca silo titreşiminin doğal periyodunun herhangi bir rasyonel yöntemle belirlenebileceği ifade edilmektedir. Bu aşamadan sonra tepkiler spektral çözümlemeyle hesaplanabilmektedir.

Burada stok malzemesinin kütesinden kaynaklanan yanal deprem kuvvetini hesaplarken silo dolu varsayılmakta, fakat yanal kuvvetin silolanan malzemenin tamamen katı bir kütle olarak dikkate alınması durumundan daha düşük değerler alabileceği vurgulanmaktadır. Yanal kuvvetteki azaltmaya taneler arası hareketle ve stok malzemesindeki taneler arası sürtünmeyle oluşan enerji kaybından dolayı izin verilmekte olduğu belirtilmektedir. (Chandrasekaran ve Jain, 1968; Konoue vd., 1986, ACI313-97,1997).

### 2.1.1.4. Yönetmeliklerin Karşılaştırmalı Olarak Değerlendirilmesi

Yukarıda en temel iki örneği verilen, stok malzemesi ile silo cidarının sismik etkileşimi sonucu cidarlara etkiyen yükler hakkında uluslararası yönetmeliklerde birkaç basitleştirici varsayım bulunmaktadır. Bunlardan DIN4149-1 (1981) ve EN1998-4 (2003) ilke ve kabullerinin, boyutlandırma üzerinde önemli etkisi olmaktadır. Dönme simetrisi üzerinde etki eden malzeme yükleri çember kuvvetleri ile etki etmektedir. Bu nedenle kesit düzleminde eğilmeye neden olan eğilme momentleri tespit edilebilmektedir. Sismik yükler etkisinde gerçekte var olan bu etki EN1998-4(2006)'da, diğer bir ifadeyle aynı yönetmeliğin yeni versiyonunda, dikkate alınmamaktadır. Bunun yerine EN1998-4 (2006)'da yükseklik boyunca oluşan eğilme momentine ilaveten kesit içinde de eğilme momenti oluşmaktadır. Bu eğilme momentleri kesit üzerindeki simetrik olmayan ek yükler etkisinde oluşmakta ve boyutlandırmada dikkate alınmak zorundadırlar.

DIN4149-1 (1981)'e göre yatay ek yük kabulü yalnızca yükseklik boyunca ilave eğilme momentine neden olmakta, ancak kesit üzerinde bir etkisinin olmadığı

varsayılmaktadır. Yine aynı yönetmelik, deprem yüklerine karşı boyutlandırma için toplam kütlelerin etkisinden hareket ederken, bu konuda EN1998-4 (2006) ve ACI313-97 (1997) farklı bir yaklaşımla kütlelerin en azından %80'inin birlikte titreşime girdiğinden hareket etmektedir. Bu bakış açısı temelde ifade edilen yönetmeliklerden çok da farklı bir bakış açısı yaratmamaktadır. Burada kullanılan en az ifadesi kütlelerin ne kadarının dikkate alınacağı konusunda kararın tasarımcıya bırakıldığını belirtmektedir. Bu yönetmeliklere göre hesapta, çok basitleştirilerek ek statik yükler elde edilmektedir. Bu durumda, silo geometrisinin göz ardı edilmesi, yani narinlikleri, boyutları ve şekilleri farklı olmasına rağmen aynı bağıntıların ve sayısal verilerin kullanılması, stok malzemesinin doğrusal olmayan davranışının dikkate alınmaması, stok malzemesinin silo cidarıyla birlikte hareket ettiği varsayılarak malzemenin cidardan ayrılarak gerçekleştirdiği bağımsız hareketinin gözardı edilmesi, sürenin hesaba katılmaması ve yapı-zemin etkileşiminin dikkate alınmaması gibi nedenlerden dolayı gerçekçi olmayan etkilerin dikkate alınmasına neden olabilmektedir.

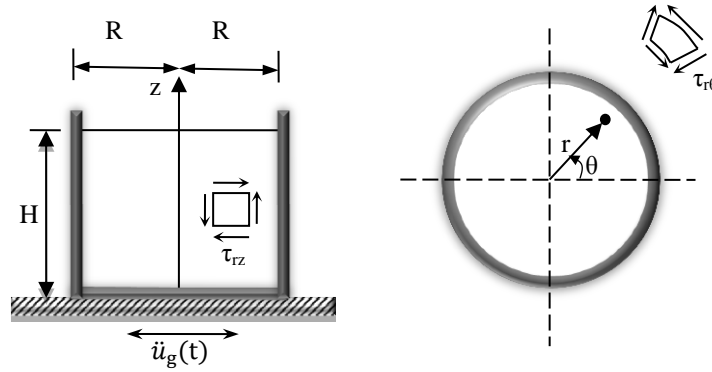
Yalnızca EN1998-4 (2006)'da dikdörtgen ve dairesel kesitli silolar arasında bir ayırım yapılmış, fakat hiçbirinde narin ya da bodur silolar için bir ayırım yapılmamış ve etkili kütle hesabı için de narinlik etkisi dikkate alınmamıştır. Buna ek olarak, daha önce de belirtildiği gibi, yine aynı yönetmelik malzemenin doğrusal olmayan davranışının gerekçesi belirtilerek dikkate alınabileceğini ve gerekli olması durumunda temel/zemin sisteminin silo davranışı üzerindeki etkilerinin de hesaba katılması gerektiğini ifade etmektedir.

### **2.1.2. Veletsos-Younan Yaklaşımı**

Silo ve benzeri stok yapılarının tepkilerinin hesabında genellikle stok malzemesinin sıkışamaz, viskositesiz bir sıvı olarak modellenebileceği varsayımı uzun yıllar kullanılmıştır. Bu durumda stok malzemelerinin mekanik özellikleri doğru olarak tanımlanamamakta, dolayısıyla da davranış gerçekçi olarak temsil edilememektedir. Bu tür malzemelerin ideal akışkan olarak temsilinin genellikle uygun olmadığı ve başkaca gerçekçi idealleştirmelerin dikkate alınmasının gerekliliği bilinmekteydi. Bu dönemde bazı diğer araştırmacılar gibi Veletsos ve Younan da yüksek derecede radyoaktif atık depolayan nükleer tesislerdeki silindirik depoların deprem davranışları üzerinde çalışmalar gerçekleştirmiş ve bu konuda bir takım yaklaşımlar öne sürmüşlerdir. Bu yöntemin tahıl ve

benzeri stok malzemelerini içeren siloların dinamik tepkisinin değerlendirilmesi için de uygun olduğunu belirtmişlerdir. Bu tür sistemlerin çözümlenmesi için basit, yaklaşık ve yeterince gerçekçi bir çözüm yöntemi sunmak için silo yüksekliğinin yarıçapına oranı, stok malzemesinin fiziksel özellikleri, stok malzemesine göre rölatif olarak cidar esnekliğinin boyutsuz ölçümü gibi çeşitli parametreleri irdelenmişlerdir. Önerilen bu yöntem, temel olarak silo cidarının ve dolayısıyla da silonun rijit (Younan ve Veletsos, 1998) ve esnek (Veletsos ve Younan, 1998) olması durumuna göre, iki ana başlıkta irdelenmektedir.

Bu yöntemde irdelenen homojen, doğrusal viskoelastik katıyla, H yüksekliğine kadar dolu olan R yarıçaplı düşey silindirik silo sistemi Şekil 2.3'de verilmektedir. Silonun düzgün ve temelde değişmez yatay harekete maruz rijit bir tabana mesnetlendiği varsayılmaktadır. Herhangi bir t zamanındaki yer hareketinin ivmesi,  $\ddot{u}_g(t)$  ve bunun en büyük değeri,  $\ddot{U}_g$  ile gösterilmektedir. Bu yöntemde silolanan stok malzemesi üst yüzeyinden serbest, tabanında ise mesnetlenmiş olarak varsayılmaktadır. Silo üzerindeki ya da stok malzemesinin içindeki noktalar Şekil 2.3'de gösterildiği gibi başlangıç silo tabanının merkezi olan silindirik koordinat sistemi,  $r, \theta, z$  ile tanımlanmaktadır.



Şekil 2.3. Veletsos-Younan yaklaşımı için dikkate alınan sistem

Rijit çözüm için silo cidarı ve stok malzemesi arayüzeyi hem pürüzsüz hem de pürüzlü olarak dikkate alınmaktadır. Esnek çözümde cidar belirli bir esnekliğe sahip olup, bundan hareketle esneklik etkileri silonun enkesitinde herhangi bir değişiklik olmayan konsol kayma kirişi olarak davrandığı varsayımına dayanarak hesaba katılmaktadır. Burada harmonik yer hareketi esas alınarak deprem hareketi için çözüm gerçekleştirilmiştir. Benzeri çalışmalar Rotter ve Hull (1989) tarafından da gerçekleştirilmiştir. Ancak Rotter

ve Hull (1989) çalışmalarında malzemenin davranışını, rijit cisim atalet kuvvetlerinin statik etkileriyle sınırlı bırakmışlar ve problemin gerçek dinamik yönünü önerdikleri yöntemde tam olarak ortaya koyamamışlardır (Veletsos vd., 1997).

### 2.1.2.1. Rijit Çözüm

Veletsos ve Younan önerdikleri bu yaklaşımı temelde iki başlık altında irdellemektedir. Bunlardan ilki, silo cidarının tamamen rijit davrandığı kabulüyle şekillendirilmiştir. Bu yaklaşımda silonun cidarının esnek olması durumunda ortaya çıkacak ötelenmeler ve bu yolla meydana gelecek malzeme basıncındaki değişimler göz ardı edilmektedir. Bu noktadan hareketle rijit çözüm başlığında irdelenen bu yaklaşım yalnızca stok malzemesinin davranışını esas almakta ve bu davranışın hiçbir surette yapı cidarının davranışından etkilenmediğini kabul etmektedir. Bu yaklaşımda davranışı modellemekte kullanılan stok malzemesinin özellikleri; kütle yoğunluğu ( $\rho$ ), kayma modülü ( $G$ ), Poisson oranı ( $\nu$ ) ve frekanstan bağımsız kayma ve aksel şekil değiştirmeler için aynı olan sönüm faktörü  $\delta$  olarak sıralanabilmektedir. Burada belirtilen  $\delta$  sönüm faktörünün; zemin dinamiği ve yapı-zemin etkileşimi çalışmalarında (örn., Veletsos ve Verbic, 1973; Veletsos ve Dotson, 1988) kullanılan  $\tan \delta$  faktörü ile aynı nitelikte olduğu ve benzer çalışmalardaki (örn., Roesset vd., 1973; Pais ve Kausel, 1988) diğer yazarların kullandıkları kritik sönüm yüzdesinin iki katına eşit olduğu yazarlar tarafından belirtilmektedir.

Önerilen yaklaşım; Veletsos ve Younan (1994a) tarafından viskoelastik bir tabakaya gömülü bir silindirin dinamik zemin basınçlarının belirlendiği yaklaşımdan faydalanılarak türetilmiştir. Bu etkilerin hesabında silindirik geometrideki cismin yatayda harmonik bir harekete maruz kaldığı varsayılarak sonuca ulaşılmaktadır. Bu yöntem dikkate alınan yatay dinamik etki için stok malzemesinin herhangi bir yerinde düşey normal gerilme oluşmadığını varsayarak, diğer bir deyişle  $p_v = \sigma_z = 0$  kabulüyle, söz konusu etkileri hesaplamaktadır. Ayrıca burada düşey yerdeğiştirmelerden kaynaklanan yatay yerdeğiştirme bileşenlerinin ihmal edilebilecek düzeyde olduğu kabul edilmekte, bu yolla yatay yerdeğiştirmelere neden olan etkinin yalnızca yataydaki eylemsizlik kuvvetleri olduğu varsayılmaktadır. Bu varsayımlar dikkate alınarak ortaya konulan yöntemde birim

elemanın üst ve alt yüzeylerindeki kayma gerilmelerinin radyal ve çevresel bileşenleri sırasıyla ( $\tau_{zr}$  ve  $\tau_{z\theta}$ ) aşağıdaki şekilde ifade edilebilmektedir.

$$\tau_{zr} = \frac{G^*}{H} \frac{\partial u}{\partial \eta} \quad (2.10)$$

$$\tau_{z\theta} = \frac{G^*}{H} \frac{\partial v}{\partial \eta} \quad (2.11)$$

Burada  $u$  ve  $v$ ; boyutsuz konum koordinatları  $\xi = r/R$  ve  $\eta = z/H$  ile tanımlanan stok malzemesinin herhangi bir noktasının taban hareketine göre rölatif yerdeğiştirmesinin radyal ve çevresel bileşenlerini ve  $G^*$  stok malzemesi için sönüme bağlı kompleks kayma modülünü göstermektedir. Bu modül ilgili kayma modülüne ( $G$ ) bağlı olarak aşağıdaki şekilde elde edilebilmektedir.

$$G^* = G(1+i\delta) \quad (2.12)$$

Silo cidarında gerek radyal, gerekse çevresel normal gerilme bileşenleri  $\sigma_r$  ve  $\sigma_\theta$  ve kayma gerilmesi bileşeni  $\tau_{r\theta}$ ,  $u$  ve  $v$  konum koordinatlarına göre aşağıdaki gibi elde edilmektedir.

$$p_{hs} = \sigma_r = \psi_o^2 \frac{G^*}{R} \frac{\partial u}{\partial \xi} + (\psi_o^2 - 2) \frac{G^*}{R} \left[ \frac{1}{\xi} \frac{\partial v}{\partial \theta} + \frac{u}{\xi} \right] \quad (2.13)$$

$$\sigma_\theta = \psi_o^2 \frac{G^*}{R} \left[ \frac{1}{\xi} \frac{\partial v}{\partial \theta} + \frac{u}{\xi} \right] + (\psi_o^2 - 2) \frac{G^*}{R} \frac{\partial u}{\partial \xi} \quad (2.14)$$

$$\tau_{r\theta} = \frac{G^*}{R} \left[ \frac{1}{\xi} \frac{\partial v}{\partial \theta} + \frac{\partial v}{\xi} - \frac{v}{\xi} \right] \quad (2.15)$$

Burada Poisson oranına bağlı olarak;

$$\psi_o = \sqrt{\frac{2}{1-\nu}} \quad (2.16)$$

şeklinde belirlenmektedir.

Gerilme ve yerdeğiştirmeler için işaret kuralı elastisite teorisinde kullanıldığı gibi dikkate alınmaktadır. Özellikle, yerdeğiştirmeler, karşılık gelen koordinat ekseninin pozitif yönü boyunca yönlendirilmiş ise pozitif; normal gerilmeler çekmeye neden oldukları zaman pozitif; ve kayma gerilmelerinin pozitif yönleri Şekil 2.3'ün içindeki diyagramda gösterildiği gibi kabul edilmiştir. Bu kabuller kullanılarak radyal ve çevresel doğrultularda, stok malzemesi için hareket bağıntısı, aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir.

$$\Psi_o^2 \frac{\partial}{\partial \xi} \left[ \frac{1}{\xi} \frac{\partial}{\partial \xi} (\xi u) + \frac{1}{\xi} \frac{\partial v}{\partial \theta} \right] - \frac{1}{\xi} \frac{\partial}{\partial \theta} \left[ \frac{1}{\xi} \frac{\partial}{\partial \xi} (\xi v) - \frac{1}{\xi} \frac{\partial u}{\partial \theta} \right] + \frac{R^2}{H^2} \frac{\partial^2 u}{\partial \eta^2} = \frac{\rho R^2}{G^*} \left[ \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + \ddot{x}_g \cos \theta \right] \quad (2.17)$$

$$\Psi_o^2 \frac{1}{\xi} \frac{\partial}{\partial \theta} \left[ \frac{1}{\xi} \frac{\partial}{\partial \xi} (\xi u) + \frac{1}{\xi} \frac{\partial v}{\partial \theta} \right] + \frac{\partial}{\partial \xi} \left[ \frac{1}{\xi} \frac{\partial}{\partial \xi} (\xi v) - \frac{1}{\xi} \frac{\partial u}{\partial \theta} \right] + \frac{R^2}{H^2} \frac{\partial^2 v}{\partial \eta^2} = \frac{\rho R^2}{G^*} \left[ \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} - \ddot{x}_g \sin \theta \right] \quad (2.18)$$

(2.17) ve (2.18) bağıntılarının çözümünde aşağıda verilen sınır koşulları kullanılmaktadır.

$$u|_{\eta=0} = v|_{\eta=0} = 0 \quad (2.19)$$

$$\frac{\partial u}{\partial \eta} \Big|_{\eta=1} = \frac{\partial v}{\partial \eta} \Big|_{\eta=1} = 0 \quad (2.20)$$

Burada (2.19) bağıntısıyla verilen sınır koşulu stok malzemesi ve taban arasındaki pürüzlü arayüzey nedeniyle silo ile ortak hareketi, (2.20) bağıntısıyla verilen sınır koşulu ise üst yüzeydeki yatay kayma gerilmelerinin meydana gelmediği kabulünü temsil etmektedir. Bu sınır koşullarına ek olarak (2.21) koşulu ile (2.10) bağıntısındaki yaklaşım sayesinde taneli malzeme ve eğrisel sınır arayüzeyinde radyal yerdeğiştirmelerde tam bir süreklilik olduğu kabul edilmektedir. Ayrıca bu sınır koşulu ile düşey kayma gerilmelerinin,  $\tau_{rz}$ , meydana gelmediği de kabul edilmektedir.

$$u|_{\xi=1} = 0 \quad (2.21)$$



Yatay düzlemdeki çevresel hareket için iki farklı arayüzey durumu dikkate alındığından: pürüzlü bir arayüzey için;

$$v|_{\xi=1} = 0 \quad (2.22)$$

ve pürüzsüz bir arayüzey için;

$$\tau_{r\theta}|_{\xi=1} = 0 \quad (2.23)$$

ifadeleri kullanılmaktadır.

Bu yaklaşımda düşey kuvvetlerin dengesinin sağlanmadığı görülmekle birlikte, uzun dikdörtgen silolar için (Veletsos vd., 1995), ve yarı sonsuz bir katmana dayanan düz duvarlar için (Veletsos ve Younan, 1994b), ayrıca diğer yaklaşımlara da başvurarak, bu ihlalin ana inceleme nicelikleri olan cidar basınçları ve kuvvetlerin büyüklüklerini bariz bir şekilde etkilemediği gösterilmiştir. Aynı durumun burada dikkate alınan silindirik sistem için de doğru olduğu yazarlar tarafından belirtilmektedir.

Önerilen bu yaklaşımın (2.24) bağıntısında belirtilen biçimde harmonik taban hareketine maruz kaldığı varsayımıyla çözümlenmeler gerçekleştirilmektedir.

$$\ddot{u}_g(t) = \ddot{U}_g e^{i\omega t} \quad (2.24)$$

Burada  $\omega$  hareketin açısal frekansını göstermektedir. Kararlı durumda  $u$  ve  $v$  harmonik yerdeğiştirmeleri,  $U$  ve  $V$ 'nin  $\xi$  ve  $\eta$  koordinatlarının fonksiyonu olduğu;

$$u(\xi, \theta, \eta, t) = U(\xi, \eta) \cos \theta e^{i\omega t} \quad (2.25)$$

$$v(\xi, \theta, \eta, t) = V(\xi, \eta) \sin \theta e^{i\omega t} \quad (2.26)$$

bağıntıları ile ifade edilmektedir. (2.17) ve (2.18) bağıntılarının sağ taraflarındaki yer ivmesi terimleriyle ilişkili birim fonksiyonları aşağıdaki şekilde genişleterek,  $U$  ve  $V$  benzer şekilde ifade edilebilmektedir.

$$1 = \frac{4}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{2n-1} \sin \left[ \frac{(2n-1)\pi}{2} \eta \right] \quad (2.27)$$

$$U(\xi, \eta) = \sum_{n=1}^{\infty} U_n(\xi) \sin \left[ \frac{(2n-1)\pi}{2} \eta \right] \quad (2.28)$$

$$V(\xi, \eta) = \sum_{n=1}^{\infty} V_n(\xi) \sin \left[ \frac{(2n-1)\pi}{2} \eta \right] \quad (2.29)$$

Burada  $U_n$  ve  $V_n$ , radyal konum koordinatı  $\xi$ 'nin fonksiyonlarıdır. (2.27), (2.28) ve (2.29) bağıntılarındaki  $\eta$ 'nin fonksiyonları, stok malzemesinin düşeyde hareketinin sınırlandırılmamış olduğu durumda, konsol kayma kirişi kabulüyle doğal titreşim modlarını temsil etmektedirler. Bu fonksiyonların (2.19) ve (2.20) bağıntıları ile tanımlanan sınır koşullarını sağladığı kabul edilmektedir.

(2.24)'den (2.29)'a kadar olan bağıntılar, (2.17) ve (2.18) bağıntılarında yerine konulursa  $U_n$  ve  $V_n$  cinsinden  $n$ 'nin her bir değeri için birleşik adi diferansiyel bağıntı sistemi elde edilmektedir. Bu bağıntılar  $U_n$  ve  $V_n$ 'nin Tajimi (1973) tarafından kullanılan  $P_n$  ve  $S_n$  potansiyel fonksiyonları cinsinden ifade edilmesiyle ayrıklaştırılabilmektedir.

$$U_n = \frac{dP_n}{d\xi} + \frac{S_n}{\xi} \quad (2.30)$$

$$V_n = -\frac{P_n}{\xi} - \frac{dS_n}{d\xi} \quad (2.31)$$

$P_n$  ve  $S_n$  cinsinden sonuç adi diferansiyel bağıntıların çözümü;

$$P_n(\xi) = A_n' I_1(\alpha_n \xi) + C_n' K_1(\alpha_n \xi) + \frac{1}{2} \xi U_n^f \quad (2.32)$$

$$S_n(\xi) = B_n' I_1(\beta_n \xi) + D_n' K_1(\beta_n \xi) + \frac{1}{2} \xi U_n^f \quad (2.33)$$

şeklinde olmaktadır.

Burada  $I_1$  ve  $K_1$  sırasıyla birinci dereceden, birinci ve ikinci türden değiştirilmiş Bessel fonksiyonlarıdır.  $A_n$ 'den  $D_n$ 'ye kadar belirlenmesi gereken integrasyon sabitleri,  $\alpha_n$  ve  $\beta_n$  aşağıdaki şekilde ifade edilen boyutsuz faktörlerdir.

$$\alpha_n = \frac{\beta_n}{\psi_0} \quad (2.34)$$

$$\beta_n = \frac{(2n-1)\pi R}{2H} \sqrt{1 - \frac{\phi_n^2}{1+i\delta}} \quad (2.35)$$

Burada;

$$\phi_n = \frac{\omega}{\omega_n} \quad (2.36)$$

ve  $v_s' = \sqrt{G/\rho}$  stok malzemesi için kayma dalgası hızı olmak üzere;

$$\omega_n = \frac{(2n-1)\pi v_s'}{2H} \quad (2.37)$$

şeklindedir ve

$$U_n^f = -\frac{16 \rho \ddot{U}_g H^2}{\pi^3 G} \frac{1}{(2n-1)^3} \frac{1}{1 - \phi_n^2 + i\delta} \quad (2.38)$$

bağıntısıyla elde edilmektedir.

Burada  $\omega_n$ 'nin düşeyde sınırlandırılmamış stok malzemesinin, konsol kayma kirişi olarak davrandığı kabulüyle, n. açısal frekansını temsil ettiği belirtilmelidir.  $U_n^f$  belirtilen taban hareketine karşı kayma kirişinin en büyük yer değiştirme genliğini temsil etmektedir. Diğer taraftan üst simge olarak kullanılan f, kayma kirişi yer değiştirmesinin malzeme ortamının merkeze uzak noktalarındaki hareketi temsil ettiğini göstermektedir.

(2.32) ve (2.33) bağıntılarından  $\xi \rightarrow 0$ 'a bağlı olmadan artan  $K_1$  fonksiyonlu terimler çıkartılır ve  $P_n$  ve  $S_n$  ifadeleri (2.30) ve (2.31) bağıntılarında yerine konulursa;

$$U_n = \left\{ 1 - A_n \left[ \alpha_n I_0(\alpha_n \xi) - \frac{1}{\xi} I_1(\alpha_n \xi) \right] - B_n \frac{1}{\xi} I_1(\beta_n \xi) \right\} U_n^f \quad (2.39)$$

$$V_n = - \left\{ 1 - A_n \frac{1}{\xi} I_1(\alpha_n \xi) - B_n \left[ \beta_n I_0(\beta_n \xi) - \frac{1}{\xi} I_1(\beta_n \xi) \right] \right\} U_n^f \quad (2.40)$$

elde edilmektedir. Burada  $I_0$  = birinci tür ve sıfıncı dereceden değiştirilmiş Bessel fonksiyonudur ve  $A_n$  ve  $B_n$  sabitleri  $A_n'$  ve  $B_n'$  ile ilişkili olarak aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir.

$$\frac{A_n'}{A_n} = \frac{B_n'}{B_n} = -U_n^f \quad (2.41)$$

$A_n$  ve  $B_n$  integrasyon sabitleri (2.21) ve (2.22) ya da (2.23) sınır koşullarından birini sağlayarak belirlenebilmektedir. (2.21) ve (2.22) ile tanımlanan pürüzlü yüzey için;

$$A_n = \frac{1}{\Delta_n} [\beta_n I_0(\beta_n) - 2I_1(\beta_n)] \quad (2.42a)$$

$$B_n = \frac{1}{\Delta_n} [\alpha_n I_0(\alpha_n) - 2I_1(\alpha_n)] \quad (2.42b)$$

ve

$$\Delta_n = \alpha_n I_0(\alpha_n) [\beta_n I_0(\beta_n) - I_1(\beta_n)] - \beta_n I_0(\beta_n) I_1(\alpha_n) \quad (2.42c)$$

şeklinde ifade edilmektedir. (2.21) ve (2.23) bağıntılarıyla tanımlanan pürüzsüz yüzey için;

$$A_n = \frac{1}{\Delta_n} \left[ 2\beta_n I_0(\beta_n) - (4 + \beta_n^2) I_1(\beta_n) \right] \quad (2.43a)$$

$$B_n = \frac{1}{\Delta_n} \left[ 2\alpha_n I_0(\alpha_n) - 4I_1(\alpha_n) \right] \quad (2.43b)$$

ve

$$\Delta_n = \left[ \alpha_n I_0(\alpha_n) - I_1(\alpha_n) \right] \left[ 2\beta_n I_0(\beta_n) - \beta_n^2 I_1(\beta_n) \right] - 2\alpha_n I_0(\alpha_n) I_1(\beta_n) \quad (2.43c)$$

şeklinde ifade edilmektedir.

Buradan hareketle ek dinamik cidar basınçları ve kayma gerilmeleri aşağıdaki şekilde hesaplanabilmektedir. Stok malzemesi-cidar arayüzeyine uygulanan radyal ya da normal basınçların dinamik bileşenleri,  $\sigma_r$ , ve çevresel kayma gerilmeleri,  $\tau_{r\theta}$ , (2.25) ve (2.26) bağıntılarına benzer bir biçimde;

$$p_{hs} = \sigma_r = \sigma(\eta) \cos \theta e^{i\omega t} \quad (2.44)$$

$$\tau_{r\theta} = \tau(\eta) \sin \theta e^{i\omega t} \quad (2.45)$$

olarak ifade edilebilmektedir.

Burada  $\sigma(\eta)$  ve  $\tau(\eta)$   $\eta$  koordinatının fonksiyonları olan kompleks değerli genlikleri ifade etmektedirler. (2.24)'den (2.29)'a kadar olan bağıntılar ve (2.39) ve (2.40) bağıntılarından yararlanarak (2.44) ve (2.45) nolu bağıntıları, (2.13) ve (2.15) nolu bağıntılarda yerine konulduğunda ;

$$\sigma(\eta) = -\frac{8\Psi_o}{\pi^2} \rho \ddot{U}_g H \sum_{n=1}^{\infty} \frac{g_n}{(2n-1)^2} \sqrt{\frac{1+i\delta}{1-\phi_n^2+i\delta}} \sin \left[ \frac{(2n-1)\pi}{2} \eta \right] \quad (2.46)$$

$$\tau(\eta) = \frac{8}{\pi^2} \rho \ddot{U}_g H \sum_{n=1}^{\infty} \frac{h_n}{(2n-1)^2} \sqrt{\frac{1+i\delta}{1-\phi_n^2+i\delta}} \sin \left[ \frac{(2n-1)\pi}{2} \eta \right] \quad (2.47)$$

bağıntıları elde edilmektedir.

Burada  $g_n$  ve  $h_n$  boyutsuz parametrelerdir. Pürüzlü arayüzey için;

$$g_n = \frac{1}{\Delta_n} \alpha_n I_1(\alpha_n) [2I_1(\beta_n) - \beta_n I_0(\beta_n)] \quad (2.48a)$$

$$h_n = \frac{1}{\Delta_n} \beta_n I_1(\beta_n) [2I_1(\alpha_n) - \alpha_n I_0(\alpha_n)] \quad (2.48b)$$

şeklinde, pürüzsüz yüzey için ise;

$$g_n = \frac{\alpha_n}{\Delta_n} \left\{ [(4 + \beta_n^2) I_1(\beta_n) - 2\beta_n I_0(\beta_n)] I_1(\alpha_n) - [\alpha_n I_0(\alpha_n) - 2I_1(\alpha_n)] 2I_1(\beta_n) \right\} \quad (2.49a)$$

$$h_n = 0 \quad (2.49b)$$

şeklinde ifade edilmektedir.

Cidar ve stok malzemesi arayüzeyi boyunca oluşan gerilme genlikleriyle, bu gerilmelerden kaynaklanan taban kesme kuvveti genliği  $V_b$  ve devirici taban momenti genliği  $M_b$  aşağıdaki integrasyonlarla belirlenebilmektedir.

$$\begin{aligned} V_b &= \int_0^1 \int_0^{2\pi} [\tau(\eta) \sin^2 \theta - \sigma(\eta) \cos^2 \theta] R d\theta H d\eta \\ &= -m \ddot{U}_g \frac{16}{\pi^3} \frac{H}{R} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\Psi_o g_n + h_n}{(2n-1)^3} \sqrt{\frac{1+i\delta}{1-\phi_n^2+i\delta}} \end{aligned} \quad (2.50)$$

$$\begin{aligned} M_b &= \int_0^1 \int_0^{2\pi} [\tau(\eta) \sin^2 \theta - \sigma(\eta) \cos^2 \theta] R d\theta H^2 \eta d\eta \\ &= -m \ddot{U}_g H \frac{32}{\pi^4} \frac{H}{R} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n-1}}{(2n-1)^4} (\Psi_o g_n + h_n) \sqrt{\frac{1+i\delta}{1-\phi_n^2+i\delta}} \end{aligned} \quad (2.51)$$

Burada  $m = \pi \rho R^2 H$  stok malzemesinin toplam kütesini ifade etmektedir.

### 2.1.2.2. Esnek Çözüm

Bu başlıkta, daha önce temel varsayımları verilmiş ve detaylı bir şekilde matematik altyapısı kurulmuş olan Veletsos ve Younan yaklaşımının esnek çözümü irdelenmektedir. Önerilen bu yöntemde üniform viskoelastik katı içeren düşey silindirik siloların harmonik taban etkisine karşı tepkisi üzerinde cidar esneklik etkileri dikkate alınmaktadır. Rijit çözümden farklı olarak silo cidarının da esnekliğinin dikkate alınması yöntemin bu kısmında cidar için de kabul yapmayı zorunlu kılmaktadır. Çözümleme silo cidarının, enkesitinde hiçbir değişme olmayan, konsol kayma kirişi gibi davrandığını öngörmekte ve bulguları buna göre üretmektedir. İlgili yöntemin değişken kesitli silo cidarı için uygulanması bu nedenle uygun olmayacaktır.

Stok malzemesinin de cidar gibi konsol kayma kirişi olarak davrandığından hareketle malzemenin esnekliğine göre cidarın esnekliğini içeren terimler bu yöntemde dikkate alınmaktadır. Bu durumda incelenen asıl parametreler; stok malzemesi yüksekliğinin silo yarıçapına oranı ve kuvvet fonksiyonunun karakteristikleridir. Rijit kabulde olduğu gibi burada da asıl taban hareketinin harmonik karakterde olduğu varsayılmakta, genel bağıntılar da bu mantıkla elde edilmektedir.

Esnek bir silo için stok malzemesinin etkili yatay rijitliği, rijit bir silodakine göre daha küçük olduğundan, cidarın esnekliği yatay hareketi ile kendisine iletilen atalet kuvveti payını azaltabilmekte ve kayma hareketi ile tabana iletilen payı artırabilmektedir. Ek olarak, silo esnekliği stok malzemesi-silo sisteminin doğal frekansını düşürebilmekte ve etkili sönümü değiştirebilmektedir. Sistemin karakteristiklerine ve tabanda dikkate alınan hareketin frekansına bağlı olarak, rijit silo için elde edilenlere göre kritik tepkileri artırabilmekte ya da azaltabilmektedir.

Çözümleme yöntemi, rijit silolar için bir önceki bölümde tanımlananın bir uzantısı şeklinde olup önceki varsayımlar ve yaklaşımların hepsini kapsamakta olduğu daha önce de ifade edilmişti. Bu yaklaşımda silo cidarının, kesitinde değişiklik olmayan, konsol kayma kirişi gibi davrandığı ve silo cidarı ile malzeme arasında tam bağ olduğu kabul edilerek, ilgili cidar özellikleri  $\rho_w$ ,  $v_w$  ve  $G_w^* = G_w(1+i\delta_w)$  ile gösterilmekte ve cidar kalınlığı  $t_w$  üniform olarak dikkate alınmaktadır. Bu durumda, silindirik sınır boyunca, stok malzemesinin hareket eden tabana göre rölatif radyal ve çevresel yerdeğiştirmeleri,  $u$  ve  $v$  aşağıdaki şekilde verilmektedir.

$$u|_{\xi=1} = u_w(\eta, t) \cos \theta \quad (2.52)$$

$$v|_{\xi=1} = -u_w(\eta, t) \sin \theta \quad (2.53)$$

Burada  $\xi = r/R$  ve  $\eta = z/H$  boyutsuz konum koordinatlarını ve  $u_w =$  cidarın herhangi bir noktasının uyarım yönünde tabana göre rölatif yer değiştirmesini göstermektedir.

Daha önce rijit yaklaşımda ifade edildiği gibi, harmonik bir taban hareketi için ivme, (2.24) bağıntısında verildiği şekliyle bu yöntemde de dikkate alınmaktadır.

Stok malzemesinin herhangi bir noktasının kararlı yerdeğiştirme değerleri  $u$  ve  $v$ , rijit siloda olduğu gibi (2.25) ve (2.26) bağıntıları ile ifade edilmektedir. İlgili cidar yerdeğiştirmesi,  $u_w$ , de aşağıdaki bağıntıyla tanımlanabilmektedir.

$$u_w(\eta, t) = \sum_{n=1}^{\infty} U_n^w \sin \left[ \frac{(2n-1)\pi}{2} \eta \right] e^{i\omega t} \quad (2.54)$$

Burada  $U_n^w$  belirlenecek olan sabitlerdir.

Bir önceki bölümde (2.17) ve (2.18) ile tanımlanan hareket bağıntılarındaki yer ivmesi terimleri ile ilişkili birim fonksiyon genişletilerek;

$$1 = \frac{4}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{2n-1} \sin \left[ \frac{(2n-1)\pi}{2} \eta \right] \quad (2.55)$$

olarak elde edilmektedir.

Son bağıntılarda (2.25) ve (2.26) bağıntıları yerine konulup, (2.52) ve (2.53) ile tanımlanan sınır koşulları sağlatılarak, (2.54) ifadesinde tanımlanan  $u_w$  ile  $U_n$  ve  $V_n$  bağıntıları aşağıdaki şekilde verilebilmektedir.

$$U_n(\xi) = U_n^f - \left\{ A_n \left[ \alpha_n I_0(\alpha_n \xi) - \frac{1}{\xi} I_1(\alpha_n \xi) \right] + B_n \frac{1}{\xi} I_1(\beta_n \xi) \right\} \{ U_n^f - U_n^w \} \quad (2.56)$$



$$V_n(\xi) = -U_n^f + \left\{ A_n \frac{1}{\xi} I_1(\alpha_n \xi) + B_n \left[ \beta_n I_0(\beta_n \xi) - \frac{1}{\xi} I_1(\beta_n \xi) \right] \right\} \{ U_n^f - U_n^w \} \quad (2.57)$$

Burada,  $I_0$  ve  $I_1$ , daha önce de belirtildiği üzere, sırasıyla birinci tür, sıfırıncı ve birinci dereceden değiştirilmiş Bessel fonksiyonlarını göstermektedir. Formüller verilen diğer parametreler ise rijit silolar için verilenlerle aynı şekilde tanımlanabilmektedir. Özellikle  $\alpha_n$  ve  $\beta_n$  bir önceki başlıkta (2.34) ve (2.35) bağıntılarıyla ve  $U_n^f$ ,  $A_n$  ve  $B_n$  ise yine aynı başlıkta (2.38), (2.42a) ve (2.42b) bağıntılarıyla tanımlanmaktadır.

Silindirik cidara uygulanan radyal ya da normal basınçlar  $\sigma_r$ , ve çevresel kayma gerilmeleri,  $\tau_{r\theta}$ , aşağıdaki şekilde ifade edilebilmektedir.

$$\sigma_r(\eta, \theta, t) = \sigma(\eta) \cos \theta e^{i\omega t} = \sum_{n=1}^{\infty} (\sigma_r)_n \sin \left[ \frac{(2n-1)\pi}{2} \eta \right] \cos \theta e^{i\omega t} \quad (2.58)$$

$$\tau_{r\theta}(\eta, \theta, t) = \tau(\eta) \sin \theta e^{i\omega t} = \sum_{n=1}^{\infty} (\tau_{r\theta})_n \sin \left[ \frac{(2n-1)\pi}{2} \eta \right] \sin \theta e^{i\omega t} \quad (2.59)$$

Burada  $\sigma(\eta)$  ve  $\tau(\eta)$  ve bunların bileşenlerinin genlikleri,  $(\sigma_r)_n$  ve  $(\tau_{r\theta})_n$ , kompleks niceliklerdir. (2.56) ve (2.57) bağıntılarındaki  $U_n^f$ 'nin  $\xi$ 'den bağımsız olduğu ve  $\sigma_r$  ve  $\tau_{r\theta}$  ifadelerindeki (bkz (2.13) ve (2.15) bağıntıları);  $\frac{1}{\xi} \frac{\partial v}{\partial \theta} + \frac{u}{\xi}$  ve  $\frac{1}{\xi} \frac{\partial u}{\partial \theta} + \frac{v}{\xi}$  terimlerinin stok malzemesi-cidar arayüzeyi boyunca kaybolduğu görülmektedir.  $(\sigma_r)_n$  ve  $(\tau_{r\theta})_n$  terimleri, rijit silolar için olan çözümdeki ilgili terimlerden, uygun ifadenin n. terimini aşağıdaki azaltma faktörü ile çarparak, basitçe belirlenebilmektedir.

$$R_n = 1 - \frac{U_n^w}{U_n^f} \quad (2.60)$$

Gerilmeler için işaret kuralı rijit yaklaşımda ifade edildiği gibidir. Tabanın hemen üzerindeki kesitteki toplam cidar kuvvetinin ve devirici momentin n. bileşenleri rijit siloların ilgili bileşenlerine benzer şekilde belirlenebilmektedir.

Henüz tanımlanmamış  $R_n$  ve  $U_n^w/U_n^f$  değerleri, cidarın birim yükseklikli parçasına etkiyen kuvvetlerin yatay dengesi dikkate alınarak aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır.

$$F_i(\eta) + F_s(\eta) + F_c(\eta) = 0 \quad (2.61)$$

Burada  $F_i$ =cidar eylemsizlik kuvvetini,  $F_s$ =cidarın kaymaya direncini ve  $F_c$ =stok malzemesi tarafından cidara uygulanan kuvveti temsil etmektedir. Bu kuvvetler aşağıdaki bağıntılarla hesaplanabilmektedir.

$$F_i = -2\pi R t_w \rho_w (\ddot{u}_w + \ddot{u}_g) \quad (2.62)$$

$$F_s = 2\pi R t_w \frac{1}{H} \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial \eta} = 2\pi R t_w \frac{G_w^*}{H^2} \frac{\partial^2 u_w}{\partial \eta^2} \quad (2.63)$$

$$F_c = \int_0^{2\pi} (\tau \sin^2 \theta - \sigma \cos^2 \theta) R d\theta e^{i\omega t} = \pi R (\tau - \sigma) e^{i\omega t} \quad (2.64)$$

Burada  $\tau_{zx}$  taban hareketi doğrultusundaki yatay kayma gerilmesini temsil etmektedir. (2.62)'den (2.64)'e kadar olan bağıntıları (2.61) bağıntısında yerine koyup, (2.54) bağıntısı ve  $\sigma(\eta)$  ve  $\tau(\eta)$ 'nin kısaltılmış hallerinden yararlanarak,  $R_n$  faktörü aşağıdaki şekilde elde edilmektedir:

$$R_n = \frac{\frac{1+i\delta_w}{1+i\delta} - d_w \frac{m_w}{m}}{\frac{1+i\delta_w}{1+i\delta} - d_w \frac{m_w}{m} \frac{\phi_n^2}{1+i\delta} - d_w C_n} \quad (2.65)$$

Burada  $\phi_n$  (2.36) ve  $\omega_n$ , kayma kirişi kabulüyle, stok malzemesinin n. açısız frekansı olmak üzere, (2.37) bağıntısı ile hesaplanabilmektedir.  $m_w/m$  cidarın kütlelerinin stok malzemesi kütlelerine oranını göstermek üzere bu bağıntı,

$$\frac{m_w}{m} = 2 \frac{\rho_w t_w}{\rho R} \quad (2.66)$$

şeklinde elde edilmektedir. Burada  $d_w$  cidar esnekliğinin boyutsuz ölçüsünü göstermektedir.  $d_w$  ve  $C_n$  aşağıdaki şekilde tanımlanmaktadır.

$$d_w = \frac{1}{2} \frac{GR}{G_w t_w} \quad (2.67)$$

$$C_n = \frac{2}{\pi} \frac{\psi_o g_n + h_n}{2n-1} \frac{H}{R} \sqrt{\frac{1-\phi_n^2 + i\delta}{1+i\delta}} \quad (2.68)$$

Son ifadedeki  $\psi_o, g_n$  ve  $h_n$  parametreleri bir önceki bölümdeki (2.16), (2.48a) ve (2.48b) bağıntılarıyla tanımlanmaktadır.

Bu yaklaşımda silo cidarının ataletinin iki etkisi vardır: (a) dinamik cidar basınçlarının ve ilgili kuvvetlerin büyüklük ve dağılımını değiştirir; ve (b) cidarda ek kuvvetlere neden olur. İlk etki  $R_n$  azaltma faktörünün değerlendirilmesi için uygun olarak sağlanmakta, fakat ikincisi önceki bölümde değinilen taban kesme kuvveti ve taban momenti için olan ifadelerde içerilmektedir.

Cidarın ataletinin neden olduğu taban kesme kuvveti ve taban momentinin zamana bağlı değerleri  $V_b^w(t)$  ve  $M_b^w(t)$  aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir.

$$V_b^w(t) = -2\pi R t_w \rho_w \int_0^1 (\ddot{u}_w + \ddot{u}_g) H d\eta \quad (2.69a)$$

$$M_b^w(t) = -2\pi R t_w \rho_w \int_0^1 (\ddot{u}_w + \ddot{u}_g) H^2 \eta d\eta \quad (2.69b)$$

(2.24), (2.54) ve (2.60) bağıntılarından yararlanarak sırasıyla aşağıdaki hale getirilebilmektedirler.

$$V_b^w(t) = -m_w \ddot{U}_g \left[ 1 + \frac{8}{\pi^2} \left( \frac{\omega}{\omega_1} \right)^2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)^4} \frac{1-R_n}{1-\phi_n^2 + i\delta} \right] e^{i\omega t} \quad (2.70a)$$

$$M_b^w(t) = -\frac{1}{2} m_w \ddot{U}_g H \left[ 1 + \frac{32}{\pi^3} \left( \frac{\omega}{\omega_1} \right)^2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n-1}}{(2n-1)^5} \frac{1-R_n}{1-\phi_n^2 + i\delta} \right] e^{i\omega t} \quad (2.70b)$$

Rijit bir silo için  $R_n$  azaltma faktörü 1 olarak elde edilirken, bu faktörleri içeren terimler normal olarak bağıntılarda gitmekte, taban kesme kuvveti ve taban momentinin genlikleri, gerektiği gibi, sırasıyla  $m_w \ddot{U}_g$  ve  $m_w \ddot{U}_g H/2$  olarak azalmaktadır.

Şimdiye kadar gerek rijit gerekse esnek silo kabulüyle elde edilen bu yaklaşım harmonik bir zorlanma etkisinde kabul edilerek Veletsos ve Younan tarafından bağıntılar türetilmiştir. Ancak bu çalışma kapsamında kuvvetli yer hareketinin silolar üzerindeki etkisi irdelendiğinden bu yaklaşım üzerinde bazı düzeltmeler gerekmektedir. Bu amaç, tepkilerin her birinin frekans alanında elde edilmesini zorunlu kılmaktadır. Bu durumda yer hareketi aşağıda verildiği şekliyle Hızlı Fourier dönüşüm tekniği kullanılarak zaman ortamından frekans ortamına dönüştürülerek tanımlanmıştır.

$$x(j) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \ddot{U}_g(k) \omega_N^{-(j-1)(k-1)} \quad (2.71)$$

$$\ddot{U}_g(\omega) = \sum_{j=1}^N x(j) \omega_N^{(j-1)(k-1)} \quad (2.72)$$

Burada  $\omega_N = e^{(-2\pi i)/N}$  olarak tanımlanmaktadır. Bu şekilde elde edilen yer hareketinin frekans ortamındaki tanımı kullanarak, sırasıyla malzeme basınçları, taban kesme kuvveti ve devirici moment aşağıdaki eşitlikler yardımıyla elde edilebilmektedir.

$$p_{hs} = \sigma_r(\eta, \theta, \omega) = -\frac{8\Psi_o}{\pi^2} \rho \ddot{U}_g(\omega) H \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{g_n}{(2n-1)^2} \sqrt{\frac{1+i\delta}{1-\phi_n^2+i\delta}} \sin\left[\frac{(2n-1)\pi}{2}\eta\right] \left[\frac{(2n-1)\pi}{2}\eta\right] \cos\theta e^{i\omega t} \quad (2.73)$$

$$V_b^w(\omega) = -m_w \ddot{U}_g(\omega) \left[ 1 + \frac{8}{\pi^2} \left(\frac{\omega}{\omega_1}\right)^2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)^4} \frac{1-R_n}{1-\phi_n^2+i\delta} \right] e^{i\omega t} \quad (2.74)$$

$$M_b^w(\omega) = -\frac{1}{2} m_w \ddot{U}_g(\omega) H \left[ 1 + \frac{32}{\pi^3} \left(\frac{\omega}{\omega_1}\right)^2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n-1}}{(2n-1)^5} \frac{1-R_n}{1-\phi_n^2+i\delta} \right] e^{i\omega t} \quad (2.75)$$

Frekans ortamında elde edilen bu tepkiler ters Fourier dönüşümü yardımıyla zaman ortamına dönüştürülerek tepkilerin zaman ortamındaki değerleri bulunmaktadır. Bu sayede harmonik hareket için türetilmiş olan bu yaklaşım kullanılarak, siloların yer hareketine

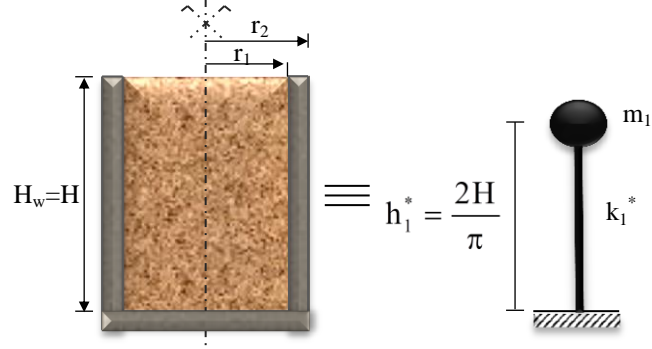
olan tepkileri elde edilmiş olmaktadır. Bu işlemlere ait çalışma kapsamında hazırlanan program kodu Ek 1’de sunulmaktadır.

### **2.1.3. Stok Malzemesi- Silo Sistemi İçin Önerilen Analitik Model (ÖM)**

Siloların deprem davranışlarının ilk olarak sıvı davranışına benzetildiği ve takip eden araştırmalarda bu yaklaşımın terk edilerek daha gerçekçi yaklaşımlar üretilmeye başlandığı teknik literatür araştırmasında ifade edilmişti. Dinamik basınçların tahmin edilme sürecinde ise genel anlamda bu ve benzeri yöntemlerin kullanıldığı anlaşılmaktadır. Veletsos ve Younan tarafından önerilen analitik yaklaşım, harmonik hareket tabanlı olması nedeniyle, deprem hareketine göre çözümlerinin gerçekleştirilmesini zorlaştırmaktadır. Bu durumda çözüm ancak deprem hareketinin frekans ortamına dönüştürülmesi ve çözümlerin bu ortamda gerçekleştirilmesinden sonra elde edilen tepkilerin zaman ortamına dönüştürülmesini gerektirmektedir ki bu durum da oldukça zaman alıcı ve pratik olmaktan uzaktır. Kaldı ki çözümün zemin dinamiğine benzetilerek kurulmuş olması sınırlı bir ortamda bulunan stok malzemesinin davranışını bazı durumlarda temsil etmekten uzak olacaktır. Diğer taraftan Eurocode’da önerilen yaklaşımın ise birçok literatürde uygun sonuçlar vermediği deneysel ve sayısal yaklaşımla belirtilmiştir (Holler ve Meskouris, 2006, Tatko ve Kobiela, 2008). Durum böyle olunca daha gerçekçi basitleştirilmiş bir yaklaşıma ihtiyaç olduğu açıkça görülmektedir.

Bu amaçla bu çalışmada; stok malzemesinin davranışını, taşıyıcı sistemin geometrisi ve rijitliğini dikkate alan bir yöntem geliştirilmiştir. Önerilen bu yaklaşımda depremin yatay bileşenine maruz cidarlara etkiyen malzeme dinamik basıncını hesaplamak için, taneli malzemenin önemli bir kısmının silo cidarı ile birlikte hareket ettiği ve silo rijitliğinin de katkı sağladığından hareket edilmiştir. Diğer taraftan dikkate alınmayan artık kütlelerin, cidar basıncına bir etkisinin olmadığı, bununla beraber silo yapısının rijitliği üzerinde de hiçbir etkisinin olmadığı kabul edilmektedir. Bu kabuller ışığında, stok malzemesi kütlelerinin belirli bir kısmı ile silo yapısının kütlelerini beraber göz önüne alıp bütün sistemi tek kütleli bir sistem gibi düşünmek mümkün olmaktadır. Silindirik bir geometriye sahip taşıyıcı sistem yine bu geometriye uygun olarak şekillenen ve silo hacminin geometrisini alan stok malzemesi ile tabanda mesnetli ve yükseklik boyunca sürekli bir kütle olarak düşünülebilmektedir. Buradan hareketle, taşıyıcı sistemin sürekliliği açısından, sistemi yayılı kütle ve rijitlik ile modellemek mümkün olmakla

birlikte, eşdeğer kütleli bir sistem olarak da modellemek mümkündür. Bu durumda zemine oturan düz tabanlı stok malzemesi-silo sistemi için dikkate alınan model, Şekil 2.4'de görülmektedir.



Şekil 2.4. Stok malzemesi-silo sistemi için önerilen matematik model

Bu yaklaşıma göre sistem konsol bir kiriş gibi düşünülerek rijitliği elde edilebilmektedir. Bu sistemin yatay rijitliği,  $k_s$ , cidarın ve stok malzemesinin rijitliğe katkısı da dikkate alınarak aşağıdaki bağıntı yardımıyla belirlenmektedir.

$$k_s = \frac{3E_w I_w}{H_w^3} + \frac{3E_m I_m}{H^3} \quad (2.76)$$

Burada  $E_w$ ,  $E_m$ ,  $I_w$ ,  $I_m$  ve  $H_w$ ,  $H$  sırasıyla, cidarın ve stok malzemesinin elastisite modüllerini, yataydaki eylemsizliklerini ve yüksekliklerini ifade etmekte olup, bu terimlerin yerine konulması ile bağıntı aşağıdaki hali almaktadır.

$$k_s = \frac{3E_w \pi (r_2^4 - r_1^4)}{4H_w^3} + \frac{3E_m \pi r_1^4}{4H^3} \quad (2.77)$$

Belirlenmesi gereken bir diğer önemli husus ise stok malzemesine ait kütlelerin ne kadarının dikkate alınacağıdır. Daha önce de ifade edildiği üzere, gerek Eurocode gerekse ACI gibi yaygın olarak kabul gören yönetmelikler, dikkate alınması gereken kütlelerin %80 mertebesinde olması gerektiğini ifade etmektedirler. Bu yaklaşımlara ek olarak Veletsos-

Younan yaklaşımındaki 2.50 bağıntısı yardımıyla dikkate alınması gereken kütleyle ait bağıntı aşağıdaki gibi elde edilebilmektedir.

$$\Omega = \frac{16}{\pi^3} \frac{H}{R} (\psi_o g_1 + h_1) \sqrt{\frac{1+i\delta}{1-\phi_1^2+i\delta}} \quad (2.78)$$

Bu bağıntıdaki gerekli parametreler, Veletsos-Younan yaklaşımında verilen bağıntılardan yararlanarak, aşağıdaki gibi belirlenebilmektedir.

$$\beta_1 = \frac{\pi R}{2 H} \sqrt{1 - \frac{\phi_1^2}{1+i\delta}} \quad (2.79)$$

$$\psi_o = \sqrt{\frac{2}{1-\nu}}, \quad \alpha_1 = \frac{\beta_1}{\psi_o} \quad (2.80)$$

$$I_0(\alpha_1) = \sum_{m=0}^{\infty} \frac{(-1)^m \alpha_1^{2m}}{2^{2m} (m!)^2} \quad (2.81)$$

$$I_0(\beta_1) = \sum_{m=0}^{\infty} \frac{(-1)^m \beta_1^{2m}}{2^{2m} (m!)^2} \quad (2.82)$$

$$I_1(\alpha_1) = \sum_{m=0}^{\infty} \frac{(-1)^m \alpha_1^{2m+1}}{2^{2m+1} m!(m+1)!} \quad (2.83)$$

$$I_1(\beta_1) = \sum_{m=0}^{\infty} \frac{(-1)^m \beta_1^{2m+1}}{2^{2m+1} m!(m+1)!} \quad (2.84)$$

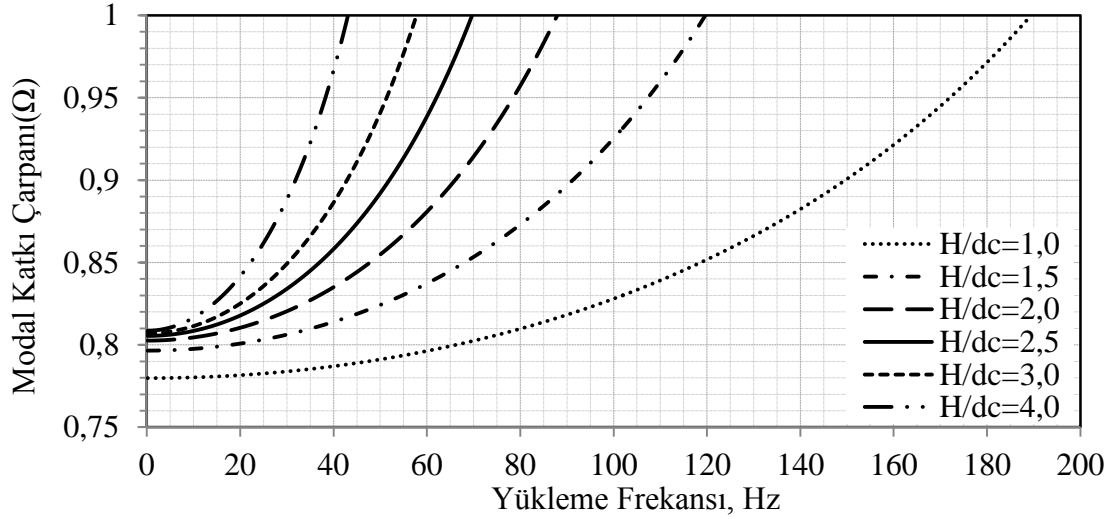
$$\Delta_1 = \alpha_1 I_0(\alpha_1) [\beta_1 I_0(\beta_1) - I_1(\beta_1)] - \beta_1 I_0(\beta_1) I_1(\alpha_1) \quad (2.85)$$

$$g_1 = \frac{1}{\Delta_1} \alpha_1 I_1(\alpha_1) [2I_1(\beta_1) - \beta_1 I_0(\beta_1)] \quad (2.86)$$

$$h_1 = \frac{1}{\Delta_1} \beta_1 I_1(\beta_1) [2I_1(\alpha_1) - \alpha_1 I_0(\alpha_1)] \quad (2.87)$$

Önerilen bu modelde kütle oranının tespit edilebilmesi için parametrik bir çalışma yapmaya ihtiyaç duyulmuştur. Bu amaçla çalışmaya konu edilen çapı 10m ve yükseklikleri ise 10-40 m arasında değişen 6 farklı silo için Şekil 2.5’de verilen değişimler elde edilmiştir. Buradan da görülebileceği üzere, zorlanmanın kuvvetli yer hareketi olması

durumunda olası yer hareketi hâkim frekansları için dikkate alınması gereken kütle oranının %80'ler civarında gerçekleştiği görülmektedir. Diğer taraftan küçük yüksekliklere nazaran, büyük malzeme yükseklikleri için bu oranın çok daha düşük frekans değerlerinde %100'e ulaşabildiği görülmektedir. Ancak genel olarak uygulamadaki silo boyutları ve bugüne kadar kayıt edilmiş kuvvetli yer hareketi frekansları düşünüldüğünde, bu oranın yönetmeliklerde ifade edildiği gibi %80 olarak kabul edilebileceği bu çalışmada da görülmektedir. Bu değer, önerilen yöntemin pratikte kullanılması için de %80 olarak dikkate alınabileceğini belirtmek uygun olmaktadır. Bu çalışmada ise sözkonusu oran, geliştirilen program yardımıyla hesaplanarak kullanılmaktadır.



Şekil 2.5. Farklı narinlik oranları için yükün frekansına bağlı olarak modal katkı çarpanı değişimi

Şekil 2.5 yardımıyla seçilecek olan kütle katkı oranı ( $\Omega$ ) kullanılarak dikkate alınacak toplam kütle aşağıdaki bağıntıda verildiği şekliyle malzemenin ( $m$ ) ve cidarın toplam kütlesi ( $m_w$ ) cinsinden elde edilebilmektedir.

$$m_1^* = m_w + \Omega \cdot m \quad (2.88)$$

Hesaplanan bu kütlenin tabandan yüksekliğinin hesaplanması için ise yine Veletsos yaklaşımında verilen moment-kesme kuvveti ilişkisi kullanılarak aşağıdaki bağıntı elde edilmektedir.



$$h_1^* = \frac{-m\ddot{X}_g H \frac{32}{\pi^4} \frac{H}{R} (\psi_0 g_1 + h_1) \sqrt{\frac{1+i\delta}{1-\phi_1^2+i\delta}}}{-m\ddot{X}_g \frac{16}{\pi^3} \frac{H}{R} (\psi_0 g_1 + h_1) \sqrt{\frac{1+i\delta}{1-\phi_1^2+i\delta}}} \quad (2.89)$$

Uygun sadeleştirmeler yapıldığında etkili yükseklik, stok malzemesi yüksekliği cinsinden aşağıdaki şekilde elde edilebilmektedir.

$$h_1^* = \frac{2H}{\pi} \quad (2.90)$$

(2.88) bağıntısıyla elde edilen toplam kütle ve (2.77)'den elde edilen sistem rijitliği kullanılarak önerilen modele ait dinamik karakteristikler belirlenebilmektedir. Burada örnek olarak sisteme ait frekans ( $f_1^*$ ) aşağıdaki eşitlik yardımıyla elde edilmektedir. Bilindiği üzere, tabana ankastre bağlı sistemlerde toplanmış kütle yaklaşımlarının kullanılması durumunda zemin üzerinde belirli yükseklikteki kütlelerin zemin hareketini taklit ettiği kabulünden hareketle kütlelerin bir kısmının sistem dinamik karakteristiği üzerinde etkisinin olmadığı varsayılmaktadır. Bu yaklaşımda da yaygın olarak kullanılan bu kabulün gereği olarak kütle 2/3 katsayısı ile azaltılmaktadır.

$$f_1^* = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_1^*}{m_1 \cdot 2/3}} \quad (2.91)$$

$$f_1^* = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\frac{3E_w \pi (r_2^4 - r_1^4)}{4H_w^3} + \frac{3E_m \pi r_1^4}{4H^3}}{(m + m_w) \cdot 2/3}} \quad (2.92)$$

Yer hareketine maruz önerilen tek kütleli sistemin tepkisi en genel manada, aşağıda verilen hareket bağıntısının çözümü yoluyla elde edilebilmektedir.

$$m_1^* \ddot{u} + c \dot{u} + k_1^* u = -m_1^* \ddot{u}_{gx}(t) - m_1^* \ddot{u}_{gy}(t) - m_1^* \ddot{u}_{gz}(t) \quad (2.93)$$

Burada da görülebileceği üzere yer hareketinin üç bileşeni de bu hareket bağıntısında içerilmiştir. Genel anlamda hareketin yatay bileşenlerinden birine göre bulunacak tepkilerin basınçların hesaplanmasında yeterli olacağı ve düşey bileşenin ihmal edilebileceği düşünüldüğünde bu hareket bağıntısı aşağıdaki biçimde yazılabilmektedir.

$$m_1^* \ddot{u}(t) + c \dot{u}(t) + k_1^* u(t) = -m_1^* \ddot{u}_g(t) \quad (2.94)$$

Bu bağıntının her iki tarafının kütleyle bölünerek sadeleştirilmesi durumunda yine yaygın olarak kullanılan hareket bağıntısı,  $\zeta$  sistemin sönüm oranını göstermek üzere aşağıdaki biçimde yazılabilmektedir.

$$\ddot{u}_1(t) + 2\zeta\omega \dot{u}_1(t) + \omega^2 u_1(t) = -\ddot{u}_g(t) \quad (2.95)$$

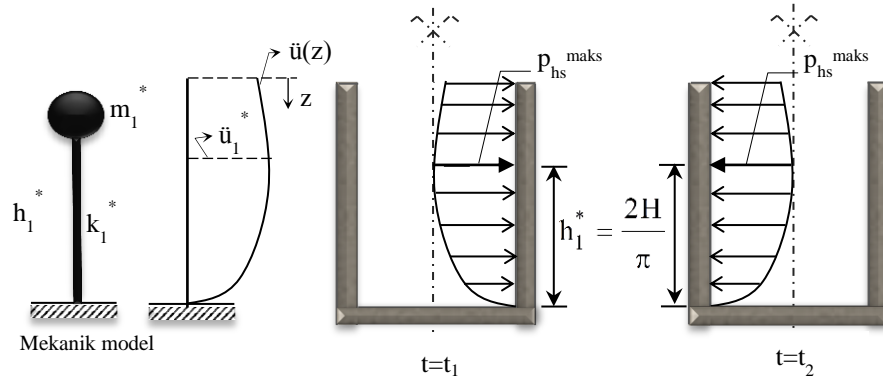
Eşitlikten de görülebileceği üzere yer hareketine ve sistemin dinamik karakteristiklerine bağlı olarak yer hareketi ile sistemin kütle seviyesinde meydana gelen yerdeğiştirme, hız ve ivmenin zamanla değişimleri arasında ilişkiler kurulmuş olmaktadır. Söz konusu bu eşitlik gerek sayısal entegrasyon tekniklerinden herhangi biri, gerekse doğrudan çözüm yöntemlerinden herhangi biri kullanılarak rahatlıkla çözülebilmektedir. Bu çözümden elde edilecek yer hareketine bağlı kütle seviyesinde meydana gelen ivmenin zamanla değişiminin yükseklik boyunca nasıl değişeceği ise önerilen bu yöntemde düzgün yayılı kütleyle sahip konsol bir kirişin yükseklik boyunca değişimine benzer şekilde elde edilebilmektedir. Bu amaçla ivmenin kütle seviyesinde en büyük değerine ulaşacağı kabulünden hareketle, sözkonusu ivme aşağıdaki bağıntı yardımıyla elde edilebilmektedir.

$$\ddot{u}(z, t_1) = \frac{-3,363 \cdot z^4 + 0,481 \cdot H^3 \cdot z + 2,882 \cdot H^4}{3 \cdot H^4} \quad (2.96)$$

Burada H, silo tabanının üst yüzeyinden malzeme üst yüzeyine kadar olan yüksekliği göstermektedir. Böylelikle her bir t anı için sistemde meydana gelen ivmenin yükseklikle değişimleri elde edilmiş olmaktadır. Buradan hareketle birim alandaki silo cidarına gelen dinamik malzeme basınçları da ( $p_{hs}$ ) aşağıdaki bağıntıyla elde edilebilmektedir (Şekil 2.6).

$$p_{hs}(z, t) = R \cdot \rho \cdot [\ddot{u}_1(z, t) + \ddot{u}_g(t)] \quad (2.97)$$

Önerilen bu yaklaşım sayesinde tek serbestlik dereceli sistemin dinamik tepkisi için yerdeğiştirme, hız ve ivme tepkilerinin yanında eşdeğer taban kesme kuvveti ve eşdeğer eğilme momentlerini bulmak mümkün olmaktadır. Bu amaçla hazırlanan program kodu Ek 2'de verilmektedir.



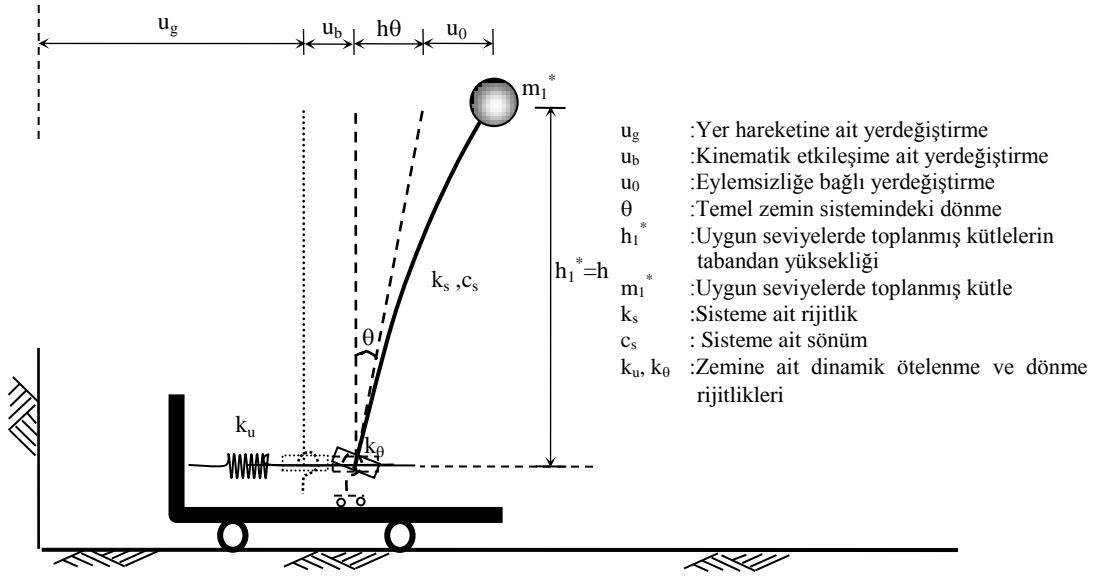
Şekil 2.6. Önerilen analitik modele göre yükseklik boyunca ek dinamik malzeme basınçlarının elde edilişi ve dağılımı

#### 2.1.4. Stok Malzemesi-Silo-Temel/Zemin Sistemi İçin Önerilen Analitik Model (ÖMZ ve ÖMZG)

Yapı sistemlerinin hesabında geleneksel olarak temel sistemi ile zemin sistemi arasındaki ilişkinin oldukça rijit olduğu, bu sebeple bu noktadaki yapı sisteminin temel-zemin sistemine göre rölatif olarak yerdeğiştirme yapmadığı, diğer bir ifadeyle yapı-temel sisteminin zemine ankastre olarak bağlı olduğu kabul edilmektedir. Fakat zemine ait dayanımın düşük değerler alması veya zeminin esnekliğinin artması, temel sisteminin yeterince rijit olmaması ya da çok büyük olması gibi durumlarda bu kabul gerçek durumdan uzaklaşmaktadır. Bu gibi koşullarda temel-zemin sisteminin yapıya olan etkisinin dikkate alınması, yapı sisteminin ankastre olarak zemine bağlandığı duruma göre elde edilen iç kuvvet ve yerdeğiştirme değerlerinden oldukça farklı sonuçlar vermektedir. Örnek olarak Mexico City (1985) depreminin özellikle 10~12 katlı yapılar üzerinde etkili olduğunu, bu yapıların ankastre olarak çözümünde doğal titreşim periyotlarının 1,0 s civarında olmasına karşın birçok yapının etkileşim sebebiyle periyotlarının 2,0 s civarına

kadar uzadığı ve bu nedenle büyük kayıpların yaşandığı bilinmektedir (Mylonakis ve Gazetas, 2000). Yine Adana-Ceyhan depreminde zemin etkileşiminin önemli rol oynadığı (Çelebi, 1998) ve son olarak ise 1999 Kocaeli depreminde birçok bölgede bu durumla karşı karşıya kalındığı bilinmektedir.

Yapı sisteminin herhangi bir noktasında meydana gelen iç kuvvetlerin, birbirine çeşitli şekillerde bağlı yapı, temel ve zemin elemanlarının herbirinin ve birleşim ara yüzeyinin özelliklerine göre farklı şekillerde etkilenebilecekleri bilinmektedir. Yapı-temel/zemin sisteminin birlikte çalışması temelde fiziksel olarak iki etkileşime ayrılabilir. Bunlar kinematik etkileşim ve eylemsizliğe bağlı etkileşim olarak ifade edilmektedir. Bunlardan ilki, serbest alandaki yer hareketinin, ortamın geoteknik karakteristikleri, yapı temel sistemi boyutları ve rijitliği nedeniyle değişimini içeren kinematik etkileşimdir. Eylemsizliğe bağlı etkileşim ise, yapıda titreşimlere bağlı olarak oluşan eylemsizlik kuvvetleri nedeniyle meydana gelen taban kesme kuvveti ve taban eğilme momentlerinin, yapı sisteminin temel-zemin ara yüzeyinde, serbest alana göre dönme, yatay ve düşey yerdeğiştirme ile burulma serbestlikleri doğrultularında rölatif yerdeğiştirmelere sebep olmasıyla ortaya çıkmaktadır (Şekil 2.7). Bu tür serbestlik derecelerinin de yapı serbestliklerine eklenmesiyle yapı taşıyıcı sistemi ile temel-zemin sistemi arasındaki eylemsizliğe bağlı etkileşim de dikkate alınmış olacaktır. Eylemsizliğe bağlı etkileşim bütün yapılar üzerinde etkili olmasına rağmen daha çok narin ve/veya yüksek yapılar üzerinde önemli ölçüde etkili olabilmektedir (Livaoğlu 2005). İnceleme konusu yapı sistemleri için temel boyutlarının ve gömülme derinliğinin kinematik etkileşim doğurmayacağı kabulüyle, bu bölümde yalnızca eylemsizliğe bağlı etkileşim üzerinde durulacaktır.

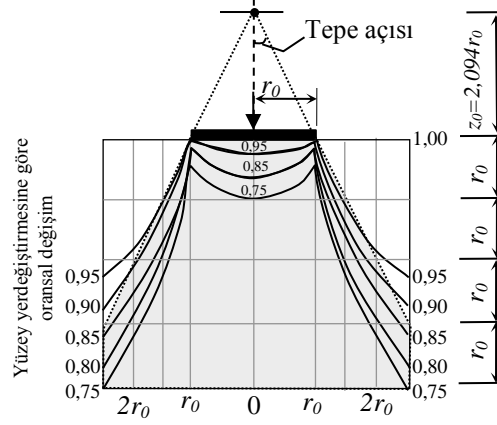


Şekil 2.7. Eylemsizliğe bağlı etkileşim için yatayda ötelenme ve dönme serbestliklerini içeren basitleştirilmiş bir mekanik model (Livaoğlu 2005)

Etkileşim mekanizmasının çözümü için genel olarak yöntemleri ikiye ayırmak mümkündür. Bunlardan ilki, zeminin ve yapının ayrı ayrı alt sistemler olarak düşünülüp, zemine ait rijitlik ve sönüm mekanizmalarının belirlenerek zeminin varlığının üst yapıya etkisinin incelendiği alt sistem yaklaşımlarıdır. Burada alt sistem mantığıyla aynı olmakla birlikte zeminin ankastre olduğu durumda elde edilmiş modal değerlerin, zemin sisteminin rijitlik ve sönüm mekanizmasına bağlı olarak değiştirilmesiyle, yapı-zemin etkileşiminin dikkate alındığı değiştirme yöntemlerinden de bahsetmek uygun olmaktadır. Bu yöntemlerden ikincisi ise her iki sistemin de birlikte düşünülerek etkileşimin hesaba katıldığı doğrudan çözüm yöntemleridir (Livaoğlu 2005). Bu çalışma kapsamında her iki yöntem de farklı modeller için kullanılmış olmasına karşın, bu başlıkta önerilen analitik modellerle kullanılacak alt sistem yaklaşımı irdelenecektir.

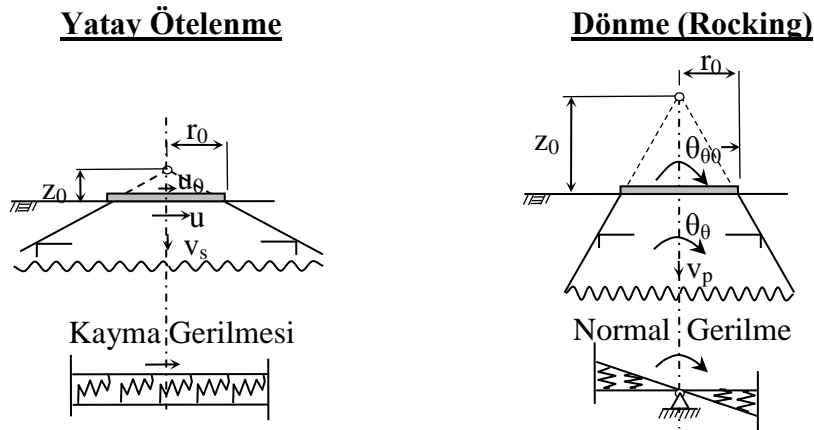
Alt sistem yaklaşımı düşünüldüğünde yapı temelinin üzerinde bulunduğu zeminin statik haldeki rijitlik değerlerinin bilinmesi gerekmektedir. Herhangi bir yarı sonsuz elastik ortam üzerinde bir disk düşeyde statik bir yük etkisinde kaldığı durumdaki elastik ortamda düşey yerdeğiştirmelerin derinlikle değişimi birçok teoriyle ifade edilmeye çalışılmıştır. Temel olarak teoriler arasında büyük farklılıklar olmamakla beraber bu durum Boussinesq teorisine göre Şekil 2.8'deki gibi ifade edilebilmektedir (Wolf, 1994). Teoriye göre elastik ortamın rijitlik karakteristiğini ifade edebilmek için, taralı alan içerisinde kalan koninin

rijitliđi sistemin statik olarak dűsey serbestlik derecesi için dűsey rijitliđi olarak kabul edilebilmektedir.



Şekil 2.8. Boussinesq teorisine göre elastik bir ortam (Poisson oranı  $\nu = 1/3$ ) üzerinde statik olarak yüklü bir disk in ortamda oluşturduğu yerdeğiştirmelerin yüzeydeki yerdeğiştirmeye göre derinliğe bağlı değişimleri

Benzer şekilde bu çalışmada dikkate alınan yatayda ötelenme ile dönme serbestlik dereceleri için yapılacak olan yüklemelerde meydana gelecek konik etki alanları Şekil 2.9’da gösterildiği gibidir (Wolf, 1994).



Şekil 2.9. Çeşitli serbestlik dereceleri için kabul edilen koni modelleri, bu modellere ait tepe açısı şekilleri, serbestlik dereceleri için dalga yayılma doğrultuları ve zeminde oluşan gerilme şekilleri (Wolf, 1994).

Burada koni şeklindeki zemin kısımlarının rijitlik özelliklerinin belirlenmesinde, disk yarıçapı ( $r_0$ ), uygulanan kuvvetin ya da hareketin doğrultusu, zeminin mekanik özellikleri

gibi parametreler etkili olmaktadır. Her bir hareket ya da kuvvet doğrultusu ile mekanik özelliklere göre Şekil 2.9’da verilen konilerin, eşdeğer yarıçapları ve bunlara bağlı olarak dikkate alınması gereken ek kütleler Çizelge 2.1’de verilmektedir.  $(z_0/r_0)$  oranının çeşitli Poisson oranları için aldığı değerler ise Çizelge 2.2’de verilmektedir.

Çizelge 2.1. Koni modeli ile elde edilmiş temel-zemin sisteminin özellikleri (Wolf, 1994).

Koni tipi	Hareket	Eşdeğer yarıçap ( $r_0$ )	$\frac{z_0}{r_0}$ oranı	Poisson oranı ( $\nu$ )	Dalga hızı ( $\nu$ )	Ek kütle ( $\Delta M$ )
Ötelenme $K = \rho v^2 A_0 / z_0$ $C = \rho A_0$	Yatay	$\sqrt{\frac{A_0}{\pi}}$	$\frac{\pi}{8}(2-\nu)$	Her ( $\nu$ ) için	$v_s$	0
Dönel $K_\theta = 3\rho v^2 I_0 / z_0$ $C_\theta = \rho v I_0$ $M_\theta = \rho I_0 z_0$	Dönme	$\sqrt{\frac{4I_0}{\pi}}$	$\frac{9\pi}{32}(1-\nu)\left(\frac{\nu}{v_s}\right)^2$	$\nu \leq \frac{1}{3}$ $1/3 < \nu \leq 1/2$	$v_p$ $2v_s$	0 $1,2(\nu-1/3)\rho I_0 r_0$

Çizelge 2.2. Koni  $(z_0/r_0)$  oranının Poisson oranına göre değişimi (Wolf, 1994).

Hareket	$\nu=0$	$\nu=\frac{1}{4}$	$\nu=\frac{1}{3}$	$\nu=0,4$	$\nu=0,45$	$\nu=\frac{1}{2}$
Yatay	$\frac{\pi}{4}=0,785$	$\frac{7\pi}{32}=0,687$	$\frac{5\pi}{24}=0,654$	$\frac{\pi}{5}=0,654$	$\frac{31\pi}{160}=0,609$	$\frac{3\pi}{16}=0,609$
Dönme	$\frac{9\pi}{32}=0,884$	$\frac{9\pi}{32}=0,884$	$\frac{9\pi}{32}=0,884$	$\frac{9\pi}{32}=0,884$	$\frac{9\pi}{32}=0,884$	$\frac{9\pi}{32}=0,884$

Çizelge 2.3. Rijit dairesel temel-zemin sistemlerinin, yüzeysel, gömülü olma durumları ve rijit bir tabaka üzerindeki zemin sistemleri için karşılaştırmalı statik rijitlikleri (Livaoğlu ve Doğangün, 2004).

Rijitlik	Yüzeysel Temel Kabulü	Gömülü Temel Kabulü
Yatay ( $K_H$ )	$\frac{8Gr_0}{2-\nu}$	$\frac{8Gr_0}{2-\nu}\left(1+\frac{1}{2}\frac{r_0}{d}\right)\left(1+\frac{e}{r_0}\right)\left(1+\frac{e}{d}\right)$
Dönme ( $K_\theta$ )	$\frac{8Gr_0^3}{3(1-\nu)}$	$\frac{8Gr_0^3}{3(1-\nu)}\left(1+\frac{1}{6}\frac{r_0}{d}\right)\left[1+2,3\frac{e}{r_0}+0,58\left(\frac{e}{r_0}\right)^3\right]\left(1+0,7\frac{e}{d}\right)$
Dönme ile yatay serbestlik arasındaki etkileşim		$K_{H\theta} = \frac{e}{3} K_H$

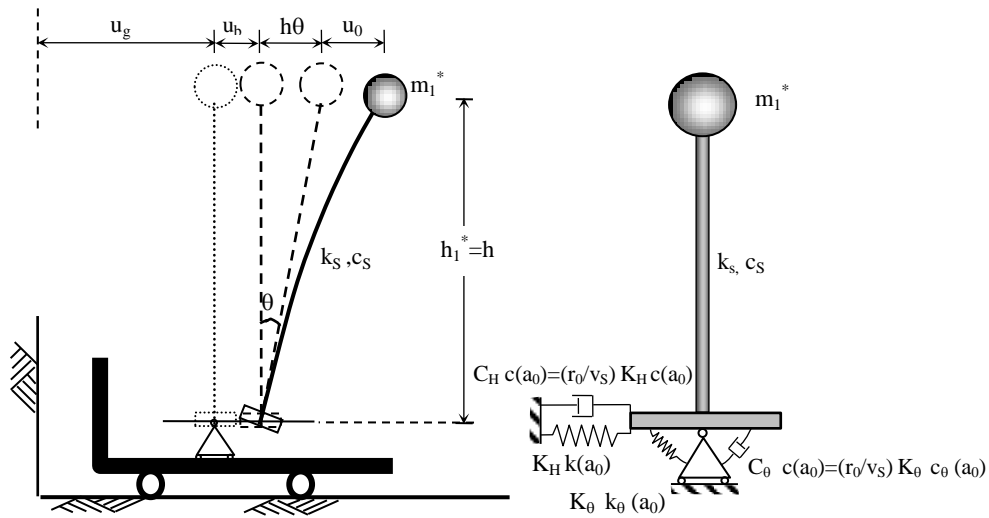
Burada;G: Kayma modülü,  $r_0$ : dairesel temel yarıçapı,  $\nu$ : Poisson oranı,  $d$ : rijit bir tabaka üzerindeki zemin yüksekliği,  $e$ : temelin gömülme derinliğidir.

Statik olarak tüm bunlar belirlendiğinde, alt sistem yaklaşımı için zemin rijitlikleri belirlenmiş olmaktadır. Doğrudan çözüm yöntemleri açısından bakıldığında ise, yarı sonsuz elastik ortam katı cisim mekaniğinden faydalanılarak modellenebilmektedir. Şekil 2.10'da görülen alt sisteme ait mekanik model irdelendiğinde, temel zemin sistemi yatay ötelenme ve dönme serbestlik dereceleri dikkate alınarak tabanda meydana gelen kesme kuvvetinin frekansla değişimi için (2.98) bağıntısı, tabanda meydana gelen eğilme momentinin frekansla değişimi için ise (2.99) bağıntısı yazılabilmektedir. Tüm bu eşitlikler yardımıyla gerçekleştirilecek siloya ait stok malzemesi-silo-temel/zemin sistemi mekanik modeli ise Şekil 2.11'deki hali almaktadır.

$$V_b(\omega) = K_H k_{H\zeta_g}(a_0) u_o(\omega) + \frac{r_0}{v_s} K_H c_{H\zeta_g}(a_0) u_o'(\omega) = S_{H\zeta_g}(a_0) u_o(\omega) \quad (2.98)$$

$$M_b(\omega) = K_\theta k_{\theta\zeta_g}(a_0) \theta_b(\omega) + \frac{r_0}{v_s} K_\theta c_{\theta\zeta_g}(a_0) \theta_b'(\omega) = S_{\theta\zeta_g}(a_0) \theta_b(\omega) \quad (2.99)$$

Burada  $k_{H\zeta_g}(a_0)$  ve  $c_{H\zeta_g}(a_0)$ , yatay ötelenme serbestlik derecesi için zemine ait malzeme sönümünün de dikkate alındığı, frekans bağımlı rijitlik ve sönüm,  $k_{\theta\zeta_g}(a_0)$  ve  $c_{\theta\zeta_g}(a_0)$ , dönme serbestlik derecesi için zemine ait malzeme sönümünün de dikkate alındığı, frekans bağımlı rijitlik ve sönümleri göstermektedir.



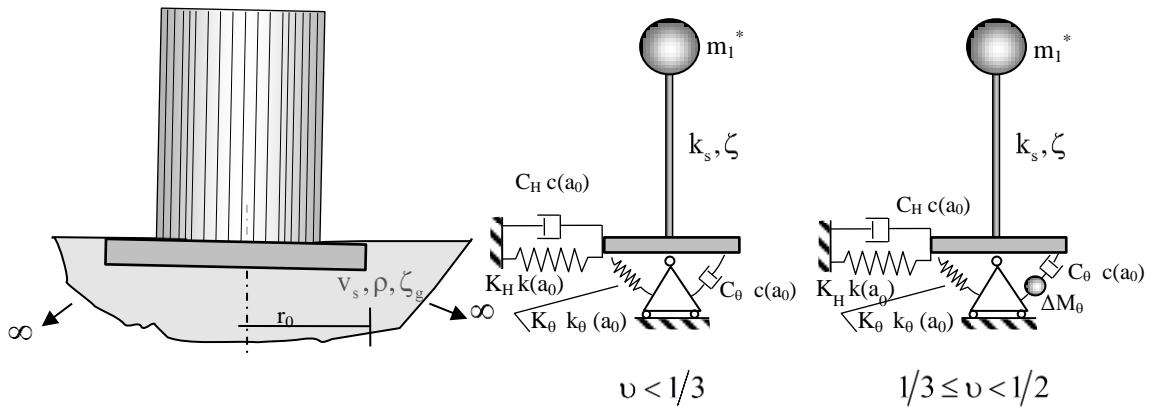
Şekil 2.10. Tek kütleli sisteme ait dönme ve yatay ötelenme serbestlik derecelerini içeren alt sistem yaklaşımı modeli (Wolf 1994).



Yaklaşık olarak ötelenme ve dönme dinamik rijitlikleri ( $S_{H\zeta_g}(a_0), S_{\theta\zeta_g}(a_0)$ ) zemine ait malzeme ( $\zeta_g$ ) ve radyasyonel sönümü de ( $\zeta_h(a_0), \zeta_\theta(a_0)$ ) içerecek şekilde aşağıdaki gibi bağıntılar yardımıyla belirlenmektedir.

$$S_{H\zeta_g}(a_0) = K_H k_{H\zeta_g}(a_0) (1 + 2i\zeta_h(a_0) + 2i\zeta_g) \quad (2.100)$$

$$S_{\theta\zeta_g}(a_0) = K_\theta k_{\theta\zeta_g}(a_0) (1 + 2i\zeta_\theta(a_0) + 2i\zeta_g) \quad (2.101)$$



Şekil 2.11. Homojen bir zemin sistemi üzerindeki silolar için yatay ve dönme serbestliklerinin dikkate alındığı alt sistem yaklaşımı

Burada  $\zeta_H(a_0)$ ,  $\zeta_\theta(a_0)$  ötelenme ve dönme için radyasyonel sönüm değerlerinin boyutsuz frekansla değişimlerini göstermektedir. Bu sönüm değerleri aşağıdaki bağıntılar yardımıyla elde edilebilmektedir.

$$\zeta_H(a_0) = \frac{a_0 c_H(a_0)}{2k_H(a_0)} \quad \zeta_\theta(a_0) = \frac{a_0 c_\theta(a_0)}{2k_\theta(a_0)} \quad (2.102)$$

Temelde koni modellerinden faydalanarak gerek ötelenme gerekse de dönme hareketleri için homojen bir zemin ortamı üzerinde bulunan temel sistemine ait frekans bağımlı (boyutsuz frekans  $a_0 = \omega r_0 / v_s$ ) sönümsüz sisteme ait rijitlik ve sönüm ifadeleri ayrı ayrı elde edilebilmektedir. Bu hareketlerden ötelenme için, dinamik rijitlik ve sönüm katsayıları (2.103) ve (2.104) bağıntılarıyla hesaplanabilmektedir.

$$k(a_0) = 1 - \frac{\mu_u}{\pi} \frac{z_0}{r_0} \frac{v_s^2}{v^2} a_0^2 \quad (2.103)$$

$$c(a_0) = \frac{z_0}{r_0} \frac{v_s}{v} \quad (2.104)$$

Yatayda ötelenme hareketine maruz koni modeli için hız, kayma dalgası hızına ( $v=v_s$ ),  $\mu_u$  katsayısı ise bütün  $\nu$  değerleri için sifıra eşittir. Düşey doğrultuda hareket için ise  $\nu < 1/3$  durumunda hız, boyuna dalga hızına ( $v=v_p$ ),  $\mu_u$  katsayısı ise sifıra eşittir. Yaklaşık olarak zeminin sıkışamaz kabul edildiği  $1/3 \leq \nu < 1/2$  aralığında ise hız kayma dalgası hızının iki katına ( $v=2v_s$ ) eşittir.  $\mu_u$  katsayısı ve buna bağlı belirlenen  $\Delta M$  ek kütlesi ise bu durumda aşağıdaki bağıntılardan hesaplanmaktadır.

$$\mu_u = 2,4\pi \left( \nu - \frac{1}{3} \right); \quad \Delta M = \mu_u \rho r_0^3 \quad (2.105)$$

Düşey ve yatay serbestlik derecelerini içeren ötelenme türü hareket için dinamik rijitlik ve sönüm katsayıları aşağıdaki gibi belirlenebilmektedir.

Yatay serbestlik derecesi için frekans bağımlı yatayda dinamik rijitlik  $k_H(a_0)$  ve sönüm  $c_H(a_0)$  katsayıları, koni ( $z_0/r_0$ ) oranı (bkz Çizelge 2.1) ve zemin ortamı kayma dalgası hızına ( $v_s$ ) bağlı olarak zemine ait her Poisson oranı ( $\nu$ ) için aşağıdaki bağıntılar yardımıyla elde edilebilmektedir.

$$k_H(a_0) = 1 \quad (2.106)$$

$$c_H(a_0) = \frac{\pi}{8} (2 - \nu) \quad (2.107)$$

Dönme ve burulma serbestlik derecelerini içeren dönme durumu için dinamik rijitlik ve sönüm katsayılarının genel ifadeleri aşağıdaki şekildedir.

$$k_\theta(a_0) = 1 - \frac{4}{3} \frac{\mu_\theta}{\pi} \frac{z_0}{r_0} \frac{v_s^2}{v^2} a_0^2 - \frac{1}{3} \frac{a_0^2}{\left( \frac{r_0 v}{z_0 v_s} \right)^2 + a_0^2} \quad (2.108)$$

$$c_{\theta}(a_0) = \frac{z_0 v_s}{3r_0 v} \frac{a_0^2}{\left(\frac{r_0 v}{z_0 v_s}\right)^2 + a_0^2} \quad (2.109)$$

Dönme hareketinde  $\nu < 1/3$  aralığında hız, boyuna dalga hızına ( $v=v_p$ ),  $\mu_{\theta}$  katsayısı ise sıfıra eşittir. Yaklaşık olarak zeminin sıkışamaz kabul edildiği  $1/3 \leq \nu < 1/2$  aralığında ise  $v=2v_s$ ,  $\mu_{\theta}$  katsayısı ve buna bağlı dönme serbestliği için hesaba katılacak  $\Delta M_{\theta}$  ek kütlesi aşağıdaki bağıntılarla belirlenebilmektedir.

$$\mu_{\theta} = 0,3\pi \left( \nu - \frac{1}{3} \right) ; \quad \Delta M_{\theta} = \mu_{\theta} \rho r_0^5 \quad (2.110)$$

Dönme serbestlik derecesi için Poisson oranının  $\nu < 1/3$  olduğu durumda;  $\mu_{\theta}$  katsayısı sıfırdır. Dönme dinamik rijitlik  $k_{\theta\theta}(a_0)$  ve sönüm  $c_{\theta\theta}(a_0)$  katsayıları aşağıdaki gibi belirlenebilmektedir.

$$k_{\theta\theta}(a_0) = 1 - \frac{1}{3} \frac{a_0^2}{\left(\frac{9\pi}{32} (1-\nu) \left(\frac{v_p}{v_s}\right)^3\right)^2 + a_0^2} \quad (2.111)$$

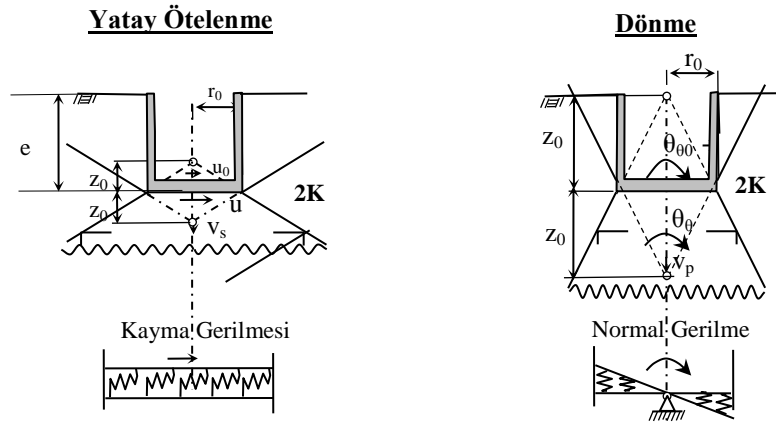
$$c_{\theta\theta}(a_0) = \frac{3\pi}{32} (1-\nu) \left(\frac{v_p}{v_s}\right) \frac{a_0^2}{\left(\frac{9\pi}{32} (1-\nu) \left(\frac{v_p}{v_s}\right)^3\right)^2 + a_0^2} \quad (2.112)$$

Zemine ait Poisson oranının  $1/3 \leq \nu < 1/2$  aralığında olması başka bir deyişle zeminin yaklaşık olarak sıkışabilir kabul edildiği durumda dönme serbestlik derecesi için dinamik rijitlik ve sönüm katsayıları aşağıdaki bağıntılar yardımıyla belirlenebilmektedir.

$$k_{\theta\theta}(a_0) = 1 - 3 \frac{0,3\pi \left( \nu - \frac{1}{3} \right)}{8} (1-\nu) a_0^2 - \frac{1}{3} \frac{a_0^2}{\left(\frac{9\pi}{4} (1-\nu)\right)^2 + a_0^2} \quad (2.113)$$

$$c_{\theta\theta}(a_0) = \frac{3\pi}{16}(1-\nu) \frac{a_0^2}{\left(\frac{9\pi}{4}(1-\nu)\right)^2 + a_0^2} \quad (2.114)$$

Elastik bir yarı sonsuz ortam üzerinde bulunan temel sistemini karakterize eden koni modeli, benzer şekilde gömülü temeller için de kullanılabilir. Burada en önemli fark, Şekil 2.12’de görüldüğü gibi, yüzeysel temel sistemlerindeki tek koniden farklı olarak yeterli derinliğe sahip bir temel sistemi için çift koniden bahsedilebileceğidir. Burada temel-zemin sisteminin rijitliğindeki zemin rijitliğinin iki kat daha arttığı açıkça gözükmektedir. Koni en boy oranı ve bunların serbestlik derecelerine göre değişimleri ise yaklaşık olarak tek koni modeli ile aynı olmaktadır.



Şekil 2.12. Yatay ötelenme ve dönme serbestlikleri için çift koni modelleri

Çift koni modeline ait statik rijitlikler ( $2K$ ) ile birçok deneysel ve teorik çalışmadan elde edilen rijitlikler arasında kurulan oransal ilişkiler aşağıdaki bağıntılar yardımıyla elde edilmektedir.

$$\frac{2K_H}{K_H^*} = \frac{7-8\nu}{4(2-\nu)(1-\nu)} \quad (2.115)$$

$$\frac{2K_V}{K_V^*} = \frac{3-4\nu}{4(1-\nu)^2} \quad (2.116)$$

$$\frac{2K_\theta}{K_\theta^*} = \frac{3-4\nu}{4(1-4\nu)^2} \quad (2.117)$$

$$\frac{2K_T}{K_T^*} = 1 \quad (2.118)$$

Burada Poisson oranının 0,5'e eşit olması durumunda çift koni modelinin deneysel ve teorik çalışmadan elde edilen rijitliğe oranının 1 olduğu aşağıdaki ifadelerden gözükmektedir. Apsel ve Luco (1987) tarafından önerilen aşağıdaki bağıntılar ise ancak  $e/r_0 < 2$  olduğu durumlarda rijitliğin derinlikle değişimini de hesaba katabilmek amacıyla kullanılmaktadır.

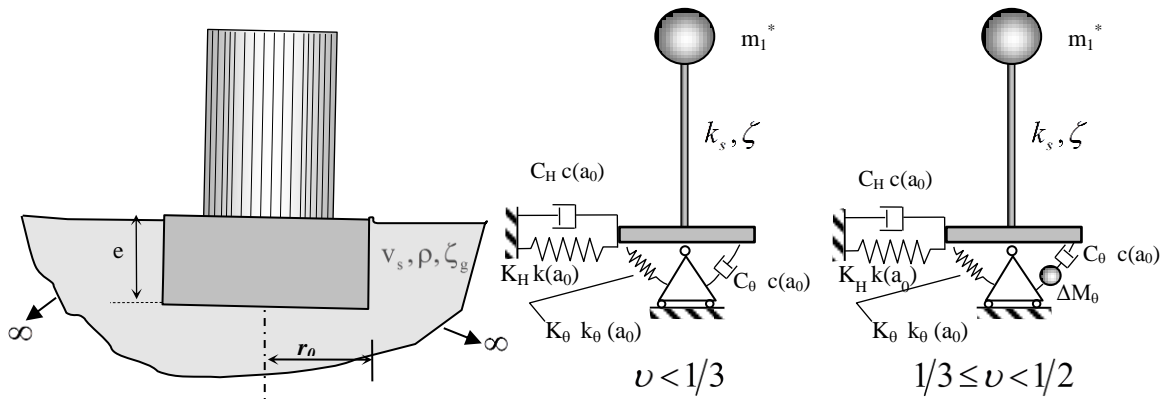
$$K_H = \frac{8Gr_0}{2-\nu} \left( 1 + \frac{e}{r_0} \right) \quad (2.119)$$

$$K_V = \frac{4Gr_0}{1-\nu} \left( 1 + 0,54 \frac{e}{r_0} \right) \quad (2.120)$$

$$K_\theta = \frac{8Gr_0^3}{3(1-\nu)} \left[ 1 + 2,3 \frac{e}{r_0} + 0,58 \left( \frac{e}{r_0} \right)^3 \right] \quad (2.121)$$

$$K_T = \frac{16Gr_0^3}{3} \left( 1 + 2,67 \frac{e}{r_0} \right) \quad (2.122)$$

Bu şekilde elde edilebilecek mekanik model yüzeysel modele benzer olarak Şekil 2.13'deki gibi ifade edilebilmektedir.



Şekil 2.13. Homojen bir zemin sistemi üzerindeki gömülü silo-temel sistemi için yatay ötelenme ve dönme serbestliklerinin dikkate alındığı alt sistem yaklaşımı

Şekil 2.11 ve 2.13'de verilen idealleştirilmiş modeller, Şekil 2.10'daki mantıkla çözümlenmek istenirse, tek kütleli temel-zemin sisteminin ötelenme ve dönme serbestlik dereceleri dikkate alınarak frekans ortamında çözülmesi mümkün olacaktır. Bu amaçla her serbestlik derecesi için aşağıdaki bağıntılar sırasıyla yazılabilmektedir.

$$-m\omega^2[u(\omega) + u_b(\omega) + h_T\theta_b(\omega)] + k_s(1 + 2i\zeta)u(\omega) = m\omega^2u_g(\omega) \quad (2.123)$$

$$-m\omega^2[u(\omega) + u_b(\omega) + h_T\theta_b(\omega)] + S_{H\zeta_g}(a_0)u_b(\omega) = m\omega^2u_g(\omega) \quad (2.124)$$

$$-mh\omega^2[u(\omega) + u_b(\omega) + h_T\theta_b(\omega)] + S_{\theta\zeta_g}(a_0)\theta_b(\omega) = mh_T\omega^2u_g(\omega) \quad (2.125)$$

Yukarıdaki (2.123) ve (2.124) bağıntılarının her iki tarafı da  $m\omega^2$  ile, (2.125) bağıntısı ise  $mh\omega^2$  ile bölünürse aşağıdaki bağıntılar elde edilebilmektedir.

$$-u(\omega) - u_b(\omega) - h_T\theta_b(\omega) + \left( \frac{k_s(1 + 2i\zeta)u(\omega)}{m\omega^2} = \frac{\omega_s^2}{\omega^2}(1 + 2i\zeta)u(\omega) \right) = u_g(\omega) \quad (2.126)$$

$$-u(\omega) - u_b(\omega) - h_T\theta_b(\omega) + \frac{S_{H\zeta_g}(a_0)u_b(\omega)}{m\omega^2} = u_g(\omega) \quad (2.127)$$

$$-u(\omega) - u_b(\omega) - h_T\theta_b(\omega) + \frac{S_{\theta\zeta_g}(a_0)\theta_b(\omega)}{mh\omega^2} = u_g(\omega) \quad (2.128)$$

Bu (2.126), (2.127) ve (2.128) ile verilen üç bağıntı katsayılar matrisi ile aşağıdaki şekilde ifade edilebilmektedir.

$$\begin{bmatrix} \frac{\omega_s^2}{\omega^2}(1 + 2i\zeta) - 1 & -1 & -1 \\ -1 & \frac{S_{H\zeta_g}(a_0)}{m\omega^2} - 1 & -1 \\ -1 & -1 & \frac{S_{\theta\zeta_g}(a_0)}{mh^2\omega^2} - 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u(\omega) \\ u_b(\omega) \\ h_T\theta_b(\omega) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{Bmatrix} u_g(\omega) \quad (2.129)$$

$u_b(\omega)$  ve  $h_T\theta_b(\omega)$ , yukarıdaki bağıntıdan,  $u(\omega)$ cinsinden ifade edilmek istenirse aşağıdaki bağıntılar elde edilebilmektedir.

$$u_b(\omega) = \frac{\omega_s^2(1+2i\zeta)}{S_{H\zeta_g}(a_0)} u(\omega) \quad h\theta_b(\omega) = \frac{\omega_s^2(1+2i\zeta)}{S_{\theta\zeta_g}(a_0)} u(\omega) \quad (2.130)$$

$$\frac{1}{m} \quad \frac{1}{mh^2}$$

Sonuç olarak, tek kütleli sisteme ait yatay yerdeğiştirme, genel halde aşağıdaki şekilde yazılabilmektedir.

$$u(\omega) = \frac{1}{\left[ \frac{1}{\omega^2} - \frac{M_n^*}{S_{H\zeta_g}(a_0)} - \frac{\omega^2 M_n^* h_n^{*2}}{S_{\theta\zeta_g}(a_0)} - \frac{1}{\omega_s^2(1+2i\zeta)} \right] (1+2i\zeta)\omega_s^2} u_g(\omega) \quad (2.131)$$

Temel-zemin sistemi için ek kütlelerin dikkate alınması durumunda (2.129~2.131) bağıntıları aşağıdaki şekli almaktadır.

$$\begin{bmatrix} \frac{\omega_s^2}{\omega^2}(1+2i\zeta) - 1 & -1 & -1 \\ -1 & \frac{S_{H\zeta_g}(a_0)}{M_n^* \omega^2} - 1 & -1 \\ -1 & -1 & \frac{S_{\theta\zeta_g}(a_0)}{M_n^* (h_n^*)^2 \omega^2} - \frac{\Delta M_\theta}{M_n^* (h_n^*)^2} - 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u(\omega) \\ u_b(\omega) \\ (h_n^*)^2 \theta_b(\omega) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} u_g(\omega) \\ u_g(\omega) \\ u_g(\omega) \end{Bmatrix} \quad (2.132)$$

$u_b(\omega)$  ve  $(h_n^*)^2 \theta_b(\omega)$ , yukarıdaki ifadelerden çekilerek,  $u(\omega)$  cinsinden ifade edilmek suretiyle ek kütlelerin dikkate alınması durumunda tek kütleli sisteme ait yatay yerdeğiştirme aşağıdaki bağıntılar yardımıyla belirlenebilmektedir.

$$u_b(\omega) = \frac{\omega_s^2(1+2i\zeta)}{S_{H\zeta_g}(a_0)} u(\omega) \quad h_n^* \theta_b(\omega) = \frac{\omega_s^2(1+2i\zeta)}{\frac{S_{\theta\zeta_g}(a_0)}{M_n^* (h_n^*)^2} - \frac{\Delta M_\theta}{M_n^* (h_n^*)^2} \omega^2} u(\omega) \quad (2.133)$$

$$u(\omega) = \frac{u_g(\omega)}{\omega_s^2(1+2i\zeta) \left[ \frac{1}{\omega^2} - \frac{1}{\omega_s^2(1+2i\zeta)} - \frac{M_n^*}{S_{H\zeta_g}(a_0)} - \frac{1}{\frac{S_{\theta\zeta_g}(a_0)}{M_n^* (h_n^*)^2} - \frac{\Delta M_\theta}{M_n^* (h_n^*)^2} \omega^2} \right]} \quad (2.134)$$

Bu şekilde elde edilmiş yerdeğiştirme değerleri kullanılarak önerilen analitik modeldeki prosedürle ek dinamik basınç değişimleri elde edilebilmektedir. Daha önce de ifade edildiği üzere burada temel/zemin sisteminin frekans bağımlı olması nedeniyle çözümlenmeler frekans ortamında gerçekleştirilmelidir. Bu işlemler sonucu elde edilen bulgular, zaman ortamına Fourier dönüşüm tekniği ya da benzer dönüşüm tekniklerinden biri ile dönüştürülerek yerdeğiştirme, dinamik malzeme basınçları ve iç kuvvetlerin zamanla değişimleri bu yolla elde edilmiş olacaktır. Bu prosedürle ilgili hazırlanan kod Ek 3'de verilmektedir.

## 2.2. Silolarda Depreme Göre Hesap İçin Sayısal Yaklaşımlar

Siloların gerçek davranışlarının belirlenebilmesi için stok malzemesi-silo ve silo-zemin etkileşimlerinin gerçekçi bir şekilde dikkate alınması gerekliliğinden daha önceki başlıklarda ayrıntılı bir şekilde bahsedilmişti. Diğer taraftan farklı fiziksel özelliklere sahip ortamlara ve bunların temasını sağlayan ara yüzeylere sahip bir sistemin modellenerek çözümlenmesi, oldukça karmaşık ifadelerin ve hesap yöntemlerinin kullanılmasını gerekli kılmaktadır. Çalışma kapsamındaki siloların modellenmesinde şu ana kadar mevcut analitik yöntemler ile bunların deprem davranışının yorumlanmasında nasıl kullanılabileceği ifade edilmeye çalışılmıştı. Bunlara ek olarak, çalışma kapsamında geliştirilen iki adet analitik yaklaşım da söz konusu bölümün sonunda detayları ile verilmeye çalışıldı. Ancak yukarıda da ifade edildiği üzere inceleme konusu yapının stok malzemesi ve zemin etkileşimlerinin bu yöntemler vasıtasıyla hesaba katılması ve çözümlenmesinde stok malzemesi, yapı ve zemin gibi birbirinden çok farklı fiziksel ortamlar ve bunların ara yüzeyleri söz konusu olmaktadır. Dolayısıyla bu tür yapıların modellenmesinde ve çözümlenmesinde, etkileşimin söz konusu olmadığı yapılara göre, bir takım güçlüklerle karşılaşılmaması doğaldır. Bu nedenle özellikle tek boyutlu ve iki boyutlu yaklaşımlar ile söz konusu problemin modellenmesinde, sınır koşulları ve kabuller çok gerçekçi olsa dahi, önemli hataların yapılabileceği açıktır. Durum böyle olunca daha gerçekçi modeller, deneysel çalışmalar ve birebir arazide mevcut yapılar üzerindeki çalışma sonuçları ile bu modellerin irdelenmesi gerektiği açıkça görülmektedir. Diğer taraftan sayısal modellemelerin bilgisayar yardımıyla ve hazır paket programlar vasıtasıyla yapılma alışkanlığı, kolaylıkla hata yapılabilmesine neden olabilmektedir. Uygun şekilde seçilmemiş elemanlar, doğru şekilde tanımlanmamış malzeme davranışları ve sınır



koşulları nedeniyle de çok kaba hataların yapılabildiği sıklıkla görülmektedir. Bu durumda doğru şekilde ve yeterli hassasiyetle tanımlanmış analitik yöntemlerin varlığının bu tür hataların önüne geçmek için en geçerli yollardan biri olduğu söylenebilmektedir.

Birçok yapı türü benzer yüklere ve bunların birleşimlerine maruz olmakla birlikte silolar standart yapı türlerinden işlevsel olarak farklı birçok yüke maruz kalabilmektedir. Bu yapı tarzı ile amaçlanan, taneli malzeme özelliğine sahip bir hacmin uygun şekilde silolanması olduğundan, büyük mertebede hacme sahip bu malzemelerin muhafazası sağlanmak durumundadır. Bu nedenle yapı geometrisi genel olarak bu çalışmada da irdelendiği üzere silindirik olarak tasarlanmaktadır. Yapı mekaniği temel ilkeleri düşünüldüğünde bu tür geometri, taşıyıcı sistem olarak mümkün yüklerin uygun şekilde taşınmasında kolaylık sağlamaktadır. Bu yapıların buldukları önemli miktarda stok malzemesi kütlesi nedeniyle birçok farklı tarzda yükle karşı karşıya kalması da mümkün olmaktadır.

Seksenlerin sonlarında dinamik yüklere maruz silolara ilişkin birkaç test çalışması gerçekleştirilmiştir (Shimamoto et al., 1982; Harris and von Nad, 1985; Sasaki et al., 1986; Sasaki and Yoshimura 1992). Bu çalışmalarda genel olarak araştırmacılar etkili stok malzemesi kütlesinin silo dinamik tepkisi üzerindeki etkisine yoğunlaşmışlardır. Bilgisayar kapasitesinde ve sayısal tekniklerdeki gelişmeler, araştırmacılara ve bilim adamlarına stok malzemelerine, silo taşıyıcı sisteminin deprem davranışlarının tespitine ve sayısal modellere daha geniş bir açıdan bakabilmeye olanak sağlamıştır. Holler ve Meskouris (2006) ise siloların sayısal ve deneysel olarak dinamik tepkilerini irdelenmişlerdir. Bu çalışmalarda, silo cidarının tasarımında temel olarak iki farklı yaklaşım kullanılmaktadır. (Abdel-Sayed vd., 1985). Bunlardan ilkinde silo cidarı ile stok malzemesi arasında etkileşim hesaba katılmamasının stok malzemesinin silo cidarı ile birlikte modellenmesi esas alınmaktadır. İkinci yaklaşımda ise stok malzemesi ve silo iki farklı sürekli ortam olarak değerlendirilmektedir. Bu yaklaşımda stok malzemesi ve silo cidarı ayrı ayrı malzeme özelliklerine ve sınır koşullarına bağlı olarak kullanılmakta, bunlara ek olarak uygun bir arayüzey modeli tanımlanmaktadır. İlk yaklaşım halen genel amaçlı tasarımcılar tarafından kullanılmakla birlikte, ikinci yaklaşım ise daha çok araştırma amaçlı olarak kullanılmaktadır (Abdel-Fattah vd., 2006). Birçok araştırmacı bu yaklaşımda malzemenin elastik olarak modellendiği bir kabulde hareket etmişler ve bu sayede çözüme ulaşmışlardır (Nikolayenko vd., 1985, Rotter ve Hull., 1989, Juan vd, 2006). Stok malzemesinin kolaylıkla elastik sınırlar ötesine geçebiliyor olması nedeniyle özellikle çelik silo tasarımı

ve araştırmalarında, stok malzemesinin elastik ve doğrusal olmayan davranışları da dikkate alınmış ve bu konudaki araştırmalar özellikle bu hususa odaklanmışlardır. Bu yaklaşımlarda daha çok granüler zeminler için geliştirilmiş olan hypo-plastik modeller kullanılmıştır. (Wagner vd., 2002: Holler ve Meskouris 2006: Nateghi ve Yakhchalian 2010, 2011).

Visko-elastik, elasto-plastik ve hypo-plastik malzeme modelleri kullanılmasına karşın, malzeme üzerinde yapılan araştırmalar stok malzemelerinin davranışlarının ve mekanik özelliklerinin önemli ölçüde değişken olabileceğini göstermektedir. Yalnızca malzemenin yoğunluğunun tahıllarda nem oranına bağlı olarak %40 mertebesinde değişebileceğinin bilinmesi bile bu oranlar hakkında fikir vermektedir. Diğer taraftan, ilk olarak siloların bu etkileşimden nasıl etkilendikleri, zemin etkileşimi ve temel derinliğinin stok malzemesi davranışı üzerinde ne tür bir etkisinin olduğunun ortaya konulması, daha sonra ise betonarme siloların tüm bu etkileşimlerden nasıl etkilendikleri, teknik literatürdeki önemli bir boşluk olarak durmaktayken, özel olarak malzeme davranışı üzerine yoğunlaşmak çok doğru olmamaktadır. Durum böyle olunca, bu çalışmada tüm bu etkileşim etkilerini hesaba katabilmek ve çok sayıda sistem çözümü gerçekleştirerek eğilimi ve mertebeleri belirleyebilmek için, stok malzemesinin davranışı elastik olarak kabul edilmiştir. Özellikle sonlu elemanlar tekniği ile problemin parametrelerinin gerçekçi bir şekilde ortaya konulabilmesi durumunda oldukça büyük boyutlarda modeller elde edilecek olmasına karşın, çözümleri mümkün olabilmektedir. Bu amaçla takip eden başlıklarda, bu çalışmada dikkate alınan sayısal modeller irdelenmektedir.

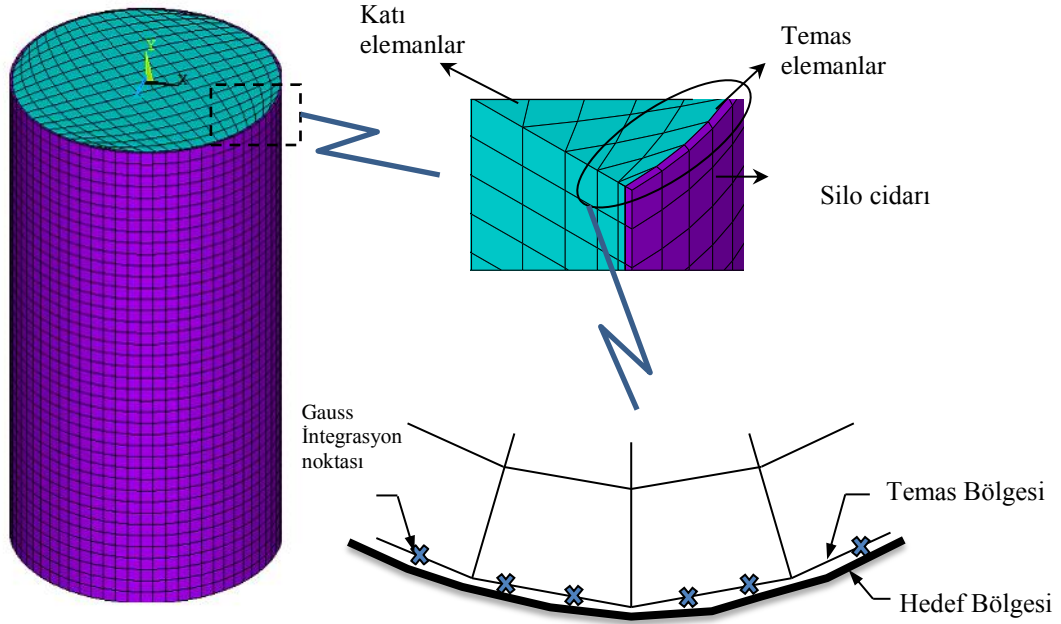
### **2.2.1. Stok Malzemesi-Silo Sistemi Sonlu Elemanlar Modeli ( SM)**

Yukarıdaki veriler işığında betonarme silo cidarını ve stok malzemesini temsil etmek amacıyla tüm modeller ve özümlemeleri ANSYS programı yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Silo cidar ve stok malzemesinin modellenmesi için SOLID185 elemanı kullanılmıştır. SOLID185, katıların 3 boyutlu modellenmesinde kullanılan bir eleman tipidir. Bu eleman, her birinde x,y ve z eksenleri doğrultusunda yerdeğiştirme serbestlikleriyle tanımlanmış 3 serbestlikli 8 düğüm noktasına sahiptir. Plastisite, hiperelastisite, büyük yerdeğiştirme ve büyük Şekil değiştirme özelliklerine sahiptir. Ayrıca eleman yaklaşık olarak sıkışamaz elastoplastik malzemeler ve tamamen sıkışamaz hiperelastik malzemelerin deformasyonları için karma bir formülasyona sahiptir.

Daha önce de ifade edildiği üzere, stok malzemesi-silo modellemelerinde temel iki yaklaşımdan biri stok malzemesi ile silo cidarının farklı iki ortam olarak modellenmesidir. Bu yaklaşım seçildiğinde, siloların yapısal çözümlerinde karşılaşılan en temel problemlerden biri ortaya çıkmaktadır. Bu problem nedeniyle silo cidarı ile stok malzemesi arasında var olan etkileşimin veya temas probleminin gerçekçi bir şekilde temsil edilmesi önem kazanmaktadır. Bu çalışmada, silo cidarı betonarme, stok malzemesi ise buğday olarak dikkate alınmıştır. Açıkça anlaşılabilceği gibi bu iki malzeme davranış ve özellikleri bakımından oldukça farklıdır. Bu nedenle doğru sonuçlar elde edebilmek için uygun temas modelini seçmek çok önemli olmaktadır. Sözkonusu etkileşimi modellemek için ANSYS 13.0 sonlu elemanlar programında tanımlanan yüzeyden yüzeye temas yöntemi seçilmiştir. Bu yaklaşım normal basınç ve sürtünme gerilmesi gibi tipik mühendislik problemleri için oldukça iyi temas sonuçları sağlamakta ve yüzeyden yüzeye temas elemanları statik ve dinamik çözümlerde kullanılabilir. Couto (2000) bu yöntemin üç boyutlu silolar için en uygun yöntem olduğunu belirtmektedir. Bu nedenle söz konusu yöntem, silo cidarı ve stok malzemesi arasındaki etkileşimi yeniden oluşturmak için seçilmiştir. Temas problemleri yüksek dereceden doğrusal olmayan ve çözümleme için önemli bilgisayar kaynağı gerektiren problemler olup, burada problemin fiziğini anlamak önemli olmaktadır. Temas problemlerinde iki önemli zorlukla karşılaşılmaktadır. Bunlardan ilki genellikle temas edecek bölgelerin çözümleme öncesinde tam olarak tahmin edilememesidir. Yükler, malzeme, sınır koşulları ve diğer faktörler nedeniyle yüzeyler çoğunlukla belirsiz olmakta ve ani bir şekilde biraraya gelerek temas haline geçmekte ve ayrılmaktadır. İkincisi ise çoğu temas probleminin gerçekçi bir şekilde modellenebilmesi için sürtünmenin dikkate alınmasının gerekli olmasıdır. Çok sayıda sürtünme kuralı ve modeli mevcut olmakla birlikte, bu yaklaşımların hepsi de doğrusal bir ilişkiye sahip değildir. Sürtünme tepkisi karmaşık olup çözümün yakınsamasını zorlaştırmakta olduğundan, öncelikle hedef ve temas yüzeylerin belirlenmesi gerekmektedir. Bu çalışmada olduğu gibi, genel anlamda da temas algoritması iki yüzeyden daha rijit olanının hedef yüzey olarak seçilmesi üzerine kurulmaktadır. Bu nedenle yapısal çözümlerinde Şekil 2.14’de gösterildiği üzere hedef yüzey silo cidarı olarak tanımlanmış ve temas yüzeyi ise stok malzemesinin sınır yüzeyi ile temsil edilmiştir. Bu yüzeyler arasındaki temas 8 düğüm noktalı izoparametrik eleman tipleri CONTA174 ve TARGET170 kullanılarak oluşturulmuştur. Her iki malzeme arasındaki etkileşimi tanımlamak için teknik literatürde bilinen Coulomb’un sürtünme modeli kullanılmıştır. Bu durumda sürtünme katsayısı

gerekli tek parametre olup, basit bir kesme deneyi ile elde edilebilmektedir. Bu sayede Coulomb sürtünme modeli vasıtasıyla temas eden iki yüzey birbirlerine göre kayma hareketine başlamadan önce ara yüzeylerinde belli bir değere kadar kayma gerilmesi taşıyabilmektedirler.

Temas algoritması, belirli bir ortak sınıra sahip elemanların ara yüzeyine yerleştirilmiş, teması tespit eden noktalar sayesinde işleme sokulmaktadır. Bu noktaların oluşturduğu temas elemanı, hedef yüzeye penetrasyon yapmaması için sınırlandırılmıştır. Buna karşın hedef yüzey temas yüzeye penetre edebilmektedir (Şekil 2.14). Genel olarak penetrasyonun tespitinde düğüm noktalarının kullanıldığı yöntemler olmasına karşın ANSYS yüzeyden yüzeye teması Gauss integrasyon noktalarını kullanarak sözkonusu tespiti gerçekleştirmektedir. Bu yöntem düğüm noktalarının referans olarak kullanıldığı yönetime göre daha gerçekçi sonuçlar üretmektedir.



Şekil 2.14. Sayısal çözümlemede kullanılan elemanlar

ANSYS, temas çifti ile ilgili bazı durumları belirlemek için birçok imkân sunmaktadır. Programın bazı varsayılan değerler vermesinin yani sıra, temas modelinin hatalı davranmasından sakınmak için bu varsayılan değerleri gözden geçirmek oldukça önemlidir. Örneğin; CONTA174 temas elemanı ile temasın tam olarak tanımlanabilmesi

için ‘standart tek yönlü temas’ yöntemi, en uygun yöntem olarak bu modelde kullanılmaktadır. Burada hedef ve temas yüzeyleri arasında ayrılma meydana geldiği takdirde normal basınç sıfıra eşit olmaktadır.

Temas modelinin oluşturulmasında ana başlık temas rijitliğidir. (2.135) bağıntısında verilen temas rijitliği etkileşime giren temas yüzeyleri arasında meydana gelen penetrasyon miktarını kontrol ederek iki cisim arasındaki etkileşimi yönetmektedir. Burada söz konusu rijitlik stok malzemesine bağlı olarak belirlenmektedir. Temas rijitliğinin büyüklüğü FKN gerçek sabiti ile kontrol edilmektedir. Guaita (1995) tarafından ifade edildiği gibi FKN rijit cidarı modellemek için olabildiğince yüksek bir değer seçilmelidir.

$$k = \text{FKN} \cdot \left[ \frac{f_s \cdot A \cdot \gamma_k}{V} \right] \quad (2.135)$$

Burada; k, temas rijitliğini; FKN, temas rijitlik faktörünü;  $f_s$ , ceza faktörünü; A, temas parçasının alanını; V, katı elemanlar için hacmi;  $\gamma_k$ , temas eden elemanın hacim modülünü göstermektedir. FKN ANSYS’de varsayılan değer olarak 1 şeklinde atanmıştır, fakat rijit cidar halini üretme durumunda FKN değeri arttırılmaktadır. Yüksek FKN değeri olması durumunda izin verilen temas penetrasyonu düşük olmaktadır. Bununla beraber global rijitlik matrisinin kötü yerleşimine neden olabilmekte ve bu da yakınsak sonuç elde etmeyi zorlaştırmaktadır. Diğer bir deyişle, FKN değeri çok düşükse şekil değiştirebilir cisimdeki penetrasyon miktarı çok fazla olabilmekte ve başlangıç şartları sağlanmamaktadır.

Hedef yüzeyin temas yüzeyine penetrasyon miktarı iki yüzey arasında varolan herhangi bir teması saptamak için kullanılmalıdır. Yazılım bir yüzeyin üzerindeki düğüm noktalarının (temas yüzeyi) diğer yüzeyin üzerindeki düğüm noktaları ile (hedef yüzey) aynı konumda olup olmadığını temas durumunu belirlemek amacıyla kontrol etmektedir. Sayısal modelin çözümü her iki düğüm noktası takımı için tamamen aynı pozisyonu sağlamamaktadır. Bu nedenle temas ve hedef düğüm noktaları arasındaki rölatif yerdeğiştirme, temas durumunu belirlemek için aşağıdaki formülle doğrulanmaktadır.

$$g = x^c - x^t \quad (2.136)$$

Burada;  $g$ , temas aralığını yani temas ve hedef düğüm noktaları arasında mevcut olan mesafeyi;  $x^c$ , temas düğüm noktasının konumunu,  $x^t$  ise hedef düğüm noktasının konumunu göstermektedir. Eğer temas aralığı sıfırdan büyükse herhangi bir temas oluşmamaktadır. Sıfırdan küçük ya da sıfıra eşitse her iki yüzey arasında temas oluşmakta ve bir miktar penetrasyon oluşabilmektedir. Sonuç olarak, penetrasyonun varlığını değerlendirmek için bazı sınır koşulları kullanılmaktadır. ANSYS programında beş algoritma seçeneği mevcuttur. Tez kapsamında çarpanının her iterasyonda yenilenmesinden dolayı daha kesin sonuçlar veren ve temas rijitlik parametresinin (FKN) etkisinin daha az olmasını sağlayan arttırılmış Lagrange algoritması kullanılmaktadır. Bunlara ek olarak yapısal çözümlemede zaman adımı uygun temas bölgesini yakalayabilmek için yeterince küçük seçilmelidir. Zaman adımı çok büyük olduğu takdirde temas kuvvetlerinin düzgün bir şekilde aktarımı sağlanamamaktadır. Temas durumu iterasyon işlemi boyunca değişiyorsa süreksizlik meydana gelebilmektedir. Düşük yakınsama oranından kaçınmak ve yenilenmiş bir rijitlik matrisi kullanmak için Newton-Raphson seçeneği uygun şekilde kullanılmalıdır.

### **2.2.2. Stok Malzemesi-Silo-Temel/Zemin Sistemi Sonlu Elemanlar Modeli (SMZ ve SMZG)**

Bu çalışma kapsamında önerilen sayısal yaklaşımlardan bir diğeri de silo-stok malzemesi etkileşimine ek olarak temel/zemin etkileşiminin de dikkate alındığı modellerdir. Stok malzemesi-silo etkileşimi ve bunun sayısal yaklaşımda nasıl dikkate alındığı önceki başlıklarda ifade edilmişti. Bu amaçla bu başlıkta yalnızca temel/zemin sisteminin sayısal yaklaşımda hangi teoriler ve yaklaşımlar kullanılarak dikkate alındığı özetlenmektedir.

Bilindiği üzere, dinamik etkileşimde, statik etkileşimden farklı bir şekilde, rijitliklere ek olarak sistemin sönüm karakteristiğinin de dikkate alınması gerekmektedir. Bununla birlikte, yükleme frekansına ve temel sistemine bağlı olarak ortamın, rijitlik ve sönüm gibi sismik özellikleri değişkenlik gösterdiğinden bu değişimin de dikkate alınması gerekmektedir (Veletsos ve Wei, 1971; Dobry ve Gazetas, 1984; Wolf, 1985). Genel durumda sistemin hareket bağıntısı aşağıdaki gibi yazılabilmektedir.

$$[M]\{\ddot{u}(t)\} + [C]\{\dot{u}(t)\} + [K]\{u(t)\} = \{R(t)\} \quad (2.137)$$

Burada  $[M]$  sistemin kütle matrisini,  $[C]$  sistemin sönüm matrisini ve  $[K]$  sistemin rijitlik matrisini  $\{\ddot{u}(t)\}$ ,  $\{\dot{u}(t)\}$ ,  $\{u(t)\}$  ve  $\{R(t)\}$  sırasıyla zamana bağlı değişen ivme, hız, yerdeğiştirme ve yük vektörlerini göstermektedir. Klasik olarak (2.137) bağıntısıyla tanımlanmış sistemde sönüm sadece  $[C]$  malzeme sönümünden ibarettir. Dinamik bir yük etkisindeki elastik bir ortamda yayılan dalgaların yayılmaya bağlı olarak enerjisinin kaybını ifade eden radyasyonel sönüm (2.137) bağıntısıyla ifade edilen hareket bağıntısında içerilmemektedir. Gerek rijitlik gerekse de sönüm frekansla değişkenlik gösterdiğinden etkileşimin gerçekçi bir şekilde dikkate alınabilmesi için sistemin hareket bağıntısının frekans ortamında ya da frekansla değişkenlik gösteren ifadelerin dikkate alındığı zaman ortamında yazılması gerekli olmaktadır. Frekans ortamında (2.137) ifadesi (2.140) bağıntısında olduğu gibi yazılabilmektedir. Burada her bir frekans bağımlı değer için Fourier ve Laplace gibi dönüşüm tekniklerinden herhangi biri kullanılarak zaman ortamındaki bağıntının çözümlenmesi ile de sonuca ulaşmanın mümkün olduğunu belirtmek uygun olmaktadır. Zaman ortamındaki hareket bağıntısı, yer hareketine ait ivme Fourier yöntemine göre (2.138) ve (2.139) bağıntıları yardımıyla frekans ortamına dönüştürülerek, genel hareket bağıntısı (2.140) bağıntısında olduğu gibi frekans ortamında yazılabilmektedir (Livaoğlu 2005).

$$\{u_g(\omega)\} = \int_{-\infty}^{\infty} \{u_g(t)\} \exp(i\omega t) dt \quad (2.138)$$

$$\{R(\omega)\} = [M]\{\ddot{u}(\omega)\} + [C]\{\dot{u}(\omega)\} + [K]\{u(\omega)\} = \{R(\omega)\} \quad (2.139)$$

$$[M]\{\ddot{u}(\omega)\} + [C]\{\dot{u}(\omega)\} + [K]\{u(\omega)\} = \{R(\omega)\} \quad (2.140)$$

(2.140) bağıntısında verilen frekans ortamındaki hareket bağıntısında ivme ve hız yerdeğiştirme cinsinden yazılmak istenirse (2.141) bağıntısı elde edilebilmektedir.

$$-[M]\omega^2 u(\omega) + [C]i\omega u(\omega) + [K]u(\omega) = \{R(\omega)\} \quad (2.141)$$

Bu bağıntıda, sistemin yerdeğiştirmeleri ile tepkileri arasındaki ilişki  $[S(\omega)]$  dinamik rijitlik matrisi ile aşağıdaki bağıntıyla ifade edilebilmektedir.

$$[S(\omega)]u(\omega) = \{R(\omega)\} \quad (2.142)$$

Dinamik rijitlik matrisi (2.141) ve (2.142) bağıntılarından kompleks biçimde (2.143) bağıntısında verilen şekilde yazılabilmektedir.

$$\begin{aligned} [S(\omega)]u(\omega) &= ([K]+i\omega[C]-[M]\omega^2)u(\omega) \\ [S(\omega)] &= [K]+i\omega[C]-[M]\omega^2 \\ [S(\omega)] &= [K](1+i2\tilde{\zeta})-[M]\omega^2 \end{aligned} \quad (2.143)$$

Bu aşamadan sonra yapılacak işlem statik halde mekanik özellikleri belirlenmiş, dinamik davranışı ifade edilmiş zemin sistemi ile yapı sistemi arasındaki etkileşimi çeşitli yöntemlerle çözümlenmektedir.

Yapı-temel/zemin sistemine ait hareket bağıntısı yaygın olarak bilindiği gibi zaman ortamında (2.137) bağıntısında olduğu gibi ya da açık şekilde aşağıdaki bağıntılarla ifade edilmektedir.

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} [M_{ss}] & [M_{sb}] \\ [M_{bs}] & [M_{bb}] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\ddot{u}_{ss}(t)\} \\ \{\ddot{u}_{bb}(t)\} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [C_{ss}] & [C_{sb}] \\ [C_{bs}] & [C_{bb}] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\dot{u}_{ss}(t)\} \\ \{\dot{u}_{bb}(t)\} \end{Bmatrix} \\ + \begin{bmatrix} [K_{ss}] & [K_{sb}] \\ [K_{bs}] & [K_{bb}] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{u_{ss}(t)\} \\ \{u_{bb}(t)\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{0\} \\ -\{P_0(t)\} \end{Bmatrix} \end{aligned} \quad (2.144)$$

Burada  $[M]$ ,  $[C]$  ve  $[K]$  sırasıyla, sisteme ait kütle, sönüm ve rijitlik matrislerini ss, sb, ve bb indisleri ise sırasıyla, yapıya, yapı-temel ara yüzeyine ve temel/zemin sistemine ait özellikleri ifade etmektedir.  $\ddot{u}_{ss}(t)$ ,  $\dot{u}_{ss}(t)$ ,  $u_{ss}(t)$  ve  $R(t)$  ise zamana bağlı olarak yapı sistemi üzerindeki söz konusu noktanın toplam ivme, hız ve yerdeğiştirmesi ile bu noktaya uygulanan zamana bağlı yük ifadesini göstermektedir (örnek olarak Şekil 2.7'deki sistemde  $u_{ss}(t) = u_g(t) + u_b(t) + u_0(t) + h_T\theta$  ve  $u_{bb}(t) = u_g(t) + u_b(t)$ ). (2.144) bağıntısında ( $P_0(t)$ ) ile yapıya temel/zemin sistemi vasıtasıyla uygulanacak zamanla değişen bir kuvvet ifade edilmektedir. Sözü edilen bu kuvvet daha önce de bahsedildiği gibi yükleme frekansına bağlı olarak temel/zemin sistemi rijitlik ve sönüm mekanizmasında değişikliklere yol açmaktadır. Bu nedenle yapı-temel/zemin sistemine ait hareket bağıntısında, zemin sisteminin frekans bağımlı rijitlik ve sönümlerinin dikkate alınması durumunda (2.144) bağıntısı aşağıdaki hale getirilebilmektedir (Livaoğlu, 2005).



$$\begin{aligned}
& \begin{bmatrix} [\mathbf{M}_{ss}] & [\mathbf{M}_{sb}] \\ [\mathbf{M}_{bs}] & [\mathbf{M}_{bb}] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\ddot{\mathbf{u}}_{ss}(t)\} \\ \{\ddot{\mathbf{u}}_{bb}(t)\} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [\mathbf{C}_{ss}] & [\mathbf{C}_{sb}] \\ [\mathbf{C}_{bs}] & [\mathbf{C}_{bb}] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\dot{\mathbf{u}}_{ss}(t)\} \\ \{\dot{\mathbf{u}}_{bb}(t)\} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [\mathbf{K}_{ss}] & [\mathbf{K}_{sb}] \\ [\mathbf{K}_{bs}] & [\mathbf{K}_{bb}] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\mathbf{u}_{ss}(t)\} \\ \{\mathbf{u}_{bb}(t)\} \end{Bmatrix} \\
& = \begin{Bmatrix} \{0\} \\ -\left\{ [\mathbf{K}_{\infty}] \mathbf{u}_b(t) + [\mathbf{C}_{\infty}] \dot{\mathbf{u}}_b(t) + \int_0^t \mathbf{S}(t-\tau) \mathbf{u}_b(\tau) d\tau \right\} \end{Bmatrix} \quad (2.145)
\end{aligned}$$

Burada  $\mathbf{K}_{\infty}$  ve  $\mathbf{C}_{\infty}$  temel/zemin sistemine ait rijitlik ve sönüm ifadelerini, göstermektedir. (2.145) bağıntısı, frekans ortamında dinamik rijitlikle aşağıdaki gibi ifade edilebilmektedir.

$$\mathbf{S}(\omega) = [\mathbf{S}_{bb}(\omega)] - [\mathbf{K}_{\infty}] - i\omega[\mathbf{C}_{\infty}] \quad (2.146)$$

$$\mathbf{S}(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} [\mathbf{S}(\omega)] e^{i\omega t} d\omega \quad (2.147)$$

Burada  $\mathbf{S}_{bb}$ , zemin sistemine ait dinamik rijitlik ifadesini göstermektedir. Temel/zemin sistemi dinamik rijitliğinin frekansla değişimlerinin zaman ortamındaki dönüşümünü ifade eden  $\mathbf{S}(t-\tau)$  ise  $\mathbf{S}_{bb}$ 'ye bağlı olarak frekans ortamından zaman ortamına Fourier dönüşümü ile (2.146) ve (2.147) bağıntılarında olduğu gibi dönüştürülebilmektedir. Hareket bağıntısının frekans ortamında aşağıdaki gibi ifade edilmesi durumunda, her  $\Delta t$  zaman artımı için frekans bağımlı hesaplanarak zaman ortamına dönüştürülmesi gereken rijitlik ve sönüm değerleri belirlenmeyecek, dolayısıyla da bir işlem kolaylığı sağlanmış olacaktır.

$$\begin{aligned}
& - \begin{bmatrix} [\mathbf{M}_{ss}] & [\mathbf{M}_{sb}] \\ [\mathbf{M}_{bs}] & [\mathbf{M}_{bb}] \end{bmatrix} \omega^2 \begin{Bmatrix} \{\mathbf{u}_{ss}(\omega)\} \\ \{\mathbf{u}_{bb}(\omega)\} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [\mathbf{C}_{ss}] & [\mathbf{C}_{sb}] \\ [\mathbf{C}_{bs}] & [\mathbf{C}_{bb}] \end{bmatrix} i\omega \begin{Bmatrix} \{\mathbf{u}_{ss}(\omega)\} \\ \{\mathbf{u}_{bb}(\omega)\} \end{Bmatrix} \\
& + \begin{bmatrix} [\mathbf{K}_{ss}] & [\mathbf{K}_{sb}] \\ [\mathbf{K}_{bs}] & [\mathbf{K}_{bb}] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\mathbf{u}_{ss}(\omega)\} \\ \{\mathbf{u}_{bb}(\omega)\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{0\} \\ -\{\mathbf{P}_0(\omega)\} \end{Bmatrix} \quad (2.148)
\end{aligned}$$

(2.148) bağıntısı frekans ortamında çözümlene yapmaya uygun bir şekilde tasarlanmıştır. Genel olarak, sonlu eleman tekniğiyle çözümlenmeler gerçekleştirildiğinden, frekans bağımlı sönüm ve rijitlik terimlerinin burada olduğu gibi sayısal yöntemde dikkate

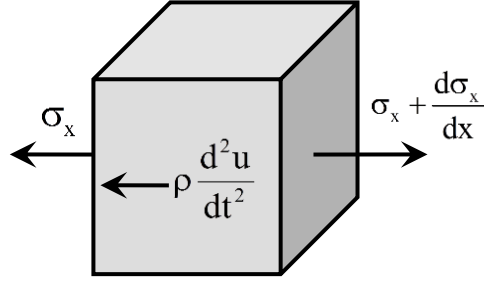
alınması oldukça güç olmaktadır. Bununla beraber doğrusal olmayan çözümlemede frekans bağımlı eşitliklerin kullanılması çözümleme işlemlerini daha da karmaşık bir hale dönüştürmektedir. Zeminin doğrusal olmayan davranışı, stok malzemesi-cidar arasındaki temas probleminin dikkate alınması gibi problem parametreleri nedeniyle önerilen sayısal modelin çözümü için doğrusal olmayan tekniklerin kullanılması zorunlu olmaktadır. Durum böyle olunca, bu eşitliğin zaman ortamında çözümlenmesi, temas probleminin bu çalışma kapsamında dikkate alınması nedeniyle, modelin alacağı boyutlar ve bilgisayar kapasiteleri düşünüldüğünde kaçınılmaz olmaktadır. Bu durumda zeminde meydana gelen radyasyonel sönümün nasıl dikkate alınacağı sonuçların güvenilirliği için önemli olmaktadır. Bu durum, kısaca şu şekilde özetlenebilmektedir; deprem dalgalarının yarı sonsuz bir ortam içerisinde yayılmaları durumunda dalganın ortamda oluştuğu noktadan başlayarak sonsuza yayılması gerekmektedir. Bu nedenle yarı sonsuz ortamların modellenmesinde ya oldukça büyük sonlu eleman modelleri kullanılarak dalganın ortamın boyutuna bağlı sönümlenmesi sağlanmalı ya da belirli bir noktada varsayılan sınır için uygun sınır şartları dikkate alınmalıdır. Bu sınır şartlarının sınıra gelen dalga enerjisini tekrar ortam içerisine yansıtmayacak ve bu noktada dalgayı sönümleyecek bir nitelikte olması gerekmektedir. Bu durum aşağıdaki ifadeler yardımıyla özetlenebilmektedir.

Yayıma durumunda, zamana bağlı kuvvetler Şekil 2.15’de görülen birim küp içerisinde dalga yayılımına neden olmaktadır. Bu küp için denge bağıntısı kurulmak istenirse;

$$\rho \frac{d^2u}{dt^2} - \frac{d\sigma_x}{dx} = 0 \quad (2.149)$$

ifadesi elde edilmektedir. Burada,  $\sigma_x$  gerilmesi,  $E_c$  elastisite modülü ve Poisson oranına bağlı bir modülü,  $\varepsilon_x$ ,  $x$  doğrultusundaki şekildeğiştirmeyi göstermek üzere,  $E_c \varepsilon_x$  ile belirlenebilmektedir. Buradan hareketle bilinen dalga bağıntısı ifadesi,  $v_p = \sqrt{E_c/\rho}$  olmak üzere, aşağıdaki şekilde elde edilebilmektedir.

$$\frac{d^2u}{dt^2} - v_p^2 \frac{d^2u_x}{dx^2} = 0 \quad (2.150)$$



Şekil 2.15. Yayılma durumunu ifade etmek için kullanılan birim küpe etkiyen kuvvetler

Burada  $x$  doğrultusunda hareket eden harmonik bir dalgaya ait yerdeğiştirme  $(u(t, x))$  ve hız  $(\dot{u}(t, x))$  fonksiyonları için aşağıdaki ifadeler yazılabilmektedir.

$$u(t, x) = U \left[ \sin \left( \omega t - \frac{\omega x}{v_p} \right) + \cos \left( \omega t - \frac{\omega x}{v_p} \right) \right] \quad (2.151)$$

$$\dot{u}(t, x) = U \omega \left[ \cos \left( \omega t - \frac{\omega x}{v_p} \right) - \sin \left( \omega t - \frac{\omega x}{v_p} \right) \right] \quad (2.152)$$

Aynı doğrultudaki şekildeğiştirme ve gerilme, zamana bağlı olarak aşağıdaki bağıntılarla belirlenebilmektedir.

$$\varepsilon(t, x) = \frac{du}{dx} = -\frac{\dot{u}(x, t)}{v_p} \quad (2.153)$$

$$\sigma_x = E_c \varepsilon(t, x) = -\rho v_p \dot{u}(x, t) \quad (2.154)$$

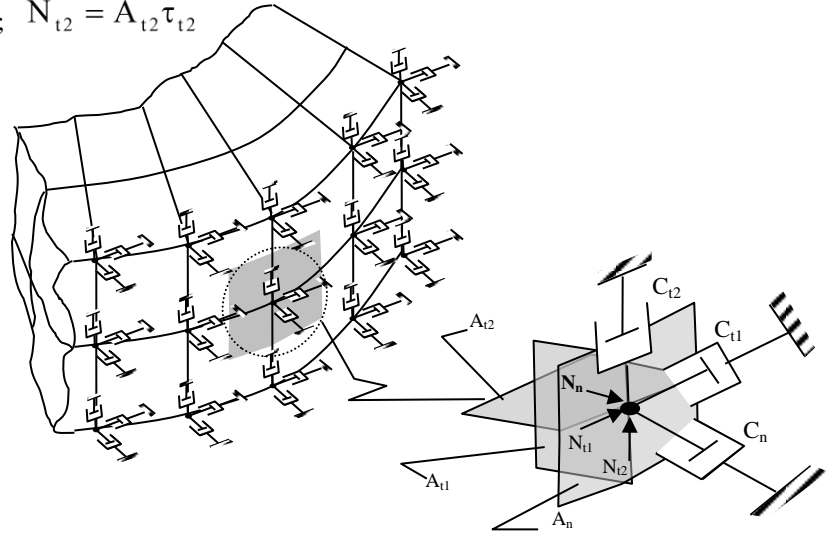
Böylece sınır ortamında birim alanda boyuna dalga hareketi ile oluşacak gerilme miktarı (2.154) bağıntısıyla elde edilebilmektedir (Wilson, 2002).

Lysmer ve Kuhlmeier (1969) sonsuz ortamda yayılan P ve S dalgalarının ortamın sınırlı bir ortam olarak modellenmesi durumunda, sınırların nasıl modelleneceğine yönelik iki boyutlu dalga bağıntısını ele alarak, yukarıda elde edilen bağıntılara benzer bir yaklaşım izlemişlerdir. Her iki doğrultuda da bu dalgaların enerjilerinin sönümlenmesi ve bu yolla sınırdaki yansıma etkilerinin giderilmesi amaçlanmaktadır. Böylece her bir doğrultu için sınır yüzeyde oluşan gerilmeler;

$$\sigma_n + \rho v_p \dot{u}_n = 0 \quad \tau_{t1} + \rho v_s \dot{u}_{t1} = 0 \quad \tau_{t2} + \rho v_s \dot{u}_{t2} = 0 \quad (2.154)$$

bağıntılarıyla ifade edilmiştir. Burada  $\rho$ ,  $v_p$  ve  $v_s$  sırasıyla, dikkate alınan ortama ait yoğunluğu, boyuna dalga ve kayma dalgası hızını ifade etmektedir.  $n$  ve  $t$  indisleri ise sanal sınır doğrultularını,  $\sigma$  ve  $\tau$  sınırdaki oluşan normal ve kayma gerilmelerini,  $\dot{u}$  ise hız vektörünü göstermektedir (Şekil 2.16). Burada  $A_n$ ,  $A_{t1}$  ve  $A_{t2}$  sırasıyla Şekil 2.16'daki sonlu eleman ağında gösterilen taralı alanları göstermektedir.

$$\begin{aligned} N_n &= A_n \sigma_n ; \quad N_{t1} = A_{t1} \tau_{t1} ; \quad N_{t2} = A_{t2} \tau_{t2} \\ N_n + C_n \dot{u}_n &= 0 \\ N_{t1} + C_{t1} \dot{u}_{t1} &= 0 \\ N_{t2} + C_{t2} \dot{u}_{t2} &= 0 \end{aligned}$$



Şekil 2.16. Sonlu eleman ağında sanal sınırın uygulaması ( Livaoğlu 2005 )

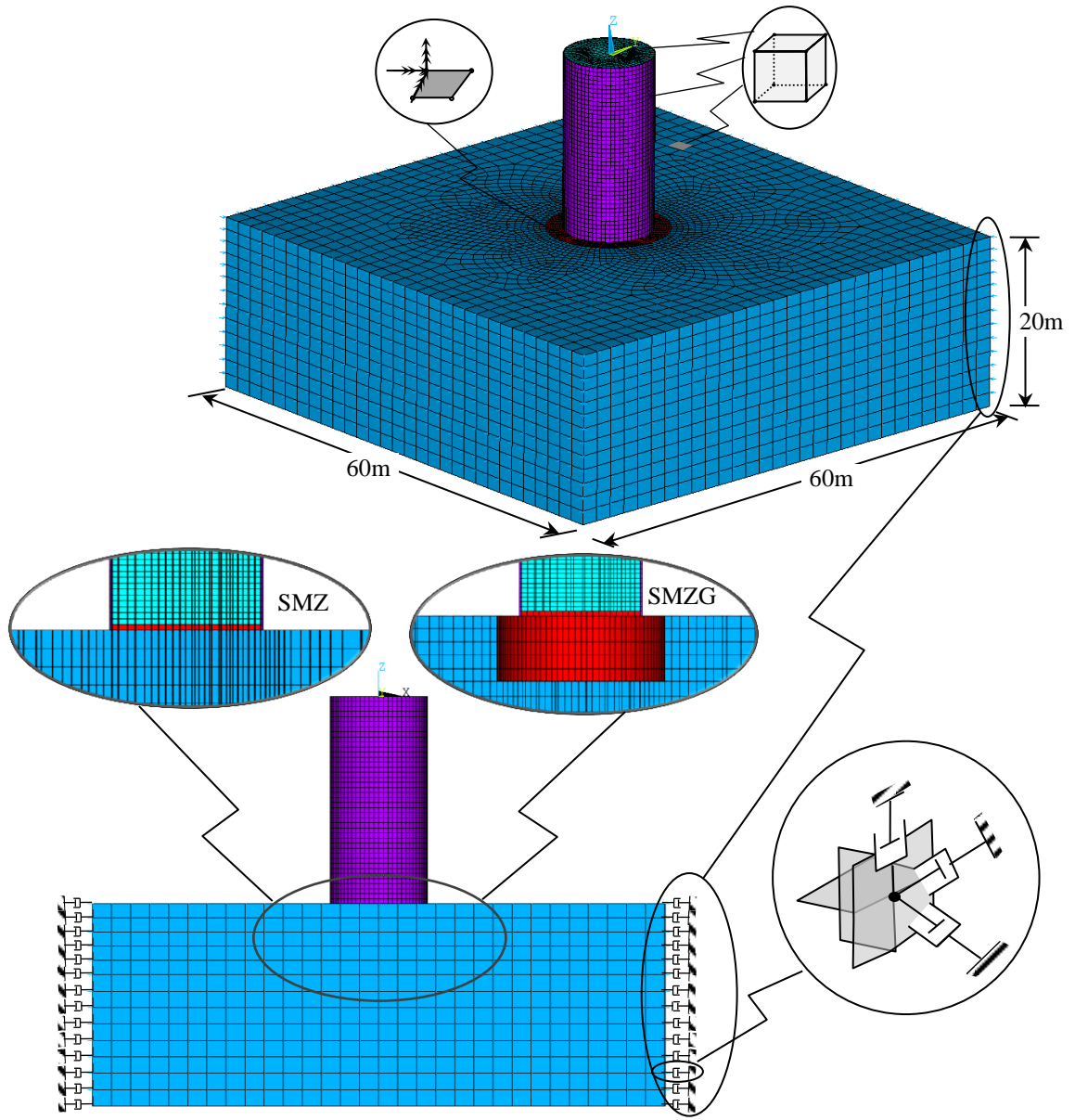
Şekil 2.16'dan da görüleceği gibi sistemde sanal sınırların kullanılmasıyla sistem hareket bağıntısına özel bir sönüm matrisi dahil edilmektedir. Bu nedenle genel hareket bağıntısı aşağıdaki şekli almaktadır.

$$[M]\{\ddot{u}(t)\} + [C]\{\dot{u}(t)\} + [C^*]\{\dot{u}(t)\} + [K]\{u(t)\} = \{R(t)\} \quad (2.155)$$

Burada  $C^*$  sisteme ait özel sönüm matrisini ifade etmek üzere bir serbestlik derecesi için aşağıdaki bağıntıda olduğu gibi yazılabilmektedir.

$$[C^*] = \begin{bmatrix} A_n \rho v_p & 0 & 0 \\ 0 & A_{t1} \rho v_s & 0 \\ 0 & 0 & A_{t2} \rho v_s \end{bmatrix} \quad (2.156)$$

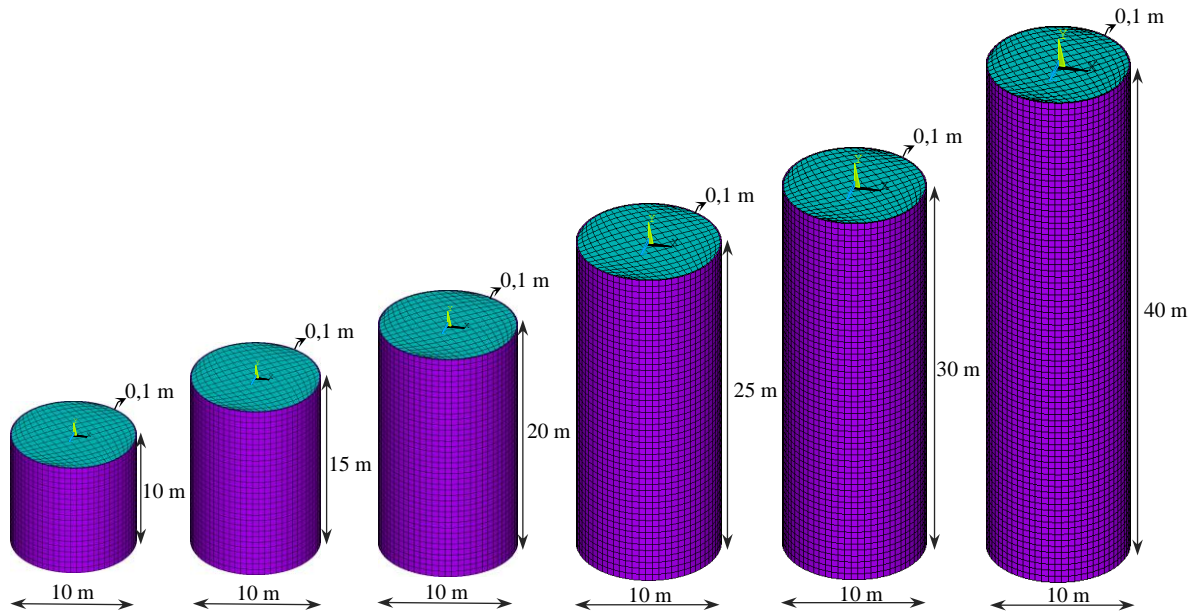
Bu başlık altında temelin gömülü olmadığı (SMZ) ve gömülü olduğu (SMZG) durumlarda stok malzemesi-silo-temel/zemin sistemi için önerilen modellere ilişkin yapı-temel/zemin etkileşimi mekanizması ve bunun nasıl dikkate alındığı açıklanmıştır. Stok malzemesi-yapı etkileşiminin dikkate alınması ise bu modellerde 2.2.1 başlığında tanımlanan SM modeli için verilen yaklaşımla aynıdır. Temel/zemin sistemi için Şekil 2.17'den de görüleceği gibi zemin yeterli genişlikte üç boyutlu katı eleman (solid), temel sistemi ise kabuk (shell) tipinde sonlu elemanla modellenmektedir. Zeminin modellenmesinde her bir noktasında üç adet serbestlik içeren (ux, uy, uz,) 8 noktalı prizmatik katı (solid) eleman kullanılmıştır. Benzer şekilde silonun ve stok malzemesinin modellenmesinde her bir noktasında üç adet serbestlik içeren (ux, uy, uz,) 8 noktalı prizmatik katı (solid) eleman kullanılmıştır. Temel sisteminin modellenmesinde ise her noktada 6 serbestliğe sahip 4 noktalı kabuk (shell) eleman kullanılmıştır. Bu modelde sonsuz zemin ortamının gerçekçi bir şekilde modellenebilmesi için sanal viskoz sınırlar kullanılmıştır. Sönümleyiciler model sınırlarına kartezyen koordinat sisteminde her bir doğrultuda yerleştirilmiştir. Bu yaklaşımların özetlendiği gömülmenin dikkate alındığı ve alınmadığı durumu gösteren modeller Şekil 2.17'de verilmektedir.



Şekil 2.17. Çalışmada önerilen SMZ ve SMZG stok malzemesi-silo-temel/zemin modelleri için örnekler

### 3. BULGULAR VE İRDELEME

Farklı fiziksel özelliklere sahip ortamlara ve bunların birbirleriyle temasını sağlayan ara yüzeylere sahip bir sistemin çözümlenmesi, oldukça karmaşık ifadelerin ve hesap yöntemlerinin kullanılmasını gerekli kılmaktadır. Siloların deprem davranışlarını gerçekçi bir şekilde ortaya koyabilmek için; stok malzemesi, silo ve zemin gibi birbirinden çok farklı fiziksel ortamın ve bunların ara yüzeyleri nedeniyle ortaya çıkan etkileşim mekanizmalarının iyi anlaşılması gerekmektedir. Bu çalışma kapsamında tüm bu mekanizmalar gerçekleştirilen 4 farklı temel yaklaşım ve bunların altında birtakım parametrelerin irdelendiği alt yaklaşımlarla incelenerek karşılaştırmalı olarak irdelenmektedir. Bu amaçla çalışmada, farklı narinlik oranları ( $H/d_c$ ) için, 10 m çapında düz tabana sahip, sırasıyla 10, 15, 20, 25, 30 ve 40 m yüksekliğinde altı adet betonarme silindirik buğday silosu seçilmiş ve bunlar üzerinde çözümler gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.1).

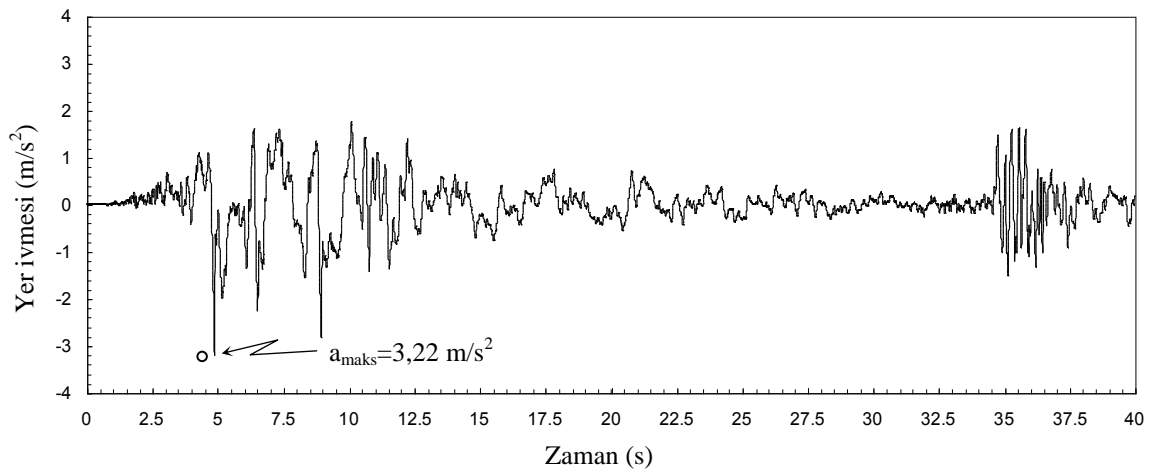


Şekil 3.1. Çalışmaya konu olan silo model ve boyutları

Çalışmada, önerilen ve geliştirilen yaklaşımların yanında, yaygın şekilde silo tasarımında tercih edilen Eurocode 1998-4 (2006) yaklaşımından elde edilen bulgular da

karşılaştırmalı olarak irdelenmektedir. Diğer taraftan Veletsos ve Younan tarafından nükleer atık depolama amacıyla kullanılan depoların dinamik tepkilerinin harmonik yükler için dikkate alınabildiği yaklaşım, frekans ortamında yapılan dönüşümler ile bu çalışmada geliştirilerek deprem yüklemesi için kullanılmıştır. Tüm bunlara ek olarak, önerilen analitik yaklaşım ile sayısal yaklaşımlar kullanılarak geliştirilen stok malzemesi-silo-temel/zemin sistemi modellerinden elde edilen bulgular kendi aralarında ve sözü edilen yöntemlerden elde edilen bulgularla, çeşitli parametreler açısından karşılaştırmalı olarak irdelenmiş ve bu irdemeler bu başlık altında verilmektedir. Bu parametreler silonun esnek ve rijit olması, silo narinlik oranı, silo temel/zemin sistemindeki farklı zemin koşulları ile silo temelinin zemine göre konumu gibi başlıklarda toplanabilmektedir. Tüm bu başlıklar altında, bu çalışma kapsamında toplam 126 farklı çözümlemenin bulguları irdelenmiş olmaktadır. Burada ifade edilen 126 sayısı çalışma için gerçekleştirilen çözümleme sayısını işaret etmemektedir. Çalışma kapsamında tekrara neden olmamak ve çalışmayı amacı dışına çıkartmamak için elde edilen birçok çözümleme sonucu burada içerilmemiştir. Bunlardan söz konusu parametrelerin irdelenmesinde en çarpıcı bulgular ve bunların irdelenmesi verilmektedir.

Gerek zaman ortamında gerekse frekans ortamında gerçekleştirilen çözümlelerde deprem kaydı olarak 17 Ağustos 1999 Kocaeli depreminin Yarımca kaydının Kuzey-Güney bileşeni kullanılmaktadır (Şekil 3.2).



Şekil 3.2. 17 Ağustos 1999 Kocaeli depremi Yarımca ivme kaydı Kuzey-Güney bileşeni



Elbetteki aynı noktada dahi iki depremin aynı karakteri sergileyebileceğinden bahsedilemez. Yine de bu depremin ülkemizde kuzey anadolu fay (KAF) hattı üzerinde gerçekleşmesi muhtemel depremleri karakter olarak temsil edebilecek bir kayda sahip olduğu kabul edilebilmektedir. Yönetmeliklerde belirli bir istatistik yaklaşım ile deprem bölgelerine göre yer hareketlerinin idealleştirildiği ve bunların etkilerinin, tepki spektrumları ile dikkate alınmaya çalışıldığı düşünüldüğünde, birbirini takip eden nitelikte iki depremin etkisini de içeren bu kayıt söz konusu 1. deprem bölgesi için oldukça ideal bir veri sağlamaktadır.

Çalışma kapsamında 4 farklı zemin sınıfı dikkate alınmaktadır. Temelin zemine göre konumu için gömülmenin olmadığı ( $e/r_0=0$ ) ve gömülmenin dikkate alındığı ( $e/r_0=1$ ) durum olmak üzere iki farklı çözümleme gerçekleştirilmektedir. Zemin sınıflarının seçiminde Türk Deprem Yönetmeliği'nde (TDY-2007) ve diğer ülkelerin ilgili yönetmeliklerinde tanımlanan zemin sınıfları ve bunlar için önerilen değerlerden yararlanılmıştır. Söz konusu zeminler için kullanılan mekanik özelliklerin belirlenmesinde ise çeşitli kaynaklarda ifade edilen deneysel çalışma bulgularından faydalanılmıştır (Bardet, 1997; Barnes, 2000; Coduto, 2000). Dikkate alınan zemin sınıfları ve bunlara ilişkin özellikler Çizelge 3.1'de verilmektedir. Bu tabloda  $\gamma$ , E, G ve  $E_c$  sırasıyla zemine ait birim ağırlığı, elastisite, kayma ve hacimsel bir modülü göstermektedir. Diğer taraftan  $\nu$ ,  $\nu_s$  ve  $\nu_p$  ise sırasıyla Poisson oranını, kayma dalgası hızını ve boyuna dalga hızını göstermektedir.  $K_H$  ve  $K_\theta$  statik rijitliklere bağlı olarak belirlenmiş temel/zemin sistemine ait yatay ötelenme ve dönme rijitliklerini, e ve  $r_0$  ise yapı temeline ait gömülme yüksekliğini ve dairesel temel sisteminin ya da eşdeğer sistemin yarıçapını temsil etmektedir.

Çizelge 3.1. Uygulamaya konu olan zemin sistemlerine ait mekanik özellikler

Zemin Sınıfı	$e/r_0$	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\nu$	E (kN/m <sup>2</sup> )	G (kN/m <sup>2</sup> )	$E_c$ (kN/m <sup>2</sup> )	$\nu_s$ (m/s)	$\nu_p$ (m/s)	$K_H$ (kN/m)	$K_\theta$ (kN/m)
S1	0	20	0,30	2000000	769230	2692308	614,25	1149,1	2,53E+07	1,01E+09
	1								5,07E+07	9,83E+07
S2	0	19	0,35	500000	192310	673077	309,22	643,6	6,53E+06	2,71E+08
	1								1,31E+07	2,53E+07
S3	0	18	0,40	150000	57690	201923	169,36	352,5	2,02E+06	8,79E+07
	1								4,04E+06	7,83E+06
S4	0	18	0,40	35000	12500	75000	82,54	202,1	4,38E+05	1,91E+07
	1								8,75E+05	1,70E+06

Gerek temel, gerekse silo malzemesi olarak dikkate alınan beton için elastisite modülü, birim kütle ve Poisson oranı için sırasıyla,  $E= 28000 \text{ MPa}$ ,  $\rho = 2500 \text{ kg/m}^3$  ve  $\nu=0,2$  değerleri dikkate alınmıştır. Stok malzemesi olarak seçilen buğday için ise bu değerler sırasıyla  $E= 5 \text{ MPa}$ ,  $\rho =900 \text{ kg/m}^3$ ,  $\nu =0,3$  olarak dikkate alınmıştır. Silo cidarı-tahıl sürtünme katsayısı,  $\mu$  bu çalışmada Eurocode (EN1991-4, 2006) tarafından, beton yüzey için stok malzemesinin buğday olması durumunda önerildiği şekliyle 0,57 olarak kabul edilmiştir.

### 3.1. Önerilen Modellerin İrdelenmesi

Yapı sistemlerinde deprem kaynaklı hasarları önleyebilmek için deprem yüklerinin ve deprem kaynaklı olmayan ancak siloya etkiyen diğer yüklerin gerçekçi bir şekilde belirlenmesi gerekmektedir. Tüm bu yük etkilerini ayrı ayrı değerlendirmek ve her biri için doğru modeller kurabilmek, yapı sistemi ile etkileşim içerisinde bulunduğu diğer sistemlerin doğru bir şekilde modellenmesi ile mümkün olabilmektedir. Silo ve benzeri büyük kütleli ve boyutlu yapı sistemleri için bu değerlendirme; oldukça zaman alıcı ve karmaşık olabilmektedir. Bu tür çözümlerinin; uygun malzeme modelleri, gerçekçi yöntem ve doğru şekilde tanımlanan sınır koşulları durumunda gerçekçi sonuçlar üreteceğini düşünmek normaldir. Ancak bu durumda model boyutları önemli derecede büyümekte ve yüksek kapasiteli bilgisayarlar ile uygun sayısal yaklaşımlara ihtiyaç duyulmaktadır. Bilgisayar teknolojisinde meydana gelen önemli gelişmelere ve sayısal yöntemlerdeki ilerlemelere rağmen, çok daha zaman alıcı ve modellenmenin zor olmasından dolayı, tasarımcılar genellikle bu yaklaşımları tercih etmemektedirler. Ayrıca, bu modellerin kurulmasında yapılacak en küçük bir hatanın, etkilerin ve dolayısıyla sistem tepkilerinin belirlenmesinde büyük yanlışlıklara neden olabileceği de bilinen bir gerçektir. Bu nedenlerle basitleştirilmiş yaklaşımların varlığı; gerek tasarımcılar, gerekse araştırmacılar için her dönem önemli bir ihtiyaçtır. Tüm yapı sistemleri için bu bakış açısı önemli olmakla birlikte, silo gibi stok malzemesi ve temel/zemin sistemi etkileşimine maruz karmaşık bir yapı sistemi için durum diğerlerine göre biraz daha önemli olmaktadır.

Siloların sismik davranışı stok malzemesi özellikleri, stok malzemesi ve silo cidarı arasındaki temas durumu değişkenliği ve tam dolu bir silonun kütlelerinin neden olabileceği ihmal edilemez seviyedeki yapı zemin etkileşimi gibi birçok etkenin birlikte değerlendirilmesini gerektirmekte ve siloların deprem davranışına ilişkin çözümlere

oldukça karmaşık bir hale gelmektedir. Bu nedenle her mühendislik probleminde olduğu gibi birtakım kabuller yardımıyla bu karmaşık olayı basitleştirerek yaklaşık bir çözüm arayan analitik yöntemler üretilmesi kaçınılmaz olmaktadır. Çeşitli ülkeler, bu analitik yöntemlerden yararlanarak, yönetmeliklerinde mühendislerin kolayca uygulamasına yönelik hesap yöntemleri önermişlerdir. Böylece belirli bir yaklaşıklıkla ve bazı sınırlamalar ve kabuller altında tasarımlar gerçekleştirilebilmektedir. Bu ihtiyaç nedeniyle bu çalışma kapsamında da gerek ankastre, gerekse yapı zemin etkileşiminin dikkate alındığı durum için, iki analitik yöntem önerilmiştir. Bu iki durum, yapının daha gerçekçi temsilinin sağlanabileceği, çalışma kapsamında gerçekleştirilen sonlu elemanlar yöntemiyle yukarıda belirtilen stok malzemesi-silo cidarı temas problemini de hesaba katabilen iki sayısal yaklaşımla da karşılaştırmalı olarak irdelenmektedir. Teknik literatürde mevcut olan ve başka bir amaçla geliştirilen Veletsos-Younan modeli, bu çalışmada deprem etkisine maruz stok malzemesi-silo etkileşimi için geliştirilerek kullanılmıştır. Bu yaklaşımla ilgili hazırlanan program Ek 1’de verilmektedir. EN1998-4 (2006) yönetmeliğinde önerilen model de dikkate alınarak çalışma kapsamında kullanılan dördü analitik, ikisi sayısal olan bu modeller karşılaştırmalı olarak irdelenmektedir. Aşağıda çeşitli başlıklar altında bu modellerin etkinliği karşılaştırmalı olarak sunulmaktadır. Bu başlıklardan ilkinde önerilen analitik model ile üretilen sayısal model bulguları karşılaştırmalı olarak tartışılmakta ve bu başlıkta bulguların geçerliliği değerlendirilmektedir. Takip eden başlıklarda ise önerilen analitik yaklaşım, halen kullanılmakta olan EN1998-4 (2006) yönetmeliği yaklaşımı ve araştırmacıları tarafından tahıl siloları için de kullanılabileceği belirtilen Veletsos-Younan yaklaşımı ile karşılaştırmalı olarak irdelenmektedir. Daha sonra ise yapı temelini zemine gömülü olup, olmama durumları için önerilen yapı-zemin etkileşimini de dikkate alan analitik ve sayısal yaklaşımlar, dört farklı zemin sınıfı için karşılaştırmalı olarak irdelenmektedir.

### **3.1.1. Stok Malzemesi-Silo Sistemi İçin Önerilen Analitik ve Sayısal Modellerin İrdelenmesi**

Analitik yaklaşımların kullanımının, gerek araştırmacılar gerekse tasarımcılar için ne denli önemli olduğu daha önce de ifade edilmişti. Bu tür yaklaşımlar için kullanıcıların yöntem kabullerinin neler olduğunu ve hangi sınırlar içerisinde kullanılabileceğini bilmeleri gerekliliği açıktır. Bu amaçla çalışmada konu edilen silo sistemleri için

parametrik olarak bulgular irdelenmektedir. Burada önerilen analitik stok malzemesi-silo modeli (ÖM) (bkz. Şekil 2.4), önerilen sonlu elemanlar modeliyle (SM) (bkz. Şekil 2.14) çeşitli parametreler bakımından karşılaştırılacaktır. Söz konusu modeller kullanılarak elde edilen tepkilerden bu başlık altında yalnızca dinamik malzeme basınçları, yatay yerdeğiştirmeler, eşdeğer taban kesme kuvveti ve eşdeğer eğilme momenti değişimleri karşılaştırmalı olarak verilmektedir.

➤ Dinamik Malzeme Basınçları

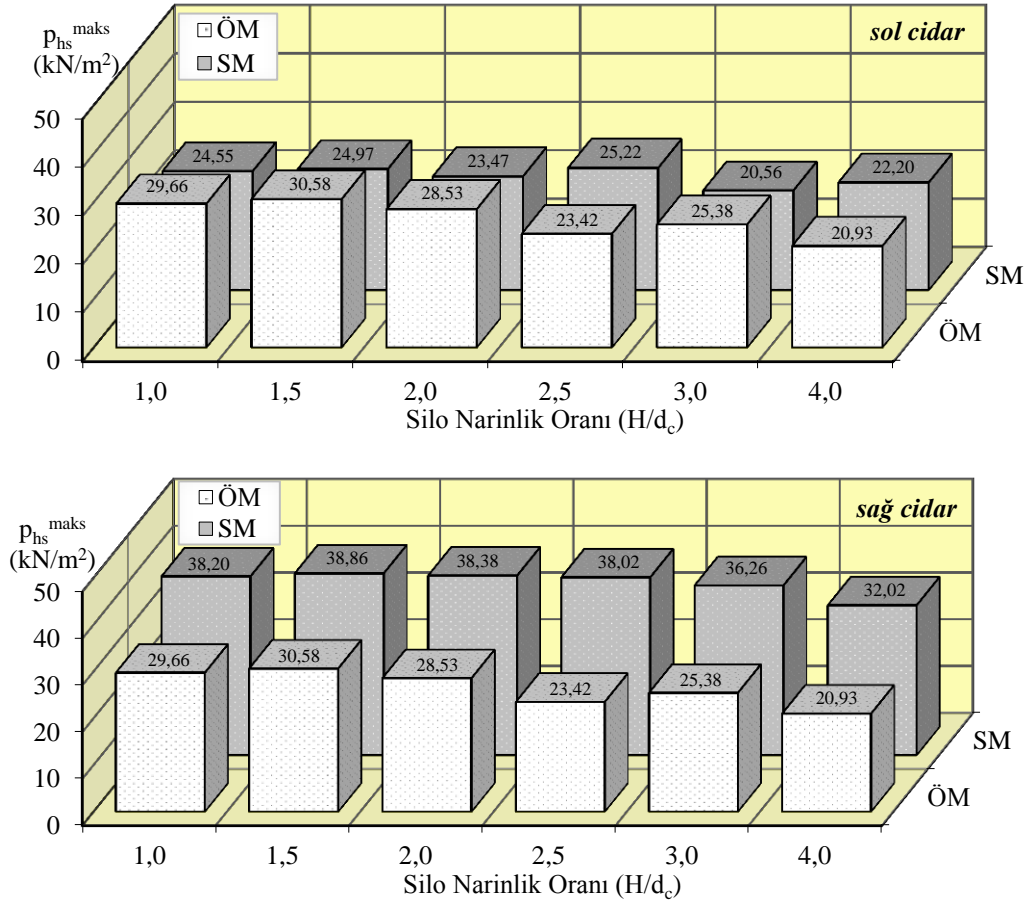
ÖM ve SM'e göre deprem doğrultusunda karşılıklı cidarlarda elde edilen en büyük dinamik malzeme basınçları ( $p_{hs}^{maks}$ ) ve bunların gerçekleşme zamanları (t) ile silo tabanından itibaren gerçekleşme yükseklikleri ( $H_o$ ) Çizelge 3.2'de sunulmaktadır. Burada ÖM için karşılıklı cidarlardaki değerler yöntem gereğince eşit olduğundan, çizelgede her iki cidarı temsilen tek bir sütun verilmektedir. Söz konusu en büyük dinamik malzeme basınçları Şekil 3.3'de, bunların yükseklik boyunca dağılımları ise Şekil 3.4'de karşılaştırmalı olarak verilmektedir.

Çizelge 3.2. SM ve ÖM'ye göre altı farklı silo için en büyük dinamik malzeme basınçları, gerçekleşme zaman ve yükseklikleri

Narinlik Oranı (H/d <sub>c</sub> )	En Büyük Dinamik Malzeme Basıncı, $p_{hs}^{maks}$ (kN/m <sup>2</sup> )								
	SM						ÖM		
	sol cidar			sağ cidar					
	t (s)	$H_o$ (m)	$p_{hs}^{maks}$	t (s)	$H_o$ (m)	$p_{hs}^{maks}$	t (s)	$H_o(m), (2/\pi)H$	$p_{hs}^{maks}$
1,0	7,00	8,0 (0,8H)	24,55	9,00	10,0 (1,0H)	38,20	4,89	6,5 (0,637H)	29,66
1,5	7,00	9,5 (0,63H)	24,97	9,00	8,5 (0,57H)	38,6	8,96	10 (0,637H)	30,58
2,0	7,00	9,0 (0,45H)	23,47	9,00	8,0 (0,40H)	38,38	4,90	13,5 (0,637H)	28,53
2,5	7,00	9,5 (0,38H)	25,22	9,00	7,5 (0,30H)	38,02	9,09	17,0 (0,637H)	23,42
3,0	6,40	13,5 (0,45H)	20,56	9,00	6,5 (0,22H)	36,26	9,17	20,5 (0,637H)	25,38
4,0	7,35	40,0 (1,0H)	22,20	4,90	7,5 (0,19H)	32,02	9,54	27,0 (0,637H)	20,93

Çizelge 3.2'de verilen en büyük basınç değerleri ve gerçekleşme zamanları incelendiğinde, sayısal modelde temas probleminin dikkate alınmış olması nedeniyle yükleme doğrultusundaki her iki yüzde farklı basınç değerlerinin elde edildiği görülmektedir. Bunların yalnızca değerleri açısından değil, gerçekleşme zamanları açısından da en büyük değerlerine farklı zamanlarda ulaştıkları bulgulardan görülmektedir. Buna ek olarak, en büyük basınçların tabandan itibaren gerçekleşme yükseklikleri de her

iki yüz için farklı narinlik oranlarında farklı değerler almaktadır. Her iki yüzeyde de, artan narinlik oranıyla, en büyük dinamik malzeme basıncının gerçekleşme yüksekliğinin ( $H_0$ ) azalma eğilimi gösterdiği söylenebilmektedir. Önerilen analitik yaklaşımda söz konusu yüksekliğin sabit tutulmuş olması nedeniyle, her narinlik oranında en büyük basıncın  $0,637 H$ 'de elde ediliyor olması yöntem kabullerinden biridir. Ayrıca bilindiği üzere, deprem yükü kütleyle doğru orantılı olarak etkidiğinden, stok malzemesi ve cidar arasındaki ayrılma ve temasa ek olarak deprem yükünün de simetrik olmamasından dolayı bu basınç farklılıklarının meydana geldiği söylenebilmektedir. Buradan hareketle, stok malzemesi ve cidar arayüzeyi modellemesinde kullanılan temas algoritmasının deprem sırasında malzemenin cidardan ayrılması ve cidarla birleşmesi olaylarını doğru bir şekilde modellemesi gerekliliği ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle yapılan değerlendirmelerde ve bu değerlendirmelerin sergilendiği çizelge ve şekillerde silo en kesitinin merkezine göre deprem doğrultusundaki karşılıklı cidarların, sol ve sağ cidar olarak isimlendirildiğini belirtmek uygun olmaktadır.



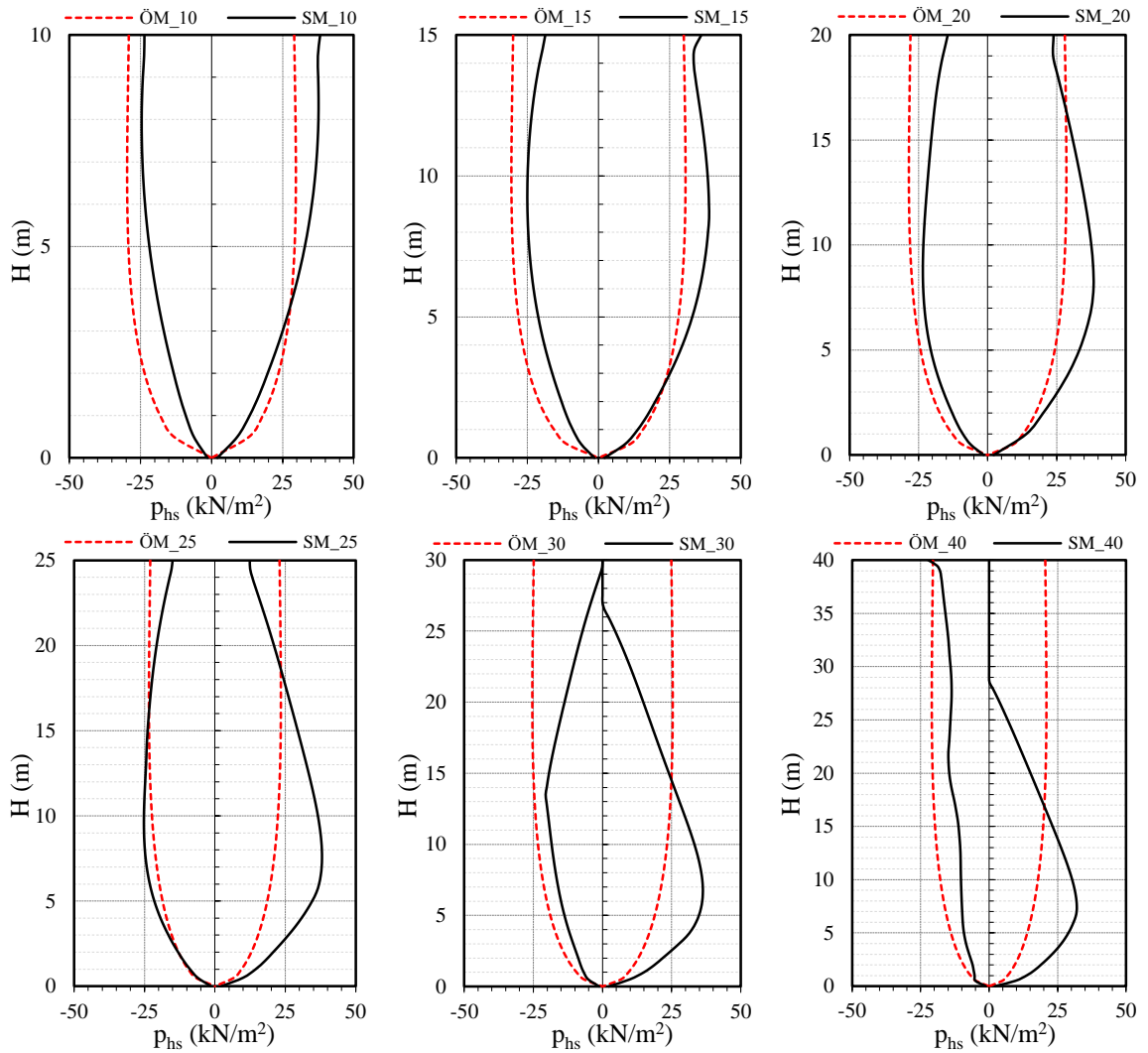
Şekil 3.3. ÖM ve SM'ye göre sol ve sağ cidarlardaki en büyük dinamik malzeme basınçlarının altı farklı silo için karşılaştırılması

Şekil 3.3'den görüldüğü üzere, sol cidarda ÖM ve SM bulguları birbirlerine oldukça benzerdir. Sağ cidar için ise ilk üç narinlik oranında aradaki fark %30 civarındadır. Diğer taraftan artan narinlik oranlarında bu fark %50'lere ulaşabilmektedir. Bu durumda, ÖM'nin bodur silolarda SM'ye benzer bulgular verdiği görülürken, narin silolar için ise SM'ye göre sağ cidar için küçük değerler verdiği karşılaştırmaya konu edilen bulgulardan görülebilmektedir.

Çizelge 3.2'den görüldüğü üzere SM'e göre ilk dört narinlik oranı için her iki cidarda da en büyük dinamik malzeme basınçları benzer değerler almaktadır. Son iki silo sistemi için ise en fazla %20 civarında bir fark meydana geldiği yine elde edilen bulgulardan hesaplanmaktadır. ÖM'de ise söz konusu basınçlar ilk üç narinlik oranı için yakın olup, son üç narinlik oranında en fazla %30 civarında bir azalma meydana gelmiştir. Dolayısıyla, silo narinlik oranı arttıkça oluşan en büyük dinamik malzeme basınçları azalma eğilimindedir. Diğer taraftan bu azalma eğiliminin gerek SM, gerekse de ÖM için aynı şekilde gerçekleşmiş olması davranışın artan narinlik oranıyla doğru şekilde temsil edildiğini göstermektedir. Ancak bu eğilimin her zaman bu şekilde gerçekleşeceğini söylemek de mümkün değildir. Bununla birlikte, birbirine çok yakın narinlik oranları için eğilim, yapı ve stok malzemesi dinamik karakteristiği ve bunun yük dinamik karakteristiği ile ilişkisinden hareketle değişiklik gösterebilmektedir. Ayrıca Şekil 3.4'den de açıkça görüldüğü üzere, SM'ye göre narinlik oranının artmasıyla  $H/d_c=4$  olan silonun sol cidarı hariç hemen hepsinde en büyük dinamik malzeme basıncının oluşma yüksekliği azalmaktadır. Daha önce de belirtildiği gibi SM'de kullanılan stok malzemesi-cidar ara yüzeyinin stok malzemesinin cidardan bağımsız bir şekilde hareket etmesini hesaba katıyor olması, deprem doğrultusunda karşılıklı cidarlarda önemli ölçüde farklı dinamik malzeme basınç değerlerinin de tespit edilebilmesine olanak sağlamaktadır. Fakat ÖM'in kabulleri gereğince karşılıklı cidarlar için farklı basınç değerleri elde edebilmek mümkün değildir. Bu durum, sayısal modelden farklı olarak, cidar ile stok malzemesinin birlikte hareket ettikleri kabulünün bir sonucudur. Ayrıca yine ÖM'de en büyük dinamik malzeme basıncının tabandan itibaren oluşma yüksekliğinin  $H_0=(2/\pi)H$  gibi sabit bir değer kabul ediliyor olması belirli bir narinlik oranı için yeterli bir yaklaşıklıkla davranışı temsil ediyor olması anlamına gelirken, artan narinlik oranı ile bu ilişkinin bozulduğu çözümlerden görülmektedir. Söz konusu bu farklar eşdeğer taban kesme kuvvetinin değişimi için önemli bir farklılığa neden olmazken, eşdeğer kesme kuvveti bileşke kuvvetinin konumunun, ÖM

için, silo tabanına göre daha yüksekte hesaplanması anlamına geleceğinden, eşdeğer eğilme momentinin daha büyük hesaplanmasına neden olacaktır.

Şekil 3.4.'de çalışmaya konu edilen tüm silolar için ÖM ve SM çözümlerinden elde edilen dinamik malzeme basınçlarının yükseklikle değişimleri karşılaştırmalı olarak verilmektedir. Bu karşılaştırmalar, yükseklik boyunca en büyük taban kesme kuvvetine neden olacak basınç değişimleri dikkate alınarak, her bir silo için ayrı ayrı gerçekleşme zamanları belirlenmek suretiyle gerçekleştirilmiştir. Söz konusu gerçekleşme zamanları eşdeğer taban kesme kuvvetlerinin gerçekleşme zamanları ile aynıdır.



Şekil 3.4. Çalışmaya konu edilen altı farklı silo için ÖM ve SM'ye göre sol ve sağ cidarlarda yükseklik boyunca dinamik malzeme basınçlarının değişimleri

Bu şekilden hareketle, hemen bütün silolar için önerilen analitik modelin (ÖM) önerilen sayısal modelle (SM) sol cidardaki basınçların tespitinde oldukça yakın bulgular verdiği görülmektedir. Özellikle ÖM'nin sol ve sağ cidarda ilk üç narinlik oranında oldukça iyi sonuç verdiği, diğerleri için ise hemen hemen benzer dağılımı temsil edebildiği de yine bu şekilden tespit edilebilmektedir. Diğer taraftan, narinlik oranının ( $H/d_c$ ) 3,0 ve 4,0 gibi değerler aldığı sistemlerde ise stok malzemesinin yapı sisteminden ayrılmasının ve buradan hareketle, yapı sistemi ile stok malzemesinin dinamik karakteristiklerinin birbirinden farklı olmasının basınç dağılımlarının alışılmadık dışında karakter sergilemelerine neden olduğu görülmektedir. Bu olay, oluşan yatay yerdeğiştirmelerin stok malzemesinin cidardan ayrılmasına neden olması ile açıklanabilmektedir. Söz konusu basınç değişimi, bu nedenle 3,0 narinlik oranına sahip siloda sağ cidarda, seçilen en büyük taban kesme kuvvetine neden olan dağılımda üstte yaklaşık 3 metre, 40 metrelik siloda ise üstte 11,5 metrelik bir kısımda ek dinamik basıncın sıfırlanması şeklinde bir davranış sergilemektedir. Gerçekleşme zamanları açısından incelenen siloların karşılaştırılması durumunda, sol cidarda en büyük malzeme basıncının  $H/d_c=3,0$  için 6,4.s, 4,0 için 7,35. s'de diğer silolarda ise 7. s'de olduğu görülmektedir. Diğer taraftan sağ cidarda ise söz konusu basınç  $H/d_c=4,0$  için 4,9. s'de oluşurken diğer silolarda 9. s'de oluşmaktadır.

#### ➤ Silo Yatay Yerdeğiştirmesi

Ankastre temel kabulü ile ÖM ve SM'ye göre deprem doğrultusunda karşılıklı cidarlarda elde edilen en büyük yatay yerdeğiştirme değerleri ve bunların gerçekleşme zamanları Çizelge 3.3'de sunulmaktadır. Çizelgeden de görüldüğü gibi SM'e göre sol cidarda tüm narinlik oranları için söz konusu yerdeğiştirmeler 7. s civarında 0,0013 ile 0,0603 m arasında gerçekleşirken, sağ cidarda ilk iki narinlik oranı için en büyük yerdeğiştirmeler 4,95. s'de, diğer incelenen silolar için ise 9. s civarında 0,0020 ile 0,0667 m arasında elde edilmektedir. ÖM'e göre ise  $H/d_c=1,0$  için 4,89. s, diğer narinlik oranları için ise 9~10. s'de 0,0005~0,1463 m olarak elde edilmektedir. Bu karşılaştırmalardan da görülebileceği üzere, sol cidar ile sağ cidardaki en büyük yerdeğiştirmelerin gerçekleşme zamanları farklı olmaktadır. Gerçekte bu yerdeğiştirmelerin deprem doğrultusundaki karşılıklı silo cidarlarında birbirine zıt yönlere silo-stok malzemesi etkileşimi nedeniyle farklı zamanlarda ve değerlerde gerçekleşmesi beklenmelidir. Önerilen analitik yaklaşımda ise bu davranışın bu hassasiyetle tespitinin beklenmesi mümkün olmamaktadır. Ancak 2,0,



2,5 ve 3,0 narinlik oranları için gerçekleşme zamanlarının sağ cidar ile aynı şekilde elde edilmiş olması silo davranışının ÖM ile bu aralıkta yeterli hassasiyetle temsil edilebildiğine işaret etmektedir. Teknik literatürde 2,0'den daha küçük narinlik oranları için bodur silo tanımı yapılmış olması, bu oranlar dışında orta narin ve narin silo olarak yapılan sınıflandırmalarda davranışın değiştiğine işaret etmektedir. Söz konusu yapı sistemi için elde edilen yerdeğiştirme tepkilerinin, özellikle bodur silolar için oldukça küçük ve bu yapı sistemi için dikkate alınmayacak mertebelerde olduğu görülmektedir. Ancak artan narinlik oranıyla tepkilerin bekleneceği üzere artmış olması da yerdeğiştirme tepkilerini kayda değer seviyelere taşımamaktadır. Durum böyleyken, önerilen analitik modelin (ÖM) söz konusu tepkiyi artan narinlik oranı ile gerçekçi bir şekilde tespit ettiğinden bahsetmek de elde edilen bulgulardan mümkün görülmemektedir.

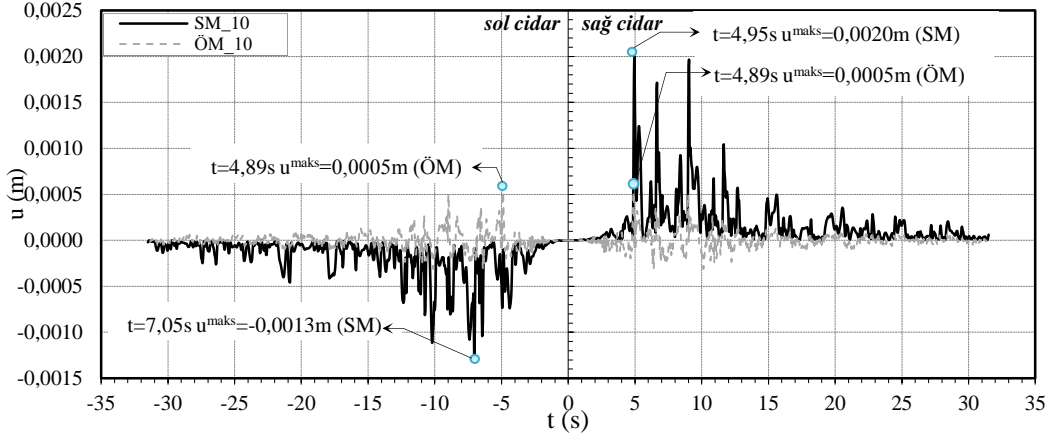
Yerdeğiştirmelerin zamanla değişimleri incelendiğinde, yukarıda ifade edilen davranış farklılıkları çok daha açık bir şekilde sayısal model bulgularından görülebilmektedir. Takip eden şekillerde bu nedenle, davranışları diğer silolara benzer olması nedeniyle,  $H/d_c=1,5$  ve  $3,0$  karşılaştırmaları verilmemektedir. Daha önce de ifade edildiği gibi burada davranışın değiştiği sınır olan SM<sub>20</sub> ile ÖM<sub>20</sub> arasındaki karşılaştırmalar kilit rol oynamaktadır.

Çizelge 3.3. SM ve ÖM'ye göre altı farklı silo için en büyük yerdeğiştirmeler ve gerçekleşme zamanları

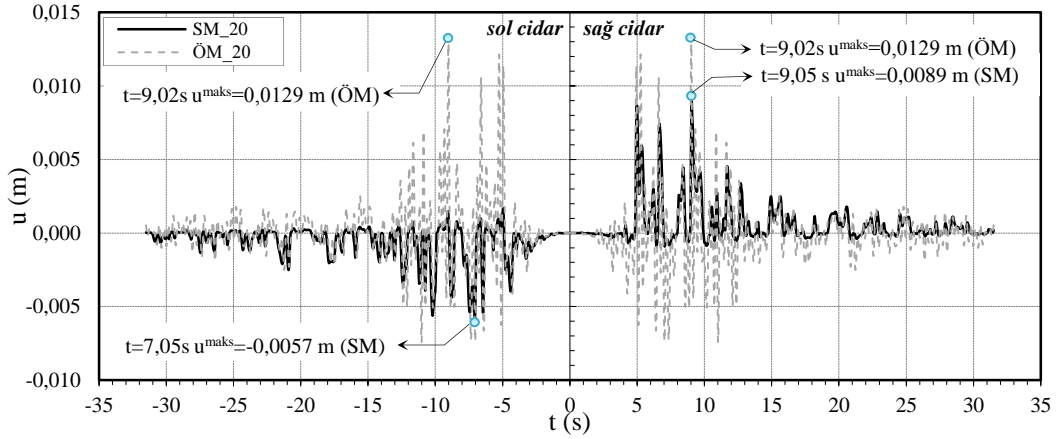
Narinlik Oranı ( $H/d_c$ )	En Büyük Yatay Yerdeğiştirme, $u^{maks}$ (m)					
	SM				ÖM	
	sol cidar		sağ cidar			
	t (s)	$u^{maks}$	t (s)	$u^{maks}$	t (s)	$u^{maks}$
1,0	7,05	-0,0013	4,95	0,0020	4,89	0,0005
1,5	7,05	-0,0032	4,95	0,0051	8,97	0,0031
2,0	7,05	-0,0057	9,05	0,0089	9,02	0,0129
2,5	7,10	-0,0101	9,10	0,0148	9,08	0,0244
3,0	7,15	-0,0196	9,15	0,0259	9,17	0,0543
4,0	7,40	-0,0603	9,30	0,0667	10,29	-0,1463

Şekil 3.5'den de görülebileceği gibi SM'e göre cidarın yerdeğiştirmesi her iki yüz için de normal doğrultusunda silo dışına doğru gerçekleşmekte ve tüm yer hareketi boyunca hiçbir şekilde diğer yönde yerdeğiştirme tepkisi elde edilmemektedir. Bu durum silonun narinlik oranı nedeniyle ortaya çıkan bir husustur ki, silonun hakim modları arasında konsol davranıştan daha çok silindirik geometrisi nedeniyle ortaya çıkan diğer

hakim mod şekillerinden kaynaklandığı söylenebilmektedir. Bu davranışın Şekil 3.6'da verilen SM\_20 ve ÖM\_20 siloları için verilen karşılaştırmada da benzer şekilde gerçekleştiği görülmektedir. 2,0'den daha büyük narinlik oranları için ise davranışın konsol davranışına benzediği, buradan hareketle teknik literatürde belirtilen 2,0 sınırının burada da anlam bulduğu söylenebilmektedir.



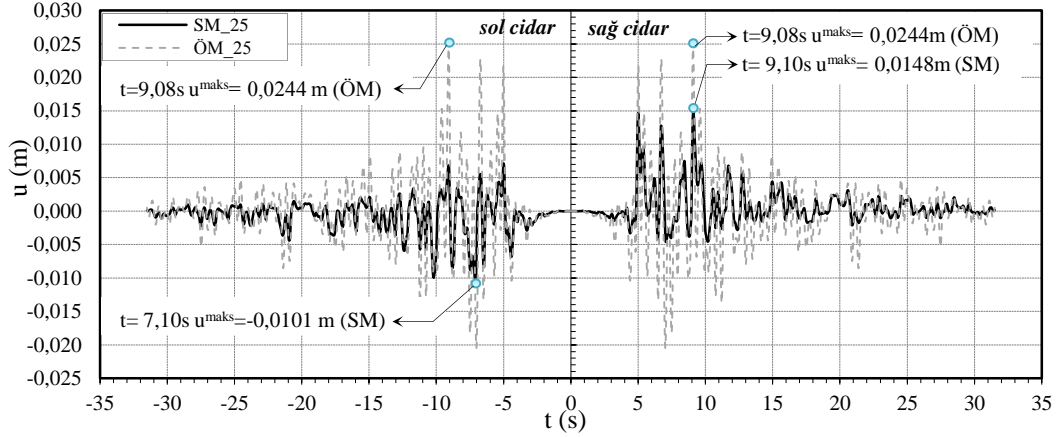
Şekil 3.5. ÖM\_10 ve SM\_10'a göre deprem doğrultusunda karşılıklı cidarlarda yatay yerdeğiştirmelerin zamanla değişimi



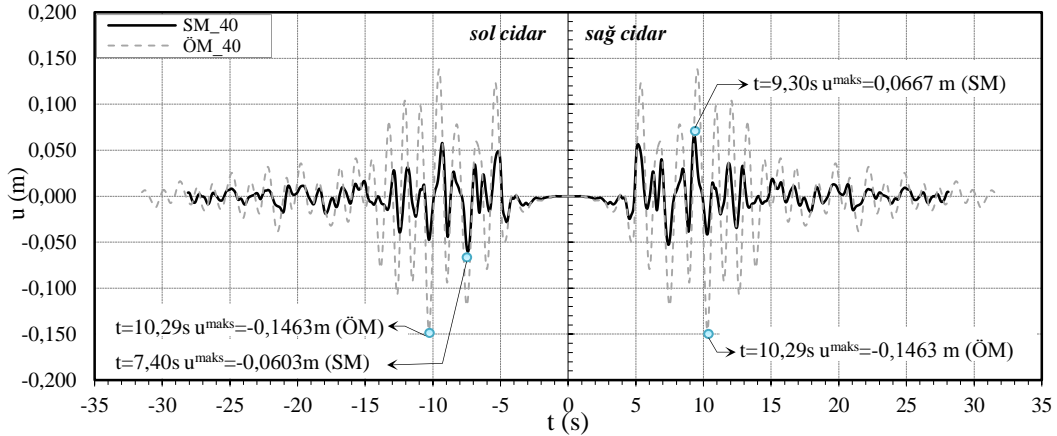
Şekil 3.6. ÖM\_20 ve SM\_20'ye göre deprem doğrultusunda karşılıklı cidarlarda yatay yerdeğiştirmelerin zamanla değişimi

Şekil 3.5'den görülebileceği gibi, önerilen analitik yaklaşımın narinlik oranının 1,0 olduğu durumda ve benzer şekilde yapılan çözümlerden 1,5 olduğu durumda, sayısal model ile elde edilen bulgulardan karakter olarak farklılık sergiledikleri, ancak artan narinlik oranı ile davranışın hemen hemen üst üste düştüğü görülmektedir (Şekil 3.6 ve

3.7). Diğer taraftan narınlığın 3,0 ve 4,0 gibi değerler alması durumunda ise davranışın diğer silo sistemlerine göre oldukça farklı olduğu görülmektedir (Şekil 3.8). Buradan hareketle elde edilen en büyük yerdeğiştirmeler açısından da her iki modelin 2,0 ve 2,5  $H/d_c$  oranları için birbirine yakın olduğu diğer silo sistemleri için ise birbirlerinden oldukça farklı elde edildiği söylenebilmektedir.



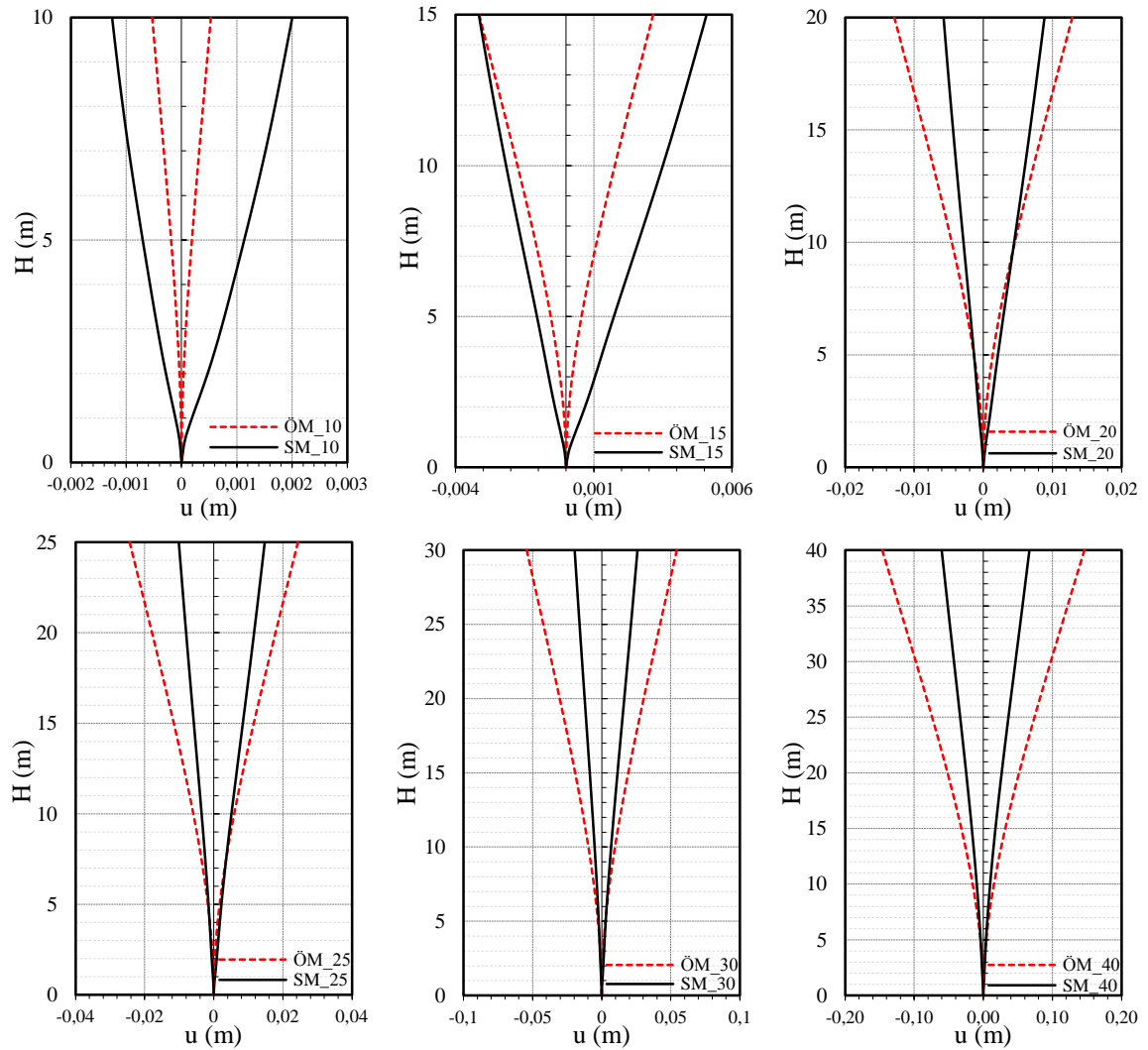
Şekil 3.7. ÖM\_25 ve SM\_25'e göre deprem doğrultusunda karşılıklı cidarlarda yatay yerdeğiştirmelerin zamanla değişimi



Şekil 3.8. ÖM\_40 ve SM\_40'a göre deprem doğrultusunda karşılıklı cidarlarda yatay yerdeğiştirmelerin zamanla değişimi

Söz konusu en büyük yatay yerdeğiştirmelerin yükseklik boyunca dağılımları Şekil 3.9'da karşılaştırmalı olarak verilmektedir. Bu karşılaştırmalar için yapılan değerlendirmeler de Şekil 3.5~3.8 için yapılanlara benzer şekilde olmaktadır.  $H/d_c=1,5, 2,0$  ve 2,5 değerleri için yükseklik boyunca değişimlerin her iki yöntemde de benzer dağılımlar

gösterdikleri, diğer sistemler için ise dağılımların karakter olarak önemli farklılık sergiledikleri görülmektedir. Önerilen analitik modelin basınçların tahmininde önerilen sayısal modele oldukça yakın bulgular veriyor olması, ÖM yaklaşımının stok malzemesinin davranışını ve buradan hareketle basınçların değişimlerini oldukça gerçekçi bir şekilde tahmin edebiliyor olduğu manasına gelmektedir. Ancak silonun geometrisine bağlı olarak hakim modlardaki önemli farklılıklar silo cidarındaki yerdeğişirmelerin bu yöntemle ancak belirli sınırlar içerisinde ( $H/d_c=1,5\sim 2,5$ ) önemli yaklaşıklıkla temsil edilebildiğini göstermektedir.



Şekil 3.9. ÖM ve SM'ye göre çalışmaya konu edilen 6 farklı silo için sol ve sağ cidarlarda hesaplanan yerdeğişirmelerin yükseklik boyunca karşılaştırılması

➤ Eşdeğer Taban Kesme Kuvveti

Önerilen analitik ve sayısal modelin ankastre temel kabulüyle çözümlenmelerinden karşılıklı cidarlarda elde edilen en büyük eşdeğer taban kesme kuvveti tepkileri ve bunların gerçekleşme zamanları Çizelge 3.4’de sunulmaktadır. Daha önce de ifade edildiği üzere burada değerlendirmeye konu edilen eşdeğer taban kesme kuvvetleri, toplam taban kesme kuvvetini temsil etmemekle birlikte, davranış ve karakter olarak aynıdır. Söz konusu bu eşdeğer taban kesme kuvvetinin her bir zaman adımı için yükseklik boyunca dinamik malzeme basıncı dağılımından elde edildiklerini ifade etmek uygun olacaktır.

Çizelge 3.4. SM ve ÖM’ye göre altı farklı silo için en büyük eşdeğer taban kesme kuvvetleri ve gerçekleşme zamanları

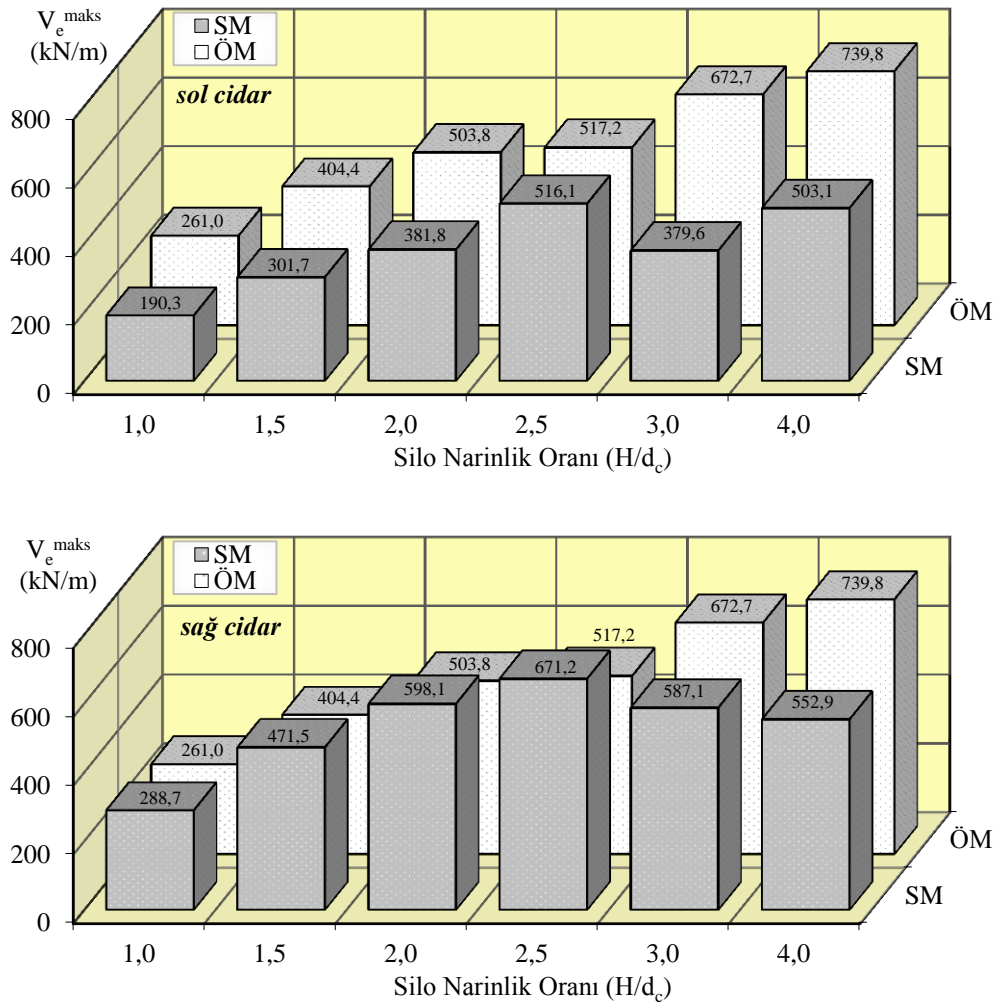
Narinlik Oranı (H/d <sub>c</sub> )	En Büyük Eşdeğer Taban Kesme Kuvveti, V <sub>e</sub> <sup>maks</sup> (kN/m)					
	SM				ÖM	
	sol cidar		sağ cidar			
	t (s)	V <sub>e</sub> <sup>maks</sup>	t (s)	V <sub>e</sub> <sup>maks</sup>	t (s)	V <sub>e</sub> <sup>maks</sup>
1,0	7,00	190,30	9,00	288,73	4,89	-260,97
1,5	7,00	301,69	9,00	471,53	8,96	-404,44
2,0	7,00	381,85	9,00	598,09	4,90	-503,76
2,5	7,00	516,08	9,00	671,18	9,09	-517,19
3,0	6,40	379,59	9,00	587,09	9,17	-672,67
4,0	7,35	503,09	4,90	552,93	9,54	-739,80

Çözümlenmeler sonucunda ÖM ve SM yaklaşımları ile çalışmaya konu edilen 6 farklı silo sistemi için elde edilen en büyük eşdeğer taban kesme kuvvetlerinin karşılaştırmaları Şekil 3.10’da, bunların zamanla değişimleri ise Şekil 3.11-3.13’de karşılaştırmalı olarak verilmektedir. Daha önce de ifade edildiği üzere, burada da her iki cidar için dinamik malzeme basınçlarının değişimine paralel olarak farklı zamanlarda en büyük değerlerine ulaşan eşdeğer taban kesme kuvvetleri değişimleri görülmektedir.

En büyük değerlerin karşılaştırılmasından görülebileceği gibi, sağ cidarda ÖM, SM’den elde edilenlerle oldukça yaklaşık bulgular verirken, sol cidarda elde edilen eşdeğer taban kesme değerlerinin ÖM bulgularına göre oldukça düşük seviyelerde kaldığı söylenebilmektedir. Burada artan silo yüksekliği ile kütlelerin dolayısıyla da taban kesme kuvvetinin de artacağını beklemek normaldir. Ancak, bunun her durumda böyle gerçekleşeceğini beklemek dinamik davranış açısından pek de uygun olmamaktadır. Şekil 3.10’dan da görülebileceği gibi, bu uygulama için H/d<sub>c</sub>= 2,5 ile 3,0 değerleri arasındaki

geçişte eşdeğer taban kesme kuvvetinde azalma olduğu görülmektedir. Artan kütleyle karşın böyle bir azalmanın stok malzemesi tepkisinin ve dolayısıyla tüm sistemin ortak tepkisinin değişimi nedeniyle gerçekleştirilebileceğini söylemek uygun olacaktır.

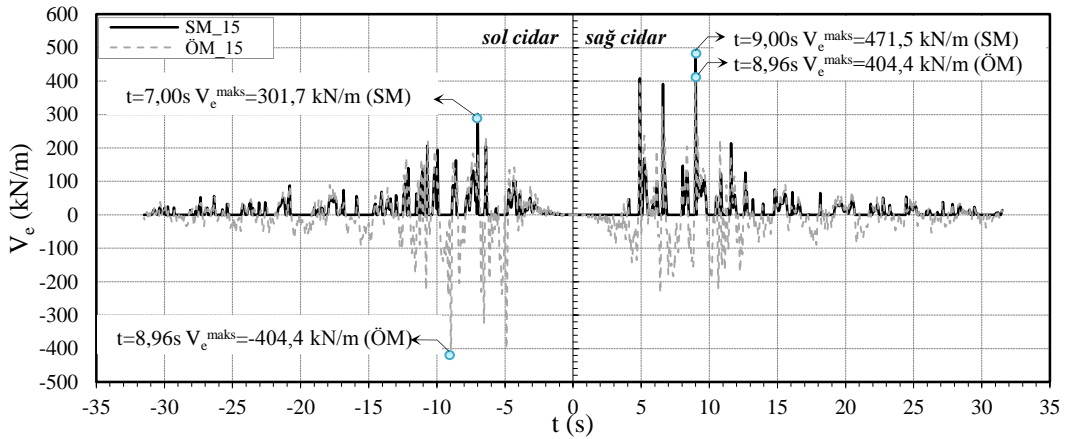
Şekil 3.10'dan görüldüğü üzere sözkonusu kesme kuvveti için ÖM, SM'e göre sol cidarda ilk üç narinlik oranı için %30 civarında daha fazla bir değer verirken, 2,5 narinlik oranı için hemen hemen aynı değeri vermekte, 3,0 ve 4,0 narinlik oranlarına sahip silolarda ise bu farkın artmakta olduğu görülmektedir. Sağ cidarda ise ilk dört narinlik oranı için ÖM, SM'e göre en fazla %20 civarında daha küçük değer verirken son iki narinlik oranında ise bu fark en fazla %30'lara ulaşmaktadır.



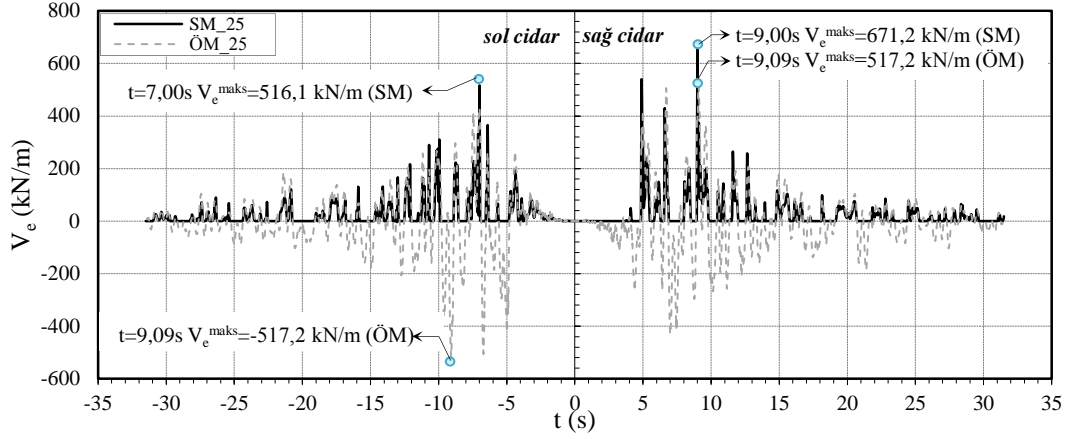
Şekil 3.10. ÖM ve SM'ye göre sağ ve sol cidarlardaki en büyük eşdeğer taban kesme kuvvetlerinin altı farklı silo için karşılaştırılması

Eşdeğer kesme tepkilerinin zamanla değişimleri incelendiğinde çalışmada önerilen her iki yöntemin de davranışın zamanla değişimini önemli yaklaşıkla benzer şekilde tahmin ettikleri Şekil 3.11-3.13'den görülmektedir. Bu benzerliğin tespiti için tüm çözümlerinin bulgularının karşılaştırmalı olarak burada sergilenmesi gereksiz görüldüğünden, takip eden şekillerde yalnızca ÖM\_15-SM\_15, ÖM\_25-SM\_25 ve ÖM\_30-SM\_30 karşılaştırmaları verilmektedir. Burada daha önce de ifade edildiği gibi, SM'de dikkate alınan stok malzemesi-silo temas ve ayrılmasının modellenilebiliyor olması nedeniyle, eşdeğer taban kesme kuvvetleri bir yönde en büyük değerlerini alırken diğer yönde sıfır olmaktadır.

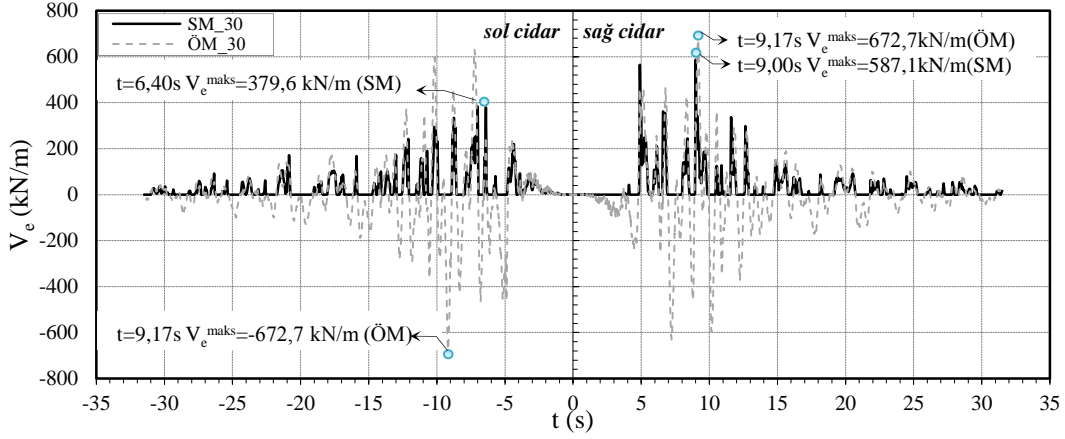
Sergilenen tüm bu karşılaştırmalardan, her üç şekilde de zamanla değişimlerin hemen hemen üst üste düştüğü açıkça görülmektedir. Temas modellemesinin olmaması nedeniyle ÖM nin kimi silolar için en büyük basınçları negatif veriyor olması gerçekçi bir yaklaşım olmamakla birlikte, hesaplanan en büyük eşdeğer kesme tepkilerinin benzer yönde elde edildiği görülmektedir. Ancak, bu durum ÖM\_25 için sol cidarda, SM\_25 için en büyük tepkinin elde edildiği 7,0. s için değerlendirildiğinde, önerilen analitik modelde de aynı zamanda 432 kN/m gibi bir eşdeğer kesme elde edildiği ve önerilen modelin bu noktada da SM'de olduğu gibi en büyük eşdeğer kesme kuvvetine ulaştığı görülmektedir. Benzer karşılaştırmalar diğer silo sistemleri için de yapıldığında durum aynıdır.



Şekil 3.11. Narinlik oranı 1,5 olan silo için ÖM ve SM'ye göre deprem doğrultusunda karşılıklı cidarlarda eşdeğer taban kesme kuvvetlerinin zamanla değişimi



Şekil 3.12. Narinlik oranı 2,5 olan silo için ÖM ve SM'ye göre deprem doğrultusunda karşılıklı cidarlarda eşdeğer taban kesme kuvvetlerinin zamanla değişimi



Şekil 3.13. Narinlik oranı 3,0 olan silo için ÖM ve SM'ye göre deprem doğrultusunda karşılıklı cidarlarda eşdeğer taban kesme kuvvetlerinin zamanla değişimi

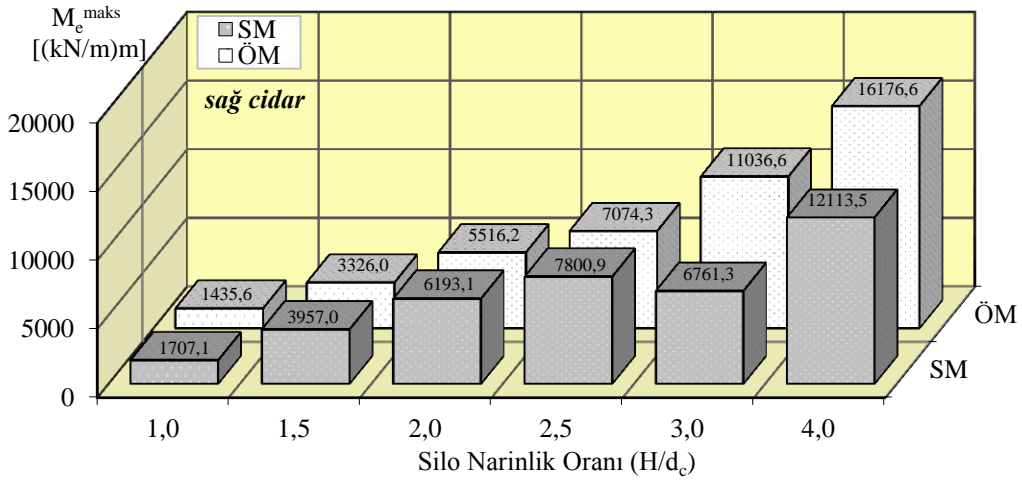
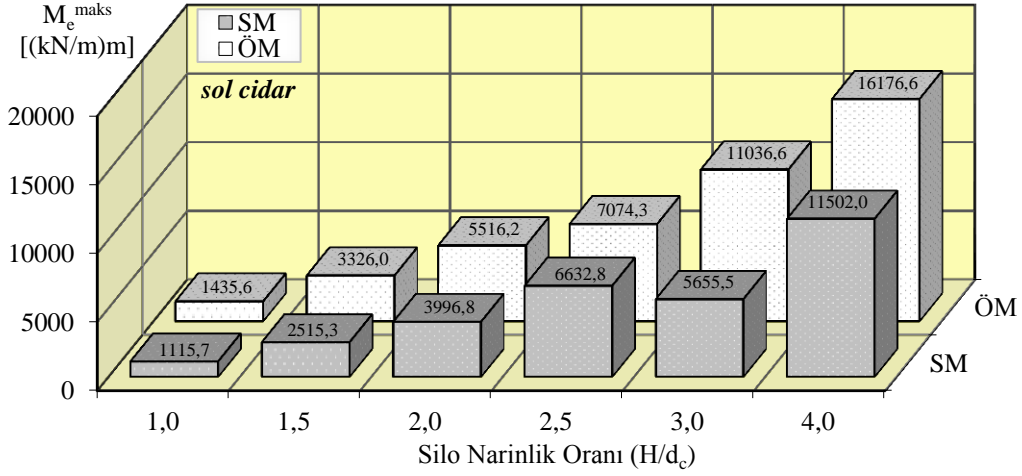
#### ➤ Eşdeğer Eğilme Momenti

ÖM ve SM'e göre ankastre durumda elde edilen en büyük eşdeğer eğilme momenti değerleri ve bunların gerçekleşme zamanları Çizelge 3.5'de sunulmaktadır. Söz konusu en büyük eşdeğer eğilme momentleri Şekil 3.14'de karşılaştırmalı olarak verilmektedir. Burada eşdeğer taban eğilme momentinin yükseklik boyunca söz konusu dinamik malzeme basıncı dağılımında 0,5m arayla hesaplanan kuvvetlerin tabana göre momentinin alınmasıyla elde edildiğini belirtmek uygun olmaktadır.



Çizelge 3.5. SM ve ÖM'ye göre altı farklı silo için en büyük eşdeğer eğilme momenti tepkileri ve gerçekleşme zamanları

Narinlik Oranı (H/d <sub>c</sub> )	En Büyük Eşdeğer Eğilme Momenti, $M_e^{\text{maks}}$ [(kN/m)m]					
	SM				ÖM	
	sol cidar		sağ cidar		t (s)	$M_e^{\text{maks}}$
	t (s)	$M_e^{\text{maks}}$	t (s)	$M_e^{\text{maks}}$		
1,0	7,00	1115,73	9,00	1707,13	4,89	-1435,58
1,5	7,00	2515,28	9,00	3957,05	8,96	-3325,99
2,0	7,00	3996,84	9,00	6193,08	4,90	-5516,22
2,5	7,00	6632,80	9,00	7800,90	9,09	-7074,27
3,0	8,75	5655,48	4,90	6761,26	9,17	-11036,63
4,0	7,35	11501,98	9,25	12113,49	9,54	-16176,65



Şekil 3.14. ÖM ve SM'ye göre altı farklı silo için deprem doğrultusunda karşılıklı cidarlardaki en büyük eşdeğer eğilme momentleri

Şekil 3.14'den de görülebileceği gibi eşdeğer taban kesme kuvveti tepkilerine benzer eğilme momenti tepkileri elde edilmektedir. Tekrar olmaması için bu başlıkta zamanla

değişimleri için herhangi bir karşılaştırma verilmemekte, yalnızca en büyük eşdeğer eğilme momenti tepkileri verilmektedir. Benzer karşılaştırmalar eşdeğer eğilme momenti tepkisi için yapıldığında, ÖM çözümü SM çözümüne göre sol cidarda ilk üç narinlik oranı için %30 civarında, 2,5 narinlik oranı için %7 daha fazla bir değer verirken, 3,0 ve 4,0 narinlik oranlarına sahip silolarda ise bu fark artmaktadır. Sağ cidarda ise ilk dört narinlik oranı için ÖM çözümü SM çözümüne göre en fazla %15 civarında küçük değer verirken son iki narinlik oranında bu fark en fazla %60'lara ulaşmaktadır.

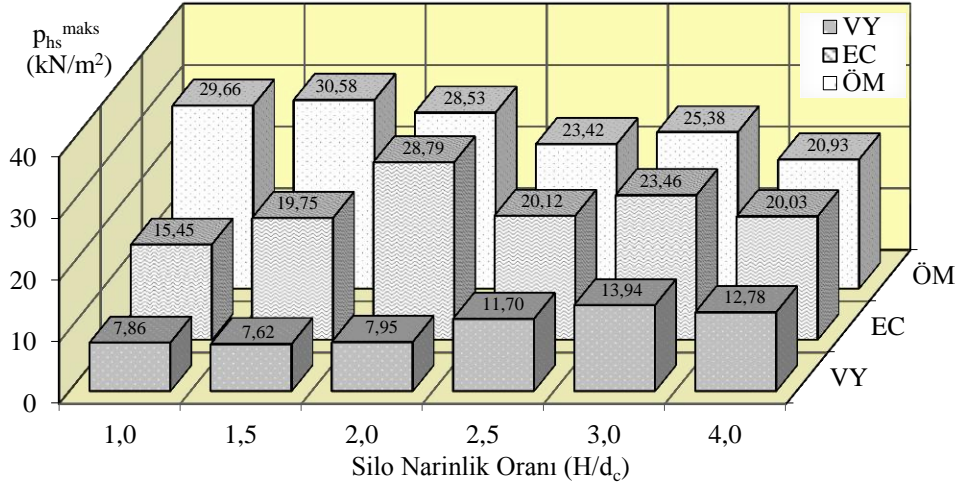
### **3.1.2. Önerilen Analitik Modelin EN-1998-4 ve Veletsos Younan Modelleriyle Karşılaştırılması**

Önerilen analitik model (ÖM), teknik literatürde mevcut olan EN-1998-4 (2006) tarafından önerilen yaklaşım (EC) ve Veletsos-Younan tarafından önerilen modelin yer hareketi için değiştirilmiş yaklaşımı (VY) ile elde edilen dinamik malzeme basınçları bu başlıkta karşılaştırmalı olarak irdelenmektedir. EN-1998-4 (2006) yönetmeliğinde önerilen model kullanılırken yapının yükseklik boyunca tepki ivmelerinin bulunması için Kocaeli depreminin Yarımca kaydı Kuzey-Güney bileşenine ait ivme spektrumundan yararlanılmaktadır. Söz konusu karşılaştırmalar için ÖM'den elde edilen açısız frekans değerlerine karşılık gelen tepki ivmesi değerlerinin alındığını belirtmek uygun olmaktadır. Bu başlıkta irdelenmekte olan yöntemler ile silo cidarındaki yerdeğiştirme, eşdeğer taban kesme, eğilme momenti ve devirici moment gibi yapısal ve stok malzemesine ait diğer birçok tepki elde edilebilmekle birlikte, yalnızca dinamik malzeme basınçları üzerinden irdemeler yapılacaktır. Burada ifade edilen diğer tepkiler ve bunlardan gerekli görülenleriyle ilgili birçok karşılaştırma takip eden başlıklarda sunulmaktadır. Bu nedenle tekrar olmaması ve asıl amaçtan uzaklaşmamak amacıyla burada değerlendirmelerde dinamik malzeme basınçları referans alınmakta ve bunların söz konusu modeller tarafından ne mertebede belirlendiği tartışılmaktadır. Bu modellere göre altı farklı narinlik oranı için ankastre durumda deprem doğrultusunda karşılıklı cidarlarda elde edilen en büyük dinamik malzeme basınçları, bunların gerçekleşme zamanları ve yükseklikleri Çizelge 3.6'da sunulmaktadır. Söz konusu dinamik malzeme basıncı değerleri Şekil 3.15'de, silo yüksekliği boyunca dağılımları ise Şekil 3.16'da karşılaştırmalı olarak verilmektedir.

Çizelge 3.6. EC, VY ve ÖM'ye göre en büyük dinamik malzeme basınçları, gerçekleşme zamanları ve yükseklikleri

Narinlik Oranı (H/d <sub>c</sub> )	En Büyük Dinamik Malzeme Basıncı, $p_{hs}^{maks}$ , kN/m <sup>2</sup>							
	EC		VY			ÖM		
	H <sub>o</sub> (m)	$p_{hs}^{maks}$	t, s	H <sub>o</sub> (m)	$p_{hs}^{maks}$	t, s	H <sub>o</sub> (m), (2/π)H	$p_{hs}^{maks}$
1,0	6,5 (0,637H)	15,45	8,98	10 (H)	7,86	4,89	6,5 (0,637H)	29,66
1,5	10,0 (0,637H)	19,75	4,90	15 (H)	7,62	8,96	10,0 (0,637H)	30,58
2,0	13,5 (0,637H)	28,79	4,91	20 (H)	7,95	4,90	13,5 (0,637H)	28,53
2,5	17,0 (0,637H)	20,12	11,56	25 (H)	11,70	9,09	17,0 (0,637H)	23,42
3,0	20,0 (0,637H)	23,46	11,59	30 (H)	13,94	9,17	20,0 (0,637H)	25,38
4,0	27,0 (0,637H)	20,03	9,00	40 (H)	12,78	9,54	27,0 (0,637H)	20,93

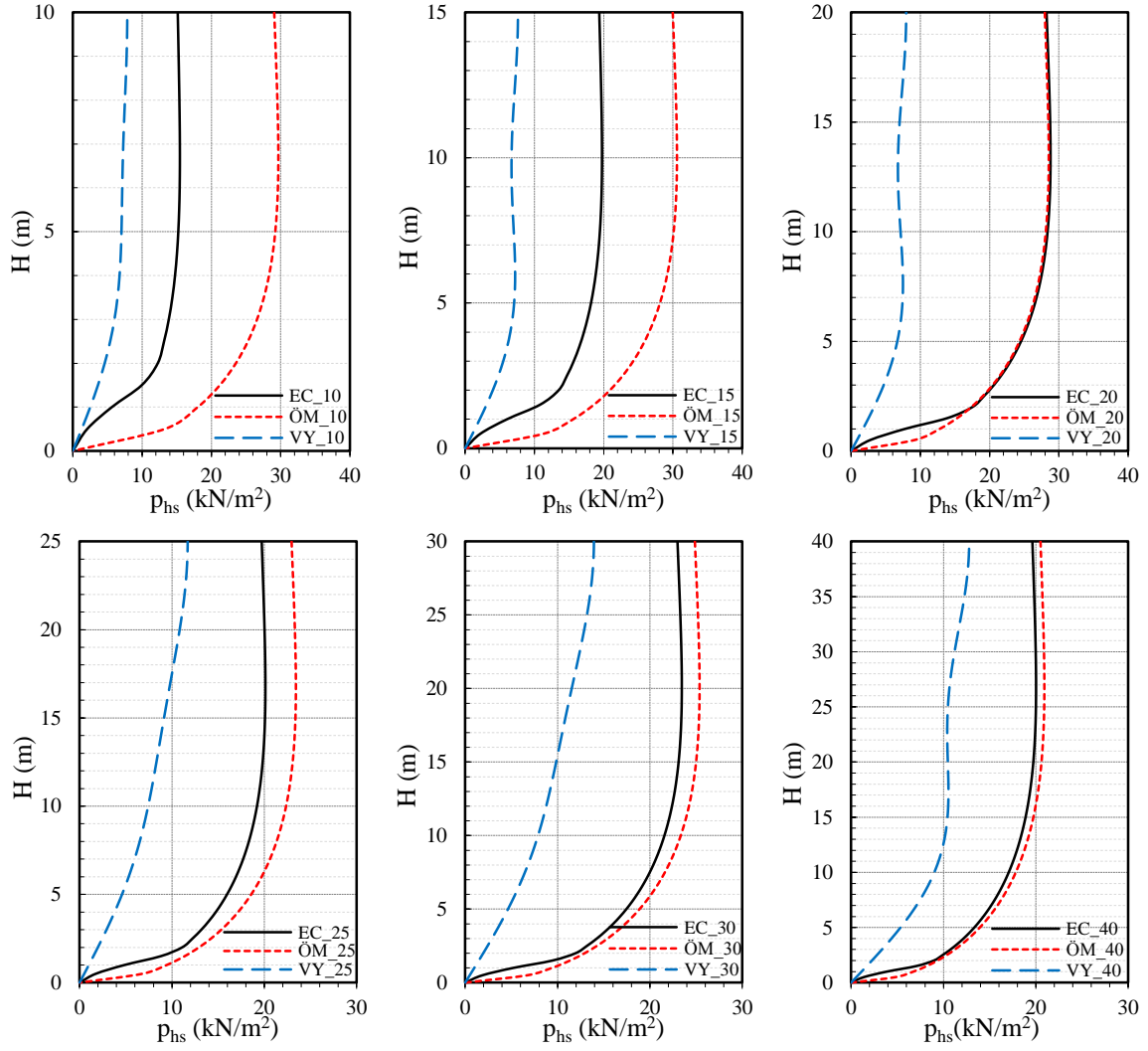
Bir önceki başlıkta önerilen analitik model (ÖM) ile elde edilen dinamik basınç dağılımlarının, bunların zamanla değişimlerinin ve en büyük basınçların gerçekleşme zamanlarının yeterli hassasiyetle tahmin edilebildiği sayısal model (SM) ile yapılan karşılaştırmalardan gösterilmiştir. Bu nedenle bu başlıkta yapılan irdelemelerde, SM modeli ile yapılan karşılaştırmalar dikkate alınarak ÖM referans model olarak kabul edilecektir. Çizelge 3.6'dan da görülebileceği gibi VY modeline göre ilk üç narinlik oranları için sözkonusu basınçlar 4~9. s'de 8 kN/m<sup>2</sup> civarında, diğer narinlik oranları için ise 9~11. s'de 11~14 kN/m<sup>2</sup> olarak elde edilmektedir. ÖM'e göre ise ilk üç narinlik oranı için 4~9. s'de 28~30 kN/m<sup>2</sup>, diğer narinlik oranları için ise 9~10. s'de 23~26 kN/m<sup>2</sup> olarak elde edilmektedir. Daha önceki karşılaştırmada temasın da dikkate alındığı durumda önerilen sayısal model (SM) ile elde edilen basınçların önerilen analitik modele (ÖM) oldukça yakın ve benzer şekilde olduğu hatırlanırsa, VY modeli ile tüm silo sistemleri için elde edilen basınç değerlerinin oldukça küçük olduğu anlaşılmaktadır. H/d<sub>c</sub>=2 olduğu durumda gerçekleşme zamanının benzer olmasına karşın basınçların bu yöntem tarafından oldukça düşük tahmin ediliyor olması yöntemin güvenilirliğini tartışılır hale getirmektedir. Diğer taraftan benzer karşılaştırmalar EC için yapıldığında yöntemin bodur silo sınıflamasına girebilecek silo sistemlerinde (H/d<sub>c</sub>=1~1,5) ÖM ve dolayısıyla SM'ye göre oldukça küçük dinamik basınçlar öngörüyor olması EC yöntemini de bu konuda tartışılır hale getirmektedir. Tüm bu değerlendirmeler Şekil 3.15'den de açıkça görülebilmektedir.



Şekil 3.15. ÖM, EC ve VY modellerine göre altı farklı silo için deprem doğrultusunda karşılıklı cidarlardaki en büyük dinamik malzeme basınçları

Buradan da görüldüğü üzere, VY yönteminin bu tür silo sistemlerinin hesabında her zaman oldukça küçük basınç değerleri vereceği kanısı oluşmaktadır. Diğer taraftan, EC’de önerilen yaklaşımın burada önerilen yaklaşıma göre, bodur silolar için oldukça güvensiz tarafta bulgular ürettiğinden bahsedilebilmektedir. Kaldı ki, gerçekte davranışın stok malzemesi ile cidar arasında ayrılmadan kaynaklı olarak her iki tarafta farklı basınçlara neden olacağı, kimi zaman tahmin edilen bu basınçların da ÖM’ye göre daha büyük oluşacağı hususları bir önceki başlıkta yapılan karşılaştırmalardan görülmüştü. Hali hazırda EC’nin bulgularının mevcut ÖM bulgularından daha küçük ve güvensiz bir şekilde tepkileri tahmin ediyor olması bu durumda daha da kritik bir hal almaktadır. Oransal olarak bakıldığında ÖM’ye göre ilk iki narinlik oranında EC’ nin %48 lere varan oranda daha düşük bulgular üretebildiği görülmektedir. Narin silo sistemleri için ise bu farkın yaklaşık olarak %10 civarında gerçekleştiği görülmektedir. Buradan hareketle EC’nin artan narinlik oranı ile temsil kabiliyetinin bodur silolara göre oldukça arttığını söylemek uygun olacaktır.

Yükseklik boyunca basınçların değişiminden de görülebileceği üzere yukarıda ifade edilen bu ilişkiler Şekil 3.16’den de açıkça anlaşılabilir. Bu karşılaştırmalardan da anlaşılabilirce üzere çalışmaya konu edilen ve bodur silo sınıfına girebilecek silo sistemleri için VY ve EC’nin oldukça küçük değerler ürettiği ve davranışını temsilde zorlandığı anlaşılmaktadır. Diğer silo sistemleri için ise EC ve ÖM hemen hemen üst üste düşen bulgular üretmektedir.



Şekil 3.16. Altı narinlik oranı için ÖM, EC ve VY Modeline göre silo yüksekliği boyunca dinamik malzeme basınçları

### 3.1.3. Stok Malzemesi-Silo-Temel/Zemin Sistemi İçin Önerilen Analitik ve Sayısal Modellerinin İrdelenmesi

Araştırmacı ve tasarımcılar için oldukça önemli olan analitik yaklaşımların hangi sınırlar içerisinde kullanılabilir olduğunu belirlemek gerekmektedir. Doğru sınır koşulları, uygun eleman tipleri ve malzeme modelleri ile etkileşimlerin doğru şekilde temsil edilmesi durumunda, sayısal yöntemlerle siloların davranışlarını analitik yöntemlere göre daha gerçekçi bir şekilde belirlemenin mümkün olacağı açıktır. Bu amaçla yapı-zemin etkileşiminin dikkate alındığı modeller için de parametrik bir çalışma gerçekleştirilmiş ve temelin yüzeysel ve gömülü olduğu durumlar için önerilen stok malzemesi-silo-temel/zemin sistemi analitik modelleri (ÖMZ, ÖMZG), sözkonusu durumlar için önerilen

sayısal modeller (SMZ, SMZG) ile dinamik malzeme basınçları, yatay yerdeğiştirmeler, eşdeğer taban kesme kuvveti ve eşdeğer eğilme momenti açısından ilgili başlıklar altında karşılaştırılmaktadır.

### 3.1.3.1. Temelin Gömülü Olmadığı Durum İçin Önerilen Analitik ve Sayısal Modeller Açısından İrdemeler

Bu çalışma kapsamında dikkate alınan bir diğeri önemli parametre de zemin etkileşimidir. Bu nedenle takip eden başlıklarda zemin etkileşiminin dikkate alındığı ve buna ek olarak temelin gömülü olması durumunu da hesaba katabilen analitik ve sayısal modeller karşılaştırmalı olarak irdelenmekte, böylece farklı yöntemler ile analitik modelin ne denli etkin bir şekilde davranışı temsil edebildiği değerlendirilmektedir. Bu bağlamda, temelin gömülü olmadığı durum için önerilen analitik (ÖMZ) (bkz Şekil 2.11) ve sayısal (SMZ) (bkz Şekil 2.17) modeller yardımıyla, altı farklı silo sistemi için ve dört farklı zemin sistemine göre (bkz Çizelge 3.1) elde edilen bulgular aşağıda başlıklar halinde çeşitli parametreler bakımından karşılaştırmalı olarak irdelenmektedir.

#### ➤ Dinamik Malzeme Basınçları

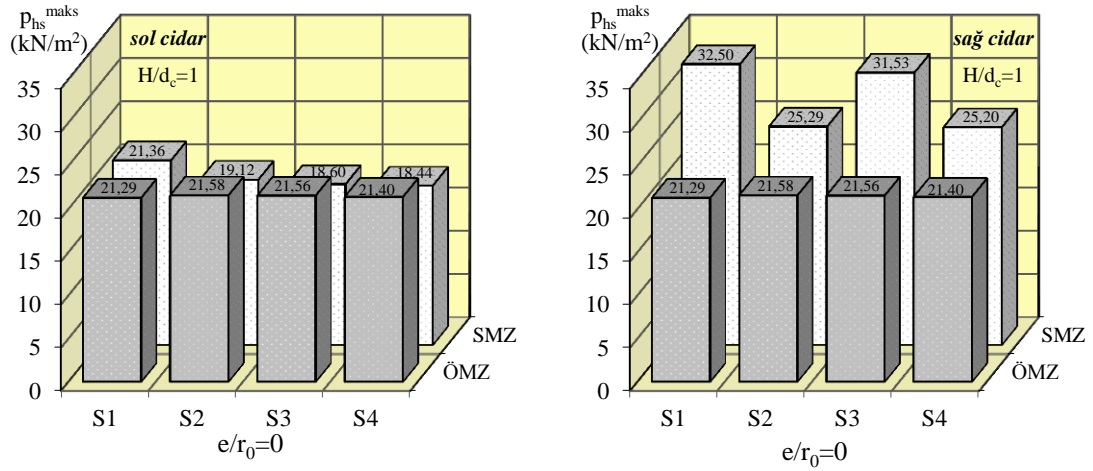
ÖMZ ve SMZ'ye göre deprem doğrultusunda karşılıklı cidarlarda elde edilen en büyük dinamik malzeme basınçları ( $p_{hs}^{maks}$ ) ve bunların gerçekleşme zamanları (t) ile silo tabanından itibaren gerçekleşme yükseklikleri ( $H_0$ ) her bir silo sistemi için Çizelge 3.7'de sunulmaktadır. Söz konusu en büyük dinamik malzeme basınçları ve bunların yükseklik boyunca dağılımları her bir narinlik oranı için dört farklı zemin sınıfına göre Şekil 3.17~3.28'de karşılaştırmalı olarak verilmektedir.

Şekil 3.17'de 10 m'lik silo için, diğeri bir ifadeyle narinlik oranı ( $H/d_c$ ) 1,0 olan siloda, ÖMZ ve SMZ yaklaşımları ile dört farklı zemin sistemi için elde edilen en büyük malzeme basınçları arasındaki değışim karşılaştırmalı olarak verilmektedir. Bu karşılaştırmalarda gerek yöntemler arasındaki farkları gerekse de irdelenen her iki yöntem için de zemin etkileşiminin dinamik malzeme basınçları üzerindeki etkilerini görmek mümkündür. Şekilden de görülebileceği gibi sol cidarda SMZ ve ÖMZ için dinamik malzeme basınçları oldukça yakın elde edilmektedirler.

10 m lik siloda yapılan bu karşılaştırmalardan tespit edilebilecek bir diğer önemli husus, zemin etkileşiminin önemli miktarda bir dinamik malzeme basıncına neden olmadığıdır. S1 ve S4 gibi birbirinden önemli derecede farklı ötelenme ve dönme (rocking) rijitliğine sahip olan iki farklı zemin sistemi için dahi, basınçtaki azalmanın sol cidar için %14 lere ulaşması, başka bir ifadeyle böylesi bir zemin farklılığında bu denli az miktarda gerçekleşiyor olması, 10 m çapa ve 10m yüksekliğe sahip bodur karakterdeki bir silo sisteminin yapı-zemin etkileşiminden önemli miktarda etkilenmeyeceğine bir işaret olarak görülebilmektedir. Çalışmaya konu edilen her iki yöntemin de benzer şekilde bir eğilim göstermeleri bu savı güçlendirmektedir.

Çizelge 3.7. Çalışmaya konu edilen silolarda dört farklı zemin sistemi için SMZ ve ÖMZ'ye göre en büyük dinamik malzeme basınçları, gerçekleşme zaman ve yükseklikleri

Silo Yüks.	Zemin Sınıfı	En Büyük Dinamik Malzeme Basıncı, $p_{hs}^{maks}$ (kN/m <sup>2</sup> )								
		SMZ ( $e/r_0=0$ )						ÖMZ ( $e/r_0=0$ )		
		sol cidar			sağ cidar					
	t (s)	H <sub>0</sub> (m)	$p_{hs}^{maks}$	t (s)	H <sub>0</sub> (m)	$p_{hs}^{maks}$	t (s)	H <sub>0</sub> (m),(2/π)H	$p_{hs}^{maks}$	
10 m	S1	7,00	8,0 (0,80H)	21,36	9,00	8,0 (0,80H)	32,50	4,88	6,5 (0,637H)	21,29
	S2	6,40	8,0 (0,80H)	19,12	4,95	10,0 (1,00H)	25,29	4,88	6,5 (0,637H)	21,58
	S3	6,45	8,5 (0,85H)	18,60	9,05	8,0 (0,80H)	31,53	4,88	6,5 (0,637H)	21,56
	S4	7,15	6,5 (0,65H)	18,44	9,15	6,5 (0,65H)	25,20	4,88	6,5 (0,637H)	21,40
15 m	S1	7,00	9,0 (0,60H)	20,05	9,00	7,0 (0,47H)	28,62	4,88	10,0 (0,637H)	21,31
	S2	6,40	7,0 (0,47H)	17,06	4,95	10,0 (0,67H)	25,67	4,88	10,0 (0,637H)	21,29
	S3	7,05	9,5 (0,63H)	19,97	9,05	7,0 (0,47H)	29,47	4,88	10,0 (0,637H)	21,75
	S4	7,20	9,0 (0,60H)	25,44	9,30	5,0 (0,33H)	24,41	4,88	10,0 (0,637H)	22,28
20 m	S1	7,00	9,5 (0,48H)	19,72	9,00	7,0 (0,35H)	27,86	4,88	13,5 (0,637H)	22,41
	S2	8,65	11,5 (0,58H)	18,21	4,95	12,5 (0,63H)	26,58	4,88	13,5 (0,637H)	22,60
	S3	7,05	7,5 (0,38H)	21,27	9,05	11,5 (0,58H)	25,66	4,88	13,5 (0,637H)	24,22
	S4	7,40	20,0 (1,00H)	23,58	5,15	6,0 (0,30H)	18,54	4,88	13,5 (0,637H)	22,66
25 m	S1	7,00	9,5 (0,38H)	17,52	4,95	6,5 (0,26H)	20,43	4,88	17,0 (0,637H)	27,75
	S2	7,05	20,5 (0,82H)	21,40	9,05	10,5 (0,42H)	29,17	4,88	17,0 (0,637H)	26,52
	S3	7,10	11,5 (0,46H)	25,24	9,10	14,5 (0,58H)	30,68	4,88	17,0 (0,637H)	24,51
	S4	10,30	25,0 (1,00H)	18,61	5,40	18,0 (0,72H)	22,72	4,88	17,0 (0,637H)	23,29
30 m	S1	7,05	18,5 (0,62H)	21,69	9,05	20,0 (0,67H)	26,99	4,88	20,0 (0,637H)	26,94
	S2	7,20	9,5 (0,32H)	19,55	4,95	12,0 (0,40H)	23,68	8,96	20,0 (0,637H)	27,50
	S3	7,30	15,0 (0,50H)	19,19	5,05	11,0 (0,37H)	15,51	4,88	20,0 (0,637H)	25,48
	S4	7,65	30,0 (1,00H)	25,33	5,45	30,0 (1,00H)	23,52	4,88	20,0 (0,637H)	23,95
40 m	S1	7,40	40,0 (1,00H)	19,49	4,95	6,0 (0,15H)	21,23	8,96	27,0 (0,637H)	30,42
	S2	7,45	40,0 (1,00H)	18,85	4,95	40,0 (1,00H)	25,04	8,96	27,0 (0,637H)	29,94
	S3	7,50	40,0 (1,00H)	22,27	5,35	36,0 (0,90H)	21,36	4,88	27,0 (0,637H)	27,73
	S4	10,85	40,0 (1,00H)	12,68	5,60	40,0 (1,00H)	18,40	4,88	27,0 (0,637H)	24,28

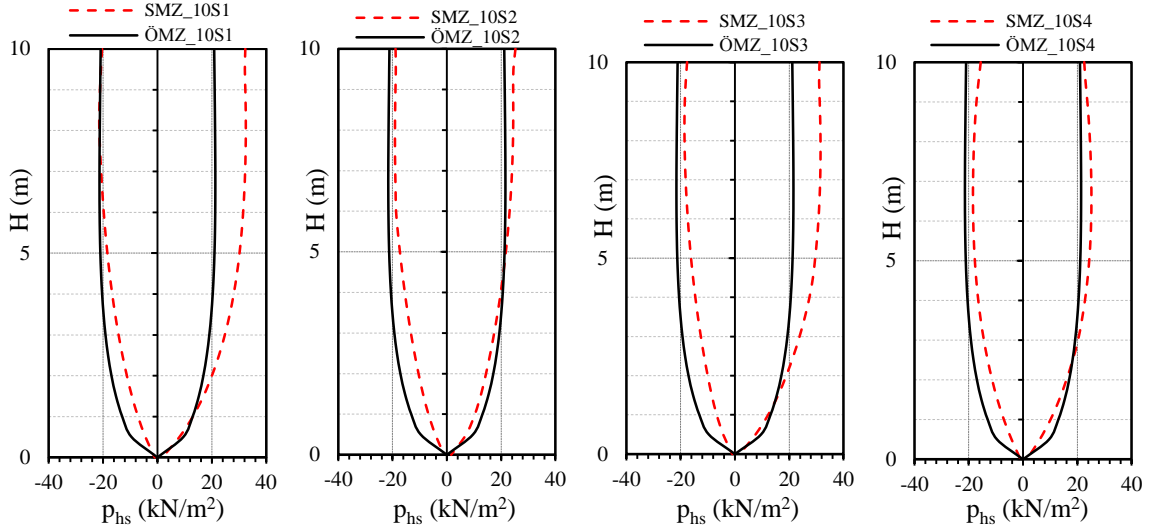


Şekil 3.17. Farklı zemin sistemlerindeki 10 m'lik ( $H/d_c=1,0$ ) silo için ÖMZ ve SMZ'ye göre karşılıklı cidarlardaki en büyük dinamik malzeme basınçlarının değişimleri

Daha önce yapılan irdelemelere benzer şekilde, sayısal modelde basınçların temas problemi nedeniyle sol cidar ile sağ cidar arasında farklı tepkiler ürettikleri tespit edilmektedir. Bu değişimin analitik yaklaşımla tespit edilebilmesine olanak olmadığından, sağ cidar ile sol cidar için yapılan ÖMZ ile SMZ arasındaki karşılaştırmalarda farklılıklar gözlemlenmektedir. Söz konusu bu karşılaştırmalar Şekil 3.18'de dinamik malzeme basınçlarının yükseklikle değişiminden daha net bir şekilde tespit edilebilmektedir. En büyük dinamik malzeme basınçları SMZ'ye göre sol cidarda bütün zemin sistemleri için 6~7. s'de 18~22 kN/m<sup>2</sup>, sağ cidarda ise S2 zemin sistemi için 4,95. s'de ve diğer zemin sistemleri için ise yaklaşık 9. s'de 25~33 kN/m<sup>2</sup> olarak gerçekleşmektedir. ÖMZ'ye göre ise benzer değerlendirmeler yapıldığında tüm tepkilerin 4,88.s'de ve 21~22 kN/m<sup>2</sup> olarak gerçekleştiği görülmektedir. Dinamik malzeme basınçları için ÖMZ sol cidarda S1 zemin sistemi için SMZ ile hemen hemen aynı değeri verirken, S2 için SMZ'den %13, S3 ve S4 için ise %16 daha fazla, sağ cidarda ise S1 ve S3 için %30 civarında, S2 ve S4 için ise %15 daha az bir değer vermektedir. Bu bulgulardan da görülebileceği üzere sol cidar ile sağ cidar arasındaki malzeme davranışı farklılığı, oransal olarak da önerilen yaklaşımın bir cidardaki davranışı temsil kabiliyetinin diğer cidardan farklı olmasına neden olmaktadır. Çok net olmasa da bulgular genelde bu silo sistemi için zemin etkileşimi nedeniyle azalma eğilimindedir. Bu durum, zemin etkileşimi nedeniyle yapı sistemlerinde iç kuvvet tepkilerinin azalma eğiliminde olduğu savıyla üst üste düşmektedir. Ancak tasarım açısından önemli mertebede olduğundan bahsedilememektedir.



Dinamik malzeme basınçlarının yükseklik boyunca değişimleri karşılaştırmalı olarak irdelendiğinde genel olarak her iki önerilen yaklaşımında birbirine oldukça yakın bir dağılım sergiledikleri ve bulguların neredeyse üst üste düştükleri görülmektedir (Şekil 3.18). Buradan hareketle, önerilen analitik yöntemin inceleme konusu 10 m'lik silo için, önemli bir hataya neden olmaksızın dinamik malzeme basınçlarının yükseklik boyunca dağılımının tespiti konusunda yeterli kabiliyete sahip olduğu söylenebilmektedir.

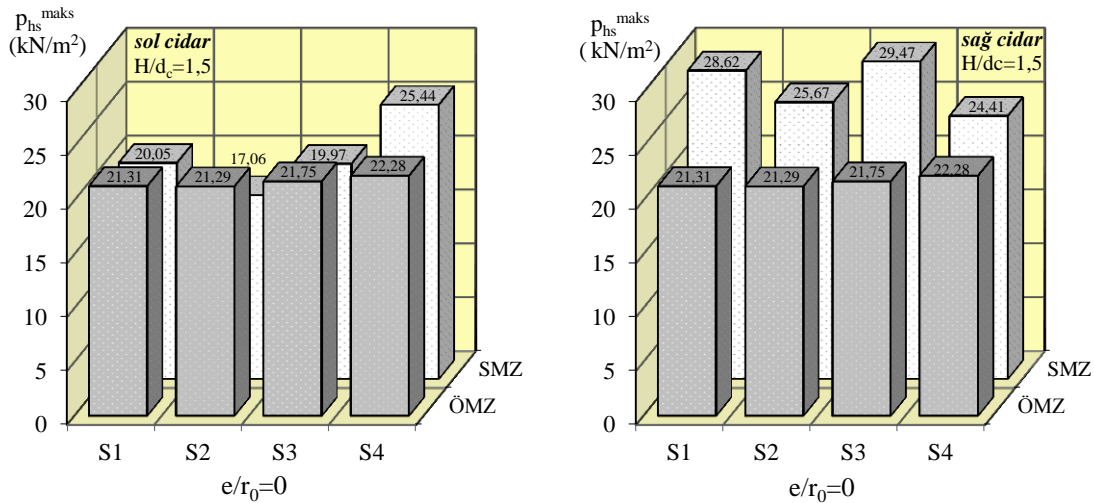


Şekil 3.18. Farklı zemin sistemlerindeki 10 m'lik ( $H/d_c=1,0$ ) silo için ÖMZ ve SMZ'ye göre dinamik malzeme basınçlarının yükseklik boyunca değişimleri

En büyük basınçların tabandan itibaren gerçekleşme yüksekliklerinin ( $H_0$ ) de sol cidarda yalnızca S4 zemin sınıfı için, sağ cidarda ise S2 ve S4 zemin sınıfları için farklı değerler aldığı tespit edilmektedir. Ayrıca karşılıklı cidarlarda 10 m'lik silo için söz konusu basınçların gerçekleşme yükseklikleri S2 zemin sınıfı dışında aynı olmaktadır. Önerilen analitik yaklaşımda söz konusu yüksekliğin sabit tutulmuş olması nedeniyle her zemin sınıfı için en büyük basıncının  $0,637 H$ 'de elde ediliyor olmasının yöntem kabullerinden biri olduğunu burada tekrar belirtmek uygun olacaktır..

10 m'lik silo için yapılan karşılaştırmalara benzer şekilde dinamik malzeme basınçlarının 15m'lik silo için de karşılaştırılması durumunda davranışın çok benzer bir karakter sergilediği tespit edilebilmektedir. Gerek sol cidar, gerekse de sağ cidar için farklı zemin sistemleri üzerinde modellenen bu silo sistemi için karşılaştırmalar iki farklı yöntem için de Şekil 3.19'dan görülebilmektedir. Bu karşılaştırmalardan da anlaşılacağı üzere 10 m için yapılan karşılaştırmalar, narinlik oranının 1,0' den 1,5'a yükselmesine karşın,

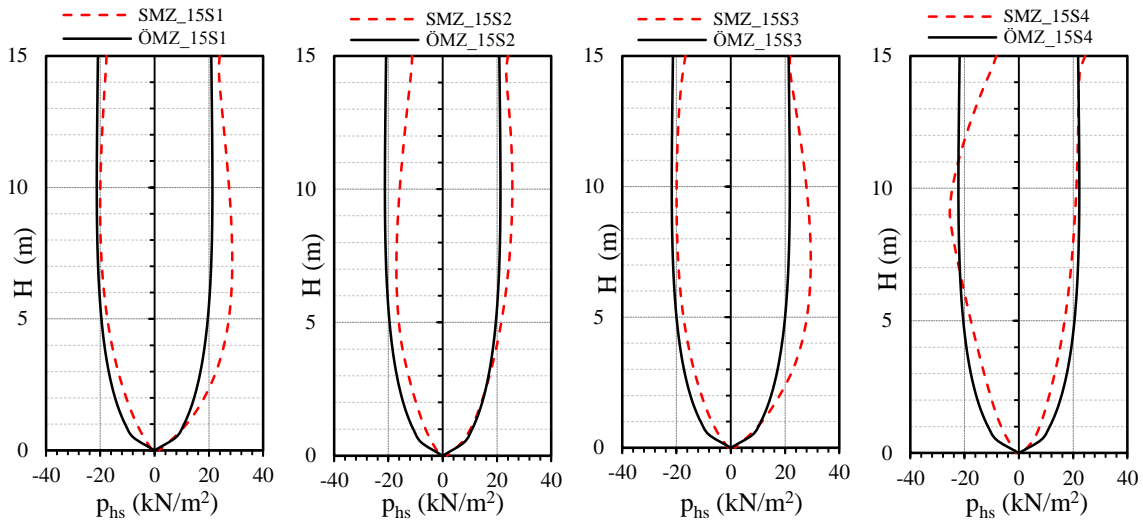
15m lik silo için de benzerdir. Sol cidar için yine tüm zemin sistemlerinde, her iki yöntem de benzer değerler üretmektedir. S1-S3 zemin sistemlerinde ÖMZ yaklaşımı sol cidarda SMZ'ye göre daha büyük bulgular verirken, sağ cidarda durum tersine değişmektedir. Zemin sistemi açısından değişim irdelendiğinde ise ÖMZ'ye göre en büyük değişim %5 oranında S1 ile S4 arasında elde edilmektedir. SMZ'ye göre de sağ ve sol cidarda farklı zemin sınıfları için zemin etkileşiminden kaynaklı önemli bir fark görülmemektedir. Bu veriler ışığında, 10 m'lik siloya benzer şekilde, burada da zemin etkileşimine bağlı belirgin bir değişimden bahsetmek mümkün olmamaktadır. Bununla birlikte, her iki cidarda değişime neden olan etkinin zemin etkileşiminden daha çok yapı-stok malzemesi sistemi dinamik karakteristiğindeki değişimden kaynaklandığını söylemek uygun olacaktır. Diğer taraftan burada gerçekleşen bu oranların, dinamik malzeme basınçları bazında, bodur sınıfta değerlendirilebilecek bu silo sınıfı için de, tasarıma etki edecek mertebelere ulaşmadığını söylemek uygun olacaktır.



Şekil 3.19. Farklı zemin sistemlerindeki 15 m'lik ( $H/d_c=1,5$ ) silo için ÖMZ ve SMZ'ye göre karşılıklı cidarlardaki en büyük dinamik malzeme basınçlarının değişimleri

Şekil 3.20'den de görüldüğü üzere yükseklik boyunca dinamik malzeme basıncı değişimleri ÖMZ ve SMZ için hemen hemen üst üste düşmektedir. Söz konusu basınçların oluşma yüksekliği ( $H_0$ ), SMZ için en büyük dinamik malzeme basınçlarının elde edildiği sağ cidarda artan zemin etkileşimi ile azalma eğilimindedir. Bu değerler hemen her zemin sistemi için  $0,50H-0,67H$  aralığında elde edilirken yalnızca sağ cidarda bu değer S4 zemin

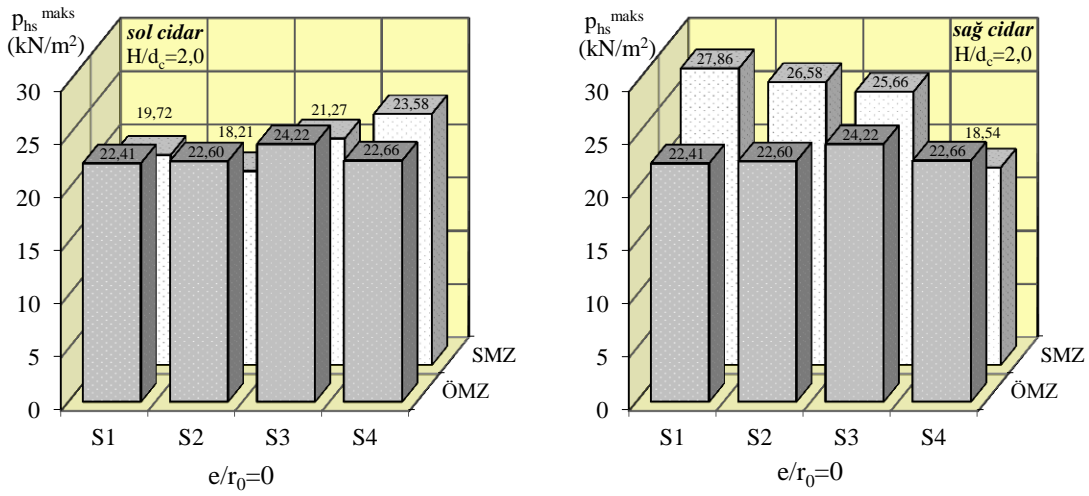
sistemi için  $0,33H$  olarak gerçekleşmektedir. Buradan da anlaşılacağı üzere, analitik yöntemde kullanılan en büyük basıncın gerçekleşme yüksekliğinin ( $H_0$ ) sabit olması kabulü, zemin etkileşimi nedeniyle de değişiklik gösterebilmektedir. Daha öncede ifade edildiği ve teknik literatürde belirtildiği üzere, bodur silolar için genel olarak narinlik oranı 2,0 ile sınırlandırılmaktadır. Artan narinlik oranı ile stok malzemesi silo etkileşiminin önemli değişim gösterebildiği gerek silolar için gerekse de benzer yapı sistemleri için bilindiğinden, kabaca bu sınırın üzerinde kalan silolar için narin sınıflandırılması yapılmaktadır. Bu nedenle daha önce tartışılan 1,0 ve 1,5 narinlik oranına sahip silolarda bodur silo tanımlaması yapılırken davranışın da bu noktada değişebileceğini tahmin etmek pek de güç olmamaktadır. Bodur olarak isimlendirilen ve bulguları irdelenen bu silo sistemlerinin karşılaştırmalarına benzer şekilde narin silolar için yapılan karşılaştırmalar Şekil 3.21 ve Şekil 3.22’de verilmektedir.



Şekil 3.20. Farklı zemin sistemlerindeki 15 m’lik ( $H/d_c=1,5$ ) silo için ÖMZ ve SMZ’ye göre dinamik malzeme basınçlarının yükseklik boyunca değişimleri

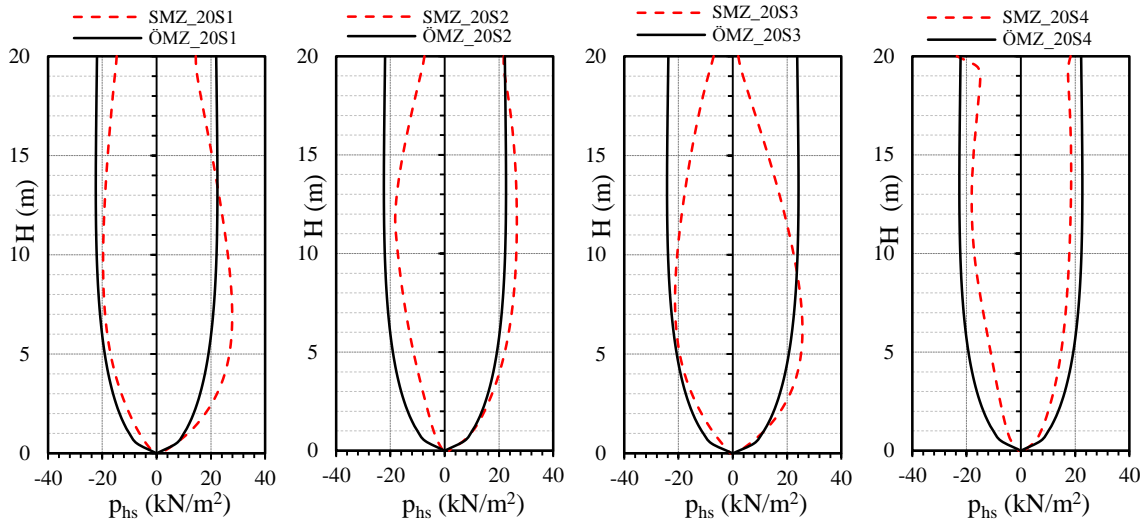
Şekil 3.21’den görülebileceği gibi, 2,0 narinlik oranı için ÖMZ yaklaşımının sol ve sağ cidardaki dinamik malzeme basınçları tahminleri ve bunların zemin etkileşimine bağlı değişimleri açısından buraya kadar yapılan irdelemelerden daha farklı bir irdeleme yapmak mümkün olmamaktadır. Davranışın inceleme konusu yapı sistemleri için de bodur silolardaki karaktere benzer olduğu ve her iki yöntem için de bulgular ile irdelemelerin diğer silo sistemlerine benzer gerçekleştiği görülmektedir. Bu karşılaştırmalara ek olarak sağ cidarda zemin etkileşimine bağlı olarak dinamik malzeme basıncındaki azalmanın dikkate değer miktarda gerçekleştiği görülebilmektedir. S1-S4 arasında yapılacak

karşılaştırmada, bu değer  $\%33$ 'lere ulaştığı, bu durumun da zemin etkileşiminin bu tür silo sistemleri için azımsanmayacak etkilere sahip olabileceğine işaret ettiği görülmektedir. Diğer taraftan, bu değişim sol cidarda gerek ÖMZ gerekse SMZ yöntemleri için benzer nitelikte gerçekleşmekte ve azalma eğilimi gözlemlenmemektedir. Oransal olarak bu ilişkiler irdelendiğinde, dinamik malzeme basınçlarının, ÖMZ yaklaşımıyla sol cidarda SMZ'den S1 ve S3 zemin sistemleri için  $\%14$  civarında, S2 için  $\%24$  daha fazla tahmin edildiği görülmektedir. S4 için ise bu değer  $\%4$ 'le tersi yöndedir ki sağ cidar için bu değer SMZ yaklaşımı ile ÖMZ'ye göre  $\%22$  oranında daha küçük tahmin edilmektedir.



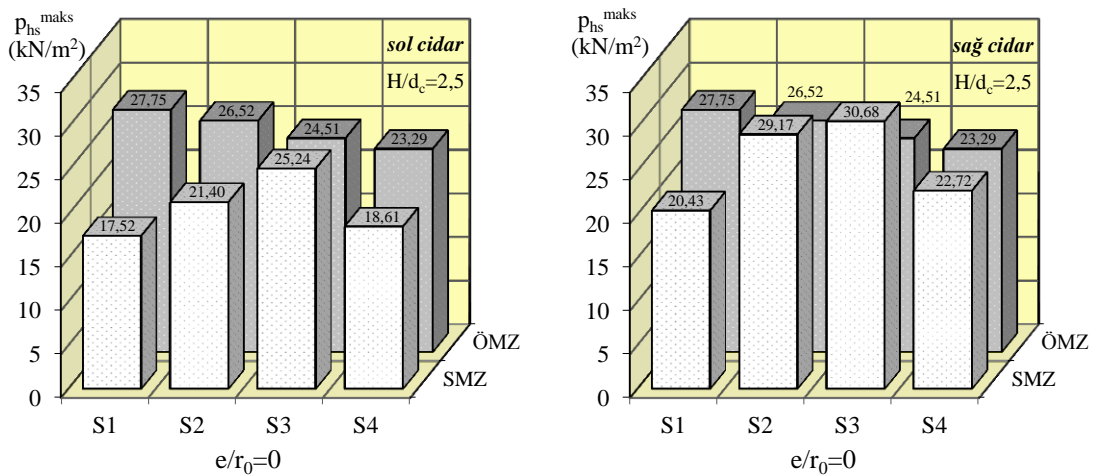
Şekil 3.21. Farklı zemin sistemlerindeki 20 m'lik ( $H/d_c=2,0$ ) silo için ÖMZ ve SMZ'ye göre karşılıklı cidarlardaki en büyük dinamik malzeme basınçlarının değişimleri

Şekil 3.22'den de görülebileceği gibi, yükseklik boyunca dinamik malzeme basıncı dağılımı ve tasarımda dikkate alınacak en büyük dinamik malzeme basınçları açısından ÖMZ ve SMZ modellerinden bütün zemin sistemleri için benzer bulgular elde edilmektedir. Diğer taraftan, en büyük dinamik malzeme basınçlarının gerçekleşme yükseklikleri SMZ'ye göre sol ve sağ cidarda da oldukça farklı değerler alabilmektedir. Bu değer  $\%22$  oranında daha küçük tahmin edilmektedir. Bu değer  $\%22$  oranında daha küçük tahmin edilmektedir. Bu değer ÖMZ için  $0,637H$  olarak hesaplandığı düşünülürse, sözkonusu yüksekliğin inceleme konusu bu tür silo sistemleri için çok farklı değerler alabileceği görülmektedir.

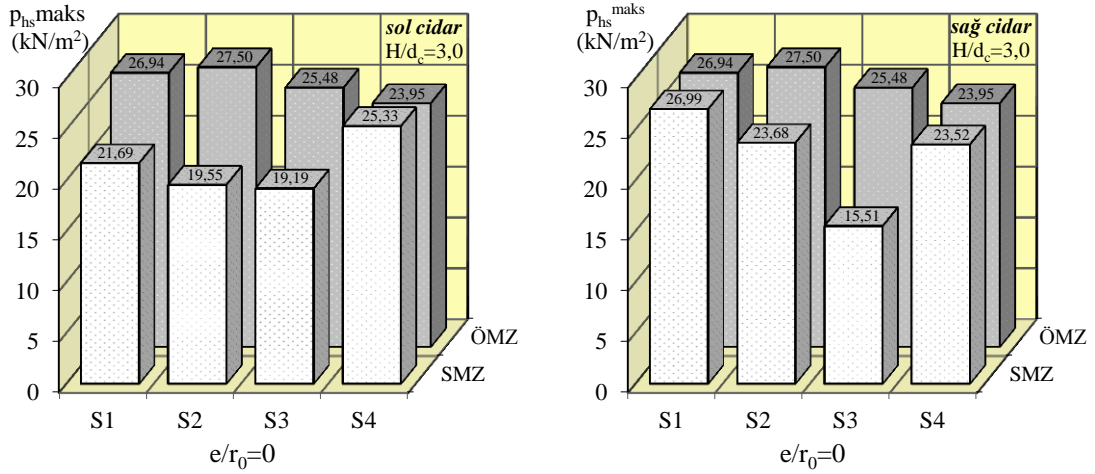


Şekil 3.22. Farklı zemin sistemlerindeki 20 m'lik ( $H/d_c=2,0$ ) silo için ÖMZ ve SMZ'ye göre dinamik malzeme basınçlarının yükseklik boyunca değişimleri

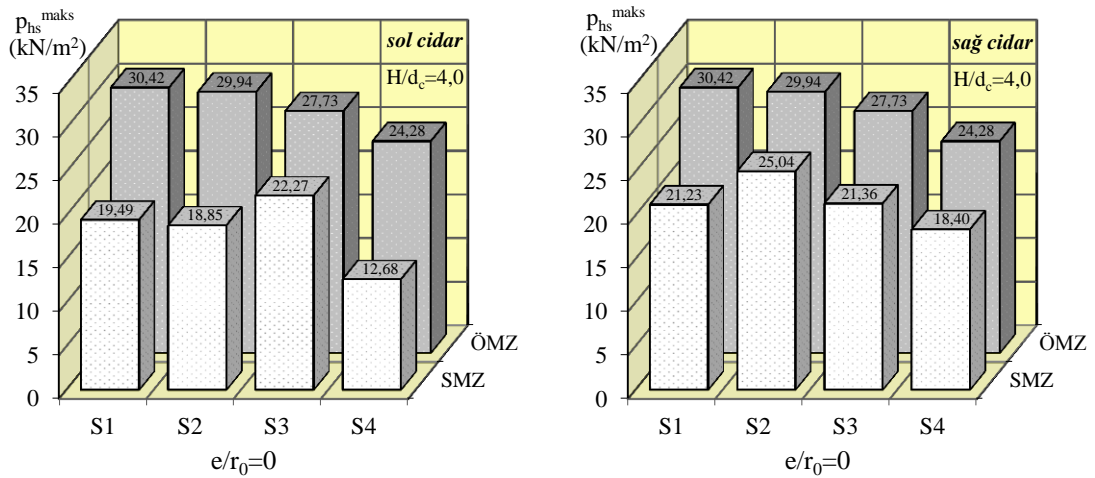
Şekil 3.23'den de görülebileceği gibi, 2,5 narinlik oranı, diğer bir ifadeyle narin silo sınıfına girebilecek geometrideki bir silo sistemi için, şu ana kadar bodur silolar için yapılan karşılaştırmalardan farklı bulgular gözlemlenmektedir. SMZ yaklaşımındaki temasın dikkate alınmasından kaynaklanan sağ cidar ile sol cidar arasındaki farklılıklar gözlemlenmekle birlikte, ÖMZ'nin hemen tüm zemin sistemleri için dinamik malzeme basınçlarını SMZ'ye göre büyük ya da çok yakın şekilde tahmin edilebildiği görülmektedir. Benzer karşılaştırmaları artan narinlik oranıyla daha da açıkça görmek mümkün olmaktadır. Aşağıda 3,0 ve 4,0 narinlik oranları için karşılaştırmaların sergilendiği şekiller sırasıyla her bir narinlik oranı için verilmektedir (Şekil 3.23-3.25).



Şekil 3.23. Farklı zemin sistemlerindeki 25 m'lik ( $H/d_c=2,5$ ) silo için ÖMZ ve SMZ'ye göre karşılıklı cidarlardaki en büyük dinamik malzeme basınçlarının değişimleri



Şekil 3.24. Farklı zemin sistemlerindeki 30 m'lik ( $H/d_c=3,0$ ) silo için ÖMZ ve SMZ'ye göre karşılıklı cidarlardaki en büyük dinamik malzeme basınçlarının değişimleri

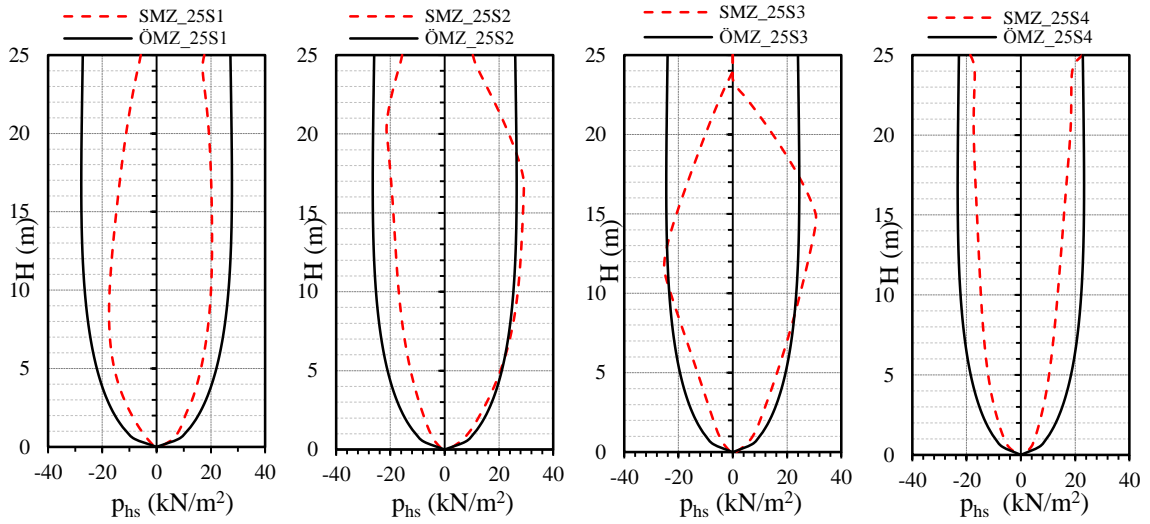


Şekil 3.25. Farklı zemin sistemlerindeki 40 m'lik ( $H/d_c=4,0$ ) silo için ÖMZ ve SMZ'ye göre karşılıklı cidarlardaki en büyük dinamik malzeme basınçlarının değişimleri

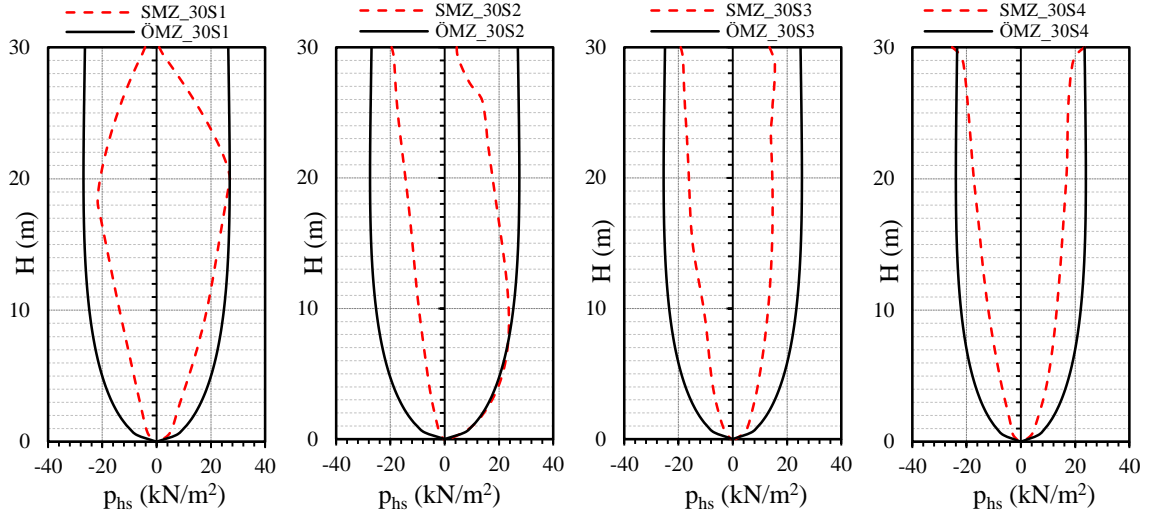
Bu karşılaştırmaların tümünden farkedilebilecek bir diğer eğilim ise önerilen analitik yaklaşımın narin silo sistemleri için yapı zemin etkileşimi nedeniyle azalan zemin rijitliğiyle basınç tepkilerinde azalma eğiliminin belirginleştiğidir. Söz konusu eğilimin SMZ için de 3,0 ve 4,0 narinlik oranı için benzer şekilde gerçekleştiğinden bahsedilebilmektedir. Bu çalışmada gerçekleştirilen parametrik çözümlerden ve tüm

bu karşılaştırmalardan anlaşabileceği üzere teknik literatürde narinlik oranı için verilen 2,0 sınırının, silo davranışının değişiminde kritik bir nokta olduğu açıkça görülebilmektedir.

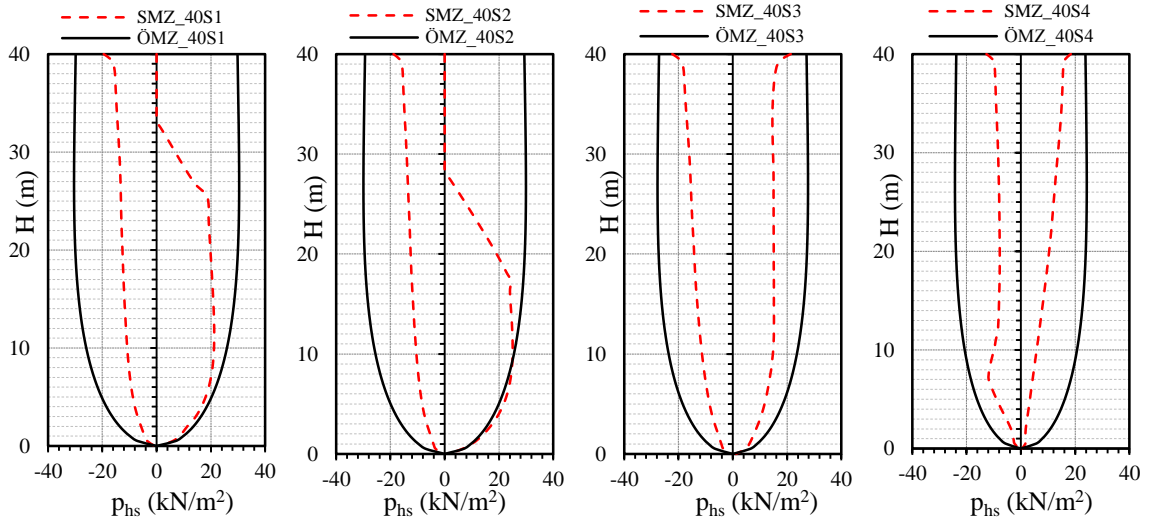
Takip eden şekillerde üç farklı narinlik oranı için ( $H/d_c=2,5$  3,0 ve 4,0) dinamik malzeme basınçlarının silo yükseklikleri boyunca değişimleri verilmektedir (Şekil 3.26-3.28). Bu değişimleri de, en büyük değerlerin karşılaştırmasına benzer şekilde yorumlamak mümkündür. Artan silo yüksekliği ile silo dinamik malzeme basınçlarının dağılımlarının da değiştiği ancak ÖMZ'den elde edilen değerlerin SMZ'ye göre daha büyük veya SMZ'ye çok yakın olduğu bu karşılaştırmalardan da görülmektedir. En büyük basınçların gerçekleşme yükseklikleri açısından bakıldığında, sözkonusu yüksekliğin farklı zemin sistemlerinde, farklı narinlik oranları için geniş bir dağılım gösterdikleri ve bodur silolardan farklı olarak analitik yaklaşımda elde edilen gerçekleşme yüksekliğinden oldukça uzaklaşabildiği ifade edilebilmektedir. Bu değişimi malzeme davranışının artan yükseklikle cidardan bağımsız hareket etme kabiliyetinin artmasına bağlamak doğru olacaktır. Diğer taraftan kimi durumlarda basıncın yükseklik boyunca belirli bir noktada sıfırlanabildiği, bunun da yine ifade edilen davranıştan kaynaklandığı söylenebilmektedir.



Şekil 3.26. Farklı zemin sistemlerindeki 25 m'lik ( $H/d_c=2,5$ ) silo için ÖMZ ve SMZ'ye göre dinamik malzeme basınçlarının yükseklik boyunca değişimleri



Şekil 3.27. Farklı zemin sistemlerindeki 30 m'lik ( $H/d_c=3,0$ ) silo için ÖMZ ve SMZ'ye göre dinamik malzeme basınçlarının yükseklik boyunca değişimleri



Şekil 3.28. Farklı zemin sistemlerindeki 40 m'lik ( $H/d_c=4,0$ ) silo için ÖMZ ve SMZ'ye göre dinamik malzeme basınçlarının yükseklik boyunca değişimleri

#### ► Silo Yatay Yerdeğiştirmeleri

ÖMZ ve SMZ'ye göre deprem doğrultusunda karşılıklı cidarlarda elde edilen büyük yatay yerdeğiştirmeler ( $u^{\text{maks}}$ ) ve bunların gerçeleşme zamanları ( $t$ ), her bir narinlik oranı için Çizelge 3.8'de sunulmaktadır. Burada ÖMZ için karşılıklı cidarlardaki değerler yöntem gereğince eşit değerlere sahip olduğundan, her iki cidarı temsilen yalnızca bir değer çizelgede verilmektedir.

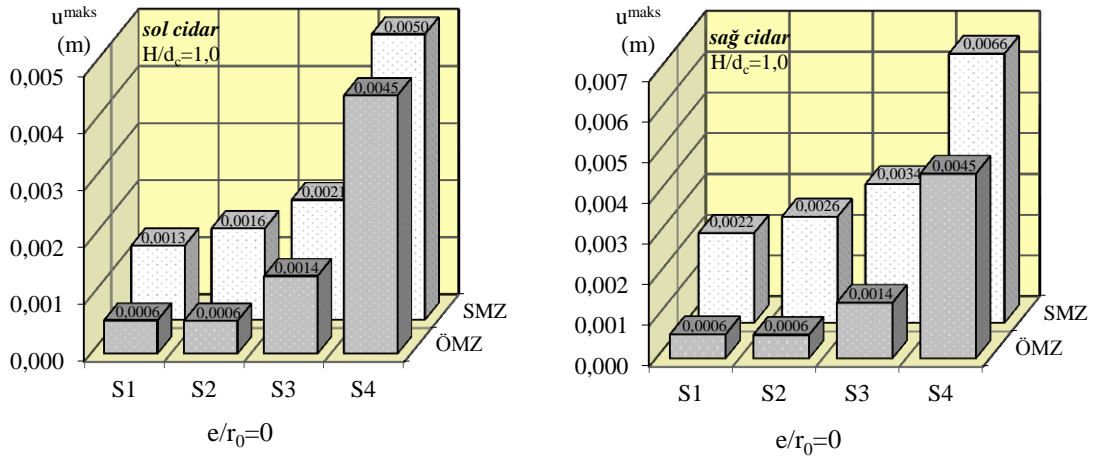


Daha sonraki başlıklarda bu yöntemlerden elde edilen yatay yerdeğiştirmelerin zamanla değişimleri inceleneceğinden burada iki yöntem en büyük yatay yerdeğiştirmeler ve bunların yükseklik boyunca dağılımları açısından karşılaştırılmaktadır.

Şekil 3.29'dan görüldüğü üzere 1,0 narinlik oranı için yatay yerdeğiştirmeler SMZ'ye göre sol cidarda bütün zemin sistemleri için 6,0~7,0.s'de 0,0013~0,0050m, sağ cidarda ise S1 ve S2 zemin sistemleri için 5.s, S3 ve S4 için ise 9.s civarında 0,0022~0,0066m, ÖMZ'ye göre ise bütün zemin sistemleri için 4,90.s civarında 0,0006~0,0045m olarak gerçekleşmektedir. Yatay yerdeğiştirmeler için ÖMZ sağ cidarda SMZ'den S1 ve S2 zemin sistemleri için %60 civarında, S3 için %33, S4 için ise %10 daha az bir değer verirken, sağ cidarda ise S1 ve S2 için %75 civarında, S3 için %59, S4 için ise %32 civarında düşük değerler vermektedir.

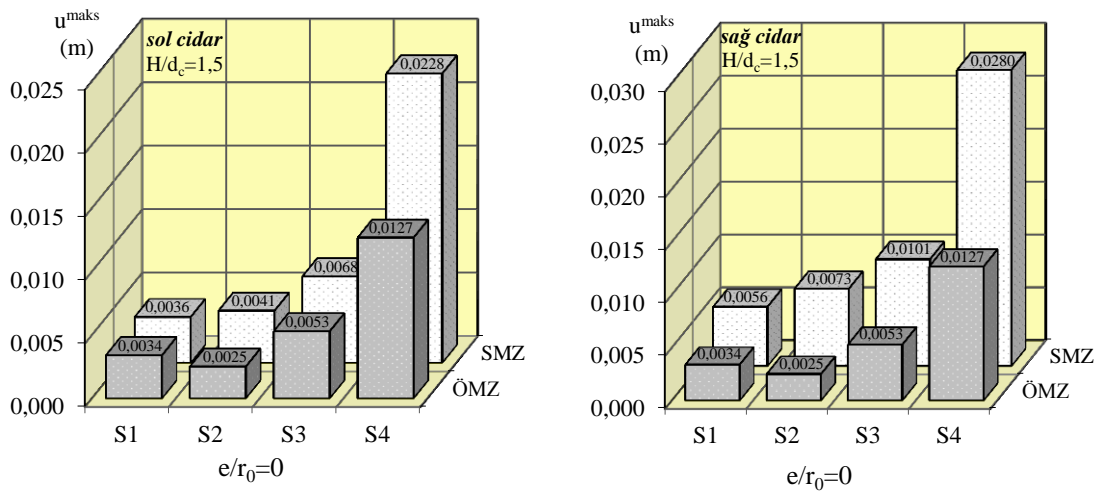
Çizelge 3.8. Çalışmaya konu edilen silolarda dört farklı zemin sınıfı için SMZ ve ÖMZ'ye göre en büyük yatay yerdeğiştirmeler ve gerçekleşme zamanları

Silo Yüks.	Zemin Sınıfı	En Büyük Yatay Yerdeğiştirme, $u^{maks}$ (m)					
		SMZ ( $e/r_0=0$ )				ÖMZ ( $e/r_0=0$ )	
		sol cidar		sağ cidar		t (s)	$u^{maks}$
		t (s)	$u^{maks}$	t (s)	$u^{maks}$	t (s)	$u^{maks}$
10 m	S1	7,05	-0,0013	4,95	0,0022	4,90	-0,0006
	S2	6,45	-0,0016	5,00	0,0026	4,90	-0,0006
	S3	7,10	-0,0021	9,10	0,0034	4,91	-0,0014
	S4	7,35	-0,0050	9,35	0,0066	4,95	-0,0045
15 m	S1	7,05	-0,0036	9,05	0,0056	8,98	-0,0034
	S2	10,25	-0,0041	5,00	0,0073	9,00	-0,0025
	S3	7,10	-0,0068	9,15	0,0101	9,02	-0,0053
	S4	7,40	-0,0228	9,35	0,0280	9,11	-0,0127
20 m	S1	7,05.s	-0,0066	5,00	0,0105	9,03	-0,0125
	S2	7,10.s	-0,0089	9,10	0,0136	5,31	-0,0078
	S3	7,20.s	-0,0167	9,20	0,0224	6,72	-0,0111
	S4	7,50.s	-0,0564	9,45	0,0657	9,27	-0,0328
25 m	S1	7,10.s	-0,0126	9,10	0,0180	9,09	-0,0238
	S2	7,15.s	-0,0176	9,15	0,0239	9,11	-0,0158
	S3	7,25.s	-0,0326	9,25	0,0420	9,18	-0,0240
	S4	7,60.s	-0,1035	9,55	0,1142	9,46	-0,0509
30 m	S1	7,20.s	-0,0237	9,20	0,0308	9,20	-0,0581
	S2	7,25.s	-0,0318	9,20	0,0404	9,25	-0,0370
	S3	7,40.s	-0,0558	9,35	0,0660	7,48	0,0368
	S4	10,55.s	-0,1967	5,55	0,1883	10,51	0,0987
40 m	S1	7,45.s	-0,0686	9,35	0,0738	10,32	0,1558
	S2	7,50.s	-0,0852	9,40	0,0898	10,39	0,0964
	S3	10,40.s	-0,1551	5,45	0,1501	8,58	-0,1020
	S4	10,70.s	-0,2690	5,75	0,3352	5,80	-0,1216



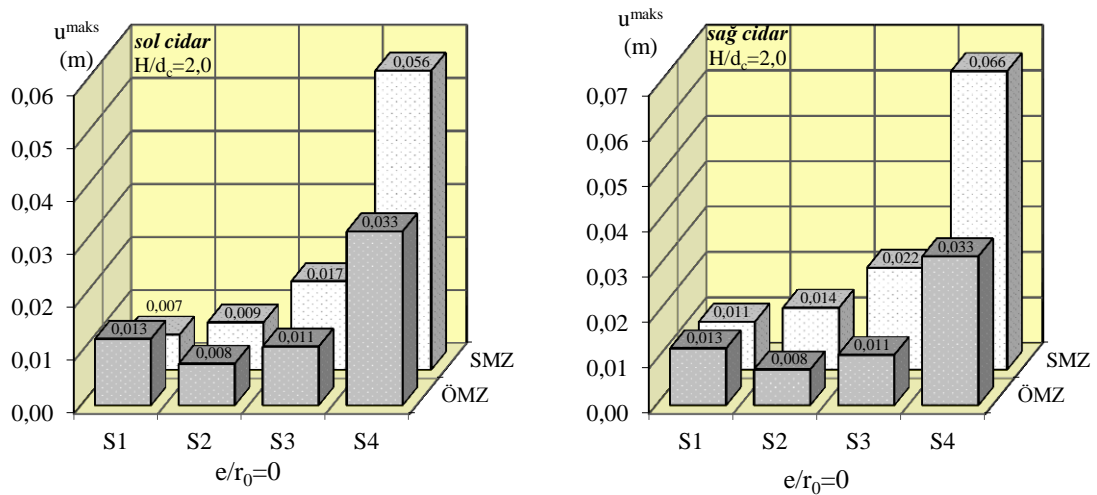
Şekil 3.29. Farklı zemin sistemlerindeki 10 m'lik ( $H/d_c=1,0$ ) silo için ÖMZ ve SMZ'ye göre karşılıklı cidarlardaki en büyük yatay yerdeğiştirmelerin değişimleri

Narinlik oranı 1,5 olan silo için yatay yerdeğiştirmelerin en büyük değerleri karşılaştırıldığında, SMZ'ye göre sol cidarda S2 zemin sistemi için 10,25.s'de, diğer zemin sistemleri için ise 7~8. s'de 0,0036~0,0228m, sağ cidarda ise S2 zemin sistemi için 5.s, diğer zemin sistemleri için ise 9~10.s'de 0,0056~0,0280m olarak elde edildiği görülmektedir. Benzer karşılaştırmalar ÖMZ'ye göre yapıldığında ise bütün zemin sistemleri için en büyük yatay yerdeğiştirme tepkileri 9.s civarında 0,0025~0,0127m olmaktadır (Şekil 3.30). Önerilen analitik yaklaşımın 1,0 narinlik oranında olduğu gibi 1,5 için de düşük yatay yerdeğiştirme tepkileri verdiği görülmektedir.

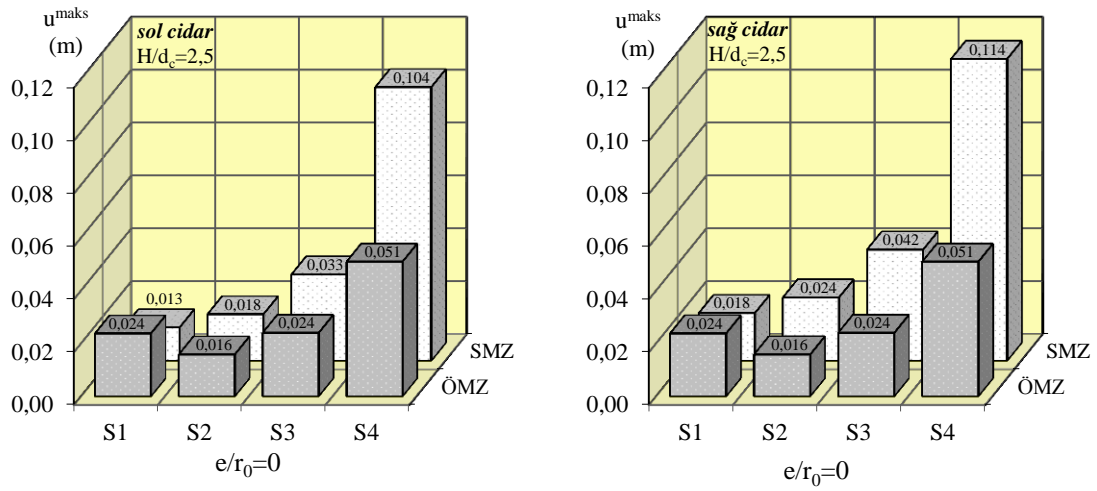


Şekil 3.30. Farklı zemin sistemlerindeki 15 m'lik ( $H/d_c=1,5$ ) silo için ÖMZ ve SMZ'ye göre karşılıklı cidarlardaki en büyük yatay yerdeğiştirmelerin değişimleri

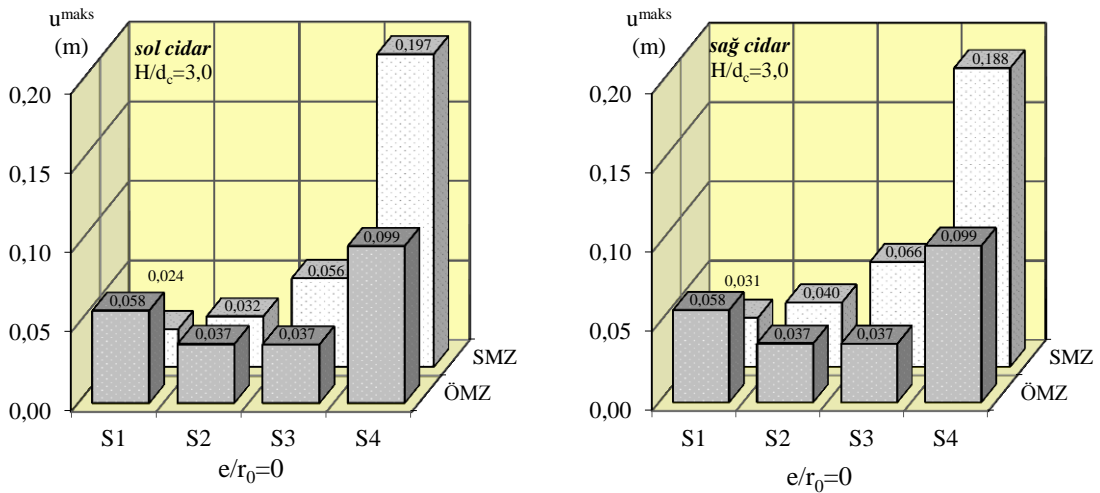
Buradan hareketle, benzer karşılaştırmalar 2,0 narinlik oranı için de yapıldığında, ÖMZ'nin sol cidarda SMZ'den genel olarak daha az yatay yerdeğiştirme tepkisi elde ettiği görülmektedir. Bu oran en büyük %42 olarak S4 zemin sistemi için gerçekleşmektedir. Benzer oransal karşılaştırmalar diğer narinlik oranları için de Çizelge 3.8'de verilen değerler üzerinden yapılabilmektedir. Burada dikkat çekilmek istenilen nokta, bodur silo ile narin silo sınırı olarak teknik literatürde kabul gören 2,0 oranının, bu çalışmadaki bulgular üzerinde yerdeğiştirme tepkileri için de önemli bir sınır olarak ortaya çıktığıdır. Gerek Şekil 3.31'den, gerekse takip eden Şekil 3.32 ve 3.33'den görülebileceği gibi yerdeğiştirme tepkileri önerilen her iki yöntem için, bodur silolara nazaran birbirine oldukça yaklaşımaktadır. Burada, S4 gibi oldukça düşük rijitlik değerlerine sahip olan zemin sistemlerinde önerilen analitik temel-zemin sisteminin önemli derecede frekans bağımlı yüksek sönüm üretebilmektedir. Bu durum da, oldukça problemleri bir zemin olarak nitelendirilebilecek bu tür zemin sistemlerinde, yatay yerdeğiştirmelerin ÖMZ yaklaşımı ile SMZ'ye göre küçük elde edilmesine neden olabilmektedir. Diğer taraftan, önerilen analitik modelde gerek yapının, gerekse stok malzemesinin konsol kiriş modeli yardımıyla dikkate alınmış olmasının, artan narinlikle sistem tepkilerinin daha gerçekçi modellenmesine olanak sağladığını, bu yolla da bulguların SMZ ile daha iyi bir uyum gösterdiğini ifade etmek uygun olacaktır.



Şekil 3.31. Farklı zemin sistemlerindeki 20 m'lik ( $H/d_c=2,0$ ) silo için ÖMZ ve SMZ'ye göre karşılıklı cidarlardaki en büyük yatay yerdeğiştirmelerin değişimleri

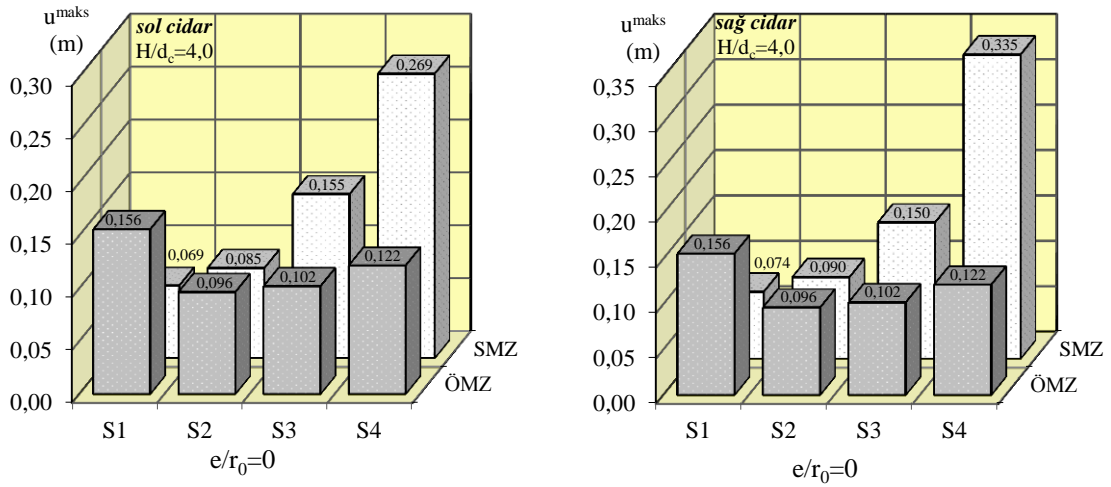


Şekil 3.32. Farklı zemin sistemlerindeki 25 m'lik ( $H/d_c=2,5$ ) silo için ÖMZ ve SMZ'ye göre karşılıklı cidarlardaki en büyük yatay yerdeğiştirmelerin değişimleri



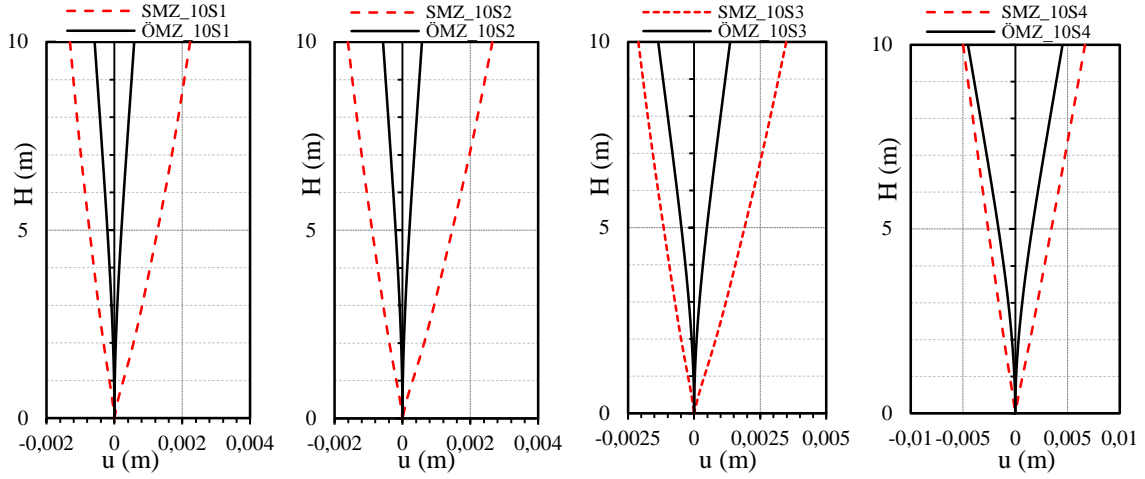
Şekil 3.33. Farklı zemin sistemlerindeki 30 m'lik ( $H/d_c=3,0$ ) silo için ÖMZ ve SMZ'ye göre karşılıklı cidarlardaki en büyük yatay yerdeğiştirmelerin değişimleri

Burada ifade edilmesi gereken bir diğer önemli husus ise rijit zemin sistemleri üzerindeki bodur silolarda yerdeğiştirme tepkisinin çoğunlukla silo silindirik taşıyıcı sistemine bağımlı olmasıdır. Dolayısıyla, silonun yerdeğiştirme tepkisini kontrol eden mekanizmanın silo cidarı modları olacaktır, bu modların da, analitik modelde kullanılan kiriş modeliyle dikkate alınmasının güç olduğu anlaşılmaktadır. Bu nedenle yerdeğiştirme tepkisinin hesabında, ÖMZ yönteminin bodur silolar için geliştirilmesi gerekliliği görülmektedir.

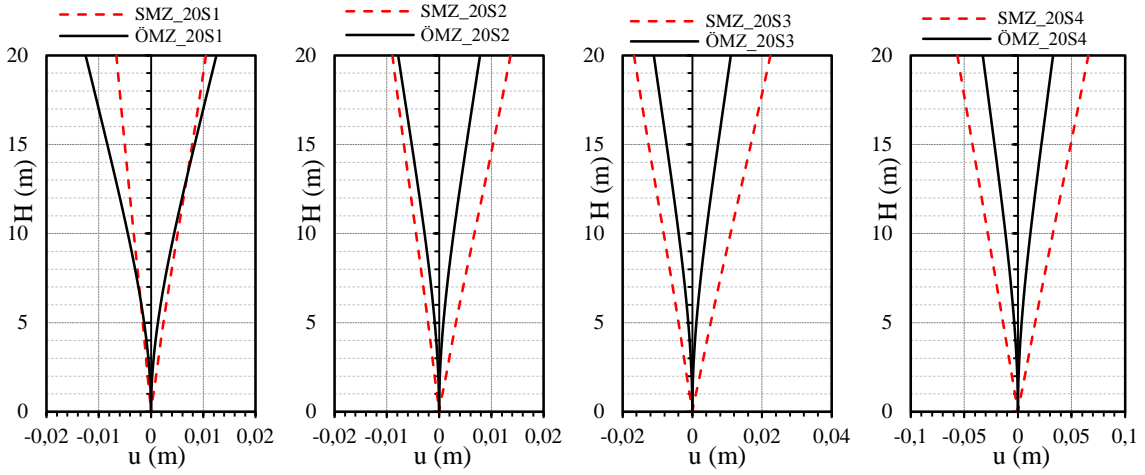


Şekil 3.34. Farklı zemin sistemlerindeki 40 m'lik ( $H/d_c=4,0$ ) silo için ÖMZ ve SMZ'ye göre karşılıklı cidarlardaki en büyük yatay yerdeğiştirmelerin değişimleri

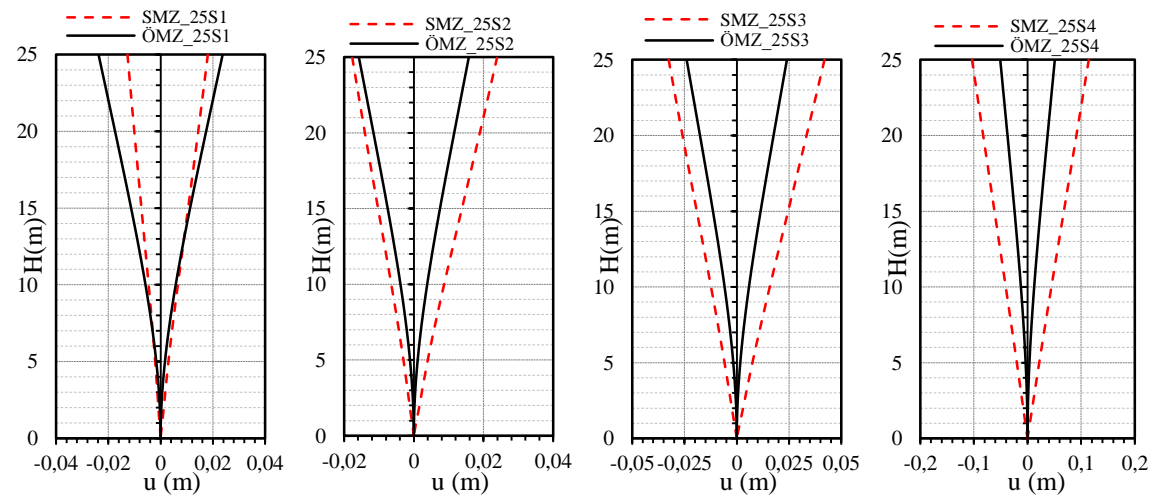
Yukarıda en büyük değerleri verilen yerdeğiştirme tepkilerinin, yükseklik boyunca değişimleri incelendiğinde, ifade edilen irdelemeler benzer biçimde bu değişimlerden de görülebilmektedir. Bu amaçla burada yalnızca narinlik oranı 1,0, 2,0, 2,5 ve 4,0 oranları için yapılan karşılaştırmalar verilmektedir (Şekil 3.35-3.38). Bu karşılaştırmalardan da görülebileceği gibi, bodur silolara göre, artan narinlik oranı ile yatay yerdeğiştirmelerin yükseklikle değişimleri her iki yöntem ile daha yakın tahmin edilebilmekte, ancak davranış farkı narinlik oranı 4,0 gibi yüksek değerler aldığı anda yine ortaya çıkmaktadır. Bunun gibi bir değer için de yerdeğiştirme tepkilerinin yine ayrı şekilde değerlendirmeye muhtaç olduğu elde edilen bulgulardan görülebilmektedir. Burada konsol kiriş kabulünün geliştirilerek, yüksek modların etkisinin de hesaba katılması gerekliliği ortaya çıkmaktadır. Bu yolla önerilen analitik yaklaşımın gerek düşük, gerekse de yüksek narinlik oranları için yerdeğiştirme tepkilerinin hesabında iyileştirilmesi gerekliliği görülmektedir.



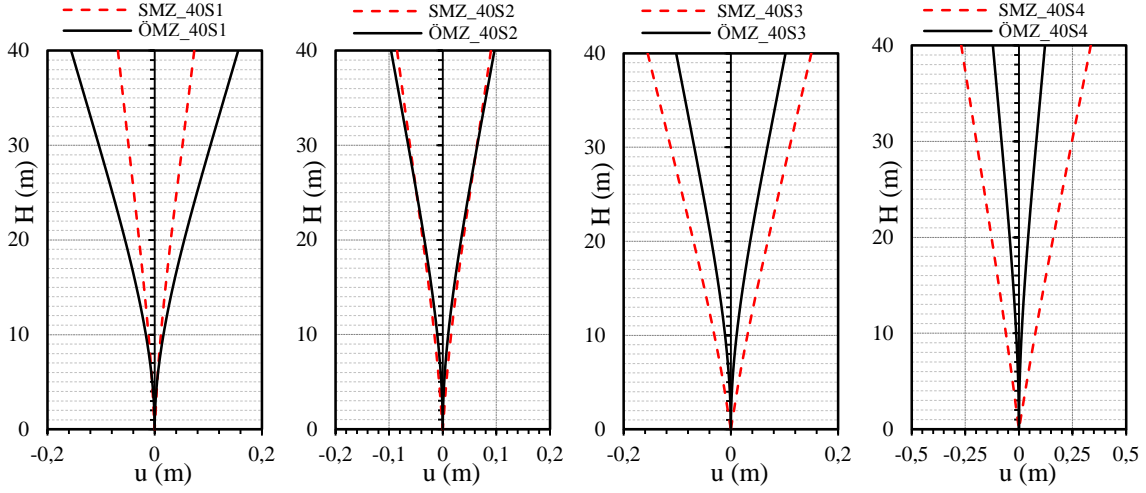
Şekil 3.35. Farklı zemin sistemlerindeki 10 m'lik ( $H/d_c=1,0$ ) silo için en büyük yatay yerdeğiştirmelerin yükseklik boyunca değişimleri



Şekil 3.36. Farklı zemin sistemlerindeki 20 m'lik ( $H/d_c=2,0$ ) silo için en büyük yatay yerdeğiştirmelerin yükseklik boyunca değişimleri



Şekil 3.37. Farklı zemin sistemlerindeki 25 m'lik ( $H/d_c=2,5$ ) silo için en büyük yatay yerdeğiştirmelerin yükseklik boyunca değişimleri



Şekil 3.38. Farklı zemin sistemlerindeki 40 m'lik ( $H/d_c=4,0$ ) silo için en büyük yatay yerdeğiştirmelerin yükseklik boyunca değişimleri

#### ➤ Eşdeğer Taban Kesme Kuvveti

ÖMZ ve SMZ'ye göre deprem doğrultusunda karşılıklı cidarlarda elde edilen en büyük taban kesme kuvvetleri ( $V_e^{maks}$ ) ve bunların gerçekleşme zamanları (t) her bir narinlik oranı için Çizelge 3.9'da sunulmaktadır. Burada eşdeğer ifadesinin toplam taban kesme etkisini temsil edebilmek için kullanıldığını ve hesaplanan değerlerin cidar birim genişliğinde en büyük malzeme basıncı nedeniyle yükseklik boyunca değişimin toplamına eşit olduğunu ifade etmek uygun olacaktır.

Çizelge 3.9'da verilen değerler irdelendiğinde, oransal olarak yöntemlerin arasındaki farkların oldukça tatminkar olduğu görülmektedir. Bu farkın 30 m ve 40 m lik silo sistemlerinde oransal olarak arttığı da yine bu karşılaştırmalardan görülebilmektedir. ÖMZ'ye göre söz konusu bu silo sistemleri için eşdeğer kesmelerin oldukça büyük tahmin edildikleri açıkça görülmektedir. 1,0 narinlik oranı için dört farklı zemin sınıfına göre en büyük eşdeğer taban kesme kuvvetleri Şekil 3.39'da ve bunların zamanla değişimleri ise S1 ve S4 zemin sınıfları için, sırasıyla, Şekil 3.40 ve Şekil 3.41'de verilmektedir. Şekil 3.39'dan görülebileceği üzere, 1,0 narinlik oranına sahip siloda en büyük eşdeğer taban kesme kuvveti için ÖMZ, SMZ'ye göre sol cidarda S1 zemin sınıfı için %15, diğer zemin sınıfları için ise %30 civarında daha fazla, sağ cidarda ise S1 ve S3 zemin sınıfı için %30 civarında, S2 ve S4 için ise %5 civarında daha az bir değer verdiği görülmektedir. Böylesi karmaşık etkileşimlerin içerildiği sayısal model ile pratik kullanımlar için önerilen analitik bir yaklaşım olan ÖMZ yöntemi arasındaki karşılaştırmaya bu mantıkla bakıldığında,

incelemeye konu olan 10m yüksekliğindeki silo ve 4 farklı zemin sistemi için söz konusu yöntemin davranışı oldukça gerçekçi bir şekilde, her iki yüzde de temsil edebildiği, burada verilen şekillerden açıkça görülmektedir.

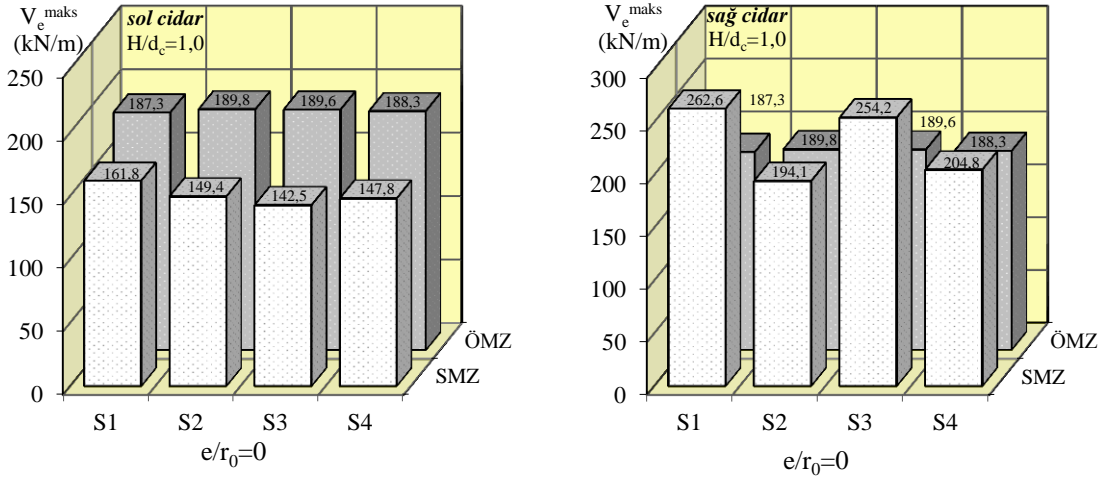
Çizelge 3.9. SMZ ve ÖMZ ile altı farklı siloda dört zemin sınıfı için elde edilen en büyük eşdeğer taban kesme kuvvetleri ve gerçekleşme zamanları

Silo Yüks.	Zemin Sınıfı	En Büyük Eşdeğer Taban Kesme Kuvveti, $V_e^{\text{maks}}$ , (kN/m)					
		SMZ ( $e/r_0=0$ )				ÖMZ ( $e/r_0=0$ )	
		sol cidar		sağ cidar			
		t (s)	$V_e^{\text{maks}}$	t (s)	$V_e^{\text{maks}}$	t (s)	$V_e^{\text{maks}}$
10 m	S1	7,00	161,75	9,00	262,59	4,88	187,33
	S2	6,40	149,37	4,95	194,05	4,88	189,84
	S3	6,45	142,53	9,05	254,17	4,88	189,64
	S4	7,15	147,80	9,15	204,81	4,88	188,31
15 m	S1	7,00	247,52	9,00	361,16	4,88	281,82
	S2	6,40	203,51	4,95	318,69	4,88	281,58
	S3	7,05	247,91	9,05	361,83	4,88	287,65
	S4	7,20	253,41	9,30	263,63	4,88	294,65
20 m	S1	7,00	325,82	9,00	431,30	4,88	395,65
	S2	8,65	252,30	4,95	450,47	4,88	399,05
	S3	7,05	315,01	9,05	336,76	4,88	427,62
	S4	7,40	279,95	5,15	316,67	4,88	400,11
25 m	S1	7,00	324,40	4,95	440,65	4,88	612,86
	S2	7,05	401,24	9,05	550,92	4,88	585,49
	S3	7,10	346,32	9,10	440,94	4,88	541,19
	S4	10,30	358,27	5,40	349,84	4,88	514,19
30 m	S1	7,05	403,38	9,05	498,26	4,88	714,09
	S2	7,20	350,30	4,95	525,34	8,96	729,02
	S3	7,30	390,31	5,05	383,42	4,88	675,36
	S4	7,65	418,14	5,45	423,46	4,88	634,88
40 m	S1	7,40	479,30	4,95	541,02	8,96	1075,47
	S2	7,45	475,44	4,95	513,93	8,96	1058,53
	S3	7,50	535,71	5,35	563,15	4,88	980,27
	S4	10,85	333,02	5,60	386,86	4,88	858,45

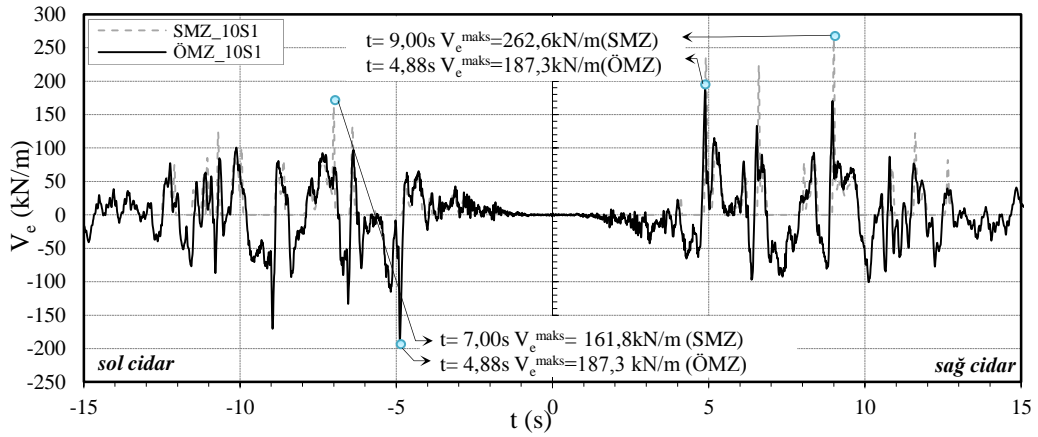
Benzer şekilde kesme kuvvetlerinin zamanla değişimleri ilk dört narinlik oranı için irdelendiğinde, S1, S2 ve S3 zemin sistemleri için neredeyse üst üste düştükleri tespit edilmiştir. Şekil 3.40'da bu durumu temsilen 10m'lik siloda S1 zemin sınıfı için sözkonusu etkilerin zamanla değişimlerinin ÖMZ ve SMZ modellerine göre karşılaştırılması verilmektedir. Daha önce de belirtildiği üzere stok malzemesi-silo etkileşiminin dikkate alınamamasından dolayı, kesme kuvvetleri için ÖMZ'den negatif bulgular elde edilebilmektedir.  $H/d_c < 3,0$  olması durumunda ÖMZ'nin sistemin davranışını ilk üç zemin sistemi için oldukça iyi temsil etmekte olduğu, en düşük rijitliğe sahip S4 zemini için gerçekleştirilen çözümlerde ise, Şekil 3.41'den de görülebileceği üzere, her iki



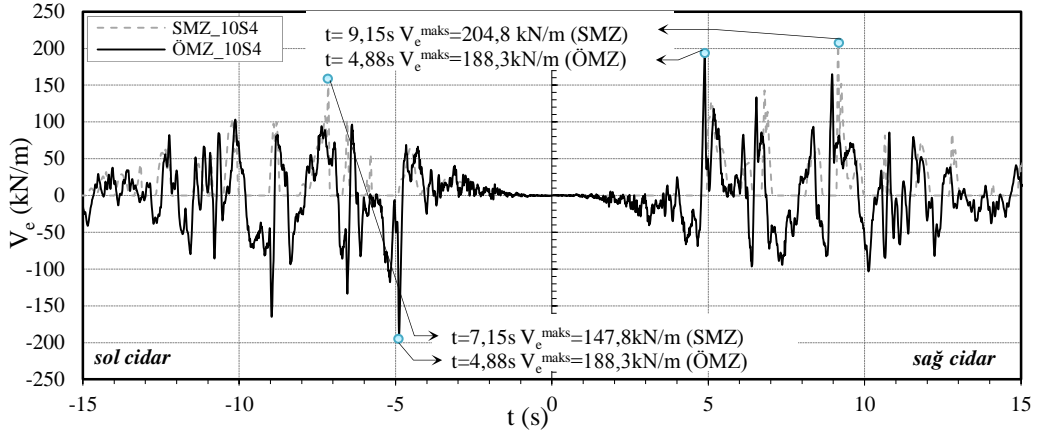
yönteme göre elde edilen dinamik karakteristiğinin birbirinden farklı olması davranışı da bir miktar değiştirmektedir. Bu durum, ÖMZ yaklaşımı ile gerçekleştirilen çözümde elde edilen sistem frekansının SMZ' ye göre daha küçük tahmin edilmesi nedeniyle meydana gelmektedir. Durum böyle iken, yine de zaman ortamındaki tepkilerin gerçekleşme zamanları birbirlerine çok yakın elde edilebilmektedir.



Şekil 3.39. Farklı zemin sistemlerindeki 10 m'lik ( $H/d_c=1,0$ ) silo için en büyük eşdeğer taban kesme kuvvetlerinin zemin sınıflarına göre değişimleri

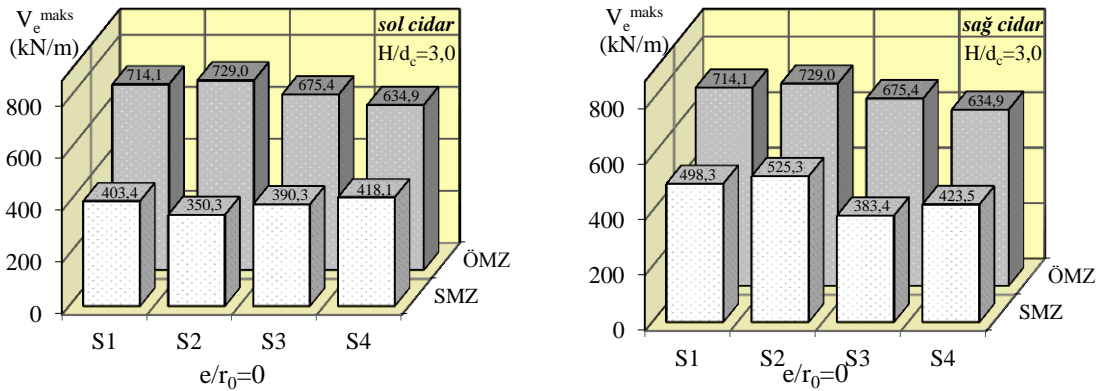


Şekil 3.40. ÖMZ ve SMZ'ye göre 10m'lik ( $H/d_c=1,0$ ) siloda S1 zemin sistemi için karşılıklı cidarlardaki eşdeğer taban kesme kuvvetinin zamanla değişimi

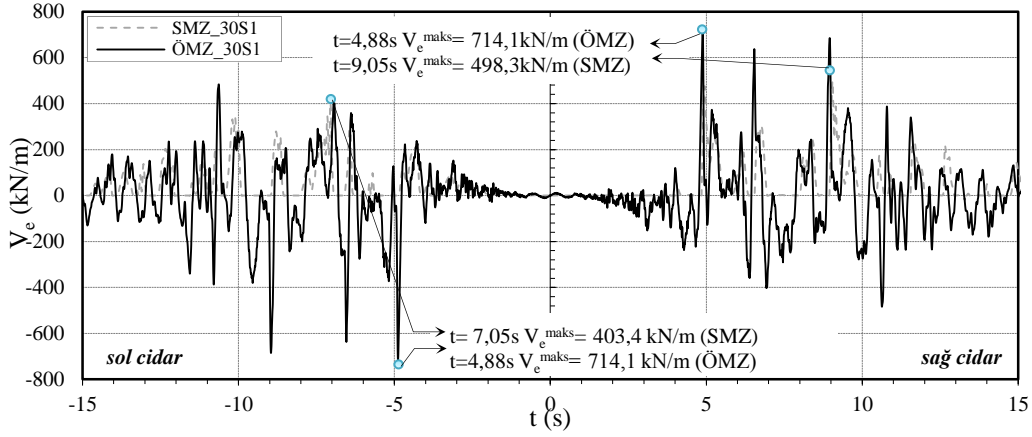


Şekil 3.41. ÖMZ ve SMZ'ye göre 10m'lik ( $H/d_c=1,0$ ) siloda S4 zemin sistemi için karşılıklı cidarlardaki eşdeğer taban kesme kuvvetinin zamanla değişimi

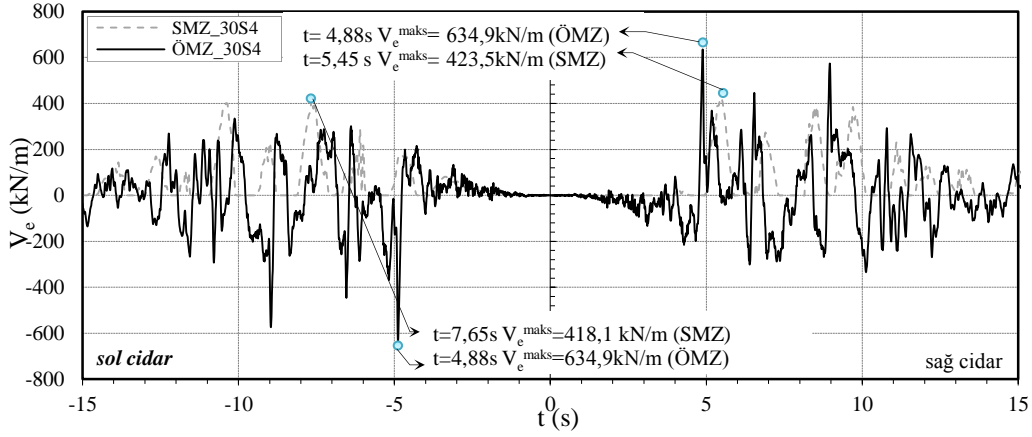
3,0 narinlik oranı için dört farklı zemin sınıfına göre en büyük eşdeğer taban kesme kuvvetleri Şekil 3.42'de, ve bunların zamanla değişimleri, davranış değişikliğinin diğer narinlik oranlarına göre daha belirgin görüldüğü S1 ve S4 zemin sınıfları için, Şekil 3.43 ve Şekil 3.44'de verilmektedir. Şekil 3.42'den görüldüğü üzere 3,0 narinlik oranına sahip siloda en büyük eşdeğer taban kesme kuvveti için ÖMZ yaklaşımı ile, SMZ'ye göre sol cidarda S1 ve S3 zemin sınıfları için %75 civarında, S2 için %108 ve S4 için %52 daha fazla bir değer elde edildiği görülmektedir. Diğer taraftan benzer karşılaştırma sağ cidar için yapıldığında, sözkonusu tepkinin ÖMZ yaklaşımı ile SMZ'ye göre S1, S2 ve S4 için %45 civarında, S3 için ise %76 oranında daha fazla olarak belirlendiği görülmektedir. 1,0 narinlik oranına sahip silo için yapılan değerlendirmelerden farklı olarak, artan narinlik oranı ile taban kesme kuvvetinin ÖMZ için, SMZ'ye nazaran oldukça büyük bir şekilde tahmin edildiği görülmektedir.



Şekil 3.42. Farklı zemin sistemlerindeki 30 m'lik ( $H/d_c=3,0$ ) silo için en büyük eşdeğer taban kesme kuvvetlerinin zemin sınıflarına göre değişimleri

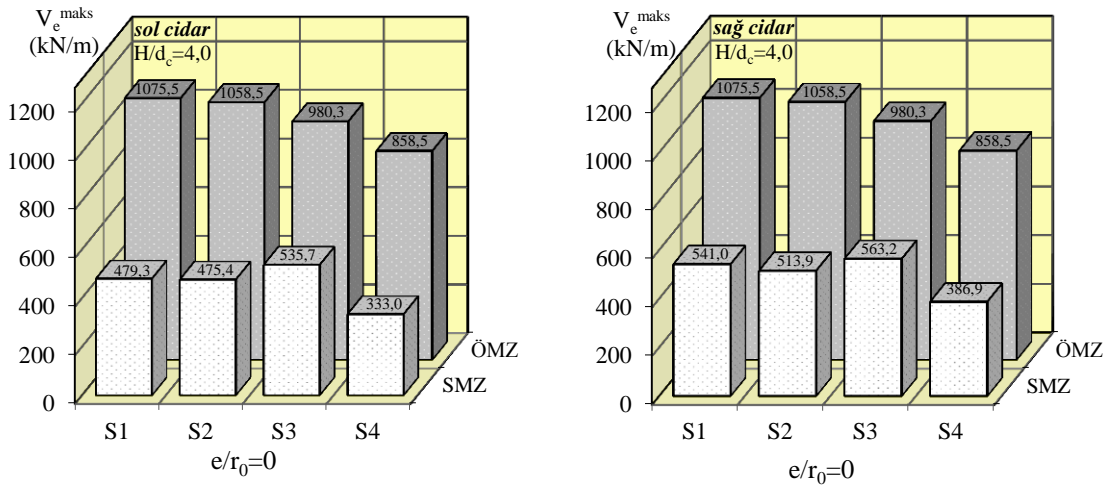


Şekil 3.43. ÖMZ ve SMZ'ye göre 30m'lik ( $H/d_c=3,0$ ) siloda S1 zemin sistemi için karşılıklı cidarlardaki eşdeğer taban kesme kuvvetinin zamanla değişimi



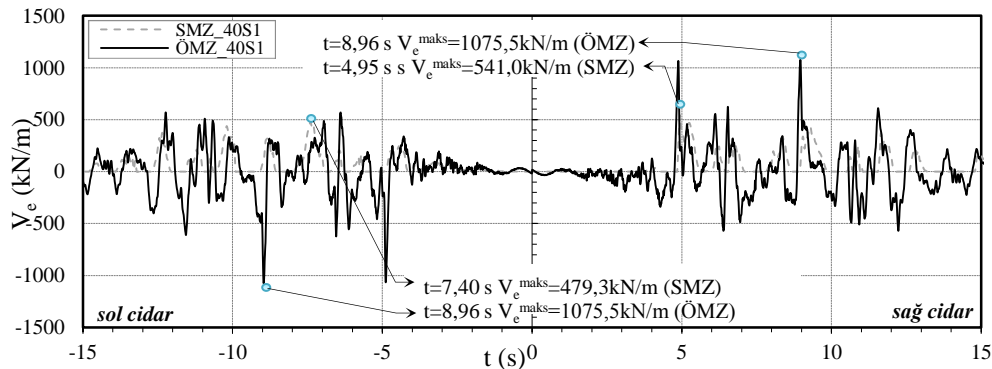
Şekil 3.44. ÖMZ ve SMZ'ye göre 30m'lik ( $H/d_c=3,0$ ) siloda S4 zemin sistemi için karşılıklı cidarlardaki eşdeğer taban kesme kuvvetinin zamanla değişimi

Benzer karşılaştırmalar,  $H/d_c=4,0$  için dört farklı zemin sınıfına göre en büyük eşdeğer taban kesme kuvvetleri açısından Şekil 3.45'de verilmektedir. Eşdeğer taban kesme kuvvetlerin zamanla değişimleri ise dört farklı zemin sınıfı için sırasıyla Şekil 3.46, 3.47, 3.48 ve 3.49'da verilmektedir. Daha önce de ifade edildiği gibi, artan narinlik ile ÖMZ ile SMZ bulguları arasındaki fark açılmakta ve daha büyük eşdeğer taban kesme kuvvetleri ÖMZ yaklaşımı ile elde edilmektedir. 3,0 narinlik oranında %76 olarak gerçekleşen söz konusu farkın 4,0 için daha da artarak sol cidarda S4 zemin sistemi için %158'lere ulaştığı görülmektedir.

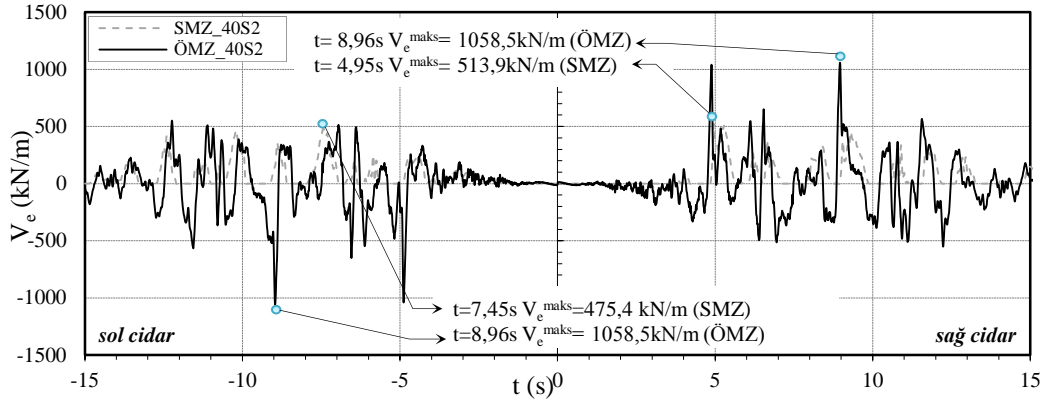


Şekil 3.45. Farklı zemin sistemlerindeki 40 m'lik ( $H/d_c=4,0$ ) silo için en büyük eşdeğer taban kesme kuvvetlerinin zemin sınıflarına göre değişimleri

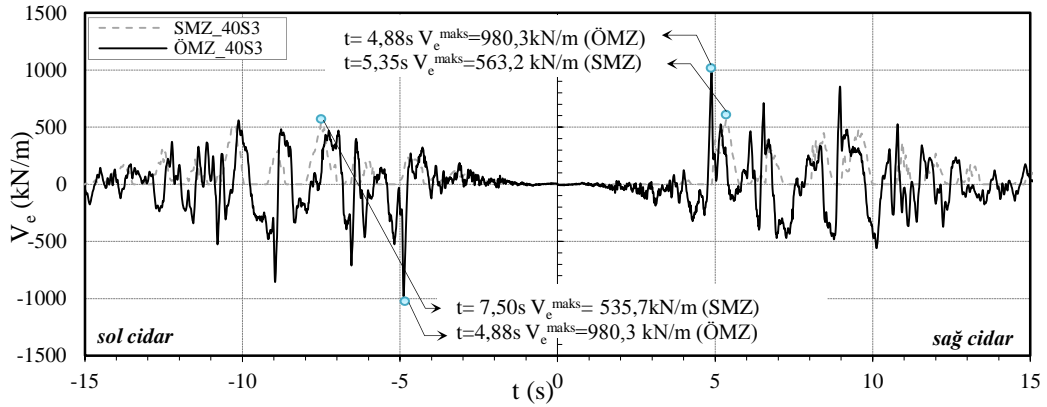
Tüm bu karşılaştırmalara ek olarak 4,0 narinlik oranı için zamanla değişimler irdelendiğinde, dikkate alınan yapı sistemi modelleriyle hesaplanan frekans değerlerine bağlı olarak, tepkilerin diğer narinlik oranları için elde edilenlere göre farklılaştığı tespit edilmektedir. Benzer tepkiler elde edilmiş olsa da, zaman tanım alanındaki değişimlerden en büyük tepkilerin birbirlerine göre  $\sim 0,2$  s lik bir gecikme ile gerçekleşmesi bu durumu açıklamaktadır. Diğer taraftan SMZ'den elde edilen yükseklik boyunca dinamik malzeme basıncı değişimlerinin 3,0 ve 4,0 narinlik oranları için üst kısımlarda sıfırlandığı görülmektedir. Önerilen analitik modellerde stok malzemesi-cidar etkileşimi sayısal yöntemde olduğu gibi temas ve ayrılmayı temsil edecek şekilde tanımlanmadığından, bu durum tam temsil edilememekte ve bu nedenle artan narinlik oranlarıyla ÖMZ çözümlemesi SMZ'ye nazaran daha büyük değerler vermektedir.



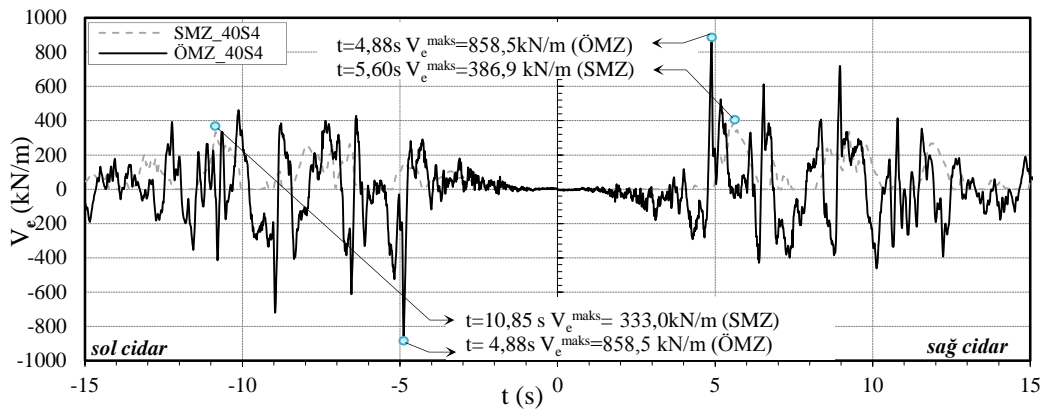
Şekil 3.46. ÖMZ ve SMZ'ye göre 40m'lik ( $H/d_c=4,0$ ) siloda S1 zemin sistemi için karşılıklı cidarlardaki eşdeğer taban kesme kuvvetinin zamanla değişimi



Şekil 3.47. ÖMZ ve SMZ'ye göre 40m'lik ( $H/d_c=4,0$ ) siloda S2 zemin sistemi için karşılıklı cidarlardaki eşdeğer taban kesme kuvvetinin zamanla değişimi



Şekil 3.48. ÖMZ ve SMZ'ye göre 40m'lik ( $H/d_c=4,0$ ) siloda S3 zemin sistemi için karşılıklı cidarlardaki eşdeğer taban kesme kuvvetinin zamanla değişimi



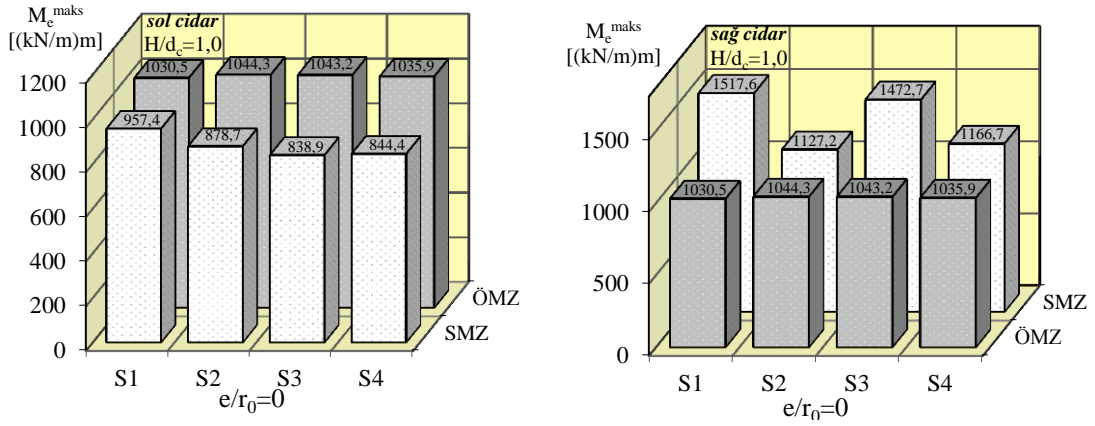
Şekil 3.49. ÖMZ ve SMZ'ye göre 40m'lik ( $H/d_c=4,0$ ) siloda S4 zemin sistemi için karşılıklı cidarlardaki eşdeğer taban kesme kuvvetinin zamanla değişimi

➤ Eşdeğer Eğilme Momenti

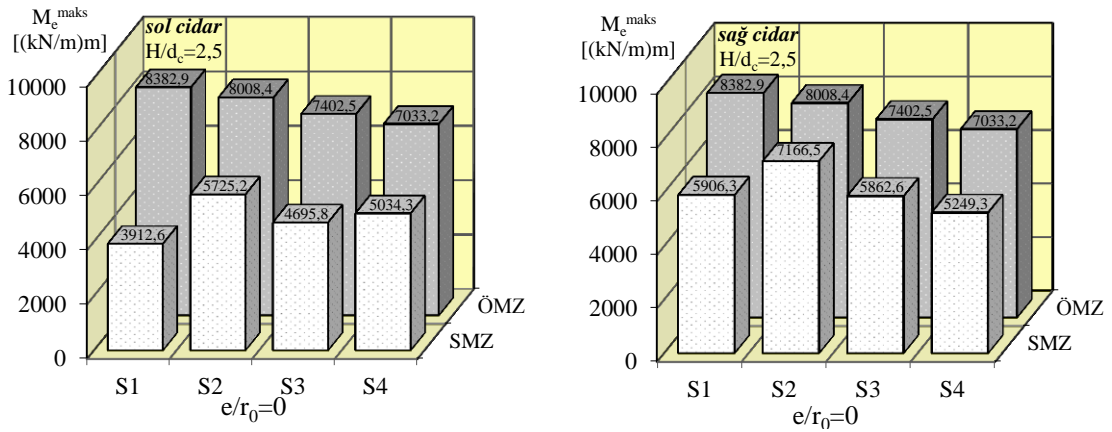
ÖMZ ve SMZ'ye göre deprem doğrultusunda karşılıklı cidarlarda elde edilen en büyük eşdeğer eğilme momentleri ( $M_e^{\text{maks}}$ ) ve bunların gerçekleşme zamanları (t), her bir narinlik oranı için Çizelge 3.10'da sunulmaktadır. İlk üç narinlik oranı için ÖMZ yaklaşımı S1, S2 ve S3 zemin sistemlerinde SMZ ile benzer davranışı sergilemekte olup 2,5 narinlik oranından sonra incelemeye konu olan narinlik oranları için davranış eşdeğer taban kesme kuvveti irdelemelerine benzer şekilde değişmeye başlamakta ve ÖMZ çözümü SMZ'den oldukça büyük bulgular üretmeye başlamaktadır. Tüm bu değişimler ve benzer irdelemeleri tekrarlamamak amacıyla burada değişimin net olarak görüldüğü durumlar Şekil 3.50-Şekil 3.52'de verilmektedir.

Çizelge 3.10. SMZ ve ÖMZ'ye göre gömülü olmayan temel sistemi için altı farklı siloda dört farklı zemin sistemine göre en büyük eşdeğer eğilme momentleri ve gerçekleşme zamanları

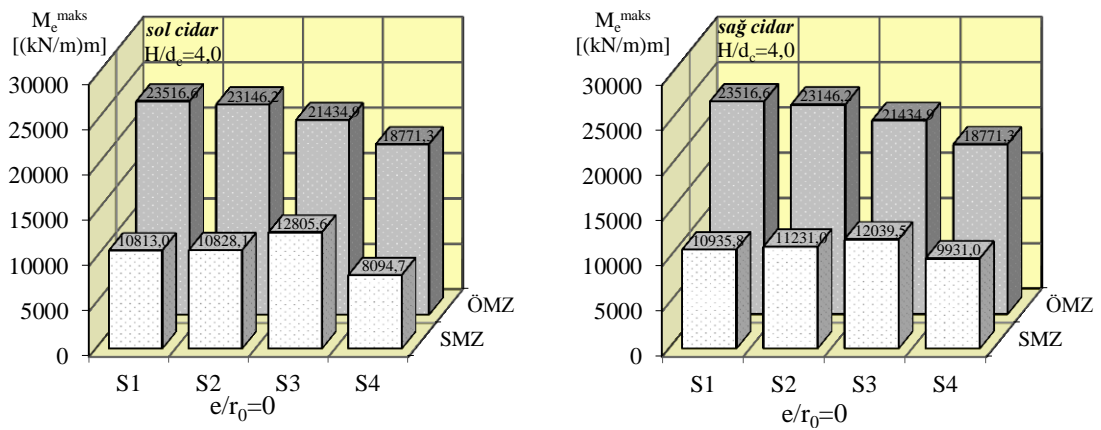
Silo Yüks.	Zemin Sınıfı	En Büyük Eşdeğer Taban Eğilme Momenti, $M_e^{\text{maks}}$ [(kN/m)m]					
		SMZ ( $e/r_0=0$ )				ÖMZ ( $e/r_0=0$ )	
		sol cidar		sağ cidar		t (s)	$M_e^{\text{maks}}$
		t (s)	$M_e^{\text{maks}}$	t (s)	$M_e^{\text{maks}}$	t (s)	$M_e^{\text{maks}}$
10 m	S1	7,00	957,38	9,00	1517,62	4,88	1030,50
	S2	6,40	878,66	4,95	1127,18	4,88	1044,33
	S3	6,45	838,90	9,05	1472,69	4,88	1043,23
	S4	7,15	844,35	9,15	1166,72	4,88	1035,89
15 m	S1	7,00	2089,09	9,00	2918,57	4,88	2317,66
	S2	7,00	1642,23	4,95	2679,98	4,88	2315,68
	S3	7,05	2082,00	9,05	2899,45	4,88	2365,60
	S4	7,20	2077,65	9,30	2288,67	4,88	2423,10
20 m	S1	7,00	3501,04	9,00	4240,72	4,88	4332,47
	S2	8,65	2741,51	4,95	4884,60	4,88	4369,69
	S3	7,05	3102,78	5,05	3666,13	4,88	4682,56
	S4	7,40	3222,95	9,40	3567,12	4,88	4381,24
25 m	S1	7,00	3912,62	4,95	5906,31	4,88	8382,85
	S2	7,05	5725,15	9,05	7166,47	4,88	8008,44
	S3	7,20	4695,76	9,20	5862,59	4,88	7402,53
	S4	10,30	5034,28	5,30	5249,29	4,88	7033,17
30 m	S1	7,05	6630,40	9,05	7887,01	4,88	11716,11
	S2	7,20	6506,97	4,95	7223,91	8,96	11961,12
	S3	7,30	6997,97	9,3	7218,36	4,88	11080,74
	S4	10,50	7698,69	5,50	7423,93	4,88	10416,63
40 m	S1	7,40	10813,04	9,30	10935,81	8,96	23516,63
	S2	7,45	10828,09	9,30	11230,99	8,96	23146,22
	S3	10,35	12805,62	5,35	12039,53	4,88	21434,89
	S4	10,65	8094,66	5,70	9931,01	4,88	18771,25



Şekil 3.50. Narinlik oranı 1,0 olan silo için ÖMZ ve SMZ'ye göre deprem doğrultusunda karşılıklı cidarlardaki en büyük eşdeğer eğilme momentleri



Şekil 3.51. Narinlik oranı 2,5 olan silo için ÖMZ ve SMZ'ye göre deprem doğrultusunda karşılıklı cidarlardaki en büyük eşdeğer eğilme momentleri



Şekil 3.52. Narinlik oranı 4,0 olan silo için ÖMZ ve SMZ'ye göre deprem doğrultusunda karşılıklı cidarlardaki en büyük eşdeğer eğilme momentleri

### 3.1.3.2. Temelin Gömülü Olduğu Durum İçin Önerilen Analitik ve Sayısal Modeller Açısından İrdelenmeler

Çalışma kapsamında yapı-zemin etkileşimini de dikkate alan modeller ile yüzeysel temel kabulünün yapıldığı 4 farklı zemin sistemi için irdelenmeler bir önceki başlıkta kapsamlı bir şekilde gerçekleştirildi. Bunun devamı olarak yapı-zemin etkileşim problemlerinde bir diğer önemli parametre de temelin gömülü olma durumudur. Diğer yapı sistemleri için teknik literatürde konuyla ilgili yapılan bir çok çalışmada, zemine göre gömülme oranının etkileşim mekanizması üzerinde önemli bir etken olabileceği belirtilmektedir. Bu nedenle gömülmenin önerilen yöntemler açısından temsilinin ne oranda mümkün olabileceği bu bölümde incelenmektedir. Bu amaçla temelin gömülü olduğu durum için önerilen analitik (ÖMZG) (bkz Şekil 2.13) ve sayısal (SMZG) (bkz Şekil 2.17) modellerden elde edilen bulgular karşılaştırmalı olarak bu başlık altında irdelenmektedir. Gömülmenin dikkate alındığı toplam 48 adet çözümlemeden, bir önceki bölümde ifade edilen bulgulara paralel bulgular elde edilmektedir. Bu nedenle burada mümkün olduğunca tekrara düşmemek için bu kısımlar özet olarak verilecek ve gömülmenin olması nedeniyle yapılacak irdelenmeler öne çıkartılmaya çalışılacaktır. Bu amaçla, diğer karşılaştırmalara benzer şekilde, çalışma kapsamında dört farklı temel/zemin sistemi için gerçekleştirilen altı farklı narinliğe sahip silo sistemi çözümlemelerinden elde edilen bulgular; dinamik malzeme basınçları ve eşdeğer taban kesme kuvvetleri açısından, karşılaştırmalı olarak irdelenmektedir.

#### ➤ Dinamik Malzeme Basınçları

ÖMZG ve SMZG'ye göre deprem doğrultusunda karşılıklı cidarlarda elde edilen en büyük dinamik malzeme basınçları ( $p_{hs}^{maks}$ ) ve bunların gerçekleşme zamanları (t) ile silo tabanından itibaren gerçekleşme yükseklikleri ( $H_o$ ) her bir narinlik oranı için dört farklı zemin sistemine göre Çizelge 3.11'de sunulmaktadır. Söz konusu en büyük dinamik malzeme basınçları ve bunların yükseklik boyunca dağılımları yine herbir narinlik oranı için dört farklı zemin sınıfına göre Şekil 3.58~3.64'de karşılaştırmalı olarak verilmektedir. Bu şekillerden gerek yöntemler arasındaki farkları gerekse de değişik zemin sınıflarının yöntem bulgularını nasıl etkilediğini görmek mümkün olmaktadır.

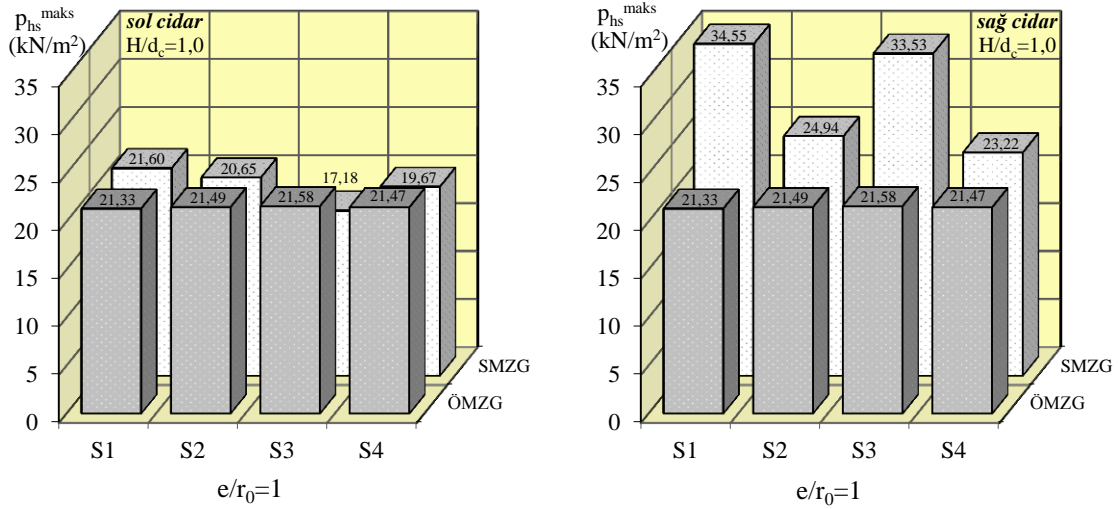


Çizelge 3.11. SMZG ve ÖMZG'ye göre gömülü temel sistemi için altı farklı siloda dört farklı zemin sistemine göre en büyük dinamik malzeme basınçları, gerçekleşme zaman ve yükseklikleri

Silo Yüks.	Zemin Sınıfı	En Büyük Dinamik Malzeme Basıncı, $p_{hs}^{maks}$ (kN/m <sup>2</sup> )								
		SMZG ( $e/r_0=1$ )						ÖMZG ( $e/r_0=1$ )		
		sol cidar			sağ cidar					
	t (s)	H <sub>0</sub> (m)	$p_{hs}^{maks}$	t (s)	H <sub>0</sub> (m)	$p_{hs}^{maks}$	t (s)	H <sub>0</sub> (m), (2/π)H	$p_{hs}^{maks}$	
10 m	S1	7,00	7,5 (0,75H)	21,60	9,00	6,0 (0,60H)	34,55	4,88	6,5 (0,637H)	21,33
	S2	6,40	10,0 (1,00H)	20,65	9,00	4,0 (0,40H)	24,94	4,88	6,5 (0,637H)	21,49
	S3	7,05	6,0 (0,60H)	17,18	9,05	6,5 (0,65H)	33,53	4,88	6,5 (0,637H)	21,58
	S4	7,15	8,0 (0,80H)	19,67	9,15	8,5 (0,85H)	23,22	4,88	6,5 (0,637H)	21,47
15 m	S1	7,00	7,0 (0,47H)	20,95	9,00	4,5 (0,30H)	32,16	4,88	10,0 (0,637H)	21,29
	S2	6,40	4,5 (0,30H)	19,31	4,95	9,0 (0,60H)	25,80	4,88	10,0 (0,637H)	21,34
	S3	6,45	9,0 (0,60H)	18,65	9,05	8,0 (0,53H)	33,64	4,88	10,0 (0,637H)	21,32
	S4	7,15	5,0 (0,33H)	25,02	9,15	8,0 (0,53H)	30,15	4,88	10,0 (0,637H)	21,78
20 m	S1	7,00	7,5 (0,38H)	20,57	9,00	4,5 (0,23H)	31,15	4,88	13,5 (0,637H)	22,33
	S2	7,00	6,0 (0,30H)	16,66	4,95	9,5 (0,48H)	24,99	4,88	13,5 (0,637H)	22,46
	S3	7,05	13,5 (0,68H)	24,03	9,05	5,5 (0,28H)	33,32	4,88	13,5 (0,637H)	22,66
	S4	7,30	20,0 (1,00H)	26,77	9,30	20,0 (1,00H)	21,95	4,88	13,5 (0,637H)	23,85
25 m	S1	7,00	6,0 (0,24H)	19,28	9,00	4,0 (0,16H)	29,97	4,88	17,0 (0,637H)	28,04
	S2	7,05	24,5 (0,98H)	17,17	9,05	20,0 (0,80H)	27,06	4,88	17,0 (0,637H)	27,73
	S3	6,45	9,5 (0,38H)	20,63	4,95	5,0 (0,20H)	25,99	4,88	17,0 (0,637H)	26,58
	S4	7,40	25,0 (1,00H)	19,94	9,35	25,0 (1,00H)	20,34	4,88	17,0 (0,637H)	24,35
30 m	S1	7,05	19,0 (0,63H)	21,57	9,05	20,5 (0,68H)	26,47	4,88	20,0 (0,637H)	27,14
	S2	7,05	12,0 (0,40H)	23,27	4,95	7,0 (0,23H)	24,60	4,88	20,0 (0,637H)	26,96
	S3	7,25	30,0 (1,00H)	21,04	4,95	8,0 (0,27H)	26,60	8,96	20,0 (0,637H)	27,33
	S4	7,55	30,0 (1,00H)	23,13	9,45	30,0 (1,00H)	25,06	4,88	20,0 (0,637H)	25,36
40 m	S1	7,40	40,0 (1,00H)	19,30	4,95	9,5 (0,24H)	20,25	8,96	27,0 (0,637H)	30,49
	S2	7,40	40,0 (1,00H)	19,68	4,95	7,5 (0,19H)	26,04	8,96	27,0 (0,637H)	30,52
	S3	7,45	40,0 (1,00H)	20,64	5,35	40,0 (1,00H)	18,89	8,96	27,0 (0,637H)	30,07
	S4	7,70	40,0 (1,00H)	26,70	5,50	40,0 (1,00H)	24,54	4,88	27,0 (0,637H)	27,48

10m'lik silo için ÖMZG ve SMZG yaklaşımlarından dört farklı zemin sistemi için elde edilen en büyük dinamik malzeme basınçları karşılaştırmalı olarak Şekil 3.53'de verilmektedir. SMZG modeli ile temas problemi nedeniyle deprem doğrultusundaki karşılıklı cidarlarda farklı tepkiler elde edildiğinden, ÖMZG ile SMZG arasındaki değerlendirmede de karşılıklı cidarlarda tepkilerin değerlendirilmesi açısından farklılıklar doğabilmektedir. Şekil 3.53'den görüldüğü üzere sol ve sağ cidarda karşılaştırılan her iki yaklaşımda benzer bulgular üretmektedir. Burada SMZG'ye göre yalnızca S1 ve S3 türü zemin sistemleri için sağ cidarda önemli derecede basınçların arttığını, bunun da gerek sol cidardaki basınçlara nazaran gerekse de ÖMZG ile elde edilen bulgulardan farklılık arz ettiğini söylemek uygun olacaktır. Şekil 3.54'den bu farklılıklar daha net bir şekilde

görülmektedir. Söz konusu basınç tahminlerinin oransal olarak değerlendirilmesi durumunda ÖMZG; sol cidarda S1 zemin sistemi için SMZG ile hemen hemen aynı değeri verirken, S3 için %26, diğer zemin sistemleri için ise %10 civarında daha büyük değerler vermektedir. Bu durum sağ cidar için değerlendirildiğinde ise, ÖMZG'nin S1 ve S3 için %37 civarında, S2 için %14 ve S4 için ise %8 daha az bir değer verdiği karşılaştırmalardan anlaşılmaktadır.

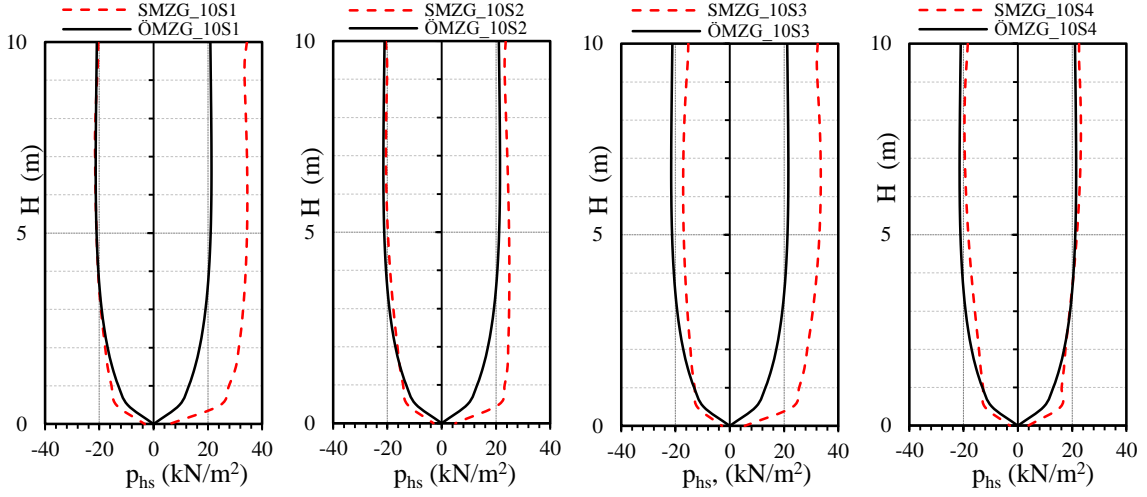


Şekil 3.53. Farklı zemin sistemlerindeki 10m'lik ( $H/d_c=1,0$ ) silo için ÖMZG ve SMZG'ye göre karşılıklı cidarlarda en büyük dinamik malzeme basınçları

Narinlik oranı 1,0 için tespit edilebilecek bir diğer önemli husus, ÖMZG'ye göre dört farklı zemin sınıfı için en büyük dinamik malzeme basınçları arasında fark olmadığıdır. Buna göre ÖMZG 10m'lik siloda azalan zemin rijitliğinden etkilenmemektedir. SMZG'ye göre ise S1 ve S4 zemin sistemleri için gerçekleşen azalma önerilen analitik model ile temsil edilememektedir. Daha önce de ifade edildiği üzere bu davranışa temelde iki ana unsur neden olmuş olabilmektedir. Bunlardan ilki ve en muhtemel olanı temas problemi nedeniyle stok malzemesi cidar arasındaki temas ve ayrılmadan kaynaklı etkileşim, diğeri ise zemin etkileşimi nedeniyle sistemin frekasının azalması ile, söz konusu değerlerin yükün hakim frekans bandı dışında kalmasıdır. Burada söz konusu durum, her bir parametrenin ayrı ayrı etkileri toplamından doğabileceği gibi, ikinci olarak ifade edilen parametrenin stok malzeme-cidar etkileşimini artırma eğilimi göstermiş olması da muhtemeldir.

Şekil 3.54'den de görüldüğü üzere yükseklik boyunca dinamik malzeme basıncı dağılımı ve en büyük dinamik malzeme basıncı için ÖMZG ve SMZG modellerinden elde

edilen bulgular oldukça yakın olmaktadır. Burada önerilen analitik modelin, oldukça iyi bir yaklaşıklıkla, söz konusu basınçların yükseklik boyunca dağılımını belirleme konusunda yeterli olduğu rahatlıkla söylenebilmektedir.

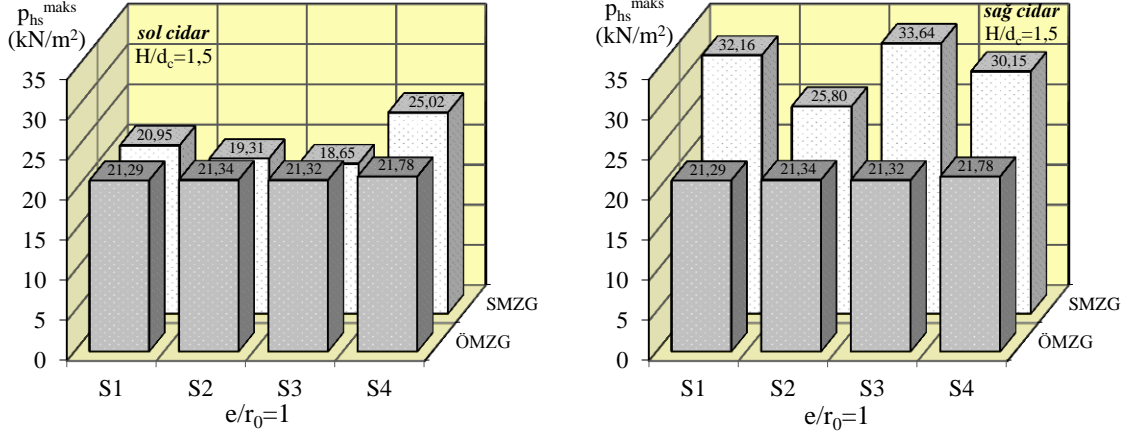


Şekil 3.54. Farklı zemin sistemlerindeki 10 m'lik ( $H/d_c=1,0$ ) silo için ÖMZG ve SMZG'ye göre dinamik malzeme basınçlarının yükseklik boyunca değişimleri

En büyük dinamik malzeme basınçlarının tabandan itibaren gerçekleşme yüksekliklerinin ( $H_0$ ) ÖMZG yaklaşımı ile  $0,637 H$  olarak elde edildiği bilinmektedir. SMZG yaklaşımının ise sol ve sağ cidarda S2 ve S4 zemin sistemleri dışında hemen hemen bu veya yakın yüksekliklerde söz konusu en büyük basınçları ürettiği görülmektedir. Karşılıklı cidarlar için bakıldığında S3 ve S4 zemin sistemleri için sol ve sağ cidarlarda en büyük dinamik malzeme basınçlarının aynı yükseklikte oluştuğu da yine bu karşılaştırmalardan elde edilebilecek bir diğer bulgudur (bkz Çizelge 3.11). Tüm bu karşılaştırmalardan hareketle 10m'lik siloda önerilen analitik modelin; gömülü olmayan durumda olduğu gibi bu durumda da, sınırlamaları iyi bilindiğinde, teknik literatürdeki modellere nazaran tasarımda rahatlıkla kullanılacak hassasiyette sonuç ürettiği söylenebilmektedir.

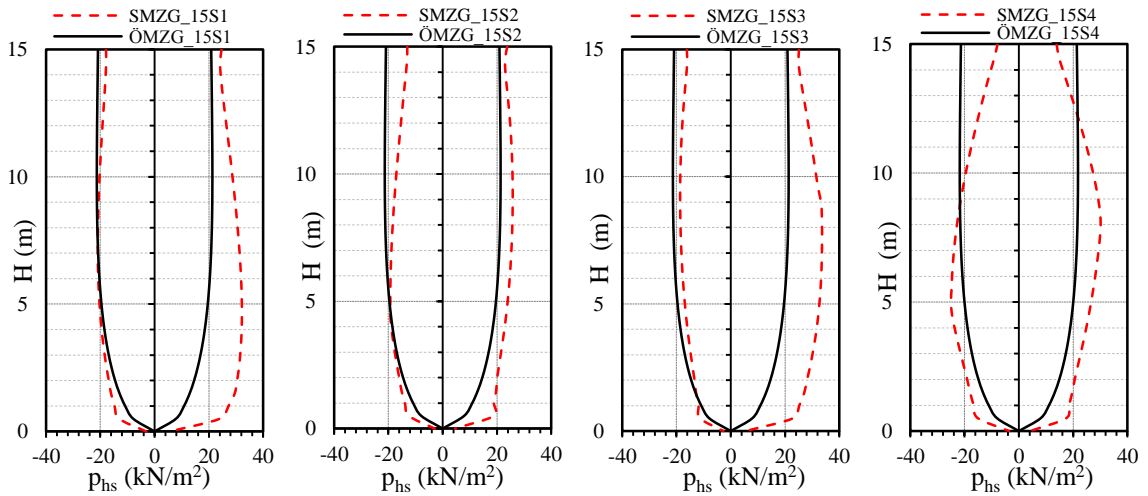
Narinlik oranı 1,5 için dinamik malzeme basınçları değerlendirildiğinde davranışın 10m'lik silo ile benzer nitelikte olduğu görülmektedir. 15m'lik siloda karşılıklı cidarlarda dört farklı zemin sınıfı için her iki yöntemden elde edilen en büyük dinamik malzeme basınçları Şekil 3.55'de karşılaştırmalı olarak görülmektedir. Sol cidarda basınçlar her iki yöntem için yakın olmakla beraber, sağ cidarda ÖMZG'nin SMZG'ye göre küçük değerler verebildiği görülmektedir. Dinamik malzeme basınçları için ÖMZG sol cidarda S1 zemin

sistemi için SMZG'den %2, S2 ve S3 için %12 civarında daha fazla, S4 için ise %13 daha az, sağ cidarda ise yine 1,0 narinlik oranına benzer şekilde %35'lere varan oranda daha az değerler üretmektedir. Zemin etkileşimi açısından ise, yine belirgin bir etkiden bahsetmek mümkün değildir.



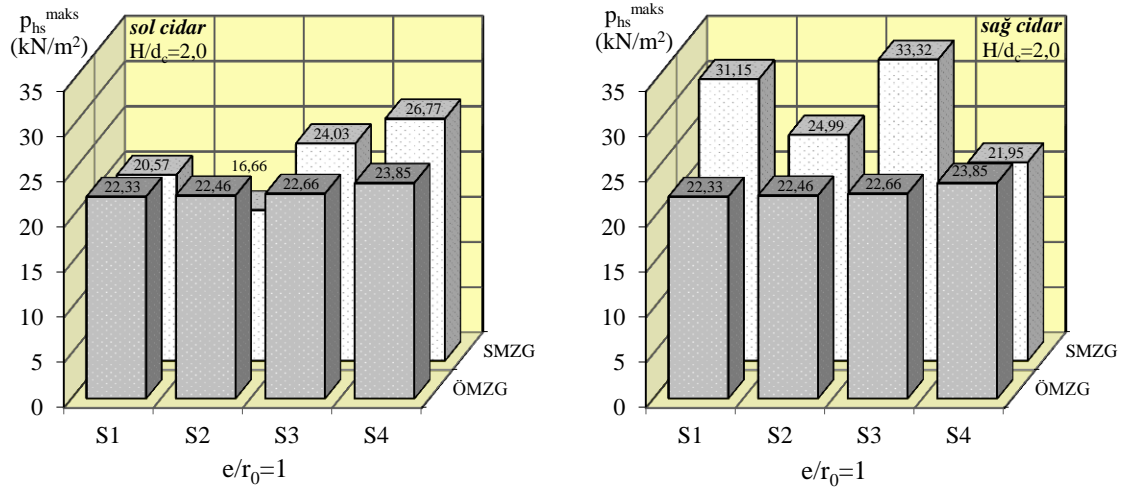
Şekil 3.55. Farklı zemin sistemlerindeki 15m'lik ( $H/d_c=1,5$ ) silo için ÖMZG ve SMZG'e göre karşılıklı cidarlarda en büyük dinamik malzeme basınçları

Şekil 3.56'dan da görüldüğü üzere yükseklik boyunca ÖMZG ve SMZG modellerinden elde edilen dinamik malzeme basıncı dağılımları oldukça yakın olmaktadır. En büyük basınçların tabandan itibaren gerçekleşme yükseklikleri ( $H_0$ ) irdelendiğinde ise analitik yöntemden farklı yüksekliklerde oluşabildiği gözlemlenmektedir. Sol cidarda, bu çok daha belirginken, sağ cidar analitik yöntemde daha yakın bulgular üretmektedir.



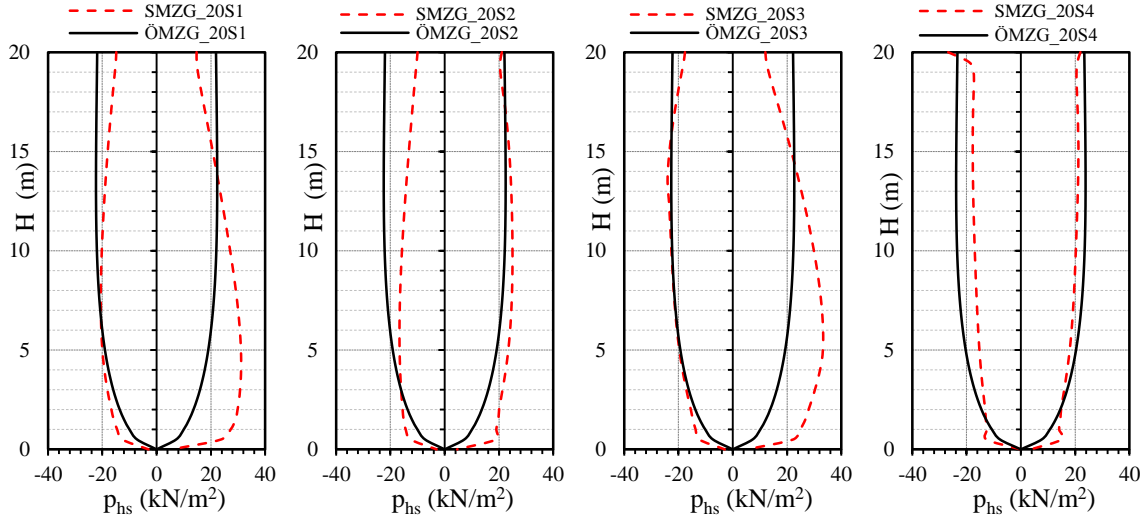
Şekil 3.56. Farklı zemin sistemlerindeki 15 m'lik ( $H/d_c=1,5$ ) silo için ÖMZG ve SMZG'ye göre dinamik malzeme basınçlarının yükseklik boyunca değişimleri

$H/d_c=2,0$  oranının bodur silolar ile narin silolar arasında bir sınırı ifade ettiği daha önce de belirtilmişti. Ancak dinamik malzeme basınçlarının bu narinlik oranı için değerlendirilmesinden davranışın 1,0 ve 1,5 narinlik oranlarından çok da farklı olmadığı görülmektedir. Benzer karşılaştırmalar önerilen her iki yöntemin bulguları arasında değerlendirildiğinde, oransal olarak ÖMZG sol cidarda SMZG'ye göre S4 zemin sistemi dışında hemen hemen benzer ya da daha büyük bulgular üretirken, bu zemin sistemi için önerilen analitik model %11 daha az bir değer vermektedir. Sağ cidarda ise 1,0 ve 1,5 narinlik oranlarına benzer şekilde %30' lara varan oranda daha az değerler üretebilmektedir.



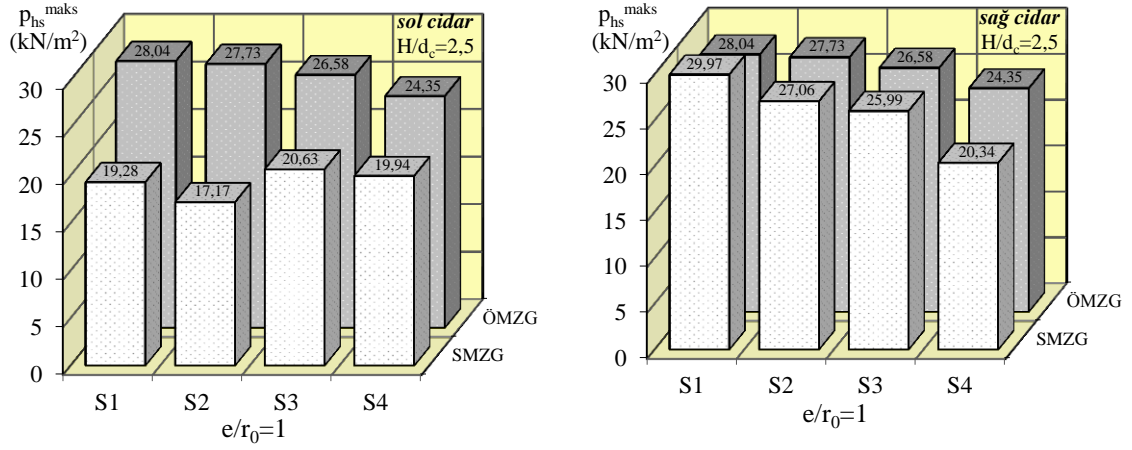
Şekil 3.57. Farklı zemin sistemlerindeki 20m'lik ( $H/d_c=2,0$ ) silo için ÖMZG ve SMZG'ye göre karşılıklı cidarlarda en büyük dinamik malzeme basınçları

Dinamik malzeme basınçlarının yükseklik boyunca değişimlerinin karşılaştırmalı olarak verildiği Şekil 3.58 irdelendiğinde, narinlik oranının etkisine bağlı olarak değişimlerinde karakter olarak farklılıklar meydana geldiği gözlemlenmektedir. Ek olarak bu karşılaştırmaların aynı zemin sistemleri için gömülü olmayan durumda da farklı olduğu hatırlanacak olursa, özellikle S1 ve S3 için yapılan karşılaştırmalarda sağ cidarda yükseklik boyunca değişimlerin temelin gömülü olması nedeniyle temel seviyesine çok yakın bir yerde en büyük değerlerine yaklaştığı ve bu durumun da yükseklik boyunca değişimlerde farklı bir karakter sergilenmesine neden olduğu görülecektir. Diğer zemin sistemlerinde ise durum, bir önceki karşılaştırmalarda olduğu gibi, hemen hemen benzer olarak rahatlıkla kabul edilebilmektedir. Sözkonusu basınçların tabandan itibaren gerçekleşme yükseklikleri ( $H_0$ ) her iki cidarda da bütün sınıfları için farklı değerler almaktadır.

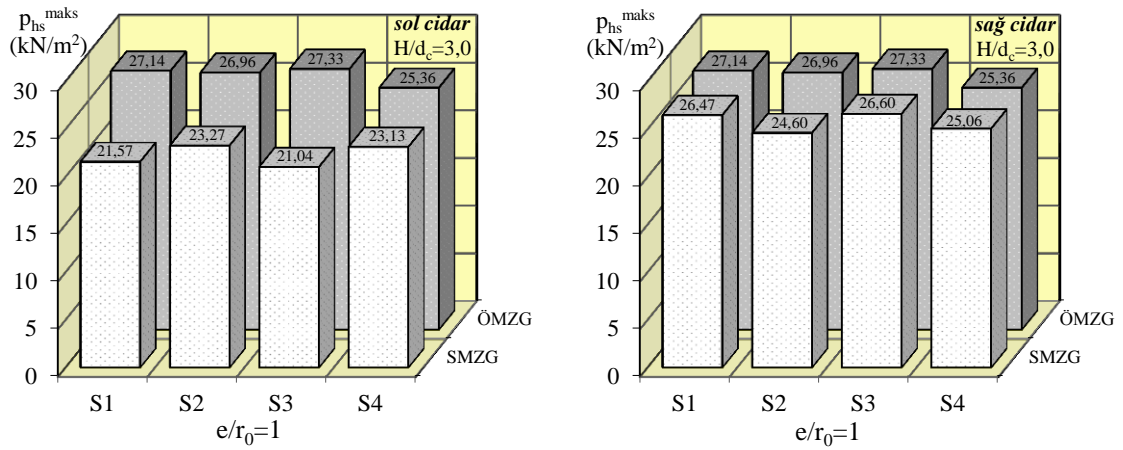


Şekil 3.58. Farklı zemin sistemlerindeki 20 m'lik ( $H/d_c=2,0$ ) silo için ÖMZG ve SMZG'ye göre dinamik malzeme basınçlarının yükseklik boyunca değişimleri

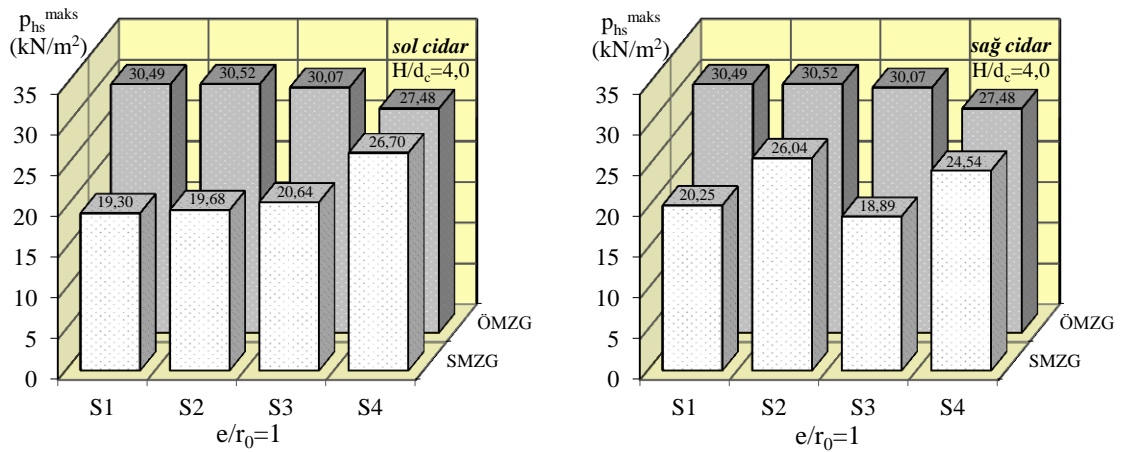
2,5 gibi bir narinlik oranına sahip silo, narin silo sınıfının belirginleştiği bir orana sahiptir ve bu oranda davranışın bodur silolardan farklılığı dana net bir şekilde ortaya çıkmaktadır. Şekil 3.59'dan görüldüğü üzere sol ve sağ cidarda her iki yonteme göre elde edilen basınçlar tüm zemin sistemlerinde de ya çok yakın değerler almakta, ya da ÖMZG SMZG'den daha büyük bulgular üretmektedir. Benzer durum artan narinlik oranları ile daha net görülebildiğinden; 3,0 ve 4,0 narinlik oranı için en büyük dinamik malzeme basınçlarının karşılaştırmalarının sergilendiği Şekil 3.60 ve 3.61, Şekil 3.59'u takiben verilmektedir. Buradan da görülebileceği gibi, gömülü olmayan durumdan farklı olarak, bu karşılaştırmalarda artan narinlik oranı ile önemli farklılıkların gömülü olan durumda ancak 4,0 narinlik oranı için gözlemlendiği anlaşılmaktadır. Benzer önemli farklılıkların temelini gömülü olmadığı durumda ise 3,0 narinlik oranında da tespit edilebileceği hatırlanacaktır. Temelin gömülü olması durumunda silo-zemin etkileşiminde zeminin silo davranışını yüzeysel temele göre daha az etkiliyor olması, buna neden olarak gösterilebilmektedir. Diğer bir ifadeyle, gömülmenin zemin nedeniyle oluşan silo sistemi periyodundaki uzamaların azalmasına neden olacağı ya da sistemin toplam rijitliğini arttıracacağı dikkate alındığında, bu oranın 3,0 dan 4,0 çıkmasının nedeni anlaşılabilir.



Şekil 3.59. Farklı zemin sistemlerindeki 25m'lik ( $H/d_c=2,5$ ) silo için ÖMZG ve SMZG'ye göre karşılıklı cidarlarda en büyük dinamik malzeme basınçları



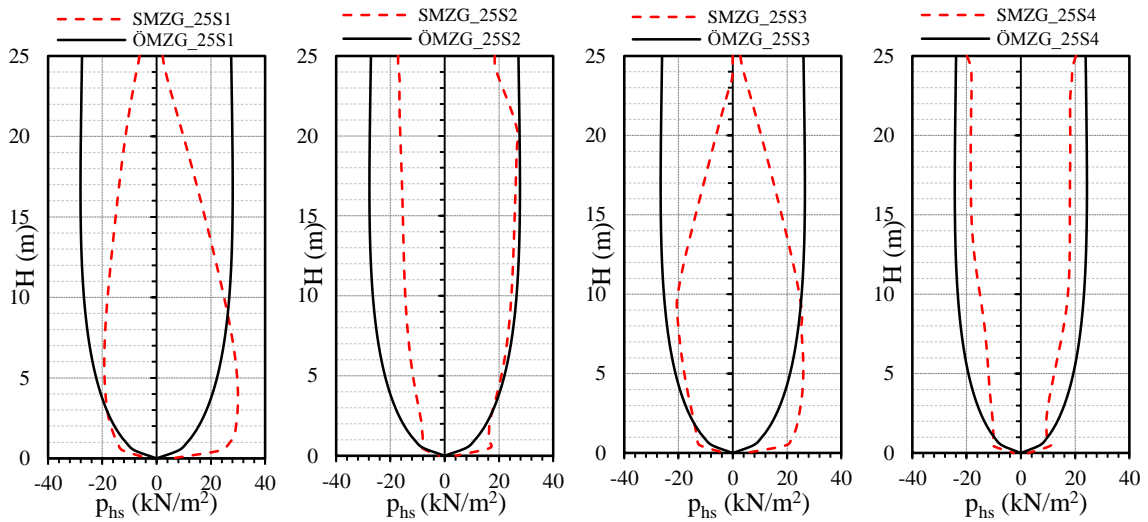
Şekil 3.60. Farklı zemin sistemlerindeki 30m'lik ( $H/d_c=3,0$ ) silo için ÖMZG ve SMZG'ye göre karşılıklı cidarlarda en büyük dinamik malzeme basınçları



Şekil 3.61. Farklı zemin sistemlerindeki 40m'lik ( $H/d_c=4,0$ ) silo için ÖMZG ve SMZG'ye göre karşılıklı cidarlarda en büyük dinamik malzeme basınçları

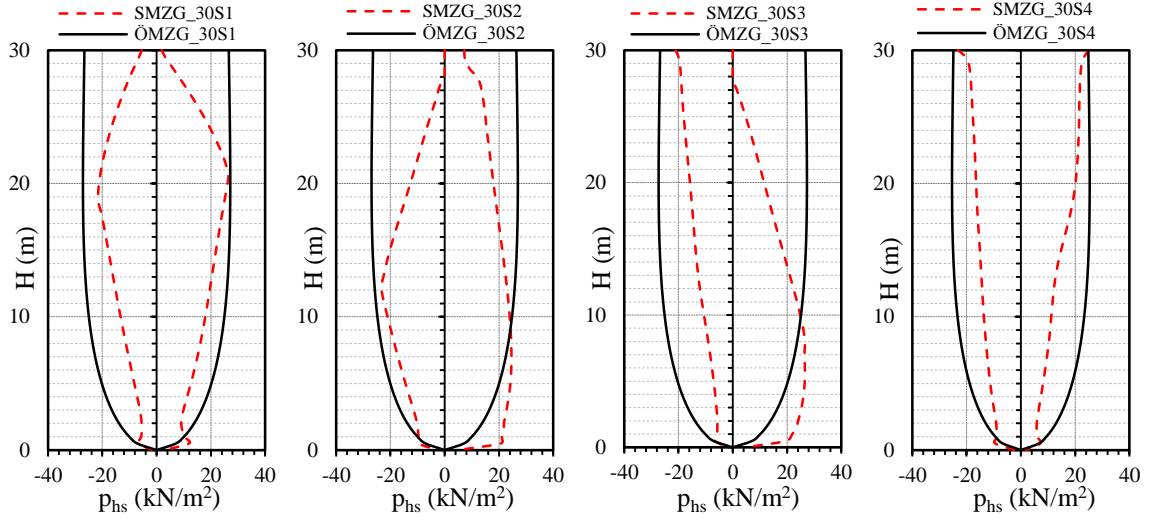
Yukarıdaki üç farklı narinlik oranı için de, SMZG'den elde edilen en büyük dinamik malzeme basınçlarının ÖMZG'den oldukça küçük olduğu görülmektedir. Bu eğilimin, artan narinlik oranları ile arttığı da yine bu karşılaştırmalardan görülebilmektedir. Azalan zemin rijitliği ile sözkonusu basınçlarda azalma eğilimi, başta sayısal modelde olmak üzere her iki yöntemde de artan narinlik oranlarıyla ortaya çıkmaktadır. Buradan hareketle narin silolarda yapı zemin etkileşiminin silo davranışını, bodur silolara nazaran, daha fazla etkilediği ifade edilebilmektedir.

Şekil 3.62, Şekil 3.63 ve Şekil 3.64'de sözkonusu narinlik oranları için dinamik malzeme basınçlarının yükseklikle değişimleri verilmektedir. Burada da en büyük dinamik malzeme basınçları için yapılan irdelemeler geçerli olmaktadır. Artan narinlik oranları ile basınç dağılımları değişiklik göstermekle beraber hemen her durumda ÖMZG'den elde edilen basınçlar SMZG'ye göre daha büyük ya da oldukça yakın çıkmaktadır. 2,0 narinlik oranında, daha küçük narinlik oranlarına göre, yükseklik boyunca değişimlerin temelin gömülü olması nedeniyle temel seviyesine çok yakın bir seviyede en büyük değerlerine yakın değerlere ulaştığı ve bu durumun da yükseklik boyunca değişimlerde farklı bir karakter olarak ortaya çıktığı ifade edilmişti. Benzer davranış artan narinlik oranları için görülmekle birlikte, 2,5 narinlik oranında bu davranışın 2,0 narinlik oranına benzer şekilde gerçekleştiği, artan narinlikle beraber ise daha düzgün dağılımların ortaya çıktığı görülmektedir.



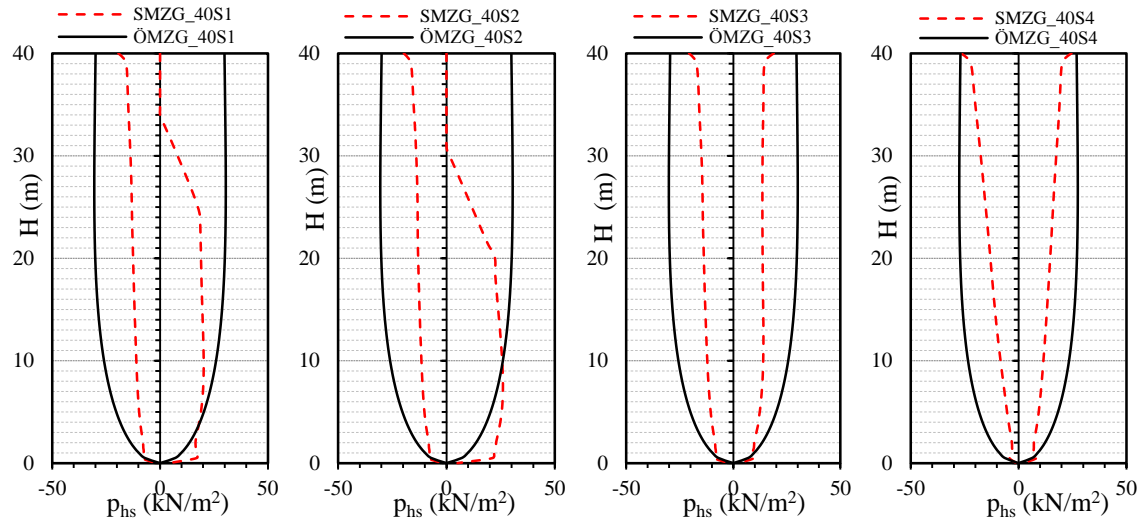
Şekil 3.62. Farklı zemin sistemlerindeki 25 m'lik ( $H/d_c=2,5$ ) silo için ÖMZG ve SMZG'ye göre dinamik malzeme basınçlarının yükseklik boyunca değişimleri





Şekil 3.63. Farklı zemin sistemlerindeki 30 m'lik ( $H/d_c=3,0$ ) silo için ÖMZG ve SMZG'ye göre dinamik malzeme basınçlarının yükseklik boyunca değişimleri

En büyük basınçların tabandan itibaren gerçekleşme yüksekliklerinin ( $H_0$ ); her iki cidarda da artan narinlik oranı ve azalan zemin rijitlikleri ile deprem doğrultusundaki karşılıklı cidarlarda daha çok tepe noktalarında elde edildiği görülmektedir. Yine artan narinlik oranları ile belirli bölgelerde söz konusu basınçların sıfırlanabildiği görülmekte olup, bu daha önce de ifade edildiği gibi, stok malzemesinin deprem esnasında cidardan ayrılma davranışına bağlanabilmektedir.



Şekil 3.64. Farklı zemin sistemlerindeki 40 m'lik ( $H/d_c=4,0$ ) silo için ÖMZG ve SMZG'ye göre dinamik malzeme basınçlarının yükseklik boyunca değişimleri

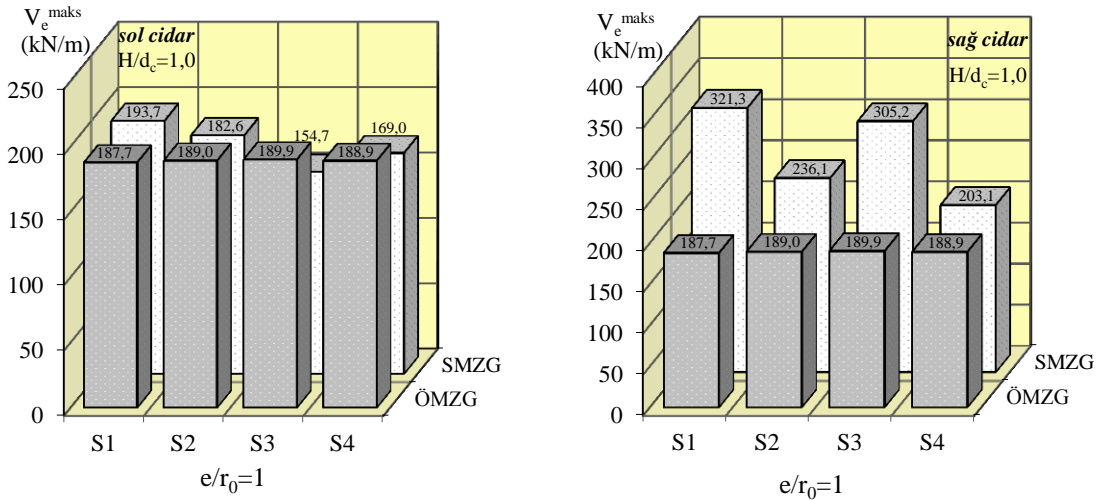
➤ Eşdeğer Taban Kesme Kuvveti

ÖMZG ve SMZG'ye göre deprem doğrultusunda karşılıklı cidarlarda elde edilen en büyük taban kesme kuvvetleri ( $V_e^{\text{maks}}$ ) ve bunların gerçekleşme zamanları (t) her bir narinlik oranı için Çizelge 3.12'de sunulmaktadır. Çizelge 3.12'den görülebileceği üzere, eşdeğer taban kesme kuvveti açısından yöntemler arasındaki farkların ilk dört narinlik oranı için kabul edilebilir sınırlar içerisinde olduğu, fakat 3,0 ve 4,0 gibi yüksek narinlik oranları için artan narinlik oranlarıyla iki yöntem arasındaki farkın da arttığı, ancak hemen her durumda önerilen analitik yaklaşımın sayısal model bulgularından daha büyük değerler ürettiği anlaşılmaktadır.

Çizelge 3.12. Gömülmenin dikkate alındığı sistemler için, SMZG ve ÖMZG'ye göre en büyük eşdeğer kesme kuvvetleri ve gerçekleşme zamanları

Silo Yüks.	Zemin Sınıfı	En Büyük Eşdeğer Taban Kesme Kuvveti, $V_e^{\text{maks}}$ , (kN/m)					
		SMZG ( $e/r_0=1$ )				ÖMZG ( $e/r_0=1$ )	
		sol cidar		sağ cidar			
		t, s	$V_e^{\text{maks}}$	t, s	$V_e^{\text{maks}}$	t, s	$V_e^{\text{maks}}$
10 m	S1	7,00	193,69	9,00	321,31	4,88	187,67
	S2	6,40	182,61	9,00	236,06	4,88	189,03
	S3	7,05	154,73	9,05	305,17	4,88	189,88
	S4	7,15	169,03	9,15	203,14	4,88	188,90
15 m	S1	7,00	281,76	9,00	428,65	4,88	281,64
	S2	6,40	247,06	4,95	349,68	4,88	282,27
	S3	6,45	245,83	9,05	443,43	4,88	282,06
	S4	7,15	282,69	9,15	352,65	4,88	288,15
20 m	S1	7,00	362,37	9,00	495,10	4,88	394,29
	S2	7,00	287,12	4,95	456,05	4,88	396,55
	S3	7,05	405,57	9,05	511,58	4,88	400,02
	S4	7,30	324,48	9,30	381,33	4,88	421,00
25 m	S1	7,00	371,05	9,00	481,41	4,88	619,15
	S2	7,05	350,04	9,05	571,69	4,88	612,36
	S3	6,45	317,54	4,95	453,70	4,88	586,90
	S4	7,40	387,60	9,35	398,62	4,88	537,72
30 m	S1	7,05	409,88	9,05	511,64	4,88	719,45
	S2	7,05	390,35	4,95	582,75	4,88	714,53
	S3	7,25	388,89	4,95	478,40	8,96	724,35
	S4	7,55	440,17	9,45	449,21	4,88	672,24
40 m	S1	7,40	490,50	4,95	554,57	8,90	1078,07
	S2	7,40	508,13	4,95	600,48	8,96	1079,05
	S3	7,45	535,68	5,35	535,72	8,96	1063,16
	S4	7,70	515,78	5,50	575,14	4,88	971,66

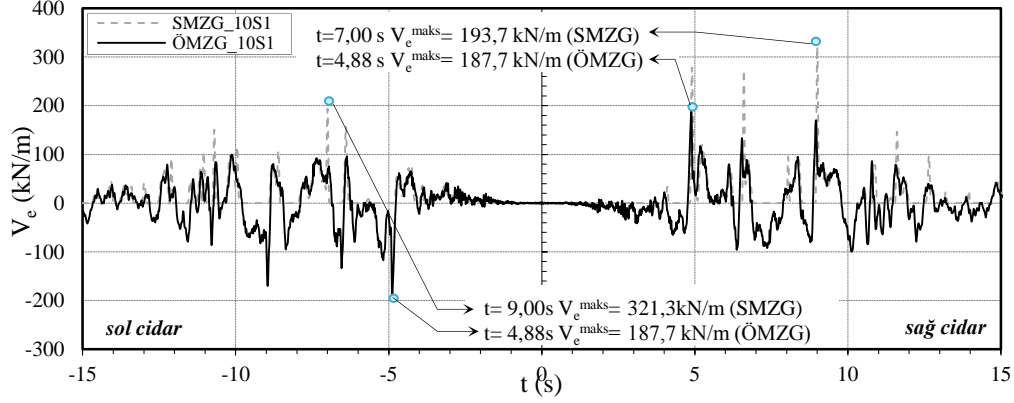
1,0 narinlik oranı için dört farklı zemin sistemine göre, en büyük eşdeğer taban kesme kuvvetleri Şekil 3.65’de ve bunların zamanla değişimleri, farkın belirginleştiği S1 ve S4 zemin sınıfları için, Şekil 3.66 ve Şekil 3.67’de verilmektedir. Şekil 3.65’den görülebileceği gibi, 1,0 narinlik oranına sahip siloda söz konusu kesme kuvveti için ÖMZG, SMZG’ye göre sol cidarda S1 zemin sınıfı için %3 daha az, S2, S3 ve S4 için ise sırasıyla %4, %23 ve %12 daha fazla bir değer vermektedir. Durum sağ cidar için değerlendirildiğinde ise, bulgular arasındaki farkın %40’lara vardığı anlaşılmaktadır. Böylesi karmaşık bir sistemin hesabı için önerilen analitik modelin, 1,0 narinlik oranına sahip siloda dört zemin sistemi için davranışı sol yüzeyde temsil edebildiği rahatlıkla söylenebilmektedir.



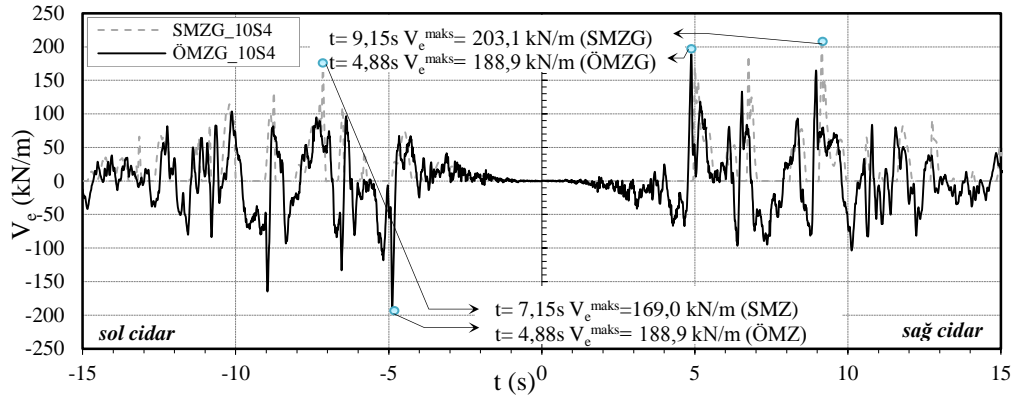
Şekil 3.65. Narinlik oranı 1,0 olan silo için ÖMZG ve SMZG’ye göre deprem doğrultusunda karşılıklı cidarlardaki en büyük eşdeğer taban kesme kuvvetleri

Eşdeğer kesme kuvvetlerinin zamanla değişimleri, ilk dört narinlik oranı için temelin gömülü olması durumunda da S1, S2 ve S3 zemin sistemleri için nerdeyse üst üste düşmektedir. Şekil 3.66’da bu durumları temsilen 1,0 narinlik oranına sahip siloda S1 zemin sınıfı için eşdeğer taban kesme kuvvetinin zamanla değişimi ÖMZG ve SMZG için karşılaştırmalı olarak verilmektedir. SMZG’de stok malzemesi ile silo arasındaki temas yüzeyi dikkate alındığından dolayı söz konusu etkiler stok malzemesinin çekme oluşturmayacağı kabulüyle negatif tarafa geçmemektedir. 3,0’dan küçük narinlik oranları için, Şekil 3.67’den görülebileceği üzere, en düşük rijitlik değerlerine sahip S4 zemin

sisteminde iki yöntemin dinamik karakteristikleri birbirinden farklı olmakta, bu da kısmen farklı davranış sergilemelerine neden olmaktadır. Diğer zemin sınıfları için ÖMZG davranışı oldukça iyi temsil etmektedir.



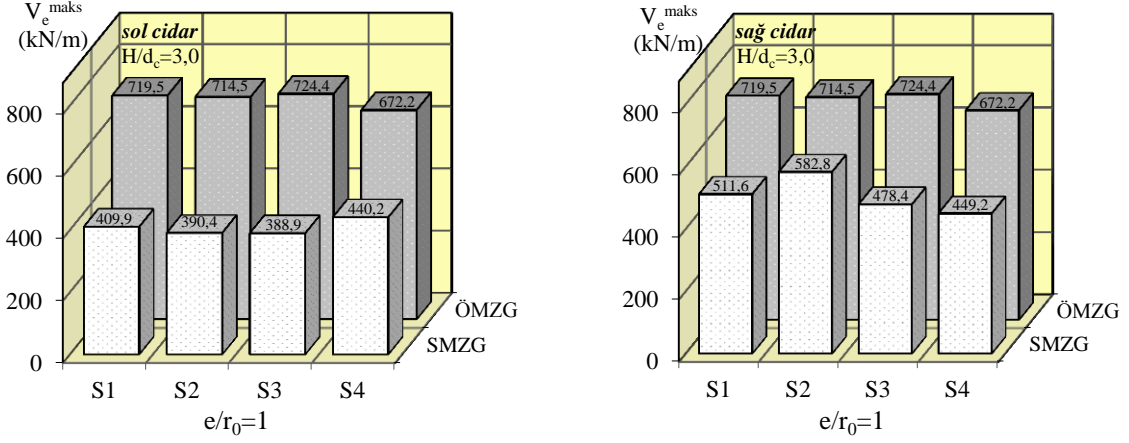
Şekil 3.66. Narinilik oranı 1,0 olan siloda S1 zemini için ÖMZG ve SMZG'ye göre karşılıklı cidarlardaki eşdeğer kesme kuvvetinin zamanla değişimi



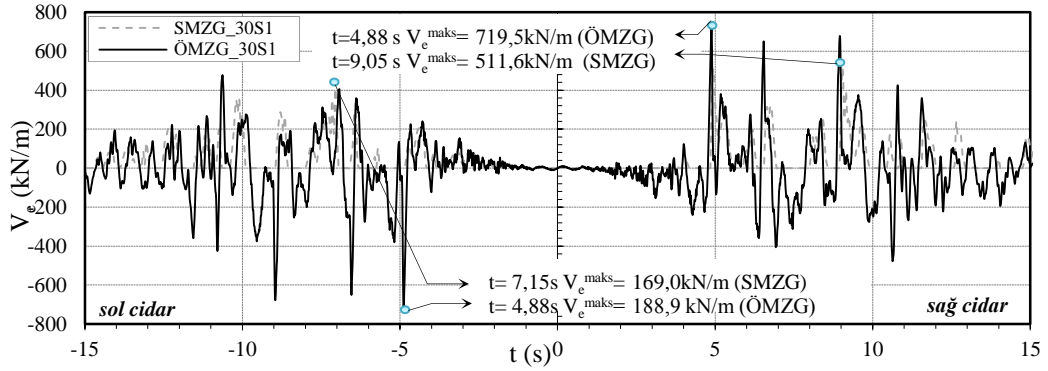
Şekil 3.67. Narinilik oranı 1,0 olan siloda S4 zemini için ÖMZG ve SMZG'ye göre karşılıklı cidarlardaki eşdeğer kesme kuvvetinin zamanla değişimi

3,0 narinlik oranı için dört farklı zemin sınıfına göre en büyük eşdeğer kesme kuvvetleri Şekil 3.68'de ve söz konusu kuvvetlerin zamanla değişimleri davranış değişikliğinin yukarıda irdelenen ilk üç narinlik oranına göre daha belirgin görüldüğü S1 ve S4 zemin sistemleri için Şekil 3.69 ve Şekil 3.70'de verilmektedir. Şekil 3.68'den görüldüğü üzere  $H/d_c=3,0$  için söz konusu kesme kuvvetini ÖMZG, SMZG'ye göre sol cidarda S1,S2 ve S3 zemin sistemleri için %80 civarında, S4 için ise %53 daha fazla, sağ

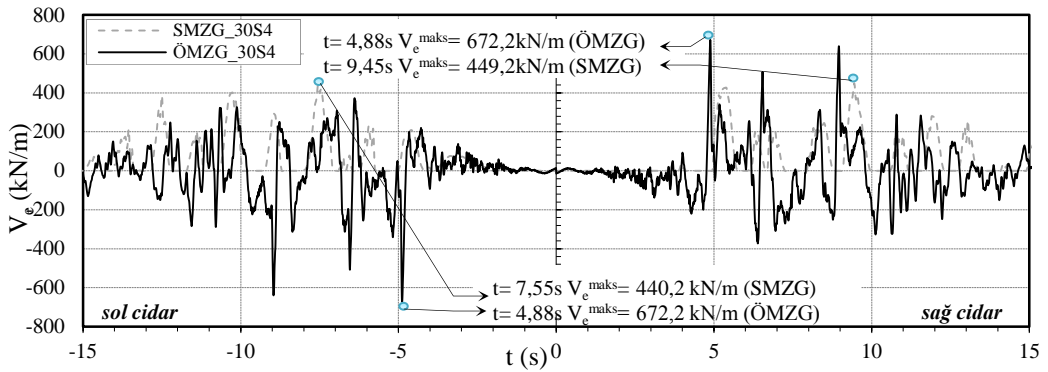
cidarda S1 için %41, S2 için %23, S3 ve S4 için ise %50 daha fazla değer verdiği görülmektedir.



Şekil 3.68. Narinlik oranı 3,0 olan silo için ÖMZG ve SMZG'ye göre deprem doğrultusunda karşılıklı cidarlardaki en büyük eşdeğer taban kesme kuvvetleri

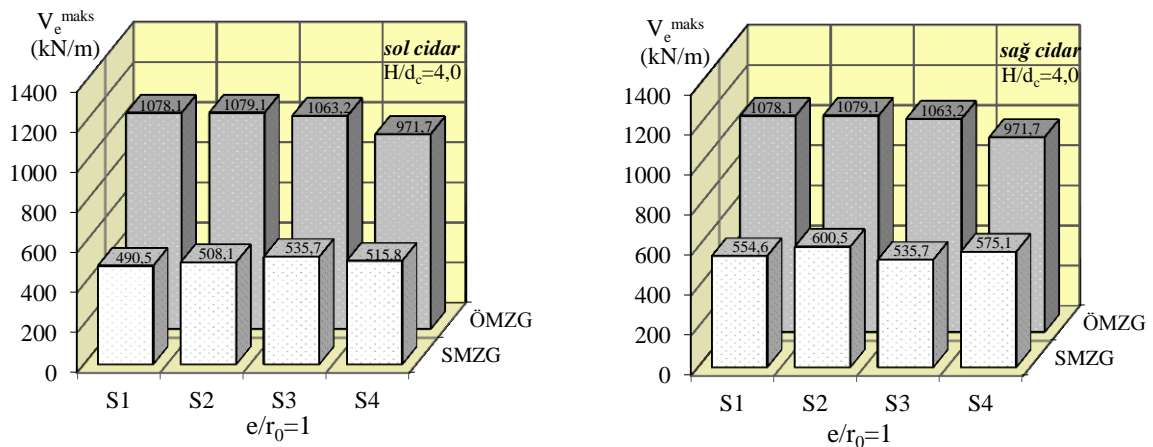


Şekil 3.69. Narinlik oranı 3,0 olan siloda S1 zemini için ÖMZG ve SMZG'ye göre karşılıklı cidarlardaki eşdeğer kesme kuvvetinin zamanla değişimi



Şekil 3.70. Narinlik oranı 3,0 olan siloda S4 zemini için ÖMZG ve SMZG'ye göre karşılıklı cidarlardaki eşdeğer kesme kuvvetinin zamanla değişimi

1,0 ve 3,0 narinlik oranları için yapılan irdelemelerden, artan narinlik oranı ile eşdeğer taban kesme kuvvetinin ÖMZG ile, SMZG'ye göre oldukça büyük tahmin edildiği görülmektedir. Benzer karşılaştırmalar  $H/d_c=4,0$  için dört farklı zemin sistemine göre Şekil 3.71'de verilmektedir. Artan narinlik oranı ile ÖMZG ve SMZG bulguları arasındaki fark artmakta ve ÖMZG daha büyük değerler vermektedir. Söz konusu eğilimin gömülü olmama durumu için de benzer şekilde elde edildiği hatırlanacak olursa, davranışın genel anlamda her iki durumda da benzer gerçekleştiği anlaşılmaktadır. Ancak dinamik malzeme basınçlarının değişiminde de tartışıldığı gibi, artan narinlik oranının sistem rijitliği üzerinde neden olduğu azalmaların, gömülü temel durumu ile toplam sistemin rijitliğinin artmasından dolayı aynı şiddette gerçekleşmeyeceği rahatlıkla söylenebilmektedir. Bu durumda söz konusu farkların gömülü olmama durumunda daha keskin gerçekleşmiş olması böylece açıklığa kavuşmaktadır. Gerek gömülü olmayan durumda, gerekse burada incelen gömülü olma durumunda tasarıma esas olacak bulguların önerilen analitik yöntemle daha büyük bulunduğu görülmektedir. Buradan hareketle, gerçekleştirilecek tasarımın her durumda güvenli ancak ekonomik olmayacağı anlaşılmaktadır. Dinamik malzeme basınçlarının yükseklik boyunca değişimlerinin kimi noktalarda önerilen sayısal yaklaşıma kıyasla düşük tahmin ediliyor olmasına karşın, eşdeğer taban kesme kuvvetinde böyle bir durumun meydana gelmemesi, önerilen analitik yaklaşımla inceleme konusu silolarda güvenli sonuç elde edilebileceğini göstermektedir. Diğer taraftan artan narinlik oranı ile oransal olarak farkın artıyor olması teknik literatürde tanımlanan sınırlara ek olarak narinlik oranının 3,0 ve daha büyük olduğu sistemlerde ekonomik bulgular üretilebilecek şekilde daha hassas çalışılması gerektiğini ortaya koymaktadır.



Şekil 3.71. Narinlik oranı 4,0 olan silo için ÖMZG ve SMZG'ye göre karşılıklı cidarlardaki en büyük eşdeğer taban kesme kuvvetleri

### 3.2. Duvar Rijitliğinin Yapı Davranışı Üzerindeki Etkisi

Çalışma kapsamında önerilen ve teknik literatürde kullanılagelen yaklaşımlar madde 3.1 de dinamik malzeme basınçları, yerdeğiştirme tepkileri, eşdeğer taban kesme kuvveti ve eğilme momenleri cinsinden karşılaştırmalı olarak irdelenmiş ve birbirlerine göre üstün ve zayıf tarafları geniş bir şekilde tartışılmıştır. Buradan hareketle bu noktadan sonra davranış üzerindeki farklı parametrelerin etkileri önerilen sayısal yaklaşım üzerinden yapılacaktır. Bu amaçla bu başlığa konu edilen duvar rijitliğinin davranış üzerindeki etkileri, SMR olarak adlandırılan ve önerilen sayısal modelde rijit cidar kabulünün yapıldığı modeli temsil eden yaklaşımla irdelenmektedir. Diğer taraftan SME olarak isimlendirilen model ise aynı yaklaşım ile esnek cidar modelini temsil etmektedir.

#### ➤ Dinamik Malzeme Basınçları

Çalışmaya konu edilen 6 farklı narinlik oranı için sözkonusu modeller yardımıyla elde edilen en büyük dinamik malzeme basınçları ( $p_{hs}^{maks}$ ), bunların gerçekleşme zamanları (t) ve yükseklikleri ( $H_o$ ) Çizelge 3.13’de verilmektedir. Buradaki verileri değerlendirirken rijit cidar kabulü ile esnek cidar kabulünün yapı davranışı ve dolayısıyla da stok malzemesinin tepkileri üzerindeki etkilerini göz önünde bulundurmak gerekmektedir.

Çizelge 3.13. Önerilen sayısal modele göre rijit ve esnek durum için altı farklı siloda en büyük dinamik malzeme basınçları, gerçekleşme zaman ve yükseklikleri

	Narinlik Oranı ( $H/d_c$ )	En Büyük Dinamik Malzeme Basıncı, $p_{hs}^{maks}$ (kN/m <sup>2</sup> )					
		sol cidar			sağ cidar		
		t (s)	$H_o$ (m)	$p_{hs}^{maks}$	t (s)	$H_o$ (m)	$p_{hs}^{maks}$
SMR	1,0	7,00	8,0 (0,80H)	26,71	9,00	10,0 (1,00H)	43,44
	1,5	7,00	9,5 (0,63H)	31,73	9,00	11,0 (0,73H)	46,70
	2,0	7,00	13,0(0,65H)	34,27	9,00	13,5 (0,68H)	48,84
	2,5	7,00	17,0 (0,68H)	34,49	9,00	17,0 (0,68H)	49,28
	3,0	7,00	22,0 (0,73H)	33,78	9,00	22,0 (0,73H)	49,00
	4,0	11,00	16,5 (0,28H)	35,16	9,00	33,0 (0,83H)	48,95
SME	1,0	7,00	8,0 (0,80H)	24,55	9,00	10,0 (1,0H)	38,20
	1,5	7,00	9,5 (0,63H)	24,97	9,00	8,5 (0,57H)	38,86
	2,0	7,00	9,0 (0,45H)	23,47	9,00	8,0 (0,40H)	38,38
	2,5	7,00	9,5 (0,38H)	25,22	9,00	7,5 (0,30H)	38,02
	3,0	6,40	13,5 (0,45H)	20,56	9,00	6,5 (0,22H)	36,26
	4,0	7,35	40,0 (1,00H)	22,20	4,90	7,5 (0,19H)	32,02

Rijit cidar kabulü ile yalnızca silo cidarının rijit cisim hareketi yaptığı kabul edilmekte ve dinamik malzeme basınçlarının tamamıyla stok malzemesi eylemsizlik etkilerinden kaynaklanacağı düşünülmektedir. Diğer taraftan, esnek cidar kabulü ile bu davranışın cidar esnekliğine dolayısıyla da silo narinlik oranına bağlı olarak değişiklik gösterebileceği açıktır. Buradan hareketle, rijit silo kabulünde dinamik malzeme basınçları, stok malzemesi narinlik oranına bağlı olarak şekillenirken, esnek yaklaşımda buna ek olarak malzemenin cidar ile girdiği etkileşim de davranışı etkileyen bir diğer parametre olarak devreye girmektedir. Bu nedenle en büyük dinamik malzeme basınçlarının gerçekleşme zamanları karşılaştırmalı olarak irdelendiğinde, davranış daha net bir şekilde anlaşılacaktır. Artan narinlik oranı ile esnek siloda sözkonusu en büyük basınç tepkilerinin gerçekleşme zamanları, 3,0 ve 4,0 narinlik oranlarında her iki cidarda değişmekte iken bu durum rijit kabulde bu şekilde tespit edilememektedir. Rijit kabul için sol cidarda 4,0 narinlik oranında gerçekleşen değişim, esnek yaklaşımdan farklı şekilde meydana gelerek her iki yaklaşımın da davranışı farklı doğrultularda değiştirdiği anlaşılmaktadır. Yukarıda da ifade edilmeye çalışıldığı gibi, rijit yaklaşımda, değişime neden olan tek parametre stok malzemesinin geometrisinde meydana gelen ve narinliğini arttıran yükseklik artması olurken, esnek yaklaşımda, silo cidarındaki değişimler de toplam davranış üzerinde etkili olmaktadır.

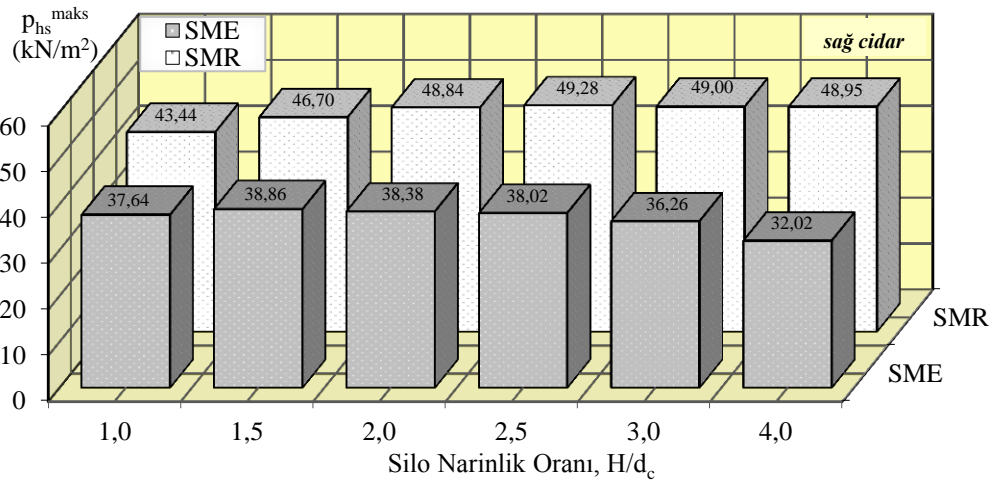
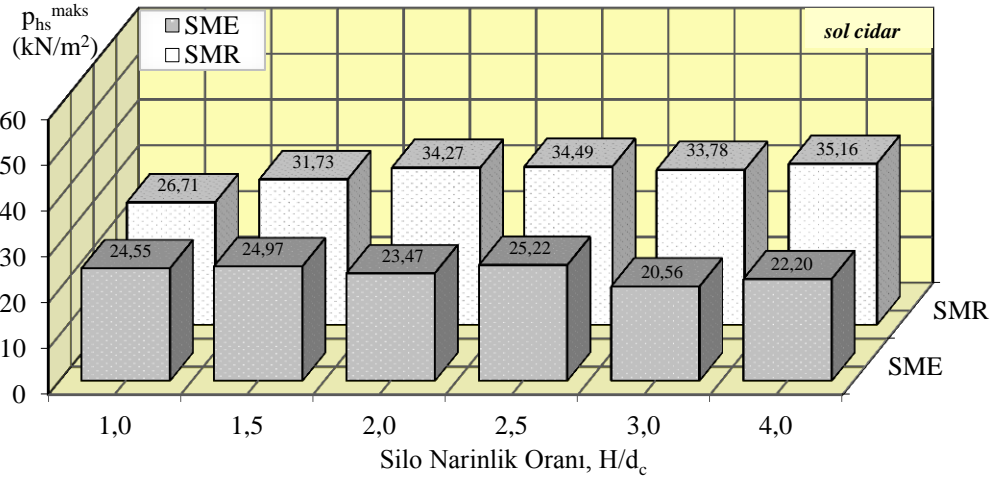
Burada dikkat edilmesi gereken bir diğer husus; davranışta rijit cidar kabulünde stok malzemesinin hareketi cidarın normali doğrultusunda bir yönde cidar tarafından sınırlandırılmış bir yüzeye sahip olduğundan, artan malzeme kütlesi ve narinlik oranının dinamik malzeme basınçlarını her iki cidarda da artırmakta olduğudur.  $H/d_c > 2$  olan narin silolarda ise stok malzemesinin toplam kütlesi eylemsizliği nedeniyle cidara yatayda ötelenme hareketi ile iletilmekte ve silolanan kütlelerin tümü bu harekette etkin olmaktadır.  $H/d_c < 2$  olan bodur silolarda ise yatay kesme (kayma) hareketi ile atalet kuvvetlerinin bir kısmı tabana iletilmektedir. Tabana iletilen oran, azalan narinlik oranı ile artmaktadır. Bu durumda cidar kuvvetlerine etki eden kütle azalmakta, dolayısıyla en büyük dinamik malzeme basıncının değeri bodur silolarda daha az olmaktadır. Rijit kabulde 4,0 narinlik oranı için sözkonusu basınçlar 1,0 narinlik oranına göre sol cidarda %32, sağ cidarda ise %13 daha fazla olarak elde edilmektedir.

Cidar esnekliği, silolanan malzemenin kayma rijitliğine göre yatay rijitliğini azaltarak yatay ötelenme hareketi ile cidara iletilen eylemsizlik kuvvetlerini azaltmakta, yatay kayma hareketi ile tabana iletilen payı arttırmaktadır. Bu durumda, narin siloların



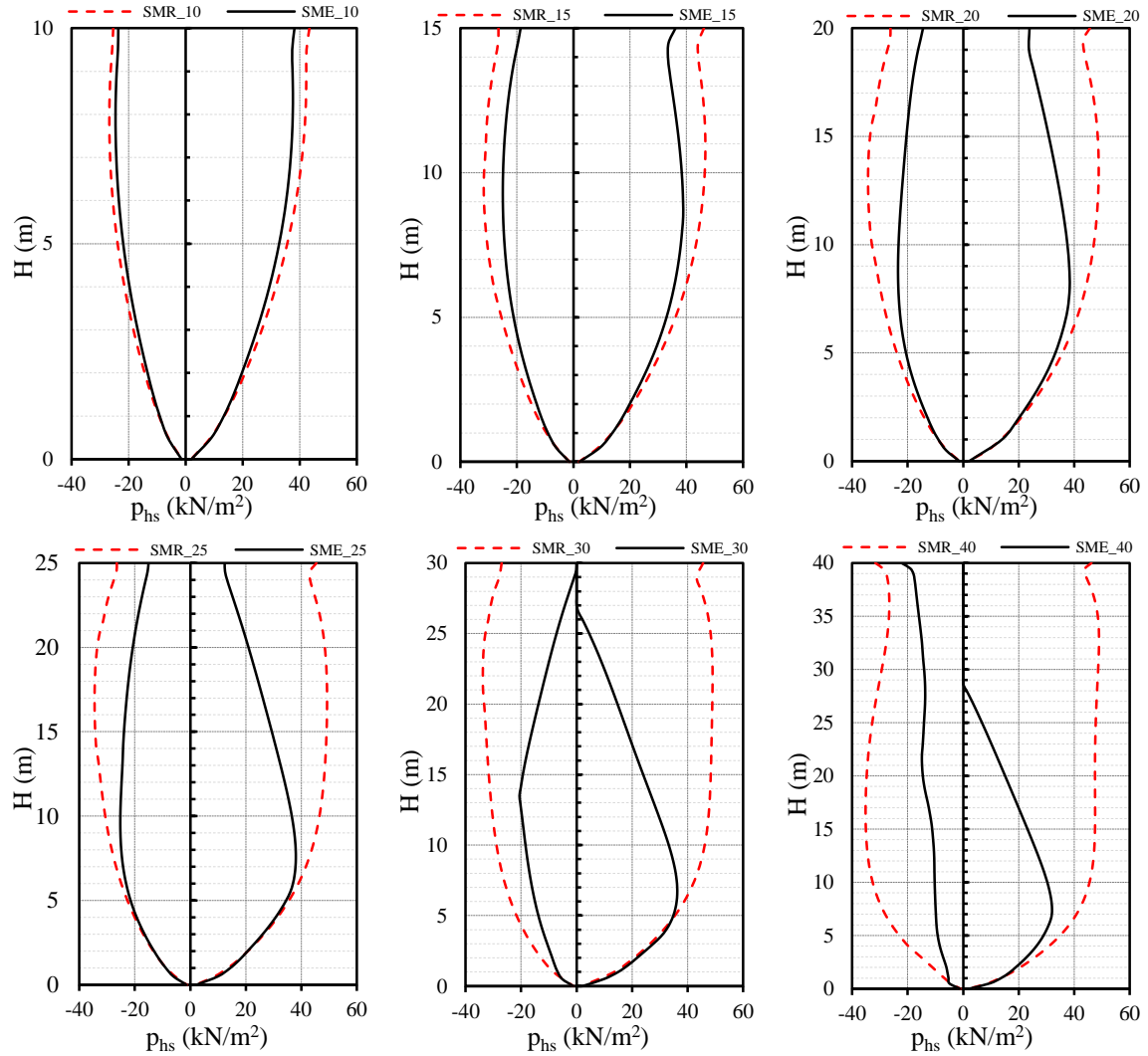
daha da esnek olması nedeni ile, elde edilen en büyük tepki değerlerinde artan narinlik oranı ile azalma meydana gelmektedir. Esnek kabulde 4,0 narinlik oranı için söz konusu basınçların 1,0 narinlik oranına göre sol cidarda %10, sağ cidarda ise %13 daha az olarak elde ediliyor olması bu durumu açıklamaktadır (Şekil 3.72).

Şekil 3.72'den de anlaşılacağı üzere, söz konusu basınç değerleri her bir narinlik oranı için rijit ve esnek çözüme göre karşılaştırıldığında, 1,0- 4,0 narinlik oranları için sol cidarda SMR, SME'den sırasıyla %9, %27, %46, %37, %64 ve %58, sağ cidarda ise %14, %20, %27, %30, %35 ve %53 daha fazla bir değer vermektedir. Buradan da görüldüğü üzere rijit ve esnek çözüme göre elde edilen bulgular arasındaki fark artan narinlik oranıyla artma eğilimindedir. Bu durumda artan narinlik oranı ile meydana gelen bu artışın yukarıda anlatılmaya çalışılan mekanizmadan kaynaklandığı söylenebilmektedir.



Şekil 3.72. SME ve SMR'ye göre altı farklı silo için deprem doğrultusunda karşılıklı cidarlardaki en büyük dinamik malzeme basıncı değişimleri

Şekil 3.73’den görülebileceği üzere dinamik malzeme basınçlarının yükseklikle değişimi açısından, narin ve bodur silo ayrımı için teknik literatürde kabul gören  $H/d_c=2,0$  sınırında, esnek ve rijit çözüm arasında fark oluşmaya başlamış  $H/d_c>2,0$  için yükseklik boyunca dağılımın farkı oldukça belirginleşmiştir. Bu sınırdan sonra yatay yerdeğiştirmeler belirginleşmeye başladığından, cidarın esnekliği nedeniyle rijitliğindeki azalmalar stok malzemesinin neden olduğu basınçları belirgin bir şekilde ortaya çıkartmaktadır. Bu mekanizmanın daha iyi anlaşılması için 25 metrelik silodan sonra yerdeğiştirmelerdeki artışa bakılabilmektedir. 2,5 narinlik oranına kadar yatayda elde edilen yerdeğiştirme 1 cm civarına ulaşırken  $H/d_c=3,0$  için 2 cm’ e,  $H/d_c=4,0$  için ise 6cm civarına yükselmekte, bu da davranış değişimini iyi bir şekilde açıklamaktadır (bkz. Çizelge 3.3).



Şekil 3.73. SMR ve SME’ye göre altı farklı silo için rijit ve esnek durumda yükseklik boyunca dinamik malzeme basıncı dağılımları

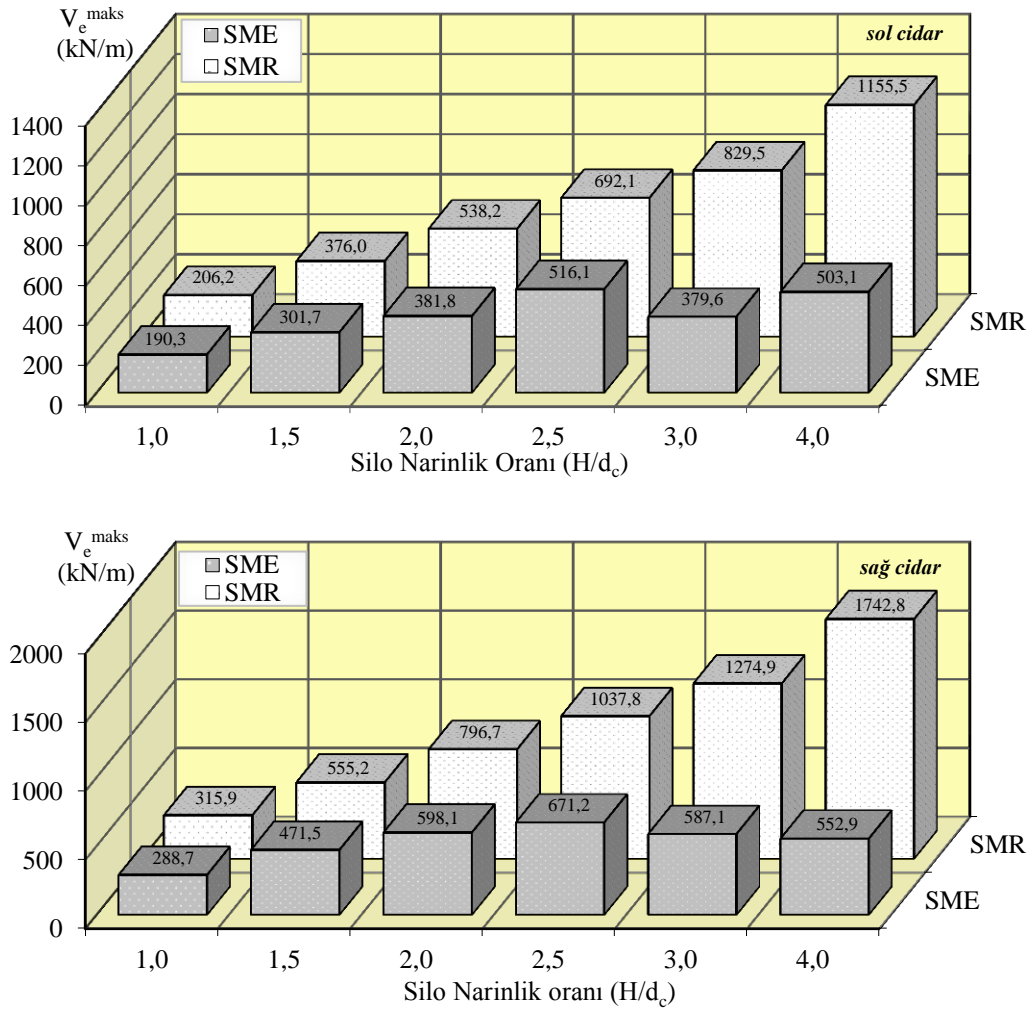
➤ Eşdeğer Taban Kesme Kuvvetleri

Önerilen sayısal modellerde rijit (SMR) ve esnek (SME) çözümden deprem doğrultusundaki karşılıklı cidarlarda elde edilen en büyük eşdeğer taban kesme kuvveti tepkileri ve bunların gerçekleşme zamanları Çizelge 3.14’de verilmektedir. Burada elde edilen eşdeğer taban kesme kuvvetlerinin dinamik malzeme basınçlarından birim genişlik için yükseklik boyunca hesaplandığını belirtmek uygun olacaktır. Dolayısıyla, eşdeğer ifadesi ile tanımlanmak istenen, taban kesme kuvvetini temsilen bu değer kullanılmıştır.

Çizelge 3.14. SMR ve SME’ye göre altı farklı siloda rijit ve esnek durum için karşılıklı cidarlarda en büyük eşdeğer taban kesme kuvvetleri ve gerçekleşme zamanları

Narinlik Oranı (H/d <sub>c</sub> )	En Büyük Eşdeğer Taban Kesme Kuvveti, V <sub>e</sub> <sup>maks</sup> (kN/m)							
	Rijit (SMR)				Esnek (SME)			
	sol cidar		sağ cidar		sol cidar		sağ cidar	
	t (s)	V <sub>e</sub> <sup>maks</sup>	t (s)	V <sub>e</sub> <sup>maks</sup>	t (s)	V <sub>e</sub> <sup>maks</sup>	t (s)	V <sub>e</sub> <sup>maks</sup>
1,0	7,00	206,17	9,00	315,90	7,00	190,30	9,00	288,73
1,5	7,00	376,00	9,00	555,15	7,00	301,69	9,00	471,53
2,0	7,00	538,15	9,00	796,70	7,00	381,85	9,00	598,09
2,5	7,00	692,14	9,00	1037,82	7,00	516,08	9,00	671,18
3,0	7,00	829,51	9,00	1274,91	6,40	379,59	9,00	587,09
4,0	11,00	1155,51	9,00	1742,84	7,35	503,09	4,90	552,93

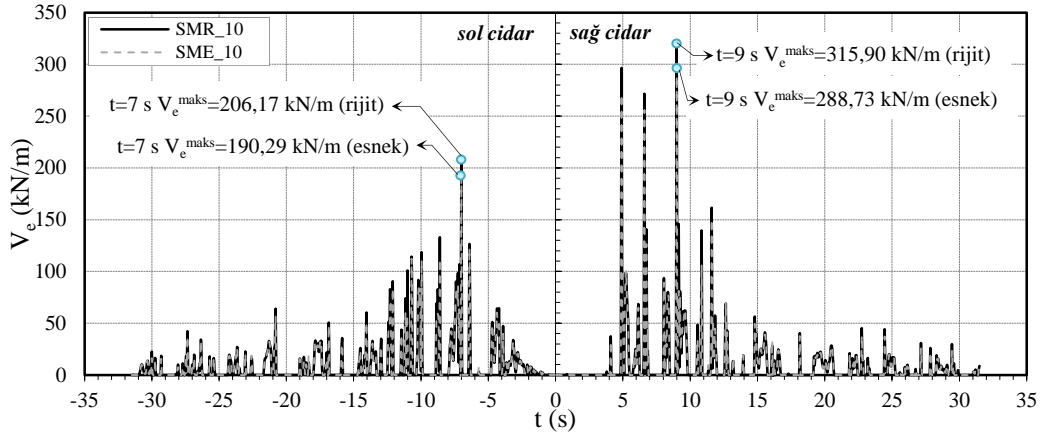
Altı farklı silo için söz konusu en büyük tepkilerin SMR ve SME yaklaşımlarına göre karşılaştırmaları Şekil 3.74’de verilmektedir. Şekil 3.74’den de görüldüğü üzere rijit çözümden beklenildiği gibi artan narinlik oranı ile söz konusu kesme kuvvetleri artış göstermektedir. Esnek çözümden ise 3,0 ve 4,0 narinlik oranı dışında durum böyle olmakla beraber, bu narinlik oranlarında değişen sistem dinamik karakteristiğine bağlı olarak dinamik malzeme basınçlarının yükseklik boyunca dağılımının farklı olması nedeniyle azalmalar meydana gelmektedir. Bu durumda, burada da esnek çözüm eşdeğer taban kesme kuvvetinin artış oranını azaltmış olmaktadır. Herbir narinlik oranı için rijit ve esnek çözümden elde edilen bulgular karşılaştırıldığında H/d<sub>c</sub>=1,0, 1,5, 2,0, 2,5, 3,0 ve 4,0 narinlik oranları için rijit çözüm esnek çözüme göre sol cidarda sırasıyla %8, %25, %41, %34, %119 ve %130; sağ cidarda ise sırasıyla %9, %18, %33, %55, %117 ve %215 daha fazla bir değer vermektedir. Bu değerlerden de anlaşılacağı üzere artan narinlik oranı ile rijit olarak öngörülen silo sistemlerinde, aynı eylemsizlik etkileri için tedrici artan nitelikte ve önemli miktarda ek taban kesme kuvvetinin doğmasına neden olmaktadır.



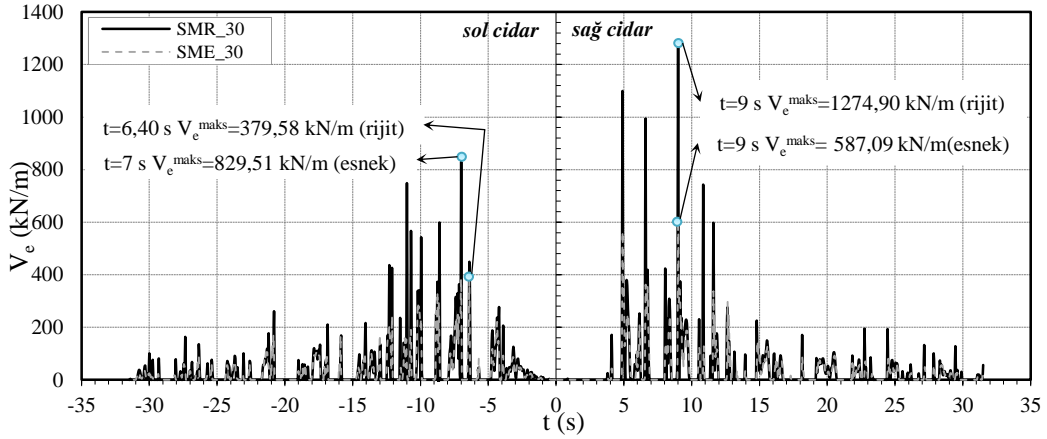
Şekil 3.74. SMR ve SME'ye göre altı farklı silo için rijit ve esnek durumda deprem doğrultusunda karşılıklı cidarlardaki en büyük eşdeğer taban kesme kuvvetleri

Rijit ve esnek çözümde elde edilen eşdeğer taban kesme kuvvetleri zamanla değişimleri açısından incelendiğinde, en büyük değerlerin rijit çözümde ilk beş narinlik oranı için sol cidarda 7.s'de 206~830 kN/m aralığında, H/d<sub>c</sub>=4,0 için ise 11.s'de 1155,5kN/m olarak, sağ cidarda bütün narinlik oranları için 9. s'de 315~1743 kN/m aralığında elde edildiği görülmektedir. Esnek çözümde ise sözkonusu tepkilerin en büyük değerleri sol cidarda ilk dört narinlik oranı için 7.s'de 190~516 kN/m aralığında, H/d<sub>c</sub>=3,0 için 6,40.s'de 379,59kN/m, H/d<sub>c</sub>=4,0 için 7,35.s'de 503,09kN/m olarak, sağ cidarda ise ilk beş narinlik oranı için 9.s'de 288~587 kN/m aralığında, H/d<sub>c</sub>=4,0 için ise 4,9.s'de 552,93kN/m olarak elde edilmektedir. Buradan da anlaşılacağı üzere davranış esnek ve rijit durum için ilk dört narinlik oranında üst üste düşmekte, fark yalnız en büyük tepki

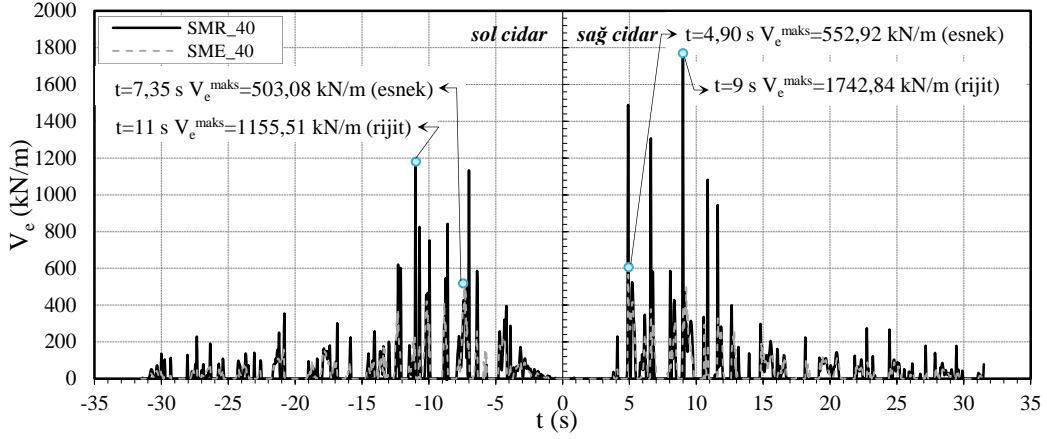
değerleri açısından oluşmaktadır. Bu nedenle, ilk dört narinlik oranını temsilen, burada yalnızca 1,0 narinlik oranı için eşdeğer taban kesme kuvvetinin zamanla değişimi her iki çözüm için karşılaştırmalı olarak Şekil 3.75’de verilmektedir. Rijit ve esnek çözümde davranış 3,0 narinlik oranında kısmen değişiklik göstermeye başlamış olup, bu fark 4,0 narinlik oranı için daha belirgin olmaktadır. 3,0 ve 4,0 narinlik oranları için sözkonusu karşılaştırmalar Şekil 3.76 ve Şekil 3.77’ de verilmektedir.



Şekil 3.75. SMR ve SME’ye göre narinlik oranı 1,0 olan siloda rijit ve esnek durum için eşdeğer taban kesme kuvvetlerinin zamanla değişimi



Şekil 3.76. SMR ve SME’ye göre narinlik oranı 3,0 olan siloda rijit ve esnek durum için eşdeğer taban kesme kuvvetlerinin zamanla değişimi



Şekil 3.77. SMR ve SME'ye göre narinlik oranı 4,0 olan siloda rijit ve esnek durum için eşdeğer taban kesme kuvvetlerinin zamanla değişimi

➤ Eşdeğer Eğilme Momentleri

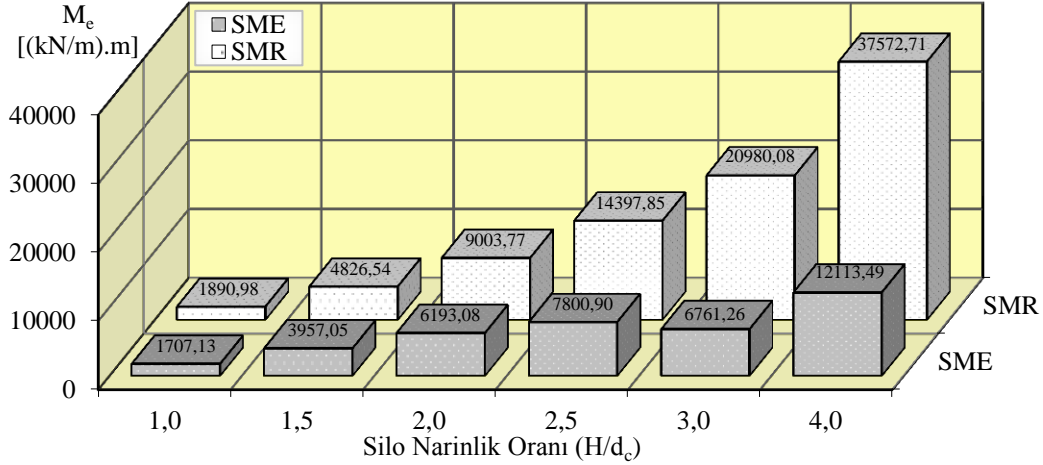
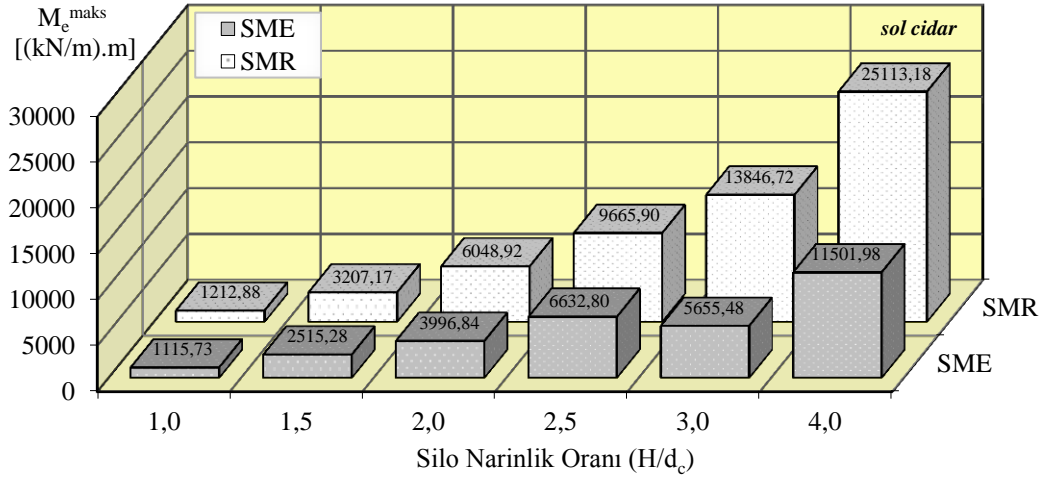
Rijit (SMR) ve esnek (SME) çözümden, önerilen sayısal modele göre deprem doğrultusundaki karşılıklı cidarlarda elde edilen en büyük eşdeğer eğilme momenti değerleri ve bunların gerçekleşme zamanları Çizelge 3.15'de verilmektedir. İlk dört narinlik oranı için rijit ve esnek çözüm aynı davranışı sergilemekte, 3,0 ve 4,0 narinlik oranı için ise davranış farklılaşmaktadır. Buradaki irdelemeler de eşdeğer taban kesme kuvveti için yapılan irdelemelere benzer olacağından, tekrara düşmemek amacıyla, burada da değişimin net olarak görüldüğü Şekil 3.78 verilmektedir.

Çizelge 3.15. SMR ve SME'ye göre altı farklı silo için rijit ve esnek durumda karşılıklı cidarlarda en büyük eşdeğer eğilme momentleri ve gerçekleşme zamanları

Narinlik Oranı (H/d <sub>c</sub> )	En Büyük Eşdeğer Taban Eğilme Momenti, $M_e^{\text{maks}}$ [(kN/m).m]							
	Rijit (SMR)				Esnek (SME)			
	sol cidar		sağ cidar		sol cidar		sağ cidar	
	t (s)	$M_e^{\text{maks}}$	t (s)	$M_e^{\text{maks}}$	t (s)	$M_e^{\text{maks}}$	t (s)	$M_e^{\text{maks}}$
1,0	7,00	1212,88	9,00	1890,98	7,00	1115,73	9,00	1707,13
1,5	7,00	3207,17	9,00	4826,54	7,00	2515,28	9,00	3957,05
2,0	7,00	6048,92	9,00	9003,77	7,00	3996,84	9,00	6193,08
2,5	7,00	9665,90	9,00	14397,85	7,00	6632,80	9,00	7800,90
3,0	7,00	13846,72	9,00	20980,08	8,75	5655,48	4,90	6761,26
4,0	7,00	25113,18	9,00	37572,71	7,35	11501,98	9,25	12113,49

Eşdeğer eğilme momentlerinin rijit ve esnek çözüm için zamanla değişimleri, örnek olması amacıyla, Şekil 3.79 ve 3.80'de sırasıyla 1,0 ve 4,0 narinlik oranları için

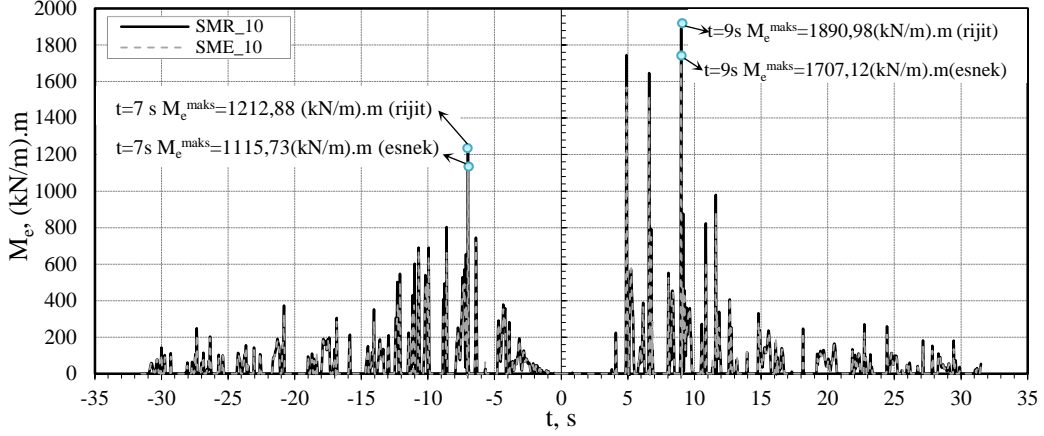
verilmektedir. Eşdeğer eğilme momentine benzer nitelikte artan narinlik oranı ile devirici momentin her iki kabul için ne denli farklı bulgular verebileceği irdelenecek olursa;  $H/d_c=1,0, 1,5, 2,0, 2,5, 3,0$  ve  $4,0$  narinlik oranları için rijit çözüm esnek çözüme göre sol cidarda sırasıyla %9, %28, %51, %46,%145 ve %118; sağ cidarda ise sırasıyla %11, %22, %45, %85, %210 ve %210 daha fazla bir değer vermektedir.



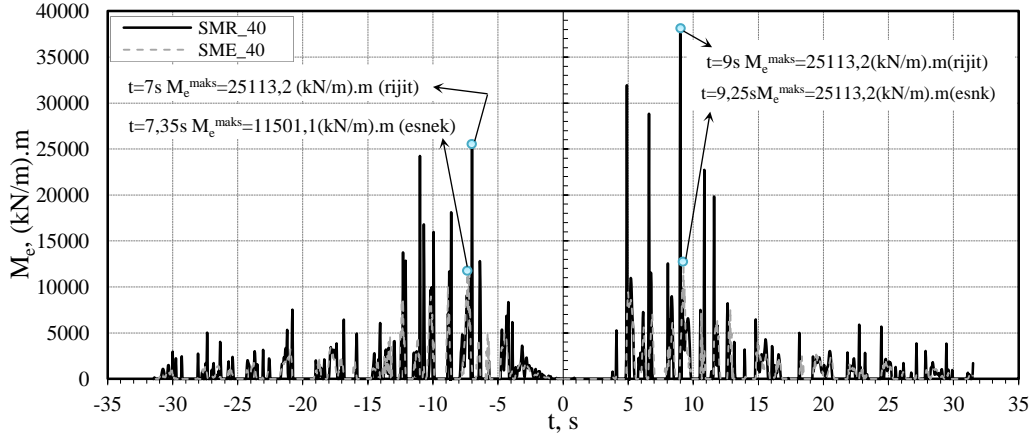
Şekil 3.78. Altı farklı narinlik oranı için SME ve SMR'ye göre deprem doğrultusunda karşılıklı cidarlardaki en büyük eşdeğer eğilme momentleri

Karşılaştırmaya konu edilen bu değerlerden de anlaşılabilceği üzere, artan narinlik oranı ile rijit olarak öngörülen silo sistemlerinde, aynı eylemsizlik etkileri için tedrici artan nitelikte ve önemli miktarda farklar oluşabildiği görülmektedir. Buna ek olarak, oransal değişimler açısından eşdeğer taban kesme kuvvetleri ile oldukça benzer oranda farklılıkların meydana gelmesi, esnek ve rijit kabulde elde edilen değişimlerin geometrik

merkezleri açısından da önemli bir farklılığının olmadığına işaret etmektedir. Bu benzerlik diğer tüm narinlik oranları için var olduğundan aşağıda yalnızca 1,0 ve davranışın farklılaşmaya başladığı 4,0 narinlik oranları için elde edilen değişimler karşılaştırmalı olarak verilmektedir (Şekil 3.79 ve 3.80).



Şekil 3.79. Narinlik oranı 1,0 olan silo için SMR ve SME'ye göre rijit ve esnek durum için eşdeğer eğilme momentlerinin zamanla değişimi



Şekil 3.80. Narinlik oranı 4,0 olan silo için SMR ve SME'ye göre rijit ve esnek durum için eşdeğer eğilme momentlerinin zamanla değişimi

### 3.3. Silo Narinlik Oranının Yapı Davranışı Üzerindeki Etkisi

Benzer birçok yapı sisteminde olduğu gibi, silo sistemlerinin deprem davranışları üzerinde de narinlik ya da bir diğer ifadeyle yükseklik/çap oranının önemli derecede etkisinin olabileceği bilinmektedir. Silo türü yapıların muhafaza ettikleri malzemelerin, silo geometrisine bağlı olarak etkileşimlerinin bu orana göre önemli davranış farklılıkları



gösterebildiği daha önce de ilgili başlıklarda ifade edildiği gibi, burada yapılan irdelemelerden de görülmektedir. Bu nedenle, teknik literatürde siloların narin (derin) ve bodur (sığ, geniş, bunker) olmak üzere başlıca iki sınıfta incelenmesini de (bkz Çizelge 1.2) göz önüne alarak, incelemeye konu edilen silo sistemleri için narinlik oranı ile sismik davranış üzerindeki karşılaştırmalar bu başlıkta verilmektedir. Seçilen geniş narinlik oranı aralığı ile 6 farklı narinlik oranı için çözümler gerçekleştirilmiştir.

Genel anlamda narinliğin stok malzemesinin davranışını etkilediği gibi cidarın hakim modlarını etkilediği de rahatlıkla söylenebilmektedir. Bu davranışın silo hücresinin geometrisinden, stok malzemesinin ve cidarın mekanik özelliklerinden kaynaklandığı da açıktır. Bu nedenle etkileşime ek olarak, silo cidarlarındaki malzeme basınçları ve silo tabanındaki etkiler narinliğe bağlı olarak da önemli değişimler gösterebilmektedir. Diğer taraftan, buraya kadar yapılan irdelemelerden ve teknik literatürde benzer sistemler üzerinde yapılan karşılaştırmalardan da anlaşılabilir üzere narinlik sınıflandırması da kendi içerisinde bodur ve narin ayırımına ek olarak bir takım diğer ayrımlara da tabi tutulabilmektedir. Bu bağlamda Eurocode dört sınıf silo narinlik oranı tanımlamaktadır. Bu sınıflandırmaya ilişkin ayrımlar daha önce verilmişti (bkz Çizelge 1.2)

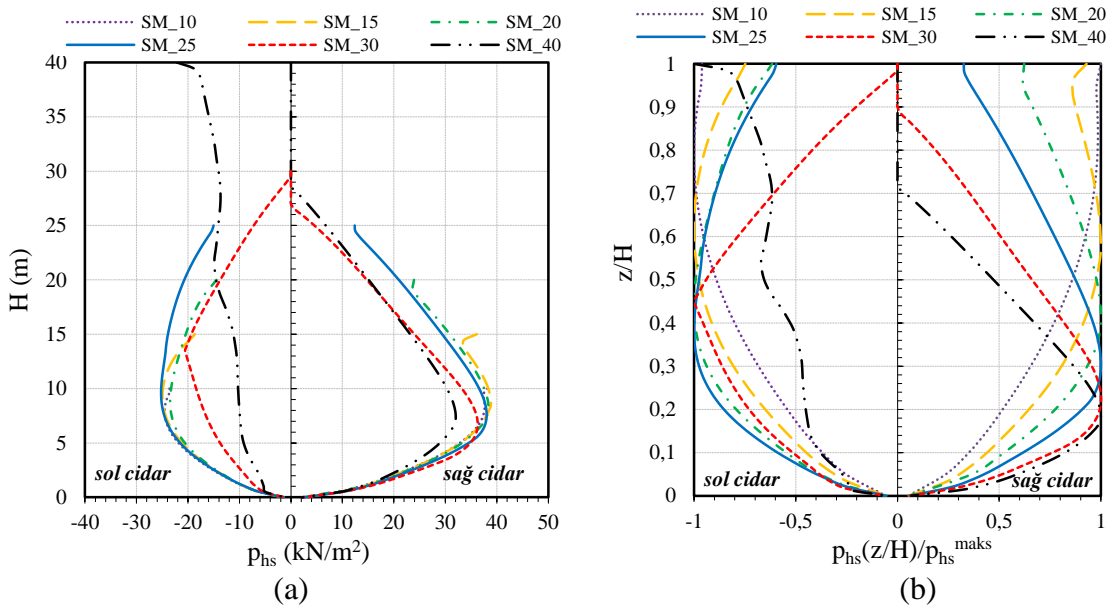
Bu başlık altında gerçekleştirilen çözümlerden elde edilen bulguların narinlik oranına bağlı olarak irdelenmeleri verilmektedir. Bu amaçla takip eden başlıklarda silo narinlik oranının silo sismik davranışına etkisi dinamik malzeme basınçları ve yatay yerdeğiştirmeler açısından karşılaştırmalı olarak irdelenmektedir.

### **3.3.1. Dinamik Malzeme Basınçlarının Silo Narinlik Oranı Açısından Değerlendirilmesi**

Bu çalışmada farklı bakış açıları kullanılarak birçok yöntem önerilmektedir. Bunlar özetle, tekrar hatırlanacak olursa, önerilen sayısal model (SM), önerilen analitik model (ÖM), Veletsos-Younan yaklaşımı (VY), ve Eurocode (EC) yaklaşımı ana başlıklarında toplanabilmektedir. Narinlik gibi bir parametreyi tüm bu yöntemlerle ayrı ayrı değerlendirmek hemen hemen benzer irdelemelerin tekrarlanması ve/veya bazı yöntemlerdeki kusurlar nedeniyle hatalı bulguları değerlendirme anlamına geleceğinden, burada özetle SM yaklaşımı ile elde edilen modeller yardımıyla karşılaştırmalar irdelenmektedir. Bu amaçla söz konusu modellerin herbiri için dinamik malzeme

basınçlarının yükseklik boyunca dağılımı, altı farklı narinlik oranına göre karşılaştırmalı olarak Şekil 3.81’de verilmektedir.

Şekilden de görülebileceği gibi, burada iki temel karşılaştırma verilmektedir. Bunlardan Şekil 3.81(a)’da farklı narinlik oranları için elde edilen bulguların yükseklik boyunca değişimleri görülürken, Şekil 3.81(b)’de her bir silo sistemi için normalleştirilmiş yükseklikle normalleştirilmiş dinamik malzeme basınçları için karşılaştırmalar görülmektedir.



Şekil 3.81. Altı farklı narinlik oranı için SM’ye göre deprem doğrultusunda karşılıklı cidarlarda yükseklik boyunca dinamik malzeme basınçlarının (a)normal ve (b)boyutsuz koordinatlarda karşılaştırılması

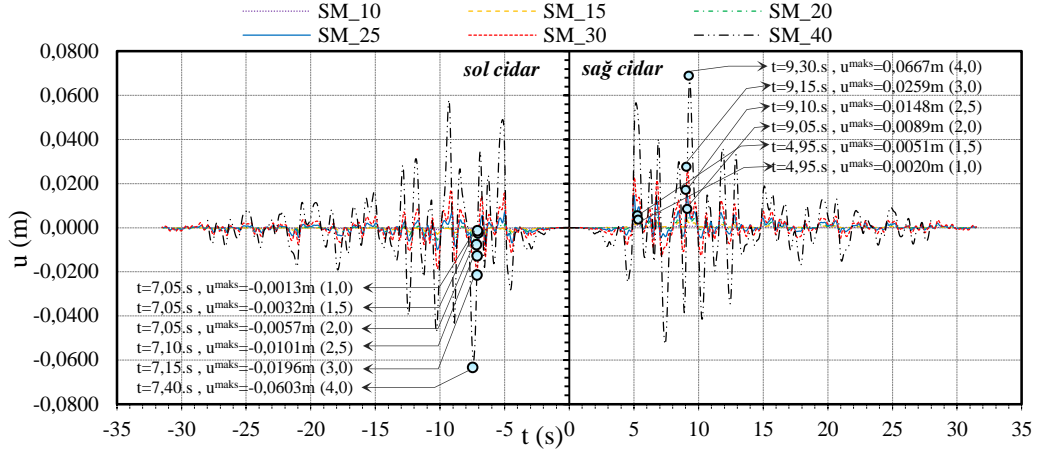
Söz konusu irdeleme daha önce de ifade edildiği gibi, stok malzemesi ile cidar arasındaki temas probleminin dikkate alındığı SM yaklaşımı üzerinden yapıldığından, stok malzemesinin cidardan ayrılmasına izin veren bakış açısı her iki cidarda da dikkate alınan yükleme için oluşan farklı basınç dağılımları hakkında fikir verebilmektedir. Hakim modların etkisi ile bu ayrılmaların artan narinlikle, belirli bir silo yüksekliğinde basıncın sıfırlanmasına da neden olduğu yine bu bulgulardan görülmektedir. Bu karşılaştırmadan deprem esnasında cidarda en büyük kesme kuvvetinin oluştuğu saniyedeki basınç dağılımı için davranışın sağ ve sol cidarda ilk dört narinlik oranında ( $H/d_c=1,0, 1,5, 2,0, 2,5$ ) benzer nitelikte olduğunu ve bu benzerliğin karşılıklı cidarlar için de geçerli olduğunu görmek mümkündür. 3,0 ve 4,0 gibi narinlik oranlarında ise esnekliğin artması ile meydana gelen

görelî olarak büyük yerdeğiştirmelerden dolayı cidarın stok malzemesi davranışına etkisi artmakta ve özellikle 4,0 gibi önemli ölçüde büyük bir narinlik oranında stok malzemesinin kendi içerisinde de davranışının değiştiği anlaşılmaktadır. Artan narinlik oranı ile artan yerdeğiştirmelerden dolayı stok malzemesinin kayma rijitliği azalarak tabana iletilen eylemsizlik kuvvetleri artmaktadır. Bu durum da sözkonusu tepkilerin pik değerlerinin artan narinlik oranları ile genel olarak tabana yakın seviyelerde oluşmasına neden olabilmektedir. Diğer taraftan narinlik oranındaki büyük artışlar, stok malzemesi ile cidarın birbirinden oldukça farklı hakim modlarının ortaya çıkmasına neden olabilmekte, bu durum malzeme basınçlarının yükseklik boyunca değişimlerini önemli ölçüde etkileyebilmektedir.

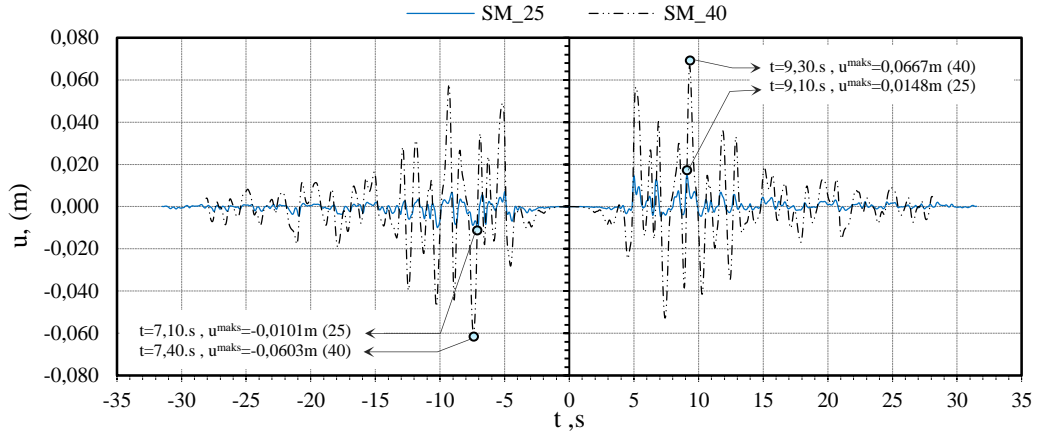
şekil 3.81(b)'de verilen boyutsuzlaştırılmış koordinatlarda dinamik malzeme basınçlarının farklı narinlik oranları için yükseklik boyunca dağılımından, artan narinlik oranı ile en büyük dinamik malzeme basıncının tabandan itibaren gerçekleşme yüksekliğinin ( $H_0$ ) de değiştiği görülmektedir. Diğer bir ifadeyle artan narinlik ile birlikte, söz konusu basınçların bileşkesinin tabandan itibaren konumu da değişmektedir.

### **3.3.2. Yatay Yerdeğiştirmelerin Silo Narinlik Oranı Açışından Değerlendirilmesi**

Silo narinlik oranının yatay yerdeğiştirme tepkileri üzerindeki etkileri, sayısal model bulguları açışından bu başlıkta karşılaştırmalı olarak irdelenmektedir. Dikkate alınan tüm narinlik oranları için elde edilen tepkilerin zamanla değişimleri şekil 3.82'de verilmektedir. Buradan da anlaşılabileceği gibi bodur silolar için oldukça küçük yerdeğiştirme tepkileri elde edilmektedir. Bu nedenle farkın daha iyi anlaşılması için şekil 3.83'de 2,5 ve 4,0 narinlik oranları için bu karşılaştırmalar ayrı olarak verilmektedir. Buradan, narin silo sınıfı içerisinde yer alan bu silo sistemleri arasında tepkide davranış olarak önemli bir farklılık meydana gelmemiş olmasına karşın, en büyük tepkilerin şiddetleri açışından büyük farklılıklar meydana geldiği anlaşılabilmektedir.



Şekil 3.82. Altı farklı narinlik oranı için SM'ye göre yatay yerdeğiştirmelerin zamanla değişimi



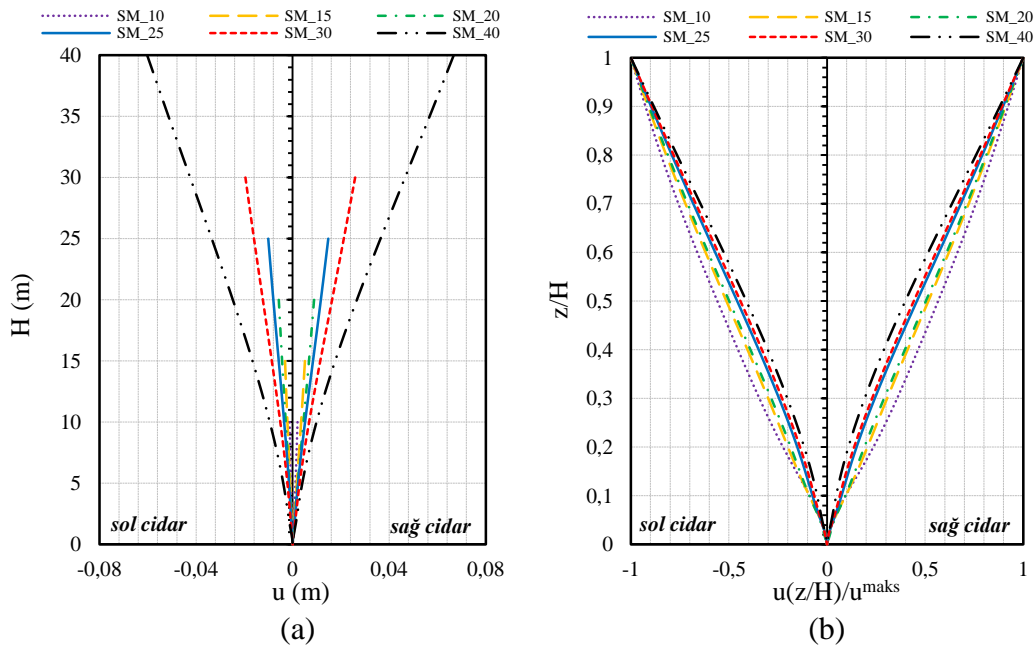
Şekil 3.83. 2,5 ve 4,0 narinlik oranları için SM'ye göre yatay yerdeğiştirmelerin zamanla değişimi

Şekil 3.84(a)'da farklı narinlik oranları için verilen yatay yerdeğiştirme tepkilerinin en büyük değerlerinin yükseklikle değişimleri, Şekil 3.84(b)'de ise normalleştirilmiş yükseklik boyunca aynı tepkilerin karşılaştırılması verilmektedir. Şekil 3.84(a)'dan gsterilebileceği gibi artan narinlik oranı ile yerdeğiştirme tepkileri önemli ölçüde artmaktadır. Bununla birlikte burada asıl irdelenmesi gereken durum, bodur silolarda elde edilen yükseklikle yer değiştirme tepkisi değişimlerinin konsol davranışından uzak ve rijit bir davranış gsterdiğidir. Diğer taraftan silo, narinlik oranının artması ile konsol kiriş davranışına benzer bir davranış sergilemektedir.

Yatay yerdeğiştirmelerin her durumda sağ cidarda daha büyük tepki vermiş olmaları yapısal herhangi bir ögeye bağlı değildir. Buradan anlaşılması gereken nokta, yük ile yapı

ve stok malzemesi dinamik özellikleri arasındaki ilişkidir ki bu durum birçok irdelirmede sağ cidarda daha büyük tepkilerin elde edilmesi sonucunu doğurmuştur. Burada ifade edilmesi gereken bir diğer önemli konu ise davranışın özellikle  $H/d_c=2,0$ 'den sonra değişmekte olduğudur ki, bu da teknik literatürde bodur silolar ile narin silolar arasındaki sınırı işaret etmektedir. Bu noktadan sonra konsol davranışı ortaya çıkmakta ve bu davranış artan narinlikle daha belirgin bir şekilde gözlemlenebilmektedir (Şekil 3.84(b)).

Yatay yerdeğiştirmeler zamanla değişimleri açısından irdelendiğinde de, 1,0 ve 1,5 narinlik oranlarında karşılıklı cidarların deprem süresince ters yönlere yerdeğiştirme yaptığı; 2,0 narinlik oranından sonra ise deprem esnasında her iki yönde de yerdeğiştirmeler olduğu görülebilmektedir. Dolayısıyla bu orandan sonra davranışın konsol davranışına geçmeye başladığı ifade edilebilmektedir.



Şekil 3.84. Altı farklı narinlik oranı için SM'ye göre deprem doğrultusundaki karşılıklı cidarlarda yükseklik boyunca yatay yerdeğiştirmelerin (a) normal (b) boyutsuz koordinatlarda karşılaştırılması

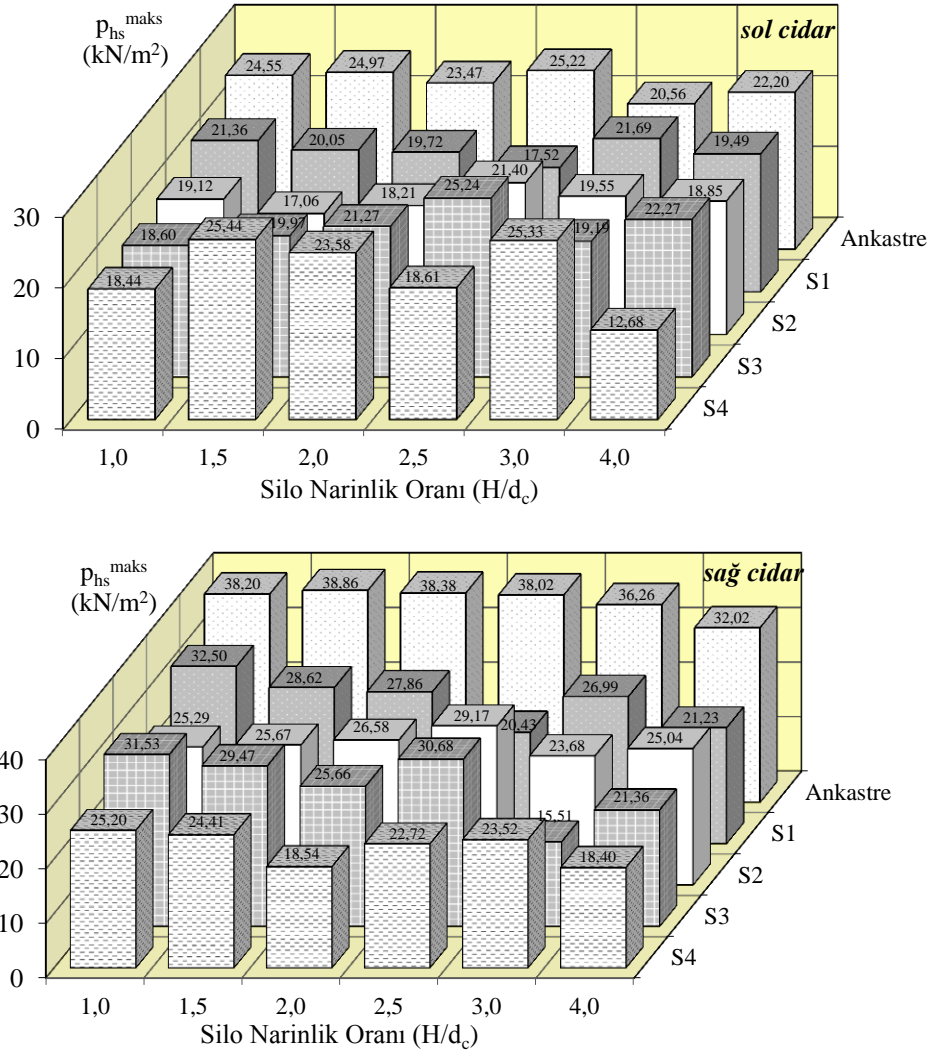
### 3.4. Silo-Temel/Zemin Etkileşiminin Yapı Davranışı Üzerindeki Etkisi

Siloların sismik davranışlarının belirlenebilmesi, stok malzemesi özellikleri, stok malzemesi-silo cidarı arasındaki temas durumu değişkenliği ve tam dolu bir silonun kütesinin neden olabileceği ihmal edilemez seviyedeki yapı-zemin etkileşimi gibi birçok

etkinin birlikte dikkate alınmasını gerektiren karmaşık bir probleme neden olmaktadır. Ancak, yapı sistemlerinin hesabında geleneksel olarak yapı-temel sisteminin zemine ankastre olarak dikkate alındığı da bir gerçektir. Fakat zeminin düşük dayanımlı olması veya zeminin esnekliğinin artması, temel sisteminin yeterince rijit olmaması ya da geometrik olarak çok büyük olması gibi koşullar kabul edilen bu ankastre davranışın sistem davranışını temsil etmekten uzaklaşmasına neden olmaktadır. Bu gibi koşullarda temel-zemin sisteminin yapıya olan etkisinin dikkate alınması durumunda, yapı sisteminin ankastre olarak zemine oturduğu duruma göre, elde edilen iç kuvvet ve yerdeğiştirme değerlerinden oldukça farklı değerler elde edilebilmektedir. Bu durumda incelemeye konu edilen silolar için yapı-zemin etkileşimi dikkate alınması gereken önemli parametrelerden biri olarak ortaya çıkmaktadır. Aşağıda bu parametrenin önerilen sayısal modele göre dinamik malzeme basınçları ve yatay yerdeğiştirmeler üzerindeki etkileri, ankastre durum ve dört farklı zemin sistemi için altı farklı narinlik oranına göre incelenerek bulgular irdelenmektedir.

#### **3.4.1. Silo-Temel/Zemin Etkileşiminin Dinamik Malzeme Basınçları Üzerindeki Etkisi**

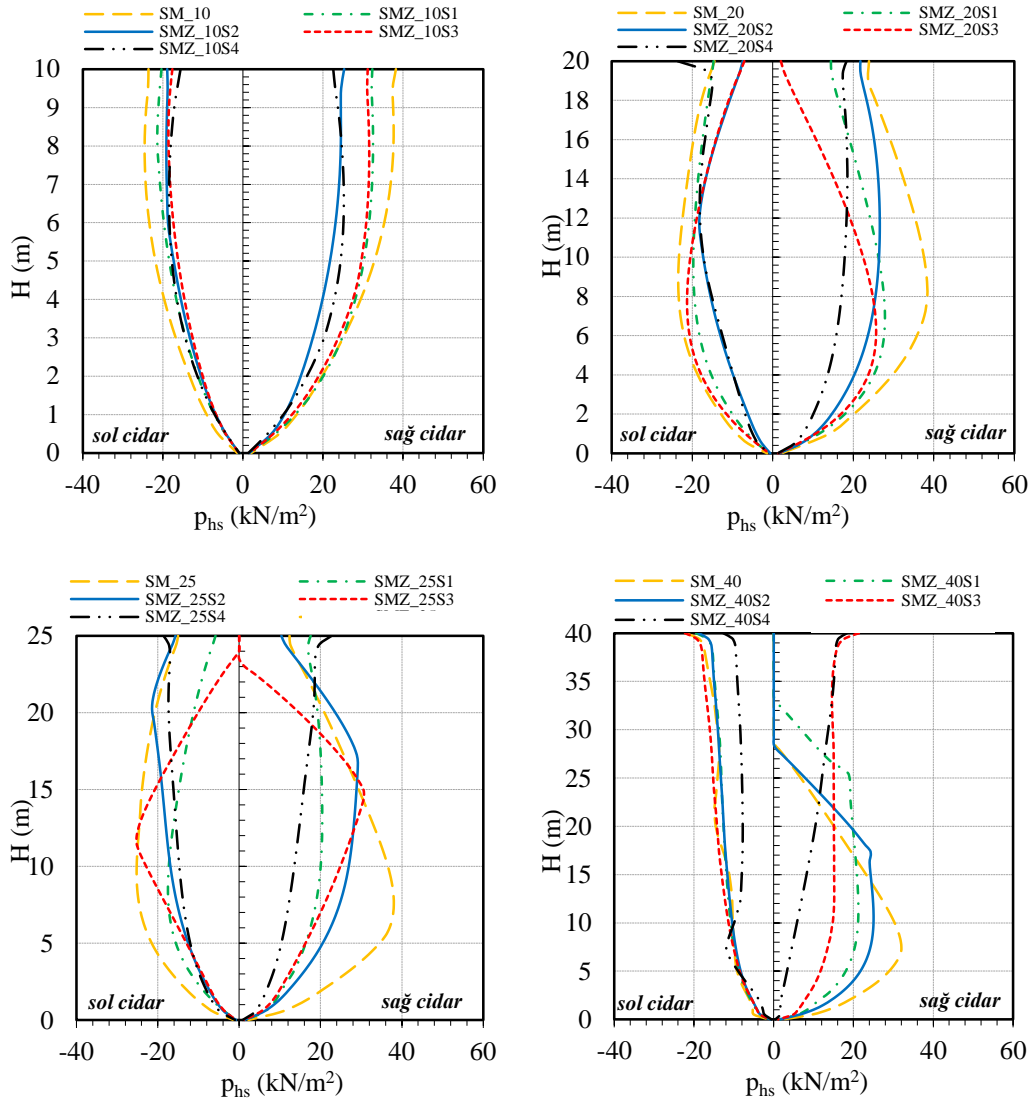
Altı farklı narinlik oranına sahip siloda ankastre durum ve dört farklı zemin sistemi için deprem doğrultusunda karşılıklı cidarlarda elde edilen en büyük dinamik malzeme basınçları Şekil 3.85’de verilmektedir. İncelemeye konu edilen 6 farklı narinlik oranı ile bunların her birinin 4 farklı zemin üzerinde ve ankastre kabul ile gerçekleştirilen çözümlerinin bulguları bu şekil yardımıyla karşılaştırmalı olarak irdelenebilmektedir. Bu durumda en büyük dinamik malzeme basınçlarının 30 farklı sistem ve 2 temel parametreye göre elde edilmiş değişimleri bu başlıkta yalnızca zemin etkileşimi açısından irdelenmektedir (Şekil 3.85 ve 3.86).



Şekil 3.85. Altı farklı narinlik oranı için SM ve SMZ'ye göre ankastre durum ve dört farklı zemin sınıfı için deprem doğrultusunda karşılıklı cidarlardaki en büyük dinamik malzeme basınçları

Sol ve sağ cidar için ayrı ayrı grafikleştirilen bu değişimlerden, zemin etkileşiminin dikkate alınması durumunda, en büyük dinamik malzeme basınçlarının azalan zemin rijitliği ile özellikle sağ cidarda net bir şekilde azalma eğiliminde olduğu açıkça gözlemlenebilmektedir. Narinlik oranının yüksek olduğu sistemlerde bu azalmanın daha büyük oranlarda gerçekleştiği, azalan narinlik oranları ile birlikte etkileşime bağlı oransal değişimde azalma eğilimi gösterdiği görülebilmektedir. Söz konusu etkinin, azalan temel/zemin sistemi ötelenme ve dönme (rocking) rijitliğinin sistem genel rijitliğini azalttığı ve bu yolla da narinlikle birlikte hali hazırda ortaya çıkmış bulunan dinamik malzeme basınçlarındaki azalmaların daha da büyümesine neden olduğu açıkça ifade

edilebilmektedir. Oransal olarak yapılacak karşılaştırmalardan zemin etkileşimine bağlı olarak dinamik malzeme basınçlarının ne derecede azalabileceği de anlaşılabilir. Bu durumda, sol cidarda 1,0 narinlik oranı için S4 zemin sisteminde elde edilen dinamik malzeme basınçları ankastre çözüme göre %25 azalma gösterirken, 4,0 narinlik oranı için bu oran %43 olarak gerçekleşmektedir. Aynı oranlar sağ cidar için değerlendirildiğinde ise sırasıyla %35 ve %43 olarak elde edilmektedir.



Şekil 3.86. SM ve SMZ'ye göre ankastre durum ve dört farklı zemin sınıfı için deprem doğrultusunda karşılıklı cidarlarda yükseklik boyunca dinamik malzeme basınçlarının değişimleri

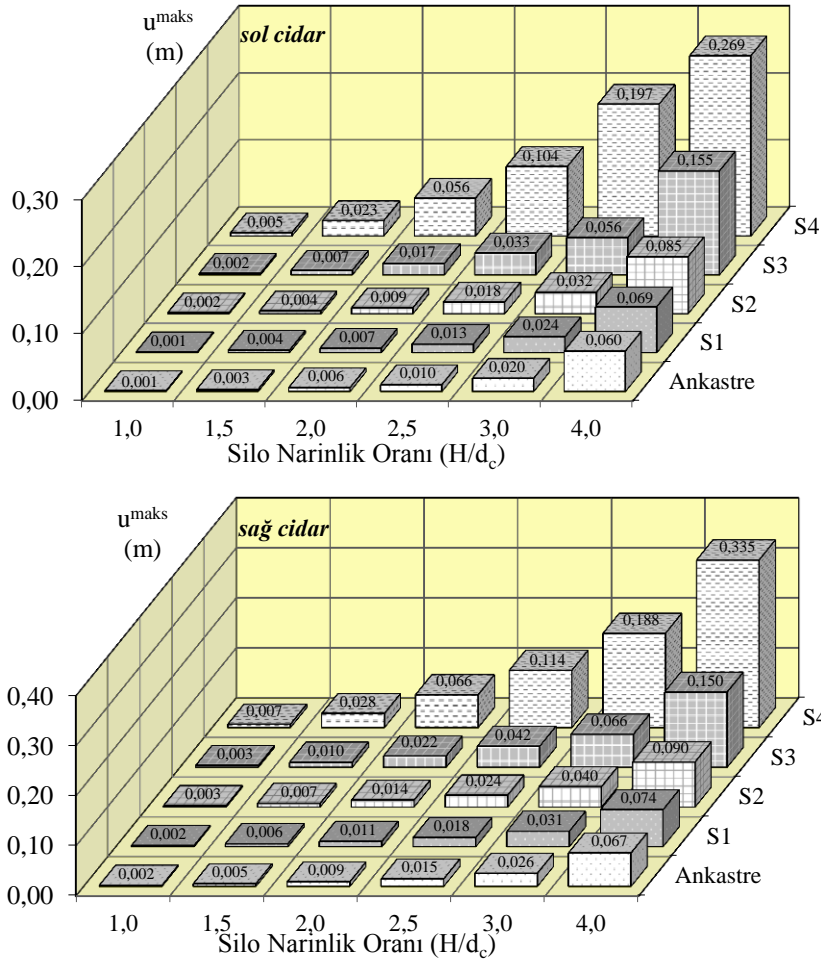


Dinamik davranışı, elbette yalnızca bir parametreye bağlı olarak değerlendirmek ve tüm davranışı bu parametrenin kontrol ettiği savıyla açıklamaya çalışmak doğru olmayacaktır. Tüm bu çözümlerden eğilim net bir şekilde görünüyor olmasına karşın, bazı sistemlerin (örneğin SMZ\_30S3) eğilimi bozan davranış sergilemeleri gayet doğaldır. Zira zemin etkileşimi tüm sistemin ötelenme ve dönme rijitliğinde önemli azalmalara neden olabilmekte, hakim periyotlarını uzatabilmekte, dolayısıyla da dikkate alınan yük ile olan ilişkisini değiştirebilmektedir. Buradan hareketle, eğilimi bozan örneklerin bulgularını bu şekilde değerlendirmek uygun olacaktır.

Dinamik malzeme basınçlarının yükseklik boyunca dağılımlarının verildiği Şekil 3.86'dan da görülebileceği üzere, ankastre çözümden elde edilen dağılımlar, örnek olarak verilen 4 farklı sistemde de en büyük dağılımı temsilen, en dıştaki çizgiler ile tanımlanmaktadır. Narinlik ile silo dinamik malzeme basınçlarının farklı nitelikte davranışlar sergileyebildikleri daha önceki başlıklarda ifade edilmişti. Burada 4 farklı grafik için de değişimdeki farklılıkları bu şekilde değerlendirmek gerekmektedir. Diğer taraftan, azalan temel/zemin sistemi rijitliğine bağlı olarak dinamik malzeme basınçlarının da yükseklik boyunca azalma gösterdiği bu şekillerden açıkça görülebilmektedir.

#### **3.4.2. Silo-Temel/Zemin Etkileşiminin Yatay Yerdeğiştirme Tepkisi Üzerindeki Etkisi**

Bütün modeller dikkate alınarak gömülmenin olmadığı durumda 4 farklı zemin sistemi için hesaplanan yatay yerdeğiştirmelerin zemin sistemine ve modellere bağlı olarak en büyük değerlerinin değişimleri Şekil 3.87'de, bunların silo yüksekliği boyunca değişimleri ise Şekil 3.88'de verilmektedir. Söz konusu şekillerden de görülebileceği gibi zemin etkileşimine bağlı olarak bütün modellerde azalan temel/zemin sistemi rijitliğine bağlı olarak yatay yerdeğiştirmelerde önemli artışlar gerçekleşmektedir. Bu artışların incelenen sistemler için sol ve sağ cidarda aynı nitelikte gerçekleştiği karşılaştırmalardan net bir şekilde anlaşılmaktadır. İnceleme konusu diğer tepki parametrelerinden farklı olarak burada eğilimi bozan hiç bir bulgunun bulunmaması, zemin etkileşiminin en önemli ve baskın parametre olmasından kaynaklanmaktadır. Bu nedenle cidar yerdeğiştirmesinde diğer ikincil etkiler görülememektedir.

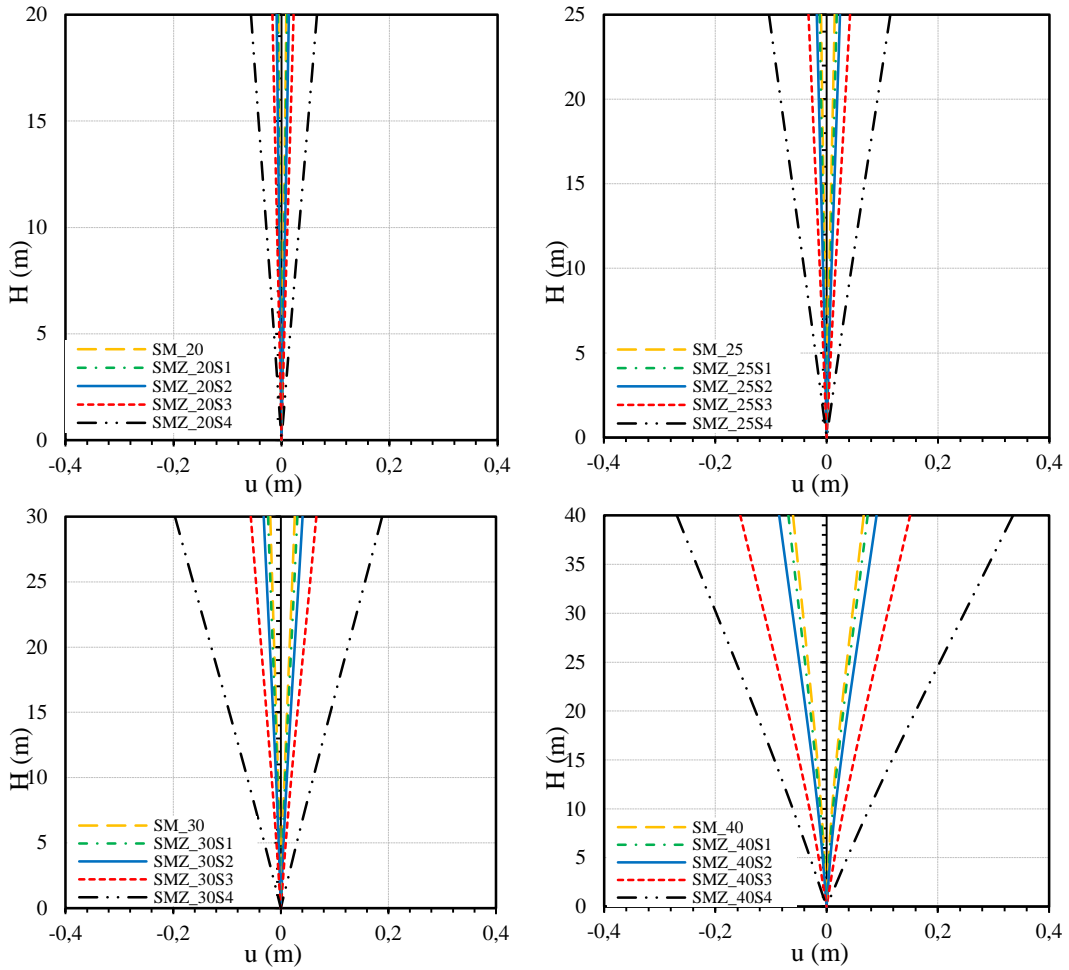


Şekil 3.87. Altı narinlik oranı için SM ve SMZ'ye göre ankastre durum ve dört farklı zemin sınıfı için deprem doğrultusunda karşılıklı cidarlardaki en büyük yatay yerdeğıştirmeler

Oransal olarak yapılacak karşılaştırmalardan zemin etkileşimine bağlı olarak yerdeğıştirmelerin ne derecede artabileceği de anlaşılabilir. Bu durumda sol cidarda 1,0 narinlik oranına sahip siloda S4 zemin sistemi için elde edilen yatay yerdeğıştirmeler ankastre çözüme göre %400 artma gösterirken, 4,0 narinlik oranı için bu oranın %348 olarak gerçekleşebildiği görülmektedir. Aynı oranlar sağ cidar için değerlendirildiğinde ise sırasıyla %250 ve %400 olarak gerçekleşmektedir. Bu oransal değışimler göz önüne alındığında, zemin etkileşimi nedeniyle azalma eğiliminde olan iç kuvvet etkilerinin, yer değıştirme etkilerinde neden oldukları çok önemli miktardaki artımları ayrı ayrı değerlendirmek gerekliliği ortaya çıkmaktadır. Böyle olmakla birlikte, söz konusu yapıların tasarımlarının değerlendirilmesinde bir taraftan olumlu sayılabilecek etkiler meydana gelirken diğer taraftan izin verilebilir yerdeğıştirme sınırları rahatlıkla

geçilebilmekte ve yapı sistemi üzerinde ikinci mertebeye etkileri rahatlıkla ortaya çıkabilmektedir. Bu durumda etkileşimin yerdeğiştirme tepkileri açısından titizlikle değerlendirilmesi gerekliliği ortaya çıkmaktadır ki yukarıda ifade edilen oranlar çok önemli mertebelere işaret etmektedir.

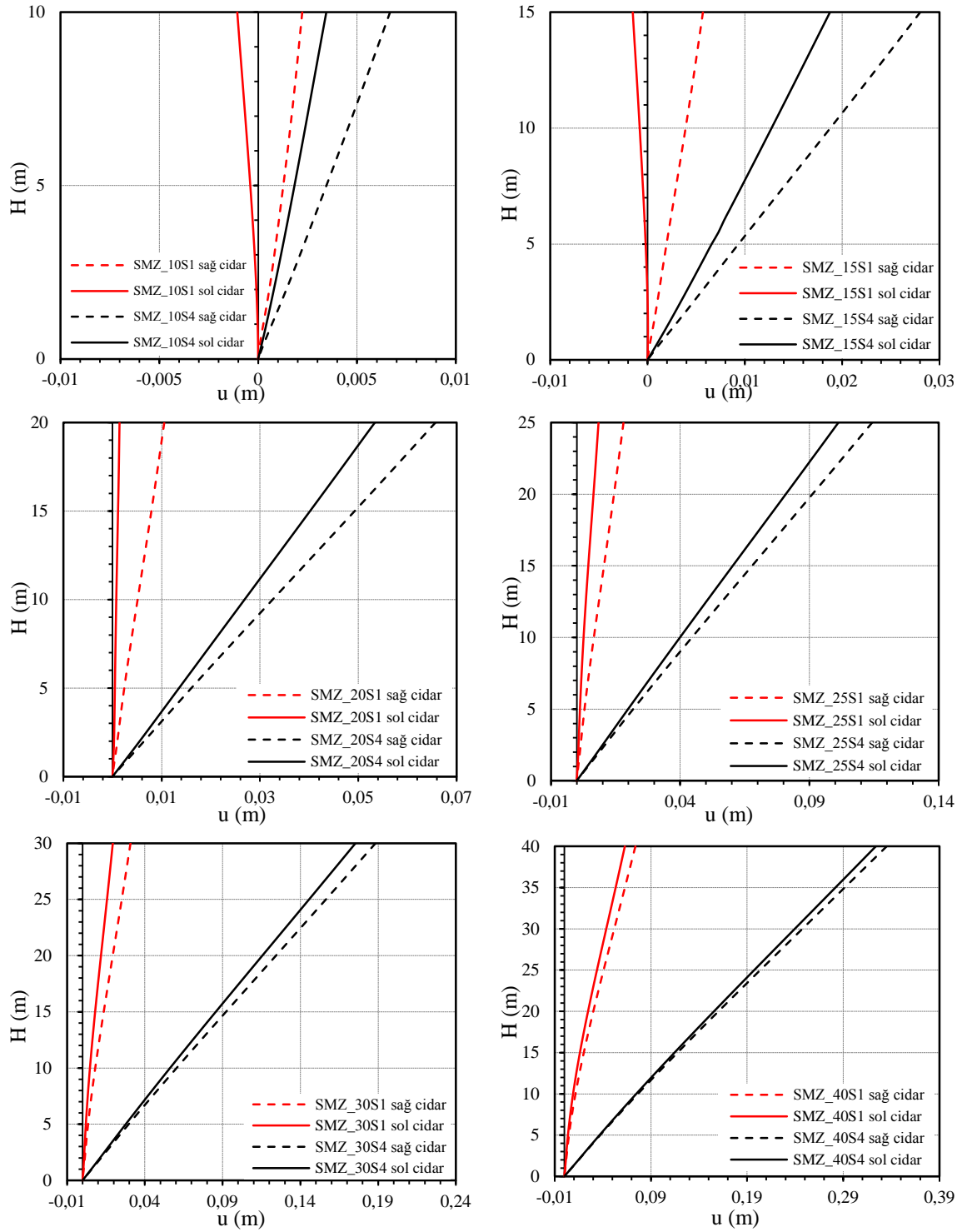
Yerdeğiştirmelerin yükseklik boyunca değişimleri iki farklı karşılaştırma için Şekil 3.88 ve Şekil 3.89’da verilmektedir. Şekil 3.88 verilen tüm karşılaştırmalar için yatay ekseninde bilinçli olarak en büyük ve en küçük değerler ortak alınmıştır. Diğer taraftan dikey eksenin solunda olan değerler deprem doğrultusu için sol cidarda, silo merkezinden sol cidara doğru olan yönde elde edilen değerleri, merkeze göre sağ tarafta verilenler ise benzer şekilde, sağ cidardaki ve bu yöndeki en büyük yerdeğiştirmenin gerçekleştiği zamanlardaki yükseklik boyunca değişimleri temsil etmektedirler.



Şekil 3.88. Altı narinlik oranı için SM ve SMZ’ye göre ankastre durum ve dört farklı zemin sınıfı için deprem doğrultusunda karşılıklı cidarlarda yükseklik boyunca yatay yerdeğiştirmeler

Bu karşılaştırmalardan da görülebileceği üzere, silolarda narinlik oranının düşük olduğu sistemlerde elde edilen yerdeğiştirme miktarları oldukça küçük değerler almaktadır. Bu yolla grafikler karşılaştırılacak olursa 30 m ve 40 m yüksekliğindeki silolar için elde edilen yatay yerdeğiştirmelerin göreceli olarak oldukça yüksek değerler aldığı görülmektedir. Genel anlamda teknik literatürde verilen birim boydaki yatay yerdeğiştirme değerleri elde edilecek olursa narinlik oranına bağlı olarak yapı-zemin etkileşiminin yatay yerdeğiştirmeler üzerinde ne denli etkin olduğu daha iyi anlaşılacaktır. Örneğin S4 zemin sistemi için 40 m lik siloda elde edilen değer  $(0,335/40)$  0,0084 iken, S4 için 10 m lik siloda bu değer 0,0007 olarak elde edilmektedir. Buradan da görülebileceği gibi iki karşılaştırma arasında 12 kat fark bulunmaktadır. Diğer taraftan bu değer diğer silo sistemlerinde ise sırasıyla, 0,0018, 0,0033, 0,0046 ve en son olarak 30 m'lik silo için ise 0,0063 olarak elde edilmektedir. Buradan da anlaşılabilir olduğu üzere artan silo yüksekliği ile birim boydaki yatay yerdeğiştirme oranı (drift) önemli miktarda artış göstermektedir.

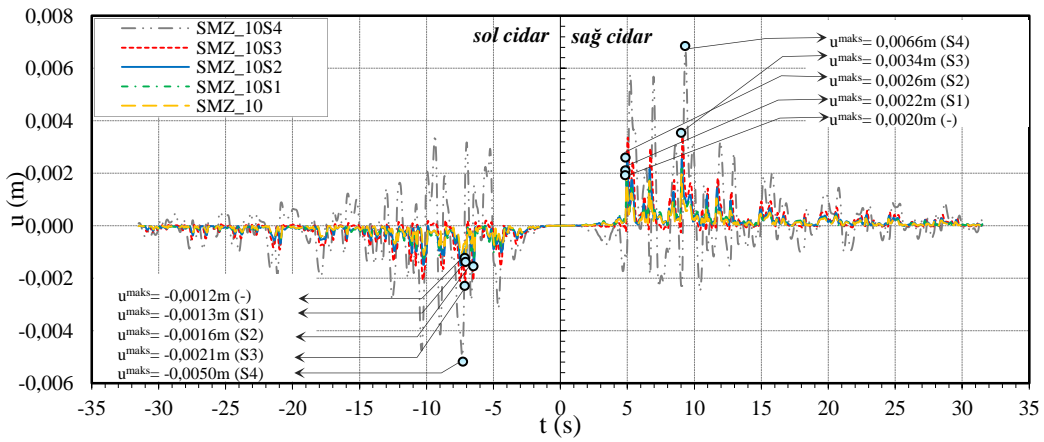
Yukarıda verilen karşılaştırmalardan farklı olarak Şekil 3.89'da sağ cidarda en büyük yerdeğiştirmenin gerçekleştiği zamanda, her iki cidardaki yerdeğiştirmeler, S1 ve S4 temel/zemin sistemleri için karşılaştırmalı olarak verilmektedir. Burada verilen karşılaştırmalardan da görülebileceği üzere, S1 zemin sisteminde meydana gelen yatay yerdeğiştirmeler ile S4 için elde edilenler bodur ve narin silo sistemleri için oldukça farklı niteliktedirler. Şekil 3.89'da 10 m ve 15m için verilen değişimler irdelendiğinde S1 zemin sisteminde sağ cidarda yatay yerdeğiştirmeler cidarın dış normal doğrultusunda meydana gelirken sol cidarda ise bu istikamette yerdeğiştirme meydana gelmemektedir. Artan silo yüksekliği ile bu davranışın değiştiği ve silonun konsol davranışına benzer bir davranış sergileyerek her iki cidarın da aynı yönde yerdeğiştirdikleri görülmektedir. Bu davranışın temelde silo sisteminin hakim modlarından kaynaklandığı anlaşılmaktadır. Bodur silolarda meydana gelen davranış genelde silindirik hacmin kendi içerisinde çiçek benzeri ya da her iki cidarın da normalleri doğrultusunda dışa yada içe hareket ettiği modların baskın gelmesinden kaynaklanmaktadır. Oysaki bu durum, artan narinlik oranıyla değişmekte ve konsol moduna dönüşmektedir. Buraya kadar narinlik oranı ile ilgili ifade edilen sınırlar burada yapılan bu irdelemede de net bir şekilde ortaya çıkmaktadır.



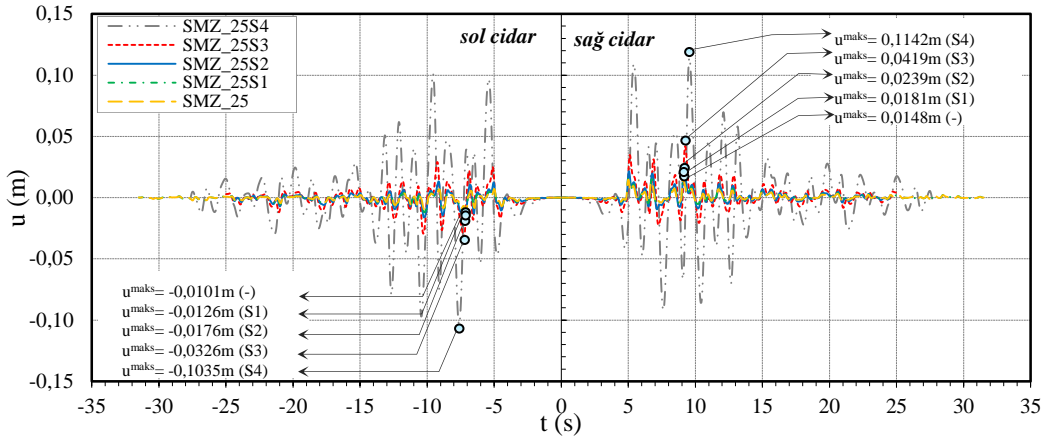
Şekil 3.89. Altı farklı narinlik oranında S1 ve S4 zemin sınıfları için SMZ'ye göre sağ cidar tepe noktasında en büyük yerdeğiştirme olduğu anda karşılıklı cidarlarda yükseklik boyunca yatay yerdeğiştirmeler

Bu irdelemeye ek olarak, durumun artan zemin etkileşimi ile de değiştiği yine Şekil 3.89'da görülmektedir. Örneğin 10 m'lik silo sisteminin S4 için gerçekleştirilen çözümlerden yatay yerdeğiştirmelerin her iki cidar için de aynı yönde gerçekleştiği ve ankastre kabulden farklı bir davranışın ortaya çıktığı söylenebilmektedir. Ancak burada zeminin dönme (rocking) rijitliğinin önemli derecede azalmış olması, cidarın yatay yerdeğiştirme bileşeninde dönmenin etkisini en üst düzeye çıkartmakta ve sistemin ötelenme davranışını da kontrol etmektedir. Dolayısıyla, yatay yerdeğiştirme tepkisi tamamıyla zemin etkileşimi bağımlı olmaktadır.

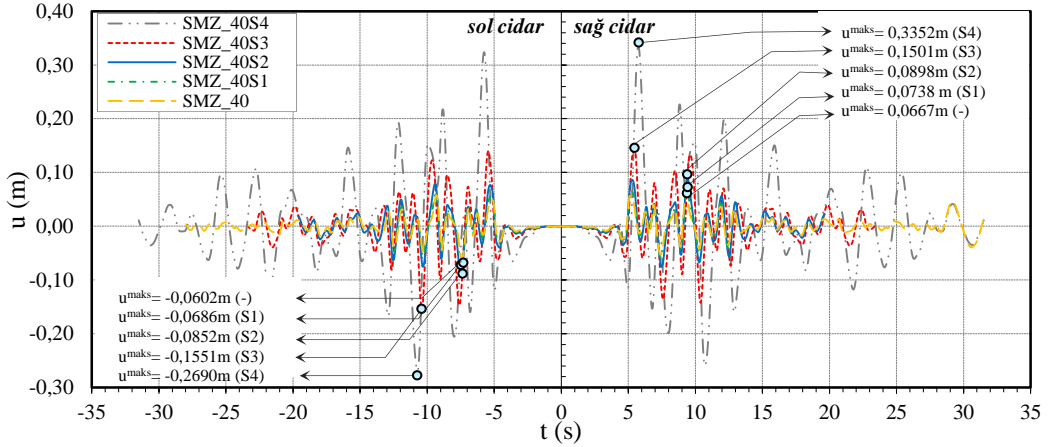
Yatay yerdeğiştirmelerin zamanla değişimleri örnek silo sistemleri için ( $H/d_c=1,0, 2,5$  ve  $4,0$ ) Şekil 3.90-3.92'de verilmektedir. Burada bodur siloları temsilen 1,0 narinlik oranına sahip sistem, bodurdan narine geçiş sınırını temsilen 2,5 narinlik oranı ve narin silo sistemlerini temsilen ise 4,0 narinlik oranı ile ilgili değişimler verilmektedir. Bodur silolar için verilen karşılaştırmalardan anlaşılacağı üzere, azalan zemin rijitliği ile davranış narin silo sistemlerine benzemekte ve bu nedenle en büyük tepkiler 9,5s civarında gerçekleşmektedir. Oysaki zemin etkileşiminin bu denli etkili olmadığı sistemlerde en büyük yerdeğiştirme tepkilerinin 5. s civarında gerçekleştiği görülmektedir (Şekil 3.90).



Şekil 3.90. 1,0 narinlik oranına sahip siloda ankastre durum ve 4 farklı zemin sınıfı için etkileşimli durumda zamanla yerdeğiştirme



Şekil 3.91. 2,5 narinlik oranına sahip siloda ankastre durum ve 4 farklı zemin sınıfı için etkileşimli durumda zamanla yerdeğiştirme



Şekil 3.92. 4,0 narinlik oranına sahip siloda ankastre durum ve 4 farklı zemin sınıfı için etkileşimli durumda zamanla yerdeğiştirme

Benzer değerlendirmeler 2,5 ve 4,0 narinlik oranı için yapıldığında ise tepkilerin sağ cidarda 9,5. s civarında sol cidarda ise 7,25. s civarında gerçekleştiği ve artan temel/zemin etkileşimi ile bir istisna dışında tepki zamanının değişmediği anlaşılmaktadır (Şekil 3.91). Burada yalnızca 4,0 narinlik oranı için tepkilerin S3 ve S4 temel/zemin sistemleri için azalarak sırasıyla en büyük değerlerini 5,5. s civarında aldıkları görülmektedir. Buradan da anlaşılacağı gibi, artan narinlik oranı ile sistemin dinamik özelliklerinden olan hakim periyot değişmekte ve bu sayede yer hareketine olan tepkiler de şekilde olduğu gibi değişmektedir (Şekil 3.92).

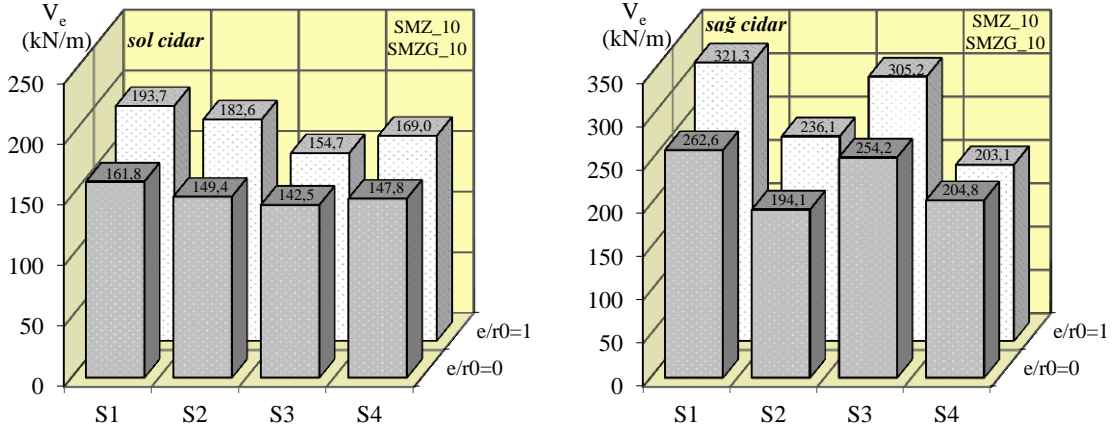
### 3.5. Temel Gömülme Oranının Silo Davranışı Üzerindeki Etkisi

Temelin gömülü olmama durumu ile ilgili karşılaştırmalardan elde edilen bulgulara ek olarak bu başlıkta, gömülü olma durumunda elde edilen bulgular irdelenmektedir. Bu amaçla, temel çapı olarak belirlenen 7 m, gömülme yüksekliği olarak da kullanılarak gömülme oranı ( $e/r_0 = 1$ ) 1'e eşitlenmiştir. Bu şekilde üretilen gömülü temel sistemi ile tüm çözümlenmeler tekrarlanmıştır. Bu şekilde elde edilen bulgular başlıklar halinde aşağıda irdelenmektedir. Burada, gömülmenin olmadığı durum için karşılaştırmalarla paralellik arz eden irdelenmeler verilerek tekrara düşülmek istenmediğinden, gömülmenin dinamik malzeme basıncı, eşdeğer taban kesme kuvveti üzerinde neden olduğu davranış değişikliği ile yatay yerdeğiştirme tepkileri tartışılmaktadır.

#### 3.5.1. Temel Gömülme Oranının Dinamik Malzeme Basıncı ve Eşdeğer Taban Kesme Tepkileri Üzerindeki Etkisi

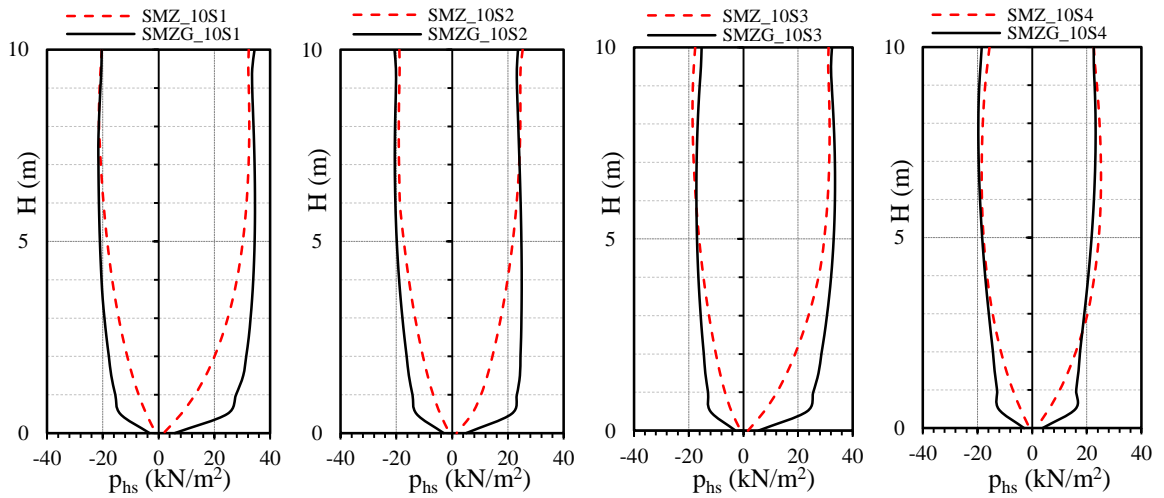
Çalışmaya konu edilen altı farklı narinlik oranı için dinamik malzeme basınçlarının yükseklik boyunca değişimleri ile sözkonusu değişimlerden elde edilen eşdeğer taban kesme kuvvetlerinin gömülme oranına bağlı olarak değişimleri takip eden şekillerde verilmektedir (Şekil 3.93-104). Bu şekillerde sırasıyla 10-40 m için birbirini takip eden sırada her bir silo için, en büyük eşdeğer taban kesme kuvvetleri ve stok malzemesi dinamik basınçlarının yükseklik boyunca değişimleri verilmektedir. 10 m'lik sistemin tepkisinden de anlaşılacağı üzere, bodur sınıftaki bu silo sisteminin artan gömülme oranı ile eşdeğer taban kesme kuvveti tepkileri artış göstermektedir. Gerek sol cidarda gerekse sağ cidarda aynı eğilimin elde edildiği açıkça görülmektedir. Oransal olarak artmalar irdelendiğinde, en önemli artışın S1 ve S2 zemin sistemleri için %20 civarında gerçekleştiği anlaşılmaktadır.



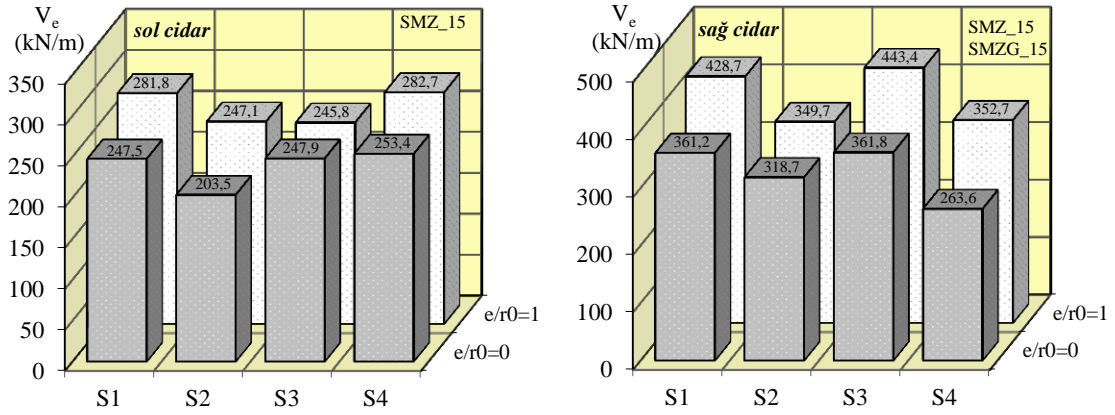


Şekil 3.93. 1,0 narinlik oranına sahip siloda SMZ ve SMZG'ye göre dört farklı zemin sınıfı için deprem doğrultusunda karşılıklı cidarlardaki en büyük eşdeğer taban kesme kuvvetleri

1,0 narinlik oranı için ifade edilen bu farklılıkların, yani söz konusu artışın, yükseklik boyunca değişimlerden de görülebileceği üzere, tabana yakın seviyelerde gömülme nedeniyle artan dinamik malzeme basınçlarından kaynaklandığı, artan yükseklik boyunca aradaki basınç farkının hemen hemen olmadığı görülmektedir. Buradan hareketle söz konusu değişimin temel gömülme oranı nedeniyle temele yakın seviyelerdeki meydana gelen ve hemen hemen basınç dağılımını yükseklik boyunca sabitleştiren artışlardan kaynaklandığı rahatlıkla anlaşılabilir (Şekil 3.94).

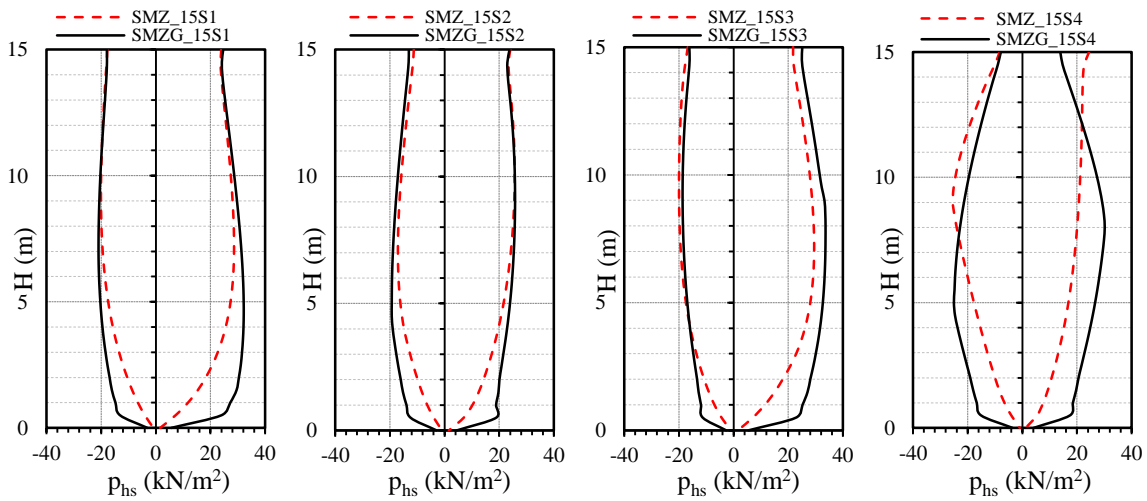


Şekil 3.94. 1,0 narinlik oranına sahip siloda SMZ ve SMZG'ye göre dört farklı zemin sınıfı için deprem doğrultusunda karşılıklı cidarlarda yükseklik boyunca dinamik malzeme basınçları



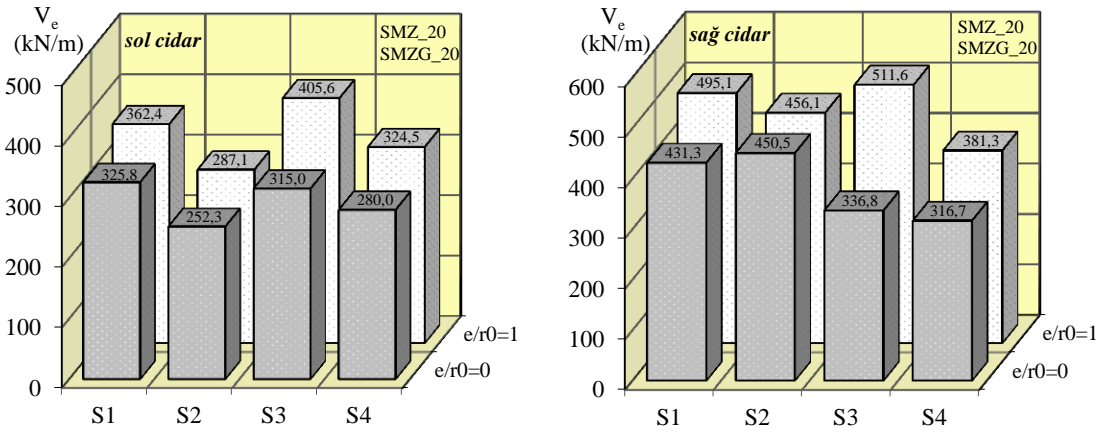
Şekil 3.95. 1,5 narinlik oranına sahip siloda SMZ ve SMZG'ye göre dört farklı zemin sınıfı için deprem doğrultusunda karşılıklı cidarlardaki en büyük eşdeğer taban kesme kuvvetleri

1,5 narinlik oranı için karşılaştırmalar benzer şekilde irdelendiğinde, gömülmeye bağlı olarak benzer artışları görmek mümkün olmaktadır. Oransal olarak bakıldığında, S4 zemini için sağ cidarda %33, S3 için ise %22 olarak gerçekleştiği anlaşılmaktadır (Şekil 3.95). 1,0 narinlik oranına benzer şekilde yükseklik boyunca değişimlerden 1,5 oranı için de gömülmenin hemen tabanın üstünde dinamik malzeme basınçlarının artışına neden olduğu, ancak yükseklik boyunca değişimler için S4 zemini hariç önemli bir farklılığın olmadığı anlaşılmaktadır. S4 zemin sistemi üzerindeki sistemde ise karakter olarak da basınç dağılımının farklılık gösterdiği ifade edilebilmektedir (Şekil 3.96).

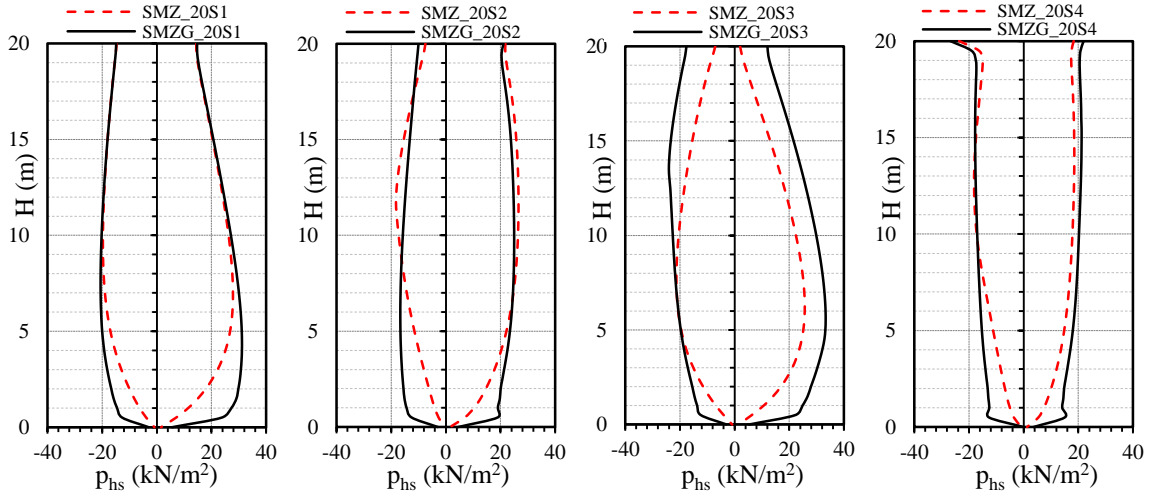


Şekil 3.96. 1,5 narinlik oranına sahip siloda SMZ ve SMZG'ye göre dört farklı zemin sınıfı için deprem doğrultusunda karşılıklı cidarlarda yükseklik boyunca dinamik malzeme basınçları

Şekil 3.97’de 2,0 narınlık oranı için en büyük eşdeğer taban kesme kuvvetlerinin gömülme oranına bağlı olarak karşılaştırılması, Şekil 3.98’de ise bunların yükseklik boyunca değişimleri verilmektedir. Buradan da anlaşılacağı gibi, diğer iki narınlık oranına benzer değerlendirmeler burada da yapılabilmektedir. Bu karşılaştırmalardan sağ cidarda S3 zemin sistemi için artışın %54’lere vardığı görülmektedir. Diğer taraftan, yükseklik boyunca değişimlerden daha öncekilere benzer şekilde davranışın yalnızca temel üst seviyesinde farklılaştığı anlaşılmaktadır.

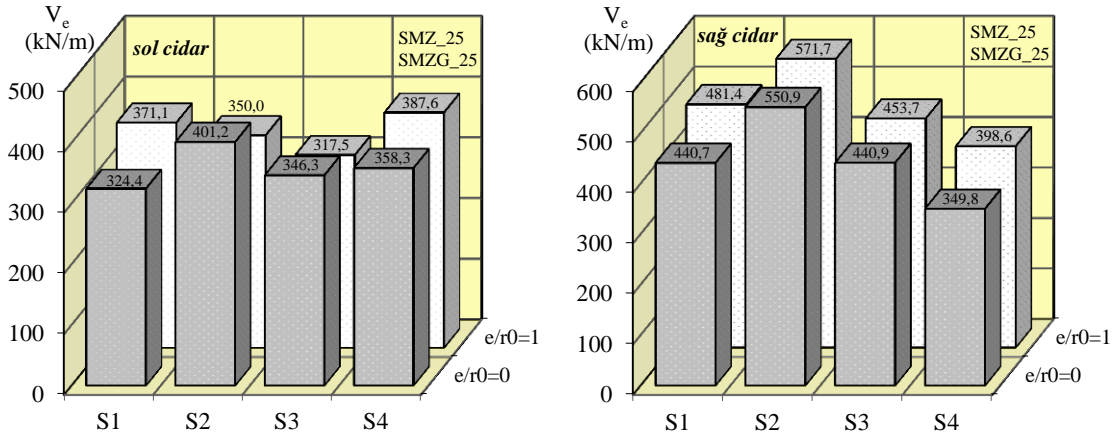


Şekil 3.97. 2,0 narınlık oranına sahip siloda SMZ ve SMZG’ye göre dört farklı zemin sınıfı için deprem doğrultusunda karşılıklı cidarlardaki en büyük eşdeğer taban kesme kuvvetleri

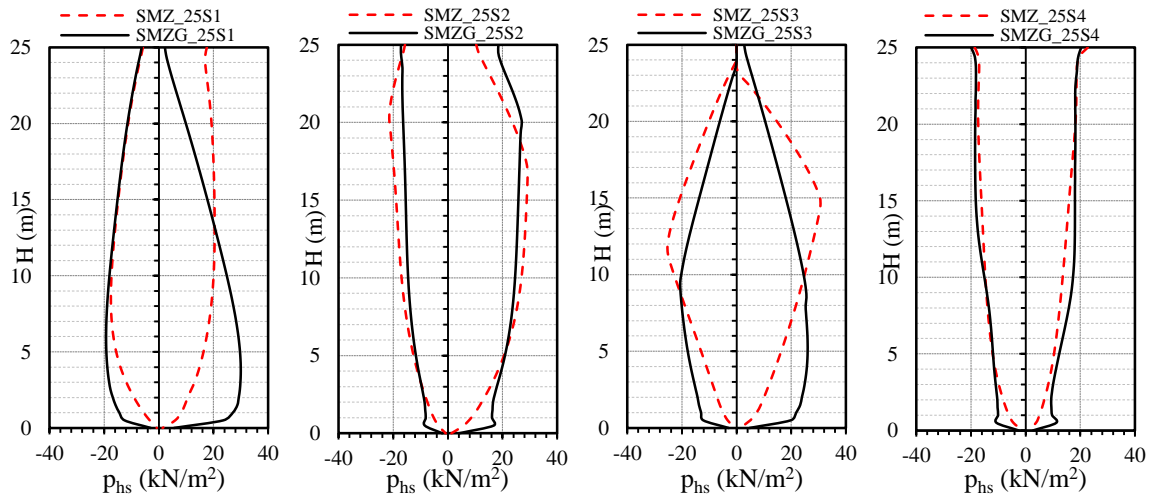


Şekil 3.98. 2,0 narınlık oranına sahip siloda SMZ ve SMZG’ye göre dört farklı zemin sınıfı için deprem doğrultusunda karşılıklı cidarlarda yükseklik boyunca dinamik malzeme basınçları

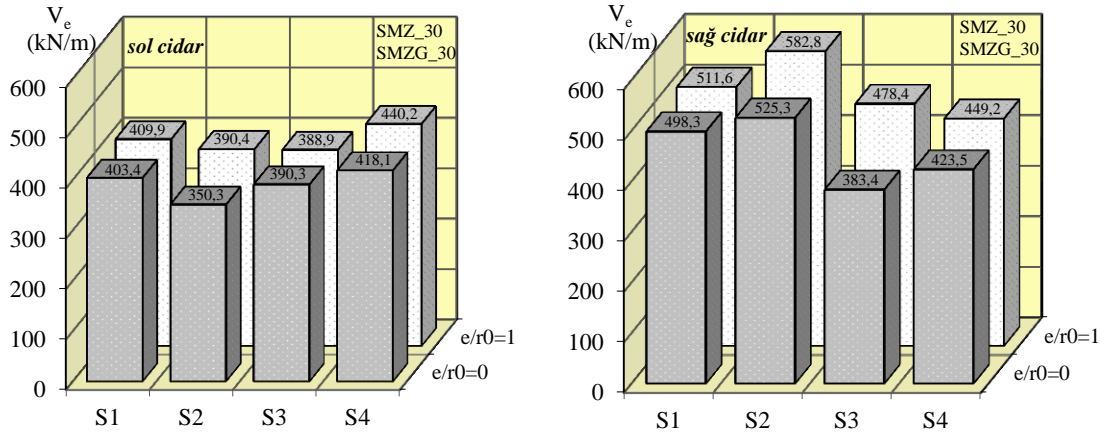
Narinlik oranına bağı olarak narin silo sınıfına girebilecek 2,5 ve üstü narinlik oranları için gömülme etkisi takip eden şekillerde karşılaştırmalı olarak verilmektedir (Şekil 3.99-3.104). Bu şekillerden de görülebileceği üzere, artan narinlik oranı ile eşdeğer taban kesme kuvveti önemli bir değişiklik göstermemekte, diğer karşılaştırmalara benzer eğilimler burada da aynı şekilde ifade edilebilmektedir. Tüm bu karşılaştırmalardan gömülmenin taban kesme kuvvetinin etkisini %50'ler gibi önemli oranlarda arttırabilecek bir etkisinin olduğu, buna ek olarak yükseklik boyunca basınç dağılımını da nitelik olarak değiştirdiği anlaşılmaktadır.



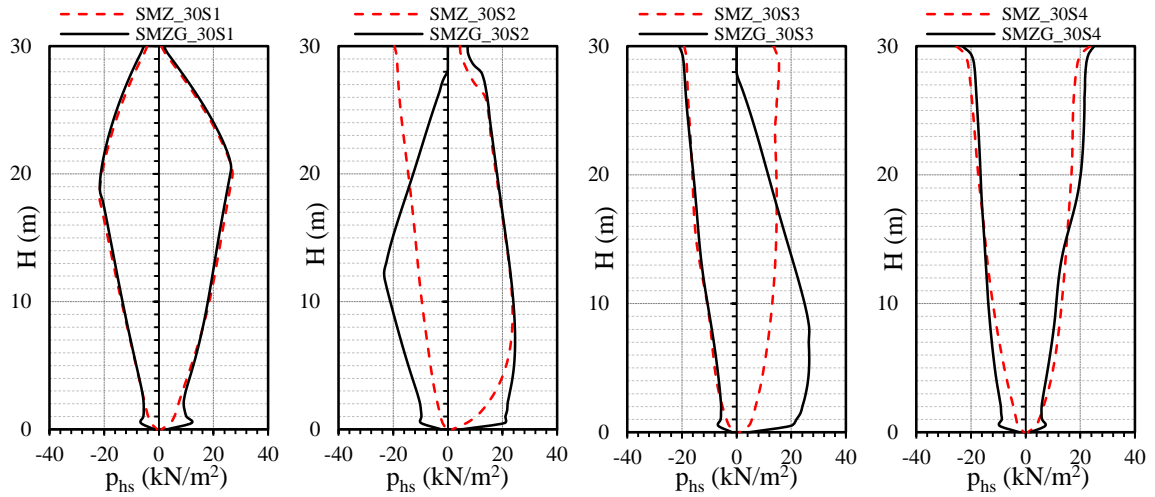
Şekil 3.99. 2,5 narinlik oranına sahip siloda SMZ ve SMZG'ye göre dört farklı zemin sınıfı için deprem doğrultusunda karşılıklı cidarlardaki en büyük eşdeğer taban kesme kuvvetleri



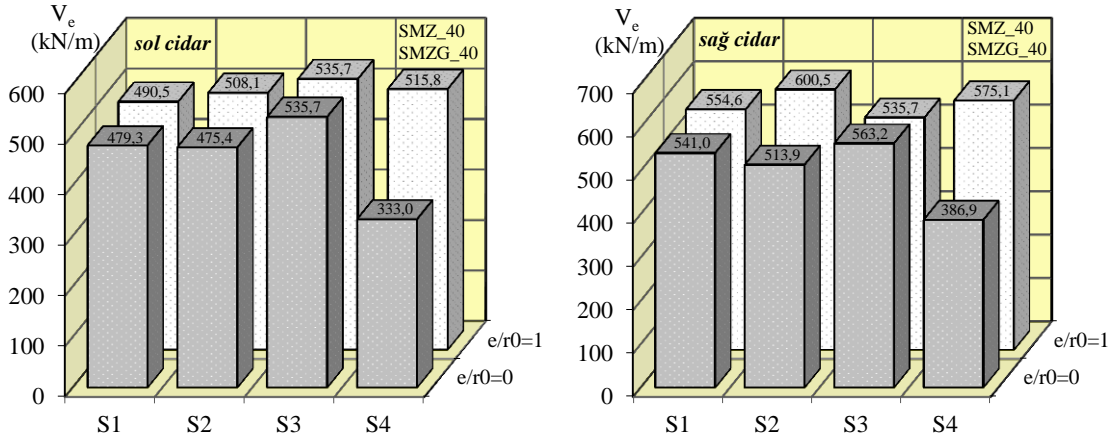
Şekil 3.100. 2,5 narinlik oranına sahip siloda SMZ ve SMZG'ye göre dört farklı zemin sınıfı için deprem doğrultusunda karşılıklı cidarlarda yükseklik boyunca dinamik malzeme basınçları



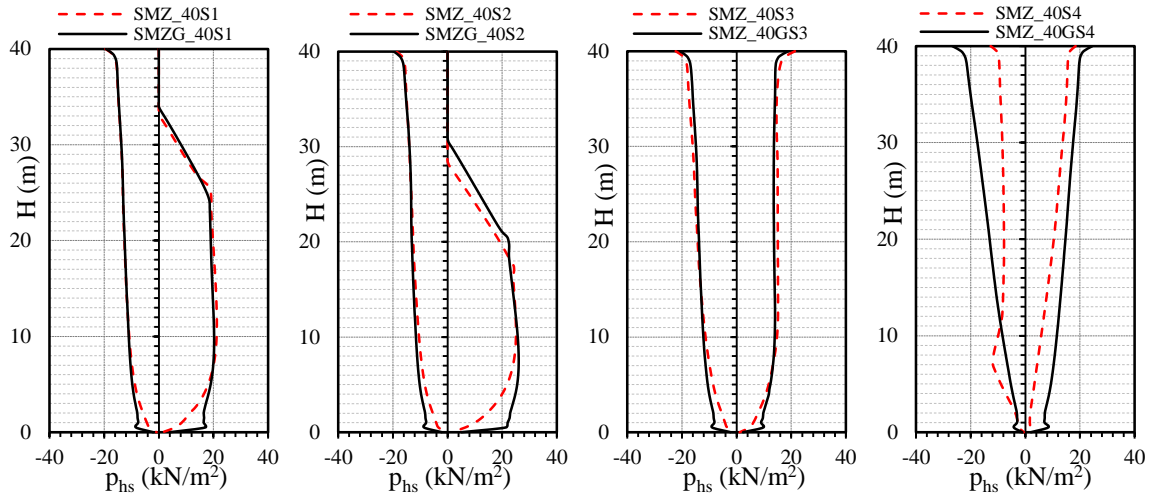
Şekil 3.101. 3,0 narinlik oranına sahip siloda SMZ ve SMZG'ye göre dört farklı zemin sınıfı için deprem doğrultusunda karşılıklı cidarlardaki en büyük eşdeğer taban kesme kuvvetleri



Şekil 3.102. 3,0 narinlik oranına sahip siloda SMZ ve SMZG'ye göre dört farklı zemin sınıfı için deprem doğrultusunda karşılıklı cidarlarda yükseklik boyunca dinamik malzeme basınçları



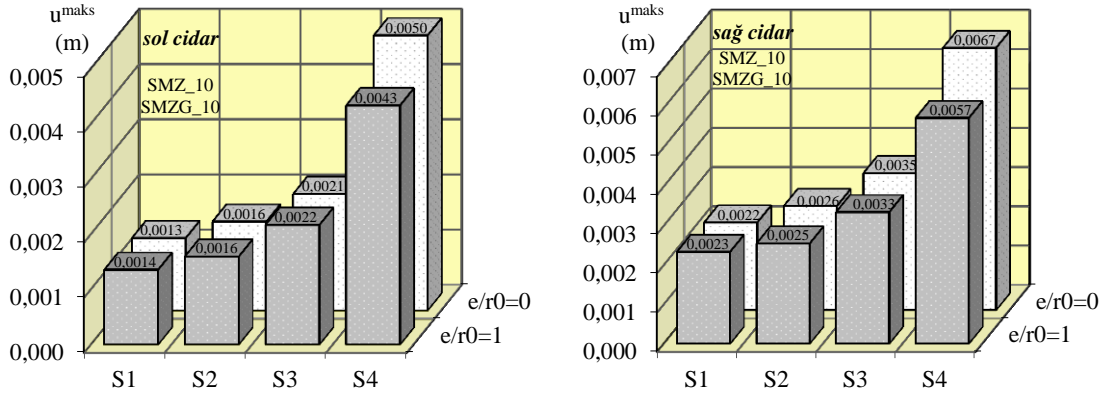
Şekil 3.103. 4,0 narinlik oranına sahip siloda SMZ ve SMZG'e göre dört farklı zemin sınıfı için deprem doğrultusunda karşılıklı cidarlardaki en büyük eşdeğer taban kesme kuvvetleri



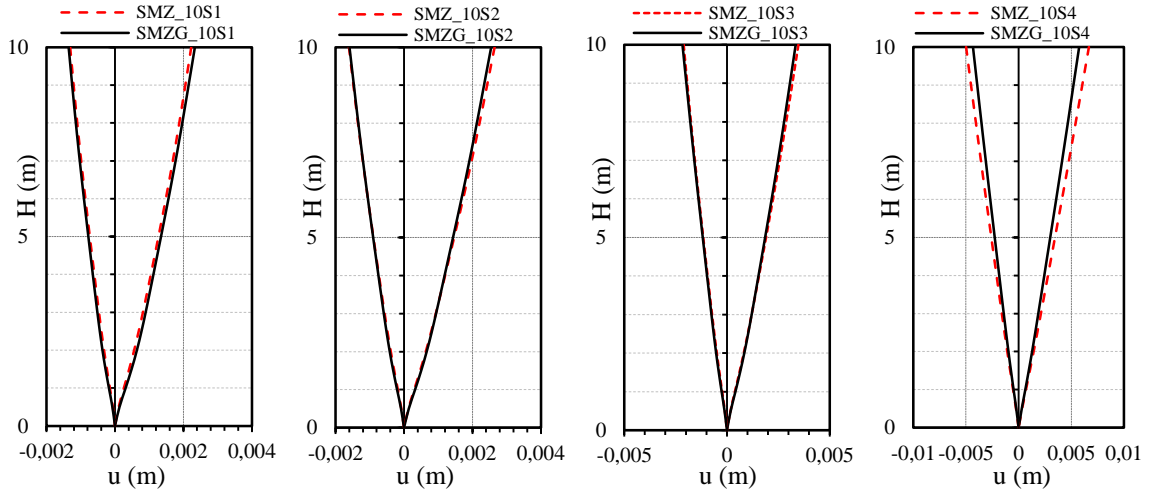
Şekil 3.104. 4,0 narinlik oranına sahip siloda SMZ ve SMZG'e göre dört farklı zemin sınıfı için deprem doğrultusunda karşılıklı cidarlarda yükseklik boyunca dinamik malzeme basınçları

### 3.5.2. Temel Gömülme Oranının Yatay Yerdeğiştirme Tepkisi Üzerindeki Etkisi

Gömülme oranının dikkate alınması ile aynı zemin sisteminde olduğu düşünülen silo sisteminin ötelenme ve dönme rijitlikleri önemli oranda artmaktadır. Bu yolla, zemin sisteminden kaynaklanan rijitlik azalmalarının ve dolayısıyla da artan yerdeğiştirmelerin azalmasının beklenmesi normaldir. Burada altı farklı silo sistemi ve dört farklı temel/zemin sistemi için karşılaştırmalar Şekil 3.105-3.112'de verilmektedir.



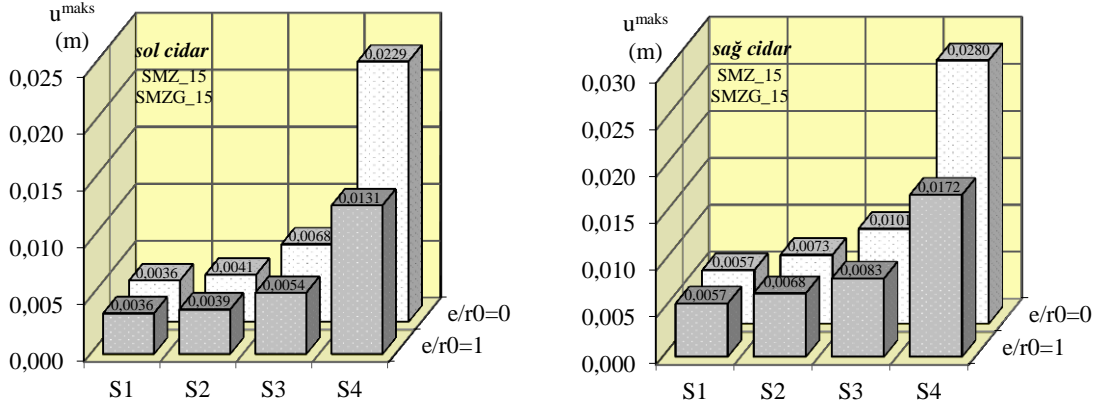
Şekil 3.105. 1,0 narinlik oranına sahip siloda SMZ ve SMZG'ye göre dört farklı zemin sınıfı için deprem doğrultusunda karşılıklı cidarlardaki en büyük yatay yerdeğıştirmeler



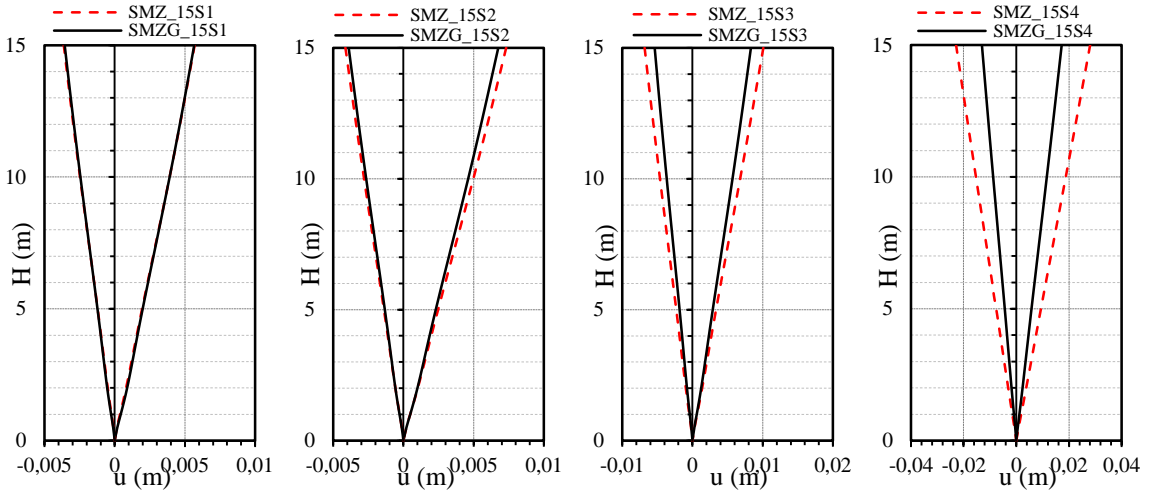
Şekil 3.106. 1,0 narinlik oranına sahip siloda SMZ ve SMZG'ye göre dört farklı zemin sınıfı için deprem doğrultusunda karşılıklı cidarlarda yükseklik boyunca yatay yerdeğıştirmeler

10 m'lik silo için dikkate alınan tüm zemin sistemlerinde gömülmenin etkisi, Şekil 3.105'de en büyük yatay yerdeğıştirmeler açısından, Şekil 3.106'da ise yatay yerdeğıştirmelerinin yükseklikle değışimleri açısından karşılaştırmalı olarak verilmektedir. Bu karşılaştırmalardan da görülebileceğı üzere, zemin rijitliğindeki azalmalara bağılı olarak gömülmenin etkisi oldukça düşük kalmakta, bu etki ancak S4 zemin sistemi için çok küçük bir oranda görülmektedir. Yükseklikle değışimlerden de davranış olarak önemli bir farklılık gözlemlenememektedir. S4 türü zeminde ise gömülmeye bağılı olarak beklenen azalma ancak 0,001 m civarındadır ki bu merteye ihmal edilebilir düzeydedir.

15 m' lik silo için zemin etkileşimine bağlı olarak gömülmenin etkisi irdelendiğinde, Şekil 3.107 ve 3.108'den de görülebildiği gibi, gömülme etkisi artan narinlik ile daha etkin bir şekilde ortaya çıkmaktadır. S3 için gömülme yerdeğıştirmeyi % 29'lara varan oranda azaltırken, S4 için bu oran %43'lere varmaktadır. Söz konusu etkinin yükseklik boyunca değışimleri de bu irdelemeyi benzer şekilde doğrulamaktadır.



Şekil 3.107. 1,5 narinlik oranına sahip siloda SMZ ve SMZG'ye göre dört farklı zemin sınıfı için deprem doğrultusunda karşılıklı cidarlardaki en büyük yatay yerdeğıştirmeler

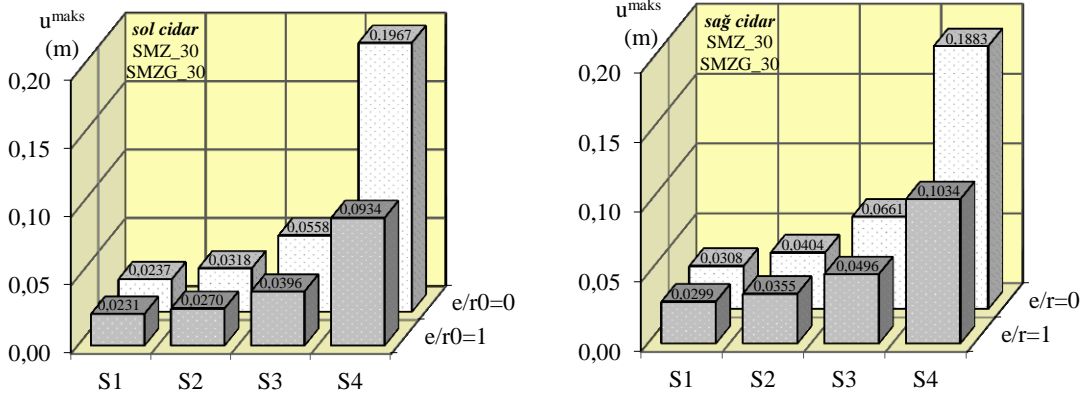


Şekil 3.108. 1,5 narinlik oranına sahip siloda SMZ ve SMZG'ye göre dört farklı zemin sınıfı için deprem doğrultusunda karşılıklı cidarlarda yükseklik boyunca yatay yerdeğıştirmeler

Benzer karşılaştırmalar 2,0 ve 2,5 narinlik oranları için de yapıldığında gömülmenin etkisinin daha da arttığı anlaşılmaktadır. Bu nedenle ifade edilen bu narinlik oranları için karşılaştırmalar burada verilmemektedir. 3,0 ve 4,0 narinlik oranları için karşılaştırmalar

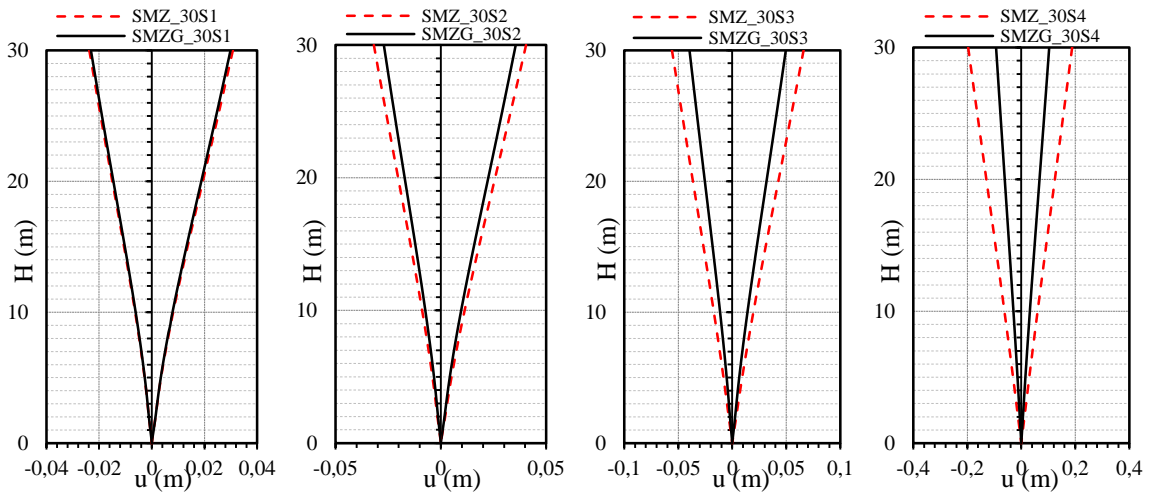


yapıldığında ise oransal olarak yatay yerdeğiştirmelerdeki azalmanın daha büyük değerler aldığı görölmektedir. Bu narinlik oranlarında gömülmenin hemen her zemin sistemi için azalmalara neden olduğu ve bu oranın 3,0 narinlik oranı için %53, 4,0 için ise %34 olarak S4 zemin sisteminde gerçekteştiği belirlenmektedir.

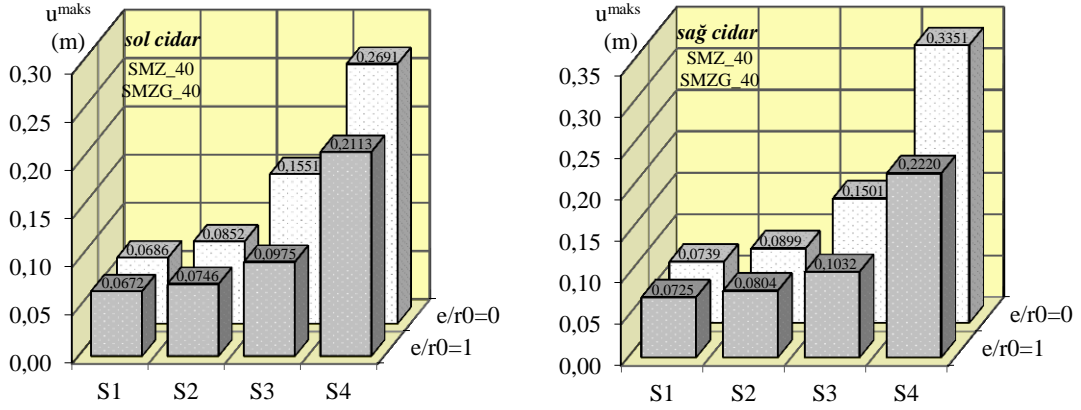


Şekil 3.109. 3,0 narinlik oranına sahip siloda SMZ ve SMZG'ye göre dört farklı zemin sınıfı için deprem doğrultusunda karşılıklı cidarlardaki en büyük yatay yerdeğiştirmeler

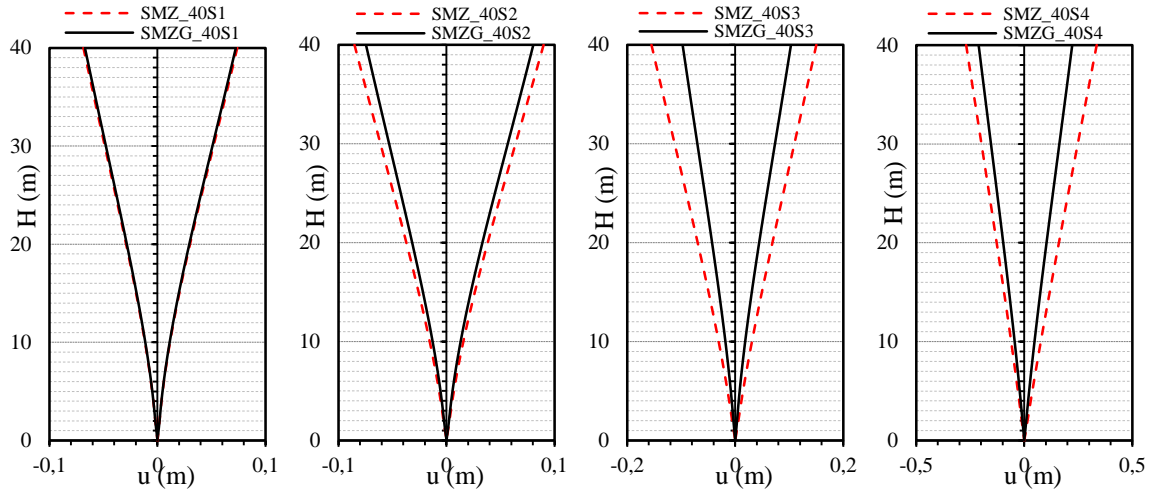
Yükseklik boyunca irdelemelerden de, davranışın benzer şekilde gerçekteşmesine karşın gömülmenin etkinliğinin, artan zemin etkileşimi nedeniyle, önemli derecede arttığı açıkça görölmektedir. Burada ifade edilmesi gereken bir diğer nokta ise artan narinlik oranı ile her iki cidarda etkinin benzer şekilde meydana gelmiş olmasıdır.



Şekil 3.110. 3,0 narinlik oranına sahip siloda SMZ ve SMZG'ye göre dört farklı zemin sınıfı için deprem doğrultusunda karşılıklı cidarlarda yükseklik boyunca yatay yerdeğiştirmeler



Şekil 3.111. 4,0 narınlık oranına sahip siloda SMZ ve SMZG'ye göre dört farklı zemin sınıfı için deprem doğrultusunda karşılıklı cidarlardaki en büyük yatay yerdeğiştirmeler



Şekil 3.112. 4,0 narınlık oranına sahip siloda SMZ ve SMZG'ye göre dört farklı zemin sınıfı için deprem doğrultusunda karşılıklı cidarlarda yükseklik boyunca yatay yerdeğiştirmeler

### 3.6. Silo-Temel/Zemin Etkileşiminin Gerilmeler Üzerindeki Etkisi

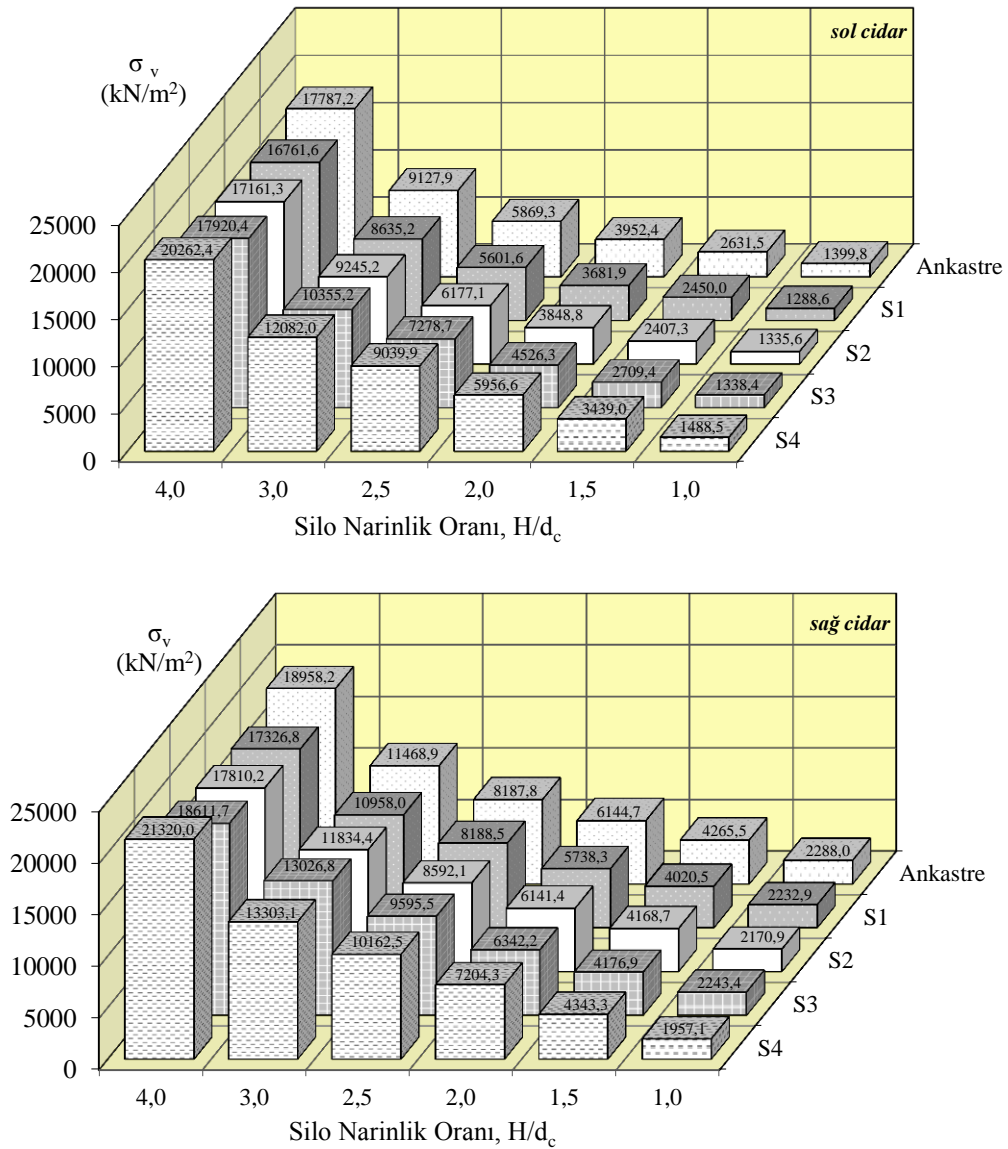
Yapılan çözümlerlerden elde edilen ve tasarım üzerinde en önemli derecede etkili karşılaştırmalardan bir diğeri de, cidar üzerindeki en kritik gerilmelerin zemin etkileşimiyle değışimidir. Hatırlanacağı üzere, yerdeğiştirmeler zemin etkileşimine bağılı olarak önemli oranda artışlara maruz kalırken, eşdeğer taban kesme kuvvetlerinde ise belirgin azalmalar meydana geldiği daha önceki karşılaştırmalarda öne çıkmaktaydı. Genel anlamda yalnızca yapı-zemin etkileşiminin irdelendiği yapı sistemlerinde iç kuvvet

tepkisindeki azalmalar ve buna paralel olarak yerdeğiştirme tepkisindeki artışlar belirgin sonuçlar olarak ortaya çıkmaktadır. Böyle olmakla beraber, Çizelge 3.16 ve Çizelge 3.17’de sunulan ve yerdeğiştirmelerin alındığı noktaların en kritik yeri olan tabana yakın noktalarda elde edilen Von-Mises gerilmeleri, beklenenin tersine artan zemin etkileşimi ile, gömülü olma durumunda özellikle narin silolarda, artan bir eğilim sergilemektedirler. Bu değişim gömülmenin olmadığı durumda ise (Çizelge 3.17) tam tersi bir eğilim sergileyebilmektedir.

Çizelge 3.16. Gömülmenin olduğu durumda Von-Mises gerilmelerinin altı farklı narinlik oranı için dört farklı zemin sistemine ve ankastre duruma göre en büyük değerleri ile bunların gerçekteşme zamanları

Silo Yüks.	Zemin Sınıfı	En Büyük Von Mises Gerilmeleri, $\sigma_v^{\text{maks}}$ (kN/m <sup>2</sup> )			
		SMZG (e/r=1)			
		sol cidar		sağ cidar	
		t (s)	$\sigma_v^{\text{maks}}$	t (s)	$\sigma_v^{\text{maks}}$
10 m	Ankastre	7,05	1399,8	4,95	2288,0
	S1	7,05	1288,6	4,95	2232,9
	S2	6,45	1335,6	9,05	2170,9
	S3	7,10	1338,4	9,10	2243,4
	S4	7,20	1488,5	9,20	1957,1
15 m	Ankastre	7,05	2631,5	4,95	4265,5
	S1	7,05	2449,9	9,05	4020,5
	S2	7,05	2407,3	5,00	4168,7
	S3	7,10	2709,4	9,10	4176,9
	S4	7,30	3438,9	9,30	4343,3
20 m	Ankastre	7,05	3952,4	9,05	6144,7
	S1	7,05	3681,9	5,05	5738,3
	S2	7,10	3848,8	5,00	6141,4
	S3	7,10	4526,3	9,15	6342,2
	S4	7,35	5956,6	9,35	7204,3
25 m	Ankastre	5,00	5869,3	5,00	8187,8
	S1	7,10	5601,6	9,10	8188,5
	S2	7,10	6177,1	9,10	8592,1
	S3	7,20	7278,7	9,20	9595,5
	S4	7,50	9039,9	9,45	10162,5
30 m	Ankastre	9,15	9127,9	9,15	11468,9
	S1	9,15	8635,2	9,15	10958,0
	S2	9,20	9245,2	9,20	11834,4
	S3	7,30	10355,2	9,25	13026,8
	S4	7,60	12082,0	9,50	13303,1
40 m	Ankastre	7,35	17787,2	9,30	18958,2
	S1	7,45	16761,6	9,35	17326,8
	S2	7,45	17161,3	9,35	17810,2
	S3	7,55	17920,4	5,35	18611,7
	S4	7,80	20262,4	5,60	21320,0

Oransal olarak yapılacak karşılaştırmalardan, gömülmenin olduğu durumda zemin etkileşimine bağlı olarak Von Mises gerilmelerinin ne derecede artışlara maruz kalabileceği de anlaşılabilir. Bu bağlamda, sol cidarda 4,0 narinlik oranı için S4 zemin sisteminde gerçekleştirilen çözümden elde edilen gerilmeler ankastre çözüme göre %14 oranında artış gösterirken, 3,0, 2,5, 2,0, 1,5 ve 1,0 narinlik oranları için ise sırasıyla, %32, %54, %51 ve %31, %6 oranında gerilme artışlarına neden olduğu görülmektedir (Şekil 3.113).

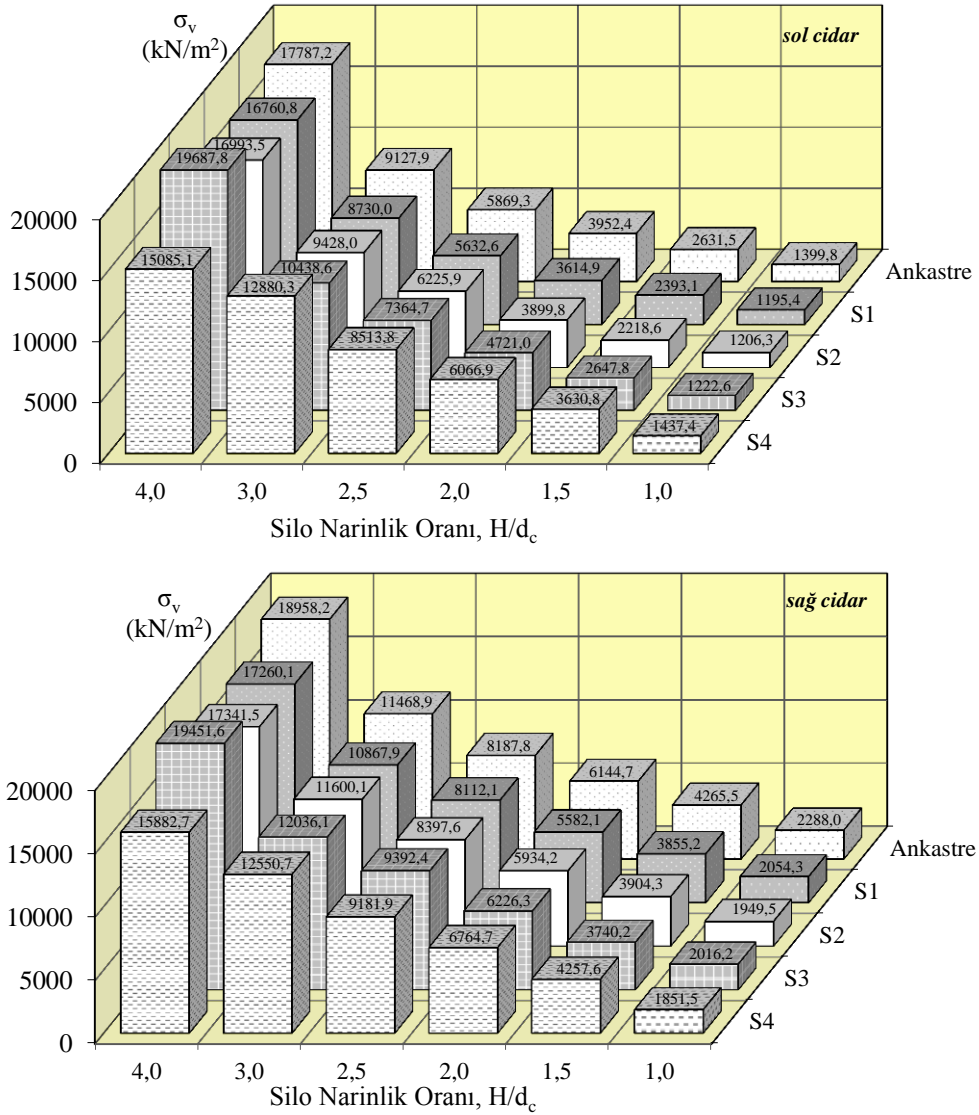


Şekil 3.113. Altı farklı narinlik oranı için SM ve SMZG'ye göre ankastre ve gömülmenin olduğu durumda dört farklı zemin sınıfı için deprem doğrultusunda karşılıklı cidarlarda en büyük Von Mises gerilmeleri

Çizelge 3.17. Gömülmenin olmadığı durumda Von-Mises gerilmelerinin altı farklı narinlik oranı için dört farklı zemin sistemine ve ankastre duruma göre en büyük değerleri ile bunların gerçekleşme zamanları

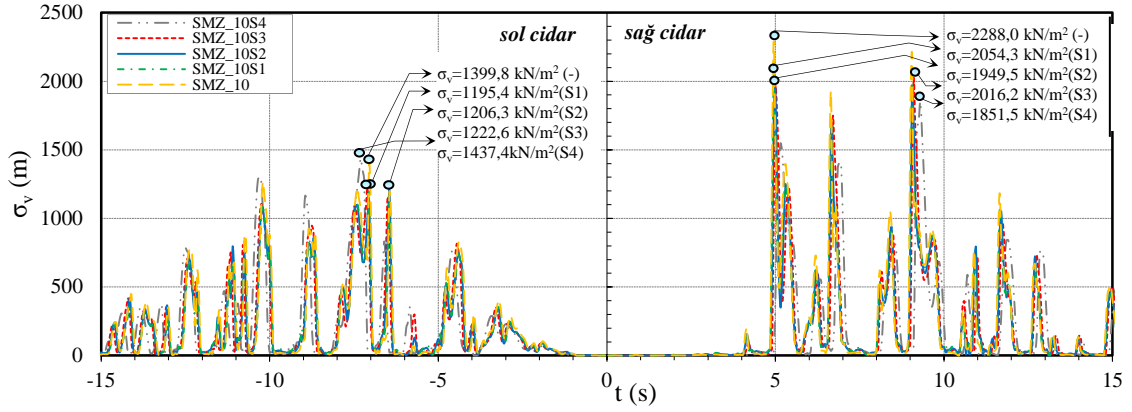
Silo Yüks.	Zemin Sınıfı	En Büyük Von Mises Gerilmeleri, $\sigma_v^{\text{maks}}$ (kN/m <sup>2</sup> )			
		SMZ (e/r=0)			
		sol cidar		sağ cidar	
		t (s)	$\sigma_v^{\text{maks}}$	t (s)	$\sigma_v^{\text{maks}}$
10 m	Ankastre	7,05	1399,8	4,95	2288,0
	S1	7,05	1195,4	4,95	2054,3
	S2	6,45	1206,3	5,00	1949,5
	S3	7,10	1222,6	9,10	2016,2
	S4	7,30	1437,4	9,30	1851,5
15 m	Ankastre	7,05	2631,5	4,95	4265,5
	S1	7,05	2393,1	9,05	3855,2
	S2	7,05	2218,6	5,00	3904,3
	S3	7,10	2647,8	9,10	3740,2
	S4	7,35	3630,8	9,35	4257,6
20 m	Ankastre	7,05	3952,4	9,05	6144,70
	S1	7,05	3614,9	9,05	5582,06
	S2	7,10	3899,8	9,10	5934,2
	S3	7,20	4720,9	9,20	6226,28
	S4	7,50	6066,9	9,45	6764,65
25 m	Ankastre	5,00	5869,3	5,00	8187,8
	S1	7,10	5632,6	9,10	8112,1
	S2	7,15	6225,9	9,15	8397,6
	S3	7,25	7364,7	9,25	9392,4
	S4	7,60	8513,8	9,55	9181,9
30 m	Ankastre	9,15	9127,9	9,15	11468,9
	S1	9,15	8729,9	9,15	10867,9
	S2	9,20	9428,0	9,20	11600,1
	S3	7,40	10438,6	9,35	12036,1
	S4	10,55	12880,3	5,55	12550,7
40 m	Ankastre	7,35	17787,2	9,30	18958,2
	S1	7,45	16760,8	9,35	17260,1
	S2	7,50	16993,5	9,40	17341,5
	S3	10,40	19687,8	5,45	19451,6
	S4	5,75	15085,1	5,75	15882,7

Benzer bir oransal karşılaştırma gömülmenin olmadığı durumda yapıldığında ise zemin etkileşimine bağlı olarak Von Mises gerilmelerinin ne mertebede azalışlara maruz kalabileceği de anlaşılabilir. Bu bağlamda sağ cidarda 4,0 narinlik oranı için S4 zemin sistemine göre çözümden elde edilen gerilmeler ankastre çözüme göre %12 oranında azalma gösterirken, diğer silo sistemleri için çoğunlukla önemli bir farklılık gözlemlenmemektedir. (Şekil 3.114). Gömülmenin olduğu duruma nazaran farkların azaldığı bu karşılaştırmalardan rahatlıkla görülebilmektedir.

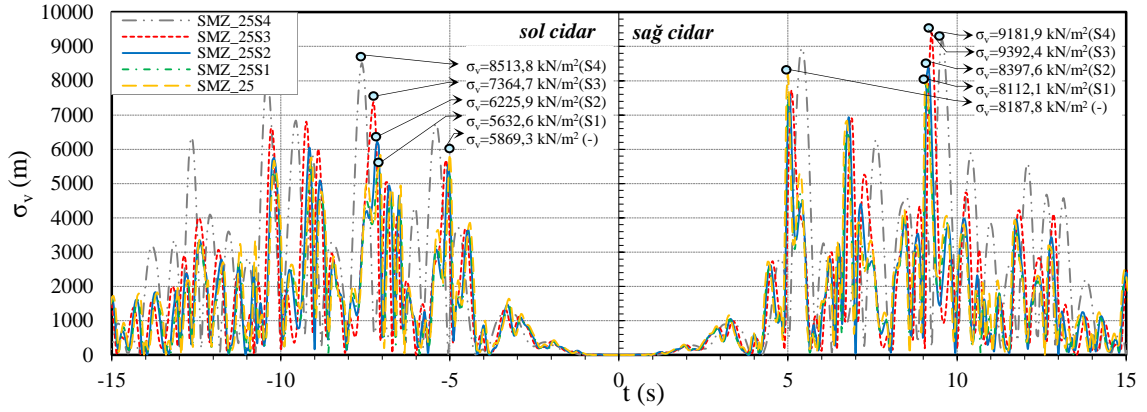


Şekil 3.114. Altı farklı narinlik oranı için SM ve SMZ'ye göre ankastre durum ve gömülmenin olmadığı durumda dört farklı zemin sınıfı için deprem doğrultusunda karşılıklı cidarlarda en büyük Von Mises gerilmeleri

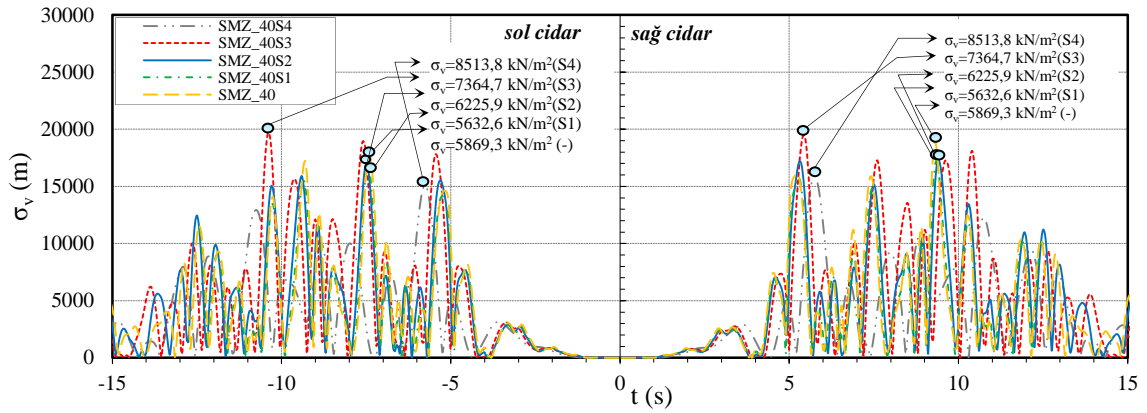
İnceleme konusu her bir silo sisteminde 4 farklı zemin sistemi için elde edilen Von Mises gerilmelerinin zamanla değişimleri Şekil 3.115-3.117'de verilmektedir. Bu karşılaştırmalardan da yukarıda yapılan değerlendirmelere paralel sonuçları daha net bir şekilde görmek mümkündür. Bu şekillerden de anlaşılacağı üzere, 10 m için gerilme tepkilerindeki farklılıklar, zemin etkileşimine göre hakim periyotta önemli bir değişim olmadığından, zemin etkileşiminin neden olduğu eylemsizlik etkileri nedeniyle meydana gelmektedir. Diğer taraftan, benzer bir değerlendirmeyi daha net bir şekilde narin silo sistemi olarak değerlendirilebilecek 25 m'lik silo sistemi için de gerçekleştirmek mümkündür.



Şekil 3.115. 1,0 narinlik oranı için SM ve SMZ'ye göre ankastre durum ve dört farklı zemin sınıfı için deprem doğrultusunda karşılıklı cidarlarda zamanla Von Mises gerilmeleri



Şekil 3.116. 2,5 narinlik oranı için SM ve SMZ'ye göre ankastre durum ve dört farklı zemin sınıfı için deprem doğrultusunda karşılıklı cidarlarda zamanla Von Mises gerilmeleri



Şekil 3.117. 4,0 narinlik oranı için SM ve SMZ'ye göre ankastre durum ve dört farklı zemin sınıfı için deprem doğrultusunda karşılıklı cidarlarda zamanla Von Mises gerilmeleri

Tüm bu karşılaştırmalardan farklı olarak, 4,0 narinlik oranına sahip silo için ise gerilme tepkileri zemin etkileşimine göre hakim periyotun değişimine paralel olarak yer hareketine farklı tepkiler vermektedir. Bu nedenle burada meydana gelen en büyük değerlerin değişimini yalnızca etkileşime bağlamak doğru olmayacaktır. Kaldı ki değerlerde de önemli bir değişim meydana gelmemektedir. Zemin etkileşimi nedeniyle meydana gelen hakim periyottaki uzamalar ve zemin etkileşiminin bir diğer ögesi olan eylemsizlik etkileri nedeniyle meydana gelen tepkiler oldukça farklı bir yol izleyebilmektedir. Narin silo sınıfı için  $H/d_c=2,5$  olduğu durumda elde edilen bulguların irdelenmesi ile buradaki irdeme farklılıkları bir kez daha narinlik oranının da kendi içerisinde sınıflandırılması gereken bir parametre olduğunu kanıtlamaktadır.



#### 4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Siloların deprem davranışlarının araştırılması ve bu davranışları temsil edecek modellerin geliştirilmesine yönelik olarak gerçekleştirilmiş olan bu çalışmada analitik ve sayısal yaklaşımların herbiri için iki model geliştirilmiştir. Geliştirilen modellerde stok malzemesi-silo sistemi etkileşimi ve stok malzemesi-silo-temel/zemin sistemi etkileşimleri dikkate alınmıştır. Böylece siloların dinamik çözümlerinde bu etkileşimlerin dikkate alınabilmesi için hesap şekilleri ortaya konularak önerilerde bulunulmuştur. Geliştirilen modellerden elde edilen bulguların karşılaştırılabilmesi için, Veletsos ve Younan tarafından harmonik yükler için önerilen yaklaşım, frekans ortamında yapılan dönüşümler ile geliştirilerek deprem etkisi için de kullanılabilir duruma getirilmiştir. Bu bağlamda ülkemizin bulunduğu coğrafyada, AB ülkeleri tarafından kullanılmakta olan ve uyum süreci kapsamında birçok yönetmeliği ülkemizde de kullanılan, Eurocode ve Türk Deprem Yönetmeliğinde verilen parametreleri kullanarak çalışmanın sayısal uygulamaları şekillendirilmiştir. Böylece, silo tasarımı yapacak ve/veya Eurocode kullanacak olan mühendislere de yol gösterici bilgiler de bu çalışmada sunulmaktadır. Bununla birlikte, silolar konusunda teknik literatürde bulunan önemli eksikliğin giderilebilmesi amacıyla siloların deprem davranışlarında etkili olabileceği düşünülen parametrelerin gerçekte etkili olup olmadıklarını ve olanların etki derecelerini belirleyebilmek için parametrik çalışmalar da gerçekleştirilmiştir. Bu parametreler; silo cidarlarının esnek ve rijit olması, 6 farklı silo narinlik oranı, silo temel/zemin sistemindeki 4 farklı zemin koşulu ve silo temelinin zemine göre 2 farklı konumu şeklinde sıralanabilmektedir.

Bu kapsamda gerçekleştirilen 200'e yakın farklı çözümlerden elde edilen en genel sonuçlar aşağıda başlıklar halinde özetlenmektedir:

- Siloların deprem davranışı stok malzemesi-silo ve yapı-temel/zemin etkileşimlerinden önemli ölçüde etkilenmektedir. Bu etkileşim mekanizmalarının dikkate alınmasının gerek sistemin davranışı gerekse de tepkilerin büyüklükleri açısından oldukça önemli olduğu yapılan analitik ve sayısal çözümlerden elde edilen bulguların değerlendirilmesiyle açıkça görülmektedir.

- Önerilen sayısal modellerde dikkate alınan stok malzemesi-cidar arayüzeyi etkileşimi ile deprem doğrultusundaki karşılıklı cidarlarda büyüklük, gerçekleşme zamanı ve gerçekleşme yüksekliği açısından farklı tepkiler oluştuğu belirlenmiştir.
- Önerilen sayısal modellerin yanısıra hesap hacmini ve süresini oldukça azaltan ankastre ve yapı-zemin etkileşimli durum için iki adet analitik model önerilmiştir.
- Ankastre durum için önerilen analitik model (ÖM) dinamik malzeme basınçları ve eşdeğer kesme kuvveti açısından gerek davranış, gerekse de söz konusu tepkilerin en büyük değerleri için oldukça iyi sonuç vermekle beraber, en büyük dinamik malzeme basıncının yerinin sabit kabul edilmesi nedeniyle, eşdeğer eğilme momentlerinin büyük hesaplanmasına neden olabilmektedir.
- Ankastre durum için önerilen analitik modelin (ÖM) dinamik malzeme basınçlarının tahmininde sayısal modele oldukça yakın bulguar veriyor olması, bu yaklaşımın stok malzemesinin davranışını ve buradan hareketle basınçların değişimlerini oldukça gerçekçi bir şekilde tahmin edebiliyor olduğu manasına gelmektedir. Ancak, silonun geometrisine bağlı olarak hakim modlardaki önemli farklılıklar silo cidarındaki yerdeğiştirmelerin bu yöntemle ancak belirli sınırlar içerisinde ( $H/dc=1,5\sim 2,5$ ) önemli yaklaşıkla temsil edilebildiğini göstermektedir.
- Önerilen analitik yaklaşımın ankastre kabulle ilk üç narinlik oranında silo davranışlarını uygun şekilde temsil edebildiği görülmektedir. Diğer taraftan artan narinlik oranlarında silo yüksekliği boyunca elde edilen dağılımlardan, silo davranışının temsiline bodur silolara göre zorlaştığı anlaşılmaktadır.
- Silo narinlik oranı arttıkça oluşan en büyük dinamik malzeme basınçları azalma eğilimindedir. Diğer taraftan bu azalma eğiliminin gerek SM, gerekse de ÖM için aynı şekilde gerçekleşmiş olması davranışın artan narinlik oranıyla doğru şekilde temsil edilebildiğini göstermektedir. Ancak bu eğilimin her zaman bu şekilde gerçekleşeceğini söylemek de doğru olmayacaktır. Kaldı ki birbirine çok yakın narinlik oranları için eğilim, yapı ve stok malzemesi dinamik özelliğine ve bunun yük dinamik özelliği ile ilişkisinden hareketle değişiklik gösterebilmektedir.
- Böylesi karmaşık etkileşimlerin içerildiği bir problemin, pratik kullanımlar için önerilen analitik bir yaklaşımla, eşdeğer taban kesme kuvvetlerinin önemli oranda tahmin edilebildiği anlaşılmaktadır. Durum gerek zemin etkileşimi için gerekse narinlik oranı için hemen her durumda önerilen sayısal modele benzer ya da çoğunlukla yüksek değerler üretmektedir. Buradan hareketle, önerilen analitik

yaklaşımların, silo sistemlerinin deprem davranışları için taban kesme kuvvetlerinin tespitinde yeterli güvenilirliğe sahip olduğu anlaşılmaktadır. Diğer karşılaştırmalara benzer olarak, burada da narinlik bakımından yüksek narinliğe sahip silolar için farklı değerlendirmek gerekliliği ortaya çıkmaktadır.

- Temelin gömülü olduğu durumun da hesaba katılabildiği ÖMZG analitik yaklaşımının en büyük dinamik malzeme basınçlarının tespitinde bodur silolar için davranışı oldukça iyi temsil edebildiği görülmektedir. Elde edilen tüm bulgular ve bunların karşılaştırılmasından hareketle bodur silo sistemlerinde analitik modelin; gömülü olmayan durumda olduğu gibi bu durumda da, sınırlamaları iyi bilindiğinde, teknik literatürdeki modellere nazaran tasarımda rahatlıkla kullanılacak hassasiyette sonuç ürettiği anlaşılmaktadır. Diğer taraftan artan narinlik oranı ile temelin gömülü olma durumuna bağlı olarak temsil kabiliyeti daha güvenli bir şekilde artmaktadır. 4,0 narinlik oranı için dahi temsil kabiliyeti gömülü olmama durumuna nazaran daha iyi bir hal almaktadır.
- Ankastrre durum için önerilen sayısal modele (SM) göre bodur silolarda ( $H/d_c < 2,0$ ) cidarın yerdeğiştirmesinin her iki yüz için de normal doğrultusunda silo dışına doğru gerçekleştiği ve tüm yer hareketi boyunca hiçbir şekilde diğer yönde yerdeğiştirme tepkisi elde edilmediği görülmüştür. Bu durum, silonun narinlik oranı nedeniyle ortaya çıkan bir husustur ki, silonun hakim modları arasında konsol davranıştan daha çok silindirik geometrisi nedeniyle ortaya çıkan diğer hakim mod şekillerinden kaynaklandığına işaret etmektedir. 2,0'den daha büyük narinlik oranları için ise davranışın konsol davranışına benzediği, buradan hareketle teknik literatürde belirtilen 2,0 sınırının burada da anlam bulduğu yapılan çalışmalardan görülmektedir.
- Silo deprem tepkisinde, en büyük basınçların tabandan itibaren gerçekleşme yükseklikleri de her iki yüz için farklı narinlik oranlarında farklı değerler alacaktır. Her iki yüzeyde de, artan narinlik oranıyla, en büyük dinamik malzeme basıncının gerçekleşme yüksekliğinin ( $H_0$ ) azalma eğilimi gösterdiği söylenebilmektedir. Söz konusu tepkinin gerçekleşme yüksekliğinin tabanda oluşacak etkileri değiştireceği ve devirici moment üzerinde önemli değişikliklere neden olabileceği açıktır. Sayısal yaklaşımla temas mekanizmasının dikkate alınması en büyük basıncın gerçekleşme yüksekliğinin tespitine imkan vermekte iken söz konusu tepkinin analitik yaklaşımla temsil edilmesi oldukça güçtür.

- Ankastra çözümde sayısal modelden (SM) her iki yüzeyde de, artan narinlik oranıyla, en büyük dinamik malzeme basıncının gerçekleşme yüksekliğinin (Ho) azalma eğilimi gösterdiği görülmüştür. Yapı zemin etkileşiminin dikkate alındığı durumda (SMZ, SMZG) ise sözkonusu yükseklik narin silolarda oldukça geniş bir dağılıma sahip olmaktadır.
- Çalışmaya konu olan sistemlerin çözümlenmelerinden narinlik , zemin sistemine ait mekanik özellikler, silo cidarının esnekliği ve temelin gömülme oranının sistemin tepkisi üzerinde önemli etkilere neden olabileceği görülmüştür.
- $H/dc=3,0$  ve  $4,0$  gibi narinlik oranları için dinamik malzeme basınçlarının yükseklik boyunca değişimleri daha düşük narinlik oranlarına göre farklılık sergileyebilmektedir. Stok malzemesinin yapı sisteminden ayrılmasının ve buradan hareketle yapı sistemi ile stok malzemesinin dinamik özelliklerinin birbirinden farklı olmasının basınç dağılımlarının alışılmışın dışında karakter sergilemelerine neden olduğu söylenebilmektedir. Bu olayın etkileşime giren her iki sistemin hakim frekansları arasındaki fark ve yerdeğiştirme tepkileri arasındaki faz farkından kaynaklı olarak gerçekleştiği anlaşılmaktadır. Söz konusu basınç değişiminin yükseklik boyunca en büyük etkiyi oluşturduğu andaki değişiminin artan narinlik oranıyla silo üst yüzeyinde daha büyük bir yükseklik boyunca sıfır basınç üretiyor olması da narinlikle değişen bir eğilime işaret etmektedir.
- Önerilen analitik model eşdeğer taban kesme kuvvetlerini oldukça yakın ya da güvenli tarafta kalacak şekilde temsil edebilmektedir. Davranış açısından artan silo yüksekliği ile kütlelerin dolayısıyla da taban kesme kuvvetinin de artacağını beklemek normaldir. Ancak bunun her durumda böyle gerçekleşeceğini beklemek dinamik davranış açısından pek de uygun olmamaktadır. Artan kütleyle karşı böyle bir azalmanın stok malzemesi tepkisinin ve dolayısıyla tüm sistemin ortak tepkisinin değişimi nedeniyle gerçekleşebileceği anlaşılmaktadır. Taban kesme kuvveti tepkilerine benzer şekilde, eğilme momenti tepkilerinin de, önerilen analitik yaklaşımla benzer şekilde elde edilebildiği anlaşılmaktadır.
- Deprem yüklemesi için geliştirilen Veletsos-Younan yaklaşımı (VY) ile tüm silo sistemleri için elde edilen dinamik malzeme basıncı ve dolayısıyla eşdeğer taban kesme ve eğilme momenti değerlerinin oldukça küçük olduğu gerçekleştirilen karşılaştırmalardan tespit edilmektedir. Dolayısıyla bu yöntemin siloların deprem

davranışı için tepkilerin tahmin edilmesinde yeteri derecede güvenilir olmadığı söylenebilmektedir.

- EN1998-4 (2006)'de önerilen yaklaşımın burada önerilen yaklaşıma göre, bodur silolar için oldukça güvensiz tarafta kalabildiği, artan narinlik oranıyla ise EC'nin davranışı belirli bir yaklaşıklıkla temsil edebildiği anlaşılmaktadır. Buradan hareketle  $H/d_c=2,0-4,0$  narinlik aralığında EC yaklaşımının sonuçları yeteri duyarlılıkla temsil edebildiği, önerilen analitik yaklaşım (ÖM) ile EC tarafından önerilen yaklaşımla elde edilen bulguların çok benzer olduğu görülmektedir. Diğer taraftan önerilen analitik yöntem bodur silolar için önemli bir hataya neden olmaksızın dinamik malzeme basınçlarının yükseklik boyunca dağılımının tespiti konusunda yeterli kabiliyete sahiptir. Buradan hareketle, Eurocode tarafından önerilen yaklaşım bu yöntemle değiştirilerek söz konusu hataların önüne geçilebileceği ifade edilebilmektedir.
- Silo deprem davranışının iki farklı fiziksel ortamın karakterine ve bunların etkileşimlerine bağlı olarak değişiklik göstereceği açıktır. Bu nedenle deprem gibi tersinir ancak antisimetrik bir yükleme durumunda yükleme doğrultusundaki her iki yüzde farklı basınç değerlerinin elde edileceği dolayısıyla da sistem davranışının silo merkezine göre simetrik kesitlerde farklı tepkiler oluşturacağı açıktır. Bununla birlikte, dinamik yükleme durumunda sistemin tepkisini kontrol edecek olan hakim modlar da her iki ortam için farklı olacağından, bunların sonuç tepki üzerinde etkileri de karşılıklı cidarlarda farklılık gösterebilmektedir.
- Yüzeysel ve gömülü temele sahip silo sistemlerinde, hem analitik hem de sayısal modellere göre (ÖMZ, ÖMZG, SMZ, SMZG), bodur silolarda ( $H/d_c < 2,0$ ) dinamik malzeme basınçları açısından zemin etkileşimine bağlı belirgin bir değişimden bahsetmek mümkün olmamakla birlikte, S1 ve S4 gibi birbirinden önemli derecede farklı ötelenme ve dönme (rocking) rijitliğine sahip olan iki farklı zemin sistemi için dahi, dinamik malzeme basıncındaki azalmalar göz ardı edilebilecek düzeyde kalmaktadır. Her iki cidarda değişime neden olan etkinin zemin etkileşiminden daha çok stok malzemesi-silo sistemi dinamik karakteristiğindeki değişimden kaynaklandığı söylenebilmektedir.  $H/d_c = 2,0$  olması durumunda yapı-zemin etkileşiminin sistemin tepkisine etkisi görülmeye başlanmıştır.

- Çok net olmasa da bodur silolar için dinamik malzeme basınçları genelde artan zemin etkileşimi nedeniyle azalma eğilimindedir. Bu bulgu zemin etkileşimi nedeniyle yapı sistemlerinde iç kuvvet tepkilerinin azalma eğiliminde olduğu savıyla üst üste düşmektedir. Ancak tasarım açısından önemli mertebede olduğundan bahsedilemez. Diğer taraftan narin silo sistemleri için artan zemin etkileşimi ile bu etkideki azalma çok daha belirgin bir şekilde göze çarpmaktadır.
- Yapı-zemin etkileşimini dikkate alan yüzeysel temele sahip silo sistemleri için önerilen analitik yaklaşım (ÖMZ) bodur silolarda sayısal modele (SMZ) oldukça yakın sonuç verirken artan narinlik oranı ile söz konusu tepki değerlerini oldukça yakın ya da büyük tahmin etmektedir.
- Bu çalışmada gerçekleştirilen parametrik çözümlerden ve irdelemelerden anlaşabileceği üzere teknik literatürde narinlik oranı için verilen 2,0 sınırının, silo deprem davranışının da değişiminde kritik bir nokta olduğu açıkça görülmektedir.
- S4 gibi oldukça düşük rijitlik değerlerine sahip olan zemin sistemlerinde önerilen analitik temel-zemin sisteminin önemli derecede frekans bağımlı yüksek sönüm üretebilmesi nedeniyle çok kötü olarak nitelendirilebilecek bu tür zemin sistemlerinde yerdeğiştirmeler sayısal modele göre küçük elde edilmektedir.
- Önerilen analitik modellerde gerek yapının, gerekse stok malzemesinin konsol giriş modeli yardımıyla dikkate alınmış olması, artan narinlikle sistem tepkilerinin daha gerçekçi modellenmesine olanak sağladığı ortaya konulmuştur.
- Gerek zemin etkileşimli gerekse de ankastre temel kabulü ile önerilen analitik yaklaşımlarda, silonun yerdeğiştirme tepkisini kontrol eden mekanizmanın silo cidarı modları olacağı, bu modların da, analitik modelde faydalanılan giriş modeliyle dikkate alınmasının güç olduğu anlaşılmaktadır. Bu nedenle önerilen analitik yaklaşımların bodur silolar için yerdeğiştirme tepkisinin hesabı konusunda geliştirilmesi gerekliliği ortaya çıkmaktadır. Bodur silolara göre, artan narinlik oranları ile yerdeğiştirmelerin yükseklikle değişimlerinin analitik model ile belirli bir yaklaşıkla elde edilebildiği, ancak davranış farkının narinlik oranı 4,0 gibi yüksek değerler aldığı da yine ortaya çıkabildiği görülmektedir. Bu nedenle yerdeğiştirme tepkileri için sistemi narinlik bakımından bodur, orta narin ve narin silolar olarak üçe ayırarak, her bir ayırım için değerlendirmeleri farklı şekilde ele almak uygun olacaktır.

- Bodur ve narin silo ayırımına benzer bir davranış farkının narinlik oranının 4,0 gibi yüksek değerler aldığı da ortaya çıktığı görülmüştür. Bunun gibi bir değer için de yine bir sınıf ayrımı yapılması gerekliliği yapılan çözümlerden açıkça görülebilmektedir. Burada konsol giriş kabulünün geliştirilerek, yüksek modların etkisinin de hesaba katılması gerekliliği ortaya çıkmaktadır. Bu yolla önerilen analitik yaklaşımının gerek düşük, gerekse de yüksek narinlik oranları için yerdeğiştirme tepkilerinin hesabında iyileştirilmesi gerekliliği görülmektedir.
- Temelin gömülü olması durumunda önerilen analitik model (ÖMZG) ile sayısal model (SMZG) arasında artan narinlik oranı ile önemli farklılıkların ancak 4,0 narinlik oranı için gözlemlendiği, benzer önemli farklılıkların temelin yüzeysel olması durumunda ise 3,0 oranında da tespit edilebildiği görülmüştür. Gömülmenin zemin nedeniyle oluşan silo sistemi periyodundaki uzamaların azalmasına neden olacağı ya da sistemin toplam rijitliğini arttıracak dikkate alındığında bu oranın 3,0 den 4,0'e çıkmasının nedeni anlaşılabilir.
- Temelin gömülü olması durumunda silo-zemin etkileşiminde zeminin silo davranışını yüzeysel temele göre daha az etkilediği anlaşılmaktadır. Gömülmenin zemin nedeniyle oluşan silo sistemi periyodundaki uzamaların azalmasına neden olacağı ya da sistemin toplam rijitliğini arttıracak dikkate alındığında, zemin etkileşiminin narinlik etkilerini daha arttırmasına temelin gömülme oranı engel olmaktadır.
- Temelin gömülü olması durumunda önerilen sayısal modele (SMZG) göre en büyük dinamik malzeme basınçlarının tabandan itibaren gerçekleşme yüksekliklerinin ( $H_0$ ) her iki cidarda da artan narinlik oranı ve azalan zemin rijitlikleri ile deprem doğrultusundaki karşılıklı cidarlarda daha çok tepe noktalarında elde edildiği görülmüştür.
- Gerek yüzeysel temel durumunda, gerekse de gömülü temel durumunda tasarıma esas olacak eşdeğer taban kesme kuvvetleri önerilen analitik yöntemle sayısal modele göre daha büyük bulunmuştur. Buradan hareketle, bu yolla gerçekleştirilecek tasarımın her durumda güvenli olacağı anlaşılmaktadır. Dinamik malzeme basınçlarının yükseklik boyunca değişimlerinin kimi noktalarda önerilen sayısal yaklaşıma nazaran düşük tahmin ediliyor olmasına karşın, eşdeğer taban kesme kuvvetinde böyle bir durumun meydana gelmemesi, önerilen analitik yaklaşımla inceleme konusu silolarda güvenli sonuç elde edilebileceğini

göstermiştir. Diğer taraftan artan narinlik oranı ile iki yaklaşım arasındaki oransal olarak farkın artıyor olması teknik literatürde tanımlanan sınırlara ek olarak narinlik oranının 3,0 ve daha büyük olduğu sistemlerde ekonomik sonuçlar üretilebilecek şekilde daha hassas çalışılması gerektiğini ortaya koymaktadır.

- Rijit cidar kabulünde dinamik malzeme basınçlarının, stok malzemesi narinlik oranına bağlı olarak şekillendiği, esnek yaklaşımda buna ek olarak malzemenin cidar ile girdiği etkileşimin de davranışı etkileyen bir parametre olarak devreye girdiği görülmüştür. Diğer bir deyişle rijit kabul için değişime neden olan tek parametre, silo-stok malzemesinin geometrisinde meydana gelen narinlik artışı olurken, esnek yaklaşımda, silo cidarındaki değişimlerin de toplam davranış üzerinde etkili olduğu belirlenmiştir.
- Rijit cidar kabulünde stok malzemesinin hareketi cidarın normali doğrultusunda bir yönde cidar tarafından sınırlandırılmış bir yüzeye sahip olduğundan, artan malzeme kütlesi ve narinlik oranı dinamik malzeme basınçlarını da arttırmıştır.
- Cidar esnekliğinin, silolanan malzemenin kayma rijitliğine göre yatay rijitliğini azaltarak yatay ötelenme hareketi ile cidara iletilen eylemsizlik kuvvetlerini azalttığı, yatay kayma hareketi ile tabana iletilen payı arttırdığı belirlenmiştir. Bu durumda narin siloların daha esnek olması nedeni ile elde edilen en büyük dinamik malzeme basıncı değerlerinde artan narinlik oranı ile azalma meydana geldiği yapılan çözümlerle belirlenmiştir.
- Rijit ve esnek çözüme göre elde edilen bulgular arasındaki fark artan narinlik oranıyla artma eğilimindedir.
- Dinamik malzeme basınçlarının yükseklikle değişimi açısından narin ve bodur silo ayrımı için teknik literatürde kabul gören  $H/dc=2,0$  sınırında esnek ve rijit çözüm arasında fark oluşmaya başlamış  $H/dc>2,0$  için yükseklik boyunca dağılımın farkı oldukça belirginleşmiştir.
- Herbir narinlik oranı için rijit ve esnek çözümden elde edilen bulgular karşılaştırıldığında artan narinlik oranı ile rijit olarak öngörülen silo sistemlerinde, aynı eylemsizlik etkileri için tedrici artan nitelikte ve önemli miktarda ek taban kesme kuvveti ve eğilme momentinin olduğu belirlenmiştir.
- Ankastre durumda önerilen sayısal modele (SM) göre, deprem esnasında cidarda en büyük kesme kuvvetinin olduğu saniyedeki basınç dağılımından davranışın sağ ve sol cidarda ilk dört narinlik oranı için ( $H/dc=1,0, 1,5, 2,0, 2,5$ ) benzer karakterde



olduğu ve bu benzerliğin karşılıklı cidarlar için de geçerli olduğu görülmüştür. 3,0 ve 4,0 gibi narinlik oranlarında ise narinliğe bağlı olarak esnekliğin artması ile meydana gelen görel olarak büyük yerdeğiştirmelerden dolayı cidarın stok malzemesi davranışına etkisinin arttığı ve özellikle 4,0 gibi önemli ölçüde büyük bir narinlik oranında stok malzemesinin kendi içerisinde de davranışının değiştiği anlaşılmıştır.

- Artan narinlik oranı ile, artan yerdeğiştirmelerden dolayı stok malzemesinin kayma rijitliği azalarak, tabana iletilen eylemsizlik kuvvetleri artmakta, bu durum da sözkonusu tepkilerin pik değerlerinin artan narinlik oranları ile genel olarak tabana yakın yerlerde oluşmasına neden olabilmektedir.
- Narinlik oranındaki büyük artışların stok malzemesi ile cidarın birbirinden oldukça farklı hakim modlarının ortaya çıkmasına neden olabildiği, bu durumun dinamik malzeme basınçlarının yükseklik boyunca değişimlerini önemli ölçüde etkileyebildiği görülmüştür.
- Zemin etkileşiminin dikkate alınmasıyla, en büyük dinamik malzeme basınçlarının azalan zemin rijitliği ile özellikle sağ cidarda net bir şekilde azalma eğiliminde olduğu görülmektedir. Narinlik oranının yüksek olduğu sistemlerde bu azalmanın daha büyük oranlarda gerçekleştiği, azalan narinlik oranları ile birlikte etkileşime bağlı oransal değişimin de azalma eğilimi gösterdiği belirlenmiştir. Azalan temel/zemin sistemi rijitliğine bağlı olarak dinamik malzeme basınçlarının yükseklik boyunca da azalma gösterdiği görülmüştür.
- Zemin etkileşiminin tüm sistemin ötelenme ve dönme rijitliğinde önemli azalmalara neden olabildiği, hakim periyotlarını uzatabildiği dolayısıyla da dikkate alınan deprem yüklemesi hakim frekansı ile sistem frekansı arasındaki ilişkiyi değiştirebildiği görülmüştür.
- Yüzeysel temele sahip sistemlerde, zemin etkileşiminden dolayı, bütün modellerde azalan temel/zemin sistemi rijitliğine bağlı olarak yatay yerdeğiştirmelerde önemli artışlar gerçekleşmiştir. Bu artışların incelenen sistemde sol ve sağ cidarda aynı karakterde gerçekleştiği görülmüştür. İnceleme konusu diğer tepki parametrelerinden farklı olarak yatay yerdeğiştirme tepkisinde eğilimi hiçbir bulgunun bulunmaması, söz konusu tepkiler için zemin etkileşiminin en önemli ve baskın parametre olduğunu göstermiştir.

- Zemin etkileşimi nedeniyle azalma eğiliminde olan iç kuvvet etkilerinin, yer değiştirme etkilerinde çok önemli miktardaki artışlara neden olduğu görülmüş, söz konusu yapıların tasarımlarının değerlendirilmesinde bir taraftan olumlu sayılabilecek etkiler meydana gelirken diğer taraftan izin verilebilir yerdeğiştirme sınırları rahatlıkla geçilebileceği ve yapı sistemi üzerinde ikincil mertebeye etkileri rahatlıkla ortaya çıkabileceği anlaşılmaktadır.
- Ankastre kabulle yapılan çözümlerden silo yapı sistemi için elde edilen yerdeğiştirme tepkilerinin özellikle bodur silolar için, oldukça küçük olduğu, söz konusu yapı sistemi için ise bu değerlerin dikkate alınmayacak mertebelerde gerçekleştiği görülmektedir. Ancak, artan narinlik oranıyla tepkilerin de narin silolarda bodur silolara göre oransal olarak önemli mertebede artmalarına karşın, yine de yerdeğiştirme tepkilerinin kayda değer seviyelere ulaşmadıkları söylenebilmektedir. Diğer taraftan söz konusu yerdeğiştirme tepkileri için durum böyle olmakla birlikte, önerilen analitik modelin (ÖM) söz konusu tepkiyi artan narinlik oranı ile gerçekçi bir şekilde tespit ettiğinden bahsetmek de mümkün görülmemektedir.
- Bodur silolarda meydana gelen davranışta genelde silindirik hacmin kendi içerisinde çiçek benzeri ya da her iki cidarında normalleri doğrultusunda dışa ya da içe hareket ettiği modların baskın geldiği, oysaki bu durumun, artan narinlik oranıyla değiştiği ve konsol moduna dönüştüğü anlaşılmaktadır.
- 1,0 narinlik oranına sahip bodur silo sisteminde S4 zemin sistemi için gerçekleştirilen çözümlerden yatay yerdeğiştirmelerin her iki cidar için de aynı yönde gerçekleştiği ve ankastre kabulden farklı bir davranışın ortaya çıktığı görülmektedir. Ancak burada zeminin dönme (rocking) rijitliğinin önemli derecede azalmış olmasının, cidarın yatay yerdeğiştirme bileşeninde dönmenin etkisini en üst düzeye çıkarttığı ve sistemin ötelenme davranışını da kontrol ettiği ortaya konulmuştur. Dolayısıyla bu durumda yatay yerdeğiştirme tepkisi tamamıyla zemin etkileşimi bağımlı oluşmaktadır. Buradan hareketle bodur silolar için azalan zemin rijitliği ile davranışın narin silo sistemlerine benzediği söylenebilmektedir.
- Artan narinlik oranı ile sistemin dinamik özelliklerinden olan hakim periyodun değişmekte olduğu ve bu sayede yer hareketine karşı tepkilerin de değiştiği anlaşılmaktadır.

- Gömülmenin sistemin tepkilerinde önemli rijitlik artışlarına neden olmasından dolayı, silo sisteminin artan gömülme oranı ile eşdeğer taban kesme kuvveti tepkileri artış göstermektedir. Benzer şekilde, gömülmenin aynı temel/zemin sistemi koşullarında gömülmenin olmadığı duruma göre yerdeğiştirmeleri de azalttığı görülmektedir. Diğer taraftan yerdeğiştirme tepkileri üzerinde gömülme etkisi artan narinlik ile daha etkin bir şekilde ortaya çıkmaktadır.
- Dinamik davranışı, elbette yalnızca bir parametreye bağlı olarak değerlendirmek ve tüm davranışı bu parametrenin kontrol ettiği savıyla açıklamaya çalışmak doğru olmayacaktır. Zemin etkileşiminin dikkate alındığı çözümlerden eğilim net bir şekilde görünüyor olmasına karşın, bazı sistemlerin eğilimi bozan karakter sergilemeleri gayet doğaldır. Keza zemin etkileşimi tüm sistemin ötelenme ve dönme rijitliğinde önemli azalmalara neden olabilmekte, hakim periyotlarını uzatabilmekte dolayısıyla da dikkate alınan yük ile olan ilişkisini değiştirebilmektedir. Buradan hareketle eğilimi bozan örneklerin bulgularını bu bağlamda değerlendirmek uygun olacaktır.
- Tasarım üzerinde en önemli derecede etkili karşılaştırmalardan bir diğeri de, cidar üzerindeki en kritik gerilmelerin zemin etkileşimiyle değişimidir. Genel anlamda yalnızca yapı-zemin etkileşiminin irdelendiği yapı sistemlerinde iç kuvvet tepkisindeki azalmalar ve buna paralel olarak yerdeğiştirme tepkisindeki artışlar belirgin sonuçlar olarak ortaya çıkmaktayken, en kritik olması beklenen tabana yakın noktalarda elde edilen Von-Mises gerilmeleri beklenenin tersine gömülmenin olduğu durumda artan zemin etkileşimi ile, özellikle narin silolarda, artan bir eğilim sergilemektedirler. Bu değişim gömülmenin olmadığı durumda ise kimi zaman kayda değer farkların çıkmaması şeklinde kimi zaman ise tersi yönde azalma eğilimi şeklinde görülmektedir.
- Yatay yerdeğiştirme tepkisi için önerilen analitik modelin bodur ve narin silolar için iki farklı yaklaşım önerilerek geliştirilmesinin gerekli olduğu elde edilen bulguların karşılaştırılmasından görülmektedir.
- İncelemeye konu olan siloların, değişik frekans içeriği ve karaktere sahip farklı deprem kayıtlarına göre çözümlenmeleri gerçekleştirilerek sonuçların daha da genelleştirilebilmesi için çalışmanın genişletilmesinde yarar bulunmaktadır.

Özetle bu çalışma, betonarme silindirik siloların deprem davranışında stok malzemesi-silo ve yapı-temel/zemin etkileşiminin önemli ölçüde etkili olduğunu, narinlik oranı, silo cidarı esnekliği, temel gömülme oranı ve zemin sınıfları gibi parametrelerin davranış karakterini ihmal edilemez seviyede değiştirdiğini göstermiştir. Diğer taraftan, bu çalışmada sözkonusu davranışı belirlemede kullanılan EN1998-4 (2006) yönetmeliğinde verilen yaklaşımın hangi sınırlar içinde geçerli olduğu ve geliştirilen Veletsos-Younan yaklaşımının bu amaçla kullanılmasının ise tepkilerin yanlış tespit edilmesine yol açabileceği anlaşılmaktadır. Tüm bunlara ek olarak bu sistemlerin deprem davranışını belirlemek için ankastre, temel gömülü ve gömülü olmadığı durumları dikkate alabilen yapı zemin etkileşiminin de dikkate alındığı iki analitik model verilen sınırlar içerisinde rahatlıkla kullanılabilir olduğu söylenebilmektedir. Bu sonuçların daha da genellenebilmesi için benzer çalışmaların daha farklı deprem kayıtları için yapılması yukarıda da belirtildiği gibi uygun olacaktır.

## 5. KAYNAKLAR

- Abdel-Fattah, M., T., Moore, I., D. ve Abdel-Fattah, T., T., 2006 (a). A Numerical Investigation into the Behavior of Ground-Supported Concrete Silos Filled with Saturated Solids, International Journal of Solids and Structures, 43, 3723-3738.
- Abdel-Fattah, M., T., Moore, I., D. ve Abdel-Fattah, T., T., 2006 (b). Behaviour of Elevated Concrete Silos filled with Saturated Solids, Canadian Journal of Civil Engineering, 33, 227-239.
- Abdel-Sayed, G., Monasa, F. ve Siddall, W., 1985. Cold-Formed Steel Farm Structures Part I: Grain Bins. Journal of Structural Engineering, American Society of Civil Engineers 111, 10, 2065–2089.
- ABYYHY, 2007. Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik, Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, Ankara.
- ACI, 1997. Standard Practice for Design ve Construction of Concrete Silos and Stacking Tubes for Storing Granular, ACI-313-97, American Concrete Institute.
- ACI, 1997. Commentary on Standard Practice for Design and Construction of Concrete Silos and Stacking Tubes for Storing Granular, ACI-313R-97, American Concrete Institute.
- Althapp, B., Böhrnsen, J., U. ve Antes, H., 2003. Silo Discharge: Numerical Investigation of Bulk Solids Behaviour, Proceedings of the 4th International Conference for Conveying and Handling of Particulate Solids, 1, 6.64-6.70.
- ANSYS 13.0, 2010. ANSYS Inc., Canonsburg, PA.
- Apsel, R., J. ve Luco, J., E., 1987. Impedance Functions for Foundations Embedded in a Layered Medium: An Integral Equation Approach, Earthquake Engineering and Structural Dynamic, 15, 213-231.
- Ayuga, F., Guaita, M. ve Aguado, P., 2001. Static and Dynamic Silo Loads Using Finite Element Models, Journal of Agricultural Engineering Research, 78, 3, 299-308.
- Ayuga, F., Guaita, M., Aguado, P., J. ve Couto, A., 2001. Discharge and The Eccentricity of The Hopper Influence on The Silo Wall Pressure, Journal of Engineering Mechanics, 127, 10, 1067-1074.
- Arnold, P., C., McLean, A., G. ve Roberts, A., W., 1980. Bulk Solids: Storage, Flow and Handling, Tunra Bulk Solids Handling Research Associates, Univ. Newcastle, Australia.

- Askegaard, V. ve Brown, C., J., 1995. Influence of Personal Factor on Cell Response When Mounting Embedded Pressure Cells. *Bulk Solids Handling*, 15(2), 221-224.
- Azadi M., R. ve Soltani A., A., 2010. The Effects of Soil-Foundation-Structure Interaction on the Dynamic Response of Delijian Cement-Storage Silo Under Earthquake Loading, *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, ejge. <http://ejge.com/2010/Ppr10.053/Ppr10.053.htm>
- Bardet, P., J., 1997. *Experimental Soil Mechanics*, Prentice Hall, Upper Saddle River New Jersey 07458, ISBN: 0-13-374935-5, 583s.
- Barnes, E., G., 2000. *Soil Mechanics: Principles and Practices*, Second Edition, Macmillan Press Ltd, 493 s.
- Bechtoula, H. ve Ousalem, H., 2005. The 21 May 2003 Zemmouri (Algeria) Earthquake Damages and Disaster Responses. *J. Adv. Concr. Technol.*, 3, 1, 161–174.
- Bellman, H., E., Deterioration Of Concrete Tower Silos. Argue & Associates/Guelph, <<http://www.omafra.gov.on.ca/english/engineer/facts/90-235.htm>> Jan. 29, 2008.
- Blight G., E., 1992. Temperature-Induced Loading on Silo Walls, *Structural Engineering Review*, 4, 1, 61– 71.
- Bozozuk, M., 1972. Foundation Failure of The Vanleek Hill Tower Silo. *Perf. Earth and Earth Supported Structures*, 2, 2, 885–902.
- Bozozuk, M. , CBD-177 Tower silo foundations. *Canadian Building Digest*, National Research Council, Canada, <[http://irc.nrccnrc.gc.ca/pubs/cbd/cbd177\\_e.html](http://irc.nrccnrc.gc.ca/pubs/cbd/cbd177_e.html)> Jan. 29, 2008.
- Branspy, P., L. ve Blair-Fish, P., M., 1974. Wall Stresses in Mass-Flow Bunkers, *Chemical Engineering Science*, 29, 5, 1061-1074.
- Briassoulis, D. ve Pecknold, D., A., 1986. Behaviour of Empty Steel Grain Silos Under Wind Loading: Part 1: The Stiffened Cylindrical Shell, *Engineering Structures*, 8,4,260-275.
- Briassoulis, D., 1991. Limitations in The Range of Applicability of The Classic Silo Theories. *Structural J.*, 88, 4, 437-444.
- Briassoulis, D., 2000. Finite Element Analysis of A Cylindrical Silo Shell Under Unsymmetrical Pressure Distributions. *Computers & Structures*,78, 271-281.

- Bucklin R., A., Molenda M., Bridges T., C. ve Ross I., J., 1996. Slip-Stick Frictional Behavior of Wheat on Galvanized Steel. Transactions of the ASAE, 39, 2, 649-653.
- Carson, J., W. ve Jenkyn, R., T., 1993. Load Development and Structural Considerations in Silo Design, Presented at Reliable Flow of Particulate Solids II, Oslo, Norway.
- Carson, J., W., 2000. Silo Failures: Case Histories And Lessons Learned, Proc., 3rd Israeli Conf. for Conveying and Handling of Particulate Solids, , Dead Sea, Israel, 1, 4, 1-11.
- Chandrasekaren, A., R. ve Jain, P., C., 1968. Effective Live Load of Storage Materials Under Dynamic Conditions, Indian Concrete Journal, Bombay, India, 42, 9, 364-365.
- Chen, J., F., Yu, S., K., Ooi, J., Y. ve Rotter, J., M., 2001. Finite-Element Modelling of Filling Pressures in a Full-Scale Silo, Journal of Engineering Mechanics, 127, 10, 1058-1066.
- Clerkin, P., Transcona Silo, Winnipeg. Archiseek, Online ArchitectureResources, <<http://www.archiseek.com/content/showthread.php?t=3043>>, Jan. 22, 2008.
- Coduto, P., D., 2001. Foundation Design: Principles and Practices, Second Edition, Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, 883 s.
- Couto, A., 2000. Metodos avanzados de calculo de precisiones estaticas en siloscilindricos y prismaticos con tolva excentrica mediante el metodo de los elementos finitos. Tesis Doctoral, Universidad Politecnica de Madrid.
- Croll, J., G., A., 2006. Design Analysis for Buckling of Tanks and Silos. Journal of Structural Engineering, 132, 1, 43-49.
- Çelebi, M., 1998. Turkish Earthquakes: Two Reports. Lessons from the Adana-Ceyhan Quake and the Dinar Aftershock EERI Newsletter 32, 9, 8.
- Ding, S., 2005. Investigation of Flow and Pressure in Silos during Filling and Discharging in Presence of Inserts, PhD. Thesis, University of Edinburgh, Edinburgh, Scotland.
- DIN, 1981. Buildings In German Earthquake Areas - Design Loads, Analysis And Structural Design, Usual Buildings - Amendment 1, Map Showing Earthquake Areas, DIN 4149-1, Deutsches Institut für Normung, Berlin, Germany.
- DIN, 1987. Design Loads for Buildings-Part 6: Loads in Silo Containers, DIN 1055-6, Deutsches Institut für Normung, Berlin, Germany.

- Dobry, R. ve Gazetas, G., 1984. Dynamic Response of Arbitrary Shaped Foundations, Journal of Geotechnical Engineering, 112, 2, 109-135.
- Doğangün A., Durmuş A. ve Durmuş A., 2008. Principles of Analysis of Granular Materials Storage Structures and Calculation of Silos, Proceeding of the 8<sup>th</sup> International Congress on Advances in Civil Engineering, ACE 2008, 3, 403-410.
- Doğangün, A., Karaca, Z., Durmuş, A. ve Sezen H., 2009. Cause of damage and failures in silo structures, Journal of Performance of Constructed Facilities, 23, 2, 65-71.
- Durmuş, A., 2007. Silolar Konusunda Bazı Teoriler ve Stok Yapılarının Tasarımına İlişkin Genel Bir Yaklaşım, Yüksek Lisans Tezi, K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Elia, G., Rouainia, M., 2011. Simulation of the Dynamic Behaviour of a Sugar Silo Founded on A Cemented Soil, Proceedings of the XIV Anidis Conference, Bari, Italy.
- Eibl, J., Landahl, H., Häußler, U. ve Gladen, W., 1982. Zur Frage des Silodrucks. Beton- und Stahlbetonbau, 77, 104-110.
- Eibl, J., 2009. Actions, Silos, Fundamentals of Theory, Behaviour and Design, edited by Brown, C. J., Nielsen, J, Taylor&Francis, New York, USA, 262-311.
- Enstad, G., G., 1983. The Ultimate Critical Outlet Width for Flow in Mass-Flow Hoppers. Chemie Ingenieur Technik, 55(2), 154-155.
- Eren Z., G., 1995. The Influence of Diameter Size on the Cost of Circular Cement Silos, Master Thesis, Boğaziçi University, İstanbul.
- Esslinger, M., 1971. Stationäre Windbelastung Offener und Geschlossener Kreiszyklindrischer Silos. Stahlbau, 12, 361–368 (in German)
- Eurocode 1, 2006. Basis of design and actions on structures - Part 4: Actions in silos and tanks, EN 1991-4.
- Eurocode 8, 2003. Design of structures for earthquake resistance – Part 4: Silos, tanks and pipelines, EN 1998-4.
- Eurocode 8, 2006. Design of structures for earthquake resistance – Part 4: Silos, tanks and pipelines, EN 1998-4.
- FEM, 1986. Specific Characteristics of Bulk Materials as Applicable to Storage in Silos, Fédération Européenne de la Manutention, FEM-2381, Paris.



- FEM, 1989. Influence of the Characteristics of Bulk Materials on the Design and Dimensioning of Silos, Fédération Européenne de la Manutention, FEM-2321, Paris.
- FEM, 1991a. Properties of Bulk Materials, Fédération Européenne de la Manutention, FEM-2581, Paris.
- FEM, 1991b. General Properties of Bulk Materials and Their Symbolization, Fédération Européenne de la Manutention, FEM-2582, Paris.
- Fischer, W., Silos and Bunkers in Stahlbeton, Veb Verlag Fur Bauwesen, Berlin, Germany, 1966.
- GEES Reconnaissance Team., The November 12, 1999, Turkey Earthquake, Preliminary Reports of the Turkey–U.S. Geotechnical Earthquake Engineering Reconnaissance Team, <[http://gees.usc.edu/GEES/RecentEQ/Turkey\\_Duzce/Reports/Tunnel/tunnel.htm](http://gees.usc.edu/GEES/RecentEQ/Turkey_Duzce/Reports/Tunnel/tunnel.htm)> Jan. 22,2008.
- Gillie, M., Holst, J., M., F., G., Münch, M. ve Rotter, J., M., 2002. Behaviour of Silos on Discrete Brackets, International Journal of Structural Stability and Dynamics, 2, 1, 45-62.
- Goda, T., J. and Ebert, F., 2005. Three-Dimensional Discrete Element Simulations in Hoppers and Silos, Powder Technology, 158, 58-68.
- Goodey, R., J., Brown, C., J. ve Rotter, J., M., 2003. Verification of A 3-Dimensional Model for Filling Pressures in Square Thin-Walled Silos, Engineering Structures, 25,14, 1773–1783.
- Goodey, R., J., Brown, C., J. ve Rotter, J., M., 2006. Predicted Patterns of Filling Pressures in Thin-Walled Square Silos, Engineering Structures, 28, 1, 109-119.
- Greiner, R. ve Derler, P., 1995. Effect of Imperfections on Wind-Loaded Cylindrical Shells, Thin-Walled Structures, 23, 1-4, 271.
- Guaita, M.,1995. Creación de Modelos para la Simulación de Silos por el Método de Elementos Finitos y Análisis de los Empujes Estáticos del Material Almacenado. Tesis Doctoral. ETSI. Agrónomas, Madrid. Universidad Politécnica de Madrid.
- Guaita, M., Couto, A. ve Ayuga, F., 2003. Numerical Simulation of Wall Pressure During Discharge of Granular Material from Cylindrical Silos with Eccentric Hoppers, Biosystems Engineering, 85, 1, 101-109.
- Guerrin, A. 1969. Traite de Béton arme, Constructions Diverses, Tome XI, Paris.
- Guines, D., Ragneau, E. ve Kerour, B., 2001. 3D Finite-Element Simulation of a Square Silo with Flexible Walls, Journal of Engineering Mechanics, 127,10, 1051-1057.

- Haaker, G. ve Scott, O., 1983. Wall Loads on Corrugated Steel Silos, Proceedings, Second International Conference on the Design of Silos for Strength and Flow, Stratford-upon-Avon, Powder Advisory Centre, Sep.1983, 480-503.
- Harris E., C. ve von Nad J., D., 1985. Experimental Determination of Effective Weight of Stored Material for Use in Seismic Design of Silos, *ACI Journal*, 82, 6, 828-833.
- Härtl, J., 2008. A Study of Granular Solids in Silos with and without An Insert, Ph D Thesis, The University of Edinburgh, Edinburgh, Scotland.
- Hartlen J., Nielsen J., Ljunggren, G., Martensson G. ve Wigram, S., 1984. The Wall Pressure in Large Grain Silos, Swedish for Building Research, Stockholm, Document D2:1984.
- Hatfield, F., J. ve Bartali, E., 1988. Static Forces and Moments in a Grain Silo, *ASCE Journal of Structural Engineering*, 114, 12, 2814-2819.
- Hertlein, B., Why Use NDT. <[http://www.members.aol.com/ NDTMAN1/papers/storag\\_1.jpg](http://www.members.aol.com/NDTMAN1/papers/storag_1.jpg)> Jan. 22, 2008.
- Holler, S. and Meskouris, K., 2006. Granular Material Silos under Dynamic Excitation: Numerical Simulation and Experimental Validation, *Journal of Structural Engineering*, 132, 10, 1573-1579.
- Homes, A., G., 1972. Lateral pressures of Granular Materials in Silos, ASME Paper No 72-MH-30 for Meeting, Sept 17-20.
- Issaev, D., A., 2002. Dynamic Non-Linear Analysis of A Silo Building, *Individual studies by participants to the International Institute of Seismology and Earthquake Engineering*, 38, 249-260.
- Jaky, J., 1948. Pressures in Silos, Proc. 2nd Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engg., Rotterdam, Netherlands June 21-30, 1, 103-107.
- Janssen, H., A., 1895. Versuch uber Getreidedruck in Silozallen. *Zeitschrift des Vereines Deutscher Ingenieure*, 39, 1045-1049.
- Jenike, R., 1964. Storage and Flow of Solids, University of Utah, Utah Engineering and Experimental Station Bulletin.
- Jenike, A., W. ve Johanson, J., R., 1968. Bin loads. *J. Structures Div. ASCE*, 94(ST4), 1011-1041.
- Jenike, A., W., Johanson, J., R. ve Carson J., W., 1973. Bin Loads-Part 3: Mass Flow Bins. *Jnl. Engng Industry, Trans. ASME* 95 (Ser. B, No. 1), 6-12.

- Jianbao, F., Maotian, L., Qing, Y. ve Tingkai, N., 2010. Three-Dimensional Finite Element Analysis of Wall Pressure on Large Diameter Silos, Journal of Convergence Information Technology, 5, 7, 120-128.
- Jofriet J., C., LeLievre B. ve Fwa T., F., 1977. Friction model for finite element analyses of silos. Transactions of the ASAE, C2, 735-744.
- Jofriet J., C., Negi S., C. ve Lu Z., 1997. A Numerical Model for Flow of Granular Materials in Silos Part 3: Parametric Study, Journal of Agricultural Engineering Research, 68, 237-246.
- Johns, D., J., 1983. Wind-Induced Static Instability of Cylindrical Shells, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 13, 1-3, 261-270.
- Juan, A., Moran, J., M., Guerra, M., I., Couto, A., Ayuga, F. ve Aguado, P., J., 2006. Establishing Stress State of Cylindrical Metal Silos Using Finite Element Method: Comparison with ENV 1993, Thin-Walled Structures, 44, 11, 1192-1200.
- Karlsson, T., Klisinski, M. ve Runesson, K., 1998. Finite Element Simulation of Granular Material Flow in Plane Silos with Complicated Geometry, Powder Technology, 99, 29-39.
- Kazas, T., Rescue Operation Continues at Morgantown Energy Associates Facility, Electric news releases, <<http://www.dom.com/news/elec2001/pr0302a.jsp>> Jan. 22, 2008.
- Keiter, W., R. ve Rombach, G., A., 2001. Numerical Aspects of FE-Simulations of Granular Flow in Silos, ASCE Journal of Engineering Mechanics, 127, 10, 1044-1050.
- Khelil, A., 2002. Buckling of Steel Shells Subjected to Non-Uniform Axial and pressure Loading. Thin-Walled Structures, 40, 11, 955-970.
- Kıvrak, K., 1987. Betonarme Siloların Hesap Esasları, Yönetmeliklere Göre Malzeme Basınçlarının Karşılaştırılması ve Uygulamalar, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Kieselbach, R., 1997. Bursting of A Silo, Eng. Failure Anal., 1, 4, 49-55.
- Killion M., 1985. Design Pressures in Circular Bins, Journal of Structural Engineering, 111, 1760-1774.
- Kmita, J., 1991. An Experimental Analysis of Internal Silo Loads. Bulk Solids Handling, 11, 120-150.
- Koenen, M., 1895. Berechnung des Seitenund Bodendrucks in Silos, Zentralbl. Bauverwaltung, 16, 446-449.

- Konoue, N., Omote, Y. ve Watanabe, S., 1986. Vibration Tests on Large Scale Coal Storage Silo at the Saijo Power Station in Japan, International Journal Bulk Solids Storage in Silos, 2, 1, 7-10.
- Kumbasar, N., Aydoğan, M. ve Altan, M., 1992. Betonarme Silo ve Bunkerler, İTÜ İnşaat Fakültesi Matbaası, İstanbul.
- Kwok, K., C., S., 1985. Wind Loads on Circular Storage Bins. Proceedings of Joint US–Australian Workshop on Loading, Analysis and Stability of Thin Shell Bins, Tanks and Silos, University of Sydney, 49–54
- Lapko, A. ve Prusiel, J., A., 2001. Studies on Thermal Actions and Forces in Cylindrical Storage Silo Bins, Handbook of Conveing and Handling of Particulate Solids, 10, 189– 197.
- Lapko, A., Gnatowski, M. ve Prusiel, J., A., 2003. Analysis of Some Effects Caused by Interaction Between Bulk Solid and R.C. Silo Wall Structure, Powder Technology, 133, 44-53.
- Lambert, F. W., 1968. The Theory and Practical Design of Bunkers, Brit. Const. Steelwk Assoc., Publ. 32, London.
- Lapko A., 1996. Computational Model of Silo Shell with Grain and Wall Structure Interaction, Engenharia Civil UM, 4, 31,41.
- Lewis, J., Silo Failures-Why Do They Happen? <<http://www.powderandbulk.com/blog/archives/2006/02/>>, Jan. 22, 2008.
- Li, Y., Puri, V., M. ve Manbeck, H., B., 1991. Finite Element Model Prediction of Cyclic Thermally Induced Loads in A Scaled Bin Using Elastic-Viscoplastic Constitutive Equation. Transactions of the ASAE, 34, 5, 2207–2215
- Li, H., 1994. Analysis of Steel Silo Structures on Discrete Supports, Ph.D. Thesis, Univ. of Edinburgh, Edinburgh, Scotland, U.K.
- Livaoğlu, R. ve Doğangün, A., 2004. A Simple Seismic Analysis Procedure for Fluid-Elevated Tank-Foundation/Soil Systems, Proceedings of 6th International Congress on Advances in Civil Engineering, Bogazici University, Istanbul.
- Livaoğlu, R., 2005. Ayaklı Depoların Sıvı-Yapı-Zemin Etkileşimleri Dikkate Alınarak Deprem Davranışlarının İncelenmesi, Doktora Tezi, K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Lu Z., Negi S.,C. ve Jofriet J., C., 1997. A Numerical Model for Flow of Granular Materials İn Silos Part 1: Model Development, Journal of Agricultural Engineering Research, 68, 223-229.
- Lysmer, J. ve Kuhlmeyer R., L., 1969. Finite Dynamic Model for Infinite Media, ASCE. Engineering Mechanics Division Journal, v.95, 859-877.

- Macdonald, P., A., Kwok, K., C., S. ve Holmes, J.,D., 1988. Windloads on Circular Storage Bins, Silos and Tanks: I. Point Pressure Measurements on Isolated Structures, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 31 , 2–3, 165–188.
- Martinez, M., Alfaro, I. ve Doblare, M., 2002. Simulation of Axisymmetric Discharging in Metallic Silos. Analysis of The Induced Pressure Distribution and Comparison With Different Standards, Engineering Structures, 24, 1561–1574.
- Mason, F. ve Lechaudel, J., F., 1998. Explosion of a grain silo in Blaye (France), Summary Rep., Ministry for National and Regional Development and the Environment, France.
- Masson, S. ve Martinez, J., 2000. Effect of Particle Mechanical Properties on Silo Flow and Stresses from Distinct Element Simulations, Powder Technology, 109, 164-178.
- Mavrot, G., Sochet, I., Bailly, P. ve Moisescot, M., 2003. Silo Vulnerability: Structural Aspects, J. Loss Prev. Process Ind., 2, 16, 165–172.
- Mendez, D., Stunned Salvador Suffers Second Deadly Quake in A Month, The BG News, Feb.14, <<http://media.www.bgnews.com/media/storage/paper883/news/2001/02/14/World/Stunned.Salvador.Suffers.Second.Deadly.Quake.In.A.Month-1283510.shtml>>, Jan. 22, 2008.
- Mora' n, J., M., Juan, A., Robles, R. ve Aguado, P., J., 2006. Effects of Environmental Temperature Changes on Steel Silos, Biosystems Engineering, 94, 2, 229–238.
- Munch-Andersen, J. ve Nielsen, J., 1986. Size Effects in Large Grain Silos. Bulk Solids Handling, 6(1), 885-889.
- Mylonakis, G. ve Gazetas, G., 2000. Seismic Soil-Structure Interaction: Beneficial or Detrimental, Journal of Earthquake Engineering, 4, 3, 277-301.
- Nateghi, F. ve Yakhchalian, M., 2010. Seismic Vulnerability Assesment of a Reinforced Concrete Silo, Proceedings of the 14th European Conference on Earthquake Engineering, Ohrid, Republic of Macedonia, 5200-5207.
- Nateghi, F. ve Yakhchalian, M., 2011. Seismic Behavior of Reinforced Concrete Silos Considering Granular Material-Structure Interaction, Procedia Engineering, 14, 3050-3058.
- Negi, S., C., Lu, Z. ve Jofriet, J., C., 1997. A Numerical Model for Flow of Granular Materials in Silos Part 2: Model Validation, Journal of Agricultural Engineering Research, 68, 231-236.

- Nielsen, J., 1977. Model Laws for Granular Media and Powders with A Special View to Silo Models. Archives of Mechanics, 29, 4, 547-560.
- Nikolayenko, N., A., Chentemirov G., M., Ayunts V., A. ve Ginchvelashveli G. A., 1985. Investigation of Three-Dimensional Oscillations of Cylindrical Silo Blocks Under Dynamic Actions, Proceedings of the International Congress IASS '85, 421-437.
- Ooi, J., Y., Pham L. ve Rotter, J., M., 1990. Systematic and Random Features of Measured Pressures on Full-Scale Silo Walls, Engineering Structures, 12, 2, 74-87.
- Ooi, J., Y. ve Rotter, J., M., 1990. Wall Pressures in Squat Steel Silos from Simple Finite Element Analysis, Computers&Structures, 37,4, 361-374.
- Ooi, J.,Y. ve She, K., M., 1997. Finite Element Analysis of Wall Pressure in Imperfect Silos, International Journal Solids and Structures, 34, 16, 2061-2072.
- Pais, A., ve Kausel, E., 1988. Approximate Formulas for Dynamic Stiffnesses of Rigid Foundations. Soil Dyn. & Earthquake Engrg., 7, 4, 213-277.
- Patra, P., Samanta, A., K. ve Ray, P., 2010. Assessment of Transverse Deformation of Wall of Elevated RC Cylindrical Empty Silo Under Wind Load, Journal of the Institution of Engineers. India. Civil Engineering Division, 91, 9-17.
- Pieper, K. ve Wenzel, F., Comments on DIN1055: Design Loads for Buildings-Loads in Silo Bins, Beton-und Stahlbetonbau, 6-11.
- Pircher, M. ve Bridge, R., 2001. The Influence of Circumferential Weld-Induced Imperfections on The Buckling of Silos and Tanks. Journal of Constructional Steel Research, 57, 5, 569-580.
- Pircher, M., Guggenberger, W. ve Greiner, R., 2001. Stresses in Elastically Supported Cylindrical Shells under Wind Load and Foundation Settlement, Advances in Structural Engineering, 4, 3, 159–167
- Pircher, M., 2004 (a). Medium-Length Thin-Walled Cylinder under Wind Loading–Case Study. Journal of Structural Engineering, ASCE, 130, 12, 2062–2069.
- Pircher, M, 2004 (b). The Influence of a Weld-Induced Axi-Symmetric Imperfection on the Buckling of a Medium-Length Silo Under Wind Loading, International Journal of Solids and Structures, 41, 20, 5595-5610.
- Prusiel, J., A., 1998. The Influence of Temperature Field on the Stress States in R.C. Silo Walls, PhD Thesis, Bialystok, in Polish.
- Puri, V., M., 2002. Characterizing Powder Flowability. Chemical Processing, 65, 1, 39.
- Reimbert, M. et Reimbert A., 1962. Réalisations Modernes de Silos Agricoles et Industriels, Dunod, Paris.

- Reimbert, M. et Reimbert A., 1977. Silos, Editions Eyrolles, Paris.
- Resinger, F. ve Greiner, R., 1984. Verhalten Stehender Behälter aus Stahl bei Baugrundsetzungen. IKM-Kongress, Weimar.
- Roesset, J., M., Whitman, R., V. ve Dobry, R., 1973. Modal Analysis for Structures with Foundation Interaction, J. Struct. Div., ASCE, 99, 3, 399-416.
- Rombach, G. ve Eibl, J., 1995. Granular Flow of Materials in silos- Numerical Results. Bulk Solids Handling, 1, 95, 65-70.
- Rombach, G., A., Ayuga, f., Neuman, F., G. ve Vazquez, E., 2005. Modelling of Granular Flow in Silos Based on Finite Element Method ANSYS vs. SILO, Proceedings of Conference Powder and Grains, Stuttgart.
- Rotter, J., M. ve Hull, T., S., 1989. Wall Loads in Squat Steel Silos During Earthquakes, Engineering Structures, 11, 3, 139-147.
- Rotter, J., M., Jumikis, P.,T., Fleming, S., P. ve Porter, S., J., 1989. Experiments on the Buckling of Thin-Walled Model Silo Structure. J. Construct Steel Res., 13, 271-99.
- Rotter, J., M., Holst, F., G., Ooi, J., Y. ve Sanad, A., M., 1998. Silo Pressure Predictions Using Discrete-Element and Finite-Element Analyses, Phil. Trans. R. Soc. Lond. A 356, 1747, 2685-2712.
- Rotter, J., M., 2001. Guide for the Economic Design of Circular Metal Silos. London, Spon Press.
- Sadowski, A., J. ve Rotter, J., M., 2011. Buckling of Very Slender Metal Silos Under Eccentric Discharge, Engineering Structures, 33, 4, 1187-1194.
- Safarian, S., S. ve Harris, E., C., 1974. Silos and Bunkers, Handbook of Concrete Engineering, Van Nostrand Reinhold Co. Inc., New York.
- Sanad, A., M., Ooi, J.,Y., Holst, J., M., F., G. ve Rotter, J., M., 2000. Numerical Computations of Granular Flow and Pressures in a Silo, Proceeding CD of the Fourteenth Engineering Mechanics Conference, Department of Civil Engineering The University of Texas at Austin, Austin, Texas, U.S.A.
- Sasaki, Y.,Yoshimura, J. ve Dohkoshi, J., 1986. Experimental Studies of the Earthquake Response Characteristics of Concrete Stave Silos, Journal of the Society of Agricultural Structures,17, 2, 24-33.
- Sasaki, Y. ve Yoshimura, J., 1992. Dynamic Discrete Modeling and Computer Simulation of Seismic Response of Concrete Stave Silos with Structural Discontinuity, Earthquake Engineering, Proceedings of the Tenth World Conference, Balkema, Rotterdam, 5065-6070.

- Schneider, W. ve Zahlten, W., 2004. Load-Bearing Behaviour and Structural Analysis of Slender Ring-Stiffened Cylindrical Shells Under Quasi-Static Wind Load. Journal of Constructional Steel Research, 60, 125–146.
- Sezen, H., Elwood, K., J., Whittaker, A., S., Mosalam, K., M., Wallace, J., W. ve Stanton, J., F., 2000. Structural Engineering Reconnaissance of The August 17 1999 Kocaeli (Izmit), Turkey Earthquake, Technical Rep. No., PEER 2000/09. Pacific Earthquake Engineering Research Center, Univ. of California, Berkeley, in press.
- Shimamoto, A., Kodama, M. ve Yamamura, M., 1982. Shaking Table Tests of Cylindrical Coal Storage Silo Models, Proceedings of the Sixth Japan Earthquake Engineering Symposium, 1249-1256.
- Silvestri, S., Trombetti, T. ve Gasparini, G., 2008. Flat-Bottom Grain Silos Under Earthquake Ground Motion, Proceedings of the 14<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering, Beijing, China.
- Silvestri, S., Gasparini, G., Trombetti, T. ve Foti, D., 2012. On the Evaluation of the Horizontal Forces Produced by Grain-Like Material Inside Silos During Earthquakes, Bulletin of Earthquake Engineering, 10, 1535-1560.
- Singh, J., Sharma, V., R. ve Khullar, N., K., 2008. Analysis of Hopper Bottom Cylindrical Silos Subjected to Earthquakes, Proceedings of The 12th International Conference of International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics (IACMAG), Goa, India, 2595-2603.
- Smith, D., L., O. ve Lohnes, R., A., 1983. Bulk Strength and Stres Strain Behaviour of Four Agricultural Grains. J. Powder & Bulk Solids Technology, 7, 4, 1-7.
- Steward, B., R., 1972. Active and Passive Wall Pressures Induced by Sorghum Grain in a Shallow Bin, Trans. Amer. Soc. Agric. Engrs., 15, 1, 121-125.
- Suzuki, T., Hangai, Y. ve Ohmori, H., 1983. Static and Dynamic Behaviours of Silo Group Under Earthquake Loadings, Bulletin of Earthquake Resistant Structure Research Center, 16, 77-91.
- Tanaka, A., Bauer, G. ve Queiroz de Carvalho, J., B., 1989. Failure and Analysis of A Concrete Silo, Proceedings of the 12th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 345-348.
- Tatko, R. ve Kobiela, S., 2008. Horizontal Bulk Material Pressure in Silo Subjected to Impulsive Load, Shock and Vibration, 15, 543-550.
- Tejchman, J. ve Gudehus, G., 1993. Silo-Music and Silo-Quake Experiments and A Numerical Cosserat Approach, Powder Technology, 76, 201-212.



- Teng, J., G. ve Rotter, J., M., 1991. Strength of Welded Steel Silo Hoppers Under Filling and Flow Pressures, Journal of Structural Engineering, 117, 9, 2567-2583.
- Thompson, S., A. ve Ross, I., J., 1983. Compressibility and Frictional Coefficients of Wheat. Transactions of The ASAE, 26, 4, 1171-1180.
- T.S.E., 1989. Betonarme Siloların Hesap, Yapım ve Kullanım Kuralları, TS-6989, Türk Standartları Enstitüsü, I. Baskı, Ankara.
- URL-1, <http://wowturkey.com/forum/viewtopic.php?p=581964>. 25 Aralık 2012.
- URL-2, [http://www.visualphotos.com/image/1x5548300/grain\\_storage\\_bins\\_hausa\\_tribe\\_village\\_niger](http://www.visualphotos.com/image/1x5548300/grain_storage_bins_hausa_tribe_village_niger). 10 Ocak 2013.
- URL-3, <http://www.serander.net/karadeniz-kulturu/halkbilim-folklor/687-orta-ve-dogu-karadeniz-bolgesinde-serendi-serenderler.html>. 25 Aralık 2012.
- URL-4, <http://www.disciplingfordevelopment.org/>. 25 Aralık 2012.
- URL-5, <http://darkwing.uoregon.edu/~epederso/Photo/IR/Test.html>. 25 Aralık 2012.
- URL-6, <http://esl.yourschools.ca/low-german-resources/student-resources/farm-words/> 06 Mayıs 2011.
- URL-7, [http://blog.traingeek.ca/2010\\_01\\_01\\_archive.html](http://blog.traingeek.ca/2010_01_01_archive.html). 06 Mayıs 2011.
- URL-8, <http://www.fowlerwestrup.com/galvanized-silo-storage-system-galvanized-flat-bottom-silos.php>. 06 Mayıs 2011.
- URL-9, <http://www.steel-silos.com/Steel-Silo-for-Sale/Corrugated-Steel-Grain-Silo.html>. 06 Mayıs 2011.
- URL-10, <http://www.hoffmanninc.com/>. 06 Mayıs 2011.
- URL-11, <http://www.panoramio.com/photo/44434031>. 06 Mayıs 2011.
- USGS, Historic Earthquakes, Magnitude 6.8 Northern Algeria. <[http://neic.usgs.gov/neis/eq\\_depot/2003/eq\\_030521/](http://neic.usgs.gov/neis/eq_depot/2003/eq_030521/)> Jan. 27, 2008.
- Van Wijk, L. ve A., 1991. Dutch Developments of Earthquake Resistant Euro-Type Mammoth Silos-A Look into the Future, Bulk Solids Handling, 11,2, 441-445.
- Veletsos, A., S. ve Verbic, B., 1973. Vibration of Viscoelastic Foundations, Earthquake Engrg. & Struct. Dyn., 2, 1, 87- 102.
- Veletsos, A., S. ve Dotson, K., W., 1988. Horizontal Impedances for Radially Inhomogeneous Viscoelastic Soil Layers, Earthquake Engrg.& Struct. Dyn., 16, 7, 947-966.

- Veletsos, A., S. ve Younan, A., H., 1994a. Dynamic Soil Pressures on Rigid Cylindrical Vaults, Earthquake Engrg. & Struct. Dyn., 23, 6, 645-669.
- Veletsos, A., S. ve Younan, A., H., 1994b. Dynamic Modeling and Response of Soil-Wall Systems, J. Geotech. Engrg., ASCE, 120, 12, 2155-2179.
- Veletsos, A., S., Parikh, V., P. ve Younan, A., H., 1995. Dynamic Response of A Pair of Long Walls Retaining A Viscoelastic Solid., Earthquake Engrg. & Struct. Dyn., 24, 12, 1567-1589.
- Veletsos, A., S., Younan, A., H. ve Bandyopadhyay, K., 1997. Dynamics of Solid-Containing Tanks, No. BNL-52526. Brookhaven National Lab., Upton, NY, United States.
- Veletsos, A., S. ve Younan, A., H., 1998. Dynamics of Solid-Containing Tanks. II: Flexible Tanks, Journal of Structural Engineering, 124, 1, 62-70.
- Veletsos, A., S. ve Wei, T., Y., 1971. Lateral and Rocking Vibration of Footings, Journal of The Soil Mechanics and Foundations Division, 97, SM9, 1227-1248.
- Vidal, P., Guaita, M. ve Ayuga, F., 2005. Analysis of Dynamic Discharge Pressures in Cylindrical Slender Silos With A Flat Bottom or With A Hopper: Comparison with Eurocode 1, Biosystem Engineering, 91, 3, 335-348.
- Vidal, P., Couto, A., Ayuga, F. ve Guaita, M., 2006. Influence of Hopper Eccentricity on Discharge of Cylindrical Mass Flow Silos wth Rigid Walls, Journal of Engineering Mechanics, 132, 9, 1026-1033.
- Vidal, P., Gallego, E., Guaita, M. ve Ayuga, F., 2008. Finite Element Analysis under Different Boundary Conditions of The Filling of Cylindrical Steel Silos Having an Eccentric Hopper, Journal of Constructional Steel Research 64, 480-492.
- Walker, D., M., 1966. An Approximate Theory for Pressure and Arching in Hoppers, chem. Engng Sci., 21, 975-997.
- Walters, J., K., 1973. A Theoretical Analysis of Stresses in Silos with Vertical Walls, Chem., Engng. Sci. 28, 1, 13-21.
- Wagner, R., Noh, S., Y., Butenweg, C. ve Meskouris, K., 2002. Seismic Excited Granular Material Silos, Proceedings of the 5th European Conf. On Structural Dynamics EURODYN 2002, Munich, Germany, 253-258.
- Wensrich, C., 2002. Experimental Behaviour of Quaking in Tall Silos, Powder Technology, 127, 87-94.
- Wensrich, C., 2003. Numerical Modelling of Quaking in Tall Silos, International Journal of Mechanical Sciences, 45, 541-551.

- Wilms, H., Rotter, M. ve Tomas, J., 1995. Comparative Pressure Calculations Using Different Codes, Preprints Partec 95, Nuremberg, 251-260.
- Wilms, H. ve Kühnemund, B, 2009. Classification of Bulk Solids, Silos, Fundamentals of Theory, Behaviour and Design, edited by Brown, C. J., Nielsen, J, Taylor&Francis, New York, USA, 104-110.
- Wilson, E., L., 2002. Three-Dimensional Static and Dynamic Analysis of Structures- A physical Approach with Emphasis on Earthquake Engineering, Computers and Structures, Inc. Berkeley, California, USA, Third Edition, 423 s.
- Wójcik, M., Enstad, G., G. ve Jecmenica, M., 2003. Numerical Calculations of Wall Pressures and Stresses in Steel Cylindrical Silos with Concentric and Eccentric Hoppers, Journal of Particulate Science and Technology, 21, 3, 247-258.
- Wolf, J., P., 1985. Dynamic Soil-Structure Interaction, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 466s.
- Wolf, J., P., 1994. Foundation Vibration Analysis Using Simple Physical Models, Prentice-Hall, Englewood, .423 s.
- Xiao, Y. ve Yaprak, T., T., Building Damage in November 12, 1999 Duzce Earthquake, Earthquake Reconnaissance Rep., <[http://www.usc.edu/dept/civil\\_eng/structural\\_lab/eq-rp/industrial.html](http://www.usc.edu/dept/civil_eng/structural_lab/eq-rp/industrial.html)> Jan. 22, 2008.
- Younan, A., H. ve Veletsos, A., S., 1998. Dynamics of Solid-Containing Tanks. I: Rigit Tanks, Journal of Structural Engineering, 124, 1, 52-61.
- Zhang, Q., M., Britton, G. ve Jaremik, R., 1993. Dynamic Loads During Discharge for Wheat, Barley and Canola in a Smooth and a Corrugated-Walled Model Bin. J. Agric. Eng. Res., 56, 111-119.
- Zhang, Q, Britton, M., G. ve Leitgeb J., M., 1993. Thermally Induced Pressures in An on-Farm Grain Storage Bin. Canadian Agricultural Engineering, 35, 1, 51-55.
- Zhiming, L. ve Shujiang, G., 1987. The Energy Dissipation Effects of Redundant Members in Silos Under Earthquakes, Bulletin of the New Zealand National Society for Earthquake Engineering, 20, 4, 269-274.

## 6. EKLER

### Ek 1. Veletsos-Younan Modeli için Geliştirilen Program

```
H = input('Malzeme Yüksekliği (m) = ');
R = input('Silo Yarıçapı(m) = ');
nu = input('Stok Malzemesi Poisson Oranı = ');
ro = input('Stok Malzemesi Yoğunluk(kg/m3) = ');
E = input(' Stok Malzemesi Elastisite Modülü(N/m2) = ');
G=E/(2+2*nu); % Stok Malzemesi Kayma Modülü
dlt= input(' Stok Malzemesi sönüm oranı = ');
rjtlk= input ('RIJIT SILO ICIN 1 ESNEK SILO ICIN 2 GIRINIZ')
if(rjtlk == 1)
puruz = input (' Puruzlu ise 1 degilse 0 girin = ');
else if(rjtlk == 2)
row= input(' Cidarın Yoğunluğu (kg/m3) = ');
nuw= input('Cidarın Poisson Oranı = ');
Ew= input('Cidarın Elastisite modülü(N/m2) = ');
Gw=Ew/(2+2*nuw); % Cidar Kayma Modülü
tw= input(' Cidar Kalınlığı (m) = ');
dltw= input(' Cidarın sönüm oranı = ');
dw = G*R/(2*Gw*tw); %Cidar esnekliğinin boyutsuz ölçüsü
oranm = 2*row*tw/(ro*R); %mw/m
m= pi*ro*R^2*H; %Depolanın malzeme kütlesi
mw=oranm*m;
else('RIJITLIK DEGERI YANLIS GIRILDI' )
end
end
vs = sqrt(G/ro); %Kayma Dalgası Hızı
ksi = sqrt(2/(1-nu));
mod = input(' DIKKATE ALINACAK MOD SAYISINI GIRINIZ = ');
m= pi*ro*R^2*H;
[fftdata,interval,ivme] = izmyarkay();
freq = (1:length(fftdata)-1)/(length(fftdata)*interval);
for ww=1:length(freq)
Xg=fftdata(ww); %Frekansa karşılık gelen yer ivmesi
wy=freq(ww)*(2*pi); %Yükün açısal frekansı
```

**Ek 1.'in devamı**

```

tt(ww)=2*pi/wy;
for n=1:1:mod
w(n) = vs*(2*n-1)*pi/(2*H);           %Stok malzemesinin n. moduna ilişkin açısız frekans
fi(n)=wy/w(n);
beta(n)=(2*n-1)*pi*R/(2*H)*sqrt(1-fi(n)^2/(1+1i*dlt));   % alfa(n) ve beta(n) boyutsuz faktörler
alfa(n) = beta(n)/ksi;
I0alfa(n)=besseli(0,alfa(n));       %I0: birinci tür ve sıfırıncı dereceden değiştirilmiş Bessel Fonksiyonu
I0beta(n)=besseli(0,beta(n));
I1alfa(n)=besseli(1,alfa(n));       %I1: birinci tür ve birinci dereceden değiştirilmiş Bessel Fonksiyonu
I1beta(n)=besseli(1,beta(n));
End

```

---

**RİJİT DEPO İÇİN ÇÖZÜ**

---

```

if(rjtlk == 1)
for n=1:1:mod
if(puruz == 1)           % g(n) ve h(n) pürüzlü yüzey için boyutsuz faktörler
Bdelta(n)=alfa(n)*I0alfa(n)*(beta(n)*I0beta(n)-I1beta(n))-beta(n)*I0beta(n)*I1alfa(n);
g(n) = 1/Bdelta(n)*alfa(n)*I1alfa(n)*(2*I1beta(n)-beta(n)*I0beta(n));
h(n) = 1/Bdelta(n)*beta(n)*I1beta(n)*(2*I1alfa(n)-alfa(n)*I0alfa(n));
else if (puruz == 0)
Bdelta(n)=(alfa(n)*I0alfa(n)-I1alfa(n))*(2*beta(n)*I0beta(n)-beta(n)^2*I1beta(n))-
2*alfa(n)*I0alfa(n)*I1beta(n);
g(n) = (alfa(n)/Bdelta(n))*(((4+beta(n)^2)*I1beta(n)-2*beta(n)*I0beta(n))*I1alfa(n)-
(alfa(n)*I0alfa(n)-2*I1alfa(n))*2*I1beta(n));
h(n) = 0;
else disp('PURUZ SARTI YANLIS GIRILDI')
end
end
end
end

```

---

**ESNEK DEPO İÇİN ÇÖZÜM**

---

```

else if(rjtlk == 2)
for n=1:1:mod
Bdelta(n) = alfa(n)*I0alfa(n)*(beta(n)*I0beta(n)-I1beta(n))-beta(n)*I0beta(n)*I1alfa(n);
g(n) = 1/Bdelta(n)*alfa(n)*I1alfa(n)*(2*I1beta(n)-beta(n)*I0beta(n));
h(n) = 1/Bdelta(n)*beta(n)*I1beta(n)*(2*I1alfa(n)-alfa(n)*I0alfa(n));
Cn(n) = 2/pi*(ksi*g(n)+h(n))/(2*n-1)*H/R*sqrt((1-(fi(n))^2+1i*dlt)/(1+1i*dlt));

```

**Ek 1.'in devamı**

```

Rn(n) = ((1+1i*dltw)/(1+1i*dlt)-dw*oranm)/((1+1i*dltw)/(1+1i*dlt)-dw*oranm*fi(n)^2/(1+1i*dlt)-
dw*Cn(n));
end
end
end

for zz=0:0.5:H
    eta=zz/H;
    z=zz*2;
    tplm1 = 0;
    tplm2 = 0;
    if(rjtlk ==1) % RİJİT DURUM
        for x=1:1:mod
            tplm1 = tplm1+g(x)/(2*x-1)^2*sqrt((1+i*dlt)/(1-fi(x)^2+i*dlt))*sin((2*x-1)*pi/2*eta);
        end
        sigma(ww,z+1)=(-8*ksi/pi^2)*ro*Xg*H*tplm1;
    end
    Q=0;
    deta=Q*pi/180;
    sigmar0(ww,z+1)=sigma(ww,z+1)*cos(deta)*exp(i*wy*tt(ww)); %0 Derecede Dinamik Malzeme Basıncı
    Q=45;
    deta=Q*pi/180;
    sigmar45(ww,z+1)=sigma(ww,z+1)*cos(deta)*exp(i*wy*tt(ww));
    Q=90;
    deta=Q*pi/180; % derece radyana çevrildi
    sigmar90(ww,z+1)=sigma(ww,z+1)*cos(deta)*exp(i*wy*tt(ww));
    Q=135;
    deta=Q*pi/180; % derece radyana çevrildi
    sigmar135(ww,z+1)=sigma(ww,z+1)*cos(deta)*exp(i*wy*tt(ww));
    Q=180;
    deta=Q*pi/180; % derece radyana çevrildi
    sigmar180(ww,z+1)=sigma(ww,z+1)*cos(deta)*exp(i*wy*tt(ww));
    Q=225;
    deta=Q*pi/180; % derece radyana çevrildi
    sigmar225(ww,z+1)=sigma(ww,z+1)*cos(deta)*exp(i*wy*tt(ww));

```

**Ek 1.'in devamı**

```

Q=270;
deta=Q*pi/180; % derece radyana çevrildi
sigmar270(ww,z+1)=sigma(ww,z+1)*cos(deta)*exp(i*wy*tt(ww));

Q=315;
deta=Q*pi/180; % derece radyana çevrildi
sigmar315(ww,z+1)=sigma(ww,z+1)*cos(deta)*exp(i*wy*tt(ww));

Q=360;
deta=Q*pi/180; % derece radyana çevrildi
sigmar360(ww,z+1)=sigma(ww,z+1)*cos(deta)*exp(i*wy*tt(ww));

for x=1:1:mod
    tplm2 = tplm2+h(x)/(2*x-1)^2*sqrt((1+i*dlt)/(1-fi(x)^2+i*dlt))*sin((2*x-1)*pi/2*eta);
end
tao(ww,z+1)=(8/pi^2)*ro*Xg*H*tplm2;

Q=0;
deta=Q*pi/180; % derece radyana çevrildi
taor0(ww,z+1)=tao(ww,z+1)*sin(deta)*exp(i*wy*tt(ww)); %0 Derecede Çevresel Kayma Gerilmesi

Q=45;
deta=Q*pi/180; % derece radyana çevrildi
taor45(ww,z+1)=tao(ww,z+1)*sin(deta)*exp(i*wy*tt(ww));

Q=90;
deta=Q*pi/180; % derece radyana çevrildi
taor90(ww,z+1)=tao(ww,z+1)*sin(deta)*exp(i*wy*tt(ww));

Q=135;
deta=Q*pi/180; % derece radyana çevrildi
taor135(ww,z+1)=tao(ww,z+1)*sin(deta)*exp(i*wy*tt(ww));

Q=180;
deta=Q*pi/180; % derece radyana çevrildi
taor180(ww,z+1)=tao(ww,z+1)*sin(deta)*exp(i*wy*tt(ww));

Q=225;
deta=Q*pi/180; % derece radyana çevrildi
taor225(ww,z+1)=tao(ww,z+1)*sin(deta)*exp(i*wy*tt(ww));

Q=270;
deta=Q*pi/180; % derece radyana çevrildi
taor270(ww,z+1)=tao(ww,z+1)*sin(deta)*exp(i*wy*tt(ww));

```

**Ek 1.'in devamı**

```

Q=315;
deta=Q*pi/180; % derece radyana çevrildi
taor315(ww,z+1)=tao(ww,z+1)*sin(deta)*exp(i*wy*tt(ww));

Q=360;
deta=Q*pi/180; % derece radyana çevrildi
taor360(ww,z+1)=tao(ww,z+1)*sin(deta)*exp(i*wy*tt(ww));

tplm3=0; tplm4=0;
for x=1:1:mod
    tplm3 = tplm3+(ksi*g(x)+h(x))/(2*x-1)^3*sqrt((1+i*dlt)/(1-fi(x)^2+i*dlt));
end
baseQ(ww)=-m*Xg*16/pi^3*H/R*tplm3; % Taban Kesme Kuvveti
for x=1:1:mod
    tplm4 = tplm4+(-1)^(x-1)/(2*x-1)^4*(ksi*g(x)+h(x))*sqrt((1+i*dlt)/(1-fi(x)^2+i*dlt));
end
baseM(ww)=-m*Xg*32/pi^4*H^2/R*tplm4; % Devirici Taban Momenti
end

if(rjtlk == 2) % ESNEK DURUM
for x=1:1:mod
    tplm1 = tplm1+g(x)/(2*x-1)^2*sqrt((1+i*dlt)/(1-fi(x)^2+i*dlt))*sin((2*x-1)*pi/2*eta)*Rn(x);
end
sigma(ww,z+1) = (-8*ksi/pi^2)*ro*Xg*H*tplm1;

Q=0;
deta=Q*pi/180; % derece radyana çevrildi
sigmar0(ww,z+1)=sigma(ww,z+1)*cos(deta)*exp(i*wy*tt(ww));

Q=45;
deta=Q*pi/180; % derece radyana çevrildi
sigmar45(ww,z+1)=sigma(ww,z+1)*cos(deta)*exp(i*wy*tt(ww));

Q=90;
deta=Q*pi/180; % derece radyana çevrildi
sigmar90(ww,z+1)=sigma(ww,z+1)*cos(deta)*exp(i*wy*tt(ww));

Q=135;
deta=Q*pi/180; % derece radyana çevrildi
sigmar135(ww,z+1)=sigma(ww,z+1)*cos(deta)*exp(i*wy*tt(ww));

```



**Ek 1.'in devamı**

```

Q=180;
deta=Q*pi/180; % derece radyana çevrildi
sigmar180(ww,z+1)=sigma(ww,z+1)*cos(deta)*exp(i*wy*tt(ww));

Q=225;
deta=Q*pi/180; % derece radyana çevrildi
sigmar225(ww,z+1)=sigma(ww,z+1)*cos(deta)*exp(i*wy*tt(ww));

Q=270;
deta=Q*pi/180; % derece radyana çevrildi
sigmar270(ww,z+1)=sigma(ww,z+1)*cos(deta)*exp(i*wy*tt(ww));

Q=315;
deta=Q*pi/180; % derece radyana çevrildi
sigmar315(ww,z+1)=sigma(ww,z+1)*cos(deta)*exp(i*wy*tt(ww));

Q=360;
deta=Q*pi/180; % derece radyana çevrildi
sigmar360(ww,z+1)=sigma(ww,z+1)*cos(deta)*exp(i*wy*tt(ww));

for x=1:1:mod
    tplm2 = tplm2+h(x)/(2*x-1)^2*sqrt((1+i*dlt)/(1-fi(x)^2+i*dlt))*sin((2*x-1)*pi/2*eta)*Rn(x);
end

tao(ww,z+1) = (8/pi^2)*ro*Xg*H*tplm2;

Q=0;
deta=Q*pi/180; % derece radyana çevrildi
taor0(ww,z+1)=tao(ww,z+1)*sin(deta)*exp(i*wy*tt(ww));

Q=45;
deta=Q*pi/180; % derece radyana çevrildi
taor45(ww,z+1)=tao(ww,z+1)*sin(deta)*exp(i*wy*tt(ww));

Q=90;
deta=Q*pi/180; % derece radyana çevrildi
taor90(ww,z+1)=tao(ww,z+1)*sin(deta)*exp(i*wy*tt(ww));

Q=135;
deta=Q*pi/180; % derece radyana çevrildi
taor135(ww,z+1)=tao(ww,z+1)*sin(deta)*exp(i*wy*tt(ww));

Q=180;
deta=Q*pi/180; % derece radyana çevrildi
taor180(ww,z+1)=tao(ww,z+1)*sin(deta)*exp(i*wy*tt(ww));

```

**Ek 1.'in devamı**

```

Q=225;
deta=Q*pi/180; % derece radyana çevrildi
taor225(ww,z+1)=tao(ww,z+1)*sin(deta)*exp(i*wy*tt(ww));

Q=270;
deta=Q*pi/180; % derece radyana çevrildi
taor270(ww,z+1)=tao(ww,z+1)*sin(deta)*exp(i*wy*tt(ww));

Q=315;
deta=Q*pi/180; % derece radyana çevrildi
taor315(ww,z+1)=tao(ww,z+1)*sin(deta)*exp(i*wy*tt(ww));

Q=360;
deta=Q*pi/180; % derece radyana çevrildi
taor360(ww,z+1)=tao(ww,z+1)*sin(deta)*exp(i*wy*tt(ww));

tplm5=0; tplm6=0;
for x=1:1:mod
    tplm5 = tplm5+(1-Rn(x))/((2*x-1)^4*(1-fi(x)^2+i*dlt));
end
baseQ(ww)=-mw*Xg*(1+8/pi^2*(wy/w(1))^2*tplm5)*exp(i*wy*tt(ww));

for x=1:1:mod
    tplm6 = tplm6+(-1)^(x-1)/(2*x-1)^5*(1-Rn(x))/(1-fi(x)^2+i*dlt);
end
baseM(ww)=-0.5*mw*Xg*H*(1+32/pi^3*(wy/w(1))^2*tplm6)*exp(i*wy*tt(ww));
end
end
end

%Zaman ortamındaki dinamik malzeme basınçları
[t,sigma0_t] = hesapifft (sigmar0,interval);
S0_t=real(sigma0_t);

[t,sigma45_t] = hesapifft (sigmar45,interval);
S45_t=real(sigma45_t);

[t,sigma90_t] = hesapifft (sigmar90,interval);
S90_t=real(sigma90_t);

[t,sigma135_t] = hesapifft (sigmar135,interval);
S135_t=real(sigma135_t);

[t,sigma180_t] = hesapifft (sigmar180,interval);

```

**Ek 1.'in devamı**

$S180\_t = \text{real}(\text{sigma}180\_t);$

$[t, \text{sigma}225\_t] = \text{hesapifft}(\text{sigmar}225, \text{interval});$

$S225\_t = \text{real}(\text{sigma}225\_t);$

$[t, \text{sigma}270\_t] = \text{hesapifft}(\text{sigmar}270, \text{interval});$

$S270\_t = \text{real}(\text{sigma}270\_t);$

$[t, \text{sigma}315\_t] = \text{hesapifft}(\text{sigmar}315, \text{interval});$

$S315\_t = \text{real}(\text{sigma}315\_t);$

$[t, \text{sigma}360\_t] = \text{hesapifft}(\text{sigmar}360, \text{interval});$

$S360\_t = \text{real}(\text{sigma}360\_t);$

*%Zaman ortamındaki çevresel kayma gerilmeleri*

$[t, \text{taor}0\_t] = \text{hesapifft}(\text{taor}0, \text{interval});$

$T0\_t = \text{real}(\text{taor}0\_t);$

$[t, \text{taor}45\_t] = \text{hesapifft}(\text{taor}45, \text{interval});$

$T45\_t = \text{real}(\text{taor}45\_t);$

$[t, \text{taor}90\_t] = \text{hesapifft}(\text{taor}90, \text{interval});$

$T90\_t = \text{real}(\text{taor}90\_t);$

$[t, \text{taor}135\_t] = \text{hesapifft}(\text{taor}135, \text{interval});$

$T135\_t = \text{real}(\text{taor}135\_t);$

$[t, \text{taor}180\_t] = \text{hesapifft}(\text{taor}180, \text{interval});$

$T180\_t = \text{real}(\text{taor}180\_t);$

$[t, \text{taor}225\_t] = \text{hesapifft}(\text{taor}225, \text{interval});$

$T225\_t = \text{real}(\text{taor}225\_t);$

$[t, \text{taor}270\_t] = \text{hesapifft}(\text{taor}270, \text{interval});$

$T270\_t = \text{real}(\text{taor}270\_t);$

$[t, \text{taor}315\_t] = \text{hesapifft}(\text{taor}315, \text{interval});$

$T315\_t = \text{real}(\text{taor}315\_t);$

$[t, \text{taor}360\_t] = \text{hesapifft}(\text{taor}360, \text{interval});$

$T360\_t = \text{real}(\text{taor}360\_t);$

*%Zaman ortamındaki taban kesme kuvveti*

$[t, \text{base}Q\_t] = \text{hesapifft}(\text{base}Q, \text{interval});$

$BQ\_t = \text{real}(\text{base}Q\_t);$

**Ek 1.'in devamı**

*%Zaman ortamındaki devirici taban momenti*

*[t,baseM\_t] = hesapiffit (baseM,interval);*

*BM\_t=real(baseM\_t);*

*figure (1)*

*plot(t,BQ\_t)*

*ylabel('Taban Kesme N'), xlabel('Zaman (s)'), grid on*

*title('Taban Kesme-Zaman Değişimi')*

*figure (2)*

*plot(t,BM\_t)*

*ylabel('Taban Eğilme Momenti Nm'), xlabel('Zaman (s)'), grid on*

*title('Taban Eğilme Momenti-Zaman Değişimi')*

*figure (3)*

*plot(t,S0\_t)*

*ylabel('Dinamik Malzeme Basıncı N/m2'), xlabel('Zaman (s)'), grid on*

*title('0 derece için Dinamik Malzeme Basıncı-Zaman Değişimi')*

*figure (4)*

*hz=0:0.5:H;*

*plot(real(sigma0\_t),hz)*

*ylabel('Silo Yüksekliği (m)'), xlabel('Dinamik Malzeme Basıncı N/m2'), grid on*

*title('0 derece için Dinamik Malzeme Basıncının Silo Yüksekliği Boyunca Değişimi')*

*figure (5)*

*plot(t,S180\_t)*

*ylabel('Dinamik Malzeme Basıncı N/m2'), xlabel('Zaman (s)'), grid on*

*title('180 derece için Dinamik Malzeme Basıncı-Zaman Değişimi')*

*figure (6)*

*hz=0:0.5:H;*

*plot(real(sigma180\_t),hz)*

*ylabel('Silo Yüksekliği (m)'), xlabel('Dinamik Malzeme Basıncı N/m2'), grid on*

*title('180 derece için Dinamik Malzeme Basıncının Silo Yüksekliği Boyunca Değişimi')*

*figure (7)*

*plot(t, T90\_t)*

*ylabel('Malzeme Kayma Gerilmesi N/m2'), xlabel('Zaman (s)'), grid on*

*title('90 derece için Malzeme Kayma Gerilmesi-Zaman Değişimi')*

*figure (8)*

*plot(real(taor90\_t),hz)*

*ylabel('Silo Yüksekliği (m)'), xlabel('Malzeme Kayma Gerilmesi N/m2'), grid on*

*title('90 derece için Malzeme Kayma Gerilmesi Silo Yüksekliği Boyunca Değişimi')*

## Ek 2. Ankastre Durumda Önerilen Analitik Model (ÖM) için Geliştirilen Program Kodu

```

[ak]=ivmeyarimca();
ag=ak*0.01;
t=input('zaman aralığı delta t=');
s=input('sönüm oranı='); %Stok Malzemesi Sönüm Oranı
Hw=input('Cidar Yüksekliği (m) =');
Hm=input('Malzeme Yüksekliği (m) =');
h1 = (2/pi)*Hm;
h2 = (h1+Hm)/2;
r1= input('Silo iç çapı =');
r2= input('Silo dış çapı =');
Ew= input('Cidar elastisite modülü =');
Em= input('Stok Malzemesi Elastisite Modülü =');
nu=input('Stok malzemesi Poisson oranı =');
row= input('Cidar Yoğunluğu =');
rom= input('Stok Malzemesi Yoğunluğu =');
G=Em/(2+2*nu); %Stok malzemesi kayma modülü
vs = sqrt(G/rom) %Stok malzemesi kayma dalgası hızı
k_w = 3*Ew*pi/4*(r2^4-r1^4)/Hw^3; %Cidar rijitliği
k_m = 3*Em*pi/4*(r1^4)/Hm^3; %Yatayda Sınırlandırılmış stok malzemesi rijitliği
mw = (r2^2-r1^2)*pi*Hw*row; %Cidar kütle
mm = (r1^2)*pi*Hm*rom; %Stok malzemesi kütle
f=(1/(2*pi))*sqrt((k_w+k_m)/(mw+mm))*3/2
wn=f*2*pi
ktl_ktlm=input('Kütle katılım Oranı =');
m1 = (ktl_ktlm*mm+mw);
k1 = wn^2*m1;
wd=wn*sqrt(1-s^2); %Sönümlü açılal frekans
d(1)=0;
v(1)=0;
a(1)=0;
T=2*pi/wn;
x=sqrt(1-s^2);
A=exp(-s*wn*t)*((s/x)*sin(wd*t)+cos(wd*t));
B=exp(-s*wn*t)*(1/wd*sin(wd*t));
C=(1/k1)*(2*s/(wn*t)+exp(-s*wn*t)*((1-2*s^2)/(wd*t)-s/x)*sin(wd*t)-(1+2*s/(wn*t))*cos(wd*t));
D=(1/k1)*(1-2*s/(wn*t)+exp(-s*wn*t)*((2*s^2-1)/(wd*t)*sin(wd*t)+2*s/(wn*t)*cos(wd*t)));
AA=(-1)*exp(-s*wn*t)*(wn/x*sin(wd*t));

```

## Ek 2.'nin devamı

```

BB=exp(-s*wn*t)*(cos(wd*t)-s/x*sin(wd*t));
CC=(1/k1)*(-1/t+exp(-s*wn*t)*((wn/x+s/(t*x))*sin(wd*t)+(1/t)*cos(wd*t)));
DD=(1/(k1*t))*(1-exp(-s*wn*t)*(s/x*sin(wd*t)+cos(wd*t)));
for i=1:(length(ag)-1)
    d(i+1)=A*d(i)+B*v(i)+C*(m1*ag(i))+D*(m1*ag(i+1));
    v(i+1)=AA*d(i)+BB*v(i)+CC*(m1*ag(i))+DD*(m1*ag(i+1));
    a(i+1)=wd^2*d(i+1);
    aa(i+1)=a(i+1)+ag(i+1);
    for zz=0:0.5:Hm
        z=zz*2;
        ivme(z+1,1)=0;
        ivme(z+1,i+1)=aa(i+1)*((-3.363*zz^4+0.481*Hm^3*zz+2.882*Hm^4)/(3*Hm^4))^0.5);
        yerdeg(z+1,i+1)=d(i+1)*((zz^4-4*Hm^3*(zz)+3*Hm^4)/3/Hm^4);
    end
end
bsnc=r1*rom*ivme; %Dinamik Malzeme Basıncı
max(max(bsnc))
min(min(bsnc))

```

### Ek 3. Yapı-Zemin Etkileşimli Temelin Gömülü ve Gömülü Olmadığı Durumlarda Önerilen Analitik Modeller (ÖMZG ve ÖMZ) için Geliştirilen Program Kodu

```

ro=input('Zemin Birim Hacim Ağırlığı/g ((kN/m3)/(m/s2))=');           %zeminin birim kütlesi (kN/g/m3)
    r0=input('Temel yarıçapı (m) =');                               % temel yarıçapı ya da eşdeğer yarıçap (m)
    pois=input('Zemin Poisson oranı =');
    vp=input('Zemin P dalgası Hızı(m/s) =');                       % Zemin boyuna_dalga hızı
    vs=input('Zemin S dalgası Hızı(m/s) =');                       %Zemin kayma dalgası hızı
    son_zem = input('Zemin Sönüm Oranı =');
    son_yap = input('Yapı Sönüm Oranı =');
    e=input('Temel Gömülme Derinliği =');
        Hw=input('Cidar Yüksekliği (m) =');
        Hm=input('Malzeme Yüksekliği (m) =');

h1 = (2/pi)*Hm;
h2 = (h1+Hm)/2;
r1=5;                                                                %Silo iç çapı
r2=5.1;                                                            %Silo dış çapı
Ew=2.8e10;                                                         % Cidar elastisite modülü
Emlz=5e6;                                                         % Stok malzemesi elastisite modülü
nu=0.3;                                                            %Stok malzemesi Poisson oranı
row=2500;                                                         % Cidar birim hacim ağırlığı
rom=900;                                                           %Stok malzemesi birim hacim ağırlığı
Gmlz=Emlz/(2+2*nu);                                              %Stok malzemesi kayma modülü
vsmlz = sqrt(Gmlz/rom)                                           %Stok malzemesi kayma dalgası hızı

k_w = 3*Ew*pi/4*(r2^4-r1^4)/Hw^3;
k_m = 3*Emlz*pi/4*(r1^4)/Hm^3;

mw = (r2^2-r1^2)*pi*Hw*row;
mm = (r1^2)*pi*Hm*rom;
ff=(1/(2*pi))*sqrt((k_w+k_m)/(mw+mm)*3/2)
wnf=ff*2*pi
        ktl_ktlm=input('Kütle katılım Oranı =');

m1 = (ctl_ktlm*mm+mw);
k1 = wnf^2*m1;
wd=wnf*sqrt(1-son_yap^2);                                         %Sönümlü frekans

etkinm_1=m1;
etkink_1=k1;
hi = h1;
w01=sqrt(k1/m1);

```

## Ek 3.'ün devamı

```

%-----%
mi=m1/1000;
%-----%
ki=k1/1000 ;                               % kN/m
%-----%
clc
format short g;
%-----%
% YAPIYLA İLGİLİ ÖZELLİKLER %
%-----%
%BURADA KONİ MODELİNE AİT STATİK RİJİTLİKLER İLE BU MODELİN DİNAMİK DAVRANIŞI
ESNASINDA RİJİLİĞİNDEKİ DEĞİŞİMİ NİTELENDİREN YATAY DÜŞEY DÖNME VE BURULMA
RİJİTLİKLERİ BELİRLENMEKTEDİR. POISSON ORANININ 1/3 DEN BÜYÜK OLDUĞU
DURUMLARDA ZEMİNİN SIKIŞMAZ KABULU GÖZ ÖNÜNE ALINMAKTADIR.%
%-----%
etkink_1=k1/1000;
etkinm_1=m1/1000;
etkinh_1=h1
%-----%
% ZEMİNLE İLGİLİ ÖZELLİKLER %
%-----%
%DÖNGÜDEN SONRAKİ KISIM FONKSİYON YAPILARAK GENEL AMAÇLI DEĞERLENDİRMELER
İÇİN KULLANILABİLİR%
%-----%
[ffidata,interval,yerd,ivme] = izmyarkay;           % Fonksiyonun içeriği olmadığından izmyarkay()
for i=1:1
    pi=3.1453;
%-----%
pois(i)=pois;
    vp(i)=vp;
    vs(i)=vs;
    G(i)=ro*vs(:,i)^2;                               %G kayma modulu
%-----%
Ec(i)=2*G(:,i)*(1-pois(:,i))/(1-2*pois(:,i))   %Ec_Elastisite modülü ve Poisson oranına bağlı bir modül
E(i)=2*G(:,i)*(1+pois(:,i))                   %E_elastisite modülü
Kh(i)=((8*G(:,i)*r0)/(2-pois(:,i)))*(1+e/r0)   %Kh kh yatay statik rijitliği ve dinamik rijitlik katsayısı
%-----%
% (GÖMÜLME DİKKATE ALINMIŞ) %
Kv(i)=(4*G(:,i)*r0)/(1-pois(:,i));             %Kv kv düşey statik rijitliği ve dinamik rijitlik katsayısı
Kr(i)=(8*G(:,i)*r0^3)/(3*(1-pois(:,i)))*(1+2.3*e/r0+0.58*(e/r0)^3)
%-----%
%Kr kr dönme statik rijitliği ve dinamik rijitlik katsayısı

```



### Ek 3.'ün devamı

```

%-----(GÖMÜLME DİKKATE ALINMIŞ)-----%
Kt(i)=(16*G(:,i)*r0^3)/(3); %Kt kt burulma statik rijitliği ve dinamik rijitlik
katsayısı
%-----%
freq = (0:length(fftdata)-1)/(length(fftdata)*interval);
fftivme = fft((ivme/100));

for w=2:length(fftdata)
    a(1) = 0;
    a(:,w) = r0*(2*pi*freq(:,w))/vs(:,i); %Boyutsuz frekans
%-----%
if(pois<=(1/3))
    %-----Yatay Rijitlik ve Sönüm Katsayısı-----%
    kh=1 ; ch=((pi/8)*(2-pois(:,i)));
    %-----Düşey Rijitlik Ve Sönüm Katsayısı-----%
    %kv=1 ; cv=((pi/4)*(1-pois(:,i)))*(vp(:,i)/vs(:,i)));
    %-----Dönme(Rocking) Rijitlik Ve Sönüm Katsayısı-----%
    kr(1)=1;
    kr(:,w) = 1-(1/3)*a(:,w)^2/((9*pi/32*(1-pois(:,i)))*(vp(:,i)/vs(:,i))^3)^2+(a(:,w))^2);
    krbak(w,:) = kr(:,w);
    cr(1)=0;
    cr(:,w) = (3*pi/32)*(1-pois(:,i))*(vp(:,i)/vs(:,i))*a(:,w)^2/(((9*pi/32)*(1-pois(:,i)) *(vp(:,i)/vs(:,i))^3)^2
        +(a(:,w))^2);
    crbak(w,:) = cr(:,w);
else
    mu(i)=0.3*pi*(pois(:,i)-1/3); % Dönme için
    % düşey ötelenme için mu(i)2.4*pi*(pois(:,i)-1/3)
    deltaM = mu(:,i)*ro*r0^5; % Dönme için
    % düşey ötelenme için deltaM=mu(:,i)*ro*r0^3
%-----Yatay Rijitlik ve Sönüm Katsayısı-----%
    kh=1 ; ch=((pi/8)*(2-pois(:,i)));
    %-----Dönme (Rocking) Rijitlik ve Sönüm Katsayısı-----%
    kr(:,w)=1-3*(0.3*pi*(pois(:,i)-1/3)/8)*(1-pois(:,i))*a(:,w)^2-(1/3)*a(:,w)^2/(((9*pi/4)*(1-
    pois(:,i))^2+a(:,w))^2);
    kr(1)=0;
    cr(:,w)=(3*pi/16)*(1-pois(:,i))*a(:,w)^2/((9*pi/4*(1-pois(:,i)))^2+a(:,w)^2);
    cr(1)=0;
end

```

**Ek 3.'ün devamı**

```

%-----Materyal ve Radyasyonel Sönümler-----%
cirw(:,w) = 2*pi*freq(:,w);
cirw(:,1) = 0;
son_rad_H(:,w) = a(:,w)*ch/(2*kh);           %Zeminin hareket şekline göre radyasyonel sönümleri
son_rad_R(:,w) = a(:,w)*cr(:,w)/(2*kr(:,w));
son_rad_H(:,1) = 0;
son_rad_R(:,1) = 0;
%-----Dinamik Rijitlikler (sadece ötelenme ve dönme)-----%
Sh(:,1) = Kh*kh*(1+2i*son_zem)*(1+2i*son_rad_H(:,1)+2i*son_zem);
Sh(:,w) = Kh*kh*(1+2i*son_zem)*(1+2i*son_rad_H(:,w)+2i*son_zem);
Sr(:,1) = Kr;
Sr(:,w) = Kr*kr(:,w)*(1+2i*son_zem)*(1+2i*son_rad_R(:,w)+2i*son_zem);
if(pois<=(1/3))
    fftyerd(w,:) = ffivme(w,:)/cirw(:,w)^2;sdf
    fftyerd(1,:) = 0;
    mat11 = (w01^2/cirw(:,w)^2)*(1+2i*son_yap)-1;
    mat22 = Sh(:,w)/(etkinm_1*cirw(:,w)^2)-1;
    mat33 = Sr(:,w)/(etkinh_1^2*cirw(:,w)^2*etkinm_1)-1;
    mat=[mat11,-1,-1
        -1,mat22,-1
        -1,-1,mat33];
    ag=ffivme(w,:)*[1
                    1
                    1];
    AA=inv(mat)*ag;           %Poisson oranı 1/3 den daha küçükken ivme vektörü
    Ak1(w,:) = AA(1,:);
    Ab1(w,:) = AA(2,:);
    hQAb1(w,:) = AA(3,:);
    Ug=(ffivme(w,:)/cirw(:,w)^2)*[1
                                    1
                                    1];
    UU=inv(mat)*Ug;
    Uk1(:,w) = UU(1,:);
    Ub1(:,w) = UU(2,:);
    hQb1(:,w) = UU(3,:);

```

## Ek 3.'ün devamı

```

%-----%
Uk1(:,1) = 0; Ub1(:,1) = 0; hQb1(:,1) = 0; U1(:,1) = 0;
U1(:,w) = Uk1(:,w)+Ub1(:,w)+etkinh_1*hQb1(:,w);
Ak1(1,:) = 0; Ab1(1,:) = 0; hQAb1(1,:) = 0; A1(:,1)=0;
A1(:,w)=Ak1(w,:);
vb1(w,:)=Sh(:,w)*(Ub1(:,w));
mb1(w,:)=Sr(:,w)*(hQb1(:,w));
else
fftyerd(w,:)=fftivme(w,:)/cirw(:,w);
fftyerd(1,:)=0;
%-----%
mat11 = (w01^2/cirw(:,w)^2)*(1+2i*son_yap)-1;
mat22 = Sh(:,w)/(etkinm_1*cirw(:,w)^2)-1;
mat33=(Sr(:,w)-etkinm_1*etkinh_1^2*cirw(:,w)^2-deltaM*cirw(:,w)^2)/
(etkinm_1*etkinh_1^2*cirw(:,w)^2);
mat=[mat11,-1,-1
-1,mat22,-1
-1,-1,mat33];
ag=fftivme(w,:)*[1
1
1];
AA=inv(mat)*ag;
Ak1(w,:) = AA(1,:);
Ab1(w,:) = AA(2,:);
hQAb1(w,:) = AA(3,:);
Ug=(fftivme(w,:)/cirw(:,w)^2)*[1
1
1];
UU=inv(mat)*Ug;
Uk1(:,w) = UU(1,:);
Ub1(:,w) = UU(2,:);
hQb1(:,w) = UU(3,:);
%-----%
ag=fftivme(w,:)*[1
1
1];
AA=inv(mat)*ag;

```

### Ek 3.'ün devamı

```

    Ug=(fftivme(w,:)/cirw(:,w)^2)*[1
                                     1
                                     1];
%-----%
    Ukl(:,1) = 0; Ub1(:,1) = 0; hQb1(:,1) = 0; UI(:,1) = 0;
    UI(:,w) = Ukl(:,w)+Ub1(:,w)+hQb1(:,w);
    AAl(:,w) = UI(:,w)/w^2;
    Ak1(1,:) = 0; Ab1(1,:) = 0; hQAb1(1,:) = 0; A1(:,1)=0;
    A1(:,w)=Ak1(w,:);
    vb1(w,:)=Sh(:,w)*(Ub1(:,w));
    mb1(w,:)=Sr(:,w)*(hQb1(:,w))-deltaM*hQAb1(w,:)/etkinh_1;
end
end
%-----%
len = length(freq);
t = 0:interval:(len-1)*interval;
hesapifft_U1 = real(iffit(U1));
hesapifft_A1 = real(iffit(A1));
VB1=real(iffit(vb1));
MB1=real(iffit(mb1))/etkinh_1;
for k = 1:len;
    A11(k,:)=real(hesapifft_A1(k));
    U11(k,:)=real(hesapifft_U1(k));
    V11(k,:)=etkinm_1*real(hesapifft_A1(k));
    M11(k,:)=etkinm_1*etkinh_1*real(hesapifft_A1(k));
end
end
for i=1:(length(ivme)-1)
    aa(i+1)=A11(i+1)-ivme(i+1)/100;
for zz=0:0.5:Hm
    z=zz*2;
    ivmem(z+1,1)=0;
    ivmem(z+1,i+1)=aa(i+1)*((-3.363*zz^4+0.481*Hm^3*zz+2.882*Hm^4)/(3*Hm^4))^0.5);
    yerdeg(z+1,i+1)=U11(i+1)*((zz^4-4*Hm^3*(zz)+3*Hm^4)/3/Hm^4);
end
end
bsnc=rI*rom*(ivmem);
max(max(bsnc))
min(min(bsnc))

```

#### Ek 4. Kullanılan Alt Program Kodları

```

function [fftdata, freq, powerspect] = cizfft(data, interval)
    [fftdata, freq, powerspect] = hesapfft(data, interval);
    len = length(fftdata);
    if (len <= 0)
        return;
    end
%----- %
function [yerd, hiz] = newmark(data, interval)
for i=2:(length(data))
    yerd(:,1) = 0;
    hiz(:,1) = 0;
    hiz(:,i) = hiz(:,(i-1))+(1-gama)*interval*data((i-1),:) + gama*interval*data(i,:);
    yerd(:,i) = yerd(:,(i-1))+interval*hiz(:,(i-1))+(0.5-beta)*interval^2*data((i-
        1),:)+beta*interval^2*data(i,:);
end
figure(2)
    t = 0:interval:(length(data)-1)*interval;
    subplot(3,1,1), plot(t, data)
    ylabel('accel cal'), xlabel('Zaman (s)'), grid on
    title('Zaman ortamundaki ivme değişimi');
    subplot(3,1,2), plot(t, hiz)
    ylabel('hiz cm/sn'), xlabel('Zaman (s)'), grid on
    title('Zaman ortamundaki hiz değişimi');
    subplot(3,1,3), plot(t, yerd)
    ylabel('yerdegistirme cm'), xlabel('Yerdegistirme'), grid on
    title('Zaman ortamundaki yerdegistirme');
%----- %
function [fftdata, freq, powerspect] = hesapfft(data, interval)
% zaman ortamundaki belirli aralıktaki (interval) deprem serisini (data) alıyor ve frekans ortamına çeviriyor
if (isempty(data))
    fftdata = [];
    freq = [];
    powerspect = [];
    return;
end

```

**Ek 4.'ün devamı**

```

if (interval <= 0)
    error('veri aralığı 0 dan küçük olamaz');
    return;
end
fftdata = fft(data);
freq = (0:length(fftdata)-1)/(length(fftdata)*interval);
powerspect = abs(fftdata)/(sqrt(length(fftdata)));
%----- %
function [t,hesapifft] = hesapifft(data,interval)
len = length(data);
t = 0:interval:(len-1)*interval;
hesapifft = ifft(data);
%plot(t, hesapifft)

```

## ÖZGEÇMİŞ

Ayşegül DURMUŞ 1983 yılında Trabzon'da doğdu. İlköğrenimini 1989-1994 yılları arasında Trabzon Merkez Mimar Sinan İlkokulu, orta ve lise öğrenimini ise 1994-2001 yılları arasında Trabzon Kanuni Anadolu Lisesi'nde her dönem takdirname alarak tamamladı. Yükseköğrenimine 2001 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümünü birincilikle kazanarak başladı. Bu bölümü her yarıyıl onur ya da yüksek onur belgeleri almak suretiyle 2004-2005 Eğitim-Öğretim yılı Haziran ayında 3,45 akademik not ortalamasıyla tamamladı. Aynı yıl Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü'nde yüksek lisans programına kabul edildi. İngilizce muafiyet sınavında başarılı olarak lisan hazırlık sınıfını okumadan yüksek lisans öğrenimine başladı. Yüksek lisans öğrenimi sırasında TÜBİTAK Bilim İnsanı Destekleme Daire Başkanlığı tarafından verilen Yurtiçi Yüksek Lisans bursuyla ödüllendirildi. 2006-2007 bahar yarıyılında yüksek lisans tezini savunarak inşaat yüksek mühendisi ünvanını aldı. Aynı yıl Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü'nde doktora programını birincilikle kazanarak doktora öğrenimine başladı ve bu Enstitü'nün 50/d kadrosuna Arş. Gör. olarak atandı. Doktora öğrenimi boyunca yine TÜBİTAK Bilim İnsanı Destekleme Daire Başkanlığı tarafından verilen Yurtiçi Doktora bursunu almaya hak kazandı. Bekâr olan Ayşegül DURMUŞ İngilizce bilmektedir.

SCI/SCIE kapsamındaki dergilerde yayınlanmış makaleleri ve diğer yayınları:

1. **Durmuş, A., ÖZTÜRK, H.,T., Durmuş, A.,** 2013. A Reliable Approach for Determining Concrete Strength in Structures by Using Cores, Computers and Concrete, 11,5, 463-473.
2. ÖZTÜRK, H.,T., **Durmuş, A.,** Durmuş, A., 2012. Optimum Design of A Reinforced Concrete Beam Using Artificial Bee Colony Algorithm, Computers and Concrete, 10, 3, 295-306.
3. **Durmuş, A.,** Livaoğlu, R., 2013. Evaluation of Seismic Behavior of Rigid Squat Silo-Bulk Material System, 50th International Conference on Earthquake Engineering, May, Skopje, Macedonia, Proceedings CD.

4. Livaoğlu, R., **Durmuş, A.**, 2013. Seismic Behavior of Squat Bulk Material-Silo Foundation/Soil System, International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, June, İstanbul, Turkey, Proceedings CD.
5. Durmuş, A., **Durmuş, A.**, Öztürk, H. T., 2012. Betonarme Binaların Kocaeli Depreminde Göçme Nedenleri, Yapı Denetim Dergisi, 4, 16-25.
6. Karaca, Z., **Durmuş, A.**, Doğangün, A., Durmuş, A., 2009. Comparative Analysis of Cylindrical Silos Subjected to Earthquake by Analytical and Numerical Methods, 2<sup>nd</sup> International Conference on Concrete Technology, November, Tabriz, Iran, Selected Abstracts Volume.
7. Doğangün, A. , **Durmuş, A.** , Durmuş, A. , 2008. Principles of Analysis of Granular Materials Storage Structures and Calculation of Silos, 8th International Congress on Advances in Civil Engineering, September, Famagusta, North Cyprus, Proceedings Books, Vol 3. , 403-410.
8. Gürsoy, Ş. , **Durmuş, A.** , Durmuş, A. , 2008. Depreme Dayanımlı Yapı Tasarımında Yapı Zemin Etkileşiminin Rolü, Yapı Dünyası Dergisi, 149, 7-12.
9. Doğangün, A. , **Durmuş, A.** , Durmuş, A. , 2008. Stok Yapılarının Tasarımına İlişkin Genel Bir Yaklaşım ve Bu Yaklaşımın Türkiye Silo Yönetmeliğiyle İlgisi, Yapı Dünyası Dergisi, 145, 7-17.
10. Doğangün, A. , **Durmuş, A.** , Durmuş, A., 2007. Stok Yapılarının Tasarımına İlişkin Genel Bir Yaklaşımın Temel İlkeleri ve Türkiye Silo Yönetmeliği, International Symposium on Advances in Earthquake & Structural Engineering, Ekim, Isparta-Antalya, Türkiye, Bildiriler Kitabı, 455-469.