T.C.
SELÇUK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DÖRTLÜ GRUP SİLOLARIN İÇ BASINÇ TESİRLERİ ALTINDA SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE İNCELENMESİ

Serkan ARIKAN
YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
KONYA - 2006

T.C.
SELÇUK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DÖRTLÜ GRUP SİLOLARIN İÇ BASINÇ TESİRLERİ ALTINDA SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE İNCELENMESİ

SERKAN ARIKAN

YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
KONYA - 2006

T.C.
SELÇUK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DÖRTLÜ GRUP SİLOLARIN İÇ BASINÇ TESİRLERİ ALTINDA SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE İNCELENMESİ

SERKAN ARIKAN
YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
KONYA - 2006

Bu tez 10 / 07 / 2006 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği / oyçokluğu ile kabul edilmiştir.

Prof. Dr. M. Yaşar KALTAKCI (Üye) Yrd. Doç. Dr. S. Bahadır YÜKSEL (Danışman) Yrd. Doç. Dr. Nail KARA (Üye)

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

DÖRTLÜ GRUP SİLOLARIN İÇ BASINÇ TESİRLERİ ALTINDA SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE İNCELENMESİ

Serkan ARIKAN
Selçuk Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Yrd. Doç. Dr. S. Bahadır YÜKSEL
2006, 59 sayfa

Jüri: Prof. Dr. M. Yaşar KALTAKCI
Yrd. Doç. Dr. S. Bahadır YÜKSEL
Yrd. Doç. Dr. Nail KARA

Bu çalışmada 4'lü silindirik betonarme grup silolarda depolanmış malzemeden dolayı meydana gelen dizayn kuvvetlerinin basit ve doğru olarak hesaplanması araştırılmıştır. Bu kapsamda, iç ve dış yükleme şartları altındaki değişik 4'lü silindirik betonarme grup siloların, 8 düğümlü solid elemanlı sonlu eleman analizleri yapılmıştır. Silo duvar kalınlığı, kesişim duvarı kalınlığı ve kesişim duvarı boyunun dizayn kuvvetlerine etkisini görebilmek için, bu değerler kapsamlı sonlu eleman analizlerinde değişken alınmıştır. Silo duvarları arasındaki sürekliliği dikkate alan kapsamlı sonlu eleman analizlerinden, boyutsuz katsayılar ve dizayn formülleri çıkarılmıştır. Sonuçlar dizaynı kolaylaştırmak amacıyla, eğilme momenti, eksenel kuvvet ve kesme kuvveti değerlerini kolayca bulabilmeyi sağlamak için basitleştirilmiş şekilde ifade edilmiştir. Buna ilaveten iç duvar rijitliği, elastisite modülü değişken alınarak dizayn kuvvetleri arasındaki yeniden dağılım araştırılmıştır. Solid elemanlar kullanılarak hazırlanmış sonlu eleman analizlerinin sonuçlarına bağlı olarak, etkili boy kavramına göre eşdeğer kabuk modeli geliştirilmiştir. Bu eşdeğer kabuk modeli kapsamlı sonlu eleman analizleri ile değişik silo duvar kalınlığı, kesişim duvarı boyu ve kesişim duvarı kalınlığı için doğrulanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Grup silolar, sonlu eleman analizleri, iç hücre duvarları, kesişim duvarları, dış duvarlar, iç yükleme

ABSTRACT

MSc Thesis

INVESTIGATION OF GROUP OF FOUR SILOS BY FINITE ELEMENT METHOD SUBJECTED TO INTERNAL PRESSURES

Serkan ARIKAN
Selçuk University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department Of Civil Engineering

Supervisor: Asst. Prof. Dr. S. Bahadır YÜKSEL
2006, 59 pages

Jury: Prof. Dr. M. Yaşar KALTAKCI
Asst. Prof. Dr. S. Bahadır YÜKSEL
Asst. Prof. Dr. Nail KARA

This study presents a simple but accurate procedure for computation of design forces for groups of four cylindrical silos due to stored materials. In this conjunction, finite element analyses were performed by using eight-node solid elements for various groups of four cylindrical silos under interstice and internal loadings. Silo wall thicknesses, intersection wall thicknesses and intersection wall lengths were varied in an extensive parametric study to demonstrate their influences on resultant design forces. The design formulas were proposed and dimensionless estimator coefficients were derived from a comprehensive series of finite element analyses considering the effect of continuity in the walls. The results were expressed in simplified forms, so that the prediction of bending moments, axial forces and shear forces are straightforward for design purposes. In addition, the rigidity of the interstice walls were varied by changing the modulus of elasticity and redistribution of design forces were investigated. Based on the results of finite element analyses using solid elements, equivalent shell model was developed based on the effective length concept, and verified in a comprehensive series of finite element analyses for various silo-wall thicknesses, intersection wall lengths and intersection wall thicknesses. Prediction of design forces is quite accurate for design purposes.

Keywords: Grouped silos; Finite element analysis; Interstice walls; Intersection walls, External walls, Interstice loading

ÖNSÖZ

Bu çalışmamın konusunu belirleyen, destek ve görüşlerini, büyük ilgi ile yapıcı eleştiri ve önerilerini esirgemeyen danışmanım Yrd. Doç. Dr. S. Bahadır YÜKSEL'e ve bugünlerimi borçlu olduğum aileme sonsuz sevgi ve saygılarımı sunuyorum.

İÇİNDEKİLER

ÖZET……. i
ABSTRACT..... ii
ÖNSÖZ..... iii
İÇİNDEKİLER..... iv
ŞEKİLLER LİSTESİ..... vi
TABLOLAR LİSTESİ..... viii
KULLANILAN SEMBOLLER..... ix
KULLANILAN KISALTMALAR..... x
1. GİRİŞ..... 1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI..... 3
3. SİLOLAR ve 4'LÜ SİLİNDİRİK BETONARME GRUP SİLOLAR'IN ÖZELLİKLERİ..... 6
3.1. Silo Elemanları Hakkında Genel Bilgi..... 6
3.2. Stok Malzemesi Türleri ve Mekanik Etkileri..... 8
3.3. Daneli Malzeme Basınçları..... 10
3.4. Silolara Etki Eden Yükler..... 10
3.5. 4'lü Silindirik Betonarme Grup Siloların Geometrik Özellikleri..... 11
3.6. 4'lü Silindirik Betonarme Grup Siloların Yükleme Durumları..... 12
4. PARAMETRİK ÇALIŞMA..... 14
4.1. Solid Eleman..... 15
4.2. Kabuk Eleman..... 17
4.3. Solid Eleman Kullanılan Sonlu Eleman Modelleri..... 18
5. SONLU ELEMAN ANALİZ SONUÇLARI..... 27
5.1. Sonlu Eleman Analiz Sonuçlarının Daha Önceki Çalışmalarla Karşılaştırılması..... 27
5.2. Solid Eleman Modelinden Elde Edilen Sonuçların Değerlendirilmesi 31
5.3. Dizayn Formülleri ve Dizayn Katsayıları..... 37
5.4. İç Duvarların Rijitliğinin Etkisi..... 43
5.5. Eşdeğer Kabuk Modelinin Geliştirilmesi..... 49

6. SONUÇLAR..... 56
7. KAYNAKLAR..... 58

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 3.1. Tekil silo…… 7
Şekil 3.2. Derince'de inşa edilmiş betonarme grup silolar…… 8
Şekil 3.3. Betonarme grup siloların kesit görünüşü…….. 11
Şekil 3.4. Betonarme grup silolarda farklı yükleme durumları……. 13
Şekil 4.1. Solid eleman, düğümleri ve yüzeyleri..... 16
Şekil 4.2. Kabuk elemanı oluşturan düğümler ve lokal eksenleri……. 17
Şekil 4.3. 4'lü Silindirik Betonarme Grup Silo'nun solid elemanlarla hazırlanmış modelinin perspektif görünüşü…….…….. 19
Şekil 4.4. Solid modelde kesişim duvarının perspektif görünümü…… 20
Şekil 4.5. Solid modeldeki kesişim duvarının geometrik özellikleri ve sonlu eleman meshleri……. 21
Şekil 4.6. Hazırlanan modellerdeki sınır şartlarının şematik gösterimi…… 22
Şekil 4.7. Solid modelde iç yüklemeden dolayı oluşan normal gerilme diyagramı perspektif görünüşleri…… 24
Şekil 4.8. Solid modelin iç yüklemeyle yüklenmiş halinin perspektif görünüşü…… 25
Şekil 4.9. Solid modelin iç yükleme sonucu deforme olmuş halinin perspektif görünüşü …….. 25
Şekil 4.10. Hazırlanan solid modellerden kesit kuvvetlerinin elde edilişi…..... 26
Şekil 5.1. Elde edilen sonuçlarla önceki çalışmaların karşılaştırılması…… 30
Şekil 5.2. Solid eleman modellerinden, iç yüklemeden dolayı iç duvarların mesnetlerinde meydana gelen kesit tesirleri……..... 33
Şekil 5.3. Solid eleman modellerinden, iç yüklemeden dolayı iç duvarların crown bölgelerinde meydana gelen kesit tesirleri…….. 34
Şekil 5.4. Solid eleman modellerinden, en kritik dış yüklemeden dolayı dış duvarlarda meydana gelen kesit tesirleri……...…….…… 35
Şekil 5.5. $t_{IW} = 1{,}50 \times t$ ve $0{,}25 \times E$ için % fark grafikleri……...…… 46
Şekil 5.6. $t_{IW} = 1{,}50 \times t$ ve $0{,}50 \times E$ için % fark grafikleri……...……... 48
Şekil 5.7. Eşdeğer kabuk modelinin perspektif görünüşü……. 49
Şekil 5.8. Kabuk modelde kesişim duvarının modellenişi…… 51

Şekil 5.9. Kabuk modelin iç yük ile yüklenmiş hali……... 52
Şekil 5.10. Analiz sonucunda bulunan kabuk modelin deforme olmuş hali üzerinde gösterilen eksenel kuvvet diyagramı…….. 52
Şekil 5.11. Ortalama kesit özellikleri kullanılan kabuk elemanlar ve kesit özellikleri……... 53

TABLOLAR LİSTESİ

Tablo 5.1. Hesaplanan eğilme momenti ve eksenel kuvvet değerlerinin diğer çalışmalarla karşılaştırılması……. 28

Tablo 5.2. İç yüklemeden dolayı iç duvarların mesnetlerinde meydana gelen mesnet reaksiyonları için dizayn katsayıları ($C_{M(MESNET)}$), ($C_{N(MESNET)}$) ve ($C_{V(MESNET)}$)……... 40

Tablo 5.3. İç yüklemeden dolayı iç duvarların crown bölgelerinde meydana gelen eğilme momenti ($C_{M(CROWN)}$) ve eksenel kuvvet ($C_{N(CROWN)}$) dizayn katsayıları……... 41

Tablo 5.4. En kritik dış yükleme durumunda, dış duvarlarda oluşan eğilme momenti ve eksenel kuvvet dizayn katsayıları ($C_{M(MAX)} \times 10^{-2}$) ve ($C_{N(MAX)}$)……. 42

Tablo 5.5. İç duvarlarının elastisite modülü 0.25×E olan modellerin elastisite modülü E olan modellerden elde edilen sonuçlardan % farkı……..… 45

Table 5.6. İç duvarlarının elastisite modülü 0.50×E olan modellerin elastisite modülü E olan modellerden elde edilen sonuçlardan % sapması… 47

Tablo 5.7. Eşdeğer kabuk modelden elde edilen sonuçların solid modellerden elde edilen sonuçlardan % fark değerleri…….…….. 55

KULLANILAN SEMBOLLER

C	=	3 boyutlu solid elemanlar kullanılarak oluşturulmuş sonlu eleman modellerinden elde edilen basit tasarım katsayıları
D	=	silo çapı
D/t	=	silo çapının silo duvar kalınlığına oranı
E	=	Elastisite modülü
L_{IW}	=	kesişim duvarı uzunluğu
M	=	silo duvarının birim yüksekliğindeki eğilme momenti
N	=	birim yükseklikteki silo duvarında oluşan eksenel kuvvet
p	=	depolanan malzemenin silo çeperine yaptığı basınç
R	=	silo yarıçapı
t	=	silo duvar kalınlığı
t_{IW}	=	kesişim duvarının orta noktasındaki duvar kalınlığı
V	=	birim yükseklikteki silo duvarında oluşan kesme kuvveti
ν	=	poisson oranı
α	=	kesişim duvarını gören merkez açı (silo birleşim açısı)

KULLANILAN KISALTMALAR

$C_{M(CROWN)}$ = iç yüklemeden dolayı iç duvarların crownundaki eğilme momenti tasarım katsayıları

$C_{M(MAX)}$ = en kritik dış yükleme durumundan dolayı dış duvarlardaki maksimum eğilme momenti tasarım katsayıları

$C_{M(MESNET)}$ = iç yüklemeden dolayı iç duvarın mesnetlerinde oluşan eğilme momenti için basit tasarım katsayıları

$C_{N(CROWN)}$ = iç yüklemeden dolayı iç duvarların crownunda oluşan eksenel kuvvet için basit tasarım katsayıları

$C_{N(MESNET)}$ = iç yüklemeden dolayı iç duvarların mesnetlerinde oluşan eksenel kuvvet değerleri için basit tasarım katsayıları

$C_{N(MAX)}$ = en kritik dış yüklemeden dolayı dış duvarlarda meydana gelen maksimum eksenel kuvvet için basit tasarım katsayıları

$C_{V(MESNET)}$ = iç yüklemeden dolayı iç duvarların mesnedindeki kesme kuvvet için basit tasarım katsayıları

M_{CROWN} = iç yüklemeden dolayı iç duvarların crownundaki eğilme momenti

N_{CROWN} = iç yüklemeden dolayı iç duvarların crownunda oluşan eksenel kuvvet

M_{MESNET} = iç yüklemeden dolayı iç duvarların mesnedindeki eğilme momenti

N_{MESNET} = iç yüklemeden dolayı iç duvarların mesnedinde oluşan eksenel kuvvet

V_{MESNET} = iç yüklemeden dolayı iç duvarların mesnedinde oluşan kesme kuvveti

M_{MAX} = en kritik dış yüklemeden dolayı dış duvarlarda oluşan eğilme momenti

N_{MAX} = en kritik dış yüklemeden dolayı dış duvarlarda oluşan maksimum eksenel kuvvet

1.GİRİŞ

Betonarme grup silolar farklı ve büyük miktardaki taneli malzemenin hem silolar içinde hem de silolar arasında kalan bölgede depolanmasında kullanılırlar. Betonarme grup silolar genellikle 10 - 15 metre çapında ve 30 - 35 metre yüksekliğinde inşa edilirler. Betonarme grup silolar yatay yükleme altında tekil silolarla karşılaştırıldıklarında hem yapısal bazı avantajlar hem de etkili ekonomik çözüm sağlamaktadırlar (Faber ve Alsop, 1981; Faber ve Alsop, 1982; Prato ve Godoy, 1989). En basit, dünyada ortak kullanımı en yaygın olan betonarme grup silo konfigürasyonu 4'lü silindirik betonarme grup silolardır. Grup silo davranışı komşu silolar arasında bulunan geçiş bölgelerindeki duvarların sürekliliğinden dolayı, tekil siloların davranışından farklıdır. Silo tasarım standartlarının yanı sıra tasarımcı, tasarım kuvvetlerinin hesaplanmasında yapısal sürekliliğin yanında grup siloları oluşturan siloların her birinin dolu veya boş olması durumundaki farklı kombinasyonları da hesaba katmalıdır. Standartlar bunu sağlamamakta ve tasarımcıya yol göstermemektedir. Silindirik betonarme grup siloların tasarım kuvvetlerinin hesaplanmasında yapısal süreklilik ve bitişik silolar arasındaki yük transferinden dolayı iç ve her bir dış yükleme durumunda belirgin hesaplama zorlukları vardır. Bu yüzden pratikte, belirgin hesaplama zorluklarından dolayı komşu iki silo arasında bulunan duvarlardaki yapısal süreklilik genellikle ihmal edilir. Diğer taraftan eğilme momenti, eksenel kuvvet ve kesme kuvvetinin kombine etkileri yapısal süreklilikten dolayı, eğer silo duvarlarında bu kombine etkilere karşı koyacak yeterli donatı sağlanmamışsa siloların yıkılmasına sebep olabilir. Donatı detayları iç ve dış duvar bölgelerinde depolanan malzeme basıncından dolayı 4'lü silindirik betonarme grup siloların tasarım kuvvetleri hatasız hesaplanmalıdır.

Takdim edilen çalışmanın amacı 4'lü silindirik betonarme grup siloların lineer elastik davranışını iç ve dış yüklemeler altında gerçekçi teorik modellerle araştırmaktır. İç ve dış duvarların önceden belirlenmiş kesitlerindeki tasarım kuvvetleri 4'lü silindirik betonarme grup siloların değişik duvar kalınlıkları, kesişim duvarı uzunlukları ve kesişim duvarı kalınlıkları için sonlu elemanlar metoduyla,

solid elemanlar kullanılarak kesişim duvarı bölgesinde gerilme dağılımı ve sınır şartları dikkate alınarak hesaplanmıştır. Bunun sonunda kapsamlı parametrik çalışmayla 4'lü silindirik betonarme grup silo geometrisine iç ve en kritik dış yükleme uygulanmıştır. Bu çalışmanın amacı 4'lü betonarme grup siloların iç ve en kritik dış yükleme durumunda sonlu eleman analizlerine gerek kalmadan tasarım kuvvetleri ve tasarım katsayıları kullanılarak hesaplanmasını sağlamaktır. Farklı silo duvar kalınlığı, kesişim duvarı uzunluğu ve kesişim duvarı kalınlığına sahip silolar için solid elemanlar kullanılarak elde edilen sonuçlar baz alınarak, basit dizayn denklemleri ve katsayıları geliştirilmiştir. Bunlara ilaveten iç duvarların rijitlikleri değişken alınıp tasarım kuvvetlerinin yeniden dağılımı araştırılmıştır. Bütün analizler sonlu eleman kullanan yapısal analiz programı SAP2000 kullanılarak yapılmıştır.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Literatürde grup silolarda oluşan eğilme momenti ve eksenel yüklerin hesaplanmasında kullanılmak üzere geliştirilmiş farklı metotlar vardır. Fakat bunların uygulanmasında her birinin kendine has zorlukları ve buna ilaveten geniş dağılım gösteren sonuçlar ortaya çıkarmaktadırlar. Aynı zamanda bu metotların uygulanması ve bunun sonucunda eğilme momenti ve eksenel kuvvet değerlerinin hesaplanması çok kolay değildir ve zaman alan bir süreçtir. Bu nedenle kullanılacak metotlar yüklemeden oluşacak kritik kesit tesirlerini doğru hesaplayabilecek, tasarımda yol gösterebilecek şekilde olmalıdır. Betonarme grup siloları yükseklik boyunca modellemek yerine, birim yüksekliğe sahip dilim modeller kullanılmıştır. Ciesielski (1970), Haydl (1987) ve Stalnaker ve Haris (1992)'in geliştirdikleri dilim modeller yüksek silolar ve hatta kısa silolar için bile kullanılabilmektedir. Bu literatürde Prato ve Godoy (1989) tarafından ispatlanmıştır.

Araştırmacıların depolanmış malzeme basıncına karşı, 4'lü silindirik betonarme grup siloların davranışını araştırmasına rağmen en etkili silo parametreleri olan, kesişim duvarı uzunluğu (L_{IW}), silo duvar kalınlığı (t) ve kesişim duvarı kalınlığının (t_{IW}) iç ve dış yüklemelerden dolayı gerilme sonuçları şimdiye kadar araştırılmamıştır.

Ghali (1979) betonarme silindirik tankların ve siloların kuvvet yöntemi, rijitlik yöntemi ve sonlu elemanlar yöntemi ile analizi için kapsamlı bilgiler vermektedir. Ayrıca silo duvarlarının sabit kalınlıklı ve değişken kalınlıklı olması durumları da incelenmiştir.

Haydl (1987) dörtlü grup siloları birim yükseklik boyunca simetriden faydalanarak ve kabuk elemanlar kullanarak modellemiştir. İç hücre duvarlarında, iç hücre bölgesindeki malzeme basıncı etkisinden oluşan kesit tesirleri incelenmiştir. İncelenen dörtlü grup siloların birleşim acısı $\alpha = 30°$ olarak sabit alınmış ve kesişim duvarı orta noktasının kalınlığının silo duvarı kalınlığına oranı 1 ve 2 olacak şekilde

değiştirilmiştir. Dörtlü grup silonun kesişim duvarı bölgesi de kabuk elemanlarla modellendiği kesişim duvarı bölgesinin gerçek rijitliği ve geometrisi modele tam yansıtılamamıştır. Kesişim duvarı bölgesinin sınır şartları ise komşu siloların etkisini ve rijitliğini de dikkate alacak şekilde seçilmiştir.

Prato, Godoy (1989) dörtlü grup siloların davranışını analitik metotla incelemişlerdir. Değişik yüksekliğe sahip grup siloların iç duvarlarında iç basınç tesirinden dolayı oluşan eğilme momenti ve eksenel kuvvetleri hesaplamışlardır. Yükseklik boyunca modellenerek analiz edilen grup siloların analiz sonuçları ile birim yükseklik boyunca analiz edilen grup siloların analiz sonuçları karşılaştırılmıştır. Birim yükseklik boyunca grup siloların modellenmesinden elde edilen sonuçların tüm yükseklik boyunca elde edilen sonuçlara yakın değerler verdiği ispatlanmıştır. Yüksek silolar için çok yakın sonuçlar bulunmaktadır. Sonuç olarak bu çalışmada birim yükseklikte silo dilimleri kullanılarak gerçeğe çok yakın sonuçların bulunabileceği ispatlanmıştır.

Kumbasar, Aydoğan, Altan (1992) betonarme silo ve bunkerlerin analizi, tasarımı ve dizaynı hakkında silo tasarımcıları için çok önemli bilgiler vermektedir. Bu kaynakta tekil silolar için çok kapsamlı bilgiler olmakla beraber grup siloların tasarımı için yeterli bilgi bulunmamaktadır.

Stalnaker, Haris (1992) grup siloları birim yükseklik boyunca kabuk elemanlar kullanarak modellemiştir. Bu çalışmada sadece dairesel siloların dolu olması durumu incelenmiş ve iç hücre bölgesindeki malzeme basıncı durumu incelenmemiştir. Elde edilen analiz sonuçlarına göre dış duvarlardaki moment ve eksenel kuvveti bulmak için ampirik formüller çıkarmışlardır. Kesişim duvarı bölgesinde kabuk elemanlar birbirine rijit elemanlar kullanarak modellemiştir. Bu model kesişim duvarı bölgesini gerçeğinden çok fazla rijit davranmasına neden olmaktadır. Elde edilen sonuçlar, gerçek sonuçlardan sapma gösterebilmektedir.

Horrowitz (1997) grup siloların kesişim duvarları bölgesinin ani olarak değişmesi nedeni ile bu bölgenin kabuk elemanlar ile doğru olarak

modellenemeyeceğini vurgulamıştır. Grup siloların kesişim duvarları bölgesinin doğru olarak modellenebilmesi için solid elemanların kullanılması gerektiğini açıklamıştır. Solid elemanlar kullanarak grup siloların doğru olarak modellenebilmesi için örnek vermiştir. Solid elemanlardan elde edilen analiz sonuçlarından grup siloların iç kuvvetlerinin nasıl bulunacağını açıklamıştır.

Horrowitz ve Nogueira (1999) iç yükleme durumunda grup siloların iç duvarlarında oluşan eğilme momenti ve eksenel kuvvetlerin değişimini incelemiştir. Grup siloları solid elemanlar kullanarak modellemişler ve solid elemanlardan elde edilen sonuçlara en yakın değerleri veren karışık modeli bulmuşlardır. Karışık modelde grup siloların kesişim duvarı bölgesi solid elemanlar ile modellenmekte, dış duvarlar ve iç duvarlar ise kabuk elemanlarla modellenmektedir. 3 boyutlu solid elemanlar kullanmak birleşim bölgelerinin incelenmesinde iyi sonuçlar vermektedir. Fakat solid elemanlar ile 4'lü grup siloların modellenmesi çok zahmetli ve zaman alıcı bir işlemdir. Ayrıca solid elemanların analizinden elde edilen çıktılar düğüm noktası kuvvetleri ve gerilme değerleridir. Bunun için solid elemanlardan bulunan sonuçlara yakın değerler veren yaklaşık modeller silo tasarımcıları için çok önemlidir. Fakat bu karışık modelde grup siloların kesişim duvarı bölgesi solid elemanlarla modellendiği için bu model grup silolar için bir pratiklik getirmemektedir. Ayrıca solid eleman ile kabuk elemanın birleştiği bölgede düğüm noktası kuvvetleri gerçekten sapma gösterebilmektedir.

3. SİLOLAR ve 4'LÜ SİLİNDİRİK BETONARME GRUP SİLOLAR'IN ÖZELLİKLERİ

3.1. Silo Elemanları Hakkında Genel Bilgi

Grup ve tekil silolar Şekil 3.1. ve Şekil 3.2.′de görüldüğü gibi başlıca aşağıdaki temel elemanlardan oluşmaktadır. Her tip siloda bu altı ana eleman bir araya getirilerek grup veya tekil silolar teşkil edilebilir.

1. Silo çatısı
2. Silo tavan döşemesi
3. Silo gövdesi
4. Silo hunisi
5. Düşey taşıyıcılar (silolar kolonlar üzerine oturabileceği gibi direk temele de oturabilir)
6. Temel



Şekil 3.1. Tekil silo

Siloların doldurulması genellikle üsttendir. Depolanacak malzemenin silolara iletimi sırasında atmosfer şartlarından korunması amacıyla silo tavan döşemesi üzerinde bir galeri (silo çatısı) teşkil edilir. Bu galeri monolitik veya prefabrik olabilir. Silo tavan döşemesi olarak altı metre açıklıklara kadar ortasında doldurma boşluğu olan plak yeterli olur. Daha büyük açıklıklarda nervürlü veya kaset döşeme gereklidir. Dünyada en yaygın kullanılan silo gövdesi silindirik kabuk şeklindedir. Silo hunisi silo gövdesine uygun olarak teşkil edilmiş malzeme alma deliği veya deliklerini içeren bir plak, prizmatik bir huni veya kesik koni şeklinde bir elemandır. Silo düşey taşıcılarının seçiminde malzeme alımı önemli rol oynar. Silolarda silo hücrelerinin altında bir hacim teşkil edilir ve bu hacim malzeme alınması için kullanır. Silolarda diğer mühendislik yapılarından çok farklı olarak hareketli yükün sabit yüke oranı çok büyük değerler almaktadır. Silo gruplarının altına betonarme sürekli temeller ve çoğu kez de radye temeller yapılır. Radye temeller kirişli ve kirişsiz radye olarak teşkil edilebilir.



Şekil 3.2. Derince'de inşa edilmiş betonarme grup silolar

3.2. Stok Malzemesi Türleri ve Mekanik Etkileri

Stok malzemesi sayısı çok fazladır ve silolarda çok çeşitli malzeme depolanmaktadır. Siloların projelendirilebilmesi, hesabı ve teşkili için siloların doldurma, depolama ve boşaltma durumlarındaki davranışının bilinmesi gerekmektedir. Bundan da stok malzemesinin silo cidarına ve diğer silo elemanlarına olan tüm fiziksel ve kimyasal etkisi anlaşılmaktadır. Stok malzemesi türleri aşağıda verilmiştir.

Silolarda depolanan malzemeler aşağıdaki gibi gruplandırılabilirler.

1. İşlenmemiş tarımsal ürünler
   a. Tahıllar: buğday, arpa, mısır,…
   b. Bakliyat: fasulye, mercimek, nohut,…
   c. Yağlı maddeler: ayçiçeği, susam,…

d. Kahve

2. İşlenmiş tarımsal ürünler
   a. Tahıl unları
   b. Yemler
   c. Şeker
3. Anorganik işlenmemiş hammaddeler
   a. Kum, kil, çakıl
   b. Maden cevheri, kömür, kok, kalker
4. Endüstri ürünleri
   a. Çimento, çimento klinkeri
   b. Kül kömür tozu
   c. Gübreler
   d. Yapay daneli malzemeler

Siloda depolanan malzemenin birim hacim ağırlığı, içsel sürtünmesi ve kohezyonu silonun boyutlandırılmasında etkili olan faktörlerdir. Bu sayılan özellikler depolanan malzemenin dane çapına bağlıdır. Bu nedenle stok malzemesi dane çapına bağlı olarak da sınıflandırılabilir. Toz şeklindeki stok malzemelerinde sürtünmenin yanı sıra kohezyonda ortaya çıkar. Daneli ve parçalı malzemede ise kohezyon ortaya çıkmaz ya da çok az olur. Eğer daneli malzemelerde de danenin kabuğu parçalanır ve yapışkan bir sıvı veya yağ dışarı çıkarsa kohezyon oluşabilir. Bu durumda yapışkan ve birbirine kenetlenen bir malzeme oluşur ki daneler birbirine bulaşarak büyük parçalar meydana getirir ve neticede silonun boşaltılması sırasında daneli malzeme gibi akmayıp, akıtılması için bir takım ek önlemlerin alınması gerekir. Depo malzemelerinin sertliği silonun depolama ve boşaltılması sırasında silo cidarlarının aşınmasına neden olur. Maden cevheri, çakıl, gibi maddelerin yüksek aşındırma etkisi vardır.

3.3. Daneli Malzeme Basınçları

Daneli malzeme etkisi 19. yüzyılda su basıncı gibi düşünülmüş, daha sonraki yıllarda toprak itkisi olarak göz önüne alınmıştır. Malzemenin çeperlerle olan sürtünmesi de göz önünde tutulunca, derinliğin üstel fonksiyonu olarak değişen basınçlar söz konusu olur. Sürtünmenin doldurma, boşaltma ve denge konumlarında farklı değerler aldığı unutulmamalıdır. Ayrıca en önemli etkilerden biri olan içsel sürtünme açısı da basınçla değişebilmektedir. Bu değişimi hesaplarda göz önüne almak zordur. Silo basınçlarının hesabında Janssen Yöntemi ve Reimbert Yöntemi gibi değişik hesap türleri vardır. Bu yöntemler hakkında detaylı bilgi "Betonarme Silo ve Bunkerler" adındaki kaynakta ve "ACI 313-97", "TS 6989" 'da bulunabilir.

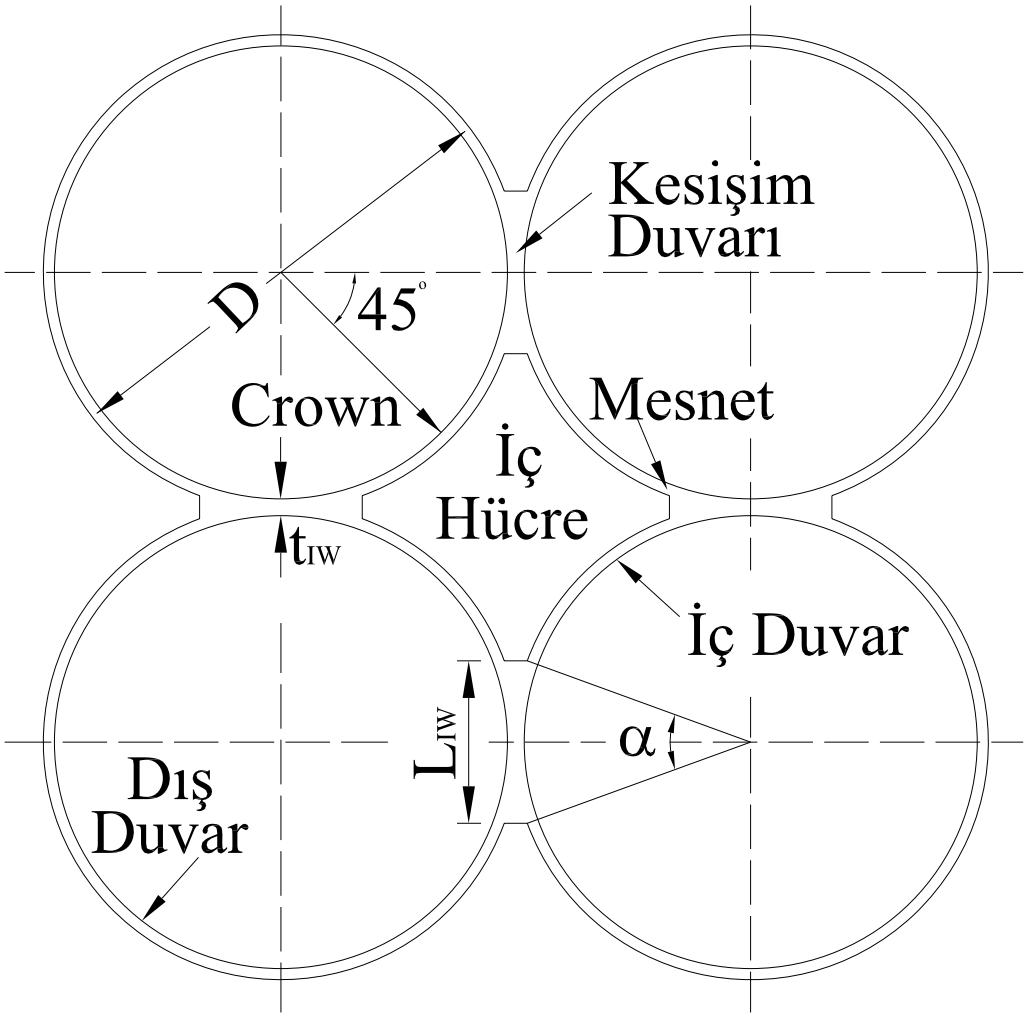
3.4. Silolara Etki Eden Yükler

Silo tasarımında göz önüne alınması gereken yükler:

1. Sabit yükler (kendi ağırlığı)
2. Malzeme basıncı
3. Sıcaklık etkisi
4. Rüzgar etkisi
5. Deprem etkisi

Bu çalışmanın kapsamı dahilinde siloların sadece malzeme basıncı altındaki elastik davranışı incelenmiştir.

3.5. 4'lü Silindirik Betonarme Grup Siloların Geometrik Özellikleri



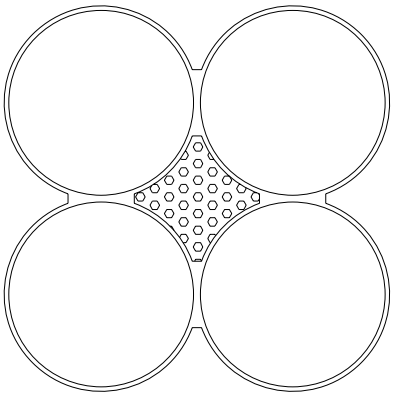
Şekil 3.3. Betonarme grup siloların kesit görünüşü

Tipik bir 4'lü silindirik betonarme grup silo Şekil 3.3.'de gösterilmiştir. Burada D silo çapını, R silo yarıçapını, t silo duvar kalınlığını, t_{IW} kesişim duvarının orta kalınlığını, L_{IW} kesişim duvarı uzunluğunu ve α kesişim duvarını gören merkez açıyı göstermektedir. İki komşu silo arasındaki geçiş bölgesi kesişim duvarı olarak, iç hücre duvarları ise iç duvar olarak adlandırılmıştır. Kesişim duvarı sınırları mesnet

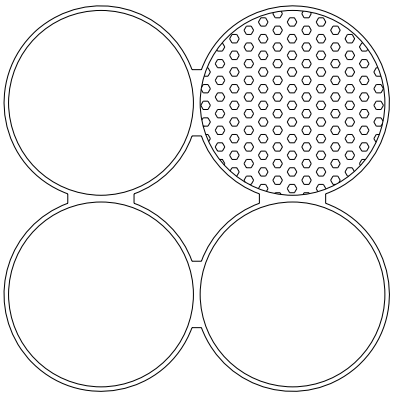
olarak ve iç duvarların orta açıklıklarına crown denmiştir. Silo duvarlarının kesişim duvarı ve iç duvar dışında kalan kısmına ise dış duvar ismi verilmiştir.

3.6. 4'lü Silindirik Betonarme Grup Siloların Yükleme Durumları

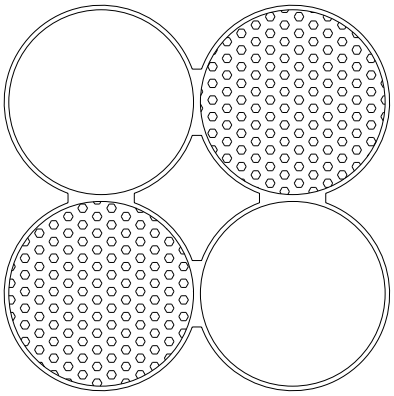
İç hücrenin yüklenmesine iç yükleme (Şekil 3.4. (a)) ve siloların her birinin dolu veya boş olması durumundaki farklı kombinasyonlara dış yüklemeler (Şekil 3.4. (b), (c), (d), (e) ve (f)) denmiştir. Yükleme kombinasyonları iç ve 5 tane dış yüklemeyi içeren ve en kritik yükleme durumunu belirlemede kullanılan 6 adet yükleme durumudur. 6 kritik yükleme kombinasyonu 4'lü silindirik betonarme grup silo tasarımında değerlendirilmelidir. İç ve dış yüklemelerde depolanmış malzemeden dolayı silo duvarına etkiyen yatay basınç kuvveti (p) olarak gösterilmiştir. Tasarımın amacı, silo duvarında, verilen yükseklik boyunca normal basınç davranışı olduğu varsayılmıştır. Bu yüzden 4'lü silindirik betonarme grup silolar iç ve dış yüklemelerde düzgün yayılı yatay basınç yükü dikkate alınmıştır.



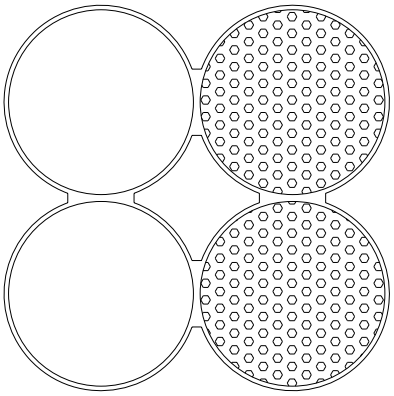
a) İç Yükleme



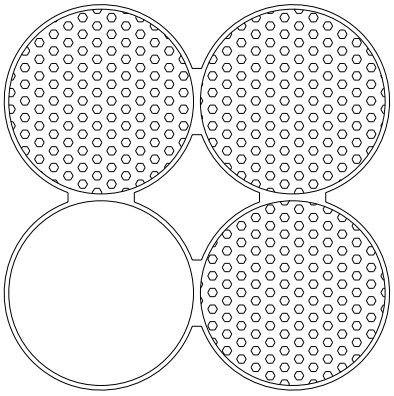
b) Dış Yükleme Durum-1



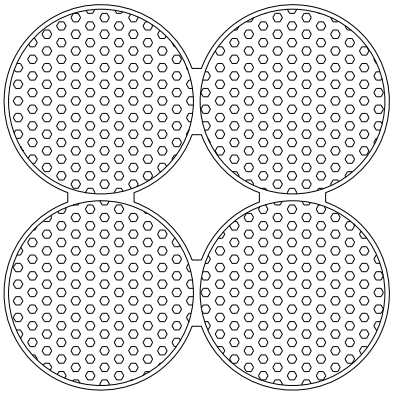
c) Dış Yükleme Durum -2



d) Dış Yükleme Durum -3



e) Dış Yükleme Durum -4



f) Dış Yükleme Durum -5

Şekil 3.4. Betonarme grup silolarda farklı yükleme durumları

4. PARAMETRİK ÇALIŞMA

4'lü silindirik betonarme grup siloların iç basınç altındaki davranışını anlamak, tasarım kuvvetlerini elde etmek amacıyla sonlu eleman modelleri hazırlanmıştır. 3 boyutlu solid elemanlar kullanmak birleşim bölgelerinin incelenmesinde iyi sonuçlar vermektedir. Fakat solid elemanlar ile 4'lü silindirik betonarme grup siloların modellenmesi çok zahmetli ve zaman alıcı bir işlemdir. Ayrıca solid elemanların analizinden elde edilen veriler düğüm noktası kuvvetleri ve gerilme değerleridir. Bunun için solid elemanlardan bulunan sonuçlara yakın değerler veren yaklaşık modeller silo tasarımcıları için çok önemlidir. Siloları yükseklikleriyle birlikte tamamen modellemek yerine, birim yükseklik için modelleme yapılmıştır. Yapının depolanan malzeme yükleri altındaki davranışını anlamak ve en uygun pratik modeli elde etmek için, SAP2000 paket programı ile analizler yapılmıştır. Modeller hazırlanırken solid eleman ve kabuk eleman kullanılmıştır. Bu çalışmada solid elemanlar kullanılarak elde edilmiş analiz sonuçları doğru kabul edilerek bu değerlere en yakın sonuçlar verecek kabuk eleman ile yapılabilecek pratik model oluşturulmaya çalışılmıştır. Grup siloların modellenmesinde kullanılan solid eleman ve kabuk eleman hakkındaki özet bilgiler daha sonraki bölümlerde verilmiştir.

Analizler için aynı yarıçapa sahip 4'lü silindirik betonarme grup silo modelleri hazırlanmıştır. İç ve dış yüklemelerle ilişkili tasarım kuvvetleri önceden belirlenmiş kesitlerde hesaplanmıştır. 4'lü silindirik betonarme grup siloların geometrisindeki karakteristik değerler değişken alınarak sonlu eleman analizleri sonucunda, bunların davranışa etkileri ortaya çıkarılmıştır. Pratikte, betonarme grup silolar genellikle 10 – 15 m çapında inşa edilirler. Doğru modelleme için D ve p sabit ve sırasıyla 12.50 m ve 110 kN/m² alınırken, diğer değerler değişken alınarak parametrelere etkisi incelenmiştir. Değişken alınan değerler: silo duvar kalınlığı t = 0.20 m, 0.25 m, 0.30 m, 0.35 m ve 0.40 m (D/t, çapın duvar kalınlığına oranı 62.5, 50.0, 41.7, 35.7 ve 31.3); kesişim duvarı kalınlığı t_{IW} = 1.25×t ve 1.50×t; ve kesişim duvarını gören merkez açı α = 30°, 35°, 40°, 45° ve 50° değerleridir.

Geometrik özellikler ve yükleme şartları (D=12.50 m; t=0.2 m, 0.25 m, 0.30 m, 0.35 m, 0.40 m; p=110 kN/m²), sonuçları karşılaştırabilmek amacıyla tamamen birbirine benzeyen ve daha önce yayınlanmış olan çalışmalardaki (Haydl, 1987; Balkaya ve ark. 2006) gibi alınmıştır. Gerçek silolarda kesişim duvarı kalınlığı t_{IW} = 1.5×t değerinden daha az olabilir ama kesinlikle t den daha kalın olmak zorundadır. Kesişim duvarı kalınlığı daha önceki çalışmalar da dikkate alınarak (Stalnaker ve Harris, 1992; Horowitz ve Nogueira, 1999 ve Balkaya ve ark. 2006) yapılan analizlerde 1.25×t ve 1.50×t olarak kullanıldı.

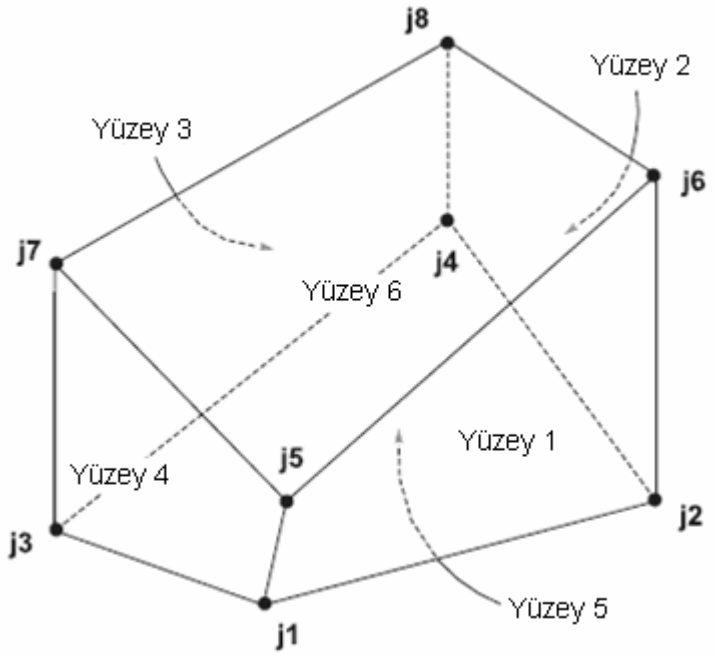
Bütün analizlerde betonarme malzemenin basınç dayanımı 25 MPa, Elastisite modülü (E) ve Poisson oranı (ν) sırasıyla 3×10^7 kN/m^2 ve 0.2 alındı. Kullanılan duvar kalınlığı çatlaksız kesit olarak alındı. Bütün bu değerlerin kombinasyonunun sonucu, geometrik olarak birbirinden farklı 50 adet silindirik betonarme grup silo ortaya çıkarmaktadır. İç yükleme ve 5 dış yükleme durumu, dolu ve boş silo hücrelerini dikkate alarak her bir silindirik betonarme grup siloya yüklenmiştir. Her bir yükleme durumu için, sonlu eleman analizleri sonuçları incelenerek en büyük pozitif ve negatif eğilme momenti, eksenel kuvvet ve kesme kuvveti araştırılmıştır.

4.1. Solid Eleman

Solid eleman her türlü yapısal elemanların modellenmesinde kullanılabilir. Tipik bir solid eleman Şekil 4.1.'de gösterilmiştir. Solid modelin en önemli avantajı, model üzerinde herhangi bir kabul ve basitleştirme yapmadan geometri, rijitlik ve sınır şartlarını tam olarak modelleyebilmesidir. Solid elemanda 8 düğüm bulunmasından dolayı elemanın her doğrultudaki kesit alanı, hacmi, vb. özellikleri bellidir. Solid elemanlarla en iyi sonucu alabilmek için yüzleri arasındaki açının mutlaka 180° dereceden küçük, 45° ile 135° derece arasında olması gerekmektedir

Solid elemanlara yükleme yapılırken solid eleman'ı oluşturan düğümlere yükler verilebileceği gibi solid elemanların yüzeylerine, yüzey basıncı yüklenebilir.

6 adet yüzeye sahip olan solid elemanın her bir yüzeyine ayrı yüzey basıncı verilebilir. Ayrıca yüklemenin durumuna göre düğüm noktası yüklemesi tanımlanmak suretiyle istenilen türde yüklemeler de yapılabilir. Yapılan yüklemeler sonucunda 6 adet gerilme ve bunlara karşılık oluşan 6 adet yer değiştirme mevcuttur ve düğümlerde oluşan kuvvetler ve gerilmeler analiz sonucu olarak alınabilir.



Şekil 4.1. Solid eleman, düğümleri ve yüzeyleri

Dizayn amacıyla 4'lü silindirik betonarme grup siloların elastik analizi 3 boyutlu solid eleman, kabuk eleman veya kiriş elemanlar kullanılarak yapılabilir. Kesişim duvarı bölgesinin aniden kalınlaşması nedeniyle 4'lü grup siloların modellenmesi oldukça karmaşıktır ve kabuk ve kiriş elemanları ile doğru olarak modellenemez. 4'lü grup silolarda birleşim duvarı bölgesi aniden kalınlaştığı için bu bölgenin gerçeğe yakın sonuçlar verecek şekilde modellenmesi çok önemlidir. Bu bölgenin doğru modellenmesi için solid elemanlar gereklidir, çünkü bu bölgenin geometri, rijitlik ve sınır şatları için herhangi bir basitleştirme yapmaya gerek

kalmaz. Kesişim duvarı bölgesi aslında 3 boyutlu bir cisim gibi davranır. Kesişim duvarı bölgesinin aynı geometri ve rijitliği verecek şekilde modellenmesi ancak solid elemanlar kullanılarak yapılabilir.

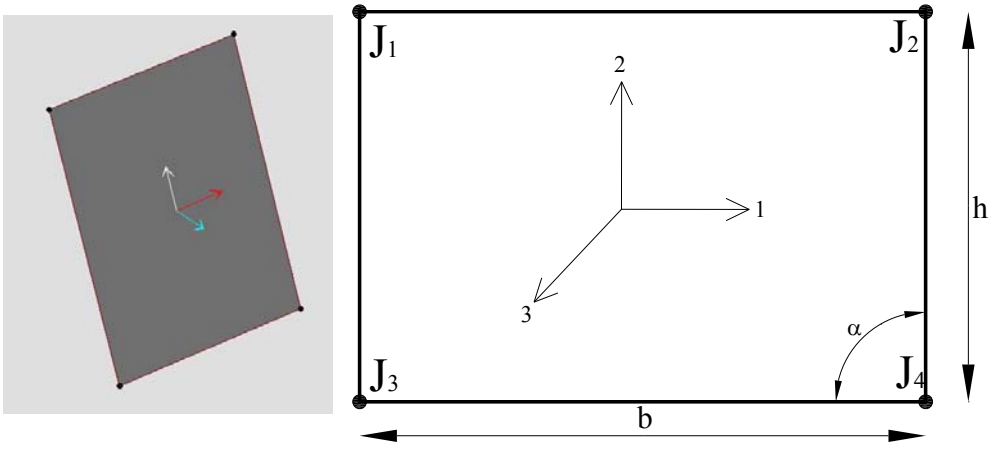
4.2. Kabuk Eleman

Kabuk elemanlar 3 veya 4 dört düğüm noktası ile tanımlanırlar. Tipik bir kabuk elemanı oluşturan düğümler ve lokal eksenleri Şekil 4.2.'de verilmiştir. Üç farklı kabuk eleman türü mevuttur. Bunların isimleri ve modellemesinde kullanılacağı yapı elemanlarına verilebilecek örnekler şöyledir:

Kabuk ➔ tanklar, silolar ve kubbelerin modellenmesinde

Plak ➔ döşeme ve temellerin modellenmesinde

Düzlem eleman ➔ İki boyutlu perde duvar modellenmesinde ve düzlem gerilmeye maruz elemanların modellenmesinde kullanılabilir.

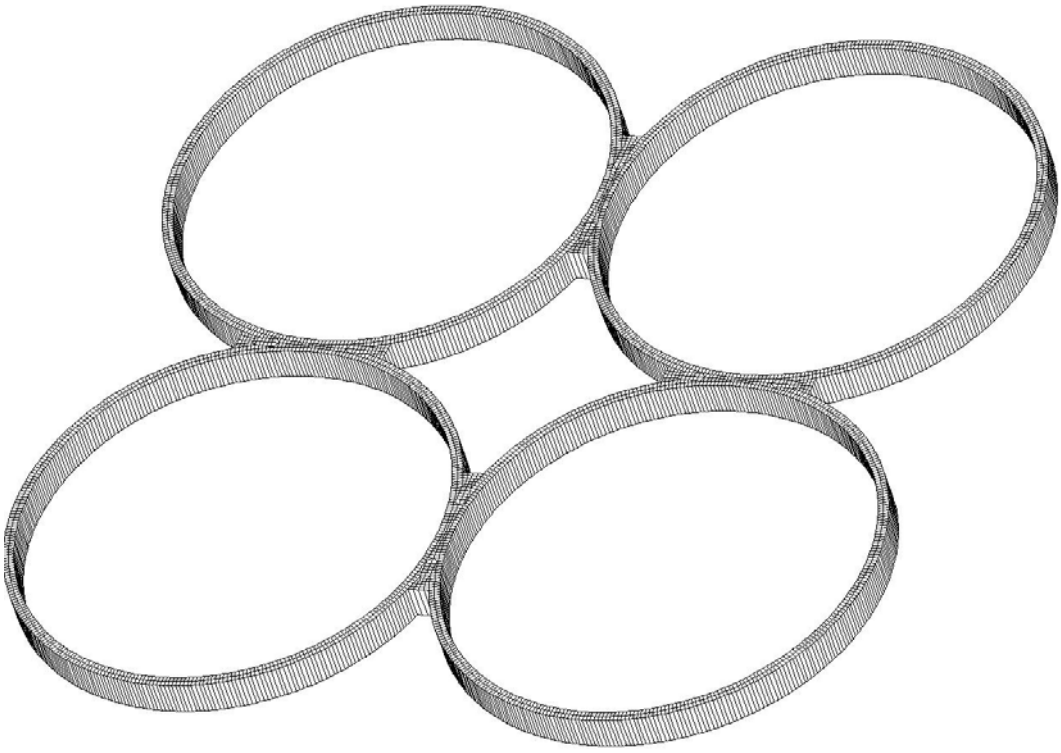


Şekil 4.2. Kabuk elemanı oluşturan düğümler ve lokal eksenleri

Kabuk elemanı oluşturan düğüm koordinatlarının, dolayısıyla kabuk elemanın sağlaması gereken geometrik özellikler şöyledir. Düğümler arasındaki açının 180° den küçük olması, modellenen yapının durumuna göre 45° – 135° arasında olmalıdır. En iyi sonuçları ise 90 derecede vermektedir.

4.3. Solid Eleman Kullanılan Sonlu Eleman Modelleri

Silindirik betonarme grup siloların modellenmesi aniden kalınlaşan kesişim duvarı bölgelerinden dolayı gerçekten karmaşıktır ve kabuk elemanlar kullanarak doğru modellenemez. Aslında bu bölgeler 3 boyutlu gövde gibi davranırlar. Geometri, rijitlik ve sınır şartlarında basitleştirme ve varsayımlar yapılmadan, silindirik betonarme grup siloları doğru modelleyebilmek için solid elemanlara ihtiyaç vardır. Solid elemanlar kullanılarak modellenmiş 4'lü silindirik betonarme grup siloların modelleri, diğer tüm basitleştirilmiş modellerden daha doğru sonuçlar üretmiştir. Bu sebepten dolayı silindirik betonarme grup siloların tüm parçaları, kesişim duvarları, iç duvarlar ve dış duvarlar solid elemanlarla modellenmiştir. Analizlerde kullanılan sonlu eleman modeli Şekil 4.3.'de verilmiştir. Her bir 4'lü silindirik betonarme grup silo modeli yaklaşık 3000 solid eleman kullanılarak modellenmiştir.



Şekil 4.3. 4'lü Silindirik Betonarme Grup Silo'nun solid elemanlarla hazırlanmış modelinin perspektif görünüşü

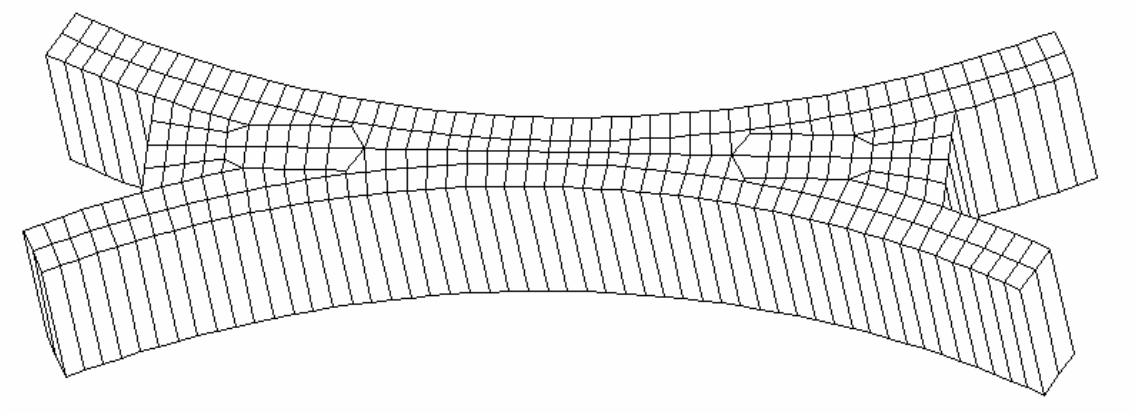
Solid elemanla modellemenin büyük zorlukları vardır. Kesişim duvarı bölgesinin, silo duvarları arasındaki süreklilikten dolayı serbestlik derecelerinin sayısındaki artış beraberinde belirgin hesaplama zorluğu getirmektedir. Tipik bir kesişim duvarı sonlu eleman ağı Şekil 4.4. ve Şekil 4.5.'de gösterilmiştir. Üç boyutlu solid elemanların analiz sonuçlarının değerlendirilmesi ve düğüm kuvvetlerinin eğilme momenti, eksenel kuvvet ve kesme kuvvetine dönüştürülmesi gerektiğinden dolayı ilave sayısal hesaplama gerektirmektedir.

Hazırlanan solid modelin geometrik özellikleri, kullanılan mesh ve sınır şartları aşağıdaki gibi alınmıştır.

Siloların kalınlığı: 4'lü grup silolarda yüklemeden dolayı kesit içinde gerilme dağılımının nasıl değiştiğini anlayabilmek amacıyla silo kalınlığı t = 0.20 m, 0.25 m, 0.30 m, 0.35 m ve 0.40 m olarak değiştirilerek 5 farklı silo kalınlığı için inceleme yapılmıştır.

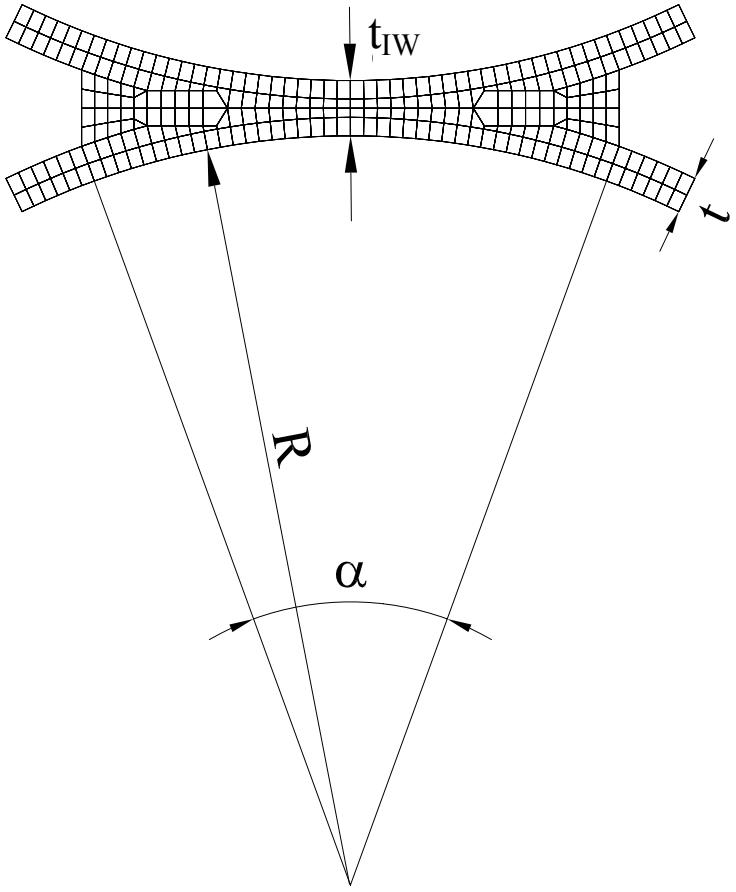
Siloların birleşim açısı: Çapı 12.50 m olan 4'lü grup siloların birleşim açısının uygulanabilirlilik göz önüne alınırsa 30°'den küçük yapılması pratik olarak mümkün olmamaktadır. 50° dereceden büyük birleşiminde uygulanabilir olmayacağı düşünülerek daha büyük açılara sahip 4'lü grup silolar incelenmemiştir. Daha önceki çalışmalarda aynı çalışma içerisinde farklı açıları inceleyen bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu çalışmada birleşim açısının 30°, 35°, 40°, 45° ve 50° durumları incelenecektir.

Siloların kesişim duvarı kalınlığı: Siloların kesişim duvarının orta noktasının kalınlığı (t_{IW}) kesişim duvarı boyunca en ince kesitin kalınlığıdır. Teorik olarak birleşim bölgesi kalınlığı en az 1.0×t olmalıdır. Fakat bu çalışmada uygulamada en çok rastlanılan t_{IW} = 1.25×t ve 1.50×t durumları incelenmiştir.



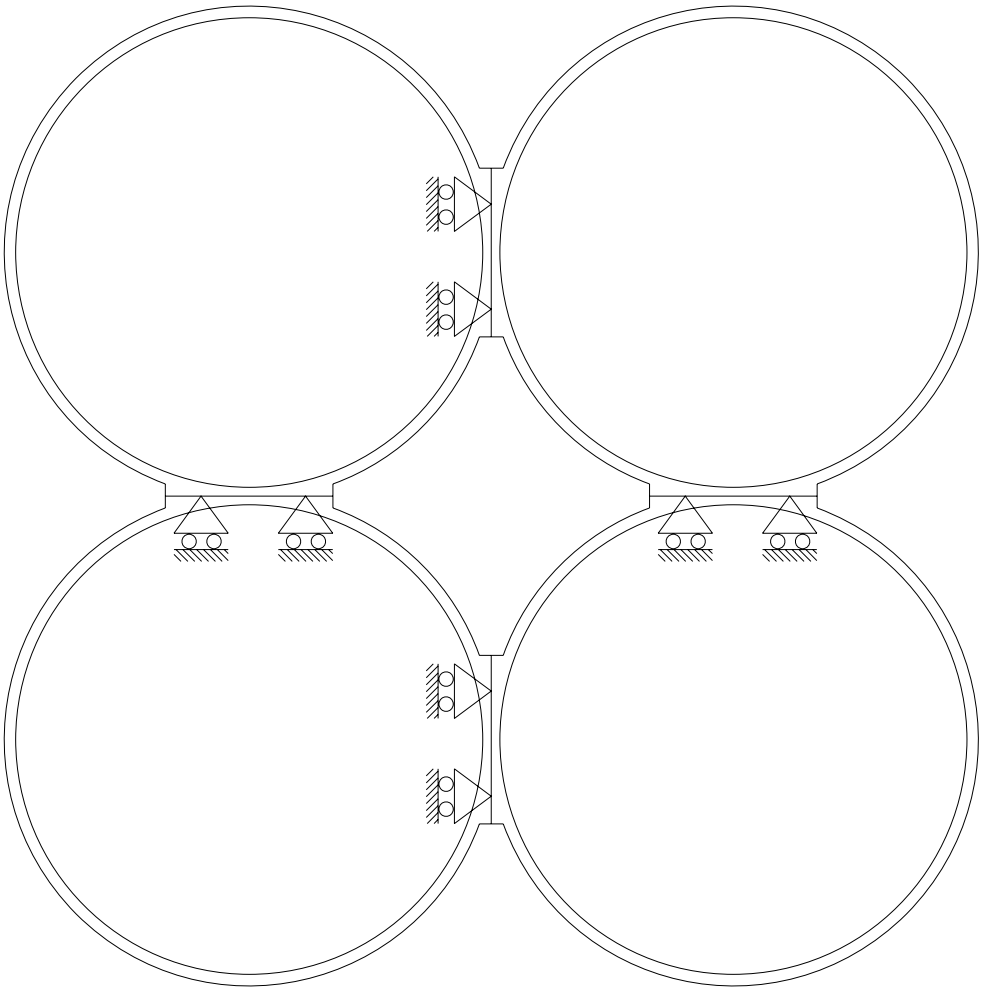
Şekil 4.4. Solid modelde kesişim duvarının perspektif görünümü

Mesh bilgisi: Mesh, sonlu elemanlarla bir yapı elemanı incelerken yapı elemanını oluşturan sonlu eleman boyutudur. Bu mesh hesaplanırken mesh sıklaştırması yapılmalıdır. Mesh sıklaştırılması sonlu eleman boyutlarını her seferinde bir öncekinin yarısı alınarak aynı yapı elemanının modellenmesi sonucu elde edilen kuvvetler arasındaki farkın tatmin edici boyutta olduğu yere kadar yapılır ve en son elde edilen mesh boyu kullanılarak diğer modeller yapılarak analizlere devam edilir. Bu çalışmanın konusu olan 4'lü silindirik betonarme grup silolarla ilgili bugüne kadar yapılan modellerde en sık mesh aralığı olarak 6 derecelik sonlu elemanlar (solid ve kabuk elaman) kullanılmıştır. Bu çalışmada ise mesh aralığı olarak solid elemanlar için 1°'lik mesh aralığı kullanılmıştır.



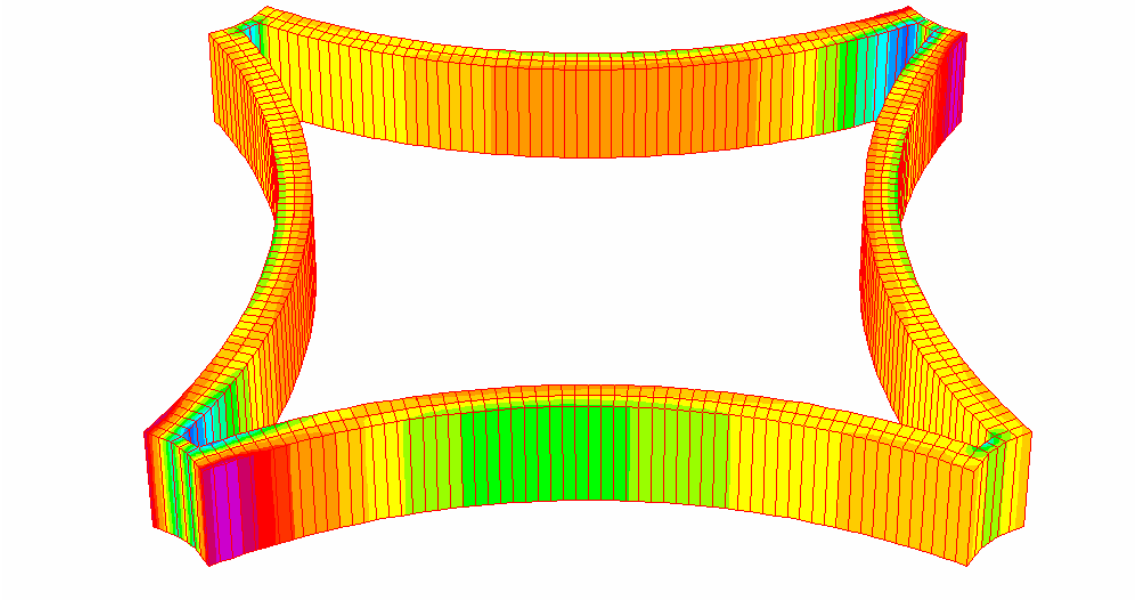
Şekil 4.5. Solid modeldeki kesişim duvarının geometrik özellikleri ve sonlu eleman meshleri

Sınır Şartları: Hazırlanan modellerdeki sınır şartlarının belirlenmesi çalışmanın gidişatına en önemli etkiyi yapacak olan kısımdır. Kesişen duvarlar arasındaki düğümlere sadece uzun doğrultuda yer değiştirme kabiliyeti olan, diğer yönlerde hareketi engellenmiş olan kayıcı mesnetler kullanılmıştır. Bu çalışmada kullanılan sınır şartları daha önce Ciesielski, 1970 Haydly, 1988 Stalnaker ve Haris, 1992 çalışmalarında kullanılan sınır şartlarının aynısıdır. Şekil 4.6.'da bu çalışmada kullanılan sınır şartlarının şematik gösterimi verilmiştir.

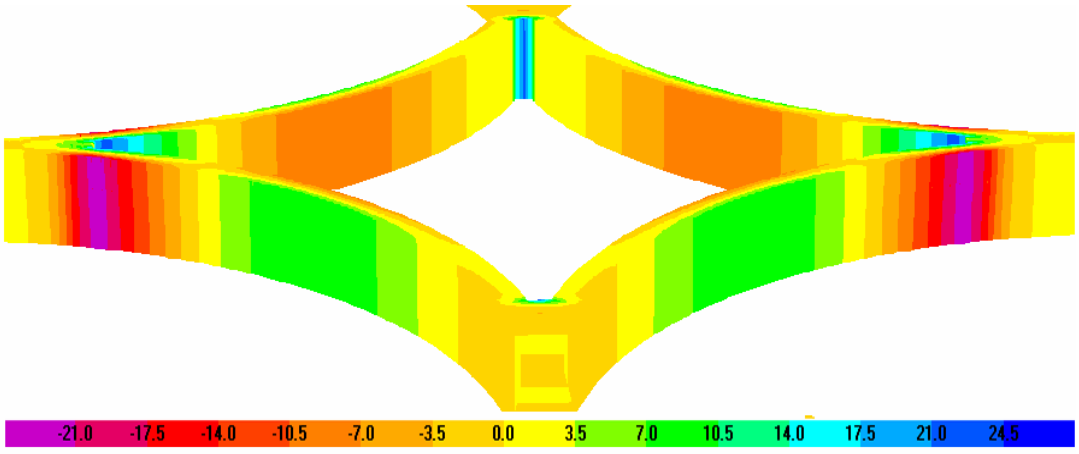


Şekil 4.6. Hazırlanan modellerdeki sınır şartlarının şematik gösterimi

Hazırlanan solid modelin iç yüklemeyle yüklenmiş hali ve bu yükleme sonucunda meydana gelen deformasyon sırasıyla Şekil 4.8. ve Şekil 4.9.'de gösterilmiştir. İç yüklemeden dolayı 4'lü silindirik betonarme grup siloların iç duvarlarında meydana gelen normal gerilme diyagramı Şekil 4.7.'de gösterilmiştir. En büyük gerilme kesişim duvarlarının mesnet bölgelerinde meydana gelmiştir. Solid eleman modellemesi özellikle silo duvarlarındaki basınç bölgelerinde, grup silolardaki gerçek geometri ve mesnet şartlarını kullandığından, gerilmelerde iyi sonuçlar vermektedir. Bununla birlikte pratik uygulamalarda, sonlu eleman analizi gerektirmeyen, solid eleman modellerinden elde edilmiş sonuçlardan türetilmiş, basit tasarım katsayıları yardımıyla iç kuvvetlerin hesaplanması arzulanır. Bu maksatla, sonlu eleman analizlerinden elde edilmiş tasarım kuvvetlerinin hesaplanması için, tasarım formülleri ve basit tasarım katsayıları önerilmiştir.

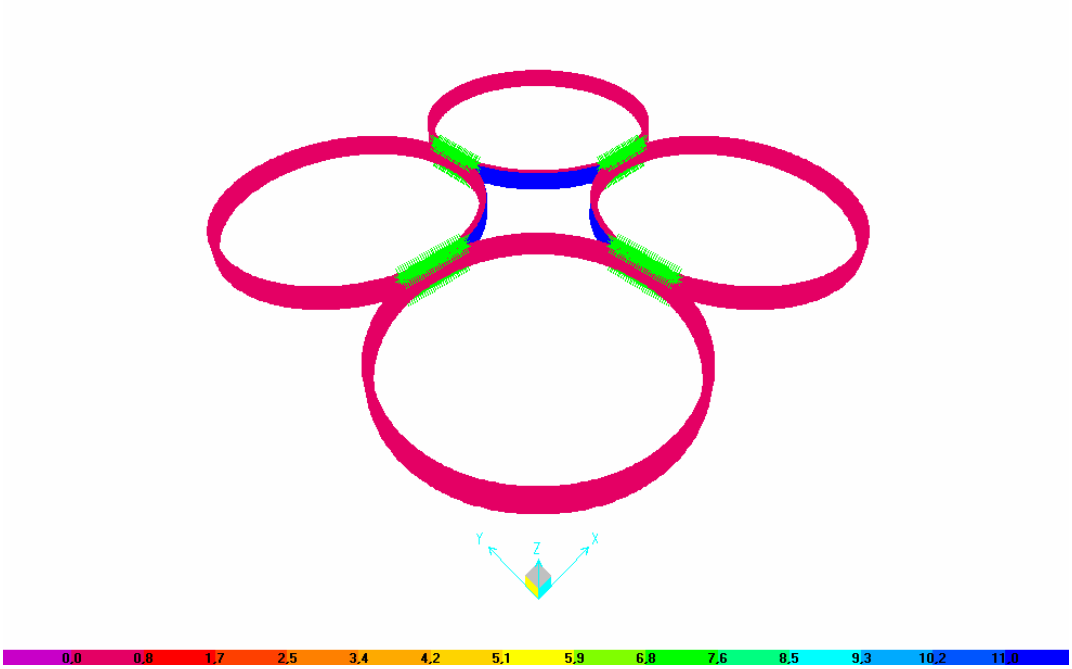


(a)

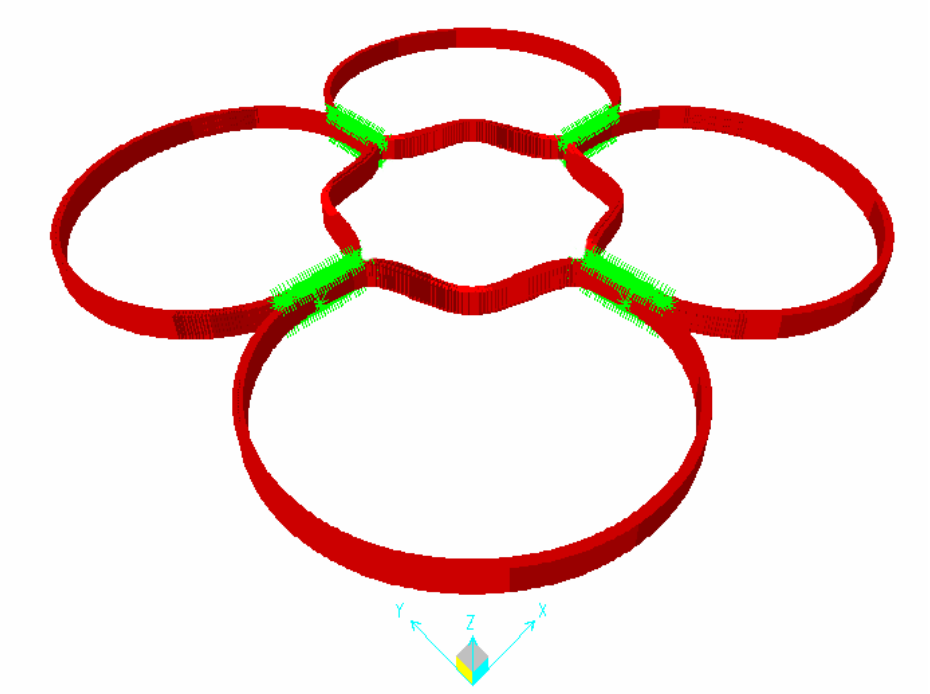


(b)

Şekil 4.7. Solid modelde iç yüklemeden dolayı oluşan normal gerilme diyagramı perspektif görünüşleri



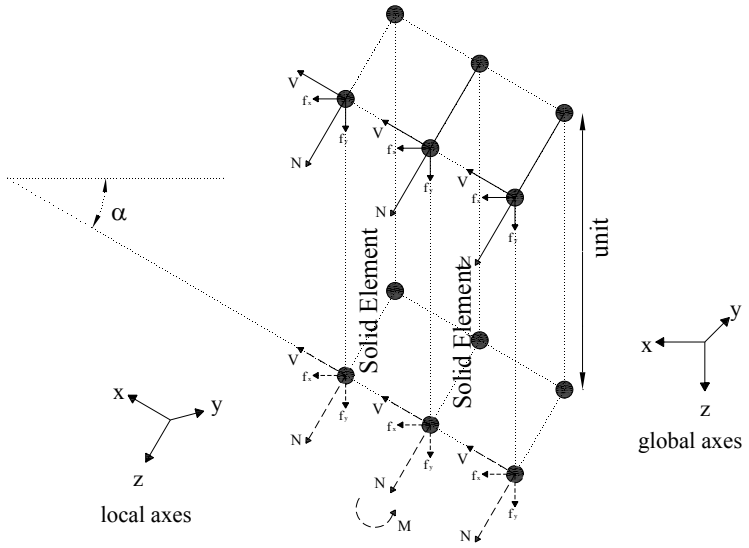
Şekil 4.8. Solid modelin iç yüklemeyle yüklenmiş halinin perspektif görünüşü



Şekil 4.9. Solid modelin iç yükleme sonucu deforme olmuş halinin perspektif görünüşü

Silindirik betonarme grup siloların sonlu eleman modeli, silonun eksenel doğrultusunda birim yükseklikteki dilimden oluşmaktadır. Birim yükseklikteki dilim modeller, bütün silindirik betonarme grup silo yüksekliğini almak yerine kullanılmıştır. Şerit (dilim) modeller basınç bölgelerinin yerlerini belirlemede (bu silo tasarımında en önemli husustur) tatmin edici sonuçlar vermektedir. Bu çalışmada sunulan şerit model, daha önceki çalışmalarla kıyaslandığında tutarlı sonuçlar vermiştir. Prato ve Godoy (1989) tarafından yüksek siloların tasarımında, bütün sonlu eleman hesaplamaları sürecinde belirgin olarak daha az hesap ile kullanılabileceği ispatlanmıştır. Bu yüzden iki boyutlu yaklaşıma dayalı sonuçlar, yüksek silolar için uygulanabilirken, sunulan metodoloji kısa silolar için kolayca genişletilebilir.

Betonarme tasarımında, gerilme değerleri ve düğüm kuvvetlerini bulmak yeterli değildir. Dizayn kuvvet ve momentleri 4'lü silindirik betonarme grup silolarda önceden belirlenmiş kesitlerde hesaplanmalıdır. Eğilme momenti, eksenel kuvvet ve kesme kuvveti değerleri sonlu eleman analizinden elde edilen düğüm kuvvetleri kullanılarak hesaplanmıştır. Gerilme değerlerinin solid elemanların düğümlerinden hesaplanışı Şekil 4.10.'da tanımlanmıştır.



Şekil 4.10. Hazırlanan solid modellerden kesit kuvvetlerinin elde edilişi

5. SONLU ELEMAN ANALİZ SONUÇLARI

5.1. Sonlu Eleman Analiz Sonuçlarının Daha Önceki Çalışmalarla Karşılaştırılması

Betonarme grup silolar çok büyük yapılardır. Bu yüzden deneysel çalışmalara ve bilinen metotların uygulanmasına imkan vermezler. Deneysel veri eksikliğinden dolayı nümerik metotlar kullanılarak gerçek davranışa yakın tesirler elde etmek için, bu çalışmada solid eleman temelli sonlu eleman modellerinden faydalanılmıştır. Modellemedeki karmaşıklık ve çözüm için hesaplama zorlukları olmasına rağmen, solid eleman tabanlı sonlu eleman modeli bilinen en doğru ve kesin değerleri elde edebilecek en sağlıklı yaklaşımdır.

İç yüklemeden dolayı iç duvarlarda meydana gelen eğilme momenti ve eksenel kuvveti hesaplamak için literatürde pek çok metot vardır. Tablo 5.1.'de 6.25 m çapında ve 110 kN/m² malzeme basıncına maruz olan silindirik betonarme grup silo modelinden elde edilen sonuçları göstermektedir. Şekil 3.3.'de verilen geometrik özellikler bütün yükleme durumları için kullanılmıştır. Silindirik hücrenin iç yüzeyinde meydana gelen gerilmeden dolayı oluşan eğilme momentlerinin pozitif olduğu belirlenmiştir.

Bazı basitleştirilmiş metotlar (Timm ve Windels, 1977; Safarian ve Harris, 1985) gerçekçi olmayan sınır şartı kabullerinden dolayı çelişkili değerler vermektedirler. Timm ve Windels, (1977)'in modelleri kesişim duvarının yer değiştirmesini serbest bırakan ve kesişim duvarlarının dairesel kiriş gibi davrandığını varsaymaktadır. Bu metot kesişim bölgesi duvarının kalınlığının farklı durumlarını dikkate almadan iç yükleme basıncını 90° den küçük bir yay üzerine uygulamaktadır. Safarian ve Harris (1985)'in sonlu eleman çözümü ise kesişim duvarlarını ankastre mesnetler kullanarak modellediği için gerçekçi olmayan ve değerce çok az eğilme momentleri üretmektedir. Model radyal yüklemeye maruz dairesel yay gibi

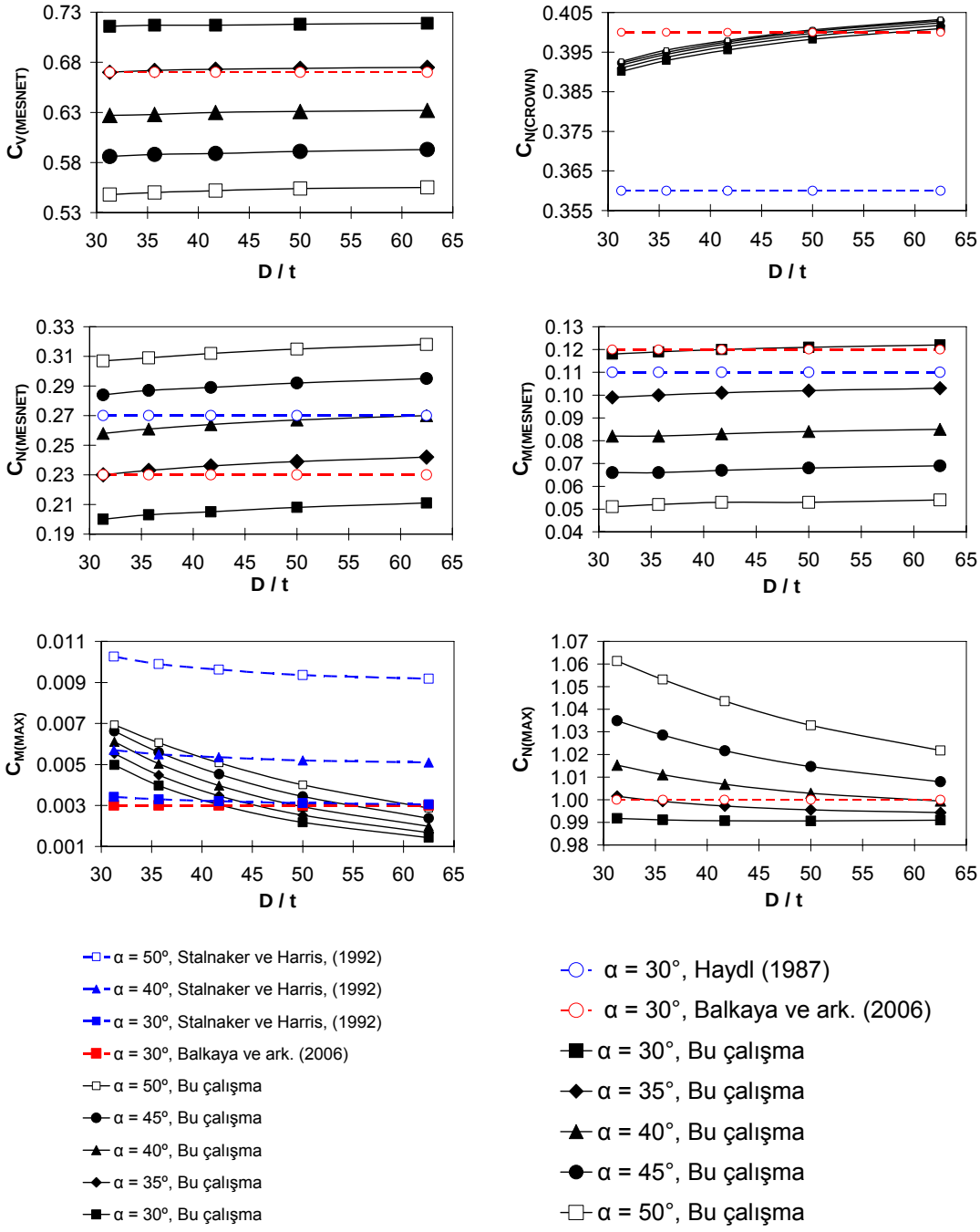
davrandığından kesişim duvarları uygulanan basınçtan dolayı eksenel itmeyi taşımaktadır.

Tablo 5.1. Hesaplanan eğilme momenti ve eksenel kuvvet değerlerinin diğer çalışmalarla karşılaştırılması

Metot	Mesnet		Crown		Mesnetlerin yeri
	Eksenel (kN/m)	Moment (kNm/m)	Eksenel (kN/m)	Moment (kNm/m)	
Safarian ve Haris (1985)	678.9	1.9	678.9	10.8	Crown'a 30°
Timm ve Windels (1977)	0	-1.1748	285.7	605.2	Crown'a 45°
Ciesielski (1970)	153.7	-542.9	284.0	271.5	Crown'a 30°
Haydl (t_{IW} = 1t) (1987)	185.4	-484.6	248.2	302.6	Crown'a 30°
Balkaya ve ark. (2006)	147.8	-510.0	275.9	290.0	Crown'a 30°
Bu çalışma	145.2	-524.6	275.7	291.2	Crown'a 30°

Ciesielski (1970)'nin modelinin sınır şartları Safarian ve Harris (1977) ve Timm ve Mindels (1985)'in sınır şartlarıyla karşılaştırıldığında en gerçekçi olanıdır. Bu model siloların birleştiği yerdeki kesişim duvarı bölgesindeki mesnetlerini de hesaba katmaktadır. Haydly (1987) zar ve eğilme özellikleri olan kabuk elemanlar kullanarak hazırladığı silindirik betonarme grup silo modelinde, Ciesielski (1970)'nin metodundaki kesişim duvarı bölgesindeki mesnet şartlarını kullanmıştır. Ama bununla birlikte adı geçen önceki kabuk modeller kesişim duvarı bölgelerinde gerçek geometri ve rijitliği göstermemektedir. Bu da analiz sonuçlarına etkimektedir. Tasarım kuvvetleri gerçek elastik değerlerden, (solid eleman kullanılarak elde edilen değerler) kesişim duvarı bölgesindeki gerçek rijitliğe bağlı olarak sapma göstermektedir. Ciesielski (1970), Haydly (1987) ve Balkaya ve ark. (2006)'nın metotları aynı sınır şartı kabulünü yaptıklarından dolayı benzer sonuçlar vermektedir.

Balkaya ve ark. (2006)'nın metotları, bu çalışmada solid elemanlar ve aynı sınır şartı kabulüne göre yapılan modellerden elde edilen sonuçlara çok yakın sonuçlar vermektedir. Bu çalışmada daha sık mesh kullanıldığından dolayı çok ufak farklılıklar vardır. Bu çalışmada kullanılan modeldeki solid eleman sayısı Balkaya ve ark. (2006)'nın sayısından 6 kat fazladır. Burada sunulan sonlu eleman modeli ve Balkaya ve ark. (2006)'nın sonlu eleman modeli daha gerçekçi ve gerçek geometriye sahip örnek bir modeldir. Çünkü 4'lü silindirik betonarme grup siloların 3 boyutlu solid elemanlar kullanılarak oluşturulan sonlu eleman modelinden, diğer basitleştirilmiş modelleme metotlarından gerçeğe daha yakın sonuçlar alınmıştır. Daha önce yapılan çalışmalarda elde edilen değerlerle bu çalışmada elde edilen dizayn katsayılarının karşılaştırması Şekil 5.1.'de verilmiştir. Balkaya ve ark. (2006), kesişim duvarının uzunluğu 30 derecelik merkez açıyı gören 4'lü silindirik betonarme grup siloları araştırmışlardır. Bununla birlikte bu çalışmada 4'lü silindirik betonarme grup siloların tasarım kuvvetlerine etki eden en önemli parametrenin kesişim duvarı açısı, α olduğu ispatlanmıştır. Bu sebepten dolayı bu çalışmada α, t ve t_{lW} değerlerinin değişken alınarak, bu değişkenlerin eğilme momenti, eksenel kuvvet ve kesme kuvvetine etkilerini gösterecektir.



Şekil 5.1. Elde edilen sonuçlarla önceki çalışmaların karşılaştırılması

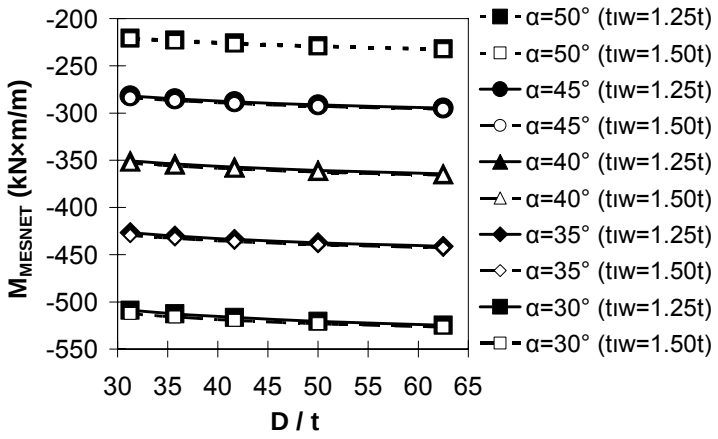
5.2. Solid Eleman Modelinden Elde Edilen Sonuçların Değerlendirilmesi

Farklı duvar kalınlığına, kesişim duvarı kalınlığına ve kesişim duvarını gören merkez açı değerine sahip 4'lü silindirik betonarme grup siloların sonlu eleman modellerinde önceden belirlenmiş kesitlerinden iç ve en kritik dış yükleme durumlarından dolayı oluşan tasarım kuvvetleri hesaplanmıştır. Tipik kesişim duvarı için kritik yükleme durumu iç hücrenin malzeme ile dolu iken diğer dairesel siloların içi boşken meydana gelmiştir. Sonlu eleman analizlerinin sonuçları tasarım kuvvetlerinin iç yüklemeden dolayı iç duvarlardaki mesnet ve crownda maksimuma ulaştığını göstermiştir. İç yükleme durumu, iç duvarların mesnetlerinde önemli mertebede eğilme momenti, eksenel ve kesme kuvveti oluşturmaktadır. İç yükleme durumu altında maksimum kritik kesme kuvveti iç duvarların mesnedinde oluşurken, crownda sıfır olmaktadır. İç yükleme durumu altında eğilme momenti, eksenel ve kesme kuvveti değerlerinin kombinasyonu iç duvarların mesnedinde kritikken, crownda eğilme momenti ve eksenel kuvvet kritik olmaktadır. İç yükleme durumunda, iç duvarın mesnet ve crownunda eğilme momenti ve bilhassa eksenel kuvvet önemli mertebelere ulaşmaktadır.

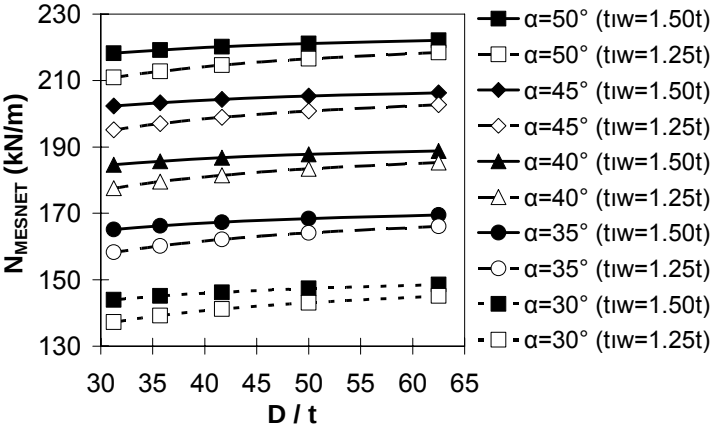
Bu kritik yükleme durumundan başka Stalnaker ve Harris (1992)'in de incelediği 5 tane ilave yükleme durumu (Şekil 3.4.) incelenmiştir. Bu yükleme durumları önceki çalışmalardaki gibi, iç duvar ve kesişim duvarlarındaki kritik kuvvet dağılımı incelendikten sonra dikkatlice belirlenmiş yükleme durumlarıdır. Dış yükleme durumları altında dış duvarlar dışa doğru bir basınca maruz kaldığından dairesel yay gibi davranırlar. Bu yüzden dış yüklemeler dış duvarlarda önemli eksenel gerilmeye sebep olur. Dış duvarlarda dış yükleme durumlarından dolayı oluşan maksimum pozitif eğilme momenti, dış duvarın hemen komşu kesişim duvarıyla birleştiği yerde meydana gelmektedir. Dış duvarlarda, dış yükleme durumlarından dolayı oluşan eğilme momenti her ne kadar önemliyse de iç yüklemeden dolayı iç duvarların crown ve mesnedinde meydana gelen eğilme momentiyle kıyaslandığında önemsenmeyecek kadar küçüktür. Bununla birlikte en

kritik dış yükleme durumundan dolayı meydana gelen eksenel kuvvet değeri, iç yüklemeden dolayı iç duvarlarda oluşan eksenel kuvvetten çok daha büyüktür.

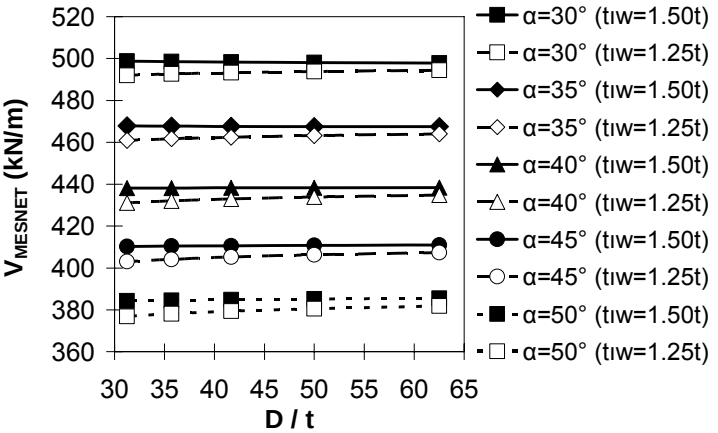
İç yüklemeden dolayı iç duvarların mesnetlerinde meydana gelen eğilme momenti (M_{MESNET}), eksenel kuvvet (N_{MESNET}) ve kesme kuvveti (V_{MESNET}) değerleri ve buna ilaveten, iç yüklemeden olayı iç duvarların crown bölgelerinde meydana gelen eğilme momenti (M_{CROWN}) ve eksenel kuvvet (N_{CROWN}) değerleri hesaplanmıştır. En kritik dış yükleme durumunda dış duvarlarda oluşan maksimum eğilme momenti (M_{MAX}) ve maksimum eksenel kuvvet (N_{MAX}) hesaplanmıştır. Sunulan grafiklerde silo çapının, silo duvar kalınlığına oranı olan D/t'nin (62.5, 50.0, 41.7, 35.7, 31.3) değerleri, α'nın (30°, 35°, 40°, 45° ve 50°) değerleri ve t_{IW}'nin (1.25×t ve 1.50×t) değerlerinin fonksiyonu olarak eğilme momenti, eksenel kuvvet ve kesme kuvvetine etkileri gösterilmiştir. 4'lü silindirik betonarme grup siloların sonlu eleman analizlerinin sonuçları M_{MESNET} [Şekil 5.2.(a)], N_{MESNET} [Şekil 5.2.(b)], V_{MESNET} [Şekil 5.2.(c)], M_{CROWN} [Şekil 5.3.(a)], N_{CROWN} [Şekil 5.3.(b)], M_{MAX} [Şekil 5.4.(a)] ve N_{MAX} [Şekil 5.4.(b)]'de gösterilmiştir. Silo duvar kalınlığındaki değişimin, kesişim duvarının kalınlığının ve kesişim duvarının uzunluğundaki değişimlerin tasarım kuvvetlerine etkisi incelenmiştir. Sonuçlar ilerleyen bölümlerde anlatılan dizayn katsayılarının geliştirilmesinde kullanılacaktır. Kritik eğilme momenti iç yüklemeden dolayı iç duvarlarda oluşurken, daha kritik eksenel kuvvet değeri dış yükleme altındaki dış duvarlarda oluşmaktadır. En kritik eğilme momenti ve kesme kuvveti değerleri iç yükleme altındaki iç duvarların mesnetlerinde oluşmaktadır.



(a)

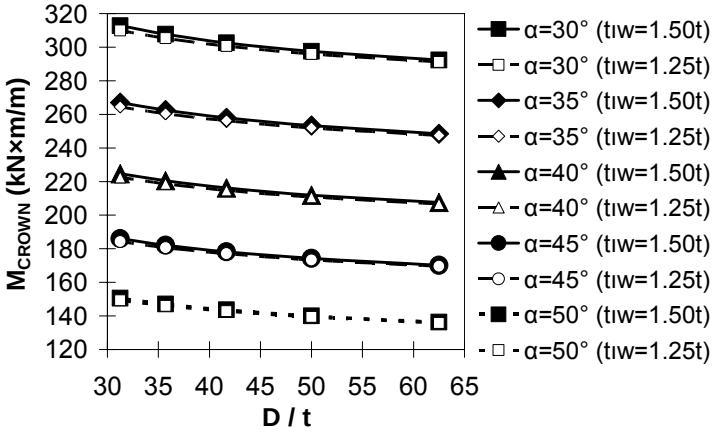


(b)

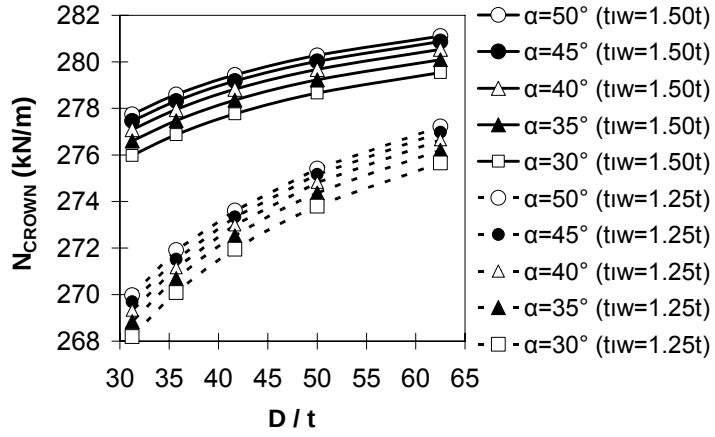


(c)

Şekil 5.2. Solid eleman modellerinden, iç yüklemeden dolayı iç duvarların mesnetlerinde meydana gelen kesit tesirleri

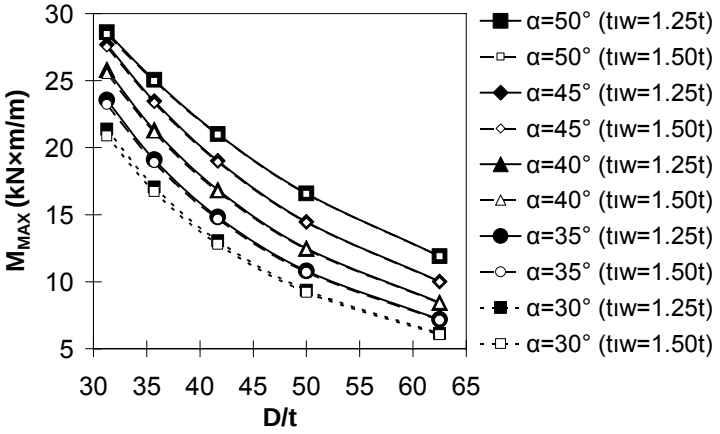


(a)

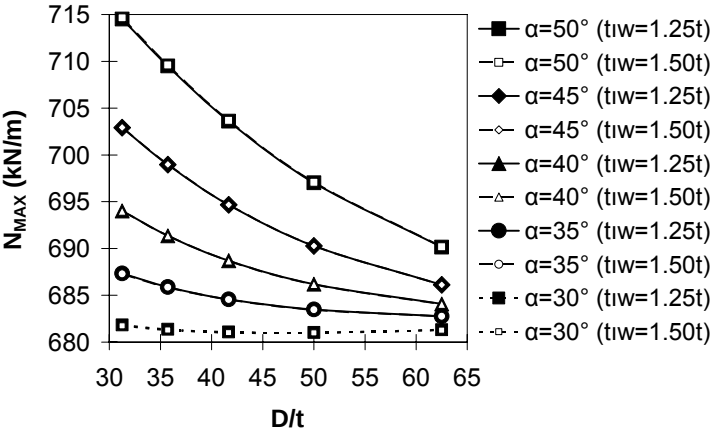


(b)

Şekil 5.3. Solid eleman modellerinden, iç yüklemeden dolayı iç duvarların crown bölgelerinde meydana gelen kesit tesirleri



(a)



(b)

Şekil 5.4. Solid eleman modellerinden, en kritik dış yüklemeden dolayı dış duvarlarda meydana gelen kesit tesirleri

1. Verilen belirli t ve t_{IW} için α değerleri artırılırsa N_{MESNET} artmakta bununla birlikte M_{MESNET}, $V_{TMESNET}$ ve M_{CROWN} değerleri oldukça azalmaktadır. N_{CROWN}, M_{MAX} ve N_{MAX} değerleri α arttıkça artmaktayken N_{CROWN}, M_{MAX} ve N_{MAX}'a etkisi ihmal edilebilir düzeydedir.

2. Verilen belirli D/t ve α için t_{IW} 1.25×t den 1.5×t'ye artırılınca M_{MESNET}, N_{MESNET}, V_{MESNET}, M_{CROWN}, N_{CROWN} değerleri çok az artmaktadır. Kesişim duvarı kalınlığı t_{IW}'deki artış N_{MESNET} ve V_{MESNET}'de daha çok etkiliyken, M_{MESNET} ve M_{CROWN} değerleri için daha az etkilidir. Kesişim duvarı kalınlığındaki artış ve azalmaların tasarım kuvvetlerine etkisi ihmal edilebilir düzeydedir. Kesişim duvarı kalınlığındaki değişim M_{MAX} ve N_{MAX} değerlerini etkilememektedir.

3. Verilen belirli t_{IW} ve α için D/t oranı artırıldıkça M_{MESNET}, N_{MESNET} ve N_{CROWN} artarken M_{CROWN} değerleri yavaşça azalmaktadır. D/t'ye bağlı olarak N_{MESNET}, V_{MESNET} ve N_{CROWN} değerlerindeki değişiklik, M_{MESNET} ve M_{CROWN} değerlerindeki değişikliğe göre daha azdır. Duvar kalınlığındaki değişiklik karşısında kesme kuvvetinde nerdeyse hiç değişiklik gözlenmemiştir. Bütün yükleme durumları için D/t oranındaki değişim V_{MESNET}'i etkilememiştir. Genellikle M_{MAX} ve N_{MAX} değerleri α değerleri arttıkça artmıştır. D/t oranı büyüdükçe M_{MAX} ve N_{MAX} genellikle azalmıştır. Bununla birlikte lineer bir değişim söz konusu değildir.

5.3. Dizayn Formülleri ve Dizayn Katsayıları

3 boyutlu solid elemanlar kullanılarak oluşturulan 4'lü silindirik betonarme grup siloların sonlu eleman modelleri diğer basitleştirilmiş modellerden çok daha doğru sonuçlar üretir (Ciesielski, 1970; Timm ve Windels, 1977; Safarian ve Harris, 1985; Haydl, 1987; Horowitz ve Nogueira, 1999; Balkaya et al, 2006). Solid eleman modellemenin başlıca zorluklarından biri silo duvarları arasındaki süreklilikten dolayı kesişim duvarlarındaki serbestlik derecesi sayısındaki artıştan dolayı önemli hesaplama zorluğu çıkartmasıdır. Buna ilaveten 3 boyutlu solid elemanların kullanıldığı sonlu eleman modellerinin sonuçlarını değerlendirmek, gerilme sonuçlarını eğilme momenti, eksenel kuvvet ve kesme kuvveti değerlerine dönüştürürken sayısal hesap gerektirmektedir. Pratik uygulamalar için, kesişim duvarı bölgesinde zar ve eğilme kabiliyeti olan kabuk elemanların kullanıldığı verimli modeller kullanmak istenir. Bu amaçla solid elemanlarla hazırlanmış sonlu eleman modelinin analiz sonuçları kullanılarak eşdeğer kabuk modeli önerilmiştir. Eşdeğer kabuk modeli kesişim duvarı bölgesinde etkili boy kavramı ve ortalama kesit alanı özellikleri ile gerçek geometri ve rijitlik şartlarını sağlayacak şekilde geliştirilmiştir.

Yeni düzenlenmiş tasarım denklemleri, tasarım kuvvetlerini sonlu eleman analizlerine gerek kalmadan tasarım kuvvetlerini elde edecek şekilde geliştirilmiştir. İç ve dış duvarlardaki eğilme momentleri, eksenel kuvvet ve kesme kuvveti değerleri (Denklem 1a 1b 1c), silo yarıçapı ve iç basınç arasındaki basit ilişkiyle ifade edilebilir. Sunulan sonlu eleman analizi sonuçlarına göre, basit tasarım katsayıları 4'lü silindirik betonarme grup siloların iç ve dış yükleme durumları altında iç ve dış duvarlardaki tasarım kuvvetlerini hesaplamak için önerilmiştir.

$$M = \text{katsayı} \times \text{iç basınç} \times \text{yarıçapın karesi} = C_M \times p \times R^2 \qquad (1.a)$$

$$N = \text{katsayı} \times \text{iç basınç} \times \text{yarıçap} = C_N \times p \times R \qquad (1.b)$$

$$V = \text{katsayı} \times \text{iç basınç} \times \text{yarıçap} = C_V \times p \times R \qquad (1.c)$$

Haydl (1987), kesişim duvarını gören merkez açının 30° olduğu 4'lü silindirik betonarme grup silolar için iç duvarlardaki eğilme momenti ve eksenel kuvvet değerlerini hesaplayabilmek için katsayılar önermiştir. Stalnaker ve Harris (1992), en kritik dış yüklemeden dolayı dış duvarlarda oluşan eğilme momenti ve eksenel kuvvet değerlerini hesaplayabilmek için katsayılar türetmişlerdir. Balkaya ve ark. (2006), kesişim duvarını gören merkez açı değeri 30° olan 4'lü silindirik betonarme grup silolar için iç ve dış duvarlarda oluşan eğilme momenti, eksenel kuvvet ve kesme kuvveti değerlerini belirlemek için katsayılar türetmişlerdir. Bu çalışmada 4'lü silindirik betonarme grup siloların geometrisiyle ilgili olan kapsamlı parametrik çalışma [t (0.20m, 0.25m, 0.30m, 0.35m ve 0.40m), α (30°, 35°, 40°, 45° ve 50°), t_{IW} (1.25×t ve 1.5×t)] özelliklerindeki tüm geometrik konfigürasyonlar için uygulanabilir doğru tasarım katsayıları elde edilmiştir.

İç yüklemeden dolayı iç duvarların mesnedindeki dizayn kuvvet ve dizayn moment değerleri (Denklem 2a , 2b , 2c) ve crowndaki dizayn kuvvet ve moment değerleri (Denklem 3a , 3b)'de, en kritik dış yüklemeden dolayı dış duvarlarda meydana gelen maksimum değerler (Denklem 4a , 4b)'deki gibi önerilmiştir. $C_{M(MESNET)}$, $C_{N(MESNET)}$, $C_{V(MESNET)}$, $C_{M(CROWN)}$, $C_{N(CROWN)}$, $C_{M(MAX)}$ ve $C_{N(MAX)}$ solid eleman kullanılarak hazırlanmış sonlu eleman modeli analizlerinin sonucunda elde edilen dizayn katsayılarıdır. Dizayn katsayıları silo çapının silo duvar kalınlığına oranı D/t'nin farklı değerleri (D/t = 31.3, 35.7, 41.7, 50.0 ve 62.5), kesişim duvarı kalınlığının (t_{IW} = 1.25×t ve 1.5×t) değerleri ile kesişim duvarını gören merkez açının (α = 30°, 35°, 40°, 45° ve 50°) değerleri için önerilmiştir.

İç yüklemeden dolayı iç duvarların mesnetlerinde;

$$M_{MESNET} = -C_{M(MESNET)} \times p \times R^2 \qquad (2.a)$$

$$N_{MESNET} = C_{N(MESNET)} \times p \times R \qquad (2.b)$$

$$V_{MESNET} = C_{V(MESNET)} \times p \times R \qquad (2.c)$$

$C_{M(MESNET)}$, $C_{N(MESNET)}$ ve $C_{V(MESNET)}$ iç yüklemeden dolayı iç duvarların mesnedinde meydana gelen eğilme momenti, eksenel kuvvet ve kesme kuvveti için dizayn katsayılarıdır. $C_{M(MESNET)}$, $C_{N(MESNET)}$ ve $C_{V(MESNET)}$ değerleri Tablo 5.2.'de gösterilmiştir. Burada p depolanan malzemenin silo çeperine yaptığı basınç ve R silo yarıçapını göstermektedir.

İç yüklemeden dolayı iç duvarların crownunda;

$$M_{CROWN} = C_{M(CROWN)} \times p \times R^2 \qquad (3.a)$$

$$N_{CROWN} = C_{N(CROWN)} \times p \times R \qquad (3.b)$$

$C_{M(CROWN)}$ ve $C_{N(CROWN)}$ dizayn katsayıları, iç yüklemeden dolayı iç duvarların crown bölgelerinde meydana gelen eğilme momenti ve eksenel kuvvet değerleri içindir. $C_{M(CROWN)}$ ve $C_{N(CROWN)}$ değerleri Tablo 5.3.'de gösterilmiştir.

En kritik dış yükleme durumunda dış duvarlarda;

$$M_{MAX} = C_{M(MAX)} \times p \times R^2 \qquad (4.a)$$

$$N_{MAX} = C_{N(MAX)} \times p \times R \qquad (4.b)$$

$C_{M(MAX)}$ ve $C_{N(MAX)}$ dizayn katsayıları, en kritik dış yüklemeden dolayı dış duvarlarda meydana gelen eğilme momenti ve eksenel kuvvet değerleri içindir. $C_{M(MAX)}$ ve $C_{N(MAX)}$ değerleri Tablo 5.4.'de gösterilmiştir.

4'lü silindirik betonarme grup silolardaki tasarım kuvvetleri basit tasarım denklemleriyle ifade edilebilir. Önerilen tasarım katsayıları kullanılarak, farklı yarıçap, duvar kalınlığı, kesişim duvarı boyu ve kesişim duvarı kalınlığına sahip 4'lü silindirik betonarme grup silolar için tasarım kuvvetleri sonlu eleman analizlerine gerek kalmadan hesaplanabilir. Denklem 2, 3 ve 4'te kullanılan birimler tutarlı olmalıdır ve bu denklemler için verilen dizayn katsayıları boyutsuzdur. Bütün bu çalışmadaki tasarım formüllerinde kullanılan tasarım katsayıları solid modellerden elde edilmiştir.

Tablo 5.2. İç yüklemeden dolayı iç duvarların mesnetlerinde meydana gelen mesnet reaksiyonları için dizayn katsayıları ($C_{M(MESNET)}$), ($C_{N(MESNET)}$) ve ($C_{V(MESNET)}$)

α	**30°**		**35°**		**40°**		**45°**		**50°**	
	t_{IW}		**t_{IW}**		**t_{IW}**		**t_{IW}**		**t_{IW}**	
	1.25 t	**1.5 t**	**1.25 t**	**1.5 t**	**1.25 t**	**1.5 t**	**1.25 t**	**1.5 t**	**1.25 t**	**1.5 t**
D/t	**$C_{M(MESNET)}$**									
31.3	0.118	0.119	0.099	0.100	0.082	0.082	0.066	0.066	0.051	0.052
35.7	0.119	0.120	0.100	0.101	0.082	0.083	0.066	0.067	0.052	0.052
41.7	0.120	0.121	0.101	0.101	0.083	0.084	0.067	0.067	0.053	0.053
50.0	0.121	0.122	0.102	0.102	0.084	0.084	0.068	0.068	0.053	0.054
62.5	0.122	0.123	0.103	0.103	0.085	0.085	0.069	0.069	0.054	0.054
D/t	**$C_{N(MESNET)}$**									
31.3	0.200	0.209	0.230	0.240	0.258	0.269	0.284	0.294	0.307	0.317
35.7	0.203	0.211	0.233	0.242	0.261	0.270	0.287	0.296	0.309	0.319
41.7	0.205	0.213	0.236	0.243	0.264	0.272	0.289	0.297	0.312	0.320
50.0	0.208	0.214	0.239	0.245	0.267	0.273	0.292	0.299	0.315	0.322
62.5	0.211	0.216	0.242	0.247	0.270	0.275	0.295	0.300	0.318	0.323
D/t	**$C_{V(MESNET)}$**									
31.3	0.716	0.725	0.670	0.680	0.627	0.637	0.586	0.597	0.548	0.559
35.7	0.717	0.725	0.672	0.680	0.628	0.637	0.588	0.597	0.550	0.559
41.7	0.717	0.725	0.673	0.680	0.630	0.637	0.589	0.597	0.552	0.560
50.0	0.718	0.724	0.674	0.680	0.631	0.638	0.591	0.597	0.554	0.560
62.5	0.719	0.724	0.675	0.680	0.632	0.638	0.693	0.598	0.555	0.561

Tablo 5.3. İç yüklemeden dolayı iç duvarların crown bölgelerinde meydana gelen eğilme momenti ($C_{M(CROWN)}$) ve eksenel kuvvet ($C_{N(CROWN)}$) dizayn katsayıları

α	**30°**		**35°**		**40°**		**45°**		**50°**	
	t_{IW}		**t_{IW}**		**t_{IW}**		**t_{IW}**		**t_{IW}**	
	1.25 t	**1.5 t**	**1.25 t**	**1.5 t**	**1.25 t**	**1.5 t**	**1.25 t**	**1.5 t**	**1.25 t**	**1.5 t**
D/t	**$C_{M(CROWN)}$**									
31.3	0.072	0.073	0.062	0.062	0.052	0.052	0.043	0.043	0.035	0.035
35.7	0.071	0.072	0.061	0.061	0.051	0.051	0.042	0.042	0.034	0.034
41.7	0.070	0.070	0.060	0.060	0.050	0.050	0.041	0.041	0.033	0.033
50.0	0.069	0.069	0.059	0.059	0.049	0.049	0.040	0.041	0.032	0.033
62.5	0.068	0.068	0.058	0.058	0.048	0.048	0.039	0.040	0.032	0.032
D/t	**$C_{N(CROWN)}$**									
31.3	0.3901	0.4014	0.3910	0.4023	0.3917	0.4030	0.3923	0.4036	0.3927	0.4040
35.7	0.3929	0.4027	0.3937	0.4036	0.3944	0.4043	0.3949	0.4048	0.3955	0.4052
41.7	0.3956	0.4040	0.3964	0.4049	0.3971	0.4056	0.3976	0.4061	0.3980	0.4065
50.0	0.3983	0.4053	0.3991	0.4061	0.3997	0.4068	0.4002	0.4073	0.4006	0.4077
62.5	0.4010	0.4066	0.4018	0.4074	0.4024	0.4080	0.4029	0.4085	0.4032	0.4089

Tablo 5.4. En kritik dış yükleme durumunda, dış duvarlarda oluşan eğilme momenti ve eksenel kuvvet dizayn katsayıları ($C_{M(MAX)} \times 10^{-2}$) ve ($C_{N(MAX)}$)

α	**30°**		**35°**		**40°**		**45°**		**50°**	
	t_{IW}		**t_{IW}**		**t_{IW}**		**t_{IW}**		**t_{IW}**	
	1.25 t	**1.5 t**	**1.25 t**	**1.5 t**	**1.25 t**	**1.5 t**	**1.25 t**	**1.5 t**	**1.25 t**	**1.5 t**
D/t	**$C_{M(MAX)} \times 10^{-2}$**									
31.3	0.498	0.486	0.553	0.545	0.611	0.604	0.662	0.657	0.693	0.690
35.7	0.397	0.389	0.448	0.442	0.504	0.499	0.560	0.557	0.606	0.604
41.7	0.303	0.298	0.347	0.343	0.397	0.394	0.453	0.451	0.508	0.507
50.0	0.218	0.214	0.253	0.250	0.294	0.292	0.344	0.343	0.400	0.399
62.5	0.143	0.141	0.168	0.167	0.198	0.197	0.238	0.237	0.287	0.287
D/t	**$C_{N(MAX)}$**									
31.3	0.992	0.992	1.002	1.001	1.015	1.015	1.035	1.035	1.061	1.061
35.7	0.991	0.991	0.999	0.999	1.011	1.011	1.029	1.029	1.053	1.053
41.7	0.991	0.991	0.997	0.997	1.007	1.007	1.022	1.022	1.044	1.044
50.0	0.991	0.991	0.995	0.995	1.003	1.003	1.015	1.015	1.033	1.033
62.5	0.991	0.991	0.994	0.994	0.999	0.999	1.008	1.008	1.022	1.022

Gözlenen her yükleme durumu için aynı özelliklere sahip modellerde C_N, C_M ve C_V değerleri kesişim duvarı boyuyla oldukça değişirken, duvar kalınlığı ve kesişim duvarı kalınlığıyla az değişmektedir.

5.4. İç Duvarların Rijitliğinin Etkisi

Yıkılan grup silolar incelendiğinde kötü çatlamış iç duvarlarla birlikte az çatlamış ya da çatlamamış kesişim duvarları olduğu ortaya çıkmıştır. İç duvardaki çatlamanın ve sünme etkisinin dizayn kuvvetlerine olan etkisini anlayabilmek için iç duvarların rijitliği değiştirilmiştir. Kesişim duvarı ve dış duvarların elastisite modülü $E = 3\times10^7$ kN/m^2 alınırken, iç duvarların elastisite modülü E/2 ve E/4'e düşürülmüştür. 50 adet 4'lü betonarme grup silo iç duvarlarındaki elastisite modülü düşürülerek yeniden analiz edilmiştir. İç duvarlarının elastisite modülü azaltılarak yapılan analiz sonuçlarına göre iç yüklemeden dolayı iç duvarlarda oluşan dizayn kuvvetleri arasındaki yeniden dağılım incelenmiştir. M_{MESNET}, N_{MESNET}, V_{MESNET}, M_{CROWN} ve N_{CROWN} değerlerinin, iç duvarı çatlamamış haldeki değerleriyle karşılaştırılarak yüzde artış ya da azalmalar araştırılmıştır.

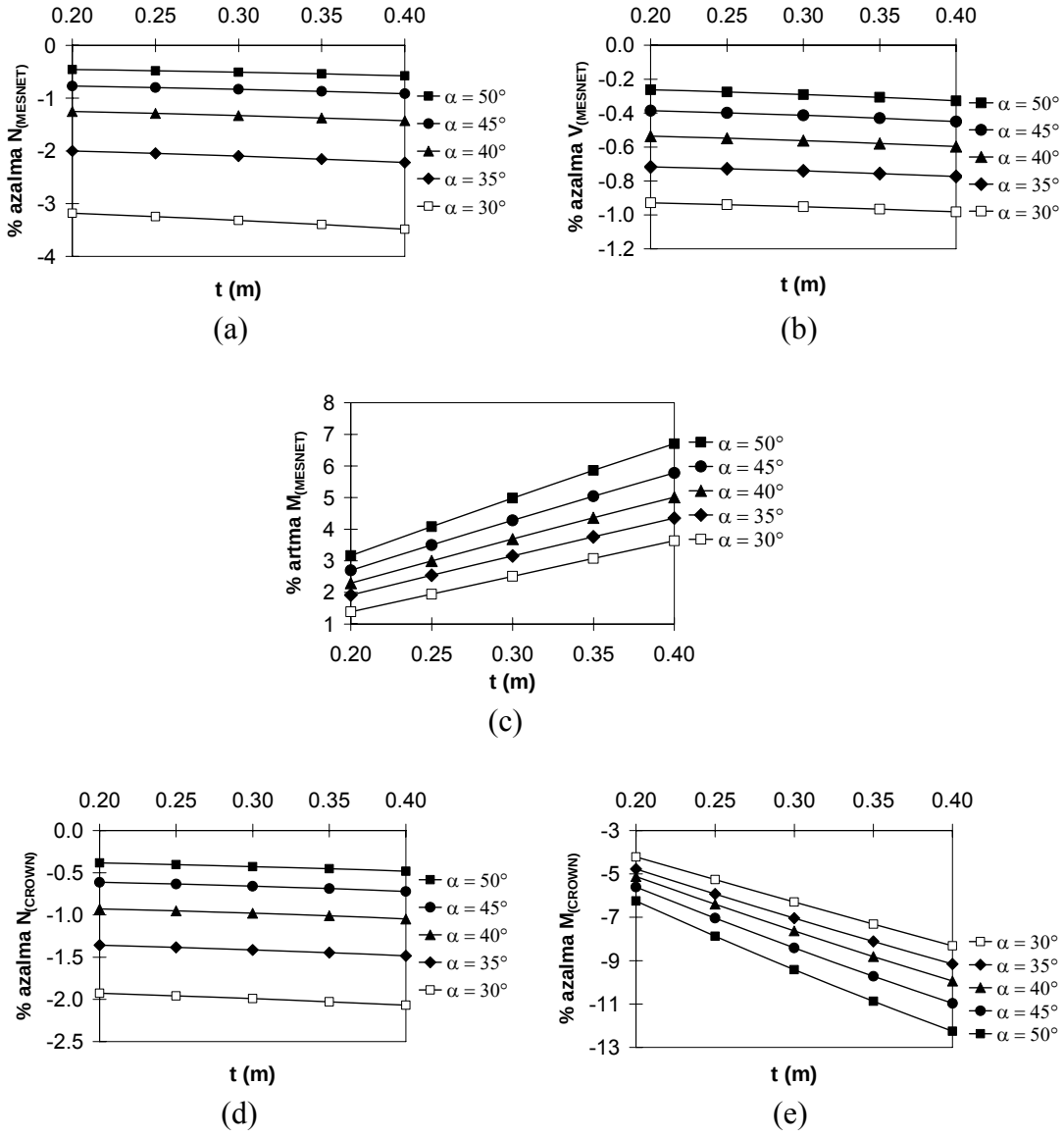
İç duvarlardaki rijitliği azaltılmış grup siloların dizayn kuvvetlerindeki yeniden dağılımı araştırmak için yapılan sonlu eleman analizlerinin sonuçları, Tablo 5.5. ve Tablo 5.6.'da verilmiştir. Karşılaştırma üç farklı durumu içermektedir. Bunlar, iç duvarların elastisite modülü E olan durum, iç duvarların elastisite modülü E / 2 olan durum ve iç duvarların elastisite modülü E / 4 olan durumlardır.

İç duvarların elastisite modülü %25 değerine düşürülmüş grup siloların M_{MESNET}, N_{MESNET}, V_{MESNET}, M_{CROWN} ve N_{CROWN} değerlerindeki yüzde artış ya da azalma, silo duvar kalınlığın (t = 0.20m, 0.25m, 0.30m ve 0.40m), kesişim duvarı kalınlığının (t_{IW} = 1.25×t ve 1.50×t) kesişim duvarını gören merkez açının (α = 30º, 35º, 40º, 45º ve 50º) değerleri için verilmiştir. İç duvarların elastisite modülü azalırken N_{MESNET}, V_{MESNET}, M_{CROWN} ve N_{CROWN} değerleri çok az azalırken M_{MESNET} değeri artmaktadır. t_{IW} , α, ve t'nin incelenen değerleri artırılınca, N_{MESNET}, V_{MESNET}, M_{CROWN} ve N_{CROWN} değerlerindeki yüzde azalmalar değerce büyümektedir. Bu değerlerdeki düşüşlerin dizayn kuvvetlerine etkisi ihmal edilebilir düzeydedir. Bununla birlikte iç duvarlarının rijitliği %50 ve %25'e düşürülmüş olan grup silolarda gözlenen en büyük düşüş değerleri N_{MESNET} için t = 0.40 m, tıw = 1.25×t,

$\alpha = 30^{o}$ ve E = E/4 durumunda % 3.61, V_{MESNET}'deki en büyük düşüş t = 0.40 m, tıw = 1.25×t, $\alpha = 30^{o}$ ve E = E / 4 durumu için % 0.097'dir. Grup siloların iç duvarlarının çatlamasından sonra eksenel kuvvet ve kesme kuvveti için yeniden dağılım yok denecek kadar azdır. Buna ilaveten iç yükleme durumu altında iç duvarları çatlamış olan grup siloların mesnetlerindeki eğilme momenti artmaktadır. Bu artış ve azalmalar Şekil 5.5. ve Şekil 5.6.'da gösterilmiştir. M_{MESNET} değerlerindeki artış N_{MESNET} ve V_{MESNET} değerlerindeki çok az miktardaki azalma, iç yükleme altındaki grup siloların iç duvarlarının mesnetlerindeki yerel yıkılmayı açıklamaktadır.

Tablo 5.5. İç duvarlarının elastisite modülü 0.25×E olan modellerin elastisite modülü E olan modellerden elde edilen sonuçlardan % farkı

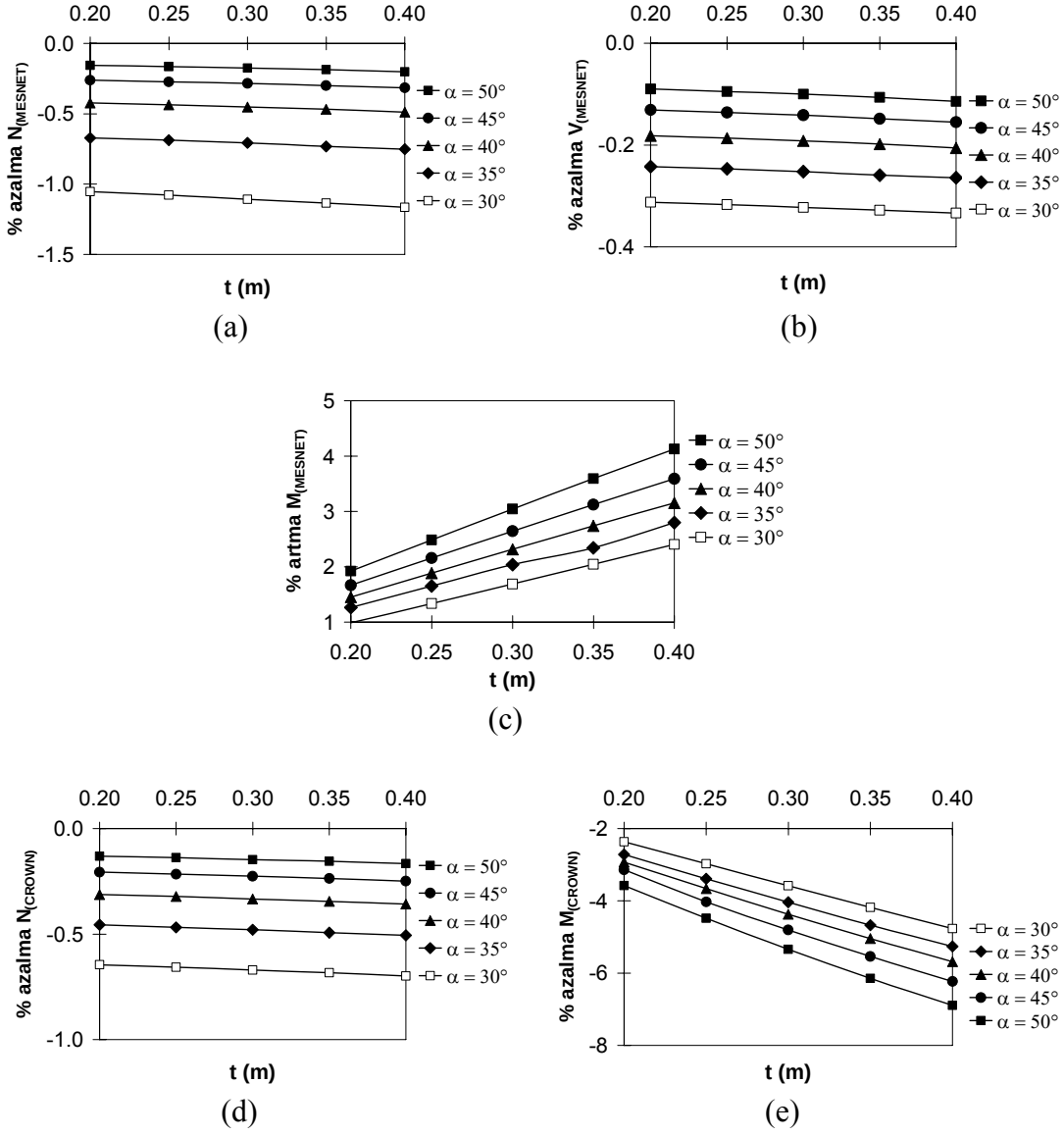
0.25 × E										
	1.25 × t					1.50 × t				
	MESNET			CROWN		MESNET			CROWN	
	M_{MES}	N_{MES}	V_{MES}	M_{CRW}	N_{CRW}	M_{MES}	N_{MES}	V_{MES}	M_{CRW}	N_{CRW}
t (m)	**α = 30º**									
0.20	1.40	-3.24	-0.93	-4.24	-1.95	1.39	-3.18	-0.93	-4.22	-1.93
0.25	1.96	-3.33	-0.94	-5.28	-1.98	1.95	-3.24	-0.94	-5.26	-1.96
0.30	2.52	-3.41	-0.95	-6.32	-2.02	2.51	-3.32	-0.95	-6.30	-1.99
0.35	3.08	-3.51	-0.97	-7.34	-2.06	3.07	-3.40	-0.97	-7.32	-2.03
0.40	3.65	-3.61	-0.98	-8.35	-2.09	3.64	-3.48	-0.98	-8.32	-2.07
t (m)	**α = 35º**									
0.20	1.91	-2.03	-0.72	-4.76	-1.37	1.92	-2.00	-0.72	-4.77	-1.36
0.25	2.53	-2.09	-0.73	-5.89	-1.40	2.54	-2.05	-0.73	-5.93	-1.38
0.30	3.13	-2.15	-0.74	-6.99	-1.43	3.16	-2.10	-0.74	-7.04	-1.41
0.35	3.71	-2.22	-0.76	-8.03	-1.47	3.76	-2.16	-0.76	-8.12	-1.45
0.40	4.28	-2.30	-0.78	-9.04	-1.51	4.35	-2.22	-0.77	-9.15	-1.49
t (m)	**α = 40º**									
0.20	2.29	-1.27	-0.54	-5.11	-0.94	2.29	-1.25	-0.54	-5.12	-0.93
0.25	2.98	-1.31	-0.55	-6.37	-0.96	3.00	-1.29	-0.55	-6.40	-0.95
0.30	3.66	-1.36	-0.57	-7.58	-0.99	3.69	-1.33	-0.56	-7.63	-0.98
0.35	4.31	-1.41	-0.58	-8.74	-1.03	4.36	-1.38	-0.58	-8.81	-1.01
0.40	4.95	-1.47	-0.60	-9.83	-1.07	5.01	-1.43	-0.60	-9.94	-1.05
t (m)	**α = 45º**									
0.20	2.70	-0.78	-0.39	-5.60	-0.62	2.70	-0.77	-0.39	-5.60	-0.61
0.25	3.49	-0.81	-0.40	-7.02	-0.64	3.50	-0.80	-0.40	-7.04	-0.63
0.30	4.26	-0.85	-0.42	-8.38	-0.67	4.28	-0.83	-0.41	-8.41	-0.66
0.35	5.00	-0.89	-0.43	-9.66	-0.70	5.04	-0.87	-0.43	-9.72	-0.69
0.40	5.72	-0.94	-0.45	-10.87	-0.73	5.78	-0.92	-0.45	-10.97	-0.72
t (m)	**α = 50º**									
0.20	3.16	-0.46	-0.26	-6.25	-0.39	3.16	-0.46	-0.26	-6.25	-0.38
0.25	4.08	-0.49	-0.28	-7.85	-0.41	4.08	-0.48	-0.28	-7.87	-0.40
0.30	4.97	-0.51	-0.29	-9.38	-0.43	4.98	-0.51	-0.29	-9.41	-0.43
0.35	5.83	-0.55	-0.31	-10.82	-0.46	5.86	-0.54	-0.31	-10.88	-0.45
0.40	6.62	-0.59	-0.33	-12.17	-0.49	6.71	-0.58	-0.33	-12.25	-0.48



Şekil 5.5. t_{IW} = 1.50×t ve 0.25×E için % fark grafikleri

Tablo 5.6. İç duvarlarının elastisite modülü 0.50×E olan modellerin elastisite modülü E olan modellerden elde edilen sonuçlardan % farkı

0.5 × E										
	1.25 × t					1.50 × t				
	MESNET			CROWN		MESNET			CROWN	
	M_{MES}	N_{MES}	V_{MES}	M_{CRW}	N_{CRW}	M_{MES}	N_{MES}	V_{MES}	M_{CRW}	N_{CRW}
t (m)	**α = 30º**									
0.20	1.00	-1.07	-0.31	-2.38	-0.65	0.99	-1.05	-0.31	-2.36	-0.65
0.25	1.35	-1.10	-0.32	-3.00	-0.66	1.33	-1.08	-0.32	-2.97	-0.66
0.30	1.71	-1.13	-0.32	-3.62	-0.68	1.69	-1.11	-0.32	-3.58	-0.67
0.35	2.07	-1.17	-0.33	-4.23	-0.69	2.04	-1.14	-0.33	-4.18	-0.68
0.40	2.44	-1.20	-0.33	-4.84	-0.70	2.40	-1.17	-0.33	-4.77	-0.70
t (m)	**α = 35º**									
0.20	1.26	-0.68	-0.24	-2.71	-0.46	1.26	-0.67	-0.24	-2.71	-0.46
0.25	1.64	-0.70	-0.25	-3.38	-0.47	1.65	-0.69	-0.25	-3.39	-0.47
0.30	2.02	-0.73	-0.25	-4.02	-0.48	2.04	-0.71	-0.25	-4.04	-0.48
0.35	2.40	-0.75	-0.26	-4.63	-0.50	2.34	-0.73	-0.26	-4.67	-0.49
0.40	2.77	-0.78	-0.27	-5.22	-0.51	2.80	-0.75	-0.26	-5.26	-0.51
t (m)	**α = 40º**									
0.20	1.45	-0.43	-0.18	-2.92	-0.32	1.45	-0.42	-0.18	-2.93	-0.31
0.25	1.88	-0.44	-0.19	-3.65	-0.33	1.88	-0.44	-0.19	-3.66	-0.32
0.30	2.30	-0.46	-0.19	-4.35	-0.34	2.32	-0.45	-0.19	-4.37	-0.33
0.35	2.71	-0.48	-0.20	-5.01	-0.35	2.74	-0.47	-0.20	-5.05	-0.34
0.40	3.12	-0.50	-0.21	-5.63	-0.36	3.15	-0.49	-0.21	-5.68	-0.36
t (m)	**α = 45º**									
0.20	1.66	-0.26	-0.13	-3.21	-0.21	1.67	-0.26	-0.13	-3.14	-0.21
0.25	2.15	-0.28	-0.14	-4.02	-0.22	2.16	-0.27	-0.14	-4.03	-0.22
0.30	2.63	-0.29	-0.14	-4.78	-0.23	2.64	-0.28	-0.14	-4.80	-0.23
0.35	3.10	-0.31	-0.15	-5.51	-0.24	3.12	-0.30	-0.15	-5.54	-0.24
0.40	3.55	-0.32	-0.16	-6.18	-0.25	3.59	-0.32	-0.16	-6.23	-0.25
t (m)	**α = 50º**									
0.20	1.92	-0.16	-0.09	-3.57	-0.13	1.92	-0.16	-0.09	-3.57	-0.13
0.25	2.48	-0.17	-0.09	-4.47	-0.14	2.48	-0.16	-0.09	-4.48	-0.14
0.30	3.04	-0.17	-0.10	-5.32	-0.15	3.04	-0.18	-0.10	-5.34	-0.15
0.35	3.57	-0.19	-0.11	-6.12	-0.16	3.59	-0.19	-0.11	-6.15	-0.16
0.40	4.07	-0.20	-0.11	-6.85	-0.17	4.13	-0.20	-0.11	-6.90	-0.17

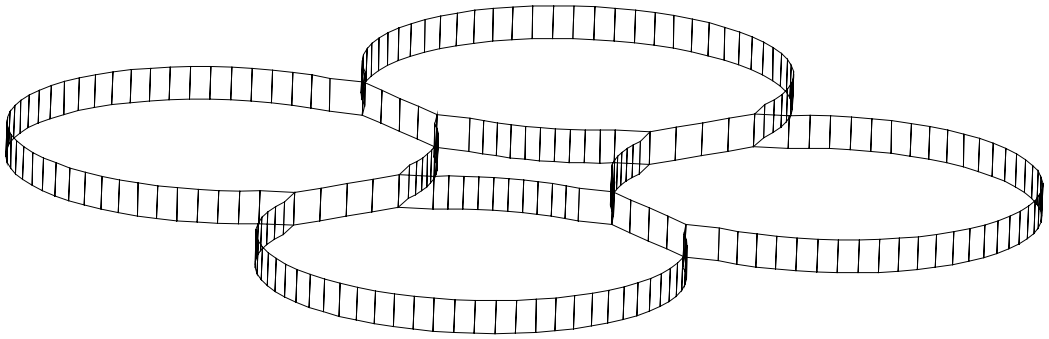


Şekil 5.6. t_{IW} = 1.50×t ve 0. 50×E için % fark grafikleri

Yeniden dağılımdan dolayı, bir betonarme yapı belirli bölgeleri kapasitesine ulaşmadan yıkılmayacaktır. Bu aşamada diğer bölgeler kapasite sınırlarına ulaşmamışlarsa moment paylaşacaklardır. Çok durumda yıkılmalar, tasarım ve yapım aşamalarında yapılan hatalar, moment ya da kuvvetler arasındaki yeniden dağılımı önlediğinden dolayı meydana gelmektedir. Bununla birlikte 4'lü silindirik betonarme grup siloların tasarım ve yapım aşamasında yapılan hatalar, belirli miktarda yeniden dağılım yeteneği olan iç duvarların yıkılmasına neden olabileceğini ispatlamaktadır.

5.5. Eşdeğer Kabuk Modelinin Geliştirilmesi

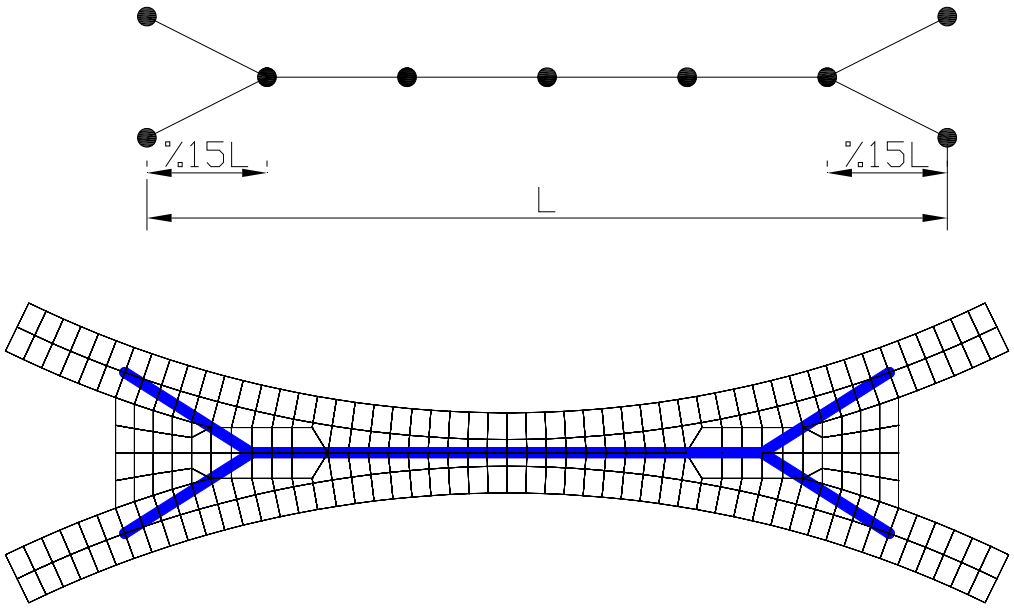
Pratik uygulamalar için, kesişim duvarı bölgeleri, zar ve eğilme yeteneğine sahip kabuk elemanlar kullanılarak tasarım kuvvetlerini hesaplayabilecek pratik modellerden faydalanmak istenir. Modelleme yaklaşımındaki karmaşıklıkları en aza indirmek için, solid elemanlar kullanılan sonlu eleman modellerinin analiz sonuçları dikkate alınarak, pratik eşdeğer kabuk modeli önerilmiştir. Eşdeğer kabuk modeli, etkili boy kavramı ve ortalama kesit alanı özellikleri ile kesişim duvarı bölgesinde gerçek geometri ve rijitliği gösterecek şekilde geliştirilmiştir. Önceki çalışmalarda, etkili boy kavramı ve ortalama kesit özelliklerine sahip eşdeğer kiriş elemanları ile iyi tahmin edilmiş değişik kesit özellikleri kullanılmıştır. (Balkaya, 2001; Balkaya ve ark., 2006). Bu kavrama bağlı olarak, farklı geometrik konfigürasyonlara sahip kabuk elemanlar, kesişim duvarının uzunluğu boyunca ağırlık merkezinden kabuk parçalara bölünmüştür. Her bir kabuk parça dört düğümlü ve ortalama kesit alanına sahip kabuk elemanlarla modellenmiştir. Geçiş elemanının eşdeğer boyu için kesişim duvarının boyunun %5'i ile % 25'i arasında değişik değerler denenmiştir.



Şekil 5.7. Eşdeğer kabuk modelinin perspektif görünüşü

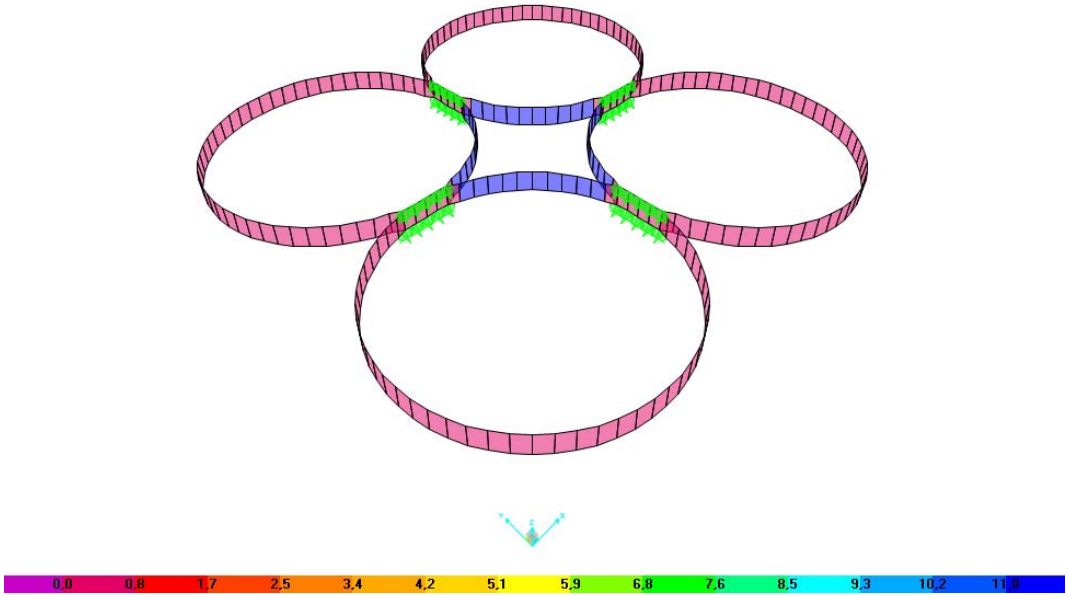
Geçiş elemanının boyu kesişim duvarının %15'i kadar olan modellerden elde edilen sonuçların, solid elemanlar kullanılarak elde edilen sonuçlara daha yakın olduğu görülmüştür. Buradan Şekil 5.7.'de gösterilen eşdeğer kabuk modeli, 4'lü silindirik betonarme grup siloların geçiş bölgelerinin modellenmesi için önerilmiştir. Önerilen kabuk modelin doğruluğu tekrar kapsamlı parametrik çalışma yapılarak, doğruluğu ispatlanmış üç boyutlu solid elemanlar kullanılarak hazırlanmış modellerin sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. İç ve dış duvarlarda 4 düğümlü kabuk elemanlar kullanılarak modellenmiştir. Bu bölgeler sabit kesit alanına sahip olduklarından, kesişim duvarı bölgelerindeki gibi bir karmaşık gerektirmeyen basit kabuk elemanlarla modellenmişlerdir.

Kabuk elemanlar kullanılarak hazırlanan modellerde yükseklik solid elemanlarla hazırlanan modellere benzer olarak birim yükseklikte alınmıştır. Kesişim duvarları bölgesi hariç diğer bölgelerde duvar kalınlığı değişmemekte fakat kesişim duvarlarında değişmektedir. Bunu göz önüne alarak solid modeldeki kesişim duvarı ile eşdeğer kabuk modelindeki kesişim duvarı kısımlarının üst üste çizilmiş hali Şekil 5.8.'de gösterilmiştir. Kabuk modelde her bir iç duvarda 10, dış duvarlarda 40, kesişim duvarında 8 adet kabuk elemanı kullanılarak model yapılmıştır. Birleşim açısı değiştiği zamanda bu eleman sayıları sabit tutulmuştur. Kesişim duvarları kabuk elemanlarla modellenirken kullanılan geçiş elemanı Şekil 5.11.'de görülmektedir. Dış duvar ve iç duvarlar için kabuk elemanı kesiti şekilden de görüldüğü gibi silo duvarının kalınlığına eşittir. Kesişim duvarı kesiti sabit değildir ve geometrik olarak da değişkendir. Bundan dolayı kesişim duvarında şekilde gösteriliği gibi ortalama kesit kalınlığı kullanılmıştır. Her bir kabuk eleman başlangıç ve bitişindeki iki kesitin ortalaması kabuk elemanın kalınlığı olacak şekilde oluşturulmuştur. Bundan dolayı siloların dairesel kısımları (iç ve dış duvarlar) ile kesişim duvarlarını birbirine bağlayan geçiş elemanları kullanılmıştır. Bu elemanların yataydaki boyu tüm kesişim duvarı boyunun %15'i alınarak grup silolar tekrar analiz edilmiştir. Kesişim duvarının iki ucunda bu çatallaşmayı sağlayan eğik elemanların arasında kalan doğrusal kısım ise eşit boyda 4 kabuk elemana bölünmüştür. Eşdeğer kabuk modeli kullanılarak 232 elemanla 4'lü silindirik betonarme grup silo modellenebilmektedir.

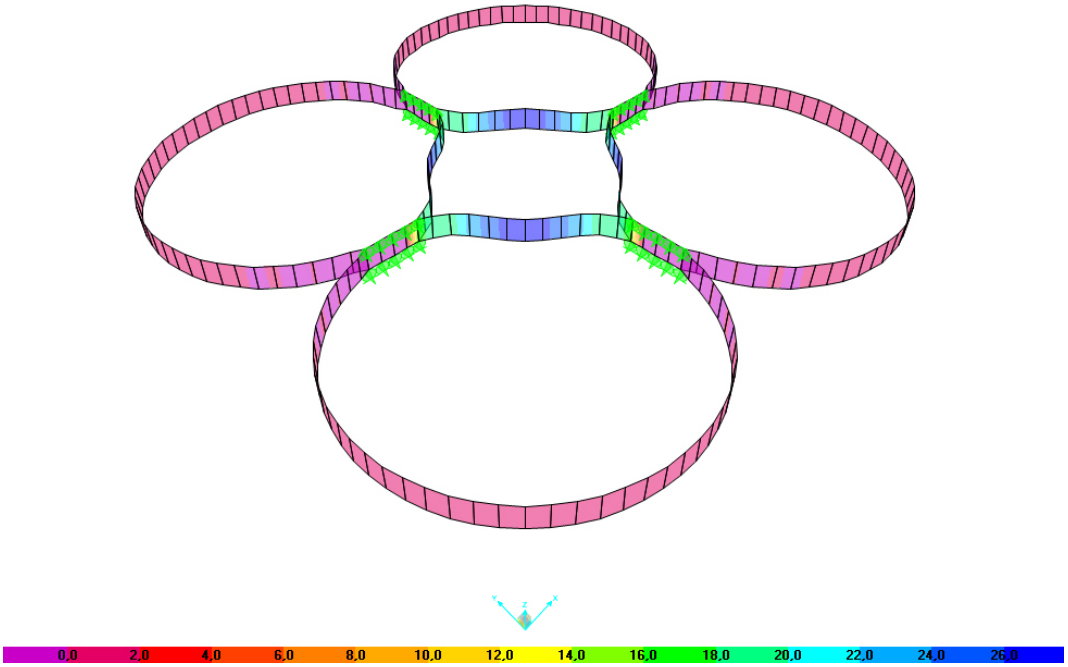


Şekil 5.8. Kabuk modelde kesişim duvarının modellenişi

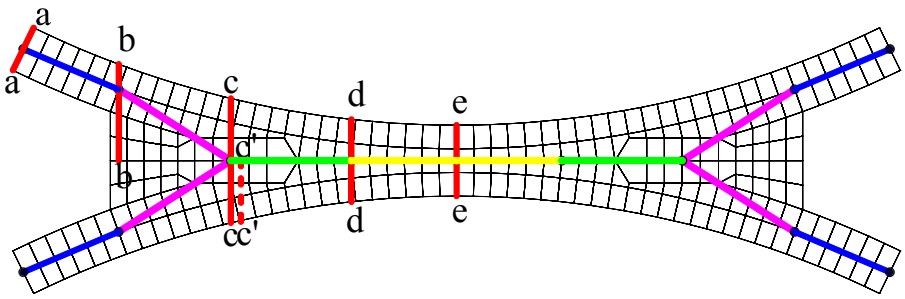
Hazırlanan kabuk modeldeki kabuk elemanlar üzerine yükler yüzey basıncı olarak yüklendi. Fakat geçiş elemanlarının gerçek modelde kesişim duvarı içinde kalmasından dolayı bu elemanlara yüzey basıncı vermek yerine solid modelde veya gerçekte o bölgeye gelen toplam yayılı yük değeri, iki geçiş elemanın birleştiği noktalara tekil yük olarak yüklenmiştir. Şekil 5.9.'da bu şekilde yüklenmiş kabuk model ve Şekil 5.10.'da ise bu yükleme altındaki deformasyon gösterilmiştir.



Şekil 5.9. Kabuk modelin iç yük ile yüklenmiş hali



Şekil 5.10. Analiz sonucunda bulunan kabuk modelin deforme olmuş hali üzerinde gösterilen eksenel kuvvet diyagramı



Kesit #1	Kesit #2	Geçiş Elemanı	Kesit #4
$t = (t_{e\text{-}e}+t_{d\text{-}d})/2$	$t = (t_{d\text{-}d}+t_{c\text{-}c})/2$	$t = C_{geçiş} \times t_{IW}$	$t = t_{a\text{-}a}$

Şekil 5.11. Ortalama kesit özellikleri kullanılan kabuk elemanlar ve kesit özellikleri

Geçiş elemanlarının et kalınlıkları Denklem 6 yardımıyla bulunabilir.

$$L_{GEÇİŞ} = 0.15 \times L_{IW} \quad (5)$$

$$t_{GEÇİŞ} = C_{GEÇİŞ} \times t_{IW} \quad (6)$$

Burada;

$L_{GEÇİŞ}$ = geçiş kabuk elemanının eşdeğer boyunu, L_{IW} = kesişim duvarı boyunu, $t_{GEÇİŞ}$ = geçiş kabuk elemanının eşdeğer et kalınlığını göstermektedir. $C_{GEÇİŞ}$ = geçiş kabuk elemanı için kalınlık katsayısını, t_{IW} = Kesişim duvarı ortasındaki kalınlığı göstermektedir. $C_{GEÇİŞ}$ değerleri farklı α değerleri için Tablo 5.7.'de verilmiştir. Boyutsuz olan $C_{GEÇİŞ}$ değerleri arasında lineer enterpolasyon yapılabilir.

50 adet 4'lü silindirik betonarme grup silo daha önce solid elemanlarla analiz edilmişti. Aynı özelliklere sahip 50 silo eşdeğer kabuk modeli ile tekrar analiz edildi. İç ve dış yükleme şartları altındaki, eşdeğer kabuk modeli analizlerinden elde edilen sonuçlar, solid eleman modelinden alınan sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

Önerilen eşdeğer kabuk modelinden elde edilen sonuçlar, solid eleman modelinden elde edilen sonuçlardan maksimum %10 sapma göstermiştir.

Bu %10'luk sapma önerilen eşdeğer kabuk modelinden alınan bütün sonuçlar ile solid eleman kullanılarak analiz edilen sonlu eleman modellerinden alınan tüm sonuçları içermektedir. Bu önerilen metodun doğruluğunu göstermektedir. Sonuçların karşılaştırılması önerilen eşdeğer kabuk modelin 4'lü silindirik betonarme grup siloların modellenmesinde kullanılabileceğini göstermektedir. İç yüklemeye bağlı, iç duvarların crown ve mesnetlerinde oluşan eğilme momenti, eksenel kuvvet ve kesme kuvveti değerleri, solid model ve önerilen eşdeğer kabuk model için Tablo 5.7'de karşılaştırılmıştır. Solid model ve önerilen eşdeğer kabuk model arasında eksenel kuvvet ve eğilme momenti için mükemmel bir uyum elde edilmiştir. Kabuk modeli iç duvarların crown bölgelerinde daha küçük eğilme momenti verirken, mesnette daha büyük momentler üretmektedir.

Önerilen model 4'lü silindirik betonarme grup siloların tasarımı için, solid elemanlar kullanılan sonlu eleman modeli yerine daha tercih edilebilir bir modeldir, çünkü önerilen metot analiz sonucunda 4'lü silindirik betonarme grup siloların tasarım kuvvetlerini ilave bir hesaplama yapmaya gerek kalmadan direk vermektedir.

Tablo 5.7. Eşdeğer kabuk modelden elde edilen sonuçların solid modellerden elde edilen sonuçlardan % fark değerleri

α	**t**	**1.25xt**				**1.50xt**			
		Mesnet		Crown		Mesnet		Crown	
		N (kN)	M (kN×m)	N (kN)	M (kN×m)	N (kN)	M (kN×m)	N (kN)	M (kN×m)
$t_{geçiş} = 1.2 \times t_{lw}$									
30°	0.20	2.810	4.883	-8.139	-4.394	-5.238	2.503	-5.277	-0.177
	0.25	1.936	4.471	-7.268	-2.507	-6.505	2.064	-4.194	1.646
	0.30	0.380	4.073	-5.858	-0.695	-7.993	1.637	-2.871	3.399
	0.35	-1.381	3.679	-4.373	1.044	-9.321	1.208	-1.621	5.085
	0.40	-3.075	3.277	-2.987	2.709	-9.895	0.769	-0.545	6.704
$t_{geçiş} = 1.3 \times t_{lw}$									
35°	0.20	-1.012	4.595	-7.948	-4.581	-6.899	1.994	-4.880	-0.002
	0.25	-1.945	4.098	-6.757	-2.547	-7.671	1.458	-3.788	1.968
	0.30	-3.119	3.627	-5.299	-0.625	-8.430	0.943	-2.604	3.838
	0.35	-4.268	3.161	-3.914	1.190	-9.075	0.429	-1.562	5.609
	0.40	-5.237	2.704	-2.660	2.921	-9.519	-0.080	-0.660	7.298
$t_{geçiş} = 1.4 \times t_{lw}$									
40°	0.20	-0.712	4.907	-5.632	-4.469	-4.930	2.067	-2.880	0.486
	0.25	-1.460	4.282	-4.309	-2.214	-5.367	1.400	-1.815	2.657
	0.30	-2.235	3.677	-2.937	-0.103	-5.745	0.746	-0.786	4.699
	0.35	-2.917	3.082	-1.714	1.874	-6.026	0.096	0.087	6.618
	0.40	-3.430	2.504	-0.645	3.739	-6.165	-0.543	0.829	8.432
$t_{geçiş} = 1.4 \times t_{lw}$									
45°	0.20	-1.539	6.476	-6.388	-8.000	-4.896	2.670	-3.923	-1.425
	0.25	-2.195	5.712	-5.029	-5.428	-5.256	1.851	-2.840	1.012
	0.30	-2.836	4.956	-3.749	-3.037	-5.565	1.034	-1.884	3.285
	0.35	-3.298	4.226	-2.593	-0.795	-5.705	0.237	-1.047	5.423
	0.40	-3.612	3.514	-1.592	1.306	-5.734	-0.548	-0.338	7.432
$t_{geçiş} = 1.5 \times t_{lw}$									
50°	0.20	-0.490	7.198	-3.870	-8.332	-2.971	2.911	-1.978	-1.045
	0.25	-0.961	6.239	-2.605	-5.440	-3.199	1.884	-1.005	1.677
	0.30	-1.365	5.283	-1.503	-2.758	-3.348	0.854	-0.198	4.204
	0.35	-1.593	4.353	-0.493	-0.257	-3.365	-0.159	0.492	6.564
	0.40	-1.702	3.774	0.274	2.070	-3.293	-1.160	1.077	8.766

6. SONUÇLAR

4'lü silindirik betonarme grup siloların iç yükleme ve dış yükleme durumları altındaki davranışı şimdiye kadar detaylı olarak araştırılmamıştır. İncelenen 4'lü silindirik betonarme grup siloların duvarları boyunca oluşan kuvvetleri hesaplayabilmek için birkaç teorik model mevcuttur. Daha önceki çalışmalar tek bir kesişim duvarını gören merkez açı (kesişim duvarı uzunluğu)'ya odaklanıp silindirik betonarme grup siloların iç ve dış yükleme durumları altındaki davranışını incelemiştir. Bu çalışmada silindirik betonarme grup siloların iç ve dış yüklemelere karşı lineer elastik davranışı 8 düğüm noktalı izoparametrik solid sonlu elemanlarla oluşturulan modellerle incelenmiştir. Bu modellerdeki büyük zorluklar; silo duvarları arasındaki süreklilikten dolayı kesişim duvarları kısmında sonlu eleman ağının meydana getirilmesinde, sonlu eleman ağının sıklığından dolayı önemli hesaplama zorlukları, bir de düğüm kuvveti sonuçlarının tasarım kuvvetlerine dönüştürülmesindeki zorluklardır. Öncelikle silindirik betonarme grup siloların tasarım kuvvetlerinde önemli rol oynayan iç ve dış yüklemeler gerçekçi teorik modellerle hesaplanmıştır. Sonlu eleman modellerinde duvar kalınlığı, kesişim duvarı kalınlığı, kesişim duvarı uzunluğu değişken olarak dikkate alınmıştır. Bundan sonra iç ve dış duvarlardaki kritik kesitlerde tasarım kuvvetlerinin hesaplanabilmesi için parametrik çalışmaya bağlı olan basit tasarım formülleri (Denklem 2 , 3 ve 4) ve tasarım katsayıları (Tablo 5.2. , 5.3. ve 5.4.) geliştirilmiştir. Tasarım formüllerindeki tasarım katsayıları D/t'nin fonksiyonu olarak önerilmiştir, iç ve dış yükleme durumları için t_{lW} ve α ayrı ayrı verilmiştir. Tasarım katsayıları hem iç hem de siloların boş ve dolu olması durumundaki en kritik dış yükleme durumları dikkate alınarak elde edilmiştir.

Sonuçlar basit formda ifade edilmiştir. Bundan dolayı silo tasarımcıları tarafından direk kullanılabilirler. Bir de iç duvarın rijitliğinin tasarım kuvvetlerine etkisi araştırılmıştır.

Silindirik betonarme grup siloların iç ve dış yüklemelerden dolayı oluşan tasarım kuvvetleri farklı silo duvar kalınlığı, kesişim duvarı kalınlığı ve kesişim duvarı boyu için gösterilmiştir. İç yükleme durumu altındaki iç duvarlar için en önemli tasarım parametresinin α olduğu ispatlanmıştır.

Sunulan araştırma silindirik betonarme grup siloların iç ve en kritik dış yükleme durumları altındaki davranışını daha çok anlamaya yöneliktir ve iç ve dış duvarlardaki tasarım kuvvetlerini önerilen basit denklemlerle pratik olarak tahmin edilebilir. Tasarım Denklemleri 2 , 3 ve 4 ve dizayn katsayıları tasarım amacına yönelik tavsiye edilmiştir. Bu denklemler silo duvar kalınlığı t'nin 0.20 m, 0.25 m, 0.30 m, 0.35 m ve 0.40 m ve, kesişim duvarını gören merkez açı α'nın 30°, 35°, 40°, 45°, 50° ve t_{IW} 'nin 1.25×t ve 1.50×t değerlerine sahip 4'lü betonarme grup silolar için geçerlidir.

Sunulan sonuçlar sadece aynı çapa sahip 4'lü silindirik betonarme grup silolar için geçerlidir fakat yaklaşım kolaylıkla genişletilerek diğer silo gruplarına da uygulanabilir. Buradaki verilen sonuçlar gerilmelerdeki özel değişiklikleri yansıtmamaktadır. Silolardaki iç basınç ve boşaltma basıncı ile yüksekliğindeki değişiklikleri dikkate almayan düzlem gerilme modelinden türetilmiştir, hem de genel yapının temel ve çatısındaki mesnetlenmeleri dikkate alınmamıştır. Düzgün yayılı basınç yatay düzlemde kabul edilmiştir. Yapının en üst kısmının rüzgar yada sismik kuvvetlerden dolayı yapacağı serbest salınım ve yapının dış mesnetlerinin temele olan etkileri tartışılmayacaktır ve bu çalışmanın kapsamı dışındadır.

7. KAYNAKLAR

A Ghali, 1979, “Circular Storage Tanks and Silos”, John Wiley and Sons, Inc., New york.

ACI Committee 313. “Standard Practice for Design and Construction of Concrete Silos and Stacking Tubes for Storing Granular Materials,” American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich., 1997

Arıkan, S. (2006), Yüksek Lisans Semineri, Grup Siloların İç Basınç Tesirleri Altında Sonlu Elemanlar Yöntemi İle İncelenmesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Selçuk Üniversitesi, Konya.

Balkaya C, Kalkan E, Yüksel S.B. 2006, “Finite Element Analysis and Practical Modeling of Reinforced Concrete Multi-Bin Circular Silos” ACI Structural Journal, V.103, No.3.

Bathe KJ. 1996. Finite Element Procedures. Prentice Hall Publisher: NJ, USA.

Briassoulis, Demetres, 1991, “Limitations in the Range of Applicability of the classic silo theories”. ACI structural journal.

Ciesielski R. et al., 1970, Behalter, Bunker Silos, Schortnsteine, Fernsehturnme und Freileitungsmaste, Verlag von Wilhelm Ernst & Shon, Belin Germany.

Haydl, Helmut M, 1987, "Bending of Interstice Walls in Circular Silos," Journal of Structural Engineering, ASCE, V 113, No. 10, pp. 2311-23 IS.

Horowitz, B., 1997, “Singularities in elastic Finite Element Analysis”, ACI Concrete International, V.19, No.12.

Horowitz, B. and Nogueira, F.A., 1999, “Stress Resultants due to Interstice Loading in Group of Four Cylindrical Silos”, ACI Structural Journal.

Kant, T. and Datye, D., “Finite Elements Available for the Analysis of Curved Thin-Walled Structures”, Department of Civil engineering, Indian Institute of technology, Powai , Bombay, India.

Prof. Dr. Nahit Kumbasar, 1992, “Betonarme Silo ve Bunkerler”, İTÜ İnşaat Fakültesi Matbaası, İstanbul.

Prato, C. A., and Godoy, L. A., 1989,"Bending of Multi-Bin RC Cylindrical Silos," Journal of Structural Engineering, ASCE, V 115, No. 12, pp. 3194-3200.

Robert D. Cook, 1995, Finite Element Modeling for Stress Analysis, John Wiley & Sons.

Robert D. Cook, 1989, Concepts and Applications of Finite Element Analysis, John Wiley & Sons, 3rd edition.

Sadler, J.E., Johnston, F.T. and Mahmoud, M.H., 1995, “designing silo walls for flow patterns”, ACI structural journal.

Safarian SS, Harris EC. 1985. Design and Construction of Silos and Bunkers. Van Nostrand Renhold: New York.

Stalnaker, J.J. and Harris, E.C., 1992, “Bending Moment in Walls of Grouped Silos Due to Structural Continuity”, ACI Structural Journal.

Timm G, Windels R. 1977. Silos. Sonderdruck ans Dem Beton-Kalendan. Verlag von Wilhelm Ernst & Shon: Belin, Germany.