

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**SİLOLAR KONUSUNDA BAZI TEORİLER VE STOK YAPILARININ
TASARIMINA İLİŞKİN GENEL BİR YAKLAŞIM**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnş. Müh. Ayşegül DURMUŞ

**AĞUSTOS 2007
TRABZON**

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**SİLOLAR KONUSUNDA BAZI TEORİLER VE STOK YAPILARININ
TASARIMINA İLİŞKİN GENEL BİR YAKLAŞIM**

İnş. Müh. Ayşegül DURMUŞ

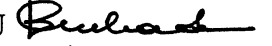
**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde
“İnşaat Yüksek Mühendisi”
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 30/07/2007
Tezin Savunma Tarihi : 16/08/2007**

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Adem DOĞANGÜN

Jüri Üyesi : Prof. Dr. Yusuf AYVAZ

Jüri Üyesi : Prof. Dr. Burhan ÇUHADAROĞLU



Enstitü Müdürü : Prof. Dr. Emin Zeki BAŞKENT

Trabzon 2007

ÖNSÖZ

Bu çalışma Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans tezi olarak gerçekleştirilmiştir.

Silolar konusunda bazı teorilerin irdelenmesi ve stok yapılarının tasarımına ilişkin genel bir yaklaşım başlıklı bu çalışmayı bana öneren, bilgi ve deneyiminden yararlandığım danışman hocam Prof. Dr. Sayın Adem DOĞANGÜN'e minnet ve şükranlarımı sunmayı bir görev sayarım.

Tezimin hazırlanması ve yazım aşamalarında dara düştüğümde danıştığım, moral, destek ve teşviklerini aldığım değerli hocamız Prof. Dr. Ing. Sayın Ahmet DURMUŞ'a minnet borçlu olduğumu belirtmek isterim.

Çalışmalarım için bana kaynak temin eden Ondokuz Mayıs Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü öğretim üyelerinden Yrd. Doç. Dr. Sayın Zeki KARACA'ya ve bölümümüz öğretim üyelerinden Yrd. Doç. Dr. Osman Üçüncü'ye, sürekli dayanışma içinde olduğum ve gerektiğinde destek aldığım üniversitemizin Fen Bilimleri Enstitüsü araştırma görevlilerinden Sayın Mehmet Emin ARSLAN ve Hasan Tahsin ÖZTÜRK'e teşekkürlerimi sunarım.

Bana Yurtiçi Yüksek Lisans Bursu vererek ödüllendiren ve bu suretle çalışmalarımı destekleyen Türkiye Bilimsel Araştırma Kurumu yöneticilerine de teşekkür ederim.

Burada öğrenimim boyunca bana emeği geçen hocalarımın tümünü saygıyla anar, kendilerine minnettar olduğumu da belirtmek isterim.

Çalışmam süresince beni sabır ve şefkatle destekleyen ailemin tüm fertlerine özellikle kendince bana moral vermeye çalışan yeğenim Batuhan'a ve fedakarlıklarını asla unutamayacağım anne ve babama müteşekkir olduğumu belirtir çalışmamın ülkemize yararlı olmasını gönülden dilerim.

Ayşegül DURMUŞ
Trabzon, 2007

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ.....	II
İÇİNDEKİLER.....	III
ÖZET	VII
SUMMARY	VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ	IX
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	XII
SİMGELER DİZİNİ.....	XIV
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş	1
1.2. Gerçek Stok Yapılarının Sınıflandırılması	3
1.3. Stok Malzemesi Türleri, Özellikleri ve Etkileri	6
1.3.1. Stok Malzemesi Türleri	7
1.3.2. Stok Malzemesi Özellikleri	7
1.3.3. Stok Malzemesi Etkileri	12
1.3.3.1. Mekanik Etkiler	12
1.3.3.2. Kimyasal Etkiler	13
1.3.3.3. Sıcaklık Etkisi.....	13
1.3.3.4. İnfilak Etkisi	13
1.4. Mekanik Tanımlar	13
1.4.1. Denge Durumları	13
1.4.2. Uygulanacak Teoriler	14
1.5. Gerçek Stok Yapılarının Tanım Alanları.....	16
1.5.1. Silolar.....	16
1.5.2. Geniş Silolar	17
1.5.3. Tiremi Şeklinde Silolar.....	17
1.5.4. Stok Ambarları	18
1.5.5. Stok Halleri.....	18
1.5.6. Gerçek Stok Yapılarının Tanım Alanlarının Şematik Olarak Gösterilimi	19
1.6. Özel Stok Yapıları ve Bunların Gerçek Stok Yapılarından Farkı	20

1.7.	Gerçek Stok Yapılarını Karakterize Eden Bazı Parametreler.....	22
1.7.1.	Hidrolik Yarıçap	22
1.7.2.	Doldurma Yüzeyi	22
1.7.3.	Taban Düzlemi	23
1.8.	Siloların Sınıflandırılması.....	24
1.8.1.	Enkesit Şekillerine Göre	24
1.8.2.	Yapımlarında Kullanılan Malzemeye Göre.....	26
1.9.	Siloların Kısımları	27
1.10.	Siloların İşletme Tesisleri	32
1.11.	Silolarda Aranılan Başlıca Özellikler	34
1.12.	Siloların İnşası	34
1.13.	Silolarda Hasar Nedenleri, Onarım ve Güçlendirme	36
1.14.	Silolara Etkiyebilecek Yükler.....	37
1.14.1.	Sabit Yükler	37
1.14.2.	Silolanan Malzeme Basınçlarından Doğan Yükler.....	38
1.14.3.	Sıcaklık Farkından Doğan Yükler	38
1.14.4.	Kar Yükü	41
1.14.5.	Rüzgar Yükü	41
1.14.6.	Deprem Yükü	41
1.15.	Silo Yüklerini Arttıran Etmenler	42
1.15.1.	Boşaltma Şekilleri.....	42
1.15.1.1.	Normal Boşaltma	42
1.15.1.2.	Özel Boşaltma.....	43
1.15.2.	Siloda Kemerleşen Malzemenin Çökmesi.....	44
1.15.3.	Havalandırma.....	45
2.	YAPILAN ÇALIŞMALAR, BULGULAR VE İRDELEME	46
2.1.	Sukunet Durumundaki Malzeme Basınçlarının Hesabı İçin Bazı Teoriler ve Karşılaştırılmaları	46
2.1.1.	Hidrostatik Teori.....	46
2.1.2.	Airy Teorisi.....	46
2.1.3.	Janssen Teorisi.....	48
2.1.4.	Sor Teorisi	52
2.1.5.	Forestier Teorisi.....	53

2.1.6.	Reimbert Teorisi	54
2.1.7.	Caquot Eğrisi	60
2.1.8.	Pamelard Teorisi	60
2.1.9.	Teorilerin Karşılaştırılması	61
2.1.10.	DeneySEL Çalışmalardan Elde Edilen Bulgular	64
2.2.	Doldurma-Boşaltma Durumlarındaki Malzeme Basınçlarının Hesabı	65
2.2.1.	Türkiye Silo Yönetmeliği	67
2.2.2.	Amerika Silo Yönetmeliği	71
2.2.3.	Almanya Silo Yönetmeliği	73
2.3.	Stok Malzemesi Gerilmelerinin Belirlenmesine İlişkin Genel Yaklaşım	74
2.3.1.	Temel Kabuller ve İrdelenmeleri	74
2.3.1.1.	Temel Kabuller	74
2.3.1.2.	Temel Kabullerin İrdelenmesi	77
2.3.2.	Temel Kabullerin Stok Yapısı Sınıflarının Tanım Alanlarıyla Uyumu	77
2.3.2.1.	Birinci ve İkinci Kabullerin Uygulama Alanı	77
2.3.2.2.	Üçüncü ve Altıncı Kabulün Uygulama Alanı	77
2.3.2.3.	Altıncı Kabulün Uygulama Alanı	78
2.3.3.	Sınır Denge Durumu Kabullerine Göre Cidar Civarındaki Gerilmeler Arasındaki Bağlılıklar	78
2.4.	Dikkate Alınan Denge Durumları	84
2.4.1.	Birinci Denge Durumuna İlişkin λ Değeri	84
2.4.2.	İkinci Denge Durumuna İlişkin λ Değeri	84
2.5.	Gerilmelerin Yüksekliğe Bağlı Olarak Genel Değişimi	86
2.5.1.	Diferansiyel Denklemin Çıkartılması	86
2.5.2.	Diferansiyel Denklemin Çözümü	87
2.6.	Cidarlar Üzerindeki Etkilere İlişkin Bağlılıklar	88
2.6.1.	Birinci Denge Durumuna İlişkin Bağlılıklar	88
2.6.2.	İkinci Denge Durumunun Teorik Olarak İncelenmesi	90
2.6.3.	Özel Durumlar için İkinci Denge Durumunun Pratik Olarak İncelenmesi	91
2.6.3.1.	Türkiye Silo Yönetmeliğindeki Pratik Bağlılıkları Elde Etme İlkeleri	91
2.6.3.2.	Hidrolik Yarıçapı $r_h < 6m$ Olan Normal Boşaltmalı Silolarda İkinci Denge Durumu	91
2.6.3.3.	Özel Boşaltmalı Silolarda İkinci Denge Durumu	92

2.7.	Silolar için Çeşitli Dağılımların ve Katsayıların İncelenmesi	93
2.7.1.	Temel Mekanik Karakteristiklerin Dağılımı	93
2.7.1.1.	Birim Kütle Dağılımı	93
2.7.1.2.	Cidar Üzerindeki Sürtünme Açısı Dağılımı	93
2.7.1.3.	İçsel Sürtünme Açısı Dağılımı	93
2.7.1.4.	$\rho = \frac{\text{tg}\delta}{\text{tg}\varphi}$ Oranı Dağılımı	94
2.7.2.	Davranış Katsayılarıyla (k_{n1} ve k_{nj}) Elde Edilen Büyütmeler	94
2.8.	Türkiye Silo Yönetmeliği Kurallarının Temel Teorik İlkeleri Hakkında Bulgular	95
2.8.1.	Birinci ve İkinci Denge Durumuna İlişkin n_1 ve n_2 İfadelerinin Elde Edilişi	95
2.8.2.	Basınçların Türkiye Silo Yönetmeliğine Göre Hesabı için Hazırlanan Abak ve Çizelgelerin Kullanımı	97
3.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	110
4.	KAYNAKLAR.....	113
5.	EKLER	117
ÖZGEÇMİŞ		

ÖZET

Özel mühendislik yapılarından olan siloların ve diğer stok yapılarının ham ve işlenmiş yiyecek ya da endüstri maddelerinin saklanması ve dolguların yapılması gibi birçok nedenle inşa edildikleri bilinmektedir.

Stok malzemelerinin denge koşullarını; zaman, malzeme cinsi, sıkışma derecesi, doldurma hızı, doldurmada düşüş yüksekliği, boşaltma şekli ve boşaltma hızı, stok yapısının geometrik ve mekanik özellikleri gibi birçok parametre etkilemektedir. Bu durumda stok yapılarını sınıflandırarak, her bir sınıfın tasarımı için bazı teorilere ilişkin tasarım yöntemlerinden, ülke ekonomisiyle bağdaşan bir emniyeti sağlamaya yönelik optimum olanının belirlenerek kullanılması gerektiği açıktır.

Bu çalışmanın temel amacı stok yapıları konusunda bir sentez ışığında, bu yapıların tasarımı için bazı tanınmış yöntemleri aynı simgeler altında sistematik olarak açıklamak ve geliştirilen genel bir yaklaşımın temel ilkelerinin Türkiye Silo Yönetmeliğinde öngörülen yöntemle ilgisini ortaya koyduktan sonra uygulanmasını kolaylaştıracak birtakım abak ve çizelgeler hazırlamaktır.

Bu amaçla gerçekleştirilen çalışma üç asıl ve bir ek bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde gerçek stok yapılarının sınıflandırılması, stok malzemesi, mekanik tanımlar, gerçek stok yapısı sınıflarından birini teşkil eden silolara etkiyen yükler üzerinde durulmaktadır. İkinci bölümde, sukunet durumundaki malzeme basınçlarının hesabı için bazı teoriler ve karşılaştırmaları, doldurma ve boşaltma durumlarında malzeme basınçlarının hesabına ilişkin bilgiler, stok malzemesi gerilmelerine ilişkin genel yaklaşım ve bu yaklaşımın Türkiye Silo Yönetmeliğiyle ilgisi açıklanmakta, yönetmelikteki yöntemin uygulanmasını kolaylaştıracak bazı abak ve çizelgeler de burada verilmektedir.

Üçüncü bölüm sonuç ve önerilere ayrılmış olup bu son bölümü kaynaklar listesi, bir ek bölüm ile yazara ilişkin özgeçmiş izlemektedir.

Sonuç olarak, geliştirilen genel yaklaşımdan Türkiye Silo Yönetmeliğinde önerilen yöntemin çıkartıldığı gösterilmekte ve bu yöntemin uygulamasını kolaylaştıracak birtakım abak ve çizelgeler verilmektedir.

Anahtar Kelimeler: Stok Yapıları, Sınıflandırma, Silo Sınıfı Tasarım Teorileri, Genel Yaklaşım

SUMMARY

Some Theories About Silos and A General Approach to the Design of Stock Structures

It is known that silos and other stock structures which are special structures have been constructed due to many reasons such as to storage raw and processed materials or industrial materials and making fill.

Many parameters such as material type, degree of jamming, filling velocity, height of falling during filling, discharge type and discharge velocity, geometrical and mechanical properties of stock structures affect the equilibrium conditions of stock materials. In this case, it is clear that determination of optimum ones among design methods related to some theories for design of each class making classification for stock structures.

The basic purpose of this study is to clarify some main methods using same symbols systematically and to prepare some tables and charts which facilitate application of developed a general approach after that putting forward its basic principles with recommended method in Turkish Silo Code.

This study carried out for this purpose consists of three main chapters and an appendix. Classification of real stock structures, stock materials, mechanical definitions, applied loads on silo which is one of a real stock type are explained in Chapter One. Some theories for estimation of material pressures during stable conditions and their comparisons, some information related to material pressures during filling and discharging of silos, general approach for stresses in stock materials, explanation of relations between this theory and Turkish Silo Code and some tables and charts which facilitate application of method defined in This code are given in Chapter Two.

Chapter three is reserved for conclusions and recommendations and this chapter is followed by references, and appendix and curriculum vitae of author.

As a result of this study, it is shown constituent of recommended method defined in Turkish Silo Code and some tables and charts which facilitate practical usage of this method are presented.

Key Words: Stock Structures, Classification, Theories for Design of Silo Types, General Approach

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 1.1.	Ayrık taneli bir malzemenin bünyesel dayanım eğrisi	6
Şekil 1.2.	Buğday ve öğütülmüş fosfat için içsel sürtünme katsayılarının uç değerleri	10
Şekil 1.3.	Stok yapılarına ilişkin teorilerin şemalar yardımıyla tanımları	15
Şekil 1.4.	İtibari narinlik oranının yeterli derecede büyük olması durumunda bir siloda denge bölgelerinin şematik gösterilimi.....	16
Şekil 1.5.	İtibari narinlik oranları (H/r_h) 3,5 ve 5 olan siloların tanım alanlarının şematik gösterilimi.....	17
Şekil 1.6.	Kısa kenara paralel stok ambarı enkesiti üzerinde H/r_h 'ın üst sınırının mekanik olarak doğrulanması.....	18
Şekil 1.7.	$h_o/H \geq 0,6$ koşulunu sağlayan üç sınıf stok yapısından her birinin maksimum tanım alanının şematik gösterilimi.....	19
Şekil 1.8.	Tiremi şeklinde silolar, haller ve geniş silolar+ambarlar için maksimum tanım alanlarının şematik gösterilimi	19
Şekil 1.9.	Gerçek stok yapılarında doldurma yüzeyi, doldurma kenarı ve ortalama doldurma düzlemi tanımları.....	23
Şekil 1.10.	Düz tabanlı ve tiremili silolarda taban düzlemi tanımları.....	24
Şekil 1.11.	Enkesit şekillerine göre silolar.....	24
Şekil 1.12.	Silindirik silo gruplarının oluşturulmasına ilişkin örnekler.....	25
Şekil 1.13.	Dörtgen ve çokgen kesitli silo gruplarının oluşturulmasına ilişkin örnekler	26
Şekil 1.14.	Yapımlarında kullanılan malzemeye göre ahşap, çelik ve betonarme silo örnekleri.....	27
Şekil 1.15.	Silo kısımları.....	27
Şekil 1.16.	Siloların çatı şekillerine örnekler	28
Şekil 1.17.	Silo cidarlarında kullanılan guselere ilişkin şematik örnekler.....	28
Şekil 1.18.	Siloların taban şekillerine örnekler	29
Şekil 1.19.	Silolarda düşey taşıyıcı kesitlerine ilişkin şematik örnek	30
Şekil 1.20.	Cidarları temele oturan silolara ilişkin şematik örnekler.....	30
Şekil 1.21.	Hücre altında hacim bulunan silo kesitleri	31

Şekil 1.22.	Siloların işletilmesine ilişkin tipik bir kesit	32
Şekil 1.23.	Malzemenin düşey bir eksen etrafında dönen boru sarkaç vasıtası elevatörden alınarak hücrelere aktarıldığı silo örneği	33
Şekil 1.24.	Her sıra için bir dağıtım bandı ile donatılmış ve elevatörlerden hücre sıralarına enine malzeme dağıtımını gerçekleştirmek için ilave bir taşıma şeridi bulunduran bir silo örneği.....	33
Şekil 1.25.	Siloların inşasında yaygın olarak kullanılan bir kayar kalıp şeması.....	35
Şekil 1.26.	Kayar kalıp tekniğiyle inşa edilen bir silo	35
Şekil 1.27.	Silonun cidar yüzeyleri arasındaki sıcaklık farkı.....	39
Şekil 1.28.	Silolarda geometrik olarak özel boşaltmaya ilişkin altı farklı şematik gösterim	43
Şekil 2.1.	Airy teorisi için silo kesiti.....	47
Şekil 2.2.	Janssen teorisindeki bağıntıların çıkartılmasına ilişkin şema	48
Şekil 2.3.	Siloya etkiyen basınçların belirlenmesinde kullanılan y fonksiyonunun derinlikle değişimi	51
Şekil 2.4.	Janssen teorisinde Sor tarafından $n(z)$ eğrisi için yapılan basitleştirme	52
Şekil 2.5.	Janssen teorisinde Forestier tarafından $n(z)$ eğrisi için yapılan basitleştirme	54
Şekil 2.6.	Reimbert teorisindeki bağıntıların çıkartılmasına ilişkin şema	55
Şekil 2.7.	$\varphi = 30^\circ$ için çeşitli teorilere göre yatay basınç eğrileri	64
Şekil 2.8.	$\varphi = 30^\circ$ için çeşitli teorilere göre düşey basınç eğrileri.....	64
Şekil 2.9.	Reimbert'in deneylerine göre $1/\lambda$ 'nın derinlikle değişimi	65
Şekil 2.10.	Silolarda boşaltma anında basınçları arttıran (a) ve arttırmayan (b) boşaltma şekilleri.....	67
Şekil 2.11.	Derinliğin geçiş derinliğinden küçük olması durumunda ($z < z_T$) farklı iki hal için yatay basıncın değişimi.....	70
Şekil 2.12.	Temel Kabullerinin şematik bir şekil üzerinde özeti	75
Şekil 2.13.	Birinci denge durumu için Mohr dairesi, mutlak koordinatlarda q_{01} ve q'_{01} gerilmeleri.....	81
Şekil 2.14.	İkinci denge durumu için Mohr dairesi, mutlak koordinatlarda q_{02} ve q'_{02} gerilmeleri.....	82
Şekil 2.15.	$\rho = 0,70$ için birinci denge durumunda η ve φ 'ye bağlı olarak ψ_1 değerleri	101
Şekil 2.16.	$\rho = 0,70$ için ikinci denge durumunda η ve φ 'ye bağlı olarak ψ_2 değerleri.....	102

Şekil 2.17.	$\rho = 0,75$ için birinci denge durumunda η ve φ 'ye bağlı olarak ψ_1 değerleri	104
Şekil 2.18.	$\rho = 0,75$ için ikinci denge durumunda η ve φ 'ye bağlı olarak ψ_2 değerleri.....	105
Şekil 2.19.	$\rho = 0,80$ için birinci denge durumunda η ve φ 'ye bağlı olarak ψ_1 değerleri	107
Şekil 2.20.	$\rho = 0,80$ için ikinci denge durumunda η ve φ 'ye bağlı olarak ψ_2 değerleri.....	108

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa No

Çizelge 1.1.	Sonlu ayırık taneli malzeme kütlelerini içeren gerçek stok yapısı sınıfları	5
Çizelge 1.2.	Bazı ayırık taneli malzemelere ilişkin birim ağırlık dağılımı	8
Çizelge 1.3.	Darıya ilişkin içsel sürtünme katsayısı dağılımı	9
Çizelge 1.4.	Bazı ayırık taneli malzemelere ilişkin cidar üzerindeki sürtünme açısı dağılımı	9
Çizelge 1.5.	Bazı ayırık taneli malzemelere ilişkin doğal şev açısı dağılımı.....	10
Çizelge 1.6.	En çok kullanılan bazı malzemelere ilişkin γ , φ ve δ dağılımları.....	11
Çizelge 1.7.	Sonlu dolgu kütlelerini içeren bazı özel stok yapılarının tanımı	21
Çizelge 1.8.	Gerçek stok yapılarının enkesit şekline göre hidrolik yarıçap ifadeleri	22
Çizelge 1.9.	Gerçek stok yapılarında enkesit şekline göre h' ifadeleri	23
Çizelge 2.1.	$\frac{z}{z_0}$ oranına bağlı olarak $y = 1 - e^{-\frac{z}{z_0}}$ fonksiyonunun değerleri.....	51
Çizelge 2.2.	Silo enkesitine göre h_{maks} ve $z \leq h_{maks}$ için n değerleri	54
Çizelge 2.3.	z/A^* 'a bağlı olarak $L(z) = 1 - \left(\frac{z}{A^*} + 1\right)^{-2}$ değerleri	58
Çizelge 2.4.	Silo enkesitine göre A^* ve n_{maks} değerleri	59
Çizelge 2.5.	Stok malzemesi yatay basınçlarına (n) dair çeşitli yöntemler için K katsayısı ifadeleri	62
Çizelge 2.6.	Stok malzemesi düşey basınçlarına (v) dair çeşitli yöntemler için K' katsayısı ifadeleri	63
Çizelge 2.7.	Silo enkesitine göre h'' düzeltme terimleri.....	68
Çizelge 2.8.	Normal boşaltmalı silolarda yatay basınçların hesaplanması için gerekli bazı ifadeler	69
Çizelge 2.9.	Janssen ve Reimbert teorilerine göre n , v ve t ifadeleri.....	72
Çizelge 2.10.	Dikdörtgen kesitli silolar için hidrolik yarıçap ifadeleri.....	72
Çizelge 2.11.	H_1 ifadeleri.....	73
Çizelge 2.12.	Yanal basınç için düzeltme katsayıları	73
Çizelge 2.13.	Sukunet, doldurma ve boşaltma durumları için λ ve $\tan \delta$ değerleri.....	74

Çizelge 2.14. $\rho = 0,70$ için birinci ve ikinci denge durumlarına ilişkin temel değerler	103
Çizelge 2.15. $\rho = 0,75$ için birinci ve ikinci denge durumlarına ilişkin temel değerler	106
Çizelge 2.16. $\rho = 0,80$ için birinci ve ikinci denge durumlarına ilişkin temel değerler	109

SİMGELER DİZİNİ

- A: Stok yapısının iç kesit alanı
- A^* : Reimbert yönteminde malzeme basınçlarının hesabında kullanılan silo geometrisine göre değişen bir katsayı
- a: Dikdörtgen kesitin kısa kenarı, cidar kalınlığı
- b: Dikdörtgen kesit uzun kenarı
- D: Silo çapı
- E: Silo cidarının elastisite modülü
- H: Silo yüksekliği, boşaltma ağzının derinliği
- h: Taban düzleminin ortalama doldurma düzlemine göre derinliği
- h' : Doldurma kenarının ortalama doldurma düzlemine olan uzaklığı
- h'' : Eşdeğer yükseklik
- I: Eylemsizlik momenti
- K: Isı akım yoğunluğu, yatay basınç katsayısı
- K' : Düşey basınç katsayısı
- $k_{n,v}$: Davranış katsayıları
- M_{At} : Sıcaklık farkından meydana gelen eğilme momenti
- n: Silolanan malzemedeki doğan yatay basınç
- n_0 : n'nin temel değeri
- $n_{1,2,3}$: Sırasıyla birinci, ikinci ve üçüncü denge durumuna karşılık gelen yatay basınçlar
- q: Silolanan malzemenin silo cidarlarına bileşke etkisi
- r_h : Hidrolik yarıçap
- U: Stok yapısı enkesit çevre uzunluğu
- U' : V çevresinin tamamını içine alan U'nun homotetisi olan çevrenin uzunluğu
- v: Silolanan malzemeni silonun yatay kesitinin birim yüzeyine uyguladığı ortalama düşey basınç
- \bar{v} : Taban düzlemindeki ortalama düşey basınç
- v_0 : v'nin temel değeri

- α_1 : Betonun ısı genleşme katsayısı
 β : Stok malzemesinin doğal şev açısı
 γ : Birim ağırlık
 δ : Stok yapısı cidarı üzerindeki sürtünme açısı
 λ_c : Betonun ısı iletkenlik katsayısı
 ρ : $\tan \delta / \tan \varphi$ oranı
 φ : Stok malzemesinin içsel sürtünme açısı

Not: Bu listede yer almayan simgeler metin içinde ilgili oldukları yerde açıklanmışlardır.

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Özel mühendislik yapılarından olan; bir sınıfını siloların diğer bir sınıfını ise palplanşlı batardo hücreleri ve dalga kıranlar gibi bayındırlık yapılarının teşkil ettiği stok yapılarının sırasıyla tahıl, bakliyat, yağ tohumları gibi işlenmemiş; un, yem, şeker gibi işlenmiş yiyecek ya da çimento, gübre, maden cevheri, kömür, kum, çakıl gibi endüstri maddelerinin saklanması ve dolgu yapılması gibi birçok nedenle inşa edildikleri bilinmektedir. İhtiyaçların zamanla artması ve kullanılan malzeme çeşitlerinin çoğalması stok yapı inşaatlarının giderek yaygınlaşmasını gerektirmektedir.

Stok malzemelerinin denge koşullarını; zaman, sıcaklık, malzeme cinsi, nem durumu, sıkışabilirlik ve sıkışma derecesi, doldurma hızı, doldurmada düşüş yüksekliği, boşaltma şekli ve boşaltma hızı, stok yapısının geometrik ve mekanik özellikleri gibi birçok parametre etkilemektedir. Bu durum stok yapılarını sınıflandırarak, her bir sınıfın tasarımı için bazı teorilere ilişkin tasarım yöntemlerinden, ülke ekonomisiyle bağdaşan bir emniyeti sağlamaya yönelik en uygun olanının belirlenerek kullanılmasını zorunlu kılmaktadır. Zira yukarıda da belirtilmeye çalışıldığı gibi yapım ve kullanım amaçları bakımından özel mühendislik yapıları sınıfına giren silolar ve diğer stok yapılarında meydana gelen olaylar bunların tasarımlarını çok karmaşık bir duruma getirmektedir.

Bir sınıfı silolar olan gerçek stok yapılarının tasarımı Türkiye’de karışıklıklar meydana getiren çeşitli yöntemlere göre yapıyordu. Çünkü 1990 yılına kadar Türkiye’de silolara ilişkin bir yönetmelik bulunmadığından tasarımcılar kendilerine uygun hesap yöntemini seçmekte ve kaynakları çok farklı teorik bilgileri kullanmakta tamamen serbest bulunuyorlardı. Gerçekten 1980’li yılların sonuna kadar stok yapılarının tasarımında daha çok Alman yönetmeliğindeki bağıntılar kullanılıyordu (DIN 1055, 1968). Üstelik bu bağıntılardaki parametrelerin sayısal değerleri de birbirinden çok farklı kaynaklardan alınıyordu. Türk Standartları Enstitüsü tarafından 1989 yılında ‘‘Betonarme Siloların Hesap, Yapım ve Kullanım Kuralları’’ adıyla bir standardın yayınlanması ülkemizde tasarımların daha sağlıklı ve tutarlı yapılmasına imkan tanımıştır (TS 6989, 1989). Bununla beraber bugün bu konuda Alman, Fransız ve Amerikan yönetmelikleri gibi çağdaş yönetmeliklerin varlığı ve bunlardaki öneri ve hükümlerin farklılığı birçok karışıklığa

neden olabilmektedir. Bu karışıklığı gidermenin tek yolunun stok yapılarına ilişkin problemleri karmaşık hale getiren nedenlerin bilinmesi ve çözümlerinin bulunması olduğu açıktır. Bu nedenlerin başlıcaları aşağıda verilmektedir:

- ✓ Narinlikleri, boyutları, şekilleri ve kullanım amaçları farklı olan, bununla beraber aynı bağıntıların ve sayısal verilerin kullanıldığı stok yapılarının tümüne "silo" adının verilmiş olması;
- ✓ Geliştirilen yeni yöntemlerin kullanılmasına çalışılırken bir taraftan da Türkiye koşulları ve ekonomisiyle bağdaşmayan yabancı yönetmeliklerin kullanılmasına devam edilmesi;
- ✓ Stok malzemesinin boşaltılmasından dolayı meydana gelen dinamik etkilerin olması gereken değerden daha az olarak dikkate alınması ya da bu etkilerin tamamen ihmal edilmesi;
- ✓ Tremi sayısı ve boşaltma çeşitlerinin dikkate alınmaması.

Yukarıda belirtilmeye çalışılan stok yapılarının problemlerini karmaşık hale getiren başlıca nedenlerden dolayı bu yapılara ilişkin genelleştirilmiş basit bir yaklaşım ortaya koymadan gerçek boyutlu silolar üzerinde yapılan deneyler yardımıyla dahi bu yapılara ilişkin problemlerin basitleştirilmesinin mümkün olamayacağı açıktır.

Bu çalışmanın temel amacı, bir sentez çalışması ışığı altında stok yapılarını sınıflandırarak, her bir sınıfın tasarımı için bazı tanınmış teorilere ilişkin yöntemleri aynı simgeler altında sistematik olarak verdikten sonra bu konuda geliştirilen genel bir yaklaşımın temel ilkelerini açıklamak ve bu yaklaşımın Türkiye Silo Yönetmeliğinde (TS 6989, 1989) öngörülen yöntemle ilgisini ortaya koyarak bu yöntemin uygulanmasını kolaylaştıracak birtakım abak ve çizelgeler hazırlamaktır.

Bu amaçla gerçekleştirilen çalışma üç asıl bölüm ve bir ekler bölümünden oluşmaktadır. Birinci bölüm genel bilgiler bölümü olup burada gerçek stok yapılarının narin silolar (silolar), geniş silolar, tiremi şeklindeki silolar, ambarlar ve haller olarak sınıflandırılması, stok malzemesi türleri, özellikleri ve etkileri, mekanik tanımlar, yeraltı boruları, palplanşlı batardo hücreleri ve dalga kıranlar gibi bazı özel stok yapıları (bayındırlık yapıları), gerçek stok yapılarını karakterize eden hidrolik yarıçap, doldurma yüzeyi ve taban düzlemi gibi bazı parametreler ve gerçek stok yapısı sınıflarından birini

teşkil eden silolarda aranan başlıca özellikler ve bunlara etkiyen yükler üzerinde durulmaktadır.

İkinci bölümde, gerçek stok yapılarından silolarda sukunet durumundaki malzeme basınçlarının hesabı için teknik literatürden bilinen, tanınmış bazı teoriler ve bunların karşılaştırılmaları, Türkiye, Amerika ve Alman Silo Yönetmeliklerine göre doldurma ve boşaltma durumlarında malzeme basınçlarının hesabına ilişkin öz bilgiler, stok malzemesindeki gerilmelere ilişkin genel bir yaklaşım ve bu yaklaşımın Türkiye Silo Yönetmeliğiyle ilgisi açıklanmakta, yönetmeliğin uygulanmasını kolaylaştıracak bazı abak ve çizelgeler de burada verilmektedir.

Çalışmanın bütününden çıkartılan bazı sonuç ve öneriler üçüncü bölümde özetlenmekte ve bu son bölümü kaynaklar dizini ile ekler bölümü izlemektedir.

1.2. Gerçek Stok Yapılarının Sınıflandırılması

Bu çalışmada belli bir kütleyi stok eden yapıların sınıflandırılmasında ‘‘ayrık taneli malzemelerin kullanılışı’’ birinci ölçüt olarak seçilmektedir. Bu ölçüte göre başlıca sınıfı, sonradan kullanılacak tahıl gibi sonlu malzemeleri içeren, gerçek anlamda stok yapıları teşkil etmektedir (Çizelge 1.1’deki şekiller). İkincil sınıfı ise, pratik olarak sonsuz hacimli dolguları içeren bayındırlık yapıları diğer bir deyişle dolgu yapıları oluşturmaktadır. Bu çalışmada bu tür yapılar özel stok yapıları olarak adlandırılmaktadır (Çizelge 1.7’deki şekiller).

Burada bayındırlık yapıları sınıfına giren stok yapılarına ilişkin problemlerin içerdikleri malzemeleri, birim ağırlığı aynı olan bir sıvıya benzeterek askıda katı elemanlar içeren bir çamur olarak dikkate almak suretiyle, ayrık taneli malzemeleri stok eden yapılarınkine benzer olduğunu belirtmek uygun olmaktadır.

Gerçek anlamda stok yapıları için, aşağıda belirtilen kavramlar yardımıyla, kütle oranına bağlı ikinci bir sınıflandırma ölçütü kullanılmaktadır.

- ✓ Gerçek stok yapılarının üstünde yatay bir referans düzlemi dikkate alınmaktadır (bkz. Çizelge 1.1). Bu düzlem stok yapısının kapalı bir hücre olması ve tamamen malzeme ile dolu olması durumunda kendi üst düzlemine, aksi halde söz konusu düzlem, doğal şev açısı $\beta = 1,5 \arctan \phi$ alınmak üzere V stok yapısının üst kısmında

oluşan şevin hacmini, A stok yapısının iç kesit alanını göstermek üzere V/A oranıyla belirlenen ve ‘ortalama doldurma düzlemi’ diye adlandırılan bir düzleme karşılık gelmektedir. Bu durumda eşdeğer yükseklik H, yapı tabanından ortalama doldurma düzlemine olan uzaklık olarak tanımlanmaktadır.

Diğer taraftan cidarları düşey, dip kısmı eğimli stok yapılarında üst kısımda da bir şevin bulunması durumunda; h_s üst kısımda oluşan şevin yüksekliğini, h_o düşey cidar yüksekliğini ve h_i tiremi yüksekliğini göstermek üzere üç parametre tanımlanmaktadır (bkz. Çizelge 1.1).

Burada yukarıdaki tanımların, bu yüksekliklerin oranı ne olursa olsun geçerli olduklarını belirtmek uygun olmaktadır.

✓ Bu çalışmada A, malzemenin maksimum olduğu bölgede stok yapısı düzlem kesitinin alanını, U, bu kesitin çevresini göstermek üzere $r_h = A/U$ oranı hidrolik yarıçap ve H/r_h oranı ise itibari narinlik olarak adlandırılmaktadır.

Buna göre aşağıdaki Çizelge 1.1’den de görüldüğü gibi gerçek stok yapıları, hidrolik yarıçap r_h metre cinsinden alınmak suretiyle, $H/r_h, h_o/H$ ve h_i/r_h (ya da h_i/H) boyutsuz parametrelerine göre beş sınıfa ayrılmaktadır.

Burada Türkiye Silo Yönetmeliğinde tanım olarak $h_o + \frac{V}{A}$ ’nın h ile gösterildiğini belirtmek uygun olmaktadır.

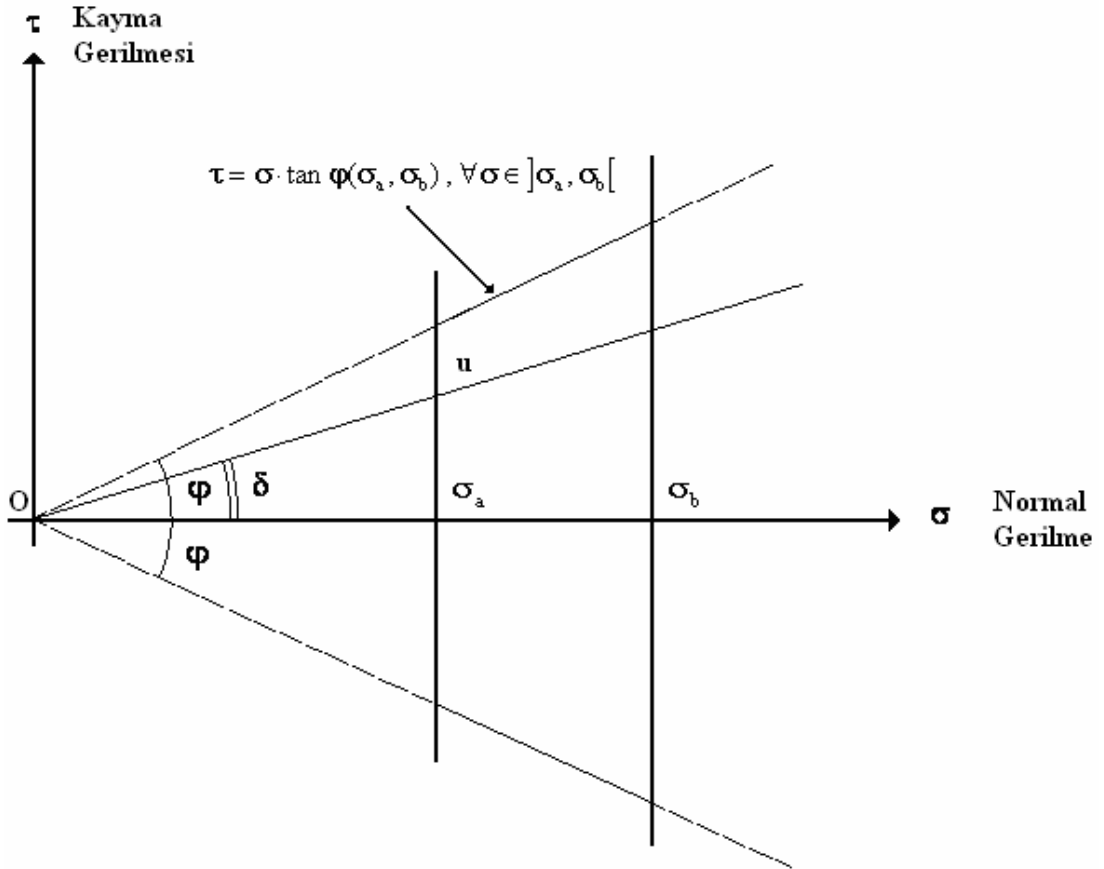
Çizelge 1.1. Sonlu ayırık taneli malzeme kütlelerini içeren gerçek stok yapısı sınıfları

Sınıf Adı	Şematik Örnek Boykesitler	Tanım
Narin Silolar (Silolar)		$\frac{H}{r_h} \geq 3,5$ $r_h \leq 6-12,5 \text{ m}$ $\frac{h_o}{H} \geq 0,6$
Geniş Silolar		$0,5-1,5 \leq \frac{H}{r_h} < 3-5$ $\frac{h_o}{H} \geq 0,6$ <p>ve</p> $\frac{H}{r_h} \geq 3-5$ $r_h \geq 6-12,5 \text{ m}$ $\frac{h_o}{H} \geq 0,6$
Tiremi Şeklindeki Silolar		$\frac{h_o}{H} \leq 3-5$ $\frac{H}{r_h} \geq 2$ $\frac{h_i}{r_h} \geq 0,5-1$
Ambarlar		$\frac{H}{r_h} \leq 0,5-1,5$ $\frac{h_o}{H} \geq 0,6$ $\frac{h_i}{H} \approx 0$
Haller		$\frac{h_o}{H} < 0,3-0,5$ $\frac{h_i}{H} \approx 0$

Belirteç:	
	Stok yapısı cidarı
	Sonlu kütle sınırı

1.3. Stok Malzemesi Türleri, Özellikleri ve Etkileri

Stok malzemesi; stok yapılarında serbest olarak stok edilebilen ya da aktarılabilen her türlü kohezyonsuz malzeme olarak ifade edilmekte ve φ malzemenin içsel sürtünme açısını, δ silo cidarı üzerindeki sürtünme açısını göstermek üzere; bünyesel dayanım eğrileri orijinden geçen iki yarı doğruya benzetilebilen (Şekil 1.1), dolayısıyla da kohezyonsuz olan tüm malzemeler ‘ayrık taneli malzeme’ olarak adlandırılmaktadır.



Şekil 1.1. Ayrık taneli bir malzemenin bünyesel dayanım eğrisi

1.3.1. Stok Malzemesi Türleri

Çeşitli amaçlarla stok edilen malzemeler için kesin bir sınırlama olmamakla beraber bu malzemeler genellikle aşağıdaki gibi gruplandırılabilirler (Turan, 1986; Kumbasar vd., 1992).

(1) İşlenmemiş tarımsal ürünler

Tahıl (çavdar, buğday, arpa, mısır, darı ...), bakliyat (fasulye, nohut, bezelye, mercimek...), yağ tohumu (ayçiçeği, susam, keten, kolza...) gibi.

(2) İşlenmiş tarımsal ürünler

Tahıl unu, yem, şeker gibi.

(3) Anorganik hammaddeler

Kum, kil, çakıl, kuars, maden cevheri, kömür, kok, kalker gibi.

(4) Endüstriyel ürünler

Çimento, çimento klinkeri, kül, kömür tozu, gübre (potasyum, fosfat), yapay taneli malzemeler gibi.

1.3.2. Stok Malzemesi Özellikleri

Stok yapılarının tasarımında kullanılan, stok malzemelerine ilişkin, üç temel özeliğin; (1) birim ağırlık (γ), (2) içsel sürtünme açısı (ϕ) ve (3) cidar üzerindeki sürtünme açısı (δ) olduğu ve bu özelliklerin deneysel olarak belirlenmesi gerektiği bilinmektedir.

Genellikle silolarda stok edilen tahıl gibi ayrık taneli malzemeler katı, kohezyonsuz, diğer bir deyişle ayrık taneli bir ortam oluşturmaktadır. Bunların denge kuralları henüz iyi tanımlanamamakla beraber bazı bilim adamları tarafından elastik, homojen, izotrop ve sonsuz bir ortamın denge teorisi yardımıyla araştırılan bir çözüm deneysel gözlemlere dayalı bir dönüşümle ayrık taneli ortam için genelleştirilmiştir. 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 dikkate almamaktadır. Gerçekten, stok malzemesi özellikleri sıcaklık, rutubet gibi çevre koşullarına, zamana, tanelerin sıkıştırılma derecesine, malzemenin sıkışabilirliğine, doldurma hızına ve doldurma esnasında malzemelerin düşüş yüksekliği gibi etmenlere bağlı olarak da çok değişmektedir. Bu da stok edilen ayrık taneli bir kütle için

önemli olmaktadır (Reimbert, 1962; 1977). Stok malzemesi özellikleri basınçla doğrudan ilgili olmakla beraber, bu özelliklerin değişimi önemli basınç değişikliklerine neden olduğundan, silo boyutları ve boşaltma sistemi stok malzemesi özelliklerine göre belirlenmektedir. Bununla birlikte malzeme stok yapısı içinde kuru, nemli, doymun hale dönüşebilmekte ve bu değişime bağlı olarak malzeme özellikleri de değişmektedir. Bu nedenle malzemenin zamana bağlı olarak ne gibi değişikliklere uğrayacağını tahmin edilmesi gerekmekte ve inşa edilecek stok yapısının kısa zamanda kullanılmayacak hale gelmesi istenmiyorsa stok malzemesinin gösterdiği en olumsuz özellikler dikkate alınmalıdır (ACI, 1977; Kıvrak, 1987; Blight, 2005). Diğer taraftan aynı yapıya zaman içinde farklı özelliklere sahip malzemelerin stok edilmesi de söz konusu olabilmektedir. Bu durumda malzemelerden biri için yatay basınç daha büyük olurken diğeri için düşey basınç daha büyük olabilmektedir. Bu gibi durumlarda tasarımın her bir malzeme için çizilen basınç diyagramlarından en elverişsiz olanlarına göre yapılması gerekmektedir. Bu hususlar stok edilen ayrık taneli bir kütlenin ortaya koyduğu problemi çok karmaşık bir duruma getirmektedir. Bu karmaşık durum elastisite teorisinde dikkate alınmadığından bu problem de bugüne kadar tam bir çözüme ulaştırılamamıştır. Tam bir çözüm için stok edilen malzemeye ilişkin karakteristiklerin en elverişsiz sınır değerlerinin belirlenmesi gerektiği açıktır.

Teknik literatürde (Reimbert, 1977; Ayazoğlu, 1987) bazı ayrık taneli malzemelerin birim ağırlık (γ), içsel sürtünme açısı (ϕ), cidar üzerindeki sürtünme açısı (δ) ve doğal şev açısı dağılımları sırasıyla Çizelge 1.2, Çizelge 1.3, Çizelge 1.4, Çizelge 1.5 ve içsel sürtünme katsayılarının uç değerleri Şekil 1.2’de verilmektedir.

Çizelge 1.2. Bazı ayrık taneli malzemelere ilişkin birim ağırlık dağılımı

Malzeme	Birim ağırlık (γ , daN/m ³)
Buğday	750-840
Darı	690-705
Arpa	550-690
Un	500-800

Çizelge 1.3. Dariya ilişkin içsel sürtünme katsayısı dağılımı

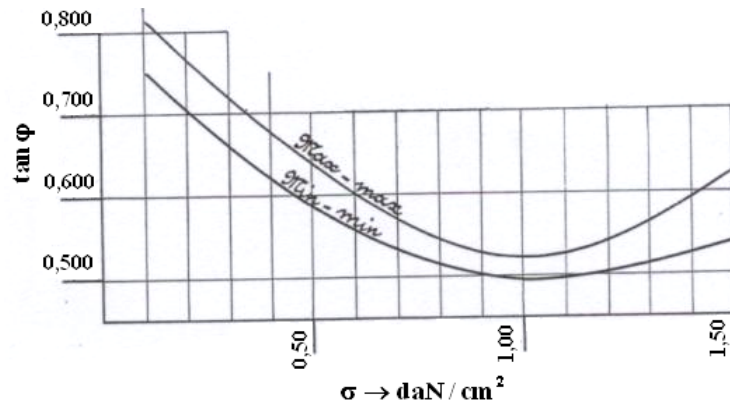
Normal Gerilme (σ)	tan ϕ maks	tan ϕ min	İçsel Sürtünme Açısı	
			maksimum	Minimum
0,1105	0,524-0,477	0,467-0,370	27° 30'–25° 30'	25° –20° 10'
0,233	0,617-0,530	0,493-0,401	31° 40'–27° 55'	26° 15'–21° 50'
0,648	0,645-0,608	0,528-0,475	32° 50'–31° 20'	27° 50'–25° 25'
0,861	0,651-0,608	0,528-0,487	33° 05'–31° 20'	27° 50'–26°

Çizelge 1.4. Bazı ayırık taneli malzemelere ilişkin cidar üzerindeki sürtünme açısı dağılımı

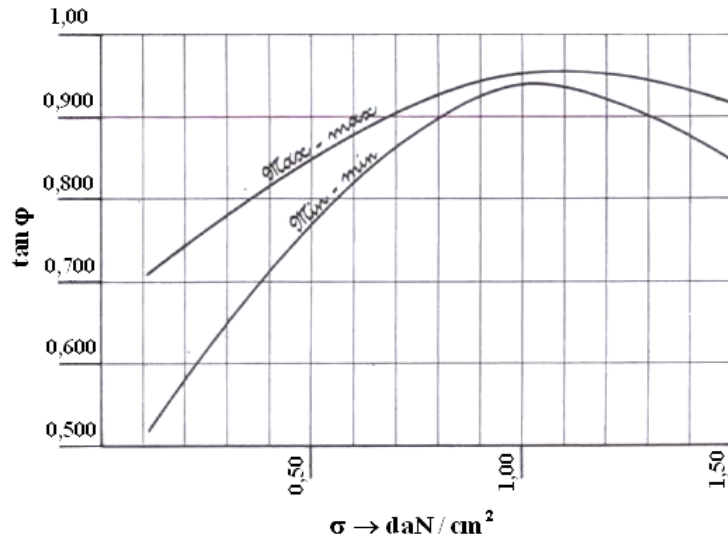
Malzeme	Cidar Türü	tan δ maks	tan δ min	Cidar üzerinde sürtünme açısı δ	
				maksimum	Minimum
Darı	Düz beton	0,542	0,486	28° 30'	25° 55'
	Pürüzlü beton	0,536	0,404	28° 10'	22°
	Düz sac	0,343	0,324	18° 55'	18°
	Pürüzlü sac	0,412	0,343	22° 20'	18° 55'
Kolza	Düz beton	0,355	0,327	19° 35'	18° 10'
	Pürüzlü beton	0,524	0,405	27° 40'	22°
	Düz sac	0,337	0,319	18° 40'	17° 40'
	Pürüzlü sac	0,302	0,291	16° 50'	16° 15'
Haşhaş	Düz beton	0,448	0,417	24° 10'	22° 40'
	Pürüzlü beton	0,723	0,642	35° 50'	32° 45'
	Düz sac	0,362	0,330	19° 55'	18° 15'
	Pürüzlü sac	0,474	0,374	25° 20'	20° 30'

Çizelge 1.5. Bazı ayırık taneli malzemelere ilişkin doğal şev açısı dağılımı

Malzeme	Doğal şev açısı (β)
Buğday	$25^{\circ} - 26^{\circ}$
Darı	$24^{\circ} 20' - 25^{\circ}$
Haşhaş	$29^{\circ} 30' - 30^{\circ}$
Öğütülmüş fosfat	$35^{\circ} - 35^{\circ} 40'$



(a) Buğday



(b) Öğütülmüş Fosfat

Şekil 1.2. Buğday ve öğütülmüş fosfat için içsel sürtünme katsayılarının uç değerleri (Reimbert, 1977).

Bir kısım teknik literatürde, stok malzemesinin birim ağırlık, içsel sürtünme açısı ve cidar üzerindeki sürtünme açısının uç değerleri en çok kullanılan malzemeler için Çizelge 1.6'da verilmektedir (Guerrin, 1969; Karaca 2000). Türkiye Silo Yönetmeliğinde (TS 6989, 1989) bu özellikler stoklanan her malzeme için sabit kabul edilmekte ve kullanılan yöntemler bu değerlerle işlem yapılması halinde geçerli olmaktadır. Daha sonra açıklanacak olan genel yaklaşımda ise pek çok malzeme için içsel sürtünme açısının $[\varphi(\sigma_a, \sigma_b)]$ hemen hemen sabit kaldığı, diğer bir deyişle basınç gerilmesinin (σ) geniş bir aralıkta değişimine karşılık φ açısında önemli bir değişiklik olmadığı ve malzemenin kuru olduğu kabul edilmektedir (bkz. Şekil 1.1).

Çizelge 1.6. En çok kullanılan bazı malzemelere ilişkin γ , φ ve δ dağılımları

Silolanan Malzeme	γ (daN/m ³)	φ	δ (Beton üzerinde)
Buğday	740/850	24/26	22/25
Pirinç	580/620	24/26	28/31
Arpa	520/700	25/28	22/25
Mısır	780/820	26/29	18/23
Yulaf	490/550	26/28	22/25
Hurma	800/900	32/35	23/25
Malt	530/600	21/23	18/24
Bezelye	800/880	21/26	20/24
Un	600/1100	25/40	30/40
Moloz taşı	1600/1850	40/45	30/40
Kuru kum	1500/1800	30/45	30/40
Çakıl	1700/1900	30/40	30/35
Çimento	1400/1500	30/40	27/30
Kok	400/450	35/40	25/35
Kömür	820/880	27/32	25/35
Antrasit	800/850	26/28	25/28
Kül	600/650	25/40	25/35
Fosfat	800/1400	35/45	30/40

1.3.3. Stok Malzemesi Etkileri

Gerçek stok yapılarının tasarımı, bunların doldurma ve boşaltma durumlarındaki davranışlarının bilinmesini gerektirmektedir. Bunun da malzemelerin stok yapısının elemanları üzerindeki mekanik, kimyasal, sıcaklık ve infilak etkilerinin dikkate alınması ile sağlanabileceği açıktır.

Aşağıdaki başlıklar altında söz konusu etkiler kısaca açıklanmaktadır.

1.3.3.1. Mekanik Etkiler

Daha önce de belirtilmeye çalışıldığı gibi stok yapılarının boyutlandırılmasına etki eden başlıca etmenler; stok malzemesinin birim ağırlığı (γ), içsel sürtünme açısı (φ) ve cidar üzerindeki sürtünme açısı (δ)'dır. Ancak bazı özel durumlarda anılan malzemelerde oluşan kohezyonun da (c) dikkate alınması gerekmektedir. Bu özelliklerin stok malzemelerinin tane çapına bağlı olduğu bilinmektedir. Teknik literatürde malzemeler tane çapına göre;

- (1) Tane çapı $< 0,1\text{mm}$ ise toz malzeme (Çimento, kül, tahıl unu vb.)
- (2) Tane çapı $< 30\text{mm}$ ise taneli malzeme (tahıl, kum, çakıl vb.)
- (3) Tane çapı $> 30\text{mm}$ ise parçalı malzeme (maden cevheri, kömür, kok, kalker vb.)

olarak üç sınıfa ayrılmaktadır (Blight 1986a; 1986b).

Toz halindeki stok malzemelerinde içsel sürtünmeyle birlikte bazen kohezyon da bulunmaktadır. Buna karşılık taneli ve parçalı malzemelerde sadece içsel sürtünme açısı mevcuttur. Ancak özel bir durum olarak taneli malzemelerde, 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 da boşaltma esnasında malzemenin akışkanlığını azaltacağından bu durum için önlem alınması gerektiği gibi, maden cevheri, çakıl vb. malzemelerin sertlikleri doldurma ve boşaltma sırasında cidarları aşındırmasına karşı da önlem alınması gerekmektedir.

1.3.3.2. Kimyasal Etkiler

Tuz, asit, yağ gibi birçok stok malzemesi yapıya zarar verdiğiinden, yapının bu etkilerden ya geçirimsizliğinin sağlanması ya da iç cidarlarının kaplanması yoluyla korunması gerekmektedir.

1.3.3.3. Sıcaklık Etkisi

Çimento gibi bazı malzemeler kimyasal işlemler sonucunda stok yapısına geldiklerinden, 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. Bu nedenlerle söz konusu yapıların tasarım ve kullanımlarında bu etkilerin de dikkate alınması kaçınılmaz olmaktadır.

1.3.3.4. İnfilak Etkisi

Un, şeker, kömür tozu gibi toz halindeki bazı malzemeler belirli bir oranda hava ile temas ettiklerinde bazen bir kıvılcım ile infilak edebilmektedirler. Bu riskin patlama boşlukları gibi birtakım önlemlerle olabildiğince azaltılması gerekmektedir.

1.4. Mekanik Tanımlar

1.4.1. Denge Durumları

Stok yapılarının tasarımında genellikle, birinci ve ikinci denge durumu olarak adlandırılan, iki denge durumu dikkate alınmaktadır.

Birinci denge durumu uzun zamandan beri doldurmadan sonra meydana gelen denge durumu ile karıştırılmakta, ikinci denge durumu ise benzer şekilde boşaltmanın başlangıcında meydana gelen denge durumuna benzetilmekteydi. Oysa gerçekte birinci denge durumu sadece bazı özel düzenli doldurmalarından sonra, ikinci denge durumu ise hem stok malzemesinin herhangi bir andaki durumunda, hem de boşaltma şekline bağlı

olarak meydana gelebilmektedir. Bu denge durumları arasında çeşitli özel (anormal) boşaltma durumlarına karşılık gelen denge durumlarının da tanımlanması gerekmektedir.

Türkiye Silo Yönetmeliğinde (TS 6989, 1989) birinci denge durumu teorik duruma karşılık gelen 01 ve 1 indisleriyle, ikinci denge durumu ise boşaltma şekillerine göre normal boşaltma yapan silolarda 02 ve 2, özel boşaltma yapan silolardan geometrik olarak özel boşaltma 3, mekanik olarak özel boşaltma 3', yapısal olarak özel boşaltma ise 1' indisleriyle gösterilmektedir. Boşaltma şekilleri hakkında ayrıntılı açıklamalar daha sonra paragraf 1.15'de yapılmaktadır.

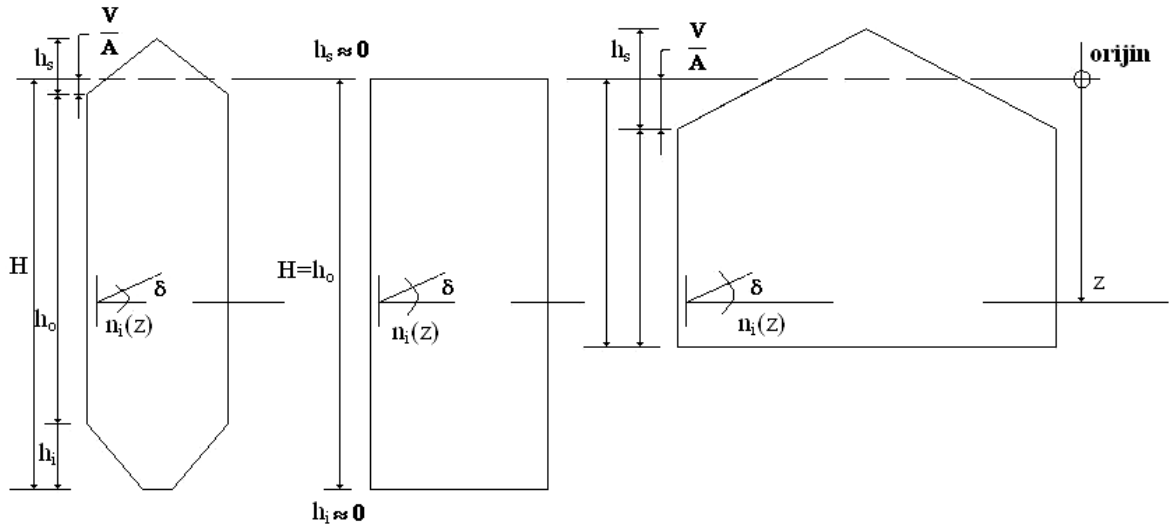
Burada denge durumlarının deneysel ve teorik incelemelere bağlı olarak tanımlandıkları belirtilmelidir.

Gerekli durumlarda bazı stok yapıları için daha farklı denge durumları dikkate alınabileceğinden, dikkate alınan denge durumunu gösteren "i" indis değerleri belirsiz bir indis olan "j" 'ye kadar devam etmektedir. Bu durumda $i \in \{01,1,02,2,3,3',1',\dots,j\}$ olmaktadır.

1.4.2. Uygulanacak Teoriler

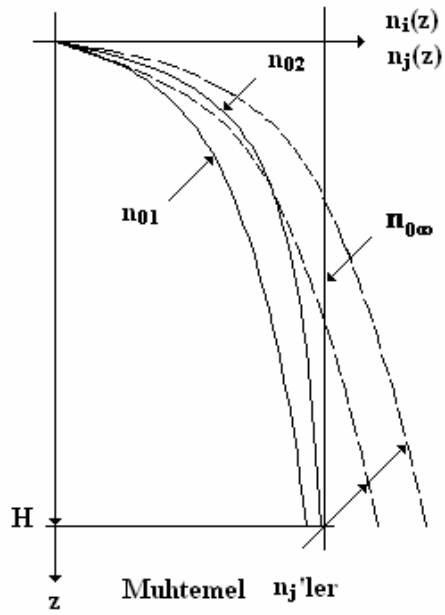
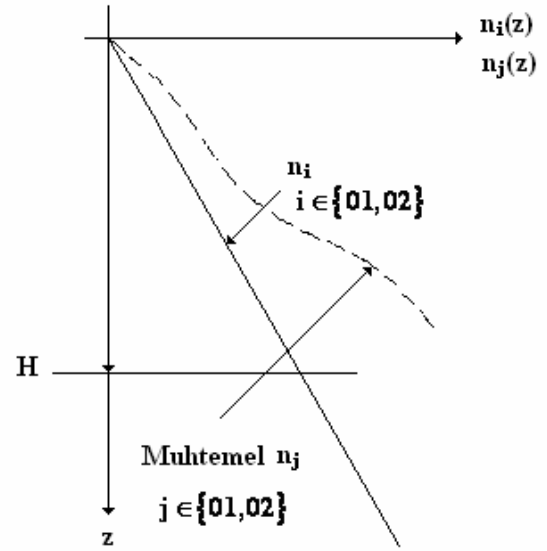
Referans düzleminden itibaren cidarın herhangi bir noktasının derinliği z ile gösterilmekte ve bunun değeri aşağı doğru pozitif olarak kabul edilmektedir. $n_i(z)$ kütlelerin düşey cidara uyguladığı basıncın yatay bileşeni olarak dikkate alınmaktadır.

Bu çalışmada stok yapılarına uygulanacak teoriler asimtot ve yarı doğrusal teori olmak üzere iki grupta toplanmaktadır. Öyle ki $n_i(z)$ eğrilerinden en az birinin bir asimtotunun bulunması, diğer $n_i(z)$ eğrilerinin ise üstten asimtotlu ya da asimtotsuz olarak sınırlandırılmış olması durumuna karşılık gelen teorilerin tümü "asimtot teorisi", $n_i(z)$ 'nin bir doğru, $i \in \{01,1\}$ için diğer $n_i(z)$ eğrilerinin belirsiz olması durumlarına karşılık gelen teori ise "yarı doğrusal teori" adlandırılmaktadır (Şekil 1.3).



(a) Silolar

(b) Geniş Silolar ve Ambarlar

(c) Silolar için
asimtot teorisi(d) Geniş silo ve ambarlar için
yarı doğrusal teori

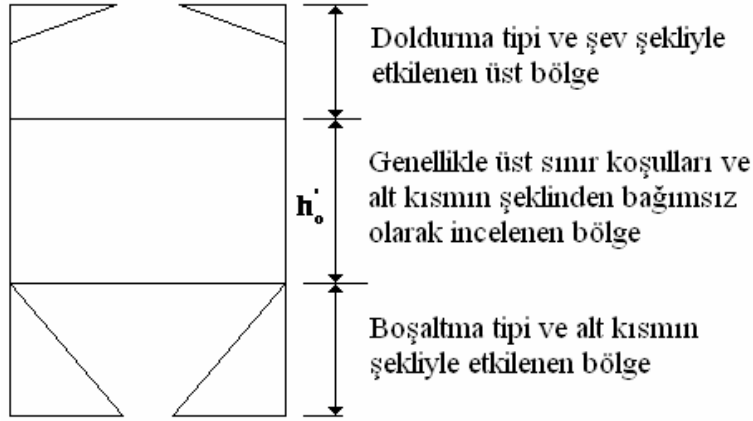
Şekil 1.3. Stok yapılarına ilişkin teorilerin şemalar yardımıyla tanımları

1.5. Gerçek Stok Yapılarının Tanım Alanları

1.5.1. Silolar

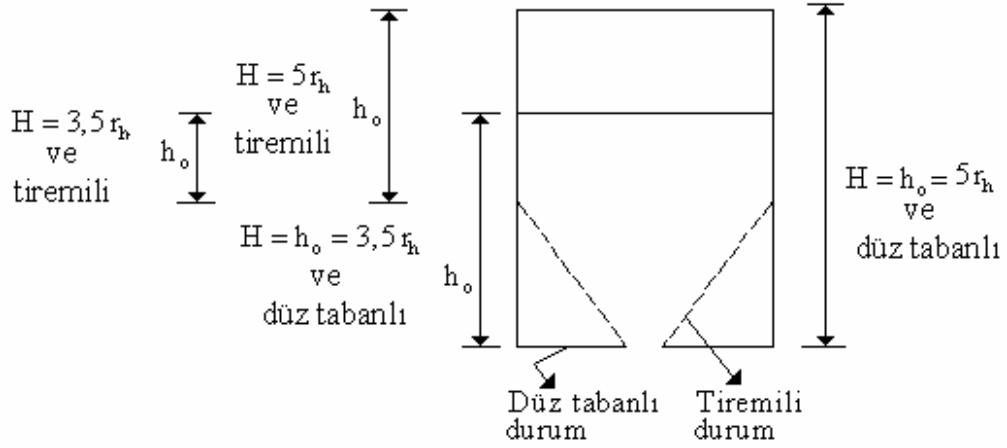
Bu çalışmada mekanik olarak, asimtot teorilerinin uygulanabileceği tüm stok yapılarına “silo” ya da “narin silo” adı verilmektedir. Çalışmanın bundan sonraki kısmında bu stok yapıları sadece silo adıyla anılmaktadır.

Geometrik olarak ise, mekanik tanım dikkate alınarak birçok bilim adamı, 1800’lü yıllardan günümüze kadar taneli malzemeleri içeren birebir ölçekli silolar ve bunların modelleri üzerinde gerçekleştirilen deneylerden elde edilen bulguların irdelenip değerlendirilmesine göre birbirinden farklı geometrik sınırlar belirtmişlerdir (Janssen, 1895; Despeyroux, 1958; Caquot ve Kerisel, 1966; Lumbroso 1970). Günümüzde kabul gören sınırlar daha öncede belirtildiği gibi Çizelge 1.1’de verilmektedir. Bu sınırların belirtilmesinde H/r_h itibari narinlik oranının yeterli derecede büyük olması durumunda alt ve üst sınır koşullarının oluşturduğu iki bölgeden başka yüksekliği h'_0 olan bir orta bölge oluşması da dikkate alınmaktadır (Şekil 1.4).



Şekil 1.4. İtibari narinlik oranının yeterli derecede büyük olması durumunda bir siloda denge bölgelerinin şematik gösterilimi

İtibari narinliğin sınır değerlerinin şematik gösterilimi Şekil 1.5’de verilmektedir.



Şekil 1.5. İtibari narinlik oranları (H/r_h) 3,5 ve 5 olan siloların tanım alanlarının şematik gösterilimi

Burada hidrolik yarıçapa (r_h) bir üst sınırın Fransız Silo Yönetmeliği’nde konulduğu belirtilmelidir (SNBATI, 1975).

1.5.2. Geniş Silolar

Mekanik olarak, güncel deney sonuçlarına göre birinci denge koşulu doğrusal, ikincisi belirsiz olan, diğer bir deyişle yarı doğrusal teoremin (bkz. Şekil 1.3) geçerli olduğu, kütleleri içeren stok yapılarına ‘geniş silo’adı verilmektedir. Mekanik tanım uyarınca bu yapıların deneysel olarak belirlenen geometrik sınırları ise Çizelge 1.1’de verilmektedir.

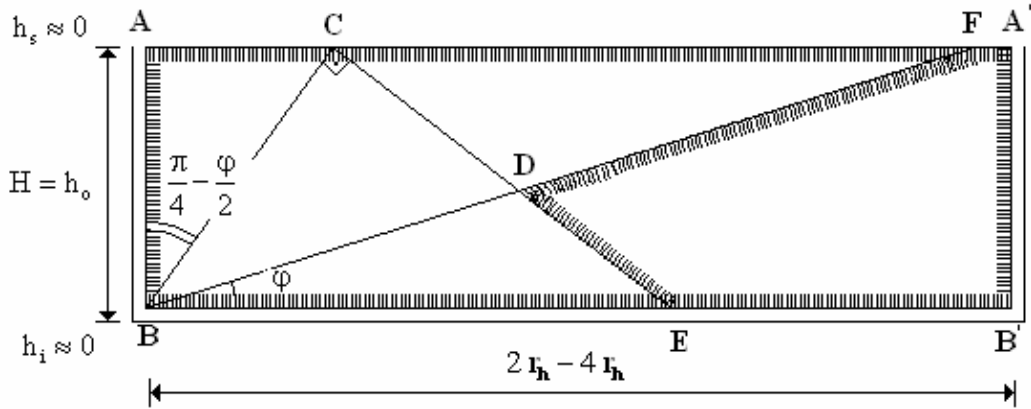
1.5.3. Tiremi Şeklindeki Silolar

Kütlenin sınır denge koşullarının belirlenmesi bakımından tireminin kesik koni ya da kesik piramit şeklinde olması mekanik tanım için önemli olmaktadır.

Geometrik olarak bu yapıları h_o/H için 0,3’ten 0,5’e kadar değişen bir üst sınır ve h_1/r_h , H/r_h için bir alt sınırla karakterize edilmektedir (bkz. Çizelge 1.1).

1.5.4. Stok Ambarları

Bu yapıların içerdği kütleler mekanik olarak yarı doğru teorisini sağladığından, bu da geometrik olarak bir taraftan $h_i \approx 0$, $h_s \approx 0$ ve $h_o/H \geq 0,6$ olmasını, diğer taraftan H/r_h narinlik oranının da 0,5'ten 1,5'a kadar değişen sınırlarının bulunmasını gerektirmektedir (Şekil 1.6). Zira bu yapılarda karşılıklı düşey cidarlardan biri diğerine göre ihmal edilerek bu durumda kütle, her bir cidarın ucunda, yarı sonsuz dikkate alınabileceğinden cidarları istinat duvarı gibi hesaplamak mümkün olmaktadır (Lumbroso 1977; Reimbert 1977).



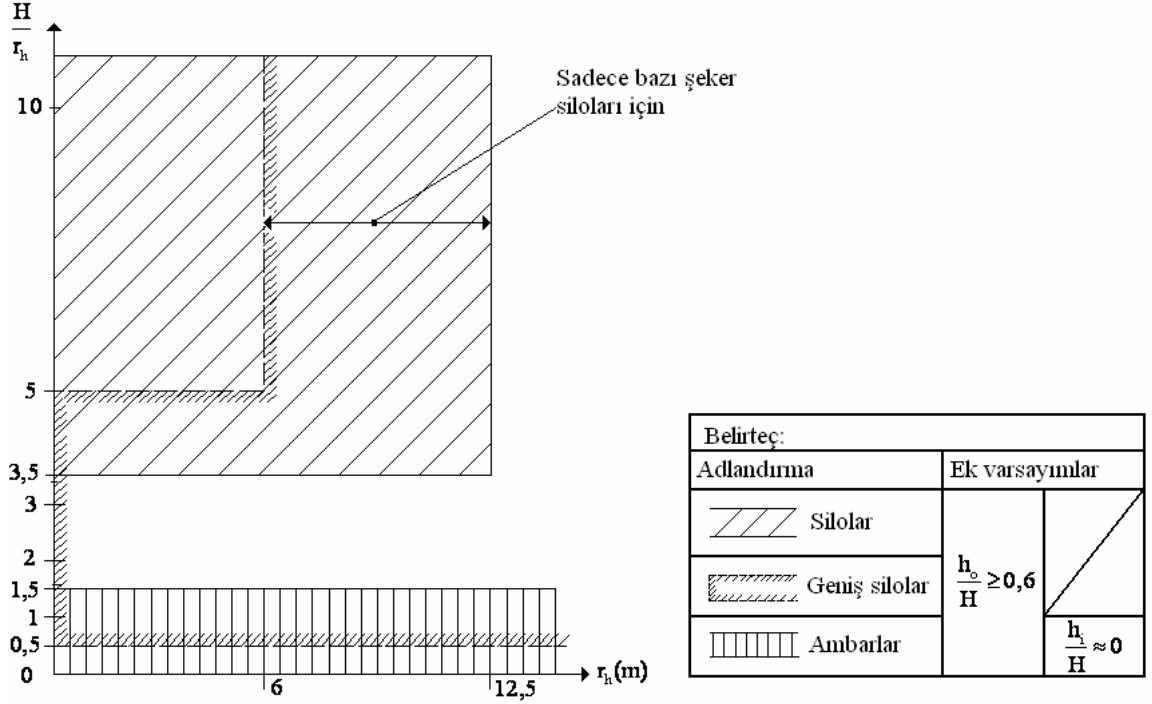
Şekil 1.6. Kısa kenara paralel stok ambarı enkesiti üzerinde H/r_h 'in üst sınırının mekanik olarak doğrulanması

1.5.5. Stok Halleri

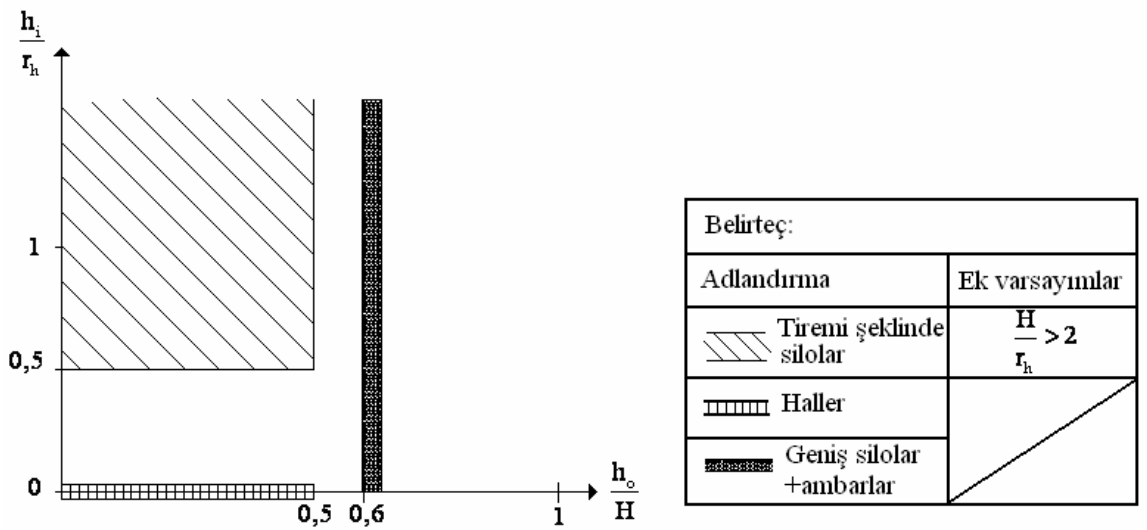
Bu yapılarda kütle altta düz bir taban, düşey cidarlarda küçük bir yükseklik ve üstte iki şev oluşturduğundan bunlar $h_i/H=0$ ve $h_o/H < 0,3-0,5$ ifadelerini sağlayan yapılar olarak tanımlanmaktadır (bkz. Çizelge 1.1). Bunlarda başlıca denge probleminin tabandaki basınç dağılımı olduğu açıktır.

1.5.6. Gerçek Stok Yapılarının Tanım Alanlarının Şematik Olarak Gösterilmesi

Bu gösterimler aşağıda Şekil 1.7 ve Şekil 1.8'de verilmektedir.



Şekil 1.7. $h_o/H \geq 0,6$ koşulunu sağlayan üç sınıf stok yapısından her birinin maksimum tanım alanının şematik gösterimi



Şekil 1.8. Tiremi şeklinde silolar, haller ve geniş silolar+ambarlar için maksimum tanım alanlarının şematik gösterimi

1.6. Özel Stok Yapıları ve Bunların Gerçek Stok Yapılarından Farkı

Daha önce de belirtilmeye çalışıldığı gibi bazı bayındırlık yapıları sonlu dolgu kütlelerini içermektedir. Bunlara birkaç örnek Çizelge 1.7'deki şekillerde verilmektedir.

Bu tür yapıların her birine asimtot teorisi ya da yarı doğrusal teorinin uygulanıp uygulanamayacağına stok yapıları için verilen sınırların dikkate alınmasıyla karar verilmesi gerektiği açıktır. Bunlarda artık tiremi olmadığı gibi altta özel bir boşaltma bölgesi oluşturan özellikli bir düzenek de bulunmamaktadır. Diğer taraftan dolgu malzemesi de denge üzerinde gerçek stok yapılarındaki gibi etkili olmamaktadır.

İki sınıf stok yapısı arasındaki başlıca fark birinci sınıflandırma ölçütünden çıkartılabilmektedir:

- (1) Sonradan kullanılacak tahıl gibi ürünleri içeren stok yapıları durumunda yapılar hizmet süreleri boyunca bir taraftan sıfırdan maksimuma kadar periyodik olarak değişen etkilere maruzdurlar. Diğer taraftan bunlarda malzemenin boşaltılması dengeyi bozan bir durum yaratmaktadır. Bu da malzemenin boşaltılmasında özel bir önlem almayı gerektirmektedir.
- (2) Sonlu dolgu kütlelerini içeren stok yapılarında yukarıda sözü edilen etkiler pratik olarak değişmemektedir. Zira kütle sürekli bayındırlık yapısının tamamlayan bir kısmı olduğundan denge üzerinde etkili olmamaktadır.

Durum böyle olunca yeraltı boruları gibi bazı sonlu dolgu kütlelerini içeren bayındırlık yapılarında, stok yapılarına ilişkin ikinci denge durumunun dikkate alınması gerekmemektedir. Bu gibi, silolarla çok alakasız gibi görülebilen fakat aslında oldukça yakından ilgili olan, yapıların çözümünde silolar için uygulanan Janssen yöntemi kullanılabilir (Blight, 2005).

Çizelge 1.7. Sonlu dolgu kütlelerini içeren bazı özel stok yapılarının tanımı

Eleman Adı	Şematik Örnek Boykesitler	Yapı Tanımı	Boyut Tanımı
Yeraltı borusu		Yerine dilimler halinde yerleştirilip daha sonra dolguyla kapatılan prefabrike boru	$r_h \geq 0,5 r_h - 0,8 r_h$ $h \geq 1 - 2 r_h$
Dolgu palplanşlı batardo hücresi (Gabyon)		Dolgu, sadece çekmeye çalışan, palplanşlı, hücreli batardo. Plandaki şekli;	Genellikle; $h > 10$ m
Palplanşlı dalga kıran (Musuar)		Dolgu, eğilmeye karşı dayanıklı, palplanşlı, dalga kıran. Plandaki şekli;	Genellikle; $h > 6$ m

Belirteç:	
	Mevcut zemin
	Dolgu kütlesi

1.7. Gerçek Stok Yapılarını Karakterize Eden Bazı Parametreler

1.7.1. Hidrolik Yarıçap

Hidrolik yarıçap stok yapısının enkesit şekline bağlı olan ve enkesiti karakterize eden temel bir parametredir. Bu parametre; A enkesit alanını, U bu kesitin çevre uzunluğunu göstermek üzere, $r_h = A/U$ şeklinde ifade edilmektedir.

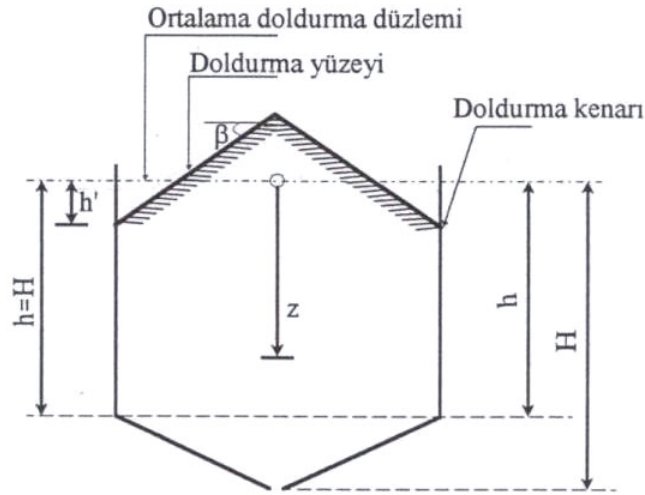
Bazı enkesitler için hidrolik yarıçap ifadeleri aşağıdaki Çizelge 1.8’de verilmektedir.

Çizelge 1.8. Gerçek stok yapılarının enkesit şekline göre hidrolik yarıçap ifadeleri

Enkesit Şekli	Hidrolik Yarıçap
Daire kesitler (r, dairenin yarıçapı)	$r_h = \frac{r}{2}$
Çokgen kesitler (r, çokgenin içine çizilebilen en büyük dairenin yarıçapı)	$r_h = \frac{r}{2}$
Dikdörtgen kesitler (a ve b dikdörtgenin kenar uzunlukları)	$r_h = \frac{a \cdot b}{2(a + b)}$
Merkezleri aynı olan iki daire arasındaki kesit (r' küçük dairenin, r büyük dairenin yarıçapı)	$r_h = \frac{r - r'}{2}$

1.7.2. Doldurma Yüzeyi

Stok malzemesinin hacmini üstten sınırlayan yüzey ‘‘doldurma yüzeyi’’ olarak adlandırılmaktadır. Bu yüzey doldurma kenarı adı verilen bir çizgi boyunca stok yapısı cidarıyla ve ortalama doldurma düzlemi diye adlandırılan yatay bir düzlemlle sınırlanmaktadır (Şekil 1.9).



Şekil 1.9. Gerçek stok yapılarında doldurma yüzeyi, doldurma kenarı ve ortalama doldurma düzlemi tanımları

Ortalama doldurma düzlemi, z derinlik ordinatının orijini olarak dikkate alınmaktadır. Doldurma yüzeyleri çoğu kez, dönel bir koni, düzgün bir piramit ya da bir kum yığını şeklinde olup yatay düzlemle β açısı yapmaktadır. Doldurma kenarının, ortalama doldurma düzlemine olan dik uzaklığı genellikle h' ile gösterilmekte ve bu uzaklığın ifadeleri Çizelge 1.9'da verilmektedir.

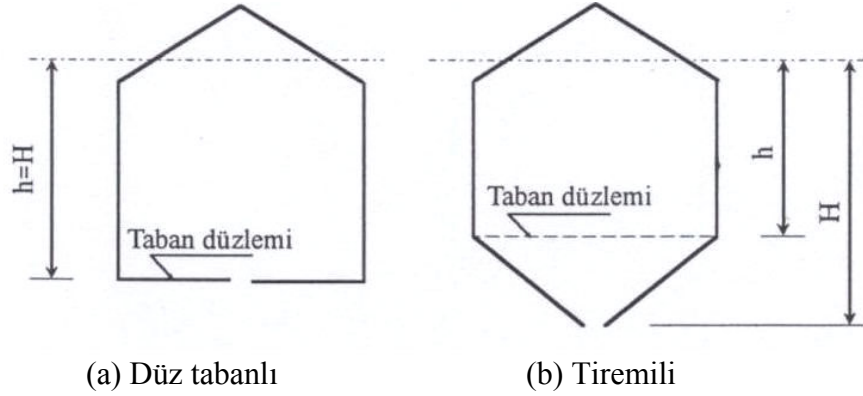
Çizelge 1.9. Gerçek stok yapılarında enkesit şekline göre h' ifadeleri

Enkesit Şekli	h'
Düzgün çokgen ya da daire kesitler	$h' = \frac{2}{3} \cdot r_h \cdot \tan \beta$
Dikdörtgen kesitler ($b > a$ olması durumunda)	$h' = \frac{a}{12} \cdot \left(3 - \frac{a}{b} \right) \cdot \tan \beta$

1.7.3. Taban Düzlemi

Stok yapısının düşey cidarlarının tiremi ile birleştiği yatay düzleme taban düzlemi adı verilmekte olup, düz tabanlı stok yapılarında bu düzlem yapının tabanından geçen yatay bir

kesitten (Şekil 1.10a), tiremili stok yapılarında ise tiremi başlangıcından geçen yatay bir kesitten ibarettir (Şekil 1.10b), (TS6989, 1989).

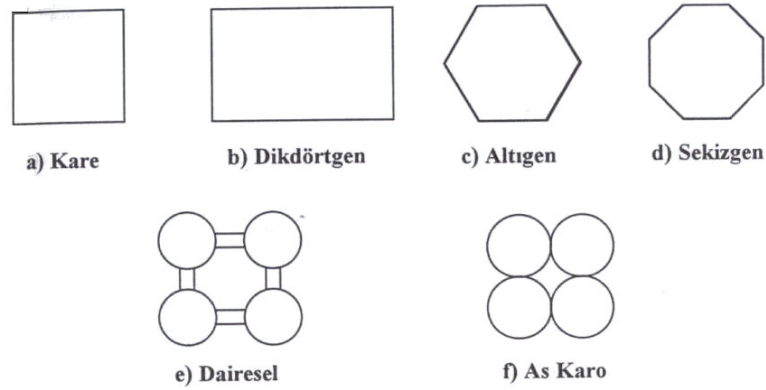


Şekil 1.10. Düz tabanlı ve tiremili silolarda taban düzlemi tanımları

1.8. Siloların Sınıflandırılması

1.8.1. Enkesit Şekillerine Göre

Siloların enkesit şekillerine göre sınıflandırılması Şekil 1.11’de verilmektedir.



Şekil 1.11. Enkesit şekillerine göre silolar

Kare ve dikdörtgen kesitli silolar belirli bir yer üzerinde arsa kaybı olmaksızın maksimum kapasiteyle inşa edilebilmektedir. Bu siloların taşıyıcı kolonlarının hesap ve yapımı kolay olmasına rağmen cidarlarının moment etkisinde kalması nedeniyle inşaat maliyetleri silindirik silolara göre genellikle daha yüksek olmaktadır.

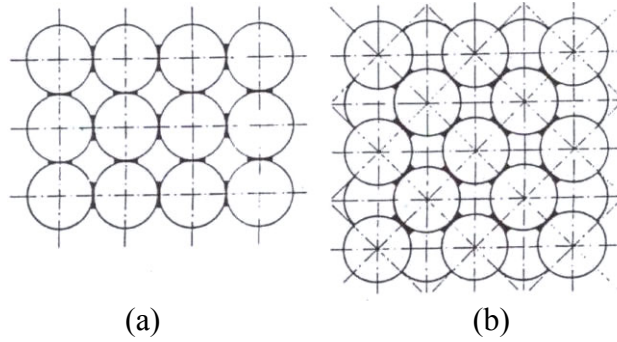
Silindirik silolar arsa kaybına sebep olmalarına karşın, çekme kuvvetleri ile zorlanmaları ve eğilme momentinin ihmal edilebilecek düzeyde olmasından dolayı, bunların toplam maliyetleri kare ve dikdörtgen kesitli silolarınkinden genellikle daha azdır. Cidar kalınlıkları da kare ve dikdörtgen kesitlilere göre daha küçük seçilebilmektedir.

Enkesitleri altıgen ve sekizgen olan silolar her bakımdan bu iki tip silonun arasında yer almaktadır.

Askaro kesitli olanlar ise arsanın çok iyi bir şekilde kullanılmasına imkan verebilseler bile, hesaplarının zor ve yorucu olmasından dolayı maliyetleri yine oldukça yüksek olmaktadır (Albiges ve Lumbroso, 1964).

Silolar tekil olarak oluşturulabildikleri gibi çok hücreli olarak da inşa edilebilmektedirler. Çok gözlü siloların yerleştirilmesinde alan, teknolojik donanım, kapasite, seçilen yapı elemanları, statik ve konstrüktif özellikler gibi etmenler etkili olmaktadır.

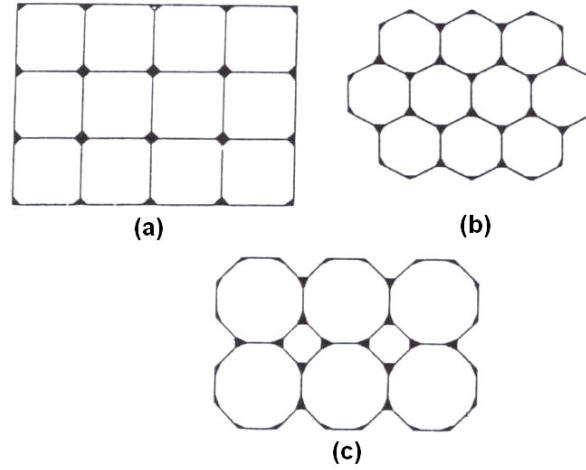
Dairesel kesitli silolar Şekil 1.12a'daki gibi yan yana birbirlerine değecek şekilde düzenlenebildikleri gibi Şekil 1.12b'deki gibi dama taşı şeklinde de inşa edilebilmektedirler. (a) ve (b) tipindeki silolarda birbirlerini etkileyerek eğilme momenti oluşturmamaları için hücreler bağımsız yapılmakta ve aralarına derz konulmaktadır. Bu nedenle esas hücrelerin arasında kalan ikincil hücrelerin kullanılmaması tercih edilmektedir.



Şekil 1.12. Silindirik silo gruplarının oluşturulmasına ilişkin örnekler

Dikdörtgen ya da poligon enkesitli silolarda hücreler birbirine değmekte ve ayrıık şekiller gerek statik gerekse malzeme açısından tercih edilmemektedir.

Düzgün çokgenlerle oluşturulan silolarda kenar sayısı arttıkça kesit daireye yaklaşmakta ve eğilme etkisi küçülmektedir. Sekizgen hücreli siloların arasında oluşan kare hücreler kaldırma aletlerini yerleştirmek için kullanılabileceği gibi depolama vazifesi de görebilirler (Şekil 1.13).



Şekil 1.13. Dörtgen ve çokgen kesitli silo gruplarının oluşturulmasına ilişkin örnekler

1.8.2. Yapımlarında Kullanılan Malzemeye Göre

Silolar ahşap, çelik, betonarme ve öngerilmeli beton olarak inşa edilebilmektedir (Şekil 1.14). Ahşap silo yapımı günümüzde pek tercih edilmemekle beraber, küçük hacimli silolar çelik, orta ve büyük hacimli silolar ise betonarme olarak inşa edilmektedir. Betonarmenin ve öngerilmeli beton tekniğinin gelişmesi ile bugün betonarme siloların sayısı gittikçe artmaktadır. Çelik silolarda cidarların ince kesitli olması nedeniyle basınç gerilmeleri altında burkulma sorunu ortaya çıkmakta ve bu nedenle genellikle eğilme etkisinin az olduğu dairesel kesitli siloların inşasında kullanımları tercih edilmektedir. Betonarmenin daha az bakım masrafı gerektirmesi ve burkulmaya karşı daha emniyetli olması, diğer taraftan silolanan malzeme yönünden çeliğe göre çeşitli üstünlüklerinin bulunması tercih edilmelerinin etmenlerini teşkil etmektedir (Noberhaus, 1965; Ciesielski vd., 1967).



(a) Ahşap silo



(b) Çelik Silo

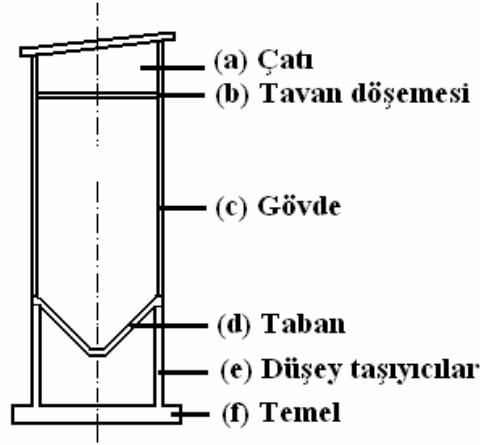


(c) Betonarme Silo

Şekil 1.14. Yapımlarında kullanılan malzemeye göre ahşap, çelik ve betonarme silo örnekleri (URL-1, 2007; URL-2, 2007; URL-3, 2007).

1.9. Siloların Kısımları

Bir silo çatı, tavan döşemesi, gövde, taban, düşey taşıyıcılar ve temel olmak üzere genellikle altı kısımdan meydana gelmektedir (Şekil 1.15).



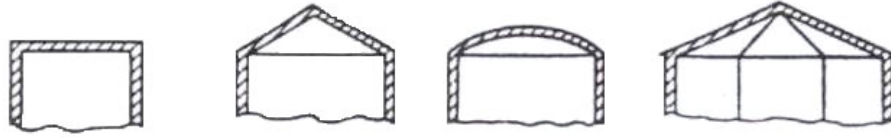
Şekil 1.15. Silo kısımları

(a) Çatı

Silo hücrelerinin doldurulması genellikle üstten yapılmaktadır. Silolanacak malzemenin silolara iletimi sırasında atmosfer koşullarından korunması amacıyla tavan döşemesi üzerinde bir çatı yekpare ya da prefabrike olarak teşkil edilmektedir. Çatının yekpare olarak inşa edilmesi durumunda cidarlar ile rijit bağlantılı olduğundan bu, siloya hacimsel

bir rijitlik sağlamaktadır. Bu durum derzlerle ayrılmamış silolarda ve oturmaların farklı olmasına izin vermeyen zeminlerde önem kazanmaktadır.

Bu çatılar dairesel, çokgen, düz plak, konik kabuk ve kubbe şeklinde yapılabileceği gibi daha kompleks şekillerde de yapılabilmektedir.



Şekil 1.16. Siloların çatı şekillerine örnekler

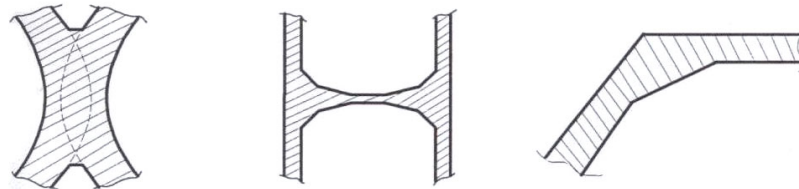
(b) Tavan döşemesi

Silo tavan döşemesi olarak 6m açıklıklara kadar, ortasında bir doldurma boşluğu bulunan betonarme plak yeterli olmaktadır. Bu doldurma boşluğu etrafında döşeme kalınlaştırılmakta ya da donatı arttırılmaktadır. Daha büyük açıklıklar için ise dişli ya da kaset döşeme yapımı gerekmektedir (Uğural, 1987).

(c) Gövde (cidarlar)

Stok malzemesinin etrafını saran ve destekleyen düşey silindirik kabuk ya da plaklardan oluşmaktadır. Geniş silindirik silolarda cidar kalınlığı genellikle sabit, narin silindirik silolarda ise değişken olarak yapılmaktadır (Çetmeli, 1970).

Askaro şeklindeki silo hücreleri birleşim yerlerinde guseler ihtiva etmektedirler (Şekil 1.17a). Bu guseler enkesiti sekizgen olan silolarda çift eğimli (Şekil 1.17b) ya da tek eğimli (Şekil 1.17c) olabilmektedir.



Şekil 1.17. Silo cidarlarında kullanılan guselere ilişkin şematik örnekler

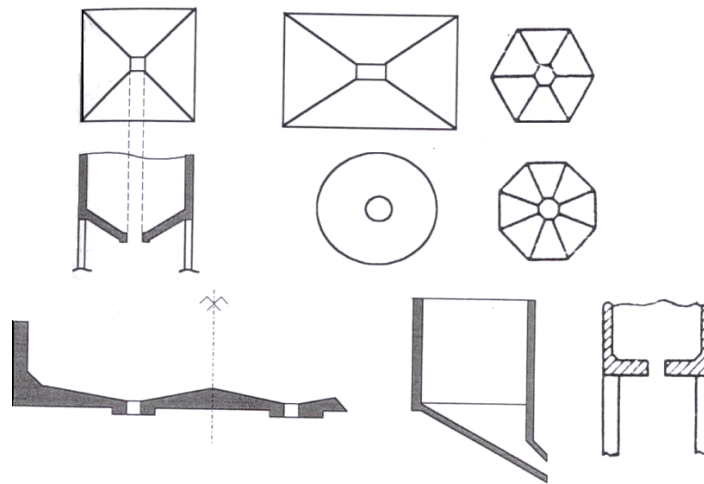
Enkesitleri kare, dikdörtgen ya da çokgen şeklinde olan silolar karma sistem olarak da yapılabilmektedirler. Bu tür silolar bir taraftan yerinde dökülmüş kolonlardan diğer taraftan yatay korniyer şeklindeki prefabrike elemanların meydana getirdiği kırıklı cidarlardan da oluşturulabilmektedirler.

Dairesel enkesitli silolarda gövdede çember doğrultusunda çekme gerilmeleri oluşmakta ve bu gerilmeler donatıyla karşılanmaktadır. Çokgen enkesitli silolarda ise bileşik eğilme söz konusu olup, bu durumda donatı buna göre hesaplanmalıdır.

Silo gövdesinde su yalıtımı için silikon reçineli suya dayanıklı boyalar kullanıldığı bilinmektedir (Guerrin, 1969).

(d) Taban

Silo tabanı düz bir plak ya da genellikle tiremi (huni, meme) olarak inşa edilmektedir. Tiremi yapılmadığı hallerde ise döşeme üzerine eğimli dolgu beton yapılmaktadır. Silo hücrelerinin boşaltılmasını sağlayan tiremiler, hacimsel şekilleri silo gövdelerinin şekline adapte edilmek üzere, malzeme alma boşluğu ya da boşluklarını içeren, prizmatik bir huni ya da kesik koni şeklinde bir elemandır. Bunlar simetrik veya antisimetrik olarak yapılabilmektedirler. Tireminin eğimi stok malzemesinin sürtünme durumuna ve akış özelliklerine bağlı olmaktadır. Düz plak şeklindeki silo tabanları ise kesit boyutlarına göre dişli ya da kaset döşeme olarak inşa edilmektedir.

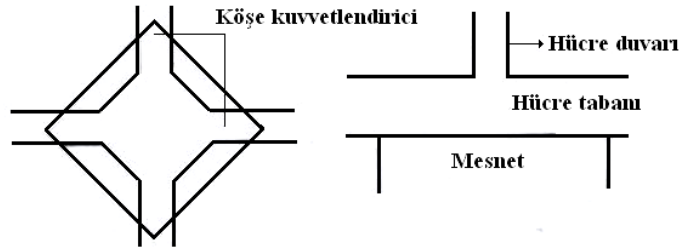


Şekil 1.18. Siloların taban şekillerine örnekler

Silo tabanları ya silo cidarlarına asılmakta ya da kolonlara oturtularak silo cidarlarıyla aynı temele taşıtılabileceği gibi farklı temele de taşıtılabilmektedirler (Ayazoğlu, 1987; Kıvrak, 1987; Kumbasar, 1992).

(e) Düşey Taşıyıcılar

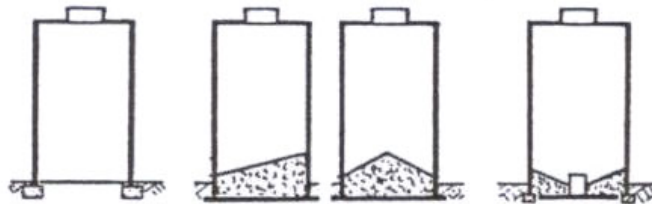
Silo cidarları tiremilerle beraber ya da ayrı olarak kolonlara ya da perde duvarlara oturmaktadırlar (Şekil 1.21). Aşağıdaki Şekil 1.19'da hücre cidarının bir bölümünden zemin kattaki mesnete geçiş görülmektedir. Burada cidar doğrultusunda gelen yüklerin daha iyi karşılanması için levha 45° döndürülmektedir (Turan, 1986).



Şekil 1.19. Silolarda düşey taşıyıcı kesitlerine ilişkin şematik örnek

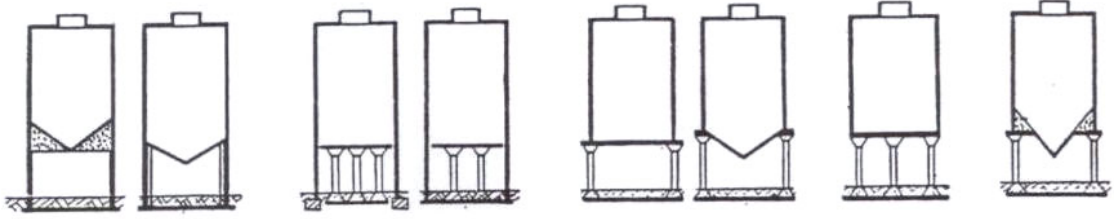
Silo düşey taşıyıcılarının seçiminde malzemenin alınışı önemli rol oynamaktadır. Bu elemanlar inşaatın öz ağırlığı ile silolanan malzemenin ağırlığından kaynaklanan düşey ve rüzgar ile depremden doğan yatay yüklerin etkisinde kalmaktadırlar. Ayak adedi ve boyutları bu yüklere göre seçilmektedir.

Cidarları temele oturmuş ender olarak inşa edilen bir silo tipi Şekil 1.20'de verilmektedir. Bu tip silolarda malzemenin alınışı zorlaştığından bu işlem yan duvarlardaki ağızlardan doğrudan ya da pünomatik şekilde gerçekleştirilmektedir.



Şekil 1.20. Cidarları temele oturan silolara ilişkin şematik örnekler

Genellikle silo hücresinin altında bir hacim teşkil edilmekte ve gövde bu hacmin duvarlarına ya da betonarme kolonlar üzerine mesnetlenmekte ve bu hacim malzeme alınması amacıyla kullanılmaktadır (Şekil 1.21).



Şekil 1.21. Hücre altında hacim bulunan silo kesitleri

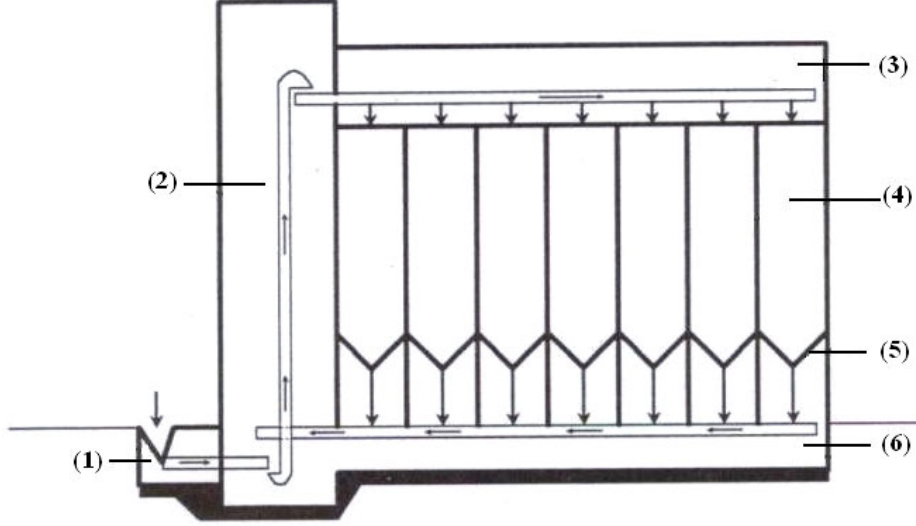
(f) Temeller

Temel alanları küçük olan yüksek silolarda hareketli yükler, doldurma ve boşaltmaya bağlı olarak değişik şekilde dağılan zemin basınçları oluşturmaktadır. Bu nedenle oturmalarından dolayı üst yapıda çatlakların oluşmaması için özellikle bu temellere önem verilmesi gerekmektedir. Temel türünün seçiminin kolon sayısı ve zemin taşıma gücüne bağlı olduğu bilinmektedir.

Zemin koşullarının iyi olması durumunda düşey taşıyıcıların altına tekil temel teşkilinin en uygun ve ekonomik olduğu da bir gerçektir. Ancak silo gruplarının altına betonarme sürekli temeller ve çoğu kez de zemin alanının sınırlı olması nedeniyle kirişli ya da kirişsiz betonarme radye temeller gerekli olmaktadır. Radye temellerin de yeterli olmadığı durumlarda ise sağlam zemin tabakalarının derinde olması durumunda kazıklı temellerin en uygun çözüm olduğu da bilinmektedir.

1.10. Siloların İşletme Tesisleri

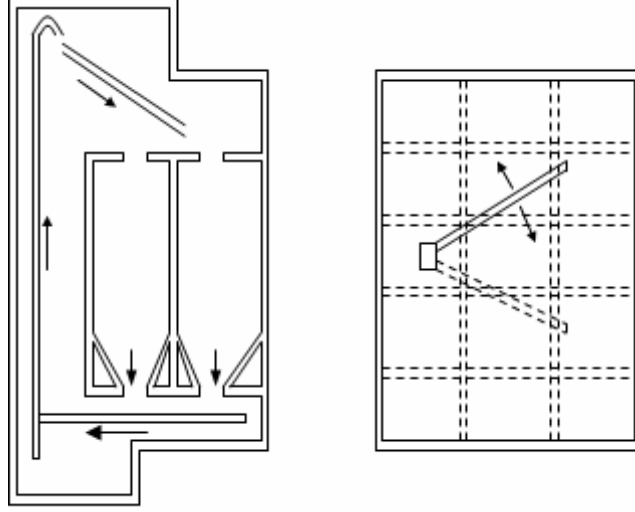
Siloların işletilmesine ilişkin tipik bir kesit Şekil 1.22’de verilmektedir. Bu şekildeki her bir kısmın görevleri aşağıda özetlenmektedir.



Şekil 1.22. Siloların işletilmesine ilişkin tipik bir kesit

- (1) Kabul kuyusu olarak adlandırılan, silolanacak malzemenin ilk gelişte döküldüğü ve silolanacak malzemenin belirli zaman aralıkları ile havalandırılması gerektiğinde geçici olarak bekletildiği kısımdır.
- (2) Elevatörlü işletme kuyusu olarak adlandırılan, silolanacak malzemenin silo hücrelerine iletilmek üzere silo üst seviyesine çıkarılmasını sağlayan kısımdır. Bu kısımdaki elevatör mekanik veya pünomatik olabilmektedir.
- (3) Yatay dağıtım tavan katı olarak adlandırılan, malzemeyi yatay doğrultuda istenilen noktaya iletmek amacıyla yatay bir doldurma bandı bulunduran kısımdır.
- (4) Silo hücresi olarak adlandırılan, malzemenin sürekli olarak stok edildiği kısımdır.
- (5) Tiremi olarak adlandırılan, boşaltmayı sağlayan kısımdır.
- (6) Yatay boşaltım zemin katı olarak adlandırılan, tiremlerden boşalan malzemenin taşıma aracına ya da havalandırma amacıyla kabul kuyusuna iletilmesini sağlayan bir boşaltma bandı bulunduran kısımdır.

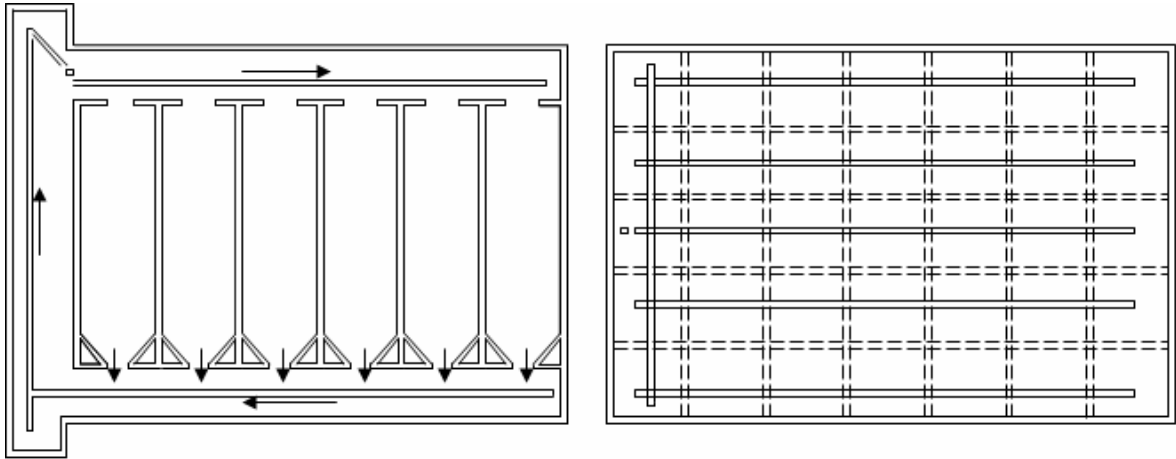
Aşağıdaki Şekil 1.23 ve Şekil 1.24’de farklı işletme tesislerine sahip silolara ilişkin şematik boy ve enkesitler verilmektedir.



(a) Boykesit

(b) Enkesit

Şekil 1.23. Malzemenin düşey bir eksen etrafında dönen boru sarkaç vasıtasıyla elevatörden alınarak hücrelere aktarıldığı silo örneği



(a) Boykesit

(b) Enkesit

Şekil 1.24. Her sıra için bir dağıtım bandı ile donatılmış ve elevatörlerden hücre sıralarına enine malzeme dağıtımını gerçekleştirmek için ilave bir taşıma şeridi bulunduran bir silo örneği

1.11. Silolarda Aranılan Başlıca Özellikler

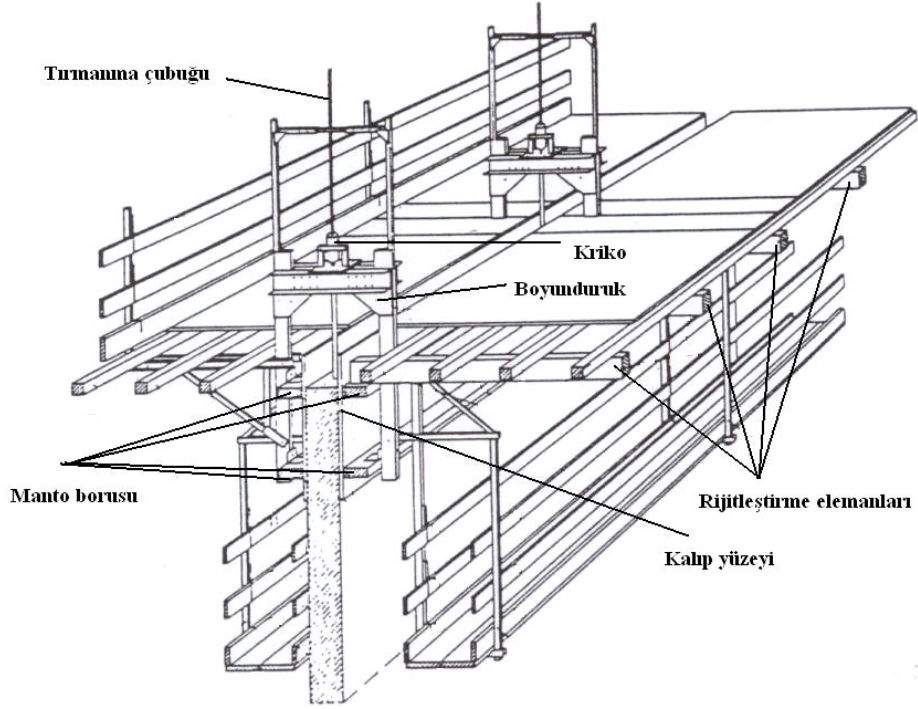
Silolarda aranılan başlıca özellikler aşağıda özetlenmektedir.

- ✓ Giriş ve çıkış kapasiteleri yeterli olmalı,
- ✓ Malzeme giriş ve çıkışlarında tartım yapabilecek basküllere sahip olmalı,
- ✓ Malzemeye istenen özellikleri kazandıracak temizleme ve eleme sistemlerine sahip olmalı,
- ✓ Nemi yüksek malzemeyi girişte kurutabilecek sağlayabilecek tertibat bulunmalı,
- ✓ Toz patlamasını önleyecek kapasitede havalandırma sistemleri bulunmalı,
- ✓ Her türlü araca yükleme yapabilecek çıkışları bulunmalı,
- ✓ Liman silolarında malzemeyi gemiye yüklerken istifleme yapabilecek yerleştirme aygıtlarına sahip olmalı,
- ✓ Dampersiz kamyon boşaltmaya elverişli kamyon kaldırma aygıtı bulunmalı,
- ✓ Periyodik bakım süresince faaliyetini durdurmayacak tertibata sahip olmalı,
- ✓ Hücrelerde sıcaklık, rutubet ve malzeme seviyelerini ölçen aygıtlar bulunmalıdır.

1.12. Siloların İnşası

Daha önce de belirtilmeye çalışıldığı gibi silolar yekpare ve prefabrike olarak inşa edilebilmektedirler. Yüksekliği 10m'yi geçmeyen stok yapılarında geleneksel kalıplama ile beton dökümü yapılabilen, yüksekliği 10m'yi geçenlerde ise kayar kalıp ya da tırmanır kalıp kullanılması hem yapım hızı hem de inşaat maliyeti yönünden gerekli olmaktadır. Bunlardan kayar kalıpların silo yapımında daha yaygın olarak kullanıldığı bilinmektedir.

Geleneksel kalıplama ile beton dökümünde yükseklik arttıkça iskele maliyeti hızla artmaktadır. Kayar kalıplar ise yapı yüksekliğinden bağımsız olarak yapıya mesnetlendikleri için zemine kadar uzanan herhangi bir taşıyıcı iskeleye gerek kalmamakta ve böylece iskele maliyetleri de ortadan kalkmaktadır. Kayar kalıplara ilişkin bir şema Şekil 1.25 ve kayar kalıp tekniğiyle inşa edilen bir silo Şekil 1.26'da verilmektedir. Bu kalıplar ile ilgili ayrıntılı bilgi kaynaklarda mevcuttur (Kumbasar, 1992; URL-6, 2007).



Şekil 1.25. Siloların inşasında yaygın olarak kullanılan bir kayar kalıp şeması



Şekil 1.26. Kayar kalıp tekniğiyle inşa edilen bir silo (URL-5, 2007).

Kayar kalıp ve tırmanır kalıp arasındaki temel farklar aşağıda verilmektedir.

- ✓ Tırmanır kalıpta ilerleme hızı, kayar kalıba göre daha düşüktür. Ancak betonarme demir montajı hızının, kayar kalıp ilerleme hızına ayak uyduramaması gibi durumlarda tırmanır kalıp ile çalışmak zorunlu olabilmektedir. Genel olarak, tırmanır kalıpta, kayar kalıba göre daha denetimli ve dolayısıyla da daha kaliteli imalat yapmak mümkün olmaktadır.
- ✓ Tırmanır kalıp sistemi kayar kalıp kadar karmaşık değildir. Ancak kayar kalıpta yatay derz görünmemekte oysa tırmanır kalıpta yatay derz izleri görülmektedir (URL-6, 2007).

1.13. Silolarda Hasar Nedenleri, Onarım ve Güçlendirme

Yaklaşık 100 yıldan beri ayrı taneli malzemelerin stok edildiği silolardan bugüne kadar birçoğunun yıkıldığı ya da kullanım dışı kaldığı bilinmektedir. Bu bakımdan hasarlı siloların onarılması, yeterli emniyete sahip olmayanların ise güçlendirilmesi gerekmektedir.

Siloların kullanım dışı kalmaları ya da yıkılmaları genellikle tasarım, yapım ve kullanım aşamasında yapılan birtakım hatalardan meydana gelmektedir (Durmuş, 1995). Yapılabilecek hatalara birkaç örnek aşağıda verilmektedir.

- ✓ Kullanım basınçlarının tasarımda dikkate alınmaması,
- ✓ Silo guruplarında birleşim ve kesişim noktalarında detayların yanlış tasarlanması,
- ✓ Silo guruplarında hücrelerin biri boş diğeri dolu durumdayken çeşitli birleşimlerde oluşan en elverişsiz kesit etkileri ve şekil değiştirmelerin dikkate alınmaması,
- ✓ Çeşitli nedenlerle meydana gelen korozyon gibi.

Onarım için birçok yöntem bulunmakla beraber bunlardan uygun olanının seçimi özel dikkat gerektirmektedir. Zira silolar yiyecekleri malzemelerini stok etmek için tasarlanmışsa onarımda bunlara zarar verecek malzemeler kullanılmamalıdır. Aynı

nedenle, cidarların iç yüzlerinin aşınmaya karşı dayanımlarını arttıran ve malzeme akışını kolaylaştıran kaplamaların seçimi de özel dikkat gerektirmektedir.

Burada günümüzde siloların onarım ve güçlendirilmesinde çelik lifli püskürtme beton tekniğinin en yaygın olarak kullanılması yanında karbon lifli çubukların da bir seçenek olarak kullanıldığı belirtilmelidir. Onarım ve güçlendirme teknikleri konusunda daha ayrıntılı bilgi için bu konudaki kaynaklara başvurulabilir (Perkins, 1997; URL-4, 2007).

1.14. Silolara Etkiyebilecek Yükler

Siloların tasarımında, biri işlevsel, diğeri yapısal olmak üzere iki durumun dikkate alınması gerekmektedir. İşlevsel yönden tasarım, uygun bir hacmin silolanmasını, malzemenin iyi bir şekilde korunmasını ve doldurma-boşaltmanın kolayca yapılmasını, yapısal yönden tasarımın ise stabiliteyi, dayanımı, yerdeğiştirmeyi ve çatlak genişliklerini denetleyecek şekilde yapılması zorunlu olmaktadır. Bu nedenle tasarımda dikkate alınması gereken yükler aşağıda verilmektedir.

- ✓ Sabit yükler
- ✓ Silolanan malzeme basınçlarından doğan yükler
- ✓ Farklı sıcaklık değişiminden doğan yükler
- ✓ Kar yükü
- ✓ Rüzgar yükü
- ✓ Deprem yükü

1.14.1. Sabit Yükler

Yapının kendi ağırlığı ve siloya monte edilmiş ekipmanların ağırlığından meydana gelen yükler sabit yükleri oluşturmaktadır. Bunların etkisiyle silolarda düşey doğrultuda merkezi normal kuvvet oluşmaktadır. Bu kuvvetin cidarlar üzerinde oluşan sürtünme kuvvetinin de dikkate alınması suretiyle denge koşullarını sağlayacak şekilde hesaplanması gerekmektedir. Diğer taraftan kolonlara oturan silolarda bu etkilerin tiremi yükleri ile birlikte yüksek kiriş hesabında dikkate alınması gerekmektedir.

1.14.2. Silolanan Malzeme Basınçlarından Doğan Yükler

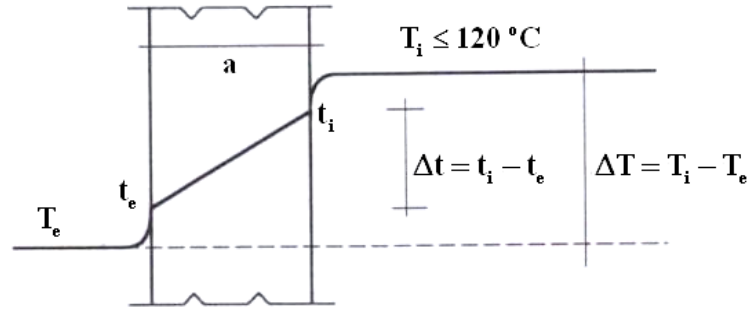
Silolanan malzeme basınçlarından doğan yükler silo gövdesinde, düşey kuvvet, silo cidarlarında ise sürtünme kuvveti ve yatay kuvvet oluşturmaktadır. Bu kuvvetlerin şiddeti içsel sürtünme açısı ile silo cidarı üzerindeki sürtünme açısına bağlı olmakta ve taneli malzemeler için bu karakteristikler sukunet ve doldurma-boşaltma durumlarında farklı değerler almaktadır. Bu nedenle tasarımın bu kuvvetlerden en elverişsiz olanına göre yapılması gerekmektedir. Gerçekte söz konusu sürtünme açıları basınca bağlı olarak da değişmekle beraber bu değişimin göz önüne alınması oldukça zor olduğundan bunlar için itibari bir değer kullanılmaktadır.

1.14.3. Sıcaklık Farkından Doğan Yükler

Bu yükler; silolanan malzeme sıcaklığı ile ilgili olup özellikle uzun stok yapısı guruplarında önem kazanmaktadır. Silolar iç ve dış sıcaklık farkından dolayı ihmal edilemeyecek büyüklükte gerilmelerin etkisinde kalabilmektedirler. Bu etkinin silo biçimine ve yüksekliğine bağlı olarak hesaplanması gerekmektedir.

Silo içindeki sıcaklık değişimi sıcak olarak doldurulan, sonradan ısıtılan ya da içindeki tepkilerden doğan sıcaklıklardan oluşabilmekte, dış sıcaklık değişimi ise güneş ışınlarının etkisi ile kuvvetli bir ısınma, yağmur ya da rüzgar dolayısıyla silo dış cidarlarında oluşan ani sıcaklık azalmasından ileri gelmektedir. Bu nedenlerle oluşan sıcaklık farkının meydana getirdiği yükler yapıyı derzlerle bloklara ayırmak suretiyle önemli derecede azaltılabileceği bilinmektedir.

Silolanan malzemenin sıcaklığı dış sıcaklıktan farklı ise (Şekil 1.27) bu Δt sıcaklık farkından dolayı bir $M_{\Delta t}$ momenti ortaya çıkmaktadır. Şayet silolanan malzemenin iç sıcaklığı ya da malzemenin üstündeki hava sıcaklığı 120°C ' yi geçmiyorsa söz konusu momentin değeri Türkiye Silo Yönetmeliğinde verilen yaklaşık bir yöntemle hesaplanabilmektedir (TS 6989, 1989).



Şekil 1.27. Silonun cidar yüzeyleri arasındaki sıcaklık farkı

Şöyle ki, t_i ve t_e sırasıyla cidarın iç ve dış yüzünün sıcaklığını, T_i ve T_e sırasıyla stok malzemesinin iç sıcaklığını ve dış hava sıcaklığını, a cidar kalınlığını, λ_c betonun ısı iletkenlik katsayısını, $1/h_i$ ve $1/h_e$ sırasıyla cidarın iç ve dış yüzlerinin ısı direncini göstermek ve cidarla hava arasındaki ısı akım yoğunluğu;

$$K = \frac{T_i - T_e}{\frac{1}{h_i} + \frac{a}{\lambda_c} + \frac{1}{h_e}} \quad (1.1)$$

bağıntısıyla hesaplanmak üzere cidar içindeki ısı akım yoğunluğu;

$$K = \frac{t_i - t_e}{\frac{a}{\lambda_c}} = \frac{\Delta t}{\frac{a}{\lambda_c}} \quad (1.2)$$

olarak yazılabilmektedir. Bu son bağıntıdan;

$$\Delta_t = K \cdot \frac{a}{\lambda_c} \quad (1.3a)$$

olarak elde edilmektedir.

Bu bağıntılarda $\lambda_c = 1,4 \text{ kcal/m}^\circ \text{Csaat}$, $1/h_i = 0,15 \text{ m}^2 \text{ saat}^\circ \text{C/kcal}$, $1/h_e = 0,10 \text{ m}^2 \text{ saat}^\circ \text{C/kcal}$ olarak alınır ve a cidar kalınlığı (m) cinsinden yerine konulursa, $\Delta T = T_i - T_e$ olmak üzere (1.3a) bağıntısı;

$$\Delta_t = \frac{a}{0,35 + a} \cdot \Delta T (^\circ \text{C}) \quad (1.3b)$$

şeklini almaktadır. Bu durumda sıcaklık değişiminden doğan moment, α_t betonun ısı genleşme katsayısını, $E_c = 7000 \sqrt{f_{ck}}$ ($f_{ck} \rightarrow \text{daN/cm}^2$) elastisite modülünü, $I = 1000 \cdot a^3 / 12 (\text{cm}^4 / \text{m})$ genişliği ya da yüksekliği 100cm, kalınlığı a (cm) olan bir kesitin atalet momentini göstermek üzere Δt sıcaklık farkından doğan moment değeri;

$$M_{\Delta t} = \frac{\alpha_t \cdot \Delta t \cdot E_c \cdot I}{a} (\text{daN} \cdot \text{cm}) \quad (1.4)$$

bağıntısıyla hesaplanabilmektedir.

Amerikan silo yönetmeliğinde (ACI 313, 1977) ise bu moment poisson oranı (ν) 0,3 olarak alınmak suretiyle;

$$M_{\Delta t} = \frac{\alpha_t \cdot \Delta t \cdot E_c \cdot I}{a \cdot (1 - \nu)} \quad (1.5)$$

ifadesi ile hesaplanmaktadır. Diğer taraftan söz konusu Amerikan Silo Yönetmeliği, ulusal yönetmeliğimiz Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kurallarındaki (TS 500, 2000) yük kombinezonlarından farklı olarak, sıcaklık etkisinin de sabit yük gibi 1,4 katsayısı ile çarpılarak kullanılmasını öngörmektedir. Bu durum siloların sıcaklık etkisine geçici ve ikincil bir yük olarak değil, kalıcı ve esas bir yük olarak maruz kaldığının kabul edilmiş olmasıyla açıklanabilmektedir.

1.14.4. Kar Yüğü

Kar yükünün coğrafi ve meteorolojik koşullar ile temasta bulunacağı yapının şekline ve rüzgar etkisine bağılı olarak değıştiğı bilinmektedir (TS 498, 1987). Siloların kar yükü de diğör mühendislik yapılarınıninkine benzer şekilde hesaplanmaktadır.

1.14.5. Rüzgar Yüğü

Rüzgar daha çok boş durumdaki yüksek siloların stabilitesini etkileyebilmektedir. Bu durumda kolonlarda ve temellerde oluşan gerilmeler dolu durumda oluşarlardan daha büyük de olabilmektedir. Özellikle silindirik silolar boşken rüzgar etkisinin oluşturacağı ovalleşme gibi etkilerin de denetlenmesi zorunlu olmaktadır.

Siloların maruz kaldığı rüzgar etkisi ulusal yönetmeliğimiz Yapı Elemanlarının Boyutlandırılmasında Alınacak Yüklerin Hesap Değerlerinde (TS 498, 1987) yapılar için verilen genel yöntemle belirlenebilmektedir.

1.14.6. Deprem Yüğü

Siloların tasarımlarında, özellikle de aktif deprem kuşağında bulunan bölgelerde, deprem yüklerinin de dikkate alınmasının kaçınılmaz olduğu açıktır.

Silolara etkileyen deprem yüklerinin belirlenmesinde bunların en az %80 oranında dolu olduğu, cidarlarının rijit olduğu, dolayısıyla da silo-malzeme etkileşiminin ihmal edildiğı, yer hareketinin harmonik olduğu gibi daima gerçekçi olmayabilen birtakım kabuller yapıldığı bilinmektedir. Bu tür incelemelerin gerçek bir deprem etkisi altında silo cidarı-malzeme ve zemin etkileşimlerini dikkate almak suretiyle yapılmasının daha gerçekçi olacağı açıktır. Söz konusu etkileşimleri dikkate alan yapısal çözümlelerde, sayısal yöntemlerden biri olan sonlu elemanlar yöntemi yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yöntem, etkileşim problemine Westergaard'ın eklenmiş kütle yaklaşımı ile Euler ve Lagrange tipi yaklaşımlar şeklinde uygulanmaktadır.

Westergaard'ın eklenmiş kütle yaklaşımında malzeme dinamik basıncını oluşturacak bir kütle cidar-malzeme arayüzeyinde yapı kütesine eklenmektedir. Salınım hareketlerini dikkate almadığı halde sıvı depolarında yaygın olarak kullanılan bu yöntemin impuls

etkilerinin daha ağırlıklı olduğu taneli malzemeleri içeren silolarda daha gerçekçi sonuçlar verebileceği düşünülmektedir.

Euler yaklaşımında malzeme davranışı basınç potansiyel terimine bağlı olarak, ya analitik fonksiyon terimleriyle ya da düğüm noktalarında bilinmeyen olarak basıncın seçildiği sonlu elemanlar modeliyle ifade edilmektedir. Lagrange yaklaşımında ise, malzeme davranışı sonlu eleman düğüm noktalarındaki yerdeğiştirme terimiyle ifade edilmekte ve bu suretle denge ve uygunluk koşulları silo-malzeme ara yüzeyindeki noktalarda kendiliğinden sağlanmaktadır. Lagrange tipi yaklaşımda özel ara yüzey denkleminde gerek duyulmadığından, seçilen eleman yapısal çözümleme için geliştirilen genel amaçlı bilgisayar programlarına daha kolay uyarlanabilmekte, kütle-rijitlik matrisleri simetrik ve bant genişlikleri de küçük olduğundan denklem çözüm yöntemleri daha etkin olarak kullanılabilir (Doğangün, 1995; Karaca 2000).

1.15. Silo Yüklerini Arttıran Etmenler

1.15.1. Boşaltma Şekilleri

Silolarda boşaltma şekilleri normal ve özel boşaltma olarak ikiye ayrılmakta, özel boşaltmada kendi içerisinde geometrik, mekanik ve yapısal olarak özel boşaltma sınıflarına ayrılmaktadır.

1.15.1.1. Normal Boşaltma

Bir siloda;

- ✓ Silolanan malzemenin boşaltmadaki akışı hava püskürtmeden, sadece kendi ağırlığı ile sağlanıyorsa,
- ✓ Silonun içinde boşaltmayı sağlayacak hiç bir donanım bulunmuyorsa,
- ✓ Boşaltma ağızı ya da ağızları tabanda bulunuyor ve U silo taban seviyesindeki yatay kesitin çevresini, V boşaltma ağızlarının çevresinin bu taban üzerindeki izdüşümünü, U' V çevrelerinin tamamını içine alan ve U' nun homotetisi olan çevrenin uzunluğunu göstermek üzere rölatif koordinat $\xi = U'/U \leq 4$ oluyorsa,

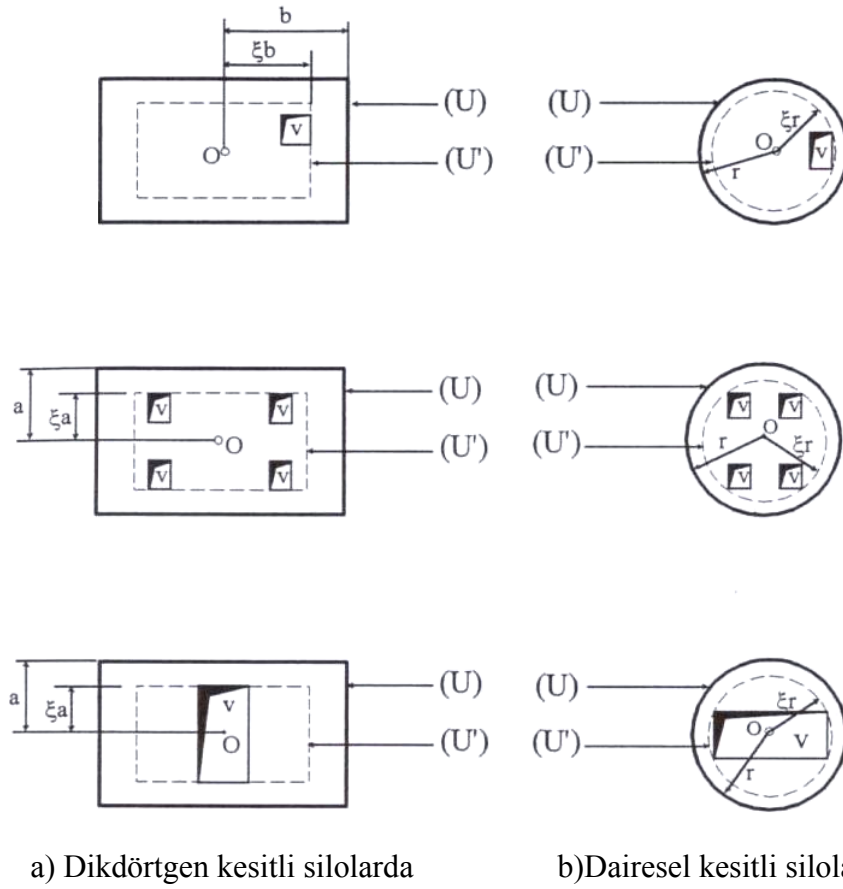
bu üç koşulu birlikte sağlayan boşaltma şekli normal boşaltma olarak adlandırılmaktadır.

1.15.1.2. Özel Boşaltma

Bir siloda yukarıda belirtilen normal boşaltma koşullarından en az birinin sağlanmaması durumu ise özel boşaltma olarak adlandırılmaktadır. Bu boşaltmanın çeşitleri de aşağıdaki başlıklar altında açıklanmaktadır.

(a) Geometrik Olarak Özel Boşaltma

Normal boşaltma için belirtilen üç koşuldan ilk ikisi sağlanıyor, üçüncü koşul sağlanmıyorsa ($\xi = U'/U > 4$) siloda geometrik olarak özel boşaltma söz konusu olmaktadır. Aşağıda Şekil 1.28'de altı farklı geometrik olarak özel boşaltma şekli verilmektedir.



Şekil 1.28. Silolarda geometrik olarak özel boşaltmaya ilişkin altı farklı şematik gösterim

(b) Mekanik Olarak Özel Boşaltma

Silolanan malzemenin boşaltılması gerek tabandaki gerekse tabana yakın seviyede düşey cidarlardan basınçlı hava püskürtmesiyle yapılıyorsa siloda mekanik olarak özel boşaltma söz konusu olmaktadır.

(c) Yapısal Olarak Özel Boşaltma

Silolanan malzemenin boşaltılması silonun içerisinde bulunan sabit ya da hareketli bir tertibat yardımıyla sağlanıyorsa bu boşaltma yapısal olarak özel boşaltma olarak adlandırılmaktadır. Aşağıda bu tür boşaltmaya ilişkin bazı örnekler verilmektedir.

- ✓ Boşaltmanın, her seviyede boşlukları bulunan bir bacayla yapılması,
- ✓ Boşaltmanın, taban üzerinde bulunan ve malzemenin kütle halinde harekete geçmesini önleyecek şekilde yapılmış çok küçük debi veren boşluklardan yapılması,
- ✓ Silindirik silonun iç yüzeyinde düşey cidarlardan içe doğru uzanan plak ya da giriş şeklinde çıkmalar bulunması.

Boşaltma dış merkez olarak yapılıyorsa, silo cidarlarına homojen olmayan bir yatay yük gelmektedir. Bu durumda yatay basıncın (n) kritik olduğu yerlerde daha büyük olarak dikkate alınması gerekmektedir (TS 6989, 1989).

1.15.2. Siloda Kemerleşen Malzemenin Çökmesi

Silolanan malzemenin kendini tutarak kemerleşmesi ve bu kemerin çökmesinden doğan çarpmanın dinamik etkisiyle yükler artmaktadır. Öyle ki bu çökmeden dolayı silo tabanına gelen \bar{v} düşey basınç iki misli artabilmektedir. Teknik literatürde düşey basıncı, tahıllar için 1,2 kat, kohezif mallar için ise 1,6 kat kadar arttırmanın yeterli olduğu belirtilmektedir (Turan, 1986; Askari 1988).

1.15.3. Havalandırma

Bazı siloların hücrelerinde taneli ya da toz malzemelerin havalandırılması için havalandırma tertibatı bulunmaktadır. Taneli malzemelerin havalandırılmasından dolayı yatay kuvvet oluşabilmekte ve bu durumda yatay basınç (n) , havalandırma boşluklarının bulunduğu yükseklikte üfleme kuvvetiyle orantılı olarak artmaktadır. Bu nedenle bu kuvvetin hücrenin en üst kısmında sıfır olacak şekilde dağıtılması gerekli olmaktadır. Toz malzemeler için kullanılan silolarda havalandırmadan dolayı önemli bir yük artması meydana gelmemektedir (Turan, 1986; Blight, 1987).

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR, BULGULAR VE İRDELEME

2.1. Sukunet Durumundaki Malzeme Basınçlarının Hesabı İçin Bazı Teoriler ve Karşılaştırmaları

Daha önce de belirtilmeye çalışıldığı gibi silolanmış sukunet durumundaki malzeme silo gövdesinde düşey yönde, cidarlarında ise yatay ve düşey yönde etki eden basınçlar oluşturmaktadır. Bu basınçların hesabı için birçok teori mevcut olmakla beraber bunlardan en yaygın olarak kullanılanları Janssen ve Reimbert teorileridir. Teknik literatürde, Janssen teorisinin özellikle A.B.D.'de kullanıldığı ancak bazı özel durumlarda emniyetsiz tarafta sonuçlar verdiği, Reimbert teorisiyle elde edilen sonuçların ise genellikle pratik deney sonuçları ile çakıştığı belirtilmektedir (ACI 313, 1977; Reimbert, 1977; Karaca, 2000).

Mühendislik uygulamalarında diğer teorilere göre çok daha yaygın kullanıldıklarından, bu çalışmada Janssen ve Reimbert teorileri daha ayrıntılı olarak açıklanmaktadır.

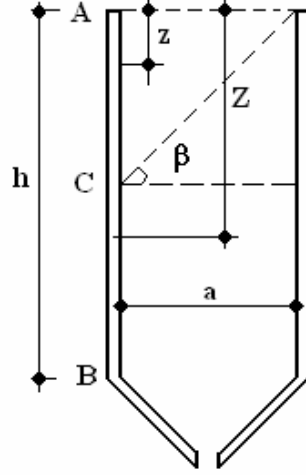
2.1.1. Hidrostatik Teori

Stok malzemelerinin oluşturduğu basıncın yükseklikle doğru orantılı olarak değiştiğini dikkate alan ve sürtünme kuvvetini ihmal eden bu teori, taneli malzemelerin oluşturduğu basınçları hidrostatik basınca benzetmektedir. Aynı zamanda malzemenin içsel sürtünme açısını da göz ardı eden bu yöntemin yalnızca silo cidarlarının üst kısmında geçerli olabileceği, genel durumda yetersiz olacağı açıktır (Guerrin, 1969).

2.1.2. Airy Teorisi

Bu teori yalnızca kare kesitli silolarda uygulanabilmekte olup silindirik silolara uyarlanmasının mümkün olabileceği düşünceleri de mevcuttur.

Bu teoriye göre yanal basınç; Şekil 2.1 yardımıyla aşağıdaki bağıntılardan hesaplanmaktadır.



Şekil 2.1. Airy teorisi için silo kesiti

A - C arasındaki herhangi bir z kotundaki yanal basınç;

$$n = \frac{\gamma \cdot z^2}{2} \cdot \left[\frac{1}{\tan \varphi \cdot (\tan \varphi + \tan \delta) + \sqrt{1 + \tan^2 \varphi}} \right]^2 \quad (2.1a)$$

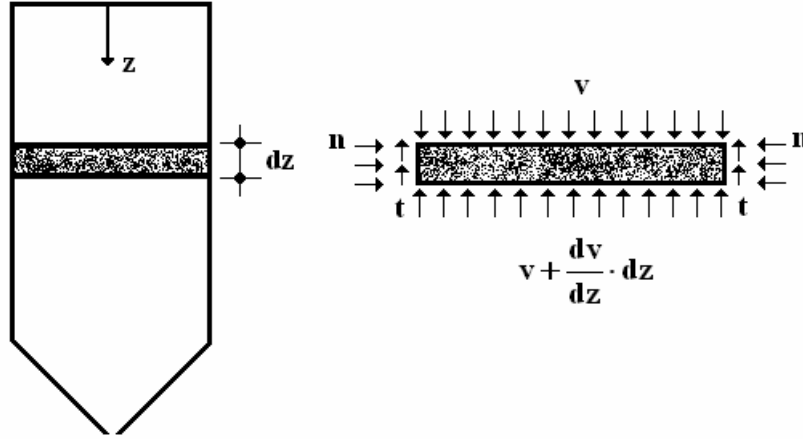
C-B arasında ise;

$$n = \frac{\gamma \cdot a^2}{2} \cdot \left[\frac{\sqrt{\frac{2z}{a} \cdot (\tan \varphi + \tan \delta) + (1 - \tan \varphi \cdot \tan \delta) - \sqrt{1 + \tan^2 \varphi}}}{\tan \varphi + \tan \delta} \right]^2 \quad (2.1b)$$

şeklindedir.

2.1.3. Janssen Teorisi

Bu teoriye göre ayrık taneli malzemelerin silolara uyguladığı yatay basınç, düşey basınç ve birim alandaki sürtünme kuvveti ifadelerinin elde edilişleri Şekil 2.2 yardımıyla aşağıda açıklanmaktadır. Bu şekildeki silo gövdesinin dz kalınlıklı elemanının düşey dengesinden;



Şekil 2.2. Janssen teorisindeki bağıntıların çıkartılmasına ilişkin şema

$$v \cdot A + \gamma \cdot dz \cdot A = A \cdot \left(v + \frac{dv}{dz} \cdot dz \right) + n \cdot dz \cdot U \cdot \tan \delta \quad (2.2)$$

ifadesi yazılabilmektedir. Bu ifade gerekli düzenlemeler yapıldığı takdirde;

$$(\gamma \cdot A - n \cdot U \cdot \tan \delta) \cdot dz = A \cdot dz \quad (2.3)$$

şeklini almaktadır. Bu ifadeden, $\lambda = \frac{n}{v} = \text{sabit} \rightarrow \lambda = \frac{1 - \sin \varphi}{1 + \sin \varphi} = \tan^2 \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2} \right)$ ve $r_h = \frac{A}{U}$

olmak üzere dz çekilirse;

$$dz = \frac{dv}{\gamma - \frac{\lambda \cdot \tan \delta}{r_h} \cdot v} \quad (2.4)$$

olmaktadır. Bu ifadenin integrasyonundan;

$$z = -\frac{r_h}{\lambda \cdot \tan \delta} \cdot \ln \left(\gamma - \frac{\lambda \cdot \tan \delta}{r_h} \cdot v \right) + c \quad (2.5)$$

olarak elde edilir. $z=0$ için $v=0$ olduğundan;

$$c = \frac{r_h}{\lambda \cdot \tan \delta} \cdot \ln \gamma \quad (2.6)$$

'dir. c 'nin bu değeri (2.5) ifadesinde yerine konulursa;

$$z = \frac{r_h}{\lambda \cdot \tan \delta} \cdot \ln \frac{\gamma}{\gamma - \frac{\lambda \cdot \tan \delta}{r_h} \cdot v} \quad (2.7)$$

olmaktadır. Bu ifade de;

$$e^{\frac{\lambda \cdot \tan \delta \cdot z}{r_h}} = \frac{1}{1 - \frac{\lambda \cdot \tan \delta}{\gamma \cdot r_h} \cdot v} \quad (2.8)$$

şeklinde yazılabilmektedir. Bu durumda Janssen teorisine göre;

$$v = \frac{\gamma \cdot r_h}{\lambda \cdot \tan \delta} \cdot \left(1 - e^{-\frac{\lambda \cdot \tan \delta}{r_h} \cdot z} \right) \quad (2.9a)$$

bağıntısıyla düşey basınç,

$$n = \frac{\gamma \cdot r_h}{\tan \delta} \cdot \left(1 - e^{-\frac{\lambda \cdot \tan \delta}{r_h} z} \right) \quad (2.10a)$$

bağıntısıyla yatay basınç ve $t = n \cdot \tan \delta = \lambda \cdot v \cdot \tan \delta$ olduğundan birim alandaki sürtünme kuvveti ise;

$$t = \gamma \cdot r_h \cdot \left(1 - e^{-\frac{\lambda \cdot \tan \delta}{r_h} z} \right) \quad (2.11a)$$

bağıntısıyla hesaplanmaktadır. Bu (2.9a), (2.10a) ve (2.11a) bağıntıları da;

$$z_0 = \frac{r_h}{\lambda \cdot \tan \delta}, \quad x = \frac{z}{z_0} \quad \text{ve} \quad y = \left(1 - e^{-\frac{z}{z_0}} \right) \text{ olmak üzere;}$$

$$n = \frac{\gamma \cdot r_h}{\tan \delta} \cdot (1 - e^{-x}) \rightarrow n = \frac{\gamma \cdot r_h}{\tan \delta} \cdot y \quad (2.10b)$$

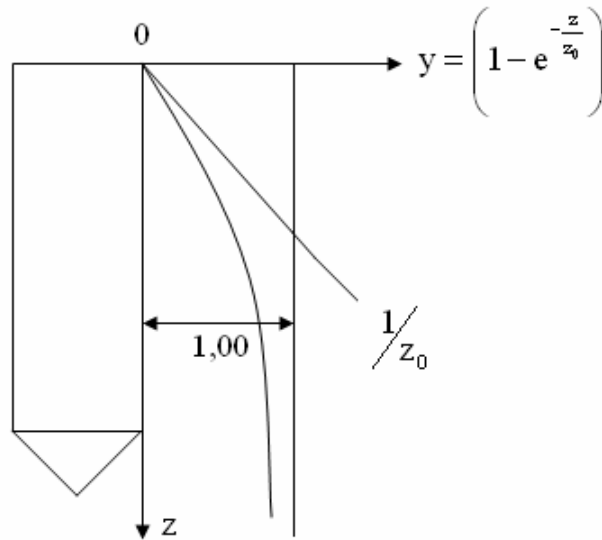
$$v = \frac{\gamma \cdot r_h}{\lambda \cdot \tan \delta} \cdot (1 - e^{-x}) \rightarrow v = \frac{\gamma \cdot r_h}{\lambda \cdot \tan \delta} \cdot y \quad (2.9b)$$

$$t = \gamma \cdot r_h \cdot (1 - e^{-x}) \rightarrow t = \gamma \cdot r_h \cdot y \quad (2.11b)$$

şeklinde yazılabilmektedir. Bu bağıntılardaki y 'nin, $\frac{z}{z_0}$ oranına göre aldığı değerler aşağıdaki Çizelge 2.1'da, değişim eğrisi ise Şekil 2.3'de verilmektedir.

Çizelge 2.1. z/z_0 oranına bağlı olarak $y = 1 - e^{-z/z_0}$ fonksiyonunun değerleri

z/z_0	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
0	0,0000	0,0952	0,1823	0,2592	0,3297	0,3935	0,4512	0,5034	0,5507	0,5934
1	0,6321	0,6671	0,6988	0,7275	0,7534	0,7769	0,7981	0,8173	0,8347	0,8504
2	0,8645	0,8775	0,8892	0,8997	0,9093	0,9179	0,9257	0,9328	0,9392	0,9450
3	0,9502	0,9549	0,9592	0,9631	0,9666	0,9698	0,9727	0,9753	0,9776	0,9798
4	0,9817	0,9835	0,9850	0,9864	0,9877	0,9889	0,9899	0,9909	0,9918	0,9926



Şekil 2.3. Siloya etkiyen basınçların belirlenmesinde kullanılan y fonksiyonunun derinlikle değişimi

$z \rightarrow \infty$ için; $y=1,00$ olmaktadır. Bu durumda n , v ve t 'nin asimtotik değerleri;

$$n_{\text{maks}} = \frac{\gamma \cdot r_h}{\tan \delta} \quad (2.10c)$$

$$v_{\text{maks}} = \frac{\gamma \cdot r_h}{\lambda \cdot \tan \delta} \quad (2.9c)$$

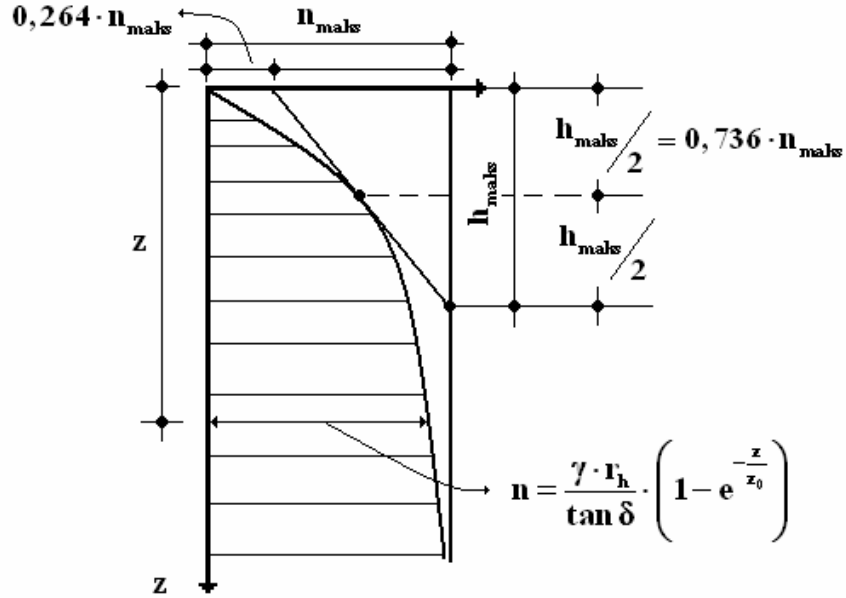
$$t_{\text{maks}} = \gamma \cdot r_h \quad (2.11c)$$

bağıntılarıyla ifade edilmektedir.

Şekil 2.3'den de görüldüğü gibi sürtünmenin ihmal edilmesi durumunda herhangi bir z derinliğinde düşey basınç $v = \gamma \cdot z$ olarak hesaplanmakta dolayısıyla da değişim doğrusal olmaktadır. Silodaki basınçların asimtotlarının bulunması silodaki sürtünme kuvvetinin dikkate alındığını göstermektedir (Janssen, 1895; Ciesielski vd., 1967; Kumbasar 1992).

2.1.4. Sor Teorisi

Bu teoride, Janssen'ın yatay basıncın (n) derinlikle değişim eğrisi Şekil 2.4'deki gibi basitleştirilerek;



Şekil 2.4. Janssen teorisinde Sor tarafından $n(z)$ eğrisi için yapılan basitleştirme

$$h_{\text{maks}} = \frac{2n_{\text{maks}}}{\gamma \cdot \lambda} = \frac{2n_{\text{maks}}}{\gamma \cdot \tan^2 \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2} \right)} \quad (2.12)$$

olmak üzere $z \leq h_{\text{maks}}$ için yatay basıncı;

$$n = n_{\text{maks}} \cdot \left(\frac{0,736}{h_{\text{maks}}} \cdot z + 0,264 \right) \quad (2.13)$$

bağıntısıyla hesaplamayı önermiştir. Şekilden görüldüğü gibi, $z = \frac{h_{\text{maks}}}{2}$ için bu bağıntıdan elde edilen yatay basınç (n), Janssen bağıntısıyla elde edilene eşit, diğer durumlar için daha büyük olmaktadır.

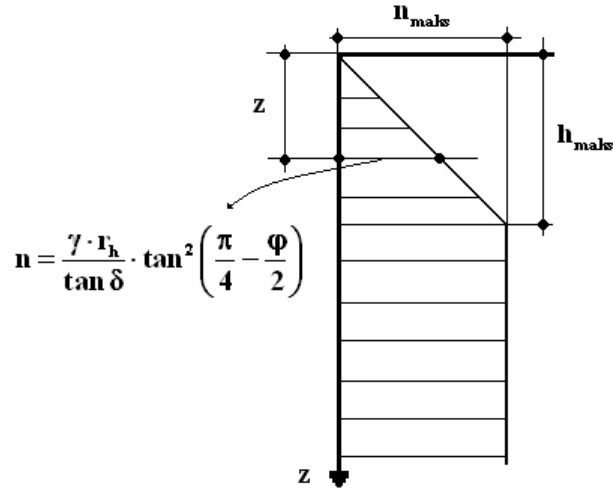
Burada $z > h_{\text{maks}}$ için yatay basıncın;

$$n = n_{\text{maks}} = \frac{\gamma \cdot r_h}{\tan \delta} \quad (2.14)$$

değerini aldığı belirtilmelidir.

2.1.5. Forestier Teorisi

Bu teoride Şekil 2.5'den görüldüğü gibi silo hücresinin şekline göre Çizelge 2.2'de değişen değerler alan bir h_{maks} derinliğine kadar yatay basıncın z ile değişimini doğrusal kabul ederek Janssen teorisi için bir basitleştirme yapılmaktadır.



Şekil 2.5. Janssen teorisinde Forestier tarafından $n(z)$ eğrisi için yapılan basitleştirme

Çizelge 2.2. Silo enkesitine göre h_{maks} ve $z \leq h_{maks}$ için n değerleri

Enkesit	h_{maks}	n ($z \leq h_{maks}$)
Daire	$h_{maks} = \frac{r_h}{\tan \delta \cdot \tan^2 \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\phi}{2} \right)}$	$n = \gamma \cdot z \cdot \tan^2 \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\phi}{2} \right)$
Kare	$h_{maks} = \frac{a}{4 \tan \delta \cdot \tan^2 \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\phi}{2} \right)}$	
Dikdörtgen	$h_{maks} = \frac{a \cdot b}{2 \tan \delta \cdot (a + b) \cdot \tan^2 \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\phi}{2} \right)}$	

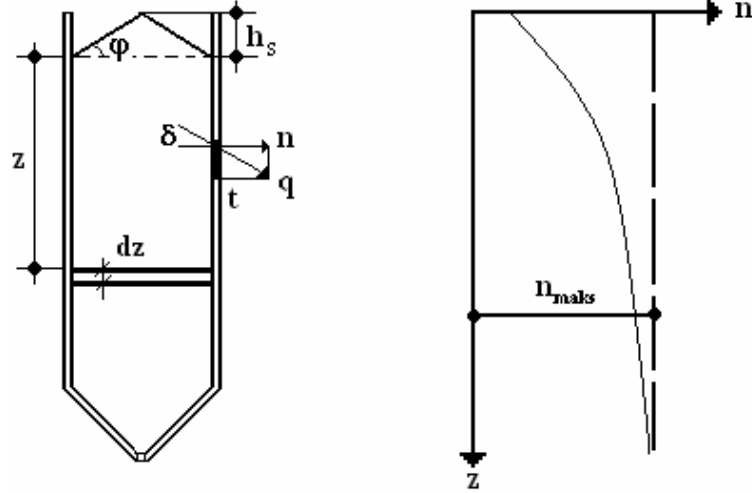
Bu teoriye göre h_{maks} 'den daha büyük z değerleri için yatay basınç; $n = n_{maks}$ sabit değerini almaktadır.

2.1.6. Reimbert Teorisi

Reimbert silo cidarlarına etkiyen basınçların doğrudan belirlenmesinin zorluğundan dolayı tanelerin cidarlar üzerindeki sürtünmelerine ilişkin deney sonuçları ve gözlenen olaylar arasında bağlantı kurulmasına imkan tanıyan matematiksel ifadelerin bulunmasına

ve daha sonra elde edilen bağıntının türevleri yardımıyla cidarlar üzerindeki basınçların belirlenmesine çalışmıştır. Silonun tabanındaki toplam basıncın belirlenmesi yardımıyla, silolanan malzemenin bilinen ağırlığıyla ölçülen farkından tanelerin cidarlar üzerinde sürtünmesiyle dengelenen sürtünme kuvvetini elde etmiştir. Deney bulgularının karşılaştırılabilir ve yeterli derecede hassas bir yorumlamaya imkan tanıyabilmesi için bu deneylerin daima aynı koşullar altında yapılması gerektiğinden Reimbert deney silolarını sabit bir yükseklikten ve sabit bir hızla doldurmuştur. Zira ancak bu doldurma şekliyle zaman silolanan malzemenin birim ağırlığı ve içsel sürtünme açısı pratik olarak deneyden deneye değişmemektedir. Ne var ki endüstri silolarında bu değerler genellikle sabit olmadığından ideal koşullarda geliştirilen teorinin gerçek koşullara uyarlanması kaçınılmaz olmakta ve bunun için de malzemenin temel özelliklerinin (γ , φ ve δ) en elverişsiz değerlerinin belirlenmesi gerekli olmaktadır.

Reimbert'e göre; silolanan malzemenin doğan basınçlar kesin olarak hesaplanamamakla beraber, olayın özü tamamen bilindiğinden bu olay Şekil 2.6 yardımıyla aşağıdaki şekilde açıklanmaktadır.



Şekil 2.6. Reimbert teorisindeki bağıntıların çıkarılmasına ilişkin şema

Bu şekle göre cidar üzerindeki eğik basıncın (q), yatay (n) ve düşey (t) bileşenleri;

$$n = q \cdot \cos \delta, \quad t = q \cdot \sin \delta \quad \text{ya da} \quad t = n \cdot \tg \delta \quad (2.15)$$

bağıntılarıyla belirlenmektedir.

Yukarıda da belirtilmeye çalışıldığı gibi belli bir z derinliğindeki düşey basıncın değeri, bu derinliğin üzerinde kalan silolanan malzemenin toplam ağırlığı ile sürtünme kuvvetinin farkından bulunmaktadır. Janssen teorisinde olduğu gibi Reimbert teorisinde de hesap ve deneyler belli bir derinlikten sonra düşey basıncın derinlikle asimtotik bir şekilde arttığını göstermektedir.

Bu teoriye göre sürtünme kuvveti ihmal edilir ve $Q_0 = \gamma \cdot A \cdot \frac{h_s}{3}$, silo üst kısmındaki şevin ağırlığını (bkz. Şekil 2.6) göstermek üzere z derinliğindeki toplam yük;

$$Q_z = \gamma \cdot A \cdot z + Q_0 \quad (2.16)$$

Sürtünme kuvveti $F(z)$ ile gösterilir ve bu kuvvetin diferansiyeli alınırsa;

$$F'(z) \cdot dz = n_z \cdot U \cdot \tan \delta \cdot dz \quad (2.17)$$

olmaktadır. Buna göre yatay basınç;

$$n = \frac{F'(z)}{U \cdot \tan \delta} \quad (2.18)$$

ifadesi şeklinde olmaktadır. Sürtünmeden sonra z derinliğindeki yük değeri;

$$\gamma \cdot A \cdot \left(z + \frac{h}{3} \right) - F(z) \quad (2.19)$$

değerini almaktadır. Bu yükün silo enkesit alanına bölünmesi suretiyle düşey basınç ifadesi;

$$v = \gamma \cdot \left(z + \frac{h}{3} \right) - \frac{F(z)}{A} \quad (2.20)$$

şeklinde yazılabilmektedir.

Görüldüğü gibi yatay ve düşey basıncın (2.18) ve (2.20) bağıntılarından hesaplanabilmesi için $F(z)$ fonksiyonunun bilinmesi gerekmektedir. Janssen yönteminde

olduğu gibi $\lambda = \frac{n}{v} = \frac{1 - \sin \varphi}{1 + \sin \varphi} = \tan^2 \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2} \right)$ sabit bir değeri göstermek ve

$Q_{\text{maks}} = A \cdot v_{\text{maks}} = A \cdot n_{\text{maks}} \cdot \frac{1}{\lambda}$ olmak üzere sürtünme ile karşılanan yük eğrisinin karakteristik ordinatı olan A^* ;

$$A^* = \frac{Q_{\text{maks}} - Q_0}{\gamma \cdot A} \quad (2.21)$$

olduğundan sürtünme kuvveti fonksiyonu;

$$F(z) = \frac{\gamma \cdot A \cdot z^2}{z + A^*} \quad (2.22)$$

bağıntısıyla ifade edilmektedir. Bu fonksiyonun türevi alınırsa;

$$F'(z) = \gamma \cdot A \left[1 - \left(\frac{z}{A^*} + 1 \right)^{-2} \right] \quad (2.23)$$

şeklinde ifade edilmekte ve bunun değeri (2.18) bağıntısında yerine konularak yatay basınç bağıntısı;

$$n = \frac{\gamma \cdot r_h}{\tan \delta} \cdot \left[1 - \left(\frac{z}{A^*} + 1 \right)^{-2} \right] \rightarrow n = n_{\text{maks}} \cdot \left[1 - \left(\frac{z}{A^*} + 1 \right)^{-2} \right] \quad (2.24)$$

olarak elde edilmektedir. $F(z)$ fonksiyonunun (2.20) bağıntısında yerine konulmasıyla ise düşey basınç bağıntısı;

$$v = \gamma \cdot \left[z \cdot \left(\frac{z}{A^*} + 1 \right)^{-1} + \frac{h^*}{3} \right] \quad (2.25)$$

şeklinde elde edilmektedir. Bu durumda birim sürtünme kuvveti de;

$$t = (\gamma \cdot z - v) \cdot r_h \quad \text{ya da} \quad t = \frac{\gamma \cdot A \cdot z^2}{z + A^*} \quad (2.26)$$

bağıntılarıyla ifade edilmektedir.

Aşağıdaki Çizelge 2.3'de, (2.24) bağıntısındaki $L(z) = 1 - \left(\frac{z}{A^*} + 1 \right)^{-2}$ ifadesinin değerleri z/A^* oranına bağlı olarak verilmektedir.

Çizelge 2.3. z/A^* 'a bağlı olarak $L(z) = 1 - \left(\frac{z}{A^*} + 1 \right)^{-2}$ değerleri

z/A^*	L(z)	z/A^*	L(z)	z/A^*	L(z)	z/A^*	L(z)	z/A^*	L(z)	z/A^*	L(z)
0,01	0,020	0,22	0,328	0,70	0,654	1,40	0,826	2,80	0,931	4,80	0,970
0,02	0,039	0,24	0,350	0,73	0,666	1,45	0,833	2,90	0,934	4,90	0,971
0,03	0,057	0,26	0,370	0,76	0,677	1,50	0,840	3,00	0,937	5,00	0,972
0,04	0,075	0,28	0,390	0,79	0,688	1,55	0,846	3,10	0,940	5,20	0,974
0,05	0,093	0,30	0,408	0,80	0,691	1,60	0,852	3,20	0,943	5,40	0,975
0,06	0,110	0,33	0,435	0,83	0,701	1,65	0,858	3,30	0,946	5,60	0,977
0,07	0,127	0,36	0,459	0,86	0,711	1,70	0,863	3,40	0,948	5,80	0,978
0,08	0,143	0,39	0,482	0,89	0,720	1,75	0,868	3,50	0,950	6,00	0,979
0,09	0,158	0,40	0,490	0,90	0,723	1,80	0,873	3,60	0,953	6,40	0,981
0,10	0,174	0,43	0,511	0,93	0,732	1,85	0,877	3,70	0,955	6,80	0,982
0,11	0,188	0,46	0,531	0,96	0,740	1,90	0,881	3,80	0,957	7,20	0,985
0,12	0,203	0,49	0,550	0,99	0,748	1,95	0,885	3,90	0,958	7,80	0,987
0,13	0,217	0,50	0,556	1,00	0,750	2,00	0,890	4,00	0,960	8,50	0,989
0,14	0,231	0,53	0,573	1,05	0,762	2,10	0,896	4,10	0,961	9,50	0,991
0,15	0,244	0,56	0,589	1,10	0,773	2,20	0,902	4,20	0,963	10,95	0,993
0,16	0,257	0,59	0,605	1,15	0,784	2,30	0,908	4,30	0,964	13,15	0,995
0,17	0,270	0,60	0,609	1,20	0,793	2,40	0,913	4,40	0,966	14,80	0,996
0,18	0,282	0,63	0,624	1,25	0,803	2,50	0,918	4,50	0,967	17,25	0,997
0,19	0,294	0,66	0,637	1,30	0,811	2,60	0,923	4,60	0,968	21,35	0,998
0,20	0,306	0,69	0,649	1,35	0,819	2,70	0,927	4,70	0,969	30,60	0,999

Bu yöntemde karakteristik ordinat (A^*) ve maksimum yatay basınç (n_{maks}) değerleri silo enkesitine bağlı olarak Çizelge 2.4’de verilen bağıntılar yardımıyla belirlendikten sonra yatay basınç, düşey basınç ve birim sürtünme kuvveti yukarıdaki (2.24), (2.25) ve (2.26) bağıntılarıyla hesaplanabilmektedir.

Çizelge 2.4. Silo enkesitine göre A^* ve n_{maks} değerleri

Enkesit	Açıklama	A^*	n_{maks}
Daire	D→Silo çapı $h^* = \frac{2}{3} \cdot r_h \cdot \tan \beta$	$\frac{D}{4 \cdot \tan \delta \cdot \tan^2 \left(\frac{\pi - \varphi}{4} \right)} - \frac{h^*}{3}$	$\frac{\gamma \cdot D}{4 \cdot \tan \delta}$
Çokgen	$h^* = \frac{2}{3} \cdot r_h \cdot \tan \beta$	$\frac{L}{\pi} \cdot \left(\frac{1}{4 \cdot \tan \delta \cdot \tan^2 \left(\frac{\pi - \varphi}{4} \right)} \right) - \frac{h^*}{3}$	$\frac{\gamma \cdot r_h}{4 \cdot \tan \delta}$
Dikdörtgen	Kısa kenar için		
	$h^* = \frac{a}{12} \cdot \left(3 - \frac{a}{b} \right) \cdot \text{tg} \beta$	$\frac{a}{\pi \cdot \tan \delta \cdot \tan^2 \left(\frac{\pi - \varphi}{4} \right)} - \frac{h^*}{3}$	$\frac{\gamma \cdot a}{4 \cdot \tan \delta}$
	Uzun kenar için		
	$a' = \frac{2ab - a^2}{b}$ $h^* = \frac{a}{12} \cdot \left(3 - \frac{a}{b} \right) \cdot \tan \beta$	$\frac{a'}{\pi \cdot \tan \delta \cdot \tan^2 \left(\frac{\pi - \varphi}{4} \right)} - \frac{h^*}{3}$	$\frac{\gamma \cdot a'}{4 \cdot \tan \delta}$
Dikdörtgen $b \gg a$	$h^* = \frac{a}{2} \cdot \tan \beta$	$\frac{2a}{\pi \cdot \tan \delta \cdot \tan^2 \left(\frac{\pi - \varphi}{4} \right)} - \frac{h^*}{3}$	$\frac{\gamma \cdot a}{2 \cdot \tan \delta}$

2.1.7. Caquot Teorisi

Caquot zemin itkisine ilişkin teorilerden yararlanarak;

$$m = \frac{\tan^2 \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2} \right) \cdot \sin 2\varphi}{2r_h} \quad (2.27)$$

olmak üzere yatay basıncın;

$$n = \frac{\gamma \cdot r_h}{\tan \delta} \cdot (1 - e^{-mz}) \quad (2.28)$$

bağıntısıyla, düşey basıncın ise;

$$v = \gamma \cdot r_h \cdot \frac{2}{\tan^2 \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2} \right) \cdot \sin 2\varphi} \cdot (1 - e^{-mz}) \quad (2.29)$$

bağıntısıyla hesaplanabileceğini belirtmektedir.

2.1.8. Pamelard Teorisi

Yatay basıncın (n) derinlikle değişiminin parabol kabul edildiği bu teoride düşey basıncın;

$$v = \frac{\gamma \cdot r_h}{\tan \delta \cdot \tan^2 \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2} \right)} \cdot \frac{1}{\frac{2}{3} + \frac{r_h}{\tan \delta \cdot \tan^2 \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2} \right)} \cdot z} \quad (2.30)$$

bağıntısıyla,

yatay basıncın ise;

$$n = v \cdot \tan^2 \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2} \right) \quad (2.31)$$

ifadesine göre hesaplanabileceği önerilmektedir (Pamelard, 1959).

2.1.9. Teorilerin Karşılaştırılması

Bu başlık altında ilkel olan hidrostatik teori ve günümüzde kullanılmayan Airy teorisi dışındaki teorilerin karşılaştırılması yapılmaktadır. Söz konusu teorilerin hepsinde maksimum yatay basıncın ;

$$n_{\text{maks}} = \frac{\gamma \cdot r_h}{\tan \delta} \quad (2.32)$$

bağıntısıyla, maksimum düşey basıncın ise;

$$v_{\text{maks}} = \frac{\gamma \cdot r_h}{\tan \delta \cdot \tan \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2} \right)} \quad (2.33)$$

bağıntısıyla hesaplanması önerilmektedir (Guerrin, 1969). Buna göre her bir yöntemle ilişkin yatay basınç katsayısı $K = f(z/r_h, \varphi)$ Çizelge 2.5'den, düşey basınç katsayısı $K' = f(z/r_h, \varphi)$ ise Çizelge 2.6'den alınmak üzere yatay ve düşey basınçlar sırasıyla;

$$n = n_{\text{maks}} \cdot K \quad (2.34)$$

$$v = \gamma \cdot r_h \cdot K' \quad (2.35)$$

bağıntılarıyla hesaplanabilmektedir.

Durum böyle olunca teorilere ilişkin yatay ve düşey basınçların karşılaştırılması sadece K ve K' katsayılarının karşılaştırılması ile mümkün olmaktadır. Ancak Caquot teorisinde $\tan \delta = 0,80 \tan \varphi$ olduğu kabul edildiğinden, teorilerin karşılaştırılmasında kolaylık sağlamak için diğer teorilerde de beton üzerinde bu eşitliğin geçerli olduğu kabul edilmektedir.

Bu kabule göre, bu çalışmaya konu olan teorilere ilişkin yatay ve düşey basınç katsayılarının dolayısıyla da basınçların içsel sürtünme açısı (φ) ve (z/r_h) oranına göre almış oldukları değerler EK.1'deki çizelgelerde verilmektedir.

Bu çizelgelerden de görüldüğü gibi Caquot teorisi hariç diğer teorilerde K ve K' basınç katsayıları dolayısıyla da basınçlar içsel sürtünme açısıyla (φ) önemli ölçüde değişmemektedir.

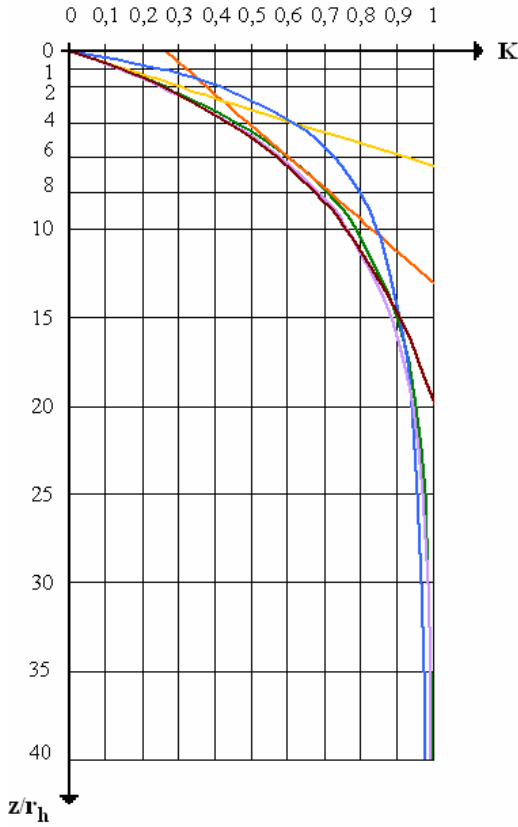
Çizelge 2.5. Stok Malzemesi Yatay Basınçlarına (n) Dair Çeşitli Yöntemler İçin K Katsayısı İfadeleri

Yöntem Adı	K = f (z/r _h , φ) Katsayısı İfadeleri
Janssen'a göre	$K = 1 - e^{\left[-\frac{z}{r_h} \cdot \tan \delta \cdot \tan^2 \left(\frac{\pi - \varphi}{4} \right) \right]}$
Sör'e göre	$K = 0,264 + 0,368 \cdot \frac{z}{r_h} \cdot \tan \delta \cdot \tan^2 \left(\frac{\pi - \varphi}{4} \right)$
Forestier'e göre	$K = \frac{z}{r_h} \cdot \tan \delta \cdot \tan^2 \left(\frac{\pi - \varphi}{4} \right)$
Reimbert'e göre	$K = 1 - \left[\frac{z}{r_h} \cdot \tan \delta \cdot \tan^2 \left(\frac{\pi - \varphi}{4} \right) + 1 \right]^{-2}$
Caquot'a göre	$K = 1 - e^{\left[-\frac{1}{2} \cdot \frac{z}{r_h} \cdot \tan^2 \left(\frac{\pi - \varphi}{4} \right) \cdot \sin 2\varphi \right]}$
Pamelard'a göre	$K = \frac{1}{\frac{2}{3} + \frac{1}{\frac{z}{r_h} \cdot \tan \delta \cdot \tan^2 \left(\frac{\pi - \varphi}{4} \right)}}$

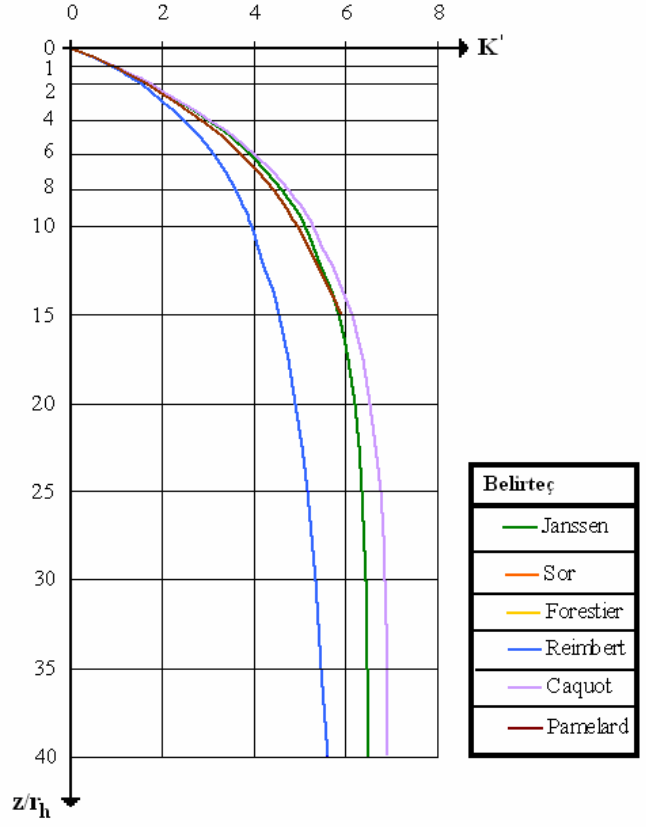
Çizelge 2.6. Stok Malzemesi Düşey Basınçlarına (v) Dair Çeşitli Yöntemler İçin K' Katsayısı İfadeleri

Yöntem Adı	$K' = f(z/r_h, \varphi)$ Katsayısı İfadeleri
Janssen'a göre	$K' = \frac{1}{\tan \delta \cdot \tan^2 \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2} \right)} \left(1 - e^{\left[-\frac{z}{r_h} \cdot \tan \delta \cdot \tan^2 \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2} \right) \right]} \right)$
Reimbert'e göre	$K' = \frac{1}{\tan \delta \cdot \tan^2 \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2} \right) + \frac{r_h}{z}}$
Caquot'a göre	$K = \frac{2}{\tan^2 \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2} \right) \cdot \sin 2\varphi} \cdot \left(1 - e^{\left[-\frac{1}{2} \frac{z}{r_h} \cdot \tan^2 \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2} \right) \cdot \sin 2\varphi \right]} \right)$
Pamelard'a göre	$K = \frac{1}{\tan \delta \cdot \tan^2 \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2} \right)} \cdot \frac{1}{\frac{2}{3} + \frac{1}{\frac{z}{r_h} \cdot \tan \delta \cdot \tan^2 \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2} \right)}}$

Silolan malzemedan doğan yatay ve düşey basınçlar içsel sürtünme açısının değişiminden önemli ölçüde etkilenmediğinden, emniyetli tarafta kalmak üzere, $\varphi = 30^\circ$ için her bir yonteme göre çizilen yatay ve düşey basınç eğrileri Şekil 2.7 ve Şekil 2.8'da verilmektedir. Bu şekillerden statik denge gereği yatay basıncı büyük veren yöntemin düşey basıncı küçük verdiği görülmektedir. Bu teorilerden sadece Reimbert teorisi deneye dayalı olduğundan daha gerçekçi sonuçlar vereceği beklenmektedir.



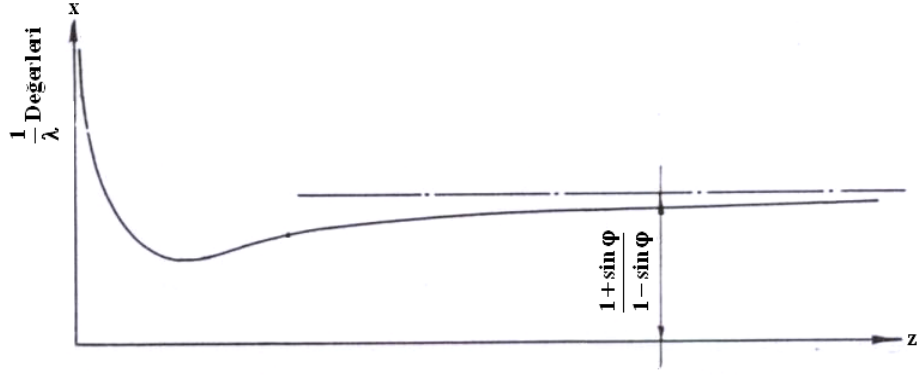
Şekil 2.7. $\varphi = 30^\circ$ için çeşitli teorilere göre yatay basınç eğrileri



Şekil 2.8. $\varphi = 30^\circ$ için çeşitli teorilere göre düşey basınç eğrileri

2.1.10. Deneysel Çalışmalardan Elde Edilen Bulgular

Janssen ve Reimbert teorilerinde $\lambda = \frac{n}{v} = \frac{1 - \sin \varphi}{1 + \sin \varphi}$ oranının sabit olduğu kabul edilmektedir. 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 $\frac{1}{\lambda}$ 'nin derinlikle değişimi Şekil 2.9'da verilmektedir.



Şekil 2.9. Reimbert'in deneylerine göre $1/\lambda$ 'nın derinlikle değişimi

Reimbert'in deneylerinden önce de bu oranın sabit olmadığı Magnel, Lossier, Buisson ve Janssen tarafından gösterilmiştir. Ancak bu oranın sabit kabul etmekle emniyetten taviz vermediği de bilinmektedir (Ayazoğlu, 1987).

Janssen, Airy ve Prante deneylerinde; 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 0,50'ye kadar değiştiği ve silo derinliği, hücre kenarı veya çapının 3 katına vardığında yatay basıncın çok az arttığı sonuçlarına varılmaktadır (Guerrin, 1969).

Buisson deneylerinde hidrostatik basınç ve Janssen' in teorik eğrisini karşılaştırmış, bunun için silo 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.

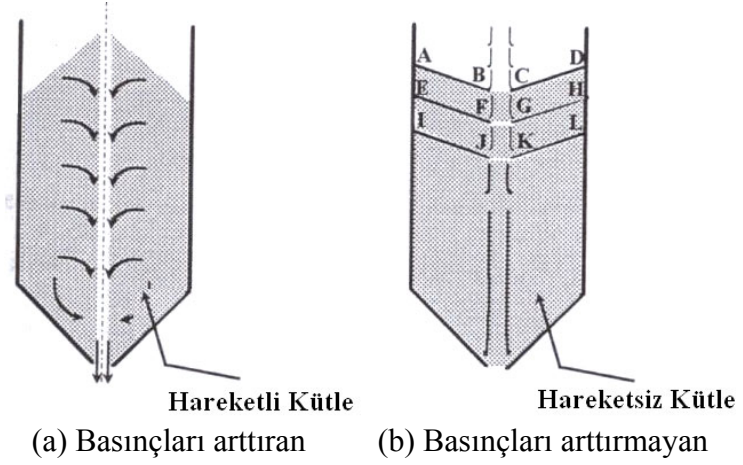
2.2. Doldurma-Boşaltma Durumlarındaki Malzeme Basınçlarının Hesabı

Doldurma ve boşaltma durumunda silolanan taneli malzemenin akışından dolayı dinamik etkiler meydana gelmektedir. Bir boşluk hatta küçük bir boşaltma vanası bile dibe doğru bir akım oluşturmakta ve bu nedenle silolanan malzemenin dengesi bozulmakta ve bu da cidarlarda ek basınçlara neden olmaktadır. Öyle ki basınçların değeri yerel olarak

sukunet durumunda Janssen ve Reimbert teorisiyle hesaplananların 3-4 katına ulaşabilmektedir.

Caquot, boşaltma anındaki yatay basıncı pasif itkiye, doldurma işlemi tamamlanınca oluşacak yatay basıncı ise aktif itkiye benzetmekte, aktif itkinin şiddetinin pasif itkiden daha küçük olduğunu ve bu iki sınır denge arasındaki farkın kullanım halindeki silolarda önemli hasarlara sebep olabileceğini belirtmektedir (Guerrin, 1969; Karaca 2000).

Reimbert'e göre boşaltma esnasında sürtünmeden dolayı cidarlar boyunca silolanan malzeme tanelerinin hızı az olmakla beraber, düşey tiremi ekseninde hız artmaktadır. Silodan çok az miktarda dahi malzeme boşaltmak için boşaltma ağzı açıldığında içte bulunan malzemenin hemen hemen hepsi harekete geçmekte ve bu şekilde cidarlardaki etkileri büyük ölçüde arttırmaktadır (Şekil 2.10a). Bu olumsuz durumu önlemek amacıyla siloların içine, silo ekseninde bir ucu boşaltma ağzında diğer ucu silo üst düzeyinde olan delikli bir tüp şeklinde, özel bir düzenek yerleştirilerek malzemenin tümünün aynı anda harekete geçmesi engellenebilmektedir (Şekil 2.10b). Bu düzeneğin çalışma ilkesi; malzeme akışının üstten itibaren tabakalar halinde olmasını ve altta kalan malzemenin hareketsiz kalmasını sağlayarak malzeme akışı devam ettikçe cidarlar üzerindeki ek basınçları azaltabilmektir. Silo dolu olduğu zaman, hidrolik yarıçapın fonksiyonu olarak cidarlara etkileyen basınçlar, siloya göre hidrolik yarıçapı küçük olan düzenek tüpü içindeki tanelerin basıncından daha büyük olmaktadır. Bu durum, boşaltma ağzı açıldığında sadece tüpün içindeki malzemenin harekete geçip diğer malzemenin hareketsiz halde kalmasını sağlamaktadır. Burada dikkat edilmesi gereken bir husus da siloların boşaltılması sırasında cidarlar üzerindeki basınç artışını engellemek ve boşaltmanın sürekliliğini sağlamak için düzenekteki tüpün üzerindeki deliklerin yeterince birbirine yakın olması gerektiğidir.



Şekil 2.10. Silolarda boşaltma anında basınçları arttıran (a) ve arttırmayan (b) boşaltma şekilleri

Aşağıdaki başlıklar altında kısaca çeşitli yönetmeliklere göre, doldurma-boşaltma durumunda, silolanan malzemeden doğan basınçların hesabına ilişkin öneri ve hükümler üzerinde durulmaktadır.

2.2.1. Türkiye Silo Yönetmeliği

Türkiye Silo Yönetmeliğinde (TS 6989, 1989), n_0 ve v_0 , sırasıyla yatay (n) ve düşey (v) basınçların temel değerlerini, h'' aşağıdaki Çizelge 2.7'de verilen bir düzeltme terimini göstermek üzere;

$$\lambda = \frac{n_0}{(v_0 - \gamma \cdot h'')} \quad (2.36)$$

bağıntısıyla hesaplanan bir parametredir.

Çizelge 2.7. Silo enkesitine göre h'' düzeltme terimleri

Enkesit	h''
Düzgün çokgen ya da dairesel	$\frac{1}{2} \cdot r_h \cdot \tan \delta$
Dikdörtgen ($b > a$)	$\frac{a}{16} \cdot \left(3 - \frac{a}{b} \right) \cdot \tan \delta$

Bu λ 'nın iki farklı değerine karşılık iki farklı denge durumu dikkate alınmaktadır. Bunlardan birinci denge durumu; genellikle doldurmanın sürekli bir şekilde yapılarak tamamlanmasıyla birlikte taneli malzemenin sükunete geçmesinden sonra meydana gelmekte olup λ 'nın en küçük değerine karşılık gelen bu durum λ_1 ile karakterize edilmektedir.

İkinci denge durumu ise genellikle boşaltmanın başlangıcındaki denge durumu olarak düşünülmekte ve λ_1 'den daha büyük bir λ değeri ile karakterize edilmektedir.

Birinci denge durumu düşey basıncın, ikinci denge durumu ise yatay basınç ve birim sürtünme kuvvetinin en büyük değerlerine karşılık gelmektedir.

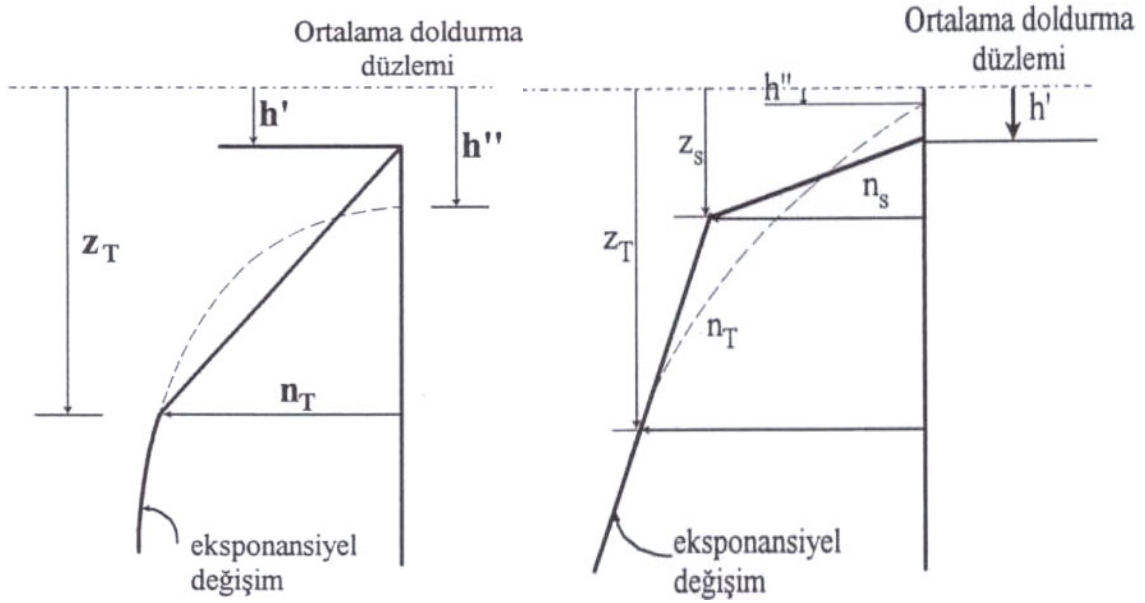
Normal boşaltma durumunda Çizelge 2.8'deki ifadeler kullanılmakta olup bu ifadelerin kullanımına sadece $\frac{h}{r_h} \geq 3,5$ ve $r_h \leq 6$ m olması durumunda izin verilmektedir. Özel boşaltmalı siloların ise basınçlar, birinci ve ikinci denge durumu için hesaplanan n_1 ve n_2 değerlerine bağlı olarak TS 6989'da (1989) Madde 3.2 ve Madde 3.3'de belirtilen şekilde hesaplanmaları önerilmektedir.

Burada Çizelge 2.8'de çizelgede verilen geçiş derinliğinin yeterince narin silolarda dikkate alınmasına gerek bulunmadığı belirtilmelidir.

Çizelge 2.8. Normal boşaltmalı silolarda yatay basınçların hesaplanması için gerekli bazı ifadeler

Terimler		Birinci Denge Durumu	İkinci Denge Durumu	
λ Değerleri $\rho = \tan \delta / \tan \varphi$ ve $m = \sqrt{1 - \rho^2}$		$\lambda_1 = \frac{1 - m \cdot \sin \varphi}{1 + m \cdot \sin \varphi}$	$\lambda_2 = \cos^2 \delta$	
Referans Yükseklikleri (z_0)		$z_{01} = \frac{r_h}{\lambda_1 \cdot \tan \delta}$	$z_{02} = \frac{r_h}{\lambda_2 \cdot \tan \delta}$	
Geçiş Derinliği (z_T) ($h/r_h < 10$ için)		$z_{T1} = h'' + \sqrt{6 \cdot h' - h'' \cdot z_{01}}$	$z_{T2} = h' + \sqrt{6 \cdot h' - h'' \cdot z_{02}}$	
İndirgenmiş Yükseklikler	$z > z_T$ için	$x_1 = (z - h'')/z_{01}$	$x_2 = (z - h'')/z_{02}$	
	$z = z_T$ için	$x_{T1} = \sqrt{\frac{6 \cdot h' - h'' }{z_{01}}}$	$x_{T2} = \sqrt{\frac{6 \cdot h' - h'' }{z_{02}}}$	
	$z < z_T$ için	$h' < h''$	$\beta = 0$ ve $h' = 0$ iken meydana gelir ve $z = z_T$ için;	
			x_{T1}	x_{T2}
		$h' > h''$	$\beta = \varphi$ iken meydana gelir ve $z = z_s = (z_T + h'')/2$ için;	
			x_{T1}	x_{T2}
Yatay İtki Bağlıları ($k_{n1} = 1,15$) ($k_{n2} = 1,15$)	$z > z_T$ için	$y_1 = 1 - e^{-x_1}$	$y_2 = 1 - e^{-x_2}$	
		$n_1 = k_{n1} \cdot \left(\frac{\gamma \cdot r_h}{\tan \delta} \right) \cdot y_1$	$n_2 = k_{n2} \cdot \left(\frac{\gamma \cdot r_h}{\tan \delta} \right) \cdot y_2$	
	$z = z_T$ için	$y_{T1} = 1 - e^{-x_{T1}}$	$y_{T2} = 1 - e^{-x_{T2}}$	
		$n_{T1} = k_{n1} \cdot \left(\frac{\gamma \cdot r_h}{\tan \delta} \right) \cdot y_{T1}$	$n_{T2} = k_{n2} \cdot \left(\frac{\gamma \cdot r_h}{\tan \delta} \right) \cdot y_{T2}$	
	$z < z_T$ için	$h' < h''$	$z = z_T$ için;	
			n_{T1}	n_{T2}
		$h' > h''$	$z = z_s = \frac{z_T + h''}{2}$ için;	
			$n_{s1} = k_{n1} \cdot \left(\frac{\gamma \cdot r_h}{\tan \delta} \right) \cdot \frac{x_{T1}}{2}$	$n_{s2} = k_{n2} \cdot \left(\frac{\gamma \cdot r_h}{\tan \delta} \right) \cdot \frac{x_{T2}}{2}$

Buna göre $z < z_T$ olması durumunda iki farklı hal için yatay basıncın değişimi Şekil 2.11a ve Şekil 2.11b' de verilmektedir.



(a) $h' \leq h''$ için hesaplarda dikkate alınacak n değişimi

(b) $h' > h''$ için hesaplarda dikkate alınacak n değişimi

Şekil 2.11. Derinliğin geçiş derinliğinden küçük olması durumunda ($z < z_T$) farklı iki hal için yatay basıncın değişimi

n 'nin değişimini doğrusal kabul eden bağıntılar, bölgedeki toplam basıncın $\left(\int_h^{z_T} n \cdot dz \right)$,

n 'nin değişiminin eksponansiyel olması durumundakine eşit olacak şekilde seçilmektedir.

Buna göre $1,00 \leq k_v \leq 1,35$ ve $v_0 = \frac{n_0}{\lambda} + \gamma \cdot h''$ olmak üzere yatay ve düşey basınçların karakteristik değerleri;

$$n = k_n \cdot n_0 \quad \text{ve} \quad v = k_v \cdot v_0 \quad (2.37)$$

bağıntılarıyla hesaplanmaktadır.

Silonun tabanındaki basınçlar tabanın düz olması durumunda $\bar{x} = (h - h'')/z_0$ ve $\bar{y} = 1 - e^{-x}$ olmak üzere;

$$\bar{v} = k_v \cdot \gamma \cdot \left(z_0 \cdot \bar{y} + h'' \right) \quad (2.38)$$

bağıntısından, tiremili olması durumunda ise V^* tiremidaki malzeme hacmini göstermek üzere;

$$\bar{v}' = k_v \cdot \gamma \cdot \frac{V^*}{A} \quad (2.39)$$

bağıntısından hesaplanmaktadır.

2.2.2. Amerika Silo Yönetmeliği

Amerika Silo Yönetmeliğinde (ACI 313, 1977), sukunet durumunda basınçların Janssen ya da Reimbert teorilerinden biri ile hesaplanmasına izin verilmektedir. Burada sukunet ve doldurma-boşaltma durumları için ayrı ayrı hesap yapılmamakta, sukunet hali için bulunan basınçlar, incelenen silonun narınlığı ile hesabı yapılan kesitin derinliğine bağlı olan, düzeltme katsayısı adı verilen katsayılarla (Cd) çarpılarak tasarım basınçları elde edilmektedir.

Aşağıdaki Çizelge 2.9'da silodaki yatay ve düşey basınçlar ile birim sürtünme kuvvetine için Janssen ve Reimbert teorilerine ilişkin ifadeler verilmektedir.

Çizelge 2.9. Janssen ve Reimbert teorilerine göre n, v ve t ifadeleri

Malzeme Basınçları	Janssen	Reimbert
N	$n = \frac{\gamma \cdot r_h}{\tan \delta} \cdot \left(1 - e^{-\frac{\lambda \cdot \tan \delta}{r_h} \cdot z} \right)$	$n = n_{\text{maks}} \cdot \left[1 - \left(\frac{z}{A^*} + 1 \right)^{-2} \right]$
V	$v = \frac{\gamma \cdot r_h}{\lambda \cdot \tan \delta} \cdot \left(1 - e^{-\frac{\lambda \cdot \tan \delta}{r_h} \cdot z} \right)$	$v = \gamma \cdot \left[z \cdot \left(\frac{z}{A^*} + 1 \right)^{-1} + \frac{h^*}{3} \right]$
T	$t = \gamma \cdot r_h \cdot \left(1 - e^{-\frac{\lambda \cdot \tan \delta}{r_h} \cdot z} \right)$ <p style="text-align: center;">ya da</p> $t = \gamma \cdot r_h \cdot \left(1 - 0,8 \cdot e^{-\frac{\lambda \cdot \tan \delta}{r_h} \cdot z} \right)$	$t = (\gamma \cdot z - v) \cdot r_h$

Bu yönetmelikte hidrolik yarıçap değeri sadece dikdörtgen kesitli silolarda aşağıdaki Çizelge 2.10'daki ifadelerle hesaplanmaktadır. Diğer kesitler için bun un hesabında bir fark bulunmamaktadır.

Çizelge 2.10. Dikdörtgen kesitli silolar için hidrolik yarıçap ifadeleri

Dikdörtgen kesit	Alan	$r_h = \frac{A}{U}$	Açıklama
a kenarı için	$A_a = \frac{(A - A_b)}{2} = \frac{2ab - b^2}{4}$	$\frac{A_a}{a} = \frac{a'}{4}$	$a' = \frac{2ab - a^2}{a}$
b kenarı için	$A_b = \frac{b^2}{4}$	$\frac{A_b}{b} = \frac{b}{4}$	-

Böylece sukunet durumundaki basınçlar hesaplanmakta ve bunlar uygun düzeltme katsayıları ile çarpılarak tasarım basınçları elde edilmektedir.

Bu katsayı (C_d) aşağıdaki Çizelge 2.11'den alınan H_1 değeri kullanılarak Çizelge 2.12'deki ifadeler yardımıyla yatay basınç için C_d düzeltme katsayısına karar verilmekte ve

sayısal değerinin ilgili çizelgeden alınması önerilmektedir. Düşey basınç için ise yine ilgili çizelgelere verilen C_{d3} katsayılarının kullanılması öngörülmektedir.

Çizelge 2.11. H_1 ifadeleri

Silo Enkesit Şekli		H_1
Dairesel ve poligonal (D silo çapı olmak üzere)		$H_1 = D \cdot \tan \varphi \leq \frac{1}{3} \cdot H$
Kare		$H_1 = a \cdot \tan \varphi \leq \frac{1}{3} \cdot H$
Dikdörtgen	a cidarında	$H_{1a} = b \cdot \tan \varphi \leq \frac{1}{3} \cdot H$
	b cidarında	$H_{1b} = b \cdot \tan \varphi \leq \frac{1}{3} \cdot H$

Çizelge 2.12. Yanal basınç için düzeltme katsayıları

Yanal basınç için	Düzeltilme Katsayısı
$z \leq H_1$ için	C_{d1}
$H_1 < z \leq \frac{1}{3} \cdot H$ için	Katsayı verilmez. "Geçiş bölgesi"
Daire ve poligonal enkesitli silolarda $H/D = 1,5$ ve $H/D \geq 4,5$ için	C_{d2}
Kare ve dikdörtgen enkesitli silolarda $H/(a, b) = 1,5$ ve $H/(a, b) \geq 4,5$ için	

Burada Amerika Silo Yönetmeliğinde $H/D > 5$ ve $H/(a, b)$ için anılan C_d katsayılarının her birinin %15 arttırılması önerilmektedir (Durmuş vd., 1997).

2.2.3. Almanya Silo Yönetmeliği

Alman Silo Yönetmeliğinde (DIN 1055, 1968) basınçlar, sukunet, doldurma ve boşaltma durumlarında Janssen bağıntıları kullanılarak λ ve $\tan \delta$ parametrelerine bağlı olarak ayrı ayrı hesaplanmaktadır. Bu hesaplarda λ ve $\tan \delta$ 'ye sukunet, doldurma ve boşaltma durumlarında aşağıdaki Çizelge 2.13'deki değerler verilmektedir.

Çizelge 2.13. Sukunet, doldurma ve boşaltma durumları için λ ve $\tan \delta$ değerleri

	Toz malzeme için	Taneli malzeme için	λ
Sukunet durumu	maks φ	maks φ	$\tan^2\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2}\right)$
Doldurma durumu	1,00 φ	0,75 φ	0,50
Boşaltma durumu	1,00 φ	0,60 φ	1,00

Durum böyle olunca silo malzemesinin her üç durumu için n , v ve t değerlerinin derinlikle (z) değişimleri çizilmekte ve elde edilen eğrilerden en elverişsizinin değerleri karakteristik değerler olarak kullanılmaktadır (Durmuş vd.,1997).

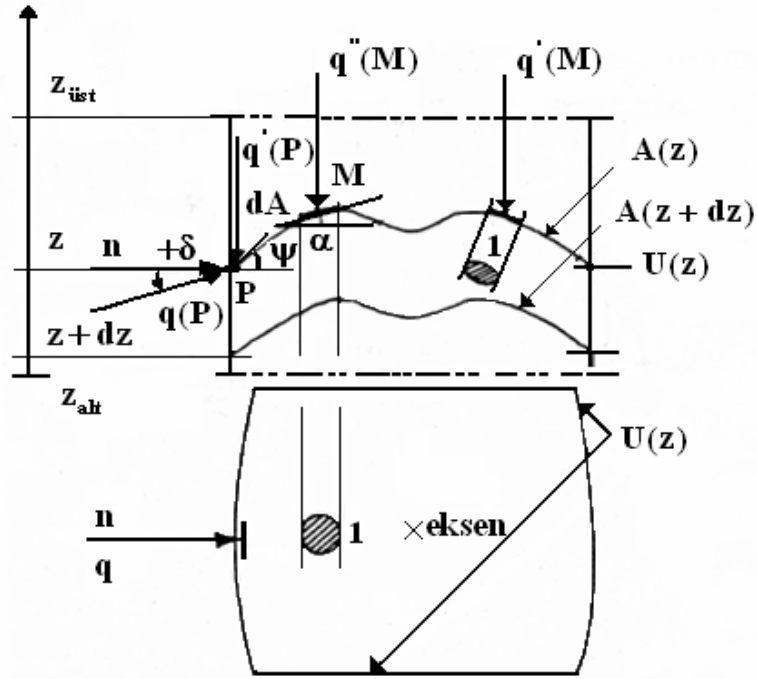
2.3. Stok Malzemesi Gerilmelerinin Belirlenmesine İlişkin Genel Yaklaşım

2.3.1. Temel Kabuller ve İrdelenmeleri

Aşağıda yapılan kabuller çalışmanın bundan önceki kısmında yapılan kabullerden tamamen bağımsızdır. Zira söz konusu kabullerle gerçekleştirilen incelemelerden elde edilen bulgular gerçek stok yapıları dikkate alınmak suretiyle elde edilmişlerdir. Çalışmanın bundan sonraki başlıklarında tartışılacak olan bu kabuller stok yapı sınıfları kavramında kullanılmaktadır.

2.3.1.1. Temel Kabuller

Yukarıda da belirtilmeye çalışıldığı gibi çalışmanın bundan önceki kısmından tamamen bağımsız olarak yapılan altı kabul Şekil 2.12'e göre aşağıda verilmektedir.



Şekil 2.12. Temel Kabullerinin şematik bir şekil üzerinde özeti

a) Birinci Kabul

Ayrık taneli sonlu stok malzemesi kütlesi; en az bir kısmı, doğurayı düşey olan silindirik stok yapısında bulunmaktadır.

b) İkinci Kabul ya da Varlık Kabulü

Stok yapılarının tanım alanları mevcut olup bunlardan yaygın olarak kullanılanlardan bir kısmının ortak yanı olan doldurma ve boşaltma süreçlerinde aşağıda belirtilen kabuller sağlanmaktadır.

c) Üçüncü Kabul ya da Yatay Bir Kesitte Üniformluk Kabulü

Her z derinliğinde stok yapısının $U(z)$ iç çevresine göre bir $A(z)$ fiktif (ititbari) yüzeyinin çizilmesi mümkündür. Öyle ki yüzey alanı dA olan bir elemana uygulanan etkiler düşey olup, dA elemanı $A(z)$ üzerinde yer değiştirdiğinde bu etkiler sabit kalmaktadır. Bu kabule göre Şekil 2.12 dikkate alınmak suretiyle,

$\forall M \in A(z)$ ve $z \in [z_{\text{üst}}, z_{\text{alt}}]$ için; $q'(M) \times \frac{1}{\cos \alpha} = \text{sabit}$ olduğundan düşey basınç;

$$q'' = \frac{q'(P)}{\cos \psi} \quad (2.40)$$

olarak ifade edilebilmektedir.

d) Dördüncü Kabul ya da ‘‘Süreklilik ve Statik Kural Uygulama Kabulü’’

- ✓ $A(z)$ yüzeyinin şekli z derinliğiyle ihmal edilebilecek kadar az değişmektedir ve $A(z)$ ile $A(z+dz)$ yüzeyleri birbirine paraleldir.
- ✓ Belirli bir z derinliğinde zamana bağlı olan $A(t)$ yüzeyinin şekli, statik denge denklemlerinin uygulanabilmesi için pratik olarak değişmemektedir.

e) Beşinci Kabul ya da Denge Durumu Kabulleri

$U(z)$ çevresi boyunca oluşan denge durumu, sınır denge durumunun bir fonksiyonudur. Daha sonra görüleceği üzere bu fonksiyon sadece bu sınır denge durumlarından sonra belirlenebilmektedir. Söz konusu sınır durumları için;

- ✓ $q(P)$, cidar üzerinde yatayla δ sürtünme açısına eşit bir açı yapmaktadır.
- ✓ Mohr dairesi bünyesel dayanım eğrisini meydana getiren iki yarı doğruya teğettir.

f) Altıncı Kabul ya da Dönel Mekanik Simetri Kabulü

Stok malzemesi kütlelerinin cidara uyguladığı gerilme $U(z)$ boyunca sabittir.

- ✓ $q(P)$ ve $q'(P)$ stok yapısının eksenini kesen aynı düzlemde bulunmaktadır.
- ✓ $\forall P \in U(z)$ için $q(P) = \text{sabit}$ ve $q'(P) = \text{sabit}$ olduğundan;
 $q(P) = q(z)$ ve $q'(P) = q'(z)$ şeklinde yazılabilmektedir.

2.3.1.2. Temel Kabullerin İrdelenmesi

Bu kabullerin kesin olarak bir çizgi boyunca ve bir kesit üzerinde ortalama gerilmelerin varlığını kabul etmek anlamını taşıdığı açıktır. Durum böyle olunca;

- (1) Yapılan temel kabullere uygun genel bağıntıların çıkartılabileceği,
- (2) Silo sınıfına giren stok yapılarına ilişkin bağıntıların bazı boşaltma şekilleri için elde edilebileceği,
- (3) Teknik literatürde mevcut deney bulgularıyla teorik bulguların karşılaştırılması suretiyle, geliştirilen yaklaşımın geçerliliğinin gösterilebileceği hususlarının kanıtlanması gerekmektedir.

2.3.2. Temel Kabullerin Stok Yapısı Sınıflarının Tanım Alanlarıyla Uyumu

2.3.2.1. Birinci ve İkinci Kabullerin Uygulama Alanı

Bu kabuller stok yapısında, doğurayı düşey yeterli büyüklükteki silindirik bir kısmın varlığını öngörmektedir. Bu nedenle, sonlu ayrık taneli malzeme kütlelerini içeren gerçek stok yapısı sınıflarına ilişkin Çizelge 1.1'den de görüldüğü gibi bu kabuller, en azından h_0/H oranı küçük olan (0,5'ten çok 0'a yakın olan) tiremi şeklindeki silolar için geçerli olmadığı gibi, stok hallerinin tümü için de geçerli olmamaktadır.

2.3.2.2. Üçüncü ve Altıncı Kabulün Uygulama Alanı

Yatay bir kesitte üniform olmayı öngören üçüncü kabul ve dönele mekanik simetrisini öngören altıncı kabulün, daha sonra görüleceği üzere, iki paralel düzlem arasında kalan kütle diliminin diferansiyel denklemini yazmaya imkan tanımaktadır. Bu kabullerin daha önce tanımlanmış olan gerçek stok yapılarından silo sınıfına girenler için geçerli olabilecekleri görülmektedir. Bu kabullerin yeterli büyüklükte silindirik kısımları olan geniş silolar ve tiremi şeklindeki silolar için de geçerli olduğu açıktır. Buna karşılık, istinat duvarı gibi dikkate alınabilecek olan cidarlarla sınırlandırılmış yarı sonsuz kütleleri içeren

stok ambarı sınıfındaki yapılara ancak, Caquot ve Kérisel'e göre (1966) geliştirilen şekliyle, aktif ve pasif itki teorilerinin uygulanabileceği düşünülmektedir.

2.3.2.3. Altıncı Kabulün Uygulama Alanı

Sadece dönele mekanik simetri kabulü adıyla da bilinen bu kabul, dairesel kesitli bir merkezi boşaltma ağızlı ya da aynı debiye sahip çok boşaltma ağızlı stok yapıları için tam anlamıyla geçerli olmaktadır. Ancak deneyler, kesiti dairesel olmayan bir merkezi boşaltma ağızlı stok yapıları için, kesitin U çevresi boyunca gerilmelerin üniform olduğunu kabul etmenin biraz hatalı olduğunu göstermektedir. Diğer taraftan deneyler, boşaltmaların dış merkez olması durumunun da, çok boşaltma ağızlı ve merkezi boşaltma ağızlılarla önemli bir farkının olmadığını ortaya koymaktadır.

Burada bu durumların tümünün Türkiye Silo Yönetmeliği (TS 6989, 1989) madde 1.3.2.2'de "geometrik olarak özel boşaltma" adı altında toplanmış olduklarını belirtmek uygun olmaktadır.

Bu yaklaşımda da merkezi boşaltma yapan gerçek stok yapılarında aynı yöntemlerinin kullanılabilmesi düşünülerek; genel bağıntılardan özel bağıntılara geçmek amacıyla ve muhtemel bir simetrik olmama durumu için TS 6989 (1989) madde 3'de önerilen ek katsayılar kullanılmaktadır.

2.3.3. Sınır Denge Durumu Kabullerine Göre Cidar Civarındaki Gerilmeler Arasındaki Bağıntılar

Cidar civarında gerilme incelemesi, şayet düşey bir yüzey elemanı üzerindeki $q(P)$ gerilmeleri ve, \vec{q}' düşey olacak şekilde, yatayla ψ açısı yapan eğik bir yüzey elemanı üzerindeki $q'(P)$ arasında bir bağıntı bulunabiliyorsa ikinci, üçüncü, dördüncü, ve altıncı kabuller $A(z)$ ve $A(z+dz)$ yüzeyleri arasında kalan cismin dengesini, çözülebilir bir diferansiyel denklem elde edecek şekilde, yazmaya imkan tanıdığından yararlı olmaktadır (bkz. Şekil 2.12). Benzer şekilde n, \vec{q}' 'nin yatay bileşeni ve $q'' = \frac{q'}{\cos \psi}$, q' 'nin yatay düzlemde birim alana etkileyen değeri olmak üzere, n ve q'' arasında, j indisi

dikkate alınan son denge durumunu belirtmek üzere, $i \in \{01, 02, \dots, j\}$ için $\lambda_i = \frac{n_i}{q_i}$ oranını

incelemekte yarar bulunmaktadır. Aşağıda bu inceleme sınır denge durumlarında Mohr dairesi yardımıyla yapılmaktadır.

Sınır denge durumlarında Mohr dairesinden yararlanarak elde edilecek bulgular için, z derinliğinde cidara son derece yakın bir P noktası civarına ilişkin Mohr dairesi dikkate alınmaktadır (bkz. Şekil 2.12). φ , iç sürtünme açısı olmak üzere denge durumu sınırda olduğundan;

- ✓ Bir taraftan Mohr dairesi bünyesel dayanım eğrileri olan iki yarı doğruya teğettir (Şekil 2.13a, Şekil 2.14a),
- ✓ Diğer taraftan q_i gerilmesine ilişkin nokta, orijinden geçen ve σ eksenine malzemenin cidar üzerindeki sürtünmesinden doğan $\delta \leq \varphi$ açısını yapan Ou yarı doğrusu üzerinde bulunmaktadır (bkz. Şekil 2.13a, Şekil 2.14a). Kapalı bir yapı içerisinde bulunan ayırık taneli bir malzeme hacmi söz konusu olduğundan denge genellikle cidarın kütleyle karşı hareketinden doğan pasif bir denge olmamaktadır. Durum böyle olunca çalışmanın bundan sonraki kısımlarında $\delta > 0$ durumu dikkate alınmaktadır. Dolayısıyla da sınır durumlar, Ou'nun Mohr dairesi ile kesişimi olan iki noktaya karşılık gelmekte ve bu durumda sadece iki denge durumunun incelenmesi gerekmektedir ($i \in \{01, 02\}$). Mümkün olabilecek değerlerin en küçüğü olan q_{01} gerilmesine karşılık gelen durumlar 01 indisiyle (bkz. Şekil 2.13), diğeri ise 02 indisiyle gösterilsin (bkz. Şekil 2.14).

Bir mutlak koordinat sistemine göre OA_1' gerilmesinin konumu aransın. q_{01} ve OA_1' arasında Mohr dairesi üzerindeki tasvir noktası $-(\pi + 2\delta)$ açısı kadar döndüğünde gerilmenin üzerine etki ettiği yüzey elemanın $+\left(\frac{\pi}{2} + \delta\right)$ lık bir açı kadar ters yönde döndüğü bilinmektedir. Bu da q_{01} 'in yatayla δ açısı yapmasını gerektirmektedir. Bu durumda OA_1' gerilmesi tanım olarak yüzey elemanı normaliyle $-\delta$ açısı yapmakta dolayısıyla dik durumda olmaktadır (bkz. Şekil 2.13a, b, c).

Durum böyle olunca; $\psi = \delta$ ve $OA'_1 = q'_{01}$ olduğu ve q_{01} ' in eşleniğinin düşey konumdaki q'_{01} ' nün olduğu gösterilebilir.

Buradan yatay bir kesitte üniformluk kabulü olan üçüncü kabul ve Şekil 2.12'e göre;

$$q''_{01} = \frac{q'_{01}}{\cos \delta} \text{ olur ve Mohr dairesi yardımıyla;}$$

$$\lambda_{01} = \frac{n_{01}}{q_{01}} = \frac{q'_{01}}{q_{01}} \cdot \cos^2 \delta \quad (2.41)$$

bağıntısı yazılır ve bu bağıntıda; $\frac{q'_{01}}{q_{01}} = \frac{\sin(\theta - \delta)}{\sin(\theta + \delta)}$ ve $\sin \delta = \sin \varphi \cdot \sin \theta$ ifadeleri yerine

konup bilinen trigonometrik dönüşümler yardımıyla gerekli düzenlemeler yapılırsa;

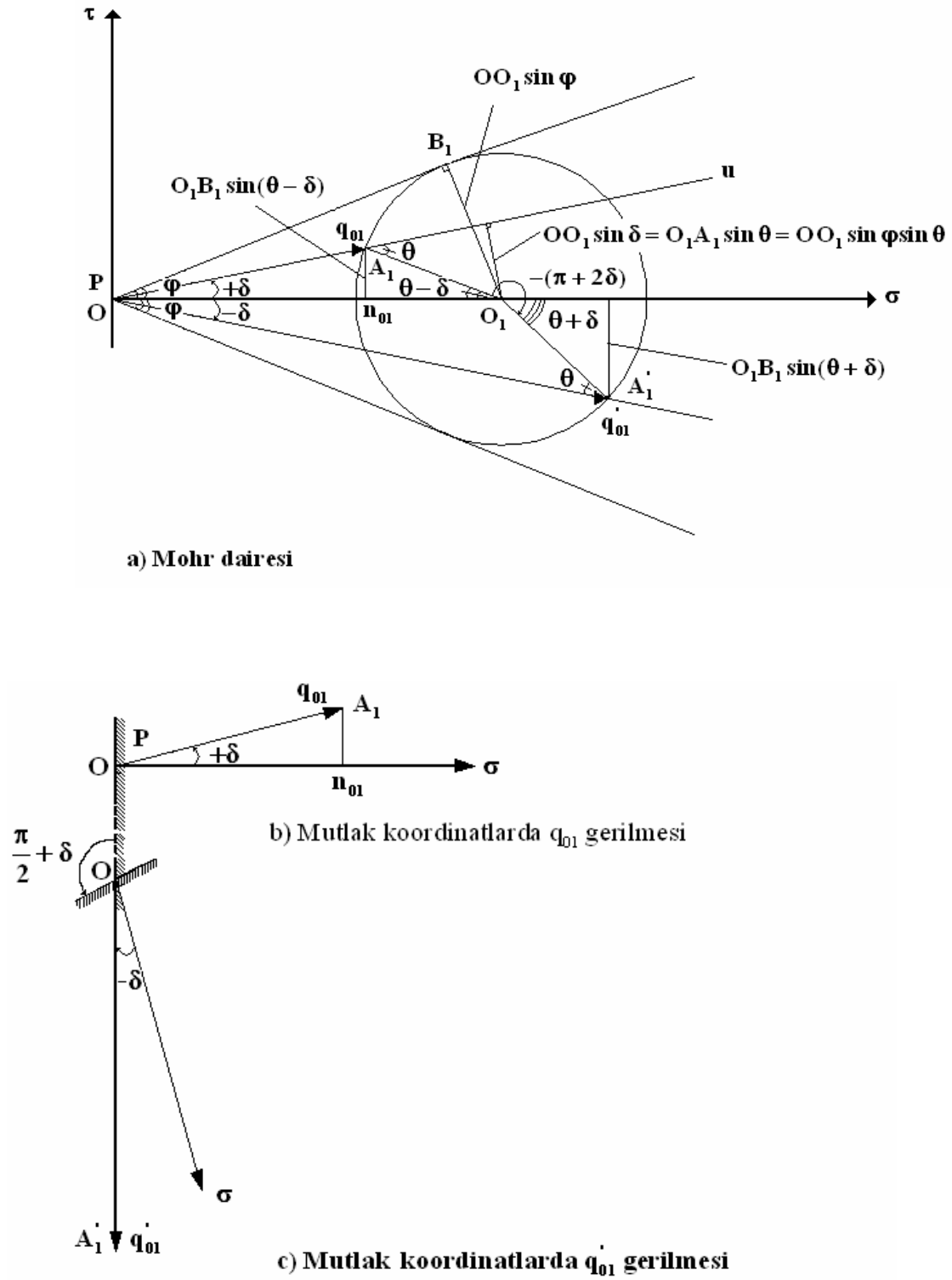
$$\lambda_{01} = \frac{1 - \sqrt{1 - \left(\frac{\text{tg} \delta}{\text{tg} \varphi}\right)^2} \cdot \sin \varphi}{1 + \sqrt{1 - \left(\frac{\text{tg} \delta}{\text{tg} \varphi}\right)^2} \cdot \sin \varphi} \cdot \cos^2 \delta \quad (2.42)$$

olarak elde edilmektedir. Benzer yolla, Şekil 2.14 yardımıyla λ_{02} ' nin de;

$$\lambda_{02} = \frac{1 + \sqrt{1 - \left(\frac{\text{tg} \delta}{\text{tg} \varphi}\right)^2} \cdot \sin \varphi}{1 - \sqrt{1 - \left(\frac{\text{tg} \delta}{\text{tg} \varphi}\right)^2} \cdot \sin \varphi} \cdot \cos^2 \delta \quad (2.43)$$

şeklinde ifade edileceği gösterilebilmektedir.

Bu durumda da q_{02} ile OA'_2 gerilmeleri, 01 sınır durumu için ıspatlanan özelliklere tamamen sahiptir. Bu durumda $q'_{02} = OA'_2$ olup, q_{02} ' nin eşleniği de $\psi = \delta$ için düşey konumda olmak durumundadır.



Şekil 2.13. Birinci denge durumu için Mohr dairesi, mutlak koordinatlarda q_{01} ve q_{01}' gerilmeleri

Daha önce yapılan kabullerin hiçbiri doldurma ve boşaltmada sınır gerilmelerden birine ulaşıldığını kesin olarak doğrulamaya imkan tanımadığından yukarıda verilen açıklamalar yardımıyla elde edilen (2.42) ve (2.43) bağıntılarının fiziki anlamlarının açık olmadığı anlaşılmaktadır. Bununla beraber söz konusu bağıntılar aşağıdaki düşünceleri belirtmeye imkan tanımaktadır.

- ✓ Silindirik silonun doldurulmasının başlangıcında malzeme ilk olarak tabana etkidiğinden bu işlem esnasında malzemenin q_1' maksimum düşey gerilmesine karşılık gelen bir denge durumu yani 01 sınır denge durumu oluşturma eğiliminde olduğu kabul edilebilir (bkz. Şekil 2.13, Şekil 2.14).
- ✓ Aksine, boşaltma esnasında ve özellikle boşaltmanın sabit debili olması durumunda bir denge durumunun olduğu ve bu denge durumunun mümkün olabilen en küçük düşey q_2' gerilmesine karşılık geldiği diğer bir deyişle Şekil 2.13 ve Şekil 2.14'ten görüldüğü üzere 02 sınır denge durumuna ulaşan bir durum aldığı kabul edilebilmektedir.

Aynı ölçekte çizilmiş olan Şekil 2.13 ve Şekil 2.14'ün karşılaştırılması bir denge durumundan diğerine geçmenin sadece, 02 denge durumuna ulaşması güç olan, ara durumlar yardımıyla olabileceğini göstermektedir.

Pieper ve Wenzel'in (1964) yapmış oldukları deneylerle ölçülen λ değerlerinin, teorik λ değerleri ile karşılaştırılmasından deneylerden elde edilen λ değerlerinin yukarıda verilen bağıntılarla hesaplanan λ_{01} ve λ_{02} değerleri arasında kaldığı ve $\lambda_{dölç}$ değerlerinin λ_{01}' den büyük olduğu ancak λ_{01}' e çok yakın olduğu oysa $\lambda_{bölç}$ değerlerinin $]\lambda_{01}, \lambda_{02}[$ arasında olduğu anlaşılmaktadır. Buna göre hesaplanan λ_0 değerlerinin sınır olarak dikkate alınması durumunda λ_{02} üst sınırının boşaltmadaki gerçek değerinden çok uzak kaldığı, λ_{01} alt sınırının ise doldurmadaki gerçek değerine çok yakın olduğu görülmektedir (Lumbroso, 1977, Blight 1988). Ancak deney siloları yerine birebir ölçekli bir silo dikkate alınır, λ' nın en büyük değerlerine sadece boşaltmanın başlangıcında ulaşılacağını göstermenin mümkün olmadığı açıktır. Zira boşaltma durdurula durdurula gerçekleştirildiğinde malzemenin çeşitli düzeylerine karşılık gelen λ değerleri mümkün

olabilecek λ değerleri serisini oluşturur. Durum böyle olunca pratikte λ 'nın alt değerine genellikle doldurmada ulaşılyorsa üst değerlerinin sadece boşaltmanın başlangıcında meydana geleceğini doğrulamak mümkün olamamaktadır. Bu durum iki sınırı dikkate almayı gerektirmektedir; bunlardan alt sınır λ_1 ile üst sınır λ_j ile gösterilsin, λ_ℓ sınır denge durumlarından ve λ_1 denge durumundan farklı bir denge durumu ise; $j \notin \{01, 1, 02\}$ olmak üzere $\lambda_{01} \leq \lambda_1 < \lambda_\ell \leq \lambda_j < \lambda_{02}$ ifadesi yazılabilmektedir.

2.4. Dikkate Alınan Denge Durumları

2.4.1. Birinci Denge Durumuna İlişkin λ Değeri

Daha önce de belirtildiği gibi dikkate alınan birinci denge durumu 1 indisiyle gösterilmektedir. Bu denge durumu 01 denge durumundan farklı olmamaktadır. Bilindiği gibi bu 01 denge konumuna ilişkin λ değeri λ_{01} 'e karşılık gelmektedir. λ_{01} ise Mohr dairesi yardımıyla hesaplanmaktadır. λ_{01} ile hesaplanan $n_{01}(z)$ teorik değerlerini büyütme katsayısıyla çarpmak suretiyle $n_1(z)$ değerleri elde edilmektedir. n değerinin büyütülmesi bir taraftan λ 'nın gerçek değerlerinden en küçüğünün λ_{01} 'den daha büyük olma ihtimalini, diğer taraftan ise silo tabanının mekanik özelliklerinin değişken olmasını dikkate almak için yapılmaktadır. Bu kabul uyarınca k_{n1} değeri daha sonra verilecek olan bir katsayıyı göstermek üzere; $\lambda_1 = \lambda_{01}$ ve $n_1(z) = k_{n1} \cdot n_{01}(z)$ ifadeleri yazılabilmektedir.

2.4.2. İkinci Denge Durumuna İlişkin λ Değeri

Dikkate alınan ikinci denge durumu incelenen stok yapısı sınıfına ve boşaltma şekline bağlı olan bir j indisiyle gösterilmektedir. Daha öncede belirtildiği gibi Pieper ve Wenzel'in (1964) deney sonuçlarından yararlanarak Lumbroso (1977) ve Blight (1988) boşaltmada ölçülen λ ($\lambda_{bölç}$) değerleriyle boşaltma için hesaplanan λ (λ_{02}) değerlerini karşılaştırarak $\lambda_{bölç}$ değerlerinin λ_{01} 'den büyük, λ_{02} 'den ise küçük olduğu ortaya koymuşlardır. Çeşitli deney sonuçlarının karşılaştırılması da belirli bir derinlikte ve belirli bir stok malzemesi için λ 'nın rastgele değiştiğini gösterdiğinden bunun birinci denge

durumu dışında bir denge serisinin bulunduğunu ve bu dengelerden dolayı $\lambda(z)$ 'in çeşitli değerler aldığını ancak bunların $\lambda_j < \lambda_{02}$ olmak üzere $[\lambda_1, \lambda_j]$ aralığında bulunduğunu göstermektedir (Reimbert, 1977; Blight, 1992).

Aşağıda denge durumu kabulleri olarak da adlandırılan beşinci kabule göre, gerekli olan incelemeler için, yukarıda belirlenen hususlar irdelenmektedir. Bu irdelenmelerde tabanın mekanik niteliklerindeki değişimler dikkate alınarak her durumda gerekli olan k_{n_j} büyütme katsayısının alacağı değerler daha sonra katsayıların incelenmesi ile bulgular başlıkları altında verilmektedir.

λ parametresinin, daha önce birinci, dördüncü ve altıncı kabul olarak adlandırılan kabuller yardımıyla gerçekleştirilen incelemelerden, bundan önce sınır denge durumu kabullerine göre cidar civarındaki gerilmeler arasındaki bağıntılar başlığı altında elde edilen $\frac{n}{q}$ değerine eşit olduğu kabul edilsin.

Diğer taraftan eğer sınır denge durumunun teorik varlığı öngörülürse, bu kabulün birinci, dördüncü ve altıncı kabul ile birleştirilmesi λ 'nın λ_{01} ve λ_{02} gibi iki değerinin varlığını ortaya koymaya imkan tanımaktadır. Buna göre kesit çevresi, $U(z)$ boyunca yazılabilecek denge durumları;

✓ “Birinci denge durumu” olarak adlandırılan durumda $\lambda_1 = \lambda_{01}$ ve büyütme katsayısı $k_n = k_{n_1}$ ile gösterilmektedir. Bu k_{n_1} , λ_1 ile hesaplanan n değerleri yardımıyla belirlenmektedir.

✓ “İkinci denge durumu” olarak adlandırılan durum j indisiyle gösterilmektedir. Bu indis stok yapı sınıfına ve boşaltma şekline bağlıdır. Bu durumda λ , bir $\lambda_j(z)$ serisi ve muhtemel n_{0j} değerlerinin büyütme katsayısı olan k_n de k_{n_j} serisi ile gösterilmektedir. Burada z 'nin fonksiyonu olan λ , 1 ve j durumları arasındaki ℓ denge durumlarına göre tanımlanmaktadır. Durum böyle olunca; $\lambda_j < \lambda_{02}$ olmak üzere anılan denge durumları $\lambda_\ell \in [\lambda_1, \lambda_j]$ şeklinde ifade edilebilmektedir.

2.5. Gerilmelerin Yüksekliğe Bağlı Olarak Genel Değişimi

Daha önce ikinci denge durumu için bir $\lambda_j(z)$ fonksiyonunun varlığı kabul edilmişti. Burada birinci denge durumunun aynı zamanda ikinci denge konumu ile birlikte, tüm hesaplardan sonra $\lambda(z) = \lambda_1(z)$ yazmak koşuluyla, incelenebileceği belirtilmelidir. Bu durumda $\lambda_1 = \lambda_{01}$ ve $\lambda_j < \lambda_{02}$ olmak üzere $\lambda(z) \in [\lambda_1, \lambda_j]$ şeklinde yazmak mümkün olmaktadır.

2.5.1. Diferansiyel Denklemin Çıkartılması

Daha önce verilen varlık (2. kabul), üniformluk (3. kabul), süreklilik ve statik kural uygulama (4. kabul) ve dönele mekanik simetri (6. kabul) kabullerinin geçerli olmaları durumunda; A silo sınıfı stok yapısının düzlem kesit alanını ve U bu kesitin çevresini göstermek üzere Şekil 2.12 yardımıyla düşey izdüşüm denge denklemi gereğince;

$$-A(z) \times dq''(z) - U(z).dz \times n(z). \tan \delta + \gamma.A(z).dz = 0 \quad (2.44a)$$

ifadesi yazılabilmektedir.

Gerçekten varlık kabulü $q''(z)$ ve $n(z)$ fonksiyonlarının z 'nin belirli bir aralığında mevcut olduğunu düşünmeye, üniformluk kabulü $A(z)$ yüzeyi üzerindeki toplam düşey yükü $A \cdot q''$ olarak ifade etmeye, dönele mekanik simetri kabulü cidarın düşey tepkisini $-U(z) \times n(z). \tan \delta$ olarak ifade etmeye imkan vermektedir. Benzer şekilde süreklilik kabulü $A(z)$ ve $A(z+dz)$ yüzeyleri arasındaki malzeme ağırlığının $\gamma.A.dz$ şeklinde ifade edilmesine imkan vermektedir.

Son olarak denge gereği statik kural uygulama kabulü 2.44a bağıntısının ikinci tarafının sıfır olmasını gerektirmektedir. Buradan $q''(z)$ belirsiz bir fonksiyonu, $r_h(z) = \frac{A(z)}{U(z)}$, z derinliğindeki hidrolik yarıçapı göstermek, $n(z) = \lambda(z) \cdot q''(z)$ temel ifadesi olarak dikkate alınmak üzere (2.44a) bağıntısı;

$$\frac{dq''(z)}{dz} + \frac{\tan \delta}{r_h} \cdot \lambda(z) \cdot v(z) = \gamma \quad (2.44b)$$

şeklini almaktadır.

2.5.2. Diferansiyel Denklemin Çözümü

İkinci taraflı, doğrusal ve birinci mertebeden bu diferansiyel denklemin genel çözümünün;

$$q''(z) = e^{-\int_0^z \frac{\tan \delta}{r_h} \lambda(u) \cdot du} \cdot \int_0^z \gamma \cdot e^{\int_0^u \frac{\tan \delta}{r_h} \lambda(w) \cdot dw} \cdot du \quad (2.45a)$$

şeklinde olduğu bilinmektedir. Daha sonra görüleceği gibi γ 'nın z ile değişimi ihmal edilebileceğinden (2.45a) bağıntısında $\gamma = \text{sabit}$ olduğu düşünülüp $n(z) = \lambda(z) \cdot q''(z)$ bağıntısını dikkate almak, teorik 0 indisleri ve denge durumu sıra numarasını gösteren i indislerini kullanarak $i \in \{01, 02, 1, \dots, j\}$ olmak üzere (2.45a) bağıntısı;

$$n_{0i}(z) = \gamma \cdot \lambda_i(z) \cdot e^{-\int_0^z \frac{\tan \delta}{r_h} \lambda_i(u) \cdot du} \cdot \int_0^z e^{\int_0^u \frac{\tan \delta}{r_h} \lambda_i(w) \cdot dw} \cdot du \quad (2.45b)$$

şeklinde yazılabilmektedir. Bu integralin incelenmesi aşağıdaki bazı açılımların yapılmasını gerektirmektedir.

Burada n_i 'lerin n_{0i} 'lerin büyütülmesinden elde edildiğini tekrar belirtmek uygun olmaktadır.

2.6. Cidarlar Üzerindeki Etkilere İlişkin Bağıntılar

2.6.1. Birinci Denge Durumuna İlişkin Bağıntılar

Birinci denge durumunda; $\lambda_1(z) = \text{sabit} = \lambda_1$ yazılabilmektedir. Bu durumda k_{n1} büyütme katsayısını kullanmak suretiyle (2.45b) bağıntısı;

$$n_1 = k_{n1} \cdot \lambda_1 \cdot \gamma \cdot e^{-\frac{\tan \delta}{r_h} \cdot \lambda_1 \cdot z} \cdot \frac{r_h}{\lambda_1 \cdot \text{tg} \delta} \cdot \left(e^{\frac{\text{tg} \delta}{r_h} \cdot \lambda_1 \cdot z} - 1 \right) \quad (2.45c)$$

şeklini almaktadır. Bu ifadede de gerekli düzenlemeler yapıldığı taktirde birinci denge durumuna ilişkin yatay basınç için;

$$n_1 = k_{n1} \cdot \frac{\gamma \cdot r_h}{\text{tg} \delta} \cdot \left(1 - e^{-\frac{\tan \delta}{r_h} \cdot \lambda_1 \cdot z} \right) \quad (2.45d)$$

bağıntısı elde edilmektedir. Bu bağıntı da;

$$\rho = \frac{\tan \delta}{\tan \varphi}, \quad m = \sqrt{1 - \rho^2}, \quad \lambda_1 = \frac{1 - m \cdot \sin \varphi}{1 + m \cdot \sin \varphi} \cdot \cos^2 \delta, \quad z_{01} = \frac{r_h}{\lambda_1 \cdot \tan \delta}, \quad x_1 = \frac{z}{z_{01}}, \quad y_1 = 1 - e^{-x_1}$$

olmak üzere;

$$n_1 = k_{n1} \cdot \frac{\gamma \cdot r_h}{\tan \delta} \cdot y_1 \quad (2.45e)$$

şeklini almaktadır.

Düşey basıncın temel değerini veren bağıntı ise, h'' aşağıda (2.47) ifadesinden belirlenen değer olmak üzere TS 6989 (1989) madde 1.5.2 ve SNBATI 334 (1975) madde 5.2.3'e göre tanım olarak;

$$v_0 = q'' + \gamma \cdot h'' \quad (2.46)$$

ifadesinden elde edilmektedir.

Burada;

a) $z \rightarrow \infty$ için, n_1 'i veren bağıntının asimtot teorisinden çıkartıldığı, buna göre

$$n_{0\infty} = n_{\text{maks}} = \frac{\gamma \cdot r_h}{\tan \delta} \quad \text{olmak üzere} \quad n_{1\infty} = k_{n1} \cdot n_{0\infty} \quad \text{değerini aldığı, stok yapısı}$$

derinliğinin yeterli düzeyde olması özel durumunda z 'nin belli bir değerinden sonra q'' sabit dolayısıyla da $dq'' = dv_0 = 0$ olduğu, bu durumda $A(z)$ yüzeylerinin düşey kesitleri, birim yatay uzunlukta bulunan $\gamma \cdot dz$ sabit yükünün finiküleri olduğu ve bu finiküler formun, $dq'' = 0$ olduğundan, ikinci dereceden parabol şeklinde olduğu,

b) $A(z)$ kesitleri $z=0'$ dan $z=H'$ ye kadar şekil değiştirmemesi durumunda, hacmin toplam dengesini sağlamak için stok yapısı derinliğinin orijinini h'' kadar değiştirmek gerektiği, burada h'' 'nün değerinin, $h = h_0 + \frac{V}{A}$ olmak üzere (bkz.

Çizelge 1.1), $A(h)$ yüzeyiyle sınırlı tabanı $H - h_1$ derinliğinde bulunan paraboloidin hacmine karşılık geldiği, bu durumda dairesel kesitli stok yapılarında h'' 'nün;

$$h'' = \frac{1}{2} \cdot \frac{r \cdot \tan \delta}{2} = \frac{1}{2} \cdot r_h \cdot \tan \delta \quad (2.47)$$

değerini aldığı, bu nedenle (2.45e) bağıntısındaki y_1 'in değerinin belirlenmesinde ilgili ifadede z yerine $z - h''$ konulması gerektiği, burada h'' 'nden daha büyük bir bölgenin donatısız kalmasını önlemek amacıyla TS 6989'da (1989) bir z_T geçiş derinliğinin önerildiğini,

c) Yukarıdaki düzeltmenin birinci denge durumu için kesinlikle gerekli olduğu, A gerçek yüzeyleri genellikle paraboloidle ilişkin olmayan ikinci denge durumu için ise bu düzeltmenin birinci denge durumundaki kadar gerekli olmadığı ve bunun TS 6989'da (1989) dikkate alınmış olduğunu belirtmek uygun olmaktadır.

2.6.2. İkinci Denge Durumunun Teorik Olarak İncelenmesi

Daha önce verilmiş olan (2.45b) bağıntısı $\lambda(z)$ ' nin sabit bir değer olmaması durumunda klasik bir fonksiyonla ifade edilememektedir. Bu durumda denge durumu kabulleri olarak da adlandırılmış olan beşinci kabulün ikinci denge durumuna ilişkin kısmının uygulamasını dikkate almak gerekmektedir. Bu koşullar altında ara denge durumları $0, \dots, \ell-1, \ell, \dots, p, \dots, N$ indisleriyle gösterilmekte ve bunlar $z = 0, \dots, z = h_{\ell-1}, z = h_{\ell}, \dots, z = h_p, \dots, z = h_N = H$ düzeylerinde aynı anda meydana gelmektedir. $z = h_{\ell-1}$ ve $z = h_{\ell}$ ardışık iki düzeyde meydana gelen iki ara denge durumu arasında λ , kendisine ait $\lambda''_{\ell-1}$ ve λ'_{ℓ} uç değerleriyle tanımlanan afın bir fonksiyondur.

$u \in [h_{p-1}, h_p]$ için $\Lambda_p(u)$ fonksiyonu, $\Lambda_p(u) = \int_0^u \lambda(w) \cdot dw$ olarak dikkate alınmaktadır. Basitleştirmek için (2.45b) bağıntısında r_h hidrolik yarıçapının sabit olduğu kabul edilir ve Λ fonksiyonu yerine konursa bağıntı n_{oi} ifadesi;

$$n_{oi} = \gamma \cdot \lambda_i(z) \cdot e^{-\frac{\tan \delta}{r_h} \cdot \Lambda(z)} \cdot \int_0^z e^{\frac{\tan \delta}{r_h} \cdot \Lambda(u)} \cdot du \quad (2.48)$$

şeklini almaktadır. Bu bağıntıdaki i indisi de $\{h_0 = 0, \dots, h_{\ell-1}, h_{\ell}, \dots, h_p, \dots, h_N = H\}$ değerlerini tanımlamaktadır. Boşaltma süreciyle uyumlu i değerlerinin en elverişsiz zarfı aranan j değeri olmaktadır. Bu durumda eğer (2.48) bağıntısındaki $\gamma \cdot \lambda(z) \cdot e^{-\frac{\tan \delta}{r_h} \cdot \Lambda(z)}$ terimi olduğu gibi muhafaza edilir, ancak bu ifade artan ya da azalan bir fonksiyon olan $\Lambda(u)$ yerleştirilmek suretiyle ifade artan ya da azalan bir fonksiyonun toplamı şeklinde gösterilirse n_{oi} ' yi içine alan $f_{im}(z)$ ve $f_{iM}(z)$ simgeleri ile gösterilen iki fonksiyon elde edilmektedir. Bu incelemeden özellikle $\exists z \in [0, H]$ için $f_{im}(z) > n_{0\infty}$ şeklinde bir denge konumunun varlığı gibi bazı bilgilere ulaşılmaktadır.

Bu λ serilerinin değer dağılımları boşaltma sürecine bağlı olarak belirlenmektedir. Bu da λ dağılımları için bazı z değerlerine karşılık $f_m(z) > n_{0\infty}$ olmasını gerektirmektedir. Bu bulgular üst kısımda küçük değerli, alt kısma doğru hızlı bir şekilde büyüyen bir λ

dağılımının varlığını göstermektedir. Bu durum stok yapısının tüm yüksekliği üzerinde λ_j 'nin maksimum olmasından daha elverişsiz olarak değerlendirilebilmektedir. Zira bu durumda (2.45d) bağıntısının fonksiyonu basit bir indis ve λ değeri değişimi ile elde edilebilmektedir. Bu fonksiyon üstten $n_{0\infty}$ asimtotuyla sınırlı monoton bir fonksiyondur (Caquot ve Kerisel, 1966; Lumbroso 1970).

2.6.3. Özel Durumlar İçin İkinci Denge Durumunun Pratik Olarak İncelenmesi

2.6.3.1. Türkiye Silo Yönetmeliğindeki Pratik Bağıntıları Elde Etme İlkeleri

Buraya kadar yapılmış olan incelemeler stok yapılarında ikinci denge durumuna ilişkin olayların çok karmaşık olduğunu göstermektedir. Zira $n_{0i}(z)$ eğrisinin sadece bir şekli bile, stok yapısı 3 dilimle temsil edilse dahi, ikisi h değeri, altı adedi ise λ değeri olmak üzere toplam sekiz parametreye bağlı bulunmaktadır. Teorinin bu tespiti teknik literatürdeki mevcut deney sonuçlarıyla da doğrulanmaktadır (Kmita,1991).

Böylece Türkiye Silo Yönetmeliği kurallarının (TS 6989,1989) sadece en sık kullanılan boşaltma şekillerine sahip gerçek stok yapılarından silo sınıfı için (bkz. Çizelge 1.1) geçerli olduğu anlaşılmaktadır. Söz konusu yönetmelikte, sık kullanılan boşaltma şekilleri için, boşaltma şeklini hassasiyetle belirleyerek z 'den bağımsız λ_j sabitlerine bağlı olarak silo tasarımına ilişkin yaklaşık bağıntılar verilmektedir.

2.6.3.2. Hidrolik Yarıçapı $r_h < 6m$ Olan Normal Boşaltmalı Silolarda İkinci Denge Durumu

Bu durum Türkiye Silo Yönetmeliğinde Madde 1.2.3'den Madde 1.3.2'ye kadar açıklanmaktadır (TS 6989, 1989). Anılan maddelerden de görüldüğü gibi, bu durumda $j=2$ alınmak suretiyle λ_2 'nin 1'den küçük olan $\lambda_2 = \cos^2 \delta$ değerlerini kullanmak mümkün olmaktadır.

Durum böyle olunca n_0 , k_{n_2} büyütme katsayısıyla çarpılarak ikinci denge durumunda yatay basıncın ifadesi;

$$n_2 = k_{n_2} \frac{\gamma r_h}{\text{tg} \delta} \left(1 - e^{-\frac{\tan \delta}{r_h} \lambda_2 z} \right) \quad (2.49a)$$

olarak elde edilmektedir. Bu bağıntı da birinci denge durumundaki kabule benzer şekilde,

$$\rho = \frac{\tan \delta}{\tan \varphi}, \quad m = \sqrt{1 - \rho^2}, \quad \lambda_2 = \cos^2 \delta, \quad z_{02} = \frac{r_h}{\lambda_2 \cdot \tan \delta}, \quad x_2 = \frac{z}{z_{02}}, \quad y_2 = 1 - e^{-x_2} \quad \text{olmak üzere;}$$

$$n_2 = k_{n_2} \frac{\gamma r_h}{\tan \delta} y_2 \quad (2.49b)$$

şeklinde de yazılabilmektedir.

2.6.3.3. Özel Boşaltmalı Silolarda İkinci Denge Durumu

Bu durum Türkiye Silo Yönetmeliğinde Madde 1.3.2.2'den Madde 1.3.3.2'ye kadar açıklanmaktadır (TS 6989,1989). Bu silolarda, daha önce de belirtildiği gibi, geometrik olarak özel (anormal) boşaltmalar için j indisi 3, mekanik olarak özel boşaltmalar için 3' ve bazı yapısal olarak özel boşaltmalar için 1' olarak alınmaktadır. Böylece ya yatay basınç, n_2 'ye göre $n_3 = n_2 + 0,10n_1$ şeklinde arttırılmakta ya da λ_1 , λ_2 'ye göre $\lambda_1 = \min(1,4\lambda_1; \cos^2 \delta)$ şeklinde muhtemelen azaltılmaktadır. Bu da n_1 'ler için (2.45e) bağıntısındaki y_1 'in belirlenmesinde λ_1 yerine $1,4\lambda_1$ konulmasını gerektirmektedir.

Burada Türkiye Silo Yönetmeliği Madde 3.4'de açıklanmış olduğu gibi hidrolik yarıçapları 12,5m'ye varan yapısal olarak özel boşaltmalı silolar hariç diğer silolarda hidrolik yarıçapın 6m ile sınırlandırılmış olduğunu belirtmek uygun olmaktadır.

2.7. Silolar için Çeşitli Dağılımların ve Katsayıların İncelenmesi

2.7.1. Temel Mekanik Karakteristiklerin Dağılımı

2.7.1.1. Birim Kütle Dağılımı

Birim kütlenin hesaplanmasında normal gerilmenin birçok siloda, yüksekliğinin alt yarısı üzerinde, genellikle 0,6'dan 2 daN/cm²'ye kadar değiştiği bilinmektedir (Reimbert, 1977). Bu belirleme, TS 6989'da (1989) öngörülen birim kütlelerin (γ) tespitindeki gerilme değerine yakın değerlerdir. Böylece toz halinde silolanan malzemeler için birim kütlenin (γ) %20'den %30'a kadar daha küçük olarak değerlendirilmesinden kaçınılmış olmaktadır. Maalesef bu hata TS 6989 (1989) yürürlüğe girinceye kadar, genellikle Alman Silo Yönetmeliği kullanıldığından, yapılagelmiştir. Ancak burada TS 6989'da (1989) taneli malzemelerden, özellikle buğday için, dünyaca kabul edilen değerden %6 daha büyük birim kütle verildiği de belirtilmelidir (ACI 313, 1977).

2.7.1.2. Cidar Üzerindeki Sürtünme Açısı Dağılımı

Cidar üzerinde sürtünme açısının değeri bir taraftan silolanan malzemenin birim kütlesine diğer taraftan silo cidarının pürüzlü olup olmaması gibi özelliklerine bağlı olarak değiştiği bilinmektedir. Doğrudan sürtünme açısının ölçümleri, sürtünme açısındaki (δ) değişimin %40'a kadar varabileceğini göstermektedir (SNBATI, 1975).

2.7.1.3. İçsel Sürtünme Açısı Dağılımı

Teknik literatüre göre aynı malzeme için verilen içsel sürtünme açısı (φ) değerleri arasındaki fark %17 civarındadır (Lumbroso, 1970). Bu farkın silolanan malzeme üretim yerinin değişik olması ile deney düzeneği ayrıntılarının özdeş olmamasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

2.7.1.4. $\rho = \frac{\text{tg}\delta}{\text{tg}\varphi}$ Oranı Dağılımı

Bu oranın dağılımının δ ve φ açılarındaki dağılımdan kaynaklandığı açıktır. Burada TS 6989 (1989) Madde 1.4.3'deki Çizelge 1.4'de emniyetli tarafta kalmak üzere bu oran için karakteristik değerlerin verilmiş olduğu ve burada Casagrande kutusu ya da üç eksenli deneylerle ölçülen φ değerlerinin bazı ürünler için %10'dan %20'ye kadar azaltılmış olduğu belirtilmelidir. Ancak deneyler φ 'ye bağlı olarak hesaplanan δ 'nın ölçülen δ 'dan %7 daha büyük olduğunu, dolayısıyla da anılan yönetmelikle yapılan hesapların emniyetli tarafta kaldığını göstermektedir (Reimbert, 1977).

2.7.2. Davranış Katsayılarıyla (k_{n1} ve k_{nj}) Elde Edilen Büyütmeler

Bu katsayıların belirlenmesinde;

- (1) k_{n1} için, gerçek λ 'nın λ_{01} 'den daima %10- %20 daha büyük olduğu, oysa TS6989'da (1989) $\lambda_1 = \lambda_{01}$ kabul edildiği ve λ değerindeki bu artışın basınç eğrisinin sadece üst kısmını etkilediği;
- (2) k_{nj} için, n 'nin değişimini yerel $n_{0\infty}$ değerini geçmeye kadar götürebilen son derece karmaşık λ_j değişebilirliği hususlarının dikkate alınması gerekmektedir.

Diğer taraftan bu davranış katsayıları için, TS 6989'da (1989) φ içsel sürtünme açısının azaltılmasında ve $\rho = \frac{\text{tg}\delta}{\text{tg}\varphi}$ oranının önerilmesinde dikkate alınmamış olan, δ dağılımının da dikkate alınması gerekmektedir. Oysa TS6989'da (1989) bu katsayıların; $k_{n1} = 1,15$; $j = 3$ ya da $3'$ için n_2 'nin belirlenmesinde $k_{n2} = 1,15$ ve $j = 1'$ için $k_{n1} = k_{n1}$ olarak alınması önerilmektedir.

2.8. Türkiye Silo Yönetmeliği Kurallarının Temel Teorik İlkeleri Hakkında Bulgular

Buraya kadar yapılan incelemeler, ayrıık taneli malzemeleri içeren stok yapılarındaki olayların çok çeşitli ve karmaşık olduğunu ortaya koymuş bulunmaktadır. Sadece gerçek stok yapılarından silo sınıfına ilişkin olmasına rağmen TS 6989'da (1989) karşılaşılan problemlerin çözümü için çeşitli boşaltma şekillerine göre farklı çözüm yolları önerilmektedir. Gerçekten bu yönetmelikte incelenen durumların açıkça yapılan tanımlarına göre davranış katsayıları için; $k_{n1} = k_{n2} = 1,15$ ve $k_v = 1,35$ (bazı durumlarda $k_v = 1,25$) önerilmektedir. Aşağıdaki belirtilen hususlar, bu yönetmeliğin diğer öneri ve hükümlerinin de son derece tutarlı olduğunu teyit etmektedir.

- ✓ λ_1 kesinlikle λ_{01} 'e eşittir;
- ✓ λ_j z' den bağımsızdır ve kesinlikle λ_{02} 'den küçüktür;
- ✓ γ , 1 daN/cm²'lik basınç altında ölçülen değere eşittir, ϕ iç sürtünme açısı genellikle ölçülen değerine göre %10-15 azaltılmakta ve bazı durumlarda bu azaltmanın %20 olması önerilmektedir. Diğer taraftan ρ değerlerinin verildiği çizelge yardımıyla δ değerleri de hesaplanabilmektedir.

Doğruluğu deneylerle gösterilmiş olan analitik bir inceleme tatmin edici bir sonuca götürebileceğinden, Türkiye Silo Yönetmeliğinde (TS 6989, 1989) tanımlanan sınırlar dışında, modeller üzerindeki deneylerden elde edilmiş olsalar bile, ampirik hiçbir bağıntının kullanılmasının ekonomi ve emniyet yönünden uygun olmadığına inanılmaktadır.

2.8.1. Birinci ve İkinci Denge Durumuna İlişkin n_1 ve n_2 İfadelerinin Elde Edilişi

Türkiye Silo Yönetmeliğindeki n_1 ve n_2 ifadelerinin daha önce genel yaklaşımdan elde edilen ifadelerle bağlantısı z_{01} ve z_{02} parametrelerinin kullanılması ve $\gamma \cdot h$ terimini dikkate alarak bir başlangıç değişimi ile sağlanabilmektedir.

Gerçekten (2.45d) ve (2.49a) bağıntıları başlangıç değişiminden sonra aşağıda tekrar yazılırsa bu bağıntılar,

$$n_1 = k_{n1} \frac{\gamma r_h}{\tan \delta} \left(1 - e^{-\frac{\tan \delta}{r_h} \lambda_1 (z-h^*)} \right) \quad (2.50a)$$

$$n_2 = k_{n2} \frac{\gamma r_h}{\tan \delta} \left(1 - e^{-\frac{\tan \delta}{r_h} \lambda_2 (z-h^*)} \right) \quad (2.51a)$$

şeklini almaktadır. Bu durumda;

$$x_1 = \frac{z-h^*}{\frac{r_h}{\lambda_1 \tan \delta}}, \quad y_1 = 1 - e^{-x_1} \quad \text{ve} \quad x_2 = \frac{z-h^*}{\frac{r_h}{\lambda_2 \tan \delta}}, \quad y_2 = 1 - e^{-x_2}$$

dönüşümleri yapılırsa Türkiye Silo Yönetmeliği Madde 2.2.1'de verilen n_1 ve n_2 ifadeleri;

$$n_1 = k_{n1} \left(\frac{\gamma r_h}{\tan \delta} \right) y_1 \quad (2.50b)$$

$$n_2 = k_{n2} \left(\frac{\gamma r_h}{\tan \delta} \right) y_2 \quad (2.51b)$$

olarak aynen elde edilmektedir. Bu birinci ve ikinci denge durumlarına ilişkin n_1 ve n_2 ifadeleri;

$$\eta = \frac{z-h^*}{r_h}, \quad n_\infty = k_{n1} \frac{\gamma r_h}{\tan \delta} = k_{n2} \frac{\gamma r_h}{\tan \delta} = \frac{1,15}{\tan \delta} \gamma r_h \quad \text{olarak gösterilir ve sadece } \varphi$$

içsel sürtünme açısına ve $\rho = \frac{\tan \delta}{\tan \varphi}$ oranına bağlı olan $\psi_1 = \frac{n_1}{\gamma r_h}$, $\psi_2 = \frac{n_2}{\gamma r_h}$

parametrelerinin, η 'nin fonksiyonu oldukları da dikkate alınarak ψ_1 ve ψ_2 ifadeleri;

$$\frac{n_{\infty}}{\gamma r_h} = \frac{1,15}{\tan \delta} \text{ olmak üzere;}$$

$$\psi_1 = \frac{n_1}{\gamma r_h} = \left(\frac{n_{\infty}}{\gamma r_h} \right) \left(1 - e^{-\lambda_1 \tan \delta \cdot \eta} \right) \quad (2.52a)$$

$$\psi_2 = \frac{n_2}{\gamma r_h} = \left(\frac{n_{\infty}}{\gamma r_h} \right) \left(1 - e^{-\lambda_2 \tan \delta \cdot \eta} \right) \quad (2.53a)$$

şeklinde yazılabilmektedir.

2.8.2. Basınçların Türkiye Silo Yönetmeliğine Göre Hesabı İçin Hazırlanan Abak ve Çizelgelerin Kullanımı

Aşağıda taneli malzemelerin siloda oluşturduğu basınçlar ve sürtünme kuvvetinin hesaplanmasında kolaylık sağlayacak birtakım abak ve çizelgelerin hazırlanışı ve kullanımları üzerinde durulmaktadır. Hazırlanan, Şekil 2.15, Şekil 2.16, Şekil 2.17, Şekil 2.18, Şekil 2.19 ve 2.20'deki abaklarda $\rho = \frac{\tan \delta}{\tan \varphi}$ oranının üç değeri ve iç sürtünme açısının (φ) on değeri için η ' ya bağlı olarak basınçlara ilişkin boyutsuz ψ_1 ve ψ_2 değerleri verilmektedir. ρ oranının anılan üç değeri;

pürüzlü cidar ve iri taneli malzeme için $\rho = 0,70$,

pürüzlü cidar ve ince taneli malzeme için $\rho = 0,75$,

pürüzlü cidar ve toz halindeki malzeme için $\rho = 0,80$,

şeklinde. İçsel sürtünme açısının on değeri ise; $\varphi = 16^\circ$ 'den $\varphi = 34^\circ$ ' ye kadar ikişer ikişer arttırılarak seçilen değerlerdir. Buna göre; çeşitli z derinliklerinde belirli bir φ ve

belirli bir ρ değeri için ilgili abaktan $\eta = \frac{z-h}{r_h}$ ifadesine bağlı olarak alınan ψ_1 ve ψ_2

değerleri kullanılarak sırasıyla birinci ve ikinci denge durumlarına ilişkin yatay basınçlar;

$$n_1 = \psi_1 \cdot \gamma r_h \quad (2.52b)$$

$$n_2 = \psi_2 \cdot \gamma r_h \quad (2.53b)$$

ifadeleriyle hesaplanabilmektedir.

Yatay basıncın sınır değeri n_∞ , ilgili abakları takip eden Çizelge 2.14, Çizelge 2.15 ve Çizelge 2.16'nın 6. satırlarında verilen $n_\infty/\gamma \cdot r_h = 1,15/\tan \delta$ yardımıyla belirlenebilmektedir.

Hazırlanan abaklardaki aynı φ ve ρ değerlerine karşılık gelen çizelgelerin 7. satırlarından 10. satırlarına kadar $n_1(z)$ ve $n_2(z)$ dikkate alınmak suretiyle kullanılması, gerçekleştirilen işlemler yardımıyla z derinliğindeki düşey basıncı $[v(z)]$ ve cidarlar üzerindeki sürtünme kuvvetini $[T(z)]$ vermektedir. Zira bu çalışmanın 2.6.1 ve 2.8 paragrafları gereğince düşey basınç ifadesi;

$$v = k_v v_0 = k_v (q_0'' + \gamma h'') = 1,35 \left(\frac{n_0}{\lambda} + \gamma h'' \right) \quad (2.54)$$

şeklinde yazılabilmektedir. Buna göre; $\frac{1}{1,15\lambda_1} = \tau_1$ ve $\frac{1}{1,15\lambda_2} = \tau_2$ olarak gösterilirse

birinci ve ikinci denge durumlarına ilişkin düşey basınçlar için sırasıyla;

$$v_1 - 1,35\gamma h'' = n_1 \cdot \frac{1,35}{1,15\lambda_1} = n_1 \cdot (1,35\tau_1) \quad (2.55a)$$

$$v_2 - 1,35\gamma h'' = n_2 \cdot \frac{1,35}{1,15\lambda_2} = n_2 \cdot (1,35\tau_2) \quad (2.56a)$$

bağıntıları yazılabilmektedir. Buradan, φ ve ρ ' nun belli olması durumunda, çizelgelerin 7. ve 8. satırları $1,35\tau_1$ ve $1,35\tau_2$ değerlerini verdiğiinden ve n_1 ile n_2 daha önce abaklar yardımıyla belli olduğundan v_1 ve v_2 basınçlar;

$$v_1 = (1,35\tau_1) \cdot n_1 + 1,35\gamma h \quad (2.55b)$$

$$v_2 = (1,35\tau_2) \cdot n_2 + 1,35\gamma h \quad (2.56b)$$

bağıntılarıyla hesaplanabilmektedir.

Yukarıdaki $n_1(z)$ bağıntısına göre, $z=h$ tiremi başlangıcındaki yatay basınç $\bar{n}_1 = n_1(z=h)$ şeklinde, tiremi başlangıcındaki düşey basınç ise (2.55b) bağıntısının uygulanması ve ilgili çizelgeden $1,35\tau_1$ değerinin alınmasıyla $\bar{v}_1 = v_1(z=h)$ şeklinde hesaplanmaktadır.

Burada TS 6989 (1989) gereği kullanılan azaltma katsayısının genellikle $1,25 \leq k_v \leq 1,35$ koşulunu sağlaması gerektiği, özel bir durum olan yalnız çevre taşıyıcılara sahip silo kolon ve temelleri için $k_v = 1,00$ alınabileceği belirtilmelidir.

Diğer taraftan çizelgeler başlangıçtan z derinliğine kadar cidar üzerindeki düşey etkilerin bileşkeleri olan $T_1(z)$ ve $T_2(z)$ değerlerinin elde edilmesine de imkan tanımaktadır. Bu imkanı TS 6989'da (1989) gösterilene özdeş $T(z)$ 'yi kullanmak suretiyle sağlamaktadır. Gerçekten, statik denge gereği:

$$T(z) \times U + q \times A = \gamma(z-h)A \quad (2.57)$$

denklemini yazılabilmektedir. Bu da;

$$T(z) = -\frac{n_0}{\lambda} r_h + \gamma(z-h)r_h \quad (2.58)$$

şeklinde ya da $\tau_1 = \frac{1}{1,15\lambda_1}$ ve $\tau_2 = \frac{1}{1,15\lambda_2}$ olmak üzere birinci ve ikinci denge durumları

için;

$$T_1(z) = -\tau_1 (n_1 r_h) + \gamma (z - h'') r_h \quad (2.59)$$

$$T_2(z) = -\tau_2 (n_1 r_h) + \gamma (z - h'') r_h \quad (2.60)$$

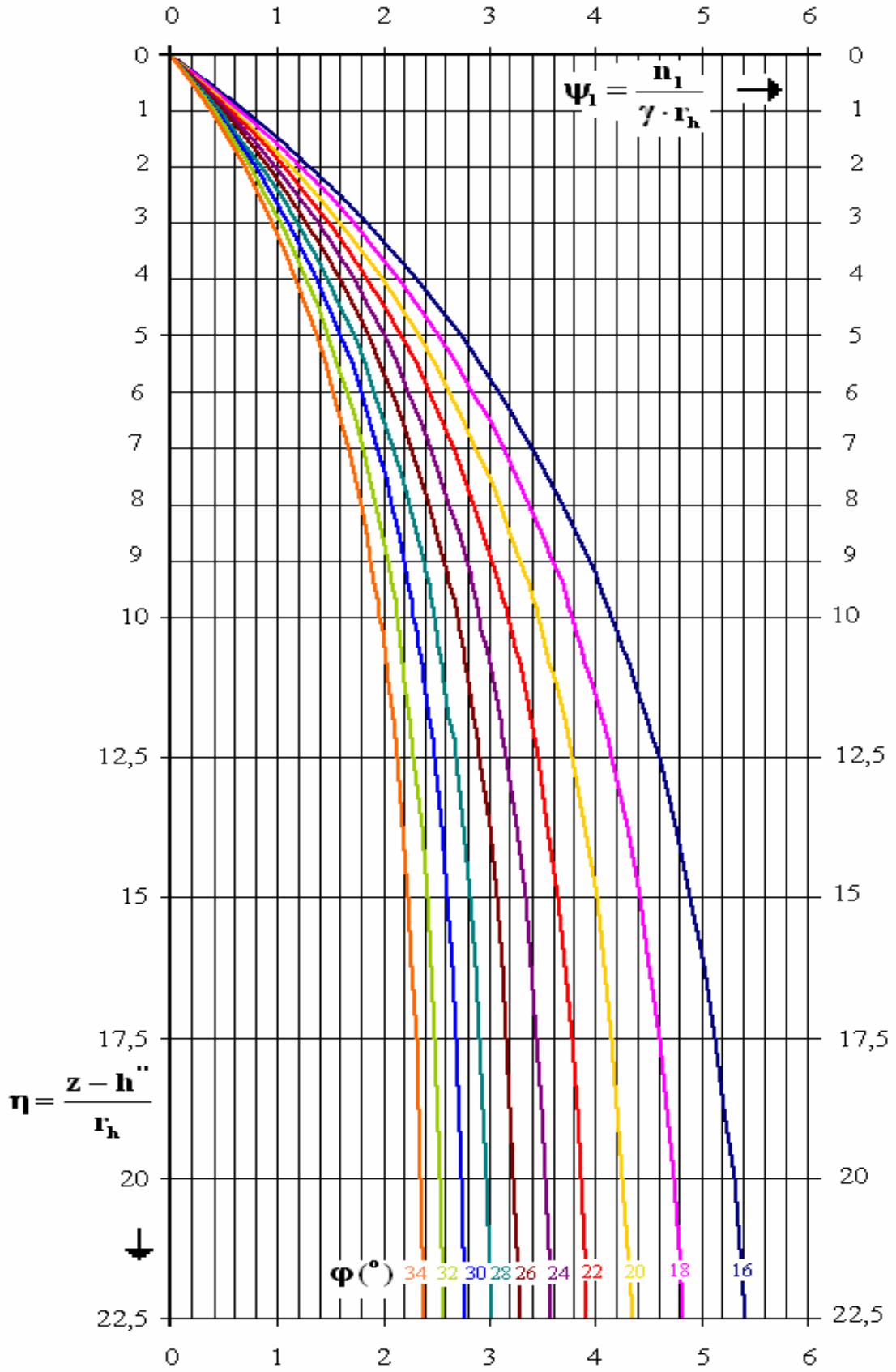
şeklinde yazılabilmektedir..

Bir başka yönden $n_1(z)$ ve $n_2(z)$ 'in belirlenmesinden sonra çizelgelerdeki 9. ve 10. satırlardan τ_1 ve τ_2 'nin alınması (2.59) ve (2.60) bağıntılarının kullanılması suretiyle $T_1(z)$ ve $T_2(z)$ elde edilmektedir.

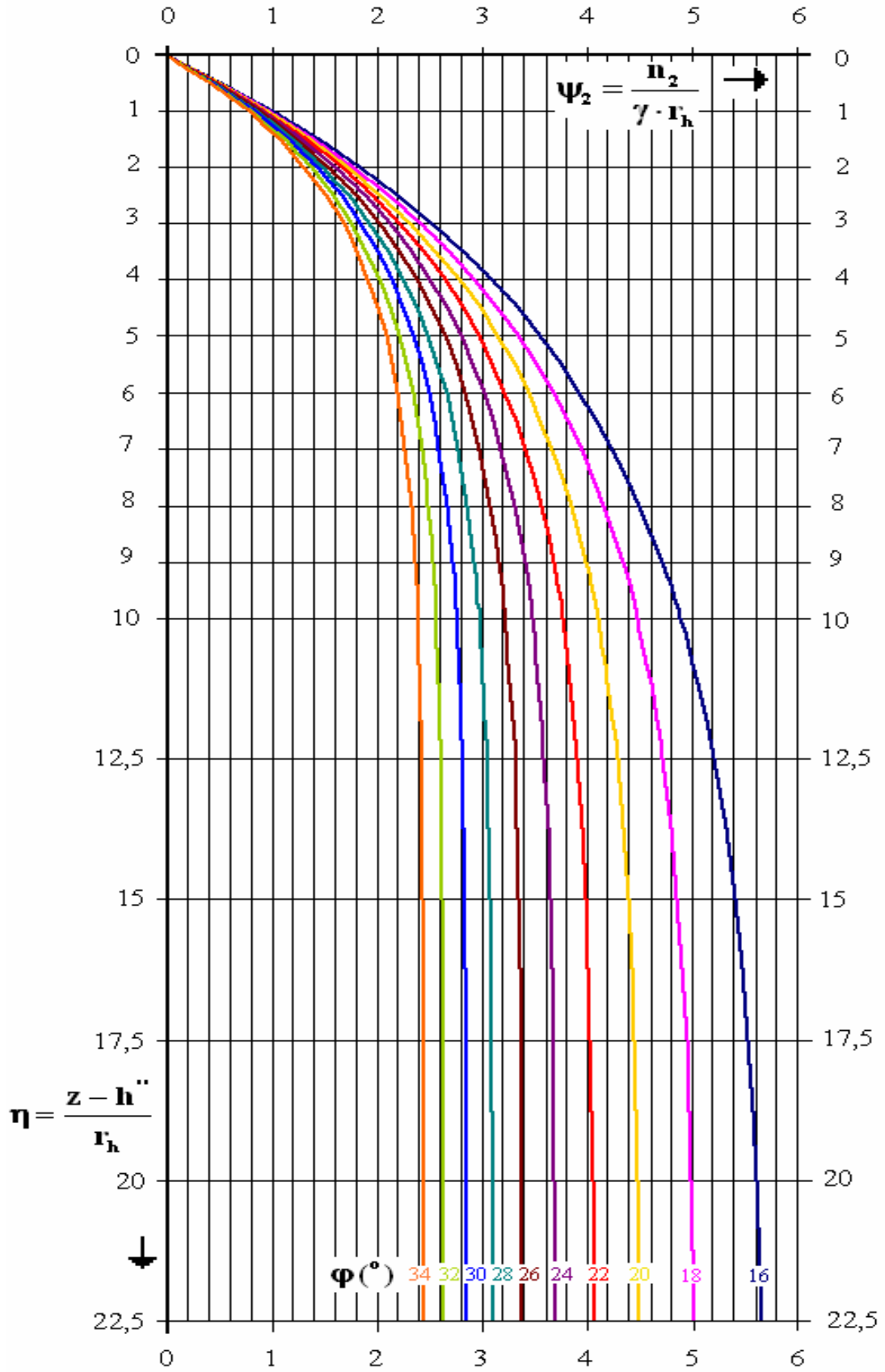
Burada genellikle $T(z)$ 'nin;

$$T_2(z = h) = T_2 = (\gamma (h - h'') - \tau_2 \cdot n_2) r_h \quad (2.61)$$

ifadesiyle belirlenen değerinin bilinmesinin yeterli olduğunu, çizelgelerin 2. satırlarındaki δ değerlerinin, δ 'nin ölçülen değerleriyle karşılaştırılmalarına imkan verdiğini ve çizelgelerde 3. satırlarından 5. satırlarına kadar verilen değerlerin paragraf 2.3'den 2.6.2'ye kadar olan genel yaklaşımdan elde edilen sonuçların genellenmesini zorunlu kılan durumlar için olduğunu belirtmek uygun olmaktadır.



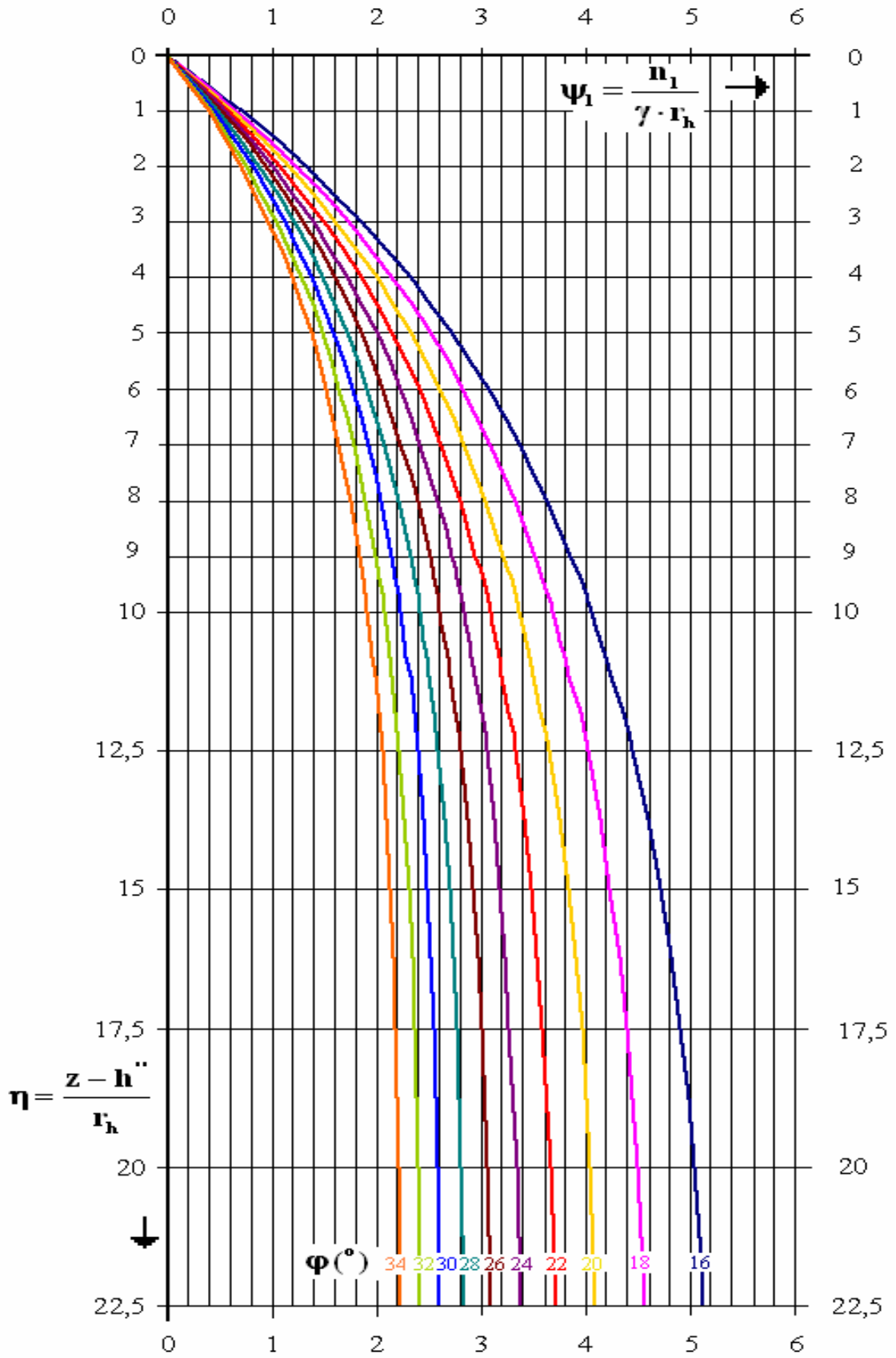
Şekil 2.15. $\rho = 0,70$ için birinci denge durumunda η ve φ 'ye bağlı olarak ψ_1 değerleri



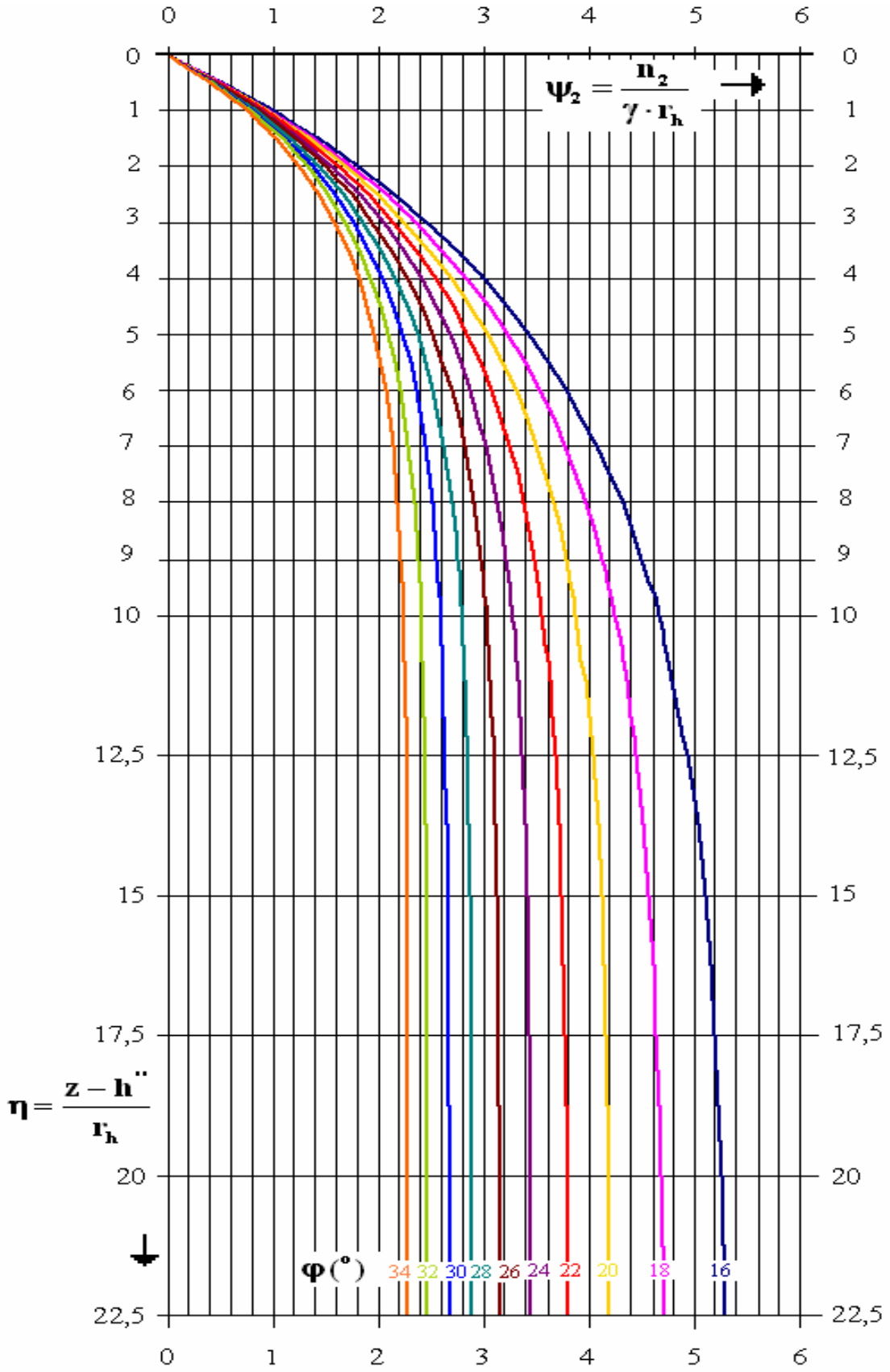
Şekil 2.16. $\rho = 0,70$ için ikinci denge durumunda η ve φ 'ye bağlı olarak ψ_2 değerleri

Çizelge 2.14. $\rho = 0,70$ için birinci ve ikinci denge durumlarına ilişkin temel değerler

$\rho = \text{tg}\delta/\text{tg}\varphi = 0,70$											
1	$\varphi(^{\circ})$	16	18	20	22	24	26	28	30	32	34
2	$\delta(^{\circ})$	11,4	12,8	14,3	15,8	17,3	18,9	20,4	22,0	23,6	25,1
3	$\lambda_1 = \lambda_{01}$	0,65	0,61	0,57	0,54	0,50	0,47	0,44	0,41	0,38	0,35
4	λ_2	0,96	0,95	0,94	0,93	0,91	0,90	0,88	0,86	0,84	0,82
5	λ_{02}	1,43	1,49	1,55	1,60	1,66	1,71	1,76	1,81	1,86	1,91
6	$n_{\infty}/\gamma \cdot r_h$	5,73	5,06	4,52	4,07	3,69	3,37	3,09	2,85	2,63	2,44
7	$\frac{(v_1 - 1,35\gamma h'')}{n_1}$	1,82	1,93	2,06	2,19	2,34	2,50	2,69	2,88	3,10	3,35
8	$\frac{(v_2 - 1,35\gamma h'')}{n_2}$	1,22	1,23	1,25	1,27	1,29	1,31	1,34	1,37	1,40	1,44
9	$\frac{[(z - h'')\gamma r_h - T_1]}{n_1 r_h}$	1,35	1,43	1,53	1,63	1,74	1,85	1,99	2,14	2,29	2,48
10	$\frac{[(z - h'')\gamma r_h - T_2]}{n_2 r_h}$	0,91	0,91	0,93	0,94	0,95	0,97	0,99	1,01	1,04	1,06



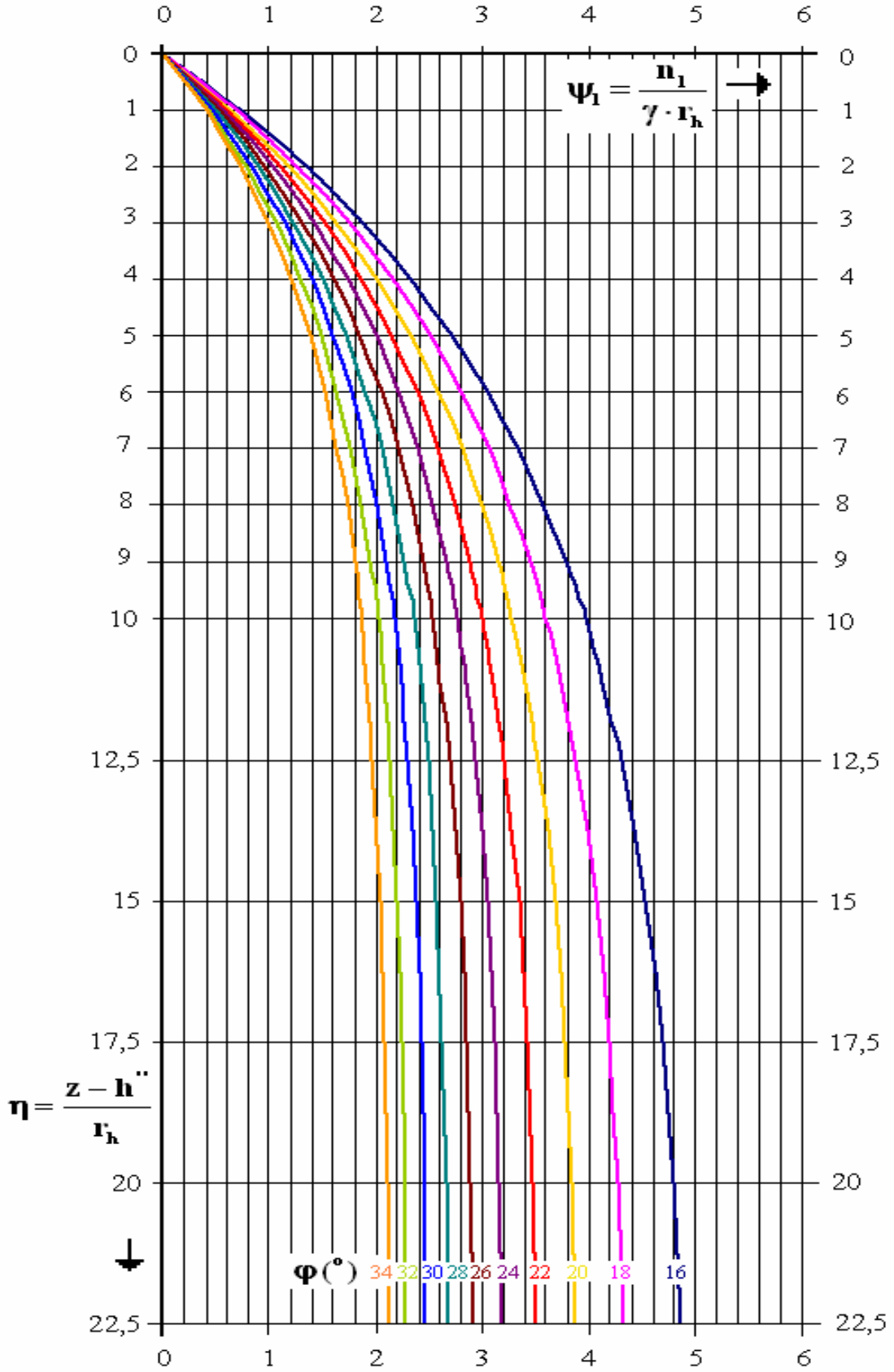
Şekil 2.17. $\rho = 0,75$ için birinci denge durumunda η ve φ 'ye bağlı olarak ψ_1 değerleri



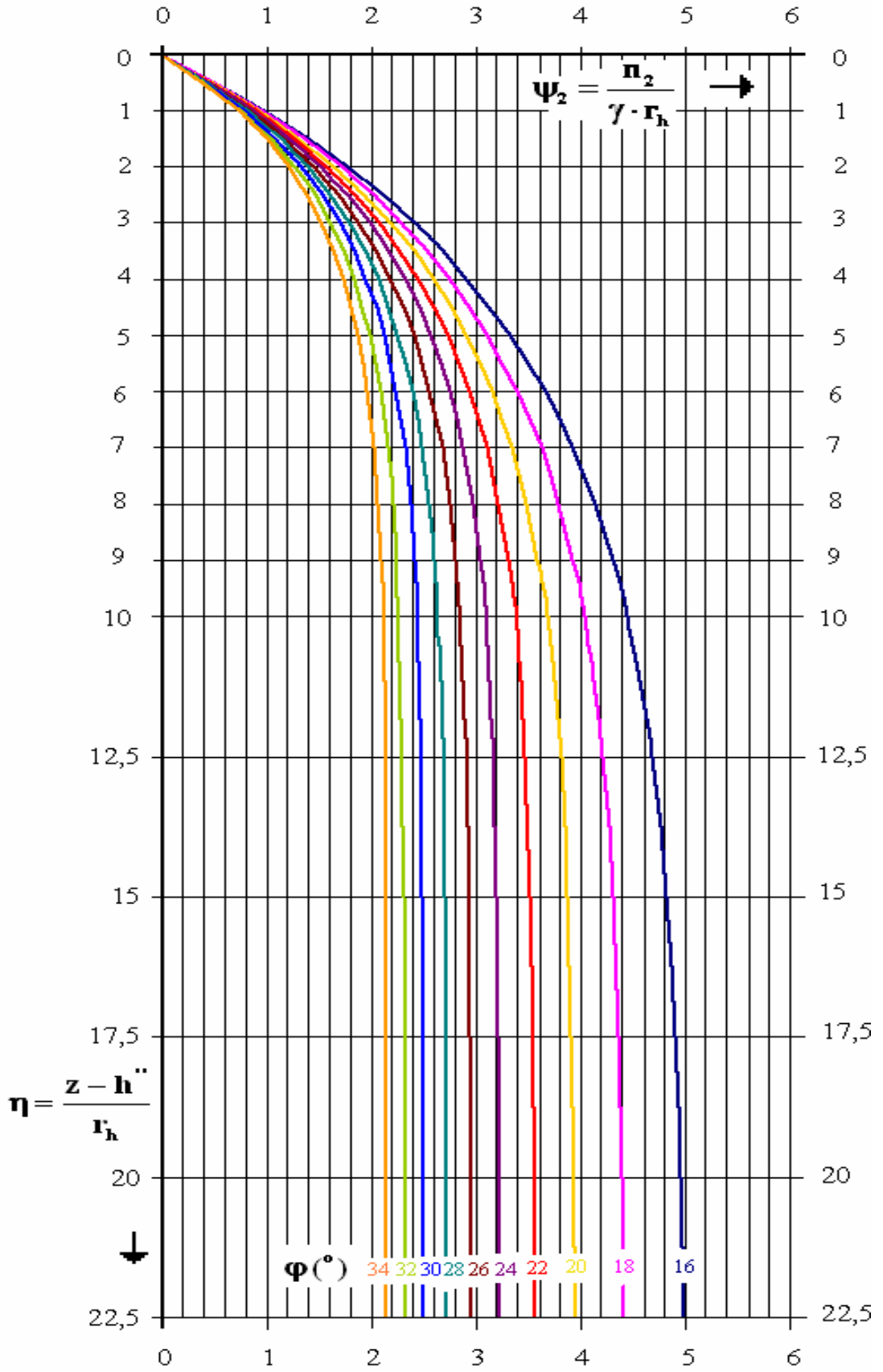
Şekil 2.18. $\rho = 0,75$ için ikinci denge durumunda η ve φ 'ye bağlı olarak ψ_2 değerleri

Çizelge 2.15. $\rho = 0,75$ için birinci ve ikinci denge durumlarına ilişkin temel değerler

$\rho = \text{tg}\delta/\text{tg}\varphi = 0,75$											
1	$\varphi(^{\circ})$	16	18	20	22	24	26	28	30	32	34
2	$\delta(^{\circ})$	12,1	13,7	15,3	16,9	18,5	20,1	21,7	23,4	25,1	26,8
3	$\lambda_1 = \lambda_{01}$	0,66	0,62	0,59	0,55	0,52	0,49	0,45	0,42	0,39	0,37
4	λ_2	0,97	0,94	0,93	0,92	0,90	0,88	0,86	0,84	0,82	0,80
5	λ_{02}	1,38	1,43	1,48	1,52	1,56	1,60	1,64	1,67	1,71	1,73
6	$n_{\infty}/\gamma \cdot r_h$	5,35	4,72	4,21	3,80	3,44	3,14	2,88	2,66	2,45	2,27
7	$\frac{(v_1 - 1,35\gamma h'')}{n_1}$	1,78	1,88	2,00	2,13	2,27	2,42	2,59	2,77	2,98	3,21
8	$\frac{(v_2 - 1,35\gamma h'')}{n_2}$	1,23	1,24	1,26	1,28	1,30	1,33	1,36	1,39	1,43	1,48
9	$\frac{[(z - h'')\gamma r_h - T_1]}{n_1 r_h}$	1,32	1,39	1,48	1,58	1,68	1,79	1,92	2,05	2,21	2,38
10	$\frac{[(z - h'')\gamma r_h - T_2]}{n_2 r_h}$	0,91	0,92	0,93	0,95	0,97	0,99	1,01	1,03	1,06	1,09



Şekil 2.19. $\rho = 0,80$ için birinci denge durumunda η ve ϕ 'ye bağlı olarak ψ_1 değerleri



Şekil 2.20. $\rho = 0,80$ için birinci denge durumunda η ve φ 'ye bağlı olarak ψ_2 değerleri

Çizelge 2.16. $\rho = 0,80$ için birinci ve ikinci denge durumlarına ilişkin temel değerler

$\rho = \text{tg}\delta/\text{tg}\varphi = 0,80$											
1	$\varphi(^{\circ})$	16	18	20	22	24	26	28	30	32	34
2	$\delta(^{\circ})$	12,9	14,6	16,2	17,9	19,6	21,3	23,0	24,8	26,6	28,4
3	$\lambda_1 = \lambda_{01}$	0,68	0,64	0,61	0,57	0,54	0,51	0,48	0,44	0,41	0,39
4	λ_2	0,95	0,94	0,92	0,91	0,89	0,87	0,85	0,82	0,80	0,78
5	λ_{02}	1,33	1,36	1,40	1,43	1,46	1,49	1,51	1,53	1,55	1,56
6	$n_{\infty}/\gamma \cdot r_h$	5,01	4,42	3,95	3,56	3,23	2,95	2,70	2,49	2,30	2,13
7	$\frac{(v_1 - 1,35\gamma h'')}{n_1}$	1,73	1,82	1,93	2,05	2,18	2,32	2,47	2,64	2,84	3,05
8	$\frac{(v_2 - 1,35\gamma h'')}{n_2}$	1,24	1,25	1,27	1,30	1,32	1,35	1,39	1,43	1,47	1,52
9	$\frac{[(z - h'')\gamma r_h - T_1]}{n_1 r_h}$	1,28	1,35	1,43	1,52	1,61	1,72	1,83	1,96	2,10	2,26
10	$\frac{[(z - h'')\gamma r_h - T_2]}{n_2 r_h}$	0,92	0,93	0,94	0,96	1,98	1,00	1,03	1,06	1,09	1,12

3. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmanın temel amacı gerçek stok yapılarının bir sınıfını teşkil eden silolar konusunda bazı teorileri aynı simgelerle sistematik olarak açıklayıp irdeledikten sonra stok yapılarının tümüne ilişkin olarak geliştirilen genel bir yaklaşımın temel ilkelerini belirterek bu yaklaşımın Türkiye Silo Yönetmeliğiyle ilgisini ortaya koyduktan sonra anılan yönetmeliğin uygulanmasını kolaylaştıracak birtakım abak ve çizelgeler hazırlamaktı.

Bu amaçla gerçekleştirilen çalışmanın birinci bölümünde gerçek stok yapılarının sınıflandırılması, stok malzemeleri ve özellikleri, mekanik tanımlar, özel stok yapıları, gerçek stok yapısı sınıflarından birini teşkil eden silolara etkiyen yükler üzerinde durulmuştur. İkinci bölümde gerçek stok yapılarından silolarda suknet durumundaki malzeme basınçlarının belirlenmesi konusunda bazı teoriler irdelenmiş, doldurma-boşaltma durumlarında stok malzemesinden doğan basınçların hesabına ilişkin bilgiler üzerinde durulmuştur.

Bu çalışmadan çıkartılabilecek başlıca sonuç ve öneriler aşağıda özetlenmektedir.

1) Stok yapılarını, tasarımlarında uygun teorilerin kullanılabilmesi için, narin siloları, geniş siloları, tiremi şeklindeki silolar, ambarları ve halleri kapsayan gerçek stok yapıları ve palplanşlı batardo hücreleri, dalgakıranlar ve yer altı boruları gibi bazı bayındırlık yapılarını kapsayan özel stok yapıları olarak iki sınıfa ayırmak yararlı olmaktadır.

2) Stok yapıları konusunda teknik literatürde mevcut teorileri de asimtot teorileri ve yarı doğrusal teoriler olmak üzere iki sınıfta toplamak yine uygulamalar ve karşılaştırmaların doğru olarak yapılabilmesi için gerekli olmaktadır.

3) Bu çalışmaya konu olan gerçek stok yapılarından silo sınıfına ilişkin teorilerin hemen hepsi asimtot teorisine göre geliştirilmiştir. Bunlardan siloların tasarımında en yaygın kullanılanlarının Janssen ve Reimbert teorilerinin olduğu anlaşılmaktadır.

4) Çağdaş oldukları kabul edilen Türkiye'nin, Amerika'nın ve Almanya'nın Silo Yönetmeliklerinde de asimtot teorisine göre geliştirilmiş olan yöntemler önerilmektedir.

5) Teknik literatürde mevcut, bu çalışmaya konu olan stok yapılarından sadece silolara ilişkin teorilerin kullanımlarının isabetli olabilmesi için stok yapıları sınıfına giren silo tanımının çok açık bir şekilde yapılması gerekmektedir. Zira narinlikleri, boyutları, şekilleri ve kullanım amaçları farklı olan, bununla beraber aynı bağıntıların ve sayısal

verilerin kullanıldığı stok yapılarının tümüne birden “silo” adının verilmiş olması teorilerin yanlış kullanılmalarına dolayısıyla da birçok karmaşıklığa neden olmaktadır.

6) Bir sınıfı silolar olmak üzere stok yapıları sınıflandırılmış ardından gerekli kabullerin tümünü, mümkün olabilecek denge durumlarını, elde edilen bulguların tartışılmasını, bazı denge durumları için stok yapısı cidarlarındaki etkilerin belirlenmesinde kullanılan bağıntıların elde edilmesini ve Türkiye Silo Yönetmeliğinde önerilen yöntemin çıkartılmasını mümkün kılan genel bir yaklaşım geliştirilmiştir.

7) Genel yaklaşımdan çıkartılabilen Türkiye Silo Yönetmeliğinde önerilen yöntemin bu yapıların tasarımlarında kullanımını kolaylaştırmak için birtakım abak ve çizelgeler hazırlanmıştır.

Stok yapılarının deprem davranışlarının, yapı-malzeme-zemin etkileşimini de dikkate almak suretiyle, geliştirilen modellerin uygun yöntemlerle incelenmesi de gerekmektedir. Bu hususlar araştırmamızın devamını sağlayabilecektir.

4. KAYNAKLAR

- ACI, 1977. Recommended Practice for Design and Construction Bins, Silos, and Bunkers for Storing Granular, ACI-313, American Concrete Institute.
- Albiges, M. M. ve Lumbroso, A., 1964. Silos à Cellules Circulaires et Intermédiaires en as de Carreau, Annales de l' ITBTP, 44,191, 112-130.
- Askari, A. H. ve Elwi A. E., 1988. Numerical Prediction of Hopper-Bin Pressures, Journal of Engineering Mechanics, 114, 2, 342-352.
- Ayazoğlu, Ü., 1987. Betonarme Siloların Projelendirilmesinde Kullanılan Yöntem ve Yönetmeliklerin Karşılaştırılması, Yüksek Lisans Tezi, K.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Blight, G., 1986a. Pressures Exerted by Materials Stored in Silos : Part I, Coarse Materials, Geotechnique, 36, 1, 33-46.
- Blight, G., 1986b. Pressures Exerted by Materials Stored in Silos : Part II, Fine Powders, Geotechnique, 36, 1, 47-56.
- Blight, G. E. ve Garstang, A., 1987. Strains Measured in a 7.500 t Sugar Silo, Bulk Solids Handling, 7, 4, 573-582.
- Blight, G., 1988. A Comparison of Measured Pressures in Silos with Code Recommendation, Bulk Solid Handling, 8, 2, 145-153.
- Blight, G., 1992. Design Implications of Measured Pressures and Strains in Silos, Journal of Structural Engineering, 118, 10, 2729-2742.
- Blight, G., 2005. Assessing Loads on Silos and Other Bulk Storage Structures, Taylor & Francis, Johannesburg.
- Caquot, M. ve Kerisel, J., 1966. Traité de Mécanique des Sols, Eyrolles, Paris.
- Ciesielski, Mitzel, Stachurski, Suwalski, Zmudzinski, 1967. Behälter, Bunker, Silos, Schornsteine, Fernsehtürme und Freileitungsmaste, Verlag Von Wilhwm Ernst & Sohn, Berlin, München, Düsseldorf.
- Çetmeli, E., 1970. Çubuk Sistemler, Plaklar ve Kabukların Hesabı İçin Tablolar, Birsen Kitabevi, İstanbul.
- Despeyroux, J., 1958. Efforts exercés sur les parois par la matière ensilée, Annales de l'ITBTP, 5, 85, 71-93.
- DIN, 1968. Beton Kalender, DIN-1055, Deutch Institut Norme.

- Doğangün, A., 1995. Dikdörtgen Kesitli Su Depolarının Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Depo-Zemin-Sıvı Etkileşimini Dikkate Alarak Analitik Yöntemlerle Karşılaştırmalı Deprem Hesabı, Doktora Tezi, K.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Durmuş, A., 1995. Yapıların Onarım ve Güçlendirilmesi Ders Notları, Trabzon.
- Durmuş, A., Doğangün A., Ayazoğlu, Ü., Karaca, Z., 1997. Betonarme Siloların Çeşitli Standartlara Göre Projelendirilme Esasları, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası Trabzon Şubesi Mühendislik Bülteni, 51, 11-29.
- Guerrin, A. 1969. Traite de Béton arme, Constructions Diverses, Tome XI, Paris.
- Janssen, H. A., 1895. Versuche über Getreidedruck in Silozellen, Zeitschrift Verein Deutscher Ingenieure, 39, 31, 1045-1049.
- Karaca, Z., 2000. Betonarme Silindirik Siloların Deprem Etkisindeki Davranışlarının Analitik ve Sayısal Yöntemlerle Karşılaştırmalı Olarak İncelenmesi, Doktora Tezi, K.T.Ü. , Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Kıvrak, K., 1987. Betonarme Siloların Hesap Esasları, Yönetmeliklere Göre Malzeme Basınçlarının Karşılaştırılması ve Uygulamalar, Yüksek Lisans Tezi, K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Kmita, J., 1991. An Experimental Analysis of Internal Silo Loads, Bulk Solids Handling, 11, 2, 459-468.
- Kumbasar, N., Aydoğan, M., Altan, M.,1992. Betonarme Silo ve Bunkerler, İTÜ İnşaat Fakültesi Matbaası, İstanbul.
- Lumbroso, A., 1970. Détermination Numérique des Sollicitations Exercées par la Matière Ensilée dans les Silos, Theories et Methods de Calcul, Annales De L' Institut Technique du Batiment et des Travaux Publics, 116, 268,53-80.
- Lumbroso, A., 1977. Bases Scientifiques du Calcul des Enceintes Renfermant des Massifs Pulvérulents et du Calcul des Silos, Theories et Methods de Calcul, Annales de L' Institut Tecnique du Batiment et des Travaux Publics, 201, 346, 21-44.
- Noberhaus, E. P.,1965. Structural Designs of Bins, Chemical Engineering, 183-186.
- Pamelard, 1959. Remarques sur le Calcul des Silos, Génie Civil, Paris.
- Perkins, P. H., 1997. Repair, Protection and Waterproofing of Concrete Structures, E & FN Spon, 3, London.
- Pieper, K. ve Wenzel, F., 1964. Druckverhältnisse in Silozellen, Wilhelm Ernst & Son, Berlin.

- Reimbert, M. A., 1962. Réalisations Modernes de Silos Agricoles et Industriels, Dunod, Paris.
- Reimbert, M. A., 1977. Silos, Editions Eyrolles, Paris.
- SNBATI,1975. Régles de Conception et de Calcul des Silos en Béton, SNBATI-334, Syndicat National du Béton Armé et des Techniques Industrialisées, Paris.
- T.S.E., 1987. Yapı Elemanlarının Boyutlandırılmasında Alınacak Yüklerin Hesap Değerleri, TS-498, Türk Standartları Enstitüsü, I. Baskı, Ankara.
- T.S.E., 1989. Betonarme Siloların Hesap, Yapım ve Kullanım Kuralları, TS-6989, Türk Standartları Enstitüsü, I. Baskı, Ankara.
- T.S.E., 2000. Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları, TS-500, Türk Standartları Enstitüsü, I. Baskı, Ankara.
- Turan, C., 1986. Betonarme ve Öngerilmeli Beton Siloların Projelendirme Esasları, Yüksek Lisans Tezi, K.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Uğural, A. C., 1981. Stresses in Plates and Shells, McGraw Hill, New York.
- URL-1, <http://www.viroqua-wisconsin.com/attractions/Scenes/Silo1.jpg>. 24 Mayıs 2007.
- URL-2, <http://www.getnet.com/~gstewart/largegif/ggep/weskan%20color%20large.jpg>. 24 Mayıs 2007.
- URL-3, <http://bodasilo.en.ec21.com/> Zibo Boda Steel Silo Co., Ltd. 24 Mayıs 2007.
- URL-4, http://www.structural.net/resources/projects/html/job_silo_frp_rod.html, Silos Strengthened With Carbon Fiber Rods. 22 Mayıs 2007.
- URL-5, <http://spectranet.ca/~wienburg/>, International slipform specialist of Chimneys, Stacks, Silos etc. 20 Mayıs 2007.
- URL-6, <http://www.sanayitesisleri.com/kayarkalip.aspx>, Kayar ve Tırmanır Kalıp 20 Mayıs 2007.

5. EKLER

EK 1. Çeşitli Teorilere Göre Yatay Basınç Katsayısı (K) ve Düşey Basınç Katsayısının (K') Sayısal Olarak Karşılaştırılmaları

EK 1a. Yatay Basınç Katsayılarının Sayısal Olarak Karşılaştırılması

$\varphi = 20^0$		K Değerleri				
$\frac{z}{r_h}$	Janssen	Sor $\left(\frac{h_{maks}}{r_h} \cong 14\right)$	Forestier $\left(\frac{h_{maks}}{r_h} \cong 7\right)$	Reimbert	Caquot	Pamelard
0	0,000	0,264	0,000	0,000	0,000	0,000
1	0,133	0,317	0,143	0,234	0,146	0,130
2	0,248	0,369	0,286	0,395	0,270	0,240
4	0,435	0,474	0,571	0,595	0,468	0,414
6	0,575	0,579	0,857	0,710	0,612	0,545
8	0,681	0,684		0,782	0,717	0,648
10	0,760	0,789		0,830	0,793	0,732
15	0,883			0,897	0,906	0,882
20	0,943			0,933	0,957	0,983
25	0,972			0,952	0,981	
30	0,986			0,964	0,991	
35	0,993			0,972	0,996	
40	0,997			0,978	0,998	
∞	1,000			1,000	1,000	1,500

$\varphi = 25^0$		K Değerleri				
$\frac{z}{r_h}$	Janssen	Sor $\left(\frac{h_{maks}}{r_h} \cong 13\right)$	Forestier $\left(\frac{h_{maks}}{r_h} \cong 6\right)$	Reimbert	Caquot	Pamelard
0	0,000	0,264	0,000	0,000	0,000	0,000
1	0,141	0,320	0,151	0,246	0,144	0,138
2	0,261	0,375	0,303	0,411	0,267	0,252
4	0,454	0,487	0,606	0,612	0,463	0,431
6	0,597	0,598	0,908	0,725	0,607	0,566
8	0,702	0,710		0,796	0,712	0,670
10	0,780	0,821		0,842	0,789	0,754
15	0,897			0,907	0,903	0,903
20	0,952			0,938	0,955	
25	0,977			0,956	0,980	
30	0,989			0,967	0,991	
35	0,995			0,975	0,996	
40	0,998			0,980	0,998	
∞	1,000			1,000	1,000	1,500

EK 1a.'nın devamı

$\varphi = 30^0$		K Değerleri				
$\frac{z}{r_h}$	Janssen	Sor $\left(\frac{h_{maks}}{r_h} \cong 13\right)$	Forestier $\left(\frac{h_{maks}}{r_h} \cong 6\right)$	Reimbert	Caquot	Pamelard
0	0,000	0,264	0,000	0,000	0,000	0,000
1	0,143	0,321	0,154	0,249	0,134	0,140
2	0,265	0,377	0,308	0,415	0,251	0,256
4	0,460	0,491	0,616	0,617	0,439	0,437
6	0,603	0,604	0,924	0,730	0,579	0,572
8	0,708	0,717		0,799	0,685	0,676
10	0,786	0,831		0,845	0,764	0,760
15	0,901			0,909	0,885	0,909
20	0,954			0,940	0,944	
25	0,979			0,958	0,973	
30	0,990			0,968	0,987	
35	0,995			0,976	0,994	
40	0,998			0,981	0,997	
∞	1,000			1,000	1,000	1,500

$\varphi = 35^0$		K Değerleri				
$\frac{z}{r_h}$	Janssen	Sor $\left(\frac{h_{maks}}{r_h} \cong 13\right)$	Forestier $\left(\frac{h_{maks}}{r_h} \cong 6\right)$	Reimbert	Caquot	Pamelard
0	0,000	0,264	0,000	0,000	0,000	0,000
1	0,141	0,320	0,152	0,246	0,120	0,138
2	0,262	0,376	0,304	0,412	0,225	0,253
4	0,455	0,488	0,607	0,613	0,399	0,432
6	0,598	0,599	0,911	0,726	0,534	0,567
8	0,703	0,711		0,796	0,639	0,671
10	0,781	0,823		0,842	0,720	0,755
15	0,897			0,907	0,852	0,904
20	0,952			0,937	0,922	
25	0,978			0,957	0,956	
30	0,990			0,968	0,978	
35	0,995			0,975	0,988	
40	0,998			0,980	0,994	
∞	1,000			1,000	1,000	1,500

EK 1a.'nın devamı

$\varphi = 40^\circ$	K Değerleri					
z/r_h	Janssen	Sor $\left(h_{maks}/r_h \cong 1\right)$	Forestier $\left(h_{maks}/r_h \cong 7\right)$	Reimbert	Caquot	Pamelard
0	0,000	0,264	0,000	0,000	0,000	0,000
1	0,136	0,318	0,146	0,239	0,102	0,133
2	0,253	0,371	0,292	0,401	0,193	0,244
4	0,442	0,479	0,584	0,601	0,348	0,420
6	0,584	0,586	0,876	0,716	0,474	0,553
8	0,689	0,694		0,787	0,575	0,657
10	0,768	0,801		0,835	0,657	0,740
15	0,888			0,902	0,799	0,890
20	0,946			0,935	0,883	0,991
25	0,974			0,954	0,931	
30	0,988			0,965	0,960	
35	0,994			0,973	0,976	
40	0,997			0,978	0,986	
∞	1,000			1,000	1,000	1,500

$\varphi = 45^\circ$	K Değerleri					
z/r_h	Janssen	Sor $\left(h_{maks}/r_h \cong 15\right)$	Forestier $\left(h_{maks}/r_h \cong 7\right)$	Reimbert	Caquot	Pamelard
0	0,000	0,264	0,000	0,000	0,000	0,000
1	0,128	0,315	0,137	0,226	0,082	0,126
2	0,240	0,365	0,275	0,384	0,158	0,232
4	0,423	0,466	0,549	0,583	0,291	0,402
6	0,561	0,567	0,824	0,699	0,402	0,532
8	0,667	0,668		0,773	0,497	0,634
10	0,747	0,769		0,822	0,576	0,717
15	0,872			0,893	0,724	0,868
20	0,936			0,929	0,820	0,970
25	0,968			0,949	0,883	
30	0,984			0,962	0,924	
35	0,992			0,970	0,950	
40	0,996			0,976	0,968	
∞	1,000			1,000	1,000	1,500

EK 1b. Düşey Basınç Katsayılarının Sayısal Olarak Karşılaştırılması

$\varphi = 20^0$	K' Değerleri			
$\frac{z}{r_h}$	Janssen	Reimbert	Caquot	Pamelard
0	0,000	0,000	0,000	0,000
1	0,932	0,875	0,925	0,913
2	1,740	1,556	1,716	1,680
4	3,048	2,546	2,967	2,897
6	4,030	3,232	3,881	3,819
8	4,769	3,735	4,547	4,542
10	5,324	4,119	5,033	5,124
15	6,182	4,775	5,749	6,179
20	6,602	5,188	6,075	6,888
25	6,807	5,472	6,223	
30	6,908	5,679	6,290	
35	6,957	5,837	6,321	
40	6,982	5,961	6,335	

$\varphi = 25^0$	K' Değerleri			
$\frac{z}{r_h}$	Janssen	Reimbert	Caquot	Pamelard
0	0,000	0,000	0,000	0,000
1	0,928	0,869	0,926	0,908
2	1,726	1,535	1,719	1,664
4	3,000	2,491	2,979	2,850
6	3,942	3,144	3,902	3,737
8	4,638	3,618	4,578	4,426
10	5,152	3,978	5,074	4,976
15	5,923	4,586	5,808	5,966
20	6,285	4,965	6,146	
25	6,455	5,225	6,301	
30	6,535	5,413	6,372	
35	6,572	5,556	6,405	
40	6,589	5,669	6,420	

EK 1b.'nin devamı

$\varphi = 30^0$	K' Değerleri			
$\frac{z}{r_h}$	Janssen	Reimbert	Caquot	Pamelard
0	0,000	0,000	0,000	0,000
1	0,926	0,867	0,931	0,907
2	1,721	1,529	1,737	1,659
4	2,987	2,476	3,039	2,836
6	3,917	3,119	4,014	3,713
8	4,600	3,585	4,745	4,393
10	5,102	3,938	5,292	4,935
15	5,850	4,533	6,133	5,906
20	6,196	4,903	6,542	
25	6,357	5,156	6,741	
30	6,431	5,339	6,837	
35	6,466	5,479	6,884	
40	6,482	5,588	6,907	

$\varphi = 35^0$	K' Değerleri			
$\frac{z}{r_h}$	Janssen	Reimbert	Caquot	Pamelard
0	0,000	0,000	0,000	0,000
1	0,928	0,868	0,939	0,908
2	1,725	1,534	1,766	1,663
4	2,998	2,489	3,134	2,847
6	3,938	3,140	4,195	3,733
8	4,632	3,613	5,018	4,421
10	5,144	3,971	5,656	4,970
15	5,912	4,577	6,691	5,957
20	6,271	4,955	7,239	
25	6,440	5,214	7,528	
30	6,518	5,402	7,682	
35	6,555	5,544	7,763	
40	6,573	5,656	7,806	

EK 1b.'nin devamı

$\varphi = 40^0$	K' Değerleri			
$\frac{z}{r_h}$	Janssen	Reimbert	Caquot	Pamelard
0	0,000	0,000	0,000	0,000
1	0,930	0,873	0,948	0,911
2	1,735	1,548	1,800	1,674
4	3,030	2,526	3,254	2,879
6	3,997	3,199	4,427	3,788
8	4,720	3,691	5,374	4,498
10	5,259	4,066	6,138	5,068
15	6,084	4,703	7,465	6,098
20	6,481	5,103	8,242	
25	6,673	5,377	8,697	
30	6,765	5,577	8,964	
35	6,810	5,730	9,120	
40	6,831	5,849	9,211	

$\varphi = 45^0$	K' Değerleri			
$\frac{z}{r_h}$	Janssen	Reimbert	Caquot	Pamelard
0	0,000	0,000	0,000	0,000
1	0,934	0,879	0,958	0,916
2	1,749	1,569	1,838	1,691
4	3,078	2,582	3,386	2,928
6	4,088	3,290	4,690	3,873
8	4,856	3,813	5,788	4,619
10	5,439	4,215	6,714	5,222
15	6,356	4,904	8,438	6,322
20	6,818	5,340	9,561	7,067
25	7,050	5,642	10,292	
30	7,167	5,862	10,768	
35	7,226	6,030	11,078	
40	7,256	6,163	11,280	

EK 2. Silo Tasarımına İlişkin Pratik Bilgiler

Bir silonun pratik, ancak doğru olarak hesaplanmasının, tabanına ve cidarlarına etkileyen maksimum basınçların doğru bir şekilde belirlenmesi ile mümkün olacağı açıktır.

Buraya kadar belirtilen hususlar çoğu zaman boşaltma halinde ve hatta doldurma halinde dahi önemli basınçların oluştuğunu, bu nedenle hassas bir hesap yapabilmenin mümkün olmayacağını göstermektedir. Fakat bu genel bir kural değildir. Çünkü silolanan malzemenin içsel sürtünme açısı $\phi > 25^0$ ise tabanda basınç artması, buna karşılık silo cidarlarında basınç azalması oluşabilmektedir. Bu olayın nedeni hesaplarda birçok parametrenin işleme girmesidir. Bu parametreler; silolanan malzemenin, birim ağırlığı, içsel sürtünme açısı, cidar üzerindeki sürtünme açısı, nemi, silonun yüksekliği, hücrelerin plandaki şekli, cidarların esnekliği, doldurma şekli, boşaltma şekli, boşaltma ağzının dışmerkezliliği şeklinde sıralanabilirler.

Aşağıda bu parametrelerin her biri üzerinde ayrı ayrı durulmaktadır.

1) Birim ağırlık (γ)

Yatay (n) ve düşey (v) basınçlar silolanan malzemenin birim ağırlığı ile doğru orantılıdır. Buraya kadar anlatılanlardan, birim ağırlığın normal durumlarda %15'e ulaşabilen bir değişim gösterdiği görülmektedir. Bu değişim, tanelerin düşey basınçları sonucu oluşan plastik şekil değiştirmeler ve hacim küçülmeleri nedeniyle şüphesiz ki daha büyük mertebelere ulaşabilmektedir. Bu nedenle güvenlikten taviz vermemek için, elde kesin rakamlar yoksa hesaplarda, birim ağırlığı daha ziyade yüksek seçmek uygun düşmektedir.

2) İçsel sürtünme açısı (ϕ)

Daha önce aynı bir malzeme için içsel sürtünme açısının önemli ölçüde değiştiği belirtilmiştir. Yatay ve düşey basınç ifadelerinin ϕ 'ye göre değişimi ise;

$$n = \frac{\gamma \cdot r_h}{\tan \delta} \cdot K \quad \text{ve} \quad v = \gamma \cdot r_h \cdot K'$$

olarak verilmiştir. Buradaki K ve K' parametreleri φ 'nin iki fonksiyonu olmak üzere, K 'nın her ifadesinde φ 'nin artması yatay basıncın (n) azalmasına, K' 'nin her ifadesinde φ 'nin artması ise düşey basıncın (v) artmasına neden olmaktadır. Bu durumda emniyetli tarafta kalmak için, yatay basıncın (n) hesabında daha ziyade küçük bir φ açısı, düşey basıncın hesabında (v) ise büyük bir φ açısı dikkate almak gerekmektedir.

3) Cidar Üzerindeki Sürtünme Açısı (δ)

Cidar üzerindeki sürtünme açısının (δ) azalması, yatay basıncın (n) artmasına neden olmaktadır. Ancak düşey basınç (v) için durum aynı değildir. Çünkü bu durum teorilere göre değişmekle beraber teorilerin tümü dikkate alındığında δ 'nin artması ile düşey basıncın arttığı söylenebilmektedir. Bu durumda yatay basıncı (n) daha ziyade küçük bir δ açısı ile hesaplamak gerekirken beraber deneyler φ ve δ açılarının sonuçları fazla etkilemediğini göstermektedir.

4) Nem

Silolan malzemenin nem miktarından doğan çeşitli problemlerin nedenleri iyi bilinmemektedir. Nem oranı ve silolan malzemenin yapısı temek iki değişkendir. Eğer ağır, rijit ve kum gibi ince bir malzeme söz konusu ise, birim ağırlık (γ) nem oranı arttıkça artmaktadır. Birim ağırlık önce nem oranına bağlı olarak artmakta ve belli bir süre sonra kararlı bir hale gelmektedir. Bunu takiben, tanelerin yüzeyinde sürekli bir su filmi oluşturan bir nem miktarından sonra, taneler arasındaki temas kapiler kuvvetlerin etkisiyle kaybolmakta ve birim ağırlık çok azalmaktadır (%15-20). Silolan malzeme sudan daha ağır olduğuna göre bu durum birim ağırlığın azalacağını açıkça gösterir. Eğer nem miktarı daha da arttırılarak taneler arasındaki hava boşlukları doldurulursa birim ağırlık tekrar artmaya başlar ve suya doymuş bir kumun birim ağırlığına ulaşır. γ kuru malzemenin birim ağırlığı, C bu malzemenin kompozitesi olmak üzere toplam itibari birim ağırlık;

$$\gamma' = \gamma + 1000 \cdot (1 - C) \quad (E.1)$$

ifadesiyle hesaplanır. Bu durumda tabandaki düşey basınç;

$$v = \gamma' \cdot z \quad (E.2)$$

bağıntısıyla belirlenir. Cidarlar üzerindeki basınç önce su basıncı gibidir. Bunu takiben birim ağırlık;

$$\gamma'' = \gamma - 1000C \quad (E.3)$$

olan bir malzemeninkine eşdeğer olmaktadır. Buradan, kum tiremisinin su sızdırmasının çok önemli olduğu sonucu ortaya çıkmaktadır. İri taneli ağır, rijit bir malzeme (makadam çakılı, kömür kırıntısı vb.) söz konusu ise kapiler kuvvetler taneler arasındaki teması yok edemeyeceğinden, birim ağırlığın başlangıçta hiçbir zaman azalmadığı görülmektedir. Bu durumda birim ağırlık nem ile devamlı bir şekilde önceki γ' ve γ'' değerlerine kadar değişir.

5) Silo Yüksekliği

Kullanılan yöntem gerek deneysel gerekse teorik olsun basınçların hesabında dikkate alınan bağıntıların çoğunda cidar üzerindeki sürtünme kuvvetlerine bağlı olan maksimum bir sınır vardır. Bu bağıntılar gösterdiği eğriler ister hiperbolik, ister eksponansiyel, isterse parabolik olsun, z'ye bağlı olarak maksimum değere yaklaşmalarının içsel sürtünme açısına çok bağlı olduğu deneylerle de görülmüştür.

6) Hücrelerin Plandaki şekli

Gerek deneyler gerekse teoriler silonun plandaki şeklinin işlemlere hidrolik yarıçap ($r_h = A/U$) olarak girdiği hususunda hemen hemen uyum içindedir. Bu uyum pratik için yeterli olmakla beraber teorik düzeyde yeterli değildir. Çünkü bu sonuç bütün çevre üzerinde basınçların eşit yayılı olduğu dairesel silolarda doğru olsa dahi, diğer silo şekillerinde köşe etkileri işlemlere girdiğinden, cidarlar üzerindeki basınç dağılımlarının

eşitliği bozulmaktadır. Reimbert'in deneyleri belirli bir yükseklikteki silolar için bu köşe etkisini iyi bir şekilde ortaya koymuştur. Ancak daha yüksek silindirik silolarda da belirli bir z derinliğinden sonra cidar üzerindeki basınç dağılımı eşit olmamakta ve dolayısıyla da Reimbert'in deneyleri bu hususta yetersiz kalmaktadır.

7) Cidarların Esnekliği

Silo cidarlarının esneklikleri arttıkça üzerlerindeki yatay basınçların azalmaktadır. Bu durumda sürtünme kuvvetleri azaldığından düşey basınçlar artmaktadır. Ancak cidarların esnekliğinin etkisi bugün için maalesef nicel olarak dikkate alınamamaktadır.

8) Doldurma Şekli

Yağmur şeklindeki yavaş doldurma jet şeklindeki hızlı doldurmaya göre malzemenin birim ağırlığını daha fazla arttırmaktadır. Ancak birkaç denek sonucunda varılan bu kararı genelleştirebilmek için daha çok sayıda deneysel çalışmaya ihtiyaç vardır.

9) Boşaltma Şekli

Siloların boşaltılması esnasında ortaya çıkan problemlerin önemi vurgulanmış ve genellikle bir ek basıncın oluştuğu da belirtilmiştir. Bu sonuç içsel sürtünme açısı çok küçük olan malzemeler için tam doğru değildir. Bu durumda Caquot eğrileri ve deneysel sonuçlara göre dinamik yük çarpanı olarak 1,10-2,50 alınabilir. Kesin bir şekilde bilinmeyen boşaltma etkisini dikkate almamak için boşluklu tüp gibi tertibatlarla her bir hücreyi donatmak gerekmektedir.

10) Boşaltma Ağzının Dış Merkezliği

Dış merkezlik boşaltma ağzında basınç azalmasına karşılık, cidarlar üzerinde ek basınçlara neden olmaktadır. Bu husus, füzenin hareketindeki gibi etki ve tepki problemine benzetilebilir. Bu konuda bilinenler sadece birkaç eski deneye göre basınçların %10 mertebesinde artacağıdır.

ÖZGEÇMİŞ

Ayşegül DURMUŞ 1983 yılında Trabzon'da doğdu. İlköğrenimini Trabzon Merkez Mimar Sinan İlkokulu, orta ve lise öğrenimini Trabzon Kanuni Anadolu Lisesi'nde her dönem takdirname alarak 2001 yılında tamamladı. Aynı yıl girmiş olduğu ÖSYM sınavında Karadeniz Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümüne birincilikle girdi. Bu bölümde her yarıyıl onur ya da yüksek onur belgeleri aldı ve 2005 Haziran döneminde ilk 5'e girerek İnşaat Mühendisi olarak mezun oldu. Aynı yıl Eylül ayında Karadeniz Teknik Üniversitesi'nde yüksek lisansa başvurdu ve 30 kişilik kontenjan sıralamasında dördüncü olarak yüksek lisans programına kabul edildi. İngilizce muafiyet sınavında başarı sağlayarak lisan hazırlık sınıfını okumaktan muaf oldu ve Yüksek Lisans derslerine başladı. Tübitak'tan Yurtiçi Yüksek Lisans Bursu almakta olan Ayşegül DURMUŞ bekar olup iyi derecede İngilizce bilmekte ve halen lisansüstü öğrenimine devam etmektedir.